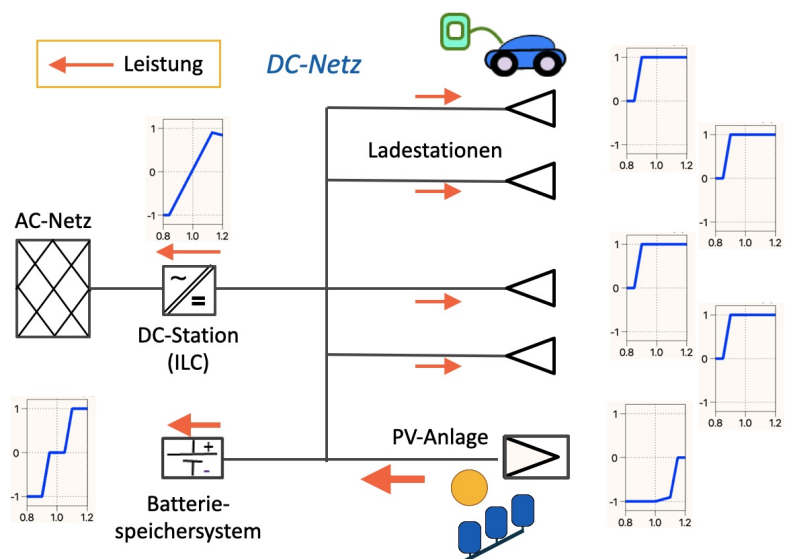


Leistungselektronik

Wie funktioniert ein Gleichspannungsnetz?

Schulungsunterlage



Ausgabe 1.0, 25.10.2024
Autor: Stephan Rupp

Kontakt: stephan.rupp@srupp.de
Web: <https://www.srupp.de>

Veröffentlicht unter [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Über dieses Dokument

Diese Schulungsunterlage wendet sich an **Techniker und Ingenieure**, die offen sind für innovative Lösungen, an **Studentinnen, Studenten und Tutoren** aus Lehre und Forschung, sowie an **Nutzer und Hersteller** von DC-Anlagen.

Inhalt der Schulung sind die physikalischen Grundlagen von DC-Netzen in der Niederspannung. Hierzu finden sich Erläuterungen zu den Schlüsselkomponenten, einschließlich einfacher Simulationsmodelle zur Untersuchung der Funktionsweise. Die Schulung besteht aus 10 Abschnitten zum Selbststudium bzw. als Material für Tutoren. Alle Unterlagen stehen unter Open-Source-Konditionen zur Verfügung. Schwerpunkt sind Netze für Anlagen mit Leistungen oberhalb von 75 kW mit Betriebsspannungen bis an die Grenze der Niederspannung (bis zu 1,5 kV).

Ziel der Schulung ist das Verständnis der Funktionsweise und der Auslegung von DC-Netzen in der Niederspannung, einschließlich der verfügbaren technischen Richtlinien und technischen Spezifikationen. Absolventen der Schulung sollten in der Lage sein, eigene Konzepte zu entwickeln und Lösungen aus dem Bereich der DC-Technik mit Anwendern und Herstellern zu diskutieren.

Unterlagen im Web: Unterlagen zu diesem Kurs:

- [Schulungsunterlage](#) (PDF, dieses Dokument)
- [Simulationsmodelle zur Schulung](#) (PLECS, zip-Datei)
- [Quelltexte](#) und [Bilder](#) (zip)

Inhaltsverzeichnis

1. Kabel und Lichtgeschwindigkeit.....	5
1.1. Anwendungsfall.....	5
1.2. Kabeleigenschaften.....	7
1.3. Kabelmodell.....	9
1.4. Wellenausbreitung.....	12
1.5. Laden des Kabels.....	14
1.6. Einfluss der Kabelinduktivität.....	17
1.7. Vereinfachtes Kabelmodell.....	18
1.8. Schalten am Kabel.....	21
2. Kommunale Kapazitäten.....	23
2.1. Füllstandregelung.....	23
2.2. Verbundene Gefäße.....	26
2.3. Netzbildung.....	28
2.4. Regeln und Regelung.....	32
3. Fehlererkennung.....	39
3.1. Spannungsquellen.....	39
3.2. Anlagen.....	43
3.3. Fehlerbilder.....	45
3.4. Fehlerauswirkungen.....	49
4. Fehlerklärung.....	51
4.1. Fehlerbehandlung.....	51
4.2. Wie unterbricht man einen Stromkreis?.....	52
4.3. Leitungsschutz.....	57
4.4. Fehler im Netz.....	60
5. Schutzbeschaltung für Bezugsanlagen.....	66
5.1. Überspannung und Überstrom.....	66
5.2. Unterspannung und Flicker.....	75
5.3. Schalter an der Bezugsanlage.....	77
5.4. Fehlerstromerkennung.....	80
6. Schutzbeschaltung für Einspeisung und bidirektionalen Lastfluss.....	83
6.1. Überspannung und Überstrom.....	83
6.2. Unterspannung und Flicker.....	84
6.3. Schalten an der Anlage.....	87
6.4. Schutz der DC-Spannungsquelle.....	93
7. Kopplung einer Anlage ans Netz.....	97
7.1. Physikalische Kopplung.....	97

7.2. Verbindungsprotokoll.....	103
7.3. Implementierung des Protokolls auf der Netzkupplung.....	106
7.4. Schnittstelle zwischen Netzkupplung und Last bzw. Einspeisung.....	109
8. Betrieb einer Anlage am Netz.....	112
8.1. Organisation der Spannungsbänder.....	112
8.2. Kennlinien der Anlagen.....	116
8.3. Energiespeichersysteme.....	120
8.4. Netzmodell.....	123
9. Das Gleichgewicht im Netz halten.....	128
9.1. Ausgleich der Interessen.....	128
9.2. Arbeitspunkte.....	132
9.3. Arbeitspunkte mit Batteriespeicher.....	138
9.4. Dynamik und Stabilität.....	141
10. Betrieb des Netzes.....	147
10.1. Zeitkonstanten.....	147
10.2. Primärregelung.....	149
10.3. Sekundärregelung.....	154
10.4. Betriebsarten.....	159

1. Kabel und Lichtgeschwindigkeit

1.1. Anwendungsfall

Kabel sind die Basis eines DC-Verteilers. Folgende Abbildung zeigt einen Anwendungsfall.

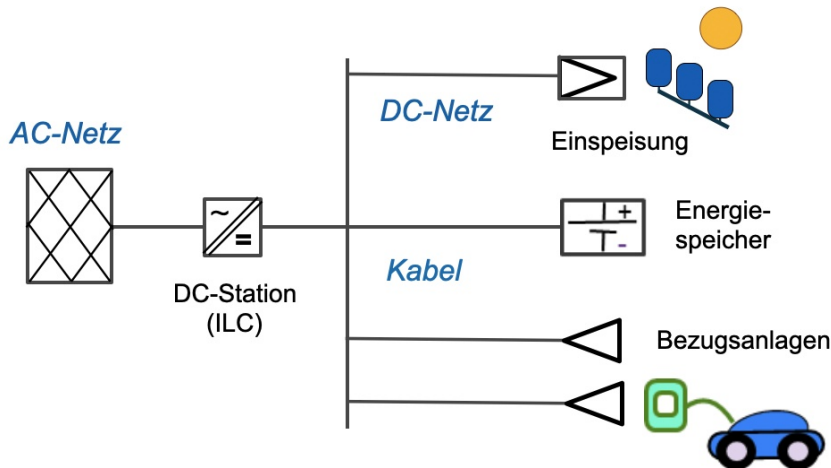


Bild 1.1.1 Netz mit Anlagen

Das Netz besteht aus einer PV-Anlage, die über eine DC-Verteilung an ein Batteriespeichersystem verbunden ist. Diese Kombination erhöht den Eigenanteil an elektrischer Energie erheblich und entlastet den Anschluss ans AC-Netz. Letzterer wird über eine DC-Station hergestellt (engl. Interlink Converter, ILC), der das DC-Netz vom AC-Netz galvanisch trennet. Innerhalb der DC-Verteilung finden sich weitere Bezugsanlagen wie z.B. Ladestationen für Elektrofahrzeuge, bzw. Frequenzumrichter für elektrische Maschinen.

Die direkte Anbindung der Gleichstromsysteme über ein Gleichspannungsnetz reduziert Konverterverluste. Das DC-Netz soll mit einer Spannung von ± 700 V betrieben werden. Gegenüber einer AC-Verteilung mit 230 V vom Leiter zum Neutralleiter ist die Spannung somit etwa dreimal so hoch. Bei gleicher Leistung reduziert sich somit der Strom auf $1/3$, die Verlustleistung auf $1/3$. Für die Verteilung der Leistung durch Kabel lässt sich somit ein deutlich kleinerer Querschnitt verwenden: Reduziert man den Kabelquerschnitt gegenüber einer AC-Verteilung auf $1/3$ (z.B. auf 50 mm^2 statt 150 mm^2), fallen die Verluste immer noch auf $1/3$.

Für die Verteilung werden Entfernungen von bis zu 100 m angenommen. Die Abbildung zeigt eine Baumstruktur des Netzes ausgehend von einer DC-Sammelschiene. Andere Topologien des Netzes sind möglich, sind jedoch nicht Gegenstand dieser Schulung.

Frage 1.1.1: Bidirektionale Anlagen. Welchen Vorteil bietet die DC-Verteilung für bidirektionale Bezugsanlagen wie Maschinenumrichter oder Ladestationen?

Lösung: Rückspeisung von Bremsenergie in den Batteriespeicher, hierdurch Entlastung der Schnittstelle zum AC-Netz; Verwendung der Fahrzeugbatterien als Energiespeicher im Netz.

Frage 1.1.2: Welchen Zweck hat die galvanische Trennung des DC-Netzes vom AC-Netz?

Lösung: Isolation von Fehlern. Für das DC-Netz ist ein eigenes Erdungskonzept möglich.

Bemerkung: Bei Verwendung konventioneller Konverter wird die galvanische Trennung durch einen eigenen AC-Transformator erzielt. Konventionelle Konverter richten die AC-Spannung gleich und ermöglichen den Lastfluss in beider Richtigen. Allerdings ist das Niveau der DC-Spannung an das Niveau der AC-Spannung gekoppelt: An einem 400 V AC-Netz beträgt die DC-Spannung etwa 660 V.

Neuere Konverter realisieren die galvanische Trennung durch integrierte Transformatoren, die mit der Schaltfrequenz des Konverters arbeiten und daher sehr viel kompakter ausfallen (wie bei einem USB-Schaltnetzteil). Wegen der galvanischen Trennung im Konverter kann die DC-Spannung unabhängig von der AC-Spannung gewählt werden, hier die oben genannten ± 700 V.

Frage 1.1.3: Netzform. Folgende Abbildung zeigt eine aus der AC-Verteilung bekannte Netzform für das DC-Verteilnetz. Welchen Vorteil besitzt die TN-S Netzform gegenüber TN-C-S? Welche Ausführung der Kabel ist eine bipolares DC-Netz (mit 2 Phasen) erforderlich? Wie ließe sich ein bipolares Netz für symmetrische Anlagen realisieren? Welche Leitungen benötigt ein monopola-res (einphasiges) Netz?

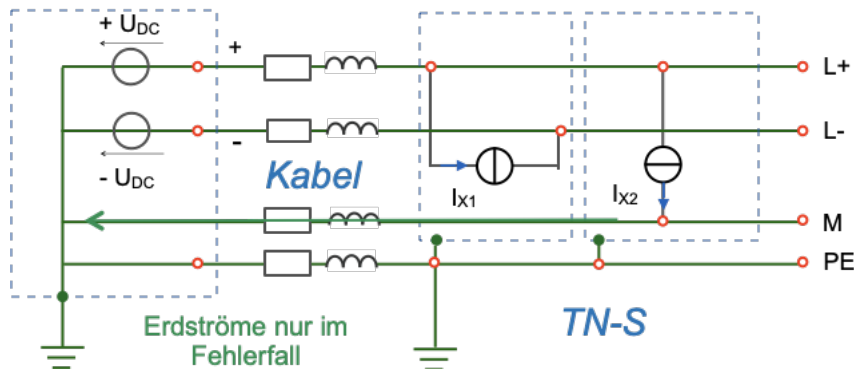


Bild 1.1.2 Netzform TN-S

Lösung: (1) TN-S Netzform: Der Neutraleiter M wird separat vom Schutzleiter PE mitgeführt. Hierdurch können Ströme unsymmetrischer Anlagen, die zwischen einer der Phasen und dem Neutraleiter M angeschlossen werden, nicht über die Erde abfließen und zu unerwünschten Korrosionen an Gebäuden führen. Erdströme gibt es nur im Fehlerfall für begrenzte Zeit bis zur Fehlerklärung.

(2a) Bipolares (zweiphasiges) Netz für symmetrische und unsymmetrische Anlagen: Mitgeführt werden die beiden Phasen, der Neutraleiter und der Schutzleiter: {L+, L-, M, PE}.

(2b) Bipolares (zweiphasiges) Netz nur für symmetrische Anlagen: Mitgeführt werden die beiden Phasen und der Schutzleiter: {L+, L-, PE}. Da keine Anlagen an den Neutraleiter angeschlossen werden, muss dieser nicht mit verteilt werden.

(2c) Monopola-res (einphasiges) Netz nur für symmetrische Anlagen: Mitgeführt werden eine Phasen, der Neutraleiter und der Schutzleiter: {L+, M, PE}. Der Aufwand für die Kabelverteilung ist vergleichbar mit dem bipolaren symmetrischen Netz, allerdings fällt die übertragene Leistung bei gleichen Strömen nur halb so groß aus.

Frage 1.1.8: Welche Ströme treten bei einer zweiphasigen symmetrischen Anlage mit einer Leistung von 140 kW auf, die an einer Spannung von 1400 V betrieben wird? Welchen Anteil an der Leistung trägt jede Phase? Welcher Kabelquerschnitt wäre erforderlich? Vergleichen Sie mit einer dreiphasigen AC-Verteilung mit 400 V verketteter Spannung.

Lösung: Die Leistung berechnet sich bei einem DC-Netz aus dem Produkt von Strom und Spannung. Scheitelwert und Effektivwert stimmen beim Gleichstrom überein. Man erhält also aus $P = U I$ für eine Leistung von 140 kW an 1400 V einen Strom von 100 A. Jede Phase trägt die Hälfte der Leistung. Mit einer Stromdichte von 3 A/mm² wäre ein Leiterquerschnitt von 33 mm² erforderlich. Mit einem Querschnitt von 50 mm² lassen sich Ströme bis 150 A übertragen.

Vergleich mit AC: $P = \sqrt{3} U_{\text{verkettet}} I = 3 U_{\text{strang}} I$. Man erhält einen Strom von $140 \text{ kW} / (3 \cdot 230 \text{ V}) = 200 \text{ A}$ pro Phase. Somit ist der Strom doppelt so groß und benötigt den doppelten Querschnitt. Für 3 Leiter

beträgt der Querschnitt somit $3 \cdot 100 \text{ mm}^2 = 300 \text{ mm}^2$. Für die DC-Verteilung würden insgesamt $2 \cdot 50 \text{ mm}^2 = 100 \text{ mm}^2$ benötigt.

Trotzdem fallen die Verluste der AC-Verteilung höher aus: $P_{V,ac} = 3 \cdot I_{ac}^2 \cdot R_{ac}$, wobei R_{ac} den Widerstand des AC-Kabels beschreibt. Da dieses den doppelten Querschnitt des DC-Kabels besitzt, gilt $R_{dc} = 2 R_{ac}$. Für den DC-Strom gilt $I_{dc} = \frac{1}{2} I_{ac}$. Die Kabelverluste für die DC-Verteilung betragen $P_{V,dc} = 2 \cdot I_{dc}^2 \cdot R_{dc}$. Durch Einsetzen erhält man: $P_{V,ac} = 3 \cdot (2 \cdot I_{dc})^2 \cdot R_{dc}/2 = 3 \cdot 2 I_{dc}^2 \cdot R_{dc} = 3 \cdot P_{V,dc}$.

Trotz des dreifachen Kabelquerschnitts bleiben die Verluste der AC-Verteilung dreimal so hoch wie bei der DC-Verteilung. Der Grund hierfür ist das Stromquadrat in der Leistung: der Widerstand geht nur linear ein. Einen doppelt so großen Strom kann man nur durch den 4-fachen Querschnitt ausgleichen. Für eine vergleichbare Verlustleistung wäre die AC-Verteilung somit mit 200 mm^2 Kabelquerschnitt pro Phase auszugleichen.

1.2. Kabeleigenschaften

Folgende Abbildung zeigt Kabel bestehend aus koaxialen Einzelleitern und mehreren Leitern. Für die in Abschnitt 1.1 beschriebenen zweiphasigen DC-Verteilnetze werden zwei Leiter {L+, L-} und ein Schutzleiter PE benötigt, sowie ggf. ein Neutraleiter M.

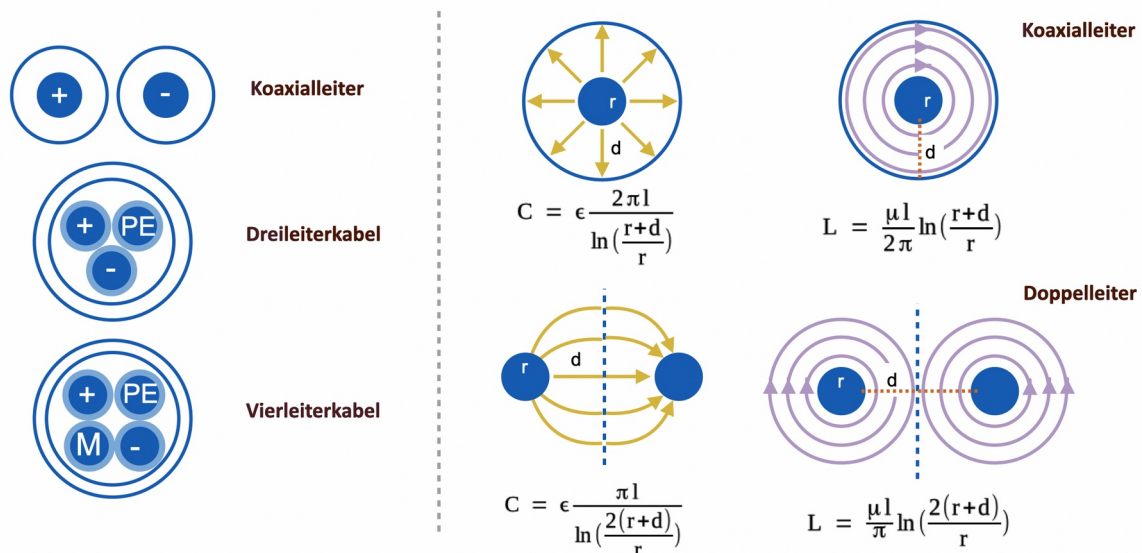


Bild 1.2.1 Physikalische Eigenschaften von Leiteranordnungen

Im Fall koaxialer Einzelleitungen lässt sich der Schutzleiter durch den geschirmten Kabelmantel abbilden. Für Mehrleiterkabel muss der Schutzleiter mitgeführt werden. Der Neutraleiter M ist eine Option für Netze mit unsymmetrischen Anlagen, die zwischen Leiter und Neutraleiter betrieben werden.

Frage 1.2.1: Kapazität und Induktivität der Leiteranordnung. Erläutern sie, wie Kapazität und Induktivität des Kabels zustandekommen. Verwenden Sie hierzu die Illustrationen rechts in der Abbildung. Welche Eigenschaften erwarten Sie bei einem Koaxialleiter mit vergleichbarer Isolation gegenüber einem Doppelleiter? Was ergibt das Produkt der Kapazität und Induktivität?

Lösung: (1) Kapazität: Ist definiert als die Ladungsmenge, die eine Anordnung bei gegebener Spannung aufnehmen kann ($C = Q/U$). Die Abbildung zeigt die elektrische Feldstärke, die durch Anlegen der Spannung U entsteht. Die Materialkonstante ϵ_r des Isolators im Kabel ist in der Lage, die elektrische Ladungsdichte gegenüber dem Vakuum (bzw. gegenüber Luft) zu erhöhen, es gilt $\epsilon_r > 1$. Für Kondensatoren wird Material mit möglichst großem ϵ_r verwendet. Für PVC oder PE als Isolator rechnet man mit $\epsilon_r \approx 2,5$.

Die Ladungsmenge der Anordnung ist auch abhängig von der Geometrie: Ein geringer Abstand der Leiter und eine große Fläche vergrößern die Kapazität. Die Ladungsmenge lässt sich durch Integration aus der Anordnung ermitteln, man erhält die in der Abbildung angegebenen Kapazitäten.

(2) Induktivität: Ist definiert als den magnetischen Fluss, den man durch einen Strom in einer Anordnung erhält ($L = \Phi/I$). Ein magnetisches Material mit der Konstanten μ_r kann den Magnetfluss erhöhen. Hiervon macht man bei Eisenkernen oder Ferritkernen in Spulen oder Transformatoren Gebrauch. Für die Leiteranordnung bzw. für die Kabel spielen magnetische Materialien keine Rolle, es gilt $\mu_r = 1$. Der Magnetfluss in der Leiteranordnung entsteht durch das Magnetfeld, das der Strom erzeugt. Das Magnetfeld treibt die magnetische Flussdichte. Den Magnetfluss der Anordnung erhält man durch Integration, es ergeben sich die Werte für die Induktivität in der Abbildung. Für die Induktivität ist die durchflossene Fläche entscheidend.

(3) Vergleich Koaxialleiter mit Doppelleiter: Bei vergleichbaren Isolationsabständen und vergleichbarem Material für die Isolation fällt die für Ladungen verfügbare Fläche des Koaxialleiters größer aus als bei der Doppelleitung. Man wird also eine größere Kapazität erwarten.

Die durch die magnetische Flussdichte durchflossene Fläche fällt bei der coaxialen Anordnung kleiner aus als beim Doppelleiter. Man wird beim Doppelleiter die größere Induktivität erwarten.

(4) Produkt aus Kapazität und Induktivität. Das Produkt besitzt die physikalische Einheit $(\text{As/V}) \cdot (\text{Vs/A}) = \text{s}^2$. Für das Produkt aus Induktivitätsbelag und Kapazitätsbelag ergibt sich sinngemäß die physikalische Einheit s^2/m^2 .

Verwendet man die Ergebnisse aus der Abbildung, so ergibt das Produkt aus $L' \cdot C' = \mu \epsilon$. Unabhängig von der Geometrie bleibt das Produkt nur abhängig von den Materialeigenschaften.

Frage 1.2.2: Ausbreitungsgeschwindigkeit auf dem Kabel. Aus den Leitungseigenschaften L' und C' erhält man für die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf der Leitung:

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{L' C'}} \quad (1.2.1)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit beschreibt, wie schnell sich ein Signal oder die Leistung auf der Leitung bzw. dem Kabel ausbreitet. Was ergibt sich, wenn man die Gleichungen für L' und C' für eines der Leitersysteme aus 1.2. einsetzt?

Lösung:

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{L' C'}} = \frac{1}{\sqrt{(\epsilon \mu)}} = \frac{c}{\sqrt{(\epsilon_r \mu_r)}} \quad (1.2.2)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist somit nur abhängig von der Materialeigenschaften μ_r und ϵ_r . Da magnetisches Material bei Kabeln und Leitungen nicht zum Einsatz kommt ($\mu_r = 1$), bestimmt die Dielektrizitätszahl ϵ_r des Isolators die Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Für die Konstanten μ_0 und ϵ_0 finden sich die Werte $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$ und $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ im Vakuum. Aus der Quadratwurzel des Kehrwertes des Produkts dieser Größen ergibt sich die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit mit einem Wert von $c \approx 300 \cdot 10^6 \text{ m/s}$.

Mit $\epsilon_r \approx 2,5$ erhält man für die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf dem Kabel annähernd $2/3$ der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, also $v_c \approx 200 \cdot 10^6 \text{ m/s}$. Eine Welle legt somit innerhalb $1 \mu\text{s}$ eine Strecke von 200 m zurück. Für eine Ortsauflösung von weniger als 200 m ist somit eine Zeitauflösung von weniger als $1 \mu\text{s}$ erforderlich. Mit Hilfe der Signallaufzeiten werden Fehler in Kabeln lokalisiert.

Frage 1.2.3: Wellenwiderstand. Schließt man eine Spannungsquelle an ein Kabel und schaltet ein, so kann die ins Kabel laufende Welle unmöglich wissen, welcher Abschlusswiderstand sie am

Ende der Leitung erwartet. Wie groß wird also der einlaufende Strom? Der Wellenwiderstand der Leitung bzw. des Kabels ermittelt sich aus

$$R_w = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (1.2.3)$$

Welche Eigenschaft beschreibt der Wellenwiderstand?

Lösung: Das Verhältnis der Amplituden von Spannung U und Strom I für die einlaufende Welle. Es gilt $U = R_w I$. Der Wellenwiderstand ist unabhängig von der Leitungslänge, er ist eine elastische Eigenschaft aus dem Verhältnis des Induktivitätsbelags der Leitung zum Kapazitätsbelag. Unter der Annahme, dass die Energie der Welle unterwegs in der Leitungsinduktivität L und Leitungskapazität C gespeichert wird, folgt dieser Zusammenhang aus dem Energiesatz:

$$\frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} L I^2 \quad (1.2.4)$$

Eine Leitung mit hoher Induktivität wird einen höheren Wellenwiderstand besitzen als eine Leitung mit geringer Induktivität. Die Ströme fallen bei vergleichbarer Spannung in der niederohmigen Leitung größer aus. Bei gängigen Kabeltypen in der Niederspannung bewegen sich die Wellenwiderstände im Bereich 20 bis 60 Ohm.

Frage 1.2.4: Ohmscher Widerstand des Kabels. Wovon hängt der ohmsche Widerstand eines Kabels ab? Welchen Effekt hat der ohmsche Widerstand?

Lösung: Der ohmsche Widerstand wächst mit der Leitungslänge l und sinkt mit dem Leiterquerschnitt A . Außerdem ist er abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit σ des Materials.

$$G = \frac{1}{R} = \frac{\sigma A}{l} \quad (1.2.5)$$

Für Kupfer findet sich $\sigma = 5,8 \cdot 10^7 \text{ S/m}$, für Aluminium $\sigma = 3,7 \cdot 10^7 \text{ S/m}$. Der ohmsche Widerstand führt zu Verlusten im Kabel und zur Kabelerwärmung. Die Verlustleistung wächst linear mit dem Widerstand und quadratisch mit dem Strom: $P_v = R I^2$. Der ohmsche Leitungswiderstand dämpft die Wellenausbreitung auf dem Kabel.

1.3. Kabelmodell

Aus den charakteristischen Eigenschaften $\{L', C', R'\}$ eines Kabels soll ein Modell erstellt werden, an dem sich mit Hilfe der Schaltungssimulation Untersuchungen durchführen lassen. Hierzu sind die charakteristischen Eigenschaften des Kabels zu interpretieren.

Frage 1.2.1: Beispiel. Für ein Kabel seien folgende Werte angenommen: $L' = 0,3 \text{ } \mu\text{H/m}$, $v_c = 200 \cdot 10^6 \text{ m/s}$. Als Material wird Kupfer ($\sigma = 5,8 \cdot 10^7 \text{ S/m}$) mit einem Querschnitt von 50 mm^2 verwendet. Berechnen Sie den vollständigen Parametersatz $\{L', C', R'\}$ für das Kabel.

Lösung: Aus L' und v_c erhält man nach Gleichung (1.2.2) den Kapazitätsbelag $C' = 0,083 \text{ nF/m}$. Der Widerstandsbelag ermittelt sich aus Gleichung (1.2.5) zu $R' = 0,34 \text{ m}\Omega/\text{m}$.

Frage 1.2.2: Kabelresonanz. Für einen Schwingkreis beträgt die Kreisfrequenz der Resonanz

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.2.6)$$

Welcher Zusammenhang ergibt sich, wenn man die Kabelparameter $\{L', C'\}$ und die Kabellänge l eingibt. Wie lässt sich dieser Zusammenhang interpretieren? Welche Resonanz ergibt sich für ein Kabel der Länge $l = 100 \text{ m}$ mit den oben beschriebenen Eigenschaften?

Lösung: Zusammenhang:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{L'C'I}} = \frac{v_c}{l} \quad (1.2.7)$$

Interpretation: Ausbreitungsgeschwindigkeit v_c und Länge l des Kabels bestimmen seine Resonanz ω_0 (Kreisfrequenz). Die Resonanzfrequenz errechnet sich zu

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{v_c}{l} \quad (1.2.8)$$

Die Wellenlänge bei der Resonanzfrequenz f_0 beträgt somit $\lambda = 2\pi l$; die Periode $T_0 = 1/f_0$ der Schwingung beträgt $T_0 = 2\pi \Delta t$ mit der Laufzeit Δt für die Strecke l .

Kabel mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von $v_c \approx 200 \cdot 10^6$ m/s und einer Länge $l = 100$ m besitzen somit eine Resonanzfrequenz bei $f_0 \approx 320$ kHz. Bei kürzeren Kabellängen steigt die Resonanz. Somit lässt sich aus der Resonanzfrequenz bei Fehlern auch auf die Entfernung zum Fehlerort schließen. Die Signallaufzeit für die Strecke von 100 m beträgt $0,5 \mu\text{s}$. Die Periode T_0 der Resonanz beträgt folglich $T_0 = 3,14 \mu\text{s}$.

Frage 1.2.3: Kabelsegmente. Für die Leiteranordnungen aus dem vorausgegangenen Abschnitt lassen sich Modelle für Kabelsegmente erstellen. Hierbei wird neben den charakteristischen Eigenschaften $\{L', C', R'\}$ auch die Geometrie der Anordnung berücksichtigt. Erläutern Sie die in folgender Abbildung dargestellte Wahl Parameter für die Segmente.

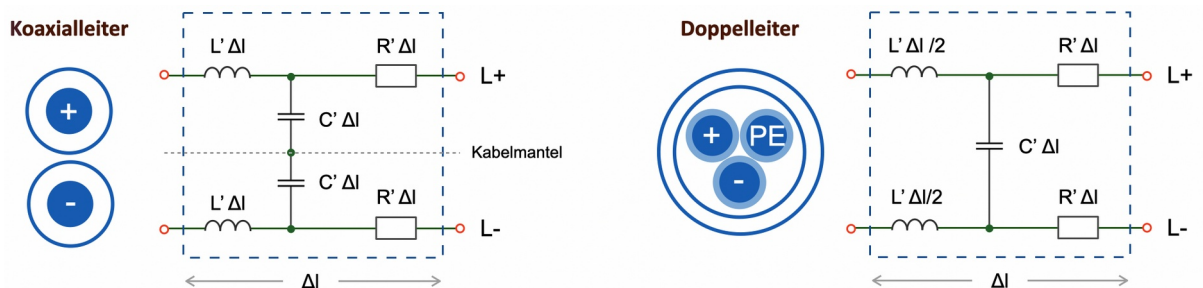


Bild 1.3.1 Modell eines Leitungssegments für zwei Leiteranordnungen

Lösung: In beiden Fällen beschreibt das Modell eine PI-Ersatzschaltung für ein Segment der Länge l .

Beim Koaxialleiter beschreiben die charakteristischen Werte ein einzelnes Kabel. Für eine Leiteranordnung aus zwei Kabeln sind die Kapazitäten der PI-Ersatzschaltung in Serie zu schalten, da über die Kabelmäntel verbunden. Für ein zweiphasiges symmetrisches System wird der Kabelmantel nicht berücksichtigt.

Der Doppelleiter (hier die beiden Phasen aus dem Dreileitersystem) wird ebenfalls für ein zweiphasiges symmetrisches System eingesetzt und besitzt daher keinen Neutralleiter M. Der Schutzleiter spielt für die Leistungsübertragung keine Rolle. Hier entsprechen die charakteristischen Werte bereits dem Doppelleitersystem. Für das Modell werden die Induktivitätsbeläge auf zwei Leiter verteilt. Der Kabelwiderstand gilt pro Leiter.

Das Modell des Leitungssegments entspricht somit der physikalischen Anordnung der Leiter im Kabel. Beim Koaxialkabel halbiert sich die Kapazität des Gesamtsystems. Da sich die Induktivität des Gesamtsystems verdoppelt, bleiben die Ausbreitungsgeschwindigkeit und Kabelresonanz gleich (siehe Gleichungen (1.2.1) und (1.2.6)). Allerdings verdoppelt sich der Wellenwiderstand (siehe Gleichung (1.2.3)). Beim Modell des Doppelleitersystems bleiben die charakteristischen Eigenschaften unverändert und daher erhalten.

Frage 1.2.4: Kabelmodell aus Segmenten. Aus dem Modell der Segmente lässt sich die Leitung als Kette nachbilden, wie in folgender Abbildung dargestellt. Die Segmente besitzen im Beispiel eine Länge von 20 m. Erläutern Sie das Funktionsprinzip der Anordnung. Welches Verhalten erwarten Sie von der Leitung im Betrieb? Welche Eingangsimpedanz hat die Anordnung?

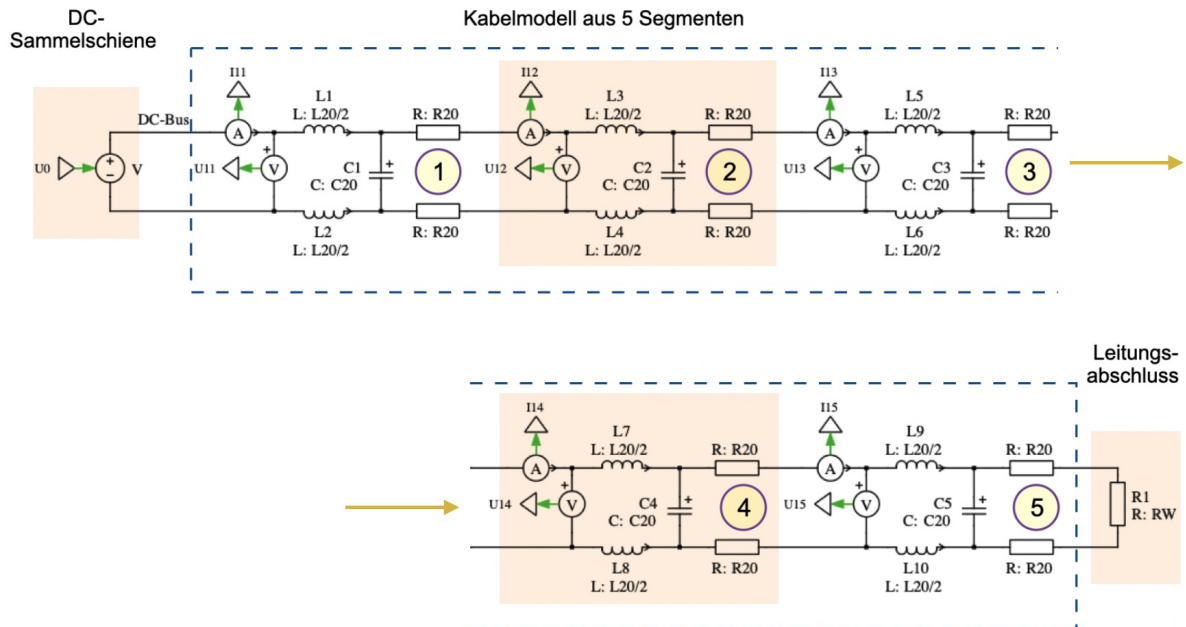


Bild 1.3.2 Kabelmodell aus einer Kette von Segmenten

Lösung: (1) Funktionsprinzip: Eine einlaufende Spannungswelle durchläuft die Kette von der Quelle aus. Die Amplitude der Stromquelle ermittelt sich aus der Spannung und dem Wellenwiderstand. Dieser geht aus dem Verhältnis der Induktivität zur Kapazität in jedem Segment hervor. Man kann sich vorstellen, dass die Energie auf dem Weg in diesen beiden Energiespeichern gehalten wird. Zum Durchlaufen eines Segments der Länge 20 m benötigt die Welle mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von $v_c = 200 \cdot 10^6$ m/s eine Zeit von $0,1 \mu s$. In der Simulation sollte sich diese Laufzeit zeigen.

Ja nach Abschluss der Leitung kommt es am Leitungsende zu Reflexionen. Die rücklaufende Welle überlagert sich mit der hinlaufenden (die bei Gleichspannung auf konstantem Niveau bleibt). Durch die Überlagerung können sich (abhängig vom Leitungsabschluss und dem Vorzeichen der reflektierten Welle) die Spannung oder der Strom auf der Leitung verdoppeln.

Wenn es eine rücklaufende Welle gibt, entstehen am Eingang der Schaltung auf jeden Fall Reflexionen: Die Spannungsquelle hält diesen auf konstantem Niveau, besitzt aber den Innenwiderstand null. Für die rücklaufende Welle wird die eingangsseitige Spannungsquelle wie ein Kurzschluss: Die Spannung wird auf den Wert der Spannungsquelle fixiert, die rücklaufende Spannungswelle somit mit umgekehrtem Vorzeichen zurück in die Leitung reflektiert. Die rücklaufende Stromwelle verdoppelt sich bei Reflexionen am Eingang.

Die fortgesetzten Reflexionen werden durch den Leitungswiderstand gedämpft und kommen nach einiger Zeit (typischerweise einigen Millisekunden) zur Ruhe.

(2) Verhalten im Betrieb: Bei Betrieb mit Gleichspannung spielt nur noch der Leitungswiderstand R eine Rolle. Die Leitung behält ihre Laufzeit, die jedoch bei Betrieb mit konstanter Spannung und konstantem Strom nicht messbar ist. Die Speicherelemente $\{L, C\}$ der Leitung kommen nur bei Änderungen der Last oder der Spannung ins Spiel.

(3) Eingangsimpedanz: Ist abhängig von der Beschaltung am Ausgang. Bei Beschaltung mit dem Wellenwiderstand R_w ergibt sich für die ins Kabel einlaufende Welle am Ende der Leitung keinen Unterschied: der Ausgang bleibt reflexionsfrei. Daher entspricht die Eingangsimpedanz dem Abschlusswiderstand R_w . Die Leitung besitzt eine Laufzeit, zeigt jedoch im Betrieb keine Reaktanz und wäre somit auch für eine AC-Übertragung geeignet.

Beim Betrieb mit DC spielt die Reaktanz einer fehlangepassten Leitung keine Rolle, da sich im eingeschwungenen Zustand (nach Schaltvorgängen, Änderungen der Lastanforderung bzw. Änderung der Spannung) keine zeitlichen Veränderungen ergeben.

1.4. Wellenausbreitung

Zur Untersuchung der Wellenausbreitung in der Simulation sollen folgende Kabeleigenschaften verwendet werden: $L' = 0,3 \mu\text{H/m}$, $C' = 0,083 \text{ nF/m}$, $R' = 0,34 \text{ m}\Omega/\text{m}$. Das Modell soll aus 5 Segmenten der Länge 20 m aufgebaut werden. An der Sammelschiene soll DC-Bus soll das Kabel mit einer Gleichspannung von 1400 V versorgt werden.

Frage 1.4.1: Kabelparameter für das Model. Welche Parameter gelten für die Leistungssegmente? Welchen Wellenwiderstand besitzt das Kabel?

Lösung: Die Werte ergeben sich auf dem Parametersatz $\{L', C', R'\}$ durch Multiplikation mit der Länge des Segments von 20 m. Im Modell ist die Induktivität auf beide Leitungen zu verteilen (als Induktivität der Doppelleitung), der Widerstand gilt für jede Einzelleitung. Der Wellenwiderstand beträgt $R_w = \sqrt{L'/C'} = 60 \Omega$.

Frage 1.4.2: Abschluss mit Wellenwiderstand. Untersuchen Sie das Kabelmodell aus dem letzten Abschnitt in der Simulation. Welches Verhalten zeigt sich, wenn das Kabel mit dem Wellenwiderstand abgeschlossen ist? Hinweis: Sie finden vorgefertigte [Modelle zur Untersuchung im Web](#).

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung. Die Abbildung zeigt die Spannungen und Ströme zu Beginn der Kabelsegmente. Die Farbkodierung zeigt die Reihenfolge der Segmente, wie mit den Nummern in der Abbildung wiedergegeben.

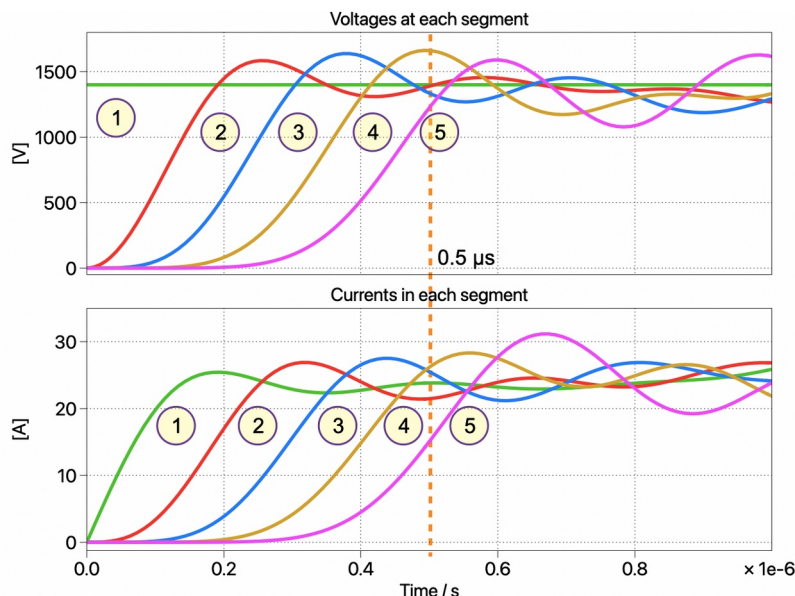


Bild 1.4.1 Wellenausbreitung auf dem Kabel bei reflexionsfreiem Abschluss

Die Spannung an der DC-Sammelschiene (1) wird von der Spannungsquelle konstant gehalten. Die Spannungswelle startet daher mit dem Wert $u(t=0) = U_0 = 1400 \text{ V}$. Die Spannung am Ende der Leitung (5) bleibt bei null, bis die Spannungswelle dort angekommen ist. Auf dem Weg passiert die Span-

nungswelle alle Messpunkte der Reihe nach. Die Abbildung oben zeigt somit die Ausbreitung der Wellenfront beim Einschalten der Gleichspannung zu Beginn der Simulation auf dem Kabel.

Das Ende der Leitung ist mit dem Wellenwiderstand R_W abgeschlossen. Nachdem die Spannungswelle dort angekommen ist, bleibt die Spannung auf dem Wert der Sammelschiene am Leitungsanfang. Somit passiert die Wellenfront die Leitung genau einmal. Nach ca. $5 \mu\text{s}$ Laufzeit ist die Spannung stabil. Die Schwankungen der Spannung erklären sich durch das Laden der Leitungskapazitäten. Im weiteren Verlauf der Simulation stabilisieren sich die Werte.

Die Stromwelle zeigt das gleiche Verhalten wie die Spannungswelle, startet jedoch aus dem stromlosen Zustand mit dem Wert $i(t=0) = 0$. Nachdem die Wellenfront am Ende der Leitung angekommen ist, stabilisiert sich der Wert des Stroms auf dem Wert 23 A. Dieser Wert geht aus dem Wellenwiderstand der Leitung hervor: Mit $R_W = 60 \Omega$ ergibt sich bei einer Spannung von 1400 V der Strom $I_0 = U_0 / R_W = 1400 \text{ V} / 60 \Omega \approx 23 \text{ A}$. Da die Leitung durch einen Abschlusswiderstand in Höhe des Wellenwiderstandes abgeschlossen ist, bleibt der Strom bei diesem Wert. Die initialen Schwankungen des Stromes bedingt durch das Laden der Leitungsinduktivität klingen im weiteren Verlauf ab.

Frage 1.4.3: Einschalten der am anderen Ende offenen Leitung bzw. kurzgeschlossenen Leitung. Untersuchen Sie die Ausbreitung der Spannungswelle und Stromwelle in der Simulation für eine Leitung im Leerlauf, bzw. im Betrieb an einem leeren Kondensator (= Anlagenskapazität).

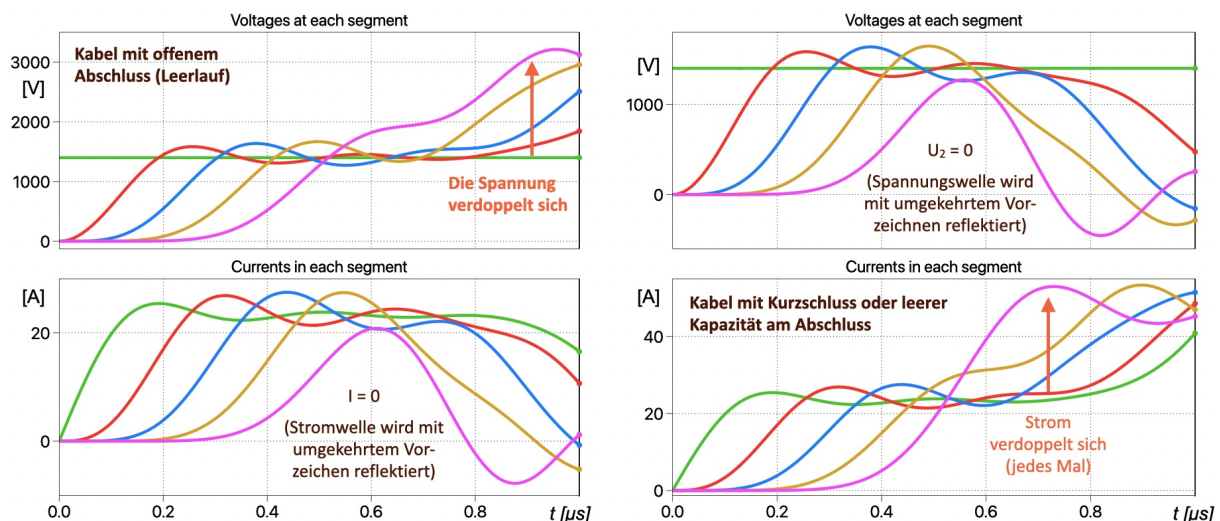


Bild 1.4.2 Reflexionen bei Leerlauf und Kurzschluss am Kabelende

Lösung: Siehe Abbildung oben. Die Startbedingungen für die Spannungswelle und Stromwelle sind gleich: Die Spannung startet mit der Spannung U_0 an der DC-Sammelschiene, der Strom aus dem Zustand null. Bis die Wellen das Ende erreichen, zeigt sich kein Unterschied zur vorherigen Simulation: Die Welle kann nicht wissen, was sie am Ende erwartet.

Ein offenes Leitungsende erzwingt einen Stromknoten: der Strom am Leitungsende muss null bleiben. Daher wird die Stromwelle mit umgekehrtem Vorzeichen zum Leitungsanfang reflektiert. Die an der Farbkodierung erkennbare Reihenfolge der passierten Leitungssegmente verläuft in umgekehrter Reihenfolge wie auf dem Hinweg.

Für die Spannungswelle bedeutet das offene Leitungsende keine Einschränkung, allerdings muss die reflektierte Spannungswelle das umgekehrte Vorzeichen haben wie die Stromwelle: Die Spannung am Leitungsende verdoppelt sich, da die Spannung mit gleichem Vorzeichen reflektiert wird und sich mit der einlaufenden Welle überlagert. Aus diesem Grund sind offene Kabel grundsätzlich in der Energieversorgung problematisch: Die Spannungsisolierung muss den doppelten Wert verkräften.

Die Spannungsüberhöhungen klingen im weiteren Verlauf der Simulation ab (hierzu die Simulationsdauer erhöhen). Im eingeschwungenen Zustand bleibt die Spannung auf der Leitung gleich der Sammelschienenspannung, der Strom bei null.

Ist die Leitung mit der leeren Kapazität der Anlage abgeschlossen, hält dieser die Spannung am Ende bei null. Dieser Zustand entspricht einer kurzgeschlossenen Leitung. In der Abbildung rechts erkennt man, dass die Rollen von Strom und Spannung gegenüber dem Leerlaufbetrieb vertauscht sind.

Die Spannung am Ende wird auf null erzwungen, daher wird die Spannungswelle mit umgekehrtem Vorzeichen reflektiert. Für den Strom gibt es keine Einschränkung, bis auf das umgekehrte Vorzeichen der reflektierten Spannungswelle. Somit verdoppelt der Strom seinen Wert.

Im weiteren Verlauf der Simulation steigt der Strom weiter an. Der Kurzschlussstrom ist im eingeschwungenen Zustand nur durch den ohmschen Widerstand der Leitung begrenzt. Bei Abschluss mit der Kapazität der Anlage wird diese unter Kurzschlussbedingungen aufgeladen, bis die Kondensatorspannung die Spannung der DC-Sammelschiene erreicht. Währenddessen sinkt der Ladestrom.

Frage 1.4.4: Welche Energie nimmt die Leitung in stationären Betrieb auf? Was geschieht mit dieser Energie beim Abschalten der Last, bzw. bei der Trennung der Leitung von der Sammelschiene?

Lösung: Im stationären Betrieb ist die Kabelkapazität auf die Höhe der Betriebsspannung aufgeladen, die Induktivität auf die Höhe des Betriebsstroms. Die Kapazität C speichert die Energie $E_C = \frac{1}{2} C U^2$, die Induktivität L die Energie $E_L = \frac{1}{2} L I^2$.

Das Kabel soll die eingangs zu 1.4 genannten Eigenschaften besitzen: $L' = 0,3 \mu\text{H/m}$, $C' = 0,083 \text{ nF/m}$, $R' = 0,34 \text{ m}\Omega/\text{m}$. Das Kabel soll eine Länge von 100 m besitzen und bei einer Betriebsspannung von $U_0 = 1400 \text{ V}$ mit einem Strom von $I_L = 100 \text{ A}$ betrieben werden. Die Kapazität $C = 8,3 \text{ nF}$ speichert eine Energie von $E_C \approx 8 \text{ mWs}$. Die Induktivität $L = 30 \mu\text{H}$ speichert beim Betriebsstrom eine Energie von $E_L \approx 150 \text{ mWs}$. Mit dem Widerstand $R = 34 \text{ m}\Omega$ ergeben sich bei dem genannten Betriebsstrom Verluste in Höhe von $P_v = R I_L^2 = 340 \text{ W}$. Die übertragene Leistung beträgt $P = U_0 I_L = 140 \text{ kW}$.

Beim Abschalten der Last und bei der Trennung des Stromkreises sollte das Kabel entladen werden. Zum Abbau der Energie der Kabelinduktivität wird ein geeigneter Strompfad benötigt.

1.5. Laden des Kabels

Folgende Abbildung zeigt den Einschaltvorgang an einem Kabel von 100 m Länge mit einer Zeitauflösung von einigen Millisekunden. Die Reflexionen im Bereich einer Mikrosekunde sind hier nur als Überlagerung zu erkennen, aber in dieser Skala nicht aufzulösen.

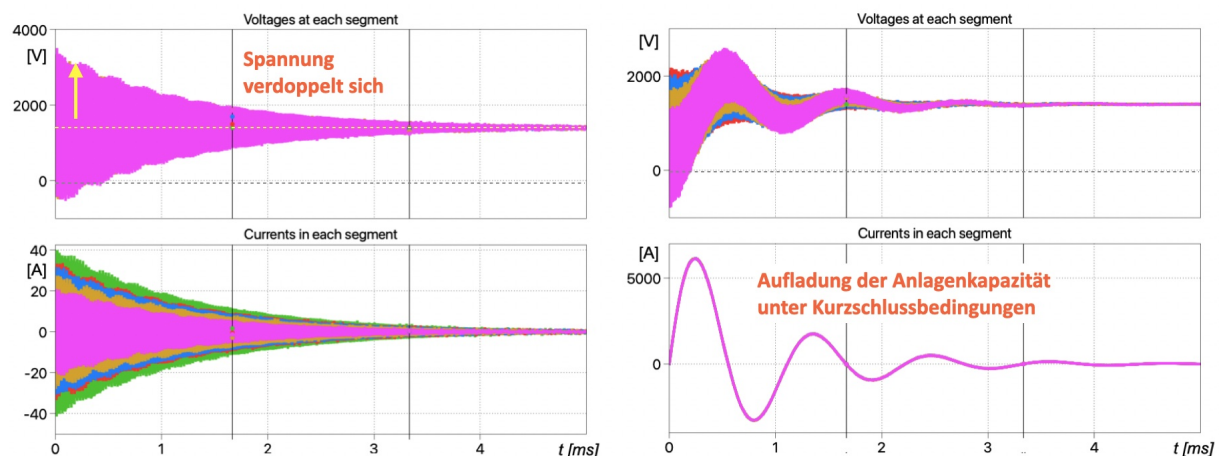


Bild 1.5.1 Leerlauf und Kurzschluss des Kabels mit grober Zeitauflösung

Der linke Teil der Abbildung zeigt den Verlauf von Spannung und Strom am offenen Kabelende, somit das Laden des Kabels im Leerlauf nach dem Aufschalten der Spannung der Sammelschiene. Im rechten Teil der Abbildung ist das Kabel mit der leeren Anlagenkapazität abgeschlossen.

Frage 1.5.1: Laden des Kabels im Leerlauf. Interpretieren Sie den Verlauf der Spannungen und Ströme im linken Teil der Abbildung. Welche Energie besitzen die Leitungsinduktivität und Leitungskapazität im eingeschwungenen Zustand?

Lösung: Mit einer Laufzeit von $0,5 \mu\text{s}$ stellen sich Reflexionen am offenen Leitungsende ein. Die Reflexion ist total, die Spannung steigt durch Überlagerung der rücklaufenden Welle auf den doppelten Wert (siehe Bild 1.4.2 in Abschnitt 4).

Der an der Spannungsquelle angeschlossene Leitungsanfang reflektiert ebenfalls, und zwar unter Kurzschlussbedingungen bei einer festen Spannung in Höhe der Betriebsspannung ($U_0 = 1400 \text{ V}$). Die Spannung am Leitungsanfang ist auf diesen Wert fixiert, die am Eingang rücklaufende Spannungswelle besitzt umgekehrtes Vorzeichen, was den Wert von annähernd null am offenen Leitungsende erklärt.

Der Strom folgt der Spannung, seine Höhe ist durch den Wellenwiderstand gegeben: $I = U_0/R_w$. Mit einem Wert von $R_w = 60 \Omega$ und einer Betriebsspannung von 1400 V beträgt der Strom 23 A . Die Reflexionen klingen innerhalb einiger Millisekunden ab, die Energie der Reflexionen wird am Leitungswiderstand in Wärme umgesetzt.

Im eingeschwungenen Zustand ist die Leitung stromlos und auf Betriebsspannung. Die Leitungskapazität ist somit geladen, die Leitungsinduktivität entladen.

Frage 1.5.2: Laden des Kabels mit leerer Anlagenkapazität. Interpretieren Sie den Verlauf der Spannungen und Ströme im rechten Teil der Abbildung. Welche Energie besitzen die Leitungsinduktivität und Leitungskapazität im eingeschwungenen Zustand?

Lösung: Die leere Kapazität der Anlage fixiert die Spannung am Leitungsende auf null. Die Leitung wird somit unter Kurzschlussbedingungen geladen. Die Reflexion ist total. Der Ausgang der Leitung reflektiert die Spannungswelle mit umgekehrtem Vorzeichen. Der Strom steigt auf den doppelten Wert, da die reflektierte Stromwelle gleiches Vorzeichen besitzt und sich mit der hinlaufenden Welle überlagert (siehe Bild 1.4.2 in Abschnitt 4).

Der Leitungsanfang ist durch die Spannungsquelle auf die Betriebsspannung fixiert und reflektiert ebenfalls unter Kurzschlussbedingungen (Umkehr des Vorzeichens der reflektierten Spannungswelle, gleiches Vorzeichen der reflektierten Stromwelle). Der Strom steigt hierdurch rasch an. Mit steigendem Strom lädt sich die Anlagenkapazität am Ende der Leitung auf. Hierdurch steigt allmählich die Spannung am Ende der Leitung auf den Wert der Betriebsspannung. Die Überschwinger im Strom erklären sich durch die Resonanz der Leitungsinduktivität mit der Anlagenkapazität.

Im eingeschwungenen Zustand ist die Leitung stromlos und auf Betriebsspannung. Die Leitungskapazität ist somit geladen, die Leitungsinduktivität entladen.

Frage 1.5.3: Vermeidung von Reflexionen an der DC-Sammelschiene. In folgender Abbildung wurde der Leitungsanfang mit einem Serienwiderstand in Höhe des Wellenwiderstandes der Leitung versehen. Die Zeitauflösung ist hoch ($5 \mu\text{s}$). Erklären Sie den Verhalten von Strom und Spannung. Welche Rolle spielt der Leitungsabschluss am anderen Ende?

Lösung: An der Zeitachse erkennt man, dass der erste Abschnitt bis $t = 1 \mu\text{s}$ dem Vorgang aus Abbildung 1.4.2 in Abschnitt 4 entspricht: Die Welle erreicht nach einer Laufzeit von $0,5 \mu\text{s}$ das Ende der Leitung und wird dort total reflektiert unter Kurzschlussbedingungen (Spannung = 0, Strom verdoppelt sich). Zum Zeitpunkt $t = 1 \mu\text{s}$ erreicht die reflektierte Welle den Anfang der Leitung. Dort findet sich nun in Serie mit der Spannungsquelle ein ohmscher Widerstand in Höhe des Wellenwiderstands R_w .

Dieser Widerstand ist in der Lage, die Energie der reflektierten Welle aufzunehmen: es gibt keine Reflexion zurück in die Leitung. Strom und Spannung stabilisieren sich sofort. Die Leitung besitzt den Zustand des mit der Anlagenkapazität abgeschlossenen Endes.

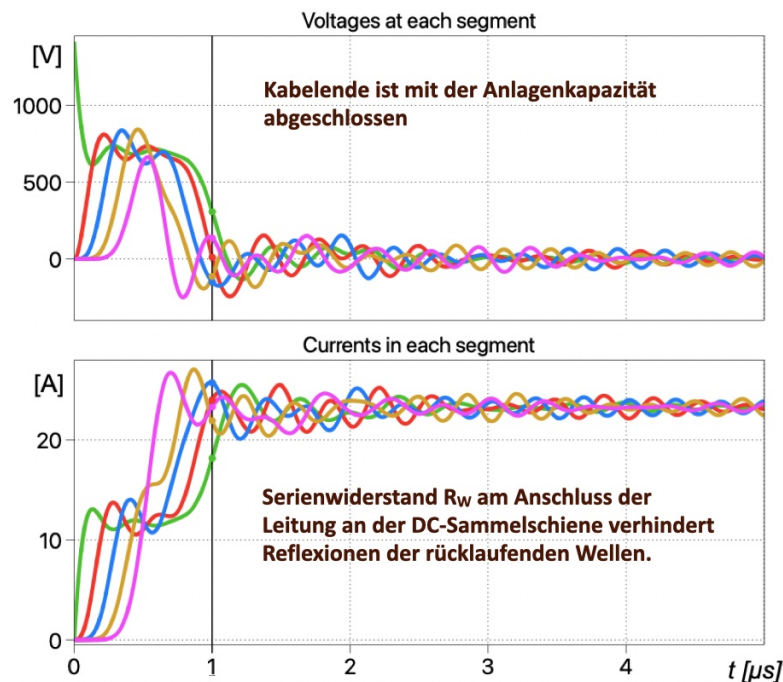


Bild 1.5.2 Vermeidung von Reflexionen am Leitungsanfang

In der gewählten feinen Zeitauflösung ist nicht zu erkennen, dass Strom und Spannung mit dem Ladezustand der Anlagenkapazität allmählich ansteigen. Der Serienwiderstand in Höhe von R_W am Anfang der Leitung begrenzt den Strom auf $1400 \text{ V} / 60 \text{ Ohm} = 23 \text{ A}$. Mit diesem Strom wird die Anlagenkapazität geladen, bis ihre Spannung das Niveau der Betriebsspannung erreicht.

Die kurzschlussartigen Ladeströme und die hiermit verbundenen Schwankungen von Strom und Spannung (siehe Abbildung 1.5.1 rechts) werden in dieser Anordnung vermieden.

Frage 1.5.4: Ladestrategie für Kabel und Anlagenkapazitäten. Welches Vorgehen wäre zu empfehlen um das Verhalten der Leitung nach dem Einschalten günstig zu beeinflussen?

Lösung: Die Anlagenkapazitäten sollten langsam aufgeladen werden, d.h. mit begrenztem Ladestrom. Idealerweise wird erst das Kabel aufgeladen, um dessen Reflexionen zu vermeiden.

Das Laden der Anlagenkapazitäten können die Anlagen am Ende der Leitung selbst übernehmen: Sobald die Spannung am Anschlusspunkt der Anlage (= Kabelende) stabil ist, beginnen die Anlagen mit der stromgeführten Aufladung ihrer Kapazitäten. Die Ladeströme sollten auf einen Wert unterhalb des Bemessungsstromes begrenzt bleiben. Der Bezug von Leistung aus dem Netz bzw. die Einspeisung von Leistung ins Netz ist erst bei vollständig aufgeladenen Anlagenkapazitäten erlaubt.

Beispiel: Eine Anlagenkapazität C besitzt bei Ladung auf die Nennspannung U_0 die Energie $E_C = \frac{1}{2} C U_0^2$. Der Ladestrom I_C bezieht bei Betriebsspannung U_0 eine Leistung von $P_C = U_0 I_C$. In der Zeit T_C überträgt er eine Energie von $E_{PC} = P_C T_C$. Im den Kondensator vollständig aufzuladen, sollte $E_{PC} = E_C$ gelten, somit $U_0 I_C T_C = \frac{1}{2} C U_0^2$.

Die Ladedauer beträgt mit konstantem Strom somit $T_C = \frac{1}{2} C U_0 / I_C$. Mit einem Ladestrom von 1 A ergibt sich bei $U_0 = 1400 \text{ V}$ und $C = 1 \text{ mF}$ eine Ladedauer von $0,7 \text{ s}$. Gemessen an den bisher betrachteten Zeitauflösungen im Bereich $< 10 \text{ μs}$ oder $< 10 \text{ ms}$ erscheint die Ladedauer groß.

1.6. Einfluss der Kabelinduktivität

Folgende Abbildung zeigt das Modell der Kabelstrecke bestehend aus 5 Segmenten, das mit der leeren Anlagenkapazität abgeschlossen ist. Die Spannung an der DC-Sammelschiene wird von einer idealen Spannungsquelle bereitgestellt. Dieses Modell gestattet die Messung von Strömen und Spannungen in den einzelnen Kabelsegmenten.

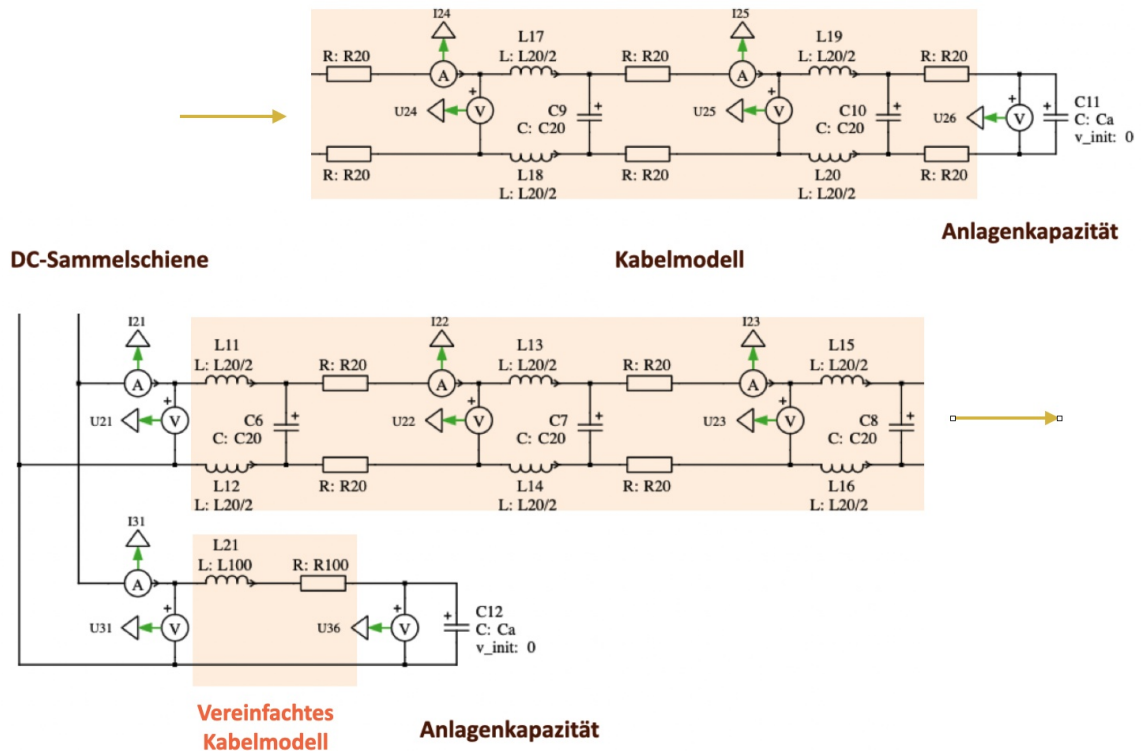


Bild 1.6.1 Einfluss der Kabelinduktivität im Ersatzschaltbild

Frage 1.6.1: Ersatzschaltbild. Erläutern Sie den Einfluss der Kabelsegmente auf Strom und Spannung beim Start der Simulation (d.h. beim Einschalten).

Lösung: Bei Simulationen mit hoher Zeitaufösung lässt sich mit Hilfe der Messpunkte für Strom und Spannung die Ausbreitung der Welle beobachten. Hierbei hängen Strom und Spannung über den Wellenwiderstand zusammen: $U = R_w \cdot I$. Bei Betrieb an einer Spannungsquelle (Betriebsspannung U_0) ist die Amplitude der einlaufenden Spannungswelle vorgegeben, der Strom folgt nach der genannten Gleichung.

Eine Möglichkeit zur Interpretation der Wellenausbreitung liefern die Kapazitäten und Induktivitäten in den Kabelsegmenten: Sie dienen als Energiespeicher für die Wellenausbreitung. Während der Wellenausbreitung entspricht der Maximalwert der Energie der Induktivitäten dem Maximalwert der Energie der Kapazitäten, es gilt $\frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} L I^2$. Aus diesem Gleichgewicht folgt der Wellenwiderstand in der Form $R_w = \sqrt{L/C}$.

Frage 1.6.2: Verhalten am Anfang und Ende der Leitung. Wie ließe sich das Ersatzschaltbild vereinfachen, wenn nur das Verhalten am Anfang und am Ende der Leitung von Interesse ist?

Lösung: Der Zustand am Anfang der Leitung und am Ende der Leitung ist durch die Beschaltung vorgegeben. Am Leitungsanfang ist die Spannung durch die Spannungsquelle auf die Betriebsspannung fixiert. Die Spannung am anderen Ende der Leitung ist auf die Spannung der Anlagenkapazität fixiert. Letztere ist abhängig vom Ladezustand der Kapazität, und somit von der Höhe des Ladestromes.

Wenn man auf die Messung innerhalb der Kabelstrecke verzichtet, lässt sich das Kabel zu einem einzelnen Segment vereinfachen. Da die Kabelkapazität sehr klein ist im Verhältnis zur Anlagenkapazität, kann man in diesem Ersatzschaltbild auf die Kabelkapazität verzichten. In der vereinfachten Ersatzschaltung verbleiben als Kabeleigenschaften $\{L, R\}$, wie im unteren Teil der Abbildung oben dargestellt. Als wesentliche Kabeleigenschaft verbleibt die Kabelinduktivität, sowie der Kabelwiderstand.

Frage 1.6.3: Simulationslauf. Eine Simulation mit dem vollständigen Modell und dem vereinfachten Modell zeigt folgendes Verhalten. Erläutern Sie den Einfluss der Kabelinduktivität.

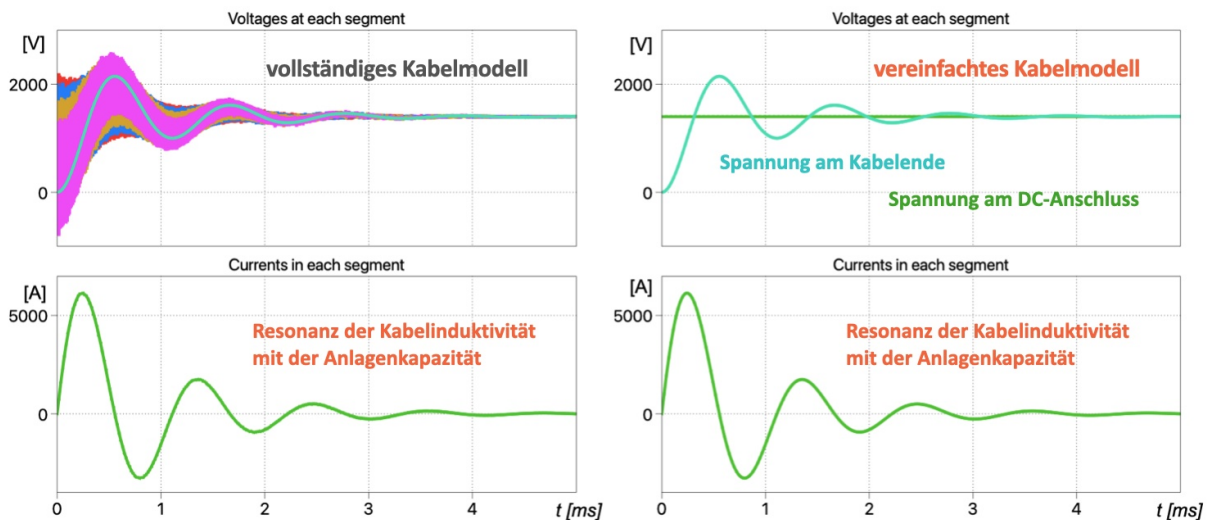


Bild 1.6.2 Ströme und Spannungen beim Laden der Anlagenkapazität unter Kurzschlussbedingungen

Lösung: Die Beschaltung entspricht der Abbildung 1.6.1. Im linken Teil in Abbildung 1.6.2 ist der Zeitverlauf der Spannungen und Ströme im vollständigen Kabelmodell dargestellt; im rechten Teil der Abbildung die Spannung am Anfang und Ende der Leitung, sowie der Leitungsstrom.

Man erkennt, dass das vereinfachte Kabelmodell die Verhältnisse am Anfang und Ende der Leitung korrekt wiedergibt. Der Vorgang zeigt das Laden der Anlagenkapazität unter Kurzschlussbedingungen nach dem Einschalten der Spannung am DC-Verteiler (= Simulationsbeginn).

Frage 1.6.4: Einschwingvorgang. In beiden Fällen (vollständiges Modell und vereinfachtes Modell) zeigt der Zeitverlauf oben eine Schwingung. Wie ist diese zu erklären?

Lösung: Eine Schwingung benötigt zwei Energiespeicher, zwischen denen die Energie pendeln kann. Im vereinfachten Kabelmodell finden sich nur noch die Kabelinduktivität und die Anlagenkapazität. Wenn die Anlagenkapazität die durch den Ladestrom übertragene Energie nicht aufnehmen kann, pendelt diese in die Kabelinduktivität. Deren Fassungsvermögen hängt vom Strom ab ($E_L = \frac{1}{2} LI^2$). Da die Kabelinduktivität relativ klein ausfällt, ist der Strom groß.

1.7. Vereinfachtes Kabelmodell

Folgende Abbildung zeigt das vereinfachte Kabelmodell zusammen mit der Anlagenkapazität. Dieses Modell fasst die wesentlichen Eigenschaften der Kabelstrecke zusammen, wenn sie mit einer Anlagenkapazität abgeschlossen ist.

Die Ersatzschaltung hat die Form eines Schwingkreises, gebildet aus der Kabelinduktivität L_{cable} und der Anlagenkapazität C_{device} . Die Resonanzfrequenz des Schwingkreises findet sich bei

$$f_{\text{cd}} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_{\text{cable}} \cdot C_{\text{device}}}} \quad (1.7.1)$$

In der Ersatzschaltung ist die Spannung am Anfang des Kabels vorgegeben: $u_1(t) = U_z$ ab dem Einschaltzeitpunkt (für $t \geq 0$). Der Strom $i(t)$ ist eine Folge der Spannung.

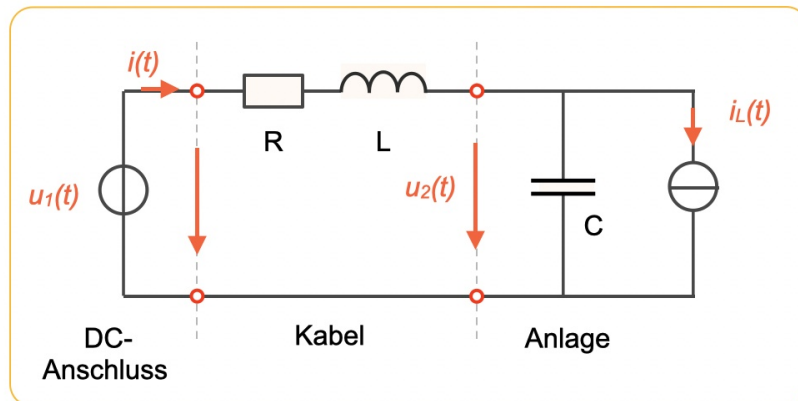


Bild 1.7.1 Ersatzschaltung für DC-Anschluss, Kabel und Anlage

Frage 1.7.1: Vereinfachungen. Welches sind die Vereinfachungen gegenüber dem Modell mit Kabelsegmenten? Welche Rolle spielen die Energiespeicher?

Lösung: Die Kabelstrecke wird nur noch durch die Kennzahlen $\{L, R\}$ repräsentiert. Diese ergeben sich aus dem Induktivitätsbelag L' und dem Widerstandsbelag R' über die gesamte Länge des Kabels. Die Kabelkapazität wurde vernachlässigt, da sie klein ist gegenüber der Anlagenkapazität (in der Größenordnung nF gegen mF). Das Modell repräsentiert Strom und Spannung an den Enden der Kabelstrecke korrekt.

Die Rolle der Energiespeicher ist die Speicherung von Energie während des Wechsels von einem Betriebszustand in einen anderen, also bei Transienten bzw. Übergängen durch Schaltungen oder Fehler. Der Kabelwiderstand R kann abhängig von Strom Energie aufnehmen und als Wärme abführen, er wirkt somit dämpfend auf Schwingungen.

Frage 1.7.2: Physikalische Eigenschaften der Schaltung. Welche Amplituden von Spannung und Strom stellen sich bei Anregung der Resonanz zwischen Kabelinduktivität und Anlagenkapazitäten ein? Verwenden Sie als Beispiel folgende Werte: $L = 30 \mu\text{H}$; $C = 1 \text{ mF}$, $R = 0,068 \Omega$. Die Schaltung soll bei $U_0 = 1400 \text{ V}$ betrieben werden.

Verwenden Sie folgenden Zusammenhang:

$$\frac{1}{2} C_{\text{device}} \Delta U^2 = \frac{1}{2} L_{\text{cable}} \Delta I^2 \quad (1.7.2)$$

Lösung: Während einer Resonanz pendelt die Energie zwischen Anlagenkapazität und Kabelinduktivität. Die Amplitude des Stroms folgt somit aus der Spannung durch das Gleichgewicht der Energie (nach dem Prinzip der Energieerhaltung).

Für die Kabelresonanz ergibt sich ein Wert $f_{\text{cd}} = 930 \text{ Hz}$. Aus Gleichung (1.7.2) folgt

$$\Delta U = \sqrt{\frac{L_{\text{cable}}}{C_{\text{device}}}} \Delta I = R_{\text{cd}} \Delta I \quad (1.7.3)$$

Der charakteristische Wert R_{cd} für das Verhältnis von Spannung und Strom berechnet sich zu $R_{\text{cd}} = 0,17 \Omega$. Mit einer Betriebsspannung von $U_0 = 1400 \text{ V}$ folgt hieraus eine maximale Stromamplitude von $I = 1400 \text{ V} / 0,17 \Omega \approx 8000 \text{ A}$.

Frage 1.7.3: Lastsprünge und Spannungseinbrüche. Folgende Abbildung zeigt zwei Simulationsläufe mit dem vereinfachten Kabelmodell. In beiden Fällen startet die Simulation aus einem Gleichge-

wichtszustand, in dem die Anlagenkapazität und die Kabelkapazität auf die Betriebsspannung geladen sind (was sich durch geeignete Initialisierung erreichen lässt). In diesem Zustand ist das Kabel stromlos.

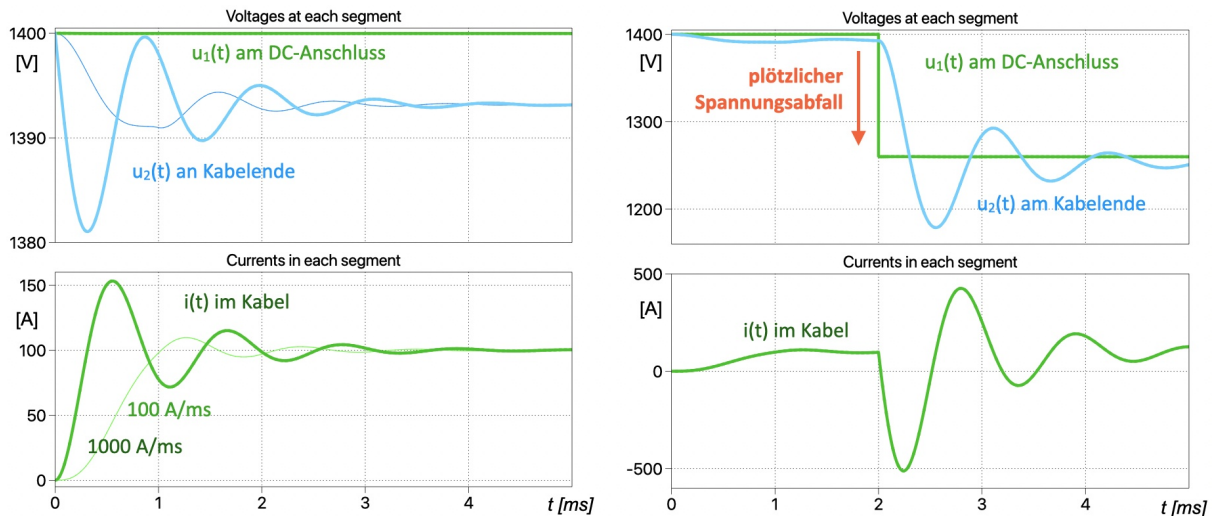


Bild 1.7.2 Verhalten bei Lastsprüngen und Spannungseinbrüchen

Im linken Teil der Abbildung fordert die Anlage am Ende der Leitung (nachgebildet durch eine Stromquelle) einen Strom von 100 A: einerseits mit hoher Stromanstiegsrate (1000 A/ms), andererseits mit geringerer Stromanstiegsrate (100 A/ms).

Im rechten Teil der Abbildung erfolgt neben der Stromanforderung von 100 A mit Anstiegsrate 100 A/ms zusätzlich zum Zeitpunkt $t = 2$ s ein Spannungseinbruch am Kabelanfang.

Erklären Sie die Effekte mit Hilfe des vereinfachten Ersatzschaltbildes.

Lösung: (1) Stromanstiegsraten: Die Anlage am Ende der Leitung wird durch die Anlagenkapazität und eine Stromquelle abgebildet. Der bis auf die Anstiegsrate sprungförmige Laststrom wird sowohl aus der Anlagenkapazität bedient als auch aus der Leitung. Da die Kabelinduktivität die Stromanstiegsraten des Leitungsstroms $i(t)$ begrenzt, steigt bei hohen Stromanstiegsraten der Strombeitrag $i_c(t)$ aus der Kapazität. Hierdurch wird die Anlagenkapazität stärker entladen, was sich am Verlauf der Spannung $u_2(t)$ zeigt.

Kurzfassung: Hohe Stromanstiegsraten der Last regen die Resonanz zwischen Kabelinduktivität und Anlagenkapazität an.

(2) Spannungseinbruch am Anfang der Leitung: Bei Spannungseinbrüchen am DC-Anschluss ist der Entladestrom der Anlagenkapazität durch die Leitung nur durch den Leitungswiderstand und den Innenwiderstand der Spannungsquelle begrenzt. Daher fällt der Entladestrom sehr hoch aus: es herrschen kurzschlussartige Verhältnisse. Die Stromanstiegsrate wird durch die Kabelinduktivität begrenzt. Es pendelt Energie zwischen Anlagenkapazität und Kabelinduktivität.

Kurzfassung: Spannungseinbrüche am DC-Anschluss regen die Resonanz zwischen Kabelinduktivität und Anlagenkapazität an.

Frage 1.7.4: Vergleichen Sie den Strom in Abbildung 1.7.2 rechts mit dem Strom in Abbildung 1.6.2. Wie lässt sich der Unterschied erklären?

Lösung: Mit der Höhe des Spannungseinbruchs. In Abbildung 1.7.2 rechts beträgt der Einbruch am DC-Anschluss 10% der Betriebsspannung. Die Anlagenkapazität befindet sich vorher im stabilen Zustand auf Betriebsspannung.

In Abbildung 1.6.2 ist die Anlagenkapazität leer, der DC-Anschluss bewegt sich in der Simulation sprunghaft auf das Niveau der Betriebsspannung.

In beiden Fällen gilt die Beziehung aus Gleichung (1.7.3). Wegen des unterschiedlich hohen Spannungshubes ΔU fällt die Stromamplitude ΔI jeweils unterschiedlich hoch aus.

1.8. Schalten am Kabel

Folgende Abbildung zeigt die Anordnung bestehen aus dem DC-Anschluss, der Kabelstrecke und der Anlage. Der DC-Anschluss wird von einer Spannungsquelle mit Innenwiderstand versorgt. Das Kabel ist durch das vereinfachte Modell bestehend aus $\{L, R\}$ repräsentiert, die Anlage durch ihre Kapazität und den Anlagenstrom (als gesteuerte Stromquelle).

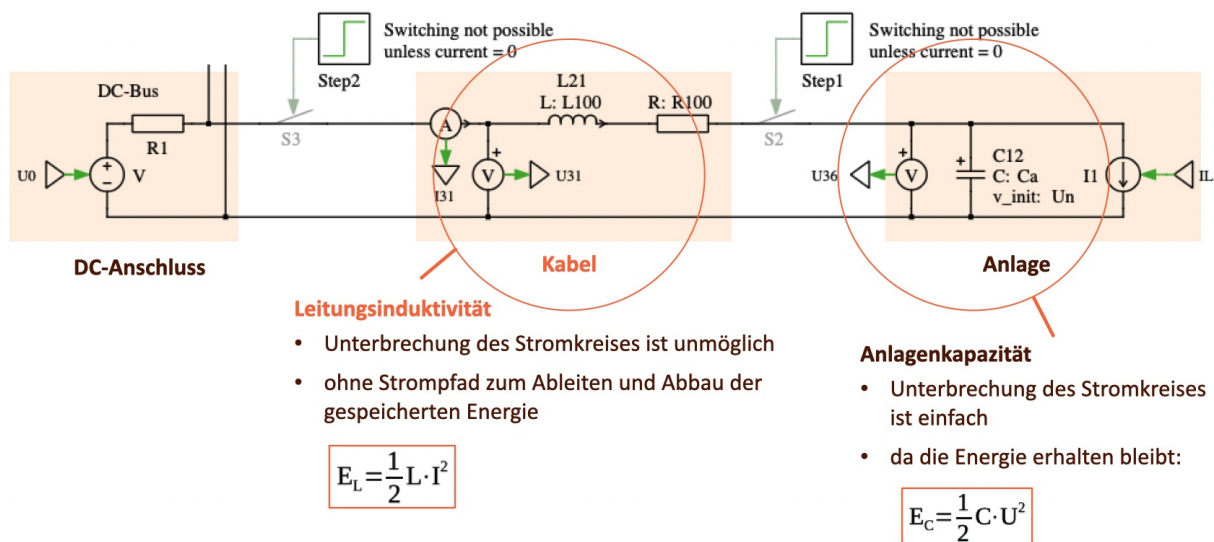


Bild 1.8.1 Unterbrechung von Stromkreisen am Kabel

Aus Gewohnheit bei AC-Verteilnetzen bietet sich am Anfang der Kabelstrecke ein Schalter als Leitungsschutz an, der bei Bedarf den Abgang komplett von der Sammelschiene trennt, bzw. umgekehrt mit der Sammelschiene verbindet. Zum Ankoppeln und Abkoppeln der Anlage wäre ein weiterer Schalter am Ende der Kabelstrecke denkbar.

Frage 1.8.1: Abschalten einer geladenen Kapazität. Verzichtet man auf die Kabelstrecke, vereinfacht sich der Stromkreis auf die Spannungsquelle mit Innenwiderstand und die Anlage (bestehend aus der Anlagenkapazität und der Stromquelle), sowie einen Schalter dazwischen.

Lösung: Die Unterbrechung des Stromkreises einer Kapazität ist jederzeit möglich. Die in der Kapazität gespeicherte Energie bleibt hierbei erhalten:

$$E_C = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (1.8.1)$$

Die Abschaltung ist auch bei gegebenem Anlagenstrom I_L möglich, wobei dieser dann ausschließlich aus der Anlagenkapazität bedient wird und diese entleert.

Frage 1.8.2: Anschalten einer geladenen Induktivität. Betrachtet sei die Schaltung in der Abbildung einschließlich der Kabelstrecke. In welchem Zustand lässt sich einer der Schalter öffnen?

Lösungsbeispiel: Nur im stromlosen Zustand, bzw. beim Nulldurchgang eines Stroms. Letzterer findet in einer AC-Strecke periodisch, in einer DC-Strecke nie (es sei denn, man provoziert eine Resonanz mit Stromumkehr).

Grund hierfür ist der Energiesatz. Eine stromdurchflossene Induktivität speichert Energie:

$$E_L = \frac{1}{2} L \cdot I^2 \quad (1.8.2)$$

Eine Unterbrechung des Stromkreises ist nur möglich, wenn diese Energie abgebaut werden kann. Hierfür muss ein geeigneter Strompfad gefunden werden, auf den der Strom ausweichen (bzw. kommutieren kann). Die Bereitstellung eines Pfades zur Kommutierung des Stroms bei Schaltvorgängen ist gängige Praxis in der Leistungselektronik, bei elektrischen Maschinen, und im Stromnetz.

Frage 1.8.3: Konsequenzen auf die Schalter in der Abbildung. Wie liessen sich Schalter am Anfang und am Ende der Kabelstrecke realisieren?

Lösung: Durch Bereitstellung eines Pfades für den Strom der Kabelinduktivität. (1) Am Leitungsanfang: Bei Betrieb einer Last würde eine Freilaufdiode am Kabelanfang hinter dem Schalter genügen, durch die der Strom der Induktivität beim Öffnen des Schalters zurückfließen kann. (2) Am Leitungsende kann eine Kombination aus Widerstand und Kondensator (RC-Glied) vor dem Schalter an der Anlage die Energie der Spule aufnehmen, wenn der Schalter öffnet und die Anlage vom Kabel trennt. Beide Maßnahmen haben keinen Einfluss auf den Betrieb der Anlage über die Kabelstrecke.

Frage 1.8.4: Zusammenfassung der Kabeleigenschaften. Wie lassen sich die Eigenschaften der Kabelstrecken in der DC-Verteilung zusammenfassen?

Lösung: (1) Kabelparameter: Kabel lassen sich charakterisieren durch ihren Induktivitätsbelag, Kapazitätsbelag und Widerstandsbelag, also durch die Parameter $\{L', C', R'\}$. Als Kabelmodelle eignen sich Ketten aus Kabelsegmenten, wobei sich die Länge der Segmente nach der gewünschten Ortsauflösung richtet.

Sofern nur das Verhalten an den beiden Enden der Kabelstrecke von Interesse ist, genügt für die bei Niederspannungsverteilungen üblichen Entfernungen (von ca. 100 m) ein Kabelsegment. Beim Betrieb an einer Anlagenkapazität lässt sich die Kabelkapazität vernachlässigen, das Modell reduziert sich auf die Kabelinduktivität und den Kabelwiderstand $\{L', R'\}$

(2) Wellenausbreitung: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle auf dem Kabel ist nur abhängig vom Material des Isolators. Bei PVC- oder PE-Kabeln beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit etwa $200 \cdot 10^6$ m/s. Eine Entfernung von 200 m wird somit in einer Zeit von 1 μ s durchlaufen. Für eine Ortsauflösung im Bereich einiger Meter ist also eine Zeitauflösung unterhalb 1 μ s erforderlich. Die Simulationsdauer für Untersuchungen der Wellenausbreitung beträgt $< 10 \mu$ s.

(3) Kabelinduktivität: Die Kabelinduktivität reagiert zusammen mit der Anlagenkapazität. Ein schneller Anstieg des Anlagenstroms bzw. Spannungseinbrüche an der DC-Versorgung regen Resonanzen an. Die Kabelinduktivität gestattet keine Unterbrechung des Stromkreises durch das Kabel. Hierzu muss für die in der Induktivität gespeicherte Energie ein geeigneter Pfad zur Kommutierung des Stroms bereitgestellt werden. Die Zeitspanne für Ausgleichsvorgänge zwischen Kabelinduktivität und Anlagenkapazität liegt bei DC-Netzen in der Niederspannung im Bereich < 10 ms.

2. Kommunale Kapazitäten

Anlagen in Gleichspannungsnetze lassen sich als Stromquellen nachbilden, die an den Anlagenkapazitäten betrieben werden. Somit besteht ein Gleichspannungsnetz aus einer Gemeinschaft über die Anschlussleitungen miteinander verbundenen Kapazitäten. Folgende Abbildung zeigt ein Beispiel für ein Niederspannungsnetz zusammen mit dem Ersatzschaltbild.

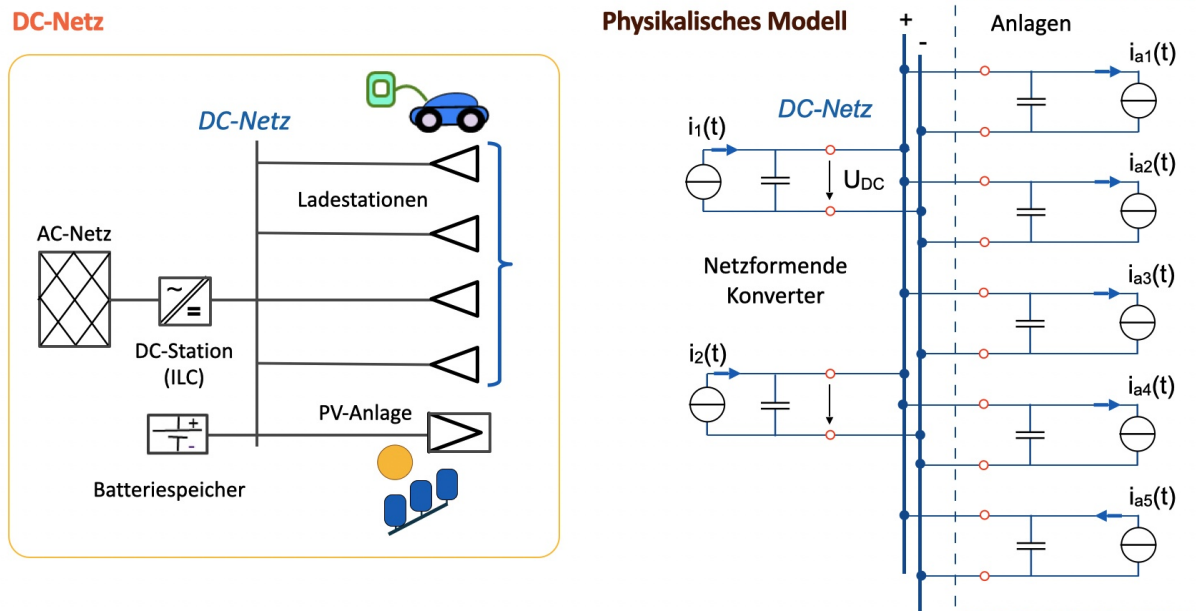


Bild 2.1 Wo finden sich Kapazitäten?

Die Stromquellen repräsentieren in einem Gleichspannungsnetz leistungselektrische Konverter. Passive Verbraucher oder Quellen finden sich hier keine. Auch die Konverter, die die Netzspannung bereitstellen, sind nach ihren physikalischen Eigenschaften Stromquellen. Im Sinne der Regelungstechnik ist die Stromquelle die Regelstrecke. Ein netzbildender Konverter ist spannungsgeführt, wird also durch die Regelung zur Spannungsquelle.

Bei einem AC-Netz fänden sich in der elektrischen Ersatzschaltung über serielle Induktivitäten gekoppelte Spannungsquellen. Bezugsanlagen und Einspeiseanlagen in einem AC-Netz sind ebenfalls stromgeführt. In diesem Fall als stromgeführte Spannungsquellen. Das Funktionsprinzip der Gleichspannungsnetze unterscheidet sich somit grundsätzlich vom Funktionsprinzip der Wechselspannungsnetze. Eine Schlüsselrolle spielen hierbei die Anlagenkapazitäten. Inhalt dieses Abschnitts ist die Untersuchung des Funktionsweise der Gleichspannungsnetze.

2.1. Füllstandregelung

Verwendet man das Wasserrohrmodell für Gleichstrom, lässt sich das Funktionsprinzip leicht durchschauen. Folgende Abbildung zeigt ein einfaches Netz bestehend aus einer Spannungsquelle, einer Bezugsanlage und den zusammengefassten Kapazitäten.

Die Bezugsanlage entnimmt dem Netz den Strom $i_2(t)$. Die Quelle führt dem Netz den Strom $i_1(t)$ zu. An der Sammelschiene werden die Ströme zusammengeführt. Die Differenz aus Zufluss und Abfluss bleibt als Kondensatorstrom $i_C(t)$.

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_C(\tau) \cdot d\tau + u_{\text{initial}} \quad (2.1.1)$$

Der Kondensator nimmt diesen Strom auf und speichert die mit dem Zufluss verbundenen Ladungsträger. Hierdurch steigt die Spannung über dem Kondensator. Die Spannung repräsentiert somit

den Füllstand des Kondensators. Gleichzeitig ist diese Spannung die Spannung im Netz. Folgende Abbildung zeigt die elektrische Ersatzschaltung zusammen mit dem Wasserrohrmodell.

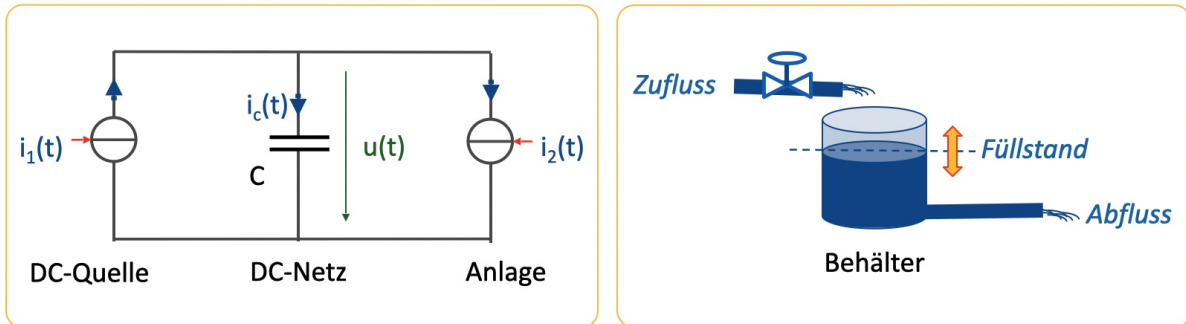


Bild 2.1.1 Funktionsprinzip der DC-Netze

Bei variablem Abfluss lässt sich der Zufluss so führen, dass die Entnahme durch den Zufluss ausgeglichen wird. Als Kriterium für den Zufluss lässt sich hier der Füllstand bzw. die Spannung verwenden: Ist die Spannung zu niedrig, wird nachgefüllt, ist die Spannung zu hoch, wird Strom entnommen. Abfluss und Zufluss arbeiten in beiden Richtungen. Man kann sich die Stromquellen hierzu als Pumpen vorstellen.

Diese Art der Füllstandregelung lässt sich auch bei verbundenen Gefäßen anwenden (siehe Abbildung 2.1 im rechten Teil): Die Füllstände der verbundenen Gefäße gleichen sich über die Verteilung (DC-Sammelschiene mit Abgängen) aus. Jede Anlage lässt sich abhängig vom Füllstand führen. Bezugsanlagen (Verbraucher), Einspeisungen und Energiespeicher werden hierbei stromgeführt bzw. leistungsgeführt: Sie entnehmen Strom oder speisen Strom ein, abhängig vom Füllstand (= der Spannung) im Netz.

Die netzbildenden Konverter werden als Spannungsquellen geführt: Sie gleichen einen Überschuss aus (durch Entnahme von Strom), bzw. füllen bei einem Mangel an Leistung (erkennbar am Füllstand bzw. der Spannung) im Netz nach. Demnach verhalten sie sich wie Spannungsquellen.

Frage 2.1.1: Strom und Spannung am Kondensator. Erläutern Sie Gleichung (2.1.1).

Lösung: Gleichung (2.1.1.) folgt aus der Definition der Kapazität: $C = Q/U$. Die Kapazität C als Kenngröße eines Ladungsspeichers repräsentiert die Ladungsmenge Q , die eine Anordnung bei gegebener Spannung U zu halten vermag. Formt man die Gleichung um nach $U = Q/C$ und differenziert man diese Gleichung nach der Zeit, so erhält man $dU/dt = (1/C) I(t)$: Der Strom repräsentiert die Ladungsänderung nach der Zeit. Gleichung (2.1.1) ist die zugehörige Integralform.

Somit repräsentiert die Spannung über der Kapazität deren Füllstand: Bei konstantem Zufluss (Strom) steigt die Spannung linear. Umgekehrt nimmt die Spannung ab. Die Kapazität C entspricht der Größe des Behälters.

Frage 2.1.2: Spannungshaltung. Folgende Abbildung zeigt ein Simulationsmodell mit dem Spannungsregler. Erläutern Sie das Funktionsprinzip. Welche Rolle spielt der Pegel U_n für das Gleichgewicht der Ströme?

Lösung: Der Regler ist als P-Regler (Proportionalregler) realisiert. Das Regelungsprinzip entspricht der gängigen Vorgehensweise (Heuristik): Ist der Füllstand zu niedrig, wird nachgefüllt. Ist der Füllstand zu hoch, wird abgepumpt. Hierzu wird nur der gewünschte Pegel (= Sollwert) mit dem aktuellen Füllstand (= Istwert) verglichen.

Die Stromquellen sind nach dem Verbraucherzählpfeilsystem ausgerichtet: Aufnahme eines Stromes in Richtung der Spannung bedeutet Leistungsaufnahme. Für einen Verbraucher (Laststrom I_L) ist diese Orientierung einleuchtend. Bei einem Erzeuger wäre der Strom negativ.

Da der Netzbildner den Füllstand ausgleichen muss, funktioniert er an einem Verbraucher wie ein Erzeuger: Der Strom hat umgekehrtes Vorzeichen. Daher hat die Reglerkonstante K_P in der Abbildung negatives Vorzeichen.

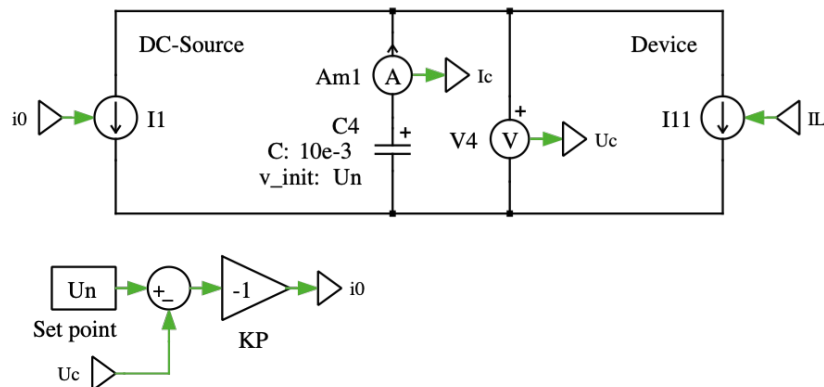


Bild 2.1.2 Ersatzschaltung des Netzes mit Spannungsregler

Als Sollwert ist ein konstanter Füllstand U_n in Höhe der Nennspannung vorgegeben. Die Höhe des Füllstandes spielt grundsätzlich keine Rolle: Ein Ausgleich der Ströme ist bei jedem Pegel möglich. Im Gleichgewicht gleicht der Zufluss den Abfluss aus, der Kondensatorstrom ist Null.

Frage 2.1.3: Simulationslauf. Untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation. Hinweis: Die Simulationsmodelle aus dieser Unterlage finden sich im Web unter der vor dem Inhaltsverzeichnis genannten URL.

Lösungsbeispiel: Siehe folgende Abbildung.

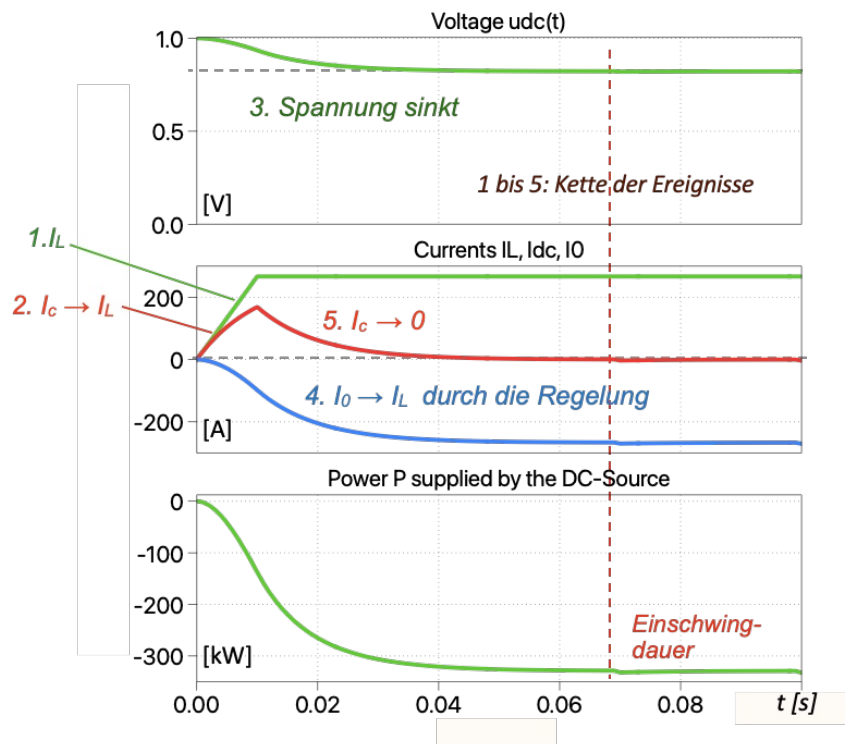


Bild 2.1.3 Simulationslauf der Schaltung

Im Beispiel wurde der Laststrom I_L in Form einer Rampe innerhalb einer Anstiegszeit auf einen konstanten Wert geführt. Nach der Knotenregel wird dieser Strom aus der Kapazität mit dem Strom I_c und

aus der Quelle mit dem Strom I_0 ausgeglichen. Man erkennt, dass sich der Laststrom zunächst ausschließlich aus der Kapazität bedient: Damit der Regler den Quellstrom I_0 aktiviert, muss erst die Spannung über der Kapazität sinken.

Mit fallender Kondensatorspannung erhöht der Regler den Quellenstrom I_0 so lange, bis dieser den Laststrom vollständig ausgleicht. Im eingeschwungenen Zustand ist der Kondensatorstrom null. Die Höhe der Spannung ist hierbei grundsätzlich beliebig. Man erkennt, dass die Spannung im eingeschwungenen Zustand geringer ausfällt als der Sollwert: Der Regler regelt die Spannung nicht vollständig aus. Dieses Verhalten ist für P-Regler normal: ohne verbleibende Regeldifferenz würde die Stellgröße auf null gestellt, es gäbe keinen Zufluss mehr. Auf den Wert U_n ausregeln gelingt nur ohne Laststrom.

Frage 2.1.4: Kausale Kette. Beschreiben Sie die kausale Kette. Verwenden Sie die Begriffe Stellgröße, Führungsgröße und Störgröße. Welche Rolle spielt die Kapazität im Netz?

Lösung: Ursache in der kausalen Kette ist der Laststrom I_L : er repräsentiert die Störgröße. Die Wirkung der Ursache ist die sinkende Spannung über dem Kondensator, dem Strom entnommen wird. Der Regler reagiert auf diese Wirkung und erhöht den Zufluss I_0 . Dieser Zufluss ist die Stellgröße der Regelstrecke. Führungsgröße der Regelung ist die Spannung U im Netz.

Die Kapazität im Netz spielt die Rolle eines Zwischenspeichers bzw. eines Puffers für die Regelung: Sie vermittelt die Stromentnahme in eine Änderung der Netzspannung, auf die der Regler reagiert.

2.2. Verbundene Gefäße

In der Realität sind die Kapazitäten im Netz Anlagenkapazitäten. Die Anlagen sind über Leitungen mit der Sammelschiene verbunden. Sinngemäß besteht das Netz aus verbundenen Gefäßen. Folgende Abbildung zeigt die Anordnung mit einer Quelle und einer Anlage.

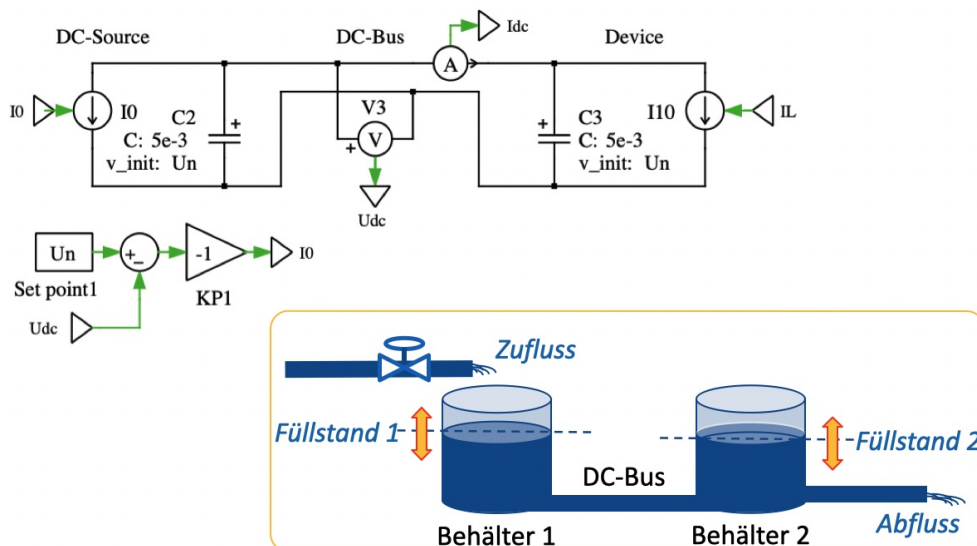


Bild 2.2.1 Verbundene Gefäße

Im Beispiel ist mit dem DC-Bus die DC-Sammelschiene bezeichnet. In der Realität sind die Anlagen über Anschlussleitungen mit der Sammelschiene verbunden. Diese Leitung fehlt im Modell. Allerdings stimmen die Messpunkte nun mit der Praxis im Netz überein: Gemessen werden die Ströme an den Anschlusspunkten (hier I_{dc} im Abgang der Anlage), nicht die Kondensatorströme.

Frage 2.2.1: Erläutern Sie das Verhalten der Anordnung bei einer Stromentnahme an der Anlage. Wie verhält sich der Strom am Abgang der Anlage?

Lösung: Beide Kapazitäten sind direkt parallelgeschaltet und gleichen ihren Füllstand augenblicklich aus. Hierbei sind die Ströme zwischen den Kapazitäten nicht begrenzt. Der Strom I_{dc} am Abgang der Anlage repräsentiert diesen Ausgleichsstrom.

Frage 2.2.2: Simulation. Ein Simulationslauf zeigt folgendes Zeitverhalten. Erläutern Sie die Vorgänge im Netz.

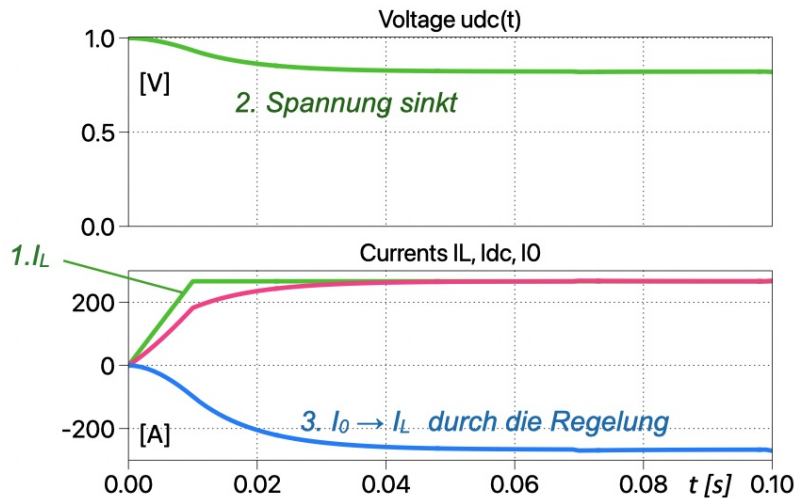


Bild 2.2.2 Wirkung der Füllstandregelung

Lösung: Ursache ist wiederum der Laststrom I_L , der innerhalb einer vorgegebenen Anstiegszeit (hier 10 ms) auf einen vorgegebenen Wert steigt. Dieser Strom entlädt beide Kapazitäten, was sich am sinkenden Spannungsniveau zeigt. Der Regler des Netzbildners reagiert auf diese Spannungsänderung und erhöht den Zufluss I_0 . Im eingeschwungenen Zustand entspricht der Zufluss I_0 dem Abfluss I_L .

Der Strom I_{dc} enthält nun zwei Komponenten: (1) den Strom aus der Kapazität C_1 der Quelle und (2) den Strom I_0 der geregelten Stromquelle. So erklärt sich der augenblickliche Anstieg des Stroms I_{dc} mit der Laststrom (linearer Anstieg am Anfang), und der weitere Anstieg bis auf das Niveau des Laststroms (verbleibender Anteil von $I_0 = I_L$).

Frage 2.2.3: Rückflusssperre für Verbraucher. Für Verbraucher lässt sich ein Rückfluss aus der Anlagenkapazität ins Netz mit Hilfe einer Diode in Lastflussrichtung verhindern: Diese Diode arbeitet als Rückflusssperre bzw. Rückschlagventil. Kann die Regelung hiermit funktionieren?

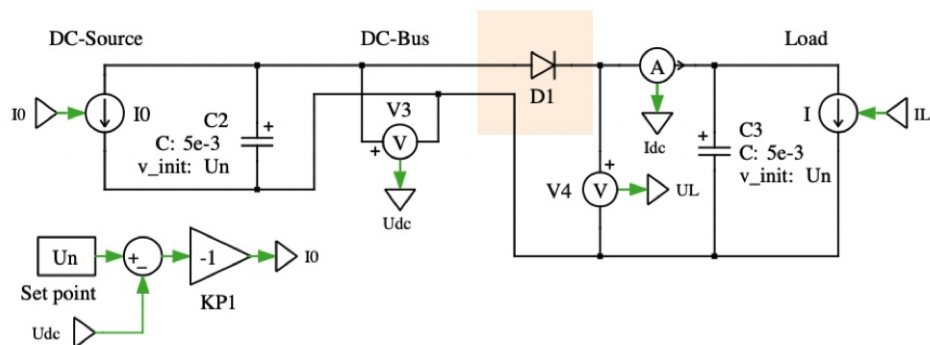


Bild 2.2.3 Diode als Rückflusssperre

Lösung: Aus der Anlagenkapazität kann durch den Regler nun kein Strom mehr entnommen werden. Dennoch bleiben beide Gefäße in Lastflussrichtung verbunden. Da die Bezugsanlage nur Strom ent-

nimmt, wird die Kapazität aus den Netz nachgefüllt, die Gefäße bleiben in dieser Lastflussrichtung miteinander verbunden. Die Regelung sollte weiterhin funktionieren.

Frage 2.2.4: Simulation. Untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation. Welches Verhalten zeigt der Regler?

Lösungsbeispiel: Siehe folgende Abbildung.

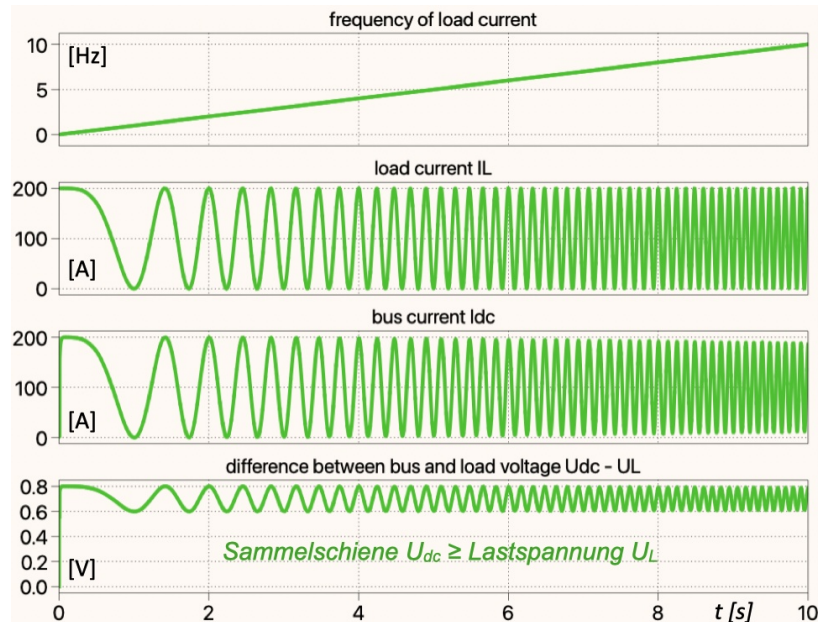


Bild 2.2.4 Einfluss der Rückflusssperre

Der Strom in diesem Fall ist ein pulsierender Gleichstrom: Er bleibt positiv und somit stets in Lastflussrichtung, enthält aber einen Wechselstromanteil in Höhe seines Mittelwertes. Die Frequenz des pulsierenden Gleichstroms wird während der Simulationsdauer auf 10 Hz erhöht.

$$i_L(t) = I_{L0} (1 + \cos(2\pi f_{\text{mod}} t))$$

Man erkennt das der Regler folgen kann: Die Variation der Spannung am DC-Bus (und somit über beiden Kondensatoren) folgt den Strom mit 90 Grad Phasenverschiebung, bedingt durch das Regelverhalten des P-Reglers: Der Sollwert $U = U_n$ wird immer dann erreicht, wenn der Laststrom den Wert null hat. Somit funktioniert die Regelung.

Es ist allerdings auch erkennbar, dass der Strom I_{dc} bei höheren Frequenzen das Niveau des Laststroms nicht mehr erreicht: Bedingt durch Gleichung (2.1.1) reagiert die Regelstrecke träge. Für eine Wechselstromanteil in den DC-Strömen eignet sich diese Regelung nicht. Auch die Anstiegszeiten der Lastströme müssen die Trägheit der Regelstrecke berücksichtigen, sollten also begrenzt sein.

2.3. Netzbildung

Netze werden üblicherweise mit konstanter Spannung geführt. Beim Wassernetz wäre die Spannung der Wasserdruck. Die Spannung ist unabhängig von der Entnahme oder der Einspeisung von Strom ins Netz konstant zu halten. Diese Rolle übernimmt der Netzbildner.

Der Netzbildner ist somit nichts anderes als eine Spannungsquelle. In der Praxis ist er eine spannungsgeregelte Anlage, bestehend aus einer Energiequelle und einer leistungselektronischen Schaltung. Im eingangs zu Abschnitt 2 dargestellten Netz ist der Netzbildner ein Konverter mit Anschluss an das AC-Netz: In diesem Fall ist das AC-Netz die Energiequelle, aus der ein Bedarf gedeckt werden kann, bzw. in die ein Überschuss abgegeben werden kann.

Ein anderer möglicher Netzbildner wäre ein Energiespeichersystem. Hier ist die Energiequelle der Batteriespeicher. Folgender Abbildung zeigt mögliche Realisierungen des Netzbildners als elektrische Ersatzschaltung.

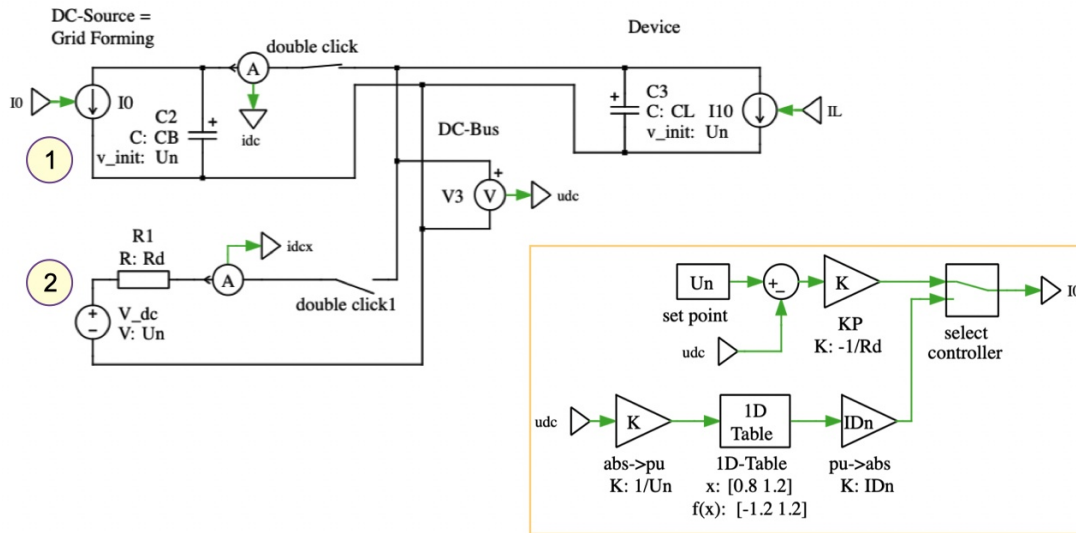


Bild 2.3.1 Spannungsquelle und spannungsgeführte Stromquelle

In der elektrischen Ersatzschaltung bleibt die Energiequelle in einer Spannungsquelle oder einer Stromquelle verborgen: Spannungsquellen und Stromquellen können Leistung aufnehmen oder abgeben (erkennbar über die Beziehung $P = U I$).

Frage 2.3.1: Realisierung des Netzbildners. Welche Möglichkeiten zur Realisierung des Netzbildners sind in der Ersatzschaltung dargestellt? Worin bestehen die Unterschiede?

Lösung: Möglichkeiten zur Realisierung des Netzbildners:

(1) Durch eine spannungsgeführte Stromquelle. Hierbei gibt es folgende Varianten:

a) Der Strom wird durch einen P-Regler geführt. Der Regler hat die Konstante $K_P = -1/R_d$.

b) Der Strom wird über eine Kennlinie geführt (die einer Tabelle entnommen wird). Die Kennlinie hat die Form $i(u) = (u-1) / r_d$. Hierbei bedeuten $u = U/U_n$ und $i = I/I_n$ die auf ihre Nennwerte normierten Größen. Der Widerstand r_d geht aus $R_d = U/I$ hervor und berechnet sich folglich aus $R_d = (u U_n) / (i I_n) = r_d U_n/I_n$.

(2) Durch eine Spannungsquelle: Die Spannungsquelle besitzt die Leerlaufspannung U_n und den Innenwiderstand R_d .

Frage 2.3.2: Untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation und nehmen Sie die Kennlinien $U(I)$ und $i(u)$ auf, indem Sie den Laststrom über einen weiten Bereich variieren. Verwenden Sie für den Strom auch negative Werte, um das Verhalten der Netzbildner bei Einspeisung mit zu erfassen. Welche Kennlinien ergeben sich für die oben genannten Varianten zur Realisierung des Netzbildners? Wie erklären sich die Unterschiede?

Lösungsbeispiel: Siehe folgende Abbildung.

Alle Varianten des Netzbildners verhalten sich exakt gleich, es gibt keine Unterschiede in den Kennlinien. Hierbei ist einschränkend zu bemerken, dass der Bereich des Laststromes langsam durchfahren wird: Die Regelung kann jeweils einschwingen und ihren stabilen Arbeitspunkt erreichen. Andernfalls hätte die Spannungsquelle die bessere Dynamik, da sie keine Trägheit besitzt, im Unterschied zur Stromquelle mit Kapazität innerhalb des Netzbildners.

In der Abbildung sind folgende Kennlinien dargestellt: $U(I)$ Spannung am DC-Bus in Abhängigkeit des Laststroms. Diese Darstellung entspricht dem Versuchsaufbau, in dem der Laststrom die Ursache darstellt, die Spannung die Wirkung.

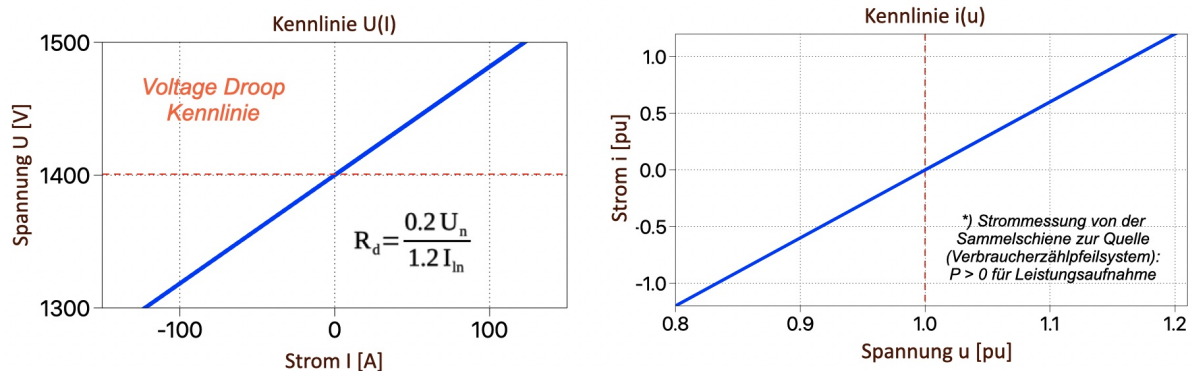


Bild 2.3.2 Kennlinien

An der Spannungsquelle kommt die Änderung der Spannung durch den strombedingten Spannungsablass über dem Innenwiderstand zustande. Dass die Spannung mit steigendem Laststrom steigt, und nicht abfällt (wie der Ausdruck „voltage droop“ nahelegt), liegt an der Richtung der Strommessung: Gemessen wird der Strom am Anschlusspunkt des Netzbildners von der Sammelschiene aus in den Netzbildner. Dieser Strom ist der negative Laststrom.

Der Grund für die Richtung der Strommessung ist die durchgängige Verwendung des Verbraucherzählpfeilsystems: Alle Ströme werden von der Sammelschiene aus in Richtung der Anlagen gemessen. Für einen positiven Laststrom (Verbraucher) wäre somit ein negativer Strom in der Kennlinie zu verwenden. Erwartungsgemäß sinkt dann die Spannung an der Sammelschiene.

Die Kennlinie kann man wie folgt beschreiben:

$$U = U_n - R_d I_L = U_n + R_d I_{dc} \quad (2.3.1)$$

Die inverse Form $I(U)$ erhält man durch algebraische Umformung:

$$I_{dc} = \frac{U - U_n}{R_d} \quad (2.3.1')$$

In normierter Schreibweise $U = u U_n$, $I = i I_n$ und folglich $r_d = R_d I_n / U_n$ ergibt sich hieraus

$$i_{dc} = \frac{u - 1}{r_d} \quad (2.3.1'')$$

In dieser Form entspricht der Mittelpunkt der x-Achse, wie oben rechts in der Abbildung zu erkennen, der Nominalspannung $u = 1$ bzw. $U = U_n$. In diesem Punkt ist der Strom gleich Null. Für den Netzbildner bedeutet diese Vorgabe, dass er bei Nennspannung weder einspeisen noch Strom entnehmen muss. Oberhalb der Nennspannung herrscht im Netz ein Leistungsüberschuss, der Netzbildner entnimmt Strom (mit positivem Vorzeichen). Unterhalb der Nennspannung fehlt Leistung im Netz, der Netzbildner erhöht den Zufluss, indem er Strom abgibt (mit negativem Vorzeichen).

Frage 2.3.3: Welche Kennlinie ergeben sich aus der in der Tabelle abgelegten Kennlinie mit den Eckpunkten $x = \{0,8; 1,2\}$ und $y = \{-1,2; 1,2\}$ für $i(u)$? Verwenden Sie als Nennwerte $U_n = 1400$ V und $I_n = 286$ A (aus einer Nennleistung des Netzbildners von 400 kW ermittelt).

Lösung: Die Steigung der Kennlinie $i(u)$ entspricht $1/r_d = \Delta i / \Delta u = 1,2/0,2 = 6$, und somit $r_d = 1/6$. Der Innenwiderstand beträgt $R_d = r_d U_n / I_n = 1400$ V / $(6 \cdot 286$ A) $\approx 0,82$ Ω . Für die Kennlinie erhält man

$$i_{dc} = (u-1)6 \quad (2.3.2)$$

Probe: Durch Einsetzen der Werte $u = 0,8$ und $1,2$ erhält man die oben genannten Eckpunkte $\{-1,2; 1,2\}$ für den Strom i .

Frage 2.3.4: Wieso erreicht der P-Regler im eingeschwungenen Zustand die gleiche Kennlinie?

Lösung: (1) Begründung nach Plausibilität: Im eingeschwungenen Zustand ist der Kondensatorstrom null und $I_0 = I_L$. Damit der Regler diesen Zustand halten kann, benötigt er eine Regeldifferenz, und somit eine Spannungsdifferenz. Die Spannungsdifferenz $(U_n - U)$ wird mit dem Reglerparameter $K_P = -1/R_d$ verstärkt zur Stellgröße I_0 , es gilt somit: $-I_0 = I_L = (U_n - U)/R_d$.

(2) Begründung aus der Übertragungsfunktion im eingeschwungenen Zustand: Wenn man aus dem Signalfluss der Regelung die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises berechnet, erhält man die Gleichung

$$U = \frac{1}{R_d C s + 1} U_n - \frac{R_d}{R_d C s + 1} I_L \quad (2.3.3)$$

Hierbei geht die Regelstrecke nach Gleichung (2.1.1) in den Ausdruck $1/Cs$ ein. Den eingeschwungenen Zustand für die Zeit $t \rightarrow \infty$ erhält man aus der Übertragungsfunktion, indem die Variable $s \rightarrow 0$ geht. Es ergibt sich die gewünschte Kennlinie $U = U_n - R_d I_L$.

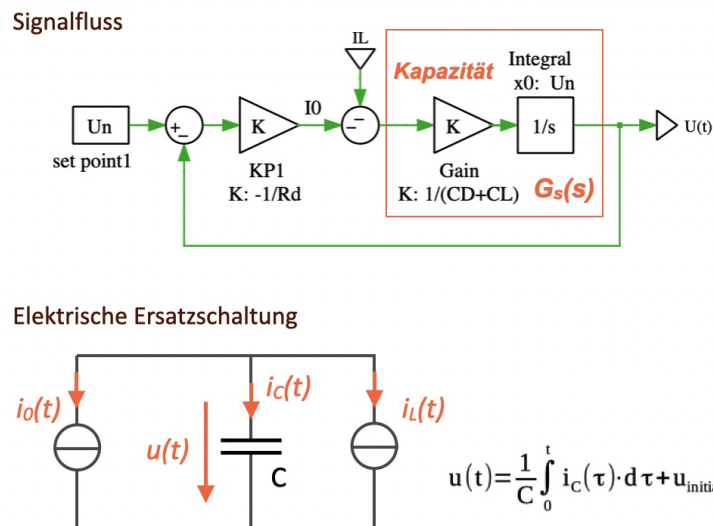


Bild 2.4.1 Signalfluss der Regelstrecke mit Regler

Der Vollständigkeit halber ist in der Abbildung oben der Signalfluss zusammen mit der elektrischen Ersatzschaltung dargestellt. Aus dem Signalfluss erhält man die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises

$$U = -\frac{G_s K_P U_n}{1 - G_s K_P} - \frac{G_s I_L}{1 - G_s K_P} \quad (2.3.4)$$

Hierbei bezeichnet $G_s(s)$ die Übertragungsfunktion der Regelstrecke. Dieser ergibt sich aus dem Stromintegral (2.1.1) zu $G_s(s) = 1/(Cs)$. Für den Reglerparameter K_P gilt $K_P = 1/R_d$. Durch Einsetzen erhält man die Form (2.3.3).

2.4. Regeln und Regelung

Aus dem Funktionsprinzip lassen sich einige Regeln zur Dimensionierung der Kapazität ableiten. Außerdem wird das einfache Modell bestehend aus DC-Quelle (Netzbildner), Sammelschiene und Anlage erweitert um die Zuleitung zur Anlage und das Regelungsverhalten untersucht.

Frage 2.4.1: Maximale Kapazität. Je größer der Behälter, desto langsamer sinkt bei gleicher Entnahme der Füllstand. Im DC-Netz variiert die Spannung umso weniger, je größer die Kapazität im Netz ausfällt. Hierdurch wird die Regelung träge. Zur Auslegung der Anlagenkapazitäten definiert man daher folgende Dimensionierungsregel.



Dimensionierungsregel: Maximale Kapazität
Damit die Regelung des Netzbildners schnell genug reagieren kann, wird die Kapazität der Anlagen nach oben begrenzt. Die Geschwindigkeit der Regelung wird an der Änderungsrate der Spannung gemessen (du/dt , z.B. 1 V/ms). Die Anlagenkapazität wird nach der Leistung der Anlage bemessen.

Wie lässt sich diese Dimensionierungsregel begründen?

Lösung: Nach der Gleichung (2.1.1) ist die Spannung über einem Kondensator proportional zum Stromintegral und umgekehrt proportional zur Kapazität. In Differenzialform erhält man

$$\frac{du(t)}{dt} = \frac{1}{C} i(t) \quad (2.4.1)$$

Bei Vorgabe einer minimalen Anstiegsrate du/dt für die Spannung folgt hieraus

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{C} \hat{i} > \left(\frac{du}{dt}\right)_{\min} \quad (2.4.2)$$

Somit muss die Kapazität kleiner ausfallen als der Scheitelwert $\hat{i}$ des Stroms, dividiert durch die gewünschte minimale Anstiegsrate. Die Höhe des Stroms ist bei konstanter Spannung direkt proportional zur Leistung. Die Stromvorgabe folgt aus der Anlagenleistung.

Frage 2.4.2: Simulationslauf. Interpretieren Sie folgenden Simulationslauf.

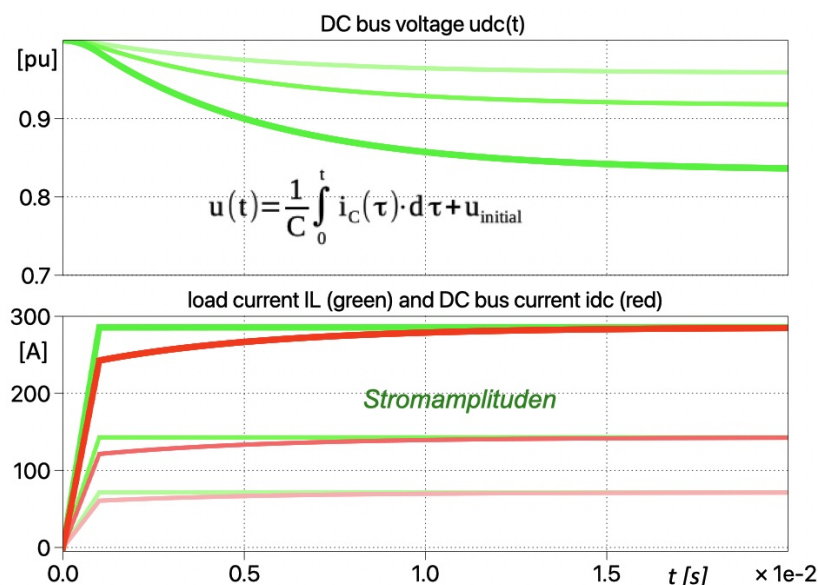


Bild 2.4.1 Spannungsabfall abhängig von der Stromamplitude

Lösung: Der Kondensatorstrom innerhalb I_{dc} (rote Kurve) folgt dem Anlagenstrom I_L sofort, bis schließlich der Regler eingreift und den Laststrom komplett übernimmt. Der Regler reagiert auf den Span-

nungsabfall in den Kennlinien darüber. Dieser ist proportional zur Stromamplitude, und proportional zur Anlagenkapazität. Die Anlagenkapazität im dargestellten Simulationslauf bleibt konstant. Durch Änderung der Kapazität lässt sich die Anstiegsrate der Spannung aber ebenfalls verändern.

Frage 2.4.3: Regler und Signalfluss. Wie kommt man vom Ersatzschaltbild im oberen Teil der Abbildung zum Signalfluss im unteren Teil der Abbildung? Welche Übertragungsfunktion ergibt sich? Ist die Regelung stabil?

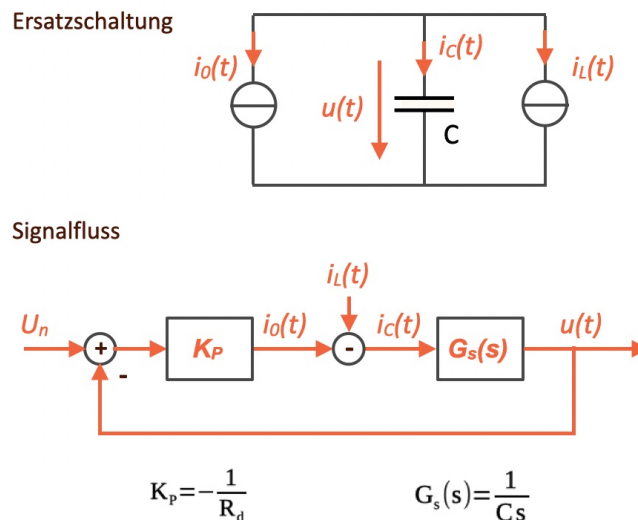


Bild 2.4.2 Elektrische Ersatzschaltung der Anordnung und Signalfluss der Regelstrecke

Lösung: Der Signalfluss ergibt sich aus der Ersatzschaltung auf folgendem Weg: Stellgröße ist der Strom $i_0(t)$. Dieser folgt aus der Differenz des Spannungssollwertes zum Istwert der Spannung, multipliziert mit dem Reglerparameter K_P :

$$I_0 = K_P(U_n - U)$$

Die Spannung $u(t)$ ergibt sich aus der Stellgröße I_0 , multipliziert mit der Übertragungsfunktion $G_s(s)$ der Regelstrecke.

$$U = G_s(-I_0 - I_L)$$

Durch Einsetzen und Ausmultiplizieren erhält man die Übertragungsfunktion

$$U = -\frac{G_s K_P U_n}{1 - G_s K_P} - \frac{G_s I_L}{1 - G_s K_P}$$

Setz man weiter $G_s(s) = 1/Cs$ ein, sowie $K_P = -1/R_d$, so erhält man die Form.

$$U = \frac{1}{R_d C s + 1} U_n - \frac{R_d}{R_d C s + 1} I_L$$

Hierbei ist U_n der Sollwert der Führungsgröße U , und der Laststrom I_L die Störgröße. Im eingeschwungenen Zustand gilt $I_L = -I_0$.

Die Übertragungsfunktion besitzt eine Polstelle bei $s_1 = -1/\tau$ mit der Zeitkonstante

$$\tau = R_d C$$

Somit ist die Regelung stabil (solange R_d positiv bleibt). Die Zeitkonstante τ beschreibt, wie langsam der Regler reagiert. Bis zum Einschwingen wäre etwa der 5-fache Wert der Zeitkonstante abzuwarten.

Wie man erkennt, ist die Zeitkonstante abhängig von der Kapazität C , sowie von der Steigung der Kennlinie des Reglers.

Frage 2.4.4: Trägheit. Für den Regler stellt die Kapazität einen Energiespeicher bzw. Puffer bereit, aus dem die Lastanforderung sofort bedient werden kann, bis der Regler greift. Diese Eigenschaft lässt sich als Trägheit interpretieren, die wie folgt definiert ist:

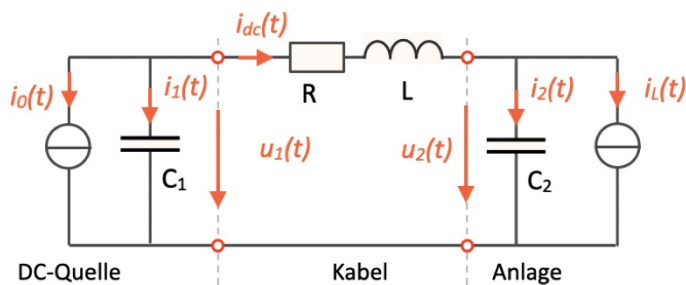
$$H = \frac{E_C}{P} = \frac{\frac{1}{2} C U^2}{P} \quad (2.4.3)$$

Wie groß wäre die Trägheit für eine Anlage mit einer Kapazität von $C = 10 \text{ mF}$, die an einer Spannung von $U = 1400 \text{ V}$ mit einer Leistung von 200 kW betrieben wird.

Lösung: Die Energie des Kondensators beträgt $E_C \approx 20 \text{ kWs}$. Mit 200 kW Anschlussleistung beträgt die Trägheit somit $H = 0,1 \text{ s}$.

Frage 2.4.5: Ergänzung des Anschlusskabels der Anlage. Ergänzt man die Schaltung um das Anschlusskabel der Anlage, so ergibt sich folgendes Ersatzschaltbild, und der darunter dargestellte Signalfluss. Untersuchen Sie die Schaltung analytisch mit Hilfe des Signalflusses. Mit welchen Resonanzen ist zu rechnen? Wie werden diese angeregt? Wie lassen sie sich vermeiden? Verwenden Sie als Beispiel folgende Auslegung: $C_1 = 5 \text{ mF}$, $C_2 = 1 \text{ mF}$, $R_d = 0,82 \Omega$.

Ersatzschaltung mit Kabel



Signalfluss

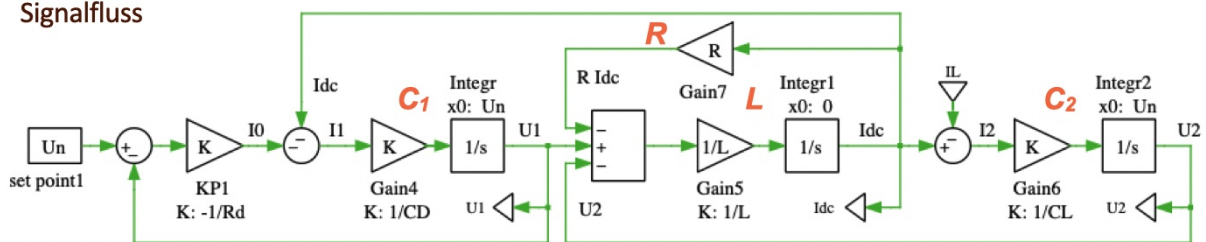


Bild 2.4.3 Netzbildner, Sammelschiene und Anlage mit Anschlusskabel

Lösung: Bemerkung zur Vorgehensweise: Den Signalfluss erhält man auf die gleiche Weise aus den Gleichungen zur Ersatzschaltung wie unter Frage 2.4.3 aufgeführt. Allerdings ist die Berechnung der Übertragungsfunktion analytisch nicht mehr mit vertretbarem Aufwand möglich. Eine formale Analyse nach der Übertragungsfunktion lässt sich mit mathematischen Werkzeugen numerisch realisieren (z.B. mit Matlab), hilft aber wenig für das Verständnis der Schaltung.

Mehr Information bietet der Signalfluss. Sucht man nach Rückkopplungen zweiter Ordnung, so erkennt man folgende Resonanzstellen:

- 1. Resonanz $f_1 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C_1}}$: Durch den Strom I_0 des Netzbildners beeinflussbar.

Mit den angegebenen Werten findet sich diese Resonanz bei $f_1 = 225 \text{ Hz}$.

- 2. Resonanz $f_2 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_2}}$: Diese Resonanz kann durch den Laststrom I_L angeregt werden und ist für den Strom I_0 des Netzbildners nicht direkt zugänglich, sondern nur über die Übertragungsfunktion der Regelstrecke mit 90 Grad Phasenverschiebung.

Diese zweite Rückkopplungsschleife stellt ein loses Ende dar. Man kann erwarten, dass die Schaltung bei Lastsprüngen und Spannungseinbrüchen am DC-Bus mit dieser Resonanz schwingt. Die Schwingung wird durch den Leistungswiderstand R gedämpft (der ebenfalls auf die Spannung U_1 zurück koppelt). Mit den gegebenen Daten findet sich $f_2 = 503$ Hz.

- Zeitkonstante des Reglers mit Strecke: $\tau = R_d C$. Mit den gegebenen Werten beträgt $\tau = 1/245$ s. Somit kann der Regler die Resonanz f_2 nicht erreichen, unabhängig vom fehlenden Zugriff über den Strom I_0 des Netzbildners.

Man kann also erwarten, dass die Schaltung mit der Resonanz schwingt, angeregt durch Lastwechsel von I_L und durch plötzliche Spannungseinbrüche an der DC-Sammelschiene.

Nach dem Signalfluss sind die Ursachen der Laststrom I_L und die Spannung U_1 an der Sammelschiene. Bei Gleichstrom und Gleichspannung sollte sich überhaupt kein Einfluss ergeben. Allerdings sind plötzliche Lastwechsel und Spannungsschwankungen zu vermeiden.

Frage 2.4.6: Untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation mit und ohne Dämpfung durch den Leitungswiderstand R .

Lösungsbeispiel: Siehe folgende Abbildung.

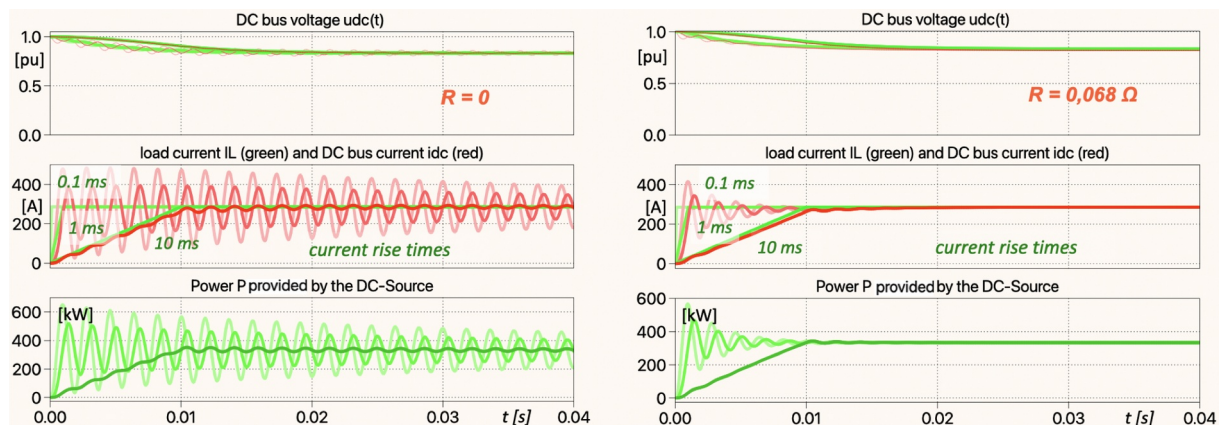


Bild 2.4.4 Anregung der Resonanz f_2 durch die Anstiegszeit des Laststroms I_L

Die Schaltung wurde mit den genannten Eckwerten betrieben. Das Simulationsmodell enthält sowohl die elektrische Ersatzschaltung als auch den Signalfluss, der die Schaltung als Differenzialgleichung beschreibt. Im linken Teil der Abbildung wurde der Widerstand R der Kabelstrecke zur Anlage zu Null gesetzt. Man erkennt die Resonanz bei der Frequenz f_2 (siehe Schaltungsanalyse in Frage 2.4.5). Mangels Dämpfung durch den Widerstand R dauert es lange bis die Schwingung abklingt.

Der rechte Teil der Abbildung zeigt das gleiche Verhalten wie links, nur unter realistischen Verhältnissen mit dem Widerstand der Kabelstrecke. In beiden Fällen wird die Resonanz angeregt durch Lastwechsel von null auf den maximalen Strom des Netzbildners (im Beispiel 286 A). Hierbei wurden die Stromanstiegszeiten im Bereich 0,1 ms, 1 ms und 10 ms variiert. Der Effekt lässt sich durch Begrenzung der Stromanstiegszeiten deutlich vermindern.

Frage 2.4.7: Begrenzung der Stromanstiegszeiten. Zur Begrenzung der Stromanstiegszeiten wird folgende Regel vereinbart.



Dimensionierungsregel: Begrenzung der Stromanstiegszeiten.
Um Resonanzen der Anlagenkapazitäten mit den Induktivitäten der Anschlussleitungen zu vermeiden, werden die Stromanstiegszeiten der Anlagen so begrenzt, dass die Anstiegsrate des Stroms 75 A/ms nicht übersteigt.

Wie lässt sich diese Dimensionierungsregel begründen? Untersuchen Sie die Wirksamkeit der Regel in der Simulation.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.

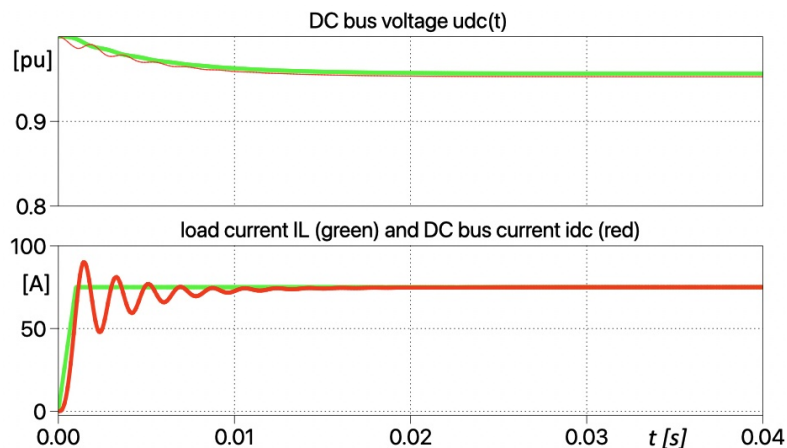


Bild 2.4.5 Wirkung der Begrenzung der Stromanstiegszeiten

Im Beispiel wurde der Anlagenstrom innerhalb 1 ms auf 75 A gefahren. Man erkennt die Resonanz noch, der Effekt ist aber gegenüber dem höheren Strom in der gleichen Zeit deutlich geringer (siehe Abbildung 2.4.4). Im oberen Teil der Abbildung erkennt man leichte Schwankungen der Spannung $u_2(t)$ über der Anlagenkapazität.

Bewertung: Die Begrenzung der Stromanstiegszeiten ist nicht alleine ausreichend. Sie ist notwendig, aber nicht hinreichend. Im Beispiel wurde eine vergleichbar kleine Anlagenkapazität verwendet.

Frage 2.4.8: Minimale Anlagenkapazität für Spannungsschwankungen. Zur Begrenzung von Spannungsschwankungen durch die zulässigen Stromanstiegszeiten wird die Anlagenkapazität nach unten durch folgende Regel begrenzt.



Dimensionierungsregel: Minimale Anlagenkapazität
Um Spannungsschwankungen bei Lastwechseln mit zulässigen Stromanstiegszeiten an Anlagen und Sammelschiene zu vermeiden, sollte die Anlagenkapazität eine Mindestgröße besitzen. Die Mindestgröße bemisst sich nach der Leistung der Anlage.

Wie lässt sich diese Dimensionierungsregel begründen? Nennen Sie ein Beispiel.

Lösung: Bei kurzen Stromanstiegszeiten bedient sich der Laststrom fast vollständig aus der eigenen Anlagenkapazität. Maximal erreicht der der Überschwinger im Strom die Höhe des Laststromes. Somit wird die Leitungskapazität mit dem Laststrom aufgeladen. Bei Resonanz pendelt Energie zwischen der Leitungsinduktivität und Anlagenkapazität. Aus dem Energiesatz folgt:

$$\frac{1}{2} C_2 U_2^2 = \frac{1}{2} L I^2 \quad (2.4.4)$$

Die Höhe der Spannungsamplitude ΔU ist somit verbunden mit der Stromamplitude ΔI über die Beziehung

$$\Delta U_2 = \sqrt{\frac{L}{C_2}} \Delta I \quad (2.4.4')$$

Demnach lässt sich die Spannungsamplitude ΔU bei gegebener Kabelinduktivität L verringern durch Vergrößern der Anlagenkapazität C_2 . In der Praxis wird man die Kabelinduktivität hierfür nach oben abschätzen, z.B. für Leitungslängen bis 100 m mit 100 μH .

Beispiel: Die Schwankungen ΔU der Spannungsamplituden sollen auf 1% U_n begrenzt werden. Für einen Laststrom $I_L = 100 \text{ A}$ unter der Annahme $\Delta I = I_L$ wäre bei einer Betriebsspannung von $U_n = 1400 \text{ V}$ ein Ersatzwiderstand $R_2 = \sqrt{L/C_2} = 0,14 \Omega$ erforderlich. Mit der maximalen Leitungsinduktivität von 100 μH wäre hierfür eine Anlagenkapazität von wenigstens $C_{2,\min} = 2,5 \text{ mF}$ erforderlich. Die Anlagenkapazität in der Simulation beträgt $C_2 = 1 \text{ mF}$. Somit besteht hier noch Verbesserungspotenzial.

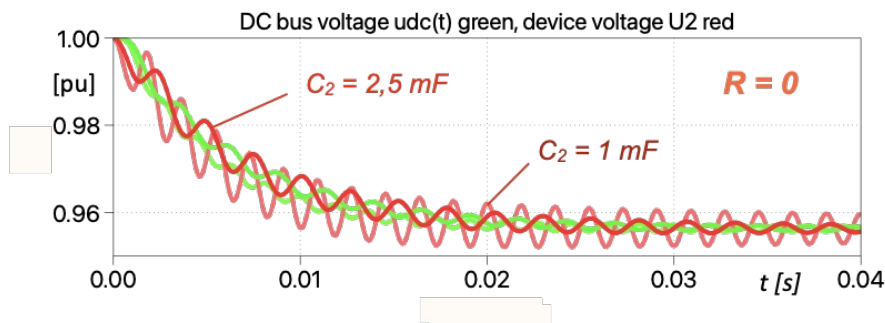


Bild 2.4.6 Einfluss der Anlagenkapazität C_2 auf die Spannungsschwankungen

Die Abbildung zeigt einen Simulationslauf mit beiden Werten der Anlagenkapazität. Um den Effekt deutlich zu zeigen, wurde der Leitungswiderstand $R = 0$ gesetzt. Mit der Mindestkapazität wird die Vorgabe an die Spannungsschwankung erfüllt.

Frage 2.4.9: Minimale Anlagenkapazität für Brummspannung (Voltage Ripple). Zur Begrenzung hochfrequenter Spannungsschwankungen durch die Schaltfrequenz (früher bei Gleichrichtern mit Netzfrequenz: Brummspannung) der Anlagen wird die Anlagenkapazität nach unten durch folgende Regel begrenzt.



Dimensionierungsregel: Minimale Anlagenkapazität
Die Anlagenkapazität ist so groß zu wählen, dass die Spannungsschwankungen, die durch die Schaltfrequenz der Anlage entstehen (früher Brummspannung, engl. voltage ripple), unter einem vorgegebenen Wert bleiben.

Diese Regel stellt eine weitere Regel für die Anlagenkapazität dar. In der Praxis ist für die Auslegung der größere Wert aus beiden Regeln zu verwenden. Wie lässt sich diese Dimensionierungsregel begründen? Nennen Sie ein Beispiel.

Lösung: Diese Regel lässt sich direkt aus dem Stromintegral über der Anlagenkapazität C_2 ableiten, völlig unabhängig von der sonstigen Beschaltung. Der Kondensator wird zur Glättung des geschalteten Laststromes eingesetzt.

$$u(t) = \frac{1}{C_2} \int_0^t i_C(\tau) \cdot d\tau + u_{\text{initial}}$$

Für einen getakteten Strom mit Scheitelwert $\hat{i}$, Tastverhältnis 50% und Periodendauer T steigt die Spannung innerhalb einer Halbperiode auf den Wert

$$\hat{u} = \frac{T \hat{i}}{2C}$$

Hieraus folgt bei gegebener maximaler Spannungsamplitude $\hat{u}$ für die Kapazität

$$C_{\min} = \frac{T \hat{i}}{2 \hat{u}}$$

Beispiel: Mit einer Anforderung nach einer Begrenzung der Brummspannung $\hat{u} < 0,1\% U_n$ ergibt sich mit einer Schaltfrequenz von $1/T = 30 \text{ kHz}$ für einen Strom mit Scheitelwert $\hat{i} = 100 \text{ A}$ bei einer Betriebsspannung von $U_n = 1400 \text{ V}$ der Mindestwert $C_{\min} = 1,2 \text{ mF}$.

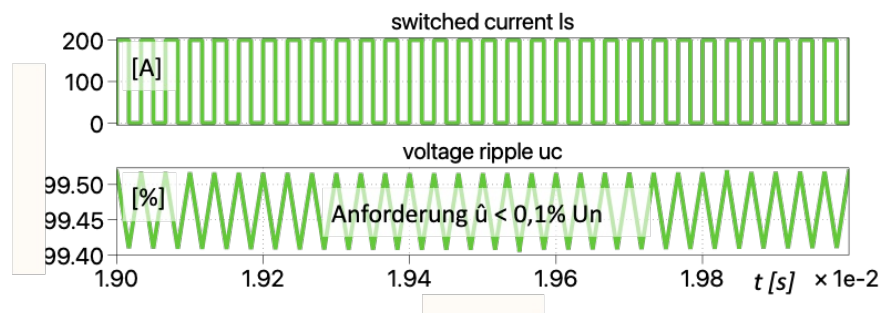


Bild 2.4.7 Begrenzung der Brummspannung (voltage ripple) durch die Anlagenkapazität

Die Abbildung zeigt einen Simulationslauf mit den angegebenen Werten. Beim Strom ist zu beachten, dass es sich um einen geschalteten Gleichstrom handelt, die Amplitude zum Mittelwert beträgt 100 A.

Frage 2.4.10 Zusammenfassung. Wie lassen sich die Eigenschaften der Kapazitäten im Netz zusammenfassen?

Lösung: (1) Funktionsprinzip: Bestimmend für die Eigenschaften des Gleichspannungsnetzes sind die Anlagenkapazitäten. Die Anlagenkapazitäten integrieren den Anlagenstrom zur Spannung. Sie stellen Leistungsreserve bereit für den Spannungsregler, der bei einem Ungleichgewicht der Leistung im Netz auf die Spannungsänderung über der Kapazität reagiert.

(2) Netzbildung und Kabelinduktivität: Kabel (bzw. Leitungen) verbinden die Anlagen mit dem Netz. Die Kabelinduktivitäten können mit den Anlagenkapazitäten in Resonanz geraten. Der Netzbildner emuliert das Verhalten einer Spannungsquelle, indem er die Spannung durch den Strom als Stellgröße führt, entweder mit Hilfe einer Kennlinie $i(u)$, oder durch einen P-Regler.

(3) Auslegungsregeln: Folgende Regeln ergeben sich aus den Anlagenkapazitäten:

- Die Stromanstiegszeiten der Anlagen sind zu begrenzen.
- Um die Regelung nicht zu träge werden zu lassen, sind die Kapazitäten der Anlagen nach oben zu begrenzen (maximale Anlagenkapazität).
- Um Spannungsschwankungen bei Lastwechseln zu begrenzen, sind die Anlagenkapazitäten nach unten zu begrenzen (minimale Anlagenkapazität). Da die Anlagenkapazitäten auch zur Glättung des gepulsten Anlagenstroms eingesetzt werden, sind zur Begrenzung der Spannungswelligkeit (voltage ripple) ebenfalls minimale Anlagenkapazitäten gefordert.

3. Fehlererkennung

Folgende Abbildung zeigt ein Verteilnetz, bestehend aus zwei Spannungsquellen (DC-Station und Batteriespeichersystem), einer DC-Verteilung, sowie Anlagen. Was geschieht im Fehlerfall, wenn beispielsweise eine der Anschlussleitungen kurzgeschlossen wird, bzw. bei einem Fehler in der Nähe der Sammelschiene?

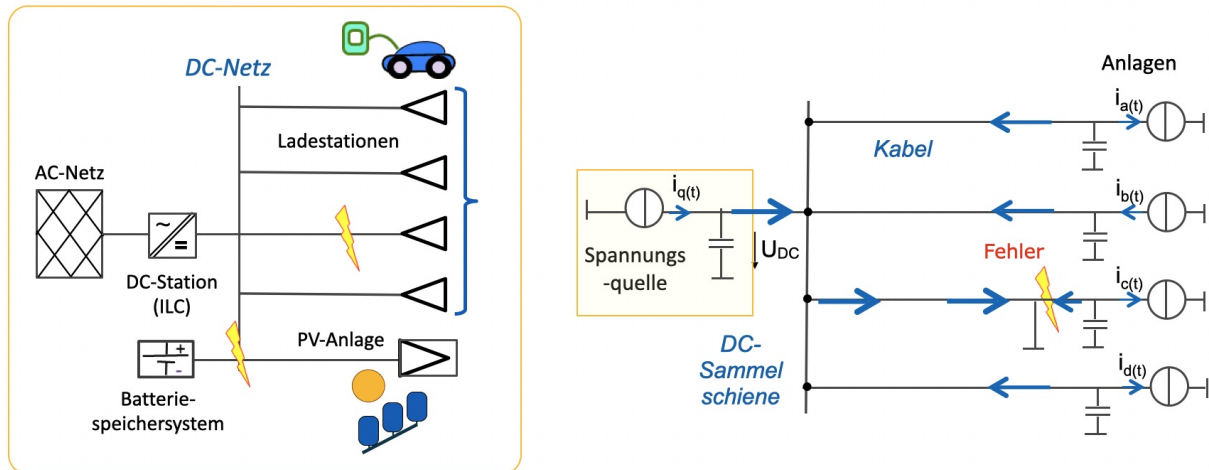


Bild 3.1 DC-Netz: Was geschieht im Fehlerfall?

Das elektrische Ersatzschaltbild daneben illustriert, womit zu rechnen ist: Die Spannung am Fehlerort bricht ein, und es fließen Kurzschlussströme zum Fehlerort. In der Ersatzschaltung sind alle Anlagen einschließlich der Spannungsquellen entsprechend ihrer Charakteristik als Regelstrecke als Stromquellen abgebildet. Die Spannung wird von den spannungsgeführten Stromquellen (= Netzbildner bzw. Spannungsquellen) mit Hilfe der Anlagenkapazitäten hergestellt. Welche Fehlerbilder sich ergeben, ist Gegenstand dieses Abschnitts.

3.1. Spannungsquellen

Als Spannungsquellen dienen Konverter, die sich aus einem Energiespeicher bedienen und von diesem galvanisch getrennt sind. Als Energiespeicher kommen entweder das AC-Netz in Frage, oder ein Energiespeicher (Batteriesystem), wie in folgender Abbildung dargestellt.

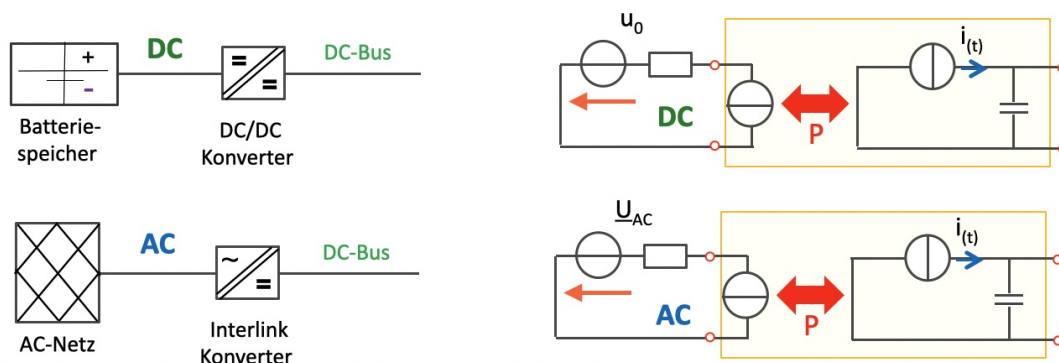


Bild 3.1.1 Spannungsquellen mit elektrischer Ersatzschaltung

In der elektrischen Ersatzschaltung stellen beide Konverter Stromquellen dar, die sich entweder aus einer DC-Quelle oder aus einer AC-Quelle speisen (bzw. in diese Leistung abführen). Gleichgerichtete AC-Ströme sind nicht Gegenstand dieser Schulung. Im Fehlerfall verhalten sich auch konventionelle Umrichter wie Gleichrichter: Die DC-Seite ist mit der AC-Seite galvanisch verbunden, die Frei-

laufdioden der Schalter wirken wie ein Brückengleichrichter. Wegen der Verbindung von AC und DC können diese Konverter auch in der DC-Spannung nicht den Scheitelwert der AC-Spannung überschreiten (jeweils an der Spannung zum Neutralleiter gemessen) und sind daher in der Niederspannung auf Spannungen unterhalb 800 V begrenzt.

Der Großteil aller Energiequellen in einem Stromnetz sind DC-Quellen (PV, Energiespeicher, Windanlagen), woraus sich der Bedarf nach DC-Netzen überhaupt ergibt. Daher spielen gleichgerichtete AC-Ströme für die hier betrachteten Anwendungen keine wesentliche Rolle. Der Anschluss an ein AC-Netz ist so ausgelegt, dass er nur einen Teil der Leistung im DC-Netz transportieren muss. Hierfür werden galvanisch trennende Konverter vorausgesetzt, die im DC-Netz ein Spannungsniveau bis zu 1500 V bzw. ± 750 V bereitstellen können.

Frage 3.1.1: Kurzschluss einer Stromquelle. Folgende Abbildung zeigt eine Stromquelle. Was geschieht bei einem Kurzschluss? Wie verhält sich eine spannungsgeführte Stromquelle?

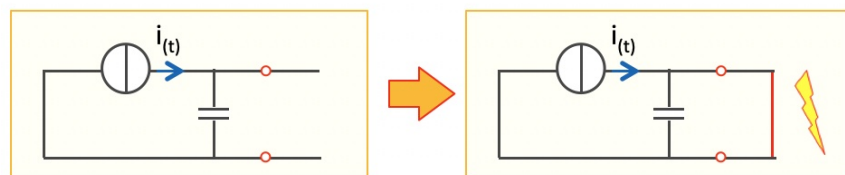


Bild 3.1.2 Kurzschluss einer Stromquelle mit Anlagenkapazität

Lösung: Eine Stromquelle stellt einen definierten Strom bereit. Stromquellen vertragen keinen Leerlauf, lassen sich aber kurzschließen. In diesem Fall fließt der Bemessungsstrom. Im Beispiel ist die Stromquelle mit einer Anlagenkapazität verbunden: Dieser stellt einen Puffer für den Strom zwischen Anlage und Netz dar. Im Kurzschlussfall entlädt sich die Kapazität in den Kurzschluss, was zu sehr großen Strömen führt (abhängig von der Leitungsimpedanz zum Kurzschluss).

Im Falle einer DC-Spannungsquelle (= Netzbildner) ist die Stromquelle spannungsgeführt: In diesem Fall wird der Regler versuchen, die Spannung zu erhöhen, indem er den Strom steigert. Der Regler reagiert in diesem Fall aber erst auf die Kondensatorentladung (= Spannungseinbruch), und somit vergleichsweise träge. Außerdem haben auch spannungsgeführte Stromquellen eine Strombegrenzung in der Größenordnung des Bemessungsstromes (z.B. das 1,2 bis 1,5-fache des Bemessungsstromes). Daher hat der Regler keinen wesentlichen Einfluss auf das Kurzschlussverhalten: Für schnelle transiente Vorgänge zählen die physikalischen Eigenschaften der Regelstrecke.

Frage 3.1.2: Kurzschlussverhalten der Spannungsquelle im Netz. Folgende Abbildung zeigt die Spannungsquelle zusammen mit einer Anschlussleitung und einer Anlage. Zur Realisierung der Spannungsquelle stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung: (1) spannungsgeführte Stromquelle mit Regler oder Kennlinie $i(u)$, (2) ideale Spannungsquelle mit Innenwiderstand. Im Fall (1) kommt sie Spannung in Kombination mit der Kapazität der Quelle zustande.

Auf der Anschlussleitung sind zwei Fehlerfälle nachgebildet:

- Kurzschluss nahe der DC-Sammelschiene (kurz DC-Bus) in 2 m Entfernung
- Kurzschluss in einiger Entfernung der DC-Sammelschiene (80 m).

Welches Verhalten erwarten Sie in beiden Fällen?

Lösung: Für die spannungsgeführte Stromquelle ist vor allen Dingen die Kondensatorentladung von Bedeutung. Der Entladestrom ist abhängig von der Leitungsimpedanz bis zum Fehlerort. Hierbei begrenzt der Leitungswiderstand die Amplitude des Entladungsstroms, die Leitungsinduktivität den Stromanstieg. Für die beiden Fehlerfälle wird folgendes Verhalten erwartet:

- Kurzschluss nahe der DC-Sammelschiene: Plötzlicher Spannungseinbruch an der Sammelschiene, da die die Kapazität der DC-Quelle (= Spannungsquelle, Netzbildner) unmittelbar entladen kann. Sehr große Entladeströme.
- Kurzschluss in einiger Entfernung zur Sammelschiene: Hohe Entladeströme der Kapazität der DC-Quelle. Die Spannung an der Sammelschiene sollte erst mit der Kondensatorentladung sinken, also vergleichsweise langsam.

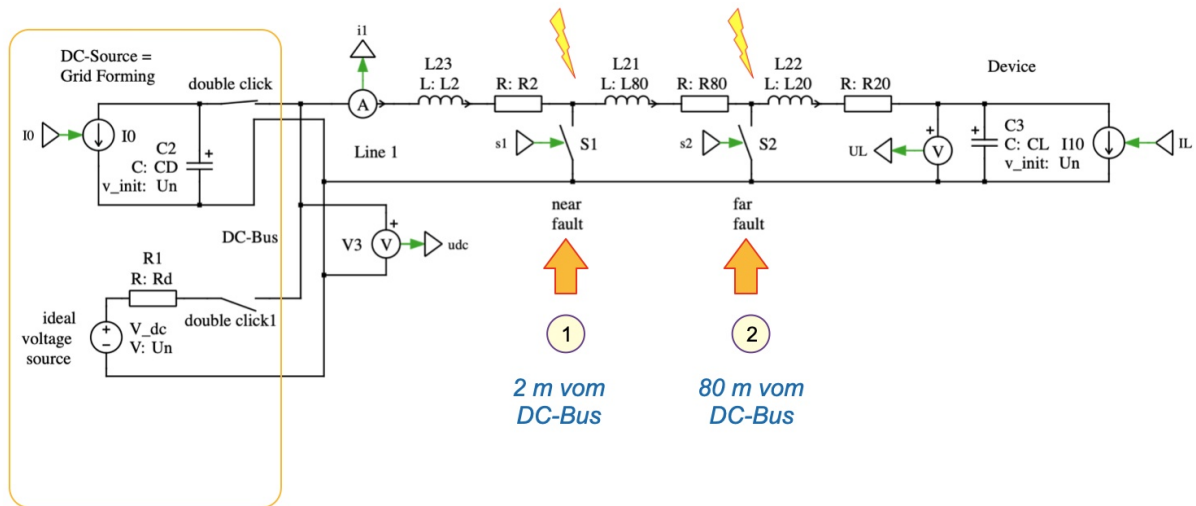


Bild 3.1.3 Netz mit Spannungsquelle, Anschlussleistung und Anlage im Fehlerfall

Eine ideale Spannungsquelle reagiert anders: Mangels Anlagenkapazität gibt es seitens der DC-Quelle hier keine Entladeströme. Der Kurzschlussstrom ist durch den Innenwiderstand der Quelle begrenzt, beim fernen Fehler auch durch den Leistungswiderstand. Allerdings stellt die Spannungsquelle diesen Kurzschlussstrom auf Dauer zur Verfügung. Die Fehlerenergie (= im Leitungswiderstand umgesetzte Leistung) wächst somit mit der Dauer des Fehlers und kann sehr groß werden.

Frage 3.1.3: Nahe und ferne Fehler. Folgende Abbildung zeigt zwei Fehlerbilder für Kurzschüsse nah und fern der DC-Sammelschiene aus dem Modell der letzten Aufgabe.

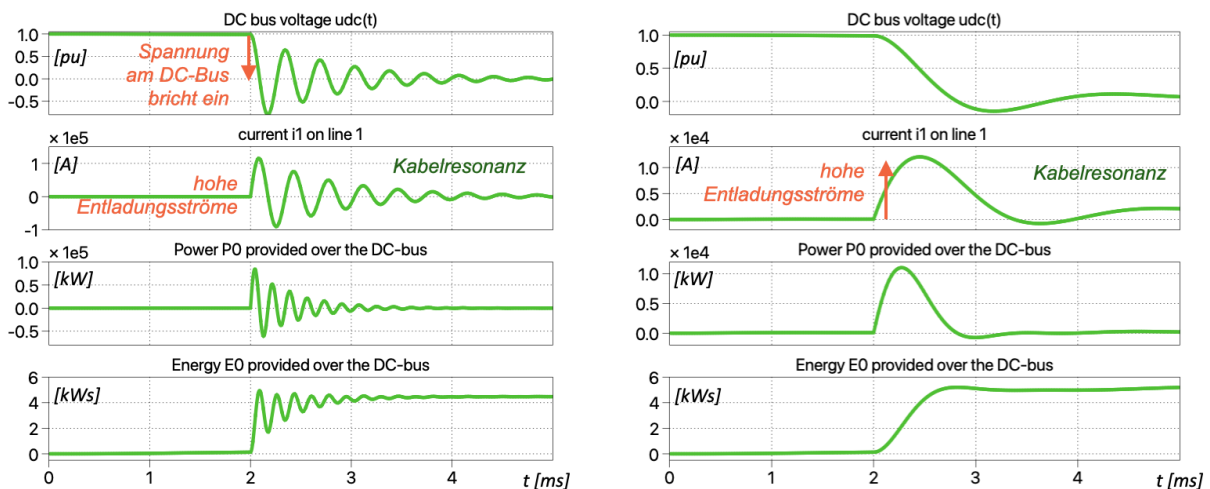


Bild 3.1.4 Fehlerbilder nah und fern der DC-Sammelschiene

Erläutern Sie den Verlauf der Spannung und des Stroms. Welche Rolle spielt die aus dem Produkt von Spannung und Strom ermittelte Leistung und die Energie?

Lösung: (1) Fehler nahe der DC-Sammelschiene (2 m): Wegen der geringen Impedanz zum Fehlerort kann sich die Kapazität der DC-Quelle sehr rasch entladen. Die Entladungsströme sind sehr groß und die Spannung bricht rasch zusammen. Der Kurzschlussstrom klingt innerhalb einiger Millisekunden ab: Der Kondensator ist entladen. Im Modell muss die im Kondensator gespeicherte Energie am Leitungswiderstand in Wärme umgesetzt werden. Da dieser die Energie nicht sofort aufnehmen kann, pendelt diese eine Weile zwischen der Leitungskapazität und der Kapazität der DC-Quelle hin und her: Man erhält eine Resonanz mit der Kabelinduktivität.

(2) Fehler in einiger Entfernung der DC-Sammelschiene (80 m): Die Fehlerimpedanz (= Leitungsimpedanz bis zum Fehlerort) ist nun größer: Die Kapazität der Quelle entlädt sich langsamer.

$$u_{dc}(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_{C_{source}}(\tau) \cdot d\tau + u_{init} \quad (2.1.1)$$

Die Spannung $u_{dc}(t)$ an der DC-Sammelschiene folgt dem Entladestrom und sinkt langsamer. Primärer Fehlerindikator ist somit der Entladungsstrom aus der DC-Quelle in die fehlerhafte Leitung. Auch hier ist die Entladung der Quellenkapazität innerhalb einiger Millisekunden abgeschlossen. Die Fehlerenergie wurde im Leitungswiderstand in Wärme umgewandelt und auf diesem Weg teilweise in der Kabelinduktivität zwischengespeichert. Die Fehlerenergie ist gleich groß wie im Fehlerfall (1).

Frage 3.1.4: Einfluss der Kabelimpedanz. Erläutern Sie den Effekt der Kabelresonanz in den Fehlerfällen der letzten Abbildung. Wie kommt diese Resonanz zustande? Welche Information enthält die Kabelresonanz? Wie beurteilen Sie den Einfluss der Fehlerenergie?

Lösung: Quelle der Fehlerenergie ist die Kondensatorladung. Wenn die Leitung diese Energie nicht gleich aufnehmen kann, wird sie in der Leitungsinduktivität zwischengespeichert: Leitungsinduktivität und Quellenkapazität bilden einen Resonanzkreis. Die Resonanzfrequenz berechnet sich aus

$$f_{cd} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_{cable} \cdot C_{device}}} \quad (1.7.1)$$

Aus dem Gleichgewicht der Energie ergibt sich das Amplitudenverhältnis von Strom und Spannung

$$\frac{1}{2} C_{device} \Delta U^2 = \frac{1}{2} L_{cable} \Delta I^2 \quad (1.7.2)$$

Für die beiden Fehlerfälle ergeben sich mit einer Quellenkapazität von $C_{device} = 5 \text{ mF}$ folgende Werte:

(1) Entfernung 2 m mit $L_2 = 0,6 \text{ } \mu\text{H}$ und $R_2 = 1,2 \text{ m}\Omega$: $f_2 = 2,9 \text{ kHz}$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_2 \cdot C_{source}}} \quad , \quad \sqrt{\frac{L_2}{C_{source}}} = 0,011 = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

(2) Entfernung 80 m mit $L_2 = 24 \text{ } \mu\text{H}$ und $R_2 = 55 \text{ m}\Omega$: $f_2 = 0,46 \text{ kHz}$

$$f_{80} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_{80} \cdot C_{source}}} \quad , \quad \sqrt{\frac{L_{80}}{C_{source}}} = 0,069$$

Die Kabelresonanz enthält somit Information über die Entfernung zum Fehlerort: Bei gegebener Anlagenkapazität wächst die Frequenz mit $1/\sqrt{L_{Entfernung}}$.

Die Fehlerenergie entspricht der in der Quellenkapazität gespeicherten Energie.

$$E_C = \frac{1}{2} C_{source} \cdot U^2 \quad (1.8.1)$$

Mit einer Kapazität von $C_{\text{device}} = 5 \text{ mF}$ erhält man bei einer Betriebsspannung von 1400 V eine Energie von ca. 5 kW s. Diese Energiemenge genügt, um 1 kg Wasser um $1,2 \text{ K}$ zu erhitzen. Verglichen mit der Akkukapazität eines Smartphones von ca. $15 \text{ Wh} = 50 \text{ kW}$ s ist die Energiemenge klein. E-Zigaretten werden mit Batterien größerer Energie angeboten.

Allerdings sind die hohen Entladeströme bei Fehlern mit Stress für Kontakte im Fehlerpfad und ggf. mit kurzzeitig hohen magnetischen Kräften verbunden.

3.2. Anlagen

Folgende Abbildung zeigt die gleiche Anordnung mit den gleichen Fehlerfällen aus Sicht der Anlage am Ende der Anschlussleitung.

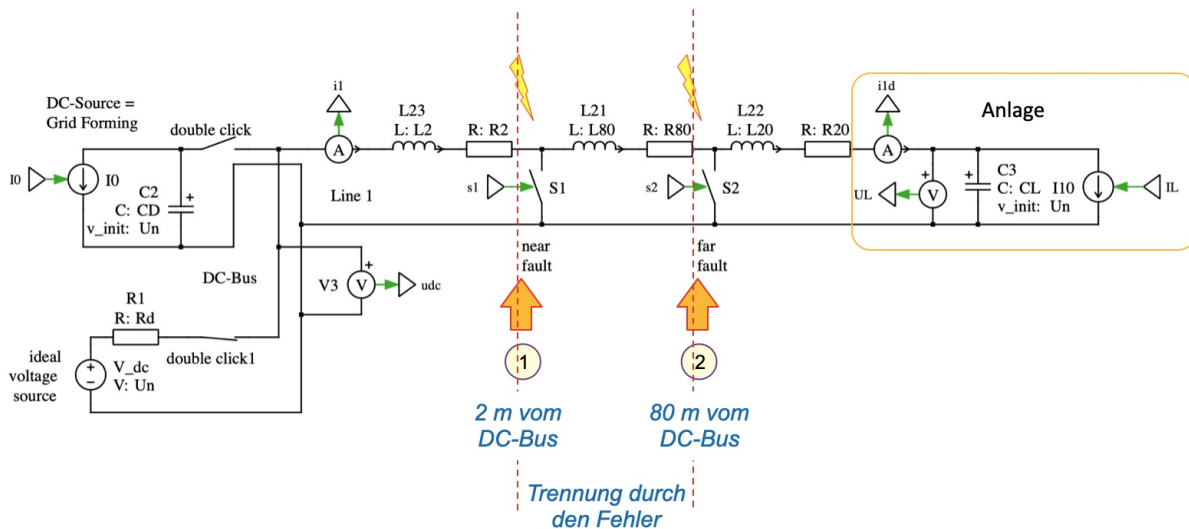


Bild 3.2.1 Fehlerfälle aus der Perspektive der Anlage

Der Fehler trennt das Netz auf der Anschlussleitung in zwei Segmente auf: (1) Von der Sammelschiene zum Fehlerort, (2) vom Fehlerort zur Anlage. Die Fehlereffekte in beiden Segmenten sind unabhängig voneinander.

Frage 3.2.1: Kurzschlussverhalten der Anlage im Netz. Welches Verhalten erwarten Sie von der Anlage in beiden Kurzschlussfällen?

Lösung: Von der Entfernung zum Fehlerort betrachtet sollten die Fälle sich genauso verhalten wie bei der DC-Quelle: Entladung der Kapazität in den Fehler und folglich Spannungsabfall.

(1) Fehler nahe der Sammelschiene und somit von der Anlage entfernter Fehler: Die Entfernung beträgt hier 100 m , also mehr als die 80 m beim sammelschienenfernen Fehler. Das Verhalten sollte grundsätzlich ähnlich sein: große Entladeströme gefolgt von sinkender Spannung an der Anlage.

(2) Fehler fern der Sammelschiene und nah der Anlage: Die Entfernung von der Anlage zum Fehlerort beträgt hier 20 m . Der Spannungseinbruch an der Anlage sollte somit weniger ausgeprägt ausfallen, aber deutlich schneller als beim entfernten Fehler. Die Fehlerströme sollten deutlich höher ausfallen als beim fernen Fehler.

Bemerkung: Die Anlage hat im Beispiel eine kleinere Leistung und somit eine kleinere Kapazität der Quelle. Die Fehlerströme sollten daher etwas kleiner ausfallen.

Frage 3.2.2: Simulationslauf für nahe und ferne Fehler. Folgende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der Spannung, des Anlagenstroms, der Leistung und der Energie. Erklären Sie die Vorgänge.

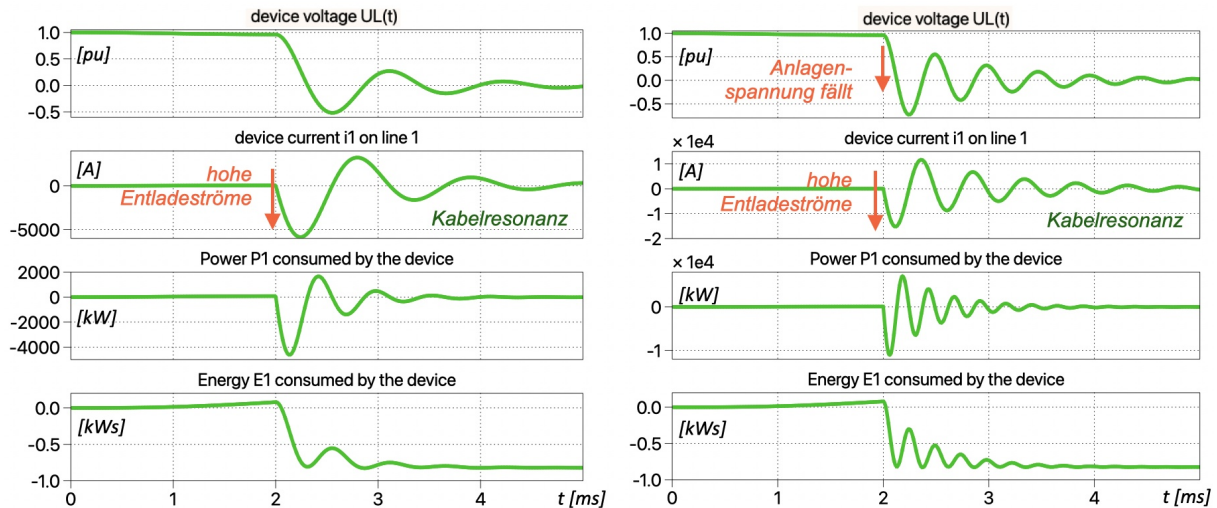


Bild 3.2.2 Fehlerbilder fern und nah der Anlage

Lösung: In einiger Entfernung zur Anlage machen sich zunächst die hohen Fehlerströme bemerkbar. Die Anlagenkapazität entlädt sich hierdurch: Die Anlagenspannung sinkt. Durch den Fehler ist die Anlage vom Netz getrennt.

In der Nähe der Anlage ist der Spannungsabfall bei deutlich höheren Entladeströmen eher bemerkbar. Die Energie der Kapazität pendelt auch einige Male zur Leitungsinduktivität und zurück. Die Resonanzfrequenz ist umso höher, je kürzer die Entfernung zum Fehlerort ausfällt.

In beiden Fällen ist die Fehlerenergie gleich: Diese stammt aus der Anlagenkapazität, die innerhalb einiger Millisekunden vollständig entladen wird.

Frage 3.2.3: Kabelresonanz und Höhe der Entladeströme. Welche Rolle spielt die Kabelinduktivität für die Höhe der Entladeströme?

Lösung: Die Quadratwurzel $\sqrt{L/C}$ aus dem Verhältnis der Kabelinduktivität L bis zum Fehlerort und der Anlagenkapazität C entspricht dem Verhältnis von Spannung und Strom: $\sqrt{L/C} = \Delta U / \Delta I$. Dieser Zusammenhang ergibt sich aus dem Energiesatz (siehe Kapitel 1.7).

Da die Kabelinduktivität bis zum Fehlerort unterschiedlich ausfällt, erhält man: (1) $\sqrt{L_{20}/C_L} = 0,035$, und (2) $\sqrt{L_{100}/C_L} = 0,077$. Bei fester Betriebsspannung U_n und $\Delta U = U_n$ fällt der Überschwinger ΔI des Stroms in der Entfernung 100 m zum Fehlerort halb so groß aus wie in 20 m Entfernung. Etwas genauer beträgt das Verhältnis $0,077/0,035 = 2,2 = \sqrt{5}$. Die Kabelinduktivität in 100 m hat den 5-fachen Wert wie die Kabelinduktivität in 20 m.

Frage 3.2.4: Anlage als Last mit Sperre für den Rückfluss. Ist die Anlage eine reine Bezugsanlage (= Last, Verbraucher), so gibt es nur eine Lastflussrichtung: der Strom fließt stets von der Sammelschiene zur Anlage. In diesem Fall lässt sich die Entladung der Anlagenkapazität bei einem Fehler mit einer Rückflusssperre verhindern, z.B. mit Hilfe einer Diode in Lastflussrichtung. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf mit der auf diese Weise veränderten Anlage. Interpretieren Sie den Ablauf.

Lösung: Der Fehler trennt die Anlage vom Netz. Gemessen auf der Anlagenseite gibt es kein Netz mehr, weder eine Spannung, noch ein Zustrom. Da die Anlagenkapazität sich nun nicht mehr entladen kann, fällt die Spannung bei einem Kurzschluss sofort.

Das gilt in jeder Entfernung vom Fehlerort bis zur Anlage. Genauer betrachtet, breitet sich der Fehler mit Lichtgeschwindigkeit vom Fehlerort bis zur Anlage aus. Mit hoher Zeitaufösung lässt sich die Fehlerausbreitung auch beobachten. Allerdings ist „Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit“ gleichbedeu-

tend mit „sofort“ und mit 100 m Entfernung einer Skala von einigen Millisekunden nicht aufzulösen (siehe Abschnitt 1).

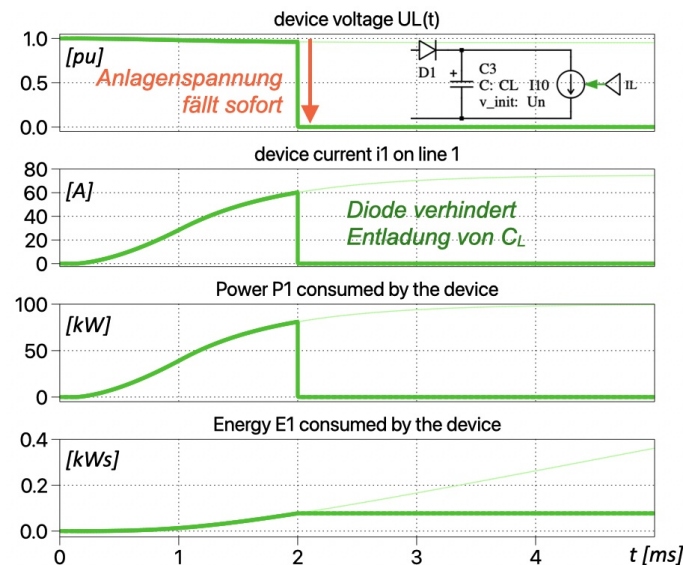


Bild 3.2.3 Last mit Diode als Sperrventil

Mit dem Kurzschluss der Spannung endet der Strom vom Netz. Mangels Rückfluss aus der Anlage wird der Strom somit ebenfalls sofort unterbrochen. Es findet keine Übertragung von Leistung und Energie mehr statt.

Bemerkung: Die Abbildung zeigt den Kurzschluss zum Zeitpunkt $t = 2$ ms, nachdem die Anlage zuvor ab dem Zeitpunkt $t = 0$ einen ansteigenden Strom aus dem Netz bezogen hat. Strom und Leistung sind sofort unterbrochen.

3.3. Fehlerbilder

Folgende Abbildung zeigt noch einmal das Szenario des sammelschienenfernen Fehlers. Die Frage ist, welches Fehlerbild charakteristisch hierfür ist und wie man den Fehler im Netz erkennen kann. Die Fehlererkennung ist Voraussetzung für die Fehlerklärung.

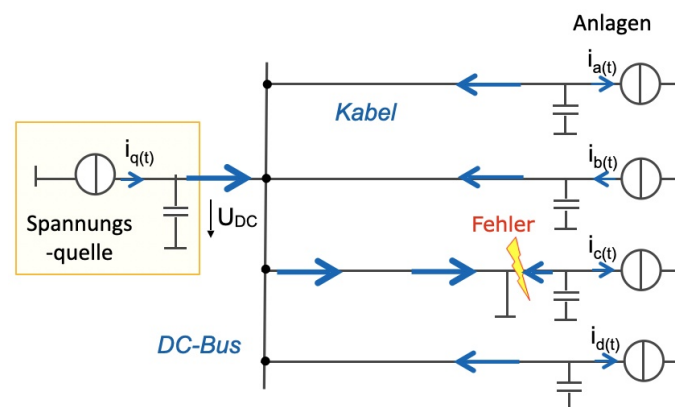


Bild 3.3.1 Abläufe im Fehlerfall

In diesem Abschnitt geht es nur um die Fehlererkennung. Der grundsätzliche Ablauf der Ereignisse ist klar: Der Fehler trennt das Netz in zwei Abschnitte: vor dem Fehler (Spannungsquelle mit verbliebenem Netz) und hinter dem Fehler (Anlage mit Leitungsabschnitt). Am Fehlerort bricht die Span-

nung sofort ein. Dieser Ereignis pflanzt sich fort. Spannungseinbrüche an Sammelschiene und Anlage sind die Folge der jeweiligen Entladeströme der Anlagenkapazitäten.

Frage 3.3.1: Sequenz der Ereignisse. Nennen Sie den genauen Ablauf der Ereignisse betreffend den Netzabschnitt.

Lösung: (1) Kurzschluss verursacht Spannungseinbruch am Fehlerort.

(2) Der Spannungseinbruch pflanzt sich als Spannungswelle und Stromwelle in beiden Richtungen vom Fehlerort aus. Die Ausbreitung erfolgt mit annähernd Lichtgeschwindigkeit und führt im Netzabschnitt zu mehrfachen Reflexionen zwischen Fehlerort und DC-Quelle. Der Fehlerort reflektiert total, für die Spannungswelle mit jeweils umgekehrtem Vorzeichen. Die DC-Quelle reflektiert ebenfalls total, wobei die Kapazität der Quelle die Spannung fixiert. Auf einer Entfernung von 100 m beträgt die Laufzeit bei $200 \cdot 10^6$ m/s etwa $0,5 \mu\text{s}$. Mit jeder Reflexion verdoppelt sich der Strom.

(3) Der Fehlerstrom wird von der DC-Quelle gespeist und steigt an (langsam in der Zeitauflösung der Wellenausbreitung, schnell in einer Zeitauflösung im Bereich einiger Millisekunden).

(4) Mit dem Fehlerstrom entlädt sich die Kapazität der DC-Quelle gemäß

$$u_{dc}(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_{Csource}(\tau) \cdot d\tau + u_{init} \quad (2.1.1)$$

Mit der Entladung der Kapazität sinkt der Fehlerstrom. Nach der Kondensatorentladung sind Strom und Spannung null.

Frage 3.3.2: Betrachtung mit hoher und niedriger Zeitauflösung. Folgende Abbildung zeigt die Abläufe im Netz in hoher Zeitauflösung (links) und vergleichsweise niedriger Zeitauflösung (rechts). Erläutern Sie die Vorgänge.

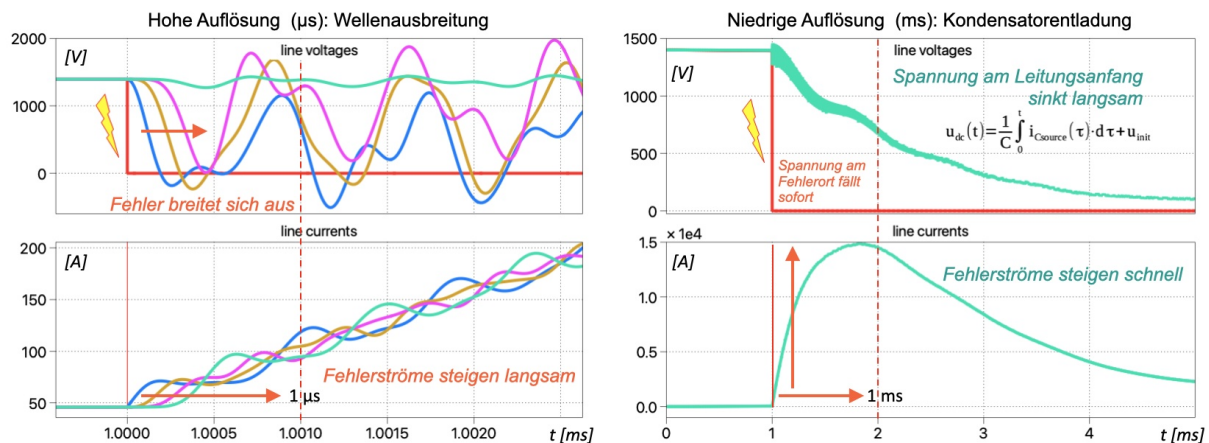


Bild 3.3.2 Fehlerereignisse mit unterschiedlicher Zeitauflösung

Lösung: Siehe Erläuterungen zu Frage 3.3.2.

In hoher Zeitauflösung erkennt man die Reflexionen der Spannungswelle mit jeweils umgekehrtem Vorzeichen, wobei jeweils die Überlagerung der hinlaufenden mit der rücklaufenden Spannungswelle dargestellt ist. Gemessen wurde in Abständen von jeweils 20 m auf dem betroffenen Leitungsabschnitt. Die Spannung ändert bei jeder Reflexion ihr Vorzeichen, wobei an den Leitungsenden die Spannungen fixiert sind (an der DC-Sammelschiene durch den Kondensator der DC-Quelle, am Fehlerort durch den Kurzschluss).

Die Stromwelle wird mit jeweils gleichem Vorzeichen reflektiert und steigt daher mit jeder Reflexion an. In höher Zeitauflösung sieht der Stromanstieg daher langsam an: Verbindlich wäre die Stromanstiegs-

rate. Mit 200 A innerhalb von ca. 2,5 μ s ergeben sich umgerechnet ca. 80 kA in 1 ms als anfängliche Stromanstiegsrate.

Für die Erkennung von Fehlern in einiger Entfernung der Sammelschiene erscheint daher der Stromanstieg als geeignetes Merkmal. In der Darstellung im rechten Teil der Abbildung (mit Zeitaufösung 5 ms) ist im oberen Teil die Spannung am Fehlerort und in 2m Entfernung der Sammelschiene dargestellt. Letztere ist durch die Spannung der Sammelschiene fixiert, zeigt aber einen Teil der überlagerten Reflexionen der Spannungswelle, die jedoch in dieser Skala gegenüber dem linken Teil der Abbildung nicht aufgelöst werden.

Frage 3.3.3: Überwachung der Sammelschienenenspannung und Ströme in den Abgängen. Zur Fehlererkennung sollen an der Sammelschiene die Spannung und die Ströme in die Abgänge der Leitungen zu den Anlagen überwacht werden. Folgende Abbildung zeigt ein DC-Netz mit Quelle, Sammelschiene, und Abgängen mit Leitungen für 4 Anlagen. Welche Fehlerindikatoren kommen zur Erkennung naher und ferner Fehler in Frage? Wie unterscheidet sich das Verhalten vom regulären Betrieb? Untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation.

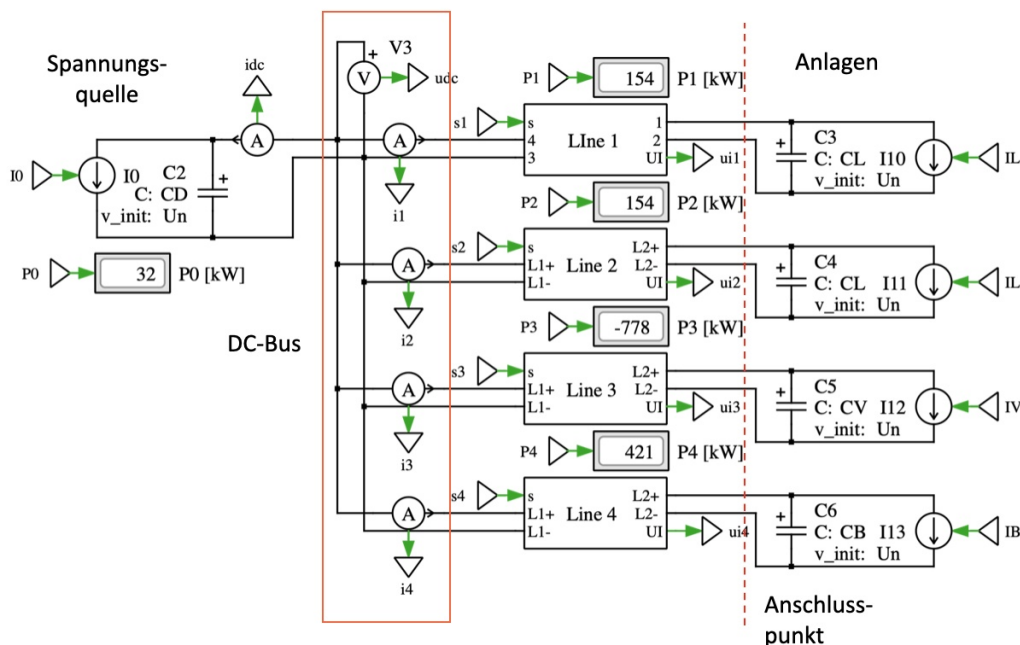


Bild 3.3.3 Netz mit DC-Quelle, Sammelschiene, Leitungen und Anlagen im Betrieb

Lösung: (1) Fehler nahe der Sammelschiene: Sammelschienenenspannung bricht ein. Außerdem ergibt sich ein hoher Fehlerstrom auf der Zuleitung der DC-Quelle und ein hoher Zustrom in die fehlerhafte Leitung, unabhängig von der Lastflussrichtung im Betrieb. Ebenfalls unabhängig von der Lastflussrichtung im Betrieb erfolgt ein Zustrom zur Sammelschiene in die fehlerhafte Leitung von allen Anlagen, sofern diese nicht durch Rückfluss-Sperren verhindert werden.

(2) Fehler in einer der Leitungen in einiger Entfernung zur Sammelschiene: Hoher Fehlerstrom in die betroffene Leitung, unabhängig von der Lastflussrichtung im Betrieb. Wegen der größeren Impedanz zum Fehlerort (Leitungswiderstand und Leitungsinduktivität) entlädt sich die Kapazität der DC-Quelle langsamer.

(3) Simulationslauf: Der linke Teil der Abbildung zeigt den normalen Betrieb. Die Ströme werden vom Beginn der Simulation an innerhalb von 2 ms an ihren Arbeitspunkt herangeführt und bleiben dann stabil. An der Lastflussrichtung ist zu erkennen, dass die Leitungen 1 und 2 identische Verbraucher

versorgen (z.B. Schnellladestationen). Leitung 3 bedient eine größere Einspeisung (PV-Anlage), Leitung 4 einen größeren Verbraucher (Batterie im Ladebetrieb).

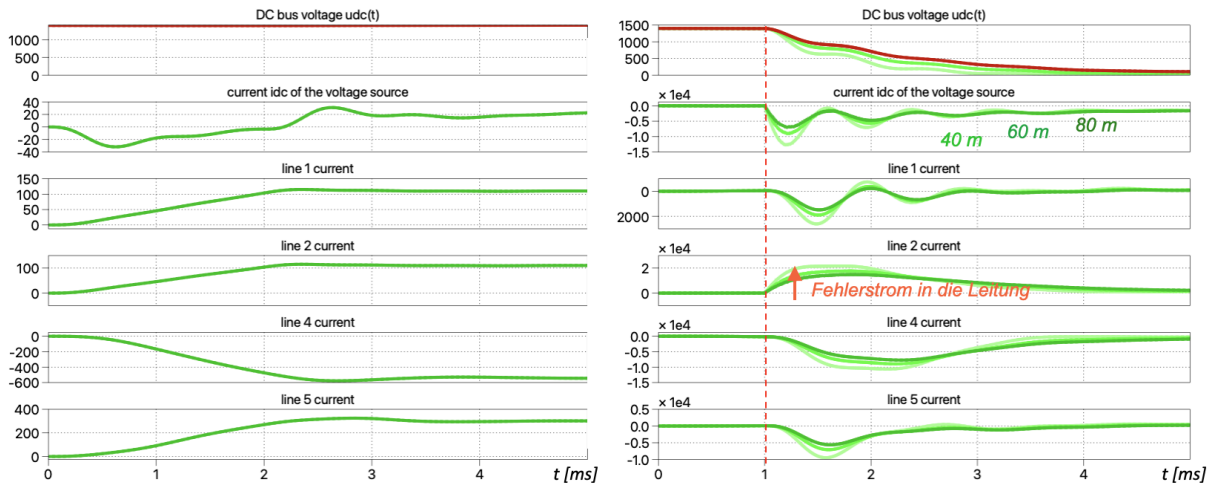


Bild 3.3.4 Betriebsfall und Fehlerfall

Die DC-Quelle zeigt im normalen Betrieb bei konstanter Spannung die größten Schwankungen im Strom: Die Konsequenz des spannungsgeführten Betriebs ist, dass die DC-Quelle die Strombilanz (und somit die Leistungsbilanz) im Netz ausgleichen muss. Der Strom folgt daher den Anforderungen aus dem Netz.

Im Fehlerfall erkennt man an der vergleichsweise langsam sinkenden Spannung an der Sammelschiene, dass der Fehler in einiger Entfernung eine der Leitungen betrifft. Die betroffene Leistung lässt sich am Fehlerstrom am Abgang an der Sammelschiene identifizieren: Betroffen ist Leitung 2. Die Stromrichtung bleibt zwar gleich, allerdings steigt der Strom stark an. Der Strom fließt in die betroffene Leitung in Richtung des Fehlers. Die Stromrichtung der anderen Leitungen wechselt bei Verbrauchern das Vorzeichen: Aus allen anderen Leitungen erfolgt ein Zustrom in Richtung Sammelschiene.

Die Resonanz auf der betroffenen Leitung ist langsam, der Fehler sollte also am Ende der Leitung liegen. Die Resonanzen in den anderen Leitungen fallen unterschiedlich aus und lassen sich ohne Kenntnis der jeweiligen Anlagenkapazitäten nicht interpretieren. Höhere Resonanzen deuten auf kleinere Anlagenkapazitäten oder kürzere Leitungen hin. Der Strom auf der Zuleitung der DC-Quelle zur Sammelschiene reflektiert die Knotenregel (Ausgleich der Summenströme aller Anlagen).

Frage 3.3.4: Finde den Fehler. Folgender Simulationslauf zeigt zwei weitere Fehlerfälle. Interpretieren-Sie die Verläufe und identifizieren Sie die mögliche Fehlerquelle.

Lösung: (1) Linker Teil der Abbildung: Auffällig ist der rasche Abfall der Spannung an der Sammelschiene. Dieser deutet auf einen sammelschiennahen Fehler hin. Leitung 1 zeigt einen auffällig hohen Fehlerstrom, der durch die DC-Quelle ausgeglichen wird.

Da die Messung aller Ströme in die jeweilige Leitung hinein erfolgt, hat der Strom der DC-Quelle umgekehrtes Vorzeichen wie der Fehlerstrom in Leitung 1. Die Ströme der übrigen Leitungen fließen in Richtung zur Sammelschiene und sind wegen der größeren Entfernung von den jeweiligen Anlagenkapazitäten zum Fehlerort kleiner als der Fehlerstrom in Leitung 1.

Die relativ hohe Frequenz der Fehlerresonanz ist ebenfalls ein Kriterium für eine Fehler in der Nähe der Sammelschiene. Dass der Fehlerstrom am Abgang der Leitung 1 gemessen werden kann, beweist, dass sich der Fehler kurz hinter diesem Abgang befinden muss. Bei einem Fehler direkt an der

Sammelschiene wäre nur der Fehlerstrom der DC-Quelle hoch. Alle anderen Fehlerströme fließen in Richtung der Sammelschiene.

Bemerkung: Das gesamte Fehlerbild enthält recht viel Information. Allerdings bleibt die Frage, welche Information sich zur Fehlerklärung nutzen lässt. Ein lokal agierender Schutz hätte nur einen Ausschnitt zur Verfügung, z.B. die Sammelschienenspannung und den Strom an einem Abgang. Das gesamte Fehlerbild müsste per Kommunikation zusammengetragen werden und könnte dann z.B. mit Methoden der Mustererkennung analysiert werden. Die Schutzauslösung benötigte dann wiederum eine schnelle Kommunikation. Die Fehlerklärung ist jedoch nicht Gegenstand dieses Abschnitts.

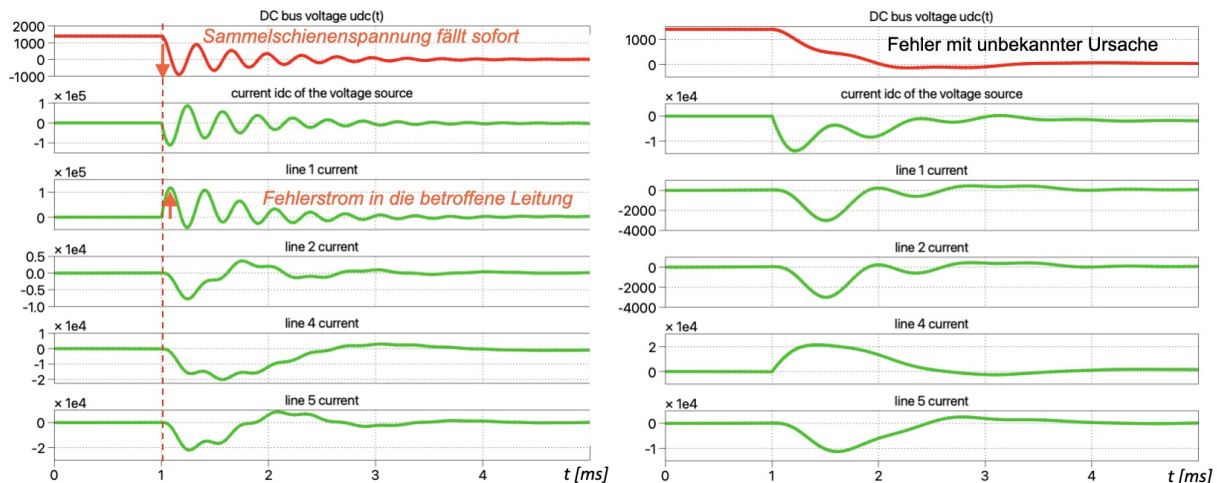


Bild 3.3.4 Fehlerbilder mit bekannte und unbekannter Ursache

(2) Rechter Teil der Abbildung: Kriterien zur Identifikation der Fehlerursache wären (1) Fällt die Spannung an der Sammelschiene schnell oder langsam? (2) Gibt es in einem der Abgänge einen verdächtig hohen Stromanstieg in die Leitung hinein? Eine Resonanz enthält bei bekannter Anlagenkapazität Informationen über die Entfernung zum Fehlerort.

3.4. Fehlerauswirkungen

Unter Fehlerauswirkungen sollen hier die Auswirkungen verstanden werden, wenn man die Fehler nicht behandelt, sondern alles so belässt, wie es sich in den diskutierten Fehlerfällen verhält.

Frage 3.4.1: Welche kurzzeitigen und langzeitigen Auswirkungen gibt es?

Lösung: Die kurzzeitigen Effekte sind bedingt durch die Kondensatorentladungen. Es ergeben sich große Entladeströme, die die Kontakte belasten und die ggf. mit magnetischen Kräften verbunden sind. Die Fehlerenergie ist jedoch begrenzt auf die in den Kapazitäten gespeicherten Ladungen. Nach der Entladung ruht das Netz. Die Entladung erfolgt innerhalb weniger Millisekunden.

Unmittelbare langzeitige Effekte durch Fehler oberhalb einiger Millisekunden gibt es keine: Die Entladeströme der Anlagen und der DC-Quellen sind begrenzt und befinden sich im Bereich der Bemessungsströme. Hierfür ist das Netz ausgelegt.

Frage 3.4.2: Fehlerenergie. Wie lässt sich die Energie bewerten, die bei einem Fehler umgesetzt wird? Was ist der Ursprung der Energie? Wie ist die Energiemenge einzuschätzen?

Lösung: Die Fehlerenergie ist maximal so groß wie die in der Kapazität aller Anlagen speicherbare Energiemenge:

$$E_{\text{ges}} = \frac{1}{2} C_{\text{ges}} \cdot U_0^2$$

Bei einer Gesamtkapazität von 100 mF und einer Betriebsspannung von 1400 V erhält man eine Gesamtenergie von $E_{\text{ges}} = 100 \text{ kWs} = 28 \text{ Wh}$. Diese Größe entspricht dem eines kleineren Reserve-Akkumulators (Power Packs) für Mobiltelefone mit ca. 5 Ah und einer Betriebsspannung von 5 V. Eine Energie von 100 kWs genügt, um 1 kg Wasser um 24 K zu erwärmen.

Um 100 g Wasser bei Raumtemperatur zum Sieden zu bringen, würden 34 kWs benötigt. Um diese Wassermenge anschließend zu verdampfen, weitere 226 kWs. Eine Energiemenge von 100 kWs genügt somit zum Verdampfen von ca. 40 g Wasser. Somit ist die Energiemenge etwas größer als die elektrischer Dampf-Zigaretten (Vapes).

Frage 3.4.3: Effekte der Entladeströme. Welche Effekte haben die hohen Entladeströme?

Lösung: Abgesehen von der Fehlerenergie (siehe oben) werden alle Kontakte durch die hohen Ströme belastet. An parallelen Leitern (Sammelschiene, Kabel bzw. Leitern in Kabeln) ergeben sich magnetische Kräfte.

Höhe der Entladeströme: Der Leitungswiderstand R von der Quelle bis zur Fehlerstelle begrenzt die Stromamplitude, die Leitungsimpedanz L den Stromanstieg:

$$\hat{i} = \frac{U_0}{R}, \quad \frac{di}{dt} = \frac{U_0}{L}$$

Durch die Entladung und Pendeln der Energie zwischen Quellenkapazität und Leitungsimpedanz wird der Scheitelwert allerdings nicht erreicht. Beispiel: Für $L = 100 \text{ nH}$ und $R = 0,68 \text{ m}\Omega$ ($\approx 2\text{m}$) ergeben sich bei einer Betriebsspannung von $U_0 = 1400 \text{ V}$ die Werte $\hat{i} > 100 \text{ kA}$ und $di/dt \approx 14 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Allerdings entlädt sich die Quellenkapazität bei solch hohen Strömen rasch: Es ergeben sich die Verhältnisse wie im linken Teil der Abbildung 3.3.4 dargestellt.

Magnetische Kräfte: Hohe Stromamplituden sind mit hohen magnetischen Kräften verbunden. Für die magnetische Kraft zwischen zwei Leitern der Länge a im Abstand d gilt $F = \mu_0 \hat{i}^2 a / (2\pi d)$. Mit $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ (siehe Abkürzungsverzeichnis) erhält man für die Kraft $F = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am} \cdot \hat{i}^2 a/d$. Mit $d = 5 \text{ cm}$ und $a = 1 \text{ m}$ beträgt das Verhältnis $a/d = 20$. Mit einem Strom von $\hat{i} = 10 \text{ kA}$ ergeben sich $F = 400 \text{ Ws/m} = 400 \text{ N}$ (Einheiten der Energie: $1 \text{ Ws} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$). Mit Erdbeschleunigung entspricht diese Kraft der eines Gewichts von 40 kg. Der 10-fache Strom ergibt die 100-fache Kraft.

Frage 3.4.4: Zusammenfassung. Wie lassen sich die Erkenntnisse zur Fehlererkennung zusammenfassen?

Lösung: (1) Voraussetzungen: Alle Spannungsquellen am Netz sind von ihrer Energiequelle galvanisch getrennt (durch einen Batteriekonverter oder einen isolierenden Interlink-Konverter). Die Konverter verhalten sich als Regelstrecke wie eine Stromquellen und werden spannungsgeführt.

(2) Fehlerindikatoren: (a) Für Fehler nahe der Sammelschiene: Die Sammelschienenspannung. (b) Für Fehler in einem der Abgänge in einiger Entfernung zur Sammelschiene: Schnell ansteigende Kurzschlussströme in den betroffenen Abgang.

Hierbei enthält die Resonanz der Quellenkapazität mit der Kabelinduktivität bis zur Fehlerstelle Informationen über die Entfernung zum Fehlerort (je höher die Resonanzfrequenz, desto näher der Fehler bei vorgegebener Anlagenkapazität).

(3) Auswirkungen der Fehler: Wegen der Strombegrenzung der Konverter gibt es nach der Entladung der Kondensatoren keine weiteren Energiebetrag in den Fehler. Allerdings fallen die Entladeströme ohne Maßnahmen zur Fehlerklärung sehr hoch aus, belasten Kontakte und führen ggf. zu kurzfristigen hohen magnetischen Kräften.

4. Fehlerklärung

4.1. Fehlerbehandlung

Folgende Abbildung zeigt ein DC-Netz mit möglichen Fehler, beispielsweise Kurzschlüsse in einem der Abgänge bzw. nahe der Sammelschiene.

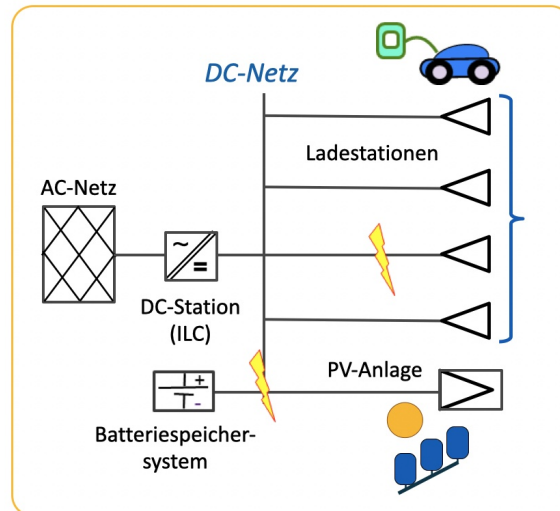


Bild 4.1.1 Fehlerfälle im Netz

Im Fehlerfall ist ein Betrieb des Netzes nicht möglich. Die Fehlerauswirkungen und Reaktionen des Netzes auf die Fehler sind Gegenstand dieses Abschnitts.

Frage 4.1.1: Fehlerquellen. Was wären mögliche Ursachen für die dargestellten Fehler?

Lösung: Kurzschlüsse z.B. durch beschädigte Leitungen. Man kann davon ausgehen, dass die DC-Sammelschiene und die größten Energiequellen (DC-Station, Batteriespeichersystem) geschützt untergebracht werden, z.B. in Art einer Transformatorstation. Fehler an der Sammelschiene z.B. durch Tiere sollten daher selten sein. Fehlerquellen durch Fremdeinwirkung oder Verschmutzung lassen sich auch durch Laminierung der Sammelschiene oder geeignete bauliche Maßnahmen vermindern. Die DC-Station trennt die DC-Verteilung galvanische vom AC-Netz und begrenzt auf diese Weise die Fehlerausbreitung in beiden Richtungen.

Frage 4.1.2: Fehlerauswirkungen. Was wären die Folgen der dargestellten Fehler ohne Fehlerbehandlung?

Lösung: Siehe Abschnitt 4. Lässt man die Fehler unbehandelt, so führen Kurzschlüsse zur Entladung der Anlagenkapazitäten im Netz (sofern diese nicht durch eine Rückflusssperre gesichert sind). Die Kurzschlussströme der Energiequellen (DC-Station, Batteriespeicher im Einspeisefall, alle Einspeiseanlagen) sind durch den Einsatz strombegrenzender Konverter begrenzt. Die Schäden an den Anlagen und an der Verteilung durch Kurzschlüsse sind daher begrenzt. Sofern kein Berührungsschutz gefordert ist, wären die Fehlerauswirkungen daher tolerierbar.

Da alle Anlagen fest angeschlossen und die Verbindungen und Kabel für die Benutzer unzugänglich sind, wäre ein Berührungsschutz nicht zu fordern. Allerdings wäre das gesamte Netz im Kurzschlussfall nicht betriebsbereit, auch wenn der Fehler nur eine der Anschlussleitungen betrifft.

Frage 4.1.3: Ziele der Fehlerbehandlung. Welche Ziele verfolgt die Fehlerbehandlung?

Lösung: Ziele der Fehlerbehandlung sind die Sicherheit der Anlagen und die Widerstandsfähigkeit (Resilienz) des Netzes gegen Fehler. Sicherheit ist hier im Sinne des Schutzes für Leben und Umwelt zu verstehen: Schäden an den Anlagen und an Personen, die die Anlagen benutzen oder an den Anlagen arbeiten, müssen vermieden werden.

Die Widerstandsfähigkeit (Resilienz) hat die Ziele (a) Fehler abzuwehren, (2) mit Fehlern unter Einschränkungen weiterzuarbeiten (indem beispielsweise das betroffene Teilsystem abgeschaltet wird), (3) bei einem Ausfall die Ausfallzeiten zu begrenzen, d.h. die Wiederinstandsetzung zu unterstützen und nach möglichst kurzer Zeit den Betrieb wieder aufzunehmen.

Diese Ziele der Resilienz sind im medizinischen Bereich aus dem Umgang mit Infektionskrankheiten bekannt: (a) sich möglichst nicht anstecken, (b) im Falle einer Infektion die Auswirkungen zu begrenzen und mit Einschränkungen weiterzumachen (z.B. durch Isolation), (c) im Krankheitsfall bald wieder zu genesen.

Frage 4.1.4: Umsetzung der Ziele. Wie lassen sich die Ziele der Fehlerbehandlung umsetzen?

Lösung: Voraussetzung der Fehlerbehandlung ist die Fehlererkennung. Bei einem Fehler in einem Abgang ist der betroffene Abgang vom Netz zu trennen, d.h. selektiv abzuschalten. Fehler an der Sammelschiene lassen sich schwer umgehen: in diesem Fall muss man das Netz in einen sicheren Zustand führen, d.h. alle Anlagen abschalten, bis der Fehler durch einen Reparaturreingriff behoben ist.

4.2. Wie unterbricht man einen Stromkreis?

Das Abschalten eines Abgangs ist mit der Unterbrechung eines Stromkreises verbunden: Im Kurzschlussfall können die Fehlerströme unter Umständen groß werden, d.h. weit über den Nennstrom im Betrieb steigen. Auch die Unterbrechung eines Stromkreises mit Betriebsstrom ist nur in Ausnahmefällen ohne Probleme möglich (siehe z.B. Lichtschalter).

Frage 4.2.1: Folgende Abbildung zeigt den Stromkreis eines Abgangs an der Sammelschiene mit einer Anlage. Die Anschlussleitung ist durch ihre Induktivität und den Leitungswiderstand abgebildet, die Anlage durch eine Stromquelle und die Anlagenkapazität. Was macht die Trennung des Stromkreises durch einen der Schalter (am Beginn der Leitung und am Ende der Leitung) schwierig?

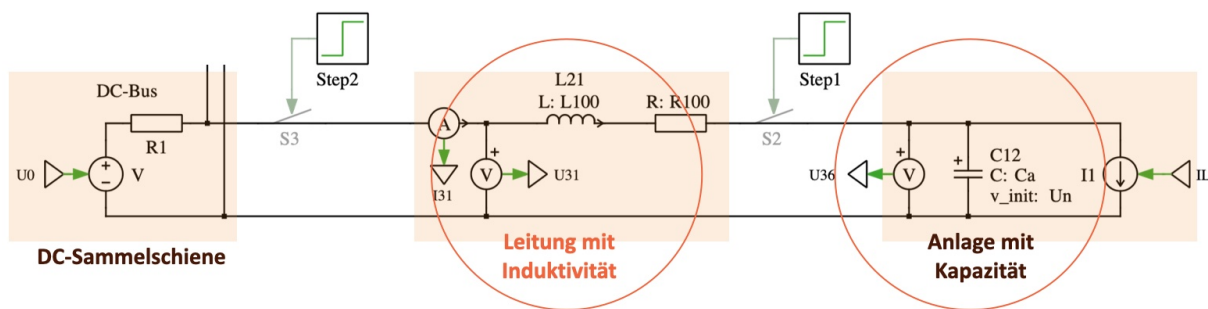


Bild 4.2.1 Stromkreis mit Energiespeichern

Lösung: Die Leitungskapazität L und die Anlagenkapazität C stellen Energiequellen dar:

$$E_L = \frac{1}{2} L \cdot I^2 \quad , \quad E_C = \frac{1}{2} C \cdot U^2$$

Beim Trennen des Stromkreises bleibt die Energie der Anlagenkapazität erhalten: Die Kapazität C behält ihren Füllstand mit der Spannung U.

Die Trennung des Stromkreises wäre allerdings mit einer Unterbrechung des Stroms durch die Induktivität L verbunden und somit mit dem Verlust der Energie E_L . Das lässt der Energiesatz nicht zu: Die gespeicherte Energie sucht sich einen Weg. Eine Unterbrechung des Stroms führt wegen

$$u_L(t) = L \frac{di}{dt} \quad (4.2.1)$$

zu Spannungen in beliebiger Höhe über der Induktivität und somit über dem Schalter. Die Folge wäre ein Lichtbogen, über den der Strom einen Weg findet und über den die Energie abgebaut wird.

Auch wenn die Energie bei kleinen Induktivitäten abhängig von der Stromstärke begrenzt ist, wäre die Überspannung in der Lage, Halbleiter im Netz zu zerstören (daher im Englischen die Bezeichnung „circuit breaker“). Möchte man diesen Effekt vermeiden, muss eine Möglichkeit gefunden werden, die Energie der Induktivität beim Schalten abzuleiten und abzubauen.

Bemerkung: In AC-Netzen verwendet man zum Schalten und Umschalten sogenannte Widerstands-Schnellschalter oder Leistungsschalter, die die Energie aus Induktivitäten im Strompfade entweder in einem Widerstand oder einer Lichtbogenkammer aufnehmen.

Frage 4.2.2: Und wenn man den Schalter einfach öffnet? Folgende Abbildung zeigt das Netz (abgebildet durch einen aufgeladenen Kondensator an der Sammelschiene), den Leitungsschutz (als Schalter mit Triggersignal) und eine Leitung, die nach 20 m Entfernung durch einen Fehler kurzgeschlossen wird. Warum möchte man den Stromkreis unterbrechen? Worin besteht das Problem beim Unterbrechen dieses Stromkreises?

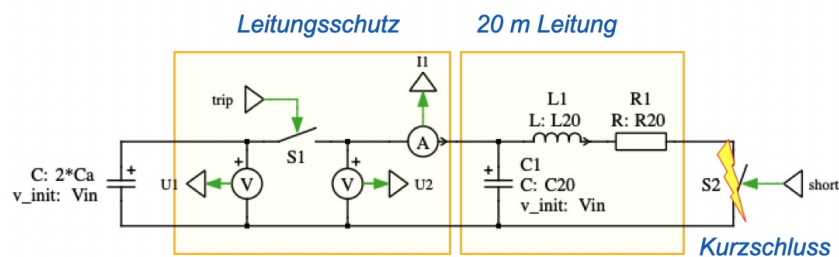


Bild 4.2.2 Fehlerszenario

Lösung: Der Kurzschlussstrom lädt die Leitungsinduktivität auf. Die Induktivität bremst wiederum den Stromanstieg, der Strom selbst ist im Kurzschlussfall nicht begrenzt. Mit einer idealen Spannungsquelle an der Einspeisung würde der Strom bis auf einen Wert $\hat{i} = U_0/R_1$ steigen, wobei R_1 den Leitungswiderstand bezeichnet. Im Beispiel würde der Strom mit der Entladung der Kapazität wieder sinken. Man könnte die vollständige Entladung abwarten. Allerdings bliebe dann die Fehlerstelle mit dem Netz verbunden. Man möchte den defekten Stromkreis abtrennen, um den Fehler von Netz zu isolieren, d.h. um selektiv abzuschalten.

Das Problem beim Abschalten besteht darin, die Energie $E_L = \frac{1}{2} LI^2$ abfließen zu lassen. Im Beispiel würde diese Energie zwischen der Leitungskapazität und Leitungsinduktivität pendeln, bis sie über dem Leitungswiderstand aufgebraucht ist. Da die Leitungskapazität klein ist, entstehen hierbei hohe Spannungen: $E_C = \frac{1}{2} CU^2 = E_L$. Es entsteht ein Schwingkreis mit RLC. Die Anforderung an den Schalter besteht darin, die Energie $E_L = \frac{1}{2} LI^2$ abzubauen.



Dimensionierungsregel: Auslegung der Schalter
Schalter im Leitungsschutz müssen in der Lage sein, eine Leitung mit einer Induktivität von 100 μH zu trennen. Wert entspricht etwa einer Leitungslänge von 100 m. Auf welche Weise der Schalter mit der Energie der Leitung umgeht, wird nicht vorgeschrieben. Die Höhe der Kurzschlussströme hängt von der Auslegung des Netzes und von der Schaltzeit des Schalters ab.

Beispiel: Für einen Kurzschlussstrom von $I = 5 \text{ kA}$ beträgt mit einer Induktivität von $L = 100 \text{ } \mu\text{H}$ die Energie $E_L = 1,2 \text{ kWs}$. Bei doppeltem Kurzschlussstrom vervierfacht sich die Energie.

Bemerkung: Verglichen mit AC-Netzen sind die Induktivitäten im Stromkreis klein: Es finden sich hier nur die Leitungsinduktivitäten. Bei AC-Netz fände sich zusätzlich die Induktivität des vorgelagerten Netzes. Diese lässt sich aus der Kurzschlussspannung des vorgelagerten Transformators abschätzen. In einem 400 V Netz und einer Kurzschlussspannung von 5% beträgt die Induktivität bei einem Transformator mit 400 kVA etwa $1,7 \text{ mH}$.

Frage 4.2.3: Diode. Eine Freilaufdiode kann einen Strompfad zum Entladen der Induktivität bereitstellen. Folgende Abbildung zeigt die Anordnung mit einem Simulationslauf. Beschreiben Sie die Funktionsweise und den Ablauf der Kommutierung des Stroms.

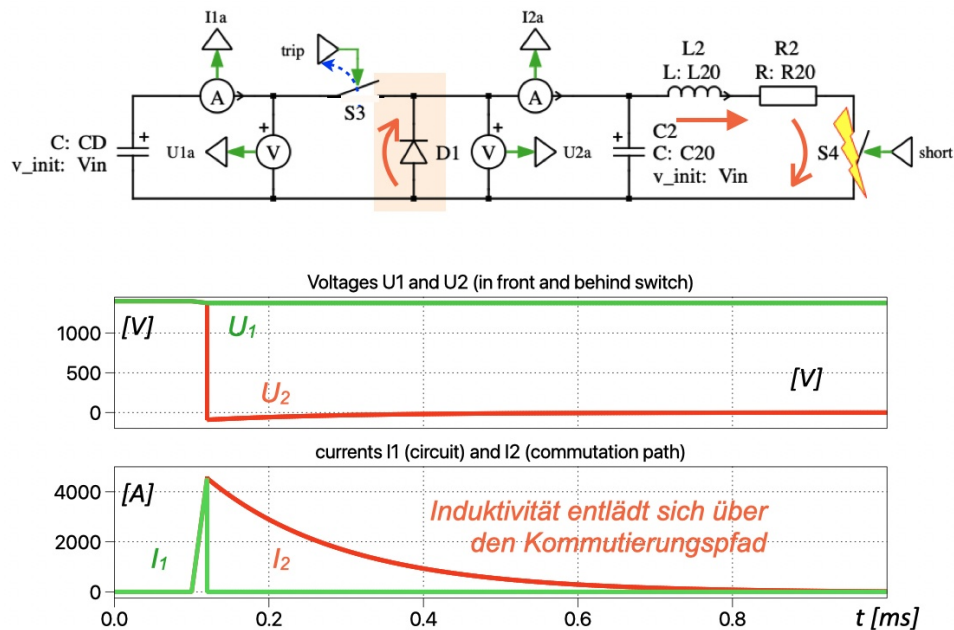


Bild 4.2.3 Strompfad zur Kommutierung durch eine Diode

Lösung: Durch den Kurzschluss komme ein Stromfluss in Gang. Solange der Schalter geschlossen bleibt, hat die Diode keine Bedeutung: Sie ist in Sperrrichtung gepolt, der Stromkreis schließt sich durch den Schalter. Nach dem Öffnen des Schalters schließt die Diode den Stromkreis der Leitungsinduktivität.

Der Simulationslauf zeigt, dass nach dem Öffnen des Schalters die Spannung hinter dem Schalter augenblicklich zusammenbricht, bedingt durch den Kurzschluss. Eine induzierte Spannung nach Gleichung (4.2.1) ist kaum zu erkennen. Durch das Öffnen des Schalters wird die Entladung der Kapazität am Eingang verhindert. Der Strom verläuft während des Vorgangs kontinuierlich: Der Kurzschluss sorgt für den raschen Anstieg des Leitungsstroms $i_1(t)$. Das Öffnen des Schalters unterbricht diesen Stromkreis augenblicklich (in grüner Farbe in der Abbildung).

Der Strom durch die Induktivität wird hierdurch nicht unterbrochen: Er fließt über den Kommutierungspfad weiter, den die Diode bereitstellt ($i_2(t)$ in roter Farbe in der Abbildung). Hierbei entlädt sich die Leitungsinduktivität.

Frage 4.2.4: Varistor. Varistoren besitzen nichtlineare Kennlinien und werden ab einer Schwellenspannung leitend. Die Schwellenspannung wird außerhalb des normalen Betriebsbereiches gewählt. Folgende Abbildung zeigt die Anordnung zusammen mit einem Simulationslauf. Erläutern Sie

die Funktionsweise und den Ablauf der Kommutierung des Stroms. Welche Unterschiede bestehen zur Freilaufdiode?

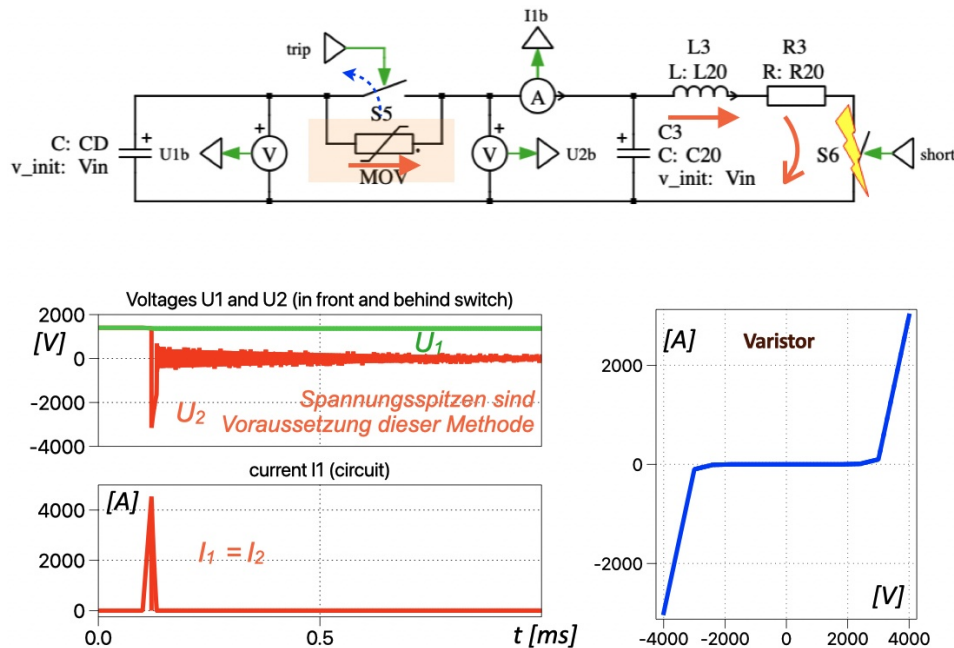


Bild 4.2.4 Strompfad zur Kommutierung durch einen Varistor

Lösung: Durch den Kurzschluss ergibt sich ein rascher Stromanstieg, der durch das Öffnen des Schalters unterbrochen wird. Durch das Schalten entsteht eine negative induzierte Spannung (siehe Gleichung (4.2.1), erkennbar an der Spannung U_2 hinter dem Schalter. Über dem Schalter steht nun in Stromflussrichtung die Spannung $\Delta U = U_1 - U_2$ an. Sobald diese Spannung die Schwellenspannung des Varistors übersteigt, wird der Varistor leitend und stellt den gewünschten Strompfad zur Entladung der Induktivität bereit.

Im Stromverlauf erkennt man, dass der Strom beim Öffnen des Schalters einbricht, um nach Überschreiten der Schwellenspannung durch ΔU über den Varistor zu fließen. Somit übernimmt der Varistor den Strompfad zur Entladung der Induktivität.

Am Verlauf der Spannung U_2 erkennt man auch, dass die Energie der Induktivität über diesen Weg nur zum Teil abgebaut wird: Unterhalb der Schwellenspannung zeigen sich Leitungsreflexionen. Über diese baut sich die Energie über dem Leitungswiderstand ab. Wie viel Energie der Varistor aufnimmt, ließe sich aus der Spannungsdifferenz ΔU und dem Strom ermitteln.

Unterschiede: Der Kommutationspfad führt am geöffneten Schalter vorbei über den gleichen Stromkreis. Die durch das Öffnen des Schalters induzierte Spannung ist Voraussetzung für die Wirksamkeit des Varistors. Somit lässt sich eine induzierte Spannung in Höhe der Schwellenspannung des Varistors nicht vermeiden. Die Schwellenspannung muss hierbei deutlich oberhalb des Betriebsbereiches der Schaltung gewählt werden, damit der Varistor unter Betriebsspannung keinen nennenswerten Strom führt und somit nicht thermisch belastet wird.

Bemerkung: Da der Varistor parallel zum Schalter angeordnet ist, ist er bei geschlossenem Schalter spannungslos und folglich unbelastet. Der Betriebsbereich der Netzspannung hat daher in diesem Fall keine Bedeutung. Die Betriebsspannung steht erst nach Öffnen des Schalters über dem Varistor an (abgesehen von der vorübergehenden induzierten Spannung).

Frage 4.2.5: RC-Glied. In folgenden Abbildung stellt ein RC-Glied (engl. RC snubber) einen Kommutierungspfad bereit. Erläutern Sie die Funktionsweise und den Ablauf der Kommutierung des

Stroms. Was geschieht mit der Energie der Leitungsinduktivität? Warum ist diese Methode bei AC-Stromkreisen eher unüblich?

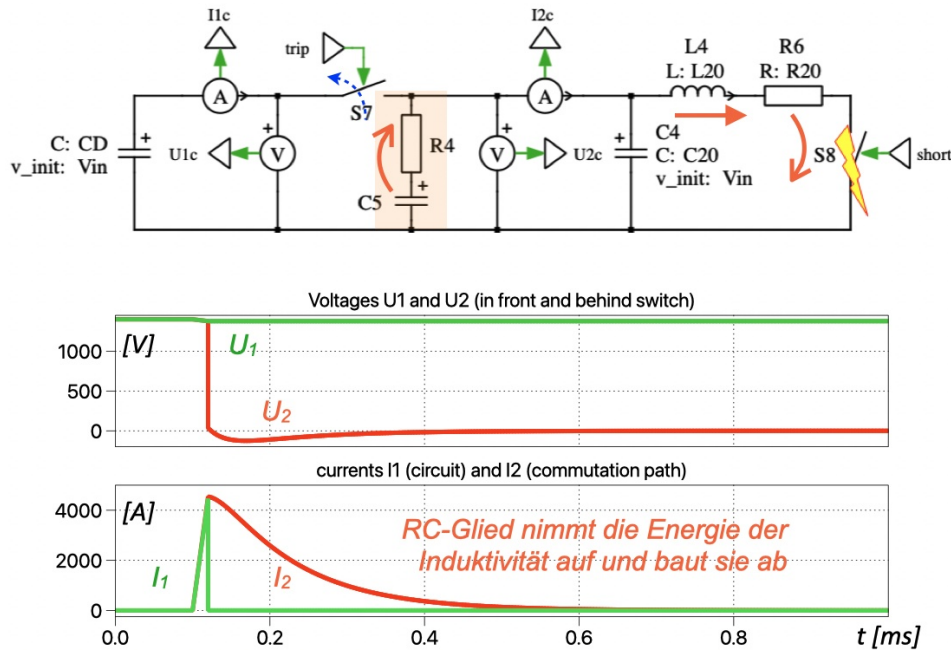


Bild 4.2.5 Strompfad zur Kommutierung durch ein RC-Glied

Lösung: Das Verfahren ist ähnlich der Freilaufdiode: Das RC-Glied befindet sich an der gleichen Stellen. Auch die Funktionsweise ist vergleichbar. Durch den zusätzlichen Kommutationspfad ergibt sich der zusätzliche Strom $i_2(t)$. Bei geschlossenem Schalter ist $i_2(t) = i_1(t)$.

Durch den Kurzschluss ergibt sich ein rascher Stromanstieg. Der Strom $i_1(t)$ wird durch das Öffnen des Schalters sofort unterbrochen. Die Spannung hinter dem Schalter bricht augenblicklich ein, eine nennenswerte induzierte Spannung (siehe Gleichung (4.2.1)) ist nicht erkennbar.

Der Strom verläuft insgesamt kontinuierlich: Die Rolle von $i_1(t)$ übernimmt nun $i_2(t)$, bis die Induktivität entladen ist. Die Energie könnte sich, je nach Speicherkapazität, in der Kapazität des RC-Gliedes unterbringen lassen. Allerdings würde sich diese Kapazität auf Dauer durch den Kurzschluss entladen. Die Energie der Induktivität wird somit am Widerstand des RC-Gliedes und am Leitungswiderstand in Wärme umgewandelt.

Allerdings könnte die Energie zwischen Leitungsinduktivität und der Kapazität des RC-Gliedes pendeln. Dass dieses im Zeitverlauf der Simulation nicht geschieht, hängt mit der Auslegung des Widerstandes R des RC-Gliedes zusammen.

AC-Stromkreise: Im geschlossenen DC-Stromkreis findet sich über der Kapazität des RC-Gliedes die Betriebsspannung. Eine Ableitung durch die Kapazität findet nicht statt. In einem AC-Netz ergäbe sich über der Kapazität im normalen Betrieb ein Strompfad, da auch dort die Betriebsspannung über der Kapazität anliegt, und diese die Impedanz $Z_c = -j/\omega C$ besitzt. Für AC-Stromkreise eignet sich diese Schaltung daher nicht.

Frage 4.2.6: Regeln zur Auslegung. Die Leitungsinduktivität L ist durch die Leitungslänge gegeben. Wie wäre ein geeigneter Wert für den Widerstand des RC-Gliedes zu wählen, wenn man außerdem die Kapazität C vorgibt? Welche Anforderungen ergeben sich an den Schalter?

Lösung: (1) Auslegung des RC-Gliedes: Zusammen mit der Leitungsinduktivität bildet das RC-Glied einen gedämpften RLC-Schwingkreis. Ein geeigneter Wert für den Widerstand ergibt sich aus dem aperiodischen Grenzfall:

$$R = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.2.2)$$

In diesem Fall werden Schwingungen durch das Pendeln der Energie zwischen der Leitungsinduktivität und der Kapazität des RC-Gliedes vermieden und der Abbau der Energie erfolgt möglichst rasch. Allerdings hängt die Leistungsinduktivität vom Fehlerort ab, daher ist eine genaue Abstimmung nicht möglich.

(2) Anforderungen an den Schalter: Die Energie der Leitungsinduktivität wächst quadratisch mit dem Kurzschlussstrom. Der Stromanstieg wird nur durch die Leistungsinduktivität vom Schalter bis zum Fehlerort begrenzt. Eine wesentliche Anforderung an den Schalter ist daher die Schaltgeschwindigkeit. Im Beispiel wurde der Schalter mit einer Verzögerung von $\Delta t = 20 \mu s$ ausgelöst. An der Busspannung (U_1) ist zu erkennen, dass die Entladung der Quellenkapazität hierdurch weitgehend vermieden wird.



Dimensionierungsregel: Auslegung der Schalter
Schalter für den Leitungsschutz müssen schnell genug sein, um die Entladung der Quellenkapazität (bzw. Kapazitäten am DC-Bus) weitgehend zu verhindern. Für die Zone 3 wird eine Antwortzeit von $< 10 \mu s$ gefordert. Durch die Vermeidung der Entladung der Kapazitäten lässt sich die Fehlerenergie vernachlässigen.

Die Fehlerenergie lässt sich in der Simulation mit Hilfe einer Leistungsmessung ermitteln. Die maximale Fehlerenergie geht aus der Ladung der Quellkapazitäten hervor. Ebenso lässt sich maximale Energie der Leitungsinduktivität aus dem Strom und einer Vorgabe für die Induktivität abschätzen.

4.3. Leitungsschutz

Folgende Abbildung zeigt als Testaufbau die DC-Quelle nun einschließlich einer kurzen Anschlussleitung von 2 m, die Leitung mit maximaler Leitungsinduktivität gemäß der Regel zur Auslegung der Schalter, sowie den Schalter als Teil des Leitungsschutzes.

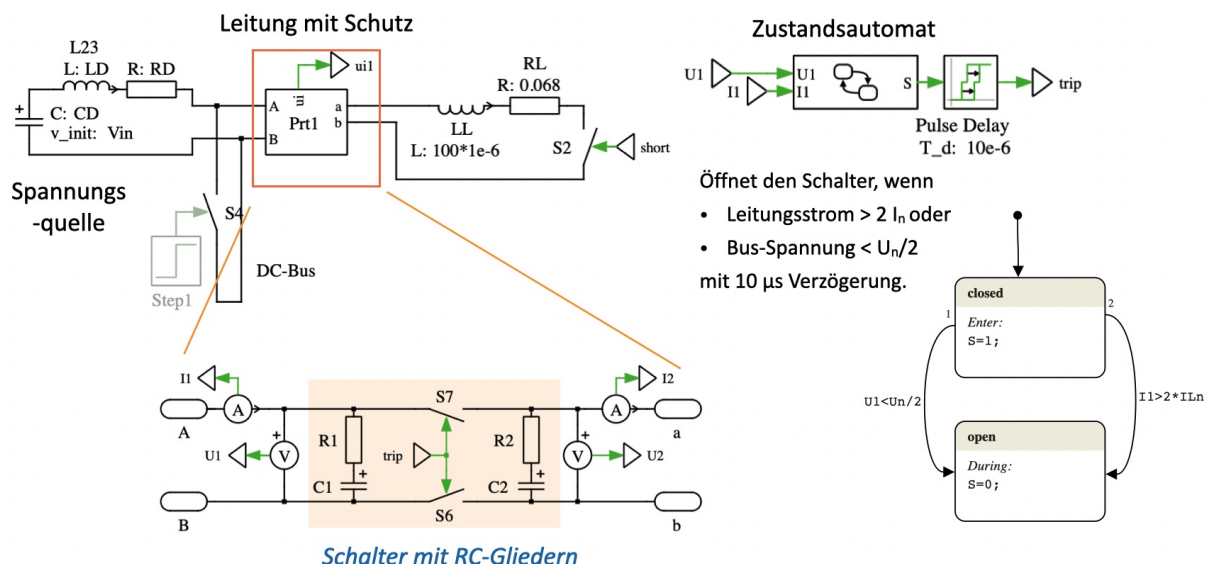


Bild 4.3.1 Aufbau des Leitungsschutzes

Der Leitungsschutz soll autonom arbeiten und verfügt dabei über eine Spannungswächter, Stromwächter und einen Zustandsautomaten zur Auslösung des Schalters.

Frage 4.3.1: Funktionsprinzip. Erläutern Sie die Funktionsweise der Anordnung.

Lösung: Wesentlicher Teil des Leitungsschutzes bleibt der Schalter. Der Schalter ist nun zweipolig ausgeführt und trennt die Leitung bei Auslösung vollständig vom Netz. Der Schalter enthält zwei RTC-Glieder (RC snubber) zur Bereitstellung eines Strompfades für geladene Leitungsinduktivitäten bei der Trennung des Stromkreises.

Das RC-Glied auf der Seite der Sammelschiene (DC-Bus) dient dazu, die Energie der kurzen Anschlussleitung der DC-Quelle aufzunehmen. In der Abbildung ist nur eine Anlage bzw. ein Leitungsabgang an der Sammelschiene angeschaltet. Eine Unterbrechung dieser Leitung unterbricht daher auch den Stromkreis der DC-Quelle.

Der Zustandsautomat erhält die Messsignale des Spannungswächters auf der Primärseite (Spannung der Sammelschiene), sowie den Stroms im Leitungsabgang. Der Zustandsautomat startet aus dem initialen Zustand in den Zustand „closed“, in dem der Schalter geschlossen ist. Der Übergang in den Zustand „open“ stellt somit die Auslösung des Leitungsschutzes dar.

In diese Zustand wechselt der Automat, wenn (1) die Busspannung auf den halben Wert fällt, (2) wenn der Strom im Leitungsabgang den doppelten Nennstrom der dort angeschlossenen Anlage übersteigt. Diese Bedingungen sind nicht exklusiv, schließen einander also nicht aus. Der Schalter löst mit einer Verzögerung von $\Delta t = 10 \mu s$ aus.

Frage 4.3.2: Verhalten bei Fehlern. Untersuchen Sie das Verhalten der Schaltung bei Fehlern in den in der Abbildung dargestellten Fehlerfällen. Welche Fehlerenergie nehmen die RC-Glieder auf?

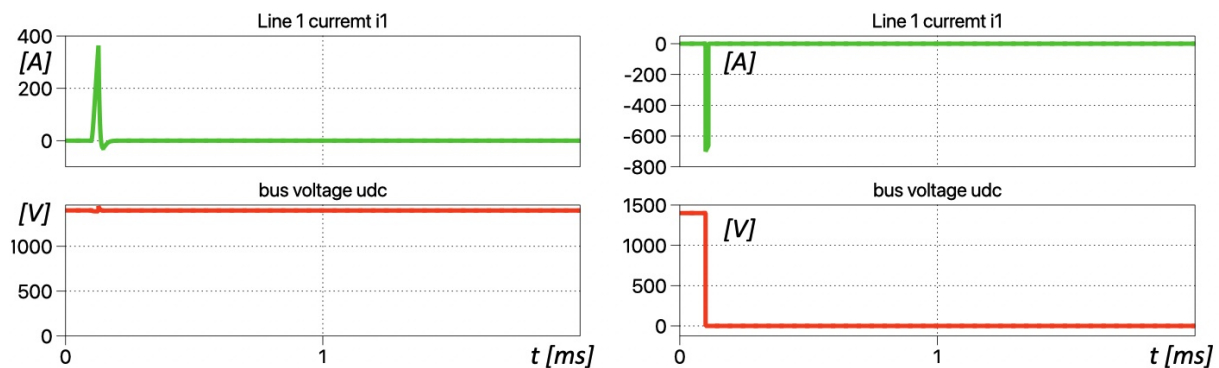


Bild 4.3.2 Verhalten bei Fehlern

Lösung: (1) Linker Teil der Abbildung: Kurzschluss am Leitungsausgang (ferner Fehler). Der Strom steigt rasch an, der Zustandsautomat reagiert bei Überschreitung der Schwelle zum doppelten Nennstrom, hier bei ca. 200 A. Dass der Fehlerstrom über diesen Wert steigt, liegt an der um $\Delta t = 10 \mu s$ zeitversetzten Auslösung. An der Spannung wäre der Fehler nicht erkennbar, da die Entladung der Kapazität der DC-Quelle über die lange Leitung langsam erfolgt. Da der Fehler durch den Leitungsschutz abgetrennt wird, bleibt die Ladung der DC-Quelle annähernd vollständig erhalten.

Aus den Spannungen und Strömen vor und hinter dem Schalter lässt sich die Leistung berechnen, und hieraus durch Integration über der Zeit die Energie, die die RC-Glieder jeweils aufnehmen. Die Fehlerenergie lässt sich auch über die Energiegleichung aus dem Strom und den beiden Leitungsinduktivitäten abschätzen: Für $L_L = 100 \mu H$, $L_D = 0,6 \mu H$ und $\hat{i} = 400 A$ berechnet man $E_L = 8 Ws$ und $E_D = 0,05 Ws$.

(2) Rechter Teil der Abbildung: Kurzschluss an der DC-Sammelschiene. Die Spannung bricht sofort ein, der Zustandsautomat löst aus. Da der Schalter aber erst mit einer Zeitverzögerung von $\Delta t = 10 \mu s$ reagiert, steigt der Kurzschlussstrom erheblich an. Der Kurzschlussstrom speist sich im dargestellten Simulationslauf aus der DC-Quelle. Zusätzlich würde sich die Kapazität des ersten RC-Gliedes in den Kurzschluss entladen. Die Energiemenge ist zwar gering, jedoch wäre der Kurzschlussstrom nur durch

den Widerstand R_1 des ersten RC-Gliedes begrenzt. In der Simulation wurde der Rückfluss aus dem ersten RC-Glied in die Sammelschiene daher durch eine Diode im RC-Kreis verhindert.

Daher entlädt sich beim Sammelschienenfehler nur die Leitungsinduktivität durch die Trennung in das zweite RC-Glied. Auf der Leitung gibt es keinen Kurzschlussstrom, sondern nur den Bemessungsstrom in Höhe von 100 A. Gegenüber dem Kurzschluss am Leitungsende mit einem Strom von annähernd 400 A fällt die Energie daher deutlich geringer aus (ca. 1/16 bei $\frac{1}{4}$ des Stroms).

Frage 4.3.3: Auslegung des RC-Gliedes. Wie wären die RC-Glieder auszulegen? Welche Energiemenge könnte die Kapazität aufnehmen? Überprüfen Sie die Auslegung in der Simulation.

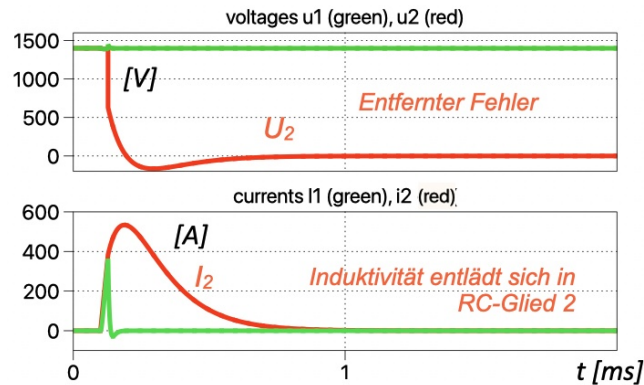


Bild 4.3.3 Spannungen und Ströme vor und hinter dem Schalter

Lösung: Für eine Auslegung nach dem aperiodischen Grenzfall nach Gleichung (4.2.2) wäre der Widerstand jeweils passend zu wählen. Für die Sekundärseite (Richtung Anlage) beträgt die maximale Leitungskapazität $L_L = 100 \mu\text{H}$, auf der Primärseite (zur DC-Sammelschiene) findet sich im Beispiel zur DC-Quelle nur eine kurze Leitung mit $L_D = 0,6 \mu\text{H}$.

Wählt man die Kapazität der RC-Glieder auf beiden Seiten mit $C_{RC} = 100 \mu\text{F}$, so ergibt sich für $L_L = 100 \mu\text{H}$ für das Verhältnis $L_L/C_{RC} = 1$, und somit $R_2 = 2 \Omega$. Für die Primärseite ergibt sich $R_1 = 0,15 \Omega$. Der Simulationslauf in der Abbildung oben zeigt die Sekundärseite. Man erkennt, dass sich der Strom $i_2(t)$ nach der Trennung der Leitung vom Netz ohne Schwingungen abbaut: die Leitungsinduktivität entlädt sich aperiodisch in das RC-Glied. Die Spannung $u_2(t)$ sinkt auf null, somit ist auch die Kapazität im RC-Glied leer und die Energie der Induktivität vollständig abgebaut (über dem Widerstand R_2 in Wärme umgewandelt).

Die maximale Energie der Leitungsinduktivität mit einem Kurzschlussstrom von 1 kA beträgt 50 Js. Die Kapazität des sekundärseitigen RC-Gliedes könnte bei Betriebsspannung 100 Js aufnehmen. Bei kleinerer Wahl der Kapazität wäre der Widerstand entsprechend anzupassen.

Frage 4.3.4: Einfluss der Entfernung des Fehlerortes. Untersuchen Sie in der Simulation die Funktion des Leitungsschutzes in Abhängigkeit der Entfernung des Fehlerortes von der Sammelschiene. Verwenden Sie hierzu das in folgender Abbildung dargestellte Simulationsmodell. Was bewirkt die Trennung des Leitungsabschnittes vom Netz? Wie sind die in der Abbildung dargestellten Zeitverläufe zu interpretieren?

Lösung (Abbildung auf der folgenden Seite): An der DC-Quelle wurde zusätzlich die spannungsgeführte Stromquelle mit ihrem Regler ergänzt. Hinter dem Leitungsschutz wird statt eines einfachen Leitungsmodells ein Kettenmodell mit Fehlerorten in unterschiedlicher Entfernung und Messmöglichkeiten verwendet, das auch die Beobachtung der Vorgänge innerhalb der Leitung gestattet.

Die Auslösung des Schalters bewirkt am Ort des Schalters die Trennung der Leitung vom Netz. Netzseitig wird der Fehlerstrom sofort unterbrochen (Abschnitt 1 und zugehöriger Simulationslauf in der

Abbildung links). Anlagenseitig entsteht ein eigener Stromkreis (Abschnitt 2 und zugehöriger Simulationslauf in der Abbildung rechts).

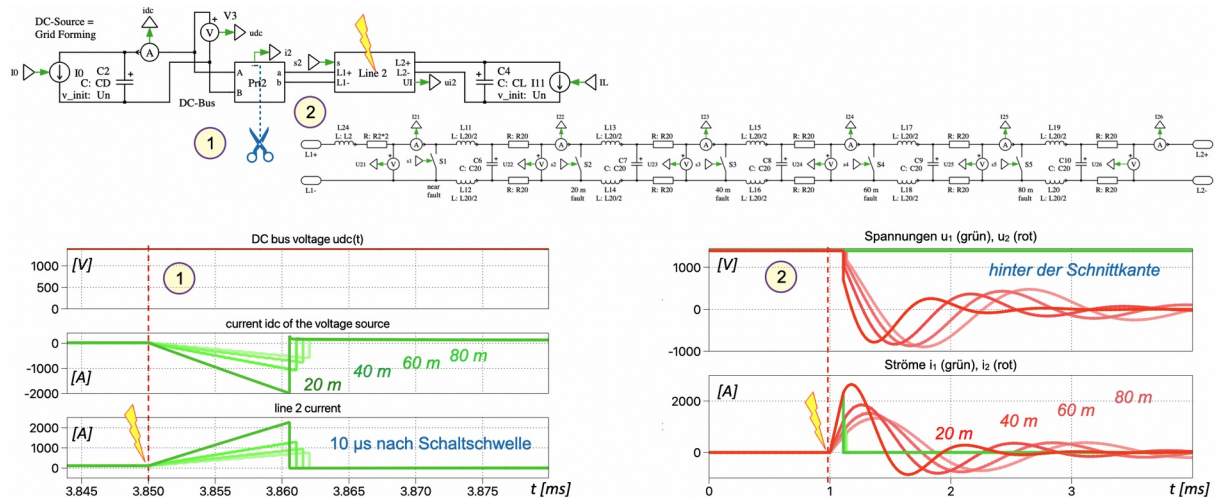


Bild 4.3.4 Einfluss des Fehlerortes auf die Ströme vor und hinter dem Schalter

Abschnitt 1 (netzseitig): Durch die Trennung ist der Fehler vom Netz isoliert. Im Netz wird der Strom mit der Auslösung des Schalters sofort unterbrochen. Am kontinuierlichen Verlauf der Spannung ist zu erkennen, dass sich die Kapazität der DC-Quelle nicht nennenswert entlädt, unabhängig vom Fehlerort. Der Strom der DC-Quelle ist in diesem Beispiel bis auf das Vorzeichen gleich dem Strom in den Leitungsabschnitt.

Der Kurzschlussstrom steigt umso schneller an, je näher der Fehler sich an der Sammelschiene befindet: Der kürzere Leitungsabschnitt besitzt die geringere Leitungsinduktivität. Mit dem höheren Stromanstieg findet auch das Überschreiten der Schwelle $I > 2 I_n$ zur Auslösung des Schutzes früher statt. Da der Schalter mit einer festen Verzögerung von $\Delta t = 10 \mu s$ nach der Fehlerdetektion durch Überschreiten der Schwelle auslöst, zeigt sich der Zeitpunkt der Detektion auch im Zeitpunkt der Unterbrechung des Stroms.

Abschnitt 2 (anlagenseitig): Mit der Schutzauslösung schließt sich der Stromkreis mit der auf den Wert des Kurzschlussstroms bei der Unterbrechung aufgeladenen Leitungsinduktivität über dem sekundärseitigen RC-Glied. Es bildet sich ein RLC-Schwingkreis. Die Größe der Leitungsinduktivität variiert mit dem Fehlerort zwischen 80 und 20 m über einen Faktor 4.

Die Abstimmung auf den aperiodischen Grenzfall ist nur für einen Fehlerort möglich. Im Beispiel wurde die Größe des Widerstands R im RC-Glied so gewählt, dass die Abstimmung für kurze Leitungen passt, da sich in diesem Fall die größten Kurzschlussströme ergeben. Hierdurch schwingen die Ströme bei weiter entfernten Fehlern etwas ein, jedoch mit kleineren Amplituden als im nahen Fehlerfall.

Im Beispiel, wurde eine Kapazität von $C_{RC} = 30 \mu F$ für die RC-Glieder verwendet. Die Leitungsinduktivität bewegt sich zwischen $6 \mu H$ und $24 \mu H$ für Entfernungen zwischen 20 m und 80 m. Bei Abstimmung auf die kürzere Entfernung wäre $R = 2 \sqrt{(6/30)} \Omega \approx 0,9 \Omega$ zu wählen. Im Beispiel wurde $R_2 = 0,3$ gewählt, daher ergeben sich hier in allen Fällen leichte Überschwinger.

4.4. Fehler im Netz

Als Leitungsschutz werden an den Abgängen Schalter mit Schaltlogik untergebracht, die die Spannung an der Sammelschiene (= Spannung am Abgang) und den Strom in den Abgang messen. Die Schutzgeräte sollen eigenständig auslösen. Folgende Abbildung zeigt die Anordnung.

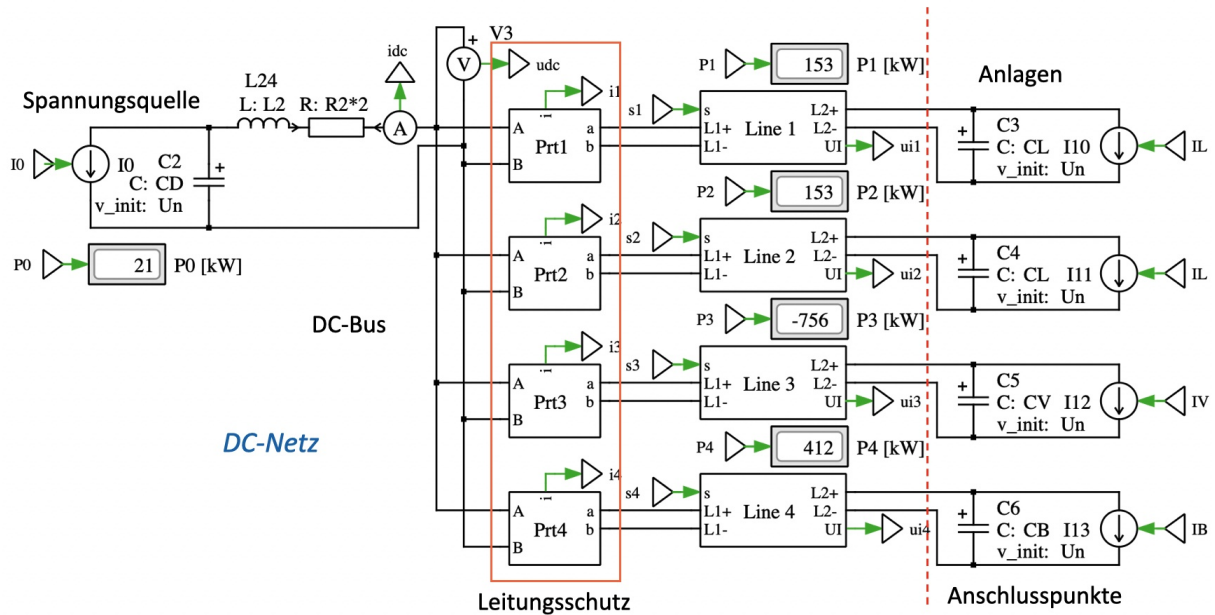


Bild 4.4.1 Netz im Betrieb mit Leistungsschutz

Die DC-Quelle ist nun als spannungsgeführte Stromquelle realisiert (mit Regler bzw. Kennlinie $i(u)$), die Anlagen als Stromquellen. Für die Fehlerströme, die aus der Entladung der Kapazitäten der Quelle und der Anlage entstehen, sind die Betriebsströme unerheblich. Durch die Anlagenkapazitäten sind die Stromquellen von der Sammelschiene entkoppelt. Die Regler spielen für die Fehlerfälle keine Rolle.

Frage 4.4.1: Funktionsprinzip. Erläutern Sie das Funktionsprinzip des Leitungsschutzes.

Lösung: Basis ist die Überwachung der Spannung an der Sammelschiene, sowie des Stroms im Abgang. Übersteigt der Strom den doppelten Nennstrom der Anlage, schaltet der Leitungsschutz die betroffene Leitung ab. Der Rest des Netzes kann weiter betrieben werden.

Unabhängig vom Strom schaltet der Leitungsschutz den Abgang ab, wenn die Spannung an der Sammelschiene auf den haben Wert der Betriebsspannung fällt. Da die Spannung an der Sammelschiene alle Abgänge betrifft, werden in diesem Fall alle Abgänge abgeschaltet. Bei einem Sammelschienenfehler ist ein Betrieb des Netzes nicht möglich.

Frage 4.4.2: Verhalten bei Fehlern. Folgende Abbildung zeigt das Verhalten des Leitungsschutzes bei einem Fehler in einem der Abgänge. Erläutern Sie den jeweiligen Ablauf. Was bewirkt der Schutz?

Lösung: Der Schutz bewirkt die selektive Abschaltung des betroffenen Abgangs: Der Betrieb des Netzes geht unterbrechungsfrei weiter.

Ablauf: An den Leitungen 1 und 2 sind die gleichen Lasten angeschlossen, beide Anlagen beziehen Strom nach Start der Simulation und erreichen zum Fehlerzeitpunkt etwa ihren Nennstrom von ca. 100 A. Bedingt durch den Fehler steigt der Strom in Leitung 2 rasch an und überschreitet die Schwelle des doppelten Nennstroms.

Der Schalter löst mit einer Schaltverzögerung von $\Delta t = 5 \mu s$ aus. In dieser Zeit erreicht der Strom einen Wert von etwa 400 A. In Leitung 1 erkennt man einen Einbruch des Stroms zum Fehlerzeitpunkt: Obwohl die Stromquelle weiterhin einen Strom aus dem Netz bezieht (mit Vorzeichen > 0), versucht sich die Anlagenkapazität der Anlage an Leitung 1 in den Fehler zu entladen.

Allerdings ist die Entfernung der Anlage 1 wehr viel weiter vom Fehler entfernt als die DC-Station, die den größten Teil des Fehlerstroms in Leitung 2 bereitstellt.

Leitungsfehler

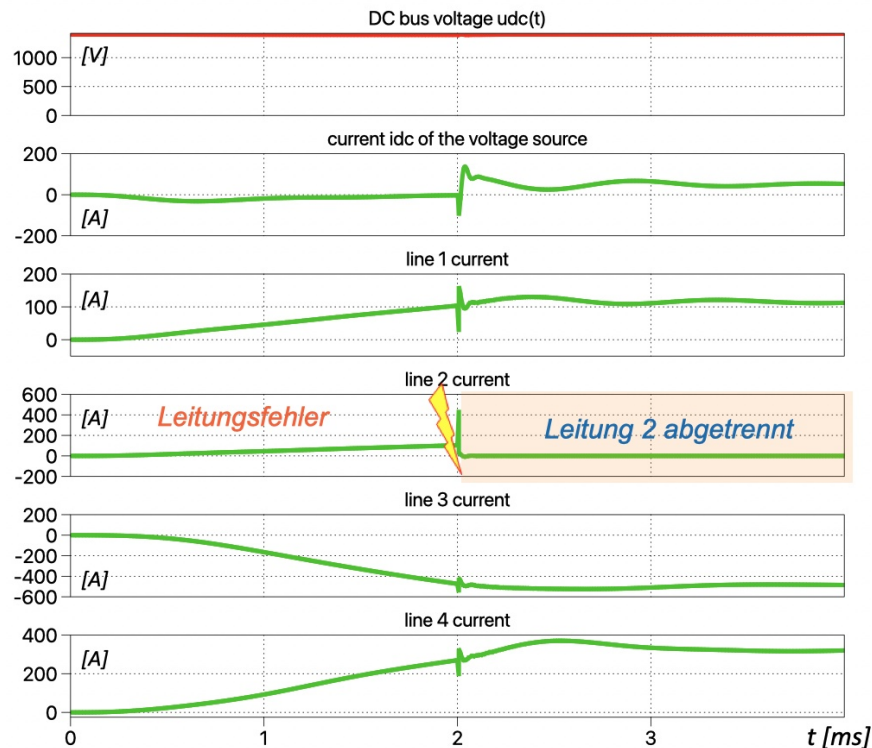


Bild 4.4.2 Selektive Auslösung bei einem Leitungsfehler

Auch die Anlagen an Leitung 3 und 4 zeigten einen Einbruch des Stroms zum Fehlerzeitpunkt. Die Anlage an Leitung 3 ist eine Einspeisung mit vergleichsweise hoher Leistung (PV-Anlage, Strom vor dem Fehler annähernd -600 A). Die Anlage an Leitung 4 besitzt ebenfalls eine höhere Leistung, arbeitet aber im Lastbetrieb (Batteriespeicher, Strom ca. 300 A vor dem Fehlereintritt).

Den größten Beitrag zum Fehlerstrom liefert die DC-Quelle, die annähernd direkt an der Sammelschiene angeschlossen ist (über eine Leitung von 2 m Länge), zusammen mit der PV-Anlage an Leitung 3. Da alle Ströme von der Sammelschiene aus in die Leitungen hinein gemessen werden, bedeutet ein negativer Strom einen Strom in Richtung Sammelschiene.

Vor dem Fehler hat die DC-Quelle überschüssigen Strom von der Sammelschiene aufgenommen. Nach Fehlereintritt nehmen Anlage 1 und Anlage 4 ihren Strom zurück, somit steht mehr Strom für den Fehler in Leitung 2 zur Verfügung.

An der Sammelschienenspannung lässt sich der Fehler kaum erkennen. Der Leitungsschutz trennt Leitung 2 vom Netz ab. Der Betrieb der übrigen Anlagen geht ungestört weiter.

Fehler nahe der Sammelschiene

Der Fehlerort befindet sich in diesem Fall nicht direkt an der Sammelschiene, sondern in 2 m Entfernung auf dem Abgang der Leitung 1. In dieser Entfernung ist der Fehler an der Sammelschienenspannung bemerkbar. Allerdings sinkt die Spannung nicht so weit, dass der Leitungsschutz deswegen auslösen würde.

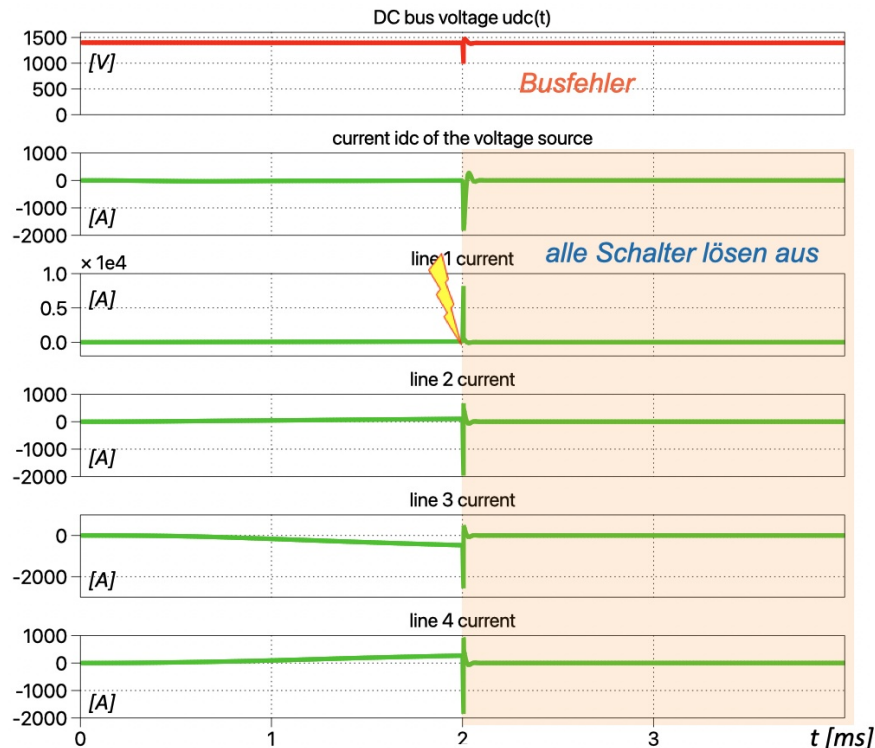


Bild 4.4.3 Schutzauslösung bei einem Fehler in der Nähe der Sammelschiene

Der Leitungsschutz aller Anlagen löst dennoch aus, da die Fehlerströme aller Anlagen den doppelten Wert der jeweiligen Nennströme überschreiten. Die Stromrichtung zeigt, dass sich der Fehler in Leitung 1 befindet: Nur hier ist der Fehlerstrom positiv, fließt also von der Sammelschiene aus in die Leitung. In allen anderen Abgängen ist der Fehlerstrom negativ, fließt also von den Leitungen zur Sammelschiene.

In der betroffenen Leitung 1 erreicht der Fehlerstrom annähernd 8k A. Der Fehlerstrom speist sich sowohl aus der DC-Quelle, als auch aus den Anlagen. Nach Auslösung aller Schalter ist das Netz außer Betrieb: Die Sammelschienenenspannung bleibt erhalten, da die DC-Quelle an der Sammelschiene bleibt. Alle sonstigen Abgänge sind vom Netz getrennt,

Bemerkung: In diesem Fall wäre eine selektive Abschaltung der betroffenen Leitung 1 möglich gewesen, da sich der Fehler hinter dem Leitungsschutz befindet, und nicht direkt an der Sammelschiene. Hierzu wären die Einstellungen des Leitungsschutzes entsprechend anzupassen.

Im Beispiel wurde der Betrag des Leitungsstromes zur Auslösung verwendet: Wenn der Betrag des Stroms in einem Abgang den doppelten Nennstrom der jeweiligen Anlage übersteigt, löst der Schutz aus. Die Selektion lässt sich verfeinern, wenn man die Stromrichtung berücksichtigt. Bei einem Fehler strömt der Fehlerstrom in den betroffenen Abgang, unabhängig davon, ob eine Einspeisung oder ob eine Last angeschlossen ist.

Frage 4.4.3: Sicherungsseil. Der bisher betrachtete Leitungsschutz arbeitet lokal und autonom unter Verwendung von Strom und Spannung auf der jeweiligen einzelnen Leitung. Informationen aus den Fehlerbild von anderen Leitungen werden nicht verwendet. Die Auslösung und die Trennung einzelner Abschnitte ist den einzelnen Schutzgeräten überlassen.

Folgende Abbildung zeigt einen Ansatz, mit der sich im Fehlerfall alle Schutzgeräte auslösen lassen. Das Verfahren funktioniert wie die Notbremse in einem Zug: Wird das Fehlersignal betätigt, werden alle Anlagen vom Netz getrennt und verbleiben in diesem Zustand, bis das Signal zurück genommen wird.

Beschreiben Sie die Funktionsweise und den Nutzen dieses Konzepts.

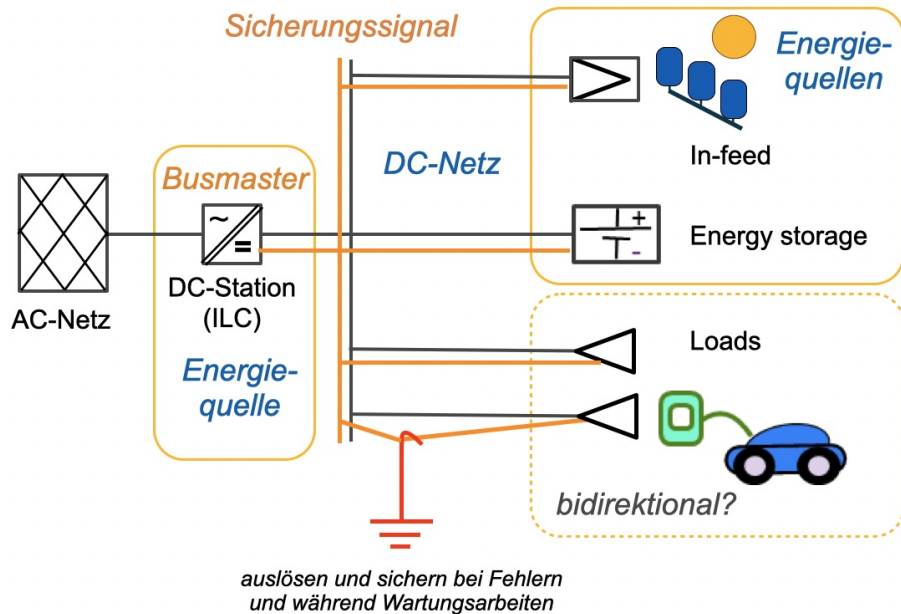


Bild 4.4.4 Netz im Betrieb mit einem Sicherungsmedium

Lösung: Das Konzept dient der Herstellung eines einheitlichen Zustands im Netz: Bei aktiviertem Sicherheitssignal darf das Netz nicht betrieben werden. Bei einem gravierenden Fehler lässt sich das Signal von einer einzelnen Anlage auslösen. Ebenso lässt sich das Signal bei Wartungsarbeiten an der Anlage verwenden, um alle Anlagen vom Netz zu trennen und gegen Wiedereinschalten zu sichern.

Die Möglichkeit zur zentralen Abschaltung ist vor allem dann nützlich, wenn das Netz mehrere Energiequellen enthält. Im dargestellten Beispiel sind nicht nur der Interlink-Konverter und das Batteriesystem als spannungsgeführte Systeme Energiequellen, sondern auch die PV-Anlage und möglicherweise auch die Ladestationen, sofern diese bidirektional ausgeführt sind.

Dimensionierungsregel: Sicherheitsmedium

Um Geräte im Netz zentral abzuschalten und auf einheitliche Weise in einem sicheren Zustand zu halten, soll in Netzen mit mehreren Energiequellen ein Sicherheitsmedium implementiert werden. Das Sicherheitsmedium ist hierbei in geeigneter Weise als Signal zu realisieren, das über eine spezielle Leitung (Safety Wire oder Tripping Wire) kommuniziert wird, bzw. über eine sicheres Kommunikationssystem (z.B. ein sicheres Feldbusprotokoll).

Frage 4.4.4: Zusammenfassung. Wie lassen sich die Erkenntnisse zur Fehlerklärung zusammenfassen? Nennen Sie das Ziel, Methoden zur Unterbrechung eines Stromkreises und die Funktion des Leitungsschutzes.

Lösung: (1) Ziel der Fehlerklärung ist es, Schäden zu verhindern an Anlagen und Personen, die an den Anlagen arbeiten. Gegen Fehler erreicht das Netz eine Widerstandsfähigkeit (Resilienz), indem es Fehler abwehrt, im Fehlerfall die betroffenen Teile abtrennt und mit vermindertem Einsatz weiter arbeitet. Nach Fehlern, die zum Systemausfall führen, begünstigt es die Wiederherstellung und ist rasch wieder einsatzbereit.

(2) Bei der Unterbrechung eines Stromkreises muss ein Weg für die in der Leitungsinduktivität gespeicherte Energie gefunden werden. Das kann über einen geeigneten Kommutierungspfad für den Strom beim Abschalten erreicht werden. Für den Kommutierungspfad eignen sich unter anderem Dioden, Varistoren und RC-Glieder.

(3) Der Leitungsschutz hat die Aufgabe, defekte Leitungen selektiv vom Netz zu trennen, so dass das übrige Netz weiter betrieben werden kann. Hierzu werden an den Leitungsabgängen die Spannung an der Sammelschiene und der Strom in den Abgang überwacht. Der Leitungsschutz reagiert auf Überströme und Unterspannungen. Zur Herstellung eines netzweit einheitlichen Betriebszustands im Fehlerfall und bei Wartungsarbeiten lässt sich ein Sicherheitssignal in allen Anlagen implementieren.

5. Schutzbeschaltung für Bezugsanlagen

Am Ende der Leitungen, die von den Sammelschienen abgehen, finden sich Anlagen. Inhalt dieses Abschnitts sind Anlagen, die aus dem Netz ausschließlich Leitung beziehen, also mit Lastflussrichtung vom Netz zur Anlage. Folgende Abbildung zeigt eine Übersicht.

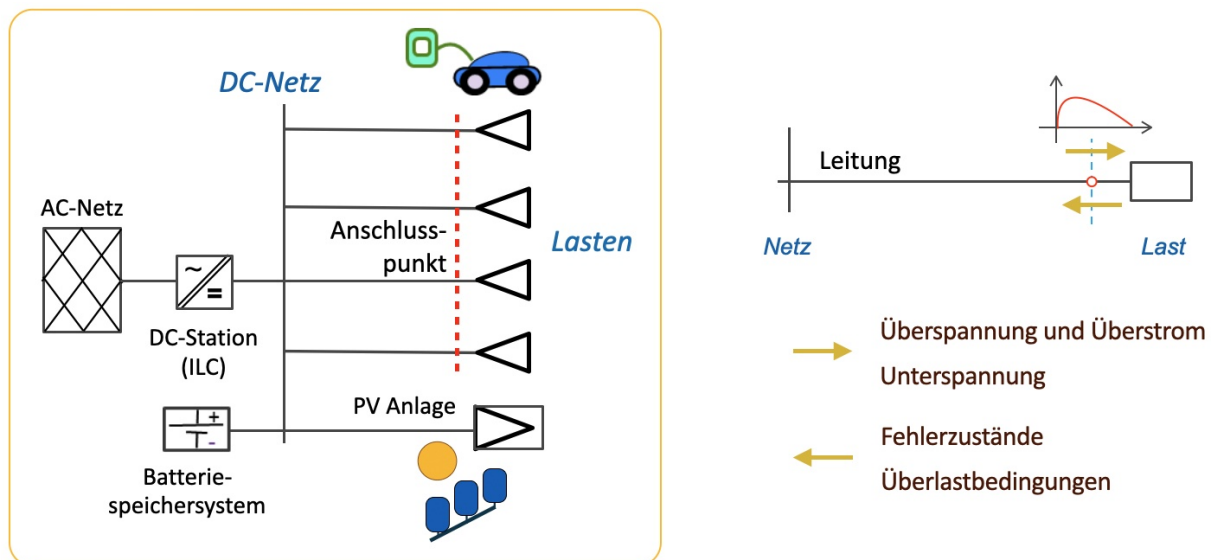


Bild 5.1. Wechselwirkungen zwischen Netz und Lasten

Am Anschlusspunkt der Anlage ergeben sich Wechselwirkungen zwischen Anlage und Netz: Aus dem Netz können Überspannungen und Überströme die Anlage treffen. Von der Anlage entstehen bei Schaltvorgängen und Fehlerzuständen der Last Rückwirkungen auf das Netz. Die Schutzbeschaltung der Anlage soll diese Auswirkungen begrenzen.

5.1. Überspannung und Überstrom

Zunächst sollen Überspannung und Überstrom am Anschlusspunkt der Anlage betrachtet werden. Als Ursache kommen äußere und innere Einwirkungen in Frage.

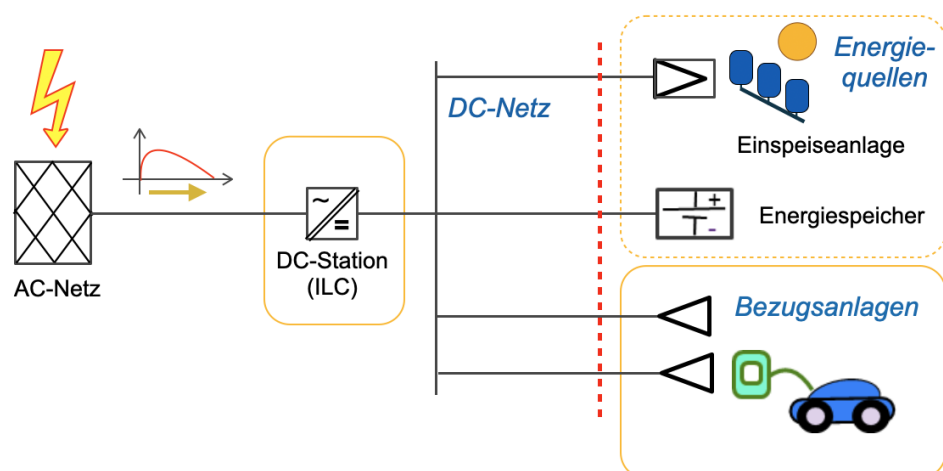


Bild 5.1.1 Einwirkungen aus dem Versorgungsnetz

Das DC-Netz ist über einen Interlink-Konverter (ILC) mit dem AC-Versorgungsnetz verbunden. Dieser trennt das DC-Netz galvanisch vom AC-Netz und wird auf der DC-Seite als als spannungsge-

fürte Stromquelle betrieben (als Netzbildner). Als weiterer Netzbildner kann der Batteriespeicher dienen. Die Bezugsanlagen im Netz sollen unidirektional in Lastflussrichtung realisiert sein.

Frage 5.1.1: Ursachen. Nennen Sie äußere und innere Ursachen für Überstrom und Überspannung. Schätzen Sie deren Relevanz im DC-Netz ein.

Lösung: Als wesentliche Ursache in AC-Netzen werden Einwirkungen durch Blitzeinschlag genannt (direkte Einwirkung in eine AC-Freileitung oder Induktion in einer Leitung durch ein Blitzereignis). Ein AC-Niederspannungsnetz wäre durch Transformatoren mit dem Versorgungsnetz verbunden. Die Mittelspannungsebene in AC-Netzen ist in der Regel als Kabelnetz ausgeführt und daher vor direkter Einwirkung geschützt. Allerdings können Ereignisse im übergeordneten Freileitungsnetz auf die unterlagerten Spannungsebenen verbreitet werden.

Das wäre auch für AC/DC-Wandler der Fall, die als Gleichrichter ohne galvanische Trennung arbeiten. Im Falle der DC-Station (Interlink-Konverter) ist das DC-Netz galvanisch vom AC-Netz getrennt. Man kann davon ausgehen, dass der Interlink-Konverter Einwirkungen aus dem AC-Netz absorbiert.

Generell gibt es für Überspannung und Überstrom im DC-Netz folgende Ursachen:

1. Indirekte Kopplung:

- Teile des Netzes sind elektromagnetischer Induktion von außen ausgesetzt
- Fehler werden durch das überlagerte Versorgungsnetz eingeschleppt. Dieser Fall ist im betrachteten Netz unwahrscheinlich und kann abgängig von der Bauart des Interlink-Konverters ausgeschlossen werden..

2. Quellen innerhalb des Netzes:

- Spannungsspitzen durch Schaltaktionen, z.B. Abschalten induktiver Lasten (Reaktoren), Transformatoren und elektrischer Maschinen, durch Gasentladungslampen, sowie durch Leistungsschalter, Sicherungen und Lasttrennschalter. Aus dieser Aufzählung bleiben im DC-Netz nur die Schalter valide (Reaktoren und Transformatoren gibt es keine im DC-Netz, elektrische Maschinen werden nicht direkt ans Netz angebunden, Gasentladungen ebenfalls nicht). Als Induktivität im DC-Netz verbleiben die Leitungsinduktivitäten.
- Einschaltströme von Transformatoren und Kondensatorbänken. Aus dieser Aufzählung verbleiben im DC-Netz nur die Anlagenkapazitäten.
- Überspannungen, die durch die Anlagen verursacht werden.
- Elektrostatische Ladung.

3. Nuklearer elektromagnetischer Impuls.

Somit wären näher zu untersuchen: (1) Überspannungen und Überstrom aus nicht näher bekannten Quellen, um die Effekte einzuschätzen, (2) Überspannungen und Überstrom aus Schaltaktionen im DC-Netz, (3) Einschaltströme der Anlagen, (4) Schaltaktionen an der Anlage und Einwirkungen der Anlage (wobei letztere bei reinen Bezugsanlagen begrenzt sind).

Frage 5.1.2: Überspannungen durch Schaltaktionen. Folgende Abbildung zeigt eine Netzausschnitt mit Fehlerquellen und dem Leitungsschutz. Die DC-Quelle ist hierbei über eine sehr kurze Leitung mit der Sammelschiene verbunden, was bei sammelschienennahen Fehlern zu großen Kurzschlussströmen und zur Aufladung der durchflossenen Leitungsinduktivitäten führt. Durch diese Schaltaktionen können Überspannungen entstehen. Folgende Abbildung zeigt das Netz mit dem Fehlerbild. Erläutern Sie den Ablauf. Wodurch entsteht die Überspannung? Wo wird die Überspannung gemessen?

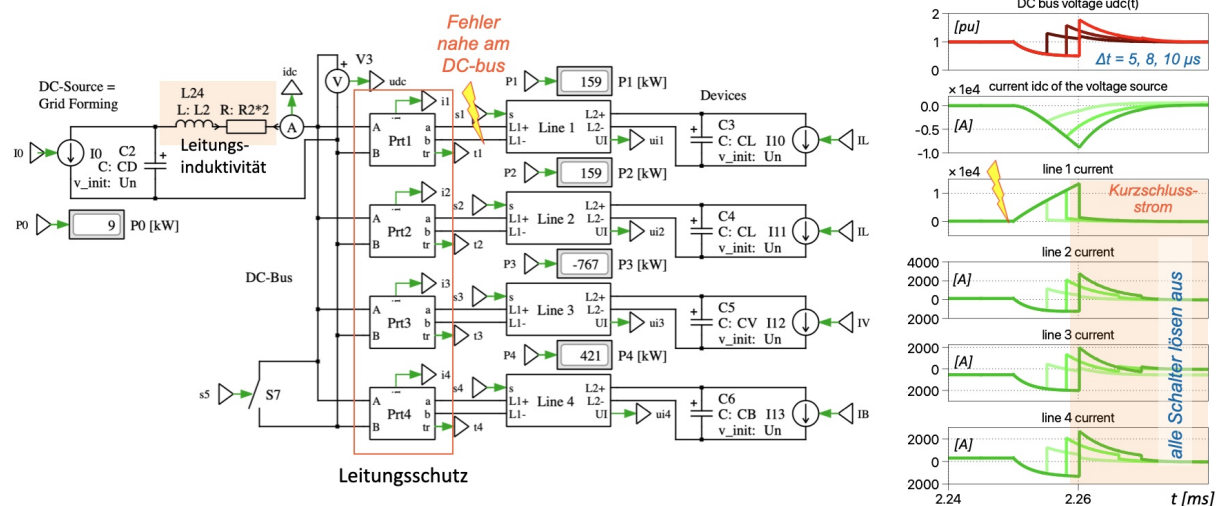


Bild 5.1.2 Netz mit Spannung und Strömen nach Schutzauslösung

Lösung: Der Fehler befindet sich in einem Leitungsabgang in der Nähe der Sammelschiene. Der Zeitverlauf zeigt einen schnell ansteigenden Fehlerstrom in Leitung 2. Der Fehler wird vorwiegend aus der DC-Quelle gespeist, die den Fehlerstrom mit umgekehrtem Vorzeichen (in Richtung zur Sammelschiene) zeigt. Bis zur Auslösung des Leitungsschutzes steigt der Fehlerstrom an. Der Zeitverlauf zeigt unterschiedliche Schaltzeiten: $\Delta t = 5 \mu s$, $8 \mu s$ und $10 \mu s$.

Der Kurzschlussstrom durchfließt die Leitungsinduktivität der DC-Quelle und kann daher nicht unterbrochen werden: An der DC-Quelle ist erkennbar, dass der Strom innerhalb von ca. $10 \mu s$ abklingt. Diesen Strom nehmen die RC-Glieder der Schalter im Leitungsschutz aller Anlagen auf. Hierdurch ergibt sich einerseits die Spannungsspitze am DC-Bus. Andererseits sind die Ströme durch die Abgänge so hoch, dass alle Schutzgeräte auslösen: Am Ende sind alle Anlagen abgeschaltet.

Die Spannung wird an der DC-Sammelschiene (am DC-Bus) gemessen. Bei Schaltvorgängen muss diese Spannung nicht mit der Spannung am Anschlusspunkt der Geräte übereinstimmen. Zwischen Anlagen und der Sammelschiene befindet sich die Anschlussleitung. Alle Anlagen besitzen Anlagenkapazitäten.

Frage 5.1.3: Anpassung des Leitungsschutzes. Welchen Einfluss haben die RC-Glieder an den Abgängen? Passen Sie die Auslegung der Schalter mit den RC-Gliedern im Leitungsschutz so an, dass Überspannungen möglichst vermieden werden.

Lösung: Die RC-Glieder nehmen den Strom der Leitungsinduktivität beim Schalten auf. Am stromdurchflossenen Widerstand entsteht hierbei eine Spannung. Da die primären RC-Glieder des Leitungsschutzes direkt an die Sammelschiene angeschlossen sind entspricht diese Spannung der Sammelschienenspannung.

Die RC-Glieder lassen sich wie folgt auslegen: Die Induktivität der etwa 2 m langen Anschlussleitung der DCStation beträgt $L_{DC} = 0,6 \mu H$. Setzt man eine Kapazität des RC-Gliedes von $C_{RC1} = 30 \mu F$ voraus, so berechnet sich für den aperiodischen Grenzfall

$$R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$

der Widerstand $R_{1DC} = 0,3 \Omega$. Ein Strom von 1 kA an diesem Widerstand verursacht eine Spannungserhöhung um 300 V, bezogen auf eine Betriebsspannung von $U_n = 1440 V$ also 0,21 pu. In der Schaltung kann sich der Strom der DC-Station auf mehrere RC-Glieder an der Sammelschiene aufteilen.

Folgende Abbildung zeigt die Spannungen und Ströme gemäß dieser Auslegung. Man erkennt, dass die Spannungserhöhung gegenüber dem in der letzten Abbildung gezeigten Fall deutlich geringer ausfällt. Die Anpassung der primären RC-Glieder zeigt also Wirkung.

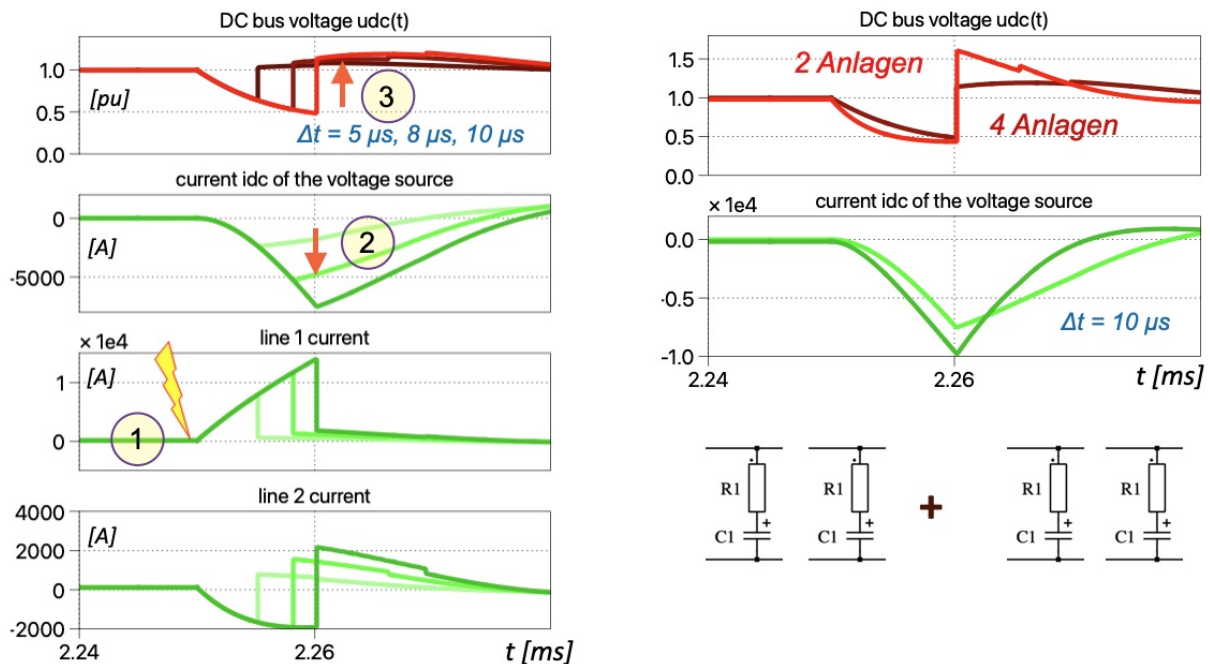


Bild 5.1.3 Anpassung der RC-Glieder im Leitungsschutz

Die Abbildung zeigt auch, dass der Effekt von der Anzahl der Abgänge an der Sammelschiene abhängt: Je weniger Abgänge, umso größer fällt er aus. Mit einem einzelnen Abgang muss ein RC-Glied den gesamten Fehlerstrom aufnehmen. Ebenso kann man natürlich die Sammelschiene mit einem solchen RC-Glied ausstatten, unabhängig von den Abgängen.

Eine Betrachtung der Fehlerenergie zeigt folgendes Bild: Die Leitungsinduktivität L_{DC} speichert bei 10 kA Strom insgesamt 30 Ws. Diese Energiemenge entspricht der Energiemenge einer Kapazität von $C_{DC1} = 30 \mu F$ in einem RC-Glied mit $U = 1400$ V Betriebsspannung.

Bemerkung: Die Fehlerströme, die die DC-Station mit Hilfe ihrer Anlagenkapazität bereitstellt, sind sehr hoch. Auch an der DC-Station wäre ggf. durch eine geeignete Beschaltung eine Begrenzung denkbar.

Frage 5.1.4: Spannungen an den Schaltern im Leitungsschutz. Es wird ein Netz mit 2 Abgängen betrachtet. Der Leitungsschutz in beiden Abgängen ist einerseits mit einem Schalter mit RC-Gliedern realisiert, andererseits mit einem Varistor über dem Schalter. Folgende Abbildung zeigt die Anordnung mit zwei Fehlerfällen: (1) Fehler nahe der Sammelschiene in Leitung 1, (2) Fehler nahe der Sammelschiene in Leitung 2. Erläutern Sie die Vorgänge. Woher kommen die relativ großen Überspannungen an den Schaltern (mehrfaches der Betriebsspannung)? Können diese Spannungen den Anlagen gefährlich werden?

Lösung: der Ablauf ist jeweils gleich: Der Fehler verursacht in der betroffenen Leitung eine sehr hohen Fehlerstrom, da in der Nähe der Sammelschiene. Der Schutz der betroffenen Leitung reagiert zuerst und schaltet die Leitung am Angang ab. Der Weg zum Fehlerort ist nun unterbrochen.

Da der Strom der DC-Quelle von der Leitungsinduktivität deren Anschlussleitung weiter getrieben wird, ergibt sich nun ein hoher Strom in der zweiten Leitung, worauf deren Leitungsschutz ebenfalls auslöst.

70/172

des Leitungsschutzes ist gar nicht mehr mit dem Ende der Leitung an der Anlage verbunden, sondern durch den Kurzschluss abgetrennt. Vom Schalter aus gesehen ist das Leitungsende am Schalter offen, die Spannung fällt über dem verbliebenen Leitungsstück zum Kurzschluss ab und sinkt folglich nach kurzer Zeit auf null.

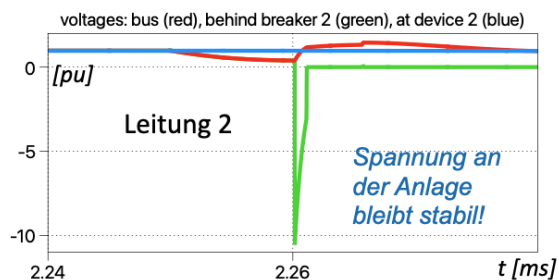
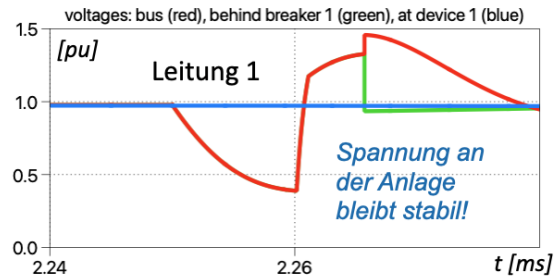
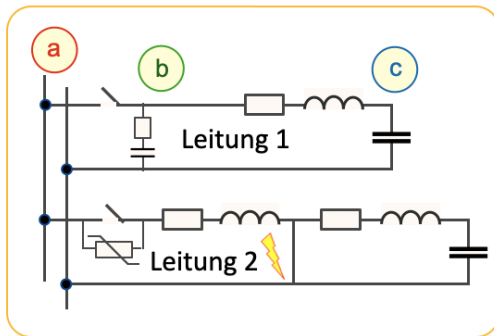


Bild 5.1.6 Ersatzschaltbild und Simulation der Fehlerfalls in Leitung 2

Leitung 1: Die Spannungen vor und nach dem Schalter an den Positionen (a) und (b) zeigen die Busspannung und die Spannung der getrennten Leitung zur Anlage. Nach der Trennung kehrt die Spannung an der Stelle (b) auf die Spannung der Anlagenkapazität zurück. Die Anlagenkapazität hält das Niveau der Spannung (c) am Ende der Leitung während der Schaltung auf konstantem Niveau.

Leitung 2: Die Spannungen vor und nach dem Schalter an den Positionen (a) und (b) zeigen die Busspannung und die Spannung der getrennten Leitung zur Anlage. Allerdings reicht das abgetrennte Leitungssegment nur bis zur Fehlerstelle. Folglich findet sich nach der Trennung und nach Abklingen der induzierten Spannung über dem Varistor hier die Spannung null. Die Anlagenspannung an der Stelle (c) bleibt trotz des Kurzschlusses im betrachteten Zeitintervall auf konstantem Niveau. Grund hierfür ist die Diode, die einen Rückfluss aus der Anlagenkapazität in den Kurzschluss verhindert.

Frage 5.1.6: Einschaltströme. Wenn man eine Anlage mit nicht vollständig aufgeladenen Anlagenkapazitäten mit dem Netz verbindet, ergeben sich hohe Einschaltströme. Die Anlagenkapazität ist über die Anschlussleitung mit der Kapazität der DC-Quelle verbunden, sowie über die weiteren Anschlussleitungen mit den Kapazitäten der übrigen Anlagen. Folgende Abbildung zeigt die Anordnung. Hierbei startet die Anlage an Leitung 2 mit halbvoller Kapazität. Erläutern Sie die Vorgänge im Netz. Untersuchen Sie die Vorgänge in der Simulation bei deaktiviertem Leitungsschutz und bei aktivem Leitungsschutz. Welche Auswirkungen ergeben sich für die Anlagen? Wie lassen sich diese Einschaltströme verhindern?

Lösung: (1) Vorgänge: Wie bei verbundenen Gefäßen finden Ausgleichsströme in Richtung der halb vollen Kapazität von Anlage 1 an Leitung 1 statt. Diese Einschaltströme sind nur durch den Widerstand der Leitung 1 begrenzt und werden daher sehr groß. Die Leitungsimpedanz begrenzt den Stromanstieg und wird durch den raschen Stromanstieg zur Resonanz mit der Anlagenkapazität angeregt. Die Ladezeit der Anlagenkapazitäten findet innerhalb einiger Millisekunden statt. Wegen der hohen Ströme muss man davon ausgehen, dass der Leitungsschutz der Leitung 1 anspricht und ggf. der Leitungsschutz weiterer Leitungen.

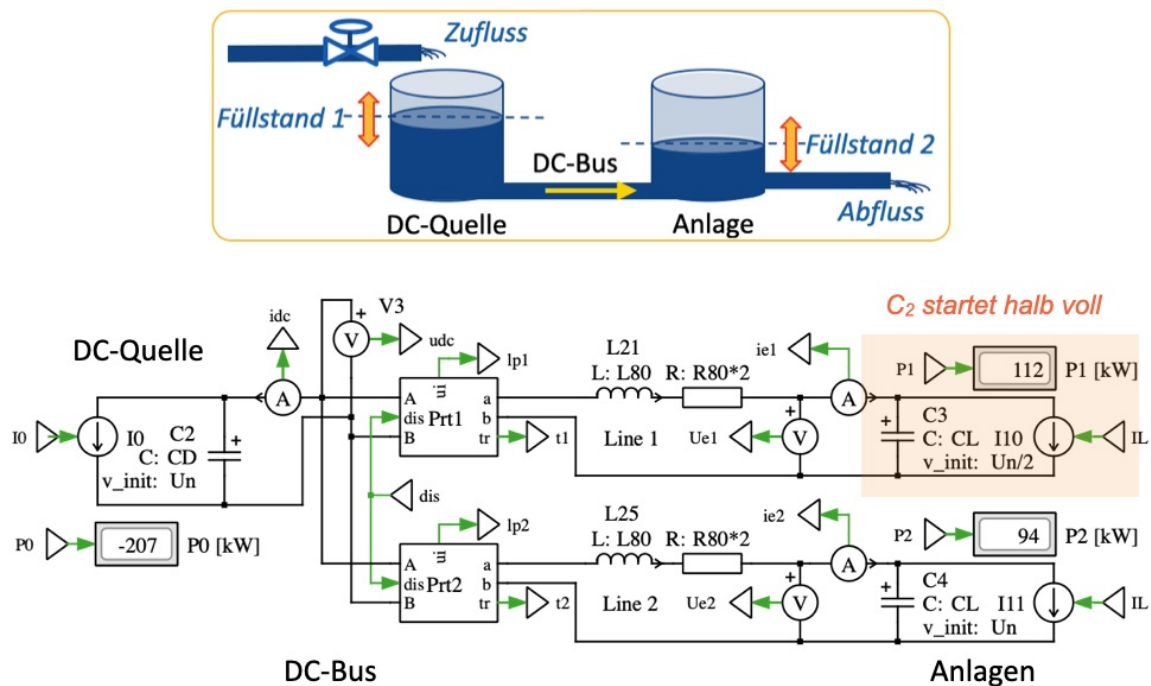


Bild 5.1.7 Netz mit Anlagenkapazitäten

(2) Untersuchung in der Simulation: Siehe folgende Abbildung. Ohne Leitungsschutz ergeben sich Einschaltströme in der Größenordnung des 20-fachen Betriebsstrom. Hierbei beträgt die Leitungslänge bis zur Anlage 80 m. Bei kürzeren Leitungen wären die Einschaltströme noch größer.

Mit etwas Zeitverzögerung ergibt sich auch ein Strombeitrag aus Leitung 2, der aus der Kapazität der dort angeschlossenen Anlage stammt. Die Einschaltströme zeigen eine deutliche Resonanz der Leitungsinduktivität mit der Anlagenkapazität. Die Kapazität der Anlage 1 wird unter diesen Bedingungen innerhalb von ca. 3 ms aufgeladen.

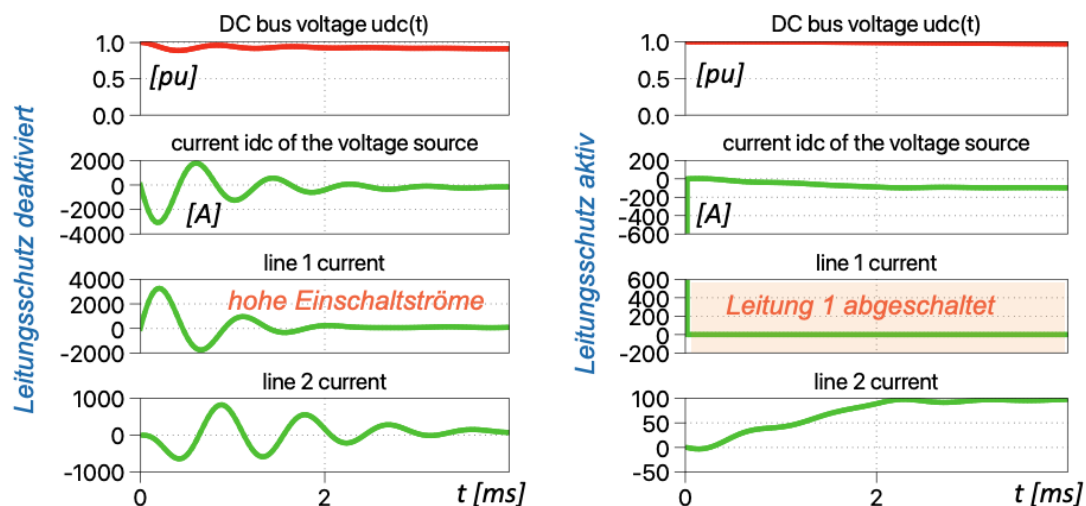


Bild 5.1.8 Einschaltströme bei nicht voll aufgeladenen Anlagenkapazitäten

Mit Leitungsschutz wird durch die hohen Einschaltströme der Anlage an Leitung 1 diese durch den Leitungsschutz abgeschaltet. Der Betrieb der Anlage an Leitung 2 geht ungestört weiter.

(3) Auswirkungen auf die Anlagen: Die Ströme betreffen die Anlagenkapazität, nicht die dahinter befindliche Anlage. Vor der Anlagenkapazität befindet sich bei einer Last eine Diode in Durchflussrichtung, sowie ggf. ein Schalter. Diode und Schalter werden durch die Einschaltströme durchflossen. Die DC-Station muss den größten Teil des Einschaltstroms aus ihrer Kapazität bereitstellen.

(4) Vermeidung der Einschaltströme: Die Einschaltströme lassen sich vermeiden, indem man die Anlagenkapazitäten vor der Aufnahme des Betriebs mit begrenzten Strömen auflädt.

Frage 5.1.7: Überstrom durch Überspannungen. Unter der Annahme, die Spannung an der DC-Sammelschiene ließe sich beliebig variieren sollen die Auswirkungen auf die Anlage nach folgendem Ersatzschaltbild untersucht werden.

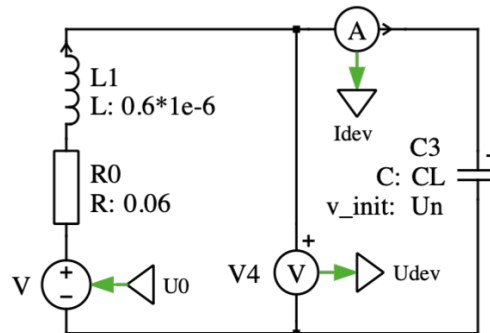


Bild 5.1.9 Ersatzschaltbild für Überspannungen und Überströme

Zwischen der idealen Spannungsquelle und der Anlage, die durch ihre Anlagenkapazität repräsentiert ist, befindet sich ein Widerstand und eine Induktivität, die etwa einer Leitungslänge von 100 m entsprechen. Die Schaltung ist bei Betriebsspannung $U_n = 1400 \text{ V}$ in Ruhe. Die Spannungsquelle erzeugt eine Überspannung von $1,5 U_n$ als Puls für eine begrenzte Zeit von $\Delta t = 10 \mu\text{s}$. Welche Auswirkungen erwarten Sie auf die Anlage (die Anlagenkapazität beträgt $C = 1 \text{ mF}$).? Wie realistisch ist die Annahme einer idealen Spannungsquelle?

Lösung: Die Induktivität begrenzt den Stromanstieg, der Widerstand die Stromamplitude. Es gelten $\Delta U = L \frac{di}{dt}$ und $\Delta U = R \Delta I$. Demnach wäre der Stromanstieg $\frac{di}{dt} = 700 \text{ V} / (0,6 \cdot 10^{-6} \text{ H}) = 1,17 \text{ kA}/\mu\text{s}$ und die maximal mögliche Stromamplitude $\Delta I = 700 \text{ V} / 0,06 \Omega = 11,7 \text{ kA}$. Innerhalb von $10 \mu\text{s}$ erreicht der Strom einen Wert von max $11,7 \text{ kA}$. Dann klingt er wieder ab.

Auswirkungen auf die Anlage: Der Strom wird von der Anlagenkapazität aufgenommen. Es gilt näherungsweise $\Delta U_c = \Delta I \Delta t / C = 11,7 \text{ kA} \cdot 10 \mu\text{s} / 1 \text{ mF} = 117 \text{ V} = 0,08 U_n$. Es sollte sich eine Spannungsüberhöhung von weniger als 10% ergeben,

Realistische Annahmen: In der Praxis ist die DC-Quelle keine ideale Spannungsquelle, sondern eine spannungsgeführte Stromquelle mit einer Quellenkapazität von einigen Milli-Farad. Auch auf sonstige Spannungsquellen = Störquellen am Bus haben die Quellenkapazität und Anlagenkapazitäten einen Einfluss. Allerdings verursachen Spannungsüberhöhungen große Ströme in die Kapazitäten.

Frage 5.1.8: Überstrom durch Überspannungen. Untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation. Wie lässt sich der Einfluss von Überspannung und Überstrom zusammenfassen?

Lösung: Siehe folgende Abbildung.

Man erkennt, dass sich gemäß der Erwartungen aus der vorausgegangenen Aufgabe aus dem Spannungspuls ein Stromimpuls folgt, den die Anlagenkapazität aufnimmt. Die Charakteristik entspricht grob der gängigen Plusform 6 kA bei $8/20 \mu\text{s}$, womit eine Anstiegszeit von $8 \mu\text{s}$ gemeint ist, und eine Impulsdauer von ca $20 \mu\text{s}$ (gemessen bei halber Stromamplitude).

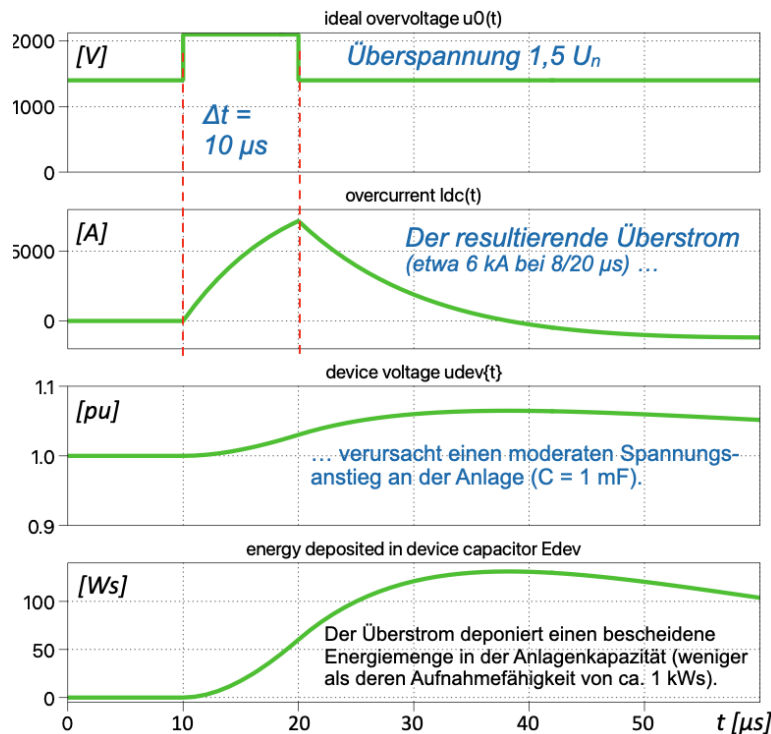


Bild 5.1.10 Simulationslauf zur Schaltung aus der vorherigen Aufgabe

Der Stromimpuls wird von der Anlagenkapazität C aufgenommen. Mit dem Wert von $C = 1 \text{ mF}$ beträgt die Überhöhung der Kondensatorspannung weniger als 10%. Trotz der hohen Amplitude beträgt die Energie des Stromimpulses weniger als 100 Ws. Die Kapazität speichert bei Betriebsspannung ca. 1 kWs. Für Anlagen mit Kapazitäten sind Stromimpulse dieser Größe somit keine Herausforderung.

Zusammenfassung zum Thema Überspannung und Überstrom: Unabhängig von realistischen Quellen für Spannungen an den Anlagen wird folgende Regel vereinbart.



Dimensionierungsregel: Überspannungen
Anlagen am Netz sollten folgenden Überspannungen standhalten: (1) $1,5 U_n$ für eine Dauer von $10 \mu s$, (2) $1,2 U_n$ für eine Dauer von 1 s und (3) $1,15 U_n$ für eine Dauer von bis zu 10 Minuten.

Die praktischen Konsequenzen dieser Anforderung sind: Überspannungen oberhalb $1,5 U_n$ müssen durch eine geeignete Schutzbeschaltung (z.B. Varistoren) abgewehrt werden. Die Schaltung der Anlage muss für die genannten Spannungsniveaus und die genannten Zeiten ausgelegt werden. Davon abgesehen werden die Anlagenkapazitäten für eine stabile Spannung sorgen und Stromimpulse aufnehmen.

Insgesamt zeigt die Untersuchung, dass die Auswirkungen durch Überspannungen und Überströme auf die Anlagen begrenzt sind:

- Direkte und indirekte Einwirkung durch Blitzeinschlag im übergeordneten AC-Versorgungsnetz werden, abhängig von der Bauart des Interlink-Konverters, von diesem absorbiert und sollten sich nicht ins DC-Netz ausbreiten.
- Für Schaltvorgänge kritische Betriebsmittel wie Transformatoren, Reaktoren und direkt angeschlossene Motoren finden sich im DC-Netz nicht.

- Es verbleiben somit als Ursache für Überspannungen Schaltvorgänge des Leitungsschutzes, die, abhängig von der Bauweise des Schalters, wegen der Leitungsinduktivitäten mit Überspannung verbunden sein können. Überspannungen auf der Sekundärseite der Schalter müssen sich jedoch nicht auf die Anlage übertragen: Dort hält die Anlagenkapazität die Spannung stabil.
- Einschaltströme, die sich bei unvollständig aufgeladenen Anlagenkapazitäten ergeben, können den Leitungsschutz auslösen. Bevor eine Anlage den Betrieb am Netz aufnimmt, müssen Anlagenkapazitäten daher mit begrenzten Strömen aufgeladen werden.
- Überspannungen am DC-Bus führen ebenfalls zu hohen Einschaltströmen. Um auf der sicheren Seite zu bleiben, sollen Anlagen den in der Auslegungsregel genannten Überspannungen für die genannten Zeiträume standhalten.

5.2. Unterspannung und Flicker

Unterspannungen und Flicker (schnelle periodische Spannungseinbrüche, die in AC-Netzen durch Flackern der Beleuchtung wahrgenommen werden können), führen in einem DC-Netz zu massiven Ausgleichsströmen und somit zu Resonanzen zwischen den Anlagenkapazitäten und den leitungsinduktivitäten der Anschlüsse.

Frage 5.2.1: Folgende Abbildung illustriert den Zusammenhang an verbundenen Gefäßen. Welchen Einfluss erwarten Sie auf die Anlage, wenn am DC-Bus die Spannung wie im unteren Teil der Abbildung dargestellt variiert?

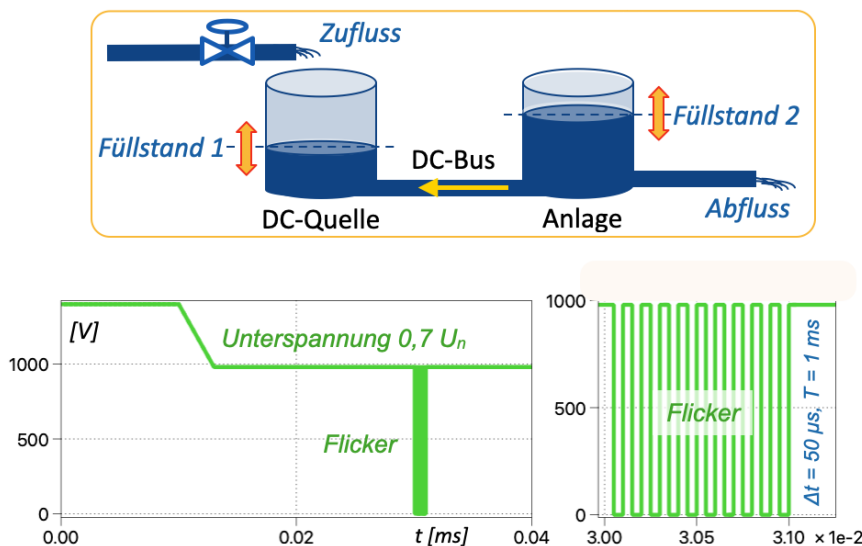


Bild 5.2.1 Anordnung und Signale zur Illustration der Auswirkungen von Unterspannung

Lösung: Eine Unterspannung führt zum Abfließen von Ladungen aus der Anlagenkapazität zum Netz. Der Fall ist umgekehrt zu den Einschaltströmen bei nicht vollständig geladener Anlagenkapazität. Die Entladeströme werden nur durch den Widerstand der Anschlussleitung begrenzt, der Stromanstieg durch die leitungsinduktivität. Kurze Stromanstiegszeiten führen zur Resonanz zwischen Leitungsinduktivität und Anlagenkapazität und hierdurch auch zu Überspannungen.

Das Flicker-Ereignis im Beispiel besteht aus periodischen Aussetzern der Busspannung im Intervall von $50 \mu s$ über eine Dauer von $1 ms$. Da der Strom in den kurzen Intervallen durch die Leitungsinduktivität kein signifikantes Niveau erreichen kann, wirkt dieses Ereignis wie ein Spannungsausfall über die gesamte Periodendauer von $1 ms$, und somit wie eine komplette Abschaltung mit darauffolgendem Einschaltvorgang. Es sollten sich erhebliche Schwankungen von Strom und Spannung ergeben.

Frage 5.2.2: Schutz der Anlage durch eine Diode im Strompfad. Folgende Abbildung zeigt eine elektrische Ersatzschaltung mit einer idealen Spannungsquelle am DC-Bus, die die Unterspannung generiert, einer Leitung, und der Anlage, repräsentiert durch ihre Anlagenkapazität, sowie einer Schutzbeschaltung. Erläutern Sie Funktion der Schutzbeschaltung? Hat die Schutzbeschaltung einen Einfluss auf den laufenden Betrieb?

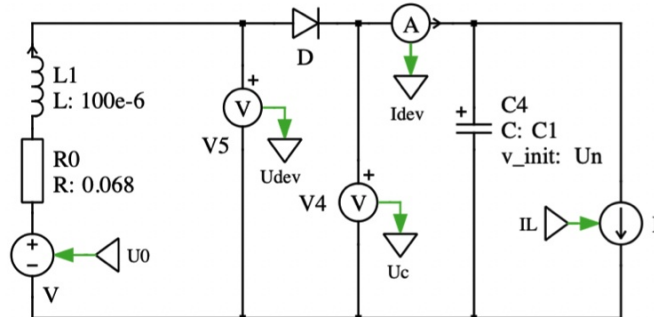


Bild 5.2.2 Elektrische Ersatzschaltung mit Schutzbeschaltung der Anlage

Lösung: Eine Diode verhindert den Rückfluss aus der Anlagenkapazität ins Netz. Hierdurch bleibt die Ladung der Anlagenkapazität bei Unterspannung an der DC-Sammelschiene erhalten. Auf den laufenden Betrieb sollte die Schaltung keinen Einfluss haben: Die Anlagenkapazität wird bei Unterspannung durch den Anlagenstrom bis auf ein Niveau entleert, bei dem die Anlagenspannung die Spannung am Bus unterschreitet, dann kann wieder Strom aus dem Netz in die Anlage nachfließen.

Das Aussetzen des Stroms aus dem Netz bei Unterspannung ist im Betrieb unter Last gefolgt von der sprunghaftigen Wiederaufnahme des Stroms aus dem Netz, wenn die Anlagenkapazität durch den Laststrom unter das Niveau der Netzspannung entladen ist. Der sprunghafte Stromanstieg bis zur Höhe des Laststromes (= Nennstromes) führt ebenfalls zur Anregung der Resonanz zwischen Leitungsinduktivität und Anlagenkapazität und somit zu Schwankungen von Strom und Spannung.

Frage 5.2.3: Simulation. Untersuchen Sie die Wirksamkeit des Schutzes in der Simulation. Für die Leitung soll hierbei der schlechteste Fall angenommen werden. Die Schaltung soll unter Lastbedingungen getestet werden.

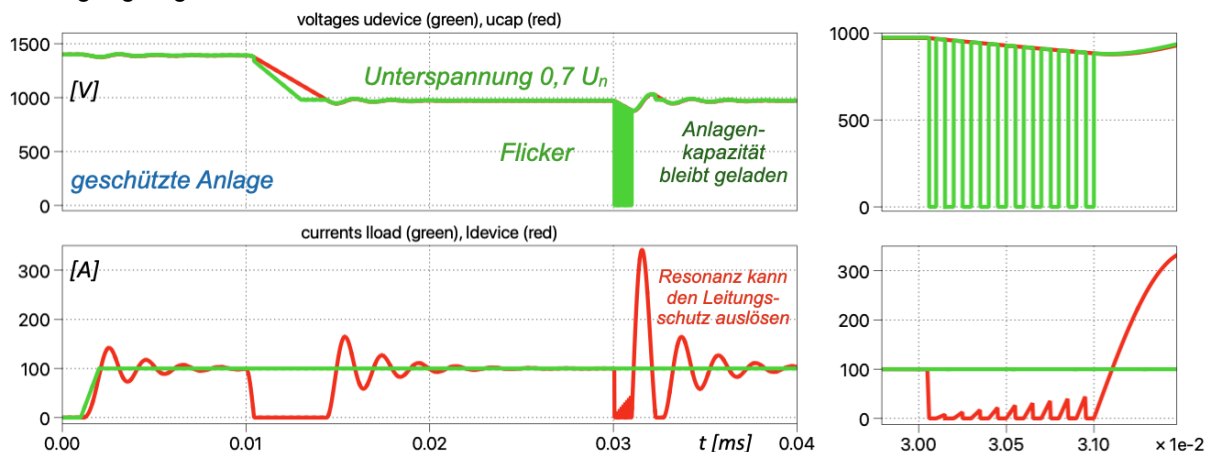


Bild 5.2.3 Simulationslauf zur Wirksamkeit des Schutzes

Lösung: Siehe Abbildung oben. Für die Leitung wurde als ungünstigster Fall eine Induktivität von $L = 100 \mu\text{H}$ angenommen, entsprechend eine Länge von über 100 m. Der Schutz der Anlage durch die Diode zur Sperrung des Rücklaufs aus der Bezugsanlage erweist sich als einfach und effektiv: (1) Unterspannungen lassen sich mit bescheidenen Stromschwankungen bewältigen, die Anlagenkapazität

bleibt geladen. Das Spannungsniveau der Anlagenkapazität folgt durch den Laststrom der Spannung im Netz. (2) Während des Flicker-Ereignis bleibt die Anlagenkapazität ebenfalls geladen. Durch den vollständigen Spannungseinbruch während der Dauer von 1 ms fällt die Anregung der Resonanz allerdings größer aus: Der Strom übersteigt das Niveau des doppelten Nennstroms. Hierdurch kann der Leitungsschutz auslösen.

Bei der angenommenen Leitungsinduktivität handelt es sich um den ungünstigsten Fall. Bei kürzeren Anschlussleitungen fällt der Effekt deutlich geringer aus.

Frage 5.2.4: Ungeschützte Anlage. Untersuchen Sie in der Simulation, wie sich eine ungeschützte Anlage verhalten würde. Was wären die Konsequenzen?

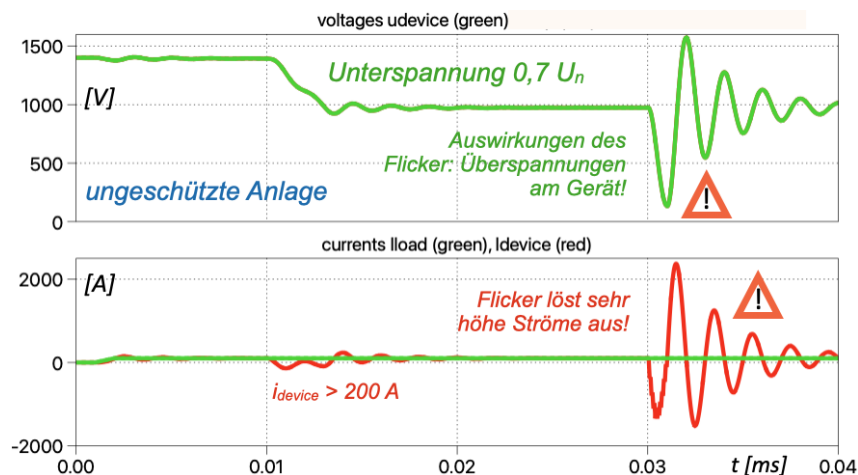


Bild 5.2.4 Simulation einer ungeschützten Anlage zum Vergleich

Lösung: Siehe Abbildung oben. Die Schaltung ist identisch zu der oben dargestellten: Nur die Diode wurde überbrückt. Der allmähliche Spannungsabfall auf das Niveau der Unterspannung von $0,7 U_n$ löst nun Stromschwankungen aus, die das Niveau des doppelten Nennstroms überschreiten.

Problematisch ist die Flicker.-Periode: An der Spannung erkennt man, dass die Anlagenkapazität durch die großen Stromschwankungen nun vollständig entladen wird. Die Stromschwankungen übersteigen den 20-fachen Wert des Nennstroms und führen zu Überspannungen größer als $1,5 U_n$.

5.3. Schalter an der Bezugsanlage

Um die Anlage mit dem Netz zu verbunden und bei Bedarf zu trennen, wird ein Schalter am Anschaltspunkt eingeführt. Folgende Abbildung zeigt die Ersatzschaltung der Anlage mit Schalter.

Damit der Schalter schnell reagieren kann, ist er als Halbleiterschalter ausgeführt. Beim Abschalten unter Last wird der Stromkreis der Leitungsinduktivität unterbrochen. Aus diesem Grund befindet sich vor dem Schalter ein RC-Glied, das den Strom aus der Leitungsinduktivität bei Schalten aufnehmen kann.

Die Diode zur Verhinderung des Rückflusses aus der Anlagenkapazität bei Unterspannung bleibt erhalten. Der Schalter übernimmt diese Funktion nicht. Sondern bleibt bei normalem Betrieb geschlossen und somit ebenfalls im Strompfad. Ein Auslösen des Schalters trennt die Anlage am Anschaltspunkt vom Netz.

Eine Sicherung im Strompfad hätte die gleiche Funktion: Bei Überlastung der Anlage (durch einen Fehler in der Anlage) würde diese vom Netz getrennt. Schalter und Sicherung zum Schutz der Anlage schließen einander nicht aus.

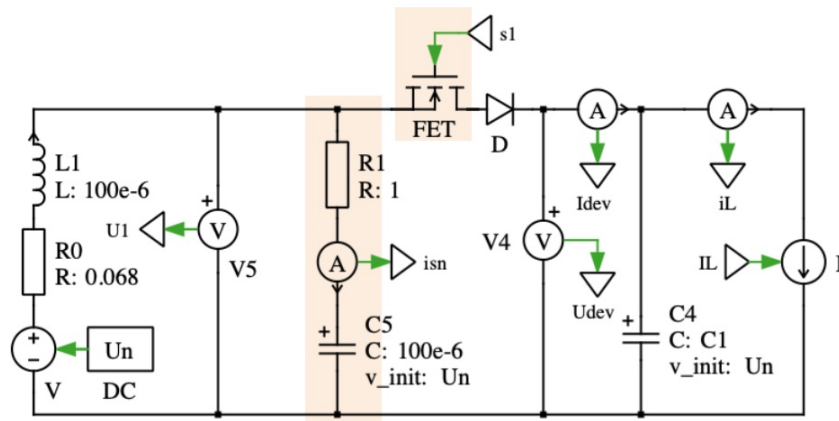


Bild 5.3.1 Ersatzschaltung der Bezugsanlage mit Schalter

Frage 5.3.1: Simulation. Untersuchen Sie die Funktion des Schalters in der Simulation, indem Sie den Schalter unter Last auslösen und hierbei auch den Laststrom auf Null setzen (andernfalls würde durch diesen die Anlagenkapazität entleert). Wodurch kommt die Spannungsüberhöhung beim Abschalten zustande?

Lösung: Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf.

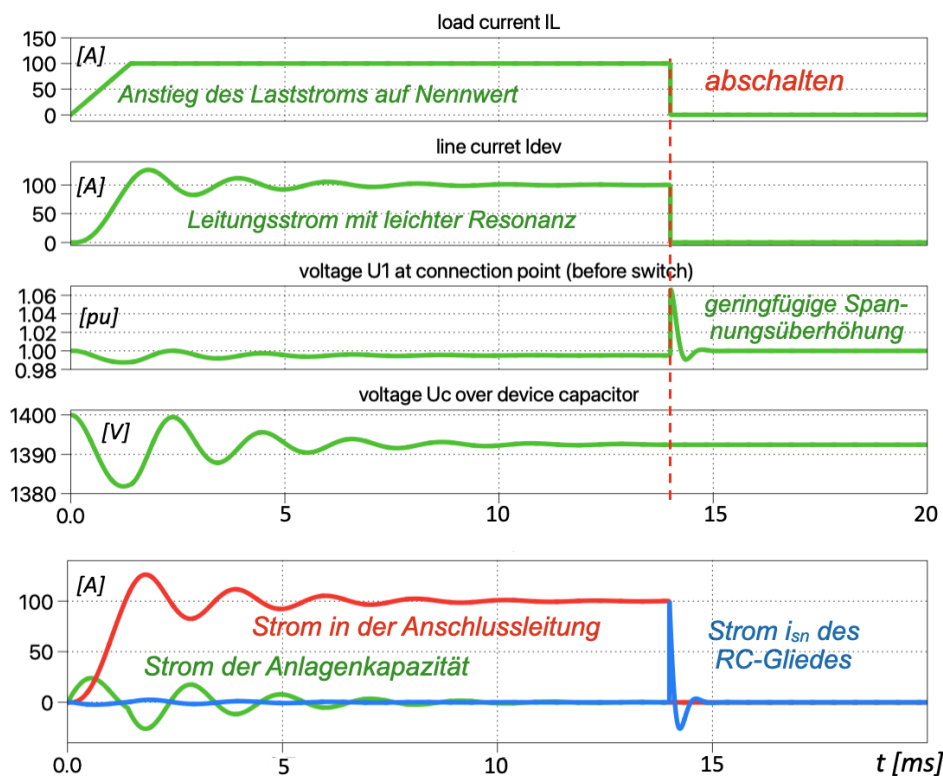


Bild 5.3.2 Abschalten der Anlage vom Netz unter Last

Man erkennt, dass die Abschaltung funktioniert und sich durch das Trennen des Stromkreises eine leichte Spannungsspitze im Bereich 6% ergibt. Die Betrachtung der Ströme in unteren Teil der Abbildung zeigt, dass das RC-Glied den Strom der Induktivität auf der Anschlussleitung übernimmt.

Die leichte Spannungsüberhöhung beim Abschalten kommt durch den Strom des RC-Gliedes zustande: Am Widerstand erzeugt der Strom einen Spannungsabfall, der sich zur Kondensatorspannung (= Betriebsspannung) addiert.

Frage 5.3.2: Auslegung des RC-Gliedes. Wie wäre das RC-Glied auszulegen, damit sich bei Abschaltung unter Nennstrom eine definierte Spannungsüberhöhung ergibt? Welche Energie besitzt die Leitungsinduktivität bei Nennstrom? Welche Energie kann die Kapazität im RC-Glied aufnehmen?

Lösung: Als Laststrom wird der Nennstrom der Bezugsanlage angenommen: $I_L = I_{Ln}$. Beim Abschalten über nimmt der Widerstand R des RC-Glieds diesen Strom. Folglich ergibt sich eine Spannungsüberhöhung der Größe

$$\hat{u} = R I_{Ln} \quad (5.3.1)$$

Bei einer Vorgabe der Spannungsüberhöhung ergibt sich hieraus der Wert für den Widerstand des RC-Gliedes. Beispiel: $\hat{u} < 0,2 U_n \Rightarrow R < 2,8 \Omega$ bei einem Strom von $I_{Ln} = 100 \text{ A}$ und bei Betriebsspannung $U_n = 1400 \text{ V}$.

Der Wert der Kapazität ergibt sich aus der Bedingung für den aperiodischen Grenzfall des Schwingkreises aus Leitungsinduktivität L und Kapazität C des RC-Gliedes

$$R = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5.3.2)$$

Für eine Leitungsinduktivität von $L = 100 \mu\text{H}$ ergibt sich für den oben berechneten Wert für den Widerstand R eine Kapazität von $C \approx 50 \mu\text{F}$.

Für die Energiemengen ergibt sich gemäß

$$E_L = \frac{1}{2} L \cdot I^2, \quad E_C = \frac{1}{2} C \cdot U^2$$

folgendes Bild: $E_L = 0,5 \text{ Ws}$, $E_C = 50 \text{ Ws}$. Die Kapazität des RC-Gliedes ist somit bei Nennstrom überdimensioniert. Sie könnte die Energie des 10-fachen Nennstroms aufnehmen. Für kleinere Kapazitäten verlässt man entweder der aperiodischen Grenzfall oder man mit größeren Widerständen R größere Spannungsüberhöhungen hinnehmen. Vermutlich würde man eher den Widerstand verkleinern um die Spannungsspitzen beim Schalten zu verringern.

Die Leitungsinduktivität wurde hierbei als ungünstigster Fall mit ihrem Maximalwert berücksichtigt. Kleinere Leitungsinduktivitäten haben keinen Einfluss auf die Größe der Spannungsüberhöhung (siehe Gleichung 5.3.1).

Frage 5.3.3: Simulation mit optimiertem RC-Glied. Untersuchen Sie die Funktion in der Simulation.

Lösung: Siehe folgende Abbildung.

Die Schaltung zeigt das gewünschte Verhalten: Die Spannungsspitze beträgt $1,2 U_n$, die Übernahme der Energie aus der Induktivität in das RC-Glied erfolgt aperiodisch gedämpft.

Im unteren Teil der Abbildung wurde die Leitungsinduktivität im Bereich von $0,3 \mu\text{H}$ (etwa 1 m Länge) bis $100 \mu\text{H}$ (mehr als 100 m Länge) variiert. Die größte Herausforderung stellt erwartungsgemäß die größte Leitungsinduktivität dar.

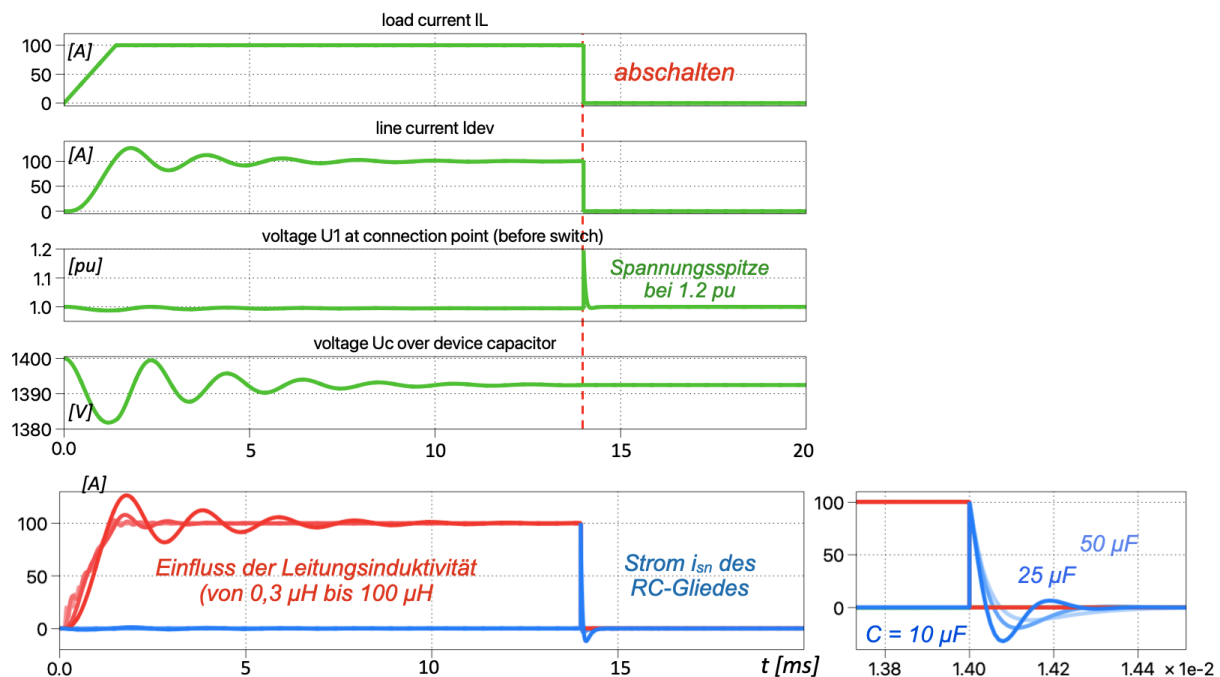


Bild 5.3.3 Abschalten der Anlage unter Last mit angepasstem RC-Glied

Der rechte Teil der Abbildung zeigt, dass sich die Kapazität des RC-Gliedes auch verkleinern lässt ohne nennenswerten Einfluss auf das Einschwingverhalten. In diesem Fall blieb die Leitungsinduktivität auf ihrem Maximalwert von 100 μH .

Frage 5.3.4: Könnte der Schalter die Funktion der Diode übernehmen? Wie wäre der Schalter in diesem Fall zu bedienen?.

Lösung: Grundsätzlich ja. In diesem Fall wäre der Schalter in Abhängigkeit der Lastflussrichtung zu bedienen und nach einem Nulldurchgang des Stroms in die negative Richtung zu öffnen.

5.4. Fehlerstromerkennung

Die Fehlerstromerkennung ist für Anlagen von Bedeutung, für die Maßnahmen zum Berührungsschutz vorgesehen sind. Sie funktioniert auf die gleiche Weise wie in einem AC-Netz in TN-S Netzform, mit dem Unterschied, dass das DC-Netz nur über zwei Leiter verfügt (statt drei bei AC).

Frage 5.4.1: Folgende Abbildung zeigt die elektrische Ersatzschaltung einer Anlage mit der Fehlerstromerkennung. Netz und Anschlussleitung sind wiederum als Spannungsquelle mit Leitungsinduktivität und Leitungswiderstand wiedergegeben, die Anlage durch ihre Anlagenkapazität. Der Fehler wird durch einen Schalter realisiert. Beschreiben Sie die Ersatzschaltung und die Funktionsweise der Fehlerstromerkennung.

Lösung: Das Netz ist symmetrische und bipolar in der Form TN-S ausgeführt: Es gibt zwei Leiter L+ und L-, sowie den am Sternpunkt geerdeten Schutzleiter PE. Der Neutralleiter M wird nicht mitgeführt, da nur Anlagen vorgesehen sind, die zwischen L+ und L- betrieben werden.

Die Summe der Ströme durch die Leiter {L+, L-} sollte zu jedem Zeitpunkt null ergeben. Andernfalls fließt ein Fehlerstrom an den Leitern vorbei zum Sternpunkt. In der Ersatzschaltung wird dieser Fehlerstrom mit Hilfe des Widerstands R_k gegen den Schutzleiter erzeugt. Diese Methode entspricht der Testfunktion bei FI-Schaltern (Fehlerstrom-Schutzschaltern).

Die Überschreitung einer vorgegebenen Schwelle für die Summe der Ströme führt zur Auslösung des Schutzschalters. Der Schutzschalter ist in der Ersatzschaltung nicht realisiert.

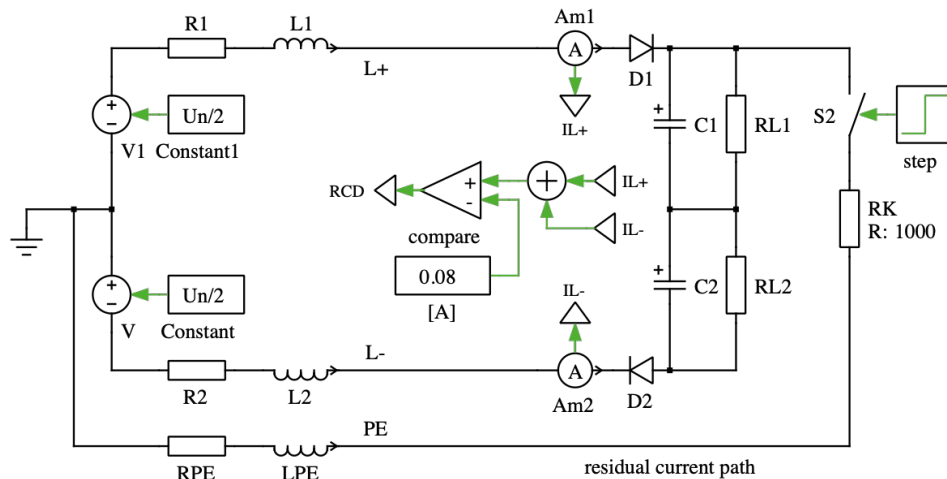


Bild 5.4.1 Ersatzschaltung der Anlage mit Fehlerstromerkennung

Wegen der Anlagenkapazitäten genügt die Trennung der Anlage vom Netz im Fehlerfall nicht: über die aufgeladenen Kapazitäten besteht weiterhin Gefahr. Im Fehlerfall muss daher auch die Anlagenkapazität entladen werden.

Frage 5.4.2: Simulation. Überprüfen Sie die Funktion der Fehlerstromerkennung in der Simulation.

Lösung: Siehe folgende Abbildung.

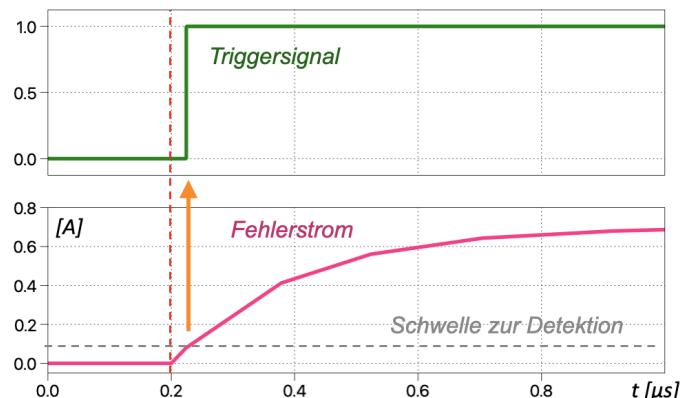


Bild 5.4.2 Erkennung von Fehlerströmen

Man erkennt, dass der Schalter einen Fehlerstrom verursacht, der bis zu einem Wert $U_n/(2 R_K)$ ansteigt. Nach Überschreiten einer Schwelle (hier 80 mA) erzeugt der Komparator das Triggersignal zur Schutzauslösung. Die Behandlung der Fehlerströme führt zu folgender Auslegungsregel.



Dimensionierungsregel: Fehlerströme
Sofern Maßnahmen zum Berührungsschutz gefordert sind, sollten Anlagen in der Lage sein, Fehlerströme oberhalb von 80 mA zu erkennen und innerhalb von 2,5 ms abzuschalten.

Frage 5.4.3: Interpretieren Sie die oben genannte Dimensionierungsregel vor dem in der Abbildung dargestellten Strom-Zeit-Diagramm mit den Grenzen für Fehlerströme.

Lösung: Das Strom-Zeit-Diagramm stellt dar, welche Ströme über welche Dauer ungefährlich bzw. lebensgefährlich wirken. Kleinere Ströme lassen sich über längere Zeiten ertragen

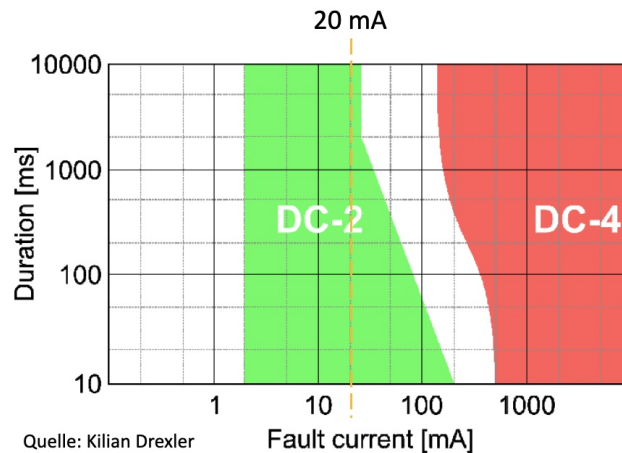


Bild 5.4.3 Strom-Zeit-Diagramm für Fehlerströme

Bekannt ist der Wert 20 mA, der auf Dauer als ungefährlich gilt. Für größere Ströme ist die Dauer begrenzt. Welche Gefahr durch eine Berührung durch Anlagenteile besteht, die sich durch Isolationsfehler auf dem Potenzial der Betriebsspannung befinden, lässt sich wie folgt abschätzen.

Nimmt man als Körperwiderstand $R_K = 1 \text{ k}\Omega$ an, so fließt bei Berührung eines der beiden Leiter der Strom $I_K = 700 \text{ V} / 1 \text{ k}\Omega = 700 \text{ mA}$. Dieser Strom liegt immer oberhalb des unbedenklichen Bereichs und wird ab einer Dauer $> 200 \text{ ms}$ lebensgefährlich. Es wäre eine Abschaltung innerhalb von 100 ms zu fordern. Gemessen am Diagramm ist die oben genannte Auslegungsregel streng.

Frage 5.4.4: Zusammenfassung. Wie lassen sich die Ergebnisse zum Thema Schutz von Bezugsanlagen zusammenfassen?

Lösung: (1) Ursachen von Überspannungen und Überströmen: Aus dem überlagerten Versorgungsnetz eingeschleppte Fehler, wie beispielsweise die Blitzeinwirkung, werden abhängig von der Bauweise des Interlink-Konverters von diesem absorbiert.

Als interne Ursache für Überspannungen verbleiben Schaltvorgänge im Netz an Transformatoren, Reaktoren, elektrischen Maschinen oder Gasentladungslampen. In einem Gleichspannungsnetz gibt es solche Anlagen nicht. Elektrische Maschinen sind nicht direkt ans Netz angeschlossen. Als Ursache für Überspannungen durch Schalthandlungen verbleiben die Leitungsinduktivitäten.

Unabhängig von den Ursachen werden für Anlagen am Netz Überspannungen spezifiziert, der die Anlage für eine vorgegebene Zeit standhalten muss. Überspannungen erzeugen an den Anlagenkapazitäten hohe Ströme. Das gilt auch für Einschaltströme bei der Verbindung von Anlagen mit nicht vollständig aufgeladenen Anlagenkapazitäten mit dem Netz. Anlagenkapazitäten müssen daher vor dem Betrieb der Anlage am Netz mit begrenzten Strömen vorgeladen werden.

(2) Auswirkungen von Unterspannung und Flicker: Unterspannungen im Netz erzeugen erhebliche Ausgleichsströme aus den Anlagenkapazitäten ins Netz. Bei raschen Spannungsänderungen ergeben sich Resonanzen der Leitungsinduktivität mit der Anlagenkapazität. Für Bezugsanlagen lässt sich die Auswirkungen von Unterspannungen einfach und effektiv mit Hilfe einer Diode im Strompfad lösen.

(3) Anschalten und Abschalten einer Anlage am Netz: Schalten am Anschaltort der Anlage unter Last ist mit der Unterbrechung des Stromkreises der Leitungsinduktivität verbunden. Die Schalter müssen einen geeigneten Kommutierungspfad für den Strom vorsehen. Grundsätzlich halten die Anlagenkapazitäten die Spannung der Anlage stabil.

6. Schutzbeschaltung für Einspeisung und bidirektionalen Lastfluss

Abschnitt 6 folgt der gleichen Logik wie Abschnitt 5. Allerdings stehen hier Anlagen zur Einspeisung und bidirektionale Anlagen im Vordergrund. Die Lastflussrichtung geht ins Netz bzw. kann in beiden Richtungen erfolgen. Daher unterscheiden sich die Effekte und die Schutzmaßnahmen von reinen Bezugsanlagen.

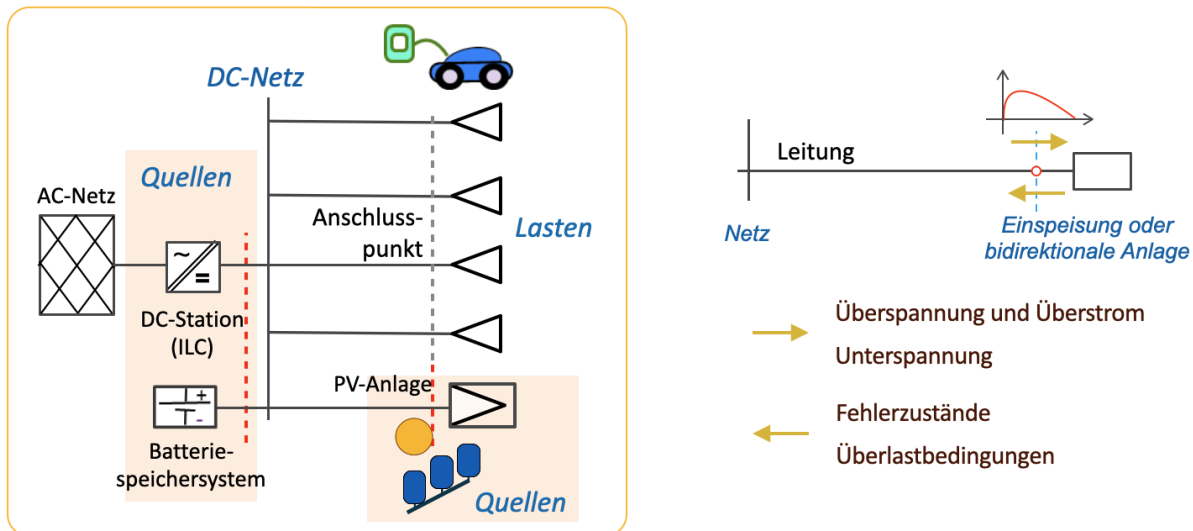


Bild 6.1. Quellen als Einspeiseanlagen oder bidirektionale Anlagen

Grundsätzlich bleiben die Anforderungen an die Anlagen bzgl. Einwirkungen aus dem Netz und Rückwirkung zum Netz gleich. Daher wird auch die Gliederung des Abschnitts beibehalten; es werden die Unterschiede dargestellt. Wegen der geänderten Lastflussrichtung greifen einfache Maßnahmen wie Schutzdioden bei reinen Lasten nicht mehr. Hier muss an den Anlagen geschaltet werden. Bei Trennung der Anlage vom Netz kann die Spannung der Anlagenkapazität von der Spannung am Anschlusspunkt abweichen, was weitere Maßnahmen zur Synchronisation der Spannung an der Anlagenkapazität erfordert.

6.1. Überspannung und Überstrom

Frage 6.1.1: Welche Ursachen gibt es für Überspannung und Überstrom. Gibt es Unterschiede zum Betrieb von Bezugsanlagen?

Lösung: Die Ursachen sind die gleichen wie bei Bezugsanlagen (siehe Abschnitt 5.1). Hierzu gehört die direkte beziehungsweise indirekte Einkopplung von Blitzereignissen im übergeordneten Versorgungsnetz, abhängig von den Eigenschaften des Netzes und der DC-Station (Interlink-Konverter). Als Quellen einer Überspannung im DC-Netz kommen Spannungsspitzen durch Schaltereignisse der Schutzbeschaltung oder Sicherungen in Frage. Eine wesentliche Quelle für Überströme sind Einschaltströme durch ein Ungleichgewicht der Spannungen an den Anlagenkapazitäten mit der Spannung im Netz. Als weitere Quelle für Überspannungen kommen die DC-Quellen und Anlagen in Frage.

Frage 6.1.2: Welche Auswirkungen durch Überspannung und Überstrom ergeben sich für Einspeiseanlagen und bidirektionale Anlagen?

Lösung: Die Auswirkungen für Einspeiseanlagen unterscheiden sich nicht von Lasten. Überspannung führt zu einem Ungleichgewicht der Spannungen und somit zu hohen Einschaltströmen. Auch Schaltereignisse im Netz (z.B. durch den Leitungsschutz) können zu Überspannungen führen, wobei sich

bei Fehlerereignissen die Spannungen an den Schaltern nicht zur Anlage fortpflanzen müssen. Einschaltströme lassen sich grundsätzlich von den Anlagenkapazitäten aufnehmen.

Spannungsschwankungen und Stromschwankungen führen zu Resonanzen zwischen der Leitungseinduktivität und der Anlagenkapazität. Anlagen sollten grundsätzlich erst mit vollständig aufgeladenen Anlagenkapazitäten mit dem Netz verbunden werden. Für Einspeiseanlagen gelten die gleichen Auslegungsregeln wie für Bezugsanlagen.

6.2. Unterspannung und Flicker

Wie bei Bezugsanlagen führen Unterspannung und Flicker zu einem massiven Rückfluss an Strom aus der Anlagenkapazität. Bei Einspeiseanlagen ist das zugleich die Lastflussrichtung, daher ist ein einfacher Schutz durch eine Diode als Rückflusssperre nicht möglich.

Frage 6.2.1: Funktionsprinzip und Testsignal. Erläutern Sie den Effekt, der durch Unterspannungen und Flicker erzeugt wird an der Abbildung und dem Testsignal unten.

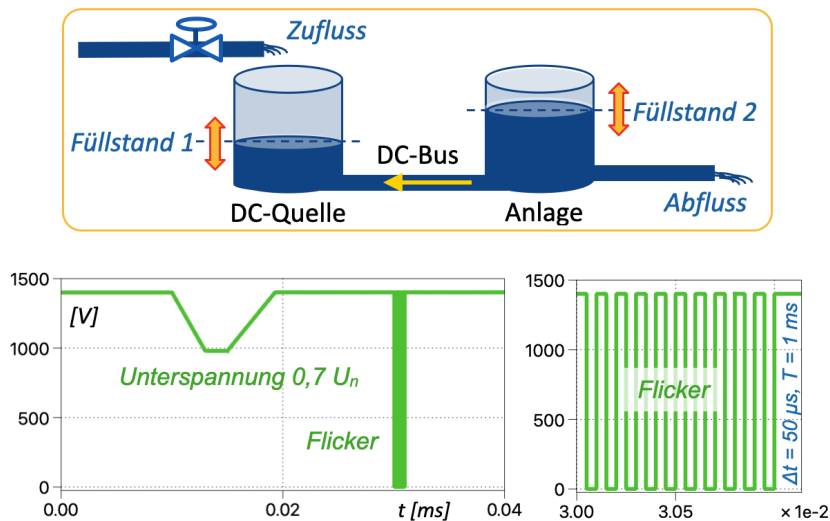


Bild 6.2.1. Unterspannung und Flicker

Lösung: Das Ungleichgewicht der Spannungen führt zu hohen Ausgleichsströmen. Der steile Stromanstieg lädt die Leitungseinduktivität auf, es ergibt sich eine Resonanz mit der Anlagenkapazität. Flicker eliminiert die Spannung am DC-Bus völlig und triggert auf diese Weise besonders hohe Ströme, die zum Ansprechen des Leitungsschutzes führen.

Frage 6.2.2: Schutzkonzept. Zum Schutz der Anlage wird folgende Schaltung vorgeschlagen. Erläutern Sie das Funktionsprinzip.

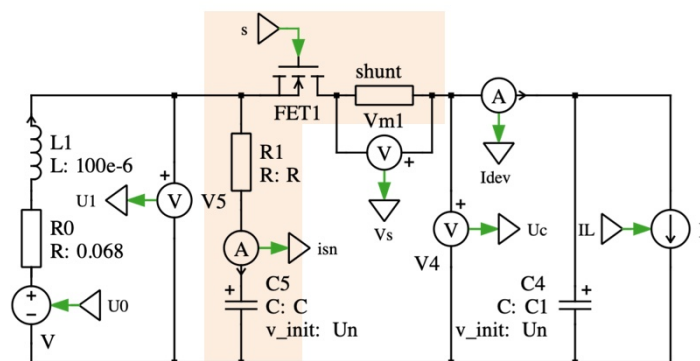


Bild 6.2.2 Gerät mit Anlagenschutz

Lösung: Ein Schalter trennt die Anlage vom Netz, wenn bei Unterspannung und Flicker ein Rückfluss auftritt. Hierbei wird als schlechtester Fall eine maximale Leitungsinduktivität von $L = 100 \mu\text{H}$ angenommen, was einer Leitungslänge von wenigstens 100 m entspricht. Durch den Rückfluss wird die Leitungsinduktivität aufgeladen und es kommt zu Resonanzen mit der Anlagenkapazität. Bei der Trennung stellt ein RC-Glied einen Kommutierungspfad für den Strom der Leitungsinduktivität bereit.

Die Anlage wird hierbei mit Bemessungsstrom betrieben. Wird die Anlage vom Netz getrennt, würde der Bemessungsstrom zu einer Aufladung der Anlagenkapazität führen. Bei einer Trennung vom Netz ist daher auch der Anlagenstrom zu unterbrechen. Bei einer Trennung vom Netz wird die Spannung an der Anlagenkapazität von der Netzspannung abweichen.

Frage 6.2.3: Simulationslauf. Überprüfen Sie die Wirksamkeit des Schutzes in der Simulation.

Lösung: Siehe folgende Abbildung.

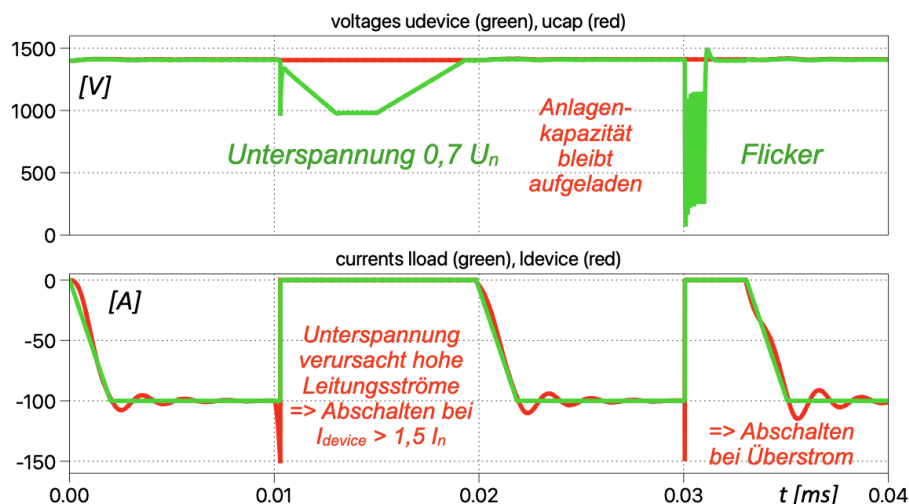


Bild 6.2.3. Geschützte Einspeiseanlage

Unterspannung und Flicker führen zu großen Strömen am Anschlusspunkt der Anlage durch die Entladung der Anlagenkapazität. Der Schalter trennt die Anlage bei Überstrom vom Netz (im Beispiel beim 1.5-fachen des Bemessungsstroms). Hierdurch bleibt die Anlagenkapazität geladen.

Allerdings muss der Laststrom bei der Trennung ebenfalls ausgesetzt werden. Bei der erneuten Verbindung der Anlage mit dem Netz sollte der Laststrom langsam ansteigen, gemäß der Auslegungsregel für den Stromanstieg.



Dimensionierungsregel: Flicker

Alle Anlagen (Bezugsanlagen, Einspeiseanlagen und bidirektionale Anlagen) in den Zonen 3 und 4 sollten Flicker-Einwirkungen (d.h. periodische Spannungseinbrüche) über mindestens 50 μs überstehen.



Dimensionierungsregel: Unterspannung

Einspeiseanlagen und DC-Quellen sollten in der Lage sein, bei Unterspannungen bis mindestens 0,92 U_n zu arbeiten. Spannungsquellen für die Notversorgung sollten bis zu einer Spannung von 0,72 U_n am Netz bleiben.

Dass der Anlagenschutz auf Weise funktioniert, zeigt sich an einem Simulationslauf mit einer ungeschützten Einspeiseanlage in nachfolgender Abbildung. Die Schaltung ist identisch mit der in Abbildung 6.2.2, allerdings wird der Schalter nicht ausgelöst.

Man erkennt, dass die Unterspannung hohe Ausgleichsströme verursacht, abhängig von der Steilheit des Spannungsabfalls $\Delta U/\Delta t$. In Resonanz mit der Leistungsinduktivität und der Anlagenkapazität entstehen extrem hohe Ströme, die die Anlagenkapazität entladen und zu Überspannungen führen.

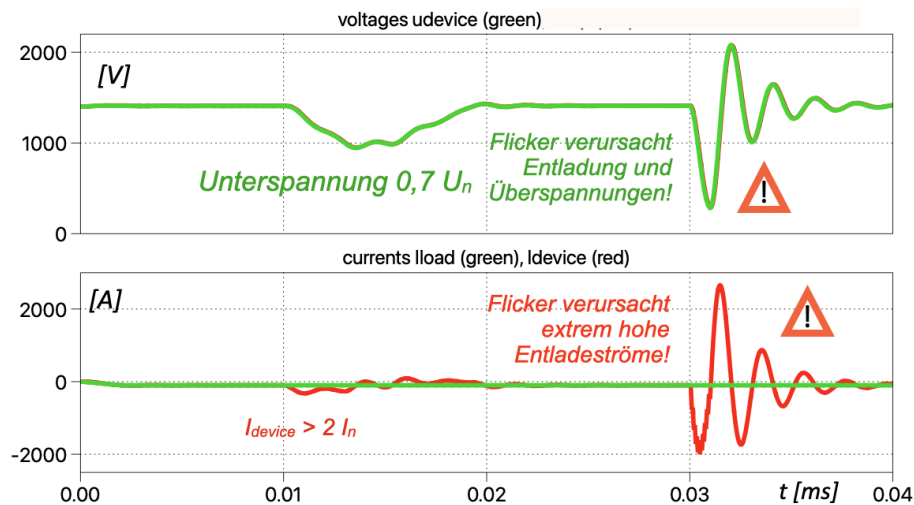


Bild 6.2.4. Auswirkungen an einer ungeschützten Einspeiseanlage

Die Auswirkungen des langsameren Spannungsabfalls auf $0,7 U_n$ fallen vergleichsweise gering aus. Dennoch würde bereits auf den hierdurch verursachten Ausgleichsstrom der Leitungsschutz reagieren, wenn er den doppelten Bemessungsstrom als Schwellwert besitzt.

Frage 6.2.4: Auslösung des Anlagenschutzes. Nach welchen Kriterien löst der Anlagenschutz aus?

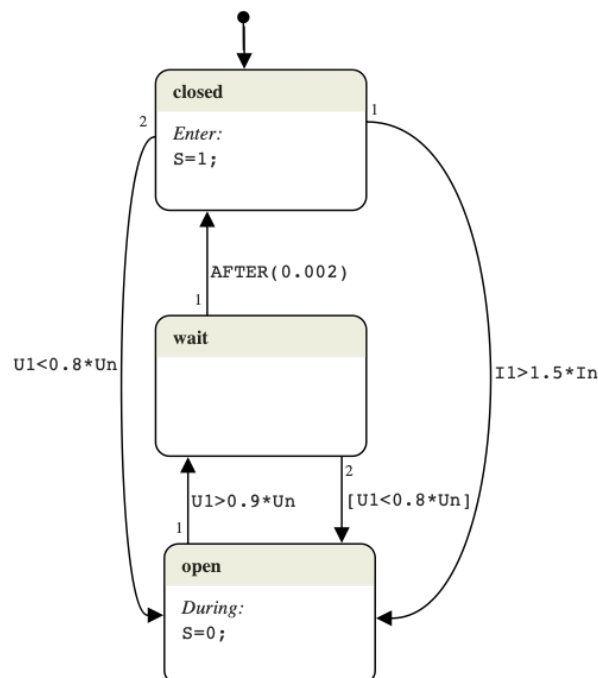
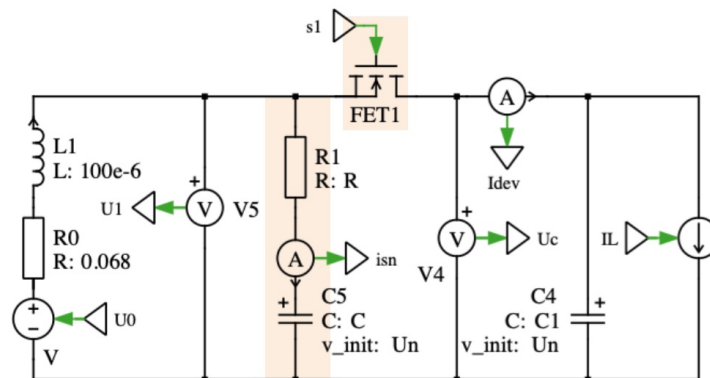


Bild 6.2.5. Auslösung des Anlagenschutzes

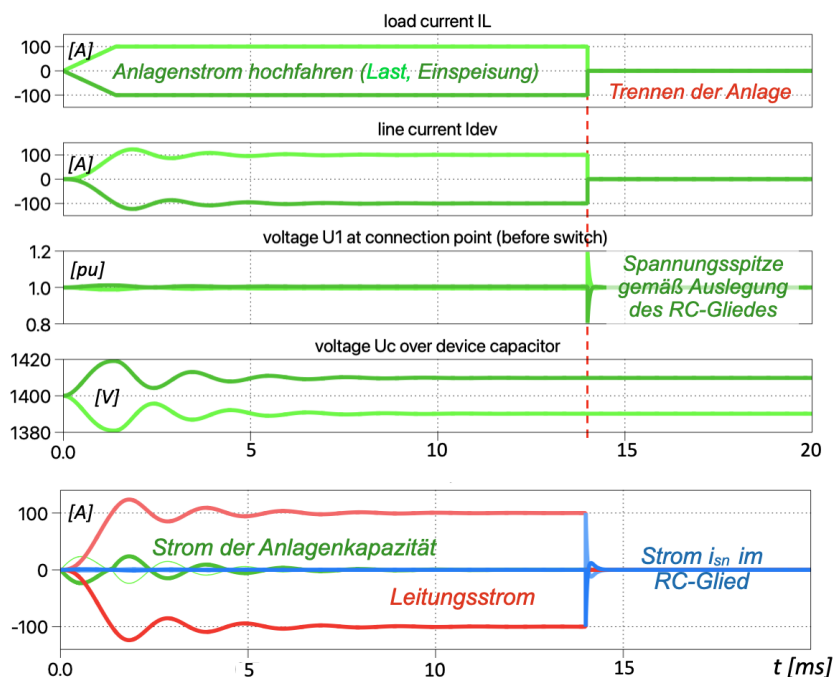
Lösung: Nach dem in der Abbildung dargestellten Zustandsautomaten löst der Anlagenschutz aus, wenn die Spannung unterhalb den in der Auslegungsregel genannten Wert von $0,8 U_n$ fällt (entsprechend $0,82 U_n$ mit einer Hysterese von $0,02 U_n$), bzw. wenn der Strom den Bemessungsstrom um

Der Schalter hat keine Auswirkungen auf den Anlagenstrom. Dieser muss bei Auslösung des Schalters ebenfalls abgeschaltet werden und darf nach der Verbindung mit dem Netz mit begrenztem Stromanstieg wieder auf den gewünschten Wert steigen. Außerdem muss vor dem Zuschalten ans Netz die Anlagenkapazität auf das Niveau der Netzspannung aufgeladen werden. Für diese Anforderungen sind unabhängig vom Anlagenschutz gesonderte Maßnahmen zu treffen.

Zum Schutz der Anlage wird ein Halbleiterschalter direkt am Anschlusspunkt platziert. Der Schalter trennt die Anlage bei Bedarf vom Netz. Zur Implementierung des Schalters gehört die Bereitstellung eines Kommutierungspfades für den Strom der Leitungsinduktivität mit Hilfe eines RC-Gliedes. Der Schalter funktioniert für Bezugsanlagen, Einspeiseanlagen und bidirektionalen Lastfluss.



Frage 6.3.1: Trennen der Anlage im normalen Betrieb. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf mit einer Bezugsanlage und Einspeiseanlage. Erläutern Sie die Vorgänge in der Schaltung.



87/172

Lösung: Die Trennung der Anlage funktioniert ohne Probleme, unabhängig von der Lastflussrichtung. Der Betriebsstrom führt zur Aufladung der Leitungsinduktivität. Beim Abschalten entstehen am Anschaltpunkt der Anlage Spannungsspitzen, deren Höhe durch die Auslegung des RC-Gliedes eingestellt werden kann (siehe Abschnitt 5.3.2).

Die Spannungsspitzen hängen ab von der Stromrichtung: Beim Kommutieren des Stroms aus der Leitungsinduktivität entstehen diese am Widerstand R des RC-Gliedes. Die Darstellung unten im Bild zeigt, dass der Strom beim Abschalten in das RC-Glied geleitet wird. Abhängig vom Bemessungsstrom lässt sich der Widerstand passend auslegen. Die Größe der Kapazität C des RC-Gliedes richtet sich nach dem aperiodischen Grenzfall der Resonanz der Kapazität C mit der Leitungsinduktivität L .

Die Anlagenkapazität spielt bei der Trennung keine Rolle: Im eingeschwungenen Betriebszustand fließt kein Strom durch die Anlagenkapazität. Davon abgesehen lässt sich der Strom einer Kapazität immer unterbrechen. Die Energie bleibt hierbei in Form der Ladung des Kondensators erhalten.

Frage 6.3.2: Zuschalten der Anlagen im Betrieb. Während die Trennung der Anlage ohne Probleme erfolgt, erweist sich das Zuschalten nach folgendem Simulationslauf als problematisch. Worin besteht das Problem und wie lässt es sich beheben?

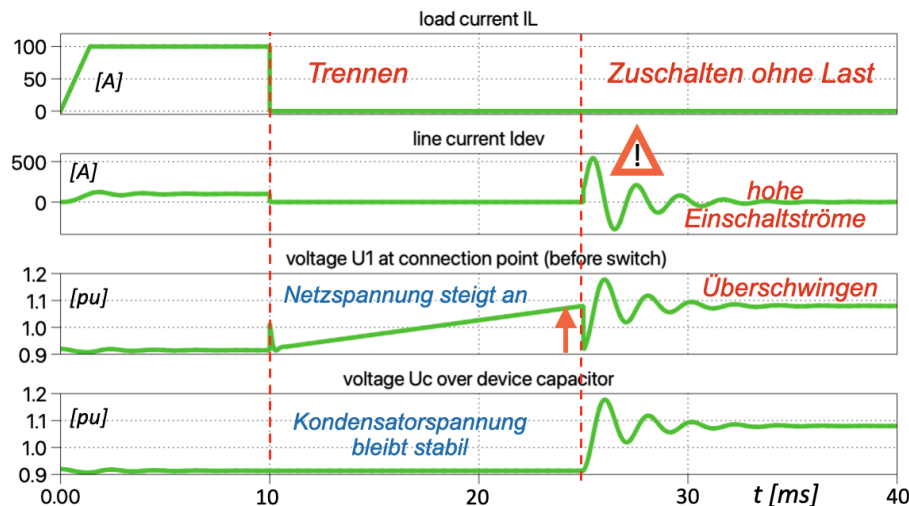


Bild 6.3.3. Probleme beim Zuschalten ans Netz

Lösung: Das Problem besteht darin, dass nach dem Trennen der Anlage die Spannung über der Anlagenkapazität von der im Netz innerhalb des Betriebsreiches variable Spannung abweicht. Beim Zuschalten ergibt sich im Beispiel ein hoher Einschaltstrom in den Anlagenkondensator. In umgekehrter Richtung wäre der Effekt vergleichbar.

Vor dem Zuschalten der Anlagen ans Netz muss die Anlagenkapazität auf das Niveau der Netzspannung geladen werden. Bei einer Last kann das durch eine Begrenzung des Ladestroms aus dem Netz mit Hilfe eines geeigneten Vorschaltgerätes gelöst werden. Bei einer Einspeisung steht die Stromquelle der Anlage zur Ladung der Anlagenkapazität zur Verfügung. Folgende Abbildung zeigt den Verlauf für das Trennen und Zuschalten einer Einspeiseanlage.

Während der Trennung ist die Anlagenkapazität nicht mit dem Netz verbunden. Allerdings wird die Spannung am Anschaltpunkt vor dem Schalter gemessen (siehe Bild 6.3.1) und steht der Anlage als Messwert zur Verfügung. Im dargestellten Verlauf wurde dieser Messwert als Sollwert einer Spannungsregelung für den Anlagenstrom verwendet: Die Spannung der Anlagenkapazität folgt nun der Spannung im Netz.

Durch diese Anpassung kann die Anlage wieder mit dem Netz verbunden werden, ohne dass nennenswerte Ausgleichsströme fließen. Die Trennung und das Zuschalten sind nun ohne Probleme möglich.

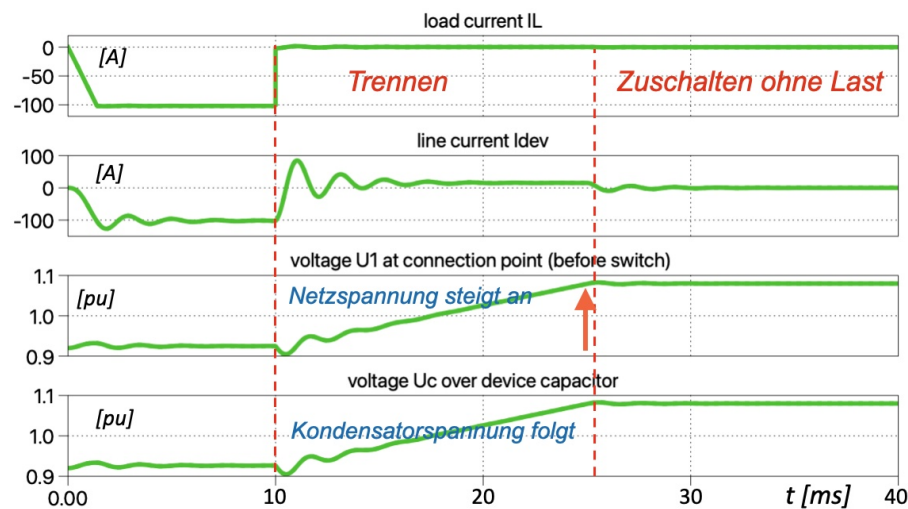


Bild 6.3.4. Zuschalten der Anlage ohne Probleme

Frage 6.3.3: Erzwingen eines unidirektionalen Lastflusses. Durch den Schalter soll das Verhalten einer Diode in Lastflussrichtung für eine Bezugsanlage und für eine Einspeisung nachgebildet werden. Folgende Abbildung zeigt die Zustandsautomaten. Wie beurteilen Sie den Nutzen dieser Lösung für Bezugsanlagen und für Einspeiseanlagen?

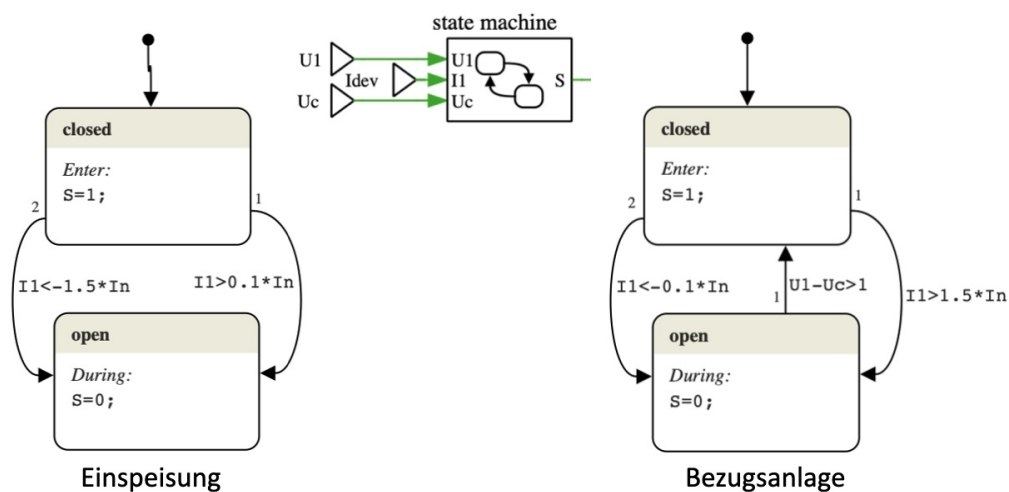


Bild 6.3.5. Zustandsautomaten für unidirektionalen Lastfluss

Lösung: Man erkennt am Zustandsautomaten, dass für die Bezugsanlage das Verhalten einer Diode in Durchlassrichtung (d.h. oberhalb einer Durchlassspannung von $U_1 - U_c > 1$) und in Sperrrichtung ($I_1 < -0,1 I_n$) nachgebildet wird. Gesperrt wird außerdem bei Überstrom in Durchlassrichtung ($I_1 > 1,5 I_n$). Diese Maßnahmen sollten grundsätzlich funktionieren, da die Kondensatorspannung U_c bis auf 1 V der Spannung U_1 am Anschlusspunkt folgt,

Für Bezugsanlagen ist der Nutzen gering. Zwar erfolgt auch hier eine Trennung bei Strömen entgegen der Lastflussrichtung ($I_1 > 0,1 I_n$), sowie bei Überstrom ($I_1 < -1,5 I_n$). Allerdings kann in Lastflussrichtung die Anlagenkapazität nicht aus dem Netz nachgeladen werden. Stattdessen muss hier die Anlagenka-

pazität aus dem Anlagenstrom geladen werden, bzw. aus dem Netz mit Hilfe einer geeigneten Vorla-
deeinrichtung. Somit bleibt nur die ohnehin nötige Überstrombegrenzung.

Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf für eine Bezugsanlage, bzw. für eine bidirektionale An-
lage, die als Bezugsanlage betrieben wird.

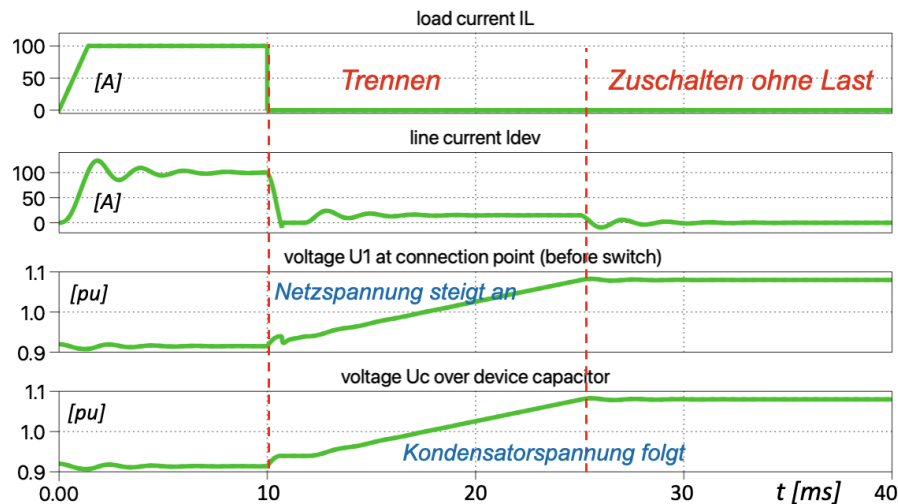


Bild 6.3.6. Emulation einer Diode durch den Schalter für Bezugsanlagen

Hier kann die Anlagenkapazität in Lastflussrichtung der Spannung am Anschlusspunkt folgen. Beim
Zuschalten ergeben sich daher keine nennenswerten Ausgleichsströme.

Frage 6.3.4: Einfluss von Leitungsfehlern auf die Anlage. Folgende Abbildung zeigt ein Netz mit zwei
Abgängen für Anlagen in einer Fehlersituation. Erläutern Sie den Einfluss des Fehlers auf die
Anlagen mit Hilfe eines elektrischen Ersatzschaltbildes.

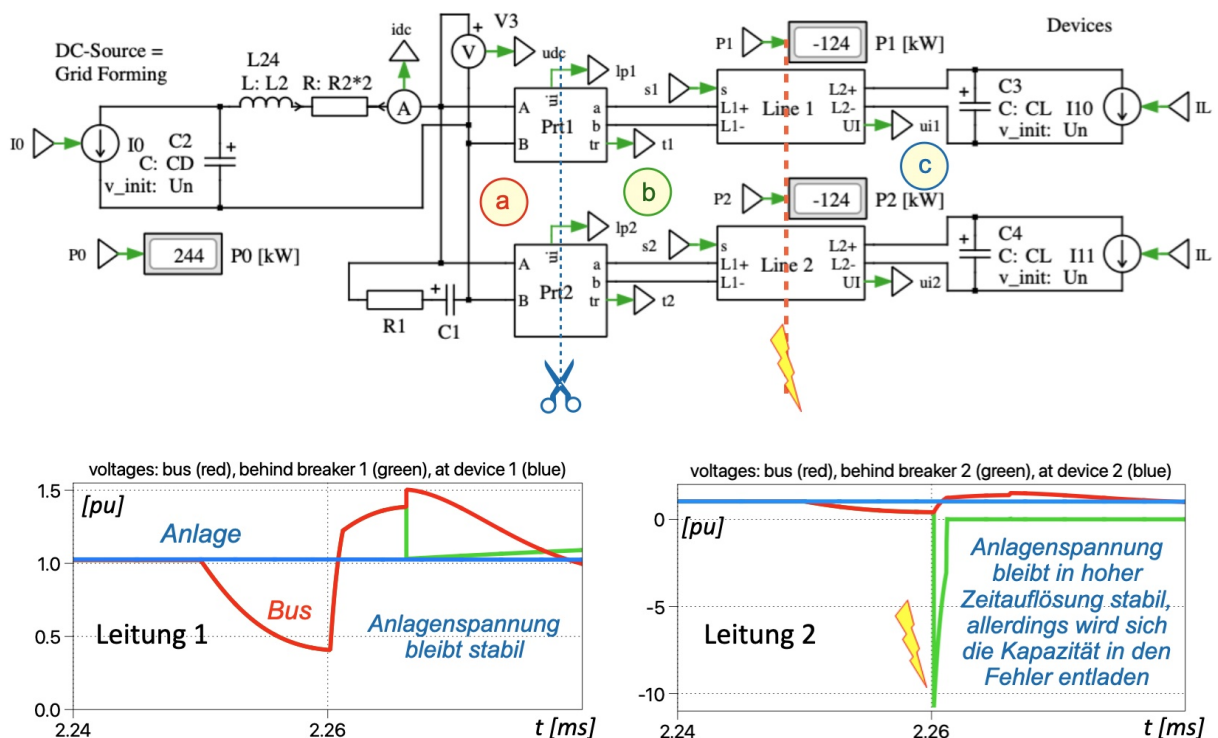


Bild 6.3.7. Netz mit Fehler in der zweiten Leitung

Lösung: Da die Fehlerströme sehr viel größer als die Betriebsströme der Anlagen ausfallen, lassen sich die Stromquellen der Anlagen in der Ersatzschaltung vernachlässigen. Der Leitungsschutz arbeitet somit unabhängig von der Lastflussrichtung für Bezugsanlagen und Erzeugungsanlagen auf die gleiche Weise. Bei einem Fehler in Leitung 2 wird der Leitungsschutz der betroffenen Leitung ansprechen und die Leitung von der DC-Sammelschiene (DC-Bus) trennen. Hierdurch ist der Fehler vom Netz isoliert, jedoch nicht von der Anlage in Leitung 2. Folgende Abbildung zeigt das elektrische Ersatzschaltbild.

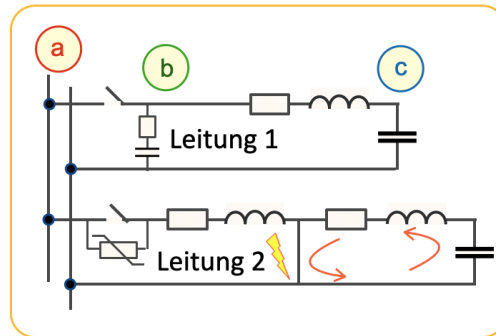


Bild 6.3.8. Elektrisches Ersatzschaltbild des Fehlers

In der zweiten Leitung bleibt die Anlage mit dem Fehler verbunden. Eine Bezugsanlage mit einer Sperre für den Rückfluss aus der Anlage bleibt geschützt. Bei einer Einspeisung wird sich die Anlagenkapazität in Lastflussrichtung in den Fehler entladen, wenn der Anlagenschutz dies nicht verhindert.

Frage 6.3.5: Folgende Anordnung zeigt Leitungsschutz und Anlagenschutz mit einem Fehlerereignis.

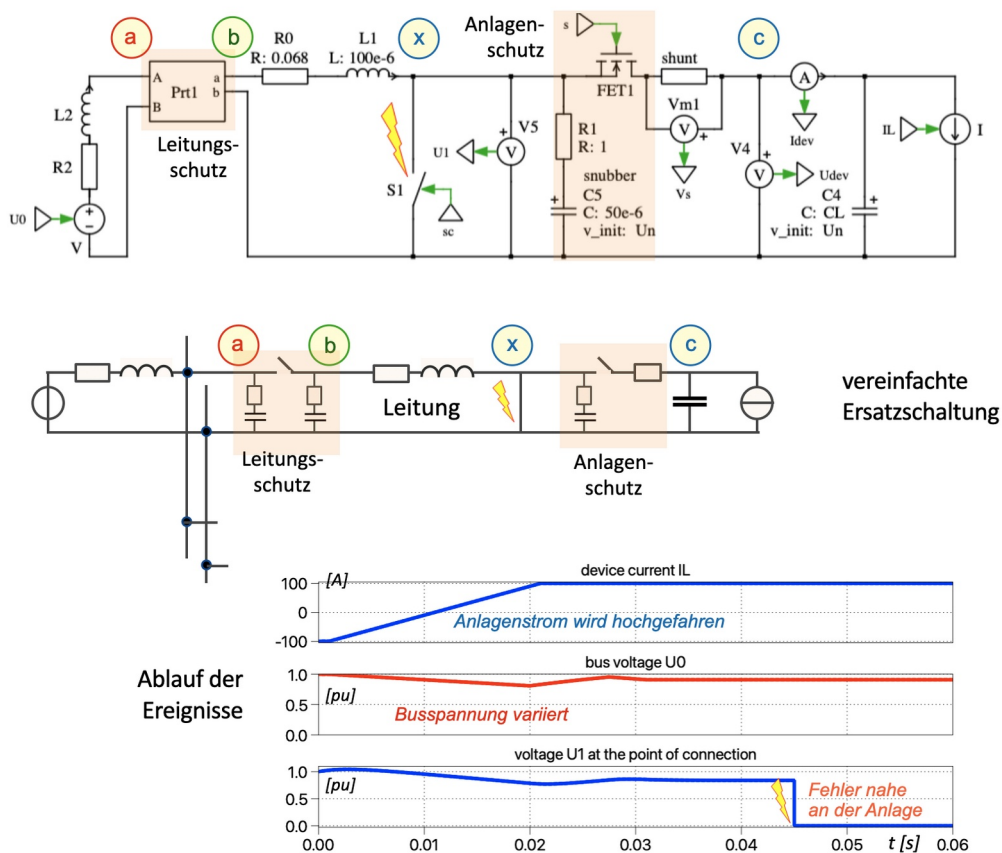


Bild 6.3.9. Zusammenwirken von Leitungsschutz und Anlagenschutz

Welche Rolle haben Leitungsschutz und Anlagenschutz an bidirektionalen Anlagen? Was geschieht bei Unterspannung, was geschieht bei einem Fehler?

Lösung: Der Leitungsschutz reagiert auf Unterspannung und Überstrom am Abgang der Anlage an der DC-Sammelschiene, beispielsweise $\{U_n/2; 2 I_n\}$. Er trennt die betroffene Leitung im Fehlerfall von der Sammelschiene, so dass der Betrieb im Netz weitergehen kann. Hierbei bleibt der Fehler auf der abgetrennten Leitung bestehen.

Der Anlagenschutz reagiert auf Unterspannung und Überstrom am Anschlusspunkt der Anlage, beispielsweise $\{0,8 U_n; 1,5 I_n\}$. Bei Unterspannung verhindert er durch die Trennung einen Rückfluss ins Netz aus der Anlagenkapazität. Er trennt die Anlage im Fehlerfall am Anschlusspunkt von der Anschlussleitung.

Frage 6.3.6: Anlagenschutz in Aktion. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf mit Leitungsschutz und Anlagenschutz. Erläutern Sie die Ereignisse im Ablauf. Wie werden Leitungsschutz und Anlagenschutz ausgelöst?

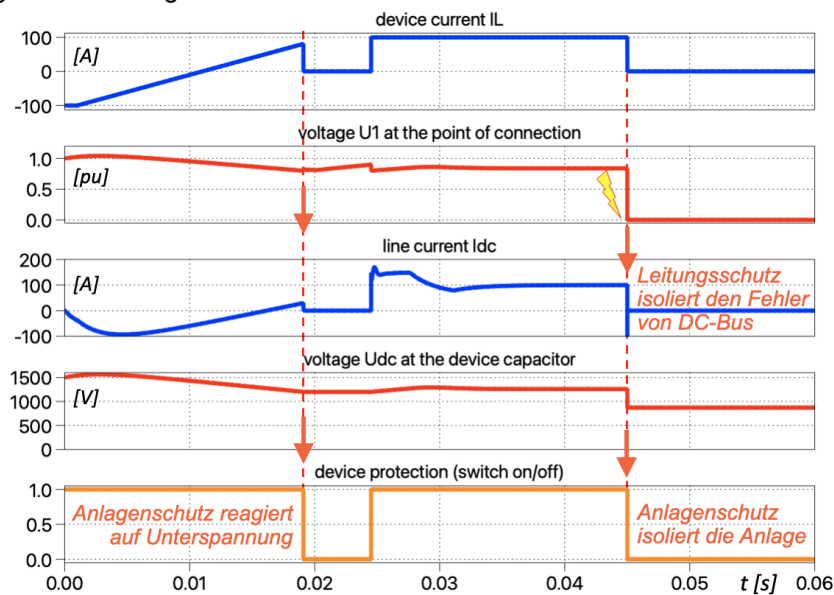


Bild 6.3.10. Betrieb mit Leitungsschutz und Anlagenschutz

Lösung: Zu Beginn wird der Anlagenstrom von der Einspeisung (negativer Strom) zum Bezug von Leistung (positiver Strom) hochgefahren. Kurz vor dem Bemessungsstrom von ca. 100 A ist die Spannung am Anschlusspunkt unter den Schwellwert des Anlagenschutzes gesunken: Der Anlagenschutz trennt die Anlage vom Netz und unterbricht den Anlagenstrom, bis die Spannung wieder in den Betriebsbereich der Anlage zurückkehrt.

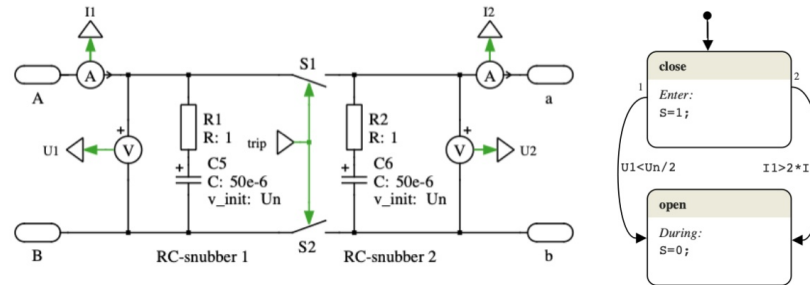
Beim Zuschalten der Anlage ergeben sich Ausgleichsströme, da die Spannung am Anschaltzeitpunkt der Anlage sich von der Spannung über der Anlagenkapazität sich während der Trennung verändert hat. Nach dem Ausgleich der Spannungen wird der Betrieb als Betriebsanlage mit Bemessungsstrom fortgesetzt.

Der Leitungsfehler führt zu hohen Fehlerströmen von der DC-Sammelschiene in den Fehler, sowie von der Anlagenkapazität in den Fehler. Sowohl Leitungsschutz und Anlagenschutz lösen aus. Die Zustandsautomaten für den Leitungsschutz und den Anlagenschutz zeigt folgende Abbildung.

Der Leitungsschutz reagiert, wie weiter oben beschrieben, auf Unterspannungen und Überströme in Richtung der Leitung. Der Anlagenschutz der bidirektionalen Anlage besitzt unterschiedliche Zustandsautomaten je nach Lastflussrichtung. Dargestellt ist der Zustandsautomat für den Betrieb als Bezugs-

anlage. Der Schalter befindet sich im Durchlassbereich, wenn die Spannung am Anschlusspunkt die Spannung sich im normalen Betriebsbereich befindet.

Leitungsschutz



Anlagenschutz

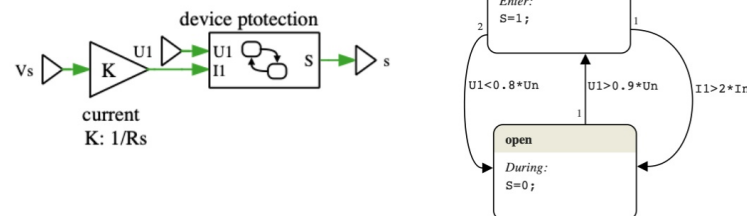


Bild 6.3.11. Schutzauslösung

Der Schalter sperrt bei Unterspannung und bei Überstrom. Im Betrieb als Bezugsanlage wäre außerdem noch eine Sperrung bei Strömen in entgegengesetzter Lastflussrichtung möglich.

6.4. Schutz der DC-Spannungsquelle

Folgende Abbildung zeigt ein Netz mit der DC-Quelle als Netzbildner und zwei Anlagen. An der Anschlussleitung der DC-Quelle befindet sich nun auch ein Leitungsschutz. Ein Anlagenschutz an der Quelle wäre ebenfalls denkbar.

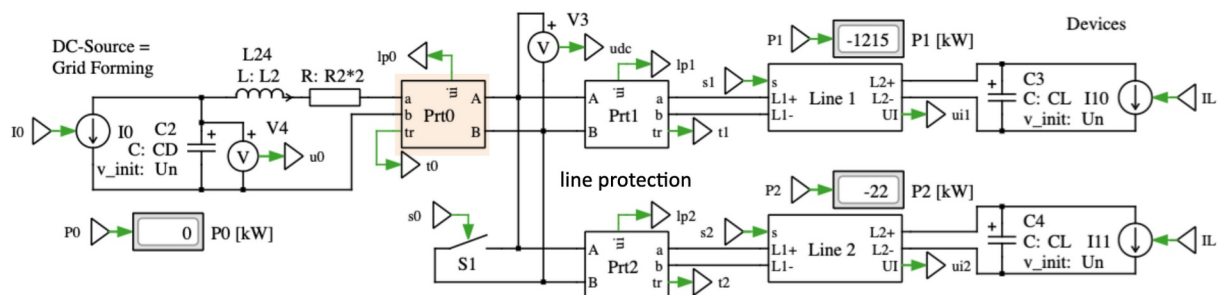


Bild 6.4.1. Netz mit DC-Quelle und zwei Anlagen

Frage 6.4.1: Fehlereffekte. Welche Auswirkungen haben Fehler auf Anschlussleitungen und an der DC-Sammelschiene auf die DC-Quelle? Welche Vorteile hätte ein Schutz der Quelle?

Lösung: (1) Fehler auf der Anschlussleitung einer der Anlagen: der Leitungsschutz löst aus und isoliert den Fehler. Der Betrieb mit der DC-Quelle geht weiter, die DC-Quelle ist nicht betroffen.

(2) Fehler direkt am DC-Bus: Führen zur Auslösung des Leitungsschutzes an den Abgängen zu den Anlagen Allerdings bleibt der Fehler bestehen und führt an der DC-Quelle zur Entladung der Kapazität

in den Fehler. Es kommt zu erheblichen Resonanzen zwischen der Kapazität der DC-Quelle und der Induktivität ihrer Anschlussleitung. Nach der Entladung der Quellenkapazität fließt der Bemessungsstrom der DC-Quelle als Kurzschlussstrom (und Blindstrom, da die Spannung am Bus null beträgt).

(4) Vorteile eines Schutzes der DC-Quelle: Es besteht eine zusätzliche Absicherung, sofern der Leitungsschutz der Abgänge versagt. Sofern der Schutz rasch reagiert, wird die Entladung der Kapazität der DC-Quelle bei Fehlern an der Sammelschiene vermieden. Außerdem stellt der Anlagenschutz der Quelle eine Fehlerindikation für Fehler an der Sammelschiene bereit.

Frage 6.4.2: Fehlerauswirkungen bei einer ungeschützten DC-Quelle. Folgende Abbildung zeigt das Verhalten einer ungeschützten DC-Quelle bei folgenden Fehlerfällen: (a) Fehler in einiger Entfernung der Sammelschiene, (b) Fehler in einem Abgang nahe der Sammelschiene, (3) Sammelschienenfehler. Beschreiben Sie die Fehlerauswirkungen.

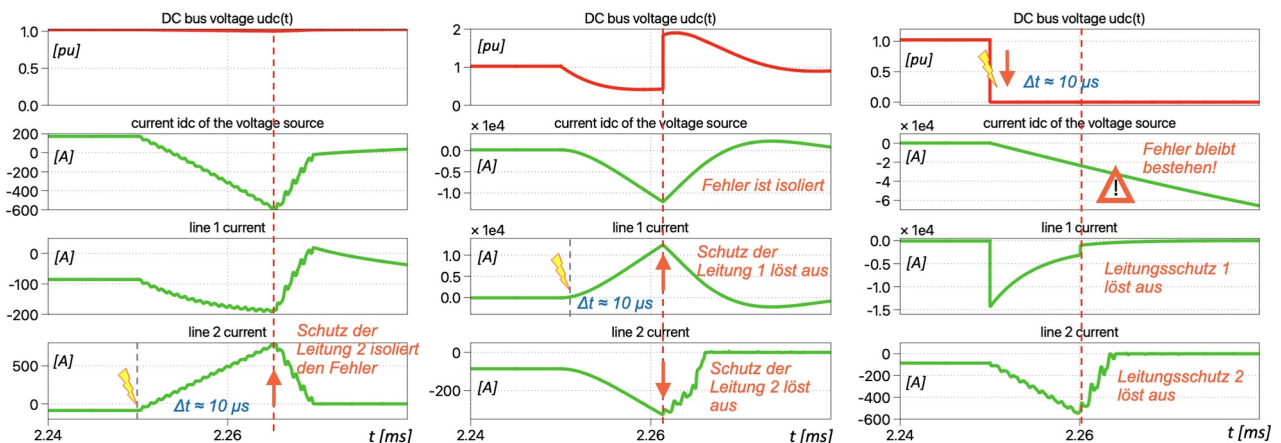


Bild 6.4.2. Verhalten einer ungeschützten DC-Quelle

Lösung: (a) Fehler in einiger Entfernung der Sammelschiene: Der Fehler ereignet sich in der zweiten Leitung, erkennbar an den stark ansteigenden positiven Fehlerstroms bei sonst negativem Betriebsstrom. Auch Leitung 1 liefert einen Beitrag zum Fehlerstrom etwa in Höhe des doppelten Betriebsstroms. Der Fehlerstrom in Leitung 1 wird hauptsächlich von der DC-Quelle gespeist, führt jedoch nicht zu einem bemerkenswerten Spannungsabfall an der Sammelschiene.

Der Leitungsschutz der Leitung 1 isoliert den Fehler, so dass der Betrieb nach Trennung der Leitung 2 fortgesetzt werden kann. Durch die Abschaltung der Leitung 2 nimmt Leitung 1 vorübergehend den Strom der DC-Quelle auf.

(b) Fehler in einem Abgang nahe der Sammelschiene: der Fehler befindet sich in der Nähe des Abgangs in Leitung 1. Der Fehlerstrom in Leitung 1 fällt nun sehr viel höher aus als beim sammelschienenfernen Fehler. Der Fehlerstrom wird zum überwiegenden Teil von der DC-Quelle bereitgestellt, der Anteil aus Leitung 2 ist vergleichsweise gering. Die Ströme in beiden Leitungen sind groß genug, um den Leitungsschutz beider Leitungen auszulösen.

Hierdurch wird auch dieser Fehler von der DC-Quelle isoliert, die DC-Quelle bleibt unter Leerlaufbedingungen am Netz. Da der Leitungsschutz der nicht betroffenen Leitung 2 ebenfalls reagiert, ist der Fehler nicht selektiv getrennt worden. Das Netz befindet sich in einem sicheren Zustand, allerdings nicht unter optimalen Betriebsbedingungen.

(3) Sammelschienenfehler: Der Fehler äußert sich durch den totalen Spannungseinbruch und massiven Ströme aus der DC-Quelle. Der Strom aus Leitung 1 fällt auch für sehr kurze Zeit vergleichsweise hoch aus, was an der Entladung der Kapazität im RC-Glied liegt. Die Beiträge am Fehlerstrom aus

den Anlagenkapazitäten fallen vergleichsweise gering aus, wie der Strom in Leitung 2 zeigt (im Leitungsschutz findet sich dort kein RC-Glied, sondern ein Varistor über dem Schalter).

Der Leitungsschutz in beiden Abgängen löst aus. Da sich der Fehler direkt an der Sammelschiene befindet, bleibt die Fehler allerdings weiterhin bestehen und führt zu einem weiteren Stromanstieg aus der DC-Quelle. Ohne Schutzmaßnahmen wird sich die Kapazität der DC-Quelle vollständig in den Fehler entladen. Die Fehlerenergie entspricht der Ladung der Kapazität der DC-Quelle.

Frage 6.4.3: Fehlerauswirkungen mit Schutzmaßnahmen an der DC-Quelle. Folgende Abbildung zeigt das Verhalten einer durch einen eigenen Leitungsschutz bzw. durch einen Anlagenschutz geschützten DC-Quelle bei einem Fehler direkt an der DC-Sammelschiene. Beschreiben Sie die Funktionsweise der Schutzeinrichtung.

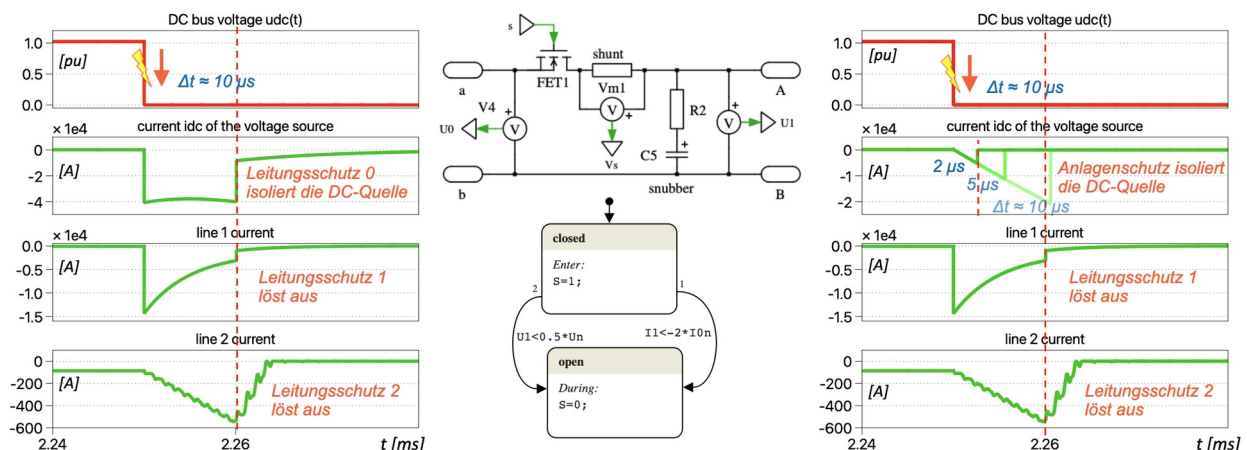


Bild 6.4.3. Verhalten einer geschützten DC-Quelle

Lösung: (a) Simulationslauf links in der Abbildung: Durch den Fehler direkt an der Sammelschiene bricht die Spannung sofort ein, der Fehlerstrom steigt augenblicklich (bis zu einer Begrenzung durch die Schutzeinrichtung). Der Leitungsschutz in allen Abgängen löst aus, auch im Anschluss der DC-Quelle. Hierdurch gelingt es, den Fehler von allen Anlagen zu isolieren. Das Netz bleibt stromlos.

(b) Der mittlere Teil der Abbildung zeigt eine Schutzvorrichtung direkt an der DC-Quelle als Anlagenschutz. Der Schalter wird ausgelöst, wenn die Spannung am Anschluss der DC-Station unter einen vorgegebenen Schwellwert fällt (hier $0,5 U_n$), bzw. wenn der Strom der DC-Quelle den doppelten Bemessungsstrom übersteigt. Der Schalter lässt sich auch von der DC-Quelle betätigen, z.B. nach dem Hochfahren der Anlage.

(c) Der Simulationslauf rechts zeigt das Verhalten bei einem Busfehler mit dem Anlagenschutz der DC-Quelle. Der Anlagenschutz trennt die DC-Station vom Netz. Hierbei wurde die Zeit bis zur Auslösung der Schaltung im Bereich zwischen $2 \mu s$ und $10 \mu s$ variiert. Erwartungsgemäß sind kurze Schaltzeiten von Vorteil: die Fehlerströme fallen deutlich geringer aus.

Der Leitungsschutz der Anlagen 1 und 2 löst unverändert aus und trennt beide Leitungen von der DC-Sammelschiene. Die Schaltzeit wurde hier bei $10 \mu s$ belassen. Nach Auslösung der Schutzeinrichtungen bleibt der Fehler insgesamt isoliert.

Ob die DC-Quelle durch eine Leitungsschutz oder einen Anlagenschutz besser gesichert ist, bleibt abzuwägen. Ein Schalter am Anschlusspunkt der Anlage an das Netz ist zum Trennen und Zuschalten der Anlage grundsätzlich von Vorteil.

Frage 6.4.4: Wie lassen sich die Erkenntnisse zum Schutz von Einspeiseanlagen und Anlagen mit bidirektionalem Lastfluss zusammenfassen?

Lösung: (1) Überspannung und Überstrom: Ursachen und Auswirkungen sind identisch mit denen für Bezugsanlagen (siehe Abschnitt 5). Es gelten die gleichen Maßnahmen zum Schutz und die gleichen Regeln zur Auslegung.

(2) Unterspannung und Flicker: Verursachen einen massiven Rückfluss von den Anlagen. Bei Einspeiseanlagen ist die Richtung des Rückflusses in Lastflussrichtung. Da in Einspeiserichtung eine passive Rückflusssperre nicht funktioniert, bedarf es eines aktiven Anlagenschutzes. Der aktive Schutz ist auch aus Bezugsanlagen anwendbar. Bei der Trennung der Anlagen vom Netz ist der Anlagenstrom ebenfalls zu unterbrechen.

(3) Anlagenschutz: Zentraler Bestandteil ist ein Halbleiterschalter am Anschlusspunkt der Anlage mit geringer Schaltzeit. Bei der Zuschaltung der Anlagen nach einer Schutzauslösung muss die Anlagenkapazität auf das Niveau der Spannung am Anschlusspunkt nachgeladen werden. Der Anlagenschutz ergänzt den Leitungsschutz: Letzterer trennt eine defekte Leitung vom Netz, ersterer trennt die Anlage in der betroffenen Leitung vom Fehler.

7. Kopplung einer Anlage ans Netz

In diesem Abschnitt geht es darum, wann eine Anlage am Netz den Betrieb aufnehmen kann, und wann Sie sich vom Netz trennen sollte. Die Aufnahme des Betriebs ist mit der Ladung der Anlagenkapazität verbunden. Folgende Abbildung zeigt eine Übersicht.

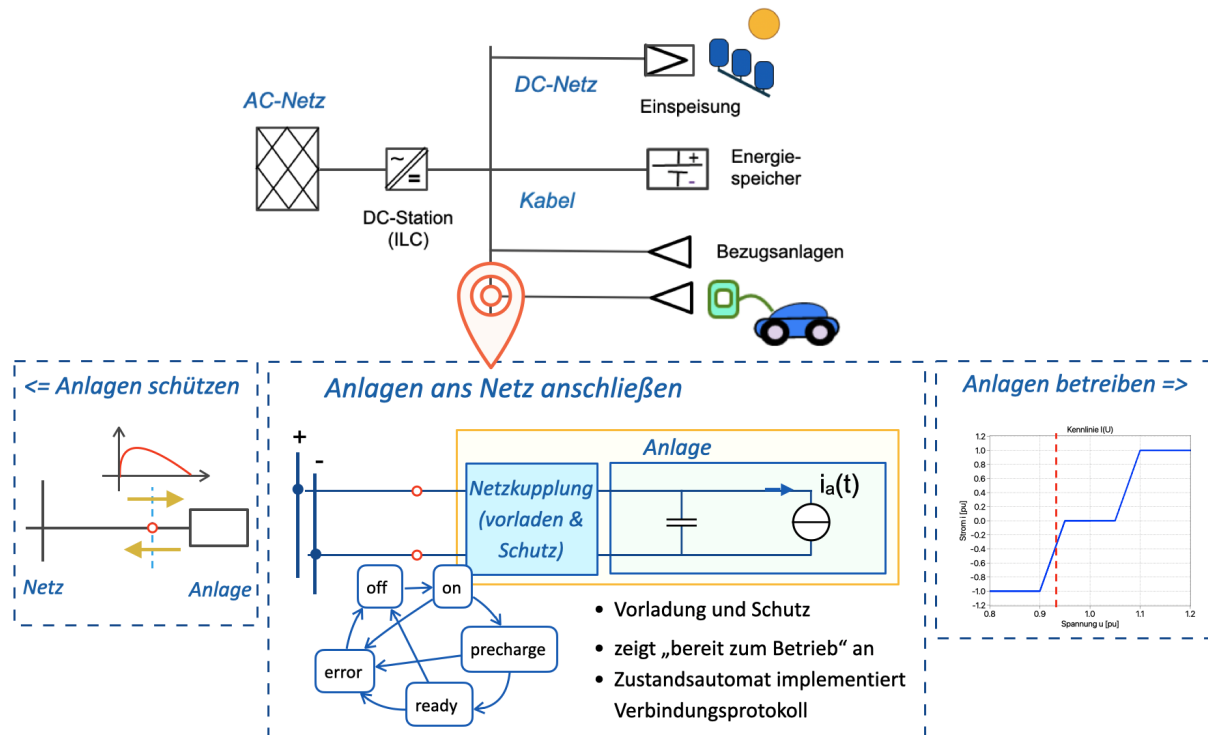


Bild 7.1 Wie lässt sich ein Gerät mit dem Netz verbinden?

Die Verbindung der Anlage mit dem Netz regelt ein Protokoll, also eine Vereinbarung im Sinne einer Richtlinie. Dieses Protokoll wird auf der Anlage mit Hilfe eines Zustandsautomaten auf einer Netzkupplung realisiert. Die Netzkupplung kümmert sich auch um die Vorladung der Anlagenkapazität, sowie um die Trennung der Anlage vom Netz bei Unterspannung bzw. im Fehlerfall.

7.1. Physikalische Kopplung

Folgende Abbildung zeigt den Aufbau der Netzkupplung zusammen mit der Anlage. Die Anlage besteht aus der Netzkupplung, der Anlagenkapazität und einer Stromquelle stellvertretend für die Einspeisung von Leistung ins Netz oder den Bezug von Leistung aus dem Netz.

Die Netzkupplung besteht aus

- Dem Schalter „connect“ zum Netzananschlusspunkt, der die Anlage mit dem Netz verbindet oder vom Netz trennt. Dieser Schalter ist identisch mit den Schalter zum Schutz der Anlage aus dem letzten Kapitel.
- Der Vorladeschaltung mit der Aufgabe, die Anlagenkapazität zu laden, wenn eine Anweisung hierzu mit Hilfe des Signals „prc“ (für pre-charge) erteilt wird. Die Kapazität wird dann aus der Spannung am Netzananschlusspunkt aufgeladen. In der Abbildung erfolgt das mit Hilfe eines Widerstandes. In der Praxis würde man hierfür eine elektronische Schaltung verwenden. Die Vorladung kann erst erfolgen, wenn die Anlage vorab mit dem Netzananschlusspunkt verbunden wurde und wenn die Anweisung „prc“ erteilt wurde, die den Vorladewiderstand mit dem Anschlusspunkt verbindet. Nach erfolgreicher Vorladung wird die Vorladeschaltung mit Hilfe des Schalters S_4 überbrückt und somit aus dem Strompfad der Anlage entfernt. Unabhängig von

der Vorladung kann die Anlage Hilfsstrom beziehen, sobald sie mit dem Netzanschlusspunkt verbunden ist. Stellvertretend für die sehr begrenzte Leistungsaufnahme zum Betrieb der Anlagenlogik dient der Widerstand R_2 .

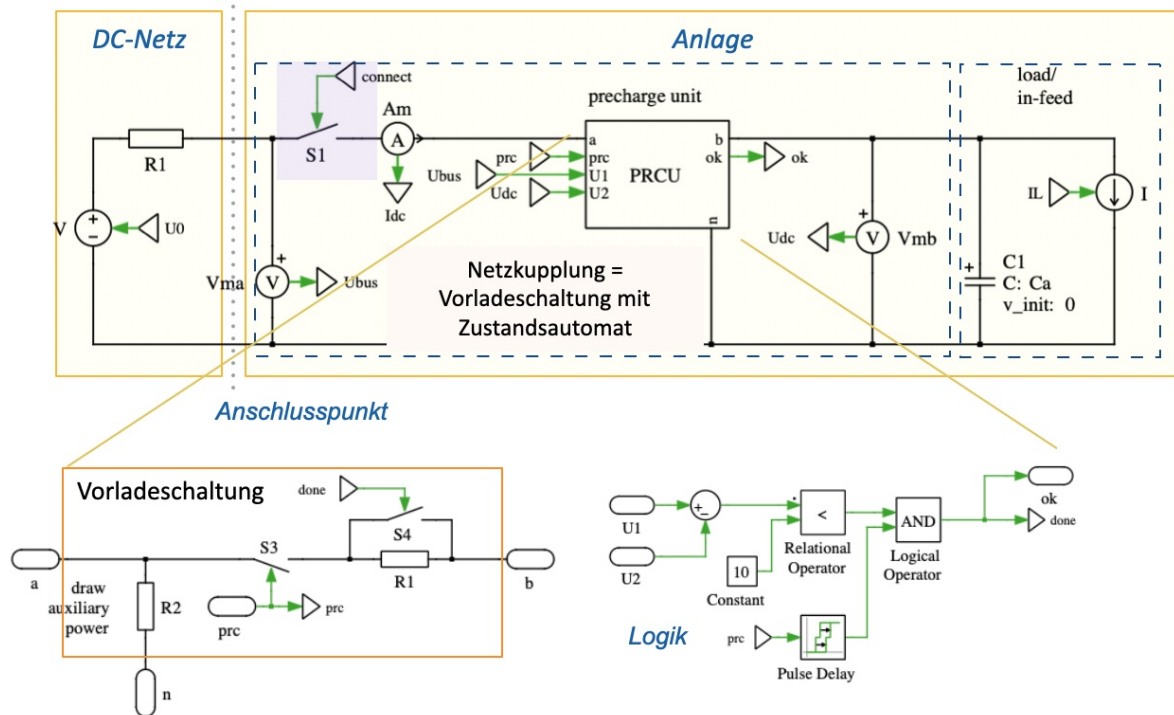


Bild 7.1.1 Aufbau der Netzkupplung

Außerdem besteht die Netzkupplung aus

- Messpunkten für den Strom und die Spannung am Anschlusspunkt, sowie für die Spannung über der Anlagenkapazität,
- einer Schaltlogik, die bei der Vorladung anzeigt, wenn die Spannung der Anlagenkapazität der Spannung am Anschlusspunkt entspricht.

Diese Anordnung soll in den folgenden Aufgaben in der Simulation untersucht werden bzgl. der Schritte zur Ankopplung der Anlage ans Netz, Reaktionen auf das Spannungsniveau am Anschlusspunkt, sowie bzgl. der Trennung der Anlage vom Netz bei Unterspannung oder im Fehlerfall.

Frage 7.1.1: Ablauf der Kopplung ans Netz. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf. Interpretieren Sie die Ereignisse und den Ablauf der Ankopplung der Anlage.

Lösung: Der Ablauf zeigt die Ereignisse bis die Anlage bereit zum Betrieb ist:

- Schwellwerte der Spannung am Anschlusspunkt:
 - U_1 stellt die untere Schwelle zum Notbetrieb dar ($0,72 U_n$)
 - U_2 stellt die untere Schwelle zum Normalbetrieb dar ($0,92 U_n$)
- Hilfsversorgung (Zustand „connect“):
 - ist verfügbar, nachdem die Anlage mit dem Netz verbunden ($U > U_1$)
 - ist in der Ersatzschaltung mit dem Lastwiderstand R_2 nachgebildet (siehe Abbildung 7.1.1)
- Vorladung (Zustand „precharge“):
 - ist mit geringen Strömen möglich bei Überschreitung der Schwelle $U > U_2$

- ist im Modell durch den Widerstand R_1 nachgebildet um das Prinzip zu illustrieren. In der Praxis würde man eine elektronische Schaltung verwenden.
- Bereit zum Betrieb (Zustand „ready“):
 - ist die Anlage nachdem die Anlagenkapazität vollständig auf das Niveau der Spannung am Anschlusspunkt aufgeladen ist.
 - Zu diesem Zeitpunkt wird die Vorladeschaltung überbrückt und somit aus dem Pfad des Anlagenstroms entfernt. Die Bezugsanlage oder Einspeiseanlage darf nun en Strom vor-
geben.

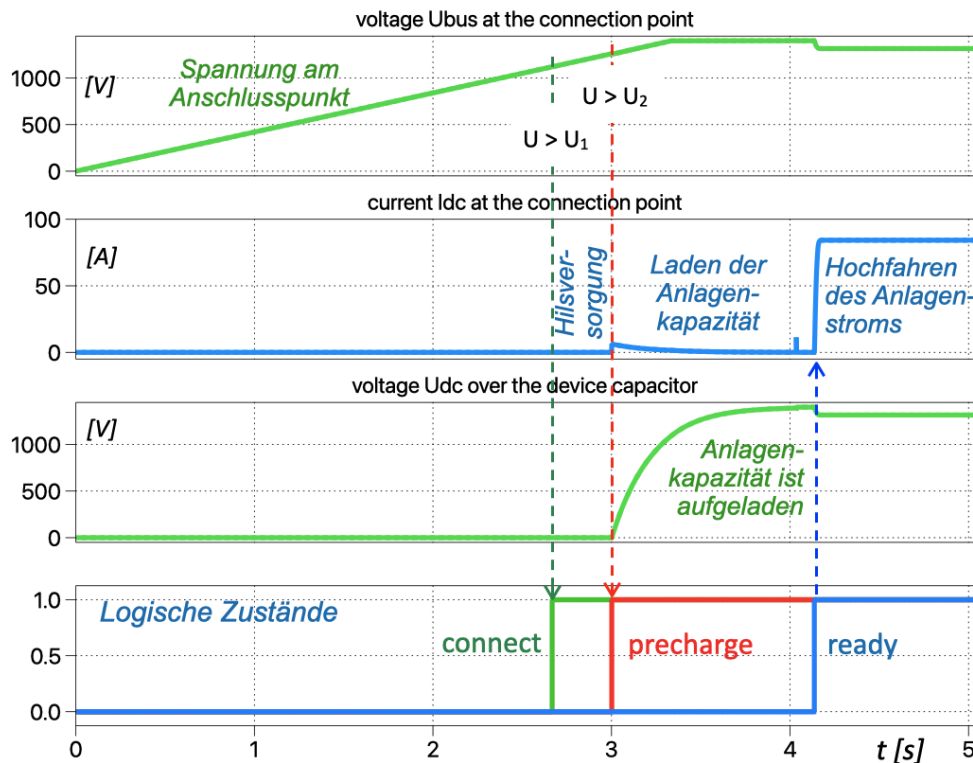


Bild 7.1.2 Ablauf des Koppelmanövers

In der Simulation wurde in Spannung am Anschlusspunkt linear auf das Niveau der Betriebsspannung erhöht, so dass die Schwellwerte U_1 und U_2 durchfahren werden. In den Zeitverläufen darunter ist der Anlagenstrom dargestellt, sowie die Spannung über der Anlagenkapazität. Diese Variablen entsprechen den Messwerten $\{U_{bus}, U_{dc}, I_{dc}\}$ in der Ersatzschaltung.

Die logischen Zustände {connect, precharge, ready} sind Ausgangssignale eines Zustandsautomaten, der in Abschnitt 7.2 näher beschrieben wird. Sie beschreiben den Zustand der Netzkupplung. Das Signal „ready“ wird an die Bezugsanlage bzw. Einspeiseanlage weitergegeben. Auf diese Weise benötigt letztere keine Kenntnis der Schwellwerte und der sonstigen Anforderungen des DC-Netzes.

Frage 7.1.2: Betrieb bei Unterspannung. Folgende Abbildung zeigt eine Simulationslauf, bei dem die DC-Spannung unter die Schwelle U_2 des normalen Betriebs sinkt. Beschreiben Sie die Reaktion der Netzkupplung auf die DC-Spannung. Hinweis: Verwenden Sie die physikalische Ersatzschaltung nach Abbildung 7.1.1 zur Erläuterung des Verhaltens der Spannung über der Anlagenkapazität in Abhängigkeit der Spannung am Anschlusspunkt.

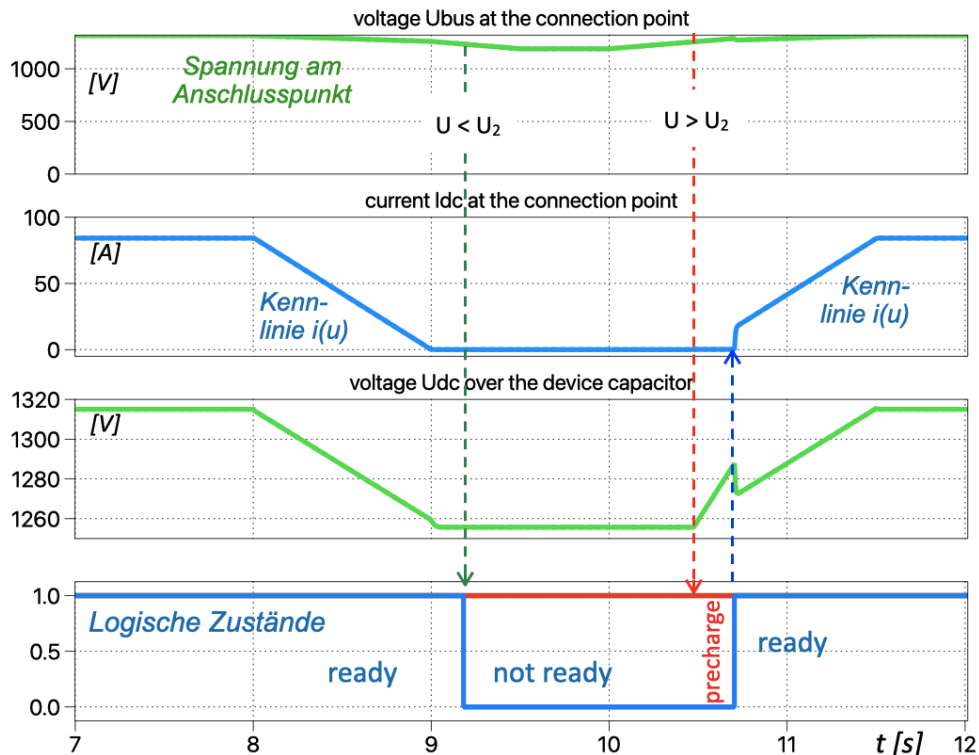


Bild 7.1.3 Betrieb bei Unterspannung

Lösung: Wenn die Spannung unter die Schwelle U_2 des Betriebsbereichs fällt, darf die Anlage nicht mehr am Netz betrieben werden. Daher trennt die Netzkupplung in diesem Fall die Anlage vom Netz. Die Netzkupplung reagiert in folgender Weise auf die Betriebsspannung:

- Führung der Bezugsanlage bzw. der Einspeiseanlage mit Hilfe des Signals „ready“: Das Signal signalisiert der Stromquelle, dass die Anlagenkapazität und das Netz bereit sind, einen Strom abzugeben oder aufzunehmen.
- Nachladen der Anlagenkapazität (bei Verbindung zum Netz im Zustand „connect“):
 - als Voraussetzung des Zustands „ready“
 - durch Verwendung der Vorladeschaltung („pre-charging unit“).
- Bedienung des Schalters zur Trennung der Anlage vom Netz durch das Signal „connect“:
 - sofern die Spannung unter die Schwelle U_1 zum Notbetrieb fällt (hier nicht der Fall)
 - bei Fehlern zum Schutz der Anlage.

Die Bezugsanlage bzw. Einspeiseanlage (Stromquelle im Ersatzschaltbild) reagiert ebenfalls auf die Spannung am Anschlusspunkt, indem sie den Strom mit Hilfe einer Kennlinie $i(u)$ abhängig von der Spannung anpasst: Bei niedriger Betriebsspannung (d.h. Spannungen unterhalb der Nennspannung innerhalb des Betriebsbereichs) wird die Last zurückgenommen (erkennbar im Bereich unmittelbar vor $U < U_2$ und unmittelbar nach $U > U_2$).

Bei einer Einspeisung würde der Strom bei Spannungen oberhalb der Nennspannung zurückgenommen. In beiden Fällen ist hierzu ein gültiges Signal „ready“ die Voraussetzung. Ist dieses Signal ungültig (Zustand „not ready“), muss der Anlagenstrom null betragen.

Frage 7.1.3: Trennung der Anlage vom Netz. In folgendem Ausschnitt des Simulationslaufs fällt die Spannung am Anschlusspunkt unterhalb des Niveaus U_1 des erlaubten Betriebs. Im rechten Teil sind die Signale „connect“, „precharge“ und „ready“ über den gesamten Zeitverlauf der Simulation dargestellt. Erläutern Sie das Verhalten der Netzkupplung.

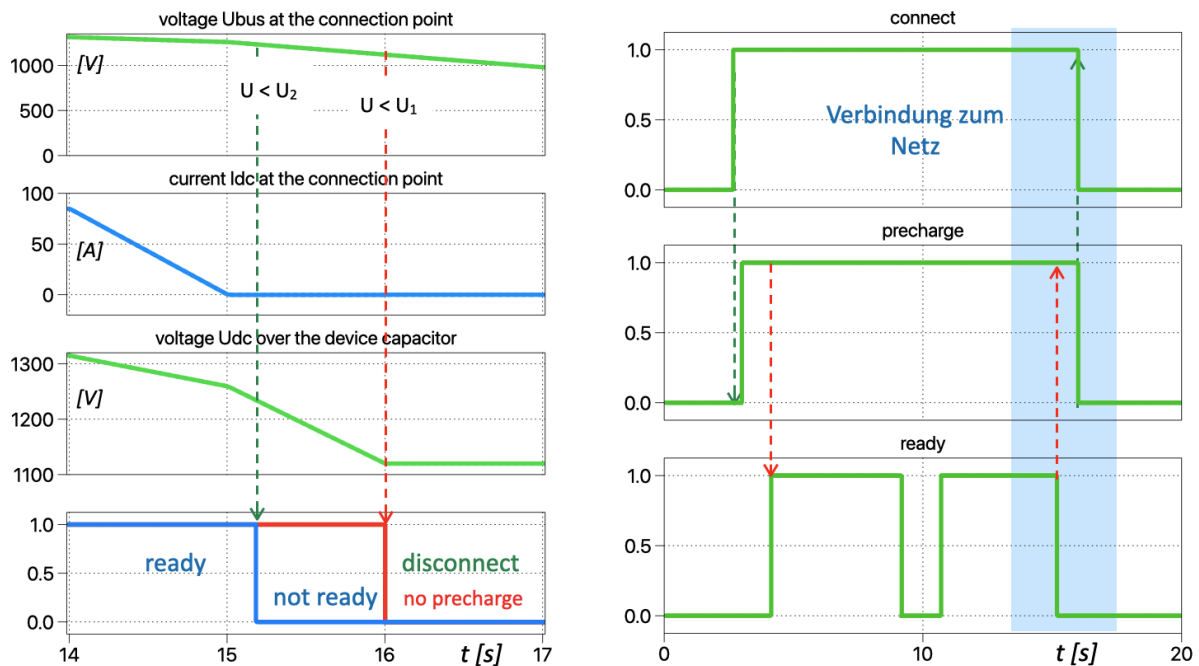


Bild 7.1.4 Trennung der Anlage bei Unterspannung

Lösung: Die Signale beschreiben die Betriebsbedingungen der Anlage:

- **Connect:**
 - Startet vom getrennten Zustand der Anlage zu Beginn der Simulation,
 - Verbunden wird, wenn die Spannung die Schwelle $U > U_1$ überschreitet. Getrennt wird bei Unterschreitung dieser Schwelle.
 - Im verbundenen Zustand ist der Bezug von Hilfsenergie („auxiliary power“) zum Betrieb der Netzkupplung möglich.
- **Precharge:**
 - ist gültig innerhalb des normalen Betriebsbereich der Spannung ($U > U_2$) und bleibt gültig, bis die Spannung den erlaubten Bereich verlässt ($U < U_1$).
 - dient der Vorladeeinheit als Bedingung zur Ladung der Anlagenkapazität.
 - Der Übergang zur Betriebsbereitschaft („ready“) erfolgt nach Stabilisierung der Spannung über der Anlagenkapazität.
- **Ready:**
 - Die Vorladeschaltung wird überbrückt und aus dem Strompfad entfernt.
 - Das Signal dient der Bezugsanlage bzw. Einspeisung die Betriebsbereitschaft.
 - Das Signal wird zurückgenommen, wenn die Spannung am Anschlusspunkt den normalen Betriebsbereich U_2 verlässt. Im gesamten Zeitverlauf ist dies zweimal der Fall. Das Signal

„precharge“ bleibt bei $U < U_2$ erhalten, bis die Spannung unter den erlaubten Bereich U_1 fällt.

Beim Hochfahren der Betriebsspannung entsprechen die Signale „connect“, „precharge“ und „ready“ dem Startvorgang „auf die Plätze“, „fertig“, „los!“. Allerdings werden sie auch innerhalb des Betriebs verwendet, um die Anlagenkapazität und den Anlagenstrom zu regeln, sowie um die Anlage im Fehlerfall zu schützen.

Frage 7.1.4: Betrieb im Fehlerfall. Im Fehlerfall werden die Signale durch eine Logik zur Fehlererkennung ausgelöst, unabhängig vom aktuellen Betriebszustand. Folgende Abbildung zeigt die Anordnung und einen Simulationslauf im Normalbetrieb und im Fehlerfall. Erläutern Sie den Ablauf.

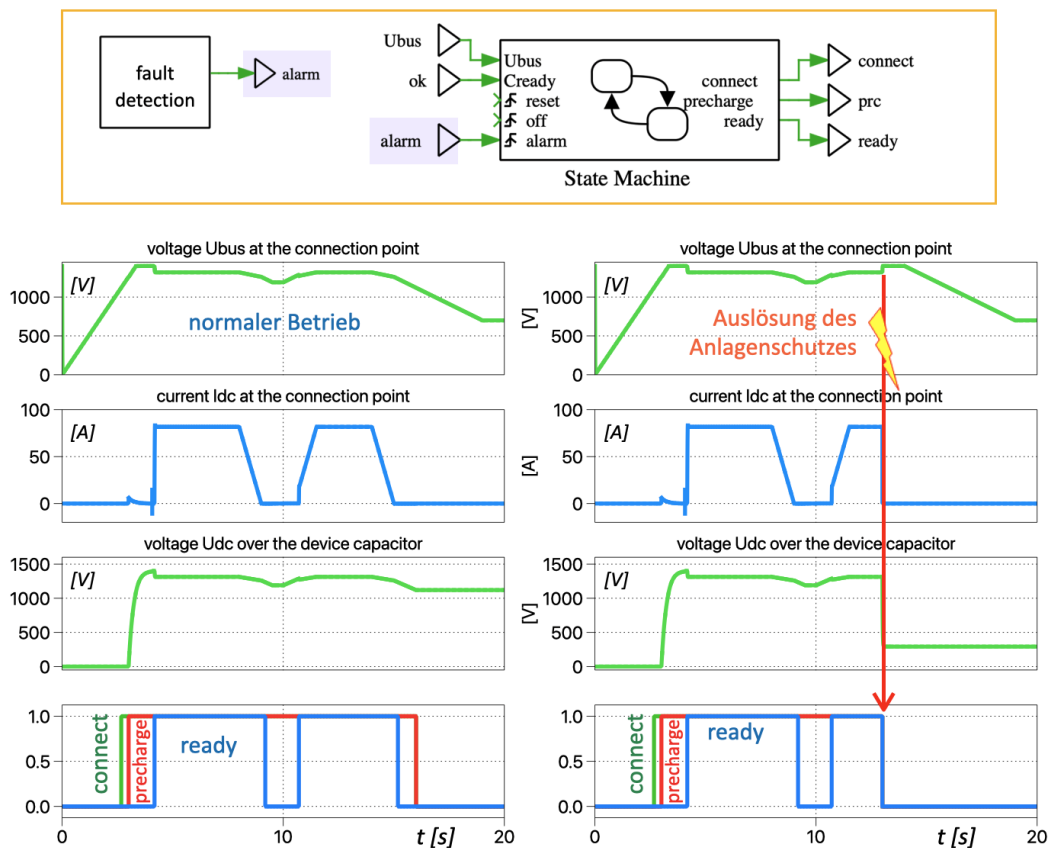


Bild 7.1.5 Schutzauslösung im Betrieb

Lösung: Die Auslösung des Anlagenschutzes kann zu jeder Zeit erfolgen, unabhängig vom Betriebszustand der Anlage. Die Auslösung erfolgt durch ein Fehlersignal „alarm“, das durch eine Schaltung zur Fehlererkennung erzeugt wird. Diese Anordnung ist im oberen Teil der Abbildung dargestellt.

Der Betrieb der Netzkupplung erfolgt mit Hilfe eines Zustandsautomaten. Dieser erhält das Fehlersignal als Triggersignal. Das Fehlersignal führt den Zustandsautomaten in einen Fehlerzustand. In diesem Zustand nimmt der Automat im dargestellten Beispiel die Signale „connect“, „precharge“ und „ready“ zurück.

Die Simulationsläufe im unteren Teil der Abbildung zeigen den Ablauf bei Normalbetrieb (links), sowie mit Auslösung des Fehlersignals zu einem beliebigen Zeitpunkt (rechts in der Abbildung, im Beispiel mit einer Sprungfunktion erzeugt). Auf diese Weise bleibt der Anlagenschutz unabhängig vom Betrieb der Anlage und wird in der Art eines „interrupt“-Signals priorisiert.

7.2. Verbindungsprotokoll

Das Verbindungsprotokoll der Anlage ist innerhalb der Netzkupplung mit Hilfe eines Zustandsautomaten implementiert.

Frage 7.2.1: Folgende Abbildung zeigt den Zustandsautomaten. Erläutern Sie den Aufbau und die Funktionsweise. Hinweis: Verwenden Sie die Begriffe „Zustand“, „Zustandsübergang“ und „Ausgangssignale“.

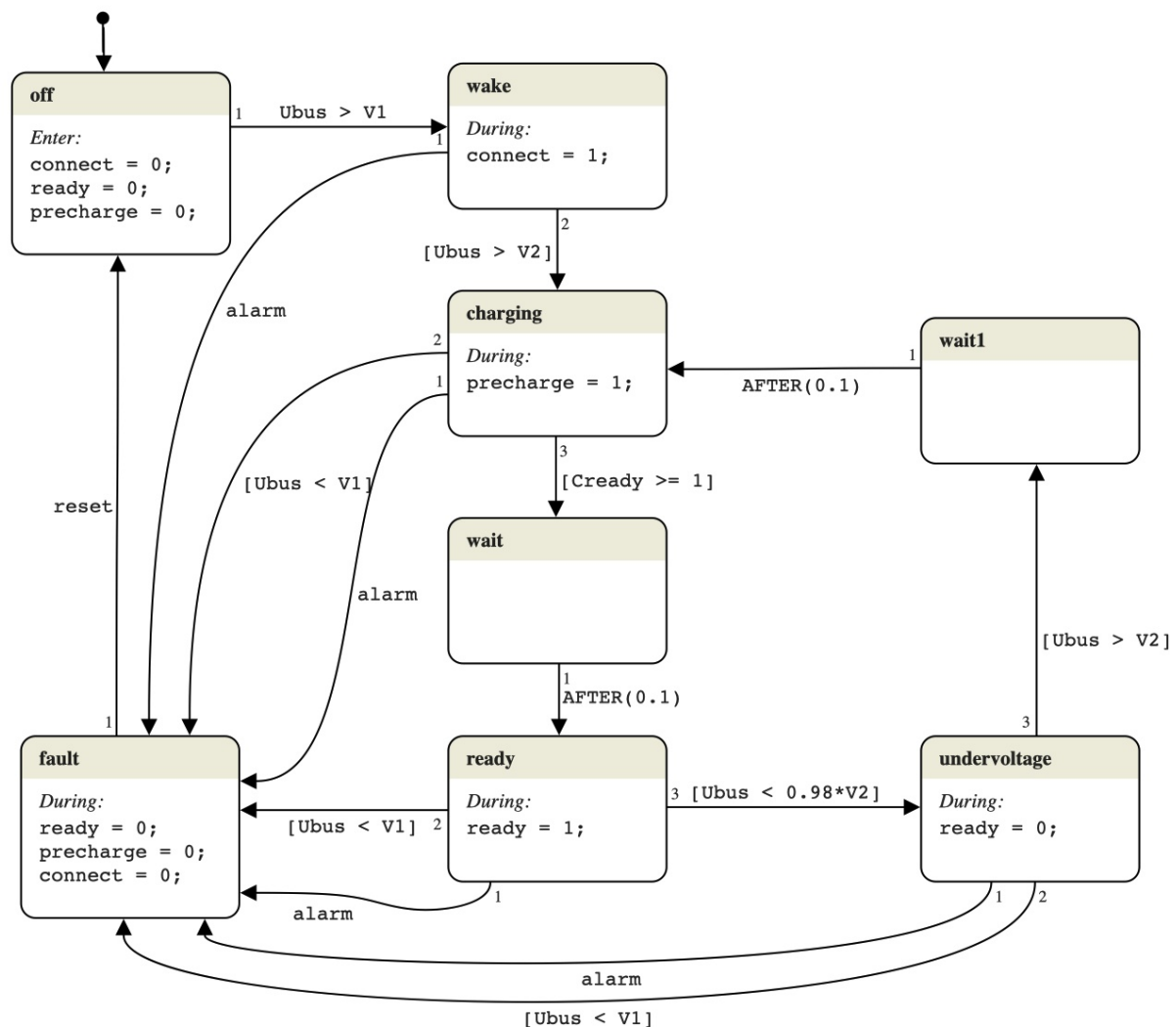


Bild 7.2.1 Zustandsautomat für das Verbindungsprotokoll

Lösung: Der Zustandsautomat hat folgenden Aufbau:

- Zustände (States):
 - off = aus: Hier startet der Zustandsautomat aus dem initialen Zustand. In diesem Zustand ist die Anlage nicht mit dem Netz verbunden.
 - wake, charging, ready, undervoltage: Innere Zustände des Automaten. Zwischen diesen Zuständen kann der Automat in einer Schleife bewegen, abhängig von aktuellen Zustand und den Signalen, die Zustandsübergänge auslösen.

- fault condition = Fehlerzustand: In diesen Zustand kann der Automat aus jedem Betriebszustand wechseln, wenn er das Fehlersignal „alarm“ erhält, bzw. wenn der Betriebsbereich der Spannung am Anschlusspunkt verlassen wird.
- Zustandsübergänge (Transitions):
 - werden durch Ereignisse ausgelöst, die durch Eingangssignale an den Automaten kommuniziert werden.
 - Einige Zustandsübergänge sind abhängig vom Niveau der Spannung am Anschlusspunkt der Anlage (z.B. die Unterschreitung eines Schwellwertes als Signal).
 - Steuersignale können Zustandsübergänge auslösen, z.B. „Cready“ als Indikator das die Aufladung der Anlagenkapazität beendet wurde.
 - Das Signal „alarm“ der Fehlerdetektion löst den Übergang in den Fehlerzustand aus.
 - Eine weitere Signalquelle ist der Ablauf der Wartezeit eines internen Zeitgebers (timers).
- Ausgangssignale (Output):
 - Die Signale „connect“ und „precharge“ werden innerhalb des Zustandsautomaten verwendet (zur Anschaltung ans Netz und zur Aufladung der Anlagenkapazität).
 - Das Signal „ready“ dient als Schnittstellen zwischen der Netzkupplung und der Stromquelle der Anlage. Es muss auf geeignete Weise an die Stromquelle kommuniziert werden (Signalleitung, bzw. als Nachricht in einem Feldbus-Protokoll).

Der Aufbau eines Zustandsautomaten mit Hilfe von Zuständen, Zustandsübergängen und Ausgangssignalen ist universell. Hier wurde ein Teil des Verbindungsprotokolls der Anlage passend zur Ersatzschaltung aus Abbildung 7.1.1 implementiert.

Frage 7.2.2: Erläutern Sie den Abläufe beim Verbinden der Anlage mit dem Netz mit Hilfe folgender Abbildung, die Komponenten und Signale der Netzkupplung zeigt.

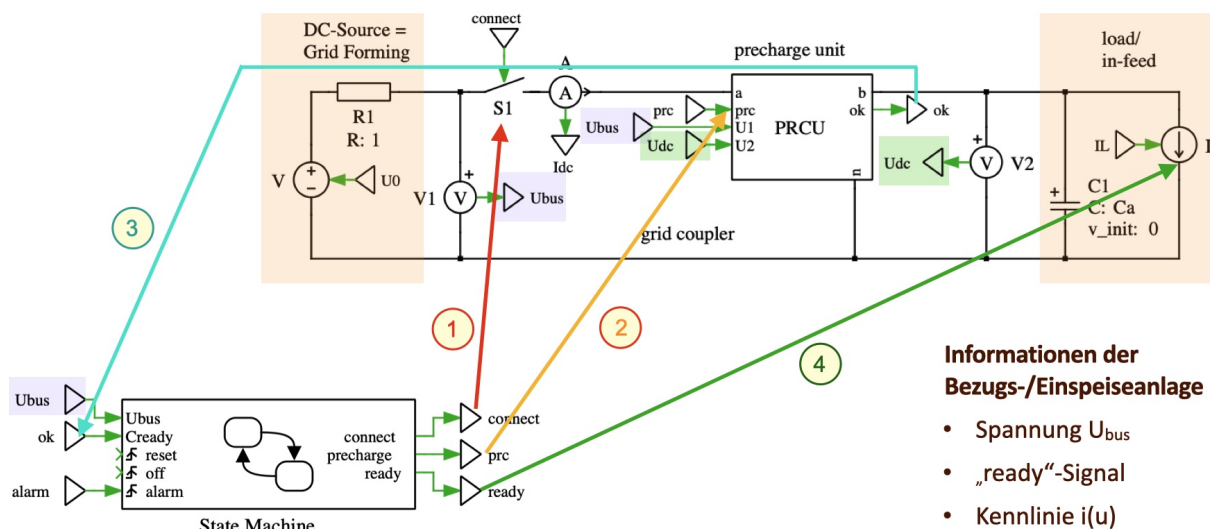


Bild 7.2.2 Funktion der Ausgangssignale des Automaten beim Zuschalten der Anlage

Lösung: Die Netzkupplung besteht auf folgenden Komponenten:

- Messungen der Spannung U_{bus} am Anschlusspunkt, der Spannung U_{dc} über der Anlagenkapazität, sowie des Anlagenstroms I_{dc} am Anschlusspunkt.
- Zustandsautomat (State Machine): Verwendet als Eingangssignale die Spannung U_{dc} am Anschlusspunkt, das Signal „Cready“ als Indikator für die vollständige Aufladung der Anlagenkapazität, sowie das Fehlersignal „alarm“.
- Schalter zur Anschaltung ans Netz: Wird durch das Signal „connect“ ausgelöst. Dieses Signal ist ein Ausgangssignal des Zustandsautomaten.
- Vorladeschaltung (Precharge Unit): Erhält das Signal „precharge“ zum Aufladen der Anlagenkapazität vom Zustandsautomaten, verwendet die Messsignale der Spannung U_{dc} am Anschlusspunkt und der Spannung U_{dc} an der Anlagenkapazität, und schickt das Signal „Cready“ nach erfolgreicher Aufladung an den Automaten.

Auf diese Weise ergibt sich bei der Verbindung der Anlage der mit den Ziffern {1,2,3,4} dargestellte Ablauf. Die Anzeige der Betriebsbereitschaft durch die Netzkupplung mit dem Signal „ready“ setzt hierbei die erfolgreiche Aufladung der Anlagenkapazität voraus.

Frage 7.2.3: Bezugsanlage bzw. Einspeiseanlage. Welche Kenntnis benötigt die Stromquelle als Kern der Anlage über das Verbindungsprotokoll und das DC-Netz? Welche Informationen vermittelt die Netzkupplung?

Lösung: Die Stromquelle darf nur aktiv werden, wenn die Betriebsbereitschaft von der Netzkupplung mit Hilfe des Signals „ready“ angezeigt wird. Bei Rücknahme dieses Signals muss der Strom auf den Wert null geführt werden. Innerhalb der Betriebsbereitschaft benötigt die Stromquelle der Anlage die Spannung U_{dc} am Anschlusspunkt, um den Strom der Anlage mit Hilfe der Kennlinie $i(u)$ zu führen.

Frage 7.2.4: Vereinfachtes Netzmodell in der Ersatzschaltung. In der Simulation wurde das der Abbildung oben dargestellte Netz verwendet, bestehend aus einer idealen Spannungsquelle mit Innenwiderstand. Realistischer wäre das unten dargestellte Modell mit einer spannungsgeführten Stromquelle und einer Anschlussleitung. Wie beurteilen Sie die Güte des einfachen Modells für die Betrachtungen zum Betriebsführung und zum Betriebszustand?

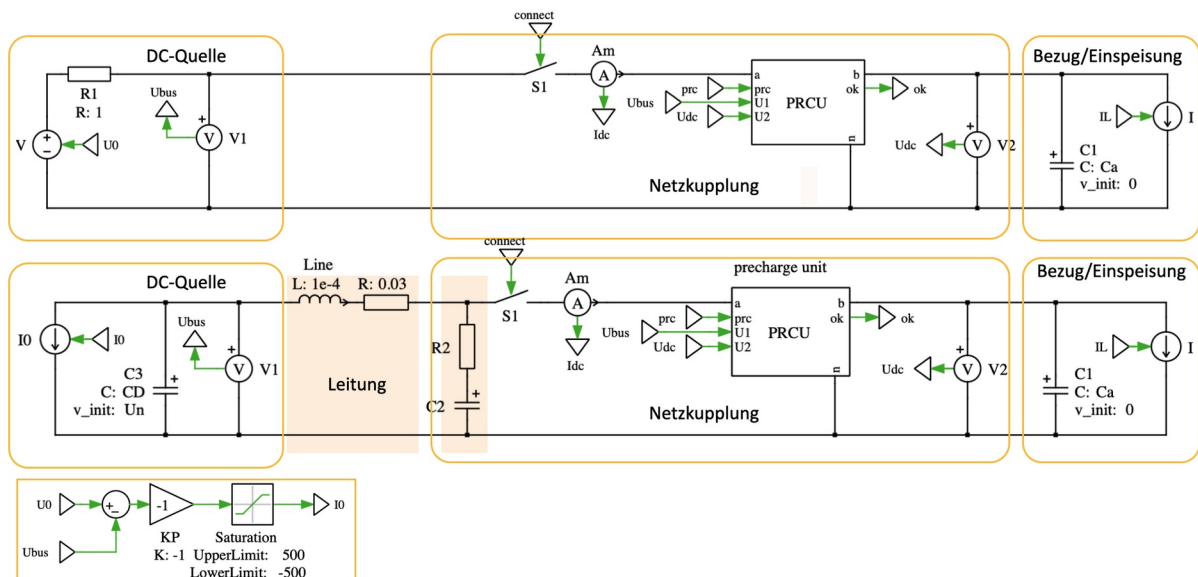


Bild 7.2.3 Modell des DC-Netzes mit Spannungsquelle und Leitung

Lösung: Das einfache Modell reicht aus. Die Kennlinie $u(i)$ der Spannungsquelle (voltage droop) kommt durch den Innenwiderstand der Spannungsquelle zustande: $U_{dc} = U_0 - R_1 I$. Da die Betriebszu-

stände sich langsam ändern (im Vergleich zu den Ausgleichsvorgängen zwischen den Kapazitäten und der Wechselwirkung mit der Leitungsinduktivität), spielt das Leitungsmodell (bestehend aus Leitungswiderstand R und Leitungsinduktivität L) keine Rolle. Der Einfluss des Leitungswiderstandes R ist im Verhältnis zum Innenwiderstand R_i der Spannungsquelle gering.

Der untere Teil der Abbildung zeigt das Modell mit einer spannungsgeführten Stromquelle und der Leitung. Der Einfluss der Leistung ist für die hier betrachteten Zeitkonstanten gering und spielt daher keine Rolle. Allerdings benötigt der Trennschalter in Kombination mit der Serieninduktivität der Leitung nun einen Pfad zur Kommutierung des Stroms bei der Trennung.

Die spannungsgeführte Stromquelle erzeugt die gleiche Klemmenspannung wie die Spannungsquelle oben in der Abbildung. Die Kennlinie $U(I)$ kommt hier durch den P-Regler zustande. Der P-Regler ist realistischer, wenn die Zeitkonstanten der Regelung eine Rolle spielen (die im Bereich einiger ms liegen). Das ist hier nicht der Fall: Es werden die Betriebszustände nach der Ausregelung der Spannung betrachtet. Die Simulation zeigt in beiden Fällen identische Ergebnisse.

7.3. Implementierung des Protokolls auf der Netzkupplung

In diesem Abschnitt soll das Zusammenspiel der Netzkupplung mit der Stromquelle der Anlage näher betrachtet werden. Hierzu werden unterschiedliche Betriebszustände simuliert.

Frage 7.3.1: Netzkupplung und Stromquelle der Anlage. Folgende Abbildung zeigt den Verlauf einer Simulation über eine Zeit von 20 s, in der die Netzspannung hochgefahren wird und in der Folge einigen Schwankungen unterliegt. Interpretieren Sie den Verlauf der in der Abbildung dargestellten Signale. Wann steuert die Kennlinie der Anlage den Strom?

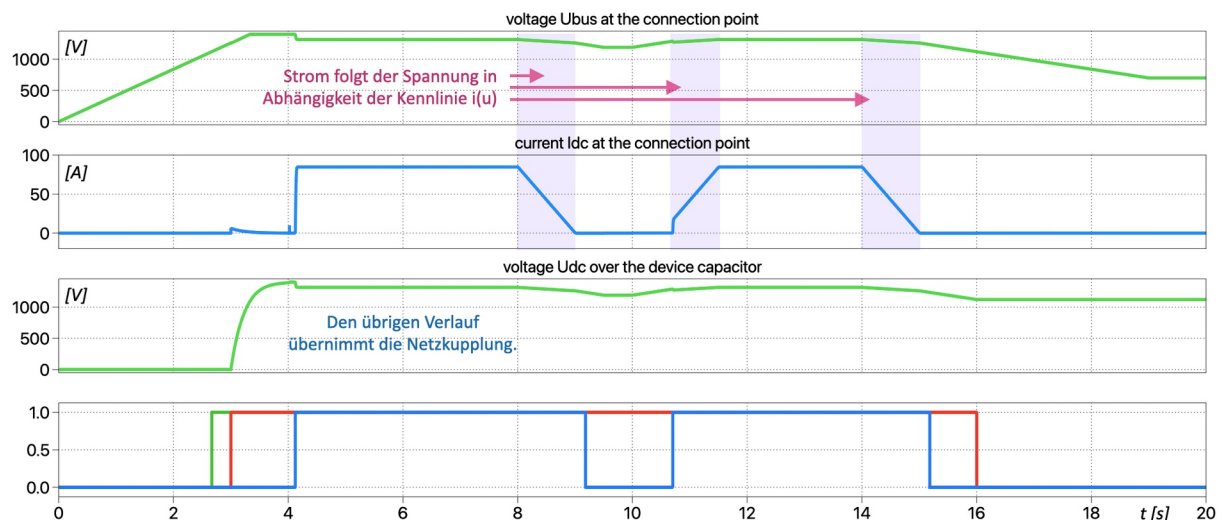


Bild 7.3.1 Ströme, Spannung der Anlagenkapazität und Ausgangssignale des Zustandsautomaten in Abhängigkeit der Spannung am Anschlusspunkt im Betrieb

Lösung: Die Vorgänge beim Hochfahren der Spannung am Anfang der Simulation, sowie beim Sinken der Spannung unterhalb des erlaubten Betriebsbereiches am Ende der Simulation wurden bereits in Abschnitt 7.2 untersucht. Von Interesse sind vor allem die in violetter Farbe hinterlegten Bereiche: Hier signalisiert die Netzkupplung Betriebsbereitschaft. Da der Strom positives Vorzeichen besitzt, handelt es sich um eine Bezugsanlage (die Ströme werden von der Sammelschiene aus in den Abgang hinein gemessen).

Der Strom in diesen Bereichen reagiert konstruktiv auf die Spannung: Mit sinkender Spannung wird der Strom zurückgenommen, mit steigender Spannung wächst der Anlagenstrom wieder. Grund für dieses Verhalten ist die Kennlinie $i(u)$ der Anlagen. Wegen des Innenwiderstandes reagiert auch die

Spannung an der Sammelschiene und somit am Anschlusspunkt der Anlage auf den Anlagenstrom. Der sinkende Strom einer Bezugsanlage stabilisiert die Spannung. Zum Zeitpunkt des Eingreifens der Netzkupplung hat die Anlage ihren Strom bereits auf null reduziert. Der Spannungseinbruch hat somit Gründe außerhalb der Anlage (in der Simulation wird er durch die Leerlaufspannung der Spannungsquelle vorgegeben).

Frage 7.3.2: Führung des Anlagenstroms mit Hilfe der Kennlinie $i(u)$. Im Betriebszustand (bei aktivem Signal „ready“) wird der Strom durch die Kennlinie der Anlage geführt. Folgende Abbildung zeigt deren Implementierung für eine Bezugsanlage als Signalfuss für den Anlagenstrom. Erläutern Sie die Funktionsweise der Kennlinie.

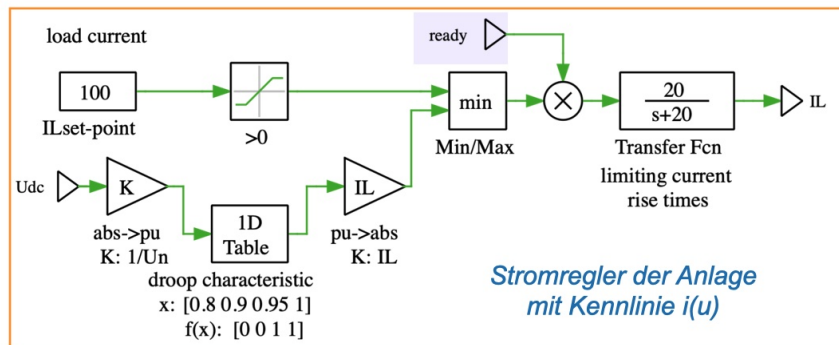


Bild 7.3.2 Stromregler der Bezugsanlage

Lösung: Der Stromregler ist nur aktiv bei gültigem Signal „ready“ = 1, andernfalls bleibt der Strom null. Der maximale Strom ist durch die Kennlinie $i(u)$ vorgegeben. Liegt der geforderte Strom unterhalb der Kennlinie, so wird dieser Wert übernommen (Minimum aus Kennlinie und Vorgabe). Das Filter am Ende begrenzt die Stromanstiegszeiten.

Frage 7.3.3: Beschreiben Sie den Ablauf aus folgender Abbildung.

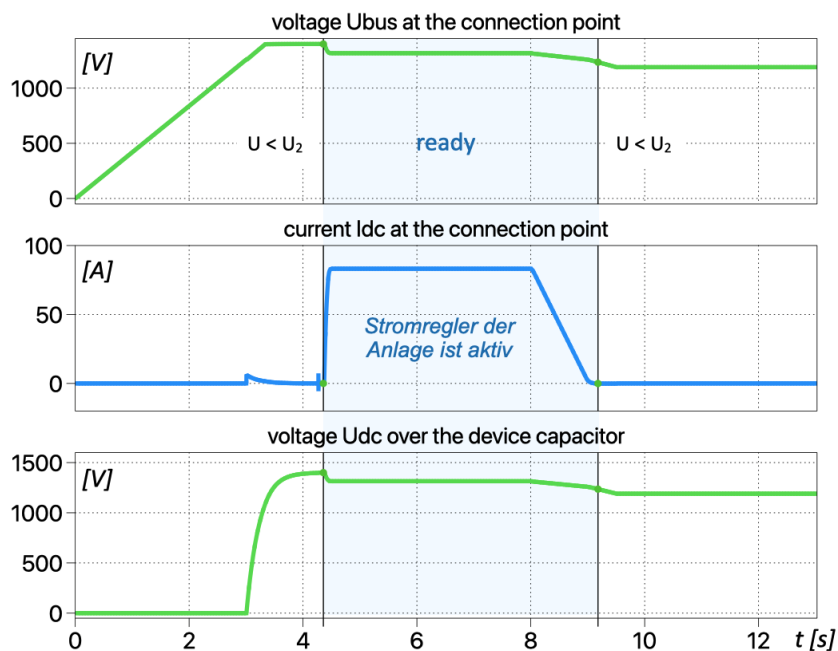


Bild 7.3.3 Führung des Anlagenstroms mit Hilfe der Kennlinie $i(u)$

Lösung: Man erkennt, dass der bei aktivem Stromregler ansteigende Anlagenstrom einen Einfluss auf die Betriebsspannung im Netz hat: diese sinkt durch den Innenwiderstand der Stromquelle (bzw. durch die Kennlinie der spannungsgeführten Stromquelle).

Mit der weiter sinkender Betriebsspannung fährt der Stromregler der Anlage den Anlagenstrom zurück, schließlich bis auf Null. Ob die Netzkupplung die Anlage von Netz trennt, ist aus dem Verlauf des Stromes und der Spannungen am Anschlusspunkt und an der Kapazität der Anlage nicht unmittelbar ersichtlich. Die Spannung über der Anlagenkapazität folgt der Spannung am Anschlusspunkt weiter.

Frage 7.3.4: Umgekehrter Lastfluss. Folgende Abbildung zeigt den Betrieb einer Einspeiseanlage am Netz anstelle der Bezugsanlage. Die Führung der Netzspannung unabhängig von der Anlage ist identisch mit dem Fall der Bezugsanlage. Erläutern Sie den Ablauf einschließlich der Reaktion der Netzkupplung. Warum trennt die Netzkupplung die Anlage in diesem Fall nicht im mittleren Bereich der Zeitverläufe?

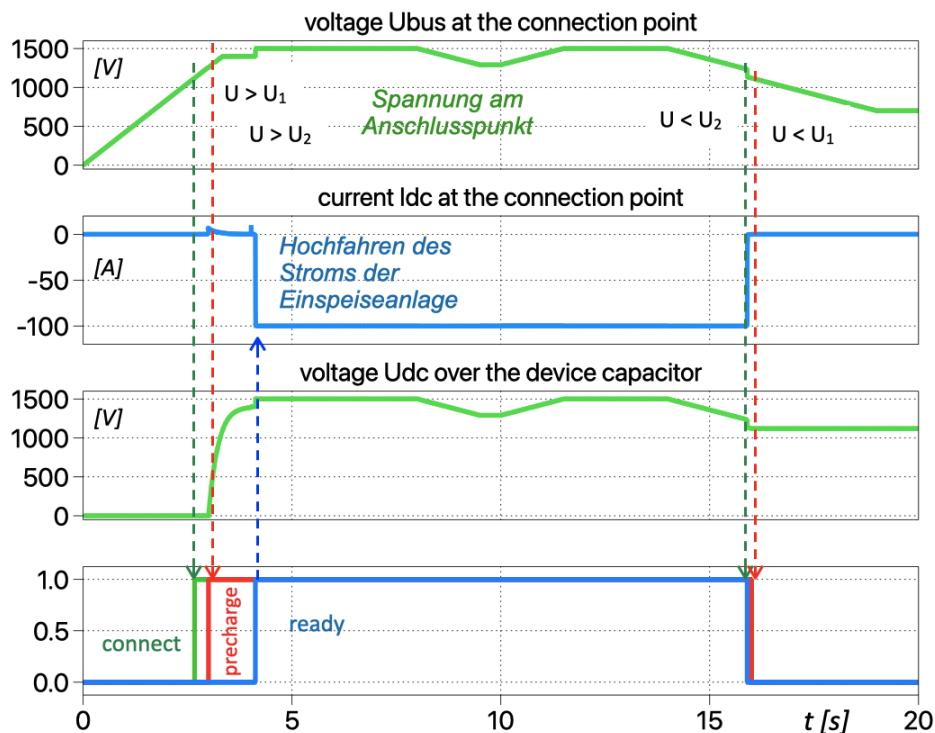


Bild 7.3.4 Betrieb einer Einspeiseanlage anstelle der Bezugsanlage unter gleichen Bedingungen

Lösung: Die Stromrichtung ist hier umgekehrt im Vergleich zur Bezugsanlage, der Betrag des Stroms ist identisch. Da der Strom in Richtung zur Spannungsquelle fließt, erhöht ein großer Strom die Netzspannung. Im Bereich niedriger Spannungen verhält sich ein großer Strom nun konstruktiv, im Unterschied zur Bezugsanlage. Aus diesem Grund reduziert der Stromregler den Anlagenstrom auch nicht bei Unterspannungen innerhalb des Betriebsbereichs. Der Stromregler der Anlage sollte den Strom umgekehrt dann reduzieren, wenn die Spannung oberhalb der Nennspannung liegt.

Nach dem Hochfahren der Betriebsspannung und der Ladung der Anlagenkapazität bleibt die Netzkupplung inaktiv, da die Spannung durch den Einspeisestrom der Anlage gestützt wird und innerhalb des normalen Betriebsbereichs verbleibt. Die Spannung der Anlagenkapazität wird auf dem Niveau der Spannung am Anschlusspunkt gehalten. Beim Hochfahren der Spannung im Netz erfolgt die Ladung der Anlagenkapazität von Netz aus, genau wie bei der Bezugsanlage.

Die Netzkupplung reagiert bei Unterschreitung des Betriebsbereichs der Spannung, sie ist gegenüber der Bezugsanlage unverändert. Die Anlagenströme werden in der Netzkupplung auf Fehler überwacht. Im Fehlerfall würde die Netzkupplung in den Fehlerzustand wechseln.

Bemerkung: Der Zustandsautomat der Netzkupplung ist nicht vollständig. In der Implementierung im Beispiel reagiert er nur auf Unterspannungen. Er wäre zu erweitern um Überspannungen. Auch eine Logik zur Detektion von Fehlern für den Anlagenschutz wäre zu ergänzen. Die Modelle sollen das Funktionsprinzip illustrieren. Für eine Implementierung in der Praxis wären sie zu erweitern.

7.4. Schnittstelle zwischen Netzkupplung und Last bzw. Einspeisung

Die Netzkupplung soll das Verbindungsprotokoll und alle sonstigen Anforderungen zum Betrieb am DC-Netz möglichst vollständig implementieren, so dass die Anlage hiervon unabhängig bleibt. Auf diese Weise kann der Kern der Anlage universell bleiben. Ebenso kann die Netzkupplung eine universelle Komponenten für Anlagen am gewählten DC-Netz darstellen.

Frage 7.4.1: Erläutern Sie den Aufbau der Anlage und die Rolle der Netzkupplung und des Anlagenkerns (Bezug/Einspeisung als Stromquelle) mit Bezug auf folgende Abbildung.

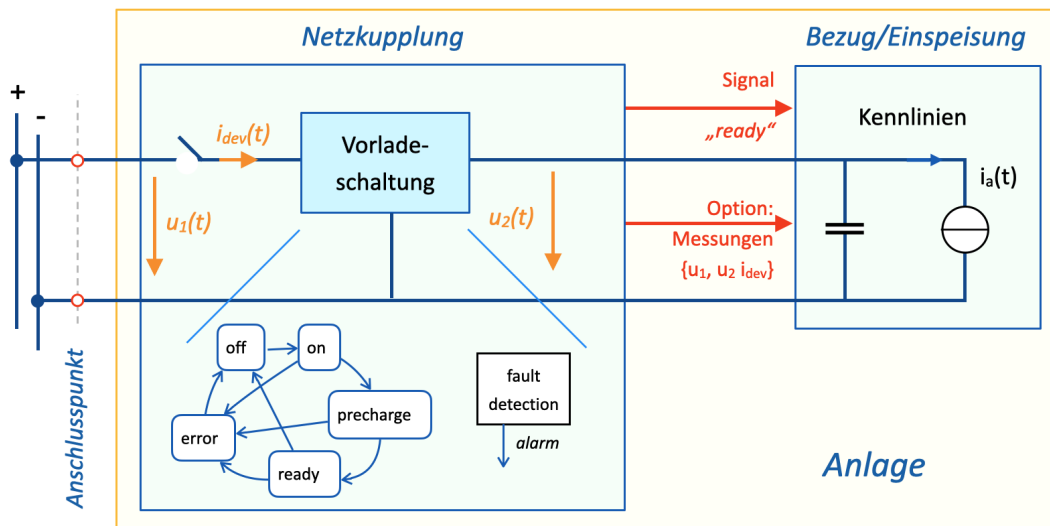


Bild 7.4.1 Aufbau einer Anlage mit der Netzkupplung als netzspezifische Komponente

Lösung: Ziel der abgebildeten Implementierung ist es, dass die Netzkupplung die speziellen Anforderungen zum Betrieb der Anlage möglichst vollständig implementiert. Der Kern der Anlage reduziert sich hiermit auf die Anlagenkapazität und den Betrieb der Anlage als Stromquelle mit Hilfe der Betriebskennlinie $i(u)$. Letztere muss sich in der Anlage parametrieren lassen.

Alle wesentlichen Funktionen zum Anschalten und Trennen der Anlage vom Netz einschließlich der Vorladung der Anlagenkapazität und des Anlagenschutzes verbleiben in der Netzkupplung, Ziel ist hier die Schaffung einer möglichst universellen Komponente als Netzkupplung für unterschiedliche Anlagentypen.

Frage 7.4.2: Komponenten der Netzkupplung und Schnittstelle zum Anlagenkern. Welche Komponenten enthält die Netzkupplung? Welche Signale benötigen Netzkupplung und Anlagenkern? Welche Signale werden zwischen der Netzkupplung und dem Anlagekern kommuniziert?

Lösung: Die Netzkupplung enthält die Vorladeschaltung einschließlich der Schutzbeschaltung, des Verbindungsschalters der Anlage, sowie aller hierfür benötigten Logik. Ebenfalls enthalten ist der Zustandsautomat für das Verbindungsprotokoll.

Zum Anlagenkern wird die Betriebsbereitschaft mit Hilfe des Signals „ready“ angezeigt. Dieses Signal kann per Leitung als digitales Signal übergeben werden, oder als Nachricht über ein Feldbusprotokoll. Wesentlich zum Betrieb der Netzkupplung sind die Messwerte $\{U_{\text{bus}} = u_1(t), U_{\text{dc}} = u_2(t) \text{ und } I_{\text{dc}} = i_{\text{dev}}(t)\}$. Wegen der für die Trennung und den Schutz notwendigen kurzen Reaktionszeiten sollten diese Signale auf der Netzkupplung gemessen werden.

Der Anlagenkern benötigt ebenfalls die Spannung $U_{\text{bus}} = u_1(t)$ bzw. ersatzweise $U_{\text{dc}} = u_2(t)$ zum Betrieb der Kennlinie $i(u)$. Im einfachsten Fall misst der Anlagenkern die Kondensatorspannung $U_{\text{dc}} = u_2(t)$ selber. Andernfalls wäre eine Übertragung der Messwerte von der Netzkupplung in den Anlagenkern denkbar.

Frage 7.4.3: Kennlinien der Anlage. Für Anlagen lassen sich Kennlinien der Form $U(P)$ vorgegeben, wie in der folgenden Abbildung dargestellt. Wie lassen sich diese Kennlinien in die Form $i(u)$ übersetzen?

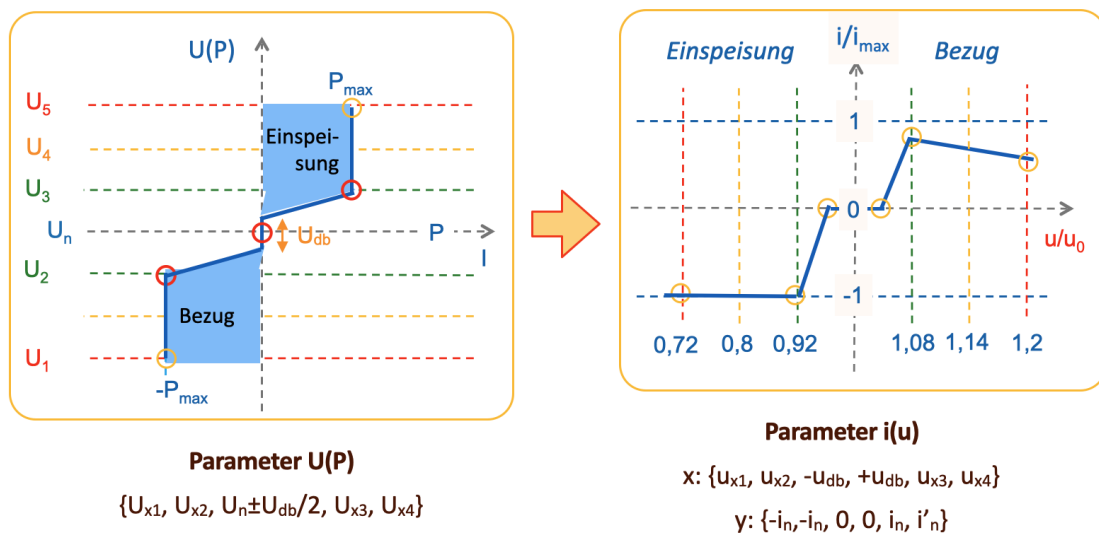


Bild 7.4.2 Vorgabe von Kennlinien der Form $U(P)$

Lösung: In der Form $U(P)$ lassen sich als Eckpunkte die Spannungen $\{U_{x1}, U_{x2}, U_n \pm U_{db}/2, U_{x3}, U_{x4}\}$ bei gegebener Anlagenleistung verwenden. Für die Anlagenleistung genügen hierfür die Werte $\{-P_{\text{max}}, 0, P_{\text{max}}\}$. Im Bereich des Totbandes $U_n \pm U_{db}/2$ werden die Leistungswerte hierbei vom Maximum auf null interpoliert.

Da die Anlagen als leistungselektronische Systeme ausgeführt sind, enthalten sie einen Stromregler oder eine Leistungsregler. Die Stellgröße ist in beiden Fällen der Strom. Daher ist für die Führung der Anlagen eine Kennlinie der Form $I(U)$ vorteilhaft. Weiterhin sind die Anlagen strombegrenzt und leistungsbegrenzt. In der Stromkennlinie $I(U)$ sind die Stromgrenzen direkt vorgebar, die Leistungsgrenzen lassen sich durch den Stromverlauf abbilden: Es gilt $P = U I$.

Aus der Gleichung $P = U I$ folgt auch die Abbildung der Leistungskennlinie $P(U)$ als Umkehrung von $U(P)$. Ersetzt man $P(U) = U I$, so folgt die Stromkennlinie $I(U) = P(U)/U$, wobei bei Leistungen innerhalb des Betriebsbereiches die Strombegrenzung verwendet wird. Für die Stromkennlinien ist hierbei die normierte Form $i(u)$ von Vorteil, indem man die Spannung auf die Nennspannung U_n bezieht, und den Strom auf den Nennstrom bzw. auf den maximalen Strom.

Zur Abbildung oben ist zu bemerken, dass die Vorgabe der Leistungskennlinie $U(P)$ im Erzeugerzählpfeilsystem erfolgt ist (positive Leistung = Leistungsabgabe). Die Stromkennlinie verwendet das Verbraucherzählpfeilsystem (positive Leistung = Leistungsaufnahme). Diese Wahl ist willkürlich: Ein positiver Strom wird als Laststrom interpretiert.

Frage 7.4.4: Wie lassen sich die wesentlichen Erkenntnisse zur Kopplung einer Anlage ans Netz zusammenfassen?

Lösung: (1) Verbindung und Trennung einer Anlage ans Netz: Erfolgt mit Hilfe einer Netzkupplung. Diese lässt sich in eine Anlage integrieren und teilt der Anlage die Betriebsbereitschaft mit.

(2) Netzkupplung: Die Netzkupplung enthält einen Schalter zum Trennen und Anschalten der Anlage und eine Vorladeschaltung zum Laden der Anlagenkapazität mit begrenztem Strom. Die Netzkupplung führt das Verbindungsprotokoll des DC-Netzes mit Hilfe eines Zustandsautomaten aus. Außerdem überwacht die Netzkupplung die Spannungen und den Anlagenstrom und führt eine Schutzauslösung im Rahmen des Anlagenschutzes aus. Sofern eine Schnittstelle zur externen Schutzauslösung vorgesehen ist, ist diese ebenfalls in der Netzkupplung integriert.

(3) Bezugsanlage bzw. Einspeiseanlage als Anlagenkern: Der Anlagenkern benötigt keine Kenntnis des Protokolls des DC-Netzes. Im Falle der Betriebsbereitschaft, die durch die Netzkupplung angezeigt wird, regelt der Anlagenkern den Anlagenstrom mit Hilfe der Kennlinie $i(u)$. Die Form der Kennlinie ist abhängig vom Typ der Anlage: Bezugsanlagen und Einspeiseanlagen haben unterschiedliche Kennlinien.

8. Betrieb einer Anlage am Netz

Thema dieses Abschnitts ist der Betrieb einer Anlage am Netz mit Hilfe von Kennlinien. Der relevante Teil der Anlage ist nun der Anlagenkern: Bezugsanlagen erfordern andere Kennlinien als Einspeiseanlagen.

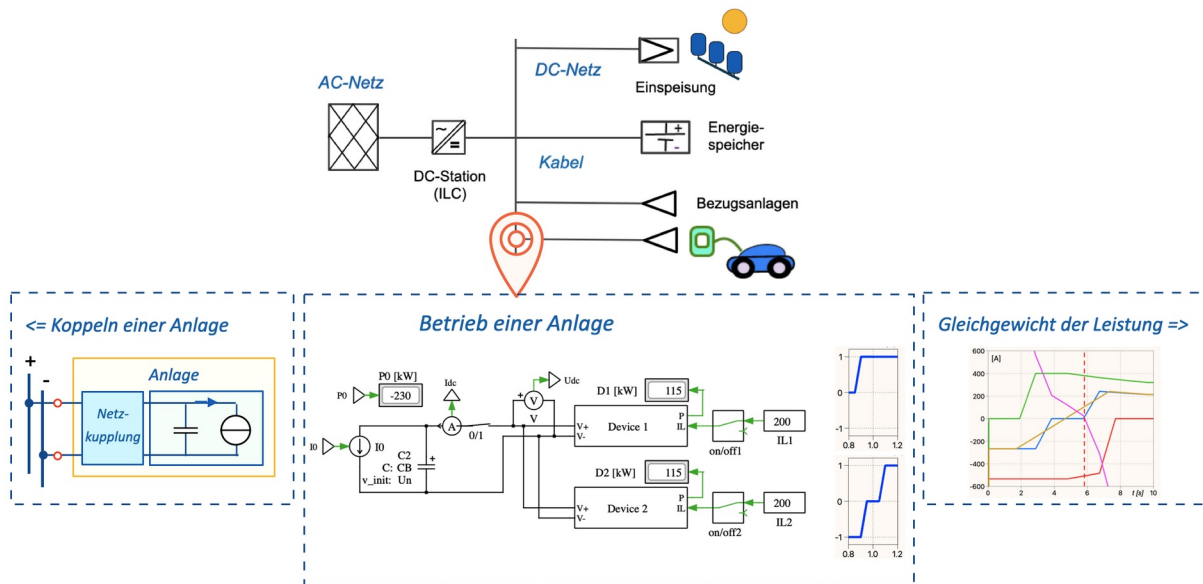


Bild 8.1 Übersicht zum Betrieb einer Anlage mit Hilfe von Kennlinien

Weitere Anlagentypen sind die Netzbildner mit der Aufgabe der Spannungsführung im Netz, sowie Energiespeicher in ihren unterschiedlichen Betriebsarten. Hierbei muss ein Anlagentyp nicht auf eine Betriebsart beschränkt bleiben: Ein Interlink-Konverter als Verbindung zum AC-Netz eignet sich als Netzbildner ebenso wie ein Batteriespeichersystem.

Letzteres kann alternativ stromgeführt betrieben werden (abhängig von Angebot und Nachfrage, bzw. von diesbezüglichen Stromkosten), oder netzstützend abhängig von der Spannung im DC-Netz. Ladestationen können bidirektional ausgeführt werden und bei Bedarf ihre Betriebsart von der Bezugsanlage zur Einspeiseanlage wechseln.

8.1. Organisation der Spannungsbänder

Basis des Betriebes einer Anlage am Netz ist die Nennspannung des Netzes. Anlagen sind für den Betrieb mit Nennspannung ausgelegt, sowie um einen Spannungsbereich um den Nennwert. Die Spannung in einem Gleichspannungsnetz ist gleichzeitig Indikator für den Lastzustand des Netzes: An einer Spannungsquelle entspricht die Nennspannung der Leerlaufspannung. Abweichungen von der Nennspannung kommen durch den Innenwiderstand der Spannungsquelle zustande, und zwar abhängig von Strom und somit von der Last im Netz,

Eine Bezugsanlage entnimmt der Spannungsquelle einen Strom, hierdurch sinkt die Klemmenspannung im Vergleich zur Nennspannung. Eine Einspeiseanlage führt der Spannungsquelle einen Strom zu: Die Spannung an der Anschlussklemme der Spannungsquelle steigt. Im DC-Netz ist die Spannungsquelle mit der Sammelschiene (DC-Bus) verbunden, die Klemmenspannung entspricht somit der Spannung an der Sammelschiene.

Zum Betrieb einer Anlage muss somit neben der Nennspannung auch der Spannungsbereich unterhalb und oberhalb der Nennspannung definiert werden, innerhalb dessen die Anlage betrieben werden darf. Folgende Abbildung zeigt ein Beispiel für die Organisation der Spannungsbänder zusammen mit der Kennlinie einer Spannungsquelle mit Innenwiderstand.

Der normale Betriebsbereich liegt in dieser Darstellung innerhalb des Intervalls $\{U_2, U_3\}$, wobei sich die Nennspannung U_n sich in der Mitte dieses Intervalls befindet. In der Kennlinie im rechten Teil der Abbildung ist dieser Bereich als $\{0,92 U_n, 1,08 U_n\}$ beziffert.

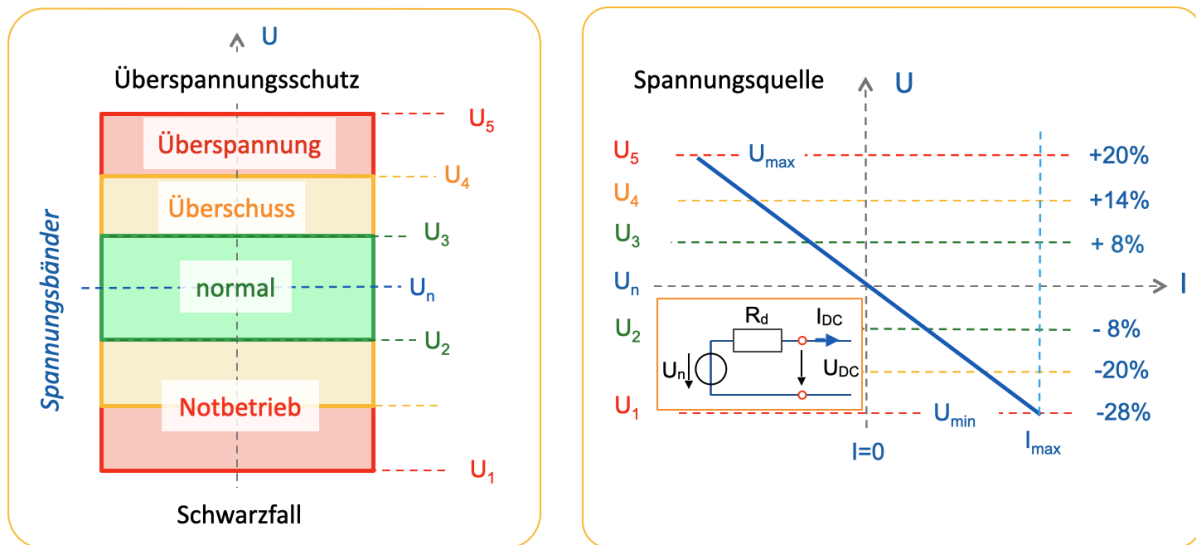


Bild 8.1 Spannungsbänder und Kennlinie einer Spannungsquelle

Im Bereich der Unterspannung (d.h. außerhalb den normalen Bereichs und unterhalb U_2) dürfen nur noch dringend benötigte Verbraucher im Notbetrieb am Netz bleiben. Spannungen oberhalb des normalen Bereichs (d.h. oberhalb U_3) schaden den Anlagen und sind nur für begrenzte Zeit zulässig.

Frage 8.1.1: Spannung und Strom. Wie kommt die Kennlinie $I(U)$ im rechten Teil der Abbildung oben zustande? Welches Zählpeilsystem wird hierbei verwendet?

Lösung: Die Nennspannung U_n entspricht der Leerlaufspannung der Spannungsquelle: Diese Spannung tritt nur im stromlosen Zustand ($I = 0$). Bei positivem Strom in Zählpeilrichtung fällt eine Spannung über dem Innenwiderstand R_d der Spannungsquelle ab: die Klemmenspannung $U(I)$ sinkt unter das Niveau der Leerlaufspannung. Umgekehrt führt der negative Strom einer Einspeisung zu einer erhöhten Klemmenspannung. Es gilt:

$$U(I) = U_n - R_d I \quad (8.1.1)$$

In der gewählten Zählpeilrichtung ist die Leistung über der Last $P_2 = U I > 0$ und es wird Leistung von der Last aufgenommen. An der Spannungsquelle fließt ein positiver Strom aus der Spannungsquelle heraus, entgegen deren Zählpeilrichtung, es ist somit $P_1 < 0$ und die Quelle gibt Leistung ab.

Die Kennlinie zusammen mit der Zählpeilrichtung gilt somit im Verbraucherzählpeilsystem. Dieses ist so definiert, dass $P > 0$ eine Leistungsaufnahme bedeutet, und $P < 0$ eine Leistungsabgabe. Die Steigung der Kennlinie ist durch den Innenwiderstand R_d vorgegeben: Je größer der Innenwiderstand, desto größer die Steigung der Kennlinie.

Frage 8.1.2: Netzbildung. Unter einem Netzbildner versteht man diejenige Anlage, die die Spannung im Netz bereitstellt. Diese Anlage besitzt die Charakteristik einer Spannungsquelle. In der folgenden Abbildung wird das Verbraucherzählpeilsystem verwendet, jedoch werden alle Ströme von der DC-Sammelschiene aus einheitlich in die Abgänge und somit in die Anlagen hinein gemessen. Das gilt auch für die Spannungsquelle als Netzbildner. Interpretieren Sie den Verlauf der Kennlinien in absoluter und normierter Darstellung. Wie erhält man ausgehend von der Spannungs-kennlinie $U(I)$ die normierte Stromkennlinie $i(u)$?

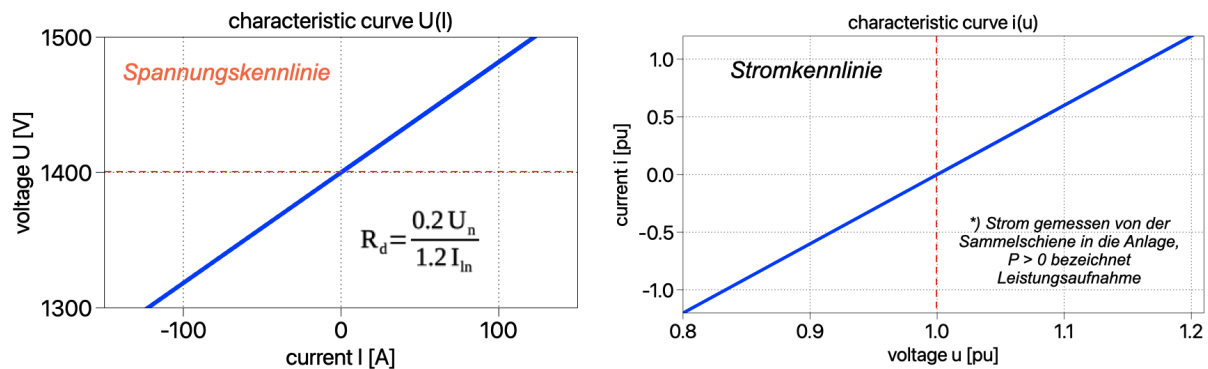


Bild 8.1.2 Spannungskennlinie und Stromkennlinie der Spannungsquelle

Lösung: Mit umgekehrter Zählfeilrichtung für den Strom ist der Strom eines Verbrauchers nun negativ. Er fließt nach wie vor von der Spannungsquelle zum Verbraucher, wird jedoch in die Spannungsquelle hinein gemessen. Somit gilt für Kennlinie der Spannungsquelle:

$$U(I) = U_n + R_d I \quad (8.1.2)$$

Die Steigung der Kennlinie R_d errechnet sich aus dem Verhältnis $R_d = \Delta U / \Delta I$. Für die dargestellte Kennlinie wäre $R_d \approx 1/6 U_n / I_n$. Etwas einfacher lässt sich die normierte Gleichung verwenden, wenn man die Spannung auf die Nennspannung U_n und den Strom auf den Nennstrom I_n bezieht: Es gilt $i = I / I_n$ und $u = U / U_n$. Durch Einsetzen in Gleichung (8.1.2) erhält man

$$u(i) = 1 + r_d i \quad (8.1.2')$$

mit $r_d = R_d (I_n / U_n)$. Im Beispiel wäre somit $r_d = 1/6$. Für die Stromkennlinie im rechten Teil der Abbildung gilt somit

$$i(u) = \frac{u-1}{r_d} \quad (8.1.2'')$$

Die Gleichung beschreibt eine Gerade mit der Steigung $1/r_d$ durch den Punkt $\{1,0\}$. Bei Nennspannung $u = 1$ beträgt der Strom null. Steigt die Spannung über den Nennwert, d.h. $u > 1$, nimmt die Anlage (hier der Netzbildner) Leistung auf. Bei Spannungen unterhalb des Nennwertes ($u < 1$) gibt die Anlage Leistung ab. Diese Konvention gilt nun einheitlich für alle Anlagen. Charakteristisch für den Netzbildner ist die lineare Kennlinie in beiden Halbebenen der Leistung ($P < 0$ und $P > 0$).

Frage 8.1.3: Spannungsgeführte Stromquelle mit Kennlinie. Eine Stromquelle soll mit Hilfe der normierten Kennlinie $i(u)$ nach Gleichung (8.1.2'') geführt werden, wie in folgender Abbildung dargestellt. Wieso entspricht das Verhalten dieser Stromquelle dem einer Spannungsquelle?

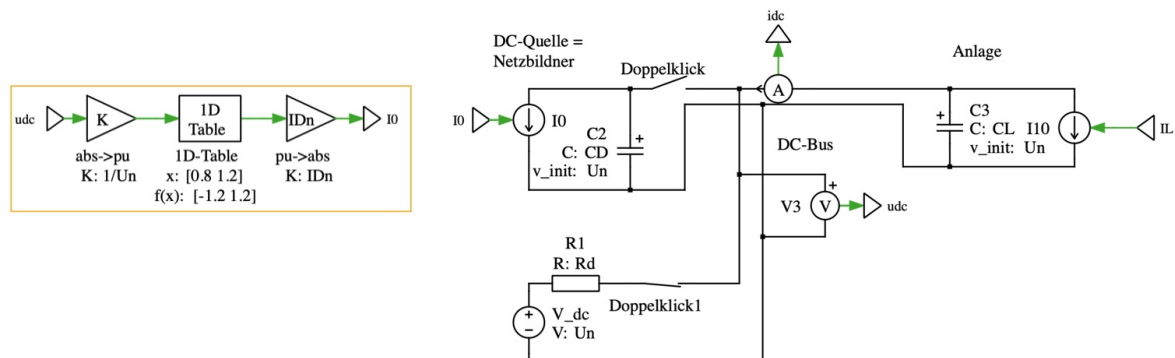


Bild 8.1.3 Netzbildner mit Stromkennlinie $i(u)$

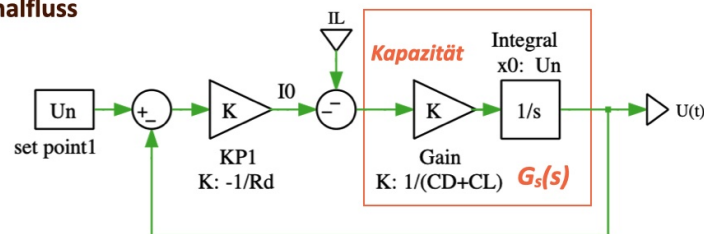
Lösung: Gleichung (8.1.2'') lässt sich nach Gleichung (8.1.2') umformen. Die Kennlinie wurde so bemessen, dass die Steigung r_d entspricht.

Bemerkung: Die Gleichung gilt streng genommen für den Strom an der DC-Sammelschiene $I = I_{dc}$. Die Kennlinie stellt den Strom der Spannungsquelle I_0 , der alternativ in die Kapazität C_D des Netzbildners abfließen kann. Daher gilt die Gleichung nur im ausgeregelten Zustand, wenn der Kondensatorstrom null beträgt und somit $I_{dc} = I_0$.

Durch die Rückkopplung der Spannung u_{dc} als Eingangsgröße der Kennlinie $i_0(u_{dc})$ entsteht eine Regelschleife. Die Führung der Spannung durch die Stromquelle (mit dem Strom I_0 als Stellgröße) mit Hilfe der Kennlinie stellt somit eine Spannungsregelung dar.

Frage 8.1.4: Spannungsgeführte Stromquelle mit P-Regler. Folgende Abbildung zeigt als Alternative zur Kennlinie für die spannungsgeführte Stromquelle einen P-Regler zur Stellung des Stroms. Repräsentiert diese Anordnung ebenfalls die Kennlinie (8.1.2) einer Spannungsquelle? Begründen Sie Ihre Aussage,

Signalfluss



elektrische Ersatzschaltung

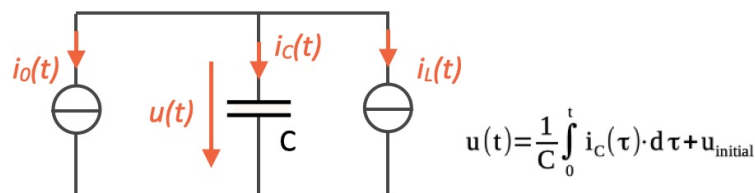


Bild 8.1.4 Netzbildner mit P-Regler

Lösung: Hier führt der Weg über die Übertragungsfunktion der Regelschleife.

$$U = -\frac{G_s K_p U_n}{1 - G_s K_p} - \frac{G_s I_L}{1 - G_s K_p} \quad (8.1.3)$$

Die Übertragungsfunktion der Regelstrecke G_s beträgt:

$$G_s(s) = \frac{1}{C_s}, \text{ die Reglerkonstante } K_p = -\frac{1}{R_d}$$

Durch Einsetzen erhält man

$$U = \frac{1}{R_d C s + 1} U_n - \frac{R_d}{R_d C s + 1} I_L \quad (8.1.4)$$

Für den eingeschwungenen Zustand $t \rightarrow \infty$ gilt $s \rightarrow 0$. Hieraus erhält man Gleichung (8.1.2). Der Laststrom I_L hat umgekehrtes Vorzeichen wie der Strom I des Netzbildners (da alle Ströme von der Sammelschiene in Richtung der Anlagen gemessen werden). Im ausgeregelten Zustand verhält sich die spannungsgeführte Stromquelle somit wie eine Spannungsquelle als Netzbildner.

8.2. Kennlinien der Anlagen

Wie der Netzbildner lassen sich alle übrigen Anlagen mit Hilfe von Kennlinien beschreiben. Da die Anlagen im Kern Stromquellen darstellen, wird hierzu die Stromkennlinie $i(u)$ verwendet. Das ist auch bei Definition einer Leistungskennlinie möglich. Die Stromkennlinie berücksichtigt Leistungsgrenzen und Stromgrenzen der Anlagen.

Frage 8.2.1: Eigenschaften der Kennlinien. Beschreiben Sie das Verhalten der in der Abbildung dargestellten Anlagen mit Hilfe ihren Kennlinien.

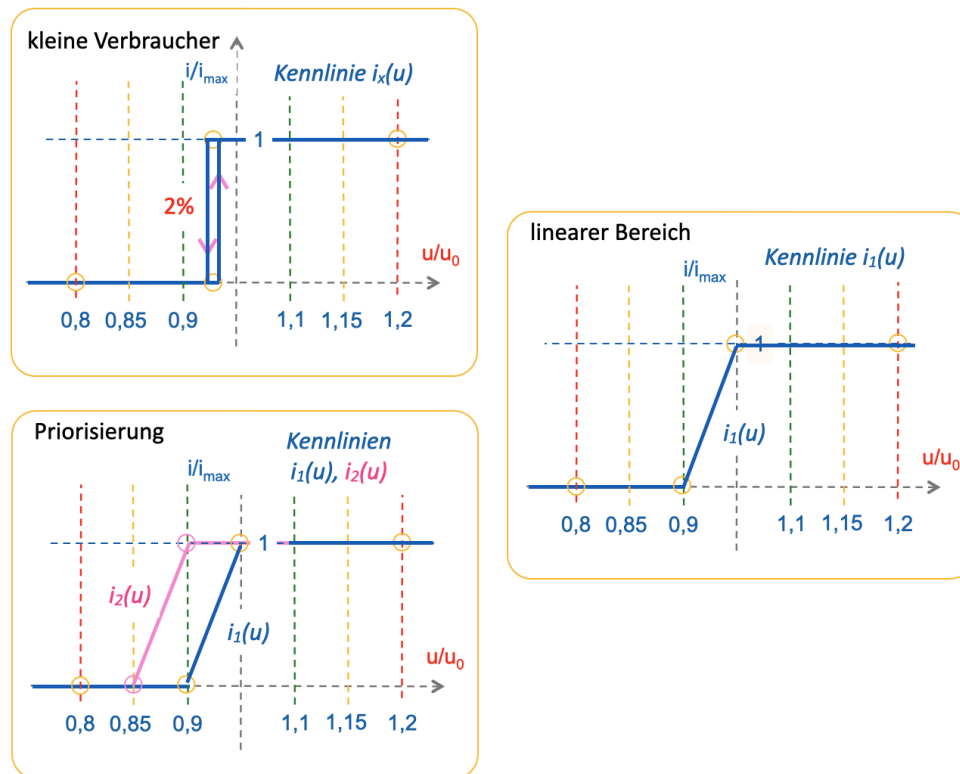


Bild 8.2.1 Kennlinien zur Beschreibung der Anlagen

Lösung: (1) Kleine Verbraucher, beispielsweise zur Beleuchtung, sind entweder eingeschaltet oder ausgeschaltet. Sie beziehen also entweder keinen Strom, oder gleich ihren Nennstrom. Die Kennlinie kennt nur die beiden Werte $\{0,1\}$. Der Übergang in den eingeschalteten Zustand erfolgt bei einem etwas höheren Schwellwert der Spannung als der umgekehrte Übergang von ein nach aus. Hierdurch soll ein Flackern der Beleuchtung vermieden werden, wenn die Spannung im Bereich des Übergangs schwankt.

(2) Verbraucher mit linearem Übergang der Kennlinie: Solche Verbraucher wechseln ab einem Schwellwert der Spannung kontinuierlich (mit linear ansteigendem Strom) in den eingeschalteten Zustand. Umgekehrt reduzieren diese Anlagen bei sinkender Netzspannung ihren Strombezug und somit ihre Leistung, bis sie an der unteren Schwelle vollständig ausschalten. Dieses Verhalten unterstützt das Netz: Bei hohem Leistungsbezug gibt die Spannung des Netzbildners nach (sinngemäß am Innenwiderstand der Spannungsquelle). Bezugsanlagen reduzieren hier ihre Leistungsaufnahme.

(3) Priorisierung von Anlagen: In diesem Beispiel der lineare Bereich der Kennlinien der Anlagen gegeneinander verschoben. Die Anlagen verhalten sich zueinander in Art einer Hysterese: Eine Anlage wechselt mit steigender Spannung früher in den eingeschalteten Zustand als die andere. Bei sinkender Spannung bleibt diese Anlage länger am Netz. Diese Anlage ist somit gegenüber der anderen priorisiert; sie arbeitet in der Art einer Notbeleuchtung noch bei niedrigeren Spannungen.

Frage 8.2.2: Netzbildner und Bezugsanlage mit Kennlinientester. Folgende Abbildung zeigt einen experimentellen Aufbau mit einer Last, die durch eine Kennlinie gesteuert wird. Der Netzbildner besteht aus einer Stromquelle, die mit Hilfe ihrer Kennlinie spannungsgeführt wird. Die Anordnung enthält außerdem einen Kennlinien-Tester: Eine nahezu ideale Spannungsquelle (mit sehr niedrigem Innenwiderstand) durchfährt den relevanten Spannungsbereich zwischen $\{0,75 U_n, 1,25 U_n\}$. Mit aktivem Kennlinientester werden alle Anlagen im Netz durch diesen versorgt. Es lassen sich somit alle Anlagekennlinien aufzeichnen. Untersuchen Sie den Aufbau in der Simulation. Welche Form haben die Kennlinien des Netzbildners und der Last? Wie spielen die Kennlinien zusammen? Welcher Arbeitspunkt wird sich einstellen?

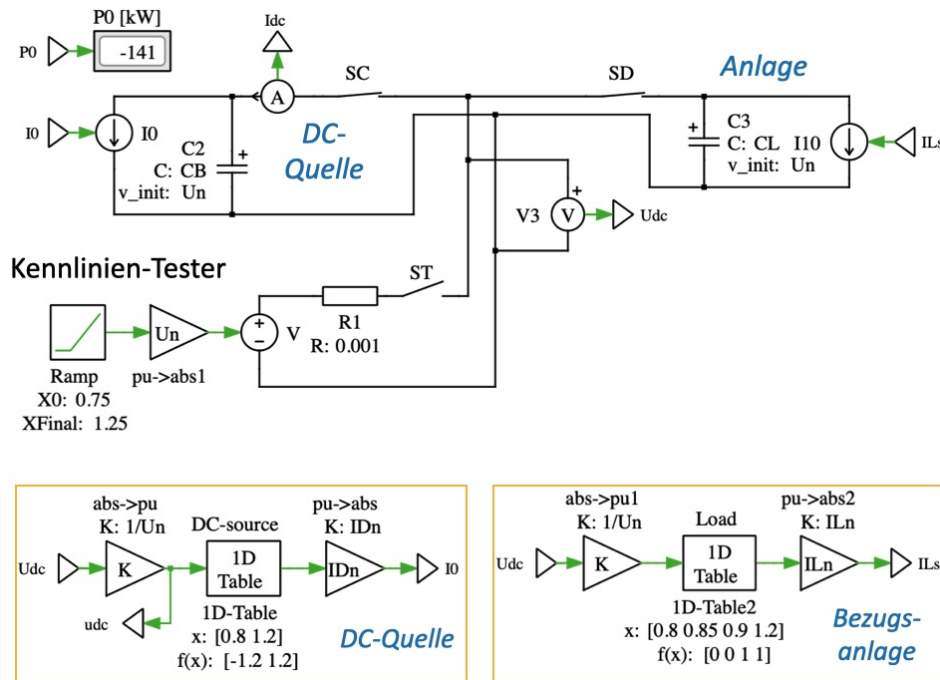


Bild 8.2.2 Minimales Netz mit Kennlinientester

Lösung: Siehe folgende Abbildung.

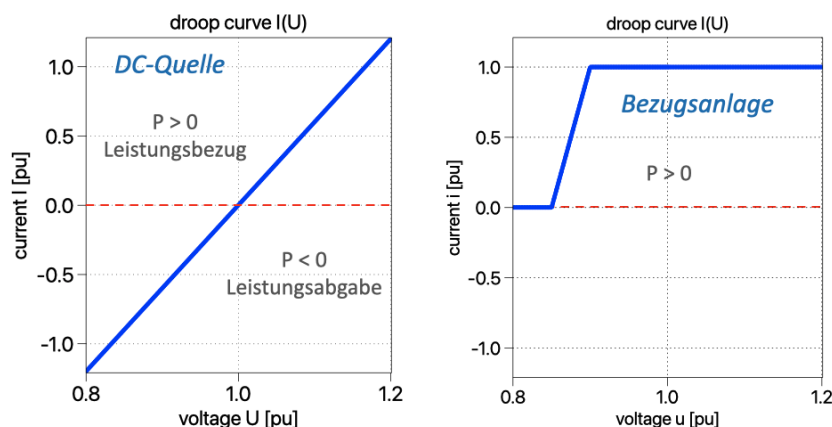


Bild 8.2.3 Aufgezeichnete Kennlinien der Anlagen

Die beiden Kennlinien zeigen den Verlauf, der in den Eckpunkten der Tabelle (1D-Table im Signalfluss-Diagramm) angegeben ist. Zwischen den Eckpunkten wird linear interpoliert. Die Kennlinie des Netzbildners verläuft linear, wie in Aufgabe 8.1 dargestellt. Die Kennlinie der Bezugsanlage schaltet im In-

tervall $\{0,85 U_n, 0,9 U_n\}$ linear ansteigend ein, der Strom bleibt ab dem oberen Wert auf den Nennstrom begrenzt.

Um den Arbeitspunkt zu ermitteln, wären die Absolutwerte der Ströme zu betrachten. Im Arbeitspunkt herrscht ein Gleichgewicht der Ströme: Die Summe aller Ströme an der Sammelschiene ist gleich Null. Mit DC-Quelle und Bezugsanlage als einzigen Anlagen gilt somit $I_0 = I_L$. Wo genau der Arbeitspunkt der Bezugsanlage (und somit der des Netzbildners) einstellt, hängt von der Nennleistung bzw. den Nennströmen der Anlagen ab. In der Simulation stellt sich der Arbeitspunkt ein, indem man den Kennlinientester von der Sammelschiene trennt.

Frage 8.2.3: Kennlinien für Bezugsanlagen. Die Anordnung aus der letzten Aufgabe hat folgende Mängel: (1) Die Bezugsanlage fährt stets den maximalen Strom, den die Kennlinie zulässt: Sie fährt auf der Kennlinie. Kleinere Leistungen bzw. kleinere Ströme (unterhalb der Kennlinie) lassen sich hiermit nicht realisieren. (2) Bei Spannungen $u > 1$ fährt die Anlage mit maximalem Strom $i = 1$. Folglich steigt die Leistung $p = u \cdot i > 1$ über die Leistungsgrenze der Anlage. In der Kennlinie wäre eine Leistungsbegrenzung einzuführen. Passen Sie die Schaltung für diese beiden Anforderungen an und überprüfen Sie die Funktion der Schaltung in der Simulation.

Lösung: (1) Führung der Bezugsanlage: Siehe folgende Abbildung.

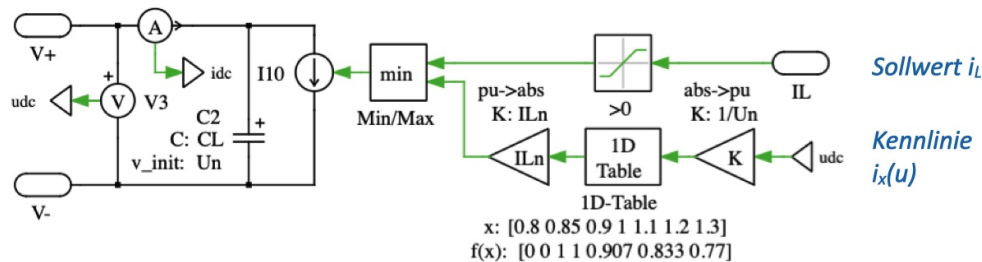


Bild 8.2.4 Führung der Bezugsanlage mit Sollwert und Grenzkennlinie

Die Anlage arbeitet als Stromquelle, deren Sollwert vorgegeben wird. Solange diese Vorgabe unterhalb der Kennlinie als Grenzkurve liegt, gilt der vorgegebene Sollwert. Überschreitet der Sollwert die Grenzkurve, gilt der Wert der Grenzkurve. Die Auswahl erfolgt durch das Minimum beider Werte.

(2) Leistungsgrenzen und Leistungskennlinie: siehe folgende Abbildung.

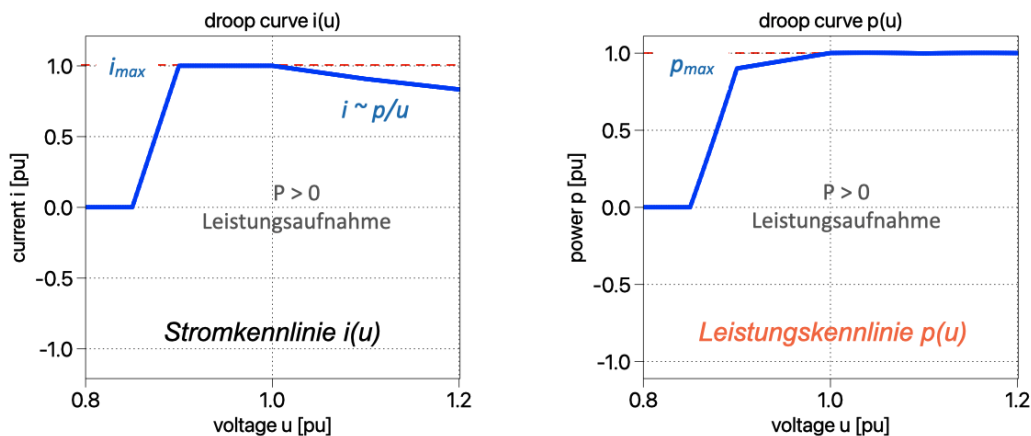


Bild 8.2.5 Stromkennlinie und Leistungskennlinie mit Begrenzungen

Oberhalb der Nennspannung $u = 1$ muss der Strom gemäß der Beziehung $i = p/u$ reduziert werden, damit die Leistungsgrenze eingehalten wird. Die Leistung lässt sich aus $p = u \cdot i$ messen und über der

Spannung als Leistungskennlinie $p(u)$ aufzeichnen. Die Werte für die Strombegrenzung finden sich in der Tabelle im Signalfluss der Ersatzschaltung in der letzten Abbildung. Die Begrenzung ist linear interpoliert. Die aufgezeichneten Kennlinien illustrieren die Funktion der Begrenzung: Durch die Rücknahme des Stroms bleibt die Leistung der Bezugsanlage bei Spannungen $u > 1$ nun konstant.

Frage 8.2.4: Kennlinien für Einspeiseanlagen. Folgende Abbildung zeigt ein minimales Netz mit einer Einspeiseanlage. Die Kennlinie wurde durch eine Tabelle vorgegeben und mit dem Kennlinientester aufgezeichnet. Erläutern Sie die Arbeitsweise der Einspeiseanlage. Welcher Arbeitspunkt wird sich einstellen? Wie lässt sich die Einspeiseanlage durch einen Sollwert mit kleinerer Leistung im Bereich der Kennlinie führen? Führen Sie eine Leistungsbegrenzung der Anlage ein.

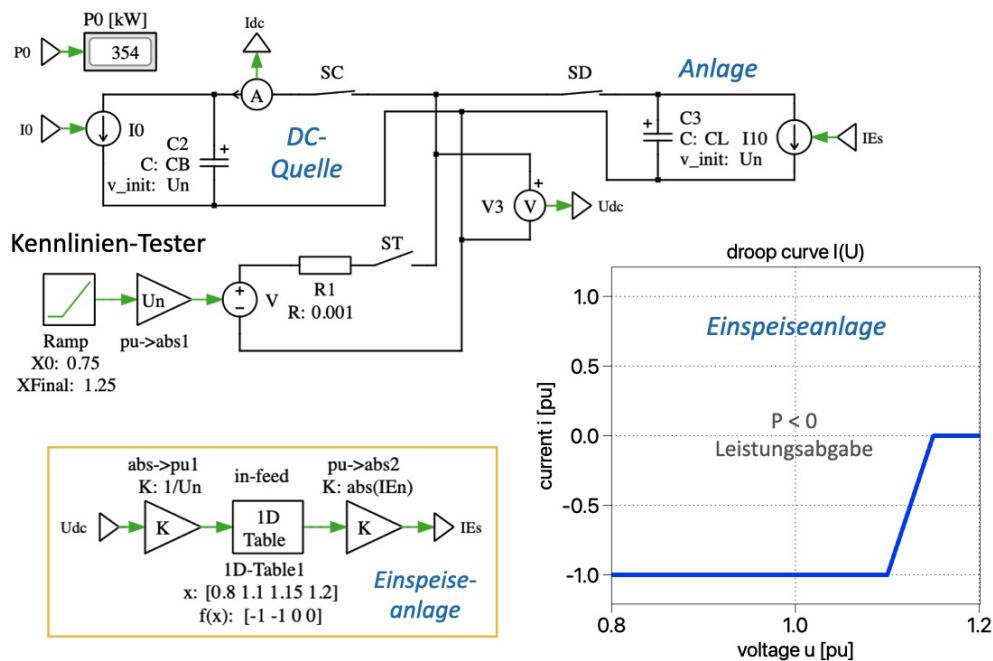


Bild 8.2.6 Netz mit Einspeiseanlage und Kennlinientester

Lösung: Die Funktionsweise entspricht der der Bezugsanlage: Der Anlagenstrom wird durch die Kennlinie $i(u)$ in Abhängigkeit der Spannung am Anschlusspunkt (bzw. an der Sammelschiene) geführt. Allerdings ist der Anlagenstrom nun stets negativ: Er fließt von der Anlage weg und auf die Sammelschiene zu. Hierdurch bleibt die Leistung stets $p < 0$, es wird Leistung ans Netz abgegeben.

Die Anlage begrenzt ihre Leistungsabgabe, wenn die Spannung in einen Bereich oberhalb der Nennspannung weiter ansteigt. Für eine Einspeiseanlage ist dieses Verhalten netzdienlich, da der Anlagenstrom die Spannung am Innenwiderstand der DC-Quelle erhöht. Bei Spannungen unterhalb der Nennspannung gibt es keine Einschränkungen des Stroms: Hier stützt der Anlagenstrom die Netzspannung.

Die Vorgabe kleinerer (negativer) Anlagenströme oberhalb der Grenzkurve ist mit dieser Anordnung nicht möglich. Auch eine Leistungsbegrenzung ist an der Stromkennlinie nicht zu erkennen. Folgende Abbildung zeigt eine erweiterte Anordnung zusammen mit der Stromkennlinie $i(u)$ und der Leistungskennlinie $p(u)$.

Man erkennt, dass nun ein negativer Sollwert für den Strom direkt vorgeben werden kann. Solange dieser Strom oberhalb der Kennlinie als Grenzkurve liegt, ist der Wert als Vorgabe des Stroms gültig. Liegt der Wert unterhalb der Kennlinie, hat die Kennlinie den Vorrang. Die Auswahl zwischen dem vorgegebenem Sollwert und der Kennlinie wird somit durch das Maximum beider Werte getroffen.

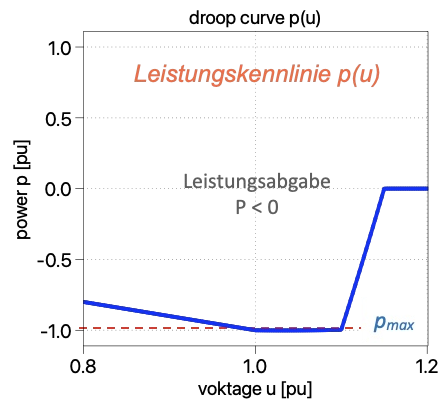
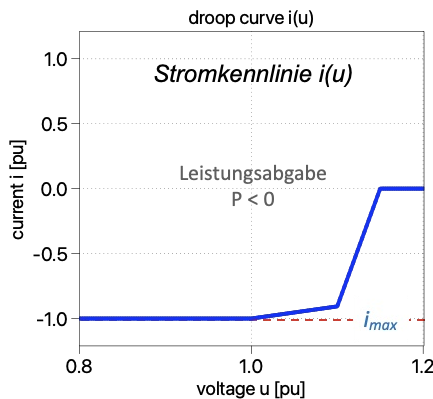
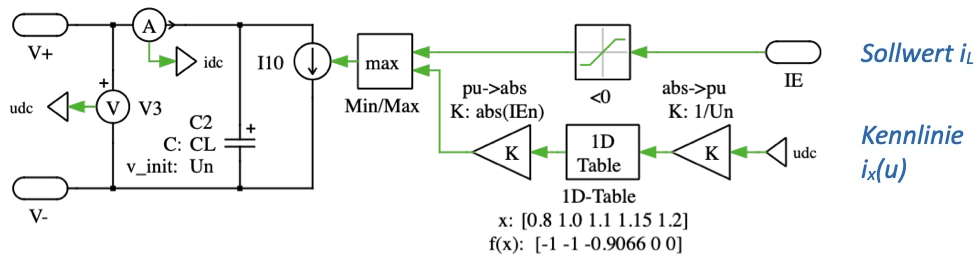


Bild 8.2.6 Führung der Einspeiseanlage mit Sollwert und Begrenzung

Die Stromkennlinie wurde so angepasst, dass das Leistungsmaximum eingehalten wird. In der Kennlinie betrifft das nur den Bereich $u > 1$ innerhalb des ursprünglich konstanten Stromes, in dem bei maximalen Strom die Leistung $p = u \cdot i > 1$ würde.

Dieser Bereich geht nun in den linearen Bereich der Kennlinie über, indem der Strom auf den Wert null geführt wird. Für Spannungen $u < 1$ ist bei maximalem Strom keine Leistungsbegrenzung erforderlich.

8.3. Energiespeichersysteme

Energiespeichersysteme sind nicht auf eine Lastflussrichtung begrenzt: Sie können Leistung aufnehmen oder Leistung abgeben. Die Menge der aufzunehmenden oder abzugebenden Energie hängt vom Füllstand des Energiespeichers ab (engl. State of Charge, kurz SoC). Nur ein vollständig gefüllter oder komplett leerer Speicher ist auf eine Lastflussrichtung begrenzt. Als Beispiel sei hier ein Batteriespeichersystem betrachtet (BESS als Abkürzung für Battery Energy Storage System).

Für Energiespeichersysteme sind in den Kennlinien somit folgende Eigenschaften abzubilden:

- (1) Wirksamkeit in beider Halbebenen des Kennlinienfeldes ($P > 0$ und $P < 0$), wie ein Netzbildner.
- (2) Auswahl des passenden Kennlinienfeldes abhängig vom Füllstand des Speichers.

Hierbei soll das Energiespeichersystem vollständig durch das Kennlinienfeld geführt werden. Über diese Betriebsart hinaus wäre auch der stromgeführte Betrieb denkbar (beispielsweise abhängig von den Stromkosten bzw. der Autonomie der Versorgung), sowie der Betrieb als Netzbildner.

Frage 8.3.1: Netz mit Energiespeicher und Kennlinientester. Folgende Abbildung zeigt die experimentelle Anordnung aus der DC-Quelle (Netzbildner), der Anlage als Energiespeichersystem, sowie dem Kennlinientester. Nehmen Sie die Kennlinie in der Simulation auf. Welchen Zweck erfüllt die Form dieser Kennlinie?

Lösung: Die Anlage wird wie die Bezugsanlage und die Einspeiseanlage zuvor am Netz betrieben. Der Anlagenstrom wird in der dargestellten Betriebsart nicht vorgegeben: Die Anlage wird ausschließlich

durch die Kennlinie geführt, abhängig von der Spannung im Netz. Die Messung der Leistung am Netzbildner zeigt, dass sich kein Stromfluss einstellt, die Spannung beträgt $u = 1$.

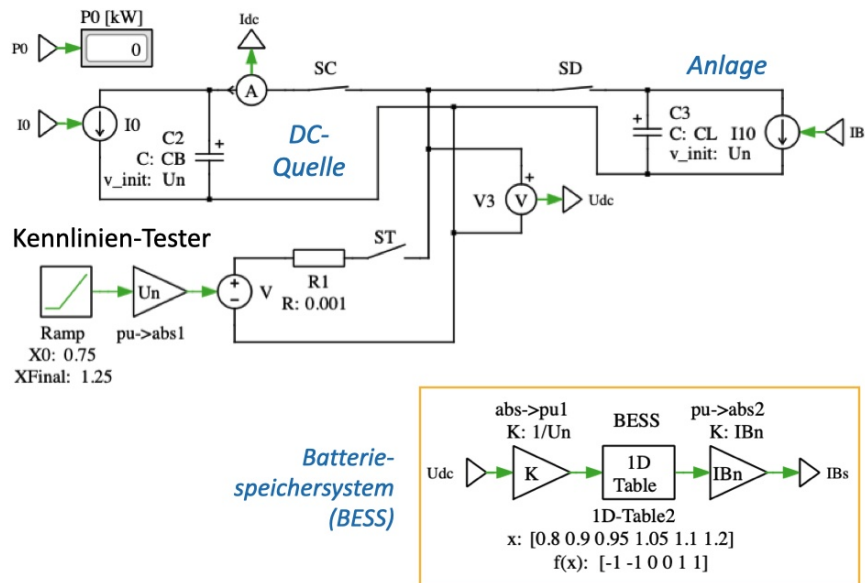


Bild 8.3.1 Netz mit Energiespeichersystem und Kennlinientester

Die mit Hilfe des Kennlinientesters aufgezeichnete Kennlinie zeigt die in folgender Abbildung dargestellte Form. Der Energiespeicher ist in beiden Halbebenen bzw. in beiden Stromrichtungen aktiv: Er kann Leistung aufnehmen oder Leistung abgeben.

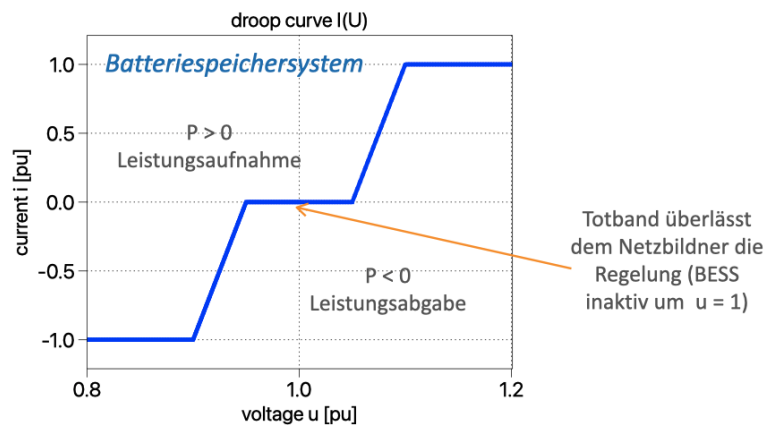


Bild 8.3.2 Aufgezeichnete Kennlinie des Energiespeichersystems

Die Kennlinie zeigt ein Totband im Intervall $\{0,95 U_n, 1,05 U_n\}$: hier bleibt der Strom bei null. Somit bleibt der Energiespeicher hier inaktiv, was den Arbeitspunkt in der Simulation erklärt. Übersteigt die Spannung das Niveau des Totbandes, nimmt der Energiespeicher Leistung auf und stützt das Netz, indem er der vorhandenen Leistungsüberschuss entgegen wirkt.

Unterschreitet die Spannung das untere Totband, gibt der Energiespeicher Leistung ab. Da Spannungen unterhalb der Nennspannung ein Indikator für einen Leistungsmangel im Netz sind, ist auch dieses Verhalten netzdienlich. Innerhalb des Totbandes bleibt der Energiespeicher inaktiv. Die Führung der Spannung übernimmt hier allein der Netzbildner. Dessen Kennlinie verläuft linear durch den Punkt $\{1, 0\}$, siehe Abbildung 8.2.3 in Abschnitt 8.2.

Die dargestellte Kennlinie geht davon aus, dass der Speicher außerhalb des Totbandes sowohl Leistung aufnehmen kann, als auch Leistung abgeben kann. Das ist dann der Fall, wenn der Speicher nicht vollständig gefüllt oder nicht ganz leer ist.

Frage 8.3.2: Leistungsbegrenzung der Kennlinie. Führen Sie eine Leistungsbegrenzung für die Kennlinie ein und untersuchen Sie diese in der Simulation.

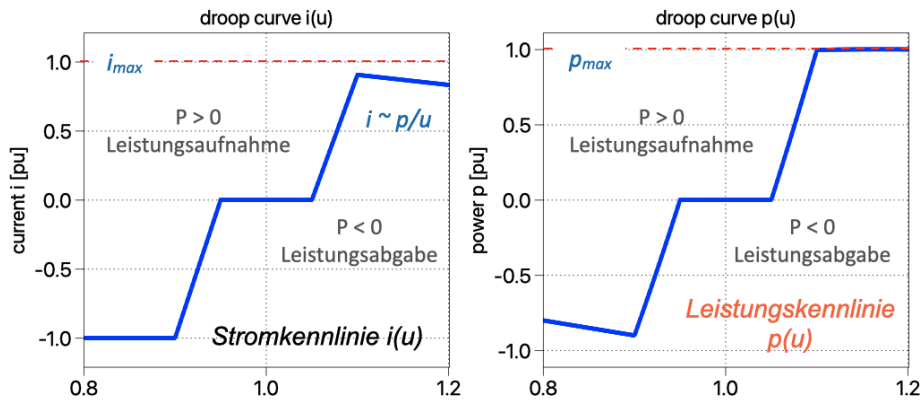


Bild 8.3.2 Kennlinie mit Strombegrenzung und Leistungsbegrenzung

Lösung: Angepasst werden muss nur der Bereich der Kennlinie bei Spannungen $u > 1$, da hier bei maximalem Strom $p = u \cdot i > 1$ wird. Die Begrenzung erfolgt genau wie bei der Lastkennlinie (Kennlinie der Bezugsanlage). Für Spannungen $u < 1$ ist keine Leistungsbegrenzung erforderlich, da dort bei maximalem Strom sowieso $p < 1$ gilt. Beide Kennlinien lassen sich mit dem Kennlinientester aufzeichnen.

Bemerkung: Diese Kennlinie gilt für den Fall, dass der Energiespeicher sowohl Leistung aufnehmen als auch Leistung abgeben kann. Mit wachsendem oder fallendem Füllstand sollten die Kennlinien angepasst werden, um den Ladezustand zu berücksichtigen und ein Überladen bzw. vorzeitiges Entleeren zu vermeiden.

Frage 8.3.3: Wahl der Betriebskennlinie des Energiespeichers. Wie lässt sich der Ladezustand des Energiespeichers in der Wahl der Kennlinie berücksichtigen?

Lösung: Siehe folgende Abbildung.

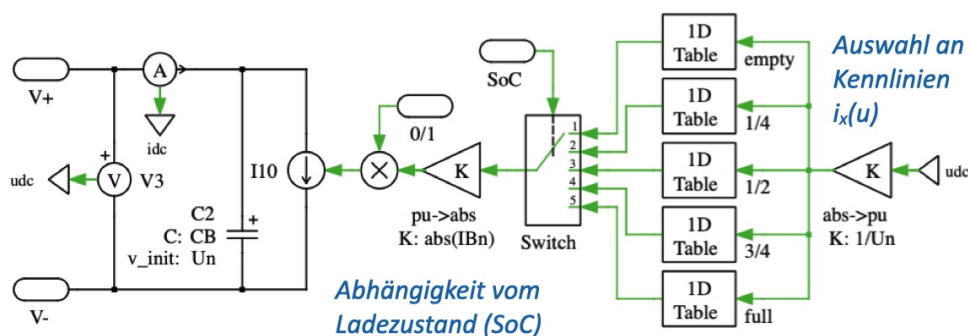


Bild 8.3.3 Führung des Energiespeichers durch Auswahl einer Kennlinie

Je nach Ladezustand stehen unterschiedliche Kennlinien zur Verfügung. Der Ladezustand ist als Füllstand des Speichers im Verhältnis zur Speicherkapazität definiert. Im Beispiel werden Kennlinien für die Ladezustände $\{0 = \text{leer}, 1/4, 1/2, 3/4, \text{und } 1 = \text{voll}\}$ vorgegeben.

Seinen Ladezustand kann der Energiespeicher selber ermitteln. Daher kann der Energiespeicher auch eigenständig eine passende Kennlinie auswählen. Eine Interaktion mit einer externen Leitstelle bzw.

einem Energiemanagementsystem ist hierfür nicht erforderlich. Im Beispiel wird der Ladezustand manuell ausgewählt, da die Simulationsdauer zu kurz für eine realistische Ladung oder Entladung ist. Der in der Abbildung dargestellte Signalfuss zeigt eine im Speicher vorgehaltene Anzahl an Kennlinien, aus denen jeweils eine ausgewählt wird.

Frage 8.3.4: Kennlinien des Energiespeichers. Für die Kennlinien wird die in der Abbildung dargestellte Auswahl vorgegeben. Erläutern Sie die Funktion der Kennlinien.

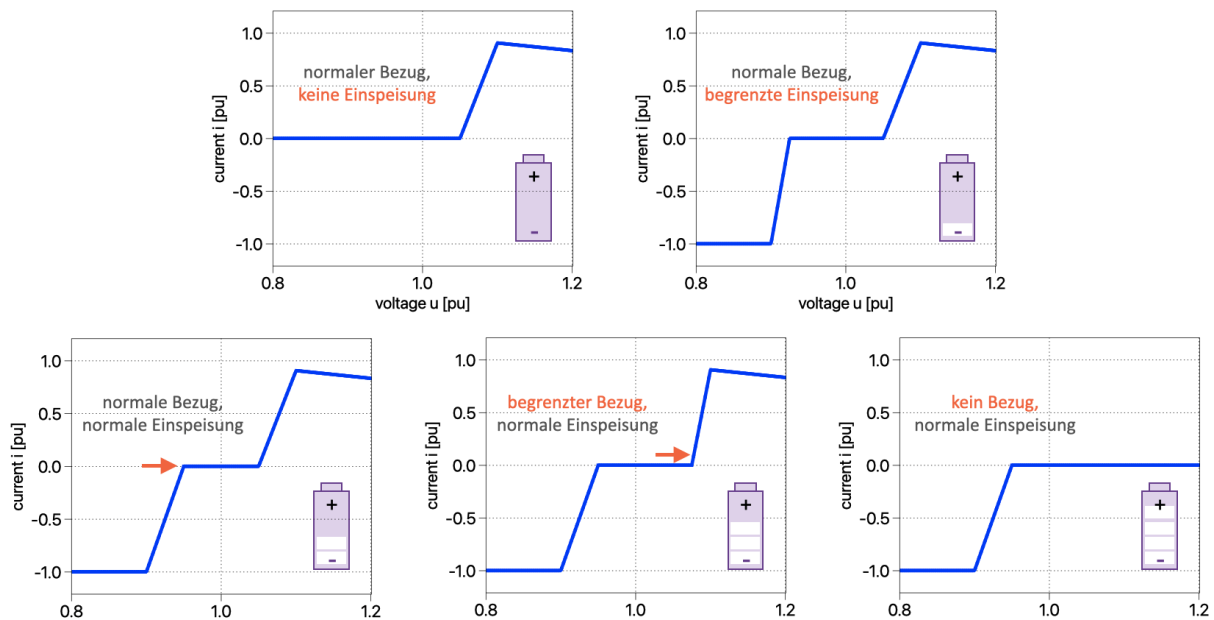


Bild 8.3.4 Kennlinien des Energiespeichers abhängig vom Ladezustand

Lösung: Am einfachsten zu interpretieren sind die Kennlinien im leeren Zustand und im vollen Zustand des Speichers: (1) Im leeren Zustand kann der Speicher keine Leistung ins Netz einspeisen, er verhält sich wie eine Bezugsanlage. Die Kennlinie entspricht der Bezugsanlage. (2) Im vollen Zustand kann der Speicher keine Leistung mehr aus dem Netz aufnehmen, allerdings kann er Leistung abgeben. Die Kennlinie entspricht der einer Einspeiseanlage.

Der mittlere Zustand (Speicher halbvoll bzw. halbleer) bietet beide Möglichkeiten in gleicher Qualität: der Speicher arbeitet als Einspeiseanlage oder Bezugsanlage, abhängig vom Spannungsniveau im Netz. Diese Betriebsart wurde in der vorausgehenden Aufgaben betrachtet.

Der Zustand mit $\frac{1}{4}$ Füllung ist nahe am leeren Speicher: hier wäre mit der Einspeiseleistung sparsam umzugehen. Daher wurde der Knickpunkt der Einspeisekennlinie zu niedrigeren Spannungen verlegt, wenn das Netz in größerer Not ist.

Bei einem Füllstand von $\frac{3}{4}$ ist der Speicher nahezu voll, hier sollte man sparsam mit der Leistungsaufnahme umgehen. Daher wurde in diesem Fall der Knickpunkt der Lastkennlinie zu höheren Spannungen verlegt, wenn das Netz unter einem Überangebot an Leistung stärker leidet.

8.4. Netzmodell

Bisher wurden die Anlagen einzeln am Netzbildner und am Kennlinientester betrieben. In der Realität wären mehrere Anlagen unterschiedlichen Typs gleichzeitig am Netz. Davon abgesehen bleibt die Anordnung bestehend aus Netzbildner, mehreren Anlagen und Kennlinientester gleich. Die folgende Abbildung zeigt ein Musternetz.

Das Netz besteht aus mehreren Schnellladestationen als Bezugssysteme, einer PV-Anlage als Einspeisung, einem Energiespeichersystem und einem Interlink-Konverter zum AC-Netz. Das Netz soll durch ein Netzmodell abgebildet werden, das mit Hilfe eines Kennlinientesters die Kennlinien der Anlagen im Netz aufzeichnen kann. Im Betrieb ohne Kennlinientester sollte das Netz einen stabilen Arbeitspunkt finden,

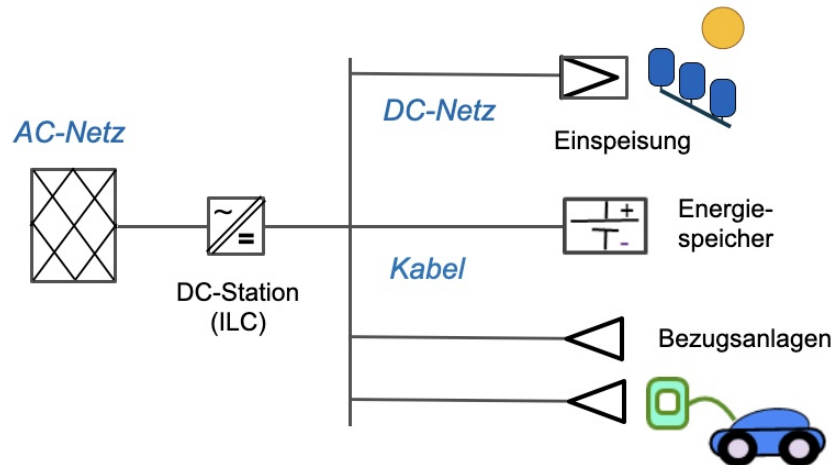


Bild 8.4.1 Musternetz mit Anlagen

Frage 8.4.1: Netzmodell. Für die Anlagen wurden in den Kennlinien Grenzen für den Anlagenstrom und die Anlagenleistung angegeben. Da die Kennlinien in normierter Weise definiert wurden, lassen sich auf gegebene Vorgaben für die Leistung der Anlagen und somit die Nennströme (bei Nennspannung) in absolute Werte übersetzen. Untersuchen Sie in der Simulation, ob in Netz die Leistungsgrenzen eingehalten werden.

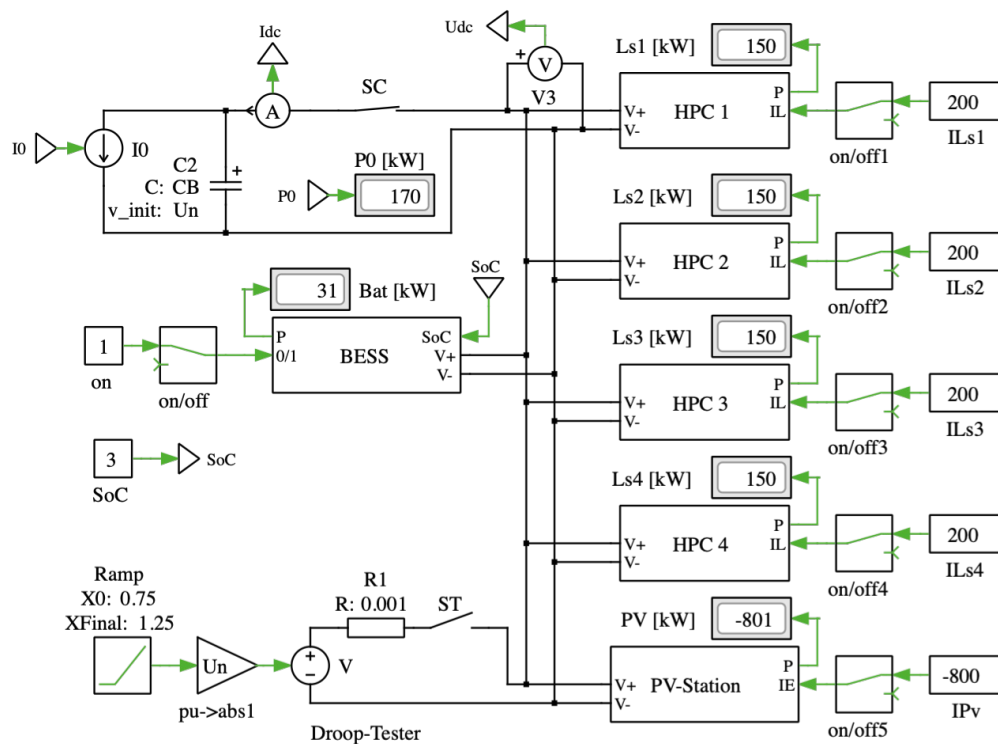
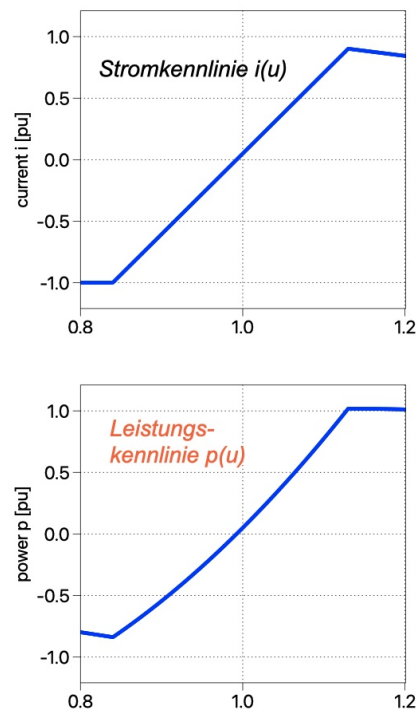
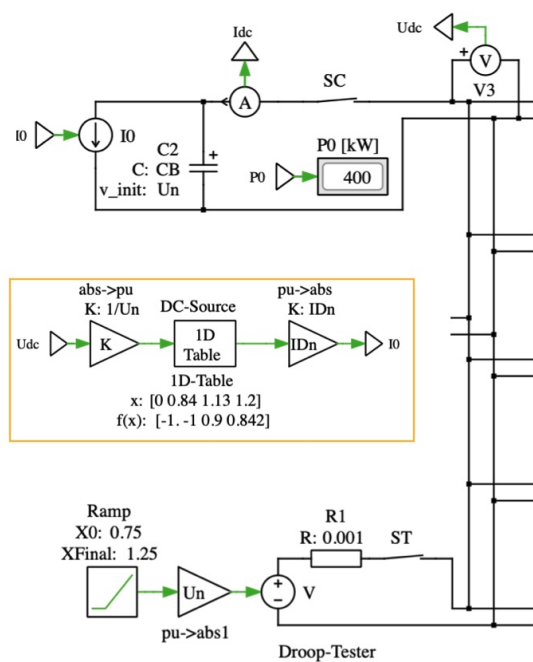


Bild 8.4.2 Netzmodell zum Musternetz

Lösung: Der Bemessungsstrom des Netzbildners folgt aus der Nennspannung und der Bemessungsleistung des Netzbildners. Die Grenze für den Strom lässt sich unmittelbar in die Stromkennlinie $i(u)$ einbringen. Bei höheren Spannungen $u > 1$ überschreitet der Netzbildner mit seinem Bemessungsstrom die Leistungsgrenze $p = u \cdot i > 1$. Die Stromkennlinie ist dort anzupassen.



Der Kennlinientester ist ein Beispiel für eine Anlage, die keine Leistungsgrenzen kennt und respektiert. Zur Absicherung für einen solchen Fall sollte der Netzbildner über eine Begrenzung von Strom und

Leistung verfügen. Allerdings ist zu beachten, dass abseits der Begrenzung unter Umständen keine Netzbildung mehr möglich ist.

Frage 8.4.3: Kennlinie des Netzes. Aus der Perspektive des Netzbildners stellt sich die Frage, ob auch das Netz mit allen Anlagen eine Kennlinie besitzt. Wie ließe sich diese Kennlinie mit Hilfe des Netzbildners aufzeichnen? Wie ließe sich aus dieser Kennlinie der Arbeitspunkt ermitteln, der sich im Netz einstellt?

Lösung: Die Netzkennlinie lässt sich aufzeichnen, indem man den Strom des Netzbildners misst und in der Form $i(u)$ über der Spannung darstellt. Folgende Abbildung zeigt die Anordnung. Hierbei wird der Strom wiederum von der Sammelschiene aus in die Anlage hinein gemessen.

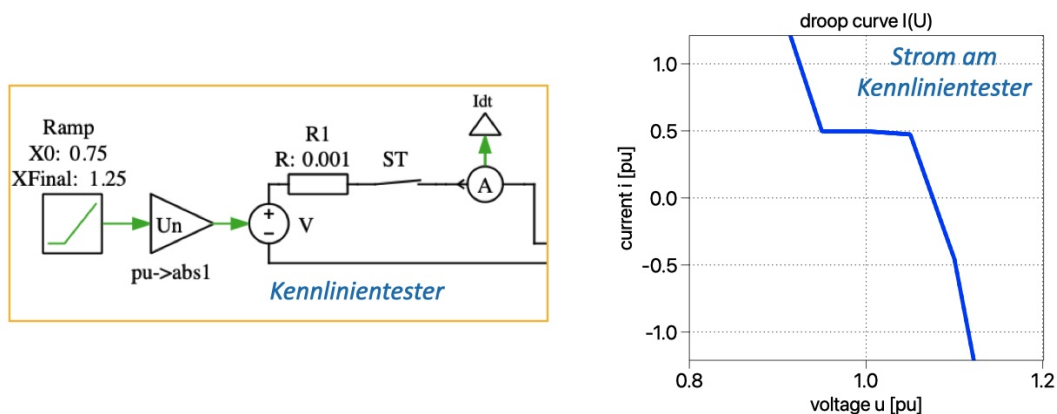


Bild 8.4.4 Am Kennlinientester gemessene Kennlinie des Netzes

Die umgekehrte Steigung der Kennlinie zeigt, dass der Kennlinientester die Ströme der Anlagen ausgleicht: An der Sammelschiene ist die Summe aller Ströme stets gleich null. Bedingt durch seinen vernachlässigbaren Innenwiderstand kann der Kennlinientester beim Durchfahren des Spannungsbereiches beliebig große Ströme bereit stellen.

Der Arbeitspunkt des Netzes findet sich an der Stelle, wo der Strom des Kennlinientesters null beträgt: In diesem Punkt leistet der Kennlinientester keinen Beitrag zum Netz, das Netz ist im Gleichgewicht. Die Stromkennlinie des Netzbildners stellt somit die Kennlinie des Netzes dar, allerdings mit umgekehrter Stromrichtung.

Bemerkung: Bedingung für den Einsatz des Kennlinientesters ist immer, dass der Spannungsbereich nur so schnell durchfahren wird, dass die Regler der Anlagen einschwingen können. Die Anlagenregler reagieren auf Änderungen der Spannung, bedingt durch die Entladung der Kapazitäten durch die Ströme der Anlagen. Die Zeitkonstanten der Anlagenkapazitäten und somit der Regler liegen im Bereich zweistelliger Millisekunden (abhängig von der gesamten Kapazität im Netz).

Frage 8.4.4: Wie lassen sich die wesentlichen Erkenntnisse zum Betrieb Anlage am Netz zusammenfassen?

Lösung: (1) Voraussetzungen für den Betrieb der Anlagen am Netz sind die Organisation der Spannungsbänder, ein Netzbildner und eine einheitliche Methode zur Beschreibung der Anlagenkennlinien. Für die Anlagen werden Stromkennlinien der Form $i(u)$ und Leistungskennlinien der Form $p(u)$ vorgeben, die Anlagen werden mit den Stromkennlinien betrieben.

(2) Kennlinien der Anlagen: Der Interlink-Konverter kann Leistung ins AC-Netz vermitteln und somit die Aufgabe eines Netzbildners übernehmen. Bezugsanlagen wie beispielsweise Schnellladestationen verhalten sich netzdienlich, indem sie bei Spannungen unterhalb der Nennspannung ihre Bezugsleistung reduzieren. Einspeiseanlagen wie die PV-Anlage verhalten sich netzdienlich, indem sie bei Spannungen

gen oberhalb der Nennspannung ihre Einspeiseleistung reduzieren. Batteriespeichersysteme eignen sich sowohl zur Leistungsaufnahme als zur Leistungsabgabe. Sie lassen sich netzdienlich betreiben, indem bei niedrigen Spannungen Leistung bereitstellen und bei hohen Spannungen Leistung aufnehmen. Allerdings hängen die Möglichkeiten der Batteriespeicher von ihrem Ladezustand ab. Daher sollten die Kennlinien den Ladezustand berücksichtigen.

(3) Netzmodell: Mit Kennlinien ausgestattet, sollten Anlagen in einem Netz in jeder Lastsituation einen untereinander ausgeglichenen Arbeitspunkt finden. Mit Hilfe eines Netzmodells lässt sich der Betrieb der Anlagen in der Simulation überprüfen. Hierbei wird ein Kennlinientester verwendet, um die Kennlinien einzelner Anlagen aufzuzeichnen, einschließlich des Netzbildners.

9. Das Gleichgewicht im Netz halten

Anlagen am Netz haben unterschiedliche Interessen: Bezugsanlagen erhalten Leistungsanforderungen, Einspeiseanlagen möchten das Maximum der angebotenen Leistung ins Netz abgeben, Energiespeicher werden entweder nach ökonomischen Vorgaben geführt (beispielsweise um den Eigenanteil der Versorgung zu maximieren) oder verhalten sich netzdienlich, Netzbildner sorgen für einen Ausgleich der Interessen.

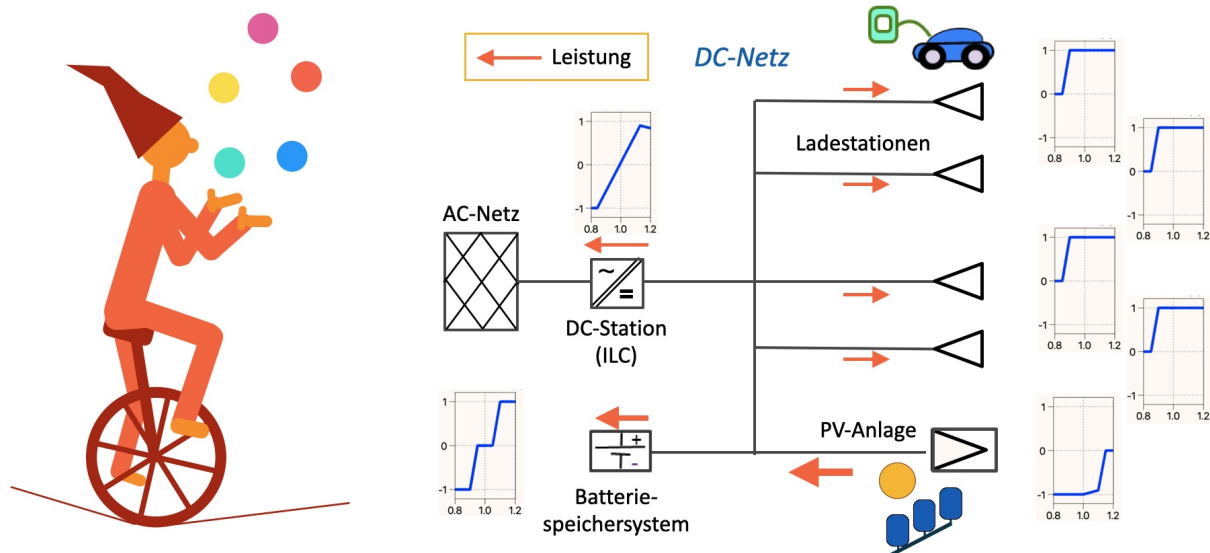


Bild 9.1.1 Gleichgewicht der Leistungen im DC-Netz

Hierbei wechselt der Betriebszustand des Netzes je nach Angebot und Nachfrage, nach der Verfügbarkeit der Anlagen, bzw. abhängig von Füllstand des Energiespeichers. Mit einer Einspeiseanlage bzw. einem Energiespeicher ist auch ein Inselnetzbetrieb möglich, unabhängig von einer Verbindung zum AC-Netz. In diesem Fall kann eine der verbliebenen Anlagen die Netzbildung übernehmen.

Physikalisch betrachtet muss zu jeder Zeit die Summe der Ströme an der Sammelschiene null ergeben. Diese Forderung entspricht einem Gleichgewicht der Leistungen an der Sammelschiene: Es wird genau so viel eingespeist, wie entnommen. Da die Führung der Anlagen mit Hilfe ihrer Kennlinien erfolgt, muss sich der Gleichgewichtszustand in der Gestalt der Anlagenkennlinien abbilden.

9.1. Ausgleich der Interessen

Als Musternetz sei ein Netz angenommen mit folgenden Anlagen:

- vier Schnellladestationen mit einer maximalen Leistung von jeweils 150 kW
- eine PV-Anlage mit einer Einspeiseleistung von 800 kW
- ein Batteriespeichersystem mit einer Anschlussleistung von 400 kW
- eine DC-Station als Interlink-Konverter zum AC-Netz mit einer Leistung von 400 kW.

Charakteristisch für dieses Netz ist, dass sowohl die Bezugsleistung der Ladestationen als auch die Einspeiseleistung der PV-Anlage die Grenzen der Interlink-Konverters übersteigt. Aus dem AC-Netz ist weder eine Versorgung aller Bezugsanlagen möglich, noch kann die Leistung der PV-Anlage komplett ins Netz abgeführt werden. Darüber hinaus soll das DC-Netz auch im Inselnetzbetrieb unabhängig vom AC-Netz betrieben werden können.

Man kann weder davon ausgehen, dass jederzeit alle Anlagen am Netz verfügbar sind, noch dass alle Anlagen mit maximaler Leistung arbeiten. Die Anzahl der aktiven Anlagen am Netz ist variabel, ebenso der Lastzustand der Anlagen.

Ein Gleichgewichtszustand im Netz ist immer dann erreicht, wenn die Summe der Anlagenströme sich zu null addiert. Diese Forderung hat eine triviale Lösung: Alle Ströme sind null, d.h. das Netz arbeitet nicht, alle Anlagen sind inaktiv. Für einen praktikablen Netzbetrieb müssen die Kennlinien sicherstellen, dass sich ein Arbeitspunkt mit aktiven Anlagen findet.

Frage 9.1.1: Betriebszustände im Netz. Folgende Abbildung zeigt das Musternetz mit den oben genannten maximalen Leistungen der Anlagen.

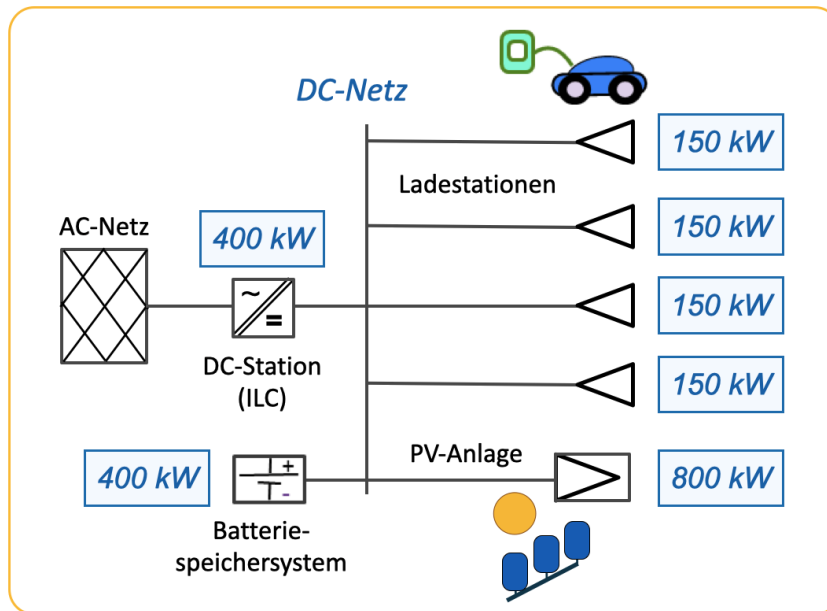


Bild 9.1.1 Netz mit maximalen Leistungen der Anlagen

Die Leistungen sind jeweils als Betrag angegeben: Im Verbraucherschlupfsystem wäre die maximale Leistung der PV-Anlage bei $P_{PV} = -800 \text{ kW}$. Batteriespeicher und DC-Station haben ein variables Vorzeichen, die Leistung bewegt sich im Bereich von jeweils $P = \pm 400 \text{ kW}$. Wie funktioniert der Ausgleich der Interessen der Anlagen im Netz? Welches Verhalten erwarten Sie für folgende Betriebszustände: (1) Mittags mit vollem PV-Angebot, ohne Ladestationen, mit oder ohne Batteriespeicher, (2) abends ohne PV-Leistung, mit voller Nachfrage nach Ladeleistung, mit und ohne Batteriespeicher, (3) Inselnetzbetrieb mit und ohne Batteriespeicher.

Lösung: Grundsätzlich können alle Anlagen nur bis an ihre Leistungsgrenzen betrieben werden. Mit Hilfe ihrer Kennlinien passen die Anlagen ihrem Strom (und somit ihre Leistung) abhängig von Spannungsniveau im Netz an: Eine Spannung oberhalb der Nennspannung ist ein Anzeichen für ein Überangebot an Leistung im Netz. Einspeiseanlagen sind angehalten, ihre Einspeiseleistung zu reduzieren. Eine Spannung unterhalb der Nennspannung signalisiert einen Mangel an Leistung im Netz. Bezugsanlagen sind angehalten, ihre Leistungsaufnahme zu reduzieren.

Netzdienliche geführte Batteriespeicher entnehmen dem Netz bei Spannungen oberhalb der Nennspannung Leistung, um das Überangebot zu reduzieren. Bei Spannungen unterhalb der Nennspannung stellen sie zusätzliche Leistung bereit. Der Netzbildner sorgt für den Ausgleich der Leistung im Netz im Rahmen seiner Möglichkeiten.

Für die genannten Betriebszustände erwartet man folgendes Verhalten:

(1) Überangebot an PV-Leistung: Mit einer Leistung von $P_{PV} = -800 \text{ kW}$ ohne Nachfrage durch Ladestationen und ohne Unterstützung durch den Batteriespeicher ist die DC-Station (der Interlink-Konverter zum AC-Netz) mit einer Leistung von $P_{DC} = 400 \text{ kW}$ überfordert. Die PV-Anlage muss ihre Leistung auf das Niveau der DC-Station reduzieren. Kann der Batteriespeicher Leistung aufnehmen, so bietet

er ebenfalls eine Kapazität von $P_{\text{Bat}} = 400 \text{ kW}$. Somit kann die PV-Anlage mit voller Leistung einspeisen. Diese Leistung sollte zur Hälfte in den Batteriespeicher fließen, die andere Hälfte sollte ins AC-Netz eingespeist werden.

(2) Nachfrage durch Ladestationen über die Grenzen der Einspeiseanlagen und der DC-Quelle hinaus: Die Ladestationen beziehen zusammen maximal eine Leistung von $P_{\text{HPC}} = 600 \text{ kW}$. Ohne Leistung aus der PV-Anlage und ohne Unterstützung des Batteriespeichers müsste diese Leistung komplett von der DC-Station bezogen werden. Diese kann maximal $P_{\text{DC}} = -400 \text{ kW}$ anbieten. Somit müssen die Ladestationen ihren Leistungsbezug auf das Niveau des Angebotes der DC-Station reduzieren. Mit Unterstützung des Batteriespeichers stehen zusätzlich maximal $P_{\text{Bat}} = -400 \text{ kW}$ zur Verfügung. Somit ist der Betrieb mit voller Ladeleistung für alle Ladestationen möglich. Die bezogene Leistung teilt sich zwischen DC-Station und Batteriespeicher auf.

(3) Inselnetzbetrieb: Im Inselnetzbetrieb steht keine DC-Station zur Verfügung. Der Batteriespeicher sollte als Netzbildner arbeiten, bzw. als netzdienlicher Speicher. Er kann eine maximale Leistung von $P_{\text{Bat}} = \pm 400 \text{ kW}$ bereitstellen. Für alle Ladestationen ohne Unterstützung der PV-Anlage genügt das nicht. Umgekehrt kann die PV-Anlage ohne Ladestationen ihre volle Leistung nicht einspeisen. Es wird erwartet, dass alle Anlagen ihre Leistung soweit anpassen, dass sich ein Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage einstellt, das die Anschlussleistung des Batteriespeichers ausnutzt.

Beim Batteriespeicher ist die verfügbare Kapazität zur Aufnahme oder Abgabe von Leistung abhängig vom Füllstand. Bei vollem Batteriespeicher und ohne Ladestationen ist eine Einspeisung durch die PV-Anlage überhaupt nicht möglich. Bei leerem Batteriespeicher können die Ladestationen ohne Unterstützung der PV-Anlage nicht versorgt werden.

Frage 9.1.2: Welche Möglichkeiten zum Ausgleich bieten die Kennlinien der Anlagen? Erläutern Sie, welche Arbeitspunkte sich voraussichtlich für die in der letzten Aufgabe genannten Betriebszustände einstellen werden.

Lösung: Bezugsanlagen drosseln ihre Leistungszufuhr bei zu geringer Spannung. Einspeiseanlagen drosseln ihre Leistungsabgabe bei zu hoher Spannung. Der Batteriespeicher kann, abhängig vom Ladezustand, einen Überschuss an Leistung aufnehmen, bzw. einen Mangel an Leistung ausgleichen. Dieses Verhalten folgt aus der Kennlinie des Batteriespeichers.

Für die genannten Betriebszustände sind folgende Arbeitspunkte zu erwarten: (1) Überangebot an PV-Leistung: Arbeitspunkt mit erhöhter Netzspannung oberhalb des Nennwertes. (2) Nachfrage durch Ladestationen über die Grenzen der Einspeiseanlagen und der DC-Quelle hinaus: Arbeitspunkt mit gegenüber der Nennspannung verringerter Spannung im Netz.

Im (3) Inselnetzbetrieb bleibt der Arbeitspunkt abhängig von der Leistungsbilanz: Ein Überschuss durch die Einspeisung führt auch hier zu einem Arbeitspunkt mit erhöhter Spannung über dem Nennwert. Ein Mangel an Leistung führt zu einem Arbeitspunkt mit reduzierter Spannung gegenüber dem Nennwert.

Frage 9.1.3: Untersuchungen in der Simulation. Verwenden Sie das in folgender Abbildung dargestellte Netzmodell mit den Kennlinien der Anlagen zur Untersuchung der genannten Betriebszustände im Netz. Welche Abhängigkeit ergibt sich vom Ladezustand des Batteriespeichers? Welche weiteren Fälle erscheinen Ihnen interessant? Lässt sich der Arbeitspunkt, der sich jeweils einstellt, mit Hilfe der Kennlinien erklären?

Lösung: Folgt den individuellen Einstellungen im Simulationsmodell. Wie in der Abbildung dargestellt, lassen sich Anlagen per manuellem Schalter deaktivieren. Auch die DC-Station (Interlink-Konverter) als Netzbildner lässt sich vom Netz trennen. In diesem Fall arbeitet das Netz im Inselnetzbetrieb.

Der Batteriespeicher lässt sich ebenfalls per Schalter deaktivieren oder einschalten. Außerdem verfügt er über die Möglichkeit, den Ladezustand einzustellen, und somit eine passende Kennlinie auszuwählen. In der Realität würde das durch den Batteriespeicher automatisch erfolgen. Mit diesen Eingabemöglichkeiten lassen sich die in den beiden letzten Aufgaben genannten Betriebszustände in der Simulation einstellen.

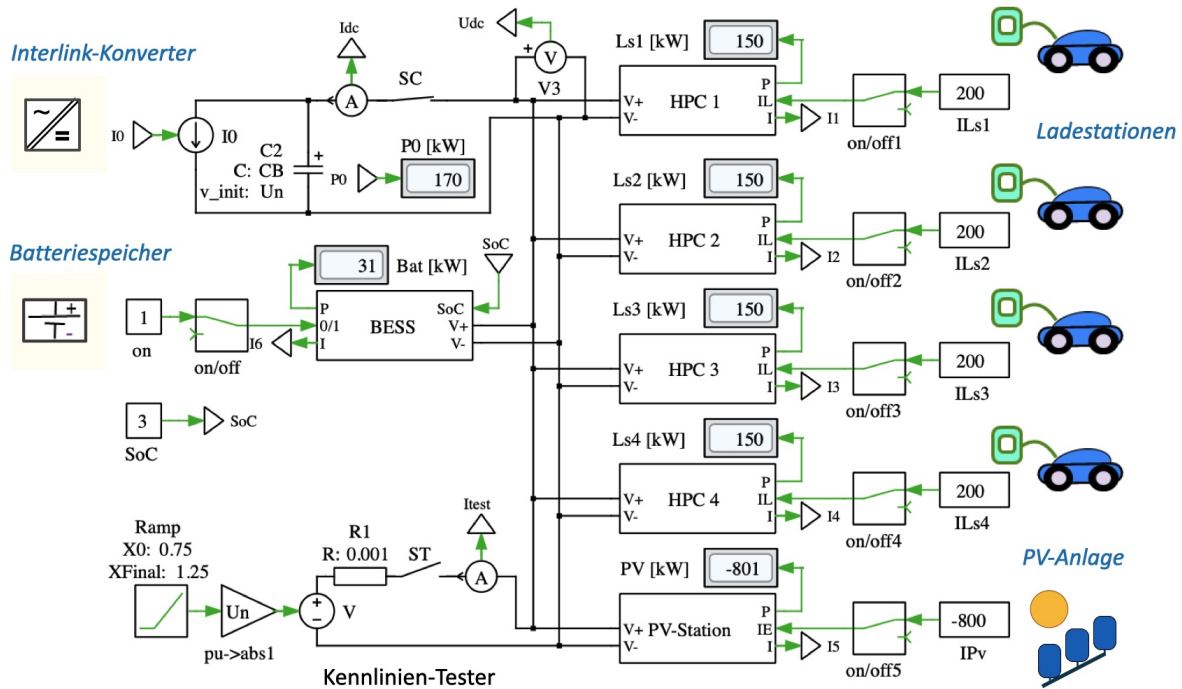


Bild 9.1.2 Netzmodell mit Anlagen

Die Abbildung zeigt das System in einem Zustand, in dem alle Anlagen aktiv sind. Die PV-Anlage arbeitet mit voller Leistung. Alle Ladestationen beziehen gleichzeitig ihre volle Leistung. Die Bilanz aus Einspeisung und Bezug beträgt somit $P_{HPC} + P_{PV} = 600 \text{ kW} - 800 \text{ kW} = -200 \text{ kW}$. Diese Leistung wird vom Interlink-Konverter und vom Batteriespeichersystem aufgenommen, es gilt $P_{DC} + P_{Bat} = 200 \text{ kW}$. Für die Summe aller Leistungen ist die Bilanz ausgeglichen.

Dass die DC-Station als Netzbildner eine höhere Leistung aufnimmt als der Batteriespeicher im netzdienlichen Betrieb, liegt an der Form der Kennlinien: Die des Netzbildners verläuft linear durch den Punkt $\{1, 0\}$, die des Batteriespeichers hat ein Totband im Bereich $\{1-u_{db}, 0\}$, $\{1+u_{db}, 0\}$. Der Batteriespeicher wird erst aktiv, wenn das Spannungsniveau das Totband überschreitet. Somit folgt der Batteriespeicher dem Netzbildner und unterstützt erst, wenn dessen Spannungskennlinie zum Überschreiten (bzw. Unterschreiten) des Totbandes des Batteriespeichers führt.

Frage 9.1.4: Anschlussrichtlinien für Anlagen. Welche Forderungen sind an das Verhalten der Anlagen zu stellen im Sinne einer Anschlussrichtlinie, d.h. einer Vereinbarung zum Betrieb der Anlagen am Netz mit dem Ziel der Vereinbarkeit der Anlagen mit dem Netz (und somit der Kompatibilität der Anlagen untereinander)?

Lösung: Abhängig vom Lastzustand stellen sich folgende Fragen:

- Wie lässt sich der Lastzustand der Anlagen im Netz kommunizieren?
- Wie lassen sich die Überlastung von Anlagen vermeiden?

- Wie kommt das Netz mit dem Abschalten der Anlagen zurecht (Lastabwurf bzw. Abschalten von Einspeiseanlagen)?
- Wie ist ein Inselbetrieb möglich?
- Wie lässt sich unter den unterschiedlichen Lastsituationen ein stabiler Zustand erreichen?
- Wie schnell passt sich das Netz an einer veränderte Lastsituation an?
- Lassen sich die DC-Station oder das Batteriespeichersystem übergangslos von stromgeführten Betrieb in den netzbildenden Betrieb umschalten?

Im Sinne von Anschlussrichtlinien wären hierzu Vereinbarungen zu treffen. In den AC-Anschlussrichtlinien finden sich folgende Kategorien:

- (1) Stützung der Netzspannung durch Vorgabe der Blindleistung (statisch, einstellbar oder durch Kennlinien $Q(U)$ bzw. $Q(P)$) in den Anlagen,
- (2) Stützung der Wirkleistung im Netz durch Einspeiseanlagen und Bezugsanlagen abhängig von der Netzfrequenz f (durch Kennlinien $P(f)$),
- (3) Verhalten bei Fehlern im Netz (Fault Ride Through bei Unterspannung und Überspannung),
- (4) Begrenzung der Einbringung von Störungen ins Netz durch Oberwellen.

Man erkennt, dass auch hier mit Kennlinien gearbeitet wird. Allerdings lassen sich die Kategorien der AC-Anschlussrichtlinien nicht übernehmen: (1) Blindleistung findet sich im DC-Netz nicht, (3) ist nicht anwendbar, da das Fehlverhalten anders ist (im AC-Netz dienen die Forderungen zur Einbringung eines Blindstroms zur Schutzauslösung für Fehler im Netz), (4) statt Oberwellen (Vielfache der Netzfrequenz) müssten Störspektren definiert werden.

Es bleibt nur (2) die Netzstützung bzw. das netzdienliche Verhalten durch Abgabe bzw. Bezug von Wirkleistung. Statt $P(f)$ sind die Kennlinien im DC-Netz der Art $P(U)$ bzw. $i(u)$.

Weitere Vereinbarung der Anschlussrichtlinien für Anlagen am DC-Netz betreffen das Koppeln der Anlagen ans Netz (Vorladung, Schutz, Verhalten bei Überspannungen und Unterspannungen (siehe Kapitel 7). Diese Anforderungen entsprechen sinngemäß der Kategorie (3) der AC-Anschlussrichtlinien. Richtlinien für Netzbildner oder für den Inselnetzbetrieb finden sich in den AC-Anschlussrichtlinien bisher nicht: Hier wird von Bezugsanlagen oder Einspeiseanlagen am Netz ausgegangen.

Wesentlicher Teil der Vereinbarungen für Anlagen am DC_Netz sind die Kennlinien (einschließlich der Netzbildung und des Inselnetzbetriebs), sowie das Verhalten bei der Kopplung ans Netz.

9.2. Arbeitspunkte

In diesem Abschnitt wird untersucht, auf welche Weise die Kennlinien die Lage des Arbeitspunktes im Netz in unterschiedlichen Lastsituationen verändert. Dabei werden zunächst nur Bezugsanlagen und Einspeiseanlagen betrachtet, ohne das Batteriespeichersystem. Für den Ausgleich sorgt die DC-Station als Netzbildner.

Frage 9.2.1: Bezugsanlagen. In folgender Sequenz wurde die Anzahl der Ladestationen im Netzmodell der Zeile nach erhöht, so dass die Ladeleistung von 150 kW auf insgesamt 600 kW steigt. Am Netz sind nur die DC-Station (mit einer maximalen Leistung von $P_{DC} = -400$ kW) und die Ladestationen (keine PV-Einspeisung, keine Unterstützung durch das Batteriesystem). Erläutern Sie, warum sich der Arbeitspunkt wie dargestellt verschiebt.

Lösung: In dieser Sequenz bleibt das Angebot bei steigender Nachfrage begrenzt. In der Wirtschaft würde sich folglich der Preis erhöhen, um die Nachfrage einzudämmen. Im DC-Netz erfüllt die Rolle des Preises die DC-Spannung, allerdings in umgekehrter Richtung: Übersteigt die Nachfrage das An-

gebot, so sinkt die Spannung. Grund hierfür ist die Kennlinie des Netzbildners, der sich verhält wie eine Spannungsquelle mit Innenwiderstand.

Nur bei einem Strom von $i = 0$ stellt sich im Netz die Nennspannung ein. Mit steigender Nachfrage (positiver Strom der Bezugsanlagen) bewegt man sich auf der linearen Kennlinie des Netzbildners (siehe Abbildung 8,4,3) in den Bereich negativer Strome (umgekehrte Stromrichtung wie bei der Bezugsanlage, da stets von der Sammelschiene aus in die Anlage gemessen wird, also auch in den Netzbildner). Die Spannung im Netz sinkt. Mit jeder weiteren Anlage steigt der Strom der Bezugsanlagen: der Arbeitspunkt auf der Kennlinie des Netzbildners verschiebt sich weiter in Richtung fallender Betriebsspannung.

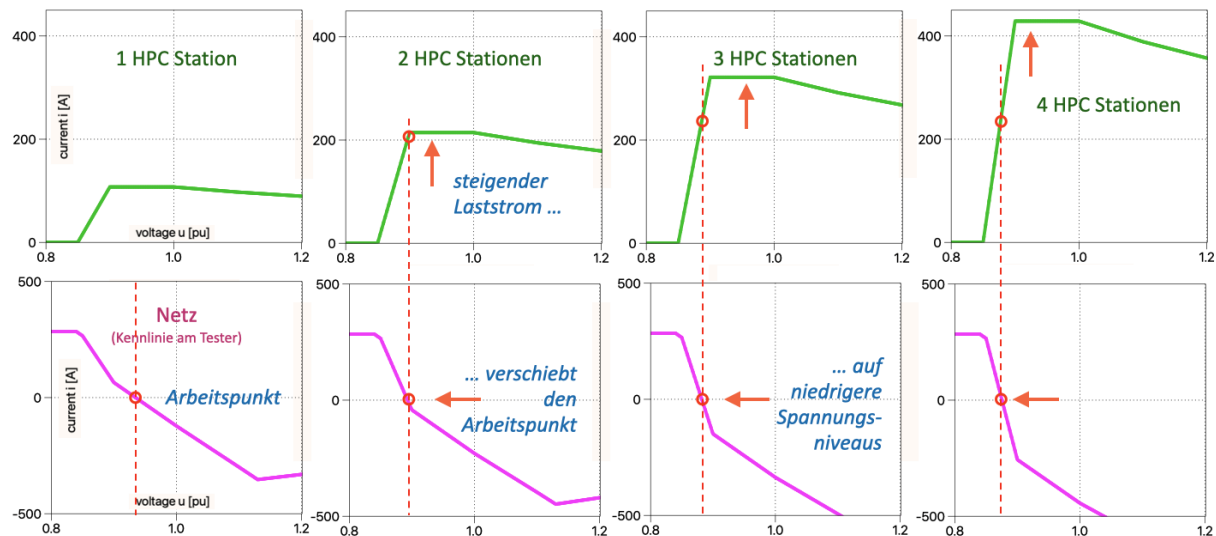


Bild 9.2.1 Steigender Leistungsbedarf bei konstantem Angebot verschiebt den Arbeitspunkt

Die Abbildung oben zeigt die Summe der absoluten Stromkennlinien der Bezugsanlagen (Ladestationen). Die Kennlinien der Anlagen wurden hierzu mit dem Kennlinientester im Netz aufgezeichnet und addiert. Da eine Ladestation eine Leistung von 150 kW beziehen kann, würde die Leistung des Netzbildners von -400 kW bereits bei 3 aktiven Anlagen überschritten, ebenso der Bemessungsstrom des Netzbildners.

Allerdings reduzieren die Anlagen bei fallender Spannung ihre Leistungsaufnahme gemäß ihrer Lastkennlinie, so dass die Grenze des Netzbildners in der Praxis auch mit 4 aktiven Anlagen nicht überschritten wird. Die Kennlinien der Anlagen in der Abbildung oben zeigen deutlich, dass der Strom nach der zweiten aktiven Ladestation in die Begrenzung fährt.

Die genaue Lage des Arbeitspunktes lässt sich aus der Kennlinie des Stroms am Kennlinientester rekonstruieren, die im unteren Teil der Abbildung dargestellt ist: Das Netz ist dann im Gleichgewicht, wenn der Beitrag des Kennlinientesters = null beträgt. In diesem Fall ist die Summe aller Anlagenströme (einschließlich des Netzbildners) gleich null.

Um den jeweiligen Arbeitspunkt in der Simulation zu ermitteln, nimmt man den Kennlinientester aus dem Netz. In diesem Fall stellt sich der aus der Theorie ermittelte Arbeitspunkt mit Hilfe der Kennlinien ein. Die Simulation zeigt die Spannung an der Sammelschiene und die Leistungsbeiträge der Anlagen an. Eine Anzeige der Ströme ist ebenfalls möglich.

Frage 9.2.2: Kausalität. Über die Kennlinien $i(u)$ passen die Anlagen ihre Ströme an. Stromänderungen an der kollektiven Kapazität im Netz verursacht eine Änderung der Spannung im Netz. Somit sind die Anlagen mit Hilfe der Kennlinien über die Spannung im Netz in einer Regelschleife

rückgekoppelt. Erläutern Sie kausale Kette beginnend mit der Lastanforderung der Anlagen aus dem Leerlaufbetrieb im Netz. Wann stellt sich ein stabiler Arbeitspunkt ein?

Lösung: Folgende Abbildung zeigt die Kennlinien der beteiligten Anlagen (Bezugsanlage und Netzbildner). Die kausale Kette verläuft wie folgt: (1) die Bezugsanlagen fordern eine Leistung ein, (2) die Lastströme werden aus den Anlagenkapazitäten bezogen und führen zu einer sinkenden Spannung im Netz, (3a) der Netzbildner erhöht wegen der sinkenden Spannung gemäß seiner Kennlinie seinen Strombeitrag und füllt die Kapazitäten hierdurch wieder auf, (3b) wegen der sinkenden Spannung senken die Bezugsanlagen gemäß ihrer Kennlinien ihre Lastanforderung, (4) als Ergebnis findet sich ein stabiler Arbeitspunkt, bei dem der Zufluss aus dem Netzbildner dem Abfluss in die Bezugsanlagen ausgleicht. Die Spannung in diesem Arbeitspunkt bleibt unterhalb der Nennspannung.

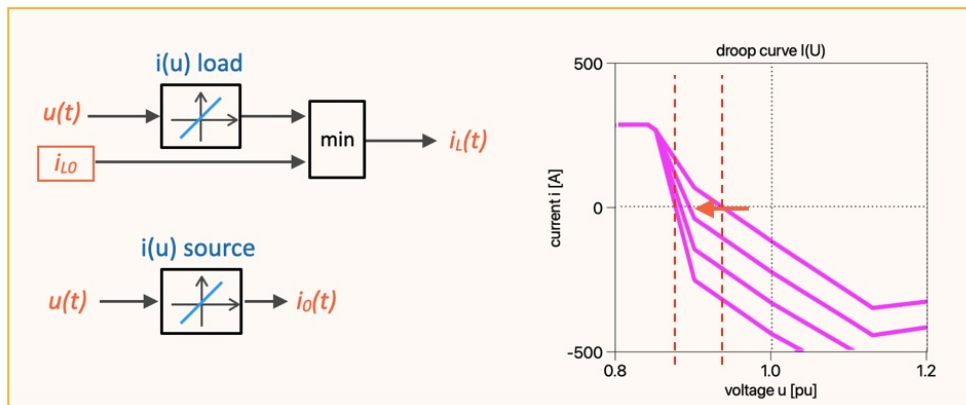


Bild 9.2.2 Wirkung der Kennlinien der Bezugsanlage und des Netzbildners

Dieser Vorgang wiederholt sich mit jeder weiteren Ladestation. Auf diese Weise sinkt die Spannung im Netz weiter. Wirtschaftlich betrachtet vermittelt die Kapazität im Netz zwischen der Nachfrage der Bezugsanlagen und dem Angebot des Netzbildners. Die Spannung ist die Währung dieses Handels. Da die Netzspannung an allen Anlagen nahezu gleichzeitig gemessen werden kann (mit Ausbreitungsgeschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit), ist für diesen Handel kein gesonderter Kommunikationskanal erforderlich.

Der Handel benötigt allerdings etwas Zeit bis zum Abschluss im Arbeitspunkt: Die Kapazitäten benötigen einige Zeit zur Änderung ihrer Ladung durch die Ströme. Je nach Größe der Kapazitäten liegt die Dauer bis zur Stabilisierung der Spannung über den Kapazitäten im Bereich zweistelliger Milisekunden. Der Handel selbst folgt mit Hilfe der Kennlinien einer einfachen Heuristik: Bei steigenden Preisen kauft man weniger.

Frage 9.2.3: Dynamik der Regelung. Wieso gibt die Kennlinie des Netzbildners das Verhalten einer Spannungsquelle mit Innenwiderstand wieder? Wie sieht der geschlossene Regelkreis mit den Bezugsanlagen und dem Netzbildner aus? Wovon hängt die Dynamik der Regelung ab?

Lösung: (1) Spannungsquelle und Netzbildner:

Eine Spannungsquelle mit Innenwiderstand lässt sich mit folgender Gleichung beschreiben:

$$U(I) = U_n + R_d I$$

In normalisierter Schreibweise erhält man

$$u(i) U_n = U_n + R_d i I_n$$

$$u(i) = 1 + r_d i \quad \text{mit } r_d = R_d I_n / U_n$$

Für die spannungsgeführte Stromquelle wird folgende Kennlinie vorgegeben:

$$i(u) = (u - 1) / r_d$$

Diese Gleichung lässt sich umformen in

$$u(i) = 1 + r_d i$$

Somit gibt die Kennlinie des Netzbildners das Verhalten einer Spannungsquelle mit Innenwiderstand R_d wieder. Diese Gleichung setzt allerdings voraus, dass der Strom der Spannungsquelle dem Strom der Bezugsanlage entspricht: In der realen Schaltung befindet sich die Kapazität der Anlagen parallel im Strompfad. Voraussetzung für die Gültigkeit der Gleichung ist somit, dass der Kondensatorstrom null ist. Diese Voraussetzung ist gleichbedeutend mit dem eingeschwungenen Zustand, Folgende Abbildung zeigt die vollständige Schaltung einschließlich der Kapazität zusammen mit dem Regelkreis.

(2) Geschlossener Regelkreis:

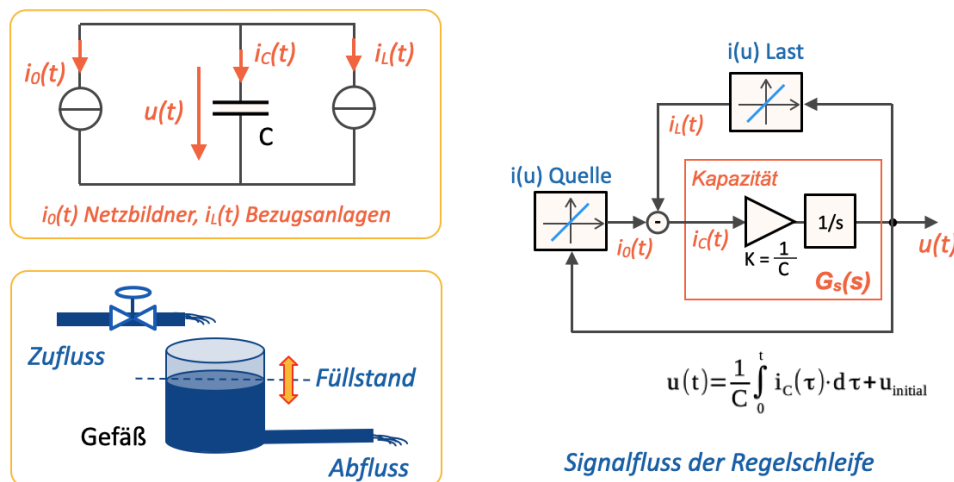


Bild 9.2.3 Physikalisches Modell und Regelkreis der Anlagen mit Netzbildner

Im physikalischen Modell auf der linken Seite der Abbildung stellt der Netzbildner den Zufluss in die Kapazität bereit, die Bezugsanlage den Abfluss. Die Regelung eines konstanten Pegels ist bei jedem Füllstand möglich. Im Gleichgewichtszustand entspricht der Zufluss dem Abfluss.

Der rechte Teil der Abbildung zeigt den Regelkreis mit den Kennlinien der Bezugsanlagen und der Kennlinie des Netzbildners. Man erkennt die Rückkopplung über die Spannung und die Vermittlung durch die Kapazität als Regelstrecke. Die Kapazität befindet sich im Querschnitt des Strompfades. Im eingeschwungenen Zustand ist dieser Zweig stromlos.

Die Kapazität als Regelstrecke integriert die Summe der Ströme zur Spannung im Netz. Die Zeitkonstante der Regelung ist abhängig von der Größe der Kapazität und der Steilheit R_d der Kennlinie des Netzbildners ($\tau = R_d C$). Mit wachsender Gesamtkapazität im Netz wird die Regelung träger.

Frage 9.2.4: Netz mit aktiver PV-Einspeisung. Ergänzen Sie in der Simulation die PV-Anlage. Welcher Arbeitspunkt stellt sich ein, wenn alle Bezugsanlagen, der Netzbildner und die PV-Anlage in Betrieb sind? Wie erklärt sich dieser Arbeitspunkt mit Hilfe der Kennlinien? Wie verändert sich der Arbeitspunkt, wenn man die Bezugsanlagen (Ladestationen) der Reihe nach außer Betrieb nimmt, die Bezugsleistung somit senkt? Hinweis: Der Batteriespeicher bleibt hierbei deaktiviert.

Lösung: Siehe folgende Abbildung.

Mit den aktiven Anlagen ergibt sich folgende Leistungsbilanz:

- vier Schnellladestationen mit einer maximalen Leistung von jeweils 150 kW: $P_{\text{HPC4}} = 600 \text{ kW}$

- eine PV-Anlage mit einer Leistung von $P_{PV} = -800 \text{ kW}$
- ergeben eine Summe von $P_{ges} = -200 \text{ kW}$.

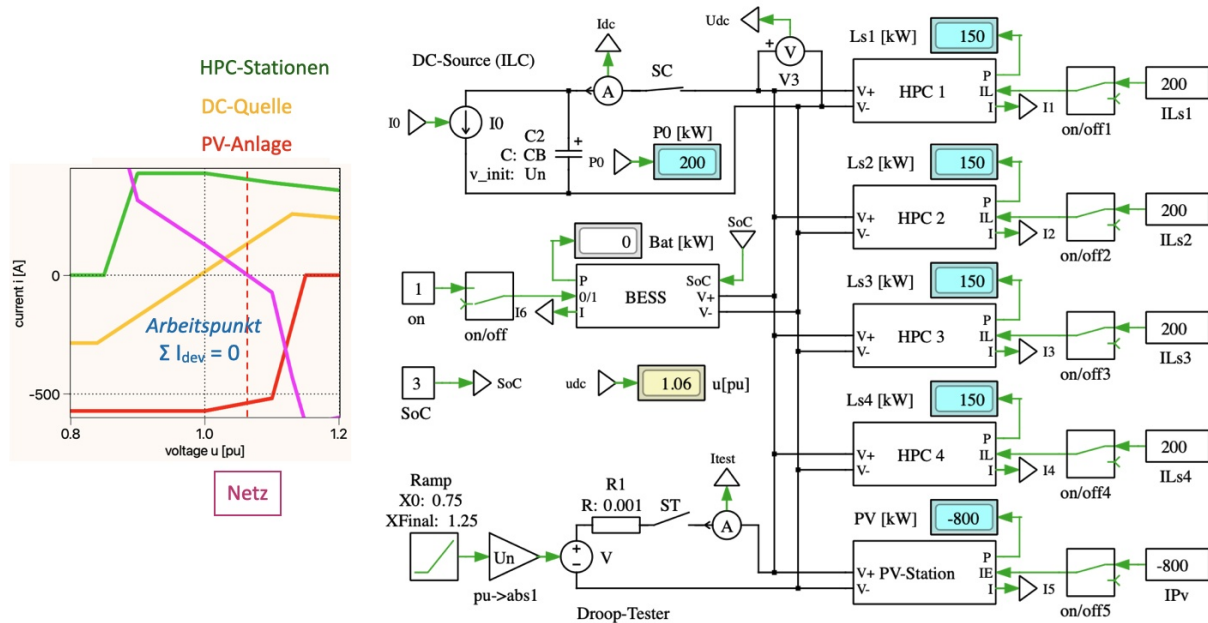


Bild 9.2.4 Arbeitspunkt mit PV-Anlage (ohne Batteriespeicher)

Diesen Leistungsüberschuss kann die DC-Station aufnehmen, da er sich im Rahmen ihrer Leistungsgrenzen von $P_{DC} = \pm 400 \text{ kW}$ bewegt. Da sich insgesamt ein Leistungsüberschuss ergibt, sollte die Spannung im Netz oberhalb der Nennspannung liegen. Die Simulation führt zu diesem Ergebnis.

Nimmt man die Kennlinien mit dem Kennlinientester auf, so erkennt man, dass im Arbeitspunkt die Summe der Anlagenströme aus Ladestationen, PV-Anlage und DC-Station Null ergibt. Hierbei fahren die Ladestationen ohne Einschränkungen in ihre Leistungsgrenze. Ebenso bewegt sich die PV-Anlage bei ihrer Grenzleistung. Eine Verringerung der Leistung ist weder bei den Bezugsanlage noch bei der Einspeisanlage erforderlich.

Damit der Netzbildner die Stromdifferenz aus Bezugsanlage und Einspeisung ausgleichen kann, bewegt sich der Arbeitspunkt in den Bereich oberhalb der Nennspannung. Die Aufzeichnung der Kennlinie des Testers zeigt, dass hier der Strombeitrag des Tester gleich null ist. Schaltet man die Ladestationen in der Simulation nacheinander ab, so ergibt sich folgender Lastzyklus.

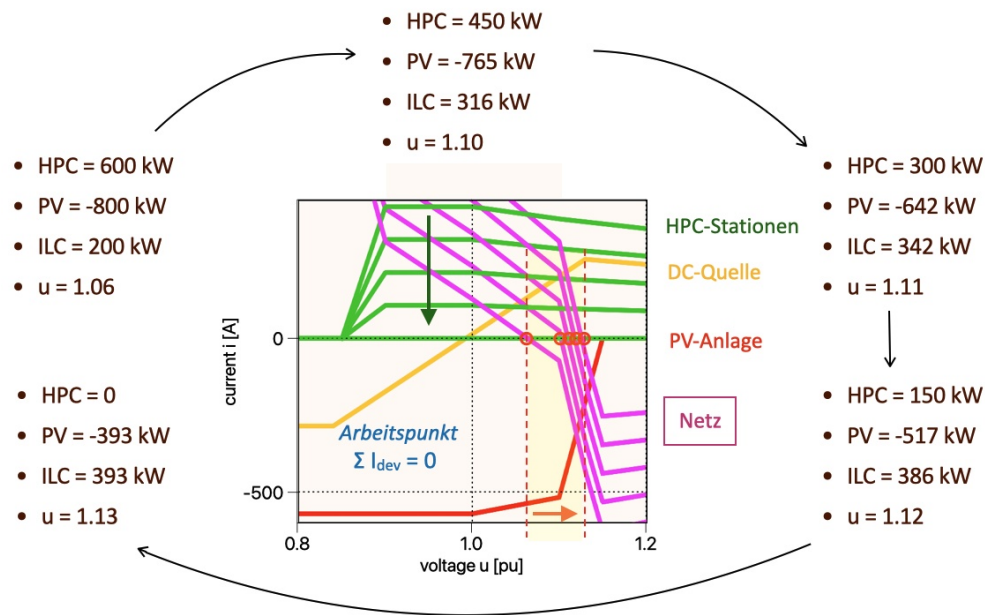


Bild 9.2.5 Lastzyklus mit PV-Anlage

Bei Leistungsbezug aus drei Ladestationen mit 450 kW und einer Leistung der PV-Anlage von 300 kW käme die DC-Station bereits in die Nähe ihrer Leistungsgrenze. Der Arbeitspunkt bewegt sich deutlich zu höheren Spannungen, wie man an der Kennlinienschar erkennt. Hierdurch gerät die PV-Anlage in den linearen Bereich der Kennlinie und reduziert ihre Leistung.

Mit weiter sinkendem Bezug auf insgesamt 300 kW bleibt die DC-Station in der Nähe ihrer Leistungsgrenze, die PV-Anlage reduziert ihre Leistung nun sehr deutlich. Grund hierfür ist die große Steigung im linearen Bereich der Kennlinie der PV-Anlage. Gemessen an der Spannungserhöhung aus dem vorausgegangenen Schritt fällt die Reduktion der Leistung folglich groß aus.

Beim Schritt von 300 kW auf 150 kW reduziert die PV-Anlage ihre Einspeiseleistung entsprechend, ebenso beim Schritt von 150 kW auf 0 kW. Am Ende drosselt die PV-Anlage ihre Leistung auf den Betrag, den die DC-Station aufnehmen kann. Insgesamt erreicht die Regelung der Anlagen in jeder Lastsituation einen plausiblen und stabilen Zustand.

138/172

riespeicher zur Verfügung. Man kann also davon ausgehen, dass der Betrieb mit Ladeleistungen zwischen 0 kW und 600 kW immer möglich ist.

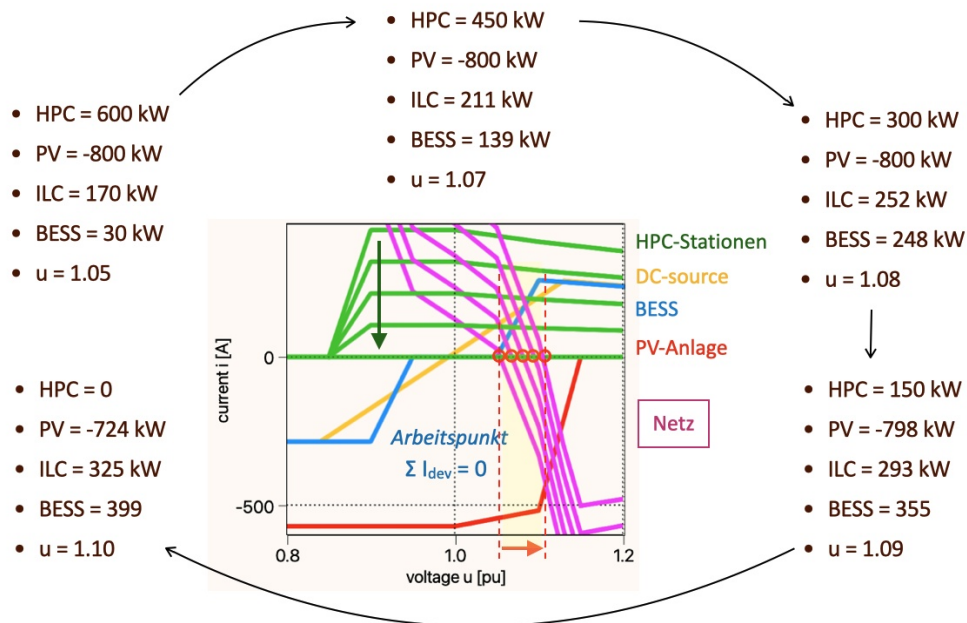


Bild 9.3.2 Lastzyklus mit allen Anlagen einschließlich des Batteriespeichers

Die Simulation bestätigt diese Erwartungen: Die PV-Anlage kann in jedem Lastzustand annähernd ihre maximale Leistung einspeisen. Ohne Ladeleistung fällt das Angebot an Leistung am höchsten aus, hier reduziert die PV-Anlage von -800 kW auf -724 kW, in allen anderen Arbeitspunkten bleibt die Einspeisung annähernd auf dem Maximalwert.

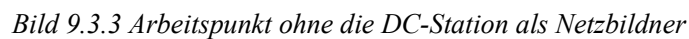
Mit reduzierter Ladeleistung unterhalb 300 kW übersteigt der Beitrag des Batteriespeichers den Beitrag des Netzbildners zur Aufnahme des Leistungsüberschusses. Grund hierfür ist die größere Steilheit der Kennlinie des Batteriespeichers oberhalb dessen Totbandes im Vergleich zur Steigung der Kennlinie des Netzbildners.

Im Vergleich zum Betrieb ohne Batteriespeicher in Aufgabe 9.2.4. fällt auf, dass die Netzspannung mit dem Überangebot an Leistung weniger stark ansteigt (im Bereich von {1.05 bis 1.1} im Vergleich zu einem Bereich von {1.05 bis 1.13} in Aufgabe 9.2.4). Die Spannungen bleiben oberhalb des Totbandes des Batteriespeichers, der erst ab diesem Spannungsniveau den Netzbildner unterstützt.

Somit ließe sich die Höhe der Spannung durch Verkleinern des Totbandes reduzieren, bzw. durch Linearisierung der Kennlinie des Batteriespeichers und Verzicht auf das Totband. In letzterem Fall würde das Netz durch zwei Netzbildner versorgt.

Bei identischen Kennlinien wäre das Verhalten des Batteriespeichers als Netzbildner vom Verhalten der DC-Station (Interlink-Konverter, ILC) nicht zu unterscheiden. In dieser Betriebsart wäre das Netz auf den Ausfall eines Netzbildners vorbereitet (Inselnetzbetrieb ohne die DC-Station als Verbindung zum AC-Netz).

Frage 9.3.3: Betrieb ohne Netzbildner. Untersuchen Sie die Arbeitsweise des Netzes im Inselnetzbetrieb, indem Sie die DC-Station außer Betrieb nehmen. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit dem Betrieb nur mit der DC-Station aus Aufgabe 9.2.4.



Beim Betrieb mit allen Ladestationen beträgt der Überschuss aus PV-Leistung von $P_{PV} = -800 \text{ kW}$ und Ladeleistung von $P_{HPC} = 600 \text{ kW}$ insgesamt 200 kW . Diese Leistung kann der Batteriespeicher aufnehmen. Wenn die Ladeleistung weiter reduziert wird, passt der Batteriespeicher seinen Strom gemäß der Steigung seiner Kennlinie oberhalb des Totbandes an. Die PV-Anlage gerät bei steigender Spannung in den linearen Bereich ihrer Kennlinie und wird die Einspeiseleistung deutlich drosseln.

Im Inselnetzbetrieb würde man die Kennlinie des Batteriespeichers daher gegen eine netzbildende Kennlinie austauschen, bzw. die Kennlinie im laufenden Betrieb umstellen. Eine Alternative wäre der Betrieb des Batteriespeichers als zusätzlicher Netzbildner parallel zur DC-Station.

Lösung: Wenn der Batteriespeicher voll ist, kann er keine Leistung aus der PV-Einspeisung mehr aufnehmen. In diesem Fall müsste die PV-Anlage ihre Einspeiseleistung auf das Niveau der geforderten Ladeleistung reduzieren. Bei Betrieb im Leerlauf (ohne Ladeleistung und sonstige Lastanforderung) müsste die PV-Anlage ihre Einspeisung komplett aussetzen. Dieser Betriebsfall lässt sich in der Simulation untersuchen.

140/172

Kriterien vorgegeben. Einen Beitrag zur Netzstützung leistet er dann höchstens mittelbar durch die Art seiner Betriebsführung.

Die Führung des Batteriespeichers ist in dieser Betriebsart auch für die Einhaltung der Leistungsgrenzen des Batteriespeichers verantwortlich. Der Batteriespeicher ist nun nicht mehr durch eine Kennlinie geführt, sondern fremdbestimmt, sein Strom somit eine Störgröße im Sinne der Regelungstechnik (als nicht beeinflussbare Größe, ohne Wertung deren Nutzen).

9.4. Dynamik und Stabilität

Mit Hilfe ihrer Kennlinien sind alle Anlagenströme an die Spannung im Netz gekoppelt. Diese Art der Kopplung bildet eine Regelschleife, da die Kapazität als Regelstrecke wiederum die Ströme zur Spannung im System integriert. Die Regelstrecke bestimmt durch ihre Trägheit die Dynamik der Regelung. Die Kennlinien lassen sich im linearen Fall als P-Regler interpretieren, sie reagieren rasch.

Eine Frage im Zusammenhang mit Regelkreisen ist die Stabilität. Im Fall des DC-Netzes hängt die Stabilität einerseits von der Wahl der Kennlinien ab, andererseits wie gewohnt von den Eigenschaften der Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises.

Frage 9.4.1: Dynamik der Regelung. Folgende Abbildung zeigt die Regelschleife. Beschreiben Sie die Eigenschaften der Regelstrecke. Führen Sie hierbei den Begriff der Trägheit ein.

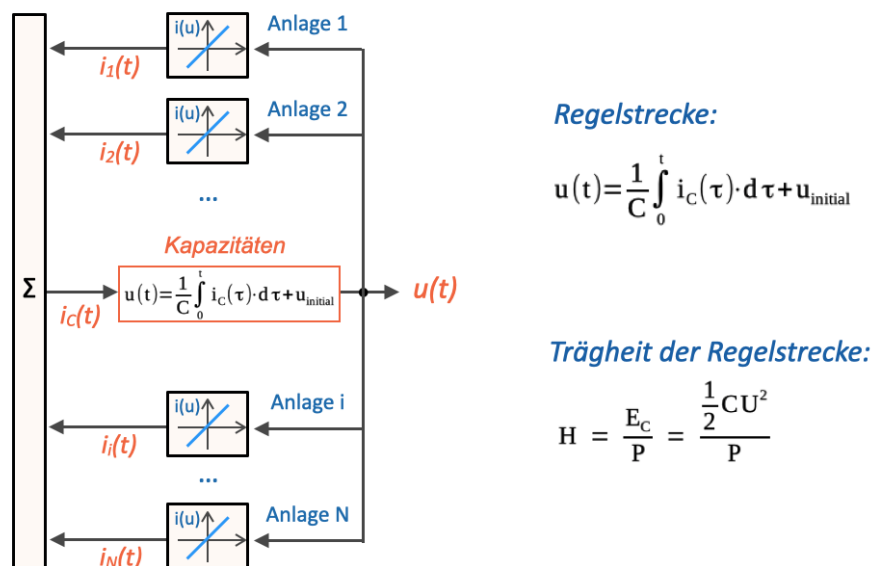


Bild 9.4.2 Regelschleife des Netzes

Lösung: (1) Ursache und Wirkung. Die Anlagenkapazitäten im Netz sind über die Anschlussleitungen zur Sammelschiene parallel geschaltet. Wenn man die Anschlussleitungen vernachlässigt, lassen sich die Anlagenkapazitäten zur Gesamtkapazität C addieren und auf diese Weise zusammenfassen. Die Kapazität C stellt die Regelstrecke des Netzes dar.

Stellgröße der Regelung und Eingangsgröße der Regelstrecke ist die Summe der Ströme an der Sammelschiene. Ein Ungleichgewicht der Ströme führt zu einem Strom $i_c(t)$ in die Kapazität C. Durch diesen Zufluss oder Abfluss ändert sich die Spannung im Netz: Die Spannung $u(t)$ ist das Integral des Stroms $i_c(t)$ über der Zeit gewichtet mit der Größe der Kapazität C.

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(\tau) \cdot d\tau + u_{\text{initial}} \quad (9.3.1)$$

Spannungsänderungen wirken nun mit Hilfe der Kennlinien $i_x(u)$ auf die Anlagenströme zurück und bewirken eine Änderung der Anlagenströme. Diese Änderung führt zu einem anderen Kondensatorstrom $i_c(t)$. Ob die Regelung stabil ist, hängt davon ab, ob sich ein Zustand findet, indem der Kondensatorstrom $i_c(t) = 0$ wird. Die Stabilität ist somit abhängig von der Wahl der Kennlinien.

Wirtschaftlich betrachtet stellt Sammelschiene zusammen mit der Kapazität C die Börse da, auf der sich Angebot und Nachfrage treffen. Die Währung des Handels ist die Spannung im Netz. Eine Einigung kommt durch Vermittlung der kollektiven Kapazität C zustande.

(2) Trägheit. Die Spannung an der Kapazität C ändert sich in Abhängigkeit des Stromes $i_c(t)$ mit der Zeit. Die Zeitkonstante der Änderung ist abhängig von der Größe der Kapazität C . Die Trägheit lässt sich aus dem Verhältnis der in der Kapazität gespeicherten Energie im Verhältnis zur Anschlussleistung definieren:

$$H = \frac{E_c}{P} = \frac{\frac{1}{2}CU^2}{P} \quad (9.3.2)$$

Die physikalische Einheit der Trägheit ist die Zeit: Wenn man die Energie in Ws misst, und die Leistung in W, verbleibt im Verhältnis die Zeit. Die Trägheit lässt sich als die Zeit auffassen, in der der Energiespeicher bei voller Anschlussleistung Energie liefern oder aufnehmen kann. In dieser Interpretation bezeichnet die Trägheit die Speicherdauer.

Als Beispiel seien folgende Werte gegeben: $C = 20 \text{ mF}$, $U_n = 1400 \text{ V}$. Hieraus ergibt sich eine Energiemenge von 20 kWs. Die Kapazität eines Smartphone-Akkus wird mit ca. 10 Wh angegeben, entsprechend 36 kWs. Die in der kollektiven Kapazität C des Netzes gespeicherte Energiemenge entspricht somit etwa der Kapazität der Batterie eines Smartphones, bzw. der Batterie einer elektrischen Zigarette. Bezogen auf eine maximale Anlagenleistung von 800 kW ergibt sich eine Trägheit von $H = 25 \text{ ms}$.

Diese Zeit wird benötigt, um eine Laständerung auszuregeln. Die mit der Trägheit H verbundene Energie E_c wird in AC-Netzen auch als Momentanreserve bezeichnet. Der Energiespeicher dort ist traditionell die Schwungmasse der Generator-Turbinensätze der Kraftwerke, die Energie somit eine kinetische Energie. In einem DC-Netz oder einem durch Konverter geführten Netz wird die Momentanreserve durch die Energie der Kapazität im DC-Kreis bereitgestellt.

In beiden Fällen bleibt die Momentanreserve eine Eigenschaft der Regelstrecke: Der bei einer Laständerung benötigte Strom wird sofort aus dieser Leistungsreserve bereitgestellt. Eine Einwirkung des Reglers wird hierfür nicht benötigt. Der Regler reagiert im DC-Netz erst auf die Änderung der Spannung, die die Regelstrecke als Wirkung der ursächlichen Laständerung vermittelt.

Die Spannungsänderung als Eingangsgröße des Reglers stellt in der kausalen Kette die Wirkung der Laständerung an der Regelstrecke dar. Der Regler reagiert erst auf diese Spannungsänderung. In Bezug auf die Momentanreserve wird der Regler auch als Primärregler bezeichnet. In einer DC-Quelle passt er die Leistung an die Laständerung an, wobei die Spannung die Rolle des Vermittlers spielt. Während die Momentanreserve die benötigte Leistung sofort bereitstellt (daher der Name), reagiert der Primärregler zeitverzögert.

Frage 9.4.2: Übergänge zwischen den Arbeitspunkten. In folgendem Simulationslauf wurde durch das Abschalten der PV-Anlage eine massive Laständerung als Störgröße in die Regelung eingebracht. Die Abbildung zeigt den experimentellen Aufbau, die Regelung einschließlich der Störgröße, und das Zeitverhalten der Regelstrecke nach der Störung. Erläutern Sie den Ablauf.

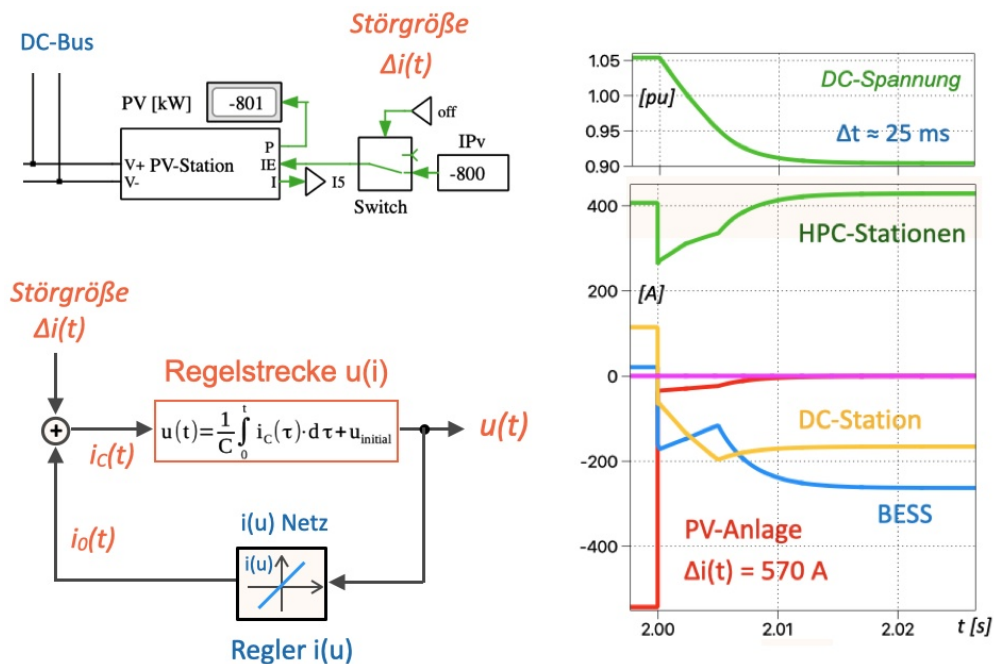


Bild 9.4.2 Regelung im Netz mit Störung (plötzlicher Verlust der Einspeisung)

Lösung: Die sprunghafte Änderung der Last wird durch das Abschalten der PV-Einspeisung mit Hilfe einer Sprungfunktion erzeugt. Dieser Eingriff in den Anlagenstrom lässt sich regelungstechnisch als Störgröße interpretieren: Im Signalfuss ergibt sich die von außen eingebrachte, nicht beeinflussbare Stromänderung $\Delta i(t)$ der PV-Anlage.

Diese Änderung wirkt unmittelbar auf die Regelstrecke. Das System hatte sich zuvor im Gleichgewicht befunden. Der fehlende Strom $\Delta i(t)$ der Einspeisung führt zu einem Sinken der Kondensatorspannung nach Gleichung (9.3.1). Regelungstechnisch betrachtet fängt die Regelstrecke den Lastsprung auf. Ein Eingriff des Regers wurde hierfür nicht benötigt.

Die Regler der verbliebenen Anlagen im Netz reagieren erst auf die Änderung der Netzspannung. Im Zeitverlauf ist zu erkennen, wie sich durch Einwirken der Regler der Arbeitspunkt aller verbliebenen Anlagen verschiebt: Die DC-Station und das Batteriespeichersystem (BESS) stellen nun die von den Ladestationen benötigte Leistung bereit und ersetzen die Einspeisung durch die PV-Anlage.

Im Zeitverlauf erkennt man auch, dass unmittelbar nach dem Lastsprung der Strom der Ladestationen abnimmt. Der Grund hierfür ist, dass die Anlagenkapazitäten der Ladestationen Teil der Gesamtkapazität C sind. Momentanreserve und Primärregelung sind kollektive Eigenschaften im System: alle Anlagen verhalten sich hier solidarisch im Sinne der Stabilität des Netzes.

Die Primärregelung durch die Kennlinien der Anlagen führt zu einem neuen stabilen Arbeitspunkt innerhalb einer Dauer von ca. 25 ms. Diese Zeit entspricht der aus Gleichung (9.3.2) mit Hilfe der Kenngrößen der Anlagen im Netz berechneten Trägheit.

Frage 9.4.3: Stabilität der Regelung. Wann würde man die Regelung im Netz als stabil bezeichnen? Nennen Sie Kriterien für die Netzstabilität.

Lösung: Voraussetzung für ein stabiles Netz ist, dass durch die Wirkung der Kennlinien insgesamt ein stabiler Arbeitspunkt gefunden wird. Diese Bedingung ist somit abhängig von einer passenden Vorgabe der Kennlinien. Darüberhinaus sollte die Dynamik der Regelung stabil sein. Diese Bedingung ließe sich beispielsweise durch die Lage der Polstellen der Übertragungsfunktion überprüfen. Als Arbeitstitel

für diese beiden Bedingungen werden hier die Begriffe (1) statische Stabilität und (2) dynamische Stabilität verwendet.

(1) Statische Stabilität: Eine Möglichkeit zur Überprüfung dieser Bedingung ist die Ermittlung der kollektiven Kennlinie aller Anlagen im Netz. Folgende Abbildung zeigt eine Anordnung hierfür und die resultierende Kennlinie.

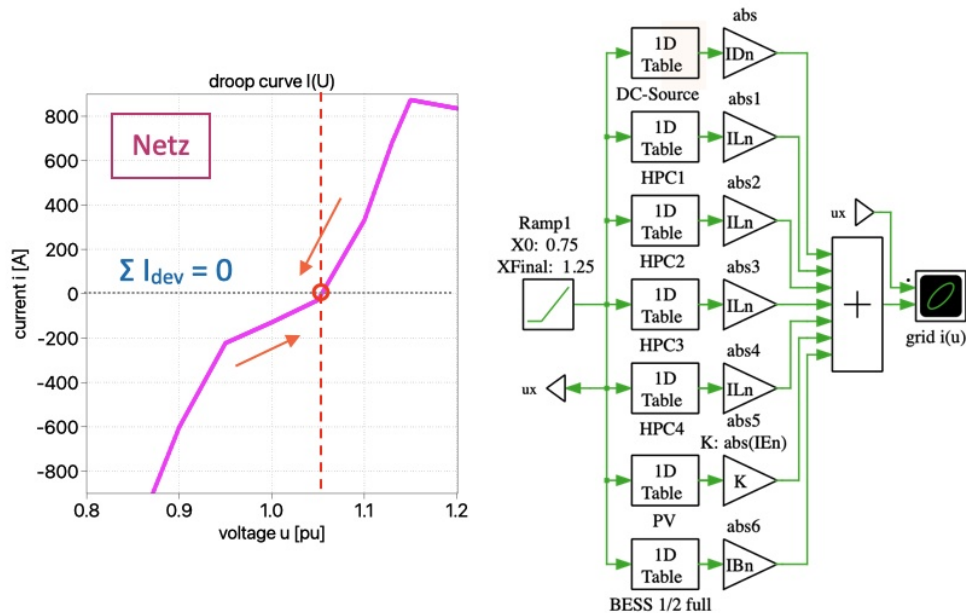


Bild 9.4.3 Ermittlung der kollektiven Kennlinie des Netzes

Zur Ermittlung der Kennlinien wird der relevante Spannungsbereich des Netzes im Signalfuss durchfahren, im Beispiel innerhalb des Intervalls $\{0,75 U_n, 1,25 U_n\}$. Die Anlagenströme folgen den Anlagenkennlinien als Grenzkurven. An der Sammelschiene addieren sich die Anlagenströme. Daher werden für die kollektive Kennlinie die Anlagenströme mit Hilfe der Bemessungsströme der Anlagen auf Absolutwerte skaliert und addiert.

Der resultierende Strom wäre der Kondensatorstrom. Ein stabiler Arbeitspunkt stellt sich dort ein, wo die Summe der Anlagenströme null ergibt. Dieser Punkt lässt sich an der Kennlinie identifizieren. Für die Stabilität ist entscheidend, dass der Punkt $\Sigma I_{dev} = 0$ eindeutig ist, und dass sich für die Heuristik der Anlagen innerhalb des relevanten Bereichs der Spannung im Netz ein Weg zu diesem Arbeitspunkt finden lässt.

Die Heuristik der Anlagen orientiert sich an der Steigung der Kennlinien: Ist der Preis zu hoch, reduziert man die Nachfrage. Ist der Preis niedrig, beschafft man mehr. Damit aus dem oberen und unteren Bereich der Spannung um den Arbeitspunkt ein Weg gefunden werden kann, sollte die kollektive Kennlinie stetig sein und einen monoton steigenden Verlauf besitzen. Das ist bei der dargestellten Kennlinie der Fall.

In der Praxis ist die kollektive Kennlinie abhängig von der jeweiligen Lastsituation. Für ein stabiles Netz sollte sich in jeder Situation ein stabiler Arbeitspunkt finden lassen, auch bei Abschaltung einzelner Anlagen. Die Überprüfung kann durch eine geeignete Auswahl der beteiligten Anlagen und repräsentativer Lastzustände erfolgen.

(2) Dynamische Stabilität: Als Beispiel sei hierfür der Netzbildner mit Hilfe eines Sollwertes und eines P-Reglers realisiert. Das Verhalten entspricht dem der Kennlinie, zeigt aber das gewohnte Bild aus der Regelungstechnik. Folgende Abbildung zeigt den Regelkreis aus der Perspektive des Netzbildners.

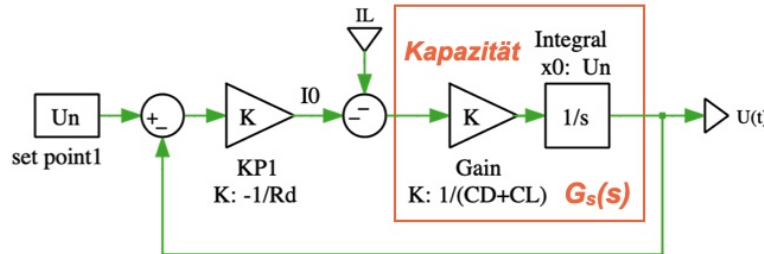


Bild 9.4.4 Regelkreis des Netzbildners mit P-Regler

Alle Anlagenströme sind hierbei als Störgröße I_L zusammengefasst. Für die Übertragungsfunktion der geschlossenen Regelschleife ermittelt man

$$U = -\frac{G_s K_p U_n}{1 - G_s K_p} - \frac{G_s I_L}{1 - G_s K_p} \quad (9.4.1)$$

Hierbei sind $G_s(s) = \frac{1}{C s}$ und $K_p = -\frac{1}{R_d}$.

Durch Einsetzen folgt

$$U = \frac{U_n - I_L R_d}{1 + R_d C s} \quad (9.4.2)$$

Diese Übertragungsfunktion besitzt eine Polstelle bei

$$s_1 = -\frac{1}{R_d C} \quad (9.4.3)$$

Die Basis der Regelung ist somit stabil und besitzt eine Zeitkonstante von

$$\tau = R_d C \quad (9.4.4)$$

Die Zeitkonstante bietet wiederum ein Maß für die Einschwingdauer der Primärregelung (hier durch den P-Regler). In diesem Modell wurden die Anschlussleistungen von der Sammelschiene zu den Anlagen vernachlässigt. Berücksichtigt man diese Leitungen, so wären im Modell die Leitungswiderstände und die Leistungsinduktivitäten zu ergänzen. Ein solches Modell mit Übertragungsfunktion findet sich in Kapitel 2.4.

Durch die Leitungsinduktivitäten steigt die Ordnung der Übertragungsfunktion, das System wird grundsätzlich schwingfähig, wenn die Reglerparameter ungünstig gewählt werden (d.h. wenn die Steigung $K_p \sim 1/R_d$ der Kennlinien zu groß wird). In der Praxis lässt sich die Stabilität mit einem erweiterten elektrischen Modell und den Kennlinien der Anlagen in der Simulation überprüfen.

Frage 9.4.4: Fassen Sie die wesentlichen Erkenntnisse zum Betrieb des Netzes zusammen.

Lösung: (1) Ein Gleichgewicht der Kräfte lässt sich durch die Kennlinien $i(u)$ der Anlagen herstellen. Die Kennlinien gestatten die Berücksichtigung der Strombegrenzung und der Leistungsgrenzen der

Anlagen. Ein Gleichgewichtszustand stellt sich dann ein, wenn die Summe aller Anlagenströme null ergibt.

(2) Das Funktionsprinzip des Netzes beruht auf der kollektiven Anlagenkapazität: Ein verbleibender Rest aus der Summe der Anlagenströme wird durch die Kapazität im Netz ausgeglichen, Hierdurch ändert sich die Spannung im Netz. Die Anlagen reagieren mit Hilfe ihrer Kennlinien $i(u)$ wiederum auf diese Spannungsänderung.

(3) Dynamik und Stabilität: Die Kapazität im Netz vermittelt die Interessen der Anlagen bezüglich Angebot und Nachfrage. Die Spannung spielt die Rolle der Währung dieses Handels. Regelungstechnisch betrachtet stellt die Kapazität im Netz die Momentanreserve für Laständerungen bereit. Die Kennlinien der Anlagen reagieren hierauf als Primärregler. Die Trägheit der Regelung steigt mit der Größe der Kapazität. Ein stabiler Arbeitspunkt stellt sich dann ein, wenn die kollektive Kennlinie der Anlagen im Netz einen stetigen, monoton steigenden Verlauf besitzt.

10. Betrieb des Netzes

Während bisher Betriebsmittel, Anlagen und das Netz betrachtet wurden, geht es in diesem Abschnitt um die Außenansicht des Netzes und um übergeordnete Aspekte der Betriebsführung. Die unterschiedlichen Ebenen der Betriebsführung lassen sich nach ihren Zeitkonstanten klassifizieren. Die Regelung der Anlagen innerhalb des Netzes mit Hilfe der Anlagenkennlinien wird als Primärregelung bezeichnet. Bei der übergeordneten Betriebsführung geht es um die Sekundärregelung und um Energiemanagementsysteme bzw. Leitsysteme.

10.1. Zeitkonstanten

Frage 10.1.1: Aufgaben der übergeordneten Betriebsführung. Folgende Abbildung zeigt das Netz aus der Perspektive des Betreibers. Ob sich der Betreiber hierbei als Person in einer Leitwarte befindet oder ob das Netz von einem Leitsystem oder einem Energiemanagementsystem aus automatisiert betrieben wird, macht bei dieser Betrachtung keinen Unterschied. Welche Aufgaben vermuten Sie unter dem Betrieb? Mit welchen Reaktionszeiten wird man in dieser Betriebsweise rechnen?

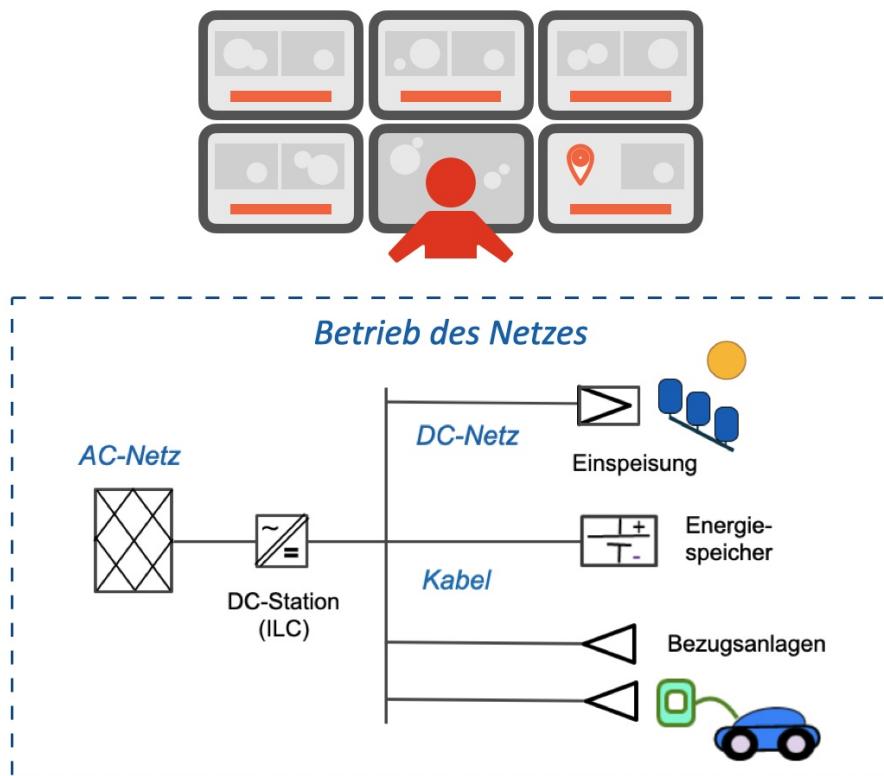


Bild 10.1.1 Führung des Netzes von außen

Lösung: (1) Aufgaben im Betrieb des Netzes: Man kann davon ausgehen, dass das Netz unabhängig von einer äußeren Beeinflussung autonom funktioniert. Die Anlagen verfügen über eine interne Regelung. Schutzgeräte sind geeignet parametrisiert. Die Kennlinien der Anlagen wurden vor der Inbetriebnahme angepasst. Das Netz sollte daher ohne äußere Eingriffe funktionieren. Diese Forderung genügt dem subsidiären Prinzip: Aufgaben werden möglichst vor Ort gelöst. Nur übergeordnete Aufgaben werden weiter nach oben delegiert.

Als übergeordnete Aufgaben außerhalb des lokalen Betriebs des Netzes kommen in Frage: Überwachung des Netzbetriebs. Hierbei lassen sich Informationen aus dem Feld sammeln, verdichten und visualisieren. Bei Fehlern oder Systemzuständen, die einen Eingriff von außen erfordern, werden durch

die Betriebsführung Maßnahmen zur Entstörung ausgelöst. Maßnahmen im Zusammenhang mit der Wartung der Anlagen bzw. zur Aktualisierung der Software auf den Anlagen gehören in diesen Bereich der Betriebsführung.

Entscheidungen, die außerhalb der Kompetenz des lokalen Netzes liegen, sind ebenfalls Teil des übergeordneten Betriebs. Hierzu gehört die Anpassung bzw. der Austausch von Kennlinien in den Anlagen, die gezielte Verschiebung des Arbeitspunktes der Netzbildner (die sogenannte Sekundärregelung), der Ausgleich der Leistung der Anlagen nach betrieblichen Gesichtspunkten außerhalb der Primärregelung, sowie der Wechsel der Betriebsweise einzelner Anlagen.

Als Beispiel wäre die Führung eines Energiespeichers nach Energiekosten zu nennen, bzw. nach betrieblichen Aspekten außerhalb des Horizontes des lokalen Netzes, die Umschaltung der Betriebsweise des Speichers in den netzdienlichen oder netzbildenden Betrieb, die Umschaltung des Netzes in den Inselnetzbetrieb, bzw. die Unterstützung des übergeordneten AC-Netzes nach einem Schwarzstart oder im Notbetrieb (mit Netzbildung auf der AC-Seite durch den Interlink-Konverter im AC-Netz).

(2) Zeitkonstanten der Betriebsführung von außen: Die zeitkritischen Aufgaben bleiben in der lokalen Betriebsführung im Netz. Die Zeitkonstanten der übergeordneten Betriebsweise liegen daher im Bereich einiger Sekunden bis Stunden.

Frage 10.1.2: Zeitkonstanten der lokalen und abgesetzten (bzw. übergeordneten) Betriebsführung. Folgende Abbildung klassifiziert vier Stufen der Betriebsführung. Welche Stufen gehören in die lokale Betriebsführung, welche zur abgesetzten Betriebsführung? Nach welchem Funktionsprinzip arbeiten die lokale Betriebsführung und die abgesetzte Betriebsführung? Welche Rolle spielen die Zeitkonstanten?



Bild 10.1.2 Zeitkonstanten der Betriebsführung

Lösung: (1) Lokale Betriebsführung: Innere Regelung und Primärregelung. Die innere Regelung der Konverter und die Schutztechnik haben die höchsten Ansprüche an die Reaktionszeit. Die Antwortzeiten auf Ereignisse liegen hier im Bereich der Mikrosekunden. Solch kurze Reaktionszeiten lassen sich nur innerhalb der Anlagen und innerhalb der Schutztechnik realisieren.

Die Primärregelung kommuniziert unmittelbar über die Spannung im Netz. Sie benötigt somit keine Kommunikationsverbindungen mit den diesbezüglichen Zeitverlusten für die Digitalisierung und Übertragung. Spannungswellen und Stromwellen breiten sich über die Leitungen mit annähernd Lichtge-

Kennlinien in den Anlagen ermöglichen es, innerhalb der Anlagen lokal zu agieren und insgesamt solidarisch zu handeln. Auch hierfür ist kein Austausch zwischen den Anlagen über Kommunikationsverbindungen erforderlich. Die Primärregelung der Anlagen arbeitet mit Hilfe der vorgegebenen Kennlinien solidarisch im Sinne der Stabilität des Netzes.

Das für die Sekundärregelung entscheidende Kriterium ist nicht die Solidarität, sondern die Fairness im Sinne einer gerechten Aufteilung der Aufgaben: Vorrangiges Ziel ist hier nicht die Netzstabilität, sondern die Entlastung einzelner Anlagen auf Kosten anderer Anlagen. Die Zeitkonstanten liegen hierbei mit einigen Sekunden deutlich über den Zeitkonstanten der Primärregelung.

10.2. Primärregelung

Frage 10.2.1: Folgende Abbildung zeigt das Netzmodell mit allen Anlagen und Kennlinien. Die Primärregelung führt das Netz in den dargestellten Arbeitspunkt. Wie funktioniert die Primärregelung?

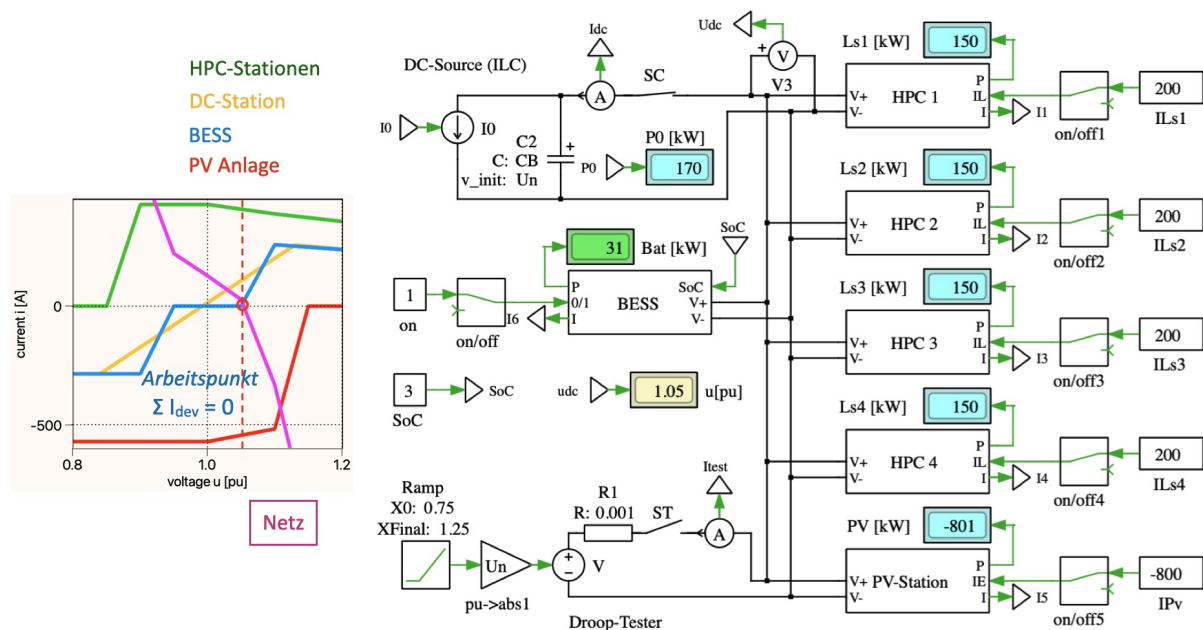


Bild 10.2.1 Netz im Betrieb mit allen Anlagen

Lösung: Im jeweiligen Arbeitspunkt müssen sich alle Ströme der Anlagen zu null ergänzen. Sollte die Summe der Anlagenströme nach einem Lastwechsel nicht aufgehen, ergibt sich ein Kondensatorstrom, der zu einer Spannungsänderung führt. Die Kennlinien der Anlagen repräsentieren die Primärregelung, die auf diese Spannungsänderung reagiert.

Je nach ihrer Kennlinie erhöht oder senkt eine Anlage ihren Strom abhängig von der Spannung. Hierdurch ändert sich die Summe der Ströme und folglich wiederum die Spannung. Idealerweise konvergiert das Verfahren in einem stabilen Arbeitspunkt. Bedingung für diese Konvergenz ist, dass die Summe der Ströme aus den Anlagenkennlinien einen stetigen und monoton steigenden Verlauf über der Spannung besitzt.

Im Beispiel sind alle Anlagen mit maximaler Leistung in Betrieb. Für die Leistungsbilanz der stromgeführten Anlagen ergibt sich: PV-Einspeisung -800 kW und Ladeleistung 600 kW mit einer Summe von -200 kW. Diese Leistung müssen die beiden spannungsgeführten Anlagen, nämlich der Batteriespeicher (netzstützend) und die DC-Station als Netzbildner, aufnehmen. Die Aufteilung gelingt, wobei nach der Gestalt der Kennlinien die DC-Station den größeren Anteil besitzt.

Frage 10.2.2: Dynamik der Primärregelung. Um die Dynamik der Primärregelung zu untersuchen, wird als größte Anlage am Netz die PV-Anlage mit voller Leistung im Bereich $\{-800 \text{ kW}, 0\}$ in der Simulation mit einem Wechselstrom betrieben, wobei die Frequenz bis auf 10 Hz steigt. Folgende Abbildung zeigt die Anordnung und die Reaktion der übrigen Anlagen. Untersuchen Sie die Reaktion der Primärregelung auf diese Anregung.

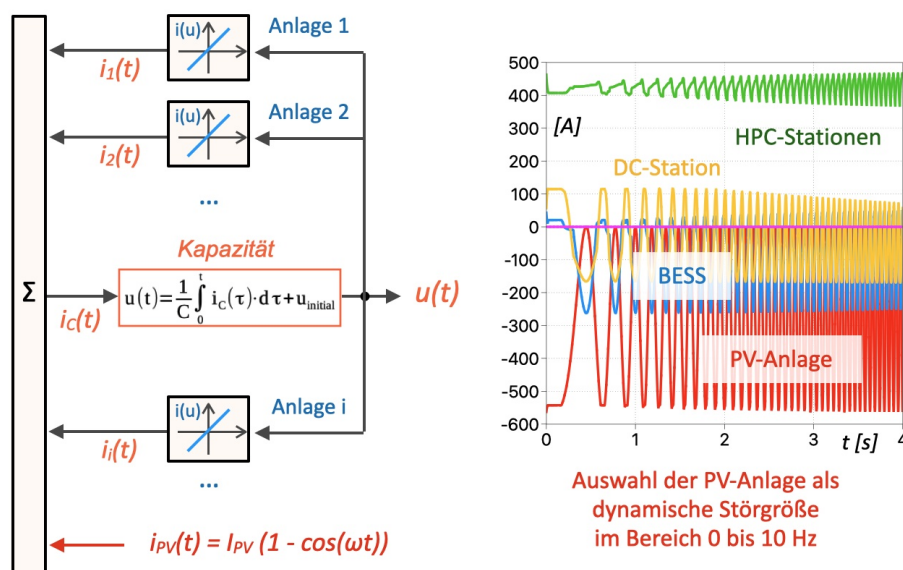


Bild 10.2.2 Testanordnung für die Dynamik der Primärregelung

Lösung: Der Strom der PV-Anlage ist der größte Strom im Netz. Durch die Anregung wechselt der Strom im Bereich $\{-550 \text{ A}, 0\}$ mit wachsender Frequenz mit bis zu 10 Hz. Am erkennt, dass die Ströme aller anderen Anlagen dem Stromverlauf der PV-Anlage als Störgröße mit umgekehrtem Vorzeichen folgen. Die Primärregelung kann anfänglich den Änderungen folgen, später bedient sich der Strom der Störgröße zunehmend aus den Anlagenkapazitäten, ohne dass die Primärregelung einen Ausgleich herbeiführen kann.

Mit der Summe der Anlagenkapazitäten beträgt die Trägheit im Netz $H \approx 25 \text{ ms}$ bezogen auf eine Anlagenleistung von 800 kW (entsprechend der Leistung der PV-Anlage). Interpretiert man diese Zeit als Dauer einer Viertelperiode, wäre die Periodendauer somit 100 ms. Die Primärregelung sollte einer Frequenz von 10 Hz (mit einer Periode von 100 ms) gerade noch folgen können.

Dass dies mehr schlecht als recht gelingt, zeigen die während der Simulation aufgezeichneten Kennlinien in folgender Abbildung. Bei langsamen Frequenzen folgt der Strom der Spannung gemäß der Kennlinie $i(u)$. Mit wachsender Frequenz stellt sich eine Hysterese ein: Die Primärregelung, die auf die Spannung reagiert und den Strom auf der Kennlinie führt, kommt nicht mehr nach, da die Regelstrecke bedingt durch ihre Trägheit zu langsam reagiert. Spannung und Strom geraten außer Phase.

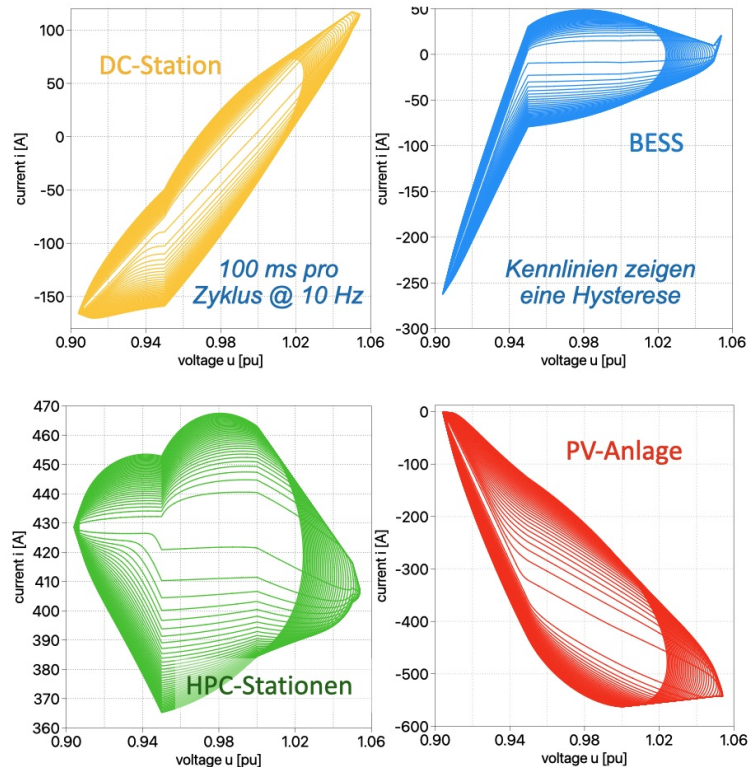


Bild 10.2.3 Kennlinien der Anlagen bei Anregung mit bis zu 10 Hz.

Die Kennlinien nähern sich mit wachsender Frequenz einer elliptischen Form, wie man es von einem Wechselstrom an einer Kapazität erwartet: Der periodische Strom eilt der periodischen Spannung um 90 Grad voraus. Die Spannungsamplitude wird mit wachsender Frequenz kleiner. In der xy-Darstellung $i(u)$ ergibt sich eine Ellipse.

In einem DC-Netz muss die Primärregelung keinen Wechselstrom ausregeln. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass die Primärregelung Laständerungen im Rahmen ihrer Zeitkonstante ausregeln kann. Im Beispiel liegt die Zeitkonstante im Bereich zweistelliger Millisekunden. Periodische Laständerungen dürfen nicht schneller schwanken, als es diese Zeitkonstante zulässt. Andernfalls bleibt das Netz zwar stabil, allerdings gelingt es der Primärregelung nicht, der Schwankung zu folgen.

Frage 10.2.3: Wechsel des Batteriespeichers in den netzbildenden Betrieb bzw. in den Inselnetzbetrieb. Untersuchen Sie in der Simulation folgende beiden Szenarien. Als Ausgangspunkt ist das Netz in beiden Fällen mit allen Anlagen in Betrieb, der Batteriespeicher im netzstützenden Betrieb. Fall (1): Zu einem gegebenen Zeitpunkt wird der Batteriespeicher vom netzstützenden Betrieb in den netzbildenden Betrieb umgeschaltet. Fall (2): Zu einem gegebenen Zeitpunkt fällt die DC-Station als Netzbildner aus. Zum gleichen Zeitpunkt wechselt der Batteriespeicher in den netzbildenden Betrieb und übernimmt die Rolle der DC-Station. In Fall (2) befindet sich das Netz nach dem Ausfall der DC-Station im Inselnetzbetrieb. Wie verkräftet die Primärregelung den Übergang?

Lösung: Folgende Abbildung zeigt die beiden Simulationsläufe. Im Fall (1) auf der linken Seite der Abbildung erkennt man, dass nach der Umschaltung der Speicherkennlinie zum Zeitpunkt $t_1 = 2$ s das

Batteriespeichersystem (Kurve BESS) und die DC-Station den identischen Verlauf zeigen (die Kurve der DC-Station überlagert hierbei die des Batteriespeichers). Beide Anlagen arbeiten nun netzbildend und teilen sich den Strom zu gleichen Teilen auf.

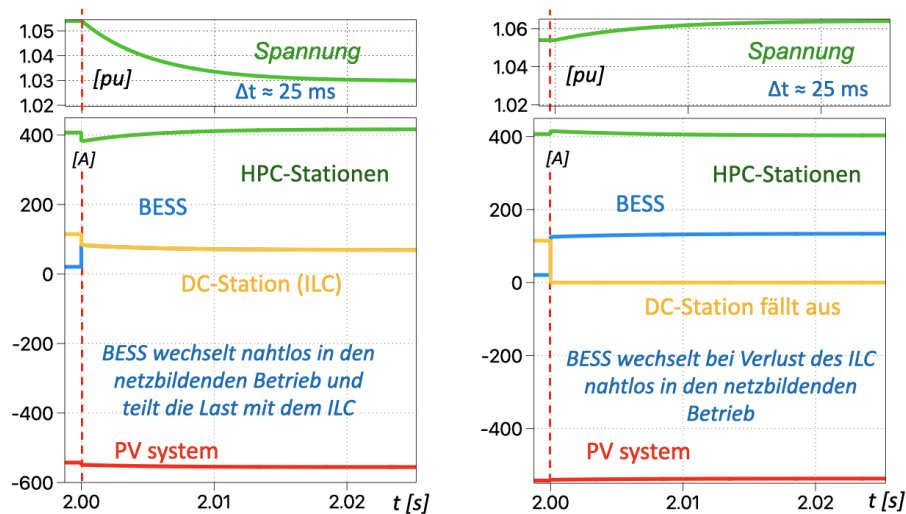


Bild 10.2.4 Übergang in den netzbildenden Betrieb

Die Summe der Ströme ist an der Sammelschiene zu jedem Zeitpunkt gleich null. Am Verlauf der Spannung im oberen Teil der Abbildung erkennt man, dass die Primärregelung noch arbeitet, bis der neue Arbeitspunkt nach etwa 25 ms erreicht ist. Bis zu diesem Zeitpunkt werden die Anlagenströme noch angepasst, was am Zeitverlauf der Ströme erkennbar ist.

Im Fall (2) fällt zum Zeitpunkt $t_1 = 2$ s die DC-Station aus, das Netz ist im Inselbetrieb. Zum gleichen Zeitpunkt wird die Kennlinie des Batteriespeichers in den netzbildenden Verlauf umgeschaltet. Am Zeitverlauf der Ströme im rechten Teil der Abbildung oben erkennt man, dass der Anteil der DC-Station sofort auf null fällt, und der Batteriespeicher den Ausgleich komplett übernimmt. Auch in diesem Fall benötigt die Primärregelung etwa 25 ms, bis sich der neue Arbeitspunkt stabilisiert.

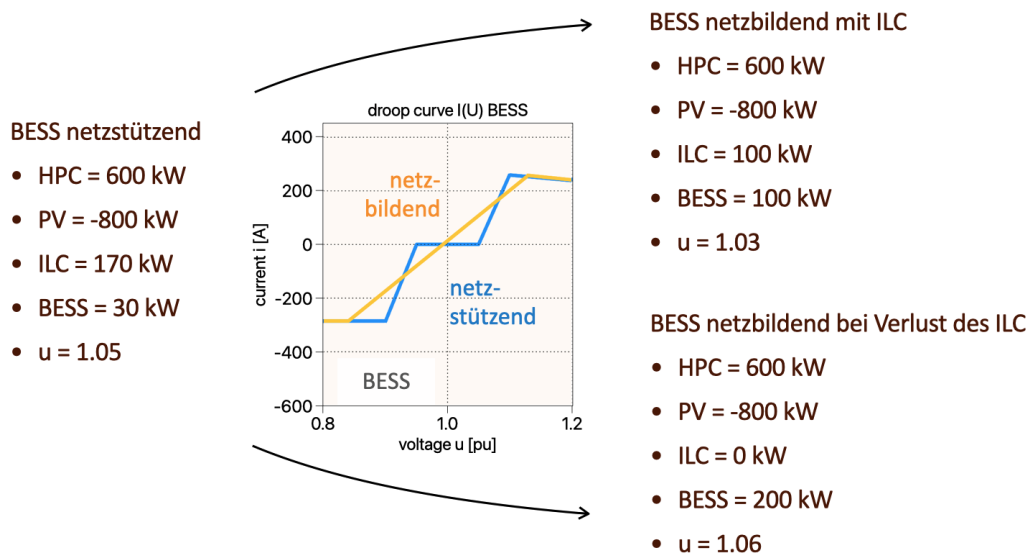


Bild 10.2.5 Leistungsbilanzen der Arbeitspunkte für die Fälle (1) und (2)

Die Leistungsbilanzen des Ausgangspunktes und der Arbeitspunkte nach der Umschaltung zeigt die Abbildung oben zusammen mit den Kennlinien des Batteriespeichers für den netzstützenden Betrieb und den netzbildenden Betrieb.

Man erkennt, dass Fall (1) mit zwei parallelen Netzbildnern den Batteriespeicher und die DC-Station gleichermaßen auslastet. Mit der netzstützenden Kennlinie beteiligt sich der Batteriespeicher erst später an der Aufnahme von Leistung. Die Spannungsabweichung im Netz fällt gegenüber dem Ausgangspunkt geringer aus. Man erkennt ebenfalls, dass sich für die stromgeführten Anlagen (Ladestationen und PV-Anlage) überhaupt kein Unterschied ergibt.

Im Fall (2) übernimmt der Batteriespeicher die komplette Leistungsdifferenz zwischen Einspeisung (PV-Anlage) und Bezugsanlagen (Ladestationen). Das Netz ist im Inselbetrieb. Für diese Anlagen ergibt sich gegenüber dem Ausgangspunkt überhaupt kein Unterschied. Die Spannungsabweichung fällt gegenüber dem Ausgangspunkt geringfügig höher aus.

Frage 10.2.4: Verlust des Netzbildners. Da sich das Netz in allen bisherigen Betriebsfällen sehr stabil verhält, ist die Frage, ob die Primärregelung auch einen Ausfall des Netzbildners und des Batteriespeichers verkraftet. Untersuchen Sie diesen Fall in der Simulation.

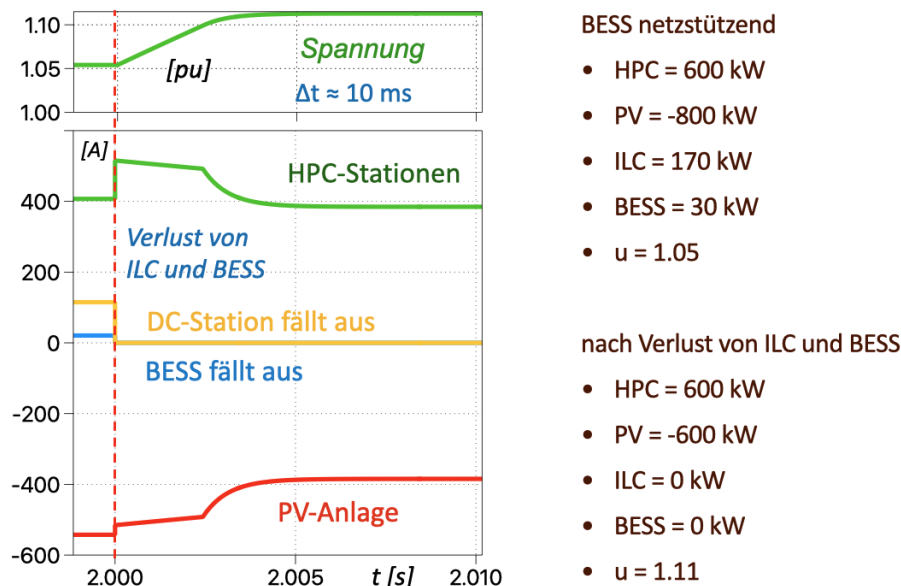


Bild 10.2.6 Verlust der DC-Station und des Batteriespeichers

Lösung: Nach dem Ausfall des Netzbildners (DC-Station) und des Batteriespeichers (BESS) zum Zeitpunkt $t_1 = 2$ s führt die Regelung der verbliebenen Anlagen das Netz erneut in einen stabilen Arbeitspunkt. Die Leistungsbilanz neben dem Zeitverlauf zeigt, dass die PV-Anlage ihre Leistung nun auf den Bedarf der Ladestationen (HPC) reduziert.

In den Zeitverläufen der Ströme erkennt man einen Knick bei den Ladestationen (HPC) und bei der PV-Anlagen, der den Knick in deren Kennlinien bei Überschreitung einer Spannungsschwelle reflektiert. Ladestationen und PV-Anlage gelingt auf Basis ihrer Kennlinien die Einigung auf einen gemeinsamen Arbeitspunkt, ohne Beteiligung eines Netzbildners. Aus einem stabilen Betriebszustand heraus ist das möglich. Allerdings wäre das Netz so nicht in der Lage, schwarz zu starten.

Eine weitere Frage wäre, ob die Regelung mit Hilfe der Kennlinien der verbliebenen Anlagen weiterhin gelingt, wenn man einzelne Ladestationen der Reihe nach abschaltet. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf. Man erkennt, dass es der PV-Anlage gelingt, zusammen mit den verbliebenen Ladestationen jeweils einen stabilen Arbeitspunkt zu finden, wobei die PV-Anlage ihre Einspeiseleistung auf

den Bedarf der verbliebenen Anlagen reduziert (erkennbar an den Strömen, die unterschiedliches Vorzeichen besitzen, jedoch gleiche Amplituden).

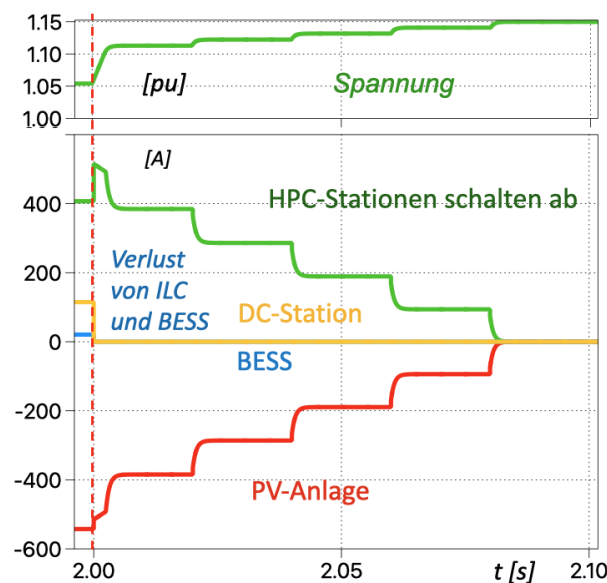


Bild 10.2.7 Änderung der Last nach Verlust von DC-Station und Batteriespeicher

Der Verlaufe der Ströme zeigt auch die Einschwingdauer der Regelung an den Lastwechseln, die durch das Abschalten der Ladestationen entstehen.

10.3. Sekundärregelung

Die Sekundärregelung ist der Primärregelung überlagert oder baut auf der Primärregelung auf. Hierunter lässt sich beispielsweise der stromgeführte Betrieb des Batteriespeichers verstehen: Statt mit Hilfe einer Kennlinie abhängig von der Spannung wird der Strom nun direkt eingestellt und stellt regelungstechnisch eine Störgröße dar. Nach einem Lastwechsel findet die Primärregelung einen neuen Arbeitspunkt.

Ein Sekundärregler lässt sich auch zur Verschiebung des Sollwertes eines Primärreglers verwenden. Die Primärregler aller Anlagen agieren solidarisch im Sinne der Netzstabilität. Solidarisches Verhalten muss nicht gerecht sein: einzelne Anlagen können hierbei auf Dauer mehr leisten, als vorab vereinbart. In AC-Netzen wird mit Hilfe der Sekundärregelung nach wirtschaftlichen Vereinbarungen der Arbeitspunkt einzelner Kraftwerke zugunsten einer höheren oder niedrigeren Belastung verändert.

Diese Methode lässt sich in einem DC-Netz ebenfalls anwenden. Dort lässt sich mit Hilfe des Sekundärreglers auch die Spannung im Netz wieder auf den Nennwert zurück führen. Bei einer einzelnen DC-Quelle ändert sich hierdurch die Belastung der Quelle nicht. Bei mehreren DC-Quellen lassen sich die Leistungsbeiträge anpassen.

Frage 10.3.1: Betriebsarten des Batteriespeichers. Erläutern Sie die in folgender Abbildung dargestellten Betriebsarten des Batteriespeichers. Wieso ist der stromgeführte Betrieb nicht geregelt?

Lösung: Die Betriebsarten (1) netzstützend und (2) netzbildend sind durch Kennlinien $i(u)$ in Abhängigkeit der Spannung vorgegeben. Durch die Rückkopplung des Anlagenstroms auf die Spannung in der Regelstrecke entsteht eine Regelschleife, Diese Betriebsarten sind Teil der Primärregelung. Die Primärregelung reagiert auf Spannungsänderungen und passt hiervon abhängig den Anlagenstrom als Stellgröße an.

In der (3) stromgeführten Betriebsart wird der Strom des Batteriespeichers als Stellgröße direkt vorgegeben: Es gibt innerhalb des Netzes keine Regelschleife in Abhängigkeit der Spannung. Daher ist diese Betriebsart nicht geregelt: Der Strom stellt im Sinne der Primärregelung eine Störgröße dar.

Für die Vorgabe des Stromes muss eine Kommunikationsschnittstelle zum Batteriespeicher eingeführt werden. In der Simulation lässt sich der Strom als Stellgröße des Batteriespeichers direkt vorgeben. Wenn die Vorgabe des Stromes durch eine äußere Regelung abhängig von der Spannung im Netz und abhängig von Stromgrenzen und Leistungsgrenzen geführt wird, liegt eine äußere Regelung vor.

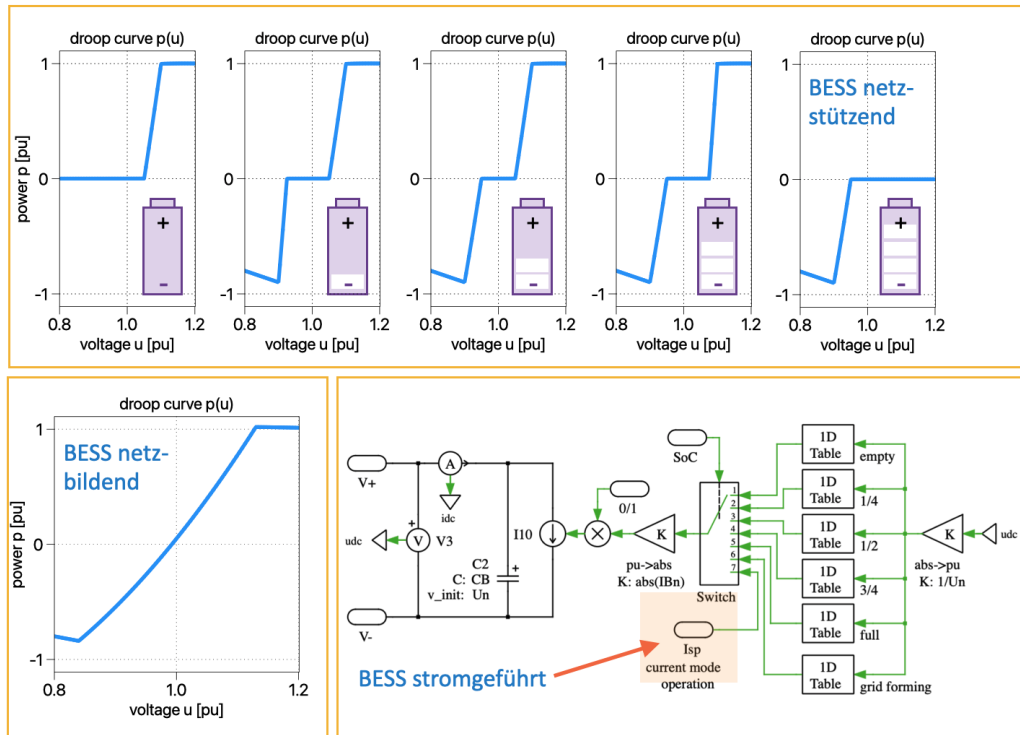


Bild 10.3.2 Betriebsarten des Batteriespeichersystems

Eine Sekundärregelung des Batteriespeichers ist die externe Regelung streng genommen nicht, da sie nicht auf einem primären Regelkreis innerhalb des Batteriespeichers aufbaut. Man könnte mit dieser Methode die Regelung des Batteriespeichers nach außen verlagern.

Als Störgröße beeinflusst die Stromvorgabe allerdings den Arbeitspunkt der verbliebenen Regler der Anlagen im Netz. Wie in Aufgabe 10.2.2 dargestellt, sind für Laständerungen durch Stromvorgaben die Zeitkonstanten der verbliebenen Regler im Netz zu berücksichtigen.

Frage 10.3.2: Primärregelung und Sekundärregelung. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Primärreglers des Netzbildners mit Hilfe eines P-Reglers. Erläutern Sie die Funktionsweise. Wie wäre eine Sekundärregelung auf dieser Basis zu realisieren?

Lösung: (1) Funktionsweise: Für den Netzbildner wird als Sollwert die Nennspannung vorgegeben. Eingangsgröße des P-Reglers mit der Verstärkung $K_P = -1/R_d$ ist die Abweichung zwischen dem Sollwert der Spannung und der aktuellen Spannung am Anschlusspunkt des Netzbildners. Mit Hilfe der Verstärkung K_P und der Regelabweichung ermittelt der Regler die Vorgabe für den Strom I_0 des Netzbildners.

Die Summe der übrigen Anlagenströme I_L spielt im Sinne der Regelung die Rolle einer Störgröße, die zur Stellgröße I_0 addiert wird. Die Summe aus Anlagenströmen I_L und Stellgröße I_0 führt auf die Regelstrecke, die hieraus die Spannung $u(t)$ ermittelt. Als Regelstrecke dient die kollektive Kapazität C . Das elektrische Ersatzschaltbild finden sich unter dem Signalfuss der Regelung.

Durch die Wirkung des Stroms I_0 des Netzbildners auf die Regelstrecke ändert sich die Spannung im Netz und kommt bei einer funktionierender Regelung dem Sollwert näher. Den Sollwert ausregeln

kann der P-Regler nicht, da er ohne Regeldifferenz Δu keine Sollwertvorgabe I_0 bilden kann. Die Regelung führt auf den Wert der mit Hilfe der Verstärkung K_P gegebenen Kennlinie $i(u)$.

Bemerkung: Beim Aufbau der Regelung mit Hilfe einer netzbildenden Kennlinie anstelle des P-Reglers ist die Vorgabe des Sollwertes bereits in der Kennlinie enthalten: Die Kennlinie verläuft durch den Punkt $\{1, 0\}$.

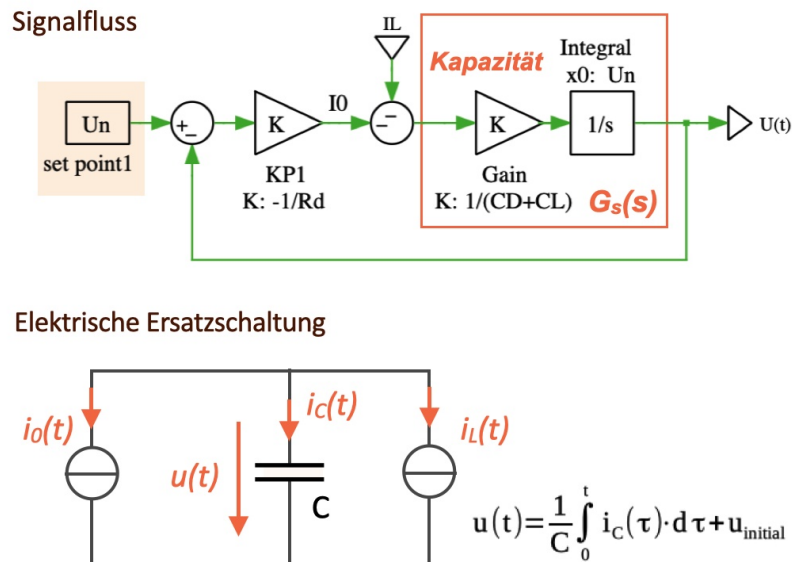
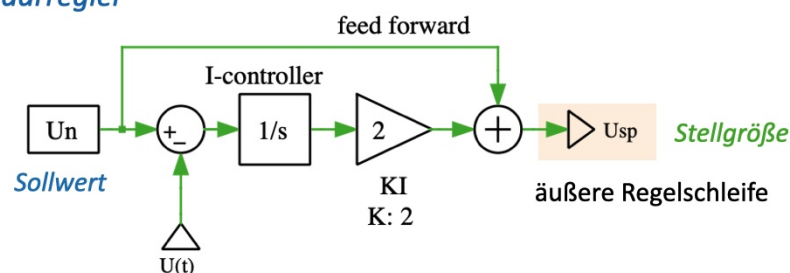


Bild 10.3.3 Primärregelung

(2) Realisierung einer Sekundärregelung: kaskadierte Regelung, siehe folgende Abbildung. Der Primärregler bleibt hierbei unverändert bestehen und wird um eine äußere Regelschleife erweitert. Der Ausgang des Sekundärreglers (d.h. die Stellgröße des Sekundärreglers) dient nun als Sollwert des Primärreglers. Somit ist der Sollwert des Primärreglers nicht mehr auf die Nennspannung fixiert, sondern variabel durch den Sekundärregler einstellbar.

Sekundärregler



Primärregler

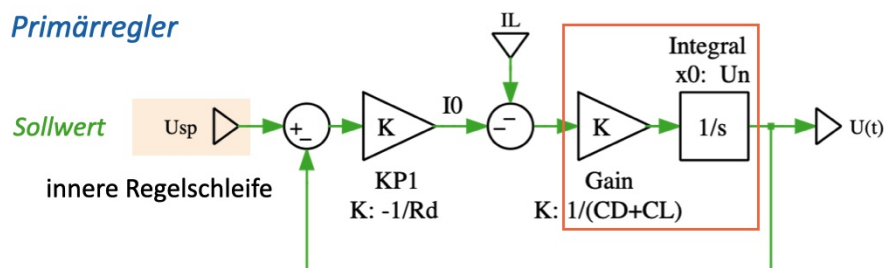


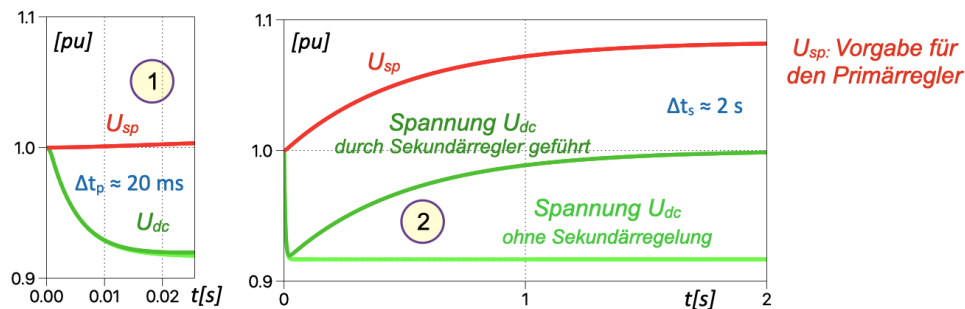
Bild 10.3.4 Primärregelung und Sekundärregelung

Sollwert des Sekundärreglers ist die Spannung im Netz. Im Beispiel wurde die Nennspannung U_n fest vorgegeben. Der Sekundärregler ist als I-Regler ausgeführt und somit in der Lage, den vorgegebenen Sollwert zu treffen. Mit Hilfe des Sekundärreglers lässt sich die Spannung im Netz führen.

Insgesamt ergibt sich eine kaskadierte Regelung mit dem Sekundärregler in der äußeren Regelschleife und dem Primärregler in der inneren Regelschleife. In einer Kaskade ist darauf zu achten, dass der äußere Regler nicht schneller reagieren darf als der innere Regler: Der innere Regler stellt die Regelstrecke des äußeren Reglers dar.

Mit Hilfe des Primärreglers arbeitet der Netzbildner als Spannungsquelle: Seine Stellgröße ist die Spannung, die durch den Sekundärregler geführt wird. Der Sekundärregler muss die Zeitkonstanten des Primärreglers einhalten und reagiert somit langsamer. Wenn der Primärregler im Bereich zweistelliger Millisekunden arbeitet, sollten dem Sekundärregler Sekunden genügen.

Frage 10.3.3: Einsatz der Sekundärregelung zur Rückführung der Spannung. Der Sekundärregler soll eingesetzt, um mit Hilfe des Netzbildners die Spannung nach der Stabilisierung des Arbeitspunktes im Netz durch den Primärregler wieder auf den Nennwert zurückzuführen. Wie lässt sich der in folgender Abbildung dargestellte Zeitverlauf interpretieren?



Ausführungen des Primärreglers:

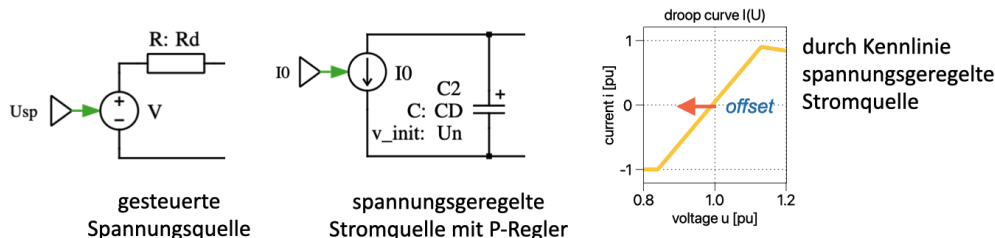


Bild 10.3.5 Zeitverlauf mit Primärregelung und Sekundärregelung

Wie wäre die Vorgabe des Sollwertes durch den Sekundärregler für den Primärregler zu realisieren, wenn dieser als gesteuerte Spannungsquelle oder als spannungsgeführte Stromquelle mit P-Regler oder Kennlinien ausgeführt ist?

Lösung: (1) Zeitverlauf: Der Primärregler reagiert im Bereich von 20 ms. Der Primärregler bildet die Kennlinie einer Spannungsquelle mit Innenwiderstand nach. Folglich weicht die Spannung im Arbeitspunkt von der Nennspannung (= Leerlaufspannung der Quelle) ab.

Der Sekundärregler ändert die Sollwertvorgabe U_{sp} des Primärreglers so, dass die Spannung wieder auf den Nennwert zurückgeführt wird. Der Zeitverlauf zeigt die Vorgabe U_{sp} des Sekundärreglers an den Primärregler.

Die Vorgabe wirkt als Verschiebung auf den Verlauf der resultierende Spannung. Die Verstärkung K_1 des Sekundärreglers wurde so gewählt, dass der Sekundärregler dem Primärregler ausreichend Zeit lässt. Der Sekundärregler reagiert im Bereich einiger Sekunden.

(2) Implementierung der Sekundärregelung: Der untere Teil der Abbildung zeigt unterschiedliche Ausführungen der Regelstrecke mit Primärregler. Der ideale Fall wäre (a) eine Spannungsquelle mit Innenwiderstand. In diesem Fall wäre die Spannungsquelle direkt durch den Sekundärregler gesteuert. Die Vorgabe für die Verschiebung U_{sp} lässt sich unmittelbar durch die Spannungsquelle umsetzen.

Im Falle (b) der Ausführung des Primärreglers als P-Regler erfolgt die Vorgabe der Stellgröße U_{sp} an des Primärregler wie bereits in Abbildung 10.3.4 dargestellt.

Für die Ausführung (c) des Primärreglers mit Hilfe der netzbildenden Kennlinie ist der Sollwert innerhalb der Kennlinie realisiert. Hier lässt sich eine Spannungsdifferenz (engl. offset) als Stellgröße des Sekundärreglers einführen, die zur gemessenen Spannung addiert wird.

Frage 10.3.4: Implementierung der Sekundärregelung. Die Sekundärregelung soll in einer Simulation untersucht werden. Hierzu wird das in folgende Abbildung dargestellte minimale Netz verwendet, bestehend aus dem Netzbildner in den Ausführungen (a), (b) und (c), sowie einer Anlage als Last. Implementieren Sie die Regelung in den drei Varianten.

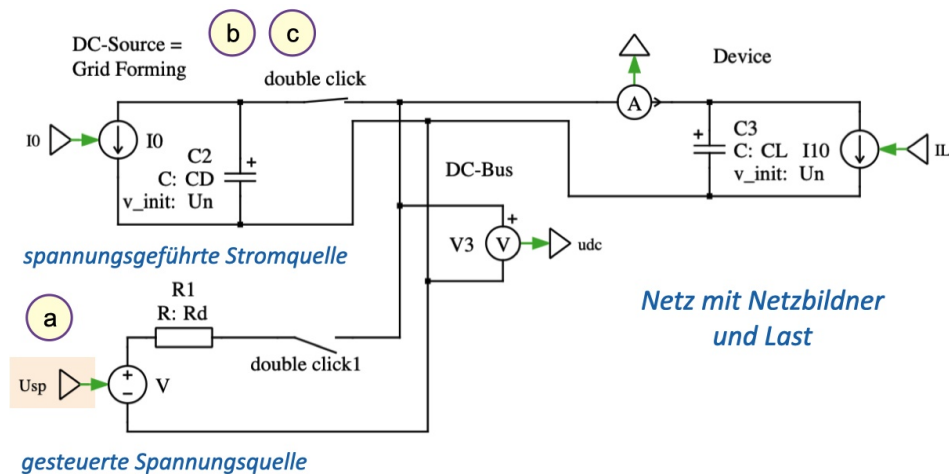


Bild 10.3.6 Netz mit Netzbildner und Anlage

Lösung: Die Implementierung des Sekundärreglers zusammen mit dem Primärregler für die Fälle (a), (b) und (c) erfolgt wie in folgender Abbildung dargestellt.

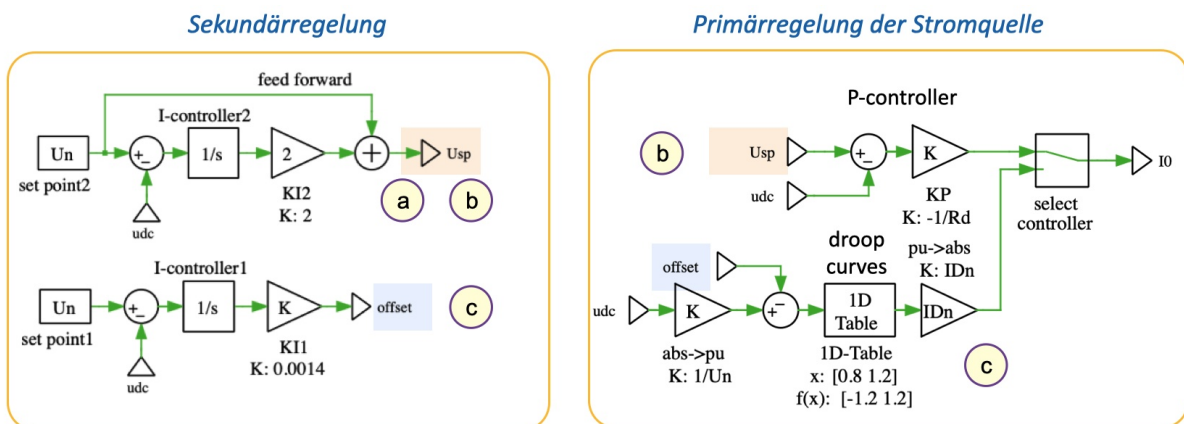


Bild 10.3.7 Implementierung der Sekundärregelung

Für die ideale Spannungsquelle aus Fall (a) lässt sich mit Hilfe des I-Reglers der Sekundärregelung die Leerlaufspannung als Stellgröße so verändern, dass die Klemmenspannung (= Spannung im Netz) dem gewünschten Sollwert des Sekundärreglers entspricht. Im Beispiel wurde die Nennspannung als Sollwert vorgegeben. Die Vorgabe der Stellgröße U_{sp} des Sekundärreglers wird direkt auf die Spannungsquelle in der Schaltung aus der Abbildung 10.3.6 darüber geführt. Die Spannung ist die Stellgröße der gesteuerten Spannungsquelle.

Für den Fall (b) der spannungsgeführten Stromquelle bedarf es einer unterlagerten Primärregelung als Spannungsregelung, da die Stellgröße der Regelstrecke nun der Strom ist. Die unterlagerte Primärregelung ist identisch mit der Regelung des Netzbildners. Statt eines festen Sollwertes wird der Sollwert der Primärregelung nun als Stellgröße U_{sp} der Sekundärregelung geführt. Der Primärregler bleibt unverändert.

Für den Fall (c) der mit Hilfe der Kennlinie $i(u)$ geführten Stromquelle ist die Stellgröße nach dem in Aufgabe 10.3.3 eingeführtem Konzept eine Spannungsdifferenz Δu (in der Abbildung als „offset“ bezeichnet). Da die Kennlinie bereits den Nennwert der Spannung enthält, wird ein Sekundärregler ohne Vorsteuerung (engl. „feed forward“) verwendet und der Reglerparameter K_I an den normierten Wertebereich der Kennlinie angepasst.

Mit allen Varianten der Regelung ergeben sich die in Aufgabe 10.3.3 dargestellten Zeitverläufe. Das Prinzip der Sekundärregelung bleibt jeweils gleich: Der Arbeitspunkt des Primärreglers an einer Anlage wird gezielt verschoben. Eine naheliegende Wahl der Anlage ist der Netzbildner.

10.4. Betriebsarten

Die Sekundärregelung soll nun im Netzmodell eingeführt werden. Der Sekundärregler lässt sich hierbei zur Spannungsregelung einsetzen, um die Spannung unabhängig vom Lastzustand wieder auf den Nennwert zurückzuführen. Bei mehreren Netzbildnern lässt er sich außerdem zur Anpassung der Beiträge der Netzbildner zur Last verwenden. Eine weitere Betriebsart ist die Umschaltung in den Inselnetzbetrieb mit aktiver Spannungsregelung durch den Sekundärregler. Der Sekundärregler lässt sich auf dem Netzbildner implementieren, bzw. außerhalb des Netzbildners.

Über die Sekundärregelung hinaus besteht die Möglichkeit zur Führung des Netzes durch eine Leitstelle oder durch ein Energiemanagementsystem. Zu Anschluss an ein solches System werden in den Anlagen Kommunikationsschnittstellen mit geeigneten Protokollen benötigt. In den Stromnetzen ist der Einsatz von Stationsleitstellen und zentralen Netzleitstellen etablierte Praxis. Als kritische Infrastruktur werden hierfür sichere Kommunikationsprotokolle eingesetzt, beispielsweise nach der Spezifikation IEC61850, die sowohl zur Stationsautomatisierung als zur Fernkommunikation eingesetzt wird.

Energiemanagementsysteme, wie beispielsweise OpenEMS, finden sich in industriellen Netzen, in Gebäuden und im Heimbereich. Hier findet sich eine Vielzahl von Protokollen und Kommunikationswegen über Draht und Funk im Zusammenhang mit dem Internet der Dinge.

Frage 10.4.1: Netzbetrieb mit Spannungsrückführung. Implementieren Sie den Sekundärregler im Netzmodell auf der DC-Station und dem Batteriesystem. Beide Anlagen sollen netzbildend betrieben werden. Untersuchen Sie die Funktionsweise in der Simulation.

Lösung: Folgende Abbildung zeugt den Aufbau des Reglers zusammen mit dem Zeitverlauf aus der Simulation. Der Netzbildner behält seine Kennlinie unverändert bei. Stellgröße des Sekundärreglers ist die Spannungsdifferenz Δu (in der Abbildung als „offset“ bezeichnet), die zur gemessenen Spannung am Eingang der Kennlinie des Primärreglers addiert wird.

Hierdurch kann der Sekundärregler den Arbeitspunkt des Netzbildners als überlagerte Regelung verändert. Die Funktion der Primärregelung zur Herstellung des Gleichgewichts im Netz bleibt erhalten, allerdings ändert sich der Sollwert der Primärregelung.

Der Sekundärregler ist als I-Regler mit festem Sollwert ausgeführt. Als Sollwert ist die Nennspannung vorgegeben. Der Sekundärregler soll bewirken, dass die Spannung unabhängig vom Lastzustand auf den Nennwert zurückkehrt. Stellgröße des Sekundärreglers ist die Spannungsdifferenz Δu , die als „offset“ die Kennlinie verschiebt.

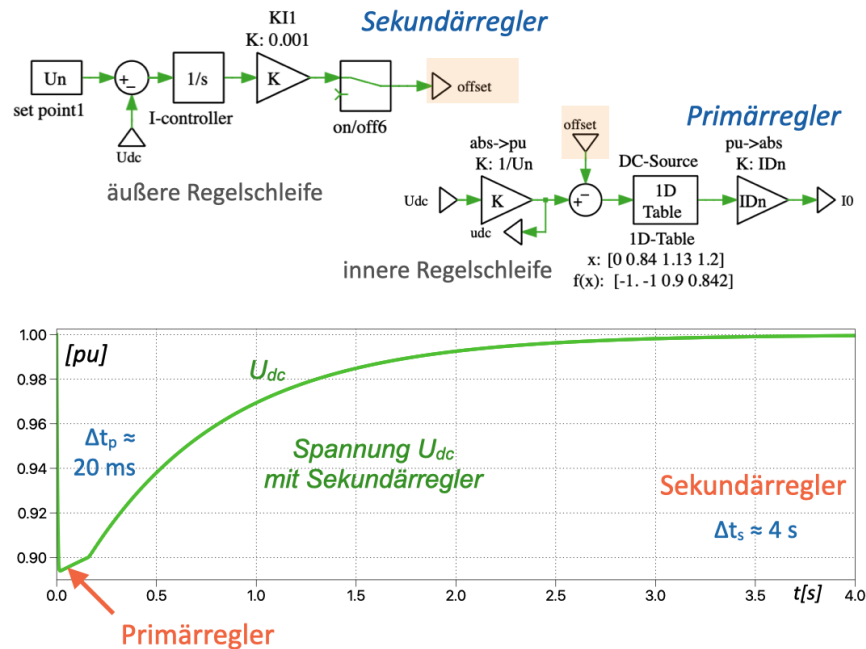


Bild 10.4.2 Implementierung des Sekundärreglers mit für Netzbildner mit Kennlinie

Der Simulationslauf im unteren Teil der Abbildung oben zeigt, dass die Sekundärregelung die Spannung nach einiger Zeit wie gewünscht aus die Nennspannung zurückführt. Folgende Abbildung zeigt das Netz mit aktiven Sekundärreglern auf der DC-Station und dem Batteriespeichersystem.

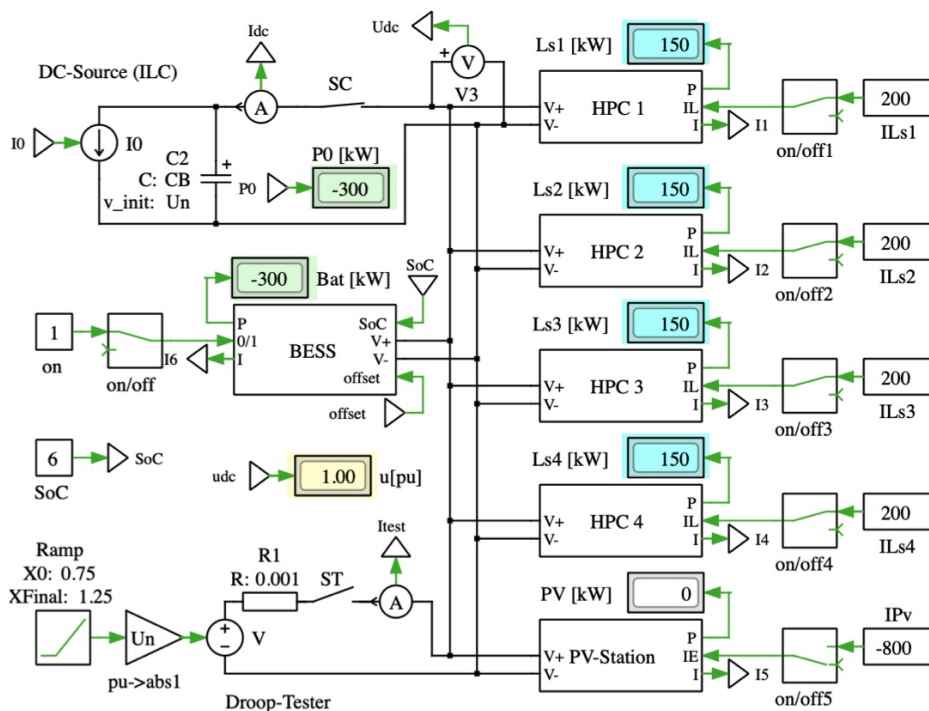


Bild 10.4.3 Netz mit Sekundärregler aus der DC-Station und dem Batteriespeichersystem

Beide Anlagen werden mit identischen Kennlinien netzbildend betrieben. Daher fallen auch die Leistungsbeiträge beider Anlagen gleich aus: Da die PV-Anlage nicht aktiv ist, teilen sich die DC-Station und der Batteriespeicher die Leistung der Ladestationen von insgesamt 600 kW mit gleichen Anteilen auf. Auffällig ist, dass trotz der relativ hohen Last beider Anlagen die Spannung im Netz exakt dem Nennwert entspricht.

Die Kennlinien der übrigen Anlagen bleiben hierbei unverändert. Die Sekundärregelung betrifft nur die netzbildenden Anlagen. Das Modell gestattet die Untersuchung weiterer Lastzustände und Übergänge in der spannungsgeregelten Betriebsführung.

Frage 10.4.2: Umschalten in den Inselnetzbetrieb. Das Netz soll aus dem netzbildenden Betrieb mit der DC-Station und dem Batteriespeicher mit Spannungsregelung in den Inselnetzbetrieb wechseln, wenn die DC-Station ausfällt. Untersuchen Sie en Übergang in der Simulation.

Lösung: In folgender Abbildung ist der Zeitverlauf der Spannung und der Ströme über einen Zeitraum von 10 s dargestellt. Zum Zeitpunkt t_1 fällt die DC-Station aus.

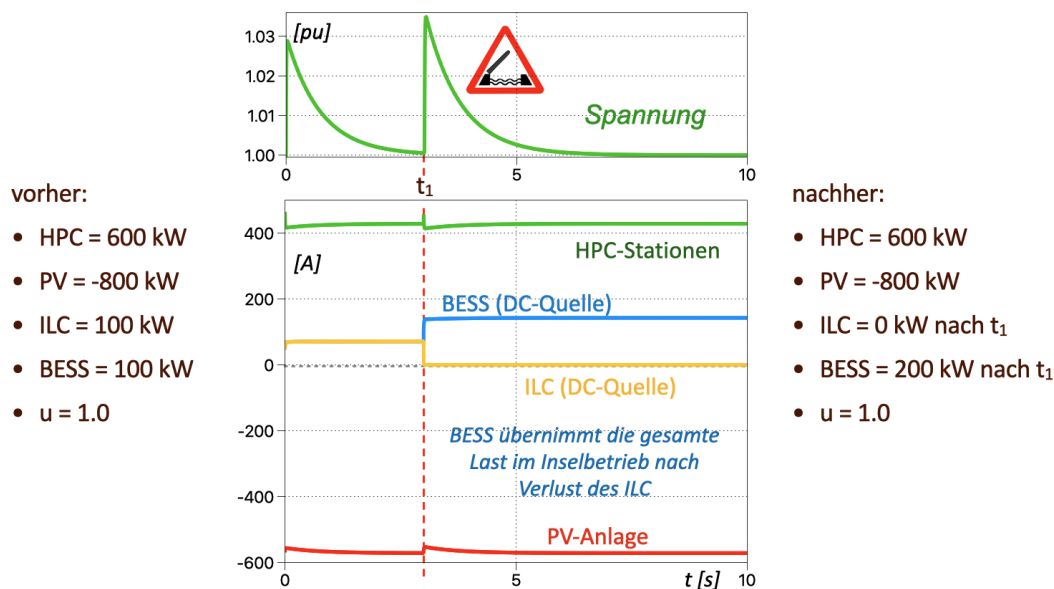


Bild 10.4.3 Netz mit Sekundärregler aus der DC-Station und dem Batteriespeichersystem

Zu Beginn der Simulation stellt der Primärregler rasch einen Arbeitspunkt ein, den die Sekundärregler auf der DC-Station und auf dem Batteriespeichersystem innerhalb einiger Sekunden so verschieben, dass die Spannung den Nennwert erreicht. DC-Station und Batteriespeicher teilen sich die überschüssige Einspeisung der PV-Anlage zu gleichen Teilen auf.

Zum Zeitpunkt t_1 fällt die DC-Station aus, das Netz wechselt in den Inselnetzbetrieb. Den Strom der DC-Station übernimmt das Batteriespeichersystem sofort. Der Primärregler stabilisiert den Arbeitspunkt oberhalb $1,03 U_n$. Der Sekundärregler des Batteriespeichersystems führt die Spannung innerhalb einiger Sekunden auf den Nennwert zurück. Der Wechsel in den Inselnetzbetrieb erfolgt nahtlos.

Frage 10.4.3: Leitsystem und Energiemanagementsystem. Folgende Abbildung zeigt die Anbindung des Netzes an ein Energiemanagementsystem. Welche Aufgaben übernimmt das zentrale System? Wie erfolgt die Anbindung an das DC-Netz?

Lösung: Das zentrale System ist im Netz beispielsweise auf einem Cloud-Server realisiert. Zur Anbindung des DC-Netzes muss eine der Anlagen eine passende Schnittstelle zum zentralen System bereitstellen. In der Abbildung ist diese Schnittstelle mit „Edge“ bezeichnet. Die mit dieser Software ausgestattete Anlage ist der Ansprechpartner des zentralen Systems.

Als Anlage hierfür eignen sich wegen ihrer besonderen Rolle im Netz die DC-Station oder das Batteriespeichersystem. Die mit „Edge“ bezeichnete Anlage sammelt Daten aus dem Netz und stellt diese bereit. Für solche Daten kommen der Betriebszustand mit der Spannung, Strömen und Leistungen in Frage, einschließlich des Betriebszustandes der Anlagen und Fehlerzuständen.

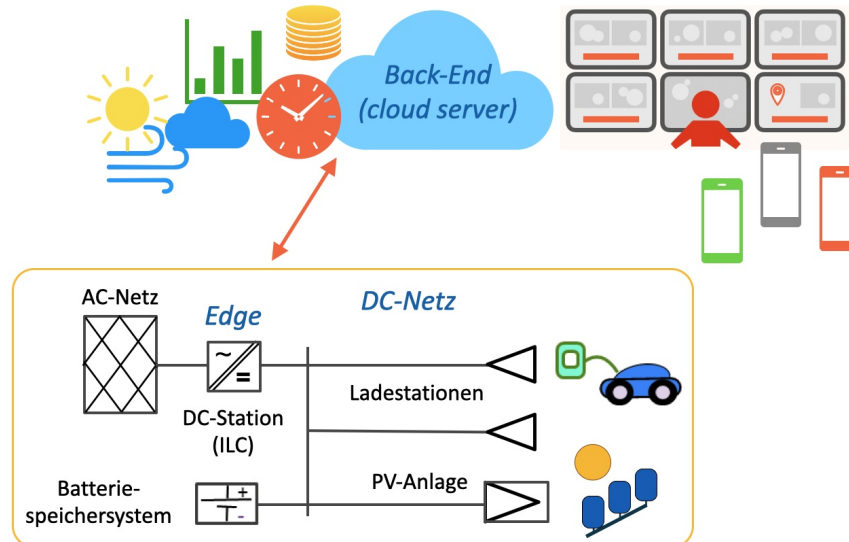


Bild 10.4.4 Netzbetrieb mit Energiemanagementsystem

Die gesammelten Daten lassen sich als Prozessabbild auf dem zentralen System visualisieren oder als Prozessabbild virtuell betreiben. Auf dem zentralen System werden alle Daten aus dem Feld gesammelt, verdichtet und zur Visualisierung oder Archivierung aufbereitet. Schnittstellen zur Visualisierung stellen beispielsweise Smartphone-Apps bereit, oder werden über das Web angeboten.

Auf den „Edge“-Anlagen lassen sich im Auftrag des Zentralsystems auch Anwendungen zur Betriebsführung der Anlagen realisieren, beispielsweise die hier diskutierten Wechsel der Betriebsarten.

Frage 10.4.4: Wie lassen sich die Erkenntnisse zum Betrieb des Netzes zusammenfassen?

Lösung: (1) Primärregelung: Ausgleich der Leistungen nach Laständerungen innerhalb zweistelliger Millisekunden. Die Primärregler reagieren auf Spannungsänderungen, die die Regelstrecke bei Laständerungen erzeugt. Die Regelstrecke besitzt eine Trägheit und stellt aus ihrer Energiereserve Leistung bereit. Primärregler lassen sich in Form von Kennlinien auf allen Anlagen implementieren. Die Primärregelung arbeitet autonom und verteilt auf allen Systemen.

(2) Sekundärregelung: Zur Anpassung der Sollwerte der Primärregler auf netzbildenden oder netzstützenden Anlagen mit dem Ziel der Rückführung der Spannung bzw. der fairen Belastung einzelner Anlagen. Eine weitere Aufgabe wäre der Austausch bzw. die Aktualisierung von Kennlinien einzelner Anlagen, die Führung einzelner Anlagen unabhängig von der Primärregelung, sowie die Führung des Netzes in eine andere Betriebsart (z.B. in den Inselnetzbetrieb). Die Reaktionszeiten liegen im Bereich einiger Sekunden.

(3) Zentrale Anlagen zur Betriebsführung wie beispielsweise Leitstellen oder Energiemanagementsysteme erledigen übergeordnete Aufgaben mit Reaktionszeiten im Bereich einiger Stunden. Die Betriebsführung erfolgt nach wirtschaftlichen oder betrieblichen Gesichtspunkten. Zu den Aufgaben der zentralen Anlagen gehört die Sammlung, Verdichtung und Aufbereitung von Informationen.

Abkürzungen

AC	Alternating Current, Wechselstrom
DC	Direct Current, Gleichstrom
$T = 1/f$	Schwingungsdauer, Periodendauer [s]
$f = 1/T$	Frequenz, Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit [1/s]
$\omega = 2\pi f = 2\pi/T$	Kreisfrequenz, Winkelgeschwindigkeit der Kreisbewegung [1/s]
E	Energie [Joule, J, Nm, Ws, $\text{kg m}^2/\text{s}^2$] potentielle Energie $E_p = 1/2 k y^2$, kinetische Energie, Translation $E_k = 1/2 m v^2$, kinetische Energie, Rotation $E_r = 1/2 J \omega^2$, Energie elektrisches Feld $E_C = 1/2 C U^2$, Energie magnetisches Feld $E_L = 1/2 L I^2$
RMS	Root mean square (Effektivwert)
A	Ampere (Einheit des elektrischen Stroms)
deg	degrees (Phasenwinkel in Grad)
kV	Kilo Volt (1000V)
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
p.u.	per unit (auf Nennwert und physikalische Einheit normierte Größe)
PV	Photovoltaik
V	Volt (Einheit der elektrischen Spannung)
W	Watt (Wirkleistung, P)

Konstanten

$\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$	Leitfähigkeit (Permittivität) im Vakuum
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$	Leitfähigkeit (Permeabilität) im Vakuum

Literatur

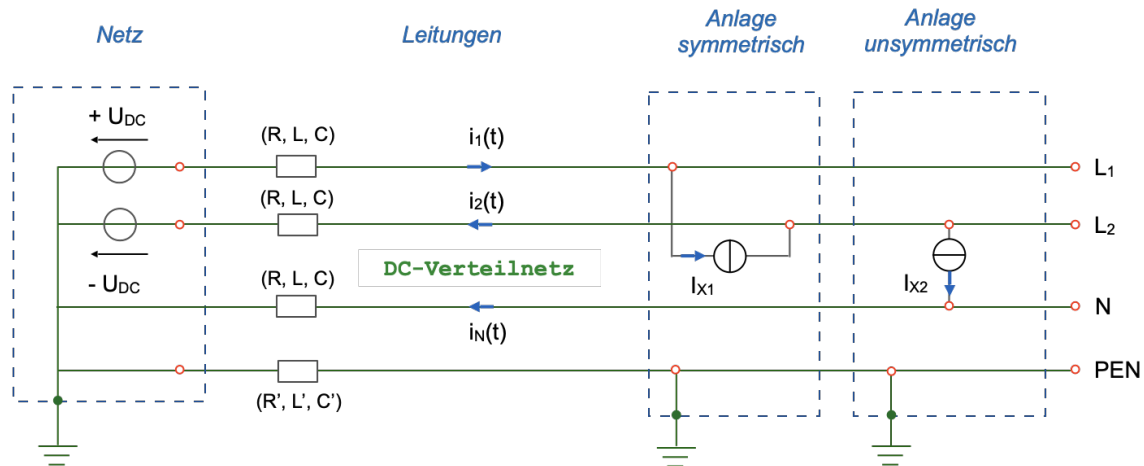
- (1) Adolf J. Schwab, Elektroenergiesysteme: Smarte Stromversorgung im Zeitalter der Energiewende, Springer Berlin, 6. Auflage, 2019, ISBN 978-3-662-60373-4
- (2) Schmolke, Callondann, DIN VDE 0100 richtig angewandt, VDE-Schriftenreihe Normen verständlich, Band 106, 8., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Errichtung von Niederspannungsanlagen übersichtlich dargestellt, VDE-Verlag, 2022, ISBN 978-3-8007-5634-6
- (3) A. Welsch, Mobile und stationäre Niederspannungs-Gleichstromnetze: Aufbau – Schalten – Dimensionierung – Schutz, Hanser, 2024, ISBN-13: 978-3446479975

Quellen im Web

- (4) Current/OS Foundation, internationales Industriekonsortium mit dem Ziel der Spezifikation von DC-Netzen in der Niederspannung, siehe <https://currentos.foundation>
- (5) Open DC Alliance, Industriekonsortium mit dem Ziel der Spezifikation industrieller DC-Netze in der Niederspannung, siehe <https://odca.zvei.org>
- (6) Flexible Elektrische Netze (FEN), Forschungsgemeinschaft mit industrieller Beteiligung mit dem Ziel der Erforschung und Entwicklung eines flexiblen Stromnetzes mit hohem Anteil dezentraler und erneuerbaren Energiequellen (und somit DC-Systemen), <https://www.fenaa.chen.net>
- (7) S. Rupp, S. Brüske, [Schutzkonzepte für DC-Netze in der Niederspannung](#), VDE, 1. DC-Verteilernetztagung, Görlitz, 2024

Anhang A – Verteilnetze

Gleichspannungsnetze lassen sich aufbauen wie Wechselspannungsnetze. Folgende Abbildung zeigt ein Niederspannungsnetz mit 3 Leitern (L_1 = Plus, L_2 = Minus und N = Neutraleiter).



Der Aufbau entspricht dem 4-Leitersystem eines Drehstromnetzes in der Niederspannung mit $\{L_1, L_2, L_3, N\}$. Das äquivalente Gleichspannungsnetz ist ein Dreileitersystem $\{L_1, L_2, N\}$. Die Phasenlage der Spannungen auf den Leitern L_1 und L_2 beträgt 180 Grad. Das Netz besitzt einen „Sternpunkt“ zum Neutraleiter, wobei der Stern nur 2 Zacken hat, also eindimensional bleibt.

Im Unterschied zum Drehstromsystem genügt für die Beschreibung der Realteil; die umgekehrte Polarität lässt sich durch das Vorzeichen auf der reellen Achse abbilden. Scheitelwerte sind bei Gleichstromsystemen Effektivwerte. Eine Netzfrequenz gibt es nicht ($f_n = 0$). Mangels Phasenlagen jenseits des Vorzeichens entfällt die bei AC gewohnte Zeigerdarstellung.

Ein DC-Dreileitersystem unterstützt zwei Spannungsebenen U_{DC} (als $+U_{DC}$ oder $-U_{DC}$ vom Leiter zum Neutraleiter) und $2 U_{DC}$ (zwischen beiden Leitern). Lässt man den Neutraleiter weg, verbleibt ein Zweileitersystem $\{L_1, L_2\}$, vergleichbar einem Dreileitersystem $\{L_1, L_2, L_3\}$ bei einem Wechselstromnetz.

Bemerkung: Da der Strom die Leistung transportiert, werden die Systeme als Gleichstromnetze bezeichnet (engl. DC = direct current). Die Netze selber sind spannungsgeführt, sind also Gleichspannungsnetze für Gleichstromsysteme. In der Abbildung sind die Anlagen daher als Stromquellen dargestellt, das Netz mit Hilfe von Spannungsquellen.

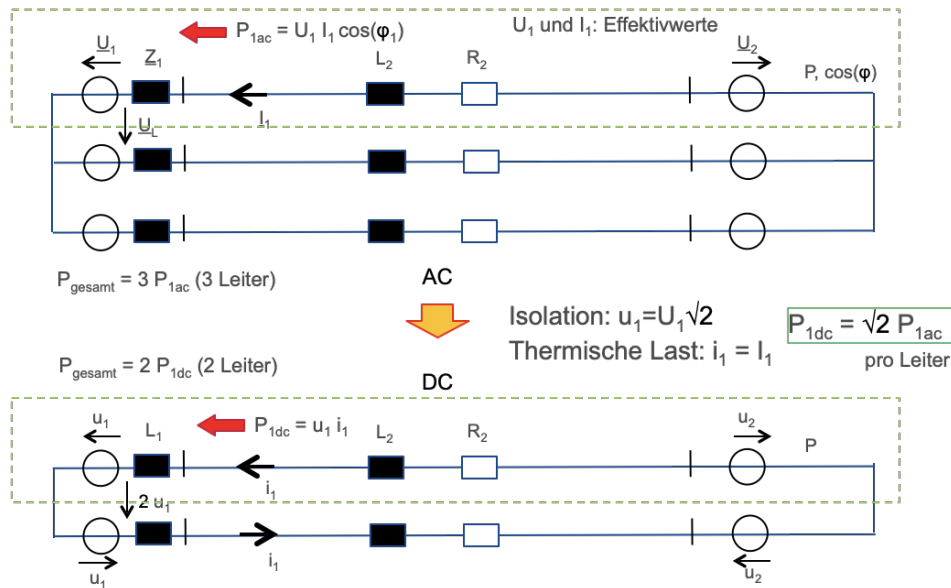
Topologie

Von besonderem Interesse sind hier Verteilnetze mit einer Stern-Topologie vom Netz über die Sammelschiene zu den Abgängen. Diese Netztopologie soll für Untersuchungen mit Hilfe der Simulation durch eine elektrische Ersatzschaltung abgebildet werden.

Frage A.1: Leistung. Welche Leistung bietet das o.g. System bei einer Nennspannung $U_n = U_{DC}$ und beim Nennstrom I_n für symmetrische und unsymmetrische Lasten?

Lösung: $P_n = 2 U_{DC} I_n$. Leiter 1: $P_1 = U_{DC} I_n$, Leiter 2: $P_2 = -U_{DC} I_n = P_1$. Bei einer unsymmetrischen Last die Hälfte.

Frage A.2: Vergleich AC- und DC-Übertragung. Folgende Abbildung zeigt ein AC-Dreileitersystem im Vergleich zu einem DC-Zweileitersystem. Welche Übertragungsleistung besitzt das DC-System, wenn man den Effektivwert der Ströme wegen der thermischen Belastung der Leitungen bzw. Kabel gleich lässt, und die Scheitelwerte der Spannungen wegen der Spannungsisolationsgleich lässt? Hinweis: Berechnen Sie die Leistung bezogen auf einen Leiter.



Lösung: Der besseren Vergleichbarkeit erfolgt die Berechnung pro Leiter.

(1) AC-System: $P_{1ac} = U_n I_n \cos(\varphi)$. Hierbei ist U_n die Sternspannung (= Strangspannung) und I_n der Leiterstrom (= Strangstrom); φ der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung bedingt durch die Leistungsinduktivität.

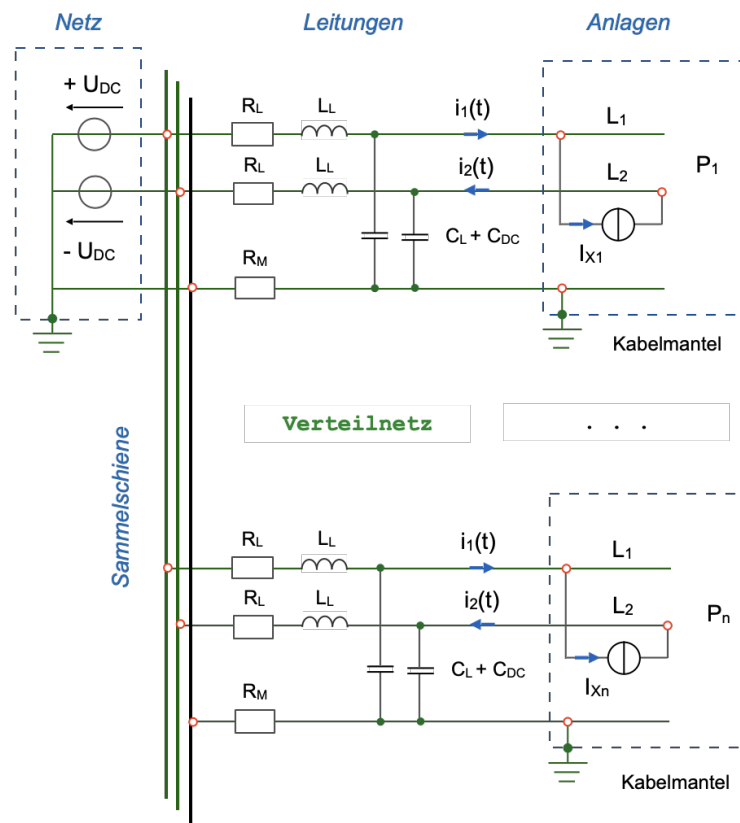
(2) DC-System: Da der Leiter andernfalls zu warm würde, belässt man den Strom $I_{DC} = I_n$. Die DC-Spannung entspricht dem Scheitelwert der AC-Spannung, d.h. $U_{DC} = \sqrt{2} * U_n$. Somit erhält man für die Leistung bezogen auf einen Leiter: $P_{1dc} = \sqrt{2} U_n I_n \approx 1.5 U_n I_n$. Die Näherung gilt grob, wenn man Effekte wie die Stromverdrängung und den Einfluss der Leistungsinduktivität beim AC-System mit bewertet.

(3) Vergleich: Der Leiter eines DC-Systems kann bei gleichem Strom und gleichem Scheitelwert der Spannung das 1.5-fache der Leistung eines Leiters in einem AC-System transportieren. Die Konsequenzen sind:

- $P_{dc} = P_{ac}$: Ein DC-Zweileitersystem besitzt die gleiche Transportleistung wie ein AC-Dreileitersystem.
- $P_{v,dc} = 2/3 P_{v,ac}$: Die Leitungsverluste eines DC-Zweileitersystems fallen um 1/3 niedriger aus als bei einem AC-Dreileitersystem, da ein Leiter fehlt ($P_{1v} = I_n^2 R$).

DC-Leitungen kommen immer dann in Frage, wenn DC-Anlagen angeschlossen werden sollen. An einem DC-Leitungssystem fallen auch die Konverter der Anlagen deutlich einfacher aus (2/3 des Aufwandes, da 2 Phasen statt 3 Phasen, ggf. ein weiterer Faktor 2/3, wenn eine AC/DC-Konversion eingespart werden kann).

Frage A.3: Verteilnetz. Folgende Abbildung ein symmetrisches Verteilnetz. Der hier nicht benötigte Neutraleiter kann für eine unsymmetrische Verteilung ergänzt werden. Zur Vereinfachung der Darstellung wird der symmetrische Fall betrachtet. Bei der Verteilung sind die Kapazitäten und Induktivitäten der Leiter (Leitungen bzw. Kabel) zu berücksichtigen, sowie die ohmschen Verluste. Welchen Einfluss haben Induktivitäten und Kapazitäten bei einem DC-Verteilung?



Lösung: (1) Die Kapazitäten der Kabel addieren sich am Anschlusspunkt des Netzes an der Sammelschiene. Je nach Ausführung der Anlagen addieren sich auch deren Eingangskapazitäten. Ist Berührungsschutz gefordert, ist auf die Entladeströme der Kapazitäten zu achten.

(2) Vom Anschlusspunkt an der Sammelschiene aus betrachtet ergibt sich eine Impedanz mit einer Resonanzstelle, pro Abgang erhält man:

$$Z(\omega) = j\omega L + \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C} \quad (1.2.1)$$

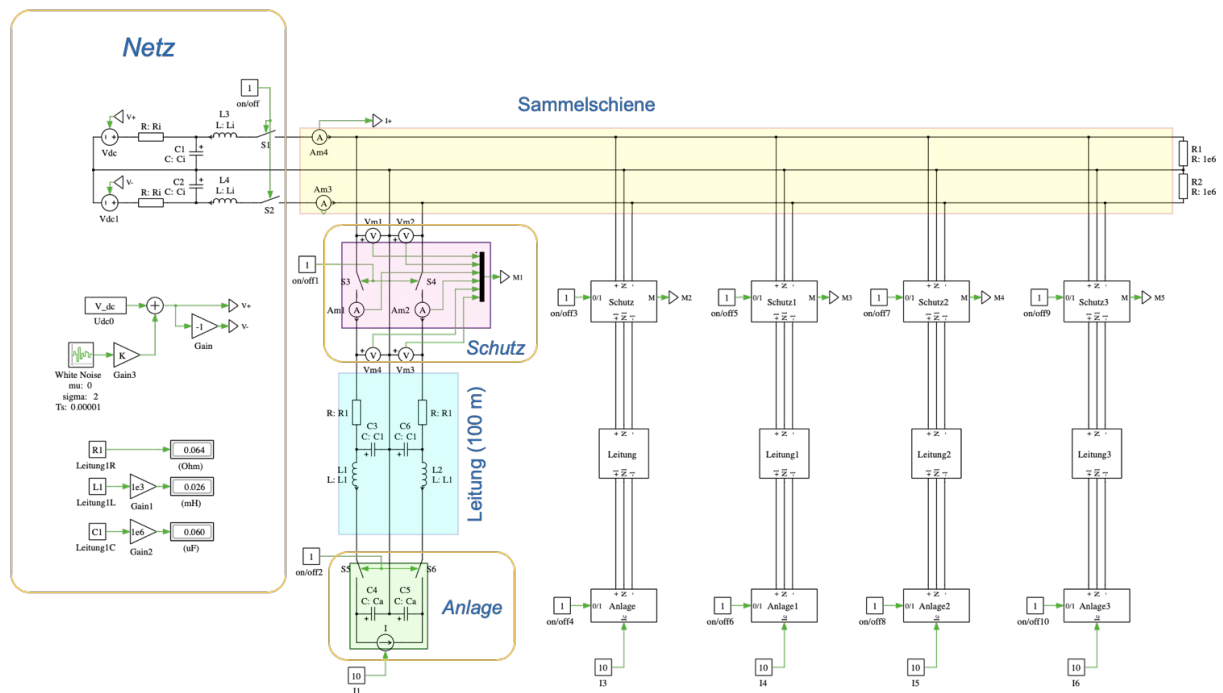
Für den Betrieb mit Gleichspannung spielt das Impedanzspektrum zwar keine Rolle, muss jedoch bei der Auslegung der Regler der Konverter berücksichtigt werden. Im Betrieb sind zusätzlich die Eingangskapazitäten zu berücksichtigen. Bei Betrieb an einer Gleichstromquelle wird die Anschlussleitung übertragungstechnisch annähernd im Leerlauf betrieben ($R \rightarrow \infty$).

Frage A.4: Simulation. Untersuchen Sie die Eigenschaften der Verteilung in der Simulation.

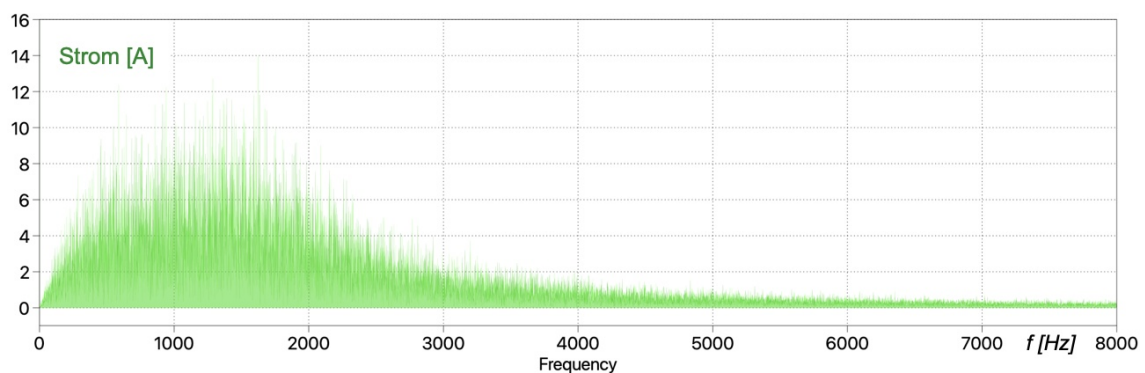
Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung. Für die Leitung wurden Kabel mit $R' = 0,64 \, \Omega/\text{km}$ (Al mit Querschnitt $50 \, \text{mm}^2$), $L' = 0,26 \, \text{mH}/\text{km}$, Kapazität zum Mantel $C_e \approx 0,3 \, \mu\text{F}/\text{km}$ und Kapazität zwischen zwei Leitern $C_L \approx 0,1 \, \mu\text{F}/\text{km}$. Im Modell wurden zwei einadrige Kabel mit Mantel verwendet.

Die Resonanzfrequenz einer einzelnen Leitung ist unkritisch (liegt im dreistelligen kHz-Bereich). Zusammen mit den Eingangskapazitäten der Anlagen in der Größenordnung von $1 \, \text{mF}$ ergeben sich jedoch Resonanzfrequenzen im kHz-Bereich.

Folgende Abbildung zeigt das Modell der Verteilung mit DC-Netz (Spannungsquellen), Sammelschiene, Leitungen und Anlagen. An allen Abgängen sind Schalter angebracht, um Anlagenteile beim Hochfahren oder im Fehlerzustand von der Sammelschiene zu trennen.



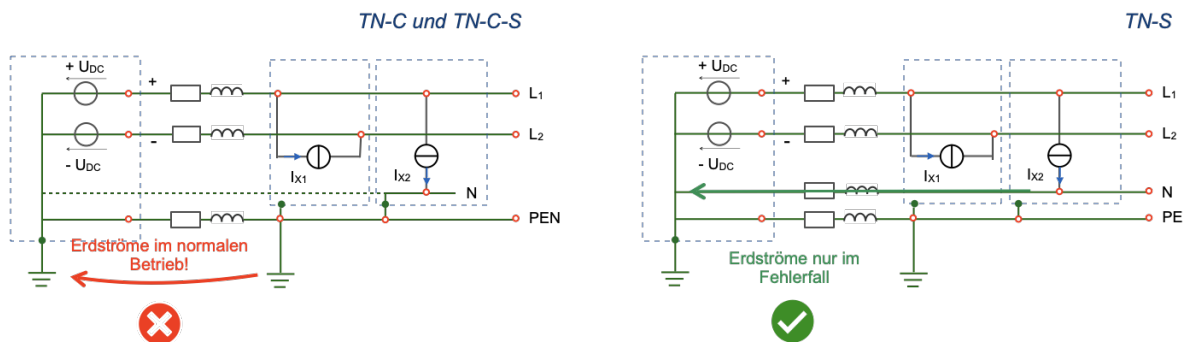
Der Strom am Anschlusspunkt des Netzes wurde verwendet, um das Impedanzspektrum an dieser Stelle zu untersuchen (die Impedanz ist umgekehrt proportional zum Strom). Für eine breitbandige Anregung wurde die DC-Spannungsquelle mit zusätzlichem weißen Rauschen in Höhe von 10% der Spannungsamplitude beaufschlagt.



Das Frequenzspektrum zeigt deutlich die zu erwartende Resonanz im kHz-Bereich. Dieser Effekt kommt durch die Kombination der Leitungsinduktivitäten mit den Eingangskapazitäten der Anlagen zustande. Die Kabelkapazitäten spielen keine wesentliche Rolle.

Anhang B – Netzformen

Bei der Erdung ist darauf zu achten, dass es keine dauerhaften Erdströme gibt. Gleichströme am Fundament von Gebäuden in Beton-Stahl-Bauweise führen langfristig zu Korrosion des Stahls. Die Erdung über die Fundamente ist of besser, als die Rückleitung über Neutralleiter. Daher kommen Konfigurationen mit Rückleitung über die Erdung nicht in Frage (kombinierter Neutralleiter mit Erdung, Kurzform TN-C, bzw. ein mitgeführter geerdeter Neutralleiter, Kurzform TN-C-S). Folgende Abbildung zeigt den Aufbau zusammen mit den möglichen Erdströmen.



In den genannten Kurzformen steht TN für den geerdeten Neutralleiter an Sternpunkt des Netzes (Sternpunkt der Spannungsquelle). Die aus der AC-Verteilung geläufigen Begriffe passen bei der DC-Verteilung ebenfalls, allerdings entfällt der dritte Leiter L_3 .

Frage B.1: Dreileitersystem mit separatem Neutralleiter. Erläutern Sie, warum das in der Abbildung oben rechts dargestellte System dauerhafte Erdströme vermeidet und daher als Topologie für DC-Verteilnetze geeignet ist. Kann man bei dieser Konfiguration auch auf den Neutralleiter verzichten, wenn nur eine Spannung angeboten werden soll?

Lösung: Dauerhafte Ströme über den Neutralleiter ergeben sich bei unsymmetrischen Lasten bzw. Anlagen. Bei einem geerdeten Neutralleiter besteht die Gefahr, dass die Impedanz der Erdung geringer ausfällt als die des Neutralleiters. In diesem Fall ergeben sich dauerhafte Neutralleiterströme über die Erdung.

Die Konfiguration mit separatem, nicht geerdetem Neutralleiter vermeidet dieses Problem: Neutralleiterströme können nicht den Weg über die Erdung nehmen. Erdströme gibt es nur im Fehlerfall bei Kontakt eines Leiters zum geerdeten Gehäuse einer Anlage. Da diese Fehler kurzfristig geklärt werden (Auslösung des Schutzes und Trennung des Fehlers), stellt das kein Problem dar.

Die TN-S Konfiguration funktioniert auch ohne Neutralleiter (dann unter der Bezeichnung TPE): Bei symmetrischen Systemen fließt der Strom über den zweiten Leiter ab, ein Neutralleiter wird nicht benötigt. Erdströme ergeben sich auch hier nur im Fehlerfall.

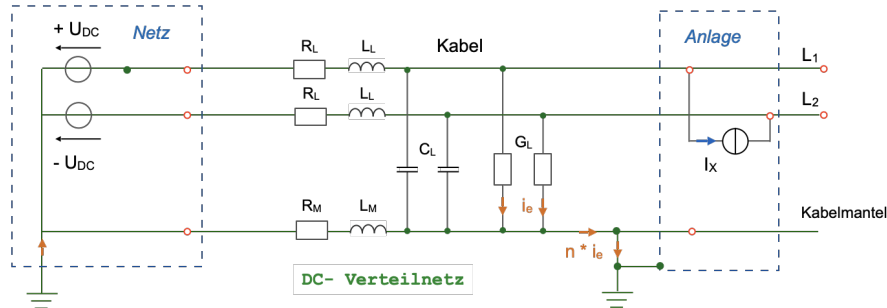
Frage B.2: Vergleichen Sie das oben beschriebene TN-S-System mit der Praxis der AC-Verteilung in der Niederspannung.

Lösung: In der AC-Verteilung gängig sind TN-C-S-Systeme: Im 4-Leitersystem $\{L_1, L_2, L_3, N\}$ wird der Neutralleiter mitgeführt für die unsymmetrische Versorgung mit 230 V von L_1 zu N. Drehstromverbraucher verwenden L_1, L_2 und L_3 mit 400 V Spannung von Leiter zu Leiter als symmetrische Verbraucher.

Der Neutralleiter wird am Hausanschluss geerdet und lokal als 5-Leitersystem fortgeführt $\{L_1, L_2, L_3, N, PE\}$, wie in der Abbildung oben links dargestellt (zusätzlich mit L_3). Im TN-S-System entfällt die Erdung des Neutralleiters N am Hausanschluss bzw. an der Anlage.

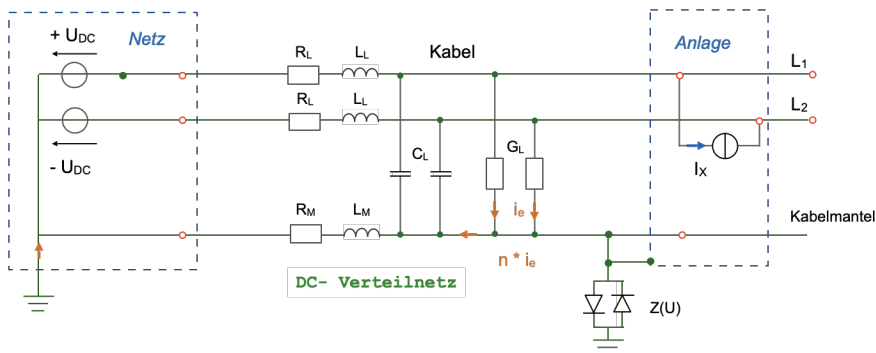
Frage B.3: Erdströme durch den Kabelmantel. Erdströme können in der TN-S-Konfiguration auch durch die Ableitung über den Kabelmantel auftreten, wie in der folgenden Abbildung dargestellt. Schätzen Sie die Bedeutung dieses Effektes ein. Welche Maßnahmen gäbe es zur Vermeidung

dieser Erdströme? Hinweis: Verwenden Sie für die Leckströme, d.h. Ableitung vom Leiter zum Kabelmantel, einen Leitwert von ca. 25 nS/km. Der Widerstandsbelag des Kabelmantels für die Rückleitung über den Kabelmantel sei mit 0,2 Ω /km abgeschätzt.



Lösung: Bei 1000 V Betriebsspannung und einer Kabellänge von 1 km erhält man somit einen Leckstrom von 25 μ A (Berechnung nach dem ohmschen Gesetz für den Leitwert G : $I = G \cdot U$). Eine Kabellänge von 1 km ergibt sich z.B. mit 10 Abgängen mit jeweils 100 m an der Sammelschiene.

Ist die Erdung besser als die Rückleitung über den Kabelmantel, nehmen die Leckströme den Weg über die Erdung. Die Alternative wäre der Rückfluss über den Kabelmantel. Diesen Weg müsste der Leckstrom nehmen, wenn man ihm den Weg über die Erdung versperrt.



Bei Rückleitung über den Kabelmantel entsteht bei einem Widerstand von $R = 0,2 \Omega$ und einem Strom von 1 mA (das 40-fache des o.g. Leckstroms) ein maximaler Spannungshub von 0,2 V/km. Bei 1 km Kabellänge bleibt der Spannungshub durch Leckströme somit deutlich unter 0,2 V.

Die Sperre lässt sich durch zwei antiparallele Dioden vom Kabelmantel zur Erde realisieren, wie in der Abbildung oben dargestellt. Auf diese Weise ist der Rückfluss über die Erde nur im Fehlerfall möglich, wenn der Spannungshub die Schwelle der Dioden von ca. 0,6 V übersteigt.

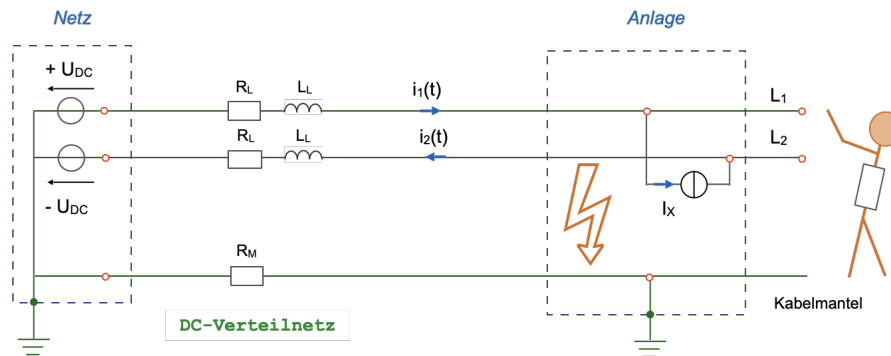
Frage B.4: Isolation des Sternpunktes. Wäre es nicht einfacher, auf die Erdung des Sternpunktes im Netz zu verzichten und somit kein Problem und keine Gefahr zu schaffen, wenn ein Leiter das Erdpotenzial berührt (direkt bei einem Isolationsfehler bzw. indirekt durch Berührung eines Menschen mit Erdpotenzial)?

Lösung: In diesem Fall wäre auch bei einem Isolationsfehler der Betrieb weiter möglich, da mangels Rückleitung keine hohen Kurzschlussströme auftreten. Die Berührung eines einzelnen Leiters ist unkritisch. Die Realisierung wäre somit einfacher.

Anhang C – Berührungsschutz

In Niederspannungsnetzen mit für Personen zugänglichen Anlagen besteht die Möglichkeit, bei einem Isolationsfehler mit der Leiterspannung in Berührung zu kommen. Bei einem Erdkontakt, beispielsweise über die Fußsohlen, besteht in diesem Fall Lebensgefahr.

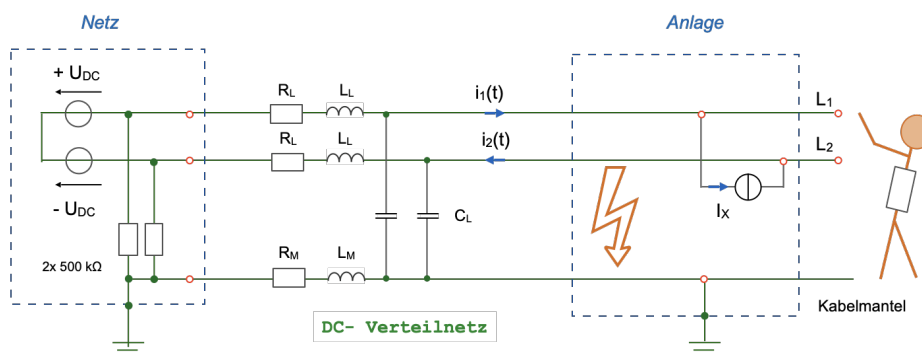
Frage C.1: TN-S Netz und TPE-Netz. Beschreiben Sie, auf welche Weise die in folgender Abbildung gezeigte Erdung des für eine Berührung zugänglichen Gehäuses einen Schutz bietet.



Lösung: Anlagen mit Plastikgehäuse benötigen keine Erdung und werden im AC-Netz daher meist über zweipolige Stecker (ohne Schutzkontakt) angeschlossen. Bei Anlagen mit Metallgehäuse ist dieses über den Schutzkontakt im Stecker mit der Erdung verbunden. Ein Isolationsfehler führt somit sofort zu einem Erdschluss des Leiters und somit zum Auslösen der Sicherung. Das Konzept lässt sich für DC-Netze in der Niederspannung übernehmen.

Die Erdung bietet keinen Schutz vor der direkten Berührung eines Leiters, bzw. bei Berührung beider Leiter. Der Körperwiderstand ist zu groß für eine Schutzauslösung. Die Leiter müssen in Geräten und Steckdosen für eine Berührung unzugänglich sein. Die Verbindung eines Leiters mit dem Erdpotenzial auch bei geringen Strömen lässt sich mit Hilfe einer Fehlerstromüberwachung feststellen: Im Normalbetrieb sollte der Strom über den Neutraleiter abfließen. Ein solcher FI-Schutz (Schutzschalter für den Fehlerstrom I) trennt den Stromkreis bei einem detektierten Fehlerstrom.

Frage C.2: Isoliertes Netz (IT-Netz). Ist der Sternpunkt des Netzes nicht geerdet, sondern hochohmig mit dem Erdpotenzial verbunden, fallen Erdströme bei Berührung eines Leiters sehr gering aus. Erläutern Sie das in der Anwendung dargestellte Prinzip. Wo lässt sich das Verfahren einsetzen? Welche Nachteile sind mit diesem Verfahren verbunden? Hinweis: Nehmen Sie für den Körperwiderstand einen Wert von $1\text{ k}\Omega$ an.

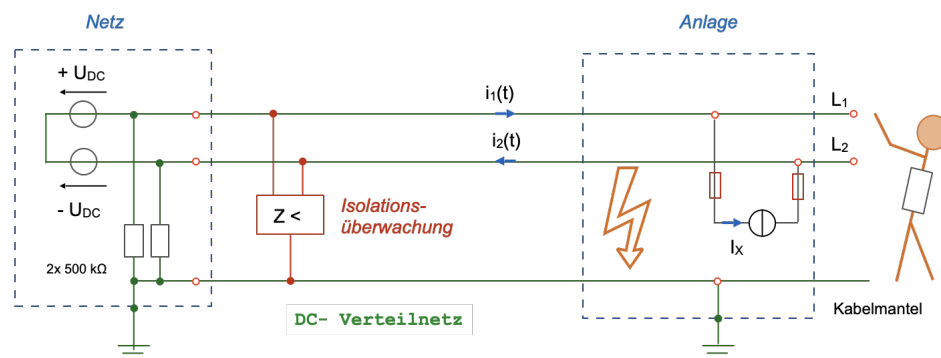


Lösung: Bei einer Spannung von 1000 V erhält man bei einem Erdschluss ohne Isolation mit einem Körperwiderstand von $1\text{ k}\Omega$ einen Strom von 1 A . Als gefährlich gelten Körperströme oberhalb von 20 mA . Bei einem Isolationswiderstand von $500\text{ k}\Omega$ spielt der Körperwiderstand keine Rolle. Der Strom bei einem Erdschluss ist auf 2 mA begrenzt und somit unbedenklich.

Das Verfahren ist unter dem Stichwort Trenntransformator für den Laborbetrieb bekannt, bzw. stellenweise noch in Hotels bei den Anschlüssen für Geräte in Nassräumen zu finden. Für den industriellen Einsatz ist der Vorteil der mögliche Weiterbetrieb im Fehlerfall.

Ein Nachteil des Verfahrens ist die mangelnde Fehlerindikation: Isolationsfehler bleiben unbemerkt. Die Fehlerdetektion in einem verteilten Netz gestaltet sich grundsätzlich aufwendig. Ein weiteres Problem sind Folgefehler: Folgt auf einen Isolationsfehler in einem verteilten Netz die Berührung eines anderen Leiters, endet der Kurzschluss über den Körperwiderstand lebensgefährlich.

Frage C.3: Isolationsüberwachung. Isolierte AC-Netze im industriellen Umfeld sind mit Möglichkeiten zur Fehlerüberwachung ausgestattet, wie in der Abbildung dargestellt. Erläutern Sie die Funktionsweise. Lässt sich das Verfahren auf DC-Verteilnetze übertragen?



Lösung: Die Funktion entspricht der Fehlerstromüberwachung: Ist die Summe der Leiterströme $\sum I_i = 0$, so gibt es einen Abfluss außerhalb der Leiter. Der Fehlerstrom dient als Indikator für einen Isolationsfehler, bzw. eine Änderung der Impedanz zwischen Leiter und Erde. Die Fehlerdetektion führt zur Schutzauslösung.

Das Verfahren lässt sich auf DC-Verteilnetze übertragen. In einem verteilten Netz bleibt der Fehler allerdings schwer zu lokalisieren. Für eine selektive Abschaltung müsste die Überwachung in jedem Abgang erfolgen.

Frage C.4: Bewertung beider Ansätze für DC-Verteilnetze. Wie beurteilen Sie die Einsatzmöglichkeiten der TN-S-Konfiguration und der IT-Konfiguration für DC-Verteilnetze?

Lösung: Bzgl. Verteilnetzen gelten für AC-Netze und DC-Netze die gleichen Bedingungen. Dass sich bei AC-Verteilnetzen in der Niederspannung die TN-S bzw. TN-C-S Konfiguration durchgesetzt hat, liegt vor allem an der deutlich einfacheren Detektion und Lokalisierung von Fehlern: Fehler führen zu einer Schutzauslösung, die Fehlerursache ist unmittelbar ersichtlich. Auch bei der Inbetriebnahme von Anlagen werden Tests hierdurch deutlich vereinfacht. Ein weiterer Vorteil ist die leichter Erweiterbarkeit bzw. Umrüstung der Verteilung.

Ist die Verteilung wenig verzweigt und die Konfiguration stabil, bieten IT-Netze mit Isolationswächter den Vorteil des weiteren Betriebes im Fehlerfall. Für Einzelfehler besteht ein hoher Schutz. Mehrfachfehler sind ein Risiko; die Fehler in verteilten Anwendungen sind schwer zu finden. Für solche Anwendungen stehen Spezialisten für die Detektion und die Beseitigung der Fehler zur Verfügung.

Bemerkung: Im Unterschied zu AC-Netzen besitzen Anlagen am DC-Netz Kapazitäten am Eingang (siehe Abbildung unter Frage 1.1.3). Die Kapazität der DC-Quelle und die Eingangskapazitäten aller Anlagen sind bei einem Verteilnetz parallel zusammengeschaltet. Die Entladeströme der Kapazitäten übersteigen im Kollektiv der Anlagen leicht die Schwelle über den zulässigen Bereich für Körperströme bei der Berührung. Das gilt auch für Bezugsanlagen. Die Entladeströme müssen beim Schutzkonzept berücksichtigt werden.