

Planung und Analyse elektrischer Energieversorgungsnetze

Teil 2.2

Netzbetrieb mit erneuerbaren Energien

Ausgabe 0.5, 15.01.2025

Autoren: Stephan Rupp

Kontakt: stephan.rupp@srupp.de

Web: <http://www.srupp.de>

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

Inhaltsverzeichnis

1. Wechselspannungsnetz.....	4
1.1. Funktionsprinzip.....	5
1.2. Analytisches Modell.....	7
1.3. Simulationsmodell.....	11
1.4. Betrieb der Anlagen am Netz.....	19
1.5. Synchronisation der Anlagen.....	27
1.6. Stabiler Betrieb der Anlagen.....	36
2. Entfernung und Netzebene.....	41
2.1. Einfluss der Entfernung.....	41
2.2. Einfluss der Netzebene.....	41
2.3. Hierarchische Netze.....	42
2.4. Zellulare Netze.....	43
3. Umrichtergeführte Anlagen.....	44
3.1. Funktionsprinzip.....	44
3.2. Momentanreserve.....	55
3.3. Primärregelung.....	59
3.4. Sekundärregelung.....	65
4. Maschinen.....	68
4.1. Funktionsprinzip.....	68
4.2. Momentanreserve.....	79
4.3. Primärregelung.....	85
4.4. Sekundärregelung.....	93
5. Verbund Maschinen und Umrichter.....	97
5.1. Regelungskonzept.....	97
5.2. Kraftwerksbetrieb.....	98
5.3. Inselnetz.....	99
5.4. Verbundnetz.....	99
6. Kraftwerksbetrieb mit Windparks.....	101
6.1. Netzstruktur.....	101
6.2. Betrieb der Kopfstation.....	101
6.3. Transformatoren im Gleichspannungsnetz.....	101
6.4. Betrieb der unterlagerten Systeme.....	101
6.5. Bereitstellung von Momentanreserve.....	101
6.6. Verbundbetrieb mit Kraftwerken.....	101

1. Wechselspannungsnetz

Das elektrische Energieversorgungsnetz ist als Wechselspannungsnetz aufgebaut, da sich auf diese Weise am effizientesten mehrere Spannungsebenen mit Hilfe von Transformatoren realisieren lassen. Die Speisung der Netze erfolgt traditionell von Kraftwerken mit Generatoren, die von Wärmekraftmaschinen angetrieben werden (Kohle, Gase, Kernkraft und Mineralöl).

Für den Transport großer Leistungen über Entfernungen größer als 100 km wird die höchste Spannungsebene verwendet, mit beispielsweise 380 kV, für Verteilung über Entfernungen bis zu 100 km die Hochspannung (mit beispielsweise 110 kV), für Entfernungen bis 10 km die Mittelspannung (beispielsweise mit 10 kV oder 20 kV), und zuletzt auf Ortsebene mit bis zu 500 m die Niederspannung (beispielsweise mit 400 V). Folgende Abbildung zeigt eine Übersicht des Aufbaus der Netze.

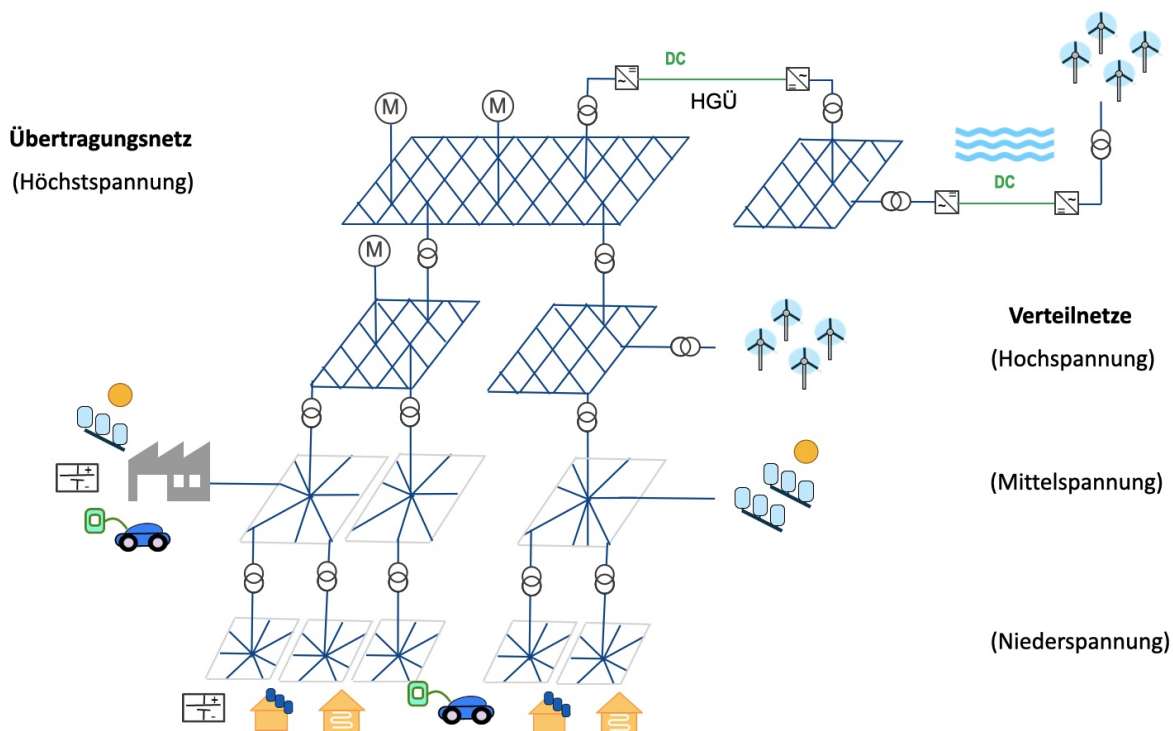


Abbildung 1.1 Elektrisches Energieversorgungsnetz

Beim Betrieb mit Freileitungen ist die charakteristische Eigenschaft der Übertragungsleitungen und Hochspannungsleitungen die Induktivität: Diese Leitungen werden gemessen an ihren Übertragungseigenschaften mit größeren Leistungen betrieben als der natürlichen Leistung, sie wirken induktiv und benötigen Blindleistung ($Q = X I^2$). Leitungen in der Mittelspannung und im Ortsnetz werden näher an der natürlichen Leistung betrieben und besitzen kürzere Entfernungen.

Eine weitere Quelle von Reaktanzen im Netz sind die Transformatoren: Mit einer Kurzschluss-Spannung von 12% ist die Reaktanz so groß, dass bei Betrieb mit Nennstrom eine Spannung $\Delta \underline{U} = j X I_n$ im Bereich von 12% der Nennspannung den Spannungswinkel verschiebt. Der Betrag der Spannung wird durch das Übersetzungsverhältnis ausgeglichen, dennoch bleibt die Reaktanz im Strompfad erhalten.

Schließlich bringen die Erzeuger der Netzspannung, nämlich die Kraftwerksgeneratoren, die Reaktanz ihrer Statorwicklung in den Strompfad. Gemessen an den Reaktanzen der Transformatoren fallen die Reaktanzen der Kraftwerksgeneratoren größer aus. Auch kleinere Kraftwerksgeneratoren, die stromgeführt sind, sowie Anlagen erneuerbarer Erzeuger, die über Umrichter ins Netz speisen, koppeln über Reaktanzen ans Netz.

Anlagen einschließlich der Kraftwerke stellen ihren physikalischen Eigenschaften nach Spannungsquellen dar: Bei Generatoren wird die Spannung durch die Bewegung des Rotors um Stator der Maschine induziert. Bei Umrichtern wird die Spannung im DC-Kreis durch die Leistungselektronik in eine AC-Spannung umgewandelt. Grundsätzlich stellen die elektrischen Energieversorgungsnetze somit Spannungsquellen dar, die mit Hilfe von Reaktanzen miteinander gekoppelt sind.

1.1. Funktionsprinzip

Folgende Abbildung illustriert das Funktionsprinzip des Wechselspannungsnetzes. Die Abbildung zeigt drei Spannungsquellen, die über Reaktanzen an einer Sammelschiene gekoppelt sind. Werden die Anlagen spannungsgeführt bzw. befinden sich im Leerlauf, so sind ihre Leerlaufspannungen exakt gleich. Andernfalls ergeben sich unerwünschte Kreisströme.

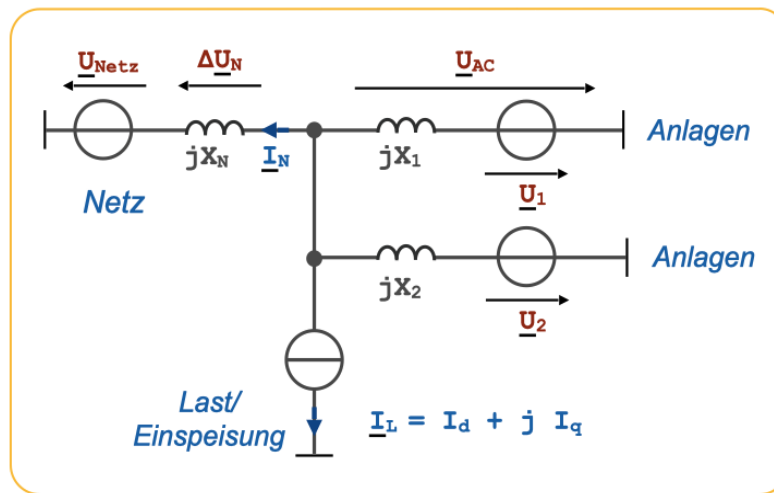


Abbildung 1.1.1 Funktionsprinzip der Wechselspannungsnetze

Es sei angenommen, dass das Netz und die beiden Anlagen als Spannungsquellen geführt werden, und somit netzbildend betrieben werden, wie Kraftwerke in einem Stromnetz. Ohne den Strom $\underline{I}_L$ soll sich kein Lastfluss im Netz ergeben. In diesem Fall sind die Leerlaufspannungen aller Spannungsquellen nach Betrag und Phase gleich.

Ein Lastfluss kommt erst dadurch zustande, dass eine Bezugsanlage oder eine Einspeiseanlage an der Sammelschiene einen Strom entnimmt (bzw. einspeist). In der Abbildung ist diese Anlage als Stromquelle dargestellt. In der Praxis wäre auch diese Anlage eine elektrische Maschine oder ein Umrichter. Ein Umrichter (Voltage Source Converter) besitzt die gleiche Ersatzschaltung wie eine Maschine: er arbeitet als Spannungsquelle, die mit Hilfe einer Reaktanz an die Sammelschiene koppelt.

Frage 1.1.1: Welchen Beitrag zum Strom leisten die drei Spannungsquellen? Begründen Sie Ihre Aussage. Was ist folglich die Voraussetzung für einen relevanten Beitrag zur Leistung in einem Netz mit mehreren Spannungsquellen?

Lösung: Da die Spannung über der Sammelschiene $\underline{U}_{AC}$ für alle Zweige gleich ist, gilt

$$jX_1 \underline{I}_1 = jX_2 \underline{I}_2 = jX_3 \underline{I}_3 \quad (1.1.1) \text{ und } (1.1.2)$$

und
$$\underline{I}_L = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 \quad (1.1.3)$$

Somit verhalten sich die Ströme $\underline{I}_i$ umgekehrt proportional zu den Reaktanzen X_i . Sind alle Reaktanzen gleich, so ist $\underline{I}_L = 3 \underline{I}_i$. In diesem Fall leisten alle Spannungsquellen den gleichen Beitrag zur Leistung.

Andernfalls verhalten sich die Leistungsbeiträge umgekehrt zur Reaktanz der Spannungsquelle: Die Quelle mit der kleinsten Reaktanz leistet den größten Beitrag. Vom Strom aus betrachtet sind die Reaktanzen parallelgeschaltet.

Frage 1.1.2: Welchen Effekt hat ein Blindstrom $\underline{I}_L = j I_q$ (bzw. $\underline{I}_L = -j I_q$) auf die Spannung $\underline{U}_{AC}$ an der Sammelschiene?

Lösung: Alle Teilströme $\underline{I}_i$ sind ebenfalls Blindströme. Je nach Stromrichtung (Vorzeichen des Stroms) ergibt sich an den Reaktanzen X_i ein Spannungsabfall $\Delta \underline{U}_i = j X_i \underline{I}_i = -X_i I_{qi}$ oder eine Spannungsüberhöhung. Wegen der Reaktanzen gilt der bekannte Zusammenhang, dass sich mit Blindströmen die Spannungsamplitude verändern lässt.

Frage 1.1.3: Welchen Effekt hat ein Wirkstrom $\underline{I}_L = I_d$ (bzw. $\underline{I}_L = I_d$) auf die Spannung $\underline{U}_{AC}$ an der Sammelschiene?

Lösung: Alle Teilströme $\underline{I}_i$ sind ebenfalls Wirkströme. Je nach Stromrichtung (Vorzeichen des Stroms) ergibt sich an den Reaktanzen X_i die Spannung $\Delta \underline{U}_i = j X_i \underline{I}_i = j X_i I_{di}$ (bzw. mit umgekehrtem Vorzeichen). Diese Spannungsänderung ist orthogonal zur Stromrichtung.

Da der Strom ein Wirkstrom ist, ist die Spannungsänderung auch orthogonal zur Spannung $\underline{U}_{AC}$. Es ergibt sich eine Phasenverschiebung der Anlagenspannung: $\underline{U}_i = \underline{U}_{AC} - j X_i I_{di}$, bzw. $\underline{U}_i = \underline{U}_{AC} + j X_i I_{di}$. An Reaktanzen lässt sich mit Wirkströmen die Phase der Spannung verändern.

Frage 1.1.4: Was ändert sich an den Spannungen $\underline{U}_i$ der Anlagen, wenn ein Wirkstrom gefordert ist? Wann wird Leistung abgegeben? Wann wird Leistung aufgenommen? Welche Anlage liefert den größten Leistungsbeitrag?

Lösung: Es ändert sich der Phasenwinkel zwischen der Spannung $\underline{U}_{AC}$ am Anschlusspunkt (bzw. an der Sammelschiene) und den Spannungsquellen $\underline{U}_i$:

(a) Wird ein Wirkstrom entnommen ($I_d > 0$), so läuft die Spannungsquelle $\underline{U}_i$ vor der Spannung $\underline{U}_{AC}$ an der Sammelschiene. Die Spannungsquelle zieht die Spannung an der Sammelschiene hinter sich her und gibt Leistung ab.

(b) Wird der Wirkstrom eingespeist ($I_d < 0$), so läuft die Spannungsquelle $\underline{U}_i$ hinter der Spannung $\underline{U}_{AC}$ an der Sammelschiene. Die Spannung an der Sammelschiene zieht die Spannung der Anlage hinter sich her, diese nimmt Leistung auf.

1.2. Analytisches Modell

In folgender Abbildung sind alle Anlagen als Spannungsquellen mit Koppelreaktanz dargestellt, unabhängig von ihrer Betriebsführung. Das Netz besitzt nur eine Spannungsebene und einem An-schalt-punkt (Sammelschiene) für die Anlagen. Diese grobe Vereinfachung dient der Illustration des Prinzips für den Betrieb des Netzes mit mehreren Quellen und Anlagen.

Die Stellgrößen hierbei sind die komplexen Spannungen $\underline{U}_i$, die sich nach Betrag und Phase einstellen lassen. Die Spannungsquellen repräsentieren die Regelstrecke. Ob die Anlage spannungs-geführt wird oder stromgeführt, spielt hierbei keine Rolle: Die Führung ist abhängig vom Regler und somit eine Eigenschaft der geregelten Strecke; Stellgrößen bleiben die Spannungen $\underline{U}_i$.

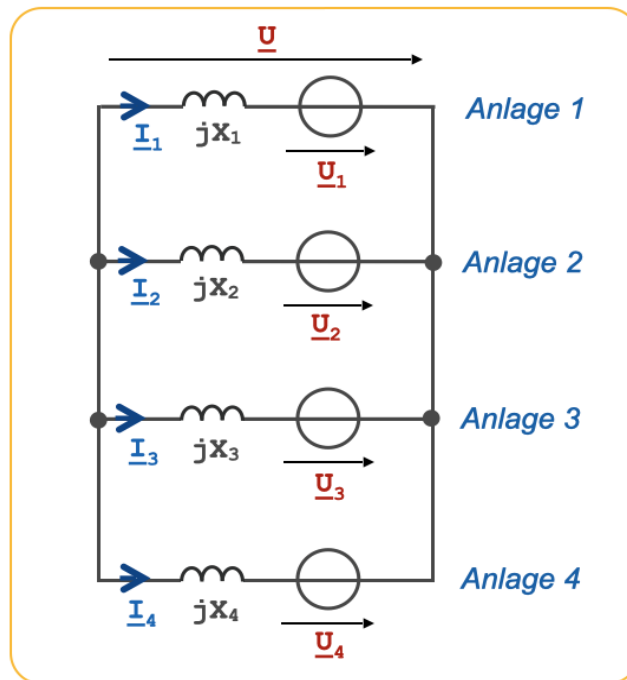


Abbildung 1.2.1 Ersatzschaltung des Netzes mit Anlagen

Frage 1.2.1: Welche Leistung wird zwischen zwei Spannungsquellen übertragen? Hinweis: Verwenden Sie hierzu folgende vereinfachte Ersatzschaltung für zwei mit Hilfe einer Serienreaktanz X gekoppelte Spannungsquellen. Verwenden Sie $\underline{U}$ als Bezugssystem.

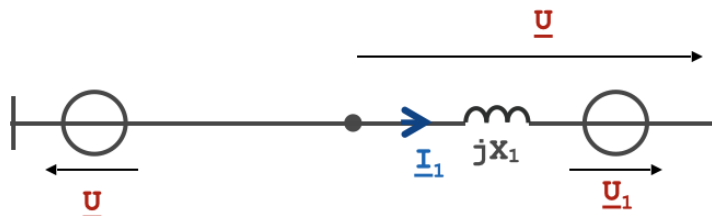


Abbildung 1.2.2 Induktiv gekoppelte Spannungsquellen

Lösung: Bezugssystem: Ohne Beschränkung der Allgemeinheit sei der Nullphasenwinkel φ_u der Spannung $\underline{U}$ gleich null ($\varphi_u = 0$). Somit gilt für die Spannungen

$$\underline{U} = U, \quad \underline{U}_1 = U_1 e^{j\delta} \quad (1.2.1)$$

Hierbei bezeichnet δ den Phasenwinkel zwischen beiden Spannungen. Für $\delta > 0$ eilt die Spannung $\underline{U}_1$ der Spannung $\underline{U}$ vor. Für den Strom gilt

$$\underline{I}_1 = \frac{(\underline{U} - \underline{U}_1)}{jX_1} = \frac{(U - U_1 e^{j\delta})}{jX_1} \quad (1.2.2)$$

Die von der Spannungsquelle $\underline{U}_1$ aufgenommene Leistung berechnet sich zu

$$S_1 = P_1 + jQ_1 = \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* \quad (1.2.3)$$

Durch Einsetzen erhält man

$$S_1 = \frac{U_1 e^{j\delta} \cdot (U - U_1 e^{-j\delta})}{-jX_1} = \frac{U_1 (U (\cos(\delta) + j\sin(\delta)) - U_1)}{-jX_1} \quad \text{und somit}$$

$$S_1 = -\frac{U_1 U \sin(\delta)}{X_1} + j \frac{U_1 (U \cos(\delta) - U_1)}{X_1}$$

Es gilt somit für die Wirkleistung und für die Blindleistung

$$P_1 = -\frac{U_1 U \sin(\delta)}{X_1} \quad (1.2.4)$$

$$Q_1 = \frac{U_1 (U \cos(\delta) - U_1)}{X_1} \quad (1.2.5)$$

Bemerkung 1: Diese Beziehungen lassen sich auch aus dem Zeigerdiagramm der Ersatzschaltung ableiten. Allerdings muss man hierzu den Phasenwinkel φ des Stroms zum Bezugssystem einführen.

Wenn der Spannungswinkel $\delta > 0$ ist, eilt die Spannung $\underline{U}_1$ der Spannung $\underline{U}$ am Bezugspunkt vor: Die Spannungsquelle $\underline{U}_1$ gibt Wirkleistung ab. Dieser Fall entspricht einer elektrischen Maschine, die im Generatorbetrieb vor dem Netz läuft. Eilt die Spannung $\underline{U}_1$ der Spannung $\underline{U}$ am Bezugspunkt nach (für $\delta < 0$), nimmt die Spannungsquelle $\underline{U}_1$ Wirkleistung auf. Eine elektrische Maschine befindet sich dann im Motorbetrieb und läuft hinter dem Netz. Bei der Maschine entspricht dem Polradwinkel (dem Winkel zwischen der vom Polrad im Stator induzierten Drehfeld und dem Spannungswinkel der Klemmenspannung).

In beiden Fällen hat die Blindleistung positives Vorzeichen (da der Kosinus eine gerade Funktion ist), so lange die Amplitude $U_1 < U \cos(\delta)$ bleibt. In diesem Fall wird Blindleistung aus dem Netz bezogen (bzw. aus der Spannungsquelle $\underline{U}$). Diese Blindleistung wird für die Reaktanz X benötigt. Wird die Amplitude $U_1 > U \cos(\delta)$, so ändert sich das Vorzeichen der Blindleistung: Die Reaktanz X bezieht nun ihre Blindleistung aus der Quelle $\underline{U}_1$.

Für den Fall, dass beide Spannungsquellen phasensynchron und von gleicher Amplitude sind, wird die Schaltung im Leerlauf betrieben: Es gibt keinen Stromfluss und folglich weder Wirkleistung noch Blindleistung.

Bemerkung 2: Diese von der Synchronmaschine bekannten Zusammenhänge sind Eigenschaften des Betriebs zweier Spannungsquellen mit induktiver Kopplung: Es werden hierfür keinerlei Maschineneigenschaften benötigt. Dieses Funktionsprinzip gilt auch für Umrichter mit Kapazitäten im DC-Kreis (Voltage Source Converter), die sich ebenfalls als induktiv gekoppelte Spannungsquellen verhalten. Die Serieninduktivität ist hierbei Bestandteil des Umrichters.

Frage 1.2.2: Wie lässt sich diese Aussage verallgemeinern für das Netz mit 4 Spannungsquellen?

Lösung: Nach Abbildung 1.2.1 bildet die Spannung $\underline{U}$ das Bezugssystem. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit sei hier der Nullphasenwinkel $\varphi_u = 0$. Somit gilt für die Spannungen

$$\underline{U} = U, \quad \underline{U}_i = U_i e^{j\delta_i} \quad (1.2.1')$$

Hierbei bezeichnet δ_i den Phasenwinkel zwischen der Spannung $\underline{U}_i$ und der Spannung $\underline{U}$. Für $\delta_i > 0$ eilt die Spannung $\underline{U}_i$ der Spannung $\underline{U}$ vor. Für die Ströme gilt

$$I_i = \frac{(\underline{U} - \underline{U}_i)}{jX_i} = \frac{(U - U_i e^{j\delta_i})}{jX_i} \quad (1.2.2')$$

Für die Summe der Ströme gilt nach der Knotenregel

$$\sum_{i=1}^4 I_i = 0 \quad \text{und somit} \quad \sum_{i=1}^4 \frac{(\underline{U} - \underline{U}_i)}{jX_i} = 0$$

Für den Spezialfall $X_i = X$ (gleiche Reaktanzen in allen Zweigen) folgt aus dieser Beziehung

$$\underline{U} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \underline{U}_i \quad \text{für } X_i = X.$$

Die Bezugsspannung $\underline{U}$ entspricht dem Mittelwert der Zweigspannungen. Bei nach Betrag und Phase gleichen Spannungen $\underline{U}_i = \underline{U}_0$ wäre somit auch $\underline{U} = \underline{U}_0$ und es gäbe keine Ausgleichsströme.

Die von der Spannungsquelle $\underline{U}_i$ aufgenommene Leistung berechnet sich zu

$$S_i = P_i + jQ_i = \underline{U}_i \cdot I_i^* \quad (1.2.3')$$

Durch Einsetzen erhält man für die Wirkleistung und für die Blindleistung

$$P_i = -\frac{U_i U \sin(\delta_i)}{X_i} \quad (1.2.4')$$

$$Q_i = \frac{U_i (U \cos(\delta_i) - U_i)}{X_i} \quad (1.2.5')$$

Somit lässt sich durch den Spannungswinkel δ_i zur der Spannung $\underline{U}_i$ zur Bezugsspannung $\underline{U}$ die Wirkleistung vorgeben, die die Spannungsquelle $\underline{U}_i$ aufnimmt oder abgibt. Aus der Vorgabe der Spannungsamplitude gegenüber der Spannungsamplitude $U \cos(\delta_i)$ folgt die Blindleistung.

Die Spannungswinkel δ_i werden hierbei relativ zur Bezugsspannung gemessen, wobei deren Nullphasenwinkel als null angenommen wurde. Für den Strom und für die Leistung sind nur die relativen Phasenwinkel zur Bezugsspannung $\underline{U}$ von Belang. Deren Nullphasenwinkel hat keine Bedeutung.

Frage 1.2.3: Wahl des Bezugssystems. Folgende Abbildung zeigt unterschiedliche Möglichkeiten zur Wahl des Bezugssystems (Koordinatensystems) für die Spannungen und Ströme als Zeigerdiagramm. Beschreiben Sie die Zusammenhänge.

Lösung: Fall (a) ist der in der Berechnung bisher verwendete Fall. Hier liegt als Bezugsspannung $\underline{U}$ auf der reellen Achse, d.h. $\underline{U} = U = U_0$. Phasenwinkel δ_u bzw. Imaginärteil U_q sind null. Die Spannungen $\underline{U}_i$ sind um den Phasenwinkel δ_i gegenüber $\underline{U}$ verschoben.

Fall (b) behält den Phasenwinkel δ_i zwischen $\underline{U}$ und $\underline{U}_i$ bei. Allerdings besitzt nun $\underline{U}$ den Winkel δ_u zum Bezugssystem. Für $\underline{U}_i$ ergibt sich in diesem Bezugssystem der Winkel $\delta'_i = \delta_i + \delta_u$.

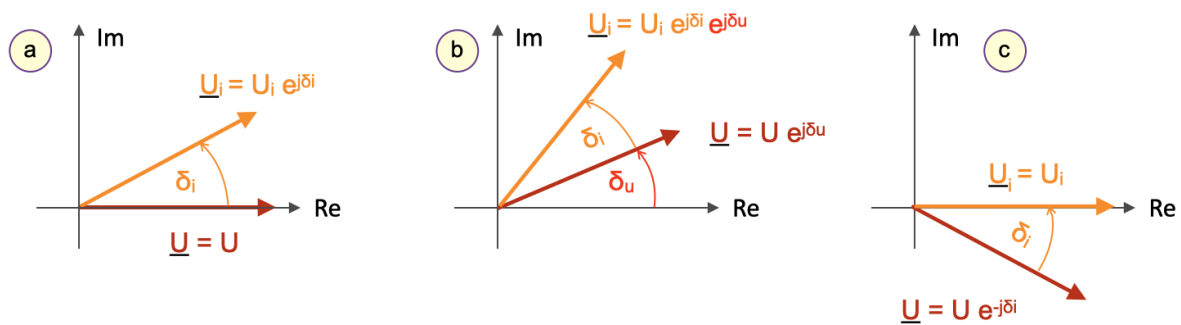


Abbildung 1.2.3 Möglichkeiten zur Wahl des Bezugssystems

Im Fall (c) befindet sich die Anlagenspannung $\underline{U}_i$ auf der reellen Achse: $\underline{U}_i = U_i = U_{id}$. Diese Verschiebung ergibt sich gegenüber dem Fall (a), wenn man $\underline{U}_i$ mit $e^{-j\delta_i}$ multipliziert. Die Phasenbeziehung zur Spannung $\underline{U}$ bleibt bestehen, d.h. es ist jetzt $\underline{U} = U e^{-j\delta_i}$.

Frage 1.2.4: Variation der Spannungswinkel. Welcher Strom ergibt sich bei gleicher Spannungsamplitude $U_i = U$, wenn man den Phasenwinkel δ_i verändert? Welcher Einfluss ergibt sich auf den Blindstromanteil?

Lösung: Bei gleichen Beträgen der Spannungen $\underline{U}_i$, jedoch unterschiedlicher Phasenlage zur Spannung $\underline{U}$ gilt

$$\underline{U}_i = \underline{U} \cdot e^{j\delta_i}$$

Hieraus folgt aus der Gleichung für den Zweigstrom

$$\underline{I}_i = \frac{(\underline{U} - \underline{U}_i)}{jX_i} = \frac{\underline{U}}{jX_i} (1 - e^{j\delta_i}) = -\frac{\underline{U}}{X_i} \sin(\delta_i) - j \frac{\underline{U}}{X_i} (1 - \cos(\delta_i))$$

Im Bezugssystem der Spannung $\underline{U}$ ist der Strom $\underline{I}_i$ annähernd ein Wirkstrom (da für kleine Winkel $\cos(\delta) \approx 1$). Wählt man als Bezugssystem beispielsweise die Spannung $\underline{U}_1$ an Anlagen 1, so ist deren zusätzliche Phasenverschiebung von $\underline{U}_1$ gegenüber $\underline{U}$ zu berücksichtigen. Bei gleichen Reaktanzen X_i wäre in einem System mit zwei Spannungsquellen dann die Vorgabe für den Spannungswinkel entsprechend zu halbieren.

Da $\cos(\delta)$ eine gerade Funktion ist, lässt sich der Blindstromanteil auch nicht durch Vorgabe von Spannungswinkeln mit unterschiedlichem Vorzeichen an jeweils zwei Spannungsquellen kompensieren: Die physikalisch vorhandenen Reaktanzen sind Energiespeicher und (abhängig vom Strom) stets mit Blindleistung verbunden. Allerdings lässt sich die geforderte Blindleistung durch die Wahl der Spannungswinkel zwischen den Ports aufteilen.

Frage 1.2.5: Variation der Spannungsamplituden. Welcher Strom ergibt sich, wenn die Spannung $\underline{U}_i$ phasensynchron ist mit der Bezugsspannung $\underline{U}$, die Amplitude U_i jedoch variieren kann?

Lösung: Für phasensynchrone Spannungen gilt

$$\underline{U}_i = k \underline{U}$$

Hieraus folgt aus der Gleichung für den Zweigstrom

$$\underline{I}_i = \frac{(\underline{U} - \underline{U}_i)}{jX_i} = \frac{\underline{U}}{jX_i} (1 - k)$$

Im Bezugssystem der Spannung $\underline{U}$ bleibt dieser Strom ein Blindstrom. Das elektrische Verhalten des AC-Kreises als Regelstrecke ist somit durch die Maschengleichungen für die Spannungen und für die Knotengleichung für die Ströme beschrieben.

Frage 1.2.6: Anlagenspannung $\underline{U}_1$ als Bezugssystem. Mit Bezug auf Abbildung 1.2.1 soll die Anlagenspannung $\underline{U}_1$ als Bezugssystem verwendet werden, d.h. $\underline{U}_1 = U_1 = U_{1d}$. Wie ergibt sich hieraus nun die Spannung $\underline{U}$ an der Sammelschiene als Bezugspunkt für die übrigen Anlagen?

Lösung: Die Spannung $\underline{U}$ an der Sammelschiene folgt aus $\underline{U}_1$ durch den Anlagenstrom $\underline{I}_1$. Für den allgemeinen Fall (b) gilt

$$j X_1 I_1 = (\underline{U} - \underline{U}_1) \quad \text{und hieraus} \quad (1.2.6)$$

$$j X_1 (I_{1d} + j I_{1q}) = U_d + j U_q - U_{1d} - j U_{1q}$$

Zerlegt nach Realteil und Imaginärteil ergibt sich

$$U_d = U_{1d} - X_1 I_{1q} \quad (1.2.7)$$

$$U_q = U_{1q} + X_1 I_{1d} \quad (1.2.8)$$

Der Wirkstromanteil I_{1d} wirkt somit auf den Imaginärteil von $\underline{U}$, der Blindstromanteil I_{1q} auf den Realteil.

Für den Fall (c) mit $\underline{U}_1 = U_{1d}$ bleibt der Imaginärteil $U_{1q} = 0$.

$$U_d = U_{1d} - X_1 I_{1q}$$

$$U_q = X_1 I_{1d}$$

Ist der Strom ein reiner Wirkstrom (und somit $I_{1q} = 0$), so ergibt sich

$$\tan(\delta_1) = \frac{U_q}{U_d} = \frac{X_1 I_{1d}}{U_{1d}}$$

Ein Wirkstrom beeinflusst den Phasenwinkel von $\underline{U}$ bzw. umgekehrt der Phasenwinkel den Wirkstrom. Der Effekt wächst mit der Reaktanz X_1 . Für kleine Winkel ist $\tan \delta_1 \approx \delta_1 = (X_1 I_{1d})/U_{1d}$.

1.3. Simulationsmodell

Die bisher dargestellten Schaltungen stellen einphasige Ersatzschaltbilder der Anlagen im Netz dar. In der Realität wären diese als dreiphasige Drehstromsysteme auszuführen. Die Berechnungen mit komplexen Zeigern folgen aus der Messung der dreiphasigen Zeitsignale für Strom und Spannung. Die Zusammenhänge sollen mit Hilfe eines Simulationsmodells illustriert werden. Da Schaltvorgänge und Einschwingvorgänge von Interesse sind, wird im Zeitbereich simuliert.

Die Modelle bestehen aus den Elementen aus der elektrischen Ersatzschaltung, d.h. den Komponenten R , L und C , sowie Spannungsquellen und Stromquellen. Die Messung der Signale, die Verarbeitung der Signale (einschließlich der Transformation in den Bildbereich und zurück in den Zeitbereich), sowie die Rückführung der Signale zu den gesteuerten Quellen erfolgt im Modell mit Hilfe von Signalflüssen. Der Anschaulichkeit halber bleibt das Modell im Niederspannungsbereich.

Frage 1.3.1: Auslegung der Anlage. Wie wäre die Induktivität einer Anlage zu bemessen, die in einem Niederspannungssystem mit 400 V in der Lage wäre, eine Leistung von 200 kW in die Sammelschiene einzuspeisen? Vergleichen Sie die Induktivität der Anlage mit einem Transformator mit 10% Kurzschlussspannung, bzw. mit einer Leitung von 1000 m Länge.

Lösung: (1) Anlageninduktivität: Für die Leistung der Anlage gilt nach Gleichung (1.2.4)

$$P_1 = -\frac{U_1 U \sin(\delta)}{X_1} \approx \frac{U_1^2 \sin(\delta)}{X_1} \quad (1.3.1)$$

In der einphasigen Ersatzschaltung bezeichnen U und U_1 die Beträge der Spannung die Sternspannung: die Leistung entspricht der Leistung einer Phase. Die maximale Leistung beträgt somit näherungsweise $P_{\max} = 3 U_1^2/X_1$. Da die Sternspannung $U_1 = U'_{1}/\sqrt{3}$ der verketteten Spannung U'_1 beträgt, erhält man aus Gleichung (1.3.1) die gesamte Leistung, wenn man für U_1 die verkettete Spannung verwendet. Somit ergibt sich für $P_{\max} = 200 \text{ kW}$ und $U_1 = 400 \text{ V}$ eine Reaktanz von $X_1 = 0,8 \Omega$.

Bei Netzfrequenz $f = 50 \text{ Hz}$ berechnet sich hieraus die Induktivität $L_1 = X_1/(2\pi f) = 2,5 \text{ mH}$.

(2) Vergleich mit der Streuinduktivität eines Transformators: Für einen Transformator mit 10% Kurzschlussspannung fließt im Kurzschlussfall mit 10% der Nennspannung der Nennstrom. Für einen Transformator mit einer Leistung von 200 kW an 400 V berechnet sich der Nennstrom zu $I_n \approx 1200 \text{ A}$. Aus dem Verhältnis von Spannung zu Strom ergibt sich eine Reaktanz von $X_T = 0,33 \Omega$. Die Induktivität fällt somit kleiner aus als die Koppelinduktivität der Anlage und beträgt $L_T \approx 1 \text{ mH}$.

(3) Vergleich mit Leitungsinduktivitäten: Für Kabel in der Niederspannung erhält man je nach Ausführung Werte im Bereich von $L_{\text{kabel}} \approx 0,3 \text{ mH/km}$. Die Längen der Leitungen bleiben in der Niederspannung unterhalb von 1 km. Leitungsinduktivitäten spielen daher im Vergleich zu den Reaktanzen der Transformatoren und Anlagen keine große Rolle.

Bemerkung: Im Übertragungsnetz sind die Entfernungen sehr viel größer. Freileitungen haben im Vergleich zu Kabeln größere Induktivitätsbeläge. Für eine 380 kV Freileitung erhält man Induktivitäten im Bereich $L_{\text{Freileitung}} \approx 0,8 \text{ mH/km}$. Für 100 km Leitungslänge ergeben sich somit 80 mH. Da das Spannungsquadrat im Verhältnis zur Leistung höher ausfällt als in der Niederspannung (Übertragungsnetze sind vergleichsweise hochohmig), vergrößern sich allerdings auch die Reaktanzen der Anlagen. Für eine Anlagen mit 1 GW an 380 kV erhält man nach Gleichung (1.3.1) eine Induktivität von 460 mH.

Frage 1.3.2: Erstellen Sie ein Modell mit der in Aufgabe 1.3.1 dimensionierten Anlage, die an einem Netz betrieben werden soll, wie in folgender Abbildung dargestellt. Gestalten Sie Betrag und Phase der Anlagenspannung variabel, so dass sich nach den Gleichung (1.2.5) und (1.2.5) Wirkleistung und Blindleistung einspeisen bzw. entnehmen lassen in Bezug auf die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt. Wie verändert sich hierbei die Spannung $\underline{U}$ in Betrag und Phase?

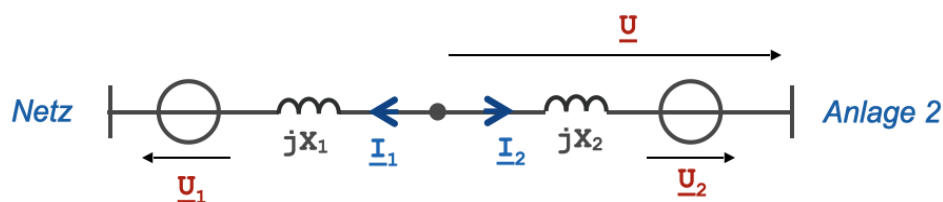


Abbildung 1.3.1 Netz mit einer Anlage

Lösung: Die Induktivität des Netzes wird identisch mit der des Netzes gewählt. Im Modell wird außerdem eine Leitungswiderstand R_1 eingefügt damit der Schaltvorgang beim Start der Simulation abklingen kann (die Spannungen $\underline{U}_1$ und $\underline{U}_2$ werden zum Start der Simulation sprunghaft eingeschaltet).

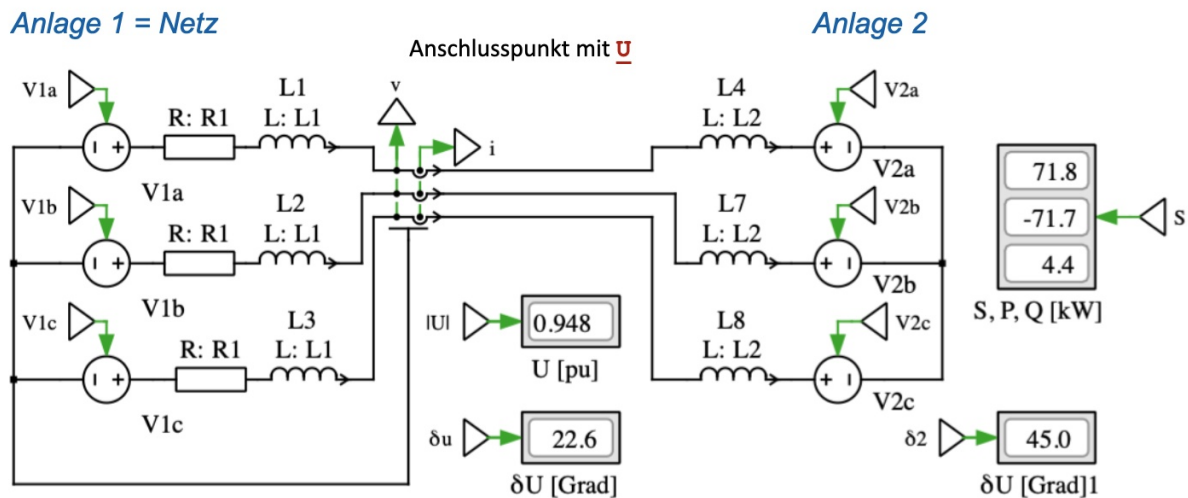


Abbildung 1.3.2 Modell mit Netz und Anlage

Im Modell sind die Anlagen dreiphasig ausgeführt. Am Anschlusspunkt werden Ströme und Spannungen gemessen. Die Zeitverläufe werden in den Bildbereich transformiert. Im Bildbereich lassen sich Realteil und Imaginärteil der Zeiger auswerten (z.B. nach Betrag und Phase, bzw. zur Berechnung der Wirkleistung, Blindleistung und Scheinleistung, siehe Anhang D).

Die Spannungen $\underline{U}_1$ und $\underline{U}_2$ für Netz und Anlage werden hierbei fest vorgegeben. Das Netz dient hierbei als Bezugssystem, d.h. $\underline{U}_1 = U_1 = U_{1d}$. Zur Einstellung von Wirkleistung und Blindleistung wird die Spannung $\underline{U}_2$ der Anlage nach Betrag und Phase vorgegeben. Folgende Abbildung zeigt die Vorgabe der Zeiger und die Transformation in den Zeitbereich.

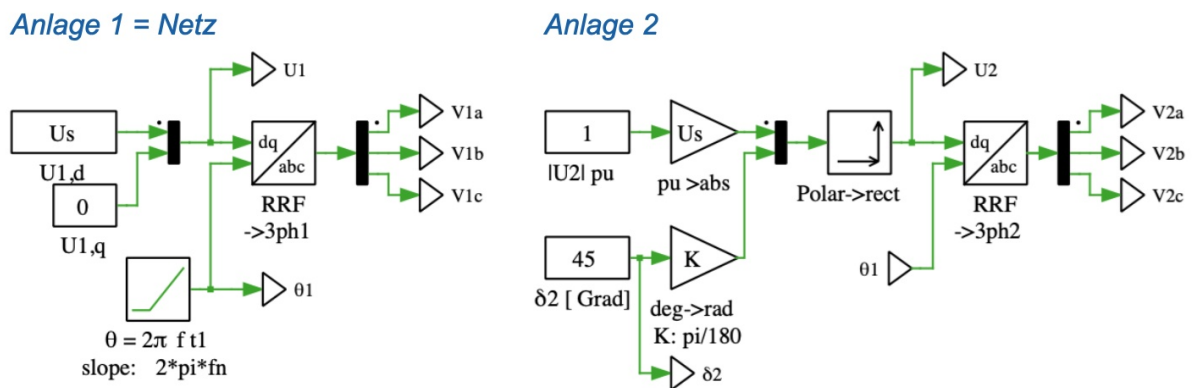


Abbildung 1.3.3 Vorgabe der Spannungen $\underline{U}_1$ (Netz) und $\underline{U}_2$ (Anlage)

Die Spannung $\underline{U}$ am Bezugspunkt folgt aus der Messung der Zeitsignale und anschließender Transformation in den Bildbereich. Man erkennt, dass sich für eine Vorgabe von $U_2 = U_1$ (gleicher Betrag) und $\delta_2 = 45$ Grad (in Bezug auf $\delta_1 = 0$) der Phasenwinkel δ_U von $\underline{U}$ auf dem halben Wert von δ_2 einstellt. Grund hierfür sind die gleichen Reaktanzen $X_1 = X_2$.

Die Wirkleistung der Anlage bei diesem Phasenwinkel beträgt etwa -72 kW (Leistungsabgabe, da die Anlage 2 dem Netz um δ_2 voraus eilt). Bei einer Vorgabe von 90 Grad erreicht die Anlage mit einem Betrag von etwa 100 kW den halben Wert der Bemessungsleistung. Grund hierfür ist die wegen $X_1 = X_2$ insgesamt doppelt so große Induktivität $X = X_1 + X_2 = 2 X_2$ zwischen den beiden Spannungsquellen. Die Bemessungsleistung kann die Anlage 2 zwar an die Sammelschiene abgeben (nur X_2), nicht jedoch in die gleich dimensionierte Anlage 1.

Wegen des mit dem Phasenwinkel δ_2 verbundenen Blindstromanteils fällt der Betrag U der Spannung am Bezugspunkt etwas geringer aus als die Anlagenspannungen: Bei $\delta_2 = 45$ Grad beträgt die Spannung U in normierter Schreibweise etwa 95%.

In der Simulation verwenden beide Anlagen für den zeitvariablen Phasenwinkel das gleiche Bezugssystem:

$$\theta_1(t) = \omega t = 2\pi f t \quad (1.3.2)$$

Dieses leitet sich aus der Frequenz f ab und wird in der Simulation nach dieser Gleichung mit Hilfe einer Rampe aus der Netzfrequenz $f = 50$ Hz gebildet. Für die Transformation in den Zeitbereich wird dieser zeitvariable Phasenwinkel für die Spannungen beider Anlagen verwendet.

Um ein solches Verfahren in der Praxis zu realisieren, müsste man beide Anlagen mit Hilfe synchroner Uhren mit gleichem Phasenbezug führen (z.B. von GPS-Zeitstempeln). Da über die Art der Anlagen (Maschinen oder Umrichter) hier keine weiteren Annahmen getroffen werden, sei der mögliche synchrone Betrieb hier vorausgesetzt.

Frage 1.3.3: Entnahme von Leistung (bzw. Einspeisung) an der Sammelschiene. Die Spannungen bei den Anlagen sollen phasensynchron und mit gleichen Amplituden betrieben werden. An der Sammelschiene soll mit Hilfe einer Stromquelle Leistung entnommen bzw. eingespeist werden. Wie verhalten sich beide Anlagen unter Last? Wie lässt sich der Laststrom als Wirkstrom oder Blindstrom vorgeben? Wie wird der Blindleistungsbedarf der Reaktanzen gedeckt?

Lösung: In einem symmetrischen Netz mit identischen Anlagenimpedanzen liefern beide Anlagen gleiche Leistungsbeiträge. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf mit Einspeisung eines Wirkstroms in den Anschlusspunkt. Der Strom teilt sich zu gleichen Teilen in die Anlagen auf.

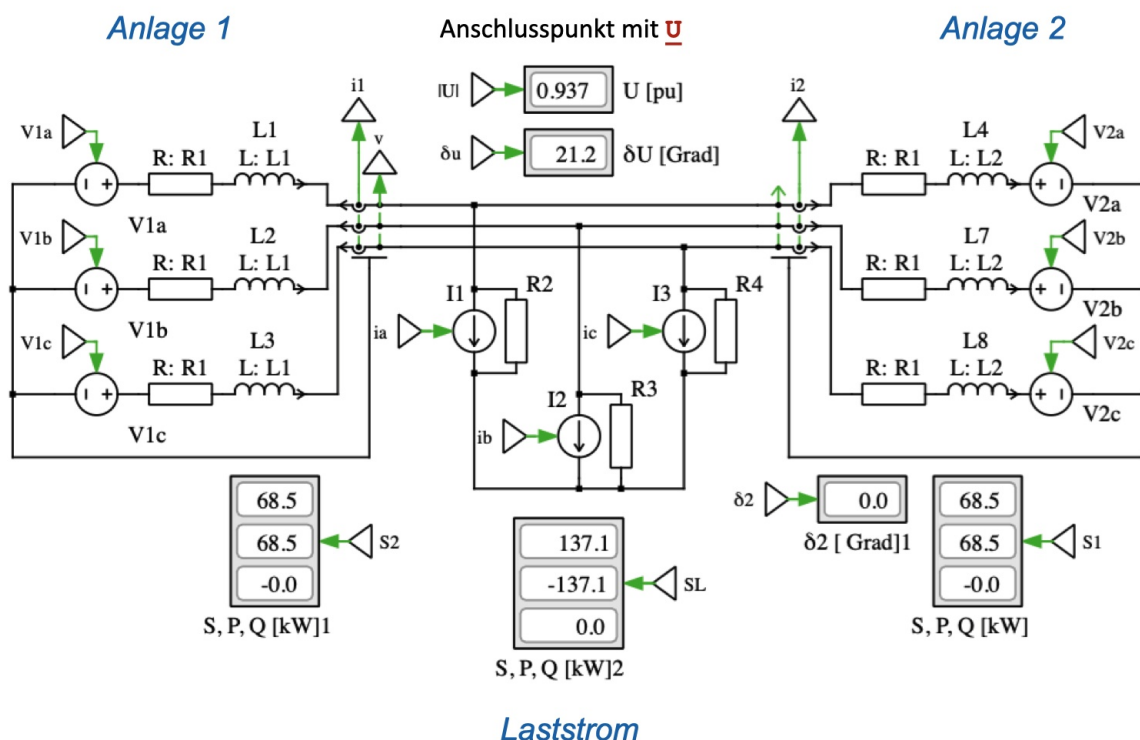


Abbildung 1.3.4 Zwei identische Anlagen mit Last am Anschlusspunkt

Die Vorgabe des Laststroms für die Einspeisung von Wirkstrom am Anschlusspunkt findet sich zusammen mit einem Zeigerdiagramm in folgender Abbildung.

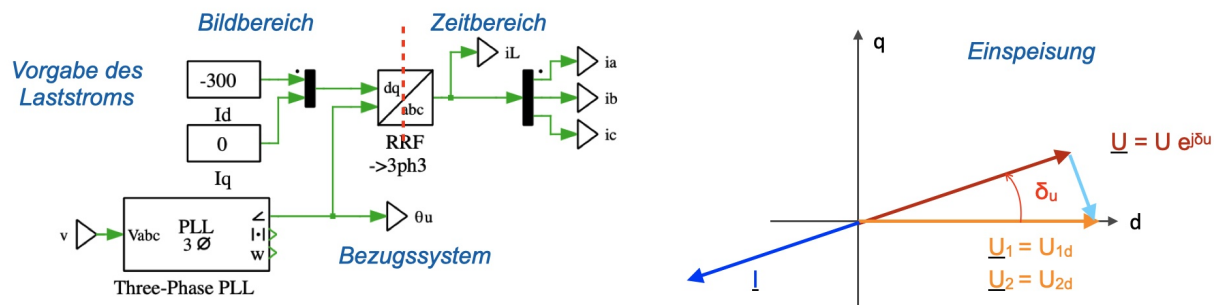


Abbildung 1.3.5 Vorgabe des Wirkstroms am Anschlusspunkt

Da sich der Phasenwinkel der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt von den Phasenwinkeln der Spannungen $\underline{U}_1$ und $\underline{U}_2$ der Anlagen unterscheidet und einer Messung nicht zugänglich ist, muss der Laststrom in Bezug auf die Spannung $\underline{U}$ vorgegeben werden. Hierzu wird der Phasenwinkel der Spannung $\underline{U}$ als Bezugspunkt benötigt. Folgende Abbildung zeigt die Gewinnung des Bezugssystems $\theta_u(t)$ aus der Messung der Zeitsignalen $u_a(t)$, $u_b(t)$ und $u_c(t)$ der Spannung am Bezugspunkt.

Blindleistungsbedarf der Anlagenreaktanzen: Da die Einspeisung bzw. die Last keinen Blindstrom bereitstellt, wird der Blindleistungsbedarf der Reaktanzen X_1 und X_2 durch die Spannungsquellen $\underline{U}_1$ und $\underline{U}_2$ der Anlagen gedeckt. Dieser Blindleistungsbedarf wird in den Anzeigen in der Simulation (siehe Abbildung 1.3.4) mit den gewählten Einstellungen nicht dargestellt: Dort wurde die Leistung und Blindleistung in Bezug auf die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt gemessen. Wählt man als Bezugspunkt für die Messung die Anlagenspannungen $\underline{U}_1$ und $\underline{U}_2$, so werden die aus dem Zeigerdiagramm zu erwartenden Blindleistungsbeiträge angezeigt.

Frage 1.3.4: Wie sieht das Zeigerdiagramm bei Bezug von Leistung aus (d.h. mit umgekehrter Richtung des Laststroms)? Wie erklärt sich jeweils der verringerte Betrag U der Spannung am Anschlusspunkt? Wie ließe sich dieser Wert wieder auf den Nennwert bringen?

Lösung: Siehe folgende Abbildung.

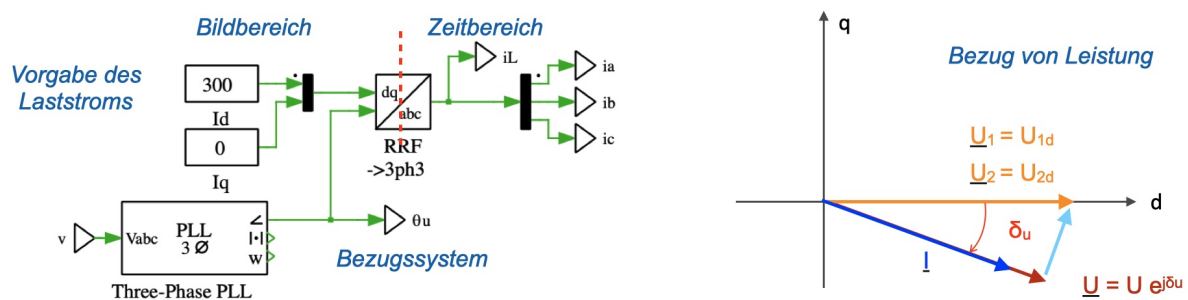


Abbildung 1.3.6 Wirkstroms und Zeigerdiagramm für Bezugsanlagen

Auch hier wird der Strom in Bezug auf die Phasenlage der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt vorgegeben. Diese Spannung stellt sich so ein, dass sie relativ zu den Anlagenspannungen $\underline{U}_1$ und $\underline{U}_2$ nach-eilt. Das Zeigerdiagramm zeigt, dass nach der Maschenregel der Betrag der Spannung U wiederum kleiner ausfällt als der Betrag der Anlagenspannungen.

Möchte man den Betrag der Spannung $\underline{U}$ am Bezugspunkt auf den Nennwert führen, sind die Amplituden der Anlagenspannungen $\underline{U}_1$ und $\underline{U}_2$ zu erhöhen.

Frage 1.3.5: Leistungsbeiträge der Anlagen. Wie lässt sich der Leistungsbeitrag der Anlage 2 erhöhen bzw. senken, ohne dass die Schaltung (d.h. der Wert der Reaktanz X_2) verändert wird? Wie sieht das Zeigerdiagramm aus?

Lösung: Basis sind die Maschengleichung für die Anlagenspannungen $\underline{U}_i$:

$$j X_i I_i = (\underline{U} - \underline{U}_i) \quad (1.3.3)$$

Der Beitrag einer Anlage zum Strom ist umgekehrt zu ihrer Reaktanz X_i . Über eine virtuelle Reaktanz sollte sich der Leistungsbeitrag somit verändern lassen. Aufgelöst nach Realteil und Imaginärteil erhält man aus der Maschengleichung (1.3.3):

$$U_d = U_{id} - X_i I_{iq} \quad (1.3.4)$$

$$U_q = U_{iq} + X_i I_{id} \quad (1.3.5)$$

Ersetzt man die Reaktanz X_i durch ihren realen und virtuellen Anteil $X_i = X_{i,r} + X_{i,v}$, so erhält man:

$$U_d = U_{id} - X_{i,r} I_{iq} - X_{i,v} I_{iq} \quad (1.3.4')$$

$$U_q = U_{iq} + X_{i,r} I_{id} + X_{i,v} I_{id} \quad (1.3.5')$$

Demnach wäre der Realteil U_{id} und der Imaginärteil U_{iq} der Spannung der Anlage mit virtueller Impedanz gemäß der Gleichung so zu verändern, dass der virtuelle Anteil mit umgekehrtem Vorzeichen zur Anlagenspannung addiert wird. Hierdurch ändern sich Betrag und Phase der Anlagenspannung $\underline{U}_i$.

Folgende Abbildung zeigt ein Beispiel für eine Laststrom, der am Anschlusspunkt bezogen wird. Die Vorgabe der Spannung für die Anlage 2 wurde gemäß der Gleichungen (1.3.4') und (1.3.5') mit Hilfe der Stromanteile I_{Ld} und I_{Lq} korrigiert.

Da die Reaktanz virtuell ist, lassen sich auch negative Werte verwenden: Im Beispiel $X_{2,v} = -0.3 \Omega$. Da die reale Reaktanz der Anlage $X_{2,r} = 0.79 \Omega$ beträgt, bleibt die Reaktanz insgesamt positiv. Allerdings ist der gesamte Wert der Reaktanz der Anlage 2 nun kleiner als der von Anlage 1 ($X_1 = 0.79 \Omega$, $X_2 = 0.49 \Omega$). Bezogen auf die gesamte Reaktanz betragen die Anteil $x_1 = 0.62$ und $x_2 = 0.38$, näherungsweise etwa 2/3 und 1/3. Wenn die Anteile der Ströme sich umgekehrt verhalten, trägt Anlage 2 somit 2/3 des Stroms, und Anlage 1 etwa 1/3 des Stroms. Somit ist der Anteil des Stroms aus Anlage 2 doppelt so groß wie der aus Anlage 1. Entsprechend fällt der Beitrag zur Leistung aus.

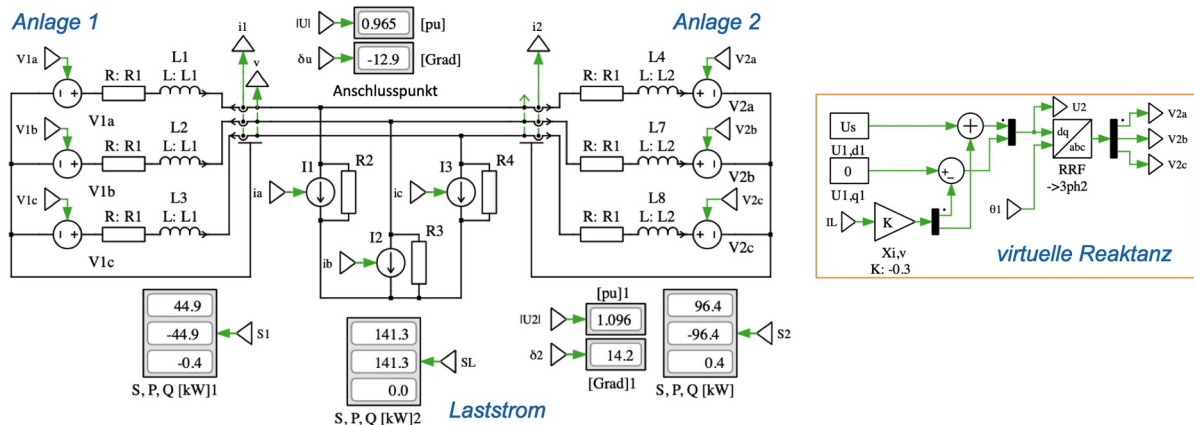


Abbildung 1.3.7 Anlage 2 mit virtueller Reaktanz

Diese Berechnung gilt nur überschlägig, da sich durch die virtuelle Reaktanz die Anlagenspannung $\underline{U}_2$ verändert, wie im Zeigerdiagramm in der folgenden Abbildung dargestellt. Mit realen Reaktanzen bleiben beide Anlagenspannungen in Betrag und Phase gleich.

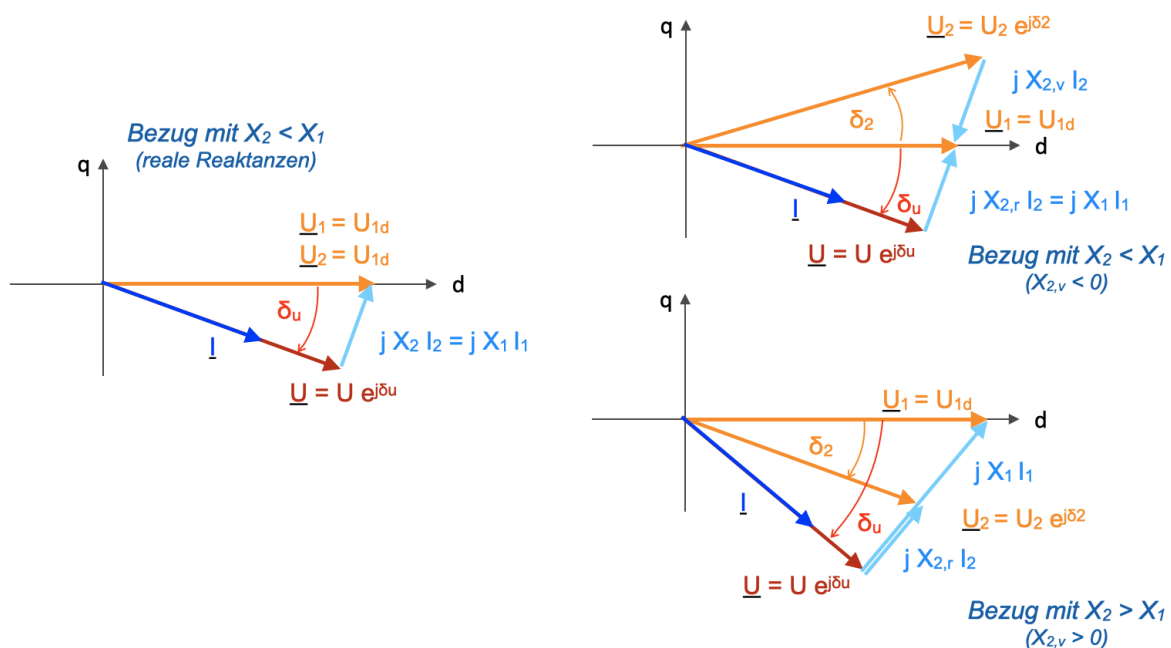


Abbildung 1.3.8 Zeigerdiagramme zu Anlagen mit unterschiedlichen Reaktanzen

Mit realen Reaktanzen (linker Teil der Abbildung) bleiben die Zeigerdiagramme für die beiden Maschinen gleich. Die Spannungsdifferenz über den unterschiedlichen Reaktanz wird durch unterschiedliche Ströme hergestellt.

Mit der virtuellen Reaktanz wird die Spannung der Anlage 2 so verschoben, dass sich trotz gleicher realer Reaktanzen ein Ungleichgewicht der Ströme und somit der Leistungen ergibt. Die Zeigerdiagramme für beide Maschen fallen daher unterschiedlich aus.

Das Leistungsungleichgewicht kommt jeweils durch die Phasenlage der Spannung $\underline{U}_2$ zustande: Mit erhöhtem Leistungsbeitrag ($X_2 < X_1$) eilt $\underline{U}_2$ vor der Anlagenspannung $\underline{U}_1$. Mit reduzierter Leistung fährt die Anlage 2 ihre Spannung $\underline{U}_2$ hinter der Anlage 1. Die Amplituden sind so gewählt, dass die Masche sich jeweils orthogonal zur Stromrichtung schließt.

Die der Abbildung 1.3.7 dargestellte Blindleistung der Anlagen 1 und 2 sind mit Bezug zur Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt berechnet und daher in Übereinstimmung mit dem Zeigerdiagramm gleich null. Bezieht man die Blindleistung auf die Quellspannungen $\underline{U}_1$ und $\underline{U}_2$ der Anlagen, fallen Blindleistungsbeiträge an, wie ebenfalls am Zeigerdiagramm erkennbar. Die Wirkleistung ist nicht von der Wahl des Bezugssystems betroffen.

Frage 1.3.6: Variation des Laststroms. Variieren Sie den Laststrom über einen maximalen Bereich zwischen Einspeisung und Bezug. Wie verändert sich der Spannungswinkel der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt?

Lösung: Es gelten für alle Anlagenspannungen $\underline{U}_i$ und Anlagenströme $\underline{I}_i$ die Maschenregeln

$$j X_i I_i = (\underline{U} - \underline{U}_i) \quad (1.3.3)$$

Bei Einspeisung oder Bezug von Wirkstrom bezogen auf die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt ergeben sich folgende Zeigerdiagramme. Aus den Zeigerdiagrammen geht hervor, dass ab einem Spannungswinkel von 45 Grad der Betrag der Spannung $\underline{U}$ am Bezugspunkt trotz weiterhin steigenden Stroms abnimmt. Somit erreicht die Wirkleistung hier einen Kipppunkt: Vergrößerung des Stroms führt zur Leistungsabnahme. Ein Regler käme hier ins Schleudern.

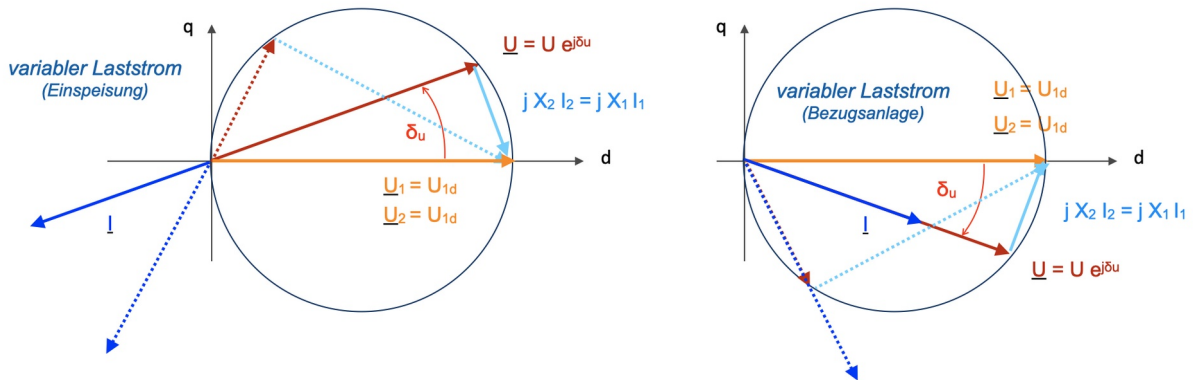


Abbildung 1.3.9 Zeigerdiagramme für variablen Wirkstrom am Anschlusspunkt

Bezogen auf die Anlagenspannungen $\underline{U}_1$ und $\underline{U}_2$ wird der Anteil an Blindstrom mit wachsenden Strombetrag sehr viel größer und übersteigt den Betrag der Wirkleistung. Aus der Simulation ergeben sich folgende Ergebnisse für die Bezugsspannung $\underline{U}$, den Laststrom $\underline{I}_L$ und die Leistung $\underline{S}_1$ der Anlage 1:

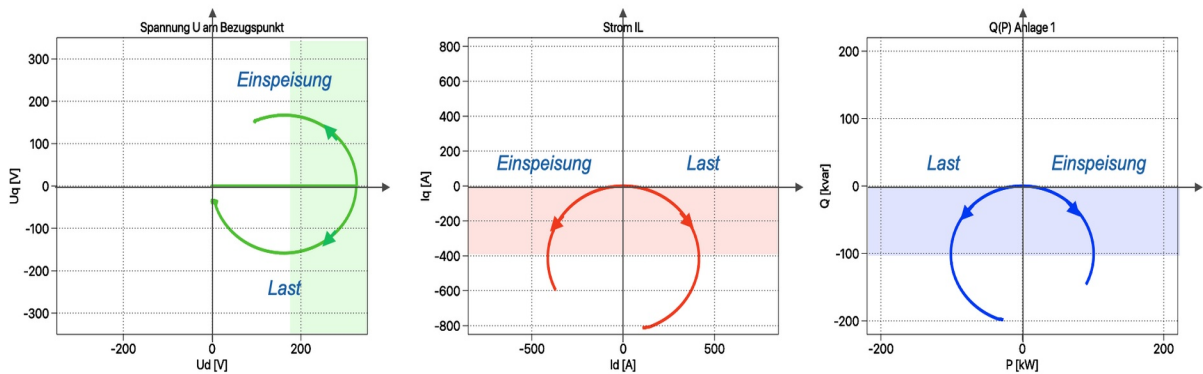


Abbildung 1.3.10 Ergebnisse der Simulation

Der im Betrieb stabile Bereich ist jeweils farbig hinterlegt. Die Leistung $\underline{S}_1 = \underline{P}_1 + j \underline{Q}_1$ ist bezogen auf die Quellenspannung $\underline{U}_1$, nicht auf die Spannung $\underline{U}$ am Anschaltspunkt. Gegenüber dem Laststrom $\underline{I}_L$ am Anschaltspunkt ist die Stromrichtung der Anlage 1 umgekehrt: Wenn durch den Strom $\underline{I}_L$ Leistung eingespeist wird (Strom $\underline{I}_L$ negativ), wird diese von der Anlage aufgenommen (Leistung $\underline{P}_1$ positiv). Auch der Strom $\underline{I}_L$ ist in Bezug auf die Anlagenspannung $\underline{U}_1$ dargestellt.

Am Leistungsdiagramm $\underline{Q}_1(\underline{P}_1)$ ist erkennbar, dass der Betrag der Blindleistung doppelt so hoch ausfallen kann wie die Wirkleistung. Gleiches gilt für den Blindanteil des Laststrom $\underline{I}_L$ im Vergleich zum Wirkstrom. Für den Strom gilt

$$\underline{I}_1 = \frac{(\underline{U} - \underline{U}_1)}{jX_1} = \frac{(\underline{U} e^{j\delta} - \underline{U}_1)}{jX_1} \quad (1.3.4)$$

Die von der Spannungsquelle $\underline{U}_1$ aufgenommene Leistung berechnet sich zu

$$\underline{S}_1 = \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* \quad (1.3.5)$$

Durch Einsetzen erhält man

$$\underline{S}_1 = \frac{\underline{U}_1 \cdot (\underline{U} e^{-j\delta} - \underline{U}_1)}{-jX_1} = j \frac{\underline{U}_1 \underline{U}}{X_1} (e^{-j\delta} - \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}})$$

Der Ausdruck $(e^{-j\phi} - 1)$ beschreibt einen Einheitskreis um den Koordinatenursprung, der um -1 verschoben ist. Multiplikation mit „j“ bewirkt eine Drehung um 90 Grad gegen den Uhrzeigersinn. Man erhält die Lage aus dem Q(P) Diagramm in der komplexen Ebene $\underline{S}$.

1.4. Betrieb der Anlagen am Netz

Das Netz soll nun mit allen Anlagen in Betrieb genommen werden. Voraussetzung bleibt, dass alle Anlagen synchronisiert sind. Durch Variation der Anlagenspannung lassen sich die Anlagen nach unterschiedlichen Methoden führen: beispielsweise als Stromquellen zur Einspeisung oder als Last. In diesem Fall ist der Strom die Führungsgröße, die Anlagenspannung ist die Stellgröße. Eine andere Betriebsart wäre der spannungsgeführte Betrieb mit der Spannung am Anschaltspunkt als Führungsgröße. Auch hier bleibt die Anlagenspannung die Stellgröße.

Frage 1.4.1: Netz mit 4 Anlagen. Erweitern Sie das Netz auf insgesamt 4 Anlagen, bestehend aus jeweils einer Spannungsquelle mit einer Koppelinduktivität. Verwenden Sie eine der Anlagen als Bezugssystem. Führen Sie ein weitere Anlage so, dass die Phase der Anlagenspannung über einen Bereich variiert werden kann. Überprüfen Sie die Funktion in der Simulation.

Lösung: Siehe folgende Abbildung.

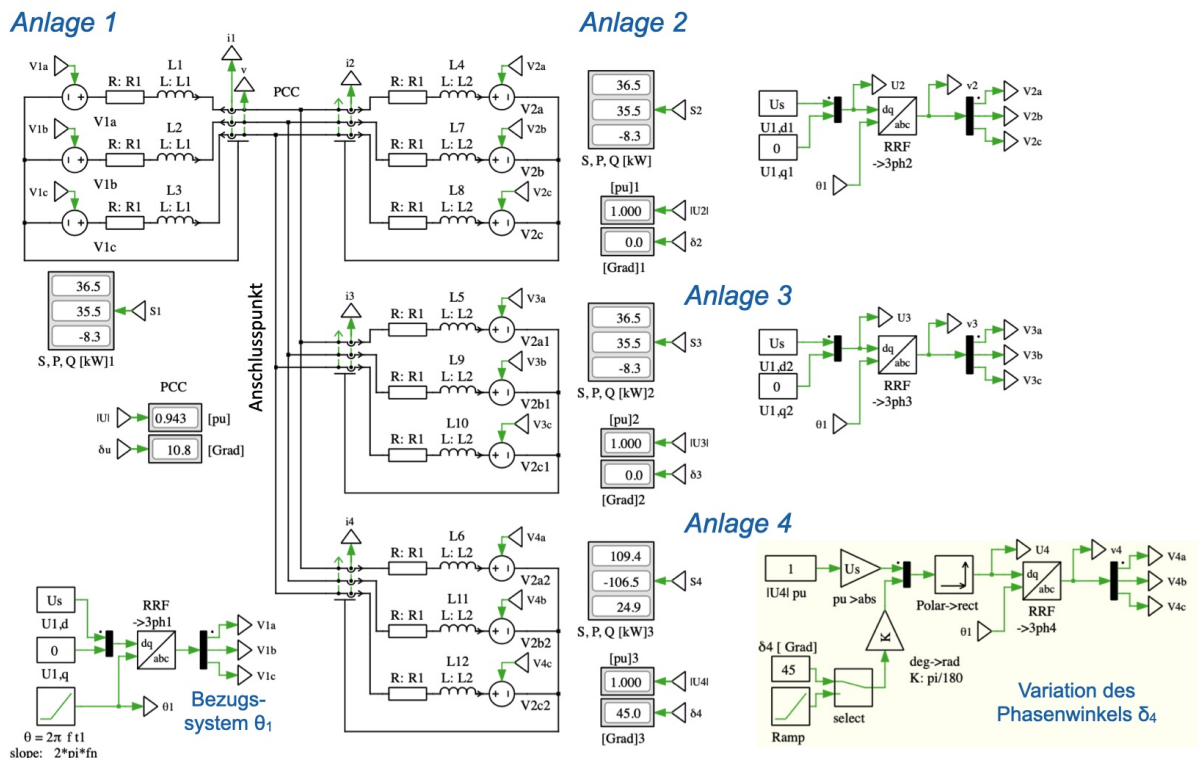


Abbildung 1.4.1 Aufbau des Netzes

Als Bezugssystem dient Anlage 1: Hier wird aus einer festen Frequenz f das System

$$\theta_1(t) = \omega t + \delta_1 = 2\pi f t + \delta_1$$

erzeugt. Hierbei wird ohne Einschränkungen der Allgemeinheit der Nullphasenwinkel $\delta_1 = 0$ verwendet. Dieses Bezugssystem wird für alle Transformationen zwischen Bildbereich und Zeitbereich verwendet. Die Anlagen 2 und 3 werden mit Spannungswinkeln $\delta_2 = \delta_3 = 0$ geführt, laufen also phasensynchron mit der Anlage 1. Die Spannungen der Anlagen 1, 2 und 3 entsprechen der Nennspannung.

Gemeinsamer Bezugspunkt aller Anlagen ist die Spannung am Anschlusspunkt (bzw. an der Sammelschiene). Wie bei Netzwerksimulationen üblich, wird diese Spannung nach Betrag und Phase ange-

zeigt (Phase relativ zum Bezugssystem δ_1). In allen Abgängen der Sammelschiene werden die Anlagenströme gemessen, und zwar einheitlich in Richtung der Anlagen. Auf diese Weise werden alle Leistungen im Verbraucherzählpfeil wiedergegeben. Die Summe der Ströme an der Sammelschiene muss jederzeit null betragen, ebenso die Summe der mittleren Leistungen.

Wenn Anlage 4 so geführt wird, dass bei Nennspannung der Spannungswinkel über den Bereich $\{0, 2\pi\}$ variiert, ergibt sich folgendes Bild.

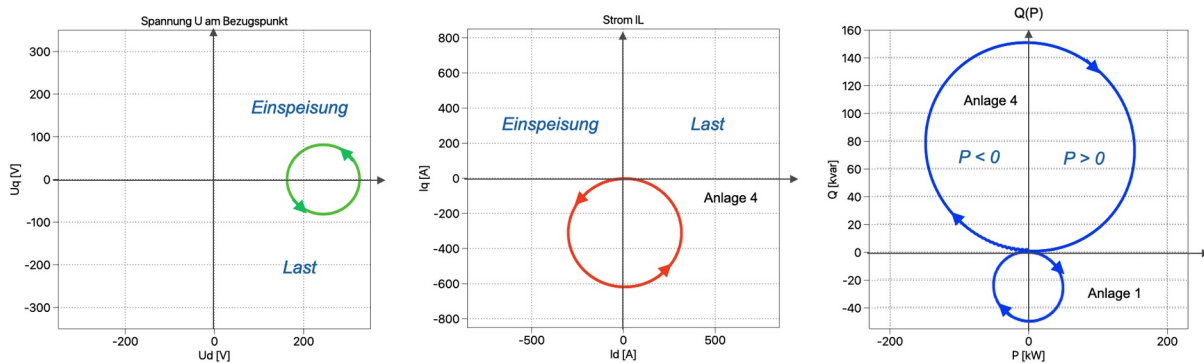


Abbildung 1.4.2 Variation des Phasenwinkels δ_4 der Anlage 4

(1) Bezugsspannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt: Wenn die Anlagenspannung $\underline{U}_4$ sich in der komplexen Ebene mit Startpunkt $\{U_n, 0\}$ auf einer Kreisbahn mit Radius U_n (Nennspannung) gegen den Uhrzeigersinn bewegt, ergibt sich für die Spannung am Anschlusspunkt der links dargestellte Verlauf. Da die Spannung $\underline{U}$ von den übrigen 3 Anlagen gestützt wird, fällt die Variation geringer aus als in Abschnitt 1.3 mit insgesamt 2 Anlagen.

Solange die Anlagen Spannung $\underline{U}_4$ der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt vorausschneidet (in der oberen Halbebene bzw. im Bereich $\{0, \pi\}$), speist Anlage 4 ins Netz ein. In der unteren Halbebene bezieht Anlage 4 Leistung aus dem Netz. Ihr Leistungsmaximum erreicht Anlage 4 jeweils bei $\delta_4 = \pm\pi/2$.

(2) Strom der Anlage 4: Solange Anlage 4 dem Netz vorausschneidet, fließt Strom ins Netz, die Stromrichtung ist somit in der gewählten Messrichtung negativ. Die der mittleren Grafik erkennt man, dass der Wirkstromanteil der Anlage sein Maximum bei $\delta_4 = \pi/2$ erreicht und anschließend wieder abfällt. Der Blindstromanteil steigt weiter bis $\delta_4 = \pi$.

In der rechten Halbebene fällt der Laststrom positiv aus: Hier bewegt sich der Spannungswinkel im Bereich $\{0, -\pi\}$: Anlage 4 läuft hinter dem Netz und bezieht folglich Strom und Leistung. Das Maximum der Wirkleistung erreicht die Anlage hier bei $\delta_4 = 3\pi/2 = -\pi/2$.

(3) Leistung der Anlagen: Die Anlagen 1, 2 und 3 arbeiten als Gegenspieler der Anlage 4. Diese Anlagen sind auf eine feste Spannungsamplitude $U_i = U_n$ und auf feste Spannungswinkel $\delta_i = 0$ eingestellt. Da alle Anlagen identisch sind (mit gleichen Koppelinduktivitäten), teilen sich die Anlagen 1, 2 und 3 die von Anlage 4 geforderte oder eingespeiste Leistung auf.

In der Abbildung rechts erkennt man oben die geforderte Leistung der Anlage 4, und unten die bereitgestellte Leistung der Anlage 1, entsprechend 1/3 der geforderten Leistung aus 3 Anlagen. Die Orientierung der Leistungskurven $Q(P)$ ergibt sich aus der Stromrichtung: Der Einspeisung aus Anlage 4 steht die Aufnahme eines Anteils der Leistung in Anlage 1 gegenüber.

Frage 1.4.2: Stromgeführter Betrieb. Führen Sie Anlage 4 so, dass sich ein definierter Strom der Anlage in Bezug auf die Spannung am Anschlusspunkt einstellen lässt. Überprüfen Sie die Regelung in der Simulation.

Lösung: Siehe folgende Abbildung. Die Anlage bleibt unverändert, erhält jedoch einen Stromregler, der die Anlagenspannung als Stellgröße verwendet. Eingangsgrößen des Reglers sind der gewünschte Strom als Sollwert, sowie der Istwert des am Anschlusspunkt gemessenen Stroms.

Der Sollwert ist nach Realteil (= Wirkstrom) und Imaginärteil (= Blindstrom) vorgebar. Der Bezugspunkt hierfür ist die Spannung am Anschaltspunkt: Am Anschaltspunkt wird ein gegebener Wirkstrom und Blindstrom gefordert. Daher muss das Bezugssystem $\theta_u(t)$ mit Hilfe einer Phasenregelschleife (PLL) aus der Spannungsmessung $u_{abc}(t)$ am Anschaltspunkt ermittelt werden.

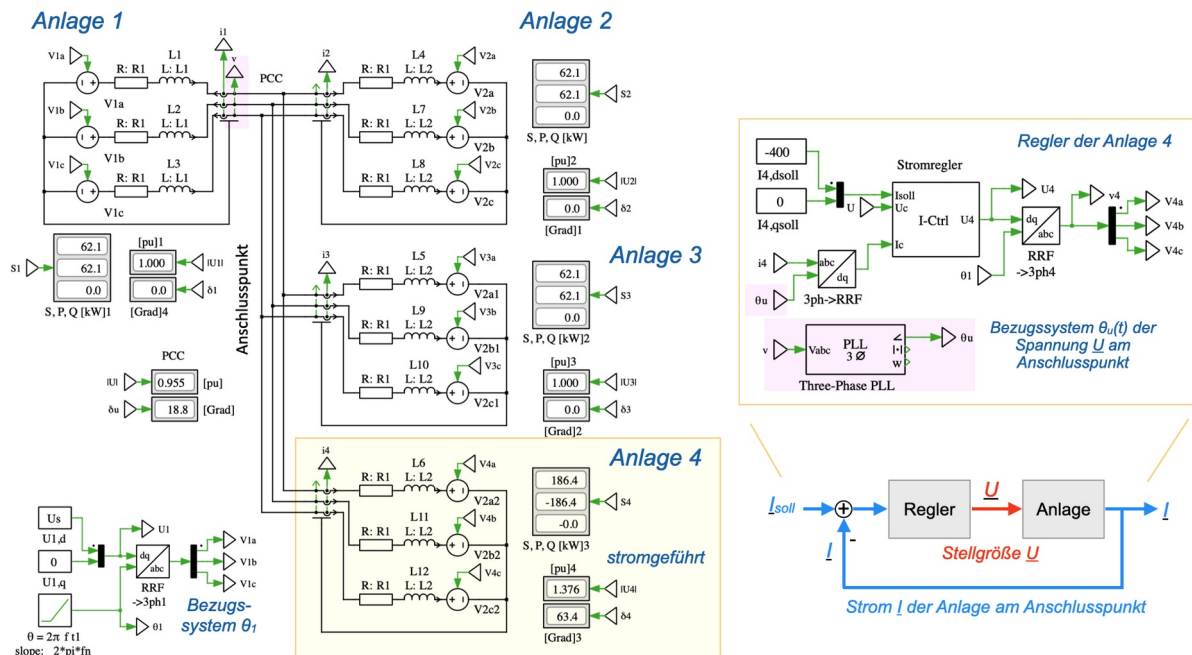


Abbildung 1.4.3 Anlage 4 im stromgeführten Betrieb

Der am Anschlusspunkt gemessene Strom $i_{abc}(t)$ wird mit Hilfe dieses Bezugssystems in den Bildbereich transformiert und mit der Sollwertvorgabe verglichen. Der Stromregler ermittelt hieraus die Vorgaben für die Anlagenspannung $\underline{U}_4$. Die Funktionsweise des Stromreglers wird an dieser Stelle nicht näher erläutert, sie findet sich in der Literatur (z.B. als Stromregler für leistungselektronische Wandler). Aus der Anlagenspannung $\underline{U}_4$ folgen die Vorgaben für die drei Phasen $u_{4,abc}(t)$ durch Rücktransformation in den Zeitbereich.

Im Beispiel wurde ein Wirkstrom von -400 A gefordert. Die Simulation zeigt, dass die zugehörige Einspeiseleistung der Anlage 4 von ca. 186 kW von den drei übrigen Anlagen zu gleichen Teilen aufgenommen wird. Die Spannung der Anlage 4 als Stellgröße wird hierzu vom Regler auf den Betrag $1,38 \text{ pu}$ erhöht bei einem Phasenwinkel von ca. 63° Grad vor dem Bezugswinkel δ_1 .

Durch die Einspeisung verändert sich auch die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt: Die Amplitude fällt auf $0,955 \text{ pu}$ bei einem Winkel von $\delta_u = 18,8^\circ$ Grad vor dem Bezugswinkel δ_1 . Somit beträgt die Phasendifferenz der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt ein Drittel der Phasendifferenz der Anlage 4. Grund hierfür ist die Aufnahme der Leistung der Anlage 4 durch die Anlagen 1, 2 und 3.

Die Größe der Phasendifferenz δ_u der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt lässt sich aus den Anlagenströmen abschätzen. Der Winkel beträgt gemessen am Strom der Anlage 1:

$$\delta_u \approx \tan(\delta_u) = \frac{U_q}{U_d} \approx \frac{X_1 I_{1d}}{U_{1d}} \quad (1.4.1)$$

Für den geforderten Strom von $I_{1d} = 400/3$ A (Scheitelwert) ergibt sich bei einer Reaktanz von $X_1 = 0,79 \Omega$ und einer Spannung von $U_{1d} = 330$ V (Scheitelwert) ein Wert von $\delta_U \approx 0,319$ entsprechend 18,3 Grad. Somit ließe sich mit der Abschätzung nach Gleichung (1.4.1) ein Näherungswert für die Differenzen der Phasenwinkel der Anlagen zum Bezugssystem aus den Anlagenströmen ableiten. Aus der gleichen Beziehung geht hervor, dass das Spannungswinkel δ_4 der Anlage 4 bei dreifachem Anlagenstrom dreimal so groß ausfallen muss.

Bei Forderung eines positiven Wirkstroms gleicher Größe (bei Bezug von Leistung aus dem Netz) ergeben sich vergleichbare Verhältnisse mit umgekehrten Phasenwinkeln: Anlage 4 eilt nun dem Netz nach. Die Amplitude der Spannung U am Bezugspunkt fällt geringfügig kleiner aus (0,939 pu), da der Blindleistungsbedarf der Koppelinduktivitäten der Anlagen nun gemäß der Lastflussrichtung aus den speisenden Anlagen 1, 2 und 3 gedeckt wird. Bei der Einspeisung wurde er von der speisenden Anlage 4 bereitgestellt.

Fordert man einen Blindstrom in der einen oder anderen Richtung, ändert sich die Amplitude der Spannung U am Bezugspunkt erheblich: Bezug eines Blindstroms (= vorausseilender Blindstrom) führt zu einer Spannungserhöhung, Einspeisung eines Blindstroms (= nachteilender Blindstrom) führt zu einer Verringerung der Spannung. Die Phase der Spannung zum Bezugswinkel δ_1 bleibt hierbei weitgehend erhalten.

Frage 1.4.3: Leistungsregelung. Führen Sie Anlage 4 so, dass sich eine definierte Wirkleistung einspeisen oder entnehmen lässt. Ebenso soll eine Blindleistung vorgebar sein, so dass die Anlage in allen 4 Quadranten $\{P, Q\}$ geführt werden kann. Überprüfen Sie die Regelung in der Simulation.

Lösung: Die Leistungsregelung wird der Stromregelung überlagert, so dass sich eine kaskadierte Regelung ergibt. Folgende Abbildung zeigt das Netz in der Simulation.

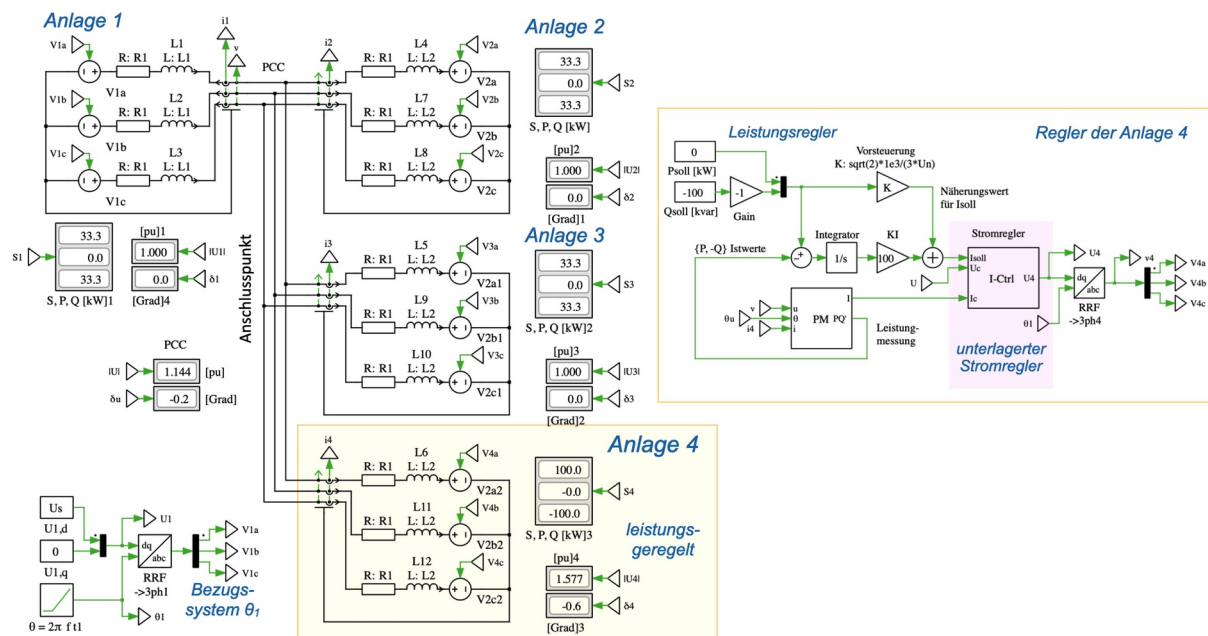


Abbildung 1.4.4 Leistungsführender Betrieb der Anlage 4

Der Regler besteht wiederum aus dem Stromregler. Dieser erhält in Form einer Vorsteuerung einen Näherungswert für den Strom, der aus der Leistungsgleichung abgeleitet ist: $P_{soll} = 3 I_{soll,approx} U_n$. Da der Signalfuss mit Scheitelwerten arbeitet, ist die Stromvorgabe mit $\sqrt{2}$ zu multiplizieren. Die Genauig-

keit der Approximation ist nicht entscheidend, die Vorsteuerung soll nur den Einschwingvorgang des Reglers beschleunigen.

Der Leistungsregler benötigt die Istwerte der Wirkleistung und Blindleistung. Die Differenz der Sollwerte für P und Q von den Istwerten wird auf einen I-Regler geführt, der als Stellgröße den Strom des unterlagerten Stromreglers besitzt. Der Strom als Stellgröße wird durch den Regler so lange verändert, bis sich die Regeldifferenz verschwindet und sich somit das gewünschte Wertepaar $\{P_{\text{soll}}, Q_{\text{soll}}\}$ einstellt.

Für die Vorgabe des Blindstroms ist das Vorzeichen der Blindleistung zu invertieren: Eine positive Blindleistung (bzw. die Aufnahme von Blindleistung) bedeutet einen der Spannung $\underline{U}$ nachteilenden Blindstrom, somit ist der Imaginärteil des Blindstroms bezogen auf die Spannung $\underline{U}$ negativ. Umgekehrt bedeutet eine negative Blindleistung (bzw. die Bereitstellung von Blindleistung) einen vorteilhaften Blindstrom (mit positivem Imaginärteil).

In der Abbildung dargestellt sind die Sollwerte $\{P_{\text{soll}} = 0, Q_{\text{soll}} = -100\}$ als Vorgaben für die Anlage 4. Es wird somit reine Blindleistung bereitgestellt. Man erkennt, dass sich die Spannung $\underline{U}_4$ näherungsweise im Winkel zur Spannung $\underline{U}$ befindet. Einen nennenswerten Einfluss auf die Spannungswinkel hat die Blindleistung somit nicht. Allerdings wurde die Amplitude der Spannung $\underline{U}_4$ deutlich erhöht, um die gewünschte Blindleistung zu erbringen. Umgekehrt würde eine Forderung nach Bezug von Blindleistung die Amplitude der Spannung $\underline{U}_4$ deutlich verringern.

Wie der Stromregler verwendet der Leistungsregler das Bezugssystem $\theta_u(t)$, das mit Hilfe einer Phasenregelschleife (PLL) aus der am Anschlusspunkt gemessenen Spannung $u_{abc}(t)$ rekonstruiert wird. Dieses Bezugssystem wird auch für die Leistungsmessung verwendet: Ein Wirkstrom liegt vor, wenn sich der Anlagenstrom $\underline{I}_4$ in Phase mit der Bezugsspannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt befindet.

Frage 1.4.4: Spannungsgeführter Betrieb. Anlage 3 soll so geführt werden, dass sie die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt auf den Nennwert bringt.

Lösung: siehe folgende Abbildung.

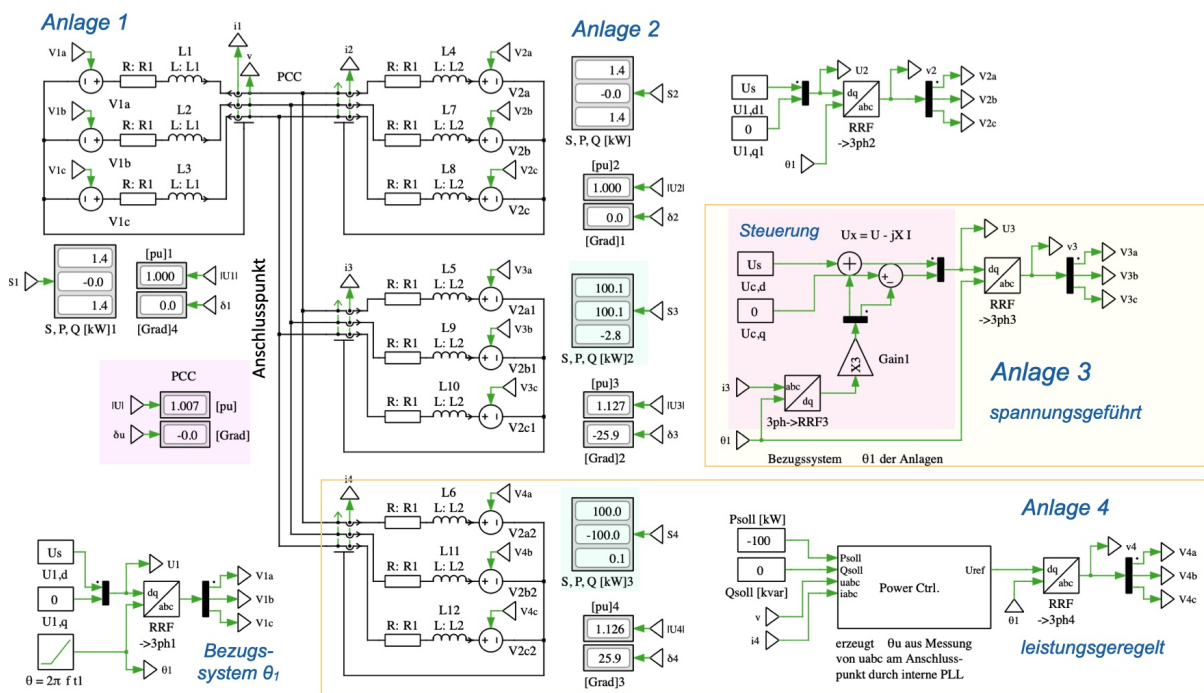


Abbildung 1.4.5 Führung der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt durch Anlage 3

Vorgabe ist nun die Spannung $\underline{U}$ im Bezugspunkt durch das Wertepaar $\{U_{d,soll} = U_s, U_{q,soll} = 0\}$. Bezugssystem ist hierbei das System $\theta_1(t)$ der Anlagen. Somit hat Anlage 3 die Aufgabe, die Spannung $\underline{U}$ auf diesen Wert zu führen, so dass die Amplitude der Nennspannung entspricht und der Phasenwinkel null ergibt im Verhältnis zum Nullphasenwinkel δ_1 . Der Spannungswinkel δ_1 der Anlage ist hierbei variabel.

In der Abbildung erfolgt die Vorgabe der Spannung $\underline{U}_3$ durch eine Steuerung, die die Maschengleichung abbildet:

$$(\underline{U} - \underline{U}_i) = j X_i I_i \quad (1.4.2)$$

Aufgelöst nach Realteil und Imaginärteil erhält man für die Anlagenspannung:

$$U_{i,d} = U_d + X_i I_{i,q} \quad (1.4.3)$$

$$U_{i,q} = U_q - X_i I_{i,d} \quad (1.4.4)$$

Diese Gleichung wurde als Steuerung für die Spannung $\{U_{3,d}, U_{3,q}\}$ abhängig von der Vorgabe der Sollwerte $\{U_{d,soll}, U_{q,soll}\}$ im Signalfuss abgebildet. Die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt und der Anlagenstrom $\underline{I}_3$ wird aus den gemessenen Zeitsignalen gewonnen, indem diese mit Hilfe des Bezugssystems $\theta_1(t)$ in den Bildbereich transformiert werden.

Das Bezugssystem $\theta_1(t)$ muss der Anlage hierfür vorliegen. Es kann beispielsweise aus synchronen Uhren in den Anlagen gewonnen werden. Bei einer elektrischen Synchronmaschine wird das Bezugssystem unmittelbar durch die synchrone Drehzahl des Rotors eingeprägt (der Rotor funktioniert durch seine Schwungmasse wie ein Kreisel).

Regelungstechnisch stellt die Spannung $\underline{U}$ am Bezugspunkt die Führungsgröße dar, der Anlagenstrom $\underline{I}_3$ die Störgröße, und die Anlagenspannung $\underline{U}_3$ die Stellgröße. Im dargestellten Beispiel bleibt Anlage 4 leistungsgeführt: Sie speist eine Leistung von 100 kW ein. Da nur Anlage 3 die Spannung am Bezugspunkt führt, nimmt Anlage 3 diese Leistung komplett auf. Die anderen Anlagen führen ihre Spannungen $\underline{U}_1$ und $\underline{U}_2$ phasensynchron und mit gleicher Amplitude wie die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt. Sie verbleiben daher im Leerlauf.

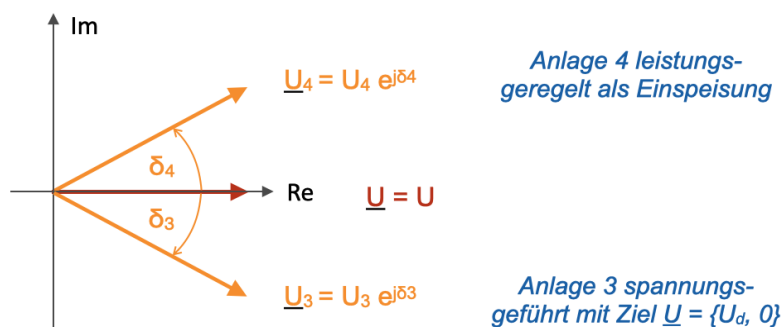


Abbildung 1.4.6 Zeigerdiagramm der Anlagen 3 und 4

Betrachtet man Betrag und Phase der Spannungen $\underline{U}_3$ und $\underline{U}_4$, so erkennt man, dass die spannungsgeführte Anlage die Spannung $\underline{U}_3$ das Spiegelbild der stromgeführten Anlagenspannung $\underline{U}_4$ darstellt: die Beträge sind gleich, die Spannungswinkel besitzen umgekehrtes Vorzeichen. Auf diese Weise bleibt die Phase der Spannung $\underline{U}$ am Bezugspunkt bei null und somit in Phase mit dem Bezugssystem. Die Abbildung oben zeigt das Zeigerdiagramm im genannten Arbeitspunkt.

Ursächlich im Sinne der Regelungstechnik ist hierbei die stromgeführte Anlage 4: Sie sorgt für den Anlagenstrom $\underline{I}_4$ als Störgröße. Den Ausgleich übernimmt die spannungsgeführte Anlage 3: Sie sorgt für eine ausgeglichene Spannung am Anschlusspunkt $\underline{U}$, indem sie die eingespeiste Leistung aufnimmt.

Im Leistungsgleichgewicht ist die Summe der Ströme am Anschlusspunkt null. Die Anlagen 1 und 2 verbleiben daher im Leerlauf.

Frage 1.4.5: Spannungsregelung. Erweitern Sie die Spannungsführung der Anlage 3 um einen Regler.

Lösung: Wie in folgender Abbildung dargestellt, wird ein PI-Regler ergänzt.

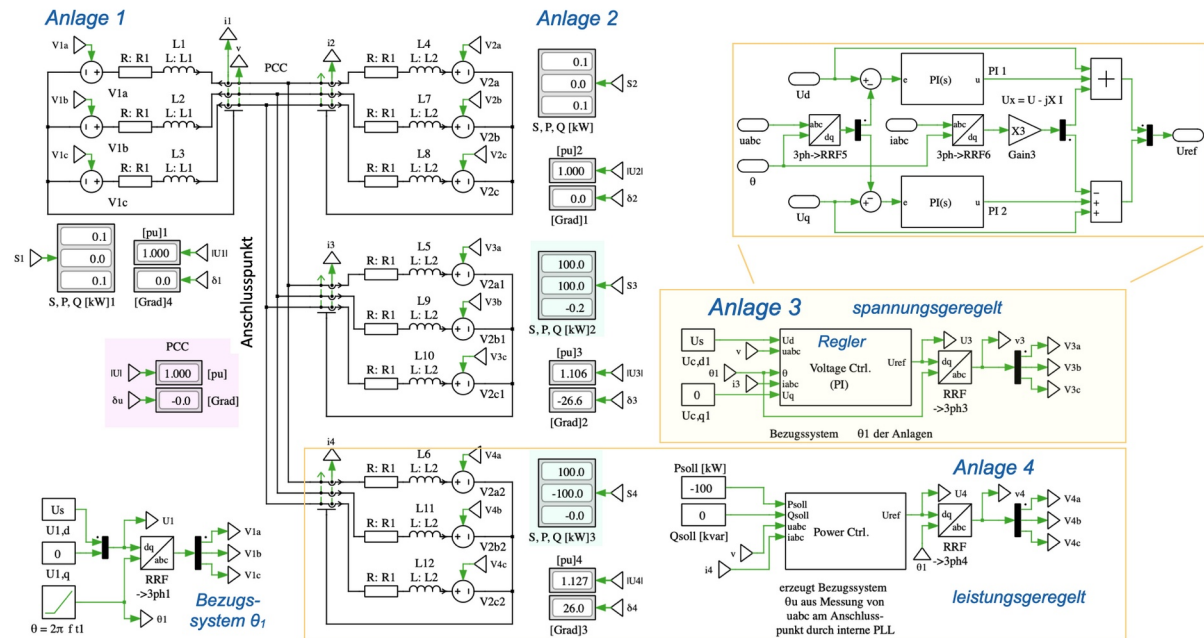


Abbildung 1.4.7 Erweiterung der Spannungsführung der Anlage 3 um einen Regler

Anlage 4 fordert nun den Bezug von 100 kW Leistung ein. Da Anlage 3 die Spannung am Anschlusspunkt regelt, stellt sie die geforderte Leistung bereit. Die Anlagen 1 und 2 verbleiben im Leerlauf. Im Vergleich zur Steuerung aus der letzten Aufgabe (englisch: open loop control) arbeitet die Regelung (englisch: closed loop control) genauer: Die Spannung $\underline{U}$ wird exakt auf den gewünschten Arbeitspunkt geführt. Bei der Regelung wurde die Steuerung als Vorsteuerung beibehalten, d.h. die Steuerung wurde um einen PI-Regler erweitert.

Frage 1.4.6: Betreiben Sie die Anlagen 1, 2 und 3 spannungsgeregelt. Untersuchen Sie das Verhalten unter unterschiedlichen Lastsituationen, die Sie mit Hilfe der Anlage 4 erzeugen.

Lösung: Der Regler der Anlage 3 wird auch für die Anlagen 1 und 2 verwendet. Die Anlagen 1, 2 und 3 sorgen nun gemeinsam dafür, dass die Spannung am Anschlusspunkt $\underline{U}$ beim Betrag der Nennspannung bleibt ($|\underline{U}| = 1 \text{ pu}$) und dass der Phasenwinkel δ_u der Spannung $\underline{U}$ dem Nullphasenwinkel des Bezugssystems entspricht ($\delta_u = \delta_1 = 0$).

Die Anlagen 1, 2 und 3 arbeiten hierbei arbeitsteilig: Die von der Anlage geforderte Leistung wird anteilig zu jeweils 1/3 erbracht. Im in folgender Abbildung dargestellten Beispiel speist Anlage 4 eine Wirkleistung von 142 kW ein und fordert eine Blindleistung von 142 kVar. Die Scheinleistung beträgt somit annähernd 200 kVA. Diese Leistung erbringen die drei Anlagen zu jeweils gleichen Anteilen der Wirkleistung und Scheinleistung.

Anlage 4 senkt zur Einbringung des geforderten Blindstroms die Amplitude $\underline{U}_4$ der Anlagenspannung 4. Die Spannung $\underline{U}_4$ eilt der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt voraus, da eingespeist wird. Somit ist der Phasenwinkel δ_4 in Bezug auf die Spannung am Anschlusspunkt größer als Null ($\delta_4 = 66,3 \text{ Grad}$). Die Amplituden der Anlagenspannungen $\underline{U}_1$, $\underline{U}_2$ und $\underline{U}_3$ fallen größer aus als die Nennspannung, um die von Anlage 4 geforderte Blindleistung bereitzustellen (unter der Bedingung $\underline{U} = 1 \text{ pu}$). Die Phasenwin-

kel der Anlagen 1, 2 und 3 eilen der Spannung am Anschlusspunkt nach (δ_1 , δ_2 und $\delta_3 > 0$), um die von Anlage 4 eingespeiste Leistung aufzunehmen.

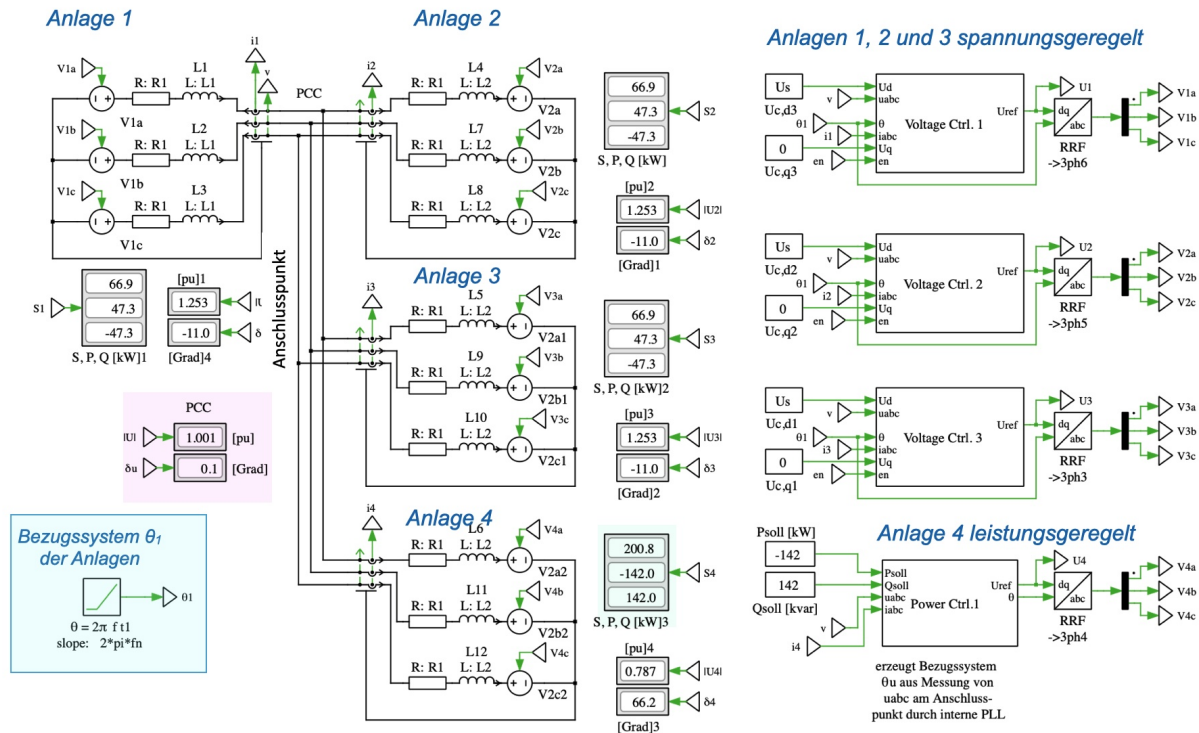


Abbildung 1.4.8 Spannungsgeregelte Anlagen 1, 2 und 3 an leistungsgeregelter Anlage 4

Bezugspunkt für Ströme und Spannungen ist nun der Anschlusspunkt der Anlagen. Die hier gemessene Spannung gilt für alle Anlagen. Die Anlagenströme sind individuell.

Dennoch bleibt das Bezugssystem für die Phasenwinkel das System $\theta(t) = \theta_1(t)$. Dieses System wird von allen Anlagen verwendet: Die spannunggeführten Anlagen 1, 2 und 3 transformieren die Zeitsignale der Spannung am Anschlusspunkt und den individuellen Anlagenstrom mit diesem System von Zeitbereich in den Bildbereich. Mit dem gleichen System wird die Referenzspannung für die Anlagen-spannung in den Zeitbereich zurücktransformiert.

Anlage 4 misst für die Ausrichtung des Anlagenstroms an der Phase der Spannung am Anschlusspunkt aus dieser Spannung (mit Hilfe einer Phasenregelschleife, PLL) das Bezugssystem $\theta_u(t)$. Die Spannung am Anschlusspunkt und der Anlagenstrom werden mit Hilfe dieses Systems in den Bildbereich transformiert, da die Sollvorgaben für den Wirkanteil und den Blindanteil des Stroms in Bezug auf die Phase der Spannung am Anschlusspunkt erfolgen. Die Referenzspannung der Anlage 4 wird mit dem Bezugssystem $\theta_u(t)$ in den Zeitbereich zurücktransformiert, die Anlagenspannung $\underline{U}_4$ somit relativ zur Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt ausgerichtet.

Auf diese Weise werden alle Anlagen synchron betrieben in dem Sinne, dass alle Anlagen ein gemeinsames Bezugssystem für die Phasenwinkel kennen. Bei Synchronmaschinen ist das Bezugssystem durch das Rotorsystem vorgegeben, das bei Änderungen der Phase am Anschlusspunkt (bedingt durch seine Trägheit) seine Phasenlage beibehält. Bei Konvertern kann ein Bezugssystem aus synchronen Uhren abgeleitet werden.

Die stromgeführte bzw. leistungsgeregelte Anlage 4 synchronisiert sich selber mit Hilfe der Phasenregelschleife auf die Spannung im Netz auf: Sie arbeitet netzfolgend. Die Anlagenspannung wird relativ zur gemessenen Spannung am Anschlusspunkt geführt. Zur Führung dieser Anlage muss die Span-

nung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt verfügbar sein. Speziell bei Unterspannung bzw. beim Durchfahren von Fehlerzuständen mit Unterspannung (engl. low voltage fault ride through) stellt die Rekonstruktion der Phase eine Herausforderung dar, wenn die Anlage die Spannung am Anschlusspunkt durch Blindströme stützen soll, und hierbei die Anlage die Spannung am Anschlusspunkt selber maßgeblich bestimmt. Für diesen Fall ist ein fester Phasenbezug erforderlich (beispielsweise durch ein „Einfrieren“ des Phasenbezugs vor dem Fehler bis zum Ende des Fehlers).

Bemerkung: Der Parallelbetrieb spannungsgeregelter Anlagen funktioniert nur ohne Kreisströme, wenn alle Anlagenspannungen $\underline{U}_i$ exakt gleich sind. Im Leerlaufbetrieb (ohne Laststrom) ist das Netz dann stromlos. Wird ein Laststrom gefordert, verhalten sich die Beiträge der Anlagen zum Strom umgekehrt proportional zu den Impedanzen der Anlagen. Bei gleichen Impedanzen sind alle Zweigströme (= Ströme der Anlagen) gleich, die Spannungsregler führen die Anlagenspannungen im besten Fall auf die gleiche Anlagenspannung. Aus der Forderung $\underline{U} = 1$ pu für die Spannung am Anschlusspunkt folgt jedoch kein stabiler Arbeitspunkt für die Regler, da diese Bedingung auch mit Kreisströmen eingehalten werden kann.

1.5. Synchronisation der Anlagen

Für eine definierte Phasenlage der Anlagen untereinander ist ein synchroner Betrieb erforderlich. Stromgeführte Anlage können sich auf die Spannung am Anschlusspunkt synchronisieren und folgen somit dem Netz. Für spannungsgeführte Anlagen scheidet diese Möglichkeit aus, da diese ja die Spannung bereitstellen sollen.

Frage 1.5.1: Frequenz und Phasenlage. Welchem Einfluss haben Abweichungen der Frequenz einer Anlage auf die Phasenlage gegenüber den anderen Anlagen?

Lösung: Die Phase $\theta_i(t)$ einer Anlage i ist das Zeitintegral über der Anlagenfrequenz $f_i(t)$, wobei $\theta_{i,0}$ den initialen Phasenwinkel (oder Nullphasenwinkel) bezeichnet.

$$\theta_i(t) = 2\pi \int_0^t f_i(\tau) \cdot d\tau + \theta_{i,0} \quad (1.5.1)$$

Eine Frequenzabweichung von 0,1 Hz bedeutet über die Dauer $T = 20$ ms einer Periode für eine Netzfrequenz von 50 Hz somit eine Abweichung von $2\pi \cdot 0,1 \text{ s}^{-1} \cdot 20 \text{ ms} = 4\pi / 1000 = 0,72$ Grad. Die Abweichung der Phase vergrößert sich mit jeder Periode: Über eine Dauer von 20 Perioden oder 0,4 s beträgt die Abweichung 14,4 Grad. Ein geordneter Betrieb der Anlagen ist unter diesen Bedingungen nicht realisierbar, wie folgendes Beispiel zeigt.

Im Beispiel bleibt Anlage 1 bei 50 Hz, Anlage 2 fährt mit 49,9 Herz und Anlage 3 mit 50,1 Hz. Anlage 4 bleibt stromgeführt und synchronisiert sich auf die Phasenlage der Spannung am Anschlusspunkt auf. Jede Anlage arbeitet mit ihrem eigenen Bezugssystem: Anlage 1 mit $\theta_1(t)$, Anlage 2 mit $\theta_2(t)$, und Anlage 3 mit $\theta_3(t)$. In ihrem jeweiligen Bezugssystem sind die Phasenwinkel der Anlagen 1 bis 3 gleich null, wie in die Anzeigen der Abbildung dargestellt. Auch eine Anlage, die mit 60 Hertz betrieben würde, hätte ihren konstanten Phasenwinkel.

Untereinander driften die Anlagen 2 und 3 aber gegenläufig vom Bezugssystem $\theta_1(t)$ weg: Anlage 2 ist langsamer und vergrößert ihren Phasenwinkel nacheilend; Anlage 3 läuft schneller und vergrößert ihren Phasenwinkel voreilend. Die im Oszillogramm rechts in der Abbildung dargestellten Phasenwinkel wurden relativ zum Bezugssystem berechnet und zeigen diese Drift über einen Zeitraum von 0,8 s.

Über diesen Zeitraum wachsen die Abweichungen der Anlagen 2 und 3 auf mehr als 30 Grad. Das äußert sich in der Leistungsbilanz: Im synchronen Betrieb sollten die Anlagen 1, 2 und 3 die geforderte Leistung von 150 kW der Anlage 4 zu gleichen Anteilen erbringen. Anlage 2 wechselt zum Ende der

Simulationsdauer von 0,8 s in den Betrieb als Bezugsanlage. Umgekehrt eilt Anlage 3 soweit vor, dass sie den größten Teil der geforderten Leistung der Anlagen 4 und 2 erbringt.

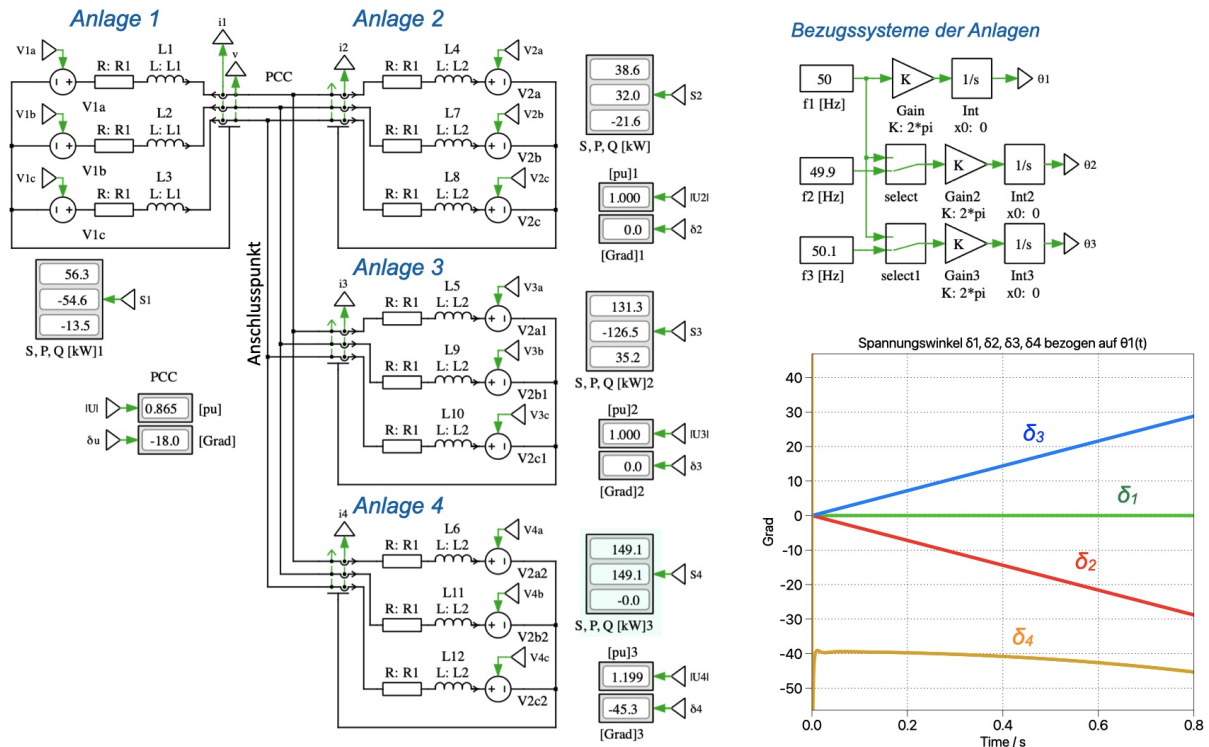


Abbildung 1.5.1 Drift der Phasenwinkel durch Frequenzabweichungen

In diesem Beispiel werden die Anlagen 1, 2 und 3 ohne Regler betrieben. Ein Regler mit dem Ziel, die Spannung am Anschlagpunkt zu halten, würde die Situation erheblich verschlechtern, da er keinen Einfluss auf die Frequenz der Anlagen hat und die Phasenlage daher nicht dauerhaft korrigieren kann.

Frage 1.5.2: Synchronisation durch synchrone Uhren. Was wäre der Effekt einer nicht synchron laufenden Anlage im Netz? Welche Genauigkeit wäre für eine Synchronisation der Anlagen durch synchrone Uhren in den Anlagen gefordert?

Lösung: Eine nicht synchron laufende Anlage verändert wegen Gleichung (1.5.1) kontinuierlich ihren Phasenwinkel im Verhältnis zu den anderen Anlagen im Netz.

In der Abbildung läuft Anlage 3 ohne Regler mit der Frequenz $f_3 = 50,2$ Hz. Die Anlagen 1 und 2 sind spannungsgeregelt und werden mit $f_1 = f_2 = 50$ Hz betrieben. Anlage 4 ist stromgeführt, hier jedoch nicht in Aktion ($P_4 = Q_4 = 0$). Durch die konstante Frequenzabweichung ändert sich für die Anlage 3 kontinuierlich der Phasenwinkel in Bezug auf die Anlagen 1 und 2.

Die Anlage durchfährt somit periodisch den gesamten Bereich über 360 Grad. Somit durchfährt die Anlage alle 4 Quadranten ihres Betriebsbereiches, wie das Q(P)-Diagramm der Anlage zeigt. Da die Anlage schneller als das Netz läuft, eilt sie zum Startzeitpunkt der Simulation vor und speist Wirkleistung ein ($P < 0$); sie durchläuft die Quadranten im Uhrzeigersinn.

Eine Anlage, die langsamer läuft, beispielsweise mit 49,8 Hz, zeigt das gleiche Verhalten, durchläuft jedoch das Q(P)-Diagramm in umgekehrter Richtung: Da sie langsamer läuft als das Netz, eilt sie zunächst nach und bezieht Wirkleistung ($P > 0$). Der Phasenwinkel relativ zu den Anlagen im Netz sinkt sich im Laufe der Zeit kontinuierlich.

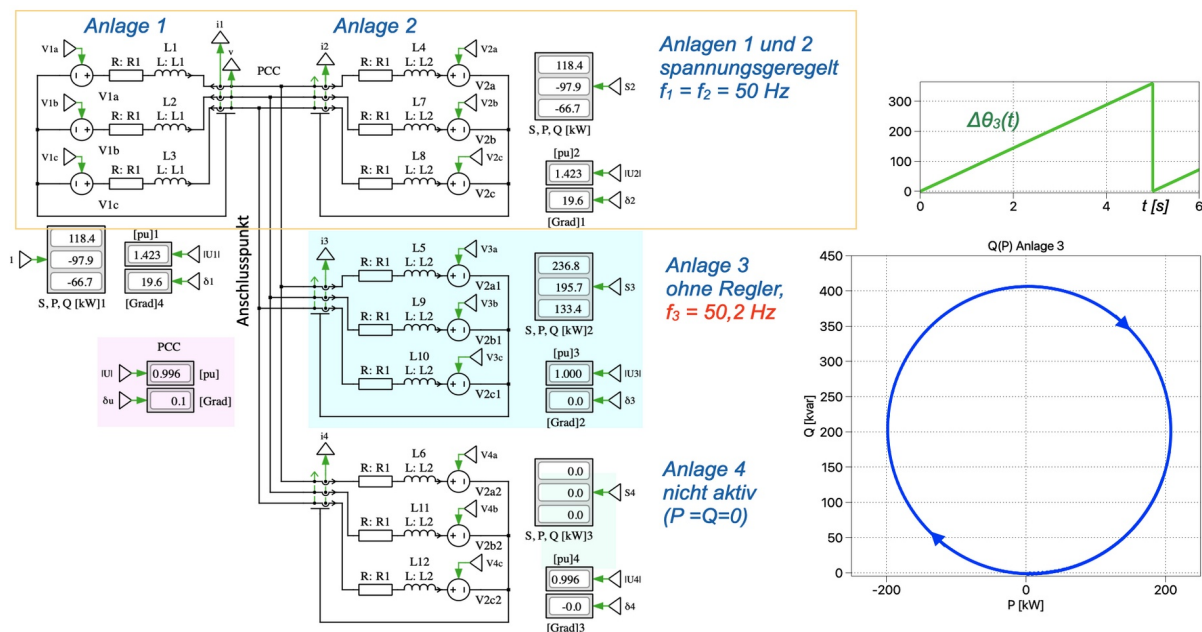


Abbildung 1.5.2 Anlage 3 läuft mit unterschiedlicher Frequenz

Für den Phasenwinkel $\Delta\theta_3(t) = \theta_3(t) - \theta_1(t)$ erhält man aus der die Frequenzabweichung Δf

$$\Delta\theta_i(t) = 2\pi \int_0^t \Delta f(\tau) \cdot d\tau + \theta_0$$

Bei einer Frequenzabweichung von 0,2 Hz und einer Nennfrequenz von 50 Hz braucht es 250 Perioden, bis der Winkelbereich von 360 Grad durchlaufen ist (50 Hz/0,2 Hz). Das ist nach einer Dauer von $250 \cdot 20 \text{ ms} = 5 \text{ s}$ der Fall.

Wenn man Quarzuhren mit einer Ganggenauigkeit 1 s pro Tag verwendet, wird die Periodendauer von 20 ms am Tag 50 mal durchlaufen. Pro Tag kumuliert sich die Phasenänderung auf $50 \cdot 2\pi$. Die Phase ändert sich pro Sekunde somit um $50 \cdot 2\pi / (24 \cdot 60 \cdot 60) \text{ s} \approx 1,2 \cdot 10^{-3} \pi/\text{s} \approx 0,13 \text{ Grad/s}$.

Die Abweichung der Uhr lässt sich bezogen auf den Tag zu $1 \text{ s} / (24 \cdot 60 \cdot 60) \text{ s} \approx 1,2 \cdot 10^{-5} = 12 \text{ ppm}$ berechnen. Bezogen auf eine Frequenz von 50 Hz bedeutet dieser Gangunterschied somit eine Abweichung von 0,6 mHz. Durch gelegentlichen Uhrenvergleich (mit Hilfe eines geeigneten Kommunikationsprotokolls wie z.B. PTP, Precision Time Protocol) lässt sich der Gangunterschied begrenzen. Über die Dauer einer Minute ist bei 0,6 mHz mit einer Phasendifferenz von etwa 0,6 Grad zu rechnen.

Frage 1.5.3: Eigene Bezugssysteme der Anlagen. Bisher wird davon ausgegangen, dass sich die Anlagen extern synchronisieren lassen. In einem Stromnetz muss man davon ausgehen, dass die Netzfrequenz schwankt. Wie ließen sich mit Hilfe der Anlagenströme die Frequenzen der Anlagen 2 und 3 automatisch auf die Netzfrequenz einstellen? Welche Rolle spielt die Frequenz der Anlagen für die Anlagenströme? Untersuchen Sie ihre Lösung in der Simulation. Hinweis: Trennen Sie die Regelung der Spannungsamplitude vom Wirkstrom der Anlage.

Lösung: (1) Spannungsregelung: Der Phasenwinkel der Spannung am Anschlusspunkt ist nur relativ zum Spannungswinkel der Quellspannungen relevant; sein Absolutwert lässt sich nur relativ zu einer ausgewählten Bezugsspannung ermitteln. Abbildung 1.2.3 zeigt den Spannungswinkel δ_u in unterschiedlichen Bezugssystemen. Relevant sind nur die individuellen Spannungswinkel δ_i zwischen der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt zu den Quellspannungen $\underline{U}_i$ der Anlagen.

Daher kann man die Spannungsregelung auf die Spannungsamplitude $|\underline{U}| = U$ beschränken. Folgende Abbildung zeigt den Anlagenregler mit dem Spannungsregler. Hierbei wurde ein Bezugssystem mit Nullphasenwinkel $\delta_0 = 0$ gewählt, es gilt $|\underline{U}| = U = U_d$. Die Spannung wird durch einen I-Regler gestellt mit Vorsteuerung $U = U_{\text{soll}}$.

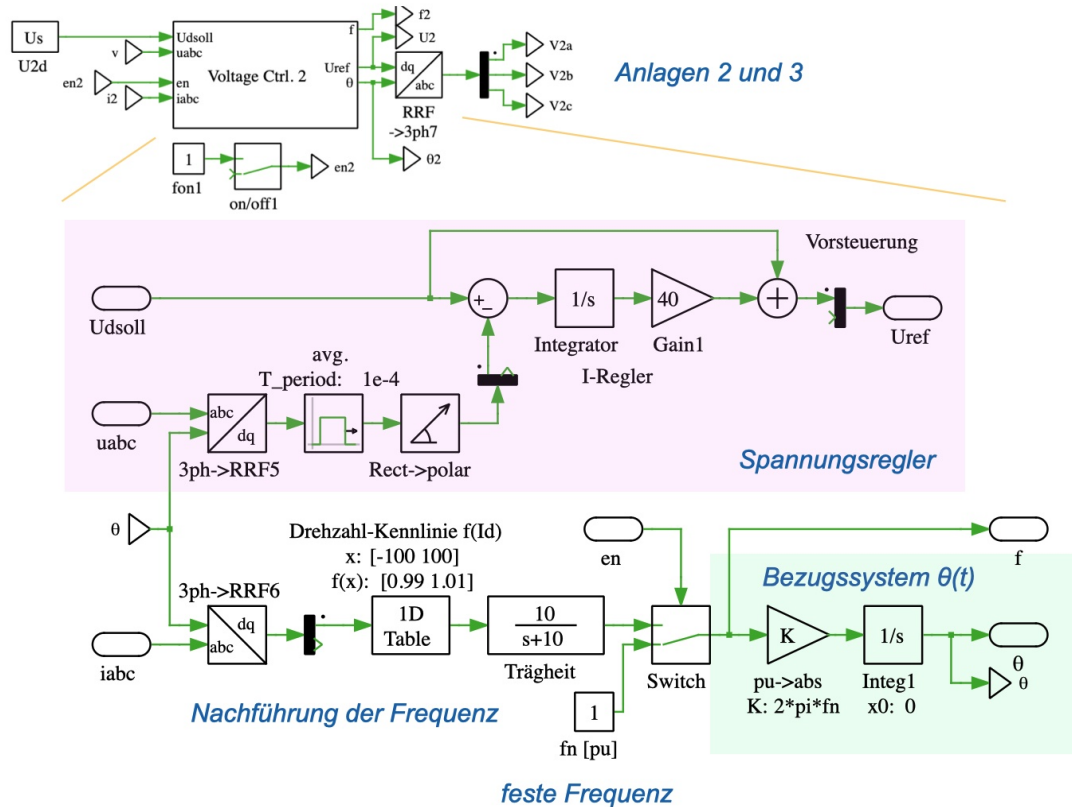


Abbildung 1.5.3 Spannungsregler mit fester oder variabler Frequenz

Die Frequenz der Anlage lässt sich wahlweise auf den Sollwert fixieren oder durch einen Regler abhängig vom Wirkstrom I_d der Anlage stellen. Das Bezugssystem $\theta(t)$ der Anlage folgt aus der Anlagenfrequenz. Mit Hilfe des Spannungsreglers bleibt die Spannung am Anschlusspunkt auf dem Nennwert. Im Betrieb unabhängig vom Netz (Anlage 1) teilen sich die Anlagen 2 und 3 die geforderte Leistung der Anlage 4 zu gleichen Teilen auf, da beide Anlagen die gleichen Koppelinduktivitäten besitzen.

Folgende Abbildung zeigt den Betrieb der Anlagen nach einer Forderung von 100 kW Wirkleistung durch Anlage 4. Die Wirkleistung wird linear ansteigend über einen Zeitraum von 100 ms eingefordert. Im Verlauf der Zeitsignale rechts neben der Abbildung erkennt man, dass die Ströme der Anlagen 2 und 3 den geforderten Wirkstrom zu gleichen Teilen bedienen.

Zusätzlich wurde aus der Spannung am Anschlusspunkt mit Hilfe einer Phasenregelschleife (PLL) die Frequenz am Anschlusspunkt ermittelt. Im Zeitverlauf rechts neben der Abbildung ist der Verlauf dieser Frequenz f_u zusammen mit den Frequenzen der beiden Anlagen 2 und 3 wiedergegeben. Während die beiden Anlagen 2 und 3 mit konstanter Frequenz weiterlaufen, ist die Frequenz durch die Lastforderung durchaus variabel.

Mit der Lastforderung ändert sich der Spannungswinkel δ_u zwischen der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt und den Quellspannungen $\underline{U}_2$ und $\underline{U}_3$ der Anlagen. Da der Strom linear über den oben genannten Zeitraum steigt, verläuft die Änderung der Frequenz f_u sprunghaft: Die Frequenz ist die zeitliche Ableitung des Spannungswinkels. Die Anlagenströme $\underline{I}_1$ und $\underline{I}_2$ sind eine Folge der Änderung der

Spannungswinkel. Daher lässt sich der Verlauf des Spannungswinkels am Stromanstieg im Zeitverlauf über der Frequenz ablesen. Da Anlage 4 eine positive Leistung fordert, sind die Ströme der Anlagen 2 und 4 negativ, und somit der Stromanstieg und die Änderung des Stromanstiegs negativ.

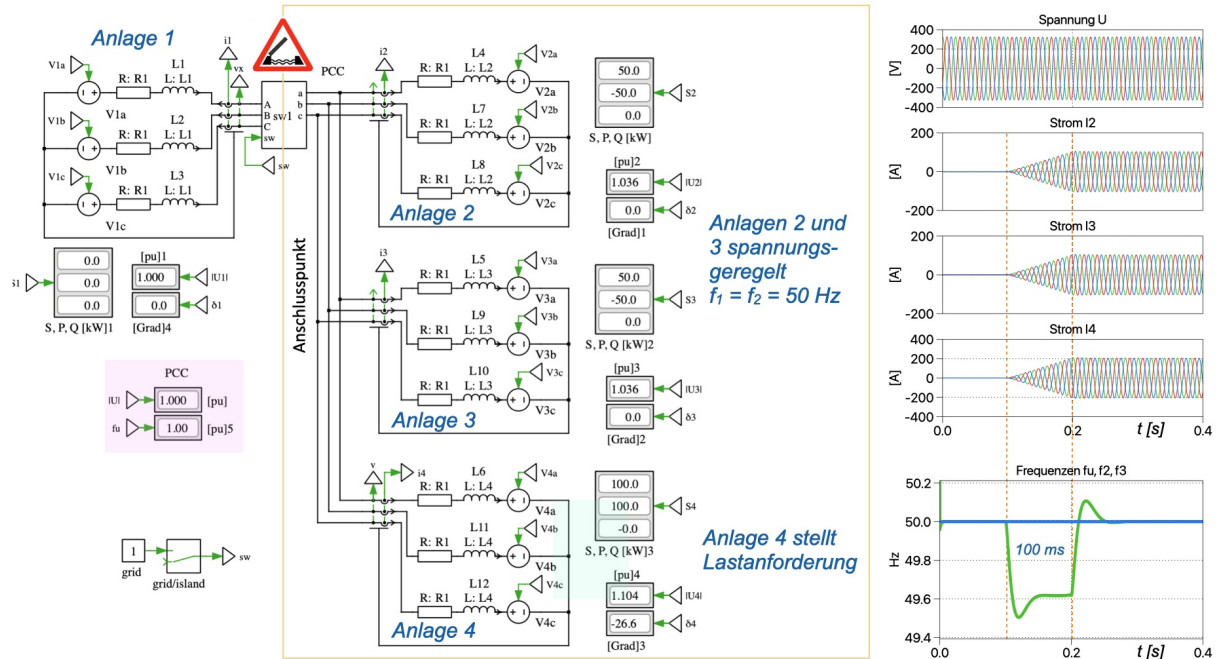


Abbildung 1.5.4 Spannungsregelung im Netz (Inselnetzbetrieb)

Folgende Abbildung zeigt den Verlauf der Frequenz f_u zusammen mit dem Spannungswinkel δ_u relativ zum Bezugssystem $\theta_2(t)$ der Anlage 2 im Detail.

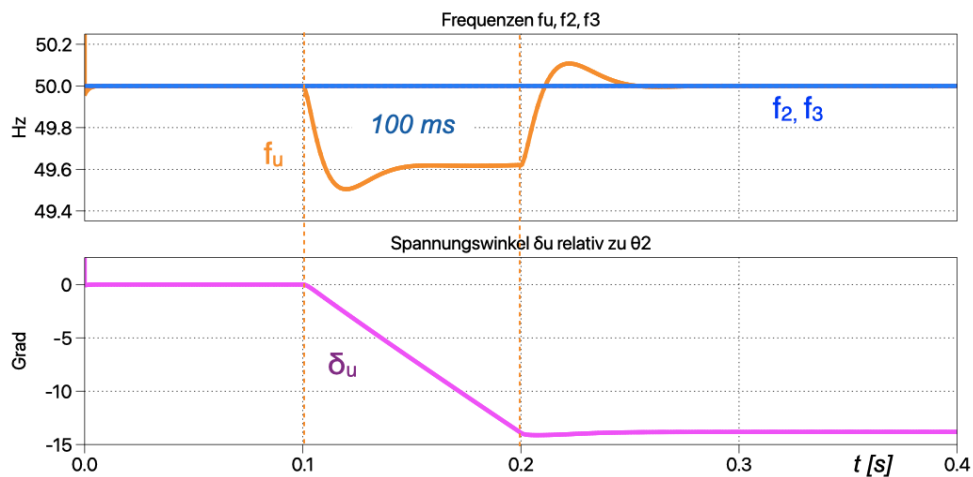


Abbildung 1.5.5 Frequenz und Spannungswinkel

Der Spannungswinkel δ_u ist negativ: Anlage 2 mit Spannungswinkel $\delta_2 = 0$ läuft somit vor der Spannung am Anschlusspunkt und gibt Leistung ab. Die Größe des Spannungswinkels relativ zur Anlage ist hierbei abhängig von der Größe der Koppelreaktanzen X_2 . Die Anlagen 2 und 3 besitzen gleich große Koppelreaktanzen $X_3 = X_2$, folglich sind die Beiträge zum Wirkstrom und zur Leistung gleich.

Um den Spannungswinkel zu definieren, sind die Bezugssysteme $\theta_2(t)$ und $\theta_3(t)$ der Anlagen 2 und 3 entscheidend: Nur durch die feste Frequenz $f_1 = f_2 = f_n$ ergeben sich Phasendifferenzen zum Anschlusspunkt. Würden die Anlagen sofort auf die Frequenz am Anschlusspunkt synchronisieren, ginge

der Phasenbezug verloren und die Anlagewinkel δ_2 und δ_3 würden dem Winkel δ_u unmittelbar folgen. Eine Synchronisation der Anlagenfrequenzen f_2 und f_3 auf die Netzfrequenz muss daher langsam erfolgen und ist mit dem Verlust der Leistungsabgabe verbunden.

(2) Synchronisation der Frequenz durch den Wirkstrom: der untere Teil des Reglers der Anlagen 2 und 3 aus Abbildung erlaubt wahlweise eine feste Vorgabe der Anlagenfrequenz, bzw. eine variable Vorgabe mit Hilfe einer Kennlinie $f(I_d)$. Diese variable Vorgabe passt die Frequenz der Anlage mit dem Anlagenstrom an.

Damit diese Anpassung nicht sofort erfolgt, wird mit Hilfe einer Übertragungsfunktion eine Reaktionszeit eingeführt: Die Zeitkonstante entspricht der umgekehrten Grenzfrequenz der Übertragungsfunktion. Bei einer Grenzfrequenz von $f_g = 10$ Hz beträgt die Zeitkonstante $T_g = 0,1$ s. Diese Zeitkonstante lässt sich als Trägheit interpretieren.

Folgende Abbildung zeigt den Verlauf von Frequenz und Spannungswinkel für den Betrieb beider Anlagen mit der variablen Frequenz im Inselbetrieb.

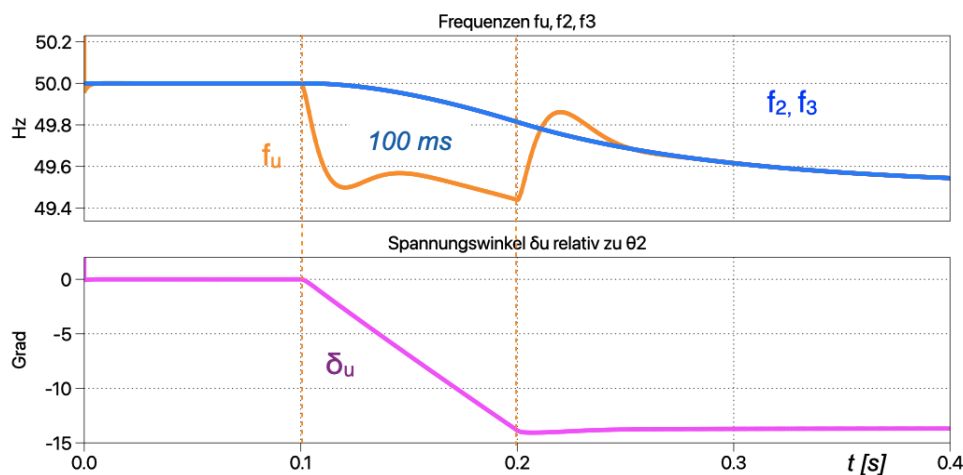


Abbildung 1.5.6 Inselbetrieb der Anlagen 2 und 3 mit variabler Frequenz

Man erkennt, dass die beiden Anlagen mit der Abgabe von Wirkstrom ihre Frequenz allmählich (mit der genannten Zeitkonstante) verringern. Die Frequenz am Anschlusspunkt folgt der der Anlagenfrequenz, da die Anlagen im Inselnetzbetrieb getrennt vom Netz (Anlage 1) sind.

Auf die Leistungsbeiträge beider Anlagen hat die Frequenzänderung keinen Einfluss: Die stromgeführte Anlage 4 synchronisiert sich mit ihrer Phasenregelschleife (PLL) auf die Frequenz am Anschlusspunkt auf. Die Spannungswinkel und Koppelreaktanzen beider Anlagen bleiben gleich.

Betrieibt man beide Anlagen mit der variablen Frequenz am Netz, so ergibt sich das in folgender Abbildung dargestellte Bild. Im Netz ist hierbei keine Spannungsregelung aktiv: Die Quellenspannung U_1 wird mit konstanter Frequenz und konstanter Amplitude geführt.

Man erkennt, dass der Spannungswinkel δ_u nun kleiner ausfällt, da sich insgesamt 3 Anlagen die Leistungsanforderung aufteilen (Anlage 1, 2 und 3). Wegen der folglich kleineren Strombeiträge der Anlagen 2 und 3 fällt auch deren Frequenzänderung mit der Lastanforderung etwas geringer aus.

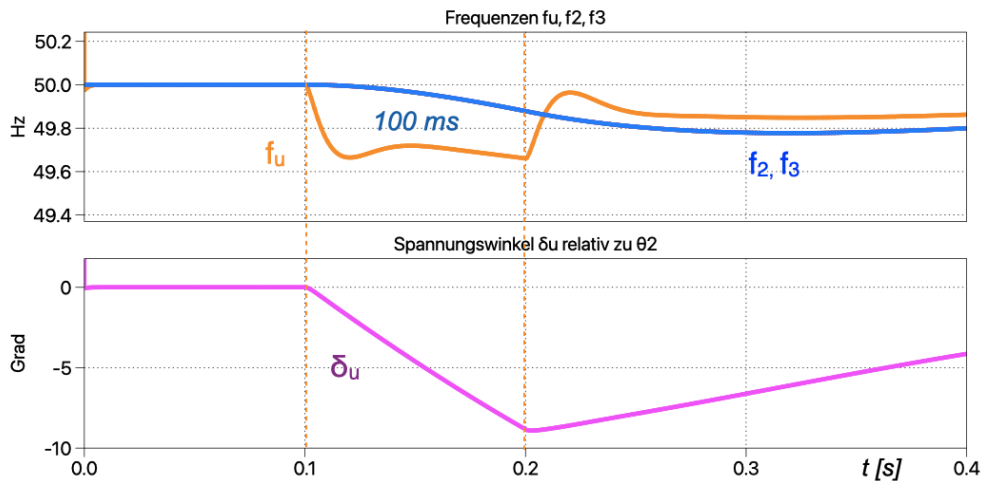


Abbildung 1.5.7 Frequenz und Spannungswinkel bei Betrieb der Anlagen 2 und 3 am Netz

Der entscheidende Unterschied ist jedoch, dass die Frequenzen f_2 und f_3 der Anlagen 2 und 3 sich nun mit der Zeit an die Frequenz der Anlage 1 angleichen: Die Anlagen 2 und 3 synchronisieren ihre Frequenzen langsam auf die starre Netzfrequenz auf. Somit wäre das Ziel der Synchronisation mit Hilfe des Wirkstroms erreicht.

Der Verlauf des Spannungswinkels δ_u zeigt aber auch, dass diese Synchronisation mit dem Verlust des Leistungsbeitrags beider Anlagen verbunden ist, da die Synchronität der Frequenz mit synchronen Phasenlagen verbunden ist: Sobald die Anlagen phasensynchron mit dem Netz laufen, ist der Spannungswinkel $\delta_u = 0$. Folglich übernimmt das Netz im Lauf der Zeit die Anlagenleistung vollständig.

Durch Vergrößern der Zeitkonstante T_g lässt sich die Dauer der Synchronisation in die Länge ziehen und Frequenz und Spannungswinkel somit länger voneinander entkoppelt, um den Leistungsbeitrag länger zu erhalten. Auf Dauer wird die Anlagenfrequenz der starren Vorgabe von Anlage 1 jedoch folgen. Diese Eigenschaft ist Ziel der Synchronisation.

Folgende Abbildung zeigt den gleichen Vorgang über eine längere Dauer zusammen mit den Leistungsbeiträgen der Anlagen. Anlage 4 fordert zum Zeitpunkt $t_1 = 0,1\text{s}$ den Bezug von $P_4 = 100\text{ kW}$. Das Netz als Anlage 1 besitzt die gleiche Koppelrealanz wie die Anlagen 2 und 3. Daher fallen die initialen Leistungsbeiträge aller Anlagen gleich aus: Die geforderte Leistung wird durch alle drei Anlagen erbracht.

Im Verlauf der Synchronisation der Frequenz der Anlagen 2 und 3 auf die starre Frequenz der Anlage 1 geht der Spannungswinkel relativ zu den Anlagen 2 und 3 verloren und es schwinden die Leistungsbeiträge der Anlagen. Da Anlage 1 die Frequenz starr vorgibt und Anlagen 2 und 3 der Vorgabe folgen, übernimmt Anlage 1 auch die Leistung.

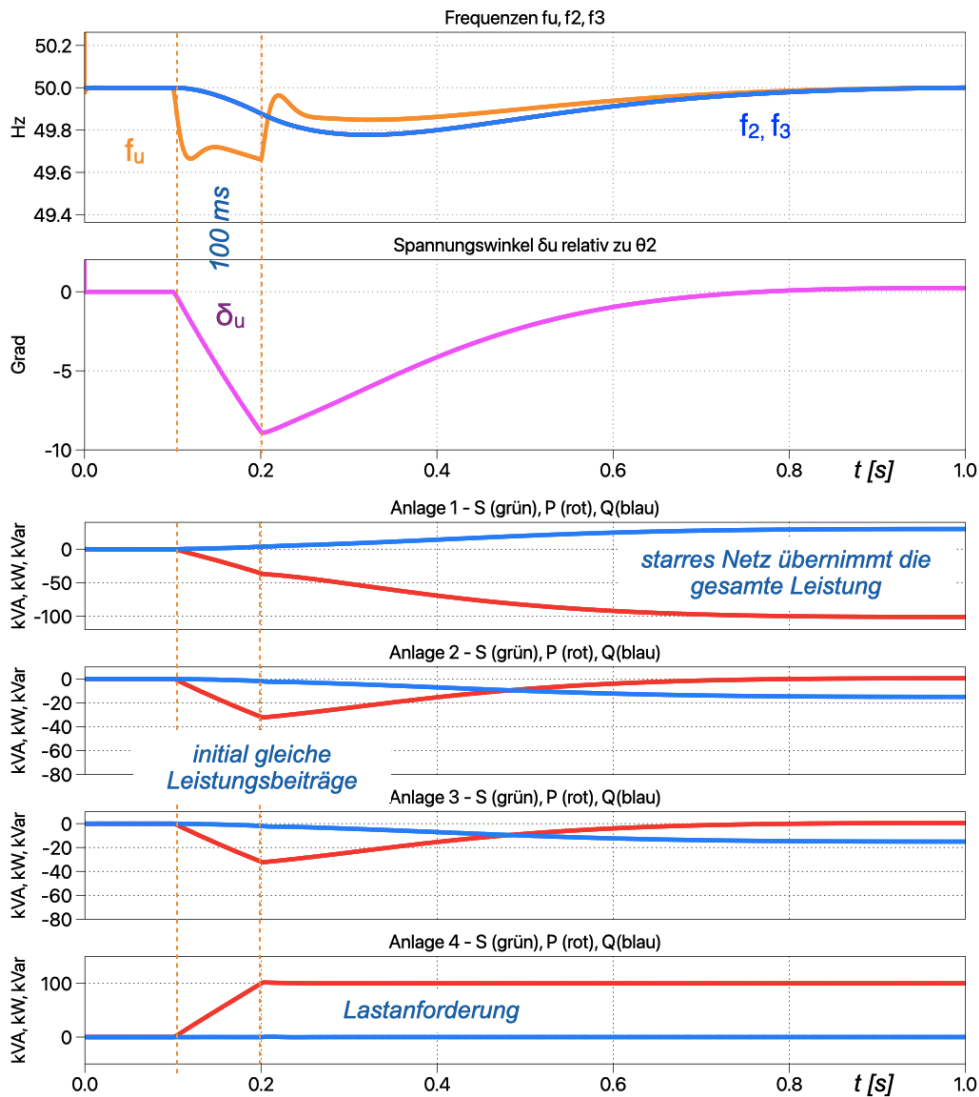


Abbildung 1.5.8 Leistungsbeiträge im Verlauf der Synchronisation mit dem Netz

Um die Leistungsbeiträge der Anlagen anzupassen, wären somit Vorgaben der Leistung unabhängig vom Spannungswinkel erforderlich. Als Alternative käme der Betrieb an einem ebenfalls in der Frequenz variablen Netz in Frage: In diesem Fall würde sich das Netz als Anlage 1 ähnlich wie die Anlagen 2 und 3 verhalten und sich gemäß ihrer Frequenzkennlinie dauerhaft an der Leistung beteigen.

Frage 1.5.4: Lastaufteilung mit Frequenzkennlinie. Im Spannungs- und Frequenzregler der Anlagen aus der letzten Aufgabe verbleibt der Leistungsbeitrag der Anlagen definiert durch die Größe der Koppelreaktanzen der Anlagen: Die Ströme teilen sich im umgekehrten Verhältnis der Koppelreaktanzen auf. Eine Anlage mit großer Koppelreaktanz leistet einen geringeren Beitrag zur Gesamtleistung. Untersuchen Sie, wie sich die Kennlinie $f(I_d)$ zur Festlegung der Leistungsbeiträge verwenden lässt. Welche Verhältnisse ergeben sich, wenn das Netz (Anlage 1) ebenfalls eine Frequenz-Kennlinie besitzt?

Lösung: Anlage 3 besitzt eine doppelt so große Koppelreaktanz wie Anlage 2: $X_3 = 2 X_2$.

(1) Betrieb mit gleichen Frequenz-Kennlinien $f(I_d)$: Beide Anlagen werden im Inselnetzbetrieb mit gleichen Kennlinien $f(I_d)$ geführt. Im eingeschwungenen Zustand darf man erwarten, dass bei gleicher Frequenz beide Anlagenströme gleich sind und somit die Leistungsanteile auf Dauer gleich ausfallen werden. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf.

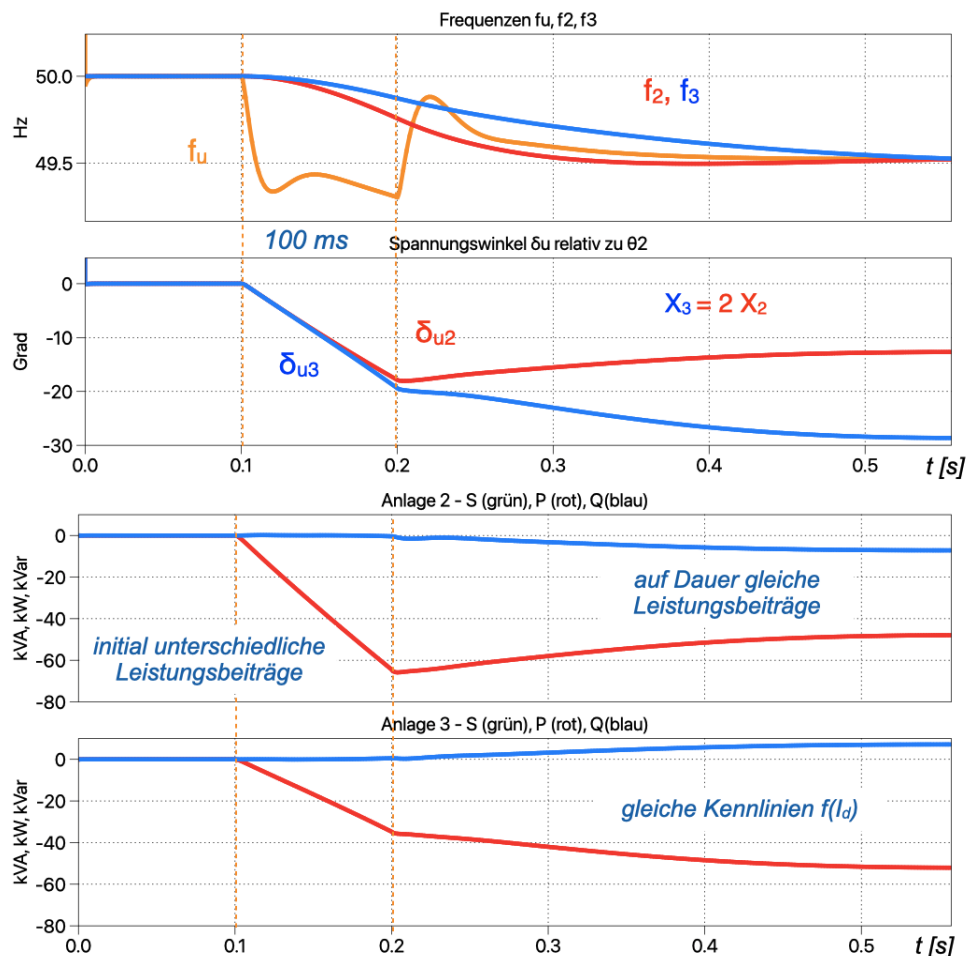


Abbildung 1.5.9 Inselnetzbetrieb mit unterschiedlichen Koppelreaktanzen und gleichen Kennlinien

Zu Beginn der Lastanforderung setzt sich der Laststrom gemäß der Verhältnisse der Koppelreaktanzen zu 2/3 aus dem Strom der Anlage 2 und zu 1/3 aus Strom der Anlage 3 zusammen. Somit fällt der initiale Leistungsbeitrag der Anlage 2 doppelt so groß aus wie der von Anlage 3.

(2) Betrieb mit unterschiedlichen Frequenz-Kennlinie $f(I_d)$:

Passt man die Steigung der Kennlinie von Anlage 3 an die Verhältnisse der Reaktanzen an, z.B. von den Eckpunkten $x = \{-100, 100\}$, $y = \{0,99, 1,01\}$ auf die Eckpunkte $x = \{-50, 50\}$, $y = \{0,99, 1,01\}$, so fallen auch die Leistungsbeiträge auf Dauer aus die die initialen Beiträge, da das Verhältnis der Anlagenströme nun dem Verhältnis der Reaktanzen entspricht.

Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf. Trotz unterschiedlicher Reaktanzen fallen nun die Frequenzen und Spannungswinkel beider Anlagen gleich aus. Da die Ströme jedoch unterschiedlich sind (Anlage 2 führt den doppelten Strom wie Anlage 3), fallen die Leistungsbeiträge unterschiedlich aus: Anlage 2 trägt 2/3 der Gesamtleistung.

Für die Leistungsbeiträge gilt dies im initialen Fall und auf Dauer, da der initiale Strom und der durch die Kennlinie im eingeschwungenen Zustand geführte Strom dem Verhältnis der Koppelreaktanzen entspricht. Den Leistungsbeitrag einer Anlage auf Dauer bestimmt die Steigung der Frequenz-Kennlinie. Je flacher die Kennlinie $f(I_d)$ ausfällt, desto höher ist der Strom bei einer gegebenen Frequenz.

Die Nennfrequenz erreichen die Anlagen in dieser Betriebsart nur im Leerlauf. Eine Frequenz unterhalb der Nennfrequenz ist ein Indikator für den Bezug einer Leistung aus dem Inselnetz. Umgekehrt wäre eine Frequenz oberhalb der Nennfrequenz ein Indikator für eine Einspeisung ins Netz.

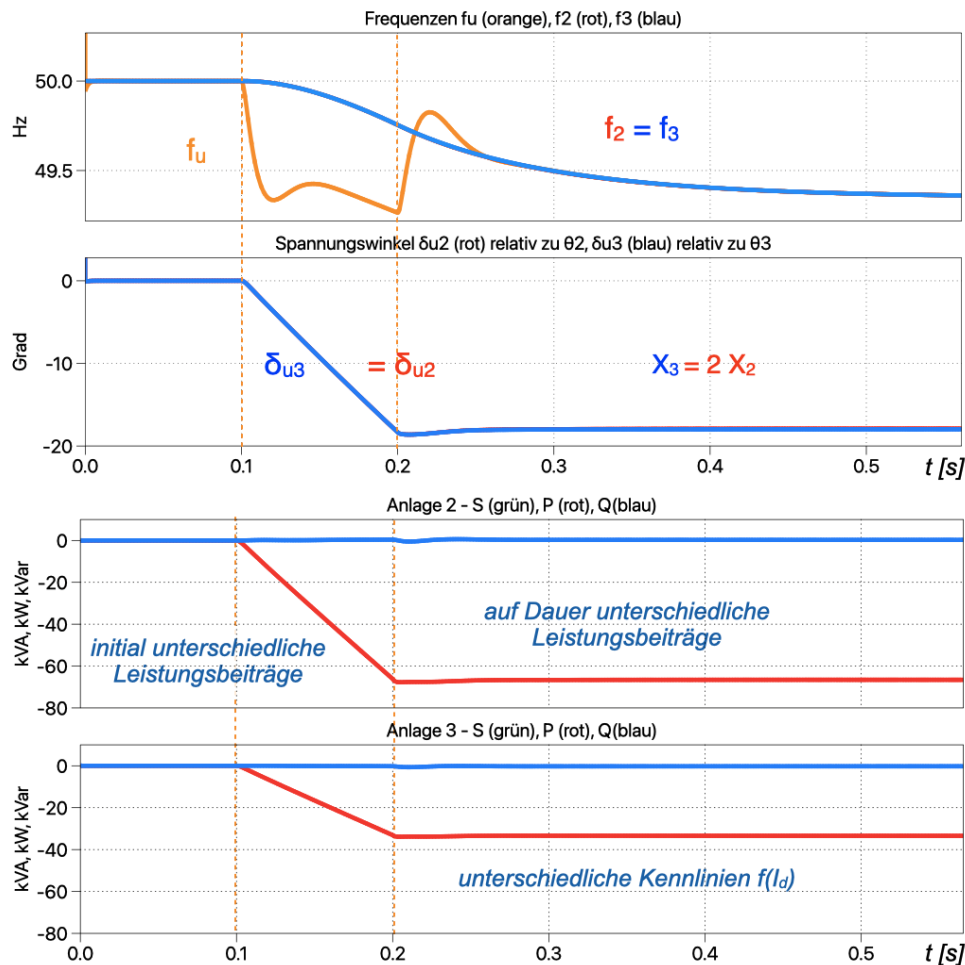


Abbildung 1.5.10 Inselnetzbetrieb mit unterschiedlichen Koppelreaktanzen und unterschiedlichen Frequenz-Kennlinien

(3) Betrieb an einem Netz mit Frequenz-Kennlinie: Betreibt man Anlage 1 als Netz ebenfalls mit einer Frequenz-Kennlinie, so lassen sich die Verhältnisse aus dem Inselnetz auf das gesamte Netz übertragen. Die Nennfrequenz im Netz wird nur im Leerlauf erreicht. Der Beitrag des Netzes zur Leistung am Anschlusspunkt ist abhängig von der Steigung der für das Netz definierten Kennlinie.

1.6. Stabiler Betrieb der Anlagen

Der parallele Betrieb von Spannungsquellen ist mit unerwünschten Kreisströmen verbunden, die nicht im Widerspruch mit dem Ziel der Regelung stehen: Einer Spannung mit festgelegter Amplitude und festgelegter Phasenlage am Anschlusspunkt der Anlagen. Diese Kreisströme sind dem am Anschlusspunkt geforderten Laststrom überlagert und lassen sich durch die Lastanforderung somit nicht fixieren. Für stromgeführte Anlagen gilt diese Einschränkung nicht: Hier werden die Zweigströme ja vorgegeben und sind daher auch als Kreisströme erwünscht. An einem Anschlusspunkt lassen sich beliebig viele stromgeführte Anlagen anschließen, deren Zweigströme sich addieren. Im Sinne der Stabilität kritisch sind parallele Spannungsquellen.

Im synchronen Betrieb spannungsgeregelter Anlagen führt ein am Anschlusspunkt geforderter Laststrom wegen der induktiven Kopplung der Quellspannungen zu einer Änderung der Phasenlage der Spannungswinkel zwischen den Quellspannungen und der Spannung am Anschlusspunkt der An-

lagen. Die Folge sind Wirkströme in den Anlagen, die im umgekehrten Verhältnis zu den Koppelreaktanzen der Anlagen stehen. Wegen der Koppelreaktanzen ist die Leistung der Anlagen begrenzt.

Bei Betrieb der Anlagen mit variabler Frequenz ist der variable Anteil der Frequenz mit Änderungen der Phasenlage der Spannung am Anschlusspunkt bezogen auf die Quellspannungen der Anlagen verbunden. Diese Spannungswinkel führen wegen der induktiven Kopplung der Quellspannungen zu Wirkströmen in den Anlagen.

Ein stabiles Verhalten der Anlagen wird dann erzielt, wenn (1) die Anlagen nicht überfordert werden, und (2) unerwünschte Kreisströme ausgeschlossen werden, beispielsweise durch Festlegung der Anlagenströme. Hierbei kann man die Kopplung der Frequenz mit der Phasenlage der Spannung am Anschlusspunkt relativ zu den Quellspannungen nutzen, da die Phasenlage mit dem Wirkstrom der Anlagen verbunden ist. Wegen der induktiven Kopplung der Quellspannungen besteht in einem Drehstromsystem ein Zusammenhang zwischen Wirkstrom und Spannungswinkel, sowie Blindstrom und Spannungsamplitude.

Frage 1.6.1: Regelung paralleler Spannungsquellen. Folgende Abbildung zeigt den vereinfachten Fall mit ohmschen Widerständen gekoppelter Spannungsquellen an einen gemeinsamen Anschlusspunkt. Am Anschlusspunkt wird ein Laststrom gefordert. Die Frequenz spielt hier keine Rolle: Die Anordnung bleibt auch bei Gleichspannung gültig. Ziel ist die Regelung der Spannung U am Anschlusspunkt auf eine feste Amplitude (sowie bei Wechselspannung zusätzlich auf eine feste Phasenlage). Wann ist dieses Ziel ohne unerwünschte Kreisströme erreichbar?

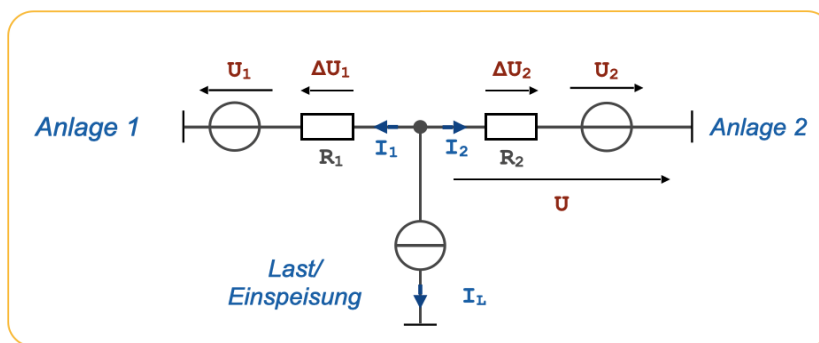


Abbildung 1.6.1 Spannungsregelung am Anschlusspunkt paralleler Spannungsquellen mit ohmscher Kopplung

Lösung: (1) Netz mit ohmscher Kopplung: Der Parallelbetrieb mehrerer Spannungsquellen ohne Kreisströme ist nur möglich, wenn folgende Bedingung erfüllt ist: Alle Quellenspannungen U_i sind gleich (bei Gleichstrom $U_i = U_j$). Andernfalls ergeben sich Kreisströme, mit deren Hilfe über den Koppelimpedanzen Z_i (bzw. R_i) mit Hilfe der Spannungen ΔU_i die Unterschiede ausgeglichen werden. Die Zweigströme verhalten sich im Betrieb ohne Kreisströme umgekehrt proportional zu dem Zweigimpedanzen (d.h. $I_i / I_j = Z_j / Z_i$).

Diese Festlegung der Quellspannungen fixiert auch den Spannungsregler: Dieser würde die Quellspannungen als Stellgröße verwenden wollen. Für einen Spannungsregler bleibt kein Spielraum, es sei denn, es werden alle Quellspannungen gleich behandelt (beispielsweise bei Last in gleicher Weise erhöht, um den Spannungsfall auszugleichen).

Der Laststrom teilt sich gemäß der Impedanzverhältnisse der Zweige auf. Somit bleiben die Beiträge der Anlagen zur gesamten Leistung durch die Impedanzen der Anlagen festgelegt.

(2) Netz mit induktiver Kopplung: Für das in folgender Abbildung dargestellte System mit induktiver Kopplung gilt:

$$\underline{U} = j X_1 I_1 + U_1 = j X_2 I_2 + U_2 \quad (1.6.1)$$

$$\underline{I}_L = -\underline{I}_1 - \underline{I}_2 \quad (1.6.2)$$

Ohne Laststrom ($\underline{I}_L = 0$) sind die Zweigströme $\underline{I}_1$ und $\underline{I}_2$ somit entgegengesetzt gleich: Sie bilden einen Kreisstrom. Nur für exakt gleiche Quellspannungen $\underline{U}_1 = \underline{U}_2$ ist die Anordnung frei von Kreisströmen. Da der Laststrom $\underline{I}_L$ sich überlagern lässt, gilt diese Aussage auch im allgemeinen Fall.

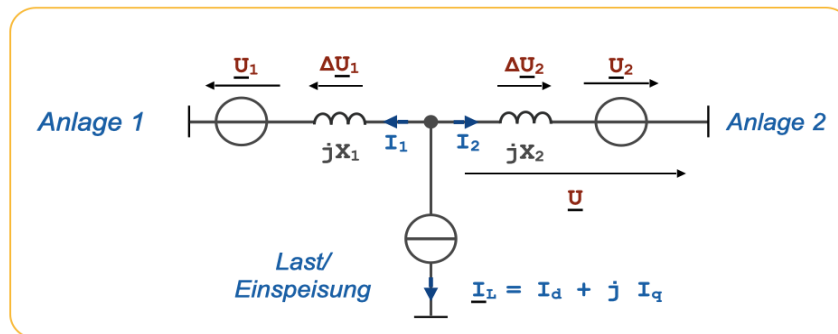


Abbildung 1.6.2 Spannungsregelung am Anschlusspunkt paralleler Spannungsquellen mit induktiver Kopplung

Für den Spannungsregler bleibt die Möglichkeit der Fixierung des Betrages der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt mit dem Preis induktiver Kreisströme: Über die Amplitude der Quellspannungen lässt sich die Amplitude der Spannung $\underline{U}$ auf diese Weise stellen.

Das funktioniert umso besser, wenn alle Quellspannungen gleich behandelt werden. Im Fall gleicher Quellspannungen gibt es keine Kreisströme.

Die Beiträge der Anlagen zum Laststrom teilen sich gemäß dem umgekehrten Verhältnis der Koppelreaktanzen auf. Das gilt für Wirkstrom und Blindstrom. Soll eine Anlage einen anderen Beitrag zum Wirkstrom leisten, als es dem Verhältnis der Koppelreaktanzen entspricht, ist dieser Beitrag mit Blindströmen als Kreisstrom verbunden. Für gleiche Beiträge zum Wirkstrom oder Blindstrom sind die Anlagen möglichst gleich auszuführen, d.h. mit möglichst gleichen Koppelreaktanzen.

Der Beitrag einer Anlage zum Wirkstrom lässt sich über die Phasenlage der Quellspannungen stellen. Auch hier gilt der Grundsatz der Gleichbehandlung aller Quellspannungen zur Vermeidung von Kreisströmen. Wenn möglich, wären Spannungsregler für Anlagen an einem gemeinsamen Anschlusspunkt für einen stabilen Betrieb bzgl. ihrer Stellgrößen miteinander zu synchronisieren.

Frage 1.6.2: Regelung der Spannungsamplitude. Individuell agierende Spannungsregler können das System in einen Arbeitspunkt mit unerwünschten Kreisströmen führen, bzw. das System destabilisieren, wenn sich kein Arbeitspunkt findet. Untersuchen Sie diesen Fall für ein System mit zwei spannungsgeführten Anlagen und einer Stromquelle, die einen Blindstrom anfordert. Wie lässt sich ein stabiler Arbeitspunkt ohne unerwünschte Kreisströme erreichen?

Lösung: Gleichung (1.6.1) lässt sich nach Realteil und Imaginärteil trennen in

$$\underline{U}_d = X_1 \underline{I}_{1q} + \underline{U}_{1d} = X_2 \underline{I}_{2q} + \underline{U}_{2d} \quad (1.6.1a)$$

$$\underline{U}_q = -X_1 \underline{I}_{1d} + \underline{U}_{1q} = -X_2 \underline{I}_{2d} + \underline{U}_{2q} \quad (1.6.1b)$$

Für das in Abbildung 1.6.2 dargestellte System gilt für den geforderten Laststrom $\underline{I}_L$ bezogen auf die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt:

$$\underline{I}_L = j \underline{I}_{Lq} = -j \underline{I}_{1q} - j \underline{I}_{2q} \quad (1.6.2')$$

Bezogen auf die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt gilt daher:

$$U_d = X_1 I_{1q} + U_{1d} = X_2 I_{2q} + U_{2d} \quad (1.6.1a')$$

$$U_q = U_{1q} = U_{2q} = 0 \quad (1.6.1b')$$

Ein Blindstrom wirkt nur auf den Realteil der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt. Der Betrag $U = |\underline{U}|$ der Spannung am Anschlusspunkt lässt sich messen und als Istwert des jeweiligen Spannungsreglers verwenden. Der geforderte Laststrom führt je nach Vorzeichen zu einer Verringerung oder zu einer Erhöhung des Spannungsbetrags am Anschlusspunkt.

Sinnvolle Vorgaben für eine Steuerung der Spannungsamplitude wären somit:

$$U_{1d} = U_s - X_1 I_{1q} \quad (1.6.3)$$

$$U_{2d} = U_s - X_2 I_{2q} \quad (1.6.4)$$

Beide Vorgaben führen die Quellenspannungen in die gleiche Richtung und zu gleichen Spannungsamplituden. Ein I-Regler kann Abweichungen zum gewünschten Arbeitspunkt angleichen. Die dynamische Stabilität der Regelung folgt aus der Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises. Für einen I-Regler ist die Regelung stabil. Um eine Überforderung der Anlagen zu vermeiden, sollte der Betrag des Stromes I_i kleiner als U_n/X_i bleiben.

Frage 1.6.3: Regelung der Spannungsphase. Untersuchen Sie die Regelung der Phase der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt für ein System mit zwei spannungsgeführten Anlagen und einer Stromquelle, die einen Wirkstrom anfordert. Wie lässt sich ein stabiler Arbeitspunkt ohne unerwünschte Kreisströme erreichen?

Lösung: Für das in Abbildung 1.6.2 dargestellte System gilt für den geforderten Laststrom $\underline{I}_L$ in Bezug auf die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt:

$$\underline{I}_L = \underline{I}_{Ld} = -\underline{I}_{1d} - \underline{I}_{2d} \quad (1.6.2'')$$

Bezogen auf die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt gilt daher:

$$U_d = U_{1d} = U_{2d} \quad (1.6.1a'')$$

$$U_q = -X_1 I_{1d} + U_{1q} = -X_2 I_{2d} + U_{2q} = 0 \quad (1.6.1b'')$$

Im Bezugssystem der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt verursacht ein Wirkstrom einen Imaginärteil der Quellenspannungen in Höhe des Produktes $U_{iq} = X_i I_{id}$, und somit eine Phasenverschiebung der Quellenspannung in Höhe

$$\tan(\delta_1) = \frac{U_{1q}}{U_{1d}} = \frac{X_1 I_{1d}}{U_{1d}} = \frac{X_2 I_{2d}}{U_{2d}} = \frac{U_{2q}}{U_{2d}} = \tan(\delta_2) \quad (1.6.5)$$

Im Bezugssystem der Anlagen wären die Spannungswinkel mit umgekehrtem Vorzeichen zu interpretieren. Für einen Betrieb ohne Kreisströme wären die Spannungswinkel durch die Spannungsregler der Anlagen somit möglichst gleich zu führen. Bei gleichen Realteilen der Quellenspannungen (siehe Regelung der Spannungsamplitude) sind die Ströme der Anlagen im umgekehrten Verhältnis der Koppelreaktanzen zu führen.

Um eine Überforderung der Anlagen zu vermeiden, sollte der Betrag des Stromes I_i kleiner als U_n/X_i bleiben. Für Wirkströme und Wirkleistung wurde in Gleichung (1.2.4) ein Zusammenhang mit dem Spannungswinkel hergeleitet, die Leistung ist proportional zum Sinus des Spannungswinkels. Für den Regler bedeutet dieser Zusammenhang, dass eine Vergrößerung des Spannungswinkels bis $\pi/2$ einen Anstieg der Leistung bedeutet. Über diesen Punkt hinaus wird die Leistung wieder kleiner. Der Spannungswinkel sollte daher im Bereich bis 90 Grad verbleiben.

Frage 1.6.4: Regelung der Anlagenfrequenz. Bei der Synchronisation der Anlagen mit Hilfe des Stromes wurden Frequenz-Kennlinien der Form $f(I_d)$ für die Anlagen verwendet, aus denen das Bezugssystem der Anlagen hervorgeht. Folgende Abbildung zeigt die Struktur der Regelung. Auf welche Weise findet sich ein stabiler Arbeitspunkt der Anlagen? Welches sind die Bedingungen hierfür?

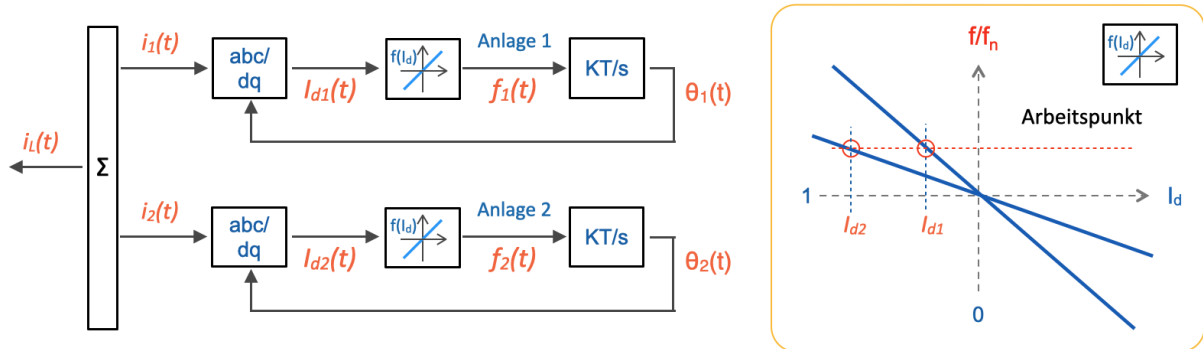


Abbildung 1.6.3 Frequenz-Kennlinien zum parallelen Betrieb spannungsgeführter Anlagen

Lösung: Die Summe der Anlagenströme ergibt zusammen mit der Lastanforderung am Anschlusspunkt der Anlagen null. Der Laststrom wird hierbei in Bezug auf die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt gestellt. Die Anlage, die den Laststrom fordert, synchronisiert sich hierzu mit Hilfe der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt auf die Frequenz im Netz auf.

Die Anlagen verwenden ihre eigenen Bezugssysteme $\theta_1(t)$ und $\theta_2(t)$. Ob ein Zweigstrom $i_1(t)$ oder $i_2(t)$ als Wirkstrom interpretiert wird, hängt von der Phasenlage dieses Bezugssystems zur Spannung $\underline{U}$ ab. Wirkströme $I_{d1}(t)$ und $I_{d2}(t)$ haben, bedingt durch den Aufbau der Regelung, einen Einfluss auf die Frequenzen $f_1(t)$ und $f_2(t)$ der Anlagen und somit auf die Bezugssysteme $\theta_1(t)$ und $\theta_2(t)$.

Es entsteht ein geschlossener Regelkreis, wobei der Block mit dem Integrator ($1/s$) im Regler eine Zeitkonstante besitzt (in Abschnitt 1.5 mit Hilfe einer Übertragungsfunktion als Tiefpass mit Initialwert 1 realisiert). Mit Hilfe der Kennlinien stellen sich auf Dauer die Wirkströme der Anlagen so ein, dass sich eine synchrone Frequenz der Anlagen ergibt.

Die Kennlinie bestimmt die Charakteristik der Regler: Jeder Regler verschiebt seinen individuellen Arbeitspunkt so lange, bis sich ein stabiler Zustand einstellt. Die Summe der Kennlinien, gewichtet mit den Strömen, muss eine monoton steigende bzw. monoton fallende Funktion ergeben.

Zur Überprüfung lassen sich die Kennlinien im relevanten Frequenzbereich umgekehrt herum betreiben und alle Anlagenströme addieren (einschließlich des Laststroms). Der Arbeitspunkt ist bei der Frequenz erreicht, bei der die Summe der Ströme null ergibt. Ohne Laststrom ist das nur im Leerlauf der Fall. Nur Leerlauf wird die Nennfrequenz erreicht. Somit liefert die Frequenz im Arbeitspunkt einen Indikator für die Last im Netz.

2. Entfernung und Netzebene

... Beiträge zur Leistung abhängig von der Impedanz => Entfernung (Leitungen) und => Netzebene (Beiträge der Transformatoren)

...

...

2.1. Einfluss der Entfernung

...

... Leitungslängen

Frage 2.1.1: ...

Lösung: ...

Abbildung 2.1.1 ...

...

Frage 2.1.2: ...

Lösung: ...

Abbildung 2.1.2 ...

...

Frage 2.1.3: ...

Lösung: ...

Abbildung 2.1.3 ...

...

Frage 2.1.4: ...

Lösung: ...

Abbildung 2.1.4 ...

...

...

2.2. Einfluss der Netzebene

...

... Transformatoren

Frage 2.2.1: ...

Lösung: ...

Abbildung 2.2.1 ...

...

Frage 2.2.2: ...

Lösung: ...

Abbildung 2.2.2 ...

...

Frage 2.2.3: ...

Lösung: ...

Abbildung 2.2.3 ...

...

Frage 2.2.4: ...

Lösung: ...

Abbildung 2.2.4 ...

...

...

2.3. Hierarchische Netze

Zentral und dezentral sind keine zutreffenden Begriffe zur Charakterisierung der Netze im Zuge der Energiewende: Im Übertragungsnetz sind auch zentral gespeiste Netze dezentral, da die lokalen Beiträge zur Leistung abhängig sind von der Entfernung. Zentral bezeichnet hier eher die Einspeisung auf der obersten Netzebene und den Lastfluss in die unteren Netzebenen. Ein zutreffenderer Begriff wäre das „hierarchisch gespeiste Netz“.

Mit wachsender Zahl erneuerbarer Erzeuger werden die Erzeuger kleiner und zahlreicher. Sie verteilen sich stärker im Netz. Eingespeist wird zunehmend in den unteren Netzebenen. Dennoch bleiben die Leistungsbeiträge abhängig von der Entfernung lokalzentral passt zwar hier als Beschreibung, jedoch nicht zur Differenzierung gegenüber dem traditionellen zentral gespeisten und dezentral organisiertem Übertragungsnetz. Den Einfluss der Lokalität beschreibt der Begriff „zellulares Netz“ zutreffender.

Im Zuge der Energiewende bewegen sich die Stromnetze somit von einem hierarchisch aus der oberen Netzebene gespeisten Netz in Richtung zellulärer Netze mit einer Vielzahl von Energiequellen in den unteren Netzebenen (den vormaligen Verteilnetzen).

Frage 2.3.1: ...

Lösung: ...

Abbildung 2.3.1 ...

...

Frage 2.3.2: ...

Lösung: ...

Abbildung 2.3.2 ...

...

Frage 2.3.3: ...

Lösung: ...

Abbildung 2.3.3 ...

...

Frage 2.3.4: ...

Lösung: ...

Abbildung 2.3.4 ...

...

2.4. Zellulare Netze

...

...

Frage 2.4.1: ...

Lösung: ...

Abbildung 2.4.1 ...

...

Frage 2.4.2: ...

Lösung: ...

Abbildung 2.4.2 ...

...

Frage 2.4.3: ...

Lösung: ...

Abbildung 2.4.3 ...

...

Frage 2.4.4: ...

Lösung: ...

Abbildung 2.4.4 ...

...

3. Umrichtergeführte Anlagen

Im Normalbetrieb dienen Umrichter dazu, Gleichspannungssysteme entweder als Bezugsanlagen über als Einspeiseanlagen mit dem Netz zu verbinden. Solche Anlagen sind stromgeführt und synchronisieren sich auf die Netzfrequenz auf. Das gilt auch für Batteriespeichersysteme. Anlage 4 im Beispielnetz aus Kapitel 1 war eine stromgeführte Anlage, die durch eine Spannungsquelle abgebildet war, die mit einer Koppelinduktivität mit dem Netz verbunden ist.

Die überwiegende Form der Umrichter besitzt einen Kapazität als Energiespeicher und wird daher als spannungsgespeicher Wechselrichter bezeichnet (engl. Voltage Source Converter). Solche Konverter besitzen eine Spannungsquellencharakteristik, allerdings ist die Spannung nicht kontinuierlich, sondern stufenweise geschaltet. Die Stufen bildet die DC-Zwischenkreise der Umrichter ab.

Je nach Bauart der Umrichter variiert die Anzahl der Spannungsniveaus. Die in mehreren Niveaus gepulste Spannung stellt eine Approximation der kontinuierlichen Wechselspannung dar. Die Unterschiede zur Wechselspannung am Netz führen zu Blindströmen mit Schaltfrequenz an den Koppelinduktivitäten. Mit Schaltfrequenzen im Audiobereich oder darüber sind diese Blindströme gut durch Filter zu kompensieren (zum Beispiel nehmen C-Filter in Y-Schaltung die Blindströme bei Schaltfrequenz auf). Die Ströme der Anlagen werden durch die Koppelinduktivitäten geglättet.

Umrichter werden benötigt, um Gleichspannungsanlagen mit dem Netz zu verbinden: Der Umrichter ist ein AC/DC-Wandler. Da der Wandler keine Energie erzeugen oder aufnehmen kann (abgesehen von Verlusten), muss die auf einer Seite aufgenommene Wirkleistung auf der andere Seite abgegeben werden und umgekehrt.

Umrichtergeführte Anlagen lassen sich auch als Spannungsquellen einsetzen und sind in dieser Betriebsweise netzbildend. Diese Betriebsart stellt besondere Ansprüche an die Anlagen: Eine stromgeführte Anlage synchronisiert sich mit Hilfe der am Anschlusspunkt gemessenen Spannung auf das Netz auf. Eine netzbildende Anlage stellt die Spannung im Netz bereit oder leistet einen signifikanten Beitrag zur Spannungshaltung. Die Synchronisation einer solchen Anlage mit Hilfe der am Anschlusspunkt gemessenen Spannung wäre ein logischer Zirkelschluss.

3.1. Funktionsprinzip

Folgende Abbildung zeigt den Aufbau eines einfachen Umrichters, wie er für Solaranlagen in der Niederspannung verwendet wird.

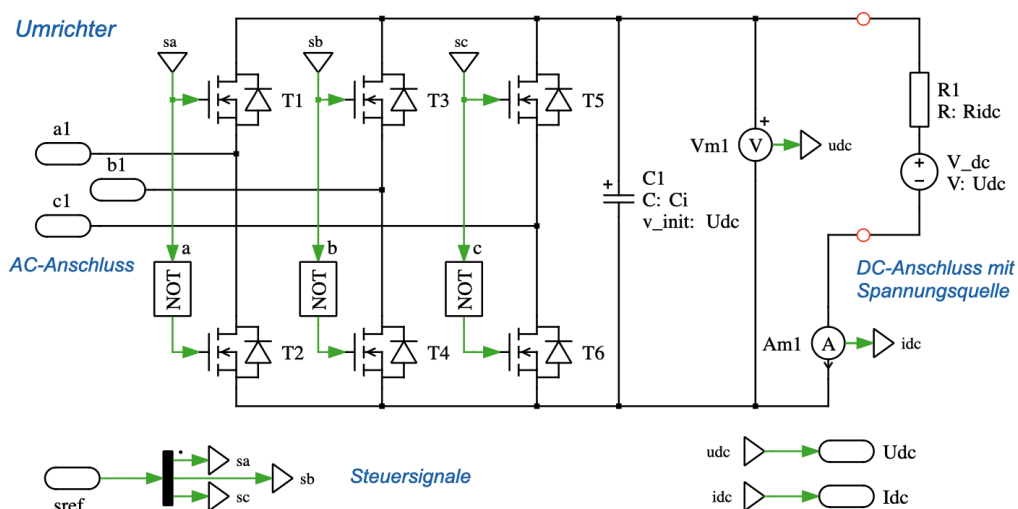


Abbildung 3.1.1 Aufbau eines Zwei-Level-Konverters mit DC-Quelle

Diese Schaltung besitzt nur 2 Spannungsniveaus (Level) und somit eine Spannungsstufe, indem die Kapazität im DC-Kreis durch die Transistoren jeweils mit umgekehrter Polarität in den AC-Kreis geschaltet wird. Die Schaltsignale gehen aus einer Approximation der AC-Spannung durch eine Pulsbreitenmodulation hervor (engl. PWM für puls width modulation). Hierdurch verhält sich die Schaltung wie eine AC-Spannungsquelle.

Die DC-Seite mit einer DC-Spannungsquelle ist im Modell enthalten. Ein realer Konverter hätte hierfür die beiden in der Abbildung dargestellten Anschlussklemmen. Die Kopplung ans AC-Netz erfolgt mit Hilfe von Koppelinduktivitäten, die außerhalb der Schaltung angebracht sind. Am AC-Netz verhält sich der Konverter somit wie die Spannungsquellen aus Kapitel 1.

Frage 3.1.1: Umrichter mit Stromregler. Untersuchen Sie die Schaltung des Converters in einem einfachen Netz bestehend aus einer Spannungsquelle (Netz) und einer stromgeführten Anlage als Lastanforderung, sowie dem Konverter, vergleichbar mit dem Aufbau aus Aufgabe 1.4.3 (ohne Anlage 3, mit Anlage 2 als Konverter).

Lösung: Siehe folgende Abbildung.

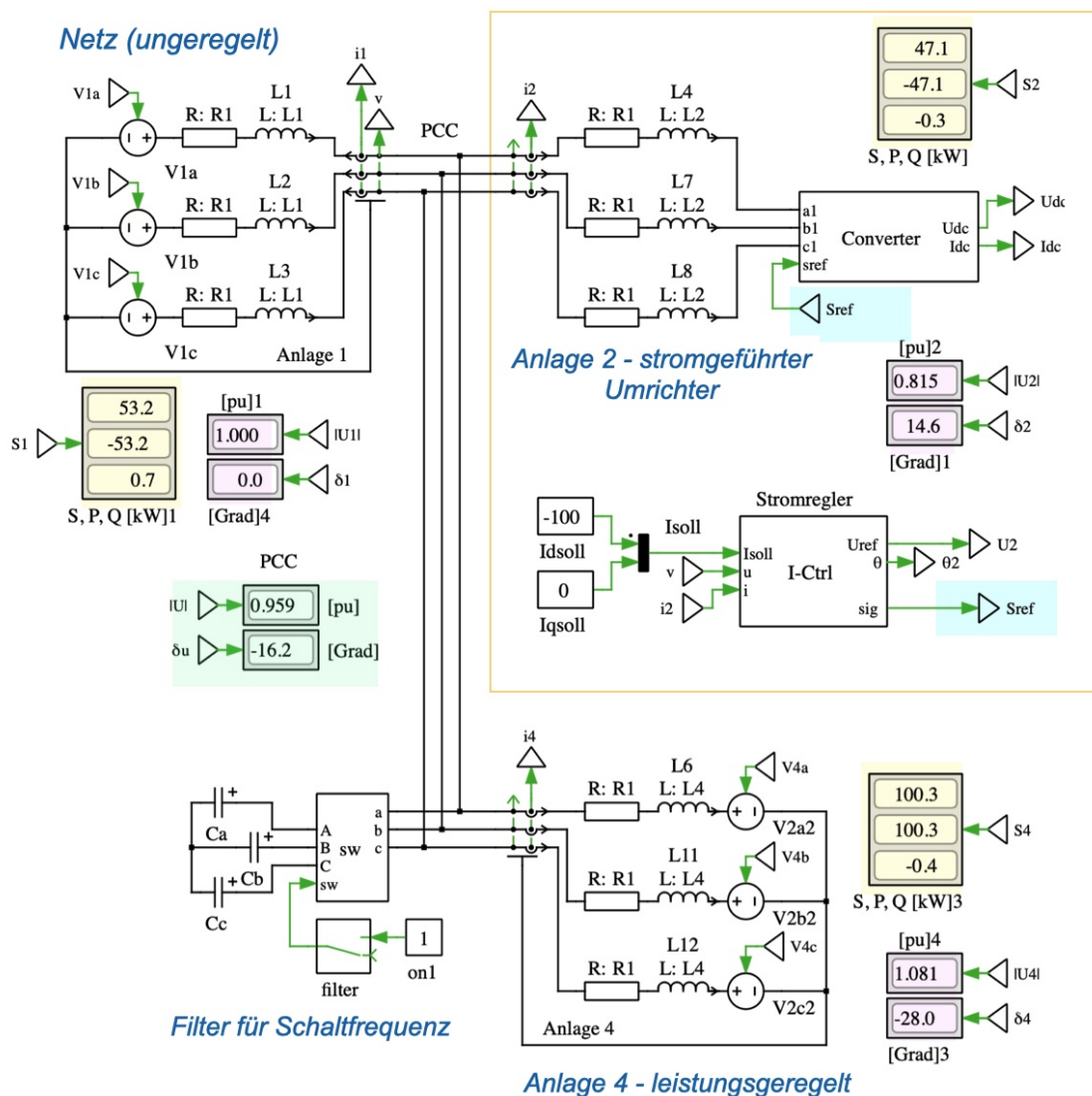


Abbildung 3.1.2 Konverter mit Last am Netz

Der Umrichter oder Konverter findet sich als Anlage 2 im Netz; die Schaltung entspricht der in der Abbildung oben. Der Konverter koppelt über gleich große Induktivitäten an den Anschaltplatz wie das Netz (Anlage 1) und die leistungsgeregelte Anlage 4). Das Netz ist eine unregelte Spannungsquelle:

Die Quellenspannung $\underline{U}_1$ ist fest vorgegeben und bleibt daher auf dem Wert 1 pu mit Phasenwinkel null. Das Bezugssystem $\theta_1(t)$ der Anlage 1 steht den anderen Anlagen nicht zur Verfügung: Anlage 2 und Anlage 4 messen ihr jeweiliges Bezugssystem $\theta_2(t)$ und $\theta_3(t)$ aus der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt. Die Vorgaben für den Strom der Anlage 2 und für die Leistung der Anlage 4 beziehen sich auf die so ermittelten internen Bezugssysteme der Anlage,

Der Konverter selbst besitzt keine Intelligenz: Er setzt lediglich die Steuersignale S_{ref} , um, die er vom Stromregler erhält. Die Pulsbreitenmodulation findet innerhalb des Stromreglers der Anlage 2 statt. In der Praxis würde man die Modulation in den Konverter übertragen, und nur die Abtastwerte des Referenzsignals für die Spannung $u_{\text{zabc}}(t)$ in den Konverter übertragen, zusammen mit dem Bezugssystem $\theta_2(t)$ der Anlage.

Der Aufbau des Stromreglers ist identisch mit den in Kapitel 1 dargestellten Regler und entspricht dem Stand der Technik (siehe Aufgabe 1.4.2). Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Stromreglers. Der Konverter wäre folglich durch Spannungsquellen ersetzbar. Der Regler erzeugt Vorgabe eine $\underline{U}_{\text{ref}}$ für die Konverterspannung, aus der die Schaltsignale s_{ref} für den Konverter abgeleitet werden.

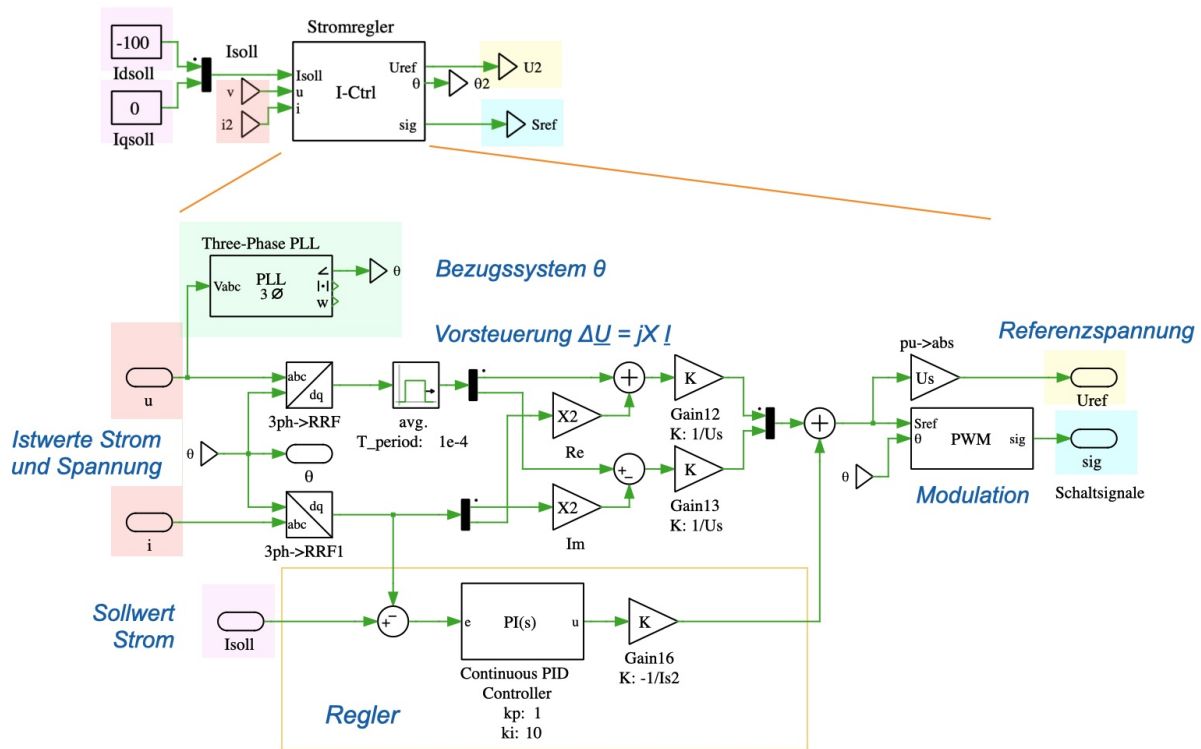


Abbildung 3.1.3 Aufbau des Stromreglers

Der Konverter setzt die Schaltsignale um und arbeitet am Netz als stromgeführte Spannungsquelle, vergleichbar mit der Anlage aus Aufgabe 1.4.2. Der Lastfluss in Abbildung 3.1.2 zeigt das Netz mit einer Vorgabe von -100 A als Sollwert für den Wirkstrom des Konverters. Der Konverter wird hiermit als Einspeiseanlage betrieben und führt eine Leistung von ca. -47 kW zum Anschlusspunkt.

Anlage 4 fordert gemäß Vorgabe den Bezug von 100 kW Wirkleistung. Die Leistungsdifferenz von ca. -53 kW wird vom Netz bereitgestellt. Das Netz wird mit fester Vorgabe der Quellenspannung $\underline{U}_1$ betrieben, daher verschiebt sich gegenüber $\underline{U}_1$ die Spannung $\underline{U}$ am Bezugspunkt. Die Winkel δ_2 und δ_4 der Anlagen 2 und 4 beziehen sich auf die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt, da hieraus deren Bezugssysteme ermittelt wurden. Der für die Spannung U dargestellte Winkel δ_U bezieht sich wiederum auf die

Quellspannung $\underline{U}_1$. Diesen Winkel kann man so interpretieren, dass bezogen auf δ_U und die Quellspannung δ_2 umgekehrtes Vorzeichen wie δ_1 besitzt.

Im Beispiel wurden die Anlagen ohne das Filter am Anschaltspunkt betrieben, daher ergeben sich Schwankungen der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt, die sich am Zeitsignal $u_{abc}(t)$ unschwer erkennen lassen. Mit Filter wird die Spannung sauberer und es werden die Vorgaben der Leistung für Anlage 4 exakt eingehalten.

Anlage 1 als Netz lässt sich wahlweise spannungsgeregelt betreiben. In dieser Betriebsart wird die Quellspannung $\underline{U}_1$ so geführt, dass die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt auf den Betrag 1 pu geregelt wird und der Phasenwinkel $\delta_U = 0$ beträgt. Da sich die Phasenwinkel δ_2 und δ_4 der Anlagen 2 und 4 auf die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt beziehen, ändert sich deren Phasenlage hierdurch nicht. Mit der Spannungsregelung beziehen sich alle Phasenwinkel δ_1 , δ_2 und δ_4 auf die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt.

Frage 3.1.2: Umrichter mit Spannungsregler. Da man nicht davon ausgehen kann, dass ein Anschluss an das Stromnetz, wie durch Anlage 1 repräsentiert, die Spannung am Anschlusspunkt genau ausregeln kann, soll der Konverter diese Aufgaben übernehmen. Realisieren Sie eine Spannungsregelung für den Konverter und überprüfen Sie deren Funktion in der Simulation.

Lösung: Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Spannungsreglers.

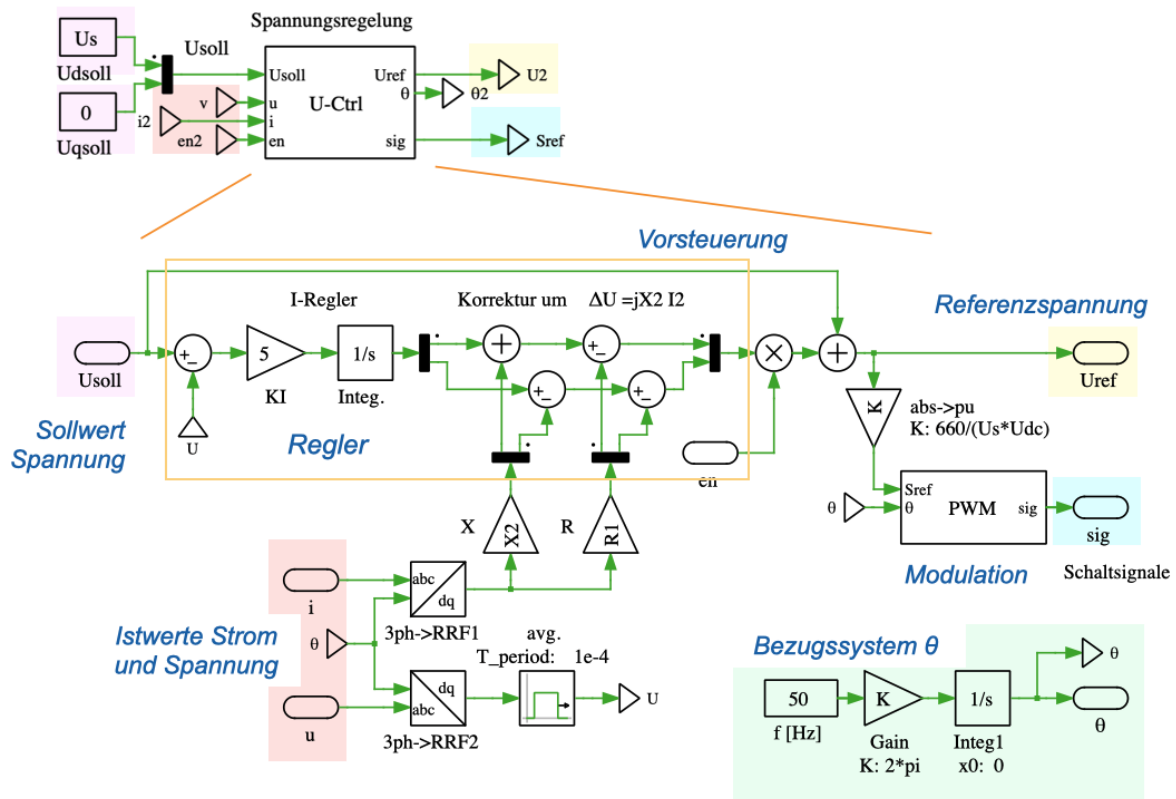


Abbildung 3.1.4 Aufbau des Spannungsreglers

Im Unterschied zur stromgeführten Anlage kann der Konverter sein Bezugssystem nicht aus der Spannungsmessung am Anschlusspunkt ableiten, da er diese Spannung ja stellt bzw. an dieser Spannungsregelung beteiligt ist. Der Konverter verfügt daher über ein eigenes Bezugssystem, dass in geeigneter Weise mit dem Netz zu synchronisieren ist. Die Spannungsregelung lässt sich durch ein Signal „enable“ aktivieren. Bei deaktivierter Spannungsregelung wird mit Hilfe der Sollvorgabe die Konverterspannung $\underline{U}_2$ gestellt.

Bei aktiver Regelung soll die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt auf den Sollwert gebracht werden. Hierzu reagiert ein I-Regler auf Abweichungen vom Sollwert. Die Stellgröße am Ausgang des I-Reglers wird mit Hilfe der gemessenen Werte der Spannung $u_{abc}(t)$ und des Stroms $i_{2abc}(t)$ um den Spannungsabfall an der Koppelreaktanz X_2 und dem Widerstand $R_2 = R_1$ korrigiert, so dass die Stellgröße des Reglers die Konverterspannung $\underline{U}_2$ ergibt.

Ziel der Regelung ist es, die Konverterspannung $\underline{U}_2$ so zu stellen, dass die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt dem Sollwert entspricht. Führungsgröße ist die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt, Stellgröße die Konverterspannung $\underline{U}_2$. Folgende Abbildung zeigt die Funktion der Regelung unter Last. Man erkennt, dass die Regelung sehr rasch reagiert.

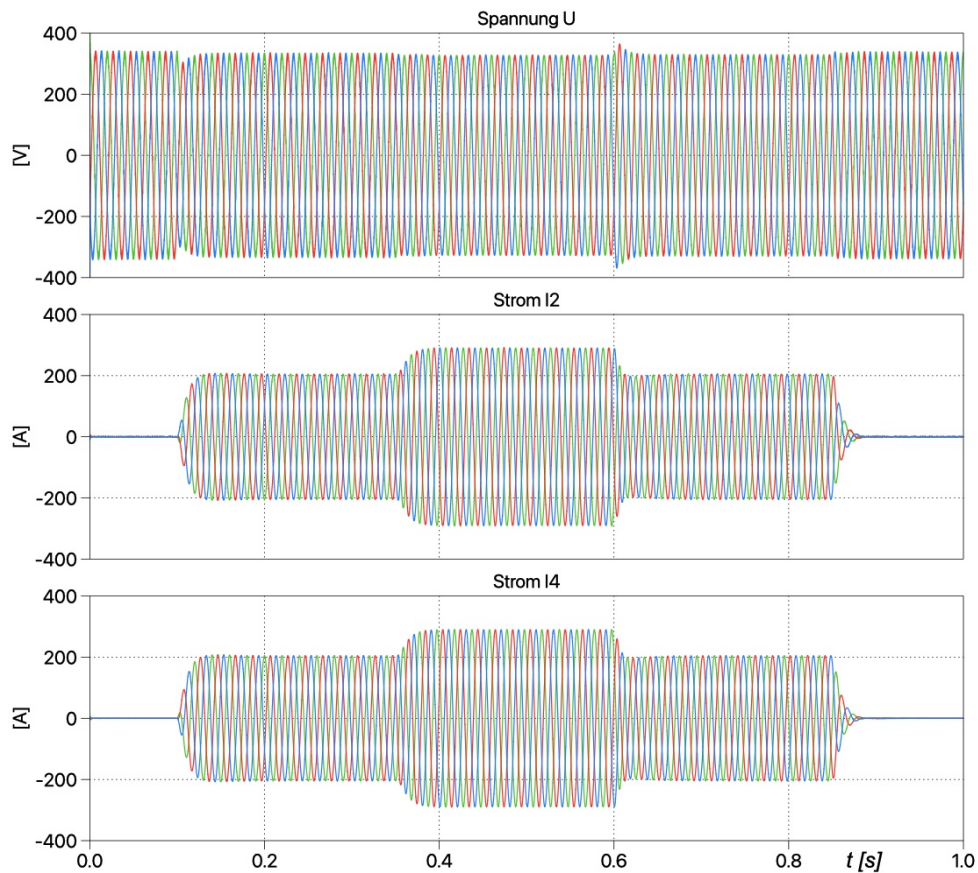


Abbildung 3.1.5 Konverter mit Spannungsregelung unter Last

Störgröße im Sinne der Regelungstechnik ist der Strom der Anlage 4. Der Konverter als Anlage 2 arbeitet in diesem Simulationslauf im Inselnetzbetrieb: es befinden sich nur die Anlage 2 und 4 am Netz. Die Spannungsregelung bewirkt, dass der Laststrom der Anlage 4 durch den Strom der Anlage 2 gespiegelt wird. Im Zeitverlauf sind Blindströme und Wirkströme nur an ihrer Phasenlage erkennbar. Einfacher zu lesen sind die aus den Zeitsignalen abgeleiteten komplexen Größen im Bildbereich.

Folgende Abbildung zeigt die Vorgaben für Wirkleistung und Blindleistung der leistungsgeregelten Anlage 4. Man erkennt, dass Anlage 2 spiegelbildlich reagiert: Als Spannungsquelle stellt der Konverter die benötigte Wirkleistung und Blindleistung bereit. Weitere Vorgaben benötigt er hierzu nicht.

Damit die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt konstant bleibt, stellt die Regelung die Konverterspannung $\underline{U}_2$ als Stellgröße geeignet ein. Der Verlauf der Konverterspannung ist in der Abbildung ebenfalls dargestellt. Man erkennt, dass eine Wirkleistungsanforderung maßgeblich auf die Imaginärteil U_{2q} der Spannung wirkt, die Blindleistung vorwiegend auf den Realteil U_{2d} .

49/105

Ohne Schaltsignale arbeitet der Konverter als Brückengleichrichter, bedingt durch die Freilaufdioden. Im Leerlaufbetrieb auf der DC-Seite stellt sich daher die maximale Spannung zwischen dem oberen und unteren Scheitelwert der AC-Spannung ein: Die Kapazität im DC-Kreis wird immer dann geladen, wenn der Scheitelwert der AC-Spannung die der Kondensatorspannung übersteigt.

Wenn im DC-Kreis kein Strom abfließt (d.h. im Leerlaufbetrieb), stellt sich als maximale Spannung der doppelte Scheitelwert der AC-Spannung ein, gemessen zwischen Leiter und Neutraleiter. Für eine verkettete Spannung von $U_{AC} = 400 \text{ V}$ erhält beträgt die Spannung zwischen Leiter und Neutraleiter 230 V, der Scheitelwert ca. 330 V, der doppelte Scheitelwert 660 V. Somit erhält man

$$U_{DC0} = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right)} U_{AC} \quad (3.1.1)$$

Die Betriebsspannung des Konverters wird oberhalb dieses Wertes gewählt, damit die Transistoren das Verhalten der Schaltung bestimmen. Im Beispiel beträgt $U_{DC} = 800 \text{ V}$. Umgekehrt wirkt die DC-Spannung beim Schalten auf den AC-Kreis. Daher muss das Referenzsignal für die Ermittlung der Schaltsignale des Konverters für den Betrieb am Niederspannungsnetz um den Faktor $660 \text{ V}/U_{DC}$ korrigiert werden (bzw. allgemein um den Faktor $\sqrt{(2/3)} U_{AC}/U_{DC}$).

Dieser Korrekturfaktor findet sich in Abbildung 3.1.4 im Signalfuss des Konverters. Das Referenzsignal zur Ermittlung der Schaltsignale wird außerdem auf den Scheitelwert der AC-Spannung normiert. Da die DC-Spannung $U_{DC} > U_{DC0}$ gewählt wird, fällt das Referenzsignal kleiner als 1 aus, so dass bei der Modulation des Konverters der Scheitelwert der AC-Spannung (als Sternspannung) bis bis zur Höhe der halben DC-Spannung zur Verfügung steht.

Aus dem Aufbau des Konverters geht ebenfalls hervor, dass keine galvanische Trennung zwischen der AC-Spannung und der DC-Spannung besteht und dass im Kurzschlussfall auf der DC-Leistung die Kurzschlussleistung der AC-Seite auf die DC-Seite dringt. Modulare Konverter für höhere Spannungen besitzen diese Eigenschaft abhängig von ihrer Bauform: Modularen Multilevel Konvertern (MMC) mit Halbbrücken, wie sie für HGÜ-Anwendungen eingesetzt werden (HGÜ = Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung) besitzen die gleiche Eigenschaft.

Andere Konverter wirken strombegrenzend von AC nach DC (beispielsweise MMC mit Vollbrücken), bzw. trennen die DC-Seite von der AC-Seite galvanisch durch den Einsatz von Transformatoren, die mit Schaltfrequenz betrieben werden (sogenannte Mittelfrequenztransformatoren). Bei den letztgenannten Konvertern kann die DC-Spannung unabhängig von der AC-Spannung gewählt werden, die Konverter arbeiten als leistungselektronische Transformatoren.

Frage 3.1.4: Parallele Konverter. Wie lassen sich netzbildende (d.h. spannungsgeregelte) Konverter parallel betreiben, wenn sie am gleichen DC-Netz angeschlossen sind und als Module in einer Anlage untergebracht werden können? Untersuchen Sie den Betrieb in der Simulation.

Lösung: Für den Parallelbetrieb von Spannungsquellen müssen die Quellspannungen der Anlagen exakt übereinstimmen, wenn es nicht zu unerwünschten Kreisströmen durch die Anlagen kommen soll. Für Konvertermodule gleicher Bauart am gleichen DC-Netz lässt sich das am einfachsten so lösen, dass die Module durch den gleichen Spannungsregler mit dem gleichen Referenzsignal angesteuert werden. Somit werden die Stellgrößen beider Anlagen gemeinsam geführt. Folgende Abbildung zeigt zwei Module (Anlagen 2 und 3) im Inselnetzbetrieb an einer leistungsgeführten Anlage.

Beide Module (Anlagen 2 und 3) teilen sich die Last der Anlage 4 zu gleichen Teilen. Es wurde das gleiche Lastszenario verwendet wie in Aufgabe 3.1.3. Da die Auslastung pro Anlage halb so groß ausfällt, fällt der Verlauf der Spannung am Anschlusspunkt bei Lastwechseln gleichmäßiger aus.

Da beide Anlagen den gleichen Spannungsregler verwenden, fallen die Quellspannungen U_2 und U_3 beider Anlagen in Betrag und in Phase gleich aus. Die Ströme beider Anlagen halbieren sich gegen-

51/105

Unterscheiden sich die Konverter in ihren Zweigimpedanzen (bzw. in ihren Koppelreaktanzen), so leistet die Anlage mit der geringeren Impedanz den höheren Strom und somit den höheren Leistungsbeitrag. Folgende Abbildung zeigt den Parallelbetrieb der Anlagen 2 und 3 an einer leistungsgeführten Anlage 4. Die Anlagen 2 und 3 sind nicht spannungsgeregelt, jedoch werden die Quellspannungen $\underline{U}_2$ und $\underline{U}_3$ phasensynchron zueinander und mit gleicher Amplitude geführt.

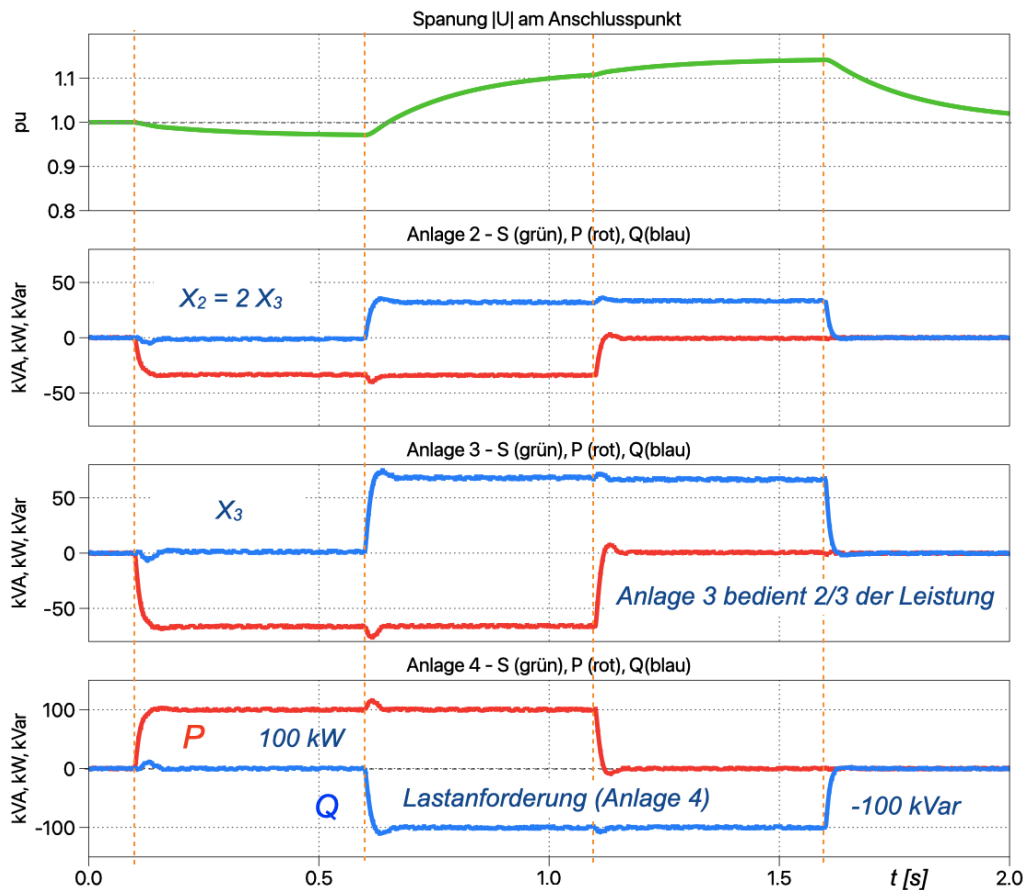


Abbildung 3.1.9 Parallelbetrieb der Anlagen 2 und 3 mit unterschiedlichen Koppelreaktanzen

Anlage 2 besitzt eine doppelt so große Koppelreaktanz wie Anlage 3. Man erkennt, dass der Strom der Anlage 3 folglich doppelt so hoch ausfällt wie der von Anlage 2. Das gilt für den Wirkstrom und den Blindstrom. Anlage 3 übernimmt daher 2/3 der geforderten Gesamtleistung (Wirkleistung und Blindleistung). Die Spannung am Anschlusspunkt ist nicht geregelt und variiert daher mit der Last. Schaltet man eine der Anlagen in den spannungsgeführten Betriebsmodus um, so übernimmt die geregelte Anlage die gesamte Last.

Im spannungsgeführten Betrieb beider Anlagen gleichen sich die Leistungsbeiträge an, wie der Simulationslauf in folgender Abbildung zeigt. Allerdings ist diese Betriebsart mit Kreisströmen verbunden: beide Konverter entwickeln im dargestellten Simulationslauf eine Blindleistung mit jeweils umgekehrtem Vorzeichen. Da die Bedingung für den Ausschluss von Kreisströmen nicht eingehalten wurde, bleiben die Kreisströme nach Zurücknahme der Lastforderung bestehen.

Gefordert sind in diesem Netz nur (1) der Laststrom, (2) die Bedingung $\underline{U} = 1$ für die Spannung am Anschaltspunkt als Sollvorgabe für die Spannungsregler der Anlagen. Kreisströme sind bei diesen Vorgaben nicht ausgeschlossen. Ein Kreisstrom darf hierbei auch ein Wirkstrom sein, der sich dem geforderten Laststrom so überlagert, dass Leistung von einer Anlage an eine andere abgegeben wird.

Für einen Betrieb ohne Kreisströme ist eine zusätzliche Vorgabe für die Regelung erforderlich. Im Beispiel sind die Anlagen 2 und 3 im Inselnetzbetrieb parallel mit der stromgeführten Anlage 4 zu führen. Eine der Anlagen muss spannungsgeführt arbeiten, damit im Inselnetz eine Spannungsquelle zur Verfügung steht. Kreisströme kann man ausschließen, wenn man den Strom einer der Anlagen vorgibt, indem beispielsweise Anlage 3 den Strom der spannungsgeführten Anlage 2 spiegelt.

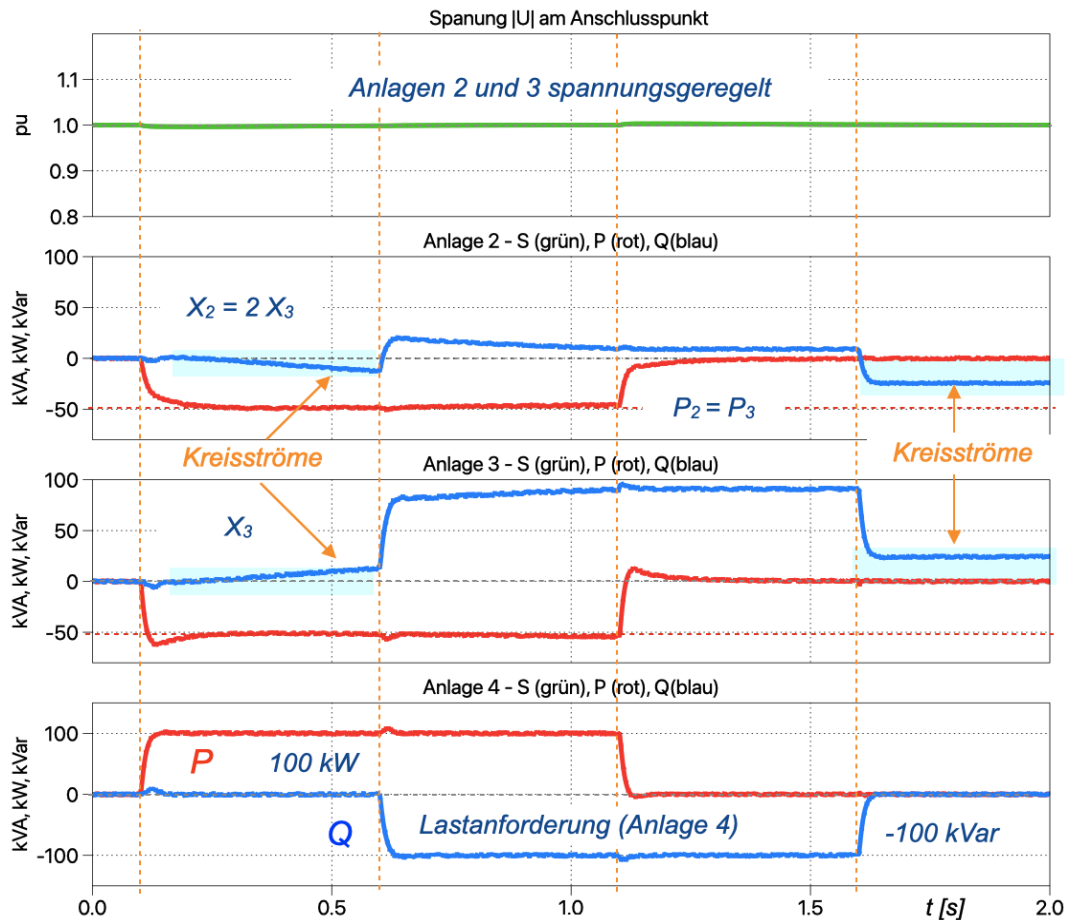


Abbildung 3.1.10 Parallelbetrieb spannungsgeregelter Konverter

Eine andere Möglichkeit wurde in Aufgabe 3.1.4 dargestellt: der Parallelbetrieb mehrerer baugleicher Module am gleichen Spannungsregler. Mit nur jeweils einem Spannungsregler im Netz sind alle Anlagenströme fixiert und somit Kreisströme ausgeschlossen. Eine weitere Möglichkeit wäre, die Bedingung für die Spannung am Anschlusspunkt auf den Betrag der Spannung zu beschränken, d.h. $U = |U| = 1$, und die Wirkströme der Anlagen unabhängig hiervon zu fixieren. In diese Betriebsart muss man Blindströme als Kreisströme akzeptieren.

Frage 3.1.6: Parallelbetrieb netzbildender Konverter: Spannungsregelung durch führenden Konverter und nachfolgenden stromgeregelten Konverter. Ändern Sie den Aufbau des Modells aus der letzten Aufgabe so ab, dass Anlage 3 stromgeführt ist und den Strom der Anlage 2 als Sollwert erhält. Überprüfen Sie die Funktion in der Simulation.

Lösung: Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf.

Der Messwert des Stroms der Anlage 2 aus Aufgabe 3.1.5 wird aus dem Spannungsregler herausgeführt und dient als Sollwert für den Stromregler der Anlage 3 gemäß Aufgabe 3.1.1. Das Modell der Anlagen bleibt gegenüber Aufgabe 3.1.5 gleich: Die Koppelreaktanz X_3 der Anlage 3 hat den halben Wert der Koppelreaktanz X_2 der Anlage 2. Die Kreisströme aus dem Simulationslauf mit spannungsgeführ-

ten Anlagen 2 und 3 aus der letzten Aufgabe sind nun verschwunden, da alle Ströme fixiert sind (bis auf den Strom der spannungsgeführten Anlage 2), und somit Kreisströme ausgeschlossen sind.

Allerdings ist nur eine Anlage im Netz spannungsgeführt (Anlage 2). Diese Anlage verdoppelt allerdings ihre Leistung durch die Projektion ihres Anlagenstroms in Anlage 3. Die Leistungsbeiträge beider Anlagen sind somit gleich (bis auf den Einschwingvorgang des Stromreglers zu Beginn der Simulation). Beide Anlagen teilen sich die geforderte Leistung zu gleichen Anteilen auf.

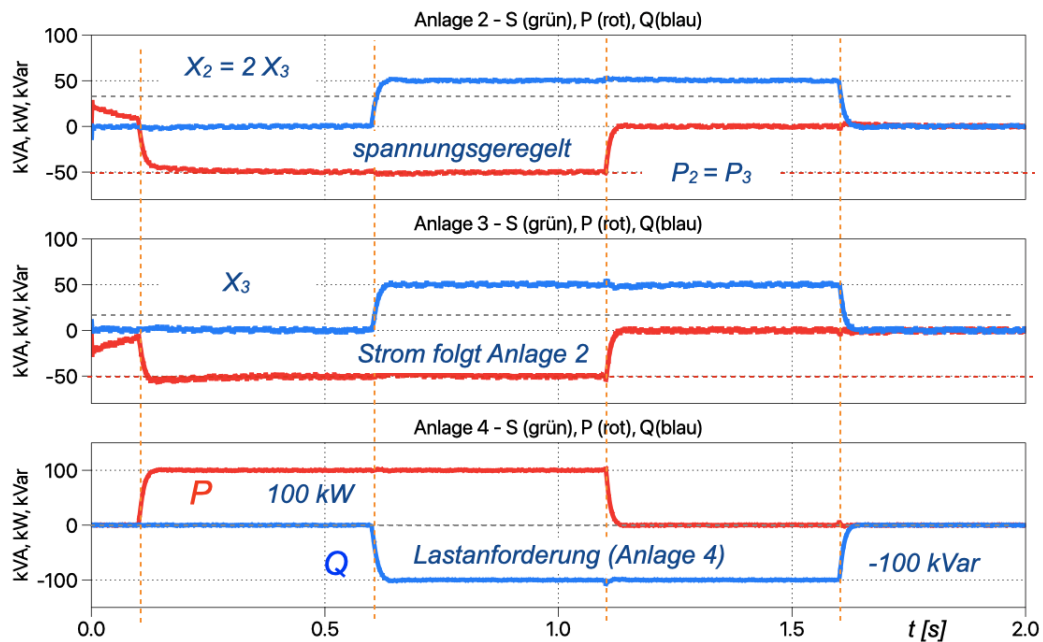


Abbildung 3.1.11 Strom der Anlage 3 folgt dem Strom der spannungsgeführten Anlage 2

Bei der Projektion des Stromes von Anlage 2 nach Anlage 3 lässt sich auch das Leistungsvermögen der Anlagen berücksichtigen, bzw. die Größe der Koppelreaktanzen: Der Strom kann entsprechend skaliert werden.

Verdoppelt man beispielsweise die Vorgabe für den Strom der Anlage 3, übernimmt diese Anlage 2/3 der Gesamtleistung. Die Spannung am Anschlusspunkt wird durch die spannungsgeführte Anlage gemäß Vorgabe des Sollwertes auf dem Wert $\underline{U} = 1$ gehalten.

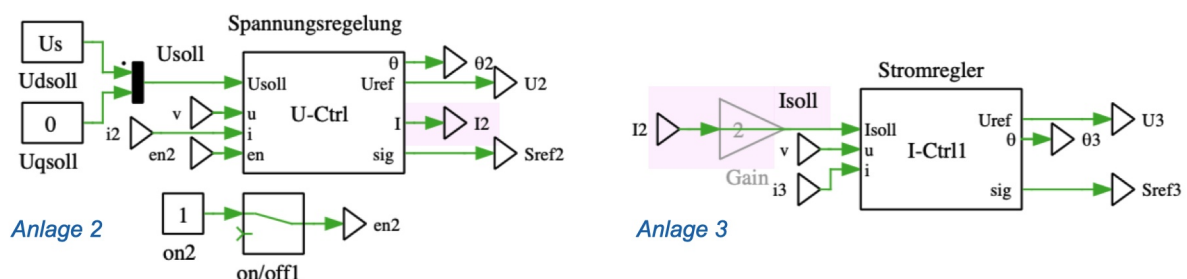


Abbildung 3.1.12 Spannungsregler und Stromregler

Die Abbildung oben zeigt die Regler der Anlagen 2 und 3. Die Spannungsregler und Stromregler sind identisch mit den in den Aufgaben 3.1.1 und 3.1.2 beschriebenen Reglern.

Folgende Abbildung zeigt den Aufbau der Simulation.

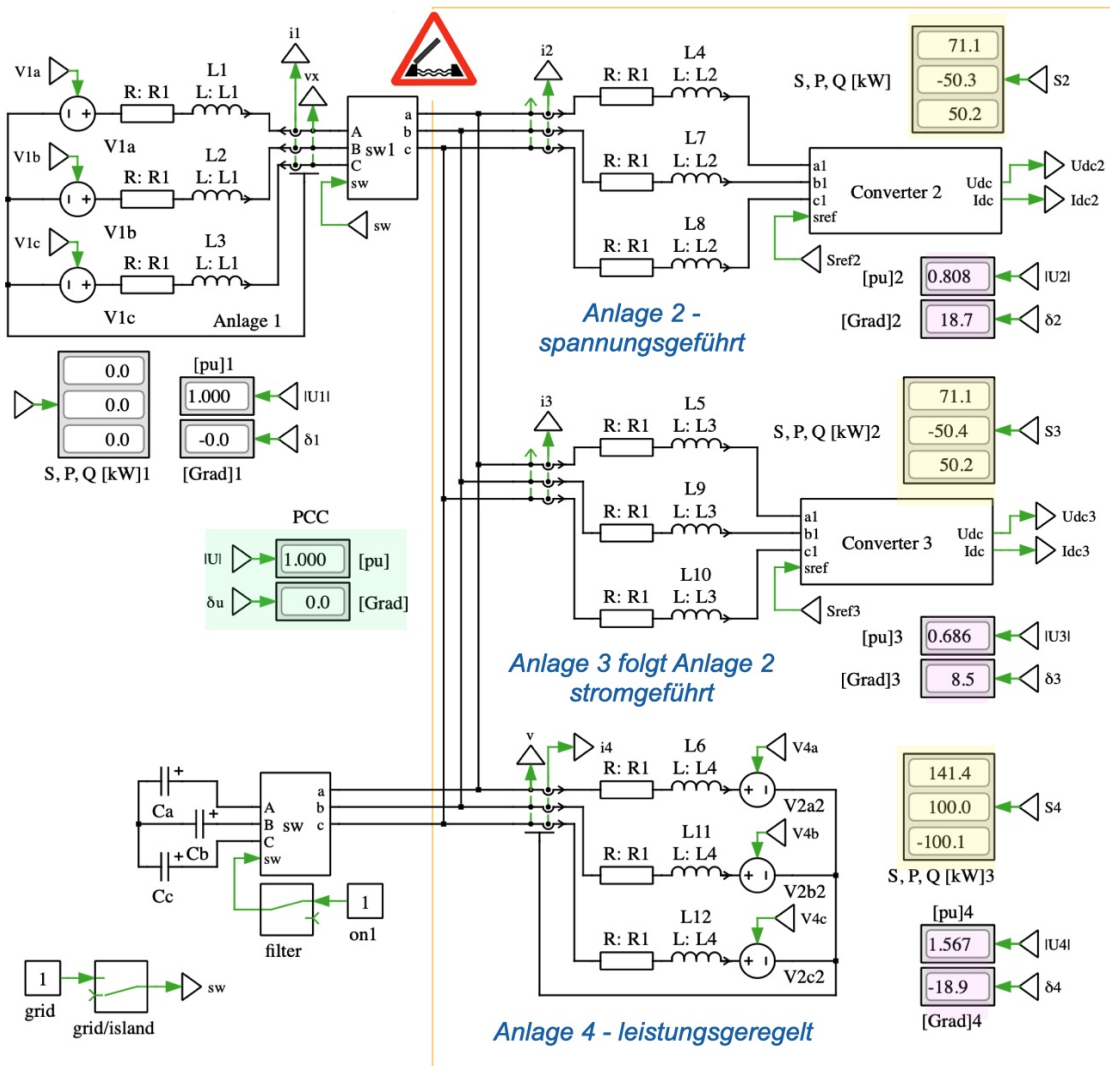


Abbildung 3.1.13 Aufbau der Simulation

Im Inselnetzbetrieb bleibt Anlage 2 die einzige Spannungsquelle im Netz und sorgt für den Ausgleich der Leistung. Die Ströme der Anlagen 3 und 4 sind fixiert. Daher sind unerwünschte Kreisströme ausgeschlossen.

Für den Betrieb am Netz sind alle Anlagen in den stromgeführten Betrieb zu schalten. In dieser Betriebsart synchronisieren sich die Anlagen auf die Netzfrequenz auf. Im Inselnetzbetrieb muss eine der Anlagen die Führung der Spannung übernehmen,

3.2. Momentanreserve

Umrichter besitzen einen Energiespeicher im Gleichspannungskreis. Bei Umrichtern mit Spannungscharakteristik (engl. Voltage Source Converter) besitzt dieser die Kapazität C. Der Kondensator C im DC-Kreis speichert eine Energiemenge von

$$E_C = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (3.2.1)$$

Die Energiemenge hängt linear von der Größe C der Kapazität ab, und quadratisch von der Höhe der Spannung U im DC-Kreis. Bei modularen Umrichtern wäre die Energiemenge aus der DC-Spannung pro Modul zu berechnen und mit der Anzahl der Module zu multiplizieren.

Wenn ein Umrichter auf der AC-Seite einen Strom einspeist, bezieht er die erforderliche Leistung aus dem DC-Kreis: Der Strom auf der DC-Seite wird dem Kondensator entnommen. Hierdurch sinkt die Spannung im DC-Kreis:

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_C(\tau) \cdot d\tau + u_{\text{initial}} \quad (3.2.2)$$

Für die Spannungshaltung im DC-Kreis ist eine dort angeschlossene Anlage verantwortlich. Diese Anlage reagiert auf die Spannung im DC-Kreis und füllt die Kapazität bei sinkender Spannung mit Hilfe eines Stroms nach. Bei Entnahme von Leistung aus dem AC-Anschluss kehrt sich die Stromrichtung um: Der Zwischenkreiskondensator wird durch den Zustrom aufgeladen, die Spannung auf der DC-Seite steigt.

Die Anlage, die auf der DC-Seite den Kondensator nachfüllt, ist spannungsgeregelt. Damit sie reagieren kann, muss die Spannung im DC-Kreis erst sinken. Die Spannung sinkt, wenn durch den Konverter dem DC-Kreis ein Strom entnommen wird. Bei umgekehrter Stromrichtung steigt die Spannung im DC-Kreis.

Somit stellt der Kondensator im Zwischenkreis eine Leistungsreserve für den Konverter bereit, die man als Momentanreserve bezeichnen kann: Die Momentanreserve steht dem Umrichter sofort zur Verfügung und ist eine physikalische Eigenschaft der Regelstrecke. Zum Abrufen der Momentanreserve wird kein Regler benötigt.

Die Momentanreserve eines Umrichters lässt sich in beiden Lastflussrichtungen nutzen: Sie kann bei einer Lastanforderung aus dem AC-Netz die geforderte Leistung sofort bereitstellen. Bei einer plötzlichen Erhöhung der Einspeiseleistung kann sie den Leistungsüberschuss sofort aufnehmen. Die Nutzung der Momentanreserve verursacht Spannungsänderungen im DC-Kreis des Converters bzw. am DC-Anschluss der Anlage. Auf diese Spannungsänderung reagiert der Spannungsregler einer dort angeschlossenen weiteren Anlage, die die geforderte Leistung dann dauerhaft bereitstellt.

Frage 3.2.1: Trägheit. Unter dem Begriff der Trägheit einer Regelstrecke wird das Verhältnis der gespeicherten Energie im Verhältnis zur Anschlussleistung der Anlage verstanden:

$$H = \frac{E_C}{P} = \frac{\frac{1}{2} C U^2}{P} \quad (3.2.3)$$

Die Anlage im Modell besitzt eine Anschlussleistung von $P_n = 200 \text{ kW}$ und eine Kapazität von $C = 10 \text{ mF}$ im DC-Kreis. Die Spannung im DC-Kreis beträgt $U_{dc} = 800 \text{ V}$. Welche Trägheit besitzt die Anlage als Regelstrecke? Wie lange würde es dauern, bis die Anlagenkapazität bei voller Anlagenleistung vollständig entladen wäre?

Lösung: Die in der Kapazität gespeicherte Energie beträgt $E_C = 3,2 \text{ kWs}$. Diese Energiemenge wäre knapp ausreichend, um ca. 1 Liter Wasser (1 kg) um 1 K zu erwärmen ($1 \text{ Ws} = 1 \text{ J}$). Bezogen auf die Anschlussleistung ergibt sich eine Trägheit von $H = 16 \text{ ms}$. Nach dieser Zeit wäre die Kapazität bei voller Leistung vollständig entladen.

Frage 3.2.2: Reaktionszeiten der Regelung zum Nachfüllen der Anlagenkapazität. Wenn man die Anlage mit ihrer Anlagenkapazität als Regelstrecke interpretiert, so muss der Regler, der die Kapazität bei sinkender Spannung nachlädt, innerhalb der Trägheit der Regelstrecke reagieren. Wie wäre ein solcher Regler zu realisieren?

Lösung: Beispielsweise als Laderegler eines Batteriespeichersystems. Im Modell wäre ein solcher Regler als Stromquelle wiederzugeben. Stellgröße der Regelung ist der Strom der Stromquelle, Führungsgröße der Regelung die Spannung im DC-Kreis und somit die Spannung über der Anlagenkapazität. Die Trägheit der Regelstrecke verursacht die Spannungsänderungen, auf die der Regler reagiert.

Frage 3.2.3: Simulationsmodell. Untersuchen Sie das Verhalten eines aus der AC-Seite spannungsgeführten Konverters bei Lastanforderungen im AC-Netz. Wie verhalten sich Strom und Spannung auf der DC-Seite?

Lösung: Folgende Abbildung zeigt das Netz mit dem Konverter als Anlage 2 im netzbildenden Betrieb auf der AC-Seite und Anlage 4 mit der Lastforderung. Die Spannung im DC-Kreis ist mit Hilfe einer Stromquelle und eines P-Reglers geregelt.

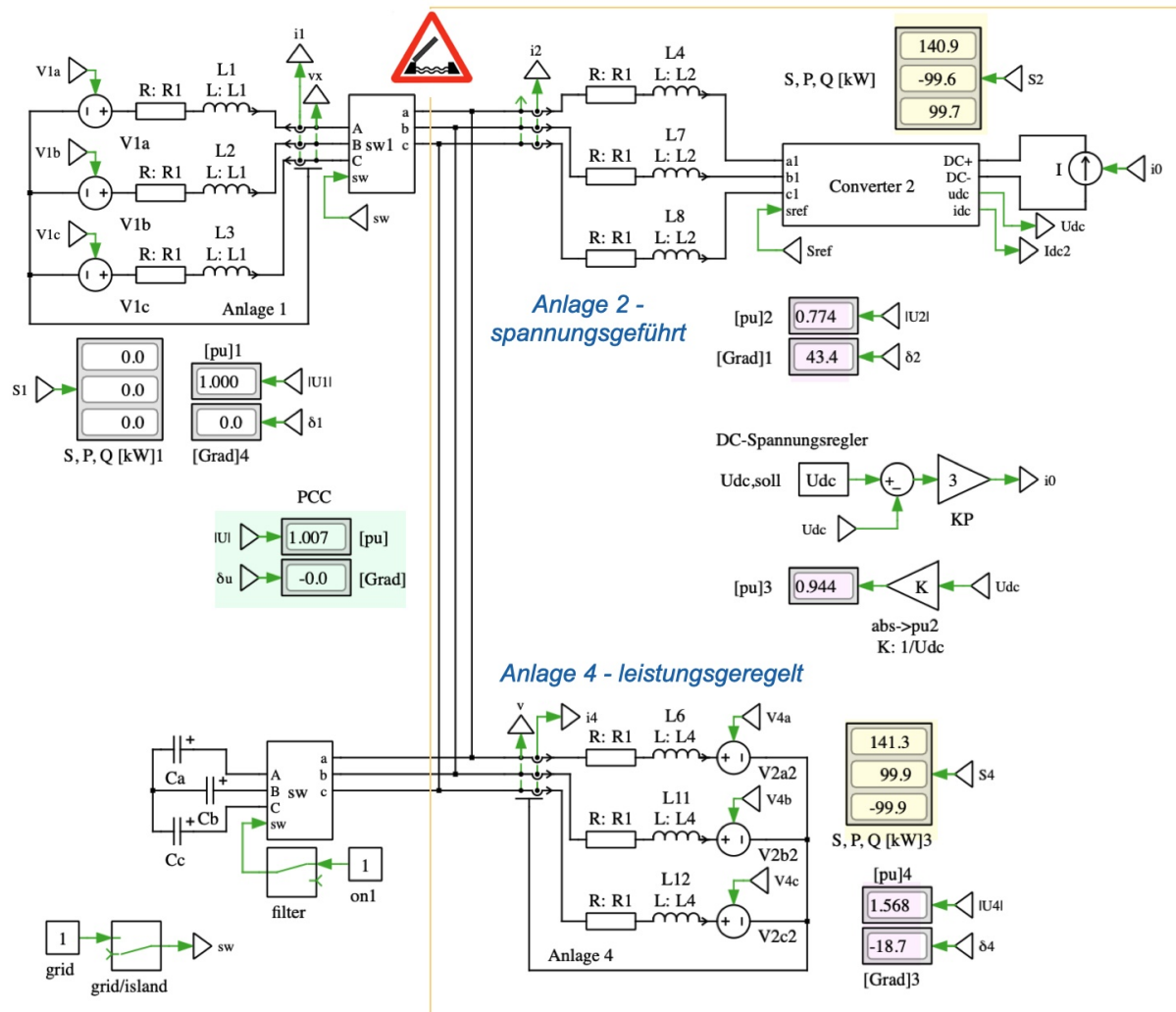


Abbildung 3.2.1 Inselnetz mit netzbildendem Konverter und Last

Anlage 1 als Netz ist vom Anschlusspunkt getrennt, Anlagen 2 und 4 arbeiten im Inselnetzbetrieb. Die von Anlage 4 geforderte Leistung wird durch Anlage 2 bereit gestellt. Anlage 2 versorgt sich hierfür aus ihrem DC-Anschluss.

Die Kapazität der Anlage 2 bildet den Puffer für die Spannungsregelung im DC-Kreis. Der Spannungsregler stellt den Strom der Stromquelle I_0 am DC-Anschluss so, dass so lange nachgefüllt wird, bis die Sollspannung U_{dc} als Füllstand über der Anlagenkapazität erreicht wird. Hierfür wird ein P-Regler verwendet.

In der Abbildung dargestellt ist die Situation, in der Anlage 4 eine Wirkleistung von $P = 100$ kW fordert, sowie eine Blindleistung von $Q = -100$ kW. Die Spannung im Inselnetz wird durch Anlage 2 geführt. Man erkennt, dass die Spannung im DC-Kreis unterhalb der Sollspannung bleibt. Grund hierfür sind die Eigenschaften des P-Reglers: Mit wachsender Reglerkonstante wird die bleibende Regelabweichung

chung kleiner. Eine dauerhafte Regelabweichung ist allerdings für die Funktion des P-Reglers unabdingbar, da er die Stellgröße durch Verstärkung der Regelabweichung gewinnt.

Der Zeitverlauf in folgender Abbildung zeigt, dass die Regelung innerhalb der Periodendauer der AC-Frequenz reagiert. Anlage 4 stellt die Lastanforderung mit einer Anstiegszeit von 10 ms.

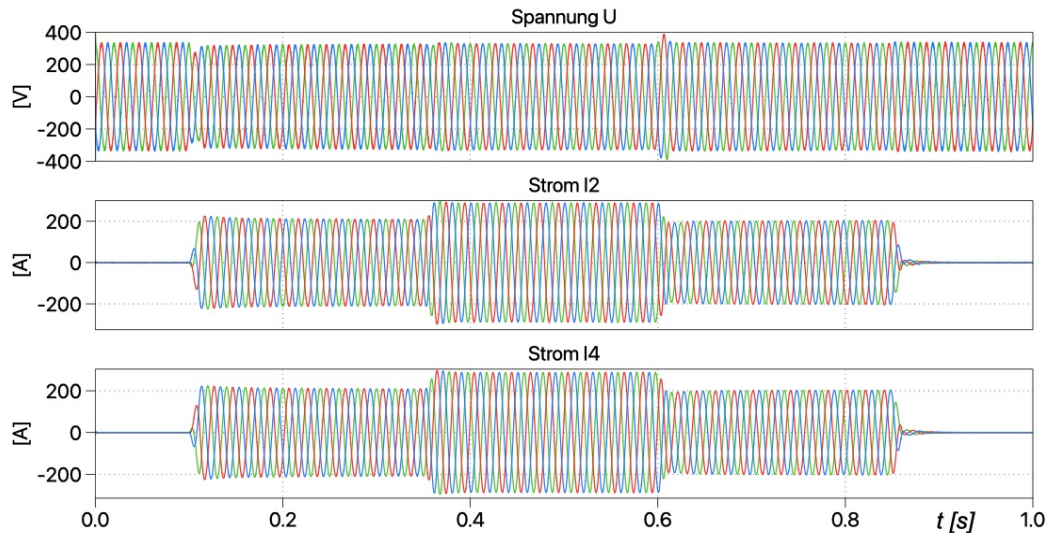


Abbildung 3.2.2 Spannung am Anschlusspunkt und Anlagenströme

In den Zeitsignalen der Spannung am Anschlusspunkt und der Anlagenströme sind Wirkleistung und Blindleistung nicht unmittelbar erkennbar. Man erkennt, dass die Spannung am Anschlusspunkt annähernd konstant bleibt und der Strom der Anlage 2 den Strom der Anlage 4 spiegelt. Folgende Abbildung zeigt die Leistungen der Anlagen 2 und 4 zusammen mit Spannung und Strom im DC-Kreis.

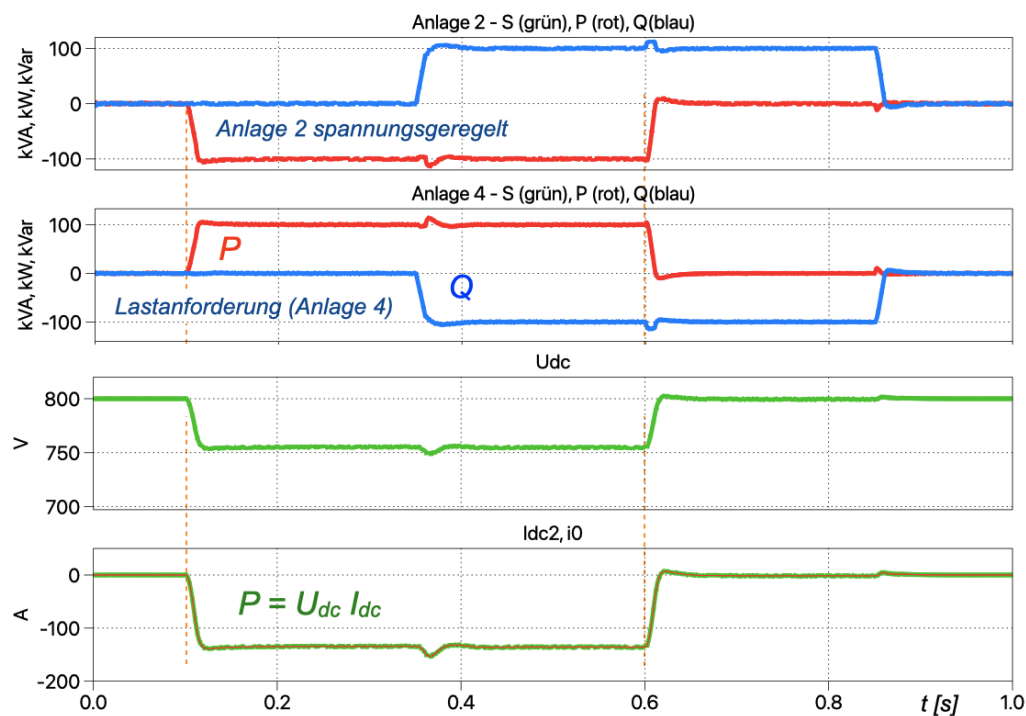


Abbildung 3.2.3 Abbildung der Lastforderung im DC-Kreis

Die Wirkleistung wird in den DC-Kreis abgebildet, die Blindleistung nicht. Die Blindleistung als mittelwertfreie Leistungsschwankung mit doppelter Netzfrequenz kann komplett aus der Kapazität der Anlage 2 bezogen werden. Der Bezug von Leistung im DC-Kreis ist nur für den Wirkstromanteil erforderlich. Hierbei ist die Leistung am AC-Anschluss mit der Leistung am DC-Anschluss gekoppelt: der Konverter kann dauerhaft keine Energie erzeugen oder aufnehmen (bis auf elektrische Verluste).

Für einen verlustfreien Konverter gilt $P_{DC} = P_{AC}$. Durch die gewählten Einstellungen des P-Reglers weicht die Spannung im DC-Kreis unter Last deutlich von der Nennspannung ab. Der Zeitverlauf der Ströme zeigt den Konverterstrom und den Strom des Spannungsreglers (Stromquelle I_0) im DC-Kreis.

Diese Ströme liegen im Zeitverlauf direkt übereinander: Die Entladung des Kondensators und die Reaktion des Reglers sind mit der gewählten Stromanstiegszeit nicht aufzulösen. Die Stromanstiegszeit liegt mit 10 ms unterhalb der Trägheit der Strecke von 16 ms. Der Regler reagiert im Millisekunden-Bereich. Das Zeitverhalten der Regelung wird in Abschnitt 3.3 näher untersucht.

Frage 3.2.4: Momentanreserve. Die Momentanreserve eines Konverters basiert auf der Anlagenkapazität. Welche Anforderungen bestehen an die Größe dieser Kapazität aus Sicht des Anlagenbauers? Wie wäre diese Energiereserve für die Nutzung im AC-Netz zu bewerten?

Lösung: Die Trägheit von Konvertern ist bestimmt durch die Energiemenge in den Anlagenkapazitäten. Die Größe dieser Kapazitäten ist einerseits bestimmt durch den Bedarf zur Glättung der Ströme im AC-Kreis (Mindestgröße der Kapazität), auf der anderen Seite durch die Reaktionszeiten der Regelung auf der DC-Seite, wenn diese an ein DC-Netz angeschlossen ist (maximale Größe der Kapazitäten). In einem DC-Netz addieren sich die Anlagenkapazitäten. Wird die Gesamtkapazität zu groß, wird die Spannungsregelung im DC-Netz zu langsam.

„Langsam“ ist hierbei ein relativer Begriff. Für Anlagenbauer genügen Kapazitäten im Bereich einiger Milli-Farad. Die Trägheit liegt hiermit im Bereich zweistelliger Millisekunden (für Anwendungen in der Niederspannung). Da die Regelung der Konverter in dieser Zeit ohne Probleme funktioniert, reicht diese Trägheit im DC-Netz aus. Eine schnelle Regelung ist hier erwünscht.

Mit den im Stromnetz gewohnten Zeitkonstanten passt diese Trägheit nicht zusammen. Für eine größere Momentanreserve durch Konverter im AC-Netz kann man die Anlagenkapazitäten erhöhen (beispielsweise durch Verwendung von Super-Kondensatoren). Der Rückgriff auf schnelle Regler für Batteriespeichersysteme funktioniert jedoch ebenfalls in Kombination mit den Anlagenkapazitäten.

3.3. Primärregelung

Aufgabe der Primärregelung ist die Spannungshaltung bzw. Netzbildung am DC-Anschluss des Konverters. Diese Aufgabe kann der Konverter übernehmen, oder eine Anlage am DC-Anschluss. Voraussetzung für die Netzbildung ist ein Energiespeicher bzw. ein Netz zum Ausgleich der Leistung.

Frage 3.3.1: Das Zeitverhalten der Regelstrecke im DC-Kreis soll näher untersucht werden. Hierzu wird der Konverter als Stromquelle nachgebildet, die sich aus der Anlagenkapazität bedient (Laststrom I_L). Der DC-Kreis wird mit Hilfe einer spannungsgeführten Stromquelle befüllt. Wenn der Konverter die Netzbildung übernimmt, sind die Rollen vertauscht. Folgende Abbildung zeigt die Anordnung. Untersuchen Sie das Zeitverhalten in der Simulation.

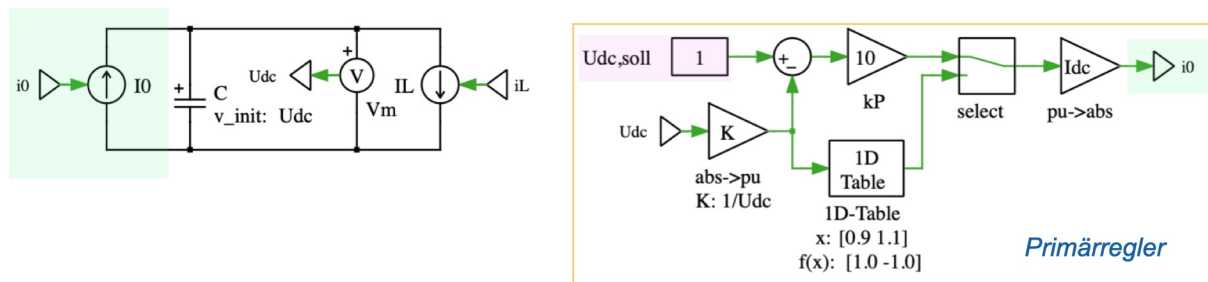


Abbildung 3.3.1 DC-Kreis mit Primärregelung

Lösung: Es wurden folgende Werte verwendet: Nennspannung $U_n = 800$ V, Nennstrom $I_n = 250$ A, Anlagenkapazität 10 mF. Für diese Werte wurde im Abschnitt 3.2 eine Trägheit von 16 ms berechnet. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf.

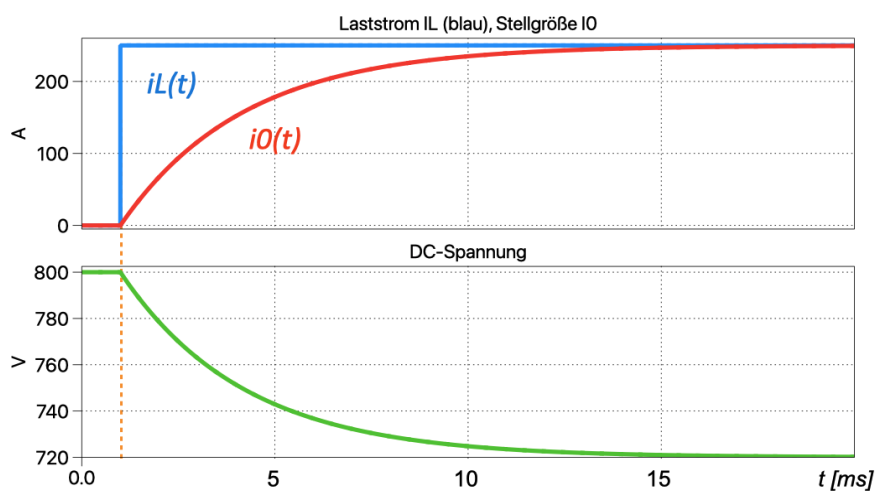


Abbildung 3.3.2 Zeitverhalten der Primärregelung

Man erkennt, dass die Regelung durchaus Zeit benötigt. Die kausale Kette beginnt beim Laststrom $i_L(t)$. Dieser steigt sprunghaft an und bedient sich hierbei aus der Momentanreserve, die die Anlagenkapazität zur Verfügung stellt. Die Momentanreserve ist eine Eigenschaft der Regelstrecke. Die Entnahme des Stroms aus der Anlagenkapazität führt zur Entladung des Kondensators und somit nach Gleichung (3.2.2) zu einer sinkenden DC-Spannung $u_{dc}(t)$.

Der Primärregler reagiert erst auf diese Spannungsänderung und führt den Strom $i_0(t)$ als Stellgröße so lange nach, bis die Spannung stabil bleibt und sich ein Gleichgewicht aus Abfluss $i_L(t)$ und Zufluss $i_0(t)$ einstellt. Bei einer Entnahme stabilisiert sich die Spannung unterhalb der Nennspannung. Durch die Größe der Reglerkonstante K_P lässt sich die verbleibende Abweichung einstellen.

Bei Nennstrom braucht die Primärregelung mit den gegebenen Werten ca. 20 ms Zeit zum Ausregeln. Da der Primärregler Strom zuführt, wird die Kapazität nur zu einem geringen Teil entladen. Ohne eine Zufuhr durch den Netzbildner wäre die Kapazität bei Nennstrom bzw. Nennleistung in dieser Zeit vollständig entladen, in Übereinstimmung mit der berechneten Trägheit H .

Frage 3.3.2: Realisierung der Primärregelung. Der P-Regler soll durch eine Kennlinie ersetzt werden, die das Verhalten einer Spannungsquelle mit Innenwiderstand R_d abbildet. An den Klemmen der Spannungsquelle mit Leerlaufspannung U_n erhält man bei Bezug des Stroms I_L :

$$U = U_n - R_d I_L \quad (3.3.1)$$

Realisieren Sie diese Gleichung als Kennlinie in normierter Form, d.h. die Spannung bezogen auf die Nennspannung, und den Strom bezogen auf den Nennstrom. Überprüfen Sie die Funktion in der Simulation. Ist die Regelung mit Hilfe der Kennlinie in der Regelung äquivalent zum P-Regler aus der letzten Aufgabe?

Lösung: (1) Realisierung der Kennlinie: Durch Erweitern der Gleichung (3.3.1) mit $1/(U_n I_n)$ und Umformen erhält man

$$u = 1 - r_d i_L \quad (3.3.2)$$

mit $u = U/U_n$, $i_L = I_L/I_n$ und $r_d = R_d I_n / U_n$. Im Vergleich zum P-Regler gilt $K_P = 1/R_d$, bzw. in normierter Form $k_P = 1/r_d$.

(2) Überprüfung in der Simulation: Folgende Abbildung zeigt die Primärregelung im Signalfuss als P-Regler und mit Hilfe einer Kennlinie der Form $i(u)$ zusammen mit der Schaltung.

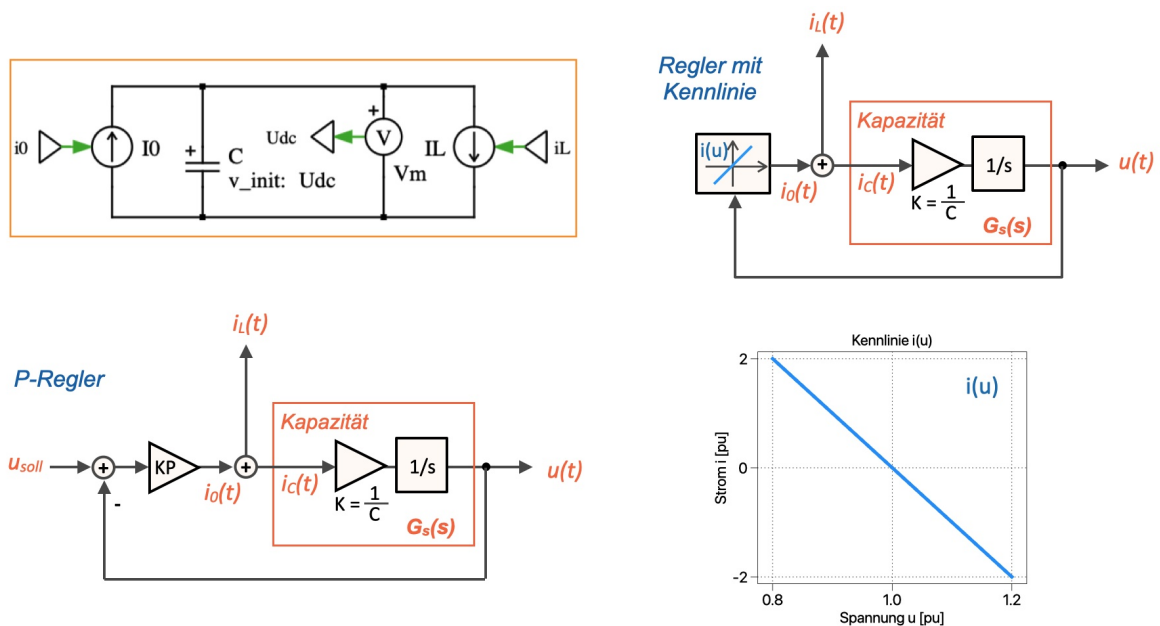


Abbildung 3.3.3 Struktur der Primärregelung als P-Regler und Kennlinie

In der Simulation wurde in normierter Form die Reglerkonstante $k_P = 10$ gewählt. Hieraus erhält man $r_d = 1/k_P = 0,1$. Die Steigung der Kennlinie $i(u)$ beträgt somit $-1/r_d = -k_P = -10$. Für eine Spannung von $u = 0,9$ pu erhält man einen Strom von 1 pu.

Mit einer Nennspannung von $U_n = 800$ V und einem Nennstrom von $I_n = 250$ A errechnet sich ein Innenwiderstand von $R_d = r_d U_n / I_n = 1/32 \Omega$. Die Simulation zeigt, dass eine Spannungsquelle mit Innenwiderstand, eine Stromquelle mit P-Regler, und eine Stromquelle mit Kennlinie $i(u)$ exakt das gleiche Zeitverhalten besitzen. Alle Realisierungen repräsentieren die Kennlinie nach Gleichung (3.3.1).

(3) Vergleich der Kennlinie mit dem mit P-Regler: Die Übertragungsfunktion der Regelschleife ergibt sich mit Bezug auf die letzte Abbildung zu:

$$U = -\frac{G_s K_P U_n}{1 + G_s K_P} - \frac{G_s I_L}{1 + G_s K_P} \quad (3.3.3)$$

Die Übertragungsfunktion der Regelstrecke G_s beträgt:

$$G_s(s) = \frac{1}{C s}, \text{ die Reglerkonstante } K_P = \frac{1}{R_d}$$

62/105

Konverter arbeitet generell bidirektional und können sowohl eine Einspeiseanlage als auch eine Bezugsanlage bedienen. Das gilt auch für den Einsatz von Energiespeichern. Konventionelle Kraftwerke und Generatoren mit mechanischem Antrieb haben diese Eigenschaft nicht, sie arbeiten unidirektional. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des DC-Netzbildners für den Konverter als Anlage 2.

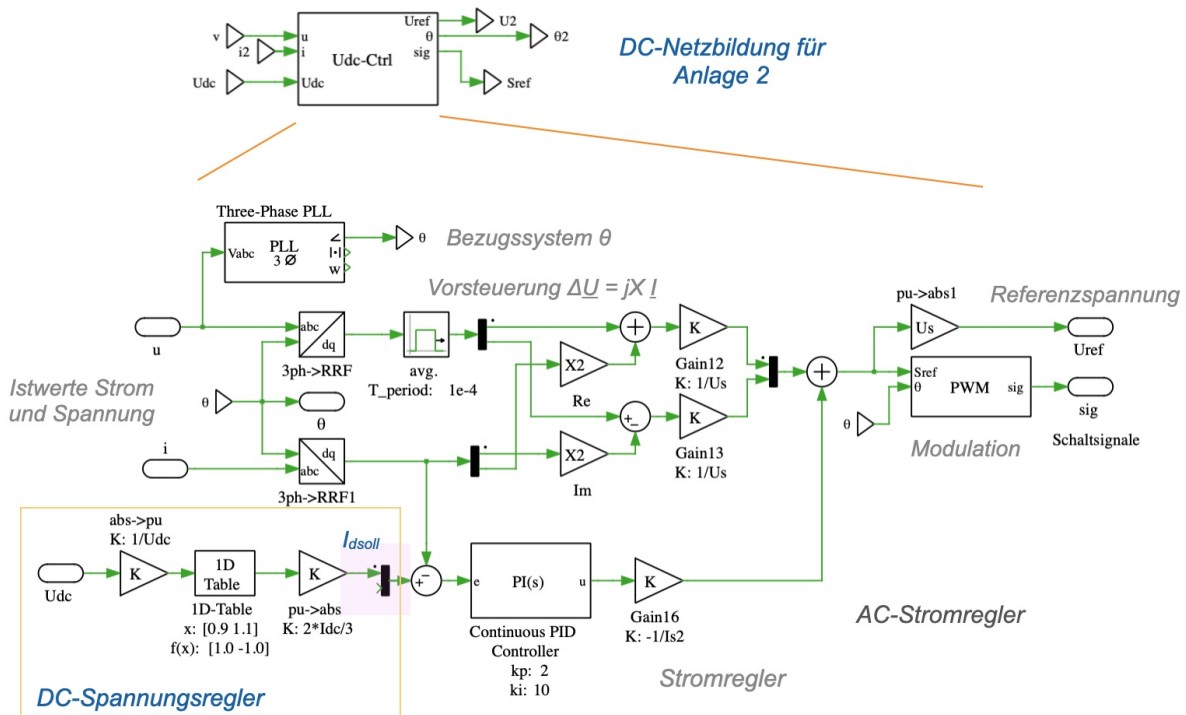


Abbildung 3.3.5 Aufbau des DC-Spannungsreglers für den Konverter

Man erkennt den Stromregler aus Aufgabe 3.1.1 mit einer Änderung: Statt eines festen Sollwertes I_{soll} wird der Realteil I_d des Sollwertes für den Konverterstrom nun als Stellgröße des vorgelagerten Spannungsreglers verwendet, der Imaginärteil I_q bleibt null. Der Spannungsregler wurde direkt aus Aufgabe 3.3.2 übernommen. Es wurde lediglich die Vorgabe des AC-Stroms um den Faktor $2/3$ korrigiert, da der AC-Strom einphasig vorgegeben wird und die DC-Spannung etwa den doppelten Wert der AC-Spannung beträgt. Folgende Abbildung zeigt das Zeitverhalten der Regelung.

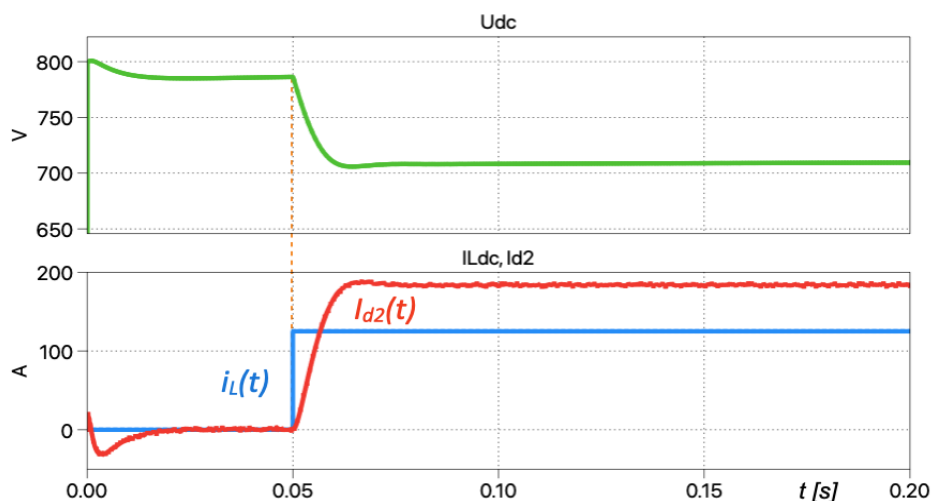


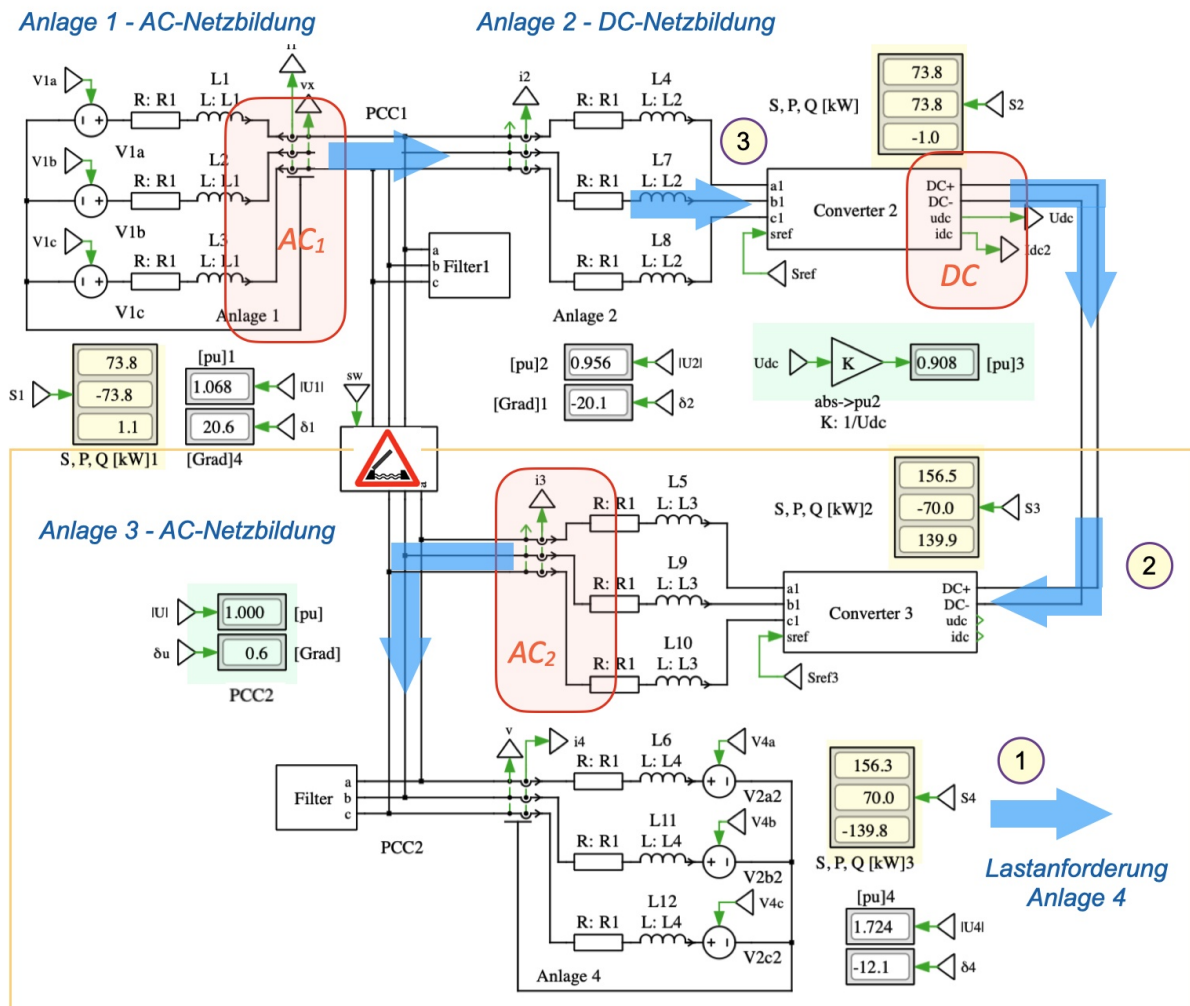
Abbildung 3.3.6 Zeitverhalten der Spannungsregelung

Der Laststrom $i_L(t)$ am DC-Anschluss steigt springförmig auf den halben Bemessungswert des Laststromes. Da dieser Strom aus der Momentanreserve der Anlage bedient wird, sinkt die Spannung $u_{dc}(t)$ über der Anlagenkapazität C . Der DC-Spannungsregler reagiert auf diese Spannungsänderung und führt den AC-Strom des Konverters nach: Es ist deutlich zu erkennen, dass der aus der Strommessung am Anschlusspunkt der Anlage ermittelte Strom $i_{dc}(t)$ dem Verlauf der DC-Spannung folgt mit umgekehrtem Vorzeichen).

Die Primärregelung besitzt eine Reaktionszeit im Bereich von ca. 20 ms und reagiert folglich innerhalb einer Periode der Netzfrequenz. Bei der Betrachtung von Vorgängen im AC-Netz ist die Zeitaufösung in der Regel gröber, so dass diese Reaktionszeit kaum zu beobachten ist (siehe z.B. Abbildung 3.2.2).

Frage 3.3.4: Inselnetz mit DC-Kopplung zum AC-Netz. Anlage 2 soll am Netz (= Anlage 1) betrieben werden, zwischen den Anlagen 1 und 2 und den Anlagen 3 und 4 wird die Verbindung durch einen Schalter aufgetrennt. Die Anlagen 3 und 4 arbeiten im Inselnetzbetrieb, wobei Anlage 3 die Netzbildung auf der AC-Seite übernimmt, und Anlage 4 wie gewohnt die Lastforderung stellt. Anlage 3 ist auf der DC-Seite mit Anlage 2 gekoppelt. Realisieren sie die Anordnung im Modell und untersuchen Sie das Regelungskonzept der Anlagen in der Simulation.

Lösung: Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Simulationsmodells.



gen arbeiten spannungsgeregelt auf der jeweiligen AC-Seite. Anlage 4 arbeitet stromgeführt und stellt die Lastanforderung. Anlage 2 übernimmt die Netzbildung im DC-Netz: Hierfür wird der Regler aus Aufgabe 3,3,3 verwendet.

In der Abbildung ist der Lastfluss mit blauen Pfeilen dargestellt: Anlage 4 fordert $P = 70 \text{ kW}$ und $Q = -140 \text{ kVar}$, die von Anlage 3 bereitgestellt werden. Die erforderliche Wirkleistung bezieht Anlage 3 aus dem DC-Netz. Über dieses DC-Netz sind die beiden AC-Netzsegmente gekoppelt.

Die geforderte Wirkleistung stellt die im DC-Netz netzbildende Anlage 2 bereit. Anlage 2 entnimmt die erforderliche Leistung als Wirkleistung dem AC-Netzbildner, d.h. Anlage 1. An den Leistungsanzeigen ist ersichtlich, dass über die DC-Strecke nur Wirkleistung transportiert wird. Das zeigen auch die Stromverläufe in folgender Abbildung.

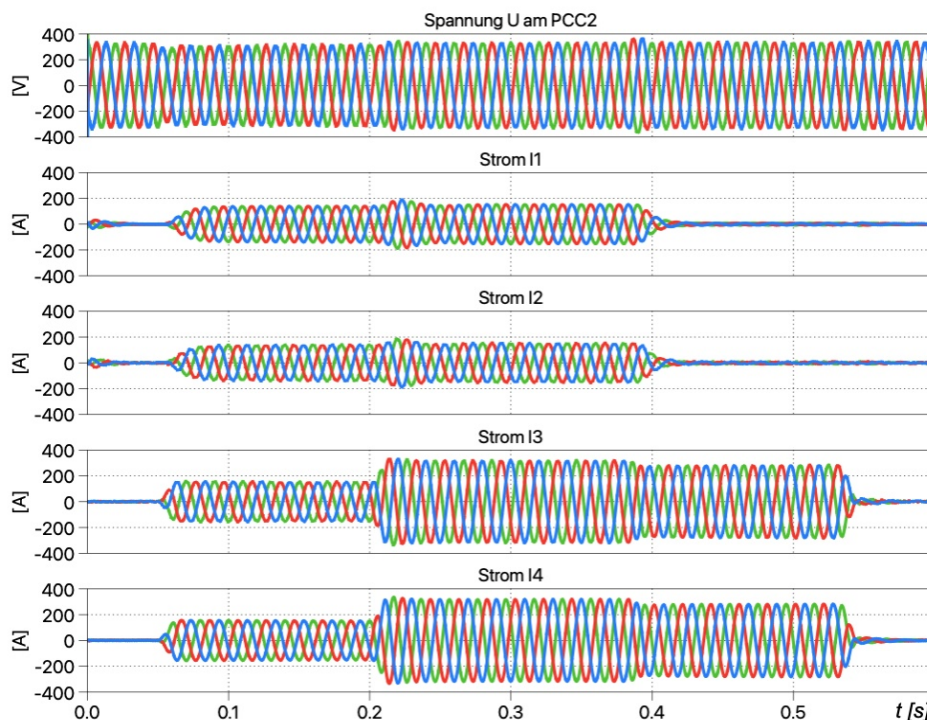


Abbildung 3.3.7 AC Spannung am Anschlusspunkt 2 und Anlagenströme

Die Lastanforderung stellt Anlage 4 mit einer Stromanstiegszeit von 10 ms. Am Anlagestrom ist zunächst nur der Wirkstromanteil vorhanden, ab dem Zeitpunkt $t_2 = 0,2 \text{ s}$ kommt der Blindstromanteil hinzu. Zum Zeitpunkt $t_3 = 0,38 \text{ s}$ wird der Wirkstromanteil zurückgenommen.

Der Strom in Anlage 3 spiegelt den Strom von Anlage 4 (Lastanforderung). Ebenso spiegelt der Strom von Anlage 1 den Strom der Anlage 2 (Lastanforderung aus dem DC-Netz). Die Ströme der Anlagen 1 und 2 enthalten jedoch nur den Wirkstromanteil der ursprünglichen Lastanforderung.

3.4. Sekundärregelung

Aufgabe der Sekundärregelung ist die Einstellung der Arbeitspunkte für die Primärregelung. Wie die Primärregelung dient die Sekundärregelung zur Führung netzbildender Anlagen auf der DC-Seite. Diese Anlage kann ein Energiespeichersystem sein, bzw. ein Konverter mit Anschluss an das AC-Netz. Bedingung für die Primärregelung und Sekundärregelung ist eine für die vorgesehene Betriebsdauer ausreichende Energiequelle.

Frage 3.4.1: Aufgaben des Sekundärreglers. Der Primärregler stellt auf der DC-Seite die Spannung eines Netzbildners. Hierbei liefert die Höhe der Spannung einen Indikator für den Lastzustand des

Netzes. Liegt die Spannung unterhalb des Nennwertes, so überwiegen im DC-Netz die Lastanforderungen, die durch die Netzbildner ausgeglichen werden. Im umgekehrten Fall (Spannung oberhalb der Nennspannung) überwiegt die Einspeisung. Der Sekundärregler kann (1) die Spannung in einem dauerhaften Lastzustand wieder auf den Nennwert führen, (2) die Arbeitspunkte einzelner Netzbildner so verschieben, dass ausgewählte Anlagen mehr Leistung übernehmen. Welchen Zweck verfolgt eine solche Regelung?

Lösung: (1) Zweck der Angleichung der Spannung an den Nennwert wäre eine überlagerte Spannungsregelung im Netz. (2) Ein Ausgleich der Lasten auf einzelne Anlagen kann aus Gründen der Fairness geboten sein, bzw. aus wirtschaftlichen Gründen (Kosten der Energie).

Grundsätzlich reagiert die Primärregelung nach dem Prinzip der Solidarität: Alle Anlagen beteiligen sich am Lastenausgleich zur Stabilisierung des Netzes. Solidarität muss jedoch nicht fair sein, wenn der Verursacher eines Ungleichgewichts die Folgen nicht tragen muss. Werden Energiespeicher eingesetzt, kann deren Betriebsführung durch zeitabhängige Energiekosten bzw. durch den Füllstand der Anlagen andere Prioritäten setzen.

Eine Sekundärregelung ist zur stabilen Führung des Netzes nicht notwendig. Sollte sie zur Führung der Betriebsmittel eingesetzt werden, so muss sie der Primärregelung überlagert bzw. übergeordnet sein. Diese Eigenschaft als sekundäre Regelung drückt bereits der Name aus. Die Zeitkonstanten der Sekundärregelung sind deutlich größer als die der Primärregelung.

Frage 3.4.2: Sekundärregler für einen Primärregler. Folgende Abbildung zeigt den Sekundärregler als überlagerten Regler zum Primärregler. Erläutern Sie die Funktionsweise der Regelung.

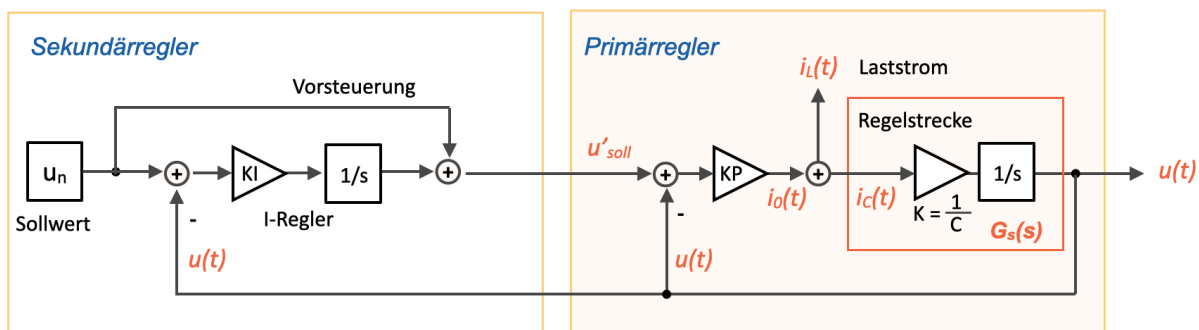


Abbildung 3.4.1 Aufbau des Sekundärreglers für einen Primärregler mit P-Regler

Lösung: Der Primärregler ist als P-Regler ausgeführt. Führungsgröße des P-Reglers ist die Spannung $u(t)$ am Ausgang des Netzbildners. Allerdings verbleibt je nach Lastzustand eine dauerhafte Regelabweichung. Stellgröße des Primärreglers ist der Strom des Netzbildners.

Der Sekundärregler hat als Stellgröße die Vorgabe u'_{soll} für den Primärregler: Er verstellt des Sollwert des Primärreglers so, dass ein vorgegebener Sollwert für die Anlagenspannung eingehalten wird. Der Sekundärregler ist hierzu als I-Regler ausgeführt. Mit Hilfe der Vorsteuerung bleibt der ursprüngliche Sollwert des P-Reglers erhalten.

Frage 3.4.3: Sekundärregler für einen mit Hilfe einer Kennlinie ausgeführten Primärregler. Wie liesse sich der Sekundärregler realisieren, wenn der Primärregler mit Hilfe einer Kennlinie arbeitet?

Lösung: Folgende Abbildung zeigt den Aufbau der Regelung.

Am Aufbau des Sekundärregler ändert sich nichts: Er bleibt als I-Regler für die Einhaltung des Sollwertes der Spannung zuständig. Die Vorsteuerung kann entfallen, da der Sollwert der Spannung bereits in der Kennlinie des Primärreglers enthalten ist.

Stellgröße des Sekundärreglers ist nun eine Spannungsabweichung (engl. Offset) in der Rückführung des Istwertes der Spannung für den Primärreglers. Auf diese Weise sind keine Anpassungen an der Kennlinie des Primärreglers erforderlich.

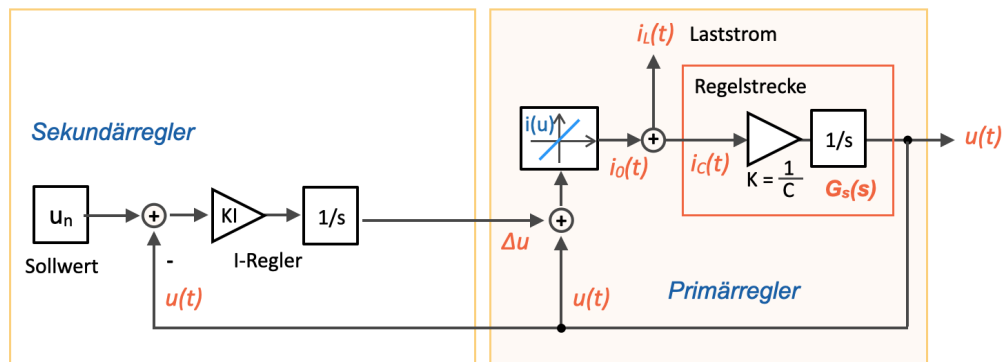


Abbildung 3.4.2 Aufbau des Sekundärreglers für einen Primärregler mit Kennlinie

Der Sekundärregler verschiebt den Arbeitspunkt des Primärreglers zu niedrigeren bzw. höheren Spannungen: Der Primärregler verschiebt den Arbeitspunkt auf seiner gegebenen Kennlinie; der Sekundärregler verschiebt die Kennlinie des Primärreglers.

Frage 3.4.4: Simulation. Ergänzen Sie einen Sekundärregler in der Anordnung nach Aufgabe 3.3.3 oder 3.3.4 und überprüfen Sie die Funktionsweise in der Simulation. Welchen Einfluss auf die Leistung hat die Sekundärregelung?

Lösung: Folgende Abbildung zeigt die Regelung des DC-Netzbildners mit Sekundärregelung zusammen mit dem Zeitverlauf der Spannungen mit und ohne Sekundärregelung. Es wurde die Anordnung nach Aufgabe 3.3.3 verwendet, Anlage 2 bedient als Netzbildner eine fest vorgegebenen Laststrom $i_L(t)$ und versorgt sich aus dem AC-Netz (Anlage 1).

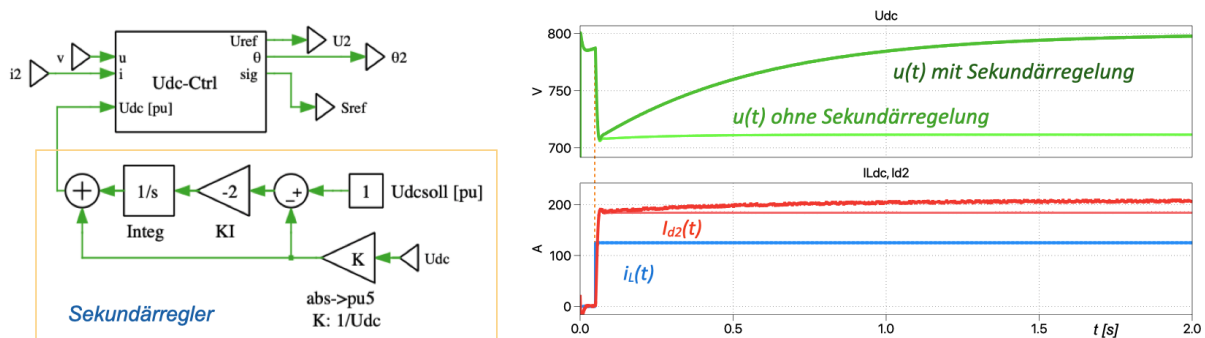


Abbildung 3.4.3 Aufbau des Sekundärreglers und Zeitverlauf in der Simulation

Der Primärregler innerhalb des DC-Spannungsreglers wurde mit Hilfe einer Kennlinie realisiert (siehe Abbildung 3.3.5, wobei die Ansteuerung jetzt direkt mit normiertem Spannungswert erfolgt). Der Sekundärregler ist ein einfacher I-Regler nach dem in der letzten Aufgabe beschriebenen Aufbau.

Im Zeitverlauf erkennt man, dass der Sekundärregler in dieser Realisierung die Spannung im DC-Kreis innerhalb von ca. 2 s wieder auf den Nennwert führt. Gleichzeitig steigt der Wirkstrom $i_{d2}(t)$ des Konverters, der der Stellgröße des DC-Spannungsreglers folgt, obwohl der Laststrom $i_L(t)$ im DC-Kreis konstant bleibt. Die Sekundärregelung hat einen Einfluss auf die Leistung der Anlage: Mit der im Vergleich zur reinen Primärregelung höheren DC-Spannung steigt die bei konstantem Laststrom geforderte Leistung. Da die Spannung im AC-Kreis konstant bleibt, steigt der Konverterstrom $i_{d2}(t)$.

4. Maschinen

4.1. Funktionsprinzip

Elektrische Maschinen besitzen einen Rotor als bewegliches Teil, und einen Stator als feststehendes Teil. Bei der in der Abbildung dargestellten Maschine besitzt der Stator Wicklungen, die an den Anschlussklemmen an das Stromnetz angeschlossen werden: Das Netz bildet die Klemmenspannung.

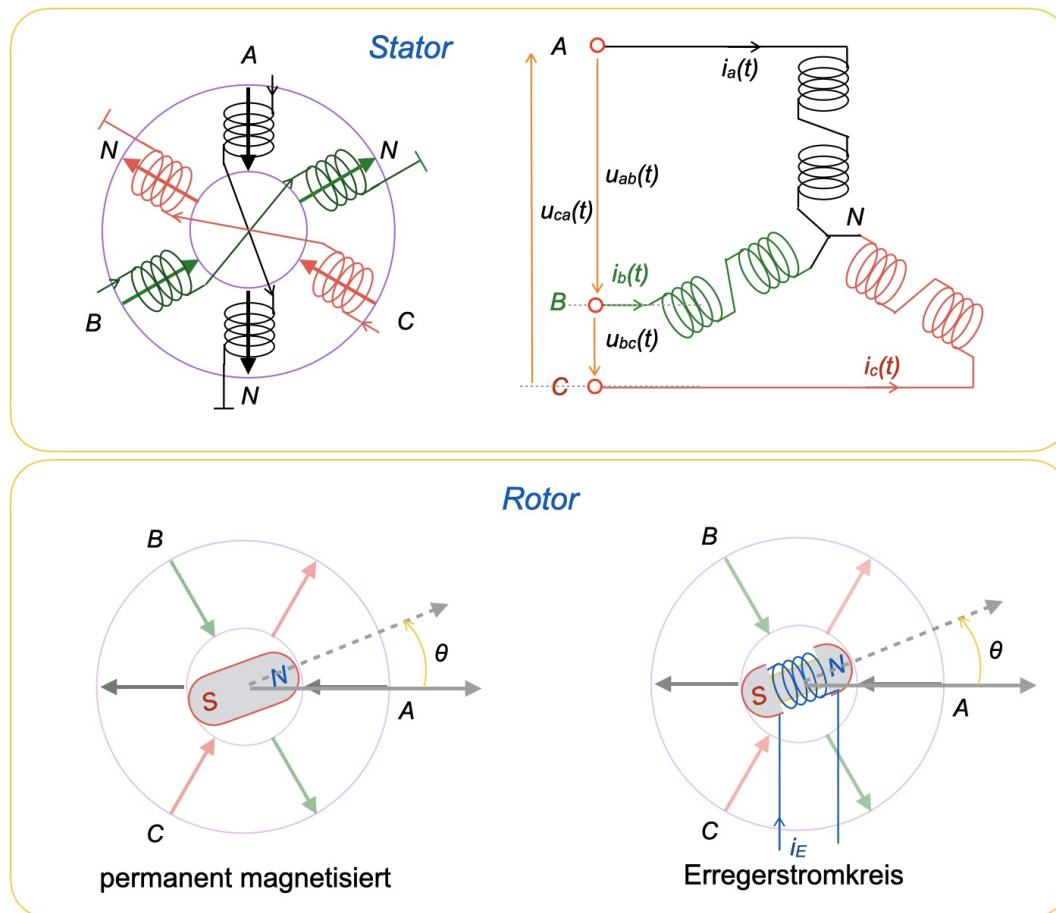


Abbildung 4.1.1 Statorsystem und Rotorsystem der Maschine

Der Rotor der abgebildeten Maschine ist entweder permanent magnetisiert, oder durch einen Erregerstromkreis mit Gleichstrom magnetisiert. Durch Bewegung des Rotors gegenüber dem Stator ändert sich die magnetische Flussdichte im Stator. Durch das induzierte elektrische Feld entsteht eine Spannung, bzw. beim Anschluss ans Netz ein Strom. Hierbei wirkt die im Stator induzierte elektrische Spannung zusammen mit der Spannung des Netzes an den Anschlussklemmen.

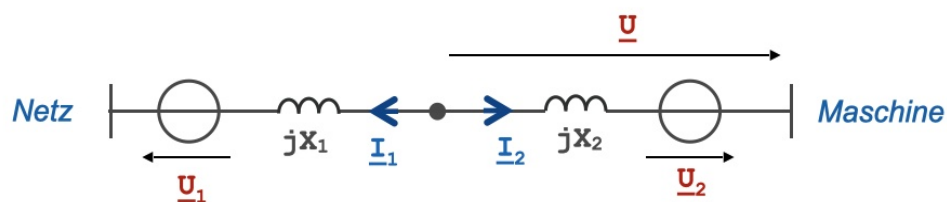


Abbildung 4.1.2 Elektrisches Ersatzschaltbild der Maschine

Das elektrische Ersatzschaltbild zeigt die Netzspannung $\underline{U}$ an den Anschlussklemmen der Maschine, sowie die induzierte Spannung $\underline{U}_2$ im Stator der Maschine, zusammen mit der Induktivität der Statorwicklung als Koppelreaktanz X_2 der Maschine zum Netz. Das elektrische Ersatzschaltbild der Maschine ist somit identisch mit dem eines Umrichters. Somit ist auch die Betriebsweise unmittelbar vergleichbar.

Die Spannung $\underline{U}_2$ der Maschine ist die durch den Rotor (= Polrad) induzierte Spannung (= Polradspannung) und besitzt eine mechanische Ursache: der Rotor besitzt eine Schwungmasse und ist an der Antriebswelle mit einem Antrieb oder mit einer mechanischen Last verbunden. Im ersten Fall arbeitet die Maschine als Generator, im zweiten Fall als Motor.

Synchronmaschinen arbeiten synchron am Netz, da ihre Anschlussklemmen fest mit dem Netz verbunden sind. Der gleiche Maschinentyp wird auch für Antriebe mit variabler Drehzahl eingesetzt, beispielsweise in Elektrofahrzeugen und Schienenfahrzeugen. Hierbei wird an den Anschlussklemmen mit Hilfe eines leistungselektronischen Konverters ein variables Drehfeld erzeugt, dem die Maschine folgt (Motorbetrieb), oder das die Maschine antreibt (Bremsbetrieb bzw. Generatorbetrieb). Auf diese Weise lassen sich elektrische Maschinen mit variabler Drehzahl an einem Gleichspannungsanschluss betreiben. Für den Betrieb am Wechselspannungsnetz ist dann ein weiterer Umrichter erforderlich.

Statorsystem

Bedingt durch die Drehung des Rotors dreht sich die im Stator induzierte Spannung (= Polradspannung) mit dem Bezugssystem $\theta(t) = 2 \cdot f_{\text{Rotor}}(t) + \theta_0$. Nach Hochlaufen und Synchronisation der Maschine mit dem Netz ist die Rotordrehzahl $f_{\text{Rotor}}(t)$ gleich der Netzfrequenz $f(t)$. Im synchronen Betrieb gilt $f_{\text{Rotor}}(t) = f(t)$. Aus der Maschengleichung der elektrischen Ersatzschaltung erhält man:

$$(\underline{U} - \underline{U}_2) = jX_2 I_2 \quad (4.1.1)$$

Mit dem Bezugssystem $\underline{U} = U$ ergibt sich nach der Berechnung aus Abschnitt 1.2 für die Wirkleistung und für die Blindleistung der Maschine

$$P_2 = -\frac{U_2 U \sin(\delta)}{X_2} \quad (4.1.2)$$

$$Q_2 = \frac{U_2 (U \cos(\delta) - U_2)}{X_2} \quad (4.1.3)$$

Hierbei bezeichnet δ den Polradwinkel, d.h. den Winkel zwischen der Klemmenspannung $\underline{U}$ und der Polradspannung $\underline{U}_2$. Das Statorsystem stellt die Kopplung der Maschine mit dem elektrischen Anschluss bzw. dem elektrischen Netz her. Das elektrische Ersatzschaltbild ist identisch mit dem eines Konverters. Als elektromechanisches System hat die Maschine jedoch auch einen mechanischen Teil.

Die mechanische Leistung ist im eingeschwungenen Zustand der Maschine (d.h. nach dem Hochlaufen und nach Lastwechseln) im Gleichgewicht mit der elektrischen Leistung. Im Generatorbetrieb wird mechanische Leistung in elektrische Leistung gewandelt, im Motorbetrieb elektrische Leistung in mechanische Leistung. Es gilt:

$$P_{\text{el}} = 3 U I_d = P_{\text{mech}} = M \omega \quad (4.1.4)$$

Hierbei bezeichnet U die Klemmenspannung und I_d den Wirkstrom ($I_d = I \cos \phi$ mit dem Winkel zwischen Strom I und Klemmenspannung $\underline{U}$). Die Klemmenspannung wird vom Leiter zum Sternpunkt gemessen (und beträgt somit 230 V effektiv bei einem 400 V System); der Faktor 3 kommt durch die 3 Phasen der Maschine zustande. Die mechanische Leistung ergibt sich aus dem Produkt des mechanischen Moments M und der Rotordrehzahl ω als Kreisfrequenz ($\omega = 2\pi f$). Die Drehzahl f entspricht bei der Synchronmaschine der Netzfrequenz.

Aus dem Leistungsgleichgewicht (4.1.4) folgt die Kopplung zwischen dem mechanischen und dem elektrischen Anteil der Maschine in Form der Maschinenkonstante k_M :

$$\frac{U}{\omega} = \frac{M}{3I_d} = k_M = \text{konstant} \quad (4.1.5)$$

Die Maschine ist so konstruiert, dass die induzierte Spannung U im Verhältnis zur Rotordrehzahl ω dem Verhältnis des mechanischen Momentes M zum Statorstrom I_d entspricht. Mit Hilfe der Maschinenkonstante k_M gelingt die Kopplung des elektrischen Systems (des Statorsystems) mit dem mechanischen System (dem Rotorsystem).

Rotorsystem

Die im Stator induzierte Polradspannung $\underline{U}_2$ folgt dem Rotor. Sie ist mit der Klemmenspannung $\underline{U}$ über die Induktivität der Statorwicklung verbunden (siehe elektrisches Ersatzschaltbild). Die Induktivität der Statorwicklung besitzt die Reaktanz X_2 . Die Betriebsweise der Maschine ist nun mechanisch plausibel: Eilt der Rotor mit der Polradspannung dem Netz vor, befindet sich die Maschine im Generatorbetrieb: Der Rotor treibt das Netz. Im Motorbetrieb zieht das Netz den Rotor.

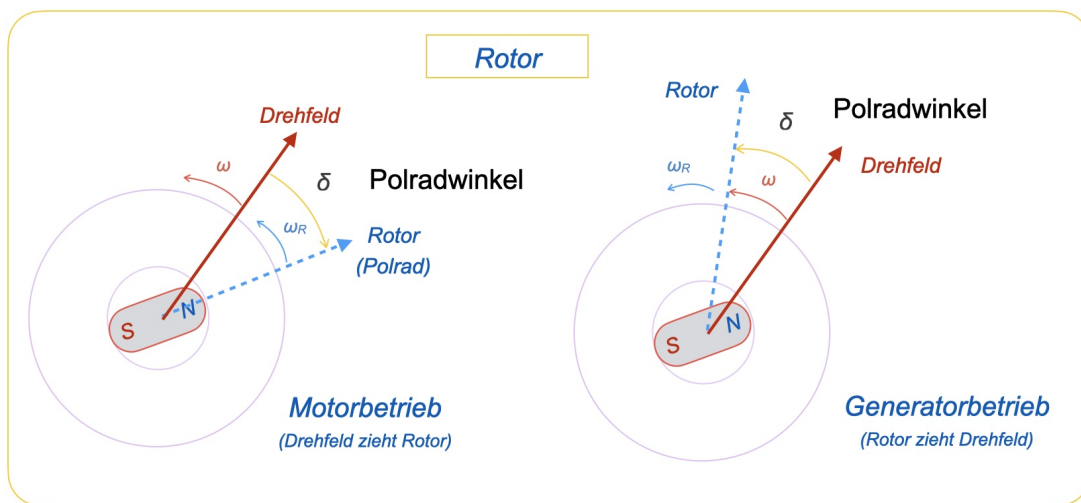


Abbildung 4.1.3 Rotor als Polrad

Der Rotor der Maschine stellt zusammen mit dem Rad der Turbine eine rotierende Masse dar. Die rotierende Masse wirkt wie ein Schwungrad: sie besitzt ein Trägheitsmoment J . Folgende Abbildung zeigt das mechanische Modell des Rotorsystems.

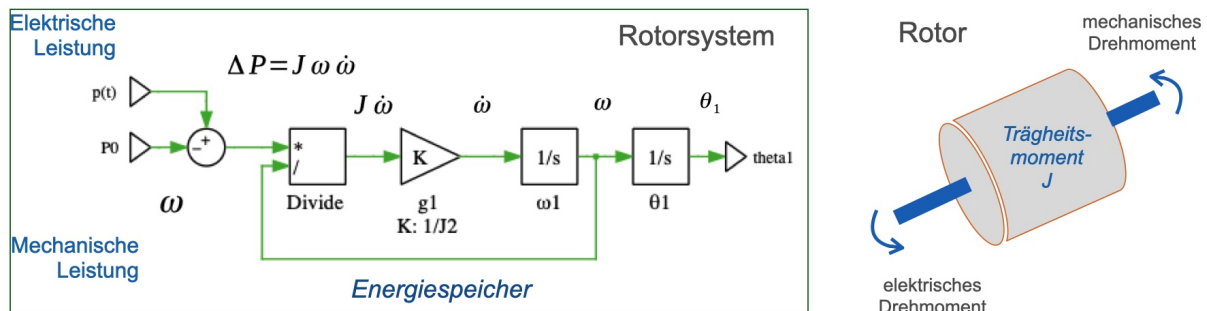


Abbildung 4.1.4 Mechanisches Modell des Rotorsystems

Die vollständige Gleichung für die mechanische und elektrische Leistung lautet nun

$$P_{el} - P_{mech} = J \omega \dot{\omega} \quad (4.1.6)$$

Eine Abweichung des Gleichgewichts zwischen elektrischer Leistung P_{el} an den Anschlussklemmen der Maschine und mechanischer Leistung P_{mech} an der Antriebswelle führt zu einer Beschleunigung oder Abbremsung der rotierenden Masse, bis bei konstanter Drehzahl ein neuer Gleichgewichts-

zustand erreicht wird. Der Ausdruck für die Leistungsdifferenz aus (4.1.6) folgt aus der kinetischen Energie der Schwungmasse:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (4.1.7)$$

Durch Differenzieren nach der Zeit erhält man

$$P_{\text{kin}} = J \omega \dot{\omega} \quad (4.1.8)$$

Aus der Leistungsbilanz nach Gleichung (4.1.6) folgt der in Bild 4.1.4 dargestellte Signalfuss. Division der Leistungsdifferenz ΔP durch die aktuelle Kreisfrequenz ω ergibt das resultierende Drehmoment aus der Leistungsdifferenz

$$M_{\text{el}}(t) - M_{\text{mech}}(t) = J \dot{\omega} \quad (4.1.9)$$

Nach Division durch das Trägheitsmoment J erhält man die Änderungsrate $\dot{\omega}(t)$ der Kreisfrequenz. Aus dieser folgt durch Integration die Kreisfrequenz $\omega(t)$ und durch erneute Integration das Bezugssystem $\theta(t)$ des Rotors. Bedingt durch die Trägheit der Schwungmasse des Rotorsystems besitzt die Maschine ein eigenes Bezugssystem $\theta(t)$.

Im Leerlaufbetrieb ist dieses Bezugssystem phasensynchron mit dem Netz. Laständerungen im Netz führen zu Phasenänderungen der Klemmenspannung $\underline{U}$ gegenüber diesem Bezugssystem. Die Maschine stellt die benötigte Leistung sofort bereit, bzw. nimmt die überschüssige Leistung sofort auf. Die bereit gestellte bzw. aufgenommene Leistung erhöht die kinetische Energie der Maschine, bzw. verringert die kinetische Energie. Hierdurch ändert sich die Drehzahl der Maschine.

Als Kenngröße für die Größe des kinetischen Energiespeichers E_{kin} im Verhältnis zur Anschlussleistung P_n der Maschine lässt sich die Trägheit H definieren:

$$H = \frac{E_{\text{kin}}}{P_n} \quad (4.1.10)$$

Maßeinheit der Trägheit ist die Zeit in Sekunden. Die Trägheit entspricht somit der Speicherdauer: Sie kennzeichnet die Zeitspanne, nach der bei Nennleistung der Energiespeicher aufgebraucht wäre. Aus der Trägheit einer die Maschine lässt sich bei bekannter Anschlussleistung P_n das Trägheitsmoment J abschätzen.

Frage 4.1.1: Simulationsmodell. Erstellen Sie ein Simulationsmodell der Maschine. Zur Auslegung sollen folgende Kenngrößen verwendet werden: Nennspannung $U_n = 400 \text{ V}$ (verkettete Spannung), Nennleistung $P_n = 200 \text{ kW}$, Nenndrehzahl 3000 U/min , Trägheit $H = 1 \text{ s}$, Statorinduktivität $L = 2,5 \text{ mH}$.

Lösung: (1) Benötigte Kenngrößen sind $\{L, J, k_M\}$. Die Statorinduktivität ist gegeben. Der Widerstand der Statorwicklung ließe sich aus dem Wirkungsgrad der Maschine abschätzen. Das Trägheitsmoment J folgt aus der Trägheit H nach Gleichung (4.1.9). Für die physikalischen Einheiten gilt $1 \text{ Ws} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$. Ein Newton entspricht $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m s}^{-2}$. Das Trägheitsmoment J besitzt somit die Einheit kg m^2 .

Die Maschinenkonstante k_M berechnet sich aus Gleichung (4.1.5). Mit Hilfe der Maschinenkonstante lässt sich das elektrische Modell mit dem mechanischen Modell des Rotorsystems koppeln. In der folgenden Abbildung wurde für das Rotorsystem der Signalfuss verwendet, das elektrische Modell wurde als physikalisches Modell mit elektrischen Komponenten realisiert (Spannungsquellen, R und L).

(2) Simulationsmodell: Der Stator der Maschine wird durch eine Spannungsquelle $\underline{U}_2$ für die Polradspannung und die Statorinduktivität L abgebildet. Folgende Abbildung zeigt die Maschine in einem Netz zusammen mit einer Einspeiseanlage bzw. Bezugsanlage. Der Vollständigkeit halber wurde ein geringfügiger Wicklungswiderstand ergänzt.

Alle Anlagen im Netz sind physikalisch betrachtet Spannungsquellen, die über Induktivitäten mit dem Anschlusspunkt verbunden werden. Anlage 1 als Abbild des Netzes lässt sich entweder ungeregelt

Eingangsgrößen des Rotorsystems sind der Strom $i_{abc}(t)$ in der Statorwicklung, sowie die mechanische Leistung P_{mech} an der Welle des Rotors. Die Ausgangsgrößen des Rotorsystems sind die Polradspannung $\underline{U}_2$ und das Bezugssystem $\theta_2(t)$.

Kern des Rotorsystems ist das Trägheitsmoment J : Eine Abweichung des mechanischen Moments an der Antriebswelle und des elektrischen Moments führt nach Gleichung (4.1.9) zu einer Änderung des Drehimpulses und somit zu einer Beschleunigung oder zu einer Bremsung des Rotors. Das elektrische Moment ergibt sich aus dem Produkt des Wirkstroms I_d und der Maschinenkonstante k_M . Das mechanische Moment erhält man aus der mechanischen Leistung P_{mech} nach Division durch die Kreisfrequenz ω . Ohne mechanisches Moment befindet sich die Maschine im Leerlauf.

Löst man Gleichung (4.1.9) auf nach der Änderungsrate $\dot{\omega}(t)$ der Kreisfrequenz, so ergibt deren Integral die Kreisfrequenz $\omega(t)$. Gibt als Initialwert der Integration den Nennwert $\omega_n = 2\pi f_n$ vor, so muss die Maschine nicht anlaufen, sondern startet in der Simulation mit Nenndrehzahl. Durch weitere Integration erhält man den Phasenwinkel $\theta(t)$ des Rotors, der als Bezugssystem der Maschine dient.

Durch den Rotor besitzt die Maschine ein Bezugssystem, das bei lastbedingten Änderungen des Phasenwinkels am Anschlusspunkt der Anlage (d.h. bei Veränderungen der Phasenlage der Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt) stabil bleibt. Bedingt durch seine Trägheit kann der Rotor höchstens mit der Zeitkonstanten H reagieren (abhängig von der geforderten Leistung).

Frage 4.1.2: Untersuchen Sie die Funktion der Maschine in der Simulation. Welchen Einfluss hat die mechanische Leistung an der Antriebswelle? Welchen Beitrag leistet die Maschine bei einer Lastforderung durch Anlage 4?

Lösung: (1) Abtrieb der Rotorwelle: Im Leerlauf folgt die Maschine dem Netz. Treibt man die Antriebswelle zum Zeitpunkt t_1 mit einer Leistung von $P_{\text{mech}} = -100$ kW an, so wird diese Leistung eingespeist, allerdings zeigen sich Pendelschwingungen des Rotors, wie in folgender Abbildung dargestellt.

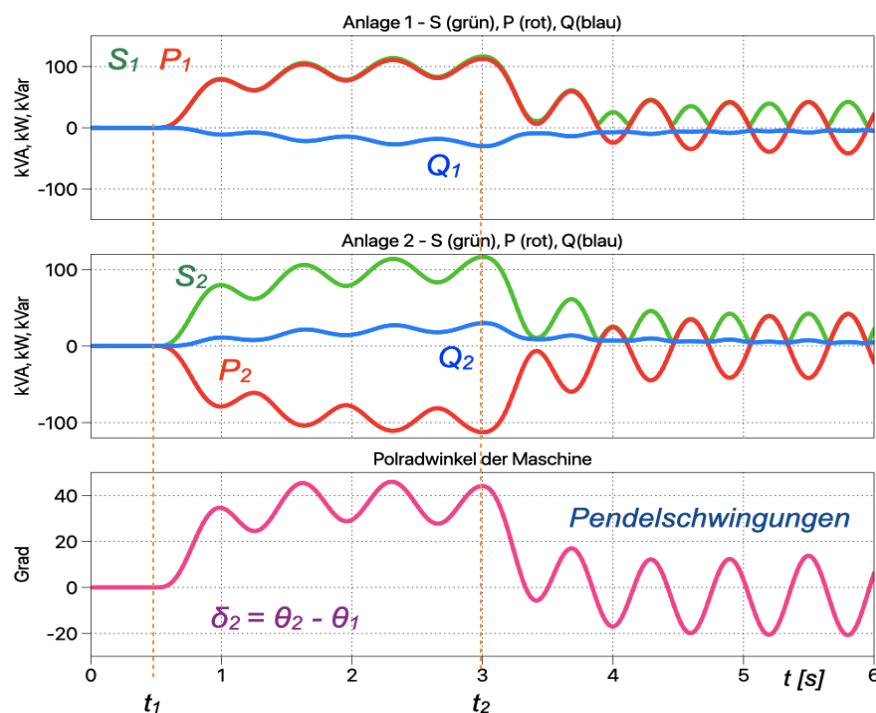


Abbildung 4.1.6 Antrieb an der Welle mit 100 kW

Da der Rotor eine Trägheit besitzt und im Stator beweglich gelagert ist, kann er um seine Achse wie ein Pendel schwingen. Die Differentialgleichung des Systems vom mechanischen Moment (= Drehim-

pulsänderung) bis zur Phase $\theta(t)$ ist dritter Ordnung und besitzt keine Dämpfung. Speziell im Leerlauf nach der Anregung auf der Antriebswelle pendelt der Rotor weiter, die Schwingung klingt nicht ab. Die Pendelschwingungen lassen sich durch eine elektrische Dämpfung des Rotors begrenzen. Folgende Abbildung zeigt das um die Pendeldämpfung erweiterte Rotormodell.

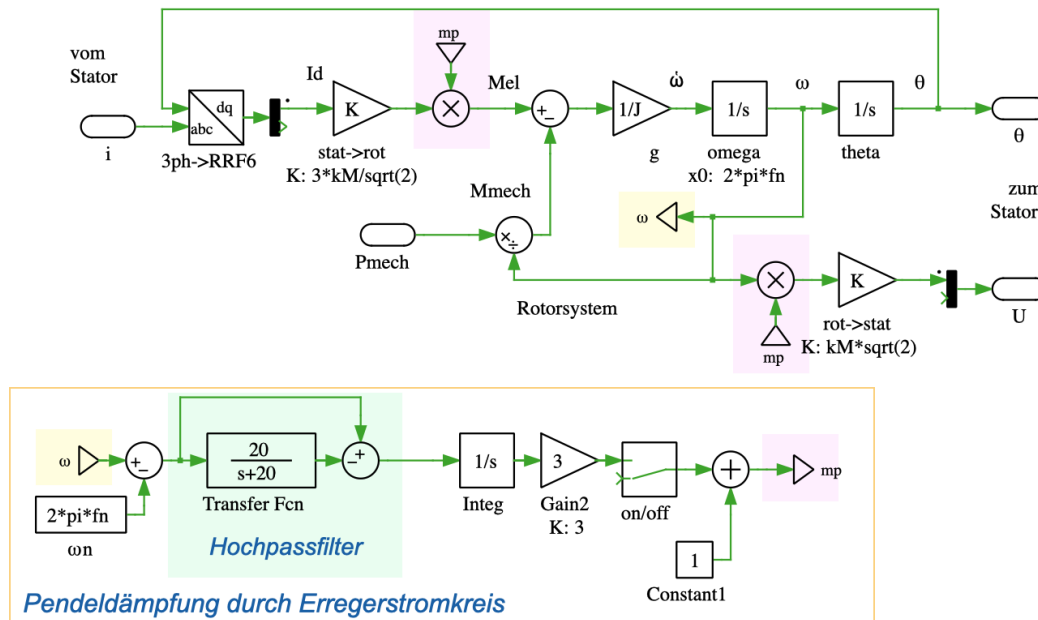


Abbildung 4.1.7 Rotormodell mit Pendeldämpfung

Aus der Rotorfrequenz ω wird mit Hilfe eines Hochpassfilters der variable Anteil herausgerechnet. Dieser Anteil ist mittelwertfrei und kann zur Ermittlung der Phasenverschiebung integriert werden. Das Signal wird so skaliert, dass es den Schwankungen des Stroms entspricht.

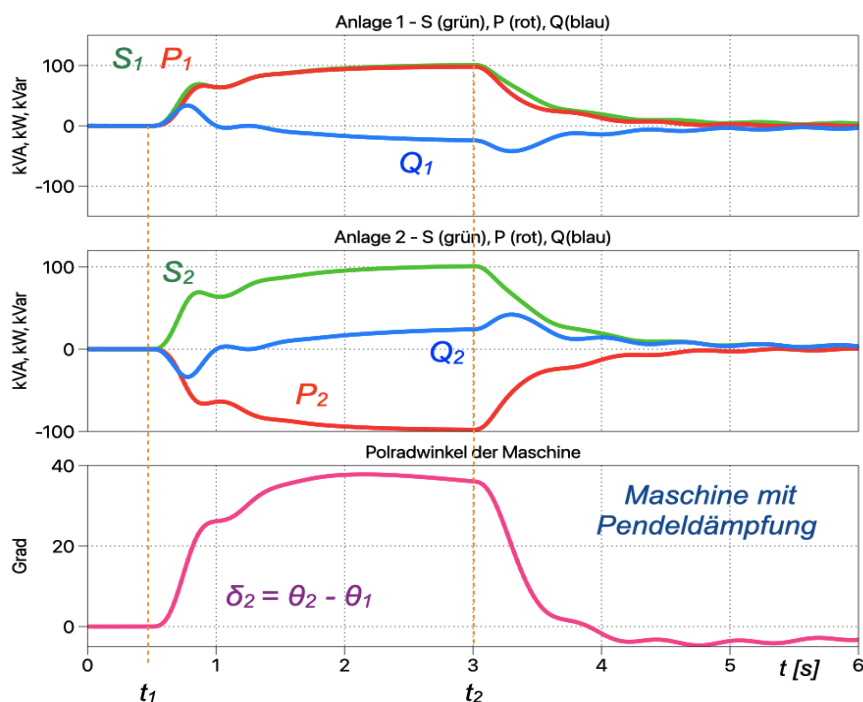


Abbildung 4.1.8 Antrieb an der Welle mit 100 kW mit aktiver Pendeldämpfung

Eine Eingriffsmöglichkeit bietet bei fremderregten Maschinen der Erregerstrom: Der Erregerstrom beeinflusst die Magnetisierung des Rotors und somit die Maschinenkonstante k_M . Das Modell besitzt keinen Erregerstromkreis, wird die Maschinenkonstante mit Hilfe des gewonnenen Signals moduliert. Hierzu wird im Pfad der Maschinenkonstante am Eingang und am Ausgang des Rotorstroms das Signal mit dem Modulationssignal multipliziert. Das Ergebnis zeigt die Abbildung oben: Die Pendelschwingungen sind nun deutlich reduziert und klingen nach der Anregung auf der Antriebswelle ab.

Der Polradwinkel zeigt deutlich weniger Pendelschwingungen und verbleibt nach Abschalten des Antriebs der Maschine noch eine Weile im negativen Bereich: die Maschine wird vom Netz mitgezogen und geht allmählich in den Leerlaufbetrieb über.

(2) Beitrag der Maschine zu Lastforderungen im Netz: Eine Lastanforderung aus dem Netz führt zu einer Phasenverschiebung der Spannung am Anschlusspunkt relativ zur Polradspannung, da die Polradspannung dem Rotorstrom und seiner Trägheit folgt. Die benötigte Leistung wird aus der kinetischen Energie der Maschine bereitgestellt. Dabei wird die Maschine abgebremst und schließlich vom Netz mitgezogen. Da die Maschine über keinen geregelten Antrieb verfügt, kann auf Dauer keine Leistung abgegeben werden, die Maschine kann keinen dauerhaften Beitrag leisten.

Die Pendeldämpfung ist nicht in der Lage die Maschine in den Leerlaufbetrieb zu führen, da die Lastanforderung über die Verschiebung des Phasenwinkels am Anschlusspunkt bestehen bleibt. Betreibt man Anlage 1 als Netz mit Spannungsregelung am Anschlusspunkt, führt das Netz des Spannungswinkel am Anschlusspunkt auf Null, da das Netz dann die gesamte Lastforderung übernimmt. Auf diese Art sorgt die Spannungsregelung der Anlage 1 für die Leistungsaufnahme. In diesem Fall bleibt für die Maschine keine Leistungsforderung bestehen. Die Maschine geht in den Leerlaufbetrieb über,

Frage 4.1.3: Drehzahlregler. Ergänzen Sie einen Drehzahlregler für den Antriebsstrang der Maschine. Wie verhält sich die Maschine nun bei einem Lastsprung am Anschlusspunkt?

Lösung: Anlage 1 bleibt ungeregelt. Der Lastsprung führt zu einem Phasensprung am Anschlusspunkt und somit zu einem Phasensprung an den Anlagen 1 (wird mit festem Bezugssystem $\theta_1(t)$ betrieben) und Anlage 2 (Maschine läuft mit Rotordrehzahl und Rotorwinkel $\theta_2(t)$ als Bezugssystem weiter).

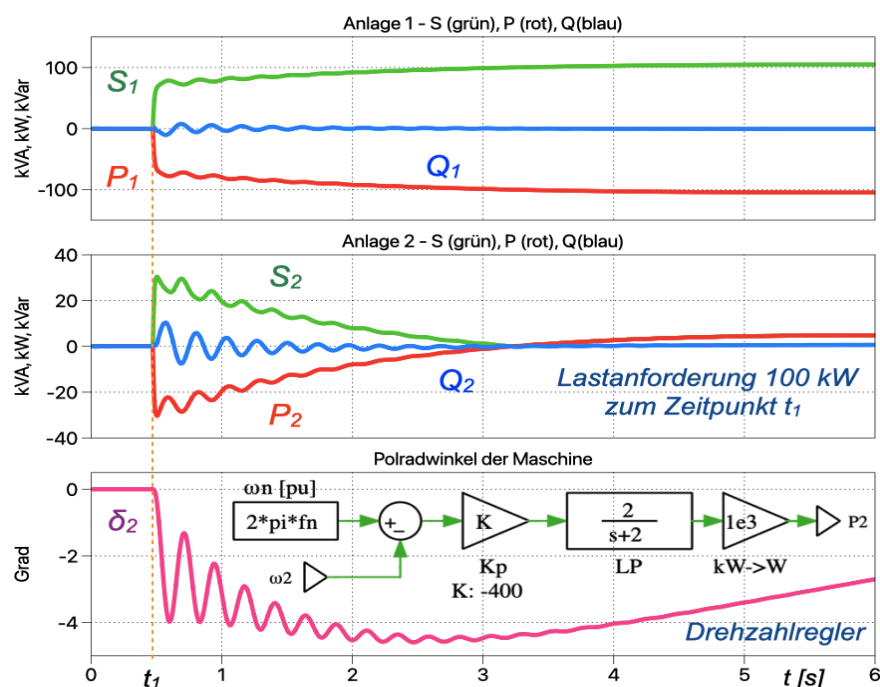


Abbildung 4.1.9 Maschine mit Drehzahlregler bei Lastanforderung am Anschlusspunkt

Der Drehzahlregler reagiert auf Abweichungen der Drehzahl der Maschine von der Nenndrehzahl. Die Nenndrehzahl entspricht der Netzfrequenz und ist durch das starre Netz fest vorgegeben. Durch den Lastsprung ändert sich der Phasenwinkel am Anschlusspunkt gegenüber dem Bezugssystem der Maschine. Die Änderung des Phasenwinkels ist wegen $\omega(t) = d\theta(t)/dt$ mit einer Frequenzänderung verbunden. Folgende Abbildung zeigt den Verlauf des Polradwinkels zusammen mit der Frequenz des Rotors und der Antriebsleistung als Stellgröße des P-Reglers.

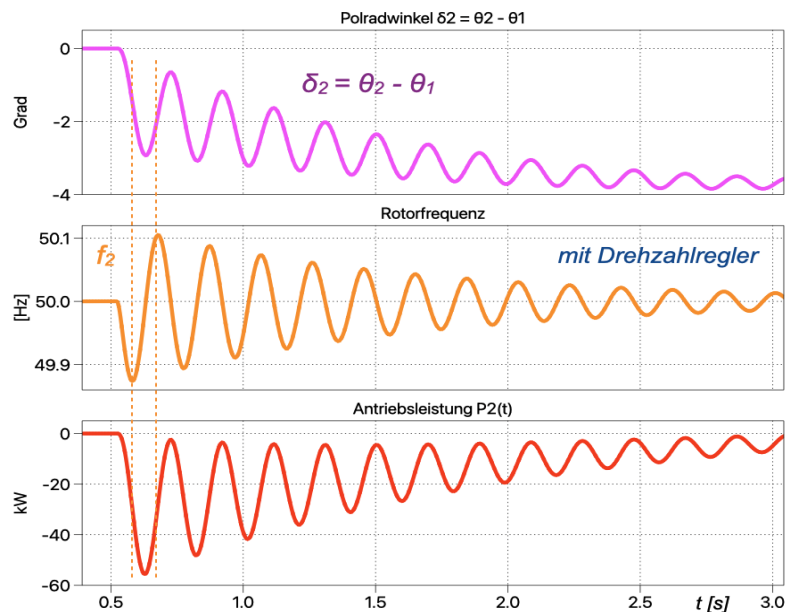


Abbildung 4.1.10 Polradwinkel und Frequenz beim Lastsprung

Der Regler reagiert auf die Frequenzabweichung und passt die Antriebsleistung entsprechend an. Allerdings reagiert der mechanische Antrieb (Dieselmotor, Gasmotor oder Gasturbine) träge, was im Modell durch ein Tiefpass-Filter mit der Grenzfrequenz 2 Hz nachgebildet wurde, entsprechend einer Zeitkonstanten von 0,5 s. Hierdurch kann der Regler nur sehr verzögert reagieren und es verbleibt eine Pendelschwingung.

Die Zeitkonstante der Maschine (Trägheit $H = 1$ s) und die Zeitkonstante des Antriebs ($T = 0.5$ s) liegen hier sehr eng beieinander. Für den Lastsprung im Netz wurde eine Grenzfrequenz von 100 Hz entsprechend einer Zeitkonstante von 10 ms zugelassen. In dieser Zeit kann der Antrieb auf keinen Fall reagieren: Die geforderte Leistung muss aus der kinetischen Energie des Rotors bezogen werden, bis der Antrieb Leistung nachliefern kann.

Frage 4.1.4: Spannungsregelung. Wie wäre eine Spannungsregelung für die Maschine zu realisieren? Untersuchen Sie Ihre Realisierung in der Simulation.

Lösung: Eine Spannungsregelung muss den Antrieb der Maschine einbeziehen, um die Wirkleistung an die Lastanforderung anzupassen. Die Wirkleistung beeinflusst die Phasenlage der Polradspannung zur Klemmenspannung. Die Amplitude der Polradspannung lässt sich über den Erregerstromkreis beeinflussen. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Spannungsreglers.

Führungsgröße der Regelung ist die Spannung U am Anschlusspunkt (und somit die Klemmenspannung). Stellgrößen der Regelung sind die mechanische Antriebsleistung und die Modulation der Maschinenkonstante durch den Erregerstromkreis. Die Maschinenkonstante k_M wurde durch die Konstruktion der Maschine so gewählt, dass sich bei Nenndrehzahl des Rotors die Nennspannung als Polradspannung einstellt. Durch Verändern des Erregerstroms gegenüber dessen Nennwert verändert sich die Maschinenkonstante. Der Effekt wurde im Modell durch einen Modulationsfaktor m_p nachge-

bildet, der bei Nennbedingungen den Wert 1 besitzt. Die Maschinenkonstante k_M bestimmt auch das elektrische Drehmoment, das der Statorstrom erzeugt. Daher lässt sich der Erregerstrom auch zur Dämpfung der Pendelschwingungen verwenden.

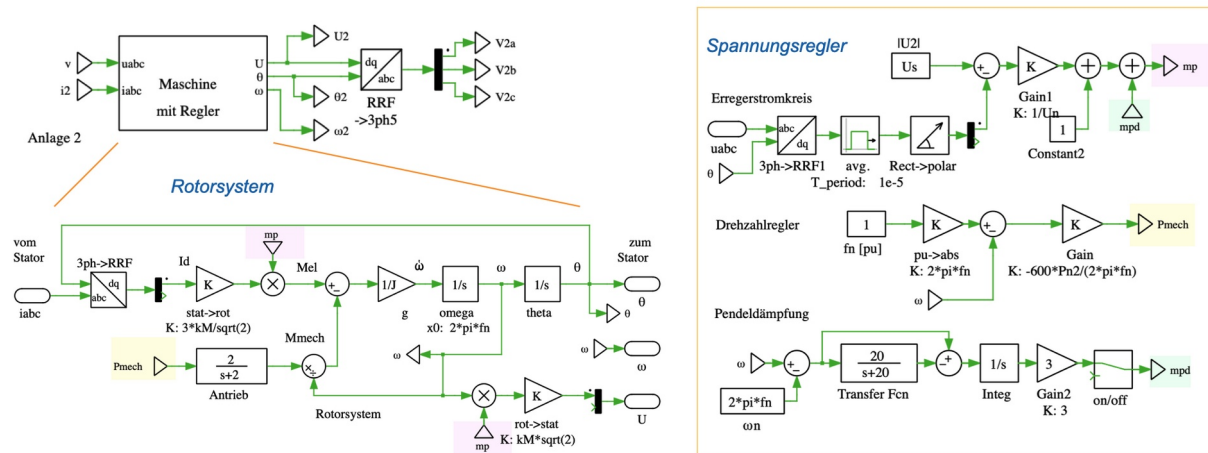


Abbildung 4.1.11 Aufbau der Maschine mit Spannungsregler

Der Stator der Maschine wird durch die elektrische Ersatzschaltung wiedergegeben, die aus den Spannungsquellen für die Polradspannung und den Statorinduktivitäten besteht. Das mechanische Modell wurde mit dem Regler zusammengefasst. Zur Regelung der Spannungsamplitude und zur Drehzahlregelung wurden P-Regler eingesetzt. Eingangsgrößen des Maschinenmodells sind die Klemmenspannung am Anschlusspunkt als Istwert der Spannung, sowie der Statorstrom. Ausgangsgrößen des Maschinenmodells ist die Polradspannung, sowie das Bezugssystem $\theta_2(t)$ und die Drehzahl $\omega_2(t)$ der Maschine. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf.

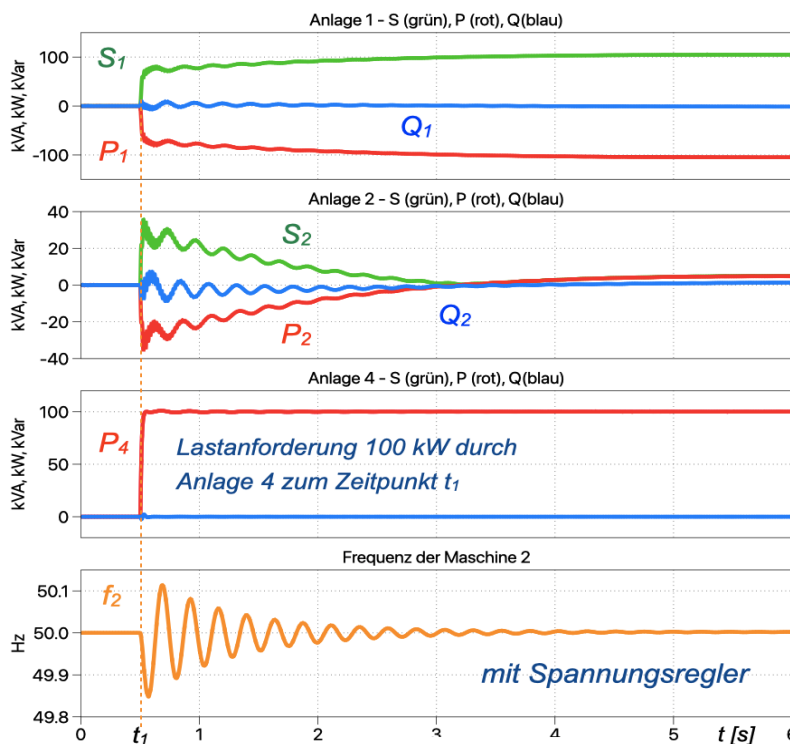


Abbildung 4.1.12 Simulationslauf mit Lastforderung durch Anlage 4

Man erkennt, dass die Lastforderung der Anlage 4 zu einer Änderung der Rotorfrequenz $f_2(t)$ führt, auf die der Drehzahlregler reagiert. Stellgröße des Drehzahlreglers ist die mechanische Antriebsleistung, die allerdings zeitverzögert verfügbar wird: Dieser Effekt wurde durch ein Tiefpass-Filter mit Grenzfrequenz 2 Hz (bzw. durch ein PT1-Glied mit Zeitkonstante 0,5 s) im Regler berücksichtigt. Diese Trägheit der Verfügbarkeit der mechanischen Leistung führt zu Pendelschwingungen des Rotors.

Die Lastforderung wird anfangs zu gleichen Teilen aus Anlage 1 (= Netz als starre Spannungsquelle ohne Spannungsregelung) und Anlage 2 (Maschine) bedient. Grund hierfür sind die gleichen Impedanzen (bzw. Reaktanzen) beider Anlagen am Anschlusspunkt: Für den Laststrom der Anlage 4 sind beide Strompfade gleichwertig. Die Maschinenleistung P_2 an den Klemmen gibt die Summe aus mechanischer Leistung (= Antriebsleistung) und Leistung aus kinetischer Energie wieder.

Auf Dauer wird die Lastforderung durch Anlage 1 (= Netz) übernommen. Grund hierfür ist, dass die Maschine durch den Drehzahlregler auf Nenndrehzahl gebracht wird und schließlich phasensynchron zur Spannung am Anschlusspunkt und somit im Leerlauf weiterläuft. Da das Netz in der Drehzahl nicht nachgibt, bleibt für den Drehzahlregler der Maschine nichts mehr zu tun.

Da Anlage 4 den Laststrom in Bezug auf die Phasenlage am Anschlusspunkt fordert, stellen sich an Anlagen 1 (Netz) und 4 (Stromquelle) Phasenwinkel mit entgegengesetztem Vorzeichen in Bezug auf die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt ein. In Abbildung 1.4.6 ist ein passendes Zeigerdiagramm dargestellt (mit Anlage 1 statt Anlage 3).

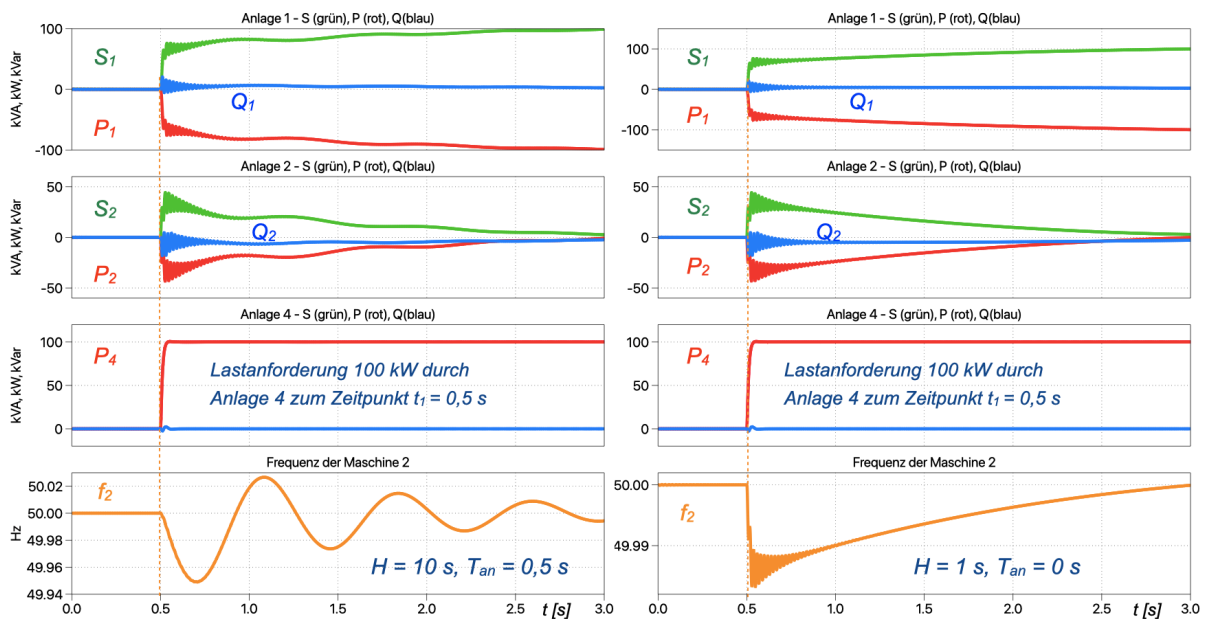


Abbildung 4.1.13 Einfluss der Trägheit des Rotors und des Antriebs

Die Trägheit H des Rotors beeinflusst die Größe der Schwankungen der Frequenz nach dem Lastsprung. In der Abbildung oben wurde die Trägheit bei sonst gleichen Einstellungen von $H = 1$ s auf $H = 10$ s erhöht. Die Pendelschwingungen fallen nun deutlich geringer aus und somit die Schwankungen der Rotorfrequenz. Die Hüllkurve der abgegebenen Wirkleistung bleibt erhalten.

Belässt man die Rotorträgheit bei $H = 1$ s und ersetzt die Übertragungsfunktion des Antriebs durch eine unverzögerte Kopplung der mechanischen Leistung ($T_{an} = 0$), so ergibt sich überhaupt keine Pendelschwingung, da der Antrieb der minimalen Frequenzänderung sogleich folgen kann. Auch hier bleibt die Hüllkurve der an den Klemmen abgegebenen Leistung erhalten.

4.2. Momentanreserve

Unter der Momentanreserve versteht man die Leistung, die bei Lastanforderungen aus der kinetischen Energie der Maschine bezogen wird, bis der Drehzahlregler der Maschine greift und Antriebsleistung als mechanische Leistung an der Rotorwelle bereitstellt. Das Verhalten der Maschine ist hierbei abhängig von der Betriebsart in einem Inselnetz oder einem Verbundnetz.

Frage 4.2.1: Inselnetzbetrieb. Wie folgende Abbildung zeigt, kann die Maschine im Inselnetzbetrieb durchaus die geforderte Leistung erbringen. Interpretieren Sie die dargestellten Zeitverläufe.

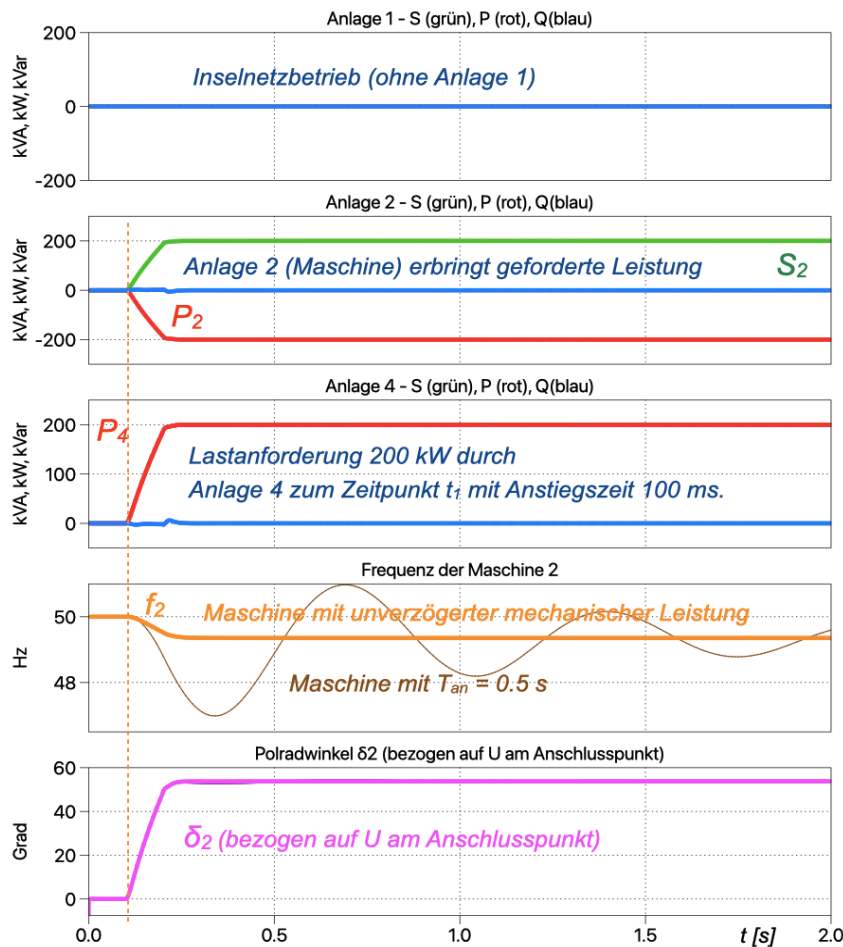


Abbildung 4.2.1 Lastforderung im Inselnetzbetrieb

Lösung: Die Maschine gibt nun das Bezugssystem vor: Anlage 4 orientiert sich bezüglich der Leistung weiterhin an der am Anschlusspunkt gemessenen Spannung $\underline{U}$. Deren Frequenz wird nun ausschließlich von der Maschine als Anlage 2 bestimmt. Der Anstieg der Leistungsforderung durch Anlage 4 auf den Maximalwert von $P_4 = 200$ kW erfolgt nun linear innerhalb von 100 ms, um das Verhalten von Frequenz und Polradwinkel der Maschine genauer darzustellen.

Bedingt durch den steigenden Laststrom als Wirkstrom ändert sich der Phasenwinkel der Spannung $\underline{U}$ am Anschaltspunkt gegenüber der Polradspannung $\underline{U}_2$ der Maschine: die Maschine läuft vor der Spannung $\underline{U}$. Die Maschine stellt die geforderte Leistung sofort aus ihrer kinetischen Energie bereit und wird hierdurch langsamer.

Der Drehzahlregler reagiert auf die fallende Rotordrehzahl und stellt die benötigte Antriebsleistung bereit. Hierdurch steigt die Rotordrehzahl wieder an und nähert sich der Nennzahl. Der Polradwinkel nähert sich hierbei 60 Grad, da die Lastforderung weiterhin besteht und da die Leistung mit wachsen-

dem Polradwinkel steigt (bis zum Kippmoment bei 90 Grad). Die Maschine ist mit 200 kW auf ihrer Nennleistung. Die Leistungsgrenze ist durch die Größe der Statorinduktivität festgelegt. Bei geringerer Statorinduktivität fiele der Polradwinkel für die geforderte Leistung geringer aus.

Die dickeren Linien in der Abbildung zeigen die Maschine mit sofortiger Bereitstellung der mechanischen Leistung, wie vom Drehzahlregler als Stellgröße gefordert. Dieser Fall gilt für einen idealen, verzögerungsfreien Antrieb. In der Simulation wurde hierfür die Übertragungsfunktion mit der Zeitkonstante T_{an} (bzw. mit der Grenzfrequenz $f_{an} = 1/T_{an}$) durchgeschaltet. Mit der Übertragungsfunktion ergibt sich in dünneren Linien dargestellte Zeitverlauf mit deutlichen Schwankungen der Rotordrehzahl. Da Anlage 4 der Frequenz am Anschlusspunkt folgt, bleibt der Polradwinkel stabil.

Die Anordnung der Anlagen im Netz bleibt gegenüber Abschnitt 4.1 unverändert, jedoch ist Netz durch einen Schalter getrennt. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau der Simulation.

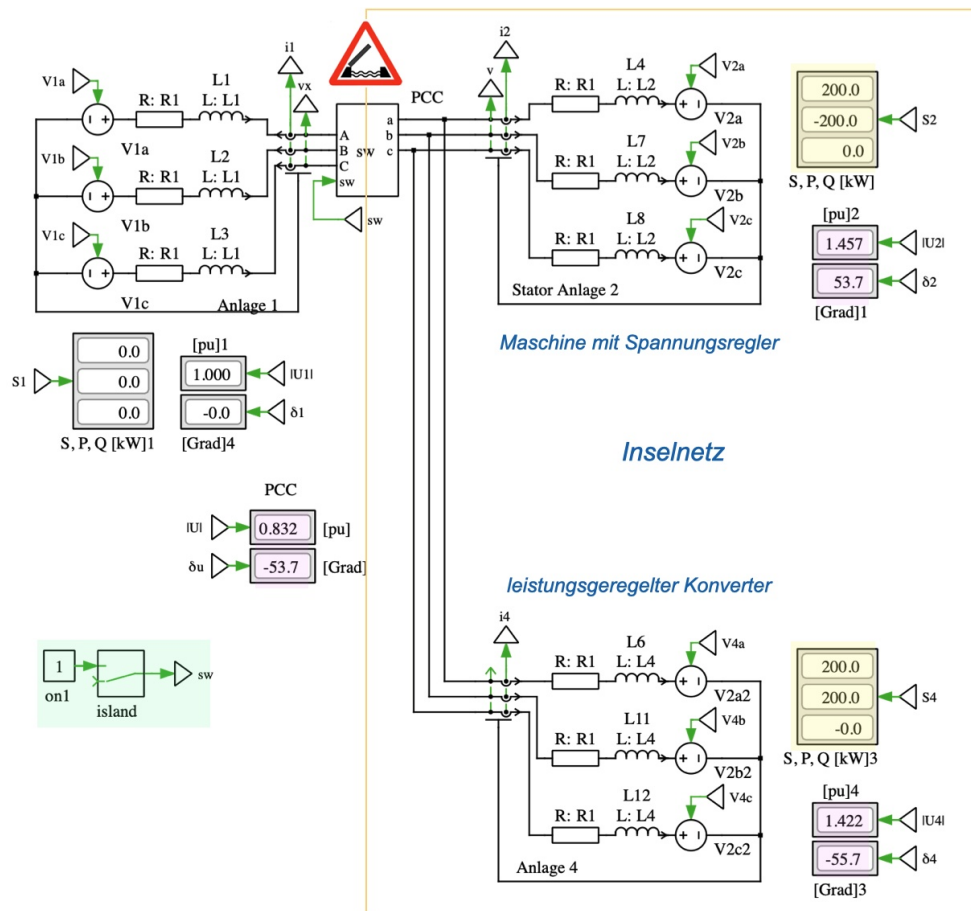


Abbildung 4.2.2 Aufbau der Simulation im Inselnetzbetrieb

Die Spannung $\underline{U}$ am Anschlusspunkt (Messpunkt v) muss nun auf der Insel gemessen werden. Da Anlage 4 die gleiche Koppelreaktanz besitzt wie Anlage 2, fallen die Polradwinkel bis auf das Vorzeichen annähernd gleich aus. Die Unterschiede sind durch den Blindleistungsbedarf der Induktivitäten bedingt. Ein passendes Zeigerdiagramm findet sich in Abbildung 1.4.6.

An der Leistungsgrenze gelingt das Ausregeln der Spannung an Anschlusspunkt nicht vollständig: Die Spannung gibt bei größeren Leistungen nach. Der Spannungswinkel am Anschlusspunkt ist identisch mit dem negativen Polradwinkel, da sich der Spannungsregler der Maschine an der Spannung am Anschlusspunkt orientiert. Die Frequenz im Inselnetz wird durch die Maschine vorgegeben.

Frage 4.2.2: Betrieb der Maschine ohne Antriebsleistung. Ohne Antriebsleistung sollte sich die kinetische Energie der Maschine im Inselnetzbetrieb aufbrauchen lassen. Starten Sie die Maschine in der Simulation hierzu im Leerlaufbetrieb (d.h. bei Nenndrehzahl) und untersuchen Sie das Verhalten der Maschine unter Last ohne mechanischen Antrieb.

Lösung: Für diese Betriebsart wird in der Simulation nur die geforderte mechanische Leistung des Spannungsreglers zu Null gesetzt. Es ergibt sich unter gleichen Voraussetzungen wie in Aufgabe 4.2.1 der in folgender Abbildung dargestellte Zeitverlauf.

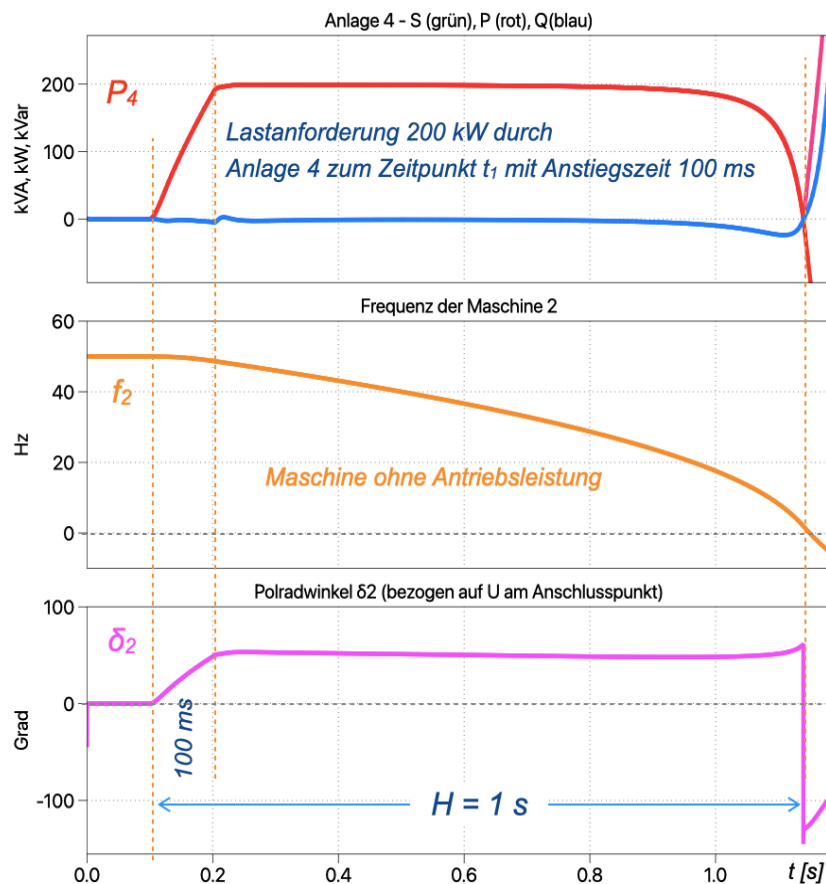


Abbildung 4.2.3 Betrieb der Maschine ohne Antriebsleistung

Anlage 4 fordert mit einer Anstiegszeit von 100 ms die Nennleistung $P_n = 200\text{ kW}$. Die Lastforderung führt innerhalb der Anstiegszeit zu einer Verschiebung des Polradwinkels. Da Anlage 4 der Rotordrehzahl folgt, bleibt die Lastforderung bestehen, während die Maschine langsamer wird.

Die geforderte Leistung wird aus der kinetischen Energie bezogen. Diese steht als Momentanreserve sofort zur Verfügung. Der Leistungsreserve hält so lange, bis der Rotor zum Stillstand kommt. Gemäß Gleichung (4.1.10) entspricht diese Dauer der Trägheit H . Die Maschine wurde auf eine Trägheit von $H = 1\text{ s}$ ausgelegt.

Frequenzen unter 90% der Nennfrequenz des Netzes würde man in der Praxis nicht akzeptieren. Der Antrieb der Maschine muss daher deutlich früher eingreifen, um die Drehzahl des Rotors zu stabilisieren. Man erkennt, dass die Zeitkonstante T_{an} des Antriebs mit einem Wert von $T_{an} = 0,5\text{ s}$ Trägheit des Rotors von $H = 1\text{ s}$ für einen Betrieb im Netz zu groß ausfällt: Hierfür sollte der Antrieb schneller reagieren. Für die folgenden Simulationen wurde die Zeitkonstante des Antriebs auf etwa 1/5 der Trägheit H der Maschine reduziert (entsprechend einem Wert von $T'_{an} = 0,2\text{ s}$).

Frage 4.2.3: Zwei Maschinen im Inselnetzbetrieb. Erweitern Sie das Netz um eine weitere Maschine und untersuchen Sie das Verhalten bei einer Lastforderung.

Lösung: Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf mit der zweiten Maschine. Beide Maschinen sind identisch und finden sich als Anlagen 2 und 3 am Netz. Anlage 4 ist leistungsgeregt und fordert eine Leistung von 200 kW mit einer Anstiegszeit von 100 ms. Die Lastforderung bleibt bis zum Ende der Simulation bestehen.

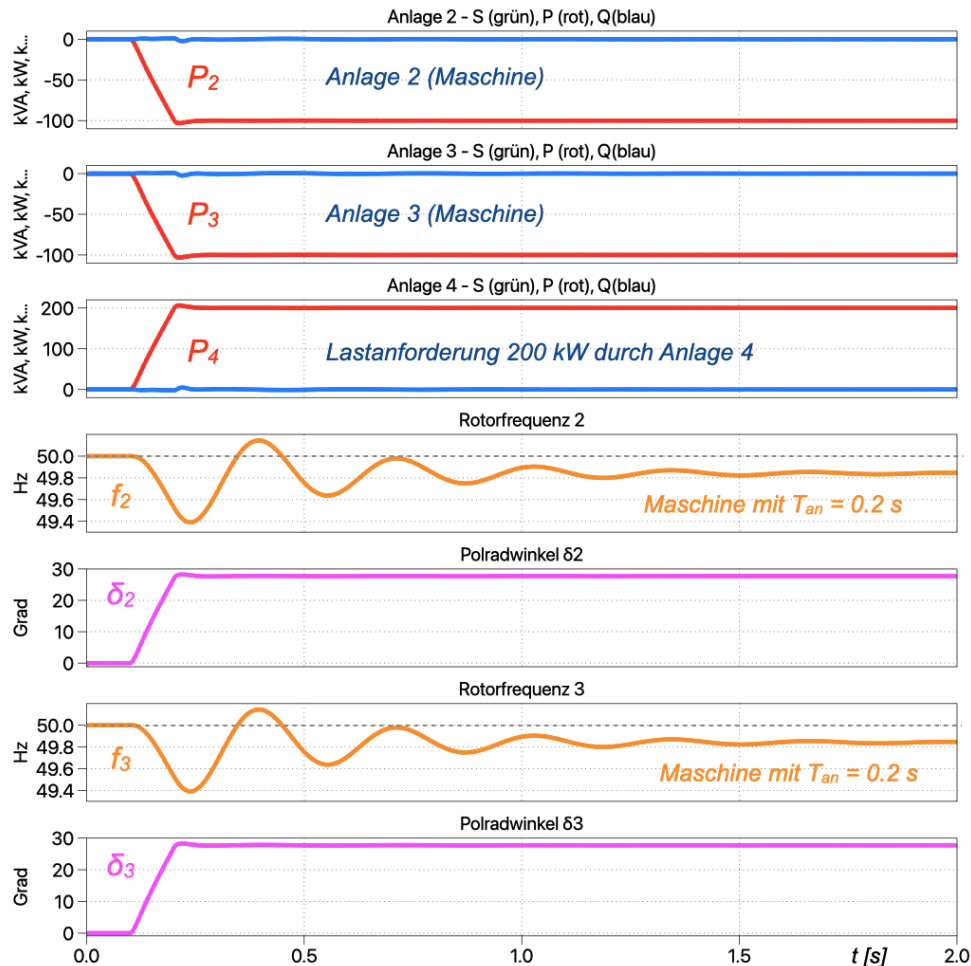


Abbildung 4.2.4 Inselnetzbetrieb mit zwei Maschinen

Im Vergleich zum Betrieb mit einer Maschine erkennt man, dass die Last nun zu gleichen Anteilen von beiden Maschinen getragen wird. Der Lastanstieg führt zu gleichen Verschiebungen der Polradwinkel, wobei diese pro Maschine wegen der Aufteilung der Last nur halb so groß ausfällt. Die geforderte Leistung wird zunächst aus der Momentanreserve beider Maschinen bedient.

Die Drehzahlregler der Maschinen reagieren auf die sinkende Drehzahl und führen den Maschinen Antriebsleistung zu. Wegen der Zeitkonstante des Antriebs ergeben sich Schwankungen der Rotordrehzahlen. Diese haben auf die Polradwinkel keinen Einfluss, da die Last der Rotorfrequenz folgt. Durch die Drehzahlregler wird ein Gleichgewicht aus geforderter Leistung und Antriebsleistung hergestellt: Im Gleichgewicht der Kräfte (bzw. Drehmomente) bleibt die Rotorfrequenz stabil.

Allerdings stellt sich die Rotorfrequenz nicht exakt auf die Sollfrequenz ein, sondern bleibt etwas darunter. Diese Abweichung ist eine Eigenschaft des P-Reglers: P-Regler benötigen eine Regelabweichung, um die Stellgröße zu bedienen. Die Größe der Regelabweichung lässt sich über die Verstärkung K_P des Reglers einstellen: Eine höhere Verstärkung führt zu einer geringeren Regelabweichung.

Im Inselnetz kann man Abweichungen bis zu einigen Prozent der Netzfrequenz tolerieren. In einem Verbundnetz ist die Toleranz geringer, hier wären die Anlagen für den normalen Betrieb im Bereich von weniger als 1% (= 0,5 Hz) zu führen. In beiden Fällen bleibt wegen der Verwendung von P-Regler die Netzfrequenz ein Indikator für die Leistungsbilanz im Netz. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Netzes in der Simulation.

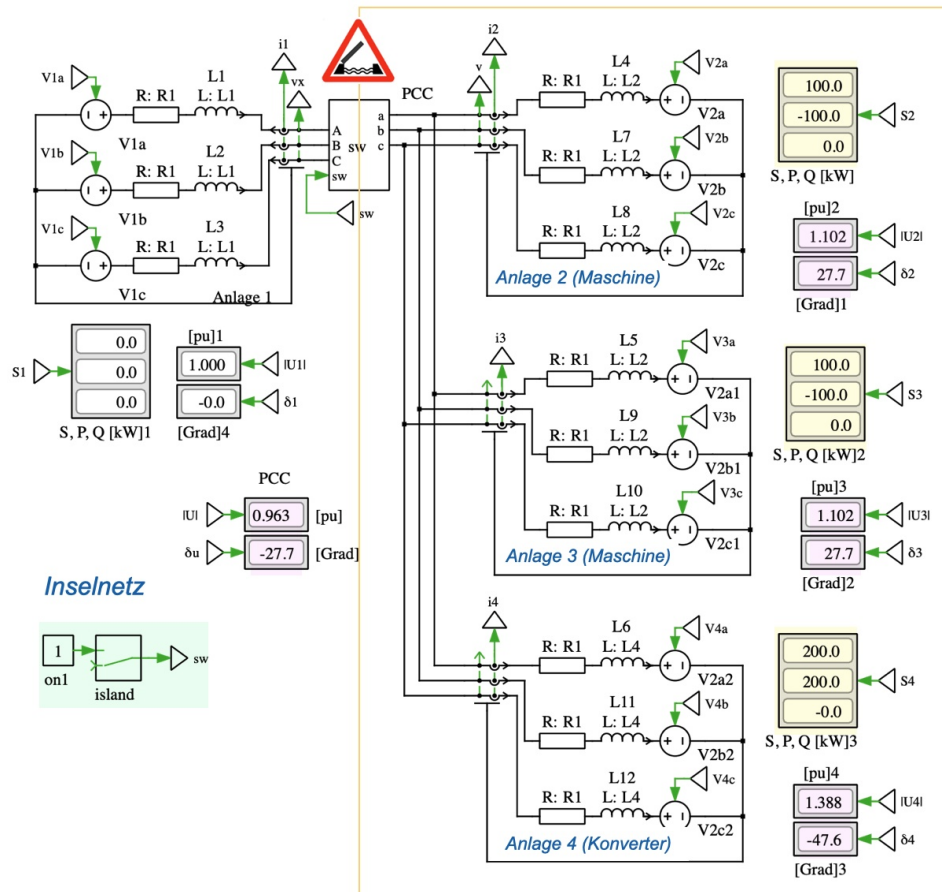


Abbildung 4.2.5 Aufbau der Simulation

Anlage 1 als Netz ist durch einen Schalter von den drei übrigen Anlagen getrennt. Die Anlagen 2 und 3 arbeiten als Maschinen mit Spannungsregler. Anlage 4 ist leistungsgeregelt und stellt die Lastanforderung. Man erkennt, dass beide Maschinen die geforderte Leistung zu gleichen Teilen bedienen. Wegen der gleichen Koppelinduktivitäten beider Maschinen sind auch die Polradwinkel gleich. Gegenüber dem Betrieb mit einer Maschine kann im arbeitsteiligen Betrieb die Spannung im Netz deutlich besser gehalten werden, da beide Maschinen nur die Hälfte der geforderten Last tragen.

In der Simulation wäre durch Anlage 4 auch eine Einspeisung möglich. Die eingespeiste Leistung würde durch die beiden Maschinen aufgenommen. Für die elektrische Maschine ist eine Rekuperation jederzeit möglich. Über die Momentanreserve hinaus müsste die aufgenommene Leistung jedoch als mechanische Leistung abgegeben werden. Ein Gasmotor oder eine Gasturbine ist als Antrieb der Maschine hierfür jedoch ungeeignet.

Frage 4.2.4: Einfluss der Koppelinduktivitäten und Reglereinstellungen. Untersuchen Sie den Einfluss der Koppelinduktivitäten auf die Leistungsbeiträge der Maschinen. Welchen Einfluss hat die Einstellung der Drehzahlregler der Maschinen? Welchen Beitrag liefert eine Maschine, die ohne Antriebsleistung im Leerlauf betrieben wird, zur Momentanreserve?

Lösung: Aus der Ersatzschaltung des Netzes mit den Anlagen (siehe Abbildung 1.2.1) geht hervor, dass aus Sicht des Laststroms die Anlagen über ihre Anschlussimpedanzen (bzw. ihre Koppelinduktivitäten) parallelgeschaltet sind. Da der Regler erst auf durch den Laststrom verursachte Änderungen reagieren kann, bestimmt die elektrische Ersatzschaltung das initiale Verhalten bei einer Lastforderung. Daher würde man folgende Ergebnisse der Untersuchung erwarten:

- Induktivität bestimmt Polradwinkel,
- Induktivität bestimmt Beitrag zur Momentanreserve,
- Reglereinstellung bestimmt dauerhaften Leistungsbeitrag.

Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf, für den bei identischen Reglereinstellungen die Induktivität der Anlage 3 doppelt so hoch gewählt wurde wie für Anlage 2.

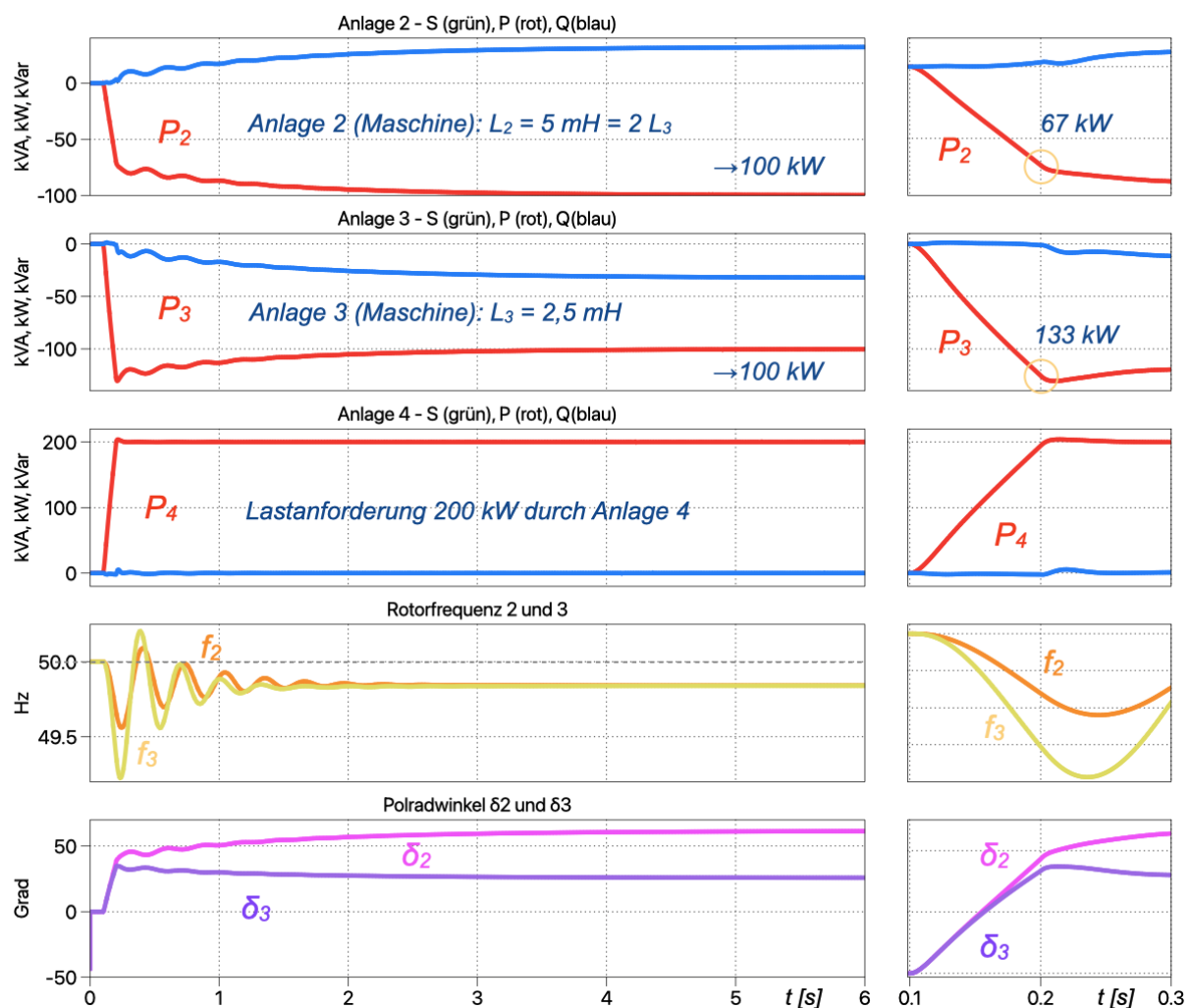


Abbildung 4.2.6 Unterschiedliche Koppelinduktivitäten in beiden Maschinen

Man erkennt, dass sich die Annahmen über den Einfluss der Koppelinduktivitäten bestätigen. Deren Reaktanz bestimmt den Strom der elektrisch parallelgeschalteten Anlagen: Anlage 3 besitzt die halbe Reaktanz der Anlage 2. Folglich verteilt sich der Strom zu 2/3 auf Anlage 3 und zu 1/3 auf Anlage 2. Die Beiträge zur initialen Leistung und somit zur Momentanreserve fallen entsprechend aus.

Eine Konsequenz dieses Verhalten ist es, dass Anlagen weit entfernt vom Anschlusspunkt wegen Transformatoren auf dem Weg zur Anlage und wegen der mit der Entfernung verbundenen Induktivität

ten einen geringeren Beitrag zur Momentanreserve leisten können. Für einen signifikanten Beitrag zur Momentanreserve ist eine kurze Anbindung zum Anschlusspunkt erforderlich.

Auf Dauer überwiegt die Reglereinstellung: Bei identischen Reglern leisten beide Maschinen im eingeschwungenen Zustand gleiche Leistungsbeiträge. Allerdings hat auch hier die höhere Koppelinduktivität ihren Preis. Bei nun gleichen Strömen fällt der Polradwinkel der Maschine mit der größeren Koppelinduktivität entsprechend höher aus (im Beispiel doppelt so groß).

4.3. Primärregelung

Unter der Primärregelung versteht man das Eingreifen des Drehzahlreglers der Maschine bei Laständerungen im Netz. In der kausalen Kette folgt die Primärregelung der Momentanreserve. Die Momentanreserve ist eine Eigenschaft der Maschine als Regelstrecke. Sie lässt sich auf die Formel $f(P)$ bringen: Die Maschine reagiert als Regelstrecke auf Laständerungen im Netz. In dieser Sichtweise stellt die Primärregelung die Reaktion des Reglers in der Form $P(f)$ dar: Der Regler reagiert auf die Drehzahländerung und passt die Antriebsleistung an. Zusammen ergibt sich ein Regelkreis.

Frage 4.3.1: Inselnetzbetrieb mit unterschiedlichen Reglereinstellungen. Untersuchen Sie den Betrieb zweier Maschinen am Netz, die bis auf die Reglereinstellungen gleich sind. Welcher Arbeitspunkt stellt sich ein? Wie hängt dieser von den Reglereinstellungen ab?

Lösung: Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf.

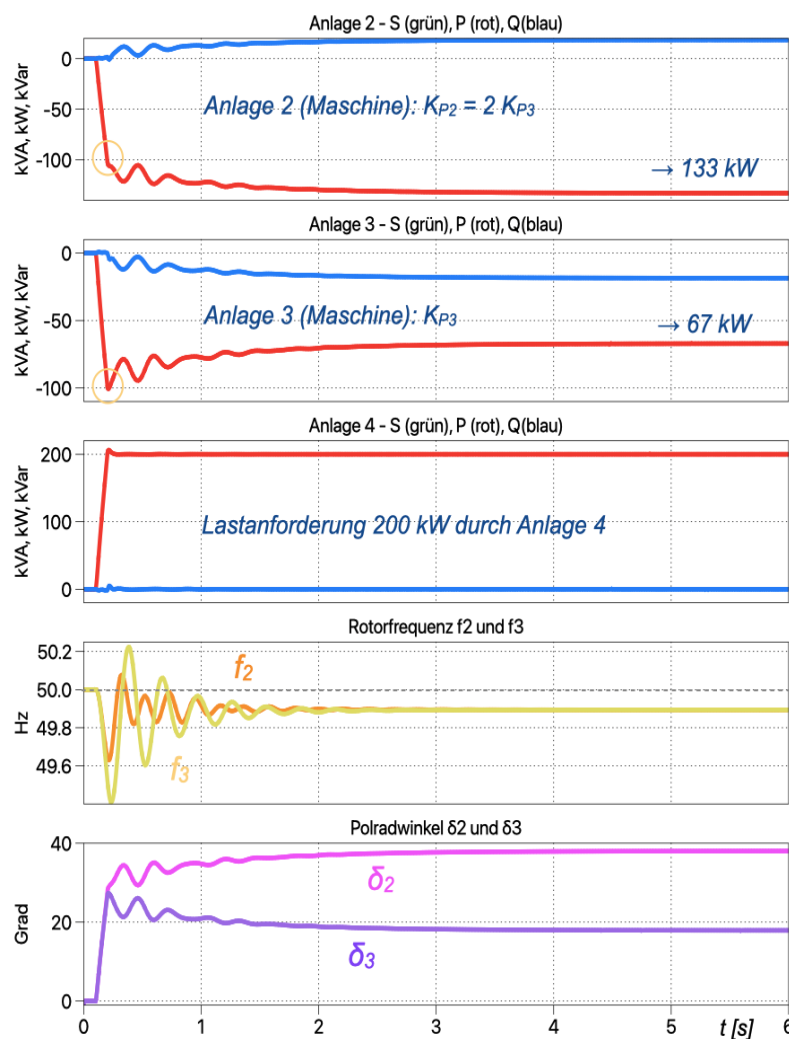


Abbildung 4.3.1 Betrieb zweier Maschinen mit unterschiedlichen Reglereinstellungen

Beide Maschinen sind gleich und über gleich große Koppelinduktivitäten mit dem Anschlusspunkt verbunden. Wegen der gleichen Induktivitäten zum Anschlusspunkt sind die Beiträge zur Momentanreserve beider Maschinen gleich. Von der durch Anlage 4 geforderten Leistung erbringen beide Anlagen zunächst die Hälfte.

Im Anschluss an die Bereitstellung der Momentanreserve bestimmen die Regler das Verhalten der Anlagen. Die Einstellungen der Regler unterscheiden sich: Die Verstärkung K_{P2} der Anlage 2 wurde doppelt so groß gewählt wie die von Anlage 3 ($K_{P2} = 2 K_{P3}$). Folglich übernimmt Anlage 2 auf Dauer die doppelte Leistung wie Anlage 3.

Da Anlage 2 den doppelten Strom führt wie Anlage 3, fällt an der gleich großen Koppelinduktivität ihr Polradwinkel doppelt so groß aus. Die Primärregelung wirkt auf den Antrieb der Maschine und findet sich im Simulationsmodell im Rotorssystem. Die elektrischen Eigenschaften werden durch den Stator vorgegeben. Hier gilt das elektrische Ersatzschaltbild des Stators.

Im Zeitverlauf ist auch zu erkennen, dass die Frequenz im Inselnetz sich im eingeschwungenen Zustand unterhalb der Nennfrequenz einstellt. Die verbleibende Regelabweichung ist eine Eigenschaft der zur Primärregelung verwendeten P-Regler. Somit lässt sich im eingeschwungenen Zustand ein Arbeitspunkt $P(f)$ beschreiben, wobei die Frequenz einen Indikator für die Leistung im Netz darstellt. Die Lage dieses Arbeitspunktes ist anhängig von den Reglereinstellungen der Anlagen im Netz.

Frage 4.3.2: Statik der Regelung. Beschreiben Sie den Signalfloss der Regelung. Beschreiben Sie die Regelung in Form einer Kennlinie $P(f)$. Was versteht man unter der Statik der Primärregelung?

Lösung: Siehe folgende Abbildung.

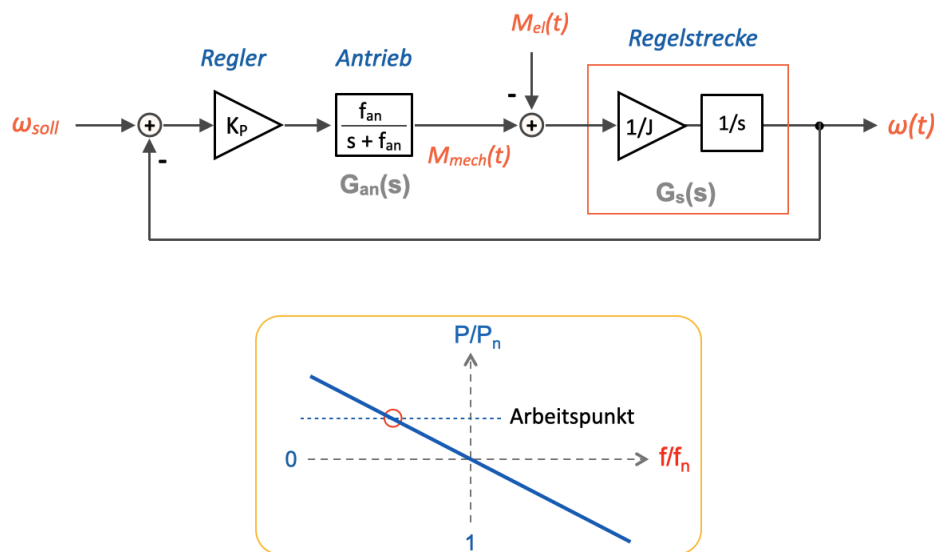


Abbildung 4.3.2 Signalfloss und Kennlinie der Regelung

Der Signalfloss der Regelstrecke folgt dem Rotormodell der Maschine. Hierbei tritt die aus dem Netz geforderte elektrische Leistung (bzw. das zugehörige Drehmoment $M_{el}(t)$) im Sinne der Regelungstechnik als Störgröße auf: Es ist durch den Regler nicht beeinflussbar. Eine Differenz ΔM aus elektrischem Moment und mechanischen Moment führt zu einer Beschleunigung oder zu einer Abbremsung des Rotors der Maschine. Aus der Differenz ΔM ergibt sich nach Division durch das Trägheitsmoment J und nach Integration ($1/s$) die Kreisfrequenz $\omega(t)$ des Rotors.

Die Kreisfrequenz $\omega(t)$ (bzw. die zugehörige Drehzahl $f(t)$) ist die Führungsgröße der Regelung: Es wird ein Sollwert $\omega_{soll} = \omega_n$ vorgegeben (bzw. $f_{soll} = f_n$). Aus der Differenz zwischen dem Sollwert ω_{soll}

und dem gemessenen Istwert $\omega(t)$ ergibt sich die Regeldifferenz. Als Regler wird ein P-Regler mit der Verstärkung K_P eingesetzt. Stellgröße des Reglers im Diagramm ist das mechanische Moment $M_{\text{mech}}(t)$. Im Diagramm durchläuft das mechanische Moment noch einen Tiefpassfilter (bzw. ein PT₁-Glied). In der Realität wäre die Stellgröße des Reglers das Gaspedal bzw. das Dampfventil des Antriebs; der Antrieb erzeugt hieraus das gewünschte Drehmoment. Da hier nur das Zeitverhalten interessiert, sind diese Details an dieser Stelle entbehrlich.

Kennlinie der Regelung

Intuitiv erscheint es einleuchtend, dass sich im eingeschwungenen Zustand eine Kennlinie für das Verhalten $P(f)$ (bzw. $M(\omega)$) in der unter dem Signalfuss dargestellten Form ergeben muss. Die Übertragungsfunktion des Antriebs spielt hierfür keine Rolle, da sie sich im eingeschwungenen Zustand auf den Wert 1 einstellt (nach dem Grenzwertsatz der Laplace-Transformation geht $s \rightarrow 0$ für $t \rightarrow \infty$).

Für die Regelstrecke ist ein Grenzwert für $s \rightarrow 0$ schwer zu bilden, da die Verstärkung wegen des Integrators gegen unendlich geht, wenn es am Eingang einen anderen Wert als null gibt. Hieraus darf man folgern, dass es im eingeschwungenen Zustand keine Abweichung geben ΔM darf, das also $\Delta M = M_{\text{mech}}(t) - M_{\text{el}}(t) = 0$. Hieraus lässt sich folgern, dass

$$M_{\text{mech}} = M_{\text{el}} = K_P (\omega_n - \omega) \quad (4.3.1)$$

Durch Erweitern mit ω_n/M_n erhält man die normierte Schreibweise

$$\frac{M}{M_n} = \frac{K_P \omega_n}{M_n} \cdot \left(1 - \frac{\omega}{\omega_n}\right) \quad (4.3.1')$$

Dieser Zusammenhang gilt auch für die Leistung $P = M \omega$ und für die Frequenz $f = \omega/(2\pi)$. Mit $k_P = K_P \omega_n/M_n$ erhält man für die normierten Größen $p = P/P_n$ und $f_{\text{norm}} = f/f_n$:

$$p = k_P \cdot (1 - f_{\text{norm}}) \quad (4.3.2)$$

Man erkennt die unter dem Signalfuss wiedergegebene Kennlinie. Die Nennfrequenz f_n (bzw. $f_{\text{norm}} = 1$) wird nur im Leerlauf erreicht (wenn also $p = 0$ ist). Für positive Leistungen (bei angeforderte Leistung bzw. im Lastfall) bleibt die Frequenz unter dem Nennwert. Für negative Leistung (Einspeisung) steigt die Frequenz über den Nennwert hinaus.

Die Statik beschreibt die Steigung der Kennlinie. In Aufgabe 4.3.1 besitzt Anlage 2 die größere Reglerkonstante K_P und somit eine steilere Kennlinie als Anlage 3. Da die Frequenz für beide Anlagen gleich sein muss, liefert Anlage 2 somit immer die größere Leistung.

Formale Herleitung der Kennlinie

Die Kennlinie nach Gleichung (4.3.2) lässt sich auch formal aus der Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises herleiten. Der Lösungsweg ist der Gleiche. Die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises ermittelt durch Auftrennen des Kreises nach der Regelabweichung $e(t) = \omega_n - \omega(t)$ im Bildbereich aus den beiden Gleichungen:

$$E(s) = \Omega_n - \Omega(s) \quad (4.3.3)$$

$$\Omega(s) = (K_P E(s) G_{\text{an}}(s) - M_{\text{el}}) G_s(s) \quad (4.3.4)$$

Nach Einsetzen der Gleichung (4.3.3) in (4.3.4) zum Eliminieren von $E(s)$ ergibt sich nach einigem Umformen der Ausdruck

$$\Omega(s) = \frac{K_p G_{an}(s) G_s(s) \Omega_n}{1 + K_p G_{an}(s) G_s(s)} - \frac{M_{el} G_s(s)}{1 + K_p G_{an}(s) G_s(s)} \quad (4.3.5)$$

Die Übertragungsfunktion der Strecke lässt sich nun in einen Ausdruck $1/G_s(s)$ im Nenner überführen und der Grenzwert für $s \rightarrow 0$ im eingeschwungenen Zustand bilden. Im Bildbereich erhält man

$$\Omega(s) = \Omega_n - \frac{M_{el}}{K_p} \quad (4.3.6)$$

Nach Umformung und Transformation in den Zeitbereich erhält man hieraus die gewünschte Kennlinie gemäß Gleichung (4.3.1).

Frage 4.3.3: Betrieb am Netz. Aus Perspektive der Kennlinien der Regelung folgt, dass für einen arbeitsteiligen Betrieb am Netz auch das Netz über eine Kennlinie verfügen muss. Im eingangs dargestellten Beispiel einer Maschine am Netz (siehe Aufgabe 4.1.4) leistete die Maschine nur einen Beitrag zur Momentanreserve: Auf Dauer übernimmt das Netz die gesamte angeforderte Last. Untersuchen Sie den Betrieb beider Maschinen am Netz, wenn das Netz mit einer Kennlinie $P(f)$ betrieben wird.

Lösung: Folgende Abbildung zeigt den Aufbau der Simulation.

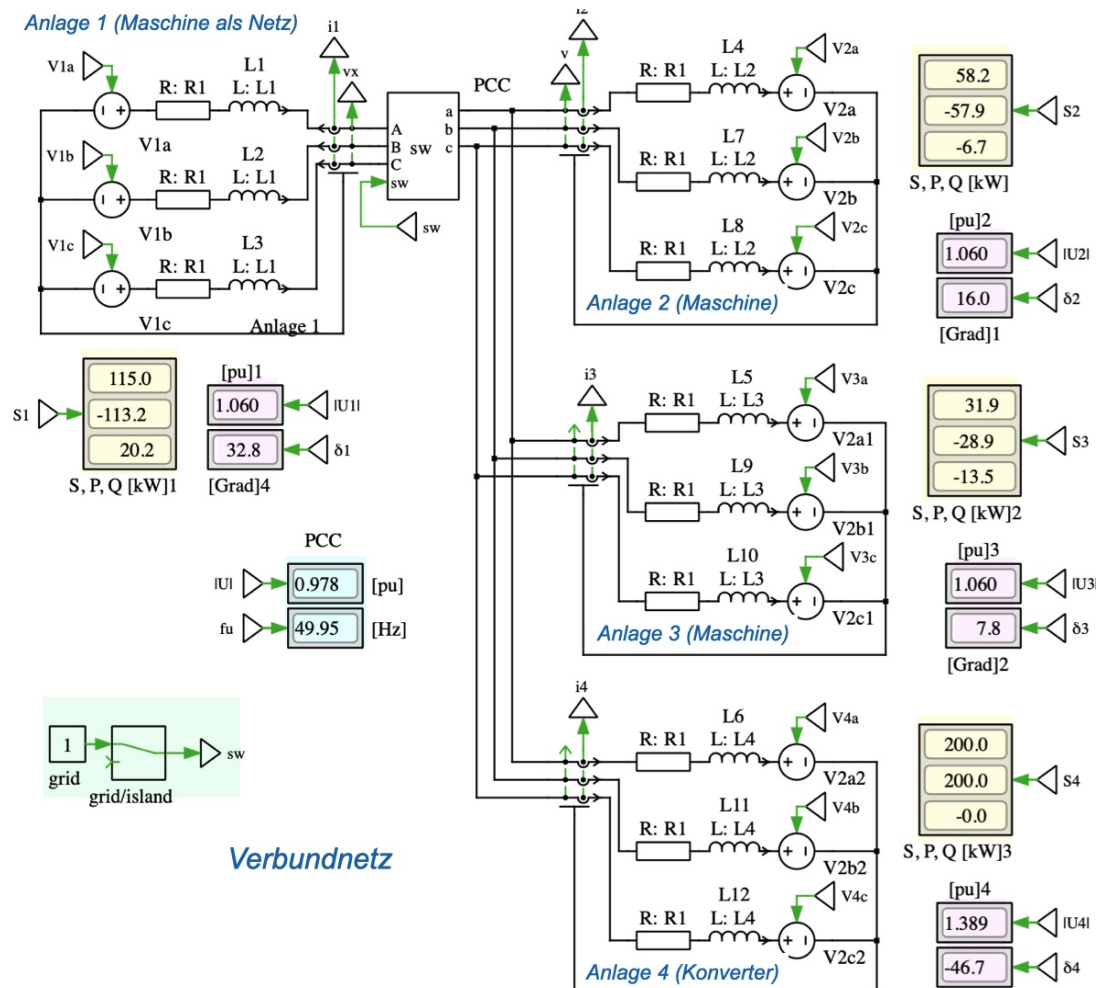


Abbildung 4.3.3 Aufbau der Simulation des Verbundnetzes

Das Netz wurde nun ebenfalls als Maschine realisiert, damit sich die Kennlinie $P(f)$ vorgeben lässt. Die Trägheit wurde mit $H_1 = 10$ s gewählt, der Antrieb als ideal (d.h. verzögerungsfrei). Die Koppelindukti-

vitäten aller Anlagen sind im Modell gleich. Die Kennlinien wurden so vorgegeben, dass die Steigungen $K_{P1} = 2 K_{P2} = 4 K_{P3}$ betragen. Bezogen auf die gesamte Last sollten die Anlagen hiermit folgende Anteile leisten: $P_1 = 2 P_2 = 4 P_3$. Ein Vergleich der Wirkleistungen zeigt, dass diese Verhältnisse sich so einstellen.

Das in folgender Abbildung dargestellte Einschwingverhalten zeigt, dass die Beiträge aller Anlagen zur Momentanreserve gleich ausfallen. Grund hierfür sind die gleichen Induktivitäten zur Anbindung am gemeinsamen Anschlusspunkt. Die Frequenz im Verbundnetz wurde aus der Spannung am Anschlusspunkt ermittelt. Diese weicht nun vom Sollwert ab.

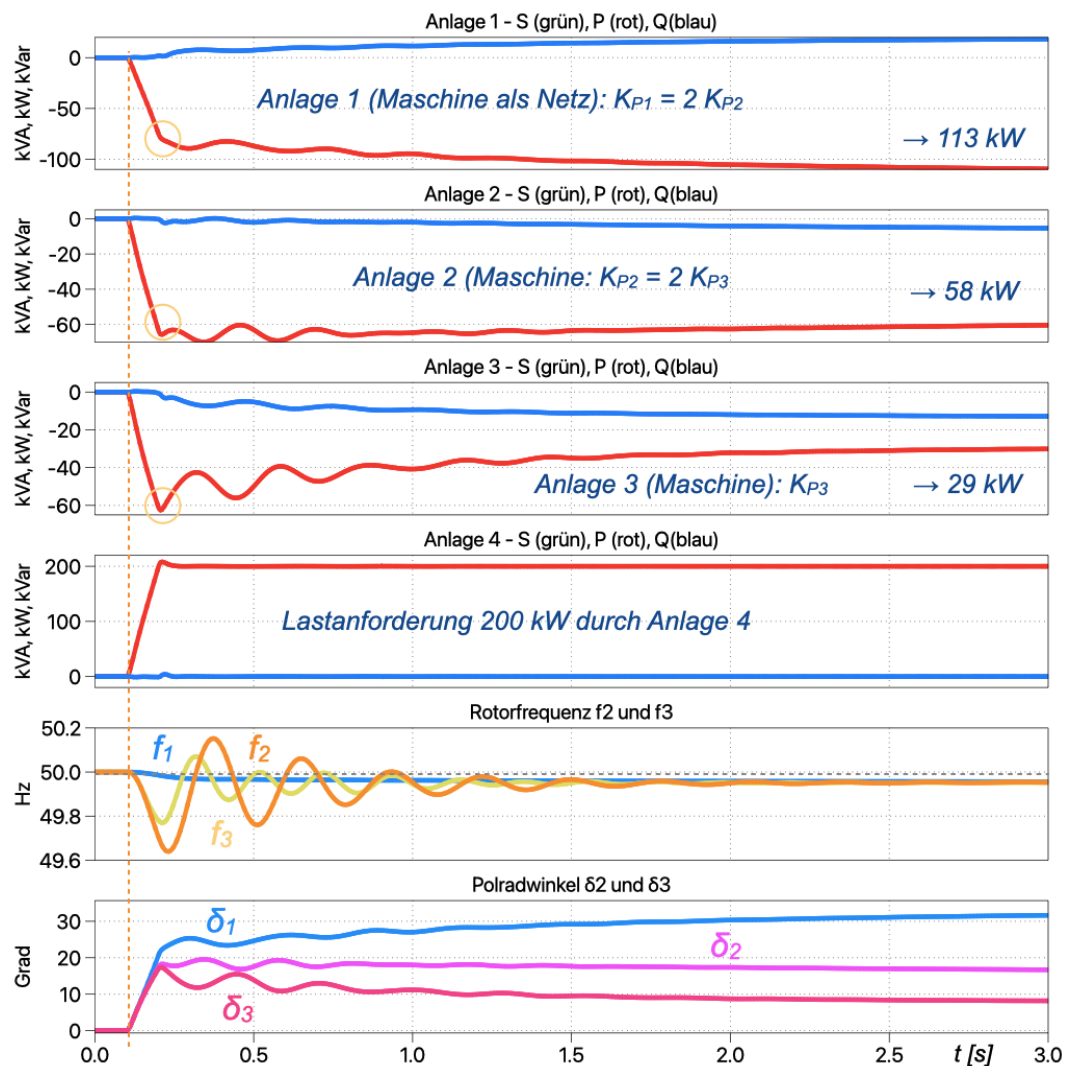


Abbildung 4.3.4 Einschwingverhalten der Primärregelung

Welcher Arbeitspunkt sich im Diagramm $P(f)$ einstellt, lässt sich aus den Kennlinien der Anlagen ermitteln. Hierbei gilt, dass die Summe der Leistungen am Anschlusspunkt null ergeben muss. Diese Anforderung ergibt sich aus der Knotenregel für die Anlagenströme. Für das gesamte Netz als Regelkreis mit den Kennlinien der Anlagen ergibt sich die in folgender Abbildung dargestellte Struktur.

Der Signalfuss auf der linken Seite der Abbildung beschreibt den Regelkreis. Anlage 4 beschreibt regelungstechnisch durch die Leistungsanforderung die Störgröße. Diese Anforderung bringt das System aus dem Gleichgewicht. Die Regelstrecken des Systems stellen die geforderte Leistung sofort bereit (Momentanreserve) und reagieren in der Form $f(P)$ auf die Störung.

Die mit Hilfe ihrer Kennlinien $P(f)$ dargestellten Regler reagieren auf die Frequenzänderung und führen die Antriebsleistung der Anlagen nach, so dass dauerhaft Leistung bereit gestellt werden kann. Dabei orientiert sich jede Anlage individuell an ihrer Kennlinie: Ist die Frequenz zu niedrig, wird weiterhin Leistung bereit gestellt. Ein stabiler Arbeitspunkt finden sich dann, wenn sich alle Anlagen auf eine Frequenz einigen können.

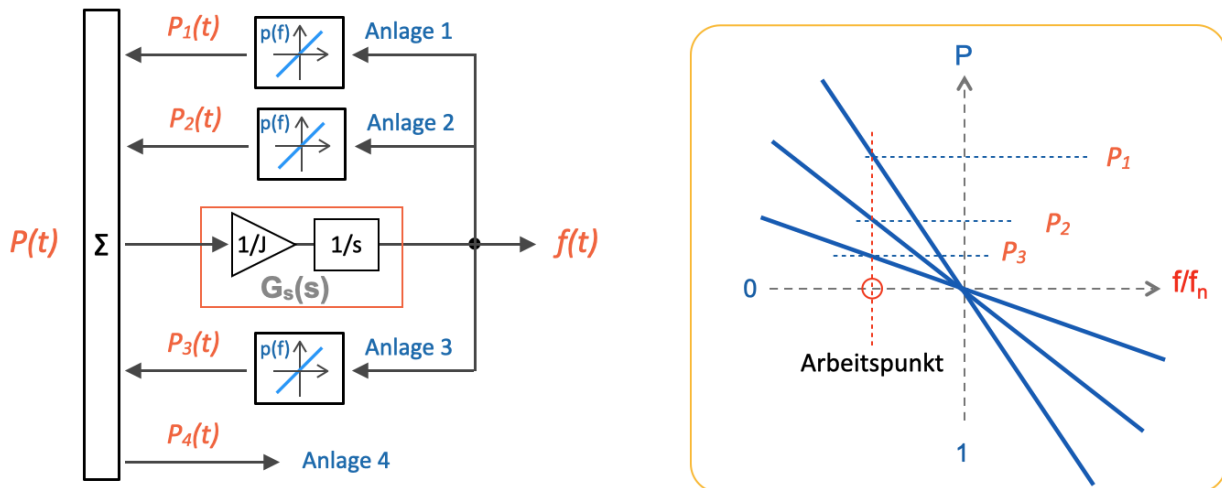


Abbildung 4.3.5 Arbeitspunkt im Netz gemäß Vorgabe der Kennlinien

Wie im rechten Teil der Abbildung dargestellt, geht dieser Arbeitspunkt aus den bzgl. der Leistung in absoluten Werten skalierten Kennlinien der Anlagen hervor: Anlagen mit steiler Kennlinie leisten einen höheren Anteil zur Gesamtleistung. Die Summe der Leistungen muss hierbei der angeforderten Leistung entsprechen. Etwas einfacher lässt sich der Arbeitspunkt aus der gesamten Kennlinie der Anlagen ermitteln. Folgende Abbildung illustriert das Prinzip.

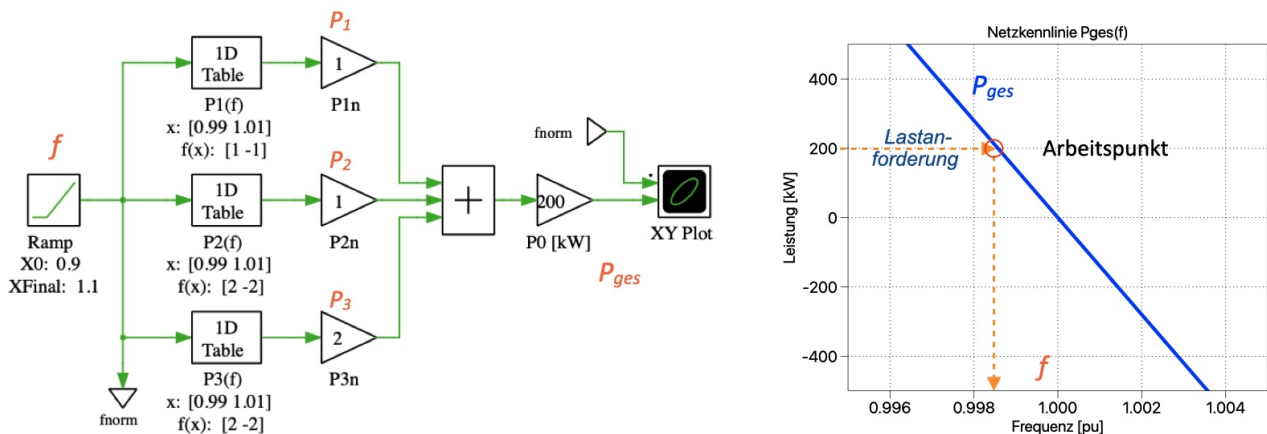


Abbildung 4.3.6 Ermittlung des Arbeitspunktes aus der Netzkennlinie

Addiert man über dem relevanten Frequenzbereich die durch die Kennlinien vorgegebenen absoluten Leistungsbeiträge der Anlagen, so ergibt sich die Kennlinie $P_{ges}(f)$ des Netzes. Aus dieser erhält man je nach Lastanforderung den Arbeitspunkt im eingeschwungenen Zustand der Primärregelung. Bemerkung: Die Kennlinien wurden für dieses Beispiel nicht exakt auf die Werte der Simulation skaliert, sondern sollen nur das Prinzip zeigen.

Frage 4.3.4: Arbeitspunkt mit zusätzlicher Einspeisung. Bei Maschinen besteht die Möglichkeit, einen Grundbetrag der Antriebsleistung vorzugeben. Regelungstechnisch bedeutet diese Vorgabe ei-

nen Sollwert P_{Soll} . Untersuchen Sie das Verhalten der Anlagen im Netz, wenn für eine der Anlagen eine feste Antriebsleistung vorgegeben wird. Welche Rolle spielt das Netz hierbei?

Lösung: Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf, in dem Anlage 2 ein Sollwert für die Einspeiseleistung vorgegeben wird. Die Anlagen 2 und 3 sind identisch aufgebaut, damit sich das Verhalten vergleichen lässt (gleiche Induktivitäten und gleiche Steigung der Kennlinien $P(f)$). Anlage 3 verbleibt nur drehzahl geregelt und folgt somit der Spannung am Anschlusspunkt. Anlage 2 leistet das ebenfalls, speist aber zusätzlich die vorgegebene Leistung ein.

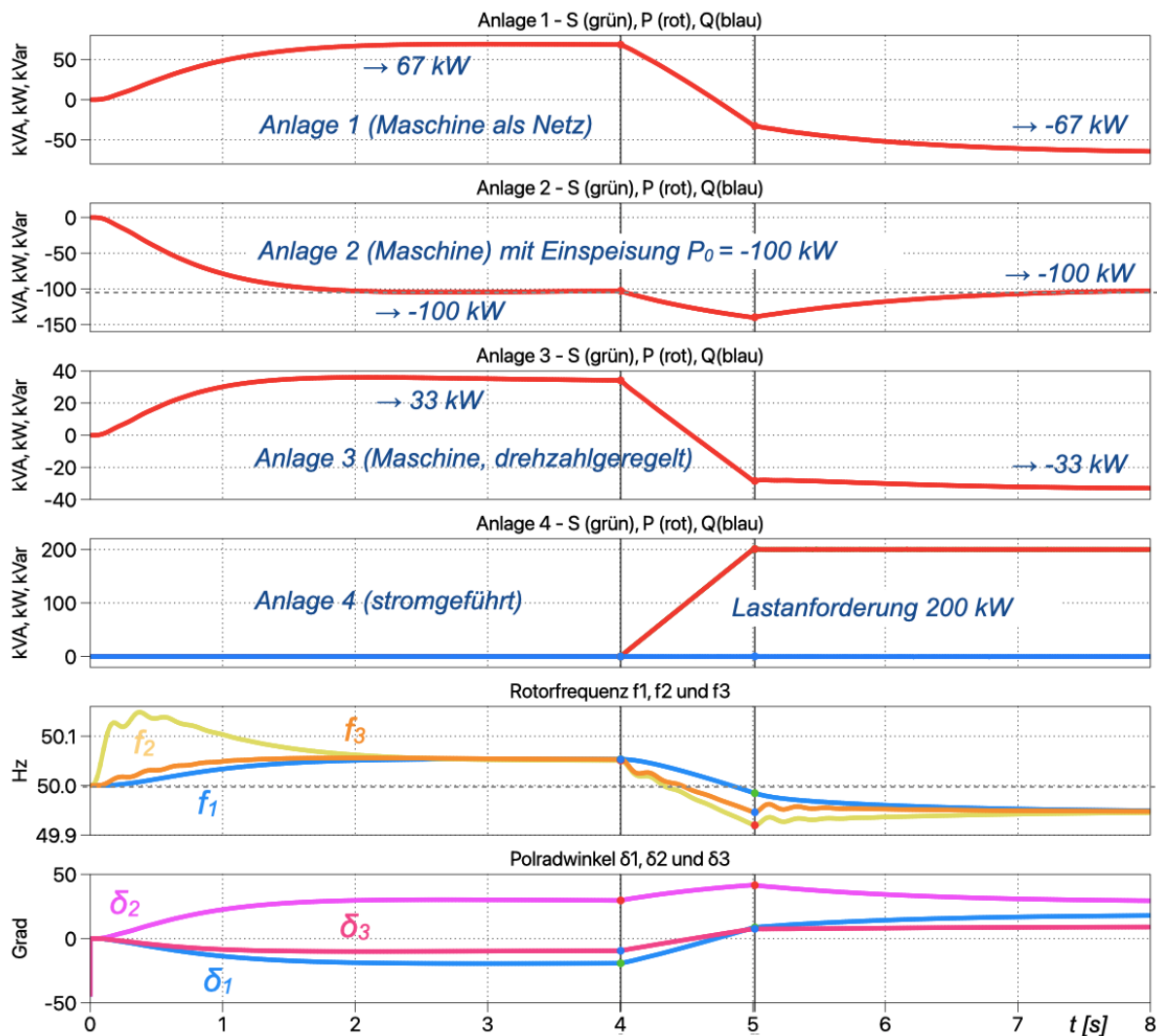


Abbildung 4.3.8 Anlage 2 als Maschine mit Einspeisung

Zum Anfang der Simulation wird Anlage 2 auf den Sollwert $P_0 = -100 \text{ kW}$ hochgefahren. Die Vorgabe für die Antriebsleistung geschieht nicht sprunghaft, sondern durch ein Tiefpassfilter mit 5 Hz Grenzfrequenz (ersichtlich im Simulationsmodell), der Leistungsregler der Anlage 2 ist als PI-Regler ausgeführt und reagiert absichtlich langsam, um dem Drehzahlregler Spielraum zu lassen. In Anlage 2 sind Drehzahlregler und Leistungsregler gleichzeitig aktiv.

Man erkennt in der ersten Hälfte der Simulation, dass die von Anlage 2 eingespeiste Leistung vom Netz (Anlage 1) und von Anlage 3 aufgenommen wird. Deren Anteile sind durch die Kennlinien $P(f)$ vorgegeben: Anlage 2 verfügt über die doppelte Verstärkung wie Anlage 3, daher verhalten sich die Anteile $P_1 = 2 P_2$ und das Netz als Anlage 1 übernimmt $2/3$ der Einspeiseleistung von P_2 .

Das Netz muss in der Lage sein, überschüssige Leistung aufzunehmen. Das Modell des Netzes als Maschine mit idealem Antrieb (Anlage 1) ist hierbei nicht wörtlich zu verstehen. In einem realen Netz sollten hinreichend viele Verbraucher verfügbar sein, über den Leistungsüberschuss der Anlagen am Anschaltspunkt hinaus, so dass die realen Maschinen im Netz im Einspeisebetrieb fahren können. Für die Anlage 3 am Anschlusspunkt stellt sich allerdings die Frage, wie diese Maschine Leistung aufnehmen kann. In der Praxis wird das nicht gelingen.

In der Realität würde man Anlage 3 ebenfalls mit einem Leistungsregler ausstatten, so dass die Leistung der Maschine bei Lastschwankungen im negativen Bereich verbleibt, und somit die Maschine im Generatorbetrieb. In der zweiten Hälfte der Simulation normalisieren sich die Verhältnisse für Generatoren, da Anlage 4 nun eine Leistung von 200 kW fordert.

Man erkennt, dass während des Lastwechsels alle Maschinen einen Beitrag zur Momentanreserve leisten: Auch die leistungsgeregelte Anlage 2 stellt mehr Leistung bereit als die vorgegebene Einspeiseleistung. Allerdings führt der Leistungsregler die Anlage wieder zurück auf den Sollwert. Den nicht von Anlage 2 gedeckten Teil der Leistung übernehmen nun wiederum Netz und Anlage 3 gemäß der Steigung ihrer Kennlinien $P(f)$. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Leistungsreglers.

Rotorsystem

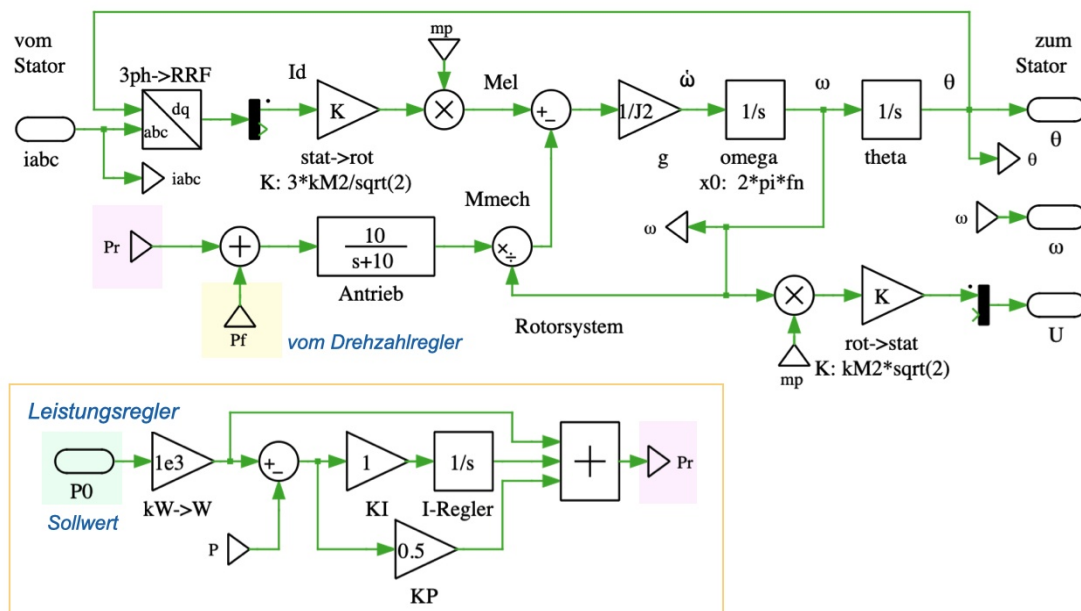


Abbildung 4.3.7 Aufbau der Regelung mit Leistungsregler und Drehzahlregler

Hierzu wurde das Rotorsystem um einen PI-Regler ergänzt, der zusammen mit dem Drehzahlregler die mechanische Leistung des Antriebs als Stellgröße vorgibt. Die Reglerparameter sind so gewählt, dass der Leistungsregler dem Drehzahlregler den Vorrang gibt, indem er langsamer arbeitet.

Der Leistungsregler lässt sich so interpretieren, dass er den Sollwert der Einspeiseleistung vorgibt. Der I-Anteil des Leistungsreglers setzt sich auf Dauer gegen den P-Regler des Drehzahlreglers durch. So wird die Drehzahl in der Nähe der Solldrehzahl gehalten und es lässt sich gleichzeitig Leistung einspeisen. Damit Anlage 3 im Generatorbetrieb bleiben kann, wäre dort ebenfalls ein Leistungsregler zu implementieren, dessen Vorgaben im negativen Bereich bleiben.

4.4. Sekundärregelung

Aufgabe der Primärregelung ist die kollektive Bewältigung dynamischer Lastanforderungen durch alle Generatoren im Netz. Die Drehzahlregler als Primärregelung $P(f)$ folgen der Bereitstellung der Momentanreserve der Regelstrecken, die mit Änderungen der Drehzahl der Maschinen $f(P)$ bedingt durch die Laständerung verursacht werden. Ursächlich ist die Laständerung als Störgröße. In der kausalen Kette folgt die Momentanreserve $f(P)$, und anschließend die Primärregelung $P(f)$.

Bei der Primärregelung verhalten sich alle so geregelten Anlagen solidarisch, indem sie sich an der Bereitstellung der benötigten Leistung beteiligen. Im Sinne der Stabilität des Netzes ist dieses Verhalten erwünscht. Auf Dauer muss die solidarische Beteiligung aller Anlagen nicht die beste Lösung sein: Anlagen haben unterschiedliche Betriebskosten, bzw. es soll der Verursacher einer außerplanmäßigen Last diese auf Dauer mit den eigenen Anlagen bedienen.

Aus diesem Grund sind die Sollwerte der Einspeiseleistung durch die Sekundärregelung veränderbar. Der Begriff Sekundärregelung deutet hierbei an, dass diese Regelung erst nach der Reaktion auf Laständerungen durch die Primärregelung eingreift. Die Primärregelung arbeitet in einem Verbundnetz innerhalb einiger Sekunden bis 5 Minuten. Die Sekundärregelung ändert die Arbeitspunkte der Anlagen außerhalb dieser Zeit bis in den Bereich einer Stunde.

Frage 4.4.1: Verschiebung der Arbeitspunkte. Folgender Simulationslauf startet mit einer ausgewogenen Leistungsbilanz für die Anlagen am Anschlusspunkt: Anlage 4 bezieht 100 kW, die zu Anteilen von -60 kW durch Anlage 2 und -40 kW durch Anlage 3 bereitgestellt werden. Diese Werte folgen den Vorgaben der Einspeiseleistung der identischen Anlagen 2 und 3. Aus dem Netz muss hierdurch keine Leistung bezogen werden.

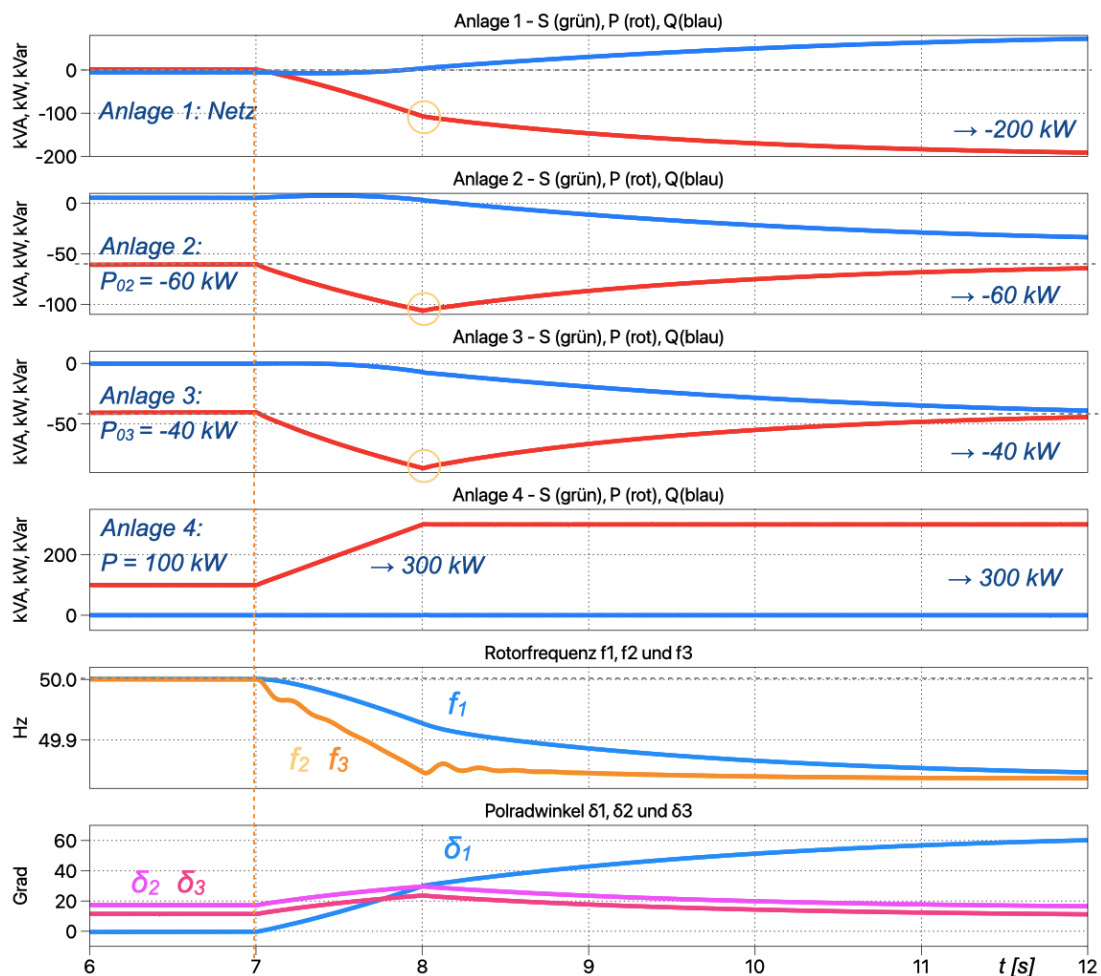


Abbildung 4.4.1 Außerplanmäßige Leistungsanforderung durch Anlage 4

Zum Zeitpunkt t_1 erhöht Anlage 4 den Leistungsbedarf außerplanmäßig auf 300 kW. Beschreiben Sie das Verhalten der Anlagen im weiteren Verlauf. Wie ließe sich der Leistungsbezug aus dem Netz verringern? Überprüfen Sie Ihre Lösung in der Simulation.

Lösung: Siehe folgende Abbildung.

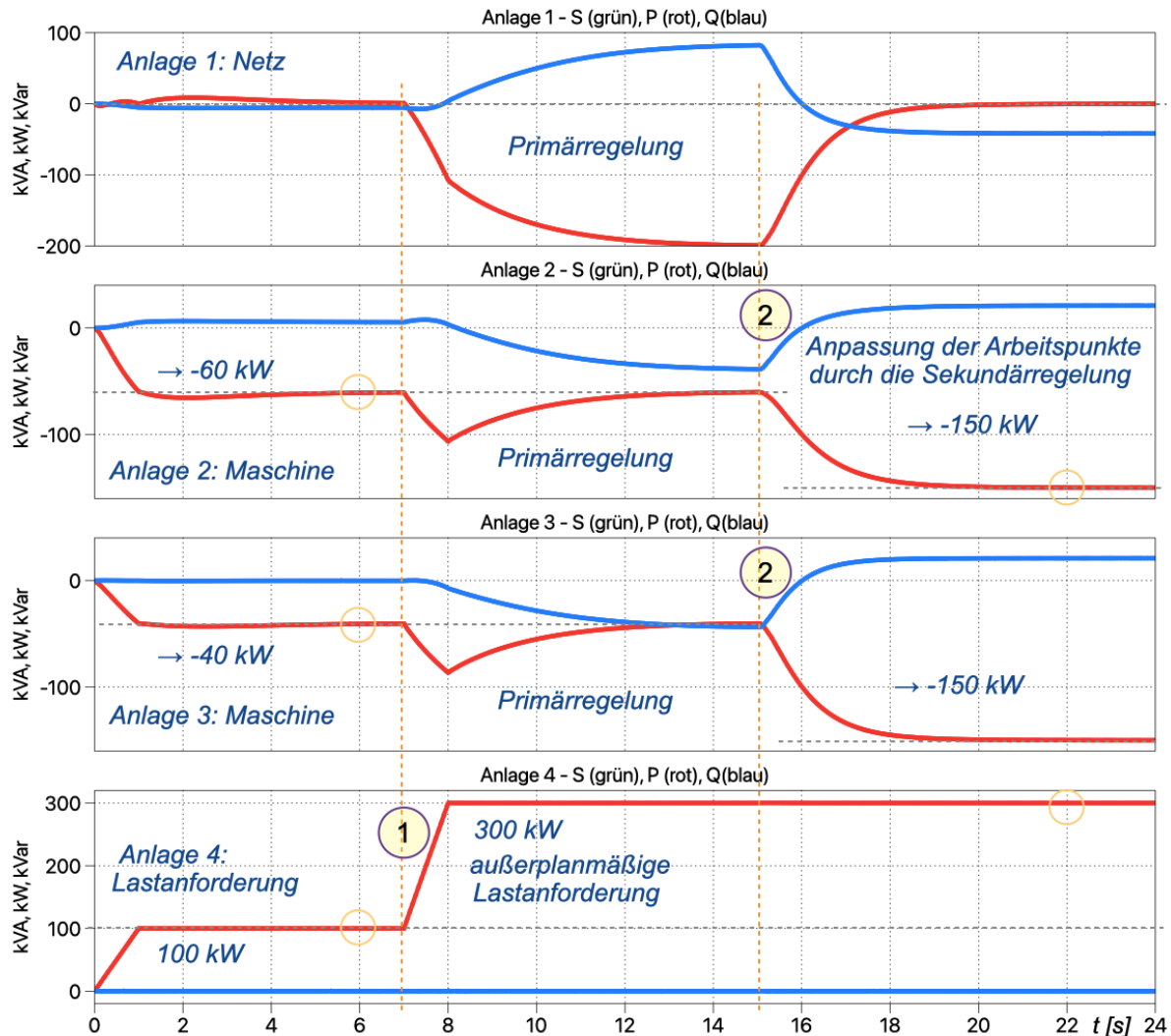


Abbildung 4.4.2 Anpassung der Arbeitspunkte der Anlagen 2 und 3

Man erkennt, dass die Primärregelung dafür sorgt, dass die Lasten solidarisch verteilt werden, auf Dauer die Anlagen jedoch wieder auf ihre vorgegebenen Arbeitspunkte zurückgeführt werden. Die Sekundärregelung passt die Arbeitspunkte der Anlagen 2 und 3 an die veränderten Lastbedingungen an, so dass auf dem Netz keine Leistung mehr bezogen werden muss.

Die Wahl der Arbeitspunkte $P_{2\text{soll}} = P_{3\text{soll}} = -150 \text{ kW}$ für die Anlagen 2 und 3 ist hierbei willkürlich. Im Simulationslauf setzt die Sekundärregelung zum Zeitpunkt $t_2 = 15 \text{ s}$ ein. Mit zunehmender Einspeiseleistung der Anlagen nimmt der Leistungsbezug aus dem Netz ab. Das Netz hat keinen Leistungsregler, sondern bleibt spannungsgeführt (durch den Spannungsregler der Anlage 1). Es kann Leistung aufnehmen und bereit stellen.

Frage 4.4.2: Kennlinien und Regler. Wie ließe sich das Szenario aus Aufgabe 4.4.1 durch Kennlinien interpretieren? Welche Aufgabe hat die Sekundärregelung?

Lösung: Die Sekundärregelung hat die Aufgabe der Anpassung der Arbeitspunkte für die Einspeisung der spannungsgeführten Anlagen (= Generatoren) an die betrieblichen Gegebenheiten im Netz. Die Sekundärregelung ist der Primärregelung nachgelagert. Folgende Abbildung illustriert die Wirkung der Sekundärregelung auf die Kennlinien der Regler.

Die Unterschiede gehen aus dem linken Teil der Abbildung hervor:

- Die Primärregelung $P(f)$ verschiebt den Arbeitspunkt auf der Kennlinie in Abhängigkeit der Frequenz.
- Die Sekundärregelung verschiebt die Kennlinie durch Vorgabe der Einspeiseleistung P_0 .

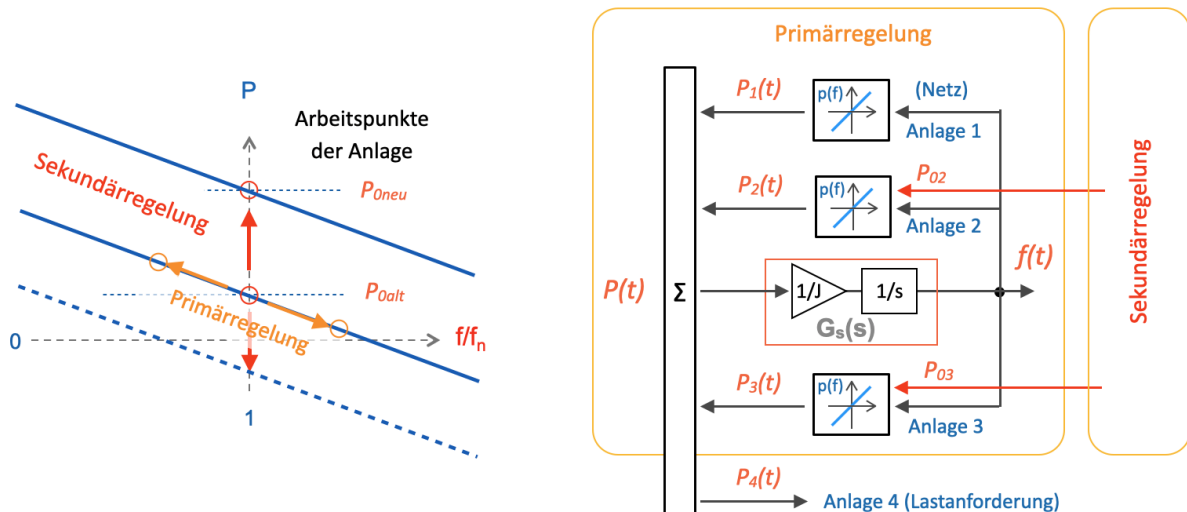


Abbildung 4.4.3 Kennlinien der Regler mit Sekundärregelung

Der P-Regler der Primärregelung lässt einen Spielraum für die Frequenz zu: die Bedienung höherer Lastanforderungen sind mit sinkender Frequenz verbunden. Der Arbeitspunkt verschiebt sich somit auf der Kennlinie.

In der Sekundärregelung setzt sich auf Dauer der I-Regler gegenüber dem P-Regler der Primärregelung durch: Die Kennlinie wird so verschoben, dass die Vorgabe P_0 der Anlagenleistung durch die Sekundärregelung eingehalten wird, unabhängig von der Frequenz, die der Primärregler zulässt. Für eine ausgeglichene Leistungsbilanz der Anlagen am Anschlusspunkt werden die Vorgaben P_{0i} der Anlagen so geführt, dass aus dem Netz keine Leistung bezogen werden muss.

Der rechte Teil der Abbildung oben zeigt die Reglerstruktur. Die Regler der Sekundärregelung finden sich hierbei in den Anlagen (Details siehe Abbildung 4.3.7). Die Primärregelung stellt die Leistung abhängig von der Drehzahl der Maschinen. Die Sekundärregelung gibt Vorgaben für die Anlagenleistung.

Im Beispiel besitzt Anlage 1 als Netz nur einen Primärregler ohne Leistungsvorgabe: Das Netz arbeitet somit mit einer festen Kennlinie durch den Punkt $\{f/f_n = 1; 0\}$. Die Nennfrequenz f_n wird nur im Leerlauf erreicht. Die Anlagen 2 und 3 sind identisch aufgebaut und besitzen Leistungsvorgaben für die Sekundärregelung. Anlage 4 arbeitet stromgeführt und stellt die Lastanforderung bereit.

Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf zum gleichen Szenario wie Abbildung 4.2.2, jedoch mit den Frequenzen und Polradwinkeln der Anlagen 1 (Netz), 2 und 3 (Generatoren mit vorgegebener Einspeisung). Die Vorgaben der Sekundärregelung für die Anlagen 2 und 4 werden zum Beginn der Simulation gestellt und bleiben bis zur Anpassung der Arbeitspunkte zum Zeitpunkt $t_2 = 15$ s bestehen. Die Lastanforderung durch Anlage 4 ändert sich zum Zeitpunkt $t_1 = 5$ s.

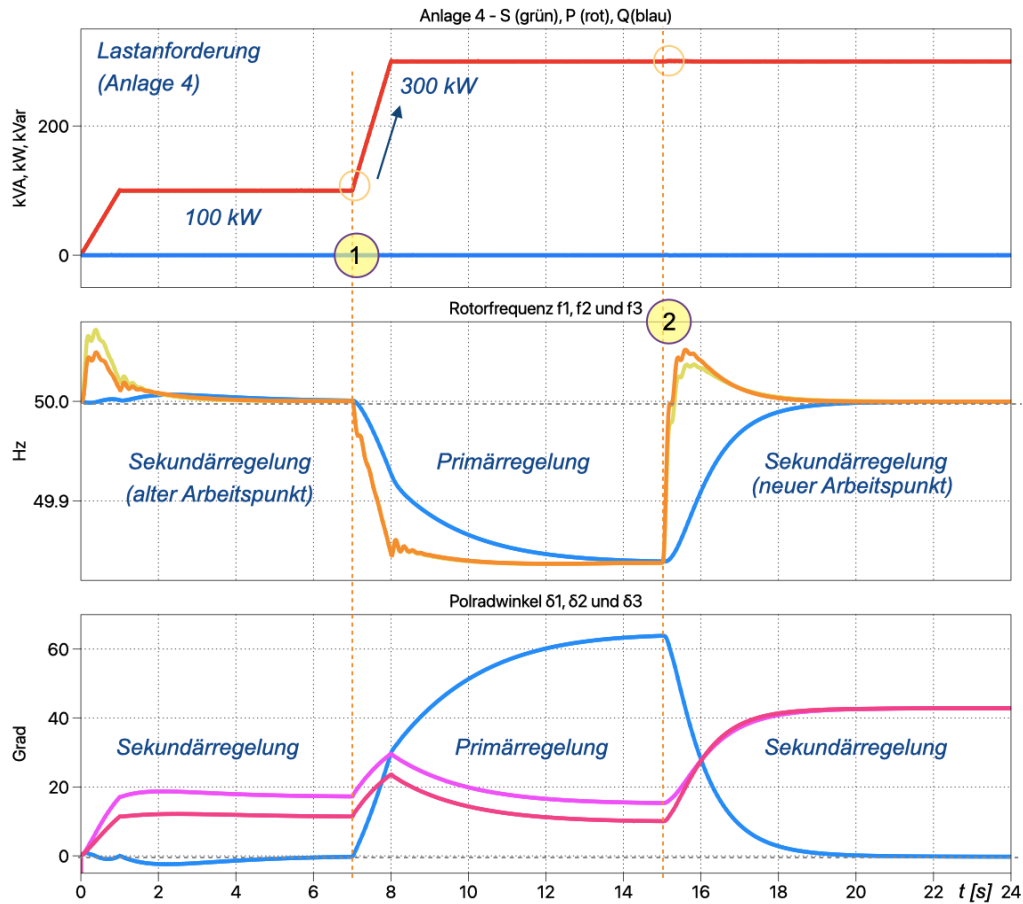


Abbildung 4.4.5 Auswirkungen der Sekundärregelung

Im Anschluss an die Laständerung ist die Primärregelung mit den bisherigen Arbeitspunkte $P_{02,alt}$ und $P_{03,alt}$ der Anlagen 2 und 3 aktiv. Man erkennt, dass diese Vorgaben nach der Laständerung eingehalten werden. Allerdings bleibt die Drehzahl der Anlagen 2 und 3 ebenso wie das Netz unterhalb der Nennfrequenz. Die Sekundärregelung hat die Kennlinien der Anlagen 2 und 3 hier soweit nach unten geschoben, dass die Leistungsvorgaben P_{02} und P_{03} eingehalten werden, allerdings nun bei niedrigeren Frequenzen. Somit liefert die Frequenz am Anschlusspunkt der Anlagen ein Kriterium für die Leistungsbilanz im Netz.

Im zweiten Abschnitt der Simulation werden die Arbeitspunkte der Anlagen 2 und 3 so aktualisiert, dass sich die Anlagen die Lastanforderung gleichmäßig aufteilen, so dass aus dem Netz keine Leistung mehr bezogen werden muss. Nachdem die Anlagen auf die Arbeitspunkte $P_{02,neu}$ und $P_{03,neu}$ geführt wurden und die Leistungsbilanz der Anlagen am Anschlusspunkt nun ausgeglichen ist, kehrt die Anlagenfrequenz wieder zum Nennwert zurück.

Der Simulationslauf zeigt auch die Polradwinkel der Anlagen, die den aktuellen Lastzustand der Anlagen repräsentieren. Im eingeschwungenen Zustand sind die Polradwinkel konstant und unabhängig von der Frequenz. Die Bezugssysteme $\theta_i(t)$ der Anlagen wären hier linear steigend, entsprechend einer konstanten Frequenz.

5. Verbund Maschinen und Umrichter

5.1. Regelungskonzept

...Folgende Abbildung zeigt zwei Anlagen, die an einem gemeinsamen Anschlusspunkt betrieben werden zusammen mit einer weiteren Anlage, die vom Anschlusspunkt Leistung abführt bzw. dem Anschlusspunkt Leistung zuführt.

...

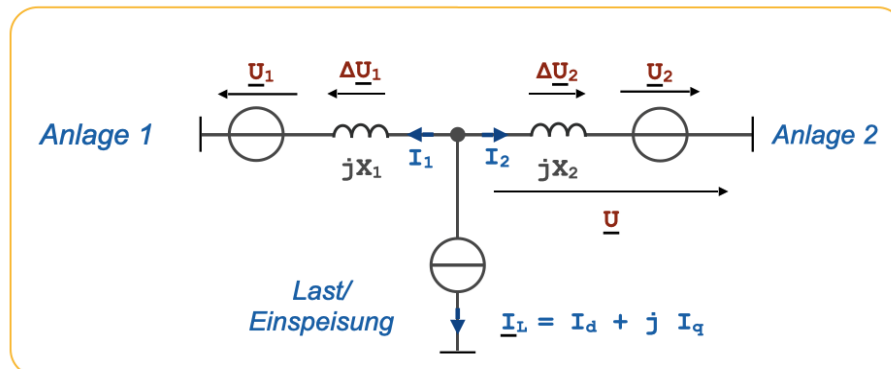


Abbildung 5.1.1 Betrieb zweier Anlagen an einem gemeinsamen Anschlusspunkt mit Laststrom

...

...

Maschinen und Umrichter besitzen eine generelle Reglerstruktur, die in folgender Abbildung dargestellt ist.

...

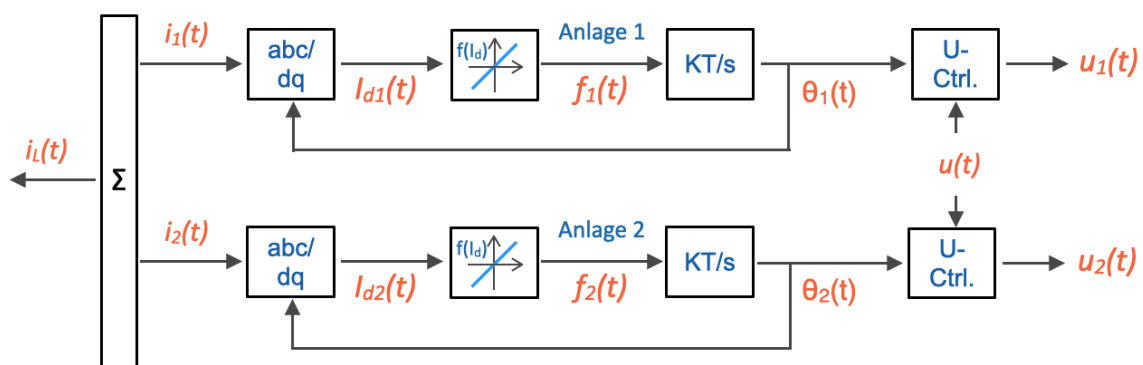


Abbildung 5.1.2 Generelle Reglerstruktur der Anlagen

...

...

Frage 5.1.1: Parallelbetrieb zweier netzbildender Anlagen.

Lösung: ...

...

Abbildung 5.1.3 ...

...

Frage 5.1.2: ...

Lösung: ...

Abbildung 5.1.4 ...

...

Frage 5.1.3: ...

Lösung: ...

Abbildung 5.1.5 ...

...

Frage 5.1.4: ...

Lösung: ...

Abbildung 5.1.6 ...

...

...

5.2. Kraftwerksbetrieb

...

Frage 5.2.1: ...

Lösung: ...

Abbildung 5.2.1 ...

...

Frage 5.2.2: ...

Lösung: ...

Abbildung 5.2.2 ...

...

Frage 5.2.3: ...

Lösung: ...

Abbildung 5.2.3 ...

...

Frage 5.2.4: ...

Lösung: ...

Abbildung 5.2.4 ...

...

...

5.3. Inselnetz

...

Frage 5.3.1: ...

Lösung: ...

Abbildung 5.3.1 ...

...

Frage 5.3.2: ...

Lösung: ...

Abbildung 5.3.2 ...

...

Frage 5.3.3: ...

Lösung: ...

Abbildung 5.3.3 ...

...

Frage 5.3.4: ...

Lösung: ...

Abbildung 5.3.4 ...

...

...

5.4. Verbundnetz

...

Frage 5.4.1: ...

Lösung: ...

Abbildung 5.4.1 ...

...

Frage 5.4.2: ...

Lösung: ...

Abbildung 5.4.2 ...

...

Frage 5.4.3: ...

Lösung: ...

Abbildung 5.4.3 ...

...

Frage 5.4.4: ...

Lösung: ...

Abbildung 5.4.4 ...

...

6. Kraftwerksbetrieb mit Windparks

...

6.1. Netzstruktur

...

6.2. Betrieb der Kopfstation

...

6.3. Transformatoren im Gleichspannungsnetz

...

...

...

6.4. Betrieb der unterlagerten Systeme

...

...

...

...

6.5. Bereitstellung von Momentanreserve

...

...

...

6.6. Verbundbetrieb mit Kraftwerken

...

...

Englisch - Deutsch

Active power	Wirkleistung
Apparent power	Scheinleistung
Capacitor	Kapazität
Circuit breaker	Leistungsschalter
Line voltage	Leiter-zu-Leiter Spannung (Effektivwert)
Inductor	Induktivität
Nominal power	Nennleistung
Nominal voltage	Nennspannung
Peak value	Spitzenwert
Phase voltage	Leiter-zu-Nullleiter Spannung (Effektivwert)
Reactive power	Blindleistung
Resistor	Widerstand
Transformer	Transformator
Transmission	Übertragung
Voltage source	Spannungsquelle
Winding	Wicklung
...	
...	

Abkürzungen

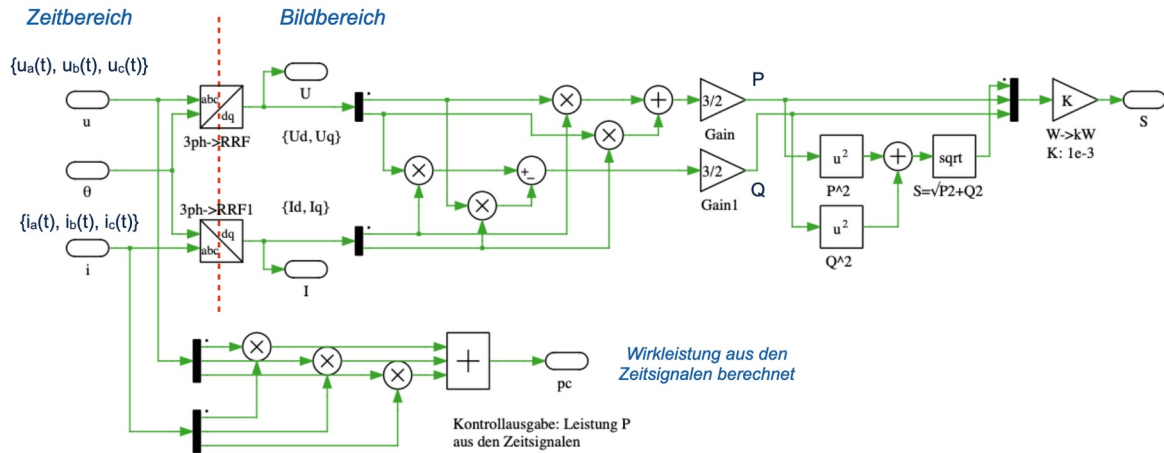
AC	Alternating Current, Wechselstrom
DC	Direct Current, Gleichstrom
$T = 1/f$	Schwingungsdauer, Periodendauer [s]
$f = 1/T$	Frequenz, Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit [1/s]
$\omega = 2\pi f = 2\pi/T$	Kreisfrequenz, Winkelgeschwindigkeit der Kreisbewegung [1/s]
E	Energie [Joule, J, Nm, Ws, kg m ² /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)
Z	komplexer Widerstand (Impedanz, impedance)
R	Wirkwiderstand (resistance)
X	Blindwiderstand (Reaktanz, reactance)
Y	komplexer Leitwert (Admittanz, admittance)
G	Wirkleitwert (conductance)
B	Blindleitwert (susceptance)
S	Scheinleistung (apparent power, in VA = Volt Ampere)
P	Wirkleistung (power, in Watt)
Q	Blindleistung (reactive power, in Var = Volt ampere reactive)
A	Ampere
deg	degrees (Phasenwinkel in Grad)
kV	Kilo Volt (1000V)
kVA	Kilo Volt Ampere (Scheinleistung S, zur Unterscheidung von kW = Wirkleistung))
kVar	Kilo Volt Ampere reactive (Blindleistung, Q)
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
ONT	Ortsnetztransformator
p.u.	per unit (auf Nennwert und physikalische Einheit normierte Größe)
PV	Photovoltaik
W	Watt (Wirkleistung, P)

Literatur

- (1) Stephan Rupp, Planung und Analyse elektrischer Energieversorgungsnetze, [Teil 1.1: Aufbau der Netze](#), Vorlesungsunterlage, siehe auch: <https://www.srupp.de>
- (2) Adolf J. Schwab, Elektroenergiesysteme: Smarte Stromversorgung im Zeitalter der Energiewende, Springer Berlin, 6. Auflage, 2019, ISBN 978-3-662-60373-4
- (3) Klaus Heuck, Klaus-Dieter Dettmann, Detlef Schulz: Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis, Vieweg+Teubner Verlag, 8. Auflage, 2010, ISBN 978-3834807366
- (4) Gerd Balzer und Claus Neumann, Schalt- und Ausgleichsvorgänge in elektrischen Netzen, Springer Vieweg, 2016, ISBN-13: 978-3662445464
- (5) Stephan Rupp, Leistungselektronik und Energiespeicher, [Teil 1: Leistungselektronik](#) und [Teil 3: Modulare Umrichtersysteme](#), Vorlesungsunterlage, siehe auch: <https://www.srupp.de> für Simulationsmodelle zur Vorlesung
- (6) Christian Seynowoldt, Dezentrale Energieversorgung mit regenerativen Energien, Technik, Märkte, kommunale Perspektiven, 2. Auflage, 2021, Springer, 978-3-658-33733-9, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-33733-9>
- (7) Günther Brauner, Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung; Strategien für effiziente Energieversorgung bis 2050; Springer, 2019, ISBN 978-3-658-24854-3
- (8) Michael Sterner und Ingo Stadler, Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration; Springer, 2. Auflage, 2017, ISBN 978-3-662-48893-5
- (9) ...

Anhang A – Leistungsmessung

Wirkleistung, Blindleistung und Scheinleistung



Basis sind die Zeiger $\underline{U} = U_d + j U_q$ und $\underline{I} = I_d + j I_q$.

Aus diesen erfolgt die Berechnung der Scheinleistung gemäß

$$\underline{S} = P + jQ = \underline{U} \cdot \underline{I}^*$$

Durch Einsetzen von Spannung und Strom erhält man hieraus

$$\underline{S} = (U_d + jU_q) \cdot (I_d - jI_q)$$

Durch Ausmultiplizieren erhält man sortiert nach Realteil und Imaginärteil

$$P = U_d I_d + U_q I_q$$

$$Q = U_q I_d - U_d I_q$$

Korrekturfaktor

In der Simulation werden für die Zeitsignale die Scheitelwerte verwendet. Daher fallen die in den Bildbereich transformierten Werte der Spannung und des Stroms um jeweils einen Faktor $\sqrt{2}$ zu groß aus. Die Leistung ist folglich um den Faktor $\frac{1}{2}$ zu korrigieren.

Die berechnete Leistung ist die Leistung einer Phase (daher wurde auch die Sternspannung U in der Messung verwendet). Die Leistung des dreiphasigen Systems ist einen Faktor 3 größer.

Hieraus ergibt sich insgesamt der Korrekturfaktor $\frac{3}{2}$ bei der Berechnung von P und Q .

Kontrolle der Wirkleistung

Die direkte Berechnung der Wirkleistung aus den Zeitsignalen dient der Kontrolle der Berechnung aus dem Bildbereich: Diese Berechnung basiert auf den Produkten von Strom und Spannung in jeder Phase. Bei der Addition der Teilbeträge mitteln sich bei einem symmetrischen System die hochfrequenten Leistungsanteile heraus (da deren Phasenbeziehungen aus dem Drehstromsystem erhalten bleiben), übrig bleibt die mittlere Leistung = physikalisch korrekte Wirkleistung.