

Leistungselektronik

Teil 2: Anwendungen im Netz

Schulungsunterlage

Ausgabe 0.1, 29.08.2022
Autor: Stephan Rupp

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

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

Über dieses Dokument

Diese **Schulungsunterlage** enthält Aufgaben für eine zweitägige Schulung über Umrichter in Inselnetzen (Microgrids) und in Verbundnetzen. In beiden Fällen sind die Netze bzw. Teile der Netze umrichtergeführt.

Basis dieser Schulung ist die eintägige Schulung Leistungselektronik, in der die Grundlagen der Umrichtertechnik einschließlich der Schaltungen und Regelung gelegt werden.

Zur Analyse der Funktion und der Betriebsweise einschließlich der Regler werden Schaltungssimulationen eingesetzt. Die Modelle ermöglichen eine individuelle, eigenständige Vertiefung im Anschluss an die Schulung. Alle Schaltungsmodelle und Unterlagen finden sich auf der u.g. Web-Seite.

- **Simulationssoftware:** In dieser Unterlage wurde PLECS verwendet. Alle Schaltungen lassen sich leicht nach Matlab/Simulink/Simscape oder in die Open-Source-Umgebung Scilab/Xcos übertragen.
- **Schwerpunkt der Schulung** sind die Anwendungen zum praktischen Einsatz der Umrichter. Hierbei stehen folgende Themen im Vordergrund:
 - Aufbau und Eigenschaften von Umrichtern in der Niederspannung (3W und 4W)
 - Einsatz physikalischer Modelle und Mittelwertmodelle in der beruflichen Praxis
 - Betrieb mit Generatoren in Inselnetzen und im Verbundnetz
- Ziel der Schulung ist ein kompakter, zweitägiger Kurs. Für eine Vertiefung der **Theorie** wird auf die Vorlesungsmanuskripte Planung und Analyse elektrischer Energieversorgungsnetze verwiesen, speziell zu den Themen
 - Gleichspannungsnetze
 - Hybride AC/DC-Netze
 - Maschinen und Anlagen am Netz.

Unterlagen im Web:

- Schulung Teil 1 (Basis):
 - [Schulungsunterlage](#) Teil 1 (PDF): Voraussetzung für diesen Kurs
 - [Simulationsmodelle](#) zur Schulung Teil 1 (PLECS)
- Schulung Teil 2 (dieser Kurs):
 - [Schulungsunterlage Teil 2](#) (PDF)
 - [Simulationsmodelle zur Schulung Teil 2](#) (PLECS)
 - [Quelltexte](#) und Bilder (zip)
- Vorlesungsmanuskript [Leistungselektronik](#) (PDF)
- Vorlesungsmanuskript Planung und Analyse elektrische Energieversorgungsnetze:
 - [Gleichstrom und Gleichspannung im Netz](#) (PDF)
 - [Netzbetrieb mit erneuerbaren Energien](#) (PDF)
- Weitere Vorlesungsunterlagen: <https://www.srupp.de/#LEN>

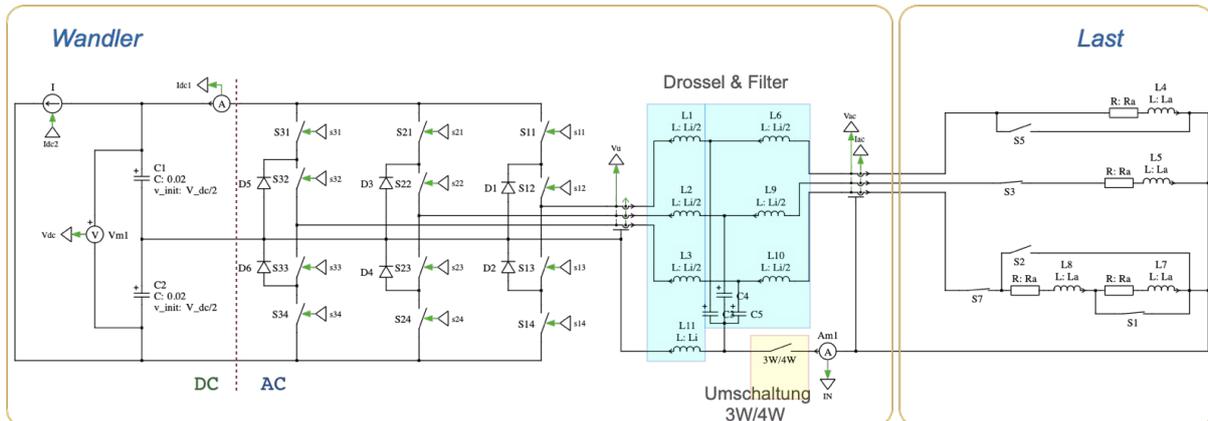
Inhaltsverzeichnis

1. Umrichter mit Neutralleiter (4W)	4
1.1. Funktionsprinzip.....	4
1.2. Simulationsmodell einschließlich Regelung.....	5
1.3. Verhalten bei unsymmetrischer Last.....	8
1.4. Mittelwertmodelle.....	9
2. Netzbildender Betrieb	12
2.1. Inselnetzbetrieb.....	13
2.2. Verbundbetrieb.....	16
2.3. Fehlererkennung.....	19
2.4. Fehlerbehandlung.....	22
3. Generatoren	27
3.1. Synchronmaschine.....	27
3.2. Mechanisches Modell.....	29
3.3. Elektrisches Modell.....	33
3.4. Betrieb am Netz.....	34
4. Generisches Umrichtermodell	37
4.1. Synchronmaschine.....	37
4.2. Virtuelle Maschine.....	41
4.3. Netzbildender Umrichter.....	45
4.4. Generische Regelung.....	49
5. Betriebsfälle	53
5.1. Parallelbetrieb von Anlagen.....	53
5.2. Betrieb mit Generatoren.....	57
5.3. Betrieb mit Generator und Umrichter.....	62
5.4. Kommunale Stromversorgung.....	66

1. Umrichter mit Neutralleiter (4W)

1.1. Funktionsprinzip

Folgende Abbildung zeigt einen Umrichter mit 3 Spannungsniveaus (Drei-Level-Konverter), bei dem der Bezugspunkt wahlweise (per Schalter) als Neutralleiter herausgeführt ist.



Der Wandler wird spannungsgeführt an einer ohmsch-induktivem Last betrieben. An der Last lassen sich unsymmetrische Betriebsfälle einstellen. Für eine realistischere Betrachtung der Spannungen und Ströme wurde die Seriendrossel am Ausgang des Konverters um ein Filter (LC-Filter) ergänzt. Die Messung der Ströme und Spannungen erfolgt am Konverterausgang. Zusätzlich ist eine Messung der Umrichterspannung vor der Serieninduktivität vorgesehen, wobei als Bezugspunkt das Nullpotenzial im Konverter gewählt wurde.

Frage 1.1.1: Erläutern Sie das Funktionsprinzip des Konverters, einschließlich der Regelung.

Lösung: Der Konverter hat die drei Spannungsniveaus $\{1, 0, 1\}$, wobei das neutrale Potenzial durch eine Serienschaltung der beiden Kapazitäten im DC-Zwischenkreis erzeugt wird.

Im DC-Zwischenkreis sorgt eine spannungsgeregelte Stromquelle für eine konstante Spannung. Hierdurch kann der Konverter aus dem DC-Zwischenkreis Leistung beziehen, bzw. Leistung in den DC-Zwischenkreis speisen. In der Realität wäre im DC-Zwischenkreis ein Energiespeicher (Batterie) oder eine Kombination aus Last und Energiequelle anzuschließen. Die geregelte Stromquelle repräsentiert diese Anlage.

Der Konverter ist spannungsgeregelte, d.h. er hält die AC-Spannung V_{ac} am Anschlusspunkt auf einem konstantem Niveau. Die Funktionsweise des Reglers mit Vorsteuerung wurde in Teil 1 der Schulung erläutert. Die Vorsteuerung benötigt eine Strommessung I_{ac} am Ausgang des Konverters.

Die Kopplung des Konverters am Anschlusspunkt erfolgt durch eine Serieninduktivität (siehe Schulung Teil 1). Hierdurch ist auch ein Betrieb am Netz möglich. Die Serieninduktivität integriert die gepulste Spannung des Konverters (siehe Messpunkt V_u) zu einem Strom, wodurch der Strom ein Drehstromsystem approximiert. Zur Unterstützung diese Glättung wurde die Serieninduktivität in zwei Teile aufgeteilt und zwischen den Teilinduktivitäten ein C-Filter zum Sternpunkt ergänzt. Zur Wirkungsweise des Filters und Impedanzspektrums wird auf das Vorlesungsmanuskript Leistungselektronik verwiesen.

Ebenfalls über eine Drosselspule herausgeführt ist der neutrale Punkt des Konverters als Neutralleiter, so dass insgesamt das Dreileitersystem $\{L_1, L_2, L_3\}$ zu einem Vierleitersystem $\{L_1, L_2, L_3, N\}$ ergänzt werden kann. Zum Vergleich beider Varianten kann zwischen den Betriebsweise umgeschaltet werden, indem der Neutralleiter unterbrochen wird.

Frage 1.1.2: Welchen Nutzen verspricht man sich von der Herausführung des Neutralleiters?

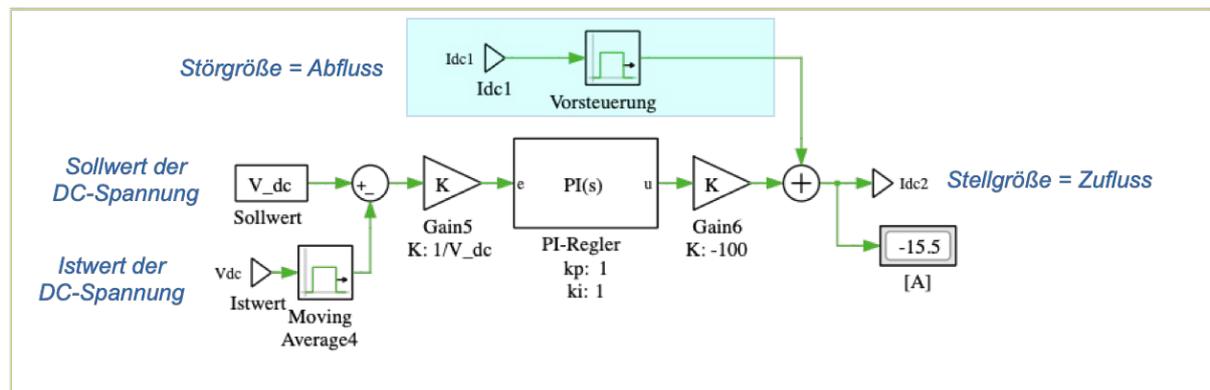
Lösung: Vorteile bei unsymmetrischen Lasten. Bei einem Vierleitersystem $\{L_1, L_2, L_3, N\}$ kann der Neutralleiter Ströme aufnehmen, die durch den Anschluss von Lasten zwischen einem Leiter und dem Neutralleiter entstehen. In einem Dreileitersystem $\{L_1, L_2, L_3\}$ führen unsymmetrische Lasten zu Verschiebungen der Spannungen und Ströme derart, dass die Summe der Ströme sich zu Null ergänzt.

In der Niederspannung sind Wechselspannungsnetze daher als Vierleitersysteme ausgeführt. Bei Verwendung eines Konverters mit 3 Leitern am Ausgang kann der Neutralleiter mit Hilfe eines Sternpunktbildners erzeugt werden (Drosselspule in Sternschaltung, wobei der Sternpunkt für den Neutralleiter verwendet wird). Ein Umrichter mit Vierleitersystem benötigt solche Maßnahmen nicht.

1.2. Simulationsmodell einschließlich Regelung

Zur Ansteuerung des Konverters sind Steuersignale erforderlich. Ebenso benötigt die Stromquelle im DC-Zwischenkreis einen Regler. Die Funktionsweise der Regler einschließlich der erforderlichen Messungen sollen in diesem Abschnitt rekapituliert werden. Für Details wird auf den ersten Teil der Schulung verwiesen.

Frage 1.2.1: Regelung der DC-Spannung. Erläutern Sie den in folgender Abbildung gezeigten Regler.



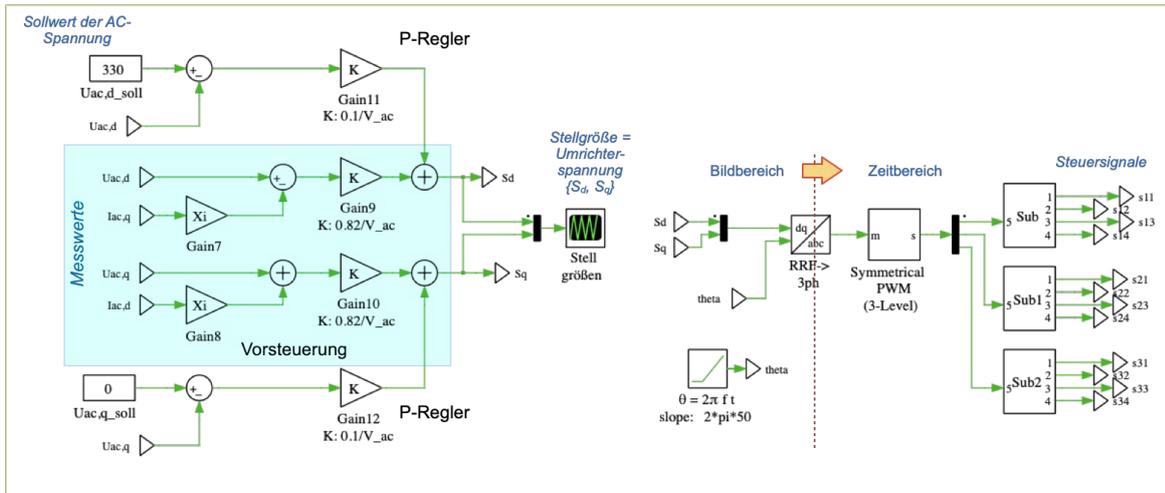
Lösung: Der Zwischenkreiskondensator integriert den Strom im Kondensatorzweig zur Spannung im DC-Zwischenkreis. Eine konstante Zwischenkreisspannung wird somit dann erreicht, wenn Zufluss (= Strom der Stromquelle) und Abfluss (= Strom des Umrichters) im zeitlichen Mittel gleich sind. Hierbei kann sich die Richtung der Ströme auch umkehren (Abfluss = Stromquelle und Zufluss aus dem Umrichter), die Schaltung arbeitet bidirektional.

Die Aufteilung zwischen Vorsteuerung und Regler ist wie folgt:

- Vorsteuerung: führt den Arbeitspunkt des Reglers schnell auf einen Strom der Stromquelle (= Stellgröße I_{dc2}), die dem Mittelwert des Umrichterstroms I_{dc1} entspricht. Somit ist der Gleichgewichtszustand beschrieben, jedoch das Niveau der DC-Spannung noch nicht festgelegt.
- Regler: Ergänzt den Zufluss (bzw. Abfluss) aus der Stromquelle I_{dc2} so, dass sich die gewünschte Zwischenkreisspannung einstellt. Hierzu wird der Messwert der Zwischenkreisspannung mit dem gewünschten Sollwert verglichen. Die Abweichung wird auf einen PI-Regler geführt, der die Stellgröße so anpasst, dass sich die Regelabweichung verkleinert.

Insgesamt führt die Regelung dazu, dass der DC-Kreis die benötigte Wirkleistung bereitstellt, die der AC-Kreis benötigt, bzw. die vom AC-Kreis eingespeiste Wirkleistung aufnimmt.

Frage 1.2.2: Regelung der AC-Spannung. Erläutern Sie den in folgender Abbildung gezeigten Regler.



Lösung:

Die Steuersignale des Umrichters leiten sich aus einem Referenzsignal dreiphasigen $\{s_a(t), s_c(t), s_c(t)\}$ für die Umrichterspannung ab. Da sich im Zeitbereich bei periodischen Signalen nicht regeln lässt, erfolgt die Regelung im Bildbereich.

Als Eingangsgrößen des Reglers werden folglich die Zeiger von Ström und Spannung verwendet, die durch ihre Realteile und Imaginärteile vorgegeben sind: $\{U_d, U_q\}$ und $\{I_d, I_q\}$. Diese Werte werden aus Messungen durch Transformation in den Bildbereich gewonnen (siehe folgende Aufgabe).

Der AC-Spannungsregler erhält als Sollwert eine feste AC-Spannung, wobei diese im Beispiel durch den Realteil der gewünschten Spannung $U_{ac,d}$ am Anschlusspunkt des Umrichters vorgegeben wird. Der Imaginärteil wird zu Null vorgegeben. Diese Vorgabe ist ohne Einschränkungen der Allgemeinheit: Der Nullphasenwinkel der Spannung spielt hier keine Rolle.

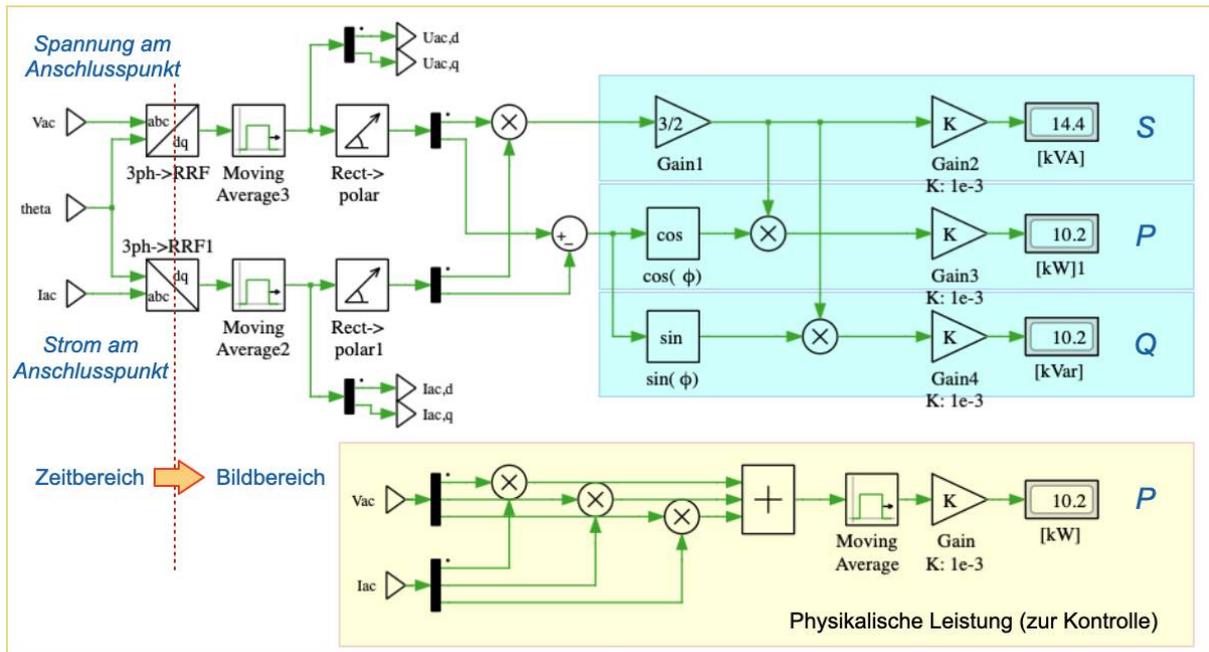
Stellgröße des Reglers ist das Referenzsignal $\{S_d, S_q\}$ des Umrichters im Bildbereich. Dieses stellt die normierte Umrichterspannung dar (Spannungswert im Per-Unit-System). Die Zeitsignale $\{s_a(t), s_c(t), s_c(t)\}$ des Referenzsignals und die Steuersignale folgen aus dieser Vorgabe durch Transformation und Signalverarbeitung.

Auf die Stellgröße $\{S_d, S_q\}$ wirkt einerseits eine Vorsteuerung, die den Arbeitspunkt schnell in einen physikalisch sinnvollen Bereich führt, und andererseits ein Spannungsregler, der hier als P-Regler ausgeführt ist. Die Vorsteuerung verwendet Messungen der Ströme und Spannungen am Anschlusspunkt, sowie Kenntnis der Seriendrossel zwischen Umrichterausgang V_u und Anschlusspunkt U_{ac} , I_{ac} .

Die Kenntnis der physikalischen Schaltung wird mit Hilfe der Reaktanz X_i der Seriendrossel L_i in Vorgaben für die Stellgrößen umgesetzt. Der Spannungsregler sorgt dann für die Führung der Schaltung in den gewünschten Arbeitspunkt. Für die Erläuterung der Funktionsweise der Vorsteuerung wird auf Teil 1 der Schulung verwiesen.

Der Verlauf der Stellgrößen (siehe Oszillograf im Regler) erlaubt die Beobachtung der Konvergenz der regelung. Hierbei ist zu beachten, dass der gesamte Einschaltvorgang dargestellt wird: Die Schaltung startet aus dem ausgeschalteten Zustand. Zwar sind die Kapazitäten vorgeladen, alle Induktivitäten müssen sich jedoch nach dem Einschalten durch Start der Simulation erst einschwingen.

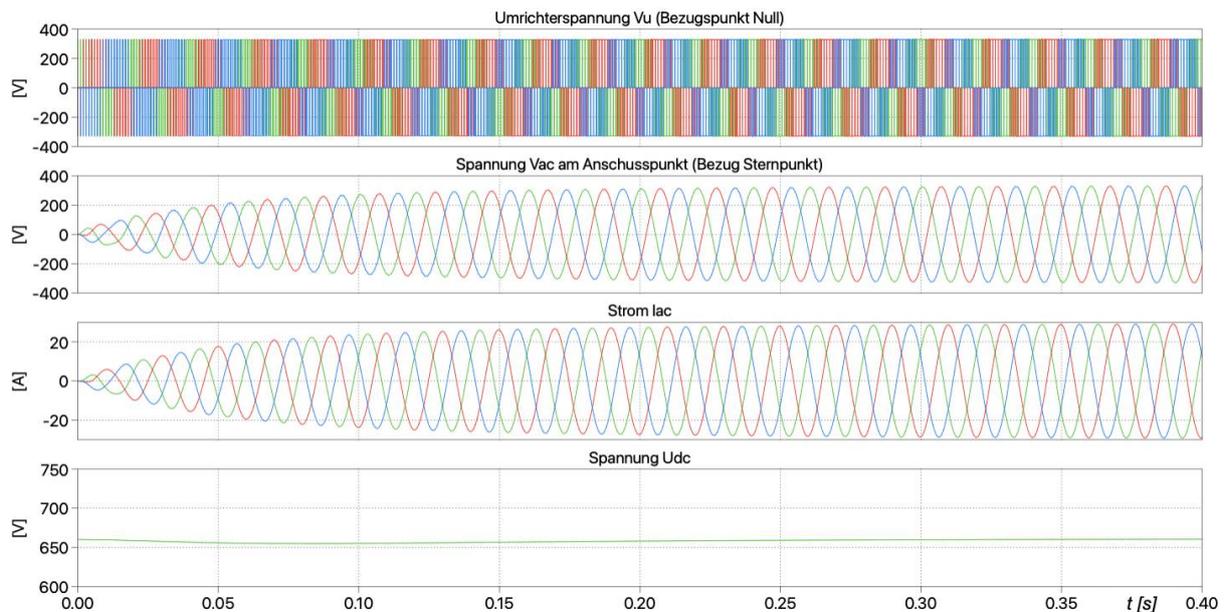
Frage 1.2.3: Leistungsmessungen. Erläutern Sie den in folgender Abbildung gezeigte Berechnung.



Lösung: Ströme $\{i_{ac,a}(t), i_{ac,b}(t), i_{ac,c}(t)\}$ und Spannungen $\{u_{ac,a}(t), u_{ac,b}(t), u_{ac,c}(t)\}$ am Anschlusspunkt werden in den Bildbereich $\{I_{ac,d}, I_{ac,q}\}$ und $\{U_{ac,d}, U_{ac,q}\}$ transformiert. Mit Hilfe dieser komplexen Zeiger erfolgt die Berechnung der Scheinleistung S, Wirkleistung P und Blindleistung Q. Zur Kontrolle erfolgt eine Berechnung der Wirkleistung P direkt aus den Zeitsignalen. Zur Erläuterung wird auf Teil 1 der Schulung verwiesen.

Frage 1.2.4: Simulationsläufe. Untersuchen Sie die Funktion der Schaltung in der Simulation.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.



Die Umrichterspannung V_u wird zum Bezugspunkt Null des Umrichters gemessen und zeigt die gepulste Form mit den Spannungsniveaus $\{U_{dc/2}, 0, U_{dc/2}\}$ eines 3-Level-Konverters. Diese Spannung stellt eine Approximation der Spannung am Anschlusspunkt durch pulsbreitenmodulierte Signale dar.

Der Strom I_{ac} am Anschlusspunkt wird durch die Seriendrossel über der Umrichterspannung integriert und zeigt daher einen annähernd glatten Verlauf. Die Spannung U_{ac} am Anschlusspunkt (in Richtung der Last hinter der Seriendrossel) folgt dem Strom und ist ebenfalls annähernd harmonisch.

Das Oszillogramm zeigt außerdem den Verlauf der Zwischenkreisspannung. Diese wird durch den Spannungsregler der Stromquelle konstant gehalten.

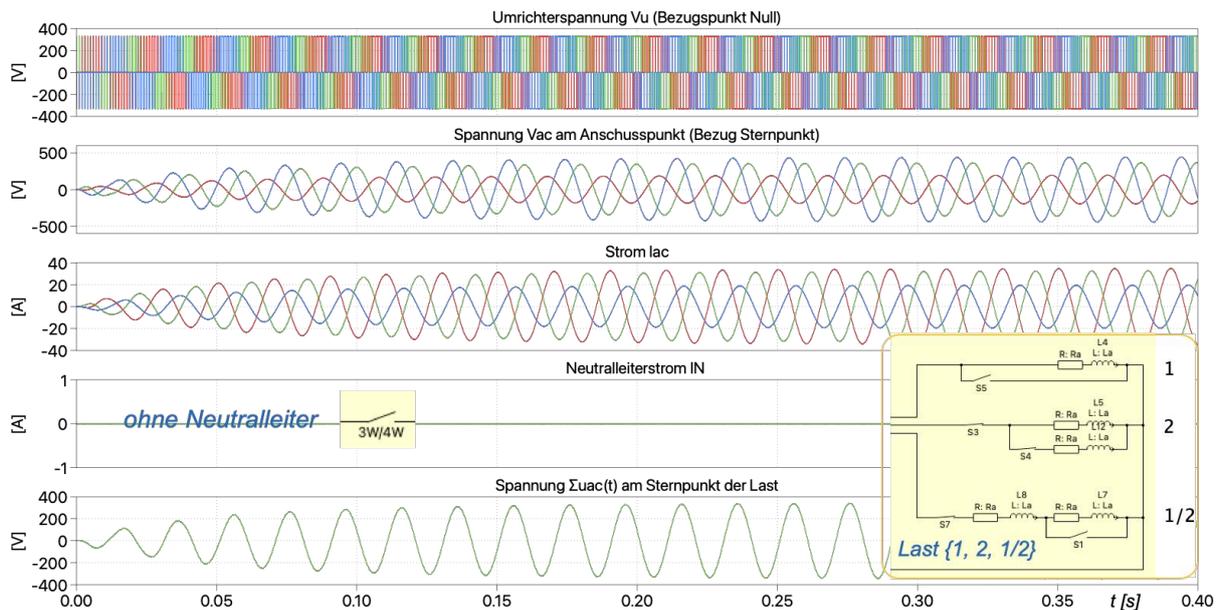
Da im Lastzweig die ohmschen Widerstände gleich den Reaktanzen sind, haben Wirkleistung P und Blindleistung Q gleiche Werte. Diese Werte finden sich im Zweig Messtechnik (siehe Frage 1.3.3).

1.3. Verhalten bei unsymmetrischer Last

Das Verhalten der Schaltung soll in unsymmetrischen Lastsituationen untersucht werden, beispielsweise (1) Zweig L_1 mit normaler Last, (2) Zweig L_2 mit doppelter Last, und (3) Zweig L_3 mit halber Last. Hierbei sind Unterschiede im Betrieb ohne Neutralleiter (3W) und mit Neutralleiter (4W) von Interesse.

Frage 1.3.1: Schaltung ohne Neutralleiter (3W). Untersuchen Sie das Lastverhalten in der Simulation. Interpretieren Sie die Ergebnisse.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.

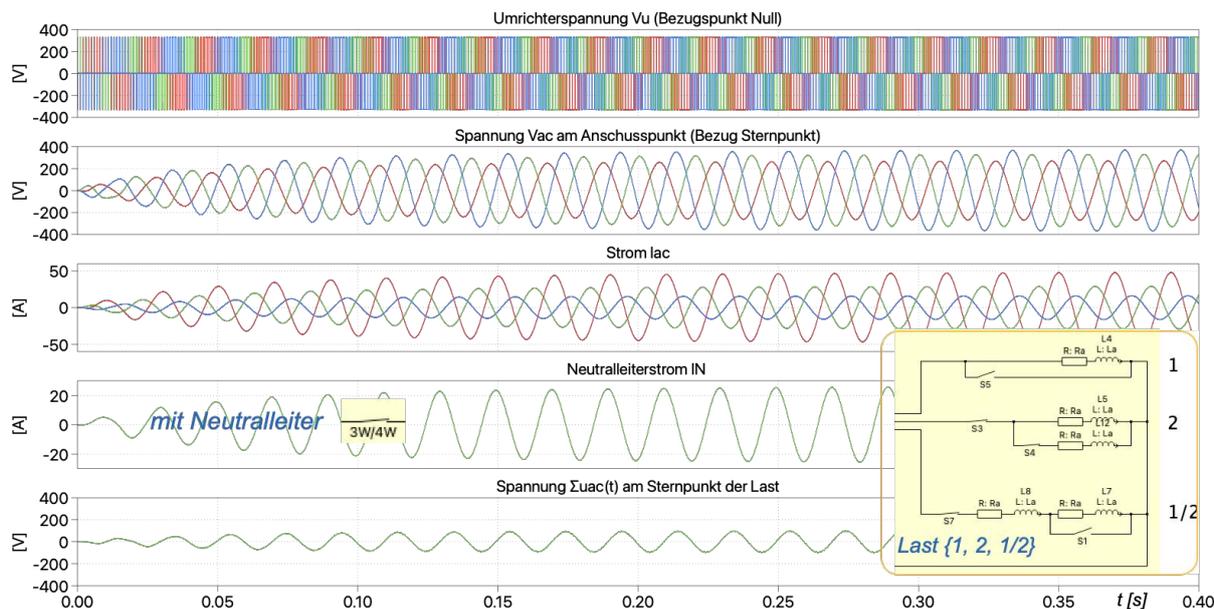


Die Farbfolge {grün, rot, blau} zeigt die Reihenfolge der Phasen $\{L_1, L_2, L_3\}$. Die Last wurde so eingestellt, dass an Phase L_2 die halben Lastimpedanz angeschaltet ist (doppelte Last), und an Phase L_3 die doppelte Lastimpedanz (halbe Last). Demnach zieht Phase L_2 den größten Strom, und Phase L_3 den geringsten Strom. Mangels Neutralleiter muss sich die Summe der Ströme zu Null ergänzen.

Die Spannungen am Anschlusspunkt geben durch die Ströme gegenüber der Umrichterspannung (= Netzspannung) nach. Die Summe der Spannungen bezogen auf den Sternpunkt der Last ist ungleich Null.

Frage 1.3.2: Schaltung mit Neutralleiter (4W). Untersuchen Sie das Lastverhalten in der Simulation. Interpretieren Sie die Ergebnisse.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.

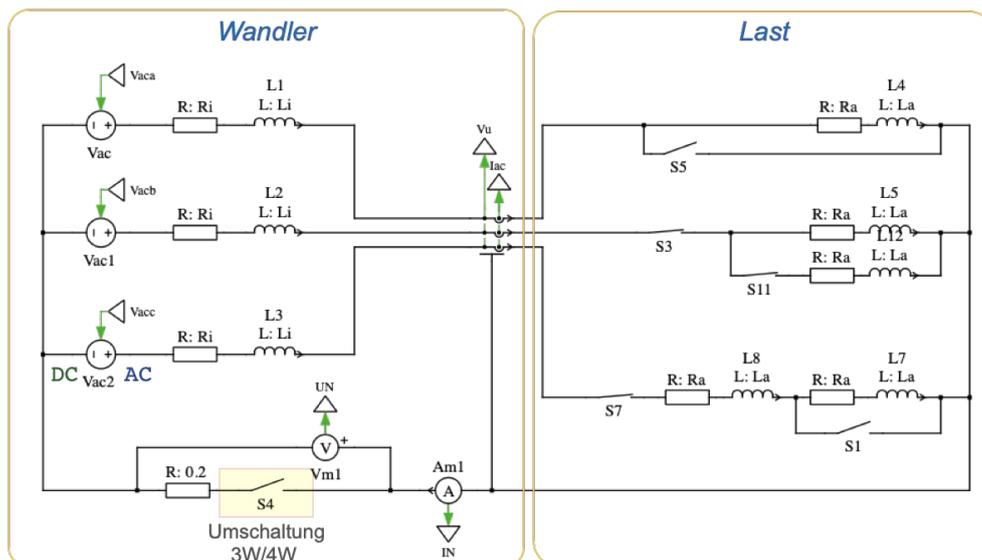


Durch den Neutralleiter kann nun die Summe der Leiterströme fließen. Eine Symmetrie der Ströme kann man wegen der sehr unterschiedlichen Impedanzen in den Lastzweigen nicht erwarten.

Die Spannungen fallen gegenüber dem Dreierersystem nun deutlich symmetrischer aus. Ein geringeres Nullsystem der Spannungen bleibt erhalten wegen der Drossel im Neutralleiter.

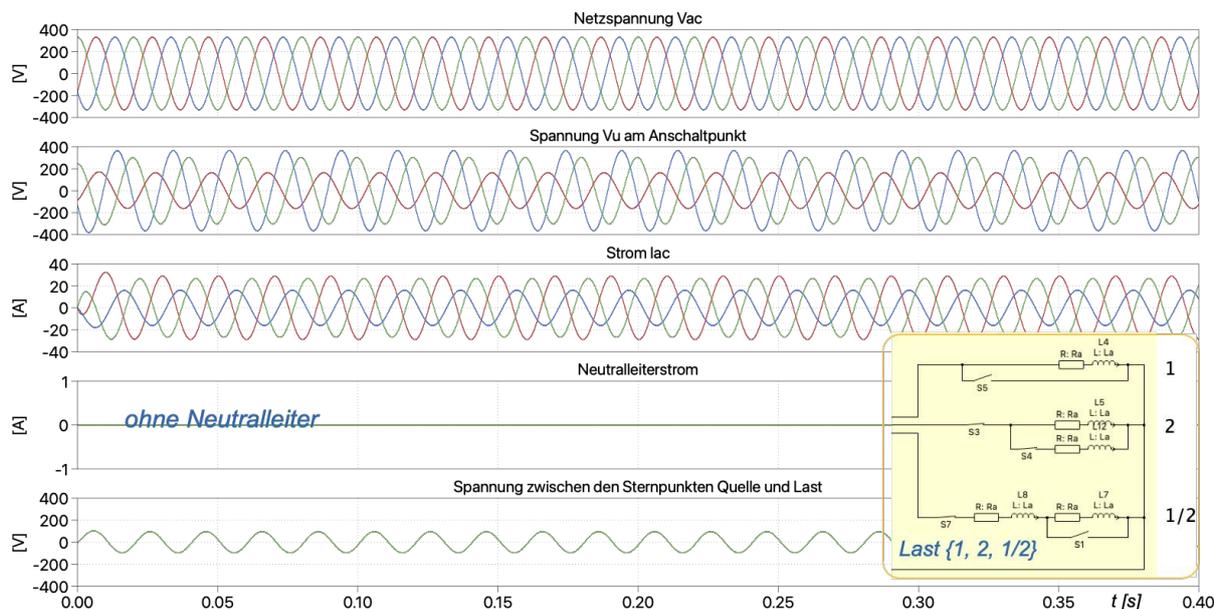
1.4. Mittelwertmodelle

Zur Vereinfachung soll der Umrichter durch ein Mittelwertmodell ersetzt werden, wie in folgender Abbildung dargestellt.



Frage 1.4.1: Schaltung ohne Neutralleiter (3W). Untersuchen Sie das Lastverhalten in der Simulation. Interpretieren Sie die Ergebnisse. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit dem Verhalten der vollständigen Schaltung aus Frage 1.3.1.

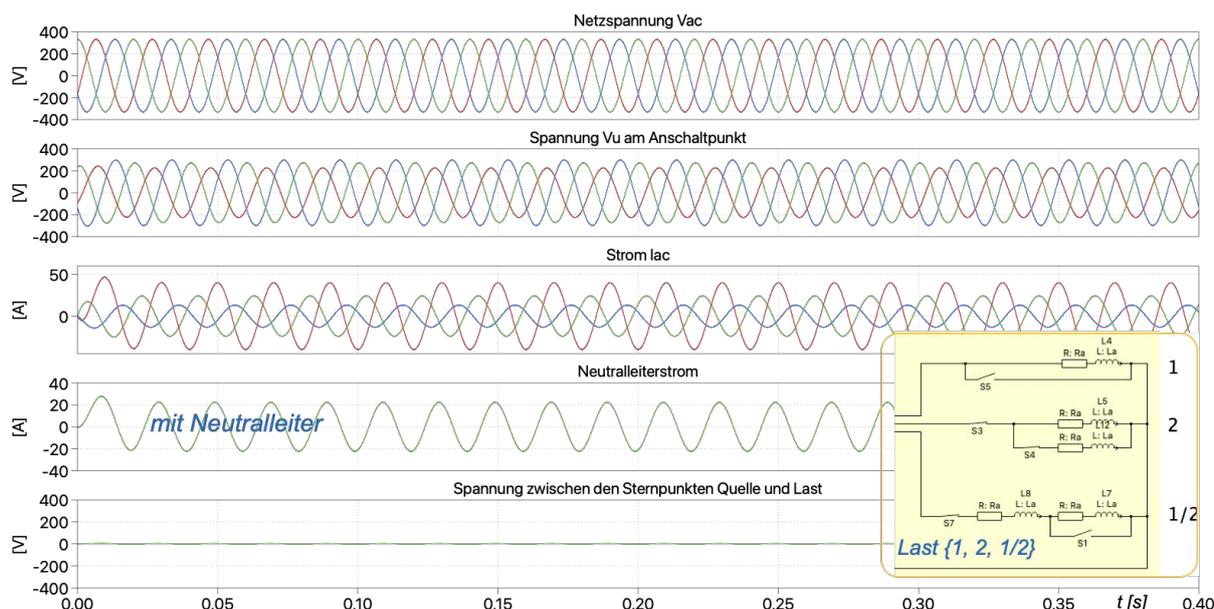
Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.



Die Ströme folgen den unterschiedlichen Lasten in den Zweigen wobei die Spannungen wegen der induktiven Kopplung gemessen an der Quellspannung (Netzspannung bzw. Umrichterspannung) nachgeben. Die Schaltung verhält sich ähnlich wie der vollständige Konverter in Aufgabe 1.3.1, wobei die Schaltungen nicht aufeinander abgestimmt sind (LC-Filter, Drossel im Neutralleiter, Leistungsaufnahme).

Frage 1.4.2: Schaltung mit Neutralleiter (4W). Untersuchen Sie das Lastverhalten in der Simulation. Interpretieren Sie die Ergebnisse. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit dem Verhalten der vollständigen Schaltung aus Frage 1.3.1.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.



Die Summe der Ströme aus den drei Phasen nimmt den Neutralleiter. Die Spannungssymmetrie fällt deutlich besser aus als ohne Neutralleiter. Ein Nullsystem der Spannungen (Summe der Spannungen in den einzelnen Phasen) ist fast keines vorhanden, da es im Neutralleiter zwischen dem Sternpunkt der Last und dem Sternpunkt des Netzes (Umrichters) keinen nennenswerte Impedanz gibt.

Hier unterscheidet sich die Schaltung vom vollständigen Schaltungsmodell (Drossel im Pfad des Neutralleiters). Davon abgesehen ist das Verhalten ähnlich, wobei eine bessere Anpassung des Mittelwertmodells an die vollständige Schaltung möglich wäre (z.B. Einfluss des LC-Filters, Anpassung der Leistungen).

Frage 1.4.3: Interpretieren Sie die Ergebnisse aus 1.4.1 (ohne Neutralleiter) mit den Begriffen Mitsystem, Gegensystem und Nullsystem.

Lösung: Die Spannung hat ein Nullsystem und ein geringfügiges Gegensystem. Ein Nullsystem des Stroms kann nicht existieren, jedoch ein Gegensystem.

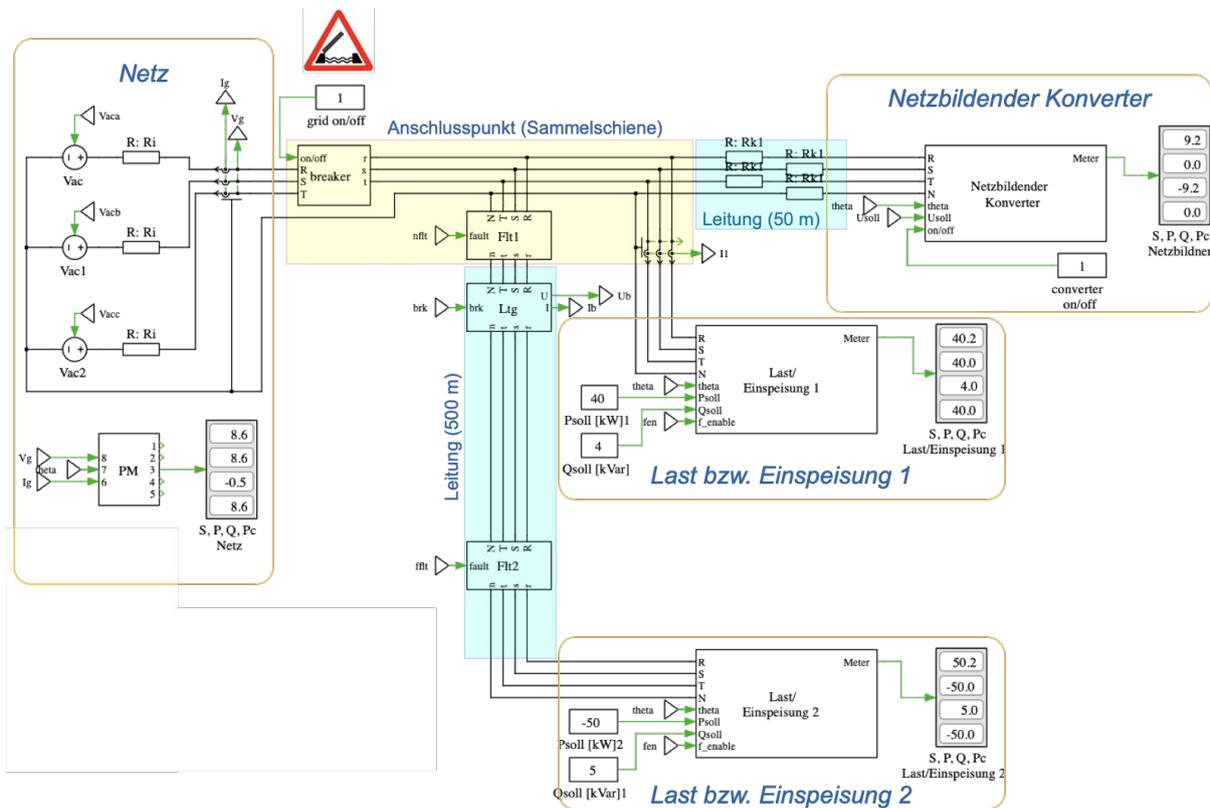
Bemerkung: Das Mittelwertmodell enthält auch eine Berechnung der symmetrischen Komponenten aus den Zeitverläufen von Strom und Spannung.

Frage 1.4.4: Interpretieren Sie die Ergebnisse aus 1.4.2 (mit Neutralleiter) mit den Begriffen Mitsystem, Gegensystem und Nullsystem. Vergleichen Sie mit 1.4.1 (ohne Neutralleiter).

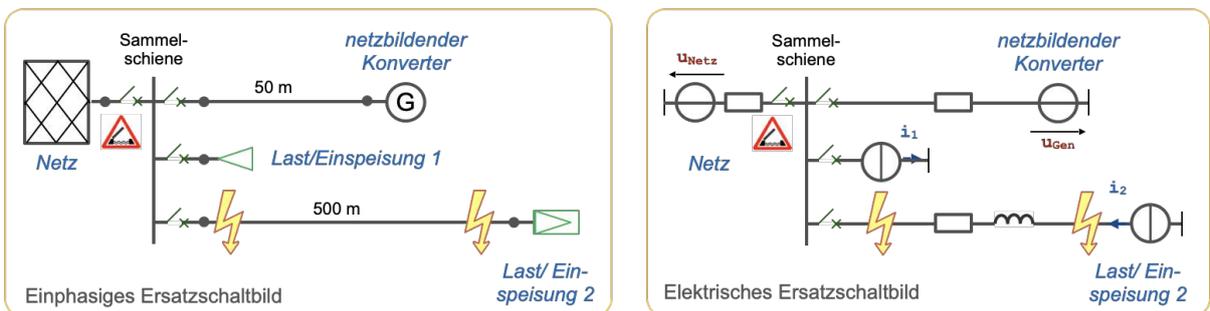
Lösung: Der Strom hat nun ein Nullsystem bedingt durch den Neutralleiter, sowie weiterhin ein Gegensystem. Das Nullsystem der Spannung reduziert sich, wodurch die Spannungen symmetrischer ausfallen.

2. Netzbildender Betrieb

Die Betriebsweise netzbildender Umrichter im Inselnetz (= getrennt vom Netz) und im Verbundnetz soll in einem Modellnetz untersucht werden. Im Verbundnetz betrieb arbeitet der netzbildende Umrichter parallel zum Netz. Folgende Abbildung zeigt das Modellnetz.



Das Modellnetz enthält zwei Anlagen zur Einspeisung bzw. zum Bezug von Leistung, von denen eine über eine längere Leitung abgesetzt ist. Diese Anlage ermöglicht Untersuchungen zu Fehlern nahe der Sammelschiene und fern der Sammelschiene. Das Ersatzschaltbild ist in folgender Abbildung dargestellt.



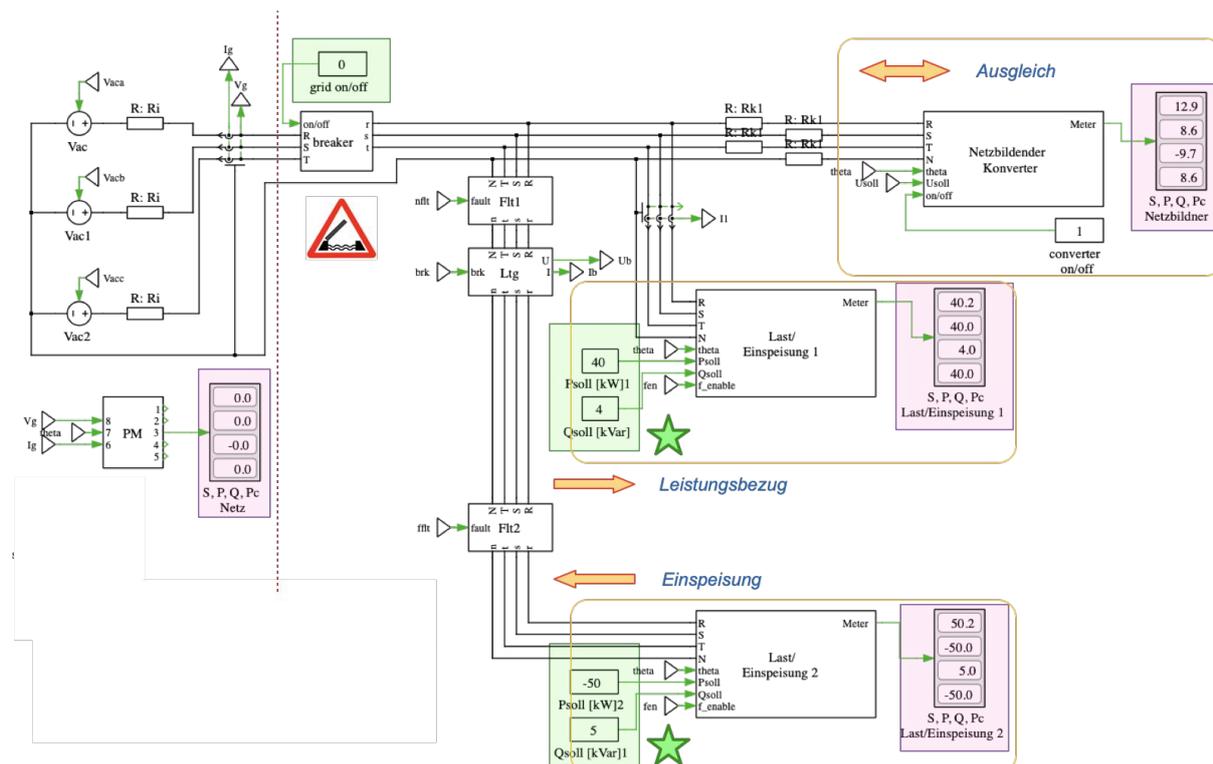
Im Unterschied zu konventionellen AC-Netzen besitzen umrichtergeführte Netze eine beschränkte Kurzschlussleistung: wegen der Strombegrenzung der Umrichter ist der Kurzschlussstrom nahe beim Bemessungsstrom. Speziell für netzferne Fehler ist daher die Frage, ob eine Auslösung des Schutzes mit Hilfe der Kurzschlussströme überhaupt funktioniert. Standards für Microgrids (siehe z.B. [4]) verwenden daher zur Schutzauslösung spannungsbasierte Verfahren.

Im Verbundbetrieb arbeiten Netz und Umrichter als parallele Spannungsquellen. Ströme an der Sammelschiene bedienen sich beider Quellen im Verhältnis derer Innenwiderstände. Somit sind die

Beiträge zum Lastfluss abhängig vom Verhältnis der Impedanzen. Während bei konventionellen AC-Netz die Innenimpedanzen vorwiegend durch die Streureaktanzen der Transformatoren auf dem Weg vom Kraftwerk zum Anschaltplatz zustande kommen, ist die Impedanz einer unmittelbar bzw. über eine kurze Leitung angeschlossenen Konverters annähernd vernachlässigbar. Hier sorgt die Regelung für eine angemessene Beteiligung des Konverters.

2.1. Inselnetzbetrieb

Im Inselnetzbetrieb ist die Verbindung zum Netz getrennt. An den Anlagen der beiden Anschlusspunkten 1 und 2 lassen sich Leistungsbezug bzw. Leistungsabgabe nach Wirkleistung P und Blindleistung Q einstellen. Folgende Abbildung zeigt ein Beispiel.

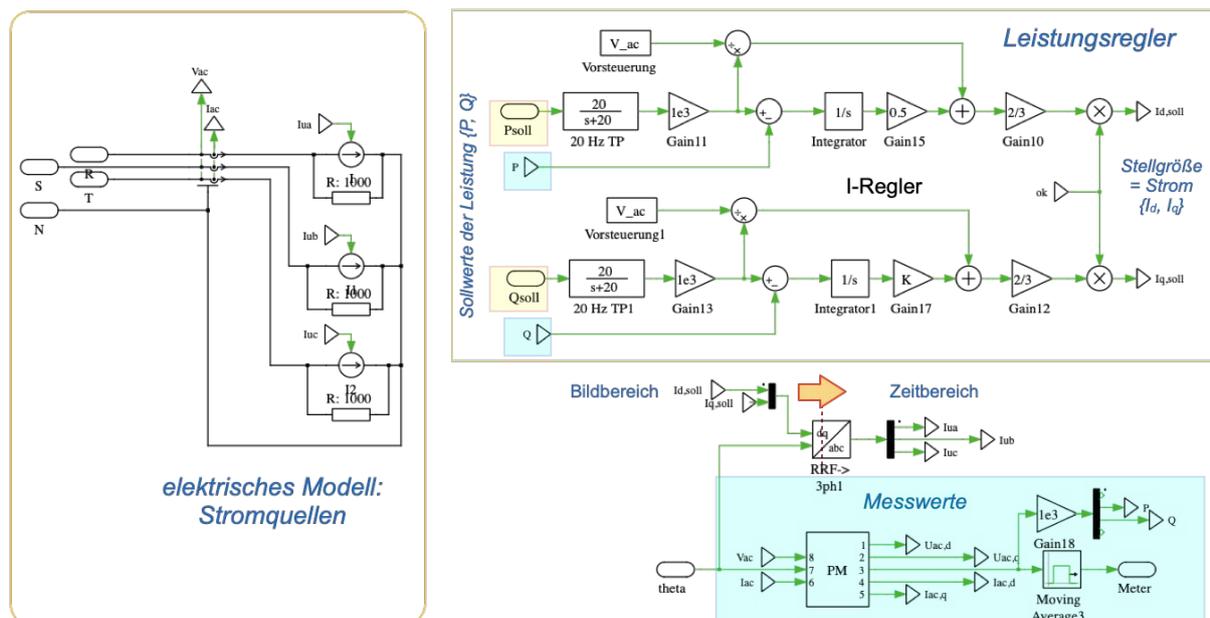


Hier speist die Anlage am Anschlusspunkt 2 eine Wirkleistung von 50 kW ein ($P = -50$ kW im Verbraucherzählpfeilsystem), mit einem Blindleistungsbezug von 5 kVar. Am Anschlusspunkt 1 bezieht die Anlage eine Wirkleistung von 40 kW und eine Blindleistung von 4 kVar. Diese Werte lassen sich als Sollwerte für die beiden stromgeführten Konverter an den Anschlusspunkten vorgeben. Diese Vorgaben sind regelungstechnisch die Ursache des Lastflusses im Netz.

Die Aufgabe des netzbildenden Konverters besteht darin, die Leistungsbilanz auszugleichen. Das gelingt durch die Bereitstellung einer konstanten Netzspannung am Anschlusspunkt des netzbildenden Konverters.

In der Abbildung oben grün markiert sind die Vorgaben bzw. Eingaben im Netzmodell. Die komplementär hinterlegten Felder zeigen die Messinstrumente für $\{S, P, Q, P_c\}$ der Konverter (wobei P_c eine Kontrollmessung aus den Zeitsignalen darstellt). Man erkennt, dass das Netz wegen der gekappten Verbindung keinen Beitrag zu Spannung und Leistung liefert. Die beiden stromgeführten Konverter regeln auf die vorgegebenen Werte. Die Leistungsdifferenz einschließlich der Verluste bzw. des Blindleistungsbezug des Anschlussleitungen gleicht der netzbildende Konverter aus. In diesem Fall nimmt der Konverter die verbliebene Wirkleistung auf und stellt die benötigte Blindleistung bereit.

Frage 2.1.1: Stromgeführter Betrieb. Die Konverter an den Anschlusspunkten 1 und 2 sind als Stromquellen abgebildet. Folgende Abbildung zeigt das Modell und den Regler. Erläutern Sie die Funktionsweise des Reglers einschließlich der Vorsteuerung.



Lösung: Die Vorsteuerung führt den Regler in die Nähe des gewünschten Arbeitspunktes, der Regler übernimmt die Feinarbeit. Aus diesem Grund ist der Regler hier als I-Regler ausgeführt.

Funktion der Vorsteuerung:

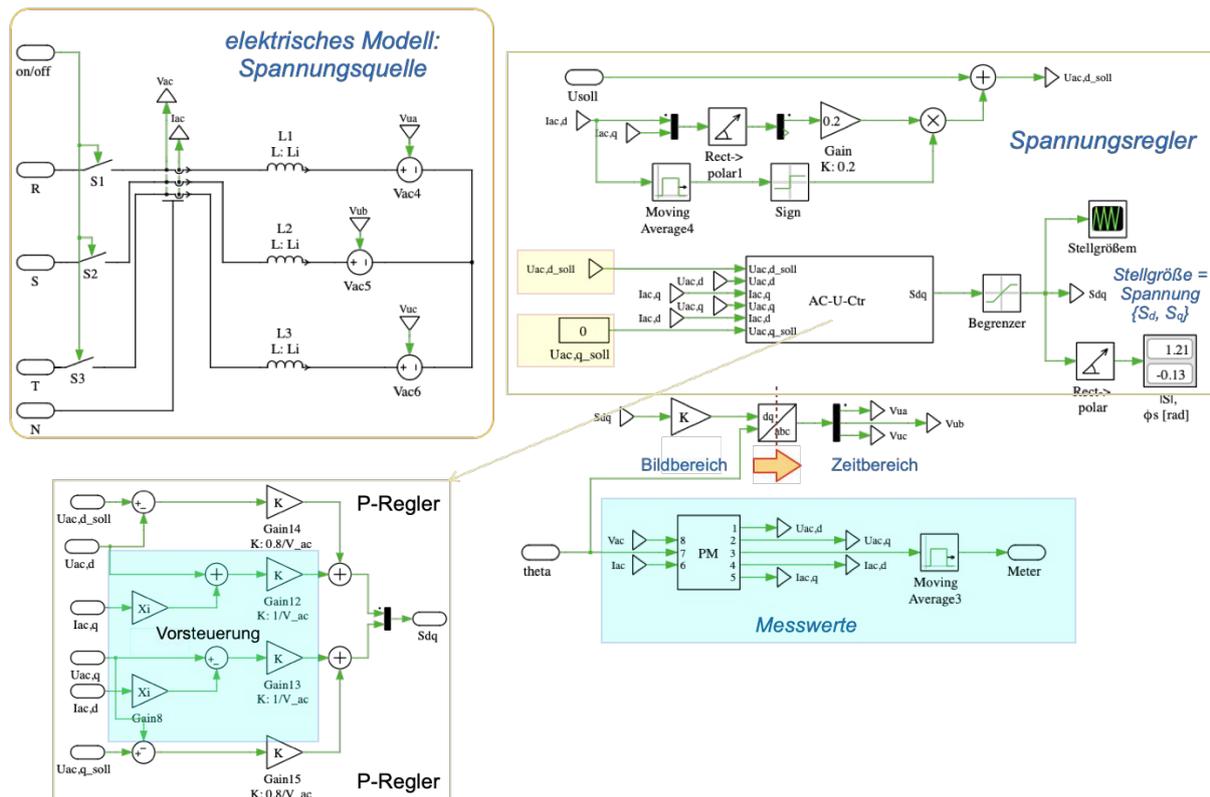
- Wirkstrom: Aus dem gegebenen Sollwert der Wirkleistung P folgt durch Division mit dem Nennwert U_{ac} der Netzspannung und Korrektur der Wirkanteil $I_{n,d}$ des Nennstroms für die geforderte Leistung: $P_{soll} = 3 U_{ac} * I_{n,d} / 2$. Die Leistung P_{soll} wird durch 3 Phase erbracht. Der Faktor 2 berücksichtigt die Verwendung von Scheitelwerten für in der Simulation anstelle der Effektivwerte. Für den Wirkanteil des Nennstrom gilt: $I_{n,d} = |I_n| \cos(\varphi)$.
- Blindstrom: Sinngemäß folgt aus $Q_{soll} = 3 U_{ac} * I_{n,q} / 2$ mit $I_{n,q} = |I_n| \sin(\varphi)$ der Blindanteil des Nennstroms $I_{n,q}$ als Vorgabe der Vorsteuerung.

Funktion des Reglers: Der Regler minimiert die Differenz aus den Sollwerten $\{P_{soll}, Q_{soll}\}$ und den Messwerten $\{P, Q\}$. Da die Vorsteuerung die Vorarbeit bereits übernommen hat, genügt hierfür ein I-Regler. Ergebnis sind Vorgaben für die Stellgrößen $\{I_{d,soll}, I_{q,soll}\}$. Da für das elektrische Modell Stromquellen verwendet werden, können diese unmittelbar in den Zeitbereich transformiert werden.

Alternativ wäre eine stromgeführte Spannungsquelle als Modell möglich (siehe Teil 1 der Schulung). Diese liefert allerdings für den Zweck dieses Modellnetzes mit Schwerpunkt auf dem netzbildenden Konverter keine Erkenntnisse.

Bemerkung: Die Multiplikation mit dem Signal „ok“ vor den Stellgrößen dient der Begrenzung der Leistung im Fehlerfall (z.B. bei einem Spannungseinbruch). Diese Funktion lässt sich ggf. aktivieren und hat hier keine Bedeutung (ok = 1). Die Sollwerte $\{P_{soll}, Q_{soll}\}$ werden dem Regler über ein Tiefpassfilter mit der Übertragungsfunktion $20/(s + 20)$ zugeführt, um einen sprunghaften Anstieg der geforderten Leistung beim Einschalten (= Start der Simulation) zu vermeiden.

Frage 2.1.2: Spannungsgeführter Betrieb. Der netzbildende Konverter ist als Spannungsquelle mit induktiver Kopplung nachgebildet. Folgende Abbildung zeigt das Modell und den Regler. Erläutern Sie die Funktionsweise des Reglers einschließlich der Vorsteuerung.



Lösung: siehe auch Teil 1 der Schulung. Vorgegeben wird der Sollwert U_{ac} der Spannung. Da das Bezugssystem ohne Einschränkungen der Allgemeinheit mit Nullphasenwinkel $\varphi_0 = 0$ gewählt wurde, genügt hierfür der Realteil $U_{ac,d}$ mit Imaginärteil $U_{ac,q} = 0$.

Diese Spannung bezieht sich auf den Anschlusspunkt des Konverters. Der Messpunkt für die Istwerte der Spannung (und die Istwerte der Ströme für die Vorsteuerung) findet sich am Anschlusspunkt.

Stellgrößen der Regelung sind die Umrichterspannungen, im Modell hinter den Serieninduktivitäten zur Kopplung mit dem Netz. Dieses Modell gibt das korrekte physikalische Verhalten eines Voltage Source Converters wieder. In einem physikalischen Modell (siehe Abschnitt 1) würden die Referenzsignale der Stellgrößen $\{S_d, S_q\}$ zu Steuersignalen für die Pulsweitenmodulation weiterverarbeitet. Hier erfolgt nur eine Skalierung auf den Scheitelwert V_{ac} der Netzspannung und eine Transformation in den Zeitbereich.

Der Spannungsregler arbeitet als P-Regler, approximiert also die vorgegebene Spannung mit einer verbleibenden Regeldifferenz. Ein genaueres Ausregeln ist hier weder erforderlich noch gewünscht, da die Spannung durch die eine Spannungscharakteristik (Voltage Droop) abhängig von Strom justiert wird.

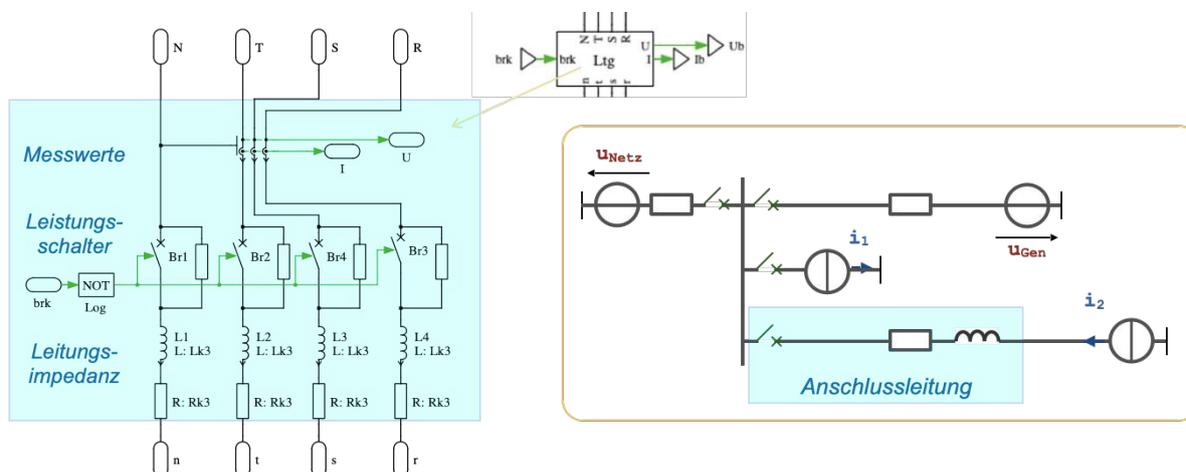
Für die Funktion der Vorsteuerung und der Spannungscharakteristik $U(I)$ wird auf Teil 1 der Schulung verwiesen. Grundsätzlich haben diese folgende Aufgaben:

- Vorsteuerung: Rasche Führung des Arbeitspunktes auf einen physikalisch plausiblen Wert durch Berücksichtigung der Serieninduktivität und der hierdurch bedingten Zusammenhänge zwischen der Spannung am Anschlusspunkt (Führungsgröße) und der Umrichterspannung (Stellgröße), abhängig vom Strom. Der Vorsteuerung überlagert ist der P-Regler, der die Spannung am Anschlusspunkt auf den gewünschten Wert führt.

- Voltage Droop (Spannungskennlinie $U(I)$): Dient der Nachführung der Spannung am Anschlusspunkt im parallelen Betrieb mit weiteren Spannungsquellen, indem der Spannungsabfall ΔU über einem Innenwiderstand nachgebildet wird durch die Beziehung $\Delta U = R \cdot I$. Über die Steigung der Kennlinie (= Innenwiderstand) lässt sich der Leistungsbeitrag im Verbund einstellen.

Die Spannungskennlinie spielt im Modellnetz beim Inselnetzbetrieb keine Rolle, da es hier keine weiteren Spannungsquellen gibt. Wenn der netzbildende Umrichter im Verbund mit weiteren Modulen, Umrichtern oder Generatoren betrieben werden soll, wird die Spannungsquelle auch im Inselnetzbetrieb benötigt.

Frage 2.1.3: Anschlussleitungen. Anlage 2 ist über eine Leitung von 500 m angeschlossen. Im Modell wird die Leitung durch ihren ohmschen Widerstand und ihre Induktivität berücksichtigt. Werte für den Widerstandsbelag und Reaktanzbelag finden sich abhängig vom Leitungstyp in den Datenblättern. Im Modell wurde ein Aluminium 4-Drahtkabel mit 150 mm² Querschnitt pro Leiter verwendet. Welchen Einfluss hat die Leistung im Modell?



Lösung: siehe elektrisches Ersatzschaltbild. Für Fehler am Leitungsende wirkt die Leitung strombegrenzend. Außerdem nimmt die Induktivität Blindleistung auf.

Bemerkung: Im Modell wurde in das Leitungsmodell auch der Leistungsschalter am Beginn der integriert, sowie Messwandler sammelschienseitig am Leitungsabgang vor dem Schalter.

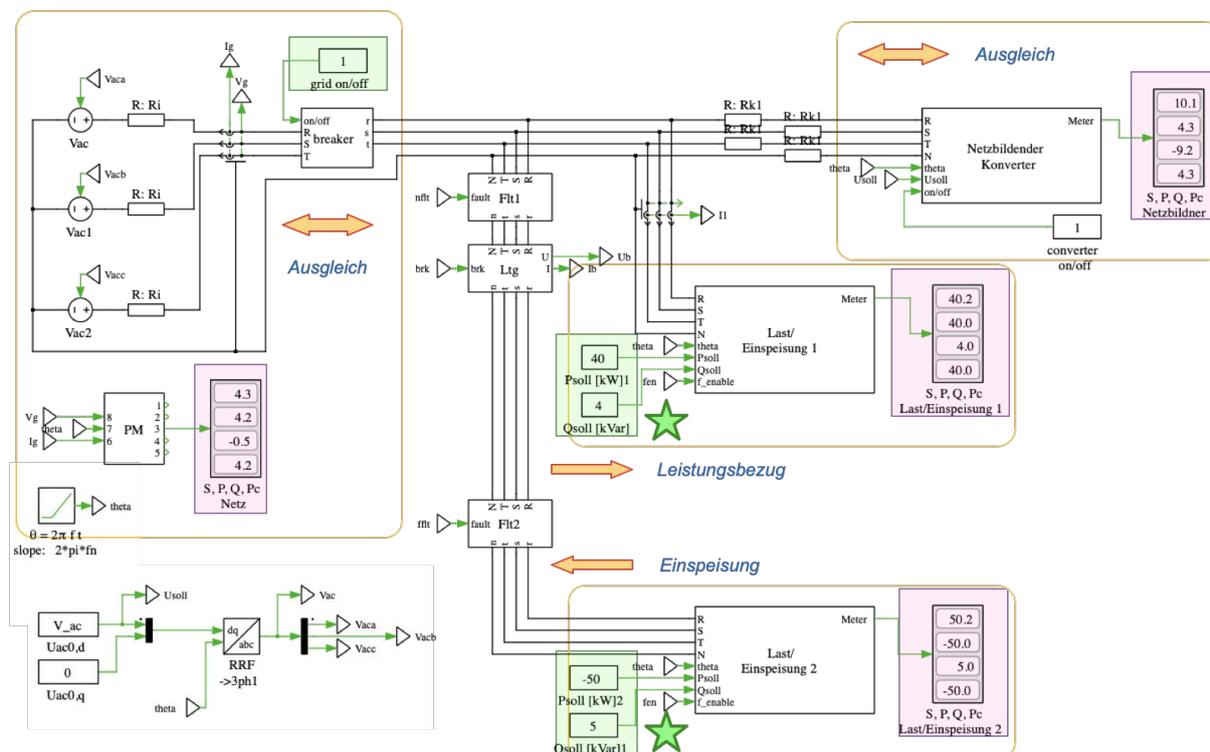
Frage 2.1.4: Blindleistungsbedarf. Gibt man in der Simulation die Sollwerte der Blindleistung der Anlagen an den Abgängen 1 und 2 zu Null vor, und die Wirkleistungen wie in der Abbildung unter Abschnitt 2.1 ($P_1 = 40 \text{ kW}$ und $P_2 = -50 \text{ kW}$), so stellt der netzbildende Konverter eine Blindleistung von 0.7 kVar bereit ($Q = -0,7 \text{ kvar}$), obwohl beide Anlagen bei $Q = 0$ landen. Woher kommt dieser Effekt?

Lösung: Die Blindleistung wird für die Anschlussleistung von Anlage 2 benötigt. Der Wert ist abhängig vom Strom in der Leitung ($Q = X I^2$). Bei einer Leistung von $P_2 = 0$ und $Q_2 = 0$ wird keine Blindleistung vom netzbildenden Konverter bereitgestellt.

2.2. Verbundbetrieb

Folgende Abbildung zeigt die Anlagen am gleichen Arbeitspunkt, jedoch im Verbund mit dem Netz. Netz und netzbildender Umrichter sorgen an der Sammelschiene für den Ausgleich der von den Anlagen geforderten bzw. eingespeisten Leistungen. Mit der gewählten Einstellungen speist Anlage 2 eine Wirkleistung von 50 kW ein, Anlage 1 bezieht eine Wirkleistung von 40 kW.

Die Differenz der Wirkleistungen verbleibt negativ, somit werden die Verluste aus Anlage 2 gespeist. Die verbliebene Wirkleistung wird zu etwa gleichen Teilen vom Netz und vom netzbildenden Umrichter aufgenommen.



Die geforderte Blindleistung beider Anlagen mit Summe 9 kVar sowie den Blindleistungsbedarf der Leitung wird mit den gewählten Reglereinstellungen vorwiegend vom netzbildenden Umrichter bereitgestellt.

Frage 2.2.1: Spannungskenlinie. Untersuchen Sie in der Simulation den Einfluss der Spannungskenlinie. Welche Verhältnisse ergeben sich ohne die Kennlinie? Wieso verschiebt sich der Betrag zur Wirkleistung mit der Steigung der Kennlinie?

Lösung: Vom Strom aus betrachtet verhalten sich die Beiträge der beiden parallelen Spannungsquellen umgekehrt zum Verhältnis ihrer Impedanzen:

$$U_{ac} = R_1 I_1 = R_2 I_2. \quad (2.2.1)$$

Bei konstanter Spannung verhalten sich Leistungsbeiträge wie die Ströme ($P_1 = U_{ac} I_1$ und $P_2 = U_{ac} I_2$). Für das Leistungsverhältnis gilt somit:

$$P_2/P_1 = R_1/R_2 \quad (2.2.2)$$

Setzt man die Verstärkungsfaktor $k = R_2$ (= Steigung $U = k I$ der Kennlinie) zu Null, so übernimmt der Konverter nahezu die komplette Leistung, da nur die Leitungsimpedanz der kurzen Anschlussleitung verbleibt ($R_2 = 0.1 \Omega$), während die Netzimpedanz vergleichsweise groß ist ($R_1 = 0.2 \Omega$). Somit sollte der Beitrag P_2 das 20-fache des Beitrags P_1 betragen, exakt gleiche Spannungen an den Anschlusspunkten der Spannungsquellen vorausgesetzt.

Mit der Steigung $k = R_2$ der Kennlinie erhöht sich die virtuelle Impedanz des Umrichters. Die Spannung gibt nun mit wachsendem Strom nach, wodurch Leistung ins Netz abfließen kann.

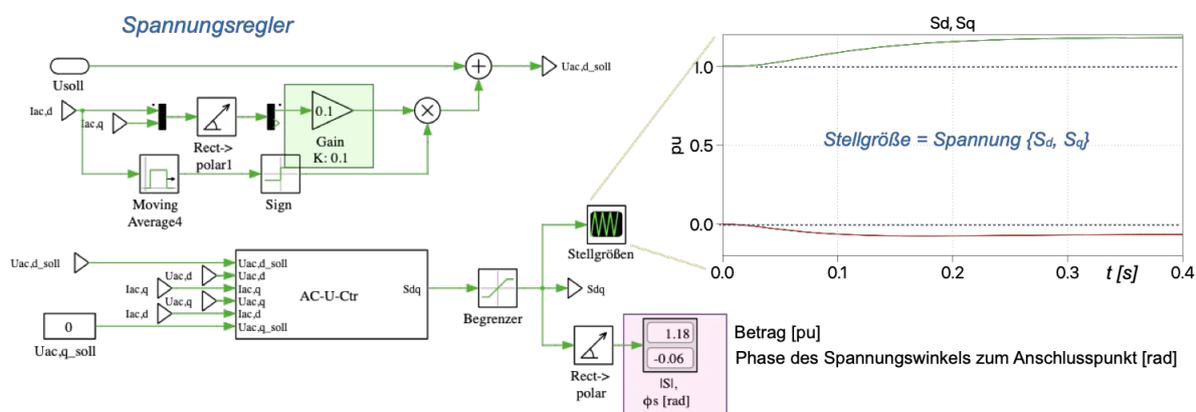
Frage 2.2.2: Bereitstellung von Blindleistung. Wieso hat die Spannungskenlinie keinen Einfluss auf den Bezug von Blindleistung?

Lösung: Die Umrichterspannung wird durch die Vorsteuerung den Wirkströmen und Blindströmen nachgeführt: Zur Blindleistungsaufnahme reduziert sich die Amplitude der Spannung am Anschlusspunkt, zur Blindleistungsabgabe erhöht sich die Spannung an Anschlusspunkt des Umrichters. Die Spannung am Netz bleibt vergleichsweise starr.

Die Kennlinie am Umrichter sorgt für die Anpassung der Spannungen am Anschlusspunkt und somit für die Wirkleistungsbilanz zwischen beiden Quellen. Darüberhinaus variiert die Amplitude der Umrichterspannung zur Aufnahme bzw. Bereitstellung der Blindleistung.

Frage 2.2.3: Stellgrößen des Umrichters. Untersuchen Sie die Führung der Stellgrößen des Umrichters in der Simulation für einen gegebenen Arbeitspunkt. Interpretieren Sie Betrag und Spannung in Bezug auf die Umrichterspannung.

Lösungsbeispiel: Der Arbeitspunkt wurde wie in der Abbildung unter der Kapitelüberschrift zu 2.2 gewählt (d.h. $\{P_1 = 40 \text{ kW}, Q_1 = 4 \text{ kvar}\}$ und $\{P_2 = -50 \text{ kW}, Q_2 = 5 \text{ kvar}\}$). Es ergibt sich der unten dargestellte Verlauf der Stellgrößen.

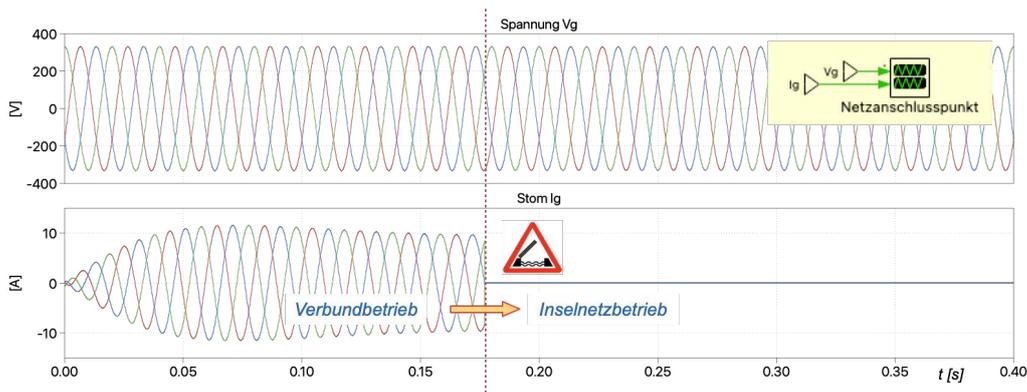


Im Spannungsregler findet sich ein Oszilloskop zur Ausgabe der Stellgrößen während der Simulation, sowie ein Ausgabefeld mit Betrag und Phase der Stellgrößen. Interpretation:

- Im Arbeitspunkt eilt die Umrichterspannung der Spannung am Anschlusspunkt nach ($\varphi < 0$), der Konverter nimmt also Wirkleistung auf ($P > 0$). Der Winkel von 0.06 rad entspricht 3,4 Grad, es ist also noch hinreichend Leistungsreserve vorhanden (Kippmoment bei 90 Grad).
- Der Betrag der Stellgröße ist > 1 , somit wird vom Umrichter Blindleistung abgegeben ($Q < 0$).

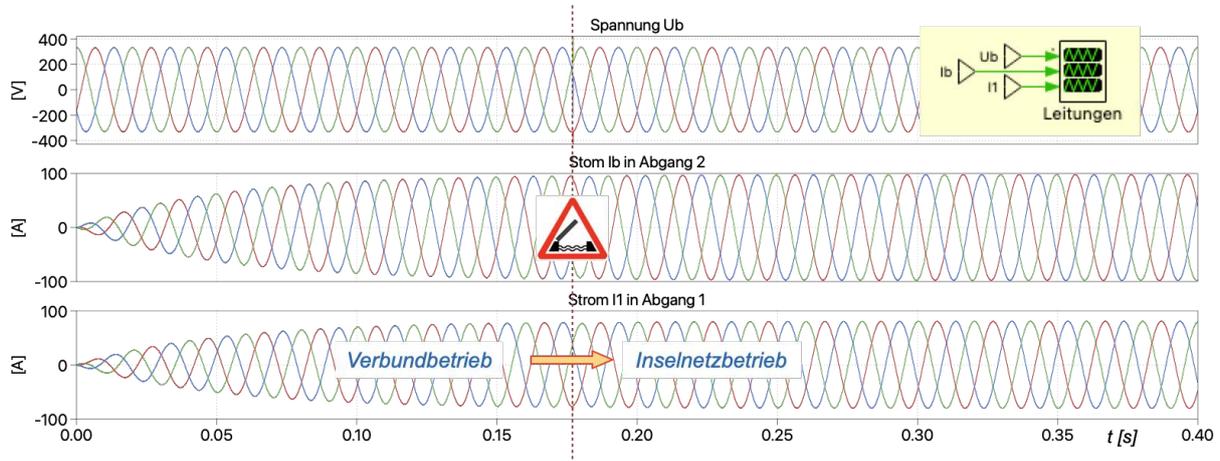
Frage 2.2.4: Umschalten bei Netzausfall. Untersuchen Sie eine Abschaltung es Netzes während der Simulation, indem Sie den Wert „grid on/off“ manuell von 1 auf 0 setzen. Wie verhalten sich Ströme und Spannungen im zeitlichen Verlauf?

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.



Das Modell enthält bereits Oszilloskope für Ströme und Spannungen. Der Stromverlauf I_g am Anschlusspunkt des Netzes zeigt, dass der Beitrag des Netzes mit Öffnung des Leistungsschalters auf Null fällt. Die Netzspannung wird vor dem Leistungsschalter gemessen.

Die Umrichterspannung verläuft bis Spannungsspitzen beim Schaltvorgang unverändert, die Ströme an den Abgängen für die Anlagen 1 und 2 zeigen keinen Einfluss der Umschaltung.



Der Umrichter übernimmt also die Leistung und führt den Betrieb fort. Bemerkung: Eine Synchronisation auf die Netzfrequenz bzw. eine Weiterführung der Frequenz nach Netzabschaltung ist im Modell nicht enthalten. Die Frequenz für Netz und Umrichter wird dem Bezugssystem $\theta(t)$ entnommen.

2.3. Fehlererkennung

Das Modell erlaubt Untersuchungen an zwei Fehlerorten: In einem Abgang nahe der Sammelschiene und fern der Sammelschiene. Hierzu dient Abgang 2 mit einer Leitungslänge von 500 m. Ein Kurzschluss als Fehler ist überall im Modell zu bemerken: die Spannung bricht an der Sammelschiene und allen Abgängen ein.

Daher enthält das Modellnetz eine Fehlererkennung an folgenden Stellen:

- Anlage 1 und Anlage 2 (Last bzw. Einspeisung)
- Messungen von Strom und Spannung am Schutzgerät in Abgang 2 und Strommessung in Abgang 1 in Kombination mit Modulen zur Fehleranalyse im Signalteil des Modells

Als Fehler erkannt werden sollen Unterspannung und Überstrom. Die beiden Anlagen 1 und 2 sind in der Lage, eigenständig auf Fehler zu reagieren. Der Leistungsschutz in Abgang 2 lässt sich mit Hilfe der beiden Module zur Fehleranalyse auslösen.

Damit die Fehlerbehandlung die Simulation und die Fehlererkennung nicht behindert, lässt sich die Fehlerbehandlung aktivieren bzw. deaktivieren mit Hilfe des Signals „fen“ für „failure mode enable“ bzw. „Fehlerbehandlung ein/aus“.

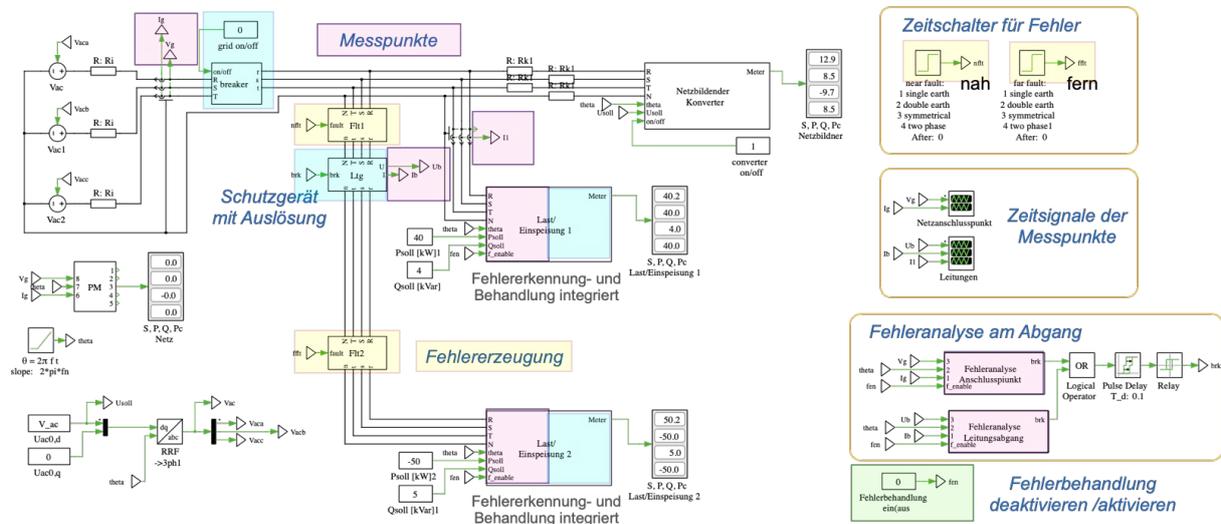
Bevor Fehler erkannt werden können, muss man sie in der Simulation verursachen. Hierzu dient jeweils ein Zeitschalter (Step-Funktion) mit einer Auswahl an Fehlerfällen für den sammelschiennahen Fehler und für den sammelschienerfernen Fehler. Die Signale führen zu Schaltungen der Blöcke „fault“ am Anfang und Ende von Abgang 2.

An Fehlerfällen stehen zur Auswahl:

- einfacher Erdschluss
- doppelter Erdschluss
- symmetrischer Fehler (dreiphasiger Kurzschluss)

- Doppelfehler (zweiphasiger Kurzschluss).

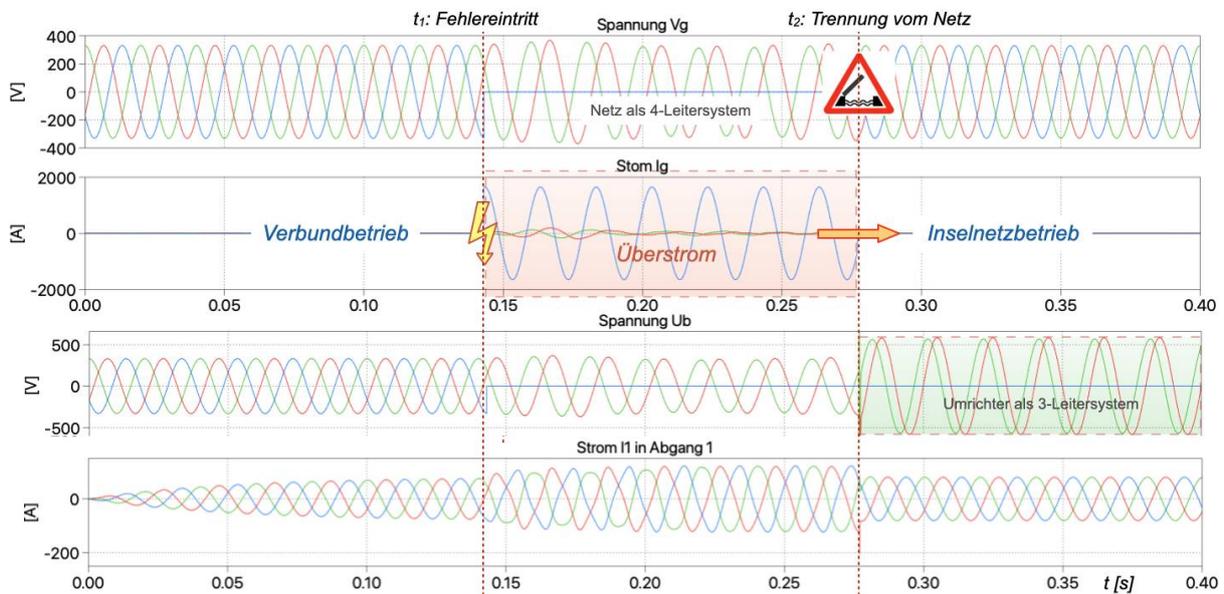
Folgende Abbildung zeigt eine Übersicht über die Steuerungsmöglichkeiten im Modell.



Wesentlich ist die Variable „Fehlerbehandlung ein/aus“ in dem grün hinterlegten Eingabefeld. Hierdurch verhalten sich alle Komponenten im ungeschützten Zustand. In dieser Betriebsweise sollen die Auswirkungen der Fehlerfälle analysiert werden.

Frage 2.3.1: Erdschluss. Untersuchen Sie das Verhalten des Netzes bei einphasigem Erdschluss in Abgang 2. Wie lässt sich ein Erdschluss erkennen? Unterscheiden sich Verbundbetrieb bzw. Netzbetrieb vom Inselnetzbetrieb?

Lösungsbeispiel: Zum Zeitpunkt t_1 tritt ein naher Erdschluss ein.



Da das Netz als 4-Leitersystem ausgeführt ist, stellt sich vom Netz aus ein hoher Kurzschlussstrom ein, mit dem die Anlage auf Dauer nicht betrieben werden kann.

Nach manueller Umschaltung in den Inselbetrieb zum Zeitpunkt t_1 wird der Erdschluss vom netzbildenden Konverter gespeist. Da dieser als 3-Leitersystem ausgeführt ist, erhöhen sich die beiden verbliebenden

nen Spannungen, nicht jedoch die Ströme. Eine Detektion wäre hier nur durch die Spannungen möglich (z.B. durch Überwachung der Spannungen in den einzelnen Phasen).

Bei einem fernen Erdschluss sind die Verhältnisse ähnlich, allerdings wird der Fehlerstrom durch die Leitungsimpedanz etwa um die Hälfte reduziert. Da der Messpunkt in Abgang 2 nun vor dem Fehler liegt, wird der Fehlerstrom auch dort gemessen.

Führt man den Konverter als 4-Leitersystem aus, kann der Konverter wegen der Strombegrenzung keine Kurzschlussströme oberhalb der Begrenzung erbringen. Die Begrenzung erzeugt Verzerrungen im Strom. Das gilt sowohl für den nahen Erdschluss als auch für den fernen Erdschluss.

Frage 2.3.2: Zweiphasiger Erdschluss. Untersuchen Sie das Verhalten des Netzes bei zweiphasigem Erdschluss in Abgang 2. Wie lässt sich der Fehler erkennen? Unterscheiden sich Verbundbetrieb bzw. Netzbetrieb vom Inselnetzbetrieb?

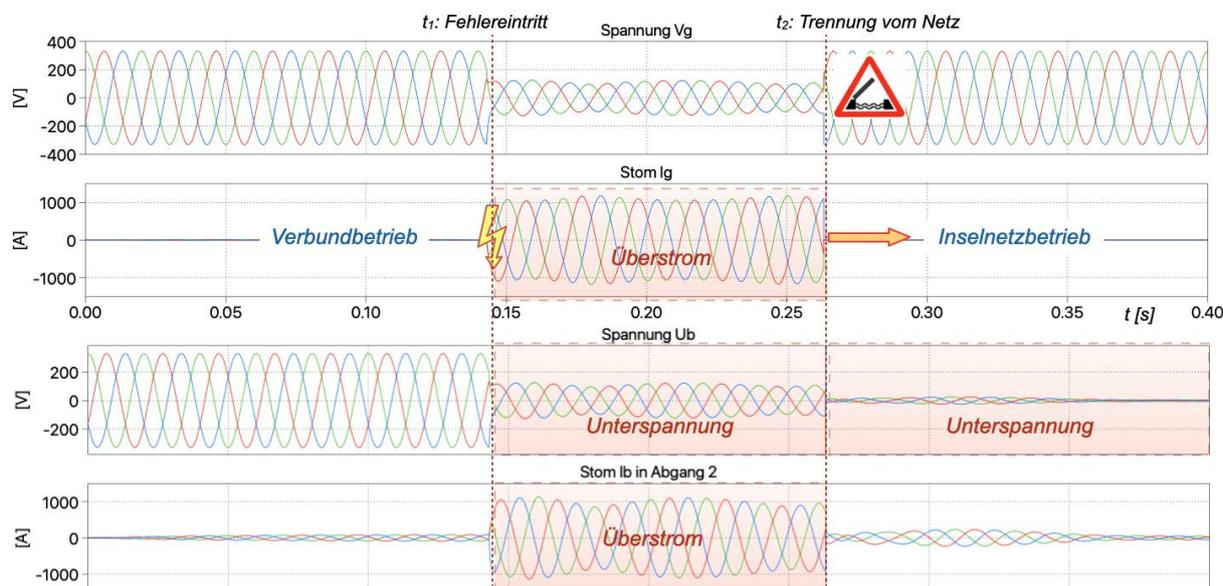
Lösung: Beim zweiphasigen Erdschluss kann das Netz mit einem nahen Fehler nicht betrieben werden: Vom Netz gespeist sind die Kurzschlussströme zu hoch; im Inselnetzbetrieb gerät der Konverter auch als 3-Levelsystem in die Begrenzung und verzerrt.

Bei einem fernen Fehler zeigt sich das gleiche Systemverhalten: Ein Inselnetzbetrieb ist weder als 4-Leitersystem noch als 3-Leitersystem möglich. Die Fehlerdetektion beim Konverter muss auch hier wegen der Strombegrenzung durch Überwachung der Spannungen in den drei Phasen erfolgen.

Frage 2.3.3: Symmetrischer Fehler (dreiphasiger Kurzschluss). Untersuchen Sie das Verhalten des Netzes beim symmetrischen Fehler in Abgang 2. Wie lässt sich der Fehler erkennen? Unterscheiden sich Verbundbetrieb bzw. Netzbetrieb vom Inselnetzbetrieb?

Lösung: Ein naher dreiphasiger Kurzschluss führt im Verbundbetrieb bzw. Netzbetrieb zu unzulässig hohen Strömen. Als Insel ist ebenfalls kein Betrieb möglich, wobei die Fehlererkennung hier über die Spannung erfolgen muss.

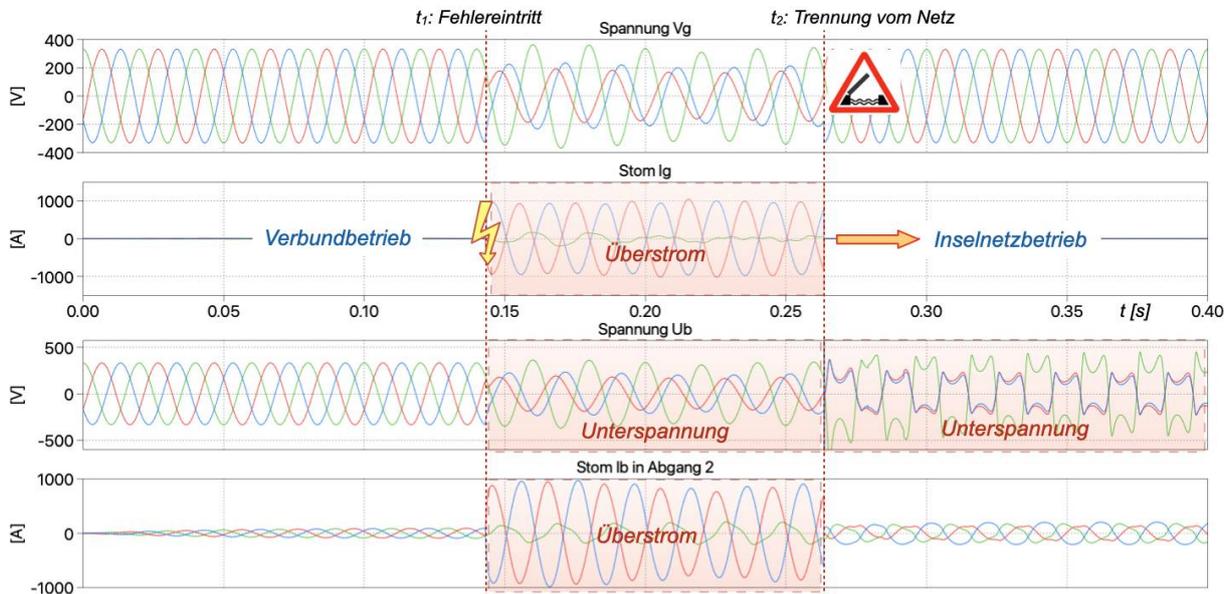
Für einen fernen Kurzschluss zeigt folgende Abbildung die Verhältnisse.



Auch hier ist kein sinnvoller Betrieb möglich. Der Fehler lässt sich im Netzbetrieb durch die hohen Ströme erkennen, sowie durch die geringe Spannung. Im Inselnetzbetrieb verbleibt die Unterspannung als Merkmal.

Frage 2.3.4: Zweiphasiger Kurzschluss. Untersuchen Sie das Verhalten des Netzes beim Kurzschluss zwischen zwei Phasen in Abgang 2. Wie lässt sich der Fehler erkennen? Unterscheiden sich Verbundbetrieb bzw. Netzbetrieb vom Inselnetzbetrieb? Fassen Sie die Ergebnisse der Untersuchungen aus den Fragen 2.3.1 bis 2.3.4 zusammen.

Lösung: Der zweiphasige Kurzschluss zeigt ein vergleichbares Fehlerbild wie der dreiphasige:



Die Spannungen im Inselbetrieb sind wegen der Strombegrenzung stark verzerrt, sowohl mit einem 3W-Konverter, als auch mit einem 4W-Konverter. Ein sinnvoller Betrieb der Anlage ist nicht möglich, auch nicht beim fernen Fehler, der in der Abbildung dargestellt wurde.

Die Fehlererkennung erfolgt als Überstrom im Netzbetrieb, und als Unterspannung im umrichtergeführten Inselbetrieb.

Zusammenfassung der Ergebnisse: Alle Fehler müssen zu einer selektiven Abschaltung des fehlerhaften Teils der Anlage führen, mit einer Ausnahme: ein einfacher Erdschluss im Inselbetrieb mit einem 3-Leitersystem. Die Fehlererkennung beim Inselnetzbetrieb muss mit Hilfe der Spannungen erfolgen (Unterspannung bzw. Verzerrungen oder Unsymmetrie). Bei Speisung durch das Netz ist eine Fehlererkennung mit Hilfe des Stroms möglich.

2.4. Fehlerbehandlung

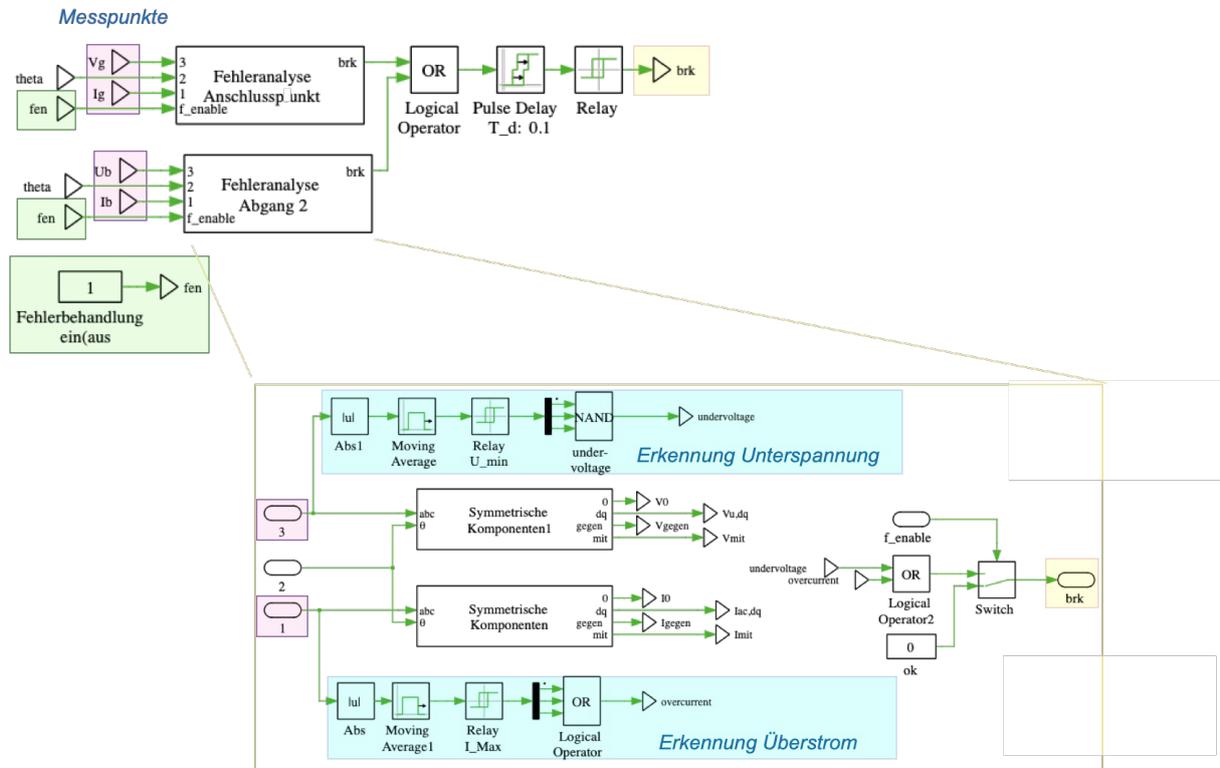
Die Betrachtung der Fehlererkennung zeigt, dass in nahezu allen Fällen bei einem Fehler eine selektive Abschaltung des defekten Abgangs gewünscht ist. Wenn der Fehler vom Netz gespeist wird (d.h. im Verbundbetrieb oder Netzbetrieb), erfolgt die Fehlererkennung mit Hilfe des Stroms. Die Fehlerbehandlung folgt den üblichen Methoden durch Auslösung des Leistungsschalters an der Einspeisung bzw. im defekten Abgang. Das gilt auch, wenn sich im Betrieb ein Lastfluss ins Netz ergibt.

Im Inselbetrieb steht wegen der Strombegrenzung des Umrichters nicht ausreichend Kurzschlussleistung für eine solche Erkennung und Behandlung von Fehlern zur Verfügung. Somit betreffen die bzgl. der Fehlererkennung und Fehlerbehandlung neuen Fälle den Inselnetzbetrieb. Für die Untersuchungen wird der Fehlerbehandlungsmodus mit dem Signal „fen“ = 1 aktiviert.

Frage 2.4.1: Überstrom. Das Modell enthält zwei Module zur Fehleranalyse (siehe Bild unter Abschnitt 2.3): am Anschlusspunkt des Netzes (Strom I_g und Spannung U_g) und am Abgang 2 (Strom I_b und Spannung U_b). Die Messwerte werden auf Überschreiten einer Stromschwelle I_{max} unter-

sucht, die sich bei den Simulationsparametern vorgeben lässt. Untersuchen Sie die Funktionsweise des Moduls.

Lösung: folgende Abbildung zeigt den Signalfluss im Modul.



Der Schwellwert des Stromes wird als obere Grenze eines Relays (= Funktion mit Hysterese) eingegeben. Das Relays schaltet auf den Wert „1“, wenn der Wert überschritten wird und fällt erst zurück, wenn der Wert eine vorgegebene minimale Schwelle unterschreitet. Auf diese Weise vermeidet man ein „flattern“ der Schaltung um den Schwellwert.

Die Ermittlung der Stromamplitude in jeder Phase erfolgt aus dem Betrag der Zeitsignale, die mit einem Mittelwert-Filter geglättet werden. Sobald der Mittelwert einer Phase die Schwelle überschreitet, erfolgt die Auslösung des Relays. Das Signal des Relays wird mit der Unterspannungsdetektion verknüpft, das Ergebnis auf den Signaleingang „brk“ des Leistungsschalters in Abgang 2 geführt.

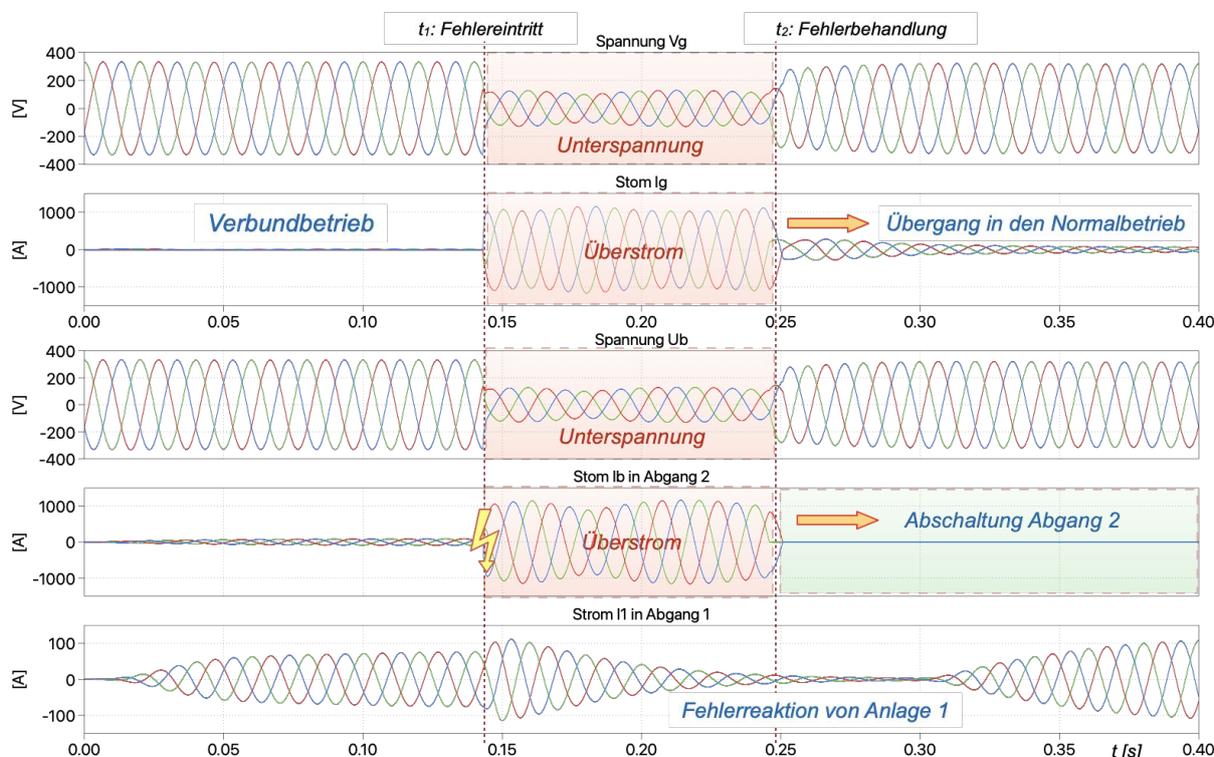
Ist die Fehlerbehandlung aktiviert (Signal „fen“ = 1), führt die Detektion zur Auslösung des Leistungsschalters. Das Verfahren soll das Funktionsprinzip demonstrieren und lässt sich in der Praxis weiter ausarbeiten.

Frage 2.4.2: Unterspannung. Untersuchen Sie die Unterspannungsdetektion in den Modulen zur Fehleranalyse für die Messsignale an den o.g. Abgängen.

Lösung: Die Unterspannungsdetektion wird im Modell durch ein Relays gelöst, dass bei Unterschreitung einer vorgegebenen Spannungsschwelle U_{min} auslöst. Diese Spannungsschwelle kann in den Simulationsparametern vorgegeben werden. Das Relay schaltet erst dann wieder zurück, wenn die Spannung die Schwelle um einen vorgegebenen Wert überschreitet (z.B. $0.9 \cdot V_{ac}$).

Eine Unterspannung liegt vor, wenn die Spannung einer Phase unter die Schwelle fällt. In diesem Fall schaltet das Relays auf den Wert 0. Liegt in einer der Phasen der Wert 0 vor, liegt eine Unterspannung vor. Diese Logik realisiert ein NAND-Verknüpfung. Die Spannungsamplituden werden aus dem Betrag der Phasenspannungen gewonnen, die mit einem Mittelwertfilter geglättet werden.

Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf im Verbundbetrieb, bei dem zum Zeitpunkt t_1 ein symmetrischer Fehler am Ende des Abgangs 2 auftritt. Am Ausgang der beiden Module zur Fehleranalyse findet sich eine Verzögerung (Pulse Delay) für die Auslösung des Schutzes, die im Beispiel auf einen Wert von 0.1 s eingestellt wurden. Der Fehler steht also bis zur Schutzauslösung um 0.1 s an.



Der Simulationslauf zeigt, dass sich sowohl Unterspannung und Überstrom detektieren lassen. Jeder erkannte Fehlerfall führt zur Schutzauslösung zum Zeitpunkt t_2 . Der Leistungsschalter am Abgang 2 trennt zu diesem Zeitpunkt. Hierdurch kehrt die Spannung wieder zurück. Die am Netz verbliebene Anlage 1 nimmt den Bezug von Leistung wieder auf.

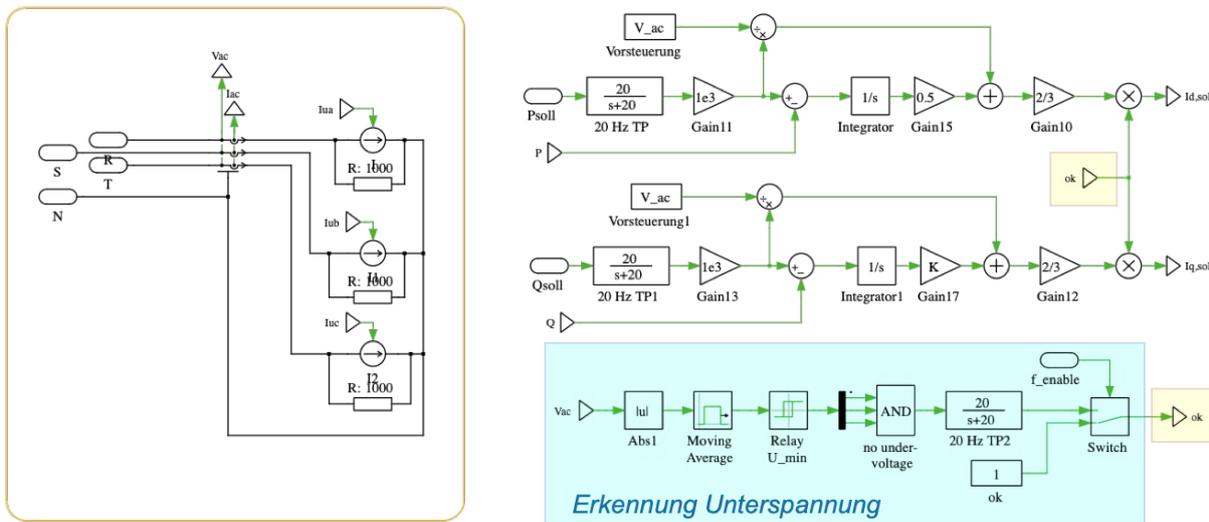
Frage 2.4.3: Verhalten der Anlagen. Der Simulationslauf aus der vorigen Abbildung zeigt die Fehlerreaktion der Anlage 1 am nicht betroffenen Abgang. Analysieren Sie das Verhalten der Anlage in der Simulation.

Lösung: Dass die Anlagen auf Spannungseinbrüche reagieren, ist kein Zufall. Für eine umrichtergeführte Bezugsanlage oder eine umrichtergeführte Einspeisung ist es wenig sinnvoll, in einen Kurzschluss zu speisen, es sei denn, dieses Verhalten ist im Rahmen einer Anschlussrichtlinie gewünscht, um strombasiert auf den Fehler zu reagieren.

Eine solche Anforderung ist dann sinnvoll, wenn der begrenzte Fehlerstrom der Anlage die Kurzschlussleistung des Netzes vergrößern soll. Im Beispiel ist der Beitrag hierfür allerdings nicht erforderlich: Die Kurzschlussleistung des Netzes ist zur strombasierten Auslösung des Fehlers ausreichend.

Im Inselnetzbetrieb reicht der Kurzschlussstrom der Anlagen für eine strombasierte Schutzauslösung nicht aus. Im Beispiel ergibt eine solche Anforderung keinen Sinn: Die Schutzauslösung erfolgt spannungsbasiert. In diesem Fall ist es sinnvoller, wenn Anlagen bei einem Spannungseinbruch ihre bezogene oder eingespeiste Leistung reduzieren, damit bei einer Wiederkehr der Spannung der netzbildende Umrichter nicht in ein Leistungsmaximum läuft. Der netzbildende Umrichter startet sich leichter in einem wenig belasteten Netz.

Die Anlagen sollten daher um eine eigene Detektion von Unterspannungen verfügen und ihre Leistung in diesem Fall reduzieren. Folgende Abbildung zeigt die Unterspannungsdetektion in den Anlagen.

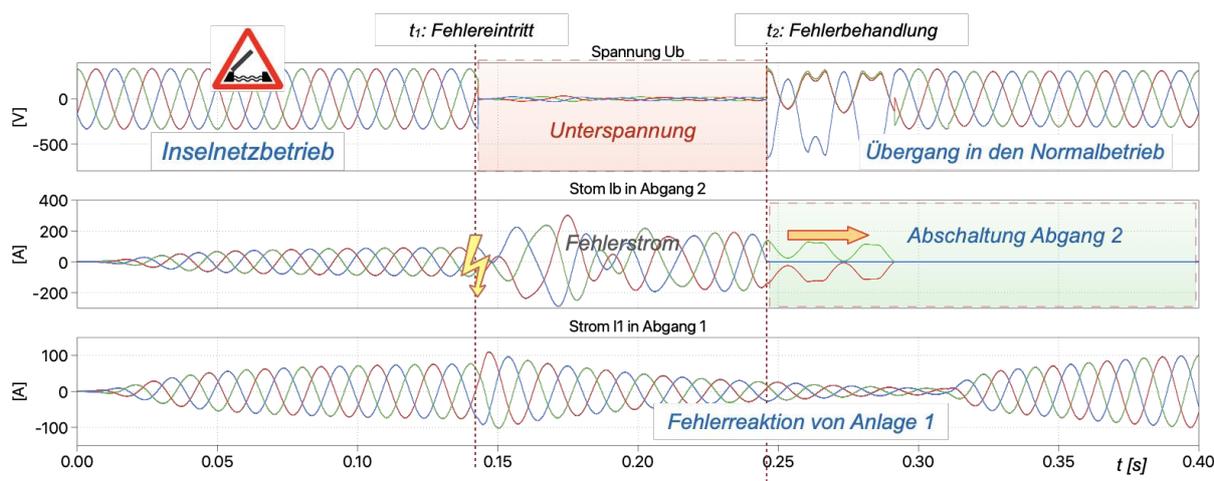


Die Erkennung der Unterspannung erfolgt auf die gleiche Weise wie in den Modulen zur Fehleranalyse. Allerdings wurde die Schwelle für das Öffnen des Relays bei einer Wiederkehr der Spannung niedriger gewählt (z.B. $1.1 \cdot U_{min}$). Auf diese Weise nehmen die Anlagen den Betrieb wieder auf, sobald die Spannung zurückkehrt.

Die Fehlerbehandlung der Anlagen lässt sich mit Hilfe des Signals „fen“ aktivieren und deaktivieren. Aus diese Weise lässt sich das Modell einfach in einen unbehandelten Zustand schalten.

Frage 2.4.4: Selektives Abschalten im Inselnetzbetrieb. Untersuchen Sie die Funktion des selektiven Abschaltens von Abgang 2 bei einem Fehler in der Simulation im Inselnetzbetrieb. Wie verhält sich die verbliebene Anlage 1 im Fehlerfall?

Lösung: Im Inselbetrieb funktioniert im Modell mangels Kurzschlussleistung des netzbildenden Umrichters nur die spannungsbasierte Fehlerauslösung. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf.



Nach Detektion der Unterspannung nach symmetrischem Fehler zum Zeitpunkt t_1 folgt mit der eingestellten Zeitverzögerung die Abschaltung des Abgangs 2 zum Zeitpunkt t_2 . Anlage 1 verfügt über eine lokale Fehlererkennung und Fehlerbehandlung: Nach Fehlereintritt reduziert sie den Strom in Abgang

1). Die Anlage erkennt nach Abschaltung des Abgangs 2 die Wiederkehr der Spannung und nimmt dann den Leistungsbezug wieder auf.

Der Simulationslauf zeigt auch, dass der netzbildende Umrichter nach Abschaltung einige Perioden benötigt, um eine brauchbare Spannung wiederherzustellen. Da Anlage 2 als Erzeuger abgeschaltet wurde, muss er nun die gesamte von Anlage 2 bezogene Leistung bereitstellen. Eine eigenständige Reaktion der Anlagen auf Fehler erscheint daher wünschenswert.

3. Generatoren

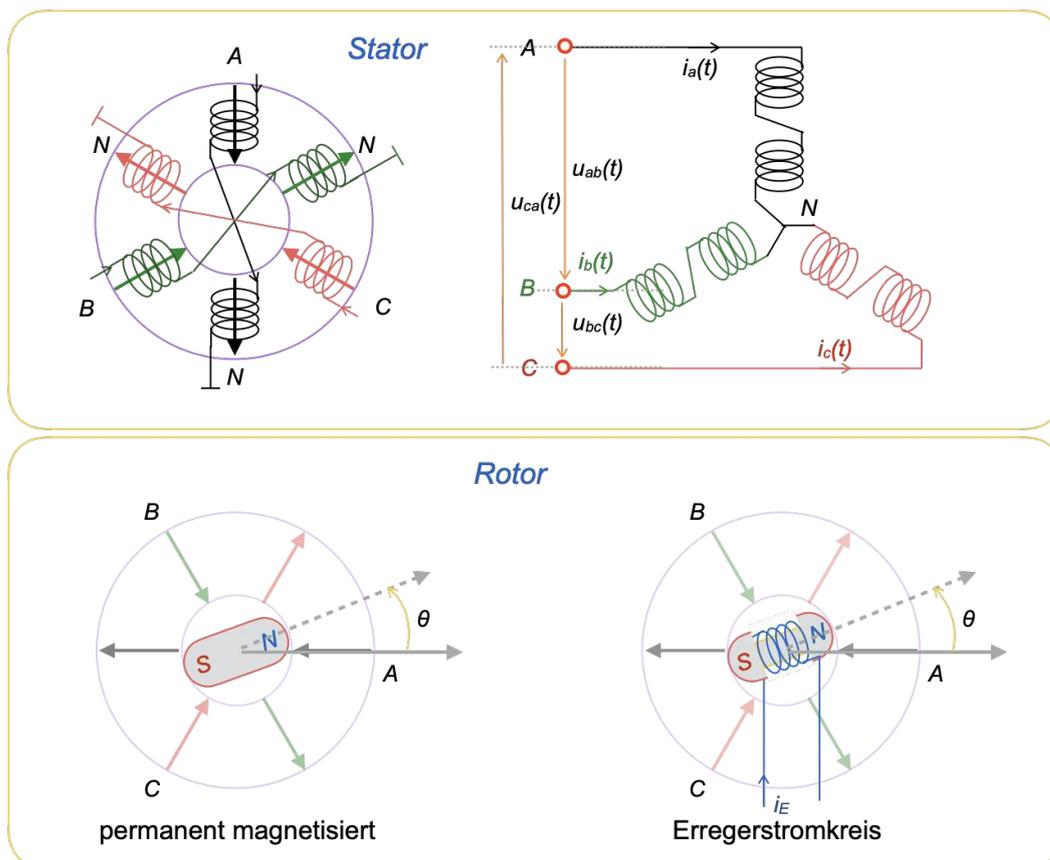
Als Generator wird eine motorgetriebene Synchronmaschine verwendet. Der Antrieb kann durch einen Verbrennungsmotor (Diesel) oder einen Gasmotor erfolgen, bei großen Kraftwerken durch eine Dampfturbine oder eine Gas- und Dampfturbine. Auch große Windräder verwenden Synchronmaschinen als Generatoren, die allerdings nicht synchron mit dem Netz laufen.

Ebenfalls verwendet werden Synchronmaschinen unter der Bezeichnung bürstenloser Gleichstrommotor (engl. BLDC für brushless DC) in drehzahlgeregelten Abtriebe wie z.B. in Schienenfahrzeugen, Elektrofahrzeugen und Elektrofahrrädern. Hier steht die Bezeichnung „Gleichstrommotor“ stellvertretend für eine variable Drehzahl. Die Maschinen arbeiten mit einem Drehfeld, das durch die Ansteuerung in der Drehzahl variiert.

Neben Synchronmaschinen sind auch Asynchronmaschinen (engl. Induktionsmaschinen) im Einsatz. Hier wird vom Stator ein Feld im Rotor induziert, das durch Wirbelströme zu einer Reaktion der Maschine führt. Die Details der Maschinen sind hier nicht relevant. Die Betrachtung beschränkt sich auf einfache mechanische und elektrische Modelle der Maschinen.

3.1. Synchronmaschine

Folgende Abbildung zeigt den Aufbau einer Synchronmaschine, bestehend aus Stator und Rotor. Der Stator enthält eine Drehstromwicklung. Bedingt durch die Geometrie ergibt sich ein Drehfeld, dem der Rotor folgt.



Der Rotor ist entweder permanent magnetisiert (enthält also Dauermagnete), oder enthält eine Gleichstromwicklung zur Erzeugung der Magnetisierung.

Frage 2.4.1: Erläutern Sie das Funktionsprinzip. Wieso trifft die Bezeichnung Synchronmaschine zu?

Lösung: Bei Anschluss ans Netz erzeugen die Ströme in den Wicklungen ein magnetisches Drehfeld, dem der Rotor wegen seiner Magnetisierung folgt. Die Maschine dreht sich mit der Frequenz des Drehfeldes, am Netz somit synchron mit der Netzfrequenz.

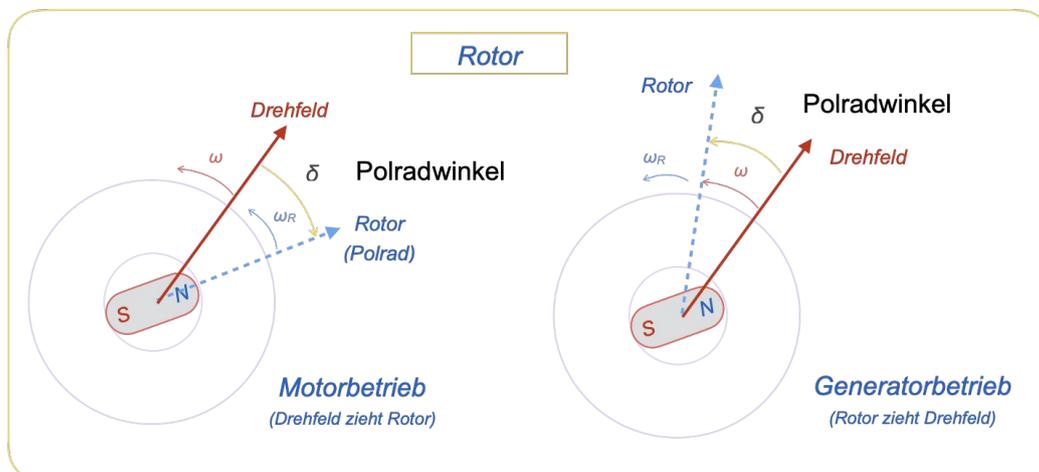
Frage 2.4.2: Welcher Zusammenhang besteht zwischen Drehzahl und Statorfeld? Wie verhält sich eine mehrpolige Maschine? Wie verhält sich die Maschine im Leerlauf und unter Last?

Lösung: In der Abbildung dargestellt ist eine dreipolige Maschine. Eine solche Maschine absolviert eine Umdrehung pro Periode der Netzfrequenz. Es gilt somit für die Drehzahl $n = f_n / m$ wobei f_n die Netzfrequenz bezeichnet. Mit 50 Hz Netzfrequenz absolviert die Maschine somit 3000 Umdrehungen pro Minute. Maschinen mit mehr Polpaaren drehen sich entsprechend langsamer (Polpaare in Vielfachen von 3). Die Maschine dreht sich immer synchron mit der Netzfrequenz, im Leerlauf und unter Last, sofern die Last im zulässigen Bereich bleibt.

Frage 2.4.3: Generatorbetrieb und Motorbetrieb. Lässt sich die Maschine als Motor und Generator betreiben? Welche Unterschiede bestehen in den Betriebsarten?

Lösung: Für die Maschine macht die Betriebsart keinen Unterschied: Sie arbeitet als elektromechanischer Wandler. Bei Anschluss ans Netz erzeugt sie an der Welle ein Drehmoment, das sich als mechanischer Antrieb nutzen lässt. Treibt man die Welle mechanisch an, wird an den Anschlussklemmen eine elektrische Spannung induziert, die sich für elektrische Lasten nutzen lässt. Das gilt auch für den Betrieb an einem Wechselspannungsnetz: Hier muss der Antrieb synchron zum Netz laufen; das mechanische Moment der Welle wird in elektrische Energie gewandelt.

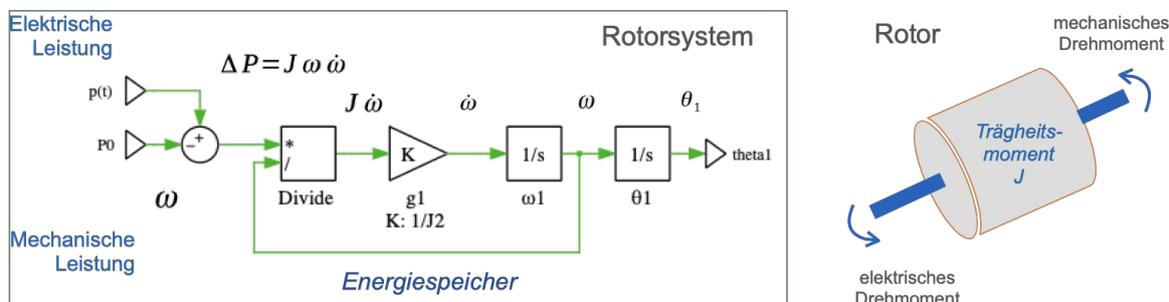
Frage 2.4.4: Polradwinkel. Folgende Abbildung zeigt die Position des Rotors im Verhältnis zur Position des Drehfeldes im Stator. Der Winkel zwischen der Rotorposition und der Position des Drehfeldes wird als Polradwinkel bezeichnet. Der Polradwinkel ist der Rotorwinkel relativ zum Stator-drehfeld, wenn man den Rotor als Polrad bezeichnet. Beschreiben Sie die Unterschiede zwischen Generatorbetrieb und Motorbetrieb am Netz bezogen auf den Polradwinkel.



Lösung: In allen Fällen läuft die Maschine synchron mit dem Netz. Im Leerlauf ist der Polradwinkel annähernd Null: Bis auf Verluste wird für die Rotation keine Leistung benötigt. Belastet man die Welle der Maschine mechanisch durch ein Drehmoment, so fällt der Rotorwinkel hinter das Netz: Die Maschine wird vom Netz gezogen und entnimmt elektrische Leistung aus dem Netz. Wechselt man das Vorzeichen des Drehmoments, indem man die Welle antreibt, so läuft die Maschine vor dem Netz. In diesem Fall wird die aufgewendete mechanische Leistung als elektrische Leistung ins Netz eingespeist.

3.2. Mechanisches Modell

Kern des mechanischen Modells ist das Rotorsystem mit seiner Schwungmasse. Letztere kommt durch das Trägheitsmoment des Rotors zustande.



Halten sich die elektrische Leistung und die mechanische Leistung die Waage, so arbeitet die Maschine als elektromechanischer Wandler mit konstanter Drehzahl. Die mechanische Leistung berechnet sich aus dem Produkt von Drehmoment und Drehzahl:

$$P = M \omega \quad (3.2.1)$$

Diese Beziehung ist Autofahrern geläufig: Dieselmotoren haben mehr Drehmoment, vergleichbare Benziner mehr Drehzahl. Die Trägheit des Rotors sorgt dafür, dass die Maschine weiterläuft, wenn an der Antriebsachse keine Leistung gefordert ist. Der Rotor speichert kinetische Energie:

$$E = J \frac{\omega^2}{2} \quad (3.2.2)$$

Für die Leistung des Rotors erhält hieraus man durch Differenzieren nach der Zeit

$$P = \omega J \dot{\omega} \quad (3.2.3)$$

Bei konstanter Drehzahl nimmt der Rotor keine Leistung auf und gibt keine Leistung ab, die Energie bleibt gespeichert. Eine Leistungszufuhr führt zu einer Erhöhung der Drehzahl, die Leistung wird als Rotationsenergie gespeichert. Umgekehrt führt eine Leistungsentnahme zu einer sinkenden Drehzahl, da die Leistung der Rotationsenergie entnommen wird.

Dieser Effekt ist Fahrradfahrern und Autofahrern geläufig: Beim Übergang von flachen Gelände auf eine Steigung wird man ohne zusätzlichen Antrieb langsamer. Die Energie wird hier aus der kinetischen Energie bezogen, hauptsächlich aus der Translation mit $E = \frac{1}{2} m v^2$, äquivalent zu Gleichung (3.2.2). Bei der Maschine wirkt das Rotorsystem als Energiespeicher und kann Differenzen aus der elektrischen Leistung und der Antriebsleistung ausgleichen.

Daher wäre die Leistung P aus Gleichung (3.2.3) durch diese Leistungsdifferenz zu ersetzen:

$$\Delta P = P_m - P_e = \omega J \dot{\omega} \quad (3.2.4)$$

Hierbei bezeichnet P_m die mechanische Leistung, P_e die elektrische Leistung. Dividiert man die Leistung aus Gleichung (3.2.4) durch die Kreisfrequenz ω , so erhält man nach Gleichung (3.2.1) das resultierende Drehmoment. Die Kreisfrequenz bzw. Winkelgeschwindigkeit ω beschreibt die Umlaufgeschwindigkeit eines Einheitskreises mit Drehzahl f , es gilt $\omega = 2\pi f$.

Frage 3.2.1: Rotorsystem. Erläutern Sie den Signalfluss aus dem Rotorsystem in der Abbildung oben. Wozu führt ein Ungleichgewicht aus elektrischer und mechanischer Leistung?

Lösung: Die Differenz ΔP der elektrischen Leistung und der mechanischen Leistung wirkt auf den Rotor. Durch Division mit der aktuellen Kreisfrequenz ω erhält man das resultierende Drehmoment $\Delta M = J \dot{\omega}$. Durch Division mit dem Trägheitsmoment J erhält man die Änderung $\dot{\omega}$ der Kreisfrequenz, aus der sich durch Integration die Kreisfrequenz ω berechnet. Die rekursive Struktur beschreibt den Ener-

giespeicher durch den Drehimpuls $J\omega$. Aus der Kreisfrequenz erhält $\omega(t)$ man durch erneute Integration den Phasenwinkel $\theta(t)$ des Rotors, wobei der Nullphasenwinkel $\theta_0 = \theta_{(t=0)}$ nicht festgelegt ist.

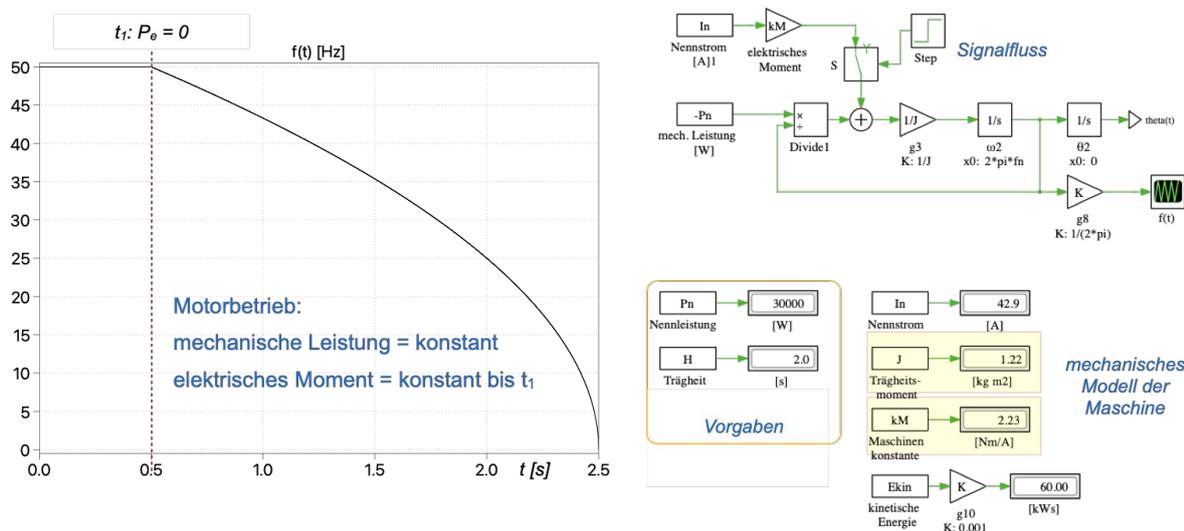
Ein Ungleichgewicht ΔP der Leistung (bzw. der Drehmomente) führt zu einer Drehzahländerung.

Frage 3.2.2: Kenngrößen der Maschine. Die Maschinenkonstante k_M beschreibt das Drehmoment M_e , das sich durch einen Wirkstrom I_d ergibt:

$$k_M = \frac{M_e}{I_d} \quad (3.2.5)$$

Die Bezeichnung M_e soll darauf hindeuten, dass dieses Moment durch die elektrische Last verursacht wird, verkürzt ausgedrückt handelt es sich um ein elektrische Moment. Die Maschine ist durch die Kenngrößen $\{J, k_M\}$ festgelegt: ihr Trägheitsmoment und die Maschinenkonstante. Untersuchen Sie die Funktionsweise der Maschine in der Simulation. Wählen Sie hierzu geeignete Kenngrößen. Hinweis: (1) Legen Sie die Maschine auf eine Trägheit von $H = 2$ s aus. (2) Die Maschinenkonstante folgt aus der Nennleistung und dem Nennstrom der Maschine.

Lösungsbeispiel: Wahl der Kenngrößen: Es wird eine Nennleistung von $P_n = 30$ kW gewählt. Aus der Vorgabe der Trägheit $H = 2$ s und Vorgabe der Nenndrehzahl f_n folgen die Kenngrößen der Maschine. Die Berechnung übernimmt das Simulationsprogramm, Ausgabe siehe folgende Abbildung.



Mit den gegebenen Werten errechnet sich ein Trägheitsmoment von 1.2 kg m². Das entspricht einer Masse von 1.2 kg, die an einem Seil mit dem Radius von 1 m rotiert. Bei einem zylindrischen Körper mit Radius r wäre das Trägheitsmoment bei Rotation um die Zylinderachse $J = \frac{1}{2} m r^2$. Bei einer Rotormasse von $m = 120$ kg hätte der Rotor einen Radius von 14 cm.

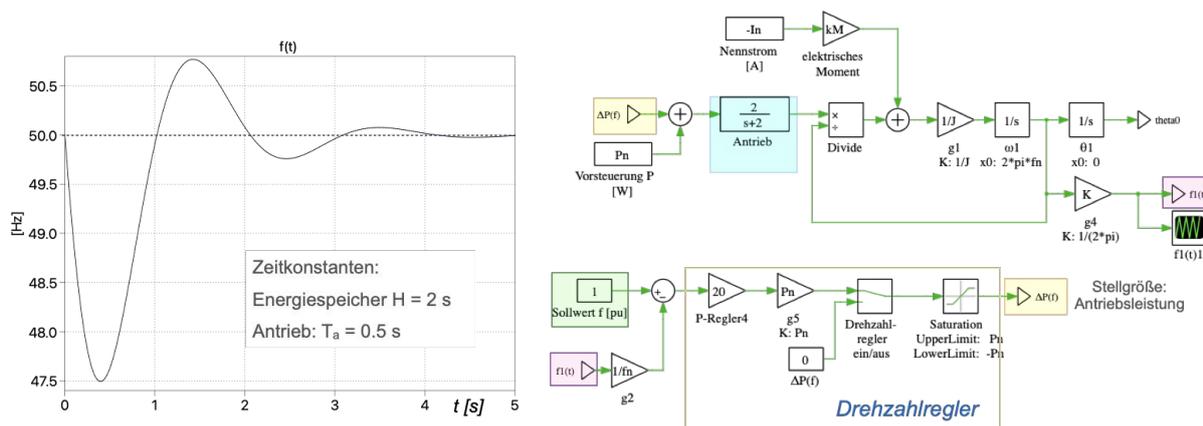
Ein stabiler Arbeitspunkt ergibt sich in diesem Zustand der Maschine nur dann, wenn die mechanische Leistung und die elektrische Leistung genau gleich sind und sich gegenseitig aufheben. Im oben dargestellten Simulationslauf wurde die Nennleistung als mechanische Leistung entnommen ($P_m < 0$), die entsprechende elektrische Leistung zugeführt ($P_e > 0$). Sobald die elektrische Leistungszufuhr unterbrochen wird, zehrt die Maschine ihre kinetische Energie auf und kommt innerhalb der Trägheit H zum Stillstand.

Bei einem Ungleichgewicht der Momente kommt die Maschine entweder zum Stillstand, oder die Maschine geht durch. Dieses Verhalten ist typisch für Maschinen und hat in der Praxis zur Entwicklung des Drehzahlreglers geführt. Der Drehzahlregler verwendet die Energiereserve der Maschine: die

Drehzahl liefert einen Indikator für die Leistungsbilanz. Bei einem Generator wird die mechanische Antriebsleistung als Stellgröße verwendet, die elektrische Leistung bildet die Störgröße.

Frage 3.2.3: Drehzahlregler. Ergänzen Sie das Modell um einen Drehzahlregler und einen Antrieb und untersuchen Sie die Funktionsweise in der Simulation.

Lösungsbeispiel: Wie in der Abbildung dargestellt, wird die zugeführte mechanische Leistung P_n als Vorsteuerung eingestellt, passend zur abgeführten elektrischen Leistung mit dem Moment $-I_n k_M$. Die Maschine ist somit im Generatorbetrieb und im eingeschwungenen Zustand im Gleichgewicht.



Der Drehzahlregler wird auf eine feste Drehzahl f_{sol} eingestellt und ist als P-Regler ausgeführt. Als Stellgröße verwendet als die Antriebsleistung ΔP . Der Antrieb (z.B. Diesel, Gasmotor) reagiert träge mit einer Zeitkonstanten von 0,5 s entsprechend einer Frequenz von 2 Hz. Die Zeitkonstante ist durch ein Tiefpassfilter mit dieser Grenzfrequenz nachgebildet (ein sogenanntes PT1-Glied). Das Trägheitsmoment des Antriebs wurde nicht gesondert berücksichtigt, sondern ist im Trägheitsmoment des Rotors enthalten, der Rotor entspricht somit dem Antriebsstrang.

In der Praxis wäre im Generatorbetrieb die elektrische Leistung die Störgröße und als solche nicht konstant. Der Simulationslauf zeigt den Anlaufvorgang des Antriebs, wobei der Rotor bereits mit Nennfrequenz rotiert (durch Vorgabe der Integrationskonstante $\omega_0 = 2 \pi f_n$ bei der Integration von $\dot{\omega}$). Da die mechanische Leistung durch die Verzögerung des Antriebs nicht sofort zur Verfügung steht, sinkt die Drehzahl. Der Regler reagiert auf die Drehzahländerung $f(P)$ und gibt Gas, erhöht also die Antriebsleistung ΔP .

Die geforderte elektrische Leistung wird hierbei jederzeit geliefert. Die Differenz zur zugeführten mechanischen Leistung stellt die Trägheit der Maschine aus ihrer Schwungmasse bereit. Da die Maschine elektrisch und mechanisch im Gleichgewicht ist, erreicht sie die Nennfrequenz. Der Regler ist in diesem Fall nicht mehr gefordert.

Frage 3.2.4: Statorsystem und Rotorsystem. Woher kommt das elektrische Moment? Wie hängt das Statorfeld mit dem Rotor zusammen? Untersuchen Sie den Zusammenhang in der Simulation und erweitern Sie das Modell entsprechend.

Lösungsbeispiel: Die Reglerstruktur ist in folgender Abbildung dargestellt. Im Beispiel wurde:

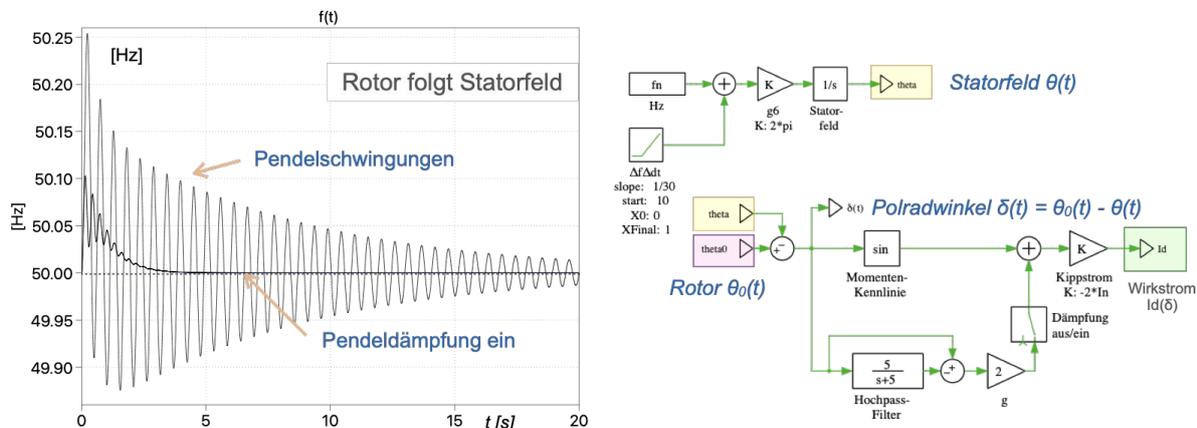
- Ein Statorsystem mit Phasenwinkel $\theta(t)$ eingeführt (mit Nullphasenwinkel 0)
- Der Polradwinkel δ als Differenz des Rotorsystems θ_0 zum Statorsystem θ eingeführt:

$$\delta(t) = \theta_0(t) - \theta(t)$$

- Der Wirkstrom I_d an den Polradwinkel gekoppelt: $I_d(t) = I_0 \sin(\delta(t))$.

- Der Wirkstrom I_d auf den Eingang des elektrischen Momentes geführt.

Der Wirkstrom wächst nun mit dem Polradwinkel, bis ein Gleichgewicht der Kräfte zwischen der Antriebsleistung und der elektrischen Leistung erzielt ist. Die Maschine folgt dem Statorfeld nun synchron und benötigt keinen Drehzahlregler hierzu.

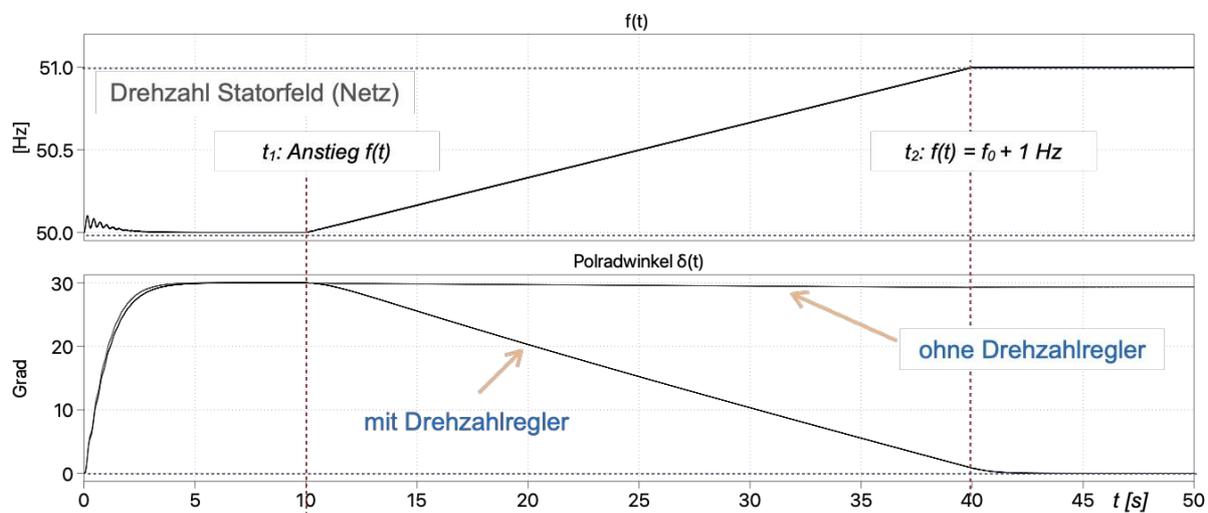


Zur Theorie der Maschine (Stromkennlinie $I_d(t) = I_0 \sin(\delta)$) wird auf das Vorlesungsmanuskript verwiesen. Der Simulationslauf zeigt, dass der Rotor im Statorfeld schwingt bzw. pendelt. Das Pendeln lässt sich dämpfen, indem man die höherfrequenten Anteile der Schwankungen des Polradwinkels $\delta(t)$ gegenkoppelt.

Der Drehzahlreglers beim synchronen Betrieb am Statorsystem erfüllt nun eine andere Funktion: Er erlaubt die Regulierung der Antriebsleistung $P(f)$ abhängig von der Netzfrequenz. Diese Eigenschaft wird mit dem Begriff „Statik“ bezeichnet:

$$P(f) = k_s \cdot P_0 \cdot \frac{f_0 - f(t)}{f_0} = k_s \cdot P_0 \cdot \left(1 - \frac{f(t)}{f_0}\right) \quad (3.2.6)$$

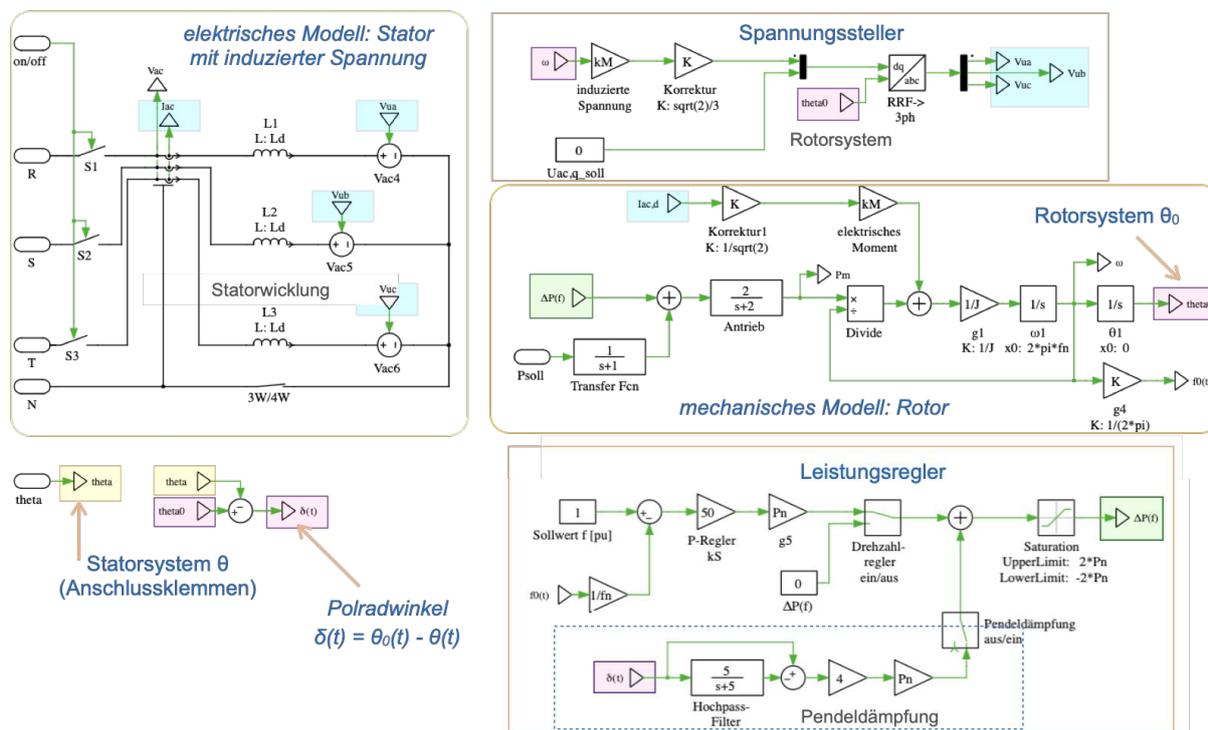
Die Reglerkonstante k_s stellt die Steilheit einer Kennlinie ein, mit der die relative Leistung $P(f)/P_0$ mit wachsender Abweichung der Netzfrequenz f von der Sollfrequenz f_0 reduziert wird. Geregelt wird nun nicht mehr die Drehzahl der Maschine, die an das Netz gebunden ist sondern die Leistungsabgabe (bzw. Leistungsaufnahme) abhängig von der Netzfrequenz. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf mit steigender Netzfrequenz und Leistungsregler.



Ohne Drehzahlregler folgt der Rotor einfach dem Statorfeld. Mit annähernd konstantem Polradwinkel bleibt auch die Abgabe elektrischer Leistung konstant ($\delta > 0$, daher Generatorbetrieb). Mit Drehzahlregler reduziert sich die Leistungsabgabe der Maschine $P(f)$ mit wachsender Frequenz über den Sollwert $f_0 = f_n$. Der Regler arbeitet somit als Leistungsregler. Die Statik wurde hier so eingestellt, dass bei 1 Hz Überfrequenz annähernd keine Leistung mehr abgegeben wird.

3.3. Elektrisches Modell

Das bisherige Modell ist rein mechanisch, jedoch bzgl. der Drehzahlabhängigkeit und bzgl. des Regelverhaltens für die Wirkleistung komplett. Die elektrischen Eigenschaften der Schaltung wurden durch die Stromkennlinie $i_d = I_0 \sin(\delta)$ eingebracht. Blindströme kennt das Modell nicht. Als reiner Signalfluss ermöglicht das Modell auch keine direkte Einbindung in ein elektrisches Schaltungsmodell. Folgende Abbildung zeigt die Ergänzung der elektrischen Eigenschaften.



Das Rotorsystem mit dem Leistungsregler bleibt bestehen. Ergänzt werden die Statorwicklungen, die zu den Anschlussklemmen führen: Der Rotor induziert durch die Drehbewegung im Stator eine elektrische Spannung. Folglich entspricht die elektrische Ersatzschaltung einer Spannungsquelle, die über die Induktivität der Statorwicklung mit den Anschlussklemmen verbunden ist.

Frage 3.3.1: Spannungsregler. Erläutern Sie die Funktion des Spannungsstellers. Welches Bezugssystem wird verwendet? Wie erklären sich hieraus die Vorgaben der Sollwerte?

Lösung: Der Spannungssteller verwendet das Rotorsystem $\theta_0(t)$ als Bezugssystem. Die im Stator induzierte Spannung folgt dem Rotor. Die Höhe der induzierten Spannung steigt hierbei mit der Rotordrehzahl ω proportional zur Maschinenkonstanten k_M (Theorie siehe Vorlesungsmanuskript). Dieser Wert wird für den Realteil der induzierten Spannung verwendet, der Imaginärteil soll Null werden.

Diese Phasenbeziehungen gelten in Beziehung zum Rotorsystem! Rotorsystem und Statorsystem unterscheiden sich durch den Polradwinkel.

Frage 3.3.2: Rotorsystem. Vergleichen Sie das Rotorsystem mit dem mechanischen Modell. Welche Unterschiede gibt es?

Lösung: Das Rotorsystem ist unverändert bis auf einen Unterschied: Der Strom ist nun nicht mehr fest vorgegeben, sondern wird aus der elektrischen Schaltung bezogen (als Wirkanteil nach der Transformation in den Bildbereich). Eine Kopplung mit Hilfe einer Stromkennlinie gibt es nun nicht mehr. Diese Kopplung ergibt sich nun aus dem physikalischen elektrischen Modell.

Frage 3.3.3: Leistungsregler. Erläutern Sie die Funktion des Leistungsreglers im Rotorsystem. Welchen Einfluss hat der Regler auf das Statorsystem?

Lösung: Der Leistungsregler ist weitgehend unverändert: Er passt die Antriebsleistung im Rotorsystem gemäß der vorgegebenen Statik abhängig von der Rotorfrequenz an. Der Rotor wird durch die elektrische Kopplung mit den Statorfeld mitgezogen, bzw. treibt das Statorfeld durch diese Kopplung an. Somit hat der Leistungsregler einen unmittelbaren Einfluss auf den Polradwinkel, und somit auf die Position der Statorspannung in Bezug auf die Spannung an den Anschlussklemmen.

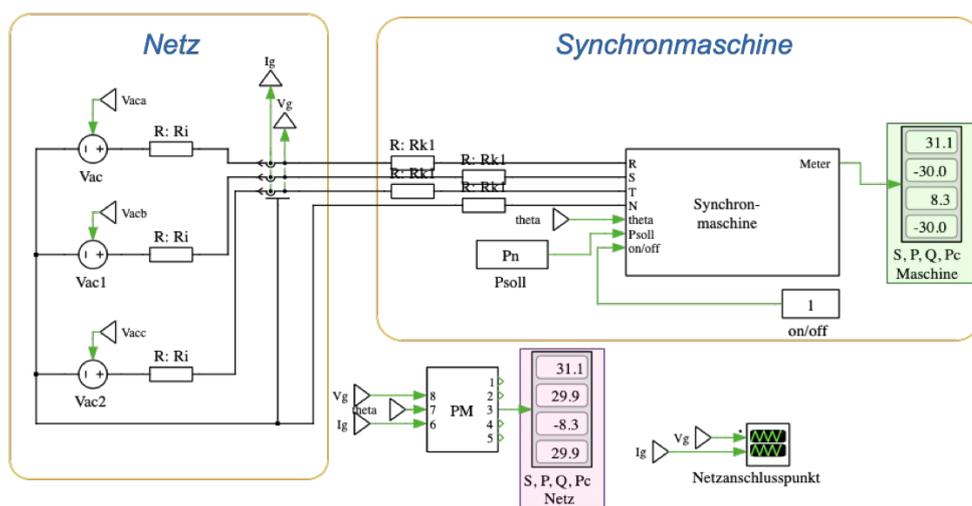
Die Pendeldämpfung ist nun mit der Regelung der Antriebsleistung verknüpft. Das Modell insgesamt beschränkt sich nun auf die im Signalfloss wiedergegebenen mechanischen Eigenschaften und die in der elektrischen wiedergegebenen physikalischen Eigenschaften, abhängig von den Kenngrößen der Maschine.

Frage 3.3.4: Maschinenkenngrößen. Durch welche Parameter ist die Synchronmaschine nun insgesamt beschrieben?

Lösung: Als Kenngrößen werden folgende Parameter verwendet: $\{J, K_M, L_d\}$. J beschreibt das Trägheitsmoment der Maschine als rein mechanische Eigenschaft, K_M die Maschinenkonstante (als Verhältnis von Drehmoment zu Strom, bzw. indizierter Spannung zu Drehzahl) und somit die Kopplung elektrischer und mechanischer Größen, und L_d die Statorinduktivität als elektrische Eigenschaft. Folglich findet sich J im Rotormodell, L_d im Statormodell, und K_M an den Koppelstellen der Modelle.

3.4. Betrieb am Netz

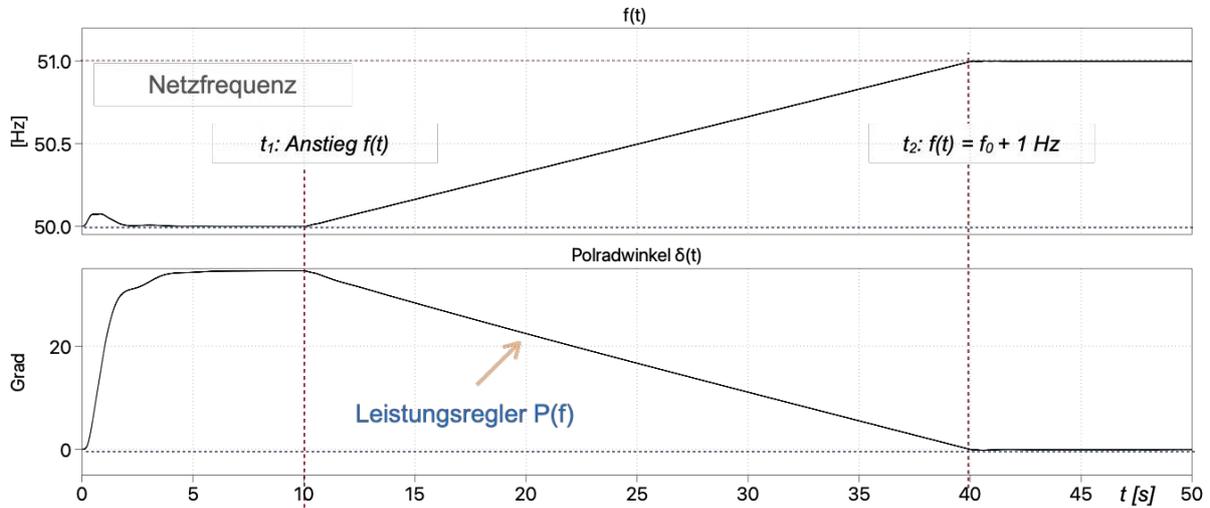
Schaltung und Regler wurden zu einem Block zusammengefasst, so dass die Maschine sich am Netz betreiben lässt, wie in folgender Abbildung dargestellt.



An den Anschlussklemmen des Stators befindet sich nun das Netz mit dem Bezugssystem $\theta(t)$. Die Maschine samt Rotorsystem ist somit mit dem Netz verbunden. Als Sollwert kann die Leistung vorgegeben werden. Die Statik der Maschine $P(f)$ ist innerhalb der Maschine eingestellt.

Frage 3.4.1: Variable Netzfrequenz. Die Maschine soll an einer steigenden Netzfrequenz betrieben werden. Untersuchen Sie das Verhalten der Maschine.

Lösungsbeispiel: Die Netzfrequenz wurde ab dem Zeitpunkt $t_1 = 10$ s mit einer Rampe erhöht, so dass innerhalb von 30 s der Wert von 50 Hz auf 51 Hz wächst. Das Verhalten der Maschine entspricht dem mechanischen Modell mit der Stromkennlinie: Die Statik $P(f)$ reduziert die abgegebene Leistung der Maschine bis zum Leerlauf bei 51 Hz; der Polradwinkel nimmt entsprechend ab.



Bei einer umgekehrten Rampe steigt die Leistungsabgabe entsprechend mit fallender Netzfrequenz. Bei einem Polradwinkel von 90 Grad gelangt die Maschine an die Stabilitätsgrenze und kippt. Hier wäre im Modell die Koppelinduktivität L_d anzupassen.

Frage 3.4.2: Wirkleistung. Untersuchen Sie den Betrieb in der Simulation. Wie gelingt es dem Spannungssteller die Wirkleistung korrekt einzustellen, obwohl er im Rotorsystem arbeitet?

Lösung: siehe Abbildung unter Abschnitt 3.4: Die Wirkleistung wird korrekt ausgeregelt. Da das Netz bei Sollfrequenz arbeitet, hat der Leistungsregler $P(f)$ hierauf überhaupt keinen Einfluss. Die Einstellung erfolgt allein über die Vorsteuerung des Leistungsreglers, sowie über den Spannungssteller:

- Die Vortsteuerung der Leistung erhöht durch die Wirkleistungsvorgabe den Polradwinkel. Die Phasenverschiebung der induzierten Spannung gegenüber den Netzspannung führt im elektrischen Modell zu einem Wirkstrom (Zeigerdiagramm siehe Vorlesungsmanuskript). Der Wirkstrom erzeugt ein elektrisches Moment, das dem Antriebsmoment entgegen wirkt, bis ein Gleichgewicht erreicht ist.
- Der Spannungssteller stellt die induzierte Spannung so ein, dass ihr Imaginärteil im Rotorsystem Null ergibt. Der Realteil der Spannung erreicht bei Nenndrehzahl die Nennspannung in Höhe der Amplitude der Netzspannung. Die Einstellung der Wirkleistung gelingt durch die Vortsteuerung der Leistung, nicht durch den Spannungssteller.

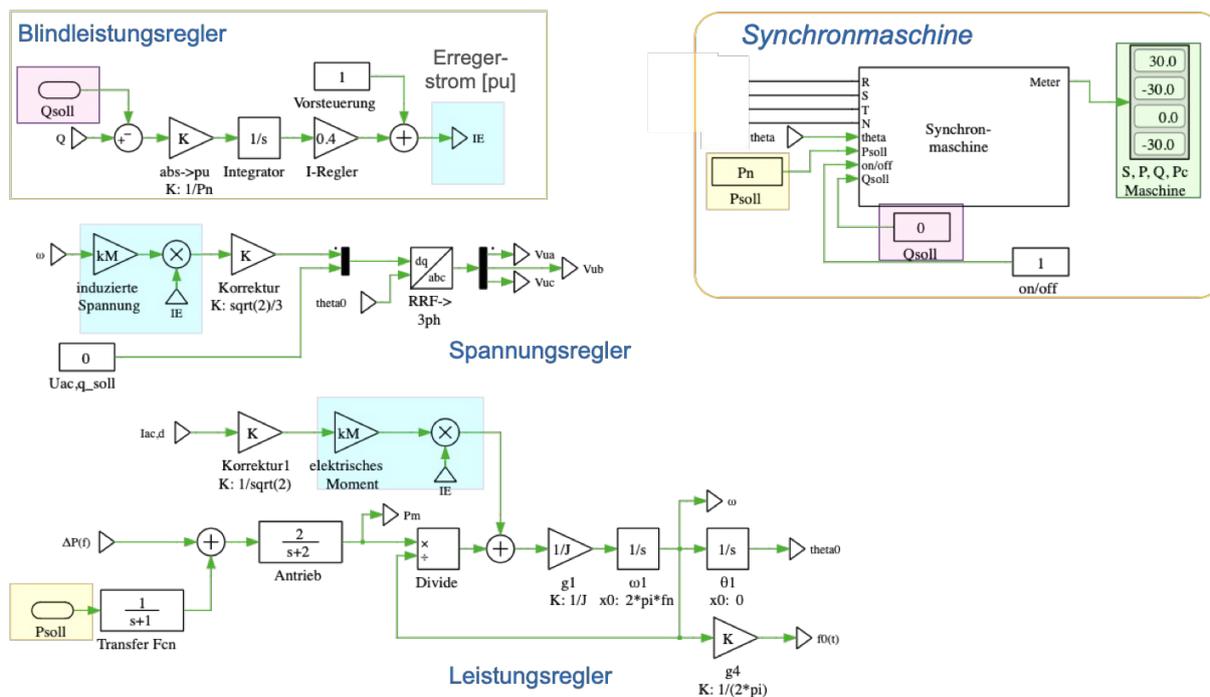
Rotor und Stator werden im elektrischen Modell durch die Spannungen und Ströme miteinander gekoppelt. Die Schaltung gibt in dieser Betriebsweise nur die physikalischen Eigenschaften der Maschine wieder, mit der passenden Vortsteuerung, jedoch ohne Regler.

Frage 3.4.3: Blindleistung. Warum wird die Blindleistung nicht ausgeregelt? Wie ließe sich die Schaltung entsprechend anpassen? Untersuchen Sie die modifizierte Schaltung in der Simulation.

Lösung: siehe Abbildung unter Abschnitt 3.4: Die Maschine nimmt Blindleistung in Höhe von 11 kVar auf bei einer Wirkleistungsabgabe von 30 kW. Der Blindleistungskonsum ist proportional zur Abgabe der Wirkleistung.

Grund hierfür ist die statische induzierte Spannung: Der Spannungssteller ändert den Wert nicht, obwohl durch die hohen Wirkströme ein Spannungsabfall über der Serienreaktanz zur Klemmenspannung stattfindet.

Um die induzierte Spannung zu erhöhen, wäre ein Eingriff in die Maschinenkonstante k_M erforderlich: Maschinen mit regelbarer induzierter Spannung besitzen eine Erregerwicklung, mit der sich die Magnetisierung des Rotors verändern lässt. Diesen Effekt kann man durch eine variable Maschinenkonstante nachbilden, wie in folgender Abbildung dargestellt, zusammen mit dem Blindleistungsregler.



Der Regler wurde um einen Blindleistungsregler ergänzt. Stellgröße ist der Erregerstrom I_E in normierter Schreibweise. Beträgt $I_E = 1$, funktioniert die Schaltung unverändert. Andere Werte von I_E vergrößern bzw. verkleinern die Maschinenkonstante k_M .

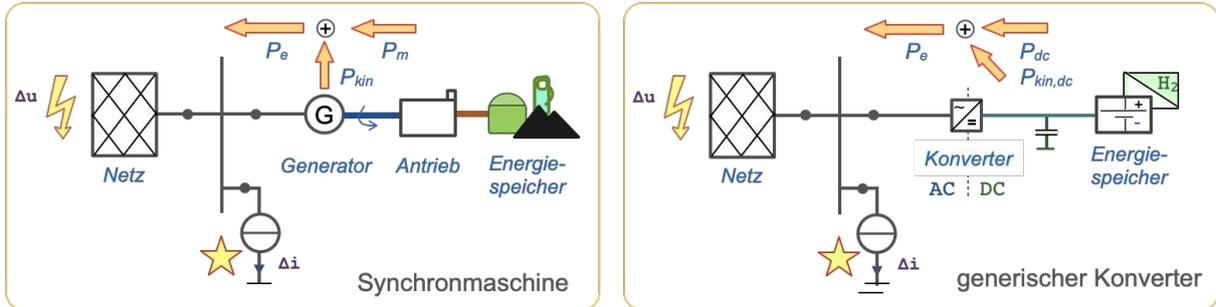
Bei erhöhter Blindleistungsaufnahme vergrößert sich I_E , was zu einer Erhöhung der induzierten Spannung führt, sowie zu einem größeren Maschinenmoment. Durch den letzteren Effekt wird der Polradwinkel etwas zurückgenommen. Die Maschine ist nun in P und Q regelbar.

Frage 3.4.4: Maschinenkonstante k_M . In der Simulation wurde die Maschinenkonstante k_M gemäß Definition nach Gleichung (3.2.5) aus dem Verhältnis des Maschinenmomentes zum Maschinenstrom berechnet. Was folgt hieraus für das Verhältnis von induzierter Spannung und Drehzahl?

Lösung: Das Maschinenmoment bei Nennleistung berechnet sich aus $M_{e,n} = P_n / \omega_n$. Für die Nennleistung P_n gilt bei Nennspannung U_n und Nennstrom I_n : $P_n = 3 U_n I_n$. Einsetzen in Gleichung (3.2.5) ergibt für die Maschinenkonstante $k_M = 3 (U_n / \omega_n)$. Somit beschreibt die Maschinenkonstante auch der Verhältnis von induzierter Spannung und Drehzahl der Maschine. Dieses Verhältnis ist durch die Bauart bedingt und kann nicht aus weiteren Parametern abgeleitet werden, daher ist die Maschinenkonstante eine der Kenngrößen der Maschine. Bei einer Maschine mit Erregerstromkreis ist die Maschinenkonstante hierdurch beeinflussbar: Aus dem höheren Erregerstrom folgt eine höhere Magnetisierung und somit eine höhere induzierte Spannung (bei gleicher Drehzahl) und mehr Moment (bei gleichem Statorstrom).

4. Generisches Umrichtermodell

Ein generischer Konverter soll sich universell einsetzen lassen, auch als Generator und im Verbund mit konventionellen Generatoren.



Beim konventionellen Generator dient die Schwungmasse des rotierenden Systems als Energiespeicher, der rasch auch große Mengen an Leistung bereitstellen kann, beispielsweise bei Lastsprüngen um Netz. Ebenso kann die Maschine bei Spannungseinbrüchen rasch Blindleistung und Leistung bereitstellen. Auf Dauer wird die Leistung über den Antrieb aus dem Energiespeicher bezogen. Dieser Teil der Leistung liegt im Bereich der Nennleistung des Aggregates.

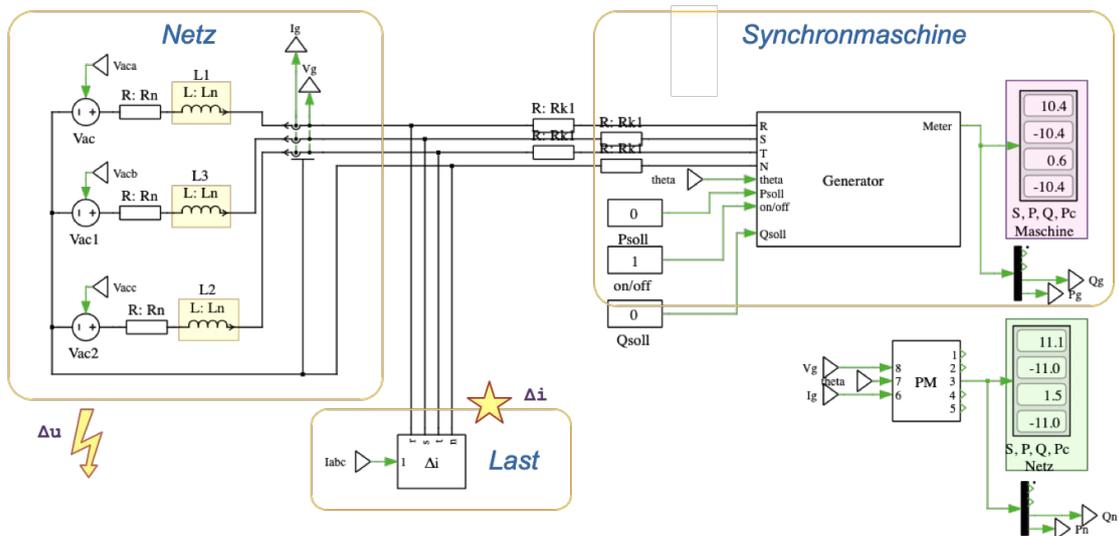
Bei einem leistungselektronischen Konverter fehlen die bewegten Teile. Der kinetische Anteil der Leistung für den Ausgleich muss daher aus einem schnellen Speicher bezogen werden. Der dauerhaften Teil der Leistung wird aus einem vergleichsweise langsamen Energiespeicher bezogen. Für den generischen Konverter ergeben sich somit

- Anforderungen an die Regelung
- Anforderungen an den Energiespeicher,

die in diesem Abschnitt näher untersucht werden sollen. Als Basis dient das Modell der Synchronmaschine. Die Auslegung der Anlagen ist hierbei exemplarisch und lässt sich in der Praxis an den speziellen Bedarf anpassen und detaillieren.

4.1. Synchronmaschine

Folgende Abbildung zeigt die Synchronmaschine im oben dargestellten Szenario.



Die Maschine wird an einem starren Netz betrieben. Netz und Maschine sind reaktiv; sie haben vorwiegend induktive Impedanzen. Im Netz sind die Impedanzen vorwiegend durch die Transformatoren bedingt, in der Maschine durch die Statorwicklung. Die Netzimpedanz im Modell hat am Anschalt- punkt die gleiche Reaktanz (Induktivitäten L_n) wie die Reaktanz der Synchronmaschine (Induktivität L_d). Diese Annahme dient der Vereinfachung bei der Interpretation der Ergebnisse.

Die Maschine ist gegenüber Abschnitt 3 unverändert. Reaktionen lassen sich durch folgende Ereignisse stimulieren:

- Spannungseinbrüche $\Delta u(t)$ im Netz: Bei einem Fehler im Netz würde die Spannung einbrechen. Im Modell wird hierfür mit Hilfe einer Zeitschaltung die Spannungsamplitude um 50% reduziert und kehrt nach Fehlerklärung im Netz wieder.
- Lastsprünge $\Delta i(t)$ am Anschalt- punkt: Am Anschalt- punkt ist eine Stromquelle angeschlossen, die nach voreingestellter Zeit Lastsprünge verursacht.

Das Verhalten der Maschine einschließlich der Anforderungen an die Regelung und an die Energiespeicher soll untersucht werden.

Frage 4.1.1: Szenario. Welches Verhalten wird von der Maschine in den beiden genannten Fällen (Spannungseinbrüche bzw. Lastsprünge) erwartet? Wie kann die Maschine das erreichen? Welche Änderungen sind in der Regelung hierfür erforderlich.

Lösung: (1) Spannungseinbrüche: Die Spannung am Anschalt- punkt stützen. Der Fehler im Netz ist ein ferner Fehler, bei dem davon ausgegangen wird, dass er z.B. durch eine selektive Abschaltung im Netz geklärt wird. Ziel ist es, den Betrieb aufrecht zu erhalten und somit die Spannung am An- schalt- punkt und in der Nähe zu erhalten. Bemerkung: Bei Fehlern nahe am Anschalt- punkt sind die Spannungseinbrüche größer; in diesem Fall wird eine Schutz- auslösung am Anschalt- punkt angestrebt.

Methode: Blindstrom bzw. Blindleistung. Wegen der reaktiven Impedanzen bewirkt ein Blindstrom eine Spannungsanhebung. Die Maschine muss auf plötzliche Spannungsschwankungen reagieren.

(2) Lastsprünge: Ziel ist die Solidarität mit dem Zweck der Stabilisierung des Netzes. Die Maschine soll sofort einen anteiligen Beitrag zum Lastsprung leisten, also sprunghaft Leistung beisteuern. Mit den oben beschriebenen Verhältnissen der Impedanzen von Netz und Maschine sollte der kurzfristige Anteil 50% betragen. Auf Dauer folgt die Maschine ihrem eingestellten Arbeitspunkt.

Methode: Wirkstrom bzw. Wirkleistung anteilig in Höhe der geforderten Wirkleistung. Geforderte Wirkströme bewirken wegen der reaktiven Impedanzen eine Phasenverschiebung der Spannung am An- schalt- punkt. Die Maschine muss auf eine plötzliche Phasenverschiebung der Spannung am An- schalt- punkt reagieren.

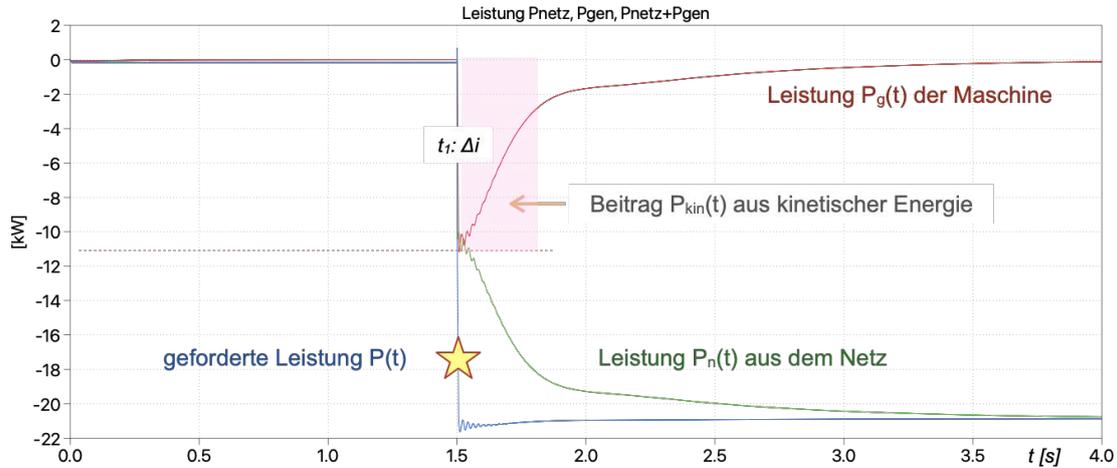
(3) Änderungen in der Regelung: Im Grunde genommen keine. (a) Die Blindleistungsregelung muss deaktiviert werden. Die physikalisch unregelmäßige Maschine stellt bei konstanter Drehzahl eine stabile induzierte Spannung bereit, die beibehalten wird, wenn die Spannung am Anschalt- punkt einbricht. Durch das Spannungsgefälle an der Reaktanz der Maschine ergibt sich sofort ein Blindstrom. (b) Die Maschine erhält durch ihre Trägheit die Rotorfrequenz. Ein Phasensprung der Spannung am An- schalt- punkt bewirkt an der Reaktanz der Maschine sofort einen Wirkstrom, wobei die Leistung der kinetischen Energie der Maschine entnommen wird.

Frage 4.1.2: Lastsprung am Anschalt- punkt. Untersuchen Sie das Verhalten der Maschine in der Simulation. Welchen Beitrag an Wirkleistung liefert die Maschine aus ihrer Schwungmasse, welchen Beitrag aus ihrer Antriebsleistung?

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.

Zum Zeitpunkt t_1 wird ein Strom in Höhe von ca. 70% des Nennstroms gefordert. Die Simulation zeigt, dass die Maschine sich die Last sofort zu gleichen Teilen mit dem Netz erbringt. Da der Antriebsregler

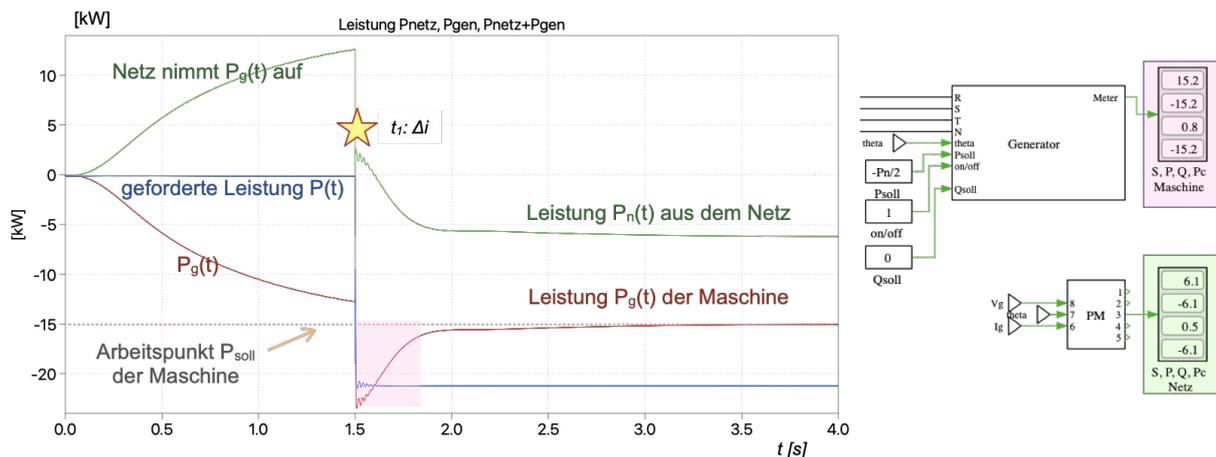
auf einen Sollwert von $P_{\text{soll}} = 0$ eingestellt ist, führt der Regler die Maschine wieder auf ihren Sollwert zurück und das Netz übernimmt die geforderte Leistung vollständig.



Die Solidarität endet somit mit dem Regler. Der solidarisch gelieferte spontane Anteil an Leistung ist jedoch entscheidend für den stabilen Betrieb des Netzes, da die Erhaltung der Energie zu jedem Zeitpunkt ein Gleichgewicht von bezogener Leistung und angebotener Leistung fordert.

Im Modell kann das starre Netz zwar spontan jeden gewünschten Beitrag leisten. Ein starres Netz existiert in der Praxis aber nur im Verbund vieler Maschinen und somit auf der Basis derer spontanen Solidarität. Die spontan verfügbare Leistung wird unter mit dem Begriff Momentanreserve bezeichnet. Die Momentanreserve wird solidarisch erbracht und anschließend abgelöst.

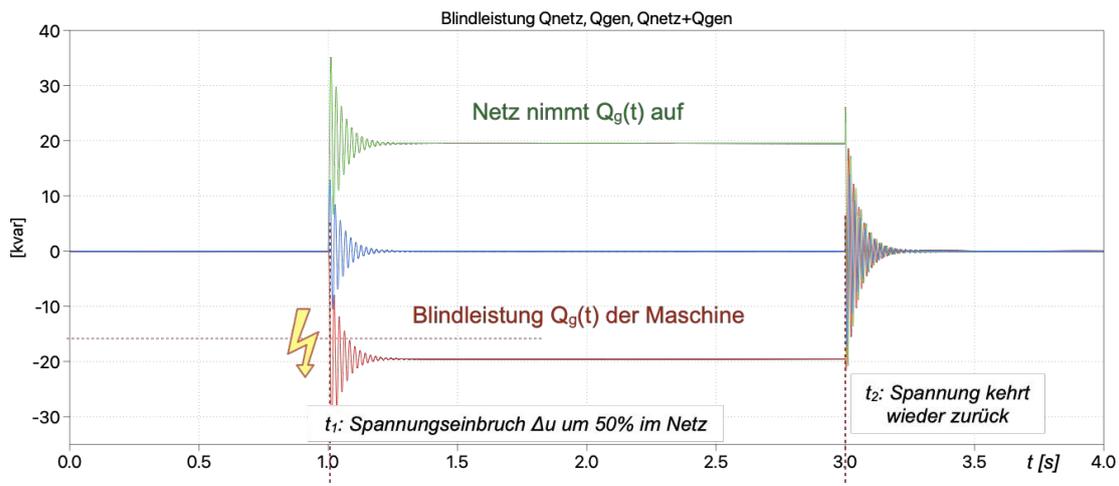
Die Maschine liefert Momentanreserve auch unter einem Arbeitspunkt mit Antriebsleistung. In folgendem Simulationslauf wurde ein Sollwert $P_{\text{soll}} = -P_n/2$ gefordert. Von der Last ist zunächst keine Leistung gefordert, d.h. das Netz nimmt die Generatorleistung auf.



Zum Zeitpunkt t_1 fordert die Last eine Leistung. Die Maschine stellt die benötigte Momentanreserve aus dem aktuellen Arbeitspunkt bereit und regelt dann wieder auf diesen Arbeitspunkt auf. Den übrigen Teil der geforderten Leistung erbringt nun das Netz.

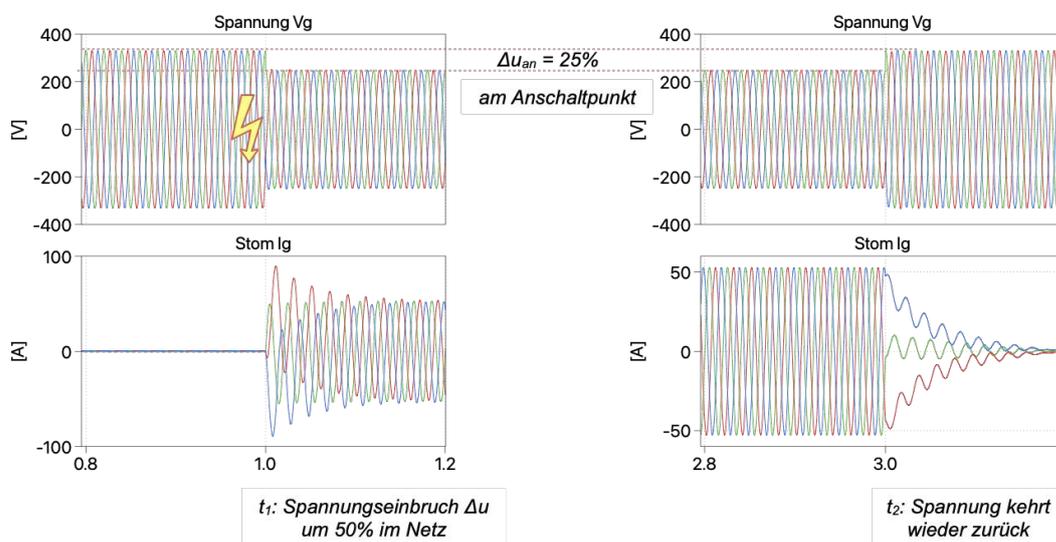
Frage 4.1.3: Spannungseinbruch im Netz. Untersuchen Sie das Verhalten der Maschine in der Simulation. Welchen Beitrag an Blindleistung liefert die Maschine? Welchen Einfluss hat die Blindleistung auf die kinetische Energie und die Antriebsleistung?

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.



Der Blindleistungsregler wurde hierzu deaktiviert. Da der Spannungseinbruch an der Netzspannung erfolgt, ist das Netz somit Ursache und leistet keinen Beitrag zur Stützung der Spannung am Anschlusspunkt. Wegen des Spannungsgefälle von Anschlusspunkt zur induzierten Spannung im Stator der Maschine reagiert die Maschine sofort mit einem Blindstrom.

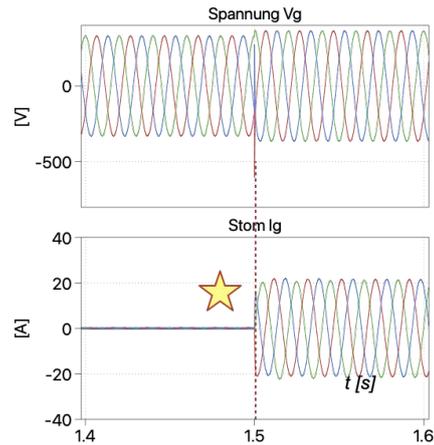
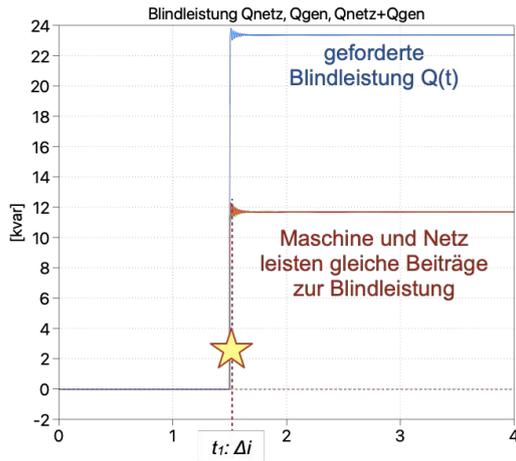
Transiente Wirkanteile während des Einbruches können aus der kinetischen Energie bezogen werden, für Blindströme ist jedoch grundsätzlich kein Energiespeicher nötig.



Eine Betrachtung der Spannungen und Ströme am Anschlusspunkt zeigt, dass die Stützung der Spannung am Anschlusspunkt funktioniert: Die Spannung bricht hier nur um 75% ein (die Netzspannung um 50%). Nach Rückkehr der Spannungen werden die Blindströme mit den üblichen elektrischen Schalttransienten zurückgenommen.

Frage 4.1.4: Lastsprung mit Blindstrom. Welches Verhalten erwarten Sie bei einem Lastsprung mit Blindstrom? Untersuchen Sie das Verhalten in der Simulation.

Lösungsbeispiel: Ein Blindstrom erzeugt an der reaktiven Impedanz der Maschine einen Spannungsabfall. Das Szenario entspricht also einem Spannungseinbruch, jedoch mit dem Unterschied, dass nun auch das Netz einen Beitrag leisten kann.



Wegen der gleichen Reaktanzen von Netz und Maschine fallen die Beiträge zum geforderten Blindstrom bzw. zur geforderten Blindleistung gleich aus. Die Betrachtung der Spannungen und Ströme zeigt, dass die Bereitstellung spontan erfolgt.

Bemerkung: Spontane Forderungen größerer Blindströme können sich durch Zuschalten von Drosseln bzw. Übertragungsleitungen ergeben. Solche Blindströme können Maschinen erbringen.

4.2. Virtuelle Maschine

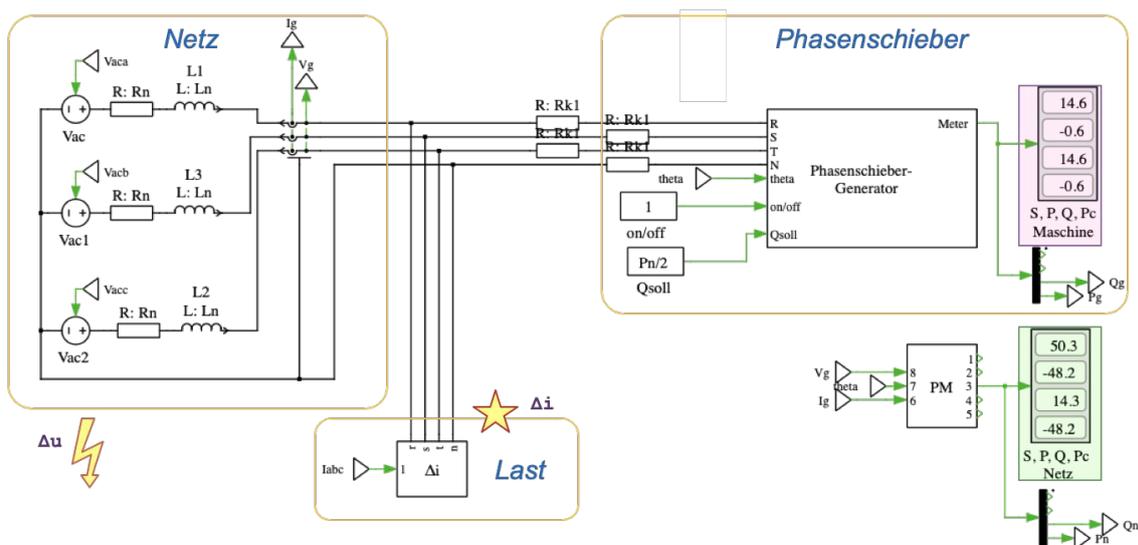
Ein Umrichter besitzt zwar keine bewegten Teile und folglich keinen kinetischen Energiespeicher, jedoch lässt sich das Verhalten einer Synchronmaschine regelungstechnisch nachbilden. Als Basis soll eine Synchronmaschine im Phasenschieberbetrieb dienen. Bei einer solchen Maschine fehlt der Antrieb völlig: Sie wird vom Netz als Motor mitgezogen, kann aber bei Bedarf aus ihrer Schwungmasse Momentanreserve beisteuern. Ebenso ist die Abgabe und der Bezug von Blindleistung möglich.

Eine solche Funktion wäre auch in einem Konverter mit ausreichender Kapazität im DC-Zwischenkreis realisierbar, also einer Kompensationsanlage (Statcom). Ebenso wäre die Funktion als virtuelle Maschine auch als Betriebsweise auf jedem anderen Konverter möglich, z.B. HGÜs oder Kopfstationen von Einspeisungen, die bzgl. ihrer elektrischen Impedanz hinreichend nahe am Übertragungsnetz angesiedelt sind. Letztere Bedingung folgt der Praxis konventioneller Kraftwerke: Diese sind über einen Maschinentransformator (und somit auf elektrisch kurzem Wege) direkt mit dem Übertragungsnetz verbunden.

Frage 4.2.1: Phasenschieberbetrieb der Synchronmaschine. Folgende Abbildung zeigt das Eingangsszenario mit einem Phasenschieber-Generator. Die Maschine bzw. virtuelle Maschine besitzt keine dauerhafte Versorgung mit Wirkstrom, wie z.B. einen Antrieb bzw. ein angeschlossenes DC-System, sondern nur einen Energiespeicher. Die Maschine soll folgende Funktionen bieten:

- Dauerhafte Versorgung mit Blindleistung nach vorgegebenem Sollwert Q_{soil} .
- Temporäre Bereitstellung von Wirkleistung als Momentanreserve als Beitrag zur Stabilität im Netz im Verbund mit Synchronmaschinen.

Erläutern Sie, wie die Anlage beide Funktionen erbringen kann. Welche Anforderungen bestehen an die Regelung und an den Energiespeicher? Wie wäre eine Umsetzung mit Hilfe einer Synchronmaschine möglich, bzw. mit Hilfe eines Konverters? Wie lassen sich die Funktionen mit Hilfe des in der Abbildung beschriebenen Ausbaus in der Simulation überprüfen? Welches Verhalten erwarten Sie von der Anlage für die beiden Lastfälle Δu und Δi ?



Lösung: (1) Funktionen:

(a) Eine dauerhafte Versorgung mit Blindleistung erfolgt durch Anpassung der Spannung der Anlage. Sowohl die Synchronmaschine als auch ein Konverter besitzen das gleiche elektrische Schaltbild: über eine Serieninduktivitäten gekoppelte Spannungsquellen. Durch Verstellen der Anlagenspannung erreicht man eine Einspeisung bzw. einen Bezug von Blindleistung.

(b) Momentanreserve als zeitlich befristete Blindleistung lässt sich aus dem Energiespeicher bereit stellen. Hierzu muss der Energiespeicher genügend groß sein (Energie), und über einen hinreichenden Anschlusswert verfügen (Leistung). Der Anschlusswert liegt im Bereich der Nennleistung der Anlage. Der Bedarf an Wirkleistung ergibt sich ebenfalls aus der Spannung am Anschlusspunkt, allerdings nicht aus der Amplitude, sondern aus der Änderung der Phasenlage. Die Anlage muss die bisherige Phasenlage speichern, so dass der Regler auf Änderungen reagieren kann.

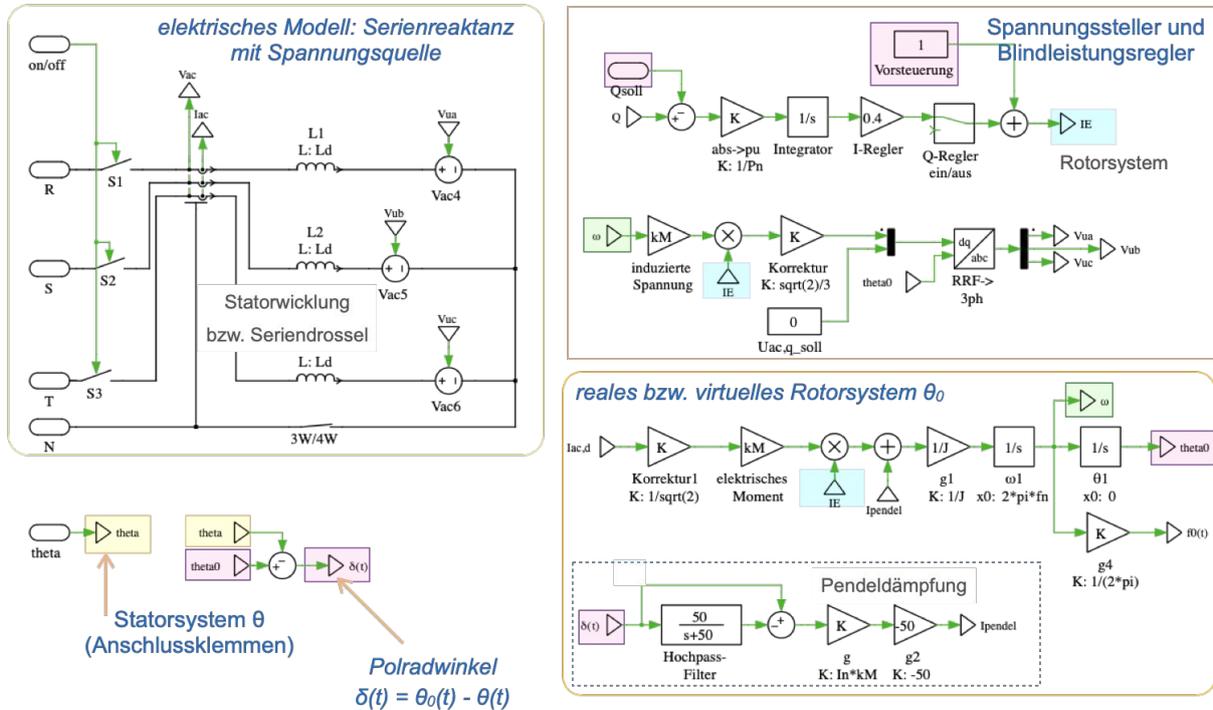
(2) Umsetzung: (a) Blindleistung: Bei der Synchronmaschine bleibt die induzierte Spannung bei konstanter Drehzahl konstant, so dass die Maschine auf Änderungen der Spannungsamplitude am Anschaltspunkt automatisch reagiert. Zur Bereitstellung einer vorgegebenen Blindleistung muss die Spannung der Anlage gegenüber der Spannung am Anschlusspunkt verändert werden, was bei der Synchronmaschine am Erregerstromkreis erfolgt, und somit keinen Antrieb benötigt. Bei einem Konverter kann die Spannung konstant gehalten bzw. nach Bedarf durch den Regler variiert werden.

(b) Momentanreserve: Bei der Synchronmaschine reagiert das Rotorsystem auf die veränderte Phasenlage der Spannung am Anschlusspunkt und liefert einen Beitrag zur Wirkleistung aus seiner kinetischen Energie. Die spontane Bereitstellung funktioniert auch ohne Antrieb. Allerdings bleibt die Anlage ohne Antrieb dauerhaft im Motorbetrieb und wird vom Netz mitgezogen. Im Arbeitspunkt befindet sich die Maschine im Leerlauf. Bei einem Konverter lässt sich ebenfalls der Bedarf an Wirkleistung aus der Änderung des Phasenwinkels der Spannung am Anschlusspunkt in Bezug auf die Umrichterspannung feststellen. Soll der Konverter ähnlich reagieren wie eine reale Maschine, kann ein Rotorsystem emuliert werden. Dieses Verfahren wird mit dem Begriff „virtuelle Schwungmasse“ bezeichnet, wobei nur die Regelung virtuell ist, der benötigte physikalischer Energiespeicher bleibt real.

(3) Verhalten in den Szenarien Δu und Δi : (a) Δu : Bereitstellung von Blindstrom zur Stabilisierung der Spannung am Anschlusspunkt genau wie bei der Synchronmaschine in Abschnitt 4.1. Ebenso kann dauerhaft Blindleistung nach Vorgabe bereit gestellt werden.

(b) Δi : Die Anlage liefert Momentanreserve wie eine Synchronmaschine in Abschnitt 4.1, jedoch nur zum Arbeitspunkt $P = 0$. Das Netz muss die geforderte Wirkleistung dauerhaft komplett erbringen. Ein Betrag zur Momentanreserve sollte unabhängig von der Bereitstellung von Blindleistung erfolgen.

Frage 4.2.2: Aufbau des Rotorsystems. Vergleichen Sie das in folgender Abbildung gezeigte Rotorsystem mit dem der Synchronmaschine in Abschnitt 3.4. Erläutern Sie die Funktionsweise.



Lösung: Der Spannungssteller einschließlich der Blindleistungsregelung bleiben unverändert. Auch beim Phasenschieber erfolgt die Änderung der Spannung über den Erregerstrom I_E , der daher auch in das Rotorsystem koppelt. In einer virtuellen Maschine kann die Vorgabe des normierten Erregerstroms als emulierte Größe ebenfalls zur Vorgabe der Spannung dienen.

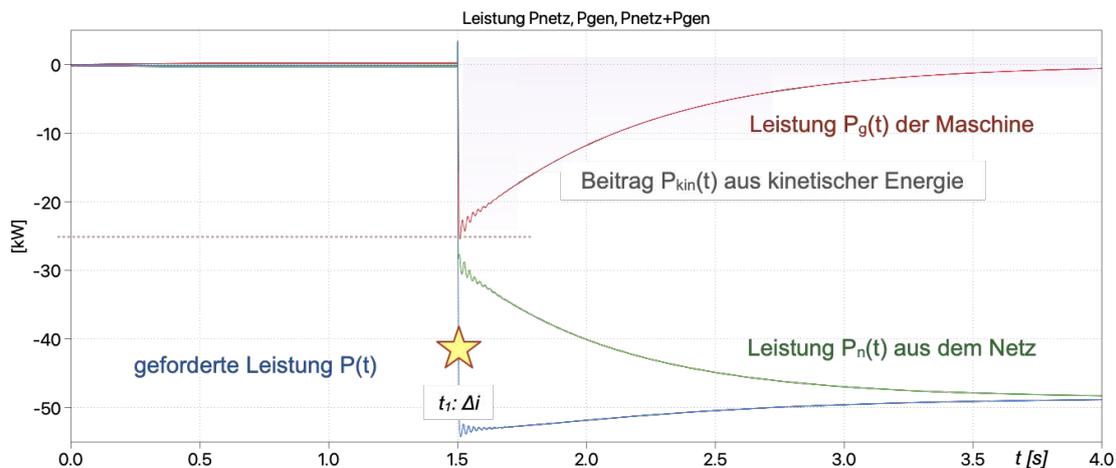
Das Rotorsystem vereinfacht sich deutlich, da der Antrieb komplett entfällt. Somit entfällt auch die Sollwertvorgabe für die Wirkleistung und die Statik $P(f)$. Es verbleibt nur die träge Masse bzw. in der virtuellen Maschine deren Emulation. Das Rotorsystem speichert den Phasenwinkel der induzierten Spannung (bzw. Umrichterspannung) gegenüber der Spannung am Anschlusspunkt. Stellgröße der Umrichterspannung für die Wirkleistung in der virtuellen Maschine ist der Phasenwinkel des Rotorsystems im Bezug auf die Spannung am Anschlusspunkt, die sich nach Realteil und Imaginärteil für eine Vorgabe im Bezugssystem des Stators zerlegen lässt. Im Bezugssystem des Rotors bleibt der Imaginärteil der induzierten Spannung $U_{ac,q_soll} = \text{Null}$. In diesem Bezugssystem ist die Regelung des Realteils $U_{ac,d}$ der induzierten Spannung daher identisch mit der Regelung der Spannungsamplitude.

Frage 4.2.3: Bereitstellung von Momentanreserve. Untersuchen Sie die Bereitstellung von Momentanreserve in der Simulation.

Lösungsbeispiel: Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf. Zum Zeitpunkt t_1 wurde der doppelte Nennstrom von der Last gefordert. Kurzfristig kann die halbe Leistung aus der Momentanreserve bereit gestellt werden. Die Anlage leistet somit ihren solidarischen Beitrag zur Stabilität des Netzes.

Dauerhaft ist eine Bereitstellung von Wirkleistung nicht möglich. Der Energiespeicher besitzt im Beispiel eine Trägheit von $H = 2$ s, wäre bei voller Leistung also nach 2 s erschöpft. Der erforderliche An-

schlusswert des Speichers liegt im Bereich der Nennleistung P_n . Somit wäre ein Speicher der Größe von $P_n \cdot 2 \text{ s}$ erforderlich.



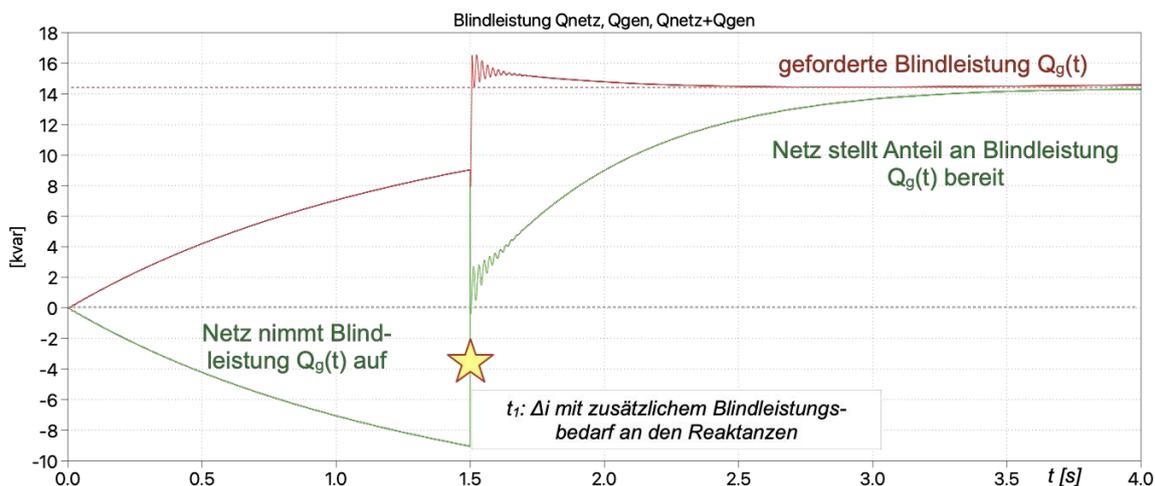
Der reale oder virtuelle Rotor des Systems wird schließlich im Leerlauf vom Netz mitgezogen. Das Netz übernimmt die komplette geforderte Wirkleistung.

Frage 4.2.4: Bereitstellung von Blindleistung. Untersuchen Sie die Bereitstellung von Blindleistung in der Simulation.

Lösungsbeispiel: Zur Bereitstellung von Blindleistung wurden folgende Szenarien untersucht:

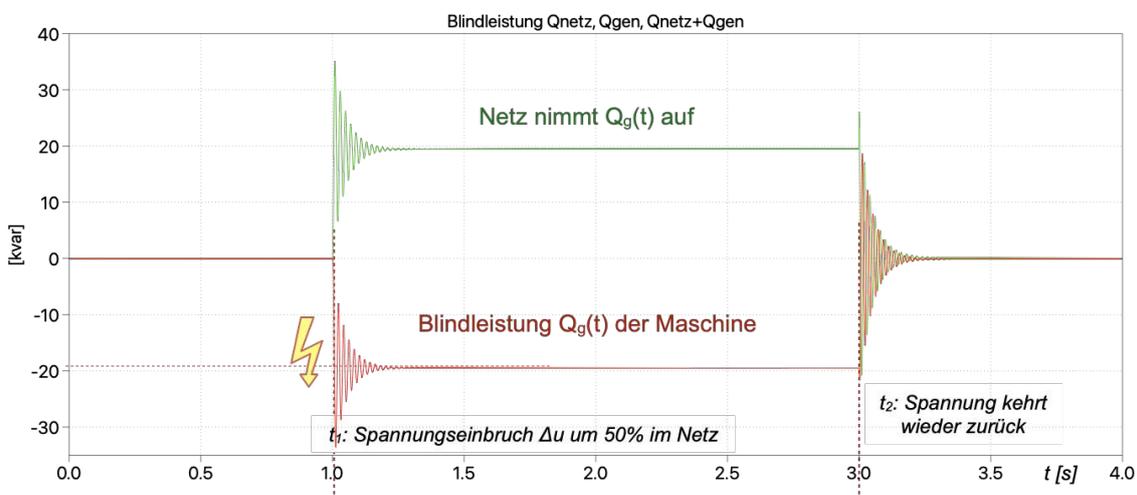
- (1) Sollwert für Q während des Lastsprungs Δi aus Frage 4.2.3,
- (2) Blindleistung zur Netzstützung nach Spannungseinbruch Δu um 50%.

Folgende Abbildung zeigt den Simulationslauf für Fall (1).



Der Lastsprung tritt auf, während die Anlage noch auf den Sollwert von $Q_{\text{soll}} = P_n/2$ hochfährt (Werte und Vorgaben wie in der Abbildung zu 4.2.1). Die Anlage erreicht schließlich den vorgegebenen Wert. Mit dem Lastsprung ergibt sich ein Blindleistungsbedarf für die Reaktanzen von Netz und Anlage. Mit der Vorgabe leisten Netz und Anlage gleiche Beiträge zur Blindleistung.

Für Fall (2) wurde die Q-Regelung deaktiviert, damit die Anlage keinen vorgegebenen Sollwert anfährt. Zum Zeitpunkt t_1 tritt im Netz ein Spannungseinbruch um 50% ein. Die Anlage liefert sofort einen Blindstrom, der die Spannung am Anschlagpunkt auf einen Wert von ca. 75% anhebt.

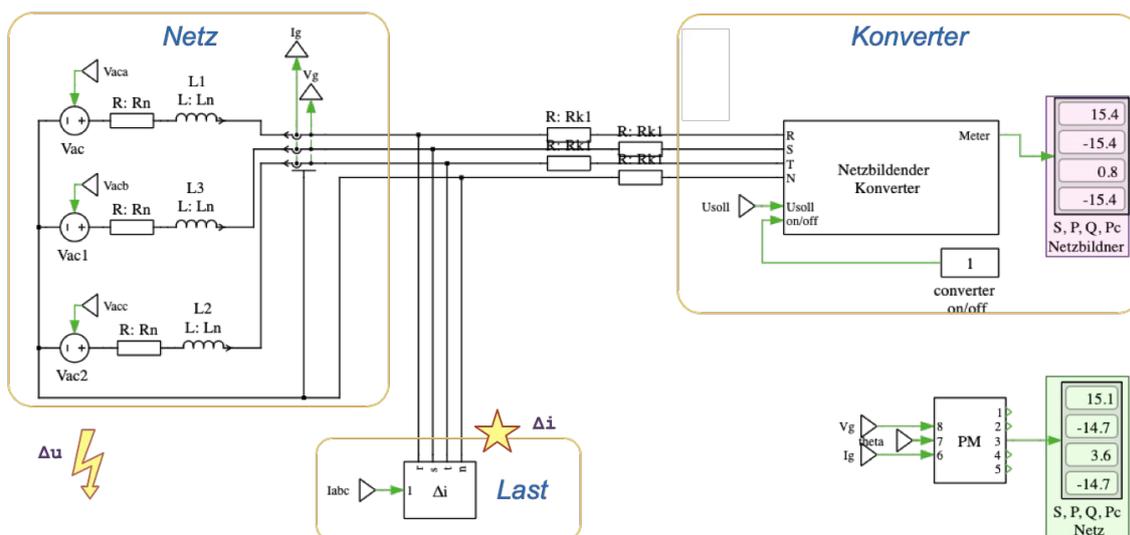


Das Netz kann hier keinen Beitrag leisten, da das Netz die Fehlerursache ist und folglich die von der Anlage bereitgestellte Blindleistung konsumiert. Sobald die Spannung nach Fehlerklärung wiederkehrt, kehrt die Anlage in den ursprünglichen Zustand zurück.

In beiden Fällen ist das Verhalten der Anlage identisch mit dem der Synchronmaschine in Abschnitt 4.1. Das war zu erwarten, da die Bereitstellung von Blindleistung mit Hilfe der Spannungsamplitude erfolgt und hierfür keine Wirkleistung benötigt wird.

4.3. Netzbildender Umrichter

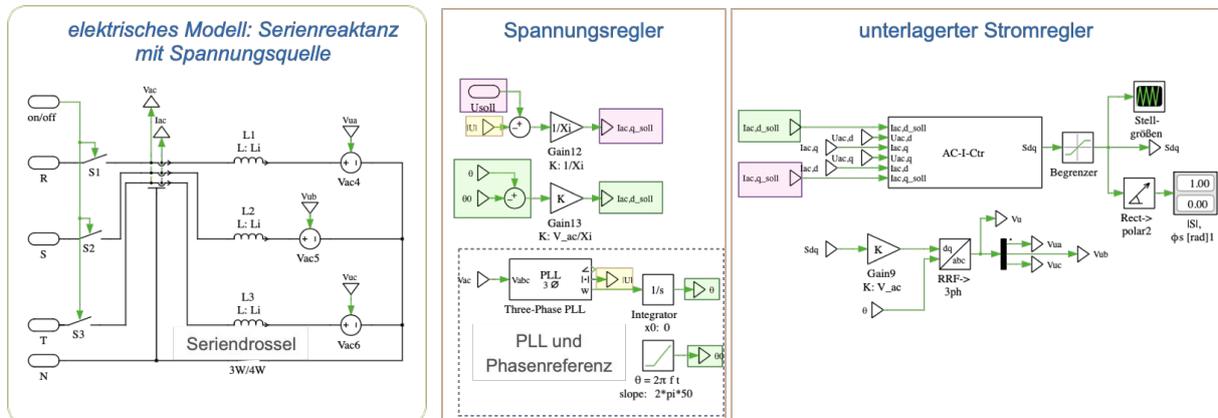
In diesem Abschnitt soll ein netzbildender Umrichter anstelle des Generators eingesetzt werden.



Die Anordnung bleibt unverändert: Der Konverter ist an ein starres Netz angeschlossen. Untersucht werden die beiden Fälle Spannungseinbruch $\Delta u(t)$ im Netz und Lastsprung $\Delta i(t)$.

Frage 4.3.1: Funktionsprinzip des Reglers. Folgende Abbildung zeigt den Konverter zusammen mit dem Regler. Der Konverter wird elektrisch durch eine Spannungsquelle abgebildet, die über

eine Seriendrossel an das Netz angeschlossen ist. Das Ersatzschaltbild und die Funktionsweise ist identisch mit dem einer Synchronmaschine. Welches Regelziel verfolgt der Spannungsregler? Wie soll der Regler auf die Fälle $\Delta u(t)$ und $\Delta i(t)$ reagieren? Auf welche Eingangsgrößen reagiert die Regelung?



Lösung: (1) Regelziel: Spannung konstant halten.

(2a) Reaktion auf Spannungseinbruch $\Delta u(t)$ im Netz: Bereitstellung von Blindstrom. Da die Netzimpedanz reaktiv ist, verändert der Blindstrom durch die Netzreaktanz die Amplitude der Spannung am Anschlusspunkt.

(2b) Reaktion Lastsprung $\Delta i(t)$: Bereitstellung von Wirkstrom. Bei einer Forderung nach Leistung soll sich der Konverter anteilig and deren Bereitstellung beteiligen. Bei einem Lastabwurf muss die bereitgestellte Leistung reduziert werden. Bemerkung: Der Konverter kann auch einen Leistungsüberschuss im Netz aufnehmen und diesen an die DC-Seite weitergeben.

(3) Eingangsgrößen: Der Konverter reagiert auf die Messung der Spannung am Anschlusspunkt.

(3a) Ein Einbruch der Spannungsamplitude signalisiert einen Bedarf nach Blindstrom.

(3b) Ein Lastsprung bedeutet einen Wirkstrom, der an der Netzimpedanz die Phase der Spannung verschiebt. Diese Phasenverschiebung dient als Indikator für die Bereitstellung von Wirkstrom durch den Konverter. Das Vorzeichen der Phasenverschiebung kennzeichnet die Lastflussrichtung.

Frage 4.3.2: Aufbau des Spannungsreglers. Erläutern Sie die Funktionsweise des Spannungsreglers. Welche Sollwerte sind vorgegeben? Wie werden die Istwerte ermittelt? Welche Vorgaben an den Stromregler werden hieraus gewonnen? Hinweis: Betrachten Sie Amplitude und Phase der Spannung.

Lösung: (1) Sollwerte: Spannungsamplitude $|U| = U_{soll}$ und Spannungswinkel $\theta_{u0} = 0$. Die Vorgabe des Nullphasenwinkels der Spannung $\theta_{u0} = 0$ ist ohne Einschränkungen der Allgemeinheit; Jeder andere Nullphasenwinkel des Bezugssystems wäre ebenfalls möglich.

(2) Durch Messung der Spannung am Anschlusspunkt. Ein PLL (Phase-Locked-Loop) ermittelt aus den Zeitsignalen Betrag und Frequenz der Spannung am Anschlusspunkt. Der Phasenwinkel $\theta(t)$ wird durch Integration der Winkelgeschwindigkeit $\omega(t)$ mit $\theta_{u0} = 0$ gewonnen.

Ermittlung von Veränderungen der Phasenlage der Spannung am Anschlusspunkt: Um Veränderungen der Phasenlage $\theta(t)$ festzustellen, ist eine Phasenreferenz $\theta_0(t)$ erforderlich. Im Modell wird diese durch ein System $\theta_0(t) = 2\pi \cdot f_n \cdot t$ erzeugt. Bei der Synchronmaschine liefert die Drehzahl des Rotors die Phasendifferenz. Wegen der Trägheit der Maschine bleibt dieses System erhalten, eine Veränderung der Phasenlage im Statorsystem führt sofort zu Änderungen des Polradwinkels.

Bemerkung: Die Phasenreferenz $\theta_0(t) = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t$ im Modell ist in der Praxis wegen der schwankenden Netzfrequenz f_n nicht praktikabel. Eine mögliche Realisierung wäre ein virtuelles Rotorsystem, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben. Eine Phasenreferenz lässt sich jedoch auch mit Methoden der Signalverarbeitung gewinnen: es muss hierzu nur ein Gedächtnis für die Phasenlage vorhanden sein, das mit der aktuellen Phase verglichen werden kann.

(3) Vorgaben an den Stromregler:

(3a) Blindstrom: Änderungen der Spannungsamplitude $U_{\text{soll}} - |U|$ lassen sich mit Hilfe der Reaktanz X_i der Seriendrossel des Konverters in eine Stromvorgabe übersetzen. Ein solcher Blindstrom sollte die Spannung am Anschlusspunkt anteilig anheben. Beträgt die Netzimpedanz ebenfalls X_i , sollte sich die Spannung am Anschlusspunkt durch den Blindstrom des Konverters um 50% verbessern. Bemerkung: In der Simulation werden Scheitelwerte verwendet. U_{soll} wird daher als Scheitelwert der AC-Spannung V_{ac} vorgegeben, der PLL ermittelt den Scheitelwert $|U|$ der Spannung.

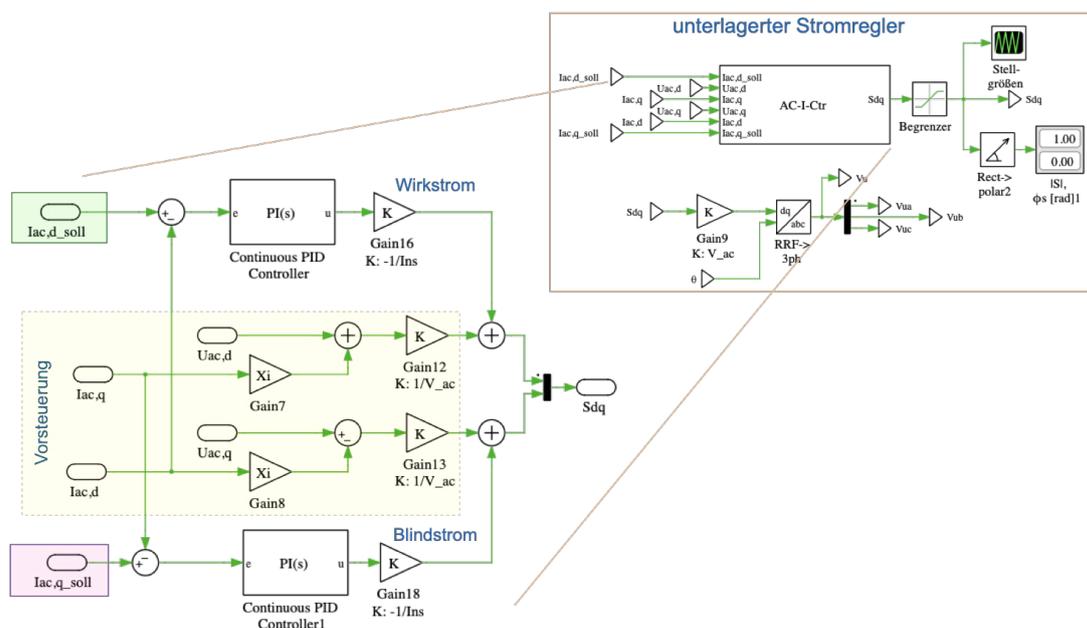
(b) Wirkstrom: Die Phasendifferenz $\theta(t) - \theta_0(t) = \delta(t)$ entspricht dem Polradwinkel einer Synchronmaschine. Dieser Polradwinkel hat nichts mit den mechanischen Eigenschaften der Maschine zu tun und ergibt sich rein aus dem elektrischen Ersatzschaltbild. Daher gelten die diesbezüglichen Beziehungen auch für den Konverter. Aus der Maschengleichung bzw. dem Zeigerdiagramm der elektrischen Beziehungen (siehe Vorlesungsmanuskript) ermittelt man die Gleichung:

$$P_2 = U_2 I \cos(\phi) = \frac{U_2^2}{X} \sin(\delta) \tag{4.3.1}$$

Bei Division durch die Kreisfrequenz erhält man hieraus die Beziehung für die Momentenkennlinie der Maschine, einschließlich Kippmoment bei $\sin(\delta) = 1$. Diese Kennlinie ist eine rein elektrische Eigenschaft und gilt auch für die Leistung des Konverters (maximale Leistung bei $\sin(\delta) = 1$).

In der Gleichung repräsentiert $I \cos(\phi) = I_d$ den Wirkstrom. Auflösung des rechten Teils nach dem Wirkstrom ergibt $I_{d,\text{soll}} = U_2/X$. Für den Konverter ist $X = X_i$, für die Spannung wurde der Scheitelwert der AC-Spannung V_{ac} verwendet, da der Strom I_d in der Simulation als Scheitelwert vorgegeben wird.

Frage 4.3.3: Unterlagertes Stromregler. Folgende Abbildung zeigt den unterlagerten Stromregler. Erläutern Sie die Funktionsweise einschließlich der Vorsteuerung.



Lösung: (1) Vorsteuerung: Bildet die Maschengleichung der elektrischen Schaltung ab:

$$\underline{U}_{Umrichter} = \underline{U}_{Anschlusspunkt} - jX_i I \quad (4.3.2)$$

Aufgelöst nach Realteil und Imaginärteil ergibt sich der Signalfluss der Vorsteuerung als Vorgaben für die Stellgrößen: den Realteil U_d und Imaginärteil U_q der Umrichterspannung.

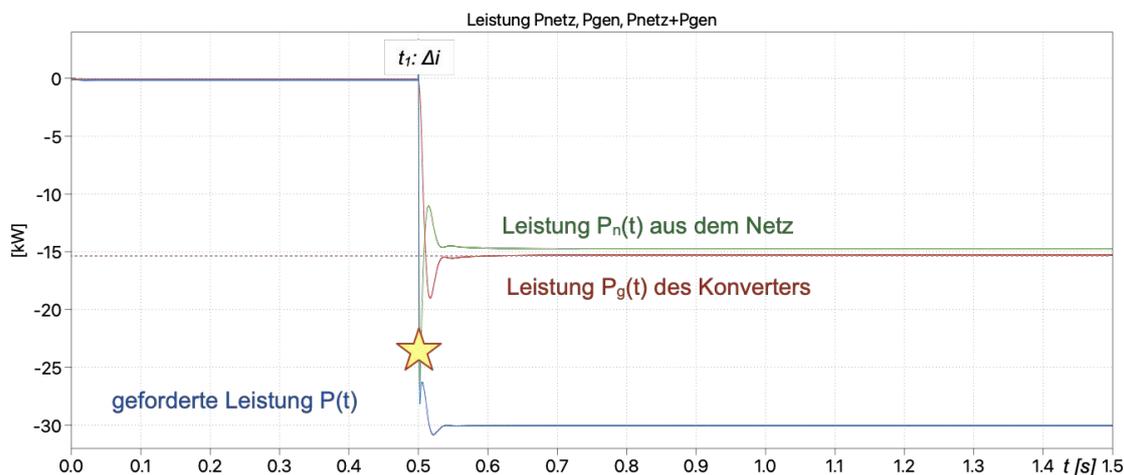
(2) Regler: Die Maschengleichung = Vorsteuerung lässt keine weitere Spannungsbeiträge mehr zu. Die Regler für Wirkstrom und Blindstrom müssen somit die zusätzlichen Beiträge zu den Stellgrößen auf Null ausregeln: Sie sind daher als PI-Regler ausgeführt. Die Regler dienen nur dazu, die Schaltung mit Hilfe der Vorsteuerung in einen passenden Arbeitspunkt zu führen und dort zu halten.

Der Wirkstrom verläuft in Phase zum Realteil der Umrichterspannung U_d , der Blindstrom in Phase zum Imaginärteil U_q . Alle Stellgrößen sind in normierter Form ausgeführt und werden bei der Transformation in den Zeitbereich auf die Spannungsamplitude V_{ac} skaliert..

Frage 4.3.4: Simulation.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildungen.

(1) Für den Lastsprung $\Delta i(t)$ wurde zum Zeitpunkt t_1 der Nennstrom der Anlage gefordert.

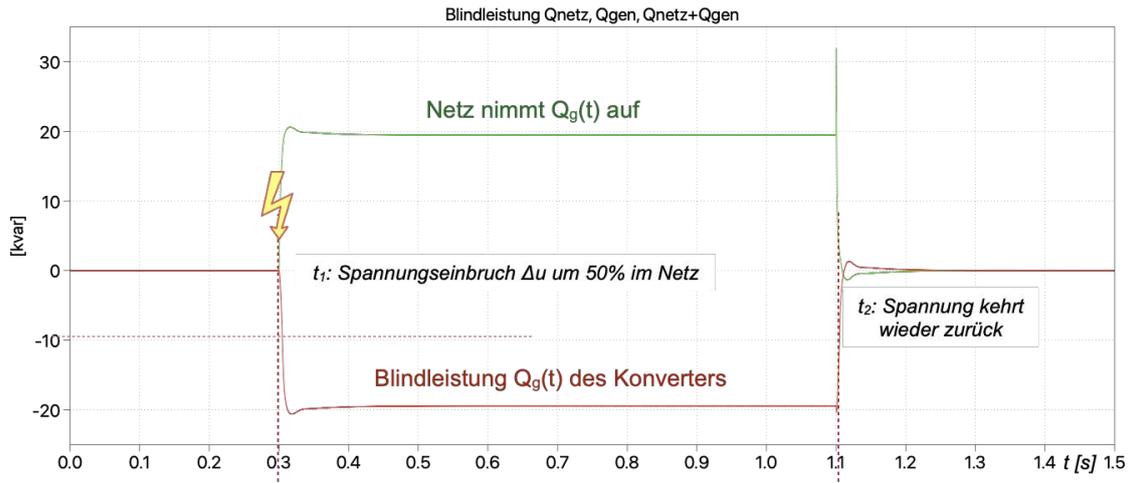


Man erkennt, dass die Anlage die geforderte Leistung sofort bereitstellt und dauerhaft einen anteiligen Beitrag zur Leistung liefert. Einer besonderen Unterscheidung nach Momentanreserve und dauerhafte Leistung bedarf es hier nicht. Allerdings muss der DC-Kreis mit einer passenden Leistungsquelle ausgestattet werden (hier: sofortige Bereitstellung der Anschlussleistung).

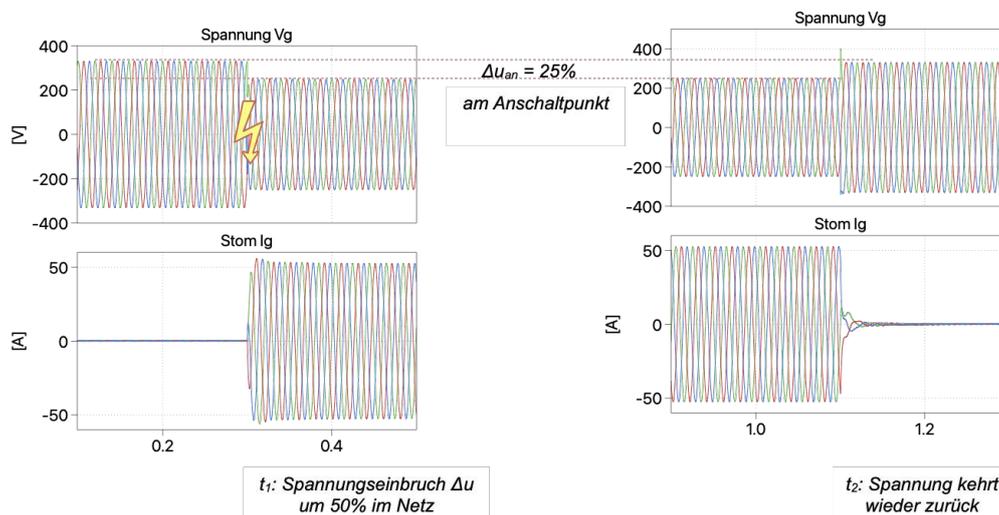
Leistungsbeiträge über die Anschlussleistung hinaus, bzw. eine zeitlich befristete Lieferung von Wirkleistung als Nachbildung einer Momentanreserve lassen sich mit Hilfe einer passenden Signalverarbeitung realisieren.

Mangels bewegter Teile reagiert der Konverter sofort. Physikalische Grenzen sind durch die Ströme und die Ausführung des DC-Kreises mit passenden Energiespeichern und Energiequellen gesetzt.

(2) Für den Spannungseinbruch $\Delta u(t)$ zum Zeitpunkt t_1 und die Wiederkehr der Netzspannung zum Zeitpunkt t_2 zeigt die Anlage das in den folgenden Abbildungen dargestellte Verhalten.



Die Anlage stellt unmittelbar Blindleistung zur Verfügung, die das Netz aufnimmt. Bei Wiederkehr der Netzspannung wird die Blindleistung sofort zurückgenommen.



Mit der gewählten Einstellung und den Impedanzverhältnissen der Serienreaktanz des Konverters und der Netzreaktanz verbessert sich die Spannung am Anschlusspunkt auf 75% bei einem Spannungseinbruch im Netz um 50%. Der Blindstrom ist in der Größenordnung des Nennstroms der Anlage.

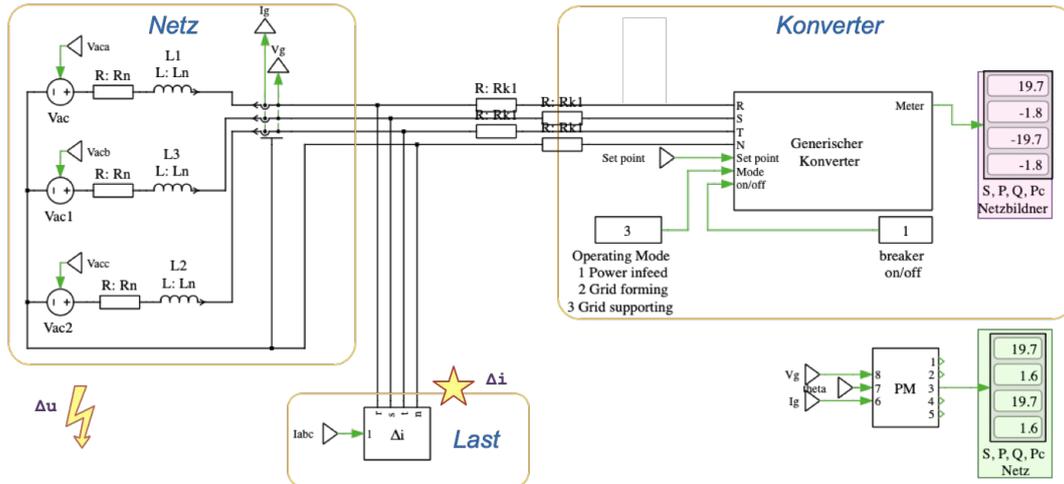
4.4. Generische Regelung

Für einen generischen Konverter lassen sich die Betriebsarten kombinieren und umschalten. Unterstützt werden sollen:

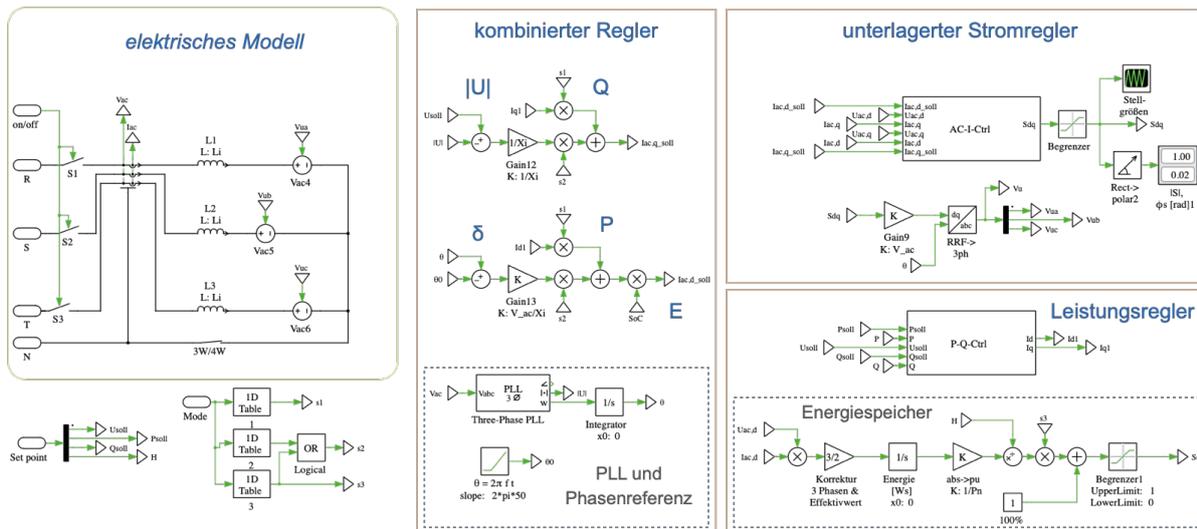
- Einspeisebetrieb
- netzbildender Betrieb
- netzbildender Betrieb mit begrenzter Energie (netzstützender Betrieb, Phasenschieber).

Für die ersten beiden Betriebsarten tauscht der Konverter Wirkleistung mit dem DC-Kreis aus. Bei der letzten Betriebsart sollen Blindleistung und Momentanreserve bereit gestellt werden, letztere als Wirkleistung für eine begrenzte Zeit im Rahmen der Speicherkapazität des DC-Kreises.

Wie folgende Abbildung zeigt, ist das Szenario gleich: Es lassen sich Spannungseinbrüche im Netz und Lastsprünge simulieren. Je nach Betriebsart reagiert der Konverter unterschiedlich.



Frage 4.4.1: Kombinierte Regelung. Folgende Abbildung zeigt den kombinierten Regler, bei dem die Sollwerte wahlweise aus der Spannung am Anschlusspunkt (Betrag und Phase) oder aus der Leistungsvorgabe (Wirkleistung und Blindleistung) abgeleitet werden. Erläutern Sie das Funktionsprinzip der Regelung und die erwartete Wirkung.



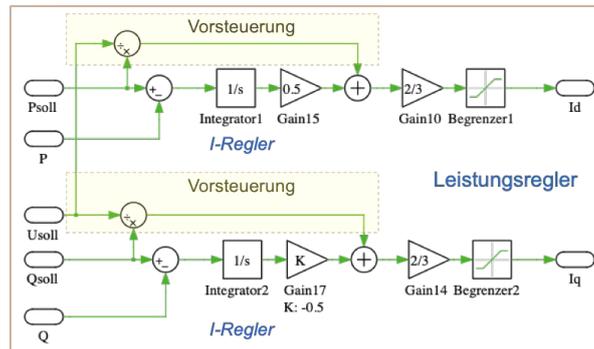
Lösung: Über die Wahl der Betriebsart (operating mode) wird zwischen Spannungsregelung $\{U\}$ und Leistungsregelung $\{P, Q\}$ ausgewählt. Die Vorgaben sind Alternativen und nicht gleichzeitig gültig.

Bei einer Überlagerung der Betriebsarten $\{P, Q\}$ und $\{U\}$ im gleichzeitigen Betrieb würde die Leistungsregelung dominieren: Bei einem Spannungseinbruch bleibt das System auf der eingestellten Blindleistung (wie auch die Synchronmaschine). Bei der Leistungsregelung gibt es mangels Trägheit keinen Zeitverzug bis zur Aktivierung der Wirkleistung aus dem Antrieb, und folglich auch keine Unterscheidung zwischen Momentanreserve und Antriebsleistung.

Die Abbildung beider Betriebsarten ist möglich wegen der unterlagerten Stromregelung: Sowohl Leistungsvorgaben als auch Spannungsvorgaben werden in Vorgaben für den Strom übersetzt.

Eine Betriebsart vergleichbar mit dem Phasenschieberbetrieb bzw. einer virtuellen Maschine lässt sich aber mit Hilfe einer begrenzten Energiereserve im DC-Kreis realisieren als Spezialfall der Spannungsregelung (netzstützender Betrieb). Hierzu wird die Stromvorgabe gemäß des Füllstandes des Energiespeichers (SoC für state of charge) gedrosselt.

Frage 4.4.2: Leistungsregler. Erläutern sie die Funktionsweise des Leistungsreglers.



Lösung: (1) Über die Vorsteuerung wird ein Arbeitspunkt $I_d = P/U$ und $I_q = Q/U$ angefahren (korrigiert um 3 Phasen und Effektivwerte statt Scheitelwerte mit Hilfe des Faktors $2/3$).

(2) Der Regler arbeitet als I-Regler, da den P-Anteil bereits die Vorsteuerung übernimmt.

Frage 4.4.3: Spannungsregler. Erläutern Sie die Funktionsweise des Spannungsreglers im kombinierten Regler.

Lösung: Der Spannungsregler arbeitet wie in Abschnitt 4.3. Die Sollwerte für den Spannungsbetrag $|U|$ und den Spannungswinkel δ zwischen Umrichterspannung und Spannung am Anschlusspunkt werden aus einem PLL-Kreis ermittelt, der Winkel außerdem mit Hilfe einer Phasenreferenz.

Der Anteil des Spannungsregler im kombinierten Regler ein P-Regler, der seine Parameter wie eine Vorsteuerung aus den Parametern der physikalischen Schaltung bezieht (Koppelreaktanz X_i und Spannungsamplitude V_{ac}). Die so ermittelten Vorgaben für den Strom regelt der unterlagerte Stromregler. Da dieser mit Hilfe seines I-Reglers ausregelt, sind realistische Vorgaben für den Strom entscheidend.

Frage 4.4.4: Netzstützender Betrieb. Untersuchen Sie die Funktionsweise der Betriebsart in der Simulation. Welches Verhalten wird von der Anlage erwartet? Welche Energiemenge wird benötigt?

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.

(1) Stimulus. Die Simulation startet im Leerlauf mit der Netzspannung. Zum Zeitpunkt t_1 erfolgt ein Einbruch der Netzspannung um $\Delta u = 50\%$, der nach einer Zeit geklärt wird. Zum Zeitpunkt t_3 erfolgt ein Lastsprung Δi in Höhe des Nennstroms des Konverters über eine vorgegebene Dauer. Anschließend kehrt das Modell wieder in den Leerlauf zurück.

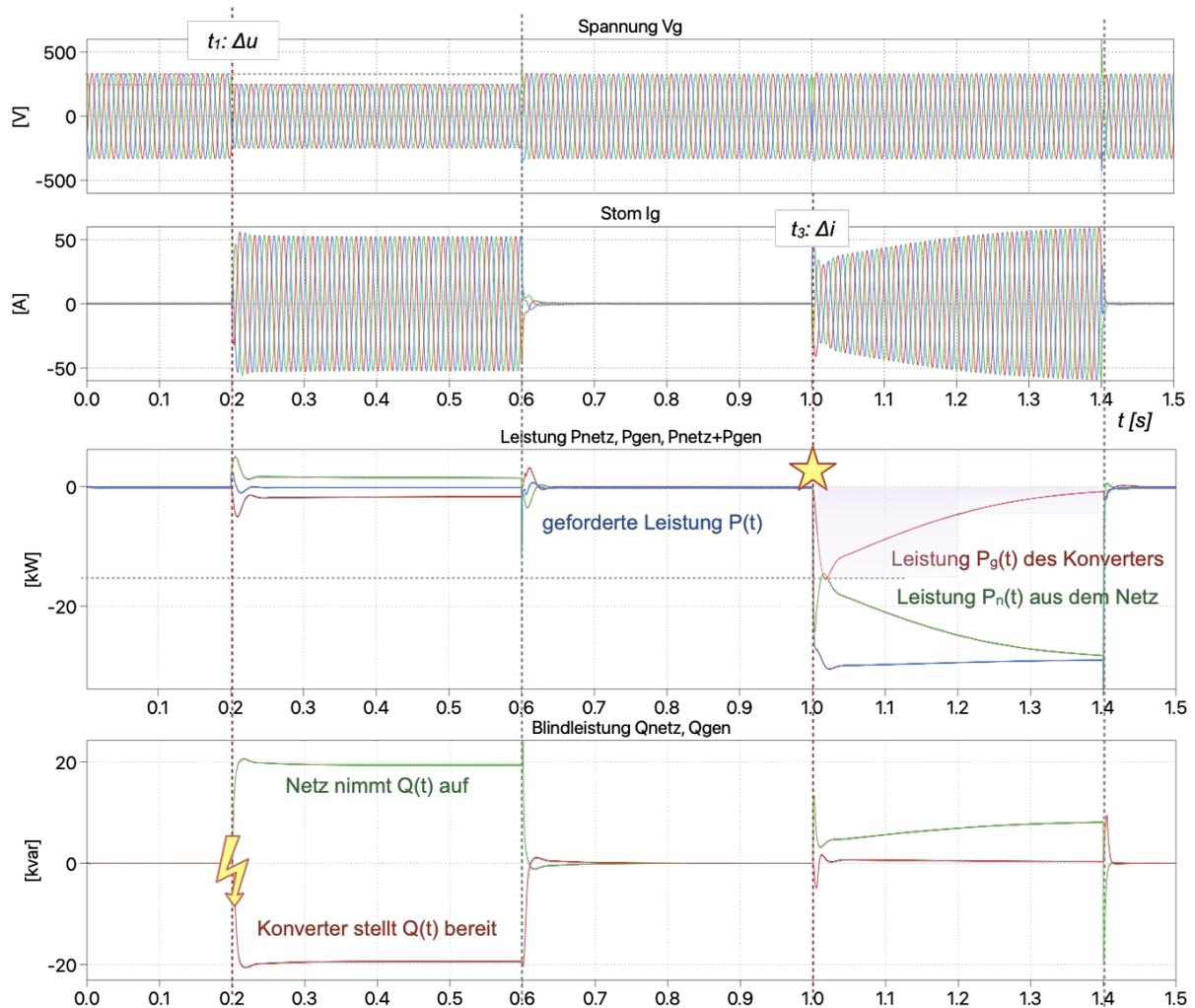
(2) Erwartetes Verhalten: (a) Stützung der Netzspannung am Anschlusspunkt beim Spannungsereignis Δu ; (b) spontane, befristete Bereitstellung von Wirkleistung (Momentanreserve) beim Stromereignis Δi .

(3) Verhalten der Anlage:

(a) Bei deaktivierter Regelung der Blindleistung stellt die Anlage spontan einen Blindstrom bereit in Höhe von $I_q = \Delta u/X_i$. Hiermit wird die Spannung um den anteiligen Anteil der Koppelreaktanz X_i des Konverters an der Gesamtreaktanz $X_i/(X_{Netz} + X_i)$ am Anschlusspunkt angehoben, hier also auf 75% der Nennspannung für einen Spannungseinbruch im Netz von 50%.

Bei gleichzeitig aktivierter Regelung der Blindleistung würde die Blindleistungsvorgabe die Spannungsregelung dominieren, d.h. die Anlage bliebe beim Sollwert von Q .

(b) Bei einem Lastsprung wird spontan Wirkleistung bereit gestellt. Auch hier erfolgt eine anteilige Beteiligung gemäß der Reaktanzen von Anlage und Netz durch die Wahl des Verstärkungsfaktors V_{ac}/X_i im kombinierten Regler.



Die Bereitstellung der Leistung erfolgt aus einem virtuellen Energiespeicher der Höhe $E_n = P_n \cdot H$. Die Energiemenge wird mit Hilfe der Trägheit H vorgegeben. Für eine Trägheit von $H = 1$ s und einer Anschlussleistung P_n beträgt die Energiemenge $E = P_n \cdot 1$ s in der Einheit Wattsekunden.

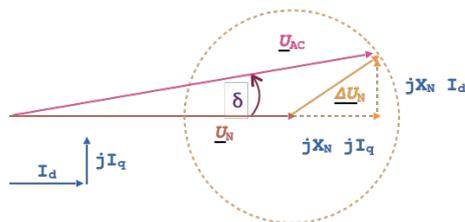
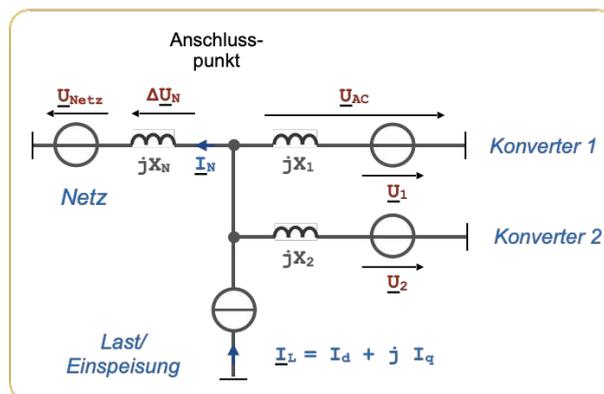
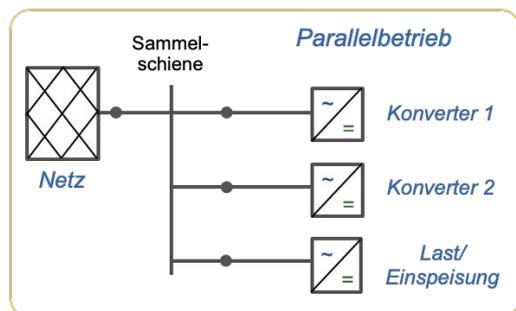
Durch Integration des Wirkstroms wird dem Speicher Energie entnommen: $\Delta E(t) = 3 U_n \int I_d(\tau) d\tau$. Der Füllstand des Energiespeichers $SoC = (E_n - \Delta E(t))/E_n$ wird im kombinierten Regler zur Drosselung der Vorgabe I_{ac,d_soll} für den Wirkstrom verwendet.

Bei einer reaktiven Ausführung des Konverters (als STACOM mit Energiereserve im DC-Zwischenkreis) würde der Energiespeicher dann wieder aus dem Netz nachgefüllt. Das Verhalten einer solchen Anlage entspricht dem einer Synchronmaschine im Phasenschieberbetrieb.

5. Betriebsfälle

5.1. Parallelbetrieb von Anlagen

Als Anlagen sollen zwei Konverter parallel an einem Netz und einer Last bzw. Einspeisung betrieben werden. Der Betrieb der Konverter als Stromquellen, d.h. im Einspeisebetrieb oder Lastbetrieb, ist nicht kritisch: Stromquellen lassen sich beliebig parallelisieren, die Ströme am Anschlusspunkt addieren sich. Werden die beiden Anlagen spannungsgeführt betrieben, sind insgesamt 3 parallele Spannungsquellen in Betrieb, wie in folgender Abbildung dargestellt.



Das Netz ist hierbei reaktiv, bedingt durch die Transformatoren im Stromweg. Die Konverter sind als geregelte Spannungsquellen mit Serienreaktanz nachgebildet. Ströme durch die Last bzw. Einspeisung verursachen Änderungen der Spannung U_{AC} am Anschlusspunkt. Die Konverter messen diese Spannung und verwenden sie für die Regelung.

Frage 5.1.1: Auswirkung von Lastströmen. Wie ändert sich die Spannung U_{AC} am Anschlusspunkt, wenn (a) ein Wirkstrom I_d an der Last gezogen wird, (b) ein Blindstrom I_d an der Last gezogen wird? Welche Anteile zum Strom liefern die 3 Spannungsquellen?

Lösung: Betrachtet man nur Netz und Last bzw. Einspeisung, so bewirkt ein Wirkstrom eine Änderung der Phasenlage der Netzspannung, ein Blindstrom eine Änderung der Spannungsamplitude. Diese Änderungen lassen sich am Anschlusspunkt der Konverter messen und für die Regelung verwenden.

Betrachtet man alle 3 Spannungsquellen, so ergibt sich im Leerlauf ($I_L = 0$) ein Gleichgewicht nur dann, wenn alle Quellspannungen übereinstimmen ($U_N = U_1 = U_2$). Andernfalls ergeben sich Kreisströme, die sich dem Laststrom I_L überlagern.

Vom Laststrom aus betrachtet verhalten sich die Beiträge der 3 Abgänge (wegen $U_{AC} = \text{konstant}$) wie die Verhältnisse der Impedanzen:

$$I_N X_N = I_1 X_1 = I_2 X_3 \quad (5.1.1)$$

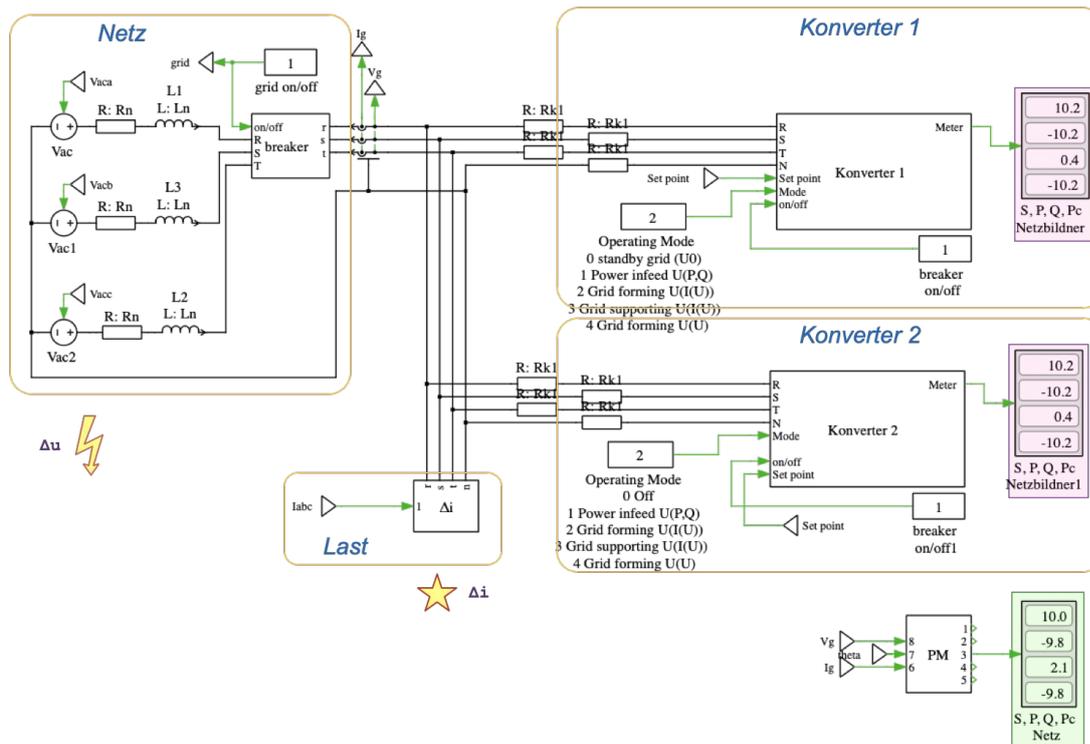
$$I_L = I_N + I_1 + I_2 \quad (5.1.2)$$

Hieraus folgt:
$$I_L = I_N (1 + X_N/X_1 + X_N/X_2) \quad (5.1.3)$$

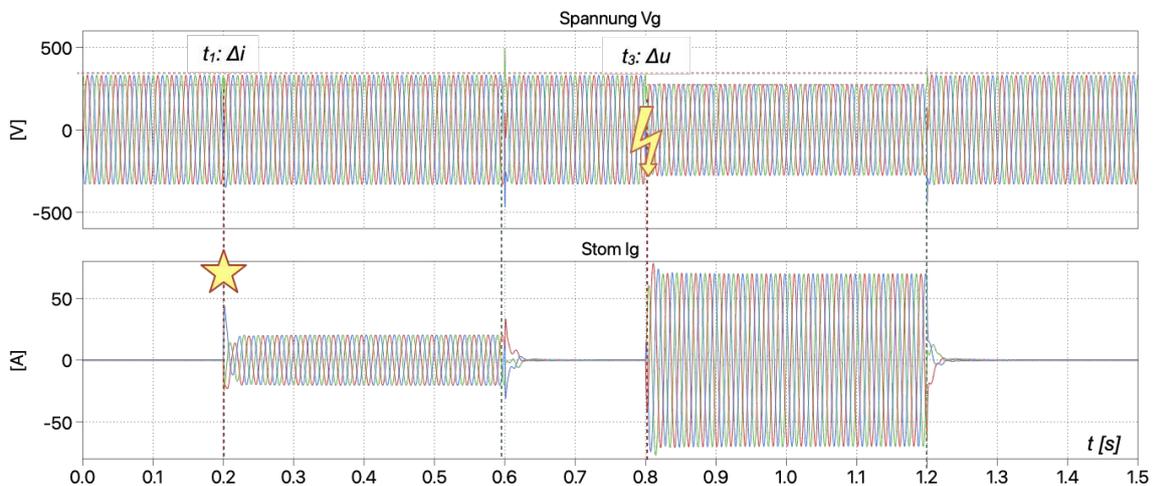
Unter der Annahme, dass $X_N = X_1 = X_2$ leistet jeder Abgang einen Beitrag von $1/3$ des Laststroms.

Für Wirkströme gilt hierbei, dass sich der Spannungswinkel δ des Netzes reduziert, da sich der Beitrag des Netzes zum Wirkstrom verringert (ebenso in den beteiligten Abgängen). Für Blindströme gilt, dass sich die Spannungsamplitude U_{AC} wegen der geringeren individuellen Ströme verbessert.

Frage 5.1.2: Simulation des Szenarios. Untersuchen Sie den spannungsgeführter Betrieb mit unterlagerter Stromregelung aus Abschnitt 4 mit dem in folgender Abbildung dargestellten Szenario. Welche Sollwerte sind vorgegeben? Wie reagiert die Anordnung auf einen Lastsprung und einen Spannungseinbruch im Netz?



Lösungsbeispiel: Mit Hilfe der Betriebsart „2“ wird der spannungsgeführte Betrieb mit unterlagerter Stromregelung ausgewählt. Die Kurzform $U(I(U))$ soll darauf hindeuten, dass die Stellgröße die Umrichterspannung ist (U vor der äußeren Klammer), diese über den Strom geführt wird, und dieser sich nach der am Anschlusspunkt gemessenen Spannung richtet (U in der inneren Klammer).



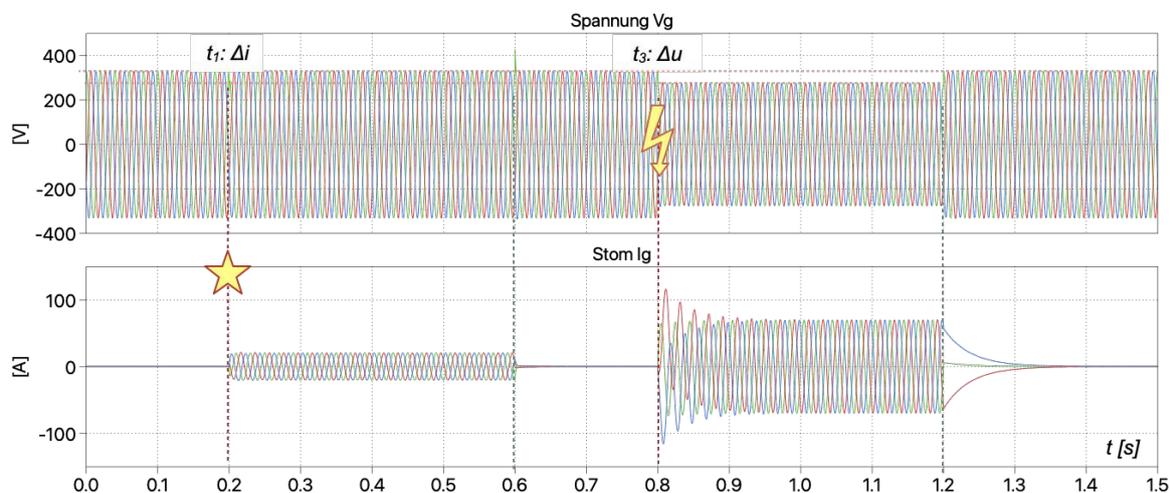
Auf den Lastsprung reagieren nun beide Konverter: Sie beteiligen sich anteilig gemäß Ihrer Anschlussreaktanzen. Da diese gleich sind, teilen sich Netz und Konverter die geforderte Wirkleistung zu gleichen Teilen auf. Der im zeitlichen Verlauf dargestellte Strom am Netzanschlusspunkt fällt als Anteil des Netzes daher geringer aus.

Auf den Spannungseinbruch im Netz reagieren ebenfalls beide Konverter und beteiligen sich zu gleichen Anteilen mit Blindstrom. Hierdurch wird die Spannung gegenüber einem Einbruch auf 50% auf 75% angehoben. Der zeitlichen Verlauf dargestellte Blindstrom ist die Summe der Beiträge der Konverter.

Für die anteilige Beteiligung der Konverter waren keine weiteren Anpassungen der Regelung gegenüber Abschnitt 4 erforderlich. Die Beiträge richten sich nach den physikalischen Eigenschaften der Anschlüsse. Für eine Einstellung darüber hinaus wäre eine Voltage-Droop-Regelung geeignet, die jedoch mit Kreisströmen verbunden ist.

Frage 5.1.3: Spannungsgeführter Betrieb mit einfacher Spannungsregelung. Statt der unterlagerten Stromregelung soll eine einfache und direkte Spannungsregelung untersucht werden. Untersuchen Sie die Wirkungsweise in der Simulation.

Lösungsbeispiel: Mit Hilfe der Betriebsart (Operating Mode = 4) wird die einfache Spannungsregelung U(U) ausgewählt. Die Kurzform soll darauf hindeuten, dass sie Stellgröße die Spannung ist (vor der Klammer), und diese in Abhängigkeit der Spannung am Anschlusspunkt (in der Klammer) geregelt wird. Folgende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf.



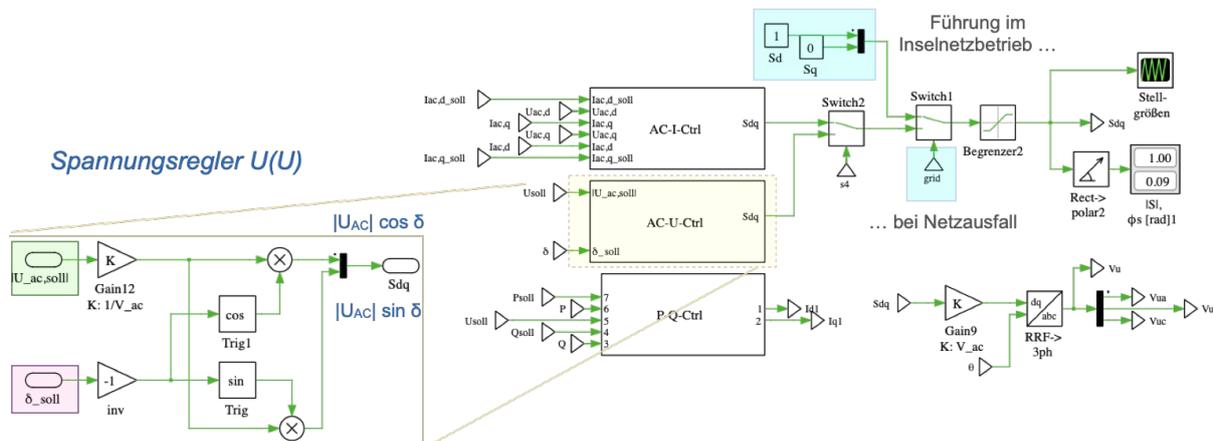
Auch hier beteiligen sich beim Lastsprung die beiden Konverter zu gleichen Teilen am Wirkstrom, der Strom am Anschlusspunkt des Netzes zeigt nur den verbliebenen Anteil des Netzes. Beim Spannungseinbruch im Netz gelingt ebenfalls eine Beteiligung beider Konverter am Blindstrom; der Spannungseinbruch wird auf 75% der Netzspannung angehoben.

Gegenüber der unterlagerten Stromregelung zeigt der Verlauf höhere transiente Blindströme und eine vergleichsweise längere Zeit zum Einschwingen nach dem sprunghaften Spannungseinbruch und nach der sprunghaften Wiederkehr der Spannung.

Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Spannungsreglers: Er besteht aus einer einfachen Steuerung. Amplitude und Phase der Sollspannung werden direkt als Stellgrößen vorgegeben. Es erfolgt nur

eine Umwandlung von der polaren Darstellung $\underline{U}_i = U_{\text{soll}} e^{-j\delta} = U_{\text{soll}} \cos \delta + j U_{\text{soll}} \sin \delta$ in Realteil und Imaginärteil der Spannung.

Abweichungen der Amplitude U_{AC} am Anschlusspunkt vom Sollwert U_{soll} führen zu Blindströmen durch den Konverter, da die Konverterspannung konstant gehalten wird. Änderungen der Phasenlage δ der Spannung am Anschlusspunkt führen zu Wirkströmen.



Die anteilige Beteiligung des Konverter erfolgt wiederum rein physikalisch abhängig von den Impedanzverhältnissen.

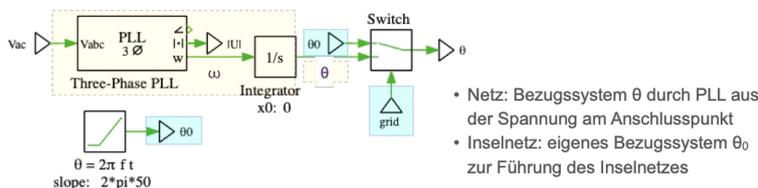
Frage 5.1.4: Umschaltung in den Inselnetzbetrieb. Bei der Umschaltung in den Inselnetzbetrieb geht die starre Spannungsquelle als Bezugspunkt verloren. Diese Aufgabe soll einer der beiden Konverter übernehmen. Untersuchen Sie die Funktion der Schaltung in der Simulation.

Lösungsbeispiel:

Die Abbildung in Frage 5.1.3 zeigt oben die Umschaltung der Spannungsregelung für Konverter 1 im Fall einer Trennung vom Netz: In diesem Fall übernimmt der Konverter die Führung einer konstanten Spannung mit Nullphasenwinkel 0, und zwar aus jeder voreingestellten Betriebsart.

Konverter 2 bleibt unverändert: er rekonstruiert sein Bezugssystem aus der Spannung am Anschlusspunkt mit Hilfe der PLL-Schaltung. Konverter 1 muss im Inselnetzbetrieb sein eigens Bezugssystem bilden. Folgende Abbildung stellt die Umschaltung dar: Bei fehlendem Netz verwendet Konverter 1 seine Phasenreferenz als Bezugssystem für die Führung der Spannung.

Führung durch Konverter 1 bei Netzausfall

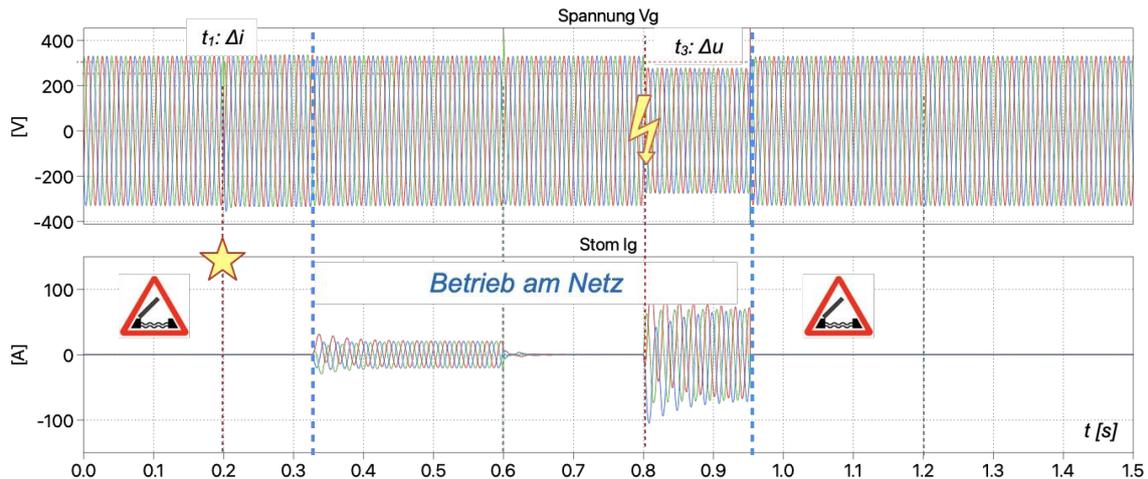


In folgendem Simulationslauf startet Konverter 1 in der Betriebsart 4 (einfache Spannungsregelung), Konverter 2 in Betriebsart 2 (Spannungsregelung mit unterlagerter Stromregelung). Die Anschaltung ans Netz und Trennung vom Netz erfolgt während der Simulation manuell durch Betätigung des Leistungsschalters am Netzanschlusspunkt (Variable grid on/off = 1 bzw. 0).

Konverter 1 detektiert das vorhandene bzw. fehlende Netz. In der Simulation wird hierzu die Variable `grid on/off` an den Konverter durchgereicht. In der Praxis wäre die Detektion aus Messungen zu realisieren. Bei Trennung vom Netz reagiert Konverter 1 wie folgt:

- Verwendung des eigenen Bezugssystems für die Phase der Spannung,
- Führung der Netzspannung.

Folgende Abbildung zeigt den Simulationslauf. Die Simulation startet im Inselnetzbetrieb. Am Netzanschlusspunkt ist der Lastsprung zunächst nicht zu erkennen, da das Netz durch den Leistungsschalter vom Anschlusspunkt getrennt ist. Die Last teilen sich beide Konverter zu gleichen Anteilen.



Beim Zuschalten des Netzes schaltet Konverter 1 um in den netzgeführten Betrieb in Betriebsart 4, Konverter 2 verbleibt in Betriebsart 2. Am Strom am Anschlusspunkt erkennt man, dass sich nun das Netz an der Last beteiligt, bis der Lastsprung zurück genommen wird.

Zum Zeitpunkt t_3 bricht die Netzspannung um 50% ein. Beide Konverter stützen die Netzspannung durch Blindströme. Während des Spannungseinbruchs erfolgt eine Trennung vom Netz. Da Konverter 1 die Führung sofort übernimmt, wird die Spannung wieder hergestellt. Die Anlage befindet sich nun im Leerlauf unter Führung von Konverter 1.

5.2. Betrieb mit Generatoren

Statt der Konverter sollen nun konventionelle Generatoren eingesetzt werden. Ziel ist die Untersuchung der Betriebsweise. Bis auf den Einsatz zweier Generatoren anstelle der Konverter bleibt das in folgender Abbildung gezeigte Szenario gleich. Das Szenario ermöglicht folgende Betriebsarten:

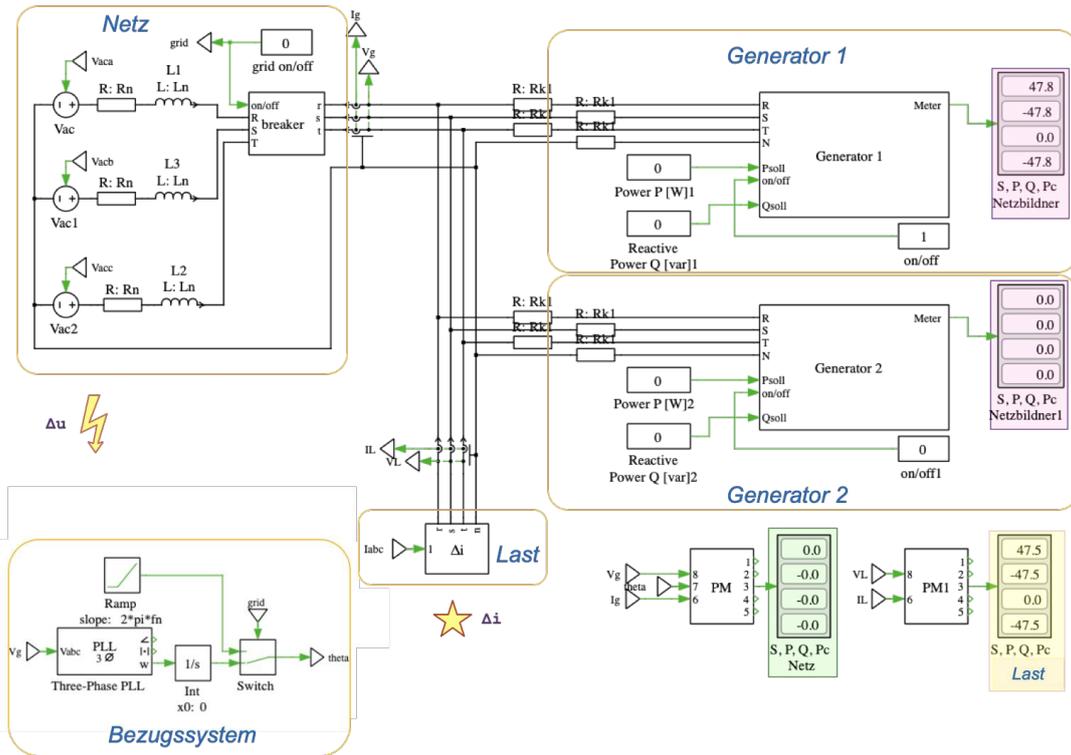
- Inselnetzbetrieb mit einem oder zwei Generatoren
- Verbundnetzbetrieb mit einem oder zwei Generatoren.

Untersucht werden soll speziell die Reaktion auf Lastsprünge, die mit Hilfe einer Stromquelle nachgebildet sind. Bei Betrieb am Netz ist außerdem die Untersuchung bei Spannungseinbrüchen im Netz möglich.

Die Maschinen sind auf einen Arbeitspunkt $P_{\text{soil}} = 0$ eingestellt. Somit bestimmt der Drehzahlregler bzw. die Statik das Verhalten bei Lastsprüngen. Im Inselnetzbetrieb sollte hierdurch eine stabile Versorgung beliebiger Lasten innerhalb des Leistungsbereichs der Anlagen möglich sein. Beim Betrieb an einem starren Netz sollten die Maschinen der Netzfrequenz folgen.

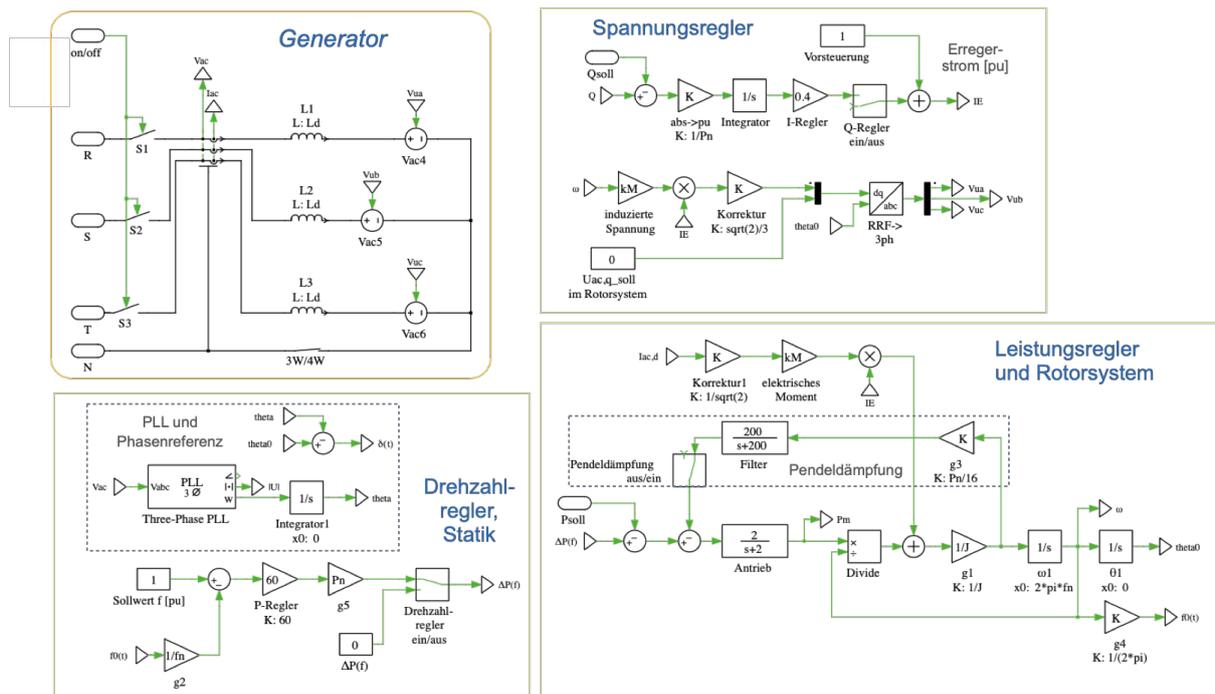
Ein wesentlicher Punkt ist das in der Abbildung gezeigte Bezugssystem ($\theta = \theta(t)$): Beim Betrieb am Netz wird die Netzspannung von einem starren Bezugssystem geführt. Im Inselnetzbetrieb

sind die Anlagen vom Netz getrennt; das Bezugssystem muss aus der Spannung rekonstruiert werden.



In der Abbildung wurde hierzu die Spannung am Anschlusspunkt an der Sammelschiene verwendet. Diese Spannung wird Inselnetzbetrieb von den Maschinen erzeugt. Das Bezugssystem folgt somit der Drehzahl der Maschinen.

Frage 5.2.1: Aufbau des Generators. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Generators. Welche Funktion haben die Regler?



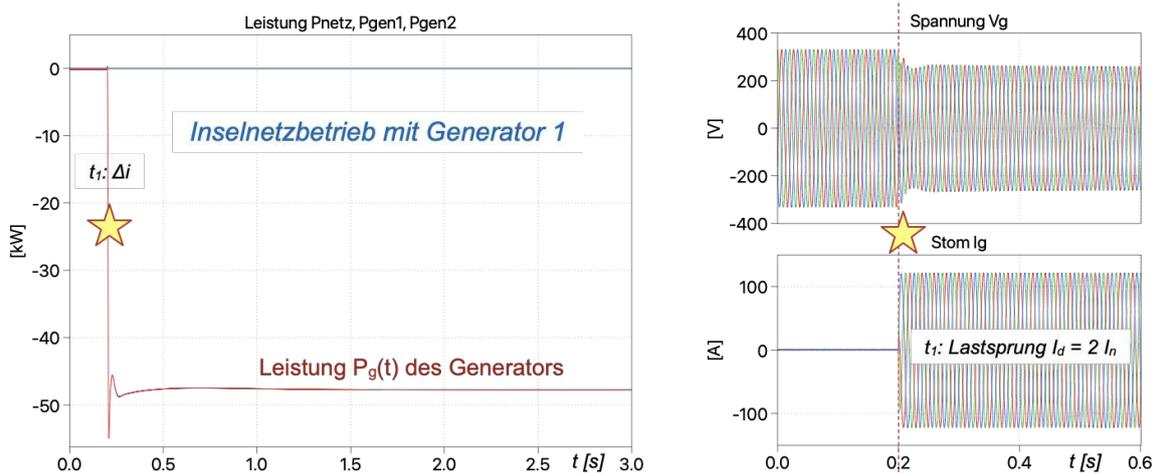
Lösung: (1) Spannungsregler: Die Spannungsamplitude folgt der induzierten Spannung und lässt sich über den Erregerstrom anpassen. Im Bezugssystem des Rotors ($\theta_0 = \theta_0(t)$) bleibt der Imaginärteil der Spannung = Null, gestellt wird der Realteil.

(2) Leistungsregler: Der Leistungsregler wirkt auf den Antrieb der Maschine (z.B. Diesel oder Gasmotor). Es kann ein Sollwert für die Wirkleistung vorgegeben werden. Der Leistungsregler enthält ebenfalls eine Pendeldämpfung, die Drehzahländerungen entgegenwirkt, sowie einen Eingang $P(f)$ für den Drehzahlregler, der den Antrieb abhängig von der Drehzahl des Statorfeldes führt. Diese Drehzahl ist im einfachsten Fall die Drehzahl der Maschine, bzw. die Frequenz im Inselnetz bzw. im Netz.

(3) Drehzahlregler: Der Drehzahlregler ist ein P-Regler, der bei Abweichungen von der statischen Sollfrequenz der Maschine über den Antrieb mechanische Leistung zuführt, bzw. mechanische Leistung entnimmt. Das Verhalten $P(f)$ wird mit Hilfe des P-Reglers als lineare Kennlinie eingestellt (siehe Abschnitt 3). Im Beispiel bedeutet ein Faktor $K_P = 60$ eine Leistung von $60 \cdot P_n$ bei einer Frequenzabweichung von 100%, bzw. $0,6 P_n$ bei einer Abweichung von 1%. In einem 50 Hz-System wäre das bei 0,5 Hz der Fall.

Frage 5.2.2: Inselnetzbetrieb. Untersuchen Sie den Inselnetzbetrieb mit einem Generator. Welchen Einfluss hat die Last auf die Frequenz im Inselnetz? Welche Funktion hat der Drehzahlregler?

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.



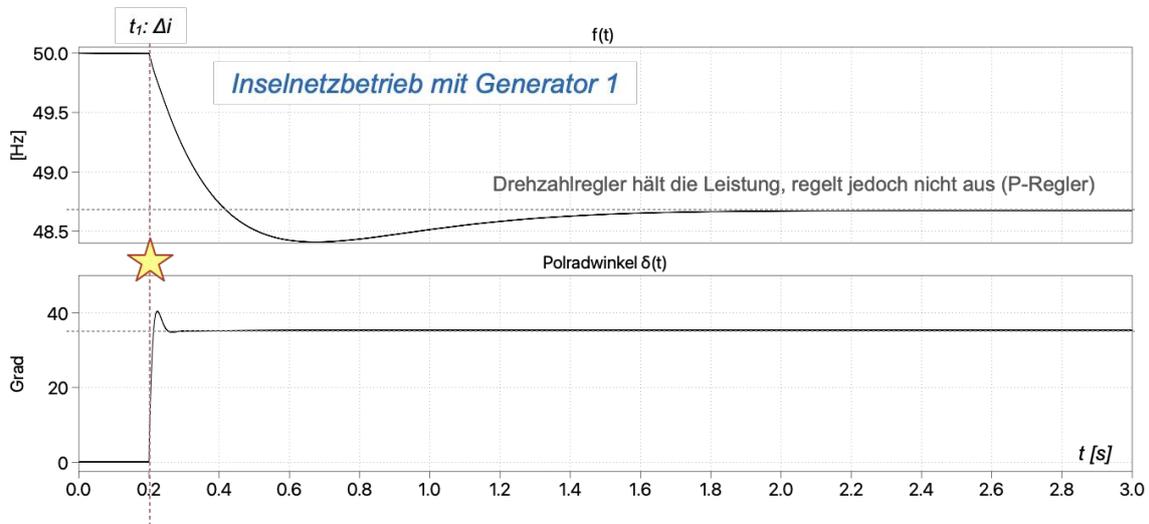
Die Anlage startet im Leerlauf. Zum Zeitpunkt t_1 war der doppelte Nennstrom der Anlage, wodurch bei der einzelne Generator an seine Leistungsgrenze geführt wird. Das System stellt den gewünschten Strom sofort bereit. Die Spannung gibt in diesem Arbeitspunkt etwas nach.

Ein Blick auf die Drehzahl und den Polradwinkel der Maschine zeigt, dass der Drehzahlregler arbeitet und im Rahmen der zeitkonstante des Antriebs (Filter mit 2 Hz entsprechen 0,5 s Reaktionszeit) mechanische Leistung zuführt, wodurch sich die Drehzahl der Maschine stabilisiert.

Bevor durch den Antrieb mechanische Leistung zugeführt wird, wird die von der elektrischen Last benötigte Leistung der kinetischen Energie der Anlage entnommen. Hierdurch verringert sich die Drehzahl (in Kurzform: $f(P_{\text{elektrisch}})$). Der Drehzahlregler reagiert erst auf die Drehzahländerung und passt die Antriebsleistung an.

Als P-Regler regelt er die Drehzahl jedoch nicht aus: Im Beispiel sinkt die Frequenz im Inselnetz auf unter 49 Hz. Für alle anderen Anlagen liefert die Netzfrequenz somit einen Indikator für die Leistungsbilanz. Mit Hilfe eines PI-Reglers wäre es möglich, die Drehzahl auszuregeln, wodurch dann allerdings die Maschine sehr strapaziert würde und der Leistungsindikator verloren ginge.

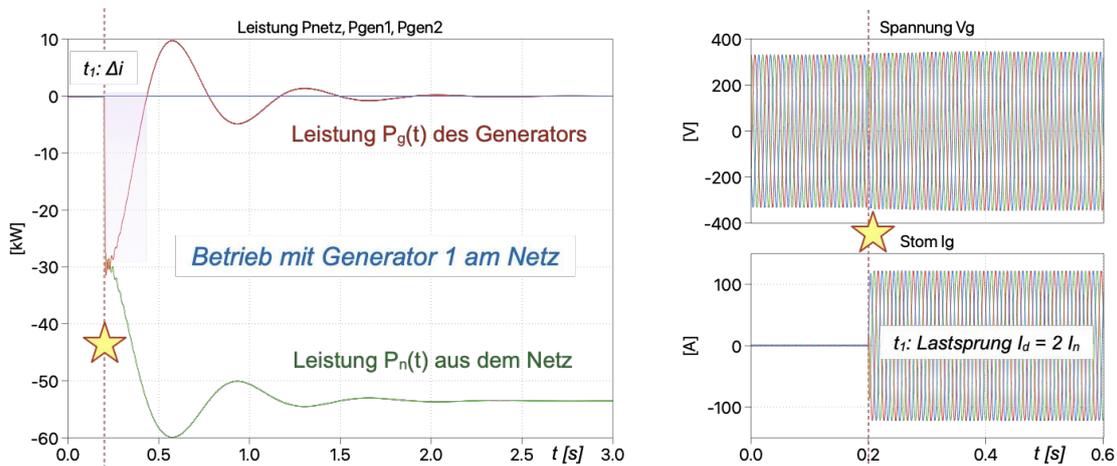
Der Polradwinkel verbleibt bei etwas weniger als 40 Grad im Generatorbetrieb (siehe Abschnitt 3). Bis zum Kippunkt bei 90 Grad hat die Maschine also noch etwas Leistungsreserve.



Frage 5.2.3: Verbundbetrieb. Untersuchen Sie den Betrieb am Netz mit einem Generator. Welchen Einfluss hat die Last auf die Frequenz im Inselnetz? Welche Funktion hat der Drehzahlregler? Wie gelingt es, dass der Generator einen dauerhaften Beitrag zur Leistung liefert?

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.

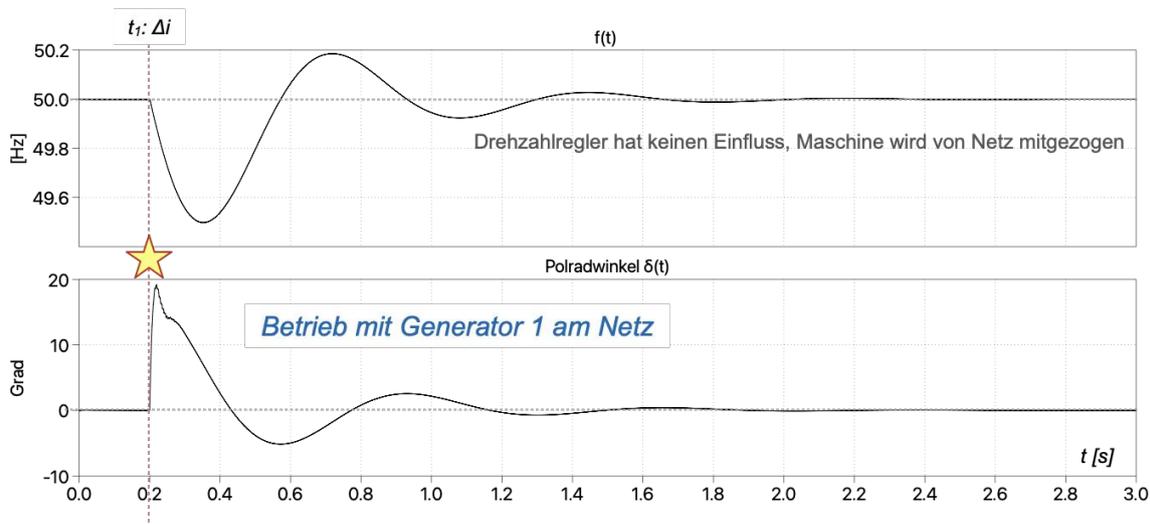
Am starren Netz wird der Generator mitgezogen. Der Drehzahlregler greift hier nicht, da sich die Netzfrequenz durch den Generator kaum ändert.



Ein reales Verbundnetz würde sich verhalten wie ein großes Inselnetz: Anlagen haben einen Einfluss auf die Netzfrequenz(im Verhältnis zu ihrer Leistung). Umgekehrt gilt, dass bei kleinen Anlagen am Verbundnetz die Annahme des starren Netzes korrekt ist. Zwar schwankt auch hier die Netzfrequenz, jedoch hat eine kleine Anlage hierauf kaum einen Einfluss.

Die Spannung wird nun durch das Netz gehalten. Der Generator liefert allerdings seinen Beitrag zur spontanen Lastforderung: Entsprechend den Impedanzverhältnissen (hier: gleiche Impedanzen) liefert er kurzfristig die Hälfte der benötigten Leistung. Ein Blick auf die Netzfrequenz (bzw. Drehzahl) zeigt, dass diese Leistung aus der kinetischen Energie bezogen wird: Die Maschine wird langsamer. Auch

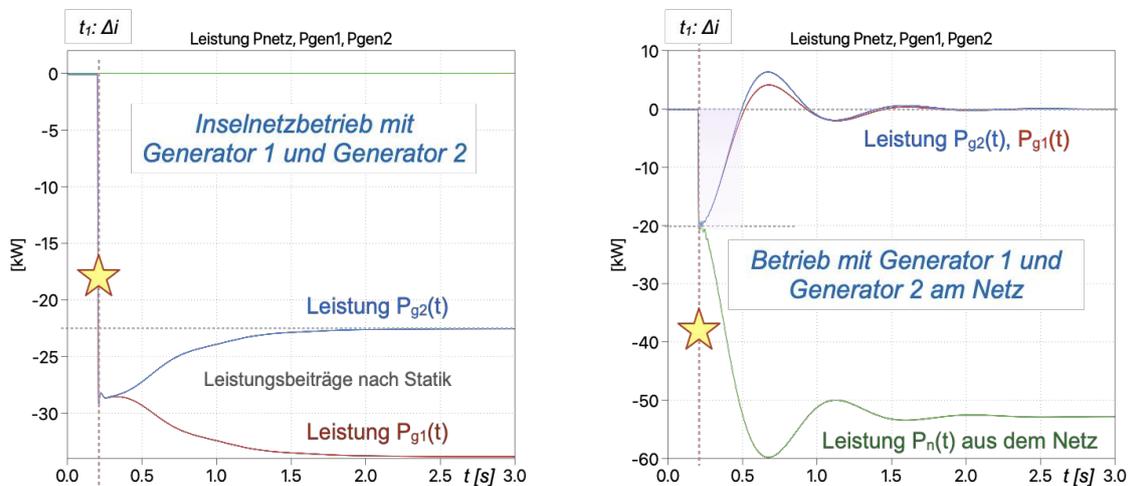
der Drehzahlregler kommt hier sicher kurzfristig zum Einsatz. Auf Dauer setzt sich jedoch der Sollwert der Wirkleistung $P_{\text{soll}} = 0$ durch.



Soll der Generator also dauerhaft einen Anteil zur Wirkleistung beisteuern, muss dies mit Hilfe der Vorgabe eines passenden Sollwertes P_{soll} geschehen.

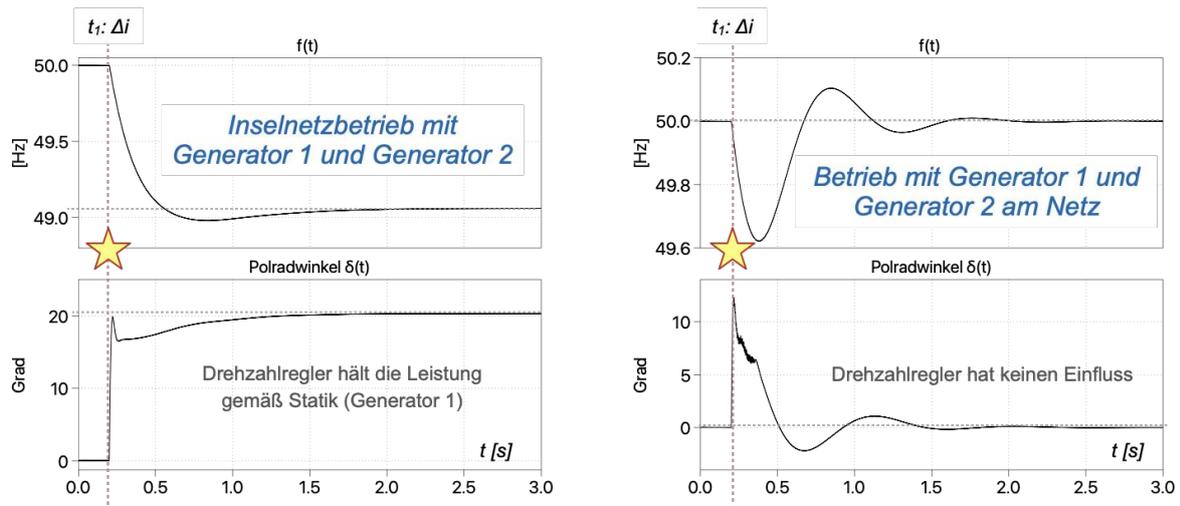
Frage 5.2.4: Parallelbetrieb von Generatoren. Untersuchen Sie den Parallelbetrieb beider Generatoren im Inselnetz und am Netz. Wie gelingt die Aufteilung der Leistung?

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.



Im Inselnetzbetrieb leisten beim Lastsprung beide Maschinen einen spontanen Beitrag (Momentanreserve) gemäß der Impedanzverhältnisse (hier: identische Maschinen). Auch Dauer leistet Generator 1 mehr als Generator 2. Grund hierfür ist die Statik des Drehzahlreglers: Generator 1 hat einen Faktor $K_p = 60$, Generator 2 einen Faktor $K_p = 40$. Daher reagiert Generator 1 stärker auf die lastbedingte Frequenzänderung.

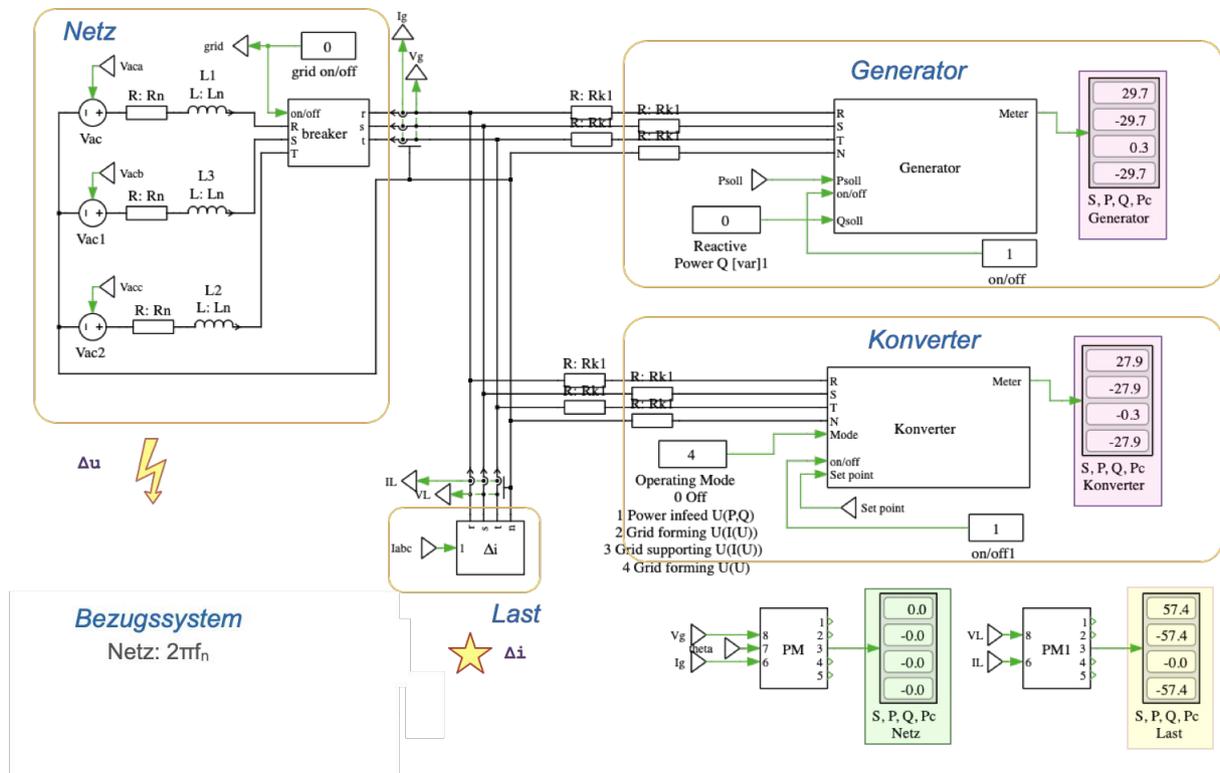
Beim Betrieb am Netz liefern Netz und beide Generatoren spontan individuelle Leistungsbeiträge: jeweils einen Beitrag von 1/3 Beitrag. Auf Dauer wird die Leistung vom Netz bereitgestellt; die Netzfrequenz pendelt sich auf den Sollwert ein. Sollen die Generatoren einen dauerhaften Beitrag zur Wirkleistung beitragen, muss dies über den Sollwert der Anlagen erfolgen (hier: $P_{\text{soll}} = 0$).



Der Frequenzverlauf im Netz und die Polradwinkel (hier: Generator 1) verdeutlichen den Unterschied zwischen Inselnetzbetrieb und Betrieb am starren Netz: Im Inselnetzbetrieb bleibt die Netzfrequenz dauerhaft lastabhängig. Der Drehzahlregler sorgt gemäß der Statik für einen dauerhaften Leistungsbeitrag. Am starren Netz pendelt sich die Frequenz nach einiger Zeit wieder auf den Sollwert ein. Leistungsbeiträge durch den Regler sind nur bei Schwankungen der Netzfrequenz zu erwarten.

5.3. Betrieb mit Generator und Umrichter

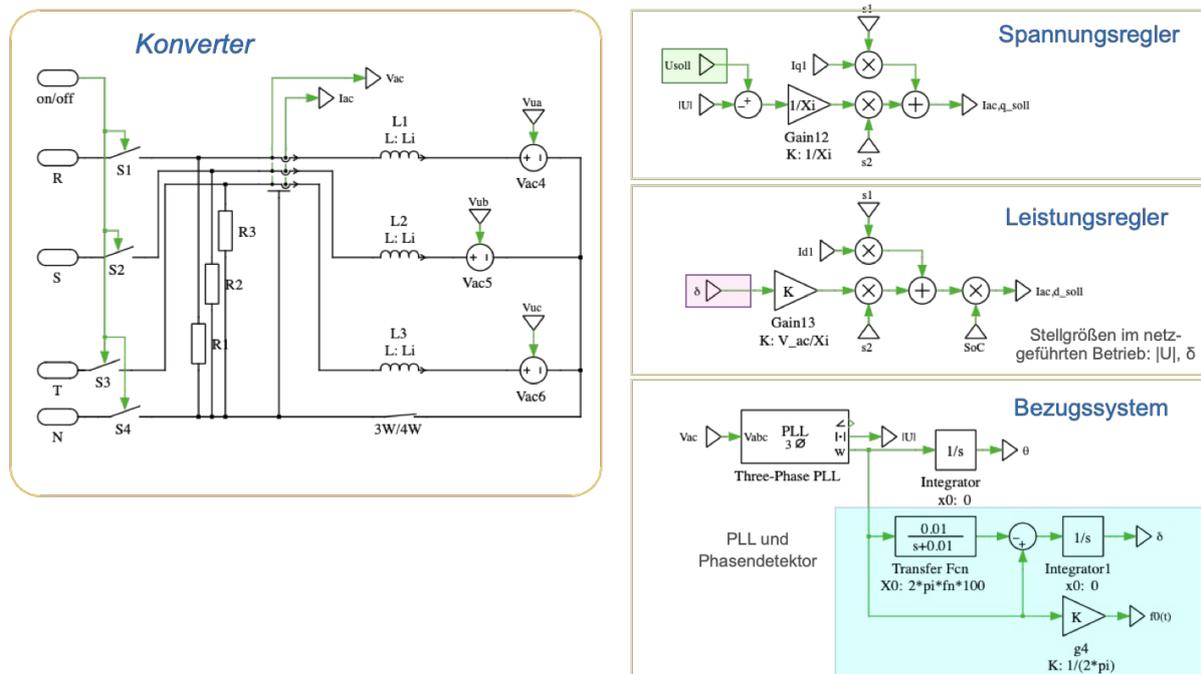
Das gleiche Szenario soll nun mit einem Generator und einem Konverter abgebildet werden.



Auch hier soll der Inselnetz und der Betrieb am Netz untersucht werden. Im Inselnetzbetrieb übernimmt das Rotorsystem des Generators die Führung der Netzfrequenz. Das Netz hat ein starres

Bezugssystem. An den einzelnen Knoten wird das Bezugssystem aus der Spannungsmessung angeleitet. Auf diese Weise dient die Spannung als Kommunikationskanal.

Frage 5.3.1: Bezugssystem des Konverters. Folgende Abbildung zeigt den Konverter mit Regelung. Im Inselnetzbetrieb und generell bei variabler Netzfrequenz kommt ein festes Bezugssystem, wie bisher der Einfachheit verwendet, nicht in Frage. Daher wird das Bezugssystem einschließlich der Phasenreferenz aus der Spannung an der Anschlussklemme errechnet. Erläutern Sie das Funktionsprinzip. Welcher Unterschied besteht zum Generator? Welche Konsequenzen leiten sich hieraus ab?



Lösung: Das Bezugssystem wird aus der gemessenen Frequenz am Anschlusspunkt ermittelt. Aus der Integration der Frequenz erhält man: $\theta(t) = \int \omega(\tau) dt$.

Für die Detektion zeitlicher Veränderungen der Phasenlage des Spannungswinkel verwendet der Generator den Rotors als Phasenreferenz: Ein äußerer Lastsprung führt zu einem Sprung des Phasenwinkels im Zeiger der Statorspannung gegenüber der vom Rotor induzierten Spannung.

Der Konverter enthält in der hier verwendeten Form keine Phasenreferenz. Stattdessen wird ein Phasendetektor eingesetzt. Ein Phasensprung am Anschlusspunkt des Konverters führt gemäß der Beziehung $\omega(t) = d\theta(t)/dt + \theta_0$ zu einem Puls in der Frequenz. Zu detektieren sind zeitliche Änderungen der Frequenz. Wie in der Abbildung dargestellt erfolgt das mit Hilfe eines einfachen Hochpassfilters.

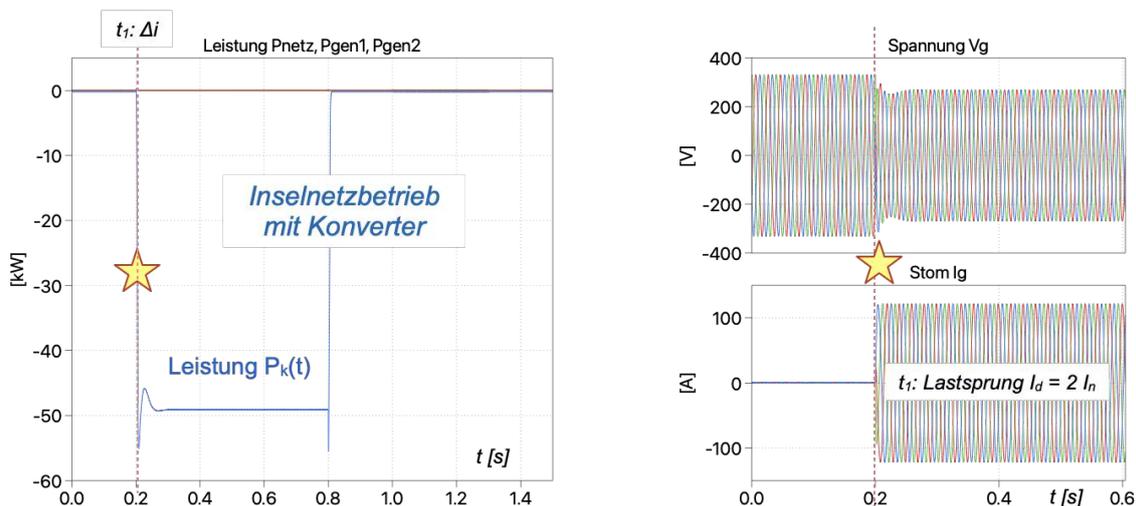
Das Hochpassfilter ist mit Hilfe eines Tiefpassfilters realisiert: Die niederfrequenten bzw. nahezu konstanten Anteile einschließlich der Netzfrequenz werden aus dem Signal subtrahiert, es verbleiben die höherfrequenten Anteile. Durch die Integration zum Phasenwinkel bleiben Frequenzänderungen als Phasenreferenz (bzw. Spannungswinkel) δ erhalten. Im Unterschied zu einem starren Bezugssystem passt sich das Bezugssystem nun an die Frequenz im Netz bzw. Inselnetz an.

Bemerkung: Die Grenzfrequenz des Filters (hier: 0,01 Hz bzw. als Zeitkonstante 100 s) muss geringer sein als die der Übertragungsfunktion des Antriebs (2 Hz, bzw. als Zeitkonstante 0.5 s). Andernfalls kann das Rotorsystem im Generator die Frequenz im Inselnetz nicht führen. Im Unterschied zum Polradwinkel δ eines Generators, der durch die Rotation als Kreisel stabilisiert ist, ist das Bezugssystem des Konverters nicht fixiert, sondern folgt der Frequenz am Anschlusspunkt. Die Übertragungsfunktion des Filters muss mit dem Sollwert der Netzfrequenz initialisiert werden, damit das Filter im einge-

schwungenen Zustand startet. Auf diese Weise folgt der Konverter der Frequenz am Anschlusspunkt und kann Phasenänderungen der Spannung detektieren.

Frage 5.3.2: Inselnetzbetrieb nur mit Konverter. Untersuchen Sie den Inselnetzbetrieb nur mit Konverter. Wie reagiert der Konverter auf eine Lastsprung? Wo kommt das Bezugssystem her?

Lösungsbeispiel: Der Konverter kann die geforderte Leistung sofort bereitstellen, wie folgende Abbildung für einen Lastsprung zwischen den Zeiten t_1 und t_2 zeigt.

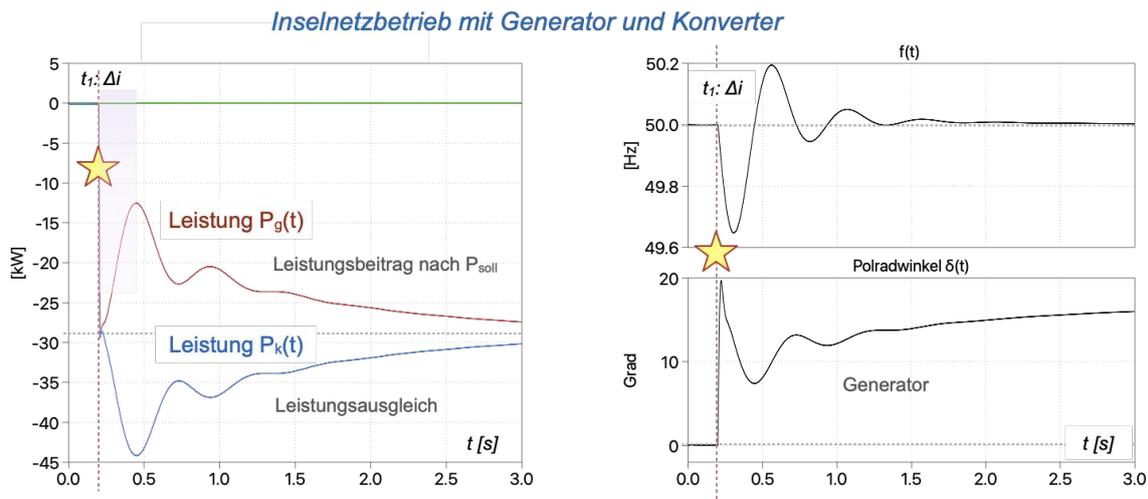


Da der doppelte Nennstrom gefordert ist, gibt die Spannung etwas nach. Mangels einer anderen Spannungsquelle stellt der Konverter das Bezugssystem selber bereit. Die Frequenz spielt für den Konverter keine besondere Rolle: er besitzt kein frequenzabhängiges Verhalten. Die Anlage behält einfach den Startwert der Frequenz für die Integration zum Bezugssystem $\theta = \theta(t)$ bei, eine Umschaltung auf ein festes Bezugssystem ist im Modell nicht enthalten.

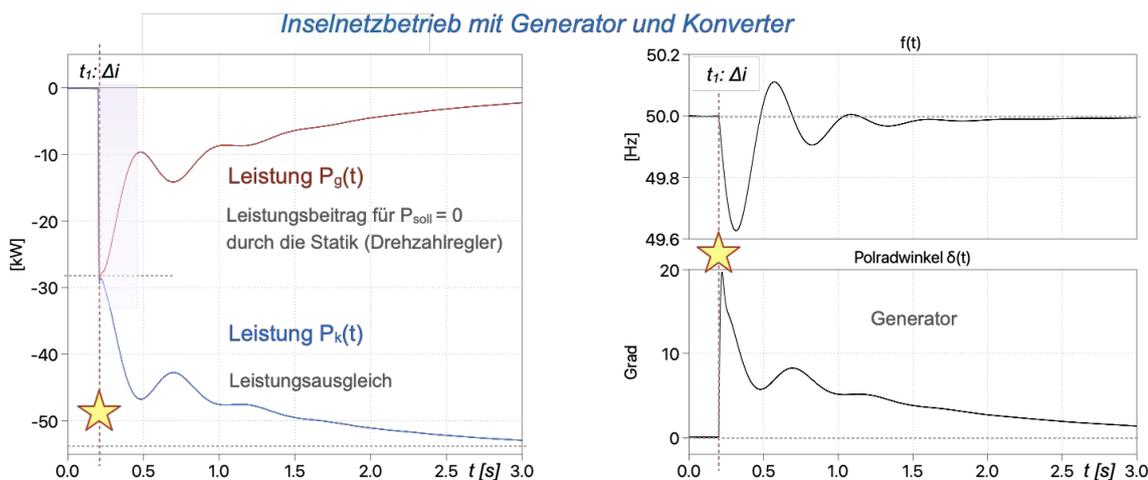
Frage 5.3.3: Inselnetzbetrieb mit Generator und Konverter. Untersuchen Sie das Verhalten bei einem Lastsprung mit Generator und Konverter. Welchen Beitrag leistet der Generator? Welche Rolle übernimmt der Konverter? Welche Unterschiede bestehen zum Inselnetzbetrieb mit 2 Generatoren? Wie kann man den Generator an der Leistung beteiligen?

Lösungsbeispiel: Der Konverter übernimmt die Rolle des Netzes. Die Maschine leistet einen Beitrag zur spontanen Lastforderung aus der kinetischen Reserve und folgt mit der ihr eigenen Trägheit der Einstellung des Sollwertes der Leistung. Grund hierfür ist der Antrieb der Maschine: Dieser wird entweder durch eine Leistungsvorgabe in Gang gesetzt, oder durch den Drehzahlregler.

Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf mit einer Leistungsvorgabe für den Antrieb. Die Vorgabe wurde aus der Leistungsmessung an der Last ermittelt, der Sollwert entspricht der halben gemessenen Leistung. Ohne die Leistungsvorgabe würde der Konverter annähernd die gesamte Leistung übernehmen. Der Einfluss des Drehzahlreglers ist abhängig von der Einstellung der Statik und hat hier nur einen bescheidenen Einfluss.



Die Beteiligung der Maschine lässt sich auch durch Anpassung der Statik steigern. In folgendem Simulationslauf wurde diese $K_p = 400$ erhöht. Der Beitrag zur geforderten Leistung mit Hilfe des Drehzahlreglers fällt bescheiden aus. Der Konverter reagiert im Vergleich zum Generator deutlich schneller, wie ein Vergleich der Simulationsläufe aus Abschnitt 5.2 zeigt..



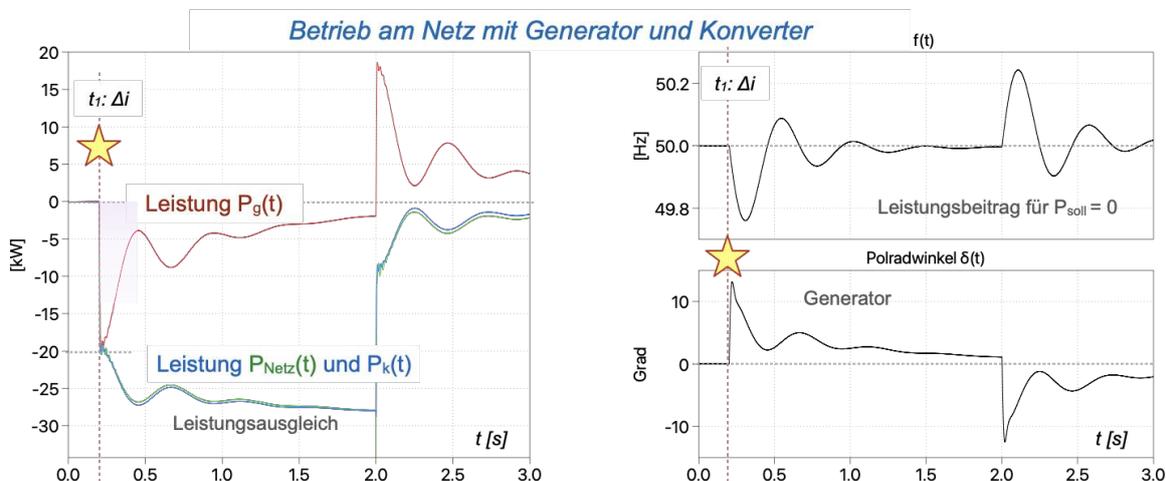
Das Bezugssystem des Converters ist nicht fest, sondern folgt dem Rotorsystem des Generators. Daher muss auf dieser Basis eine frequenzbasierte Absenkung der Leistung scheitern. Für eine Beteiligung des Converters über eine Statik wäre ein virtuelles Rotorsystem erforderlich.

Frage 5.3.4: Betrieb am Netz mit Generator und Konverter. Untersuchen Sie das Verhalten bei einem Lastsprung in der Simulation. Welche Unterschiede bestehen zum Inselnetzbetrieb?

Lösungsbeispiel: Das Verhalten des Generators bleibt wegen seiner physikalischen Eigenschaften unverändert. Zusammen mit Netz und Konverter leistet bei einem Lastsprung seinen initialen Beitrag gemäß der Impedanzverhältnisse (im Beispiel sind alle Reaktanzen gleich). Darauf folgt der Generator seinem eingestellten Arbeitspunkt bzgl. der Antriebsleistung und somit der elektrischen Leistung.

Dieser Arbeitspunkt ist wegen der Zeitkonstante des Antriebs nicht spontan veränderbar. Wenn der Lastsprung im Netz zurückgenommen wird, ergibt sich aus dem aktuellen Arbeitspunkt der Maschine heraus erneut ein sprunghafter Leistungsbeitrag aus der kinetischen Reserve.

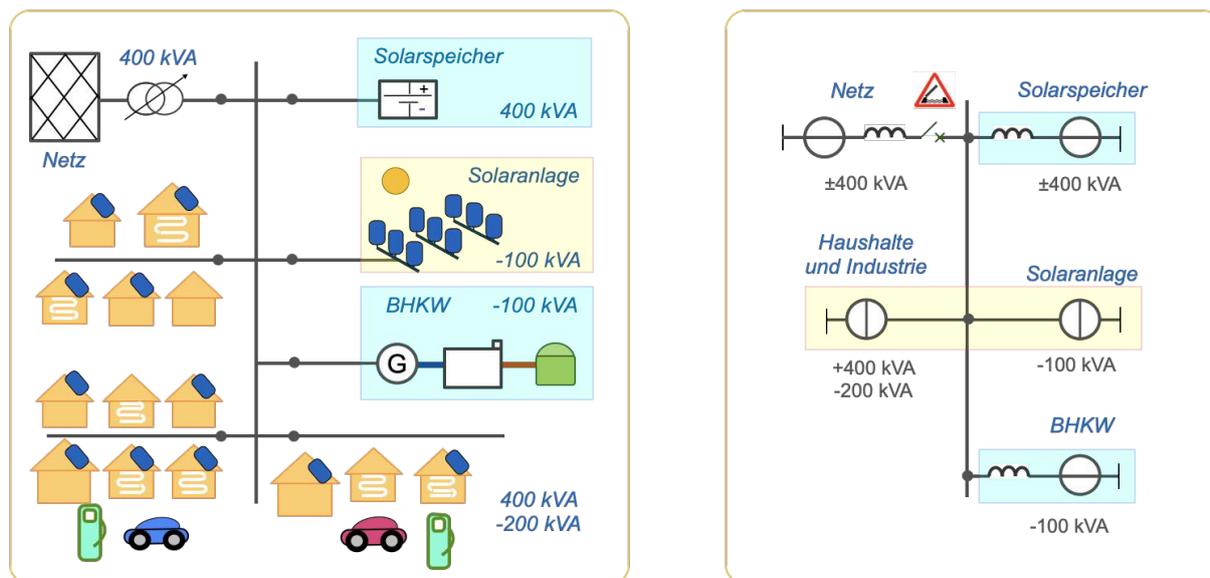
Netz und Konverter reagieren nahezu trägheitslos und gleichen die benötigte Leistung in allen Fällen aus. Die Beiträge von Netz und Konverter fallen hierbei gleich aus, da beide über gleiche große Impedanzen angeschlossen sind.



Das Netz detektiert Phasenveränderungen in der Spannung am Anschlusspunkt mit Hilfe seiner starren Phasenreferenz. Der Generator verwendet zur Detektion von Phasenveränderungen sein Rotor-system als Phasenreferenz. Der Konverter verwendet den eingangs beschriebenen Phasendetektor auf Basis der gemessenen Frequenz der Spannung. Die in der Abbildung dargestellten Leistungen sind die individuellen Leistungsbeiträge der Anlagen. Die geforderte Leistung ergibt sich aus der Summe dieser Teilbeiträge. Die Anteile am Zeitverlauf bestimmt hier der Generator; Netz und Konverter folgen ausgleichend.

5.4. Kommunale Stromversorgung

Für eine kommunale Stromversorgung soll ein Blockheizkraftwerk (BHKW) und ein zentraler Speicher für Solarstrom eingesetzt werden.



Außer einer großen Solaranlage betreibt die Gemeinde individuelle Solaranlagen auf Dächern und setzt Wärmepumpen und Ladestationen für Elektrofahrzeuge ein. Innerhalb der Wohngebiete wird eine Last von 400 kVA angenommen, sowie ein Spitzenwert von -200 kVA durch Einspeisung in last-

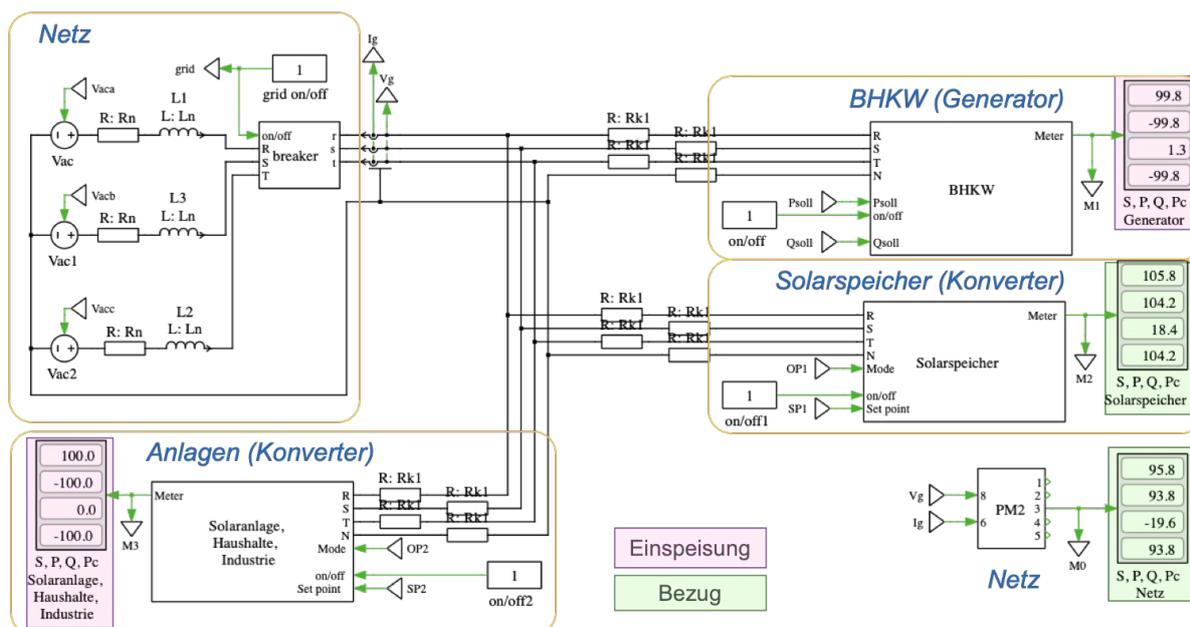
schwachen Zeiten. Für die große Solaranlage und für das BHKW sei eine Leistung von jeweils -100 kVA angenommen. Der Solarspeicher kann bidirektional mit einer Leistung bis zu 400 kVA betrieben werden.

Elektrisch lassen sich am Anschlusspunkt (Sammelschiene der Ortsnetzstation) unterscheiden: (1) Netz als Spannungsquelle, (2) Solarspeicher im netzbildenden Betrieb als Spannungsquelle, (3) das BHKW im netzbildenden Betrieb als unidirektionale Spannungsquelle, (4) die Solaranlage und die summarische Leistung der Haushalte und Industrie als Stromquelle. Das kommunale Netz lässt sich mit Hilfe des BHKW und des Solarspeichers wahlweise als Inselnetz betreiben.

Frage 5.4.1: Auslegung der Anlagen. Legen Sie (1) das Netz, sowie die Anlagen (2), (3) und (4) gemäß der Leistungsvorgaben für die Simulation aus. Wie lässt sich aus den bisher verwendeten Komponenten das Netz nachbilden?

Lösung: (1) Netz: Aus einer Kurzschlussspannung von 20% ermittelt man näherungsweise bei einer Nennleistung von 400 kVA bei einer Nennspannung von 400 V eine Kurzschlussreaktanz von $X_n = 0.15 \text{ Ohm}$ (die Berechnung erfolgt aus $u_k \cdot U_n = X_n \cdot I_n$). Die ohmschen Verluste werden bei der Hälfte dieses Wertes angesetzt.

(2) Solarspeicher: Der Solarspeicher wird als Konverter auf die gegebene Nennleistung festgelegt ($P_{nk} = 400 \text{ kW}$). Hieraus leitet sich bei gegebener Nennspannung (unverändert 400 V) der Nennstrom ab. Da alle Regler in normierter Form ausgeführt wurden, sind keine sonstigen Änderungen nötig. Die Koppelreaktanz wurde mit $X_i = 0.15 \text{ Ohm}$ angenommen.



(3) BHKW: Wird als Generator mit dem Maschinenmodell betrieben. Als Nennleistung wird der genannte Wert von $P_{nm} = 100 \text{ kW}$ angenommen. Als Trägheit wird $H = 2 \text{ s}$ angenommen. Vorgegeben muss noch die Reaktanz der Statorwicklung (Annahme $X_d = 0.2 \text{ Ohm}$), sowie die Zeitkonstante des Antriebs (Annahme $t_x = 1/3 \text{ s}$). Zusammen mit der Nennspannung (400 V) berechnet das Modell hieraus die Maschinenkonstante und sonstigen Parameter für die Simulation. Da die Regler in normierter Form ausgeführt wurden, bedarf es keiner Anpassungen.

(4) Solaranlage, Haushalte und Industrie: Werden in einer stromgeführten Anlage zusammengefasst. Die Leistung von $P_{nk} = 400 \text{ kW}$ entspricht dem Solarspeicher. Da die Betriebsart der Konverter wählbar sind, kann das gleiche Modell verwendet werden. Die Arbeitspunkte der Anlagen sind im Modell in-

individuell einstellbar. Das Modell ist in der Abbildung dargestellt. Im gewählten Arbeitspunkt werden von der Solaranlage, von den Haushalten, und vom BHKW jeweils 100 kW eingespeist.

Frage 5.4.2: Betrieb am Netz in Sommer und Winter. Untersuchen Sie das Netz in der Simulation für Arbeitspunkte, die für den Betrieb von Interesse sind.

Lösungsbeispiel: (1) Sommer: maximale Produktion von Solarenergie, BHKW außer Betrieb. Hier wäre mit Hilfe des Solarspeichers eine zum Teil autonome Versorgung möglich: Aufladen in der Mittagszeit, Abgabe in den Abendstunden.

Einstellungen am System: (1) Blockheizkraftwerk aus, (2) Anlagen: $P = -P_{nk}/4$, somit Einspeisung mit $P = -100$ KW, (3) Solarspeicher: Betriebsart 1 für den stromgeführten Betrieb („Power Infeed U(P,Q)“ mit Vorgabe $P = +P_{nk}/4 = +100$ kW. Das Netz stellt die Spannung und gleicht verbliebene Abweichungen der Leistung aus. Sollte der Solarspeicher zuliefern, wäre die Lastflussrichtung umzukehren.

Bemerkung: Für einen effizienten Betrieb des Solarspeichers wäre mehr Solarleistung im Netz wünschenswert. Das Regelungskonzept bleibt beim Solarausbau erhalten. Die Führung der Systeme sollte ein Batteriemangement- oder Energiemanagementsystem übernehmen.

(2) Winter: BHKW in Betrieb, kein Solarstrom. Im Winterquartal (Dezember bis Februar) ist kein Beitrag aus dem Solarspeicher zu erwarten. Die Leistung der Solaranlage und der individuellen Anlagen wird komplett vom Bedarf aufgebraucht. In den Abendstunden muss man für Haushalte und Industrie $P = 400$ kW annehmen. Das BHKW liefert hierfür $P_{nm} = -100$ kW zu, der Rest muss aus dem Netz bezogen werden. Der Solarspeicher kann nicht als solcher eingesetzt werden, ließe sich allerdings netzdienlich betreiben, z.B. für Regelleistung oder zur Flexibilisierung von Angebot und Nachfrage.

Frage 5.4.3: Inselnetzbetrieb mit Solarspeicher. Untersuchen Sie das Verhalten des Netzes im Inselnetzbetrieb. Worauf wäre in der Praxis zu achten?

Lösungsbeispiel: Im Inselnetzbetrieb stehen als Spannungsquellen (1) das BHKW zur Verfügung, (2) der Solarspeicher. Der Solarspeicher wird für eine Speicherdauer von ca. 6 h ausgelegt sein, kann also alleine nur für Versorgungslücken aushelfen, bzw. als Notstromversorgung. Je nach Angebot an Solarleistung wäre jedoch auch ein dauerhafter Betrieb möglich.

Als Betriebsfälle lassen sich untersuchen:

- (1) Betrieb mit BHKW und Solarspeicher (z.B. im Notstrombetrieb),
- (2) autonomer Betrieb mit Solarspeicher bei ausreichend Angebot an Solarleistung.

Annahmen für Fall (1): Bei einem Leistungsbezug der Anlagen von bis zu 400 kW kann das BHKW hiervon 100 kW abdecken, der Rest wird aus dem Solarspeicher bezogen. Einstellungen am System: (a) Netz aus (grid = 0), (b) BHKW mit Sollwert $P = -P_{nm}$, (c) Solarspeicher im netzbildenden Modus 2, 3 oder 4, (d) Anlagen auf den gewünschten Leistungsbezug zwischen 0 und 400 kW (z.B. 200 kW).

Das BHKW wird auf dem Sollwert leistungsgeführt, der Solarspeicher gleicht den Leistungsbedarf zu jeder Zeit aus.

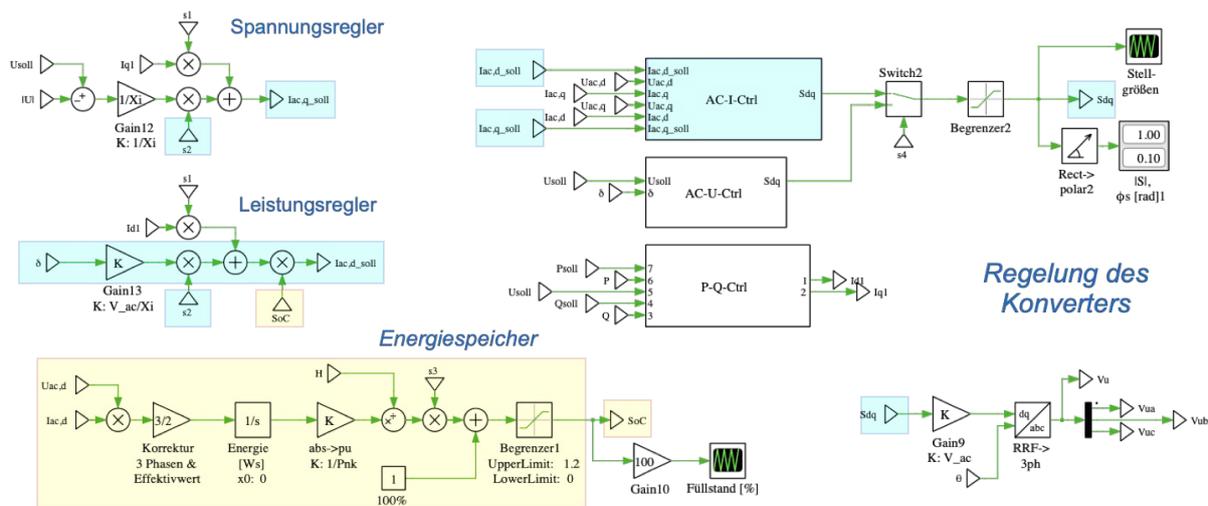
Annahmen für Fall (2): Wie für den Fall (1), jedoch mit deaktivierten BHKW. Idealerweise deckt die Solarenergie den Energiebedarf im Tagesmittel ab (zuzüglich der Verluste bei der Wandlung und Speicherung), dann kann der Speicher dauerhaft eine autonome Versorgung aufrechterhalten.

Frage 5.4.4: Laden des Solarspeichers. Untersuchen Sie, wie der Solarspeicher abhängig vom Ladezustand geladen und eingesetzt werden kann.

Lösungsbeispiel: Im Modus 3, „Netzstützung“ bzw. „Netzbildung mit begrenzter Energie“ wurde in Abschnitt 4.4 ein Energiespeicher eingeführt, der ähnlich funktioniert wie die kinetische Energie einer Maschine. Auf diese Weise kann der Konverter wie ein dynamischer Phasenschieber eingesetzt werden,

aufgebaut als reaktiver Konverter mit temporärer Energiereserve. Vergleichbar mit der Maschine wurde die Energiereserve mit Hilfe der Trägheit H [s] vorgegeben. Die Trägheit entspricht bei einem Energiespeicher der Speicherdauer. Somit ist für des Solarspeicher bereits ein Energiespeicher mit Füllstand vorhanden, für einen Speicher der Größe $P_{nk} * 1 \text{ h}$ wäre $H = 3600 \text{ s}$ zu wählen. Mit $P_{nk} = 400 \text{ kW}$ hätte der Energiespeicher eine Größe von 400 kWh .

Im Konvertermodell ist die Betriebsart 3 „Netzstützung mit Speicher“ ein Spezialfall der Betriebsart 2, „Netzbildung mit unterlageter Stromregelung“: Im Strompfad der unterlagerten Stromregelung lässt sich eine Lastflusssteuerung unterbringen, hier abhängig vom Füllstand des Energiespeichers. Die in der Abbildung dargestellte Regelung zeigt, dass hier die Stromvorgabe abhängig vom Füllstand „SoC“ einfach gedrosselt wird.



Im Strompfad ließe sich auch eine ausgefeiltere Regelung einführen. Auch der Betrieb vergleichbar einem Generator im spannungsgeführten Betrieb mit Leistungsvorgabe wäre auf diese Art möglich.

Der Regler enthält ein einfaches Modell des Energiespeichers: Aus Wirkstrom und Wirkspannung wird die am Anschlusspunkt zugeführte bzw. entnommene Leistung berechnet (hochgerechnet auf 3 Phasen und korrigiert um Effektivwerte statt Scheitelwerten). Die Leistung [W] wird integriert zur Energie [Ws]. Division durch die Speicherdauer H liefert somit in normierter Schreibweise den relativen Wert der Entnahme bzw. Zufuhr der Leistung.

Als Initialwert des Füllstandes wird 1 (entsprechend 100%) angenommen. Durch Leistungsentnahme verringert sich dieser Wert und liefert den relativen Füllstand SoC. Im Modus 3 (Signal s_3) kann der Füllstand von 1 abweichen; somit lässt sich über das Signal SoC die Vorgabe des Wirkstroms im Leistungsregler drosseln. Bemerkung: Im Modus 3 wird auch der der Modus 2 mit dem Signal s_2 aktiviert; die Betriebsart 3 ist ein Spezialfall von Betriebsart 2 mit Energiespeicher.

Damit sich in der kurzen Simulationsdauer ein Effekt des Füllstandes zeigt, kann man die Speicherdauer entsprechend klein wählen, z.B. $H = 12 \text{ s}$ bei einer Simulationsdauer von 3 s . H wird bei den Einstellungen des Konverters (set point SP1) eingegeben.

Literatur

- (1) Stephan Rupp, [Leistungselektronik – Schulung Teil 1 für industrielle Anwender](#); Umrichter in der Niederspannung mit Regler, Juli 2022
- (2) Stephan Rupp, [Leistungselektronik – Vorlesungsmanuskript mit Übungen](#); Center of Advanced Studies der Dualen Hochschule Baden-Württemberg, August 2019
- (3) Joachim Franz, EMV - Störungssicherer Aufbau elektronischer Schaltungen Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011, 4., erweiterte und überarbeitete Auflage 2011
- (4) IEC 62898-3-1/TS Ed.1.0 - Microgrids - Part 3-1: Technical requirements - Protection and dynamic control, VDE, 2022, Standard für umrichtergeführte Inselnetze
- (5) ...