

Leistungselektronik

Umrichter (2L und 3L) mit Regelung

Schulungsunterlage zum Vorlesungsmanuskript

Ausgabe 0.1, 25.07.2022
Autoren: 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 eintägige Schulung über gängige Schaltungen der Leistungselektronik in der Niederspannung. Zur Analyse der Funktion und der Betriebsweise einschließlich der Regler werden hierbei 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 Grundlagen zum praktischen Einsatz der Umrichter. Hierbei stehen folgende Themen im Vordergrund:
 - Aufbau und Eigenschaften der Konverterschaltungen (2L und 3L)
 - Einsatz physikalischer Modelle und Mittelwertmodelle in der beruflichen Praxis
 - Betriebsweise der Umrichter (stromgeführt, spannungsführt, statische und harmonische Kompensation, Umgang mit Schiefasten ...)
 - Aufarbeitung der Grundlagen (symmetrische Komponenten, Common Mode, ...)
- Für folgende Ergänzungen aus der **Theorie** wird im Verlauf der Schulung auf das Manuskript zur Leistungselektronik zurückgegriffen, wobei individuelle Vertiefungen möglich sind:
 - Betrachtungen zum Wirkungsgrad (Schaltverluste, Durchlassverluste, Sperrverluste)
 - Betrachtungen zur Signalgüte (Oberwellen, Klirrfaktor, spektrale Analyse)
 - Erzeugung von Steuersignalen
 - Betrachtungen zu Übertragungsfunktionen und Impedanzen
 - Vergleich verschiedener Umrichtertopologien

Ziel der Schulung ist ein kompakter, eintägiger Kurs. Sollten sich Themen für weitergehende Betrachtungen ergeben, kann das Schulungsprogramm um einen zweitägigen Block erweitert werden.

Unterlagen im Web:

- [Schulungsunterlage](#) (PDF):
- [Simulationsmodelle](#) zur Schulung (PLECS):
- [Quelltexte](#) und Bilder (zip)
- Vorlesungsmanuskript [Leistungselektronik](#) (PDF)
- Weitere Vorlesungsunterlagen: <https://www.srupp.de/#LEN>

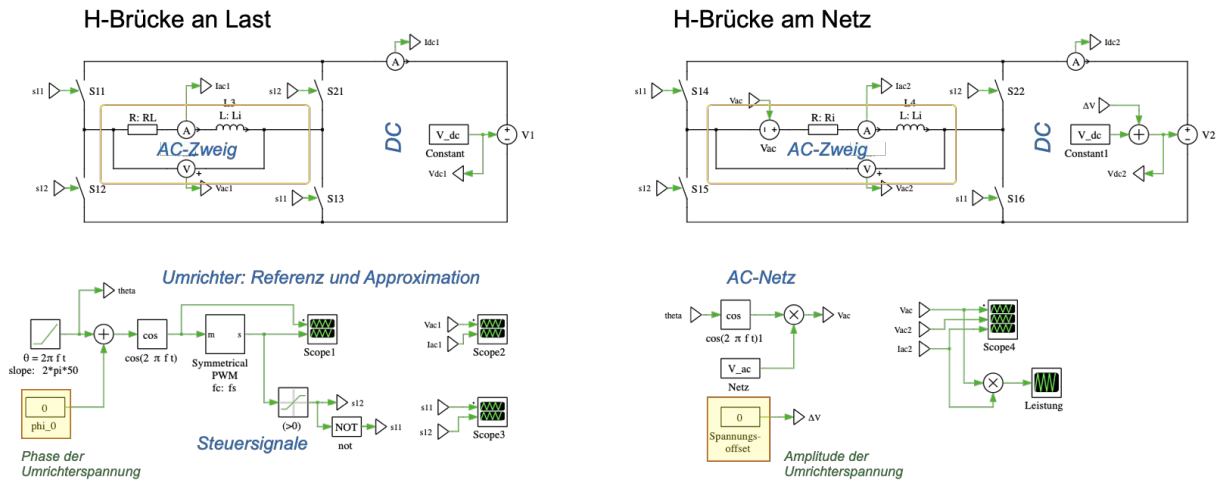
Inhaltsverzeichnis

1. Zwei-Level-Konverter.....	4
1.1. Funktionsprinzip.....	4
1.2. Dreiphasige Schaltung.....	6
1.3. DC-Zwischenkreis im Leerlauf.....	10
1.4. DC-Zwischenkreis mit Last.....	11
2. Drei-Level-Konverter.....	15
2.1. Aufbau und Funktionsweise.....	15
2.2. Stromgeführter Betrieb.....	17
2.3. Spannungsgeführter Betrieb.....	20
2.4. Vergleich mit Zwei-Level-Konverter.....	22
3. Mittelwertmodelle.....	28
3.1. Aufbau leistungselektronischer Wandler.....	28
3.2. Stromgeführter Betrieb.....	30
3.3. Spannungsgeführter Betrieb.....	32
3.4. Betrieb als Transformator.....	33
4. Physikalische Eigenschaften.....	35
4.1. Wirkungsgrad.....	35
4.2. Signalgüte und Störeinflüsse.....	36
4.3. Common Mode.....	37
4.4. Parallelbetrieb von Modulen.....	40
5. Symmetrische Komponenten.....	42
5.1. Definition.....	42
5.2. Einphasige Unsymmetrie.....	43
5.3. Zweiphasige Unsymmetrie.....	45
5.4. Simulationsmodell.....	46
6. Betriebsfälle.....	49
6.1. Einspeisung.....	49
6.2. Netzbildung.....	51
6.3. Harmonische Kompensation.....	54
6.4. Symmetrie und Umgang mit Schiefasten.....	57

1. Zwei-Level-Konverter

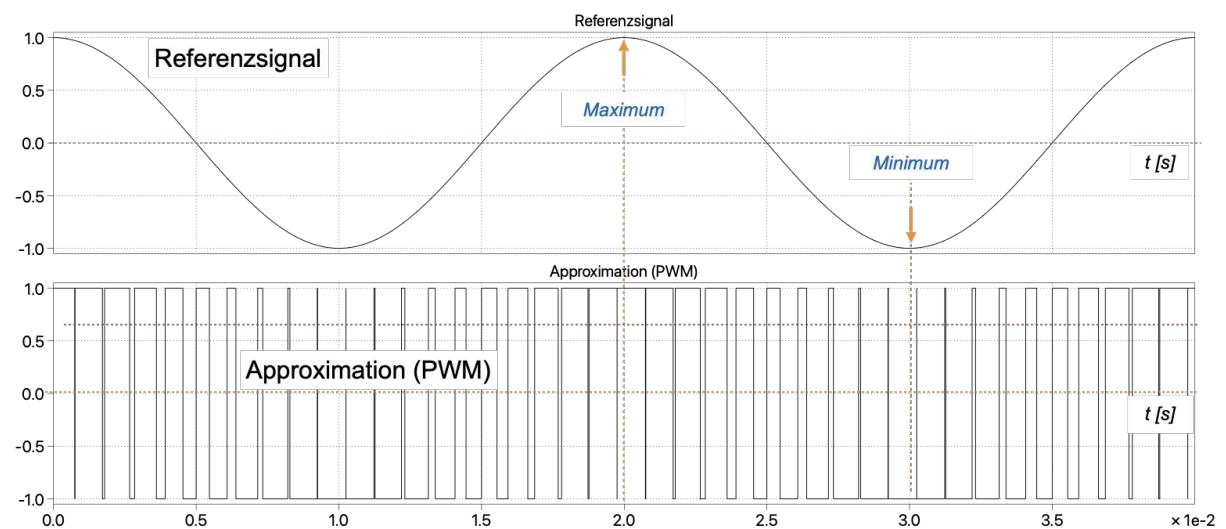
1.1. Funktionsprinzip

Folgende Abbildung zeigt das Schaltungsmodell eines einphasigen Umrichters, bestehend aus einer H-Brücke. Im Quersweig der H-Brücke befindet sich das AC-Netz (AC-Zweig). Die H-Brücke kann nur die Gleichspannung im DC-Kreis umpolen. Zur Approximation einer sinusförmigen Wechselspannung wird daher eine Pulsweitenmodulation verwendet (engl. PWM, pulse width modulation).



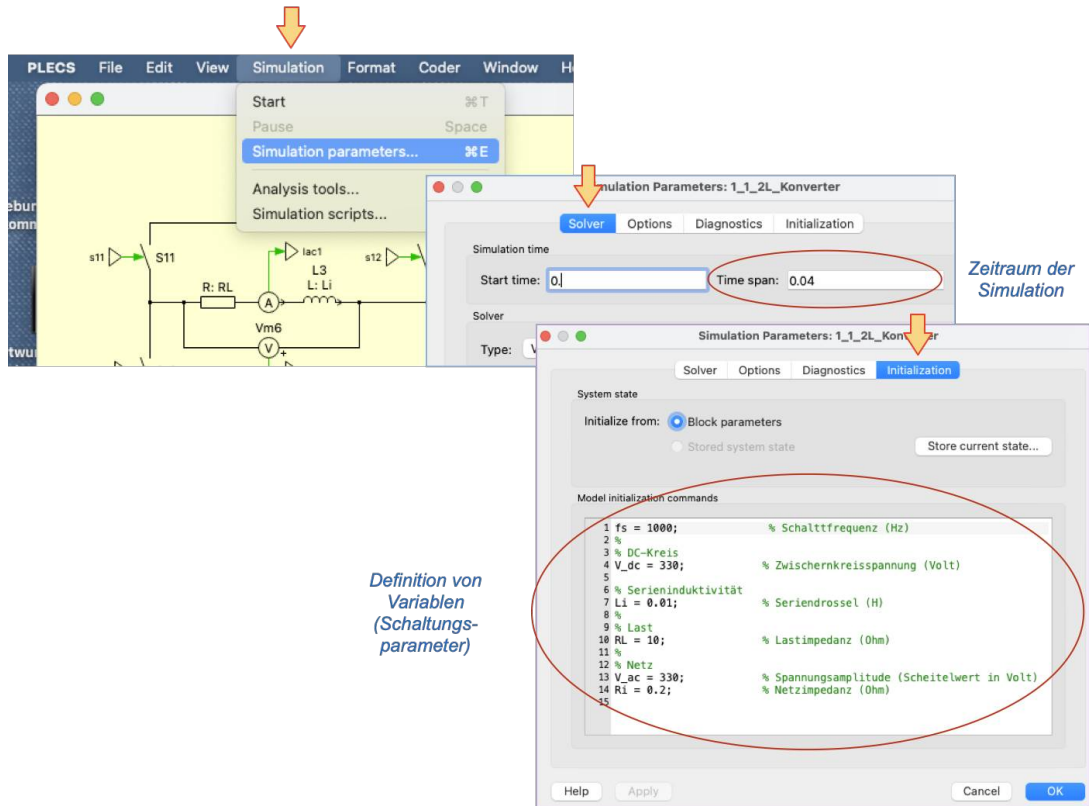
Das Modell findet sich in den Schulungsunterlagen. Es besteht einerseits aus dem Leistungsteil als elektrische Schaltung (wobei die Transistoren als Schalter dargestellt sind), andererseits aus der Messtechnik (in der elektrischen Schaltung) und der Signalverarbeitung einschließlich der Erzeugung der Steuersignale für den Umrichter. Das Modell wird einerseits an einer ohmschen Last betrieben, andererseits an einem einphasigen Wechselspannungsnetz.

Frage 1.1.1: Laden Sie das Modell und ergründen Sie die Funktionsweise. Starten Sie hierzu die Simulation und beobachten Sie das Verhalten an den Oszilloskopen. Folgende Abbildung zeigt das Referenzsignal und seine Approximation durch ein pulsbreitenmoduliertes Signal.



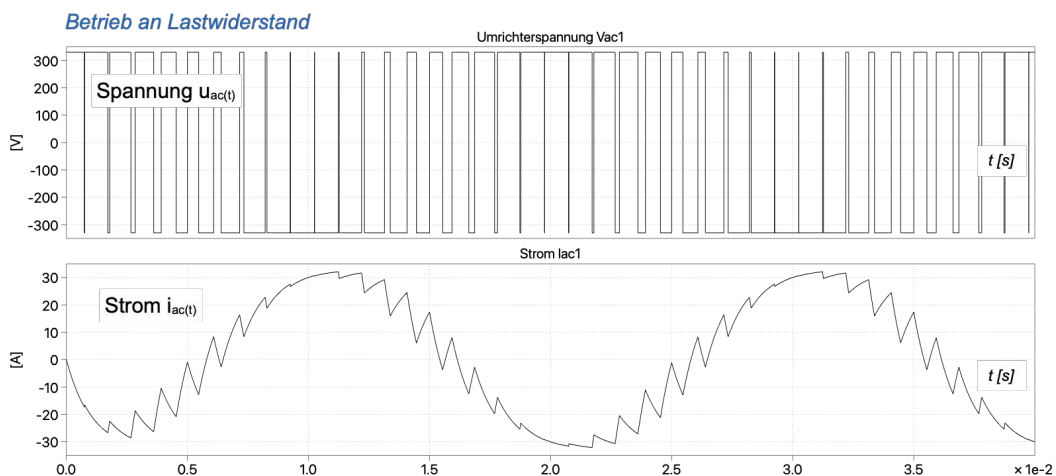
An welchen Stellen erwarten Sie die größten Fehler der Approximation? Wir werden aus dem PWM-Signal Steuersignale abgeleitet?

Frage 1.1.2: Bedienung des Simulationswerkzeugs. Für die Modelle wurde PLECS verwendet. Unter dem Menüpunkt „Simulation“ lässt sich nicht nur die Simulation starten, sondern auch der zu simulierende Zeitraum einstellen, sowie Variablen für die Schaltung ablegen, wie in folgender Abbildung dargestellt.



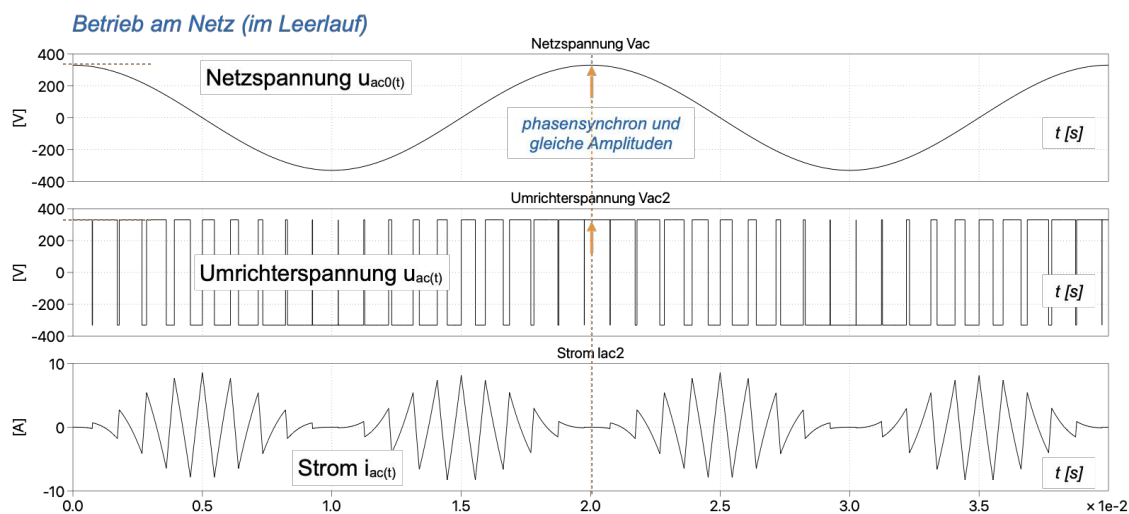
Variieren Sie den Simulationszeitraum, sowie einige Schaltungsparameter (Schaltfrequenz, Größe der Koppelinduktivität, ...) und ergründen Sie den Einfluss auf das Verhalten der Schaltung. Hinweis: Um die Effekte mit geringer Zeitauflösung zu zeigen, wird hier mit einer Schaltfrequenz von 1 kHz gearbeitet. In der Praxis würde man sich im oberen Audibereich bzw. außerhalb des Audibereichs bewegen.

Frage 1.1.3: Betrieb an einem Lastwiderstand. Der linke Teil der Schaltung hat nur einen Lastwiderstand im AC-Zweig.



Wie verhält sich der Strom zur Spannung? Erklären Sie den Verlauf des Stroms, sowie seine Phasenlage im Verhältnis zur Umrichterspannung. Wo ist der Fehler am größten?

Frage 1.1.4: Betrieb am Wechselspannungsnetz. Der rechte Teil der Schaltung hat eine AC-Spannungsquelle mit Innenwiderstand im AC-Zweig.



Starten Sie mit phasensynchroner Urichterspannung gleicher Amplitude wie die Netzspannung (siehe Abbildung oben). Wodurch kommen die Ströme zustande? Wird Leistung transferiert? Die Amplitude der Urichterspannung lässt sich durch die Spannung am DC-Zwischenkreis verändert. Welche Auswirkungen hat eine solche Änderung (ΔU im Modell)? Wird Leistung transferiert? Welchen Einfluss hat die Phasenlage der Urichterspannung im Verhältnis zur Netzspannung? Verändern Sie hierzu die Phasenlage der Urichterspannung um beispielsweise $+\pi/8$ oder $-\pi/8$. Wird Leistung übertragen? Wird diese Leistung vom AC-Netz aufgenommen oder abgegeben? Wohin geht bzw. woher kommt die Leistung im Umrichter? Hinweis: Erläuterungen zur Schaltung mit Zeigerdiagrammen finden sich im Vorlesungsmanuskript.

Frage 1.1.5: Einfluss der Schaltungsparameter. Variieren Sie einige Schaltungsparameter (z.B. die Schaltfrequenz f_s , bzw. die Koppelinduktivität L_i). Welcher Einfluss ergibt sich auf die Schaltung bzw. die Auslegung der Schaltung?

Frage 1.1.6: Stellgrößen für eine Regelung. Die Schaltung hat als Stellgrößen: (1) die Amplitude der Urichterspannung, (2) die Phase der Urichterspannung im Verhältnis zur Netzspannung. Wie könnte man hieraus einen Regler für Wirkleistung P und Blindleistung Q realisieren? Wie wären Wirkleistung und Blindleistung in 4 Quadranten zu führen? Welche Kopplung besteht zwischen Netz und DC-Zwischenkreis? Wie wäre ein Spannungsregler für den netzbildenden Betrieb auszulegen?

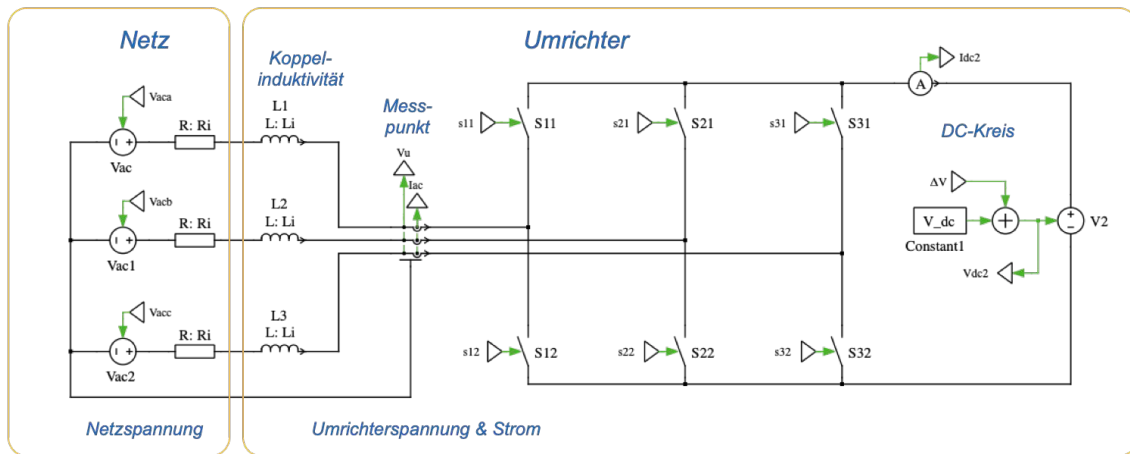
Lösung: siehe Vorlesungsmanuskript.

1.2. Dreiphasige Schaltung

Folgende Abbildung zeigt die dreiphasig aufgebaute Schaltung.

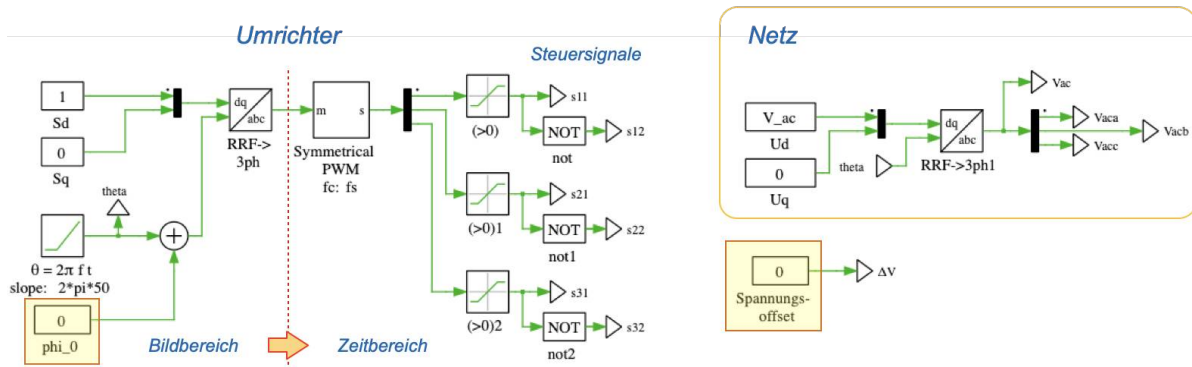
- Das Netz wird hierbei durch drei Spannungsquellen in Sternschaltung nachgebildet. Der Innenwiderstand des Netzes R_i ist unerheblich, dient jedoch zur Dämpfung des mit der Simulation verbundenen Einschwingvorgangs.
- Der Umrichter besteht aus den Koppelinduktivitäten ans Netz, den H-Brücken der 2L-Schaltung und dem DC-Kreis. Gegenüber der einphasigen Schaltung aus Aufgabe 1 werden die Brückenarme nun jedoch mit Steuersignalen aus dem Drehstromsystem angesteuert. Der DC-Zwischenkreis wird so jeweils zwischen Phasen geschaltet. Daher muss die Zwischenkreisspannung auf den Scheitelwert der verketteten Spannung angehoben werden (bzw. etwas darüber, wie ein Durchlauf zur Kalibration zeigt).

In der dreiphasigen Beschaltung an die AC-Zweige ergeben sich mehr als zwei Spannungsniveaus, Erläuterungen hierzu finden sich im Manuskript zur Vorlesung.



Frage 1.2.1: Aufbau der Schaltung. Untersuchen Sie Aufbau und Funktion der schaltung in der Simulation (laden Sie hierzu das Modell zu dieser Aufgabe). Vergleichen Sie mit der einphasigen Variante aus Abschnitt 1.

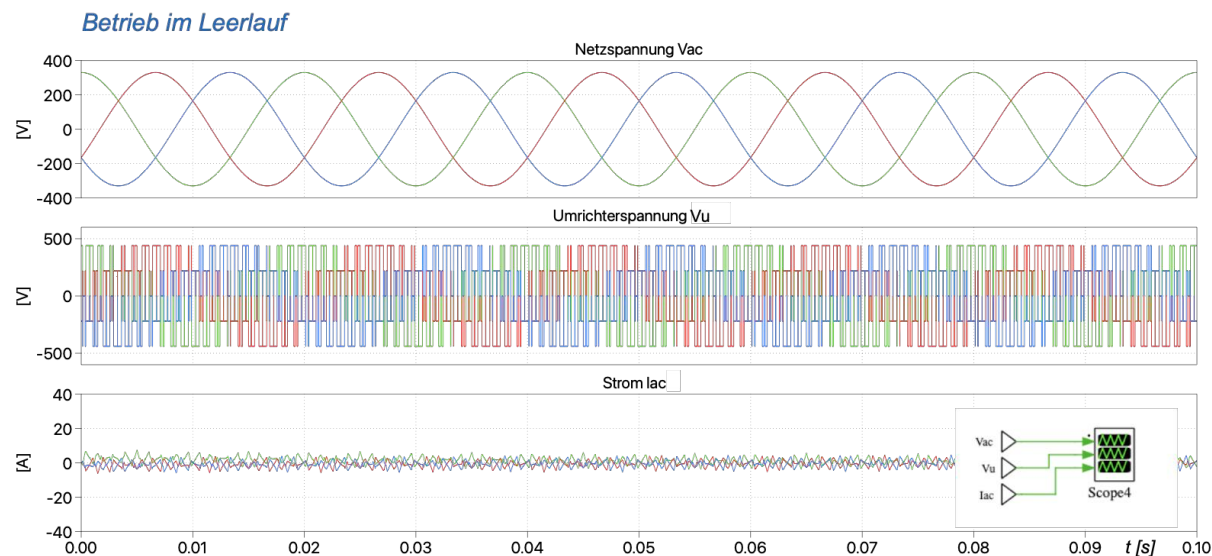
Frage 1.2.2: Transformation aus dem Zeitbereich. Die Referenzsignale für den Umrichter und das Drehstromsystem für das AC-Netz wurden im Modell durch eine Transformation eines Zeigers aus dem Bildbereich in den Zeitbereich erzeugt. Folgende Abbildung zeigt den Signalfuss aus dem Modell. Im Bildbereich vorgegeben werden hierzu Realteil S_d und Imaginärteil S_q des Zeigers S , bzw. Realteil U_d und Imaginärteil U_q der Netzspannung U_{ac} . Die Transformation erzeugt hieraus jeweils ein Drehstromsystem. Zur Transformation wird außerdem der zeitliche Verlauf des Phasenwinkels „theta“ benötigt: $\theta(t) = 2\pi f t$. Suchen Sie eine plausible Erklärung für die Transformation. Welche Information liegt im Bildbereich vor, welche Information enthält das System im Zeitbereich?



Lösung: Verwendet werden Realteil und Imaginärteil des Zeigers (z.B. Spannungszeigers), sowie die Phase, die die Frequenz f bzw. die Kreisfrequenz ω enthält. Mehr Information enthält das Drehstromsystem im Zeitbereich somit nicht: harmonischer Zeitverlauf mit der Frequenz f , sowie Betrag und Nullphasenlage einer Phase. Die anderen beiden Phasen gehen durch die Phasenverschiebungen um 120 Grad und 240 Grad aus Phase 1 hervor. Das System im Zeitbereich ist also symmetrisch.

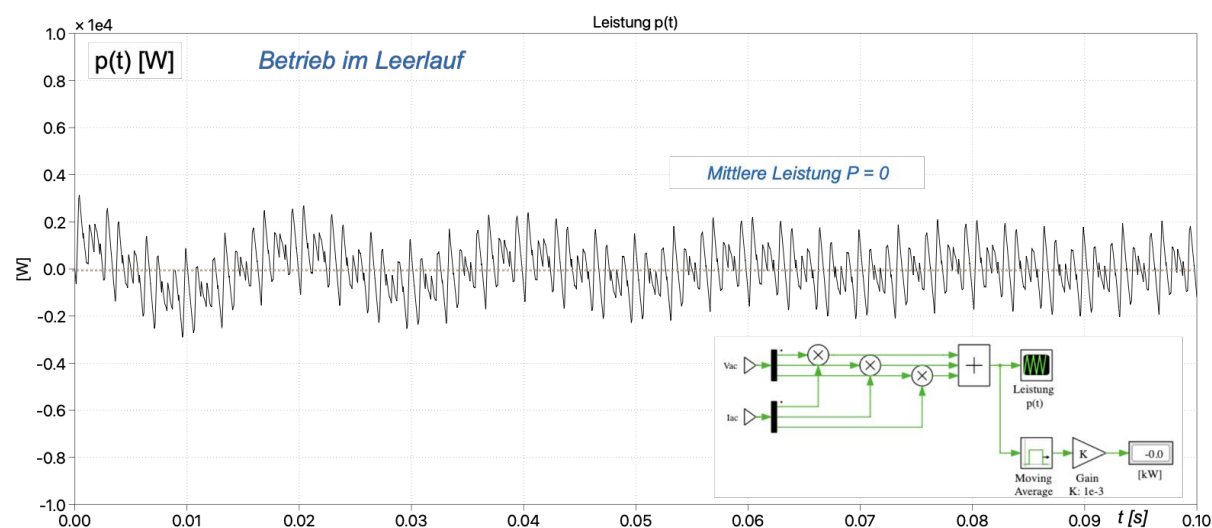
Frage 1.2.3: Betrieb im Leerlauf. Untersuchen Sie den Betrieb im Leerlauf.

Lösung: siehe folgende Abbildung.



Netzspannung und Umrichterspannung sind phasensynchron. Die Amplitude der Umrichterspannung ist schwer am Scheitelwert der PWM-Signals zu bemessen; diese liegt höher, um einen wirksamen Beitrag zu erzielen. Richtig eingestellt ergeben sich minimale Ströme, wie in der Darstellung gezeigt. Die verbliebenen Ströme sind Blindströme, bedingt durch die Signalform der pulsbreitenmodulierten Spannung, wie bereits im einphasigen Fall aus Abschnitt 1 zu sehen. Beim 2L-Umrichter sind diese Störungen besonders ausgeprägt (reduzieren sich jedoch mit höherer Schaltfrequenz und Einsatz eines LC-Filter zur Ergänzung der Koppelinduktivität).

Frage 1.2.4: Leistungsmessung. Die Schaltung enthält eine Leistungsmessung, wie in folgender Abbildung rechts unten dargestellt (zusammen mit dem zeitlichen Verlauf der Leistung $p(t)$ im Leerlauf. Erläutern Sie das Prinzip dieser Leistungsmessung. Welche physikalische Bedeutung hat $p(t)$ beim dreiphasigen System? Wie lässt sich hieraus die Wirkleistung berechnen? Bonusfrage: Wie ermittelt man Scheinleistung und Blindleistung?

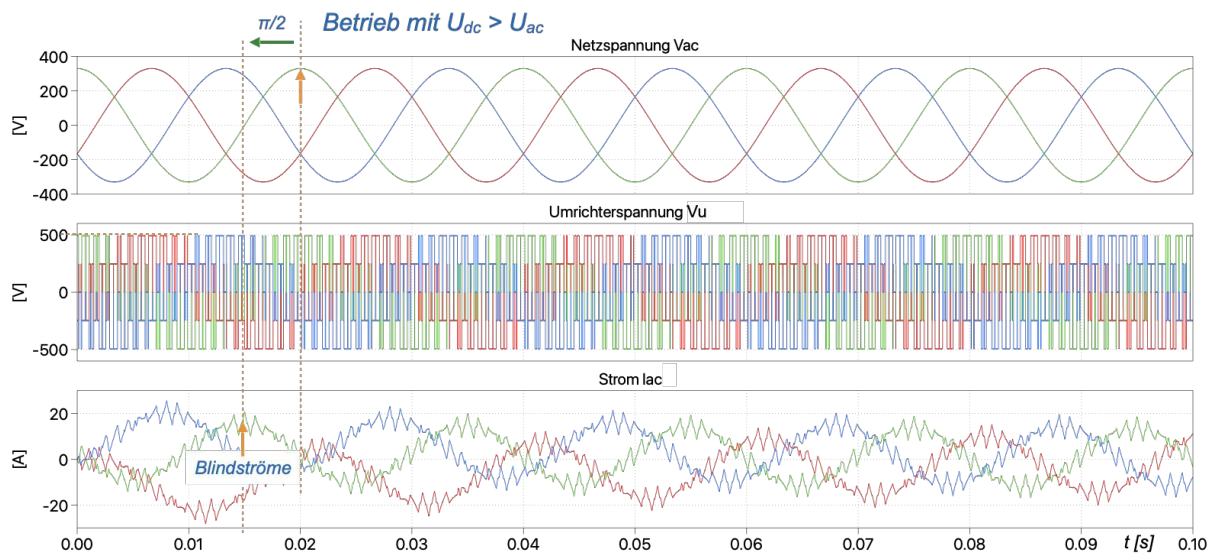


Lösung: Bei einem symmetrischen System heben sich die überlagerten höherfrequenten Anteile der Produkte $p_i(t)$ aus Strom und Spannung jeder Phase bei der Addition dieser Werte zu $p(t)$ weg (da die Phasenbeziehung aus dem Drehstromsystem erhalten bleibt). Es verbleiben die Störanteile. Die Wirkleistung entspricht einfach dem Mittelwert von $p(t)$. Dieser Wert ist in der Abbildung mit guter Nähe-

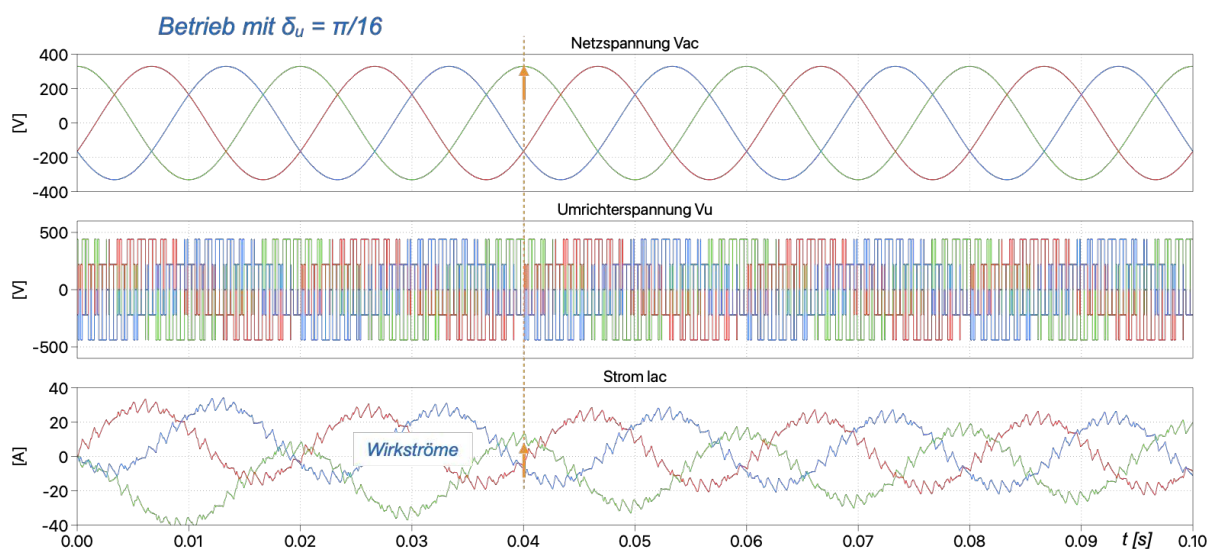
ung gleich Null (nachdem der Einschaltvorgang abgeklungen ist). Sonstige Zusammenhänge siehe Vorlesungsmanuskript.

Frage 1.2.5: Stellgrößen. Als Stellgrößen bleiben der Phasenwinkel der Umrichterspannung zur Netzspannung und die Amplitude der Umrichterspannung im Verhältnis zur Amplitude der Netzspannung. Betreiben Sie die Schaltung mit Bezug oder Abgabe von Blindleistung. Betreiben Sie die Schaltung mit Bezug oder Abgabe von Wirkleistung.

Lösung: (1) Betrieb mit Blindleistung: Hebt man die Umrichterspannung an (durch Erhöhung der Zwischenkreisspannung), eilt der Strom der Netzspannung um 90 Grad vor, der Umrichter gibt Blindleistung ab. Umgekehrt (durch Absenken der Umrichterspannung) nimmt der Umrichter Blindleistung auf.



(2) Betrieb mit Wirkleistung: Verstellt man den Phasenwinkel der Umrichterspannung in Bezug auf die Netzspannung, so ergeben sich Wirkströme, siehe folgende Abbildung.

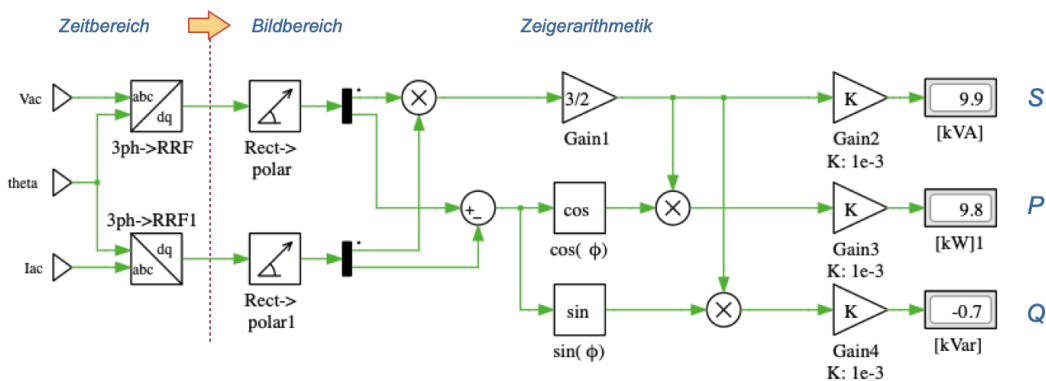


Wirkströme sind in Phase mit der Netzspannung, bzw. in Gegenphase (180 Grad bzw. $\pi/2$) mit der Netzspannung. Sind Stromrichtung (unabhängig von der Orientierung des Spannungsmeters) und die Netzspannung gleich, ergibt sich eine positive Wirkleistung P . Im Verbraucherzählpfeilsystem wird dies

als Leistungsaufnahme interpretiert. Die Messung der Leistung $p(t)$ zeigt die Wirkleistung einschließlich des Vorzeichens als Mittelwert. Details und Hintergründe finden sich im Vorlesungsmanuskript.

In der Abbildung läuft der Umrichter um $\pi/16$ vor dem Netz, und somit im Generatorbetrieb. Der Umrichter gibt Wirkleistung ab, das Netz nimmt sie auf. Am Messpunkt wird der Strom ins Netz gemessen. Die zusammen mit der Netzspannung berechnete Leistung ist positiv, zeigt also die vom Netz aufgenommene Leistung.

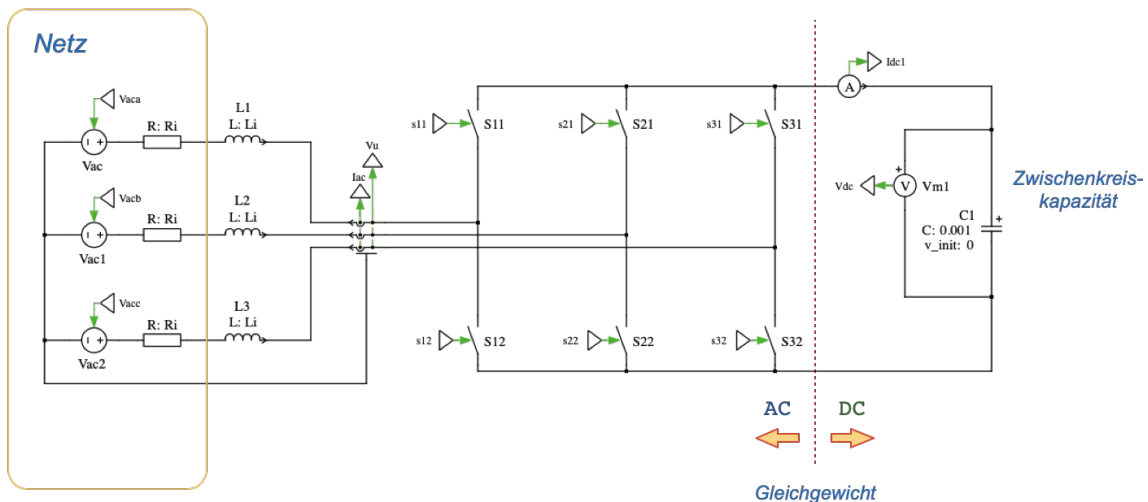
Frage 1.2.6: Berechnung von Scheinleistung und Blindleistung. Die Wirkleistung als physikalische Leistung (Mittelwert aus dem Zeitverlauf $p(t)$) lässt sich unmittelbar aus den Zeitverläufen von Strom und Spannung ermitteln. In der Schaltung wurde die in folgender Abbildung gezeigte mathematische Berechnung ergänzt. Erläutern Sie die Funktionsweise zusammen mit den Definitionen von Wirkleistung, Blindleistung und Scheinleistung.



Lösung: $\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = P + j Q$, siehe Vorlesungsmanuskript. Die Schaltung berechnet S, P und Q aus dem Stromzeiger und dem Spannungszeiger. Hierbei ist auf die Verwendung von Scheitelwerten in der Simulation zu achten, während für die Leistungsformeln Effektivwerte verwendet werden. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass das System dreiphasig ist (gesamte Leistung = dreifache Strangleistung).

1.3. DC-Zwischenkreis im Leerlauf

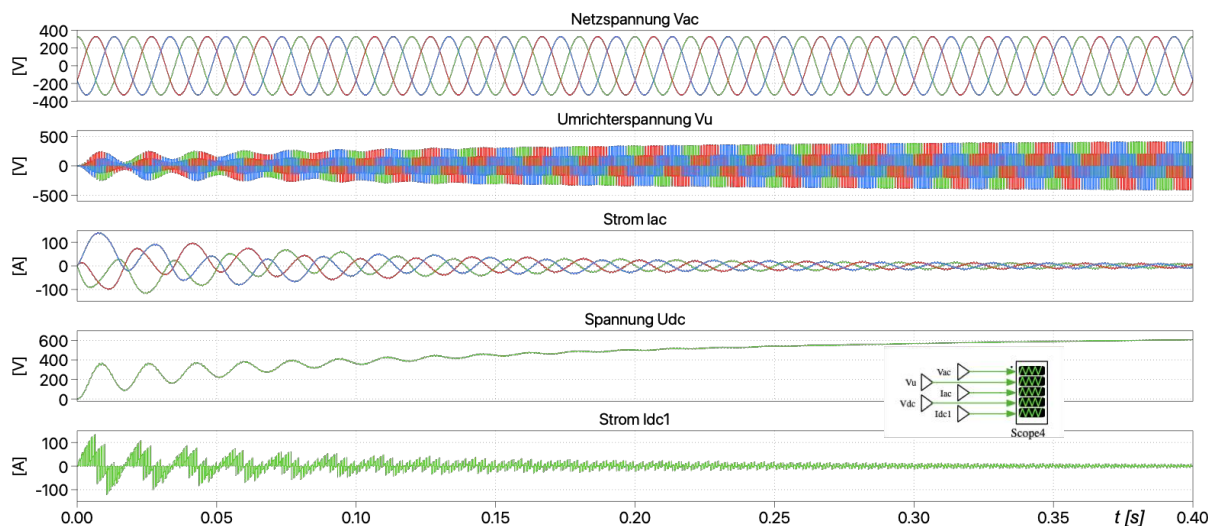
Folgende Schaltung zeigt den Umrichter mit Zwischenkreiskapazität.



Eine Vorgabe der Spannung im DC-Kreis ist nun nicht mehr unmittelbar möglich. Der DC-Kreis kann nun dauerhaft auch keine Leistung mehr aufnehmen bzw. abgeben.

Frage 1.3.1: Simulieren Sie die Schaltung mit leerem Kondensator (Initialspannung = 0), bzw. mit vorgeladenem Kondensator (z.B. Initialspannung = 1000 V). Welches Gleichgewicht stellt sich ein? Erläutern Sie das Verhalten der Schaltung.

Lösungsbeispiel:



Bei leerem Kondensator liegt die Zwischenkreisspannung unter der Netzspannung, der Kondensator füllt sich allmählich auf. Liegt die Initialspannung des Zwischenkreises weit über den Netzspannung, entlädt sich der Kondensator allmählich ins Netz, bis ein Gleichgewichtszustand hergestellt ist. Im Gleichgewicht findet kein Leistungstransfer zum Netz statt.

Frage 1.3.2: Leistung und Energie. Wohin wird nach dem Einschalten (Start der Simulation) Leistung bzw. Energie übertragen? Beschreiben Sie den Initialzustand und den eingeschwungenen Zustand. Untersuchen Sie Leistung und Energie in der Simulation.

Lösung: siehe Simulationsmodell.

Frage 1.3.3: Zwischenkreisspannung und Kondensatorstrom. Wie hängt die Zwischenkreisspannung von Kondensatorstrom ab? Wie lässt sich folglich die Zwischenkreisspannung regeln?

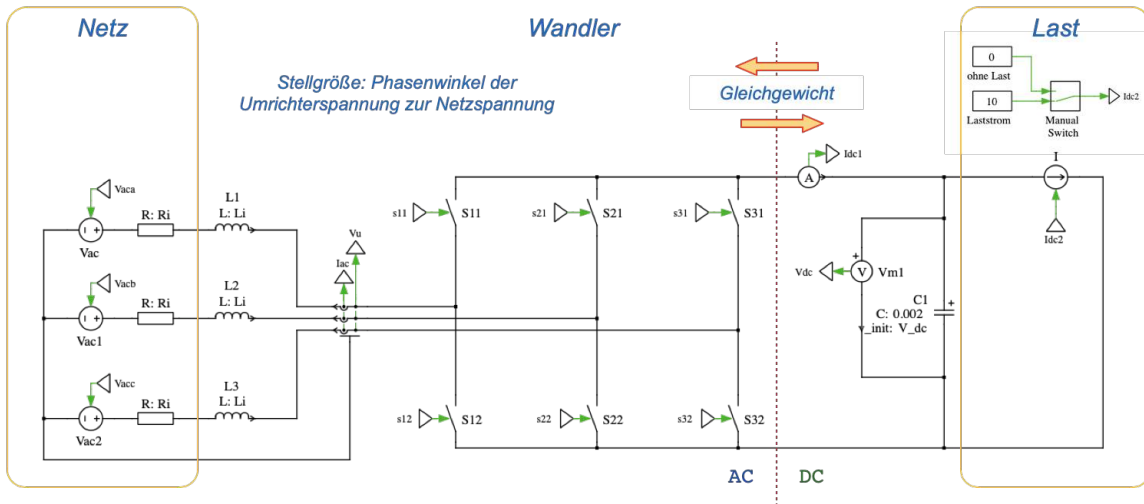
Lösung: siehe Vorlesungsmanuskript, Abschnitt 1.4. Die Zwischenkreisspannung ist das Integral des Kondensatorstroms. Somit lässt sich über die Differenz aus Zufluss und Abfluss im Zwischenkreis die Zwischenkreisspannung regeln.

1.4. DC-Zwischenkreis mit Last

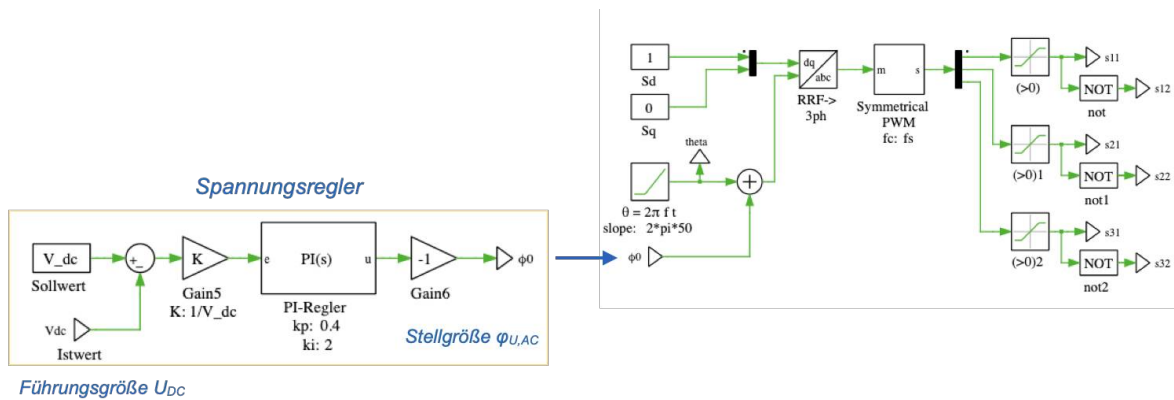
Im DC-Zwischenkreis wird nun eine Stromquelle als Last ergänzt, wie in folgender Abbildung dargestellt. Je nach Stromrichtung wird Leistung entnommen oder Leistung eingespeist. Um ein Gleichgewicht herzustellen, muss die jeweilige Wirkleistung aus dem AC-Netz entnommen bzw. ins AC-Netz weitergegeben werden.

Ein Indikator für die Leistungsbilanz ist die Spannung im DC-Zwischenkreis. Wie aus dem Schaltbild zu entnehmen, bleibt die Zwischenkreisspannung dann konstant, wenn gleich viel Strom zufließt als abfließt. Die Höhe der Zwischenkreisspannung ist hierbei grundsätzlich egal.

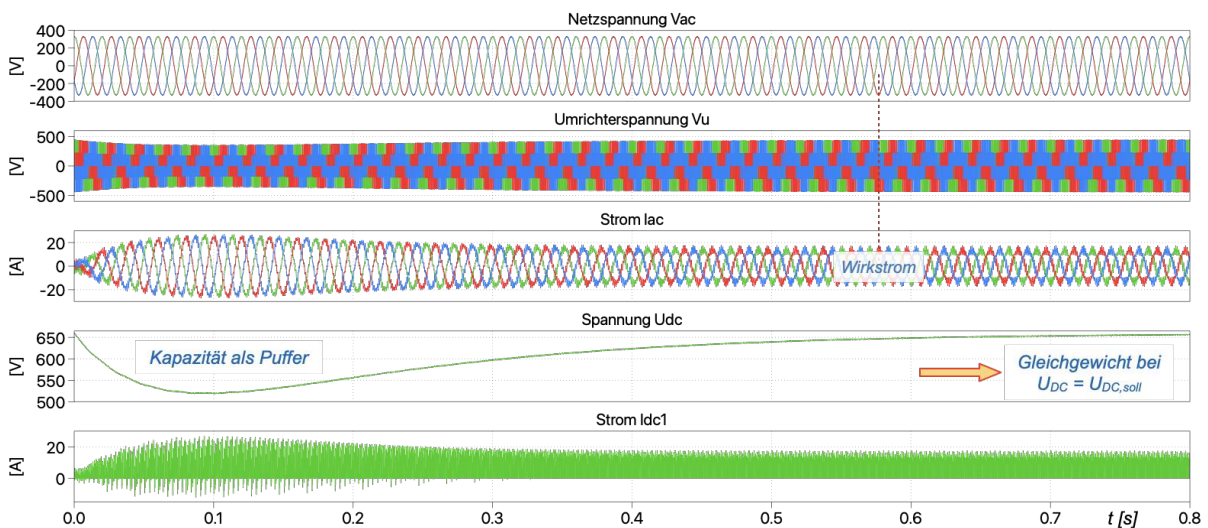
Allerdings ergeben sich bei Abweichung der Zwischenkreisspannung vom Gleichgewichtszustand U_{DC} im Leerlauf Unterschiede zwischen den Spannungsamplituden der Umrichterspannung und Netzspannung, und somit AC-seitig Blindströme. Daher soll der Sollwert der Zwischenkreisspannung auf den Wert U_{DC} fixiert werden. Die Fixierung der Zwischenkreisspannung U_{DC} erfolgt mit Hilfe eines Spannungsreglers. Bedingt durch das Gleichgewicht von Zulauf und Ablauf ist dann auch die Leistungsbilanz ausgeglichen.



Frage 1.4.1: Erläutern Sie die Funktionsweise des Reglers aus der Simulation (siehe Abbildung unten). Was ist die Führungsgröße, was ist die Stellgröße? Welcher Messwert wird als Istwert benötigt? Untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation für Lastströme mit unterschiedlichen Vorzeichen. Welchen Verlauf nimmt die Stellgröße während der Regelung?

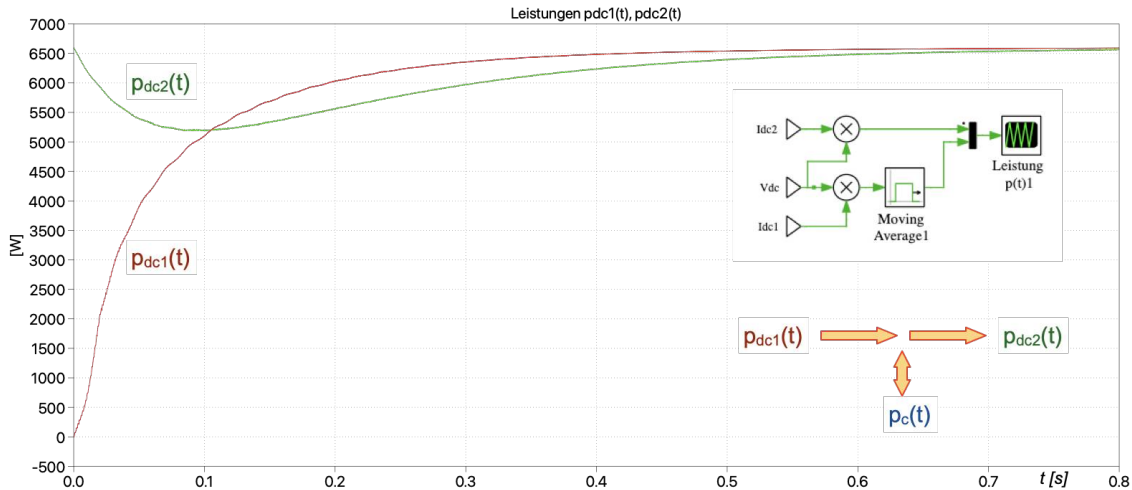


Lösungsbeispiel: siehe folgender Simulationslauf.



Frage 1.4.2: Leistungsbilanz. Untersuchen Sie den Zufluss an Leistung in den DC-Zwischenkreis, sowie den Abfluss der Leistung aus dem DC-Zwischenkreis. Woher kommt die Differenz?

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung. Die Leistungsdifferenz steuert die Zwischenkreiskapazität bei. Der Zwischenkreiskondensator fungiert als Energiespeicher für die Regelung, so dass die Zwischenkreisspannung als Leistungsindikator verwendet werden kann.



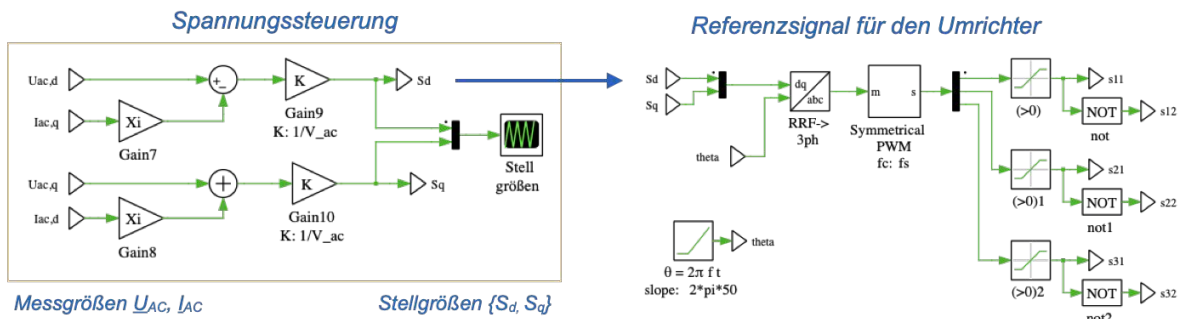
Frage 1.4.3: Vorsteuerung. Die Regelung reagiert etwas träge. Grund hierfür ist, dass der regler durch Probieren die richtige Einstellung findet. Eine Regelung lässt sich deutlich beschleunigen, indem man zusätzliche Informationen über die Beschaltung und zusätzliche Messwerte einbringt, wie man sie bei einer Steuerung verwenden würde. Die Steuerung fährt als sogenannte Vorsteuerung einen Arbeitspunkt in der Nähe des gewünschten Sollwertes an, der Regler übernimmt die genaue Ausregelung. Welche Werte für die Vorgabe der Umrücker Spannung \underline{U} ergeben sich aus der Maschengleichung:

$$\underline{U} = \underline{U}_{ac} + jX \underline{I}_{ac}$$

Hinweis: Formen Sie nach Realteil und Imaginärteil um, so dass sich Vorgaben für U_d und U_q ergeben.

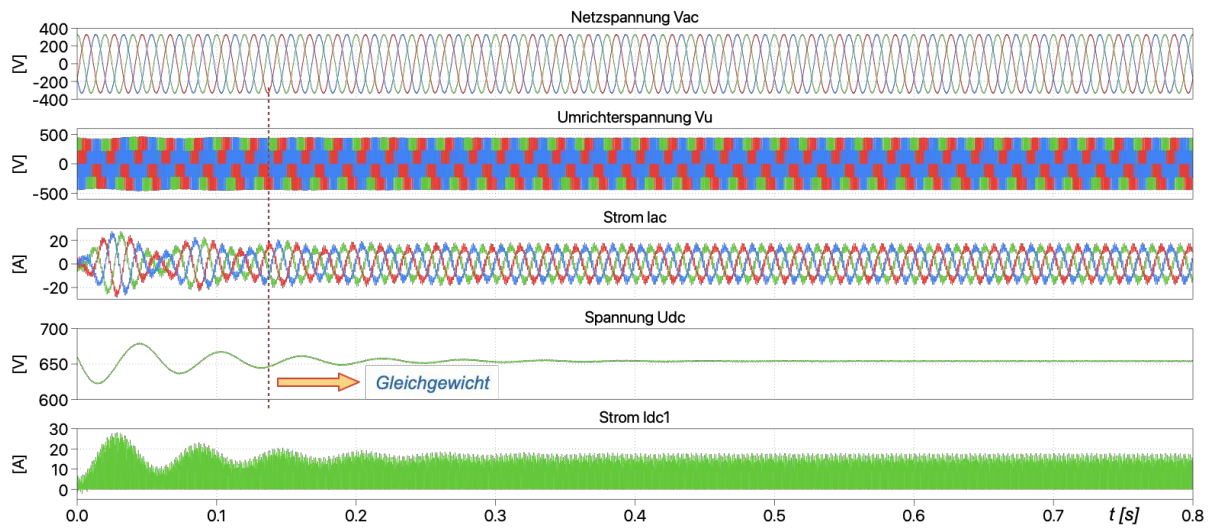
Lösung: $U_d = U_{ac,d} - X I_{ac,q}$
 $U_q = U_{ac,q} + X I_{ac,d}$

Mit Hilfe von Messwerten für \underline{U}_{ac} und \underline{I}_{ac} lässt sich hieraus eine Steuerung ableiten:



Frage 1.4.4: Reaktionszeit mit Vorsteuerung. Untersuchen Sie die Wirksamkeit der Vorsteuerung in der Simulation mit Lastströmen unterschiedlicher Vorzeichen. Hinweis: Starten Sie die Simulation mit vorgeladenem Zwischenkreis.

Lösungsbeispiel: Die Schaltung schwing nun sehr viel schneller ein.

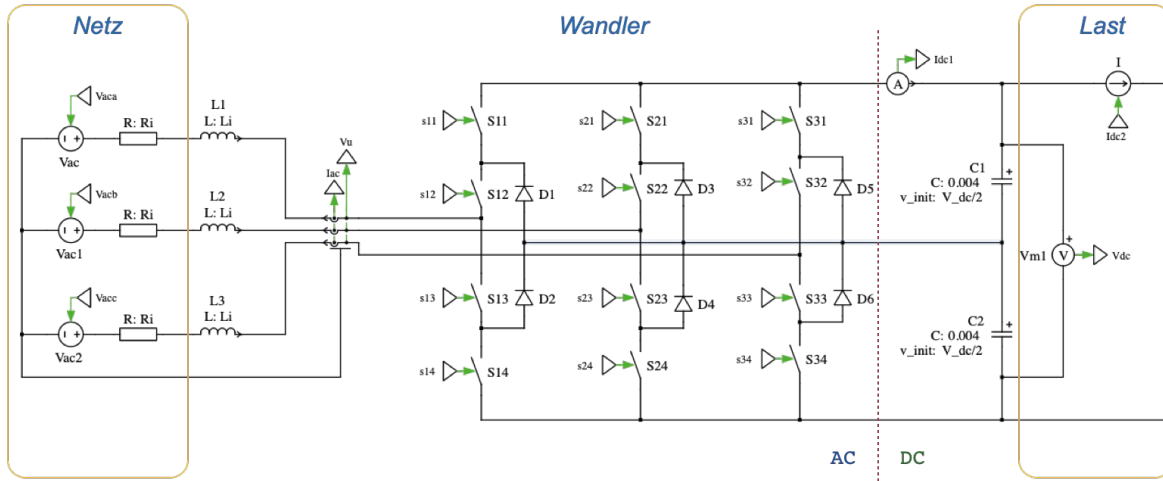


2. Drei-Level-Konverter

Drei-Level-Konverter verwenden als Approximation der Umrichterspannung ein Referenzsignal mit 3 Spannungsniveaus $\{-1, 0, 1\}$, anstelle nur zwei Spannungsniveaus $\{-1, 1\}$. Die Approximation gelingt hierdurch bei vertretbarem Schaltungsaufwand deutlich genauer (siehe Vorlesungsmanuskript, Abschnitt 3.2 und 3.6).

2.1. Aufbau und Funktionsweise

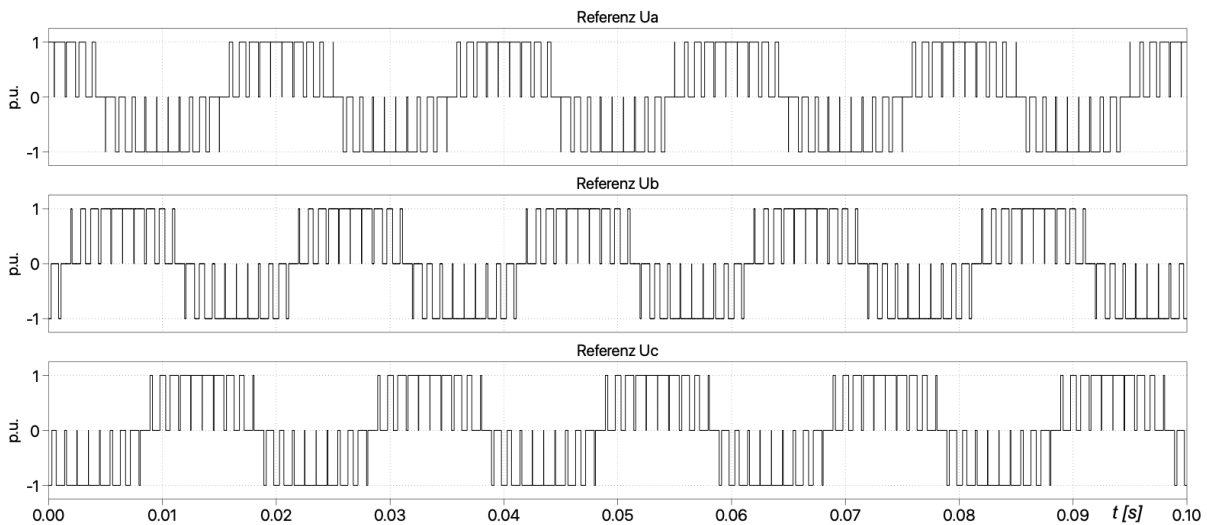
Folgende Abbildung zeigt den Aufbau der Schaltung.



Frage 2.1.1: Erläutern Sie die Funktionsweise der Schaltung.

Lösung: Die Schalter in jeder Phase ermöglichen die Verbindung der Niveaus $\{-1, 0, 1\}$ mit der AC-Seite. Das Nullpotenzial wird durch die Reihenschaltung zweier Zwischenkreiskondensatoren definiert. Die jeweiligen Stromflüsse finden sich im Vorlesungsmanuskript.

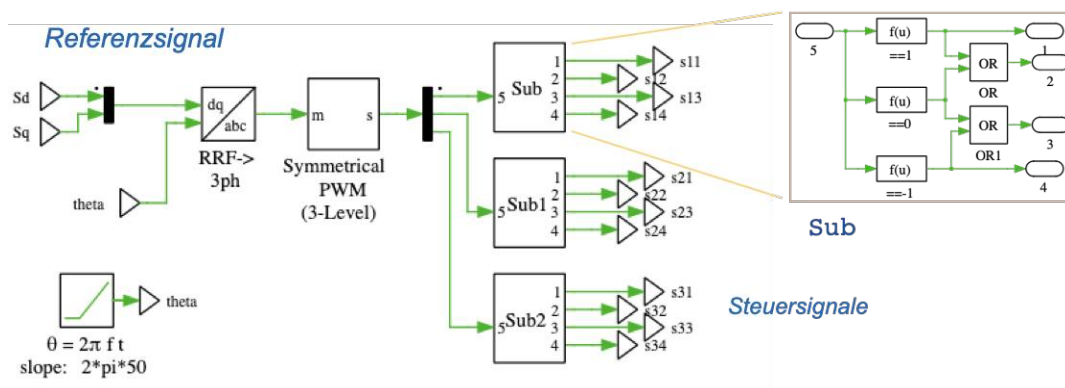
Frage 2.1.2: Approximation. Folgende Abbildung zeigt die Abbildung der Referenzsignale in PWM-Signale mit 3 Niveaus. Worin bestehen die Unterschiede zum Zwei-Level-Konverter?



Lösung: Die Approximation gelingt nun deutlich besser, vor allem im Bereich um den Wert Null. Hier steht hierfür ein eigenes Nullpotenzial zur Verfügung, beim Zwei-Level-Konverter muss das Nullpoten-

zial aus $\{-1, 1\}$ gemittelt werden. Ein Vergleich der Signalgüte und Störeinflüsse findet sich im Vorlesungsmanuskript in Abschnitt 5 (Klirrfaktor ca. 50% statt 100%, deutlich geringeres Störspektrum bei insgesamt vertretbarem Mehraufwand für die Schaltung).

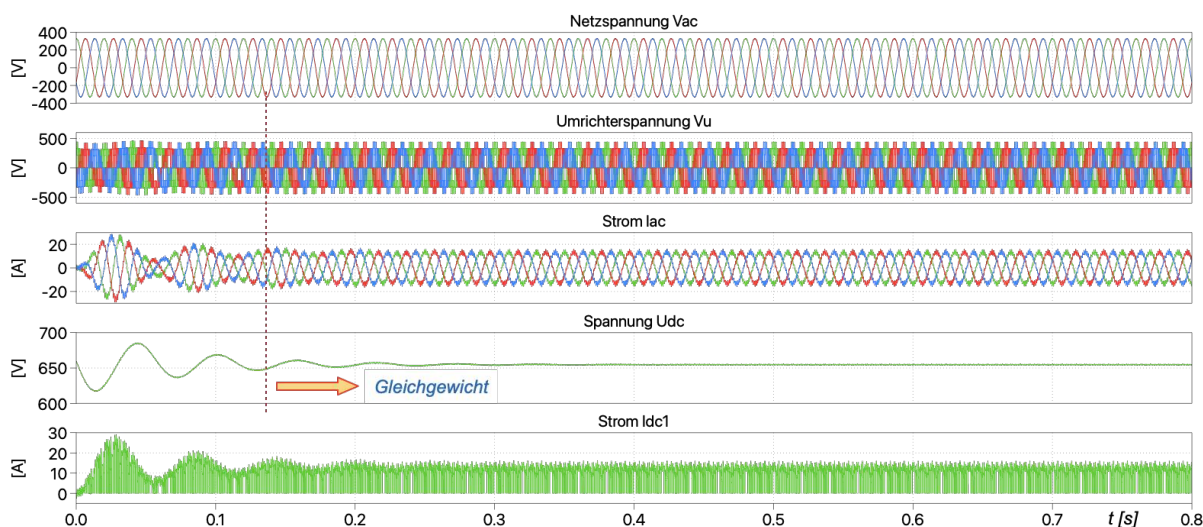
Frage 2.1.3: Ableitung der Steuersignale. Aus dem Referenzsignal werden zunächst die Approximation mit Hilfe der PWM erzeugt, hieraus dann die Steuersignale abgeleitet. Identifizieren Sie die Signale im Zeitdiagramm.



Lösung: Für das Referenzsignal werden Realteil S_d und Imaginärteil S_q vorgegeben und hiermit durch Transformation in den Zeitbereich ein Drehstromsystem hergestellt. Die Signale im Zeitbereich werden durch PWM-Signale mit 3 Niveaus approximiert (Block „Symmetrical PWM; 3-Level“, siehe Abbildung in der vorausgegangenen Aufgabe). Hieraus folgen die Steuersignale für die Ansteuerung per Schaltung.

Frage 2.1.4: Untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation.

Lösungsbeispiel: Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf mit den gleichen Einstellungen wie beim Zwei-Level-Konverter aus Aufgabe 1.4.4.



Die Signalformen von Strom und Spannung sind wegen der zusätzlichen Amplitude deutlich näher an der gewünschten Sinus-Form. Bei gleichen Randbedingungen und gleichem Regler verhält sich die Schaltung ähnlich dem Zwei-Level-Konverter aus Aufgabe 1.4.4.

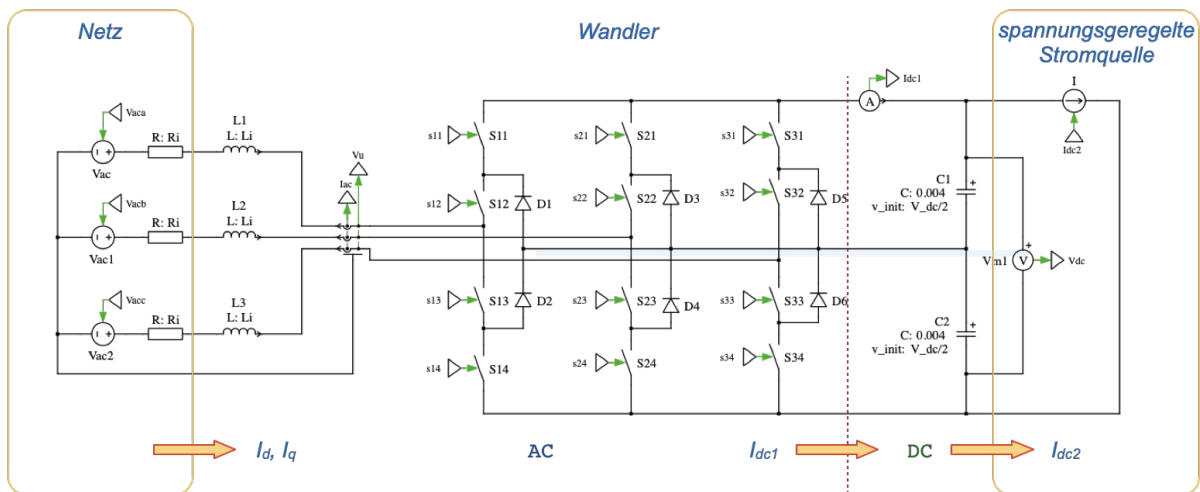
2.2. Stromgeführter Betrieb

Die Regelung des Konverters soll nun so erweitert werden, dass ein stromgeführter Betrieb auf der AC-Seite möglich ist. Ziel ist es, den Wirkstrom I_d und den Blindstrom I_q frei zu wählen. Während der Blindstrom aus der Zwischenkreiskapazität bezogen werden kann, muss die mit dem Wirkstrom verbundenen Wirkleistung auf der DC-Seite bereitgestellt werden (im Falle einer Einspeisung), bzw. aufgenommen werden (im Falle einer Bezugsanlage).

Für den stromgeführten Betrieb sind folgende Erweiterungen nötig:

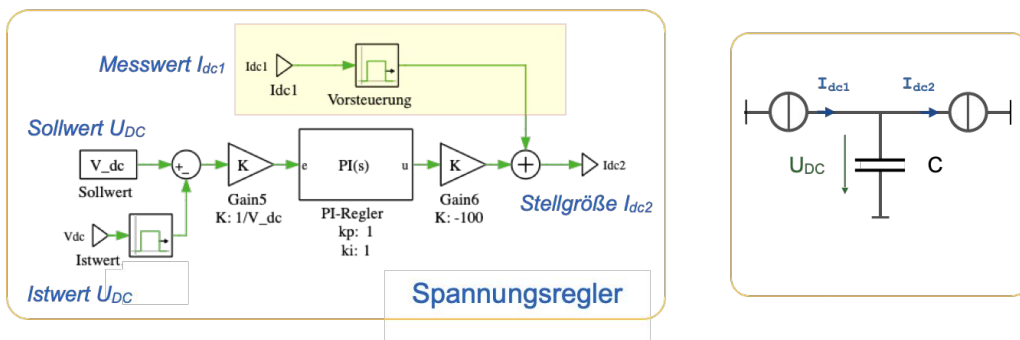
- Eine Energiequelle im DC-Zwischenkreis: Es wird eine spannungsgeregelte Stromquelle verwendet. Geregelt wird die Zwischenkreisspannung. Bleibt die Zwischenkreisspannung konstant, sind Zufluss und Abfluss im DC-Kreis im Gleichgewicht.
- Ein Stromregler auf der AC-Seite: Wirkstrom I_d und Blindstrom I_q werden als Sollwerte für eine Regler vorgegeben. Der Regler stellt die Stellgrößen der Schaltung so ein, dass die Vorgaben erreicht werden. Hierzu stehen dem Regler die Istwerte der Führungsgröße zur Verfügung, sowie eine Vorsteuerung mit weiteren Messwerten.

Wie folgende Abbildung zeigt, bleibt die Schaltung hierbei unverändert.



Frage 2.2.1: Funktionsprinzip der Regelung. Erläutern Sie das Funktionsprinzip. Im Fall der Einspeisung: Woher stammt die die ins Netz eingespeiste Wirkleistung? Für eine Bezugsanlage: Wohin wird die aufgenommene Leistung transportiert? In beiden Fällen: Woher stammt die ins Netz eingespeiste Blindleistung, bzw. was geschieht mit der aus dem Netz aufgenommenen Blindleistung? Welchen Zweck verfolgt die Regelung der Zwischenkreisspannung? Wieso übernimmt diese Regelung nicht der Umrichter?

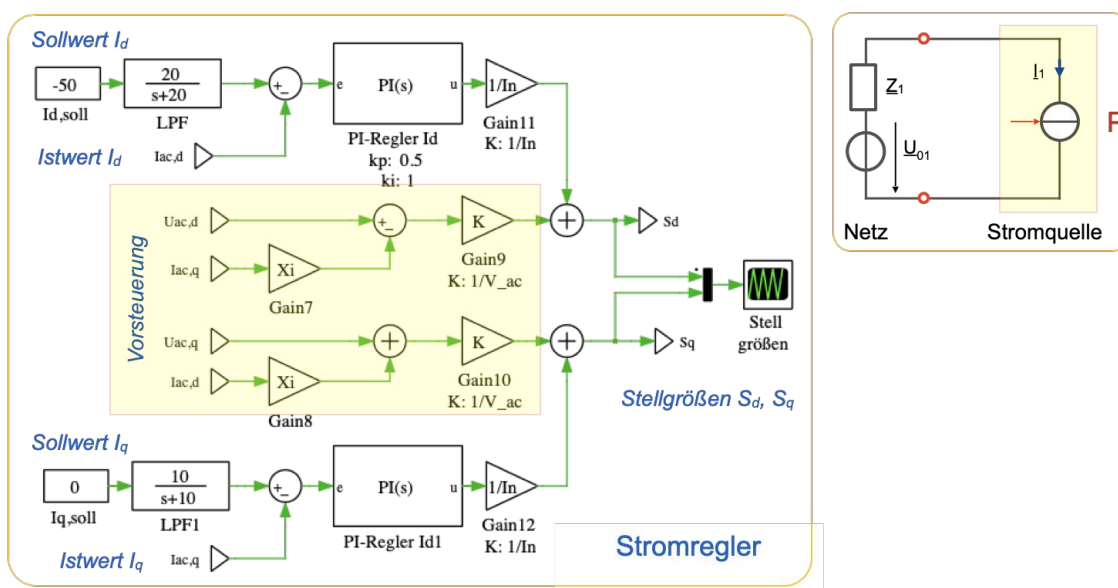
Frage 2.2.2: Spannungsregler im DC-Kreis. Folgende Abbildung zeigt den Spannungsregler. Erläutern Sie das Funktionsprinzip.



Lösung: Funktionsprinzip ist eine Füllstandsregelung: Stimmen Zulauf und Ablauf überein, so bleibt der Füllstand des Kondensators konstant. Die Höhe des Füllstandes, d.h. das Spannungsniveau, ist für das Gleichgewicht egal.

Der Regler verwendet daher als Vorsteuerung einen Messwert des Zulaufs I_{DC1} als Vorgabe für den Ablauf I_{DC2} . Der Regler justiert nun den Ablauf I_{DC2} so nach, dass der gewünschte Füllstand (= Führungsgröße) erreicht wird. Am Kondensator gilt, dass das zeitliche Integral aus der Differenz von Zulauf und Ablauf $I_C = I_{DC2} - I_{DC1}$ die Zwischenkreisspannung ergibt (siehe Vorlesungsmanuskript).

Frage 2.2.3: Stromregler. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Stromreglers. Erläutern Sie das Funktionsprinzip unter Verwendung des einphasigen Ersatzschaltbildes auf der rechten Seite der Abbildung. Welches ist die Führungsgröße? Welches sind die Stellgrößen? Welchem Zweck dient die Vorsteuerung?



Lösung: Der Wandler funktioniert zusammen mit der Regelung als Stromquelle am Netz, wobei das Netz als Spannungsquelle abgebildet wird.

Führungsgröße der Regelung ist der Strom $\underline{I} = \{I_d, I_q\}$. Die Führungsgröße wird als Sollwert vorgegeben. Abweichungen zwischen Sollwert und Istwert der Führungsgröße gehen an den Regler. Der Regler stellt die Stellgrößen solange nach, bis die Führungsgröße der Vorgabe entspricht.

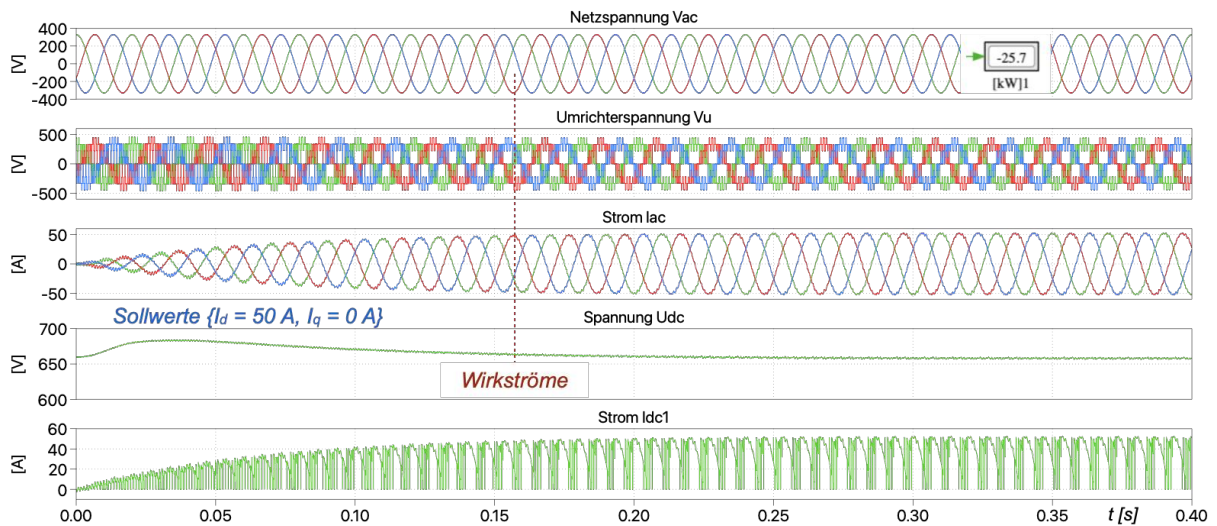
In der Schaltung wird jeweils ein PI-Regler für den Realteil I_d und ein PI-Regler für den Imaginärteil I_q des Stroms verwendet. Die Vorsteuerung (siehe Abschnitt 1.4) sorgt für die rasche Führung der Stellgrößen in die Nähe des gewünschten Arbeitspunktes. Der Regler übernimmt die Feinarbeit.

Frage 2.2.4: Simulation. Untersuchen Sie die Funktionsweise der Schaltung mit Hilfe des Modells zu dieser Aufgabe. Wählen Sie unterschiedliche Arbeitspunkte. Welche Veränderungen an den Stellgrößen nimmt der Regler vor?

Hinweis: Arbeitspunkte, bei denen die Umrichterspannung größer werden müsste als die Netzspannung (z.B. $I_q < 0$), sind mit der gewählten Spannung im DC-Kreis nicht möglich. Hierzu müsste die Zwischenkreisspannung z.B. auf 800 V erhöht werden. Auf solche Einstellungen wird im Rahmen der Schulung verzichtet.

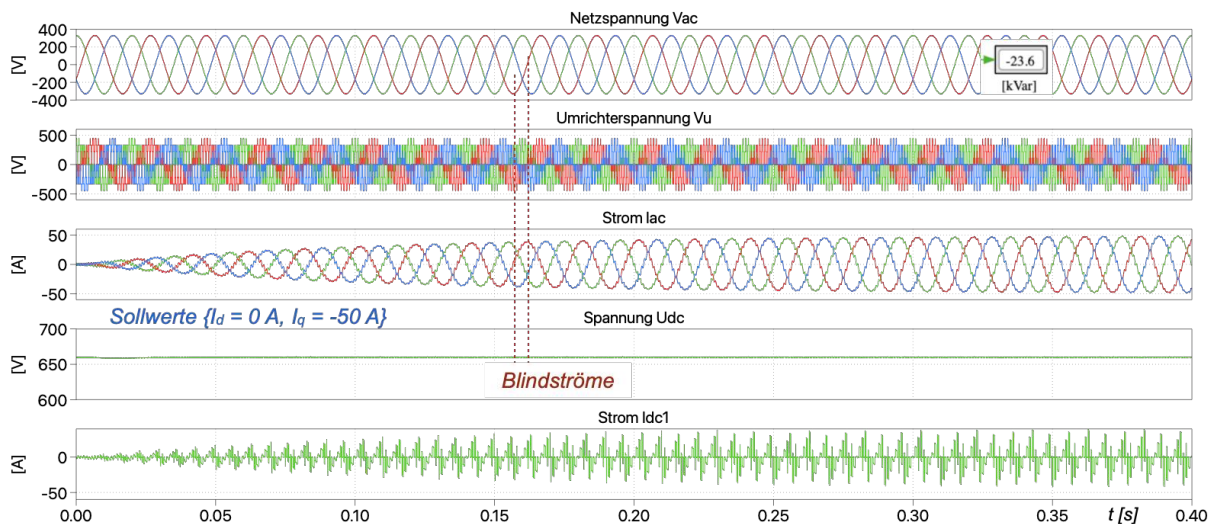
Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.

Im ersten Simulationslauf wurde ein reiner Wirkstrom vorgegeben. Dieser Strom sollte also in Phase mit der Netzspannung und der Umrichterspannung sein (passende Zeigerdiagramme finden sich im Vorlesungsmanuskript). Im Diagramm lässt sich die Phasenlage am einfachsten an den Maxima des Stroms mit den Spannungen vergleichen: Diese sollten entweder mit dem Maxima oder den Minima übereinstimmen. Das Vorzeichen des Stromes bestimmt die Lastflussrichtung.



Die Funktionsweise des Reglers lässt sich am zeitlichen Verlauf der Stellgrößen überprüfen (hier $S_d \rightarrow 1$, $S_q \rightarrow -0.5$). Am Verlauf der Zwischenkreisspannung U_{DC} erkennt man, dass der Regler im Zwischenkreis ebenfalls gefordert ist, die erforderliche Leistung bereitzustellen bzw. aufzunehmen.

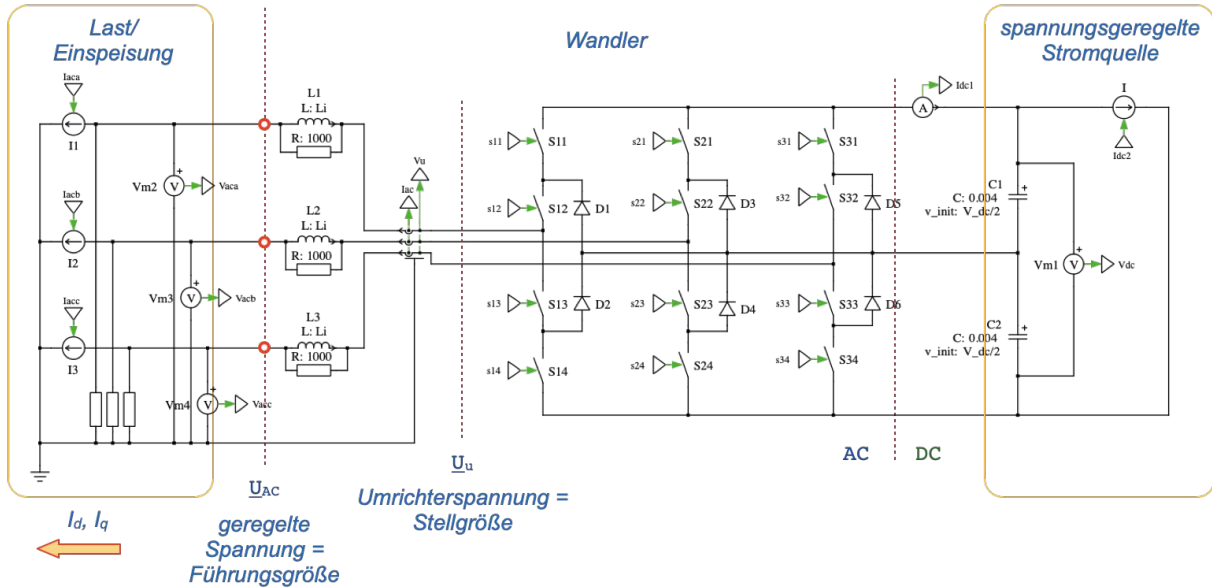
Wird ein reiner Blindstrom vorgegeben, ergibt sich der in folgender Abbildung gezeigte Simulationslauf. Hier erkennt man keine Änderungen der Spannung im Zwischenkreis nicht bemerkbar, da kein Leistungsfluss vorhanden ist.



Ein Blick auf die Phasenlage der Strome im Vergleich zu den Spannungen zeigt eine Verschiebung um 90 Grad (d.h. vom Maximum oder Minimum in die Nullstelle). Der Verlauf der Stellgrößen demonstriert die Funktion des Reglers: Hier bewegen sich $S_d \rightarrow 0.55$, und $S_q \rightarrow -0.03$.

2.3. Spannungsgeführter Betrieb

Im spannungsgeführten Betrieb erzeugt der Umrichter die Spannung am Anschlusspunkt. Ziel der Regelung ist die Bereitstellung einer stabilen Spannung, unabhängig von der Belastung am Anschlusspunkt. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau der Schaltung.



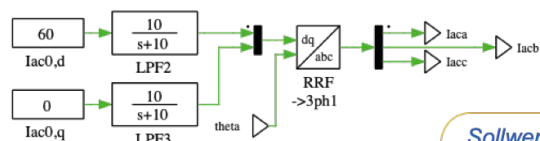
Frage 2.3.1: Erläutern Sie das Funktionsprinzip. Welches ist die Führungsgröße? Welche Stellgröße stellt die Schaltung zur Verfügung? Woher wird Wirkleistung bezogen, bzw. wo wird Wirkleistung aufgenommen?

Lösung: Ziel ist die Bereitstellung einer stabilen Spannung \underline{U}_{AC} am Anschlusspunkt. Somit ist diese Spannung die Führungsgröße. Die Stellgröße bleibt unverändert die Umrichterspannung. Die Umrichterspannung ist so einzustellen, dass die gewünschte Spannung an den Anschlussklemmen eingehalten wird.

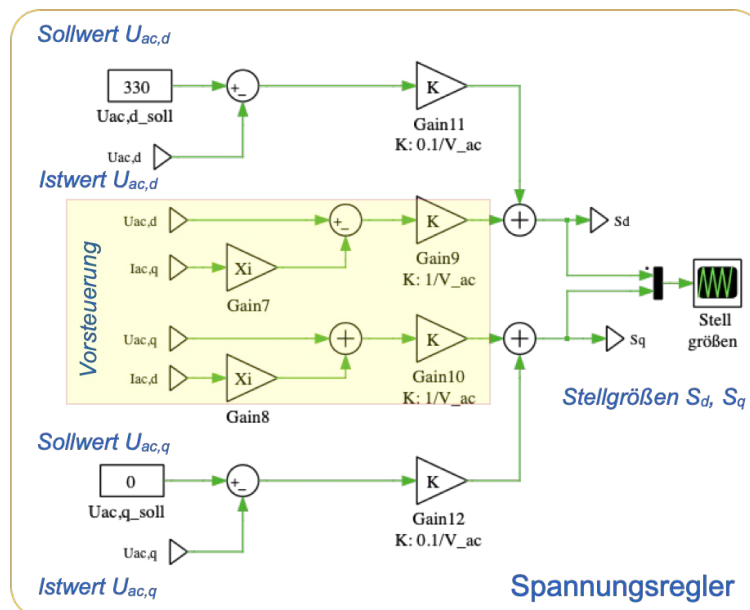
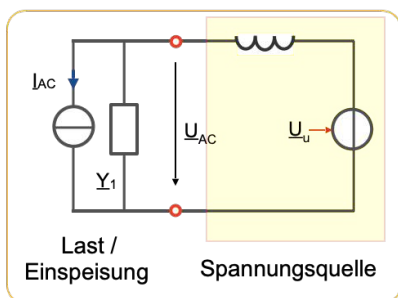
Je nach Lastflussrichtung wird Leistung von der Stromquelle an den Anschlussklemmen der Schaltung aufgenommen, bzw. von dieser Stromquelle bereit gestellt. Der Umrichter als Wandler bezieht die geforderte Leistung aus der Spannungsquelle im DC-Zwischenkreis (= spannungsgeregelte Stromquelle), bzw. überträgt die Leistung in den DC-Zwischenkreis.

Hinweis: Die Widerstände an den AC-Stromquellen am Eingang der Schaltung repräsentieren die Innenwiderstände der Stromquellen. Die parallelen Widerstände zu den Serieninduktivitäten sind immer dann erforderlich, wenn Stromquellen in Serie mit Induktivitäten geschaltet werden. Andernfalls führen sprunghafte Änderungen der Ströme in der Simulation zu unendlich hohen induzierten Spannungen.

Frage 2.3.2: Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Reglers. Die Last bzw. Einspeisung hat die Funktion einer Störgröße: sie wird beliebig vorgegeben, hier durch einen Wirkstrom und Blindstrom. Welche Rolle spielt das Bezugssystem mit dem Winkel „theta“ = θ für den Strom und die Spannungen? Wie funktioniert der Spannungsregler?



Last / Einspeisung



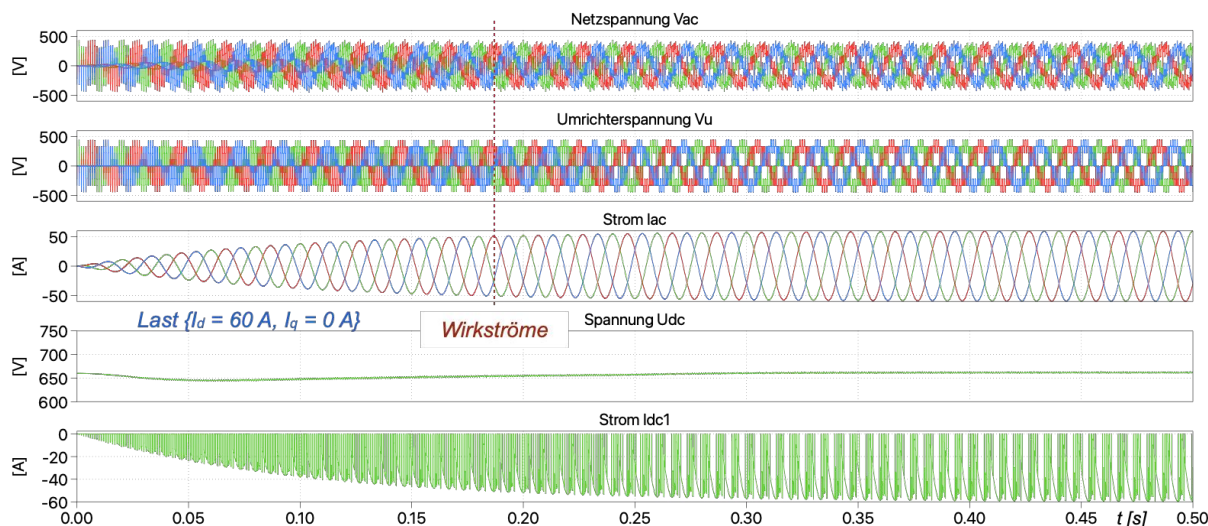
Lösung: Am Bezugssystem orientieren sich der Stromzeiger und die Spannungszeiger. Eine Vorgabe $\underline{I} = \{I_d, 0\}$ ergibt einen Strom in Richtung der reellen Achse d des Bezugssystems. Die Orientierung der Führungsgröße \underline{U}_{AC} bezieht sich ebenfalls auf das Bezugssystem: Bei Vorgabe $\underline{U}_{AC} = \{U_{ac,d,soll}, 0\}$ sollte der Spannungszeiger am Anschlusspunkt ebenfalls auf der reellen Achse des Bezugssystems liegen.

Wirkleistung und Blindleistung am Anschlusspunkt ergeben sich aus der Orientierung des Stromzeigers mit dem Spannungszeiger an dieser Stelle. Die Umrichterspannung als Stellgröße wird durch den Regler vorgegeben: Um einen Wirkstrom zu erzeugen, muss der Phasenwinkel der Umrichterspannung gegenüber der Spannung am Anschlusspunkt verstellt werden.

Diese Funktion übernimmt der Spannungsregler, der als P-Regler ausgeführt ist: Ein einfacher Verstärkungsfaktor = „Gain“ genügt hier. Zur schnelleren Reaktion der Schaltung bleibt die Vorsteuerung aus der vorausgehenden Aufgabe erhalten. Auf der linken Seite der Abbildung ist das einphasige Ersatzschaltbild der Anordnung dargestellt.

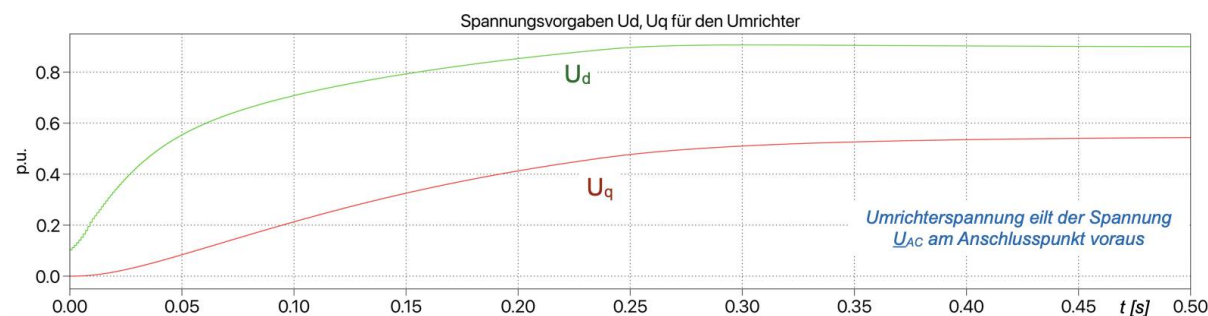
Frage 2.3.3: Untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung. Der Regler führt den Wandler so, dass innerhalb der physikalischen Grenzen der Schaltung die Klemmenspannung (= Spannung am Anschlusspunkt) unabhängig vom Lastzustand erhalten bleibt.



Frage 2.3.4: Welche Änderungen führt der Regler je nach Vorgabe der Führungsgrößen an den Stellgrößen durch? Untersuchen Sie die Funktion in der Simulation.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.



Stellt der Wandler am Anschlusspunkt Leistung aus dem DC-Kreis zur Verfügung, so muss die Umrichterspannung der Spannung am Anschlusspunkt voraus eilen. Zeigerdiagramme und Erläuterungen hierzu finden sich im Vorlesungsmanuskript.

2.4. Vergleich mit Zwei-Level-Konverter

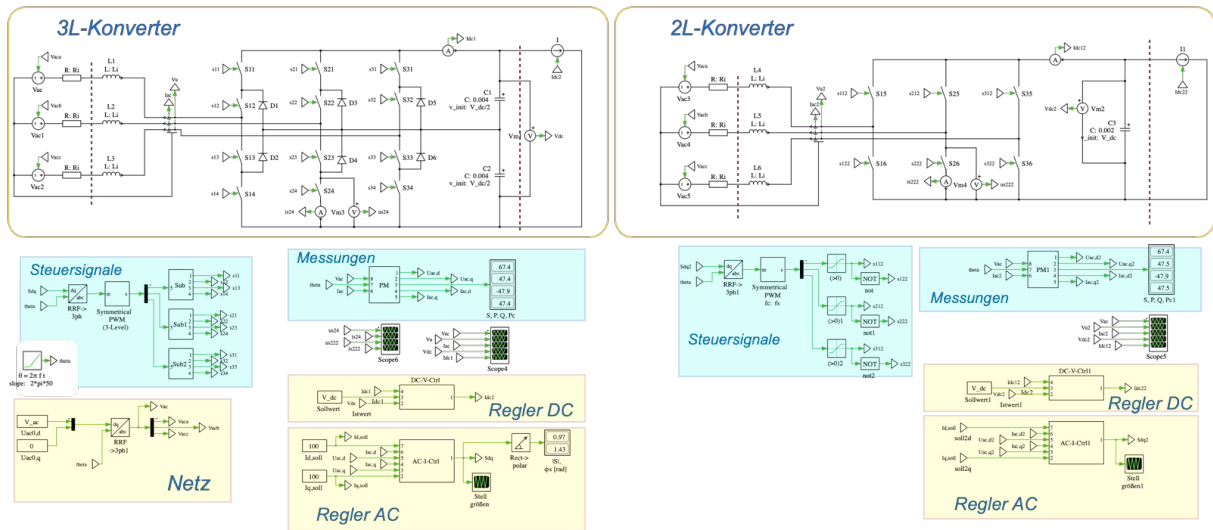
Zum Vergleich werden beide Konverter gemeinsam in einem Modell betrieben. Folgende Abbildung zeigt das Modell. Die Beschaltung beider Konverter ist jeweils gleich: auf der AC-Seite das Netz repräsentiert durch Spannungsquellen, im DC-Kreis eine Spannungsquelle, die durch eine spannungsgeregelte Stromquelle realisiert ist.

Jeder Konverter besteht:

- aus der Leistungselektronik einschließlich Seriendrossel, Schaltern und Zwischenkreiskapazität (PU = Power Unit)
- Aus Messungen, die zum Regler geführt werden und der Generierung der Steuersignale, die aus den Stellgrößen des Reglers generiert werden (MIO = Measurement & IO)
- Aus dem Regler: hier jeweils ein AC-Regler für den Konverter, sowie jeweils ein DC-Regler für die Spannung im DC-Zwischenkreis (CU = Control Unit).

Die AC-Regler für die Konverter sind identisch aufgebaut, ebenso die DC-Regler für den Zwischenkreis. Da die Messsignale und Vorgaben für die Stellgrößen individuell sind, werden jeweils ei-

gene Regler benötigt. Der Übersichtlichkeit halber wurden die Regler und Messsignale in Subsysteme verpackt.

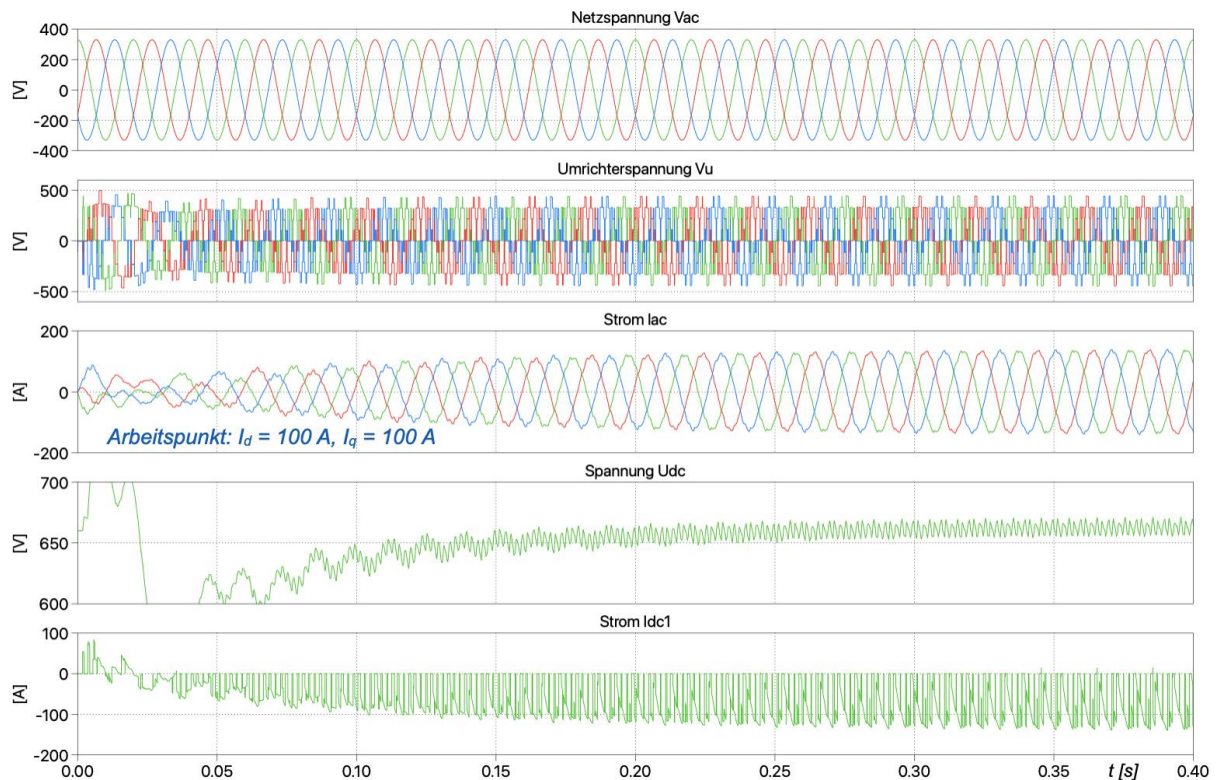


Frage 2.4.1: Verhalten an den Anschlussklemmen. Untersuchen Sie das Verhalten der Konverter für gegebene Arbeitspunkte. Vergleichen Sie das Verhalten an den Anschlussklemmen.

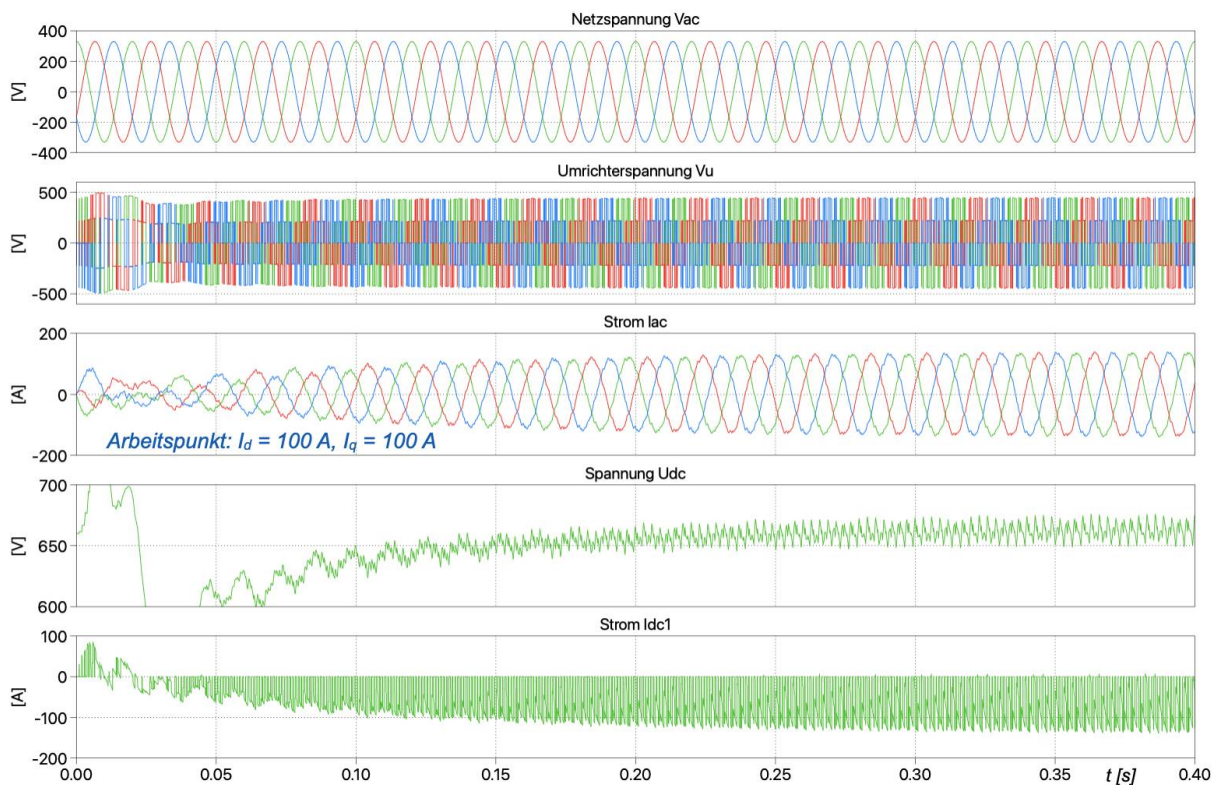
Lösungsbeispiel: Simulationslauf, siehe folgende Abbildungen.

Als Arbeitspunkt wurde jeweils ein Wirkstrom $I_d = 100\text{ A}$ gewählt, sowie ein Blindstrom $I_q = 100\text{ A}$. In diesem Arbeitspunkt überträgt jeder Konverter eine Leistung von ca. 50 kW vom DC-Zwischenkreis ins Netz ($P \approx 50\text{ kW}$). Vom Netz aus gesehen eilt der Strom der Netzspannung voraus. Somit werden jeweils ca. 50 kVar Blindleistung vom Netz abgegeben ($Q \approx -50\text{ kVar}$).

3-Level-Konverter:



2-Level-Konverter:



Der Vergleich zeigt, dass sich beide Konverter an den Anschlusspunkten annähernd gleich verhalten. Da die Regler identisch sind, war das zu erwarten. Unterschiede zeigen sich in den Signalformen der Umrichterspannungen. Hier ist die Approximation des Drei-Level-Konverters deutlich besser. Bei den Strömen sind die Unterschiede wegen des gewählten Arbeitspunktes (mit großen Strömen) weniger ausgeprägt. Beide Konverter verhalten sich an den Anschlussklemmen wie Stromquellen.

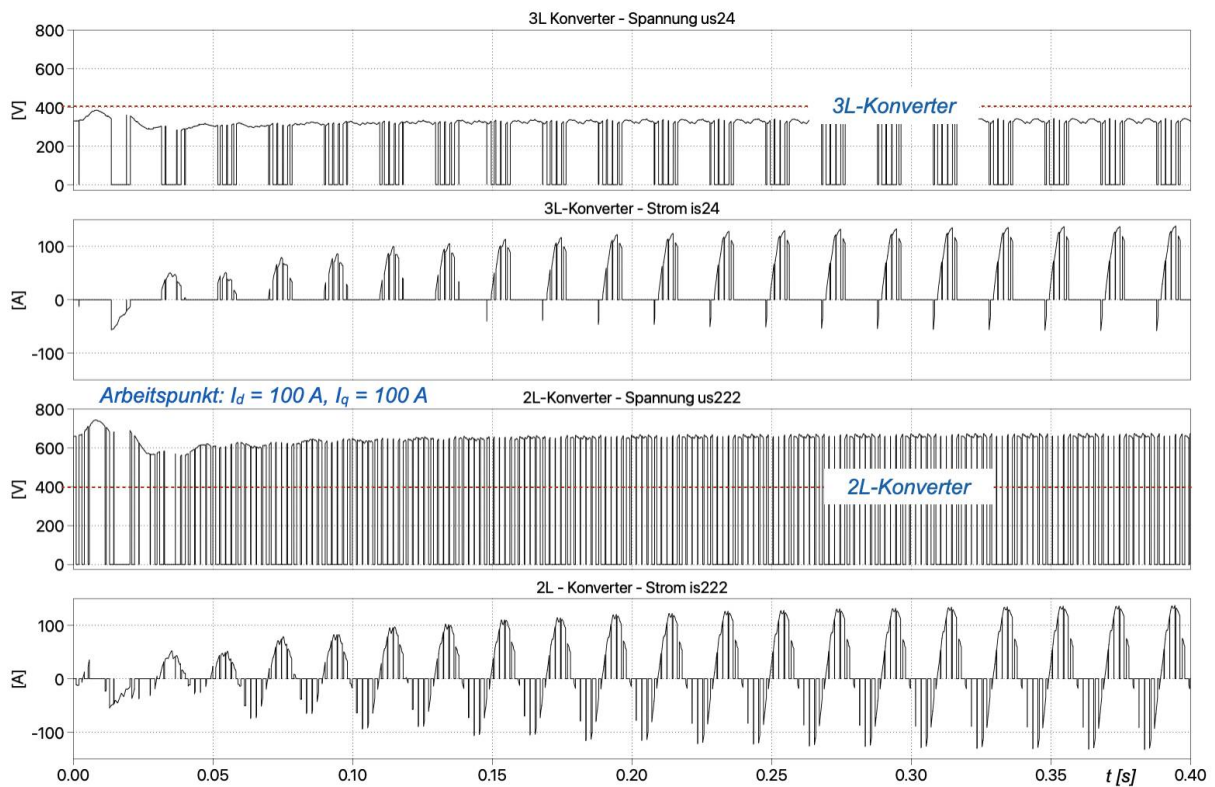
Frage 2.4.2: Belastung der Transistoren. Untersuchen Sie Spannungen und Ströme an den Schaltern, die als das Verhalten von Transistoren mit Freilaufdioden annähern. Welche Unterschiede zeigen sich zwischen 3L- und 2L-Konverter?

Lösung: siehe Simulationslauf in folgender Abbildung. Hierbei wurde der Arbeitspunkt mit $I_d = 100\text{ A}$ und $I_q = 100\text{ A}$ beibehalten.

Wegen der 3 Spannungspegel $\{-1, 0 \text{ und } 1\}$ schaltet ein Transistor im 3L-Konverter nur die halbe Spannung eines Transistors im 2L-Konverter. Außerdem ist die Anzahl der Schaltvorgänge geringer. Beides wirkt sich günstig auf die Verluste aus (siehe Durchlassverluste und Schaltverluste im Vorlesungsmanuskript).

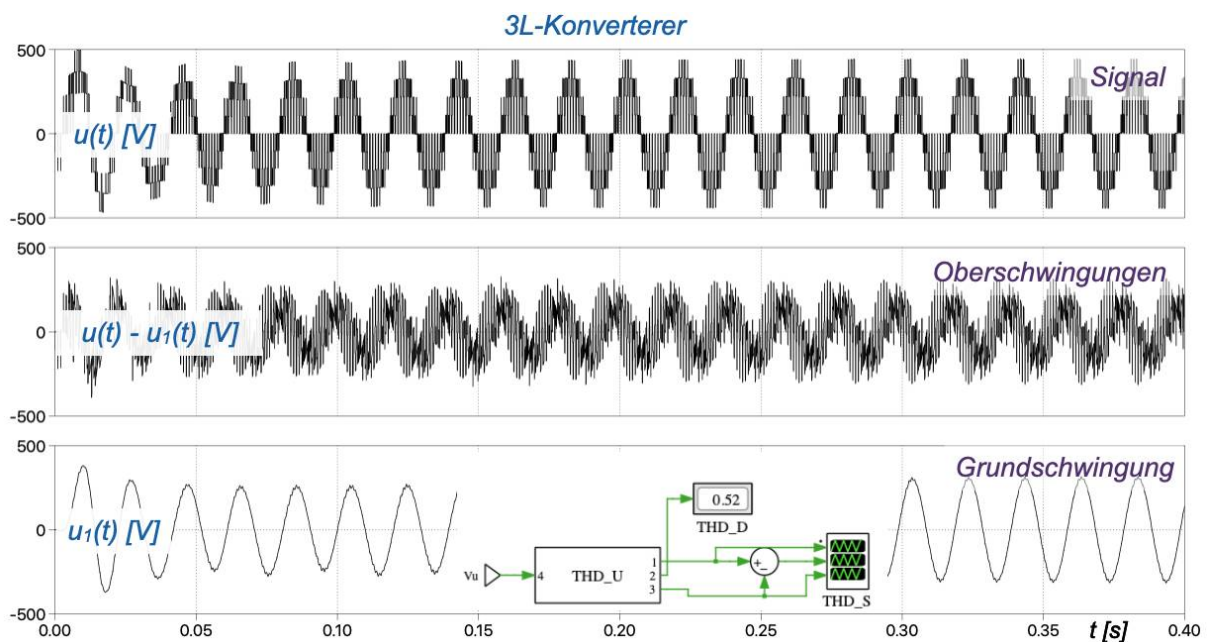
Die Ströme sind im gewählten Arbeitspunkt gleich, jedoch beschränkt sich ein Schalter im 3L-Konverter im wesentlichen auf eine Halbwelle. Auch der Transistor im 2L-Konverter kann nur die positive Halbwelle (in Durchlassrichtung des Transistors) schalten: die negative Halbwelle würde den Weg über die Freilaufdiode nehmen. In aller Regel sind die Verluste auf dem Weg über die Diode größer.

Insgesamt bedeutet der Betrieb in einem 3L-Konverter somit deutlich weniger Stress für die Schalter. Dieser Effekt sollte sich in einer längeren Lebensdauer bzw. geringeren Ausfallraten äußern. Quantifizieren lassen sich diese Effekte mit dem gewählten Modell nicht (Schalter anstelle Transistoren und Freilaufdioden eines bestimmten Typs, Schaltfrequenz 1 kHz für die Simulation). Qualitativ sind diese Aussagen korrekt.



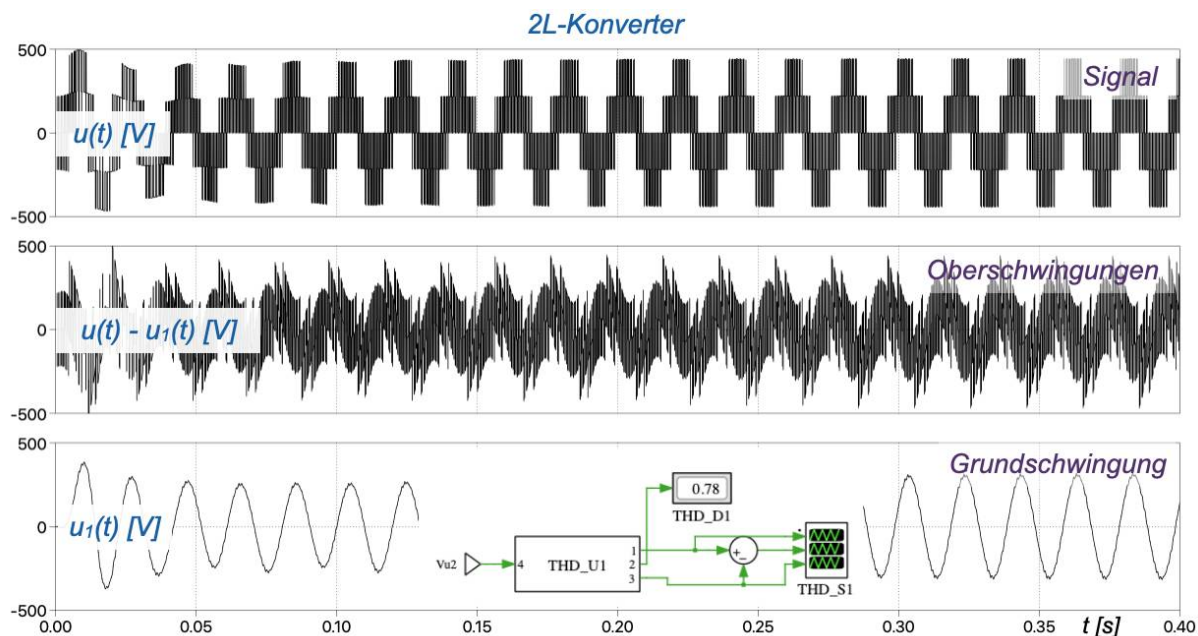
Frage 2.4.3: Klirrfaktor und Signalspektrum. Untersuchen Sie die Qualität der Approximation der Umrichterspannung und der Ströme. Verwenden Sie die Signale aus dem Simulationsmodell zusammen mit der Berechnung des Klirrfaktors.

Lösung: Ein Vergleich der Spannung einer Phase zeigt die bessere Approximation durch den 3L-Konverter. Der Arbeitspunkt aus den vorherigen Simulationsläufen mit $I_d = 100 \text{ A}$ und $I_q = 100 \text{ A}$ wurde hierbei beibehalten.

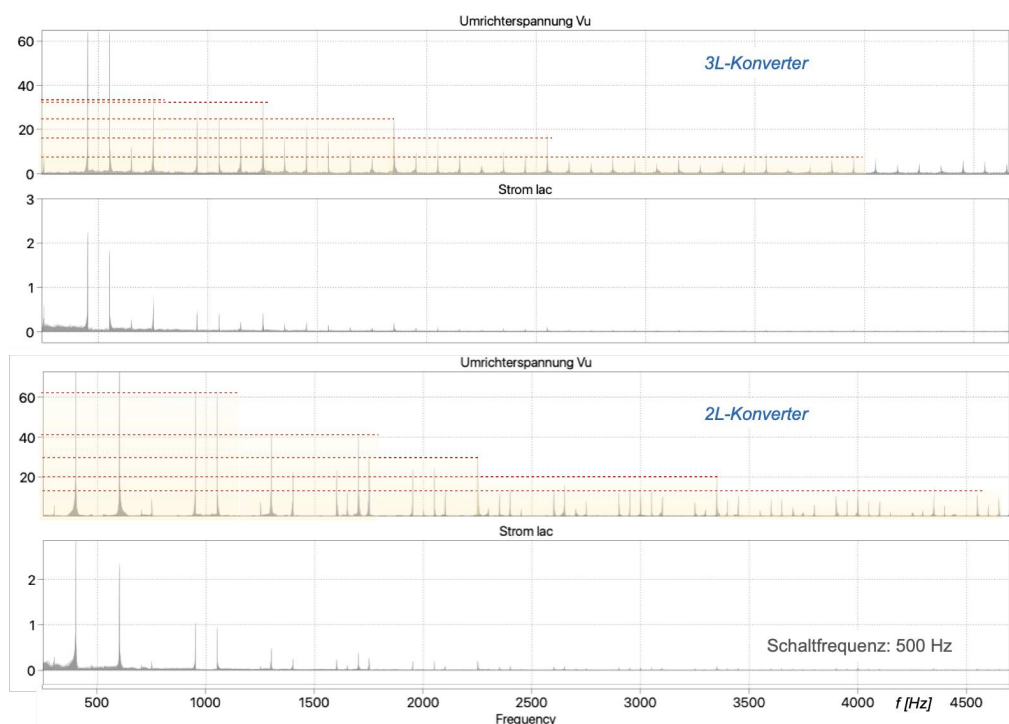


Aus der Spannung lässt sich mit Hilfe eines Tiefpassfilters die Grundschiwingung herausrechnen. Subtrahiert man diese Grundschiwingung vom Spannungssignal, so verbleiben sich die Oberschwingungen (siehe mittlerer Teil der Abbildungen). Eine Berechnung des Klirrfaktors (THD, Methoden siehe Vorlesungsmanuskript) ergibt ca. 50%, wie bei einem 3L-Umrichter zu erwarten.

Für den 2L-Konverter sind die Spannungen deutlich stärker verzerrt. Auch hier lässt sich der Oberschwingungsanteil herausrechnen, wie in folgende Abbildung dargestellt. Der Klirrfaktor liegt deutlich über dem 3L-Konverter, wenn auch nicht ganz bei 100%, was an der Beschaltung liegt.



Aus den Signalverläufen lassen sich mit dem Simulationsprogramm auch direkt Spektren berechnen. Das Signalspektrum des 2L-Konverters hat erwartungsgemäß den höheren Oberwellengehalt.



Frage 2.4.4: Bewertung insgesamt. Zur Bewertung dienen die Kategorien Schaltungsaufwand, Signalgüte, Verluste und Lebensdauer. Quantitative Aussagen sind hierbei nur mit Hilfe realer Transistoren aus dem Datenblatt möglich, jedoch lassen sich beide Konvertertypen relativ zu einander qualitativ bewerten. Welches Bild ergibt sich insgesamt?

Lösung: Schaltungsaufwand und Signalgüte siehe Vorlesungsmanuskript, Abschnitt 3.6 und Abschnitt 5. Insgesamt ergibt sich folgendes qualitatives Bild:

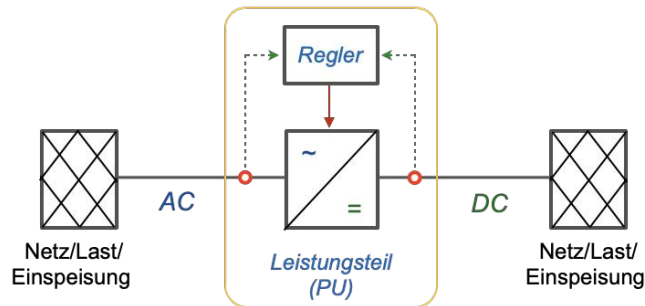
	2L-Konverter	3L-Konverter
relativer Schaltungsaufwand:	3,5	4,7
Oberwellen (THD _U):	1	0,5
Verluste (%):	4	3
Lebenserwartung (Jahre):	10	15

Die Lebenserwartung ist in der Praxis abhängig von der Betriebsart: Für einen Solarumrichter mit 1000 Betriebsstunden (unter Nennlast) im Jahr sind 2L-Konverter in aller Regel eine gute Wahl. Die MTBF (mean time between failure) als Maß für die Zeit bis zu einem Ausfall geht von einer kontinuierlichen Belastung aus. Berechnungen zur Systemverfügbarkeit finden sich im Vorlesungsmanuskript.

3. Mittelwertmodelle

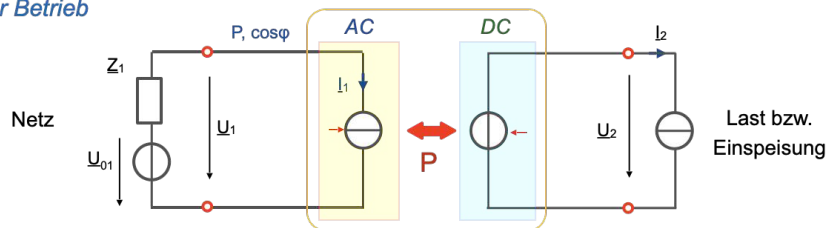
3.1. Aufbau leistungselektronischer Wandler

Die in den vorausgegangenen Abschnitten beschriebenen Konverter haben den in folgender Abbildung beschriebenen Aufbau bestehend aus Leistungsteil (Power Unit, PU), Mess- und Kommunikationstechnik (Measurement & I/O, MIO), sowie dem Regler basierend auf einem Prozessor zur Echtzeitverarbeitung der Signale (Control Unit, CU).

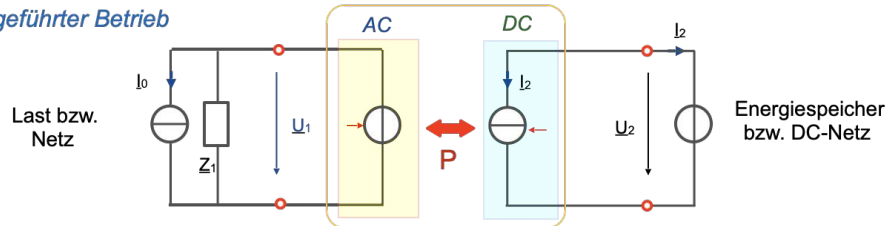


Die in den vorausgehenden Abschnitten verwendeten Modelle geben den Leistungsteil physikalisch korrekt wieder. Der Regler wird mit Hilfe eines Signalfusses abstrakt repräsentiert. Die folgende Abbildung zeigt regelungstechnische Modelle als einphasige Ersatzschaltbilder.

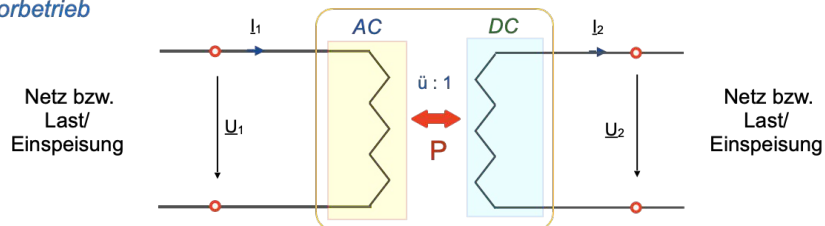
Stromgeführter Betrieb



Spannungsgeführter Betrieb



Transformatorbetrieb



Die regelungstechnischen Modelle sind festgelegt auf vorgegebene Betriebsarten und beschreiben den Leistungsteil des Konverters in abstrakter Form, beispielsweise als Stromquellen oder Spannungsquellen. Die Spannungsquellen oder Stromquellen beschreiben entweder die Stellgrößen, oder

gleich die Führungsgrößen. In letzterem Fall wird kein Regler benötigt, da sich die Führungsgrößen unmittelbar vorgeben lassen.

Frage 3.1.1: Physikalische und regelungstechnische Modelle. Worin bestehen die Unterschiede zwischen einem physikalischen Modell (obere Abbildung) und den regelungstechnischen Modellen in der unteren Abbildung?

Lösung: (1) Im Abstraktionsgrad: Das physikalische Modell wird zu einer Ersatzschaltung abstrahiert (z.B. Stromquellen oder Spannungsquellen), die das Verhalten an den Anschlussklemmen in der gewünschten Betriebsart repräsentiert. Geschaltete Spannungen und kommutierte Ströme werden hierbei durch ihre Mittelwerte ersetzt, d.h. durch die Approximation der Wechselspannung bzw. des Wechselstroms.

(2) In der Kausalität: Physikalische Modelle bilden physikalische Gleichungen ab. Diese beschreiben Gleichgewichtszustände (Beispiel: $U = R I$), ohne dass Ursache und Wirkung hierdurch festgelegt sind. Der Regler basiert auf einem kausalen Systemmodell: Wirkung und Ursache werden festgelegt durch die Definition der Regelstrecke mit Stellgröße, Führungsgröße (und Störgröße). Das gilt auch für den Regler physikalischer Modelle. Beim regelungstechnischen Modell wird zusätzlich der elektrische Teil des Modells kausal.

Frage 3.1.2: Stromgeführter Betrieb. Beschreiben Sie Stellgrößen, Führungsgrößen und Störgrößen des Konverters. Hinweis: Bezugspunkt ist die AC-Seite. Welcher Zusammenhang besteht zwischen AC und DC? Welche Beschaltung ist an den Klemmen des Konverters vorgesehen? Für welche Anwendungsfälle eignet sich diese Betriebsart?

Lösung: (1) Führungsgröße ist der Strom (AC-seitig). Im dargestellten Modell mit einer Stromquelle ist daher keine Stellgröße erforderlich. Bemerkung: Sofern die Stromquelle durch eine stromgeregelte Spannungsquelle mit Serieninduktivität wiedergegeben wird, wäre die Stellgröße die Spannung.

(2) AC-Seite und DC-Seite sind durch die Wirkleistung gekoppelt: Bis auf Verluste, die vernachlässigt werden, kann der Konverter weder Leistung konsumieren noch erzeugen. Somit ist $P_1 = P_2$. Leistung, die DC-seitig entnommen wird, wird der AC-Seite entnommen (bei einer Bezugsanlage). Leistung, die auf der DC-Seite eingespeist wird (Erzeugungsanlage), wird ans AC-Netz weitergegeben.

(3) Da die AC-Seite als Stromquelle modelliert ist, wird diese an einem Netz = Spannungsquelle betrieben. DC-seitig hält der Konverter die DC-Spannung und wird folglich mit einer Stromquelle belastet. (4) Anwendungsfälle: Bezugsanlagen (Antriebe, Ladestationen), Erzeugungsanlagen (PV) und Energiespeicher mit Laderegler (Stromquelle).

Frage 3.1.3: Spannungsgeführter Betrieb. Beschreiben Sie Stellgrößen, Führungsgrößen und Störgrößen des Konverters. Hinweis: Bezugspunkt ist die AC-Seite. Welcher Zusammenhang besteht zwischen AC und DC? Welche Beschaltung ist an den Klemmen des Konverters vorgesehen? Für welche Anwendungsfälle eignet sich diese Betriebsart?

Lösung: (1) Führungsgröße ist die Spannung (AC-seitig). Im dargestellten Modell mit einer Spannungsquelle ist daher keine Stellgröße erforderlich.

(2) AC-Seite und DC-Seite sind durch die Wirkleistung gekoppelt, siehe vorherige Aufgabe.

(3) Da die AC-Seite als Spannungsquelle modelliert ist, wird diese an einer Stromquelle betrieben (Last, Einspeisung, bzw. Netz als Spannungsquelle mit Serienimpedanz). Der Konverter stellt die Netzspannung bereit und liefert die hierfür benötigte Leistung, bzw. nimmt Leistung auf.

DC-seitig erzeugt beispielsweise ein Energiespeicher (Batterie) die DC-Spannung. Hier arbeitet der Konverter als Stromquelle und gibt die AC-seitig aufgenommene Leistung ab, bzw. entnimmt die auf der AC-Seite benötigte Leistung.

(4) Anwendungsfälle: Netzbildende Umrichter.

Frage 3.1.4: Transformatorbetrieb. Beschreiben Sie Stellgrößen, Führungsgrößen und Störgrößen des Konverters. Welcher Zusammenhang besteht zwischen AC und DC? Welche Beschaltung ist an den Klemmen des Konverters vorgesehen? Für welche Anwendungsfälle eignet sich diese Betriebsart?

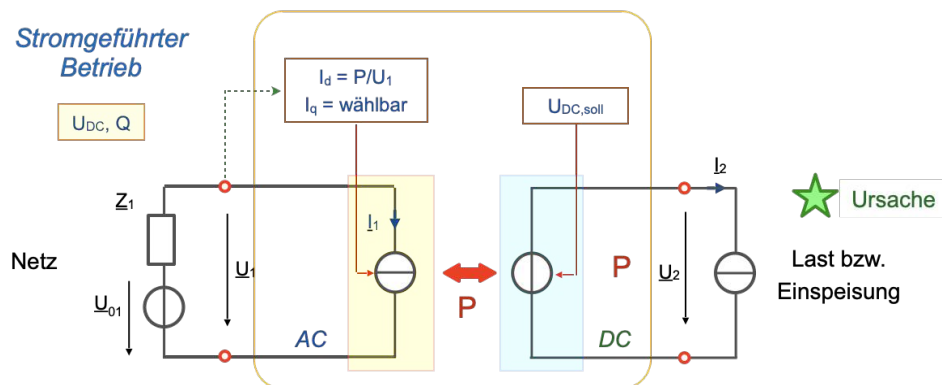
Lösung: (1) Führungsgröße (und Stellgröße) ist hier das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} . (2) Wenn man das Übersetzungsverhältnis als Spannungsverhältnis definiert ($U_2 \ddot{u} = U_1$), so folgt aus der Invarianz der Leistung $P_1 = P_2$ für die Ströme $I_1 \ddot{u} = I_2$. Im Transformatorbetrieb hält der Konverter das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} konstant.

(3) In dieser Betriebsweise arbeitet er weder als Stromquelle noch als Spannungsquelle. Folglich ist die Beschaltung primärseitig und sekundärseitig beliebig: Er kann sowohl an einem Netz (= Spannungsquelle) betrieben werden und übersetzt diese Spannung dann auf die Sekundärseite, also auch an einer primärseitigen Stromquelle. In letzterem Fall übersetzt der den Strom auf die Sekundärseite.

(4) Diese Betriebsart eignet sich folglich für Anwendungsfälle, in denen der Konverter unterschiedlich beschaltet ist und einfach Spannung bzw. Strom übersetzen soll. Der Lastfluss bleibt hierbei bidirektional, unabhängig von der Beschaltung. Die Betriebsart entspricht dem eines AC/AC-Transformators, allerdings hier einschließlich der Wandlung AC/DC.

3.2. Stromgeführter Betrieb

Folgende Abbildung zeigt das Regelungskonzept für den stromgeführten Betrieb an einer Einspeisung bzw. Last auf der DC-Seite.



Frage 3.2.1: Ursache und Wirkung. Die Betriebsart legt die Kausalität fest. Erläutern Sie die Funktionsweise der Schaltung ausgehend von der Ursache.

Lösung: Ursache: Eine Last entnimmt Leistung aus dem Konverter; eine Einspeisung führt dem Konverter Leistung zu. Der Konverter hält die DC-Spannung konstant und stellt die benötigte Leistung P bereit (bzw. nimmt diese Leistung P auf), indem er sie der AC-Seite entnimmt (bzw. der AC-Seite zuführt). Die AC-Seite des Konverters repräsentiert als Stromquelle somit die Last (bzw. Einspeisung).

Bei konstanter Spannung ist die Leistung P proportional zum Strom. Der Wirkstrom I_d auf der AC-Seite ist somit proportional zur Leistung zu führen, abhängig von der gemessenen Netzspannung. Der Blindstrom I_q ist nicht an die DC-Seite gekoppelt und kann im Rahmen der Grenzen des Konverters willkürlich vorgegeben werden.

Frage 3.2.2: Regelungskonzept. Wie ist der Konverter AC-seitig und DC-seitig zu führen?

Lösung: Die Leistung P wird auf der DC-Seite gemessen und dient als Vorgabe für den Wirkstrom auf der AC-Seite. DC-seitig ist der Konverter als Spannungsquelle zu führen (Halteung von $U_{DC} = \text{konstant}$). AC-seitig ist der Wirkstrom I_d durch die Leistung P festgelegt, dieser Sollwert ergibt sich somit aus der

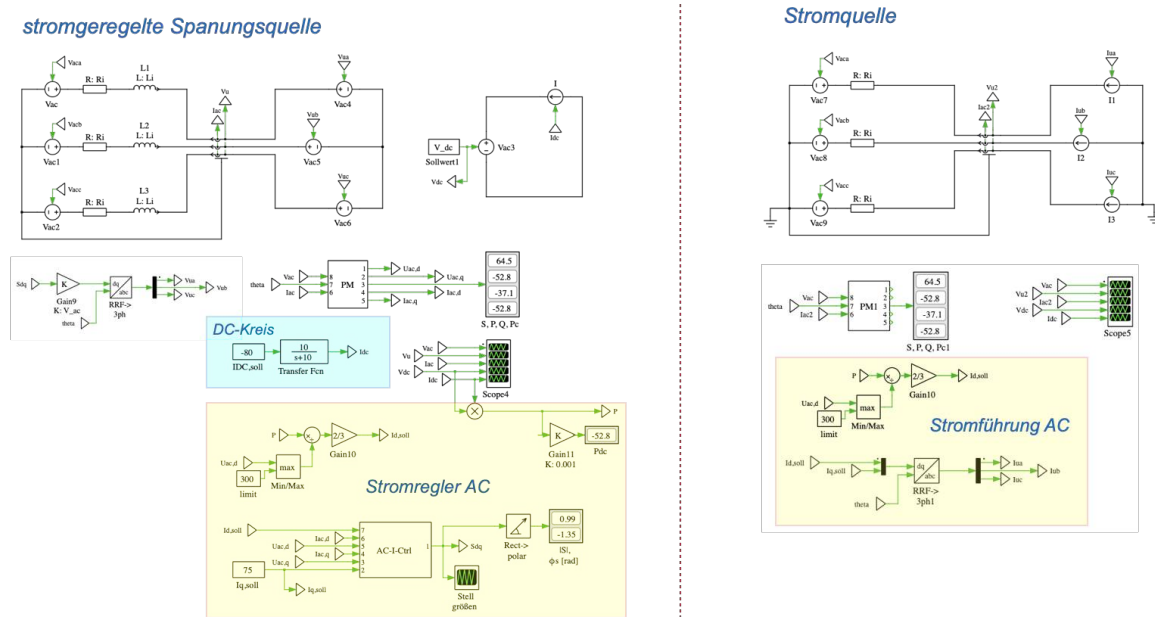
leistung P im DC-Kreis. Der Blindstrom I_q und somit die Blindleistung Q st im Rahmen der Grenzen des Konverters frei einstellbar.

Insgesamt ergibt sich als Regelungskonzept: $\{U_{DC}, I_q\}$ bzw. $\{U_{DC}, Q\}$.

Bemerkung: Das Regelungskonzept bezieht sich hier immer auf die AC-Seite. Da es sich dort um ein Wechselstromsystem bzw. Drehstromsystem handelt, hat die Regelung zwei Freiheitsgrade) stellvertretend für Betrag und Phase bzw. Realteil und Imaginärteil).

Frage 3.2.3: Simulation. Überprüfen Sie die Funktionsweise der Schaltung in der Simulation.

Lösungsbeispiel:



Auf der rechten Seite der Abbildung ist das Umrichtermodell mit Stromquellen gezeigt. Aus der Messung der Leistung P im DC-Kreis leitet sich die Vorgabe für den Wirkstrom I_d ab. Zusammen mit der frei wählbaren Vorgabe für den Blindstrom I_d werden beide Werte in den Zeitbereich transformiert zur Steuerung der Stromquellen.

Bei einer realistischeren Abbildung des Konverters als Spannungsquellen (in der Abbildung links, siehe folgende Aufgabe) dienen die Vorgeben $\{I_d, I_q\}$ als Sollwerte $\{I_{d,soll}, I_{q,soll}\}$ für den Stromregler. Der Stromregler kann aus Aufgabe 2.2 übernommen werden, wobei die Referenzsignale $\{S_d, S_q\}$ am Ausgang des Reglers unmittelbar als Vorgaben für die Umrichterspannung (= Stellgröße) dienen.

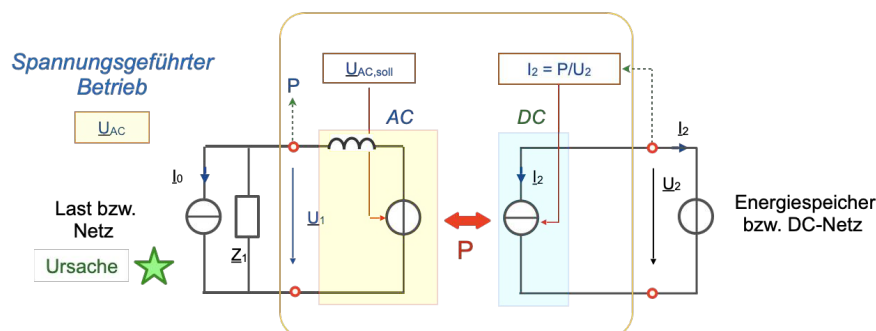
Frage 3.2.4: Umrichter als Spannungsquelle. Physikalisch betrachtet sind 2L-Konverter und 3L-Konverter Spannungsquellen (engl. VSC, Voltage Source Converter). Wie wäre die AC-seitige Stromquelle als physikalisch korrekt abzubilden? Welche Konsequenzen ergeben sich für die Regelung?

Lösung: Als stromgeregelte Spannungsquelle, die über die Koppelinduktivität an das Netz gekoppelt ist. In diesem Fall ist die Umrichterspannung die Stellgröße, und der Strom die Führungsgröße. AC-seitig wird nun also ein Regler benötigt, der $\{I_d$ und $I_q\}$ als Sollwerte hat, und die Umrichterspannung $\{U_d$ und $U_q\}$ als Stellgrößen.

Die Vorsteuerung aus Abschnitt 2.2 beschleunigt die Regelung. Regler und Vorsteuerung entsprechen der Regelung aus Abschnitt 2.2, wobei die Stellgrößen jetzt unmittelbar auf die Umrichterspannung abbilden, nicht auf Steuersignale für den Konverter.

3.3. Spannungsgeführter Betrieb

Im spannungsgeführten Betrieb bildet der Konverter das AC-Netz stellt AC-seitig also eine Spannungsquelle dar, aus der sich eine Last bzw. eine Einspeisung bedienen kann.



Die geforderte bzw. eingespeichte Leistung gibt der Konverter an die DC-Seite weiter. Dort stellt er folglich eine Stromquelle dar. Das DC-Netz wird beispielsweise von einem Energiespeicher zur Verfügung gestellt.

Frage 3.3.1: Ursache und Wirkung. Erläutern Sie die Funktionsweise der Schaltung ausgehend von der Ursache. Warum kann der Konverter nicht das DC-Netz bilden?

Lösung: Ursache ist die Last bzw. Einspeisung auf der AC-Seite. Der Strom auf der DC-Seite folgt der AC-seitig gemessenen Spannung. Der Konverter ist leistungsinvariant, muss also die AC-seitig bereitgestellte Leistung der DC-Seite entnehmen. Er übersetzt die Ursache in den DC-Kreis und bildet dort folglich eine Stromquelle.

Bemerkung: In einem spannungsgeführten Netz ist der Strom immer die Störgröße bzw. Ursache. Die Leistung folgt dem Strom. Anders wären die Verhältnisse in einem stromgeführten Netz: Dort wäre die Spannung als Störgröße variabel. Allerdings erscheint diese Variante wenig praktikabel.

Frage 3.3.2: Regelungskonzept. Wie ist der Konverter AC-seitig und DC-seitig zu führen?

Lösung: Als Spannungsquelle kann die Spannung AC-seitig einfach vorgegeben werden. Je nach Störgröße (Strom) stellt sich ein Lastfluss ein. Die Leistung wird im AC-Kreis gemessen.

Der Strom auf der DC-Seite wird der Leistung P nachgeführt, wozu ein Messwert der Spannung im DC-Kreis verwendet wird ($I_{DC} = P/U_{DC}$). Auch hier ist kein Regler erforderlich, da der Strom unmittelbar vorgegeben werden kann.

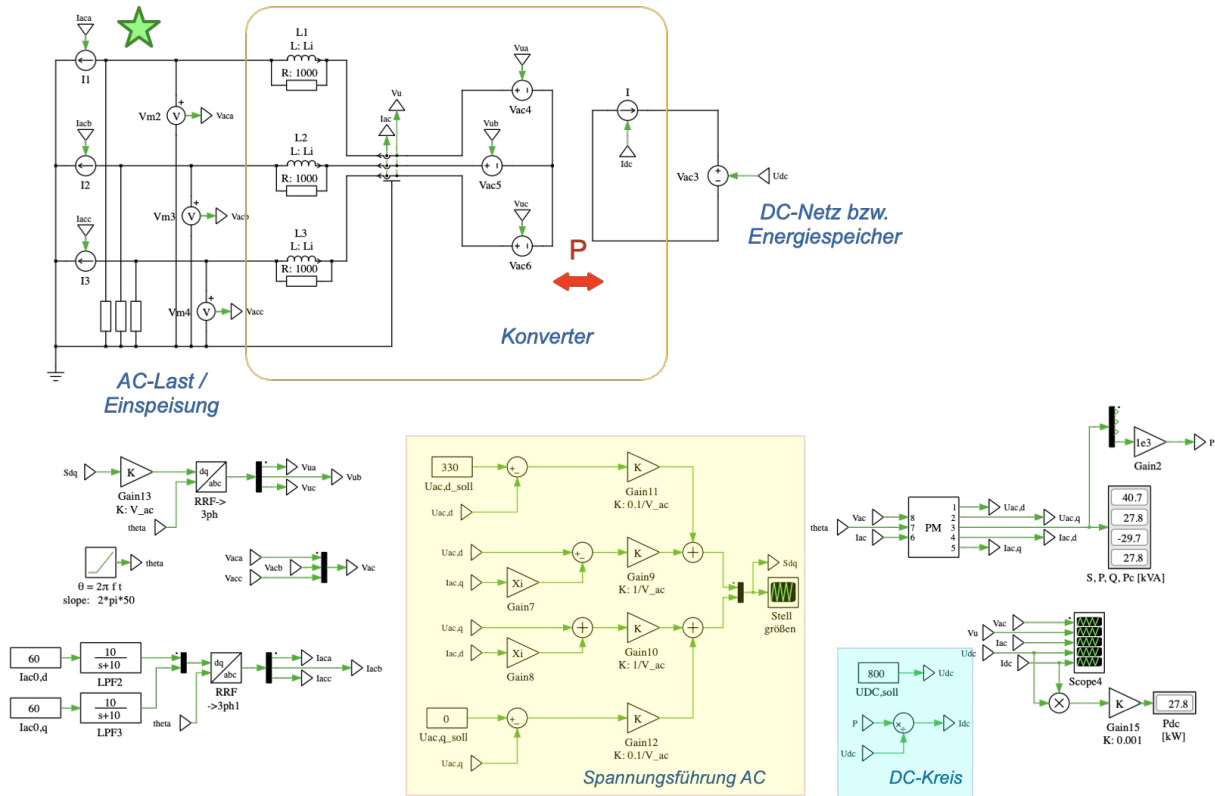
Frage 3.3.3: Simulation. Überprüfen Sie die Funktionsweise der Schaltung in der Simulation.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.

Das Netz und die Beschaltung kann aus Aufgabe 2.3 übernommen werden, ebenso die Spannungsführung. Die Konverterschaltung ist zu ersetzen durch AC-Spannungsquellen und eine DC-Stromquelle. Die Führung der DC-Stromquelle erfolgt wie in der vorigen Aufgabe beschrieben mit Hilfe im AC-Kreis gemessenen Leistung P .

Die Vorsteuerung im AC-Kreis bleibt erhalten. Die Stellgrößen führen als Referenzsignal nicht mehr auf einen PWM-Block, wie in Aufgabe 2.3, sondern werden auf den Betrag (= Scheitelwert) der Netzspannung skaliert und in den Zeitbereich transformiert als Vorgabe für die Umrichterspannung.

Auch hier ist kein Regler erforderlich, da die Umrichterspannungen unmittelbar vorgegeben werden können. Der Blindstrom I_G der Störgröße $\underline{I} = \{I_G, I_Q\}$ hat keinen Einfluss auf die Wirkleistung und folglich keinen Einfluss auf den DC-Kreis.

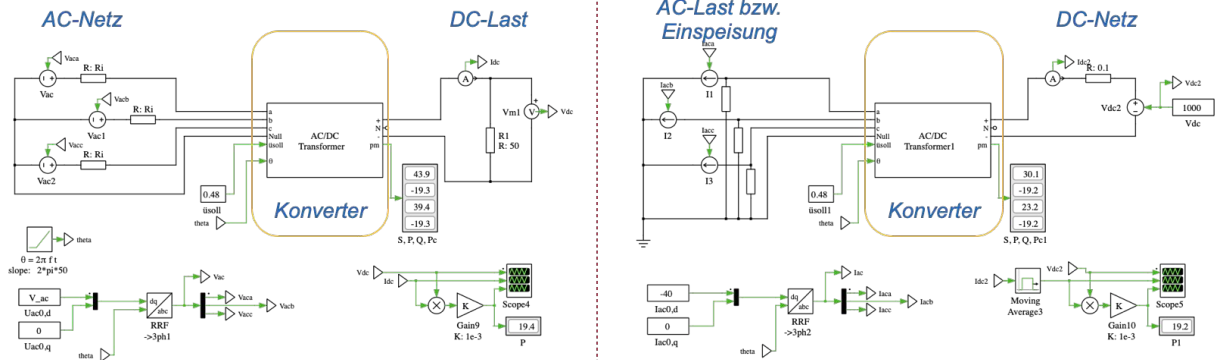


Frage 3.3.4: Mehrere Spannungsquellen im Netz. Was wäre erforderlich für den parallelen Betrieb mehrerer Spannungsquellen im AC-Netz?

Lösung: Parallele Spannungsquellen führen bei geringen Spannungsabweichungen zu erheblichen Kreisströmen, da die Abweichungen durch den Spannungsabfall an den Innenimpedanzen der Spannungsquellen kompensiert werden müssen. Die Impedanzen der Spannungsquellen müssen möglich übereinstimmen. Eine Stromquelle als Störgröße an parallelen Spannungsquellen erhält Strombeiträge umgekehrt proportional zu den Impedanzen der Quellen (Parallelschaltung der Impedanzen).

3.4. Betrieb als Transformator

Im Transformatorbetrieb wird der Konverter nicht auf eine Rolle als Stromquelle oder Spannungsquelle festgelegt. Führungsgröße ist hier das Übersetzungsverhältnis.



Wie die Abbildung zeigt, kann der Konverter hier primärseitig sowohl an einer Spannungsquelle als auch an einer Stromquelle betrieben werden. Sekundärseitig stellt er die durch das Übersetzungsverhältnis gegebene Spannung und den durch das Übersetzungsverhältnis gegebenen Strom.

Frage 3.4.1: Übersetzung von AC nach DC und umgekehrt. Wie ermittelt sich aus dem Leistungsgleichgewicht das Übersetzungsverhältnis für die Spannungen bzw. für die Ströme?

Lösung: Die Leistung berechnet sich zu

$$P = \frac{3}{2} U_{ac,d} \cdot I_{ac,d} = U_{dc} \cdot I_{dc} \quad (3.4.1)$$

wobei sich der Faktor 3 wegen der 3 Phasen ergibt, die AC-Spannung zum Sternpunkt gemessen wird, und der AC-Strom ein Strangstrom ist. Die Korrektur um den Faktor $\frac{1}{2}$ berücksichtigt die Verwendung von Scheitelwerten in der Simulation (anstelle von Effektivwerten). Auf der DC-Seite entspricht die Leistung einfach dem Produkt aus Strom und Spannung.

Aus dem Leistungsgleichgewicht erhält man für das Übersetzungsverhältnis

$$\ddot{u} = \frac{3}{2} \frac{U_{ac,d}}{U_{dc}} = \frac{I_{dc}}{I_{ac,d}} \quad (3.4.2)$$

Somit ist das Verhältnis der Ströme bzw. der Spannungen primärseitig und sekundärseitig festgelegt. Wenn der Konverter diese Verhältnisse herstellt, arbeitet er als AC/DC-Transformator, vergleichbar einem AC/AC-Transformator. Bei letzterem entfällt der Skalierungsfaktor im Spannungsverhältnis, da sich die Leistung primärseitig und sekundärseitig aus der gleichen Formel berechnet.

Frage 3.4.2: Simulation. Untersuchen Sie die Funktionsweise in der Simulation.

Lösungsbeispiel: siehe Abbildung oben unter der Kapitelüberschrift.

Bei Betrieb an einer AC-Spannungsquelle übersetzt der Transformator diese auf die DC-Seite und lässt sich an einer DC-Last betreiben (im dargestellten Beispiel ein Lastwiderstand). Anders betrachtet übersetzt der Konverter die sekundärseitige DC-Last in eine primärseitige AC-Last.

Die gleiche Schaltung mit dem gleichen Regler funktioniert auch umgekehrt bei Betrieb an einer DC-Spannungsquelle und mit einer AC-Last (im dargestellten Beispiel eine Stromquelle). In dieser Betriebsweise übersetzt der Konverter die sekundärseitige DC-Spannungsquelle in eine primärseitige AC-Spannungsquelle. Anders betrachtet übersetzt der Konverter die primärseitige AC-Stromquelle in eine sekundärseitige DC-Stromquelle.

Im Unterschied zum konventionellen Transformator findet sich in der elektrischen Bibliothek leider kein idealer Transformator von AC/DC. Das vorhandene Bibliothekselement arbeitet von AC/AC (bzw. von DC/DC), unterstützt jedoch die Skalierung nach (3.4.2) und die Transformation von Gleichspannung in Wechselspannung nicht.

Daher muss bei der Simulation auf ein physikalisches Modell des Konverters zurückgegriffen werden. Da elektrische Schaltungen grundsätzlich nicht kausal sind, ist die Betriebsart als Transformator nicht auf eine spezielle Konverterschaltung festgelegt.

Mangels Mittelwertmodellen für AC/DC-Transformatoren wird auf weitere Details an dieser Stelle verzichtet.

4. Physikalische Eigenschaften

4.1. Wirkungsgrad

Für weitergehende Betrachtungen zum Wirkungsgrad wird auf das Vorlesungsmanuskript, Kapitel 4 verwiesen. An dieser Stelle werden die wichtigsten Zusammenhänge zusammengefaßt, einschließlich Maßnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrades.

Frage 4.1.1: Durchlassverluste. Wodurch kommen Durchlassverluste zustande? Wie lassen sie sich abschätzen? Wie lassen sie sich verringern?

Lösung: Durchlassverluste kommen durch den Durchlasswiderstand der Transistoren sowie aller sonstigen Bauelemente im Strompfad zustande. Die Verluste steigen linear mit dem Durchlasswiderstand R_{on} und quadratisch mit dem Strom: $P_{vd} = I_n^2 R_{on}$, wobei für Abschätzungen der Nennstrom I_n verwendet werden kann.

Als Maßnahmen zur Verringerung der Durchlassverluste kommen folglich als Maßnahmen in Frage: (1) Verringerung der Ströme durch eine geeignete Auslegung der Systeme, (2) Verringerung der Widerstände im Strompfad, speziell Wahl niederohmige Halbleiter (Transistoren und Dioden).

Frage 4.1.2: Schaltverluste. Wodurch kommen Schaltverluste zustande? Wie lassen sie sich abschätzen? Wie lassen sie sich verringern?

Lösung: Ein idealer Schalter führt (1) entweder Strom, und ist in diesem Zustand komplett spannungslos, oder (2) er ist offen und trägt die Spannung im stromlosen Zustand. Ein realer Schalter hat im geschlossenen Zustand (1) Durchlassverluste wegen der Restspannung über dem Durchlasswiderstand, und (2) im offenen Zustand einen Sperrstrom über dem Sperrwiderstand. Letzterer ist meistens vernachlässigbar.

Zwischen diesen beiden Zuständen schaltet ein idealer Schalter übergangslos. In der Realität ist der Übergang beim Schalten mit einem Stromanstieg bei fallender Spannung verbunden, und umgekehrt. Aus dem Produkt von Strom $i(t)$ und Spannung $u(t)$ während des Schaltens ergibt sich eine Leistung $p(t)$, dessen Integral über der Schaltzeit Δt die pro Schaltvorgang verlorene Energie ergibt.

Die Schaltverluste sind somit proportional zur Anzahl der Schaltvorgänge, d.h. zur Schaltfrequenz. Die Energie pro Schaltvorgang finden sich in Datenblättern, so daß mit Hilfe der Schaltfrequenz eine Abschätzung der Schaltverluste möglich ist. Verringern lässt sich durch niedrige Schaltfrequenzen, was bei modularen Umrichtern durch arbeitsteilige Schaltung der Transistoren erreicht wird (z.B. bei MMC-Umrichtern in HGÜ-Kopfstationen). Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Feldeffekttransistoren, die gegenüber IGBTs weniger Ladungen speichern und nahezu übergangslos schalten.

Frage 4.1.3: Verluste durch Kühlung. Wodurch kommen sekundäre Verluste zustande? Wie lassen sie sich verringern?

Lösung: Wegen der hohen Leistungsdichte sind auch Verluste einer Schaltung mit einer hohen Dichte verbunden. Folglich sind Konverter luftgekühlt oder wassergekühlt, bzw. kombinieren eine Luftkühlung mit einer Klimatisierung des Raumes bzw. Containers. Die Kühlung und Klimatisierung erzeugt sekundäre Verluste.

Verringern lassen sich diese in erster Linie durch Verringerung der primären Verluste: Verlustleistung, die nicht entsteht, muss auch nicht abgeführt werden. Eine weitere Maßnahme wäre der Einsatz geregelter Lüfter, um die sekundären Verluste an die primären Verluste anzupassen. Eine Klimatisierung führt auch die von außen einströmende Wärme wieder nach außen, hier wäre auf eine geeignete Isolation zu achten.

Ggf. lassen sich die Wärmeverluste auch als Wärme nutzen. In diesem Fall tauchen die Wärmeverluste in der Bilanz unter dem Nutzen auf und stehen im Zähler des Wirkungsgrades, nicht im Nenner.

Frage 4.1.4: Modulare Bauweise. Baugleiche Module sollen wie folgt verwendet werden: (1) Ein Modul mit dem Strom I . (2) Zwei Module in Parallelschaltung. Variante (2) hat somit den doppelten Aufwand an Hardware. Lassen sich durch diesen Mehraufwand die Verluste reduzieren?

Lösung: Die Verluste im Fall (1) betragen $P_{v1} = I^2 R$. Im Fall (2) gilt $P_{v2} = (I/2)^2 R + (I/2)^2 R = P_{v1}/2$.

Frage 4.1.5: Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad ist definiert aus dem Verhältnis von Nutzen zum Aufwand. In der Regel werden hierfür die Leistungen im Arbeitspunkt (= Nennwerte) verwendet. Wie lässt sich der Wirkungsgrad berechnen?

Lösung: siehe Vorlesungsmanuskript, Abschnitt 4.4: $\eta = (P_n - P_{v,n}) / P_n = 1 - P_{v,n} / P_n$

Frage 4.1.6: Energetischer Wirkungsgrad. Die oben genannte Definition beschreibt nur einen Arbeitspunkt, in der Regel bei Nennleistung. Das Verhalten im Leerlauf bzw. mit einem Teil der geforderten Leistung wird hiermit nicht korrekt wiedergegeben. Wie wäre ein Wirkungsgrad zu definieren, der für den Betrieb insgesamt repräsentativ ist?

Lösung: Aus dem Verhältnis der über den Betriebszeitraum umgesetzten Nutzenergie zur Gesamtenergie. Als Betriebszeitraum ließe sich ein Tageszyklus oder Jahreszyklus verwenden: $\eta_E = (E_n - E_{v,n}) / E_n = 1 - E_{v,n} / E_n$.

4.2. Signalgüte und Störeinflüsse

Dieser Abschnitt fasst wesentliche Aussagen aus dem Vorlesungsmanuskript, Kapitel 5 zusammen, für die Details, speziell die Definitionen und Messmethoden wird auf das Skript verwiesen.

Frage 4.2.1: Klirrfaktor. Was kennzeichnet der Klirrfaktor (engl. THD, total harmonic distortion)? Welchen Klirrfaktor hat ein rechteckförmiges periodisches Signal? Welchen Klirrfaktor hat ein harmonisches Signal?

Lösung: Der Klirrfaktor kennzeichnet den Oberwellengehalt eines periodischen Signals. Er ist definiert als der Effektivwert aus der Leistung des Signals, reduziert um die Leistung der Grundschwingung des Signals. Der Effektivwert dieser Leistungsdifferenz wird bezogen auf den Effektivwert der Grundschwingung.

Ein harmonisches Signal hat den Klirrfaktor Null. Ein rechteckförmiges Signal hat die doppelte Leistung eines harmonischen Signals, folglich beträgt der Klirrfaktor hier 100%. Bemerkung: Ein rechteckförmiges Signal hat als Effektivwert seinen Scheitelwert. Bei einem harmonischen Signal beträgt der Effektivwert $1/\sqrt{2}$ des Scheitelwertes, folglich die Leistung die Hälfte.

Frage 4.2.2: Oberwellen. Das Spektrum eines harmonischen Signals zeigt Spektrallinien bei der Signalfrequenz (und dem Spiegelbild der Signalfrequenz auf der negativen Frequenzachse). Ein verzerrtes Signal zeigt Oberwellen bzw. Oberschwingungen im Spektrum. Wodurch entstehen Oberwellen in der Praxis der Energietechnik?

Lösung: Durch Nichtlinearitäten, wie z.B. Sättigungseffekte an magnetischen Kernen (der magnetische Fluss über der magnetischen Feldstärke geht in Sättigung, wodurch sich die Induktivität bei großen Strömen verringert), bzw. bei Brückengleichrichter bedingt durch das Funktionsprinzip (hohe Ströme, wenn die Wechselspannung das Niveau der gleichgerichteten Spannung übersteigt). Diese Oberwellen sind bezogen auf das Wechselstromsystem mit 50 Hz bzw. 60 Hz.

Bei Konvertern entstehen außerdem Oberwellen als Vielfache der Schaltfrequenz, d.h. im Frequenzbereich oberhalb 10 kHz. Grund für diese Oberwellen ist die Approximation der harmonischen Spannung des Konverters durch pulsbreitenmodulierte Signale.

Frage 4.2.3: Impedanzen. Welche Rolle spielt die Impedanz an Anschlusspunkt des Konverters? Welche Impedanz besitzt der Konverter von Anschlusspunkt aus betrachtet?

Lösung: Das Impedanzspektrum am Anschaltort ist vom Konverter aus betrachtet wegen der Induktivitäten im Netz in der Regel gut bedämpft. Ist der Konverter parallel zu einer Anlage angeschaltet, fällt die Netzimpedanz in der Regel deutlich geringer aus als die Impedanz der Anlage. Aus diesem Grund funktioniert die Kompensation von Blindleistung bzw. von Oberschwingungen.

Bei längeren Anschlussleitungen ist im Impedanzspektrum auf Resonanzstellen zu achten, die mit den Reglern des Konverters in Konflikt geraten können. Vom Anschaltort aus betrachtet ist der Konverter im stromgeführten Betrieb hochohmig, und im spannungsgeführten Betrieb niederohmig.

Frage 4.2.4: Filter. Die Schaltfrequenz eines Konverters wird durch ein LC-Filter bedämpft. Welchen Impedanzverlauf besitzt dieses Filter vom Konverters aus betrachtet, bzw. vom Netz bzw. Anschaltort aus betrachtet?

Lösung: Vom Konverter aus betrachtet ist das Filter in Art eines Serienschwingkreises niederohmig. Vom Anschlussort aus betrachtet wird das Filter wie ein Parallelschwingkreis hochohmig.

Frage 4.2.5: Anschlussregeln. Welche Anforderungen stellen Anschlussregeln (engl. Grid-Codes) an Konverter ?

Lösung: In der Niederspannung und Mittelspannung gelten z.B. die TAR 4105 und TAR 4110. Gefordert sind: (1) Oberwellenspektrum, (2) einstellbare Blindleistung (z.B. $Q(U)$, $Q(P)$) (3) Netzstützung im Fehlerfall (OVRT und UVRT, engl. fault ride through (FRT) für over voltage (OV) und under voltage (UV)), (4) Unterstützung der Leistungsbilanz durch $P(f)$ außerhalb eines Totbandes (z.B. von 49,8 bis 50,2 Hz) für die Primärregler.

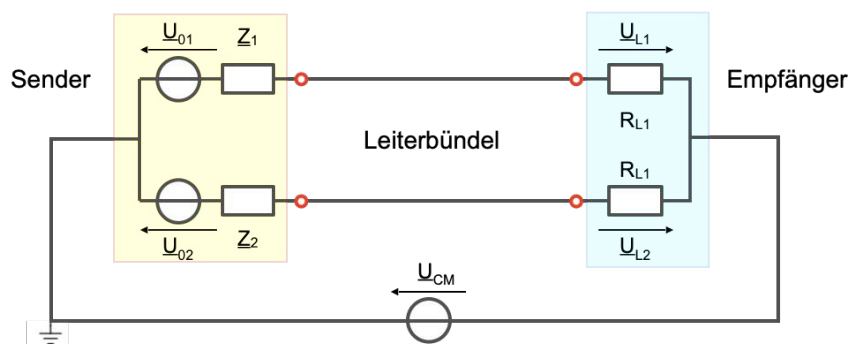
Frage 4.2.6: Regeln für DC-Kreise. Sollen mehrer Anlagen an den DC-Kreis angeschlossen werden, sind hierfür Regeln zu beachten. Welche Spielregeln sind hier zu erwarten? Lassen sich AC-Anschlussrichtlinien als geeignete Basis hierfür verwenden?

Lösung: Spielregeln: (1) Verhalten im Fehlerfall, (2) Verhalten beim Einschalten der Anlage.

Anwendbarkeit von AC-Anschlussrichtlinien: Mangels Blindströmen bleibt höchstens (1) das erlaubte Oberwellenspektrum erhalten. Die Netzstützung im Fehlerfall (2) erfolgt im DC-Netz komplett anders, ebenso die Fehlererkennung und selektive Abschaltung.

4.3. Common Mode

Unter einem Common Mode versteht man ein Gleichtaktsignal, d.h. einen Signalanteil, der in einem Leitungsbündel auf allen Leitern gleich ist. Folgende Abbildung zeigt ein symmetrisches Übertragungssystem mit 2 Leitern. Das Common Mode Signal koppelt z.B. als Störsignal zwischen den Leitern und der Masse bzw. Rückführung ein und ist dadurch gekennzeichnet, dass es auf beiden Leitern gleich ist (Literatur siehe [2]).

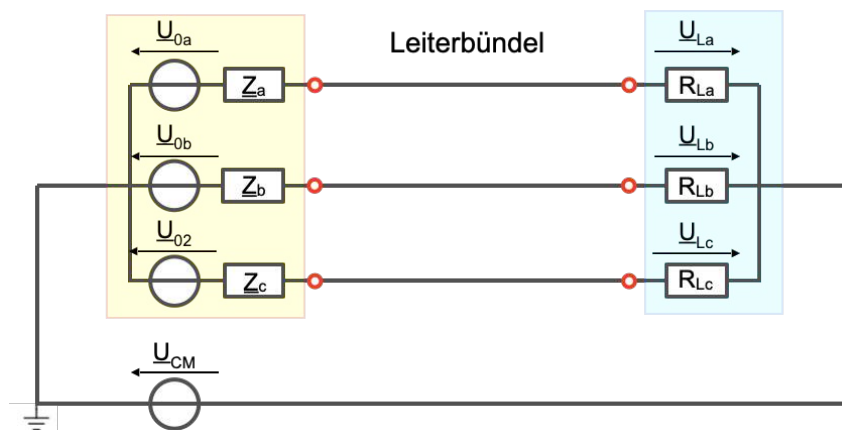


Das Gleichtaktsignal koppelt zwischen Leiterbündel und Neutralleiter ein. Sender und Empfänger verwenden eine differenzielle Signalübertragung. In der Differenz der Spannungen am Anschluss-

punkt des Empfängers ist das Gleichtaktsignal nicht vorhanden, wie man durch Anwendung der Maschenregel erkennt.

Frage 4.3.1: Common Mode bei dreiphasigem System. Wie lässt sich das Ersatzschaltbild auf ein dreiphasiges Wechselspannungssystem übertragen? Wie entsteht hier ein Common Mode?

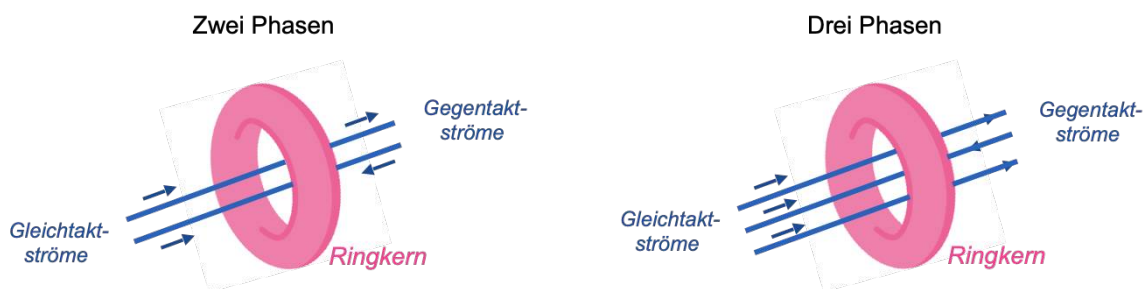
Lösung: siehe folgende Abbildung.



Der Common Mode entsteht durch den Gleichanteil bei einem unsymmetrischen System, bzw. durch die Einkopplung von Störungen in der Rückführung.

Bei einem symmetrischen System wären die Summe der Phasenspannungen gleich Null, ebenso die Summe der Ströme an den beiden Sternpunkten. In diesem Fall gibt es keinen Strom in der Rückführung und somit keinen Gleichanteil.

Frage 4.3.2: Funktionsweise der Gleichtakt-Drossel. Der Gleichtaktanteil lässt sich durch Gleichtakt-Drosseln unterdrücken, wie in folgender Abbildung gezeigt. Erläutern Sie das Funktionsprinzip.



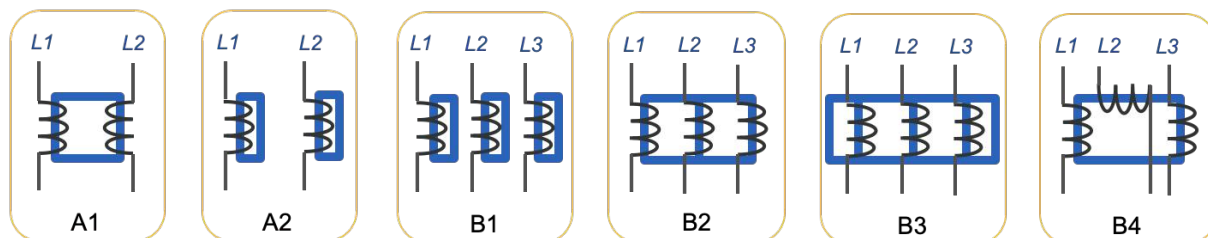
Lösung: (1) Zwei Phasen: Die Gleichtaktströme erzeugen ein Magnetfeld (nach der rechten Hand Regel). Im Ringkern stellt sich ein magnetischer Fluss ein, die Anordnung mit Ringkern wirkt somit als Induktivität bzw. Drossel. Für die Gegentaktströme heben sich die Magnetfelder der gegenläufigen Ströme auf; der Ringkern hat keinen Einfluss.

Bemerkung zur Realisierung: Der Effekt lässt sich verstärken, wenn man beide Leiter in einigen Windungen um den Ringkern wickelt. Man erhält eine Gleichtakt-Drosselspule. Die magnetischen Flüsse der Gegentaktströme im Ringkern heben sich auch hier auf.

(3) Drei Phasen: Die Wirkung auf die Gleichtaktströme ist identisch wie im zweiphasigen Fall: Das resultierende Magnetfeld führt im Ringkern zu einem magnetischen Fluss, der Kern wirkt als Drossel. Die Gegentaktströme stellen hier ein symmetrisches Drehstromsystem dar: die Summe der Ströme und somit das resultierende Magnetfeld ist zu jedem Zeitpunkt Null.

Bemerkung zur Realisierung: Auch hier lässt sich der Effekt verstärken, wenn man die Leiter in einigen Windungen um den Ringkern wickelt. Die Summe der Gegentaktströme ist Null, somit auch die Summe deren magnetischen Flüsse im Ringkern.

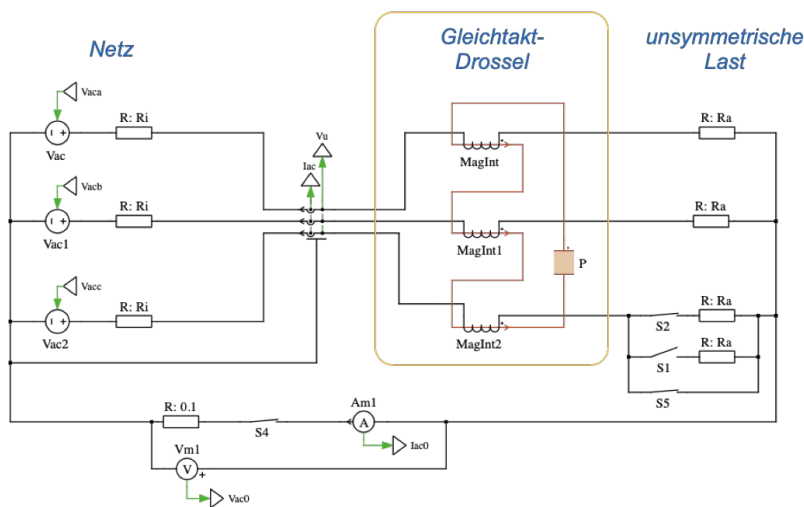
Frage 4.3.3: Realisierung der Gleichtakt-Drossel. Bewerten Sie die in folgender Abbildung dargestellten Varianten. Welche funktionieren, welche nicht? Erläutern Sie die Funktionsweise.



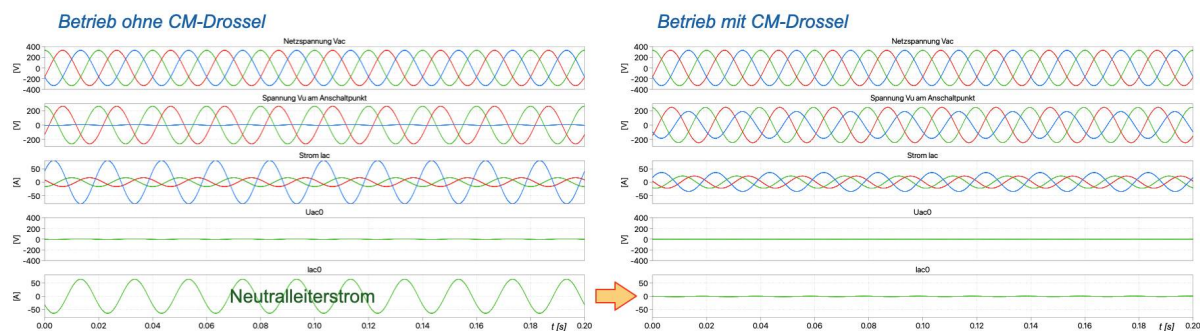
Lösung: A1: funktioniert A2: funktioniert nicht B1: funktioniert nicht
B2: funktioniert nicht B3: funktioniert nicht B4: funktioniert

Um als Gleichtakt-Drossel zu funktionieren, muss der Kern den magnetischen Fluss bei Gleichtaktströmen schließen. A2, B1 und B3 drosseln alles, auch den Gegentakt und funktionieren somit nicht als Gleichtakt-Drosseln. B2 drosselt den Gleichtakt nicht.

Frage 4.3.4: Simulation. Untersuchen Sie die Funktion der Gleichtakt-Drossel in der Simulation. Erläutern Sie das Funktionsprinzip nach folgender Abbildung.



Lösungsbeispiel: Die CM-Drossel schaltet die magnetischen Flüsse des Leiterbündels in Serie. Für einen Gleichtaktstrom erhält man eine große Induktivität. Für Gegentaktströme hat die Schaltung keinen Einfluss, da sich in einem symmetrischen Drehstromsystem die Ströme und folglich die Flüsse zu Null addieren. Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf.



4.4. Parallelbetrieb von Modulen

Beim Parallelbetrieb von Modulen ist zu unterscheiden, ob die Module als Stromquellen oder Spannungsquellen arbeiten, wie in folgender Abbildung dargestellt.



Frage 4.4.1: Parallelbetrieb von Stromquellen. Welche Ströme und Spannungen stellen sich ein? Welche Anwendungsfälle finden sich für diese Betriebsart? Welche Vorkehrungen sind für den parallelen Betrieb von Modulen erforderlich?

Lösung: Der Gesamtstrom ist die Summe der Ströme der Spannungsquellen (Knotenregel). Das Netz arbeitet als Spannungsquelle mit geringem Innenwiderstand. Folglich fließen die Ströme ins Netz, bzw. werden aus dem Netz bezogen. Stromquellen (Last, Einspeisung, weitere Module) besitzen einen großen Innenwiderstand.

Anwendungsfälle: Kompensationsanlagen. Wenn $i_2(t)$ die Last darstellt, lässt sich der Strom $i_1(t)$ der Kompensationsanlage so regeln, dass dieser den von der Last benötigten Blindstrom bereitstellt. Somit wird aus dem Netz nur Wirkstrom bezogen. Auf die gleiche Weise funktionieren Anlagen zur Kompensation von Oberwellen.

Vorkehrungen für den Parallelbetrieb: Keine besonderen Anforderungen. Die Module können individuelle Ströme bereit stellen.

Frage 4.4.2: Parallelbetrieb von Spannungsquellen. Welche Ströme und Spannungen stellen sich ein? Welche Anwendungsfälle finden sich für diese Betriebsart? Welche Vorkehrungen sind für den parallelen Betrieb von Modulen erforderlich?

Lösung: Nach der Maschenregel gibt es nur eine Spannung vom Anschlusspunkt zum Bezugspunkt. Ideale Spannungsquellen lassen sich folglich nicht parallel betreiben. Bei Spannungsquellen mit Innenwiderstand stellen sich an hohe Ausgleichsströme ein, so dass Spannungsdifferenzen an den Innenwiderständen ausgeglichen werden. Die Ströme richten sich folglich nach dem Impedanzverhältnissen.

Anwendungsfälle: Module in einem netzbildenden Umrichter und Parallelbetrieb von Generatoren mit Umrichtern.

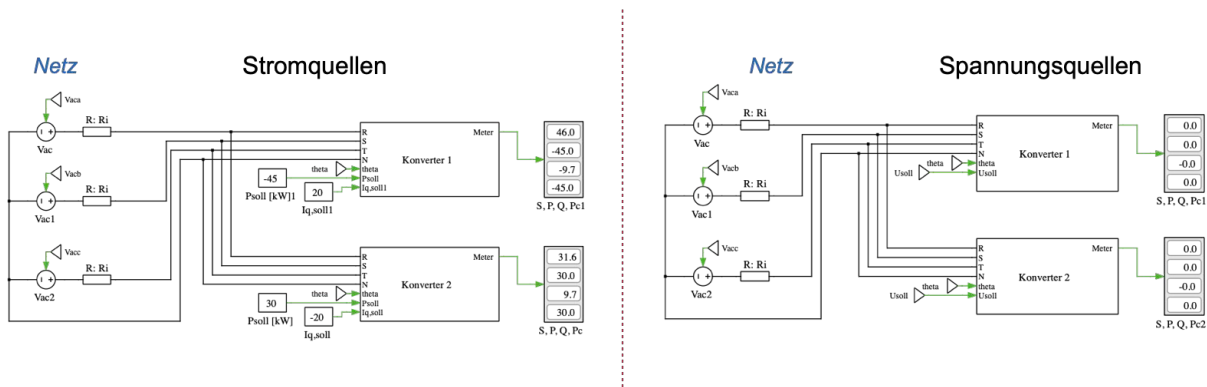
Vorkehrungen für den Parallelbetrieb: Geregelte Spannungsquellen sind ideale Spannungsquellen. Der Parallelbetrieb funktioniert nur, wenn alle Spannungen exakt gleich sind. Zum Angleichen der Spannungen ist eine Kennlinie vorzugeben, die die Spannung in Abhängigkeit des Stromes des einzelnen Moduls absenkt (engl. Voltage Droop). Mit dieser Kennlinie verhält sich das Modul wie eine Spannungsquelle mit Innenwiderstand.

Frage 4.4.3: Simulation im stromgeführten Betrieb. Untersuchen Sie den Parallelbetrieb zweier Konverter in der Simulation.

Lösungsbeispiel: Wirkströme und Blindströme (bzw. Wirkleistung und Blindleistung) können innerhalb der Grenzen der Konverter beliebig vorgegeben werden. Im Beispiel wurde das Spannungsquellenmodell für den Konverter verwendet, das für Voltage-Source-Konverter der Realität am nächsten kommt. Abbildung siehe folgende Aufgabe.

Frage 4.4.4: Simulation im spannungsgeführten Betrieb. Untersuchen Sie den Parallelbetrieb zweier Konverter in der Simulation.

Lösungsbeispiel: Wie in folgender Abbildung dargestellt, arbeiten insgesamt 3 Spannungsquellen parallel: das Netz, Konverter 1 und Konverter 2. Im Gleichgewicht findet mangels Last kein Transfer von Leistung statt.

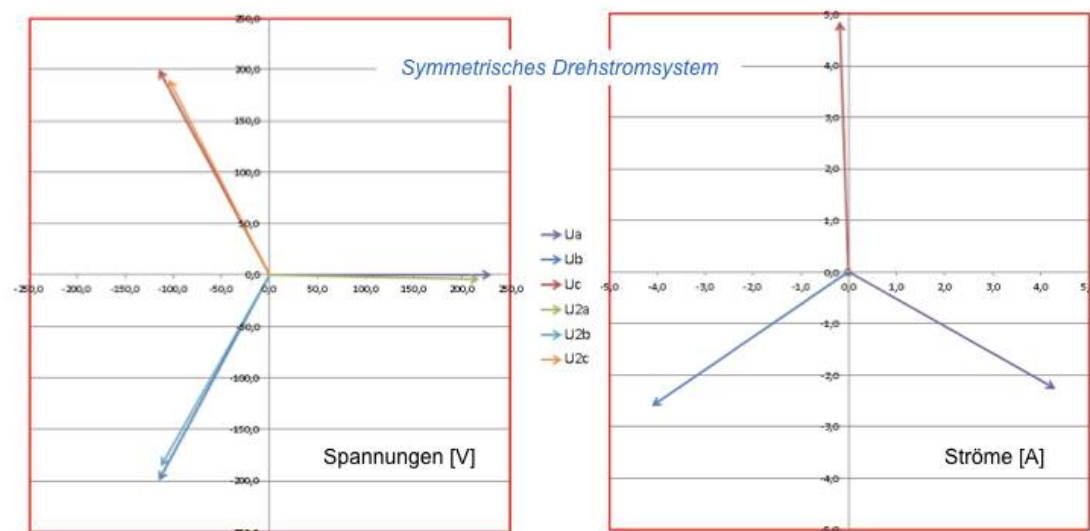


Bei einer Stromquelle im Anschlusspunkt wären die Leistungsbeiträge der einzelnen Spannungsquellen umgekehrt proportional zu den Innenwiderständen bzw. per Kennlinien nachgebildeten Innenwiderständen. Bei Spannungsabweichungen der Quellen im Anschlusspunkt stellen sich Ausgleichsströme ein.

5. Symmetrische Komponenten

5.1. Definition

Folgende Abbildung zeigt Spannungen und Ströme aus einem Drehstromsystem in der Niederspannung, bestehen aus Netz, Leitung und dreiphasiger Last. Gezeigt sind die Spannungen am Eingang und Ausgang der Leitung, sowie die Leiterströme.



Das gezeigte Drehstromsystem ist symmetrisch. Die Lage der Zeiger in der komplexen Ebene lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\underline{U}_{1a} = U_0 \cdot \underline{a}^0 \quad (5.1a)$$

$$\underline{U}_{1b} = U_0 \cdot \underline{a}^2 \quad (5.1b)$$

$$\underline{U}_{1c} = U_0 \cdot \underline{a}^1 \quad (5.1c)$$

Hierbei bedeuten $\underline{a}^x = e^{jx2\pi/3}$, und somit $\underline{a}^0 = \underline{a} = 1$, $\underline{a}^1 = e^{j2\pi/3}$, $\underline{a}^2 = e^{j4\pi/3}$. Da jeweils eine Drehung um $2\pi/3$ beschrieben wird, folgt $\underline{a}^3 = \underline{a}^0 = 1$ und $\underline{a}^4 = \underline{a}^1 = e^{j2\pi/3}$. Außerdem addieren sich die drei Zeiger zu Null: $\underline{a}^0 + \underline{a}^1 + \underline{a}^2 = 0$.

Ein beliebiges Drehstromsystem lässt sich aus der Überlagerung dreier symmetrischer Komponenten beschreiben: dem Mitsystem (engl. positiv sequence component), Gegensystem (engl. negative sequence component) und Nullsystem (engl. zero sequence component). Diese Begriffe sind wie folgt definiert:

$$\text{Mitsystem:} \quad \underline{U}_{1m} = \frac{1}{3} (\underline{U}_{1a} \cdot 1 + \underline{U}_{1b} \cdot \underline{a}^1 + \underline{U}_{1c} \cdot \underline{a}^2)$$

$$\text{Gegensystem:} \quad \underline{U}_{1g} = \frac{1}{3} (\underline{U}_{1a} \cdot 1 + \underline{U}_{1b} \cdot \underline{a}^2 + \underline{U}_{1c} \cdot \underline{a}^1)$$

$$\text{Nullsystem:} \quad \underline{U}_{10} = \frac{1}{3} (\underline{U}_{1a} \cdot 1 + \underline{U}_{1b} \cdot 1 + \underline{U}_{1c} \cdot 1)$$

Die Transformation liefert jeweils den ersten Zeiger des Systems. Bei einem symmetrischen System mit der in Gleichung (5.1) genannten Phasenfolge werden durch die Transformationsvorschrift des Mitsystems alle Zeiger auf die reelle Achse gedreht und dort addiert. Ergebnis (nach Division durch 3) ist der Zeiger $\underline{U}_{1m} = \underline{U}_{1a}$.

Das vollständige Mitsystem wäre wie folgt beschrieben:

$$\underline{U}_{1ma} = \underline{U}_{1m} \cdot \underline{a}^0 \quad (5.2a)$$

$$\underline{U}_{1mb} = \underline{U}_{1m} \cdot \underline{a}^2 \quad (5.2b)$$

$$\underline{U}_{1mc} = \underline{U}_{1m} \cdot \underline{a}^1 \quad (5.2c)$$

Sinngemäß gilt für das vollständige Gegensystem:

$$\underline{U}_{1ga} = \underline{U}_{1g} \cdot \underline{a}^0 \quad (5.3a)$$

$$\underline{U}_{1gb} = \underline{U}_{1g} \cdot \underline{a}^1 \quad (5.3b)$$

$$\underline{U}_{1gc} = \underline{U}_{1g} \cdot \underline{a}^2 \quad (5.3c)$$

Das Gegensystem (sofern vorhanden) besitzt somit eine umgekehrte Phasenfolge wie das Mitsystem. Für das Nullsystem sind alle Zeiger gleichphasig, d.h. $\underline{U}_{10a} = \underline{U}_{10b} = \underline{U}_{10c}$.

Die Transformation lässt sich am einfachsten mit Hilfe einer Tabellenkalkulation berechnen, die auch die grafische Darstellung der Zeiger ermöglicht. Ein Beispiel findet sich bei den Modellen zu Teil 1 dieser Unterlage, siehe [Modelle zur Schulung](#) (5_Grundlagen.xls). Eine Zusammenfassung der Zeigerdarstellung und Zeigertransformation findet sich im Vorlesungsmanuskript.

Frage 5.1.1: Berechnen Sie die symmetrischen Komponenten des eingangs gezeigten, symmetrischen Drehstromsystems. Prüfen Sie Ihre Ergebnisse auf Plausibilität.

Lösung: Für das Mitsystem erhält man:

$$\underline{U}_{1m} = \underline{U}_0/3 (1 + \underline{a}^2 \underline{a}^1 + \underline{a}^1 \underline{a}^2) = \underline{U}_0/3 (1 + \underline{a}^3 + \underline{a}^3) = \underline{U}_0.$$

Für das Gegensystem ergibt sich

$$\underline{U}_{1g} = \underline{U}_0/3 (1 + \underline{a}^2 \underline{a}^2 + \underline{a}^1 \underline{a}^1) = \underline{U}_0/3 (1 + \underline{a}^4 + \underline{a}^2) = \underline{U}_0/3 (1 + \underline{a}^1 + \underline{a}^2) = 0.$$

Ein Nullsystem gibt es nicht, da sich bei einem symmetrischen System die Zeiger zu Null addieren.

Frage 5.1.2: Zweiphasiges Wechselstromsystem. Beschreiben Sie ein zweiphasiges Wechselstromsystem als Überlagerung zweier Drehstromsysteme. In welchem Anwendungsfall ist eine solche Konstruktion hilfreich?

Lösung: Für die drei Phasen sei angenommen: $\underline{U}_{1a} = \underline{U}_0/2$, $\underline{U}_{1b} = -\underline{U}_0/2$ und $\underline{U}_{1c} = 0$.

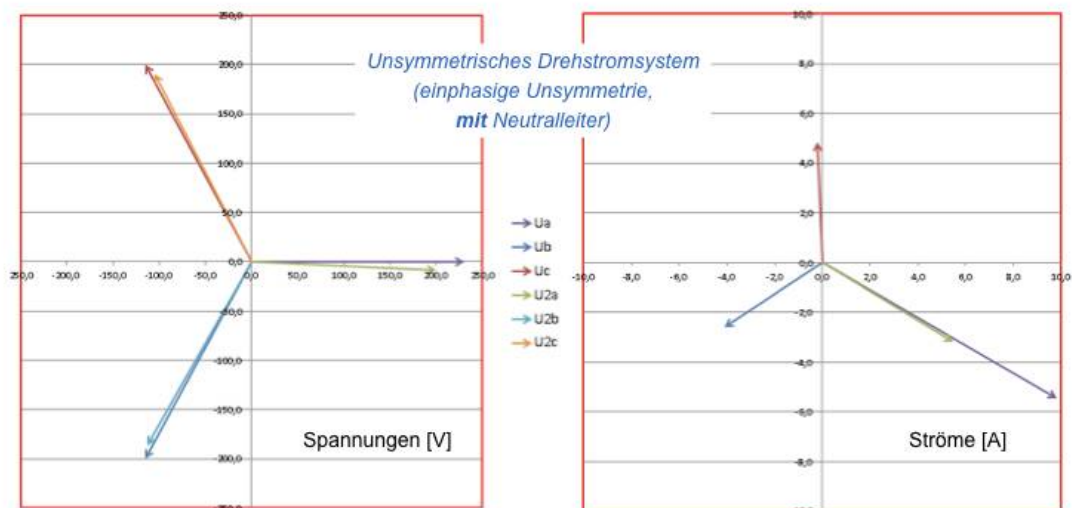
Die Transformation liefert ein Mitsystem und ein Gegensystem gleicher Amplitude.

Ein einphasiges System lässt sich somit als Überlagerung zweier gegenläufiger Drehstromsysteme interpretieren. Anwendungsfall: Betrieb eines Drehstrommotors an 2-phasigem Wechselstrom. Die Laufrichtung ist hierbei nicht eindeutig.

5.2. Einphasige Unsymmetrie

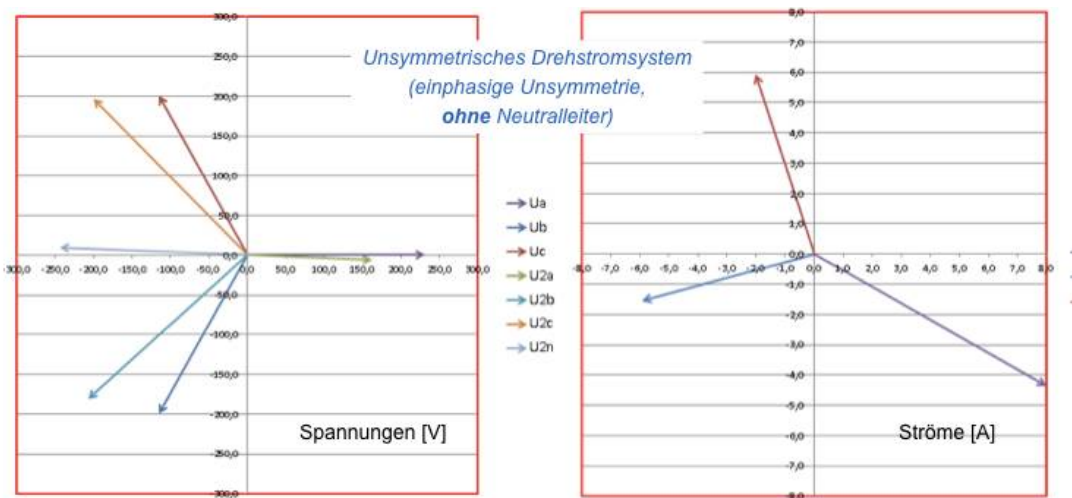
Das in folgender Abbildung gezeigte System hat eine einphasige Unsymmetrie, verursacht durch eine größere Last an einer der Phasen (zwischen Phase und Sternpunkt). Das gezeigte System hat einen Neutralleiter.

Frage 5.2.1: Interpretieren Sie die Lastverhältnisse. Wie würde sich ein System ohne Neutralleiter verhalten?



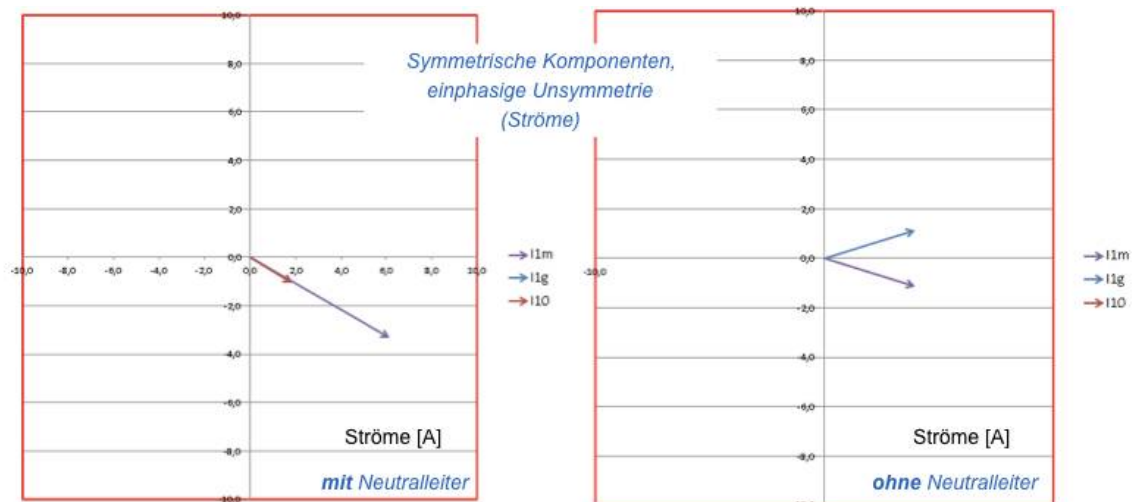
Lösung: (1) Lastverhältnisse: Die Last ist ohmsch-induktiv, da die Ströme den Spannungen nacheilen. Leiter 1 ist stärker belastet und hat den größeren Strom. Die Rückleitung des Stroms erfolgt über den Neutralleiter; hierdurch bleiben die spannungen symmetrisch.

(2) System ohne Neutralleiter: Die Spannungen über der Last werden unsymmetrisch, es ergibt sich eine Spannung vom Sternpunkt der Last zum Bezugspunkt (Sternpunkt des Quellsystems).



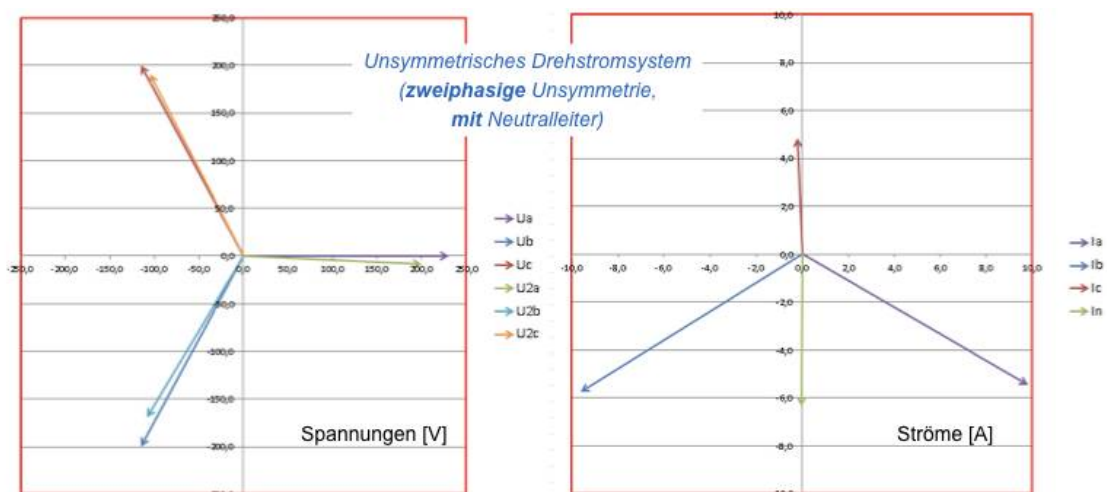
Frage 5.2.2: Berechnen Sie die Symmetrischen Komponenten der Ströme mit und ohne Neutralleiter (numerisch mit Tabellenkalkulation).

Lösung: Für das System mit Neutralleiter ergibt sich ein Mitsystem und Nullsystem der Ströme. Für ein System ohne Neutralleiter gibt es für die Ströme mangels Neutralleiterstroms kein Nullsystem, jedoch ein Mitsystem und Gegensystem.



5.3. Zweiphasige Unsymmetrie

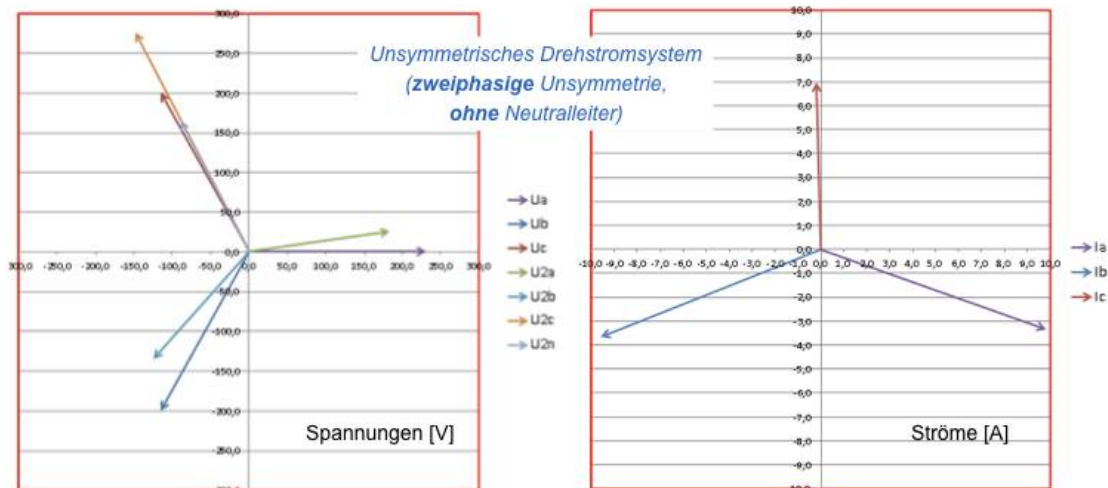
Das in folgender Abbildung gezeigte System hat eine zweiphasige Unsymmetrie, verursacht durch eine größere Last zwischen zwei Phasen und Sternpunkt. Das gezeigte System hat einen Neutralleiter.



Frage 5.3.1: Interpretieren Sie die Lastverhältnisse. Wie würde sich ein System ohne Neutralleiter verhalten?

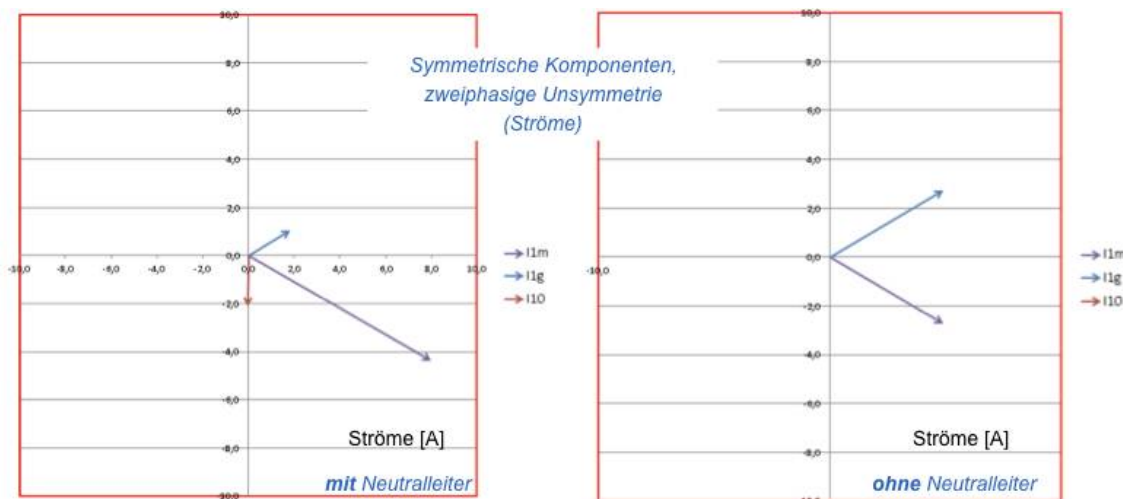
Lösung: (1) Lastverhältnisse: Die Ströme zeigen, dass zwischen Phase a und Sternpunkt, sowie zwischen Phase b und Sternpunkt eine größere Last als an Phase c angeschlossen ist. Beide Lasten erscheinen gleich groß. Alle Lasten sind ohmsch-induktiv. Wegen des Neutralleiterstroms bleiben die Spannungen über der Last symmetrisch.

(2) System ohne Neutralleiter: Es ergeben sich unsymmetrische Spannungen und Ströme. Es stellt sich eine Spannung vom Sternpunkt der Last zum Bezugspunkt ein. Die Spannung in Leiter c (zum Bezugspunkt) ist überhöht.



Frage 5.3.2: Berechnen Sie die symmetrischen Komponenten der Ströme mit und ohne Neutralleiter (numerisch mit Tabellenkalkulation).

Symmetrische Komponenten der Ströme: Für das System mit Neutralleiter ergeben sich Mitsystem, Gegensystem und Nullsystem. Ein System ohne Neutralleiter lässt sich aus der Überlagerung von Mitsystem und Gegensystem interpretieren.

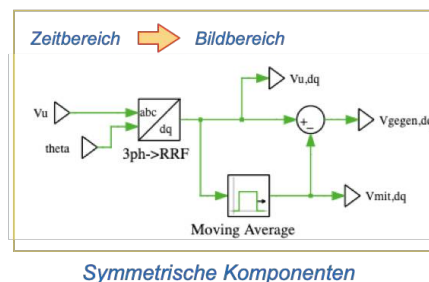
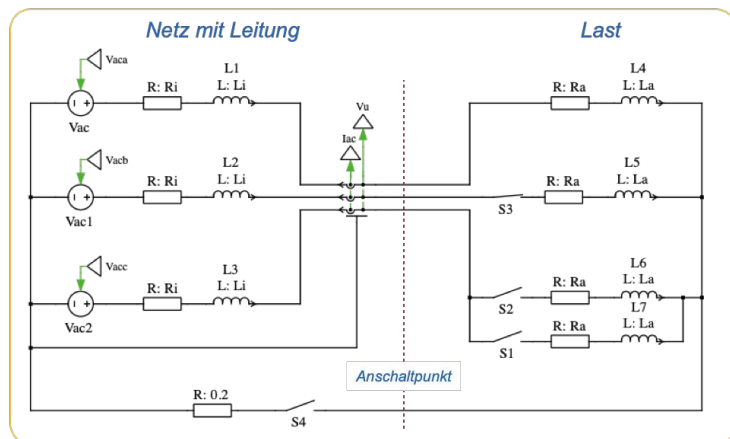


5.4. Simulationsmodell

Die symmetrischen Komponenten beruhen auf den Methoden der Vektoraddition der Spannungszeiger und Stromzeiger. Sie eignen sich daher für analytische Betrachtungen im Bildbereich. Unmittelbar aus den Zeitsignalen rekonstruieren lassen sich nicht. Allerdings lässt sich aus dem Verlauf der Zeitsignale der 3 Phasen Betrag und Amplitude der einzelnen Phasen ablesen bzw. qualitativ erfassen und auf diese Weise Schlüsse auf den Zustand des Systems ziehen.

Folgende Abbildung zeigt einen vergleichbaren Aufbau wie in den Tabellenkalkulationen aus den vorausgegangenen Abschnitten. Die Anordnung besteht aus einem Netz als Spannungsquelle, der Impedanz des Netzes und der Zuleitungen, sowie einer Lastimpedanz am Anschaltunkt.

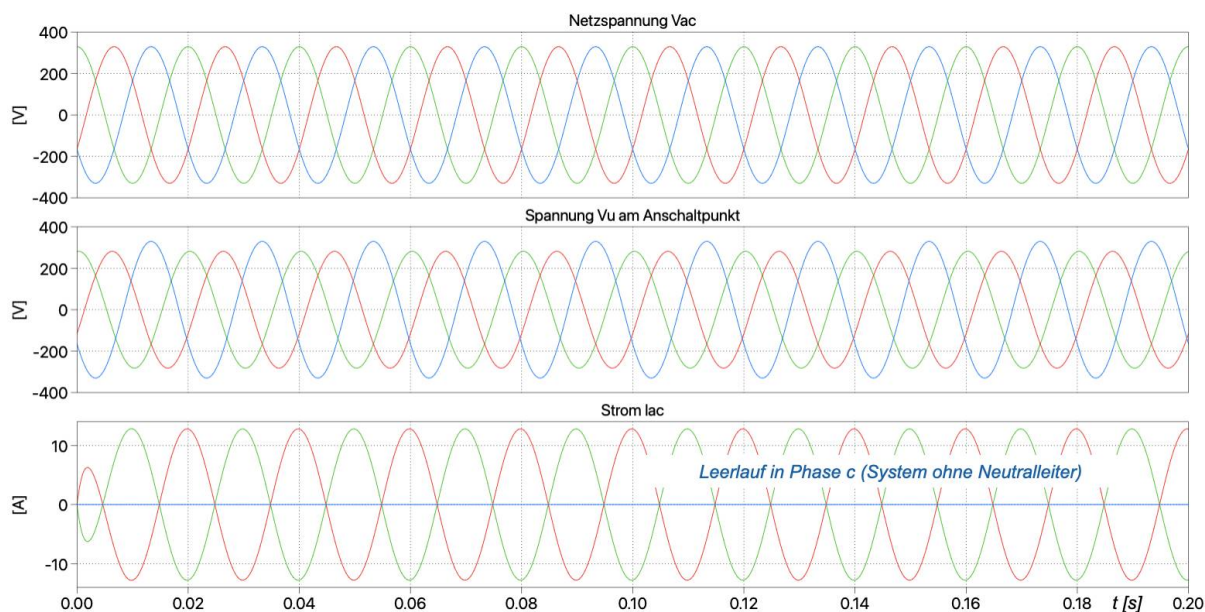
Die Impedanzen lassen sich durch manuelle Schalter in einen unsymmetrischen Zustand versetzen. Wahlweise lässt sich auch ein Neutralleiter aktivieren oder wegschalten. Die Effekte der Unsymmetrien lassen sich an den Zeitverläufen der Spannungen und Ströme nachvollziehen und auf Übereinstimmung mit der Theorie prüfen.



Frage 5.4.1: Untersuchen Sie verschiedene Lastzustände in der Simulation. Überprüfen Sie die Übereinstimmung mit der Theorie (Zeigerdiagramme der Systeme, Abbildung mit Hilfe des Mitsystems, Gegensystems und ggf. Nullsystems).

Lösung: siehe Aufgaben in den Abschnitten davor.

Beispiel: Folgende Abbildung zeigt einen Simulationslauf für den im Schaltbild oben angegebenen Zustand (Phase 3 im Leerlauf, kein Neutralleiter).



Der Strom $i_c(t)$ in Phase 3 ist folglich Null, und somit $i_a(t) = -i_b(t)$ wegen des fehlenden Neutralleiters. Die Spannungen am Anschaltpunkt sind folglich ebenfalls unsymmetrisch. Es lässt sich ein Zeigerdiagramm rekonstruieren.

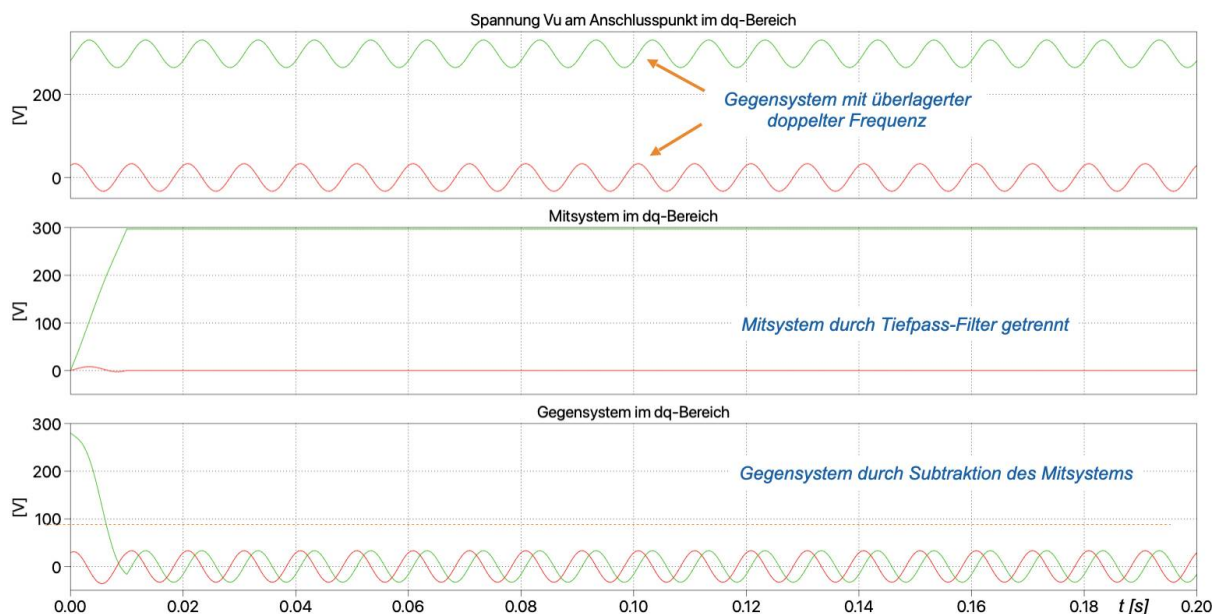
Frage 5.4.2: Transformation in den Bildbereich. Mitsystem, Gegensystem und Nullsystem sind Zeigeroperationen. Unmittelbar auf Zeitsignale anwenden lassen sie sich nicht. Transformiert man die Spannung am Anschaltpunkt mit Hilfe der dq-Transformation in den Bildbereich, so ergibt sich das in folgender Abbildung gezeigte Ergebnis.

Die Transformation wurde durchgeführt, wie rechts neben dem Schaltbild oben dargestellt:

- Transformation der Spannungen mit Hilfe des Bezugssystems „theta“ ergibt im dq-Bereich eine Überlagerung mit doppelter Frequenz, wie in folgender Abbildung oben dargestellt.

- Wenn man die Überlagerung mit Hilfe eines Tiefpassfilters beseitigt, erhält man das Mitsystem.
- Bei Subtraktion des Mitsystems von der transformierten Spannung verbleibt somit das Gegensystem.

Interpretieren Sie diese Zusammenhänge. Wieso ergibt ein ggf. vorhandenen Gegensystem bei der dq-Transformation eine Überlagerung mit doppelter Frequenz? Wie interpretiert man das Gegensystem?



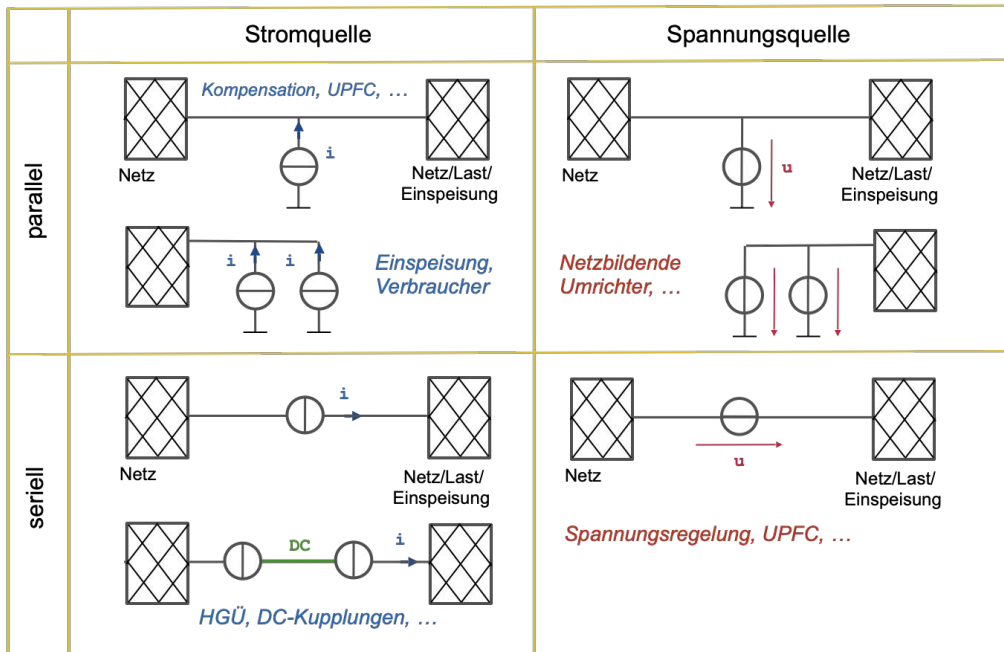
Lösung: Die Transformation aus dem Zeitbereich „abc“ in den Bildbereich „dq“ erfolgt in zwei Schritten:

- Schritt 1 sammelt die Phasenbeziehungen der 3 Zeiger in einen repräsentativen Zeiger, vergleichbar mit der Transformation ins Mitsystem, jedoch auf Basis der Zeitsignale. Ein symmetrische Drehstromsystem enthält nur Information für 2 Freiheitsgrade: Betrag und Amplitude (bzw. Realteil und Imaginärteil) eines komplexen Zeigers. Die Phasenbeziehungen der beiden übrigen Zeiger stehen fest und sind daher frei von Informationen.
- Schritt 2 bringt die Drehbewegung des repräsentativen Zeigers dadurch zum Stillstand, dass das Zeitsignal mit einer Drehbewegung in umgekehrter Richtung multipliziert wird: Aus dem rotierenden Zeiger $\underline{U}(t) = \hat{u} e^{j\varphi} e^{j\omega t}$ wird durch Multiplikation mit $e^{-j\omega t}$ der ruhende Zeiger $\underline{U}(t) = \hat{u} e^{j\varphi}$. Das Gegensystem rotiert jedoch in umgekehrter Drehrichtung, d.g. $\underline{U}_g(t) = \hat{u}_g e^{j\varphi_g} e^{-j\omega t}$. Hier führt die Multiplikation mit $e^{-j\omega t}$ somit zu einer gegenläufigen Rotation mit doppelter Frequenz $\underline{U}_g(t) = \hat{u}_g e^{j\varphi_g} e^{-j2\omega t}$.

Eine Unsymmetrie lässt sich somit an diesem überlagerten Anteil erkennen. Da das Mitsystem zeitlich stabil sein sollte, lässt sich durch Tiefpassfilterung leicht beseitigen, wobei hier ein rekursives Rechteckfilter, englisch „moving average filter“ über die Periode des 100 Hz Anteils von 0,01 s verwendet wurde. Bei dieser gewählten Methode der Filterung bleibt die Phasenbeziehung des ausgefilterten Signals für das Gegensystem erhalten (da um genau eine Periode verzögert wird).

6. Betriebsfälle

Alle Betriebsfälle lassen sich einteilen nach der Art der Anschaltung (seriell oder parallel), sowie nach der Betriebsweise der Konverter (stromgeführt oder spannunggeführt). Insgesamt ergeben sich die in der Abbildung dargestellten Möglichkeiten.

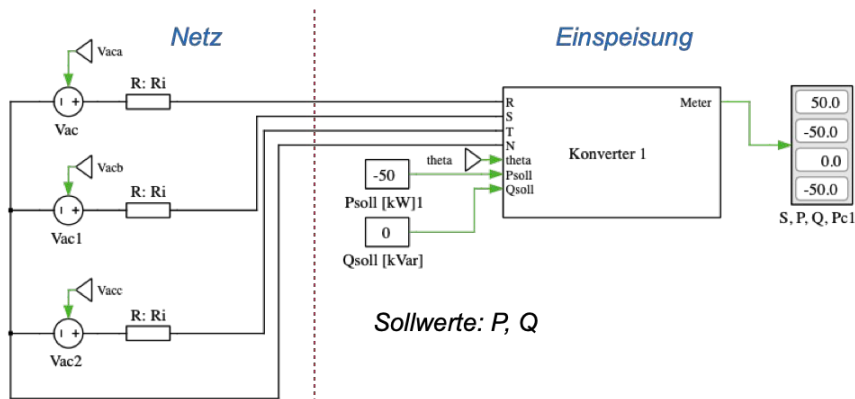


Anwendungsfälle für Stromquellen sind Einspeisung, Lasten, sowie Kompensationsanlagen. Stromquellen lassen sich ohne Probleme parallel schalten. Die Serienschaltung zweier Stromquellen (vergleichbar zweier Pumpen an einem Schlauch) funktioniert nur mit einer Regelung in Kombination mit einem Energiespeicher zur Pufferung der Ströme. Als Beispiel wäre eine stromgeführte HGÜ mit DC-Kreis zu nennen.

Spannungsquellen finden sich bei netzbildenden Umrichtern, sowie bei Anlagen, die den Lastfluss regeln (UPFC, Phasenschiebertransformatoren). Bei der Parallelschaltung ist Vorsicht geboten: Hier müssen die Innenwiderstände und Spannungsniveaus sehr genau übereinstimmen, damit sich die Ausgleichsströme in Grenzen halten. Dieses Prinzip ist aus dem Parallelbetrieb von Transformatoren im Netz bekannt.

6.1. Einspeisung

Im Einspeisebetrieb arbeitet der Konverter als Erzeugungsanlage bzw. Bezugsanlage.



In der Abbildung dargestellt ist die Einspeisung von 50 kW, erkennbar am negativen Vorzeichen des Sollwertes der Leistung an den Konverter.

Frage 6.1.1: Betriebsart. Welches wäre das korrekte Ersatzschaltbild des Converters? Wie ist der Converter geführt? Welcher Zusammenhang besteht zwischen Strom und Leistung?

Lösung: Der Converter arbeitet als Stromquelle und somit stromgeführt. Zwischen Leistung und Strom besteht folgender Zusammenhang:

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = U I \cos(\varphi) + j U I \sin(\varphi) = U I_d + U I_q = P + j Q \quad (6.1.1)$$

Hierbei bedeuten \underline{U} und \underline{I} die komplexe Spannung und den komplexen Strom (als Zeiger bzw. Phasor), und \underline{S} die komplexe Scheinleistung. Um den Phasenwinkel $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ zwischen Strom und Spannung zu erfassen, wird der konjugiert komplexe Strom \underline{I}^* verwendet. Ausmultipliziert ergeben sich Realteil und Imaginärteil mit den Effektivwerten U und I der Spannung und des Stroms.

In der Projektion mit dem Phasenwinkel φ erhält man die Wirkleistung P aus dem Betrag der Spannung und dem Wirkstrom I_d , die Blindleistung Q aus dem Betrag der Spannung und dem Blindstrom I_q .

Die Berechnung nach Gleichung (6.1.1) gilt für eine Phase, wobei der Strom den Strangstrom bezeichnet, und die Spannung die Strangspannung (d.h. die Spannung vom Anschlusspunkt zum Sternpunkt). Für ein dreiphasiges System ist die Leistung zu verdreifachen. Werden die Zeiger als Scheitelwerte verwendet (anstelle der Effektivwerte), so ist die Leistung (das Produkt aus Strom und Spannung) um den Faktor $\frac{1}{2}$ zu korrigieren.

Frage 6.1.2: Stellgrößen des Converters. Welche Stellgrößen besitzt der Converter? Wie ist der Converter an den Anschlusspunkt angeschaltet? Wie verhält sich der Converter beim Einspeisen von Wirkleistung bzw. beim Einspeisen von Blindleistung?

Lösung: Als Voltage-Source-Converter ist die Stellgröße die Spannung. Die Anschaltung erfolgt mit Hilfe einer Serieninduktivität.

Wirkleistung lässt sich einspeisen, indem der Phasenwinkel der Umrichterspannung im Vergleich zum Phasenwinkel der Netzspannung vorausseilt (der Converter läuft vor dem Netz). Läuft der Converter hinter dem Netz, nimmt er Leistung auf. Stellgröße ist also hier der Spannungswinkel (entsprechend dem Rotorwinkel bzw. Polradwinkel einer elektrischen Maschine).

Blindleistung lässt sich einspeisen oder beziehen, indem der Betrag der Converterspannung gegenüber dem Betrag der Netzspannung verstellt wird.

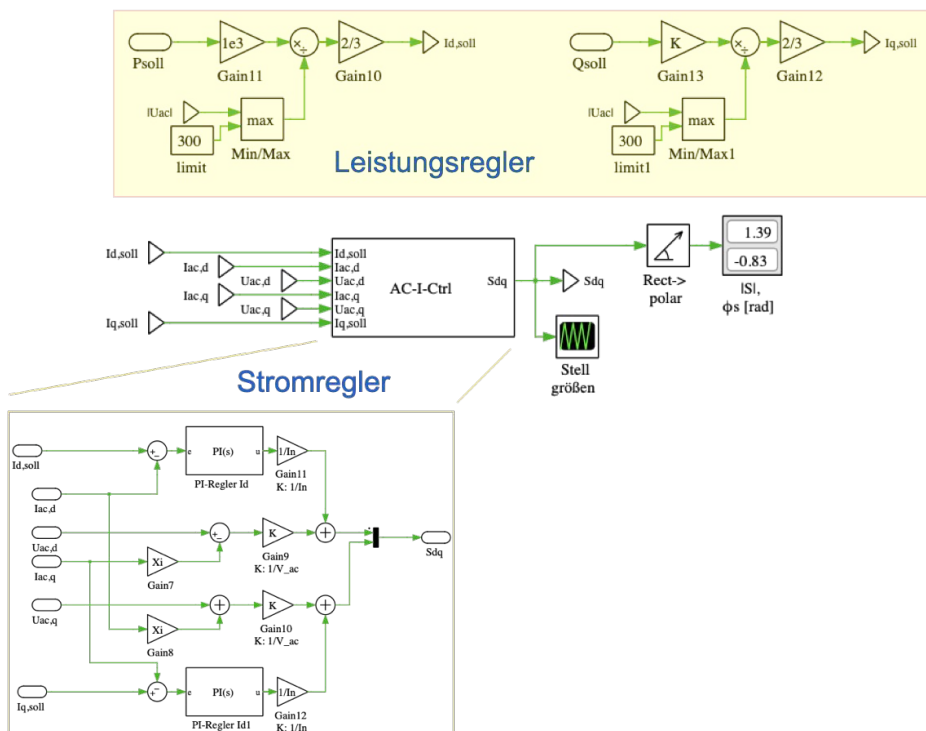
Frage 6.1.3: Leistungsregler. Erläutern Sie den Aufbau des Leistungsreglers.

Lösung: siehe folgende Abbildung.

Der Leistungsregler basiert auf dem Stromregler aus Abschnitt 2.2. Aus der Leistungsvorgabe $\{P, Q\}$ werden mit Hilfe der Gleichung (6.1.1) die Vorgaben für den Strom $\{I_d, I_q\}$ abgeleitet. Der Skalierungsfaktor $2/3$ berücksichtigt hierbei die Leistung pro Phase (Faktor $1/3$), sowie den Scheitelwert als Stellgröße anstelle des Effektivwertes (Faktor 2).

Die Vorgaben für den Strom sind bei einer Leistungsregelung abhängig von der Spannung: bei geringerer Spannung am Anhaltspunkt wird die Leistung durch größere Ströme erbracht.

Die Werte $\{I_d, I_q\}$ dienen als Sollwerte für den Stromregler. Im Beispiel ist der Stromregler als PI-Regler mit Vorsteuerung ausgeführt (siehe Abschnitt 2).

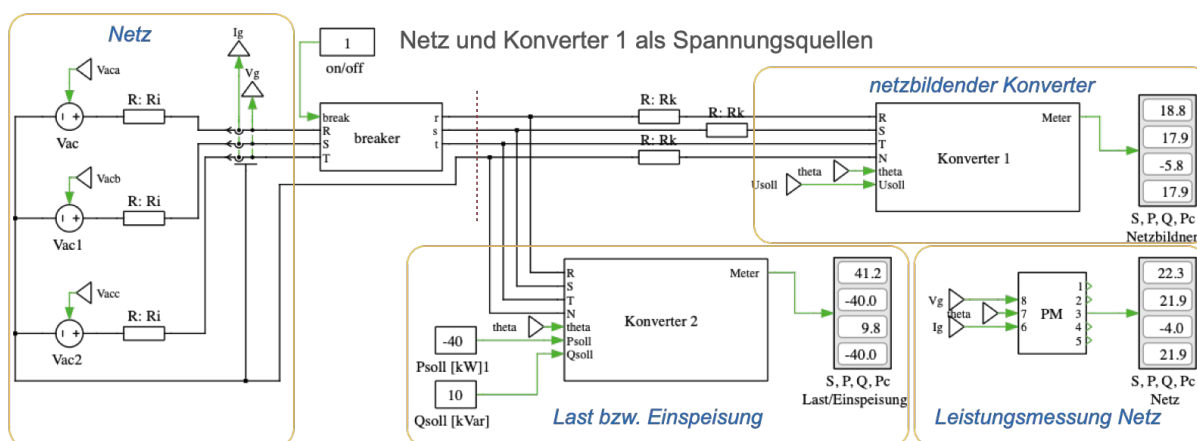


Frage 6.1.4: Simulation. Untersuchen Sie das Verhalten der Einspeisung in der Simulation.

Lösung: Innerhalb der Grenzen des Systems lassen sich Wirkleistung und Blindleistung vorgeben. Die Schaltung arbeitet in allen Quadranten (Wirkleistung und Blindleistung mit positivem oder negativem Vorzeichen). Im Verbraucherzählpeilsystem wird eine positive Leistung als Bezug interpretiert, eine negative Leistung als Abgabe.

6.2. Netzbildung

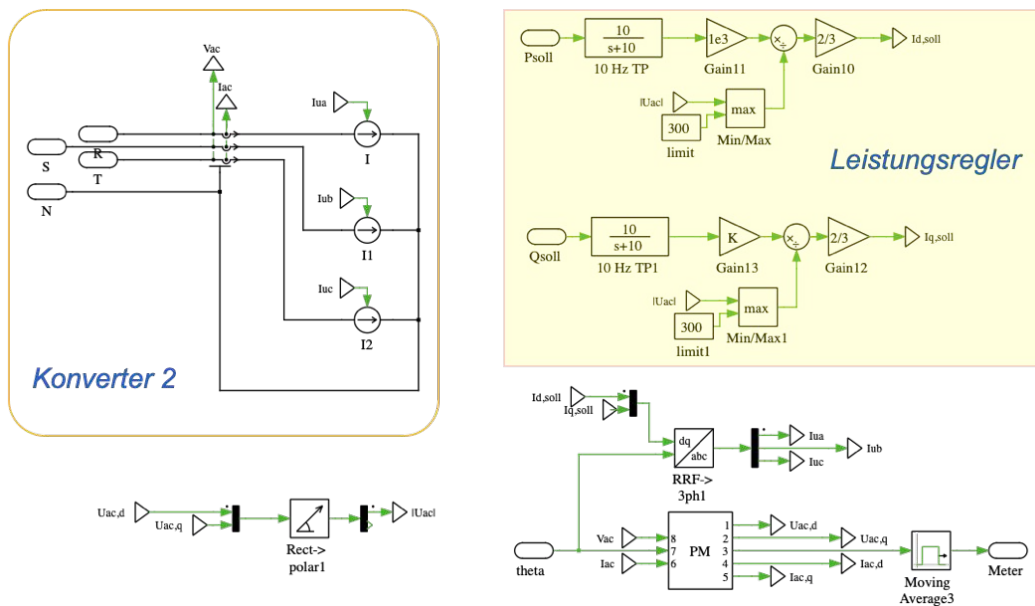
Im netzbildenden Betrieb stellt der Konverter eine stabile Spannung bereit. Ob Leistung abgegeben wird oder bezogen wird, ist abhängig von der äußeren Beschaltung.



Die Abbildung zeigt ein Netz. Am Anschaltort ist ein stromgeführter Umrichter angeschlossen, der als Last oder Einspeisung arbeitet, sowie ein netzbildender Umrichter. Ein Leistungsschalter am Anschaltort erlaubt die Trennung vom Netz.

Frage 6.2.1: Last bzw. Einspeisung. Untersuchen Sie den Aufbau des stromgeführten Umrichter in der Simulation Was sind Führungsgrößen und Stellgrößen?

Lösung: siehe folgende Abbildung.



In diesem Fall wurde der Konverter mit Hilfe von Stromquellen abgebildet. Diese Realisierung stellt eine Vereinfachung der stromgeführten Spannungsquelle aus Abschnitt 6.1 dar. Die Koppelinduktivitäten entfallen bei diesem Modell da sie ein Hilfsmittel zur Stromführung darstellen.

Führungsgrößen sind Wirkleistung P und Blindleistung Q, Stellgrößen Wirkstrom I_d und Blindstrom I_q . Die Orientierung der Stromquellen und Messpunkte wurde in diesem Modell so angepasst, dass das Verbraucherzählpeilsystem gilt: positive Leistungen werden als Leistungsaufnahme interpretiert, negative Leistungen als Leistungsabgabe.

Da die Schaltung in der Simulation aus dem Leerlauf startet, wurden die geforderten Lastsprünge für P und Q durch ein 10-Hz-Filter gedämpft (Transfer-Funktion $10/(s+10)$), so dass sich ein Anstieg auf die Sollwerte innerhalb einiger Zehntel Millisekunden ergibt.

Frage 6.2.2: Netzbildender Konverter. Untersuchen Sie den Aufbau des spannungsführten Umrichter in der Simulation Was sind Führungsgrößen und Stellgrößen? Wie wird der Parallelbetrieb am Netz (= weitere Spannungsquelle) ermöglicht?

Lösung: siehe folgende Abbildung.

Der Konverter besteht aus Spannungsquellen, die mit einer Serieninduktivität an den Anschalt punkt koppeln. Dieser Aufbau entspricht dem Mittelwertmodell eines Voltage-Source-Konverters.

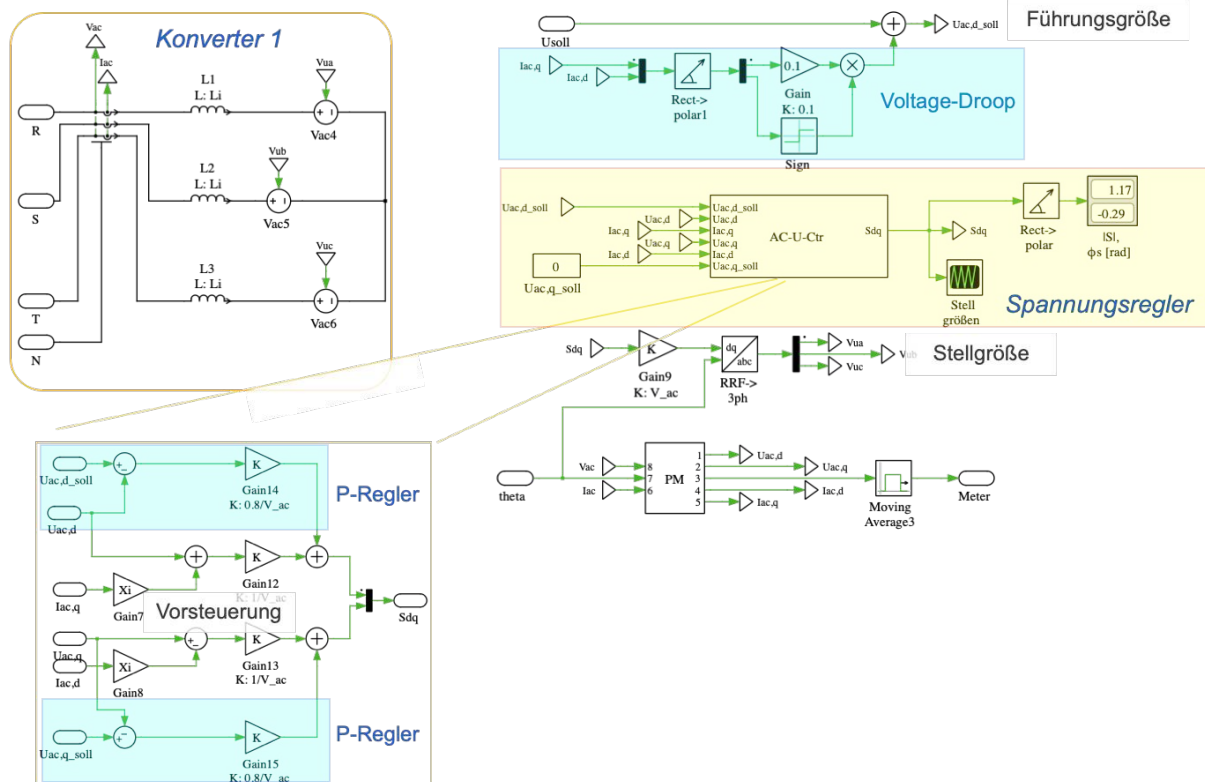
Führungsgröße ist die Spannung am Anschalt punkt (\underline{V}_{ac}), Stellgröße die Umrichterspannung (\underline{V}_u).

Der Spannungsregler ist ein einfacher P-Regler in Kombination mit der üblichen Vorsteuerung (siehe Abschnitt 2.3 und Abschnitt 3.3). Die Orientierung der Spannungen und Ströme wurde so gewählt, dass Messungen und Vorgaben dem Verbraucherzählpeilsystem entsprechen (positive Leistung = Leistungsaufnahme).

Beim Parallelbetrieb mit dem Netz spielen die Impedanzen eine entscheidende Rolle: Die Beiträge zur Leistung sind umgekehrt proportional zu den Impedanzen der beiden Spannungsquellen zum Anschalt punkt. Beim Netz ist diese Impedanz der Innenwiderstand R_i ; beim Konverter die Impedanz R_k der Kabel zum Anschluss punkt. Im Beispiel wurden diese Impedanzen gleich gewählt, so dass sich

ohne weitere Eingriffe ein Gleichgewicht der Leistungsbeiträge zwischen Netz und netzbildendem Konverter einstellen sollte.

In der Praxis sind dies Impedanzen willkürlich vorgegeben. Der Leistungsbeitrag des netzbildenden Converters lässt sich über die Steigung der Strom-Spannungskennlinie (engl. Voltage-Droop) einstellen. Im Beispiel wurde diese Kennlinie als lineare Funktion $U(I) = k I$ abhängig vom Betrag und Vorzeichen des Stromes realisiert. Die Steigung k der Kennlinie entspricht einer Impedanz.



Frage 6.2.3: Betrieb mit Netz und netzbildendem Umrücker. Untersuchen Sie die Schaltung im Betrieb des netzbildenden Umrücker parallel zum Netz. Die Lastsituationen werden hierbei mit dem stromgeführten Konverter vorgegeben.

Lösungsbeispiel: siehe Abbildung ganz oben unter Abschnitt 6.2.

Die Leistungsbeiträge von Netz und Umrücker sind abhängig von den Impedanzen zum Anschaltspunkt und von der Kennlinie des Umrücker. In der Abbildung dargestellt ist eine Einspeisung von $P = 40 \text{ kW}$ bei einem Blindleistungsbezug von 10 kVar .

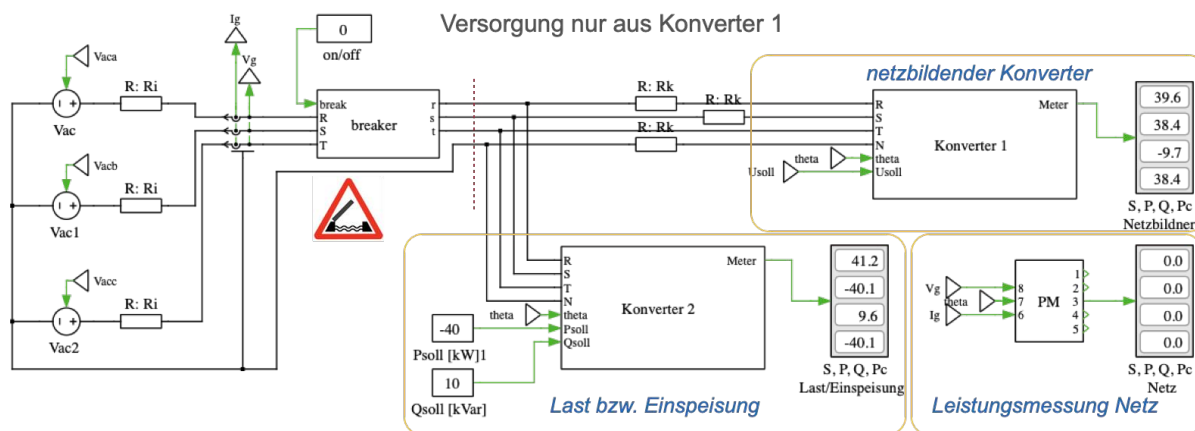
Die Messungen an Konverter 1 und Netz zeigen, dass die Wirkleistung etwas zu gleichen Teilen vom Netz und vom Konverter aufgenommen wird. Wegen der Leitungsimpedanzen auf dem Weg zum Konverter 1 ergeben sich Verluste (die eingespeiste Leistung ist höher als die Summe der von Netz und von Konverter 1 aufgenommenen Leistung):

Die von Konverter 2 geforderte Blindleistung wird vom Netz und von Konverter 1 bereitgestellt. Da die Blindströme insgesamt wenig Einfluss auf die Leistung haben (siehe Scheinleistung S), stimmt die Summe der Beiträge aus Netz und Konverter gut mit der Anforderung überein.

Die Spannungsregelung reagiert insgesamt etwas träge, da sich die Leistung zwischen Netz und Konverter 1 einpendeln muss. Hierbei ist zu beachten, dass die Schaltung insgesamt aus dem Leerlauf startet, also Zeit zum Einschwingen benötigt.

Frage 6.2.4: Inselbetrieb. Untersuchen Sie die Schaltung in der Simulation bei Trennung vom Netz. In diesem Fall erfolgt die Versorgung ausschließlich aus dem Konverter 1.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.



Durch Öffnen des Leistungsschalters startet die Simulation im Inselbetrieb. Aus dem Netz gibt es keine Beiträge mehr zur Leistung. Folglich muss die eingespeiste Wirkleistung $P = 40 \text{ kW}$ komplett von Konverter 1 aufgenommen werden (bis auf Verluste an den Kabelimpedanzen R_k).

Die geforderte Blindleistung wird von Konverter 1 erbracht. Bemerkung: Die Simulationsmodelle gestatten die Darstellung der Entwicklung der Stellgrößen für den Umrichter in einem Oszillogramm. Die Simulation startet auch hier im Leerlauf, die Regelung benötigt etwas Zeit zum Einschwingen.

6.3. Harmonische Kompensation

Ziel der Kompensation ist die Beseitigung von Oberwellen und Blindleistung am Anschlusspunkt ins Netz, so dass diese nicht ins Netz wirken. Folgende Abbildung zeigt die Anordnung bestehend aus:

- Dem Netz, repräsentiert durch eine Spannungsquelle mit Impedanz
- Einer nichtlinearen Last, die aus dem Netz Leistung bezieht und hierbei Oberwellen und Blindleistung verursacht
- Einer Kompensationsanlage zur Bereinigung der Oberwellen und Blindleistung am Netzanschlusspunkt.

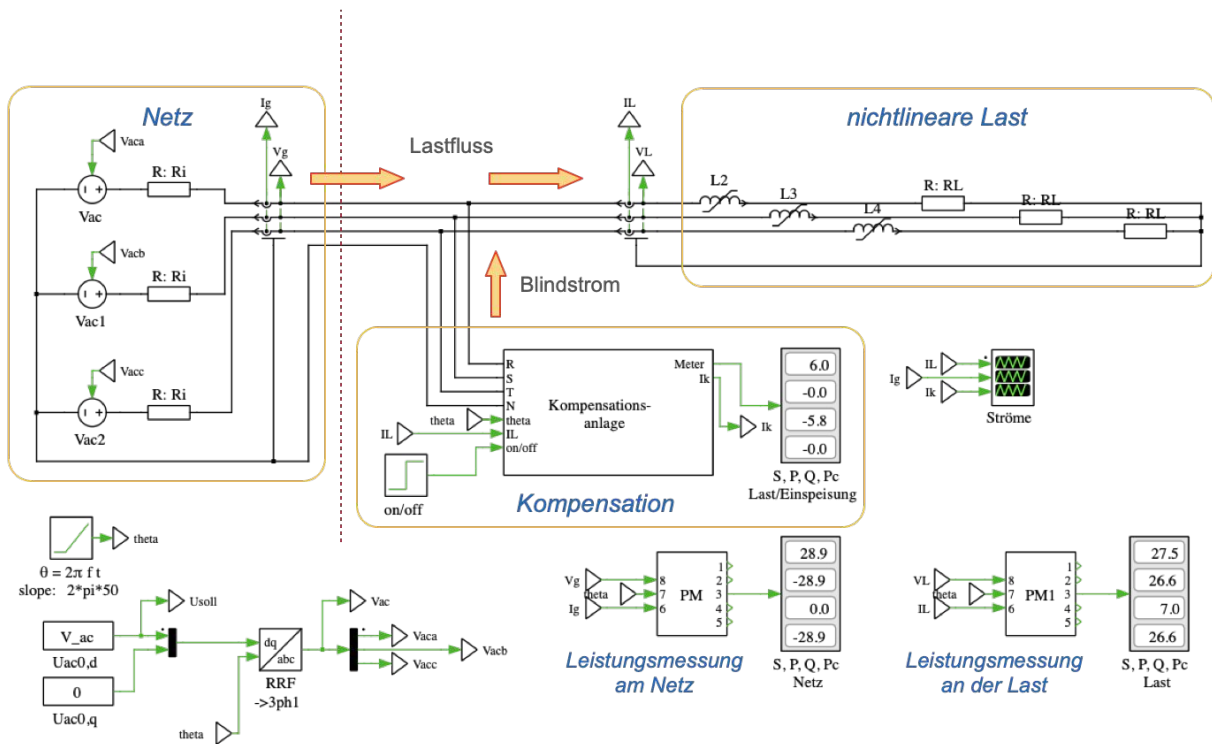
Frage 6.3.1: Funktionsprinzip. Erläutern Sie das Funktionsprinzip der Anlage. Wie wird die Kompensationsanlage als Konverter geführt? Wo verschwinden die Störungen, wo nicht?

Lösung: Wesentlich für die Funktion der Kompensationsanlage sind die Impedanzverhältnisse: Das Netz ist niederohmig im Vergleich zur Last. Dies ist grundsätzlich immer der Fall, da andernfalls eine effiziente Leistungsübertragung in den Energieversorgungsnetzen nicht möglich wäre.

Die Kompensationsanlage wird als Stromquelle geführt, die parallel zur Last am Anschaltort angeschlossen ist. Der Strom der Kompensationsanlage fließt wegen der Impedanzverhältnisse vorwiegend ins Netz. Somit ist es möglich, Stromanteile der Last zu ersetzen: Vom Netz aus betrachtet, übernimmt die Kompensationsanlage den Bedarf an Blindstrom bzw. Oberwellen der Anlage; der Strom im Netz bleibt sauber.

Hierbei ist das Vorzeichen der Ströme zu beachten: Wenn die Last eine Blindleistung bezieht ($+ Q$), stellt die Kompensation diese Blindleistung bereit ($- Q$ als Leistungsabgabe). Wenn die Last Stromanteile mit Oberwellen verursacht ($+ i_{\text{stör}}(t)$), stellt die Kompensationsanlage diese bereit ($- i_{\text{stör}}(t)$). Am Anschaltort gilt die Knotenregel. Somit bleibt das Netz frei von Blindleistung und Störströmen.

Die Störungen im Lastpfad liegen an der Natur der Last und verschwinden nicht. Kompensiert wird nur der Störanteil aus dem Netz.



Frage 6.3.2: Oberwellen. Wodurch entstehen im Beispiel Oberwellen? Wieso genügen zur Kompensation Blindströme? Hat die Anlage auch einen Blindleistungsbedarf?

Lösung: Durch Sättigung der Induktivität im Lastpfad. In diesem Fall erzeugen größere Stromamplituden weniger magnetischen Fluss: Die Kennlinie $\Phi(I)$ verläuft nichtlinear in die Sättigung. Da die Induktivität aus dem Verhältnis des erzeugten magnetischen Flusses Φ zum eingesetzten Strom I definiert ist, nimmt die Induktivität bei großen Stromamplituden stark ab.

Die Begrenzung der Ströme bei großen Amplituden lässt somit nach, der Stromverlauf weicht vom harmonischen Verlauf ab und zeigt Oberwellen. Da die nichtlinearen Stromanteile an einer Induktivität entstehen, handelt es sich um Blindstromanteile.

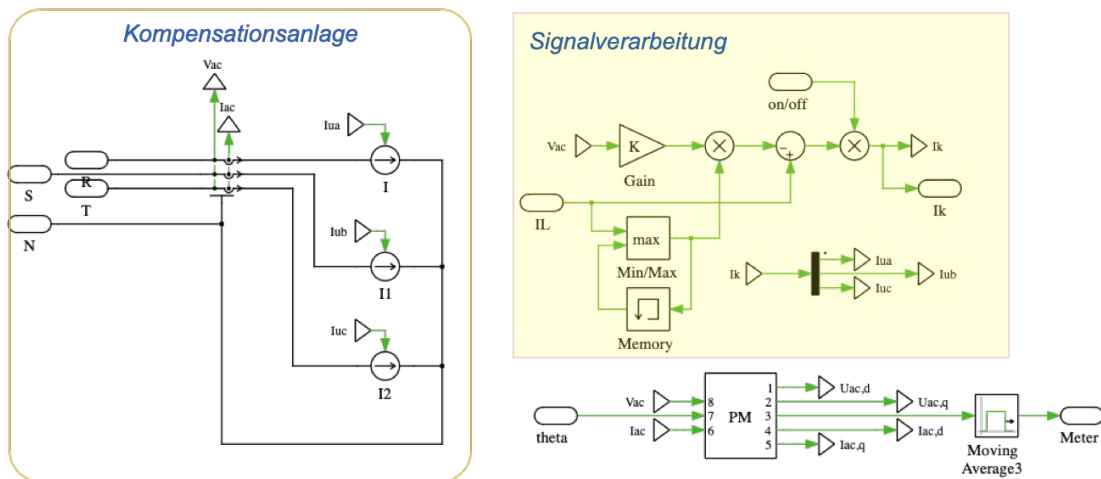
Die Induktivität in der Last sorgt außerdem für einen statischen Blindstrombedarf (+ Q) der Last. Die Kompensationsanlage muss somit nur Blindströme bereit stellen und benötigt hierfür keine Energiequelle. Für die Bereitstellung der Blindströme genügt der DC-Zwischenkreis. In der Simulation sollte sich zeigen, dass die Kompensationsanlage frei von Wirkleistung bleibt.

Frage 6.3.3: Aufbau der Kompensationsanlage. Erläutern Sie die Funktion der Kompensationsanlage aus der Simulation.

Lösung: siehe folgende Abbildung.

Der Konverter ist als Stromquelle abgebildet. Der Konverterstrom wird im Beispiel direkt im Zeitbereich ermittelt: Die Signalform orientiert sich einfach an der am Anschlusspunkt gemessenen Netzspannung. Idealerweise ist der Strom am Netzanschlusspunkt harmonisch und in Phase mit der Netzspannung. Abweichungen von dieser Idealform soll die Anlage als Strom $i_k(t)$ einspeisen.

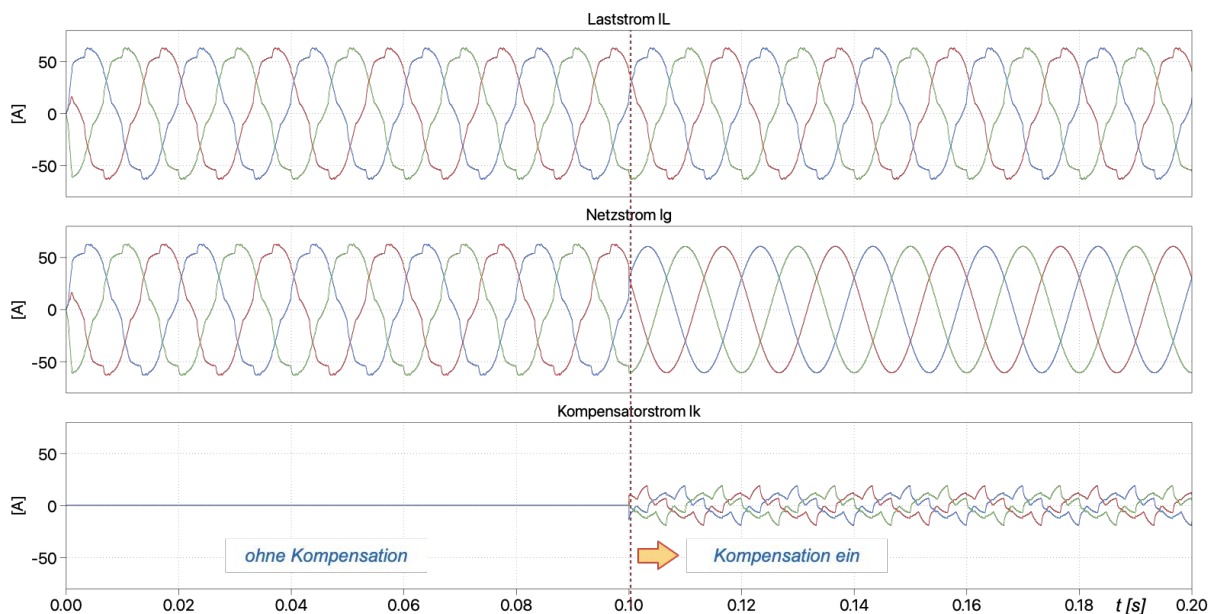
Hierzu werden der Anlage Messwerte der Ströme am Anschluss der Last zugeführt (Lastströme $i_L(t)$). Aus dem Stromverlauf wird die Stromamplitude ermittelt. Mit deren Hilfe wird aus der Netzspannung ein ideales Stromsignal mit Amplitude des Laststroms berechnet.



Die Differenz des realen Laststroms von diesem Signal ergibt die Störstromanteile als Vorgabe für den benötigten Konverterstrom. Der Kompensationsstrom $i_k(t)$ der Anlage lässt sich über ein Steuersignal (on/off) aktivieren.

Frage 6.3.4: Simulation. Untersuchen Sie die Funktion der Anlage in der Simulation.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.



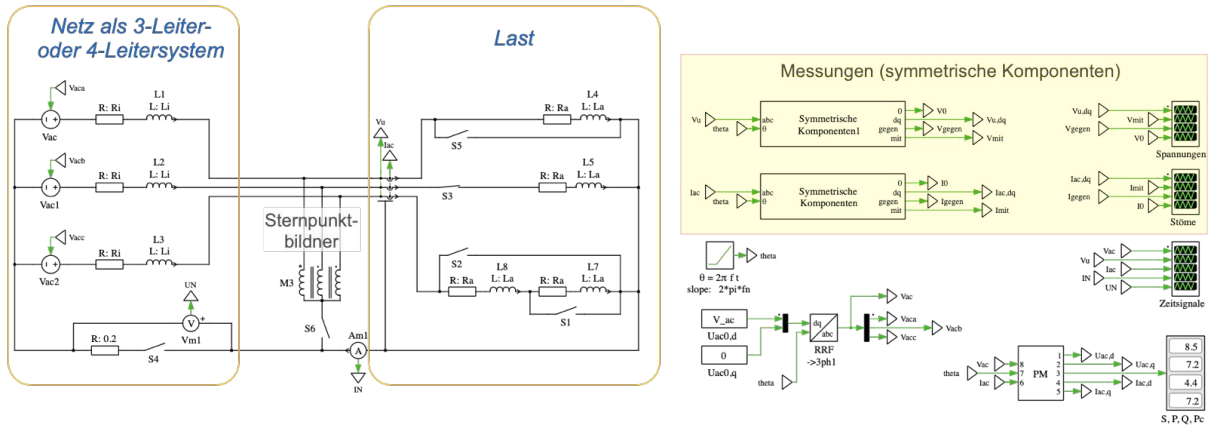
Wie zu erwarten, verändert die Kompensationsanlage den Strom im Lastzweig nicht, speist jedoch zum Netz hin ihren Differenzstrom ein. Am Anschlusspunkt zum Netz ergibt sich somit: $i_g(t) = i_L(t) - i_k(t)$. Somit werden die Störanteile zum Netz beseitigt.

Leistungsbilanz: Die Abbildung direkt unter Abschnitt 6.3. zeigt auch die Leistungsbilanz nach Aktivierung der Anlage. Wegen der Oberwellen ist die Leistungsmessung nur näherungsweise zutreffend.

Klar zu erkennen ist jedoch, dass die Anlage tatsächlich nur Blindleistung bereit stellt. Das Netz ist nach Aktivierung der Anlage frei von Blindleistung.

6.4. Symmetrie und Umgang mit Schiefllasten

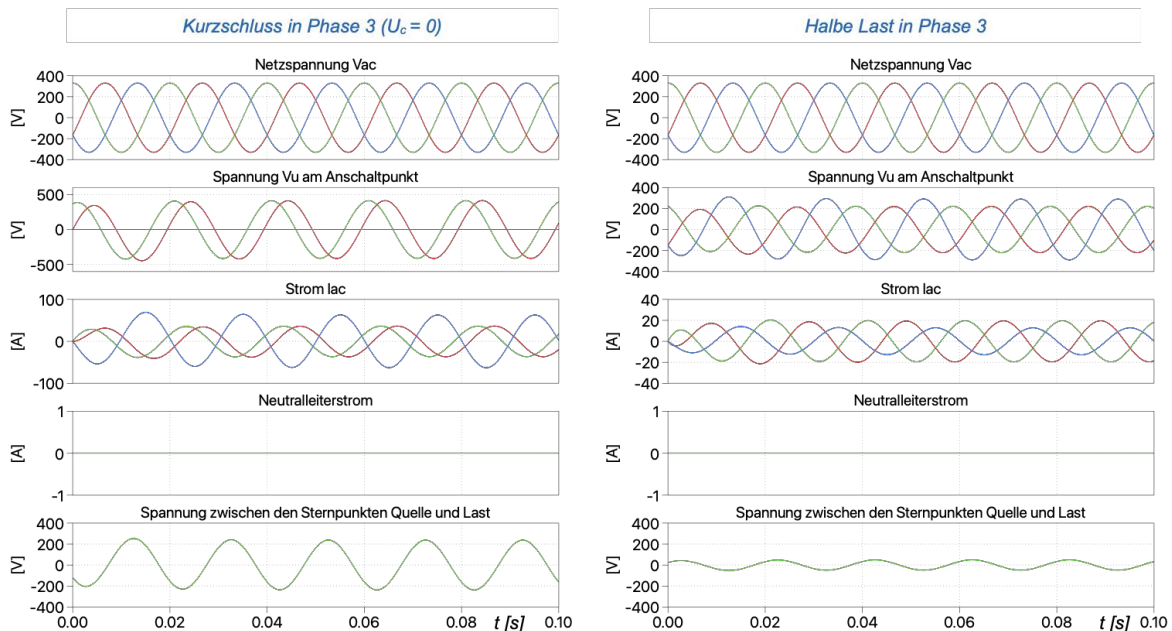
Folgende Abbildung zeigt ein einfaches Modell zur Simulation mit unsymmetrischen Verhältnissen, die sich an einer passiven Last durch Schalter realisieren lassen. Wahlweise kann das System als Dreileitersystem ohne Neutralleiter und als Vierleitersystem betrieben werden.



Zur Erstellung von Zeigerdiagrammen lässt sich das Tabellenwerk zu Aufgabe 5 verwenden, das sich bei den Modellen findet. Alternativ gestattet die Simulation auch die Berechnung der symmetrischen Komponenten aus den Zeitsignalen.

Frage 6.4.1: Dreileitersystem. Welche Konsequenzen hat ein einphasiger Kurzschluss? Welche Auswirkungen haben Schiefllasten? Welche Möglichkeiten zur Kompensation bestehen?

Lösung: (1) Einphasiger Kurzschluss: Die kurzgeschlossene Phase (im Beispiel U_c) wird zum Referenzpunkt der beiden verbliebenen Spannungen. Der Strom in dieser Phase übernimmt die Rückleitung der Ströme aus den gesunden Phasen (siehe folgende Abbildung). Grundsätzlich ist ein Betrieb mit überhöhter Spannung möglich.



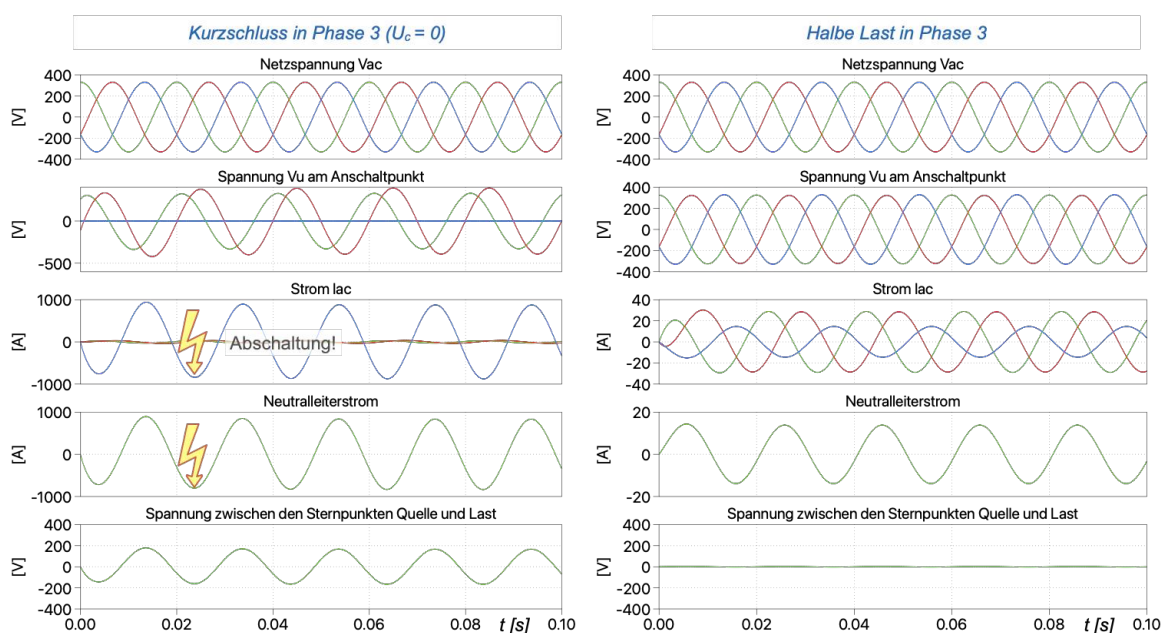
(2) Eine geringere Last in einer Phase führt zu einem geringeren Strom in dieser Phase, während sich die Spannungen in den anderen Phase reduzieren (siehe Abbildung), wobei die Phasenlage der Spannungen stabil bleibt. Die Phasenlage der Ströme verschiebt sich, was sich durch ein Gegensystem beschreiben lässt. Im Extremfall (Leerlauf der Phase) sind die Ströme gegenphasig, wie bei einem 2-Leitersystem.

(3) Möglichkeiten zur Kompensation: Absenken der Spannung in der wenig belasteten Phase. Wegen der Einhaltung der Spannungsbänder ist der Spielraum hierfür begrenzt.

Frage 6.4.2: Vierleitersystem. Welche Konsequenzen hat einphasiger Kurzschluss? Welche Auswirkungen haben Schiefasten? Welche Möglichkeiten zur Kompensation bestehen?

Lösung: (1) Einphasiger Kurzschluss: führt zur Abschaltung (Leiterstrom fließt über den Neutralleiter).

(2) Schiefasten führen zu geringeren Strömen in den weniger belasteten Phasen. Die Phasenlage der Ströme bleibt stabil, da ein Rückfluss über den Neutralleiter möglich ist (siehe folgende Abbildung).



(3) Möglichkeiten zur Kompensation: Da die Spannungen stabil bleiben, besteht hierfür wenig Anlass. Um Ströme zur Symmetrierung anzuheben, wären höhere Spannungen erforderlich, was gegen die Einhaltung der Spannungsbänder verstößt. Diese Einschränkung gilt auch für das Absenken der Spannungen zur Symmetrierung der Ströme.

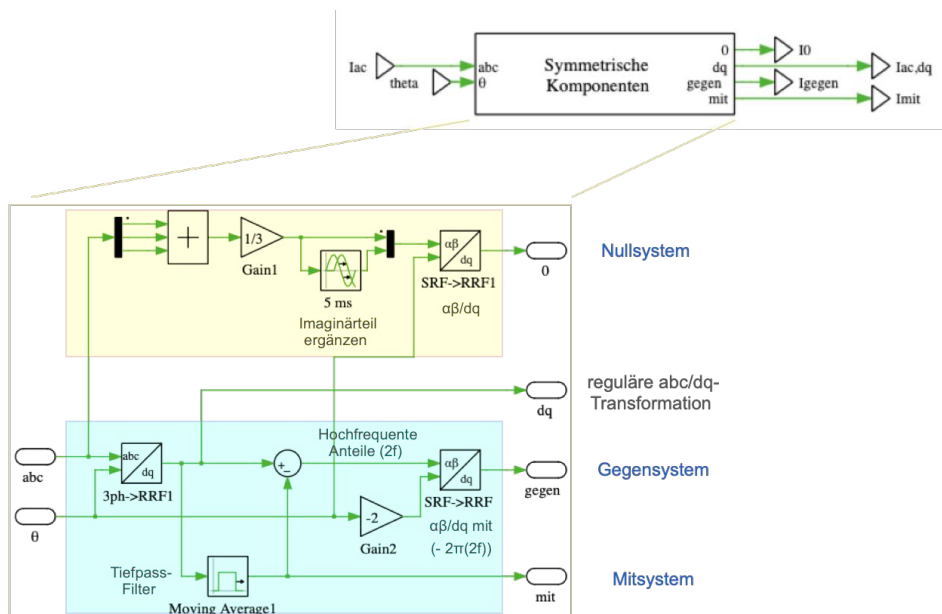
Frage 6.4.3: Symmetrische Komponenten. Aus den Zeitsignalen der Spannungen und Ströme lassen sich in der Simulation die symmetrischen Komponenten berechnen. Folgende Abbildung zeigt ein Beispiel. Erläutern Sie die Vorgehensweise.

Lösung: Als Eingangsgrößen dienen die Zeitsignale der drei Phasen {a,b,c}.

(1) Nullsystem: Ein Nullsystem liegt vor, wenn sich die drei Zeitsignale nicht zu Null addieren, wie es bei einem symmetrischen System der Fall wäre. Die Addition der drei Zeitsignale ergibt in diesem Fall ein harmonisches Zeitsignal, z.B. den Neutralleiterstrom bei einem Vierleitersystem mit unsymmetrischer Last, wobei dieser mit einem Faktor 1/3 gewichtet wird.

Um das Zeitsignal in die Zeigerdarstellung zu wandeln, wird zum reellen Zeitsignal ein Imaginärteil ergänzt (= Zeitsignal mit Phasenverschiebung um 90 Grad). Das komplexe Zeitsignal entspricht einem

rotierenden Zeiger, der sich dann mit Hilfe der Transformation $\alpha\beta \rightarrow dq$ in einen statischen Zeiger verwandeln lässt, der als Information die Amplitude und den Phasenbezug des Nullsystems enthält.



(2) Mitsystem und (3) Gegensystem: Bei einem symmetrischen System liefert die Transformation $abc \rightarrow dq$ einen statischen Zeiger, der das Mitsystem repräsentiert. Bei einem unsymmetrischen System, das sich aus der Überlagerung des Mitsystems mit dem Gegensystem beschreiben lässt, liefert die Transformation $abc \rightarrow dq$ folglich das Mitsystem mit einem überlagerten Signalanteil, der das Gegensystem repräsentiert.

Letzterer ist leicht zu identifizieren, da er sich mit der doppelten Netzfrequenz verändert, d.h. mit 100 Hz bei einem 50 Hz-System. Diese Frequenz kommt dadurch zustande, dass die Transformation $abc \rightarrow dq$ den rotierenden Zeiger $\alpha\beta$ der Zeitsignale mit einem Zeiger vom Betrag 1 multipliziert, der sich entgegen der Netzfrequenz dreht. Die Überlagerung ergibt beim Mitsystem einen Stillstand, beim Gegensystem jedoch einen Signalanteil mit 100 Hz (entsprechend der doppelten Rotation in entgegengesetzter Richtung).

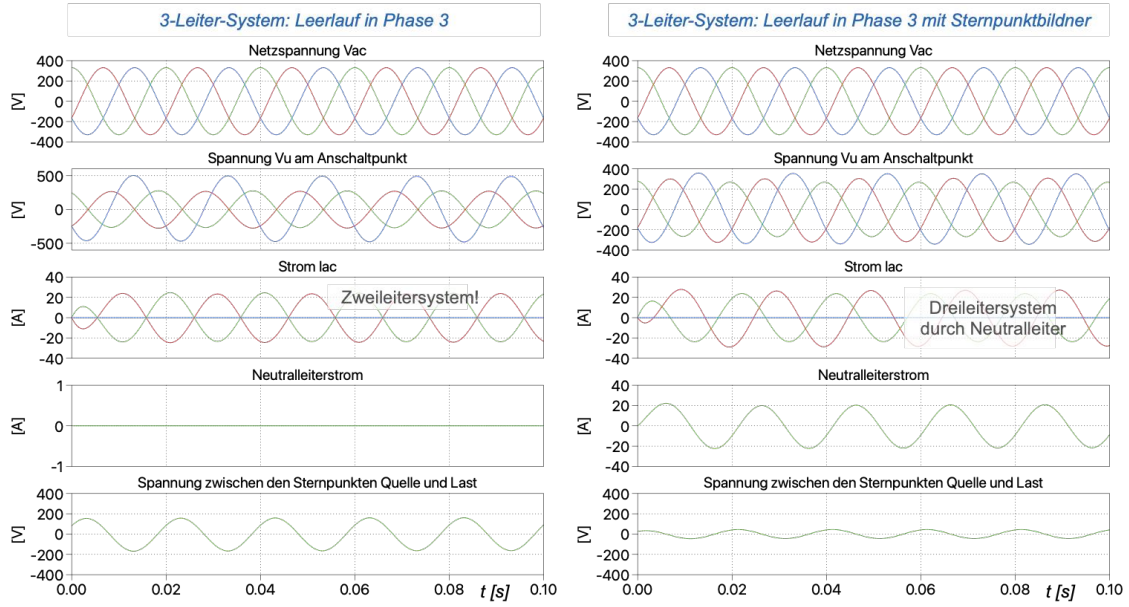
Der Signalanteil des Gegensystems lässt sich mit Hilfe eines Tiefpassfilters eliminieren, wodurch sich das Mitsystem ergibt. Der verbliebene Signalanteil (Signal – Mitsystem) repräsentiert dann das Gegensystem. Als Filter wurde im Beispiel ein rekursives Rechteck-Filter mit der Länge einer 100 Hz-Periode verwendet (10 ms). Auf diese Weise bleibt der Phasenbezug des Gegensystems erhalten.

Frage 6.4.4: Sternpunktbildner. Wenn kein Vierleitersystem zur Verfügung steht, kann man sich mit einem Sternpunktbildner behelfen. Untersuchen Sie die Funktionsweise in der Simulation.

Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung.

Im Beispiel wurde eine Phase im Leerlauf betrieben (bzw. eine Phase abgeschaltet und hierdurch im Leerlauf). In einem Dreileitersystem führt diese Situation zu einem Zweileiterbetrieb, wie im linken Teil der Abbildung dargestellt: Die Ströme sind entgegengesetzt ausgerichtet, es gibt große Unterschiede in den Spannungen.

Der Sternpunktbildner führt das System näherungsweise in ein Vierleitersystem über, da Ströme nun über den Neutralleiter zum Sternpunkt der Drossel fließen können. Der Neutralleiter übernimmt den Strom der beiden intakten Phasen auf dem Rückweg, die Phasenbeziehungen bleiben weitgehend erhalten.



Literatur

- (1) Stephan Rupp, [Leistungselektronik – Vorlesungsmanuskript mit Übungen](#); Center of Advanced Studies der Dualen Hochschule Baden-Württemberg, August 2019
- (2) Joachim Franz, EMV - Störungssicherer Aufbau elektronischer Schaltungen Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011, 4., erweiterte und überarbeitete Auflage 2011