Leistungselektronik

Teil 3: Gleichspannungsnetze

Schulungsunterlage

Ausgabe 0.1, 31.10.2022
Autoren: Stephan Rupp

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

Veröffentlicht unter CC-BY-SA

Über dieses Dokument

Diese **Schulungsunterlage** enthält Aufgaben für eine zweitägige Schulung über Gleichspannungsnetz in der Niederspannung. Solche Netze dienen der direkten Kopplung von Gleichstromsystemen wie Frequenzumrichtern (bei Anschluss am DC-Zwischenkreis), PV-Anlagen, Batteriespeichern und Ladestationen für Elektrofahrzeuge.

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

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

- **Simulationssoftware**: In dieser Unterlage wurde PLECS verwendet. Alle Schaltungen lassen sich leicht nach Matlab/Simulink/Simscape oder in die Open-Source-Umgebung Scilab/Xcos übertragen.
- **Schwerpunkt der Schulung** sind die Anwendungen zum praktischen Einsatz der Netze. Hierbei stehen folgende Themen im Vordergrund:
  - Aufbau und Eigenschaften von Gleichspannungsverteilnetzen in der Niederspannung
  - Betrieb und Schutz der Netze
  - Anforderungen an Anlagen am Gleichspannungsverteilnetz
  - Konverter für Gleichspannungsnetze
- Ziel der Schulung ist ein kompakter, zweitägiger Kurs. Für eine Vertiefung der **Theorie** wird auf die Vorlesungsmanuskripte Planung und Analyse elektrischer Energieversorgungsnetze verweisen, speziell zu den Themen
  - Gleichspannungsnetze
  - Hybride AC/DC-Netze
  - Maschinen und Anlagen am Netz.

Unterlagen im Web:

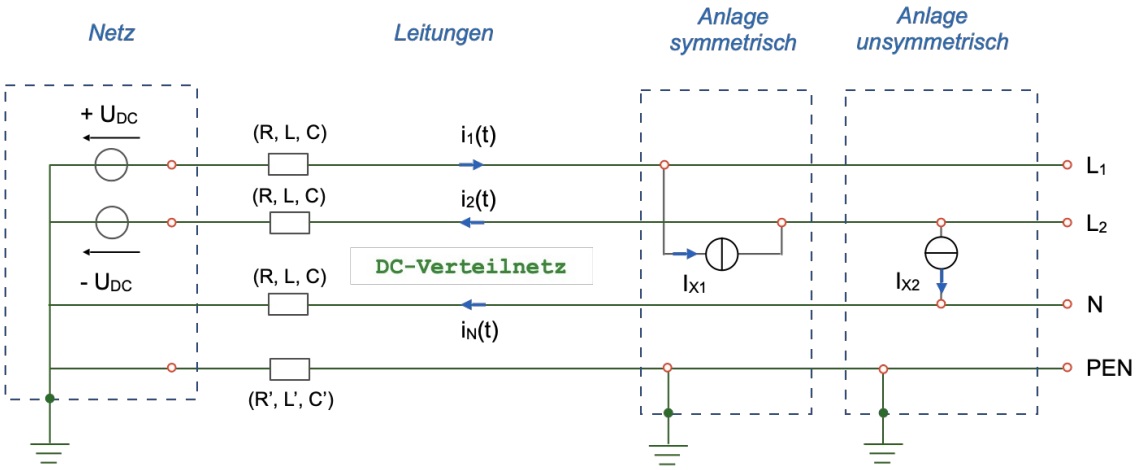
- Schulung Teil 1 (Basis):
  - Schulungsunterlage Teil 1 (PDF): Voraussetzung für diesen Kurs
  - Simulationsmodelle zur Schulung Teil 1 (PLECS)
- Schulung Teil 3 (dieser Kurs):
  - Schulungsunterlage Teil 3 (PDF)
  - Simulationsmodelle zur Schulung Teil 3 (PLECS)
  - Quelltexte und Bilder (zip)
- Vorlesungsmanuskript Leistungselektronik (PDF)
- Vorlesungsmanuskript Planung und Analyse elektrische Energieversorgungsnetze:
  - Gleichstrom und Gleichspannung im Netz (PDF)
  - Netzbetrieb mit erneuerbaren Energien (PDF)
- Weitere Vorlesungsunterlagen: https://www.srupp.de/#LEN

Inhaltsverzeichnis

1. Verteilnetze....4
1.1. Topologie....4
1.2. Erdung und Isolation....7
1.3. Berührungsschutz....9
1.4. Anlagen am Verteilnetz....11
2. Betrieb und Schutz....16
2.1. Schutzkonzept....16
2.2. Fehlererkennung....16
2.3. Fehlerbehandlung....16
2.4. Betrieb nach Fehlerklärung....16
3. Anforderungen an Anlagen am Netz....17
3.1. Anschluss ans Stromnetz....17
3.2. Ungeschützter Bereich....17
3.3. Geschützter Bereich....17
3.4. Schnittstellen für Anlagen im geschützten Bereich....17
4. Konverter für Gleichspannungsnetze....18
4.1. Hochsetzsteller....18
4.2. DAB-Konverter....18
4.3. Spannungsregelung....18
4.4. Transformatorbetrieb....18
5. Industrienetze....19
5.1. 19
5.2. 19
5.3. 19
5.4. 19
6. Gewerbeparks und Einkaufszentren....20
6.1. 20
6.2. 20
6.3. 20
6.4. 20

1. Verteilnetze

Gleichspannungsnetze lassen sich aufbauen wie Wechselspannungsnetze. Folgende Abbildung zeigt ein Niederspannungsnetz mit 3 Leitern (L_1 = Plus, L_2 = Minus und N = Neutralleiter).



Der Aufbau entspricht dem 4-Leitersystem eines Drehstromnetzes in der Niederspannung mit {L_1, L_2, L_3, N}. Das äquivalente Gleichspannungsnetz ist ein Dreileitersystem {L_1, L_2, N}. Die Phasenlage der Spannungen auf den Leitern L_1 und L_2 beträgt 180 Grad. Das Netz besitzt einen „Sternpunkt“ zum Neutralleiter, wobei der Stern nur 2 Zacken hat, also eindimensional bleibt.

Im Unterschied zum Drehstromsystem genügt für die Beschreibung der Realteil; die umgekehrte Polarität lässt sich durch das Vorzeichen auf der reellen Achse abbilden. Scheitelwerte sind bei Gleichstromsystemen Effektivwerte. Eine Netzfrequenz gibt es nicht (f_n = 0). Mangels Phasenlagen jenseits des Vorzeichens entfällt die bei AC gewohnte Zeigerdarstellung.

Ein DC-Dreileitersystem unterstützt zwei Spannungsebenen U_{DC} (als $+U_{DC}$ oder $-U_{DC}$ vom Leiter zum Neutralleiter) und 2 U_{DC} (zwischen beiden Leitern). Lässt man den Neutralleiter weg, verbleibt ein Zweileitersystem {L_1, L_2}, vergleichbar einem Dreileitersystem {L_1, L_2, L_3} bei einem Wechselstromnetz.

Bemerkung: Da der Strom die Leistung transportiert, werden die Systeme als Gleichstromnetze bezeichnet (engl. DC = direct current). Die Netze selber sind spannungsgeführt, sind also Gleichspannungsnetze für Gleichstromsysteme. In der Abbildung sind die Anlagen daher als Stromquellen dargestellt, das Netz mit Hilfe von Spannungsquellen.

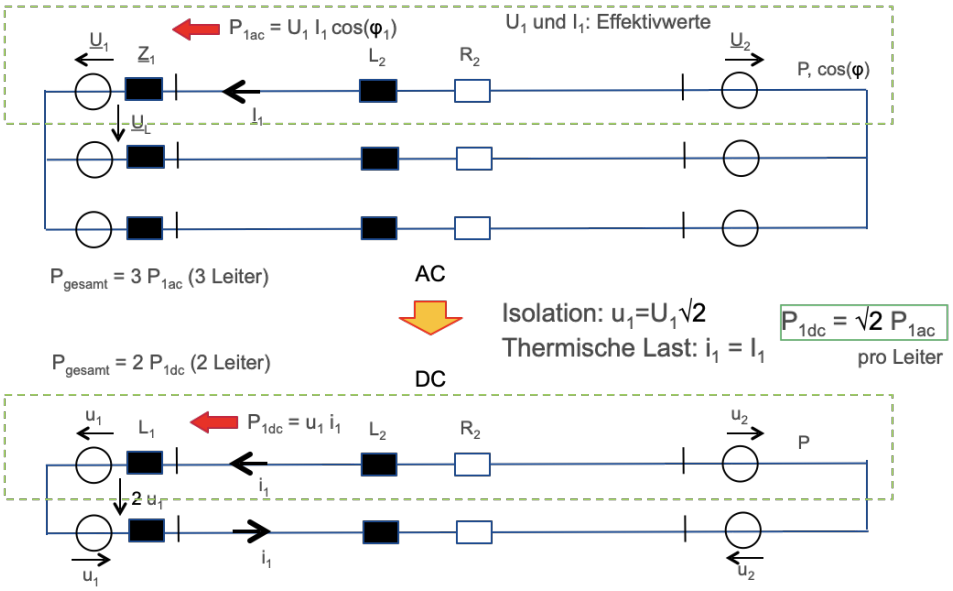
1.1. Topologie

Von besonderem Interesse sind hier Verteilnetze mit einer Stern-Topologie vom Netz über die Sammelschiene zu den Abgängen. Diese Netztopologie soll für Untersuchungen mit Hilfe der Simulation durch eine elektrische Ersatzschaltung abgebildet werden.

Frage 1.1.1: Leistung. Welche Leistung bietet das o.g. System bei einer Nennspannung $U_n = U_{DC}$ und beim Nennstrom I_n für symmetrische und unsymmetrische Lasten?

Lösung: $P_n = 2\ U_{DC}\ I_n$. Leiter 1: $P_1 = U_{DC}\ I_n$, Leiter 2: $P_2 = -U_{DC}\ -I_n = P_1$. Bei einer unsymmetrischen Last die Hälfte.

Frage 1.1.2: Vergleich AC- und DC-Übertragung. Folgende Abbildung zeigt ein AC-Dreileitersystem im Vergleich zu einem DC-Zweileitersystem. Welche Übertragungsleistung besitzt das DC-System, wenn man den Effektivwert der Ströme wegen der thermischen Belastung der Leitungen bzw. Kabel gleich lässt, und die Scheitelwerte der Spannungen wegen der Spannungsisolation gleich lässt? Hinweis: Berechnen Sie die Leistung bezogen auf einen Leiter.



Lösung: Der besseren Vergleichbarkeit erfolgt die Berechnung pro Leiter.

(1) AC-System: $P_{1ac} = U_n I_n \cos(\varphi)$. Hierbei ist U_n die Sternspannung (= Strangspannung) und I_n der Leiterstrom (= Strangstrom); φ der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung bedingt durch die Leistungsinduktivität.

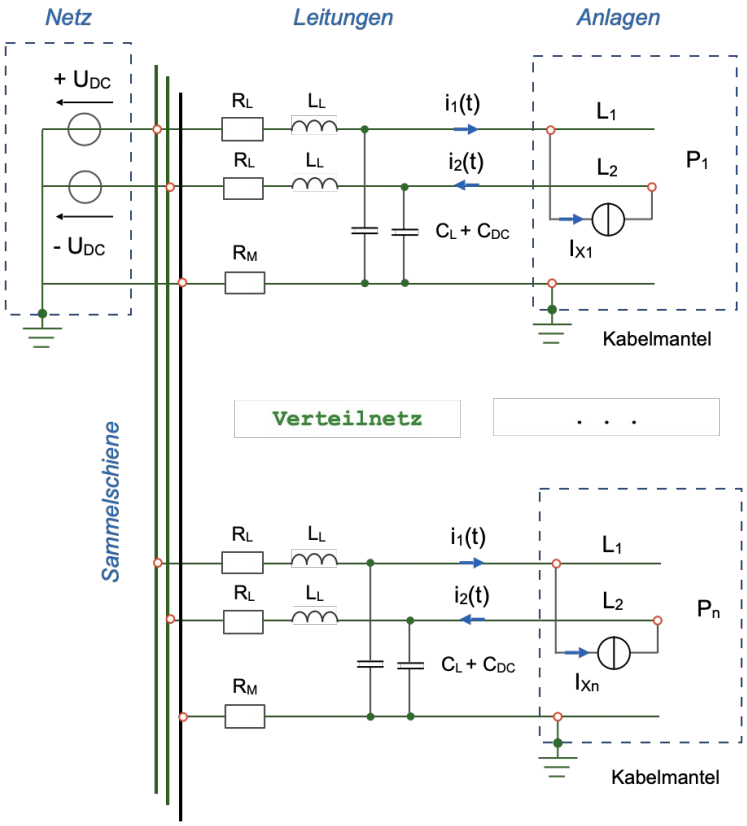
(2) DC-System: Da der Leiter andernfalls zu warm würde, belässt man den Strom $I_{DC} = I_n$. Die DC-Spannung entspricht dem Scheitelwert der AC-Spannung, d.h. $U_{DC} = \sqrt{2} * U_n$. Somit erhält man für die Leistung bezogen auf einen Leiter: $P_{1dc} = \sqrt{2}\, U_n I_n \approx 1.5\, U_n I_n$. Die Näherung gilt grob, wenn man Effekte wie die Stromverdrängung und den Einfluss der Leistungsinduktivität beim AC-System mit bewertet.

(3) Vergleich: Der Leiter eines DC-Systems kann bei gleichem Strom und gleichem Scheitelwert der Spannung das 1.5-fache der Leistung eines Leiters in einem AC-System transportieren. Die Konsequenzen sind:

- $P_{dc} = P_{ac}$: Ein DC-Zweileitersystem besitzt die gleiche Transportleistung wie ein AC-Dreileitersystem.
- $P_{v,dc} = 2/3\, P_{v,ac}$: Die Leitungsverluste eines DC-Zweileitersystems fallen um 1/3 niedriger aus als bei einem AC-Dreileitersystem, da ein Leiter fehlt ($P_{1v} = I_n^2 R$).

DC-Leitungen kommen immer dann in Frage, wenn DC-Anlagen angeschlossen werden sollen. An einem DC-Leitungssystem fallen auch die Konverter der Anlagen deutlich einfacher aus (2/3 des Aufwandes, da 2 Phasen statt 3 Phasen, ggf. ein weiterer Faktor 2/3, wenn eine AC/DC-Konversion eingespart werden kann).

Frage 1.1.3: Verteilnetz. Folgende Abbildung ein symmetrisches Verteilnetz. Der hier nicht benötigte Neutralleiter kann für eine unsymmetrische Verteilung ergänzt werden. Zur Vereinfachung der Darstellung wird der symmetrische Fall betrachtet. Bei der Verteilung sind die Kapazitäten und Induktivitäten der Leiter (Leitungen bzw. Kabel) zu berücksichtigen, sowie die ohmschen Verluste. Welchen Einfluss haben Induktivitäten und Kapazitäten bei einem DC-Verteilung?



Lösung: (1) Die Kapazitäten der Kabel addieren sich am Anschlusspunkt des Netzes an der Sammelschiene. Je nach Ausführung der Anlagen addieren sich auch deren Eingangskapazitäten. Ist Berührungsschutz gefordert, ist auf die Entladeströme der Kapazitäten zu achten.

(2) Vom Anschlusspunkt an der Sammelschiene aus betrachtet ergibt sich eine Impedanz mit einer Resonanzstelle, pro Abgang erhält man:

$$\underline{Z}(\omega)=j\omega L+\frac{1}{\frac{1}{R}+j\omega C} \qquad (1.2.1)$$

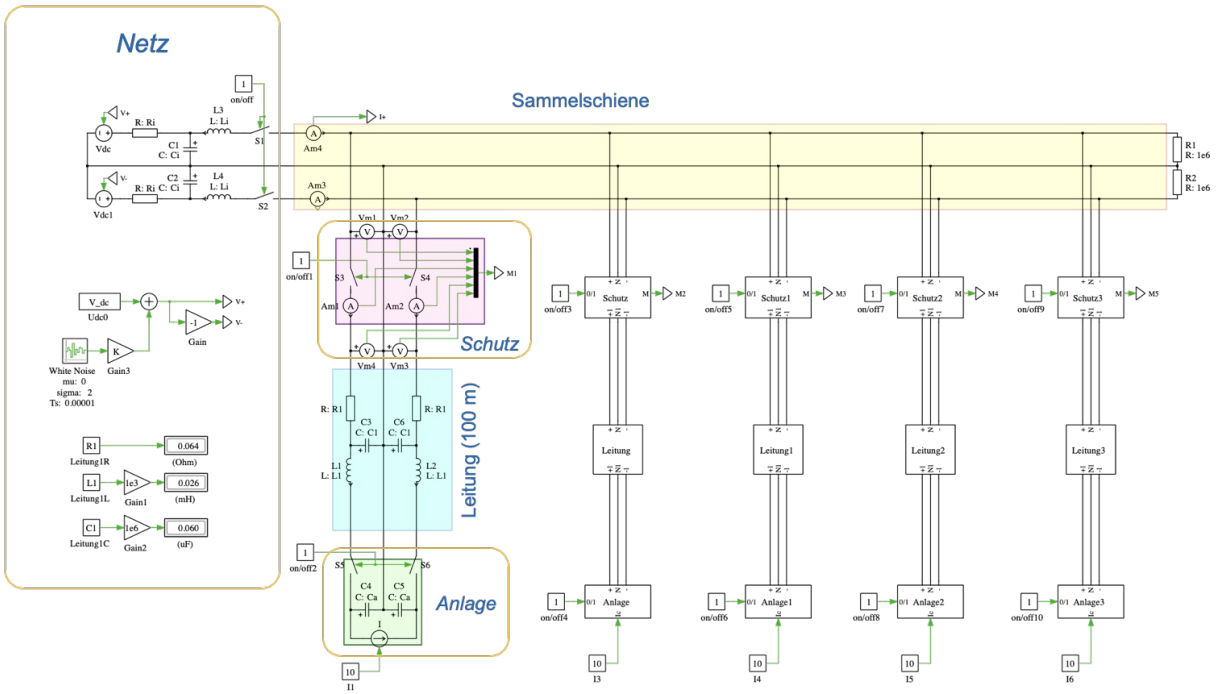
Für den Betrieb mit Gleichspannung spielt das Impedanzspektrum zwar keine Rolle, muss jedoch bei der Auslegung der Regler der Konverter berücksichtigt werden. Im Betrieb sind zusätzlich die Eingangskapazitäten zu berücksichtigen. Bei Betrieb an einer Gleichstromquelle wird die Anschlussleitung übertragungstechnisch annähernd im Leerlauf betrieben (R → unendlich).

Frage 1.1.4: Simulation. Untersuchen Sie die Eigenschaften der Verteilung in der Simulation.

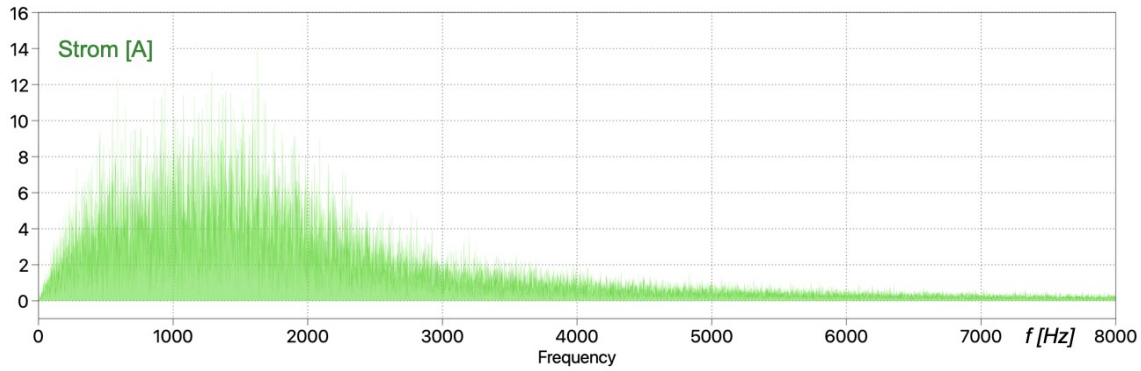
Lösungsbeispiel: siehe folgende Abbildung. Für die Leitung wurden Kabel mit R'=0,64 Ω/km (Al mit Querschnitt 50 mm²), L' = 0,26 mH/km, Kapazität zum Mantel C_e ≈ 0,3 µF/km und Kapazität zwischen zwei Leitern C_L ≈ 0,1 µF/km. Im Modell wurden zwei einadrige Kabel mit Mantel verwendet.

Die Resonanzfrequenz einer einzelnen Leitung ist unkritisch (liegt im dreistelligen kHz-Bereich). Zusammen mit den Eingangskapazitäten der Anlagen in der Größenordnung von 1 mF ergeben sich jedoch Resonanzfrequenzen im kHz-Bereich.

Folgende Abbildung zeigt das Modell der Verteilung mit DC-Netz (Spannungsquellen), Sammelschiene, Leitungen und Anlagen. An allen Abgängen sind Schalter angebracht, um Anlagenteile beim Hochfahren oder im Fehlerzustand von der Sammelschiene zu trennen.



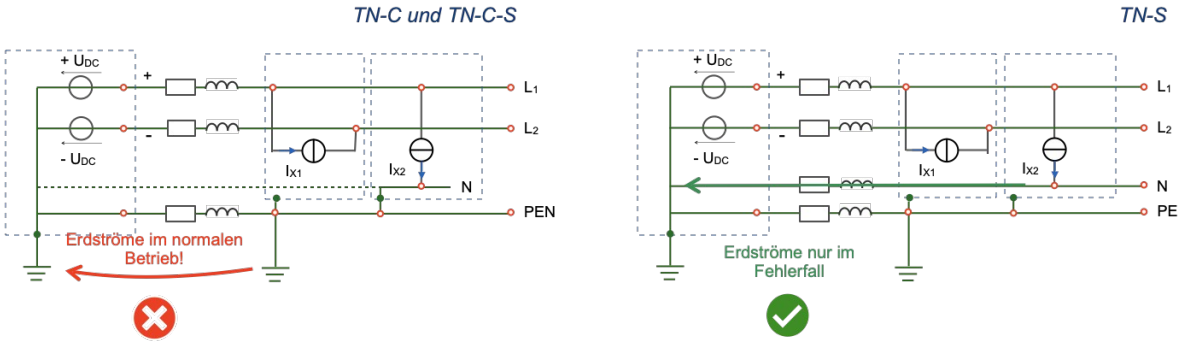
Der Strom am Anschlusspunkt des Netzes wurde verwendet, um das Impedanzspektrum an dieser Stelle zu untersuchen (die Impedanz ist umgekehrt proportional zum Strom). Für eine breitbandige Anregung wurde die DC-Spannungsquelle mit zusätzlichem weißen Rauschen in Höhe von 10% der Spannungsamplitude beaufschlagt.



Das Frequenzspektrum zeigt deutlich die zu erwartende Resonanz im kHz-Bereich. Dieser Effekt kommt durch die Kombination der Leitungsinduktivitäten mit den Eingangskapazitäten der Anlagen zustande. Die Kabelkapazitäten spielen keine wesentliche Rolle.

1.2. Erdung und Isolation

Bei der Erdung ist darauf zu achten, dass es keine dauerhaften Erdströme gibt. Gleichströme am Fundament von Gebäuden in Beton-Stahl-Bauweise führen langfristig zu Korrosion des Stahls. Die Erdung über die Fundamente ist of besser, als die Rückleitung über Neutralleiter. Daher kommen Konfigurationen mit Rückleitung über die Erdung nicht in Frage (kombinierter Neutralleiter mit Erdung, Kurzform TN-C, bzw. ein mitgeführter geerdeter Neutralleiter, Kurzform TN-C-S). Folgende Abbildung zeigt den Aufbau zusammen mit den möglichen Erdströmen.



In den genannten Kurzformen steht TN für den geerdeten Neutralleiter an Sternpunkt des Netzes (Sternpunkt der Spannungsquelle). Die aus der AC-Verteilung geläufigen Begriffe passen bei der DC-Verteilung ebenfalls, allerdings entfällt der dritte Leiter L_3.

Frage 1.2.1: Dreileitersystem mit separatem Neutralleiter. Erläutern Sie, warum das in der Abbildung oben rechts dargestellte System dauerhafte Erdströme vermeidet und daher als Topologie fpr DC-Verteilnetze geeignet ist. Kann man bei dieser Konfiguration auch auf den Neutralleiter verzichten, wenn nur eine Spannung angeboten werden soll?

Lösung: Dauerhafte Ströme über den Neutralleiter ergeben sich bei unsymmetrischen Lasten bzw. Anlagen. Bei einem geerdeten Neutralleiter besteht die Gefahr, dass die Impedanz der Erdung geringer ausfällt als die des Neutralleiters. In diesem Fall ergeben sich dauerhafte Neutralleiterströme über die Erdung.

Die Konfiguration mit separatem, nicht geerdetem Neutralleiter vermeidet dieses Problem: Neutralleiterströme können nicht den Weg über die Erdung nehmen. Erdströme gibt es nur im Fehlerfall bei Kontakt eines Leiters zum geerdeten Gehäuse einer Anlage. Da diese Fehler kurzfristig geklärt werden (Auslösung des Schutzes und Trennung des Fehlers), stellt das kein Problem dar.

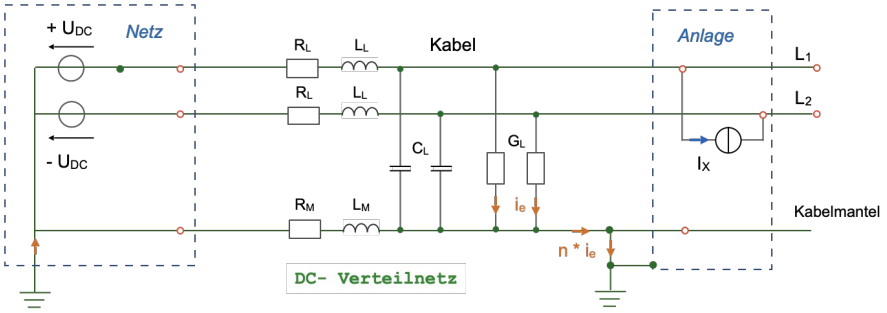
Die TN-S Konfiguration funktioniert auch ohne Neutralleiter (dann unter der Bezeichnung TPE): Bei symmetrischen Systemen fließt der Strom über den zweiten Leiter ab, ein Neutralleiter wird nicht benötigt. Erdströme ergeben sich auch hier nur im Fehlerfall.

Frage 1.2.2: Vergleichen Sie das oben beschriebene TN-S-System mit der Praxis der AC-Verteilung in der Niederspannung.

Lösung: In der AC-Verteilung gängig sind TN-C-S-Systeme: Im 4-Leitersystem {L_1, L_2, L_3, N} wird der Neutralleiter mitgeführt für die unsymmetrische Versorgung mit 230 V von L_i zu N. Drehstromverbraucher verwenden L_1, L_2 und L_3 mit 400 V Spannung von Leiter zu Leiter als symmetrische Verbraucher.

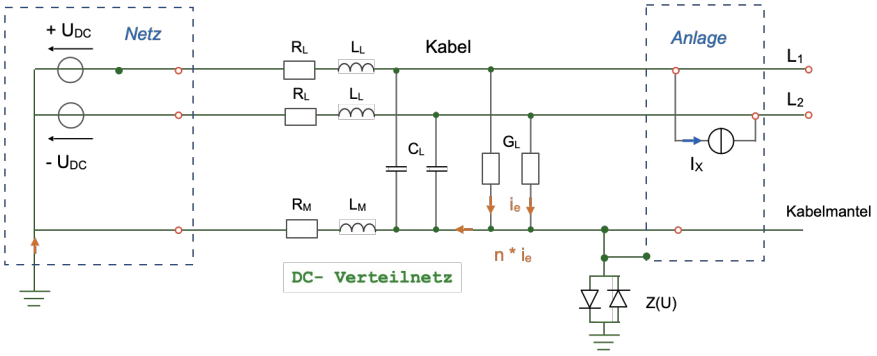
Der Neutralleiter wird am Hausanschluss geerdet und lokal als 5-Leitersystem fortgeführt {L_1, L_2, L_3, N, PE}, wie in der Abbildung oben links dargestellt (zusätzlich mit L_3). Im TN-S-System entfällt die Erdung des Neutralleiters N am Hausanschluss bzw. an der Anlage.

Frage 1.2.3: Erdströme durch den Kabelmantel. Erdströme können in der TN-S-Konfiguration auch durch die Ableitung über den Kabelmantel auftreten, wie in der folgenden Abbildung dargestellt. Schätzen Sie die Bedeutung dieses Effektes ein. Welche Maßnahmen gäbe es zur Vermeidung dieser Erdströme? Hinweis: Verwenden Sie für die Leckströme, d.h. Ableitung vom Leiter zum Kabelmantel, einen Leitwert von ca. 25 nS/km. Der Widerstandsbelag des Kabelmantels für die Rückleitung über den Kabelmantel sei mit 0,2 Ω/km abgeschätzt.



Lösung: Bei 1000 V Betriebsspannung und einer Kabellänge von 1 km erhält man somit einen Leckstrom von 25 µA (Berechnung nach dem ohmschen Gesetz für den Leitwert G: I = G U). Eine Kabellänge von 1 km ergibt sich z.B. mit 10 Abgängen mit jeweils 100 m an der Sammelschiene.

Ist die Erdung besser als die Rückleitung über den Kabelmantel, nehmen die Leckströme den Weg über die Erdung. Die Alternative wäre der Rückfluss über den Kabelmantel. Diesen Weg müsste der Leckstrom nehmen, wenn man ihm den Weg über die Erdung versperrt.



Bei Rückleitung über den Kabelmantel entsteht bei einem Widerstand von R = 0,2 Ω und einem Strom von 1 mA (das 40-fache des o.g. Leckstroms) ein maximaler Spannungshub von 0,2 V/km. Bei 1 km Kabellänge bleibt der Spannungshub durch Leckströme somit deutlich unter 0,2 V.

Die Sperre lässt sich durch zwei antiparallele Dioden vom Kabelmantel zur Erde realisieren, wie in der Abbildung oben dargestellt. Auf diese Weise ist der Rückfluss über die Erde nur im Fehlerfall möglich, wenn der Spannungshub die Schwelle der Dioden von ca. 0.6 V übersteigt.

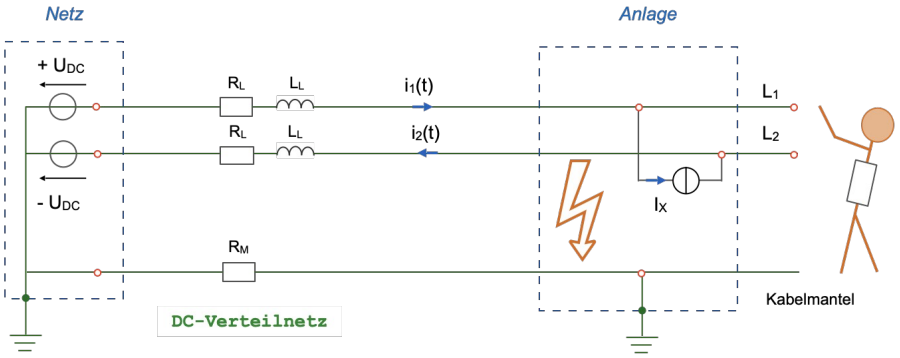
Frage 1.2.4: Isolation des Sternpunktes. Wäre es nicht einfacher, auf die Erdung des Sternpunktes im Netz zu verzichten und somit kein Problem und keine Gefahr zu schaffen, wenn ein Leiter das Erdpotenzial berührt (direkt bei einem Isolationsfehler bzw. indirekt durch Berührung eines Menschen mit Erdpotenzial)?

Lösung: In diesem Fall wäre auch bei einem Isolationsfehler der Betrieb weiter möglich, da mangels Rückleitung keine hohen Kurzschlussströme auftreten. Die Berührung eines einzelnen Leiters ist unkritisch. Die Realisierung wäre somit einfacher.

1.3. Berührungsschutz

In Niederspannungsnetzen mit für Personen zugänglichen Anlagen besteht die Möglichkeit, bei einem Isolationsfehler mit der Leiterspannung in Berührung zu kommen. Bei einem Erdkontakt, beispielsweise über die Fußsohlen, besteht in diesem Fall Lebensgefahr.

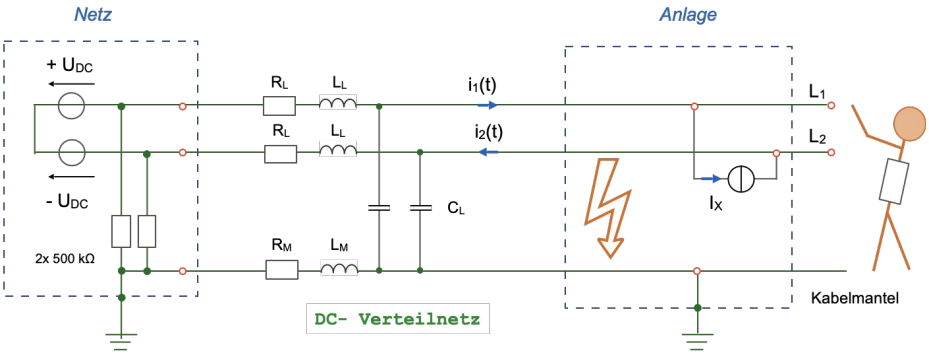
Frage 1.3.1: TN-S Netz und TPE-Netz. Beschrieben Sie, auf welche Weise die in folgender Abbildung gezeigte Erdung des für eine Berührung zugänglichen Gehäuses eine Schutz bietet.



Lösung: Anlagen mit Plastikgehäuse benötigen keine Erdung und werden im AC-Netz daher meist über zweipolige Stecker (ohne Schutzkontakt) angeschlossen. Bei Anlagen mit Metallgehäuse ist dieses über den Schutzkontakt im Stecker mit der Erdung verbunden. Ein Isolationsfehler führt somit sofort zu einem Erdschluss des Leiters und somit zum Auslösen der Sicherung. Das Konzept lässt sich für DC-Netze in der Niederspannung übernehmen.

Die Erdung bietet keinen Schutz vor der direkten Berührung eines Leiters, bzw. bei Berührung beider Leiter. Der Körperwiderstand ist zu groß für eine Schutzauslösung. Die Leiter müssen in Geräten und Steckdosen für eine Berührung unzugänglich sein. Die Verbindung eines Leiters mit dem Erdpotenzial auch bei geringen Strömen lässt sich mit Hilfe einer Fehlerstromüberwachung feststellen: Im Normalbetrieb sollte der Strom über den Neutralleiter abfließen. Ein solcher FI-Schutz (Schutzschalter für den Fehlerstrom I) trennt den Stromkreis bei einem detektierten Fehlerstrom.

Frage 1.3.2: Isoliertes Netz (IT-Netz). Ist der Sternpunkt des Netzes nicht geerdet, sondern hochohmig mit dem Erdpotenzial verbunden, fallen Erdströme bei Berührung eines Leiters sehr gering aus. Erläutern Sie das in der Anwendung dargestellte Prinzip. Wo lässt sich das Verfahren einsetzten? Welche Nachteile sind mit diesem Verfahren verbunden? Hinweis: Nehmen Sie für den Körperwiderstand einen Wert von 1 kΩ an.

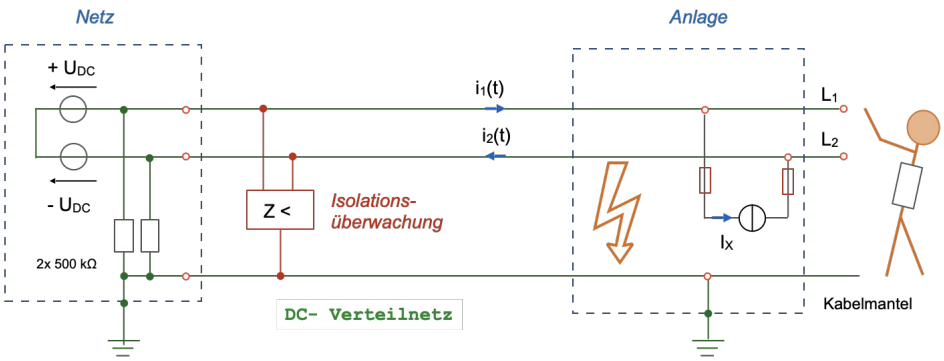


Lösung: Bei einer Spannung von 1000 V erhält man bei einem Erdschluss ohne Isolation mit einem Körperwiderstand von 1 kΩ einen Strom von 1 A. Als gefährlich gelten Körperströme oberhalb von 20 mA. Bei einem Isolationswiderstand von 500 kΩ spielt der Körperwiderstand keine Rolle. Der Strom bei einem Erdschluss ist auf 2 mA begrenzt und somit unbedenklich.

Das Verfahren ist unter dem Stichwort Trenntransformator für den Laborbetrieb bekannt, bzw. stellenweise noch in Hotels bei den Anschlüssen für Geräte in Nassräumen zu finden. Für den industriellen Einsatz ist der Vorteil der mögliche Weiterbetrieb im Fehlerfall.

Ein Nachteil des Verfahrens ist die mangelnde Fehlerindikation: Isolationsfehler bleiben unbemerkt. Die Fehlerdetektion in einem verteilten Netz gestaltet sich grundsätzlich aufwendig. Ein weiteres Problem sind Folgefehler: Folgt auf einen Isolationsfehler in einem verteilten Netz die Berührung eines anderen Leiters, endet der Kurzschluss über den Körperwiderstand lebensgefährlich.

Frage 1.3.3: Isolationsüberwachung. Isolierte AC-Netze im industriellen Umfeld sind mit Möglichkeiten zur Fehlerüberwachung ausgestattet, wie in der Abbildung dargestellt. Erläutern Sie die Funktionsweise. Lässt sich das Verfahren auf DC-Verteilnetze übertragen?



Lösung: Die Funktion entspricht der Fehlerstromüberwachung: Ist die Summe der Leiterströme $\sum I_i = 0$, so gibt es einen Abfluss außerhalb der Leiter. Der Fehlerstrom dient als Indikator für einen Isolationsfehler, bzw. eine Änderung der Impedanz zwischen Leiter und Erde. Die Fehlerdetektion führt zur Schutzauslösung.

Das Verfahren lässt sich auf DC-Verteilnetze übertragen. In einem verteilten Netz bleibt der Fehler allerdings schwer zu lokalisieren. Für eine selektive Abschaltung müsste die Überwachung in jedem Abgang erfolgen.

Frage 1.3.4: Bewertung beider Ansätze für DC-Verteilnetze. Wie beurteilen Sie die Einsatzmöglichkeiten der TN-S-Konfiguration und der IT-Konfiguration für DC-Verteilnetze?

Lösung: Bzgl. Verteilnetzen gelten für AC-Netze und DC-Netze die gleichen Bedingungen. Dass sich bei AC-Verteilnetzen in der Niederspannung die TN-S bzw. TN-C-S Konfiguration durchgesetzt hat, liegt vor allem an der deutlich einfacheren Detektion und Lokalisierung von Fehlern: Fehler führen zu einer Schutzauslösung, die Fehlerursache ist unmittelbar ersichtlich. Auch bei der Inbetriebnahme von Anlagen werden Tests hierdurch deutlich vereinfacht. Ein weiterer Vorteil ist die leichter Erweiterbarkeit bzw. Umrüstung der Verteilung.

Ist die Verteilung wenig verzweigt und die Konfiguration stabil, bieten IT-Netze mit Isolationswächter den Vorteil des weiteren Betriebes im Fehlerfall. Für Einzelfehler besteht ein hoher Schutz. Mehrfachfehler sind ein Risiko; die Fehler in verteilten Anwendungen sind schwer zu finden. Für solche Anwendungen stehen Spezialisten für die Detektion und die Beseitigung der Fehler zur Verfügung.

Bemerkung: Im Unterschied zu AC-Netzen besitzen Anlagen am DC-Netz Kapazitäten am Eingang (siehe Abbildung unter Frage 1.1.3). Die Kapazität der DC-Quelle und die Eingangskapazitäten aller Anlagen sind bei einem Verteilnetz parallel zusammengeschaltet. Die Entladeströme der Kapazitäten übersteigen im Kollektiv der Anlagen leicht die Schwelle über den zulässigen Bereich für Körperströme bei der Berührung. Das gilt auch für Bezugsanlagen. Die Entladeströme müssen beim Schutzkonzept berücksichtigt werden.

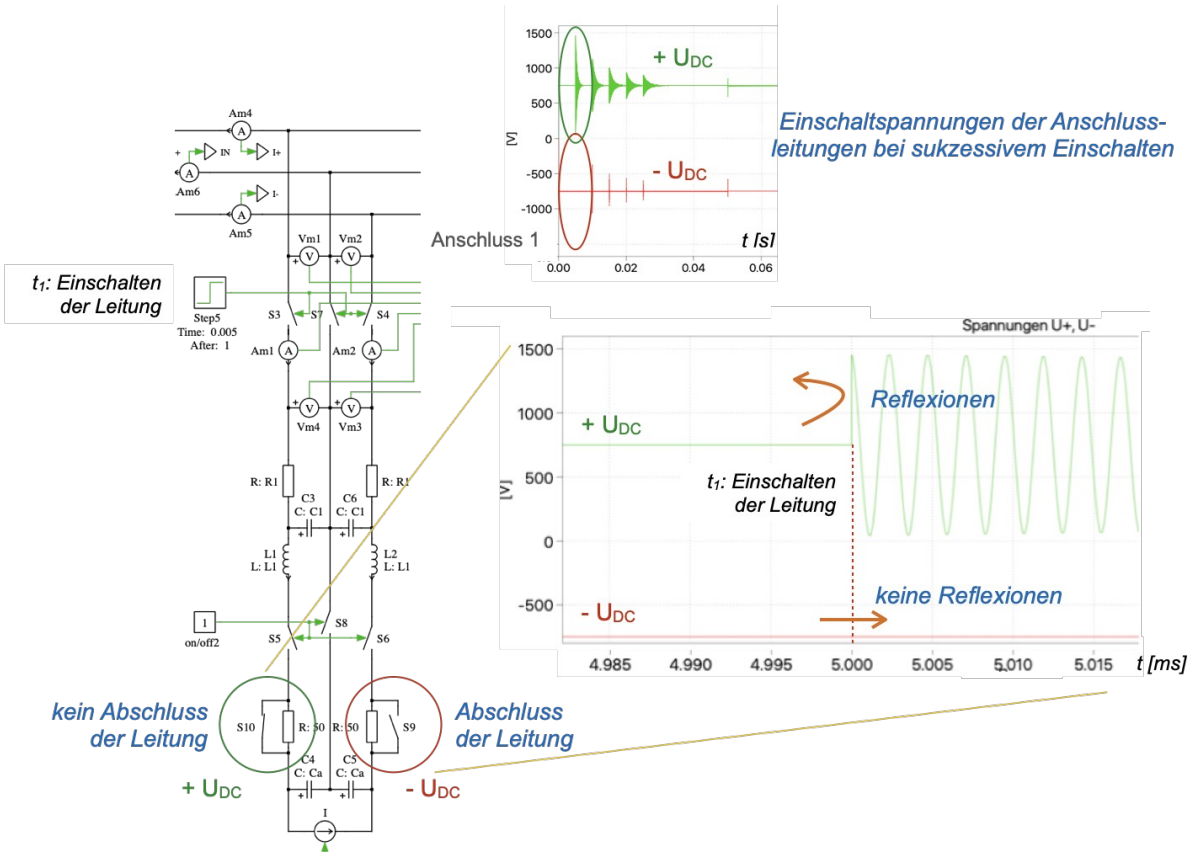
1.4. Anlagen am Verteilnetz

Das Netz mit dem in Abschnitt 1.1 dargestellten Modell soll nun bezüglicher seiner Eigenschaften beim Einschalten und Ausschalten von Anlagen untersucht werden. Im Unterschied zu einem AC-Verteilnetz sind am DC-Netz nur aktive Anlagen beteiligt:

- Die Versorgung erfolgt mit Hilfe eines DC-Netzes mit begrenztem Kurzschlussstrom in Höhe des Bemessungsstromes. Diese Eigenschaft besitzt der Konverter, der das DC-Netz speist. In der Ersatzschaltung ist das Netz eine Spannungsquelle mit Strombegrenzung.
- Alle Anlagen sind über leistungselektronische Konverter angeschlossen, sowohl Bezugsanlagen als auch Einspeisungen, bzw. Energiespeicher. Der Lastfluss ist grundsätzlich bidirektional, die Ströme der Anlagen sind grundsätzlich in Höhe der Bemessungsströme begrenzt.
- Zu berücksichtigen sind die Kapazitäten der Anschlussleitungen bzw. Anschlusskabel, sowie die Eingangskapazitäten der Anlagen.

Aktive Anlagen sind geregelt und reagieren schnell, auch zum eigenen Schutz der Anlagen in einem Fehlerfall. Es besteht somit keine Notwendigkeit, die Anlagen nur mit Hilfe von Schaltern zu aktivieren oder abzuschalten, wie es in einem AC-Netz mit passiven Verbrauchern der Fall ist.

Frage 1.4.1: Ladeströme der Anschlusskabel. An der Anschlussleitung der Anlage 1 wurden Abschlusswiderstände angebracht. In der Teilleitung + U_{DC} ist der Abschlusswiderstand deaktiviert, in der Teilleitung – U_{DC} aktiviert. Beim Einschalten der Anschlussleitungen erkennt man deutliche Spannungstransienten und Stromtransienten beim Zuschalten der leer laufenden Leitungen, außer in der Zuleitung – U_{DC} der ersten Anlage. Wie erklären sich die Transienten?



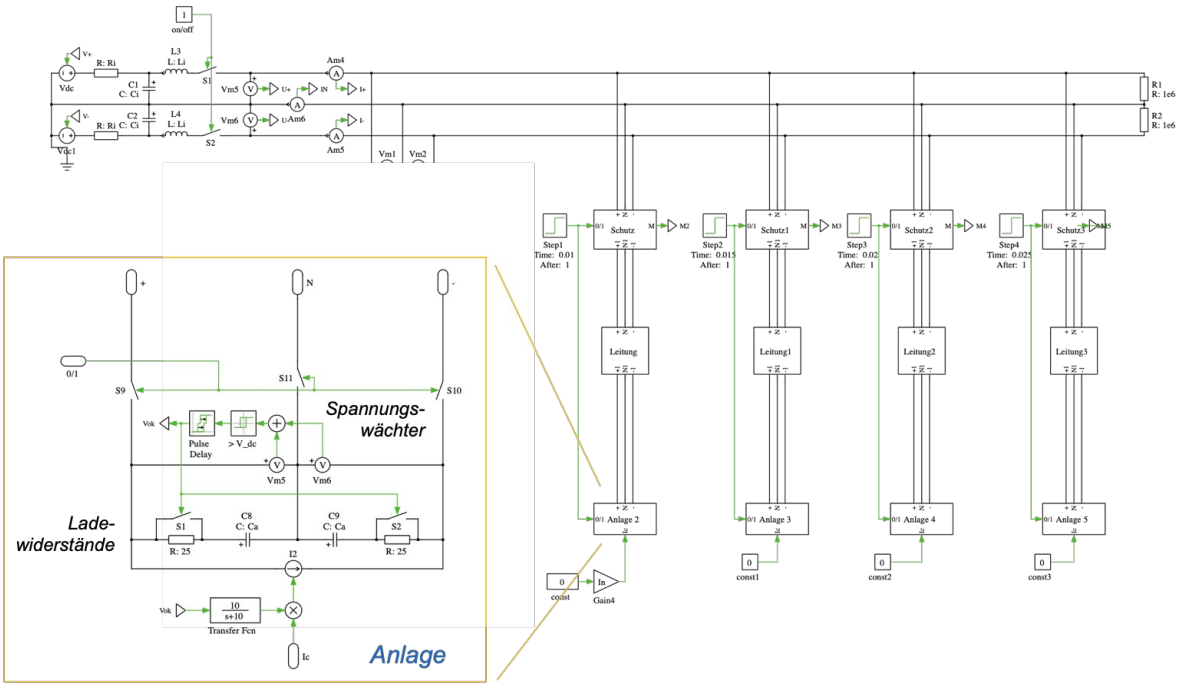
Lösung: Elektrisch gesehen sind die Leitungen im Leerlauf. Das gilt auch bei Abschluss der Anschlussleitungen mit den Eingangskapazitäten der Anlagen und mit den Stromquellen der Anlagen. Das Ende der Anschlussleitungen neigt zur Totalreflexion: der einlaufende Spannungspuls (bzw. der Spannungssprung wird am Ende der Leitung mit gleichem Vorzeichen zurückgeworfen. Es ergibt sich

kurzzeitig eine Verdopplung der Spannung. Im Strom ergeben sich ebenfalls Schalttransienten. Da die speisende Spannungsquelle eine geringe Impedanz besitzt und daher ebenfalls keinen Leitungsabschluss bietet, ergeben sich fortgesetzte Reflexionen, die innerhalb einer ms abklingen. Bemerkung: An einem Kurzschluss (geringe Impedanz der Spannungsquelle) und an einem Leerlauf (offene Leitung zw. Stromquelle) ergeben sich Totalreflexionen (mit jeweils umgekehrten Vorzeichen der reflektierten Welle, in Summe Spannung = 0 beim Kurzschluss; Spannung = doppelter Wert im Leerlauf).

Kabel als Anschlussleitung besitzen Wellenwiderstände in der Größenordnung von ca. 50 Ohm (zu berechnen aus dem Verhältnis $R_W = \sqrt{(L'/C')}$. Der Wellenwiderstand ist unabhängig von der Leitungslänge, somit gibt es den Effekt auch bei kürzeren Leitungen (hier: 100 m), jedoch mit kürzeren Laufzeiten zwischen den Reflexionen. Möchte man diesen Effekt vermeiden, ist die Leitung mit einem Widerstand in Größenordnung ihres Wellenwiderstandes abzuschließen, zumindest währen des Einschaltvorgangs, bis die Kabelkapazität geladen ist.

Bemerkung: Hier unterscheiden Sich AC-Systeme von DC-Systemen. Bei DC ist ein Laden der Kabelkapazität möglich; der transiente Zustand wird abgeschlossen. Beim Betrieb mit AC überlagern sich die Schalttransienten mit dem Betrieb mit Wechselspannung. Kapazitäten erreichen bei einem Wechselspannungssystem keine statische Aufladung.

Frage 1.4.2: Anschalten der Anlagen. Die Eingangskapazitäten der Anlagen müssen vorgeladen werden, wenn man große Einschaltströme vermeiden möchte. Die Anlage soll die Vorladung selbst übernehmen, sobald eine Spannung am Eingang detektiert wird. Folgende Abbildung zeigt eine mögliche Anordnung hierzu. Erläutern Sie die Funktionsweise und untersuchen Sie den Einschaltvorgang für Anlagen an der Sammelschiene mit Hilfe der Simulation.

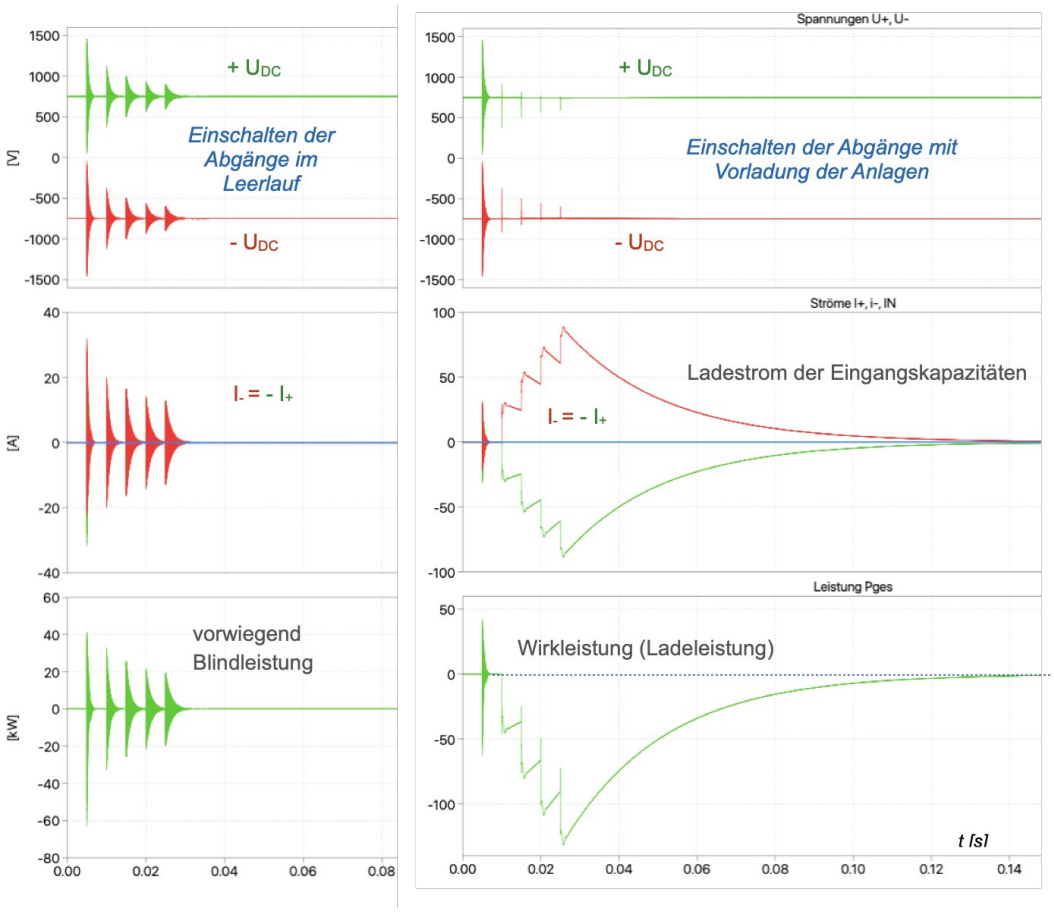


Lösung: (1) Funktionsweise: Die Eingangskapazitäten haben serielle Widerstände zum Vorladen, die nach der Ladung überbrückt werden. Ein Spannungswächter am Eingang schaltet die Widerstände zu, wenn keine Spannung anliegt. Nach Vorliegen einer Spannung am Eingang werden die Widerstände zeitverzögert mit Hilfe der Schalter überbrückt. Die Schaltung ist nun betriebsbereit (Signal Vok).

Im Beispiel werden die Schalter am Eingang der Anlagen synchron mit den Schaltern der Abgänge betätigt. In diesem Fall übernehmen die Vorladewiderstände auch den Abschluss der Leitung während des Zuschaltens. In der Realität werden die Schalter am Abgang und an den Anlagen (sofern vorhan-

den) voneinander unabhängig sein. Ladeströme der Leitungen beim Zuschalten muss man dann in Kauf nehmen.

Bemerkung: In der Praxis kann man die Eingangskapazitäten je nach Ausführung der Anlage aus einer Hilfsspannungsquelle aufladen, mit Hilfe leistungselektronischer Schalter im Stromweg. Das Beispiel in der Simulation dient nur der Demonstration der Effekte beim Einschalten von Anlagen ans Verteilnetz.



Die Simulation zeigt einerseits das Einschalten der Leitungen im Leerlauf (line Seite der Abbildung oben), andererseits das Einschalten der Abgänge einschließlich des Vorladens der Eingangskapazitäten. In Fall der leerlaufenden Leitungen erkennt man die Reflexionen in Spannung und Strom. Die Leitungen der Anlagen 1 bis 5 werden nacheinander eingeschaltet.

Aus dem Produkt von Strom und Spannung erhält man den unten dargestellten Verlauf der Leistung p(t). Wie man am wechselnden Vorzeichen und den annähernd gleichen Amplituden erkennt, handelt es sich hier vorwiegend um Blindleistung (bis auf die Ladung der Kabelkapazitäten pendelt die Leistung während der Reflexionen hin und her).

Anlage 1 verbleibt im Leerlauf mit geladenen Eingangskondensatoren, während Anlagen 2 bis 5 der Reihe nach zugeschaltet werden, sowohl die Kabel an der Sammelschiene als auch die Anlagen (rechter Teil der Abbildung oben). Am Spannungsverlauf erkennt man, dass sich die Reflexionen durch die Ladewiderstände deutlich reduzieren. Gleichzeitig nehmen die Anlagen der Reihe nach Energie zum Laden der Eingangskapazitäten auf, wie man am Stromverkauf erkennt. Bei insgesamt 4 Anlagen erreichen die Ladeströme das Niveau des Bemessungsstromes eines Abgangs (100 A).

Am Verlauf der Leistung erkennt man, dass diese nun eine Vorzugsrichtung hat: $P < 0$ steht für eine Leistungsabgabe, von der Spannungsquelle aus betrachtet. Das Integral unter dem Leistungsverlauf ergibt die von den Kapazitäten aufgenommene Energie. Die zugehörige Leistung ist eine Wirkleistung, da die zugeführte Energie bis zur Entladung der Kondensatoren erhalten bleibt.

Frage 1.4.3: Transienten beim Abschalten.

Lösung:

Frage 1.4.4: Transienten im Fehlerfall.

Lösung:

2. Betrieb und Schutz

…

2.1. Schutzkonzept

2.2. Fehlererkennung

...

2.3. Fehlerbehandlung

...

2.4. Betrieb nach Fehlerklärung

...

3. Anforderungen an Anlagen am Netz

3.1. Anschluss ans Stromnetz

...

3.2. Ungeschützter Bereich

...

3.3. Geschützter Bereich

… Kapselung der Schutzfunktion

...

3.4. Schnittstellen für Anlagen im geschützten Bereich

...

4. Konverter für Gleichspannungsnetze

...

4.1. Hochsetzsteller

...

4.2. DAB-Konverter

… stromgeführter Betrieb

4.3. Spannungsregelung

… spannungsgeführter Betrieb

4.4. Transformatorbetrieb

...

5. Industrienetze

...

5.1. ...

...

5.2. ...

...

5.3. ...

...

5.4. ...

...

6. Gewerbeparks und Einkaufszentren

…

...

6.1. ...

...

6.2. ...

...

6.3. ...

...

6.4. ...

...

...

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

Anhang A – ...