

1 Einleitung

Die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) gewinnt durch die Nutzung regenerativer Energien zunehmend an Bedeutung. Die Yunnan-Guangdong HGÜ in China, welche die Energie aus den Wasserkraftwerken der Xiaowan- und Manwan-Talsperren zwischen den Städten Chuxiong (Provinz Yunnan) und Zengcheng (Provinz Guangdong) überträgt, gehört mit einer Übertragungsleistung von 5000 MW bei +/-800 kV und einer Länge von 1418 km zu den größten HGÜs weltweit. Die beiden von der Siemens AG errichteten Stromrichterstationen sind aus vier Stromrichtern mit einer Spannung von jeweils 400 kV in klassischer Thyristortechnik aufgebaut [Sie05].

In Deutschland wird mit dem Projekt „BorWin 1“ der erste Offshore-Windpark (OWP) über eine HGÜ angebunden. Die von der ABB gebaute HGÜ verbindet am sogenannten Netzanschlusspunkt (NAP) mit einer Übertragungsleistung von bis zu 400 MW bei +/-150 kV den Offshore-Windpark „BARD Offshore 1“ über die 200 km entfernte Umrichterstation mit dem deutschen Höchstspannungsnetz am sogenannten Netzverknüpfungspunkt (NVP) in Diele. Die Netzspannung in den Offshore-Windparks wird durch den aus Insulated Gate Bipolar Transistoren (IGBT) in Zweipunkttechnik aufgebauten Spannungszwischenkreisumrichter realisiert [Abb03].

Zurzeit befinden sich vier weitere HGÜs mit den von der Siemens AG entwickelten Modularen Multilevelstromrichtern zur Anbindung der Offshore-Windparks mit Übertragungsleistungen von bis zu 864 MW bei +/-320 kV im Bau [Sie06]. Weiterhin ist zu erwarten, dass die Modulare Multilevelstromrichtertechnik für die Übertragung der Energie aus den Windkraftanlagen im Norden in die großen Metropolregionen im Süden des Landes zum Einsatz kommt und damit eine führende Position beim Ausbau der regenerativen Energien einnimmt [Nee01].

In den hohen Leistungsbereichen wird sich auch langfristig die klassische HGÜ mit Übertragungsleistungen von bis zu 11.000 MW behaupten, während sich die Modulare Multilevelstromrichtertechnik im mittleren Leistungsbereich mit Übertragungsleistungen bis zu 2.000 MW zunehmend durchsetzen wird. Insbesondere die erreichbare Dynamik, Blindleistungsstützung und Schwarzstartfähigkeit gehören zu den entscheidenden Argumenten, welche für den Einsatz dieser Technik gegenüber der klassischen HGÜ sprechen.



2 Grundlegender Aufbau und Funktionen

2.1 Funktionen und Arten von Stromrichtern

2.1.1 Grundfunktionen von Stromrichtern

Die Hauptaufgabe von Stromrichtern besteht in der Umformung elektrischer Energie sowie der Steuerung des Energieflusses. Unter der Umformung elektrischer Energie versteht man die Änderung der elektrischen Größen zwischen dem Ein- und Ausgang des Stromrichters, welche unter anderem durch die Energieflussrichtung gekennzeichnet ist. Prinzipiell ergeben sich daraus die vier Grundfunktionen von Stromrichtern. Zu den Grundfunktionen zählen das Gleichrichten, das Wechselrichten, das Gleichstromstellen sowie das Wechselstromstellen (Abb. 2.1).

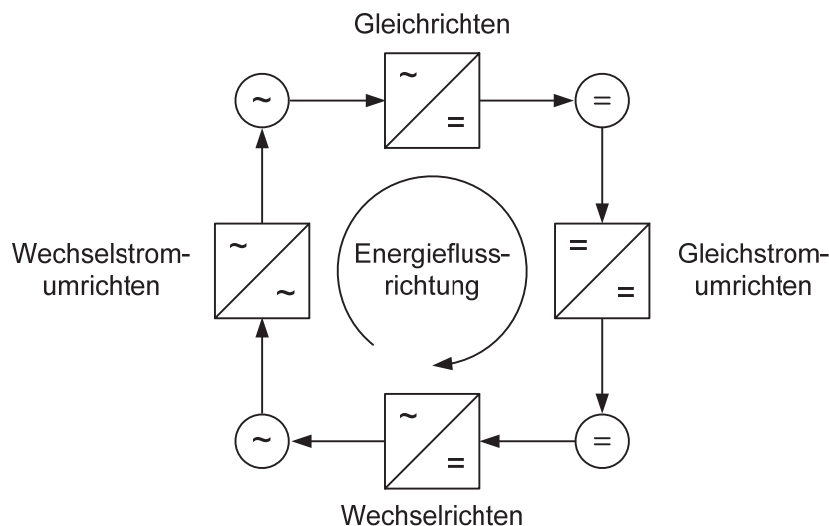


Abb. 2.1 Grundfunktionen von Stromrichtern

Bei der Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom spricht man von einem Gleichrichter und bei der Umformung von Gleichstrom in Wechselstrom spricht man von einem Wechselrichter. Im Weiteren werden Gleich- und Wechselrichter unter dem Oberbegriff Stromrichter zusammengefasst [Heu01].

Unter einem Umrichter versteht man eine Schaltung bzw. Topologie, die aus einem beliebigen Wechselstromsystem ein anderes Wechselstromsystem mit gleicher oder anderer Phasenzahl, Frequenz und Spannung erzeugt. Hierzu werden auch Gleichstromumrichter, d. h. die Wandlung zwischen zwei Gleichstromsystemen, gezählt. In diesem Zusammenhang unterscheidet man zwei Klassen von Umrichtern.



Zwischenkreisumrichter sind aus einem Gleich- und einem Wechselrichter aufgebaut und über einen Zwischenkreis miteinander verbunden. Die Wandlung zwischen zwei Wechselstromsystemen erfolgt hier über einen Gleichstrom- oder Gleichspannungszwischenkreis. Die Wandlung zwischen zwei Gleichstromsystemen kann dabei über ein Wechselstrom- bzw. Wechselspannungssystem erfolgen.

Direktumrichter führen eine direkte Wandlung zwischen zwei Wechselstrom- oder Gleichstromsystemen ohne einen Zwischenkreis durch und bilden aus diesem Grund eine eigene Klasse von Stromrichtern. Weitere Funktionen von Stromrichtern sind in der EN 60146-2 definiert. Dazu zählen neben den oben aufgeführten Grundfunktionen:

- (elektronisches) (Leistungs-)Umrichten
- (elektronisches) Wechselstrom-Gleichstrom-(Leistungs-)Umrichten
- (elektronisches) (Leistungs-)Gleichrichten
- (elektronisches) (Leistungs-)Wechselrichten
- (elektronisches) (Leistungs-)Wechselstromumrichten
- (elektronisches) (Leistungs-)Gleichstromumrichten
- direktes (Leistungs-)Umrichten
- Zwischenkreis-(Leistungs-)Umrichten

2.1.2 Arten von Stromrichtern

Neben den Grundfunktionen werden die Stromrichter entsprechenden Arten zugeordnet. Prinzipiell unterscheidet man in diesem Zusammenhang zwischen netzgeführten und selbstgeführten Stromrichtern. In der EN 60146-2 werden bisher die folgenden Arten von Stromrichtern definiert.

- (elektronischer) (Leistungs-)Stromrichter
- selbstgeführter Stromrichter
- Wechselstrom-Gleichstromumrichter
- Wechselstrom-Gleichstromumrichter mit Spannungseinprägung
- Wechselstrom-Gleichstromumrichter mit Stromeinprägung
- Gleichrichter
- Wechselrichter
- Spannungsquellen-Wechselrichter / spannungsgespeicherter Wechselrichter



- Stromquellen-Wechselrichter / stromgespeicherter Wechselrichter
- netzinteraktiver Umrichter
- Blindleistungs-Umrichter
- Wechselstromumrichter
- Wechselstrom-Direktumrichter
- Zwischenkreis-Wechselstromumrichter
- Gleichstromumrichter
- Gleichstrom-Direktumrichter / Gleichstromsteller
- Zwischenkreis-Gleichstromumrichter

2.1.3 Einteilung von Stromrichtern

2.1.3.1 Art der Kommutierung

Die Einteilung der Stromrichter erfolgt u. a. nach der Art der Kommutierung in Stromrichter ohne Kommutierung (Wechselstromschalter, -steller), mit natürlicher Kommutierung (fremdgeführte Stromrichter) und in Stromrichter mit Zwangskommutierung (selbstgeführte Stromrichter).

Bei fremdgeführten Stromrichtern wird die notwendige Kommutierungsspannung durch das Netz (netzgeführte Stromrichter) oder die Last (lastgeführte Stromrichter) zur Verfügung gestellt. Zu den fremdgeführten Stromrichtern gehören u. a. aus Dioden und Thyristoren aufgebaute Gleich- und Wechselrichterschaltungen mit Stromzwischenkreis.

Bei selbstgeführten Stromrichtern wird die notwendige Kommutierungsspannung durch abschaltbare Leistungshalbleiter (Erhöhung des Widerstandes) oder zum Stromrichter gehörende kapazitive oder induktive Energiespeicher (Löschzweig) zur Verfügung gestellt. Zu den selbstgeführten Stromrichtern gehören unter anderem aus abschaltbaren Leistungshalbleitern (z. B. GTO (Gate Turn-off Thyristor), IGBT) aufgebaute Gleich- und Wechselrichterschaltungen mit Strom- oder Spannungszwischenkreis.

2.1.3.2 Art des Zwischenkreises

Neben der Art der Kommutierung werden Umrichter (auch Zwischenkreisumrichter genannt) nach der Art ihres Zwischenkreises unterschieden (Abb. 2.2). Diese teilt man in Zwischenkreisumrichter mit Gleichspannungs- und Gleichstromzwischenkreis ein.

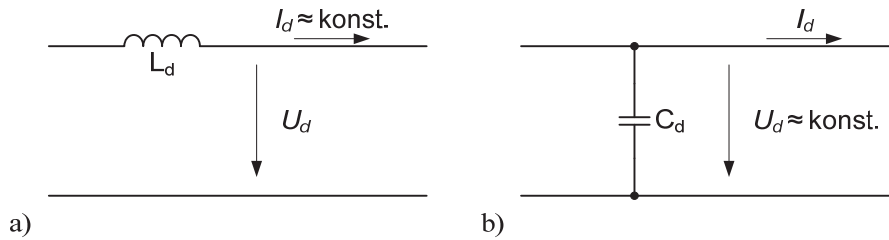


Abb. 2.2 Zwischenkreise von Umrichtern mit a) Strom- und b) Spannungszwischenkreis

Umrichter mit Gleichstromzwischenkreis sind durch feste Stromrichtung und einen (konstanten) Zwischenkreisstrom (Gleichstrom) charakterisiert. Eine Änderung der Übertragungsrichtung wird in Stromzwischenkreisumrichtern (I-Umrichtern) durch eine Änderung der Polarität der Zwischenkreisspannung realisiert (Abb. 2.3a).

Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis sind durch eine feste Polarität und eine nahezu konstante Zwischenkreisspannung (Gleichspannung) charakterisiert. Eine Umkehr der Übertragungsrichtung oder Übertragungsleistung wird in Spannungszwischenkreisumrichtern (U-Umrichter) durch eine Änderung der Stromrichtung oder Stromstärke im Zwischenkreis realisiert (Abb. 2.3b).

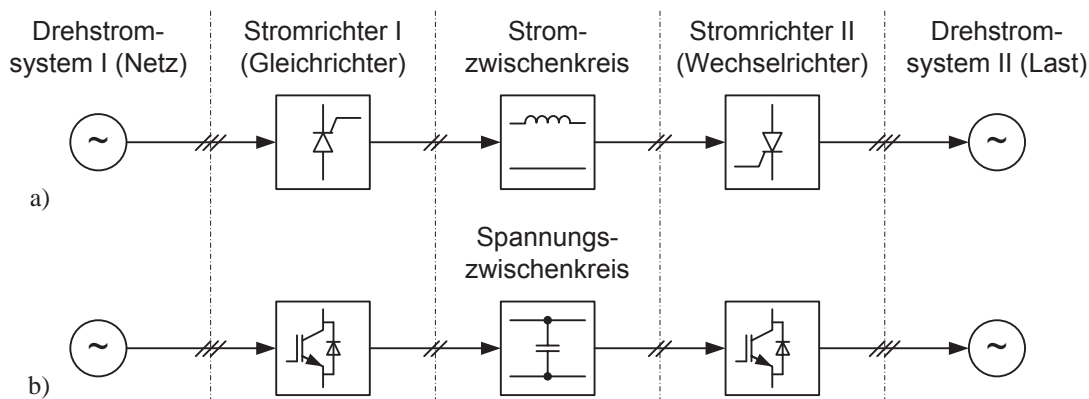


Abb. 2.3 Prinzipieller Aufbau von Zwischenkreisumrichtern mit a) Stromzwischenkreis (I-Umrichter) und b) Spannungszwischenkreis (U-Umrichter)

Im Unterschied zu konventionellen I- und U-Umrichtern, bei denen der Energiespeicher im Spannungs- bzw. Stromzwischenkreis integriert ist, verfügen Modulare Multilevelstromrichter über einen in den Stromrichtermodulen integrierten Energiespeicher (Abb. 2.4).

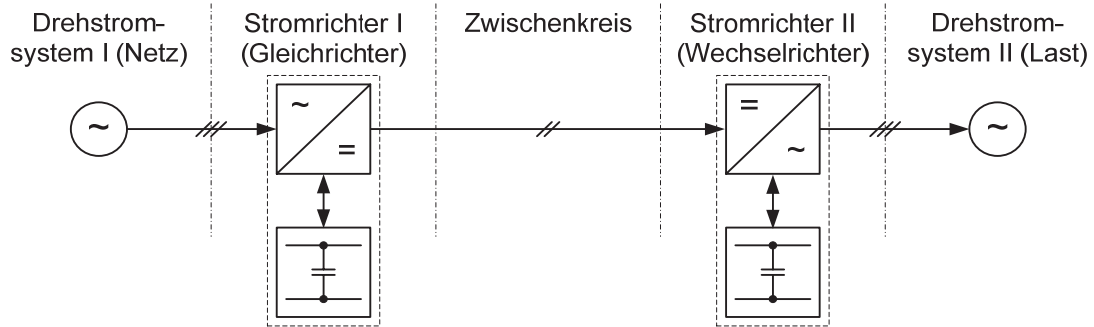


Abb. 2.4 Prinzipeller Aufbau von Modulen Multilevelumrichtern

Damit ist prinzipiell eine Kopplung von Modulen Multilevelstromrichtern sowohl mit U- als auch I-Stromrichtern möglich. In Kombination mit I-Stromrichtern lässt sich damit eine Anbindung von Modulen Multilevelstromrichtern an klassische, netzgeführte Umrichter im Zwischenkreis oder eine Anbindung von Modulen Multilevelstromrichtern an klassische, netzgeführte I-Stromrichter realisieren (Abb. 2.5).

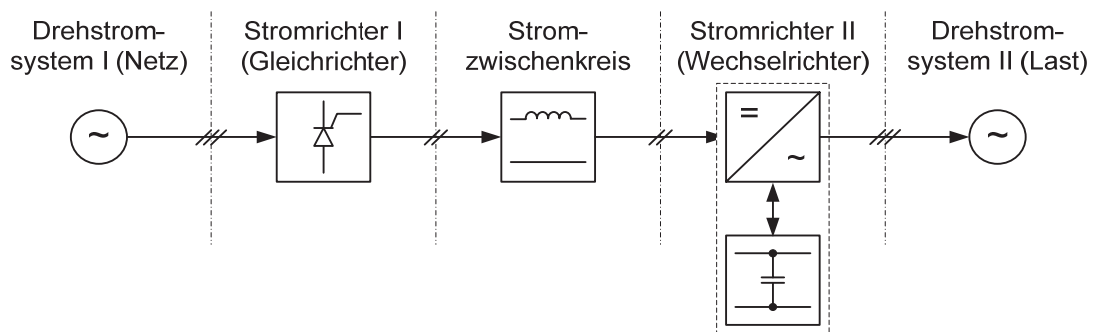


Abb. 2.5 Anbindung von Modulen Multilevelstromrichtern an netzgeführte Stromrichter mit Stromzwischenkreis

2.2 Transformatoren

2.2.1 Einsatz von Transformatoren bei Stromrichtern

Die Anbindung der Umrichter an das Netz erfolgt über Transformatoren (Abb. 2.6). Diese werden in erster Linie zur Anpassung der Netzspannung an die Umrichterspannung benötigt. Daneben sind die Transformatoren zur Entkopplung der drehstromseitigen Nullsysteme erforderlich. In der Hochspannungsgleichstromübertragung mit Modulen Multilevelstromrichtern lassen sich Transformatoren in Stern-Dreieck-Schaltung oder Stern-Stern-Schaltung mit isoliertem Sternpunkt auf der Stromrichterseite einsetzen. Der Sternpunkt auf der Stromrichterseite kann zum Schutz vor unzulässig hohen Überspannungen über Ableiter am Erdpotential angebunden werden. Prinzipiell lässt sich durch den

Einsatz von Transformatoren in Stern-Dreieck-Schaltung oder Stern-Stern-Schaltung mit Ausgleichswicklung ein besseres Verhalten der Umrichter während ein- oder zweiphasiger Netzfehler, durch die resultierende Restspannung auf der Stromrichterseite, erreichen.

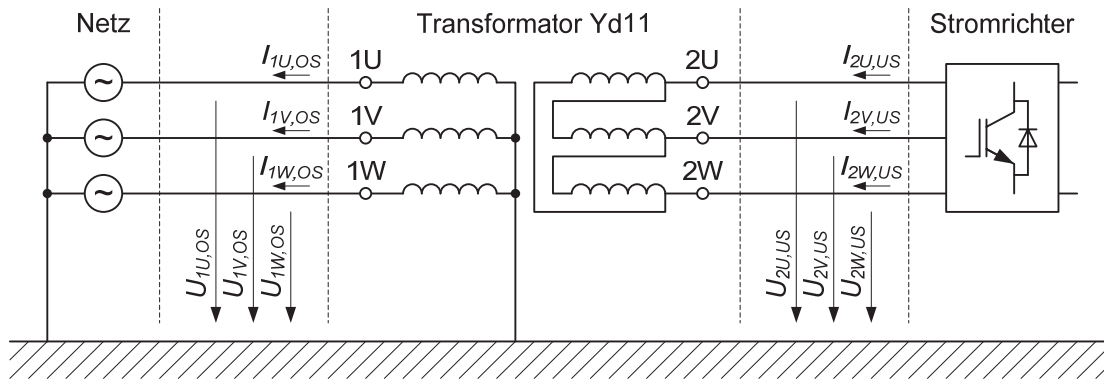


Abb. 2.6 Ströme und Spannungen am Transformator

2.2.2 Einphasiges Ersatzschaltbild

Für die Auslegung und Dimensionierung der Transformatoren sind einige Randbedingungen zu berücksichtigen. Dazu zählen unter anderem das Verhalten von Transformatoren mit Stufensteller, die mit der Baugröße verbundene Kurzschlussleistung sowie die durch Gleichstromanteile im Ein- oder Ausgangsstrom der Umrichter verbundenen Sättigungserscheinungen. Im Allgemeinen werden die Transformatoren für die Auslegung und Dimensionierung durch ein einphasiges Ersatzschaltbild nachgebildet (Abb. 2.7). Darin lässt sich der Einsatz eines Stufenstellers durch unterschiedliche Streuinduktivitäten und Wicklungswiderstände berücksichtigen [Hck01].

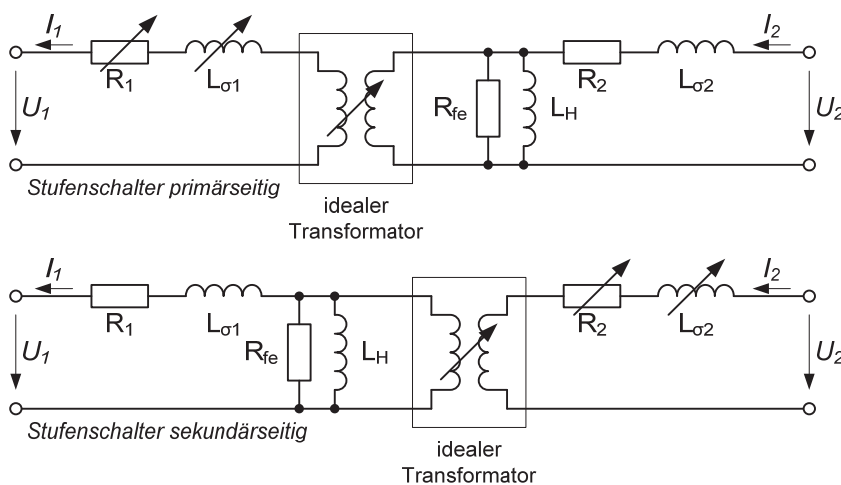


Abb. 2.7 Einphasiges Ersatzschaltbild von Transformatoren mit Stufensteller



Die Abhängigkeit der Kurzschlussspannung von der Stufenstellerposition lässt sich den technischen Angaben der Hersteller entnehmen und somit in der Auslegung und Dimensionierung der Anlagen berücksichtigen. Größere Unterschiede und damit in jedem Fall zu berücksichtigende Unterschiede treten unter anderem dann auf, wenn zusätzliche Anforderungen an die Transformatoren (z. B. an die Tertiärwicklungen zur Energieauskopplung) gestellt werden oder die Position des Stufenstellers in Bezug auf die konstant zu haltende Leerlaufspannung ungünstig gewählt wurden.

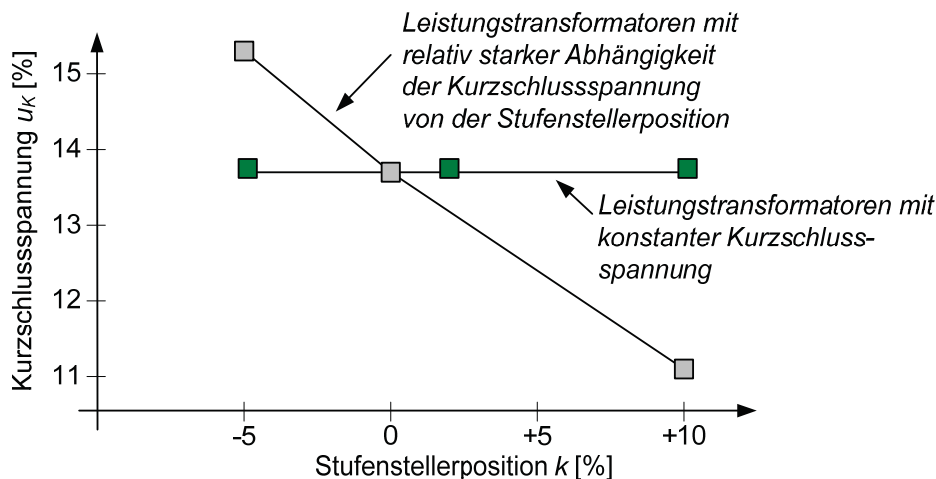


Abb. 2.8 Abhängigkeit der Kurzschlussspannung von der Stufenschalterposition

In der Abb. 2.8 wird ein Beispiel für einen einphasigen Transformator mit entsprechender Abhängigkeit angegeben. In diesem Fall variiert die relative Kurzschlussspannung zwischen $u_k = 11\%$ und $u_k = 16\%$ zwischen den Stufenstellerpositionen $k = +10\%$ und $k = -5\%$.

2.3 Modularer Multilevelstromrichter

2.3.1 Ströme und Spannungen am Stromrichter

Die Kennzeichnung der Ein- und Ausgänge erfolgt definitionsgemäß durch die Richtung des Energieflusses. Bei umkehrbarem Energiefluss werden die Ein- und Ausgänge durch die Hauptflussrichtung festgelegt und ändern sich nicht mit der Energieflussrichtung und Anwendung.

Im Weiteren werden unabhängig von der Richtung des Energieflusses die Gleichspannungsseite als Eingang und damit die gleichspannungsseitigen Größen als Eingangsgrößen sowie die Drehstromseite als Ausgang und damit die drehstromseitigen Größen als Ausgangsgrößen gekennzeichnet. Die Festlegung der Strom- und Spannungsrichtung erfolgt für die Eingangsgrößen im Verbraucher-



zählpeilsystem und für die Ausgangsgrößen im Generatorzählpeilsystem (Abb. 2.9).

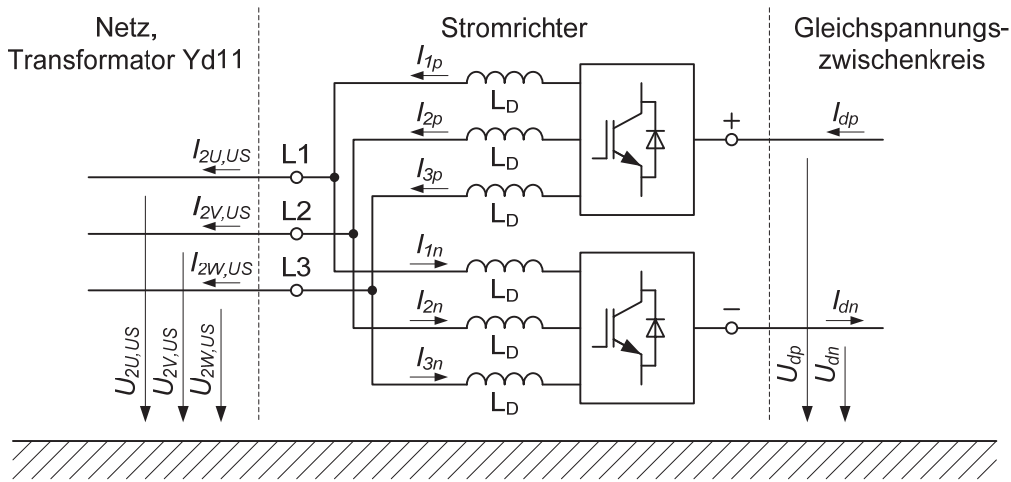


Abb. 2.9 Ströme und Spannungen am Stromrichter

Der Begriff Ventil ist bei dieser Topologie laut Definition nicht zutreffend, so dass diese im Weiteren als Stromrichtermodule bezeichnet werden. Dies ist damit begründet, dass der Strom in beiden Richtungen durch das Stromrichtermodul fließen kann. Ebenso ist ein dauerhafter Stromfluss in beiden, sich gegenüberliegenden Stromrichtermodulen zulässig.

2.3.2 Einphasiges Ersatzschaltbild

Einphasige Ersatzschaltbilder von Modulen Multilevelstromrichtern werden neben der Auslegung und Dimensionierung in erster Linie für Lastflussberechnungen eingesetzt (Abb. 2.10). Gleich- und drehstromseitig ergeben sich die Induktivitäten und Widerstände aus der Reihen- beziehungsweise Parallelschaltung der Zweigdrosseln, der Streuinduktivitäten der Transformatoren sowie dem Widerstand im Zwischenkreis. Die Ströme und Spannungen am Stromrichter folgen im stationären Zustand drehstromseitig aus der Scheinleistung sowie der Netzspannung und gleichspannungsseitig aus der Übertragungsleistung sowie der Zwischenkreisspannung und dem ohmschen Widerstand des Kabels bzw. der Freileitung.

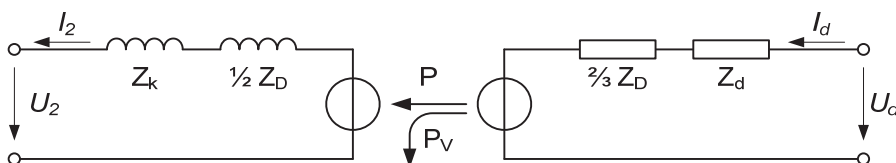


Abb. 2.10 Einphasiges Ersatzschaltbild