

Kapitel 1

Einleitung

Die Leistungselektronik für elektrische Antriebe, als Schnittstelle zwischen Energieversorgung und elektrischer Maschine, muss hohen Anforderungen bezüglich der Qualität der Ausgangsgrößen und ihrem Wirkungsgrad gerecht werden.

Die vom Umrichter erzeugten pulsformigen Spannungen mit hoher Steilheit können der Isolation der Maschine schaden. Ebenfalls können die Lager durch hervorgerufene kapazitive Ströme beschädigt werden. Ein nicht sinusförmiger Strom kann Pendelmomente verursachen. Die beste Qualität der Ausgangsspannung wird erreicht, wenn diese im stationären Zustand eine Sinusform mit der elektrischen Motorfrequenz aufweist.

Es gibt jedoch einen Kompromiss zwischen Qualität und Effizienz. Eine Erhöhung der Schaltfrequenz des Umrichters zur Verbesserung des Stromverlaufes, oder eine Verringerung der Spannungssteilheit zur Verringerung von Störströmen, bringt eine Erhöhung der Schaltverluste in den Halbleitern, was die Effizienz verschlechtert.

In den letzten Jahrzehnten wurde die Leistungsfähigkeit der Halbleiter aus Silizium beträchtlich verbessert. Da man sich heute den physikalischen Grenzen des Siliziums annähert, kann nur eine gleichzeitige Verbesserung der Effizienz und Qualität durch neue Halbleitermaterialien erreicht werden.

In der vorliegenden Arbeit wird der Einsatz von Leistungshalbleitern aus Siliziumkarbid (SiC) in der Antriebstechnik praktisch untersucht. Die physikalischen Eigenschaften dieses Halbleitermaterials sind hervorragend für die

Leistungselektronik, z.B. niedrigerer Durchlasswiderstand bei höherer Sperrspannung und höhere Temperaturbeständigkeit als Silizium.

Das Ziel der Arbeit ist es, einen Antriebsstromrichter zu erstellen, der

- sinusförmige Spannungen der Maschine zur Verfügung stellt (Qualität), um die Lebensdauer der Maschine durch Abwesenheit von Lagerströmen und Reflexionen zu erhöhen, und die Verwendung von langen ungeschirmten Motorkabeln zu ermöglichen,
- kompakt ist (Volumen, Gewicht, Preis), mit kleinem Netz- und Motorfilter, da eine hohe Schaltfrequenz verwendet wird,
- rückspeisefähig ist und einen ähnlichen Wirkungsgrad wie ein konventioneller IGBT-Umrichter aufweist (Effizienz),

Dies soll bei Einhaltung einschlägiger Normen zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) erfolgen.

Die Arbeit gliedert sich wie folgt:

Im Kapitel 2 werden die mit den pulsformigen Ausgangsspannungen eines Antriebsstromrichters verbundenen Probleme erläutert, und eine Lösung vorgestellt.

Im Kapitel 3 werden sowohl die physikalischen Eigenschaften des Siliziumkarbids, als auch verschiedene Leistungshalbleiterbauelemente dargestellt und untersucht.

Das Kapitel 4 widmet sich der gründlichen Analyse des Siliziumkarbid Junction Field Effect Transistors (SiC-JFET), welcher im realisierten Umrichter eingesetzt wird. Die entwickelte Ansteuerschaltung und die Auslegung eines Antriebsstromrichters werden hier ebenfalls beschrieben.

Das Kapitel 5 erklärt die Topologie und den Aufbau des eingesetzten rückspeisefähigen PWM-Stromrichters mit netzfrequent geschaltetem aktiven Gleichrichter.

Das Kapitel 6 beschreibt das Netz- und Motorfilter des Umrichters eingehend, von der Festlegung der Filterkennlinien für Gegen- und Gleichtaktsystem, über die Auslegung der Filter bis zum Aufbau der induktiven Bauelemente.

Zusätzlich zu den bereits dargestellten Messungen werden im Kapitel 7 die wichtigsten Ergebnisse, u. a. die EMV-Messungen, präsentiert.

Kapitel 2

Problematik der Ausgangsspannungen eines Pulswechselrichters

2.1 Betriebsweise eines Pulswechselrichters

2.1.1 Prinzip eines Pulswechselrichters

Um elektrische Maschinen nach den Wünschen des Anwenders anzutreiben, müssen bestimmte elektrische Ströme durch ihre Wicklungen fließen, die das Drehmoment und damit das dynamische Betriebsverhalten des Motors beeinflussen.

Die Steuerung des Stromes erfolgt in der Regel mittels Leistungselektronik in Stromrichtern. Diese bestehen aus schaltbaren Halbleiterbauelementen, auch Leistungsschalter genannt, wie z.B. "Insulated Gate Bipolar Transistors" (IGBTs). Da hier die Minimierung der Verluste eine wesentliche Rolle spielt, werden die Leistungsschalter nur im gesperrten oder gesättigten leitenden Zustand verwendet. Aufgrund der induktiven Impedanz von Motorwicklungen, werden oberfrequente

Anteile der Eingangsspannung gefiltert und entsteht ein Stromverlauf, dessen Frequenz der Grundschiwingung der Eingangsspannung entspricht.

$$|Z_L| = \frac{|u|}{|i|} = \omega L \quad (2-1)$$

Aus der Gleichung der Impedanz eines Induktiven Bauelementes (2-1) ist zu erkennen, dass je höher die Frequenz der Eingangsspannung ist, desto stärker wird der Strom bedämpft. Eine Erhöhung der Frequenz von Spannungs-Oberschwingungen ergibt somit einen weniger verzerrten Stromverlauf.

Diese Eigenschaft kann in selbstgeführten Stromrichtern zu Nutze gemacht werden, weil die Schaltfrequenz der Leistungshalbleiterbauelemente unabhängig von der Frequenz des elektrischen Versorgungsnetzes eingestellt werden kann. So entsteht ein "Pulswechselrichter", der durch das beliebige Schalten der Transistoren pulsformige Ausgangsspannungen liefert.

2.1.2 Ausgangsspannungen eines Pulswechselrichters

Hier wird von einem Spannungszwischenkreis-Pulswechselrichter (VSI) mit Leistungstransistoren ausgegangen. Die konstante Zwischenkreisspannung wird in eine pulsformige Wechselspannung umgewandelt.

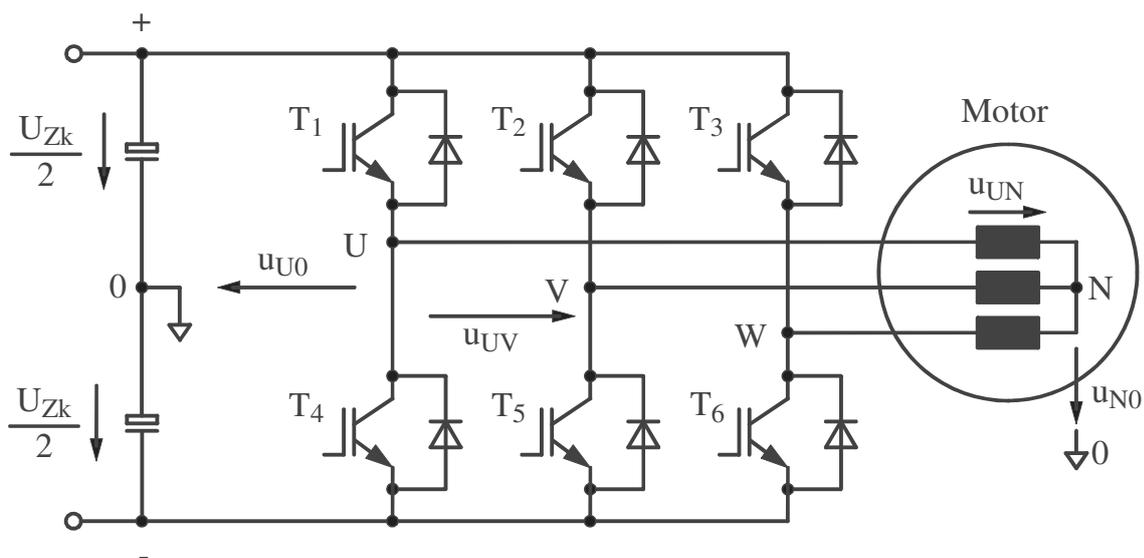


Bild 2.1 Dreiphasiger Pulswechselrichter.

Ein dreiphasiger Pulswechselrichter besteht aus drei Halbbrücken (Bild 2.1), deren Mittelpunkte (Klemmen U, V und W), durch das abwechselnde Schalten der Transistoren, pulsformige Spannungen gegenüber dem Zwischenkreis aufweisen. Im Bild 2.2 wird die Mittelpunkt-Ausgangsspannung u_{U0} bei Sinus-Dreieck Modulation dargestellt. T_s ist die Schaltperiode und T_{ein1} die Einschaltzeit des Transistors T1. Die Aussteuerung der Transistoren sorgt dafür, dass der Mittelwert von u_{U0} innerhalb jeder Schaltperiode die Sollwertspannung stufenweise folgt. An welcher Stelle der Mittelwert den Sollwert trifft, oder welche Harmonischen im Spannungsverlauf entstehen, hängt vom gewählten Ansteuerungsverfahren der Pulsweitenmodulation (PWM) ab [Hol1, Jen1, Pie1, Moh1, Hol2], z.B. Sinus-Dreieck oder Supersinus mit analoger oder digitaler Implementierung, oder Raumzeigermodulation, etc.

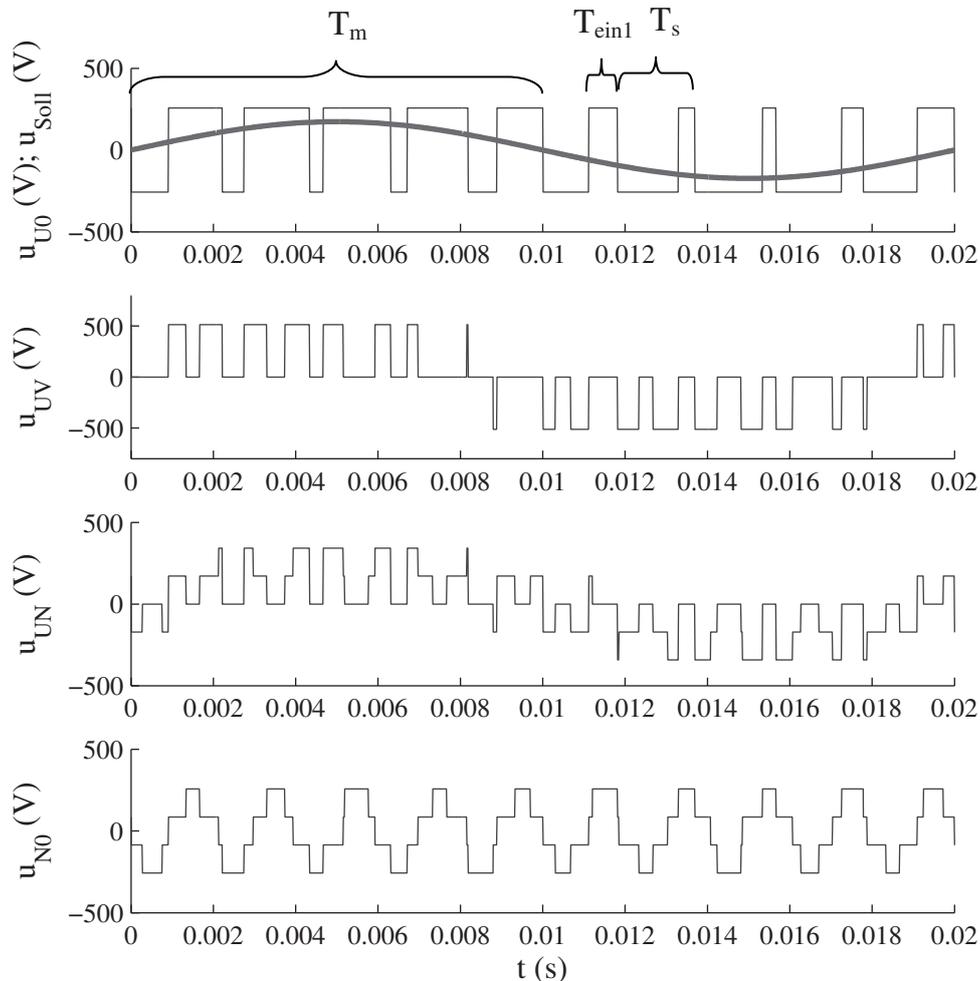


Bild 2.2 Spannungsverläufe im dreiphasigen Pulswechselrichter.
 $U_{Zk} = 513$ (V).

Die Subtraktion zweier Ausgangsspannungen bildet eine verkettete Ausgangsspannung mit den möglichen Spannungswerten U_{Zk} , 0 V oder $-U_{Zk}$ wie z. B. u_{UV} im Bild 2.2.

Die Motor-Strangspannungen, wie z.B. u_{UN} , resultieren aus der Verteilung der verketteten Spannungen in einem aus den symmetrischen Impedanzen des Motors bestehenden Spannungsteiler. Bei dem betrachteten dreiphasigen Zweipunkt-Wechselrichter gibt es acht mögliche Zustände (Kombinationen der zwei möglichen Mittelpunktspannungen bei drei Halbbrücken: $2^3 = 8$). Zwei Beispiele sind im Bild 2.3 zu sehen. Die möglichen Spannungswerte an einem Motorstrang sind $(2/3)U_{Zk}$, $(1/3)U_{Zk}$, 0 V, $-(1/3)U_{Zk}$, $-(2/3)U_{Zk}$.

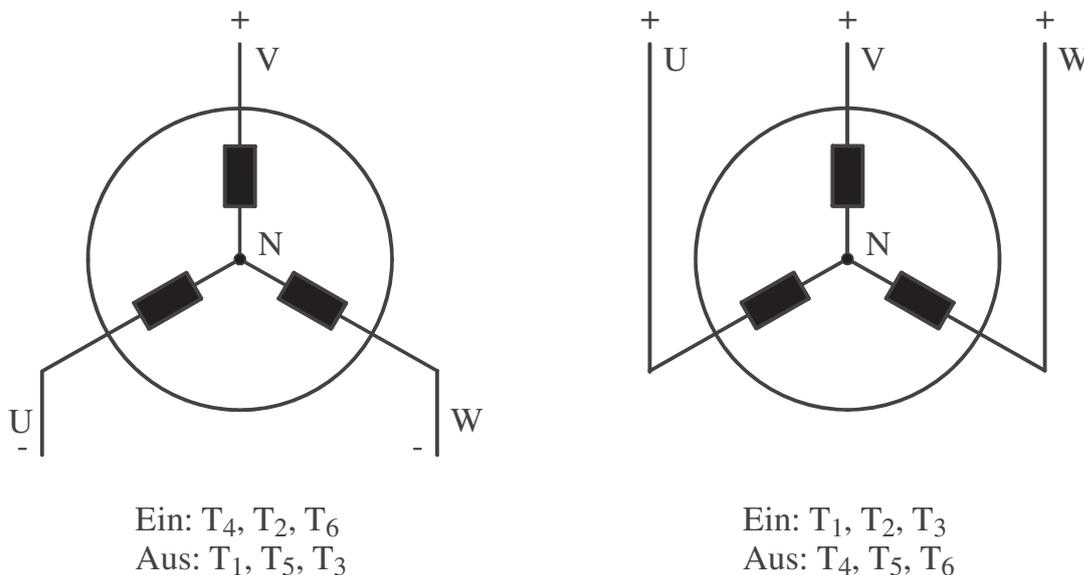


Bild 2.3 Last bei zwei verschiedenen Schaltzuständen.

Wird es nur die Grundschiwingung der Mittelpunkt-Ausgangsspannungen (z.B. u_{U0} im Bild 2.2 berücksichtigt, erhält man eine symmetrische Anregung und damit eine Sternpunktspannung $u_{N0} = 0$ V bei symmetrischer Last.

Bei Berücksichtigung der Harmonischen der Mittelpunkt-Ausgangsspannungen ist jedoch $u_{N0} \neq 0$ V. Das wird ersichtlich, wenn die Subtraktion von (2-2) gebildet wird. Dann entsteht ein schaltfrequenter Verlauf wie u_{N0} im Bild 2.2.

$$u_{N0} = u_{X0} - u_{XN} \quad , \text{ bei } X = U, V \text{ oder } W \quad (2-2)$$

Bei jeder einzelnen Frequenz f kann der dreiphasige Wechselrichter und die Last mit dem vereinfachten Ersatzschaltbild vom Bild 2.4 dargestellt werden.

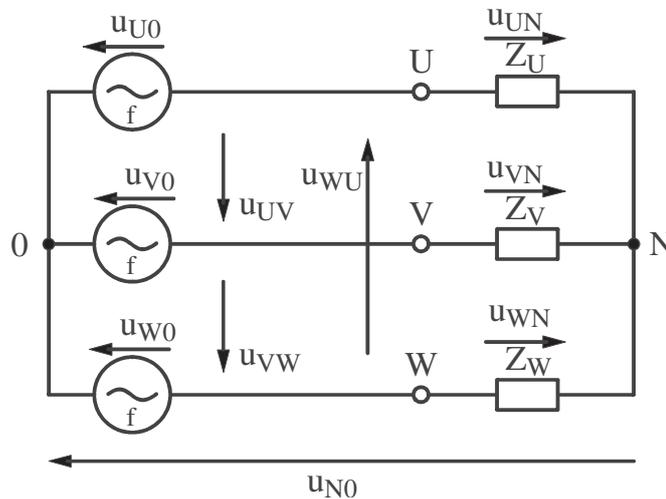


Bild 2.4 Ersatzschaltbild des dreiphasigen Wechselrichters mit Last.

Alle Spannungen mit Amplituden und Phasenlagen können im entsprechenden Gleichungssystem bestimmt werden, wenn folgende Größen bekannt sind:

- a) Die drei Mittelpunkt-Ausgangsspannungen und das Verhältnis der Lastimpedanzen ($u_{U0}, u_{V0}, u_{W0}, Z_U:Z_V:Z_W$).
- oder
- b) Zwei Mittelpunkt-Ausgangsspannungen, die Sternpunktspannung und das Verhältnis der Lastimpedanzen. (z.B. $u_{U0}, u_{V0}, u_{N0}, Z_U:Z_V:Z_W$)
- oder
- c) Zwei Strangspannungen, die Sternpunktspannung und das Verhältnis der Lastimpedanzen. (z.B. $u_{UN}, u_{VN}, u_{N0}, Z_U:Z_V:Z_W$)
- oder
- d) Zwei verkettete Spannungen, die Sternpunktspannung und das Verhältnis der Lastimpedanzen. (z.B. $u_{UV}, u_{VW}, u_{N0}, Z_U:Z_V:Z_W$)

Bei symmetrischer Last, wie in der vorliegenden Arbeit der Fall ist, gilt (2-3) [Jen1].

$$\overline{u_{U,V,W}} = \frac{1}{3}(u_{U0} + u_{V0} + u_{W0}) = u_{N0} \quad (2-3)$$