

**FREQUENZUMRICHTER FÜR DIE MODERNEN DREHSTROMANTRIEBE:  
SIMULATIVER VERGLEICH DER HALBLEITERVERLUSTE**

**Einführung.** Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis (U-Umrichter) haben in den letzten Jahren sehr große Verbreitung auf dem Gebiet der drehzahlveränderbaren Antriebe erlangt. Zur Einprägung der Gleichspannung  $U_{DC}$  enthält der U-Umrichter im Zwischenkreis einen Kondensator als Speicherelement. Wegen der steigenden Anforderungen an die Netzqualität gewinnen zunehmend auch Pulsstromrichter auf der Netzseite an Bedeutung, vgl. Bild 1.

Der aufwendige Zwischenkreiskondensator wird allerdings oft als Hauptnachteil dieses Umrichters angesehen, da er viel Raum beansprucht und sich negativ auf die Zuverlässigkeit des Umrichters auswirkt. Eine Alternative dazu kann der so genannte Zweistufige Direktumrichter sein, vgl. Bild 2.

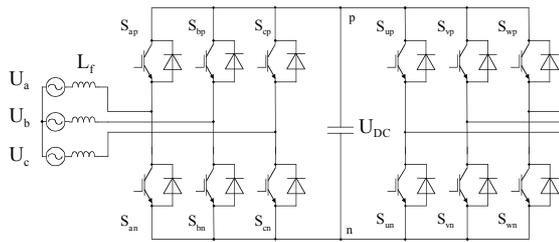


Bild 1: U-Umrichter mit Pulsstromrichtern

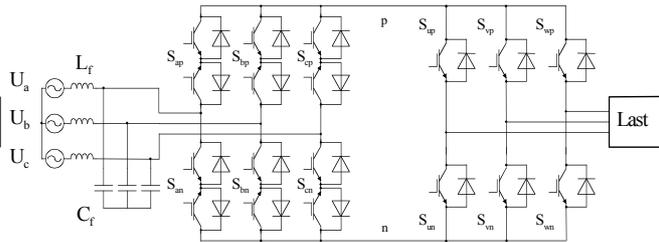


Bild 2: Zweistufige Direktumrichter

Der Zweistufige Direktumrichter (ZDU) besteht aus zwei Stufen: Gleichrichter (GR) und Wechselrichter (WR), die über einen speicherlosen Zwischenkreis (ZK) miteinander verbunden sind, vgl. Bild 2. Wegen der fehlenden Energie-zwischenspeicherung kann dieser Umrichtertyp der Familie der Direktumrichter zugeordnet werden.

**Zielsetzung der Forschung.** Das Ziel des Beitrages ist der Vergleich dieser modernen Stellglieder für die Drehstromantriebe bezüglich deren Halbleiterverluste. Für diesen Zweck wurden zwei Simulationsmodelle in Matlab/Simulink entworfen, wobei für die Nachbildung der Halbleiterbauelemente die Toolbox Plecs eingesetzt wurde.

**Untersuchungsmaterialien.** Um den Vergleich der beiden Topologien durchzuführen, müssen sämtliche Randbedingungen angepasst werden.

Jeder Umrichter wird mit einem symmetrischen 3-phasigen 400 V/50 Hz Netz verbunden. Auf der Lastseite wird eine 22 kW Asynchronmaschine angeschlossen. Für die bessere Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse, wird diese allerdings durch eine äquivalente passive RL-Last ersetzt, deren Werte in Abhängigkeit von der Grundschwingungsfrequenz und Amplitude (~ Modulationsgrad) der Ausgangsspannung leicht nachgeführt werden können.

Die maximale verkettete Ausgangsspannung des ZDU beträgt 0.866 seiner Eingangsspannung [2], d.h.

$$U_{2N} = \frac{\sqrt{3}}{2} (1 - \Delta m_{\min}) \cdot U_{1N} \approx 330 \text{ V}, \tag{1}$$

wobei  $\Delta m_{\min} = 0.05$  – eine dynamische Regelreserve ist.

Der Nennausgangsstrom des ZDU kann mit der folgenden Gleichung gefunden werden

$$I_{2N} = \frac{P_{2N,el}}{\sqrt{3} \cdot U_{2N} \cdot \cos \varphi_2} \approx 50 \text{ A}. \tag{2}$$

Für den Fall des U-Umrichters gilt

$$U_{2N} = (1 - \Delta m_{\min}) \times \frac{\hat{U}_{1N}}{\sqrt{2}} \gg 400 \text{ V}, \quad I_{2N} = \frac{P_{2N,el}}{\sqrt{3} \cdot U_{2N} \cdot \cos \varphi_2} \approx 41 \text{ A}. \tag{3}$$

Es ist zu sehen, dass wegen der reduzierten Ausgangsspannung des ZDU sein Ausgangsstrom um ca. 22 % größer als beim U-Umrichter sein muss, um bei der Vollaussteuerung die gleiche Leistung wie der U-Umrichter zu erreichen. Dies wird zu den höheren Leitverlusten im ZDU führen.

Um möglichst günstige und platzsparende Stellglieder zu entwerfen, müssen sämtliche reaktive Bauelemente auf ihre Größe hin optimiert werden. Für die Dimensionierung des Netzfilters des ZDU wurde eine Methode aus [1] eingesetzt. Danach wurde das entworfene Filter auf die Einhaltung der Grenzwerte der Stromüberschwingungen nach [4] kontrolliert.

Bei dem U-Umrichter hängt die Dimensionierung des Zwischenkreiskondensators mit der Dimensionierung der Eingangsinduktivität zusammen [3]. Für die Simulation wurde die ZK-Spannung von 600 V ausgewählt und zur Verifizierung der dimensionierten Eingangsdruckdrossel wurde ebenfalls die oben erwähnte Norm verwendet.

Alle Ergebnisse der Dimensionierung sind in der Tabelle 1 zusammengefasst. Das Volumen der reaktiven Bauelemente in einem U-Umrichter ist ca. 2.5 Mal größer als in einem ZDU, was den Bau von kompakten Stellgliedern verspricht.

Für einen einschlägigen Vergleich sind auch die ähnlichen Modulationstechniken (asymmetrische Raumzeigermodulation) eingesetzt worden. Für die Kommutierung des GR im ZDU wurde 4-Schritt-Kommutierung verwendet. Eine Verriegelungszeit von  $T_d = 1 \mu\text{s}$  sorgt für eine kurzschlussfreie Kommutierung bei den beiden Umrüchtern. Die Steueralgorithmen wurden in Simulink in einer S-Funktion implementiert.

Zur Halbleitersimulation wurde die Toolbox Plecs eingesetzt. Die gleichen Halbbrückenmodule der Fa. Semikron SKM200GB128 (1200 V, 205 A) wurden für die beiden Umrüchertopologien ausgewählt. Dabei wurden die Daten aus dem Datenblatt, wie z. B. die Verlustenergie während der Ein- und Abschaltzeit, Kollektor-Emitter-Spannung in Abhängigkeit von Kollektorstrom, usw., in das IGBT- bzw. Dioden-Modell eingetragen. Alle Halbleiterverluste waren bei einer konstanten Sperrschichttemperatur  $T_j = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  ermittelt.

Die Halbleiterverluste der beiden Umrüchter wurden in Abhängigkeit von der Aussteuerung  $m$ , dem Leistungsfaktor der Last  $\varphi_2$ , der Grundschiwingung der Ausgangsfrequenz  $f_2$ , dem Effektivwert des Ausgangsstromes und der Schaltfrequenz untersucht. Aus Platzgründen werden allerdings hier nur ausgewählte Ergebnisse dargestellt, die übrigen werden im Rahmen der Konferenz präsentiert.

Tabelle 1: Reaktive Bauelemente ZDU / U-UR

	ZDU	U-UR
Netzfilter	L=1 mH	L=4.4 mH
	C=24 $\mu\text{F}$	
	R=20 Ohm	
ZK-Kap.	-	C=1700 $\mu\text{F}$
$\Sigma$ Volumen	8926,2 $\text{cm}^3$	22051 $\text{cm}^3$

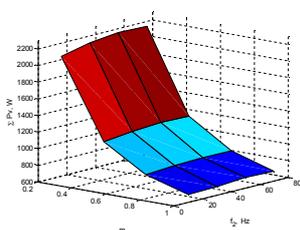


Bild 3: ZDU  $P_v(m, f_2)$ , bei  $P_2 = \text{const}$

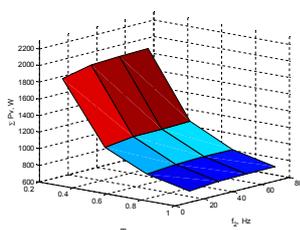


Bild 4: U-Umrichter  $P_v(m, f_2)$ , bei  $P_2 = \text{const}$

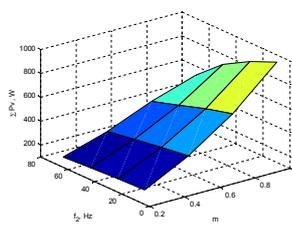


Bild 5: ZDU  $P_v(m, f_2)$ , bei  $P_2 = \text{variabel}$

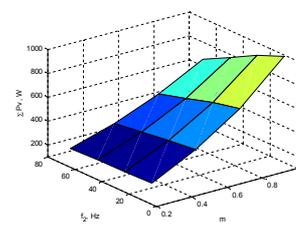


Bild 6: U-Umrichter  $P_v(m, f_2)$ , bei  $P_2 = \text{variabel}$

In den Bildern 3 und 4 sind die Gesamtverluste für ZDU und U-Umrichter in Abhängigkeit von der  $f_2$  und  $m$  bei  $P_2 = \text{const}$  dargestellt. In diesem, für die Antriebstechnik eher untypischen Fall des Dauerbetriebs, zeigt sich der ZDU erwartungsgemäß schlechter, als der U-Umrichter, da wegen des schlechteren Übersetzungsverhältnisses muss der Ausgangsstrom zwangsläufig größer sein, und das spiegelt sich in den höheren Leitverlusten nieder.

Ganz anders sieht die Situation aus, wenn die Lastwiderstände und Induktivitäten nicht nachgeführt werden, vgl. Bild 5 und 6. In diesem Fall zeigt der ZDU in allen Bereichen eine bessere Effizienz als der U-Umrichter.

Die detaillierte Verteilung der Verluste kann man dem Bild 7 entnehmen. Beim U-Umrichter dominieren die Schaltverluste sowohl im WR als auch im GR. Im ZDU heben sich vor allem die Leitverluste hervor.

Um die Effizienz des ZDU zu steigern, gibt es die Möglichkeit der stromlosen Kommutierung (ZCS). Einen weiteren Ansatz bietet die Implementierung der so genannten  $U_{\text{DC,min}}$ -Modulation für den GR, um die Schaltverluste im WR im Bereich der Teilleistung zu reduzieren [2].

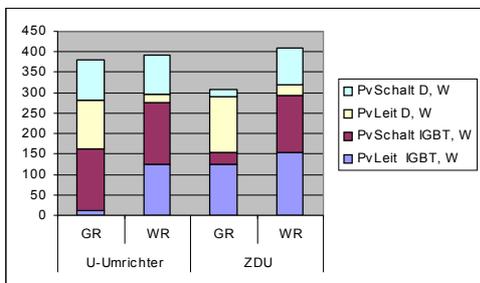


Bild 7: Leistungsverluste in den Halbleitern,  $P_{2,el} = 23,8 \text{ kW}$ ,  $\cos \varphi = 0,84$ ,  $f_2 = 50 \text{ Hz}$

**Schlussfolgerung.** Der Zweistufige Direktumrichter zeigt vergleichbare Effizienz mit dem U-Umrichter, bietet allerdings mehr Optimierungsmöglichkeiten für die weitere Reduzierung der Halbleiterverluste. Seine Topologie erlaubt es, die Stellglieder für die elektrischen Antriebe kompakt und zuverlässig bauen.

#### Literaturverzeichnis.

1. Zwimpfer, P.M.: Modulationsverfahren für einen zweistufigen MC zur Speisung von Drehstromantrieben. Diss., ETH Zürich, 2002
2. Round, S.; Schafmeister, F.; Heldwein, M.; Pereira, E.; Serpa, L.; Kolar, J.: Comparison of Performance and Realization Effort of a Very Sparse Matrix Converter to a Voltage DC Link PWM Inverter with Active Front End. IEEJ Trans. IA, Vol. 126, No. 5, pp. 578-588 (2006)
3. Carlsson, A., "The back-to-back converter", MThesis; Lund Institute of Technology; Lund, Sweden; 1998
4. IEC 61000-3-12 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current  $> 16 \text{ A}$  and  $\leq 75 \text{ A}$  per phase, 2004