

# **PSPICE-SIMULATION EINES DREIPUNKTWECHSEL- RICHTERS MIT EINER SYNCHRONMASCHINE ALS LAST**

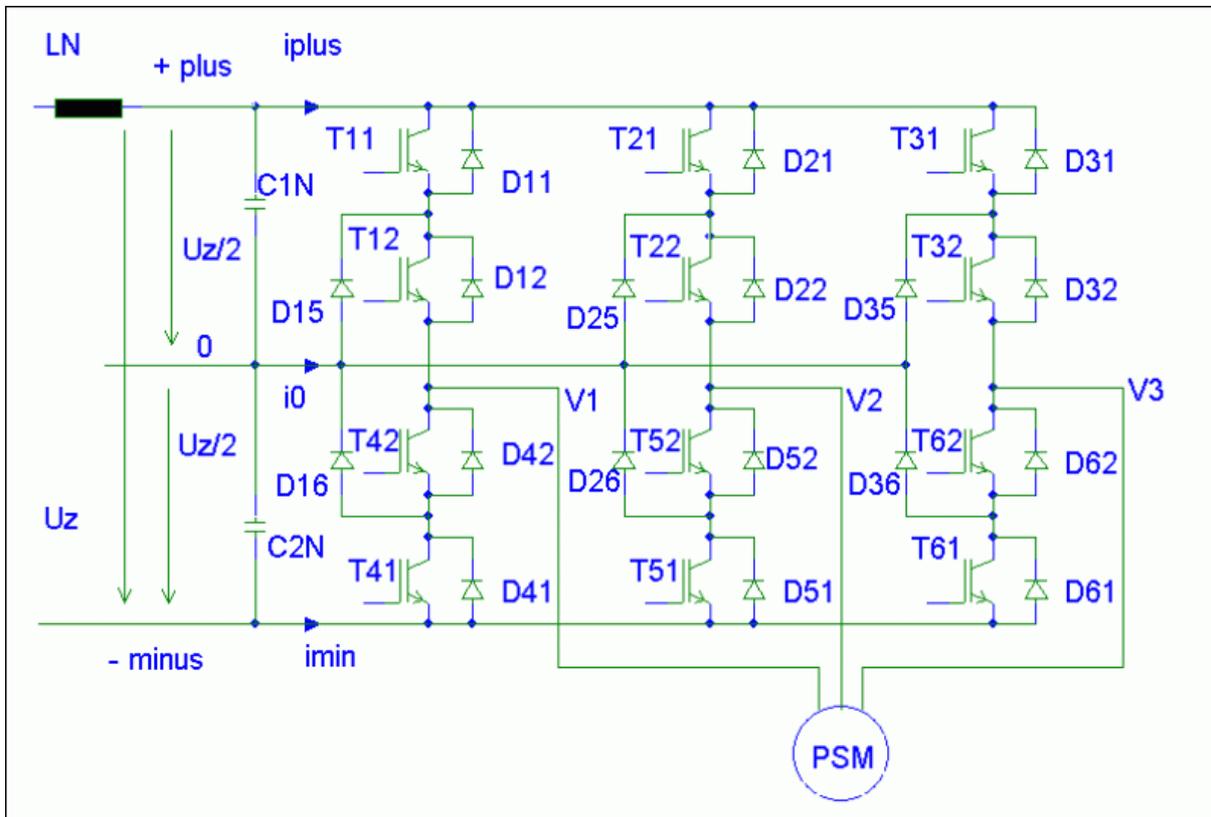
**J. Poschadel**

## **1 DREIPUNKTWECHSELRICHTER**

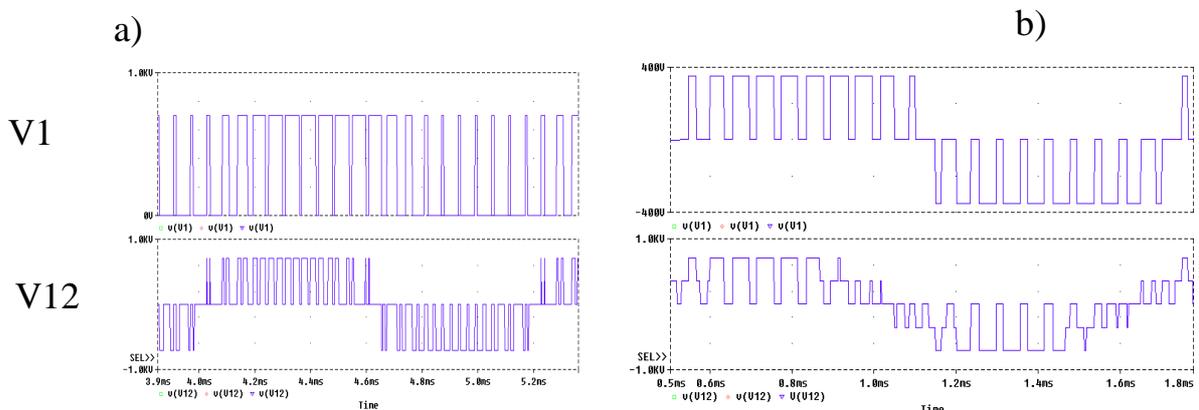
In der Klasse der Stromrichter mit Gleichspannungszwischenkreis und Pulsbreitenmodulation findet meist der sogenannte Zweipunktwechselrichter Verwendung, bei dem sechs Halbleiterschalter und die antiparallelen Freilaufdioden als Drehstrombrücke angeordnet sind. Die maximale Sperrspannung liegt kurz nach dem Sperren an den Schaltern, wenn die Zwischenkreisspannung und zusätzlich durch Streuinduktivitäten im Stromrichter verursachte Spannungsüberhöhungen an ihnen auftreten. In Mittelspannungsnetzen können diese Spannungsspitzen so groß werden, daß sie die maximal zulässigen Sperrspannungen heute verfügbarer IGBT's übersteigen. Eine Reihenschaltung von Halbleitern innerhalb eines Wechselrichterzweiges, bei der schon geringste Unterschiede in den Schaltzeiten zu unsymmetrischen Spannungsaufteilungen führen, kann vermieden werden, wenn sogenannte Mehrpunktwechselrichter eingesetzt werden. Zu diesen Stromrichtern gehört z.B. der in **Abb. 1** dargestellte Dreipunktwechselrichter. Bei ihm ist im Gegensatz zum Zweipunktwechselrichter der Zwischenkreiskondensator zweigeteilt und der Mittelpunkt über jeweils zwei Dioden pro Strang mit den Mittelpunkten der in Reihe geschalteten Halbleiterschalter verbunden, so daß an den Ausgangsklemmen V1, V2, V3 des Wechselrichters zusätzlich zu den beiden Potentialen  $+U_z/2$  (Plus) und  $-U_z/2$  (Minus) auch das Potential Null auftreten kann.

Vom Bauelementeaufwand her unterscheidet sich der Dreipunktwechselrichter vom Zweipunktwechselrichter mit Reihenschaltung nur durch sechs zusätzliche Dioden. Er bietet dafür aber eine Reihe von Vorteilen. Alle Halbleiter werden maximal mit der Sperrspannung  $U_z/2$  plus Spannungsüberhöhung belastet. Während beim Zweipunktwechselrichter die geschaltete Spannung nur zwischen den maximalen Amplituden (  $+U_z$  u. 0 ) springen kann, z.B. V1 in **Abb. 2a**, erlaubt das zusätzliche Potential Null die Modulation mit einer Zwischenstufe (**Abb. 2b**). Die verkettete Spannung V12 weist daher als Treppenkurve beim Dreipunktwechselrichter eine deutlich bessere Annäherung an die ideale Sinusform auf als beim Zweipunktwechselrichter, bei dem man die sinusförmige Modulation des Pulsmusters nur erahnen kann. Wegen der

geringeren zu schaltenden Spannungshübe reduzieren sich die Schaltverluste im Wechselrichter und durch die bessere Anpassung an die Sinusform werden die höheren Harmonischen stark vermindert, so daß die Stromüberschwingungen reduziert werden und damit die Oberschwingungsverluste in der Maschine.

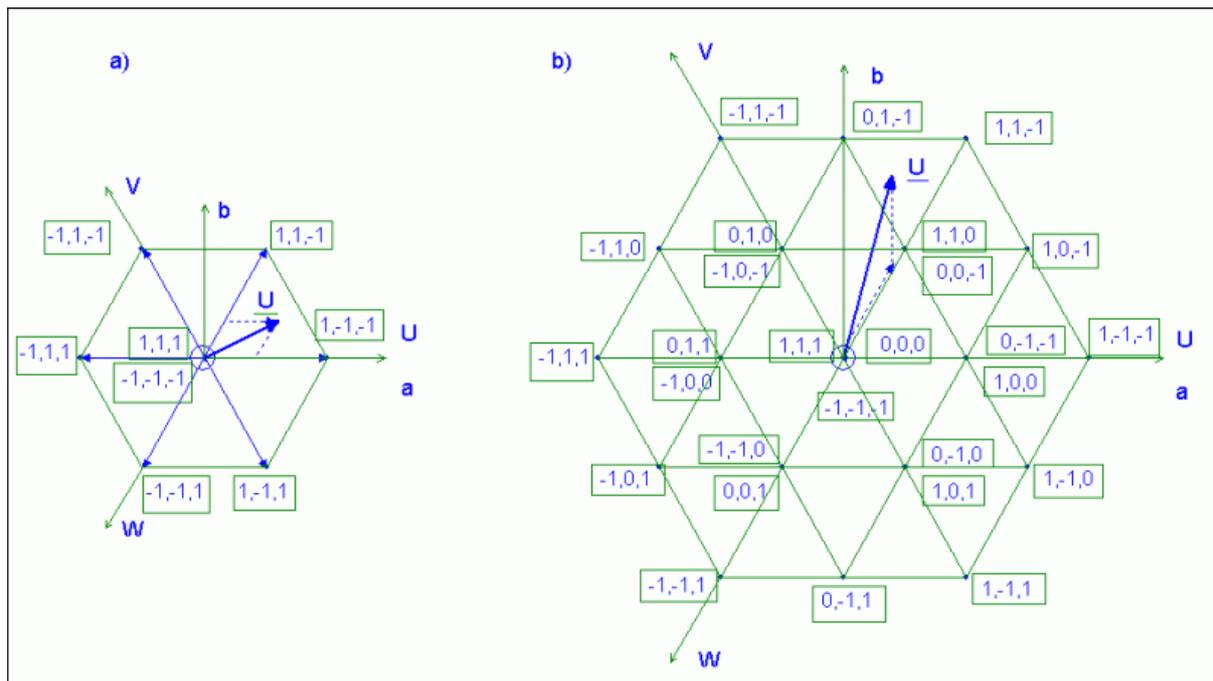


**Abb.1:** Permanentmagneterregte Synchronmaschine am Dreipunktwechselrichter



**Abb. 2:** Ausgangsspannungen der unterschiedlichen Wechselrichter  
 a) Zweipunktwechselrichter      b) Dreipunktwechselrichter

Wie oben gesagt, können die drei Ausgangspotentiale des Zweipunktwechselrichters jeweils zwei verschiedene Werte annehmen. Damit ergeben sich  $2^3 = 8$  unterschiedliche Schaltzustände. Diesen Schaltzuständen kann jeweils ein Spannungsraumzeiger zugeordnet werden. **Abb. 3a** zeigt das Zeigerdiagramm aller durch den Pulsstromrichter generierten Spannungsraumzeiger. Die Bezeichnungen der Zeiger ergeben sich aus dem jeweiligen Schaltzustand.



**Abb. 3:** Zeigerdiagramme der Stromrichterausgangsspannungen  
 a) Zweipunktwechselrichter    b) Dreipunktwechselrichter

Der Schaltzustand wird durch eine Kombination von drei Symbolen (drei Stränge) charakterisiert. Liegt an dem Ausgang eines Stranges die positive Klemme der Zwischenkreisspannung, so wird der Zustand mit "1" gekennzeichnet. Entsprechend wird die Verbindung mit der negativen Klemme mit "-1" beschrieben. Zwei der acht geschalteten Spannungen besitzen die Amplitude Null.

Der Dreipunktwechselrichter erlaubt wegen der drei möglichen Ausgangspotentiale  $3^3 = 27$  verschiedene Schaltzustände. Das zugehörige Raumzeigerdiagramm, es gilt für die gegenüber dem Zweipunktwechselrichter doppelte Zwischenkreisspannung, ist in **Abb. 3b** dargestellt. Jeder Punkt des äußeren Sechsecks repräsentiert einen, die Punkte des inneren Sechsecks zwei und der Mittelpunkt drei unterschiedliche Schaltzustände des Pulswechselrichters. Das Nullpotential wurde dabei durch "0" berücksichtigt. Insgesamt sind den

Schaltzuständen 19 unterschiedliche Spannungswerte zugeordnet. Mit einem geeigneten Modulationsverfahren, z.B. der Raumzeigermodulation, können mit diesen Werten Spannungsraumzeiger  $\underline{U}$  innerhalb der gesamten Modulationsfläche eingestellt werden.

## 2 STROMREGELUNG IN POLLAGEKOORDINATEN

Die PSpice-Simulationsschaltung für die Speisung einer permanentmagnet-erregten Synchronmaschine mit Spannungen, wie sie von einem Dreipunktwechselrichter erzeugt werden, ist in **Abb. 4** dargestellt.

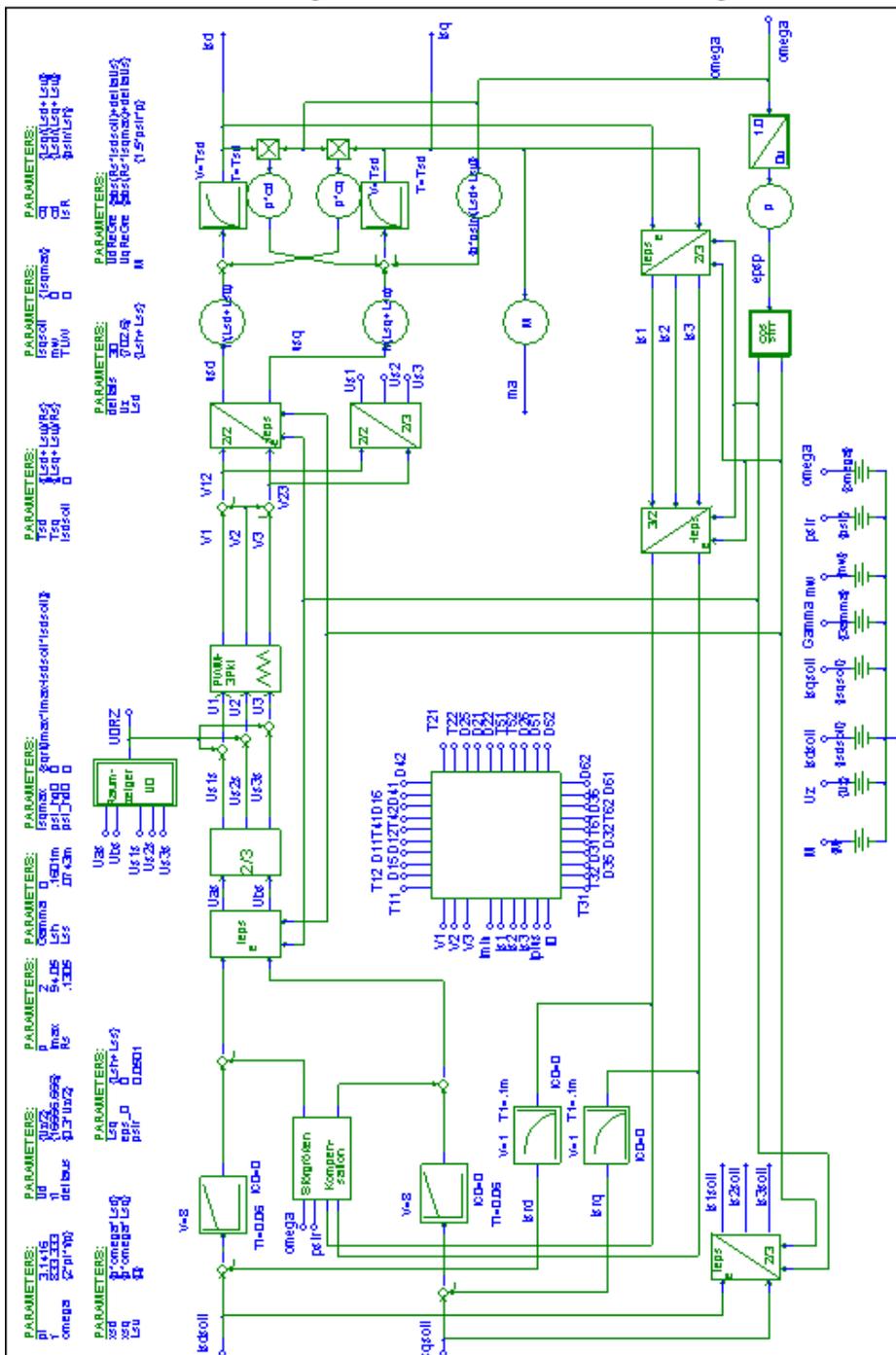


Abb. 4: Struktur der Stromregelung in Pollagekoordinaten

Als Sollwerte werden die d- und q-Komponenten  $i_{dsoll}$ ,  $i_{qsoll}$  des Ständerstromes vorgegeben und mit den Istwerten, die in der unteren Bildhälfte aus den drei Strangströmen, den Ausgangsgrößen des Wechselrichters, die bei der praktischen Realisierung direkt gemessen werden können, durch eine Koordinatentransformation gewonnen werden, verglichen. Die Differenzen der Signale gelangen auf PI-Regler und stehen nach dem Durchlaufen von jeweils zwei Begrenzungsgliedern als Sollwerte  $u_{ds}$ ,  $u_{qs}$  für die Spannungen in Längs- und Querachse der Maschine zur Verfügung.

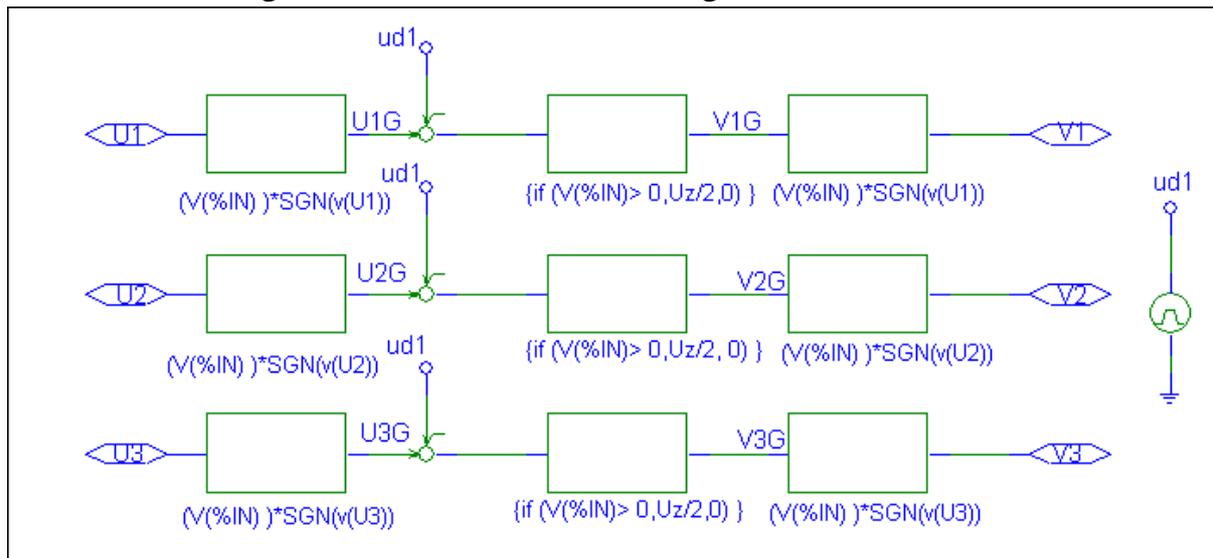
Zwischen den Begrenzungsgliedern ist eine Störgrößenaufschaltung wirksam. Darin werden die in der Maschine rotatorisch induzierten Gegenspannungen nachgebildet und invers zu den Reglerausgangsgrößen addiert. Auf diese Weise lassen sich die beiden Achsen der Maschine vollständig entkoppeln.

Nach den Begrenzern erfolgt eine Transformation in die Raumzeigerkoordinaten  $U_{as}$  und  $U_{bs}$  und anschließend eine Phasenaufspaltung in die Sollwerte für die Strangspannungen  $U_{s1s}$ ,  $U_{s2s}$  und  $U_{s3s}$ . Zu diesen wird eine Nullspannung  $U_{0RZ}$  (Raumzeigermodulation) mit der dreifachen Grundschwingungsfrequenz addiert. Diese kann bei freiem Sternpunkt der Maschine keine Ströme ausbilden, erlaubt aber eine um den Faktor  $2/\sqrt{3}$  höhere Ausnutzung des Wechselrichters.

Im Pulsbreitenmodulator (PWM-3Pkt) werden aus den kontinuierlichen Signalen  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  die Schaltsignale  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  gewonnen, die bei einer praktischen Realisierung der Anordnung als Ansteuersignale für die Halbleiter des Wechselrichters genutzt werden. Für die Simulation können sie jedoch direkt zur Speisung der Maschine herangezogen werden, denn der simulierte Pulsbreitenmodulator kann mit den Spannungswerten des Leistungskreises arbeiten. Nach dem Pulsbreitenmodulator werden durch Phasenreduktion und eine anschließende Transformation die Spannungen, die an der d- und q-Achse liegen, gewonnen. Die beiden Achsen der Maschine, die in den Längszweigen Verzögerungsglieder enthalten, sind über die rotatorisch induzierten Spannungen miteinander verkoppelt. Diese Gegenkopplung, die die Regelung sehr erschwert, wird durch die schon oben erwähnte Störgrößenaufschaltung beseitigt. Die Modulationen und die Demodulationen ( $a,b \Rightarrow d,q$  bzw.  $d,q \Rightarrow a,b$ ) werden durch den Drehwinkel  $\epsilon_{psp}$ , der rechts unten in der **Abb. 4** durch Integration aus der vorgegebenen Winkelgeschwindigkeit gewonnen wird, bzw. durch  $\cos(\epsilon_{psp})$  und  $\sin(\epsilon_{psp})$  gesteuert.

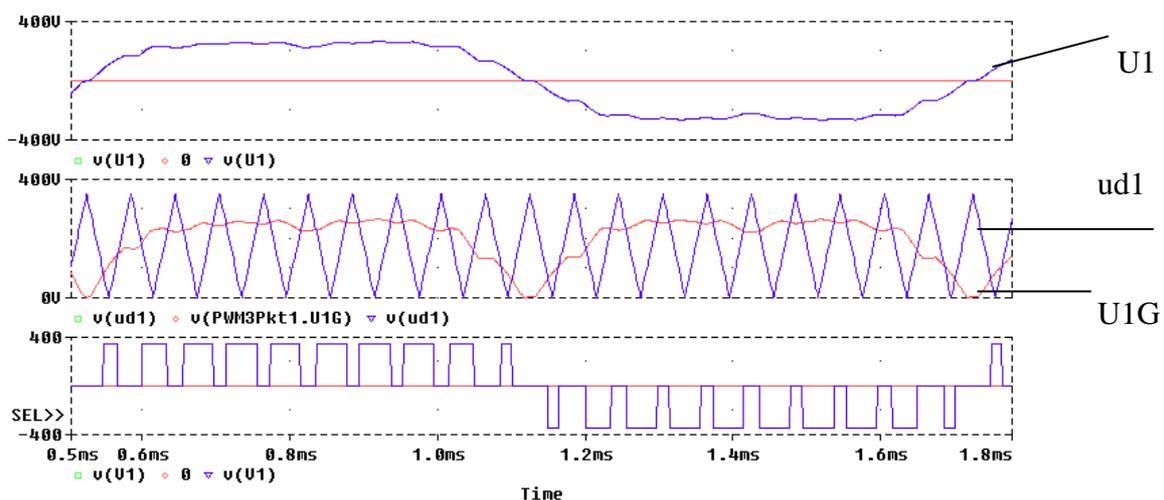
## 2.1 Pulsbreitenmodulator

PSpice stellt ABM-Bausteine (Analog Behavioral Modeling) bereit, mit denen logische Funktionen berechnet werden können. Sie arbeiten auf einem beliebigen Leistungsniveau und sind nicht wie die analogen und die digitalen Bausteine an bestimmte Spannungspegel gebunden. Sie eignen sich daher für die Nachbildung des Pulsbreitenmodulators und, wie später gezeigt wird, auch für die Ermittlung der Wechselrichterbelastungen.



**Abb. 5:** Pulsbreitenmodulator für Dreipunktwechselrichter

Am Beispiel der Spannungen für den Strang1 soll die Funktionsweise des Modulators (**Abb. 5**) erläutert werden. Die Eingangsspannung  $U_1$  wird über die Vorzeichenfunktion  $\text{SGN}(v(U_1))$  gleichgerichtet. Von der Ausgangsspannung des ersten ABM-Bausteines wird eine dreieckförmige Hilfsspannung  $ud_1$ , deren Modulationsperiodendauer klein ist gegenüber der Periodendauer der Grundschwingung, abgezogen. Der Spannungsdifferenz werden im nächsten Baustein bei positiven Werten das Niveau  $U_z/2$  ( $U_z = \text{Zwischenkreisspannung}$ ) und bei



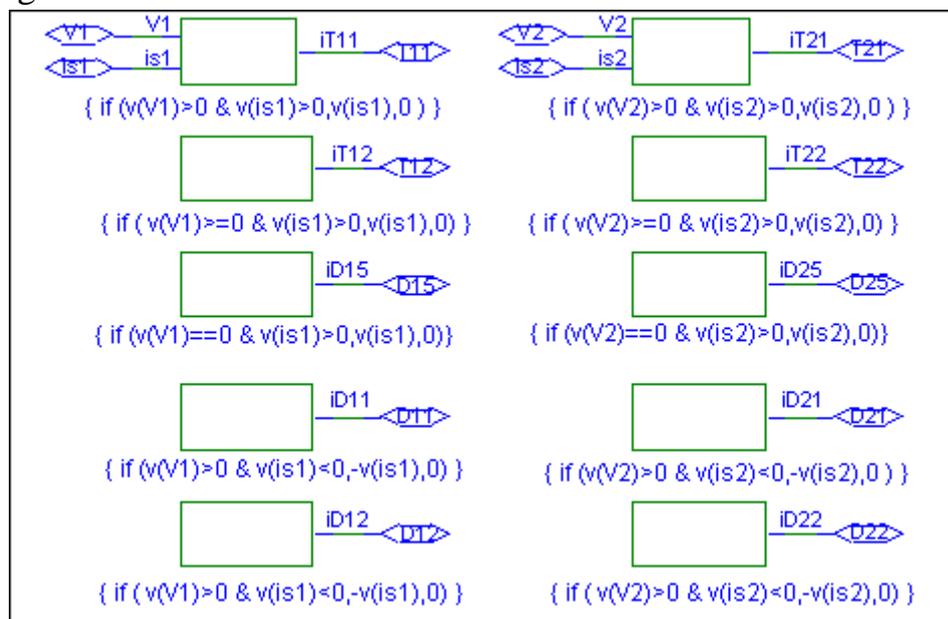
**Abb. 6:** Signalverläufe im Pulsbreitenmodulator

Werten  $\leq 0$  das Niveau "0" zugeordnet. Schließlich wird im dritten Baustein die modulierte, positive Pulsfolge über die Signum-Funktion in eine gepulste Wechselspannung, das Schaltsignal  $V_1$ , umgewandelt. Die im Modulator auftretenden Signale enthält **Abb. 6**.

## 2.2 Belastung der Halbleiter im Wechselrichter

$V_1$

Der Wechselrichter ist in der Simulationsschaltung (**Abb. 4**) nicht e... Die Belastung der einzelnen Ventile aber kann über ABM-Bausteine bestimmt werden. In **Abb. 7** ist dies für die oberen Schalter der Brückenzweige 1 u 2 wiedergegeben.

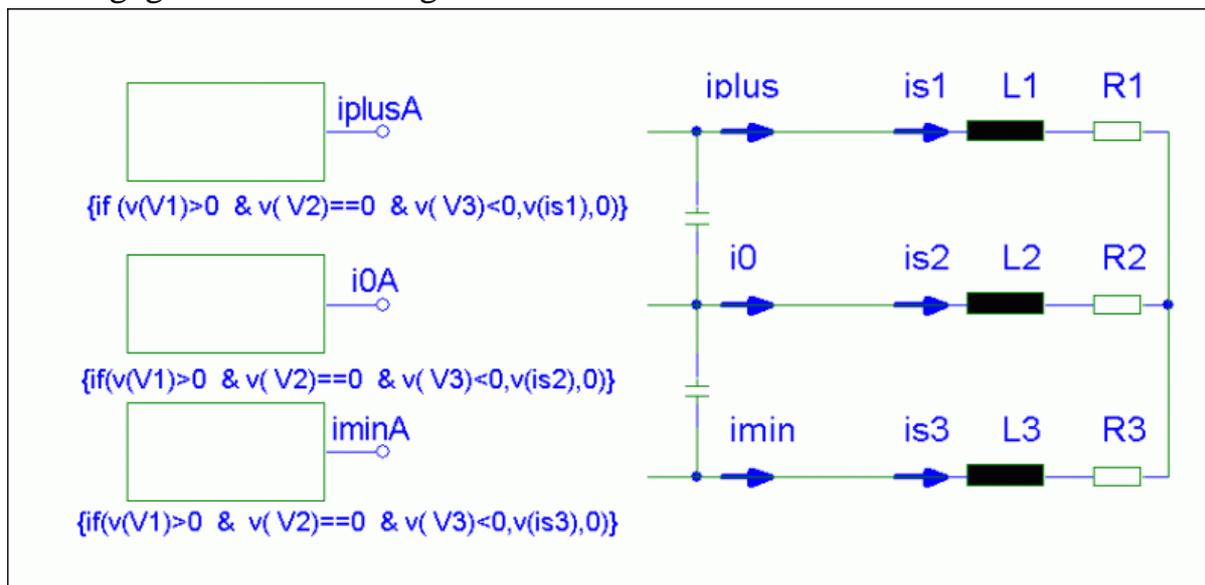


**Abb. 7:** Berechnung der Halbleiterbelastung

Für den Strom  $i_{T11} = v(T11)$  im Hauptschalter des oberen Brückenzweiges gilt beispielsweise: Ist das Potential  $V_1 > 0$  und der Strom  $is1$  im Strang1  $> 0$ , so fließt im Transistor T11 der Strom "is1", andernfalls hat der Strom den Wert "0".

Für die Diode D11 gilt: Ist das Potential  $V_1 > 0$  und der Strom  $is1 < 0$ , so ist die Strombelastung der Diode identisch mit "-is1", andernfalls fließt der Strom "0". Auch die Ströme in den Zuleitungen des Wechselrichters lassen sich auf ähnliche Weise bestimmen. Dazu müssen alle der 27 unterschiedlichen Schaltzustände erfasst werden und die jeweiligen Stromanteile in den einzelnen

Zuleitungen addiert werden. Für den Zustand  $[1,0,-1]$  gelten z.B. die in **Abb. 8** wiedergegebenen Gleichungen.



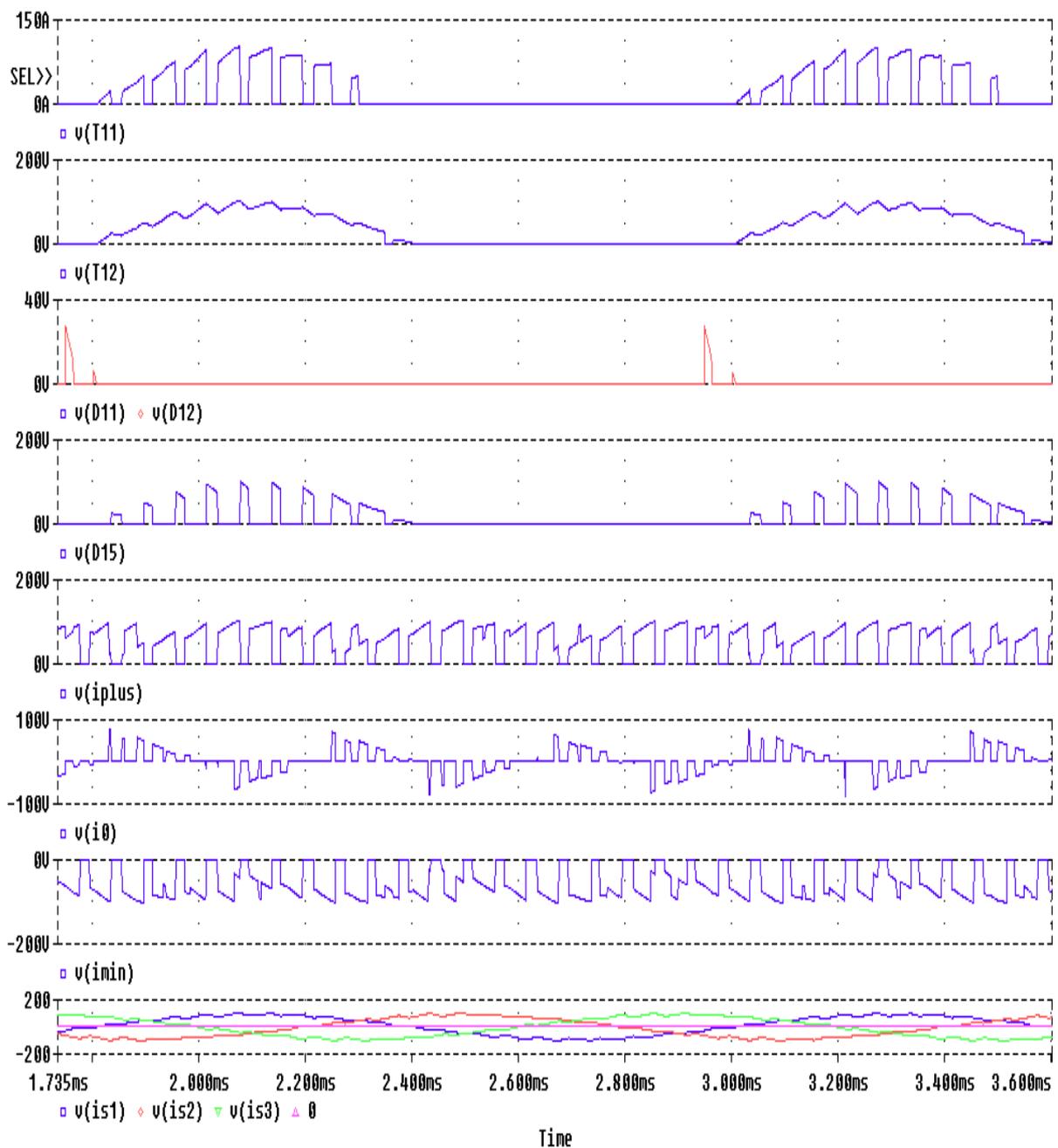
**Abb. 8:** Ströme in den Wechselrichterzuleitungen

Alle Halbleiterströme und die Zuleitungsströme werden in dem Baustein, der sich in der Mitte der **Abb. 4** befindet (Aussehen wie ein vielbeiniges IC), bestimmt.

Die Tatsache, daß die Simulation der Wechselrichterströme gelingt, obgleich die vielen Bauteile des Wechselrichters nicht in der Simulationsschaltung enthalten sind, wirkt sich günstig auf die Simulationszeit aus. Außerdem treten Konvergenzprobleme, die mit der großen Zahl von Halbleitern unweigerlich verbunden wären, nicht auf.

Die Ströme in den Halbleitern der oberen Brückenhälfte<sup>1</sup>, die Zuleitungsströme und die Strangströme sind in **Abb. 9** aufgetragen. Im Transistor T11 (oberes Diagramm) treten deutlich größere Verluste als im IGBT T12 (zweites Diagramm) auf, denn er führt einen gepulsten Strom (Schaltverluste), während in T12 ein kontinuierlicher Strom fließt. Bei dem simulierten Arbeitspunkt-Motornennbetrieb- wirkt die Synchronmaschine nahezu wie eine ohmsche Last. Dies ist an den Strömen der Freilaufdioden D11 u. D12 zu erkennen. Es treten nur sehr kurzzeitige Stromimpulse auf (drittes Diagramm von oben). Bei anderen Betriebsfällen können die Dioden jedoch viel stärker belastet sein. Im Bremsbetrieb z.B. fließt ein kontinuierlicher Strom während der negativen Halbschwingung des Strangstromes. Im vierten Diagramm von oben ist der Strom in der Diode D15 aufgetragen. Sie verbindet die Ausgangsklemme im Taktmuster mit dem Kondensatormittelpunkt. Die Diagramme darunter zeigen die Klemmenströme. Der Strom  $i_{plus}$  ist ein gepulster, positiver Gleichstrom, während  $i_{min}$  ein negatives Vorzeichen aufweist. In der Mittelpunktssleitung

fließt ein gepulster Wechselstrom. Bei anderen Betriebsarten, z.B. dem oben genannten Bremsbetrieb, kann iplus jedoch auch negative Anteile aufweisen und imin positive. Das unterste Diagramm zeigt die drei Strangströme. Der Ripple in den Strömen weist sanfte Änderungsgeschwindigkeiten auf. Das ist ein Zeichen dafür, daß der Anteil höherfrequenter Oberschwingungen gering ist.



**Abb.9:** Strangströme, Halbleiterströme und Zuleitungsströme eines Dreipunktwechselrichters