

PSpice-Simulation einer stromgeregelten, permanentmagneterregten Synchronmaschine

J.Poschadel

Für den drehzahlvariablen Antrieb von hochtourigen Strömungsmaschinen wurde ein permanentmagneterregter Synchronmotor entworfen, der über einen stromgeregelten Pulswechselrichter gespeist wird. Das stationäre und dynamische Betriebsverhalten dieser Antriebseinheit soll zunächst theoretisch, d.h. durch Simulation untersucht werden, bevor die praktische Realisierung erfolgt.

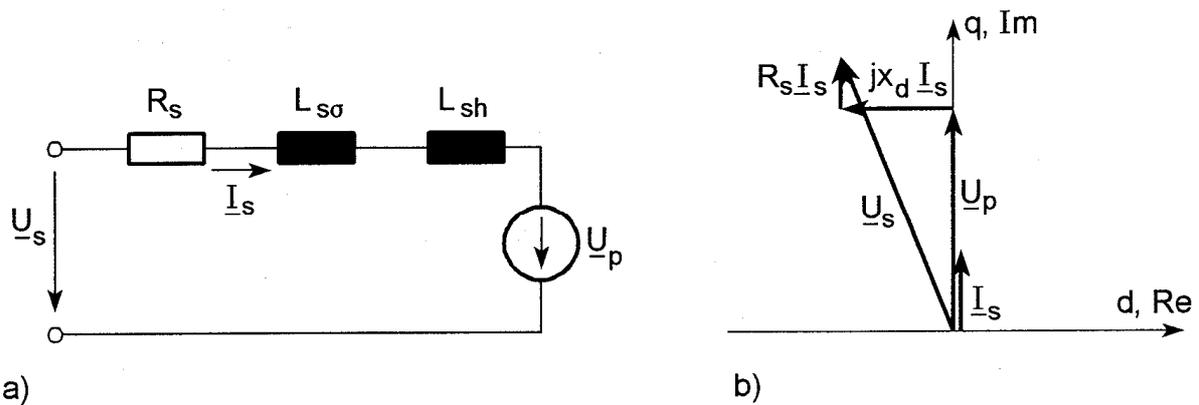


Bild 1: a) Ersatzschaltbild der Synchronmaschine
b) Zeigerdiagramm für den Bemessungspunkt

In **Bild 1** ist das Ersatzschaltbild und das Zeigerdiagramm für den Bemessungspunkt der Vollpolsynchronmaschine aufgezeichnet. Der volle Strangstrom fließt in der Querachse, so daß die Maschine ein maximales Moment liefert. Die Erregung wird alleine durch die Magnete bereitgestellt.

Die für die Simulation erforderlichen Daten des Motorentwurfs enthält die **Tabelle 1**.

Strangspannung	$U_s = 230V$
Polradspannung	$U_p = 224V$
Statorstrom	$I_s = 109A$
Statorwiderstand	$R_s = 0,012 \Omega$
Streuinduktivität	$L_{\sigma} = 0,01875mH$
Hauptinduktivität	$L_{sh} = 0,05438mH$
Synchroneinduktivität	$L_d = 0,07313mH$
Statorfrequenz	$f = 1083Hz$
Leistung	$P = 75kW$
Polpaarzahl	$p = 1$
Zwischenkreisspannung	$U_z = 592V$

Tabelle 1: Simulationsdaten der permanentmagneterregten Synchronmaschine

Bei den Pulswechselrichtern werden heutzutage vorwiegend spannungssteuernde Verfahren, d.h. Wechselrichter mit Spannungszwischenkreis und Pulsdauermodulation eingesetzt, da sie mit einer vom Betriebspunkt des angeschlossenen Drehstromsystems unabhängigen und konstanten Schaltfrequenz (Pulsfrequenz) betrieben werden können. Dem Gesamtsystem kann, z.B. durch eine überlagerte Stromregelung, stromeinprägendes Verhalten verliehen werden. Die Regelungsstruktur solch eines Systems zeigt **Bild 2**. Es stellt einen geschlossenen Regelkreis dar. Der Block 1 entspricht dem Stromregler, der aus den Soll- und Istwerten der Ströme die einzustellenden Sollspannungskomponenten U_{as} , U_{bs} des Raumzeigers \underline{U}_s ermittelt. Der Regler kann z.B. mit Pollagekoordinaten arbeiten. Aus den Komponenten des Raumzeigers werden im Block 2 die Sollwerte der Strangspannungen bestimmt (U_{s1s} , U_{s2s} , U_{s3s}). Zu diesem nullsystemfreiem, symmetrischen Spannungssystem wird in Block 3 eine Nullspannungskomponente U_0 addiert. Diese Nullspannung wird je nachdem welches Modulationsverfahren Verwendung finden soll entweder nur aus den Spannungssollwerten oder aber auch aus Spannungssollwerten und Stromistwerten bestimmt [5]. Im Block 4 werden die kontinuierlichen Sollwerte (U_1 , U_2 , U_3) der Stromrichter Ausgangsspannungen mit ein und demselben dreieckförmigen und höherfrequenten Signal verglichen und in die Schaltsignale V_1 , V_2 , V_3 für die Halbleiterschalter des Wechselrichters umgeformt. Die Ausgangsgrößen des Wechselrichters speisen eine Drehstromlast, z.B. eine Synchronmaschine. Für die Simulation, die nicht mit bezogenen Größen durchgeführt wird, ist die Nachbildung des rechenzeitintensiven Wechselrichters nicht erforderlich, denn die Schaltsignale können direkt zur Speisung der Maschine herangezogen werden.

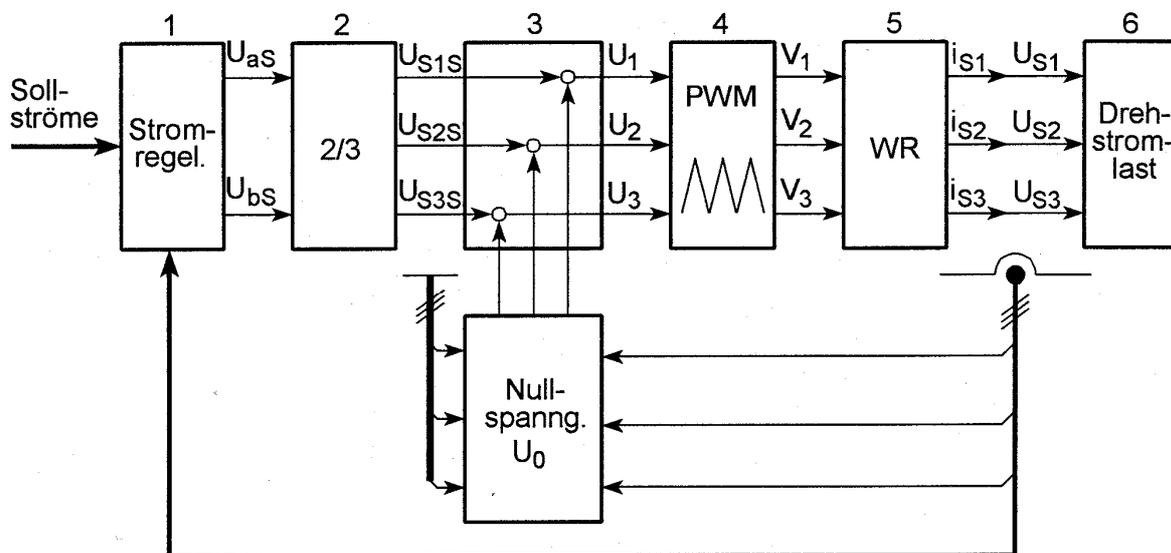


Bild 2: Regelungsstruktur der Pulsdauermodulation als unterlagerte Spannungssteuerung

Pspice stellt eine große Anzahl von analogen und digitalen Bausteinen zur Verfügung. Sie haben aber nicht das aus der regelungstechnischen Literatur ([1], [2], [3], [4]) bekannte Aussehen. Möchte man jedoch weiterhin mit vertrauten Strukturbildern arbeiten, so muß man sich aus dem Bauteilvorrat eigene Bauelemente erzeugen. Die Möglichkeiten, die mitgelieferten Bausteine zu manipulieren, werden von Pspice bereitgestellt.

Koordinatentransformation gewonnen werden, verglichen. Die Differenz der Signale gelangt auf PI-Regler (Parallelschaltung von P- und I-Regler) und steht danach als Sollwert für die Spannungen in Längs- und Querachse der Maschine zur Verfügung. Bevor die Sollwerte auf einen Modulator und das danach folgende Glied für das Phasensplitten gelangen, müssen sie jeweils zwei Begrenzungsglieder durchlaufen. Die Grenzwerte enthalten neben den maximal zulässigen Gegenspannungen auch Terme für eine Stellreserve. Außerdem werden sie durch das verwendete Modulationsverfahren für die Pulsdauermodulation beeinflusst [4]. Auf die zwischen den Begrenzern angreifenden Störgrößen $u_{sdstör}$ und $u_{sqstör}$ wird weiter unten noch eingegangen. Nachdem die Phasenaufspaltung in die drei Sollwerte für die Strangspannungen durchgeführt wurde, wird die Nullspannung addiert. Im dargestellten Fall wird dem symmetrisch und sinusförmig zu modulierenden Drehspannungssystem U_{s1s} , U_{s2s} , U_{s3s} eine dritte Harmonische mit der Amplitude $-1/6 \cdot \hat{U}_s$ überlagert. Im Gegensatz zu der nullsystemfreien Modulation, bei der die maximale Amplitude der zu modulierenden Strangspannung auf $1/2 \cdot U_z$ begrenzt ist, kann hier das theoretische Maximum von $1/\sqrt{3} \cdot U_z$ erreicht werden, d.h. der Wechselrichter wird um 15% besser ausgenutzt [5]. Im Pulsbreitenmodulator werden aus den kontinuierlichen Spannungen die Schaltsignale gewonnen und daraus durch Phasenreduktion die Komponenten des Raumzeigers, der demoduliert wird, so daß an der Maschine die Spannungen für d- und q-Achse anliegen.

Allein die Maschine und die Regler bestimmen das dynamische Verhalten des Systems, die anderen Bausteine des Schaltbildes haben darauf keinen Einfluß. Die beiden Achsen der Maschine, die jeweils ein Verzögerungsglied enthalten (rückgekoppelter Integrator), sind über die rotatorisch induzierten Gegenspannungen miteinander verkoppelt. Diese Gegenkopplung, die die Regelung sehr erschwert, wird durch die schon oben erwähnte inverse Störgrößenaufschaltung kompensiert.

Die Modulationen und Demodulationen ($a,b \Rightarrow d,q$ bzw. $d,q \Rightarrow a,b$) werden durch den Drehwinkel ϵ_{psp} , der rechts unten im Bild durch Integration aus der Winkelgeschwindigkeit ω gewonnen wird, gesteuert, bzw. durch $\cos(\epsilon_{psp})$ und $\sin(\epsilon_{psp})$.

In diesem Bericht sollen Strom- und Spannungsverläufe für eine konstante Drehzahl, nämlich die Bemessungsdrehzahl untersucht werden. Wenn das dynamische Verhalten der Maschine interessiert, also Hochlauf, Lastwechsel und Drehrichtungsumkehr, so müssen dem Regelschema in **Bild 3** noch weitere Regler überlagert werden, z.B. Regler für die Lageregelung, für die Drehzahlregelung und für die Momentenregelung.

In **Bild 4** sind einige typische Spannungs- und Stromverläufe aufgetragen. Der oberste Schrieb enthält den Sollwert der Strangspannung U_{s1s} , das dreieckförmige Vergleichssignal mit deutlich kleinerer Amplitude sowie die Nullspannungskomponente U_0 und das Differenzsignal U_1 , das mit dem Dreieck verglichen wird und die im Schrieb darunter gezeichnete Spannung $u_{sa} = u_{sl}$ erzeugt. Die Spannungen U_{s1s} , U_0 und U_1 enthalten Oberschwingungen, die durch die Regelabweichungen in den Istströmen i_{sd} und i_{sq} (zweite Diagramm von unten) verursacht werden. Der zweite und dritte Schrieb von oben enthält die Komponenten u_{sa} und u_{sb} des Spannungsraumzeigers. Darunter sind die Spannungen in Längs- und Querachse der Maschine aufgetragen. Im untersten Diagramm werden Soll- und Istwert eines Strangstromes wiedergegeben. Trotz der hohen Pulsfrequenz ($f_p = 20 \cdot f_G = 21660 \text{ Hz}$) ist der Ripple im Strangstrom noch relativ hoch. Dies ist auf die doch sehr kleinen Maschineninduktivitäten zurückzuführen. Reduzieren ließe er sich durch eine höhere Pulsfrequenz. Allerdings sind

21660Hz auch für einen IGBT Wechselrichter und Ströme von über 100A kaum noch zu realisieren. Eine andere Möglichkeit, die Oberschwingungsströme zu reduzieren, wäre eine Vorschaltrossel, z.B. in der Größenordnung der Hauptinduktivität. Diese Drossel könnte wegen der hohen Pulsfrequenz recht kompakt gebaut werden.

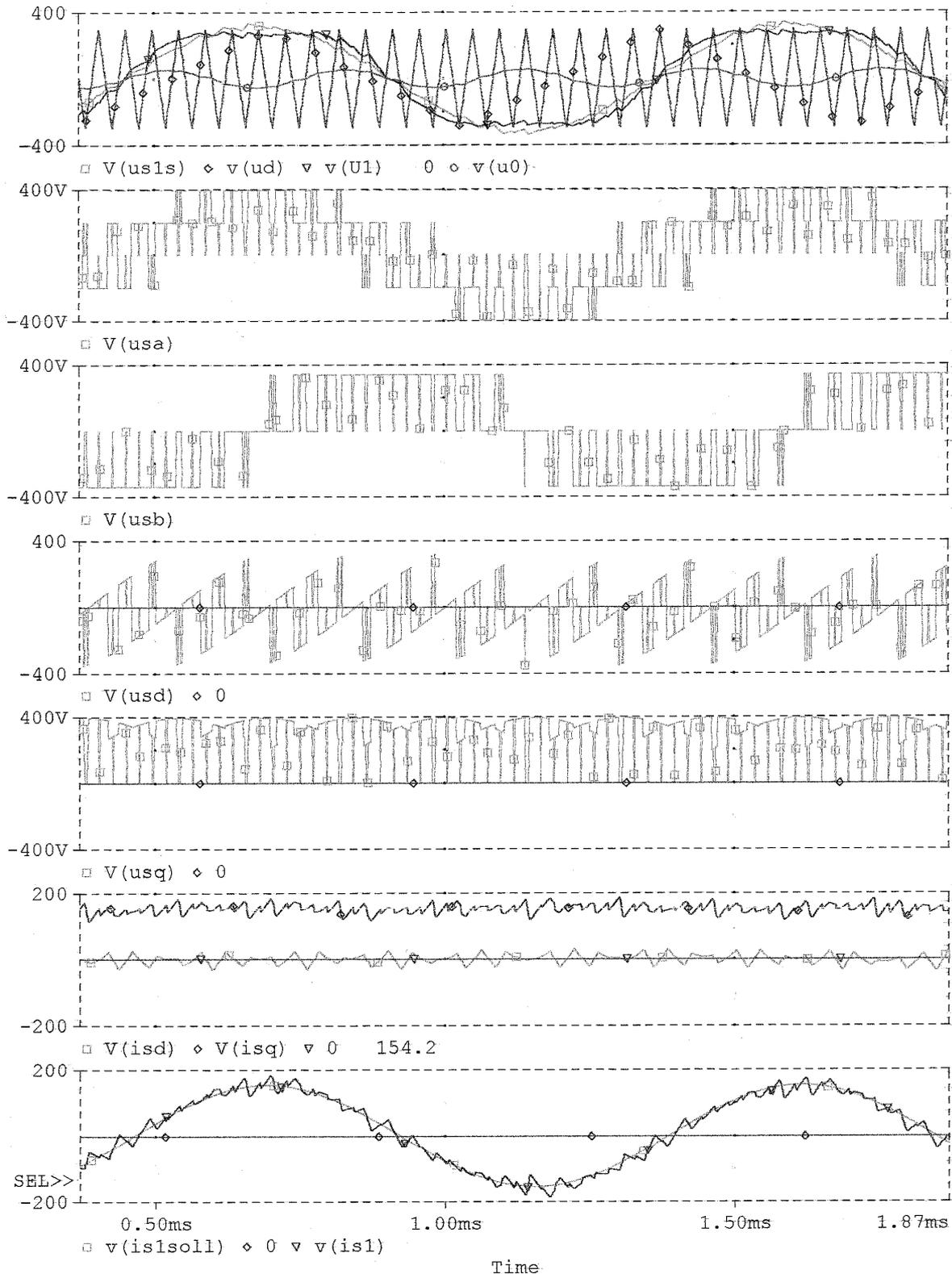


Bild 4: Ausgewählte Simulationsergebnisse

Literatur

- [1] Leonhard, W., Control of Electrical Drives, Springer-Verlag, Berlin 1985
- [2] Bühler, H., Einführung in die Theorie geregelter Drehstromantriebe, Bd. I u. II, Birkhäuser, Basel 1977
- [3] Föllinger, O., Regelungstechnik, AEG-Telefunken, Berlin 1980
- [4] Orlik, B., Zum Betriebsverhalten mikrorechnergeregelter und pulswechselrichter gespeister Synchronmaschinen mit Permanentmagneterregung, Dissertation, TU Braunschweig 1987
- [5] Reinold, H., Optimierung dreiphasiger Pulsdauermodulationsverfahren, Dissertation, RWTH Aachen 1995