

Netzfrenderlicher Anschluß elektrischer Antriebe an das Drehstromnetz durch verbesserte Regelung

Jürgen Wolff, Gunther Bauer, Olaf Simon, Karlsruhe

Statt aus einer Diodenbrücke kann der Netzgleichrichter eines elektrischen Antriebes auch aus einem dreiphasigen IGBT-Stromrichter bestehen. Eine Elektronik übernimmt die Regelung des Netzstromes und der Zwischenkreisspannung. Die Regelung der Netzströme ist so optimiert, daß der Antrieb im stationären Betrieb mit einem $\cos\varphi=1$ und einem Leistungsfaktor von ca. eins Energie aus dem Drehstromnetz bezieht oder einspeist. Dies führt zu einem sinusförmigen Netzstrom und zur Übereinstimmung der Phasenlage zwischen Strom und Spannung - letztendlich die Netzfrenderlichkeit des Antriebes.

Mains friendliness of electric drives

The mains rectifier of an electric drive can be a three-phase-self-commutated IGBT-Converter. The control of the mains current has been optimized in a way that the drive, in stationary running receives energy from or feeds energy into the threephase current mains with a $\cos\varphi=1$ and with a power factor of about one. This results in a sinusoidal mains current and in conformity of the phase position between current and voltage - at long last the mains friendliness of the drive.

Autoren:

Dipl.-Ing. Jürgen Wolff ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Elektrotechnischen Institut der Universität Karlsruhe. Seine Aufgabengebiete sind die Leistungselektronik und die elektrische Antriebstechnik. Zur Zeit leitet er unter Betreuung von Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Späth das Projekt „Switched-Reluctance-Drive“.

Dipl.-Ing. Gunther Bauer beschäftigte sich im Rahmen seiner Diplomarbeit am Elektrotechnischen Institut der Universität Karlsruhe mit dem Reglerentwurf für einen netzseitigen IGBT-Stromrichter.

Dipl.-Ing. O. Simon ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Elektrotechnischen Institut der Universität Karlsruhe. Ein Schwerpunkt seiner Forschungstätigkeit umfaßt selbstgeführte Stromrichter zur Netzeinspeisung sowie den Einsatz dieser Stromrichter zu Kompensationszwecken.

1. Problematik

Eine große Anzahl elektrischer Verbraucher benötigen für ihre Energieversorgung eine Gleichspannungsquelle. Beispiele hierfür sind in unseren Haushalten die unzähligen Elektrogeräte der Unterhaltungselektronik, in der Industrie die Computer bzw. andere Datenverarbeitungsanlagen und in der Energietechnik die Mehrzahl der mit Frequenzumrichter betriebenen elektrischen Antriebe. Für die Umwandlung der Wechselspannung des Drehstromnetzes in die benötigte Gleichspannung werden in großem Umfang Gleichrichter mit kapazitiver Glättung der Gleichspannung eingesetzt.

In dem Bestreben, derartige Baugruppen möglichst kostengünstig zu fertigen und preisgünstig anzubieten, wird oftmals auf die Belange der elektromagnetischen Verträglichkeit wenig Rücksicht genommen. Für die Gleichrichtung werden Diodenbrücken ohne wechsel- bzw. drehstromseitige Vordrosseln direkt an das Netz gelegt. Am Ausgang des Gleichrichters wird der für die Glättung der Gleichspannung zuständige Kondensator ohne eine den Gleichstrom glättende Drossel angeschlossen.

In Bild 1 ist links das Schaltungsbeispiel eines solchen Diodengleichrichters mit kapazitiver Glättung der Gleichspannung und der dazugehörige Leiterstrom dargestellt. Der Strom weicht mit den zwei hohen Impulsen pro Halbperiode erheblich von dem wünschenswerten sinusförmigen Stromverlauf ab. Bereits bei einer relativ kleinen Leistung erreicht der Spitzenwert des Stromes sehr hohe Werte. Eine harmonische Analyse des Stromverlaufes ergibt, daß das Drehstromnetz mit einer fünften, siebten, elften und dreizehnten Oberschwingung stark belastet wird. Die Oberschwingungen stellen ein Vielfaches der 50-Hz-Grundschiwingung dar. Die fünfte Oberschwingung mit 250 Hz beträgt z.B. noch ca. 80% der Grundschiwingung [1].

Diese auch als Netzurückwirkung bezeichneten Erscheinungen verursachen eine Verzerrung der ursprünglich sinusförmigen Netzspannung und führen zu einer schlechten Qualität des elektrischen Energieversorgungsnetzes. Das wiederum kann die Funktion anderer elektrischer Verbraucher beeinträchtigen.

2. Schaltungsvarianten

Um die erheblichen Netzurückwirkungen der Diodengleichrichter zu vermeiden, empfiehlt es sich, den Diodenbrücken wechsel- oder drehstromseitig Drosseln vorzuschalten (Bild 1, Mitte). Diese bewirken eine Reduzierung der Stromamplitude und der Stromoberschwingungen, aber auch einen erhöhten Bezug von Grundschwingungsblindleistung und eine Absenkung der Gleichspannung. Alternativ zu dieser Lösung kann im Gleichstromkreis zwischen Diodenbrücke und Kondensator eine Glättungsdrossel geschaltet werden. Sie ist so zu dimensionieren, daß das jetzt aus Drossel und Kondensator bestehende Filter auf die Wechselanteile der gleichgerichteten Wechselspannung stets induktiv wirkt. Die Drosseln auf der Netzseite sind ebenfalls vorzusehen, können aber kleiner dimensioniert werden.

Werden außer der Gleichrichtung und der Erfüllung der für diese Baugruppen maßgeblichen Normen (u.a. EN 61000) keine weiteren technischen Anforderungen gestellt, so wird man aus Kostengründen bemüht sein, eine Diodenbrücke mit Drosselbeschaltung vorzusehen und entsprechend zu dimensionieren.

Kommen zusätzliche Forderungen, wie z.B. nach einer konstanten und vom Netzanschlußpunkt unabhängigen Gleichspannung, nach einer hohen Gleichspannung,

nach der Rückspeisefähigkeit oder nach der Option auf Blindleistungskompensation, hinzu, lohnt der Einsatz eines selbstgeführten Stromrichters (Bild 1, rechts).

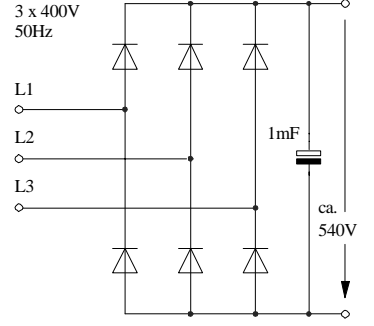
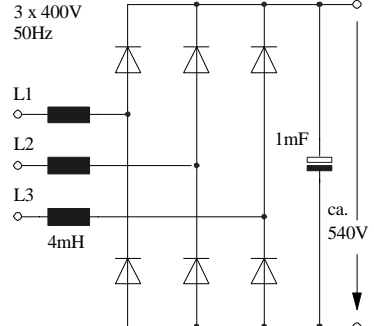
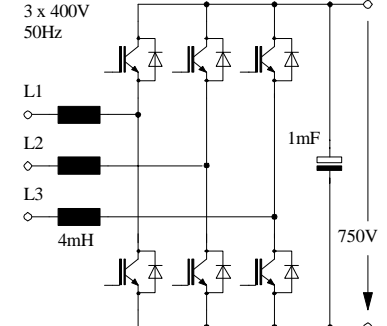
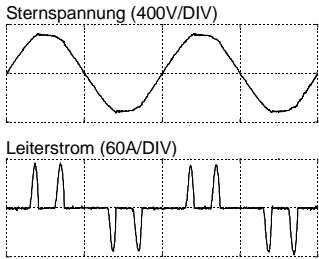
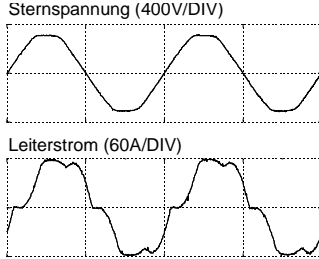
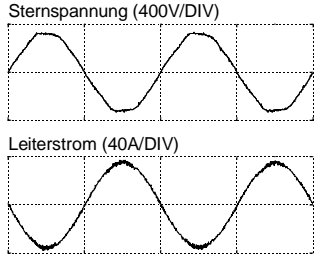
<p>Schaltung:</p> <p>Diodenbrücke mit kapazitiver Glättung der Gleichspannung</p> 	<p>Diodenbrücke mit drehstromseitigen Vordrosseln</p> 	<p>Selbstgeführter Stromrichter</p> 
<p>Messung der Netzgrößen:</p> <p>5 kW Motorleistung</p> 	<p>20 kW Motorleistung</p> 	<p>20 kW Generatorleistung</p> 
<p>Vor- und Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - sehr schlechte elektromagnetische Verträglichkeit - erhebliche Verzerrung der Netzspannung - Ausgangsgleichspannung von der Höhe der Netzanschlußspannung abhängig - keine Energierückspeisung möglich - keine Blindleistungskompensation möglich + geringe Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> - Aufnahme von Grundschwingungsblindleistung ± Reduzierung der Netzspannungsverzerrungen - Ausgangsgleichspannung von der Höhe der Netzanschlußspannung abhängig - keine Energierückspeisung möglich - keine Blindleistungskompensation möglich ± mittlere Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> + kein Bezug von Grundschwingungsblindleistung + sehr geringe Verzerrungsleistung + einstellbare und konstante Ausgangsgleichspannung + hohe Gleichspannung + Energierückspeisung in das Drehstromnetz möglich + Kompensation von Blindleistung möglich - höhere Kosten

Bild1: Vergleich möglicher Schaltungsvarianten zur Erzeugung von Gleichspannungs-Zwischenkreisen

Forderungen dieser Art werden zunehmend im Bereich der elektrischen Antriebstechnik und der Energietechnik gestellt. Die konstante und hohe Gleichspannung, in der Umrichtertechnik auch als Zwischenkreisspannung bezeichnet, wird für eine ausgeglichene und hohe Regeldynamik benötigt. Bei dynamischen Antriebssystemen werden Lasten mit z.T. großen Trägheitsmomenten schnell und häufig abgebremst, eine Energierückspeisung in das Drehstromnetz ist hierfür lohnend. Weitere Beispiele für den möglichen Einsatz der selbstgeführten Netzstromrichter sind die Wechselrichter in Solaranlagen, in drehzahlveränderbaren Wind- und in Wasserkraftanlagen. In der Energietechnik können sie als Kompensationsanlagen für Grundschiwungsblindleistung und Verzerrungsleistung verwendet werden. Eine Kombination von gleichzeitigem Gleich- bzw. Wechselrichterbetrieb und der Blindleistungskompensation ist ebenfalls möglich.

3. Selbstgeführter Netzstromrichter

Im folgenden soll auf den elektrischen Aufbau, die Wirkungsweise und die Regelung des selbstgeführten Netzstromrichters eingegangen werden. Beispielhaft hierfür wird der Netzstromrichter eines Switched-Reluctance-Antriebes der Bemessungsleistung von 26 kW herangezogen. Dieser Antrieb wurde am Elektrotechnischen Institut der Universität Karlsruhe entwickelt und getestet.

Der Leistungsteil des selbstgeführten Netzstromrichters benötigt für die Entkopplung zwischen Stromrichter und Drehstromnetz eine Netzdrossel mit einer relativen Kurzschlußspannung von ca. 20%. Mit dieser Dimensionierung läßt sich ein ruhiges Regelverhalten und ein kleiner den Netzströmen überlagerter Stromrippel erreichen. Als Leistungshalbleiterbauelemente sind für die oben genannte Leistungsklasse bipolare Leistungstransistoren mit integrierter MOSFET-Ansteuerung und antiparalleler Diode (IGBT) empfehlenswert. Sie werden zu einer Drehstrom-Brückenschaltung miteinander verschaltet. Der Zwischenkreiskondensator dient zur Glättung der Gleichspannung und zur Entkopplung von netzseitigem und maschinenseitigem Stromrichter. Aufgrund der den Transistoren antiparallelen Dioden beträgt die Zwischenkreisspannung beim Anschluß an das 400 V Drehstromnetz mindestens 540 V. Deshalb muß der Sollwert für die Regelung der Zwischenkreisspannung größer als 540 V sein. In der Versuchsanlage wurde ein Sollwert von 750 V gewählt. Dieser relativ hohe Wert führt zu einer guten Dynamik der Antriebsregelung und liegt ausreichend unterhalb der zulässigen Spannungsbeanspruchung der Leistungstransistoren.

Der in Bild 1 rechts abgebildeten Leistungselektronik des selbstgeführten Stromrichters ist eine Steuer- und Regelelektronik übergeordnet. Für den Reglerentwurf wurde die Kaskadenstruktur verwendet. Die drei Netzströme sind die Regelgrößen des schnellen, unterlagerten Stromregelkreises, und die Zwischenkreisspannung ist die Regelgröße des langsamen, überlagerten Gleichspannungsregelkreises. Für die Ströme sind Einregelzeiten im 100 μ s-Bereich, für die Gleichspannung Ausregelzeiten im 100 ms-Bereich typisch. Das Bild 2 zeigt die Struktur des gesamten Regelkreises. Dicke Pfeile kennzeichnen dreiphasige und komplexe Größen, dünne Pfeile skalare Größen.

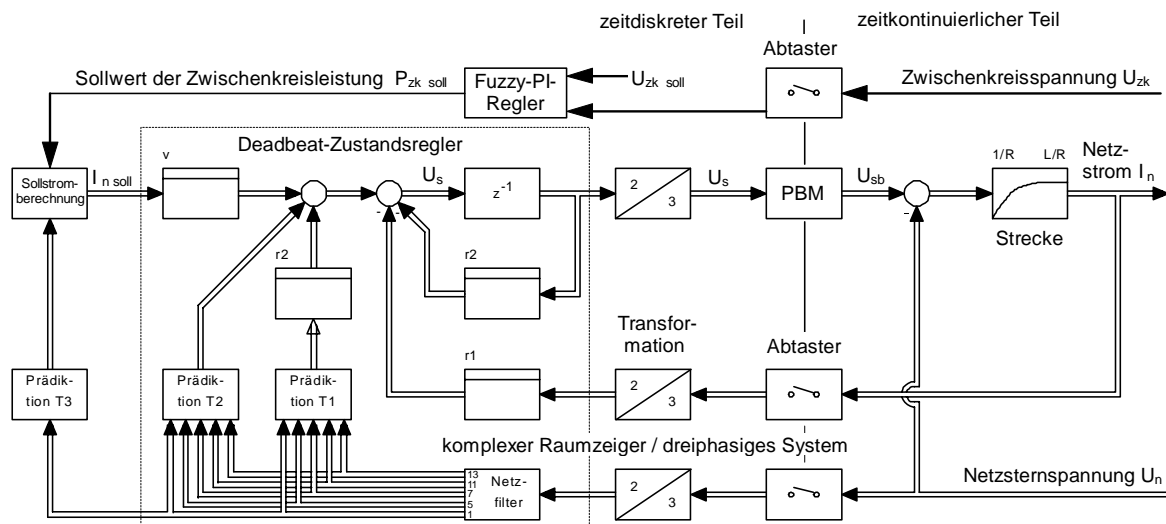


Bild 2: Strukturbild des gesamten Regelkreises mit dem Deadbeat-Zustandsregler für den Netzstrom und dem adaptiven Fuzzy-PI-Regler für die Zwischenkreisspannung.

3.1. Netzstromregler

Die Regelgrößen des Netzstromreglers sind die drei Leiterströme. Bei geschlossenem Sternpunkt können die Leiterströme unabhängig voneinander geregelt werden. Es ist möglich, für jeden Strom einen autonomen Regler zu implementieren. Diese Regelungsstruktur wird z.B. in Inselnetzen mit Photovoltaikgeneratoren [2] eingesetzt. Eine Transformation der Leiterströme in Raumzeiger bringt hier keinen Vorteil, weil statt der drei Phasen dann Real- und Imaginärteil sowie die auftretende Nullkomponente geregelt werden müssten.

Ohne geschlossenem Sternpunkt sind die Netzphasen miteinander verkoppelt. Aufgrund des meistens in der Antriebstechnik nicht angeschlossenen Sternpunktes verschwindet die Nullkomponente. Damit wird in der Raumzeigerdarstellung die Anzahl der Stromregler von drei auf zwei reduziert.

Transformation in die Raumzeigerdarstellung

In [3] werden die Netzströme im mit der Kreisfrequenz des Netzspannungsraumzeigers rotierenden Bezugssystem geregelt. Die Raumzeiger selber rotieren nicht. In diesem Bezugssystem stellt die Regelstrecke ein verkoppeltes System dar. Das bedingt einen Entkopplungsregler für den Real- und Imaginärteil des komplexen Netzstromraumzeigers. Die Definition des Raumzeigers kann der Literatur entnommen werden [8].

Ein anderer, vorteilhafter Weg wird im folgenden vorgestellt. Hierbei werden die dreiphasigen Strom- und Spannungsgrößen in eine komplexe Raumzeigerdarstellung mit einem ruhenden Bezugssystem transformiert. Somit dreht der Spannungsraumzeiger mit der Netzkreisfrequenz von $2\pi \cdot 50$ Hz. Ein Netzstromregler regelt den Realteil und ein zweiter den Imaginärteil des drehenden Stromraumzeigers. Hier sind beide Regler nicht miteinander verkoppelt, müssen jedoch 50-Hz-Wechselgrößen stationär genau ausregeln.

Im transformierten System ändern sich die Streckeneigenschaften nicht. Somit kann der Reglerentwurf für ein einphasiges System erfolgen.

Streckeneigenschaften

Die Strecke wird als Reihenschaltung einer Drossel L , eines Ersatzwiderstandes R und der Netzspannung approximiert. Im Ersatzwiderstand ist die Summe der ohmschen Widerstände von Netzdrossel, Zuleitungen und Transistoren zusammengefaßt. Die Induktivität besitzt den Wert der Netzdrossel. Den Spannungsabfall über Drossel und Widerstand bildet nun die Differenz aus Netzsternspannung U_n und Brückenphasenspannung U_{sb} . Weil die gesamte Regelung auf einem digitalen Signalprozessor (Texas Instruments TMS320C40) implementiert ist, muß als weiteres die Rechenzeit berücksichtigt werden. Der Regelalgorithmus liest zu Beginn jeder Abtastperiode die Meßwerte der Analog-Digital-Wandler aus. Er berechnet eine neue Stellgröße und gibt sie zu Beginn der nächsten Abtastperiode aus. Durch die Rechenzeit ergibt sich deshalb eine konstante Totzeit von genau einer Abtastperiode. In der Versuchsanlage ist eine Abtastzeit von $125 \mu\text{s}$ realisiert. Damit beträgt die Schaltfrequenz der Transistoren 8 kHz . Innerhalb von zwei bis drei Abtastperioden werden die Netzströme eingeregelt. Aus diesem Grund ist ein zeitdiskreter Reglerentwurf zwingend erforderlich.

Als Reglertypen sind der verallgemeinerte PI-Regler und der Deadbeat-Zustandsregler untersucht worden.

Verallgemeinerter PI-Regler

Ein gewöhnlicher Integrator antwortet auf einen Sprung mit einer in Abhängigkeit der Zeit ansteigenden Rampe. Ist der Eingang des Integrators Null, so bleibt der Ausgang konstant. Deswegen führt der gewöhnliche Integrator bei einer sinusförmigen Führungsgröße nicht zu stationärer Genauigkeit. Es muß zum verallgemeinerten Integrator übergegangen werden. Er antwortet auf ein Sinussignal der Frequenz ω und der Amplitude a mit dem Sinussignal der Frequenz ω , dessen Amplitude rampenförmig mit zunehmender Zeit anwächst. Ist der Eingang des verallgemeinerten Integrators Null, so verbleibt an seinem Ausgang ein Sinussignal der Frequenz ω mit konstanter Amplitude. Damit ist die stationäre Genauigkeit für Eingangssignale der Frequenz ω gewährleistet. In [2] wird der verallgemeinerte PI-Regler ausführlich behandelt. Die Reglerparameter wurden mit dem Frequenzkennlinienverfahren [4] ermittelt.

Deadbeat-Zustandsregler

Alternativ hierzu ist der Entwurf eines Zustandsreglers auf endliche Einstellzeit (deadbeat-response) [5] ein sehr interessantes Verfahren, das auf zeitdiskrete Systeme angewendet werden kann. Die Ausgangsgröße der Regelung erreicht bei einem Sollwertsprung den neuen Sollwert nach n Abtastschritten, wenn n die Ordnung der Strecke ist. Die Strecke der Stromregelung besitzt unter Berücksichtigung von Netzdrossel und Rechenzeit die Ordnung zwei. Also erreicht der Leiterstrom nach zwei Abtastschritten den vorgegebenen Sollwert. Um diese Verzögerung zu kompensieren, wird der aus dem gefilterten Spannungsraumzeiger und dem Ausgang des Zwischenkreis-Spannungsreglers ermittelte Stromsollwert aus der Kenntnis heraus, daß der Raumzeiger auf einer kreisförmigen Ortskurve mit $2\pi \cdot 50 \text{ Hz}$ umläuft, um zwei Abtastschritte prädiert. Da der Netzstrom - unabhängig von bereits

bestehenden Verzerrungen der Netzspannung - sinusförmig sein soll, wird zur Sollstromberechnung nur die Grundschiwingung der Netzspannung herangezogen (Bild 2, Prädiktion T3).

Pulsbreitenmodulation

Der Stromregler liefert als Ausgangsgröße den komplexen Spannungsraumzeiger U_s . Dieser wird wieder in ein dreiphasiges Spannungssystem zurücktransformiert und auf einen Pulsbreitenmodulator geschaltet. Der Pulsbreitenmodulator (PBM) setzt nun die über eine Abtastperiode konstanten Ausgangsspannungen des Stromreglers in die Schaltfolge für die Transistoren um, und zwar so, daß der Mittelwert der erzeugten Brückenphasenspannung U_{sb} der vorgegebenen Reglerausgangsspannung U_s entspricht.

Mit Rücksicht auf entstehende Verluste können in der Leistungselektronik keine linearen Stellglieder verwendet werden. Das Produkt aus Strom und Spannung bildet die Verlustleistung. Es wird Null, wenn entweder der Strom durch das Stellglied oder die darüber abfallende Spannung Null werden. Nur ein Schalter kann diese Forderung erfüllen. Da diese Schalter auch noch sehr schnell und häufig schalten müssen, kommen hierfür Transistoren zum Einsatz.

Meßergebnisse

Die Versuchsreihen zeigen, daß die beiden vorgeschlagenen Reglertypen im stationären Verhalten nahezu identische Ergebnisse liefern. Bei dynamischen Übergangsvorgängen läuft der Ausgang des verallgemeinerten PI-Reglers dem Sollwert etwas hinterher (Bild 4, links). Es dauert eine kurze Zeit, bis der Regler sich auf den neuen stationären Zustand eingeschwungen hat. Dies führt unmittelbar nach einem Lastwechsel zu einer sehr geringen Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. Der Deadbeat-Zustandsregler jedoch schafft es, daß während der dynamischen Übergangsvorgänge die Nulldurchgänge von Strom und Spannung zeitgleich stattfinden (Bild 4, rechts).

Störgrößenaufschaltung

Weil am Netzanschlußpunkt die Netzsternspannung U_n erheblich von der Sinusform abweichen kann und bereits kleine Differenzen zwischen der Reglerausgangsspannung U_s und der Netzsternspannung U_n große Stromänderungen ΔI_s zur Folge haben, muß eine exakte Störgrößenaufschaltung der Netzsternspannung erfolgen. Hierzu wird die dreiphasige Netzsternspannung U_n zu Beginn einer Abtastperiode über A/D-Wandler abgetastet und anschließend über die 3/2-Transformation in einen komplexen Spannungsraumzeiger transformiert. Weil der digitale Prozessor die Stellgröße U_s erst zu Beginn der nächsten Abtastperiode ausgibt, muß die Störgrößenaufschaltung für die nächste Abtastperiode erfolgen. Das nachfolgende Netzfilter zerlegt den Raumzeiger in die 50 Hz Grundschiwingung und die ersten vier auftretenden Oberschwingungen 250 Hz, 350 Hz, 550 Hz und 650 Hz. Weil sich die einzelnen Raumzeiger mit konstanter Länge und mit den angegebenen Frequenzen in der komplexen Ebene drehen, können sie jeweils um den Drehwinkel einer Abtastzeit prädiert werden. Das wird durch die Prädiktion T2 in Bild 2 übernommen. Um zu berücksichtigen, daß für die Störgrößenaufschaltung nicht der Momentanwert der Spannung, sondern der Mittelwert von einem zum nächsten Abtastschritt wirksam ist, muß um einen weiteren halben Abtastschritt prädiert werden. Die Zeit

T_2 wird deshalb zu $T_2=TA+TA/2$ gewählt. Danach erfolgt die Addition der Harmonischen und die Störgrößenaufschaltung.

In Bild 2 sind r_1 und r_2 die Reglerparameter des Zustandsreglers, z^{-1} gibt die Rechenzeit von einem Abtastschritt wieder. Die Aufschaltung der gemessenen Netzsternspannung U_n über r_2 stellt gewissermaßen eine Kompensation der Regler-rückführung von U_s über r_2 dar. Auch bei dieser Aufschaltung wird wegen des wirksamen Mittelwertes einer Abtastperiode mit $T_1=TA/2$ präzisiert. Der Parameter v des Vorfilters sorgt für die stationäre Genauigkeit des Zustandsreglers. Die Entwurfsverfahren für den Zustandsregler können der Literatur entnommen werden [3].

3.2. Zwischenkreis-Spannungsregler

Für den Entwurf des Zwischenkreis-Spannungsreglers wird die über den Stromregler geschlossene innere Regelschleife als Totzeit von zwei Abtastintervallen betrachtet. Diese Näherung ist für die relativ langsame Gleichspannungsregelung völlig ausreichend. Wegen des langsamen Regelverhaltens und der kurzen Abtastzeit des eingesetzten Signalprozessors konnte der Reglerentwurf zeitkontinuierlich mit dem Frequenzkennlinienverfahren [4] durchgeführt werden. Das in der Zwischenkreisstrecke vorhandene Divisionsglied wurde um den Arbeitspunkt linearisiert. Zur Sicherung der stationären Genauigkeit ist es auch hier notwendig, dem Regler einen I-Anteil hinzuzufügen. Im Laufe der Arbeit entstanden zwei Zwischenkreis-spannungsregler, die unabhängig vom verwendeten Stromregler eingesetzt werden können. Neben dem konventionellen PI-Regler wurde auch ein adaptiver Fuzzy-PI-Regler untersucht.

PI-Zwischenkreisspannungsregler

Beim Entwurf des PI-Zwischenkreisreglers werden die Grenzen des linearen Reglerentwurfs deutlich. Durch das Doppel-I-Verhalten der Strecke ist der Regelkreis relativ langsam und neigt zu Schwingungen. Der Verstärkungsfaktor kann deshalb nicht zu groß gewählt werden. Außerdem führt ein großer Verstärkungsfaktor zu einem unruhigen stationären Verhalten, da auf eine kleine Regeldifferenz gleich mit einer großen Stellgröße reagiert wird. Für ein gutmütiges stationäres Verhalten wäre deshalb ein kleiner Verstärkungsfaktor wünschenswert.

Bei großen Leistungssprüngen auf der Gleichspannungsseite wird vom Zwischenkreisregler jedoch eine schnelle Reaktion verlangt. Die Zwischenkreisspannung soll nicht zu stark einbrechen bzw. ansteigen. Für den Fall großer Regeldifferenzen sollte der Regelkreis schnell reagieren. Man müßte deshalb einen großen Verstärkungsfaktor anstreben.

Ein Lösungsansatz, um diese beiden konträren Forderungen erfüllen zu können, ist der Einsatz von Fuzzy-Technologien. Hier wird vorgeschlagen, einen konventionellen Regler zu verwenden, dessen Parameterwerte über eine Fuzzy-Verstellstrategie eingestellt werden. Aus dem konventionellen PI-Regler wird so ein adaptiver Fuzzy-PI-Regler.

Adaptiver Fuzzy-PI-Regler

Der PI-Regler hat zwei Parameter: K_p und K_i . Zu Beginn steht die Überlegung, wie die Fuzzy-Verstellstrategie prinzipiell aussehen kann. Mit der Fuzzy-Strategie könnten z.B. die Parameter K_p und K_i verändert werden. Randbedingung ist, daß auch eine sprungförmige Änderung der Parameter möglich sein muß, ohne daß das Reglergebnis darunter leidet.

Wird der Parameter K_p sprungförmig geändert, so führt das zu einer sprungförmigen Änderung der Stellgröße. Das ist nicht erstrebenswert, da sprungförmige Stellgrößenschwankungen unerwünschte Schwingungen im Regelkreis anregen.

Wird der Parameter K_i sprungförmig geändert, so ändert sich im Zeitbereich nur die Steigung am Ausgang des Integrators. Die Stellgröße hat aber weiterhin einen stetigen Verlauf. Aus diesem Grund wird nur der Verstärkungsfaktor des I-Anteils variiert. Bild 2 zeigt die Struktur dieses adaptiven Fuzzy-PI-Reglers.

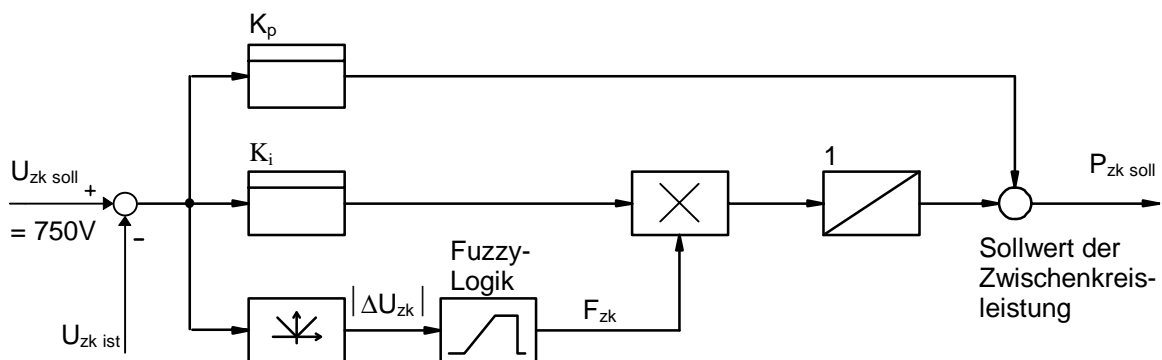


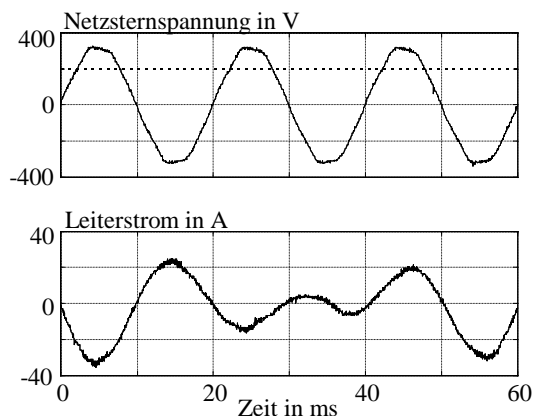
Bild 3: Adaptiver Fuzzy-PI-Regler für die Regelung der Zwischenkreisspannung.

Der Entwurf eines Fuzzy-Reglers [6] bietet eine Vielzahl von Freiheitsgraden. Hier fließt heuristisches Wissen ein, das nicht durch den formalen Entwurfsalgorithmus ersetzt werden kann. Für diese Regelungsaufgabe gilt:

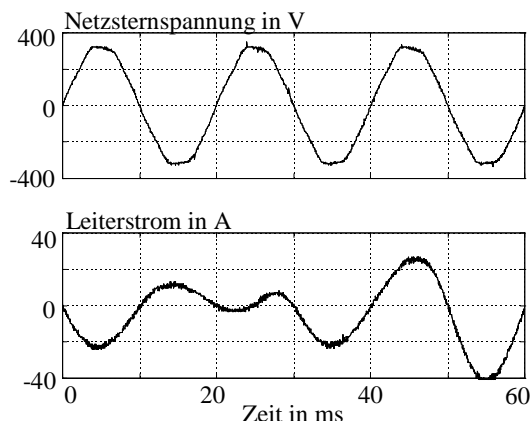
- kleine Regelabweichung - kleine I-Verstärkung - ruhiges Ausregeln kleiner Störungen
- große Regelabweichung - große I-Verstärkung - schnelles Ausregeln der großen Störung

Nach diesen Regeln wurde sinngemäß die Fuzzy-Komponente implementiert. Der I-Anteil des Reglers wird mit zunehmender Regelabweichung größer. Allerdings wird er vor Erreichen der Stabilitätsgrenze wieder auf einen kleinen Wert zurückgesetzt.

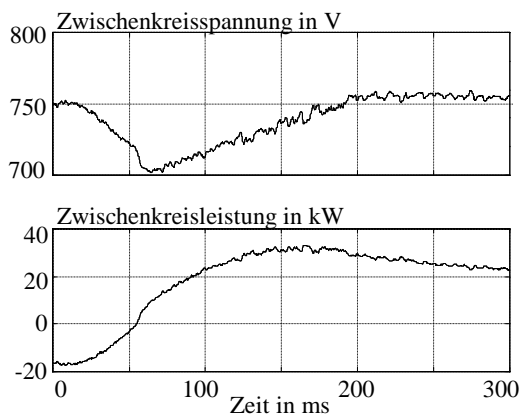
Das Ergebnis dieser Zwischenkreisspannungsregelung ist in Bild 4 rechts zu sehen. Bei dem Lastwechsel von 40 kW schwankt die Gleichspannung nur geringfügig um den Arbeitspunkt von 750 V. Unter Verwendung des einfachen PI-Reglers ohne Fuzzy-Komponente würde die Gleichspannung bei sonst gleichen Versuchsbedingungen von 750 V auf 700 V absinken (Bild 4, links).



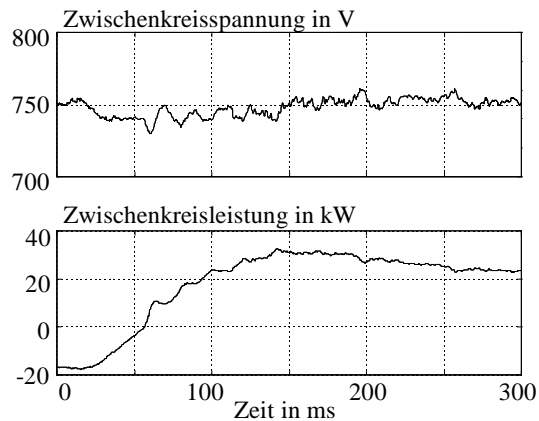
Stromregelung mit verallgemeinertem PI-Regler
(Ausschnitt über 3 Netzperioden)



Stromregelung mit Deadbeat-Zustandsregler
(Ausschnitt über 3 Netzperioden)



Zwischenkreisspannungsregelung mit PI-Regler
(gesamter Vorgang)



Zwischenkreisspannungsregelung mit Fuzzy-PI-Regler
(gesamter Vorgang)

Bild 4: Messung der Netz- und Zwischenkreisgrößen bei einem Lastwechsel von 20 kW Generatorbetrieb auf 20 kW Motorbetrieb.

4. Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren sind die Kosten für Bauelemente der Leistungselektronik sehr zurückgegangen. Aufgrund der rasanten Entwicklung auf diesem Gebiet wird diese Tendenz weiter anhalten. Das macht den Einsatz selbstgeführter Netzstromrichter nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich interessant.

In Prüfständen für Verbrennungsmotoren werden heute zum Teil noch Wirbelstrombremsen als Belastungseinrichtung verwendet. In diesen Wirbelstrombremsen wird die gesamte vom Verbrennungsmotor erzeugte Energie in Wärme umgesetzt. Werden anstelle der Wirbelstrombremsen drehzahlgeregelte Generatoren mit dazugehörigem Netzstromrichter als Belastungseinrichtung eingesetzt, kann die vom Verbrennungsmotor erzeugte Energie in hochwertige elektrische Energie umgewandelt und in das Versorgungsnetz eingespeist werden.

In der Aufzugstechnik z.B. werden die selbstgeführten Netzstromrichter bereits heute mit Erfolg eingesetzt [7].

Der in diesem Aufsatz behandelte Zustandsregler für die Regelung der Netzströme und die dazugehörige Netzspannungsaufschaltung eignet sich für die Implementierung auf einem digitalen Prozessor. Hier liegen seine Vorteile: Mit dem sehr schnellen Regler und der präzisen Störgrößenaufschaltung der Netzspannung können die Netzströme sinusförmig und phasenrichtig eingepreßt werden.

Bei dem Entwurf des Zwischenkreisspannungsreglers wurde bewußt von einer Störgrößenaufschaltung der Motor- bzw. Generatorleistung abgesehen. Der selbstgeführte Netzstromrichter kann aufgrund des vorgeschlagenen Fuzzy-PI-Reglers mit relativ konstanter Zwischenkreisspannung völlig autark und ohne Kenntnis der an der Gleichspannungsquelle angeschlossenen Verbraucher arbeiten.

Literatur:

- [1] Meyer, M.: Leistungselektronik. Springer, Berlin 1990
- [2] Burger, B.: Transformatorloses Schaltungskonzept für ein dreiphasiges Inselnetz mit Photovoltaikgenerator und Batteriespeicher. Dissertation Universität Karlsruhe 1997
- [3] Kalaschnikow S.N.: Regelung des netzseitigen Pulsstromrichters eines Vier-Quadranten-Spannungszwischenkreis-Umrichters. ELIN-Zeitschrift (1994) H. 3/4, S. 102-111
- [4] Föllinger, O.: Regelungstechnik. Hüthig, Heidelberg 1990
- [5] Föllinger, O.: Lineare Abtastsysteme. Oldenbourg, München 1993
- [6] Kahlert, J.: Fuzzy Control für Ingenieure. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1995
- [7] Herrmann, G.; Liebhart, K.H.: Elektrisches Antriebssystem für Aufzüge in Frequenzumrichtertechnik. etz (1997) H. 1/2, S. 8-9
- [8] Späth, H.: Steuerverfahren für Drehstrommaschinen. Springer Verlag 1983