

Kurzfassung zur Dissertation von Herrn Matthias Marcks mit dem Titel
„Direkte Regelung eines Matrixumrichters sowie die Möglichkeiten zum stromlosen Schalten“

Der zwangskommutierte Direktumrichter ist seit mehr als 30 Jahren immer wieder Thema theoretischer Arbeiten mit z.T. bemerkenswertem Tiefgang. Während der natürlich kommutierende Thyristor-Direktumrichter (Cycloconverter) im Bereich hoher Leistungen in der Vergangenheit durchaus Anwendungsgebiete gefunden hat, ist dies für den zwangskommutierten Direktumrichter - wahrscheinlich aufgrund der bevorzugten Entwicklungsrichtung bei den Leistungshalbleitern - nicht der Fall. Die gegenwärtige Situation ist durch eine positive Rückkopplung zwischen der in der Praxis vorherrschenden Topologie des hart schaltenden U-Umrichters und der darauf gerichteten Optimierung der Leistungshalbleiter gekennzeichnet. Daß aber auch andere Ansätze ernsthaft untersucht werden sollten, zeigt u. A. der gegen Ende der Arbeit von Herrn Marcks gestartete DFG-Scherwerpunkt „Halbleiter hoher Leistung“ in dem sowohl symmetrisch sperrende als auch bidirektionale Halbleiterschalter einschließlich dazu passender Schaltungstopologien (also auch I-Umrichter und Matrixumrichter) untersucht werden. Mit den heute vorhandenen, auf den U-Umrichter hin optimierten Halbleitern hat der zwangskommutierte Direktumrichter nur geringe Chancen, gleichwohl könnte sich dies durch die Entwicklung angepaßter Halbleiterschalter durchaus ändern.

Die vorliegende Arbeit von Herrn Marcks behandelt hauptsächlich drei Gebiete:

- a) Steuerverfahren für Matrixumrichter mit PWM
- b) Entwicklung und Erprobung eines **direkten** Regelverfahrens für Matrixumrichter
- c) Resonanter, stromlos abschaltender Matrixumrichter.

Zu a): Steuerverfahren für Matrixumrichter mit PWM

Als Einstieg wird zunächst das aus der Literatur bekannte, anschauliche Verfahren der „fiktiven Gleichrichtung“ dargestellt und auf dessen Beschränkung bezüglich Ausgangsspannung und Eingangsblindleistung hingewiesen.

Leistungsfähigere Steuerverfahren wurden 1980 von Venturini und Alesina angegeben. Unabhängig davon entstand am Institut für Stromrichtertechnik und Antriebsregelung der THD im gleichen Zeitrahmen die Dissertation von M. Braun. Die genannten Arbeiten kombinieren die von Gyugyi 1970 angegebenen Verfahren des „unrestricted frequency changer“ ($f_s=f_E+f_A$), das den lastseitigen Phasenwinkel mit umgekehrten Vorzeichen am Eingang abbildet und des „slow switching frequency changer“ ($f_s=f_E-f_A$), das den lastseitigen Phasenwinkel unverändert am Eingang wiedergibt derart, daß sowohl das lastseitige Spannungssystem als auch die eingangsseitige Blindleistung unabhängig voneinander gesteuert werden können. Herr Marcks erweitert den Venturini-Ansatz (zusätzlicher Parameter j_z) und bestimmt die im Ansatz eingeführten Koeffizienten durch numerische Optimierung, mit dem Ergebnis, daß partiell eine höhere Spannungsaussteuerung verglichen mit Venturini erreicht wird. Allerdings hat Herr Marcks keinen Vergleich mit dem an und für sich weitergehenden Ansatz von M. Braun durchgeführt.

Zu b): Die Entwicklung und Erprobung eines direkten Regelverfahrens für den Matrixumrichter stellt einen Kernpunkt der Arbeit dar. Bei dem zuvor beschriebenen Modulationsverfahren wurde davon ausgegangen, daß eingangsseitig starre, sinusförmige und symmetrische Spannungsquellen und ausgangseitig ebensolche Stromquellen vorhanden seien. In der Realität wird jedoch netzseitig ein L-C-Filter verwendet, um die ins Netz eingespeisten Oberschwingungsströme zu begrenzen. Schalthandlungen im Umrichter sowie gegebenenfalls Störungen im Netz können Schwingungen dieses L-C-Filters anregen. Zur Bedämpfung dieser Schwingungen können entweder verlust erzeugende Ohm'sche Widerstände in die Filter eingebaut werden oder es wird eine aktive Dämpfung mit Hilfe einer Regelung eingeführt. Herr Marcks entschied sich für die aktive Dämpfung. Bei Verwendung des im vorangegangenen Abschnittes beschriebenen Steuerverfahrens müßte die aktive Dämpfung durch eine überlagerte Regelschleife erzielt werden. Ob dieser Weg zum Ziel führen würde, ist aus folgendem Grund offen:

In einer etwa zeitgleich durchgeführten Dissertation trat bei Herrn Meinhardt das Problem der aktiven Bedämpfung eines netzseitigen L-C-Filters mit Hilfe eines stromeinprägenden Wechselrichters auf. Dabei wurde festgestellt, daß eine direkte Regelung der Kondensatorspannung dieses Filters mit Hilfe eines Schaltreglers zu einer wesentlich robusteren Regelung führt, als ein Pulsweitenmodulator mit überlagelter Regelschleife zur Dämpfung dieses Filters.

Von daher bietet es sich an, auch für den Matrixumrichter ein direktes Regelverfahren zu entwickeln und zu erproben. Dabei werden zwei Regelziele verfolgt:

- 1.) Regelung des Laststromes auf einen geforderten Sollwert und
- 2.) erzeugen eines möglichst sinusförmigen, blindstromfreien Netzstromes, was gleichzeitig die aktive Bedämpfung des Netzfilters beinhaltet. Dazu wird zunächst anhand eines einphasigen Ersatzschaltbildes in der Phasebene gezeigt, daß zur Stabilisierung des ungedämpften Systems zweiter Ordnung mit Totzeit eine geneigte Schaltgerade für einen Schaltregler erforderlich ist. Diese Neigung der Schaltgeraden bedeutet

eine Abhängigkeit des Schaltaugenblicks von der Filterkondensatorspannung. Da diese jedoch nicht gemessen werden soll, wird statt dessen eine Differentiation des Netzstromes (D-Anteil) verwendet.

Zur Entwicklung des Schaltreglers wird für jeden der 27 zulässigen Schaltzustände des Matrixumrichters der Raumzeiger der Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Eingangsspannungen (Tabelle 2.2) sowie der Raumzeiger des Eingangstromes in Abhängigkeit des Ausgangsstromes (Tabelle 2.3) angegeben. Die 27 zulässigen Schaltzustände des Matrixumrichters lassen sich bezüglich des Ausgangsspannungsraumzeigers (oder des Eingangstromraumzeigers) in vier Gruppen einteilen:

Neben den Nullzeigern gibt es, ähnlich wie beim Zwischenkreisumrichter, Schaltzustände (Typ 3) die Ausgangsspannungsraumzeiger fester Winkellage in vielfachen von 60° erzeugen. Im Gegensatz zum Zwischenkreisumrichter variieren jedoch die Längen dieser Zeiger entsprechend der Eingangsspannung. Daneben gibt es Ausgangsspannungszeiger, die mit dem Eingangsspannungszeiger rotieren (Typ 1) beziehungsweise gegensinnig dazu rotieren (Typ 2) und gegenüber diesem in Vielfachen von 120° versetzt sind. Bei der entwickelten (nicht prädiktiven) direkten Regelung interessiert nur die Richtung des Ausgangsspannungsraumzeigers in Bezug auf die des Eingangsspannungsraumzeigers bzw. die Richtung des Eingangstromraumzeigers in Bezug auf die des Ausgangsstromes. Mit Hilfe dieser Richtungsinformation wird der nächste Schaltzustand bestimmt, die Dauer dieses Schaltzustandes wird durch zyklisches Überprüfen der Regelabweichung festgelegt.

Um eine Abweichung zwischen dem Ist-Raumzeiger des Ausgangsstromes und dessen Soll-Raumzeiger zu verkleinern, muß eine Ausgangsspannung erzeugt werden, die in Richtung des Fehlerstromraumzeigers liegt. Die Richtung des Ausgangsspannungszeigers wird in sechs Sektoren ($\hat{=} 60^\circ$) diskretisiert, während das Eingangsspannungssystem in zwölf Sektoren unterteilt werden muß. Diese zwölf Sektoren bilden die Spalten und die möglichen Schaltzustände die Zeilen einer Matrix (Bild 2.31), deren Elemente die Sektornummer angeben, in dem der Raumzeiger der zugehörigen Ausgangsspannung liegt. Dabei zeigt sich, daß es stets mindestens drei Schaltzustände des Matrixumrichters gibt, die eine Ausgangsspannung erzeugen, deren Raumzeiger in einem gewünschten Sextanten liegen. Wenn die Regelung des Ausgangsstromes die einzige Aufgabe wäre, dann könnte sie in jedem Fall erfüllt werden. Tatsächlich soll aber zusätzlich ein sinusförmiger Netzstrom eingestellt werden, welches die aktive Dämpfung von Schwingungen des Netzfilters mit einschließt. Dual zu der oben erwähnten Matrix wird eine zweite (Bild 2.32) verwendet. Deren zwölf Spalten geben den Sektor in dem der Ausgangstromraumzeiger liegt an, die Matrixelemente geben den Sextanten an, in dem der zugehörige Eingangstromraumzeiger liegt. Der Raumzeiger des Netzstromfehlers bestimmt zusammen mit seiner Ableitung (als Ersatz für die nicht gemessene Spannung des Filterkondensators) den Wunsch an den Netzstromregler. Wenn die Netzstromregelung die einzige Aufgabe wäre, dann gäbe es stets vier mögliche Schaltzustände des Matrixumrichters, die zu einem Eingangstrom führen, dessen Raumzeiger in einem gewünschten Sextanten liegt.

Tatsächlich müssen aber gleichzeitig beide eingangs definierten Regelziele angestrebt werden. Nach meßtechnischer Erfassung des Eingangsspannungsraumzeigers liegt die Spalte in der ersten erwähnten Matrix fest, ebenso liegt durch Messung der Ausgangsströme die Spalte der zweiten Matrix fest. Gesucht wird in diesen Spalten nach den Sextanten, die der Richtung des ausgangs- bzw. eingangsseitigen Fehlerraumzeigers entsprechen. In günstigen Fällen gibt es wenigstens einen Schaltzustand der beide Regelgrößen in die gewünschte Richtung bewegt. In der Realisierung findet diese Suche nicht On-Line statt, sondern es werden alle möglichen Kombinationen von 12 Eingangszuständen mit je 6 ausgangsseitigen Wünschen sowie den zwölf Ausgangszuständen mit je 6 eingangsseitigen Wünschen in einer Tabelle mit 5184 Elementen abgelegt, auf die dann On-Line zugegriffen wird.

Neben den günstigen Fällen muß mit unvereinbaren Forderungen durch die beiden Regelaufgaben gerechnet werden. Dann wird nur diejenige Regelaufgabe befriedigt, bei der momentan die größere Abweichung vorliegt. Da zur Befriedigung einer einzelnen Regelaufgabe stets mehrere Schaltzustände zur Verfügung stehen, wird die Auswahl des Schaltzustandes anhand der in drei Stufen diskretisierten (klein - mittel - groß) Regelabweichung getroffen.

Da in diesen Fällen (mit unvereinbaren Forderungen) das jeweils andere Regelungsziel nicht berücksichtigt wird, wird dessen Regelabweichung größer, so daß es bei einem der folgenden Zyklen bearbeitet wird.

Anschließend werden Meßergebnisse vorgestellt, die an dem später noch detailliert beschriebenen Prüfstand erzielt wurden. Auffällig ist dabei, daß die Netzströme mit vergleichsweise großen Oberschwingungen behaftet sind. Hierzu gibt Herr Marcks in seinem Schlußwort als Ursache an, daß beim experimentellen Aufbau mit dem vorhandenen Signalprozessor eine Zykluszeit von $50\mu\text{s}$ nicht unterschritten werden konnte. Somit können Änderungen von Schaltzuständen nur in diesem Raster initiiert werden. Simulatorisch wird das System auch bei kleineren Zykluszeiten des Reglers untersucht. Hierzu zeigt Bild 5.1 eine Simulation mit einer Zykluszeit von $10\mu\text{s}$. Bei dieser verkürzten Zykluszeit sind auch die Netzströme sehr gut sinusförmig.

Im Kapitel 3 wird über die Realisierung des hartgeschalteten Matrixumrichters berichtet, wobei zunächst die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Kommutierung gegenüber gestellt werden. Die Kommutierung über einen Parallelkreis, der eine eingangs- und eine ausgangsseitige Diodenbrücke enthält ist zwar robust, die in

dem Parallelkreis eingespeiste Energie kann jedoch nur mit hohem Aufwand genutzt werden. Im folgenden werden daher verschiedene Kommutierungsstrategien ohne Parallelkreis, die über mehrere Schritte ablaufen diskutiert. Unterschiedliche Abläufe ergeben sich jeweils für Kommutierungen bei denen die Leistung in der kommutierenden Phase erhöht (Aufwärtskommutierung) oder erniedrigt (Abwärtskommutierung) wird. Wenn ein großer Aufwand in der Meßtechnik getrieben wird und sowohl das Vorzeichen der Kommutierungsspannung als auch das Vorzeichen des zu kommutierenden Laststromes bekannt sind, dann läßt sich die Aufwärtskommutierung in drei Schritten und die Abwärtskommutierung in zwei Schritten erreichen. Steht eines der beiden Vorzeichen nicht zur Verfügung, dann benötigt eine Kommutierung vier Schritte. In allen Fällen kommt es entscheidend auf eine fehlerfreie und störsichere Meßwerterfassung und Signalverarbeitung an. Fehler der Vorzeichenerfassung führen entweder zum Kurzschluß der Kommutierungsspannung mit entsprechend hohem Kurzschlußstrom der Halbleiter oder zum Versuch des Abschaltens des induktiven Laststromes mit entsprechend hoher Überspannung an den Halbleitern. Es wird gezeigt, daß auch das gleichzeitige Verwenden der Vorzeichen von Spannung und Strom keine zusätzliche Sicherheit bringt, jedes einzelne Signal muß für sich alleine absolut zuverlässig sein. Aufgrund der Nullpunktfehler der Stromwandler entschied sich Herr Marcks für die Version der vierschrittigen Kommutierung unter Verwendung des Vorzeichens der Kommutierungsspannung.

Besondere Sorgfalt verwendete Herr Marcks auf einen möglichst niederinduktiven Aufbau des Leistungsteiles (400V, 10kW). Umfangreiche Maßnahmen zum Erreichen der elektromagnetischen Verträglichkeit waren insbesondere bei der Signalverarbeitungshardware erforderlich. In weiteren Unterkapiteln geht Herr Marcks auf die Meß- und Schutzeinrichtungen ein, wobei er insbesondere den Überspannungs- und den Überstromschutz sowie die Erfassung des Kommutierungsspannungsvorzeichens behandelt.

Zu c): Resonanter, stromlos abschaltender Matrixumrichter

Neben dem im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen hartschaltenden Matrixumrichter untersucht Herr Marcks in einem weiteren Schwerpunkt seiner Arbeit einen resonanten Matrixumrichter, der pro Ausgangsphase einen Serien-Resonanzkreis zum stromlosen Ausschalten der IGBTs verwendet. Gegenüber dem hartgeschalteten Matrixumrichter werden also nur drei Serien-Resonanzkreise zusätzlich benötigt. Während beim hartgeschalteten Typ die Ausgangsspannung aus Ausschnitten der Eingangsspannungen zusammengesetzt wurde, wird beim resonanten Typ auch in kommutierungsfreien Zeitabschnitten periodisch eine Schwingung des Resonanzkreises angestoßen, wobei die Ausgangsspannung im zeitlichen Mittelwert dem zugeordneten Ausschnitt aus den Eingangsspannungen entspricht. Diesem Mittelwert ist jedoch die Resonanzschwingung überlagert. Eine Änderung des Schaltzustandes dieses Matrixumrichters kann jetzt nur noch zu diskreten Zeitpunkten, die durch die Resonanzschwingung bestimmt sind durchgeführt werden. Die hier projektierte Periodendauer einer Schwingung des Resonanzkreises beträgt jedoch nur $T_r=4,5\mu s$

Zur Analyse dieser resonanten Schaltung eignet sich die Darstellung in der Phasenebene des Schwingkreises besonders gut. Dabei ist wieder zwischen der abwärts- und der aufwärts- Kommutierung zu unterscheiden. Letztere läßt sich als zweistufige Kommutierung so ausgestalten, daß ein Beanspruchungsminimum für die Leistungshalbleiter erreicht wird. Randbedingungen für die Dimensionierung der Schwingkreiselemente werden hergeleitet und damit für die folgenden Simulationsläufe Parameter festgelegt. Das direkte Regelverfahren, welches im vorangegangenen Abschnitt für den hartschaltenden Umrichter entwickelt wurde, wird auch beim resonanten, stromlos abschaltenden Umrichter verwendet.

Die Simulationsergebnisse demonstrieren die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Vorschlages und veranschaulichen im Detail die komplizierten Abläufe bei den verschiedenen Kommutierungsarten.

Einer vollständigen Realisierung des resonanten Matrix Umrichters stehen jedoch erhebliche Anforderungen im Hinblick auf präzise und störungssichere meßtechnische Erfassung von Strömen und Spannungen, und einer extremen schnellen und zugleich extrem störsicheren Signalverarbeitung entgegen.

Wichtige realisierungsbezogene Problemfelder werden in Kap. 4 behandelt. Jeder Schalter des Matrixumrichters enthält eine Reihenschaltung aus IGBT und Diode. Diese Reihenschaltung wird meßtechnisch untersucht wobei ein Prüfstand aufgebaut wurde in dem unterschiedliche Resonanzelemente (Luftdrosseln und Kondensatoren) zur Variation der Einschaltstromsteilheiten und Resonanzfrequenz eingesetzt werden. Wie zu vermuten wachsen mit der Einschaltstromsteilheit auch die Einschaltverluste im IGBT und zwar um den Faktor 10, wenn die Einschaltstromsteilheit von 10 A/ μs auf 70 A/ μs erhöht wird. Beim Ausschalten entstehen im IGBT selbst erwartungsgemäß keine nennenswerte Verluste. Die Seriodiode zeigt jedoch mit wachsender Ausschaltstromsteilheit erwartungsgemäß eine wachsende Rückstromspitze. Diese regt den Schwingkreis an, der bei gesperrtem IGBT aus der Reihenschaltung von Resonanzinduktivität, Resonanzkapazität sowie der parasitären Schalterkapazität besteht. Während der Rückstromspitze kommt es zu einer starken Spannungsschwingung an der Diode wodurch Diodenausschaltverluste in einer ähnlichen Größenordnung wie die Einschaltverluste des IGBTs entstehen. Aus den für unterschiedliche Stromsteilheiten ermittelten Einzel- und Gesamtverlusten läßt sich ablesen, daß eine vernünftige Auslegung des Resonanzkreises eine Stromsteilheit von ungefähr 25 A/ μs realisieren sollte.

Zur Signalverarbeitung beim resonanten Matrixumrichter werden in Kapitel 4.3 Vorschläge gemacht. Es müssen Spannungen der Resonanzkondensatoren und die Eingangsspannungen störungsfrei erfaßt wer-

den. Weiterhin werden die Nulldurchgänge der Schalterströme benötigt. Wie zuvor gezeigt, führt die Seriene diode im Abschaltaugenblick des IGBTs einen Rückstrom der über eine Resonanzschwingung zu einer großen Spannung am Schalter führt. Da ohnehin die Spannung am Schalter gemessen wird, kann aufgrund dieses Effektes aus der Schalterspannung auf den Stromnulldurchgang geschlossen werden, so daß eine zusätzliche Schalterstrommessung entfällt. Herr Marcks gibt das Prinzip einer Signalverarbeitungshardware an, mit der die komplexen Kommutierungsabläufe gesteuert werden können.

P. Mutschler)