

Mike Meinhardt „Stromeinprägender, transformatorloser Photovoltaik Wechselrichter mit konkurrierenden Schaltreglern für gleich- und wechselstromseitigen Zustandsgrößen.“ Darmstädter Dissertation 1997 (Übersicht)

Die Mehrzahl der derzeit in der Praxis verwendeten Photovoltaik - Wechselrichter sind einphasige Spannungsquellenwechselrichter mit einem Transformator zur Spannungsanpassung; der Schwerpunkt der Leistungen liegt zwischen 1 und 2 kW. Für größere Anlagen ab 5 kW muß eine dreiphasige Netzeinspeisung erfolgen. Für diesen Leistungsbereich wird eine möglichst günstige Wechselrichter - Lösung gesucht. Zunächst wird auf die Schnittstellen eines Photovoltaik - Wechselrichters eingegangen. Zum Einen ist dies der Solargenerator und zum Anderen das Niederspannungsnetz. Beim Solargenerator wird die notwendige Hintergrundinformation zu dem elektrischen Verhalten und der daraus resultierenden Modellbildung für die spätere Simulation zusammengetragen. Auf die zwischen Solargenerator und Erde wirksame Kapazität wird insbesondere deshalb eingegangen, weil über sie bei einem transformatorlosen Wechselrichter ein störender Erdstrom fließen kann.

Im Kapitel über das Niederspannungsnetz wird zunächst zusammengestellt, mit welchen Unsymmetrien und Oberschwingungen in der Netzspannung am Anschlußpunkt des Wechselrichters zu rechnen ist. Dies führt zu einem einfachen Netzmodell, das in späteren Simulationen verwendet wird. Unter den so vorgegebenen Anschlußbedingungen des Wechselrichters muß dieser bei seinem Betrieb Grenzwerte für die von ihm ausgehenden Störungen einhalten. Zunächst müssen diese Grenzwerte aus mehreren Quellen (Normen, Richtlinien usw.) zusammen getragen werden. Im Frequenzbereich unterhalb 2 kHz (einschließlich DC) ist für die Vielfachen der Netzfrequenz eine jeweils zulässige Oberschwingungs - Strom - Amplitude vorgegeben. Oberhalb von 2 kHz existiert eine Lücke in den Vorgaben. Für Frequenzen zwischen 10 kHz und 150 kHz sind Grenzwerte für Funkstörspannungen einzuhalten. Diese werden in Grenzwerte für Oberschwingungsströme umgerechnet, so daß auch hier Grenzwerte in Form von zulässigen Oberschwingungsströmen vorliegen. Der Bereich zwischen 2 kHz und 10 kHz wird derzeit von keiner Norm für die leitungsgebundenen Störungen erfaßt. Es wäre aber sicherlich kein besonders weitsichtiges Vorgehen einen Wechselrichter zu entwerfen, der in diesem Frequenzbereich besonders hohe Oberschwingungsströme ins Netz einspeist. Die bestehende Definitionslücke wird in dieser Arbeit durch Extrapolation der Grenzwerte aus dem Bereich unterhalb von 2 kHz geschlossen. Insgesamt liegt damit eine Grenzkurve für die zulässigen Oberschwingungsströme im gesamten interessierenden Frequenzbereich vor (Bild 3.7). An dieser Grenzkurve werden die späteren Wechselrichter - Entwürfe gemessen. Nach dieser einführenden Behandlung der beiden Schnittstellen (PV-Generator und Netz) befassen sich die zentralen Kapitel mit dem Wechselrichter selbst. In der Regel besitzen die heute eingesetzten PV - Wechselrichter einen Transformator zur Spannungs - Anpassung. Die Vor- und die Nachteile von Wechselrichtern mit und ohne Netztransformator werden einführend gegenübergestellt. Als Vorteile transformatorloser Anlagen erweisen sich die geringen Verluste im Nennbetrieb, die geringeren Investitionskosten, das geringere Gewicht und Bauvolumen sowie der geringere Energieaufwand zur Herstellung des gesamten Wechselrichters. Diesen überzeugenden Vorteilen des transformatorlosen Wechselrichters stehen aber auch einige zu lösende Probleme gegenüber. Durch den Wegfall eines spannungsanpassenden Transformators entsteht der Zwang zu einer vergleichsweise hohen Gleichspannung des Solargenerators.

Die heute in der Praxis meist verwendeten Spannungsquellen - Wechselrichter (U-WR) besitzen einen Transformator und sind einphasig ans Netz angeschlossen. Würde man zur dreiphasigen Vollbrücke übergehen und diese ohne Transformator ans Netz anschließen, dann könnte bei entsprechender Witterung auf der Gleichspannungsseite eine Leerlaufspannung des Solargenerators von deutlich über 1000 V auftreten. Hierfür sind aber die heute verfügbaren PV - Module nicht zugelassen. Anders liegen die Verhältnisse beim dreiphasigen, gepulsten Stromquellen- Wechselrichter (PI-WR). Dort wird eine wesentlich niedrigere Gleichspannung benötigt, da er hochsetzend arbeitet. Dafür sind die heutigen PV - Module ohne Weiteres geeignet. Somit impliziert die Entscheidung für einen transformatorlosen Wechselrichter bei dreiphasiger Ausführung gleichzeitig die Festlegung auf den Stromquellen-Wechselrichter.

Als weitere Konsequenz des transformatorlosen Ansatzes ist das Problem des über die gegebenenfalls große Kapazität zwischen dem flächenhaften Solargenerator und Erde

fließenden Störstromes zu sehen. Verursacht wird dieser Störstrom durch die schaltende Arbeitsweise des Wechselrichters. Zur Analyse des Problems entwickelt Herr Meinhardt ein Ersatzschaltbild in Form einer innenwiderstandsbehafteten Spannungsquelle, das den zu untersuchenden Störstrom liefert. Die Spannungsquelle dieser Ersatzschaltung repräsentiert diejenige Spannung, die zwischen dem Sternpunkt des Netzes und dem Mittelpunkt des Solargenerators dann entstehen würde, wenn kein Störstrom fließen könnte, wenn also die Kapazität zwischen Generator und Erde Null wäre. Das Spektrum dieser Spannung zwischen Sternpunkt des Netzes und Mittelpunkt des Solargenerators wird simulatorisch ermittelt. (Das bei der Simulation unterstellte Regel- und Steuerverfahren wird erst in späteren Kapiteln erläutert.) Das Spektrum dieser Spannung hängt von der Bestrahlungsstärke ab und hat unter gewissen Randbedingungen einen beachtlichen großen Gleichanteil. In jedem Fall treten bei der mittleren Schaltfrequenz erhöhte Spannungsamplituden auf. Der Innenwiderstand, auf den diese Spannungsquelle arbeitet, wird gebildet durch die passiven Elemente des Solargenerator-Modells, sowie durch die gleichstrom- und durch die drehstromseitigen Filterelemente. Belastet wird diese innenwiderstandsbehaftete Spannungsquelle durch die Kapazität zwischen Generator und Erde. Der von der Spannungsquelle aus gesehene Impedanzverlauf hat ein Minimum (Resonanzstelle), welches durch den kleinen Ohm'schen Längswiderstand des PV - Generatormodells gegeben ist. Die Frequenz, an der diese Resonanz auftritt variiert mit der witterungsbedingten Kapazität C_{Erd} zwischen 1,5 kHz und 50 kHz. Die Schaltfrequenz der verwendeten Schaltregler liegt auf jeden Fall innerhalb dieses Bereiches, typisch bei 20 kHz. Es sind daher Maßnahmen einzuführen, mit denen der störende Strom hinreichend klein gehalten wird. Als wirkungsvollste Einzelmaßnahme erweist sich die Bedämpfung des vorhandenen Schwingkreises durch Erdung des Generatormittelpunktes über einen Widerstand $R_{\text{MN}}=100 \Omega$. Dadurch wird der Störstrom um nahezu 2 Zehnerpotenzen reduziert. Nachteilig ist, daß jetzt ein Gleichstrom über Erde fließen kann. Der Gleichanteil des Störstromes wird mit Hilfe des später erläuterten Regelverfahrens klein gehalten. Als weitere Maßnahme zur Verbesserung der Netzfrendlichkeit kann man den vom Generator zur Erde fließenden Strom dadurch teilweise vom Netz fernhalten, daß man den Sternpunkt (S) der netzseitigen Filterkondensatoren über einen Ohm'schen Widerstand erdet. In der so gebildeten Masche sind jedoch die netzseitigen Filterinduktivitäten nicht mehr enthalten, so daß zur Erhöhung der Maschen - Induktivität jetzt gleichstromseitig eine stromkompensierte Drossel zusätzlich eingebaut wird. Mit der Summe dieser Maßnahmen bleibt der störende Erdstrom in allen Betriebsbereichen deutlich unter den zulässigen Werten.

Als Kernstück der Arbeit ist das fünfte Kapitel zu sehen, in dem die Regelung des Wechselrichters behandelt wird. Hier gelingt Herrn Meinhardt eine entscheidende Neuerung. Die zu lösende Problematik läßt sich folgendermaßen umreißen: Sowohl netzseitig als auch gleichspannungsseitig sind schwingungsfähige Filter vorhanden, wobei die Filterelemente möglichst klein sein sollen. Auf der Gleichspannungsseite beinhaltet dies den Wunsch nach einer möglichst kleinen Glättungsdrossel. Je kleiner die Glättungsdrossel gemacht wird, um so weniger ist die „Stromeinprägung“ gegeben, in gleichem Maße wachsen aber die regelungstechnischen Schwierigkeiten. Mit dem gepulsten IWR müssen zwei Regelungsziele erreicht werden. Die vom Solargenerator bereitgestellte Wirkleistung muß ins Netz eingespielt werden, gleichzeitig ist die Blindleistung zu regeln, z.B. $Q_1=0$. Um möglichst sinusförmige Spannungen an den netzseitigen Filterkondensatoren zu erzeugen, wird ein „Raumzeiger - Schaltregler“ eingesetzt.

Aus der Literatur (Diss. Wick, Erlangen) ist für einen spannungseinprägenden - WR ein (Spannungs-) Raumzeiger - Schaltregler zur Einprägung der Motorströme eines Drehstromantriebes bekannt. Das in der vorliegenden Arbeit verwendete Verfahren ist dazu dual: Herr Mienhardt regelt bei einem stromeinprägenden - WR die Spannungen der netzseitigen Filterkondensatoren mit einem (Strom-) Raumzeiger - Schaltregler. Zunächst ist anzunehmen, daß durch direkte Regelung der netzseitigen Kondensatorspannungen (mit einem Schaltregler) nach Betrag und Phase auch die netzseitige Wirk- und Blindleistung in gewünschter Weise eingestellt werden kann. Dies ist im Prinzip richtig. Jedoch zeigt sich, daß mit der angestrebten Verkleinerung der gleichstromseitigen Induktivität, und dem damit einhergehenden Verlust an „Gleichstrom - Einprägung“ das System nicht mehr stabil arbeitet, wenn die Zustandsgröße „Strom durch die Glättungsdrossel“ nicht in die Regelung zurückgeführt wird. Aufgrund dieser Situation hat Herr Meinhardt die Regelstrategie folgendermaßen konzipiert:

Der MPP-Tracker liefert einen Sollwert für die Gleichspannung U_{dc} . Es folgt ein P-I-Regler für die Gleichspannung. Dieser liefert einen Sollwert für den Gleichstrom I_{dc} . Der Gleichstrom wird mit Hilfe eines Zweipunktreglers in einem Hystereseband gehalten. Dieser Zweipunktregler für den Gleichstrom ist jedoch nicht der einzige Regler, der die Schaltzustände des Wechselrichters beeinflusst, es gibt weitere Regelungsziele, die ebenfalls durch geeignete Wechselrichterschaltzustände erreicht werden müssen.

Mit der bisher beschriebenen Regelungsstruktur werden die gleichstromseitigen Zustandsgrößen, also Kondensatorspannung und Induktivitätsstrom, geregelt. Damit sind auch mögliche Schwingungen dieser Größen aktiv gedämpft.

Zur Auslegung des linearen Gleichspannungsreglers muß das Verhalten des unterlagerten Gleichstromregelkreises bekannt sein. Da, wie erwähnt der Gleichstrom - Zweipunktregler nicht der einzige Regler ist, der die Schaltzustände ändert, kann das gesamte Streckenverhalten nur simulatorisch ermittelt werden. Es zeigt sich (Bild 5.19), daß zur Beschreibung des geschlossenen Gleichstrom - Regelkreises ein PT1-Glied verwendet werden kann, dessen Zeitkonstante allerdings nicht konstant ist sondern mit dem Quadrat der Gleichspannung wächst und umgekehrt proportional zum Gleichstrom abnimmt. Trotz dieser Arbeitspunktabhängigkeit kann der Gleichspannungsregler mit dem üblichen Verfahren als PI-Regler dimensioniert werden.

Der Zweipunkt - Gleichstromregler ist nur einer von drei Reglern, welche die Schaltzustände des Wechselrichters **direkt** vorgeben möchten. Um konkurrierende Anforderungen der drei Regler hinsichtlich der Auswahl des Wechselrichterschaltzustandes zu entscheiden, wird jeder Regler mit einer sogenannten Schaltzustandsbewertung ausgeführt. Die Schaltzustandsbewertung für den Gleichstromregler arbeitet folgendermaßen:

Für jeden der sieben möglichen Schaltzustände des Wechselrichters kann man die an der Glättungsdrossel anliegende Spannung als Linearkombination der netzseitigen Kondensatorspannungen und der Gleichspannung angeben. Zur Bildung dieser Linearkombinationen können sieben Operationsverstärker verwendet werden, denen die entsprechenden Meßwerte der erwähnten Spannungen zugeführt werden. Die an der Glättungsdrossel anliegende Spannung für jeden der sieben Schaltzustände ist ein Maß für die bei diesem Schaltzustand auftretende Änderung des Gleichstromes (di_{dc}/dt).

Ein Schaltzustand wird als „sehr gut“ (6) bewertet, wenn er den Strom in das Hystereseband zurückführt. Eine „sehr schlechte“ (1) Bewertung erhält ein Schaltzustand, wenn er den Strom weiter vom Hystereseband wegführt.

Ein zweiter Regler, der ebenfalls die Schaltzustände des Wechselrichters direkt vorgeben möchte, ist der Raumzeigerschaltregler für die netzseitigen Kondensatorspannungen. Die Sollwerte für die drei netzseitigen Kondensatorspannungen werden erzeugt durch einen überlagerten Blindstromregler sowie eine Vorsteuerung. Diese arbeiten in netzsynchron rotierenden d-q-Koordinaten. Mit der Vorsteuerung werden Spannungsabfälle, hervorgerufen durch die jeweils andere Achse, berücksichtigt. Während der Blindstrom durch einen eigenen PI-Regler geregelt wird, stellt sich der Wirkanteil des Netzstromes auf indirekte Weise ein. Da auf der Gleichspannungsseite sowohl die Gleichspannung als auch der Gleichstrom geregelt werden, ist damit auch die mittlere Wirkleistung, die der Solargenerator abgibt, festgelegt.

Der Sollwert für die netzseitige Kondensatorspannung entsteht in der q-Achse durch den Blindstromregler und die Vorsteuerung, in der d-Achse wirkt die Vorsteuerung alleine. Sowohl die Schaltregler für den Gleichstrom als auch der Raumzeigerschaltregler für die netzseitige Kondensatorspannung greifen auf das gleiche Stellglied zu. Im Falle entgegengesetzter Anforderungen an das Stellglied muß eines der Regelungsziele bevorzugt werden. Bevorzugt wird hier immer der Gleichstrom. Damit wird die „Gleichstrom - Einprägung“ mit Hilfe einer Bevorzugung in der Regelung erreicht. Bei konkurrierenden Anforderungen bedeutet das aber auch, daß eine Regelabweichung in der d-Achse der Kondensatorspannung verbleibt. Diese Regelabweichung ist aber auch zu erwarten, denn der Vorsteuerungssollwert für die d-Achse kann einerseits durch Meßfehler und Parameterfehler sowie durch die darin nicht berücksichtigten Verluste im Wechselrichter und den Filtern ja nur als Anhaltswert für die Kondensatorspannung in der d-Achse angesehen werden. Diese Abweichung in der d-Achse stellt sich so ein, daß die (Wirk-) Leistungsbilanz erfüllt wird. Auf diesem indirekten Weg wird also die netzseitige Wirkleistung eingestellt. Das dynamische Verhalten dieser indirekten Wirkstromregelung wird durch eine Simulation demonstriert, bei der eine sprungförmige Änderung der Sonneneinstrahlung unterstellt wird. Der Gleichstrom folgt aufgrund seiner Bevorzugung in der Regelung sehr gut dem Sollwert. Er regt dadurch aber eine Schwingung in der Gleichspannung an, wodurch der netzseitige d-

Achsenstrom (Wirkstrom) über eine gedämpfte Schwingung den neuen Stationärzustand einnimmt.

Wie erwähnt, werden die drei Netzkondensatorspannungen durch einen Raumzeigerschaltregler geregelt. Die Darstellung des Reglers erfolgt im ruhenden α - β -Koordinatensystem. Die Differenz zwischen Soll- und Istwert der netzseitigen Kondensatorspannungen ergibt einen Fehlerraumzeiger. Wenn der Betrag dieses Fehlerraumzeigers größer als eine vorgegebene Schwelle wird, dann wird von diesem Regler ein neuer Schaltzustand gewünscht. Zunächst wird die α - β -Ebene in 12 winkelgleiche Sektoren eingeteilt und festgestellt, in welchem dieser Sektoren der Fehlerraumzeiger liegt. Weiterhin werden die ins Netz fließende Ströme gemessen und daraus die Sektorlage des Netzstromraumzeigers ermittelt. Die bisher angesprochene Signalverarbeitung kann mit Operationsverstärkern (α - β -Transformation) und Komparatoren (Sektoreinteilung) durchgeführt werden. Den 7-Wechselrichterschaltzuständen entsprechen die Richtungen von 7-Wechselrichterstromraumzeigern. Für jeden der 7-Schaltzustände läßt sich der Raumzeiger des Kondensatorstroms als Differenz der Raumzeiger von Netzstrom und Wechselrichterstrom angeben. Die Änderung des Kondensator - Spannungsraumzeigers erfolgt in der Richtung, die durch den oben ermittelten Kondensator - Stromraumzeiger festgelegt ist. Für jeden der 7 möglichen Schaltzustände kann damit zu jeder der möglichen 12 Sektorlagen des Netzstromraumzeigers die Richtung der Änderung des Kondensator - Spannungsraumzeigers bestimmt werden. Dieser Änderungsrichtung soll durch geeignete Wahl des Wechselrichter - Stromraumzeigers möglichst genau entgegengesetzt zu der zuvor bestimmten Richtung des Kondensator - Fehler - Spannungsraumzeigers sein.

Zur Durchführung des Verfahrens wird eine Off-Line erstellte Tabelle (EPROM) verwendet. Die Anzahl der Tabelleneinträge ergibt sich folgendermaßen: $(12 * 12 * 7 = 1.008)$ entsprechend (Sektorlagen des Fehler - Spannungs-RZ * Sektorlagen des Netzstrom-RZ * Anzahl möglicher Schaltzustände). In diese 1.008 Einträge umfassende Tabelle wird Off-Line von Hand jeweils eine Bewertung von 1 bis 6 eingetragen. Die Bewertung ist um so höher je besser der Fehler - Spannungs - RZ in den Ursprung der α - β -Ebene zurückgeführt wird. Weiterhin werden Nullzustände im allgemeinen etwas besser bewertet, damit sie in Realität möglichst häufig ausgewählt werden. Der Sinn liegt darin, daß der noch zu Besprechende dritte konkurrierende Schaltregler für I_{LH} Eingriffsmöglichkeiten erhält. Der I_{LH} Regler hat die Aufgabe, den Gleichanteil im Erdstrom zu Null zu machen.

Beim PIWR sind drei unterschiedliche gleichspannungsseitige Kurzschlüsse (Nullzustände) möglich. Mit Hilfe einer Nullzustandsbewertung wird bei Anforderung eines Nullzustandes derjenige ausgewählt, der zum minimalen Erdstrom führt. Auch hierzu wird eine Bewertungstabelle verwendet.

Zur Auswahl des optimalen Schaltzustandes werden die Bewertungen des Gleichstromreglers und die des netzseitigen Kondensatorspannungsreglers miteinander multipliziert. Im einfachsten Fall gibt es einen einzigen Schaltzustand, der die höchste Bewertung erhält. Es können aber auch mehrere höchste Bewertungen entstehen. Dann wird derjenige Schaltzustand ausgewählt, der die höchste Einzelbewertung des anfordernden Reglers (bei dem das Hystereseband verlassen wurde) aufweist. Wenn jedoch bei beiden Reglern das Hystereseband verlassen ist, dann wird immer der Schaltzustand genommen, der die höchste DC-Bewertung hat. Damit wird die Dominanz des Gleichstromreglers hergestellt (Gleichstrom-Einprägung)

Wie die Simulationen zeigen, muß die gesamte Entscheidung aller konkurrierenden Schaltregler innerhalb von rund $4,5\mu s$ gefällt werden, damit das angestrebte netzfreundliche Verhalten nicht gefährdet wird. Eine Abschätzung für den vorhandenen Signalprozessor TMS 320C30 ergab eine fast doppelt so große Bearbeitungszeit. Zur Realisierung kommt daher vor allen ein kundenspezifischer Schaltkreis (ASIC) in Frage, als Laboraufbau wäre auch an eine größere Schaltung aus Standard - Bauelementen denkbar. Im Rahmen der verfügbaren Bearbeitungszeit konnte dies jedoch nicht verwirklicht werden.

Im 6. Kapitel werden Simulationsergebnisse vorgestellt. Im Stationärbetrieb bei sinusförmiger Netzspannung aber unterschiedlichen Sonneneinstrahlungen ergeben sich Spektren der Oberschwingungen im Netzstrom die deutlich unterhalb der zulässigen Grenzwerte liegen. Allerdings ist der Betrieb bei Teillast kritischer, da die Resonanzfrequenz des netzseitigen Filters nicht so gut bedämpft werden kann. Dies liegt daran, daß bei Teillast der Gleichstromregler sehr oft zum dominierenden Regler wird und damit für die netzseitige Kondensatorspannungsregelung nur wenige Eingriffsmöglichkeiten verbleiben.

Bei überschwingungshaltiger Netzspannung sind die Verhältnisse sehr viel schwieriger. Bei gesperrtem Wechselrichter sind nur die Filter ans Netz geschaltet. Überschwingungen der Netzspannung führen dann natürlich zu Überschwingungsströmen im Netzfilter. Insbesondere in der Nähe der Resonanzfrequenz des Netzfilters (711 Hz) wird der vom Filter aufgenommene Netzstrom um ein vielfaches höher als der zugelassene Grenzwert. Wird nun der Wechselrichter freigegeben, so sorgt die Regelung für eine drastische Abnahme der Überschwingungsströme, vor allem bei Nennbetrieb. Hier werden die Grenzwerte nur noch unwesentlich überschritten.

Bei überschwingungsfreien aber unsymmetrischen Netzspannungen bleiben die Überschwingungen im Netzstrom weitgehend unter den zulässigen Grenzwerten. Das dynamische Verhalten wird simulatorisch mit Hilfe einer schnellen Änderung der Einstrahlung bzw. einer Teilabschattung demonstriert. Es zeigt sich, daß der Gleichstrom stets sehr schnell eingeregelt wird, und daß auch bei Teilabschattungen durch geeignete Nullzustandsauswahl der Gleichanteil im Netzstrom sehr klein gehalten werden kann. Auch eine sprungförmige Änderung des Netzspannungsamplitude wird dynamisch sehr gut beherrscht.

Im 7. Kapitel werden Teilgebiete der Realisierung des Leistungsteiles angesprochen. Die Kommutierung beim stromeinprägenden IGBT-Wechselrichter wird mit Hilfe eines Prüfstandes untersucht. Es treten sowohl natürliche Kommutierungen als auch Zwangskommutierungen auf. Die Einschaltverluste im IGBT bei natürlicher Kommutierung liegen in der selben Größenordnung wie seine Ausschaltverluste bei Zwangskommutierung. Beachtenswert ist das Verhalten der Seriendiode. Sie muß durch eine RC-Beschaltung gegen Überspannung geschützt werden. In der Diode und ihrer Beschaltung treten während der natürlichen Kommutierung Verluste in der Größenordnung von 80% der IGBT Verluste auf. Damit werden die Gesamtverluste (Diode + IGBT + Beschaltung) bei der natürlichen Kommutierung höher als bei der Zwangskommutierung!

Drei Varianten mit unterschiedlichen Gate - Widerständen für die IGBTs sowie unterschiedlichen Beschaltungen für die Diode werden hinsichtlich ihrer Schaltverluste verglichen. Als Optimum wird ein Gate - Widerstand von 20Ω und eine Diodenbeschaltung von 15Ω und $3,3nF$ ermittelt. Aus diesen Meßergebnissen wird dann mit Hilfe einer Häufigkeitsverteilung der Kommutierungsspannungen, die simulatorisch gewonnen wurde, rechnerisch die einzelnen Anteile der Halbleiter und Beschaltungsverluste ermittelt.

In einem weiteren Abschnitt wird gezeigt, daß die Wahl der Nennspannung des Solar-generators einen Kompromiß hinsichtlich Wirkungsgrad einerseits und Regelungsverhalten andererseits erfordert. Eine möglichst hohe Generatorspannung ist aus Verurstgründen wünschenswert, dann sind jedoch die Möglichkeiten für die Regelung eingeschränkt, da es über längere Zeitabschnitte immer nur einen Schaltzustand gibt, mit dem der Gleichstrom abgebaut werden kann. Dies führt aber dazu, daß die netzseitige Kondensatorspannungsregelung in diesen Zeitabschnitten nicht den Schaltzustand bestimmen wird und somit netzseitig mit Abweichungen von Regelungsziel zu rechnen ist.

In zwei abschließenden Abschnitten wird das gleichstromseitige und die netzseitigen Filter ausgelegt. Zu bemerken ist, daß die gleichstromseitige Glättungsdrossel weniger als halb so groß ist, wie ansonsten in der Literatur üblich.

Zusammenfassung:

Es wurde ein neues Regelungskonzept mit konkurrierenden Schaltreglern gefunden, mit dem die Energiespeicher in den Filtern, insbesondere die Glättungsdrossel, deutlich verkleinert werden können. Neu ist sicherlich die Bewertung von Schaltzuständen hinsichtlich der Erfüllung eines vorgegebenen Regelungszieles und das damit verbundene Auffinden eines möglichst günstigen Kompromisses bei divergierenden Wünschen mehrerer Regler an das gleiche Stellglied. Möglicherweise kann dieser Grundgedanke auch auf andere Anwendungen übertragen werden. In diesem neuen Regelungsverfahren sehe ich den Kern und den Fortschritt der Arbeit.

P. Mutschler