



1 Einleitung

Die deutsche Bundesregierung hat in ihrem *Energiekonzept 2010* die energiepolitische Zielsetzung formuliert, bis 2020 die Treibhausgasemissionen um 40 % gegenüber 1990 zu senken. Darüber hinaus sollen diese bis 2050 um 80 bis 95 % gesenkt werden. Zur Erreichung dieses Ziels soll der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch bis 2020 auf 35 % und bis 2050 auf 80 % erhöht werden [1]. Zusammen mit dem Beschluss zum Ausstieg aus der Kernenergie und der daraus resultierenden Abschaltung der letzten Kernkraftwerke bis Ende 2022 [2], bedeutet dies einen erheblichen Wandel der elektrischen Energieversorgung in Deutschland.

Neben der elektrischen Energieerzeugung ändert sich auch die Art des Verbrauchs. Insbesondere der durch verschiedene Gesetzesinitiativen [3–5] geförderte Ausbau der Elektromobilität wird sich auf die Verbrauchsstruktur auswirken. Elektrofahrzeuge haben das Potential, zu den leistungsstärksten Verbrauchern auf der untersten Netzebene aufzusteigen.

Dieser fortschreitende Umbau des Energiesystems erfordert neue technische Ansätze, um den damit einhergehenden Herausforderungen zu begegnen, weiterhin eine stabile und qualitativ hochwertige Energieversorgung sicherzustellen.

1.1 Problemstellung und Lösungsansatz

Die elektrische Energieversorgung in Deutschland verändert sich seit Ende der 1990er Jahre deutlich. Das ursprünglich zentralistisch aufgebaute, von großen, fossil befeuerten Kraftwerken geprägte Versorgungssystem



1 Einleitung

wird zunehmend um kleinere, dezentrale Erzeugungsanlagen erweitert, die Strom aus erneuerbaren Energiequellen gewinnen. Im Zuge dieses Ausbaus erneuerbarer Energien und der zunehmenden Integration dezentraler Erzeuger in die Netze steigt auch der Bedarf zur dezentralen Erbringung von Systemdienstleistungen.

Unter anderem gilt es die bisher von großen – zukünftig wegfallenden – Kraftwerken vorgehaltene Momentanreserve adäquat zu ersetzen. Für das Jahr 2030 wird der Bedarf auf 254 MW geschätzt, der gegenüber 2011 dezentral bzw. durch neue Einspeiser und Verbraucher bereitgestellt werden muss [6, 7]. Momentanreserve ist dabei die in der rotierenden Masse großer Synchrongeneratoren gespeicherte kinetische Energie, die bei Belastungsschwankungen instantan an das Netz abgegeben werden kann. Sie trägt wesentlich zur Kurzzeitstabilität des Netzes bei.

Eine Möglichkeit, Momentanreserve dezentral bereitzustellen, ist das Konzept der Virtuellen Synchronmaschine (VISMA). Eine VISMA bildet das elektrische Verhalten eines Synchrongenerators oder -motors am Netz mithilfe eines leistungselektronischen Umrichters nach. Durch die Simulation der mechanischen Bewegung des Rotors inklusive seiner Massenträgheit und der darin gespeicherten kinetischen Energie, reagiert das System genauso mit der Bereitstellung von Momentanreserve auf Frequenzschwankungen, wie eine reale Synchronmaschine.

Neben der Momentanreserve, die für die globale Stabilität des Verbundnetzes benötigt wird, müssen auch Systemdienstleistungen erbracht werden, die zur lokalen Stabilität auf den unteren Netzebenen beitragen. Hierunter fällt die Spannungshaltung, die im Zuge zunehmender dezentraler Erzeugung an Bedeutung gewinnt. Beispielsweise kann die erhöhte Einspeisung durch Photovoltaikanlagen in einem Niederspannungsnetz zu einer örtlichen Anhebung der Spannung führen.

Um die Netzspannung in den zulässigen Grenzen zu halten, können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden. Eine Möglichkeit ist der Einsatz regelbarer Ortsnetztransformatoren, die ihr Übersetzungsverhältnis im Betrieb an die vorliegenden Spannungsverhältnisse anpassen.

Ansätze, die sich direkt mit umrichterbasierten Erzeugern oder Verbrauchern realisieren lassen, sind die Bereitstellung von Blindleistung oder die spannungsabhängige Regulierung der abgegeben oder aufgenommenen Wirkleistung. Zum Beispiel kann das Laden von Elektrofahrzeugen, so gestaltet werden, dass bevorzugt der lokal erzeugte Strom aufgenommen wird.

Nicht zur Spannungshaltung im eigentlichen Sinne, aber zur Gewährleistung der Spannungsqualität, gehört der Umgang mit Unsymmetrie. Unsymmetrische Netzzustände belasten die Transformatoren und erhöhen die Netzverluste. Eine möglichst symmetrische Aufteilung der Last im Drehstromnetz ist somit erstrebenswert. Auch hierbei ist denkbar, die Ladetechnik von Elektrofahrzeugen zu nutzen, um während des Ladens gezielt einzelne Phasen stärker zu be- oder entlasten und insgesamt eine symmetrischere Ausnutzung des Netzes zu erreichen.

Auf den höheren Netzebenen, die als Dreileiter-System ausgeführt sind, kann ein Dreileiter-Umrichter für die Realisierung der VISMA zum Einsatz kommen. Für die unteren Netzebenen, die stärker unsymmetrischen Belastungen ausgesetzt und deshalb als Vierleiter-Systeme aufgebaut sind, ist ein Vierleiter-Umrichter von Vorteil. Damit können neben Momentanreserve, die über das VISMA-Prinzip bereitgestellt wird, auch Wirk- und Blindleistungsregelung zur Spannungshaltung und Unsymmetriekompensation angeboten werden.

Die vorliegende Arbeit stellt ein Umrichtersystem vor, das mit vier aktiv geschalteten Zweigen an das Vierleiter-Netz angeschlossen wird und als Plattform für die dezentrale Bereitstellung der aufgegriffenen Systemdienstleistungen

- Momentanreserve,
- Spannungshaltung und
- Unsymmetriekompensation

dienen soll. Der Einsatz des Vierleiter-Umrichters ist sowohl für die Netzanbindung stationärer Batteriesysteme als auch in der Ladetechnik für Elektrofahrzeuge denkbar.

1.2 Stand der Technik und Abgrenzung

In der Literatur werden bereits unterschiedliche Umrichtertopologien zur Speisung von Vierleiter-Netzen beschrieben, z. B. Dreileiter-Umrichter mit nachgeschaltetem Dy- oder Dz-Transformator [8], Vierleiter-Umrichter mit passivem Neutralleiter [9] und Vierleiter-Umrichter mit aktiv geschaltetem Neutralleiter [10–14] sowie hybride Varianten aus den beiden letztgenannten [15].

Ebenfalls sind verschiedene Steuer- und Regelverfahren für Vierleiter-Umrichter zu finden. Dabei kann die Spannungssteuerung bzw. die Erzeugung der Schaltpulse für die Leistungshalbleiter eingeteilt werden in Verfahren, die in abc-Koordinaten arbeiten [11, 14, 16–18], und welche, die auf die Implementierung in $\alpha\beta 0$ -Koordinaten zurückgreifen [10, 12, 13, 19–21]. Bei den Stromregelverfahren sind die Regelung in dq-Koordinaten [12, 14, 19], PR-Regler [11, 22] und Zustandsregler [17] sowie H^∞ -Regler mit getrennter Ansteuerung der drei Außenleiter und des Neutralleiters [23, 24] vertreten.

Die vorliegende Arbeit stellt die Hyperraumzeigermodulation als neues Verfahren zur Spannungssteuerung vor. Die dreidimensionale Darstellung von Drehstromgrößen als Hyperraumzeiger wurde in [25] als Alternative zu klassischen, in der Ebene liegenden Raumzeigern vorgeschlagen. Zwar können Raumzeiger um eine Nullkomponente erweitert werden, um unsymmetrische Systeme zu behandeln, jedoch hat die Nullkomponente im Gegensatz zu α - und β -Komponente keine geometrische Bedeutung. Hyperraumzeiger liefern hier eine insgesamt in sich geschlossener Darstellung.

Die Hyperraumzeigermodulation wird für die vorliegende Arbeit mit einem sogenannten Proportional-Resonanz-Regler (PR-Regler) kombiniert. Der Einsatz von PR-Reglern zur Stromregelung in der Leistungselektronik ist in der Fachliteratur ausführlich beschrieben [26–29].

Das am Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme der TU Clausthal entwickelte Konzept der Virtuellen Synchronmaschine (VISMA) wurde erstmals 2007 in [30] vorgestellt. Seither ist es Gegenstand fortlaufender Forschungsarbeit [31–39]. Parallel zur Weiterentwicklung der VISMA werden in den letzten Jahren auch an anderen Forschungsstandorten ähnliche Vorhaben zur Nachbildung des elektrischen Verhaltens elektromechanischer Synchronmaschinen bzw. ihrer netzstützenden Eigenschaften mithilfe von leistungselektronischen Umrichtern verfolgt. Hier ist unter anderem das VSYNC-Projekt [40–43] zu nennen. Weitere Verfahren, die in die gleiche Richtung zielen, sind in [44–48] beschrieben.

Alternative Ansätze zur Erbringung von Systemdienstleistungen, z. B. über den Einsatz von Frequenz- und Spannungsstatiken [49, 50] sowie die Wirk- und Blindleistungsregelung [22] oder die Behandlung von Unsymmetrien mit Vierleiter-Umrichtern [51, 52] sind ebenfalls zu finden.

Der innovative Ansatz der vorliegenden Arbeit liegt in der Kombination aus Vierleiter-Umrichter mit aktiv moduliertem Neutralleiter, neu entwickelter Hyperraumzeigermodulation und digital implementierter Stromregelung als Ausgangsbasis für die Realisierung einer Virtuellen Synchronmaschine bzw. für die Erbringung von Systemdienstleistungen.

1.3 Aufbau der Arbeit und Systemübersicht

Die Gliederung der vorliegenden Arbeit orientiert sich am Aufbau des entwickelten Umrichtersystems. Die Systemübersicht in Abbildung 1.1 zeigt schematisch seine Architektur. Der Umrichter ist als Ladegerät für Elektrofahrzeuge oder zur Netzanbindung stationärer Batteriesysteme konzipiert. Der leistungselektronische Aufbau, der die Batterie mit dem Netz verbindet, besteht aus dem Vierleiter-Umrichter mit seinem Filter und einem DC/DC-Wandler. Der DC/DC-Wandler wird benötigt, um die

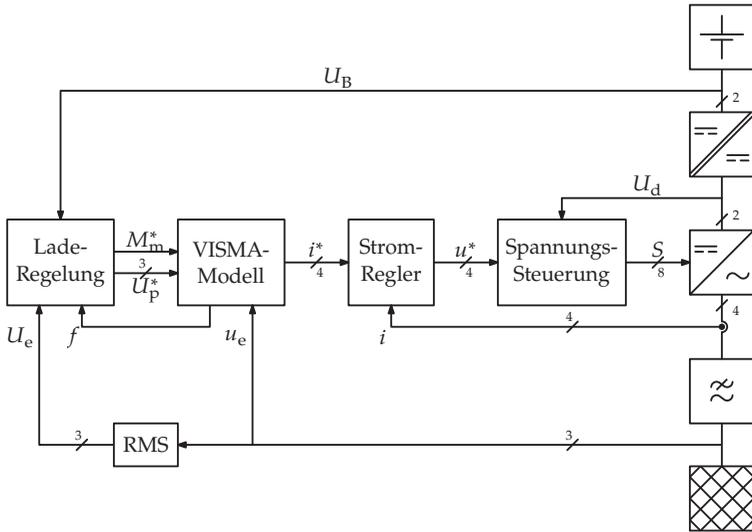


Abbildung 1.1: Systemübersicht des Vierleiter-Umrichters mit physischem Aufbau in der Vertikalen und kaskadierter Regelung in der Horizontalen

im Zwischenkreis des Umrichters bereitgestellte Gleichspannung an das Niveau der Batterie anzupassen. Er wird als unabhängige Komponente im Verlauf der Arbeit nicht weiter thematisiert.

Für den Betrieb des Umrichters und darüber hinaus für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen sind verschiedene ineinandergreifende Regler erforderlich. Zur Erzeugung der Schaltsignale für die Leistungshalbleiter des Umrichters wird ein Steuerverfahren benötigt. Da es sich um einen Umrichter mit Spannungszwischenkreis handelt, wird das Verfahren als Spannungssteuerung bezeichnet. Dieser muss eine Stromregelung überlagert werden, um den Umrichter am Netz betreiben und die netzseitigen Ströme einstellen zu können. Darüber können je nach Anwendung weitere Regler angeordnet werden. Das können beispielsweise eine einfache Spannungsregelung für den Zwischenkreis, die modellba-

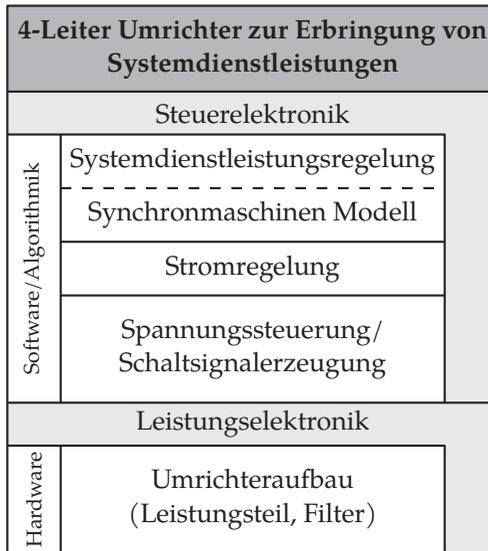


Abbildung 1.2: Systembeschreibung des vorgestellten Vierleiter-Umrichters mit den einzelnen Ebenen der digitalen Regelung und des Hardwareaufbaus

sierte Regelung der VISMA, ein netzspannungsabhängiger Wirk- und Blindleistungsregler oder eine Kombination aus VISMA und netzdienlicher Laderegelung sein.

Aus der als Blockschaltbild dargestellten Systemübersicht lässt sich die in mehrere Ebene unterteilte Systembeschreibung in Abbildung 1.2 ableiten. Es wird grob zwischen der leistungselektronischen Hardware und dem Steuercontroller unterschieden, wobei der digital implementierte Steuerungsteil zusätzlich noch in die einzelnen Regelalgorithmen zerlegt werden kann.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird ausgehend von dieser Systembeschreibung kapitelweise, beginnend auf der Hardwareebene, von unten nach oben auf die einzelnen Ebenen des Umrichtersystems eingegangen.



2 Umrichteraufbau und Schaltverhalten

Auf der untersten Ebene des hier vorgestellten Umrichtersystems befindet sich die leistungselektronische Hardware – der Leistungsteil des Umrichters. Er sorgt mittels geschalteter leistungselektronischer Halbleiterbauelemente für die Umformung der elektrischen Energie und die Steuerung des Energieflusses. In diesem Kapitel werden drei verschiedene Schaltungstopologien selbstgeführter Umrichter für Drehstromanwendungen in Dreileiter- und Vierleiter-Systemen vorgestellt. Dazu werden jeweils der Aufbau des Leistungsteils und die möglichen Schaltzustände zur Stellung der Ausgangsspannung betrachtet. Außerdem wird kurz auf das notwendige Ausgangsfilter eingegangen.

2.1 Schaltungstopologien für Drehstromsysteme

Entsprechend der Anwendungsregel VDE-AR-N 4105 zu den technischen Mindestanforderungen für den Anschluss von Erzeugungsanlagen an das Niederspannungsnetz, dürfen Erzeuger nur bis zu einer Leistung von 4,6 kVA einphasig an das Drehstromnetz angeschlossen werden [53]. Das bedeutet, bis zu einer Leistung von 4,6 kVA können Erzeuger einphasig angeschlossen werden, ab 4,6 kVA muss die Einspeiseleistung auf mehrere Phasen verteilt werden und ab 13,8 kVA ist der Erzeuger dreiphasig an das Netz anzubinden. Bei transformatorlosen Zweilevel-Umrichtern gibt es dazu verschiedene Schaltungstopologien, die hier kurz vorgestellt werden [54].

Die erste Topologie besteht aus drei einphasigen Umrichtern, die jeweils an einen der drei Außenleiter und den Neutralleiter des Drehstromnetzes

2 Umrichteraufbau und Schaltverhalten

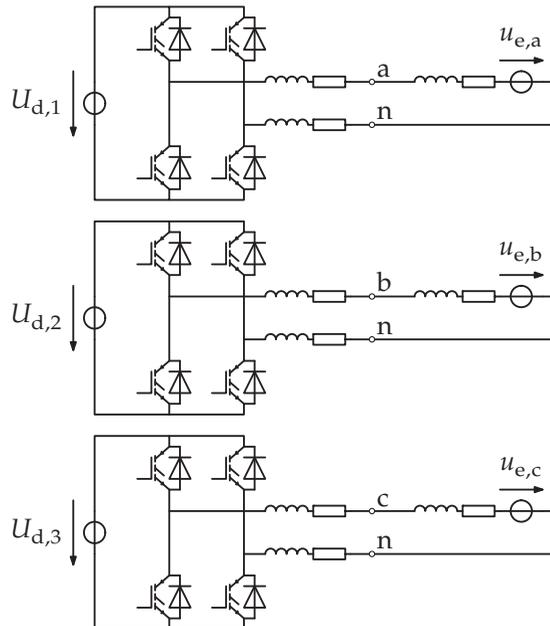


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung drei einphasiger, zwei Level IGBT-Umrichter mit getrennten Spannungszwischenkreisen am Vierleiter-Netz mit einem Umrichter je Phase