

1 Motivation

Am 18. Dezember 2019 trat das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) in Kraft, mit dem Zweck, nationale Klimaschutzziele zu erfüllen und europäische Zielvorgaben zu gewährleisten um Schutz vor den Auswirkungen des weltweiten Klimawandels zu bieten. Grundlage ist die Verpflichtung nach dem Übereinkommen von Paris aufgrund der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen. Die Auswirkungen des weltweiten Klimawandels sollen so gering wie möglich gehalten werden, indem der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur möglichst auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau begrenzt wird. [5]

Die erste Novellierung vom 18. August 2021 steckte nationale Klimaschutzziele, indem die Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 1990 schrittweise reduziert werden sollen: [5]

- Bis zum Jahr 2030 um mindestens 65 %
- Bis zum Jahr 2040 um mindestens 88 %
- Bis zum Jahr 2045 soll Netto-Treibhausgasneutralität erreicht sein.

Um diese sektorenübergreifenden Ziele erreichen zu können, ist eine Dekarbonisierung in allen Bereichen notwendig. Für die Stromerzeugung bedeutet dies die Abkehr von der Verstromung fossiler Brennstoffe wie Kohle hin zu einem steigenden Anteil erneuerbarer Energien (EE), insbesondere Photovoltaik und Windkraft, siehe Abbildung 1.1. Neben der Substitution konventioneller Kraftwerke steigt der Bedarf an neuen regenerativen Stromerzeugern mit zunehmender Sektorkopplung. Schwerpunkte sind die Elektrifizierung im Verkehrssektor sowie in der Wärmebereitstellung. Zusätzlich wird ein starker Anstieg der Wasserstoffproduktion mit entsprechendem elektrischen Energiebedarf angenommen. Die Studie *Klimaneutrales Deutschland*

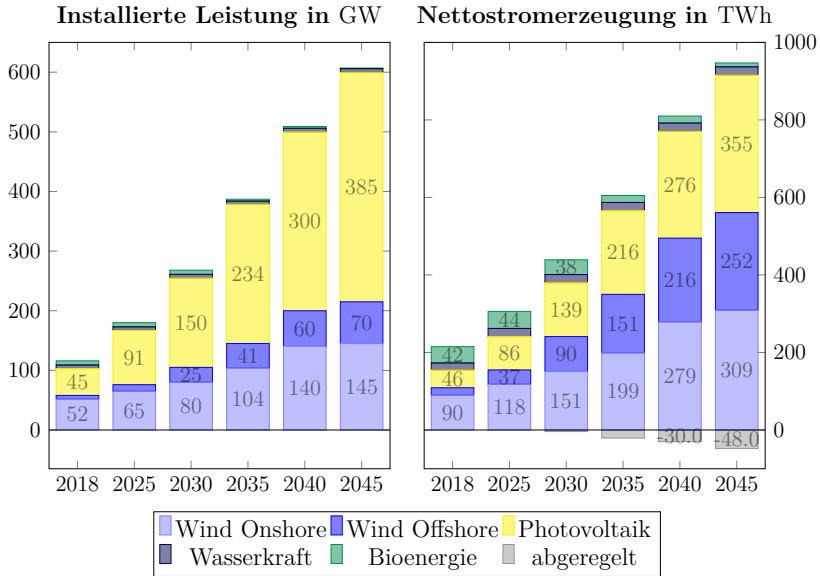


Abbildung 1.1: Installierte Leistung und Nettostromerzeugung der erneuerbaren Energien in Deutschland, eigene Darstellung nach [34]

2045, erschienen 2021, geht von einem Stromverbrauch in Deutschland von etwa 1000 TWh im Jahr 2045 aus, das sind rund 400 TWh mehr als heute [34].

Der Großteil der regenerativen Stromerzeugungsanlagen verfügt über leistungselektronische Umrichter (UR) anstatt von Synchronmaschinen (SM) wie in thermischen Kraftwerken mit Turbinen. Dies führt zwangsweise zu einer grundsätzlichen Veränderung im elektrischen System, da die inhärent vorhandenen stabilisierenden Eigenschaften der Synchronmaschinen im zukünftigen Stromnetz deutlich weniger werden. Die *Roadmap Systemstabilität*, herausgegeben vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im November 2023, zeigt einen Fahrplan zur Erreichung eines sicheren und robusten Betriebs des zukünftigen Stromversorgungssystems mit 100 % erneuerbaren Energien auf. Das zukünftige Stromsystem weist zwei wesentliche Veränderungen im Gegensatz zum heutigen Stand auf: Die Systemstabilität wird zukünftig auch durch Beiträge aus dem Verteilnetz, insbeson-

dere durch die Eigenschaften von Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen bestimmt, ergänzend zu den Beiträgen aus dem Übertragungsnetz. Zweitens übernehmen stromrichterbasierte Anlagen stabilisierende Aufgaben der wegfallenden konventionellen Kraftwerke. [6]

Als einer der drei zentralen Pfade zum sicheren und robusten Stromsystem ausschließlich aus EE führt [6] die Etablierung von netzbildenden Stromrichtern an. Diese werden darin als eine Schlüsseltechnologie für die Systemstabilität bezeichnet. Im Unterschied zu heute üblichen netzfolgenden Umrichtern wie z. B. die von Photovoltaikanlagen, können auf netzbildenden Umrichtern Regelungen implementiert werden, die ein stabilisierendes Verhalten aufweisen. Hier sei insbesondere auf die Momentanreservebereitstellung als Beitrag zur Frequenzstabilität hingewiesen. Der VDE FNN Hinweis *Technische Anforderungen an Netzbildende Eigenschaften inklusive der Bereitstellung von Momentanreserve* [47] aus dem Juli 2024 zeigt die Aktualität der Thematik.

1.1 Problemstellung und Lösungsansatz

Zum heutigen Stand beschränkt sich hierzulande die Erfahrung mit netzbildenden Umrichtern auf deren Einsatz in Inselnetzen, nicht jedoch auf den Parallelbetrieb mit dem Verbundnetz. Außerhalb von Deutschland ist die Entwicklung teilweise schon weiter fortgeschritten. [6] empfiehlt neuerdings Pilotversuche mit flächendeckendem Einsatz, um Wissen zum Umgang mit diesen Umrichtern aufzubauen und deren Beitrag zur Systemstabilität abschätzen zu können.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Ansätze von Umrichtern mit netzbildenden Eigenschaften entwickelt, Übersichten geben beispielsweise [46, 40]. Bereits 2007 stellte Hesse in [3, 23] die detaillierte Nachbildung einer Synchronmaschine vor, bezeichnet als **V**irtuelle **S**ynchron**ma**schin**e** (VISMA). Ein Umrichter mit diesem ursprünglichen VISMA-Konzept kann netzparallel betrieben werden und verhält sich dabei wie eine elektromechanische Synchronmaschine. Insbesondere die Netzstützung durch Momentanreservebereitstellung aufgrund der (virtuellen)

Trägheit ist möglich. In den folgenden Jahren wurde die VISMA weiterentwickelt und vereinfacht. Der wesentliche Unterschied der VISMA zu anderen Konzepten ist, dass die VISMA Sollströme bestimmt – Stromeinprägung mit Filterkapazität zur Netzspannungsbildung. Der Großteil der anderen Ansätze stellt die Spannung direkt ein – Spannungseinprägung. Eine spannungsstellende Variante ist der **V**oltage **C**ontrolled **I**nverter (VCI), vorgestellt 2017 in [28].

Für beide Konzepte konnte, z. B. in [7, 28], gezeigt werden, dass sie im Normalbetrieb am Netz sowie im Inselnetz betrieben werden können. Hierbei standen insbesondere netzstützende Eigenschaften wie die Frequenzhaltung im Fokus. Das Verhalten von VISMA und VCI in Fehlerfällen, wie dem Netzausfall oder bei einem Kurzschluss (KS), wurde bisher weniger intensiv betrachtet, zu den wenigen Untersuchungen zählen [7, 35, 39]. Um einen stabilen Betrieb zu ermöglichen, müssen jedoch die Umrichter auch mit diesen Situationen umgehen können. In dieser Arbeit werden deshalb besonders solche Fälle untersucht.

Neben der Idee, einen netzbildenden Umrichter alleine wegen seines Beitrags zur Systemstabilität einzusetzen, ist sein Einfluss auf eine lokal angeschlossene Last, Ziel der Untersuchungen. Die Last soll möglichst vor Einflüssen aus dem Netz in Fehlerfällen geschützt werden, zu nennen sind hier insbesondere die Weiterversorgung bei Netzausfall oder während eines Netzfehlers. Diese Aufgaben erfüllt üblicherweise eine Anlage zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV), jedoch ohne den Fokus auf die Systemstabilität. Konventionelle statische USV-Anlagen basieren ebenfalls auf einem Umrichtersystem, das die Last schützen kann, allerdings sind solche Anlagen für den konkreten Einzelfall ausgelegt, eine Erweiterung ist schwierig. Im Inselnetzfall geben sie eine feste Frequenz vor, es fehlt die Dynamik. Ein netzbildender Umrichter basierend auf den neuartigen Konzepten kann hingegen auch im Inselnetz dynamisch arbeiten, also Frequenz und Spannung anpassen. Im Prinzip baut er ein kleines Netz auf, ein sogenanntes Microgrid. Dieses kann durch andere Umrichter, Erzeugungsanlagen und Lasten erweitert werden, indem die Frequenz als Kommunikationsmittel zur Leistungsaufteilung genutzt wird. Weder ist eine zusätzliche Kommunikation zwischen den Anlagen notwendig, noch muss die jeweilige Regelung angepasst werden. Bisher fehlt jedoch die Erfahrung mit netzbildenden

Umrichtern in Fehlerfällen. Um Erkenntnisse über das Verhalten netzbildender Umrichter in diesen Fällen zu gewinnen, werden Netzausfall, Kurzunterbrechungen und Kurzschlüsse untersucht.

Der Kern dieser Arbeit ist die Erweiterung des Einsatzes eines netzbildenden Umrichters um die Anwendung als USV. Hierzu wird zunächst das Systemverhalten von VISMA und VCI in verschiedenen Netzzuständen untersucht, ein Ansatz ausgewählt, Messungen zur Validierung durchgeführt und anschließend die USV-Funktionalität betrachtet.

Die unterbrechungsfreie Weiterversorgung einer Last während des Ausfalls des vorgelagerten Netzes ist die wesentliche Aufgabe im Sinne der USV-Funktionalität. Es wird gezeigt, dass die hier vorgestellten netzbildenden Umrichterkonzepte dies erfüllen können, ohne Änderungen ihrer Regelungen. Im Falle eines netzseitigen Kurzschlusses ermöglicht eine zusätzliche neu entwickelte Kurzschlussregelung für die VISMA die Weiterversorgung der Last durch den Umrichter. Sobald die Kurzschlussregelung aktiviert wurde, kann die VISMA die Last versorgen, noch vor dem Abtrennen des Fehlers. Außerdem wird gezeigt, dass die Umrichterkonzepte sich netzdienlich verhalten, solange sie sich im Netzparallelbetrieb befinden. Im Inselnetz bilden sie dieses. Die geforderten netzdienlichen Eigenschaften bleiben erhalten.

1.2 Aufbau der Arbeit

Um das übergeordnete Ziel der Erweiterung um den USV-Einsatz erreichen zu können, werden zunächst in Kapitel 2 die Konzepte VISMA und VCI erläutert. Bei der VISMA werden die verschiedenen Modelle genannt, der Schwerpunkt liegt jedoch auf dem hier verwendeten abc-Modell von Chen. Das VISMA-Maschinenmodell verfügt über keine Kraftwerksregelung, deshalb wird in Kapitel 3 eine überlagerte Regelung vorgestellt, die Frequenz und Wirkleistung, sowie Spannung und Blindleistung über Statiken koppelt. Der VCI hingegen hat bereits eine f - P -Statik im Modell

in der Literatur, die Spannungshaltung wird im Rahmen der Auswahl des Spannungsreglers integriert. Mithilfe eines Simulationsmodells in MATLAB/Simulink werden beide Ansätze in den verschiedenen Netzzuständen simulativ untersucht und verglichen. Betrachtet werden der Netzparallelbetrieb mit Fokus auf Frequenz- und Spannungshaltung, der Inselnetzbetrieb mit Schwarzstart, dem dynamischen Verhalten bei Laständerungen sowie dem Parallelbetrieb zweier Umrichter. Zu den untersuchten Fehlerfällen sind der Netzausfall zu zählen, Kurzunterbrechungen (KU) im Außenetz und Kurzschlüsse in verschiedenen Abständen zu VISMA bzw. VCI. Ein Zwischenfazit mit der Auswahl eines Konzepts für die folgenden Untersuchungen beendet Kapitel 3.

Kapitel 4 dient der Validierung des VISMA-Modells. Hierfür wird das VISMA-Modell mit der überlagerten Statikregelung auf einem echtzeitfähigen Prüfstand implementiert und in ausgewählten Messungen getestet. Nachdem die Simulation der VISMA auf Plausibilität geprüft wurde, wird die Erweiterung zur USV untersucht. Hierzu werden zunächst die wesentlichen Eigenschaften konventioneller USV-Anlagen aufgeführt, anschließend die USV-VISMA vorgestellt. Ihre Fähigkeiten zeigen sich in Simulationen. Für den Kurzschluss im Netz wird eine spezielle Kurzschlussregelung neu entwickelt und implementiert, die auf der aktiven Umschaltung der Statorparameter des VISMA-Modells beruht. So kann trotz bestehendem Kurzschluss, noch vor der Fehlerklärung oder Abtrennung, die Spannung an der Last im erlaubten Bereich gehalten werden. Final zeigt eine Messung am Prüfstand, dass die Kurzschlussregelung analog zur Simulation funktioniert. Kapitel 6 fasst die Ergebnisse zusammen.

2 Netzbildende Umrichter

Der momentane Wandel im Energiesystem insbesondere hin zu immer mehr regenerativen Erzeugern bringt einen steigenden Anteil von Umrichtern im Netz mit sich. Früher wurden hauptsächlich Synchrongeneratoren zur Stromerzeugung eingesetzt, die mit ihrer rotierenden Masse konstruktionsbedingt den wesentlichen Anteil der instantanen Frequenzstützung übernommen haben.

Heute werden regenerative Erzeuger insbesondere Photovoltaik- und Windkraftanlagen über Umrichter ins Netz eingebunden, mit dem Ziel möglichst viel Energie einzuspeisen. Bei geringen Anteilen solcher Erzeuger im Netz können die restlichen Generatoren weiterhin für die Stabilität verantwortlich bleiben. Jedoch ergeben sich mit steigendem Anteil von Umrichtern neue Herausforderungen: Zukünftig müssen auch umrichterbasierte Erzeugungsanlagen vermehrt ein netzdienliches Verhalten aufweisen. Gemeint ist hiermit insbesondere die Aufgabe für Stabilität zu sorgen, also Frequenz und Spannung im zulässigen Bereich zu halten und in Fehlerfällen stützend zu wirken – die Erbringung von Systemdienstleistungen.[16]

Um die Integration von neuen Konzepten in das bestehende Netz möglichst aufwärtskompatibel zu gestalten, bietet es sich an, das Verhalten von Synchronmaschinen im Netz nachzuahmen[3]. Aus dieser Idee leitet sich das Regelkonzept für spannungsstellende Umrichter (VCI - voltage controlled inverter) ab. Diese wirken wie eine Spannungsquelle am Netz, ebenso wie auch ein feldgeregelter Synchrongenerator. Hiervon abzugrenzen sind die heutigen Umrichter von z. B. PV-Anlagen, die sich wie eine Stromquelle verhalten (CCI - current controlled inverter).

Spannungsstellende Umrichter arbeitend netzbildend, sie sind für den Inselnetzbetrieb, aber auch Netzparallelbetrieb geeignet. Im Allgemeinen sind sie aus Schutzgründen mit einer unterlagerten Stromregelung versehen. In den letzten Jahren

wurden mehrere Konzepte spannungsstellender Umrichter vorgestellt, einen Überblick geben beispielsweise [46, 40]. In einigen der Ansätze wird eine virtuelle Trägheit implementiert, um instantan Leistung bereitstellen zu können. Häufig basieren sie analog zur virtuellen Synchronmaschine auf der Bewegungsgleichung der Synchronmaschine, unterscheiden sich jedoch in der Umsetzung der Maschinennachbildung. Im Folgenden werden zwei Konzepte genauer betrachtet, einerseits die VISMA, andererseits der VCI basierend auf [28].

Anmerkung: In der Literatur werden teils unterschiedliche Kriterien zur Einteilung von Umrichtern in *netzbildend*, *netzfolgend* und *netzstützend* gewählt. Hier beschreibt netzbildend die Fähigkeit, ein Netz aufzubauen, auch ohne von außen anliegende Spannung, eben wie eine Synchronmaschine mit Feldregelung. Netzfolgend hingegen benötigt eine äußere Spannung. Netzdienliches Verhalten wird mit netzstützend bezeichnet.

2.1 Ansatz der virtuellen Synchronmaschine

Das Grundkonzept einer virtuellen Synchronmaschine (**V**irtual **S**ynchronous **M**achine – **VSM**) ist ein relativ neuer Ansatz zur Steuerung eines Umrichters in der Stromversorgung. Dem Umrichter wird durch eine Nachbildung der Massenträgheit einer elektromechanischen Synchronmaschine in Kombination mit einem Energiespeicher das Verhalten einer solchen Maschine aufgeprägt.

Im Jahr 2007 veröffentlichte Ralf Hesse, damaliger Mitarbeiter des Instituts für Elektrische Energietechnik der TU Clausthal, eine sehr detaillierte Nachbildung einer Synchronmaschine als **V**irtuelle **S**ynchron**m**aschine (**VISMA**) in [23], zusätzlich in [3, 4, 24]. Yong Chen, ebenfalls Mitarbeiter dieses Institutes, entwickelte das VISMA-Konzept weiter und vereinfachte es in den folgenden Jahren. Sein abc-Modell, z. B. in [12] und [8] gezeigt, wird bis heute am Institut genutzt, auch in dieser Arbeit. Das Konzept der VISMA stellt einen Teil der VSM-Ansätze dar, begrenzt auf die mit höherer Ordnung und detaillierter ausgeführter Nachbildung der

Dämpfungseigenschaften einer Synchronmaschine. Übersichten der verschiedenen VSM-Ansätze und Einordnung der VISMA darin werden in [13] und [41] gezeigt.

Wird lediglich das Trägheitsverhalten, nicht aber die eigentliche Synchronmaschine mit Dämpferkäfig nachgebildet, werden diese Konzepte häufig als *virtuelle Trägheit* bezeichnet, nicht jedoch als *virtuelle Synchronmaschine*.

2.1.1 Genereller Aufbau eines VISMA-Systems

Ein VISMA-System besteht grundsätzlich aus einem leistungselektronischen Teil, sowie der Steuerung mit dem eigentlichen VISMA-Modell. Zur Leistungselektronik wird der Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis, ein Energiespeicher auf DC-Seite sowie ein netzseitiges Filter gezählt. Das VISMA-Modell auf einer Recheneinheit simuliert die Synchronmaschine, über eine Stromregelung und Schaltsignalenerzeugung wird der Umrichter angesteuert. Als Eingangsgrößen für das Modell dienen Messwerte von Strom und Spannung sowie Vorgaben der virtuellen Erregung und des virtuellen mechanischen Moments. Diese beiden Größen können mit einer überlagerten Regelung bestimmt werden. Abbildung 2.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines VISMA-Systems.

Als Energiespeicher bieten sich Batterien an, die die gespeicherte kinetische Energie des bewegten Rotors einer Synchronmaschine abbilden. Bei der Auslegung müssen eine ausreichende Anzahl in Reihe verschaltet werden, damit die gesamte Zwischenkreisspannung auch bei niedrigem Ladezustand jederzeit größer als die Amplitude der Gegenspannung, also der Netzspannung ist. Beachtet werden muss unbedingt, dass die Netzspannung nicht konstant ist und gemäß den Normen um $\pm 10\%$ vom Nennwert abweichen darf. Zusätzlich zu den Batterien sind die sogenannten Zwischenkreiskondensatoren verbaut, die die Stromüberschwingungen auf der DC-Seite kompensieren, um Mikrozyklen in der Batterie zu vermeiden.

Der Umrichter im VISMA-System ist im Falle eines Vierleiternetzes ein 4-Leiter-Umrichter mit passiv angeschlossenem Neutralleiter, wie in Abbildung 2.2 gezeigt. Die drei Brückenarme sind an die Außenleiter des Drehstromnetzes angeschlossen,

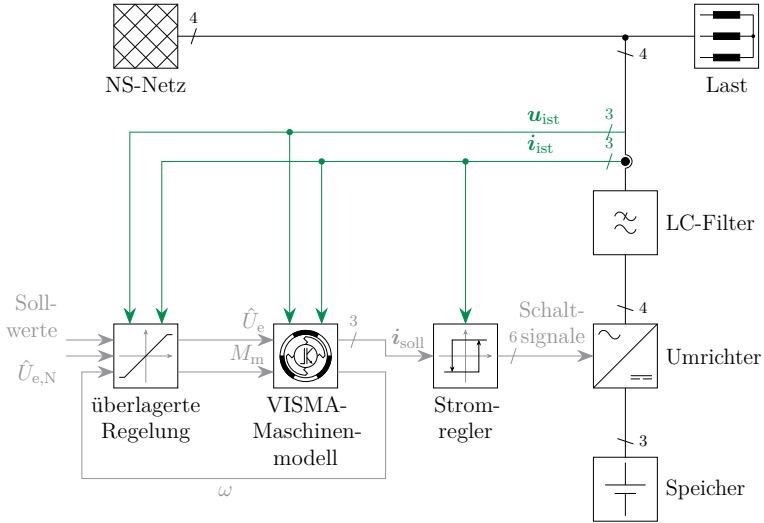


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines VISMA-Systems

der Neutraleiter liegt passiv auf dem Mittelpunkt des Gleichspannungszwischenkreises. Die Herausforderung hierbei ist, ständig die positive und negative Hälfte der Zwischenkreisspannung symmetrisch zu halten. Insbesondere für unsymmetrische Belastungsfälle ist eine größere Zwischenkreiskapazität nötig, als bei Umrichterkonzepten ohne Mittelabgriff. Der restliche Aufbau als Drei-Zweige-Brückenschaltung entspricht einer weit verbreiteten Standardlösung in der Antriebstechnik, ist somit einfach und günstig im Aufbau.[45]

Zum Anschluss ans Netz ist ein Filter notwendig, um die schaltfrequenten Anteile der Ausgangsspannung und des Stroms zu glätten. Für die VISMA im Netzparallelbetrieb mit hinreichend stabiler Netzspannung kann ein einfaches L-Filter verbaut werden. Soll die VISMA jedoch auch ein Inselnetz aufbauen können, sind Filterkondensatoren nötig, siehe Seite 23.