

Schlussbericht zum Teilvorhaben

Hybrider Windstromrichter für erweiterte Systemdienstleistungen im Verbundprojekt

Nächste Generation von Windumrichtern für einen effizienteren Betrieb und die Bereitstellung von erweiterten Netzdienstleistungen

Autoren: Dr. Stefan Laudahn, Marc Müller, Steven Krämer

Zuschussempfänger: FREQCON GmbH 27336 Rethem		Förderkennzeichen: 03EE2029B
Vorhabenbezeichnung: Nächste Generation von Windumrichtern für einen effizienteren Betrieb und die Bereitstellung von erweiterten Netzdienstleistungen Teilvorhaben: Hybrider Windstromrichter für erweiterte Systemdienstleistungen		
Laufzeit des Vorhabens / Berichtszeitraum: 01.02.2021 bis 31.07.2024		
Datum: 21.03.2025		

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurze Darstellung der Aufgabenstellung, der Voraussetzungen, der Planung und des Ablaufs des Teilvorhabens	2
1.1	Aufgabenstellung	2
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	2
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4	Stand der Technik, an den angeknüpft wurde	3
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	4
2	Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse und des voraussichtlichen Nutzens ..	4
2.1	Definition der Anforderungen an die Systemarchitektur und Netzdienstleistungen .	4
2.2	Entwicklung von System und Komponenten	6
2.3	Regelungsstrategien für Systemdienstleistungen.....	8
2.4	Entwurf und Aufbau des Demonstrators.....	9
3	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	10
4	Notwendigkeit der Zuwendung	10
5	Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen	10
6	Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	11
7	Erfolgte oder geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses	11
8	Liste der Abbildungen	11
9	Verzeichnis der Tabellen	11

1 Kurze Darstellung der Aufgabenstellung, der Voraussetzungen, der Planung und des Ablaufs des Teilvorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Ziel von NextWIND ist die Integration von erweiterten Systemdienstleistungen (SDL) in eine effizientere Generation von Windstromrichtern, um Lebensdauerkosten zu reduzieren und eine progressive Integration in das Energiesystem zu realisieren. Dies betrifft die Bereitstellung eines erhöhten Kurzschlussstroms im Fehlerfall (Ziel: 3-facher Nennstrom), die Integration frequenzstützender Maßnahmen (virtual inertia) sowie die Möglichkeit des Netzwiederaufbaus (Schwarzstart) bzw. Inselnetzbetriebs ohne zusätzliche Komponenten im Netz.

Bezogen auf das Gesamtsystem sollen über die Innovationen im Vorhaben die Kosten, basierend auf einer Anlagenlebensdauer von 20 Jahren, um 30% gegenüber herkömmlichen Lösungen reduziert werden. Dieser Kostenvorteil wird vor allem durch die Steigerung der Systemspannung von 690 V auf 950 V und/oder durch den Wechsel von der 2-Level- auf die 3-Level-Stromrichtertopologie erreicht.

Im Fokus des Teilvorhabens steht ein innovatives neuartiges Umrichterkonzept für Windenergieanlagen (WEA), wobei der Schwerpunkt in dieser Anwendungsumgebung auf dem Kompromiss aus optimaler Erzeugung elektrischer Energie aus der Drehbewegung des Generators und dem Einspeisen ins Netz unter Berücksichtigung der Netzanforderungen liegt.

FREQCON verfolgt in diesem Teilvorhaben das Ziel, die Hard- und Software von Windstromrichtern der nächsten Generation für die Bereitstellung von erweiterten SDL auszulegen und zu optimieren. Zur Evaluation der Performance der neuentwickelten Leistungshalbleitermodule sowie zur Validierung der innovativen Regelungsstrategien baut FREQCON im Rahmen des Projektes einen Demonstrator bestehend aus zwei Teilsystemen a 1 MW in Back-to-Back Anordnung auf, der auch repräsentativ für eine spätere potentielle Verwertung der Forschungsergebnisse ist.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie veröffentlichte im Bundesanzeiger vom 29.06.2021 die Förderbekanntmachung Angewandte nichtnukleare Forschungsförderung im 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“

Das Projekt NextWind fügte sich sehr gut in den Förderbereich „Windenergie“ ein und erhielt dementsprechend eine Förderzusage aus dem oben genannten Förderprogramm.

In Tabelle 1 ist das aus den drei Partnern bestehende Projektkonsortium angegeben. Die Partner ergänzten sich ideal und gewährleisteten mit ihren spezifischen Kompetenzen, dass einerseits der theoretische Erkenntnisgewinn verfolgt werden und andererseits auch ein Schwerpunkt auf die Praxisrelevanz durch die Entwicklung eines konkreten Produktes gelegt werden konnte.

SEMIKRON Elektronik GmbH & Co. KG	Projektkoordinator Teilvorhaben: Erforschung wesentlicher Leistungselektronikkomponenten auf Chip-, Modul- und Treiberebene für eine erhöhte Windgeneratorspannung und erweiterte Systemdienstleistungen
--------------------------------------	---

FREQCON GmbH	Teilvorhaben: Hybrider Windstromrichter für erweiterte Systemdienstleistungen
Technische Universität Dresden – Professur für Leistungselektronik	Teilvorhaben: Integration von Systemdienstleistungen in einen neuartigen Windstromrichter mit gesteigerter Effizienz

Tabelle 1: Projektkonsortium

Das Projekt NextWind wurde zum 01.02.2021 gestartet und nach einer kostenneutralen Verlängerung zum 31.07.2024 abgeschlossen.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie förderte das Teilvorhaben von Freqcon mit insgesamt 440.605 €.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wird als Verbundvorhaben durchgeführt. Die einzelnen Projektpartner erarbeiten in ihren jeweiligen Teilprojekten in Abstimmung mit den Projektpartnern die Ergebnisse ihrer jeweiligen Teilprojekte. Das Teilvorhaben der Freqcon GmbH folgt dabei grundsätzlich dem in der Vorhabenbeschreibung aufgeführten Arbeitsplan.

Der Arbeitsplan gliedert sich in insgesamt sechs technische Arbeitspakete.

- Arbeitspaket 1: Definition der Anforderungen an die Systemarchitektur und Netzdienstleistungen
- Arbeitspaket 2: Erforschung von optimierten Bauelementen und stromrichternahen Technologien
- Arbeitspaket 3: Entwicklung von System und Komponenten
- Arbeitspaket 4: Regelungsstrategien für Systemdienstleistungen
- Arbeitspaket 5: Entwurf und Aufbau der Demonstratoren (Demonstrator-Phasenbaustein)
- Arbeitspaket 6: Evaluierung des Umrichter-Systems (Demonstrator-Phasenbaustein)

Im Fokus der Freqcon GmbH stehen insbesondere die Arbeitspakete 3 bis 6. In den anderen Arbeitspaketen ist die Freqcon GmbH weitestgehend unterstützend tätig.

Die Zusammenarbeit im Konsortium erfolgte grundlegend so, dass die Projektpartner ihre Arbeitspakete weitestgehend selbstständig, aber in eine engere Abstimmung zueinander durchgeführt haben. In einem zweiwöchentlichen Austausch zwischen den Projektpartnern (remote) wurden neue Erkenntnisse ausgetauscht sowie notwendige Abstimmungen zwischen den Projektpartnern getroffen.

Das Projekt wurde aufgrund Einschränkungen durch die Corona-Pandemie sowie von Lieferproblemen bei wichtigen Bauteilen im Ablauf beeinträchtigt und musste daher kostenneutral verlängert werden.

1.4 Stand der Technik, an den angeknüpft wurde

Die 2-Level-Topologie ist zum Zeitpunkt der Antragsstellung die für Windumrichter mit 690 V Systemspannung die am häufigsten genutzte Konfiguration. Hierbei kamen bislang ausnahmslos 2-Level-Topologien mit 1,7 kV Halbleitern zum Einsatz. Für die Stromrichtertopologie mit einer erhöhten Systemspannung von 950 V sind zwei Lösungswege denkbar.

1. 2-Level-Topologie mit 2,3 kV Halbleitern
2. 3-Level-Topologie mit 1,2 kV Halbleitern

Das Risiko der Realisierbarkeit ist für die 3L Lösung geringer, denn die 2,3 kV Halbleiter befinden sich noch in der Entwicklung und der im Rahmen des Vorhabens zur Verfügung stehende Technologiereifegrad ist damit undefiniert. Darüber hinaus bietet die Verwendung der komplexeren 3Level Topologie die Möglichkeit die Effizienz des Gesamtsystems im Vergleich zur 2 Level Topologie weiter zu steigern. Es sollen dennoch beide Technologien basierend auf Erwartungswerten und Messdaten evaluiert werden, um die wirtschaftliche Verwertung der 3L Lösung abzusichern und flexibel in Bezug auf geänderte Rahmenbedingungen reagieren zu können.

Bislang wurden erneuerbare Energien in ein Netz integriert, in dem der größte Teil der Leistung und Netzdienstleistungen durch konventionelle Kraftwerke bereitgestellt wurde. Der Rückgang der Erzeugungsleistung von konventionellen Kraftwerken im Elektroenergiesystem lässt die Anforderungen an die dann dominierenden stromrichterbasierten Erzeugungsanlagen und Speicher steigen, um einen stabilen Netzbetrieb in Deutschland aufrechtzuerhalten.

In jüngster Vergangenheit befassten sich eine Vielzahl nationaler und europäischer Projekte mit der Identifikation und Definition der Anforderungen für ein größtenteils von leistungselektronischen Erzeugern und Verbrauchern geprägtes Energieversorgungsnetz. Im Kern beschreiben sie übereinstimmend die Forderung nach flächendeckend (spannungs-) netzbildenden Erzeugungsanlagen, da nur so ein instantanes Last- und Erzeugungsgleichgewicht realisiert werden kann. Zu dieser Charakteristik zählt auch die virtuelle Synchronmaschine (VSM). Weitere Fragen betreffen die zeitlichen Anforderungen der Synchronisation der netzbildenden Stromrichter untereinander, die Blindleistungsbereitstellung sowie die Integration von Speichern. Ein wichtiger Aspekt ist darüber hinaus das Verhalten im Fehlerfall. Hierbei ist die sinkende Kurzschlussleistung bei leistungselektronischen Erzeugungsanlagen, verursacht durch eine üblicherweise geringe Überlastfähigkeit der Halbleiter, eine der größten Herausforderungen. Neben diesen Anforderungen für ein Netz aus 100 % leistungselektronischen Teilnehmern gilt es, auch im Übergangszeitraum maximale Kompatibilität mit dem bestehenden Energieversorgungsnetz herzustellen. Darüber hinaus ist eine wichtige Forderung, dass auch bei dezentraler Erzeugung mit möglichem Wechsel zwischen Inselnetz- und Verbundnetzbetrieb weitestgehend auf externe Messungen und Kommunikation verzichtet werden kann.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes wurde sehr gut und intensiv mit den Verbundpartnern zusammengearbeitet. Darüber hinaus wurde in diesem Teilvorhaben keine Unterbeauftragung an Dritte vergeben.

2 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse und des voraussichtlichen Nutzens

2.1 Definition der Anforderungen an die Systemarchitektur und Netzdienstleistungen

Um für das Projekt aktuelle Kenntnisse berücksichtigen zu können, wurden gültige Grid Codes und weitere relevante Dokumente berücksichtigt.

Als Ergebnis konnten keine konkreten normativen Vorgaben für die im Projekt betrachteten Systemdienstleistungen

- Momentanreserve (synthetic inertia)
- Kurzschlussstrombereitstellung für Ströme größer als Nennstrom
- Schwarzstartfähigkeit mit Regenerativen Energiesystemen

identifiziert werden.

Allerdings sind sowohl in Deutschland auch als Großbritannien Arbeitsgruppen derzeit mit der Erstellung von Anforderungen für virtuelle Synchronmaschinen beschäftigt. Diese Arbeitsgruppen befinden sich allerdings noch in einem frühen Status und liefern noch keine belastbaren Grundlagen.

Für den Bereich Momentanreserve wurden aufgrund üblicher Werte von Synchrongeneratoren und der ENTSO-E „Continental Europe Synchronous Area“ Zielgrößen für das Projekt abgeleitet, die für die weitere Projektbearbeitung verwendet werden sollen. Da die Momentanreserve eine Größe ist, die nicht zwangsläufig für eine Erzeugungseinheit relevant ist, sondern eher die Summenmomentanreserve in einem Gesamtnetz ausschlaggebend ist, ist eine konkrete Angabe für eine Einzelanlage zwar gebräuchlich, aber als Auslegungsgrundlage eher unüblich. Je nach Zusammensetzung der Gesamtanzahl der Anlagen sind zum Beispiel Anlaufzeiten im Bereich 0,8 bis 40 Sekunden je Anlage denkbar. Für das Projekt wurde daher definiert, dass durchschnittliche Anlaufzeitkonstanten verwendet werden sollen. Daraus ergibt sich eine angestrebte Anlaufzeitkonstante von $T_N = 10$ Sekunden und ein maximal zu berücksichtigender Frequenzgradient von 2 Hz/s.

Für den Bereich Kurzschlussstrombereitstellung wurde aufgrund mangelnder konkreter Forderungen in Normen eine Fortschreibung des Verfahrens nach K-Faktor als zielführend identifiziert. Hierbei soll das bisher übliche Verfahren nach K-Faktor bei der Kurzschlussstrombereitstellung in der Form erweitert werden, dass die Umrichter ihren Kurzschlussstrom nicht bei Nennstrom abregeln, sondern diesen auch als Überlaststrom liefern können. Hieraus konnten Zeitverläufe für Überlastfähigkeiten, wie in Abbildung 1 dargestellt, abgeleitet werden.

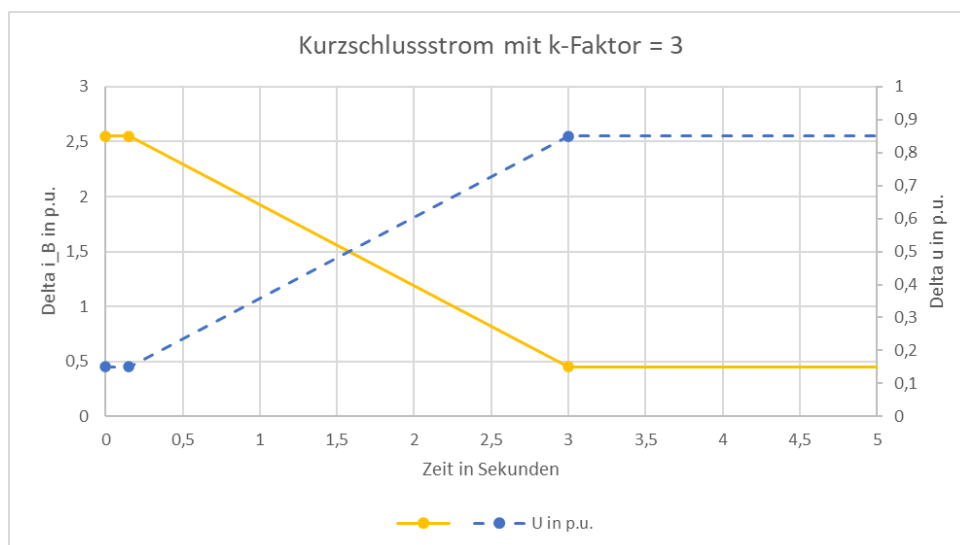


Abbildung 1: Beispielhafter, zeitlicher Verlauf der Überstromanforderung beim Verfahren nach K-Faktor

Als Anlagenkonzept wurde die virtuelle Synchronmaschine als am besten geeignetes Konzept zur Bereitstellung der Systemdienstleistungen identifiziert. Im Unterschied zu üblichen Anlagenkonzepten muss eine Zwischenkreisregelung des Umrichters voraussichtlich über den Batteriestrang erfolgen, da die Regelung des Windgenerators nicht die erforderliche Dynamik aufweist und beim Konzept der virtuellen Synchronmaschine der netzseitige Umrichter nicht für diese Aufgabe verwendet werden kann.

Die Spezifikation beinhaltet technische Daten für den Netz-, Batterie- und Windgeneratoranschluss. Weiterhin wurden z.B. Genauigkeitsklassen für verwendete Stromsensoren und Spannungsmessungen angegeben. Ebenso wurden grundlegende Regelungsparameter und Schnittstellen definiert.

Ein grundsätzliches Anlagenkonzept wurde erstellt, welches alle möglichen Anlagenszenarien abdeckt. Folgende Ports werden dabei berücksichtigt:

1. ein 3-phasiger AC-Port (plus N-Leiter) für den Netzanschluss
2. ein bidirektionaler DC-Port für die Batterie
3. ein unidirektionaler DC-Port für die Windkraftanlage
4. ein Bremschopper als Fall-Back Ebene für z.B. Ausfälle der Batterie.

2.2 Entwicklung von System und Komponenten

FREQCON wird für das System größtenteils Standardkomponenten verwenden können, welche nur ein geringes Ausfallrisiko haben. Insbesondere bei den von FREQCON präferierten 2,3 kV IGBT ergibt sich der Vorteil, dass das grundlegende Regelungskonzept von Freqcon beibehalten werden kann, da die Ansteuerung der IGBT nicht auf eine komplette Neuentwicklung aufbauen muss und die 2-Level Topologie beibehalten werden kann.

Die 2-Level 2,3 kV Module können voraussichtlich auf SKiiP 4 Basis realisiert und die vorhandenen Schnittstellen weiter genutzt werden. Lediglich bei den Kühlern ergibt sich eine Abweichung, da andere Kühlkörper verwendet werden. Desweiteren sollen die 2-Level 2,3kV IGBT auf SiC-Basis aufgebaut werden. Dies bietet eventuell weitere Vorteile im Bezug auf geringe Verluste. Weiterhin können höhere Schaltfrequenzen realisiert werden.

Diese Entwicklung ist für Freqcon insofern sehr erfreulich, da das Gesamtsystem damit in der Grundstruktur bestehen bleiben kann und größtenteils Hardwarekomponenten getauscht werden müssen.

In Abbildung 2 ist die bisherige Ansteuerung der Leistungshalbleiter bei Freqcon dargestellt.

Die Hauptsteuerung ist eine SPS vom Typ Siemens Simotion P320. Mittels der von Freqcon entwickelten PIII (Profinet IRT IGBT Interface), im Bild als Converter control module betitelt, werden die Steuersignale der Steuerung in die analogen Ansteuersignale für die IGBT umgewandelt. Ebenso erfolgt eine Umwandlung der analogen Rückmeldungen der Hardware auf digitale Signale, die über das Profinet IRT Feldbussystem von der SPS eingelesen werden können.

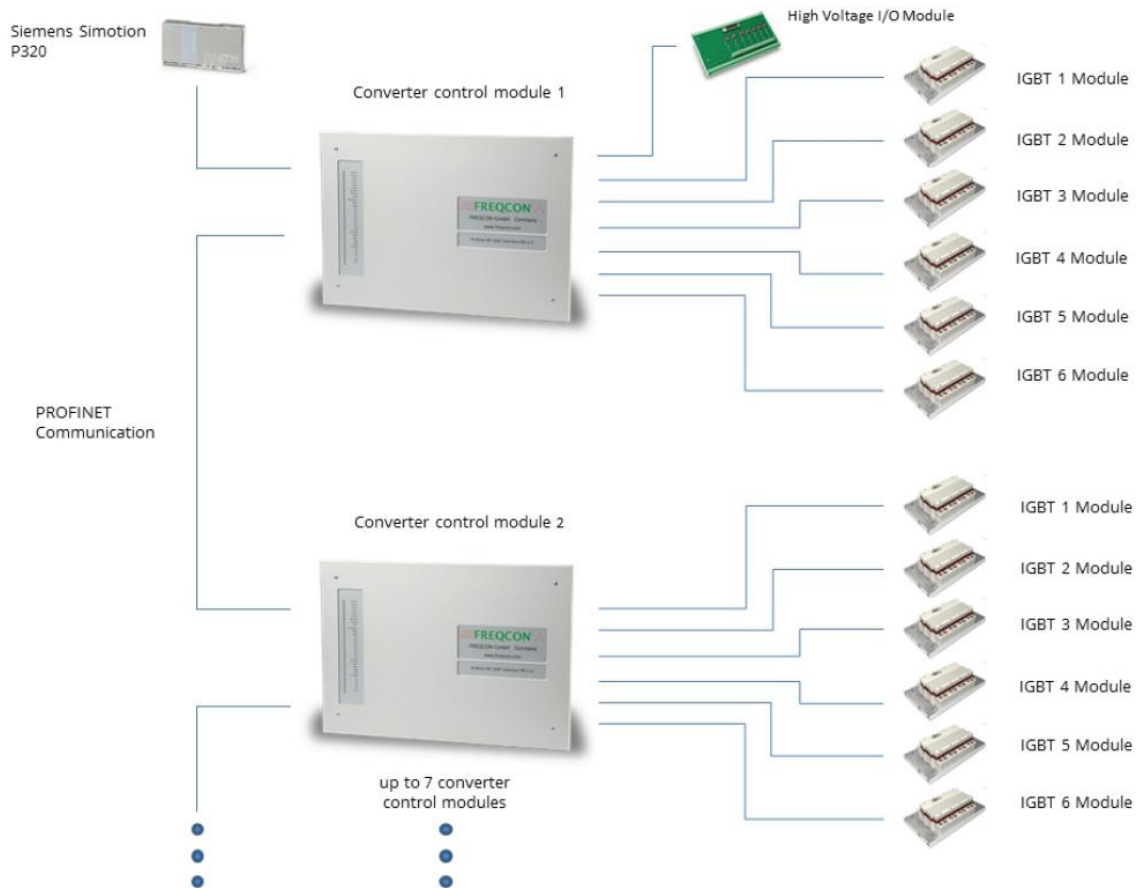


Abbildung 2: Ansteuerung der Leistungshalbleiter bei Freqcon

Durch die Verwendung der Skiiip 4 Schnittstelle für die 2,3kV Module und die Verwendung der 2-Level Topologie kann das Steuerungssystem mit geringen Anpassungen weiterverwendet werden.

Für den Einsatz der 2,3kV IGBT wurde eine Isolationskoordination durchgeführt, um das Umrichterdesign auf die Fähigkeit von 1500V Zwischenkreisspannung prüfen zu können. Das Ergebnis ist, dass die Komponenten größtenteils beibehalten werden können. Neben einer Anpassung des High Voltage I/O Modules müssen lediglich die Zwischenkreiskondensatoren aufgrund einer zu geringen Spannungsfestigkeit ausgetauscht werden.

Ein weiterer Fokus lag auf der Überprüfung der Widerstandsfähigkeit gegenüber der höheren Spannungsanstiegszeiten. Dies ist erforderlich, da die SiC-Halbleiter schneller schalten und damit höherfrequente Anteile im Stromspektrum zu erwarten sind. Diese Höherfrequenten Anteile können insbesondere in den Filterkondensatoren zu einer erhöhten Belastung führen. Die Prüfungsergebnisse sind, dass die Bauteile grundsätzlich weiter genutzt werden können, allerdings ist bei den folgenden Tests eine Auswertung der Temperaturen der Kondensatoren erforderlich.

2.3 Regelungsstrategien für Systemdienstleistungen

Grundlage für die Erbringung von erweiterten Systemdienstleistungen auf Basis eines virtuellen Synchrongenerators ist die Möglichkeit die Leistung jederzeit in gewissen Grenzen ändern zu können. Gerade bei Windkraftanlagen ist dies nur eingeschränkt der Fall, weshalb ein Energiespeicher notwendig ist. Hierzu ist die Batterietechnologie mittlerweile der übliche Stand der Technik und soll daher auch im Projekt NextWind als Energiespeicher Berücksichtigung finden.

Um eine sichere und gleichzeitig effiziente Einbindung des Batteriesystems vornehmen zu können, wurde ein DCDC-Steller zur DC-seitigen Ankopplung des Batteriestrangs als notwendige Voraussetzung angesehen.

Weiterhin ist ein Energiemanagementsystem (EMS) erforderlich, welches die unflexible Energieerzeugung der Windkraftanlage und die flexible Energieanforderung des Netzes mittels des Batteriespeichers in Einklang bringt.

Das interne EMS muss grundsätzlich drei verschiedene Leistungen regeln:

1. Die Leistung des Windgenerators. Diese kann nur Leistung bereitstellen, kann begrenzt werden, aber nicht über die verfügbare Windleistung hinaus gesteigert werden.
2. Die Leistung der Batterie. Diese kann unter Berücksichtigung des Ladezustands und weiterer Betriebsparameter wie der Temperatur frei geregelt werden. Es ist ein bidirektionaler Leistungsfluss möglich.
3. Die Leistung am Netz. Diese soll aufgrund der Netzdienlichkeit so geregelt werden können, dass sie am ehesten den Netzbedürfnissen entspricht.

Die Summe aller Leistungen muss aufgrund der Energieerhaltung jederzeit Null sein. Da die Leistung, die ins Netz abgegeben wird, zumindest in erster Näherung nicht direkt abhängig vom Primärenergieangebot (bzw. der verfügbaren Windleistung) sein soll und die Windleistung lediglich gedrosselt, aber nicht beliebig erhöht werden kann, ist es für die Funktion vorteilhaft, wenn die Batterie jederzeit die entsprechende Differenzleistung aus verfügbarer Windleistung und netzseitig benötigter Leistung ist.

Als notwendige Einschränkung ist zu berücksichtigen, dass die Batterieleistung abhängig von der Zelltemperatur und dem aktuellen Ladezustand limitiert werden muss. Damit ist die netzseitig abgegebene Leistung P_{Netz} eine Funktion der verfügbaren Windleistung P_{Wind} sowie der Netz- P_{gridcode} und Batterieanforderungen P_{SOC} .

$$P_{\text{Netz}} = f(P_{\text{Wind}}, P_{\text{SOC}}, P_{\text{gridcode}})$$

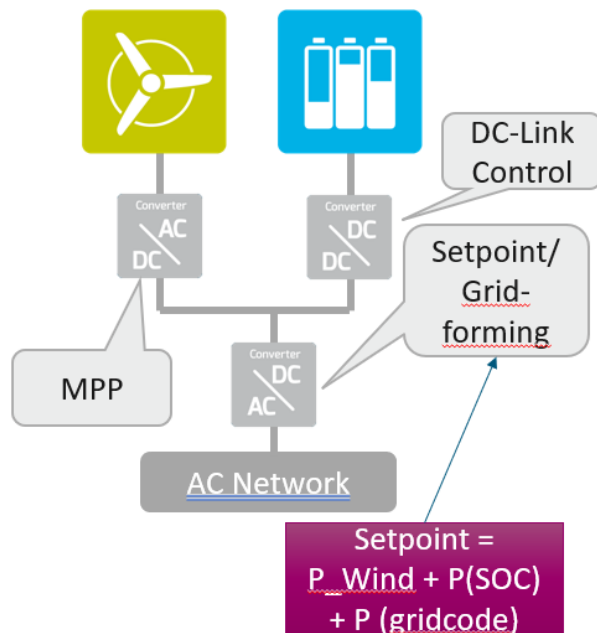


Abbildung 3: Schematische Darstellung der EMS-Reglerstruktur

Eine wesentliche Grundvoraussetzung für dieses Konzept ist eine stabile und flexible Zwischenkreisregelung.

Für die Integration der virtuellen Synchronmaschine wird weitestgehend auf die Entwicklung des Projektpartners TU Dresden zurückgegriffen. Daher sei an dieser Stelle auf den Bericht des genannten Projektpartners verwiesen.

2.4 Entwurf und Aufbau des Demonstrators

Die für das Forschungsprojekt NextWind geplanten zwei Demonstratoren sind als Grundlage für die experimentellen Untersuchungen vorgesehen. Das erste System dient als Testumgebung für den Phasenbaustein und simuliert in Originalleistung (> 1MW) einen vollständigen WEA-Umrichter. Bei dem zweiten System handelt es sich um ein Modell eines windumrichterdominierten Netzes in einer Skalierungsstufe von 15 kVA.

Parallel zum Aufbau des Systems wurde an der Entwicklung der Umrichtersoftware gearbeitet und die Entwicklungskapazitäten auf die Einbindung der neuen Stacks in das Gesamtsystem gebündelt. Herausforderungen an dieser Stelle des Projektes waren die grundsätzliche Unterscheidung der Regelungskonzepte die für die Ansteuerung der Leistungsmodule. So hat sich gezeigt, dass die Generierung der Schaltbefehle für die neuen Halbleiter unter Nutzung des Raumzeigermodells mit den Hardware-Reglern unserer Stromhystereseregulierung nicht kompatibel ist, da zur Optimierung der Filterung der Zwischenkreis des Gesamtsystems geerdet ist. Ein Lösungsansatz ist die Umwandlung in das dq-System.

Im Berichtszeitraum konnten wesentliche Tests am Umrichtersystem durchgeführt werden. Hierzu wurden wichtige Komponenten im Umrichtersystem für 1500V DC-Spannung angepasst. Der Power Stack konnte zunächst mit geringerer Spannung vorgetestet und später mit voller DC-Spannung betrieben werden. Hierbei wurde neben dem Leistungshalbleiter auch ein

Fokus auf die Kondensatoren gelegt, welche aufgrund der verwendeten SiC-Halbleiter einer höheren Belastung ausgesetzt sind.

Anschließend konnten Leistungstests durchgeführt werden.

Trotz Fertigstellung der dq-Umrechnung konnten finale Tests am Leistungshalbleiter nicht erfolgen, da der finale Softwarebaustein, der die Umwandlung aus dem dq-System zur Schalteransteuerung nicht fertiggestellt werden konnte. Teilttests konnten bei SEMIKRON durchgeführt werden.

3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die größte Position der bei der Freqcon GmbH entstandenen Kosten sind Personalkosten. Neben den Personalkosten sind die Materialkosten die andere wichtige Position, welche für den Aufbau des Demonstratorsystems angefallen sind. Die ursprünglich geplanten Reisekosten wurden aufgrund der Einschränkungen der Coronapandemie nur im geringen Maße abgerufen.

4 Notwendigkeit der Zuwendung

Die Zuwendung für das Vorhaben war notwendig, da die Untersuchungen unter rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht in dieser Art durchgeführt worden wären. Zwar konnte eine Optimierung der Produkte vorgenommen werden, allerdings entstand kein grundsätzlich neues Produkt für die Freqcon GmbH, welches neue Kundengruppen oder Absatzmärkte etabliert hätte. Auch wenn die Verbesserung der Stabilität, der Regelungen und der Verfügbarkeit der Produkte gesteigert werden konnte, ist dies wirtschaftlich gesehen nur eingeschränkt abbildbar.

Die Förderung wird von Freqcon dennoch als angemessen betrachtet, da über die reinen wirtschaftlichen Interessen der Freqcon GmbH hinaus wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden konnten. Diese sind insbesondere bei der weiteren Ausgestaltung von zukünftigen Netzananschlussbedingungen hilfreich als auch bei der generellen Bewertung der Fähigkeiten erneuerbarer Energien und insbesondere der Windenergie in Bezug auf erweiterte netzbildende und netzstützende Eigenschaften.

5 Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen

Die im Rahmen des Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Systemlösungen sind sowohl für den Projektpartner FREQCON als auch für die allgemeine Weiterentwicklung netzdienlicher Regelungs- und Umrichtertertechnologien von hoher Relevanz. Insbesondere die Auseinandersetzung mit Anforderungen an zukünftige Systemdienstleistungen und deren technische Umsetzung in Form einer virtuellen Synchronmaschine ermöglicht eine zielgerichtete Weiterentwicklung regenerativer Energieanlagen für ein zunehmend dekarbonisiertes und dynamisches Stromnetz.

Durch die erfolgreiche Definition technischer Anforderungen, konnten konkrete Zielparameter für das Systemdesign abgeleitet werden. Diese Parameter bilden die Grundlage für die Auslegung künftiger Anlagen und können unmittelbar in neue Produktentwicklungen einfließen.

Die mögliche Nutzung von SiC-basierten 2,3-kV-IGBT-Modulen in Verbindung mit der Beibehaltung der bewährten 2-Level-Topologie ermöglicht es FREQCON, bestehende Systeme mit geringem Anpassungsaufwand weiterzuentwickeln. Die realisierten Hardwareanpassungen, insbesondere hinsichtlich Zwischenkreisspannung und thermischer Belastbarkeit, können direkt in die Weiterentwicklung für ein zukünftiges 1500 V System einfließen.

Die während des Projekts gemachten Erfahrungen, etwa in Bezug auf die Kompatibilität verschiedener Regelungsstrategien (z.B. dq-Transformation vs. Raumzeigermodell) sowie die thermische Bewertung von Bauteilen unter höheren Schaltfrequenzen, liefern wertvolle Erkenntnisse für die weitere Entwicklung.

Insgesamt zeigt sich, dass die im Projekt gewonnenen Ergebnisse eine hohe Verwertbarkeit aufweisen – sowohl in technologischer, wirtschaftlicher als auch in wissenschaftlicher Hinsicht. Sie schaffen die Grundlage für die Entwicklung zukunftsfähiger Energiesysteme und stärken die Position der Projektpartner im Bereich netzdienlicher Leistungselektronik für regenerative Energieanlagen.

6 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Es liegen keine weiteren Erkenntnisse vor.

7 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses

Es erfolgte keine Veröffentlichung von Projektergebnissen während der Projektlaufzeit. Bis auf die Veröffentlichung dieses Schlussberichtes ist auch keine Veröffentlichung geplant.

8 Liste der Abbildungen

Abbildung 1: Beispielhafter, zeitlicher Verlauf der Überstromanforderung beim Verfahren nach K-Faktor

Abbildung 2: Ansteuerung der Leistungshalbleiter bei Freqcon

Abbildung 3: Schematische Darstellung der EMS-Reglerstruktur

9 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2: Projektkonsortium