

TECHNOLOGIESPEZIFISCHE BEREITSTELLUNG VON MOMENTANRESERVE

Marc Wöstefeld¹, Hendrik Vennegeerts²

Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Fachgebiet elektrische Energiesysteme (eES), Bismarckstr. 81, 47057 Duisburg, <https://www.uni-due.de/ees>,
¹+49 (0)203 379 1015, marc.woestefeld@uni-due.de
²+49 (0)203 379 1032, hendrik.vennegeerts@uni-due.de

Kurzfassung: Das Ziel einer klimaneutraleren Energieversorgung bedingt die Substitution der Synchronmaschinen fossiler Kraftwerke durch Erzeugungsanlagen auf Basis erneuerbarer Quellen (EE). Daraus entsteht die Herausforderung, die Bereitstellung von Systemdienstleistungen neu zu organisieren. Insbesondere der Rückgang der Trägheit im Netz wird von den Übertragungsnetzbetreibern (ÜNB) als eines der größten Risiken angesehen. Die Netzanbindung der umrichterbasierten EE mit Hilfe von netzbildenden Regelungskonzepten bietet die Möglichkeit einen Teil zur Erbringung dieser Systemdienstleistungen, speziell zur Momentanreserve (MR) in Form von (virtueller) Trägheit, beizutragen. Trotz eines Branchenkonsenses zur grundlegenden Wirkungsweise und der Aufnahme in die aktuellen Entwürfe der Europäischen Netzcodes, sind die Anforderungen an diese noch nicht konkret umschrieben. Für die Bereitstellung von MR liegt zudem, wie auch heute in Form der Trägheitskonstante des Maschinensatzes, offensichtlich eine Technologieabhängigkeit vor, die bei der Ausformulierung von Anforderungen zu berücksichtigen ist. Eine differenzierte Bewertung ist daher für eine Ableitung von Handlungsempfehlungen bei der Integration in verschiedene Netzebenen des Energieversorgungsnetzes erforderlich.

Ziel dieser Arbeit ist die Identifikation von Einschränkungen und Potenzialen zur Erbringung von MR verschiedener umrichterbasierter Anlagentypen. Dies geschieht auf Grundlage von einfachen Modellen umrichterbasierter EE-, Speicher- und STATCOM-Anlagen.

Keywords: Momentanreserve, netzbildendes Verhalten, Grid-forming control, Photovoltaik, Windenergieanlage, Batteriespeicher, STATCOM, erneuerbare Energien

1 Hintergrund und Motivation

Die aktuelle Transformation in Richtung einer klimaneutraleren Energiewirtschaft führt zwangsläufig zu einer Substitution der konventionellen Kraftwerke mit fossilen Brennstoffen durch erneuerbare Energien (EE). Diese werden hauptsächlich durch umrichterbasierte Einspeisung von Windenergie- und Photovoltaikanlagen realisiert. Nach aktuellem Stand der Technik sind kommerzielle umrichterbasierte Anlagen zur Einspeisung erneuerbarer Energien netzfolgend konzeptioniert. Das schnellausrichtende Verhalten auf die aktuelle komplexe Spannung am Anschluss, ähnlich einer Stromquelle, ist bezeichnend für die netzfolgende Betriebsweise [1]. Ergänzt wird dieses Verhalten durch Anforderungen der aktuellen Anschlussbedingungen zur Netzstützung, z.B. durch einen Beitrag zur dynamischen

Spannungsstützung erfolgend durch die Vorgabe eines Blindstromsollwertes im Fehlerfall [2]. Im Gegensatz zu den konventionellen Generatoren erfolgt jedoch von den umrichterbasierten erneuerbaren Energien zunächst kein systematischer Beitrag zu der Erbringung von MR, da sie über keine direkte physikalische Kopplung mit der Systemfrequenz verfügen. Somit muss die Erbringung der MR bei stetig abnehmender synchroner Erzeugung neu organisiert werden.

Eine Substitution fossiler konventioneller Kraftwerke durch erneuerbare Energien kann jedoch nicht in der gleichen Leistungs- und Energieflächendichte erfolgen, sodass sich eine weitere geographische Verteilung ergibt. Dieser Aspekt sowie der ausgeprägtere innereuropäische Stromhandel führen zu höheren Transitleistungen, welche bei Netzauftrennungen zu signifikanten Leistungsungleichgewichten führen können. Auch die weiter zunehmende Volatilität aufgrund der steigenden Anteile an erneuerbaren Energien im Strommix muss berücksichtigt werden.

Ein starker Rückgang an MR bedeutet daher, dass bereits bestehende Maßnahmen für die Beibehaltung der Frequenzstabilität nicht mehr ausreichend sein können, da höhere dynamische Frequenzgradienten entstehen, welche unverträglich für Anlagen – Erzeugung wie Verbrauchsgeräte – sein könnten. Zumindest wird jedoch die Reaktionszeit zur Aktivierung von Systemschutzplänen reduziert und somit die Effektivität vermindert [1].

Die MR kann durchaus weiter mittels Synchronmaschinen bereitgestellt werden, wenn diese als Phasenschieber betrieben werden. Neben den zumeist aus anderen Gründen temporär weiterbetriebenen Synchrongeneratoren können auch neue Anlagen installiert werden, die speziell für den Betrieb als Phasenschieber und zur MR-Erbringung mit zusätzlicher Schwungmasse ausgestattet sind. Auch werden weiterhin Kraftwerke mit Synchronmaschinen existieren, wie Pumpspeicher-, Gas- oder Laufwasserkraftwerke. Dieser Anteil reicht jedoch in Summe und in der regionalen Verteilung absehbar nicht aus [3, 4]. Ein intensiv diskutierter und vielversprechender Ansatz zur Erweiterung der verfügbaren MR stellt das netzbildende Regelkonzept von Umrichtern (GFC) dar, welches auch weitere netzstützende Eigenschaften mit sich bringt [5]. Netzbildendes Verhalten ist im Kern grundsätzlich technologieübergreifend auf allen umrichterbasierten Anlagen einsetzbar. Der verfügbare Umfang an MR hängt allerdings von den Möglichkeiten zur unverzögerten Aufnahme und Abgabe von Energie ab.

Weder in nationalen noch in das Synchrongebiet Continental Europe betreffenden internationalen Netzkodizes sind zurzeit konkrete Umschreibungen der Anforderungen an GFC bindend umgesetzt worden. Daraus resultierend wird eine standardisierte Prüfung auf netzbildendes Verhalten unmöglich und demnach können diese nicht flächendeckend umgesetzt werden. Sehr wohl ist ein Branchenkonsens vorhanden und eine erste Aufnahme in Entwürfe zur Änderung internationaler Netzkodizes ist erfolgt [6]. Diese sind jedoch noch sehr allgemein ausformuliert. Mit der angestrebten Technologieoffenheit werden keine Restriktionen an bestimmte Technologien umrichterbasierter erneuerbarer Energien gestellt, sodass zunächst grundsätzlich jede umrichterbasierte Anlage GFC implementieren könnte. Dies eröffnet ein breites Feld an Ausgestaltungen und Konzepten.

Aus den bisherigen weltweiten Untersuchungen zu GFC wurde eine offensichtliche Abhängigkeit der eingesetzten Technologie festgestellt, um bestimmte Teilaspekte des netzbildenden Verhaltens zu erfüllen [7]. Ziel dieser Arbeit ist es, Potenziale und Limitierungen von umrichterbasierten Anlagen technologiespezifisch zu identifizieren. Eine differenzierte

Bewertung ist daher für eine Ableitung von Handlungsempfehlungen bei der Integration in verschiedene Netzebenen des Energieversorgungsnetzes erforderlich.

2 Stand der Technik

GFC ist aufgrund der fehlenden Normung/bindenden Definition nicht flächendeckend verfügbar oder einforderbar. Über Einzel- und Pilotanlagen hinaus sind zurzeit netzfolgende umrichterbasierte erneuerbare Energien der Stand der Technik. Deren Verhalten zeichnet sich durch eine sehr schnelle Stromregelung auf Basis der gemessenen Ausgangsspannung der Anlage aus, sodass Sollwertvorgaben an Wirk- und Blindleistung möglichst schnell eingeregelt werden. Daraus resultiert ein stromquellenähnliches Verhalten. Erweitert wird dieses Verhalten durch die Anforderungen gemäß der lokalen Anschlussbedingungen. Beispiele hierfür sind das Verhalten im Fehlerfall (FRT) oder eine eventuell eingeforderte Q(U)-Regelung. Darüber hinaus kann eine solche Anlage auch an der Bereitstellung von marktbasierter Systemdienstleistungen teilnehmen. Die Bereitstellung von Momentanreserve unterstützen sie jedoch gemäß Regelungskonzept nicht.

Durch die breite Akzeptanz von GFC als systemische Lösung – d.h. über die Bereitstellung von MR hinaus – für den Wegfall von Synchrongeneratoren am Netz entsteht trotz fehlender Definitionen sukzessive ein Branchenkonsens hinsichtlich eines teilspezifizierten Verhaltens. Allgemein wird eine umrichterbasierte Anlage als GFC anerkannt, welches einer idealen Spannungsquelle mit Innenimpedanz und begrenzter Winkel- und Frequenzänderungsgeschwindigkeit gleicht.

Über diesen Konsens hinaus fehlen noch konkrete Vorgaben, auch wenn aus einigen national applizierbaren Quellen durchaus Vorschläge für Definition und Verhalten getätigt wurden. Als Reaktion auf den europaweiten Systemsplit in 2016 hat ENTSO-E einen technischen Bericht ausgearbeitet, der grundsätzliche Fähigkeiten definiert, die von GFC erbracht werden müssen [8]. Das Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) im VDE, das mit der nationalen Entwicklung der Netzanschlussregeln in Deutschland beauftragt ist, hat zwei Hinweise veröffentlicht, welche Anforderungen sowie Nachweismöglichkeiten für ein netzbildendes Verhalten liefern [9-10]. Die vier deutschen Übertragungsnetzbetreiber haben einen Vorschlag über netzbildendes Verhalten, basierend auf den ENTSO-E Bericht, ausgearbeitet [11]. Mit dieser allgemeinen Akzeptanz der Einsatzmöglichkeiten für GFC wurden diese in die Entwürfe zur Änderung der Netzkodizes für den Anschluss von Energieerzeugungsanlagen aufgenommen. In anderen Ländern mit ausgeprägten Inselnetzverhalten oder schwachen Netzen, wie z.B. Großbritannien, Irland oder Australien, wird dahingegen GFC bereits aktiv umgesetzt [12]. Die Aufnahme in die Anschlussbedingungen und in die marktbasierter Prozesse führte dort zu einer breiteren Umsetzung verschiedener Konzepte.

Die zu erwartende Aufnahme in die nationalen Anschlussbedingungen in Mitteleuropa wird das geforderte Verhalten auf Basis des Klemmenverhaltens einer Erzeugungsanlage definieren. Dieses auch für andere Anlagentypen angewendete Vorgehen gewährleistet eine Technologieoffenheit, so dass keine Regelungsumsetzung grundsätzlich ausgeschlossen, oder Anlagentechnologie bevorzugt wird. Die offene Gestaltung des GFC-Verhaltens ermöglicht eine Vielzahl von Ansätzen, welche auf verschiedenen technologischen Anlagen- und zugehörigen Primärenergieprozessen basieren. Eine allgemeine Bewertung

technologisch differenzierter Anlagentypen und der dazugehörigen Primärprozesse für eine Handlungsableitung ist notwendig, um eine schnelle Ausbreitung von GFC zu fördern.

3 Methodik

Für die technologiespezifische Untersuchung auf Potenziale und Restriktionen umrichterbasierter Anlagen wird ein Bewertungsschema aufgestellt. Ziel dieses Schemas ist es, die Bereitstellung von MR hinsichtlich der eingesetzten Technologie zu bewerten. MR ist die instantane Bereitstellung von Wirkleistung bei einer sich kontinuierlich ändernden Netzfrequenz. Angelehnt ist dieses Verhalten an den physikalischen Zusammenhang der Synchronmaschine mit ihrem synchronisierenden Moment sowie mit ihren und um die Turbinen erhöhten rotierenden Massen, welche Rotationsenergie abhängig von der Rotationsfrequenz (hinreichend langsame Vorgänge: Netzfrequenz entspricht der Rotationsfrequenz multipliziert mit Polpaarzahl) besitzen. Eine Änderung in der Rotationsfrequenz geht mit der Ein- oder Ausspeicherung von Energie einher. Einspeicherung wird im Klemmenverhalten durch eine Verringerung der Energieeinspeisung ins Netz sichtbar (negative MR), wohingegen Ausspeicherung eine Erhöhung der Energieeinspeisung bedeutet (positive MR). Eine Änderung der Wirkleistung aufgrund eines Winkelsprunges ist kein kontinuierlicher Prozess und stellt somit keine MR dar.

Das Bewertungsschema umfasst, neben der jeweilig betrachteten Technologie, das Vorzeichen der bereitzustellenden MR (Leistungsrichtung) und den betrieblichen Arbeitspunkt (AP) der umrichterbasierten Anlage. Die betrachtete Technologie kann dabei beliebig detailliert, je nach Ausführung eines Herstellers, erweitert werden. Daher wird in dieser Arbeit auf die jeweiligen Technologiegrundsätze der bekanntesten umrichterbasierten Anlagen eingegangen. Als dazugehörige Primärprozesse sollen in dieser Arbeit Windenergie- und Photovoltaikanlagen, sowie Batteriesysteme und STATCOM-Anlagen untersucht werden.

In Verbindung mit dem Technologiegrundsatz und der Leistungsrichtung ist das maximale Leistungsbetriebsdiagramm in Abhängigkeit vom AP und die Dauer der Erbringung von MR ausschlaggebend. Darin enthalten sind Informationen zur Betriebsführung sowie mögliche Energie- und Leistungsreserven.

4 Auswertung und Ergebnisse

Unabhängig vom Bewertungsschema kann mit der Methodik der getrennten Leistungsrichtung für MR der umrichterbasierten Anlagen die Möglichkeit geschaffen werden, eine Vielzahl von Anlagen in die Bereitstellung von MR einzubinden. Anlagen ohne dezidierten Speicher oder einer eingeplanten positiven Leistungsmarge sind in der Regel nicht fähig, MR über einen längeren Zeitraum (mehrere Sekunden) bereitzustellen. Umgekehrt kann eine schnelle Leistungsreduktion über andere Mechanismen realisiert werden. Die Auftrennung in positiver und negativer Leistungsrichtung kann diese Anlagen zur Bereitstellung von MR überhaupt erst qualifizieren. So kann durch entsprechende schnelle Regelung und Energieabsorptionseinrichtungen im Klemmenverhalten eine Leistungsreduktion erreicht werden, während eine Leistungserhöhung aufgrund fehlender Speicher/Leistungsmarge des angekoppelten Primärprozesses nicht möglich wäre (Bereitstellung unsymmetrischer MR).

Ebenso unabhängig vom Bewertungsschema ist die Überlastfähigkeit der Leistungselektronik von den umrichterbasierten Anlagen. Ohne signifikante, da bisher unwirtschaftliche, Überdimensionierung ist keine relevante Überlastfähigkeit der Leistungselektronik gegeben. Diese resultierenden Grenzen wirken technologieunabhängig auf das Betriebsdiagramm (Abbildung 1a, konstante Klemmenspannung vorausgesetzt). Darüber hinaus hängen weitere Grenzen von der eingesetzten Technologie ab. Eine geeignete Auslegung der umrichterbasierten Erzeugungsanlagen verfügt über die Möglichkeit der Leistungsaufnahme aus dem Netz, ohne zwangsläufig mit übergroßen Mehrkosten verbunden zu werden. Dafür sind jedoch zusätzliche Speicher- oder dissipative Elemente (Abbildung 1b), wie z.B. Chopper/Crowbar wie bei Windenergieanlagen üblich, notwendig.

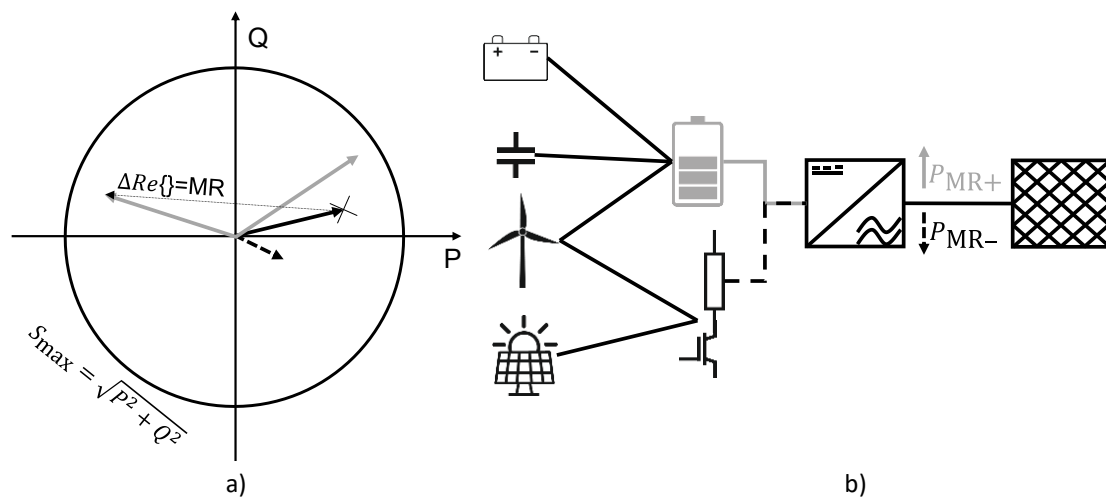


Abbildung 1: Allgemeines Betriebsdiagramm umrichterbasierter Anlagen, basierend auf Strombegrenzung unter Annahme einer konstanten Spannung (a) und verallgemeinerte Topologieansätze umrichterbasierter Anlagen (b).

Für das Bewertungsschema können allgemeine Arbeitspunkte definiert werden, welche für die jeweilige Technologie, bzw. Anlageneigenschaften erweitert werden können. Eine zeitliche Betrachtung (also Energiemengen) kann jedoch nur technologiespezifisch erfolgen.

Tabelle 1: Allgemeingültige Arbeitspunkte zur Möglichkeit der Bereitstellung von Momentanreserve für eine umrichterbasierte Anlage mit der Möglichkeit zusätzliche Energie bereitzustellen. Die bereitzustellende Momentanreserve (P_{MR}) kann der Leistungsrichtung entsprechend positiv oder negativ sein. Die Summe aus Momentanreserve und aktueller Leistung (P_{akt}) kann nicht größer werden als die maximale Ausgangsleistung ($P_{max+/-}$). Bei Überschreitung der Leistungsgrenzen kann die MR, entsprechend der verbleibenden Leistungsmarge, teilweise (*) bereitgestellt werden.

	Arbeitspunkt (AP)	Negative MR	Positive MR
	①	①	Ja
②	②	Ja	Teilweise*
③	③	Ja	Ja
④	④	Teilweise*	Ja
⑤	⑤	Nein	Ja

Im Allgemeinen lassen sich somit fünf APs identifizieren. Aufgrund stark begrenzter Überlastfähigkeit kann betragsmäßig keine leistungserhöhende MR bereitgestellt werden,

wenn die Anlagenausgangsleistung der maximalen Leistung entspricht (AP 1 & AP 5). Bereitstellung leistungsverringender MR ist jedoch möglich. Eine teilweise Bereitstellung von MR ist möglich (AP 2 & AP 4), wenn die Ausgangsleistung nicht voll ausgeschöpft ist, jedoch nicht ausreicht, die volle MR bereitzustellen. Leistungsverringende MR ist weiterhin möglich. Im Arbeitsband, in dem die Summe aktueller Leistung und positiver bzw. negativer MR die maximale Ausgangsleistung nicht überschreitet (AP 3), ist die Bereitstellung beider Anteile möglich.

Der generelle Aufbau von spannungsgeführten umrichterbasierten Anlagen sieht einen Zwischenkreiskondensator vor, welcher jedoch aus wirtschaftlichen Gründen heute mit möglichst minimaler Kapazität ausgelegt wird. Eine instantane Abweichung der Leistungseinspeisung vom vorherigen AP bedingt eine Differenzleistung. Der Zwischenkreiskondensator wird im initialen Moment durch diese Differenzleistung zusätzlich aufgeladen, bzw. entladen. Die resultierende Spannungsänderung am Kondensator muss durch Anpassung der AP der Primärprozesse beherrscht werden, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Für die Bereitstellung von MR ist der Energieinhalt in diesem Zwischenkreisspeicher jedoch nicht ausreichend, da MR zumeist mehr als nur einen initialen Moment beinhaltet. Welche Primärprozesse dazu in der Lage sind wird in den nachfolgenden Abschnitten diskutiert.

4.1 Batteriesysteme

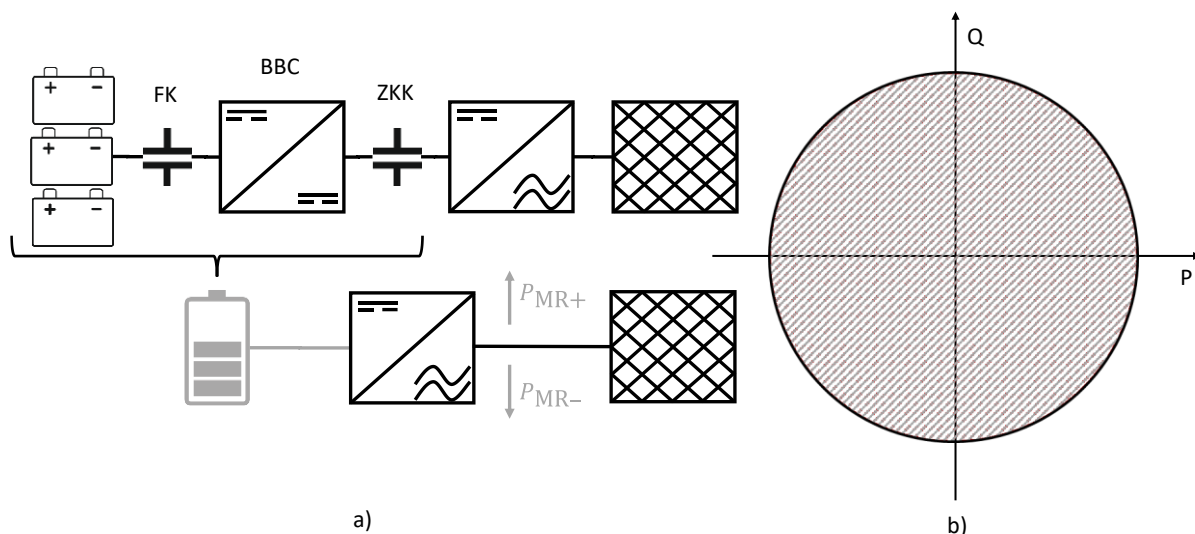


Abbildung 2: Repräsentation der Hardware von Batteriesystemen. Vollwertiger Speicher ermöglicht MR in beide Richtungen (a). Leistungsdiagramm deckt den gesamten Bereich der Auslegungsscheinleistung des Umrichters ab (b).

Der intuitive Lösungsansatz für die Bereitstellung von MR bilden die Batteriesysteme. Die allgemeine Topologie besteht aus einem oder mehreren Batteriepacks, Filterkondensatoren (FK), Hoch-/Tiefsetzsteller (BBC), Zwischenkreiskondensatoren (ZKK) und dem netzangebundener Umrichter (Abbildung 2a).

Bei Bereitstellung von MR wird nach dem initialen Moment der Erbringung der Differenzleistung durch den ZKK das Taktverhältnis des BBC geändert, um die Leistung des Batteriepacks anzupassen. Die relevanten Aspekte zur Fähigkeit der Bereitstellung von MR sind dabei die Zykluszeit des Regelungssystems des BBC, und das Verhalten des

Batteriepacks. Das Batteriepack verhält sich hochdynamisch wie ein Kondensator und wird von einer von der Zellchemie abhängigen typischen Batteriekennlinie im Langzeitverhalten abgelöst. Unter Annahme der vertraglichen Zusicherung oder Vermarktung von MR ist der Ladezustand für eine grundsätzliche Diskussion nicht relevant. Die Leistungsfähigkeit des Batteriepacks unterliegt jedoch kalendarischer und zyklischer Alterung. Bei aktivem Management wird diese Alterung aber eine Bereitstellung von MR nicht beeinflussen. Durch den Paradigmenwechsel der Regelungsaufgaben von einzelnen Stellgliedern im Anlagen-Aufbau bei GFC, erhöht sich die Signifikanz der Taktung bzw. Zykluszeit des BBC. Typisch bei netzfolgenden Anlagen ist das Paradigma, dass der BBC einen Leistungsfluss einstellt und der netzgebundene Umrichter die DC-Spannung auf einen bestimmten Wert regelt. Diese Aufgaben müssen nun im Kern getauscht werden und die auftretenden Differenzleistungen vom BBC ausgeregelt werden. Dieser muss entsprechend schnell reagieren, um ein akzeptables Spannungsband in DC-Zwischenkreis zu gewährleisten.

Sind diese Aspekte erfüllt, ist ein bidirektionaler GFC-Betrieb möglich (Abbildung 2b). Einen Ersatz des elektrochemischen Batteriespeichers durch eine andere Technologie ist konzeptionell möglich, so dass ebenfalls bidirektionale MR-Bereitstellung gegeben ist.

Hinsichtlich der AP-Betrachtung können die allgemeinen AP (aus Tabelle 1) herangezogen werden. In einem Speichersystem herrschen hinsichtlich der AP, unter Annahme der vertraglichen oder marktlichen Zusicherung hinsichtlich Ladezustand (SOC) und Gesundheitszustand (SOH, Leistungsfähigkeit), einzig die Beschränkung des maximalen Betrags der bereitgestellten Leistung (Abbildung 2b). Dies gilt besonders bei Betrachtung der Anlage im Arbitragemarkt. Dies erfordert eine Anpassung des angebotenen Energieinhalts und der Leistungsfähigkeit von der MR oder der Anlage im Arbitragemarkt. Dies bezieht sich auf Wirkleistungen. Bei Teilnahme an spannungsstützenden Maßnahmen oder blindleistungsbasierten Systemdienstleistungen sind die Wechselwirkungen auf freie Wirk- und Blindleistungsbänder zu beachten.

4.2 STATCOM-Systeme

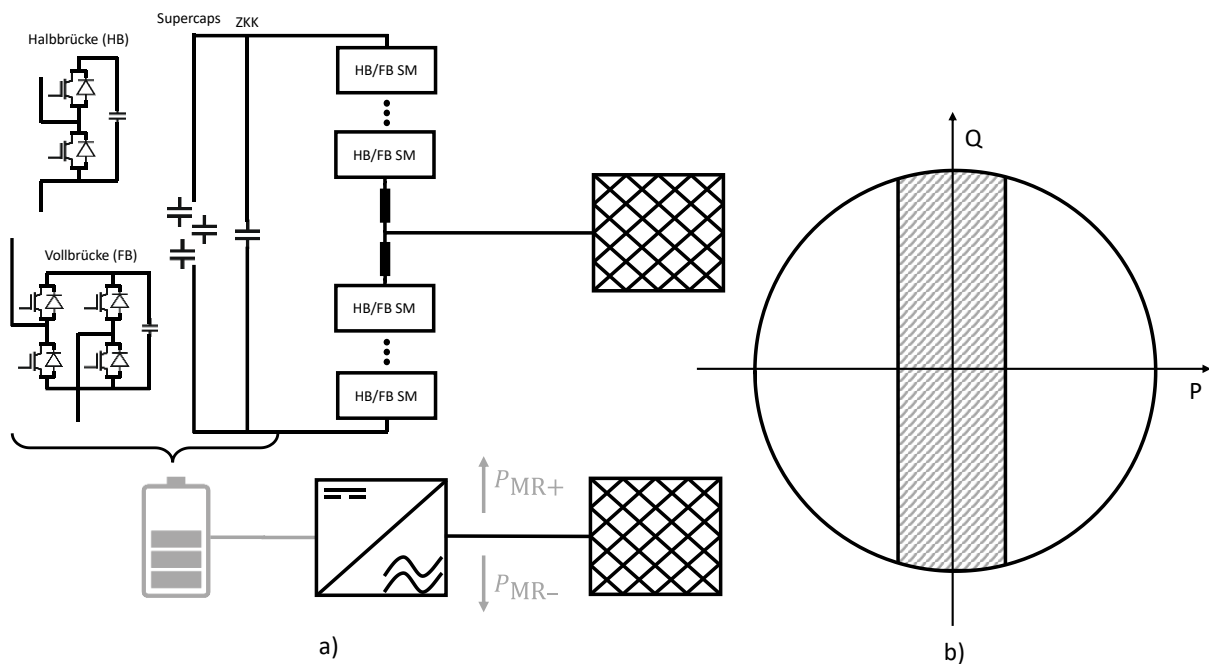


Abbildung 3: Vereinfachte Abbildung eines STATCOM-Systems bestehend aus Vollbrücken, und/oder Halbbrücken als Submodule in Verbindung mit System Zwischenkreiskondensator und zusätzlichen Speicher über z.B. Supercaps (a). Begrenzter Energieinhalt und Betriebsweise des STATCOM-Systems erlauben Bereitstellung von bidirektionaler MR im begrenztem Leistungsband

STATCOM-Systeme werden zumeist in Hoch- oder Höchstspannung eingesetzt und sind auf entsprechende Spannungsniveaus von einigen kV in Verbindung mit einem Transformator oder über Direktanbindung mit dem Netz gekoppelt. Gängig sind dabei MMC-Topologien (modular multilevel converter). Der Aufbau besteht aus dem System Zwischenkreiskondensator (ein oder mehrere ZKK) und den in Serie geschalteten Voll- oder Halbbrücken Modulen mit jeweils eigenen Modul ZKK. Erweitert werden kann dieser Aufbau durch Supercaps oder Speichersysteme, welche direkt oder über zusätzliche Wandlerstufen an den ZKK angeschlossen werden (Abbildung 3a).

Die Modul-ZKK sind im Grundaufbau auf den primären Zweck des STATCOM minimal ausgelegt, bei beliebiger Blindleistungsbereitstellung innerhalb der Stromgrenzen des Umrichters einen stabilen Betrieb aufrecht zu erhalten. Dieser ist in der MMC Technologie komplexer, da zusätzliche Effekte wie Zirkulationsströme zwischen den Modulen auftreten können. Aufgrund der Vielzahl der Modul-ZKK in Kombination mit dem System-ZKK können bei geeigneter Wahl der Regelungsalgorithmen vorhandene Kapazitäten besser ausgenutzt werden, wodurch mehr verfügbare Energie verwendbar sind.

Die Energiemenge aus den ZKKs (System ZKK oder auch mit optimierter Regelung Modul ZKK) reicht jedoch nicht für eine längere Bereitstellung von MR. Energiemengen für die Bereitstellung einiger Periodendauern sind denkbar, aber aus Sicht des Energieversorgungssystems wenig hilfreich. Ein Lösungsansatz ist die Einbindung von zusätzlichen Speicherelementen, z.B. Supercaps oder mehrstufiger Speicher mit BBC. Um die verfügbare Energiemenge zu erhöhen, kann zusätzlich eine höhere mögliche Spannungsdifferenz an den ZKK erlaubt werden und somit die Auslegung angepasst werden. In Kombination mit Vollbrückenmodulen kann diese effektiver ausgenutzt werden und ist weniger vom Modulationsindex abhängig. Dies würde die Bereitstellung von MR nicht über

Sekunden, jedoch über einige Perioden mehr gewährleisten.

Aufgrund der begrenzten Speicherkapazität müssen auch sog. „Recovery“-Effekte berücksichtigt werden. Eine Bereitstellung von MR bedingt einen Spannungshub oder Spannungsabsenkung an den ZKK. Mit der Größe des Arbeitsbandes der Spannung im DC-Zwischenkreis steigt der Energiegehalt quadratisch an, muss aber auf die maximal erlaubten transienten Spannungen der Bauteile abgestimmt sein. Zusätzlich hängt das Arbeitsband von der Betriebsweise ab, da die DC-Zwischenkreisspannung nicht zu tief absinken darf. Sonst wird der DC-Zwischenkreis über die Dioden im netzgebundenen Umrichter ungesteuert vom Netz aufgeladen. Nach Bereitstellung von positiver MR muss die Spannung wieder in die Mitte des Arbeitsbandes verfahren werden, bevor ein weiterer Beitrag zur MR in die gleiche Leistungsrichtung möglich ist. Dies erfordert Energie, welche aus dem Netz bezogen werden muss. Der zeitliche Rahmen hierfür ist stark vom individuellen STATCOM-Aufbau abhängig. In einem Fall des Leistungsungleichgewichts des Netzes kann eine zu schnelle Wiederaufladung zu weiterer Instabilität des Netzes beitragen.

Die AP-Betrachtung einer STATCOM-Anlage erfordert zwingend den Einbezug der Scheinleistung bzw. Blindleistung, da die Spannungsstützung, also Bereitstellung von Blindleistung, den eigentlichen Verwendungszweck der Anlage darstellt. Daher ist eine MR-Bereitstellung im hohen zweistelligen Prozentanteil der installierter Scheinleistung bei gleichzeitig langer Bereitstellungsdauer, die ohnehin nur in Verbindung mit einem vollwertigen Speichermodul (also Batteriepack und BBC) realisierbar ist, für den Einsatz in der Praxis nicht relevant (Abbildung 3b).

Im AP mit maximaler Blindleistung, bei 100% Auslastung der installierten Scheinleistung durch Blindleistung und unter Annahme einer kurzzeitigen Überlastfähigkeit von 10%, könnte so kurzzeitig noch immer ca. 45% der installierten Scheinleistung als MR bereitgestellt werden. Ohne Überlastfähigkeit beträgt die maximale Blindleistung bei gleich gewählter maximaler Bereitstellung von MR (45% von installierter Scheinleistung) nur 89% der Bemessungsscheinleistung bzw. 98% bei 20% MR. Eine größere MR-Erbringung ist also entweder stark vom Blindleistungsarbeitspunkt des STATCOM abhängig oder durch Verzicht auf Ausnutzung des vollen Blindleistungsbandes zu erkaufen.

4.3 Photovoltaik-Systeme

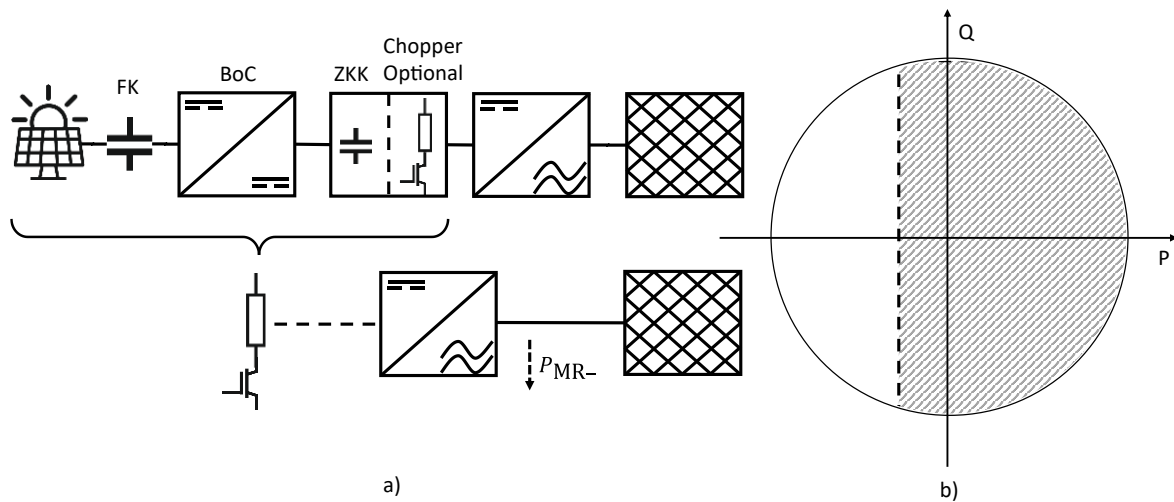


Abbildung 4: Vereinfachte Abbildung einer Photovoltaikanlage (a). Bereitstellung negativer MR ist möglich über Anpassung an Hochsetzer (BoC) oder integration eines zusätzlichen Choppers o.Ä. (b). Bei Anwendung mit Chopper ist auch Energiebezug aus dem Netz möglich. Positive MR ist nicht aufgrund fehlender Speicherlemente.

Photovoltaiksysteme (PV), in reiner Form, wurden bisher sehr wenig bis gar nicht in Verbindung mit Erbringung von MR bei GFC gebracht. Aufgrund des grundlegenden Aufbaus, Solarstrings, Filterkondensatoren (FK), Hochsetzer (BoC), ZKK und netzgebundener Umrichter (Abbildung 4a), bieten diese Anlagen keine Möglichkeit signifikante Energiemengen bereitzustellen. Die Bereitstellung von zusätzlicher Energie für dynamische Vorgänge, z.B. aus dem vorgelagerten Primärprozess, ist aufgrund fehlender Speicher - lediglich FK - nicht möglich. Eine entsprechend große Auslegung der ZKK ist ohne entsprechende Vergütung nicht kommerziell praktikabel. Lösungsvarianten mit Vorhaltung von Leistungsreserven sowie GFC durch Kombination mit Batteriespeichern sind durchaus möglich, müssten aber durch entsprechende Vergütungssystem angereizt werden.

Durch die Auftrennung der MR-Leistungsrichtung ist jedoch die Möglichkeit gegeben, negative MR bereitzustellen. Die auftretenden Differenzleistungen müssen vom BoC ausgeregelt werden, sodass der Spannungshub im DC-Zwischenkreis nicht zu groß ausfällt. Der Modulationsindex für den BoC wird im Allgemeinen durch einen MPP-Algorithmus gebildet. Dieser versucht die maximale Leistung aus den Solarstrings zu erzielen. Die Zykluszeit kann hier durchaus Sekunden betragen. Auch kann der MPP-Tracker je nach Ausführung einen iterativen Algorithmus implementiert haben, wodurch mehrere Regelungszyklen einer sonst langsamen Regelung in Anspruch genommen werden. Dies sorgt ohne Adaption der Algorithmen für den BoC zu länger anstehenden Differenzleistungen.

Eine Änderung des Algorithmus, eine etwas größere Auslegung des ZKK oder die Integration von dissipativen Elementen wie Chopper/Crowbar ermöglichen somit alle die Bereitstellung von negativer MR. Die Benutzung dissipativer Elemente sorgt zugleich für die Möglichkeit der Bereitstellung von MR auch über die Summennulleistung hinaus, sodass die PV-Anlage Energie aus dem Netz beziehen kann. Diese Elemente sind in PV-Anlagen jedoch üblicherweise nicht in solchem Umfang verbaut, da eine schnelle Leistungsreduktion für die Low-Voltage-Ride-Through-Fähigkeit über den BoC erreicht werden kann.

Die AP-Analyse kann in großen Teilen aus Tabelle 1 übernommen werden. Die maximale negative Leistung entfällt oder entspricht die des Choppers. Die Bereitstellung von positiver MR wird – trotz der oben aufgeführten Optionen - nicht in Betracht gezogen, da die PV-Anlagen zumeist mit höherer AC-Leistung als die vereinbarte Einspeiseleistung ausgeführt sind. Damit befinden sich die APs der PV-Anlagen sehr häufig am AP der maximalen Wirkleistungseinspeisung.

Die APs beinhalten eigentlich immer die Möglichkeit, die Leistung zu reduzieren. Im Falle von vorhandenen dissipativen Elementen, kann die Leistung auch in den Netzbezug wechseln. Andernfalls entspricht die maximale negative Leistung gleich Null. Eine Bereitstellung von negativer MR ist in der Regel in allen APs möglich. Sie wird nur auf das verbleibende Leistung begrenzt, wenn die Einspeiseleistung im Arbeitspunkt geringer ist als die bereitzustellende MR in Abwesenheit von dissipativen Elementen (Abbildung 4b).

4.4 Windenergiesysteme

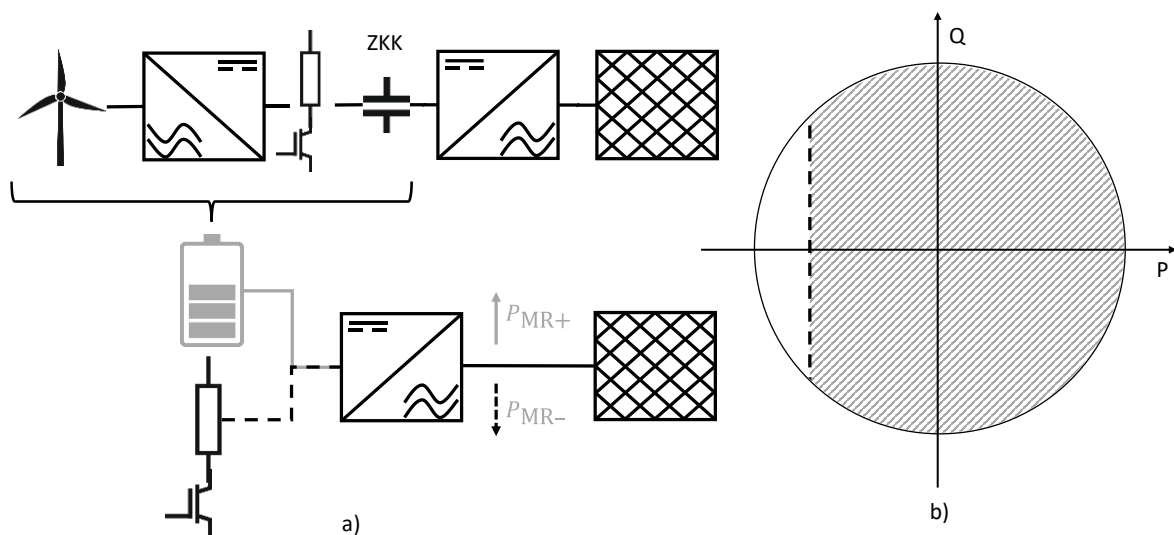


Abbildung 5: Vereinfachte Abbildung von Vollumrichter-Windenergieanlagen (a). Durch Mechanische Speicher und dissipativer Elemente kann die Windenergieanlage innerhalb des allgemeinen Leistungsbandes bidirektionale MR bereitstellen (b).

Windenergieanlagen (WEA) bieten im Gegensatz zu PV-Systemen durch Ihren Aufbau die Möglichkeit, zusätzliche Energie aus ihrem inhärenten mechanischen Speicher zu entnehmen. Der Aufbau (Abbildung 5a) besteht bei Vollumrichteranlagen grundlegend aus dem Windrotor mit gekoppelter Synchron- oder Asynchronmaschine (ggf. auch über Getriebe), einem maschinenseitigen Umrichter (MSC), ZKK und dem netzseitigen Umrichter (LSC). Ein GFC-Verhalten muss dabei nur im LSC umgesetzt werden. Der MSC muss, ähnlich wie bei den Speichersystemen, die durch Bereitstellung von MR variierende DC-Zwischenkreisspannung durch eine ebenso variierende Leistungsbereitstellung ausgleichen. Die Rotationsenergie des Windrotors kann dabei so ausgenutzt werden, dass diese zusätzliche Leistung bereitstellt, oder aufnehmen könnte. Dies bedingt eine Abweichung von dem Punkt der maximalen Leistung (MPP), welcher abhängig von der Rotationsgeschwindigkeit des Rotors und der Windgeschwindigkeit ist. Insbesondere bei Erbringung positiver MR ist dieser Zusammenhang zu beachten und wirkt begrenzen, da sonst die aus der Rotationsenergie entnommene

Leistung durch die verringerte Leistungsgewinnung aus dem Wind aufgrund des wenig effizienten Arbeitspunktes ausglich wird. Um eine geringere Effizienz der Windausnutzung durch Abweichung vom MPP möglichst gering zu halten, wird die Rotationsgeschwindigkeit zeitnah wieder auf den MPP geführt (speed recovery). Dies bedingt jedoch in der Klemmenleistung einer WEA eine Abweichung vom Sollwert, ähnlich dem Recovery-Prozess bei einer STATCOM-Anlage.

Bei hochdynamischen Vorgängen, wie Bereitstellung von MR und der damit einhergehenden Energieänderung der rotierenden Masse, ist die Änderung der Energieflüsse entscheidend für die Reduktion der Langlebigkeit von WEA. Um den Energiefluss und somit die Leistung anzupassen, müssen die applizierten Drehmomente des Generators am Rotor geändert werden. Je abrupter diese Änderung erfolgt, desto schneller wird die zusätzliche Energie bereitgestellt, aber auch schlagartige mechanische Belastung ausgeübt. Eine zu langsame Änderung der Drehmomente resultiert in langen Zeiträumen von hohen Differenzleistungen und somit großen Änderungen im DC-Zwischenkreis.

Positive MR kann entsprechend aus der Rotationsenergie des Windrotors extrahiert werden. Die Aktivierung dieser Energiereserve kann jedoch nicht instantan geschehen, sodass der ZKK inhärent als Zwischenspeicher dienen muss. Alternativ kann an dem DC-Zwischenkreis wieder ein zusätzliches Speicherelement eingebunden werden, welches aber nur diese Energie als Zwischenspeicher kompensieren muss. Eine weitere Lösungsmöglichkeit ist die Erhöhung des Spannungsbandes des DC-Zwischenkreises. Kommunikation zwischen LSC und MSC kann auch dazu beitragen, die Reaktionszeit des MSC zu mindern. Die Rotationsenergie im Windrotor reicht dabei aus, um zusätzliche MR bereitzustellen, da WEA über ähnliche Trägheitskonstanten (H) wie konventionelle Kraftwerke in dieser Größenordnung verfügen [13]. Zusätzlich bieten sie den Vorteil, dass diese Rotationsenergie nicht mit der Netzfrequenz gekoppelt ist.

Differenzleistungen, hervorgerufen durch negative MR, können prinzipiell auch in die Rotationsenergie des Windrotors umgesetzt werden. Durch die Nachteile der Abweichung zum MPP und dem entsprechenden speed recovery Effekt bietet sich hier allerdings die kurzzeitige Verwendung der dissipativen Elemente in einer WEA an. Diese sind – entsprechend der für Deutschland geltenden Netzanschlussregeln und der dort enthaltenen Anforderungen für Low-Voltage-Ride-Through-Fähigkeiten - in der Lage, Energie entsprechend der installierten maximalen Wirkleistungsfähigkeit für zwei Sekunden umzusetzen. Dies beschränkt jedoch die Erbringung von MR nicht auf diese Zeitspanne, da der Windrotor für die Bereitstellung von negativer MR heruntergeregelt wird, wenngleich etwas verzögert und gedämpft. So steht die Differenzleistung i.d.R. nicht dauerhaft, an.

Die Arbeitspunkt Betrachtung kann nun analog zum PV-System vollzogen werden. Da, in einer WEA technologisch über den Chopper vorhanden, im AP3 Leistung aus dem Netz bezogen werden kann, um negative MR bereitzustellen (Tabelle 1), auch wenn die Ausgangsleistung geringer ist, als die bereitzustellende MR. Zusätzlich kann, abgesehen vom AP bei maximaler Ausgangsleistung, (AP 1) in jedem AP positive MR bereitgestellt werden (Abbildung 5b).

5 Fazit und Ausblick

Die technologiespezifische Untersuchung der Bereitstellung von Momentanreserve auf Potenziale und Restriktionen bietet die Möglichkeit, einen Grundstein für Anlagenkonzepte und

Auslegungsoptionen zu legen, so dass die technische Möglichkeit der Bereitstellung von MR flächendeckend vorangetrieben werden kann. Durch die Reduktion der konventionellen fossilen Kraftwerke und der damit einhergehenden Reduktion der rotierenden Masse, wird das Potenzial zur Bereitstellung von Momentanreserve verringert. Dies wird als eins der größten Probleme in der Transition zu einer klimaneutraleren Energiewirtschaft gesehen.

Durch netzbildende umrichterbasierte erneuerbaren Energien können auch andere Anlagentypen wie Synchronmaschinen zur Bereitstellung von Momentanreserve herangezogen werden. Neben intuitiven Lösungsansätzen wie Batteriespeicher können aber auch andere Technologien diese Funktion bieten, da der Einsatz von flächendeckenden Batteriestationen kostspielig und ressourcenintensiv ist. Durch eine differenzierte Betrachtung von Arbeitspunkten und leistungsrichtungsabhängiger Bereitstellung der Momentanreserve können Anlagen auch ohne inhärente mechanische oder elektrische Speicher Momentanreserve darbieten.

STATCOM-Anlagen können durch bessere Regelungsalgorithmen für eine kurze Zeit (einige Perioden) Momentanreserve bereitstellen. Ist eine längere Zeit nötig, muss diese durch weitere Speichereinheiten aufgerüstet werden.

Photovoltaikanlagen bieten ohne Vorhaltung von Leistungsreserve (Drosselung) oder weiteren Speichereinheiten durch kleine Modifikationen in der Regelung der Leistungselektronik die Möglichkeit, negative Momentanreserve bereitzustellen.

Windenergieanlagen können durch ihre rotierenden Massen, welche losgelöst von der Netzfrequenz sind, ohne große mechanische Veränderungen einen Beitrag zu beiden Leistungsrichtungen der Momentanreserve leisten.

Alle Technologien unterliegen zugleich bestimmten Restriktionen, aber auch Potenzialen um die fehlende rotierende Masse konventioneller Kraftwerke in Zukunft auszugleichen. Eine geographische und technologisch verteilte Kombination von allen befähigten Betriebsmitteln kann hier die entscheidende Rolle spielen, um die Netzstabilität zu gewährleisten.

In weiterführenden Sensitivitätsanalysen sollen Einflussgrößen identifiziert und praktikable Bereiche für Bauteileigenschaften ermittelt werden, um umrichterbasierte netzbildende Anlagen bestmöglich auszunutzen, wobei gleichzeitig Systemanforderungen an die Momentanreserve jederzeit und regional erfüllt werden müssen.

Referenzen

- [1] H2020 MIGRATE Project. D1.1—Current and Arising Issues Caused by Increasing Power Electronics Penetration.
https://www.h2020-migrate.eu/_Resources/Persistent/dacdf9db7dffbeb16071037ea26c2f20aac6ed46/D1.1%20summary%20and%20questionnaire%20for%20external%20stakeholders_vf.pdf (Aufgerufen 31.Okt, 2023).
- [2] VDE „Technische Anschlussregel Mittelspannung (VDE-AR-N 4110)“
- [3] ENTSO-E “FREQUENCY STABILITY IN LONG-TERM SCENARIOS AND RELEVANT REQUIREMENTS” https://eepublicdownloads.azureedge.net/clean-documents/Publications/ENTSO-E%20general%20publications/211203_Long_term_frequency_stability_scenarios_for_publication.pdf (Aufgerufen 31. Jan. 2024)
- [4] Bundesnetzagentur “Aktueller Szenariorahmen 2023-2037/2045”
https://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/Bedarfsermittlung/2037/SR/Szenario_rahmen_2037_Genehmigung.pdf?__blob=publicationFile (Aufgerufen 31. Jan. 2024)
- [5] Julia Matevosyan et al., “Grid Forming Inverters – Are they the Key for High Renewable Penetration?,” IEEE PES Power & Energy magazine Nov-Dec 2019.
- [6] ACER, “Draft amendments to the NC RfG”,
<https://surveys.acer.europa.eu/eusurvey/files/81a1f4fe-c0ff-422a-9d11-169154922f30/ed215316-79d5-4fa0-b6db-0ee44a71a4d8> (Aufgerufen 20. Nov, 2023)
- [7] Matevosyan, J.; Vital, V.; O’Sullivan, J.; Quint, R.; Badrzadeh, B.; Prevost, T.; Quitmann, E.; Ramasubramanian, D.; Urdal, H.; Achilles, S.; et al. Grid-Forming Inverters: Are They the Key for High Renewable Penetration? IEEE Power Energy Mag. 2019, 17, 89–98
- [8] ENTSO-E „High Penetration of Power Electronic Interfaced Power Sources (HPoPEIPS)“ 2017
- [9] VDE FNN Hinweis „Netzbildendes und Systemstützendes Verhalten von Erzeugungsanlagen“ 2021
- [10] VDE FNN Hinweis „Spannungseinprägendes Verhalten von HGÜ-Systemen und nichtsynchrone Erzeugungsanlagen mit Gleichstromanbindung“ 2020
- [11] 50 Hertz, Amprion, Tennet, TransnetBW „Anforderungen an netzbildende Umrichter“ 2022
- [12] H2020 MIGRATE Project D3.4, “New Options in System Operation”, 2019.
https://www.h2020-migrate.eu/_Resources/Persistent/dacdf9db7dffbeb16071037ea26c2f20aac6ed46/D1.1%20summary%20and%20questionnaire%20for%20external%20stakeholders_vf.pdf (Aufgerufen 04 Jun. 2022)
- [13] Sandia National Laboratories „Use of Wind Turbine Kinetic Energy to Supply Transmission Level Services” <https://www.osti.gov/servlets/purl/1489867> (Aufgerufen 31. Jan. 2024)