

Zusammenfassung

Der Energiesektor vollzieht eine Wende von thermischen Kraftwerken zu verteilten erneuerbaren Ressourcen im Verteilungsnetz. Hierdurch erfährt insbesondere das Niederspannungsnetz und seine Vierleiter-Topologie eine Zunahme an unsymmetrischer Last und Erzeugung. Diese Zunahme ist auf die wachsende Verbreitung von Photovoltaikanlagen, Elektrofahrzeugen und Wärmepumpen zurückzuführen. Multifunktionale Konverter, die als Schnittstelle zwischen diesen verteilten Ressourcen und dem Netz dienen, können verschiedene netzdienliche Systemdienstleistungen wie Spannungsunterstützung, Frequenzunterstützung oder Kompensation von Spannungsasymmetrien bereitstellen. Asymmetrien auf der Ebene des Niederspannungsnetzes stellen dabei eine besondere Herausforderung in Bezug auf den Schutz von Betriebsmitteln und die Aufteilung von zugehörigen symmetrischen Komponenten dar. Darüber hinaus befindet sich die systemische Integration von Konvertern zur gezielten Bereitstellung von Systemdienstleistungen noch in einem frühen Stadium. Die Entwicklung einer marktbasierten Beschaffung dieser Systemdienstleistungen und die Erhöhung der Sichtbarkeit von verteilten Ressourcen für Netzbetreiber spielen hierbei zukünftig eine wichtige Rolle.

Zur Bewältigung dieser komplexen Herausforderungen, behandelt diese Dissertation zunächst eine Methode zur Verbesserung der Sicherheit in Microgrids durch die softwaretechnische Regelung von netzbildenden Konvertern. Die Sicherheitseigenschaften eines netzbildenden Konverters im Inselnetzbetrieb werden verbessert, um den Schutz vor Fehlerfällen und Überströmen zu erhöhen. Anschließend wird eine Methode zur Aufteilung von symmetrischen Komponenten unter verteilten netzbildenden Konvertern vorgeschlagen. Die vorgestellte Methode arbeitet kommunikationslos und ist in der Lage, die Mitkomponente der Leistungen sowie die Gegen- und Nullkomponente der Ströme in einem gewünschten Verhältnis aufzuteilen. Dies wird erreicht unter Berücksichtigung der Stromtragefähigkeit der Konverter sowie der erlaubten Spannungsunsymmetrie am Netzanschlusspunkt. Abschließend entwickelt die Dissertation ein marktbasiertes Beschaffungssystem für Systemdienstleistungen am Beispiel von Blindleistung. Das entwickelte System basiert auf dem Einsatz von Blockchain-Technologie und zielt darauf ab, einen transparenten, diskriminierungsfreien und flexiblen Markt für Blindleistung zu schaffen und gleichzeitig die Kosten für die beteiligten Akteure zu minimieren. Das Beschaffungssystem repräsentiert die systemische Integration von multifunktionalen Konvertern in das Verteilungsnetz, um marktgestützt Systemdienstleistungen bereitzustellen.

Abstract

As the energy sector transitions from thermal power plants to distributed resources in distribution networks, the four-wire topology of low-voltage networks is experiencing an increase in unbalanced load and generation. This is partly due to the growing adoption of resources such as photovoltaic generators, electric vehicles, and heat pumps. Multi-functional converters, which act as the interface between these distributed resources and the grid, can improve network efficiency, security, and stability during this transition by providing various ancillary services such as voltage support, frequency support, or voltage asymmetry compensation. However, asymmetries at the low-voltage network level still present challenges regarding security measures of components and the sharing of affiliated sequence components. Furthermore, the systemic integration of converters to provide targeted ancillary services is at an early stage. Developing a market-based procurement system of these ancillary services and increasing the visibility of energy resources for the system operator will be important aspects to consider.

To address these challenges, this thesis first proposes a method for improving security in islanded four-wire microgrids through grid-forming converter control. The security property of a single operating grid-forming converter is enhanced to mitigate contingencies and increase protection against overcurrents. Secondly, a decentralized droop control is proposed for sharing symmetrical components among distributed grid-forming converters in unbalanced four-wire power systems. The presented sharing strategy is capable of accurately sharing positive-sequence powers as well as negative- and zero-sequence currents while adhering to converter ampacity ratings and voltage unbalance restrictions. Finally, the thesis examines the use of blockchain technology in procuring ancillary services and develops a market-based procurement system for reactive power. The developed system aims to create a transparent, non-discriminatory, and flexible market for these services while minimizing costs for involved stakeholders. The market procurement system represents the systemic integration of multi-functional converters into the distribution network to provide grid-supporting ancillary services.