

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio

PH.D. THESIS ON THE SUBJECT OF

ARM ENERGY BALANCING TECHNIQUES FOR
MODULAR MULTILEVEL CONVERTER FOR BOTH
EQUAL AND UNEQUAL FREQUENCIES OPERATIONS

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik

der Universität Rostock

vorgelegt von

M.Sc. Gyanendra Kumar Sah

aus Rostock

Rostock, 20.12.202

Abstract

Modular Multilevel Converter (MMC) has gained popularity in medium and high voltage industrial applications like HVDC, statcom, electric drives, etc., due to its modular submodule design. MMC can be used for either DC-AC, AC-AC with equal frequency, or AC-AC with unequal frequency applications. Due to the modular submodule design, an additional controller is required to regulate the MMC's arm energies. MMC provides numerous degrees of freedom to exchange energies among its arms. The main objective of this work is to investigate and present all possible degrees of freedom to exchange energies between the arms of MMC for both equal and unequal single-phase and three-phase system frequency operations.

Further, different arm energies regulation techniques of MMC (derived from a suitable combination of degrees of freedom) and their stability analysis for different single-phase and three-phase frequency operations are presented. In normal operation, it could be desired not to inject harmonics into the MMC's source and load side currents. Only four average arm energy controllers are found to be possible, which do not inject harmonics into the source and load currents. Of these four methods, only two are stable for equal frequency operation. A generalized analytical toolchain is proposed to mathematically analyze and compare the performance of all discussed arm energy regulation techniques during various load conditions.

Almost all power converters are controlled using digital controllers; hence, accurately designing the controllers in the discrete-time domain is essential. The direct discrete-time plant model is assumed to be the most accurate, but its inaccuracy because of the incapability to accurately sample the average voltage at the *Point of Common Coupling* (PCC) is investigated. A possible correction using a deadbeat-based observer is proposed to tune the closed-loop bandwidth of the discrete-time current controller accurately.

This work also presents how to design the average arm energy control loops from the arm power equations for a selected arm energy strategy. Command tracking obtained from the simulation is used to validate the design and tuning of the controllers.

A new seven-arm direct AC-AC MMC topology is proposed to increase the converter's power density if the source does not allow reactive power flow for equal frequency operation of MMC. Further, if the source allows exchanging the reactive power, a simple strategy to reduce the MMC's current stress for equal frequency operation by compensating the load reactive power with the source reactive power is presented.

Zusammenfassung

Modular Multilevel Converter (MMC) hat in mittleren und hochspannungsindustriellen Anwendungen wie Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ), statische Kompensation (STATCOM), elektrische Antriebe usw. aufgrund seines modularen Untermodul-Designs an Beliebtheit gewonnen. MMC kann für Gleichstrom-Wechselstrom (DC-AC), Wechselstrom-Wechselstrom mit gleicher Frequenz oder Wechselstrom-Wechselstrom mit ungleicher Frequenz eingesetzt werden. Aufgrund des modularen Untermodul-Designs ist ein zusätzlicher Regler erforderlich, um die Energien der Arme des MMC zu regulieren. MMC bietet zahlreiche Freiheitsgrade zum Austausch von Energien zwischen seinen Armen. Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, alle möglichen Freiheitsgrade zur Energieaustausch zwischen den Armen des MMC für sowohl gleiche als auch ungleiche einphasige und dreiphasige Systemfrequenzoperationen zu untersuchen und vorzustellen.

Darüber hinaus werden verschiedene Techniken zur Regulierung der Energie der Arme des MMC (abgeleitet aus einer geeigneten Kombination von Freiheitsgraden) und ihre Stabilitätsanalyse für verschiedene einphasige und dreiphasige Frequenzoperationen vorgestellt. Im Normalbetrieb ist es möglicherweise erwünscht, keine Harmonien in die Quell- und Laststromströme des MMC einzuspeisen. Es wurden nur vier durchschnittliche Armenergieregler gefunden, die keine Harmonien in die Quell- und Lastströme einspeisen. Von diesen vier Methoden sind nur zwei für den Betrieb mit gleicher Frequenz stabil. Eine generalisierte analytische Werkzeugkette wird vorgeschlagen, um die Leistung aller diskutierten Techniken zur Armenergieregulierung während verschiedener Lastbedingungen mathematisch zu analysieren und zu vergleichen.

Fast alle Leistungswechsler werden mit digitalen Controllern gesteuert; daher ist eine genaue Gestaltung der Controller im diskreten Zeitbereich wesentlich. Das direkte diskrete Pflanzenmodell wird angenommen, um das genaueste zu sein, aber seine Ungenauigkeit aufgrund der Unfähigkeit, die durchschnittliche Spannung am Verknüpfungspunkt (PCC) genau zu erfassen, wird untersucht. Ein möglicher Ausgleich unter Verwendung eines auf Totzeit basierenden Beobachters wird vorgeschlagen, um die Bandbreite des geschlossenen Regelkreises des diskreten Stromreglers genau abzustimmen.

Diese Arbeit zeigt auch, wie die Regelkreise für die durchschnittliche Armenergie aus den Leistungsgleichungen für eine ausgewählte Armenergiestrategie entworfen werden können.

Die Befehlsverfolgung, die aus der Simulation erhalten wurde, wird verwendet, um die Gestaltung und Abstimmung der Controller zu validieren.

Es wird eine neue siebenarmige direkte AC-AC-MMC-Topologie vorgeschlagen, um die Leistungsdichte des Wandlers zu erhöhen, wenn die Quelle keinen Blindleistungsfluss für den Betrieb des MMC mit gleicher Frequenz ermöglicht. Weiterhin wird, wenn die Quelle den Austausch der Blindleistung ermöglicht, eine einfache Strategie zur Reduzierung der Strombelastung des MMC für den Betrieb mit gleicher Frequenz vorgestellt, indem die Lastblindleistung mit der Quellblindleistung kompensiert wird.