

# Abstract

Voltage source converter high-voltage direct-current (VSC-HVDC) technology has become increasingly cost-effective and technically feasible in recent years. Among the voltage source converters, the modular multilevel converter is widely used thanks to merits such as high reliability, control flexibility, and scalability. In this dissertation, a comprehensive set of analytical models for efficiency evaluation and fault transients was developed with the main aim to support efficient and stable operation of the power system. In terms of the efficiency, the instantaneous switching frequencies and losses are calculated analytically. The switching frequencies cover two levels: the submodule state switching frequency at the submodule level and the device switching frequency at the power electronic device level. From the instantaneous switching frequencies, the instantaneous switching losses are calculated analytically. The average switching losses are calculated by integrations of the instantaneous switching losses. The analytical solutions of the integrals are given for steady-state operation. Applying the analytical switching loss model to a thermal model of the switching device, the junction temperature is obtained. The junction temperature provides valuable information for thermal limitation of the power electronic switching devices. With regard to severe short-circuit contingencies, the analytical model of the MMC under the pole-to-pole fault is derived. The analytical formulas are applied to the parameter design of the arm inductor and the selection of the circuit breaker breaking capability. The representation of electromagnetic transients jointly with the electromechanical transients is also very important for contingencies. The transient stability of the AC/DC parallel transmission system is analyzed. The critical clearing times are calculated analytically for the AC/DC parallel transmission system respectively under the AC and DC short-circuit faults. The impact of the initial power flow on the transient stability is discussed. All proposed analytical models have been validated through comprehensive numerical simulations.

# Kurzzinhalt

Die Technologie von Hochspannungsgleichstromübertragung mittels spannungsgeführter Stromrichter (Voltage Source Converter, VSC) ist in den letzten Jahren immer kostengünstiger und technisch machbarer geworden. Unter den spannungsgeführten Stromrichtern ist der modulare Multilevel-Umrichter (Modular Multilevel Converter, MMC) aufgrund seiner hohen Zuverlässigkeit, Steuerflexibilität und Skalierbarkeit weit verbreitet. In dieser Dissertation wurde eine umfassende Menge von Analysemodellen zur Bewertung des Wirkungsgrades und von Fehlertransienten entwickelt, mit dem Hauptziel, einen effizienten und stabilen Betrieb des Stromversorgungssystems zu unterstützen. Für die Bewertung des Wirkungsgrades des Umrichters werden die momentanen Schaltfrequenzen und -verluste analytisch berechnet. Die Schaltfrequenzen werden auf zwei Ebenen untersucht: die Schaltfrequenz für den Submodulstatus auf der Submodulebene und die Schaltfrequenz für das Gerät auf der Ebene der Leistungselektronik. Aus den momentanen Schaltfrequenzen werden die momentanen Schaltverluste analytisch berechnet. Die durchschnittlichen Schaltverluste werden anschließend durch Integration der momentanen Schaltverluste spezifiziert. Die analytischen Lösungen der Integralrechnung sind für den stationären Betrieb angegeben. Durch Anwenden des analytischen Schaltverlustmodells auf ein thermisches Modell des Schaltgeräts wird die Sperrschichttemperatur erhalten. Die Sperrschichttemperatur liefert wertvolle Informationen zur thermischen Begrenzung der leistungselektronischen Schaltgeräte. Im Hinblick auf schwerwiegende Kurzschlusskontingenzen wird das analytische Modell des MMC unter dem Pol-zu-Pol-Fehler abgeleitet. Die analytischen Formeln werden auf das Parameterdesign des Arminduktors und die Auswahl des Leistungsschalter-Abschaltvermögens angewendet. Die Darstellung elektromagnetischer Transienten gemeinsam mit den elektromechanischen Transienten ist auch für Kontingenzen sehr wichtig. Die Transientenstabilität des AC/DC-Parallelübertragungssystems wird analysiert. Die kritischen Löszeiten werden für das AC/DC-Parallelübertragungssystem jeweils unter den AC- und DC-Kurzschlussfehlern analytisch berechnet. Der Einfluss des initialen Wirkleistungsflusses auf die Übergangsstabilität wird diskutiert. Alle vorgeschlagenen analytischen Modelle wurden durch umfassende numerische Simulationen validiert.