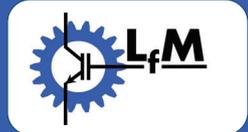




Dr.-Ing. Lukas Bergmann

„Einsatz von Siliciumcarbid-Halbleitern in Hochleistungsrichtern der Hochspannungsgleichstromübertragung“

Promotionsprüfung am 17.12.2024

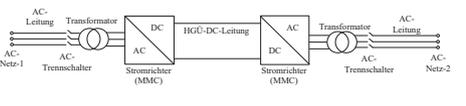


Motivation & Zielsetzung der Arbeit

Im Kontext von regenerativen Energiequellen wird ein weiterer Ausbau der elektrischen Energienetze notwendig. Hier existieren zwei Übertragungsprinzipien:

- Übertragung mit Dreh- bzw. Wechselstrom vs. Gleichstrom
- Gleichstromübertragung ab gewisser Leitungslänge wirtschaftlicher, da keine Blindleistungsverluste

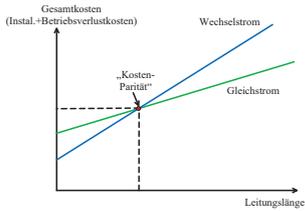
Eine wichtige derzeitige und zukünftige HGÜ-Übertragungstechnologie stellen HGÜ-Anlagen mit selbstgeführten Modular Multilevel Converter (MMC) realisiert werden:



- Derzeitige Leistungshalbleiter der MMC-Stromrichter auf Silizium (Si)-Basis
- Neuartige Leistungshalbleiter auf Siliciumcarbid (SiC) - Basis auch im hochspannenden Bereich ≥ 3.3 kV verfügbar
- Technologische Vorteile von SiC gegenüber Si hinsichtlich der Verlustleistungen sowie weiterer technischer Freiheitsgrade

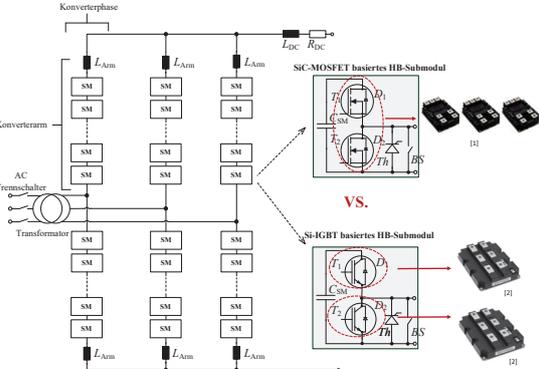
Zielsetzung der Arbeit

Technologiebewertung von SiC-Halbleitern im Vergleich mit Si sowie Erforschung weiterer Freiheitsgrade in der Anwendung von HGÜ-MMCs

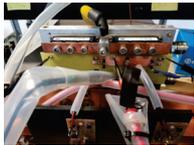
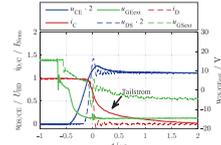


Der Modulare Multilevel Converter (MMC)

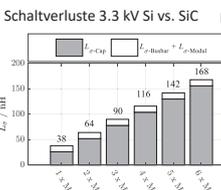
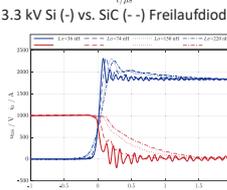
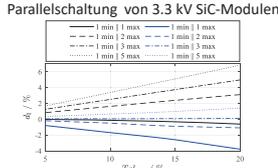
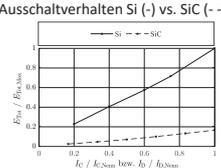
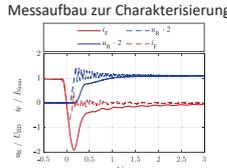
- Konzept: viele in Serie geschaltete steuerbare Spannungsquellen
- Halbbrücken-Submodul kann U_c oder 0 V ausgeben
- Bei U_c werden somit N_{SM} = U_{DC} / U_c pro Konverterarm benötigt
- Halbleiter mit z.B. 3.3 kV, 4.5 kV, 6.5 kV Sperrspannung
- Bildung der sinusförmigen Ausgangsspannung mit niedrigen Schaltfrequenzen (ca. 80 Hz bis 200 Hz)
- Wenig Filteraufwand
- Schwarzstartfähig
- Skalierbar



Ansteuerung von SiC-Halbleitern in MMC-Submodulen



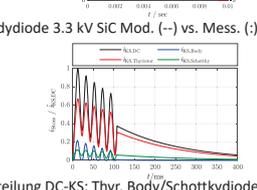
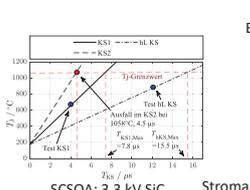
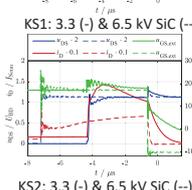
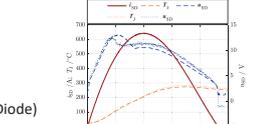
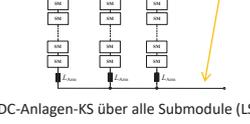
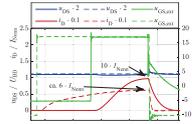
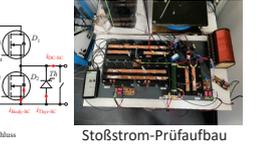
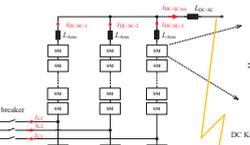
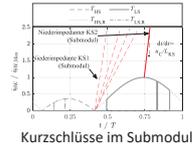
Parallelschaltung von 3.3 kV SiC-Modulen



- Kein Teilstrom bei SiC-MOSFETs \rightarrow geringere Abschaltverluste
- 3.3 kV SiC weist ca. 80 % weniger Schaltverluste als 3.3 kV Si auf
- SiC ermöglicht Rückwärtsbetrieb und besseres Schaltverhalten durch Totzeitoptimierung \Rightarrow ca. 60 % weniger Einschaltverluste
- Max. Strom-Derating je nach therm. Kopplung, Streuung und parallelen Modulen zwischen 1.3 % und 6.8 %

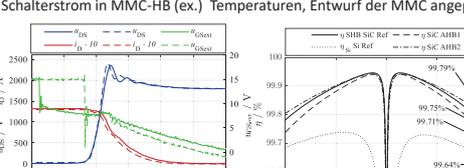
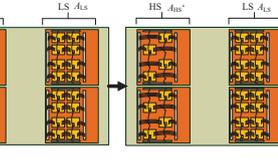
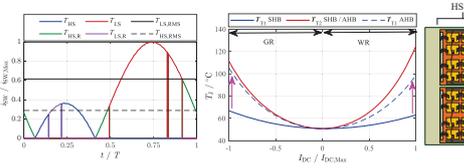
Einfluss des Submodul-Zwischenkreises: Parallelschaltung erhöht Streuinduktivität pro SiC-Modul, größter Anteil ist Kondensator

Schutz von SiC-Halbleitern im MMC



- Betrachtung unterschiedlicher Fehlerfälle im MMC mit Auswirkungen auf die SiC-Halbleiter
- Worstcase-KS ist KS2, maximale KS-Zeit im KS2: 3.3 kV SiC ca. 4 μ s / 6.5 kV SiC ca. 7 μ s
- Untersuchte Halbleiterkonfigurationen und Strom-Belastung im DC-KS relativ zur thermischen Grenze:
 - Drei parallele 3.3 kV SiC-Module *Bodydiode* | 4.5 kV Si-Entlastungs-Thyristor: 15.2 % (kein Derating)
 - Vier parallele 6.5 kV SiC-Module *embSchottky* | 6.5 kV Si-Entlastungs-Thyristor: 17.3 % (kein Derating)

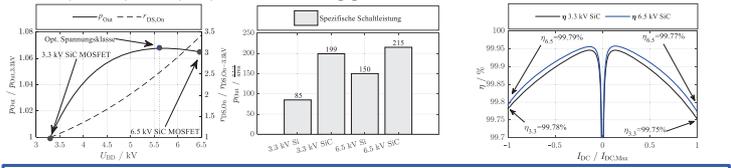
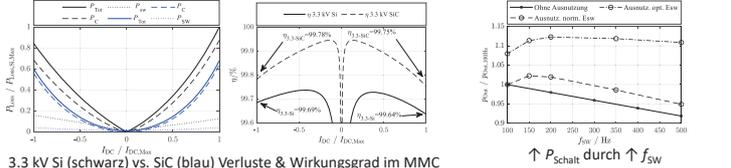
Optimierte SiC-Halbleiterfläche in MMC-Submodulen



- Unsymmetrischer Armstrom führt zu unsymmetrischer Belastung LS- vs. HS-Schalter in MMC-Halbbrücke
- Idee: Reduktion/Optimierung von SiC-Halbleiterfläche (ursprünglich bei Si: H.G. Eckel, aber dort nicht möglich wegen Abschaltstromproblem IGBT)
- Auslegung auf ident. Schalten möglich
- Einsparung von ca. 25 % SiC-Chipfläche oder höherer Wirkungsgrad möglich

Schalten und Systemwirkungsgrad der MMC-angepassten SiC Halbbrücke

Einfluss von SiC auf die MMC-Systemeigenschaften



- Erhöhung von Wirkungsgrad sowie Schaltleistung von SiC gegenüber Si je nach Bauelement / Optimierung
- Optimale SiC-Spannungsklasse ca. 5.6 kV \Rightarrow 4.5 kV SiC sinnvoll möglich, da etablierte Spannungsklasse
- SiC ermöglicht höhere Schaltfrequenz $\Rightarrow \downarrow U_c$ - und T_j -Welligkeit, Anhebung von U_c , I_{Max} möglich $\Rightarrow \uparrow P_{Schalt}$

Ergebnisse der Dissertation

- Auslegung des Schaltverhaltens in der Umgebung eines MMC-Submoduls möglich, Optimierung des SiC-Schaltverhaltens: $\eta \Rightarrow \uparrow 0.04$ % gegenüber unopt. SiC-Modul, Parallelschaltung durch pos. Temp.-Koeff. vorteilhaft
- Zusätzliche externe SiC-Schottkydiode verhindert nicht Aktivierung der Bodydiode, η im Gleichrichterbetrieb um 0.06 % höher als ohne Schottkydiode $\Rightarrow P_{Schalt}$ ca. 33 % kleiner, da höhere SiC-Halbleiterfläche der Schottkydiode nicht im Vorwärtsbetrieb nutzbar
- Niederimpedante Kurzschlussfälle: worstcase KS2 ca. 2.6 μ s bis 4 μ s bei 3.3 kV SiC je nach Halbleiter, Randbedingung, ca. 7 μ s bei 6.5 kV SiC, Bypass-Thyristor ermöglicht bei allen Fällen Entlastung und alle Szenarien waren unterhalb der Grenzwerte bei einem DC-Anlagenkurzschluss
- Einsparung von ca. 25 % SiC-Chipfläche oder höherer Wirkungsgrad durch MMC-angepasste SiC-Halbbrücke möglich

- Topologien / Freiheitsgrade / Kosten / künftige SiC-Technologien:
 - SiC in allen Submodultopologien (Halbbrücke(HB), Vollbrücke(VB), Double-Zero (DZ)) besseres η als Si, HB > DZ > VB
 - SiC ermöglicht höhere Schaltfrequenz $\Rightarrow \downarrow U_c$ und $\downarrow T_j$ -Welligkeit, Anhebung von U_c , I_{Max} möglich $\Rightarrow \uparrow P_{Schalt}$ um bis zu 12.8 %
 - Kosten: Benchmark 4.5 kV Si vs. 3.3 kV SiC bei Auslegung auf identische Leistungsfähigkeit therm. Begrenzt, SiC nur bei hoher Verlustbewertung rentabel \Rightarrow SiC Kosten derzeit noch zu hoch
 - Künftige SiC-Technologien: 3.3 kV SiC-Superjunction-MOSFET vs. konvent. $\Delta \eta$ bis zu 0.12 %, SiC-IGBT möglich, derzeit kein Markt
- Vergleich η HB [%]
 - 3.3 kV Si vs. SiC: 99.64 vs. 99.75
 - 3.3 kV SiC vs. 6.5 SiC: 99.75 vs. 99.77
 - 6.5 kV Si vs. SiC: 99.71 vs. 99.77
- Vergleich P_{Schalt} [kVA/cm²] HB
 - 3.3 kV Si vs. SiC: 85 vs. 199
 - 3.3 kV SiC vs. 6.5 SiC: 199 vs. 215
 - 6.5 kV Si vs. SiC: 150 vs. 215