Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
2 Grundlagen 5
2.1 Grundlagen der elektrischen Energieübertragung 5
2.1.1 Leistungsübertragung. 5
2.1.2 Lastflussberechnung im vermaschten Energienetz 6
2.1.3 Stabilität der Energieübertragung 8
2.1.4 Leistungspendelungen 8
2.1.5 Dämpfung von Leistungspendelungen 12
2.1.6 Leitungen 13
2.1.7 Kompensation 16
2.2 Flexible AC Transmission Systems 18
2.2.1 Thyristor Controlled Series Compensator 19
2.2.2 Static VAR Compensator 24
2.3 Schaltelemente mit Vakuum als isolierendem Medium 26
2.3.1 Vakuumschütze 30
2.3.2 Vakuum-Leistungsschalter 30
2.4 Eigenschaften während des Schaltvorgangs von Vakuumschaltern . . 31
2.4.1 Metalldampfbogen-Spannung 32
2.4.2 Abreißstrom 32
2.4.3 Dielektrische Wiederverfestigung 33
2.4.4 Dielektrische Festigkeit der Kontaktstrecke 34
2.4.5 Multiple Wiederzündugen 34
2.4.6 Vorzeitiges Zünden der Schaltstrecke 35
2.4.7 Virtueller Stromabriss 35
2.4.8 Prellen und Schweißverhalten 35
2.4.9 Mechanische Schalteigenschaften 36
2.4.10 Schaltereigenzeiten 37
2.4.11 Erhöhung der Schaltfrequenz 38
2.4.12 Thermische Überlegungen 39
2.4.13 Schutzbeschaltung von Vakuumschaltern 41

2.5 Vorgänge beim Schalten in elektrischen Energienetzen 42
2.5.1 Abschalten einer kapazitiven Last 42
2.5.2 Einschalten einer kapazitiven Last 46
2.5.3 Abschalten einer induktiven Last 47
3 Einsatzmöglichkeiten von VLS bei FACTS 49
3.1 MSSR zur Lastflusssteuerung 49
3.2 MSSR zur Dämpfung von Leistungspendelungen. 50
3.3 MSSR und TCSC zur Dämpfung von Leistungspendelungen 51
3.4 Einsatz im SVC 51
3.4.1 Anschlussleistung und Spannungshub. 52
3.4.2 Mechanically Switched Device 54
3.4.3 Kapazitive Spannungsüberhöhung am Transformator 56
4 Simulation 57
4.1 Anforderungen an das Simulationsprogramm 58
4.2 Vergleich verschiedener Programme 59
4.3 Vakuum-Leistungsschaltermodell 61
4.3.1 Parameter des verwendeten VLS 62
4.3.2 Programmierung in Fortran 64
4.3.3 Berücksichtigung der Eigenschaften beim Schaltvorgang . . . 64
4.3.4 Parametrierung des VLS-Modells 68
4.3.5 Berücksichtigung der Schaltereigenzeiten. 69
4.3.6 Ablauf bei Schalteröffnung und -schließung 69
4.3.7 Verifizierung des VLS-Modells 71
4.4 Leitungsmodell 79
4.5 Transformatormodell 81
4.6 Simulationsmodell für den Einsatz des MSSRs 82
4.6.1 Synchronmaschine 83
4.6.2 MSSR- und TCSC-Modell 84
4.6.3 Regler 86
4.6.4 Lastfluss in der Grundkonfiguration. 89
4.7 Simulationsmodell für den Einsatz des MSDs 89
4.7.1 Asynchronmaschine 92
4.7.2 MSD-Modell 94
5 Simulationsergebnisse 99
5.1 Einsatz von VLS im MSSR 99
5.1.1 MSSR zur Lastflusssteuerung 99
5.1.2 Schutz des MSSRs bei Kurzschlüssen 103
5.1.3 MSSR zur Dämpfung von Leistungspendelungen 103

5.1.4 MSSR und TCSC zur Dämpfung von Leistungspendelungen . . 104
5.1.5 Streukapazitäten des MSSRs 113
5.1.6 Lebensdauer der VLS beim Dämpfen von Leistungspendelungen 114
5.1.7 Bewertung des MSSRs 115
5.2 Einsatz von VLS im MSD 117
5.2.1 Schutzbeschaltung des MSRs 118
5.2.2 Schutzbeschaltung der MSCs 121
5.2.3 Abschalten eines MSCs 121
5.2.4 Gleichzeitiges Abschalten von drei MSCs 126
5.2.5 Einschalten eines ungeladenen MSCs 127
5.2.6 Einschalten eines geladenen MSCs 128
5.2.7 Parallelschalten eines Kondensators 129
5.2.8 Gleichzeitiges Zuschalten von drei MSCs 131
5.2.9 Abschalten des MSRs 132
5.2.10 Einfluss der Trennfähigkeit von hochfrequenten Strömen beim Abschalten des MSRs 132
5.2.11 Gleichzeitiges Abschalten eines MSCs und des MSRs 133
5.2.12 Kurzzeitiges Zu- und wieder Abschalten der MSCs 134
5.2.13 Dynamische Last – Asynchronmaschinen 135
5.2.14 Bewertung des MSDs 139
6 Zusammenfassung und Ausblick 141
A Anhang 145
A.1 Herleitung der Leistungsgleichungen 145
A.2 Berechnung der Zustands-Matrizen 146
A.3 Wiederverfestigung einer CrCu50 Schaltstrecke 147
A.4 Technische Daten des verwendeten VLS 3 AH 4 306-6 147
A.5 Parameter des Leitungsmodells 147
A.6 Donaumast Abmessungen 149
A.7 Parameter des Synchrongenerators und dessen Regelung 150
A.8 Asynchronmaschinen-Modell 151
A.9 Linearisierung und Reglerauslegung mit PSAT/MATLAB 152
A.10 Eingabemaske des VLS-Modells 156
A.11 Flussdiagramm des VLS-Modells 157
Abbildungsverzeichnis 167
Tabellenverzeichnis 171
Literaturverzeichnis 173