

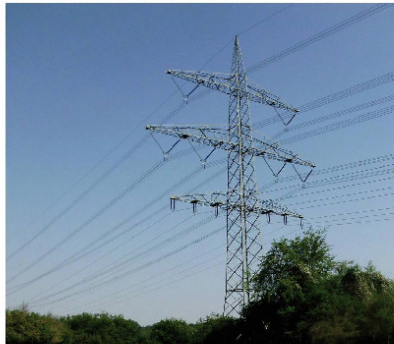


Timo Wenzel (Autor)

## **Einsatz von Vakuum-Leistungsschaltern in Flexible AC Transmission Systems (FACTS)**

Timo Wenzel

**Einsatz von Vakuum-Leistungsschaltern in  
Flexible AC Transmission Systems (FACTS)**



**Cuvillier Verlag Göttingen**  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/344>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 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 Wiederzündungen . . . . .	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 Leistungs- pendelungen . . . . .	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