

Kapitel 1

Einleitung

Die Beanspruchung von elektrischen Energieversorgungsnetzen hat sich in den letzten Jahren durch die Liberalisierung des Strommarktes und zunehmende Einspeisung durch regenerative Energiequellen stark verändert. So kommt es heute z. B. zum Energietransport über mehrere Ländergrenzen hinweg, für den die Netze nicht konzipiert worden sind. Gleichzeitig nimmt der Energieverbrauch stetig zu, was man am Beispiel der steigenden installierten Gesamtleistung des UCTE Netzes erkennen kann [ENTSO-E08, S. 133]. Ein Netzausbau findet allerdings nicht im gleichen Maße statt, wie er zur Wahrung der Versorgungssicherheit und -qualität erforderlich wäre. Das liegt an den langwierigen Genehmigungsverfahren für den Bau neuer Freileitungen genauso wie an der Höhe der notwendigen Investitionen. Die Nachteile zeigen sich in einigen Ländern durch Stromausfälle (z. B. Italien, Amerika, Brasilien) und damit verbunden einer reduzierten Versorgungssicherheit der Verbraucher mit elektrischer Energie [Papp04], [Koch05].

In diesem Zusammenhang können sogenannte Flexible AC Transmission Systems (FACTS) einen wertvollen Beitrag zur Erhöhung der Übertragungskapazität und der Stabilität eines Netzes leisten. Darunter sind Anlagen zur schnellen Bereitstellung von Blind- und/oder Wirkleistung zu verstehen. Eine weitere Anwendung von FACTS ist die Stabilisierung der Spannung an Netzknoten. FACTS können ohne platzintensive Zubaumaßnahmen ins Netz eingefügt werden und lassen sich in zwei Klassen einteilen: reihen- und parallelgeschaltete FACTS. Zu den reihengeschalteten FACTS gehört z. B. der Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC), zu den parallelgeschalteten FACTS der Static VAR Compensator (SVC). Daneben gibt es kombinierte Anlagen, wie z. B. den Unified Power Flow Controller (UPFC).

FACTS sind mit leistungselektronischen Halbleitern, typischerweise Thyristoren oder IGBTs, ausgestattet, so dass sie im Bereich weniger Millisekunden wirksam werden können. Aus wirtschaftlichen Gründen ist der Einsatz von mechanischen Vakuum-Leistungsschaltern (VLS) bei FACTS geplant. Diese sind deutlich günstiger als die leistungselektronischen Komponenten einschließlich der notwendigen Ansteuerung und Kühlung [Ängquist02, S. 18]. VLS sind hauptsächlich im Mittelspannungsbereich bis zu 40,5 kV verfügbar und haben sich dort seit den 1970/1980er-Jahren durchgesetzt

[Lippmann03, S. 3]. Der hohe technologische Reifegrad rechtfertigt die Untersuchung neuer Einsatzfelder. Neben den geringen Anschaffungskosten von VLS liegen weitere Vorteile in einer geringen Verlustleistung und Überspannungsempfindlichkeit, sowie einem kompakten Bauvolumen [Vinaricky02, S. 657]. Vorteilhaft ist auch ihre Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen, die oft in der Nähe von Hochstromsystemen entstehen. Im Vergleich zu mechanischen Schaltern mit anderen Löschrinzipien sind sie außerdem wartungsarm und weisen eine hohe Zuverlässigkeit auf [Lippmann03, S. 171].

Alle mechanischen Schalter haben allerdings Einschränkungen bezüglich der Schaltgeschwindigkeit und -frequenz. Die Schaltgeschwindigkeit ist durch die Schaltzeit bestimmt und liegt je nach Schaltertyp im Bereich von 20 ms bis 80 ms. Sie ist in vielen Fällen für das elektrische Energienetz völlig hinreichend. So werden im Hochspannungsnetz mechanisch geschaltete Kondensatoren eingesetzt, um an Lastknoten mit hohem Asynchronmaschinen-Anteil einen Spannungskollaps nach Netzfehlern (z. B. Kurzschlüssen) durch schnelle Bereitstellung von kapazitiver Blindleistung zu verhindern. Allerdings werden die Kondensatoren bislang über die Schalter direkt mit dem Lastknoten verbunden und Schalter mit anderen Löschmedien als Vakuum verwendet [Mathur02, S. 70]. Weiterhin denkbar ist der Einsatz zur Lastflusssteuerung, bei der ein Eingreifen innerhalb weniger Millisekunden nicht notwendig ist [Carrus03], [Ängquist02].

Durch eine spezielle Schalterkonfiguration mit mehreren VLS kann das Anwendungsgebiet auf schnellere Vorgänge erweitert werden. Dazu gehört z. B. das Dämpfen von Leistungspendelungen. Für den Einsatz von VLS bei FACTS kristallisieren sich folgende Elemente heraus:

- Mechanically Switched Series Reactor (MSSR)
- Mechanically Switched Device (MSD)

Unter der Abkürzung MSSR ist eine Spule zu verstehen, die in Reihe zu einer Leitung geschaltet wird und durch VLS überbrückt werden kann. Ein Teil der Arbeit widmet sich der Fragestellung, ob sich der MSSR zur Lastflusssteuerung und durch periodisches Überbrücken mit der speziellen Schalterkonfiguration ebenfalls zur Dämpfung von Leistungspendelungen eignet.

Das MSD ist eine Parallelkompensationsanlage und beinhaltet zuschaltbare Kondensatoren und Spulen. Mit ihm ist es möglich, induktive und kapazitive Blindleistung direkt an einem Lastknoten im Hochspannungsnetz bereitzustellen, um dort die Spannung zu stabilisieren. Damit die VLS, die für die Mittelspannung ausgelegt sind, eingesetzt werden können, sind die Einzelelemente über einen Transformator mit dem Hochspannungsnetz verbunden.

Die Ziele der vorliegenden Arbeit sind die Untersuchung der Wirksamkeit der oben genannten FACTS mit VLS innerhalb bestimmter Netzkonfigurationen, sowie die Ermittlung der elektrischen Belastungen der VLS mit Hilfe von Simulationen. Dazu wird zunächst ein VLS-Modell entwickelt, das die wesentlichen elektrischen Charakteristika eines VLS berücksichtigt. Die Verifikation des Modells erfolgt durch Vergleich mit Messdaten aus unterschiedlichen Prüfschaltkreisen. Das VLS-Modell wird dann in verschiedene Netzmodelle eingefügt, um zu überprüfen, in wie weit sich VLS als Schaltelemente in FACTS trotz ihrer genannten Einschränkungen eignen.

MSSRs mit VLS sind dann geeignet, wenn sie die Lastflussverteilung in verschiedenen Netztopologien positiv beeinflussen, oder Leistungspendelungen in Netzen mit geringer Eigendämpfung schneller zum Abklingen bringen. Hinsichtlich des letztgenannten Punktes wird ebenfalls untersucht, ob der MSSR als Ergänzung zum TCSC geeignet ist, um dessen Anwendungsbereich zu erweitern. Beim TCSC wird der induktive Arbeitsbereich aufgrund der hohen elektrischen Belastungen der Thyristoren häufig gemieden [Mathur02, S. 293], [Song99, S. 208]. Der MSSR kann gemeinsam mit einem TCSC eingesetzt werden, um dessen induktiven Arbeitsbereich zu erweitern.

Beim MSD werden die Grenzwerte für die Dimensionierung der Kondensatoren und Spulen bei Verwendung von am Markt verfügbaren VLS ermittelt. Darüber hinaus wird untersucht, ob das MSD unter Einsatz von VLS in der Lage ist, durch schnelle Bereitstellung von kapazitiver Blindleistung am Netzknoten einen Spannungskollaps nach einem Netzfehler zu verhindern.

In allen Fällen werden die elektrischen Belastungen (z. B. Überspannungen) der VLS bei Schaltvorgängen ermittelt. Hiermit ist es möglich, ggf. geeignete Schutzbeschaltungen zu bestimmen. Es wird jeweils eine Bewertung der technischen Machbarkeit unter Berücksichtigung der Parameter von gängigen VLS abgegeben. Ebenso werden mögliche Einschränkungen genannt.

Die Arbeit ist folgendermaßen strukturiert:

Zunächst werden in Kapitel 2 die Grundlagen erläutert, die für das weitere Verständnis der Arbeit hilfreich sind. Dort werden Leistungspendelungen und deren Zustandekommen, der Spannungskollaps, sowie FACTS vorgestellt. Die Grundlagen der VLS werden ebenfalls dargestellt.

In Kapitel 3 werden anschließend die Einsatzmöglichkeiten von Vakuum-Leistungsschaltern in Flexible AC Transmission Systems vorgestellt. Die Hauptanwendungsgebiete sind der Einsatz bei der Reihenkompensation für die Lastflusssteuerung und das Dämpfen von Leistungspendelungen, sowie bei der Parallelkompensation für die Stabilisierung der Spannung an Netzknoten.

Um die technische Umsetzbarkeit und die elektrischen Belastungen der verwendeten VLS zu überprüfen, werden verschiedene Simulationen durchgeführt. Dazu beschreibt

Kapitel 4 die verwendeten Simulationsprogramme und -modelle. Das schließt neben den Netzmodellen auch die verschiedenen erstellten Bauteile, wie z. B. das VLS-Modell mit ein.

Die Ergebnisse der Simulationen sind in Kapitel 5 beschrieben. Hier wird die Wirksamkeit von FACTS mit VLS bezüglich der unterschiedlichen Aufgaben, wie z. B. der Lastflusssteuerung oder dem Dämpfen von Leistungspendelungen, bewertet. Weiterhin werden die elektrischen Belastungen der VLS bei Schaltvorgängen detailliert dargestellt, sowie sich hieraus ergebende notwendige Schutzeinrichtungen.

Kapitel 6 fasst diese Arbeit zusammen und gibt einen kurzen Ausblick.