

Diss. ETH Nr. 13926

Transformatorloser reaktiver Seriekompensator mit Gleichspannungswechselrichtern zur Leistungsflussregelung

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

ANDREAS BEER

Dipl. El.-Ing. ETH

geboren am 4. Oktober 1970

von Breil/Brigels, Kanton Graubünden

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. H. Stemmler, Referent

Prof. Dr. D. Povh, Korreferent

Prof. Dr. W. Fichtner, Korreferent

2000

Zusammenfassung

Elektrische Stromversorger stehen heute unter dem Druck der weltweit voranschreitenden *Deregulierung*. Damit grosse Kunden ihre Energie von den gewünschten Lieferanten beziehen können, müssen die elektrischen Netze für Dritte zugänglich gemacht werden ('Third Party Access'). Angetrieben einerseits von diesen neuen Bedürfnissen auf dem elektrischen Markt und andererseits von den Entwicklungen in der *Halbleiter-Technologie* sind in den letzten zehn Jahren neue Aktivitäten auf dem Gebiet der Energieübertragung und -verteilung unter dem Namen FACTS (Flexible AC Transmission Systems) aufgekommen. FACTS-Systeme können die Wirk- und Blindleistungen in Wechselstrom-Übertragungssystemen sehr fein regeln und steuern. Bestehende Generatoren und Leitungen können dadurch viel besser ausgelastet werden.

In einem privatisierten Markt spielen Kosten eine entscheidende Rolle. Das Ziel dieser Dissertation lag darin, ein modernes FACTS-Gerät zur Leistungsflussregelung in Hochspannungsleitungen zu konzipieren, das

- einen grösseren und feiner einstellbaren Regelbereich bietet als konventionelle Leistungsflussregler mit Thyristoren wie der wohlbekannte TCSC ('Thyristor Controlled Series Compensator'),
- kostengünstiger ist als andere moderne FACTS-Geräte wie der wohlbekannte UPFC ('Unified Power Flow Controller').

Das Resultat welches beide Anforderungen erfüllt ist der vorgeschlagene transformatorlose reaktive Seriiekompensator (TL-RSC). Der TL-RSC besteht in jeder Phase der Leitung aus einer Kette AC-seitig reihengeschalteter Wechselrichter-Brücken. Sie bilden eine resultierende Ausgangsspannung, gross genug, um ohne Transformator den Leistungsfluss in der Leitung zu regeln. Transformatoren sind massig und mit bis zu 30% der Gesamtanlagekosten auch sehr teuer. Die erforderliche Spannung kann durch die Kombination von AC-seitiger Reihenschaltung ganzer WR-Brücken mit direkter Serieschaltung von Leistungshalbleitern (IGCTs, IGBTs) erzielt werden.

Als Folge der AC-seitigen Reihenschaltung liegen die DC-Seiten jeder WR-Brücke auf unterschiedlichen, "floatenden" Potentialen. Das bringt jedoch keine Nachteile mit sich, da die DC-Seiten in dieser rein reaktiven Anwendung nicht gespeist werden müssen.

Die eingebaute Kompensatorleistung ist klein im Vergleich zur geregelten Durchflussleistung durch die Leitung, typischerweise 20%. Zum Vergleich muss eine HGÜ oder ein 'Back-to-Back'-Aufbau immer für die doppelte Durchflussleistung (200%) ausgelegt sein.

Alle WR-Brücken in der gleichen Phase der Leitung erzeugen dieselbe Grundschwingung, allerdings mit versetzter Taktung innerhalb der WR-Brücken und auch von Brücke zu Brücke. Die entstehende AC-Spannung weist deswegen eine hohe resultierende Pulsfrequenz auf und kommt der Sinusform sehr nahe. Normalerweise besteht keine Notwendigkeit für zusätzliche AC-Filter. Die Übertragungsleitung weist aber zahlreiche Resonanzstellen auf, welche durch die schaltenden Wechselrichter angeregt werden können. Eine genügend grosse Anzahl seriegelagerter WR-Brücken und/oder ein AC-Filter verhindern das Entstehen hoher Resonanzströme.

In einer Analyse des stationären Systemverhaltens werden die geringfügigen Einschränkungen des Regelbereichs durch die ohmschen Verluste dieses rein reaktiven FACTS-Gerätes untersucht. Es wird aufgezeigt dass der Regelbereich im Wesentlichen nur bei kleinen Durchflussleistungen durch die Leitung eingeschränkt wird.

Die Regelung des TL-RSC muss zwei Aufgaben erfüllen: Einerseits muss der Leitungsstrom durch Einspeisung von Blindleistung in die Leitung, andererseits die DC-Spannung jeder seriegelagerter WR-Brücke durch transienten Austausch von Wirkleistung mit der Leitung geregelt werden. Unglücklicherweise sind diese beiden Regelstrecken nichtlinear und miteinander gekoppelt. Die vorgeschlagene Entkopplung erlaubt es Leitungsstrom und DC-Spannungen nahezu unabhängig voneinander zu regeln.

Ein weiteres Regelungsverfahren wird als interessante Variante vorgestellt: Der Modulationsgrad der Wechselrichter wird möglichst hoch und konstant gehalten. Die geforderte Ausgangsspannung wird durch Anpassung der DC-Spannungen erzielt. Es wird gezeigt, dass dadurch die Verluste des Kompensators wie auch die eingespeisten Harmonischen reduziert werden. Darüber hinaus werden die Einschränkungen des Regelbereichs bei kleinen Durchflussleistungen reduziert.

Die Untersuchungen in dieser Dissertation wurden auf zwei Arten durchgeführt:

- mittels Berechnungen und Simulationen am Computer.
- mittels Versuchen an einem herunterskalierten Labormodell.

Es wurde gezeigt, dass das Konzept des vorgestellten Kompensators machbar ist. Die entkoppelte Regelung mit Anpassung der DC-Spannungen wurde am Labormodell erfolgreich getestet. Zusätzlich wurde der Einsatz eines multifunktionellen schnellen Bypass-AC-Schalters am Kompensatorausgang vorgeschlagen. Dieser bietet interessante praktischen Anwendungsmöglichkeiten wie den Schutz vor Leitungsfehlern, den lückenlosen Weiterbetrieb bei Fehlfunktion eines Wechselrichters sowie das direkte Aufstarten ohne zusätzliche Aufstartvorrichtung.

Summary

Electrical power utilities are under pressure to *deregulate*, allow access to network by independent power producers ('Third Party Access') and lend their network to big customers for wheeling power from chosen suppliers. Driven by this market demands and by developments in the *semiconductor technology*, new activities in the field of power transmission and distribution have been coming up during the last decade: FACTS (Flexible AC Transmission Systems) devices can control the active and reactive power flow in AC systems very accurately. As a consequence it is possible to make much better use of existing generators and power lines.

In an open market costs are a major issue. The goal of this thesis was to design a modern FACTS device for power flow control in high power transmission lines, which

- offers a wider and more refined range of operation than conventional thyristor switched devices such as the well known TCSC ('Thyristor Controlled Series Compensator'),
- is more cost effective than other modern FACTS devices such as the well known UPFC ('Unified Power Flow Controller').

The result meeting both requirements is the proposed transformerless reactive series compensator (TL-RSC). In each phase of the transmission line the TL-RSC consists of a chain of single phase inverter bridges serially linked at their AC sides which form a resultant AC voltage high enough to control the power flow through the transmission line without a transformer. Transformers are rather bulky and expensive with up to 30% of the total system costs. The required AC voltage level can be achieved by the combination of series connected inverter bridges with directly series connected turn-off semiconductor devices (IGCTs, IGBTs).

As a result of the series connection at the AC-side, the DC-sides of the individual inverter bridges are floating on different potentials. This, however, has no negative consequences, since the DC-sides of the inverter bridges need no power supply in this reactive power application.

The power rating of the inverters is low compared to the power transferred through the line, i.e. 20%. For comparison the power rating of a HVDC transmission or a HVDC Back-to-Back system always amounts two times the full transmission power of the line (200%).

All inverter bridges of the same phase generate the same fundamental AC voltage, but with staggered switching within the bridges and also from bridge to bridge. The wave shape of the resultant AC voltage, has a high re-

sultant pulse frequency and comes very close to a sine wave. In general there is no need for additional AC-filters. The transmission line, however, contains numerous resonance circuits which start oscillating when excited by harmonics caused by the switching mode of the compensator. An adequate number of series connected and staggered switched inverter bridges and/or an additional filter prevents the line from high resonance currents. In a steady state analysis the slight control range limitations resulting from the losses of this completely reactive FACTS-device are investigated. It is shown that the main restrictions concern only the operation at low transfer power of the line.

The control of the TL-RSC has to fulfil two main tasks: On the one hand the line current in each phase has to be controlled by reactive power fed into the line by the inverters; on the other hand the DC voltage of each series connected inverter bridge has to be controlled by transient active power exchange with the line. Unfortunately this two controls are nonlinear and dynamically coupled. The proposed decoupling allows to control line current and DC voltages nearly independently.

In addition an interesting alternative control strategy is presented: the modulation degree of the inverters is kept constant at a high level. The compensator output voltage required for power flow control is set by adjusting the DC voltages. It is shown that in this way the losses of the compensator as well as the injected harmonics are reduced. As a further result the restrictions of operation at low transfer power of the line are reduced.

The investigations in this thesis have been performed in two ways:

- by calculations and computer simulations,
- by experiments on a down-scaled laboratory model.

It has been shown that the concept of the transformerless reactive series compensator is feasible. The decoupled control with adjustable DC voltage has been tested successfully on the laboratory model. The installation of a multifunctional Bypass-AC-switch at the compensator's output has been discussed specially. This fast AC-switch offers interesting practical features such as AC-protection from line faults, continuous operation during an inverter failure and direct start-up without additional start-up equipment.