



JAHRESBERICHT 1999



Über die Arbeiten gemäss Projekt-/Vertragsnummer: 22301/61701

Titel des Projekts: **Entwicklung neuer systemorientierter FACTS-Elemente**

Zusammenfassung:

Die Entwicklung von FACTS-Elementen optimaler Wirtschaftlichkeit und deren Integration in die Netzbetriebsführung ist die Zielsetzung des vorliegenden Forschungsprojektes. Als Referenz für die zu entwickelnden FACTS-Elemente stehen der Universale Lastflussregler (UPFC), der eine unabhängige Regelung der Wirk- und Blindleistungsflüsse sowie Spannungsregelung erlaubt, sowie die „Advanced Series Compensation“ (ASC), deren Integration ins Netz transformatorlos erfolgen kann. Beginnend beim Hardwareaufbau der eingesetzten Leistungselektronik bis hin zur Integration der Regelung des Gesamtsystems in die Netzbetriebsführung werden kostengünstige FACTS-Elemente durch Minimierung der primärtechnischen Einrichtungen entwickelt, die optimalen FACTS-Element-Funktionen und die optimale FACTS-Element-Anordnung im Netz abhängig von typischen Netzkonfigurationen festgelegt und Verfahren zur Optimierung des Netzverhaltens erarbeitet.

Dauer des Projekts: 1.07.97 – 31.03.00

Beitragsempfänger: **ABB Hochspannungstechnik AG**

WEB-Seite des Beitragsempfängers: <http://www.abb.ch/>

Berichterstatter: **Ch.Schäfer / Dr. D. Westermann** E-Mail: dirk.westermann@ch.abb.com

Adresse: **ABB Hochspannungstechnik; TB AC; Brown-Boveri-Str. 5; 8050 Zürich**

Telefon/Fax: **(01) 318 34 79 / (01) 318 33 80**

1. Einleitung

Im Rahmen der „Entwicklung neuer systemorientierter FACTS-Elemente“ stehen einerseits gerätespezifische systemtechnische Fragestellungen bei der Auslegungen dieser statischen Betriebsmittel im Vordergrund. Andererseits bildet die systemseitige Integration dieser FACTS-Elemente ins Netz nebst wirtschaftlicher Bewertung den Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht die transformatorlose Serienkompensation (ASC: Advanced Series Compensation) sowie der universale Lastflussregler (UPFC). Ob in Serie oder im Sternpunkt von existierenden Transformatoren bieten beide Lösungen erheblicher Vorteile. Mit Hardwaremodellen wurden zahlreiche Simulationen durchgeführt um das Verhalten dieser FACTS Geräte zu testen.

Da die Wirtschaftlichkeit von FACTS Elementen bei der Entscheidung über deren Einsatz im Vordergrund steht, muss der Aufwand an zusätzlichen – zur Netzintegration benötigten – Komponenten wohlüberlegt sein. Die Entwicklung von Wirtschaftlichkeitsmodellen stellt dabei einen wesentlichen Schwerpunkt dar.

2. Universale Lastflussregelung

Aus der Untersuchung des Anlagenverhaltens im gestörten Netzbetrieb resultierten zahlreiche Auslegungsempfehlungen, insbesondere für die Gerätetopologie des UPFC. Die bereits abgeschlossenen Arbeiten befassen sich hauptsächlich mit der Untersuchung der Auswirkung von Kurzschlüssen in der unmittelbaren Nähe der Seriespannungseinkopplung. Im Normalbetrieb zeigt die Zustandsregelung gegenüber der Zeigerregelung deutliche Vorteile

Meist ist eine Regelung des Lastflusses innerhalb von 200 ms ausreichend, um einen gewünschten Netzbetrieb zu erreichen. Weiterhin ist das X/R Verhältnis in vielen Netzen so hoch, dass der Einfluss der d (q) Komponente der Spannung auf die q (d) Komponente des Stromes vernachlässigbar ist und so eine entkoppelte Regelung von Wirk- und Blindleistung kein weiteres Entkopplungsnetzwerk im Regelkreis benötigt, was die Realisierung des Reglers erheblich vereinfacht. Dies gilt auch für den Shuntteil des UPFC, da die dominierenden Impedanzen zum Anschluss des Shuntumrichters an das Netz die X und R Werte des Shunttransformers sind.

Als Erweiterung des Arbeitsbereiches des Serienkompensators steht auch eine hybride Lösung im Vordergrund. Dieser Ansatz gleicht dem UPFC in Topologie, indem ein weiterer Shuntumrichter

eingesetzt wird, jedoch ist in diesem Fall keine Blindleistungskompensation vorgesehen. Die Primärfunktion des Shuntumrichters ist die Speisung des Zwischenkreises, so dass der Serienumrichter eine Spannung von beliebiger Amplitude und Phase einspeisen kann. Dies bedeutet, dass auch Wirkleistung eingespeist werden kann und so der Seri kompensator im Vierquadrantenbereich arbeiten kann. Der Shuntumrichter muss – bei rms Betrachtung – lediglich für die vom Serienumrichter benötigte maximale Wirkleistung ausgelegt werden, was die Dimensionen des zusätzlichen Umrichters klein hält. Eine zusätzliche Regelung der Anschlussspannung ist zudem auch möglich.

3. Transformatorenlose Spannungseinkopplung

3.1 Transformatorenloser Seri kompensator zu Lastflussregelung

Für die Lastflussregelung in Hochspannungsleitungen mit hohem X/R Verhältnis bietet sich eine kostengünstige Lösung an: der transformatorlose Seri kompensator. In Bild 1 ist der Aufbau eines transformatorlosen reaktiven Seri kompensators dargestellt. Der Kompensator ist dreimal einphasig aufgebaut. Er besteht in jeder Phase x aus einer Serieschaltung von WR-Brücken, die je ihre eigene DC-Kapazität besitzen und auf ihrer AC-Seite aneinander gereiht direkt ohne Transformator in die Leitung geschaltet sind. Der Seri kompensator kann nur Blindleistung ins Netz liefern. Seine Ausgangsspannung $u_{comp,x}$ muss daher immer senkrecht zum Leitungsstrom i_{2x} sein. Bei hohem X/R Verhältnis der Leitung genügt das, um den Lastfluss über einen weiten Bereich zu regeln. Die für die Lastflussregelung nötige installierte Leistung des Kompensators ist darüber hinaus klein im Vergleich zur geregelten Durchflussleistung der Leitung.

Durch die Serieschaltung von ganzen Wechselrichterbrücken einerseits und von Halbleitern (siehe Bild 1 unten) andererseits kann jede erforderliche Seriespannung ohne Serie-Transformator erzielt werden. Da der Kompensator nur Blindleistung liefern muss braucht er auf seiner DC-Seite keine DC-Speisung. Im Vergleich zum UPFC kommt der Serienkompensator also auch ohne Shuntteil und dazu nötigen Shunttransformator aus. Dieses Kostenersparnis durch das Weglassen der Transformatoren von bis zu 40% steht ein erhöhter Aufwand an statischen Komponenten und ein eingeschränkter Regelbereich entgegen. Je nach Anforderung der praktischen Anwendung ist der transformatorlose reaktive Seri kompensator jedoch die weitaus einfachere und kostengünstigere Lösung.

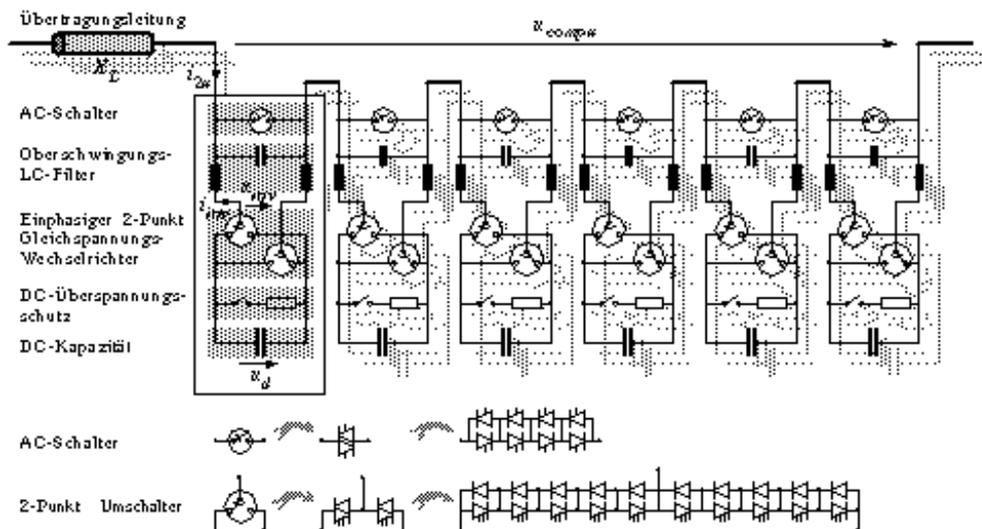


Bild 1: Dreimal einphasiger Aufbau des Leistungsanteils des transformatorlosen Seriekompen-
sator. Der erste WR in Phase a ist herausgehoben und beschriftet.

Wie in Bild 1 dargestellt, ist am Ausgang jedes WR-Moduls ein paralleler schneller AC-Schalter eingebaut. Dieser AC-Schalter besteht aus antiparallel angeordneten Thyristoren (Bild 1 unten) und kann gleich mehrere Funktionen erfüllen:

- Schutz vor Netzstörungen wie Überspannungen und Überstrom. Dabei dient der Schalter in einer ersten Schutzstufe als schneller Bypass-Schalter. In einer zweiten Stufe muss ein langsamerer mechanischer Schalter den Fehlerstrom übernehmen.
- Redundanzschalter bei Fehlfunktion eines seriegeschalteten Wechselrichters. Der fehlerhafte Wechselrichter kann sehr schnell überbrückt und der Kompensator kann ohne diesen Wechselrichter - mit reduzierter Leistung - weiter betrieben werden.
- Aufstarten ohne DC-Vorladung. Diese Funktion des AC-Schalters soll hier nun speziell beschrieben werden.

In Bild 2 ist der Aufstartvorgang mit dem AC-Schalter ohne DC-Vorladung dargestellt. In einer ersten Phase I ist der Kompensator ausgeschaltet, die DC-Spannung u_d und die Wechselrichterausgangsspannung u_{inv} sind Null. In Phase II wird der AC-Schalter nach jedem Nulldurchgang des Stromes etwas verzögert gezündet. Dadurch entsteht auf der AC-Seite des Wechselrichters eine Wechselfspannung (kleine Spitzen in u_{inv}), die durch den Dioden-Gleichrichter im Wechselrichter direkt auf die DC-Seite und in die DC-Spannung u_d übertragen wird. In Phase III ist die DC-Spannung u_d bereits so hoch, dass der Wechselrichter zu takten beginnen kann und geregelt die DC-Spannung u_d durch Bezug von Wirkleistung aus dem Netz (i_{inv} in Phase zu u_{comp}) bis auf den

Sollwert von 0.2 p.u. hochfährt. Im Abschnitt IV schließlich ist ein Starten der Stromregelung möglich.

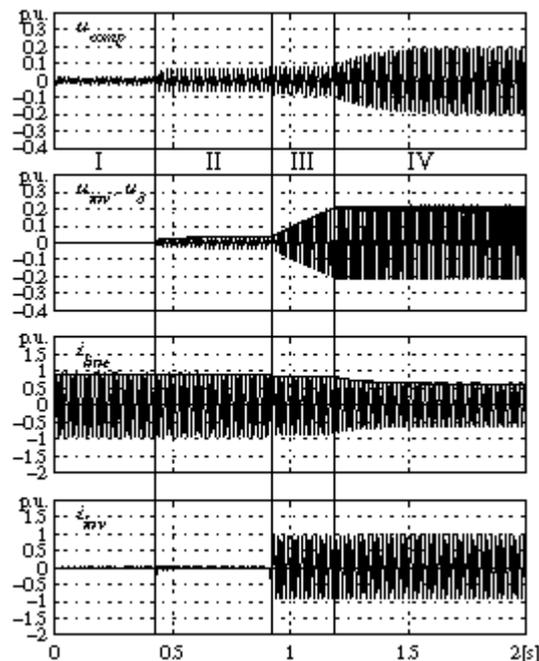


Bild 2: Vier Phasen des direkten Aufstartvorgangs mit dem AC-Schalter ohne DC Vorladung

Die 3-kVA-Laboranlage eines vereinfachten transformatorlosen reaktiven Seriiekompensators mit einem 2-Punkt-Wechselrichter pro Phase ist fertig in Betrieb genommen. Dies einhergehend mit der Implementierung eines Netzmodells, bestehend aus einem Leitungsmodell entsprechend einer 400kV-500km-Hochspannungsleitung und einem Synchrongenerator mit hoher Güte. Die Verhältnisse in einem Hochspannungsnetz sind so möglichst getreu auf die niedrige Leistungsstufe der Laboranlage herunterskaliert. Der Synchrongenerator liefert eine zum Netzanschluss unabhängige synchrone dreiphasige Spannungsquelle zur Modellierung eines 500km entfernt liegenden Drehstromnetzes. Die Regelung des Synchrongenerators hält die erzeugte Spannung synchron zum Netzanschluss, hier mit einer während des Betriebes frei wählbaren Phasenverschiebung zum Netzanschluss. Diese Laboranlage ermöglicht nun neben der Untersuchung des Normalbetriebes zur Lastflussregelung im kapazitiven und im induktiven Modus eine schwerpunktmässige Entwicklung des Aufstartvorganges der Anlage. Da der Kompensator keine DC-Speisung aufweist musste diesem Betrieb eine besondere Beachtung geschenkt werden.

3.2 Transformatorlose Spannungseinkopplung im Sternpunkt eines Transformators

Im Rahmen der transformatorlosen Einkopplung einer Zusatzspannung zur Lastflussregelung ist eine Herausführung der Transformatorsternpunktes als Anschlusspunkt der Leistungselektronik möglich. Das Funktionsprinzip der transformatorlosen Spannungseinkopplung wurde bereits beschrieben. Der Hauptnachteil dieser Funktionsweise (Bild 3 a) ist das hohe Spannungsisolati-

onsniveau, das dem der Leitung gleichen muss. Obwohl die Kosten eines zusätzlichen Transformators gespart werden können, ist dieser oft schon vorhanden, in welchem Fall eine Modifikation des bestehenden Transformers eine kostensparende Weiterverwendung darstellt und gleichzeitig das benötigte Spannungsisolationsniveau der Leistungselektronik reduziert. Die Einkopplung der Zusatzspannung erfolgt im herausgeführten Sternpunkt des Transformers (Bild 3 b).

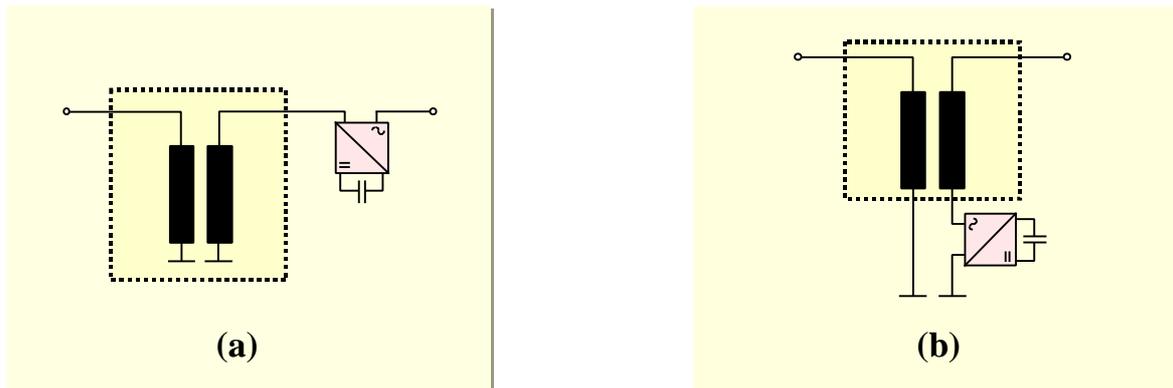


Bild 3: Transformatorenlose Spannungseinkopplung

- (a) Serieeinkopplung
- (b) Sternpunkteinspeisung

Für die nachträgliche Herausführung des Transformatorsternpunktes ist es erforderlich, die intern gebildete Sternpunktverbindung der Spulen R, S und T aufzutrennen und die nun freien Spulendenen mit einem Leitermaterial so zu verlängern, dass diese durch neu anzubringende Bohrungen in der Kesselwandung herausgeführt werden können. Die erforderliche Bohrung ist dabei mit elektrisch isolierendem Material so abzudichten, dass zum einen das Transformatoröl nicht auslaufen kann und zum anderen die potentialführenden Leitungen gegenüber der Kesselwandung isoliert sind.

4. Wirtschaftlichkeit

Bei der Entscheidung über den Einsatz von FACTS-Elementen in elektrischen Energieübertragungssystemen steht die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems im Vordergrund. Während die Betriebsmittel zur Abhilfe von Netzproblemen durch ihre verschiedenen Ausführungsvarianten hinsichtlich der Kosten relativ genau bewertet werden können, stellt eine Analyse des tatsächlichen Nutzens innerhalb der Energieübertragung eine ungleich schwierigere Aufgabe dar. Im Rahmen des vorliegenden Projektes steht daher neben der gerätespezifischen Entwicklung insbesondere die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit beim Einsatz von FACTS-Elementen im Vordergrund. Hier eine belastbare Aussage zu erzielen ist die grundlegende Aufgabe des Teilprojektes "Wirtschaftlichkeit". Da ein allgemeines wirtschaftliches Modell zur Bewertung von FACTS-Elementen auf-

grund der zahlreichen und mitunter auch nicht immer eindeutig quantifizierbaren Einflussgrößen eine zu komplexe Aufgabe darstellt, erfolgt die Erarbeitung der Wirtschaftlichkeit anhand zweier Fallbeispiele aus dem europäischen Verbundnetz. Die besondere Schwierigkeit bei der kostenmäßigen Bewertung ist die Wahl eines geeigneten Kostenrechnungsverfahrens, das aufgrund verschiedener Bewertungsverfahren bei unterschiedlichen Energieversorgern stark variieren kann. Die aus dieser Anwendung auf konkrete Problemstellungen resultierenden Ergebnisse lassen hinsichtlich einer Verallgemeinerung des Ansatzes die Formulierung eines allgemeinen Wirtschaftlichkeitsmodells zu. Dieses stellt dann eine Empfehlung für die Durchführung von Wirtschaftlichkeitsanalysen dar und erlaubt auch bei unterschiedlichen Netzproblemen sowie Kostenrechnungsverfahren eine konsistente Vorgehensweise bei der wirtschaftlichen Bewertung des Einsatzes von FACTS-Elementen.

In der Vergangenheit standen absolute Faktoren im Vordergrund von Wirtschaftlichkeitsanalysen, wobei relative Faktoren lediglich als mehr oder weniger systematische Begründungen zur Installation neuer Betriebsmittel betrachtet wurden. Angesichts der Liberalisierung der elektrischen Energiewirtschaft und der Tendenz, den physikalischen Energiefluss vom wirtschaftlichen Energiefluss getrennt zu betrachten, wächst die Bedeutung der relativen Faktoren, insbesondere auch im Bereich von Zuverlässigkeit und Abwicklung von Lieferverträgen. In erster Linie stehen diese hier im Vordergrund. Allgemein bestimmen anwenderspezifische Regulationsanforderungen die relativen Faktoren. Ein anderer Aspekt dieser Systembetrachtung ist die Anpassungsfähigkeit von FACTS-Elementen an spezifische Bedürfnisse eines Versorgungsunternehmens, welche zu der Einführung von massgeschneiderten FACTS-Elementen führen. Letztere zielen auf Geräte mit sehr kurzen Amortisationszeiten, die insbesondere durch die in dem vorstehenden Kapiteln beschriebenen Anlagenlösungen ermöglicht werden.

Oftmals übersehen ist die Schwierigkeit der eigentlichen Einbindung von FACTS Elementen in bestehende Anlagen. Der zusätzliche Aufwand an Leistungshaltern, Trennern und Messwandlern, ganz zu schweigen von der Leittechnik selbst ist beträchtlich im Vergleich zu den Kosten der Leistungselektronik und Transformatoren. Da jedoch die meisten FACTS Elemente massgeschneiderte Systeme darstellen muss auch die Systemtechnik in diesem Fall eine massgeschneiderte Lösung finden. Ein wesentlicher Bestandteil des Teilprojektes „Anlagenkonzepte“ ist die Erstellung von systemtechnischen Lösungen zur wirtschaftlichen Einbindung von FACTS Geräten in bestehende Anlagen, da man nur im seltensten Fall von einer vollständigen Neuinstallation ausgehen kann.

Weiterhin erfordert die Einbindung eines FACTS Elementes in eine bestehende Schaltanlage zusätzliche Schalter, Trenner, Messwandler und möglicherweise auch Sammelschienen, abhängig von der Konfiguration der Anlage. Als sehr kostenintensiv erweisen sich Szenarien in denen Leistungsflussregelung über Doppelleitungen erwünscht ist (Bild 4). Auch in diesem Fall gibt es kostengünstige Anordnungen, die möglicherweise auch die Topologie der bestehenden Anlage – teilweise – ändern. Da es sinnvoller ist FACTS-Elemente in bestehende oder geplante Anlagen zu integrieren, um so eine bessere Schnittstelle zur Stationsleittechnik zu erschaffen, müssen Modelle erstellt werden um einen geeigneten Ausgangspunkt zur Einbindung der Anlage zu kreieren.

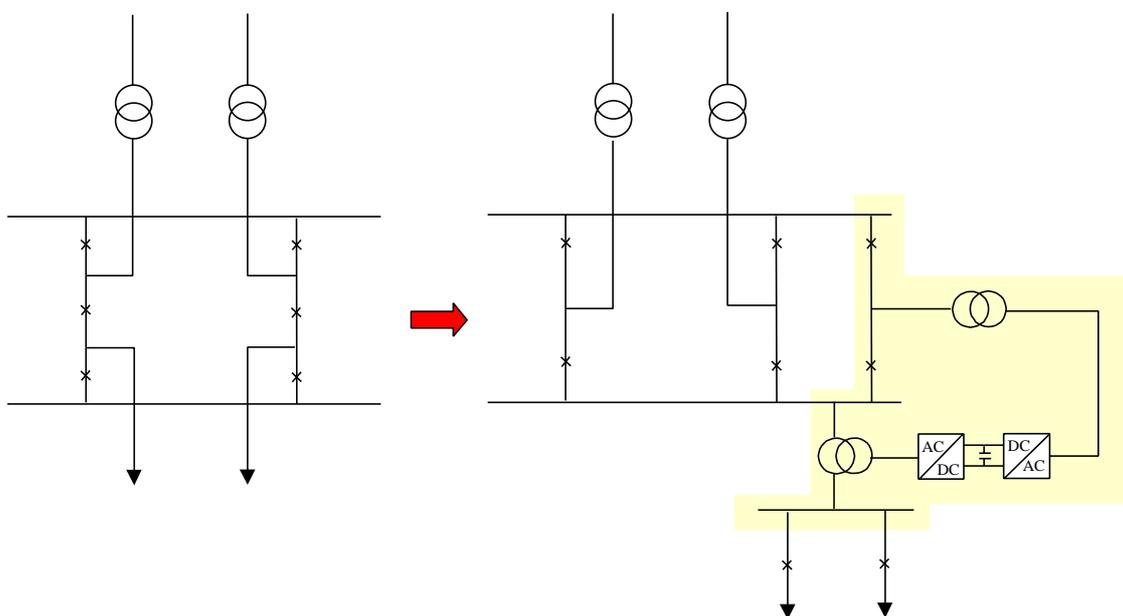


Bild 4: Kostengünstigste Einbindung eines UPFC in eine 1½ Schalter Anlage