Leistungselektronische Anlagen für Hochspannungsnetze : Facts - Flexible AC Transmission Systems : erhöhen die Übertragungsfähigkeit der Netze

Autor(en): **Povh, Dusan**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **85 (1994)**

Heft 7

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-902553

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Die schnelle Entwicklung der Leistungselektronik bietet neue Möglichkeiten zum Bau von Anlagen, die die Übertragungsfähigkeit der Netze erhöhen können. Einige dieser Anlagen, unter Anwendung der Thyristortechnik, sind seit langem im Einsatz, oder die Prototypen wurden bereits im Netz eingesetzt. Die GTO-Technik eröffnet Möglichkeiten zum Bau einer neuen Generation solcher Anlagen. Die Entwicklung befindet sich im Stadium der System- und Auslegungsstudien. Der Bericht gibt eine Übersicht über die Anlagen der Leistungselektronik für Hochspannungsnetze und über ihre Aufgaben im Netz.

Leistungselektronische Anlagen für Hochspannungsnetze

Facts – Flexible AC Transmission Systems – erhöhen die Übertragungsfähigkeit der Netze

■ Dusan Povh

In den industrialisierten Ländern wird weiterhin langfristig ein langsam ansteigender Bedarf an elektrischer Energie von etwa 2% jährlich erwartet. Dies bedeutet eine Verdoppelung des Bedarfs in etwas mehr als 30 Jahren. In den dichtbesiedelten Gebieten ist es immer schwieriger, neue Trassen für Freileitungen oder Kabel bereitzustellen. Wegen der nur langsam ansteigenden Lasten ist es ausserdem oft wirtschaftlicher, die Übertragungsfähigkeit der bestehenden Netze zu erhöhen und den Bau neuer Übertragungsleitungen zeitlich zu verschieben.

In den USA und in Europa befindet sich die Elektrizitätswirtschaft im Wandel. Es wird erwartet, dass der Austausch der elektrischen Energie innerhalb der Verbundnetze weiter ansteigen wird. Ausserdem wird man Leistung, auch in vermaschten Netzen, auf vorgegebenen Wegen ohne unerwünschte Belastung der nicht betroffenen Netzteile übertragen wollen. Zusätzlich ist damit zu rechnen, dass regenerative Energie von weit entfernten Energiequellen in das Verbundnetz über Fernübertragungen eingespeist wird. Beispiele dafür sind in Europa die Energieübertragungen von den Wasserkraftwerken in Norwegen und in Zukunft auch aus dem Osten. Auch mit der Übertragung von Solarenergie aus Nordafrika kann gerechnet werden.

In den nicht entwickelten Ländern wird der Energiebedarf weiterhin mit durchschnittlich etwa 5% jährlich relativ schnell wachsen. Die Energieversorgung in diesen Ländern ist in der Regel nur schwach entwickelt. Wegen der Finanzierungsprobleme kann der Netzausbau dem schnell steigenden Bedarf nicht folgen. Oft muss deshalb Leistung auf grosse Entfernungen mit einer relativ niedrigen Spannung übertragen werden, mit Folgen für die Qualität und Zuverlässigkeit der Stromversorgung.

Durch diese Entwicklungen besteht sowohl in den Industrieländern als auch in den nicht entwickelten Ländern Bedarf an Einrichtungen, die die Übertragungsfähigkeit der bestehenden Netze erhöhen können, wobei dadurch Investitionen gespart oder zeitlich verschoben werden und die Qualität der Energieversorgung verbessert wird.

Die stürmische Entwicklung der Leistungselektronik, die am Bau zahlreicher HGÜ-Anlagen grosser Leistung zu verfolgen ist, sowie die Entwicklung neuer Halbleiterelemente sind im Zusammenhang mit den obengenannten Anforderungen an die Erhöhung der Übertragungsfähigkeit der Netze die Wegbereiter der neuen Tech-

Adresse des Autors:
Prof. Dr. *Dusan Povh*,
Siemens AG, D-91050 Erlangen.

nik «Leistungselektronische Anlagen für Hochspannungsnetze», oft auch Facts (Flexible AC Transmission System) genannt [1].

Eigenschaften der leistungselektronischen Anlagen

Bild 1 zeigt schematisch eine Drehstromübertragung, die zwei Teilnetze verbindet. Die Verbindung kann aus einer Leitung oder auch aus einem in sich vermaschten Teilnetz bestehen. Die zwischen den Teilnetzen übertragene Leistung entspricht

$$P_{12} = (U_1 U_2 / X) \sin(\delta_2 - \delta_1) \qquad (1)$$

wobei U_1 und U_2 die Spannungen an beiden Enden der Übertragung, δ_1 und δ_2 die entsprechenden Winkel der Spannungsvektoren und X die Ersatzimpedanz der Verbindung sind.

Mit Hilfe dieser Gleichung kann die Beeinflussung der Übertragungsleistung durch die leistungselektronischen Anlagen gezeigt werden. Aus der Gleichung ist ersichtlich, dass drei Parameter, nämlich die Spannung, die Impedanz und der Übertragungswinkel die Leistung P_{12} beeinflussen können.

Die leistungselektronischen Anlagen, die bereits entwickelt sind oder sich in der Entwicklung befinden, können einen dieser Parameter oder auch mehrere gleichzeitig regeln. Daraus ergibt sich eine Vielfalt möglicher Elemente, die in Tabelle I zusammengefasst sind. Aufgeführt sind dabei Anlagen, für die man glaubt, dass sie eine wichtige Rolle in den Hochspannungsnetzen spielen werden. Für die Sonderaufgaben in den Netzen können jedoch auch weitere Einrichtungen aus den bereits vorhandenen Anlagenelementen entwickelt werden. Beispiele für solche Anlagen sind in Tabelle II zusammengefasst.

Beeinflussung der Spannung

Die Spannung in einem Übertragungsnetz kann mit Hilfe eines statischen Kompensators effektiv geregelt werden. Bild 2 zeigt schematisch die Schaltung einer solchen Anlage, bestehend aus einem thyristorgeschalteten Kondensator (C) und einer thyristorgesteuerten Drosselspule (L_1) sowie ihr Spannungs-Strom-Diagramm (rechts im Bild). Innerhalb der eingezeichneten Kennlinien kann der Kompensator durch seine Regelung jeden Punkt in einigen Perioden der Betriebsfrequenz erreichen. Die statischen Kompensatoren sind bereits seit langem eingeführte Technik [2].

Da die Spannung im Netz unter Berücksichtigung der zulässigen Grenzen der Betriebsspannung und der begrenzten Leistung des Kompensators nur in einem engen Bereich geändert werden kann, beeinflusst der statische Kompensator im stationären Betrieb praktisch nur den Blindleistungsfluss. Durch seine schnelle Regelung kann jedoch der statische Kompensator bei Stabilitätspendelungen durch die Änderung der Spannung auch einen Anteil an Wirkleistungsfluss erzeugen, der diesen Pendelungen entgegenwirkt und sie damit dämpft. Damit kann die Pendelstabilität einer Übertragung vergrössert werden. Ein Beispiel zur Illustration dieses Effektes ist weiter unten im Kapitel «Anwendung der leistungselektronischen Geräte im Netz» gezeigt.

Eine Weiterentwicklung des statischen Kompensators stellt eine Anlage dar, bei der auf der Sekundärseite des Transformators ein GTO-Umrichter mit Spannungszwischenkreis angeschlossen ist (Bild 3). Mit Hilfe der GTO-Elemente kann die Anlage neben der induktiven auch die kapazitive Blindleistung erzeugen. Damit entfällt die Notwendigkeit einer Kondensatorbatterie für den Betrieb im kapazitiven Bereich, wie das beim herkömmlichen statischen Kompensator der Fall ist. Der Vorteil der Einrichtung ist Kompaktheit im Aufbau und Erzeugung des Blindleistungsstromes, unabhängig von der Netzspannung. Dies ist auch dem Betriebsdiagramm dieses Kompensators rechts in Bild 3 zu entnehmen. Die Nachteile des GTO-Kompensators sind vor allem die noch relativ hohen Verluste und einige Probleme, GTO-Stromrichter grosser Leistungen zu bauen. Da Stromrichter relativ hohe Oberschwingungen erzeugen, werden sie nicht 6pulsig, wie im Bild 3 angedeutet, sondern 24- oder sogar 48pulsig gebaut. Die Entwicklung dieser Anlagen ist so weit fortgeschritten, dass sich die ersten Prototypen im Bau befinden [3]. Man kann sich auch vorstellen, dass der Kondensator C des Zwischenkreises dieser Schaltung durch eine Energiequelle, zum Beispiel Batterien oder eine supraleitende magnetische Spule, ersetzt wird. Damit erhalten wir eine Anlage, die neben der Spannungsregelung des Netzes auch als Energiespeicher benutzt werden kann.

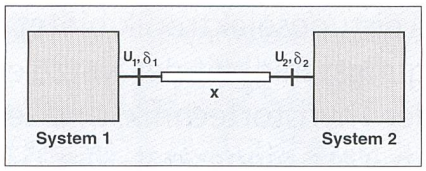


Bild 1 Schematische Darstellung einer Drehstromübertragung

U_1, U_2 Spannungen an beiden Enden der Übertragung
δ_1, δ_2 Winkel der Spannungsvektoren
X Ersatzimpedanz der Verbindung

Geräte für Übertragungsnetze

- Statischer Kompensator
- Thyristorgeregelter Reihenkompensator
- Statischer Kompensator in GTO-Technik
- Thyristorgeregelter Quertransformator
- Universaler Lastflussregler

Tabelle I Geräte der Leistungselektronik für Übertragungsnetze

Geräte für Sonderaufgaben

- NGH-Schaltung zur Dämpfung der subsynchronen Schwingungen
- Energiespeicher
- Strombegrenzer
- Thyristorgesteuerter Bremswiderstand
- Serienkompensation in GTO-Technik
- Thyristorgesteuerter Spannungsbegrenzer

Tabelle II Geräte der Leistungselektronik für Sonderaufgaben

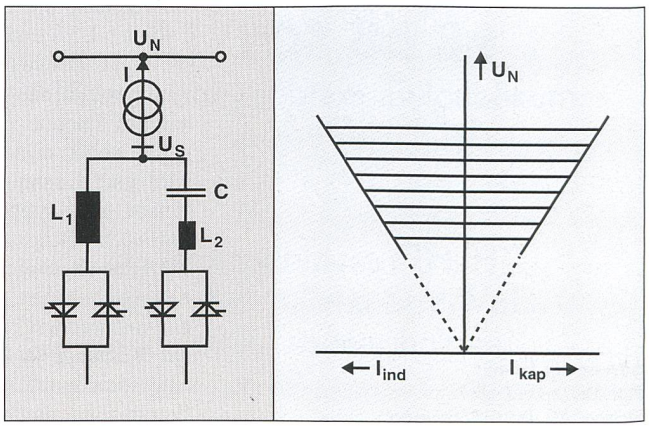


Bild 2 Schematische Darstellung eines statischen Kompensators und sein Betriebsdiagramm
siehe Text

Beeinflussung der Impedanz

Die Impedanz einer Übertragungsleitung kann durch die Serienkompensation reduziert werden. Seit langem wird diese Technik zur Erhöhung der Übertragungsfähigkeit und zur Erhöhung der Stabilitätsgrenzen bei Fernübertragungen benutzt. Der Kompensationsgrad ist jedoch entweder konstant oder durch das mechanische Schalten einzelner Kondensatorsegmente nur langsam und in grossen Stufen veränderbar.

Die Neuentwicklung, unter Ausnutzung der Leistungselektronik, bietet mit der thyristorgesteuerten Serienkompensation die Möglichkeit, die Impedanz kontinuierlich und schnell zu verändern. Damit kann auch eine schnelle Lastflussänderung im vermaschten Netz, Dämpfung der Pendelungen sowie Vermeiden der eventuell auftretenden subsynchronen Schwingungen erreicht werden.

Die in Bild 4 gezeigte schematische Schaltung der regelbaren Serienkompensation zeigt, dass sie eine duale Lösung eines statischen Kompensators darstellt. Eine thyristorgesteuerte Drosselspule *L* mit parallelgeschaltetem, festem Kondensator *C* wird in die Leitung geschaltet. Aus dem Betriebsdiagramm der ersten solchen ausgeführten Anlage [4] in Bild 4 ist zu sehen, dass sich der Betriebsbereich im kapazitivem Bereich befindet, wobei die Nähe der Resonanz der Parallelschaltung bei Betriebsfrequenz vermieden wird. Werden Thyristoren voll durchgezündet, kann auch der im Diagramm eingezeichnete Betriebspunkt im induktiven Bereich benutzt werden, vor allem als Schutz vor einer zu hohen Spannungsbeanspruchung der Kondensatoren. Die durch thyristorgesteuerte Drosselspulen erzeugten Oberschwingungen im benutzten Betriebsbereich sind so niedrig, dass ihr Anteil, der in das Netz eindringt, keine Beeinflussungsprobleme zur Folge hat.

Mit dem Baustein der thyristorgesteuerten Serienkompensation nach Bild 4 können zusammen mit einer festen Serienkompensation, die aus mehreren Segmenten bestehen kann, Einrichtungen zusammengesetzt werden, die den spezifischen Anforderungen des jeweiligen Netzes entsprechen.

Ähnlich wie bei den statischen Kompensatoren kann auch hier eine Weiterentwicklung unter Ausnutzung der GTO-Technik erwartet werden. In den Leitungszug wird ein Transformator geschaltet, dem auf der Sekundärseite ein GTO-Stromrichter mit Spannungszwischenkreis angeschlossen ist (Bild 5). Durch die Erzeugung einer Zusatzspannung, in der Längsrichtung der Leitung, die um 90° dem Übertragungsstrom vor- oder nacheilt, wird der durch den Betriebsstrom an der Reaktanz der Leitung verursachte Spannungsabfall reduziert oder vergrössert. Dies wirkt wie eine kapazitive bzw. induktive Reihenkompensation.

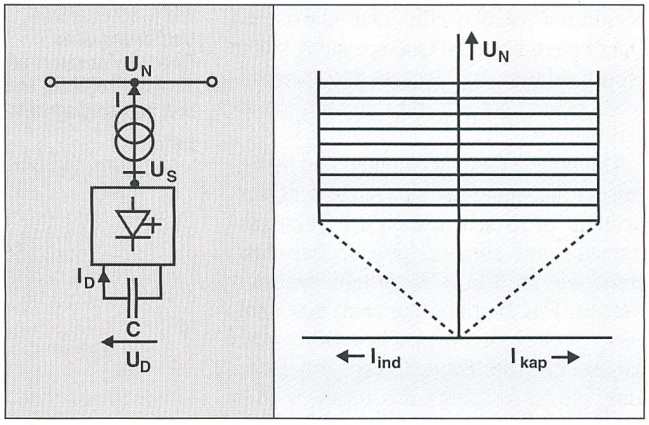


Bild 3 Schematische Darstellung eines GTO-Kompensators und sein Betriebsdiagramm
siehe Text

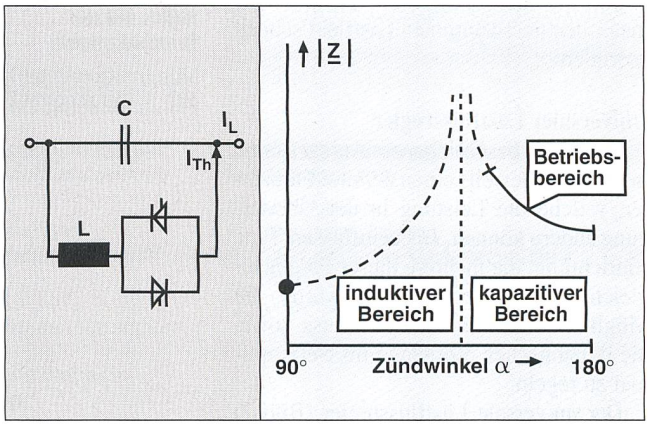


Bild 4 Schematische Darstellung einer regelbaren Serienkompensation und ihr Betriebsdiagramm
siehe Text

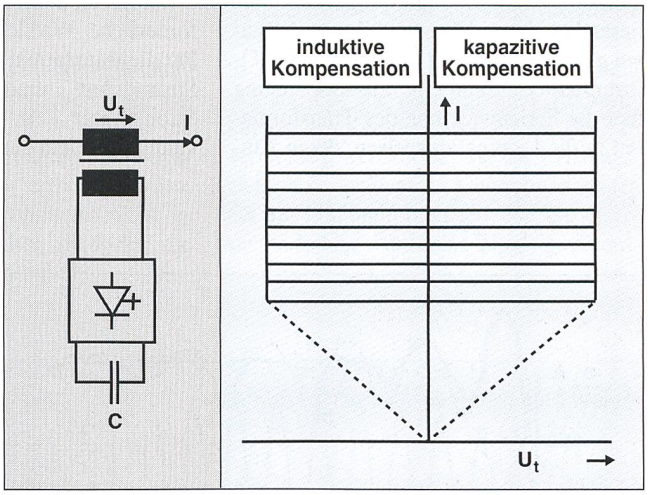


Bild 5 Schematische Darstellung eines GTO-Serienkompensators und sein Betriebsdiagramm
siehe Text

Beeinflussung des Winkels

Der Spannungswinkel im Netz kann durch einen Quer- oder Schrägregler verändert werden. Diese Spezialausführung der Transformatoren ist bereits seit vielen Jahren im Einsatz [5]. Die Ausführung des Transformators hängt von der jeweiligen Aufgabe im Netz ab. Meistens werden Geräte benötigt, die die Netzspannung nur in der Querrichtung verschieben. Dadurch können im vermaschten Netz Lastflüsse

beeinflusst werden. Bei den klassischen Querreglern kann die Querspannung nur in groben Stufen und wegen des mechanischen Stufenschalters nur langsam verändert werden.

Um höhere Geschwindigkeit und Stetigkeit der Spannungsänderungen in der Querrichtung zu erreichen, kann der Quertransformator mit einem Thyristor-Zwischenkreis, wie in Bild 6 dargestellt, realisiert werden. Das Betriebsdiagramm eines solchen Gerätes ist im gleichen Bild rechts dargestellt. Die Schnelligkeit der Regelung, die ein solches Gerät bietet, wird in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Wenn zum Beispiel in stark ausgelasteten Netzen Überlastungen einzelner Leitungen durch Ausfälle auftreten, kann der Quertransformator den unerwünschten Lastfluss schnell korrigieren.

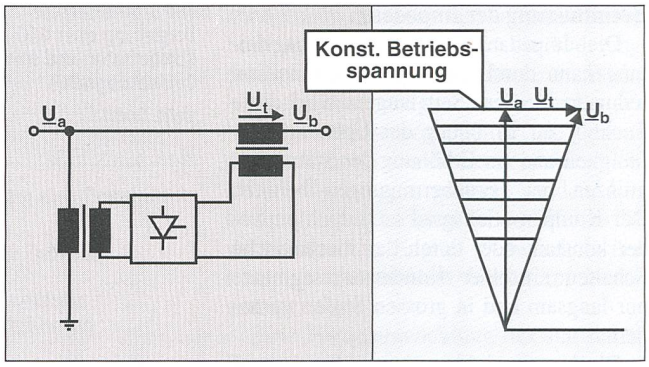


Bild 6 Schematische Darstellung eines Quertransformators mit Thyristor-Regelung und sein Betriebsdiagramm

siehe Text

Universaler Lastflussregler

Die oben beschriebenen Anlagen sind in der Lage, jeweils einen der drei Parameter, welche die Leistung in der Übertragung ändern können, zu beeinflussen. Eine Einrichtung, die mehrere dieser Parameter gleichzeitig ändern könnte, würde die Möglichkeit bieten, den Lastfluss sowie die dynamischen Vorgänge im Netz optimal zu regeln.

Der universale Lastflussregler (Bild 7) stellt ein solches Gerät dar. Zwischen beiden Teilen eines Quertransformators werden zwei GTO-Stromrichter mit einem Spannungszwischenkreis eingesetzt. Mit dieser Schaltung können mehrere Aufgaben gleichzeitig erfüllt werden. Der GTO-Stromrichter *2* kann eine Zusatzspannung über die Serienwicklung des Transformators in die Leitung einspeisen, deren Amplitude und Winkel veränderbar sind. Die für die Erzeugung dieser Spannung erforderliche Blindleistung wird vom GTO-Stromrichter *2* selbst erzeugt, und die erforderliche Wirkleistung wird über den Paralleltransformator und die beiden Stromrichter eingespeist. Der GTO-Stromrichter *1* des Paralleltransformators kann ausserdem durch die Erzeugung oder den Verbrauch der Blindleistung die Spannung an der Klemme des Lastflussreglers regeln. Der universale Lastflussregler vereint demnach in einem Gerät den GTO-Kompensator und den GTO-Reihenkompensator [6]. Das Betriebsdiagramm ist in Bild 7, rechts, dargestellt.

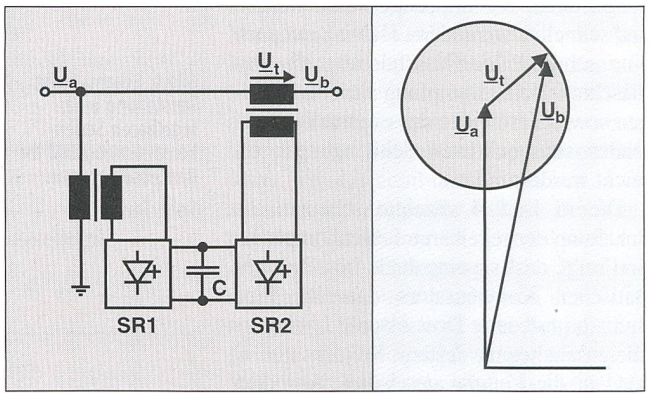


Bild 7 Schematische Darstellung eines universalen Lastflussreglers und sein Betriebsdiagramm

SR1 Stromrichter *1*
SR2 Stromrichter *2*

Der universale Lastflussregler befindet sich in der Entwicklung. Die Realisierung wird jedoch noch einige Jahre auf sich warten lassen, da dafür GTO-Stromrichter für grössere Leistungen benötigt werden, die eine Reihenschaltung dieser Elemente unter wirtschaftlichen Bedingungen erforderlich machen. Ausserdem sollen GTO-Elemente eine Pulsmodulation mit höheren Frequenzen erlauben, damit eine Reduktion der vom Gerät erzeugten Oberschwingungen erreicht wird. Entwicklungen sind auch für eine komplexe Regelung mehrerer Parameter gleichzeitig erforderlich, um die Vorteile des Gerätes voll ausnutzen zu können.

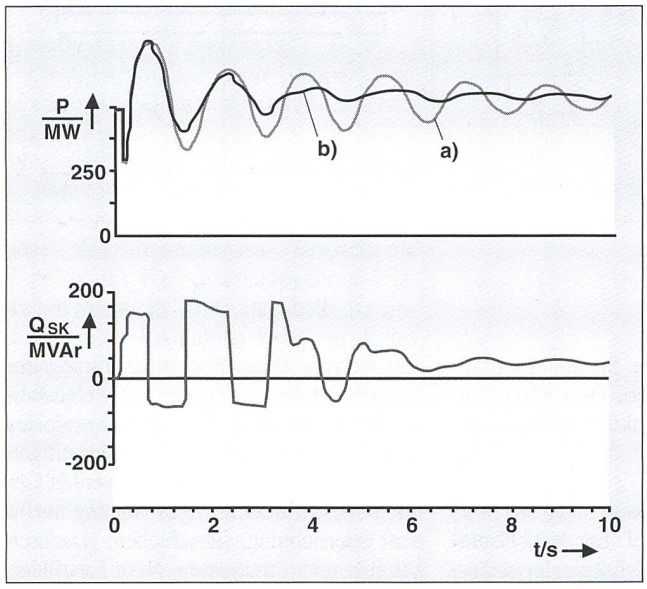


Bild 8 Wirk- und Blindleistungspendelungen

P Wirkleistung
a Verlauf von *P* ohne Einsatz des statischen Kompensators
b Verlauf von *P* mit Einsatz des statischen Kompensators
Q_{SK} Blindleistung des statischen Kompensators

Anwendung der leistungselektronischen Geräte im Netz

Die Einrichtungen der Leistungselektronik können, wie bereits aus den einzelnen Beschreibungen ersichtlich, für verschiedene Aufgaben im Netz eingesetzt werden:

a) Zur Regelung des Lastflusses im stationären Betrieb. Für diese Aufgabe ist in der Regel keine schnelle Regelung erforderlich. Deshalb können dafür auch konventionelle, mechanisch-schaltbare Elemente benutzt werden, insbesondere wenn sich die Häufigkeit des Schaltens in Grenzen hält.
b) Zur schnellen Regelung des Lastflusses, um eine Überlastung einzelner Elemente oder ein daraus resultierendes Ansprechen des Schutzes bei Ausfällen im Netz zu vermeiden. Für diese Aufgabe werden Anlagen unter Ausnutzung der schnellen Regelbarkeit der Leistungselektronik gebraucht.
c) Zur Erhöhung der Stabilitätsgrenzen in einer Fernübertragung oder zur Dämpfung von Stabilitätspendelungen in Verbundnetzen wird eine schnelle Regelung gebraucht, die mit Zeitkonstanten unter 100 ms arbeiten muss.

Welche leistungselektronische Anlage zur Lösung eines bestehenden Netzproblems unter Berücksichtigung der technischen Eigenschaften und Kosten optimal ist, muss durch Systemstudien ermittelt werden. Solche Studien werden in der Regel mit Hilfe der Simulationsprogramme im Zeitbereich durchgeführt [7], wobei diese Programme detaillierte Modelle der leistungselektronischen Geräte mit entsprechender Möglichkeit der Nachbildung der komplexen Regelung beinhalten müssen. Solche Studien ergeben das zu erwartende Verhalten im Netz und die dafür erforderlichen Hauptdaten der Anlage. Daraus können dann Kostenvorteile beim Einsatz der Leistungselektronik ermittelt werden. Die Simulationsstudien dienen ausserdem zur Weiterentwicklung der technischen Lösungen und zur Erstellung der detaillierten Bemessungsgrundlagen der Anlagen. An einigen Beispielen sollen solche Studien illustriert werden.

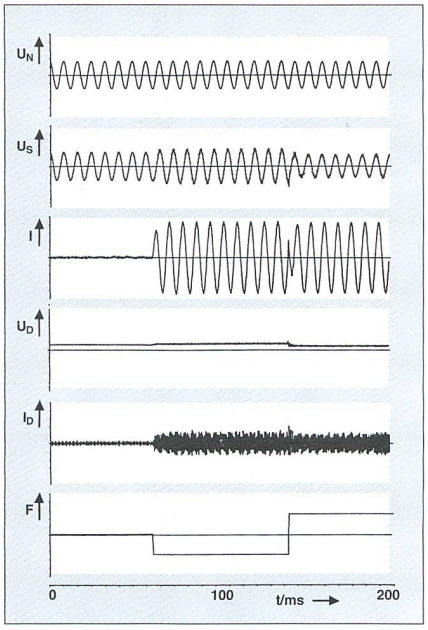


Bild 9 Verhalten eines 24pulsigen GTO-Kompensators am Netz bei einer Blindleistungs-Sollwert-Änderung

U_N Spannung an der Sammelschiene
U_S Spannung an der Sekundärseite des Transformators
I Strom des Kompensators
U_D Spannung an der Kapazität des Stromrichter-Zwischenkreises
I_D Strom im Stromrichter-Zwischenkreis
F Sollwert der Blindleistung

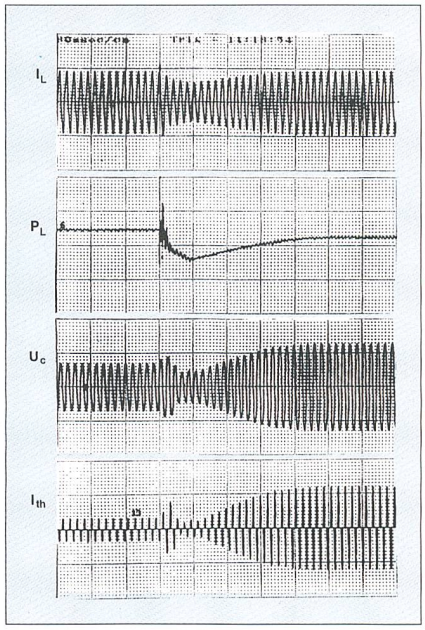


Bild 10 Lastflussänderung durch die regelbare Reihenkompensation

I_L Leitungsstrom
P_L übertragene Leistung
U_C Spannung an der Kondensatorbatterie
I_{th} Strom durch die thyristorgesteuerte Drosselspule

Statischer Kompensator im Verbundnetz

Für einen statischen Kompensator, der in einem grossen 400-kV-Verbundnetz eingesetzt wurde, sollte zusätzlich zur Spannungsregelung auch eine Regelungsfunktion zur Dämpfung der Stabilitätspendelungen vorgesehen werden. Die Entwicklung dieser Regelungsfunktion wurde unter Nachbildung des Netzes mit Hilfe des digitalen Programmes *Netomac* entwickelt, in die Regelungshardware implementiert und vor der Auslieferung am Simulator überprüft [8]. Bild 8 zeigt die berechneten Wirkleistungspendelungen im Netz, folgend auf einen der kritischen Fehlerfälle ohne und mit dem Einsatz des statischen Kompensators, sowie den Verlauf der Blindleistung des statischen Kompensators.

GTO-Kompensator

Das Verhalten des GTO-Kompensators im Netz ist dem eines statischen Kompensators ähnlich, mit einigen Vorteilen, die im Kapitel «Eigenschaften der leistungselektronischen Anlagen» erwähnt wurden. Um die Anlage zu dimensionieren, ist es erforderlich, das Verhalten am Netz, die Rückwirkungen und die Beanspruchung einzelner Anlagen-Komponenten im Detail zu untersuchen. Dafür muss eine detaillierte rechnerische Nachbildung des Kompensators einschliesslich der Regelung erstellt werden. Um die unerwünschten Rückwirkungen des Kompensators auf das Netz zu vermeiden, werden die von der Leistungselektronik erzeugten Oberschwingungen auf ein Minimum reduziert. Für die untersuchte Anlage wurde eine 24pulsige Anord-

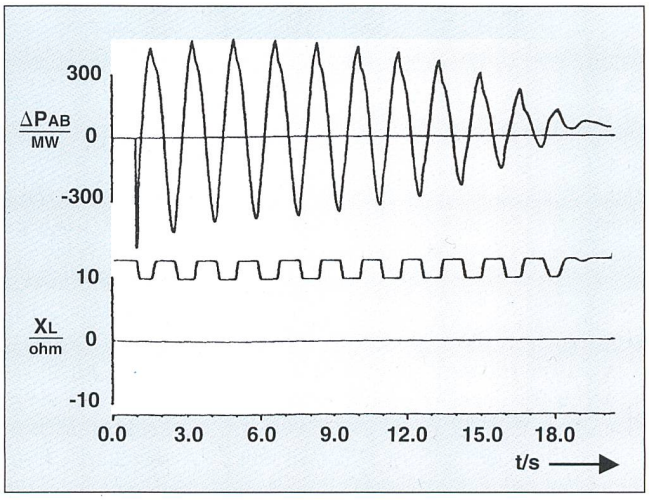


Bild 11 Dämpfung der Pendelung im Netz durch die regelbare Reihenkompensation

ΔP_{AB} Wirkleistungspendelungen (Abweichung vom Mittelwert)
X_L Impedanz der Leitung

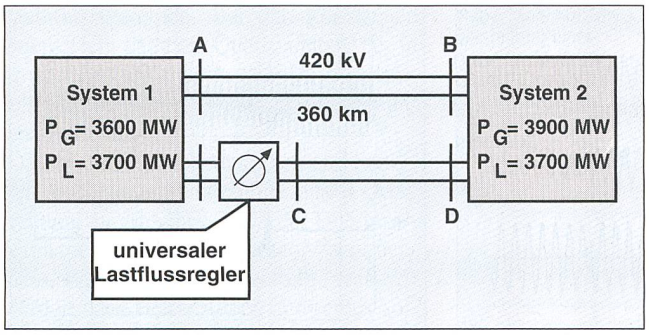


Bild 12 Schematische Schaltung des untersuchten Verbundnetzes

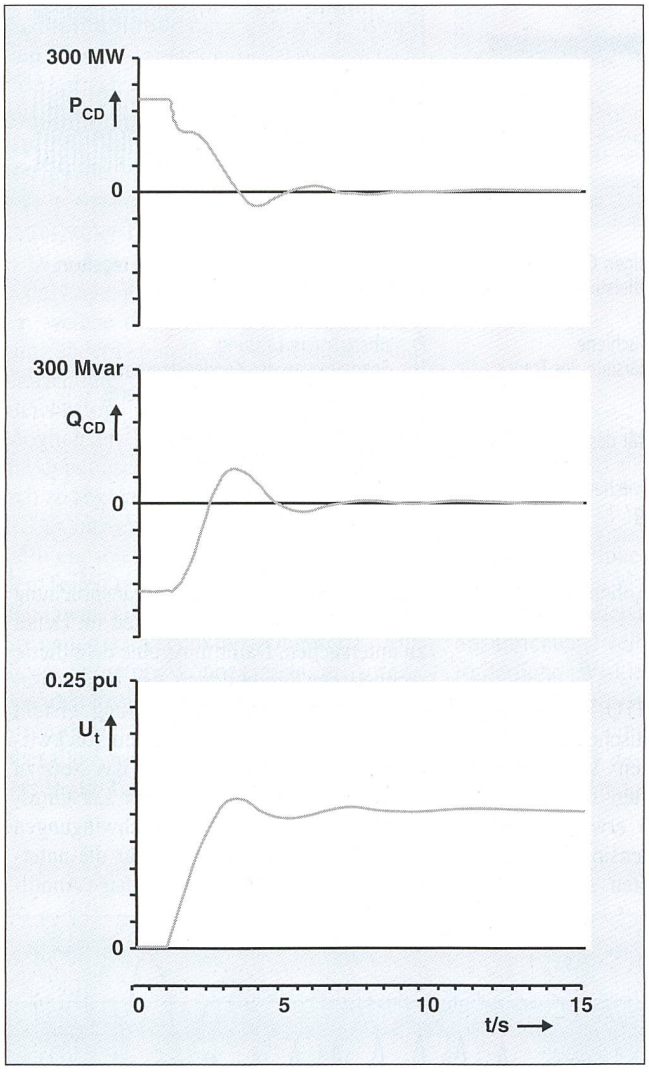


Bild 13 Regelung des Lastflusses des Verbundnetzes nach Bild 12 mit Hilfe des universalen Lastflussreglers

P_{CD} Wirkleistung in der Verbindung zwischen C und D

Q_{CD} Blindleistung in der Verbindung zwischen C und D

U_t Wert der Zusatzspannung des universalen Lastflussreglers

nung gewählt. Bild 9 zeigt Spannungen und Ströme des Kompensators, folgend einer vorgegebenen Blindleistungs-Sollwert-Änderung.

Regelbare Serienkompensation

Bild 10 zeigt die Änderung des Lastflusses in einer Freileitung innerhalb eines Verbundnetzes im mittleren Westen der USA, wo die erste regelbare Serienkompensation kommerziell eingesetzt wurde [4]. Aufgrund der Netzkonfiguration ist die betrachtete Leitung im Normalfall nur schwach belastet. Durch die regelbare Serienkompensation wird jedoch die Gesamtimpedanz der Verbindung reduziert und somit die über die Leitung übertragene Leistung erhöht. Das Bild zeigt ein Beispiel, bei dem die Regelung der Anlage den Leitungsstrom konstant hält. Durch eine Änderung der Konfiguration im Verbundnetz werden der Leistungsstrom I_L und damit auch die Leistung P_L reduziert. Mit der Regelung der Leitungsimpedanz wird jedoch der Leitungsstrom nach einigen 100 ms wieder auf den ursprünglichen Wert geregelt.

Neben der Lastflussregelung kann diese Einrichtung auch zur Dämpfung von Pendelungen im Netz beitragen, wie Bild 11 zeigt. Angenommen, in einer Fernübertragung tritt ein Fehler auf, der zur Instabilität führen würde, wenn nicht Massnahmen zur Dämpfung der Stabilitätspendelungen nach dem Abschalten des fehlerhaften Leitungsabschnittes vorgesehen werden. Das Bild zeigt die Wirkleistungspendelungen (ΔP_{AB}) und die Impedanz der Leitung (X_L). Durch die Regelung wird die Impedanz und damit die durch die Leitung übertragene Leistung so geregelt, dass die Pendelungen gedämpft werden.

Universaler Lastflussregler

Bild 12 zeigt schematisch ein Verbundnetz, bestehend aus zwei Teilnetzen, die miteinander durch zwei Doppelleitungen verbunden sind. Solche Konfigurationen sind typisch für Netze in Europa und Nordamerika. Die wichtigsten Daten des betrachteten Netzes sind im Bild eingetragen [6]. Im normalen Betriebszustand soll ein Austausch der Leistung zwischen beiden Teilnetzen über die obere Verbindung stattfinden. In Wirklichkeit fliesst jedoch zusätzlich ein Kreisstrom, der auch die untere Verbindung belastet. In dieser Verbindung wird deshalb ein universaler Lastflussregler, wie aus Bild 12 ersichtlich, eingesetzt. Er hat unter anderem die Aufgabe, die Leistung in der unteren Verbindung auf Null zu regeln. Wie Bild 13 zeigt, erfolgt dies innerhalb von einigen Sekunden. Dargestellt sind die Wirkleistung P_{CD} und die Blindleistung Q_{CD} in der betrachteten Leitung sowie der Betrag der Längsspannung U_t des universalen Lastflussreglers.

Bild 14 zeigt das Verhalten des universalen Lastflussreglers an einem einfachen Netz, wobei das Gerät im Momentanteil von Netomac detailliert nachgebildet wurde. Solche Untersuchungen sind erforderlich, um die Grenzen der schnellen Regelbarkeit des Gerätes zu untersuchen und die auftretenden Oberschwingungen zu analysieren. Gezeigt ist das Verhalten des Gerätes bei einer Änderung des Sollwertes der Wirkleistung am Ausgang des Lastflussreglers, wobei die Blindleistung konstant bleiben soll. Aufgetragen sind neben dem Sollwert P_{ref} die Wirkleistung P_{aus}, die Blindleistung Q_{aus}, die Spannung U_A am Ausgang des Lastflussreglers, die Zusatzspannnung U_t sowie der Strom I_{aus}. Für die verwendeten GTO-Stromrichter wurde eine 6pulsige Schaltung mit Pulsmodu-

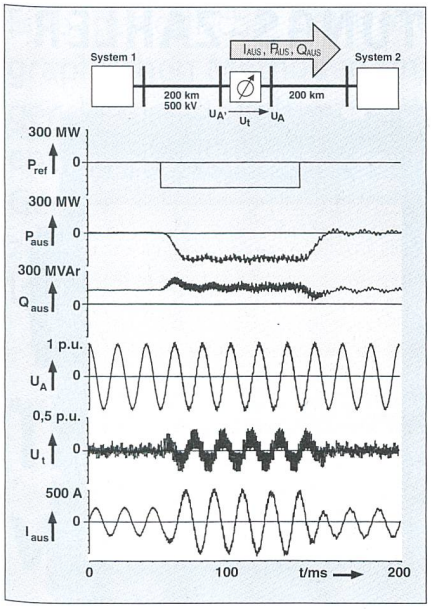


Bild 14 Verhalten des universalen Lastflussreglers in einem vereinfachten System bei Sollwert-Änderung der Wirkleistung

P_{ref} Sollwert der Wirkleistung
P_{aus} Wirkleistung
Q_{aus} Blindleistung
U_A Spannung am Ausgang des Lastflussreglers
U_t Zusatzspannung des Lastflussreglers
I_{aus} Strom am Ausgang des Lastflussreglers

lation mit einer Frequenz von 1000 Hz berücksichtigt. Wie man aus Bild 14 ersehen kann, ist der Anteil der Oberschwingungen nach wie vor relativ hoch und es ist erforderlich, ihren Anteil entweder durch weitere Erhöhung der Pulsfrequenz oder mittels einer 12-Puls-Schaltung weiter zu reduzieren.

Zusammenfassung und Ausblick

Die schnelle Entwicklung der Leistungselektronik bietet neue Möglichkeiten im Bau von Anlagen, welche die Übertragungsfähigkeit der Netze durch Lastflusssteuerung im stationären Betrieb und Verbesserung der Stabilität nach Fehlern erhöhen. Mit den statischen Kompensatoren ist diese Technik bereits seit langem im Einsatz. Die ersten thyristorgesteuerten Anlagen der Reihenkompensation sind seit kurzem in Betrieb.

Die GTO-Elemente ermöglichen den Bau von Anlagen mit verbesserten Eigenschaften. Dazu gehören der GTO-Kompensator, die GTO-Serienkompensation sowie als Kombination mehrerer Geräte der universale Lastflussregler. Diese Elemente befinden sich noch in Entwicklung, wobei der Prototyp des GTO-Kompensators bald im Netz eingesetzt wird. Für grössere Leistungen muss noch die Serienschaltung der GTO-Elemente unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten realisiert werden. Ausserdem sind weitere Entwicklungen bezüglich der Rückwirkungen dieser Anlagen auf das Netz erforderlich.

Die Regelungskonzepte für die meisten leistungselektronischen Geräte sind bereits vorhanden. Beim universalen Lastflussregler, der mehrere Elemente in sich vereint, müssen jedoch neue Regelungskonzepte entwickelt werden, wenn sie einen optimalen Einsatz im Netz ermöglichen sollen.

Beim Einsatz dieser neuen Technik spielen Studien mit einer detaillierten Nachbildung des in Frage kommenden Netzes und der einzelnen Geräte unter Berücksichtigung der Regelung eine entscheidende Rolle. Nur wenn solche Studien Kostenvorteile für das Netz sowie die Machbarkeit der Anlage unter Beweis stellen, wird diese Technik in grösserem Umfang in den Netzen eingesetzt werden.

Literatur

[1] *N.G. Hingorani*: High Power Electronics and Flexible AC Transmission System. IEEE Power Engineering Review, July 1988.

[2] *D. Povh* and *H. Tyll*: Static Var Compensators for High Voltage Systems. The II Sepope, August 21–25, 1989, São Paulo, Brasil.

[3] *L. Gyugyi* et al.: Advanced Static Var Compensator Using Gate Turn-Off Thyristors for Utility Applications. Cigré Paper 23–203, 1990.

[4] *A. H. Montoya* et al.: 230 kV Advanced Series Compensation, Kayenta Substation Project Overview. Epri Workshop on Facts, November 14–16, 1990, Cincinnati, Ohio.

[5] *Z. X. Han*: Phase Shifter and Power Flow Control. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 10, Oct. 1982.

[6] *E. Lerch* et al.: Simulation and Performance Analysis of Unified Power Flow Controller. Cigré Paper 14–205, 1994.

[7] *W. Bayer* et al.: Studies for HVDC and SVC Using the Netomac Digital Program. IEEE Joint Conference on High Voltage Transmission System, Beijing 1987.

[8] *W. Kaufhold*, *D. Retzmann* and *W. Schultz*: Echtzeitsimulator zur Untersuchung des Systems Stromrichter und Netz. Etz Bd. 113 (1992), H. 3, S. 116–123.

Installations d'électronique de puissance pour réseaux à haute tension

Les Facts – Flexible AC Transmission Systems – augmentent la capacité de transmission des réseaux

Le développement rapide de l'électronique de puissance offre de nouvelles possibilités pour la construction d'installations qui peuvent augmenter la capacité de transmission des réseaux. Quelques unes d'entre elles, utilisant la technique à thyristor, sont en service depuis longtemps, ou des prototypes ont déjà été utilisés dans un réseau. La technique GTO ouvre des possibilités pour la construction d'une nouvelle génération de telles installations. Le développement se trouve au stade des études de système et de conception. Le rapport donne un aperçu des installations d'électronique de puissance pour réseaux à haute tension et des tâches qu'elles assument dans les réseaux.

La puissance transmise entre deux réseaux partiels $P_{12} = (U_1U_2/X)\sin(\delta_2-\delta_1)$, où U_1 et U_2 sont les tensions aux deux extrémités de la transmission, δ_1 et δ_2 les angles correspondants des vecteurs de tension et X l'impédance équivalente de la jonction (fig. 1), peut être influencée par diverses installations d'électronique de puissance. Pour régler la tension on utilise des compensateurs (fig. 2 et 3). Outre de la puissance réactive, les installations selon la figure 3, à l'aide des éléments GTO peuvent aussi générer de la puissance réactive capacitive. Avec une compensation série (fig. 4 et 5) on peut réduire l'impédance de la ligne de transport. Pour modifier l'angle des tensions dans le réseau, on utilise déjà depuis de nombreuses années des régulateurs transversaux; pour accroître la vitesse et la continuité des variations de tension dans le sens transversal, on peut réaliser le transformateur transversal avec circuit intermédiaire à thyristor selon la figure 6. Alors que les installations ci-dessus ne peuvent influencer qu'un des trois paramètres pouvant varier la puissance dans la transmission, un régulateur de charge universel selon la figure 7 peut changer simultanément plusieurs de ces paramètres et par cela le flux de charge et régler de manière optimale les phénomènes dynamiques dans le réseau. Pour définir l'installation d'électronique de puissance optimale permettant de résoudre un problème de réseau existant, tenant compte des propriétés techniques, il faut procéder à des études de système. Quelques exemples cités dans l'article permettent de discuter les résultats de telles études (fig. 8–14).

DREIPHASIGER ENERGIE- UND LEISTUNGS-ZÄHLER

Das EMU3 ist ein dreiphasiger Energie- und Leistungszähler der auf eine DIN-Befestigungsschiene (35 mm) aufgeschnappt werden kann.

Mögliche Messwerte:
Wirk-, Blind- und Scheinenergie. Max. Leistung, (5, 10, 15, 30, 60 Min. Messperiode), Wirk-, Blind- und Scheinleistung, (total und pro Phase) Spannung, Strom, cos Phi, Preis/kWh, Kosten total, Frequenz. Der Zähler ist in Einfach- oder Doppeltarif-Ausführung erhältlich.

Optische Schnittstelle:
Bidirektionale Infrarot-Schnittstelle zum Auslesen aller gemessenen Daten. Datenkommunikation nach IEC 1015.

Festmengenimpulsausgang:
Klemmenanschluss (Optokoppler)

Wertigkeit:

100A:	1 Imp/10 Wh
25A:	1 Imp/Wh
5A:	1 Imp/100 Wh

Serielle Schnittstellen:
2-Leiter-Datenbus für Parallel-Auslesung bis max. 1000 EMU's. Datenkommunikation nach IEC 1015.

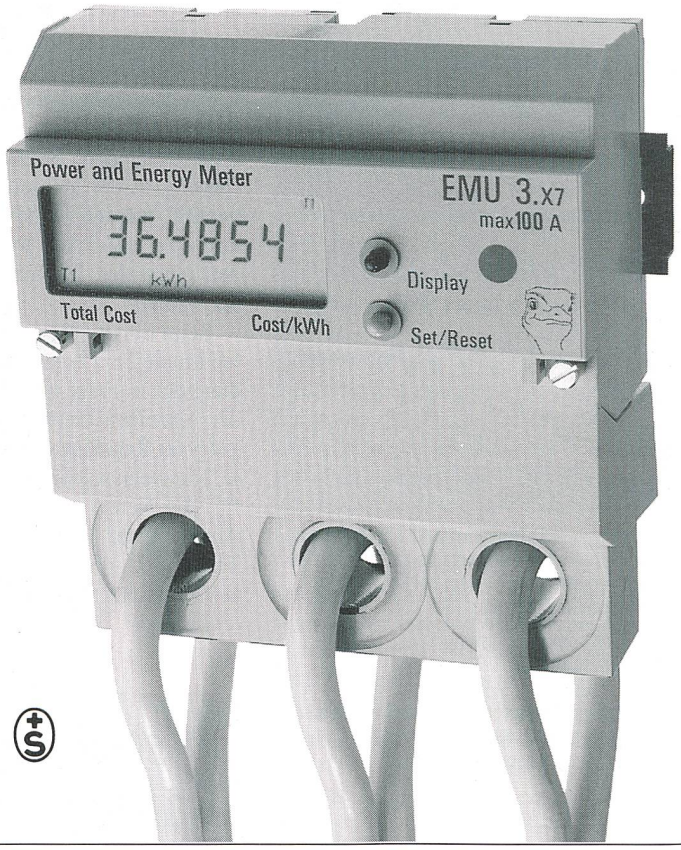
Direktanschluss:
Messbereich

Spannung	3x230/400V
Strom pro Phase	25/100A
Frequenz	45–65Hz
cos. Phi	0,02–1
Genauigkeit:	Kl. 2

Messwandler:	5A

Masse:

140x120x65 mm	(5A, 25A)
140x160x65 mm	(100A)



EMU ELEKTRONIK

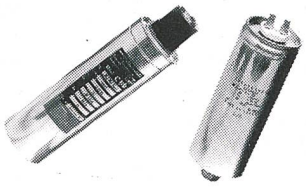
EMU ELEKTRONIK AG
Erlibergstrasse 11a
CH-6314 Unterägeri

Telefon 042 72 30 79
Telefax 042 72 15 95
Telefon 043 21 84 15

Korrektur Leistungsfaktor
Arcotronics

Ein- und Dreiphasenkondensatoren von höchster Qualität

- 2,5 ... 60 kVar
- PCB frei
- verlustarm
- betriebssicher
- spannungsfest
- selbstheilend
- preiswert



Partner für Elektro-Energie-Optimierung · erfahren · kompetent · individuell beratend seit 1965

detron ag Zürcherstrasse 25, CH 4332 Stein
Tel. 064-63 16 73 Fax 064-63 22 10

Eine gute Dokumentation erhöht die Verfügbarkeit Ihrer Anlage

Wir übernehmen folgende Arbeiten:

- Reinzeichnen von Stromlauf- und Klemmenplänen
- Erstellen von Symboldateien für SPS-Software
- Erfassen von Texten für Listen und Handbücher
- Ändern und Nachführen von bestehenden Unterlagen

Nutzen Sie unser Fachwissen zu Ihrem Vorteil

Technisches Büro *Ulrich Bircher*
5000 Aarau *Tel. 064 24 60 06*

EWD

Infolge Beförderung des bisherigen Stelleninhabers suchen wir per sofort oder nach Vereinbarung eine/n

Elektro-Kontrolleur/in mit eidg. Fachausweis

Zur Hauptaufgabe gehören die Abnahme von Neuinstallationen nach der NIV und periodische Kontrollen, welche mit modernen Hilfsmitteln ausgeführt werden. Interessante Aufgaben ergeben sich in der Steuerungs- und Messtechnik sowie im EDV-Mutationswesen.

Im Rahmen der Kant. Personalverordnung bieten wir interessante Anstellungsbedingungen.
Bei Bedarf stellen wir auch eine 4 1/2 - Zimmerwohnung zur Verfügung.

Bitte senden Sie uns Ihre Unterlagen oder rufen Sie unseren Herrn J. Guler an. Er gibt Ihnen gerne weitere Auskunft und sichert Ihnen absolute Diskretion zu.

Elektrizitätswerk der Landschaft Davos
Talstrasse 35, 7270 Davos Platz - Tel. 081 / 44 13 44