

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Band:	75 (1984)
Heft:	19
Artikel:	Wirkleistungs- und Spannungsregelung mit einer Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
Autor:	Kühn, W. / Flückiger, D. / Güth, G.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-904482

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Wirkleistungs- und Spannungsregelung mit einer Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung

W. Kühn, D. Flückiger, G. Güth

Eine Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung dient hauptsächlich zur Leistungsübertragung. Wegen der speziellen Stromrichtereigenschaften lässt sie sich ausserdem zur Netzspannungsregelung verwenden.

In diesem Aufsatz werden anhand von Regelkennlinien und Wirkleistungs-Blindleistungsdiagrammen die Zusammenhänge zwischen Stromrichteraussteuerung und Netzgrössen diskutiert. Es wird eine Regeleinrichtung vorgestellt, die eine Regelung sowohl der Wirkleistung als auch der Netzspannung ermöglicht. Simulationsergebnisse zeigen den Einfluss und den Wert der Spannungsregelung bei normalen Schaltvorgängen sowie bei Fehlerfällen.

La transmission à courant continu à haute tension sert surtout au transport de puissance, mais, du fait des propriétés spéciales des redresseurs de courant, ce mode de transmission peut en outre servir à régler la tension du réseau. Au moyen de caractéristiques de réglage et de diagrammes des puissances actives et réactives, les relations entre la commande des redresseurs et les grandeurs du réseau sont traitées. Un équipement est présenté qui effectue le réglage de la puissance active ainsi que celui de la tension du réseau. Des résultats de simulation montrent l'influence et la valeur de la régulation de la tension dans le cas de processus de couplage normaux, ainsi que dans celui de défauts.

1. Einleitung

Eine Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) dient zur Übertragung elektrischer Energie. Sie kommt einerseits zum Einsatz bei grossen Übertragungsentfernnungen und stellt anderseits die einzige mögliche Lösung der Aufgabe dar, elektrische Energie zwischen zwei asynchronen Netzen auszutauschen. In beiden Fällen entscheiden wirtschaftliche Gründe über den Einsatz einer HGÜ. Bei der Fernübertragung sind die Leistungskosten, bei der Kurzkupplung die Nutzung unterschiedlicher Tagesganglinien in benachbarten Verbundsystemen und die damit verbundene Minimierungsmöglichkeit der Leistungsreserve bestimmend.

Ein Beispiel einer Fernübertragung ist die Anlage *Nelson River* in Kanada, bei der mit dem Bipole 2¹⁾ über eine Distanz von 900 km eine Leistung von 2000 MW übertragen wird, und für eine Kurzkupplung die Gleichstromkupplung *Dürnrohr* in Österreich, mit der 550 MW zwischen dem osteuropäischen und dem westeuropäischen Netz ausgetauscht werden [1; 2].

Die in heutigen Anlagen zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung installierten Stromrichter sind *netzgeführt* und nehmen induktive Blindleistung auf, abhängig vom Strom, vom Aussteuerwinkel und von der Kurzschlussspannung des Stromrichtertransformators. Obwohl dies seit den Anfängen der Stromrichtertechnik bekannt ist, hat man bei allen bisherigen Anlagen keinen Gebrauch von der Möglichkeit gemacht, durch Aussteuern des Gleichrichters und des Wechselrichters sowohl den Wirkleistungsfluss als auch den Blindleistungsfluss, bzw. die hiervon mitbe-

stimmte Netzspannung, auf gewünschte Werte zu regeln. Dies lag wohl zum einen daran, dass bei Fernübertragungen ohne besondere Massnahmen durch eine solche Regelung die Gleichspannung auf unwirtschaftliche Werte absinken würde, und zum anderen, dass bei einem relativ hohen Kurzschlussleistungsverhältnis der Anlagen (Kurzschlussleistung des Netzes dividiert durch Übertragungsleistung) eine Spannungsregelung durch die HGÜ überflüssig ist.

Bei geringem Kurzschlussleistungsverhältnis (etwa 2,5) ist die Regelung der Spannung, entweder über einen Phasenschieber oder wie oben erwähnt über die Kurzkupplung selbst, wichtig für die Stabilität und das dynamische Verhalten der Übertragung.

Dieser Aufsatz behandelt auf der Basis von Stromrichtergrundgleichungen und Blindleistungscharakteristiken von Stromrichtern und Netzen die inhärenten Möglichkeiten für eine gleichzeitige Wirk- und Blindleistungsregelung. Die Simulation einer konkreten Konfiguration zeigt das dynamische und das stationäre Verhalten einer mit solch kombinierter Regelung ausgestatteten Kurzkupplung.

2. Aufbau einer HGÜ-Anlage

Wie in Figur 1 dargestellt ist, besteht der Hauptschaltkreis einer HGÜ im wesentlichen aus

- den Stromrichterventilen, wobei jeweils 12 eine 12pulsige Stromrichtergruppe bilden,
- den Stromrichtertransformatoren,
- den Drehstromfilterkreisen,
- dem Gleichstromzwischenkreis mit einer Glättungsdrosselpule und mit einer Leitung bei Fernübertragung.

Um mit der in Figur 1 gezeigten Anordnung elektrische Energie austauschen zu können, ist eine den ge-

Adresse der Autoren

Dr. W. Kühn, D. Flückiger, Abt. AEH, und Dr. G. Güth,
Abt. IEE, Brown, Boveri & Cie. AG, 5406 Baden.

¹⁾ Zweite HGÜ-Ausbauweise

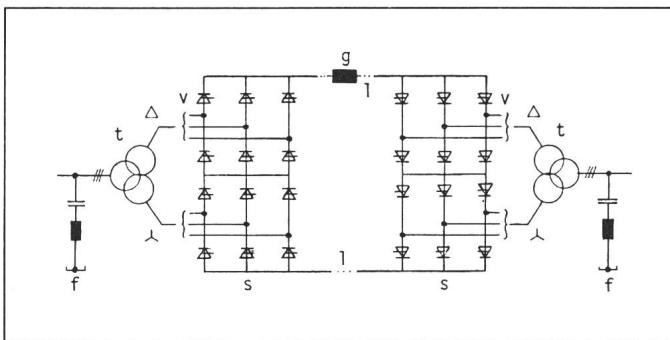


Fig. 1
Übersichtsschaltplan
für eine Hoch-
spannungs-Gleichstrom-
Übertragung
f Filterkreise
g Glättungsdrosselpule
l Leitung
s 12-Puls-Stromrichter-
gruppe
t Stromrichter-
transformator
v Ventile aus serie-
geschalteten Thyristoren

wünschten Leistungsfluss sicherstellende, entsprechende Aussteuerung beider Stromrichter notwendig. Dies übernimmt eine Regelung, die über die von Steuersätzen erzeugten Zündimpulse auf die Ventile wirkt.

Von den beiden Stromrichtergruppen arbeitet je nach Übertragungsrichtung jeweils eine im Gleichrichterbetrieb und die andere im Wechselrichterbetrieb. Die Stromrichtertransformatoren ermöglichen durch die ventilseitige Stern- und Dreieckschaltung eine 12pulsigkeit, d.h., es werden harmonische Ströme der Ordnung $n = 12 k \pm 1$, mit $k = 1, 2, 3, \dots$ erzeugt. Die Drehstromfilterkreise sorgen für eine weitgehende Entkopplung des Netzes von diesen harmonischen Strömen. Die Glättungsdrosselpule dient zur Begrenzung des Stromanstiegs bei

Kommutierungsfehlern im Wechselrichter und zur Entkopplung der asynchronen Netze, so dass Schwingungen zwischen den Netzen hinsichtlich Spannungsverzerrung und einer Resonanzanfachung unkritisch bleiben.

3. Betriebskennlinien einer HGÜ

Der im Gleichstromkreis fliessende Strom wird im Mittelwert bestimmt durch die Differenz der Gleichspannungen der beiden Stromrichter $U_{d,GR} - U_{d,WR}$ und durch den im Kreis befindlichen ohmschen Widerstand R . Es gilt die Beziehung

$$I_d = (U_{d,GR} - U_{d,WR}) / R$$

Bei einer Kurzkupplung streben R und damit ebenfalls die Spannungsdifferenz gegen Null, und zwar in der Art, dass I_d den gewünschten Wert einnimmt. Näherungsweise gilt $U_{d,GR} = U_{d,WR}$.

Die Höhe der jeweiligen Gleichspannungen wird bestimmt von der Aussteuerung des Stromrichters. Für die Gleichspannungen gilt (Bezeichnungen s. Fig. 2):

$$U_{d,GR} = U_{d,0,GR} (\cos \alpha - d_{xn} i_d) \quad (1)$$

$$U_{d,WR} = U_{d,0,WR} (\cos \gamma - d_{xn} i_d) \quad (2)$$

Zur Diskussion der Einflussgrößen α , γ und i_d sind diese Betriebsgleichungen in Kennlinienform (Fig. 2) dargestellt.

Das Diagramm zeigt, dass sich eine konstante Wirkleistung bei verschiedenen Stromrichterwinkeln fahren lässt, dass eine Vergrößerung des Löschwinkels von γ_1 auf γ_2 die Gleichspannung verkleinert, dass sich durch eine Regelung auf konstante Wirkleistung der Gleichstrom vergrößert und der Zündwinkel des Gleichrichters dabei

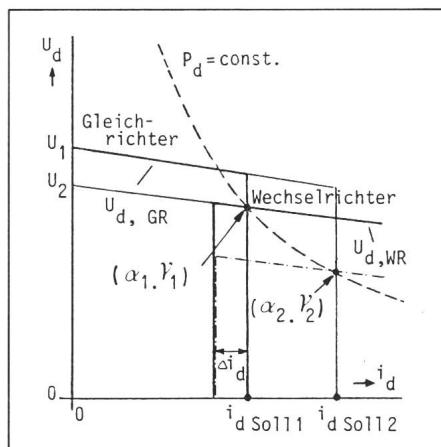


Fig. 2 Regelkennlinien einer HGÜ

GR	Gleichrichter
WR	Wechselrichter
U_d	Gleichspannung
$U_{d,0}$	ideale Leerlaufgleichspannung
U_1	$= U_{d,0,GR} \cdot \cos \alpha_0$
U_2	$= U_{d,0,WR} \cdot \cos \gamma_1$
α	Zündwinkel
γ	Löschwinkel: $180^\circ - \alpha - \mu$
μ	Überlappungswinkel
d_{xn}	Spannungsabfall bei Nenngleichstrom bezogen auf Leerlaufgleichspannung
i_d	relativer, auf Nennwert normierter Gleichstrom $I_d/I_{d,n}$
Δi_d	Marginalwert

ebenfalls grösser wird. Was bedeuten diese Zusammenhänge für die Netze, an denen die Stromrichter angeschlossen sind?

Um zu einer Aussage zu kommen, muss man sich den Blindleistungsbedarf des Stromrichters ansehen. Für die übertragene Wirkleistung lässt sich mit den Gleichstromgrössen (Index d) und den Wechselstromgrössen (Index a) angeben:

$$P_d = U_d I_d = U_{d,0} (\cos \alpha - d_{xn} i_d) I_d \quad (3)$$

$$P_d = P_a = \sqrt{3} U_a I_a \cos \varphi = S \cos \varphi \quad (4)$$

Mit

$$I_a = K_1 I_d; \quad K_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} = 0,78$$

$$U_a = K_2 U_{d,0}; \quad K_2 = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} = 0,74$$

erhält man die drei Beziehungen:

$$\cos \varphi = \cos \alpha - d_{xn} i_d \quad (5)$$

$$S = U_{d,0} I_d \sim I_d \quad (6)$$

$$U_d = U_{d,0} \cos \varphi \sim \cos \varphi \quad (7)$$

Diese lassen sich zur Konstruktion des Wirk-Blindleistungsdiagramms eines Stromrichters verwenden (Fig. 3). Das Diagramm ist parametrisiert mit dem Strom I_d bzw. der Scheinleistung S auf konzentrischen Kreisen und dem Phasenverschiebungswinkel φ bzw. der Gleichspannung U_d auf Radialstrahlen.

Vergrössert man den Stromrichterwinkel bei konstanter Wirkleistung, so

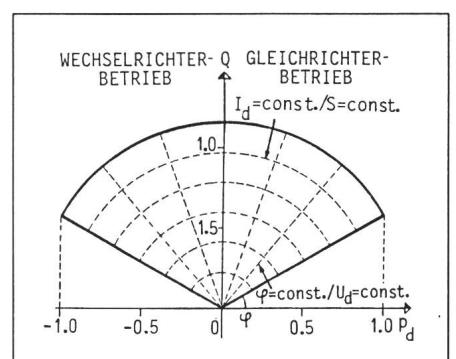


Fig. 3 Wirk-Blindleistungsdiagramm eines Stromrichters

vergrössert sich auch die aufgenommene Blindleistung. Dies gilt sowohl für den Gleich- als auch für den Wechselrichterbetrieb. Das bedeutet, dass sich innerhalb der durch die Bemessung festgelegten Grenzwerte der Anlage die Blindleistung entkoppelt von der Wirkleistung variieren lässt. Diese Eigenschaft einer HGÜ bildet die Grundlage für die im nächsten Abschnitt behandelte gleichzeitige Wirkleistungs- und Spannungsregelung.

4. Betriebsverhalten einer HGÜ

Eine Spannungsregelung ist insbesondere bei «weichem» Netz, wie es z.B. bei einer Einspeisung über eine lange Drehstromleitung vorliegt, vorteilhaft. Mit der Wirkleistung ändert sich nämlich die Blindleistungsaufnahme des Stromrichters und gemäss den Leitungsgleichungen der Blindleistungsaustausch mit der Leitung. Bei Verkleinerung der Übertragungsleistung gibt es z.B. einen Blindleistungsüberschuss und damit einen Anstieg der Spannung. Durch diesen Spannungsanstieg wird die Blindleistungslieferung durch die Leitung soweit verringert, bis stationäres Gleichgewicht in der Blindleistungsbilanz vorliegt. Bei weichen Netzen ist der Spannungsanstieg grösser als bei relativ steifen Netzen. Die in Abschnitt 2 erwähnten Filterkreise stellen als Blindleistungsquellen weitere, die Spannungsabweichung vergrössernde Elemente dar. Es gibt nun eine Grenze für die Weichheit des Netzes und die Blindleistungslieferung durch Kondensatoren, bei deren Überschreitung keine Spannungsstabilität mehr erreicht werden kann. Diese Grenze liegt bei einem effektiven Kurzschlussleistungsverhältnis von etwa 1,5...2,5. Die effektive Kurzschlussleistung ist die um die Filterkreisblindleistung reduzierte Kurzschlussleistung des Netzes.

Eine mathematische Formulierung für die Stabilitätsgrenze lässt sich für den betrachteten Netzknopen unter Verwendung von Differentialquotienten für das Blindleistungs-Spannungsverhalten der einzelnen Betriebsmittel und des Netzes angeben. Für Stabilität muss gelten

$$\partial Q_i / \partial U > 0$$

wobei Q_i die individuelle aufgenommene induktive Blindleistung ist [3; 4].

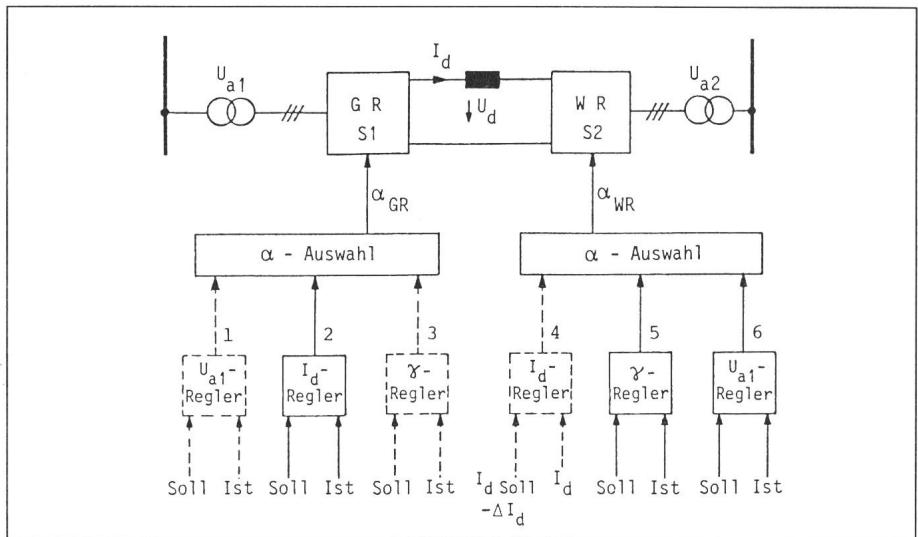


Fig. 4 Regeleinrichtung einer HGÜ mit Wirkleistungs- und Spannungsregelung sowie Löschwinkelbegrenzung

- 1 Wechselspannungsregler (hier ausser Eingriff)
- 2 Gleichstromregler
- 3 γ-Regler (hier ausser Eingriff)
- 4 Gleichstromregler (hier ausser Eingriff)
- 5 γ-Regler
- 6 Wechselspannungsregler

- S1 Stromrichter 1 (hier als Gleichrichter)
- S2 Stromrichter 2 (hier als Wechselrichter)
- α Zündwinkel
- GR Gleichrichter
- WR Wechselrichter

5. Regeleinrichtung und Regelverhalten

5.1 Spannungsregelung

Bei bisherigen Anlagen zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung wird der Wechselrichter mit einem konstanten Löschwinkel gefahren, was eine nahezu konstante Gleichspannung bedeutet. Während dies bei Fernübertragungen im Interesse möglichst geringer Leitungsverluste sinnvoll erscheint, besteht für eine Kurzkupplung keine unbedingte Notwendigkeit für eine maximale Übertragungsgleichspannung. Mit einer Ventiltechnologie, die einen Dauerbetrieb bei erhöhtem Aussteuerwinkel ermöglicht, kann der in Abschnitt 3 behandelte Effekt der Blindleistungsänderung durch Stromrichteraussteuerung für eine Spannungsregelung benutzt werden.

Führt man nämlich die Spannung U_a auf einen PI-Regler (Fig. 4), wobei dieser auf den Steuersatz des Wechselrichters wirkt, dann wird der Löschwinkel γ entsprechend der Regelabweichung einen Wert annehmen, der die Blindleistungsaufnahme des Stromrichters so einstellt, dass wieder die ursprüngliche Spannung vorliegt. Da die Stromrichterwinkel von Gleichrichter und Wechselrichter über die Regelung miteinander gekoppelt sind, lässt sich diese Anordnung mit dem Wechselrichter als Stellglied auch

zur Regelung der Spannung auf der Gleichrichterseite verwenden (über Block 6 in Fig. 4). Der Regler 4 wird aktiv, wenn entweder der Wechselrichter infolge zu geringer Spannung U_{a1} den Strom regelt oder wenn der Stromrichter S2 als Gleichrichter arbeitet (bei Energierichtungsumkehr). Dabei wird der Stromsollwert um den Marginalwert ΔI_d abgesenkt. Die Regler 1 und 3 werden aktiv, wenn der Stromrichter S1 als Wechselrichter arbeitet.

Vorbedingung für eine solche Spannungsregelung ist, dass die ungeregelte Netzseite der HGÜ eine relativ hohe Kurzschlussleistung besitzt, so dass deren Spannung weitgehend unbeeinflusst von Blindleistungsänderungen der HGÜ bleibt.

Die gegenwärtig von der BBC in den USA erstellte Kurzkupplung *Blackwater* ist mit solch einer Spannungsregelung ausgestattet [5]. Diese Anlage wird einen Energieaustausch zwischen den Netzen der Staaten New Mexico und Texas ermöglichen. Eine Spannungsregelung ist wegen der dort vorhandenen langen Drehstromleitung notwendig und mit der HGÜ im Vergleich zu dem alternativ einsetzbaren statischen Phasenschieber kostengünstig zu realisieren.

Die Figur 5 zeigt die überlagerten Wirk-Blindleistungsdiagramme für ein Netz und den daran angeschlossenen Stromrichter. Um auf konstante Netzspannung zu fahren, muss bei

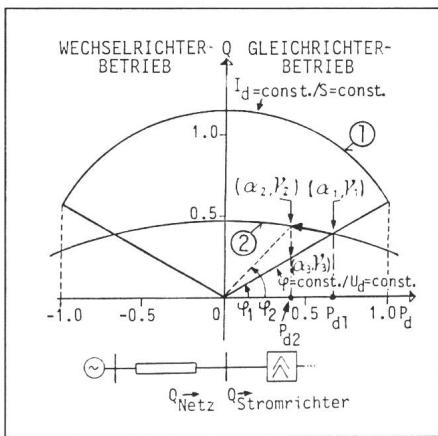


Fig. 5 Überlagerte Leistungsdiagramme für Stromrichter und Netz

- 1 $Q_{SR} = f(P_d)$ bei $S = \text{const.}$
- 2 $Q_N = f(P_d)$ bei $U_a = \text{const.}$
- SR Stromrichter
- N Netz

Verkleinerung der Wirkleistung von z.B. P_{d1} auf P_{d2} der Stromrichterwinkel entsprechend von α_1 bzw. γ_1 auf α_2 bzw. γ_2 geändert werden. Der neue Betriebspunkt ist jedoch infolge des erhöhten Aussteuerungswinkels und der dadurch bedingten Beschaltungsverluste nicht verlustminimal. Ein Winkel α_3 bzw. γ_3 ist daher anzustreben. Wenn es gelingt, die durch eine Zurücknahme des Winkels von α_2 auf α_3 bzw. γ_2 auf γ_3 erfolgende Verkleinerung der Blindleistungsaufnahme des Stromrichters zu kompensieren, so wäre eine Verlustminimierung erreicht.

Tatsächlich gibt es bei einer entsprechend feinen Unterteilung der Filterkreise in einzelne schaltbare Kreise eine solche Möglichkeit. Abzuwagen ist jedoch der für die Realisierung zu treibende Aufwand, die Häufigkeit, mit der eine solche Verlustminimierung im Betrieb auftreten würde und der dabei entstehende Nutzen.

5.2 Begrenzung von Überspannungen

Der Wert einer Netzspannungsregelung durch den Stromrichter liegt neben der Gewährleistung eines kontinuierlich optimalen Spannungsprofils im Netz hauptsächlich in ihrer Wirkung

hinsichtlich der Begrenzung von dynamischen Überspannungen. Dynamische Überspannungen treten z.B. nach vorübergehender Leistungsunterbrechung bei wiederkehrender Spannung, bei Schalthandlungen im Netz oder bei schnellen Leistungsänderungen in der Kurzkupplung selbst auf. Diese zu begrenzen, zahlt sich im Hinblick auf die Ventilkosten aus. Denn die Bemessung von Stromrichterventilen, d.h. die Anzahl der in Reihe zu schaltenden Thyristoren, ist abhängig von der höchsten netzfrequenten Spannung.

Die Oszillogramme in Figur 6 machen die Wirkung der Spannungsregelung beim Schalten einer Kondensatorbank mit 0,175facher Nennübertragungsleistung deutlich. Während bei ungeregelter Netzspannung die Spannungserhöhung stationär etwa 6% beträgt, wird bei geregelter Netzspannung nach einer kurzzeitigen, etwa zwei Perioden dauernden Überhöhung wieder der Ausgangswert eingenommen. Die Figur 7 vergleicht die Wirkung einer HGÜ, die mit einem statischen Phasenschieber zusammen ar-

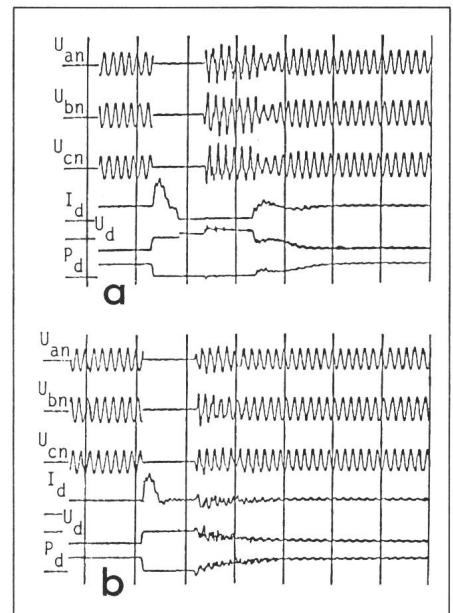


Fig. 7 Transientes Verhalten bei wiederkehrender Spannung

- nach dreiphasigem Kurzschluss am Wechselrichterausgang
- a mit statischem Blindleistungskompensator
Die HGÜ wird durch die Regelung blockiert
 - b mit spannungsgeregelter HGÜ

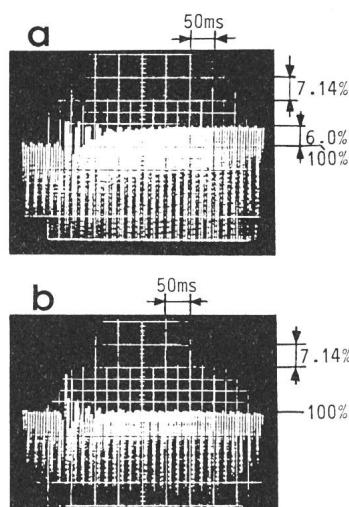


Fig. 6 Regelverhalten bei Blindleistungssprung
Schrittantwort der Netzspannung beim Schalten einer Kondensatorbank von 0,175facher Nennübertragungsleistung
a ohne Spannungsregler
b mit Spannungsregler

beitet, mit derjenigen einer spannungsgeregelten HGÜ für den Fehlerfall eines dreiphasigen Kurzschlusses mit anschliessend wiederkehrender Spannung. Auch hier zeigt sich die positive Wirkung der Spannungsregelung: dynamische Überspannungen werden begrenzt.

Literatur

- [1] C.V. Thio: Nelson River HVdc bipole-two. Part I: System aspects. IEEE Trans. PAS 98(1979)1, p. 165...173.
- [2] H. Kölsch and G. Moravc: HVDC back-to-back tie to connect eastern and western Europe. Seminar of the Economic Commission for Europe—Committee on Electric Power, London, 1981.
- [3] K.-W. Kanngiesser and W. Kühn: Tapping of an HVDC point-to-point transmission as feed-in to a relatively weak AC system. CIGRE Study-Committee 14: DC Links, Meeting, Rio de Janeiro, 1981.
- [4] W. Kühn a.o.: Design and control strategies of HVDC-schemes for AC voltage control and stabilization. Proceedings of the International Conference on DC Power Transmission. Montreal, June 4...8, 1984.
- [5] H. Stemmle, H. Güth and P. Dähler: A new high-speed controller with simple program language for the control of HVDC and SVS. Proceeding of the International Conference on DC Power Transmission. CIGRE Study-Committee 14: DC Links, Meeting, Rio de Janeiro, 1981.