

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: 91 (2000)

Heft: 25

Artikel: Impendanzkompensation mit beschalteten Stromwandlern

Autor: Brakelmann, Heinrich / Rasquin, Werner

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-855645>

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: 15.01.2026

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

Impedanzkompensation mit beschalteten Stromwandlern

Bei der Drehstrom-Übertragung von elektrischer Energie beeinflussen die Impedanzen des Übertragungssystems die sich ausbildenden Längsspannungen. Um keine grossen Abweichungen von der Nennspannung zu erhalten, dürfen die Längsspannungen bestimmte Grenzen nicht übersteigen, was die Übertragungslängen begrenzt, wenn keine Zusatzmassnahmen getroffen werden. So geht man heute davon aus, dass die Übertragungslängen von unkompensierten Drehstromkabeln auf Grund ihres Übertragungsverhaltens auf etwa 30–50 km begrenzt sind. Mit beschalteten Stromwandlern kann das Übertragungsverhalten von Drehstromkabeln und Freileitungen je nach Lastsituation beeinflusst werden.

Sekundärseitig beschaltete Stromwandler weisen den Vorteil auf, dass die Kompensationsschaltung nicht dem hohen Leiterpotential des Übertragungssystems angepasst sein muss. Damit werden keine Massnahmen wie der Einsatz eines Höchstspannungstransformators mit entsprechenden wirtschaftlichen und betrieblichen Nachteilen oder die isolierte Aufstellung von Transformator und Kondensatoren erforderlich [1].

In Bild 1a ist als Prinzipbild die Ader eines Drehstromkabels dargestellt, die durch einen Umbautransformator geführt ist. Dieser Umbautransformator weist nur eine Wicklung auf, die mit einer Kapazität C beschaltet sein soll. Aus Bild 1b wird das Ersatzschaltbild des Kabels ersichtlich, unter Vernachlässigung der Leitungsquerschnitte und des ohmschen Leiterwiderstandes: der Transportstrom I durchfliesst zunächst die Induktivität L_K und baut damit ein magnetisches Feld einerseits zwischen Leiter und Metallmantel (Induktivität L_{Ki}) und andererseits zwischen dem Metallmantel und der Kabelumgebung (Induktivität L_{Ka}) auf. In Reihe dazu liegt die Hauptinduktivität L_H des Wandlers, die ein Mass für das im Transformator Kern herrschende Magnetfeld ist.

Adresse der Autoren

Prof. Dr.-Ing. Heinrich Brakelmann und
Prof. Dr.-Ing. Werner Rasquin, Elektrische
Energieübertragung, Gerhard-Mercator-
Universität, D-47048 Duisburg

Bei der Schaltung nach Bild 1b fliesst im Sekundärkreis ein Strom I_2 , der auf die Primärseite umgerechnet die Grösse I_2^* besitzt. Dieser Strom baut ein Magnetfeld über dieselbe Induktivität L_H auf wie der Leiterstrom. Der Strom I_2^* muss ausserdem den (hier vernachlässigten) ohmschen Widerstand R_2^* und die (hier vernachlässigte) Streuinduktivität $L_{2\sigma}^*$ des Sekundärkreises sowie die Kapazität C^* überwinden. Für die umgerechneten Grössen von Bild 1b gilt:

$$\begin{aligned} I_2^* &= I_2 / \bar{u} \\ C^* &= C / \bar{u}^2 = w_2^2 C \\ R_2^* &= R_2 / \bar{u}^2 = R_2 / w_2^2 \\ L_{2\sigma}^* &= L_{2\sigma} / \bar{u}^2 = L_{2\sigma} / w_2^2 \end{aligned}$$

mit $\bar{u} = w_1 / w_2$, dem Windungszahlverhältnis (hier: $w_1 = 1$; $\bar{u} = 1 / w_2$).

Nach Bild 1b muss der Transportstrom insgesamt folgende Längsimpedanz überwinden:

$$Z_1 = j\omega L_K + j \frac{\omega L_H}{1 - \omega^2 L_H C^*} \quad (1)$$

Gleichung (1) lässt erkennen, dass Resonanzerscheinungen auftreten können. So ist die für eine Parallelresonanz des Transformators erforderliche Kapazität

$$C_p^* = \frac{1}{\omega^2 L_H} \quad (2)$$

Definiert man das Induktivitätsverhältnis zwischen Transformator-Hauptinduktivität und Kabel-Induktivität zu

$$h = L_H / L_K \quad (3)$$

und bildet man das Impedanzverhältnis p zwischen der resultierenden Längsimpedanz nach Gleichung (1) und der Kabel-längsimpedanz $Z_K = j\omega L_K$, so erhält man:

$$\frac{Z_1}{Z_K} = p = \frac{1 + h - C^* / C_p^*}{1 - C^* / C_p^*} \quad (4)$$

In Bild 2 ist dieses Impedanzverhältnis p als Funktion der umgerechneten, auf die Parallelresonanz-Kapazität bezogenen Kompensations-Kapazität C^* dargestellt. Deutlich wird, dass bei vollständiger Kompensation die Längsimpedanz der Übertragungseinrichtung zum Verschwinden gebracht werden kann ($p = 0$), wenn sie wie folgt dimensioniert wird:

$$C^* = C_0^* = \frac{L_K + L_H}{\omega^2 L_K L_H} \quad (5)$$

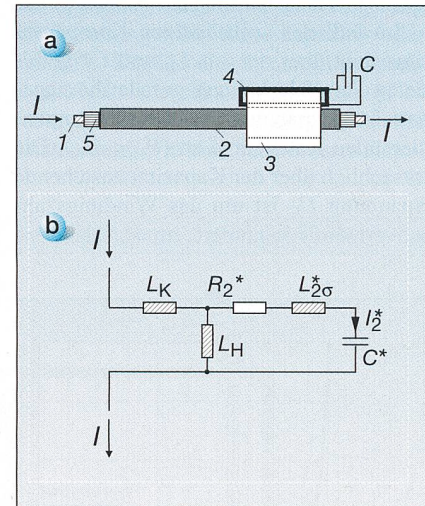


Bild 1 Kabelader mit Umbauwandler und sekundärseitiger Beschaltung

- a) Aufbau: 1: Kabelleiter, 2: Kabelmantel, 3: Wandlerkern, 4: Wandlerwicklung, 5: elektrische Isolierung
b) Ersatzschaltbild für den Leitungs-Längszweig

Demnach wird Reihenresonanz erreicht, wenn die Kapazität C^* auf die Parallelschaltung aus der Kabelinduktivität L_K und der Transformator-Hauptinduktivität L_H abgestimmt wird. Ausserdem ergibt der Vergleich der Formeln (2) und (5) ein Verhältnis der für Reihenresonanz

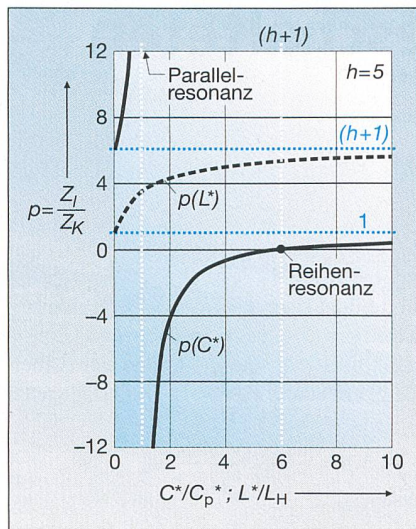


Bild 2 Auf die Längsreaktanz bezogene resultierende Längsimpedanz der Übertragungseinrichtung bei Kompensation mit der Kapazität C^* bzw. mit der Induktivität L^* (gestrichelt) für $h = L_H/L_K = 5$. C_p^* ist die auf die Primärseite umgerechnete, für Parallelresonanz erforderliche Kapazität.

bzw. für Parallelresonanz erforderlichen Kapazitäten von

$$\frac{C_0^*}{C_p^*} = h + 1 \quad (6)$$

Im Fall der vollständigen Kompensation steht über der aus L_H und C^* gebildeten Parallelschaltung gerade die negative Längsspannung U_K der zu kompensierenden Kabellänge an ($U_H = -U_K$). Die tatsächlich über der Kapazität anstehende Spannung U_C ist um das Windungszahlenverhältnis verändert, im vorliegenden

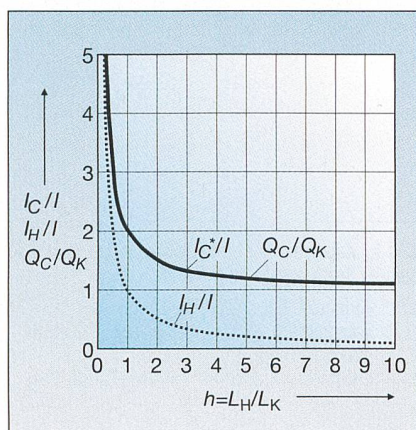


Bild 3 Einfluss des Induktivitätsverhältnisses

Einfluss von $h = L_H/L_K$ bei vollständiger Kompensation ($p = 0$) auf den (umgerechneten) kapazitiven Strom I_C^* (obere Kurve) und den Magnetisierungsstrom I_H (untere Kurve), beide bezogen auf den Laststrom I und auf die kapazitive Blindleistung Q_C , bezogen auf die zu kompensierende Leitungsblindleistung Q_K (ebenfalls obere Kurve)

Beispiel mit $w_1 = 1$ demnach um die Sekundärwindungszahl vergrößert:

$$U_C = U_H / \dot{u} = w_2 U_H \quad (7)$$

während der Strom I_C über die Kapazität im vorliegenden Beispiel um die Sekundärwindungszahl verkleinert ist:

$$I_C = I_C^* / w_2 \quad (8)$$

Auch eine für Schwachlastzeiten gewünschte Vergrößerung der Längsimpedanz ($p > 1$) kann nach Bild 2 mit Hilfe der Kapazität C^* erreicht werden, allerdings nur für Impedanzverhältnisse $p > (h+1)$. Bei Analyse der sich ergebenden Lücke des Impedanzverhältnisses zwischen $p = 1$ und $p = (h+1)$ ergeben sich mit Gleichung (4) negative Kapazitäten, d.h. statt mit einer Kapazität muss die sekundäre Transformatorwicklung nun mit einer Induktivität beschaltet werden. Man erhält aus Gleichung (4) das Impedanzverhältnis zu

$$p = \frac{(L^* / L_H) \cdot (1 + h) + 1}{1 + L^* / L_H} \quad (9)$$

Diese Abhängigkeit des Impedanzverhältnisses von der transformierten, auf die Hauptinduktivität bezogenen Induktivität L_2 ist ebenfalls in Bild 2 (gestrichelt) eingetragen. Demnach kann bei geeigneter Wahl der Kapazität C^* bzw. der Induktivität L^* grundsätzlich jede gewünschte induktive oder kapazitive Längsreaktanz der Übertragungseinrichtung eingestellt werden.

Aufwand für die Reihenkompensation im Netz

Zur Abschätzung des Aufwands für die Netzkompensation zeigt Bild 3 den umgerechneten, auf den Laststrom I bezogenen Strom I_C^* und den auf den Laststrom I bezogenen Magnetisierungsstrom I_H für eine vollständige Kompensation ($p = 0$). Hierfür gilt:

$$I_C^* = \left(1 + \frac{L_K}{L_H}\right) I \quad (10)$$

$$I_H = -\frac{L_K}{L_H} I \quad (11)$$

Die sich ergebende kapazitive Blindleistung Q_C ist ebenfalls in Bild 3 dargestellt, und zwar bezogen auf die vom Übertragungssystem erzeugte induktive Blindleistung Q_K . Es gilt:

$$Q_C = Q_K \left(1 + \frac{L_K}{L_H}\right) \quad (12)$$

mit $Q_K = \omega L_K I^2$

Deutlich wird, dass beide Ströme nach den Formeln (10) und (11) bei kleiner Transformator-Hauptinduktivität L_H sehr gross werden. Entsprechendes gilt für die kapazitive Blindleistung. Soll diese nicht wesentlich grösser sein als die zu kompensierende Blindleistung und soll gleichzeitig der Magnetisierungsstrom I_H klein gehalten werden, so empfiehlt sich demnach ein Verhältnis von $L_H \geq 5-10 L_K$. Die Wahl einer entsprechend grossen Hauptinduktivität führt nach Gleichung (5) zu einem wünschenswert grossen Verhältnis der für Reihenresonanz bzw. für Parallelresonanz erforderlichen Kapazitäten.

In Tabelle I sind einige Kenndaten eines 400-kV-Einleiter-Ölkabels, eines 110-kV-Einleiter-VPE-Kabels und einer gasisolierten 400-kV-Leitung (GIL) zusammengefasst. Geht man davon aus, dass eine Systemlänge von 50 km mit einer einzigen Kompensationsanlage beeinflusst werden soll, so muss für alle betrachteten Fälle mit $L_K \approx 25-35$ mH und der oben genannten Forderung für die primärseitige Hauptinduktivität diese zu etwa

$$L_H \approx 125-350 \text{ mH}$$

gewählt werden.

Bild 4 zeigt gemessene Magnetisierungskennlinien von kornorientierten Blechen, die zu zylinderförmigen Eisenkernen (Ringbandkern) gewickelt wurden. Bei einer Beschränkung der magnetischen Feldstärke auf etwa $H \leq 200$ A/m lassen sich demnach relative Permeabilitäten μ_r von mehr als 6000 erreichen. Diese Beschränkung soll bei den folgenden Betrachtungen eingehalten werden, da in diesem Bereich die Magnetisierungskennlinien noch weitgehend linear verlaufen und somit durch den Kompensationstransformator noch keine störenden Oberschwingungen erzeugt wer-

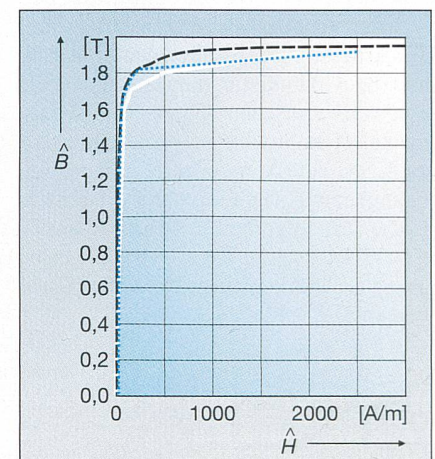


Bild 4 An drei kornorientierten Eisenblechen gemessene Magnetisierungskennlinien

Kenngrösse	Einheit	400-kV-Einleiter-Ölkabel	110-kV-Einleiter-VPE-Kabel	400-kV-GIL einadrig
Kupfer-Leiterquerschnitt	mm ²	1600	1000	
Leiterdurchmesser	mm	49	38	200
Durchmesser über Isolierung	mm	101	78	550
Achsabstand	m	0,4	0,4	1,2
Permittivitätszahl ϵ_r	–	3,6	2,3	1,0
Induktivitätsbelag L_K'	μH/m	0,61	0,66	0,50
Kapazitätsbelag C_K'	nF/m	0,28	0,18	0,099
Wellenwiderstand Z_W	Ω	46,7	60,6	70,8
Natürliche Leistung S_N	MVA	3092	200	2260
Therm. Grenzleistung S_{max} bei natürlicher Kühlung	MVA	400–600	150–200	600–800
Therm. Grenzleistung S_{max} bei Zwangskühlung	MVA	800–1200	250–400	1200–4000

Tabelle 1 Kenngrössen zweier Hochspannungskabel und einer gasisolierten 400-kV-Leitung

den. Den weiteren Berechnungen wird unter dieser Voraussetzung eine relative Permeabilität von $\mu_r = 5000$ zugrunde gelegt.

Als Beispiel sei ein Drehstromwandler betrachtet, dessen Dreischenkel-Eisenkern einen Querschnitt von $A_{FE} = 1 \text{ m}^2$ aufweist. Bei Berücksichtigung einer Windungszahl $w_1 = 20$ des Kabels wird bei den erforderlichen Biegeradien eine mittlere Eisenlänge (je Phase) von etwa $l_{Fe} = 9 \text{ m}$ erforderlich. Für eine Primärwindungszahl von $w_1 = 1$ und eine relative Permeabilität von $\mu_r = 5000$ würde sich eine Hauptinduktivität von

$$L_{H1} = 0,7 \text{ mH}$$

ergeben. Eine Primärwindungszahl von $w_1 = 20$ hebt die Hauptinduktivität auf eine zufrieden stellende Grösse von $L_H = 280 \text{ mH}$ an, jedoch beträgt der höchstzulässige Magnetisierungsstrom nur

$$I_{H, \max} = H_{\max} \cdot l_{FE} / w_1 = 1800 \text{ A} / w_1 = 90,0 \text{ A} \quad (13)$$

was nach den oben abgeleiteten Forderungen noch zu gering ist (Bild 4).

Führt man in den Eisenweg einen Luftspalt der Länge $l_0 = 1 \text{ mm}$ ein, so erhöht sich der magnetische Widerstand des Kreises auf

$$R_m = \frac{l_{Fe}}{\mu_0 \mu_r A_{Fe}} \left(1 + \frac{\mu_r \cdot l_0}{l_{Fe}} \right) \quad (14)$$

was einer effektiven relativen Permeabilität von

$$\mu_{eff} = \mu_r \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\mu_r \cdot l_0}{l_{Fe}} \right)} = 3214 \quad (15)$$

entspricht. Hierdurch verringert sich die Hauptinduktivität für $w_1 = 20$ auf $L_H =$

180 mH, wobei sich für den höchstzulässigen Magnetisierungsstrom

$$I_{H, \max} = H_{\max} [l_{Fe} + \mu_r l_0] = 200 \text{ A} (9,0 + 3,2) \text{ m} / w_1 = 122,1 \text{ A}$$

ergibt.

Nach den vorangegangenen Abschätzungen werden somit akzeptable Grössen erreicht. Demnach kann mit der beschriebenen Konstruktion die vollständige Kompensation einer 50–100 km langen Höchstspannungs-Übertragungseinrichtung verwirklicht werden.

Für eine Leitungslänge von $l = 50 \text{ km}$, eine zu kompensierende Leitungsinduktivität von etwa $L_K \approx 25\text{--}35 \text{ mH}$ und eine

erforderliche Transformator-Hauptinduktivität von etwa $L_H \approx 125\text{--}350 \text{ mH}$ beträgt nach Bild 3 die Kompensationsblindleistung je Phase ($p=0$)

$$Q_C \approx 1,1\text{--}1,2 \omega L_K I^2$$

was bei einem angenommenen Laststrom von $I = 1000 \text{ A}$ bedeutet:

$$Q_C \approx 8,6\text{--}13,2 \text{ MVA (je Phase).}$$

Die erforderliche, umgerechnete Kapazität ist nach Gleichung (5):

$$C^* = 318\text{--}486 \text{ μF.}$$

Werden die Windungszahlen z.B. zu $w_1 = 20$ und $w_2 = 40$ gewählt, so folgt:

$$C = 79,6\text{--}121,5 \text{ μF.}$$

Die an dieser Kapazität anliegende Spannung ist:

$$U_C \approx w_2 / w_1 \omega L_K I = 15,7\text{--}22,0 \text{ kV.}$$

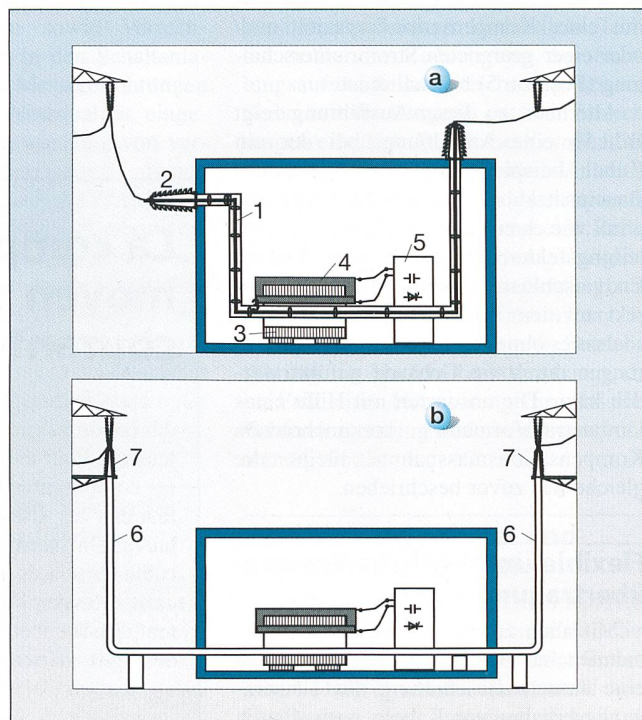
Es können also Mittelspannungskondensatoren zur Kompensation eingesetzt werden.

Verringerung der Kompensationskapazität durch Stromrichter

Zur Verringerung der erforderlichen Kompensationskapazität C können Leistungshalbleiter eingesetzt werden. Durch solche geregelten Halbleiterschalter (VSI = Voltage Sourced Inverters) kann erreicht werden, dass der Stromfluss verzögert einsetzt, d.h. gegenüber der treibenden Spannung nacheilt. Je nach Regelung der Schaltung wirkt diese kapazitiv oder induktiv. Enthält die Stromrichterschaltung zusätzlich einen Transformator, so wirkt die Anordnung bei entsprechender Ansteuerung wie eine vergrösserte Kapazität.

Bild 5 Kompensationsanordnung für eine Freileitung

- a) Gebäudedurchführung mit einem gasisolierten Rohrleiter (GIL)
- b) Verwendung eines Baueinsatzkabels
- 1 gasisierte Leitung (GIL)
- 2 GIL-Endverschluss
- 3 Umbautransformator
- 4 Sekundärwicklung
- 5 Kompensationsschaltung
- 6 Baueinsatzkabel
- 7 Endverschluss des Baueinsatzkabels



azität. Eine ausführliche Beschreibung einer solchen Schaltung wird in [2] gegeben.

Diese Massnahme kann auf die bisher diskutierten Anordnungen angewendet werden. In den entsprechenden Ersatzschaltbildern erscheint dann die entsprechend vergrösserte Kompensationskapazität C^* , so dass der Aufwand für die kapazitive Kompensation verringert wird.

Ausführungsform der Kompensation bei Freileitungen

Das bisher beschriebene Prinzip ist bei Freileitungen zunächst einmal nicht anwendbar, da – anders als bei Kabeln – deren elektrische Felder weit ausgedehnt sind, so dass keine Umbauwandler eingesetzt werden können.

In Bild 5a ist ein Aufbau wiedergegeben, der eine mögliche Lösung dieses Problems darstellt. Die ankommende Freileitung wird zu einem Gebäude geführt, in dem sich eine gasisolierte Leitung (GIL) befindet, die mit zwei einfachen SF_6 -Endverschlüssen (Position 2) nach aussen geführt wird. Diese z.B. mit SF_6 oder einem SF_6 -Stickstoff-Gemisch isolierte Leitung sei für die Betriebsspannung der Freileitung ausgelegt und nach den üblichen Gesichtspunkten der Innenraumschaltanlagen gebaut.

Mit einer solchen Anordnung sind nun im Bereich der GIL alle Massnahmen möglich, die zuvor für Hochspannungskabel beschrieben wurden. Insbesondere kann nach Bild 5a ein Umbautransformator (Position 3) eingesetzt werden, dessen Sekundärwicklung (Position 4) mit einer Kompensationskapazität und/oder einer geeigneten Stromrichterschaltung (Position 5) beschaltet ist.

Alternativ zu dieser Ausführung zeigt Bild 5b eine Anordnung, bei der ein Kabel, beispielsweise ein sogenanntes Baueinsatzkabel (Position 6), verwendet wird, wie es zur Überbrückung von Freileitungsfeldern eingesetzt wird. Dessen Endverschlüsse (Position 7) werden direkt auf dem Freileitungsmast montiert, so dass es ohne Hochspannungsdurchführungen durch ein Gebäude geführt werden kann. Die ansonsten mit Hilfe eines Umbautransformators vorzunehmende Kompensationsmassnahme bleibt die gleiche wie zuvor beschrieben.

Flexible unterirdische Energieübertragung

Mit allen zuvor beschriebenen Massnahmen besteht die Möglichkeit, durch eine äussere Beschaltung das Übertragungsverhalten von Kabeln, gasisolierten

Leitungen und sogar Freileitungen zu beeinflussen, ohne auf dem hohen Aussenleiterpotential der Übertragungseinrichtung arbeiten zu müssen.

Wird die verwendete Kompensationseinrichtung in weiten Grenzen variabel gestaltet, so kann für die Längsreaktanz des Übertragungsmittels praktisch jede gewünschte Grösse angesteuert und dieses dadurch mit seiner natürlichen Leistung betrieben werden. So ergibt sich längs des Übertragungsmittels keine Änderung von Strom und Spannung, und der Wirkungsgrad der Übertragung wird optimal.

Ein solcher je nach Lastsituation geregelter Kompensationsbetrieb einer Übertragungsleitung ist im Rahmen des Projekts FACTS (Flexible AC Transmission Systems) für Freileitungen bereits Gegenstand intensiver Untersuchungen und umfasst die Regelung der Übertragungsspannung, des Lastflusses und der Leitungsimpedanz. Allerdings besteht bei den Freileitungen bisher der Nachteil, dass man die auf Hochspannung liegenden Leiter mit einem Hochspannungstransformator beschalten muss, was einen erheblichen Aufwand bedeutet.

Bei Kabeln und GIL hat man den Vorteil, dass das elektrische Feld auf die elektrische Isolierung begrenzt ist. Für Freileitungen lässt sich diese Begrenzung mit der im vorhergehenden Abschnitt ge-

zeigten Anordnung bereichsweise ebenfalls erreichen. Damit kann mit den zuvor beschriebenen Massnahmen, d.h. allein durch Eingriff in das äussere Magnetfeld des Übertragungsmittels, die gewünschte Beeinflussung der Übertragungseigenschaften vorgenommen werden.

Ausblick

Die vorgeschlagenen Massnahmen erlauben erhebliche Beeinflussungen der Übertragungseigenschaften von Kabeln und eröffnen damit neue Möglichkeiten für die Drehstromübertragung. Lastabhängige Kompensations- und Anpassmassnahmen mit Hilfe von Stromrichterschaltungen, wie sie für Freileitungsübertragungen im Zusammenhang mit FACTS zurzeit weltweit im Brennpunkt der Netzentwicklungen stehen, können für Drehstromkabel auf einfachere Weise realisiert werden, da anstelle von Höchstspannungstransformatoren nur Umbautransformatoren für Mittelspannung eingesetzt werden müssen.

Literatur

[1] H. Brakelmann, W. Rasquin: Schaltungsmassnahmen für Drehstromübertragungseinrichtungen. Patentanmeldung v. 10.8.1999.

[2] B. Kastenny, C. Hatziaodoniu, A. Funk: VSI-Based Series Compensation Scheme for Transmission Lines. ETEP Vol. 9 No. 2, March/April 1999, pp. 101-104.

La compensation d'impédance au moyen de transformateurs de courant commutés

Dans le transport d'énergie électrique sous forme de courant triphasé, les impédances du système de transmission influencent les composantes longitudinales de tension. Pour éviter des écarts trop importants par rapport à la tension nominale, les composantes longitudinales ne doivent pas dépasser certaines limites, ce qui restreint les distances de transmission s'il n'est pas pris de mesures supplémentaires. On part aujourd'hui de l'hypothèse que les distances de transmission de câbles triphasés non compensés sont limitées à environ 30-50 km du fait de leur comportement de transmission. Des convertisseurs de courant commutés permettent d'influencer le comportement de transmission des câbles à courant triphasé et des lignes aériennes en fonction de la situation de charge.