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: 92 (2001)

Heft: 15

Artikel: Kompensation von Hochspannungskabeln durch induktive Einkopplung

Autor: Brakelmann, Heinrich / Rasquin, Werner

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-855735

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: 16.08.2025

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

Kompensation von Hochspannungskabeln durch induktive Einkopplung

Bei der Übertragung von elektrischer Energie mit Drehstromkabeln werden die Übertragungslängen durch die auf Grund der Kabelimpedanzen längs der Leitung entstehenden Spannungen auf etwa 30–50 km begrenzt. Geeignete Beschaltung des Mantel- bzw. Schirmkreises eines Kabels oder auch Parallelkabel können das Übertragungsverhalten je nach Lastsituation beeinflussen. Das vom Leiterstrom erzeugte Magnetfeld durchsetzt dabei eine vom Kabelmantel oder -schirm gebildete Sekundärschleife, die als Kompensationsschleife verwendet und entsprechend beschaltet wird. Da diese Kompensationsschaltung nicht – wie bei Freileitungen – dem hohen Leiterpotential des Übertragungssystems angepasst sein muss, entfallen zusätzliche Massnahmen wie der Einsatz von Höchstspannungstransformatoren oder die isolierte Aufstellung von Kondensatoren.

Heinrich Brakelmann, Werner Rasquin

Der Metallmantel oder -schirm eines Kabels soll als Sekundärwicklung eines Transformators verwendet werden, mit dem bei geeigneter Beschaltung die Längsimpedanz des Kabels lastabhängig verändert werden kann. In Bild 1 ist dieses Prinzip anhand einer Ader eines Drehstromkabels dargestellt, die einen äusseren Metallmantel aufweist. Dieser soll nun in bestimmten Abständen mit dem Rückleiter (bzw. im Drehstromsystem mit den anderen Mänteln) eine Schleife bilden, wobei in die Kurzschlussverbindungen an den Mantelabschnittsenden eine Kapazität C geschaltet wird.

Das Ersatzschaltbild der Kabelader ist unter Vernachlässigung der Leitungsquerzweige in Bild 1b dargestellt: der Transportstrom I durchfliesst zunächst die Induktivität L_{ki}, ein Mass für das vom Leiterstrom zwischen Leiter und Metallmantel aufgebaute Magnetfeld. In Reihe liegt die Induktivität $L_H = L_{Ka}$, die ein Mass für das ausserhalb des Metallmantels herrschende Magnetfeld ist und die nun als Hauptinduktivität eines gedachten Transformators dient. Bei offenem Mantelkreis wird die Induktivität L_H vom vollen Transportstrom I durchflossen.

Im Mantelkreis fliesst ein Strom I_C, der den ohmschen Widerstand des Mantelkreises R_2 sowie die Kapazität C überwinden muss und der ausserhalb der Kabelader über dieselbe Induktivität $L_H = L_{Ka}$ ein Magnetfeld aufbaut wie der Leiterstrom. Der ohmsche Widerstand des Mantelkreises R_2 wird im Folgenden vernachlässigt. Damit muss der Transportstrom insgesamt die folgende Längsimpedanz überwinden:

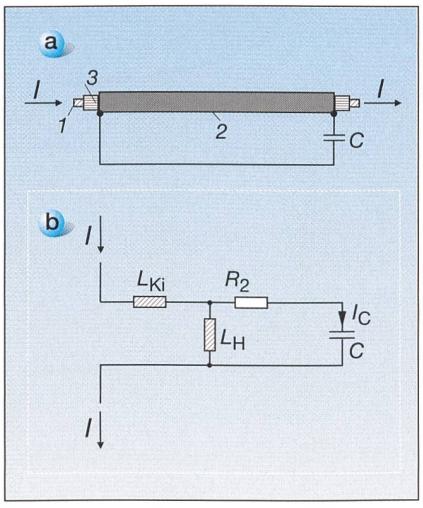


Bild 1 Kabelader mit Kompensationskapazität im Mantelkreis

a) Schaltung
1 Leiter
2 Metallmantel oder -schirm
3 elektrische Isolierung
b) Ersatzschaltbild für den Leitungslängszweig

$$Z_l = j\omega L_{Ki} + j\frac{\omega L_H}{1-\omega^2 L_H C} \qquad (1)$$

Bildet man das Impedanzverhältnis p zwischen der resultierenden Längsimpedanz nach Gleichung (1) und der Kabel-Längsimpedanz $Z_K = j\omega L_K = j\omega(L_{Ki} + L_H)$, so erhält man

$$\frac{Z_l}{Z_K} = p = \frac{1+h-C/C_p}{(1-C/C_p)(1+h)} \qquad (2)$$

mit der für eine Parallelresonanz massgeblichen Kapazität

$$C_p = \frac{1}{\omega^2 L_H} \qquad (3)$$

sowie dem Induktivitätsverhältnis zwischen der äusseren Kabelinduktivität $L_{Ka} = L_H$ und der inneren Kabelinduktivität $h = L_H/L_{Ki}$. Den Beispielen der später diskutierten Tabelle I kann entnommen werden, dass dieses Induktivitätsverhältnis bei Einleiterkabeln üblicherweise bei etwa $h \approx 2$–5 liegt.

In Bild 2 ist für Beispiel 1 der Tabelle I (h=2,36) das Impedanzverhältnis p als Funktion der auf die Parallelresonanz-Kapazität C_p bezogenen Kompensationskapazität C dargestellt. Deutlich wird, dass bei vollständiger Kompensation die Längsimpedanz der Übertragungseinrichtung zum Verschwinden gebracht werden kann (p=0), wenn folgendermassen dimensioniert wird:

$$C = C_0 = \frac{L_K + L_H}{\omega^2 L_K L_H} \qquad (4)$$

Demnach wird Reihenresonanz erreicht, wenn die Kapazität C auf die Parallelschaltung aus der inneren und der äusseren Kabelinduktivität abgestimmt wird. Ausserdem ergibt der Vergleich der Formeln (3) und (4) ein Verhältnis der für Reihenresonanz bzw. für Parallelresonanz erforderlichen Kapazitäten von

$$C_0/C_p = h+1 \approx 3\text{–}6 \qquad (5)$$

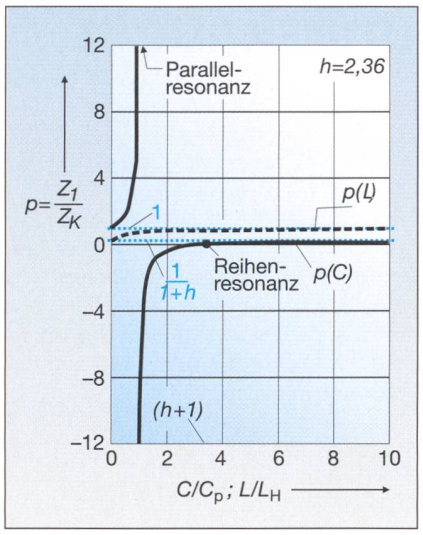


Bild 2 Resultierende Längsimpedanz

Auf die Längsreaktanz der Übertragungseinrichtung bezogene resultierende Längsimpedanz bei Kompensation mit der Kapazität C bei $L_H = 2{,}36\ L_K$. C_p ist die für Parallelresonanz erforderliche Kapazität.

Im Fall der vollständigen Kompensation steht über der aus L_H und C gebildeten Parallelschaltung gerade die negative Längsspannung U_{Ki} der zu kompensierenden Kabellänge an ($U_H = U_C = -U_{Ki}$).

Auch eine für Schwachlastzeiten gewünschte Vergrösserung der Längsimpedanz ($p > 1$) kann nach Bild 2 mit der Kapazität C erreicht werden, allerdings nur für Impedanzverhältnisse $p \geq 1$. Bei Analyse der sich ergebenden Lücke des Impedanzverhältnisses zwischen $p = 1/(h+1)$ und $p = 1$ ergeben sich mit Formel (2) negative Kapazitäten, d.h. statt mit einer Kapazität muss der Mantel/Schirm-Kreis nun mit einer Induktivität beschaltet werden. Man erhält aus Formel (2) das Impedanzverhältnis zu

$$p = \frac{(L/L_H)(1+h)+1}{(1+L/L_H)(1+h)} \qquad (6)$$

Diese Abhängigkeit des Impedanzverhältnisses von der auf die äussere Kabelinduktivität L_{Ka} bezogenen Induktivität L 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.

Bei kapazitiver Kompensation wird der Strom über die Hauptinduktivität L_H:

$$I_H = \left[p - \frac{L_{Ki}}{L_H}(1-p)\right] I = \frac{p\cdot(h+1)-1}{h} I \qquad (7)$$

Er ist ein Mass für das ausserhalb des Kabels erzeugte Magnetfeld. Der Strom über die Kapazität wird

$$I_C = \left[(1-p)\left(1+\frac{L_{Ki}}{L_H}\right)\right] I = \frac{(1-p)(h+1)}{h} I \qquad (8)$$

Die erforderliche kapazitive Blindleistung ist

$$\frac{Q_C}{Q_K} = p(1-p) - \frac{(1-p^2)}{h} \qquad (9)$$

Für vollständige Kompensation ($p = 0$) wird aus Formel (9)

$$\frac{Q_C}{Q_K} = -\frac{1}{h} = -\frac{L_{Ki}}{L_H} \qquad (10)$$

mit der induktiven Blindleistung des unkompensierten Kabels

$$Q_K = \omega\,(L_{Ki} + L_H)\, I^2 \qquad (11)$$

Für die induktive Blindleistung des äusseren Magnetfeldes gilt dann

$$\frac{Q_H}{Q_K} = \frac{1}{h(h+1)} \qquad (12)$$

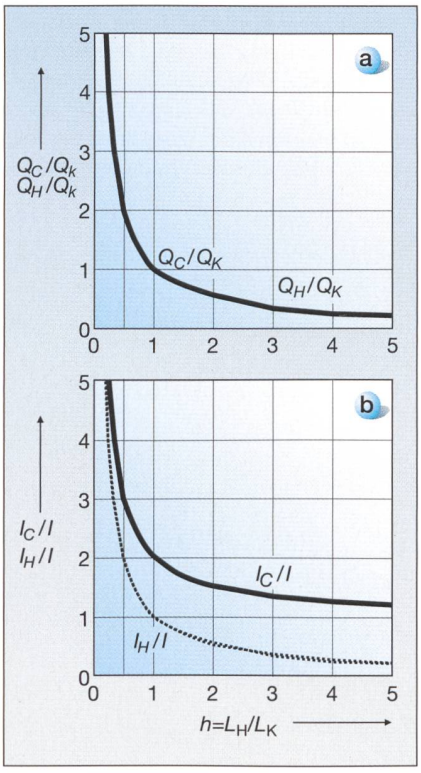


Bild 3 Verhältnisse der Blindleistungen und Ströme bei vollständiger Kompensation als Funktion des Induktionsverhältnisses $h = L_H/L_{Ki}$

(a) Q_C und Q_H bezogen auf die Blindleistung des unkompensierten Kabels Q_K

(b) I_C und I_H bezogen auf den Laststrom I

Für diesen Fall der vollständigen Kompensation sind aus Bild 3 die auf den Laststrom I bezogenen Ströme I_C und I_H nach den Formeln (8) und (9) sowie die auf die Blindleistung des unkompensierten Kabels Q_K bezogenen Blindleistungen Q_C und Q_H nach den Formeln (10) bis (12) ersichtlich.

Für die meisten Anordnungen gilt:

$$L_H = L_{Ka} = (2\text{–}5)\, L_{Ki}$$

Für diesen Bereich ist ersichtlich, dass

- die für eine vollständige Kompensation aufzubringende kapazitive Blindleistung wesentlich geringer ist als die induktive Blindleistung des unkompensierten Kabels,
- das äussere Magnetfeld des vollständig kompensierten Kabels erheblich geschwächt wird ($Q_H < Q_K$ und $I_H < I$), aber auch, dass
- der über den Kabelmantel fliessende Strom I_C immer grösser bleibt als der Transportstrom.

Der letztgenannte Punkt ist ein wesentlicher Nachteil des Verfahrens, dem im folgenden Kapitel nachgegangen werden soll.

Bild 4a zeigt eine Möglichkeit, die erforderliche Kompensationskapazität C zu verringern. Die Kurzschlussverbindung wird an einem Ende des Mantelabschnitts durch einen Transformatorkern geführt, der sekundärseitig mit w Windungen belegt und mit der Kompensationskapazität C belastet ist, was zum Ersatzschaltbild nach Bild 4b führt. Die Kompensationskapazität C erscheint jetzt im Mantelkreis um das Quadrat der Windungszahl vergrössert, der Aufwand dafür wird also verringert, und gleichzeitig kann die über der Kompensationskapazität anstehende Spannung beeinflusst werden.

Aus Formel (4) für die vollständige Kompensation wird dann

$$C_0 = \frac{L_K + L_H}{w^2 \omega^2 L_K L_H} \qquad (13)$$

Aufwand für die Kompensationsmassnahme

Zum Abschätzen des zum Kompensationsbetrieb einer Übertragungsstrecke erforderlichen Aufwands werden als Beispiele ein 110-kV-Einleiter-VPE-Kabel sowie eine gasisolierte 380-kV-Leitung (GIL) nach Tabelle I mit einer zu kompensierenden Trassenlänge von 50 km betrachtet.

Beispiel 1: 110-kV-Einleiter-VPE-Kabel

Mit einem Transportstrom von 1000 A ergeben sich die in Tabelle I angegebenen

Induktivitätsbeläge und Gesamtinduktivitäten. Die Spannung über der Induktivität des Kabelinneren beträgt

$$U_{Ki} = \omega L_{Ki} I = 3031{,}6 \text{ V} \quad (14)$$

Die zur vollständigen Kompensation erforderliche Kapazität wird nach

$$C = \frac{L_H + L_{Ki}}{\omega^2 L_H L_{Ki}} = \frac{1}{\omega^2 6{,}78 \text{ mH}} = 1{,}49 \text{ mF} \quad (15)$$

berechnet.

Die Spannung über der Kapazität C wird zu

$$U_C = U_H = -3031{,}6 \text{ V} \quad (16)$$

bei einem Mantelstrom von

$$I_C = \left[1 + \frac{L_{Ki}}{L_H}\right] I = (1 + \frac{9{,}65 \text{ mH}}{22{,}75 \text{ mH}}) 1000 \text{ A} = 1424{,}2 \text{ A} \quad (17)$$

Der das äussere Magnetfeld erzeugende Strom über die Hauptinduktivität wird schliesslich

$$I_H = -\frac{L_{Ki}}{L_H} I = -424{,}2 \text{ A} \quad (18)$$

Demnach fliesst im Kabelmantel bzw. -schirm ein Strom, der um 42,4% grösser ist als der Laststrom. Gleichzeitig beträgt das äussere Magnetfeld des Kabels nur noch 42,4% des ursprünglichen Magnetfeldes und ist diesem entgegengerichtet.

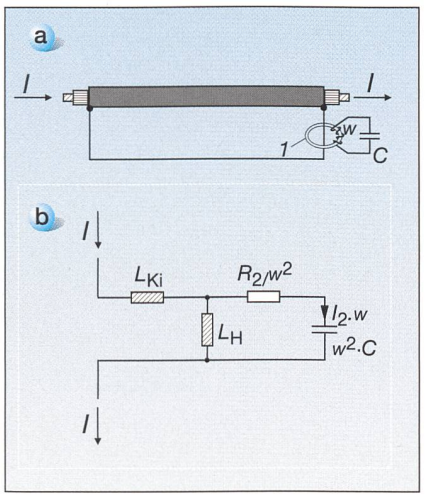


Bild 4 Kabelader mit Transformator und Kompensationskapazität im Mantelkreis

a) Schaltung
1 Transformator
b) Ersatzschaltbild für den Leitungslängszweig

Kenngrösse	Einheit	110-kV-Einleiter-VPE Kabel	400-kV-GIL einadrig
Kupferleiterquerschnitt	mm²	1000	
Leiterdurchmesser	mm	38	200
Durchmesser über Isolierung	mm	78	550
Achsabstand	m	0,4	1,2
Permittivitätszahl ε_r	–	2,3	1,0
Induktivitätsbelag des Kabelinneren L_{Ki}'	µH/m	0,193	0,21
Induktivitätsbelag des Kabeläusseren L_{Ka}'	µH/m	0,455	0,29
Gesamter Induktivitätsbelag des Kabels L_K'	µH/m	0,65	0,50
Induktivität des Kabelinneren L_{Ki}	mH	9,656	10,25
Induktivität des Kabeläusseren L_{Ka}	mH	22,75	14,55
Gesamte Kabelinduktivität L_K	mH	32,5	24,8
Kapazitätsbelag C_K'	nF/m	0,18	0,099
Wellenwiderstand Z_w	Ω	60,6	70,8
natürliche Leistung S_N	MVA	200	2260
thermische Grenzleistung S_{max} bei natürlicher Kühlung	MVA	150–200	600–800
thermische Grenzleistung S_{max} bei Zwangskühlung	MVA	250–400	1200–4000

Tabelle I Kenngrössen zweier Beispiele

Die zur Kompensation aufzubringende kapazitive Blindleistung (je Phase) ist

$$Q_C = \omega L_{Ki} I^2 \left(1 + \frac{L_{Ki}}{L_H}\right) = 4{,}32 \text{ MVA} \quad (19)$$

und beträgt damit 42,4% der induktiven Blindleistung des unkompensierten Kabels:

$$Q_K = \omega (L_{Ki} + L_H) I^2 = 10{,}18 \text{ MVA} \quad (20)$$

Wird der Kabelmantel mit demselben Querschnitt versehen wie der Leiter (1000 mm²), so ergeben sich Widerstandsbeläge von Leiter und Mantel von $R_M' = R_L' = 17{,}9$ µΩ/m und damit ein Mantelverlustbelag von

$$P_M' = R_M' I_C^2 = 36{,}2 \text{ W/m} \quad (21)$$

d.h., die im Leiter entstehenden Verluste treten im Mantel in derselben Grösse auf und beeinträchtigen damit die Kabelbelastbarkeit spürbar.

Beispiel 2: einadrige gasisolierte 400-kV-Leitung (GIL)

Die Trassenlänge sei wiederum 50 km, der Transportstrom betrage 1000 A. Damit ergeben sich die in Tabelle I angegebenen Induktivitätsbeläge und Gesamtinduktivitäten. Die Spannung über der Induktivität des Leitungsinneren beträgt

$$U_{Ki} = \omega L_{Ki} I = 3220{,}1 \text{ V} \quad (22)$$

Die zur vollständigen Kompensation erforderliche Kapazität ist

$$C = \frac{L_H + L_{Ki}}{\omega^2 L_H L_{Ki}} = 1{,}69 \text{ mF} \quad (23)$$

Die Spannung über der Kapazität C wird

$$U_C = U_H = -3220{,}1 \text{ V} \quad (24)$$

bei einem Mantelstrom von

$$I_C = \left[1 + \frac{L_{Ki}}{L_H}\right] I = (1 + \frac{10{,}25 \text{ mH}}{14{,}55 \text{ mH}}) 1000 \text{ A} = 1704{,}5 \text{ A} \quad (25)$$

Der das äussere Magnetfeld erzeugende Strom über die Hauptinduktivität wird schliesslich

$$I_H = -\frac{L_{Ki}}{L_H} I = -704{,}5 \text{ A} \quad (26)$$

Die zur Kompensation aufzubringende kapazitive Blindleistung (je Phase) ist

$$Q_C = \omega L_{Ki} I^2 \left(1 + \frac{L_{Ki}}{L_H}\right) = 5{,}49 \text{ MVA} \quad (27)$$

und beträgt damit 70,5% der induktiven Blindleistung der unkompensierten GIL:

$$Q_K = \omega (L_{Ki} + L_H) I^2 = 7{,}79 \text{ MVA} \quad (28)$$

Wird dem äusseren Aluminiumrohr der GIL eine Wanddicke von 10 mm zugeordnet, so ergibt sich ein Widerstandsbelag dieses Rohres von $R_M' = 1{,}89\ \mu\Omega/\mathrm{m}$ und damit ein Mantelverlustbelag von

$$P_M' = R_M'\, I_C^2 = 5{,}49\ \mathrm{W/m} \qquad (29)$$

Während alle übrigen Kenngrössen der gasisolierten Leitung vergleichbar mit dem zuvor diskutierten Beispiel sind, bleiben die Mantelverluste durchaus in einer akzeptablen Grössenordnung.

Folgerungen

Nach diesen Ergebnissen sollte sich die beschriebene Kompensationsmassnahme auf GIL problemlos und ohne weiteren konstruktiven Aufwand an der Übertragungseinrichtung anwenden lassen, da diese aus konstruktiven Gründen ohnehin einen sehr grossen Leiterquerschnitt des äusseren Rohres aufweisen. Die von der Kompensation herrührenden zusätzlichen Verluste halten sich in erträglichen Grenzen. Hinzu kommt, dass es bei den gasisolierten Rohrleitern aus thermisch-mechanischen Gründen ohnehin sinnvoll sein kann, den Laststrom über das äussere Rohr zurückzuführen, so dass vergleichbare Zusatzverluste entstünden. Gleichzeitig mit der Kompensation wird das äussere Magnetfeld der GIL um rund 60% vermindert.

Demgegenüber weist eine Kompensation von Kabeln durch Beschaltung des Kabelmantels wegen des vergrösserten Aufwandes (erforderliche Querschnittsvergrösserung) und der dennoch auftretenden zusätzlichen Verluste Nachteile auf. Dies gilt nicht für supraleitende Drehstromkabel mit einer zusätzlichen supraleitenden Leiterschleife im Mantelbereich. Bei solchen Kabeln wäre zwar ein konstruktiver Mehraufwand erforderlich, jedoch wären dann die zusätzlichen Verluste ohne Bedeutung.

Kompensation mit mehradrigen Parallelkabeln

Der zuvor beschriebene transformatorische Effekt des Kabelmantels lässt sich auch dadurch erreichen, dass parallel zu dem zu kompensierenden Hochspannungskabel mehradrige Kabel gemäss Bild 5a verlegt werden, die durch Hintereinanderschaltung ihrer Leiter eine Spule im Magnetfeld des Hochspannungskabels bilden, die in Reihe mit der Kompensationskapazität bzw. -induktivität gelegt wird [1].

In diesem Fall wird die erforderliche Kompensationskapazität um das Quadrat

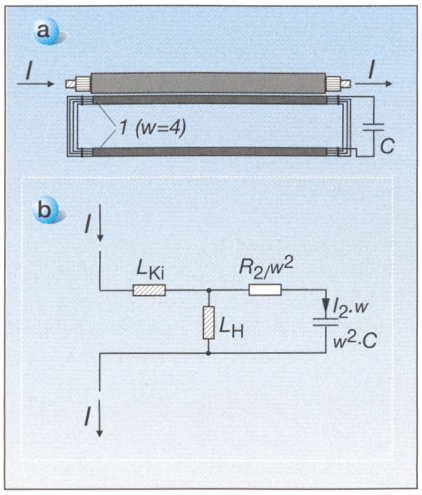


Bild 5 Kabelader mit parallelem, mehradrigem Kabel

a) Schaltung
1 Parallelkabel, dessen Leiter zu einer Wicklung zusammengeschaltet sind, mit Kompensationskapazität C
b) Ersatzschaltbild für den Leitungslängszweig

der Windungszahl w verringert, wobei unter der Windungszahl jetzt die Aderanzahl der Kompensationskabel zu verstehen ist. Ein besonderer Vorteil dieser Variante besteht darin, dass mit der Kompensationsmassnahme überhaupt nicht mehr in die Konstruktion bzw. Beschaltung des Hochspannungskabels eingegriffen wird.

Die in den Kompensationskabeln entstehenden Verluste könnten zudem durch eine Zwangskühlung abgeführt werden, so dass das Hochspannungskabel weder durch zusätzliche Mantelstromverluste noch durch sonstige zusätzliche Verlustwärme im Kabelgraben gestört wird, sondern im Gegenteil noch eine zusätzliche Kühlung erfährt. Auf die vielfältigen Kühlmöglichkeiten wird hier nicht eingegangen.

Unter Aufgabe der genannten Vorteile können die mehradrigen Parallelkabel natürlich direkt in die Kabelkonstruktion integriert werden, was beispielsweise durch einen Schirm aus isolierten Einzeldrähten erreicht werden kann. Bezüglich der Verlustwärmeabfuhr könnte beispielsweise die Verknüpfung einer solchen Konstruktion mit dem Prinzip der Bündelkühlung [2] in Betracht gezogen werden.

Verringerung der Kompensationskapazität durch Stromrichter

Zur Verringerung der erforderlichen Kompensationskapazität C können Leistungshalbleiter als Stromrichter eingesetzt werden. Durch solche geregelten Halbleiterschaltungen (VSI = Voltage Sourced Inverters) kann erreicht werden, dass der Stromfluss verzögert einsetzt, d.h. gegenüber der treibenden Spannung nacheilt. Je nach Regelung der Schaltung kann diese kapazitiv oder induktiv wirken.

Enthält die Stromrichterschaltung zusätzlich einen Transformator, so wirkt die Anordnung bei entsprechender Ansteuerung wie eine vergrösserte Kapazität oder Induktivität [3].

Eine derartige Massnahme kann auf alle bisher diskutierten Anordnungen angewendet werden. In den Ersatzschaltbildern erscheint dann eine vergrösserte Kompensationskapazität C^*, und der Aufwand für die physische Kompensationskapazität wird verringert. Ein Beispiel zeigt Bild 6 für den Fall der Beschaltung eines Kabelmantels.

Flexible unterirdische Energieübertragung

Mit allen zuvor beschriebenen Massnahmen besteht die Möglichkeit, durch eine äussere Beschaltung das Übertragungsverhalten von Kabeln oder GIL dynamisch zu beeinflussen. Werden die verwendeten Kompensationskapazitäten und -induktivitäten in weiten Grenzen variabel gestaltet, so kann für die Längsreaktanz des Übertragungsmittels praktisch jede gewünschte Grösse angesteuert werden.

Damit besteht bei variabler, gegebenenfalls geregelter Kompensationseinrichtung auch die Möglichkeit, das Übertragungsmittel mit seiner natürlichen Leistung zu betreiben. So ergeben sich längs des Übertragungsmittels vernachlässigbare Änderungen des Strom- und

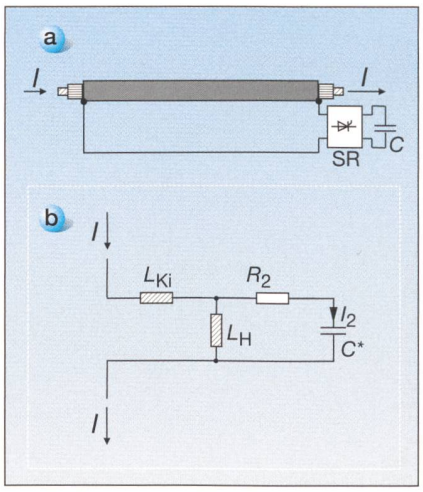


Bild 6 Kabelader mit Stromrichter und nachgeschalteter Kompensationskapazität im Mantelkreis

a) Schaltung (SR = Stromrichter)
b) Ersatzschaltbild für den Leitungslängszweig

Spannungsbetrags, und der Wirkungsgrad der Übertragung wird optimal.

Ein je nach Lastsituation geregelter Betrieb ist für Freileitungen bereits Gegenstand intensiver Untersuchungen im Rahmen des Projekts FACTS (Flexible AC Transmission Systems) und umfasst die Regelung der Übertragungsspannung, des Lastflusses und der Leitungsimpedanz. Allerdings besteht bei Freileitungen der Nachteil, dass die auf sehr hoher Spannung liegenden Aussenleiter mit einem Transformator beschaltet werden oder aber dass die Kompensationseinrichtungen auf diesem hohen Potential betrieben werden müssen.

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 einer in [4] gezeigten 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 Anpassungsmassnahmen mit Stromrichterschaltungen, wie sie für Freileitungsübertragungen im Zusammenhang mit FACTS zurzeit weltweit im Brennpunkt der Netzentwicklungen stehen, können für Drehstromkabel auf weitaus einfachere Weise erreicht werden, da anstelle von Höchstspannungstransformatoren nur Mittelspannungsstromwandler eingesetzt werden müssen.

Bedeutsam könnten solche Kompensationseinrichtungen auch für künftige supraleitende Kabel sein. Mit Kompensation der Längsinduktivität verlieren diese Kabel weitest gehend ihre Längsimpedanz, so dass auch für die Drehstromübertragung über grosse Entfernungen niedrigere Spannungen gewählt werden können, als sie bisher diskutiert werden. Gleichzeitig sinken mit verringerter Übertragungsspannung auch der elektrische Verschiebungsstrom und die dielektrischen Verluste, so dass man einer idealen Leitung als längsimpedanz- und queradmittanzfreier Verbindung zweier Netzknotenpunkte nahe kommt.

Compensation des câbles haute tension par couplage inductif

Dans le transport d'énergie électrique sur câbles triphasés, les distances sont limitées à environ 30–50 km en raison des tensions apparaissant sur les lignes par suite des impédances de câbles. Un raccordement adéquat du circuit de gaine ou de blindage du câble, de même que des câbles parallèles, permettent, suivant la charge, d'influencer le comportement de transmission. Le champ magnétique engendré par le courant sur la ligne est induit sur une boucle secondaire constituée par la gaine ou le blindage, qui peur servir de boucle de compensation en étant raccordée en conséquence. Etant donné que ce circuit compensatoire n'a pas besoin d'être adapté au potentiel élevé de la ligne – comme c'est le cas des lignes aériennes – on peut renoncer à des mesures supplémentaires comme l'emploi de transformateurs très haute tension ou l'installation isolée de condensateurs.

Literatur

[1] *H. Brakelmann:* Autarke Energieversorgung von Verbrauchern in Hochspannungskabeltrassen. Erscheint in ETZ.

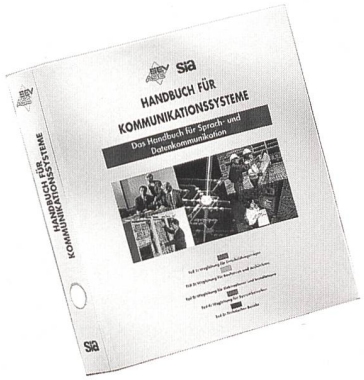
[2] *H. Brakelmann, W. Rasquin:* Die Bündelkühlung. Elektrizitätswirtsch. (1992) S. 1387–1390.

[3] *B. Kastenny, C. Hatziadoniu, A. Funk:* VSI-Based Series Compensation Scheme for Transmission Lines. ETEP Vol. 9 N° 2, March/April 1999, pp. 101–104.

[4] *H. Brakelmann, W. Rasquin:* Schaltungsmassnahme für Drehstromübertragungseinrichtungen. Patentanmeldung vom 10.8.1999.

Adresse der Autoren

Gerhard-Mercator-Universität, Elektrische Energieübertragung, D-47048 Duisburg: Prof. Dr.-Ing. *Heinrich Brakelmann;* brakelmann@uni-duisburg.de; Prof. Dr.-Ing. *Werner Rasquin,* rasquin@uni-duisburg.de



Handbuch für Kommunikationssysteme

Vom Handbuch für Sprach- und Datenkommunikation in fünf Bänden haben wir noch einige wenige Exemplare

zum Aktionspreis von Fr. 90.–

auf Lager.

Bestellungen beim SEV, Fax 01 956 11 68, Stichwort «Kommunikationssysteme». (Preis exkl. MwSt. und Versandkosten)