

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: 11

Artikel: Neues, normal leitendes verlustarmes Kabel

Autor: Brakelmann, Heinrich / Rasquin, Werner

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-855720>

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: 14.01.2026

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

Neues, normal leitendes verlustarmes Kabel

Durch neue Verfahren übertreffen normal leitende Kabel die Leitungseigenschaften supraleitender Kabel

Die Hochtemperatur-Supraleitung (HTS) bietet unter anderem den Vorteil geringer Übertragungsverluste. Die – unter Berücksichtigung der heute absehbaren Entwicklung bei HTS-Kabeln – erhofften Vorteile können aber durch neuartige

Konzepte für normal leitende Hochspannungskabel sogar noch übertroffen werden. Durch die Verseilung von sechs VPE-isolierten¹ Einzeladern lassen sich sehr grosse Gesamtleiterquerschnitte realisieren. Diese Kabel können in grossen

Heinrich Brakelmann, Werner Rasquin

Längen produziert und auch installiert werden. Auf Grund der kombinierten Verseilung der Einzeldrähte und der Leiter halten sich die Wechselstrom-Zusatzverluste dieser Sechseiterkabel in engen Grenzen.

Die erzielbaren Grenzleistungen sind schon bei natürlicher Kühlung der Kabel extrem hoch. Es können bis zur 110-kV-Ebene Leistungsbereiche angegangen werden, die bisher der nächsthöheren (oder sogar den beiden nächsthöheren) Spannungsebenen vorbehalten waren.

Die in die Kabelkonstruktion integrierten Rohre eröffnen u.a. die Möglichkeit einer wirksamen Zwangskühlung der Kabel. Diese bieten gegebenenfalls erhebliche Leistungsreserven bzw. auch eine spätere Leistungserhöhung der Kabel.

In vielen Fällen liegen die thermischen Grenzleistungen der Sechseiterkabel im Bereich ihrer natürlichen Leistung. Hohe Leistungen, z.B. im Mittelspannungsbereich, können damit über grosse Entfernungen übertragen werden.

Anwendungen der HTS

Die Entdeckung und Weiterentwicklung der Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) mit kritischen Temperaturen oberhalb der Siedetemperatur des flüssigen Stickstoffs (77 K) im Jahre 1986 eröffnete in den letzten Jahren die Option auf

innovative Kabeltechnologien, mit den wesentlichen Zielrichtungen:

- hohe Übertragungsleistungen auf Grund der hohen Stromtragfähigkeit und damit verbunden eine Herabsetzung der Übertragungsspannungen
- geringe Übertragungsverluste
- geringer Trassenbedarf
- Kosteneinsparungen auf Grund vereinfachter Netzstrukturen

Vereinfachte Netzkonzepte sehen beispielsweise bei Einspeisung und Verteilung in Ballungszentren die Substitution von Höchstspannungskabeln durch Kabel niedrigerer Betriebsspannung und damit die Einsparung von Spannungsebenen, Transformatoren usw. vor.

Ein weiterer Aspekt ist die direkte Energieableitung aus Kraftwerken bei Generatorspannung oder die Energieübertragung über grössere Entfernungen von Offshore-Windparks und ähnlichen Anlagen.

Bei der letztgenannten Anwendung werden die Planungen vom Konzept der HVDC² dominiert, da herkömmliche Drehstrom-Seekabel bisher ein zu geringes Übertragungsvermögen aufweisen und/oder ihr Übertragungsverhalten bezüglich Spannungsverwerfungen³ längs der Übertragungsstrecke sowie kapazitiver Ladeströme nachteilig ist.

Neues Konzept für Kabelkonstruktionen

Bild 1 zeigt mögliche Ausführungsformen des im Folgenden diskutierten Kabels. Das Prinzip besteht in der Verseilung von sechs herkömmlichen Einleiter-Kunststoffkabeladern um ein zentrales Rohr, beispielsweise ein Edelstahlrohr. Dieses innere Rohr, das auch als Wellrohr⁴ ausführbar ist, kann der Kühlung des Kabels dienen, es kann aber auch Übertragungselemente der Telekommu-

nikation (z.B. Lichtwellenleiter) beinhalten oder als Medienrohr dienen.

In dem in Bild 1e gezeigten Beispiel handelt es sich um 30-kV-Einleiterkabeladern mit jeweils einem Kupferleiter, der von einer feldbegrenzten⁵ und Kupferdraht-geschirmten VPE-Isolierung mit einer Wanddicke von 7 mm (Leiterfeldstärke etwa 3 kV/mm) umhüllt ist. Die sechs Einzeladern weisen entweder einzeln einen Korrosionsschutz auf oder werden gemeinsam von einem solchen umhüllt. Bild 1b zeigt die Mög-

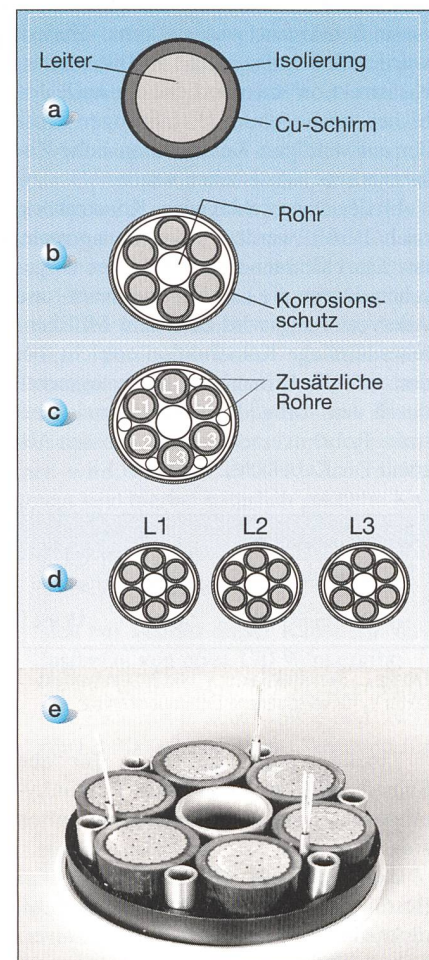


Bild 1 Durch Verseilung von sechs Einzeladern gebildetes Sechseiterkabel

- a) Einzelner Leiter mit Isolierung und Cu-Schirm
- b) Ein Kabel mit innerem Rohr
- c) Wie b), aber zusätzliche Rohre in den Wickelräumen
- d) Aus drei Sechseiterkabeln nach b) gebildetes System
- e) Querschnitt durch ein reales Kabel

lichkeit auf, in die entstehenden Zwickelräume weitere Rohre zu integrieren, die im Falle der Kabelkühlung für den Kühlwasserrücklauf verwendet werden können.

Die sechs Einzeladern können nun entsprechend Bild 1d eine Phase eines Drehstromkabelsystems bilden. Werden sie andererseits in der in Bild 1c dargestellten Weise den Phasen des Drehstromsystems zugeordnet, so enthält das in den Bildern 1b und 1c dargestellte Kabel tatsächlich zwei parallel geschaltete Drehstromsysteme.

Werden die Leiterquerschnitte beispielsweise jeweils zu 1000 mm² gewählt, so erzielt man mit dieser Konstruktion einen Gesamtleiterquerschnitt von 6000 mm². Ein solcher Querschnitt eines einzelnen verseilten Leiters wurde bislang in der Kabeltechnik nicht diskutiert, da sich ein Leiterdurchmesser von etwa 100 mm ergeben würde, der mit herkömmlichen Extrusionsanlagen nicht mehr beherrscht werden kann. Zudem würde eine aufwändige Millikenleiter-Konstruktion⁶ erforderlich, die nach den bisher vorliegenden Erfahrungen trotz der aufwändigen Konstruktion hohe Zusatzverluste verursachen würde.

In der vorgeschlagenen Konstruktion nach Bild 1 werden hingegen normale, aus Einzeldrähten verseilte Leiter vorgesehen. Durch die kombinierte Draht- und Aderverseilung wird eine dem Millikenleiter ähnliche Konstruktion erreicht, bei der sich die einzelnen Leitersegmente durch den vorhandenen Hohlkanal (zentrales Rohr) in einem günstig grossen Abstand zur Kabelachse befinden.

| Kupferquerschnitt | y _s | y _p |
|----------------------|----------------|----------------|
| 500 mm ² | 3,7% | 4,0% |
| 1000 mm ² | 14,4% | 15,9% |

Tabelle I Skineffektfaktor y_s und Proximityeffektfaktor y_p für verschiedene Leiterquerschnitte

Tabelle I zeigt die Werte für den Skineffektfaktor y_s und den Proximityeffektfaktor y_p der dicht benachbarten Adern [1].

Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung dieser Faktoren unter Berücksichtigung der Ader- und Drahtverseilung sind in Vorbereitung.

Weitere Kenndaten der Kabelkonstruktion sind für die beiden oben erwähnten Leiterquerschnitte in der Tabelle II zusammengefasst. Demnach weisen die diskutierten 30-kV-Kabel Aussendurchmesser von rund 140 mm (6·500 mm²) bzw. 185 mm (6·1000 mm²) auf. Sie können damit auf her-

| Grösse | Einheit | Typ | |
|---|-----------------|-------------------------|--------------------------|
| | | 6 · 500 mm ² | 6 · 1000 mm ² |
| Kupferleiter | | | |
| Querschnitt | mm ² | 500 | 1000 |
| Durchmesser | mm | 26,3 | 37,6 |
| VPE-Isolierung mit Leitschichten: Wanddicke | mm | 8,5 | 8,5 |
| Cu-Schirm: Querschnitt | mm ² | 25 | 25 |
| PE-Mantel je Ader: Wanddicke | mm | 3,0 | 3,0 |
| Aderdurchmesser | mm | 51 | 61 |
| Rohrdurchmesser | mm | 51 | 61 |
| Kabel-Aussendurchmesser | mm | 140 | 185 |

Tabelle II Kenndaten von 30-kV-Sechseiterkabeln nach Bild 1 für Leiterquerschnitte von 6·500 mm² und 6·1000 mm²

| Nr. | Kabel | Adern | | Daten | | I _D | S _D | I _D | S _D | I _n | S _n |
|-----|-------|-------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | n | A _L | d _L | d _K | NK | NK | ZK | ZK | [A] | [MVA] |
| | | [-] | [mm ²] | [mm] | [mm] | [A] | [MVA] | [A] | [MVA] | | |
| 1 | | 3 | 500 | 26,3 | 103 | 752 | 39 | – | – | 550 | 29 |
| 2 | | 3 | 1000 | 37,6 | 128 | 1018 | 53 | – | – | 673 | 35 |
| 3 | | 3 | 2000 | 54 | 80 | 2000 | 104 | – | – | 566 | 29,4 |
| 4 | | 6 | 500 | 26,3 | 140 | 1147 | 60 | 2200 | 114 | 1383 | 72 |
| 5 | | 2-6 | 500 | 26,3 | 140 | 1922 | 100 | 3800 | 197 | 2680 | 139 |
| 6 | | 3-6 | 500 | 26,3 | 140 | 2620 | 136 | 5200 | 220 | 4148 | 216 |
| 7 | | 6 | 1000 | 37,9 | 185 | 1540 | 80 | 3000 | 156 | 1655 | 86 |
| 8 | | 2-6 | 1000 | 37,9 | 185 | 2603 | 135 | 5200 | 270 | 3204 | 166 |
| 9 | | 3-6 | 1000 | 37,9 | 185 | 3490 | 181 | 7000 | 364 | 4966 | 258 |

Tabelle III Kenndaten von 30-kV-Drehstromkabeln in Erde

Index D = Dauerlast; Index n = Betrieb mit natürlicher Leistung; d_L = Leiterdurchmesser; d_K = Kabeldurchmesser; n = Anzahl der Kabeladern; A_L = Leiterquerschnitt; NK = natürliche Kühlung; ZK = Zwangskühlung

kömmliche Kabelspulen aufgespult und in Längen von mehreren 100 m transportiert und verlegt werden.

Grenzleistungen und Grenzlängen

Zur Verdeutlichung der mit dem beschriebenen Kabel ermöglichten Übertragungsleistungen soll zunächst Tabelle III herangezogen werden. In dieser Tabelle werden Kabel der 30-kV-Ebene betrachtet, die in einer Tiefe von 1,0 m in einem thermisch stabilisierten Bereich in Erde verlegt sind (15 °C Bodentemperatur, partielle Bodenaustrocknung entsprechend [2]) und die mit Dauerlast beaufschlagt sind.

In den Zeilen 1 bis 3 dieser Tabelle sind zunächst 30-kV-VPE-Drehstromkabel herkömmlicher Konstruktion betrachtet, deren Leistungsgrenze etwa durch Zeile 3 (2000 mm² Millikenleiter) beschrieben sein dürfte. Deutlich wird ein für grosse Achsabstände erreichbarer

Grenzstrom von rund 2000 A sowie die Tatsache, dass diese Kabel bei Erreichen ihrer thermischen Leistungsgrenze ihre natürliche Leistung weit überschreiten. Eine Grenzleistungsübertragung über grosse Entfernungen wird mit diesen Kabeln daher nicht ohne Kompensationsmassnahmen möglich sein. Dieselbe Aussage trifft im Übrigen auch auf solche HTS-Drehstrom-Einleiterkabel zu, die keinen Koaxialbetrieb aufweisen.

Die Zeilen 4 bis 6 der Tabelle III geben das Leistungsvermögen von 30-kV-Sechseiterkabeln unterschiedlicher Aderanzahl (lichter Verlegeabstand in allen Fällen: 0,5 m) für einen Leiterquerschnitt von 6·500 mm²=3000 mm² sowohl bei natürlicher Kühlung als auch bei einer Zwangskühlung (Wasserumlauf durch das integrierte Edelstahlrohr; vergleiche auch [3]) wieder. Da die Leistungserhöhung bei Zwangskühlung stark von der Kühlabschnittslänge abhängt, wurde zur Parameterbegrenzung vereinfachend von einer Leistungsverdoppe-

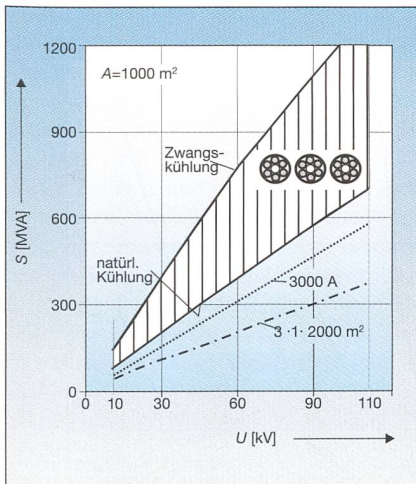


Bild 2 Grenzleistung von Sechseiterkabeln (3·6·1000 mm²) als Funktion der Betriebsspannung (s. Text)

lung ausgegangen [3]. Mit den Grössen S_n bzw. I_n sind die natürliche Leistung bzw. der «natürliche Übertragungsstrom» der jeweiligen Anordnung wiedergegeben.

Die entsprechenden Angaben für 30-kV-Sechseiterkabel mit einem Leiterquerschnitt von $6 \cdot 1000 \text{ mm}^2 = 6000 \text{ mm}^2$ finden sich in den Zeilen 7 bis 9 der Tabelle III.

Der Tabelle III können die folgenden Informationen entnommen werden:

- Leiterquerschnitt $6 \cdot 500 \text{ mm}^2 = 3000 \text{ mm}^2$:
- Bei natürlicher Kühlung können mit einem 30-kV-Kabel mehr als 1100 A (etwa 57 MVA) und mit drei Kabeln mehr als 2600 A (etwa 135 MVA) übertragen werden.
- Bei Zwangskühlung verdoppeln sich diese Grenzdaten etwa auf 2200 A (etwa 114 MVA) bei einem Kabel sowie bei drei Kabeln auf mehr als 5200 A (etwa 220 MVA).
- In allen Fällen können die Kabel im Bereich ihrer natürlichen Leistungen betrieben werden, so dass auch Übertragungen über sehr grosse Entfernungen ohne Kompensationsmassnahmen möglich sind.

- Leiterquerschnitt $6 \cdot 1000 \text{ mm}^2 = 6000 \text{ mm}^2$:
- Bei natürlicher Kühlung können mit einem 30-kV-Kabel mehr als 1500 A (etwa 78 MVA) und mit drei Kabeln mehr als 3400 A (etwa 177 MVA) übertragen werden.
- Bei Zwangskühlung verdoppeln sich diese Grenzdaten etwa auf 3000 A (etwa 156 MVA) bei einem Kabel sowie bei drei Kabeln auf mehr als 7000 A (etwa 364 MVA).

- In allen Fällen können die Kabel mit ihren natürlichen Leistungen betrieben werden, so dass auch Übertragungen dieser hohen Leistungen über sehr grosse Entfernungen ohne Kompensationsmassnahmen möglich sind.

Wesentliche Folgerungen sind, dass mit der vorgestellten Kabelkonstruktion die bisherigen Übertragungsgrenzen konventioneller Kabel verlassen werden, und zwar sowohl im Hinblick auf die thermisch gegebenen Grenzen als auch bezüglich des Übertragungsverhaltens. Eine der wichtigsten Optionen der HTS-Kabel (hohe Übertragungsleistungen auf Grund der hohen Stromtragfähigkeit, mögliche Herabsetzung der Übertragungsspannungen) wird damit von einem normal leitenden Kabel erfüllt.

Werden die Sechseiterkabel im Normalbetrieb mit natürlicher Kühlung betrieben, so bieten sie durch die zusätzliche Möglichkeit der Zwangskühlung enorme Leistungsreserven für einen sich später oder auch nur zeitweilig einstellenen Leistungsbedarf.

Um die auch in anderen Spannungsebenen gegebenen Möglichkeiten dieser Kabelkonstruktion zu verdeutlichen, zeigt Bild 2 die Grenzleistung von Sechseiterkabeln ($3 \cdot 1 \cdot 1000 \text{ mm}^2$) als Funktion der Betriebsspannung. Es ergibt sich ein Kennlinienband, dessen unterer Rand durch die Belastbarkeit der natürlich gekühlten Kabel und dessen oberer Rand durch die Möglichkeiten der Zwangskühlung dieser Kabel (bis zur Leistungsverdoppelung) festgelegt sind.

Zum Vergleich führt die gestrichelte Kennlinie den Fall eines gleich bleibenden Laststroms von 3000 A und die strichpunktierte Kennlinie das Leistungsvermögen des herkömmlichen Kabels nach Tabelle III, Zeile 3 (Millikenleiter 2000 mm^2) auf, das durch einen Laststrom von etwa 2000 A beschrieben ist.

Die sich ergebenden Grenzleistungsbereiche und die sich ohne Kompensationsmassnahmen ergebenden Grenzlängen sind für die einzelnen Spannungsebenen in Tabelle IV zusammengefasst. Diese Grenzlängen wurden unter der un-

günstigen Annahme ohmschen (nicht induktiven) Laststromes und der Vorgabe eines höchstzulässigen Ladestroms ermittelt, der zu einer Reduktion der Grenzleistung der Kabel um 10% führt.

Demnach können mit dem beschriebenen Sechseiterkabel bei jeder Übertragungsspannung Leistungsbereiche angegangen werden, die bisher der nächsthöheren (oder sogar den beiden nächsthöheren) Spannungsebenen vorbehalten waren. Die ohne Kompensationsmassnahmen erzielbaren Grenzlängen liegen jenseits der aus der Praxis zu erwartenden Anforderungen.

Übertragungsverluste

Wegen der geringen dielektrischen Verluste der VPE-Isolierungen resultieren die Übertragungsverluste der betrachteten Sechseiterkabel bis einschliesslich der 110-kV-Spannungsebene nahezu ausschliesslich aus den Wechselstrom-Leitungsverlusten (Unterdrückung der Schirmströme, d.h. der Längsströme in den Kupferschirmen der Kabeladern, vorausgesetzt).

Wird angenommen, dass der thermische Grenzstrom der Kabel andauernd geführt wird, so ergeben sich die Verlustleistungsbeläge P'_{\max} , die in Bild 3 für die einzelnen Spannungsebenen als Funktion der Übertragungsleistung wiedergegeben sind. Die zusätzlichen, nach dem Laststrom parametrisierten gestrichelten Kennlinien kennzeichnen den Fall, dass der Laststrom der Kabel gegenüber ihrem thermischen Grenzstrom zurückgenommen wird, z.B. auf 2000 A. Zu Grunde gelegt sind hierbei natürlich gekühlte Kabelsysteme mit einem Leiterquerschnitt von $3 \cdot 6 \cdot 1000 \text{ mm}^2$.

Deutlich wird, dass

- sich bei Vollast dieser Kabel ein Verlustbelag von etwa 170 W/m ergibt;
- dieser Verlustbelag bei Zurücknahme des Laststroms stark sinkt, und zwar für $I = 3000 \text{ A}$ auf 75–90 W/m und für $I = 2000 \text{ A}$ auf 30–40 W/m.

Für den normalen Betrieb und für die normale Auslegung der Netze (z.B. n-1-Prinzip) erscheint die Bild 3 zu Grunde liegende Annahme eines andauernd anstehenden Vollaststromes unrealistisch. Zum Vergleich sind daher in Bild 4 die Verlustbeläge für den Fall dargestellt, dass nur über die halbe Betriebsdauer der Grenzstrom des Kabels, über die restliche Zeit jedoch nur der halbe Grenzstrom geführt werden muss. Der Mittelwert \bar{P}' des Verlustbelags beträgt dann 62,5% seines Höchstwertes P'_{\max} (zu einem ähnlichen Ergebnis gelangt man, wenn jeweils ein

| U_N [kV] | S_D [MVA] | I_{grenz} [km] |
|---------------|----------------|----------------------------|
| 10 | 70–110 | 250–500 |
| 30 | 160–360 | 200–400 |
| 60 | 340–680 | 100–200 |
| 110 | 600–1250 | 70–140 |

Tabelle IV Thermische Grenzleistungen und Grenzlängen unkompensierter Sechseiterkabel ($3 \cdot 6 \cdot 1000 \text{ mm}^2$)

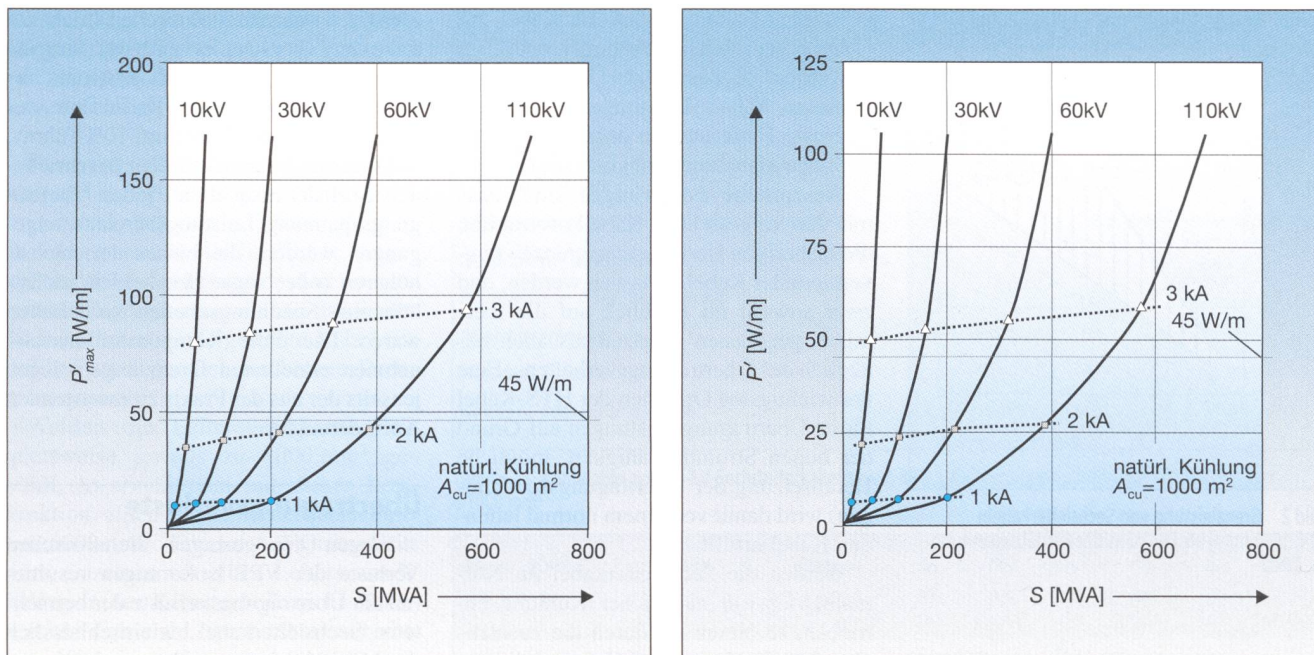


Bild 3 (links) Verlustleistungsbeläge natürlich gekühlter Sechseiterkabel (3·6·1000 mm²) bei dauernd anstehender Vollast als Funktion der Übertragungsleistung; Parameter: Betriebsspannung

Bild 4 (rechts) Mittlere Verlustleistungsbeläge natürlich gekühlter Sechseiterkabel (3·6·1000 mm²) als Funktion der Übertragungsleistung; Parameter: Betriebsspannung

täglicher und ein jährlicher Belastungsgrad von etwa 0,9 zu Grunde gelegt wird).

Bild 4 weist für diesen Betriebsfall aus, dass

- bei Betrieb der Kabel mit ihrem Grenzstrom die Verlustbeläge etwa bei 105 W/m liegen;
- schon bei Zurücknahme des Laststroms auf 3000 A die Verlustbeläge nur noch etwa 50–60 W/m betragen. Dies ist eine Grössenordnung, die mit den zurzeit besten thermischen Superisolationen von starren HTS-Dreileiterkabel-Konstruktionen nicht unterschritten wird (vergleiche [5]);
- bei Zurücknahme des Laststroms auf 2000 A (ein bei einigen HTS-Kabel-Entwicklungsprojekten angestrebter Übertragungsstrom) die Verlustbeläge nur noch 20–25 W/m betragen. Damit werden die Verlustbeläge der HTS-Kabel, die entscheidend von der Qualität der thermischen Isolierungen abhängen und damit fast unabhängig von den Laststromschwankungen anfallen und sich mit fallendem Betriebsstrom kaum verringern, von den normal leitenden Sechseiterkabeln ganz erheblich unterschritten.

Wird bei den genannten Lastströmen zusätzlich noch die Möglichkeit der Zwangskühlung ausgenutzt, so lassen

sich die Verlustbeläge der Sechseiterkabel noch weiter senken (vergleiche [4]).

Seekabel

Im Folgenden wird gezeigt, welche Möglichkeiten sich beim Einsatz der beschriebenen Sechseiterkabel als Seekabel ergeben. Da bei künftigen grossen Offshore-Windkraftanlagen die Leistungsverteilung innerhalb dieser Anlagen mit Mittelspannung vorgenommen wird, soll den Betrachtungen exemplarisch eine Übertragungsspannung von 30 kV zu Grunde gelegt werden.

Um den Durchmesser der Sechseiterkabel, die als Seekabel zusätzlich eine Bewehrung (Armierung) aufweisen müssen, in Grenzen zu halten, wird allein die Konstruktion mit einem Leiterquerschnitt von 6·500 mm² betrachtet. Der Durchmesser des Verseilverbandes unterhalb der Bewehrung liegt dann etwa bei 136 mm.

Tabelle V zeigt die sich ergebenden Möglichkeiten. Es werden 30-kV-Kabel betrachtet, die in einer Tiefe von 2,0 m im Meeresboden liegen (10°C Umgebungstemperatur, Wärmeleitfähigkeit der Umgebung 2,0 W/Km) und die mit Dauerlast beaufschlagt sind.

In den Zeilen 1 und 2 dieser Tabelle sind zunächst dreiadrige 30-kV-VPE-Drehstromkabel herkömmlicher Kon-

struktion betrachtet, deren Leistungsgrenze etwa durch Zeile 2 (3·1000 mm² Kupferleiter) beschrieben wird. Es ergibt sich ein Grenzstrom von rund 1050 A, bei dem das Kabel seine natürliche Leistung erheblich überschreitet. Eine Übertragung dieser Leistung über grosse Entfernungen wird daher nicht ohne Kompensationsmassnahmen möglich sein.

Zeile 3 weist aus, dass mit einem einzelnen 30-kV-Sechseiterkabel eine Leistung von rund 70 MVA (1324 A) übertragen werden kann, die fast exakt mit der natürlichen Leistung des Kabels übereinstimmt.

Werden zwei dieser 30-kV-Sechseiter-Seekabel in einem Abstand von mehr als 10 m verlegt, so wird nach Zeile 4 diese Kabelanlage im Bereich ihrer natürlichen Leistung betrieben werden, so dass eine Übertragung von rund 140 MVA über grosse Entfernungen ohne Kompensationsmassnahmen möglich wird.

Nach diesem Ergebnis könnte die gesamte Leistung grosser Offshore-Windparks mit zwei Mittelspannungsdrehstrom-Seekabeln über grosse Entfernungen zum Land transportiert werden, so dass weder ein Umspannen innerhalb des Windkraftparks auf eine höhere Übertragungsspannung noch die beiden Gleichrichterstationen für eine HGÜ-Übertragung erforderlich sind.

Durch Verringerung der Anzahl der Strom führenden Adern kann die natür-

liche Leistung des Übertragungssystems verringerten Leistungsanforderungen während des Betriebs angepasst werden. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass alle Adern der Sechseiterkabel einzeln schaltbar sind.

Die Zeilen 5 und 6 zeigen schliesslich für ein bzw. zwei 30-kV-Sechseiter-Seekabel ihr erhöhtes Übertragungsvermögen im Falle eines Gleichstrombetriebs. Auf Grund der entfallenden Wechselstrom-Zusatzverluste in den Leitern und Bewehrungen steigt die Übertragungsleistung zweier paralleler Sechseiterkabel auf rund 170 MVA.

Folgerungen

Als Seekabel mit einem Kupferleiterquerschnitt von $6 \cdot 500 \text{ mm}^2$ und einem Kabel-Aussendurchmesser von etwa 160 mm erlauben zwei 30-kV-Sechseiterkabel im Drehstrombetrieb die Übertragung von rund 140 MVA, so dass die gesamte Leistung grosser Offshore-Windkraftanlagen ohne Umspann- und Umrichtanlagen mit Mittelspannungskabeln über grosse Entfernungen transportiert werden kann. Im Gleichstrombetrieb zweier 30-kV-Sechseiter-Seekabel können sogar rund 170 MVA übertragen werden.

Wegen der grossen, hier realisierbaren Leiterquerschnitte sind die Übertragungsverluste gering. Unter Annahme realistischer Betriebsbedingungen erreichen oder unterschreiten die Verlustbeläge der Sechseiterkabel mit etwa 50 W/m diejenigen künftiger HTS-Kabel, wenn der Laststrom der natürlich gekühlten Kabel auf 3000 A begrenzt wird. Wird ein Laststrom von 2000 A vorgegeben, der heute Entwurfsgrösse bei einigen HTS-Kabel-Projekten ist, so liegen die Verlustbeläge der Sechseiterkabel mit etwa 25 W/m konkurrenzlos niedrig. Sie können durch eine zusätzliche Wasserkühlung noch weiter gesenkt werden. Eine solche Zwangskühlung bietet auch die Möglichkeit der Wärmerückgewinnung, so dass der Wirkungsgrad der Übertragung noch weiter gesteigert werden kann.

Alle Aufbauelemente der in diesem Beitrag vorgestellten Sechseiterkabel – Leiter, elektrische Isolierung, Schirm, Korrosionsschutz, Garnituren – und auch die Produktions- und Montagevorgänge entsprechen bewährter, herkömmlicher Kabeltechnik. Die Sechseiterkabel sind bei Betrieb mit natürlicher Kühlung wartungsfrei, und auch der Aufwand für eine mögliche Zwangskühlung mit Wasser steht in keinem Verhältnis zu den Problemen einer LN_2 -Kryokühlung⁷. Erste Kostenabschätzungen lassen nicht nur bei







| Nr. | Kabel | Adern | | Daten | | I_D | S_D | I_n | S_n |
|-----|---|-------|--------------------|-------------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | n | A_L | d | | NK | NK | [A] | [MVA] |
| | | [-] | [mm ²] | [mm] | | [A] | [MVA] | | |
| 1 |  | 3 | 500 | d_L 26,3 d_K 109 + Bewehrung | | 752 | 41 | 550 | 29 |
| 2 |  | 3 | 1000 | d_L 37,6 d_K 133 + Bewehrung | | 1050 | 55 | 673 | 35 |
| 3 |  | 1-6 | 500 | d_L 26,3 d_K 136 + Bewehrung | | 1324 | 69 | 1383 | 72 |
| 4 |  | 2-6 | 500 | d_L 26,3 d_K 136 + Bewehrung | | 2649 | 138 | 2680 | 139 |
| 5 |  | 1-6 | 500 | d_L 26,3 d_K 136 + Bewehrung | | 1622 | 84 | HGÜ | HGÜ |
| 6 |  | 2-6 | 500 | d_L 26,3 d_K 136 + Bewehrung | | 3244 | 169 | HGÜ | HGÜ |

Tabelle V Kenndaten von 30-kV-Seekabeln

Index D = Dauerlast; Index n = Betrieb mit natürlicher Leistung; d_L = Leiterdurchmesser; d_K = Kabeldurchmesser; n = Anzahl der Kabeladern; A_L = Leiterquerschnitt; NK = natürliche Kühlung; ZK = Zwangskühlung

den Betriebskosten, sondern gerade auch bei den Herstellkosten ganz erhebliche Vorteile gegenüber den HTS-Kabeln erwarten.

Adressen der Autoren

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

Referenzen

- [1] IEC 60287: Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1
- [2] VDE 0298 T2: VDE-Bestimmung für die Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen
- [3] H. Brakelmann, W. Rasquin, G. Hahne: Bündelkühlung. F&G-Report, VWEV-Verlag, 1993
- [4] A. Deterding: Energetischer Vergleich von zwangsgekühlten Hochleistungskabelsystemen mit supraleitenden Energiekabeln. Elektrizitätswirtschaft (1994), S. 1648–1653

- [5] S.P. Ashworth, P. Metra, R.J. Slaughter: A Techno-Economic Design Study of High-Temperature Superconducting Power Transmission Cables. ETEP (1994) S. 293–300

¹ VPE (= vernetztes Polyäthylen; engl.: XLPE = cross-linked polyethylene) ist das meistgebrauchte Isoliermaterial bei Kunststoffkabelisolierungen.

² High-Voltage Direct Current, Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung

³ Längs eines Strom führenden Kabels ändert sich die Spannung gegen Erde. Diese Längsspannung (= Spannungsverwerfung) ist oft eine begrenzende Grösse bei der Energieübertragung über grosse Entfernungen. Meist wird für eine Übertragungsstrecke $\Delta U \leq 10\%$ vorgeschrieben.

⁴ Ein Wellrohr ist ein gewelltes Metall- oder Kunststoffrohr. Wird als Aluminiumwellrohr oft als besonders flexibler Kabelmetallmantel verwendet.

⁵ Unter einer feldbegrenzten Isolierung wird eine Isolierung verstanden, die an ihrer inneren und an ihrer äusseren Oberfläche von einer leitfähigen (feldbegrenzenden) Schicht umhüllt wird.

⁶ Ein Millikenleiter, auch als Segmentleiter bezeichnet, wird – zur Verringerung der Wirbelstromverluste – aus mehreren Segmenten gefertigt.

⁷ LN_2 : Liquid Nitrogen. Unter Kryokühlung wird eine Kühlung verstanden, bei der das Kühlmedium höchstens die Temperatur des flüssigen Stickstoffs aufweist.

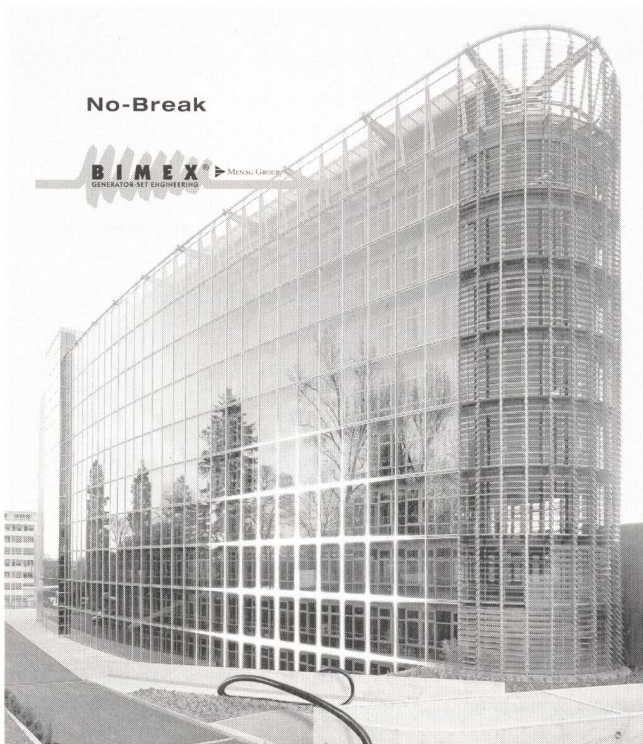
Nouveau câble à faibles pertes et conductibilité normale

Le supraconducteur à haute température (SHT) a entre autre l'avantage de ne présenter que de faibles pertes. Les avantages à attendre compte tenu du développement prévisible dans le domaine des câbles supraconducteurs à température élevée peuvent cependant encore être dépassés par des concepts d'un type nouveau pour câbles haute tension à conductibilité normale. Six conducteurs isolés au polyéthylène réticulé et toronnés permettent de réaliser de très grosses sections. Ces câbles peuvent être produits et installés sur de grandes longueurs. Etant donné le toronnage combiné des brins et des conducteurs, les pertes supplémentaires de ces câbles à six conducteurs en courant alternatif sont très limitées.

Ces câbles peuvent servir jusqu'au niveau 110 kV à des puissances réservées jusqu'à présent au niveau ou même aux deux niveaux supérieurs.

No-Break


BIMEX GENERATOR SET ENGINEERING MENAG GROUP



BIMEX Technic AG
Notstromanlagen
Biergutstrasse 4
CH-3608 Thun
Tel. +41 (0)33 334 55 66

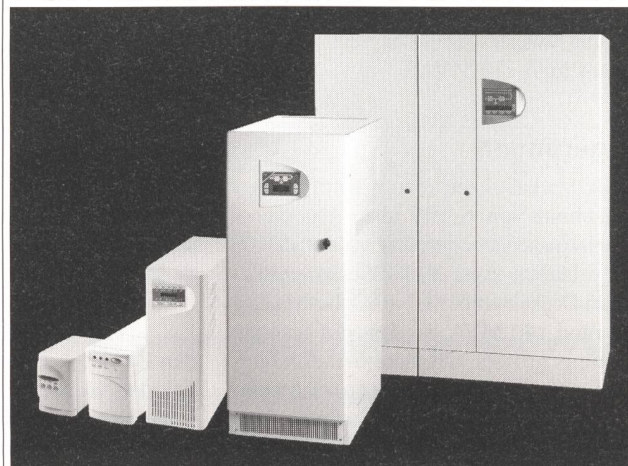
Niederlassung Zürich
Tel. +41 (0)1 908 61 00

www.menag-group.com




Industriestrasse 17, CH-4415 Lausen
Tel. 061/921 33 00, Fax 061/921 33 11
Homepage: www.socomec-sicon.com
E-Mail: sicon-socomec@bluewin.ch

FÜR ENERGIE MIT SICHERHEIT

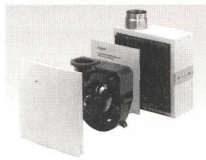


USV von 300 VA bis 4800 kVA
Gleichrichter bis 1000 Ampère
Wechselrichter 1 kW bis 100 kW

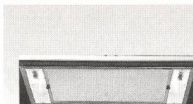
ANSON liefert die besten + modernsten Lüftungsgeräte für STWE, EFH und MFH:



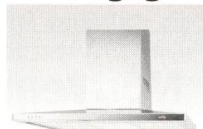
ANSOMATIC
Bad-/WC-Ventil
mit Zeitautomatik
die besten, die es gibt!
230 V 100 m³/h 50 Pa.
Putzbündig. Preisgünstig von ANSON



Superleise 1-Rohr-
Ventilatoren UP
Mit Zeitautomatik.
Formschön. 230 V 80
m³/h 300 Pa. Auch in
AP-Ausführung. CE-
konform. Von ANSON



Formschöne
Einbau-Hauben
ANSOLUX
1- und 2-motorig. Hohe
Leistung 570 m³/h 310
Pa. Einbaumassee ab 258
x 494 mm. Pflegeleicht.



ANSON DECOR
Abzugshauben
für designbetonte
Küchen und Kochin-
seln. Auch inox. 230 V
400–1000 m³/h.–Ange-
bot verlangen von:

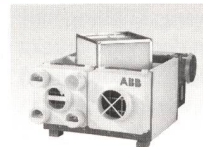


ABB Ventilatoren
mit WRG
4 Anschlüsse 80 mm Ø;
400 m³/h, für Bad-/
WC- und Küchen-Ent-
lüftung in STWE und
EFH. Von ANSON!



Luft-Entfeuch-
ter für Wäsche-
Trockenräume
in EFH und MFH. War-
tungsfrei. Geringer
Energiebedarf. 4 Model-
le 230 V 400–800 W.
Ab Lager! Von ANSON.

Verlangen Sie
Besuch + Beratung:

ANSON 01/461 11 11

Friesenbergstrasse 108
8055 Zürich Fax 01/461 31 11

