Energieversorgung von Einrichtungen in Hochspannungskabeltrassen

Autor(en): **Brakelmann, Heinrich**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **93 (2002)**

Heft 7

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-855398

Nutzungsbedingungen

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

Haftungsausschluss

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

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

http://www.e-periodica.ch

Energieversorgung von Einrichtungen in Hochspannungskabeltrassen

Zur Erhöhung der Durchgangsleistung von Energiekabeltrassen kann eine Zwangskühlung eingesetzt werden. Für die Umwälzung des Kühlmediums mit Hilfe von Pumpen oder Lüftern benötigen solche Kühlanlagen eine Energieversorgung – und zwar gegebenenfalls auch längs der Trasse, weit entfernt von den Schaltstationen an den Kabelenden. Im vorliegenden Beitrag wird ein Leitersystem gezeigt, das durch Induktionswirkung dem Hochspannungskabelsystem an beliebiger Stelle der Trasse Energie entzieht und somit eine aus dem Hochspannungskabel selbst gespeiste Energieversorgung realisiert.

Um eine Erhöhung der Durchgangsleistung durch Zwangskühlung der Energieversorgung von Energiekabeltrassen durch Wasser [1, 2, 3, 4] oder Luft [5] zu erreichen, wird ein Leitersystem vorgeschlagen, das parallel zu einem Hochspannungskabel verlegt oder in dessen

Heinrich Brakelmann

Konstruktion integriert wird (Bild 1). Das System wirkt dabei als Spannungsquelle und bezieht seine Energie direkt aus dem Hochspannungskabelsystem. Die Leistungen, die dem Hochspannungskabel dadurch laststromabhängig entzogen und einer Einrichtung in der Trasse zugeführt werden können, sollen nachfolgend bestimmt werden.

Die Auslegung solcher Anlagen lässt eine grosse Variationsfülle zu. Interessante Anwendungen liegen im autarken Betrieb von Umwälzpumpen in Kühlsystemen und gegebenenfalls auch von aktiven Kühleinrichtungen. Dabei ist beispielsweise an kurze Längen von Versorgungsleitersystemen und Kühlrohren zur Entlastung von Hot-Spot-Bereichen (z.B. Muffenbereichen) eines Hochspannungskabels zu denken, aber auch – bei grösseren Längen der Versorgungsleitersysteme von einigen 100 Metern – an einen autarken Betrieb zwangsgekühlter Hochleistungskabel.

Versorgungsleitersystem

Ein solches Versorgungsleitersystem besteht prinzipiell aus mehreren isolierten Adern – vorzugsweise herkömmlichen 1-kV-Kabeladern –, die entweder direkt in den Mantel- bzw. Schirmbereich des Hochspannungskabels oder in ein Kühlrohr integriert werden oder aber als eigenständige mehradrige Kabel (z.B. konventionelle vieladrige 1-kV-Kabel) ausgeführt werden können, wie dies in Bild 2 skizziert ist.

Zur Funktion des Versorgungsleitersystems soll eine Anordnung nach Bild 2a betrachtet werden: Parallel zu einem Hochspannungskabelsystem sind zwei mehradrige Versorgungsleiterkabel verlegt (zur Vereinfachung ist in Bild 2a eine Aderanzahl von nur $n = 2$ eingetragen). In jede Ader der Versorgungsleiterkabel wird je nach ihrer Positionierung und je nach Verlegeanordnung des Hochspannungskabels eine Längsspannung U_I induziert, die für alle Adern eines Versorgungsleiterkabels gleich gross ist, sich für die beiden Versorgungsleiterkabel jedoch nach Betrag und Phase unterscheiden kann. So können bei symmetrischen Verlegeanordnungen beispielsweise die Längsspannungen der beiden Adern im Betrag gleich sein, in der Phase aber um 100° bis 180° differieren [6].

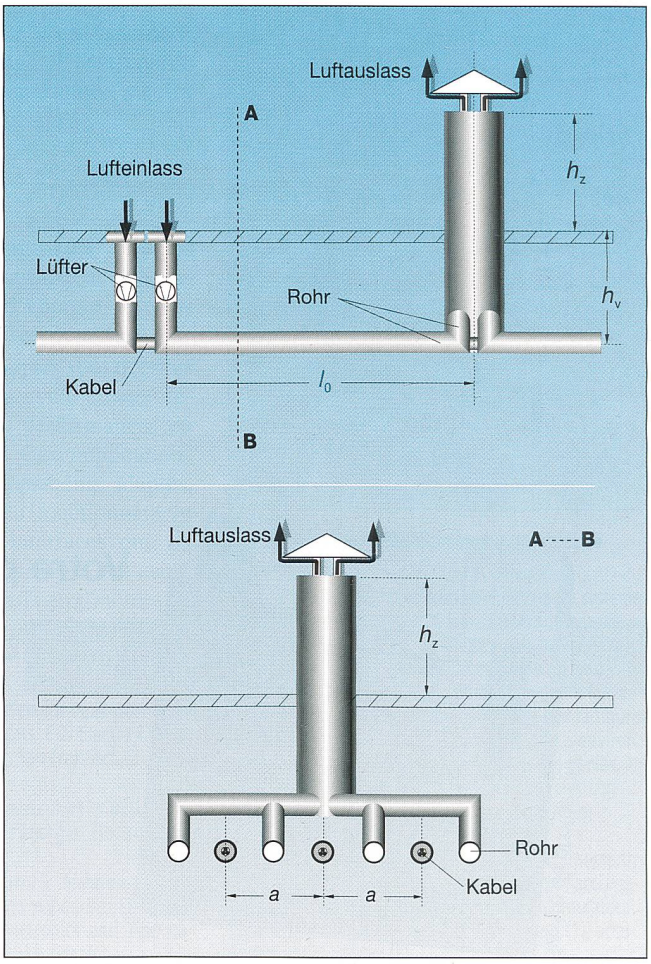

Bild 1 110-kV-VPE-Kabel in einer Ebene angeordnet und mit vier zwangsbelüfteten Kühlrohren
Vergleiche dazu [5].

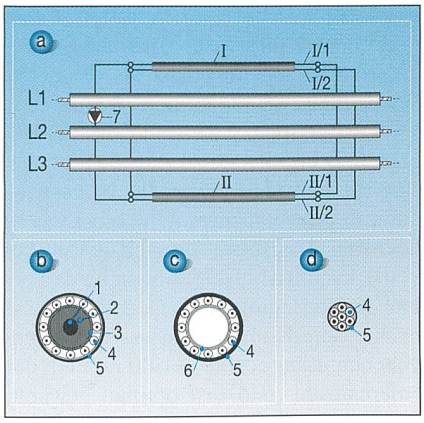

Bild 2 Kabelanlage mit zwei zweiadrigen Versorgungsleiterkabeln

a: Anordnung der Versorgungsleiter; b: Versorgungsleiter in die Kabelkonstruktion integriert; d: Versorgungsleiterkabel; c: Versorgungsleiter in eine Kühlrohrkonstruktion integriert
I, II: Versorgungsleiter; I/1, I/2, II/1, II/2: Adern 1 und 2 des Versorgungsleiters; L1, L2, L3: Leiter des Hochspannungskabels; 1: Leiter; 2: elektrische Isolierung; 3: Kabelschirm; 4: Versorgungsleiter; 5: Korrosionsschutz; 6: Kühlrohr; 7: Umwälzpumpe oder Lüfter

Schaltet man die Adern der beiden Versorgungsleiterkabel entsprechend Bild 2a so zusammen, dass im Prinzip eine Spulenwicklung gebildet wird, so ergibt sich die treibende Spannung einer jeden Wicklungsschleife als Differenz der Längsspannungen der beiden beteiligten Adern: bei einer Phasenwinkeldifferenz von 180° bedeutet dies für Formel 1 den Schleifenfaktor $f_S = 2$ gegenüber dem Betrag der einzelnen Längsspannung U_0; bei einer Phasenwinkeldifferenz von 120° beträgt $f_S = 1{,}7$.

Die an den Anschlussklemmen eines solchen Systems anstehende Leerlaufspannung U_{ges} wächst daher nicht nur mit der Länge l der Versorgungsleiterkabel, sondern auch mit ihrer Aderanzahl n (Formel 1).

$$U_{ges} = U_I' \cdot n \cdot l \cdot f_S = U_0' \cdot n \cdot l \qquad (1)$$

mit U_I': Längsspannungsbelag der Ader eines Versorgungsleiterkabels; f_S: Schleifenfaktor; $U_0' = f_S \cdot U_I'$: Spannungsbelag der Leiterschleife eines Versorgungsleiterkabels; n: Aderanzahl der Versorgungsleiterkabel; l: Länge der Versorgungsleiterkabel.

Als Anhaltspunkt für die Grössenordnung der induzierten Längsspannungsbeläge soll davon ausgegangen werden, dass für ein flach verlegtes 110-kV-VPE-Kabel[1] mit Leiterquerschnitt 1000 mm² und Aussendurchmesser 90 mm die beiden Versorgungsleiterkabel aussen, dicht neben den beiden äusseren Kabeladern platziert werden. Je nach Achsabstand des 110-kV-Systems ergeben sich dann für einen Leiterstrom von 1000 A Längsspannungsbeläge einer Leiterschleife von 100 bis 350 mV/(m·kA) (Tabelle).

Für die Bestimmung der Leistung, die ein solches Versorgungsleiterkabelsystem an einen angeschlossenen Verbraucher abgeben kann, wird als Ersatzschaltbild eine Spannungsquelle der treibenden Spannung U_{ges} nach Formel 1 betrachtet. Die Innenimpedanz dieser Spannungsquelle setzt sich zusammen aus dem ohmschen Längswiderstand (Formel 2) und der Schleifenreaktanz (Formel 3).

$$R_{ges} = 2 \cdot R_0' \cdot n \cdot l \qquad (2)$$

$$X_{ges} = X_0' \cdot n \cdot l = \frac{\omega \cdot \mu_0 \cdot n \cdot l}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot s}{d_{KL}}\right) \qquad (3)$$

Die Formelzeichen bedeuten dabei: R_{ges}: Innenwiderstand der Spannungsquelle; R_0': Widerstandsbelag der Ader eines Versorgungsleiterkabels; X_{ges}: Innenreaktanz der Spannungsquelle; X_0': Reaktanzbelag einer Schleife, die aus jeweils einer Ader der beiden Versorgungsleiterkabel gebildet wird; ω: Netzkreisfrequenz; μ_0: Permeabilität des Vakuums; s: Achsabstand der beiden Versorgungsleiterkabel; d_{KL}: Leiterdurchmesser der Ader eines Versorgungsleiterkabels.

Werden als Versorgungsleiterkabel marktübliche mehradrige 1-kV-Kabel gewählt, so liegt der Widerstandsbelag R_0' (20 °C) für Kupferleiterquerschnitte von 1,5 bis 10 mm² bei etwa 12 bis 2,5 mΩ/m. Mit Achsabständen s der Versorgungsleiterkabel zwischen 180 und 1100 mm beträgt der Reaktanzbelag X_0' (für $d_{KL} \approx 1$ bis 3 mm) etwa 0,6 bis 0,8 mΩ/m, so dass in diesem Leiterquerschnittsbereich $R_{ges}' \gg X_{ges}'$ gilt und die Ersatzspannungsquelle näherungsweise als ohmsch angesetzt werden kann (Formel 4).

$$Z_{ges} \approx R_{ges} = 2 \cdot R_0' \cdot n \cdot l \qquad (4)$$

Für eine erste Abschätzung der verfügbaren Leistung wird der Verbraucher als ohmscher Widerstand R_a angenommen. Die grösste Leistung wird in diesem Verbraucher bei Leistungsanpassung ($R_a = R_{ges}$) umgesetzt und beträgt

$$P_{max} = \frac{\left(U_0' \cdot n \cdot l\right)^2}{4 \cdot R_{ges}} = \frac{n \cdot l \cdot U_0'^2}{8 \cdot R_0'} = n \cdot l \cdot P_{0,max}' \qquad (5)$$

$P_{0,max}'$ ist dabei der maximale Leistungsbelag einer einzelnen, aus zwei Adern der Versorgungsleiterkabel gebildeten Schleife.

$$P_{0,max}' = \frac{U_0'^2}{8 \cdot R_0'} \qquad (6)$$

Für den oben genannten Querschnittsbereich von 1,5 bis 10 mm² liegt dieser Leistungsbelag für $U_0' \approx 100$ bis 300 mV/(m·kA) und $R_0' \approx 12$ bis 2,5 mΩ/m bei

$$P_{0,max}' \approx 0{,}1 \ldots 4{,}6 \ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{kA}} \qquad (7)$$

Gleichzeitig gilt für den in einem Versorgungsleiterkabel maximal auftretenden Verlustbelag

$$P_{v,max}' = n \cdot P_{0,max}' \qquad (8)$$

Für den ohmschen Verbraucher $Z_a \approx R_a$ ergibt sich je nach Verbraucherwiderstand R_a der Verbraucherstrom I_a. Damit lässt sich – bei einer Klemmenspannung U_a – die im Verbraucher umgesetzte Leistung P_a bestimmen (Formeln 9, 10 und 11).

$$I_a = \frac{U_{ges}}{R_{ges} + R_a} = \frac{U_0' \cdot n \cdot l}{2 \cdot R_0' \cdot n \cdot l + R_a} \qquad (9)$$

$$U_a = \frac{U_0' \cdot n \cdot l \cdot R_a}{2 \cdot R_0' \cdot n \cdot l + R_a} \qquad (10)$$

$$P_a = \frac{\left(U_0' \cdot n \cdot l\right)^2 \cdot R_a}{\left(2 \cdot R_0' \cdot n \cdot l + R_a\right)^2} \qquad (11)$$

Achsabstand [mm]	U_0' 1 Versorgungsleiter [mV/(m·kA)]	U_0' 1 Schleife [mV/(m·kA)]
0	80	130
300	151	250
500	183	310

Längsspannungsbeläge eines Versorgungsleiters (neben Phase L1, Bild 2a) und einer Schleife aus zwei Versorgungsleitern (neben Phasen L1 und L3, Bild 2a) für einen Leiterstrom des 110-kV-Hochspannungskabels von 1000 A

Erforderliche Adernlänge

Wird der Verbraucher durch seine Kenngrössen Nennspannung U_N und Widerstand R_a vorgegeben, so ist die Bemessung der Versorgungsleiterkabel nach der vorgegebenen Klemmenspannung vorzunehmen. Mit Formel 10 lässt sich ihre Adernlänge, d.h. das erforderliche Produkt ($n \cdot l$) aus Adernanzahl und Länge der Versorgungsleiterkabel, gemäss Formel 12 bestimmen.

$$n \cdot l = \frac{U_N \cdot R_a}{U_0' \cdot R_a - 2 \cdot U_N \cdot R_0'} \qquad (12)$$

Die Adernlänge ergibt sich demnach aus den Verbraucherparametern U_N und R_a, sowie der Verlegeanordnung (U_0') und dem Leiterquerschnitt der Versorgungsleiterkabel (R_0').

Meist ist der Verbraucher durch seine Kenngrössen Nennspannung U_N und

Nennleistung P_N beschrieben. Für diesen Fall folgt aus Formel 12 die erforderliche Adernlänge zu

$$n \cdot l = \frac{U_N^2}{U_0' \cdot U_N - 2 \cdot P_N \cdot R_0'} \qquad (13)$$

Kann bei der Auslegung der Anlage Formel 13 nicht exakt erfüllt werden, so ergeben sich gemäss Formel 10 die tatsächliche Klemmenspannung und die Leistung des Verbraucher zu

$$U_a = \frac{U_0' \cdot n \cdot l \cdot U_N^2}{2 \cdot R_0' \cdot n \cdot l \cdot P_N + U_N^2} \qquad (14)$$

$$P_a = \frac{(U_0' \cdot n \cdot l)^2 \cdot U_N^2 \cdot P_N}{(2 \cdot R_0' \cdot n \cdot l \cdot P_N + U_N^2)^2} \qquad (15)$$

Bei allen bisher abgeleiteten Beziehungen (Formeln 1 bis 14) ist zu beachten, dass der induzierte Längsspannungsbelag U_0' eine Funktion des Laststroms des Hochspannungskabels ist, sich also je nach Betriebssituation einstellt, wie weiter unten noch gezeigt wird.

Anwendungsbeispiele

Nachfolgend soll das Verhalten eines Verbrauchers untersucht werden, der von einer aus zwei Versorgungsleiterkabeln gebildeten Schleife gespeist wird. Hierzu wird ein flach verlegtes 110-kV-VPE-Kabel (Leiterquerschnitt 1000 mm²; Aussendurchmesser 90 mm) mit einem Achsabstand a von 300 mm gewählt (U_0' ≈ 250 mV/(m·kA)). Die Abschätzung wird für zwei Beispiele durchgeführt, wobei den Versorgungsleiterkabeln wieder Kupferleiterquerschnitte von 1,5 bis 10 mm² zugeordnet werden (R_0' = 12 bis 2,5 mΩ/m).

Beispiel 1: Länge der Versorgungsleiterkabel l = 400 m (Muffenabstand)

Für einen Laststrom von 1 kA zeigt Bild 3 die im Verbraucher umgesetzte Leistung nach Formel 11 als Funktion des Verbraucherwiderstandes R_a, und zwar für zwei fünfadrige Versorgungsleiterkabel mit einem Kupferleiterquerschnitt von 2,5 mm² (R_0' (8 mΩ/m). Zum Vergleich ist die Verbraucherleistung auch für

- zwei zehnadrige Versorgungsleiterkabel (n=10) bei demselbem Leiterquerschnitt;
- zwei einadrige Versorgungsleiterkabel (n=1) desselben Leiterquerschnitts sowie
- zwei einadrige Versorgungsleiterkabel mit sehr grossem Leiterquerschnitt (R_0' ↦0 Ω/m)² wiedergegeben.

Bild 3 zeigt, dass durch die Variation der Aderanzahl der Versorgungsleiterkabel die im Verbraucher umgesetzte Leistung in weiten Grenzen verändert werden kann. Sie liegt gegebenenfalls sehr viel höher als im Fall n = 1, d.h. im Fall einer direkten Beschaltung der Kabelmäntel, und zwar selbst dann, wenn deren Querschnitt sehr gross gewählt wird.

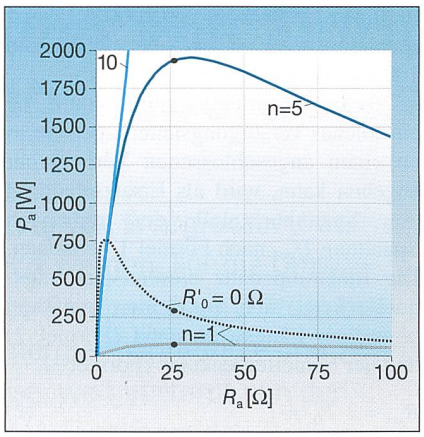

Bild 3 Verbraucherleistung als Funktion des Verbraucherwiderstandes für zwei 400 m lange Versorgungsleiterkabel

Laststrom 1 kA; Parameter: Adernanzahl n der Induktionsleiterkabel, Leiterquerschnitt der Versorgungsleiterkabel 2,5 mm² bzw. extrem gross (R_0' ≈ 0 Ω)
•: Arbeitspunkt für vorgegebenen Verbraucher (230-V-/2-kW-Pumpe mit R_a = 26,5 Ω)

Ergänzend ist aus Bild 4 ersichtlich, dass mit Hilfe mehradriger Versorgungsleiterkabel auch die Spannung – im Gegensatz zur direkten Beschaltung der Kabelmäntel (n = 1) – in weiten Grenzen variiert werden kann. Hierzu muss allerdings die Adernanzahl entsprechend den sonstigen Parametern der Anlage und dem Verbraucher gewählt werden.

Als Beispiel soll ein Verbraucher mit einer Nennspannung von 230 V und einer Nennleistung von 2 kW vorgegeben sein (z.B. eine Kühlwasser-Umwälzpumpe), dessen Eingangsimpedanz als ohmscher Widerstand angenommen wird (cos φ ≈ 1). Der Innenwiderstand dieses Verbrauchers ergibt sich zu R_a = 26,5 Ω.

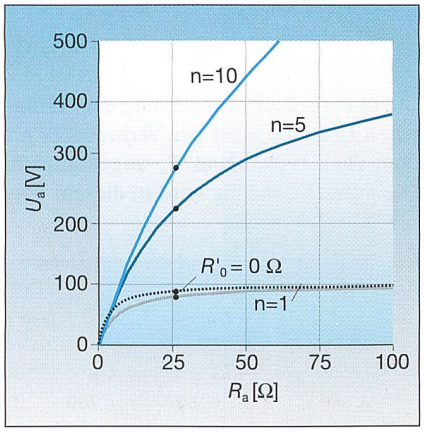

Bild 4 Verbraucher-Klemmenspannung als Funktion des Verbraucherwiderstandes für zwei 400 m lange Versorgungsleiterkabel

Laststrom 1 kA; Parameter: Adernanzahl n der Induktionsleiterkabel, Leiterquerschnitt der Versorgungsleiterkabel 2,5 mm² bzw. extrem gross (R_0' ≈ 0 Ω)
•: Arbeitspunkt für vorgegebenen Verbraucher (230-V-/2-kW-Pumpe mit R_a = 26,5 Ω)

Wird gefordert, dass die Nennspannung des Verbrauchers gerade bei einem höchsten Laststrom der 110-kV-Kabel von 1 kA ansteht, so ergibt sich aus Formel 12 die Bedingung $n \cdot l$ = 2075[3]. Demnach ist die Kombination aus der vorgegebenen Länge von l=400 m und der Adernanzahl n=5 fast optimal gewählt. Die sich für die unterschiedlichen diskutierten Fälle ergebenden Betriebspunkte sind in den Bildern 3 und 4 eingezeichnet.

Der längs der Kabelstrecke von den beiden Versorgungsleiterkabeln bewirkte zusätzliche Verlustbelag beträgt bei gleichem Laststrom

$$P_V' = \frac{R_{ges} \cdot I_a^2}{l} = \frac{(U_0' \cdot n \cdot l)^2 \cdot 2 \cdot R_0' \cdot n}{(2 \cdot R_0' \cdot n \cdot l + R_a)^2} \qquad (16)$$

und damit für das obige Beispiel P_v' = 5,9 W/m[4]. Die Verbraucher-Klemmenspannung hängt dabei linear, die Verbraucherleistung quadratisch vom Laststrom ab.

Bild 5 zeigt diese Zusammenhänge für das Beispiel des Verbrauchers mit 230 V/2 kW. Danach nimmt die Verbraucherspannung U_a bei halbem Laststrom (500 A) auf die Hälfte (115 V) und die Verbraucherleistung P_a auf ein Viertel (500 W) des Höchstwertes ab. Auf Fragen des Anlaufverhaltens motorischer Verbraucher einerseits und gegebenenfalls erforderlicher Klemmenspannungsbegrenzung andererseits soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

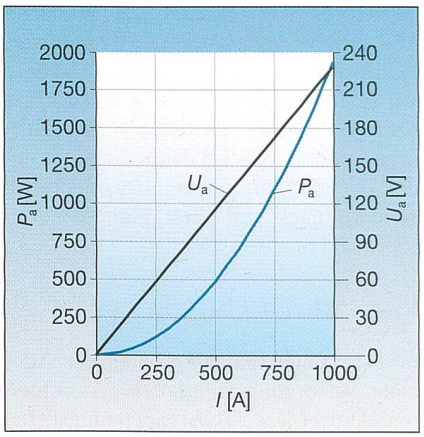

Bild 5 Abhängigkeit der Verbraucherleistung und der Verbraucher-Klemmenspannung vom Laststrom des 110-kV-Kabelsystems

n = 5; l = 400 m; 230-V-/2-kW-Pumpe mit R_a = 26,5 Ω

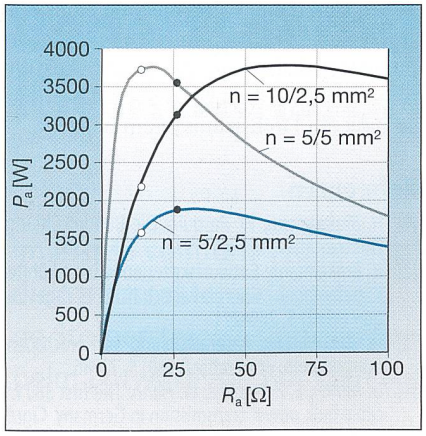

Bild 6 Verbraucherleistung als Funktion des Verbraucherwiderstandes für zwei 400 m lange Versorgungsleiterkabel

Laststrom 1 kA; Parameter: Adernanzahl n der Induktionsleiterkabel, Leiterquerschnitt der Versorgungsleiterkabel 2,5 mm² bzw. 5 mm²
Arbeitspunkte für vorgegebenen Verbraucher:
P_1: 2-kW-Pumpe mit V_N = 230 V, P_N = 2000 W, R_a = 26,5 Ω
P_2: 4-kW-Pumpe mit V_N = 230 V, P_N = 4000 W, R_a = 13,3 Ω

Die Verbraucherleistung lässt sich spürbar vergrössern, wenn die Adernanzahl der Versorgungsleiterkabel von n = 5 auf n = 10 gesteigert wird (Bild 3). Allerdings steigt dann auch die Spannung am Verbraucher entsprechend über die gewünschte Spannung hinaus an (Bild 4).

Bei gleich bleibender Verbraucherspannung lässt sich dann praktisch eine Verdopplung der Verbraucherleistung erreichen, wenn man mehrere Versorgungsleiterkabel bzw. deren Adern parallel schaltet, was einer Vergrösserung des Leiterquerschnitts gleichkommt. Mögliche Massnahmen sind daher

- jeweils zwei Adern von zwei zehnadrigen Versorgungsleiterkabeln werden parallel geschaltet (2×10/2×2,5 mm²);
- jeweils zwei fünfadrige Versorgungsleiterkabel werden nebeneinander aussen neben die beiden äusseren 110-kV-Kabeladern gelegt (2×2×5/2,5 mm²) und parallel geschaltet;
- der Leiterquerschnitt der beiden fünfadrigen Versorgungsleiterkabel (2×5/5 mm²) wird verdoppelt, was in der Wirkung dem letztgenannten Fall entspricht.

Die hiermit erreichbaren Verbraucherleistungen als Funktion des Verbraucherwiderstandes sind in Bild 6 zusammengestellt. Der Vergleich mit den Kennlinien für die fünfadrigen (5×2,5 mm²) und für die zehnadrigen (10×2,5 mm²) Versorgungsleiterkabel aus Bild 3 zeigt die weit gehenden Möglichkeiten, durch Auswahl der Parameter – Länge der Versorgungsleiterkabel, Anzahl der in Reihe geschalteten Adern und Anzahl der parallel geschalteten Adern bzw. Adern-Leiterquerschnitt – die Versorgungsleiterkabelanlage optimal dem jeweiligen Verbraucher anzupassen. Zur Verdeutlichung sind die sich ergebenden Arbeitspunkte für einen 2-kW-Verbraucher (•: U_N = 230 V; R_a = 26,5 Ω) sowie für einen 4-kW-Verbraucher (¤: U_N = 230 V; R_a = 13,3 Ω) eingezeichnet.

Beispiel 2: Geringe Länge der Versorgungsleiterkabel (l = 40 m) zum Betrieb einer Umwälzpumpe für Kühlwasserrohre als Heat-Pipe-Ersatz

Ebenfalls für einen Laststrom von 1 kA soll nun der Fall betrachtet werden, dass die Versorgungsleiterkabel nur eine kurze Länge von 40 m aufweisen. Ein Anwendungsbeispiel ist das Auslegen von Kühlwasserrohren in thermisch schwierigen Trassenbereichen (z.B. bei Kabelkreuzungen), die zur Abfuhr von Verlustwärme aus dem kritischen Bereich durch Umwälzen des Kühlwassers mittels einer autark betriebenen Umwälzpumpe verwendet werden. In gewissem Rahmen erreicht man heute eine solche thermische Entlastung durch den Einsatz von Wärmerohren (Heat-Pipes, [7]), die in ihrer Länge allerdings stark eingeschränkt sind.

Werden mit den Versorgungsleiterkabeln Kühlwasserrohre parallel zu den Kabeln über eine Länge von 40 m gelegt, so ist für die Wärmeabfuhr aus dem thermischen Engpassbereich der Kabelkreuzung nur eine geringe Antriebsleistung erforderlich. Geeignet wären zu diesem Zweck Pumpen geringer Spannung und Leistung, wie sie im Bereich der Solartechnik für den Dauerbetrieb Verwendung finden. Als typisches Beispiel wird eine Nennspannung von U_a = 18 V (die Betriebsspannung liegt oft zwischen 2 bis 22 V) und eine Nennleistung von P_a = 36 W angenommen. Aus Formel 12 folgt damit für einen Leiterquerschnitt von 2,5 mm² $n{\cdot}l$ = 82,6[5].

Somit reichen zwei zweiadrige Versorgungsleiterkabel (2,5 mm²) aus, um die vorgegebenen Randbedingungen näherungsweise zu erfüllen. Bei einem Laststrom von 1 kA ergibt sich U_a = 17,5 V und P_a = 34,1 W.

Mit einer von einer solchen Pumpe erzeugten Druckdifferenz von etwa 0,3 bar und einer Temperaturdifferenz des umgewälzten Kühlwassers zwischen Hot-Spot und kühlem Bodenbereich von nur 10 K lässt sich eine abgeführte Wärmeleistung von rund 14 kW – die thermische Entlastung des Kabelgrabens also zu etwa 350 W/m – selbst dann realisieren, wenn der Wirkungsgrad der Umwälzpumpe nur zu 30% angesetzt wird. Dies ist eine Wärmeleistung, die normalerweise bei weitem nicht erforderlich ist.

Möglichkeiten optimierter Versorgungsleitersysteme

Um eine schnelle Abschätzung der erforderlichen, an die Leistung angepassten Auslegung eines Versorgungsleitersystems zu ermöglichen, wurde ein Rechenprogramm entwickelt, das zu einer vorgegebenen Verbraucherleistung die minimale Adernlänge $n{\cdot}l$ sucht. Die Ergebnisse sind beispielhaft für einen Leistungsbereich bis 5 kW in Bild 7 zusammengefasst (Laststrom: 1 kA).

$$U_N = \frac{n \cdot l \cdot U_0'}{2} \qquad (17)$$

Unter den getroffenen Voraussetzungen ergeben sich lineare Kennlinien sowohl für die Adernlänge ($n \cdot l$) als auch für die Verbraucherspannung. Dies liegt daran, dass die minimale Adernlänge ($n \cdot l$) sich gerade bei Anpassung des Versorgungsleitersystems an den Verbraucher ergibt. Da im Anpassungsfall die Verbraucherspannung gleich der halben induzierten Spannung ist (Formel 17), ergibt sich für das Verhältnis zwischen Adernlänge $n \cdot l$ und Verbraucherspannung U_N für jede Verbraucherleistung im vorliegenden Beispiel gemäss Formel 12 das feste Verhältnis

$$\frac{n \cdot l}{U_N} = \frac{2}{U_0'} = \frac{2}{0{,}25\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}} = 8\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{V}} \qquad (18)$$

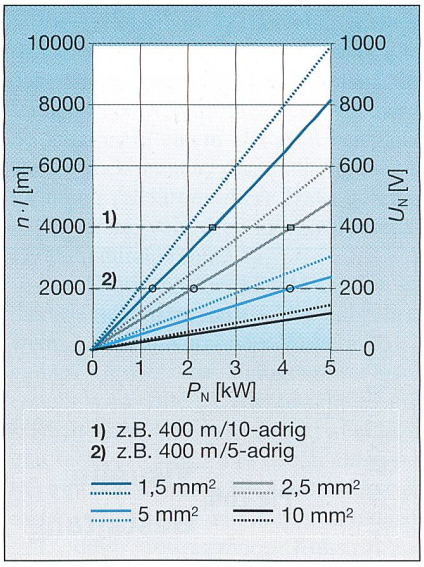

Bild 7 Adernlänge und Klemmenspannung von Versorgungsleitersystemen unterschiedlicher Leiterquerschnitte als Funktion der Verbraucherleistung

Leistungsbereich: 0...5 kW; gestrichelte Linien: U_N; durchgezogene Linien: $n{\cdot}l$

Bei einer Länge der Versorgungsleiterkabel von 40 m können diesen schon bei kleinen Leiterquerschnitten von 1,5 bis 5 mm² Leistungen bis zu etwa 500 W entnommen werden, wenn die Kabel fünf- bis zehnadrig ausgeführt werden. Die Klemmenspannungen liegen dabei unterhalb 100 V. Entsprechend ist bei einer Länge der Versorgungsleiterkabel von 400 m unter gleichen Voraussetzungen ein Leistungsbezug bis zu etwa 5 kW möglich. Die Klemmenspannungen liegen dabei zwischen 200 und 400 V (Bild 7).

Wählt man grössere Leiterquerschnitte von 5 bis 25 mm² und begrenzt die Verbraucherspannung auf 400 V, so können einer Versorgungsleiterkabelschleife mit 400 m Länge (Muffenabstand) Leistungen von mehr als 40 kW entnommen werden (2×10×25 mm²). Dieselben Leistungen ergeben sich beispielsweise auch dann, wenn vieradrige Versorgungsleiterkabel (2×4×25 mm²) mit einer Länge von 1000 m gewählt werden.

Weitere Möglichkeiten zur Steigerung der Verbraucherleistungen sowie zum Betrieb von Drehstromverbrauchern ergeben sich dann, wenn anstelle einer einzigen Schleife drei Schleifen aus Versorgungsleiterkabeln in geeigneter Ausführung und Anordnung verwendet werden, so dass ein Drehstromsystem entsteht.

L'alimentation en énergie de dispositifs installés dans les canaux de câbles haute tension

Un refroidissement forcé peut servir à améliorer la puissance admise dans les canaux de câbles énergétiques. Dans de telles installations de refroidissement, la circulation du fluide refroidisseur au moyen de pompes ou de ventilateurs nécessite une alimentation en énergie et ceci éventuellement sur le trajet des câbles, loin des postes de couplage situés aux extrémités de la ligne. L'article présente un système de conducteurs prélevant de l'énergie par induction en un point quelconque du câble haute tension et réalisant ainsi l'alimentation directement depuis celui-ci.

En vue d'augmenter la puissance de passage par le refroidissement forcé des câbles d'énergie au moyen d'eau ou d'air [5], il est proposé un système composé d'un conducteur posé parallèlement au câble haute tension ou intégré à celui-ci. Le système sert de source de courant et prend son énergie directement sur le câble.

Referenzen

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

[2] H. Brakelmann: Entwurfskriterien leitergekühlter Kabelanlagen. Energiewirtschaftliche Tagesfragen (1982) S. 260–271.

[3] *H. Brakelmann:* Lateralkühlung von Hochspannungskabeln. etz-Archiv (1980) S. 77–86.

[4] *U. Müller, E. F. Peschke, W. Hahn:* The first 380 kV cable bulk power transmission in Germany. Cigré-Report 21-08, 1976.

[5] *H. Brakelmann:* Kabeltrassen mit zwangsbelüfteten Rohren. Bulletin SEV/VSE (1999) S. 19–23.

[6] *H. Brakelmann:* Längsspannungs- und verlustarme Verlegeanordnungen in Kabeltrassen. etz-Archiv (1988) S. 361–365.

[7] J. P. Ruiter, A. W. Thus: Cooling of oil-filled cable joints using heat pipes. IEE Proceedings (1984) S. 340–348.

Adresse des Autors

Heinrich Brakelmann, Prof. Dr.-Ing., Universität Duisburg, D-47048 Duisburg, brakelmann@uni-duisburg.de

[1] VPE: Vernetztes Polyethylen

[2] Näherungsweise erfasst dies auch den Fall, dass der Verbraucher direkt an die querschnittsgrossen Metallmäntel bzw. -schirme der beiden aussen liegenden Kabeladern angeschlossen wird.

[3] $R_a = 26{,}5\ \Omega$; $U_N = 230$ V; $U_0' = 0{,}25$ mV/(m·kA); $R_0' = 0{,}008\ \Omega$/m

[4] $R_a = 26{,}5\ \Omega$; $U_0' = 0{,}25$ mV/(m·kA); $R_0' = 0{,}008\ \Omega$/m; $n = 5$; $l = 400$ m

[5] $R_a = 26{,}5\ \Omega$; $U_N = 18$ V; $P_N = 36$ W; $U_0' = 0{,}25$ mV/(m·kA); $R_0' = 0{,}008\ \Omega$/m

Kompetenz in Text und Bild

Suchen Sie eine Fachperson, die Ihre Drucksachen gestaltet und realisiert?

Illustrationen
Briefschaften
Bücher
Beschriftungen
Hauszeitungen
Logos
Broschüren
Plakate
Jahresberichte

Das Titelbild dieses Bulletins ist eine Referenz.
Weitere Arbeiten zeige ich Ihnen gerne.

Pia Thür
Visuelle Gestaltung
Hardturmstrasse 261, 8005 Zürich
Tel 01-563 86 76 Fax 01-563 86 86
piathuer@dplanet.ch