Frequenzreduzierte Energieübertragung und -verteilung mit Kabeln

Autor(en): **Brakelmann, Heinrich / Steinbrich, Kai**

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 1

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-855370

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

Frequenzreduzierte Energieübertragung und -verteilung mit Kabeln

Energieübertragung bei Mittelspannung erfolgt zum überwiegenden Teil mit erdverlegten Kabeln. Die «niedrige» Spannung führt zu hohen Betriebsströmen und daraus resultierenden hohen Leiterverlusten. Zusätzlich entstehen frequenzabhängige Verluste im Leiter (Skin- und Proximityeffekt), den äusseren Kabelaufbauelementen (induzierte Längsströme, Wirbelstromverluste, Hystereseverluste) und in der Isolierung (dielektrische Verluste). Ausserdem belasten durch betriebsfrequente Spannungsänderung hervorgerufene Blindströme die Kabel.

Der nachfolgende Beitrag beschreibt die Möglichkeit, durch eine frequenzreduzierte Energieübertragung in der Drehstromtechnik die Vorteile einer Gleichstromübertragung zu erzielen, wobei weiterhin herkömmliche AC-Mittelspannungskabel eingesetzt und bestehende Kabelanlagen genutzt werden können. Zudem werden die daraus resultierenden Übertragungseigenschaften und Einsatzmöglichkeiten aufgezeigt.

Heinrich Brakelmann, Kai Steinbrich

Gleichstromvorteile bei AC-Betrieb erzielen

Um die eingangs aufgeführten Verluste und Abweichungen der Betriebsspannung möglichst niedrig zu halten, werden im Mittelspannungsnetz im Vergleich zum Hochspannungsnetz nur geringe Distanzen überbrückt. Zudem wurden – um den hohen Übertragungsverlusten und den geringen Übertragungslängen der Drehstromtechnik entgegenzuwirken – unterschiedliche Lösungen wie einseitiges Erden der Kabelschirme, Cross-Bonding[1], Legen der Kabel im Dreieck oder Milikenleiter[2] (für grosse Leiterquerschnitte) entwickelt, die jedoch schnell an technische oder wirtschaftliche Grenzen stossen, so dass sie bei Mittelspannung fast keine Anwendung finden.

Ein Einsatz der Mittelspannungskabel bei 0 Hz – also eine Gleichstromübertragung (HGÜ) – würde die frequenzabhängigen Probleme der Drehstromübertragung beseitigen, doch zeigen Untersuchungen, dass ein Gleichstrombetrieb mit herkömmlichen kunststoffisolierten Kabeln auf Grund der sich ausbildenden Raumladungen und Feldstärkeverzerrungen sowie der Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit in der Isolierung nicht möglich ist [1].

Um dennoch die bei Gleichstrombetrieb gegebenen Vorteile erzielen zu können, gab es in der Vergangenheit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Herstellung von Kunststoffkabeln für Gleichstrom, was – bezüglich des verwendeten Isolierstoffes – zu modifizierten Gleichstromkabeln geführt hat [2]. Diese Kabel haben sich in ersten realisierten Projekten bewährt [3]. Ein Umrüsten bestehender Übertragungsstrecken auf Gleichstrombetrieb ist allerdings nicht möglich.

Prinzip der Energieübertragung bei reduzierter Betriebsfrequenz

Für eine Energieübertragung mit reduzierter Betriebsfrequenz sind Modifikationen bei Energieeinspeisung und Entnahme an der Übertragungsstrecke nötig.

Um die reduzierte Frequenz bereitzustellen, muss die übliche Betriebsfrequenz am Anfang der Übertragungsstrecke über Umrichter gesenkt oder aber direkt aus der Energieerzeugung reduziert eingespeist werden, wie dies im Bahnstromnetz geschieht. Am Ende der Übertragungsstrecke wird über Umrichter die ursprüngliche Netzfrequenz wieder bereitgestellt. Denkbar sind aber auch Anwendungen der reduzierten Frequenz für spezielle industrielle Prozesse.

Bild 1 zeigt zwei Anwendungsbeispiele einer frequenzreduzierten Energieübertragung. So können z.B. grosse Distanzen mit herkömmlichen Drehstromkabeln überbrückt oder die Über-

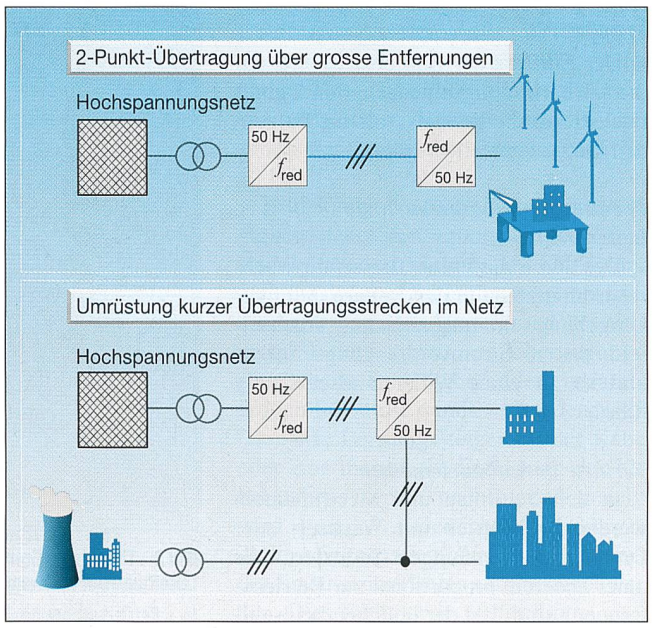


Bild 1 Schematische Darstellung zweier Einsatzmöglichkeiten einer frequenzreduzierten Energieübertragung

Eigenschaften des untersuchten 30-kV-Übertragungssystems

Die angegebenen Daten wurden beim betrachteten Kabel sowie seiner Legung und Legeumgebung zu Grunde gelegt

Grösse	Einheit	30-kV-VPE-Kabel
Leitermaterial	–	Kupfer
Leiterquerschnitt	mm^2	500,1000, 2000
Leiterfüllfaktor	–	0,886
Leiteraufbau	–	rund/segmentiert
Maximale Leitertemperatur	K	363
Dicke der inneren Leitschicht	mm	0,6
Dicke der äusseren Leitschicht	mm	0,8
Dicke der Isolierung	mm	7,5
Dielektrizitätszahl	–	2,5
Dielektrischer Verlustfaktor	–	10^{-3}
Spezifischer thermischer Widerstand der Isolierung	K·m/W	3,5
Cu-Schirm	mm^2	50
Dicke des Korrosionsschutzes	mm	3
Spezifischer thermischer Widerstand des Korrosionsschutzes	K·m/W	5
Tiefe *h*	m	0,7
Lücke zwischen den Kabeladern	mm	70
Umgebungstemperatur	K	293
Thermische Leitfähigkeit des Erdbodens trocken/feucht	W/K·m	0,4/1,0
Grenzerwärmung für Austrocknung	–	nach VDE 0298

tragungseigenschaften bestehender Streckenabschnitte im Netz verbessert werden.

Die gewünschte Betriebsfrequenz kann über Frequenzumrichter mit Spannungszwischenkreis bereitgestellt werden. Diese mit IGBT-Technik[3] ausgerüsteten Umrichter haben günstige Betriebseigenschaften, die sie für diesen Einsatz prädestinieren [4]. Negativ wirken sich bei einer ersten Betrachtung die Umrichterverluste aus. Diese können aber durch die verbesserten Übertragungseigenschaften auf der Übertragungsstrecke kompensiert werden.

Betriebsverhalten der Kabel bei reduzierter Betriebsfrequenz

Der Einfluss der Betriebsfrequenz auf die Übertragungseigenschaften eines Drehstromkabelsystems soll im Folgenden kurz dargestellt werden.

Frequenzabhängige Verluste

Leiterverluste

Der durch die Leiter fliessende Wechselstrom erzeugt in den Leitern und ihrer Umgebung ein magnetisches Wechselfeld, das zu Stromverdrängungseffekten und so zu einer Widerstandserhöhung führt.

Verluste in Aufbauelementen

In den Schirmen und Metallmänteln werden bei Betrieb mit Wechsel- oder Drehstrom Spannungen induziert, die unter anderem proportional zur Betriebsfrequenz sind. Bei der üblichen beidseitigen Erdung verursachen die induzierten Spannungen Ströme, die an den Gesamtverlusten des Systems einen grossen Anteil haben können.

Des Weiteren verursachen die magnetischen Wechselfelder zusätzliche Verluste durch Wirbelströme in metallenen Hüllen und durch Ummagnetisierung in ferromagnetischen Materialien.

Eine reduzierte Betriebsfrequenz verringert in allen oben aufgeführten Fällen die Verluste in den äusseren Aufbauelementen. In [5] wird dies an 110-kV-VPE-Kabeln[4] gezeigt, welche vor dem Hintergrund eines Retrofittings im Stahlrohr betrachtet wurden.

Verluste in der Isolierung

In den Isolierungen der Kabel treten bei Wechselspannungen dielektrische Verluste auf. Diese können mit sinkender Betriebsfrequenz verringert werden.

Generatorverluste

Die im Generator entstehenden Verluste im Erreger- sowie im Statorstromkreis sind in hohem Masse blindleistungsabhängig [6]. Durch eine Frequenzreduzierung wird der Blindleistungsbedarf der Übertragungsstrecke verringert, womit auch die Verluste im Generator gesenkt werden.

Betriebsgrössen

Längsspannung

Mit sinkender Frequenz verringert sich die Reaktanz der Längsinduktivität, während sich die Reaktanz der Querkapazität vergrössert. Diese Effekte haben zur Folge, dass induktiver Spannungsfall oder kapazitiver Spannungsanstieg (in Abhängigkeit vom Laststrom) stark reduziert werden und der Ohm'sche Widerstand für die Längsspannung dominierend wird.

Spannungsfestigkeit

Die für Gleichspannungskabel zulässigen elektrischen Betriebsfeldstärken liegen spürbar über denen einer Wechselspannungsbeanspruchung. Probleme bei der Gleichspannungsbeanspruchung treten durch in die Isolierung diffundierende Raumladungen und die stark temperaturabhängige Leitfähigkeit der Isolierung auf.

Nach [7] kann durch eine gegenüber 50 Hz verringerte Betriebsfrequenz eine

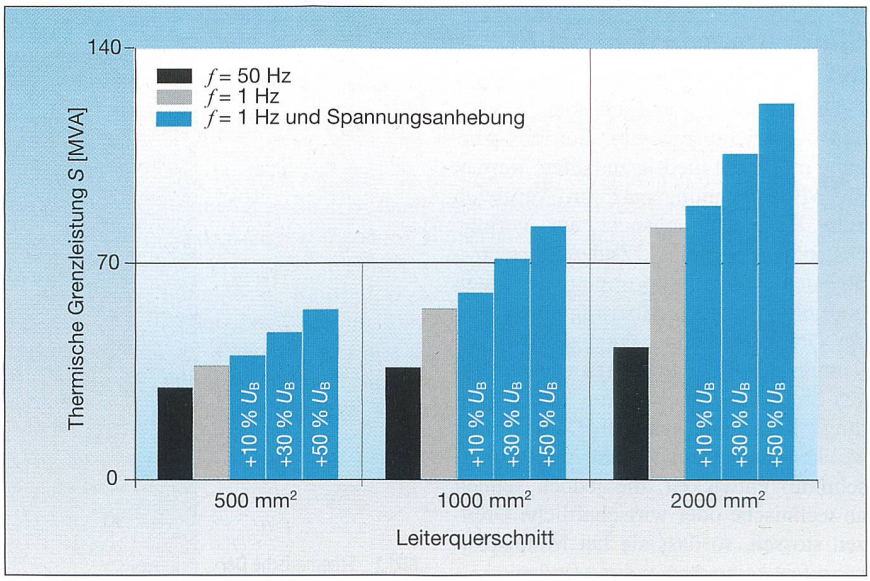


Bild 2 Thermische Grenzleistung von 30-kV-VPE-Mittelspannungskabeln in Abhängigkeit vom Leiterquerschnitt. Parameter: Betriebsfrequenz

U_B = Betriebsspannung; Kabelaufbau und Verlegeanordnung in der Tabelle

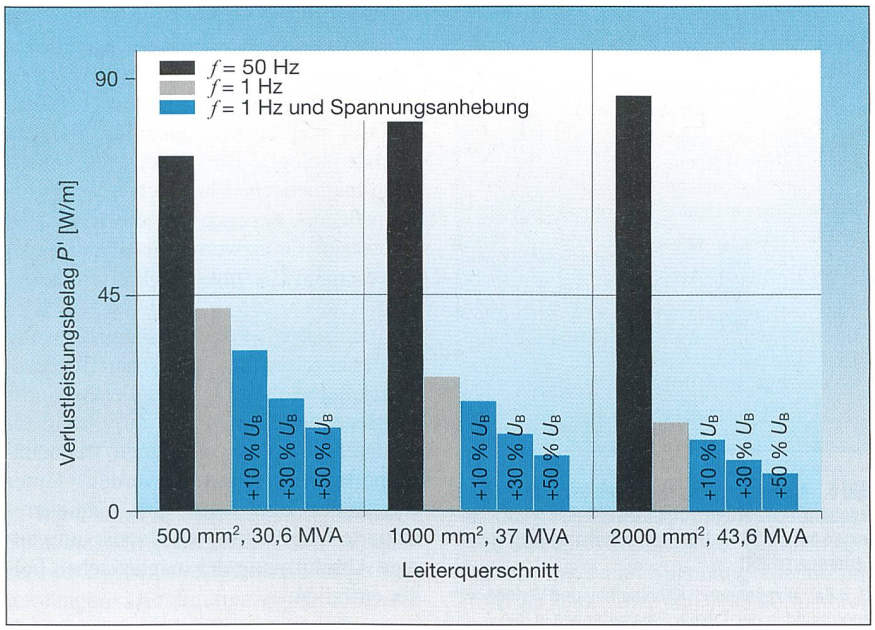


Bild 3 Verlustleistungsbelag *P'* von 30-kV-VPE-Mittelspannungskabeln bei Übertragung der 50-Hz-Grenzleistung in Abhängigkeit des Leiterquerschnitts

U_B = Betriebsspannung; Kabelaufbau und Verlegeanordnung in der Tabelle; Parameter wie in Bild 2

Anhebung der Spannungsfestigkeit erreicht werden. Demnach steigt die Stehspannung für VPE-Kabel bei 1 Hz im Vergleich zu 50 Hz um bis zu 100%.

Stabilität

Durch Frequenzumrichter mit Spannungszwischenkreis am Anfang und Ende der Übertragungsstrecke sind Wirk- und Blindleistung entkoppelt und unabhängig regelbar. So kann ohne Stabilitätsprobleme sowie ohne eine Erhöhung der Kurzschlussleistung auch in Netze ohne Eigenerzeugung eingespeist werden [4].

Um die maximalen Auswirkungen einer Frequenzreduktion zu zeigen, wird im Folgenden die Betriebsfrequenz extrem von 50 Hz auf 1 Hz gesenkt und das veränderte Übertragungsverhalten an einem 30-kV-VPE-Mittelspannungskabel (siehe Tabelle) untersucht. Natürlich sind auch davon abweichende Betriebsfrequenzen (etwa $16^2/_3$ Hz) denkbar, die sich besonders durch ihre Verwendung im Bahnnetz und die dadurch vorhandene Umrichtertechnik anbieten.

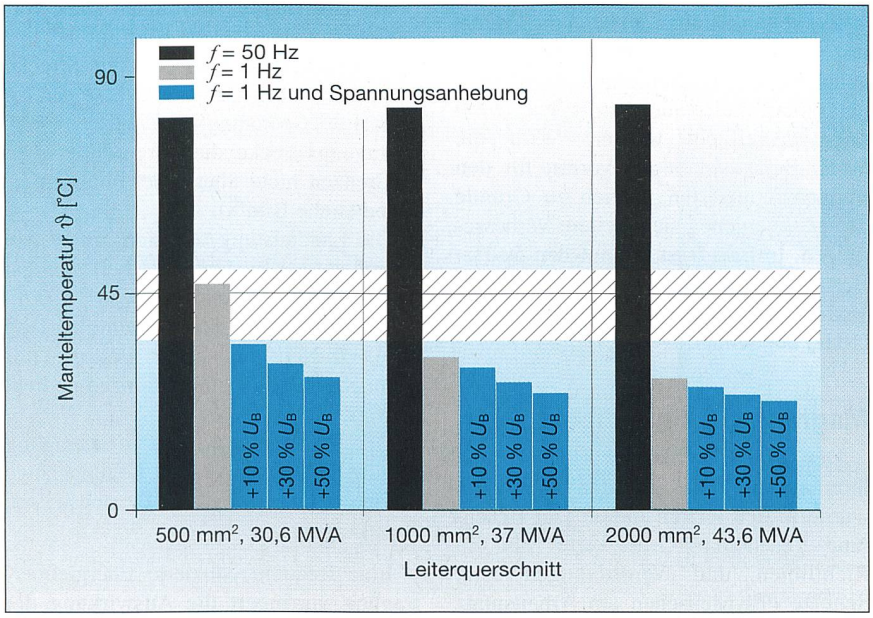


Bild 4 Manteltemperatur ϑ bei Übertragung der thermischen 50-Hz-Grenzleistung von 30-kV-VPE-Mittelspannungskabel in Abhängigkeit vom Leiterquerschnitts

Der schraffierte Bereich kennzeichnet die Temperaturspanne, ab der es zur Bodenaustrocknung kommen kann.
U_B = Betriebsspannung; Kabelaufbau und Verlegeanordnung in der Tabelle; Parameter wie in Bild 2

Thermische Grenzleistung

Durch eine Reduzierung der Betriebsfrequenz kann die übertragbare thermische Grenzleistung erhöht werden. Besonders deutlich wird diese Leistungssteigerung bei Kabelsystemen mit beidseitiger Schirmerdung, bei denen sich die Verringerung der induzierten Längsströme stark auswirkt. Aber auch die Reduzierung von Skin- und Proximityeffekt erhöht die thermische Grenzleistung, wie Bild 2 für 30-kV-VPE-Mittelspannungskabel bei 50 Hz und 1 Hz zeigt.

Bild 2 ist zu entnehmen, dass durch eine Frequenzreduzierung erhebliche Steigerungen der Übertragungsleistung erreichbar sind. So kann bei zusätzlicher Anhebung der Übertragungsspannung die Übertragungsleistung bei allen drei Leiterquerschnitten fast verdoppelt werden. Aber auch ohne eine solche Spannungsanhebung zeigen sich erhebliche Steigerungsraten gegenüber dem 50-Hz-Betrieb.

Durch die erhöhte Übertragungsleistung kann der frequenzreduzierte Betrieb einer bestehenden Übertragungsstrecke eine Alternative zu einem Ausbau oder zu einer zusätzlichen Übertragungsstrecke liefern.

Verlustleistung

Eine Verringerung der Betriebsfrequenz bewirkt eine Reduzierung der Stromwärmeverluste. Skin- und Proximityeffekt sowie Verluste durch induzierte Längsströme treten nur noch in sehr geringem Masse auf. Bild 3 zeigt den Stromwärmeverlustbelag *P'* des Übertragungssystems für die drei betrachteten Leiterquerschnitte bei 50 Hz und 1 Hz. Die übertragene Leistung bei reduzierter Betriebsfrequenz entspricht der thermischen Grenzleistung bei 50 Hz.

Bild 3 zeigt die starke Frequenzabhängigkeit der Übertragungsverluste. Eine Reduktion der Verluste um 50% und mehr ist in fast allen Fällen möglich. Dies erscheint vor dem Hintergrund des sehr guten Wirkungsgrads von Übertragungsstrecken noch nicht besonders attraktiv. Jedoch fallen die damit verbundenen Effekte wie Leistungssteigerung der Kabel oder eine thermische Entlastung des Kabelgrabens – wie nachfolgend gezeigt wird – stark ins Gewicht. Auch können diese «eingesparten» Verluste mit jenen der Frequenzumrichter aufgerechnet werden. Dies führt – wie weiter hinten noch

gezeigt wird – ab bestimmten Übertragungslängen zu einer positiven Verlustleistungsbilanz für eine frequenzreduzierte Übertragungsstrecke.

Oberflächentemperatur des Kabels

Die Manteltemperatur eines erdverlegten Kabels beeinflusst den umgebenden Erdboden. So kann sich ab einer bestimmten Temperaturdifferenz zwischen Kabelmantel und Umgebung ein Gebiet mit Bodenaustrocknung ausbilden [8]. Durch diesen Effekt veränderte thermische Eigenschaften des Erdbodens müssen bei der Auswahl der Kabel und den geforderten Übertragungsleistungen berücksichtigt werden, da eine nicht beachtete Bodenaustrocknung zur thermischen Überlastung der Kabel führen kann. In Bild 4 ist die Manteltemperatur der heissesten Kabelader eines 30-kV-VPE-Mittelspannungskabels unter Berücksichtigung der Bodenaustrocknung für die Betriebsfrequenzen 50 Hz und 1 Hz über dem Leiterquerschnitt aufgetragen.

Durch die Frequenzreduktion stellen sich stark verringerte Manteltemperaturen ein, die meist unterhalb der Grenzbereiche für Bodenaustrocknung liegen. Hieraus resultiert ein grösserer Zeitraum für Überlasten.

Überlastbarkeit

Bei Ausfall eines Versorgungsstranges im Netz oder bei durch Revisionen bedingte Betriebsstörungen können erhöhte Betriebsströme auftreten. Begrenzende Grösse für einen solchen Notbetrieb ist die einzuhaltende, höchstzulässige Leitertemperatur. Eine kurzzeitig höhere Belastung ist bei geringer thermischer Vorbelastung der Umgebung im Notbetrieb möglich, wobei das transiente Verhalten des Systems bis zum Erreichen der maximalen Leitertemperatur berücksichtigt werden muss [9].

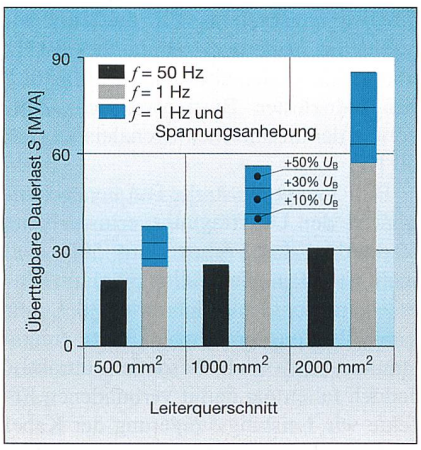


Bild 5 Übertragbare Dauerlast *S* unter Berücksichtigung eines Notbetriebes mit doppelter Übertragungsleistung für den Zeitraum einer Woche in Abhängigkeit vom Leiterquerschnitt.

U_B = Betriebsspannung; Kabelaufbau und Verlegeanordnung in der Tabelle; Parameter wie in Bild 2.

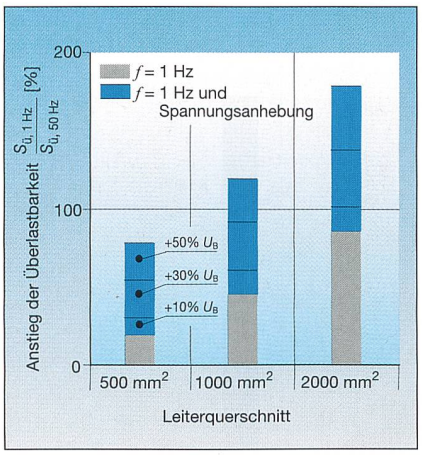


Bild 6 Anstieg der Überlastbarkeit (eine Woche) bei frequenzreduziertem Notbetrieb (50-Hz-Vorlast), bezogen auf die 50-Hz-Überlast, in Abhängigkeit vom Leiterquerschnitt

U_B = Betriebsspannung; Kabelaufbau und Verlegeanordnung in der Tabelle; Parameter wie in Bild 2

In Bild 5 ist die für eine Woche zulässige Überlast im Notbetrieb aufgetragen. Als Vorlast wurden 50% dieser Überlast vorausgesetzt, so dass die Leistung einer zweiten, gleich aufgebauten Kabelstrecke bei einer Störung für eine Woche übernommen werden kann.

Für den frequenzreduzierten Betrieb sind erhebliche Steigerungen der Überlastbarkeit erkennbar. So kann die Dauerlast bei einer zusätzlichen Spannungsanhebung in fast allen Fällen verdoppelt, bei einem Leiterquerschnitt von 2000 fast verdreifacht werden. Wird die 50-Hz-Belastbarkeit als Vorlast für den frequenzreduzierten Betrieb zu Grunde gelegt, so ergeben sich weitere Verbesserungen. In Bild 6 ist der auf den 50-Hz-Betrieb bezogene Anstieg der Überlast bei frequenzreduziertem Notbetrieb (1 Hz) abgebildet.

Magnetische Flussdichte

Der magnetischen Flussdichte und ihrer Auswirkung auf den Menschen wurde in den letzten Jahren viel Beachtung geschenkt. Grenzwerte sind in Richtlinien und Verordnungen zum Schutze des Menschen am Arbeitsplatz und im privaten Umfeld vorgegeben. Die Höhe der magnetischen Flussdichte an der Erdoberfläche der oben betrachteten Systeme soll mit den Grenzwerten der Bundesimmissionsschutzverordnung [10] verglichen werden, die angegeben sind für Dauerexposition bei 50 Hz mit 100 µT und bei $16^2/_3$ Hz mit 300 µT (300 µT werden hier auch für 1 Hz zu Grunde gelegt). Bild 7 zeigt die maximale magnetische Flussdichte an der Erdoberfläche, bezogen auf die nach [10] zulässigen Grenzwerte für den Expositionsbereich II (unkontrollierte Bereiche).

Auch die Funktionsbeeinflussung elektrischer und elektronischer Betriebsmittel ändert sich mit sinkender Betriebsfrequenz. Störspannungen auf Grund induktiver Kopplungen können frequenzproportional verringert werden. Unter Umständen kann durch eine frequenzreduzierte Übertragung eine sonst aufwändige Abschirmung der magnetischen Felder entfallen.

Steigerung der Systemlänge

Eine 50-Hz-Energieübertragung mit Kabeln stösst bezüglich der maximal überbrückbaren Entfernung an technische und wirtschaftliche Grenzen. Die folgenden Punkte zeigen die unterschiedlichen Restriktionen der Leitungslänge eines Drehstrom-Kabelsystems auf:

- Mit zunehmender Leitungslänge (bei einseitiger Erdung) steigen die Schirmspannungen schnell an, so dass ein beidseitiges Erden der Kabelschirme notwendig wird. Um die hohen Schirmverluste bei beidseitiger Erdung zu verringern, ist ein aufwendiges Cross-Bonding nötig, da sonst die Übertragungsleistungen stark verringert werden (siehe Bild 2).
- Die Längsspannung auf der Strecke stellt eine begrenzende Grösse dar. So darf die Spannung am Ende der Übertragungsstrecke die vorgeschriebenen Grenzen nicht über- oder unterschreiten (siehe Bild 8).
- Die Ladeleistung reduziert bei langen Kabelstrecken stark die Übertragungsleistung des Systems.
- Die Phasenlage der Spannung darf im 50-Hz-Netz längs der Leitung nur innerhalb bestimmter Grenzen gedreht werden.
- Der Wirkungsgrad der Übertragung wird mit zunehmender Leitungslänge kleiner und lässt so die Betriebskosten ansteigen.

Eine frequenzreduzierte Energieübertragung verringert die Auswirkung der oben aufgeführten Einschränkungen und ermöglicht so grosse Systemlängen. Anhand des Spannungsfalls auf der Kabelstrecke soll dies gezeigt werden.

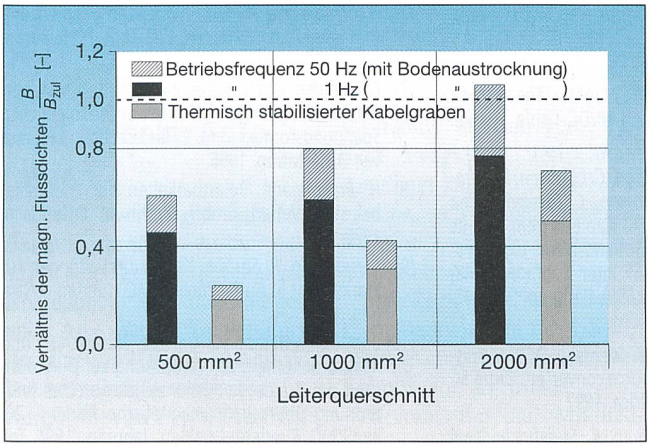


Bild 7 Verhältnis der magnetischen Flussdichte *B* zur zulässigen magnetischen Flussdichte B_{zul} (Expositionsbereich II, unkontrollierte Bereiche) von 30-kV-VPE-Mittelspannungskabeln bei Übertragung der 50-Hz-Grenzleistung

Wird längs des Kabels eine maximale Spannungsdifferenz von ±10% zugelassen, so ergeben sich höchstzulässige Systemlängen. Die durchgezogene Kurve in Bild 8 zeigt die höchstzulässige Systemlänge bei Übertragung der 50-Hz-Grenzleistung bei einer Verbraucherleistung von 33 MVA, einem cos φ = 1 und einer Verlustleistung P_V = 3,6 MVA ≠ f(*f*). Die gestrichelte Kurve zeigt die höchstzulässige Systemlänge bei verringerter Betriebsfrequenz und Übertragung der thermischen Grenzleistung.

Aus Bild 8 geht hervor, dass durch eine frequenzreduzierte Energieübertragung Übertragungslängen mit herkömmlichen Wechselspannungskabeln realisiert werden können, die bisher nur mit Gleichspannungskabeln zu überbrücken waren. Es sei bemerkt, dass Spannungsfall und Phasenwinkel für eine Übertragungsstrecke mit je einem Umrichter am Anfang und Ende nicht zwingend begrenzende Grössen darstellen. So ist die Übertragungsstrecke vom Netz entkoppelt, und die vorgegebenen Grenzen von Phasenwinkel und Spannung können mit Hilfe der Umrichter und Transformatoren eingehalten werden.

Als weitere begrenzende Grösse der Systemlänge sind die Betriebs- und Investitionskosten der Übertragungsstrecke zu nennen. Diese Kosten hängen stark von den Stromwärmeverlusten des Systems ab, so dass aus wirtschaftlicher Sicht kurze Übertragungsstrecken mit einem hohen Wirkungsgrad die optimale Lösung darstellen. Ab welcher Kabellänge der Wirkungsgrad einer frequenzreduzierten Energieübertragung denjenigen einer herkömmlichen Drehstromübertragung übersteigt, wird nachfolgend dargestellt.

Erhöhung des Wirkungsgrads

Voraussetzung für eine Erhöhung des Wirkungsgrads der Energieübertragung ist eine positive Verlustleistungsbilanz aus den eingesparten Verlusten auf der Kabelstrecke und den zusätzlich in den Frequenzumrichtern entstehenden Verlusten.

Heutige Frequenzumrichter besitzen Wirkungsgrade von 97 bis 98% [11], die durch Weiterentwicklung der Umrichtertechnologie in Zukunft sicher noch verbessert werden. Für das 30-kV-VPE-Mittelspannungskabel (1000 mm²) ergeben sich Grenzübertragungslängen in Abhängigkeit vom Umrichterwirkungsgrad nach Bild 9.

Ein Umrüsten unter dem Aspekt einer Wirkungsgradsteigerung ist bei den verwendeten Kabeln und den Umrichterstationen erst ab einigen Kilometern Systemlänge energetisch interessant. Vorteilhaft wirkt sich eine Wärmerückgewinnung in den Umrichterstationen aus.

Schlussfolgerungen

Eine reduzierte Betriebsfrequenz ermöglicht ein gezieltes Eingreifen in das Betriebsverhalten von Kabelsystemen. Im Gegensatz zur HGÜ kann diese Technik auch zur Verbesserung bereits bestehender Kabelsysteme in der Mittelspannungsebene eingesetzt werden. Erhöhter Aufwand und zusätzliche Verluste durch den Einsatz von Umrichtern können durch die sich bei dieser Betriebsart bietenden Vorteile kompensiert werden.

So bietet die Steigerung der Übertragungsleistung Alternativen zu sonst zusätzlich benötigten Kabelsystemen. Eine Reduzierung der Übertragungsverluste mit der damit verbundenen thermischen Entlastung des Kabelgrabens verringert

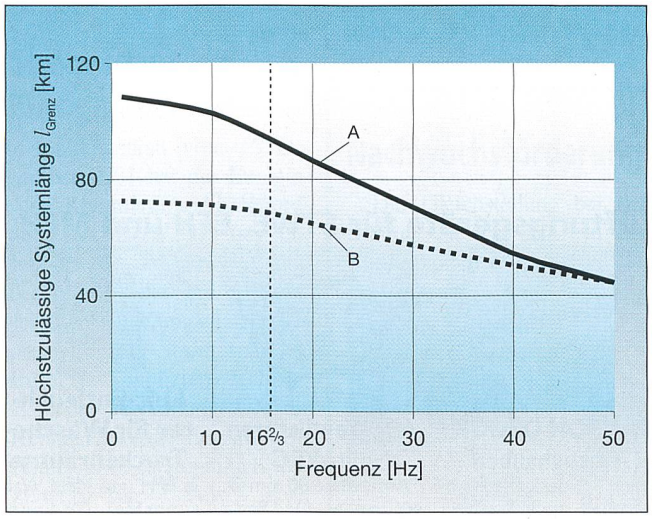


Bild 8 Höchstzulässige Systemlänge bei Berücksichtigung eines Spannungsfalls von 10% in Abhängigkeit von der Betriebsfrequenz

Verbraucher-Phasenwinkel = 0°; 30-kV-VPE-Mittelspannungskabel; 1000 mm²
A: Übertragung der 50-Hz-Grenzleistung; Verbraucherleistung 33 MVA; B: Übertragung der thermischen Grenzleistung bei reduzierter Frequenz

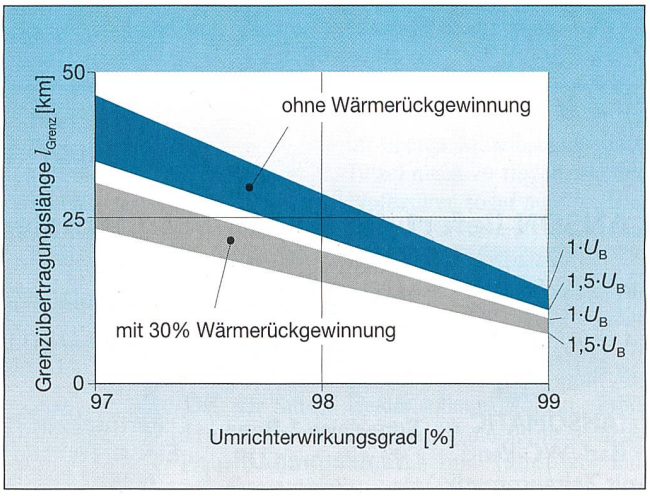


Bild 9 Grenzübertragungslänge für eine positive Verlustleistungsbilanz der frequenzreduzierten Übertragung mit zwei Umrichtern im Vergleich zur 50-Hz-Übertragung als Funktion des Umrichterwirkungsgrades, mit und ohne Wärmerückgewinnung

30-kV-VPE-Mittelspannungskabel, 1000 mm², *S* = 37 MVA; U_B = Betriebsspannung; Kabelaufbau und Verlegeanordnung in der Tabelle

thermische Beeinflussungen, erhöht die Überlastbarkeit oder kann zu einer Lebensdauersteigerung der Kabel führen. Ferner können grosse Übertragungsentfernungen mit herkömmlichen Drehstromkabeln überbrückt werden, wo bisher nur eine Gleichstromübertragung mit den dafür speziell anzufertigenden Kabeln und Garnituren in Frage kommt. Schliesslich werden bei frequenzreduziertem Betrieb Probleme im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit erheblich verringert.

Referenzen

[1] *H. Fukagawa, H. Miyauchi, Y. Yamada, S. Yoshida, N. Ando:* Insulation Properties of 250 kV DC XLPE Cables., IEEE Transactions PAS, Vol. PAS-100, No.7, 1981.

[2] *M. Byggeth, K. Johannesson, C. Liljegren, U. Axelsson:* Gotland HVDC Light – The World's First Commercial Extruded HVDC Cable System. Cigre Symposium, Paris, 2000.

[3] *M. Byggeth, K. Johannesson, C. Liljegren, L. Palmqvist, U. Axelsson, J. Jonsson, C. Törnkvist:* The Development of an HVDC Cable System and its first Application in the Gotland HVDC Light Projekt. Proceedings of the 5th Inter. Conf. on Insulated Power Cables (JICABLE99), Paris, pp. 538–542, 1999.

[4] *G. Asplund, K. Eriksson, K. Svensson:* DC transmission based on voltage source converters. Cigre SC 14 Colloquium, South Africa, 1997.

[5] *H. Brakelmann, W. Rasquin, K. Steinbrich:* Steel Pipe Cables with Reduced Operating Frequency. Erscheint demnächst.

[6] *H.-J. Haubrich, W. Fritz:* Wirk- und Blindleistung in Hochspannungsnetzen. ETG-Tage 1995, Berlin; Offenbach, VDE-Verlag GmbH, 1995.

[7] *G. Schiller:* Das Durchschlagverhalten von vernetztem Polyethylen (VPE) bei unterschiedlichen Spannungsformen und Vorbelastungen. Hannover, Dissertation, 1996.

[8] *H. Brakelmann:* Belastbarkeiten der Energiekabel. VDE-Verlag GmbH, Berlin u. Offenbach, 1985.

[9] *L. Heinhold, R. Stubbe:* Kabel und Leitungen für Starkstrom. 5. Aufl., Publicis MCD Verlag, Erlangen, 1999.

[10] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BimSchV). Bundesgesetzblatt. Jahrgang 1996, Teil I, Nr.66, Bonn, 20.12.1996.

[11] *E. Hau:* Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. 2. Aufl., Berlin, Springer, 1996.

Transmission et distribution d'énergie à fréquence réduite par câbles

Le transport d'énergie à moyenne tension s'effectue en majeure partie par câbles souterrains. La «basse» tension fait que les courants d'exploitation sont élevés, entraînant des pertes considérables dans les conducteurs. En outre, il y a des pertes en fonction de la fréquence dans les conducteurs (effet pelliculaire, effet de proximité), les éléments extérieurs des câbles (courants longitudinaux induits, courants de Foucault, hystérésis) et l'isolation (pertes diélectriques). Enfin, les courants déwattés provoqués par les changements de tension à fréquence de service sollicitent également les câbles.

L'article décrit la possibilité d'obtenir les mêmes avantages que la transmission à courant continu par une transmission d'énergie en courant triphasé à fréquence réduite – tout en utilisant les câbles moyenne tension à courant alternatif et les installations existantes – ainsi que les caractéristiques qui en résultent et les possibilités d'utilisation.

Adressen der Autoren

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

Kai Steinbrich, Dipl.-Ing., Universität Duisburg, D-47048 Duisburg, steinbrich@euenet.uni-duisburg.de

[1] Cross-Bonding: Auskreuzen der Kabelmäntel zur weit gehenden Kompensation der Induktionsspannungen, so dass trotz beidseitiger Erdung der Gesamtstrecke Mantelstrom und -verluste minimiert werden.

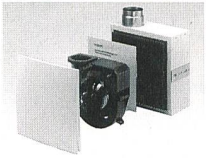
[2] Milikenleiter: Spezieller Leitertyp aus verseilten, elektrisch isolierten Segmenten, die ihrerseits aus verseilten Einzeldrähten bestehen. Hiermit soll eine Zwangsführung des Stromes und so eine Verringerung der Stromverdrängungseffekte erreicht werden.

[3] IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

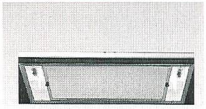
[4] VPE: vernetztes Polyäthylen

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

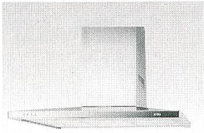
ANSOMATIC Bad-/WC-Venti mit Zeitautomatik
die besten, die es gibt! 230 V 100 m³/h 50 Pa. Putzbündig. Preisgünstig von ANSON



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. Einbaumasse ab 258 x 494 mm. Pflegeleicht.



ANSON DECOR Abzughauben
für designbetonte Küchen und Kochinseln. Auch inox. 230 V 400–1000 m³/h. – Angebot verlangen von:

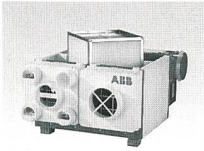


ABB Ventilatoren mit WRG
4 Anschlüsse 80 mm Ø; 400 m³/h, für Bad-/WC- und Küchen-Entlüftung in STWE und EFH. Von ANSON!

Luft-Entfeuchter für Wäsche-Trockenräume
in EFH und MFH. Wartungsfrei. Geringer Energiebedarf. 4 Modelle 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**