

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 55 (1964)

Heft: 9

Artikel: Grundsätzliche Gesichtspunkte bei der Projektierung von Höchstspannungsübertragungen

Autor: Jancke, G.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916704>

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: 17.02.2026

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

Grundsätzliche Gesichtspunkte bei der Projektierung von Höchstspannungsübertragungen

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 20. Januar 1964 in Zürich,
von G. Jancke, Stockholm

621.311.1.027.8

1. Das Bedürfnis für Höchstspannungen

In den Industrieländern steigt der gesamte Energiebedarf jährlich um etwa 3 %. Der Verbrauch an elektrischer Energie nimmt in der gleichen Zeit um 5...7 % zu. Das zeigt deutlich, dass die Elektrizität immer mehr in solche Gebiete vordringt, die bisher anderen Energieformen vorbehalten waren.

Die Ursache für diese Erscheinung ist einmal darin zu suchen, dass die Elektrizität ein bequemer und leicht zu regelnder Energieträger ist. Zum anderen lässt sich elektrische Energie mit niedrigen Kosten über weite Strecken befördern und ermöglicht dadurch die Niederlassung von industriellen Grossverbrauchern in Gegenden, die wegen der Transportmöglichkeiten oder aus anderen Gründen sehr günstig liegen. Schliesslich aber kann die Elektrizität am Verbrauchs-ort auf einfache Weise, z. B. in mechanische, thermische oder chemische Energie umgewandelt werden.

Wenn die Entwicklung jedoch gleicherweise fortschreiten soll, muss unter Beibehaltung der niedrigen Kosten die Qualität verbessert werden. Es zeigt sich hiebei, dass die spezifischen Übertragungskosten in einem optimal bemessenen Leitungsnetz ungefähr umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Übertragungsleistung sind. Ausserdem verhält sich die günstige Spannung etwa wie die Quadratwurzel aus der Leistung. Dies gilt mit guter Annäherung für Übertragungsstrecken von 500 km oder länger, während bei kürzeren Entfernungen je Leitung wesentlich höhere Leistungen übertragen werden können, was eine Senkung der optimalen Spannung bedeutet.

Angesichts dieser Verhältnisse fordern die Energieversorgungsunternehmen mit den Belastungssteigerungen immer höhere Übertragungsspannungen. Wie sich zeigte, hat die Industrie die entsprechenden Stations- und Leitungsausrüstungen entwickeln können.

In seiner reinsten Form liegt ein Bedürfnis für Höchstspannung vor, wenn eine entfernt gelegene grosse Energiequelle nutzbar gemacht werden soll. Es kann sich hiebei um Wasserkraft handeln oder auch um Kohle-, Öl- oder Gasvorkommen. Beispiele für Übertragungen von Wasserkraftenergie über grosse Entfernungen finden sich vor allem in Schweden, Kanada und der Sowjetunion. Diese Länder wendeten sich folgerichtig auch als erste den hohen Übertragungsspannungen zu. Bei der Wahl zwischen der Verwertung von Wasserkraft und dem Bau von Dampfkraftwerken nahe den Verbraucherschwerpunkten, müssen bei der ersten Alternative die Kosten für die langen Übertragungsstrecken berücksichtigt werden. Bei Kohle, Öl oder Gas bestimmt das Kostenverhältnis zwischen dem direkten Transport des Brennstoffes und der Elektrizitätsübertragung in weitem Masse den Aufstellungsort des Kraftwerks.

Der Verbundbetrieb mehrerer Elektrizitätsnetze ist im allgemeinen wirtschaftlich gewinnbringend. Dies gilt insbesondere dann, wenn ein Netz auf Wasserkraftenergie, ein anderes auf Wärmeenergie basiert. In diesem Fall kann man den Ausbau der beiden Netze verlangsamen, ohne die Sicher-

heitsvorkehrungen für niederschlagsarme Jahre oder für den Leistungsbedarf bei Spitzenbelastung zu vernachlässigen. Andere wichtige Gründe für den Verbundbetrieb sind die unterschiedlichen Spitzenlastzeiten in verschiedenen Versorgungsgebieten, die Möglichkeit, auf der Wirkungsgradkurve der Turbinen den besten Betriebspunkt auszunützen, die Verminderung der erforderlichen Reservehaltung sowie die Niederschlagsunterschiede zwischen verschiedenen Landesteilen. Diese Verbundleitungen sollen im allgemeinen grosse Leistungen übertragen können, so dass hohe Spannungen am geeigneten erscheinen.

Auch seitens der Erzeuger von Elektrizität ging die Entwicklung in Richtung auf immer grössere Einheiten; eine Senkung der Energiekosten war die natürliche Folge. Dampfturbinen in der Grössenordnung 1000 MW sind hiebei aktuell, und die installierten Gesamtleistungen der einzelnen Kraftwerke wachsen stark an. Die Energie eines Kraftwerks wird deshalb häufig über verhältnismässig weite Strecken übertragen. Auch die Rücksicht auf die Erhöhung der Kurzschlussleistung und auf die Möglichkeiten, Trassen zu finden, spricht für die Verwendung von Höchstspannungen.

Die Erhöhung der Kurzschlussleistung bildet in Ländern mit grosser Belastungsdichte ein ernstliches Problem. Hier zeichnet sich eine Tendenz ab, als Gegenmittel ein starkes Höchstspannungsnetz zu verwenden, das zur Speisung von Ortsnetzen mit niedriger Spannung dient.

2. Heutige Situation der Höchstspannungsnetze

Die Technik der Energieübertragung befindet sich zur Zeit in einem ausserordentlich dynamischen Stadium. Die Industrie hat sich durch den Ausbau von Werkstätten, Laboratorien und Prüffeldern auf immer höhere Spannungen eingestellt; zahlreiche Prüfanlagen zur Untersuchung von Isolationsfestigkeit, Koronaverlusten und Funkstörungen wurden errichtet. Die erste 400-kV-Übertragung wurde im Frühjahr 1952 in Schweden in Betrieb genommen, und diese Spannung wurde für Europa bald vorherrschend. In anderen Ländern wurden während der vergangenen zehn Jahre zahlreiche Anlagen von 300...350 kV in Betrieb genommen. In der Sowjetunion nahm man vor ein paar Jahren die ersten Teile eines Netzes von 500 kV in Betrieb, und auf diese Spannung werden auch die ersten sowjetischen 400-kV-Anlagen umgestellt. Dieselbe Spannung wurde auch für einige neue Netze gewählt, die in Kanada und den USA gebaut werden. In der kanadischen Provinz Quebec wurde mit dem Bau eines ausgedehnten 700-kV-Netzes begonnen. Die Inbetriebnahme der ersten Teile mit einer Leitungslänge von 600 km und mit vier Unterwerken ist für den Herbst 1965 vorgesehen. Zur gleichen Zeit soll in der Sowjetunion eine erste 90 km lange 750-kV-Übertragung in Betrieb gesetzt werden.

Als Konkurrent der Drehstrom-Hochspannung ist bei Grosskraftübertragungen der hochgespannte Gleichstrom ernstlich in Erscheinung getreten. Bereits seit 1954 befindet sich die Kabelverbindung zwischen der Insel Gotland und

dem schwedischen Festland in Betrieb, und seit 1961 besteht die Übertragung durch den Ärmelkanal zwischen England und Frankreich. Darüber hinaus wurde 1963 die sowjetische Übertragung von Wolgograd zum Donez-Becken versuchsweise in Betrieb genommen. Für Neuseeland, Japan, Italien sowie für den Verbundbetrieb der skandinavischen mit den kontinental-europäischen Kraftwerken liegen bereits Bestellungen auf weitere Gleichstrom-Kupplungsglieder vor.

Im Drehstrombereich von 220...400 kV ist eine üppige Flora verschiedener Netzspannungen entstanden, und es bestand lange die Gefahr, dass die gleichen chaotischen Verhältnisse auch im Bereich über 400 kV eintreten werden. Innerhalb der CIGRE und der CEI wurde deshalb intensiv daran gearbeitet, eine Beschränkung auf eine geringere Anzahl Spannungen zustande zu bringen. Hierdurch hätte man nämlich die Möglichkeit, in weitem Umfang serienmässige Schaltgeräte zu verwenden. Die Kosten wurden dadurch gesenkt, und vermutlich auch die Betriebssicherheit besser, als wenn für jeden Kunden neue Berechnungs- und Konstruktionsunterlagen erarbeitet werden müssten. Darüber hinaus könnten die Ergebnisse der teuren und zeitraubenden Untersuchungen von Isolationsfestigkeit, Korona-Erscheinungen usw. allgemein zugänglich gemacht und verwertet werden. Bei Höchstspannungen besteht zwischen der Länge der Luftstrecke und der Isolationsfestigkeit kein linearer Zusammenhang mehr, und man möchte sich deshalb nicht auf Extrapolationen, selbst auf Interpolationen nur ungern, verlassen, ohne verteuern zusätzliche Sicherheitsmargen vorzusehen. Schliesslich aber sollten vor allem Elektrizitätsnetze, die später einmal im Verbundbetrieb arbeiten sollen oder deren künftige Kupplung denkbar ist, für eine gleiche Betriebsspannung ausgelegt werden, damit auf die aufwendige Transformation verzichtet werden kann.

Die CEI hat kürzlich beschlossen, die bisherige Reihe der höchsten Betriebsspannungen, nämlich 245, 300 und 420 kV, durch die neuen Werte 362, 525 und 765 kV zu ergänzen. An die dritte Spannung werden die Nennspannungen von 700 und 750 kV angeschlossen. Für den hochgespannten Gleichstrom wurde die Zeit für eine Normung der Spannungen bisher noch nicht als reif angesehen. Der Bedarf hierfür wird nicht als so vordringlich empfunden, da der Gleichstrom bis jetzt lediglich für Zweipunkt-Übertragungen verwendet wurde.

3. Wahl der Stromart

Bis in die fünfziger Jahre war der Drehstrom die einzige Stromart, die für Grosskraftübertragungen in Frage kam, wenn auch schon vielerorts eine intensive Entwicklungsarbeit im Gleichstrombereich geleistet wurde. Das Ergebnis war eine erste kommerzielle Anlage zur Energieübertragung mit hochgespanntem Gleichstrom zwischen der Insel Gotland und dem schwedischen Festland (Inbetriebnahme 1954). Die Erfahrungen waren nach Überwindung der Kinderkrankheiten so gut, dass die Betriebssicherheit ohne weiteres mit der einer sorgfältig ausgeführten Drehstromübertragung verglichen werden kann. Heute ist die Wahl zwischen den beiden Stromarten deshalb in erster Linie eine wirtschaftliche Frage, wenn auch Gleichstrom bis auf weiteres nur in Sonderfällen sich aufdrängen darf.

Für eine Gleichstromübertragung spricht die Tatsache, dass die Kosten einer Freileitung etwa 60 % der Kosten

einer Drehstrom-Freileitung mit gleicher Übertragungsleistung und gleichen Verlusten betragen. Bei Verwendung von Kabeln fällt der Unterschied noch erheblich mehr ins Gewicht: Die Gleichstromkosten belaufen sich bei höheren Spannungen auf nur 10...20 % der Drehstromkosten. Dem stehen allerdings die erheblichen Kosten für die Umrichterstationen gegenüber. Eine Gleichstromanlage mit ausschliesslich Freileitungsstrecken wird infolgedessen erst bei grossen Entfernungen konkurrenzfähig, heute normalerweise in der Grössenordnung von 800...1000 km, während sie mit Kabelstrecken bereits bei einer Kabellänge von 30...50 km interessant wird.

Was die Betriebssicherheit betrifft, so sei darauf hingewiesen, dass eine Drehstromübertragung mit bleibenden Schäden in einem der Phasenseile naturgemäß nicht mehr betrieben werden kann. Bei einer Gleichstromübertragung kann hingegen bei einem Fehler in einer Phase die halbe Leistung auf der anderen Phase übertragen werden, wobei die Erde als Rückleiter dient. In vielen Fällen kann die Rückleitung über Erde auch im normalen Betrieb verwendet werden, und der Ausbau der Anlage kann infolgedessen in zwei Stufen erfolgen. Der Nachteil hiebei ist die Gefahr der Korrosion in u. a. Kabeln und Rohrleitungen im Boden, doch dürften diese Schäden auch nicht schwerer sein als die von Gleichstrombahnen verursachte Korrosionen. Die Korrosion wirkt sich langsam aus und sollte unter allen Umständen während der verhältnismässig kurzen Zeit in Kauf genommen werden, die für die Reparatur eines allfälligen Phasenfehlers notwendig ist. Ein Blitzüberschlag in einer Gleichstromleitung verursacht ein rasches Heruntersteuern von Strom und Spannung mittels der Umrichtergitter, worauf die volle Übertragungsleistung automatisch schneller oder wenigstens so schnell wieder aufgenommen werden kann wie bei Schnellwiedereinschaltung in einem Drehstromnetz. Die etwas höhere Betriebssicherheit im Leitungsteil wird durch die komplizierteren Ausrüstungen in den Abspannwerken wieder wettgemacht.

Die Gleichstromübertragung bildet ein asynchrones Kupplungsglied zwischen zwei Energieblöcken. Die Frequenz- und Leistungsregelung kann dadurch wesentlich vereinfacht werden. Dies war einer der Gründe dafür, dass bei der Kupplung des skandinavischen mit dem kontinental-europäischen Netz Gleichstrom verwendet wurde. In einigen wenigen Fällen, bei denen es sich um den Verbundbetrieb grosser Netze mit verschiedenen Betriebsfrequenzen handelt (wie z. B. in Japan), ist ein Gleichstromglied wirtschaftlich sehr interessant.

Bei einer Übertragung über weite Entfernungen wird bei Drehstrom die Stabilität sehr problematisch. Bei Gleichstrom treten derartige Probleme nicht auf und hier sind deshalb lange Leitungsabschnitte ohne Zwischenstationen möglich.

Eine Gleichstromleitung überträgt keine Kurzschlussleistung. In stark konzentrierten Netzen mit grosser Belastungsdichte kann sich deshalb die Aufteilung in verschiedene Teilnetze als vorteilhaft erweisen, wobei diese über Gleichstromleitungen gekuppelt werden. In solchen Fällen kann es auch zweckmässiger sein, die Leitungen als Kabelstrecken auszuführen, was bei Gleichstrom wirtschaftlich eher tragbar ist.

Der grösste Nachteil des Gleichstromes ist der, dass bisher noch kein geeignetes Schaltglied konstruiert werden

konnte. Infolgedessen bleibt eine Gleichstromleitung im Prinzip eine Zweipunkt-Übertragung, möglicherweise kombiniert mit einer oder zwei Abzweigstationen.

4. Wahl der Spannung für Drehstromübertragungen; wirtschaftliche Gesichtspunkte

Wie schon erwähnt, sind die Übertragungskosten je Leistungseinheit und Kilometer Leitungslänge bei der bestmöglichen Wahl von Spannung und Leitungsquerschnitt der Quadratwurzel aus der übertragenen Leistung umgekehrt proportional. Der Leitungsquerschnitt hängt in erster Linie von der Stromdichte ab, die optimal auf der Basis des örtlichen Verhältnisses zwischen Seil- und Verlustkosten gewählt wird. (In Schweden liegt dieser Wert bei etwa $0,5 \text{ A/mm}^2$ für Aluminiumseile.) Die günstigste Spannung ist nach einer einfachen Faustregel für lange Übertragungsstrecken $15\sqrt{P} \text{ kV}$, wobei P die übertragene Leistung in MW angibt. Ein ähnliches Ergebnis drückt die erfahrungsmässig bekannte Tatsache aus, die günstigste Belastung stimme annähernd mit der natürlichen Belastung überein. Sie beträgt bei 400 kV etwa 550 MW, bei 500 kV etwa 900 MW und bei 700 kV nahezu 2000 MW. Die Kurve der Kosten durchläuft jedoch ein sehr flaches Minimum, und unter Beibehaltung der guten Wirtschaftlichkeit kann man — soweit es die Stabilität der Übertragung erlaubt — bis zu den zweien- und dreifachen Werten hinaufgehen. Kurze Leitungen, bei denen die Ausrüstungen in den Abspannwerken kostenmässig viel mehr ins Gewicht fallen, lassen sich mit noch höheren Werten beladen.

In Fig. 1 sind die Ergebnisse schwedischer Untersuchungen an einer Doppelleitungs-Übertragung dargestellt. Kurve *a* zeigt den Idealfall, in dem für jede Leistung der günstigste Leitungsquerschnitt und die günstigste Spannung gewählt wurden. Kurve *b* bezieht sich auf den günstigsten Leitungsquerschnitt, jedoch bei einer festen Spannung von 400 kV. Kurve *c* schliesslich stellt einen Fall dar mit einem festen Leitungsquerschnitt von 1370 mm pro Phase (Stahl-Aluminium-Seile) bei einer festen Spannung von 400 kV. Die Kurven zeigen deutlich, dass man bei Anpassung der Leitungsquerschnitte an die zu erwartende Belastung die Spannung innerhalb verhältnismässig weiter Grenzen wählen kann.

32 795-797

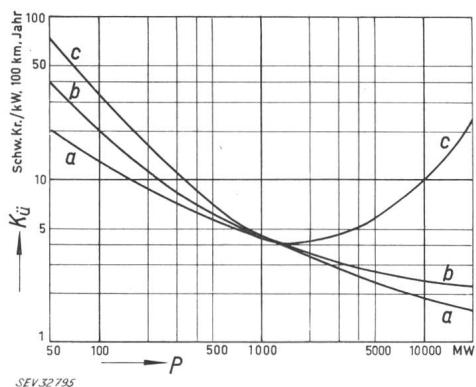


Fig. 1

Spezifische Übertragungskosten K_U bei 600 km Übertragungsdistanz P übertragene Leistung; *a* optimaler Leiterquerschnitt und optimale Spannung; *b* optimaler Leiterquerschnitt und konstante Spannung; *c* konstanter Leiterquerschnitt und konstante Spannung

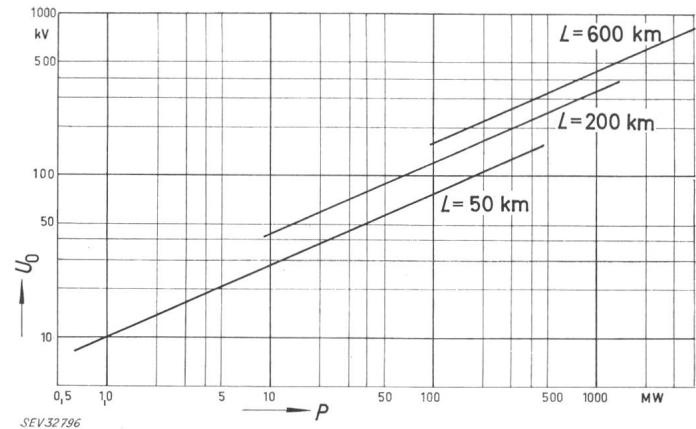


Fig. 2
Optimale Übertragungsspannung U_0 in Funktion der übertragenen Leistung P und der Übertragungsdistanz L

Aus der gleichen Untersuchung ist in Fig. 2 die günstigste Spannung als Funktion der übertragenen Leistung und der Übertragungsdistanz und in Fig. 3 die entsprechenden spezifischen Übertragungskosten wiedergegeben.

Da man bei der Spannungswahl unabhängig von den spezifischen Übertragungskosten verhältnismässig weit vom günstigsten Wert abweichen kann, sollte man sich auf die international genormten Spannungen beschränken, und dabei in erster Linie auf solche, über die mit anderen Unternehmen oder geographisch benachbarten Ländern eine Einigung erzielt werden kann. Ausserdem sollte man zwischen den verschiedenen Spannungen nicht zu kleine Stufen wählen. Als Überlagerungsspannung auf ein vorhandenes Netz von 300...400 kV sollte man sich demzufolge für 700...750 kV entscheiden, während sich 500 kV als nächsthöhere Stufe nach 220 kV eignet.

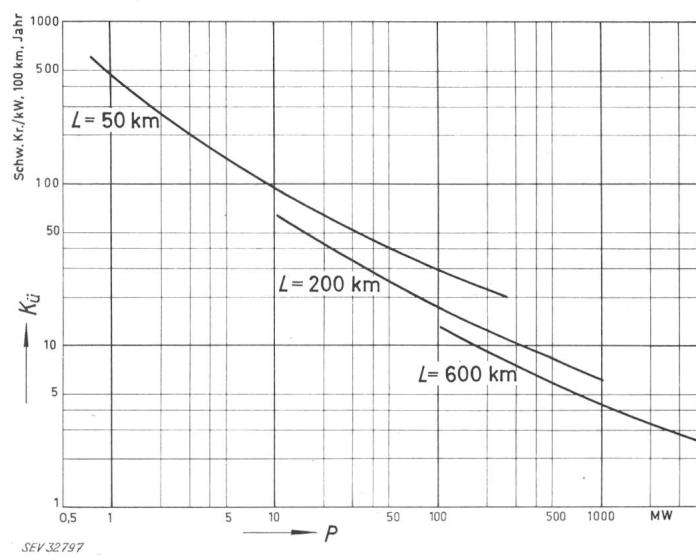


Fig. 3
Spezifische Übertragungskosten K_U in Funktion der übertragenen Leistung P und der Übertragungsdistanz L

5. Stabilität

Die oben angegebenen Werte für die Belastbarkeit der Leitungen bei verschiedenen Spannungen sind als Idealwerte zu betrachten. Ihre praktische Verwirklichung kann bisweilen durch das Stabilitätsverhalten erschwert werden. Indessen stehen verschiedene Mittel zur Erhöhung der statischen und dynamischen Stabilitätsgrenzen zur Verfügung, die vor

allem auf eine Verringerung der Übertragungsreaktanz hinzielen.

Die Verwendung von Mehrfach-Bündelleitern als Phasenleile verringert die Leitungsreaktanz erheblich und wirkt sich also günstig aus. Gleichzeitig wird die Randfeldstärke an der Seiloberfläche reduziert, wodurch die Koronaverluste und Funkstörungen für einen vorgegebenen Leitungs-Gesamtquerschnitt vermindert werden.

Die wichtigste Massnahme zur Verbesserung der Stabilität in Überlandleitungen ist indessen der Einsatz von Seriekondensatoren, mit deren Hilfe ein Teil der Leitungsreaktanz kompensiert werden kann. Der Seriekondensator kann genau entsprechend dem Bedarf bemessen werden, er lässt sich bei erhöhtem Übertragungsbedarf zu einem späteren Zeitpunkt installieren oder ergänzen, und ist ganz allgemein ein vielseitiges Mittel zur Erhöhung der Stabilität. Außerdem kann er zwischen parallel geschalteten Übertragungskreisen zur Verbesserung der Lastverteilung dienen, indem die parallelen Zweige das gleiche Verhältnis zwischen Ohmschem und Blindwiderstand erhalten.

Für Transformatoren und Generatoren kann es sich lohnen, trotz gewisser Mehrkosten niedrige Reaktanzen zu wählen. Eine schnell arbeitende Spannungsregelung wirkt sich vorteilhaft aus, und hier macht sich neuerdings zusammen mit elektronischen Spannungsreglern der Einsatz der Halbleitertechnik für die Magnetisierung bemerkbar.

Schnellwiedereinschaltung bei Leitungsfehlern sowie ein schnell arbeitender Relaischutz und wirksame Leistungsschalter sind unerlässlich für die Aufrechterhaltung der dynamischen Stabilität.

Aus Stabilitätsgründen darf man die erste Leitung einer langen Elektrizitätsübertragung normalerweise nur mit mässiger Belastung betreiben, während man nach Hinzufügen einer wachsenden Zahl von parallel geschalteten Leitungen die Belastung pro Leitung allmählich erhöhen kann.

6. Blindleistungsbilanz

Freileitungen für Höchstspannung erzeugen eine beträchtliche Blindleistung. So liefert eine 400-kV-Leitung bei normaler Betriebsspannung etwa 0,6 MVar pro Leitungskilometer, während eine 700-kV-Leitung mehr als den dreifachen Betrag erzeugt. Bei der natürlichen Belastung kommt es zu einem Ausgleich zwischen der kapazitiven Ladeleistung und der in der Leitung verbrauchten Blindleistung. Insbesondere bei langen Leitungen machen sich deshalb grosse Schwankungen in der Blindleistungsbilanz bemerkbar. Für den Betrieb im Leerlauf oder bei schwacher Belastung werden deshalb Shuntrosselpulen und für hohe Belastung Shuntkondensatoren eingeschaltet. Bis zu einem gewissen Grade empfiehlt sich im allgemeinen auch der Einsatz von Synchronmaschinen, da diese sowohl über- als auch untererregt arbeiten können und dadurch den Bedarf an Kondensatoren und Drosselpulen verringern. Außerdem können die Synchronmaschinen die Feinregelung übernehmen, so dass es möglich ist, Drosselpulen und Kondensatorbatterien zu grossen rentablen Einheiten zusammenzufassen.

Seriekondensatoren werden zweckmässigerweise nahe der Last eingesetzt, da der Transport von Blindleistung teuer ist. Auf jeden Fall sollten die Nebenschlussdrosselpulen für Netze mit einer Spannung von 400 kV und mehr an die Höchstspannung angeschlossen werden. Massgebend für

ihre Gesamtleistung und die Verteilung der Leistung ist das Verhalten bei schwacher Belastung des Netzes, beim Zuschalten von unbelasteten Leitungen und bei bestimmten Betriebsstörungen.

7. Isolation

Bei Höchstspannungen ist die Frage der Isolation von besonderer Bedeutung, da man sich hiebei in einem Bereich befindet, in dem das Verhältnis zwischen der Überschlagsfestigkeit einer Luftstrecke und deren Länge nicht mehr linear ist. Von atmosphärischen Überspannungen kann man fast gänzlich absehen, da als Schutz für die Stationsausrüstungen heutzutage Ventilableiter mit sehr guten Eigenschaften zur Verfügung stehen. Allerdings können an Kraftleitungen Blitzüberschläge auftreten, normalerweise vorübergehender Natur. Die Leitungen müssen deshalb durch Erdseile mit Blitzableiterwirkung geschützt werden. Bei Bedarf werden auch die Masterdungen ergänzt. Die verbleibende geringe Störziffer für die Leitungen wird durch Schnellwiedereinschaltung noch erträglicher gemacht.

In der Praxis wird der erforderliche Spannungspegel durch die in der Anlage selbst erzeugten Überspannungen bestimmt. Diese Überspannungen haben einerseits Betriebsfrequenz, nämlich bei Spannungserhöhung nach einem Lastabwurf, bei natürlicher Spannungserhöhung entlang einer einseitig angeschlossenen Leitung und bei Spannungserhöhung in den gesunden Phasen bei einphasigem Erdchluss. Bei Schaltvorgängen andererseits treten innere Überspannungen mit höheren Frequenzen auf.

Die betriebsfrequenten Spannungserhöhungen lassen sich begrenzen, indem die einzelnen Leitungsabschnitte eine bestimmte Höchtlänge nicht überschreiten dürfen. Im Nebenschluss direkt an die Hochspannungsleitungen angeschlossene Drosselpulen sorgen für eine starke Begrenzung. Eine Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass sie dauernd mit dem Netz verbunden bleiben oder aber bei Spannungserhöhungen schnell und selbsttätig eingeschaltet werden können. Betriebsfrequenten Spannungserhöhungen sind bei niedriger Kurzschlussleistung des Netzes am stärksten und nehmen mit wachsender Kurzschlussleistung ab. Infolgedessen genügt es unter Umständen, im Anfangsstadium einer Grosskraftübertragung die Drosselpulen dauernd eingeschaltet zu lassen, zumal es wahrscheinlich auch im Hinblick auf die Blindleistungsbilanz wirtschaftlich vorteilhafter ist.

Schaltüberspannungen beim Abschalten von Leitungen werden dadurch beseitigt, dass man die Leistungsschalter bis zu den höchsten vorkommenden betriebsfrequenten Überspannungen rückzündungsfrei ausführt. Statt dessen erhält man die höchsten Schaltüberspannungen beim Zuschalten von Leitungszweigen sowie besonders bei Schnellwiedereinschaltung, wenn sich die Leitung während der spannungslosen Pause nicht entladen hat. Ausreichende Entladung lässt sich durch an die Leitung angeschlossene Drosselpulen herbeiführen oder, bei kürzeren Leitungsabschnitten, durch induktive Spannungswandler. Wahlweise können die Netzschafter auch mit niederohmigen Widerständen für kurzzeitigen Betrieb während des Einschaltvorganges versehen werden.

Was die Bemessung der Isolation betrifft, so kann man sagen, dass die Transformatoren und Drosselpulen ein verhältnismässig niedrigen Isolationspegel erhalten können,

der von den betriebsfrequenten Spannungserhöhungen und den Eigenschaften der in der Nähe der Geräte aufgestellten Ableiters abhängt. Die Kraftleitungen erhalten eine Isolation, die die betriebsfrequenten Spannungserhöhungen und die Schaltüberspannungen bewältigen kann. Sammelschienen sowie die an sie oder an die Leitungen angeschlossenen Geräte sollten einen etwas höheren Isolationspegel erhalten, um die Gefahr von Überschlägen an solchen Stellen zu verringern, die auf Grund ihrer Auffälligkeit eine wichtige Rolle spielen. Die Stationen sind durch Seile mit Schirmwirkung zu schützen. Funkenstrecken als Geräteschutz sind ganz zu vermeiden, da die Streuung des Funktionswertes gross ist und die Koordinierung deshalb grosse Sicherheitszuschläge erforderlich macht. Ausserdem sollten auch steile Wellen in der Nähe von wichtigen Geräten vermieden werden.

Bei Höchstspannungen sind die Schaltüberspannungen am gefährlichsten für die Isolation. Es ist deshalb wichtig, dass die Frage der Isolationsfestigkeit gegen Schaltüberspannungen eingehend untersucht wird. Ausserdem sollte eine Isolationsprüfung bei Schaltüberspannungen für Abnahmeprüfungen vorgeschrieben werden.

8. Betriebssicherheit

Aus verständlichen Gründen liegt gegenwärtig noch keine Störungsstatistik für Netze mit Spannungen von 500 kV und mehr vor. Erfahrungen von 400-kV-Netzen wurden von der CIGRE zusammengestellt, und zwar für Freileitungen. Sie weisen auf eine Blitzstörziffer von etwa 0,01 Störungen je Gewittertag und 100 km Leitungslänge. Die Fehler sind hauptsächlich einphasig; nur zum kleineren Teil sind es zweiphasige Fehler mit Erdschluss. In 80...90 % der Fälle führen die Fehler zu erfolgreichen Schnellwiedereinschaltungen. Bei Spannungen über 400 kV kann man mit einer Verringerung der Blitzstörziffer rechnen.

Mehrachleiter scheinen keine grösseren Schwierigkeiten in Bezug auf Schnee- und Eislasten zu bereiten als Einzelleiter. Die Neigung zum «Galoppieren» verringert sich etwas.

Nur wenige Versorgungsunternehmen und Hersteller veröffentlichen Störziffern für Geräte, Überwachungsausrüstungen und Bedienungspersonal. Da die Blitzstörziffer sehr klein ist, werden jedoch gerade diese Faktoren einen beherrschenden Einfluss auf die Betriebssicherheit haben. Die schwedischen Erfahrungen vom 400-kV-Betrieb deuten für Transformatoren und Drosselpulsen auf 5 Störungen in

100 Gerätejahren (Dreiphasen), zum überwiegenden Teil vorübergehender Natur, für Leistungsschalter auf etwa 3 Störungen in 100 Gerätejahren sowie für Messwandler auf etwa 0,2 Störungen in 100 Gerätejahren. Fehler der Überwachungsausrüstung und Personenschäden, welche letzteren sich auch oft auf nachlässig ausgeführte Überwachungsausrüstung oder auf eine komplizierte Stationsschaltung zurückführen lassen, sind von gleicher Bedeutung wie Leitungs- und Gerätefehler.

Die Betriebssicherheit in einem Grosskraftnetz ist von grosser Bedeutung und muss deshalb bei der Berechnung der Netzbemessungen mit berücksichtigt werden. Eine Untersuchung in Schweden hat gezeigt, dass ein Ausfall der Energiezufuhr der Wirtschaft des Landes etwa 20 US-Cent pro kW und zusätzlich 40 US-Cent pro kWh kostet. Bestimmte Unterbrechungen lassen sich durch den Einsatz mehrerer Transformatoren, Leistungsschalter oder Kraftleitungen vermeiden. Die genannten Ausfallwerte werden zusammen mit einer evtl. vorhandenen Statistik oder Schätzungen der Störziffer bei der Beurteilung der Frage herangezogen, wie weit man in der Reservehaltung gehen soll.

9. Zukunftsaussichten

Die Verwendung von Höchstspannungen hat dazu geführt, dass die Übertragungskosten gesenkt wurden. Ausserdem bietet sich die Möglichkeit, entlegene Naturvorkommen an Energie wirtschaftlich auszunützen. Die Entwicklung ist während der letzten Jahrzehnte rasch vorangeschritten, und heute werden Netze für 700...750 kV sowie für immer höhere Gleichspannungen gebaut. Es ist zu erwarten, dass diese Entwicklung anhalten wird. Technisch dürfte die Grenze für Drehstromübertragungen bei Spannungen von 1000...1200 kV liegen, wobei vorausgesetzt ist, dass auch die bei einphasigem Erdschluss auftretenden Überspannungen begrenzt werden können. Sollte diese Spannung immer noch nicht ausreichen, hat man sicher ein Gebiet erreicht, in dem der hochgespannte Gleichstrom das alleinige Monopol ausübt. Hier dürfte die Grenze bei ungefähr ± 1200 kV liegen.

Damit die bestmögliche Lösung der mit einer Grosskraftübertragung verknüpften Probleme gefunden wird, ist eine enge Zusammenarbeit zwischen den Herstellern und Verbrauchern notwendig. Nur dadurch kann man auf eine ausreichende Betriebssicherheit, gepaart mit niedrigen Investitionskosten, hoffen.

Adresse des Autors:

Dr. h. c. G. Jancke, Chefingenieur, Schwedische Staatliche Kraftwerkverwaltung, Stockholm (Schweden).

Stabilität und Überspannungen

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 20. Januar 1964 in Zürich,
von H. Glavitsch, Baden

621.311.1.016.35 : 621.3.015.38

Aus der Natur der beiden Themen, auf die der Titel des Vortrages hinweist, ergibt sich auch eine getrennte Behandlung derselben im Vortrag selbst. Ich möchte mich daher zuerst den Stabilitätsproblemen zuwenden.

1. Stabilität

Wenn von einer grösseren Schau aus der Wachstumsprozess der elektrischen Netze, den wir heute beobachten

können, betrachtet wird, so wird man sich folgerichtig sagen können, dass die Stabilitätsprobleme immer die gleichen sind, wenn die Netze im selben Grad vermascht und die Leistungen entsprechend sind. Stabilitätsprobleme treten immer dann auf, wenn eine neue Spannungsebene eingeführt wird, wenn wenige Verbindungsleitungen vorhanden sind und wenn besonders grosse Übertragungsentfernung überbrückt werden müssen. Beim Erstausbau einer 750-kV-An-