Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 58 (1967)

Heft: 2

Artikel: Energie-Ferntransport mit hochgespanntem Gleichstrom im Westen der USA

Autor: Dommel, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916214

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.01.2026

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

Energie-Ferntransport mit hochgespanntem Gleichstrom im Westen der USA [1])

Von *H. Dommel*, Portland/Ore (USA)

621.325.051.024

1. Einleitung

Die Idee, elektrische Energie mit Gleichstrom hoher Spannung zu übertragen, ist schon alt. So erreichte z. B. *Thury* durch Serieschaltung von isoliert aufgestellten Gleichstromgeneratoren eine Spannung von 125 kV bei einer Leistung von 20 MW auf der Übertragung Moûtier–Lyon, die erstmals 1906 in Betrieb ging. Bekanntlich siegte aber um die Jahrhundertwende der Dreiphasen-Wechselstrom, dem *Dolivo-Dobrowolski* den Namen Drehstrom gab (im Englischen heisst er noch «three phase alternating current»), über den Gleichstrom wegen seiner bekannten Vorteile, insbesondere wegen seiner leichten Transformierbarkeit. Der Ausbau der Verteilungsnetze auf Drehstrombasis war und ist durch ständig höhere Übertragungsspannungen bei ständig grösseren Übertragungsleistungen gekennzeichnet; angefangen mit 15 kV bei der Übertragung von Lauffen nach Frankfurt (1891), über 100 kV von Lauchhammer nach Riesa (1912), 220 kV von Los Angeles nach Big Creek (1920), 287 kV von Los Angeles nach Hoover-Damm (1936), 380 kV in Schweden (1950), 500 kV in Russland (1959) bis zu 750 kV in Kanada (1966). Mit steigenden Leistungen und steigenden Entfernungen wurde aber die Hochspannungs-Gleichstromübertragung — kurz HGÜ genannt — wieder mehr konkurrenzfähig gegenüber dem Drehstrom, sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus technischen Gründen. Die Entwicklung auf dem Gleichstromgebiet stand nicht still — werden doch immerhin 20 % der elektrischen Energie in Deutschland in Form von Gleichstrom verbraucht, in USA sogar 25 %. Was dabei die HGÜ anbelangt, schuf der gittergesteuerte Quecksilberdampf-Stromrichter die Voraussetzungen für deren Verwirklichung. Da die Drehstromnetze heute bestehen und auch kein Grund gegeben ist, davon abzugehen, muss sich eine HGÜ als Bindeglied ins Drehstromnetz einfügen, d.h. es muss auf der Sendeseite Drehstrom in Gleichstrom umgeformt und auf der Empfangsseite Gleichstrom in Drehstrom zurückgeformt werden. Dafür kommen nach dem gegenwärtigen Stand der Technik nur Quecksilberdampf-Stromrichter in Frage, in Zukunft wohl auch Thyristoren. Grob vereinfachend kann gesagt werden, dass bei Kabelübertragungen die HGÜ ab 30...55 km wirtschaftlicher ist, bei Freileitungen ab 700...1100 km [1] [2]). Diese Zahlen können von Fall zu Fall schwanken und verschweigen, dass auch technische Vorteile entscheidend sein können.

Die physikalischen und technischen Probleme einer HGÜ lassen sich nur im praktischen Versuch studieren; man braucht deshalb Versuchsübertragungsanlagen. Nach Kenntnis des Verfassers wurde die erste Versuchsanlage 1936 von der General Electric Co. in den USA mit 30 kV und 5 MW als Konstantstromsystem gebaut. Auch europäische Firmen waren massgebend an der Entwicklung beteiligt. 1954 folgte als praktische Verwirklichung die Gotland-Übertragung (100 kV, 20 MW).

Zur Zeit sind in der Welt 10 Hochspannungs-Gleichstromübertragungen entweder im Betrieb, im Bau oder in Auftrag gegeben. Davon ist die HGÜ im Westen der USA die längste mit etwa 1300 km Freileitungslänge, die leistungsstärkste mit 1440 MW und nach Wissen des Verfassers die einzige, die 2 Drehstromnetze kuppelt, die ausser durch die HGÜ auch mit Drehstromleitungen synchron verbunden sind. Tabelle I gibt einen Vergleich charakteristischer Daten bereits bestehender HGÜ-Anlagen.

2. Zweck der HGÜ

Die Westküste der USA — das sind von Norden nach Süden die Staaten Washington, Oregon, Kalifornien — hat im wesentlichen zwei getrennte Verbundnetze. Das nördliche Netz wird fast ausschliesslich aus Wasserkraftwerken

[1]) Dieser Aufsatz ist eine leicht geänderte Fassung eines Vortrags, den der Verfasser am 16. Februar 1966 an der Technischen Hochschule München im Rahmen des Kolloquiums der Abteilung für Elektrotechnik gehalten hat.

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Charakteristische Daten von bestehenden Hochspannungs-Gleichstromübertragungen [2]

Tabelle I

Anlage	Gotland	Ärmelkanal	Italien-Sardinien	Neuseeland	Japan 50/60 Hz	Konti-Skan
Übertragungsleistung in MW	20	160	200	600	300	250
Gleichspannung in kV	100	± 100	200	± 250	± 125	250
Brücken pro Station	2	2	2	4	4	2
Spannung pro Brücke in kV	50	100	100	125	125	125
Gleichstrom in A	200	800	1000	1200	1200	1000
Anzahl der parallelen Anoden pro Ventil	2	4	4	4	4	4
Blindleistungserzeugung [1])	S	B	S + B	S + B	B	S + B
Spannung des Drehstromnetzes in den beiden Stationen in kV	130 30	275 225	220 380	16 110	275 275	400 220
Freileitungslänge in km	—	—	350	Zweierbündel 580	—	90
Kabel [2])	1K + E	1K pro Pol	2K parallel + E	1K pro Pol E für Reserve	—	1K + E
Kabellänge in km	97	61	98	40	—	74
Regelung [3])	*P, f*	*P*	*P, f*	*P*	*P*	*P*
Energierichtungsumkehr	von Hand	vorgesehen	automatisch	möglich	automatisch	vorgesehen

[1]) S = Synchronphasenschieber, B = Kondensatorbatterie
[2]) K = Kabel, E = Erdrückleitung
[3]) *P* = konstante Leistung, *f* = konstante Frequenz

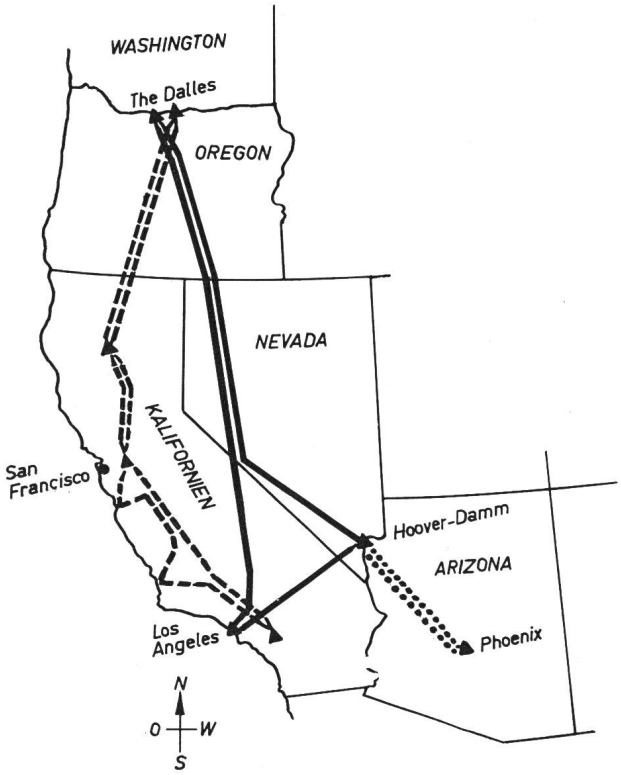


Fig. 1
Netzkupplung der Nordwest-Region mit der Südwest-Region in den USA
HGÜ 750 kV — 500 kV, 3~ — 345 kV, 3~

gespeist — am Columbia-Fluss und dessen Einzugsgebiet — und versorgt ein relativ schwach industrialisiertes Gebiet (Oregon und Washington). Das südliche Netz wird überwiegend aus Dampfkraftwerken gespeist und versorgt ein hoch industrialisiertes Gebiet (Kalifornien mit dem Ballungszentrum Los Angeles). Der Plan, die beiden Netzverbände zu kuppeln, entstand schon 1935. Ende der fünfziger Jahre schlug man eine 230 kV-Drehstromleitung zum Kuppeln vor, und Anfang der sechziger Jahre dachte man dann an Gleichstrom aufgrund der Erfahrungen mit bereits bestehenden HGÜ-Anlagen. Die Verwirklichung musste zunächst zurückgestellt werden, bis der Kongress 1964 das sog. Vorzugsgesetz (regional preference act) verabschiedete, das u. a. bestimmt, dass bei auftretender Energieknappheit die Verbraucher das Vorzugsrecht auf die in ihrem Gebiet erzeugte Energie haben. Diesem Gesetz liegen energie- und entwicklungspolitische Motive zugrunde.

Die Kupplung des nördlichen und südlichen Netzverbandes soll folgenden Zwecken dienen:

1. Im Norden anfallende überschüssige Wasserkraftenergie soll an das Industriegebiet um Los Angeles verkauft werden. Überschüssig bedeutet, dass es sich um Energie aus nicht voraussehbarem, zusätzlichem Wasserdargebot handelt, die deshalb auch nicht vertraglich garantiert werden kann. Diese Überschussenergie verursacht z. Z. erhebliche finanzielle Verluste in Form von Wasser, das ungenutzt über die Wehre läuft. Der Süden kann diese Energie leicht aufnehmen, indem er kurzfristig Dampfkraftwerke abschaltet.

2. Vertraglich garantierte Energie (Grundlast) soll an den Süden verkauft werden. Dabei handelt es sich im wesentlichen um den Energiezuwachs durch den weiteren Ausbau des Columbia-Flusses auf der kanadischen Seite. Dort sollen drei grosse Staudämme errichtet werden. Die dadurch entstehende Vergleichmässigung der Wasserführung am Unterlauf ergibt in den USA einen Leistungszuwachs von ca. 2800 MW, der zunächst im Norden nicht abgesetzt werden kann. Kanada wird an den Einnahmen aus diesem Energiezuwachs beteiligt.

3. Lastausgleich. Der Süden soll wertvolle Spitzenleistung vom Norden unter der Bedingung kaufen können, dass die Energie ausserhalb der Spitzenbelastungszeit wieder zurückgegeben wird, d. h. Einkauf von Spitzenleistung ohne Einkauf von Energie. Darüber hinaus wird ein jahreszeitlicher Lastausgleich besonders zwischen dem Norden und Arizona stattfinden. Der Norden hat die Spitzenleistung im Winter, Arizona aber im Sommer, bedingt durch Klimaanlagen und Bewässerungspumpen aufgrund seines Wüstenklimas.

4. Die Reserveleistung in beiden Netzverbänden kann durch die Kupplung verringert werden.

Für die Ausführung dieser Kupplung mit einer Gleichstromübertragung waren primär wirtschaftliche Gründe massgebend. Eine HGÜ stellte sich ab 800 km Länge als billiger heraus und war bei 1300 km Entfernung also dem Drehstrom überlegen. Ein technischer Vorteil ist ausserdem der Wegfall von Stabilitätsproblemen auf der Leitung, die bei 1300 km Drehstromleitung nicht unterschätzt werden dürfen. Da jedoch bei einer HGÜ Anzapfungen unwirtschaftlich und technisch schwer realisierbar sind, werden ausserdem zwei Drehstromleitungen mit 500 kV gebaut.

Fig. 1 zeigt den Leitungsverlauf der geplanten Netzkupplung. Zum Grössenvergleich sei erwähnt, dass die Strecke San Francisco—Los Angeles etwa der Entfernung Hamburg—München entspricht. Die beiden 500-kV-Einfach-Drehstromleitungen haben je 1000 MW Übertragungsleistung und sind über 1500 km lang. Die erste Drehstromleitung soll im Mai 1967 in Betrieb genommen werden, die zweite voraussichtlich im Mai 1968. Beide Leitungen sind mit Serienkondensatoren längskompensiert. Die HGÜ der 1. Ausbaustufe führt vom Columbia-Fluss (The Dalles, Oregon) nach Los Angeles mit einer Freileitungslänge von 1330 km und einer Übertragungsleistung von 1440 MW bei 800 kV (zweipolig ±400 kV); sie soll im April 1969 in Betrieb genommen werden. In einer 2. Ausbaustufe wird eine HGÜ mit den gleichen Daten und etwa gleicher Länge vom Columbia-Fluss zum Hoover-Damm gebaut; die Inbetriebnahme ist für Januar 1971 geplant. Tabelle II zeigt die wesentlichen Daten dieser HGÜ. Später soll eventuell eine dritte HGÜ vom Hoover-Damm nach Los Angeles hinzukommen; diese Querverbindung wird aber unter Umständen als 500-kV-Drehstromleitung ausgeführt. Zu dem gesamten Projekt der Netzkupplung gehört ausserdem eine 345-kV-Doppel-Drehstromleitung vom Hoover-Damm nach Phoenix in Arizona.

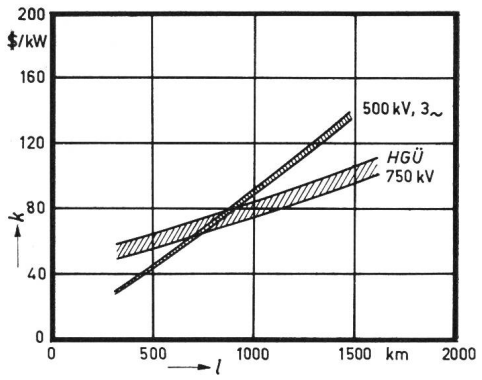


Fig. 2
Investitionskosten pro kW Übertragungsleistung k als Funktion der Länge l
Übertragungsleistung = 1200 MW; Drehstrom 500 kV mit Längskompensation auf 37° Leitungswinkel (untere Begrenzung des Bandes bei 10 % Verringerung der Kosten für die Schaltanlagen); Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) 750 kV (untere Begrenzung des Bandes bei 20 % Verringerung der Kosten für die Stromrichter-Stationen)

Charakteristische Daten der beiden Hochspannungs-Gleichstromübertragungen im Westen der USA (Pacific Northwest-Southwest-Intertie) [2; 4]

Tabelle II

Gleichstromfreileitungen	
Spannung	800 kV (± 400 kV)
Strom	1800 A (kurzzeitig 3600 A, jedoch insgesamt nicht länger als 1000 h)
Nennleistung	1440 MW
Leitungsverluste	ca. 7 %
Länge	1330 km bzw. 1355 km
Leiterseile	wahrscheinlich Zweierbündel mit Aluminium-Stahlseil 4,6 cm Durchmesser, 46 cm Bündelabstand, 12,2 m Polabstand
Erdseil	1,3 cm Durchmesser
Isolatoren	25 Kappen mit ca. 10 m Kriechweg
Umrichterstationen	
Ventil-Typ	Quecksilberdampf-Stromrichter, gittergesteuert
Schaltung	Serieschaltung von 6 Gruppen in Dreiphasen-Brückenschaltung mit je 6 Ventilen und je 1 Beipass-Ventil, Mittelpunkt geerdet
Ventil-Nenndaten	133 kV, 1800 A (gemeinsame Kathode, 6 parallele Anoden mit je 300 A)
Ventil-Betriebsdauer	ca. 5 Jahre zwischen Überholungen
Ventil-Kühlung	Kathode wassergekühlt, Anode luftgekühlt
Spannung auf Drehstromseite	230 kV (verkettet)
Stromrichter-Transformatoren	230/114 kV, 18 Einphaseneinheiten, als Drehstrombänke mit 290 MVA Leistung in Stern/Stern und Stern/Dreieck geschaltet für zwölfpulsigen Betrieb

Fig. 2 gibt einen Vergleich der Investitionskosten für eine HGÜ mit 750 kV und eine Drehstromübertragung mit 500 kV als Funktion der Entfernung [2]. Der Schnittpunkt der beiden Kurven liegt bei etwa 800 km Länge.

3. Wirkungsweise der HGÜ

Bei allen HGÜ wird die Dreiphasen-Brückenschaltung verwendet (Fig. 3). An den drei Phasen R, S, T des Stromrichter-Transformators liegen jeweils zwei Quecksilberdampf-Stromrichter — kurz Ventile genannt. Die technische Stromrichtung ist vorgegeben von der Anode zur Kathode; in umgekehrter Richtung sperrt das Ventil. Die Ventile sind gittergesteuert; wird dieses Gitter negativ vorgespannt, so ist die Stromführung solange blockiert, bis ein überlagerter Rechteckimpuls eine positive Gitterspannung erzeugt und die Stromführung freigibt. Ausserdem muss die Brükkenschaltung netzgeführt sein, d. h. das Drehstromnetz ist vorhanden und schreibt die Spannungskurven praktisch vor.

Die Stromrichterventile wirken bekanntlich wie Schalter, die schliessen (Strom führen), sobald die Anodenspannung grösser als die Kathodenspannung ist und das Gitter die Stromführung freigibt. Kurve I in Fig. 4a zeigt den Spannungsverlauf an der Kathodenklemme I der drei unteren Ventile (s. Fig. 3). Das Ventil an Phase R führe gerade Strom; die Spannung in I folgt deshalb der Wechselspannung der Phase R. Vom Zeitpunkt t_a an würde die Anodenspannung des Ventils an Phase S grösser, d. h. das Ventil in S übernimmt den Strom. Diese Übergabe kann man um den

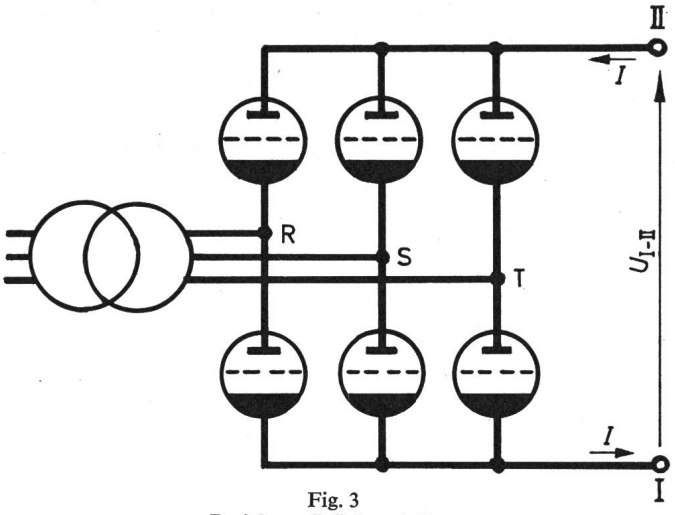


Fig. 3
Dreiphasen-Brückenschaltung
I Gleichstrom
Weitere Erklärungen siehe Fig. 4

Steuerwinkel α verzögern, indem man erst im Zeitpunkt t_b mit einem Impuls auf das negativ vorgespannte Gitter das Ventil an Phase S freigibt. Die Spannung in I springt dann auf die Wechselspannung der Phase S hinauf. Analog setzt sich der Spannungsverlauf fort. Lässt man α über 90° wachsen, dann verläuft die Spannung in I unterhalb der Nullinie (rechte Hälfte in Fig. 4a). Der Winkel α darf nur so gross werden, dass die Anodenspannung des in der Stromführung folgenden Ventils über der Kathodenspannung liegt; der Spannungsverlauf an der Klemme I muss deshalb immer Sprünge nach oben haben.

Die Kurve I in Fig. 4a gilt für Einweggleichrichtung. Die oberen 3 Ventile der Brückenschaltung nach Fig. 3 sorgen für Zweiweggleichrichtung; die Spannung an der Klemme II verläuft entsprechend der Kurve II in Fig. 4a. Die resultierende Spannung zwischen den Klemmen I und II ist in Fig. 4b aufgezeichnet. In der linken Bildhälfte ist der Gleichrichter-Betrieb dargestellt; α liegt zwi-

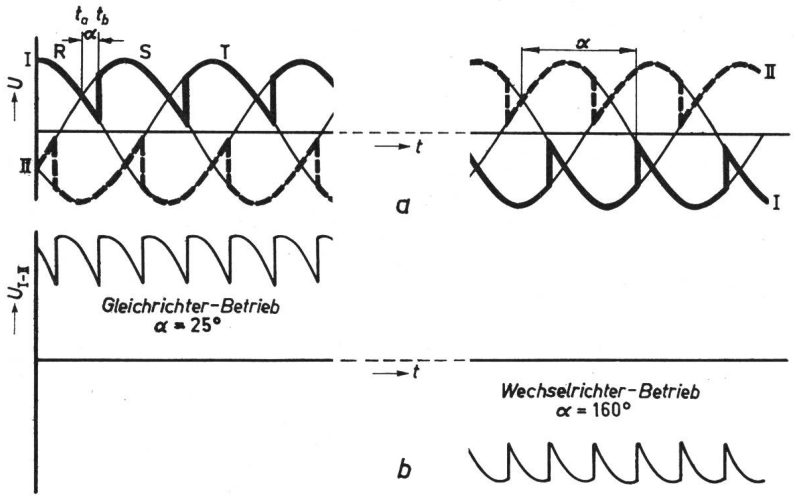


Fig. 4
Spannungsverlauf bei Gleichrichter- und Wechselrichter-Betrieb
a Spannung an den Klemmen I und II; *b* resultierende Spannung U_{I-II}
α Steuerwinkel, Überlappung vernachlässigt; *t* Zeit; t_a Stromübergabe ohne Verzögerung, t_b Stromübergabe mit Verzögerung

schen 0 und 90° und der Energiefluss ist von links nach rechts gerichtet, d. h. das Drehstromnetz gibt Energie an die Gleichstromseite ab. Lässt man α immer grösser werden, so senkt sich die Gleichspannung immer mehr und dreht bei $\alpha > 90°$ die Polarität um (rechte Hälfte von Fig. 4). Da aber die Stromrichtung weiterhin gleich bleibt — immer von Anode zu Kathode —, muss sich auch die Energierichtung umdrehen, d. h. der Gleichstromkreis gibt nun von rechts nach links Energie ins Drehstromnetz ab; dies ist der Wechselrichter-Betrieb. Für den Wechselrichter-Betrieb liegt α theoretisch zwischen 90° und 180°, aus Gründen einer sicheren Stromübergabe praktisch nur bis 160°.

Die Stromübergabe von einem Ventil zum anderen — Kommutierung genannt — ist in Wirklichkeit komplizierter. Nach Freigabe des Gitters führen für die Dauer des sog. Überlappungswinkels μ beide Ventile Strom und schliessen dabei kurzzeitig zwei Phasen des Transformators kurz;

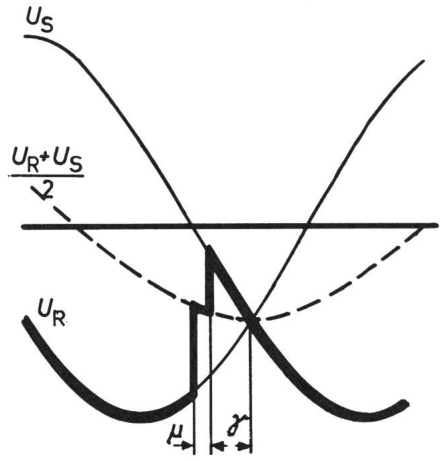


Fig. 5
Kommutierung
μ Überlappungswinkel; γ Löschwinkel; U_R, U_S Phasenspannungen

die Spannung folgt in etwa der Mittelwertkurve der beiden Spannungen (Fig. 5). Nach der Kommutierung erlischt das vorher stromführende Ventil. Das Erlöschen kann nicht durch die Gittersteuerung erreicht werden; diese kann nur den Beginn der Stromführung verzögern, bleibt aber danach ohne jeden Einfluss auf den Vorgang.

Eine dreiphasige Brückenschaltung liefert eine sechspulsige Gleichspannung. Durch Serieschaltung zweier Brükken (Fig. 6) erreicht man eine zwölfpulsige Gleichspannung, wenn die Wechselspannungen um 30° phasenverschoben sind. Zur Spannung der Brücke A addiert sich dann die verschobene Spannung der Brücke B und ergibt eine zwölfpulsige Gesamtspannung. Die Phasenverschiebung von 30° erreicht man, indem ein Transformator in Stern/Stern ge-

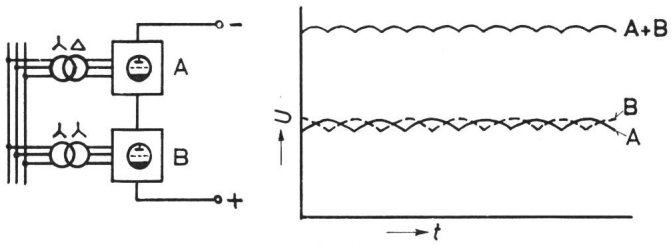


Fig. 6
Serieschaltung zweier Brücken
Jedes Quadrat mit dem Stromrichtersymbol deutet eine Brücke an
A Spannung an Brücke A; B Spannung an Brücke B; $A+B$ Spannung der Serieschaltung; U Spannung; t Zeit

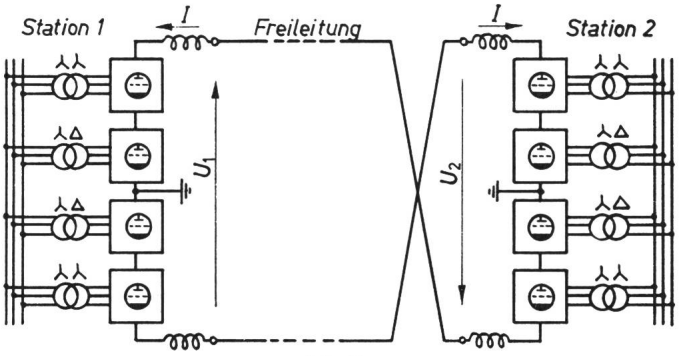


Fig. 7
Hochspannungs-Gleichstromübertragung
I Gleichstrom; U_1 Spannung am Gleichrichter; U_2 Spannung am Wechselrichter

schaltet wird, der andere in Stern/Dreieck. Eine solche Serieschaltung zweier Brücken ist wünschenswert, um die Pulszahl zu erhöhen und damit die Spannung zu vergleichmässigen; sie ist auch notwendig, um höhere Gleichspannungen zu erzielen. Die Ventile kann man nicht für beliebig hohe Spannungen bauen; im Augenblick sind pro Brücke ca. 130 kV möglich, in nächster Zukunft vermutlich 200 kV.

Fig. 7 zeigt eine zweipolige HGÜ mit den Stromrichter-Stationen 1 und 2 und der dazwischen liegenden Freileitung. Jede Station hat von Erde zu Pluspol bzw. Erde zu Minuspol zwei in Serie geschaltete Brücken mit nachgeschalteten Glättungsdrosselspulen. Im Prinzip ist es ein Gleichstrom-Dreileiter-System mit zwei Leitern (Plus- und Minuspol) auf der Freileitung und der Erde als drittem Leiter. Im normalen Betrieb wird die HGÜ symmetrisch betrieben, d. h. in der Erde fliesst kein Strom. Fällt jedoch ein Pol aus — z. B. durch gerissenes Leiterseil — dann kann die HGÜ einpolig mit Erdrückleitung betrieben werden. Dabei muss man beachten, dass benachbarte Fernmeldeleitungen stärker gestört werden und u. a. Korrosionen durch den Erdstrom in metallischen Wasserleitungen und Erdölleitungen auftreten können. So wie die Spannungspfeile in Fig. 7 eingezeichnet

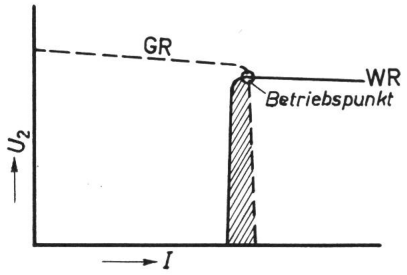


Fig. 8
Spannungskennlinien an den Klemmen des Wechselrichters
GR vom Gleichrichter diktierte Kennlinie;
WR vom Wechselrichter diktierte Kennlinie;
I Gleichstrom; U_2 Spannung am Wechselrichter

sind, ist die Energierichtung von 1 nach 2, d. h. die Station 1 arbeitet als Gleichrichter und die Station 2 als Wechselrichter.

Beide Stationen sind vollkommen gleich aufgebaut; ob sie als Gleich- oder Wechselrichter arbeiten, hängt nur vom Steuerwinkel α ab. Es ist deshalb möglich, nur durch Veränderung des Winkels α in beiden Stationen die Energierichtung für die Wirkleistung umzudrehen. Beide Stationen nehmen unabhängig von der Energierichtung Blindleistung auf. Der Blindleistungsbedarf entsteht durch die Verschiebung der Stromführung mit der Gittersteuerung; er ist gross und beträgt 50...60 % der Wirkleistung. Beide Stationen brauchen deshalb auf der Drehstromseite Blindleistungserzeuger, entweder rotierende Phasenschieber oder Kondensatorbatterien oder beides zusammen.

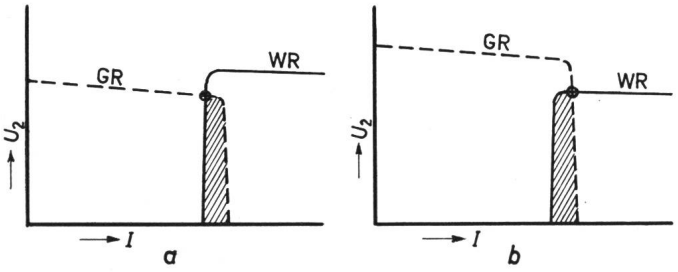


Fig. 9
Spannungskennlinien bei Störungen
a Spannungssenkung am Gleichrichter; *b* Spannungssenkung am Wechselrichter
Erklärungen siehe Fig. 8

4. Regelung der HGÜ

Die Betriebsweise der HGÜ erkennt man am besten an den Spannungskennlinien für die Klemmen des Wechselrichters. Der Wechselrichter wird im Prinzip so geregelt, dass die Spannung möglichst hoch ist. Das erreicht man, indem man die Kommutierung möglichst spät einsetzen lässt, aber gerade noch rechtzeitig genug, um eine sichere Kommutierung zu gewährleisten. Dadurch erhält man den geringstmöglichen Blindleistungsbedarf. Technisch bedeutet diese Art der Regelung, dass man den in Fig. 5 eingezeichneten Löschwinkel γ konstant hält, etwa auf 10^0, einen Wert, bei dem die Kommutierung gerade noch sicher abläuft. Da der Überlappungswinkel μ von der Drehstromspannung und dem Gleichstrom abhängt, wird der Steuerwinkel α kontinuierlich so geregelt ist, dass γ konstant bleibt. Für diese Art der Regelung (consecutive grid control [3]) ergibt sich eine lineare Kennlinie, der man eine Strombegrenzung auf einen Minimalwert gibt (Wechselrichter-Kennlinie in Fig. 8). Die Kennlinie des Gleichrichters an den Klemmen des Wechselrichters ist ebenfalls eine abfallende Gerade, wenn man den Steuerwinkel α konstant hält; er wird so eingestellt, dass die Kennlinie des Gleichrichters etwas über der des Wechselrichters liegt (Gleichrichterkennlinie in Fig. 8). Der Abfall entspricht dem Spannungsabfall in der Leitung und in den bei der Kommutierung wirksamen Reaktanzen. Diese Kennlinie begrenzt man regelungstechnisch ebenfalls durch eine Konstantstrom-Kennlinie, um das Ventil gegen Stromüberlastung zu schützen. In diesem nahezu senkrecht abfallenden Teil wird der Steuerwinkel dann natürlich verändert. Der Betriebspunkt muss im Schnittpunkt der beiden Kennlinien sein. Im Normalbetrieb wird, wie aus Fig. 8 ersichtlich, die Spannung vom Wechselrichter diktiert, der Strom vom Gleichrichter. Durch entsprechende Steuerung von Strom und Spannung erzielt man dann eine konstante Leistung. Bei Störungen, z. B. bei Kurzschluss einer Brücke durch Rückzündung oder bei Kurzschluss auf der Leitung arbeitet die HGÜ als Konstantstromsystem innerhalb des in Fig. 8 schraffierten Strombandes, das von den beiden Strombegrenzungs-Kennlinien gebildet wird. Fig. 9a zeigt den neuen Betriebspunkt, der sich z. B. bei Spannungsabsenkung am Gleichrichter ergibt — dem entspricht ein Herunterrutschen der Gleichrichter-Kennlinie — und Fig. 9b den Betriebspunkt, wenn die Spannung am Wechselrichter aus irgendeinem Grund absinkt.

Die Forderungen, die an die Regelung gestellt werden, demonstrieren folgende Daten: Bei Rückzündungen in einer Brücke wird der Fehler durch Blockieren der Brücke, Umleitung des Stroms über ein Beipass-Ventil und erneutes Freigeben der Brücke innerhalb von 0,2...0,8 s behoben. Rückzündungen lassen sich nie ganz vermeiden; man rechnet mit durchschnittlich einer Rückzündung je Monat je Brücke. Bei Fehlern auf der Gleichstromleitung, z. B. bei Kurzschluss eines Pols, wird die Leistung automatisch auf Null herabgeregelt und danach zurück auf 90 % des vorausgegangenen Wertes innerhalb von 150 ms. Für eine volle Energieumkehr wird eine Zeit von 300 ms gefordert, immer vorausgesetzt, dass die angeschlossenen Drehstromnetze der Regelung so schnell folgen können. All diese Änderungen erzielt man ohne mechanisches Schalten allein durch die Gittersteuerung. Für die wichtigsten Betriebsweisen werden die entsprechenden Regelgeräte vorgesehen. Später wird diesem Regelsystem eventuell noch ein Prozessrechner übergeordnet, d.h. ein On-Line-Digitalrechner mit direktem Anschluss auf der Ein- und Ausgabeseite, der dann die HGÜ nach vorprogrammierten Gesichtspunkten im Rahmen der Gesamtlastverteilung steuern würde.

5. Bauausführung der HGÜ

Fig. 10 zeigt den Schaltplan einer Stromrichter-Station für die erste HGÜ vom Columbia-Fluss nach Los

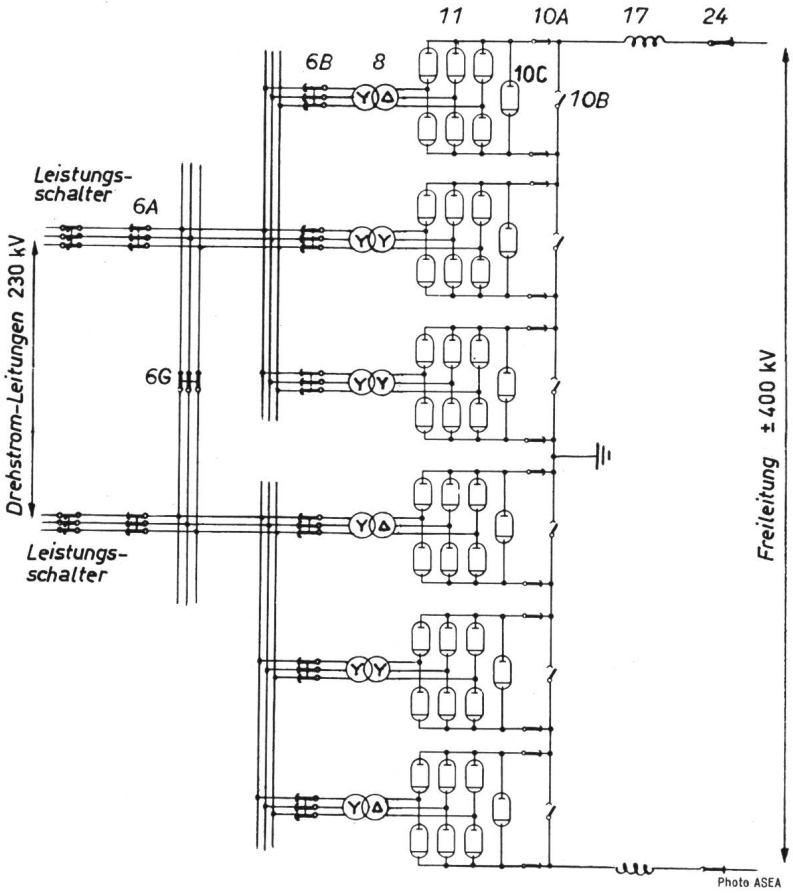
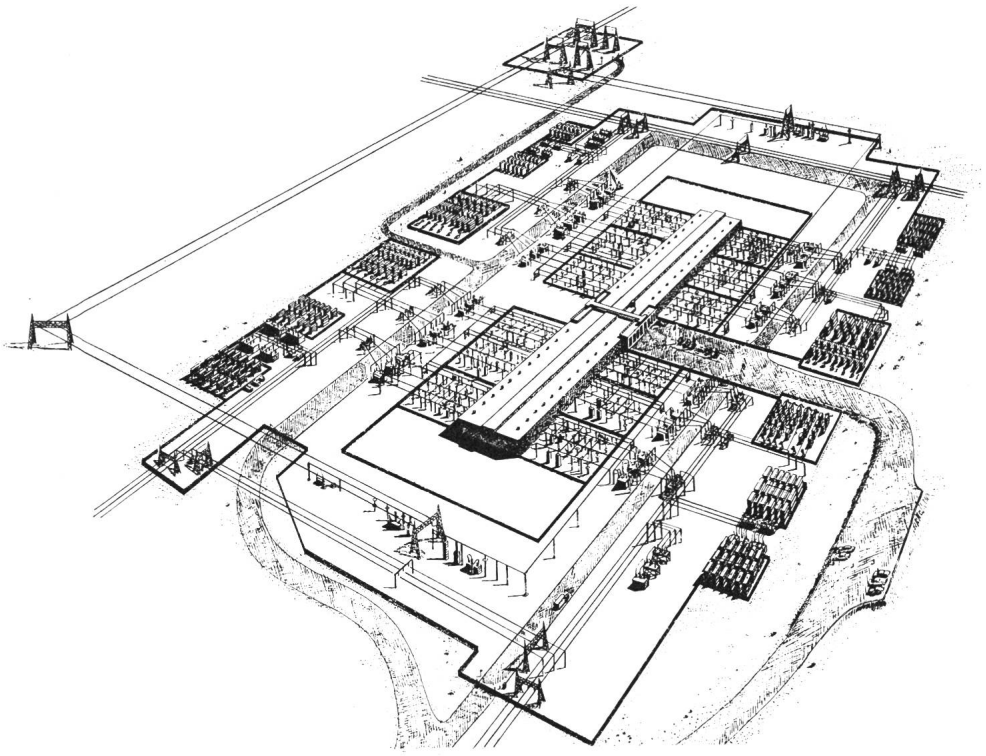


Fig. 10
Schaltplan der Stromrichter-Station am Columbia-Fluss
6A Sammelschienen-Trennschalter (230 kV); *6B* Transformatoren-Trennschalter; *6G* Sammelschienen-Kuppelschalter; *8* Stromrichter-Transformatoren; *10A* Trennschalter für Ventilgruppe; *10B* Beipass-Schalter; *10C* Beipass-Ventil; *11* Ventile; *17* Glättungsdrosselspulen; *24* Trennschalter für Gleichstromleitung
(Filter auf Drehstromseite u. a. nicht eingezeichnet)

Fig. 11
Entwurf der beiden Stromrichter-Stationen am Columbia-Fluss



Angeles, wobei im Gegensatz zu Fig. 7 pro Pol nicht zwei, sondern drei Brücken in Serie geschaltet sind, um eine Spannung von ±400 kV zu erzielen. Die Stromrichter-Transformatoren sind wieder abwechselnd Stern/Stern und Stern/Dreieck geschaltet, insgesamt drei Transformatoren in Stern/Stern und drei in Stern/Dreieck. Normalerweise liegen alle sechs Brücken in Serie. Fällt eine Brücke durch einen Fehler aus, dann wird der Strom vorübergehend über das Beipass-Ventil umgeleitet; dauert der Fehler länger — z. B. bei Reparaturen —, dann wird der Beipass-Schalter eingelegt. Für die zweite HGÜ zum Hoover-Damm werden vermutlich nur noch zwei Brücken pro Pol notwendig sein, da Ventile für 200 kV bereits in erfolgversprechender Entwicklung sind.

Fig. 11 zeigt den Entwurf der Umrichterstationen für die beiden HGÜ am Columbia-Fluss. Die sechs Brücken werden in der Halle untergebracht; die beiden Pole liegen auf den gegenüberliegenden Seiten der Halle. Fig. 12 gibt den Entwurf für die Station am Hoover-Damm wieder.

Das wichtigste Bauteil der HGÜ ist der Quecksilberdampf-Stromrichter, dessen schematischer Aufbau aus Fig. 13 ersichtlich ist. In einem Stahltank *T* befindet sich am Boden die Quecksilber-Kathode *K*, darüber in einem Porzellanüberwurf *P* die Anode *A*. *Z* ist die Zündelektrode zum Zünden und *E* die Erregeranode, die über einen Hilfskreis den Brennfleck im Quecksilber der Kathode aufrechterhält. Das Gefäss muss den Strom über ⅓ Periode führen können und muss sofort danach die hohe Sperrspannung aushalten. Dazu ist es notwendig, die Spannungsverteilung längs des Gefässes zu vergleichmässigen; dies wird erzwungen durch einen Ohmschen-kapazitiven Spannungsteiler *D*, an den die Abstufungselektroden *R* (grading electrodes) angeschlossen sind. Das unterste Gitter *G* ist das Steuergitter. Die Spannungsbeanspruchung in Sperrichtung liegt bei 100...200 kV in 20...30 µs.

Ein weiteres Konstruktionsproblem stellen die hohen Ströme in Durchlassrichtung. Man beherrscht sie durch Parallelschalten mehrerer Anoden auf einem gemeinsamen Kathodentank. Fig. 14 zeigt den Prototyp des Stromrichters; die Spannungsteiler sind deutlich zu erkennen. Es sind sechs Anoden parallelgeschaltet; ein oben aufgesetzter Stromteiler erzwingt eine gleichmässige Aufteilung des Stromes auf die sechs Anoden. Die Nenndaten sind: 133 kV, 1800 A, bezogen auf Dreiphasen-Brückenschaltung. Da die Ventile auf Potential liegen, müssen sie isoliert aufgestellt werden. Alle Hilfs- und Steuerkreise müssen deshalb über Isoliertransformatoren zugeführt werden. Fig. 15 zeigt die Glättungsdrosselspule für die Gleichstromseite.

Es ist geplant, eine dritte Gleichstromleitung von Los Angeles zum Hoover-Damm als Querverbindung zu bauen, und zwar nur als Leitung ohne zusätzliche Stromrichter-Stationen. Damit wäre erstmals ein Gleichspannungs-Maschennetz verwirklicht

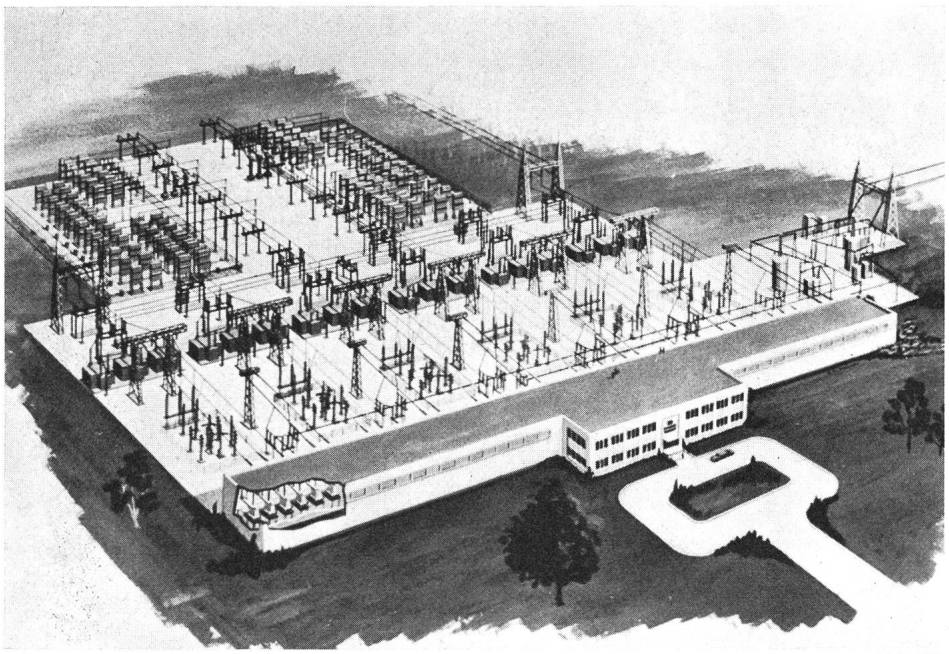
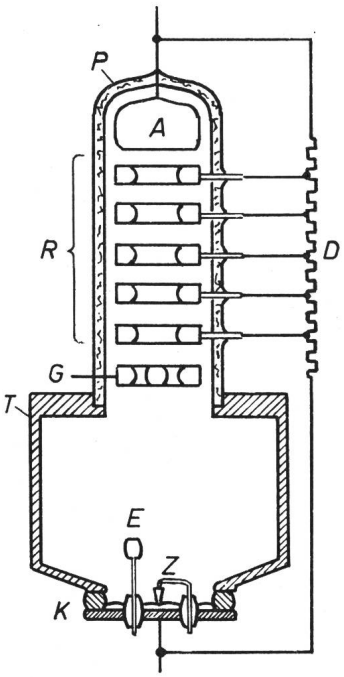


Photo ASEA

Fig. 12
Entwurf der Stromrichter-Station am Hoover-Damm

Fig. 13
Schematischer Aufbau des Quecksilberdampf-Stromrichters
A Anode; *D* Spannungsteiler; *E* Erregerelektrode; *G* Steuergitter; *K* Kathode; *P* Porzellanüberwurf; *R* Abstufungselektroden; *T* Stahltank; *Z* Zündelektrode



und das Problem des Gleichspannungsschalters würde akut. Da es einen Leistungsschalter für Gleichspannung bisher nicht gibt, würde man Schnellschalter einbauen, die kurze Schaltzeiten haben, aber keinen Strom schalten müssen. Dazu könnte man vermutlich konventionelle Leistungsschalter mit gewissen Änderungen verwenden. Diese Schalter würden also nur stromlos trennen, die eigentliche Schaltfunktion würden die gittergesteuerten Ventile ausüben. Anhand von Fig. 16 sei ein solcher Schaltvorgang erläutert. Es fliesse Energie von The Dalles am Columbia-Fluss nach Los-Angeles auf der linken HGÜ und zum Hoover-Damm auf der rechten HGÜ. Die Schnellschalter in den Querverbindungen — im Norden in der Sammelschiene *A*, im Süden in der Freileitungsverbindung *B* — sind dann offen, die Schnellschalter *C, D, E, F* an den beiden HGÜ geschlossen. Es trete nun ein Kurzschluss zwischen den beiden Polen auf der linken HGÜ ein. Die beiden Stromrichter-Stationen würden dann auf Leistung Null herabgeregelt und beide würden kurzzeitig als Wechselrichter arbeiten, bis die Leitungskapazitäten entladen sind. Der Strom wird Null und die Schnellschalter *C, D* können stromlos öffnen. Nun schliessen die Schnellschalter *A, B* in den Querverbindungen, beide Stationen werden in der Leistung wieder hochgeregelt und die Energie nach Los Angeles wird vorübergehend über die rechte HGÜ umgeleitet. Die Freileitungen sind so dimensioniert, dass sie total 1000 h lang den doppelten Strom führen können. Die Lastunterbrechung würde dabei etwa ⅓ s dauern. Wenn der Kurzschluss auf der linken HGÜ beseitigt ist, schalten die Schnellschalter *C, D* die Leitung zu, die dann sofort wieder einen Teil der Leistung übernimmt. Die eine Stromrichter-Station am Columbia-Fluss wird solange nachgeregelt, bis über die Querverbindung kein Strom mehr fliesst; der Schnellschalter *A* kann dann stromlos öffnen. Ein analoger Regelvorgang läuft im Süden ab, um den ursprünglichen Betriebszustand wiederherzustellen.

Bekanntlich verursachen Stromrichter Oberwellen, Stromoberwellen auf der Drehstromseite und Spannungsoberwellen auf der Gleichstromseite. Die Oberwellen wirken sich sehr störend aus; sie führen u. a. zu unzulässiger Erwärmung angeschlossener Geräte und zu Beeinflussung von benachbarten Fernmeldeleitungen. Man muss deshalb Filter einbauen, um die Oberwellen so gut wie möglich zu beseitigen. Für diese Filter ist ein beträchtlicher Aufwand nötig. Die geplanten Filter auf der Drehstromseite für die 5., 7., 11. und 13. Oberwelle werden voraussichtlich Kapazitäten mit ca. 180 Mvar Blindleistung bei 6 Hz enthalten, in Los Angeles zusätzlich nochmals 90 Mvar für ein Hochpassfilter. Diese Blindleistung trägt erfreulicherweise zum Blindleistungsbedarf der Stromrichter-Stationen bei.

Fig. 17 zeigt den Entwurf für die Erdung am Columbia-Fluss. Sie ist aus Gusseisen und soll in ca. 1 m Tiefe von Koks umgeben kreisförmig in einem Durchmesser von 800 m

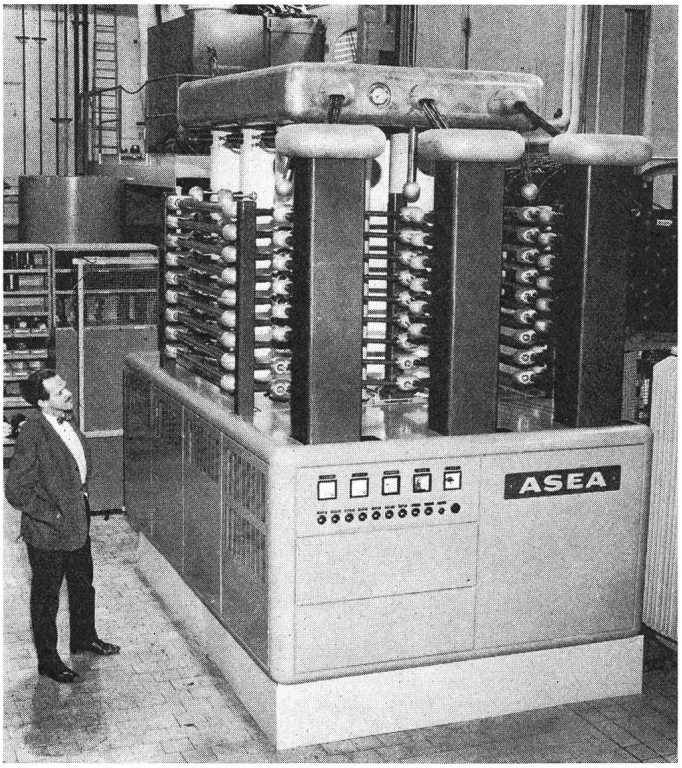


Photo ASEA

Fig. 14
Prototyp des Stromrichters

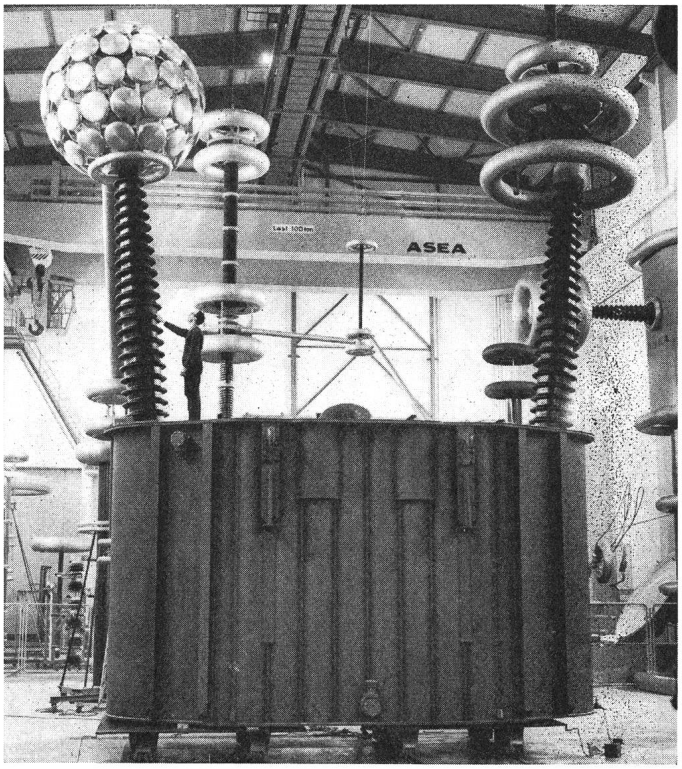


Photo ASEA

Fig. 15
Prototyp der Glättungsdrosselspule

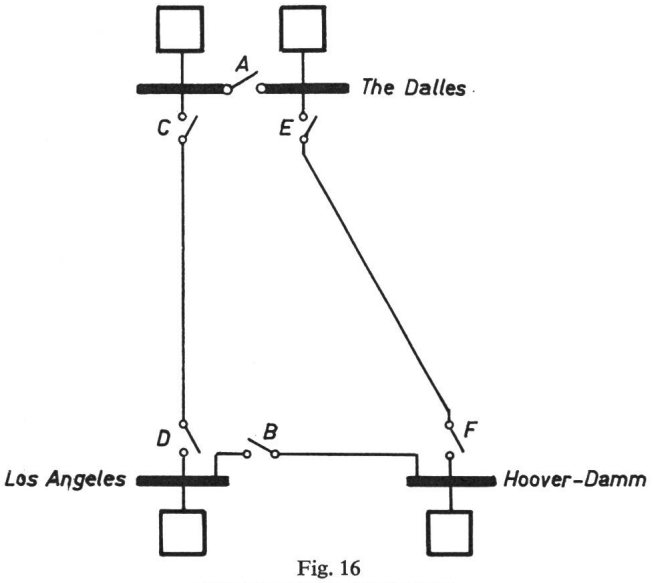


Fig. 16
Gleichspannungs-Maschennetz
Quadratisches Kästchen = Stromrichter-Station
A, B, C, D, E, F Schnellschalter

oder mehr verlegt werden. In der Stromrichter-Station bei Los Angeles wird man die Erdung vermutlich ins Meer verlegen, das nur 50 km entfernt ist; dadurch würde der Erdwiderstand sehr gering. Interessant ist, dass die Erdrückleitung nicht wie bei Wechselstrom der Leitungstrasse folgt, sondern den direkten Weg des geringsten Widerstandes nimmt. Fig. 18 zeigt die Form eines Tragmastes. Der Polabstand beträgt 12 m, die gesamte Masthöhe ca. 33 m. Voraussichtlich wird ein Zweierbündel aus Aluminium-Stahlseil mit 4,6 cm Seildurchmesser und 46 cm Bündelabstand verwendet. Ein Erdseil wird zumindest innerhalb Oregons zum Schutz gegen atmosphärische Überspannungen verlegt.

Die Bonneville Power Administration (Portland, Oregon), die für den Bau und den Betrieb der Stationen am Columbia-Fluss und der Freileitungen innerhalb Oregons zuständig ist, betreibt seit November 1963 ein Gleichspannungsprüffeld für zweipolig ±550 kV oder einpolig 825 kV und 1,5 A [5]. Die Gleichspannung wird aus einer Halle über Wanddurchführungen entweder auf eine 180 m lange Leitung für Isolatorenprüfungen, auf eine 7,5 km lange Versuchsleitung für Korona- und Störungsmessungen oder auf

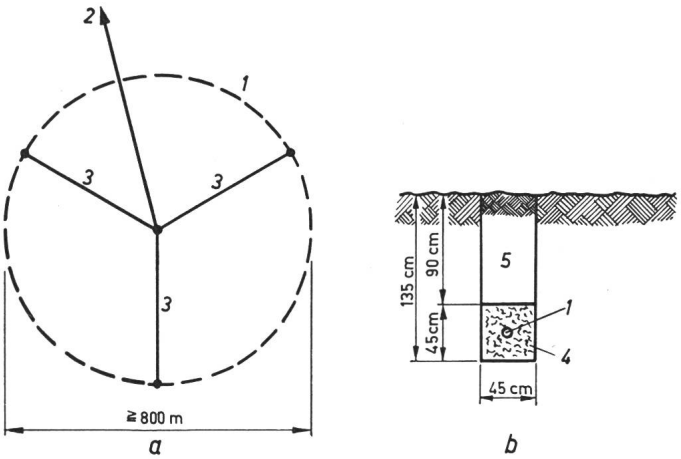


Fig. 17
Entwurf der Erdung der Stromrichter-Stationen am Columbia-Fluss
a Verlegungsplan; *b* Querschnitt
1 Ringleitung, in Erde verlegt; *2* Freileitungserdseil zur Umrichterstation; *3* isolierte Leiter, in Erde verlegt; *4* Koksschüttung; *5* Erdschüttung

einen Spezialmast für Überschlagsversuche geschaltet. Die 7,5 km lange Versuchsleitung wurde etwa wie die HGÜ-Leitungen ausgelegt, so dass man die daran gewonnenen Erkenntnisse unmittelbar auf die HGÜ-Leitungen anwenden kann.

6. Ausblick

Die beiden Hochspannungs-Gleichstromübertragungen vom Columbia-Fluss (The Dalles, Oregon) nach Los Angeles bzw. zum Hoover-Damm sind bereits in Auftrag gegeben. Man verfolgt dieses Projekt in den USA mit grossem Interesse, da die HGÜ für den zukünftigen überregionalen Verbundbetrieb in den USA eine interessante Lösung bieten kann. Der überregionale Verbundbetrieb wird sich in den USA immer stärker durchsetzen, weil nur damit das Problem der Reserveleistung beim Trend zu grössten Kraftwerkseinheiten mit höchster Wirtschaftlichkeit bewältigt werden kann. Die Entfernungen sind dabei so gross, dass sowohl aus technischen wie aus wirtschaftlichen Gründen

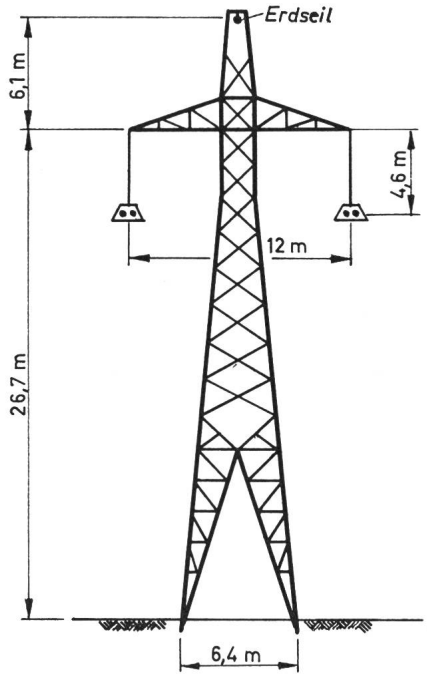


Fig. 18
Entwurf des Tragmastes

HGÜ erfolgversprechend sein können. Auch der Lastausgleich ist ein Anreiz zum Grossverbundbetrieb. In West-Ost-Richtung könnte man die Zeitdifferenz zum Lastausgleich ausnützen (wenn es in San Francisco 9 Uhr vormittags ist, ist es in New York 12 Uhr mittags). In Nord-Süd-Richtung wäre ein jahreszeitlicher Lastausgleich möglich; während der Norden die Spitzenlast im Winter hat, tritt die Spitzenlast im Süden im Sommer auf, bedingt durch Klimaanlagen und Bewässerungspumpen. Die Federal Power Commission rechnet in ihrer Vorschau damit, dass bis 1980 die sommerliche Spitzenlast des Südens um 15 000 MW grösser ist als die winterliche Spitzenlast im Norden [6]. Für einen solchen Lastausgleich auf grosse Entfernung kann die HGÜ eine erfolgversprechende Lösung sein.

7. Zusammenfassung

Nach einem kurzen Überblick über die historische Entwicklung der Energieübertragung werden die Gründe ge-

nannt, die für den Bau der beiden Hochspannungs-Gleichstromübertragungen im Westen der USA massgebend waren. Die Wirkungsweise einer HGÜ und die Art der Strom-Spannungs-Regelung wird kurz erklärt. Anhand von Skizzen und Bildern wird die Ausführung der Stromrichtergefässe, der Stationen und der Freileitungen erläutert. Zu den beiden HGÜ soll später eine Gleichstromleitung als Querverbindung hinzukommen. Auf die geplante Betriebsführung dieses dadurch entstehenden dreieckförmigen Maschennetzes wird hingewiesen.

Der Verfasser ist dem U.S. Department of the Interior, Bonneville Power Administration in Portland, Oregon (USA) für die bereitwillige Überlassung von Informations- und Bildmaterial sowie der ASEA für die Überlassung einiger Photos zu Dank verpflichtet.

Literatur

[1] *A. U. Lamm:* High-Voltage D-C Transmission: General Background and Present Technical Status. Trans. IEEE Power Apparatus and Systems 83(1964)1, S. 62...71.

[2] *E. J. Harrington* and *E. F. Weitzel:* The BPA EHV D-C Program. Report of the Division of Engineering, Bonneville Power Administration, Portland/Oregon, May 1965.

[3] *P. G. Engström:* Operation and Control of HV D-C Transmission. Trans. IEEE Power Apparatus and Systems 83(1964)1, S. 71...77.

[4] *G. D. Breuer, E. M. Hunter, P. G. Engström* and *R. F. Stevens:* The Dalles Converter Terminal of the HVDC Intertie. Technical Paper of the Third Winter Power Meeting of the IEEE Power Group from January 31 to February 4, 1966 in New York, 31 TP 66–58.

[5] *R. S. Gens* and *R. F. Stevens:* The High Voltage D-C Test Program of the Bonneville Power Administration. Trans. IEEE Power Apparatus and Systems 82(1963)69, S. 1054...1060.

[6] *A. Kroms:* Entwicklungsrichtungen der Elektrizitätsversorgung in den USA. Bull. SEV 56(1965)11, S. 439...441 + Nr. 12, S. 477...484.

Adresse des Autors:
Dr.-Ing. *Hermann Dommel,* Div. of System Engineering, Bonneville Power Administration, P. O. Box 3621, Portland, Oregon 97208 (USA).

Neue elektronische Steuerungen für elektrische Triebfahrzeuge [1])

Von *R. Germanier,* Genf

(Übersetzung)

62 – 523.8 : 621.335

Die Resultate, welche mit den automatischen Steuerungen erreicht werden, sowie der Aufbau der funktionellen Regelelemente sind in der Einführung beschrieben. Danach folgen die Beschreibung der Steuerungen mit Beschleunigungsregelung und der elektronischen Ausrüstungen für Strassen- und Untergrundbahnen. In einem weiteren Teil wird die elektronische Geschwindigkeitsregelung mit ihren Zusatzvorrichtungen gezeigt, welche zum automatischen Fahren mit «Minimalenergieverbrauch» führen. Die Schlussfolgerung weist auf die Etappen hin, welche zur elektronischen Lokomotive ohne bewegliche Kontakte führen.

Les résultats que les commandes automatiques permettent d'atteindre sont cités dans l'introduction qui décrit également la constitution de l'élément fonctionnel. Viennent ensuite la description du principe des commandes à accélération contrôlée et celle des équipements électroniques pour tramways et métros. Un paragraphe suivant présente les équipements de vitesse affichée et leur complément conduisant à la marche automatique avec consommation minimum d'énergie. La conclusion évoque les étapes menant à la locomotive électronique sans contacts mobiles.

1. Entwicklungsgeschichte

Die erste elektronische Sécheron-Steuerung wurde im Jahre 1960 auf einem Trolleybus der Compagnie Genevoise des Tramways Electriques (CGTE, Genf), die erste automatische Geschwindigkeitsregelung bereits im Frühjahr 1962 auf einem Triebwagen der SNCF im Vorortsverkehr von Paris-Nord in Betrieb genommen. Die Entwicklung von automatischen Steuerungen hat seither erfreuliche Fortschritte gemacht. Sie sind in verschiedene Gebiete vorgedrungen und werden für alle Arten von Fahrzeugen verwendet. Das Vertrauen, welches diese Technik geniesst, wird durch die Anzahl von Steuerausrüstungen, die sich teils schon im Betrieb, teils in Fabrikation befinden, bestätigt.

Der hohe Automatisierungsgrad dieser Ausrüstungen hätte theoretisch schon vor Jahren erreicht werden können durch Verwendung zahlreicher Relais und Röhrenverstärker, wie sie in der Radiotechnik gebraucht wurden. Die Sicherheit solcher Apparate auf Traktionsfahrzeugen wäre indessen sehr fragwürdig gewesen. Erst die Einführung der Halbleiter in der Elektrotechnik machte die Verwirklichung der heutigen automatischen Steuerungen möglich. Während zuerst beabsichtigt war, Relais und bewegliche Kontakte durch statische, gegen Staub, Korrosion, Feuchtigkeit und Vibrationen unempfindliche und wartungsfreie Elemente zu ersetzen, erkannte man bald, dass es dank der leichten Regulierbarkeit der Halbleiter möglich ist, eine Automatisierung gewisser Funktionen zu verwirklichen. Solche automatische Steuerungen enthalten keine beweglichen Kontakte und sind deshalb herkömmlichen Steuervorrichtungen hinsichtlich Betriebssicherheit überlegen. Sie ermöglichen es, folgende Resultate zu erreichen:

a) *Optimale Ausnützung* der Starkstrom-Ausrüstung durch automatische Begrenzung des Anfahrstromes in Abhängigkeit der Last des Fahrzeuges und der Überlastbarkeit der Motoren. Bei auftretendem Schleudern wird der Anfahrstrom automatisch verringert. Die automatische Begrenzung des Anfahrstromes verlängert die Lebensdauer der Starkstromausrüstung und begrenzt die Spitzenleistungen, welche die Unterstationen liefern müssen.

b) *Erhöhte Leistungsfähigkeit einer Bahnlinie* durch minimale Fahrzeiten. Die automatische Geschwindigkeitsregelung erlaubt, die einzelnen Strecken mit der höchstzulässigen Geschwindigkeit zu befahren, und die Geschwindigkeitsgrenzen werden mit grösserer Genauigkeit eingehalten als bei manueller Regulierung.

c) *Erhöhter Fahrkomfort* durch Regelung der Beschleunigung beim Anfahren und der Verzögerung beim Bremsen für Fahrzeuge, welche starken Laständerungen unterworfen sind.

d) *Kürzeste Bremsstrecken* durch Steuerung der elektrischen Widerstandsbremse und automatische Korrektur der Bremskraft beim Gleiten einer oder mehrerer Achsen.

e) *Vereinfachung der Führung* von Fahrzeugen mit Geschwindigkeiten von mehr als 150 km/h durch automatische Regelung der Zugsgeschwindigkeit. Dem Lokomotivführer wird die dauernde Regelung der Maschinenleistung abgenommen, so dass er seine ganze Aufmerksamkeit den in Abständen von 20...30 s vorüberziehenden Streckensignalen widmen kann.

f) *Verringerung des Energieverbrauchs* auf Untergrund- und Vorortbahnen, dank einer Zusatzvorrichtung der Geschwindigkeitsregelung, die das Fahren im Leerlauf sinnreich steuert.

g) Die heutige Entwicklung dieser Art von automatischen Steuerungen würde die *Verwirklichung von ferngesteuerten Fahrzeugen,* sowie von Fahrzeugen, welche nach einem vorgegebenen Programm verkehren, erlauben.

[1]) Vortrag vom 6. September 1966 vor dem Direktionsausschuss der Union Internationale des Transports Publics (UITP).