

Hochspannungs-Gleichspannungsübertragungen als Verbindung in Übertragungsnetzen

Günther Brauner, Wien

erschienen in: ETG Journal 2018, H. 2, S. 66-69

Inhalt

1. Geschichte der Gleichspannungstechnik in den Anfängen der Energieübertragung	1
2. Prinzipien der Hochspannungs-Gleichstromübertragung	2
3. Die Geschichten der GKK Dürnrohr und Wien-Südost.....	4
4. Zukünftige Bedeutung von HGÜ-Verbindungen in Übertragungsnetzen	7
5. HGÜ im Übertragungsnetz der USA	7
6. HGÜ in China	8
7. Literatur.....	9

1. Geschichte der Gleichspannungstechnik in den Anfängen der Energieübertragung

Die Entwicklung der elektrischen Energieübertragung begann parallel sowohl mit Gleichstrom- als auch mit Wechselstromtechnik. Am Anfang waren sich auch Fachleute nicht einig, welche Technik sich durchsetzen würde. Edison, ein Verfechter der Gleichstromtechnik, richtete 1881 ein Gleichstromsystem zur Beleuchtung der Weltausstellung in Paris ein. Vor 1890 wurde mit zwei in Reihe geschalteten Gleichstromgeneratoren die Elektrizitätsversorgung in Städten mit Reichweiten von etwa 800 bis 1.000 m begonnen. Dabei wurde die mittlere Verbindung beider Maschinen durch einen dritten Leiter mit den Verbrauchszentren verbunden (Dreileitersystem). René Thury hatte schließlich durch die Reihenschaltung von 16 Generatoren mit jeweils 3,6 kV eine Leistung von 4.320 kW mit einer Zweidraht-Gleichspannungsfreileitung von Moutier nach Lyon über eine Entfernung von 180 km übertragen.¹ Auf der Lastseite waren 16 Asynchronmotoren mit jeweils angekuppelten Wechsel- oder Gleichspannungsgeneratoren ebenfalls in Serie geschaltet [1]. Bei variabler Erzeugung und Last mussten jeweils gleichviele Generatoren und auf der Erzeugungsseite wie Asynchronmotoren auf der Lastseite abgeschaltet und überbrückt

¹ Siehe: Gleichstrom-Hochspannungs-Kraftübertragung Montiers-Lyon. In ETZ 27 (1906), S. 1091-1094 [Anm. d. Hrsg.]

werden. Hier zeigte sich die betriebliche und technische Unzulänglichkeit der Gleichstrom-Fernübertragung in den Anfängen der Energieübertragung.

Die erste Drehstrom-Übertragung erfolgte 1891 über 175 km von Lauffen am Neckar zur Internationalen Elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt am Main mit einer Spannung im Bereich von 16 bis 30 kV. Verbraucherseitig konnten alle Asynchronmotoren und Beleuchtungseinrichtungen über einen gemeinsamen Transformator parallel betrieben und je nach Belieben zu- oder abgeschaltet werden. Dies wirkte sich lediglich auf die Leistungsabgabe des Wechselstromgenerators in Lauffen aus, war aber betrieblich sehr einfach.

Die Umsetzung der Spannungen auf kleinere Werte war in der Anfangszeit bei Gleichspannung betrieblich schwierig und meistens nur mit Verlusten möglich. Die Erzeugung hoher Spannungen war ebenfalls wegen der Reihenschaltung von Generatoren mit erheblichen Problemen der Wicklungsisolation verbunden. Und schließlich war die Schaltertechnik in ihren Abschaltleistungen begrenzt, da natürliche Nulldurchgänge wie bei der Wechselspannung fehlen. Die Gleichspannungstechnik verlor daher allmählich an Terrain gegen die Wechselspannungstechnik und war nur noch in industriellen Sonderanwendungen, wie z. B. bei der Elektrolyse anzutreffen.

Erst in um 1935 wurde sie wieder entdeckt, insbesondere weil mechanische Lichtbogen-Stromrichter entwickelt worden waren [2]. Im Jahr 1941 wurde die erste Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) zur bipolaren Kabelübertragung zwischen dem Braunkohlekraftwerk Vockerode bei Dessau und Berlin mit einer symmetrischen Übertragungsspannung von 200 kV bei 60 MW begonnen und 1945 fertiggestellt. Sie konnte aber wegen des Endes des zweiten Weltkrieges nicht in Betrieb gehen, wurde demontiert und einpolig zwischen Moskau und Kaschira² in Betrieb genommen [1].

2. Prinzipien der Hochspannungs-Gleichstromübertragung

Gründe für die Wiederentdeckung der Gleichspannungstechnik waren die Entwicklung der Lichtbogen-Stromrichter nach Marx [3], später die Quecksilberdampfventile und schließlich die Halbleiter-Thyristortechnik. Auch die Zusammenschaltung der nationalen 220-kV-Wechselspannungs-Übertragungsnetze von Deutschland, Frankreich und der Schweiz im Jahr 1955, dem dann im Jahr 1967 der Zusammenschluss von 14 westeuropäischen Netzen auf der Ebene von 380 kV zum Stern in Laufenburg am Rhein zum europäischen UCPTE1-Energiesystem folgte, sowie die Bildung eines ähnlichen transnationalen Wechselspannungsnetzes der kommunistischen Länder in Osteuropa (UCPTE2), stellte große Anforderungen an die Entwicklung von leistungsfähigen, verlustarmen und wirtschaftlichen Fernübertragungstechniken dar. Durch die dezentrale Struktur des europäischen Übertragungsnetzes, bei der die Kraftwerke jeweils nah bei den Lastschwerpunkten

² Kaschira liegt ca. 100 km südlich von Moskau [Anm. d. Hrsg.]

angeordnet waren, beschränkte sich die Aufgabe des Übertragungsnetzes in erster Linie auf einen kleinräumigen Energieaustausch zwischen Nachbarn, wobei die einzelnen Teilnetze eine ausgeglichene Jahresbilanz der Energielieferungen anstrebten.

Weiträumige Übertragungen und insbesondere die Notwendigkeit, Verbindungen über das Meer zwischen der UCPTe1 und Großbritannien sowie später nach Schweden und Norwegen herzustellen, sowie zur Anbindung von Inseln, machten den Einsatz der HGÜ-Technik interessant.

Folgende prinzipiellen Verbindungsmöglichkeiten von Übertragungsnetzen ermöglicht die HGÜ-Technik:

- Punkt-zu-Punkt-Verbindung

Hierbei kann Energie zwischen zwei Anschlusspunkten der zu verbindenden Übertragungsnetze in beide Richtungen ausgetauscht werden. Beispiele hierfür sind die Anbindung der Insel Gotland an das schwedische Festland im Jahr 1954. Eine erste HGÜ-Weitverbindung wurde 1979 zwischen Cabora Bassa am Sambesi (Mosambik) und Johannesburg (Südafrika) über 1410 km mit ± 533 kV und 1920 MW in Betrieb genommen [3]. Diese Anlage hatte bereits Halbleiter-Thyristoren. Punkt-zu-Punkt-Verbindungen sind relativ einfach zu regeln, da der Strom in beiden HGÜ-Stationen gleich ist. Über den Ansteuerwinkel kann die Leistungsrichtung und der Leistungsfluss gesteuert werden.

- Punkt-zu-Multipunkt-Verbindung

Diese Verbindungstechnik erfordert eine aufwendige Regelungstechnik, da die Bilanz der Ströme in allen Wechselrichterstationen gleich der Summe der Ströme in allen Gleichrichterstationen sein muss. Bisher wurden daher fast alle HGÜ-Systeme nur als Punkt-zu-Punkt-Verbindungen ausgeführt und es besteht die Tendenz, anstelle von Multipunkt-Systemen unabhängige parallele Punkt-zu-Punkt-Systeme einzuführen, die jeweils für sich geregelt werden können. Dies erfolgt auch aus Gründen der Versorgungssicherheit, da mehrere unabhängige Richtsysteme eine höhere Zuverlässigkeit als ein Multipunkt-System aufweisen.

- Back-to-Back-System

Dies ist eine Sonderform der Punkt-zu-Punkt-Verbindung. Hierbei sind beide HGÜ-Stromrichter in demselben oder in unmittelbar benachbarten Gebäuden untergebracht und werden direkt über eine Drossel verbunden. Daher wird dieses System auch als Gleichstrom-Kurzkupplungen (GKK) bezeichnet. Beispiele sind die Kurzkupplungen in Dürnrohr in Österreich (1983-1995), Etzenricht (1993-1995) und Wien-Südost (1993-1996). Mit ihnen wurden die zueinander asynchronen Netze der UCPTe und des RGW³ für den Leistungsaustausch verbunden.

³ Rat für Gegenseitige Wirtschaftshilfe, internationale Organisation der sozialistischen Staaten für wirtschaftlich Zusammenarbeit unter Führung der Sowjetunion [Anm. d. Hrsg.]

3. Die Geschichten der GKK Dürnrohr und Wien-Südost

Die GKK von Dürnrohr nach Slavetice (ČSSR) war die erste Verbindung zum Energieaustausch zwischen den Westeuropäischen UCPTE-System und dem östlichen RGW-System [4] und diente dem Stromaustausch zwischen Österreich und Polen mit teilweiser Leitungsführung über das Gebiet der ČSSR (Bild 1). Von 1980 bis 1983 wurde die Anlage errichtet. Sie hatte auf der Gleichspannungsseite eine Spannung von 145 kV und war für eine Übertragungsleistung von 550 MW konzipiert.

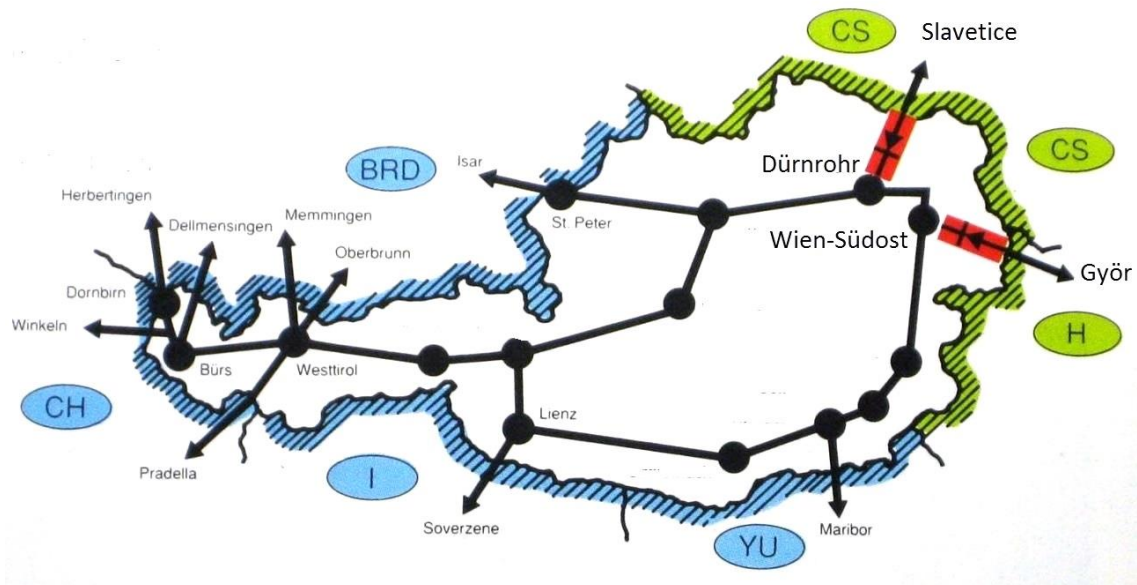


Bild 1 Anbindung des UCPTE- und des RGW-Netzes über die GKK Dürnrohr und später über die GKK Wien-Südost; Quelle: Verbund

Energiewirtschaftlich wurden folgende Ziele verfolgt:

- Export von hydraulisch erzeugter Überschussenergie im Frühjahr und Sommer nach Osteuropa
- Import von thermisch und nuklear erzeugter Überschusselektrizität aus Osteuropa in das UCPTE-Netz

Hierzu wurde zwischen Österreich und dem RGW ein Tauschvertrag für die gegenseitigen Energielieferungen abgeschlossen. Langfristige strategische Überlegung war dabei, das österreichische Übertragungsnetz zu einer Stromdrehscheibe für Europa zu entwickeln. Weiterhin sollte die zeitliche Verschiebung von zwei Stunden der Spitzenlast im RGW-System gegenüber derjenigen im UCPTE-System energiewirtschaftlich für beide Seiten vorteilhaft genutzt werden.

Die Kurzkupplung war aus folgenden Gründen notwendig:

- In der UCPTÉ war die Frequenzregelung dezentral in Regelzonen und Regelblöcken mittels Primär- und Sekundärregelung organisiert, während im RGW-Raum eine zentrale Regelung vorgesehen war.
- Die Kraftwerke in West- und Ost-Europa hatten unterschiedliche Normen für die Regelgeschwindigkeit.
- Es wurden Pendelungserscheinungen und zeitweilige Instabilitäten bei einer schwachen Netzanbindung beider Energiesysteme über wenige 380-kV-Freileitungs-Doppelsysteme erwartet.
- Mit einer Kurzkupplung konnte technisch problemlos ein definierter Energiefluss zwischen beiden Netzgebieten eingestellt werden.

Im Jahr 1993 wurde eine zweite GKK zwischen Wien-Südost und Győr in Ungarn errichtet, die aber bereits 1996 wieder außer Betrieb ging.

Bild 2 zeigt das Prinzip der GKK Dürnrohr, die aus 12-pulsigen Stromrichtern bestand. Die technischen Daten sind in Tabelle 1 dargestellt.

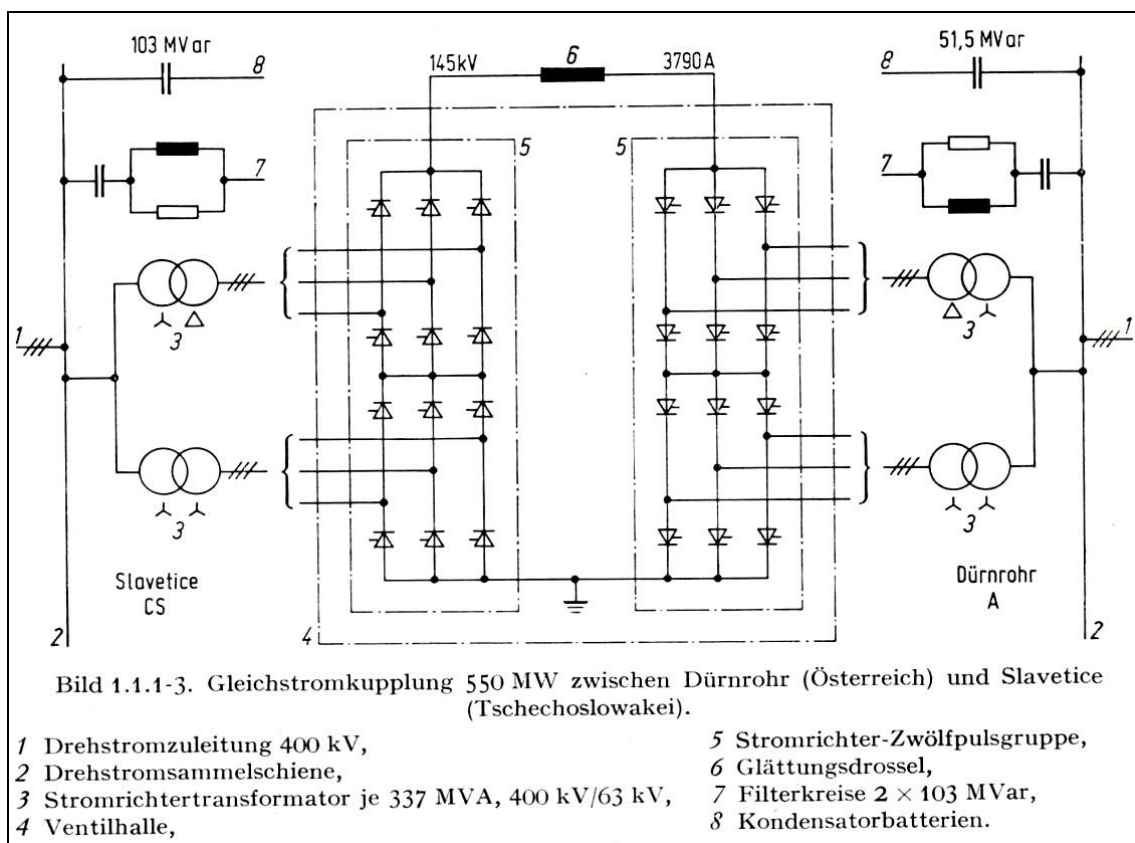


Bild 2 Prinzipschaltung der GKK Dürnrohr; Quelle [5, S. 14]

Die GKK Dürnrohr wurde am 1. September 1983 in Betrieb genommen und intensiv für den Stromaustausch genutzt. Mit dem Synchronschluss der osteuropäischen CENTREL-Länder (Polen, ČSSR, Ungarn) mit dem westeuropäischen Verbundnetz im Jahr 1995 war die Kurzkupplung technisch nicht mehr erforderlich. Sie wurde aber bis 1996 in Betrieb gehalten, da wegen des unzureichenden Ausbaus des österreichischen 380-kV-Netzes bei einer direkten Kupplung der Netze lokal regelungstechnische Probleme aufgetreten wären. Endgültig abgeschaltet wurde die Anlage am 31. Oktober 1996. Im Jahr 2007 wurde die Anlage demontiert.

Nennleistung	570 MW	Thyristordaten	
Nenngleichstrom	3.790 A	Durchmesser	100 mm
Verluste bei Nennleistung	1,4 %	Nennndaten	4,2 kV/3.790 A
Nenngleichspannung	145 kV	Anzahl	1.056
Drehstrom-Spannung	380 kV	Zünd-/Löschwinkel	15/17 Grad
Stromrichtertrafos; 4 x	337 MVA	Ventilkühlung	Wasser
	400/63 kV	Ventilisation	Luft
Glättungs-drossel	85 mH	Zündung	Glasfaser
Blindleistung je Seite	306 MVAr		
400 kV-Kondensatoren	102 (51) MVAr		
420 kV-Filter	2 x 102 MVAr		

Tab. 1 Technische Daten der GKK Dürnrohr; Quelle: Verbund

Eine zweite GKK-Verbindung zwischen Wien-Südost und Győr in Ungarn des Herstellers Siemens wurde 1993 in Betrieb genommen, konnte aber nur noch kurze Zeit bis 1996 genutzt werden. Sie war weitgehend baugleich mit der deutschen Anlage in Etzenricht und hatte eine Übertragungsleistung von 600 MW bei einer Zwischenkreis-Gleichspannung von 142 kV. Die Stromrichter bestanden aus 864 Thyristoren. Im Gegensatz zur Anlage Etzenricht im Oberpfälzer Landkreis Neustadt an der Waldnaab war sie aber nicht mit sechs 1-phasigen, sondern wie die GKK in Dürnrohr mit vier 3-phasigen Transformatoren ausgestattet. Die Anlage wurde nach einer kurzen Betriebszeit von nur drei Jahren stillgelegt und ebenfalls im Jahr 2007 demontiert. An ihrer Stelle wurde die Hauptschaltleitung für das österreichische Übertragungsnetz (Austrian Power Grid, APG) errichtet. Die Stromrichterhalle blieb aber erhalten und wird heute als Werkshalle genutzt.

4. Zukünftige Bedeutung von HGÜ-Verbindungen in Übertragungsnetzen

Derzeit werden weltweit nationale Übertragungsnetze international vernetzt, wodurch sehr große und weiträumige Netzgebiete entstehen. Ein zunehmendes Problem in diesen weiträumigen Netzen sind elektromechanische Pendelvorgänge. Hierbei können sehr niederfrequente Pendelschwingungen der Generatorschwingmassen verschiedener Netzgebiete gegeneinander entstehen. Das derzeitige europäische Übertragungsnetz des entso-e⁴ reicht von Nordafrika mit Tunesien, Algerien und Marokko (Magreb-Staaten) bis nach Polen und zur westlichen Ukraine sowie bis Griechenland und zur Türkei. Diese Netze sind alle galvanisch verbunden und haben daher die gleiche Netzfrequenz. Dabei gilt, dass die auftretenden Pendelvorgänge (power system oscillations) umso niederfrequenter sind, je größer die Netzausdehnung ist. Im entso-e-Netz sind Ost-West-Schwingungsmoden im Frequenzbereich von 0,1 bis 0,2 Hz möglich. Bei diesem Schwingungsmodus sind die Pendelvorgänge im Westen (Spanien, Portugal, Magreb) gegenläufig zu denjenigen in Osteuropa bis Griechenland und Türkei. Nord-Süd-Schwingungsmoden betreffen Dänemark und die Regionen der Benelux-Staaten, Deutschland und Polen, die gegen die südlichen Regionen (Italien, Griechenland und deren Nachbarländer) schwingen. Hierbei sind Eigenfrequenzen im Bereich von 0,3 bis 0,4 Hz möglich.

Die nördlichen Länder wie England, Norwegen, Schweden und Finnland beteiligen sich nicht an diesen Pendelvorgängen, da diese über HGÜ-Kabelverbindungen an das europäische Netz angebunden sind. Hier wird der Vorteil von HGÜ-Kupplungen deutlich, da diese eine konstante Übertragungsleistung ausregeln, aber keine Pendelungen verursachen können. Wegen dieser Eigenschaften und der Möglichkeit, Leistungsflüsse entsprechend der Übertragungsfähigkeit der Wechselstromnetze am Einspeisepunkt der HGÜ-Kupplungen einstellen zu können, eignen sich HGÜ-Übertragungssysteme zur Verbindung großräumiger Teilnetze.

5. HGÜ im Übertragungsnetz der USA

Das Übertragungsnetz in den USA besteht aus drei Wechselstromnetzen die über Gleichstromkupplungen verbunden sind: Western Interconnection, Eastern Interconnection und Texas Interconnection (ERCOT). In den einzelnen Netzgebieten sind Spannungsebenen von 115 kV bis 750 kV vorhanden. Das gesamte Netzgebiet hat eine Ausdehnung in Ost-West-Richtung von etwa 4.500 km und in Nord-Süd-Richtung von etwa 2.500 km und hat eine gesamte Systemlänge der Hochspannungsleitungen von etwa 100.000 km.

Bis 2030 ist die Installation von 300 GW an Windenergie geplant. Hierfür soll ein überlagertes 765-kV-Netz in den drei Netzgebieten geschaffen werden, das ebenfalls durch HGÜ-Kurzkupplungen verbunden werden soll. Der Grund für Trennung durch HGÜ-

⁴ European Network of Transmission System Operators for Electricity, Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber [Anm. d. Hrsg.]

Kurzkupplungen liegt in Sicherheitsüberlegungen. Wenn jedes Netzgebiet eine möglichst ausgeglichene Leistungsbilanz anstrebt, so können die Störungsauswirkungen in den einzelnen Teilnetzen durch die HGÜ-Kurzkupplungen auf deren Nennleistungen technisch einfach begrenzt werden, wodurch sie nicht auf das Gesamtnetz übergreifen können. Weiterhin werden hierdurch weiträumige und damit sehr niederfrequente Pendelerscheinungen vermieden.

6. HGÜ in China

Am Beispiel China soll exemplarisch ein anderer Weg der HGÜ-Versorgung dargestellt werden. Während in den USA großflächige Übertragungsnetze mit HGÜ-Kurzkupplungen verbunden werden, werden in China die leistungsstarken Kraftwerkszentren mit den großstädtischen Lastzentren durch einzelne HGÜ-Fernübertragungssysteme verbunden. Ein Beispiel hierfür ist das große Wasserkraftwerk Drei Schluchten (Three Gorges), das über 26 Generatoren mit je 700 MW, insgesamt also 18.200 MW verfügt und eine Jahresenergie von 84 TWh erzeugt. Neben vier Wechselspannungsleitungen von 500 kV mit insgesamt 12 GW Übertragungskapazität sind eine HGÜ-Übertragung von ± 500 kV und 3.000 MW sowie zwei weitere mit der gleichen Spannung und 2 x 3.600 MW nach Ost-China in Betrieb. Die HGÜ-Verbindungen wirken in den Erzeugungszentren wie eine konstante Last und in den Lastzentren wie eine konstante Kraftwerkseinspeisung und stabilisieren damit den Netzbetrieb.

Die Vorteile dieser Vorgehensweise sind:

- Die Fernübertragung kann verlustarm mittels Gleichstrom erfolgen und die Aufteilung der Teilleistungen auf die einzelnen Lastschwerpunkte kann durch Regelung der Punkt-zu-Punkt-HGÜ-Übertragungsanlagen erfolgen.
- Die bei der Wechselspannungs-Fernübertragung erforderlichen vom Leistungsfluss abhängigen Maßnahmen zur Leitungskompensation mittels Kompensationsspulen und Serienkondensatoren werden vermieden.
- Oszillatorische und transiente Netzinstabilitäten können hierdurch ebenfalls begrenzt werden.

7. Literatur

- [1] Oeding, Dietrich; Oswald, Bernd R.: Elektrische Kraftwerke und Netze. Kap. 19 „Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung“. 6. Aufl., Berlin u. a.: Springer 2004
- [2] Marx, Erwin: Lichtbogen-Stromrichter für sehr hohe Spannungen und Leistungen. Berlin u. a.: Springer 1932
- [3] Hofmann, Arnold: Das Kraftwerk Cabora Bassa und die Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragung nach Südafrika. In: ETZ-A 91 (1970), S. 65-72
- [4] Moraw, Günter: Hochspannungs-Gleichstrom-Kurzkupplung in Österreich. ÖZE 31 (1978), S. 67-69
- [5] Hütte: Elektrische Energietechnik, Bd. 3: Netze, hrsgg. v. Hosemann, Gerhard. 29. Aufl., Berlin u. a: Springer, 1988