Realisierung einer Mittelspannungs-Gleichstromübertragung mit extrudierten AC-Kabeln

U. Schichler OVE, A. Buchner

Die Gleichstromübertragung kann bei der Lösung der bestehenden Herausforderungen im Mittelspannungsnetz einen Beitrag leisten und zu einem sicheren Netzbetrieb beitragen. MGÜ-Anwendungen können dabei unter anderem für die Erhöhung der Übertragungskapazität von einzelnen Leitungen (Freileitung, Kabel) und eine flexible Lastflusssteuerung sorgen. Es besteht die Möglichkeit, bereits in Betrieb befindliche extrudierte AC-Kabelsysteme auf DC-Betrieb umzurüsten. Dabei sind zahlreiche technische Aspekte zu betrachten, die auch für einen Einsatz von neuen extrudierten AC-Standard-Kabeln für die MGÜ gelten. Die in Anlehnung an die CIGRE TB 496 bisher durchgeführten experimentellen Untersuchungen zeigen, dass ein handelsübliches 12/20-kV-VPE-AC-Kabelsystem den DC-Beanspruchungen des LCC-Präqualifikationstests für ein extrudiertes 55-kV-DC-Kabel standhalten kann.

Schlüsselwörter: Mittelspannungs-Gleichstromübertragung; DC-Kabel; extrudierte AC-Kabel; Präqualifikationstest

Implementation of Medium-Voltage Direct Current transmission with extruded AC cables.

MVDC is an option for enhancing transfer capacity of lines (cable, overhead line) and providing improved power control at distribution networks. There are several advantages for network operation by converting existing medium voltage AC cable systems to DC operation. Different technical aspects need to be considered for refurbishing and also in case of application of standard MVAC cables for MVDC. The economic aspects of MVDC need to be compared to standard solutions. Investigations with respect to CIGRE TB 496 show that a 12/20 kV XLPE cable system for AC operation might pass the prequalification test for an extruded 55 kV MVDC cable.

Keywords: MVDC; DC cables; extruded MVAC cables; prequalification test

Eingegangen am 22. Juli 2018, angenommen am 14. September 2018, online publiziert am 29. November 2018
© The Author(s) 2018

1. Einleitung

Die aktuellen Änderungen im Bereich der elektrischen Verteil- und Übertragungsnetze basieren im Wesentlichen auf der Umstellung der Energieerzeugung in Richtung dezentraler erneuerbarer Energien wie Windkraft und Photovoltaik. Den durch die Energiewende in Europa verursachten aktuellen Herausforderungen kann unter anderem durch eine Integration von Gleichspannungsübertragungssystemen in allen Spannungsebenen vorteilhaft begegnet werden [1]. In der Zukunft wird das elektrische Übertragungsnetz in Europa durch zahlreiche neue Hochspannungs-Gleichstromübertragungs(HGÜ)-Anlagen geprägt sein, wobei sich diese Anlagen derzeit bereits im Bau befinden bzw. geplant sind (z. B. Western HVDC Link, ULTRANET, ALEGro, SüdLink).

Im Mittelspannungsnetz kann die Gleichstromübertragung bei der Lösung der bestehenden Herausforderungen ebenfalls einen Beitrag leisten und zu einem sicheren Netzbetrieb beitragen. Mittelspannungs-Gleichstromübertragungs(MGÜ)-Anwendungen können dabei unter anderem für die Erhöhung der Übertragungskapazität von einzelnen Leitungen (Freileitung, Kabel) und eine flexible Lastflusssteuerung im Mittelspannungsnetz sorgen, wobei aber stets die jeweiligen wirtschaftlichen Aspekte gegenüber Standardlösungen zu berücksichtigen sind. Den im Mittelspannungsbereich häufig verwendeten Kabeln kommt bei Überlegungen zur MGÜ eine besondere Bedeutung zu (Abb. 1). Es besteht die Möglichkeit bereits in Betrieb befindliche extrudierte Wechselspannungs(AC)-Kabelsysteme auf Gleichspannungs(DC)-Betrieb umzurüsten, um die

Übertragungskapazität zu erhöhen (z. B. Erweiterung von Windparks), eine gezielte Lastflusssteuerung oder einen Notbetrieb bei Kabelfehlern zu ermöglichen [2–7].

Bei der Umrüstung bestehender extrudierter AC-Kabelsysteme auf DC-Betrieb sind technische Effekte wie die DC-Nennspannung, elektrische Durchschlagfestigkeit des Isoliersystems, Feldinversion, Raumladungsaufbau und das Verhalten der Kabelgarnituren bei unterschiedlichen Temperaturen und Polaritätswechseln zu betrachten. Die vorstehenden Überlegungen gelten auch für einen Einsatz von neuen handelsüblichen AC-Kabeln für die MGÜ.

2. MGÜ mit extrudierten AC-Kabeln

2.1 Grundsätzliche Vorteile

Die Energieübertragung mit DC-Kabeln hat gegenüber AC-Kabeln die wesentlichen Vorteile, dass keine kapazitiven Ladeströme, kein Skin-Effekt und keine induzierten Zusatzverluste auftreten. Die durch den Leiterstrom verursachten Leiterverluste sind bei beiden Technologien im Hinblick auf die Kabelerwärmung zu berücksichtigen. Ein weiterer grundsätzlicher Aspekt ist der zur Energieübertragung notwendige Materialeinsatz. Eine DC-Übertragungsstrecke

Schichler, Uwe, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 18, 8010 Graz, Österreich (E-Mail: uwe.schichler@tugraz.at); **Buchner, Anton**, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 18, 8010 Graz, Österreich (E-Mail: anton.buchner@tugraz.at)

Abb. 1. MGÜ-Varianten mit extrudierten AC-Kabeln [7]

Tab. 1. Erhöhung der Übertragungskapazität in Abhängigkeit der DC-Nennspannung U_{DC} und des Leistungsfaktors $\cos \varphi$ ($m = 2$, $U = 20$ kV, $I_{DC} = I$)

U_{DC} (kV)	P_{DC}/P_{AC} ($\cos \varphi = 0,85$)	P_{DC}/P_{AC} ($\cos \varphi = 1,0$)
16,3	1,11	0,94
20	1,36	1,15
30	2,04	1,73
50	3,40	2,89
70	4,75	4,04

ist bereits mit nur zwei Kabeln zu realisieren, während eine AC-Kabelstrecke drei Kabel erfordert.

Der Einsatz von extrudierten AC-Standard-Kabeln für MGÜ kann aus derzeitiger Sicht zu wirtschaftlichen Vorteilen führen, da diese Kabel eine hohe technische Produktqualität aufweisen, der Herstellungsprozess langjährig etabliert und damit eine ausreichende Verfügbarkeit zuverlässig gegeben ist.

2.2 Erhöhung der Übertragungskapazität durch die Umstellung von AC-Kabelsystemen auf DC-Betrieb

Die Umstellung von AC-Kabelsystemen auf DC-Betrieb kann zu einer Erhöhung der Übertragungskapazität führen. Dabei sind gemäß Gl. (1) insbesondere die MGÜ-Topologie (bipolare MGÜ: $m = 2$), die DC-Nennspannung U_{DC} und die eventuell mögliche Erhöhung des DC-Nennstromes I_{DC} von Bedeutung [4].

$$\frac{P_{DC}}{P_{AC}} = \frac{m \cdot U_{DC} \cdot I_{DC}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi} \quad (1)$$

Tabelle 1 zeigt die Erhöhung der Übertragungskapazität einer bipolaren MGÜ-Kabelstrecke im Vergleich zu einem 12/20-kV-AC-Kabelsystem für verschiedene DC-Nennspannungen und Leistungsfaktoren.

Eine DC-Nennspannung entsprechend dem Scheitelwert der einphasigen AC-Spannung ($\sqrt{2} \cdot U / \sqrt{3} = 16,3$ kV) führt zu keiner nennenswerten Erhöhung der Übertragungskapazität (+11%) gegenüber der AC-Kabelstrecke bzw. bei einem Leistungsfaktor von $\cos \varphi = 1,0$ sogar zu einer Verschlechterung (−6%). Für eine DC-Nennspannung von beispielsweise $U_{DC} = 50$ kV ergibt sich eine signifikante Erhöhung der Übertragungskapazität um den Faktor 2,89 bzw. 3,40. Dabei ist eine Steigerung der Übertragungskapazität bei größeren Leiterquerschnitten aufgrund des fehlenden Skin-Effekts noch nicht berücksichtigt. Für einen Cu-Leiterquerschnitt von

$A = 630 \text{ mm}^2$ kann der DC-Nennstrom um ca. 9% gegenüber dem AC-Nennstrom gesteigert werden, ohne dass es zu einer unzulässigen Kabelerwärmung kommt. Für größere Leiterquerschnitte ist dieser Effekt noch stärker ausgeprägt.

Es ist festzustellen, dass sich der Vorteil einer Umstellung von bestehenden extrudierten AC-Kabelsystemen auf DC-Betrieb bzw. die Anwendung von kunststoffisolierten AC-Standard-Kabeln für MGÜ insbesondere aus der Festlegung einer technisch zulässigen hohen DC-Nennspannung ergibt. Die daraus folgende Fragestellung nach der technisch maximal zulässigen DC-Nennspannung für extrudierte AC-Kabel kann allerdings nur mit der Kenntnis des unterschiedlichen Durchschlagverhaltens der Kabel bei Gleich- und Wechselspannungsbeanspruchung, der Berücksichtigung der besonderen Phänomene bei DC-Kabeln (Feldinversion, Raumladungen, Wärmedurchschlag) und geeigneten elektrischen Prüfungen (Typprüfung, Präqualifikationstest etc.) beantwortet werden. Dabei sind die chemischen Zusammensetzungen und Eigenschaften der für extrudierte AC-Kabel eingesetzten Isolierstoffe zu berücksichtigen.

3. Extrudierte DC-Kabel

3.1 Historie und Stand der Technik

DC-Kabel wurden bisher hauptsächlich in Form von papierisolierten Seekabeln (OF, MI, PPLP) für den Energietransport über lange Strecken verwendet. Seit Ende der 1990er Jahre sind auch extrudierte DC-Kabel mit einer VPE-Isolierung im Einsatz, die derzeit mit DC-Nennspannungen von bis zu $U_{DC} = 320$ kV im Einsatz sind und für $U_{DC} = 525$ kV kommerziell zur Verfügung stehen [8, 9]. Extrudierte DC-Kabel mit $U_{DC} = 640$ kV sind fertig entwickelt und haben die erforderlichen Prüfungen bestanden [10].

Die bisherige Erfolgsgeschichte der extrudierten DC-Kabel kann durch die folgenden HGÜ-Projekte beschrieben werden [11]:

- Das erste HGÜ-Projekt mit VPE-isolierten DC-Kabeln wurde 1999 mit einer Leistung von 50 MW und einer Länge von 72 km in Betrieb genommen (Projekt „Gotland Link“). Es handelt sich um ein bipolares 80-kV-DC-Kabelsystem.
- Als weiterer bedeutender Meilenstein wurde im Jahr 2010 das 400-MW-HGÜ-Projekt „Trans Bay“ in San Francisco in Betrieb genommen. Die weltweit erstmals verwendeten 200-kV-DC-Kabel haben einen Kupferleiter mit einem Leiterquerschnitt von 1100 mm².
- Ein VPE-DC-Kabelsystem mit einer Nennspannung von 320 kV und einer Übertragungsleistung von 800 MW wurde erstmals im HGÜ-Projekt „DolWin 1“ eingesetzt. Die Übertragungsstrecke hat eine Länge von 165 km und wurde 2014 in Betrieb genommen.

3.2 Besonderheiten des Isoliersystems von DC-Kabeln

VPE-isolierte DC-Kabel haben u. a. aufgrund der temperaturabhängigen Leitfähigkeit des Isoliermaterials verschiedene technische Effekte zu berücksichtigen, die bei VPE-Kabeln für AC nicht relevant sind [11, 12]:

- **Feldinversion:** Die elektrische Feldverteilung in einem DC-Kabel ist von der temperatur- und feldstärkeabhängigen Leitfähigkeit des verwendeten Isoliermaterials abhängig. Ein von den Stromwärmeverlusten des Kabelleiters verursachter Temperaturgradient ΔT in der Kabelisolierung führt zu einer Verringerung der elektrischen Feldstärke am Innenleiter und zu einem Ansteigen der Feldstärke am Außenleiter.
- **Raumladungen:** Hochpolymere Isolierstoffe wie VPE sind in der Lage freie Ladungsträger zu speichern. Die dabei ggf. entstehenden

Tab. 2. Prüfprogramm für DC-Kabel bei LCC-Anlagen

Nr.	Prüfung	Anzahl der Zyklen oder Tage	Polarität	Prüfspannung
1	LC	30 Zyklen	+	U_{TP1}
2	LC	30 Zyklen	–	U_{TP1}
3	LC + PR	20 Zyklen	±	U_{TP2}
4	HL	40 Tage	+	U_{TP1}
5	HL	40 Tage	–	U_{TP1}
6	ZL	120 Tage	–	U_{TP1}
7	LC	30 Zyklen	+	U_{TP1}
8	LC	30 Zyklen	–	U_{TP1}
9	LC + PR	20 Zyklen	±	U_{TP2}
10	S/IMP	–	Bipolar	$U_{P2,O}$ U_{P1}

temperatur-, feldstärke-, zeit- und ortsabhängigen Raumladungen beeinflussen die elektrische Feldverteilung in der Kabelisolierung und können insbesondere nach einem Polaritätswechsel zu Ausfällen führen. Die Messung von Raumladungen in dünnen Materialproben und dickwandigen Kabelisolierungen kann mit verschiedenen Verfahren (PEA, TSM) experimentell durchgeführt werden. Mit geeigneten Maßnahmen und Modifikationen des Isolierwerkstoffs ist eine Minimierung der Raumladungsbildung möglich.

- **Wärmedurchschlag:** Die temperaturabhängige Leitfähigkeit des Isoliermaterials kann bei hohen Temperaturen zu einem geringen Isolationswiderstand führen. Daraus resultiert in Folge ein erhöhter Gleichstrom durch die Kabelisolierung und eine damit verbundene weitere Erwärmung des Dielektrikums. Diese stetig fortschreitende Erwärmung führt zu einem Wärmedurchschlag des Kabeldielektrikums. Der beschriebene Effekt begrenzt bei älteren VPE-isolierten DC-Kabeln die maximale Leitertemperatur auf 70 °C und wird bei modernen extrudierten DC-Kabeln durch entsprechend ausgewählte und modifizierte Isoliermaterialien ausgeschlossen.

3.3 Präqualifikationstest für DC-Kabel

Die erforderlichen Prüfungen an extrudierten DC-Kabelsystemen sind in den entsprechenden IEC-Normen und der CIGRE TB 496 beschrieben [13].

Im Rahmen des Präqualifikationstests ist eine Langzeitprüfung mit einer Dauer von mindestens 1 Jahr durchzuführen. Die zuvor beschriebenen Einflüsse der Feldinversion und der Raumladungsbildung auf die Lebensdauer von extrudierten DC-Kabeln werden dabei durch geeignete Prüfungen berücksichtigt (Tab. 2, 3). Die Einzelprüfungen des Präqualifikationstests unterscheiden sich für die zu prüfenden DC-Kabel entsprechend der verwendeten Konvertertechnologie (LCC- bzw. VSC-Anlagen).

Die einzelnen Prüfungen sind wie folgt zu beschreiben (U_0 = DC-Nennspannung):

LC: Die Lastzyklen bestehen aus einer kontinuierlichen DC-Spannungsbeanspruchung mit $U_{TP1} = 1,45U_0$ und einer Stromfahrt mit Aufheizen (8 h) und Abkühlen (16 h) des Kabels. Dabei ist der Heizstrom entsprechend der maximal zulässigen Leitertemperatur und dem maximal zulässigen Temperaturgradienten in der Kabelisolierung zu wählen.

LC + PR: Die Lastzyklen mit Polaritätswechseln umfassen neben der Stromfahrt (8/16 h) auch Polaritätswechsel (alle 8 h) der Gleichspannung mit $U_{TP2} = 1,25U_0$.

Tab. 3. Prüfprogramm für DC-Kabel bei VSC-Anlagen

Nr.	Prüfung	Anzahl der Zyklen oder Tage	Polarität	Prüfspannung
1	LC	40 Zyklen	+	U_{TP1}
2	LC	40 Zyklen	–	U_{TP1}
3	HL	40 Tage	+	U_{TP1}
4	HL	40 Tage	–	U_{TP1}
5	ZL	120 Tage	–	U_{TP1}
6	LC	40 Zyklen	+	U_{TP1}
7	LC	40 Zyklen	–	U_{TP1}
8	S/IMP	–	Bipolar	$U_{P2,O}$ U_{P1}

HL: Die Beanspruchung besteht in einer kontinuierlichen Spannungs- und Strombelastung.

ZL: Die Beanspruchung besteht in einer kontinuierlichen Spannungsbelastung ohne Kabelerwärmung.

S/IMP: Als letzte Prüfung erfolgt eine Beanspruchung mit zusammengesetzter Prüfspannung gemäß Abb. 2 (DC/SL: $U_{P2,O} = 1,2U_0$, optional DC/LI: $U_{P1} = 2,1U_0$), wobei im Rahmen der Prüfung jeweils 10 Impulse pro Polarität vorgesehen sind. Der dabei zur Anwendung kommende komplexe Prüfkreis mit zwei Spannungsquellen, elektrischen Schutzelementen und einer Spannungsmessung am Prüfobjekt mit einem Universalteiler stellen besondere Anforderungen an das Hochspannungsprüflabor [14, 15]. Vor der Impulsbeanspruchung des Kabels ist die maximale Leitertemperatur und eine Spannungsbeanspruchung mit U_0 für eine Zeitdauer von mindestens 10 Stunden zu realisieren.

4. Experimentelle Untersuchungen

4.1 Prüfobjekt, Vorversuche und Versuchsaufbau

Als Prüfobjekt für die experimentellen Untersuchungen wurden zwei VPE-isolierte 12/20-kV-Mittelspannungskabel (NA2XS2Y RM 150/25) mit einer Länge von jeweils 10 m verwendet. Es handelt sich dabei um handelsübliche AC-Kabel, die einem neuwertigen Zustand entsprechen und vor der Verwendung ca. 5 Jahre unter üblichen Bedingungen gelagert waren. Die Dicke der Kabelisolierung beträgt $s = 5,5$ mm.

Als Kabelendverschlüsse wurden bei beiden Kabeln 12/20-kV-Freiluftendverschlüsse mit geometrischer Feldsteuerung verwendet. Ein Kabelprüfling wurde zusätzlich mit einer handelsüblichen 12/20-kV-AC-Kabelmuffe mit refraktiver Feldsteuerung ausgestattet.

Die beiden Kabel wurden zu einer Kabelschleife mit einer Gesamtlänge von $l = 20$ m miteinander verbunden und als Prüfobjekt für die Untersuchungen in Anlehnung an die CIGRE TB 496 verwendet.

In einem ersten Versuch wurde die Erwärmung einer Referenz-Kabelschleife in Abhängigkeit vom 50-Hz-Heizstrom ermittelt. Die Temperaturmessung erfolgte mit Thermoelementen am Innenleiter und am Kabelmantel. Bei einem Strom von $I = 425$ A ergaben sich stationäre Temperaturen von $\vartheta = 70$ °C für den Innenleiter und $\vartheta = 52$ °C für den Kabelmantel mit einer resultierenden Temperaturdifferenz in der Isolierung von ca. $\Delta T = 18$ K. Die Erhöhung des Heizstroms auf $I = 500$ A führte zu einer Leitertemperatur von $\vartheta = 90$ °C und einer Temperaturdifferenz in der Isolierung von ca. $\Delta T = 25$ K (Abb. 3).

Abb. 2. Zusammengesetzte Prüfspannungen [13]

Abb. 3. Aufheizen/Abkühlen einer Referenz-Kabelschleife in Abhängigkeit des 50-Hz-Heizstroms (Farbig online)

Abb. 4. Schaltungsaufbau für die Prüfung mit zusammengesetzter Spannung (S/IMP)

Als DC-Generator für den Langzeitversuch wurde eine Gleichspannungsquelle mit automatischer Regelung, einer Polaritätsumkehr innerhalb von ca. 20 s und einem integrierten Spannungsteiler verwendet. Für die Prüfungen mit zusammengesetzter Spannung (S/IMP) gemäß IEC 60060-1 erfolgte ein Versuchsaufbau mit einem zusätzlichen Wasserwiderstand zum Schutz des DC-Generators, einem Stoßspannungsgenerator in Verbindung mit einer Schutzkapazität ($C_{\text{Schutz}} = 130 \text{ nF}$) und einer Spannungsmessung am Prüfobjekt (Abb. 4, 5). Der dafür nach [16, 17] selbst gebaute Universalteiler

für Prüfspannungen von $U_{LI} = 300 \text{ kV}$ und $U_{DC} = 200 \text{ kV}$ zeichnet sich durch eine einfache Konstruktion, eine Höhe von 1,5 m und einen modularen Aufbau aus. Eine Kalibrierung mit LI- und DC-Referenzteilern wurde erfolgreich durchgeführt. Durch die gewählte Bauweise ist eine Reihenschaltung von mehreren Modulen für die Messung von höheren Spannungen einfach realisierbar [7].

Die zum Abschluss der Langzeitprüfung durchzuführende Prüfung mit zusammengesetzter Prüfspannung (S/IMP: DC/SI, optional DC/LI) umfasst je 10 Stoßspannungsimpulse mit bipolarer Beanspruchung des Prüfobjekts, wobei eine Vorbelastung über mindestens 10 Stunden mit DC-Nennspannung (U_0) und maximal zulässiger Leitertemperatur zu realisieren ist. Mit Hilfe des Universalteilers ist die zusammengesetzte Prüfspannung direkt am Prüfobjekt zu messen (Abb. 6).

4.2 MGÜ-Langzeitprüfung für AC-Kabel

Für die als Prüfobjekt verwendete Kabelschleife (VPE-isolierte 12/20-kV-AC-Kabel) wurde aufgrund der verwendeten Kabelgarnituren eine DC-Nennspannung von $U_{DC} = 55 \text{ kV}$ definiert. Daraus resultieren folgende Prüfspannungen für die Langzeitprüfung:

$$U_{DC} = U_0 = 55 \text{ kV}$$

$$U_{TP1} = 80 \text{ kV}$$

1 DC-Generator, 2 Stoßspannungsgenerator mit integrierter Schutzkapazität, 3 Prüfobjekt, 4 Wasserwiderstand, 5 Heiztransformator, 6 Universalspannungsteiler

Abb. 5. Versuchsaufbau für die MGÜ-Langzeitprüfung

Abb. 6. Prüfung mit zusammengesetzter Spannung: DC/SI ($U_0 = +55 \text{ kV}$, $U_{P2,0} = -66 \text{ kV}$)

$$U_{TP2} = 69 \text{ kV}$$

$$U_{P2,0} = 66 \text{ kV}$$

$$U_{P1} = 116 \text{ kV}$$

Im Hinblick auf eine allgemeine Verwendung der untersuchten extrudierten AC-Kabel für MGÜ-Anwendungen wurde für die Langzeitprüfung das LCC-Prüfprogramm ausgewählt (Tab. 4), da dadurch die Anforderungen für die Verwendung der Kabel bei VSC-Anlagen abgedeckt werden.

Das CIGRE-Prüfprogramm wurde im Hinblick auf die Heizzyklen modifiziert, da eine ausreichende Aufheizung bzw. Abkühlung der 5,5 mm dicken Kabelisolierung bereits mit einem 4/8-h-Zyklus erreicht werden konnte (Abb. 3). Der für den Langzeitversuch gewählte AC-Heizstrom von $I = 440 \text{ A}$ führte zu einer Manteltemperatur von $\vartheta = 56^\circ\text{C}$ und einer damit verbundenen Temperatur des Innenleiters von $\vartheta = \text{ca. } 78^\circ\text{C}$ (Abb. 7). Die in der Kabelschleife montierte Muffe zeigt ein im Vergleich zum Kabel abweichendes Temperaturverhalten mit einer grösseren thermischen Zeitkonstanten und einer geringeren maximalen Manteltemperatur.

4.3 Durchgeführte Untersuchungen

Im Rahmen der bisherigen Untersuchungen wurden die Prüfungen Nr. 1–3 des MGÜ-LCC-Prüfprogramms für LCC-Anlagen durchgeführt und ohne Auffälligkeiten bestanden. Die im Prüfprogramm als

Tab. 4. Adaptiertes MGÜ-Prüfprogramm

Nr.	Prüfung	Anzahl der Zyklen oder Tage	Prüfspannung
1	LC	10 Zyklen mit 8/16 h 20 Zyklen mit 4/8 h	+80 kV
2	LC	10 Zyklen mit 8/16 h 20 Zyklen mit 4/8 h	–80 kV
3	LC + PR	40 Zyklen mit 4/8 h, jeder 2. Zyklus: 3 × PR (4 h)	±69 kV
4	HL	40 Tage	+80 kV
5	HL	40 Tage	–80 kV
6	ZL	120 Tage	–80 kV
7	LC	30 Zyklen mit 4/8 h	+80 kV
8	LC	30 Zyklen mit 4/8 h	–80 kV
9	LC + PR	40 Zyklen mit 4/8 h, jeder 2. Zyklus: 3 × PR (4 h)	±69 kV
10	S/IMP	—	66 kV 116 kV

Abschluss vorgesehene Prüfung Nr. 10 (S/IMP: DC/SI) wurde vorgezogen und ebenfalls bestanden. Dadurch konnte eine unzulässige thermisch/elektrische Alterung der Kabelschleife aufgrund der durchgeführten Prüfungen (LC, LC + PR) sicher ausgeschlossen werden. Nach dem Abschluss der Prüfung Nr. 4 (HL mit positiver Polarität) durchläuft die Kabelschleife derzeit (September 2018) die Prüfung Nr. 5 (HL mit negativer Polarität) ohne bisherige Auffälligkeiten. Die im Prüfprogramm aufgelisteten Prüfungen Nr. 6–9 sind Gegenstand der weiteren Untersuchung. Zum Abschluss wird die Prüfung Nr. 10 (S/IMP) durchgeführt, wobei die überlagerte Stoßspannungsbeanspruchung dabei mit Schalt- und Blitzstoßspannung erfolgen wird.

5. Diskussion der Ergebnisse

Die bisher durchgeführten Untersuchungen (LC, LC + PR, S/IMP und HL) zeigen, dass ein handelsübliches 12/20-kV-VPE-AC-Kabel mit Standard-AC-Kabelgarnituren den DC-Beanspruchungen des LCC-Präqualifikationstests für ein extrudiertes 55-kV-DC-Kabel standhalten kann.

Abb. 7. Temperaturverlauf bei Lastzyklen (LC), $I = 440$ A (Farbig online) Abb. 8. Elektrische Feldverteilung in der Kabelisolierung des untersuchten 12/20-kV-VPE-AC-Kabels für verschiedene Temperaturgradienten, Prüfspannung $U_{TP1} = 80$ kV

Die bei der LC-Prüfung in der Kabelisolierung auftretenden elektrischen Feldverteilungen sind in Abb. 8 dargestellt. Für die Prüfspannung $U_{TP1} = 80$ kV ergeben sich eine mittlere elektrische Feldstärke von $E = 14,5$ kV/mm, eine maximale Feldstärke von $E = 16,8$ kV/mm an der inneren Leitschicht für $\Delta T = 0$ K und eine maximale Feldstärke von $E = 18,8$ kV/mm an der äußeren Leitschicht für $\Delta T = 20$ K. Eine Feldinversion ist damit deutlich zu erkennen. Bei DC-Nennspannung beträgt die mittlere elektrische Feldstärke $E = 10,0$ kV/mm. Die auftretenden elektrischen Feldstärken sind damit deutlich höher als bei VPE-AC-Mittelspannungskabeln. Für die Berechnung der elektrischen Feldverteilung wurde ein Temperaturkoeffizient von $\alpha = 0,084$ K $^{-1}$ und ein Feldstärkekoeffizient von $\beta = 0,0645$ mm/kV verwendet [11].

Eine Ausbildung von kritischen Raumladungen ist bei Leitertemperaturen von bis zu $\vartheta = \text{ca. } 78$ °C, elektrischen Feldstärken von bis zu $E = 18,8$ kV/mm und Polaritätswechseln bisher anhand der Prüfergebnisse nicht zu erkennen. Eine abschließende Bewertung kann allerdings erst nach dem erfolgreichen Abschluss aller im Prüfprogramm vorgesehenen Prüfungen erfolgen, wobei insbesondere die HL-Prüfungen im Hinblick auf den Einfluss von Raumladungen von Bedeutung sind. Darüber hinaus ist für abschließende Betrachtungen auch eine erfolgreiche DC-Typprüfung nachzuweisen.

Es ist zu beachten, dass die im Rahmen der Untersuchungen festgelegte Nennspannung $U_{DC} = 55$ kV aus praktischen Gründen gewählt wurde. Es besteht daher durchaus die Möglichkeit, dass das untersuchte AC-Kabelsystem nur für VSC-Anlagen bzw. geringere DC-Nennspannungen geeignet ist. Bei den Prüfungen eventuell auftretende Durchschläge sind zu analysieren, um notwendige Verbesserungen dem Bereich des Kabels oder den Kabelgarnituren zuordnen zu können. Unter Umständen ist die Verwendung von speziellen DC-Kabelgarnituren erforderlich.

Abb. 9. Temperaturverteilung in einem erdverlegten AC-Kabelsystem bei bipolarem DC-Betrieb mit $I = 320$ A und unter Berücksichtigung des untersuchten 12/20-kV-VPE-AC-Kabels (Farbig online)

Die Langzeitprüfung für extrudierte DC-Kabel soll gemäß CIGRE TB 496 eine Dauer von mindestens 1 Jahr aufweisen, um eine Lebensdauer von 40 Jahren nachzubilden. Für die Berechnung mit Hilfe des Lebensdauergesetzes wird dabei ein konservativ abgeschätzter Lebensdauere exponent von $n = 10$ verwendet. Eine Optimierung und Verkürzung der Langzeitprüfung für extrudierte MGÜ-Kabel erscheint anhand der bisher ermittelten Ergebnisse möglich zu sein und ist Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten.

6. Beanspruchungen im Betrieb einer MGÜ-Kabelstrecke mit extrudierten AC-Kabeln

Die Temperaturverteilung in einer auf DC-Betrieb umgerüsteten erdverlegten AC-Kabelstrecke ist unter Berücksichtigung des untersuchten 12/20-kV-VPE-AC-Kabels in Abb. 9 für einen Betriebsstrom von $I = 320$ A dargestellt. Die unter Berücksichtigung typischer Materialkennwerte und unter Vernachlässigung einer Bodenaustrocknung durchgeführte FEM-Simulation führt zu einer Temperatur am Innenleiter von $\vartheta = 91$ °C und einem Temperaturgradienten in der 5,5 mm dicken Kabelisolierung von $\Delta T = 7,5$ K. Für Leiterströme von $I = 150$ A bzw. 250 A ergeben sich maximale Leitertemperaturen von $\vartheta = 29$ °C bzw. 58 °C und Temperaturgradienten von $\Delta T = 1,8$ K bzw. 4,5 K. Die für den DC-Betrieb ermittelten Temperaturgradienten sind damit deutlich geringer als die Beanspruchung während der Langzeitprüfung. Daraus resultiert im ungünstigsten Fall im Betrieb mit $U_{DC} = 55$ kV eine elektrische Feldverteilung gemäß Abb. 10. Der maximale Temperaturgradient von $\Delta T = 7,5$ K führt zu einer

Abb. 10. Elektrische Feldverteilung in der Kabelisolierung des untersuchten 12/20-kV-VPE-AC-Kabels für verschiedene Temperaturgradienten, $U_{DC} = 55$ kV

Vergleichsmässigung der elektrischen Feldstärke innerhalb der Kabelisolierung mit einer maximalen Feldstärke von $E = 10,3$ kV/mm.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die thermischen und elektrischen Beanspruchungen im Betrieb deutlich geringer sind als während der Langzeitprüfung und ein MGÜ-Präqualifikationstest zur Qualitätssicherung für den Betrieb geeignet ist.

Es bleibt für das hier diskutierte bipolare DC-Kabelsystem anzumerken, dass gemäß den durchgeführten Simulationen eine maximale Übertragungsleistung von $P_{DC} = 35,2$ MW realisiert werden kann. Im Vergleich zum bipolaren DC-Betrieb beträgt die Übertragungsleistung des betrachteten AC-Kabelsystems bei EVU-Last weniger als 25%.

7. Zusammenfassung

Im Mittelspannungsbereich besteht die Möglichkeit bereits in Betrieb befindliche extrudierte AC-Kabelsysteme auf DC-Betrieb umzurüsten. Dabei sind zahlreiche technische Aspekte zu betrachten, die auch für einen Einsatz von neuen extrudierten AC-Standard-Kabeln für die MGÜ gelten.

Die in Anlehnung an die CIGRE TB 496 bisher durchgeführten experimentellen Untersuchungen zeigen, dass ein handelsübliches 12/20-kV-VPE-AC-Kabel den DC-Beanspruchungen des LCC-Präqualifikationstests für ein 55-kV-DC-Kabel standhalten kann.

Die für den DC-Betrieb einer umgerüsteten AC-Kabelstrecke ermittelten thermischen und elektrischen Beanspruchungen sind deutlich geringer als während der Langzeitprüfung. Ein MGÜ-Präqualifikationstest ist zur Qualitätssicherung für den Betrieb geeignet.

Autoren

Uwe Schichler

Jahrgang 1965, ist seit 2014 Institutsleiter am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz, Österreich. Er studierte Elektrotechnik an der Universität Hannover, Deutschland, und promovierte 1996 am Schering-Institut der Universität Hannover. Anschließend war er für Siemens im Bereich gasisolierter Schaltanlagen und Übertragungsleitungen tätig. Mitglied im OVE, VDE, IEEE und CIGRE und Mitarbeit in mehreren CIGRE-Arbeitsgruppen. Seit 2014 österreichischer Vertreter im CIGRE SC B3 „Schaltanlagen“. Die aktuellen Arbeitsschwerpunkte liegen im Bereich Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel, Teilentladungsmessungen, HGÜ-Betriebsmittel und DC-Isolierte Systeme.

Danksagung

Open access funding provided by Graz University of Technology.

Open Access This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

Literatur

- Hammons et al. (2012): State of the art in ultrahigh-voltage transmission. Proc. IEEE, 100(2), 360–390.
- Bathurst, Hwang, Tejwani (2015): MVDC – the new technology for distribution networks. In IET int. conf. on AC and DC power transmission, Birmingham.
- Yu et al. (2017): Initial designs for ANGLE-DC project: challenges converting existing AC cable and overhead line to DC operation. In CIGRE, Glasgow. Report 0974.
- Burstein, Cuk, de Jong (2017): Determining potential capacity gains when repurposing MV AC cables for DC power transportation. In CIGRE, Glasgow. Report 0142.
- Shekhar et al. (2017): Grid capacity and efficiency enhancement by operating medium voltage AC cables as DC links with modular multilevel converters. Electr. Power & Energy Syst., 93, 479–493.
- Liu, Cao, Fu (2017): The upgrading renovation of an existing XLPE cable circuit by conversion of AC line to DC operation. IEEE Trans. Power Deliv., 32(3), 1321–1328.
- Schichler, Buchner (2018): Anwendung von extrudierten AC-Kabeln für die Mittelspannungs-Gleichstromübertragung (MGÜ). In VDE-Fachtagung „Hochspannungstechnik“, Berlin.
- Montanari et al. (2018): Challenges and opportunities with interfaces and materials for HVDC cable systems. CIGRE Sci. Eng., 11, 80–87. June
- Brueggemann et al. (2018): Prequalification test of extruded HVDC 525-kV-underground cables. In CIGRE, Paris Session. Report B1-308.
- Jeroense et al. (2018): Fully qualified 640 kV underground extruded DC cable system. In CIGRE, Paris Session. Report B1-309.
- Mazzanti, Marzotto (2013): Extruded cables for high-voltage direct-current transmission. New York: Wiley.
- Chen et al. (2015): Review of high voltage direct current cables. CSEE J. Power Energy Syst., 1(2), 9–21.
- CIGRE WG B1.32 (2012): Recommendations for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 500 kV. CIGRE technical brochure, 496.
- Voss, Gamlin (2017): Superimposed impulse voltage testing on extruded DC-cables according to IEC CDV 62895. In 20. ISH, Buenos Aires. Report 195.
- Pischler, Schichler (2018): Challenges resulting from the use of spark gaps for composite voltage tests. In 12. ICPADM, Xian. Report 54.
- Modrusan (1983): Hochspannungsteiler: Typen, Messeigenschaften und Einsatz. Bull. ASE/UCS, 74(17), 1030–1037.
- Harada, Aoshima, Okamura, Hiwa (1976): Development of a high voltage universal divider. IEEE Trans. Power Appar. Syst., 95(2), 595–600.

schler Betriebsmittel, Teilentladungsmessungen, HGÜ-Betriebsmittel und DC-Isolierte Systeme.

Anton Buchner

Jahrgang 1993, hat 2018 sein Studium der Energietechnik an der Technischen Universität Graz, Österreich, abgeschlossen und ist am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der TU Graz angestellt. Seine Hauptarbeitsgebiete sind: Simulationen und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von extrudierten Kabeln bei der Gleichspannungsübertragung.