



直流連系線用XLPEケーブル

XLPE Cable for DC Link

西川 哲*
Satoshi Nishikawa

佐々木 賢一
Ken-ichi Sasaki

秋田 浩二
Koji Akita

坂巻 正敏
Masatoshi Sakamaki

風間 達也
Tatsuya Kazama

鈴木 公三
Kozo Suzuki

近年、直流送電線へのXLPEケーブル適用事例が増えている。当社では、長年に亘って直流用XLPEケーブルの開発を行い、これまでの研究開発の過程でその優れた特性が検証されている。2012年には電源開発(株)に納入した直流250kV XLPEケーブルが運転を開始、直流XLPEケーブル線路としては世界最高電圧(当時)であり、かつ極性反転を行う線路への納入は世界初であった。その後、400kV用の評価試験を経て、北海道電力(株)の直流250kV連系線、NEMO Link Limited社の直流400kV連系線を受注、現在は納入に向けた製造等の準備を進めている。当社の直流用XLPEケーブルは、常時導体許容温度が交流用と同じ90℃で、かつ極性反転運用が可能といった特長を有しており、今後ますます増えていくであろう直流送電線のさまざまなニーズに応えることができるものと考えている。

The cross-linked polyethylene (XLPE) cable has been used for DC transmission lines. We have been developing the DC XLPE cable for a few decades, and proved its quality and reliability through the research and development process. In 2012, we delivered the cable to Electric Power Development Co., Ltd. for its 250 kV DC transmission project, making it the world's highest voltage DC XLPE cable at that time and the first one to be applied to a line commute converter system. Following the project, we successfully completed a pre-qualification test for a 400 kV DC XLPE cable. Currently, we are working two new projects: the 250 kV transmission project of Hokkaido Electric Power Co., Inc. and the 400 kV transmission project of NEMO Link Ltd. Our DC XLPE cable has an allowable continuous conductor temperature of 90 degrees Celsius, which is equivalent to the conventional AC XLPE cable, and withstands polarity reversal of voltage. This cable will meet the various needs of DC transmission that are expected to increase in the future.

キーワード：直流連系線、XLPEケーブル、PQテスト、タイプテスト、CIGRE

1. 緒 言

近年、欧州では直流(DC)による国家間連系や洋上風力発電からの送電が盛んに行われている。

従来、直流送電にはOFケーブル^{*1}(Oil-Filled cable)やMIケーブル^{*2}(Mass Impregnated cable)といった油浸紙絶縁ケーブルが用いられてきたが、近年では漏油の恐れがない押出絶縁ケーブルの適用が拡大されている。

交流送電に広く適用されているXLPE(架橋ポリエチレン絶縁^{*3})ケーブルは、直流電圧を印加すると絶縁体である架橋ポリエチレンに空間電荷が蓄積され、直流送電に適用するには多くの問題があった。そこで筆者らは、直流特性に優れたDC-XLPE絶縁材料を開発し、更にこれを絶縁体として用いたDC-XLPEケーブルを実用化した。

本報告では、DC-XLPE絶縁材料の優れた特性に加えて実プロジェクト向け評価試験や納入仕様について報告する。

2. DC-XLPE絶縁材料の特性

交流送電に広く適用されているXLPEケーブルの絶縁材料をAC-XLPEとする。AC-XLPE絶縁材料は、交流電圧に対して優れた絶縁性能を発揮するものの、直流電圧に対し

ては、空間電荷^{*4}の蓄積などに起因して十分な性能を発揮することができない。

筆者らは、長年に亘る電源開発(株)との共同開発を経て、DC-XLPE絶縁材料を実用化した。このDC-XLPE絶縁材料は、XLPEに無機充填剤を添加することで優れた直流特性を発揮するもので、以下の特長を有する。

- ・体積抵抗率が高い
- ・空間電荷蓄積が少ない
- ・直流寿命が長い
- ・直流破壊強度が高い
- ・導体許容温度が90℃と高い

2-1 体積抵抗率

プレス加工により成型したシートサンプルを用いて測定した体積抵抗率を図1、図2に示す。図1は体積抵抗率の電界依存性、図2は温度依存性を示したものであり、測定した電界範囲、温度範囲において、DC-XLPEはAC-XLPEの約100倍の体積抵抗率を有していることがわかる。

2-2 空間電荷特性

空間電荷による電界への影響を具体的に数値化するため、以下の式(1)により定義されるFEF(Field Enhancement Factor)を求め、その時間変化を評価した。

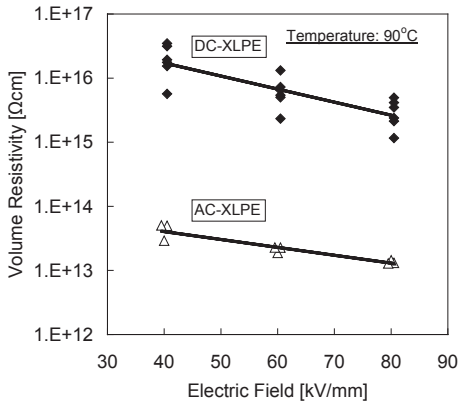


図1 DC-XLPEの体積抵抗率の電界依存性

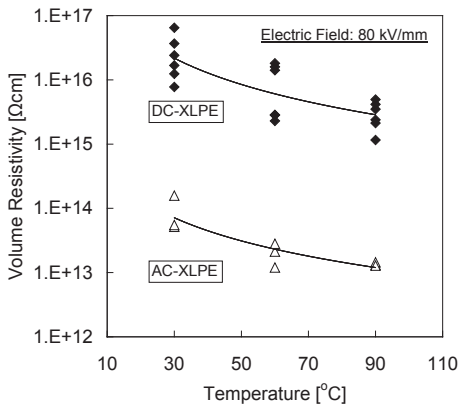


図2 DC-XLPEの体積抵抗率の温度依存性

$$FEF = \frac{\text{試料内部の最大電界}[kV/mm]}{\text{印加電圧}[kV]/\text{試料厚さ}[mm]} \dots\dots\dots (1)$$

図3にDC-XLPEとAC-XLPEのFEFの経時変化を示す。図中には、直流電界20kV/mmと50kV/mmの場合の結果を併記した。測定開始から60分までの範囲では、DC-XLPEのFEFは1.1以下と小さく、なおかつ、時間経過に対してほとんど変化しないことがわかる。一方、AC-XLPEの場合は、FEFが時間経過にともなって明らかに増加する傾向にある。更に、FEFの増加割合は、20kV/mmに比べて50kV/mmの場合の方が大きい。

DC-XLPEを対象に、空間電荷特性の経時変化をさらに長時間に亘って評価した。図4は、直流50kV/mmにおけるDC-XLPEのFEF経時変化を数日オーダーで評価した結果である。図4から、DC-XLPEのFEFは、数日のオーダーまで1.1以下で安定していることがわかる。

実際に使用される電界は20kV/mm程度であり、この程度の電界下ではAC-XLPEに比べ空間電荷蓄積量が少なく、試料内部における電界強調も抑止されることが確認された。

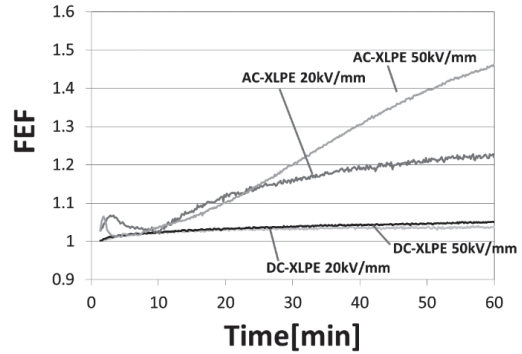


図3 DC-XLPEとAC-XLPEのFEFの経時変化

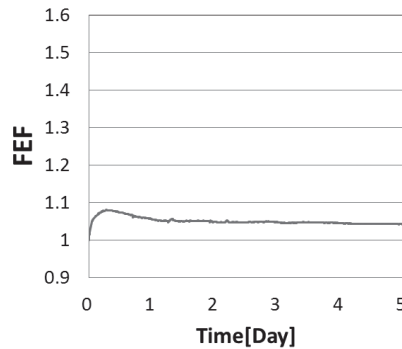


図4 DC-XLPEのFEFの経時変化 (50kV/mm, 30°C)

2-3 直流V-t特性

DC-XLPEおよびAC-XLPEの材料からシート状の試料を作製し、直流V-t特性の評価を実施した。図5に両材料の直流V-t特性を示す。本図の縦軸は試料に印加した電圧を試料厚さで除した平均電界 (E_{mean})、横軸は試料に電圧を印加してから絶縁破壊が生じるまでの時間 (t) を示している。この結果より、DC-XLPE、AC-XLPEのいずれにおいても、直流破壊強度は経過時間に対して低下する特性を示しているが、DC-XLPEとAC-XLPEとを比較すると、DC-XLPEの方が絶縁破壊電界の絶対値は高く、かつ経過時間による低下割合も緩やかであることがわかる。

ここで、直流に対する寿命を評価する。AC-XLPEでは、電界Eと破壊までの時間tの間に、式(2)の関係が成立すると仮定して寿命指数nを算出、絶縁設計に用いていることから、この結果に対しても同様の評価を試みた。

$$E^n \times t = const. \dots\dots\dots (2)$$

その結果、DC-XLPEはn=26、AC-XLPEはn=13と得られた。この結果は、DC-XLPEでは無機充填剤添加の効果によって直流電圧下での寿命特性が向上することを示している。

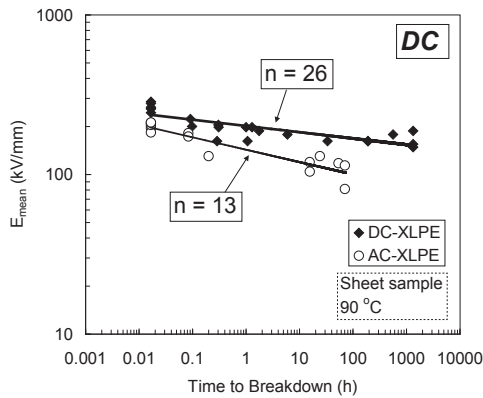


図5 DC-XLPEとAC-XLPEの直流V-t特性

2-4 モデルケーブルの直流破壊特性

DC-XLPEを絶縁体に適用した導体サイズ200mm²、絶縁厚さ9mmのモデルケーブルを製造し、導体温度90°Cの直流破壊試験に供試した。

破壊試験結果⁽¹⁾をAC-XLPEケーブルの破壊試験結果⁽²⁾と対比できるように図6に示す。図6より、DC-XLPEモデルケーブルの直流破壊強度は、AC-XLPEモデルケーブルの2倍以上であることがわかる。

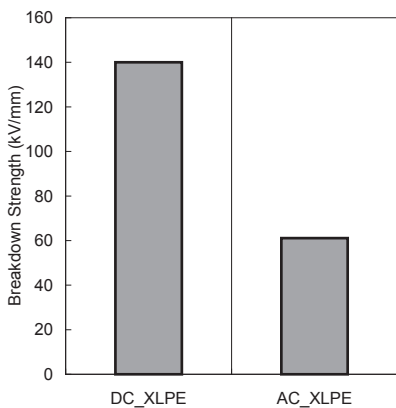


図6 モデルケーブルの直流破壊強度 (90°C)

2-5 温度特性

図1、図2の体積抵抗率温度特性や、図6の破壊強度に示したように、90°CにおいてもDC-XLPEはAC-XLPEに比べ十分に高い直流性能を有しており、導体許容温度をAC-XLPEと同じ90°Cとすることが可能である。

3. 実プロジェクトにおける評価試験と納入

DC-XLPEケーブルは、基礎開発の開始から実用化に至る

までの間に、幾つもの長期実証試験が段階的に実施され、最高電圧500kVのケーブルおよびFJ (Factory joint; 海底ケーブル用工場接続部) の性能については十分に検証済みである^{(1)、(3)、(4)}。しかしながら、実プロジェクトにおいては納入仕様そのものでのタイプテスト (国内規格の形式試験に相当) が必要であり、かつ陸上ケーブル用の中間接続部等はPQテスト (Pre-qualification test; 国内規格の開発試験に相当) も実施の必要があった。

本章では、2010年以降に実施した実プロジェクトに対応した評価試験につき述べる。

3-1 電源開発(株)北本直流幹線

電源開発(株)が所有する北本直流幹線は、津軽海峡を海底ケーブルで横断し、北海道と本州を結ぶ直流±250kVの双極、送電容量600MWの送電線である。既にOFケーブル2条が布設、運転されてきたが、1条の増設が行われることとなり、DC-XLPEケーブルが採用された⁽⁵⁾。本線路の特徴としてLCC^{*5} (Line Commute Converter) 方式が用いられ、電圧の極性反転が行われること、ならびに架空送電線と直結されていることが挙げられる。

製品の納入に先立ち、DC250kVのXLPEケーブル (海底ケーブルおよび陸上ケーブル) ならびに接続部を製造し、PQテストとタイプテストを実施した。供試した海底ケーブルにはFJを組み込んだ。FJの補強絶縁体には、絶縁テープを巻いたうえでモールドする方式を採用している。また、中間接続部として、海底ケーブル揚陸部において陸上ケーブルと接続する渚ジョイント、および終端接続部として油浸紙絶縁方式のEB-A (気中終端接続部) も供試した。供試品の構造を図7から10に示す。

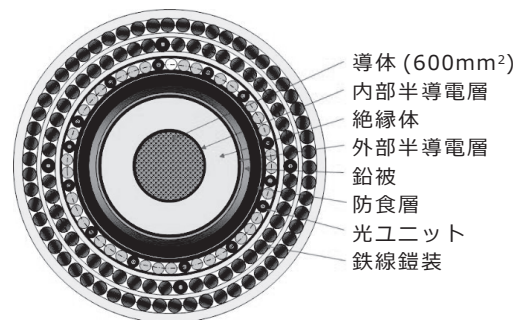


図7 海底ケーブルの構造

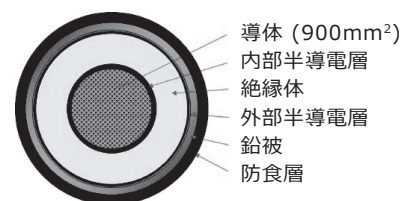


図8 陸上ケーブルの構造

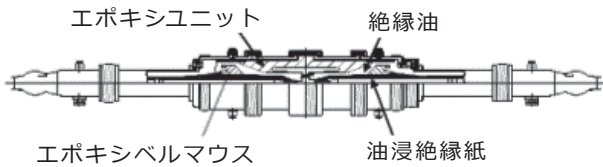


図9 渚ジョイントの構造

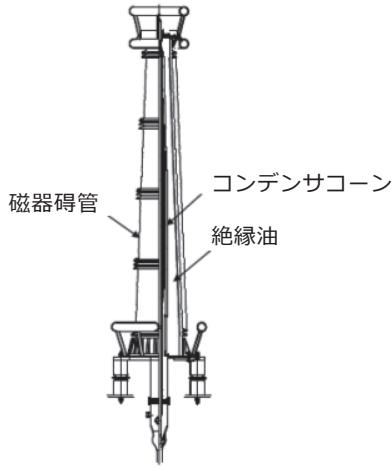


図10 EB-Aの構造

これらのテストには、250kV以下の押出直流絶縁ケーブル試験法に関する推奨案CIGRE（国際大電力システム会議）Technical Brochure（以下、CIGRE TB）219⁽⁶⁾に記載されているLCC線路用の試験条件に準拠した条件を適用した。この試験には、極性反転試験も含まれている。また、試験温度は実使用時の許容温度を鑑みて90℃とした。タイプテストは2010年、PQテストは2011年に完了した。本プロジェクトは、海底ケーブル約42km、陸上ケーブル約1.3kmおよび接続部を出荷、布設・接続工事を行い、竣工試験を経て2012年12月に運転が開始され、無事故で現在に至っている。本線路は、LCC方式のシステムにXLPEケーブルを適用した世界初の事例であり、かつ運転開始時点では世界最高電圧のDC-XLPEであった。

3-2 400kVDC-XLPEケーブルのPQテスト

前述のプロジェクト完了後には、さらに高電圧向けの評価を行うこととし、電圧400kV、双極で1000MWの送電容量となる線路を想定し、海底・陸上ケーブル（導体サイズはいずれも1000mm²）と各種接続部を対象にPQテストを実施した⁽⁷⁾。

FJを含む海底ケーブルについては、電気試験を行う前の機械履歴印加のため、コイル取り試験および引張曲げ試験を実施したうえで試験線路に布設した。また、陸上区間用の中間接続部としてRBJ（ゴムブロック式接続部）および渚ジョイント用としてPJ（プレハブ式接続部）、終端には

ゴムブロック式のEB-A（ポリマー碍管および磁器碍管）を供試した。これらの接続部の仕様は、実績のあるAC用に準じている。試験条件はCIGRE TB 219の後に発行された500kVまでの直流ケーブルを対象とするCIGRE TB 496⁽⁸⁾で推奨されているLCC線路向けの極性反転試験を含む試験条件に準じた。試験条件を表1、PQテスト線路レイアウトを図11に示す。本試験は2013年に完了した。

表1 DC 400kV XLPEケーブルのPQテスト条件

| 試験項目 | 試験条件 | 判定基準 |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 機械試験 (ケーブル・FJ) | コイル取り試験 コイル取り径6m×3回 引張曲げ試験 引張張力134kN×3回 使用シープ径：8m | 外観異常がないこと |
| ヒートサイクル試験 | 印加電圧：+580kV (1.45U ₀) 導体温度：常温～90℃ (8h通電ON/16時間OFF) | 30日 |
| ヒートサイクル試験 | 印加電圧：-580kV (1.45U ₀) 導体温度：常温～90℃ (8h通電ON/16時間OFF) | 30日 |
| 極性反転試験 | 印加電圧：±500kV (1.25U ₀) 8時間毎に極性反転 導体温度：常温～90℃ (8h通電ON/16時間OFF) | 20日 |
| 高温試験 | 印加電圧：+580kV (1.45U ₀) 導体温度：90℃ | 40日 |
| 高温試験 | 印加電圧：-580kV (1.45U ₀) 導体温度：90℃ | 40日 |
| 無負荷試験 | 印加電圧：-580kV (1.45U ₀) 導体温度：常温 | 120日 |
| ヒートサイクル試験 | 印加電圧：+580kV (1.45U ₀) 導体温度：常温～90℃ (8h通電ON/16時間OFF) | 30日 |
| ヒートサイクル試験 | 印加電圧：-580kV (1.45U ₀) 導体温度：常温～90℃ (8h通電ON/16時間OFF) | 30日 |
| 極性反転試験 | 印加電圧：±500kV (1.25U ₀) 8時間毎に極性反転 導体温度：常温～90℃ (8h通電ON/16時間OFF) | 20日 |
| DC重畳 開閉インパルス (SI) 試験 | 印加電圧：DC+400kV、SI-480kV DC-400kV、SI+480kV 導体温度：90℃ | 各10回 |
| DC重畳 雷インパルス (LI) 試験 | 印加電圧：DC+400kV、LI-840kV DC-400kV、LI+840kV 導体温度：90℃ | 各10回 |
| DC耐電圧試験 | 印加電圧：-580kV (2時間) 導体温度：常温 | 破壊しないこと |

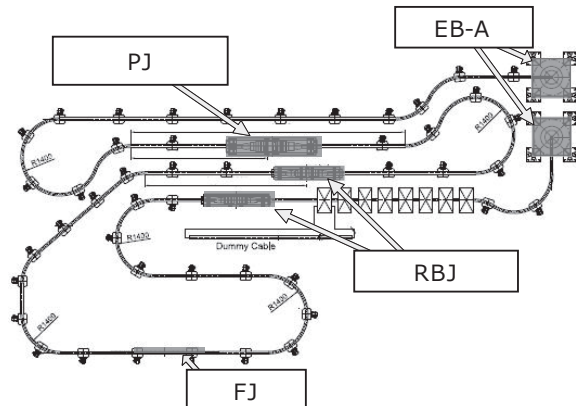


図11 400kV級PQテスト線路レイアウト

3-3 北海道電力(株)北斗今別直流幹線

北海道電力(株)は、北海道の電力供給をより安定化させるため、新たなルートで北海道と本州を結ぶ250kVの直流送電線の建設を決定、当社は地中送電線区間(約24km)を受注した。本線路の特徴としてVSC^{※6}(Voltage Sourced Converter)方式が採用されたこと、架空送電線と直結されること、ケーブルは青函トンネル内に布設されることが挙げられ、海峡トンネル内への超高压ケーブル布設工事としては世界最長となる。

このプロジェクトにおいても、納入に先立ちDC250kVのXLPEケーブルならびに接続部を製造し、タイプテストを実施した。タイプテストの試験条件はCIGRE TB 496で推奨されているVSCシステム向けを採用した。本テストには、導体サイズ1000、1500mm²のアルミ被ビニル防食層ケーブル、400kV級PQテストで性能検証済みのRBJ(同径接続用)およびPJ(異径接続用)、既に納入実績を有するEB-A(油浸紙絶縁式、磁器碍管)を供試した。図12、図13に中間接続部の構造を示す。

既にタイプテストは問題なく完了し、製品の製造に着手している。

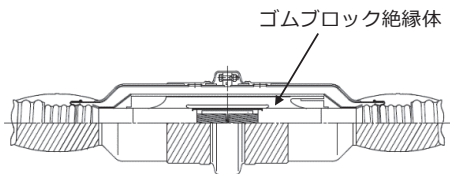


図12 RBJの構造

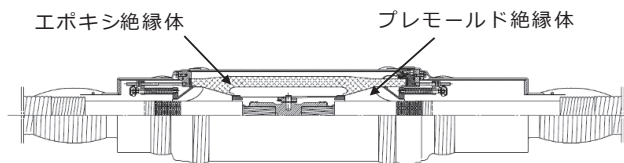


図13 PJの構造

3-4 NEMO Link Limited社向け直流連系線

英国National Grid社とベルギーELIA社の合弁会社であるNEMO Link Limited社から受注した両国を結ぶ直流400kVの送電ケーブルシステムへの納入準備も既に始まっている。この線路は、英国南東部のケント州と、ベルギーのゼーブルージュの交直変換所を結ぶ連系送電線の建設プロジェクトで、全長は141.5km(海底区間130km、陸上区間11.5km)となる。

このプロジェクトにおいても、CIGRE TB 496に準拠した

タイプテストを実施した。この線路にはVSCシステムが採用されるが、タイプテストはLCCシステムの条件も組み込み、より厳しい条件とした。タイプテストは既に完了し、ケーブルの製造に着手している。

納入対象品を表2に示す。接続部はいずれも400kV PQテストに供試した仕様がベースとなっている。

表2 NEMOプロジェクト向け納入対象品

| 品目 | 仕様 |
|---------|--------------------------------------|
| 海底ケーブル | 導体サイズ1100mm ² 、光複合、一重鉄線外装 |
| 陸上ケーブル | 導体サイズ1600mm ² 、光複合 |
| 陸上ジョイント | RBJ |
| 渚ジョイント | PJ |
| 洋上ジョイント | ゴムブロック式 |
| 気中終端接続部 | ゴムブロック式、ポリマー碍管 |

4. 結 言

当社のDC-XLPE絶縁材料は、常時導体許容温度が90℃であること、極性反転が可能であることなどの非常に優れた特性を有しており、その成果として、DC-XLPEケーブルとして世界最高電圧(当時)、および世界初のLCCシステム適用事例となった電源開発(株)の北本直流幹線は2012年から運転されている。

さらに、400kV PQテストを経て受注した2件のプロジェクトが進行中である。

直流送電技術は、国家間連系などの大容量・長距離送電線路への適用に加え、洋上風力やメガソーラーといった再生エネルギーを遠隔地へ供給する用途への適用が拡大するものと期待されている。

以上に述べたように、当社のDC-XLPEケーブルは、このような時代の要求に十分に答える性能、実用性を有しており、今後の世界的な電力インフラ整備に貢献できるものと考えている。

用語集

※1 OFケーブル

Oil-Filled Cable: 油浸紙により絶縁体を構成するケーブル。給油設備により油圧を印加することで性能を発揮。

※2 MIケーブル

Mass Impregnated Cable: 高粘度の絶縁油を含浸することで給油設備が不要となり長距離送電が可能なケーブル。

※3 架橋ポリエチレン

Cross-Linked Polyethylene: 架橋反応によりポリエチレンの分子間結合を高め、ポリエチレンの欠点であった耐熱性を改善した絶縁材料。

※4 空間電荷

固体絶縁体中に蓄積される電荷。直流電圧が印加された場合の電界を変歪する。

※5 LCC (Line Commute Converter) システム

サイリスタ制御器を用いた相整流変換器による直流送電システム。送電方向を変える場合には、電圧の極性を反転させる。

※6 VSC (Voltage Sourced Converter) システム

自励式の電圧源コンバータを用いた直流送電システム。送電方向を変える場合でも、電圧の極性を反転させる必要はない。

参考文献

- (1) 前川、渡部、浅野、村田、片貝、嶋田、「直流500kV XLPEケーブルの開発」、電学論B、121巻3号、pp.390-398 (2001)
- (2) Y. Maekawa, A. Yamaguchi, Y. Sekii, M. Hara and M. Marumo, "Development of DC XLPE Cable for Extra-High Voltage Use," Trans. IEE of Japan, Vol.114-B, No.6, pp.633-641 (1994)
- (3) K. Terashima, H. Suzuki, M. Hara, K. Watanabe, "Research and Development of +/-250 kV DC XLPE Cables," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.13, No.1, pp.7-16 (1998)
- (4) 前川、山中、木村、村田、片貝、松永、「直流500kV海底XLPEケーブル」、日立電線No.21、pp.65-72 (2002)
- (5) C. Watanabe, Y. Itou, H. Sasaki, S. Katakai, M. Watanabe, Y. Murata, "Practical Application of +/-250kV Dc-XLPE Cable for Hokkaido-Honshu HVDC Link," CIGRE 2014, B1_110_2014 (2014)
- (6) Working Group WG21-01 CIGRE, "Recommendation for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 250 kV," CIGRE Technical Brochure 219 (2003)
- (7) Y. Murata, M. Sakamaki, Y. Tanji, T. Katayama, T. Igi, O. Matsunaga, "400kV DC-XLPE Cable and Accessories," CIGRE AORC Technical Meeting 2014, B1-1095 (2014)
- (8) Working Group B1.32 CIGRE, "Recommendations for Testing DC Extruded Cable Systems for Power Transmission at a Rated Voltage up to 500 kV," CIGRE Technical Brochure 496 (2012)

執筆者

西川 哲* : 海外電カプロジェクト部 部長



佐々木賢一 : 電力品質保証部 グループ長



秋田 浩二 : 電力エンジニアリング事業部
グループ長



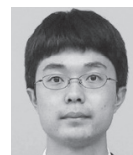
坂巻 正敏 : 電力技術開発部 主席



風間 達也 : 電力機器事業部 主査



鈴木 公三 : 電力事業部



*主執筆者