

三相同軸超電導ケーブルの試作と性能検証結果

Performance Test of Prototype Triaxial Superconducting Cable

大西 浩樹 中西 達尚 北村 祐
Hiroki OHNISHI Tatsuhisa NAKANISHI Tasuku KITAMURA

小泉 勉 三堂 信博 長谷川 隆代
Tsutomu KOIZUMI Nobuhiro MIDO Takayo HASEGAWA

発電所で用いられる相分離母線のコンパクト化・低コスト化を実現するため、三相同軸超電導ケーブルの開発を実施している。ケーブルを試作製造し通電性能及び耐電圧性能を調査した結果について報告する。

We are developing a triaxial superconducting cable in order to realize a compact and low-cost isolated phase bus used in power plants. We report test results of the current flow and electrical insulating performance of the prototype cable.

1. はじめに

当社では、発電所等で用いられる低電圧大電流母線の省エネ化を目的とし、イットリウム系線材を用いた低コスト型超電導ケーブルを開発している。発電機で発電された電力は、相分離母線や閉鎖母線、水冷ケーブルによって昇圧変圧器に運ばれた後、送電系統に連系される。これらのケーブルには大型の銅導体を使用されており、主としてジュール発熱による熱損失を伴うとともに、広い設置スペースを必要とする。これらのケーブルを超電導化することにより、大電流通電による熱損失を大幅に低減させることが可能であり、大きな省エネルギーにつながる。また、超電導線を交流で使用した場合に交流損失が発生するが、超電導層を薄膜化した方が交差する量子化された磁束侵入量が減り、交流損失を減らすことができる。従って、超電導線材には、ピスマス系線材に比べ膜厚の小さいイットリウム系線材を使用すると交流損失が低減できる。また三相同時に冷却できるため冷却負荷を低減でき、コンパクトな低コストケーブルの作製が可能となる。

本開発では、基礎データを取得するために、定格電圧を 22 kV、定格電流 3 kA の回路母線を想定した三相同軸超電導ケーブルの導体コアを試作した。試作した導体コアの通電性能検証試験及び絶縁性能検証試験を実施し、母線への適合性を検討した。

2. ケーブルの要求性能及び構造

本開発における三相同軸超電導ケーブルに関する代表的な要求性能を表 1 に示す。

表 1 ケーブルの要求性能一覧表

項目	単位	要求性能
定格電圧	kV	12
商用周波数耐電圧	kV	50
雷インパルス耐電圧	kV	125
定格電流	kA	10
短時間電流	kA	70

当該回路母線では、使用電圧（定格電圧）は 12 kV だが、22 kV クラスの性能が要求されている。従って、日本電機工業会規格である JEM 1425「金属閉鎖形スイッチギア及びコントロールギア」に準じ、要求性能（22 kV クラス）に相当する商用周波数耐電圧は 50 kV、雷インパルス耐電圧は 125 kV とした。上記の要求性能を満たすケーブルの設計を検討した。図 1 に三相同軸超電導ケーブルの概略図を示す。

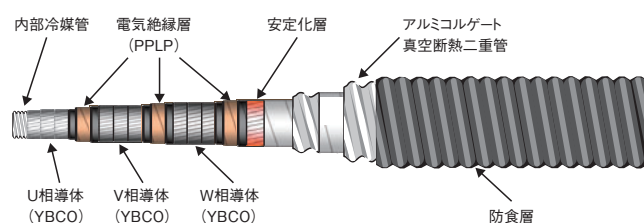


図 1 ケーブル概略図

ケーブルは導体部、真空断熱部の二つのコンポーネントで形成される。まず、導体部分の中央には内部冷媒管が配置される。これはステンレスを材料とした波付コルゲート管であり、この内部はケーブルを液体窒素で冷却する際の往路側の冷却路となる。この上に、超電導線材が配置される。これは厚さ約 0.2 mm、幅約 4 mm の超電導線材を複数本巻き付けている。超電導線材を巻き付ける本数はケーブルの定格電流に応じて設定される。本導体は U 相、V 相、W 相の交流三相を同時通電するため、三相分の導体が配置される。また、導体間に所定の絶縁性能を持たせるために、PPLP などの半合成紙を巻き付け絶縁層とする。また、絶縁層の上下には電界緩和層を形成する。本開発では半導電性を有するカーボン紙を採用する。W 相絶縁層の上部に遮へい層を形成する。これはケーブルに静電遮へい機能を付与するものである。

3. 絶縁設計

三相同軸超電導ケーブルに定格電圧を印加すると、導体間の絶縁層に電界ストレスが加わる。この電界ストレスに耐えうる絶縁強度を絶縁層に付与する必要がある。そこで、表 1 に示す定格電圧を母線に印加した際にかかる電界ストレスを計算により求めた。ケーブルの絶縁体部分の概要図を図 2 に示す。

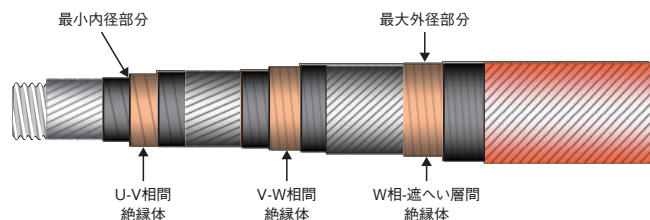


図 2 絶縁体部分の概要図

ケーブルの絶縁体に電圧を印加すると、導体内側との界面付近において最も電位傾度が大きくなり、導体外側との界面付近では最も電位傾度が小さくなる。同時に絶縁体の外径が大きくなるにつれて電位傾度が大きくなる。この二つの傾向から、絶縁体の最小内径部分と最大外径部分の 2 か所で、電界ストレスを求め、この値が材料の持つ最小破壊電界 (E_L) を上回らないように絶縁設計する必要がある。

そのための検証として、絶縁厚を 3.3 mm としてケーブルの構造設計を行ったうえで電界計算を行った。上記の構造のケーブルに対して交流破壊電圧 52 kV、インパルス破壊電圧 125 kV を印加した際の電界計算結果を表 2 に示す。

表 2 電界解析結果

絶縁部位	項目	記号	単位	商用周波数 試験耐電圧	雷インパルス 試験耐電圧
		試験電圧	V_t	kV	52
U 相-V 相	導体外径	d_1	mm	56.6	
	絶縁厚	t_1	mm	3.3	
	絶縁外径	D_1	mm	63.2	
	最大電界ストレス×2	$2 E_{max1}$	kV/mm	33.3	80.1
	最小電界ストレス×2	$2 E_{min1}$	kV/mm	29.8	71.7
V 相-W 相	導体外径	d_2	mm	65.4	
	絶縁厚	t_2	mm	3.3	
	絶縁外径	D_2	mm	72.0	
	最大電界ストレス×2	$2 E_{max2}$	kV/mm	33.1	79.5
	最小電界ストレス×2	$2 E_{min2}$	kV/mm	30.1	72.2
W 相-遮へい層	導体外径	d_3	mm	74.2	
	絶縁厚	t_3	mm	3.3	
	絶縁外径	D_3	mm	80.8	
	最大電界ストレス×2	$2 E_{max3}$	kV/mm	32.9	79.1
	最小電界ストレス×2	$2 E_{min3}$	kV/mm	30.2	72.6

U 相-V 相間の最大電界ストレス E_{max1} 及び最小電界ストレス E_{min1} は以下の式で与えられる。

$$E_{max1} = \frac{2V_t}{d_1 \ln(D_1/d_1)} \quad \dots (1)$$

$$E_{min1} = \frac{2V_t}{D_1 \ln(D_1/d_1)} \quad \dots (2)$$

安全率を考慮するため、ストレス値は計算値である E_{max1} 及び E_{min1} に対し 2 を乗じた値とする。

V-W 相間及び W 相-遮へい導体間の最大電界ストレス及び最小電界ストレスについても上式と同様に求められる。三相同軸ケーブルの各絶縁層にかかる電界ストレスは表 2 の通りとなり、この電界ストレスを上回る E_L を有する絶縁材料を選定する必要がある。

3.1 絶縁材料の選定

当社における油浸紙 (OF) 電力ケーブル、超電導ケーブルの製造実績をもとに、三相同軸超電導ケーブルに適用する絶縁材料の選定を行う。表 3 に絶縁材料候補リストを示す。

表 3 絶縁材料候補リスト

材料	PPLP	タイベック	クラフト紙
主原料	セルロース+PP	ポリエチレン	セルロース
電気特性	◎	△	○
加工性(当社設備によるケーブル製造)	○	未知	○
超電導ケーブル実績(当社)	○	×	×
浸透性	×	○	△

上記の一覧表から、本開発においては使用実績があり電気特性に優れる PPLP と、浸透性に優れるタイベックの二種類の材料を候補に絞り込み、ケーブル特性に関し重要な性能評価試験を実施することとした。電気特性試験として絶縁材料のシートによる交流破壊試験、雷インパルス破壊試験を行い、材料としての E_L を求める。次に絶縁層の厚さ

1.2 mm のモデルケーブルを製造し、交流破壊試験、雷インパルス破壊試験を行い、材料としての E_L を求めた。

3.2 シート電気試験

PPLP 及びタイベックのシート状の絶縁材料を用いて以下の通り電気試験を行った。80 mm 角のシート状サンプルを $\phi 25$ mm, 75 mm の二枚の電極にはさみ、これを液体窒素中に浸漬し電圧を印加する。圧力は常圧とした。交流破壊試験については、0.5 kV ステップで破壊電圧まで電圧印加する。雷インパルス破壊試験では 1.5 ~ 1.7 kV ステップで破壊電圧まで電圧印加する。計測サンプル数は各 10 とした。上記の条件で 10 点破壊試験を行った。それらの結果をおのおのワイブルプロットし、 E_L を求める。上記の結果から求められた各 E_L 値を表 4 に示す。

表 4 シート試験 E_L 値

材料	単位	交流破壊試験	雷インパルス破壊試験
PPLP	kV/mm	80	95
タイベック	kV/mm	40	60

表 4 より、PPLP の E_L がタイベックと比較して 30 ~ 50% 程度高くなっていることがわかる。PPLP はクラフト紙でポリプロピレンフィルムを挟んだ三層構造の絶縁紙である。高分子材料であるポリプロピレンフィルムが優れた電気絶縁特性を持つため、PPLP の E_L が高くなったと考えられる。

3.3 モデルケーブル電気試験

図 3 のような構造のモデルケーブル（絶縁厚：1.2 mm）を作製し、交流破壊試験及び雷インパルス試験を行い、ワイブルプロットを行うことによりそれぞれの試験の E_L を求めた。ケーブル長は PPLP が 500 mm, タイベックが 1000 mm である。

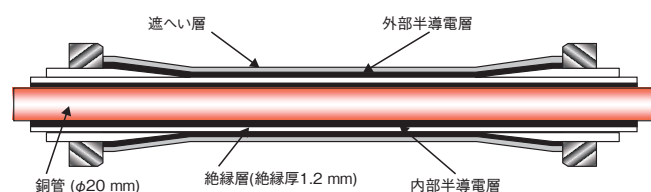


図 3 絶縁モデルケーブル構造

課電条件として、交流破壊試験の昇圧条件は、10 kV/10 分に耐えることを確認後、各 5 kV/5 分で絶縁破壊まで昇圧した。雷インパルス試験は +40 kV × 3 回耐えることを確認後、各 +10 kV × 3 回で絶縁破壊まで昇圧を継続した。サンプル数はそれぞれの試験で 10 (PPLP) 及び 5 (タイベック) として実施した。冷却条件については、クライオスタット内の気体部分の気圧は大気圧、液体窒素での冷却時間は 4 時間とした。上記の結果から求められた各 E_L 値を表 5 に示す。

表 5 モデルケーブル試験 E_L 値

材料	単位	交流破壊試験	雷インパルス破壊試験
PPLP	kV/mm	36.9	87.4
タイベック	kV/mm	13.0	30.0

表 5 の結果より、PPLP はシート試験の結果と同様にタイベックに比べ 2 倍以上の値となった。これはシート試験の原因と同様であると考えられる。

シート及びモデルケーブルの試験結果から PPLP を用いて絶縁層を形成した場合、3 項（絶縁設計）で検討した三相同軸ケーブルの各絶縁層にかかる最大電界ストレスは、 E_L を上回らないことを確認した。従って、本開発の三相同軸超電導ケーブルの絶縁材料には PPLP を選定した。

4. 導体設計

三相同軸超電導ケーブルの通電能力を付与する導体部分の設計を行った。導体には幅約 4 mm, 厚さ約 0.2 mm のテープ状のイットリウム系超電導線材を複数本同心円状に巻き付ける。各層の導体の電流容量は概ね巻き付ける超電導線材の臨界電流 × 本数となる。ケーブルの基礎データを取得するために、試作品の設計臨界電流は 3 kA とした。超電導線材 1 本の臨界電流値が 100 ~ 150 A のため、各相に使用した線材本数は表 6 のようになる。

表 6 各相の線材使用本数

相	単位	本数
U 相	本	32
V 相	本	36
W 相	本	40

5. 三相同軸超電導ケーブルの導体コアの設計・試作

本開発における三相同軸超電導ケーブル試作は当社の製造設備を使用し、導体及び絶縁層の形成を実施した。

5.1 三相同軸超電導ケーブル導体コアの設計仕様

導体コアの試作製造を撚線機及び紙巻機を使用して実施した。試作導体コアの主な設計仕様を表 7 に示す。

表 7 試作導体コア設計仕様

項目	厚さ (mm)	外径 (mm)	
フォーマ	ステンレスコルゲート管	—	53
押さえ巻	不織布	1.6	56.2
U 相導体	Y 系超電導線材 32 本	0.2	56.6
U - V 相絶縁層	内部半導電層 カーボン紙 2 枚	0.3	57.2
	絶縁層 PPLP 紙 28 枚	3.3	63.8
	内部半導電層 カーボン紙 4 枚	0.6	65
V 相導体	Y 系超電導線材 36 本	0.2	65.4
V - W 相絶縁層	内部半導電層 カーボン紙 2 枚	0.3	66
	絶縁層 PPLP 紙 28 枚	3.3	72.6
	内部半導電層 カーボン紙 4 枚	0.6	73.8
W 相導体	Y 系超電導線材 40 本	0.2	74.2
W 相 - 遮へい層絶縁層	内部半導電層 カーボン紙 2 枚	0.3	74.8
	絶縁層 PPLP 紙 28 枚	3.3	81.4
	内部半導電層 カーボン紙 4 枚	0.6	82.6
遮へい層	銅テープ 40枚 × 2	0.6	83.8
押さえ巻	不織布	0.2	84.2

5.2 導体コアの試作

表7の仕様に基づき、導体コアを試作した。試作長は7 mとした。超電導線材及び銅テープの撚合工程は撚合機、カーボン紙及びPPLP紙の紙巻工程は紙巻機で行った。

リールサプライから供給された超電導線材は、撚り口付近に設置された目板盤にて集線され、所定本数の線材が整列される。この状態で目板中央を通る導体に線材が巻き付けられる。巻き付けられた導体上に保護テープが巻き付けられ、次工程の紙巻工程に進む。図4に紙巻工程の状況を示す。



図4 紙巻状況

紙巻機は図のようなテーピングヘッドを4台使用する。図中手前方向に導体を送られ、その周囲をテーピングヘッドが回転する。ヘッドの中に取り付けられた材料パッドから絶縁紙が供給され導体上に巻き付けられる。各製造工程において、導体、絶縁体が設計仕様値通り巻き付けられているか工程内検査を行って管理した。最終工程で、設計通り導体コアが完成したことを確認した。

6. 性能検証試験

前項で試作した三相同軸超電導ケーブル導体コアの各相における通電性能検証試験、耐電圧性能検証試験を実施した。検証試験結果から当該相分離母線の要求性能を満たすことを確認した。

6.1 通電性能検証試験

測定方法は直流四端子法によって行った。また、本試験は超電導ケーブルの試験法に関する国際規格推奨案 CIGRE TB 538「WG B1.31 Testing of superconducting cable systems」に準拠して実施した。試験時の等価回路図を図5に示す。図中外側からU相、V相、W相の通電端子及び電圧端子を取り付ける。相ごとに電源を切り替え通電特性を計測するので、図中の回路線は点線で標記した。通電時の電流値は並列に配置したシャント抵抗器の電圧を読み取り電流値に換算した。各相の電圧端子間距離は、U相：173 cm、V相：133 cm、W相：96 cmとした。各層ごとに通電用のバスバーと電圧端子を取り付け、電流値を0 Aから3 kAまで100 A毎のステップで通電し各電流での発生電圧値を読み取った。通電電流3 kAで3分ホールドし、発生電圧に異常がないか確認した後、最大4.5 kA

まで通電し発生電圧値を読み取り、臨界電流値を算出した。

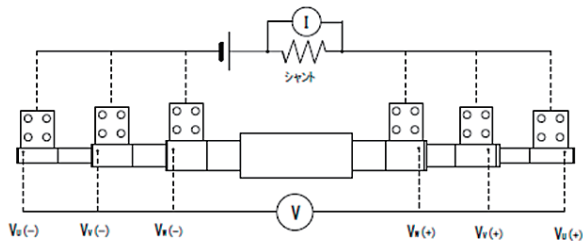


図5 通電試験等価回路図

上記の結果から得られた、各相の臨界電流値を表8に示す。通電時に各相の電圧端子間で1 μ V/cm以上の発生電圧が生じたときの電流値を臨界電流値とした。

表8 各相臨界電流値

相	単位	臨界電流値
U相	kA	4.3
V相	kA	4.3
W相	kA	3.8

表8より、各相とも設定臨界電流3 kAに対し、約1 kAのマージンを持った臨界電流値であることを確認できた。

6.2 耐電圧性能検証試験

6.1項と同様に本試験は超電導ケーブルの試験法に関する国際規格推奨案 CIGRE TB 538に準拠して実施した。試験用モデルケーブルは絶縁厚3.3 mm、サンプル長1000 mmとした。要求性能を満たす課電条件は表9に示す通りであり、交流耐圧試験、部分放電試験、雷インパルス耐圧試験を実施した。冷却条件については、クライオスタット内の気体部分の気圧は0.3 MPaに加圧し、液体窒素での冷却時間は約72時間とした。耐電圧性能検証試験の結果を表9に示す。

表9 耐電圧性能検証試験条件及び結果

項目	試験条件	U-V相	V-W相	W相-差へい
交流耐圧試験	52 kV/30分間に耐えること	○	○	○
部分放電試験	36 kV 10秒間昇圧後 31.5 kVにて発生しないこと	○	○	○
雷インパルス耐圧試験	±125 kV 各10回に耐えること	○	○	○

表9より、要求性能を満たすことを確認した。今後は各相の絶縁破壊強度を取得し、要求性能に対する安全率をどの程度まで下げられるか検討を進めていく。

7. まとめ

発電所で用いられる相分離母線をコンパクトな低コストケーブルとするため、三相同軸超電導ケーブルの開発を実施した。三相同軸超電導ケーブルの基礎データを取得するために、定格電圧を22 kV、定格電流3 kAを想定した三相

同軸ケーブルを試作した。試作したケーブルの通電性能検証試験及び耐電圧性能検証試験を実施した。

通電性能については、各相とも設定臨界電流 3 kA に対し、約 1 kA のマージンを持った臨界電流値であることを確認できた。耐電圧性能については、各相で要求性能である課電試験の規格を満たすことを確認した。今後、各相の絶縁破壊強度を取得し、要求性能に対する安全率の検討を進めていく。

今回は当社設備で問題なくケーブルの導体コアを製造できることを確認し、通電特性及び耐電圧特性の評価を実施した。今後、真空断熱層としてアルミコルゲート管を製造し、実際にケーブルを敷設し型式試験の実施を検討している。

謝 辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業の結果得られたものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 足立和久，他：“Design of 22kV-10kA HTS Triaxial Superconducting Bus”，24th International Conference on Magnet Technology (2015)
- 2) 足立和久，他：「AC 35 kV 600 A 超電導ケーブルシステムの開発」，SWCC レビュー vol. 61, No.1, p15-19 (2015)
- 3) 武祐一郎：「最近の合成絶縁紙」，電気學會雑誌 92 (10)，p995-1002 (1972)
- 4) 深沢正名，永野宏郎：「高電圧極低温ケーブル用液体窒素含浸絶縁の開発」，日立評論 Vol.56, p.49~54 (1974)

昭和電線ケーブルシステム(株)
大西 浩樹 (おおにし ひろき)
超電導テクノロジーセンター
ケーブルシステム開発グループ
ケーブル開発及び絶縁性能評価に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
中西 達尚 (なかにし たつひさ)
超電導テクノロジーセンター
ケーブルシステム開発グループ 主査
導体性能評価に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
北村 祐 (きたむら たすく)
工学博士
超電導テクノロジーセンター
ケーブルシステム開発グループ 主幹
ケーブル設計・開発，性能評価に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
小泉 勉 (こいずみ つとむ)
超電導テクノロジーセンター
線材開発グループ長
超電導線材の研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
三堂 信博 (みどう のぶひろ)
超電導テクノロジーセンター
ケーブルシステム開発グループ長
主任研究者補佐，ケーブル設計，システム設計に従事

昭和電線ホールディングス(株)
長谷川 隆代 (はせがわ たかよ)
工学博士
取締役 技術企画室長
兼 昭和電線ケーブルシステム(株)
超電導テクノロジーセンター長