

275kV 系統 YBCO 超電導電力ケーブルの定常伝熱特性

Thermal Characteristics of 275 kV Class YBCO Superconducting Power Cable at Steady Operation

王 旭東, 瓜生 季邦, 石山 敦士(早大); 八木 正史(古河電工); 丸山 修, 大熊 武(ISTEC-SRL)

WANG Xudong, URYU Toshikuni, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);

YAGI Masashi (Furukawa Electric); MARUYAMA Osamu, OHKUMA Takeshi (ISTEC-SRL)

E-mail: wan-x-don@ruri.waseda.jp

1. はじめに

275kV 系統 YBCO 超電導電力ケーブルは、定常運転時には交流損失だけでなく高電圧による誘電損失が発生する。さらにケーブル長尺化に伴い、超電導接続部の接続抵抗損失も考慮した定常伝熱特性の評価が必要となる。以前に、我々は銅フォーマの構成が異なる 2 種類のダミーケーブルを用いて、交流損失と誘電損失を考慮した伝熱特性評価を行った [1] [2]。今回は、有限要素法を用いた数値解析により、超電導接続も含めたモデルケーブルの定常伝熱特性評価を行ったので報告する。

本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

2. 接続モデル

275kV 系統 YBCO 超電導電力ケーブルの諸元を Table.1 に、接続部の構成を Fig.1 に示す。Fig.1 はケーブル中心軸から最外層までの断面を図示している。接続部の発熱を分散させるため、Fig.1 に示すように各超電導層の接続部が重ならないように設置している。接続長は超電導導体層で 100 mm、超電導シールド層で 120 mm である。事前に YBCO 線材を用いた素線接続モデルの抵抗測定を行った結果、素線の接続抵抗は最大で約 200 nΩ/m であった。よって、超電導導体層の各層の合成接続抵抗は約 14.3 nΩ/m (200/14)、超電導シールド層は約 4.7 nΩ/m (200/43) と推定できる。接続抵抗の推定値と 275 kV 系統の定常電流 3 kA_{rms} より、超電導導体層の各層の接続抵抗損失は約 0.32 W/m、超電導シールド層は約 0.35 W/m と算出できる。本報告では、接続抵抗損失を 1 倍、2 倍、3 倍としたときの伝熱特性解析を行った。また、交流損失 (導体層とシールド層でそれぞれ 0.15 W/m) と誘電損失 (0.5 W/m) も解析に組み込んだ。なお、交流損失と誘電損失は 275 kV 系統 YBCO 超電導電力ケーブルの設計目標値 (合計 0.8 W/m) より設定した。

3. 伝熱特性解析

伝熱特性解析は、式(3)の熱平衡方程式を 3 次元有限要素法により定式化した。境界条件として、ケーブルの最外層の表面が液体窒素 (77.3 K) に触れているとして、飽和液体窒素の非線形熱伝達特性を考慮した式(2)の熱伝達式を式(1)に代入した。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j \quad (1)$$

$$Q_q = h(T_s - T_b) \quad (2)$$

式(1)の ρ は密度、 c は定圧比熱、 k は熱伝導率、 Q_j は接続抵抗損失、交流損失と誘電損失を意味する。式(2)の Q_q は液体窒素の冷却で、 h は熱流束、 T_s はケーブル最外層の表面温度、 T_b は液体窒素温度を表す。

4. 結果と今後の予定

定常状態における超電導導体層と超電導シールド層の温度上昇の最大値と接続抵抗損失との関係を Fig.2 に示す。Fig.2 より、実測値から求めた接続抵抗損失において、超電導

導体層の温度上昇は約 0.37 K で、超電導シールド層は約 0.08 K であった。また実測値の 3 倍の接続抵抗損失を想定した場合において、超電導導体層の温度上昇は約 0.52 K で、超電導シールド層は約 0.1 K であった。本結果で得られた温度上昇は、定常運転に影響を及ぼすことが極めて低いと考えられる。

今後は、超電導接続部の過電流通電特性や中空フォーマモデルケーブルの定常伝熱特性について検討していく予定である。

Table.1 Specifications of 275 kV Class YBCO Power Cable

	Outer diameter (mm)
Copper former	21.7 (325 mm ²)
HTS conductor layer	26.8 (2 layers, 14 tapes/layer)
Insulation	75.3
HTS shield layer	75.8 (1 layer, 43 tapes)
Copper shield layer	82.2
Insulation	84.0

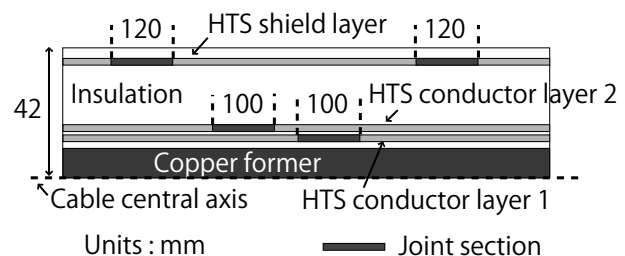


Fig.1 Joint Model

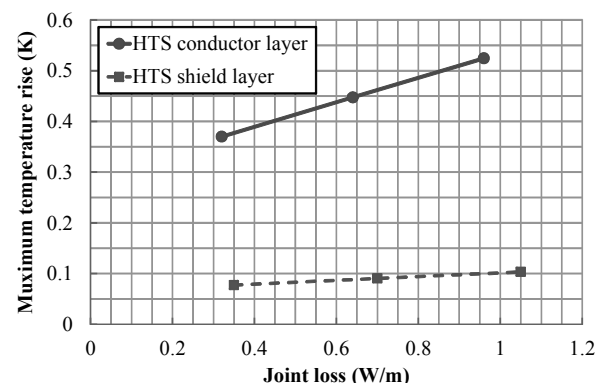


Fig. 2 Results of maximum temperature rise

参考文献

1. T. Uryu, X. Wang, A. Ishiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 80 (2009), p. 180
2. S. Sato, X. Wang, H. Ueda, A. Ishiyama, et al.: Physica C: Superconductivity, vol. 470 (2010), no. 20, pp.1572-1575

275kV 系統 YBCO 超電導ケーブルにおける過電流通電試験 Experiment on Over-current Characteristics of 275 kV YBCO Superconducting Power Cable

神谷 侑司, 王 旭東, 石山 敦士(早稲田大学);八木 正史(古河電気工業);丸山 修, 大熊 武(ISTEC-SRL)

Yuji Kamiya, Xudong Wang, Hiroshi Ueda, Atsushi Ishiyama (Waseda University);
Masashi Yagi (Furukawa Electric); Osamu Maruyama, Takeshi Ohkuma (ISTEC-SRL)
E-mail: y-kamiya@ruri.waseda.jp

1. はじめに

近年、電力需要の増加に伴い、電力輸送システムの拡充が急務となっている。超電導ケーブルは、電力輸送の高密度化と低損失化という特性を兼ね備えていることから、この課題を解決するのに最も適した解決策の一つである。275 kV 系統の電力ケーブルは最大で 63 kA_{rms}、0.6 s の短絡事故電流が通過する恐れがあり、超電導線材が劣化・焼損する恐れがある。そのため各素線に流れる短絡事故電流による線材の特性劣化や焼損しない電流の限界値を調査し、想定した事故電流に対する裕度を評価しておく必要がある。今回は 275kV 系統超電導ケーブルを模擬したモデルケーブルを製作し、液体窒素浸漬冷却下において過電流通電試験を行った。電流と温度に対して特性劣化までの裕度について調べ、また 30 回繰り返し通電を行い、経年劣化の可能性に関する調査も行ったので報告する。なお本研究は「リットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

2. 実験目的、実験装置、実験方法

本実験の目的は、構造を模擬したケーブル中で、かつ液体窒素浸漬冷却下という実用に近い条件の中で超電導線材がどのくらいの電流に耐えられるのかを確認することである。モデルケーブルの全長は 1 m であり、中心から銅フォーマ、超電導線材、絶縁層という構造になっている。超電導線材は直状に取り付けられており、実験は液体窒素浸漬冷却下において以下の手順で行った。

- (1)初期 I_{c0} (1 μ V/cm 基準) を測定
- (2)過電流のピーク値 I_{peak} を I_c 以上として通電
- (3) I_c を測定し、 I_c 劣化の有無を確認

今回の実験では、 I_c 測定時に ± 2 A 程度の誤差が含まれるため、2 A 以上の I_c 低下が観測されるまで交流過電流の I_{peak} を上げながら(2)、(3)の手順を繰り返した。経年劣化の調査では I_{peak} を固定して(2)、(3)の手順を 30 回繰り返した。実験で用いた過電流波形を Fig.1 に示す。

3. 実験結果

裕度測定試験の結果を Fig.2 に、経年劣化試験の結果を Fig.3 にそれぞれ示す。Fig.2 より 630A または 650A 通電後劣化が確認された。また Fig.3 より、 I_{peak} が 500A、575A の過電流を 30 回繰り返し通電しても劣化は見られなかった。

4. まとめと今後

裕度測定試験においては想定される事故電流の約 1.5 倍の過電流通電により劣化が確認された。また経年劣化試験においては想定される事故電流の 1.4 倍の過電流でも劣化は確認されなかった。今後は中間接続部を模擬したモデルケーブルにおいて同様の実験を行う予定である。

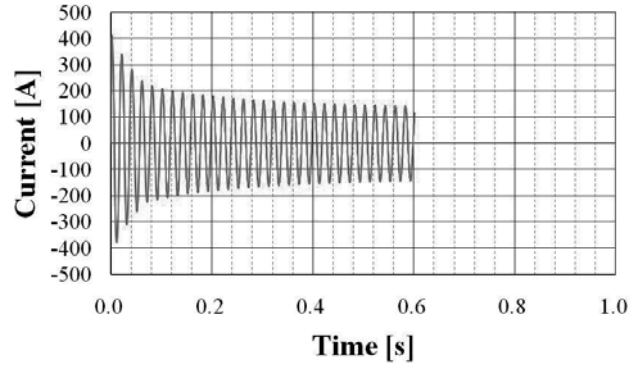


Fig.1 Over-current pulse used in experiment

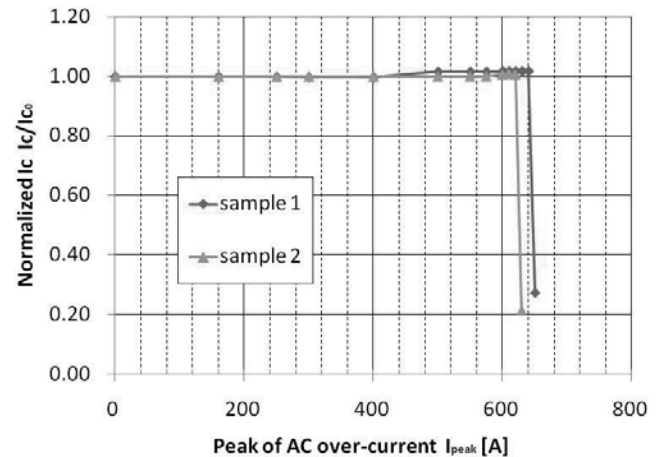


Fig.2 Experimental result of I_c/I_{c0} with AC over-current

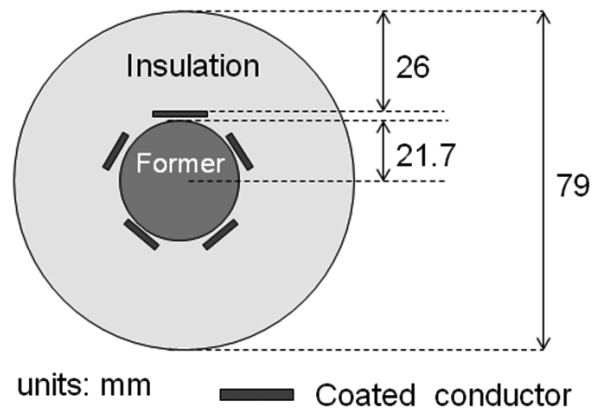


Fig. 3 Model cable

参考文献

1. Kentaro Kojima, WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi, et al: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.29

275 kV-3 kA YBCO 高温超電導ケーブルの交流損失低減 AC loss reduction of 275 kV-3 kA YBCO HTS Cable

八木 正史, 向山 晋一(古河電工); 雨宮 尚之(京都大); 青木 裕治(昭和電線); 齋藤 隆(フジクラ);
大熊 武, 丸山 修(超電導工研)

YAGI Masashi, MUKOYAMA Shinichi (Furukawa Electric); Amemiya Naoyuki (Kyoto Univ.);
AOKI Yuji (SWCC); SAITO Takashi (Fujikura); OHKUMA Takeshi, MARUYAMA Osamu (ISTEC-SRL)
E-mail: m-yagi@ch.furukawa.co.jp

1. はじめに

YBCO 線材を用いた高温超電導ケーブルの開発において、高電圧化・大容量化を指向し、ほぼ架空送電線の送電容量と同等の 1.5 GW の送電が可能な世界最大容量の 275 kV-3 kA 級の超電導ケーブルの開発を進めている[1,2]。このなかで、低損失化(交流損失と誘電損失を合わせて 0.8 W/m 以下)、コンパクト化(外径で 150 mm 以下)、過電流事故の耐性(63.0 kA-0.6 sec)を目標として設定した。今回の報告では交流損失の低損失化を検討し、その成果として、3 kA の交流送電で、0.235 W/m の世界最小の交流損失を達成したので報告する。

2. 超電導ケーブルの設計と作製

使用した YBCO 超電導線材の仕様は TFA-MOD の製法で作製した超電導線材で、幅 5 mm で、臨界電流(I_c)は約 150 A であった。この超電導線材を使って、作製した導体の仕様を Table 1 に示す。幅 5 mm の超電導線材をスパイラルに巻いて、2 層の超電導導体(5-C)を作製した。次に、低損失化のために I_c の落ちていると思われる線材の両側 1 mm をレーザで取り除いて 3 mm 幅にし、スパイラルに巻いて、2 層の超電導導体(3-C)を作製した。導体の外径は、5-C、3-C ともに 25.5 mm である。

3. 交流損失評価

Table 1 の超電導導体に対して、液体窒素の温度を変えて、 I_c (臨界電流)と交流損失を評価した。3-C の I_c は、77.3 K, 72.5 K, 70.0 K, 68.7 K でそれぞれ、4700 A, 6700 A, 8550 A, 9200 A となった。3 kA の交流損失は I_c が 8550 A, 9200 A のときでそれぞれ、0.297 W/m, 0.235 W/m と低損失な交流損失を確認した。Fig.1 には規格化した損失を示しており、Norris の strip モデル(線材間の相互作用を考えず、線材のみの損失の総和)よりも損失値が小さくなっている。これは、線材間のギャップ間を小さくする事で、垂直磁場がキャンセルされた効果と考えられる。また、Fig.1 で I_c が変化しても、損失を I_c で規格化するとほぼ同一になる。

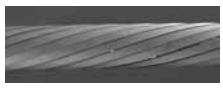
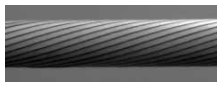
一方、5-C 導体の I_c は、77.3 K, 75.5 K, 73.0 K でそれぞれ、3860 A, 4530 A, 5550 A であり、 I_c で規格化した損失は特に低電流領域で、Norris の strip モデルから大きく乖離している。

Fig.1 には、線材の I_c 分布を考慮した交流損失の数値解析結果[3]を合わせて示しており、 I_c 分布をそれぞれ Fig.2 のように仮定して計算した。5 mm 幅線材では両端の 0.8 mm に I_c のスロープがある場合を想定し、細線化した 3 mm 幅線材では、細線化の際に、0.085 mm の I_c を失い、両端の 0.1 mm に I_c のスロープがある場合を想定した。数値解析は測定結果と良い一致を示している。このことから、端部 I_c の性能が交流損失に大きな影響を与えており、交流損失低下には、超電導線材の I_c の均一化を図る事が重要であることを見いだした。

4. 謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託により実施したものである。

Table 1 Specification of 2-layer HTS conductors

	5-C	3-C
YBCO tapes width	5 mm (original)	3 mm (after laser slitting)
Structure		
HTS Conductor	2-layer 1-layer: 14 tapes 2-layer: 14 tapes	2-layer 1-layer: 23 tapes 2-layer: 23 tapes
Outer diameter	25.5	25.5
I_c of the conductor	3860 A (77.3 K) 4530 A (75.5 K) 5550 A (73.0 K)	4700 A (77.3 K) 6700 A (72.5 K) 8550 A (70.0 K) 9200 A (68.7 K)
AC loss at 3 kA	1.56 W/m (73.0 K)	0.297 W/m (70.0 K) 0.235 W/m (68.7 K)
YBCO tape	TFA-MOD YBCO 1.5 μ m 5 mm width, I_c :150 A(300 A cm ⁻¹)	

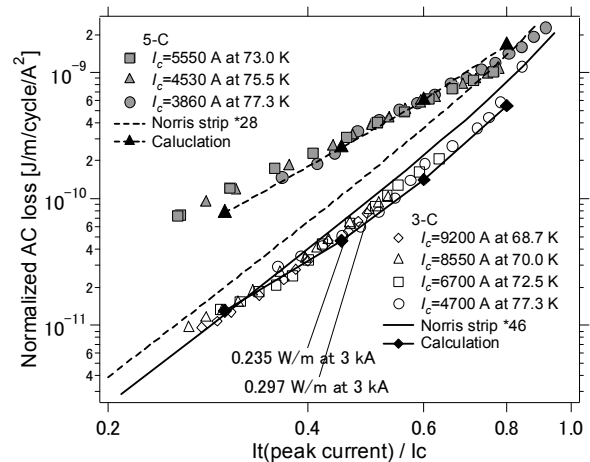


Fig.1 Normalized AC loss of 3-C and 5-C

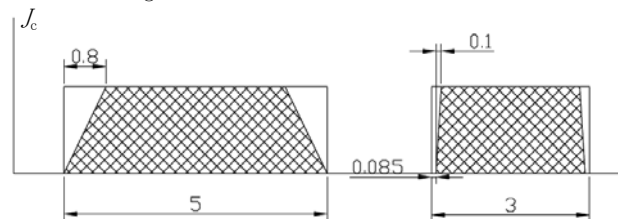


Fig.2 Lateral I_c distribution of YBCO tape for calculation

参考文献

1. M.Yagi, et al: Abstracts of CSJ Conference, vol. 81 p.26 (2009)
2. M.Yagi, et al: Abstracts of CSJ Conference, vol. 82 p.30 (2010)
3. N. Amemiya, et al: presented at ASC 2010, 4LY-02

スパイラル構造を考慮したイットリウム系 2 層超伝導ケーブルの交流損失計算

Ac loss calculation of two-layer cables comprising spirally-wound coated conductors

竹内 活徳, 雨宮 尚之, 中村 武恒(京大);大熊 武, 丸山 修(SRL)
 TAKEUCHI Katsutoku, AMEMIYA Naoyuki, NAKAMURA Taketsune (Kyoto University)
 ; OHKUMA Takeshi, MARUYAMA Osamu (SRL)
 E-mail: katsutoku@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

イットリウム系超伝導線の交流損失は、線材に侵入する磁束密度の線材面に対する垂直成分によって支配されている。超伝導ケーブルにおいては、垂直磁束密度成分のほとんどが線材間ギャップの近傍で発生する(ギャップ効果)が、ギャップ効果とケーブルのスパイラル構造を同時に考慮した解析はほとんど行われていない。今回、ケーブルの 3 次元(2D)モデルを構築し、ギャップ効果とスパイラル構造を考慮した解析を行い、従来のケーブル断面内の 2 次元(2D)モデルによる解析と比較した。

2. 解析対象の超伝導ケーブルの諸元

内層 17 本、外層 18 本の 4 mm 幅イットリウム系線材からなる、内層直径 25.0 mm 外層直径 25.8 mm の 2 層超伝導ケーブル(Cable A, B, C)を考えた。Table 1 に示すように、Cable A, B, C の順にスパイラルピッチが長くなる。まず、これらを、3D モデルを用いてケーブル形状を正確にモデリングし、解析を行った。次に 2D モデルを用いて解析を行ったが、2D モデルはケーブル断面内での解析であるため、長手方向のスパイラル構造を考慮できない。そこで、Table 1 に示すように、直径が同じ(25.0 mm/25.8 mm)となるように線材間ギャップと線材幅を同じ比率で拡大したモデルを考えた。

3. 解析結果と考察

交流損失の解析結果を Table 2 に示す。まず 3D モデルの解析結果を見ると、内層、外層ともに、スパイラルピッチの短いケーブルの方が損失は小さいことが分かる。この原因としては①線材間ギャップの変化②線材の円断面化が考えられる。

スパイラルピッチが短くなると、線材はケーブル断面に対して斜めに配置されるため、ケーブル断面に占める線材の幅が大きくなる。したがって、ケーブルの直径を一定に保つためには、スパイラルピッチが短くなるにつれて線材間ギャップを小さくしなければならない。このように、ギャップ幅が小さくなることによって損失が小さくなるということが①である。

また、線材は Fig. 1 に示すように、幅方向には平らであるが、長手方向には曲がっている。したがって、ケーブル断面で見ると、線材の断面は湾曲している。通電電流によって発生する磁束は、ケーブルの周りを円形状に流れるので、線材の湾曲が円に近付くほど、線材に侵入する垂直磁束密度成分が小さくなり、損失が減少する。これが②の効果である。

Table 2 に戻って、3D と 2D の損失を比較すると、スパイラルピッチが短くなるほど、3D と 2D の差が大きくなるのがわかる。2D モデルでは、ギャップ幅と線材幅を拡大することにより、①の効果は近似的に考慮できているが、②の効果は考慮できない。よって、スパイラルピッチが短くなるほど誤差が大きくなり、3D モデルとの差が大きくなったと考えられる。Fig.2 に 3D モデルで解析した外層の線材長手方向の損失密度分布と、対応する断面において 2D モデルで解析した損失密度を示す。損失密度においても、スパイラルピッチが短くなるほど 2D モデルの誤差が大きくなるのが分かる。

謝辞

本研究は、イットリウム系超伝導電力機器技術開発の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託のもと、国際超伝導産業技術研究センターとの共同研究として実施されたものである。

Table 1 Specifications of calculated cables

		Spiral pitch (m)		Gap (mm)		Width of C.C. (mm)	
		Inner/Outer	Inner/Outer	Inner/Outer	Inner/Outer		
Cable A	3D	0.4 / -0.2	0.58 / 0.21	4.00 / 4.00			
	2D	Infinity	0.59 / 0.23	4.08 / 4.32			
Cable B	3D	0.6 / -0.3	0.62 / 0.39	4.00 / 4.00			
	2D	Infinity	0.63 / 0.40	4.03 / 4.14			
Cable C	3D	0.8 / -0.4	0.64 / 0.45	4.00 / 4.00			
	2D	Infinity	0.64 / 0.46	4.02 / 4.08			

Table 2 Calculated ac losses of cables

		Ac loss(10 ⁻³ W/m)		
		Inner layer	Outer layer	Entire cable
Cable A	3D	24.5	19.4	43.9
	2D	22.3	33.8	56.2
Cable B	3D	25.1	39.2	64.4
	2D	22.5	46.0	68.5
Cable C	3D	25.4	46.9	72.3
	2D	22.6	49.3	71.9

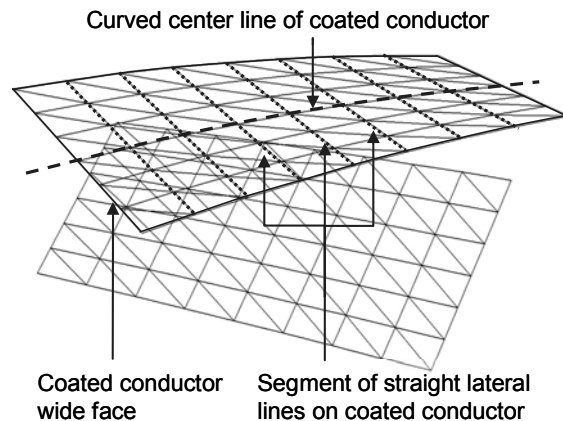


Fig.1 Coated conductor faces in a cable

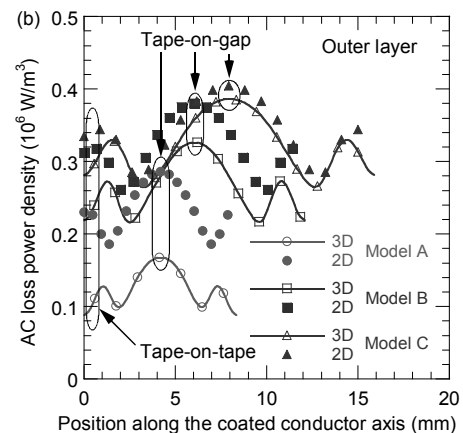


Fig.2 Distribution of ac loss density along the coated conductor axis in outer layer.

参考文献

1. K. Takeuchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.87

HTS ケーブルの過電流通電時の過渡熱安定性解析

Stability analysis of HTS power cable in a fault condition

我妻 洸, 古瀬 充穂, 淵野 修一郎 (産総研); 増田 孝人, 大屋 正義 (住友電工);
 本庄 昇一, 三村 智男, 野口 裕, 原 築志 (東京電力)

AGATSUMA Koh, FURUSE Mitsuho, FUCHINO Shuichiro (AIST); MASUDA Takato, OHYA Masayoshi (SED);
 HONJO Shoichi, MIMURA Tomoo, NOGUCHI Yu, HARA Tsukushi (TEPCO)
 E-mail: koh.agatsuma@aist.go.jp

1. はじめに

著者らは、短絡事故等による過電流が超電導ケーブルに流れた際の冷媒の挙動を解明するため、管路内で導体が加熱されたときのサブクール窒素の流れ方向の温度分布を計算する数値解析プログラムを作成した[1]。今回、NEDO「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」内で行われた、「30m 検証ケーブル短絡電流模擬試験」にあわせた数値解析を行い、試験結果と比較したので、結果を報告する。

2. 30m ケーブル短絡電流模擬試験概要と数値解析モデル

数値解析プログラムでは、図1に示すようなケーブル長手方向に分割された各要素間の伝熱を、一次元熱伝導方程式を解くことによって求める(変数の説明は省略する)。ケーブルコアからサブクール窒素への伝熱は Dittus-Boelter の関係式に従うとし、サブクール窒素の温度は Cryodata 社のソフトウェア GASPAC を用いて計算する。

解析対象である短絡電流模擬試験で使用された超電導ケーブルは、三心一括型、長さ30mで、図2に示すように途中に90度の曲げとジョイント部が設けられている。試験ではこのケーブルの2心に10kA・18.6sの過電流を通电し、ケーブル内の各所の温度変化を計測した。試験条件を表1に示す。これにあわせた数値解析モデルを構築し、超電導ケーブル内のサブクール窒素の温度分布の時間変化を計算した。

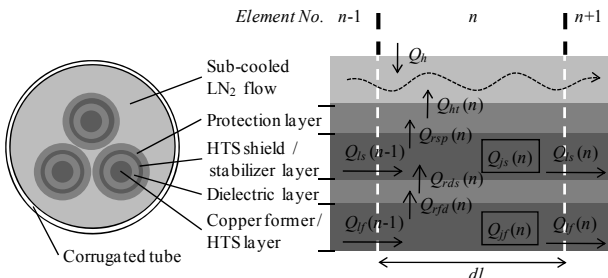


Fig. 1 Cable model used in numerical calculation.

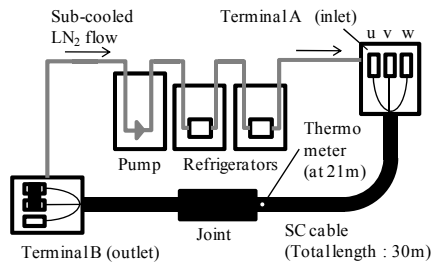


Fig. 2 Schematic of 30-m cable model

Table 1 Test conditions of over-current test

Average inner diameter of corrugated pipe	108 mm
Diameter of cable cores	45.6 mm
Temperature of LN ₂ at the inlet	74.5 K
Pressure of LN ₂ at the inlet	0.31 MPa
Flow speed of LN ₂ at the inlet	0.173 m/s
Heat load	2.5 W/m
Fault current / duration	10 kA / 18.6s

3. 数値解析結果と短絡電流模擬試験結果との比較

図3にサブクール窒素の長手方向温度分布の時間変化の計算結果を示す。ケーブル内を流れる冷媒(サブクール窒素)は、出口に向かって流れている間に、過電流通電により加熱されたケーブルコアにより暖められるため、下流に向かうに従って温度が高くなる。過電流通電終了後も、ケーブル入口から入ってくる新鮮な冷媒が到達するまでは、冷媒の温度は上昇を続ける。数値解析の結果では、過電流通電開始から約170秒後(新鮮な冷媒が出口に到達する時刻)にケーブル出口部の冷媒の温度が最高で79.3Kまで上昇した。またケーブル全長にわたって冷媒温度が初期温度に戻るまでに、約3000秒かかっている。図4は短絡電流模擬試験において入口から21mの位置に設置された温度計の指示値と、数値解析結果を比較したものである。数値解析では過電流通電直後に急峻な温度上昇があることを示しているが、試験では観測されなかった。これは温度計が設置された場所がケーブルジョイント部の近くであったため、その部分の熱容量の影響を受けたことと、数値解析に置いてケーブルコア内のPPLPの比熱を考慮していないことなどが原因と考えられる。しかしながら、その後の温度特性はよく合っており、数値解析は実際のケーブル内の冷媒の挙動をよく再現できていると言える。

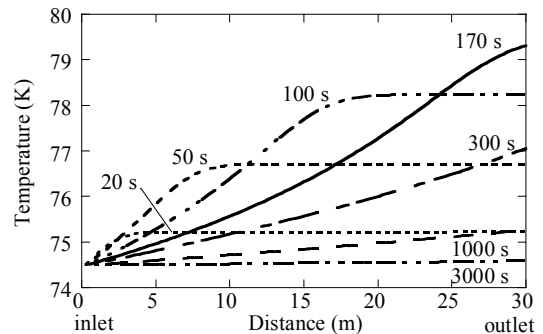


Fig. 3 Calculated temperature distribution of subcooled liquid nitrogen along the cable model.

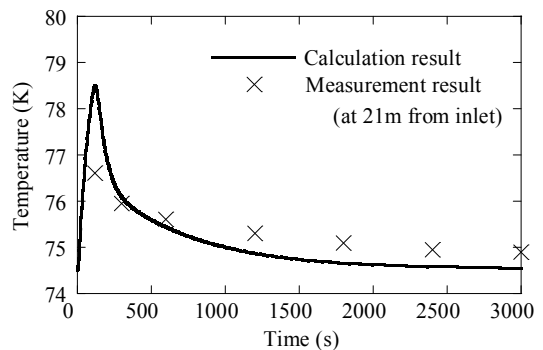


Fig. 4 Comparison of calculated and measured coolant temperatures.

参考文献

1. K. Agatsuma, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.33

Influence of damaged coated conductors on AC losses of superconducting power transmission cables

LI Quan (Kyoto University, University of Cambridge); AMEMIYA Naoyuki, TAKEUCHI Katsutoku, NAKAMURA Taketsune (Kyoto University); MARUYAMA Osamu, OHKUMA Takeshi (ISTEC)
E-mail: QL229@cam.ac.uk

1. Introduction

AC loss is one of the most important characteristics of superconducting power transmission cables for their introduction into power grid. Cables are composed of several tens of coated conductors, and there might be a damaged coated conductor among them; existence of a degraded section along a coated conductor may be more possible. Damaged coated conductors can cause distortion to magnetic fields and reduced capability of transporting power to cables, which consequently increase the entire AC losses. This paper presents a detailed analysis on the influence of damaged coated conductors on AC losses of superconducting power transmission cables. First, AC losses of cables with/without damaged coated conductors are calculated. The influence of damaged coated conductors is discussed. Second, the influence of location of damaged coated conductors is analyzed. Corresponding numerical results are presented and discussed.

2. Numerical results and analyses

All the AC losses are calculated with a numerical model employing 1D FEM [1]. As shown in Fig. 1, cables are constructed using 4 mm wide coated conductors with 2 μ m superconductor-thickness. The gaps between adjacent coated conductors are 0.36 mm wide. I_c of each coated conductor is 100 A. Damaged coated conductors do not carry any current and cables before and after damage carry the same transport current I_t . Detailed properties of cables are listed in Table 1.

Table 1. Properties of cables constructed

Number of layers	Number of coated conductors	I_c of cables (kA)		I_t of cables (kA)
		Before damage	After damage	
1	13	1.3	1.2	0.78
2	27	2.7	2.6	1.62
4	58	5.8	5.7	3.48
6	93	9.3	9.2	5.58

The numerical results presented in Fig. 2 show that AC losses increase in all cables after damage. Mono-layer cable is most affected by the damage, whereas 6-layer cable is slightly influenced. Cables not damaged but have the same I_c as damaged ones, which evenly distributes among all the coated conductors, are also presented in Fig. 2. The AC losses of these cables are higher than the undamaged ones, however much smaller than the damaged ones. This proves that damaged coated conductors have a significant influence on AC loss.

Fig. 3 shows the AC losses of cables with damaged coated

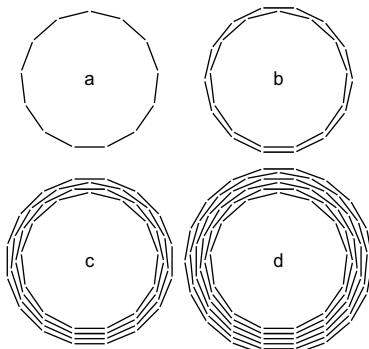


Fig. 1 Configurations of cables, (a) mono-layer, (b) 2-layer, (c) 4-layer and (d) 6-layer cables.

conductors located in different layers. Take 4-layer cable for instance, "1st layer damaged" means the damaged coated conductor is located in the 1st layer counting from inner layer. It is obtained that the location of damaged coated conductors has a subtle influence on AC loss comparing to the damage itself. Specifically, cables are more affected while the damaged coated conductor is located in the outer middle layer.

3. Conclusion

Damaged coated conductors have a significant influence on AC losses of superconducting power transmission cables. The influence weakens as the number of layers increases. Location of damage affects AC loss slightly.

This work is supported by the New Energy and Industrial Technology Development Organization in M-PACC project.

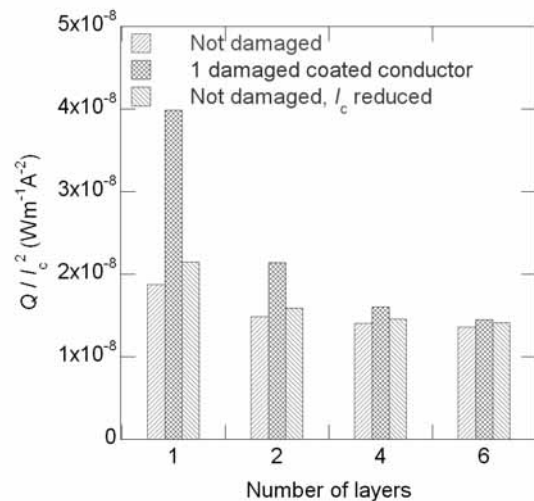


Fig. 2 Normalized AC losses of cables with/without damaged coated conductors and with reduced critical current.

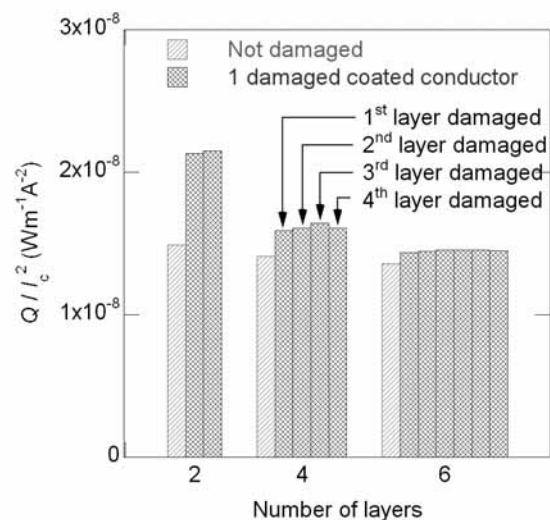


Fig. 3 Normalized AC losses of multi-layer cables with a damaged coated conductor in different layers.

References

1. Q. Li, N. Amemiya, etc: *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 23 (2010) 115003

66kV/5kA 級三心一括型薄膜高温超電導ケーブルの開発

Development of 66 kV/5 kA Class “3-in-One” HTS Cable with RE123 Wires

大屋 正義, 湯村 洋康, 増田 孝人(住友電工); 雨宮 尚之(京都大学); 丸山 修, 大熊 武(ISTEC-SRL)
 OHYA Masayoshi, YUMURA Hiroyasu, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries, Ltd);
 AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University); Osamu Maruyama, Takeshi Ohkuma (ISTEC-SRL)
 E-mail: ohya-masayoshi@sei.co.jp

1. はじめに

平成 20 年度より、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトがスタートし[1]、住友電工では薄膜超電導線を用いた 66kV/5kA 級三心一括型超電導ケーブルの開発を実施している。ケーブルの主要な開発目標は以下の通りである。

- ・ 定格容量: 66kV/5kA
- ・ 交流損失: 2W/m/ph@5kArms 以下
- ・ 短絡電流: 31.5kA、2 秒の過電流に対してダメージ無し
- ・ 外径: 150mm φ 管路へ収容可能

特に交流損失の低減が重要な課題であり、これまでに幅の異なる線材を用いた 3kA 級導体を試作し、交流損失特性への影響を評価した[2-3]。今回、上記試験結果を導体設計に反映した 5kA 級導体を新たに試作し、交流損失特性を評価したので、その結果について報告する。

2. 4 層導体の諸元

使用した薄膜線材の仕様を表 1 に示す。30mm 幅の Clad 基板[4]上に $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ の中間層を積層した後、 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ の超電導層を PLD 法により成膜したものである。上記線材は、Ag 安定化層をスパッタリングした後に 4mm 幅にスリットされ、全周に銅メッキを施してある。

試作したケーブル導体の諸元を表 2 に示す。FRP パイプ上に線材をスパイラル状に巻き付けた 4 層構造であり、各層のスパイラルピッチは、交流電流が均等に分流するように調整を行っている。なお、導体の有効長は 1.5m である。

69~80K における導体の臨界電流 (I_c) 測定結果を図 1 に示す。実測値は、使用した線材の I_c と J_c - B - T 特性を考慮した計算値と一致することを確認した。

Table1. Specifications of the RE123 wires.

Items	Details
Width (mm)	4.0
Thickness (mm)	0.17
Average I_c (A) at 77 K	150

Table2. Specifications of the HTS conductor.

Items	Details	Diameter (mm)
Former	FRP pipe	20
HTS Conductor	4 layers RE123 wires, 57 pcs	23

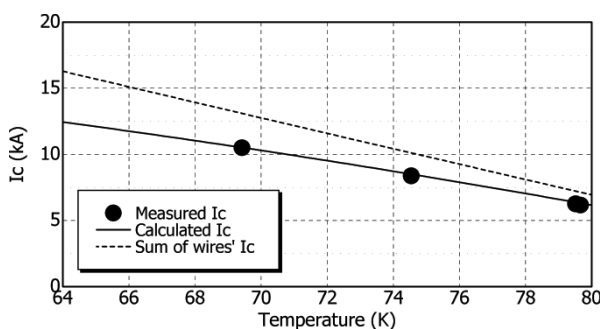


Fig.1 Measured I_c of the HTS conductor.

3. 交流損失測定結果

77K および 64K における交流損失測定結果を図 2 に示す。77K (実測 $I_c=7000\text{Adc}$) における損失値 $1.2\text{W/m}@3\text{kArms}$ に対し、冷媒温度の低下にもなって損失は減少し、64K (推定 $I_c=12400\text{Adc}$) において $0.22\text{W/m}@3\text{kArms}$ および $1.5\text{W/m}@5\text{kArms}$ の損失値を達成した。これまでに京都大学にて実施した数値シミュレーションの結果から、ケーブルコア全損失に占めるシールド層の損失の割合は 1/4 程度と想定しており、本試験結果からケーブルコア損失目標 $2\text{W/m/ph}@5\text{kArms}$ 達成の目処がたつた。

今後、最終目標達成に向けてシールド層を有するケーブルコアを試作し、 $2\text{W/m/ph}@5\text{kArms}$ の損失検証を行うとともに、平成 24 年度に予定している 15m ケーブルシステムの課通電試験に向けて、線材の要求仕様を決定し、ケーブルの最終設計を行っていく。

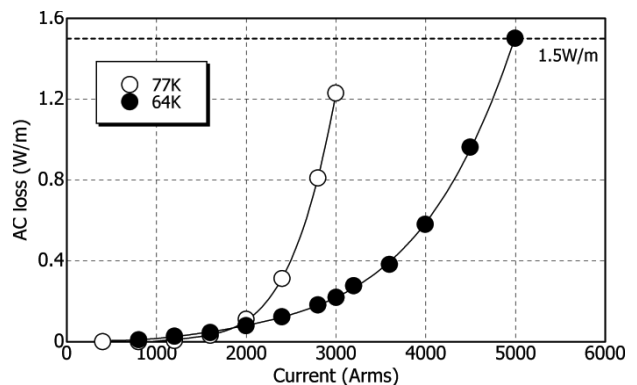


Fig.2 Measured AC loss of the HTS conductor.

4. さいごに

「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトにおいて、薄膜超電導線を用いた 66kV/5kA 級三心一括型超電導ケーブルの開発を実施している。本プロジェクトは 5 年計画の 3 年目を迎えており、ISTEC 及び大学との共同研究体制のもと、平成 22 年度中に大電流・低損失化等の要素技術開発を完了させるべく研究開発を行っている。今後、中間評価を経て、平成 23 年度に 15m 超電導ケーブルの製造、平成 24 年度にケーブルシステム長期課通電試験を予定しており、高密度・高効率な超電導電力送電技術の検証を行う。

謝辞

本研究は NEDO からの委託により実施したものである。

参考文献

1. N. Fujiwara, et al.: Abstracts of IEEJ Technical Meeting, (2009) Vol.5, p.183-184
2. M. Ohya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.27
3. M. Ohya, et al.: submitted to Applied Superconductivity Conference 2010
4. K. Ohki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.114

KEPCO HTS 電力ケーブルの実系統設置 Installation of KEPCO HTS power cable in real grid

梁 炯哲, 孫 松縞, 林 志炫, 吳 承烈, 黃 時昱 (KEPRI)

YANG Hyung Suk, SOHN Song Ho, Lim Ji Hyun, Oh Seung-Ryle, HWANG Si Dole (KEPRI)

E-mail: yanghs@kepri.re.kr

1. はじめに

韓国電力では、2006 年超伝導ケーブルシステムを韓国電力実証試験センターに設置して[1]超伝導ケーブル(22.9kV 級)の実系統適用の可能性と運用技術の確立のための研究を行ってきた[2]。主な試験アイテムは熱負荷試験、初期冷却及び熱サイクル試験(10 回)、臨界電流測定試験、1 ヶ月以上長期定格通電試験及び日負荷変動通電試験、3 相不平衡通電試験などをあげられる。10,000 時間を越える運転時間を経て実系統設置の可能性を確認し[3, 4]、今回実系統設置を行っている。本研究では、超伝導ケーブルの韓国での初の実系統設置結果について発表する。

2. 超伝導ケーブル設置

設置する超伝導ケーブルシステムは図 1 に示したような 3 相 1 クライオスタット形の 22.9 kV, 50MVA, 500 m 級で、製作及び設置は LS 電線で担当した。超伝導ケーブルのレイアウト図を図 2 に示す。本レイアウトは超伝導ケーブルの実際の系統の中に設置時、ありうる設置状況を想定し、設置時の施工上及び運転上の問題点などについて調べるためオプセット部、立ち上がり部、立下り部、曲がり部、地中埋設の管路などで構成した。



Fig. 1 Photograph of 3 phases 1 cryostat HTS cable.

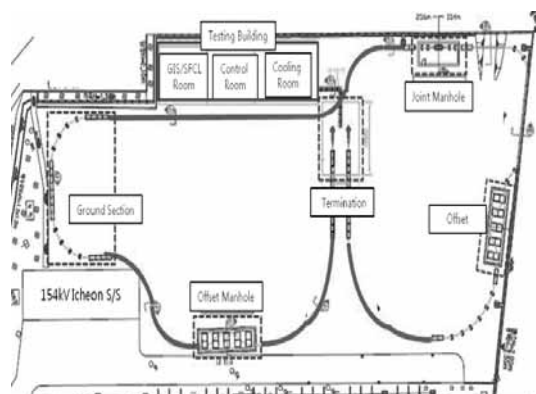


Fig. 2 KEPCO HTS cable layout.

3. 冷却システム

冷却システムの概略図を図 3 に示す。冷却は過冷却液体窒素循環冷却方式で、減圧冷却システムと過冷却液体窒素循環システムで構成されている。本システムでは冷凍機を使わずにサブクーラーの中の液体窒素を減圧する方法で運転温度に冷却する方式を採用して運転中周期的な液体窒素の供給が必要なシステムである。超伝導ケーブルシステムはサブクーラーで運転温度に冷却された過冷却液体窒素が端末、超伝導ケーブル、端末を冷却し、循環ポンプユニットに戻って来て再び、サブクーラーで冷却されるルートで循環冷却される。

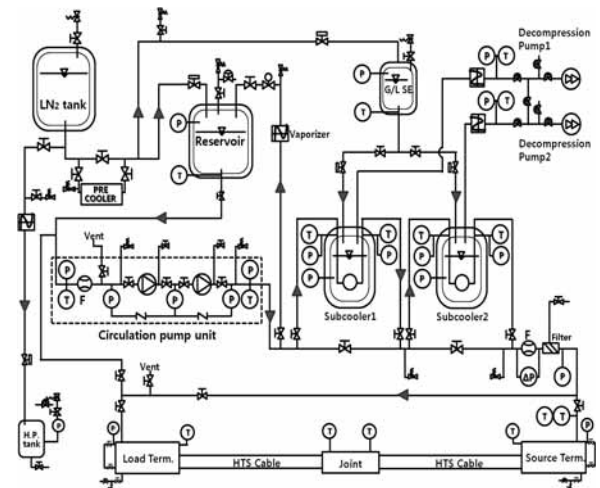


Fig. 3 P&I diagram of the cooling system for the KEPCO HTS cable. T; temperature sensors, P; pressure transducers, F; flow meters.

This work was partially supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), an agency of the Korean government Ministry of Knowledge Economy (MKE).

参考文献

1. S.H. Sohn, et al.: IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol. 17 (2007) pp. 2043~2046
2. H.S. Yang, et al.: IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol. 20 (2010) pp. 1292~1295
3. H.S. Yang, et al.: Adv. in Cryo. Eng., Vol. 53 (2008) pp. 1067~1072
4. J.H. Lim, et al.: Physica C 470 (2010) pp. 1597 ~ 1600

200m 級超伝導直流送電ケーブル実験装置(CASER-2)の今までの実験経緯と今後の予定

Experiment of superconducting DC transmission test device of CASER-2 and its future plan

山口 作太郎, 福田 真治, 杉野 慎, 山田 秀貴, ユーリー・イワノフ, 孫 建, 芳村 幸治, 浜辺 誠, 渡邊 裕文, 河原 敏男
(中部大)

YAMAGUCHI Satarou, FUKUDA Shinji, SUGINO Makoto, YAMADA Hideki, SUN Jian, IVANOV Yury, YOSHIMURA Kouji,
HAMABE Makoto, WATANABE Hirofumi, KAWAHARA Toshio (Chubu Univ.)

E-mail: yamax@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

中部大学では直流超伝導送配電システムの実用化を目指して 20m 級超伝導直流送電ケーブル装置に引き続き、200m 級超伝導直流送電ケーブルの実験装置を建設した。200m ケーブル実験装置は、2010 年 1 月より 3 月まで実験を行った。本年度に入り、8 月から 10 月まで同様に実験を行った。本発表では、実験方針及びこれまでの経緯をまとめると同時に、今後の予定について述べる。

2. 装置・実験の基本方針及び実験結果

装置建設で最初に考慮したのは超伝導ケーブルの熱収縮についてである。200m 長では熱収縮が 600mm 程度と推測されることや、熱応力が超伝導テープ線材にかかることと臨界電流が低下するなどの報告されているからである。このため、ケーブル両端は固定しないで、ケーブル両端末のクライオスタットを可動式にして、ケーブル長に合わせて移動させる構造にした。このために、ケーブルを納める断熱 2 重管と端末クライオスタットの間にダイナミックベローズを挿入している。Table 1 は建設後、2 回の冷却・昇温時のダイナミックベローズの長さを示した。建設直後をゼロとし、マイナスは収縮、プラスは伸張を示す。第 1 回目の冷却では Cryo-A 側から液体窒素を導入して冷却を行った。2 台のクライオスタットが合計で 525mm 短くなった。600mm との差はケーブルが断熱 2 重管内で移動したと考えている。その後、昇温したが完全には元に戻らないので、配管内部で螺旋状になっていることが想定された。このため、X 線透過写真を撮った。Fig. 1 にそれを示す。これらの写真からケーブルが内管内で螺旋状になり、このため短くなっていることが確かめられた。これが昇温後もクライオスタットの位置が完全に元に戻らなかった原因である。現在までの 2 回目の冷却と昇温が行った結果を Table 1 に示しているが、これからケーブルは毎回同じように移動しているわけではない。しかし、その差は全体の長さの 0.05% 程度である。尚、2 回目の冷却も冷媒は Cryo-A 側から行った。また、ケーブルはクライオスタットに固定されていないため、数 cm の「遊び」がある。

次に考慮したのは、断熱 2 重管の真空排気である。長尺の真空容器であるため、ベーキングができない。今後 km 級以上の長さになればベーキングは全く使えない。高真空に排気することは断熱 2 重管の熱侵入量を低減するので、ベーキングを行わないで高真空を達成することは極めて重要な課題である。幸い 2 回目の真空排気では 10^{-4} Pa まで到達した。複数の文献によると、 10^{-4} Pa 程度の真空度で熱侵入量はほぼ飽和するため、方法的に十分なレベルに到達したと考えている。今後は高真空の長期間保持は重要な課題である。詳しい発表は本講演会で渡邊(1P-p16)が行う。

次ぎの課題は冷媒循環である。循環動力を低減するために断熱 2 重管の内管は直管とベローズ管から構成した。全長の 98% は直管である。ベローズ管は熱収縮を吸収するために利用し、内管全体は外管に支持材を通じて固定している。このような場合には流体力学の半経験式を利用して圧力損失などを見積もることができる。実験データと設計値との精密な

比較が可能である。詳しい発表は本講演会でイワノフ(1P-p13)より行われる。

次の課題は端末からの熱侵入低減である。中部大では長年ペルチェ電流リード(PCL)の研究を進めてきた。このため、実用化研究を進めるために、今回半分の PCL を実際に適用できる形で企業が製作し実験に供した。詳しい発表は本講演会で河原(1C-a09)から行われる。

次の課題は電力貯蔵である。大電流送電は原理的に大きな電力貯蔵が可能であるため、送電線が持つインダクタンスは重要なパラメータである。これについては、本講演会で浜辺(1P-p43)が詳しい発表を行う。更に、本講演会では孫建(1P-p39)から大電流用直流超伝導ケーブル設計についての基礎実験結果について発表する。また、杉野(1P-p17)から断熱 2 重管の熱侵入測定についての発表を行う。以上以外の研究課題も鋭意開発を進める予定である。

3. 今後の予定

今後は上記課題の解決や性能向上を行うと同時に、パワーレ、直流遮断器、電力網への組み込みなどの検討項目があり、現在準備を行っている新しいアイデアを試す。

Table 1 Positions of Two Terminal Cryostats

	Cryo-A [mm]	Cryo-B [mm]
After construction	0.0	0.0
1 st cooling down	-157	-368
1 st temperature rise ¹⁾	+32.5	-234
2 nd cooling down	-162	-294
2 nd temperature rise	+7	-100

[単位 mm]

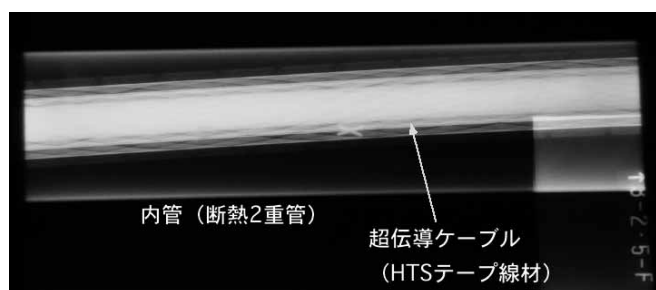


Fig. 1 X-ray photo in room-temperature

参考文献

S. Yamaguchi, et al.: "Design and construction of 200-meter high temperature superconducting DC power cable test facility in Chubu University", ICEC23/ICMC2010, Poland.

巻き戻し構造を持つ変圧器型超電導限流器の模擬系統限流実験 — 有負荷下自己復帰動作 —

Current limiting characteristics of transformer type SCFCL of rewound structure using BSCCO wire in model power system -recovery under load-

野田 翔, 小田 さや香, 白井 康之(京都大学); 馬場 旬平, 森 政人, 服部 圭佑(東京大学)
 NODA Sho, ODA Sayaka, SHIRAI Yasuyuki (Kyoto University); BABA Junpei, MORI Masato, HATTORI Keisuke (The University of Tokyo)
 E-mail: noda@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

本研究では巻き戻し構造を持つ変圧器型 SCFCL のモデル装置を作成し、模擬電力系統で実験を行った。変圧器型 SCFCL では、巻き戻し構造を採用することによってより良好な限流特性を得る事が出来る。これまでの実験によりモデル装置により発電機の出力を安定させる効果を確認している[1]。本発表では、モデル装置の有負荷下での復帰特性及び復帰後の限流特性について報告する。

2. 巻き戻し構造

巻き戻しコイルは二つのコイルを同方向に巻き、互いに接続したものである⁽¹⁾。一次コイルは系統へ接続し、二次コイルは短絡した。この構造は、二次側コイルのインダクタンスを小さく、且つ大きな抵抗を得ることが可能であり、これによってより良好な限流特性を得る事が出来る。モデル装置のインダクタンスを Table1 に示す。

Table 1. Inductance of the proposed transformer type SCFCL having rewound structure.

	Primary coil	Secondary coil
Inner coil	779	89
Outer coil	554	70
Connected Inner and Outer coils (rewound coil)	238	37
Mutual inductance	72.9	

Unit: μ H

3. 実験方法

Fig.1 は一機二回線模擬送電系統で、FCL は発電機端に設置した。一回線の発電機母線至近端での一線地絡事故を模擬した。事故は約 2s の間隔で連続して二回発生させ、限流特性を比較した。事故を模擬したスイッチシーケンスを Fig.2 に示す。発電機は事故中も一回線で継続して送電する。FCL は事故相にのみ設置し、他相には限流器の待機時リアクタンスと同等のリアクトルを挿入し三相平衡をとった。

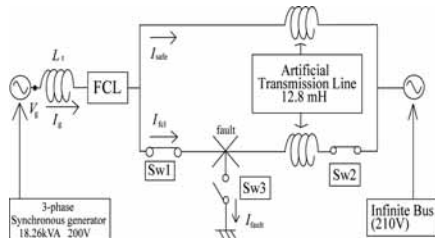


Fig.1 Experimental circuit

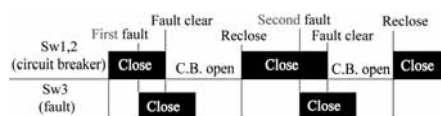


Fig.2 Switch sequence

4. 実験結果

地絡事故中の FCL の二次コイル電流 I_2 、FCL 電流 I_{fcl} 、FCL 電圧 V_{fcl} を Fig.3 に示す。これは 0s において事故が発生し、限流動作をした後に、有負荷下で自己復帰して 2 回目の事故時に限流動作している事を示している。1 回目と 2 回目の事故時の動作特性を比較するため Fig.3 を拡大したものを Fig.4 に示す。1 回目と 2 回目の事故発生時の位相は異なっている。事故電流の大きさは事故が発生した際の位相にも依存するため厳密な比較はできないが、Fig.4 より 1 回目と 2 回目の波形やその大きさが同程度であることが確認できる。また、一回目の事故後(Fault Clear 直後)に V_{fcl} が 0 となっている事が分かる。これらより、FCL が 1 回目の事故後に待機状態に復帰し、2 回目の事故を限流している事が分かる。

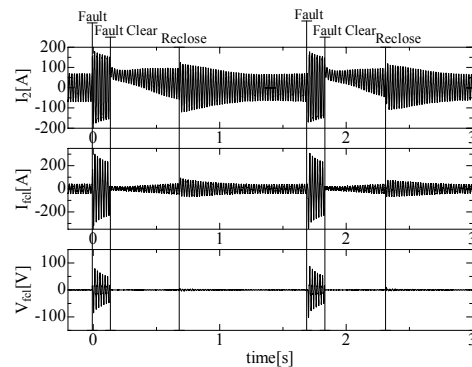


Fig.3 Secondary current, current and voltage of SCFCL

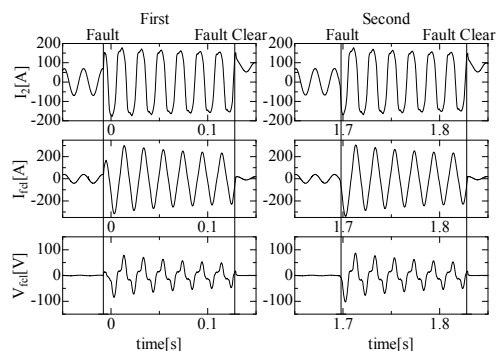


Fig.4 Waves of the SCFCL in the first and second fault

5. まとめ

SCFCL は有負荷下において自己復帰(RUL)し、2 回の連続した事故でも期待通りの限流動作を行った。

参考文献

1. S. Oda, et al.: The Papers of Technical Meeting on Application of superconductivity, IEE Japan, (2010) p.25