

交流横磁界下における積層導体で巻線された高温超伝導コイルの交流損失測定

AC Loss Measurement of HTS Coils Wound with Stacked Conductors under Transverse Magnetic Field

平山 斎, 川畑 秋馬 (鹿児島大)

HIRAYAMA Tadashi, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)

E-mail: hirayama@eee.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

本研究では、積層導体で巻線された高温超伝導コイルの交流損失特性を明らかにすることを目的とし、そのために様々な外部横磁界印加条件下における Bi-2223 サンプルコイルの交流損失を測定し、磁化損失と結合損失を評価した。また、交流損失の測定値は理論値と比較し、得られた結果をもとに、積層導体で巻線された高温超伝導コイルの交流損失特性について議論した。

2. サンプルコイル

サンプルコイルの外観を Fig. 1 に示す。サンプルコイルの作製には、Bi-2223 テープ線材を用いた。この線材の臨界電流は 77 K で 116 A である。線材の断面寸法は 4.1 mm × 0.21 mm であり、フィラメントはツイストされていない。この Bi-2223 線材 2 枚を積層して導体を作製した。Fig. 1(a) に示すように、積層導体の線材間に 0.7 mm のスペーサを挿入することで、積層導体の線材間に鎖交する磁束を増やし、意図的に大きな結合損失を発生するようにした。積層導体をソレノイド形状に巻線して要素コイルを作製し、Fig. 1(b) に示すように 2 つの要素コイルを軸方向に配置したものをサンプルコイルとした。要素コイルのターン数は 7 層 21 ターンである。サンプルコイルは、上側と下側の要素コイルの接続時に、積層導体の内側の線材と外側の線材を入れ替えることで転位を施した。

3. 実験方法

Fig. 2 に示すように、サンプルコイルを外部磁界印加用 Cu マグネット内に配置後、交流横磁界をサンプルコイルに印加して、液体窒素蒸発法[1]により交流損失を測定した。ここでは、転位を施したサンプルコイルが正規の位置からずれた場合の交流損失特性への影響について調べた。Fig. 2(a) はコイルをマグネット中心に配置した場合、Fig. 2(b) はマグネット中心から 50 mm 上方に移動させた場合のコイル周辺の磁界分布を示したものである。サンプルコイルをマグネット中心の位置に配置した場合、上下の要素コイルに鎖交する磁束は打ち消される。しかし、サンプルコイルの配置位置が正規の位置からずれた場合、鎖交磁束は完全には打ち消されないため、2枚の線材とコイル両端部分の接続部で形成される閉ループに遮蔽電流が流れ、接続部で付加的な結合損失が発生することになる。なお、Fig. 2(b) の場合は、結合損失を容易に測定できるように要素コイル間の距離を 20 mm 広げて測定した。

4. 測定結果

Fig. 3 に交流損失の測定結果を示す。図中の 4 種類の線は、交流損失の計算値を示している。破線は磁化損失、一点鎖線は結合損失、実線は結合損失と磁化損失の和を表している。また、点線はサンプルコイルが正規の配置位置であるマグネットの中心にあるときの磁化損失の計算値である。サンプルコイルの配置位置が正規位置からずれていないとき、結合損失はほとんど発生していない。それゆえ交流損失の測定値は磁化損失の計算値とよく一致している。一方、サンプルコイルの配置位置が正規位置からずれたとき、磁化損失の値は小さくなっている。これは、上側の要素コイルでの垂直磁界成分による磁化損失がコイルの上方への移動によって増加するが、上側の要素コイルでは平行磁界成分による磁化損失が

支配的であり、その損失成分が減少するため磁化損失全体としては小さくなっていることに因る。また、2 つのコイル間の鎖交磁束は、コイルの上方への移動により完全に打ち消されないため結合損失が発生し、サンプルコイルの全損失は増加することが確認できた。さらに、測定値と計算値がおよそ一致しているため、結合損失は積層導体とコイル両端の接続部で形成される閉ループのインダクタンスと接続部の抵抗を得ることにより見積もることができることがわかった。

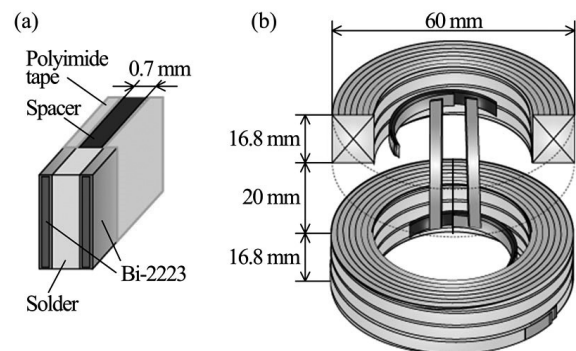


Fig. 1 Overview of the sample coil. (a) stacked conductor, (b) sample coil with transposition

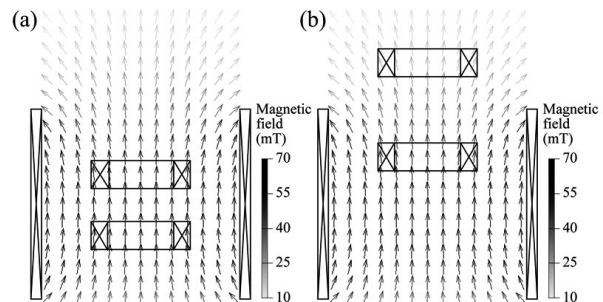


Fig. 2 The magnetic field distributions around the sample coil. (a) normal position, (b) 50 mm movement to the upper side

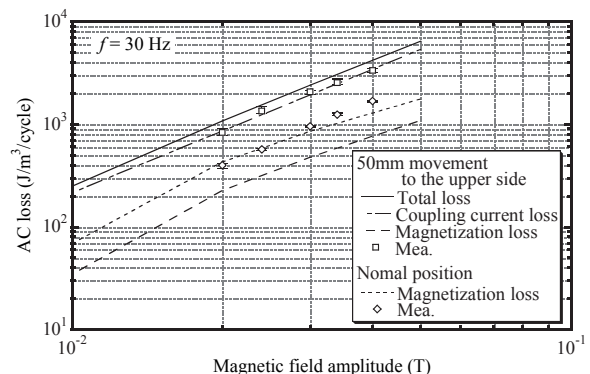


Fig. 3. Measured results of AC loss in the coil under the inhomogeneous magnetic field distributions

参考文献

1. R. Motomura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.157

**ポインティングベクトル法を用いた
ソレノイドコイル形状 HTS 線材の交流損失測定 2**
-交流斜め磁界と交流輸送電流の同時掃引時の交流損失特性-
**AC loss measurements of HTS tapes formed into a solenoidal coil
by using poynting's vector method 2 -AC loss properties
under simultaneous application of AC current and AC spread magnetic fields-**

古川 匡玄, 帯田 啓太, 川越 明史 (鹿児島大・工)
 FURUKAWA Masaharu, KEITA Obita, KAWAGOE Akifumi (Kagoshima University)
 E-mail: k4419353@kadai.jp

1. はじめに

高温超伝導線材で発生する交流損失は機器の効率を低減させる。このため、実機の条件下で交流損失を精度良く測定し、その特性を定量的に明らかにすることが重要である。そこで我々は、交流外部磁界と交流輸送電流について制約条件の少ないポインティングベクトル法を応用し、ソレノイドコイル形状にした長尺線材の交流損失測定装置を開発している[1]。これまでに、Bi-2223 多芯テープ線材の試料コイルに、交流輸送電流のみ、コイル軸方向成分の交流外部磁界のみ、そしてこれらを同時に印加した時の 3 つの場合において、実験と理論の両面から、本測定装置の有効性を実証した[2-3]。さらに、改良した本測定装置を用いてテープ面に対し、斜めに印加される磁界の中で交流損失測定を行い、その有効性を示した。したがって今回、改良型測定装置を用いて交流斜め磁界と交流輸送電流を同時に印加した同時掃引時の交流損失測定を行ったので、その結果について報告する。

2. 測定原理と本測定装置

ポインティングベクトル法では、電界測定用ポテンシャルリードと磁界測定用ピックアップコイルを用いて局所的な電界と磁界を測定し、それらの外積からポインティングベクトルを求める。ポインティングベクトルを線材周囲の複数の点で測定し、その値を線材周囲の面で面積積分することにより交流損失を求めている。

今回の測定で用いたサンプルコイルは、幅 4.2mm、厚み 0.22mm の銀シース Bi-2223 多芯テープ線材を 10mm ピッチで 1 層×12 ターン巻線した直径 90mm、高さ 132mm の単層疎巻きソレノイドコイルである。コイル形状でのサンプルの臨界電流 I_c は 115A で n 値は 22.7 である。

3. Bi-2223 長尺多芯テープ線材を用いた交流損失測定

サンプルコイルに流す電流は、交流外部磁界と同相の交流電流とし、電流値はサンプルコイルの I_c の 0%, 12% とした。また、交流外部磁界は 4~30mT_{0p}、印加角度はコイル軸方向に対して 20~30 度、周波数 30Hz とした。測定は全て液体窒素中で行った。

Fig.1 に交流輸送電流と交流外部磁界を同時掃引した時の交流損失特性を示す。横軸は外部印加磁界のピーク値、縦軸は交流損失を表している。プロットが測定値で、実線や破線は磁界のみ印加した時の理論値を示している。Fig.1 の黒塗りプロットは外部磁界のみを印加した場合で、白抜きプロットは交流斜め磁界と交流輸送電流を同時に印加した場合の測定結果である。測定結果より、高磁界中では交流斜め磁界のみ印加した時の測定値と変わらない結果が得られた。低磁界中では交流輸送電流による影響が表れたため、交流外部斜め磁界のみ印加した時と比べて 2 倍以上大きな値となっている。高磁界中では、通電電流の影響は小さく、これまでの

研究結果と矛盾しない。

4. まとめ

ポインティングベクトル法を応用したコイル形状の長尺超伝導線材の交流損失測定装置を改良した。交流斜め磁界と交流輸送電流の同時掃引時において測定した結果より、本測定装置の有効性を示した。

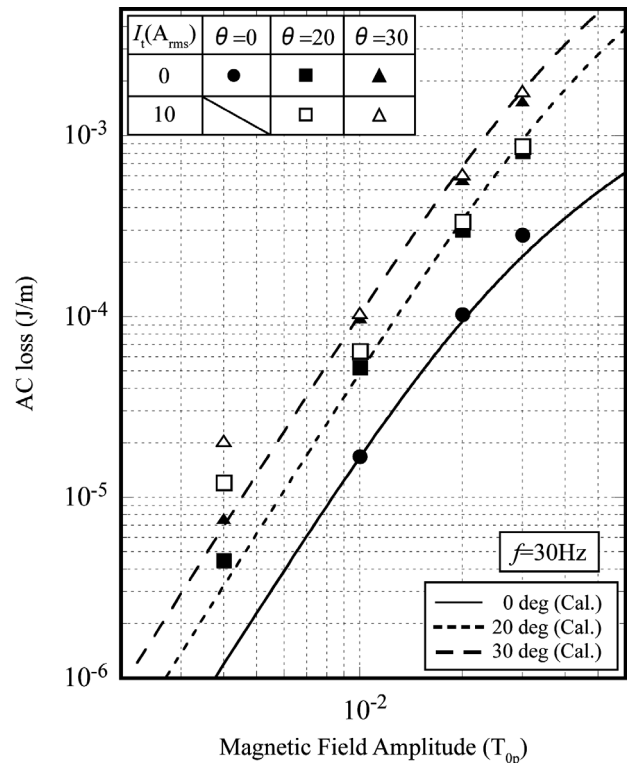


Fig.1 AC loss properties in case of simultaneous application of ac transport current and external ac spread magnetic field.

参考文献

- [1] Y. Kasahara, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 14 (2004) 1078
- [2] Y. Haeyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84(2011) P. 38
- [3] M. Mukai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) P. 156

ポインティングベクトル法を用いた高温超伝導コイルの交流損失測定

The measurement of ac losses in high temperature superconducting coils by using poynting's vector method

樋口 英輝、松藤 直樹、川越 明史 (鹿児島大学・工)

HIGUCHI Hideki, MATSUFUJI Naoki, KAWAGOE Akifumi, (Kagoshima University)

E-mail:k3686240@kadai.jp

1. はじめに

超伝導応用機器の実用化のためには、使用する超伝導コイルの交流損失特性を詳細に把握することが重要である。我々は、交流損失の測定法として制約条件が少ないポインティングベクトル法を提案している。これまでに短尺直線試料やコイル形状の長尺試料の交流損失測定装置を開発し、その有効性を実証している[1][2]。本研究では、ポインティングベクトル法を応用した超伝導コイルの損失測定法を提案する。

本測定法では、超伝導コイル全体の損失だけでなく、複数のコイルを組み合わせた複合コイルの一部の損失を測定することもできる。Bi-2223 多芯テープ線材で作製した超伝導コイルを試料コイルとして、液体窒素中で通電時の交流損失を測定し、本測定法の有効性を実証した。

2. 測定原理

ポインティングベクトル法(以下 PV 法と記す)では電界測定用ポテンシャルリードと磁界測定用ピックアップコイルを用いて電界と磁界を測定し、その外積からポインティングベクトルを求める。本測定法では、Fig. 1(a)に示すように被測定コイルの周囲を取り囲む、内側、外側、上下のそれぞれの面でポインティングベクトルを測定する。それらの結果から交流損失を求めることができる。それぞれの測定面で電界・磁界を測定するために、Fig. 1(b)に示すように測定素子を配置する。内側と外側に設置した測定素子対では、周方向電界と軸方向磁界を、上下に設置した測定素子対では、周方向電界と周方向磁界を測定する。

3. 実験

今回は、次の二点を確かめるための実験を行った。本測定法で超伝導コイルの交流損失が正確に測定できるかどうかと、組合せコイルの一部のコイルの交流損失の測定ができるかどうかである。前者の実験では、サンプルコイルに交流電流を流したときの交流損失を測定した。後者の実験では、組合せコイルを模擬して、サンプルコイルの内側に円柱形 Cu バルクを入れた状態でサンプルコイルに交流電流を流して測定を行った。いずれの場合も、四端子法と PV 法の両方で測定した。前者の実験の場合、四端子法でも正確に測定できるが、後者の場合四端子法ではサンプルコイルのみの損失は測定できない。

実験に用いたサンプルコイルは、幅 4.2 mm、厚み 0.2 mm の Bi-2223 多芯線テープ状線材で作製した 1 層 1 ターンのリング状コイルとした。サンプルコイルの臨界電流は 114 A であり n 値は 14.3 である。測定は液体窒素中で行った。15 Arms から 30 Arms までの交流電流を 50Hz~100Hz で通電し、交流損失を測定した。

測定結果を Fig. 2 に示す。円柱形 Cu バルク有りの四端子法による測定結果以外には周波数依存性が観測されなかったため、100Hz のデータのみプロットしている。横軸は通電電流、縦軸は測定値である。□と◇は、それぞれ四端子法と PV 法によるデータを示す。また黒塗りりと白塗りりは、それぞれ円柱形 Cu バルク有りと無しを示す。白塗りの円柱形 Cu バルク無しデータのデータを見ると、四端子法と PV 法の測定結果がよく一致している。このことから、PV 法でサンプルコイルの交流損失が正確に測定できていることがわかる。次に、黒塗りの

円柱形 Cu バルク有りのデータをみると、四端子法の測定データは、バルク無しデータのデータよりも大きくなっていることがわかる。これは、四端子法による測定データには、サンプルコイルの交流損失だけでなく、円柱形 Cu バルクの渦電流損失も含まれるからである。このため、このデータには周波数依存性も観測されていた。一方、PV 法による測定データは、円柱形 Cu バルクの有無による測定データは変化しておらず、サンプルコイルのみの交流損失が測定できていることがわかる。このことは、PV 法により、組合せコイルの一部のコイルの交流損失の測定が可能であることを示している。

4. まとめ

ポインティングベクトル法を用いた超伝導コイルの交流損失測定法を提案し、本測定法でコイル全体の交流損失を測定できること、また、組み合わせコイルの一部のコイルの損失だけを測定できることを実験的に示した。

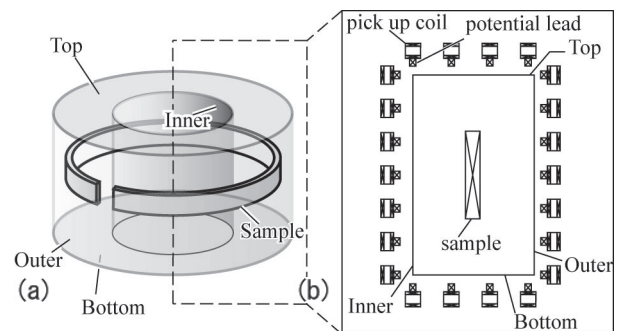


Fig.1 Principle of the measuring method, (a) measuring area, (b) array of pick up coils and potential leads.

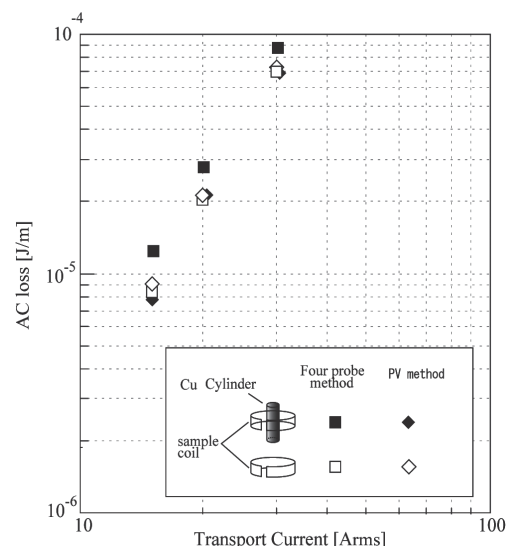


Fig.2 Experimental result.

参考文献

- [1] H. Sakuda, et al. : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p. 155
- [2] M. Mukai, et al. : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p. 156

6素線及び10素線からなる高温超伝導 Roebel ケーブルの磁化損失の実験的比較

Experimental comparison of magnetization losses in HTS Roebel cables consisting of six strands and ten strands

米田 宇志, 雨宮 尚之, 中村 武恒(京大); 姜 哲男, Rod A. Badcock (Callaghan Innovation)
 KOMEDA Takashi, AMEMIYA Naoyuki, NAKAMURA Taketsune (Kyoto University);
 JIANG Zhenan, Rod A. BADCOCK (Callaghan Innovation)
 E-mail: komeda@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

大電流高温超伝導導体として転位構造を持つ高温超伝導Roebelケーブルが注目されている[1]。このRoebelケーブルを様々な機器に応用していくためには、その交流損失特性の把握が重要である。Roebelケーブルを構成する素線の数が変わると、損失特性が変化する可能性がある。そこで今回、我々は10素線からなる高温超伝導Roebelケーブルの磁化損失を測定し、以前測定した6素線からなる高温超伝導Roebelケーブルの磁化損失[2]と比較検討したので報告する。

2. 実験結果

10素線からなる高温超伝導Roebelケーブルの諸元をTable. 1に示す。周波数65.44 Hz、112.5 Hz、26.62 Hzの外部交流磁界をケーブル面に対して様々な角度(15 - 90 deg)で印加し、磁化損失を測定した。

Fig. 1には、周波数65.44 Hzの外部磁界を様々な角度で印加した場合の磁化損失を外部磁界のケーブル面に垂直な成分 $\mu_0 H_e \sin\alpha$ (H_e : 外部磁界振幅、 α : 線材面の法線に対する外部磁界のなす角度)に対してプロットした。損失値はケーブル全体の損失を素線本数で割った素線一本あたりの平均値である。さらに、図には式(1)の超伝導ストリップに垂直横磁界を印加した場合のE. H. Brandt と M. Indenbomの磁化損失の理論値(各素線の平均臨界電流を使用)も同時に示した。異なる磁界角度での損失値がほぼ重なることから、外部磁界に関しては垂直磁界成分が損失を支配し、平行磁界成分はほとんど損失に影響しないことがわかる。

$$Q_m = \frac{B_c^2 \pi w^2}{\mu_0} \left\{ g \left(\frac{H_c}{I_c / \pi w} \right) / \left(\frac{H_c}{I_c / \pi w} \right) \right\}$$

$$g(x) = (2/x) \ln(\cosh x) - \tanh x \quad \dots (1)$$

Fig. 2には、10素線からなるRoebelケーブルと6素線からなるRoebelケーブルの磁化損失($f = 65.44$ Hz, $\alpha = 90$ deg)の比較を示した。この図では、式(1)の理論値にならない、損失値を式(2)で、外部磁界の垂直成分を式(3)で除して規格化を施し、損失が素線一本の臨界電流や素線幅によらないようにした。両者は超伝導ストリップの理論値に比べて、中磁界領域で損失は小さくなっており、集合化により、磁束が侵入しづらくなっているためであると考えられる。また、同領域において、10素線Roebelケーブルのほうが6素線Roebelケーブルより損失が小さくなっており、5層の10素線Roebelケーブルの方が、3層の6素線Roebelケーブルよりも、磁束が侵入しづらくなっていると考えられる。

$$\frac{B_c^2 \pi w^2}{\mu_0} \quad \dots (2)$$

$$\frac{I_c}{\pi w} \quad \dots (3)$$

3. まとめ

10素線Roebelケーブルの磁化損失はケーブル面に対して垂直な磁界成分が支配し、平行磁界成分は損失にほとんど影響しない。また、10素線Roebelケーブルの磁化損失は、6素線Roebelケーブルの磁化損失に比べて、中磁界領域で小さい。

Table. 1 HTS Roebel cable consisting of ten strands

素線数	10
素線幅	2 mm
ケーブル幅	5 mm
ケーブルリングピッチ	90 mm
素線の平均臨界電流	42.2 A

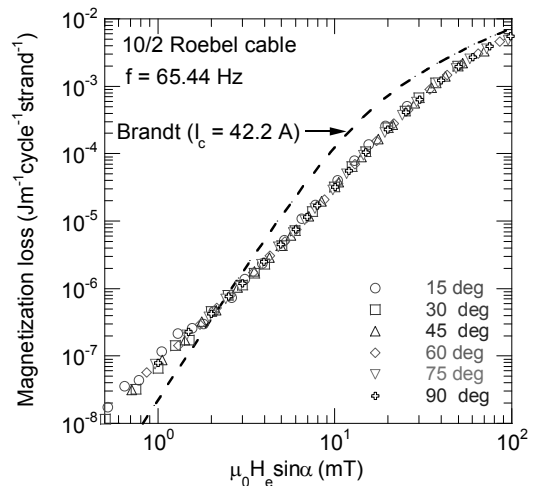


Fig. 1 Magnetization loss of each angle

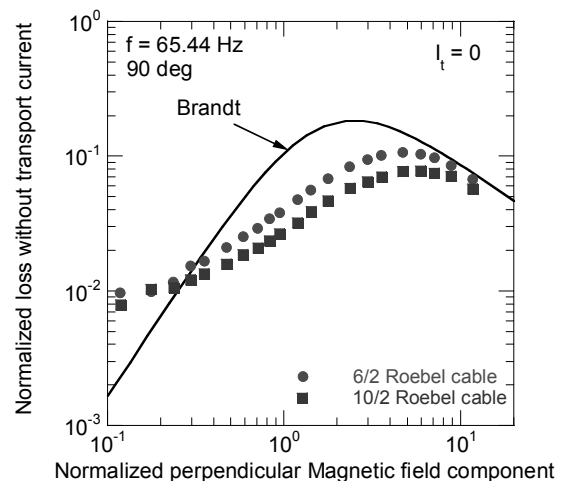


Fig. 2 Comparison of normalized loss

参考文献

- W. Goldacker, et al.: Supercond. Sci. Technol. **22** (2009) 034003
- Z. Jiang, et al.: Supercond. Sci. Technol. **26** (2013) 035014

高温超伝導 Roebel ケーブルの 3 次元構造と交流損失特性

Three dimensional structure of HTS Roebel cable and its ac loss characteristics

両宮 尚之, 二井 雅裕, 米田 宇志, 中村 武恒(京大・工); 姜 哲男(Callaghan Innovation)
 AMEMIYA Naoyuki, NII Masahiro, KOMEDA Takeshi, NAKAMURA Taketsune (Kyoto University);
 JIANG Zhenan (Callaghan Innovation)
 E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

イットリウム系テープ線材を均流化のために転位した上で集合導体化した高温超伝導 Roebel ケーブルは、その 3 次元構造故に複雑な電磁的振る舞いをし、これが交流損失特性にも影響する。Roebel ケーブルならびに、イットリウム系テープ線材単線、イットリウム系テープ線材を積み重ねたバンドル導体の交流損失の実測値と計算値を比較、検討した。

2. 比較対象

比較対象の導体の概念図を Fig. 1 に示す。6 素線から構成される Roebel ケーブルのほか、テープ線材単線、テープ線材を 3 本重ねた 3x1-スタック(バンドル導体を模擬)、3x1-スタックを 2 列ならべた 3x2-スタック(Roebel ケーブルの直線部の断面を模擬)の交流損失を実測、計算した。なお、各素線は電気的に絶縁されている。

3. 実験方法・計算方法

交流電流を通電した場合、ケーブル面に垂直な交流磁界を印加した場合、交流磁界下で交流電流を通電した場合の 3 通りについて実験、解析を行った。実験は短尺導体を用いて行い、3x1-スタック、3x2-スタックに通電する場合には、線材間の均流を保證するために、素線を直列に接続した。計算は我々のグループで構築した Roebel ケーブルの 3 次元幾何学構造を考慮した電磁界解析モデルを用いて行った。

Roebel ケーブルの素線幅が 2 mm であるのに対して、単線での損失測定・計算、3x1-スタック、3x2-スタックを構成しての損失測定・計算に使用したイットリウム系テープ線材の幅が 4 mm であったため、損失の比較は、損失値、電流値、磁界値として規格化値を用いて行った。

4. 結果

交流電流を通電した場合、ケーブル面に垂直な交流磁界を印加した場合の規格化損失(素線 1 本あたりの値)を Fig. 2, Fig. 3 に示す。実験値と計算値はおおむねよく一致している。要点をまとめると以下の通りである。

(1) 通電損失

- 単線の損失がもっとも小さく、3x1-スタックの損失が次に小さく、Roebel ケーブルと 3x1-スタックの損失がほぼ等しくもっとも大きい。スタック、Roebel ケーブルの損失が大きいのは、他の素線が作る交流磁界の影響である。
- Roebel ケーブルは素線を編みこんだような構造をしているにも関わらず、その損失が 3x2-スタックと同等であることは、Roebel ケーブルの転位の有効性を示すものである。

(2) 磁化損失

- 高磁界領域では、単線、スタック、Roebel ケーブルの損失はほぼ等しい。
- 中磁界領域では、単線の損失が大きく、その他の損失はほぼ等しい。
- さらに磁界を下げると、Roebel ケーブルと 3x1-スタック、3x2-スタックの損失はかい離し始める。解析結果によれば、この領域では Roebel ケーブルの 3 次元構造が電磁現象に大きく影響を与えている。

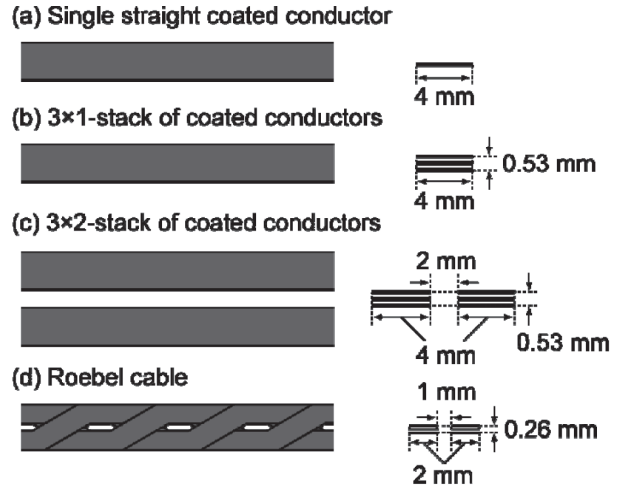


Fig. 1 Schematics of conductors.

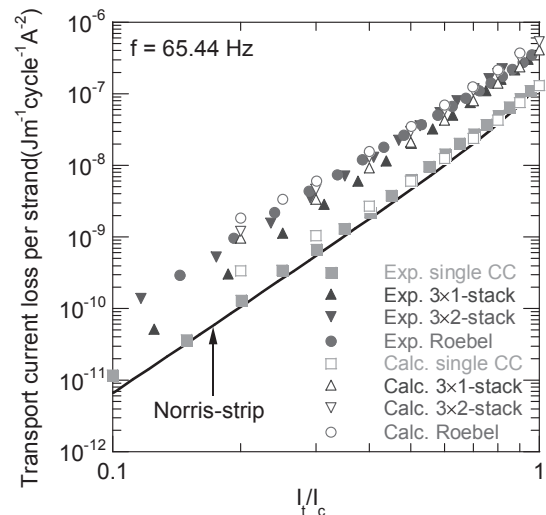


Fig. 2 Transport losses.

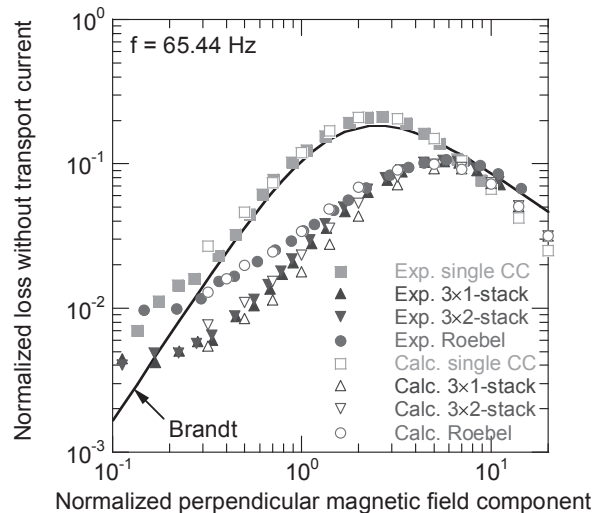


Fig. 3 Magnetization losses.

高温超電導線材の非対称ひずみ波電流に対する交流電流損失特性

Characteristic of AC Transport Current Loss against Asymmetric AC Current with Harmonics in an HTS Wire

中出 陽介, 宮城 大輔, 津田 理 (東北大), 濱島 高太郎 (八戸工大)
 NAKAIDE Yosuke, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku University),
 HAMAJIMA Takataro (Hachinohe Institute of Technology)
 E-mail: nakaide@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年, 超電導モータや超電導変圧器等の交流超電導機器の研究開発が盛んに行われている。その実用化に向けて正弦波交流電流時の交流損失だけでなく, インバータで発生するひずみ波電流や, 整流時に発生するリップルを有する電流を超電導機器に通電した時の交流損失を正確に評価し, 機器の設計に反映する必要がある。これまでの研究で高温超電導線材に奇数次高調波を含むひずみ波電流を通電した波形のように対称性のある場合の通電損失特性を明らかにしてきた[1]。そこで, 今回は非対称波形やインバータ波形の交流電流損失特性について検討を行い, 任意のひずみ波電流に対する通電損失の評価方法を明らかにしたので報告する。

2. ひずみ波電流に対する通電損失評価

先行研究で, 基本波と奇数次高調波からなるひずみ波のように対称性のある波形で通電損失を正確に推定できる方法を確認した。この推定方法を用いて, 偶数次高調波が含まれたり, 基本波と高調波に位相差があるために非対称な波形となるひずみ波を通電して通電損失の評価を行い, 任意のひずみ波に対する推定方法の妥当性の検討を行った。

Fig. 1 に測定を行った非対称ひずみ波形を示す。60Hz の正弦波電流を基本波として, 4次と5次の高調波を合成した。基本波に対して4次は $\pi/2$, 5次は $\pi/6$ の位相ずれがある。1次・4次電流値はともに固定して, 5次電流を変化させて測定を行った。Fig. 1 の波形は正負でピーク値が異なり, 半周期ごとの対称性もない波形となっている。このような非対称ひずみ波に対して測定結果と本推定方法に基づき算出された値をFig. 2に示す。 Q_{exp} は通電損失の測定値, Q_{major} はメジャーロープの損失, Q_{minor} はマイナーロープの損失である。これらと比較すると通電損失は推定値と良く一致しており, 対称性のあるひずみ波だけでなく, 任意のひずみ波に対して本推定方法が有効であることが確認できた。

次に Fig. 3 にインバータ波形を模擬したひずみ波形を示す。今回はインバータ波形の模擬のため60Hzの基本波に対して高次の高調波を合成したひずみ波を通電して検討を行った。Fig. 3 より, 多数のマイナーロープが生じていることが分かる。このため, 正確な推定のためには全てのマイナーロープの振幅を明確にする必要がある。しかし, 今回は簡単化のためにマイナーロープのうち最大振幅の場合の通電損失をマイナーロープの個数分加えることによってひずみ波の通電損失の推定を行った。その結果, Fig. 4 に示すように測定結果と推定方法の値が一致しており本推定方法の有効性が確認できた。

3. まとめ

今回, 先行研究の通電損失推定方法を用いて, 任意のひずみ波に対して通電損失の評価を行いその妥当性を確認した。今後, 交流超電導機器の実用化に向けて, コイルにひずみ波を通電した場合の交流損失を外部磁界の影響も考慮しながら評価する予定である。

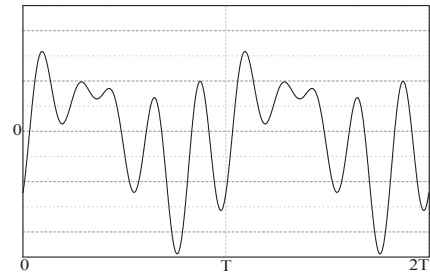


Fig. 1 Waveform of asymmetric AC current with harmonics

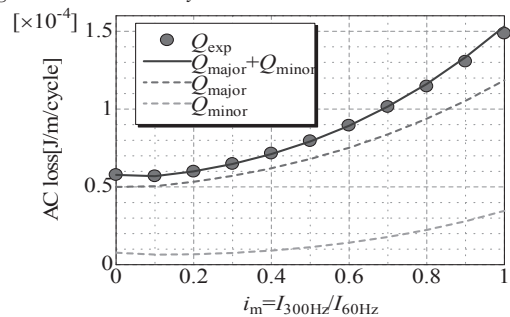


Fig. 2 Transport current loss against asymmetric AC current with harmonics

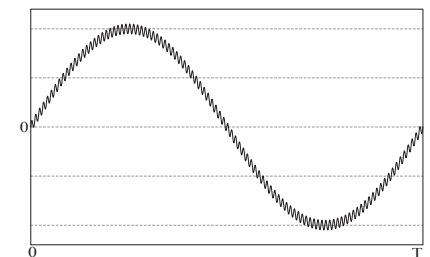


Fig. 3 Waveform of AC current with high-order harmonics

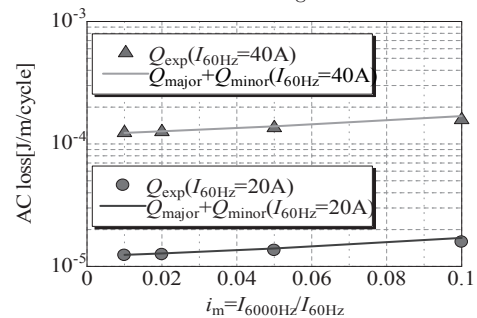


Fig. 4 Transport current loss against AC current with high-order harmonics

参考文献

- Y. Nakaide, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.15
- Y. Nakaide, et al.: The Papers of Technical Meeting on Application of Superconductivity IEEJ, ASC-12-013, pp.71-75 (2012)

鉄道用超電導ケーブルの研究開発 Research and Development of Superconducting Cables for Railway Systems

富田 優(鉄道総研);大崎 博之(東大);木須 隆暢(九大);雨宮 尚之(京大);増田 孝人(住友電工);玉田 紀治(前川)
TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute); OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo),
KISS Takano (Kyushu University); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University);
MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries, Ltd.); TAMADA Noriharu (MAYEKAWA MFG. CO., LTD.)
E-mail: tomita@rttri.or.jp

1. はじめに

超電導技術の鉄道システムへの適用を目的とし、鉄道用超電導ケーブルの研究開発を進めている。具体的には鉄道用超電導ケーブルに向けた超電導線材の基礎特性評価、シミュレーションによる最適導入法の検討および信頼性の高いシステム設計といった材料から応用まで一貫した研究開発に取り組んでいる。

本講演では各種検討結果を踏まえ、DC1.5 kV、5 kA 長の30 m 級鉄道用超電導ケーブルのプロトタイプを製作し、構内試験線で実験を開始したので報告する。

2. 鉄道用超電導ケーブルの基礎検討

電気鉄道のき電システムには直流電化と交流電化がある。特に直流電化と超電導の相性はいいと考えられる。各種シミュレーションを行ったところ、超電導ケーブルを大都市近郊路線の直流き電系に導入することで、回生率の向上や送電ロスの低減などにより省エネルギー効果が得られることが明らかになった。また変電所間の連絡送電線として導入することで、変電所間の負荷平準化や変電所の削減なども期待できることが分かった。

一方で鉄道における直流送電では、き電区間への列車の進入、離脱に伴う電流急変や、列車の力行、惰行の切り替わりに伴う電流急変、電力変換装置により発生する高調波電流などの電流急変に伴い交流損失が発生する。これらの電流急変に対する交流損失に関してのシミュレーションを行ったところ、輻射などの熱損失に比べ小さいことが分かった。

これまで開発された超電導ケーブルの冷却システムの多くは各機能をユニット化し、個別のユニットを低温配管で接続する方式が採用されてきているため、冷却システムの寸法を巨大にするだけでなく、冷却システム全体の信頼性の低下を招いてしまっているが、全てのユニットを一体化する冷却システムを考案した。また、超電導ケーブルにおいて、見かけ上1本で冷媒の循環を行える対向流循環 (Go-Return) 方式について検討し、熱交換の低減手法等を考案した。

3. 30 m 級鉄道用超電導ケーブル

上記検討を踏まえ、30m 級超電導ケーブルを製作し(図 1)、構内実験線に敷設した(図 2, 3)。現在は、各種基礎試験を行っている。

4. 謝辞

本研究は研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム (S-イノベ)」の支援を受けて進めたものである。

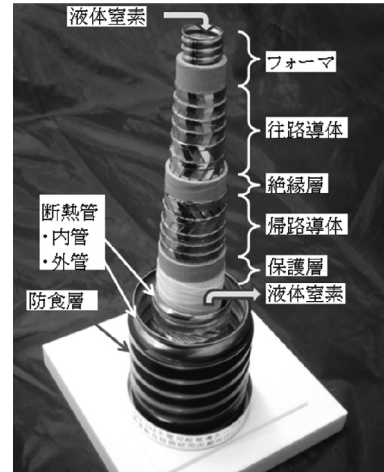


Fig.1 Design of 30-m superconducting cables for railway systems



Fig.2 Photograph of 30-m superconducting cables in a railway test track



Fig.3 Photograph of cooling system for 30-m superconducting cables

超電導直流送電ケーブルにおけるリップル電流による交流損失

AC loss of ripple current in superconducting DC power transmission cable

吉富 邦和, 小田部 荘司, ビヤトキン ウラジミール, 木内 勝, 松下 照男(九工大);
浜辺 誠, 山口 作太郎(中部大); 稲田 亮史(豊橋技科大)

YOSHITOMI Kunikazu, OTABE Edmund Soji, VYATKIN Vladimir, KIUCHI Masaru,
MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);

HAMABE Makoto, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.); INADA Ryoji (Toyohashi Univ. of Tech.)
E-mail: yoshitomi@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

現在、送電網における送電ロスを大幅に低減する方法として超電導直流送電が注目されている。超電導直流送電ケーブルには交流から変換された直流電流が流されるが、交流変換によりリップル電流が重畳している。このリップル電流により交流損失が発生するので、機器設計においてはこの交流損失の正確な見積もりが必要である[1]。本研究では、交直変換に6相、12相、24相の交流電流を整流しただけの電流を用いた際の交流損失について評価した。

2. 交流履歴損失の評価

超電導線に流れるリップル電流による交流履歴損失の評価式として、磁界に対し臨界電流密度を一定とする Bean モデルが用いられる。この Bean モデルが成り立つ直線状の超電導丸線に振幅 I_m の交流電流を通電した場合の交流 1 周期・単位長さ当たりの交流履歴損失 Q は次式で与えられる[2]。

$$Q = Q_0 \left[(1 - i_m) \ln(1 - i_m) + \frac{(2 - i_m)i_m}{2} \right] \quad (1)$$

ここで、臨界電流 I_c を用いて $i_m = I_m / I_c$ である。また、 Q_0 は

$$Q_0 = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} \quad (2)$$

で表される。3 相交流電流の角周波数を ω としたとき、6 相、12 相、24 相の整流電流はフーリエ級数で次のように表される。

$$I_6(t) = \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(6n-1)(6n+1)} \cos(6n\omega t) \right] \quad (3)$$

$$I_{12}(t) = \frac{12}{\pi} \sin \frac{\pi}{12} \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(12n-1)(12n+1)} \cos(12n\omega t) \right] \quad (4)$$

$$I_{24}(t) = \frac{24}{\pi} \sin \frac{\pi}{24} \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(24n-1)(24n+1)} \cos(24n\omega t) \right] \quad (5)$$

Fig. 1 は (3)式から(5)式の整流電流波形を示したものである。交流履歴損失の評価では 6 相、12 相、24 相の整流電流の交流成分として、各整流電流の基本波(角周波数はそれぞれ 6ω 、 12ω 、 24ω)を考える。 p 相整流電流の i_m を $(i_m)_p$ と書

くと、 $(i_m)_6 = 2/35$ 、 $(i_m)_{12} = 2/143$ 、 $(i_m)_{24} = 2/575$ となる。

3. 結果及び考察

ここでは超電導直流送電ケーブルの一例として、39 本の並列線材で構成されたケーブルを考える。このケーブルに周波数 60 Hz の 3 相交流から得られた 2 kA の整流電流を流すと、 $I_c = 2000/39 = 51.3$ (A) となる。したがって、(1)-(2)式から 6 相、12 相、24 相の整流電流を流したときの線材 1 m あたりの交流履歴損失は、Table 1 に示すような結果となる。24 相整流電流での交流損失は 0.415 $\mu\text{W}/\text{m}$ となり非常に小さいが、12 相整流電流でも 13.6 $\mu\text{W}/\text{m}$ であり 6 相の場合の約 35 分の 1 である。したがって、12 相整流により十分交流損失の小さい超電導直流送電が可能であると考えられる。なお、結合損失 [3]については十分に小さくなる様に設計すればいいと考えられるが、詳細については当日発表する。

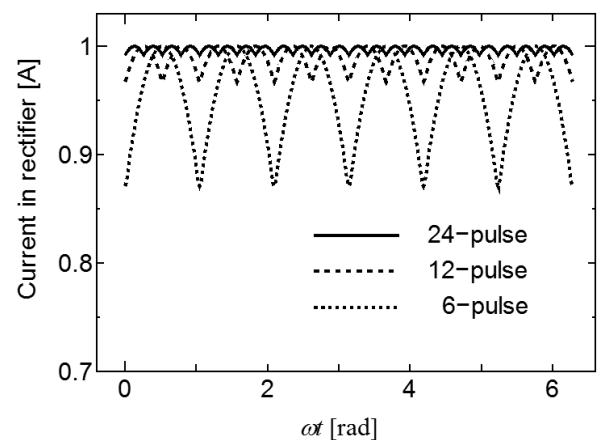


Fig. 1 Current in three-phase 6, 12, 24-pulse rectifiers

Table 1 AC loss for various pulse rectifier current

Pulses	AC loss ($\mu\text{W}/\text{m}$)
6	473
12	13.6
24	0.415

参考文献

1. E.S. Otabe et al.: Physics Procedia 27 (2012) 248-251.
2. 柁川 一弘: 超伝導体の交流損失の基礎, 低温工学 44 (2009) 400-410.
3. R. Inada et al.: Supercond. Sci. and Tech. 22 (2009) 085014.

超伝導直流送電ケーブルの構造に対するテープ線材の臨界電流特性

Critical current of BSCCO tape relating with cable structure for the DC HTS power cable

孫 建, 小原 久人, 渡邊 裕文, 浜辺 誠, 河原 敏男,
山口 作太郎 (中部大学)

SUN Jian, OHARA Hisato, WATANABE Hirofumi, HAMABE Makoto, KAWAHARA Toshio,
YAMAGUCHI Satarou (CHUBU UNIVERSITY)

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

1. Introduction

DC superconducting power transmission system has been studied at Chubu University by using high temperature superconducting (HTS) tape wires [1]. In the 200 m HTS power cable system, called as CASER-2, a coaxial cable is used as shown in Fig.1, which is made of BSCCO tape wires by Sumitomo Electric Industries (SEI). There are 23 tape wires with a two-layer structure for the inner conductor and 16 tape wires for the outer conductor with a monolayer structure in consideration of the gap effect on the critical current of the tape wires in the cable, which will lead to the reduction of the maximum current of HTS power cable [2]. In order to optimize the structure of a HTS power cable, we have been studying the effect on the performance of BSCCO tapes for the superconducting DC power cables relating with cable structure [3]. In the present experiments HTS tapes are set as a similar structure in the cable with a two-layer structure by considering the winding methods because of two kinds of winding directions as shown in Fig.1.

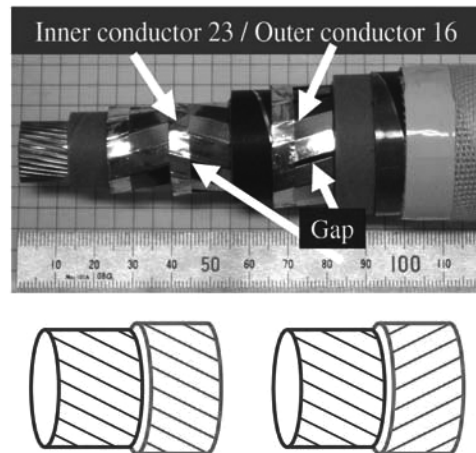


Fig.1 CASER-2 power cable and winding direction

2. Samples and experiments

BSCCO tapes are used with cross sections of 4.5 mm wide and 0.35 mm thick same as those in CASER-2 power cable. In the present experiments, the HTS tapes are prepared with length 27 cm and set as the tape arrangement in the cable with a two-layer structure as shown in Fig.2. The tapes are insulated with each other and the critical current measurement is performed at 77 K. Different currents are applied to the tapes using two power supplies. The critical current of the middle tape #3 is measured against the gap between the tape edges in the same layer for different current in other tapes.

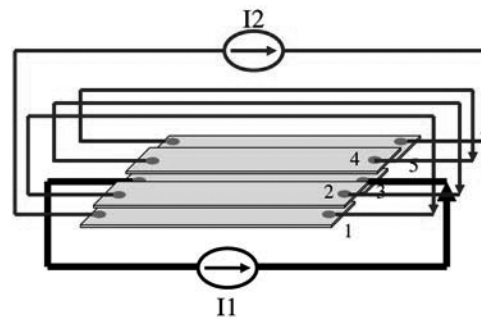


Fig.2 A scheme of transport current loop

3. Experimental results and discussion

Fig.3 shows measured critical current for single and five tape arrangements with a 2 mm gap. The critical current increases with respect to the neighboring current. When the neighboring current is larger than 80 A, the critical current becomes larger than that of single tape. The measured critical currents of middle tape #3 increases 10% for 2 mm gap in the five straight parallel tapes arrangement and thus the critical current of BSCCO tape is improved when there are gaps between the tapes in the same layer. As shown in Fig.1, the tapes for inner HTS conductor are wound crossly between each layer. Since there are two winding methods for a cable as in the inset of Fig.1, the experimental results will be presented for different arrangements in consideration of twist effects and winding directions to improve the property of the DC HTS cable. The improvement of the critical current of BSCCO tape in the cable due to magnetic field interaction between the tapes can be obtained by optimizing the tape arrangements.

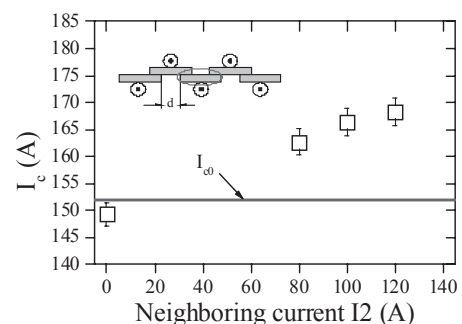


Fig.3 The critical current of tape #3 for 2 mm gap

参考文献

1. S. Yamaguchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2008) p.57
2. J. Sun, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.136
3. J. Sun, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.100

中空フォーマを用いた 275 kV 級 YBCO 超電導ケーブルの過電流通電特性評価

Overcurrent Characteristics of 275-kV-class YBCO Power Cable with Hollow Former

王 旭東, 石山 敦士(早大); 劉 勁, 八木 正史(古河電工); 丸山 修, 大熊 武(ISTEC-SRL)
 WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); LIU Jin, YAGI Masashi (Furukawa Electric Co., LTD.);
 MARUYAMA Osamu, OHKUMA Takeshi (ISTEC-SRL)
 E-mail: wan-x-don@ruri.waseda.jp

1. はじめに

2012 年度に終了した「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、275 kV 級 YBCO 超電導ケーブルは最大 63 kA_{rms}、0.6 s の耐過電流事故設計が目標である。そのため、筆者らは事故電流による突発的な温度上昇が超電導ケーブルの劣化を引き起こさないよう、保護層としての線材安定化層、銅フォーマや銅シールド層の設計最適化を行うことが必要となる。これまでに筆者らは保護層の最適化設計のための計算機シミュレータの開発を行い、超電導線材やモデルケーブルの過電流通電試験を行うとともに、計算機シミュレータの開発および妥当性の検証を行ってきた[1-2]。今回は、絶縁層に Tyvec®/PE 合成紙を用いて試設計した中空型モデルケーブルを作製し、過電流通電実験と数値解析評価を行ったので報告する。本研究は 2012 年度に終了した「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 の委託により実施されたものである。

2. 実験方法と解析手法

実験で使用したモデルケーブルの諸元を Table.1 に示す。モデルケーブルは、銅フォーマの断面積が 412 mm²、HTS 導体層が 2 層、HTS シールド層が 1 層、銅シールド層の断面積が約 210 mm² である。試験回路は、2 本のモデルケーブルの導体層(銅フォーマ、HTS 導体層)を電源と直列接続し、シールド層 (HTS シールド層、銅シールド層) は 2 本同士で短絡接続して、導体層からの誘導でシールド電流が流れるように構成した。過電流通電による超電導層の温度上昇を測定するためにケーブル長手方向の中央部に熱電対温度計を、電流計測用にログスキューコイルを設置した。実験は液体窒素浸漬冷却 (77 K) で行い、交流過電流として約 63 kA_{rms} を 0.05, 0.1, 0.3, 0.6 s 通電した (60Hz)。

開発した 3 次元有限要素法と回路方程式に基づく電流分布・熱伝導連成解析の計算機シミュレータ[1-2]を用いて、実験を模擬した中空型モデルケーブルの解析プログラムを構築した。超電導線材は 3 次元有限要素法を用いてモデル化し、I-V 特性には n 値モデルを採用した。銅フォーマと HTS 導体層、また HTS シールド層と銅シールド層が端部のみで電気的に接触しているとした。フォーマ中空部とケーブル最外層の表面は液体窒素に触れているとして、初期温度 77 K の飽和液体窒素の非線形熱伝達特性を考慮した。また、インダクタンスはケーブルを円筒モデルで近似し、集中定数とした。

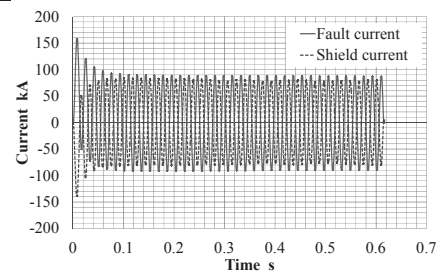
3. 結果とまとめ

63 kA_{rms}、0.6 s 過電流を通電した際のシールド電流を Fig. 1 に、超電導層の温度上昇を Fig. 2 に示す。なお、解析の過電流は定常成分 (63 kA_{rms}) に加えて直流成分 (最大 89 kA、時定数 90 ms) を想定して行った。Fig. 1 より、実験結果と解析結果のシールド電流は 0.6 s 付近でそれぞれ通電電流の約 91% と約 95% であった。シールド電流のわずかな違いは、ケーブル端部などの影響を解析で考慮していないことが原因と考えられる。Fig. 2 より、超電導層の温度上昇は実験結果と解析結果でそれぞれ最大約 22 K と約 28 K となった。Fig. 1, 2 の実験結果と解析結果は定性的かつ定量的によく一致し、開発した計算機シミュレータの妥当性を確認できた。また 63 kA_{rms}、

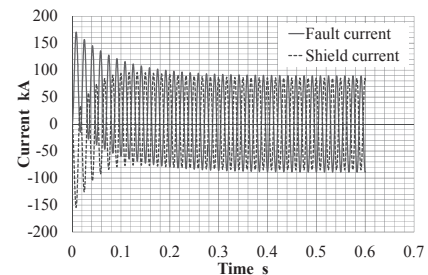
0.6 s の短絡事故に対して、先行研究の丸撚り形状のフォーマで設計したモデルケーブルは、HTS 導体層が 80 K 以上であったが[1]、今回の結果は 50 K 以上低く抑えることができた。過電流通電後に超電導特性の劣化は観測されなかったことから、設計したモデルケーブルの耐過電流特性が実証できたと考える。

Table.1 Specifications of superconducting model cable

	Outer diameter (mm)
Copper former	30.6 (412 mm ²)
Hollow diameter	14
HTS conductor layer	35.4 (2 layers, $I_c=6000$ A)
Electrical insulation (Tyvec®/PE)	79.4
HTS shield layer	80.0 (1 layer, $I_c=6000$ A)
Copper shield layer	86.5 (210 mm ²)



(a) Experimental results



(b) Simulation results

Fig. 1 Shield current

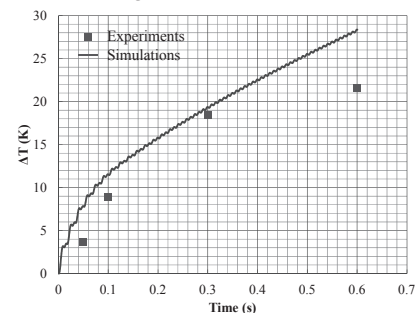


Fig. 2 Temperature increase on superconducting layer

参考文献

1. X. Wang, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21 (2011), no. 3, pp. 1017-1020
2. X. Wang, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20 (2010), no. 3, pp. 1268-1271

275 kV-3 kA 超電導ケーブルの長期課通電試験 Long-term electrical test of 275 kV-3 kA YBCO Superconducting Cable

中山 亮, 八木 正史, 三觜 隆治, 劉 勁, 藤 軍 (古河電工);
長谷川 隆代 (昭和電線), 斎藤 隆 (フジクラ), 雨宮 尚之 (京大),
石山 敦士, 王 旭東 (早大); 早川 直樹 (名大), 大熊 武, 丸山 修 (ISTEC-SRL)

NAKAYAMA Ryo, YAGI Masashi, MITSUHASHI Takaharu, LIU Jin, TENG Jun, (Furukawa Electric);
HASEGAWA Takayo(SWCC), SAITO Takashi(Fujikura), AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.), WANG Xudong,
ISHIYAMA Athushi (Waseda Univ.); HAYAKAWA Naoki (Nagoya Univ.), OHKUMA Takeshi, MARUYAMA Osamu(ISTEC-SRL)
E-mail: mr252088@mr.furukawa.co.jp

1. はじめに

架空送電線に匹敵する大容量をもつ 275 kV-3 kA の YBCO 超電導ケーブルを M-PACC プロジェクトの中で 2008 年より開発してきた。このケーブルは 1.5 GW という架空送電線に匹敵する大容量で、将来の電力基幹線としての実用化が期待されている。古河電工では 30 m ケーブルを作製し、検証試験を 2012 年秋季から中国遼寧省の瀋陽市に位置する瀋陽古河電纜で実施した。本検証試験では、長期の課通電試験を実施し、ケーブル I_c 、誘電損失、交流損失などの各種特性の測定を行ったので報告する。

2. 30m ケーブル性能及び長期課通電試験概要

試験に用いた 30 m ケーブルは、耐電圧試験、部分放電試験、交流損失試験、過電流試験などの結果に基づいて最適設計され、中間接続部も含めて予め日本で作製をした上で、試験場所である瀋陽古河に輸送、布設された。輸送前に実施した製造余長 2 m の抜き取り試験では、設計値通りである 6440 A(導体層)、5920 A(シールド層)の I_c を、製造余長 5 m の抜き取り試験で系統異常電圧を想定した 310 kV で部分放電フリーを確認している[1]。また、誘電損失及び交流損失を合算した全損失の設計値は 0.80 W/m(誘電損失:0.60 W/m、交流損失 0.20 W/m)である。

瀋陽古河で実施した長期課通電試験の内容を Table.1 に示す。 I_c 測定、部分放電試験は、日本で行った抜き取り試験と同等の条件で実施し、輸送前と比較して劣化がないかを確認した。また、長期課通電試験の条件は 3 kA の電流と、30 年の劣化を模擬した 200 kV とした[1]。損失測定はカロリメトリック法で測定した。

3. 実証試験結果

ケーブル I_c 測定の結果を Fig.1 に示す。導体部の I_c (Fig.1 (a))は 6800 A、シールド部の I_c (Fig.1(b))は 7000 A であり、輸送前の抜き取り試験の結果と比較して十分な値であるといえる。部分放電試験についても Table.1 に記載の、抜き取り試験と同等の条件で部分放電フリーであることを確認し、十分な性能を有していることを確認している。

損失測定の結果、200 kV 課電(通電なし)時、カロリメトリックから導出される誘電損失は 0.7 W/m であるが、通常運転時の電圧である 160 kV ならば誘電損失は 0.44 W/m となり、設計値である 0.6 W/m よりも 25 % 小さい値となり、サブクール状態での、液体窒素浸漬状態の改善と考えている。

3 kA 通電(課電なし)時、カロリメトリックから導出される交流損失は 0.19 W/m であり、設計値通りの結果である。長期課通電試験では、交流通電時のシールド電流の振幅が導体電流の 75 % であったが(Fig.2)、これはシールド回路の常電導部の長さが全回路の 1/3 になり、常電導部のインダクタンスが無視できないためと考えられる。また、長期課通電試験後に 310kV

で部分放電フリーであることを確認しており、長期課通電による絶縁性能の劣化はみられなかった。

4. まとめと今後の展望

瀋陽古河で実施した 30 m ケーブルの長期課通電試験は無事完了した。ケーブル I_c 測定、部分放電試験については瀋陽への輸送前に日本で行った抜き取り試験と同等の結果が得られ、輸送による劣化がなく、十分なケーブル性能を有していることを確認した。また、損失測定においても、設計通りか、それ以上のヒートサイクルを含む値を確認した。

今後は長期課通電試験の継続試験を実施し、残存性能を評価していく予定である。

5. 謝辞

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

Table.1 Items of 30 m cable test

Item	Condition	Result
I_c Conductor / Shield	77 K	6800 A / 7000 A
Partial Discharge (PD)	310 kV - 10min	No - PD
Loss Dielectric / AC	200 kV - 3 kA	0.7 W/m / 0.19 W/m
Long - term electrical test	200 kV - 1 month 3 kA ON/OFF over 20 cycle	Completed

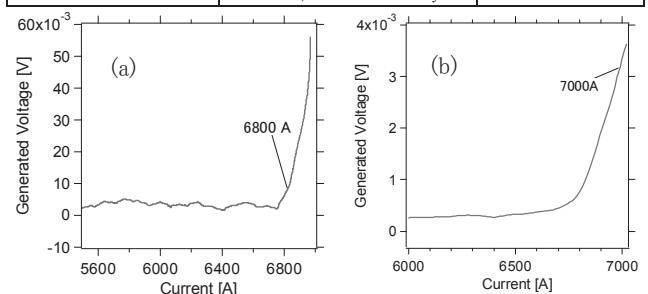


Fig.1 Cable I_c (a)conductor layer (b)shield layer

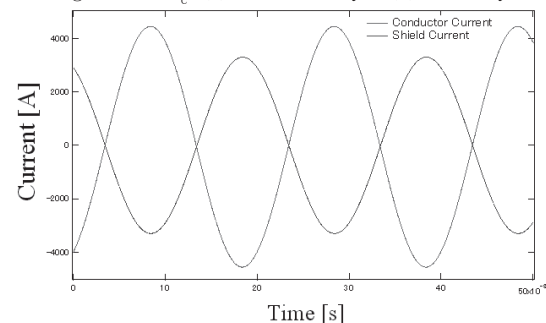


Fig.2 long-term AC current test

参考文献

- R. Nakayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 86(2012) p.12

電力ケーブルの銅フォーマ部に存在する液体窒素を考慮した 短絡事故時の端末部の圧力上昇解析 Transient Stability Simulation on Pressure of HTS Power Cable forced cooled by sub-cooled Nitrogen

我妻 洸 (早大) ; 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, 市川 裕志, 原 築志 (東京電力)

AGATSUMA Koh (Waseda) ; FURUSE Mitsuho, FUCHINO Shuichiro (AIST);
MASUDA Takato, OHYA Masayoshi (SEI);
HONJYO Shouichi, MIMURA Tomoo, ICHIKAWA Hiroshi, HARA Tsukushi (TEPCO)
E-mail: agatsuma@kurenai.waseda.jp

1. はじめに

超電導電力ケーブルは、サブクールした液体窒素が加圧循環され、かつ限られた断面積の断熱管の中に収容されるので、長尺の実ケーブルにおいては短絡事故時の現象を模擬した過渡安定解析が重要である。

我々は、HTS 超電導電力ケーブルのコア最内層にある銅フォーマ部に存在する液体窒素による影響を考慮し、管路内の冷却特性を模擬できる計算コードを開発し、これを用いて、NEDO「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」内で行われた 66kV、200MVA、30m の実験ケーブルの短絡事故時の超電導ケーブル内の導体、および冷媒の挙動・現象を数値解析で行ってきた。解析結果は温度解析結果については、ほぼ納得のゆく結果を得ることが出来たことを報告した。しかし、電流の入出力端末部やリザーバタンクなどの圧力変動解析は実験値と乖離がみられ、モデルを含めて改善が必要となった。今回、窒素循環ポンプを含む冷却系を含む解析モデルを構築し、圧力変動解析コードを開発し、圧力変動を良好に再現出来たので報告する。

2. 窒素循環ポンプを含む冷却系の圧力変動解析モデル

今までのモデルはケーブル入口と出口の初期境界条件から、圧力変動を推定する手法であった。温度解析に関しては比較的良好な結果が得られたが、圧力変動に関しては、ケーブルコア最内層にある銅フォーマ部に存在する液体窒素の蒸発を考慮しても、圧力変動の解析結果は実験と乖離が大きかった。これを改善するために、今回は、循環ポンプを含む冷却系を解析モデルに組み込む手法を開発し、圧力変動を良好に再現できた。モデルの概要を Fig. 1 に示す。

モデルの概要は: 1) 各圧力計測部で質量(質量流量: g_{AB} など)は保存される。2) 摩擦抵抗 (f_{AB} など) は実験の範囲で不変など。3) 各部の圧力変動は流入する流体(気・液)の体積変化により生じる(Fig.2 参照)。液体は非圧縮性とする。4) 各計測部間の流量 (g_{AB} など) は差圧で規定される。5) 実験値よりポンプ吐出流量は一定で、吐出圧は吸入圧力+100kPa と仮定する。以上の仮定のもとに解析する。

3. シミュレーション結果

このモデルを用いた圧力変動シミュレーションコードに前回のシミュレーション結果から得られた銅フォーマ部からの流出流体の体積を模擬した値を代入して解析した。結果を Fig. 3 に示す。圧力変動解析結果(白抜き)は、良く実験(塗りつぶし)を再現している。また、このシミュレーション結果は、ポンプ部から A 端末部への流量が閉塞を示すことも再現している。さらに、リザーバタンクの圧力変動、液面変動もよく再現している。

4. 今後の予定

今回開発したコードと HTS ケーブル過渡安定性解析コードを統合した解析コードを完成する予定である

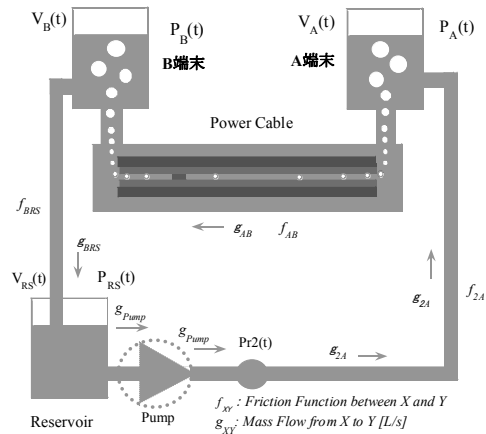


Fig.1 Pump Circulation Model

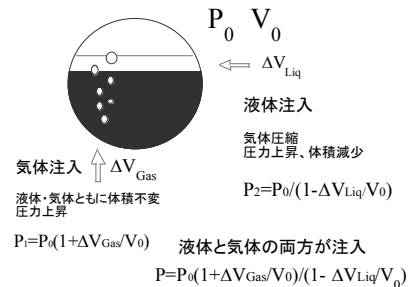


Fig.2 Pressure Estimation Model

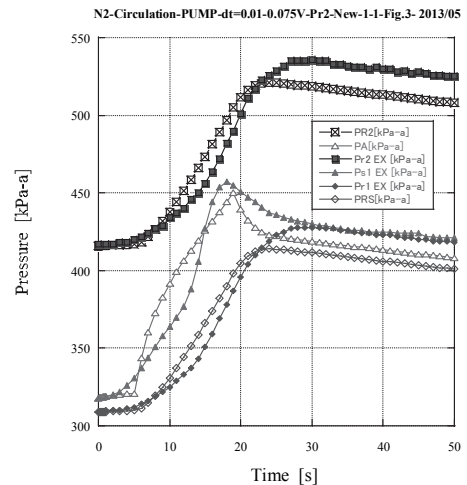


Fig.3 Pressure Simulation Results by Pump Circulation Model

参考文献

1. K. Agatsuma, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82, p.33 (2010)
2. K. Agatsuma, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83, p.268 (2010).
3. K. Agatsuma, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.85, p.22 (2011)

洋上風力発電用三相同一軸高温超電導ケーブルの送電可能距離の検討

Maximum cable length in an HTS tri-axial cable for offshore wind power

秋田 真志, 大野 真, 宮城 大輔, 津田 理(東北大); 濱島 高太郎(八戸工大)
 AKITA Masashi, OHNO Shin, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.);
 HAMAJIMA Takataro (Hachinohe Institute of Technology)
 E-mail: akita@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

次世代の大容量洋上風力発電設備には大容量送電設備が必要不可欠である。超電導ケーブルは既存の銅ケーブルに比べ、大容量である上に低損失で送電できるため、洋上風力発電用の送電ケーブルとして期待されている。特に三相同一軸超電導ケーブルは三心一括型より交流損失が少なく、より大きな冷媒流路を確保できるため、長尺化を期待できる。超電導ケーブルの送電可能距離についての検討は様々に行われている[1]が、本稿では三相同一軸ケーブルを海底に敷設した場合の定常運転時における送電可能距離を伝熱特性と流体特性の両面から検討を行ったので報告する。

2. 解析方法

本解析に用いた三相同一軸ケーブルの諸元を Table 1 に示す。導体部分は各相に超電導線、故障電流分担のための銅テープ、絶縁のためのPPLP®により構成され、コルゲート管に収容されている。海底ケーブルは管路による制約がないため断熱管であるコルゲート管の内径を変化させて解析を行った。ケーブルの冷却は液体窒素のリターンを考え向流を採用した。向流では内外流路において対向するように液体窒素が流れたため、液体窒素は1回線分のケーブルで往復させることができ、新規の流路や他回線を設ける必要がなく信頼性が高いと考えられる。ケーブル内の伝熱特性の解析は式(1)で表わされる熱伝導方程式を用いた。

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

ただし、 T は温度、 ρ は密度、 c は比熱、 k は熱伝導率、 Q は発熱項である。発熱項としては、超電導体の交流損失、銅安定化層の渦電流損失、誘電体損失、液体窒素の摩擦損失を考慮している。解析領域は2次元円筒座標系とした。流入される液体窒素の流体特性は、式(2)で表わされる圧力損失 ΔP で評価した。

$$\Delta P = f_L \frac{1}{D_H} \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2)$$

ただし、 f_L は管摩擦係数、 D_H は特性長さ、 v は流速である。管摩擦係数は、液体窒素がコルゲート管に接触するケーブル最外部では Hawthorne の実験式を、その他の部分は Prandtl-Karman の式を用いた。

超電導ケーブルは水深 100m で一定の海底に敷設するものと仮定した。水深 100m の海底では大気圧に静水圧分が加算されケーブルに 1.1MPa の圧力が加わる。この影響で液体窒素の圧力は 0.92MPa に上昇し、気液飽和曲線より液体窒素の沸点が 104K に上昇する[2]。これにより液体窒素が沸騰せずに循環できる距離が増大する。その一方、冷媒の温度上昇により超電導線材の温度が上昇し、線材の臨界電流値が減少して負荷率が上昇することがわかる。

送電可能距離については、伝熱特性は液体窒素の温度が 65K から 77K, 83.6K, 89.1K のそれぞれに上昇する距離、流体特性は液体窒素圧力が 1.5MPa から 1.2MPa に減少する距離として算出した。双方の特性について安定に送電ができる最大の距離を流量ごとにプロットし近似曲線を作成し、交点を求めることで最大送電可能距離を算出した[1]。ここでは負荷率上昇に起因する交流損失の上昇を考慮している。

Table 1 Specifications of analysis.

Conductor composition	Tri-axial BSCCO 1-layer
HTS tape thickness	0.3 mm
Cu stabilizer thickness	2.2 mm
PPLP® insulation thickness	a-b or b-c 5.5 mm outer c 3.0 mm
Nominal power	500 MVA
Nominal voltage	66 kV
Transport current	4.4 kA
Radii of phase-a,b,c	(42.0, 50.0, 58.0) mm
Thermal insulation pipe	SUS corrugated pipe

3. 解析結果およびまとめ

上述の通り、Fig.1 に断熱管の内径と最大送電可能なケーブル長の関係を異なる伝熱安定条件ごとに示す。ただし、液体窒素流量は上限を 60 liter/min にしている。同図より、海底に超電導ケーブルを敷設する場合、10km ほどであった送電可能なケーブル長が、ケーブル外径を増大させ液体窒素の沸点上昇を考慮し冷媒の温度上昇を 83.6K まで許容することで、40km を越えることがわかる。断熱管内径が 200 mm を越えてから送電可能距離の伸びが減少するのは、液体窒素の最適流量が上限の 60 liter/min に達してしまい、伝熱特性が支配的になるためである。このことからケーブルの最適設計の必要性があることがわかる。

今後は、海底の水深が一定でない場合の冷却特性や、内径変化も考慮した上でのケーブルの最適構造について検討する予定である。

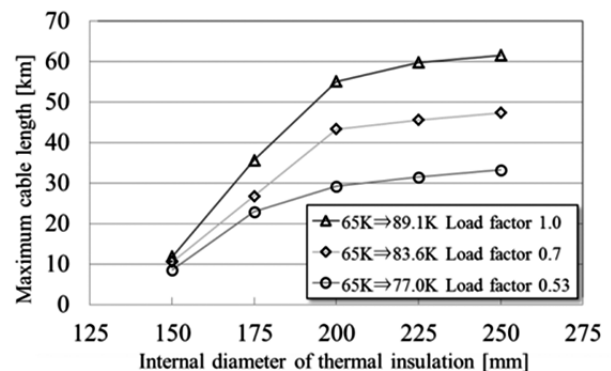


Fig.1 Maximum cable length in consideration of elevation of boiling point of the liquid nitrogen.

4. 謝辞

本研究の一部は、パワーアカデミー研究助成「萌芽研究」の支援を受けて実施されたものである。

参考文献

- O.Maruyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.86 (2012) p.168
- T.Ishigohka: The Journal of the Faculty of Engineering, Seikei University, Vol.40, No.2 (2003) p.1-6

薄膜高温超電導電力ケーブルの交流損失特性

AC loss characteristics of HTS power cable using REBCO wires

大屋 正義, 湯村 洋康, 芦辺 祐一 (住友電工);
 雨宮 尚之 (京都大学);
 丸山 修, 大熊 武 (ISTEC-SRL)

OHYA Masayoshi, YUMURA Hiroyasu, ASHIBE Yuichi (Sumitomo Electric Industries, Ltd);
 Naoyuki Amemiya (Kyoto University);
 Osamu Maruyama, Takeshi Ohkuma (ISTEC-SRL)
 E-mail: ohya-masayoshi@sei.co.jp

1. はじめに

「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、住友電工では薄膜線材を用いた 66kV/5kA 級三心一括型超電導ケーブルの開発を実施した[1]。本プロジェクトの重要開発テーマとして低交流損失化が掲げられており、線材製法や線材幅がケーブルの交流損失特性に及ぼす影響を検証するため、種々の導体サンプルを作製して交流損失特性を実測した結果について報告する。

2. 線材・ケーブル諸元

使用した薄膜線材の仕様を表 1 に示す。Clad 基板が磁性を有しているのに対して[2]、IBAD 基板は非磁性である。線材は 2mm あるいは 4mm 幅にスリットした後に、全周に銅メッキを施した。

試作したケーブル導体の諸元を表 2 に示す。全ての導体が超電導 4 層構造であり、その幾何学配置は同じである。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おり、サンプルの有効長は約 1.5m である。なお、77K における導体の臨界電流値(Ic)は表 2 に示すとおりであり、Clad 線材と IBAD 線材の特性差により、導体 E のみが高い Ic を有している。

Table 1 Specifications of HTS wires.

	Clad (4mm ^w)	Clad (2mm ^w)	IBAD (2mm ^w)
Substrate	Textured metal	Textured metal	Hastelloy®
Buffer layer	CeO ₂ /YSZ /CeO ₂	CeO ₂ /YSZ /CeO ₂	GZO/MgO /LMO/CeO ₂
HTS layer	GdBCO	GdBCO	GdBCO
Protection layer	Ag, Cu	Ag, Cu	Ag, Cu
Thickness	170 μm	170 μm	150 μm
Ic @77K	125~165A	60~90A	110~130A

Table 2 Specifications of HTS conductors.

Former	FRP pipe (21 mmφ)				
	A	B	C	D	E
1 st layer	Clad, 4mm ^w , MS	Clad, 4mm ^w , MS	Clad, 4mm ^w , MS	Clad, 2mm ^w , LS	IBAD, 2mm ^w , LS
2 nd layer	Clad, 4mm ^w , MS	Clad, 4mm ^w , MS	Clad, 4mm ^w , MS	Clad, 2mm ^w , LS	IBAD, 2mm ^w , LS
3 rd layer	Clad, 4mm ^w , MS	Clad, 4mm ^w , MS	Clad, 4mm ^w , MS	Clad, 2mm ^w , LS	IBAD, 2mm ^w , LS
4 th layer	Clad, 4mm ^w , MS	Clad, 2mm ^w , MS	Clad, 2mm ^w , LS	Clad, 2mm ^w , LS	IBAD, 2mm ^w , LS
O. D.	24 mm				
Ic @77K	8.3 kA	8.2 kA	8.3 kA	8.4 kA	12.4 kA

※MS: Mechanical Slit, LS: Laser Slit

3. 交流損失測定結果

各導体の交流損失測定結果を図 1 に示す。導体 Ic を近づけるため、導体 A~D は 74K (想定 Ic は約 10kA)、導体 E は 77K の測定結果を比較して示している。

- Clad 線材導体(A~D): 最外層に 2mm 幅線材を、さらに全層に 2mm 幅線材を用いることで低損失化が可能。
- スリット方法(B, C): 機械スリットよりも端部 Jc 低下の小さいレーザスリットを採用することで低損失化が可能。
- 2mm 幅線材導体(D, E): IBAD 線材を用いた導体 E よりも Clad 線材を用いた導体 D の損失が低い。

各通電電流ピーク値(I_{peak})に対する磁場分布と線材の Ic-B 特性を用いて算出した導体 Ic で損失を規格化した結果を図 2 に示す。なお、同図に京都大学の数値シミュレーション結果[3]も合わせて示す。

- Clad 線材導体: 4mm 幅および 2mm 幅線材を用いた導体(A, D)ともに、解析結果より損失が小さい。
- IBAD 線材導体: 2mm 幅線材を用いた導体(E)は、高負荷領域で解析結果とほぼ一致する。

本結果は、多層導体において、Clad 線材の基板磁性を活かした低損失化の可能性を示唆しており[4]、今後さらに検討を進める。

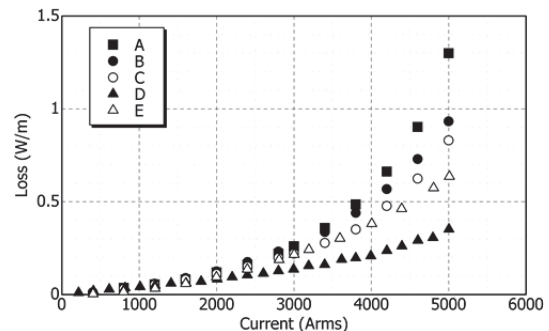


Fig.1 Measured AC loss of the HTS Conductors.

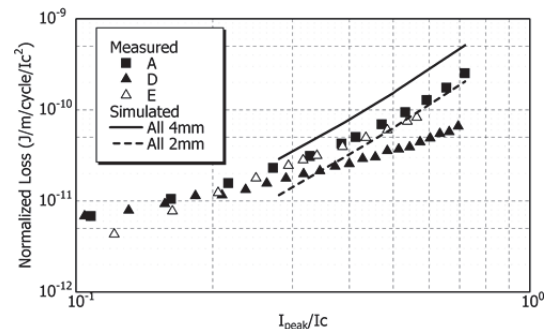


Fig.2 Normalized AC loss of the HTS Conductors.

謝辞

本研究の一部は、NEDO の委託により実施したものである。

参考文献

1. M. Ohya, et al.: Physics Procedia (2012) Vol. 36, p.849-854.
2. Y. Shingai, et al.: SEI Technical Review, Vol. 174 (2009) p.105-110.
3. N. Amemiya, et al.: Supercond. Sci. Technol. 24 (2011) 065013.
4. N. Amemiya, et al.: Supercond. Sci. Technol. 23 (2010) 014022.