

TSUBAME 共同利用 平成 27 年度 学術利用 成果報告書

超電導電力ケーブルの交流損失解析
AC loss analysis of superconducting power cable

野地英樹
Hideki Noji

都城工業高等専門学校
National Institute of Technology, Miyakonojo College
<http://www.cc.miyakonojo-nct.ac.jp/>

本研究では、古河電気(株)で製作された 2 層 REBCO ケーブルの交流損失を解析する。著者が開発した電気回路モデルと 2 次元有限要素解析法を組み合わせた方法によって、交流損失を計算した。これより、損失が層間の線材の相対位置角に依存することが明らかになった。この依存性は、同一層で隣接する線材間に発生する垂直磁界の大きさが、相対位置角の違いによって異なることにより生じる。実用化ケーブルでは各層の線材の螺旋ピッチが異なることから、ケーブル長さ方向に相対位置角が変化するため、交流損失はケーブル長さ方向に対して分布を持つ。相対位置角で変化する損失の平均値とケーブル長さ方向の位置で変化する損失の平均値は共に等しく、両平均値は測定値に等しいことが明らかになった。

This study investigates the losses in a two-layer REBCO cable fabricated by researchers at Furukawa Electric Co. Ltd. The losses were calculated using a combination of our electric circuit model with a two-dimensional finite element method. The results showed that the losses depended on the relative tape-position angle between the layers (θ/θ'), because the vertical field between adjacent tapes in the same layer varied with θ/θ' . The losses changed along the cable length because the difference between helical pitches of the tapes in each layer altered the θ/θ' along this direction. The average angle-dependent and position-dependent losses were equal and closely approximated the measured losses.

Keywords: AC loss, HTS cable, REBCO tapes, 2D FEM, EC model.

背景と目的

近年、超電導ケーブルの断面構造を変えることにより交流損失の低減が可能である、という研究結果が多く発表されている。例えば、線材間のギャップを小さくすることによる効果(ギャップ効果)[1]や、線材断面に対して臨界電流密度 J_c の低いエッジ部分を切除することによる効果(J_c 分布効果)[2]、幅の狭い線材を使ってケーブルを構成することによる効果(多角形効果)[3]等が報告されている。それに加えて著者は、層間の線材の相対位置角の調整による損失低減効果(相対位置角効果)を報告している[4]。

一般的に、ケーブルの損失計算には有限要素解析法が有効であることが知られている。それに対して、著者はケーブルの層電流を計算するために電気回路モデル(EC モデル)による計算法を開発してきた[5]。この EC モデルと 2 次元有限要素法(2D FEM)の組み合わせは、準 3 次元的電磁界解析と考えられ、損失計算法

として有効であると考えられる。本研究に先だって、著者は、有限要素解析ソフト COMSOL を使って単層と 2 層ケーブルの 2D FEM 解析に成功している。本研究では、EC モデルと 2D FEM を組み合わせた方法を適用し、古河電気(株)の S. Mukoyama 等が製作した 2 層 REBCO ケーブルの損失特性を明らかにする。

概要

Mukoyama 等が製作した 2 層 REBCO ケーブルの交流損失を解析する。交流損失は、著者が開発した EC モデルと 2D FEM を組み合わせることによって算出する。計算の結果、交流損失が層間の線材の相対位置角に依存することが明らかになった。実用ケーブルでは各層の線材の螺旋ピッチが異なるため、ケーブル長さ方向に相対位置角が変化し、交流損失はケーブル長さ方向に対して変化する事が分かった。相対位置角の変化に対する損失の平均値とケーブル長さ方

向の位置に対する損失の平均値は等しく、また両平均値は測定値に等しいことが明らかになった。

結果および考察

図 1 は、それぞれの規格化電流 (I_a/I_C) に対して、相対位置角 (θ/θ') に対する交流損失の特性を示したものである。 I_a と I_C は、それぞれ通電電流のピーク値とケーブルの臨界電流値である。ここでは、ケーブルの各層の線材の数 (N_1, N_2) は $N_1 = N_2 = 16$ 、各層の線材の螺旋ピッチ (P_1, P_2) は $P_1 = P_2 = \infty$ 、各層の層電流 (I_1, I_2) は $I_1 = I_2$ と固定している。この図から分かるように、損失は相対位置角に依存し、 $\theta/\theta' = 0.5$ で最小値となる。

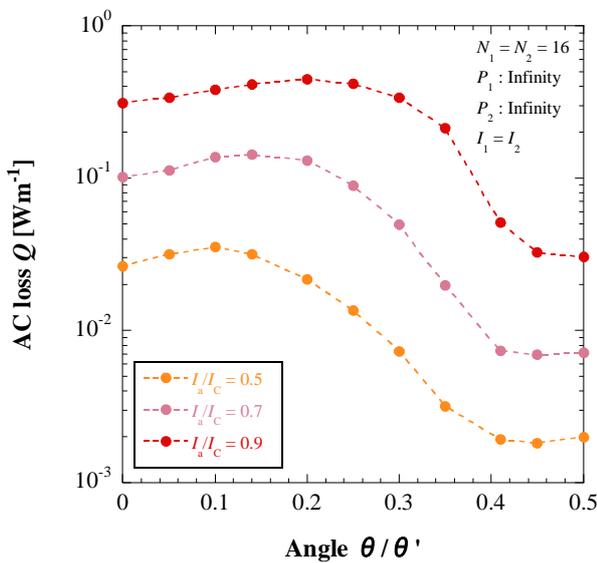


図 1 相対位置角に対する交流損失の特性

図 2 は、ケーブル長さ方向の位置に対する損失の特性を示したものである。この計算では、EC モデルより各層の層電流を求め、その値を 2D FEM に入力して損失を求めている。この計算では、 $N_1 = N_2 = 16$ 、 $P_1 = 340$ mm (S 方向)、 $P_2 = 280$ mm (Z 方向) と固定している。この図から明らかなように、損失はケーブルの長さ方向に対して分布している。このような損失の分布は、すでに N. Amemiya らによって報告されている[6]。彼等は、損失の計算に 3 次元有限要素法を使っているが、この方法は計算に長時間かかってしまうことが短所である。それに対して、著者の方法は準 3 次元的な解析方法であり、比較的シンプルで短時間の計算で済む。さらにこ

の研究によって、損失のケーブル長さ方向に対する分布が、損失の相対位置角に対する依存性が原因で発生することが明らかになった。

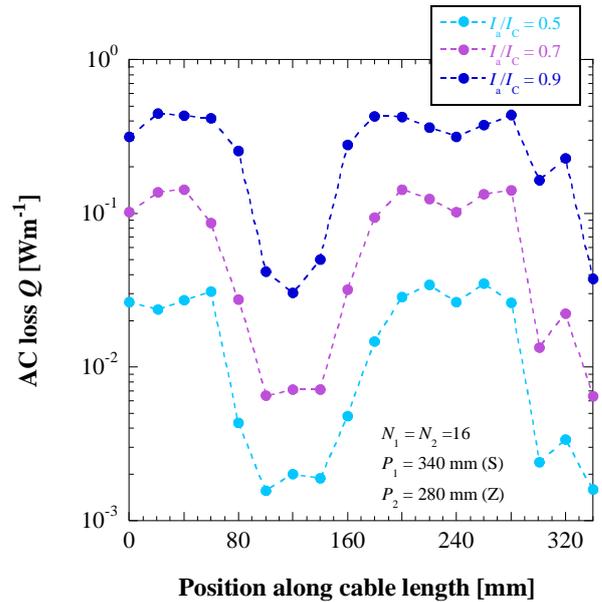


図 2 ケーブル長さ方向の位置に対する損失の特性

最後に、交流損失の計算結果と測定結果を比較する。図 3 には、相対位置角により変化する損失の平均値 (図 1 参照) とケーブル長さ方向の位置により変化する損失の平均値 (図 2 参照)、さらに損失の測定結果を示した。ここでは、 $N_1 = N_2 = 16$ 、 $P_1 = 340$ mm (S)、and $P_2 = 280$ mm (Z) と固定している。この結果から、両平均値は一致していることが分かる。これは、損失のケーブル長さ方向に対する分布が損失の相対位置角に対する依存性により発生することから考えると、妥当と言える。交流損失は、電圧端子法かカロリメトリック法で測定される。ケーブル長さ方向に損失が分布している場合、どちらの測定方法でも得られた測定結果は損失の平均値となる。そのため、両平均値と測定結果が一致することは、準 3 次元的電磁界解析法が有効であることを示していると言える。

さらに、このケーブルの損失低減法の例を示す。図 1 より明らかなように、 $\theta/\theta' = 0.5$ のときに損失は最小になる。実用ケーブルで相対位置角をこの値に固定するためには、各層の螺旋ピッチと方向を同一にしなければならない。図 4 に、層電流に対する螺旋ピッチ特性を示

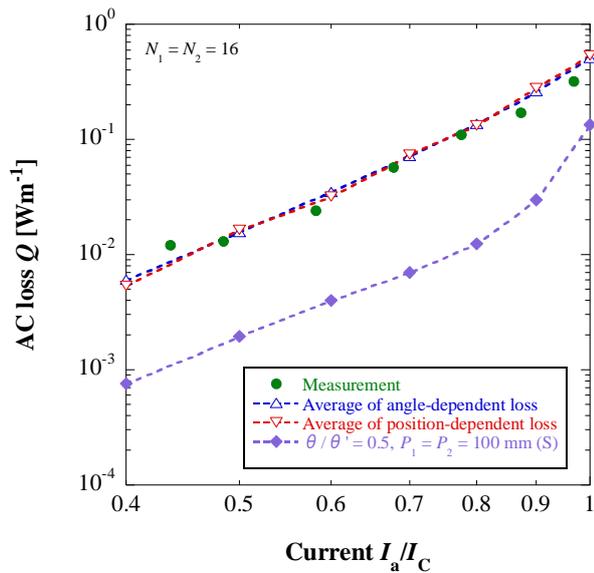


図 3 規格化電流に対する交流損失の特性

す。ここでは、 $\theta/\theta' = 0.5$ 、 $P_1 = P_2$ と固定している。ECモデルによる層電流の計算結果は、 $P_1 = P_2 = 100$ mm (S方向)で両層電流が一致することを示している。ケーブルをこの条件、すなわち $\theta/\theta' = 0.5$ 、 $P_1 = P_2 = 100$ mm (S方向)で製作した場合、この損失を図 3 に示した(紫色のダイヤモンド形でプロットされたもの)。この方法により、損失が約一桁程度低減できることが分かる。ただし、この方法は実用的には無理があるかもしれない。それは、この条件を実現するには各層の線材の数と螺旋ピッチを一致させる必要があるからである。そのため、これは損失低減法の一つの例と言えるかもしれない。

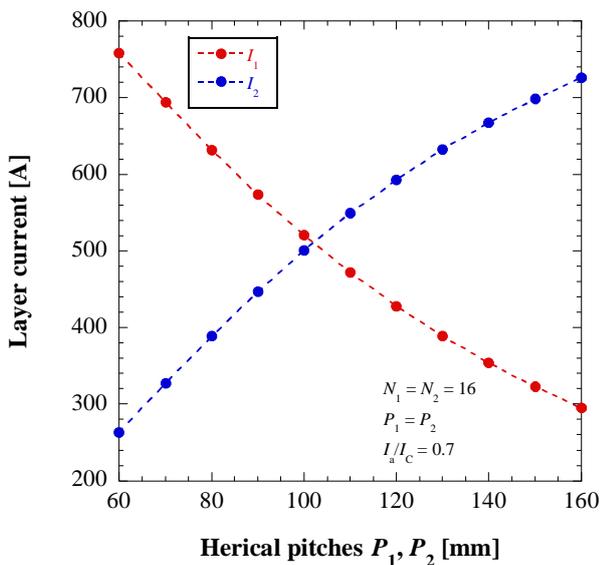


図 4 螺旋ピッチに対する層電流の特性

まとめ、今後の課題

2層 REBCO ケーブルにおいて、層電流が均一でかつ各層の螺旋ピッチが無大と仮定して計算を行なった場合、交流損失は相対位置角に強く依存することが分かった。実用ケーブルでは各層の螺旋ピッチは異なるため、この依存性により損失はケーブルの長さ方向に分布するようになる。損失の相対位置角依存性と損失のケーブル長さ方向への分布を求めるために、ECモデルと 2D FEM を組み合わせて損失計算を行なった。その結果、相対位置角により変化する損失の平均値とケーブル長さ方向の位置により変化する損失の平均値は、測定結果と一致することが確認された。これは、準 3 次元的電磁界解析による損失計算法が有効であることを示していると言える。

次年度は、古河電工(株)が製作した 3 層 REBCO ケーブルを対象に交流損失解析を行う予定である。

参考文献

- [1] Q. Li, N. Amemiya, K. Takeuchi, T. Nakamura, N. Fujiwara, *Supercond. Sci. Technol.* 23 (2010) 115003.
- [2] N. Amemiya, Q. Li, K. Takeuchi, T. Nakamura, M. Yagi, S. Mukoyama, Y. Aoki, N. Fujiwara, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 21 (2011) 943-946.
- [3] Q. Li, N. Amemiya, R. Nishino, T. Nakamura, T. Okuma, *Physica C* 484 (2013) 217-222.
- [4] H. Noji, *Int. J. Energy Eng.* 5 (2015) 152-162, <http://www.ij-ee.org/paperInfo.aspx?PaperID=16861>
- [5] H. Noji, S. Kawano, Y. Akaki, T. Hamada, *Phys. Procedia* 58 (2014) 322-325.
- [6] N. Amemiya, R. Nishino, K. Takeuchi, M. Nii, T. Nakamura, M. Yagi, T. Ohkuma, *Physica C* 484 (2013) 148-152.