

TSUBAME 共同利用 平成 26 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
Miyakononojo National College of Technology
<http://www.cc.miyakononojo-nct.ac.jp/>

超電導ケーブルの実用化のためには、その交流損失を低減することが必要である。REBCO 超電導テープでは、構成しているテープの幅を小さくすると交流損失が低減できることが知られているが、BSCCO 超電導ケーブルではその効果は明らかにされていない。本研究では、BSCCO テープ断面の超電導部分を楕円もしくは矩形と仮定し、1 層超電導ケーブルの交流損失を計算した。計算の結果、単層超電導ケーブルの交流損失はほとんどモノブロックモデルに近い値を示し、テープ幅が小さくなるほど高い規格化電流値 I/I_c において交流損失は減少するが、その効果は小さいことが分かった。

The reduction of AC loss in superconducting cable is crucial for its practical use. It has been found that the loss in REBCO cable is able to be reduced by using narrow tapes. On the other hand, in BSCCO cable, it has not been cleared which the loss is reduced or not by using narrow tapes. In this research, the cross section of the superconductor is approximated to an ellipse or a rectangle, and the losses in monolayer cables are calculated. The results indicate that the AC losses of the cables are almost equal to the theory of monoblock model, and the loss is decreased with a decrease of the tape width at high normalized current values I/I_c , but the effect is small.

Keywords: AC loss; superconducting cable; BSCCO tapes; high- T_c superconductor; 2D FEM

背景と目的

超電導電力ケーブルは、大電流を低損失で送電できるため実用化が期待されている。このケーブルを構成する超電導テープには、BSCCO テープか REBCO テープが使われる。近年では、REBCO テープの開発が進み、より高い I_c と低損失の特性を有するため、REBCO ケーブルの開発が進んでいる。超電導電力ケーブルの実用化のためにはより低い交流損失が要求されるため、REBCO ケーブルの交流損失の研究が盛んに行なわれている。REBCO ケーブルの交流損失を低減するためには、ケーブルを構成する REBCO テープの幅を小さくすることが有効であることが報告されている。一方で、BSCCO テープの幅を小さくすることがケーブルの損失を低減するのに有効なのかどうかは明らかにされていない。本研究では、BSCCO ケーブルの交流損失を解析するため、2D FEM 解析モデルを開発した。このモデルを基に、単層 BSCCO ケーブルの交流損失に対するテープ幅とテープ本数依存性を調査した。

概要

2D FEM 解析モデルは、有限要素解析ソフト COMSOL で作成した。このモデルでは、単層ケーブルのみを扱い、BSCCO テープの超電導部分を楕円もしくは長方形で近似している。フォーマーの直径を 17 mm

として固定し、その上に幅 4 mm のテープが 13 本、幅 2 mm のテープが 26 本、幅 1 mm のテープが 52 本、ケーブル長さ方向と平行に構成されていると仮定して交流損失を計算している。また、テープ数を減らすことにより隣接したテープ間の距離を大きくし、テープ間相互作用を減らすことによりテープが単独である場合の状態に近づけ、交流損失を減らすことができることを期待した。これを確認するため、テープ幅が 1 mm の場合を例にとり、テープ数を 52 本から 48 本まで減少させたときの交流損失を計算した。この報告書では、この 2 種類の計算結果について記述する。

結果および考察

テープ幅が 4 mm の場合について、超電導テープの断面を矩形と楕円で近似した場合の単層ケーブルの交流損失を図 1 に示す。赤丸が楕円の場合で、青丸が矩形の場合である。両者の値はほとんど変わらないが、規格化電流 $I/I_c=1$ において楕円の損失が矩形のものより大きくなっている。図 1 において、楕円に対するノリス方程式にテープ本数 n を掛けた値を点線で示す。ノリス方程式はテープが単独である場合の損失であるので、単層ケーブルの損失はその値より小さくなっていることが分かる。これは、単層ケーブルの場合には、隣接するテープがテープ面に垂直方向の磁場を低減させるためであると考えられる。我々は、多層ケーブルの損失を

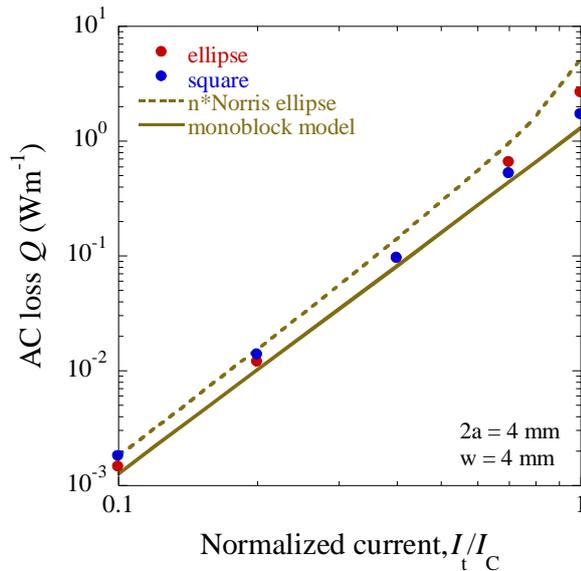


図 1 テープ幅が 4 mm の場合の単層超電導ケーブルの交流損失-通電電流特性

計算するのに回路モデルを提案し、各層の抵抗値を計算するのにノリス方程式を利用してきた。しかしながら、この解析結果によって、ノリス方程式を利用することは間違いだということが明らかになった。ただし、近年では、多層ケーブルの層電流分布を計算するためには各層の抵抗値を考慮する必要がないとの結果を発表し、新しい回路モデルを提案している。新しい回路モデルにより多層ケーブルの層電流を求め、2D FEM 解析により各層の損失を求めることで、準 3 次元的な解析が可能になるものと考えている。また、図 1 にモノブロックモデルの損失を実線で示す。単層ケーブルの損失はモノブロックモデルの損失より大きいので、テープ幅が 4 mm の場合にはケーブル断面が多角形になり、完全な円筒ではないため、テープ面に垂直方向の磁場がかかり損失が増加すると考えられる。

テープ幅が 4, 2, 1 mm の場合について、超電導テープの断面を楕円で近似した場合の単層ケーブルの交流損失を図 2 に示す。赤丸が 4 mm、緑三角が 2 mm、青四角が 1 mm の FEM 解析結果である。低電流では単層ケーブルの損失はモノブロックモデルとほぼ等しくなり、高電流ではテープ幅が小さくなるほど損失は小さくなり、モノブロックモデルに等しくなることが分かる。テープ幅が小さくなった場合、テープ 1 枚あたりの I_C はテープ幅に比例して小さくなる。テープ 1 枚あたりの損失は、ノリス方程式に従えば I_C の 3.37 乗に比例するので、例えば幅 1 mm のテープの損失は極端に小さくなる。そのため、テープ数 $n \times$ ノリス方程式で計算される損失はモノブロックモデルのものよりかなり小さくなる。しかし、実際には FEM の解析結果で見られたように、単層ケーブルの損失はモノブロックモデルの結果とほぼ一致する。このように、ノリス式の計算結果はあくまでテープ単独の場合の損失であり、単層ケーブルの損失の解析には向かないことが分かる。テープ幅が 1 mm になった場合に FEM 解析結果がモノブロックモデルに一致

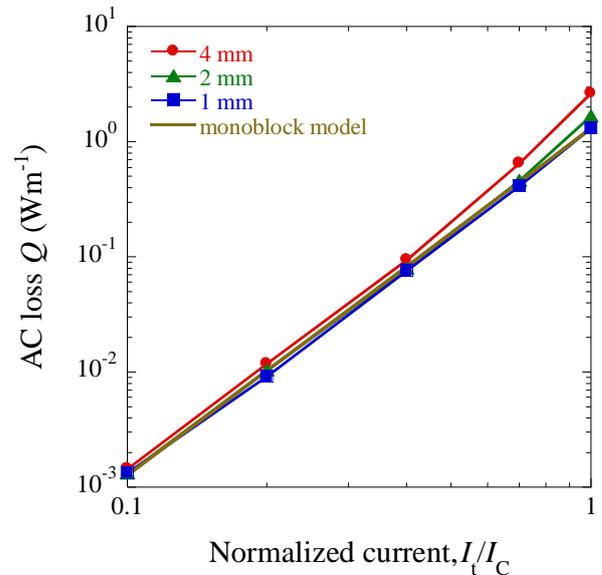


図 2 単層超電導ケーブルの交流損失に対するテープ幅依存性

するのは、ケーブル断面が多角形から円筒に近づいたためと考えられる。

テープの I_C 値が低い場合、ノリス式で表されるテープ単独の損失は低くなるため、テープ本数 $n \times$ ノリス式によって求められる単層ケーブルの損失は、モノブロックモデルにより求められる損失よりかなり低くなる。単層ケーブルにおいて、ケーブルを構成しているテープがノリス式で表されるようなテープ単独の損失に近づけるためには、テープ間のギャップを大きくする方法が考えられる。テープ間のギャップを大きくするためにはテープ本数を少なくする必要があり、そうするとケーブルの I_C 値は減少してしまうので、損失は増加することが考えられる。ギャップを大きくすることによる損失の低減効果とケーブル I_C が減少することによる損失の増加とが合わさって、ケーブルの損失を最小にするようなテープ本数があるものと考えられる。これを確認するために、テープ幅が 1 mm の場合でテープ本数を 52 本から 48 本まで減少させたときの損失を計算した。その結果を図 3 に示す。FEM 解析結果は、テープ本数に関わらずほぼモノブロックに一致している。しかし、FEM 解析結果を良く見ると、テープ本数が減少するほど損失はわずかながら増加することが分かる。すなわち、ケーブル I_C の減少による損失増加の効果が現れていると考えられる。また、テープ本数を少なくしても損失があまり変わらないことから、ケーブル作製時においてテープ間のギャップが狭すぎてケーブルを構成することが難しい場合は、テープ本数を少なくしても問題ないことが分かる。

まとめ、今後の課題

単層 BSCCO ケーブルの交流損失を解析するために、2D FEM 解析モデルを開発した。このモデルでは、テープの超電導部分を矩形か楕円で近似した。テープ

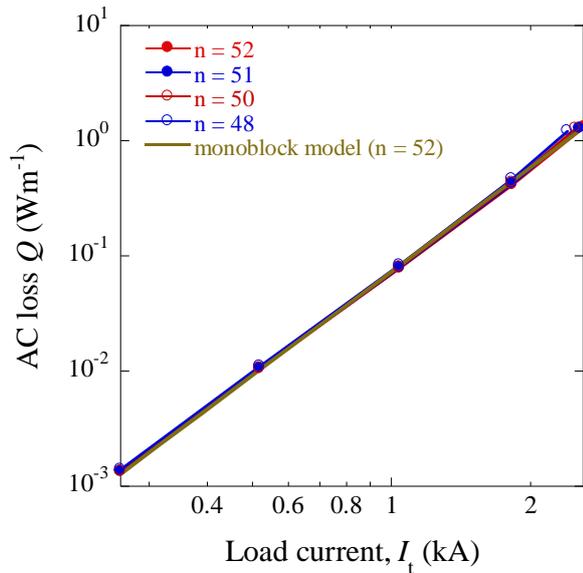


図 3 単層超電導ケーブルの交流損失に対するテープ本数依存性

の幅を 4 mm から 1 mm まで減少させて、幅の狭いテープを使うことによるケーブル損失への影響を調べた。ケーブルの直径と I_C 値は固定した。FEM 解析の結果は、低電流においてはテープ幅に依存せずに損失はモノブロックモデルにほぼ一致するが、高電流においてはテープ幅が減少するほど損失は減少し、テープ幅が 1 mm の場合は全電流領域でモノブロックモデルと一致することが分かった。次に、テープ本数を少なくすることにより、隣接するテープ間のギャップを大きくし、このことが損失に与える影響を調査した。テープ幅が 1 mm の場合において、テープ本数を 52 本から 48 本に減少させたが、FEM 解析の結果はテープ本数が少なくなるほど損失がわずかに増加することが分かった。これは、テープ本数が少なくなることにより、ケーブル I_C が減少するためであると考えられる。今後は、2 層以上の超電導ケーブルの解析を行なうため、回路モデルで各層に流れる電流を計算し、その値を基に 2D FEM で交流損失を計算する準 3 次元解析法を開発していく。