

臨界電流密度の磁場依存性を考慮した 超電導電力ケーブルの交流損失解析

野地 英樹* (都城高専)

AC loss analysis of superconducting power cables considering the dependence of
critical current density on magnetic fields

Hideki Noji (National Institute of Technology, Miyakonojo College)

1. まえがき

本研究では、4層導体+2層磁気シールドケーブル（フジクラ製）[1]を研究対象として、交流損失解析を行ってきた。フジクラ製ケーブルは、2013年に発表された66kV-5kA級ケーブルである。このケーブルの模式図を図1に示す。ケーブルを構成する超電導テープ（REBCO超電導体）の各層における巻き付け方向および巻き付けピッチ（これらをケーブル構成パラメータと呼ぶ）は公表されていないため、電気回路モデルにより適切な値を算出した（1次設計）。算出したケーブル構成パラメータによりケーブルの3次元モデルを作成し、高速化した H formulationによる3次元電磁界解析により交流損失を算出した（2次設計）。昨年、この結果を低温工学・超電導学会で報告したが、ケーブルの測定値に対して計算値は一致していなかった[2]。その原因を臨界電流密度(J_c)の磁場依存性にあるものと考え、 J_c - B 特性における臨界磁束密度(B_c)を変化させ、交流損失の通電電流特性を計算した。本発表では、その結果を報告する。

2. 計算方法

<2・1>電気回路モデル 本研究室が独自に開発した電気回路モデル[3]をベースに数式処理 Mathematica を使ってプログラミングし、総当たり式アルゴリズムによりケーブル構成パラメータを決定した。総当たり式アルゴリズムでは、32通りある超電導テープの巻き付け方向の組み合わせに対して、各組合せ当たり巻き付けピッチを0.1mから1mまで0.1m刻みで変化させ（合計3,200万通りの組み合わせ）、Norrisの方程式をベースにして最小の損失が得られるケーブル構成パラメータを決定した。これをケーブルの1次設計と呼んでいる。この方法で決定したケーブル構成パラメータは、あくまで次の3次元電磁界解析のための初期値となり、最適なケーブル構成パラメータは3次元電磁界解析により求められる。これをケーブルの2次設計と呼んでいる。

<2・2>3次元電磁界解析 電気回路モデルで決定したケーブル構成パラメータをベースに、有限要素解析ソフト COMSOL Multiphysics でケーブルの3次元モデルを作成し

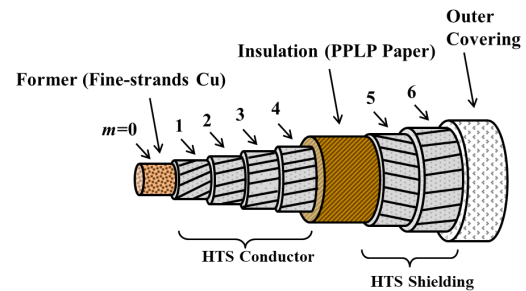


図1 超電導電力ケーブルの模式図

Fig. 1 Schematic diagram of superconducting power cable

た。3次元電磁界解析は、通常の H formulation [4]を基本として、AC/DCモジュールの磁場定式化(mfh)インターフェースを利用してプログラミングした。このプログラミングでは、次のMaxwell方程式を基本としている。

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{J} は電流密度、 \mathbf{H} は磁界、 \mathbf{E} は電界、 μ_0 は真空の透磁率である。さらに、次に示す超電導固有の抵抗率の式を使用した。

$$\rho_x = \frac{E_c}{J_c(B_n)} \left(\frac{J_x}{J_c(B_n)} \right)^{n-1} \quad (3)$$

$$\rho_y = \frac{E_c}{J_c(B_n)} \left(\frac{J_y}{J_c(B_n)} \right)^{n-1} \quad (4)$$

$$\rho_z = \frac{E_c}{J_c(B_n)} \left(\frac{J_z}{J_c(B_n)} \right)^{n-1} \quad (5)$$

ここで、 ρ は抵抗率、 E_c は臨界電界であり、 $E_c = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$ である。 $J_c(B_n)$ は磁束密度に依存する臨界電流密度であり、次の式で表される[5]。

$$J_c(B_n) = \frac{B_c}{B_c + B_n} J_{c0} \quad (6)$$

ここで、 B_c は臨界磁束密度であり、計算において $B_c = 0.1 \sim 100 \text{ T}$ まで変化させた。 B_n は超電導テープ表面に対し

て垂直方向の磁束密度であり、計算ではケーブル軸に対して法線方向の磁束密度として求めた。 J_{c0} は、 $B_n = 0$ における臨界電流密度であり、 $J_{c0} = 6 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ とした。 J_{c0} の値は実験結果に基づいている[1]。式(3)～式(5)における n は指数値であり、 $n = 25$ とした。また、次のオームの法則を使用した。

$$\mathbf{E} = \rho_x J_x \mathbf{i} + \rho_y J_y \mathbf{j} + \rho_z J_z \mathbf{k} \quad (7)$$

式(2)のファラデーの法則を基本として、式(3)～式(5)、式(7)および式(1)を代入すると \mathbf{H} のみが変数である式に変換され、これを *H formulation* と呼ぶ。

境界条件は導体とシールドそれぞれに設定し、導体にはアンペールの法則により境界の磁界を定義した。シールドの境界条件における磁界はゼロとした（完全磁気遮蔽が実現されているものと仮定した）。また、COMSOL の計算パラメータを最適化して *H formulation* による計算を高速化することが可能であり、この計算方法を「高速化した *H formulation*」と呼んでいる。3次元電磁界解析により、各層の交流損失および層電流を算出し、ケーブル全体の損失計算値と測定値を比較した。

3. 結果と考察

図2と図3に、ケーブルの交流損失 vs 通電電流特性を示す。ただし、図2は log-log プロットであり、図3は線形プロットである。白丸で示したデータはフジクラが実施した測定結果である[1]。実丸、実三角および実四角で示したのが計算結果であり、それぞれ $B_C = 0.6 \text{ T}$ 、 $B_C = 10 \text{ T}$ および $B_C = 100 \text{ T}$ となっている。 B_C の値が上昇するほど、超電導テープの $J_C(B_n)$ vs B_n 特性が改善され、 B_n の値が大きくなっても $J_C(B_n)$ の値は減少しにくくなる。実丸で示した $B_C = 0.6 \text{ T}$ の場合、低電流側では測定値とほぼ一致するが、高電流側では計算値が測定値より大きくなる。この高電流側での傾向は、図3でより鮮明になり、計算値は測定値より大きいことが分かる。一方、実三角および実四角で示した $B_C = 10 \text{ T}$ および $B_C = 100 \text{ T}$ の計算結果はほぼ同一であり、低電流側では計算値が測定値より小さくなるが、高電流側では計算値が測定値に近づく。この高電流側での傾向は、図3でより鮮明になっている。低電流側では、おそらく測定の精度があまり高くなく、誤差が大きいものと推察される。高電流側、特に $I_a = 5 \text{ kA}_{\text{rms}}$ のときに、例えば実三角で示した $B_C = 10 \text{ T}$ の計算値が $Q = 2.4 \text{ W/m}$ であるのに対し、測定値が $Q = 1.3 \text{ W/m}$ とほぼ半分になっているのは、計算方法に何らかのミスがあるためと考えられる。

4. 結論

$I_a = 5 \text{ kA}_{\text{rms}}$ のときに計算値が大きくなる問題は、おそらく電気回路モデルで最小ピッチを 0.1 m 、変化幅を 0.1 m とそれぞれ大きくしたことが原因と考えられる。今後、さらに最適なケーブル構成パラメータについて調査していく。

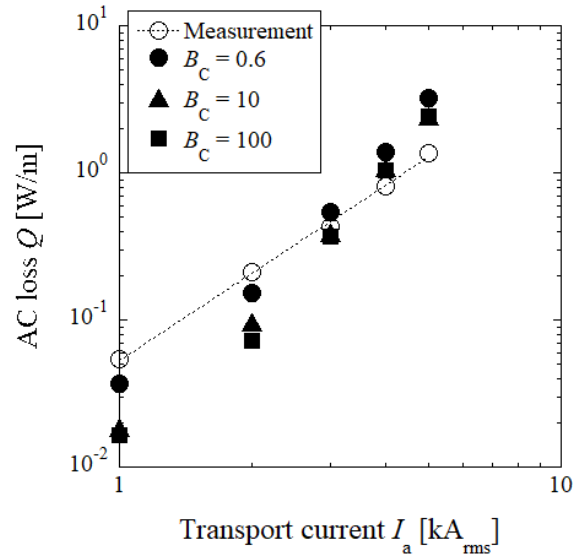


図2 交流損失 vs 通電電流特性 (対数)

Fig. 2 Property of AC loss vs transport current (logarithmic)

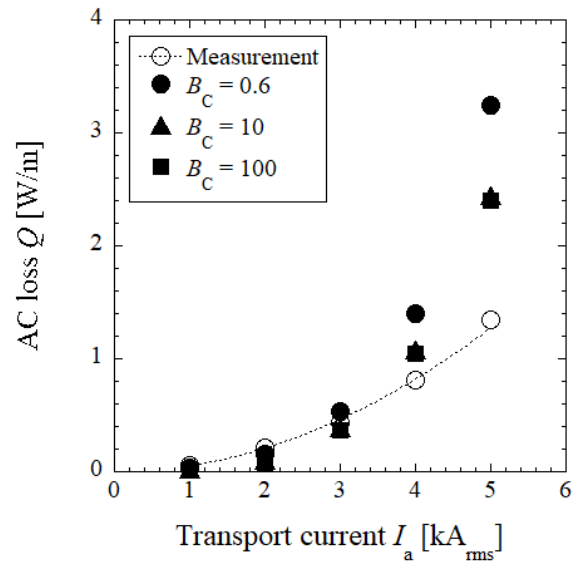


図3 交流損失 vs 通電電流特性 (線形)

Fig. 3 Property of AC loss vs transport current (linear)

文献

- [1] M. Daibo, et al., *Physics Procedia*, 58, 314~317 (2014)
- [2] 野地英樹: 2023年春季低温工学・超電導学会講演概要集 p.51
- [3] H. Noji, *Physics Procedia*, 58, 322~325 (2016)
- [4] R. Brambilla, *Supercond. Sci. Technol.*, 20, 16~24 (2007)
- [5] N. Amemiya, et al., *Physica C*, 484, 148~152 (2013)