

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2013～2015

課題番号：25420928

研究課題名（和文）超伝導直流送電用に最適化された新しい電力ケーブルの設計

研究課題名（英文）Calculation for design of new HTS DC power cables

研究代表者

渡辺 裕文（WATANABE, Hirofumi）

中部大学・超伝導・持続可能エネルギー研究センター・准教授

研究者番号：10447584

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000 円

研究成果の概要（和文）：高温超伝導線材の臨界電流は線材の周りの磁場の強さの影響を受け変化する。超伝導直流送電用ケーブルには複数の線材が用いられ、ケーブル中の線材配置によって線材周りの磁場分布が変化するため、ケーブルに通電可能な最大電流は線材の配置により変化する。本研究では超伝導直流送電用ケーブルの設計において最適な線材配置を求めるため、磁場と臨界電流密度の関係を表す式を実験的に求め、線材配置に対するケーブルの臨界電流を求めるプログラムを作成した。モデルケーブルに対する計算結果と実験結果の比較により、プログラムが有効に働いていることを確認した。

研究成果の概要（英文）：It is known that a critical current of an HTS tape depends on a magnetic field distribution around it. Since an HTS DC power cable is composed of a number of HTS tapes, the magnetic field distribution around the HTS tape in the cable and its critical current depend on the arrangement of the HTS tapes. A program calculating critical currents of cables was developed in this study. To develop the program, the relationship between a magnetic flux density and a critical current density was obtained experimentally.

Numerical models of cables were composed and their critical currents were calculated. The calculated results showed that the critical currents depended on the arrangements of the HTS tapes strongly. Model cables were assembled based on the numerical models and their critical currents were measured. The calculated results agreed well with the experimental ones, which indicated that the program developed in this study worked well.

研究分野：超伝導直流送電システム

キーワード：超伝導直流送電 超伝導ケーブル 臨界電流

1. 研究開始当初の背景

(1) 低炭素化社会の実現のために、再生可能エネルギーの積極的な導入と共に、効率的なエネルギー利用のための社会基盤の整備が進められている。超伝導直流送電は超伝導の電気抵抗 0 の性質を利用し、送電における損失を減らす事が出来るため、研究が進められ、近年実際の送配電システムに適用されつつある。

(2) 超伝導直流送電システムにおいて超伝導ケーブルはシステムのコストの中で大きな部分を占める。そのため、超伝導線材当たりの通電可能電流が大きいケーブルが送電システムのコスト低減のために、特に長距離送電用のケーブルにおいて、求められている。

(3) 線材の臨界電流は線材周辺の磁場に影響を受けるため、線材間に隙間を開けて配置するなどにより、磁場分布を整えることで線材の臨界電流を向上させることが出来る①。このことを利用すれば線材当たりの通電可能電流が大きいケーブルを作ることが出来ると期待される。

2. 研究の目的

(1) 線材配置を最適化することにより通電電流が大きい超伝導直流送電用ケーブルを設計する。そのために、ケーブル中での線材配置からケーブルの臨界電流を計算するプログラムを完成させる。

(2) 磁場により線材の臨界電流は影響を受けるため、プログラムを完成させるには線材周辺の磁束密度と線材の臨界電流密度の関係を求める必要がある。それらの関係を表す式として Gömöry ら②が提案した式を採用する。式の中で必要なパラメーターを実験的に求めることで磁束密度と線材の臨界電流密度の関係を表す式を求める。

(3) ケーブルの数値モデルを作成し、様々な線

材配置に対して臨界電流を計算する。ケーブルの数値モデルに対応して、実際のモデルケーブルを作成し、臨界電流を測定し、計算結果と実験結果を比較する。それにより、プログラムの有効性を検証し、設計に利用できることを確認する。

3. 研究の方法

(1) 計算プログラム中で線材をモデル化するために図 1 に示すように、線材を小要素に分割する。プログラム中で、ある要素の臨界電流密度は、その要素における磁束密度に依存するとする。

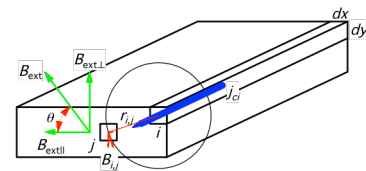


図 1 線材のモデル

(2) 磁束密度はビオサバールの法則により計算する。要素 i を流れる電流による要素 j の磁束密度は

$$dB_{i,j} = \mu \frac{j_{ci} dx dy}{2\pi r_{i,j}} \quad [1]$$

と表される。ここで、 μ は透磁率、 j_{ci} は要素 i での臨界電流密度、 $r_{i,j}$ は要素 i から要素 j の距離、 dx と dy は要素の幅と高さを表す。要素 j の磁束密度は $dB_{i,j}$ を i について足し合わせることで求められ、

$$B_j = \sum_i dB_{i,j} \quad [2]$$

と表される。

(3) 式 [1] と [2] より、磁束密度と臨界電流密度の関係が得られれば、再帰的に計算する事により、線材内の臨界電流密度分布が得られる。ここで、磁束密度と臨界電流密度の関係を Gömöry ら②が提案した関係式を用いる。

$$j_{cj} = j_{c0} / \left(1 + \frac{\sqrt{k^2 B_{\parallel j}^2 + B_{\perp j}^2}}{B_0} \right)^\beta \quad [3]$$

ここで j_{cj} は要素 j での臨界電流密度、 $B_{\parallel j}$ と $B_{\perp j}$ は B_j の線材表面に対して平行と垂直成分を表す。そして、 j_{c0} , k , B_0 , β の四つは実験で定める変数である。

(4) 式[3]は $B_{\parallel}$ と $B_{\perp}$ に対して j_c を与える式になっている。一本の線材を用い、線材表面に対して、垂直及び平行に外部から磁場をかけ、臨界電流を測定する。実験により測定する臨界電流を I_{cex} 、計算により得られる j_c を足し合わせるにより求める臨界電流を I_{cc} 、データ数を N とすると、

$$\Delta I_c = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (I_{cc,i} - I_{cex,i})^2} \quad [4]$$

の ΔI_c が最小になるように式[3]の四つの変数を定める。これにより磁束密度と臨界電流密度の関係式を得る。式[3]を再帰計算の中に組み込む事により、ケーブルの数値モデルから臨界電流を求めるプログラムを完成させる。

(5) 単純な線材配置で行った臨界電流の測定結果と計算結果の比較を行う。これにより、完成したプログラムによる計算が実験結果を再現するか確認する。

(6) ケーブルの数値モデルを作り、臨界電流を計算することにより、臨界電流が最も大きくなる線材配置を求める。線材のサイズは $4.5 \times 0.26\text{mm}$ とし、その領域を 10×5 のノードで分割する。数値モデルの線材配置は内層、外層 6 本ずつの線材を円筒状に配置する 2 層構造として、外層の線材は内層の線材の間の上になるように配置する。線材間の隙間に対する臨界電流の依存性を計算するために径 R (ケーブルの中心と内層の線材の中心との距離) と、層間の間隔 d を変化させて計算を行う。数値モデルの例として $R=4.18\text{mm}$ と 8.08mm 、 $d=0\text{mm}$ と 0.5mm の場合を図 2 に示す。通電方向は全ての線材について同方向とする。

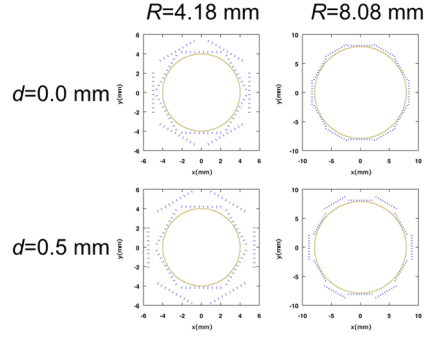


図 2 ケーブルの数値モデルの例

(7) 30cm 程度の長さのモデルケーブルを自作する。自作するケーブルは計算結果と比較するために、線材を密に巻いた配置のケーブルと計算により最も大きな臨界電流を与えた配置のケーブルとする。実験により求めた臨界電流と計算により求めた臨界電流を比較する事により、完成したプログラムを評価する。

4. 研究成果

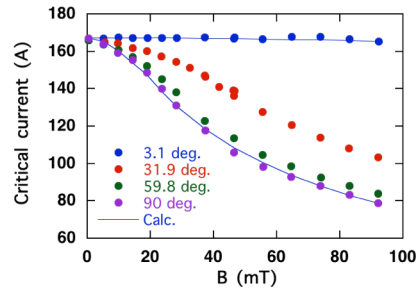


図 3 外部磁場に対する臨界電流

(1) 図 3 に式[3]の四つの変数を求めるために行った、外部磁場に対する臨界電流の測定結果を示す。用いた線材は 160A 級の Bi 系線材である。線材は通電方向を軸として一様な磁場内で回転させた。磁場の方向を表す角度を図 1 に示す。磁場は 0mT から 100mT の範囲で変化させ、 $1\mu\text{A}/\text{cm}$ の基準で臨界電流を求めた。この結果を用いて ΔI_c が最小になるように式[3]の四つの変数を求めた。式[3]の四つの変数として、 $j_{c0} = 173.3\text{A}/\text{mm}^2$, $k = 0$, $B_0 = 0.0318\text{T}$, $\beta = 0.69533$ を得、磁束密度と臨界電流密度の関係を表す式を得た。図 3 の実線

は結果を元に 3.1° と 90° に対して計算した臨界電流の結果である。

(2) 求めた式[3]をプログラムに組み込み $R=4\text{--}10\text{mm}$ 、 $d=0, 0.5, 1\text{mm}$ の範囲でケーブルの数値モデルを作成し、臨界電流の計算を行った。 R を大きくすることは線材間に隙間を開ける事に対応している。計算では全ての線材に等量の電流が流れるとした。数値モデルを構成する線材の臨界電流の計算結果を図4に実線で示す。図4の黒い横線は自己磁場中での一本の線材の臨界電流の測定結果である。臨界電流の計算結果は線材配置により大きく変化した。線材を密に配置したモデルでは線材の臨界電流は線材一本の臨界電流より小さく、 R を増加させるに連れ臨界電流は増加し、密の場合に比べ最大で約20%増加した。

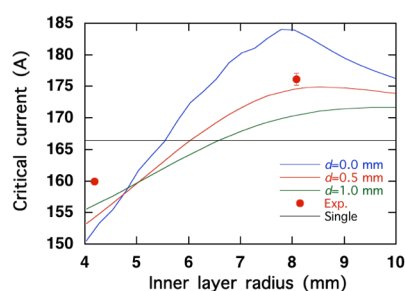


図4 臨界電流の計算結果と測定結果

(3) $R=4.18\text{mm}$ と 8.08mm として、数値モデルと同じ配置で二本のモデルケーブルを作成した。 $R=4.18\text{mm}$ は線材が最密になる構造、 $R=8.08\text{mm}$ は計算により臨界電流が最大となった R である。 $1\mu\text{A}/\text{cm}$ の基準でモデルケーブルを構成する複数の線材について臨界電流を測定した。臨界電流の測定結果はばらついたが、これはモデルケーブルの組立精度のためであると考えている。測定結果を計算結果と共に図4に示す。測定では R を変化させる事により約10%臨界電流が増加するという結果を得た。

(4) 計算結果と実験結果を比較した。今回用い

た線材には厚さ 0.05mm の銅が被覆され、絶縁のため厚さ約 0.07mm のポリイミドテープが巻かれている。これらを考慮すると d は最低でも 0.24mm より大きい。モデルケーブルの組立精度を考慮すると d は概ね 0.5mm 程度であると考えられる。このことから計算結果と実験結果は良く一致しており、プログラムはうまく働いていると結論づけた。本研究の手順により、数値モデルから計算により超伝導直流送電用ケーブルの臨界電流を求めることが出来る。

<引用文献>

① J. Sun *et al.* Physics Procedia **27** (2012) 372.

② F. Gömory *et al.* Supercond. Sci. Technol. **19** (2006) 732.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計1件)

① H. Watanabe, “Critical current measurement for design of HTS DC power cables”, 26th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Material Conference 2016, 2016/3/9, New Delhi (India).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 裕文 (WATANABE, Hirofumi)

中部大学・超伝導・持続可能エネルギー研究センター・准教授

研究者番号：10447584