超電導コイルにおける偏流特性と鉄芯法によるその抑制

非会員 大瀧 直浩* 正員 中村 圭二*
 正員 山口作太郎* 正員 野村 新一**
 正員 二ノ宮 晃*** 非会員 佐藤 利和****
 非会員 長谷川靖洋*5 正員 花井 哲*6

Characteristics of Current Imbalance on Superconducting Coils and Suppression with Iron Core Method

Naohiro Ohtaki*, Non-member, Keiji Nakamura*, Member, Sataro Yamaguchi*, Member,
 Shin-ichi Nomura**, Member, Akira Ninomiya***, Member, Toshikazu Sato****, Non-member,
 Yasuhiro Hasegawa*5, Non-member, Satoshi Hanai*6, Member

This paper describes characteristics of current imbalance in AC-operated superconducting coil and trial for its suppression with iron core method. Measurements of strand current in the frequency less than ~ 1 Hz revealed that the current imbalance significantly occurred to the frequency increase, and that the critical frequency almost corresponds to a frequency where the coil leakage inductance is comparable to the coil resistive. Such a current imbalance was not seriously affected by ferromagnetic materials set in the coil. The iron core method was effective for suppression of the current imbalance, especially in the low frequency region, and inductance measurements suggested that the suppression effect was attributed to inductance compensation as well as reduction of effective electro-magnetic coupling between coil strands.

キーワード：偏流，超電導コイル，鉄芯法，素線

Keywords: current imbalance, superconducting coil, iron core method, strand

* 中部大学工学部

〒487-8501 春日井市松本町 1200

College of Engineering, Chubu University
 1200 Matsumoto, Kasugai 487-8501

** 東京工業大学原子炉工学研究所

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute
 of Technology

2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550

*** 成蹊大学工学部

〒180-8633 武蔵野市吉祥寺北町 3-3-1

Department of Electrical Engineering and Electronics, Seikei
 University

3-3-1, Kichijoji-Kitamachi, Musashino 180-8633

**** 名古屋大学理学部

〒464-8601 名古屋市中種区不老町

Faculty of Science, Nagoya University

Furo, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601

*5 埼玉大学大学院理工学研究科

〒338-8570 さいたま市下大久保 225

Graduate School of Sci.&Eng., Saitama University
 255, Shimo-Okubo, Saitama 338-8570

*6 (株) 東芝 京浜事業所

〒230-0045 横浜市鶴見区末広町 2-4

Keihin Product Operations, Toshiba Corporation

2-4, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-0045

1. はじめに

交流超電導応用電力機器で用いられている超電導素線は、極細多芯構造がとられている。極細多芯線ではフィラメント間の磁氣的結合を防ぐために撚りを施すことができるように、線径は小さくせざるを得なく、1本の超電導素線に流せる電流の値は限られてしまう。従って、所定の電流容量を得るためには多数本の超電導素線を撚り合わせて導体を形成する。さらに素線間の結合損失を最小化するためには、各素線間を互いに絶縁することが最も良い方法とされている。しかし抵抗成分を持たない超電導導体においては各素線を通る電流がリアクタンス成分によってのみ決まり、その僅かなばらつきにより電流の不均一、即ち偏流が生じるため、交流損の増大や、ある素線への電流集中による実効的な通電電流の低減などが問題視されている。

そこで我々は、多芯撚り線を使用した交流超電導コイルの各素線の電流電圧波形を実測することにより、偏流現象、特にその周波数依存性について定量的に調べる⁽¹⁾と共に、鉄芯法による偏流の抑制を試みた。これまでに偏流抑制法として鉄芯法⁽²⁾が提案され、2本素線の超電導導体による

原理実証が行われている⁽³⁾。本研究では、より実用コイルに近い9本素線からなる超電導コイルに鉄芯法を施し、その有効性について実験的に検討する。そして実測した各素線インダクタンスを用いて等価回路によるモデル計算⁽⁴⁾を行い、その妥当性を検討した。

2. 超電導コイルの等価回路と偏流発生および鉄芯法によるその抑制

素線間絶縁された n 本の撚り線からなる超電導コイルの等価回路を図1に示す。並列接続された各素線には電流測定用シャント抵抗などの抵抗成分が直列に接続されている。シャント抵抗 R_i ($i = 1 \dots n$)、各素線の自己インダクタンス L_{ii} 、各素線間の相互インダクタンス L_{ij} ($i = 1 \dots n$, $i \neq j$) を用いると各素線の電圧 V_n と電流 I_n は、次の関係を満たす。

$$V = ZI = (R + j\omega L)I \dots\dots\dots (1)$$

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

$$I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

各素線を端部で短絡し、電源（起電力 E ）を接続すると、

$$V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n = E \dots\dots\dots (6)$$

であるため(1)式より電流 I を求められる。これを簡単な超電導素線が2本の場合に適用すると、素線電流の比は、

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2 + j\omega(L_{22} - L_{21})}{R_1 + j\omega(L_{11} - L_{12})} \dots\dots\dots (7)$$

となる。シャント抵抗を用いない場合、2素線に流れる電流の比は $I_1/I_2 = (L_{22} - L_{21})/(L_{11} - L_{12})$ で表され、漏れインダクタンスの比により決まる。超電導コイルの場合は各素線が密に巻かれているために互いの結合が非常に強く、 $L_{11} \approx L_{22} \approx L_{12} (= L_{21})$ となる。したがって、漏れインダクタンスの僅かなばらつきが、偏流に大きな影響を与える。また、結合係数 $k_{12} = L_{12}/(L_{11} \cdot L_{22})^{1/2}$ を用いると $I_1/I_2 = (L_{22} - k_{21}(L_{11}L_{22})^{1/2})/(L_{11} - k_{12}(L_{11}L_{22})^{1/2})$

図1 等価回路

Fig. 1. Equivalent circuit.

図2 2素線コイルでの鉄芯法等価回路

Fig. 2. Iron core method for two strands coil.

と表すこともできる。

一方鉄芯法では、互いに絶縁された超電導素線を互いに電流の向きが逆になるように鉄芯に巻きつける。2素線での等価回路は図2のようになり、2つの素線間で異なる大きさの電流が流れようとしても、それを打ち消すような起電力が鉄芯の巻線部に発生し、偏流は抑制される。

N 本の素線からなる超電導コイルに鉄芯法を適用する場合、鉄芯部のインダクタンス行列 L_{iron} を用いると(1)式は、

$$Z = R + j\omega(L + L_{iron}) \dots\dots\dots (8)$$

となり、図2の2素線コイルに適用すると素線電流比は

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2 + j\omega(L_{22} - L_{21} + L_{iron22} + L_{iron21})}{R_1 + j\omega(L_{11} - L_{12} + L_{iron11} + L_{iron12})} \dots\dots\dots (9)$$

で与えられる。 L_{iron11} , L_{iron22} は鉄芯部分の自己インダクタンス、 L_{iron12} , L_{iron21} は鉄芯による相互インダクタンスである。鉄芯部の自己インダクタンスと相互インダクタンスの和が、コイルにおける自己インダクタンスと相互インダクタンスの差に比べて十分に大きいならば、 $I_1/I_2 \approx 1$ となり、コイルの漏れインダクタンスを補償する程度の比較的小型の鉄芯コアを用いて偏流を抑制できる。また(7)式と(9)式の比較から、鉄芯法を施すと自己インダクタンスが増加し相互インダクタンスは減少するので素線間の実効的結合が弱まり偏流が抑制されるとも解釈できる。

3. 実験装置および実験方法

図3に実験装置を示す。クライオスタット内に収められ

た超電導コイルは液体ヘリウムによって 4.2 K に保たれている。通電電流は電源から電流リード・短絡板を介して超電導コイルに供給される。コイル導体は電気的に絶縁された 9 本の NbTi 製超電導撚り線（一次撚りピッチ：約 10 cm，二次撚りピッチ：約 15 cm，SS 撚り）を並列接続している。素線の直径は 0.3 mm，フィラメントの直径および数は各々約 20 μm ，約 196 本であり，自己磁界における素線の臨界電

図 3 実験装置

Fig. 3. Experimental apparatus.

図 4 9 本素線からなる撚り線

Fig. 4. Twisted superconducting wire composed of 9 strands.

図 5 鉄芯法における超電導配線

Fig. 5. Connection of superconducting wire in iron core method.

流値は 100 A 程度である。コイル電流波形を検出するために各素線に 60~80 $\mu\Omega$ 程度のシャント抵抗を設けている。電流リードも超電導素線と同じ本数の絶縁被覆銅素線からなり，短絡板をはずすと各コイル素線に流れる電流は各銅素線に流れる電流と等しくなる。超電導コイルの直径および高さは 366 mm，100 mm であり，巻数は 1 層目 75 ターン，2 層目 74 ターンの合計 149 ターンである。コイルの中心磁束密度は 80 A 通電時に約 3.6 mT である。

今回使用した超電導導体は 3 本素線からなる 1 次撚り線を，3 本撚り合わせた 2 次撚り線からなり，1 次撚りの組み合わせ毎に素線番号を，各々 1~3，4~6，7~9 とする。実験条件は通電周波数：20 mHz~1 Hz，通電電流 10 A~80 A で行った。各シャント抵抗の両端の電圧波形と各素線でのコイルの両端の電圧波形を A/D 変換ボードによってデジタル的に取り込み，各電圧電流の振幅を求める。

一方，鉄芯法による偏流抑制試験では各素線と鉄芯コアを図 5 のように接続し，コアに対する磁界の影響を除くため鉄製シールドケース内にコアを収めた。用いたコア鉄芯（トーキン製，N50）の飽和磁束は 0.7 T，コアの内径 25 mm，外径 35 mm，高さ 10 mm である。このコアにおいて 2 A 以内の電流のばらつきにおいては鉄芯は飽和しない。さらに，等価回路に必要なインダクタンス行列を得るために各超電導素線のインダクタンスを測定した。各素線は電気的に独立した状態になるよう短絡板を取り外し完全に絶縁された状態で測定している。測定には LCR メータを使用し 20 Hz の交流電流を単独の素線に投入したときに生じる自己及び他の素線の励起電圧，位相特性から自己インダクタンスと相互インダクタンスを計測した。このとき，電流リード線のインダクタンス成分は排除できるように考慮している。測定結果は 100 個の実測値を平均処理をした。各素線の測定誤差は 1 μH 以内に収まっている。

4. 実験結果

〈4・1〉 超電導コイルにおける偏流の通電周波数依存性
通電周波数を変化させたときの偏流特性を図 6 に示す。

図 6 偏流の周波数依存性（実験値）

Fig. 6. Observed frequency dependence of amplitude for current imbalance.

図7 各素線における自己インダクタンスおよび相互インダクタンス

Fig.7. Self and mutual inductances for coil strands.

ここでは、偏流がおきていない（各素線が等しい）ときの素線電流で規格化し、

$$\text{電流比} = \frac{9I_n}{\text{全電流}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

のように定義された各素線電流比を用いて偏流を示した。周波数が 50 mHz 以下においては素線間の電流のばらつきが $\pm 20\%$ 程度の範囲に収まっており、これは各素線に直列接続されたシャント抵抗のばらつきによるものであり、その電流比はシャント抵抗比に対応している。一方、100 mHz を越えると偏流が顕著に観測され、1 Hz においては各素線に流れる電流のうちで最大のものと最小のものの比が 7 倍程度まで達している。なお、この電流比は通電電流にあまり依存しなかった。

この結果を等価回路による計算と比較する。まず計算に必要なインダクタンスの測定結果を図 7 に示す。図 7 では各素線の相互インダクタンスおよび自己インダクタンスの値を示しており、左から順に素線 1 から素線 9 の各素線に対するインダクタンスをまとめている。素線 5 に着目すると、1 次撚り線を構成している素線 4, 6 に対する相互インダクタンス L_{45}, L_{56} は、他の素線に対する素線 5 の相互インダクタンスよりも大きくなっており、1 次撚りとして組合わせられた 3 本の素線間の結合は他のものより強い傾向が見られる。結合係数は 1 次撚りとの組み合わせの平均が 0.9971 であるが、2 次撚りとの平均は 0.9957 であった。

これらのインダクタンスを用いて等価回路により計算した偏流の周波数依存性について図 8 に示す。計算結果を図 6 の実測値と比較すると、電流振幅の比は比較的よく一致しており、100 mHz 付近から偏流が顕著になる様子がわかる。(7) 式からわかるように偏流が顕著になるのは、抵抗成分に比べ漏れインダクタンスによるリアクタンス成分が大きくなる場合である。本実験で用いた 3×3 本素線の超電導コイルの場合、インダクタンスのばらつきがおおよそ 40~50 μH 程度、また各素線の抵抗分は直列に接続されたシャント抵抗の 70 $\mu\Omega$ 程度と見積もられるので、インダクタンスのばらつきに対応する漏れインダクタンスとシャント抵抗により得られる時定数は 1.4~1.8 s 程度となる。そ

図8 偏流の周波数依存性（計算値）

Fig.8. Frequency dependence of calculated normalized current amplitude.

の時定数の逆数は実験で観測された偏流が顕著となる周波数（数百 mHz）に比較的良好に一致している。

〈4・2〉鉄芯法による偏流抑制効果 本実験では鉄芯法で用いる磁性体コアに対するコイル磁界の影響を除くために鉄製シールドケースを用いたが、シールドケースの有無により偏流の周波数依存性の違いを調べたところほぼ同じであり、本実験ではシールドケースが偏流にはほとんど影響しないことがわかっている。これはインダクタンスの測定よりシールドケースによって各自己インダクタンス・相互インダクタンスの増加が全ての素線に対してほぼ一様に起こったためと考える。

次に鉄芯法を用いて 4-1 と同様な実験を行って得られた偏流特性を図 9 に示す。なお、全電流は 10 A で一定である。鉄芯法を用いないときと同様に 100 mHz 以降で偏流が顕著に起こるが、電流分布のばらつきは数百 mHz の周波数領域においては低減している。それをより明確にするために、各周波数において電流が最大になる素線の電流と最小となる素線の電流との差分を、鉄芯法を用いない場合を ΔI 、鉄芯法を用いた場合を ΔI_{iron} として、偏流抑制効果の指標 $\eta = \Delta I_{\text{iron}} / \Delta I$ を定義し、 η の周波数依存性を図 10 に示す。 $\eta = 1$ の場合は鉄芯法による偏流抑制効果

はなく、 η が 1 より小さくなるにつれて抑制効果が大きくなることを意味している。周波数が十分に小さく電流分布がシャント抵抗の比によって決定する低周波数領域では抑制効果は見られないが、偏流が顕著になる周波数領域で電流のばらつきを約 4 割低減させていることが確認できる。

このとき各素線インダクタンスを測定したところ、図 11 のようになり、これを用いて鉄芯法での偏流の周波数依存性を図 8 と同様に計算して η を求めると図 10 の実線のよ

図 9 鉄芯法による偏流特性

Fig. 9. Suppression of current imbalance with iron core method.

図 10 η の周波数依存性

Fig. 10. Frequency dependence of η .

図 11 鉄芯法を施した後の自己インダクタンスおよび相互インダクタンス

Fig. 11. Self and mutual inductances with iron core method.

うに、0.5 Hz 付近まで比較的实验値と一致していることがわかる。鉄芯がない場合と比べ、自己インダクタンス間のばらつきは約 28%, 相互インダクタンス間のばらつきも約 15% 減少し、鉄芯法により各インダクタンスが均一になるように補償されたことがわかった。結合係数では、1 次撚りの組み合わせの平均が 0.9968, 2 次撚りの組み合わせは 0.9956 であり、結合が弱まった結果が得られた。以上のことから鉄芯法を施すとインダクタンスの均一化および素線間の結合が弱まり偏流が抑制されたことが確認できた。これにより漏れインダクタンス間のばらつきが緩和され、偏流抑制以前の値よりも大きな値になり、より抑制されるような結果になったと考える。以上より鉄芯法では鉄芯コアによってインダクタンスが補償された結果として偏流が抑制されていることがわかった。

5. まとめ

本実験では 3×3 本素線の超電導コイルにおける偏流現象の周波数依存性について、実験的および理論的に考察した。超電導コイルにおける偏流の周波数依存性について調べたところ、周波数が高くなるにつれて偏流現象が顕著に観測され、等価回路を用いたモデル計算と比較すると、0.5 Hz 以下の比較的低い周波数領域で実験結果と一致した。また、鉄芯法により偏流抑制効果が確認でき、それはインダクタンスの補償効果による。また本実験では鉄芯法によって 40% 程度の偏流抑制効果が得られた。抑制効果とその程度にとどまった原因の一つとして、鉄芯コアでの磁氣的干渉などが考えられる。個々のコアは任意の 2 本の素線を電磁的に結合させる役割を持つが、設置箇所の条件から本実験ではコア間の距離が 1 mm 以下と極めて近いので、コア間が磁氣的に結合してしまい、鉄芯コアが本来の役割を果たしていない可能性がある。その場合には、磁氣的干渉が起らないように鉄芯部の設計の最適化が必要であろう。さらに 0.5 Hz 以上の周波数領域において実測値と計算結果が一致していなかったが、この原因の一つとしてシャント抵抗と鎖交するコイル磁場の影響などが考えられる。

なお、本研究は文部科学省学術フロンティア推進事業の支援により行われた。また、本実験の遂行にあたり多大に

御協力頂いた株式会社 東芝 高野廣久氏に感謝の意を表します。また、有益な御助言を頂きました東工大 嶋田隆一氏 松阪大 奥村晴彦氏に深謝いたします。

(平成 14 年 6 月 17 日受付, 平成 14 年 12 月 20 日再受付)

文 献

- (1) A. Ninomiya, et al.: "Relation between Impedance Distribution and Current Imbalance in an Insulated Multi-strand Superconducting Cable Conductor", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol.11, No.1, pp.1466-1469 (2001-3)
- (2) S. Yamaguchi: "An iron core circuit to balance the current of insulated strands in superconducting cables", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol.7, No.2, pp.782-785 (1997-2)
- (3) S. Nomura, T. Osaki, S. Takahashi, R. Shimada, Y. Sato, and S. Yamaguchi: "Experiment of Current Imbalance Correction using Iron Core", *T. IEE Japan*, Vol.119-D, No.4, p.481 (1999-4) (in Japanese)
野村・大崎・高橋・嶋田・佐藤・山口:「鉄芯法による超電導素線素線間の偏流解消実験」, 電学論 D, 119, 4, p.481 (1999-4)
- (4) L.D. Landau, E.M. Lifshitz, and L.P. Pitaevskii: "Electrodynamics of Continuous Media", 2nd edition, pp.118-126, Pergamon Press (1984)

大 瀧 直 浩 (非会員) 1977 年 11 月 17 日生まれ。2000 年 3 月中部大学電気工学科卒業。2002 年 3 月同大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月 NEC アクセステクニカ株式会社に入社。現在、電送通信機器の開発に従事。

中 村 圭 二 (正員) 1961 年 10 月 24 日生まれ。1985 年 3 月名古屋大学工学部電気学科卒業。1990 年 3 月同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程単位取得退学。同年 4 月同大学助手。講師を経て、1999 年 10 月より中部大学工学部電気工学科助教授、現在に至る。プラズマ材料プロセスの生成・計測・制御、および超電導電力機器に関する研究に従事。工学博士。

山 口 作 太 郎 (正員) 名古屋大学理学部物理学科卒業。名古屋大学プラズマ研究所の後、1982 年三菱電機核エネルギー開発部勤務。1992 年に核融合科学研究所に移籍し、2001 年より中部大学工学部教授、現在に至る。その間、ピンチ装置におけるプラズマの電磁流体力学の平衡/安定性とそのプラズマ放光、核融合プラズマ実験のための電源、マグネット、それに関連した超伝導システム、エネルギー変換およびデータ処理システムの開発に従事。理学博士。

野 村 新 一 (正員) 1973 年 6 月 20 日生。96 年 3 月明治大学理工学部電気工学科卒業。2001 年 3 月東京工業大学大学院博士後期課程修了。2002 年 4 月より日本学術振興会特別研究員、現在に至る。工学博士。主として超電導、電力工学、核融合に関する研究に従事。IEEE 会員。

二 ノ 宮 晃 (正員) 昭和 27 年 4 月 29 日生, 昭和 52 年工学院大学電気工学科卒業, 同年 4 月より成蹊大学工学部電気工学科(現:電気電子工学科)助手, 主に電力機器の超電導化および超電導マグネットの保護の研究に従事, 電気学会, 低温工学協会, 工学博士。

佐 藤 利 和 (非会員) 1953 年 02 月 23 日生まれ。1971 年 3 月愛知県立東山工業高校電子工学科卒業。同年 4 月名古屋大学理学部物理学科電子線回折研究室に文部技官として採用。現在に至る。短時間微小重力場の利用技術の研究及び、超微粒子の生成過程に関する研究に従事。

長谷川 靖 洋 (非会員) 昭和 46 年 11 月 19 日生。1995 年 3 月近畿大学理工学部原子炉工学科卒業。1997 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻修士課程修了。2000 年 3 月総合研究大学院大学博士課程数物科学研究科核融合科学専攻修了。2000 年 4 月新エネルギー・産業技術総合開発機構産業技術研究員を経て、2001 年 12 月より埼玉大学大学院理工学研究科環境制御工学専攻助手、現在に至る。プラズマや半導体を用いたエネルギー変換の研究に従事。博士(工学)。

花 井 哲 (正員) 1957 年 5 月 10 日生まれ。1983 年 3 月東京大学大学院工学系研究科原子力工学専攻修士課程修了。同年(株)東芝入社。現在、京浜事業所機器装置部開発機器技術主査。主に超電導マグネットの開発・設計業務に従事。低温工学協会会員。日本 AEM 学会会員。2000 年電気学会論文賞受賞。