

# 超電導コイルにおける偏流現象とその抑制

中部大学 工学部 電気システム学科 教授 中村 圭二

Professor Keiji NAKAMURA  
Department of Electrical Engineering  
Chubu University



## 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。

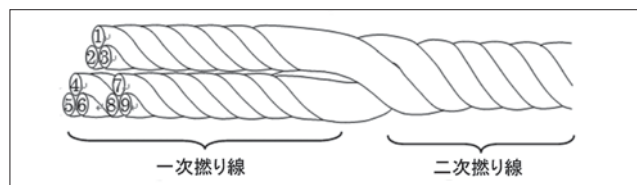
本稿では、多芯撚り線を使用した交流超電導コイルの各素線の電流電圧波形を実測し、偏流現象、特にその周波数依存性について定量的に調べると共に、鉄芯法によって偏流の抑制を試みた例を紹介する<sup>(1)</sup>。

## 2.超電導コイルにおける偏流現象の観測

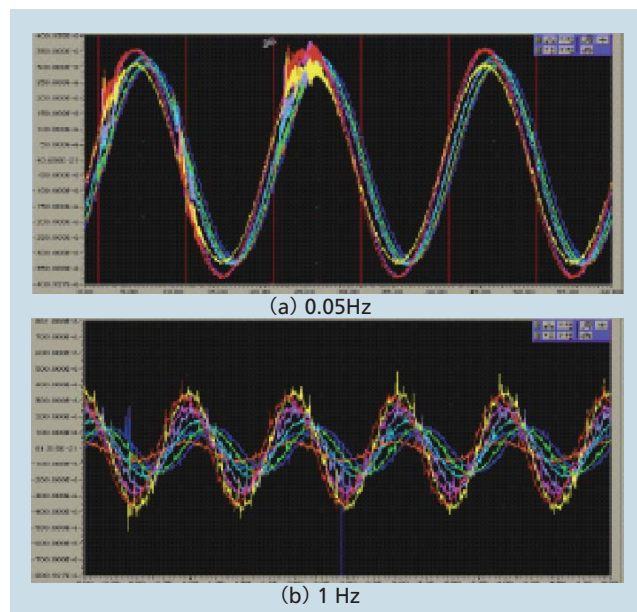
まず超電導コイルで生じる偏流の観測例を示す。ここで用いたNbTi製の超電導体は3本素線からなる一次撚り線と、3本撚り合わせた二次撚り線からなり、1次撚りの組み合わせ毎に素線番号を、各々 1~3、4~6、7~9 とする(第1図参照)。そのような超電導導体を2層で計149ターンさせて、直径366mm、高さ100mmの超電導コイルが形成されている。

周波数が0.05Hzおよび1Hzの正弦波電流を流したときの各素線の電流波形を第2図(a)および第2図(b)に示す。ここでは各素線の電流は0.1mΩ程度のシャント抵抗により測定している。0.05Hzでは、若干のばらつきは見られるものの、各素線の電流は、振幅・位相ともに、ほぼ揃っており、偏流は生じていない。それに対して1Hzでは、電流の振幅・位相とも、各素線ごとで大きく異なり、偏流が生じている。

このような偏流の発生は、各素線における漏れインダ



第1図 撚り線からなる超電導導体

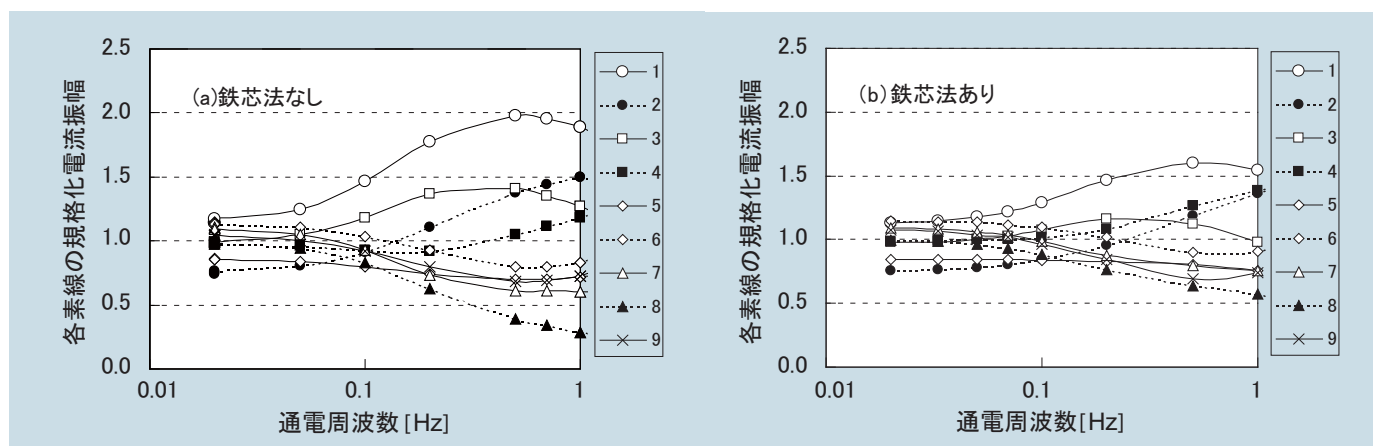


第2図 通電周波数を変化させたときに生じる超電導コイルの各素線における電流波形の変化

クタンスの僅かなばらつきが主な原因と考えられている。二本の素線からなるコイルを考えた場合、各素線の抵抗成分を $R_1$ および $R_2$ 、自己インダクタンスを $L_{11}$ および $L_{22}$ 、素線間の相互インダクタンスを $L_{12}$ および $L_{21}$ とすると、各素線の電流 $I_1$ と $I_2$ は等価回路で求められ、素線が超電導状態( $R_1, R_2 \rightarrow 0 \Omega$ )では

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2 + j\omega(L_{22} - L_{21})}{R_1 + j\omega(L_{11} - L_{12})} \xrightarrow{R_1, R_2 \rightarrow 0} \frac{L_{22} - L_{21}}{L_{11} - L_{12}}$$

のように、各素線の電流比は漏れインダクタンスの逆数の比で与えられる。2本の素線が密に巻かれている超電導コイルでは、素線間の電磁的な結合が強いため、 $L_{12} \sim L_{11} \sim L_{22} \sim L_{21}$ となり、自己インダクタンスと相互インダクタンスのわずかな差(漏れインダクタンス)のばらつきが、そのまま電流比として現れてしまう。コイルの



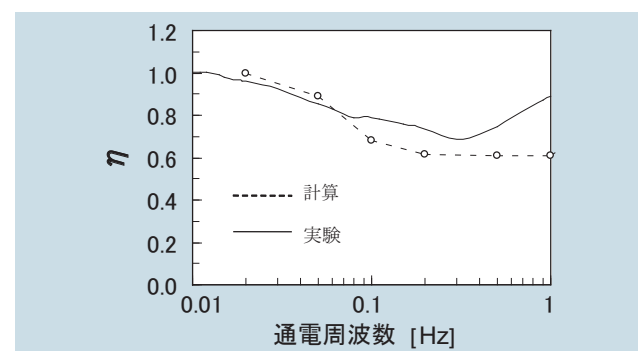
第3図 各素線における規格化電流振幅の周波数依存性

巻き方等を完全に制御できれば理論上は偏流を抑制できるはずであるが、工学上の限界もあり、筆者の知る限り、そのようなインダクタンスの僅かなばらつきまで制御して偏流を抑制した報告例はない。

### 3. 鉄芯法による偏流抑制の試み

このような超電導コイルでの偏流を抑制する一つの方法として、我々は鉄芯法を提案している。鉄芯法では、互いに絶縁された超電導導体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素線での等価回路を考えると、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き線部に発生するため、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れば、偏流を抑制できることが導出できる。

第3図に各素線における規格化電流振幅の周波数依存性を示す。規格化電流振幅とは、各素線の電流振幅を、すべての素線に等しく電流が流れている場合の電流振幅で規格化したものである。また第3図(a)は通常の超電導コイルの場合、第3図(b)は鉄芯法を施した超電導コイルの場合である。0.02~0.05Hz程度の周波数では、規格化電流振幅はシャント抵抗により決まっており、鉄芯法の有無によらず、0.8~1.2程度の範囲に収まっている。しかし0.5~1Hz程度の周波数になると、規格化電流振幅は、通常の超電導コイルでは0.3~2程度の範囲で大きくばらついているのに対し、鉄芯法を施した超電導コイルでは0.6~1.6程度となり、鉄芯法により電流振幅のばらつきが緩和されている。この結果を検証するために、各周波数で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に $\Delta I$ 、鉄芯法を用いた場合に $\Delta I_{\text{iron}}$ として、偏流抑制効果の指標 $\eta = \Delta I_{\text{iron}} / \Delta I$ を定義し、 $\eta$ の周波数依存性を第4図に示す。 $\eta = 1$ の場合は鉄芯法による偏流抑制効果はなく、 $\eta$ 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

第4図  $\eta$ の通電周波数依存性

味している。0.02Hz付近では、シャント抵抗の影響により $\eta$ は1に近いが、0.5Hz程度まで周波数が高くなるにつれ $\eta$ は0.6程度まで小さくなり、鉄芯法により偏流抑制効果が得られたことがわかる。さらに実測した各素線のインダクタンスを用いて等価回路から求めた電流比より $\eta$ を算出したところ、0.5Hz程度以下の周波数領域で、実験と比較的によく一致したことから、ある周波数領域では漏れインダクタンスを補償する鉄芯法によって偏流抑制できることが裏付けられた。

### 4. まとめと今後の展望

本稿では、交流超電導コイルで問題となっている偏流現象を観測するとともに、鉄芯法による偏流抑制の試みを紹介した。ここで用いた鉄芯法では、せいぜい6割程度しか偏流の抑制効果が得られていないが、鉄芯でのインダクタンスの補償をさらに行えば、より大きな偏流抑制効果が得られると考えられる。今後は通電周波数をさらに高めて、商用周波数での偏流抑制効果について検討したい。

#### 参考文献

(1) 大滝他: 電気学会論文誌B-123(6), 759-764

#### 中村 圭二(なかむら けいじ)氏 略歴

1990年 4月 名古屋大学 助手、講師を経て

1999年10月 中部大学工学部 助教授

2006年 4月 同大学 教授。現在に至る。