

交流電気機器に向けた高温超電導導体円筒巻線の 大容量化に関する基礎検討

福本 祐介* 富田 優*

Fundamental Study on Large-Capacity of High Temperature Superconducting Cylindrical Windings
for AC Electrical Equipment

Yusuke FUKUMOTO Masaru TOMITA

Superconducting conductors must possess a large current capacity for their application to large capacity power equipment. To increase the capacity, tape-shaped high temperature superconducting wires are stacked to constitute superconducting parallel conductors. Superconducting windings are primary components of superconducting power equipment. When the winding is composed of a superconducting parallel conductor and the inductance of each strand is unbalanced, there will be a decrease in capacity and an increase in loss in superconducting power equipment. Therefore, we propose transposition pattern as a winding method. The transposition pattern can balance the inductance and as a result, can suppress a decrease in capacity and an increase in loss. In this paper, we numerically calculate the characteristics of the proposed transposition pattern and reports the results.

キーワード：高温超電導線材，超電導コイル，並列導体，転位，変圧器

1. はじめに

超電導体は、低温に冷却していくと電気抵抗がゼロになる性質（完全導電性）を持ち、この完全導電性を利用して電気抵抗によるエネルギー損失なしに高電流密度で電流が流せる導電材料として、超電導変圧器、超電導電力貯蔵装置といった交流電気機器や、高磁場用超電導マグネット、直流超電導き電など直流電気機器への応用が期待されている。

超電導体に電流を流す場合、電流分布や磁界分布に変化が起これると、交流損失すなわち発熱が起これり、超電導状態が破れてしまうことがある。従来の金属系超電導材料は、臨界温度 (T_c) が低く、冷媒として使用する液化ヘリウムも小さいため、温度マージンが不十分であった。そのため、交流損失や電磁力による摩擦熱等により、超電導フィラメント内で局所的なクエンチ（超電導状態の消失）が発生すると、クエンチしたフィラメントに流れていた電流が他のフィラメントに急速に再分配することを繰り返して、超電導線材全体の温度が急速に上昇する（fast quench¹⁾、図1）。したがって、安定性確保のために電流経路を増やす必要があり、金属系超電導線材のほとんどは、交流損失の対策や安定化のため数〜数十 μm に細線化した多数本の超電導フィラメントを常電導母材に埋め込んだ多芯線とし、さらに撚線導体化

した構造としている。これにより安定性が確保されるが、輸送電流や遮蔽電流がフィラメント間に存在する常電導母材を流れることによるジュール熱（結合損失）が増大する。そのため、従来の金属系超電導体を用いて、低損失、大容量、高安定な交流電気機器を実現することは不可能であった。このような状況の中、高い臨界温度を持つ高温超電導体が発見された。特に昨今、線材化技術の開発が進む、RE（RE: Rare Earth）系やBi系などの酸化物超電導体は、臨界温度が90K以上であるため液化窒素（大気圧沸点 77.3K）を冷媒として使用でき、高い

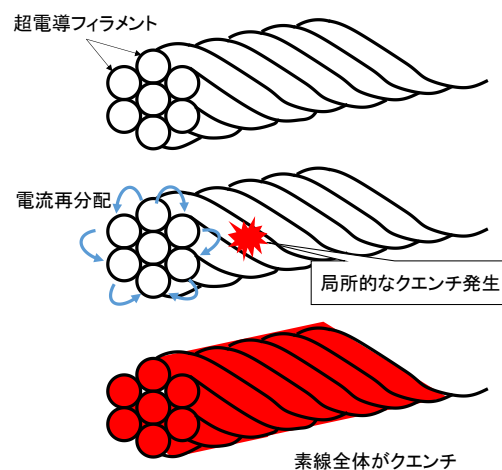


図1 急速なクエンチ（fast quench）

* 材料技術研究部 超電導応用研究室

特集：材料技術

温度マージンを確保することができる。さらに、液化窒素は液化ヘリウムと比較して熱容量が大きいので、多少の発熱で深刻な影響を及ぼすことがない。つまり、素線単体で高い安定性を確保できるため、素線間の絶縁が可能となり、遮蔽電流や輸送電流による損失を防ぐことができる。このため、絶縁した超電導素線を束ねて導体化することで、高い電流密度を持つ低損失な導体を実現できる。このように、高温超電導体の発見により、大容量、高安定、低損失な超電導応用機器が具現化しつつある。

2. 高温超電導線材の導体化技術

数 MVA 以上の容量を有する交流電気機器は、電圧階級にもよるが、定格電流が kA オーダーとなる。そのため、単一の超電導線材では対応が困難なため、多数本を導体化する必要がある。典型的な低温超電導線材は円断面の多芯線であり、一般的には大電流容量化のために撚線導体を構成する。しかしながら、高温超電導線材である RE 系や Bi 系超電導線材は、長手方向に結晶を配向させるために扁平なテープ状に加工されている²⁾ことから撚線導体を構成できず、大容量化のためには図2のように絶縁された高温超電導線材を多層に重ね、並列導体を構成する。しかし、単純に積層するだけでは、通電電流による自己磁界の影響により、構成する各線材の電流容量が低下するため、導体としての電流容量が低下する。また、外部磁界が印加されると素線間に鎖交する磁界により、遮蔽電流が誘起され、各素線の電流分流が不均一になるとともに、並列導体構成に伴う付加的な交流損失が発生する(図3(a))。この付加的な交流損失を抑制するためには、素線間に印加される磁界の鎖交面積を等しくし、遮蔽電流が誘起しないように適切な位置で転位(素線の位置を入れ替えること)を施す必要がある(図3(b))。このことは並列導体を構成する素線間のインダクタンスをバランスさせることと同義であり、超電導状態においては抵抗成分が無視できるため、各素線の電流分流比は素線間の自己及び相互インダクタンスのみから決定される。各素線に流れる電流は、輸送電流と遮蔽電流の和であり、遮蔽電流は周回電流であるため素線間のインダクタンスのバランスをとる、つまりは外部磁界の鎖交面積を等しくすれば、誘起されず、その結果として素線間の電流分流比が均一になって、輸送電流のみを流すことができ、低損失な大電流導体を実現できる。

転位並列導体は、従来の常電導電気機器の銅巻線として多く使用されており³⁾、電線メーカーの工場において、絶縁された素線を数十 cm のピッチで連続的に転位したもの(図4)が、出荷されている。しかしながら、高温超電導線材は歪みの影響を受けやすく、転位によって超電導特性が劣化する可能性がある。このため、著者らは

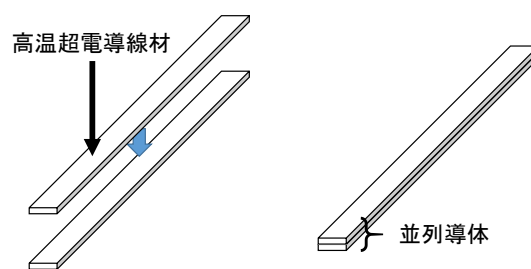


図2 並列導体の構成

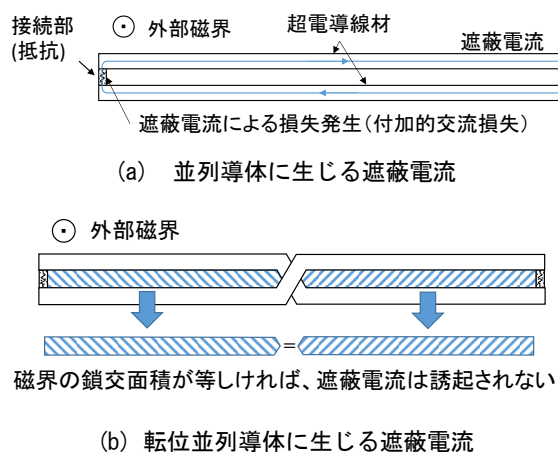


図3 並列導体に外部磁界を印加した場合の遮蔽電流



図4 銅線による転位並列導体 (De Angeli Prodotti 社 HP より)

巻線工程で転位することで転位ピッチを長くすることを提案している。

本稿では、交流電気機器に向けた高温超電導導体円筒巻線の大容量化方策として、転位並列導体を用いて巻線を構成する際に、素線間のインダクタンスをバランスさせて均一な電流分流比が得られる転位パターンを示し、数値解析によりその妥当性を検討する。

3. 計算方法

超電導状態では抵抗成分を無視できるため、並列導体を構成する素線間の電流分流比は各素線のインダクタンスのみから決定される。ここでは、素線の1ターンを1つのインダクタンス要素と考え、それらが直列に接続されているものとした。

素線数を2本とした並列導体で構成するコイルの例および等価回路を図5に示す。層数を4、ターン数を T とし、層を渡る際に転位を施したものである。要素数は $8T$ (2 [本] × 4 [層] × T [ターン]) となり、回路方程式は、式 (1) となる。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_{8T} \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} m_{1,1} & \cdots & m_{8T,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{1,8T} & \cdots & m_{8T,8T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_{8T} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 v_n 、 i_n は要素 n の電圧および電流、 m_{ij} は要素間の相互インダクタンスであり、特に $i=j$ の時は自己インダクタンスである。同じ素線は層毎で直列接続であることから、素線毎の電圧および電流を V_N 、 I_N とすると、

$$V_N = \sum v_{iT} \quad (2)$$

$$I_N = i_{iN} \quad (3)$$

となる。つまり、式 (1) を素線毎にまとめると、式 (4) となる。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} \\ M_{21} & L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

各素線は並列接続されていることから、 $V=V_1=V_2$ であるため、各素線に流れる電流は、インダクタンス行列の逆

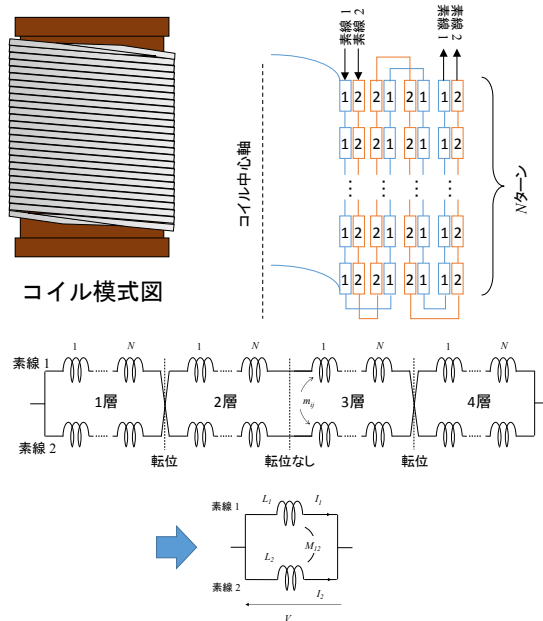


図5 コイル構成と等価回路

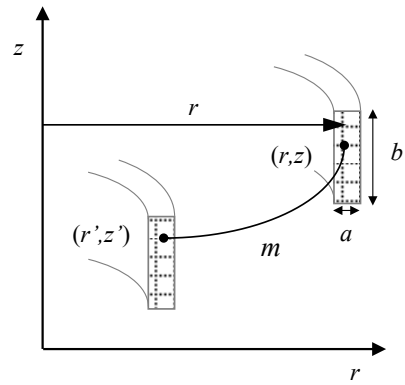


図6 インダクタンスの模式図

行列を解くことで求めることができる。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{j\omega} \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} \\ M_{21} & L_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

自己インダクタンスには多くのモデルが提案されているが、現在の高温超電導線材の加工寸法と、交流電気機器の巻線が大型となることを考慮すると、コイルの平均直径を D 、高温超電導線材の幅を b 、厚さを a とした場合に、 $0 < b/D$ 、 $a/D < 0.4$ の関係が成り立つときに精度よくインダクタンスの計算ができる、Weinstein=Stefan⁴⁾ の近似式を用いる。

$$L = \mu_0 r N^2 \left\{ \left(1 + \frac{3b^2 + a^2}{96R^2} \right) \ln \frac{8R}{\sqrt{a^2 + b^2}} - y_1 + \frac{b^2}{16R^2} y_2 \right\} \quad (6)$$

ここで、

$$y_1 = \frac{\pi x}{3} - \frac{1}{12x^2} \ln(1+x^2) - \frac{x^2}{12} \ln \left(1 + \frac{1}{x^2} \right) x^{\frac{2}{3}} \left(x - \frac{1}{x} \right) \tan^{-1} x - \frac{1}{12}$$

$$y_2 = \frac{1}{6} \left\{ \frac{69}{20} + \frac{221}{60} \frac{1}{x^2} - \frac{1}{10x^4} \ln(1+x^2) + \frac{x^2}{2} \ln \left(1 + \frac{1}{x^2} \right) - \frac{8\pi x}{5} + \frac{16x}{5} \tan^{-1} x \right\}$$

$x = b/a$

ただし、 r はコイルの平均半径である (図6)。 N は巻数であるが、素線1ターン毎に計算するため、 $N=1$ となる。相互インダクタンスは、線材断面を考慮した Neumann の式 (式 (7)) を用いる。

$$M = \iiint \iiint \mu_0 \sqrt{r \times r'} \left\{ \left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} \times E(k) \right\} dr_1 dr_2 dz_1 dz_2 \quad (7)$$

上式は、積分の計算に多大な時間を要するため、図6のように素線断面を分割することでできた点を計算点とし、それぞれの点同士の相互インダクタンス m を式 (9) で計算し、平均化することで素線間の相互インダクタンス M (式 (8)) を求める。

$$M = \frac{(\sum m)}{(P_r \times P_z)^2} \quad (8)$$

$$m = \mu_0 \sqrt{r \times r'} \left\{ \left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} \times E(k) \right\} \quad (9)$$

特集：材料技術

$$k = \sqrt{\frac{4r \times r'}{(r+r')^2 + (z-z')^2}}$$

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\phi}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \phi}}$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \phi} d\phi$$

ただし、 P_r は厚み方向の分割数、 P_z は幅方向の分割数であり、 $P_r \times P_z$ は計算点の数である。なお、本稿で使用する各パラメータは表 1 のとおりとする。

表 1 数値計算に用いたパラメータ

超電導線材		コイル	
厚み	0.11 mm	内径	150 mm
幅	5.0 mm	ターン数	48 turns
絶縁厚	0.035 mm	層間距離	1 mm

4. 最適転位パターン

4.1 層間転位パターン

巻線工程で転位を施す際、素線を配置換えするために、転位箇所において余分にスペースが必要となり、磁場乱れが生じる可能性が高い。多層ソレノイドコイルの巻線において、層を移る際に転位する（以下、層間転位）と転位部が巻線端になるため密に巻くことが可能で、巻乱れが少なくなり様な磁場を実現しやすい。一方で、層内で転位する（以下、層内転位）と、転位部が巻線内になるため、この箇所磁場が乱れやすい。よって、磁場の均一性が問題にならない場合は層内転位が適用できるが、超電導マグネットなどのように磁場均一性が重要である場合には層内転位は適用できない。従って、可能な限り層間で転位し、層内転位を少なくすることが望ましい。

層間でのみの転位方法を以下に示す。ただし、素線数を S 、層数を L とする。

① $1 \leq L \leq S$ の場合

次の層に移るときに、最も外側の素線を最も内側に移し、それ以外の素線をそのまま外側にずらす。

② $S+1 \leq L \leq 2S$ の場合

S 層と $S+1$ 層の間を境として、素線の配置が層毎に対象となるように転位を施す。例えば、 $S+1$ 層であれば S 層と、 $S+2$ 層であれば $S-1$ 層と同じとなるように転位を施す。

③ $2S+1 \leq L \leq 4S$ の場合

$2S$ 層と $2S+1$ 層の間を軸として素線の順番が対称となるように転位を施す。

④ $4S+1 \leq L$ の場合

①から繰り返す。

転位回数は、素線数の 4 倍の層数の場合、 $(4S-3)$ 回となる。例として、4本並列導体を用いた転位図を図 7 に、各層における電流分流比の計算結果を図 8 に示す。素線数の 4 倍である 16 層およびその整数倍である 32 層において、均一な電流分流比を得ることができる。

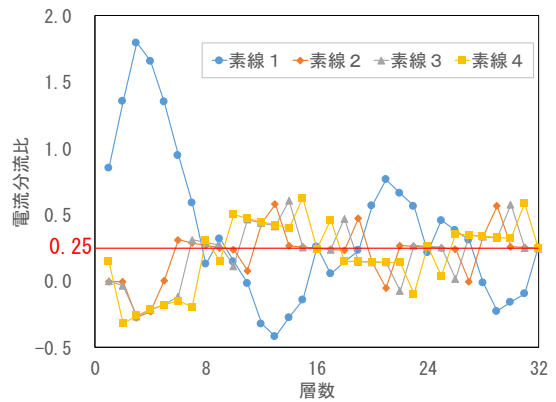


図 8 層間転位の電流分流比計算結果

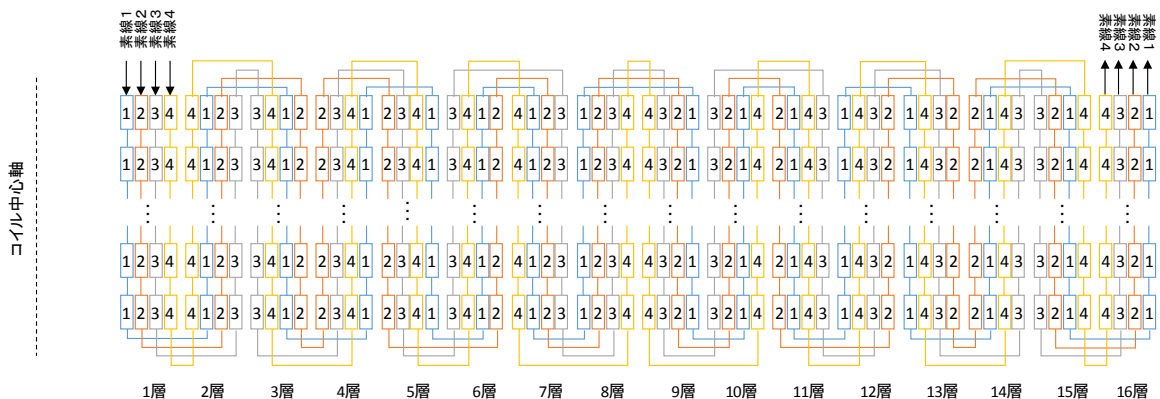


図 7 4本並列導体で構成する巻線の層間転位

4.2 層内転位パターン

層間転位パターンにより均一な電流分流が実現できるが、その制約として素線数の4倍の層数である必要がある。それ以外の層数においては、均一な電流分流比を得るために層内転位を導入しなければならない。ここでは、単層ソレノイドコイルを対象とする層内転位パターンについて提示する。

単層ソレノイドコイルの場合、以下の手順で層内転位を行う。 t はターン数、 T は総ターン数、 S は素線数である。

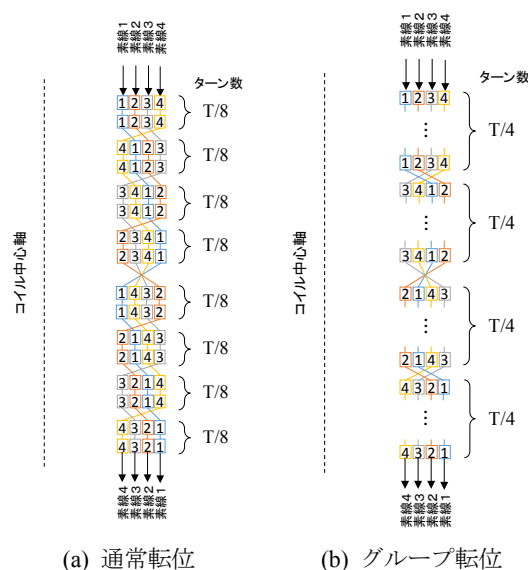
- ① $1 \leq t \leq T/2$ の場合
 $T/(2S)$ ターン毎に外側の素線を内側に転位する。
- ② $t = T/2$ の場合
中心部で全素線を対称に入れ替える全転位を行う。
- ③ $T/2 \leq t \leq T$ の場合
 $T/(2S)$ ターン毎に外側の素線を内側に転位する。

転位回数は、1層あたり $(2S - 1)$ 回となる。各素線がそれぞれの位置で同じターン数を経験することにより、自己インダクタンスを等しくし、コイル中心で全転位することでコイル上下の対称性により相互インダクタンスをバランスさせることができる。素線数が偶数である場合は、転位の際に隣り合う2本を1つのグループとみなして転位することで転位回数を削減することができる(以下、グループ転位と呼ぶ)。手順を以下に示す。

- ① $1 \leq t \leq T/2$ の場合
隣り合う2つの素線を1つのグループとし、 T/S ターン毎に外側のグループを内側に転位する。
- ② $t = T/2$ の場合
中心部で全ての素線を対称に入れ替える全転位を行う。
- ③ $T/2 \leq t \leq T$ の場合
 T/S ターン毎に外側のグループを内側に転位する。

通常の層内転位パターンとグループ転位を用いた最適層内転位パターンの比較を図9に示す。グループ転位を適用することで転位回数は1層あたり $(S - 1)$ 回となり、通常の層内転位の約半分に削減できる。中心の全転位により、グループ内の素線位置が入れ替わることで、各素線がすべての位置を経験するとともに、コイル上下で対称となることでインダクタンスをバランスさせることができる。

この層内転位パターンは、層毎にインダクタンスがバランスするため、これを繰り返して多層に適用することでも電流分流比を均一にできる(図10)。



(a) 通常転位 (b) グループ転位

図9 層内転位パターン

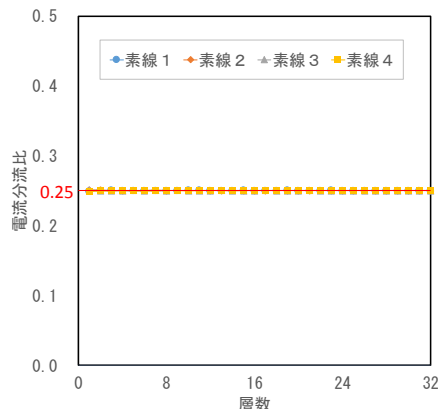


図10 層内転位の電流分流比計算結果

4.3 全転位を組み込んだ層間転位パターン

層内転位を繰り返していく転位パターンでは層毎にインダクタンスがバランスするが、転位回数が増大する。そこで、各層の中心ですべての素線の位置を入れ替える全転位を組み込み、層間においても転位することで転位回数を抑制できる転位パターンについて、手順を以下に示す。

- ① 各層内
各層内において、コイル中心部で全転位を施す。
- ② $1 \leq L \leq S$ の場合
コイル下部で層をわたる場合は、内側の素線が外側になるように転位を施す。
コイル上部で層をわたる場合は、外側の素線が内側になるように転位を施す。
- ③ $S+1 \leq L \leq 2S$ の場合
 S 層と $S+1$ 層の間を境として、各層における素線の配置が同じになるように転位を施す。例えば、 $S+2$ 層であ

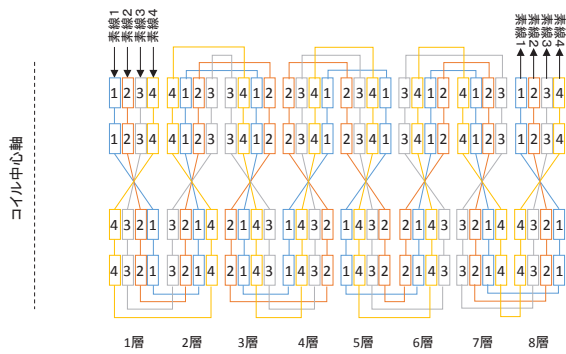


図 11 全転位を組み込んだ層間転位パターン

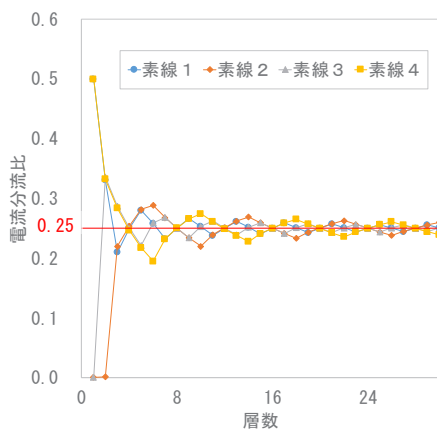


図 12 全転位を組み込んだ層間転位の電流分流比計算結果

れば、 $S-1$ 層と同じとなるように転位を施す。

④ $2S \leq L$ の場合

①から繰り返す。

4本並列導体における転位図を図11に、電流分流比の計算結果を図12に示す。各層の中心で全転位を組み込むことにより、素線数の2倍の層数で均一な電流分流を得ることができる。

4.4 任意の層数への対応

層間のみ転位で素線数の4倍、全転位を組み込んだ層間転位で素線数の2倍の層数で電流分流比が完全に均一になることを示した。これ以外の層数でコイルを構成する場合は、層毎にインダクタンスをバランスさせることができる層内転位を用いることで、任意の層数で電流分流比を均一にすることができる。

5. まとめ

これまで、並列導体を用いて巻線を構成する際の転位方法が断片的に示され、電流分流特性や交流損失特性の

検証を目的とした、さまざまな試作巻線による検証が行われてきた^{5)~8)}。実際に、本稿で提示した転位パターンを用いた巻線が個別に試作され、均一な電流分流特性や付加的な交流損失が発生しないことが報告されている。しかしながら、高温超電導体の大電流量化の手段として、交流損失の増大を生じない転位並列導体の導入を促進するためには、望ましい転位パターンを明らかにし、任意の巻線形状に対応する技術を確認する必要があった。そのため本稿では、数値計算を用いて、任意の巻線形状に適応できる転位パターンについて示した。本研究成果により、高温超電導の機器応用が加速することを期待する。

謝 辞

本研究においては、九州大学岩熊成卓教授の多大なるご指導をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) Iwakuma M, Kanetaka H, Tasaki K, Funaki K, Takeo M, Yamafuji K “Abnormal quench process with very fast elongation of normal zone in multi-strand superconducting cables,” *Cryogenics*, vol.30, pp686-692 (1990).
- 2) 和泉輝郎, 塩原融: 高温超電導線材開発の現状と展望, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第37巻, 第5号, 2002-5
- 3) J. Langrish, et al. 1972 Wealth from Knowledge: A Study of Innovation in Industry 149-152.
- 4) Frederick W. Grover “Additions to the formulas for the calculation of mutual and self inductance,” *Bulletin of the Bureau of Standards*, vol.14 (1981) pp.537-570.
- 5) M. Iwakuma et al., “Electromagnetic Properties in Parallel Conductors Composed of Bi2223 Multifilamentary Wires for Power Transformer Windings,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 7, No. 2, pp. 298-301, 1997.
- 6) M. Iwakuma et al., “Development of a 1T Cryocooler-Cooled Pulse Coil with a Bi2223 Superconducting Parallel Conductor for SMES,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 9, No. 2, pp. 928-931, 1999.
- 7) M. Iwakuma et al., “Current Distribution in Superconducting Parallel Conductors Wound into Pancake Coils,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 10, No. 1, pp. 861-864, 2000.
- 8) M. Iwakuma et al., “Development of REBCO Superconducting Power Transformers in Japan,” *Physica C*, Vol. 469, No. 15-20, pp. 1726-1732, 2009.