

## 円筒巻線に適用する高温超電導並列導体の最適転位 と電流分流に関する研究

福本, 祐介

<https://hdl.handle.net/2324/2236259>

---

出版情報 : 九州大学, 2018, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名 : 福本 祐介

論 文 名 : 円筒巻線に適用する高温超電導並列導体の最適転位と電流分流に関する研究

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

直流およびパルス用の超電導マグネットに適用する超電導導体は、保護の観点から一般的に大電流量化する必要がある。超電導マグネットの起磁力は、通電電流とターン数の積であり、起磁力を確保するだけであればこれらの設定には自由度がある。しかし、起磁力はターン数に比例するが、マグネットのインダクタンスはターン数の二乗に比例する。絶縁耐力の観点から端子間の電圧が特定の値以下に制限される中、クエンチ検出後に蓄積エネルギーを外部抵抗によって回収するに際し、ターン数が少ない、すなわち電流量が大きいほど電流減衰時定数が短くなり、電流減衰までの温度上昇を抑制することが可能である。一方で、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 以上となり、単一の高温超電導線材では対応が困難であり、多数本を導体化する必要がある。従来の低温超電導線材は、円形断面を有する多芯線形状をしており、通常、大電流量化のためは撚線導体を構成する。しかしながら、高温超電導線材は薄いテープ状であり、撚線導体を構成することができない。そのため、我々の研究グループでは、複数のテープ線材を多層に重ねる並列導体を導入し、高温超電導変圧器、MRI 用高温超電導マグネット等の開発を行ってきた。

並列導体は、従来より、常電導電気機器において銅巻線の大電流化のための常套手段として採用されており、通常、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、出荷されている。しかしながら、高温超電導テープ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高い。並列導体を構成するにあたって、導体内の電流分流を均一にし、低損失化を図る上で重要なことは、各素線のインダクタンスバランスを取ることである。インダクタンスがアンバランスであれば、輸送電流が均一に流れず、また、素線間で鎖交磁束が異なるため、遮蔽電流が誘起され、並列導体を構成することによる新たな損失が発生する。したがって、我々は、高温超電導転位並列導体を構成するにあたり、転位ピッチを長くし、巻線工程において、素線間インダクタンスバランスを取り得る最低限の転位箇所転位することを提唱し、実行した。

本論文は、高温超電導並列導体を構成するにあたり、電流分流を均等にし、導体構成に伴う損失増大を抑制するための最適転位パターンについて考察したものであり、以下の 5 章で構成されている。

第 1 章では、本論文の背景と目的について述べている。第 2 章では、円筒巻線を対象とし、層間のみ転位を行う層間転位の場合の基本的転位パターンについて考察している。まず、無限ソレノイドコイル近似を用いて巻線端部での磁界の乱れを無視して、素線間の自己および相互インダクタンスを表記し、電流分流の解析式を導出した。その上で、電流分流の層数依存性を明示し、最適転

位パターンを提示した。しかし、層間転位パターンでは、最適転位を実現するために層数に制約があるため、任意の層数を持つソレノイドコイルについても、層内転位を導入し均一な電流分流を実現する転位パターンを提示した。第3章では、無限ソレノイドコイル近似により導出した最適転位パターンについて、現在開発されている高温超電導線材の寸法を参照して、自己および相互インダクタンスを算出し、回路方程式を用いて素線間の電流分流比を求め、無限ソレノイドコイル近似により導出した最適転位パターンの妥当性を検証している。さらに、実際の巻線の電流分流、交流損失の観測結果から、提示した最適転位パターンの有用性、および、並列導体化に伴う付加的な交流損失が発生しないことも確認している。第4章では、高温超電導線材を用いた実際の転位並列導体において、転位によりインダクタンスバランスを取っているにも関わらず、臨界電流、通電特性（電流  $I$ ・電圧  $V$  曲線）の傾き  $n$  値が素線間でばらつく場合には、素線間電流分流が低周波領域で均等にならず、電流不均一性が磁場均一性に影響することを実用上の課題として明示し、その対策について検討している。具体的な対策としては、各素線間の接触抵抗を調整することで解決できることを示している。第5章では、全体の総括を行っている。