

識別番号 P13

研究課題 超伝導を利用した電力伝送・貯蔵システムと超伝導ケーブルの開発

研究代表者 谷貝 剛 (理工学部 機能創造理工学科)

共同研究者 宮武 昌史 (理工学部 機能創造理工学科)

Summary Superconductivity is one of the promising technologies to resolve global environmental issues and uncertain power supply. This research project is to realize a “smart” power transmission and storage system as well as superconducting cable. We have developed CICC superconducting cables, high-efficiency DC power supply system with superconducting cable and microgrid system with Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) and renewable energy sources.

研究背景と目的

近年の電力をめぐる環境は、地球環境問題だけでなく、東日本大震災および原発事故を発端とする電力供給の不確実性も加わり、ますます困難かつ重要な問題の解決が求められてきている。また、ここにきて「スマートグリッド」と呼ばれる新しい電力技術に注目が集まっている。これは、デマンドの把握と制御、電力貯蔵装置や再生可能エネルギーを含むシステムの合理的電力マネジメントなどを行うものである。

本研究では、画期的電力技術である超伝導技術に着目し、①高性能超伝導送電ケーブルの開発、②高効率直流給電システムの開発、③超伝導電力貯蔵と再生可能エネルギーの利用、を大きな柱として、電力の諸問題の解決とスマートグリッド化への貢献を目指している。

研究テーマ

本研究課題では、次のような研究テーマを設定し、超伝導を利用した電力伝送・貯蔵システムと、それに必要な超伝導ケーブルを総合的に検討している。

1. CICC 超伝導送電ケーブル

大電流通電用のケーブルでは、直径 1mm 程度の超電導素線を多数段にわけて撚り合わせ、最終的に数 100～1000 本束ねた導体にするが、通電中に素線には最大で数 100kN/m の電磁力がかかる。本研究では、これまで難しかった CICC 導体内部の素線配置 3D 計測を行い、それを基に構造力学的考察から電磁力下での素線の撓みのシミュレーションを行う。これにより曲げ歪みに弱い Nb₃Sn 素線の特性劣化の定量化が可能であり、その集合体である導体のケーブルとしての特性が評価できる。

2. 高効率超伝導直流給電システム

超電導ケーブルは直流でその真価を発揮する。しかし、超電導は冷却が必要であり、ケーブル端部から電気的接続を通して大量の熱進入があり、これが等価的に損失となる。これを低減するためには、熱的接触を介さない電力伝送が必要となる。本研究では、低温動作 DC-AC インバータ用いて電力を AC に変換し、トランスを用いて熱的に絶縁しながら電力伝達する事で高効率の直流給電システムを構築する。

3. 超伝導電力貯蔵装置 SMES の利用

3.1 カルマンフィルタを用いた風力発電出力変動補償

直流送電と親和性の良い自然エネルギー発電では、その出力の変動を補償する必要がある。電力貯蔵を用いた補償が一般的だが、用いる蓄電デバイスによって特性が異なるため、自然エネルギーの変動分を周波数成分によって、デバイスに振り分ける必要がある。本研究では、カルマンフィルタを用いて発電電力をトレンド分（低周波）と高速変動分（高周波）に分離する理論的な検討を行っている。これにより、高コストである SMES の容量最適化が可能となり、経済的なフェージビリティの検討が可能となる。

3.2 ループ形マイクログリッドの潮流制御回路方式

SMES では普通、1つのコンバータを介して交流系統との間で充放電を行う。ここでは、1つの超伝導コイルに対し、2つのコンバータを直列に接続し、ループ形のマイクログリッドの2方向との間で独立に充放電を行う回路・制御方式を考案した。

この方式では、上下のコンバータの合計電力で連系線の電力を制御できるだけでなく、電力の差分でループ内の電力を制御するループコントロール機能も有する。ループ系統内の太陽光・風力発電の出力変動による連系電力の変動抑制、およびループ内の電力潮流の適正化を行う。

今年度までに得られた成果

研究を開始した 2010 年度から現在までに、実験やシミュレーションによって得られた主な成果は次の通りである。

- 構造力学的モデルを導入して、超伝導ケーブルの電磁力下での超伝導素線の撓みをシミュレーションし、平均で 0.35%歪むことを確認した。これは、20%程度の臨界電流特性の劣化に相当する。さらに歪みは局所的に数%に達する所もあり、ほとんど通電できない場所もある事が確認された。これにより素線間の結合電流と併せて通電時の電流経路が複雑になっている事が示唆される結果となった。
- DC-AC 変換では、半導体スイッチング素子が用いられる。低温では、FET のオン抵抗が極めて小さくなる事例が報告されており、高温超伝導体発見当時（1980 年代）は研究が盛んだった。今日、電力用の低損失デバイスの開発が大きく進展し、液体窒素温度でのアプリケーション開発の重要性も高まっている。本研究では、FET を用いた ZVS スwitching 回路を試作し、低温でも DC-AC 変換が可能であるという結果を得た。
- 自然エネルギーは直流と親和性が良いが、出力変動が存在する。蓄電デバイス（SMES や 2 次電池、燃料電池）と組み合わせる事で、その変動を補償する。しかし、SMES が高コストのため、そのシステムに応じた容量の最適化が重要である。本研究では、カルマンフィルタを用いる事で、出力をトレンド分（低周波）と速い変動分（高周波）に分離した。高周波成分を高速応答・低損失である SMES に担わせた場合、10MW 風力発電設備の出力から 5MW 直流出力するシステム構成で約 2MW の SMES 容量で済む事が確認された。過度な設備投資を抑制したシステム構成に寄与できると考えられる。
- ループ形マイクログリッド内の太陽光・風力の出力変動に対して、連系線の電力に着

目し、それを平滑化するための基本的な制御特性を確認できた。

今後の予定

今後は次の項目を検討事項に挙げ、さらなる研究の高度化を目指していく予定である。

- 超電導直流送電システム構成の検討と実証試験
- 自然エネルギーと蓄電デバイスを用いた直流出力システムの最適化検討
- SMES を用いたループ系統内の潮流制御、無効電力対策と電流形インバータ導入の検討。

謝辞

本研究は、文科省「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」の採択課題「学際連携による超伝導伝送システムとマグネット開発」により実施されているものである。