

第7章 総括

7. 1 研究結果の要約

SMES は貯蔵効率が大きく、耐久性、環境面に優れる等の数多くの特長を有するが、他の競合する電力貯蔵装置との経済的メリットを考えた場合、瞬時大出力を特長とする短時間大出力へのニーズ、およびスケールメリットにより優位性が高まる大容量化へのニーズに向けた開発が有益と考えられる。前者は瞬低補償装置に相当し、後者は電力系統制御装置に相当する。

本論文では、瞬低補償用途と電力系統制御用途のための SMES の実用化技術確立とさらなる信頼性向上・効率向上・大容量化を目的として、SMES システムの全体構成技術開発、高温超電導線材を用いた SMES コイルの温度安定性向上、低損失化、高磁界化・高強度化による高エネルギー密度化等について検討した。以下に、各章毎の研究結果を要約する。

第2章では、瞬低補償システムとして、金属系超電導線材を用いて SMES を研究開発し、早期に実用化技術を確立した。実用機器としての観点から、設計・製作において、大容量化・大出力化による工場一括補償、充電専用回路等による待機損失低減、変換器逆電圧印加・リアクトル挿入等による高速切換、小型冷凍機組合せによるメンテナンス簡素化、4 極反転コイル配置による漏洩磁界低減等を実現した。開発した 5 MW-5 MJ 瞬低補償 SMES システムに対して、定格容量の模擬負荷を用いた瞬低補償動作検証試験、実負荷を用いた模擬瞬低信号による補償動作検証試験、さらに実系統で実負荷を用いた 2 年を超える長期フィールド試験を実施し、順次、SMES システムの健全動作・運転を実証し、その有用性を明らかにした。さらに 5 MW-5 MJ SMES システムの知見から大容量化、損失低減による高効率化を図り、世界最大となる大容量 10 MW-10 MJ

SMES システムを実用化した。一方、金属系 SMES コイルでは、温度安定性の改善による信頼性向上や経済性が課題であることを明らかにした。

第 3 章では、Bi-2212 高温超電導線材を用いて 1 MJ 級の高温 SMES コイルを研究開発した。Bi-2212 線材の高い温度マージンを活かして SMES コイルの高耐電圧化を図り、要素コイルで耐電圧 AC 2.67 kA 以上（全 18 個積層で 48.1 kV 以上）および対地間地絡電圧 DC 32 kV を試験検証することで、Bi-2212 コイルの高い絶縁性能を検証した。また、高耐電圧化を実現した Bi-2212 コイルに間接冷却システムを適用し、長時間待機運転、保護遮断動作等の試験検証を実施し、SMES 用途としての Bi-2212 コイルの高い温度安定性等を実証した。これらの検証結果、Bi-2212 高温超電導線材を用いることで、SMES コイルの高耐電圧化による大出力化、高い温度安定性による信頼性向上が可能であることを明らかにした。さらに、1 MJ 級 SMES コイルを実運用可能な 1 MW 瞬低補償用 SMES システムに組み込み、繰り返し瞬低補償動作等を実施することで、実用途として世界初となる高温 SMES システムの実用性・信頼性を実証した。

第 4 章では、Y 系高温超電導線材の SMES コイルへの適用可能性について明らかにした。大容量 SMES 最適化設計によりフープ応力耐性の最重要性を把握、貯蔵エネルギーと線材量やフープ応力・最大電界・総発熱量等との相関関係を定量化した。また、最重要となった Y 系線材の機械特性について各種試験により評価し、従来の 3 倍に匹敵する 1 GPa 級のフープ応力耐性や 10^6 万回繰り返し引張応力を許容する耐久性等を実証することで、Y 系コイルのポテンシャルの高さを明らかにした。この結果、Y 系線材の SMES コイル適用で、高磁界化による高エネルギー密度化（コンパクト化）や高温運転が可能となり、高効率な SMES コイルが実現可能となることを明らかにした。

第 5 章では、Y 系線材の構造を活かした新たなコイル化技術について評価・検証し、製作性や伝導冷却等に優位なダブルパンケーキ型の最内層巻線方法、

接続抵抗値制御や剥離抑制が容易な電極形成方法、排熱性の高い樹脂含浸方法等のコイル化に関わる基盤技術を開発した。また、伝導冷却型 Cu 安定化 Y 系コイルを製作・評価し、安定性厚さに応じた過通電時のコイル抵抗値（発熱量）制御の容易性、樹脂含浸によるコイルの高い排熱特性、 I_c の 2 倍を超える短時間過負荷通電の可能性等を実証した。さらに、小型 Y 系トロイドコイルを製作し、線材長手方向の I_c 特性にばらつきのある Y 系線材の補修技術を確立するとともに、SMES 充放電基本動作による長時間連続運転、ヒートサイクル、車両運送時の振動、経年後の基本動作等により同コイルの実用的な耐久性を検証し、Y 系線材の SMES コイルへの適用実現性を実証した。

第 6 章では、Y 系線材を用いた 100 MW/ 2 GJ 級負荷変動補償用 SMES システムの概念設計により、SMES 各構成機器の個別検討および変換器と組み合わせたシステムコーディネーションを実施し、SMES システムの全体構成を明らかにした。特に、トロイド型コイルの 180 分割を新たに提案することで、高磁界化（11 T 級）と同時に垂直磁界成分の低減（0.7 T 級）や漏洩磁界の低減（ ϕ 11.4 m 位置で 5 ガウス）を実現し、2 GJ 級大容量コイルのコンパクト化（直径 ϕ 10 m 以下 1 台）、交流損失の低減（常時充放電する負荷変動補償動作において 3 kW 以下）、コイル直近への冷凍機配置等による高効率伝導冷却システムの適用を可能とした。また、トロイド要素コイルを同数のセルモジュール変換器と組み合わせたダブルマルチユニット構成を新たに提案することで、要素コイルの定格電圧・電流の低減、コイル保護時の電流遮断時定数の短縮によるクエンチ対策と誘導電圧低減による過電圧保護の両立、要素コイル毎の独立制御によるクエンチコイルの個別保護や隣接コイルへの波及低減等を可能とし、SMES システムの大幅な性能向上を実現可能とした。

7. 2 本研究の意義

超電導電力機器の特長は、超電導線材特有の低損失、大電流密度、高磁界を利用した高エネルギー密度化、高効率化、低コスト化が図られることと考える。本研究では、時代の情勢に合わせてその時点で可能な技術を取り入れ、開発途上の SMES を進展させ、実用化するとともに、Y 系線材を用いた新規技術を取り入れ、大容量化、信頼性向上、高効率化への道筋をつけることができた。

特に、瞬低補償用途として開発した世界最大の SMES システムについては、実フィールド試験等を経て早期に実用化し、既に産業界における瞬低被害の一括回避に貢献しているとともに、超電導電力応用機器の先駆けとして超電導技術開発分野の進展に寄与することができたと考える。また、高いポテンシャルを有する Y 系線材を用いてコイルの高磁界化・高強度化や伝導冷却による高温運転を実証することで、SMES のさらなる大容量化、高効率化が実現可能となり、年々ニーズが高まっている電力系統制御用途への SMES システム適用の可能性を高めることができたと考える。これらの成果は、資源エネルギー庁の新規プロジェクトに進展しているとともに、海外においてもマルチトロイド方式が取り入れられており、世界的な Y 系 SMES の開発に貢献している。

また、本研究で研究開発してきた SMES 用コイルは、大容量エネルギー貯蔵装置であると同時に、高磁界を発生するマグネットでもあるため、本研究成果は SMES コイルに限定されることなく、その開発技術や知見を高磁界が要求される各種加速器等、様々な産業用マグネット機器へ応用されることが可能である。特に、高齢化が進展し、医療負担が増加する現代社会においては、がん治療用重粒子線加速器などへのニーズが高まっている。高磁界・コンパクトを実現する Y 系超電導コイルの知見や技術を適用することで、小型化による初期コストの低減とともにマグネットの超電導化によるランニングコストの削減が図られるなど、産業応用機器の開発が進展していくものと期待される。