テーマ解説

超電導電力貯蔵装置 (SMES) の冷却システム

平野 直樹^{*,†}, 渡部 智則^{*}, 長屋 重夫^{*}

Cooling Technologies for SMES

Naoki HIRANO^{*,†}, Tomonori WATANABE^{*} and Shigeo NAGAYA^{*}

Synopsis: As energy storage equipment for electric power systems, superconducting magnetic energy storage (SMES) systems have good characteristics such as high efficiency, quick response and no deterioration under repeated operations. Since 1991, a national project by the Agency for National Resources and Energy Japan has been carried out to develop an SMES system for power control in a power system. Moreover, SMES has been developed as a bridge for instantaneous voltage dips since 2003. In this issue, cooling systems and cryocoolers for SMES are introduced.

Keywords: SMES, cryocooler, liquid helium, pulse tube, inverter control

(Some figures in this article may appear in colour only in the electronic version)

1. はじめに

超電導電力貯蔵 (SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage) と呼ばれる電力貯蔵法は、超電導現象である電気抵抗がゼロとなる特長を利用し、超電導線で作るコイルを作り、そこに電気を流しても超電導コイルのみで閉回路を構成すれば、その回路内を電流が減衰することなく流れ続け、電力をエネルギー変換なく貯蔵する技術である。他の電力貯蔵手法が例えば一旦電気エネルギーを化学エネルギーや回転エネルギーなどエネルギー変換を伴うのに比べ、電気を磁気エネルギーの形で貯蔵することから、エネルギー変換によるロスがなく、高い貯蔵効率を有することが特長として挙げられる。加えて、1 秒程度の短時間で貯蔵全エネルギーを放出したり、数万、数十万回もの繰返し充放電に対して貯蔵部が劣化しない特長も有する。SMES は、すでに瞬時電圧低下補償 (以下、瞬低補償) 用途への実用化が実現しており、三重県亀山市の最新鋭液晶テレビ工場をはじめ国内 3 か所で実稼働している。また、瞬低補償用 SMES に比べ、もう一段高度な技術を必要とする電力系統制御用 SMES の開発が 1991 年から 2012 年まで国家プロジェクトとして進められた。中でも、2007 年には、実系統に SMES を連系し、負荷変動補償機能や系統安定化機能の実証が行われている。ここでは、瞬低補償用 SMES や国家プロジェ

クトとして進められた電力系統制御用 SMES、ならびに SMES 用酸化コイルの開発状況を紹介した上で、SMES の冷却設備にスポットを当てて解説する。開発が進められている酸化コイル伝導冷却技術や小型冷凍機のインバータ化による省エネ技術についても紹介する。

2. SMES の原理と特徴

SMES は、超電導の電気抵抗ゼロの特長を利用し、電気エネルギーを磁気エネルギーとして貯蔵する装置である。超電導線で作られたコイルに電流を流した場合、電気抵抗がないために、コイルを流れる電流の減衰時定数は無限大となる。この時、コイルの両端を閉じると電流は減衰することなくコイルの中を流れ続け、電流が作る磁場が発生し続けることになる。これにより、磁気エネルギーとして電力が保存された状態となり、これが超電導エネルギー貯蔵の原理である。

SMES コイルに貯蔵されるエネルギーは、コイルのインダクタンス (L) と通電電流 (I) で決まり、 $(1/2)L \cdot I^2$ のエネルギーを貯蔵することができる。SMES では、電力がコイルに電流を流し続けることで一定の磁界が発生する形として蓄えられている状態となるので、他の貯蔵手法に比べ電力の変換効率が高く、入出力の瞬時応答性、例えば 1 秒で貯蔵しているエネルギーを放出したり、有効・無効電力の独立制御、更には数万、数十万回もの繰返し充放電に対して貯蔵部が劣化しない長寿命などの特徴を持つ。また、目的に応じた必要貯蔵エネルギー量で、その貯蔵部を構成できるという特徴を持つ。具体的な用途で言えば、瞬低補償であれば 1 秒も出力できればよく、SMES では 1 秒間に大出力できるだけのコンパクトな貯蔵部が実現できる

Received February 28, 2014

^{*} 中部電力(株)電力技術研究所 流通グループ 超電導チーム
〒459-8522 愛知県名古屋市中区大高町字北関山 20-1

Chubu Electric Power Co., Inc., Electric Power R&D Center, 20-1
Kitasekiyama, Ohdaka-cho, Midori-ku, Nagoya, Aichi 459-8522, Japan

[†] E-mail: Hirano.Naoki@chuden.co.jp

DOI: 10.2221/jcsj.49.295

が、二次電池のような貯蔵技術では大出力化のために電池の直並列数を増加させなければならず、結果として数時間以上出力可能な大容量貯蔵部を背負うことになる。

Fig. 1 に SMES のエネルギー充放電原理を示す。電力系統と超電導コイルの間には、交流電流と直流電流を変換する装置や遮断器を持ち、超電導コイル充電時には超電導コイルで閉回路を構成し、コイルに直流電流を流し続けることでエネルギーを貯蔵する。放電時には超電導コイルと変換器の回路を閉じ、コイルの直流電流を外部にエネルギーとして取り出す。

3. SMES 開発動向

超電導状態では大電流を効率良く取り扱えるため、電流密度を高めることができ、電力機器においては大幅なコンパクト化が可能となる。このため、多くの用途において、容量に対するスケールメリットが大きく発揮されるが、SMES においても、高い電力の貯蔵効率とその優れた耐久性の特徴も加わって、1970 年代には、昼夜の負荷平準化などの大規模電力貯蔵技術として、貯蔵容量が数百 MWh から数 GWh 級の SMES が検討された。しかしながら、このような揚水発電の代替えも視野に入れた大型 SMES は、コイルが発生する電磁力支持に、地下の岩盤利用も想定するような大規模なシステムであり課題も多いため、まず市場ニーズもあり、技術的に実現可能な SMES とするために、秒単位の応用となる系統安定化用や瞬時電圧低下（以下、瞬低という）補償用の SMES の開発が進められた。

欧米では、米国企業の 1～3 MJ 級の金属系 SMES が瞬低補償用等に一部導入された実績がある。最近、米国では 2010 年度から、イットリウム系超電導線材を用いた 3.4 MJ @ 4.2 K & 30 T の超高磁場 SMES の開発が 3 年計画で開始されており、ABB 社が主体で SuperPower 社、ブルックヘブン（Brookhaven）国立研究所が開発を推進している¹⁾。フランスにおいても電磁推進用パルス電源として SMES の開発が行われており、Bi 系超電導線材を使用して 0.8 MJ 級のコイル製作評価が実施されている²⁾。

アジアでは、韓国、中国やインドにおいて MJ 級の金属系 SMES が既に開発されている状況にある。

日本における本格的な SMES 開発は、資源エネルギー庁の国家プロジェクトとして電力系統制御用 SMES の開発が、1991 年から産学官を挙げて始められた。また、同プロジェクトで超電導コイルのコスト低減に目処が立ったことから、瞬時の放電動作のみでその責務を果たすことができる瞬低補償システムが実用化されている。以下、瞬低補償用と電力系統制御用の SMES 開発状況を簡単に紹介する。

3.1 瞬低補償用 SMES の開発

SMES は、瞬間に大電力の出し入れが可能で貯蔵効率も高いことから、瞬低補償用に最適な電力機器である。工場

Fig. 1 Principle underlying the charge and discharge of SMES.

Fig. 2 Overview of 10 MVA-20 MJ SMES for bridging instantaneous voltage dips.

Table 1 Specifications of 10 MVA-20 MJ SMES for bridging instantaneous voltage dips

Coil configuration	Four-pole coil arrangement
Rated current	1,400 A
Rated voltage	6,000 VDC
Inductance	21.1 H
Stored energy	20.7 MJ
Maximum field	4.4 T
Cooling method	LHe pool boiling
Rated output	10 MVA 1s
Change over time	1/4 cycle + α

を一括で瞬低補償できる大出力が可能なシステムを実現するため、高圧機器と浸漬冷却超電導コイルとして高電圧化を図った固体絶縁コイルを組み合わせ、待機時の損失を低減できる常時商用給電方式を採用するとともに、瞬低発生時の電力系統からの切替時間を 1/2 サイクルとした世界最大規模の出力 5～10 MVA、補償時間 1 秒の瞬低補償システムが開発された。すでに、インバータやモータ等の多様な負荷が混在した国内の最新鋭液晶 TV 工場内にて、2003 年 7 月より 5 MVA 機のフィールド試験³⁾、2005 年 10 月からは 10 MVA 機のフィールド試験が実施された。これまでに 40 回以上の瞬低補償動作が確認されており、現在も出力 4～10 MVA、貯蔵エネルギー 10～20 MJ 級の金属系超電導体のコイルを用いた SMES が国内 3 か所で実運用されている。実運用中の 10 MVA 機エネルギー貯蔵部外観を Fig. 2 に、緒元を Table 1 に示す。

3.2 電力系統制御用 SMES の開発

国内における本格的な電力系統制御用 SMES 開発は、1991 年から資源エネルギー庁の国家プロジェクトとして産学官を挙げて進められた。第 1 期の要素技術開発において、100 kWh 級の多目的 SMES が金属系超電導体を用いて実現可能であることが示されたが、コスト面の課題も明らかになり、引き続き実施された第 2 期の開発（1999～2003 年度）では、当時システムコストの大半を占めていた超電導コイル部分に対して検討を行い、目的に応じた機能に最適化させることで、コスト低減可能な技術が開発された。その結果、SMES の本体となる超電導コイルは、従来の 1/6 程度で作製可能となる見通しが得られ、要素モデルコイルによる性能実証試験が、中部電力寛政変電所内の超電導試験センターにて実施された。定格通電電流 10 kA の大電流コイルで、18 秒周期の変動負荷補償として過去に例のない連続 1 万回の充放電試験を行い、電力系統制御装置としての優れた性能が証明されている⁴⁾。

さらに 2004 年からの第 3 期国家プロジェクトでは、SMES の電力系統制御システムとしての機能検証を目指した開発が行われた。1 万 kW 級（貯蔵エネルギー 20 MJ 級）SMES を製作し、負荷の変動による電力系統への影響を低減させる機能や発電機が停止するなどの外乱により電力系統が不安定となることを防ぐ機能を、工場での試験による要素機器毎の性能検証試験のみでなく、要素機器をシステムとして組合せ、その効果を実地で確認するために、実系統に連系して試験が行われた。SMES 実系統連系試験システムの鳥瞰図を Fig. 3 に示す。SMES は、Fig. 4 に示すように、栃木県日光市にある古河日光発電株式会社細尾発電所 11 kV 母線に接続され、分岐線の電流、電圧を計測し、隣接工場の電気炉等の運転に伴う有効・無効電力の変動を補償するように SMES は運転し、負荷変動の補償効果が確認された。繰り返し補償動作は、当初目標の 2 万回以上に対して、5 万回以上の動作実績を残し、耐久性・安定性が確認された⁵⁾。なお、第 3 期のプロジェクトでは、実系統連系試験の他に、コイル冷却等に不可欠な極低温冷凍機の信頼性向上についても開発が行われており、その成果も次節で紹介する。

3.3 酸化物系 SMES コイルの開発

これまで紹介してきた SMES は、金属系超電導体を用いたコイルによる SMES であり、超電導状態を維持するために液体ヘリウム温度域（マイナス 269℃）に冷却する特殊なシステムが必要となる。このため、コスト面のみならず運用・保守の面からも制約があり、幅広く普及させるには、更なる技術革新が求められてきた。高温超電導体、中でもイットリウム系超電導体は磁場中でも通電特性に優れ、SMES の高磁界化が可能で、また線材自体に機械強度の高い基材が使用可能であるため、高磁界化コイルでの課題となる高耐電磁力化が容易となる。他の電力貯蔵技術に

Fig. 3 Layout for components of SMES for control of power systems.

Fig. 4 Diagram of power system at field test site.

比べエネルギー貯蔵密度が低い SMES の高磁界化は貯蔵密度を高め、これによりコンパクト化を図ることが出来、物量低減と冷却システムへの負荷を下げることににより、ランニングコストも含めた大幅なコストダウンが期待される。2008 年から始まった第 4 期の国家プロジェクトでは、このイットリウム系超電導体の長所を生かした SMES 用超電導コイルの構成技術の確立を図り、限界性能を把握することを最終目的とした開発が進められた。

イットリウム系超電導体は、製造技術の開発・発展により長尺線材が製作されるようになってきたが、コイル化に際しては引っ張りに強いイットリウム系線材が厚さ方向の応力で積層構造の薄膜に剥離が生じるという問題が生じた。そこで、Yoroi (Y-based oxide superconductor and reinforcing outer integrated) - coil と称するコイル化技術により、イットリウム系線材の弱点を克服して高強度コイルの実現を図った。Yoroi-coil では、超電導線材に作用する電磁力を超電導線材だけでなく、コイルの面方向の側板で支えることによって、超電導線材の強度の限界を超える電磁力に耐えることを可能にしている。東北大学金属材料研究所強磁場センターで、Fig. 5 に示す試作コイルを用いて電磁力により広がろうとする力（以下、フープ力と記す。）に

対する耐力を検証した。液体ヘリウム中、8 T の外部磁場の下、評価設備の電源の限界 1,500 A までコイル通電した結果、コイルに作用するフープ力は最大 1,700 MPa で、Y 系超電導線材の引張強度をはるかに超えるという結果が得られている⁶⁻⁸⁾。この新構造コイルは 2,000 MPa 級の電磁力に耐えることが可能で、これまでのコイルの機械強度による制限を変え、大型の強磁場コイルでも超電導線材の通電特性を発揮できる構造である。

4. SMES の冷却設備

4.1 瞬低補償用 SMES の冷却システム

金属系超電導コイルを用いた瞬低補償用 SMES の冷却システムには、コイルや電流リード等の冷却対象に合わせた小型冷凍機を組み合わせることで、保守・メンテナンス性に優れ、高圧ガス保安法に関わる法定管理者が不要なシステムが実現されている。Fig. 6 に冷却設備を含む貯蔵部の鳥瞰図を示す。超電導コイルを極低温に保持するクライオスタットは、超電導コイルを液体ヘリウムに浸漬するためのヘリウム容器と外側真空容器の隙間に輻射シールド層を配置した真空断熱構造の容器であり、輻射シールドや電流リードを 60 K 前後に冷却する GM 冷凍機が配置されている。また、コイルへの通電や外部からの侵入熱によってガス化したヘリウムを GMJT 冷凍機によって再液化することで、ヘリウム容器内の圧力を一定に保ち、一旦液体ヘリウムを注液すれば途中で補充することなく運転を継続できる設計となっている。

4.2 電力系統制御用 SMES の冷却システム

電力系統制御用 SMES のフィールド試験のために製作した設備は、SMES 充放電の連続繰り返し運転による大きな定常発熱を除去するために、瞬低補償用フィールド試験機では採用しなかった再凝縮機構が採用された。Fig. 7 に電力系統制御用 SMES フィールド試験装置の冷却系を示す。フランスエアリキッド社製大型冷凍機 (helial1000, 冷凍能力 87.5 冷凍トン) から 6.2 K、0.6 MPa のヘリウムガスをクライオスタットのバルブボックスへ送り、JT 膨張させて気液二相流を発生させる。この気液二相流を、クライオスタット上部に取り付けられたステンレス配管をパンケーキ状に巻いた凝縮熱交換器に通し、コイル発熱で蒸発したヘリウムガスを再凝縮させる。なお、結果的には超電導コイルに発生する発熱が設計値を下回ったことから、大型冷凍機による再凝縮運転を行うことなく、瞬低補償用 SMES と同様な GMJT 冷凍機による再凝縮運転により繰返充放電試験が実施された。

4.3 パルス管冷凍機の開発

第 3 期の国家プロジェクトでは冷凍機自体の信頼性を向上させるパルス管冷凍機の開発も行われた。パルス管冷凍機は圧力振動を利用して断熱仕事を行うことで冷熱を発生させる冷凍機であるが、極低温部に可動部がないことから

Fig. 5 Photograph of Yoroi-coil.

Fig. 6 Superconducting coil and cooling system image of SMES for bridging instantaneous voltage dips.

Fig. 7 Schematic diagram of the SMES cooling system for power system control.

小型化が可能で信頼性が高いという特徴を有する。開発されたパルス管冷凍機は従来の冷凍機と異なり、冷凍能力を向上させるため、ヘリウムガスを膨張させる部分を 1 気筒から世界初の 2 気筒構造とすることで出力を 300 W@80 K と高めると共に、冷凍機効率の面でも COP : 0.05 とクラス最高を達成した。また、閉じこめたヘリウムガスを圧縮・膨張させる部分に摩擦する部品を持たないため、摩擦による劣化がなく、従来機の課題であった半年毎のメンテナン

ス間隔を 10 倍に延ばす技術的な見通しを得ている。Fig. 8 に外観、Table 2 に主な仕様を記す。

4.4 酸化物系 SMES コイルの冷却技術

イットリウム系超電導コイルの特性が生かされる 20～40 K の温度領域での冷却は、従来の液体ヘリウム温度領域に比べ、超電導コイルが非常に高い熱安定性を有することが確認されている。この高い熱安定性を活かし、短時間過負荷運転が SMES において可能であり、また、使用温度の上昇により冷凍機がより高効率で運転することも可能となる。ただし、同温度領域においては、4 K 温度領域と異なり固体の伝熱板による熱伝導では、比熱が大きくなる分、迅速な排熱が困難となることが懸念される。このため、Fig. 9 に示すヘリウムガスを循環させることで熱の伝達を促進させる冷却システムを開発した⁹⁾。図中に示す圧縮機はヘリウムガスの循環用に用いている。このシステムに SMES 評価用モデルコイルを接続し、伝導冷却によるコイル特性評価を行った。モデルコイルは、Y 系線材をシングルパンケーキ状に巻線し、絶縁処理したものを 2 層重ね、その両表面に冷却配管を埋め込んだアルミニウム伝熱板を取り付けた構造とした。小型冷凍機で 20 K 以下に冷却したヘリウムガスを循環することで、コイル全体が 20 K 以下に冷却されることが確認されている。

4.5 インバータ制御小型冷凍機の開発

SMES では冷凍負荷が動作時と待機時では大きく異なっている。しかし従来の冷凍機では冷凍能力を変えることができない。したがって最大負荷に合わせた運転をしなければならず、多くの電力を消費することとなるため、その低減が求められる。圧縮機、冷凍機の運転周波数をインバータ制御により可変とすることで、負荷に応じて冷凍能力を換えられる冷凍システムとすることができる。消費電力の低減を目的とした、4 K、20 K、77 K の能力可変高信頼性冷凍機が開発されている。一例として 77 K インバータ冷凍機について紹介すると、冷凍機駆動モータにはインバータ用モータを使用しており、運転周波数として 80 Hz まで駆動可能である。また、圧縮機はインバータ駆動用圧縮機を使用しており、30～60 Hz の範囲で駆動可能である。冷凍機駆動周波数は 60 Hz とし、圧縮機駆動周波数を変化させて冷凍能力を測定した結果を Fig. 10 に示す。目標温度に合わせた制御運転が可能となり、待機時の消費電力が従来に比べ 4 割近く削減できることが確認されている。

5. まとめ

SMES の開発動向とその冷却設備を紹介した。SMES は、エネルギー変換効率が高く、繰返し充放電による劣化がないことからエネルギー貯蔵部の取替えが不要となり廃棄物が出ないシステムであるなどの特徴を有しており、瞬低補償用途への適用・実用化も図られた技術である。今後、既存電源や今後普及が見込まれる分散電源、風力発電

Fig. 8 Photograph of the pulse tube cryocooler.

Table 2 Specifications of the pulse tube cryocooler

Type	Stirling pulse tube
Cooling power	77 K 300 W
Power consumption	7 kW
Input power	200 VAC $\pm 10\%$
Frequency	50/60 Hz
Dimensions	H800×W1,037×D700 mm
Weight	300 kg

Fig. 9 Schematic diagram of the indirect cooling by circulating cryogenic He.

Fig. 10 Variable cooling power of a 77 K inverter controlled cryocooler

等と SMES の最適な融合を図り、電力系統制御技術に寄与する技術として一層の技術開発を展開するとともに、次世代線材によるコイル開発など SMES の低コスト化に向けた技術開発と、電力機器に求められる高い信頼性の検証を推し進めていくことが重要であると考えている。特に、超電導電力機器の信頼性を左右する極低温冷凍機や冷却システムは極めて重要であり、開発が継続、発展することを期待したい。

参 考 文 献

- 1) 例えば、SuperPower 社インターネット公開情報
<http://www.superpower-inc.com/content/superconducting-magnetic-energy-storage-smes>
- 2) A. Badel and P. Tixador: "Optimized use of superconducting magnetic energy storage for electromagnetic launcher powering", *Supercond. Sci. Technol.* **25** (2012) 014006 (9pp)
- 3) S. Nagaya, et al.: "Field test results of the 5 MVA-5 MJ SMES for bridging instantaneous voltage dips", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **16** (2006) 632
- 4) Y. Tatsuta, et al.: "Cost reduction measures for SMES", *TEION KOGAKU* **40** (2005) 141-149 (in Japanese)
辰田昌功ら:「超電導電力貯蔵システム (SMES) のコスト低減」、*低温工学* **40** (2005) 141-149
- 5) T. Katagiri, et al.: "Field test result of 10MVA/20MJ SMES for load fluctuation compensation", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** (2009) 1993
- 6) S. Nagaya, et al.: "Development of high strength pancake coil with stress controlling structure by REBCO coated conductor", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) Issue:3, Part: 2, Digital Object Identifier: 10.1109/TASC.2012.2233854, Article#: 4601204
- 7) T. Watanabe, et al.: "Development of high-strength pancake-coil structure: "Yoroi-coil", *TEION KOGAKU* **48** (2013) 213-219 (in Japanese)
渡部智則ら:「高強度パンケーキコイル構造 (Yoroi-coil) の開発」、*低温工学* **48** (2013) 213-219
- 8) Xudong Wang, et al.: "Numerical structural analysis on a new stress control structure for high-strength REBCO pancake coil", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24** (2014) Issue: 3, Digital Object Identifier: 10.1109/TASC.2013.2288294, Article#: 4601605
- 9) S. Nagaya, et al.: "Development of a high-efficiency conduction cooling technology for SMES coils", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) Issue: 3, Part: 2 Digital Object Identifier: 10.1109/TASC.2012.2235751, Article#: 5602804

平 野 直 樹 1963 年生。1988 年 3 月大阪大学大学院基礎工学研究科卒業。1998 年 3 月総合研究大学院大学博士課程修了。現在、中部電力(株)電力技術研究所 超電導チーム チームリーダー。超電導の電力応用や冷凍機開発に従事。低温工学・超電導学会、電気学会会員、博士 (工学)。

渡 部 智 則 1964 年生。1990 年 3 月東京工業大学大学院理工学研究科金属工学専攻修了。現在、中部電力(株)電力技術研究所 超電導チーム 研究主査。主として高温超電導線材に関する研究に従事。低温工学・超電導学会会員。

長 屋 重 夫 1957 年生。1981 年 3 月名古屋大学工学部応用化学科卒業。現在、中部電力(株)電力技術研究所 超電導チーム 研究主査。主として超電導の電力応用に関する研究に従事。低温工学・超電導学会、電気学会会員。