解 説

SMES 用酸化物電流リードの開発 —多並列接続 Y 系電流リードシステム—

平野 直樹[†], 鹿島 直二, 長屋 重夫

Development of Oxide Superconductor Current Leads for SMES Large-current YBCO Current Leads using Parallel Connection

Naoki HIRANO, Naoji KASIMA and Shigeo NAGAYA

Synopsis: This paper introduces the development progress regarding the current lead for SMES. Large-current carrier capacity has been attained by connecting two or more 1kA-class YBCO superconductivity current lead elements in parallel. Miniaturization of the SMES current lead for bridging instantaneous voltage dips has been achieved by cooling the YBCO bulk elements with a small direct cryocooler, and a 10kA-class current lead has been produced by connecting 1kA-class current leads in parallel. This current lead, which supplies electric power to the SMES model coil for load fluctuation compensation and frequency control, was further developed as a national project of the Agency of Natural Resources and Energy.

Keywords: SMES, YBCO, current lead, large current, parallel connection

1. はじめに

超電導電力貯蔵システム（以下 SMES という）に用いられる電流リードには、SMES の規模に応じた通電容量のみならず、電力機器として求められる高い信頼性とランニングコストの低減を図る上での熱侵入の低減、電極部でのジュール発熱の低減が要求される。イットリウム系（以下 Y 系という）電流リードは、磁場中でも通電特性の低下が少なく、また、一方向凝固による結晶性の向上で高い通電特性が有られること¹⁾から、早くから、SMES などの比較的大きな磁界を発生するコイルの電流供給部への適用が期待されていた。現在、SMES 用の Y 系酸化物超電導体を用いた電流リードとしては、Y 系バルク体を直接小型極低温冷凍機により冷却することでコンパクト化を図った瞬時電圧

低下補償用 SMES（以下瞬低補償 SMES という）の電流リード²⁾と、資源エネルギー庁の国家プロジェクトとして開発が進められた負荷変動補償・周波数調整用 SMES 要素モデルコイルに給電する電流リードとして、1 kA 級の電流リードを集積化し、10 kA 級の大容量電流リードの開発³⁾が行われており、優れた運転性能が確認されているので紹

介する。

2. 瞬低補償 SMES 用電流リード

2.1 瞬低補償用 SMES

SMES は短時間に大電力を放出することが可能なことから、他の瞬低補償装置では困難な工場を一括補償できるシステムが可能である。このため、大規模な半導体工場等を対象とした瞬低補償装置として、工場の受電設備に設置することを前提に、保守性・メンテナンス性にも配慮した設計思想を持つ出力 5MVA の SMES が開発され、国内の最新鋭液晶工場にてフィールド試験が行われている。瞬低補償用 SMES は、落雷等による瞬低を、速やかに検出する高速検出器、負荷への電力供給を電力系統から超電導コイル側に切替えて給電する高速切替スイッチと変換器、エネルギー貯蔵部である超電導コイル、コイルや電流リード冷却用の冷凍機、コイルの保護装置等から構成されている。貯蔵部である超電導コイルは漏洩磁場を低減させるために 4 個のソレノイドコイルを 4 重極に配置し、その冷却には小型冷凍機 3 台による浸漬冷却方式が採用されている。また、電流リードや輻射熱シールド用に、それぞれ極低温小型冷凍機を分割して採用することで、冷凍能力 3 冷凍トン以上の冷凍機冷却では必要となる高圧ガス保安法上の法定管理者を選任する必要がなく、設置者側の負担を大幅に低減できるシステムを実現している。**Fig. 1** に瞬低補償 SMES コイルシステム鳥瞰図、**Fig. 2** にフィールド試験状況写真を示す。

Received February 25, 2004

中部電力（株）電力技術研究所

〒459-8522 名古屋市長区大高町字北関山 20-1

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

[†] E-mail: Hirano.Naoki@chuden.co.jp

2.2 電流リードの特徴

瞬低補償用 SMES の電流リード設計諸元を **Table 1** に示す。瞬低補償用 SMES は、瞬低発生時に速やかに超電導コイルに蓄えているエネルギーを放出する動作を要求されるため、常時電流リードには定格電流が流れている。**Fig. 3** に電流リードシステム構成図を示すが、この電流リードは銅リードと HTS リードを組み合わせることで侵入熱を低減している。室温から 77 K レベルまでの真空雰囲気中に置かれる銅リードはメンテナンスの観点からガス冷却を伴わない最適化されたリードを用いその侵入熱は 1 段の GM 冷凍機によって除熱される。2800 A の通電電流に対して、最適化された銅リードでは約 260 W/対の侵入熱があり大容量の GM 冷凍機により銅リードの低温端を 77 K 以下に冷却する。77 K 以下の温度領域では HTS リードを用いるが、77 K レベルの高温、0.5 T 程度の磁場中でも利用可能な Y 系リードを採用した。本システムで、HTS リードに要求される性能は、2800 A 通電時に全ての HTS リードの伝導分、ターミナルのジュール発熱分を含めて 3 W/対以下である。本システムに用いた電流リード素子単体の仕様値は 77 K、0.5 T で臨界電流 1000 A 以上、77 K から 4.2 K への侵入熱が、通電時で 0.38 W/本以下のものであり、2.8 kA の定格通電電流を確保するため、Y 系電流リード素子 4 本を並列接続して用いた。

2.3 通電性能

瞬低補償用 SMES に組み込む前に、電流リード素子単体の性能を把握する目的で通電試験を実施した。本試験では液体窒素 (77 K) 中で 0.5 T の磁場を印加した状態で行われ、Y 系電流リードの健全性を確認するとともに、通電時のジュール発熱を把握する。**Fig. 4** に 1000 A までの IV 特性を示す。図中の直線の傾きが Y 系パルク材と銅リードの接触抵抗となる。本図より電極と Y 系パルク材の接触抵抗は $0.6 \mu\Omega/1$ 箇所であることがわかった。実際 Y 系リードは 77 K と 4.2 K の温度範囲で用いられ、本リードの場合、低温側 (4.2 K) での接触抵抗は 77 K での測定値の 1/10 以下になることが確認されている為、4 本のリードに電流が均等に流れた場合、低温でのジュール発熱分は 0.3 W/対以下になる。本リードの場合、熱伝導による侵入熱が支配的であり、本リードの侵入熱が 3.0 W (前述した 0.38 W/本が 8 本分) であることを考えると、その内の約 1 割がジュール発熱分であると言える。

なお、本電流リードをフィールド試験実システムに組み込み、2.8 kA 通電時の 4.2 K への侵入熱評価を行ったところ、今回構成した電流リードシステムの侵入熱は 3 W 以下を達成したことを確認している。

Fig. 1 Bird's-eye view of the SMES coil system.

Fig. 2 The SMES coil system at a field test site.

Table 1 Main parameters of the HTS current lead for SMES

Material	YBCO
Rated current	2800 A
Heat load between 77 K and 4.2 K	less than 3 W

Fig. 3 The HTS current lead system.

Fig. 4 V-I characteristics of an HTS current lead at 77 K, 0.5 T.

3. 大容量電流リード

3.1 負荷変動補償・周波数調整用 SMES

資源エネルギー庁の SMES 国家プロジェクトとして、超電導コイルを中心としたコスト低減技術開発が行われている。SMES の持つ便益を代替の既存技術からライフサイクルコストで評価することで、機能の相対的な価値換算を行い、電力系統制御用として、負荷変動補償・周波数調整用途と系統安定化用途のそれぞれに最適化した SMES の開発に成功した。中でも、負荷変動補償・周波数調整用 SMES は、SMES の本体である超電導コイルに関して、導体構造の簡素化、超電導線材の物量低減や、交流損失の低減により、従来の 1/6 程度のコストで作製可能となる見通しが得られ、要素モデルコイルでの性能実証試験が、中部電力（株）の寛政変電所内に建設した超電導試験センターにおいて実施された。10kA の定格通電容量を持つ大電流強制冷却超電導コイルを製作し、18 秒周期の変動負荷補償として過去に例の無い 1 万回の繰り返し充放電試験を行い、電力系統制御装置として SMES の優れた性能が確認されている。

この試験の実施に当たり、超電導コイルに直流 10 kA を通電できる大容量電流リードが必要となり、開発が行われた。

3.2 電流リード単体試験装置

(1) 電流リード素子

開発した Y 系電流リード素子の主な諸元を Table 2 に、外観を Fig. 5 に示す。電極部での接続抵抗を低減するため、銅電極部には超電導体を埋めこんだ構造としている。電極への酸化物の埋め込みの効果については、別途実施した比較試験の結果、電極部に超電導体を埋め込むことにより、接続抵抗を低減する効果があることが確認されている。なお、Y 系超電導体は、熔融凝固により製作した均一配向バルク体から切り出したものであり、電極へ埋め込んだ超電導体も、同様にして作成したものである。

Table 2 Specifications of HTS current lead element

Material	YBCO
Size (Cross section, Length)	$3 \times 4 \text{ mm}^2$, 87 mm
Critical Current	More than 1200 A (0.1 T, 77 K)

Fig. 5 The HTS current lead element.

(2) 通電特性試験装置

上記電流リード素子を正負各極にそれぞれ 12 本並列に接続し、両極を短絡バーにて短絡し、10 kA までの通電試験を行った。Fig. 6 に試験装置概略図を示す。電流リードは SMES 等の大容量超電導コイルに接続することを想定し、高温端側は内部に液体窒素を貯液した円筒状の銅電極、低温端側は液体ヘリウム貯槽から突き出した円筒状の低温端部に接続した。従って、両極合わせて合計 24 本の電流リードは、真空空間に配置され、高温側は液体窒素への伝導冷却、低温側は液体ヘリウムへの伝導冷却により冷却される。なお、各極それぞれ 12 本の電流リードは、円筒状の電極の周囲に等間隔に配置した（ただし、Fig. 6 では、高温超電導リードは、説明のために各極 1 本のみ図示してある）。

3.3 電流リード単体試験結果

(1) 通電特性

Fig. 7 に通電時の電流波形を示す。10 kA まで上昇させたところで、約 20 分間ホールドし、異常のないことを確認し

Fig. 6 Schematics of the test apparatus.

た。その後、4 kAまで下げ、約1 kA/sの励磁速度にて、10 kAまでの上げ下げを2回繰返した。10 kAに到達したところで、約10秒ホールドした。特に異常は認められなかった。各素子に流れる電流は、それぞれの素子の電極部に取り付けた電圧タップによる電圧値と接触抵抗を含む電極部の抵抗値から算出した。各電流リード素子の電流分布算出結果をFig. 8に示す。12本の素子において、通電電流にバラツキが発生している。定格の10 kA通電時に、最も大きな電流が流れている素子において1130 A、最も小さな電流が流れている素子において560 Aであり、平均値の833 Aに対し、それぞれ、+36%、-33%程度のバラツキとなった。なお、各素子の臨界電流は、高温端側の液体窒素温度部において約2200 A（1/4サンプルからの推定値）であり、それを超えるような偏流にはなっていないことが確認された。

(2) 熱侵入特性

通電特性試験装置において、電流リード素子（12 本×2 極）を接続した場合における発熱量（10kA 通電時）および侵入熱量は、合計で 12W 程度であった。このうち、約 4W 分が 10kA 通電による発熱分であった。この値は、電流リードに接続する超電導コイルの冷却に負担とならない値であり、既存の冷凍機によるコイル冷却設計が可能である。

Fig. 7 The current pattern when testing the HTS current lead.

Fig. 8 Current distribution for each HTS current lead element.

3.4 負荷変動補償試験結果

負荷変動補償試験においては、予冷に約1ヶ月、合計10000回の負荷変動補償を模擬した通電パターン（7.7 kA→10 kA→7.7 kA の変化を 18 秒周期で 5000 回繰返し、その後、7.7 kA→4.2 kA→7.7 kA の変化を 18 秒周期で 5000 回繰返す通電パターン）、による 50 時間に渡る連続通電通電試験、および 2000 A/s の連続高速通電等を含む約 2 ヶ月の通電試験を実施した。その間、高温超電導電流リードにおいては、異常な電圧発生等は観測されず、問題なく動作した。Fig. 9 に負荷変動補償試験時の装置外観を示す。全面に見える真空容器は、外径 3.6 m、床からフランジまでの高さは 1.8 m の大きさであり、電流リードならびに輻射シールドを冷却する液体窒素が流れる配管が凍っている様子が分かる。Fig. 10 に負荷変動補償用モデルコイルの電極部の模式図を示す。基本的な構造は、単体通電時と同様であるが、モデルコイルにおける低温側端子部は、0.6 MPa、6 K 程度の超臨界圧ヘリウムを端子内部の空洞に配管により供給し冷却した。低温側端子部および、高温超電導電流リードを取囲む 80 K シールドは、アルミ製の円筒であり、底部をコイル本体の 80 K シールドに接続した。

電流リードの低温側端子部への侵入熱量は、Fig. 10 における電流リード低温側端子を冷却するヘリウムガスのエンタルピー変化から評価した。一極分の侵入熱量評価結果をTable 3 に示す。定常侵入熱を 5.6 W から評価すると、高温超電導電流リードは、12 本並列に接続されているため、1 本あたりでは、約 0.47 W となる。なお、この熱負荷には、高温側端子からの熱伝導分および 80 K シールドからの輻射等を含む。また、通電時発熱量（1.6W、10 kA）から 1 ヶ所あたりの接続抵抗を求めると約 0.2 $\mu\Omega$ となる。この値は、素子単体における液体窒素中における超電導素子と電極との間の抵抗値とほぼ一致する。電気的な抵抗としては、

Current Lead

Fig. 9 The SMES model coil system at the test site.

Fig. 10 A schematic of the 10 kA current lead.

Table 3 Heat load to supercritical helium line from a 10 kA current lead (loss of the only one pole)

Conduction	Joule loss	Total
5.6 W	1.6 W (10 kA)	7.2 W

超電導素子と電極との間の抵抗に加えて、低温側端子の銅部分等があるものの、これらの抵抗値と比較し、充分小さい。そのため、通電時の発熱源は、超電導素子と高温側端子との間の接触抵抗が支配的と考えられる。

なお、今回開発した電流リードは、液体窒素温度、0.5 T の磁場中で、1 本あたりの臨界電流が 2 kA 以上ある Y 系電流リード素子を 12 本並列接続していることから、20 kA 級の大容量電流リードの性能を備えていると考えられるが、確実に国家プロジェクトでのコイル性能評価試験を実施するために、2 倍の裕度を与えた設計とした。

4. まとめ

1 kA 級の Y 系超電導電流リード素子を複数本並列に接続することで大容量化を図った SMES 用電流リードについて、開発状況を紹介した。SMES は実用化の一手手前まで開発が進んでおり、超電導コイルに電流を供給する重要な構成要素である電流リードにおいても長期信頼性や冷却方法の最適化、構造の最適化によるコスト低減が今後とも一層要求されるため、引き続き開発が必要と考えている。

最後に、本稿をまとめるに当たり、貴重なデータを提供いただきました、株式会社東芝 嶋田 守氏、大勢持 光一氏、同和鉱業株式会社 小早志 秀一氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) N. Hirano and S. Nagaya: "Ag doping effects on the microstructure and properties of unidirectional grown Y-Ba-Cu-O superconductors," IEEE Trans. Appl. Supercond. **1.5**, No.2 (1995) 1564-1567
- 2) S. Nagaya, N. Hirano, et al.: "Development and performance results of 5MVA SMES for bridging instantaneous voltage dips," MT-18 (2003)
- 3) N. Hirano, N. Kashima, S. Nagaya, et al: "Development of HTS current leads for large current", Abstract of CSJ Conference **68** (2003) 238
平野直樹、鹿島直二、長屋重夫ら：「大容量高温超電導電流リードの開発」、第 68 回 2003 年度春季低温工学超電導学会講演概要集 (2003) 238

平野 直樹

1963 年 11 月 6 日生。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・新素材チーム研究副主査。主として超電導の電力応用に関する研究に従事。低温工学協会会員。電気学会会員。工学博士。

鹿島 直二

1965 年 5 月 1 日生。1991 年 3 月立命館大学大学院理工学研究科卒業。現在、中部電力（株）電力技術研究所 超電導・新素材チーム研究副主査。主として超電導の電力応用に関する研究に従事。電気学会会員。

長屋 重夫

1957 年 4 月 28 日生。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・新素材チームリーダー。主として超電導の電力応用に関する研究に従事。低温工学協会会員。電気学会会員。