

Application of the SMES for the Accelerator Magnet Power Supply

Hikaru Sato^{1,A)}, Takakazu Shintomi^{B)}, Toshifumi Ise^{C)}

A) Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

B) Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities, Nihon University

Ichigaya-Tokyo Bldg. 6F, 4-2-1 Kudan-kita, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0073

C) Graduate School of Engineering, Osaka University

Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871

Abstract

Power supply for the large-scale accelerator magnets, such as J-PARC, draws a large amount of power from the utility network. Such large pulse power will give un-allowed disturbances to the connected ac power system. A SMES system will be required for compensating such pulse electric power and reducing the disturbances. For other applications, a SMES system is expected to protect the instantaneous voltage drop and the load leveling so far. Present status of the R & D for the SMES system and application example for an accelerator power supply will be discussed.

加速器電源へのSMESの応用

1. はじめに

素粒子・原子核物理実験用の加速器はより大型化してきている。一方で加速器技術の発展から物性応用、医療用等に小型で廉価な加速器施設の建設も進んでいる。大強度加速器では受電系統を高圧専用線から取るのが一般的であるが、大電力の充放電に伴う系統内の負荷変動を補償する必要がある。小型加速器においては負荷変動は小さいものの、一般商用線から受電する機会が多く、系統の負荷変動補償は必要であり、かつ消費電力の平滑化は運転経費を軽減する効果ももたらす。放射光や衝突型加速器のような蓄積型加速器では大きな負荷変動はないが、瞬時停電等による運転への影響が多岐である。これらの負荷変動補償、消費電力平滑化、瞬時停電対策用に超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES) が有用であると考えられる。SMESの開発研究は我が国においてはKEK-PSにその端を発している。しかし、当時加速器業界のなかでは加速器電源を加速器科学・技術として評価・認識する状況になくSMESについても同様であった。その後、電力業界では使用電力の平滑化や系統安定化等にSMESを応用する研究開発が行われ、NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) を通じて国家プロジェクトとしても研究開発が推進された。本稿ではこれまでのSMESの研究開発状況とそれらの事例の紹介をし、加速器電源へのSMESの応用について述べる。

2. SMES研究開発の状況

SMESは、大型装置としては他のエネルギー貯蔵装

置と比較して効率がよく、また直接電気エネルギーとして貯蔵する利点もあり、米国では1960年代の末から研究が進められてきた^[1]。わが国においては、1970年代にKEK-PSにおいて主リング電源の充放電エネルギーの平滑化のための開発研究が行われ^[2,3]、KEKにおいて2回のワークショップが開催された^[4,5]。また、核融合炉用電源においてもSMESが注目され設計研究が行われた^[6]。電力業界では使用電力の平準化のため揚水発電所に代わりうる大規模電力貯蔵装置として期待がもたれ、活発な研究が展開された。時代を経て、エネルギー入出力装置に使用する半導体素子を用いた交流・直流電力変換装置の高速制御の技術革新が進み、電力系統の電圧・周波数変動を抑制する系統安定化装置、負荷変動補償装置などへの応用や、瞬時停電対策に着目した研究が国家プロジェクトとして推進された。すなわち、電力系統安定化装置および負荷変動補償装置のための、SMESの要素技術開発が1991年度から8年にわたって、続いて1999年度から5年にわたってSMESのコスト低減技術を中心とする技術開発が行われた。これらはISTEC (国際超電導産業技術研究センター) がNEDOより委託を受けたSMESの要素技術確立のためのプロジェクトであった。

九州電力ではESK (Experimental SMES of Kyushu Electric Power) を同社今宿変電所 (福岡市西区) に設置し、1998年3月から2002年3月まで4年間に渡り、実系統に連携した実証試験が行われた^[7]。現在実証機としては10MW-20MJ級のSMESによる試験が古河電工日光事業所において行われている^[8]。また瞬時停電補償用としても同規模の実証機が最新鋭液晶テレビ工場に設置され稼働している^[8]。

¹ E-mail: hikaru.sato@kek.jp

大電力エネルギー転送の実績としては、ITER計画の工学設計活動の一環として開発されたCSモデルコイルとJT-60用フライホイール発電機との間で450MJを12秒で往復する実験が行われた^{[9]2}。

これらの開発研究の進展を背景に、2003年度より高エネルギー加速器研究機構共同開発研究として「シンクロトロン電磁石電源の負荷変動補償」の研究を開始した。また2005年度、2007年度には超電導エネルギー貯蔵研究会³の技術委員会の課題としてJ-PARC-50GeVリング用SMESの検討が行われた^[10]。図1にSMESのエネルギー貯蔵容量と応用分野の関係を示す。

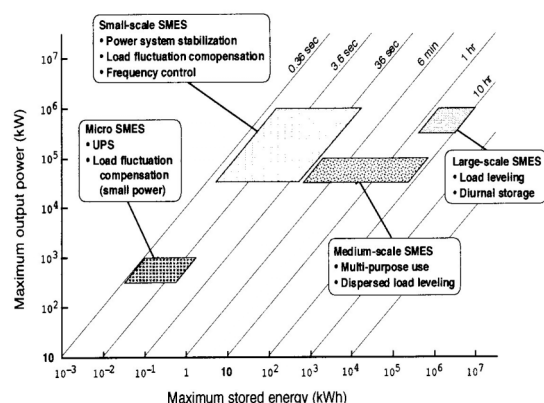


図1：SMESのエネルギー貯蔵容量と応用分野

3. 加速器電源へのSMESの応用

加速器電源への応用としても、同様に負荷平準化、負荷変動補償、瞬時停電補償等が考えられる。すでに述べたように1970年代にKEK-PSにおいて負荷平準化用にSMESの検討が行われ、小規模の実験も行われた^[2,3]。KEK-PSの主リング電源はピーク電力20 MW、平均8 MWを2秒ないし4秒周期の台形波で繰り返し運転される。システムの電圧変動は無効電力補償装置にて抑制されている。しかし、大強度加速器になると有効電力の変化も系統に影響を与えるので、負荷変動補償としてSMES等、何らかのエネルギー貯蔵装置が必要とされる。また最近社会的要請もあって小型の医療用シンクロトロンの建設が進んでいるが、SMES等のエネルギー貯蔵装置を付加し、負荷平準化を行えば運転経費の軽減が期待される。これらは数秒周期で繰り返し充放電されるシンクロトロンの場合であるが、放射光加速器や衝突型加速器のような蓄積型リングの場合、瞬時停電による影響を回避することが重要である。また、超電導電磁石を用いた加速器や加速器に付随した超電導機器も瞬時停電による影響をこうむる。これらの瞬時停電対策用にもSMESは有望である。米国ではトレーラーに積載した可搬型1 MJ級のSMESが市販 (MICRO-SMES) されており⁴、

BNLのNSLSには瞬時停電対策用のMICRO-SMES⁵が設置されている^[11,12]。負荷変動補償用にはJ-PARC他、CERN-PSにおいても検討が始まっている^{[13]6}。

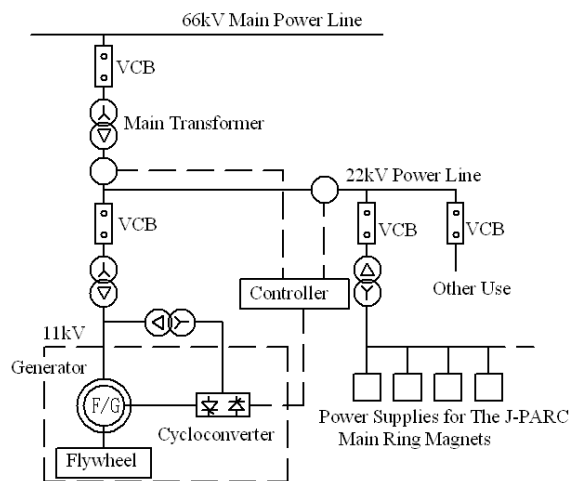


図2：J-PARC 50GeV Magnet電源の概念図

4. J-PARC 50GeV-PS用SMESの検討

J-PARC 50GeV-PSの場合はRCSからの3 GeVのビームを入射し、50 GeVまで加速、減磁、を2.8〜3.6秒で繰り返す。例えば、偏向電磁石のパラメーターは、入射電流：202 A、最大電流：3015 A、磁石当たりのインダクタンス：104 mH、抵抗：45 mΩで、これが96台あり、有効電力は平均で19.1 MW、ピーク電力は72.5 MWと−54.4 MWをスイングする。このように大きな変動電力が電力系統との間でやり取りされるため、電力系統に擾乱が加わる。最大容量で運転した際には、許容値以上の擾乱が発生するために、何らかの電力負荷変動補償装置が必要となり、当初設計では可変速フライホイール (FW) 装置を搭載することになっている^[14]。図2に電磁石電源の概念接続を示す。他にも4極電磁石や補正用6極電磁石、軌道補正用電磁石等々があり、図3にそれらの総合電力を示す。変動電力補償装置の設計にあたっては、50 GeV運転の変動電力を40 GeV運転時の電力変動分100MW以下に抑えるように考えればよい⁷とされている。従って、60 MWを越える変動部分を補償するとして、その部分のエネルギー量は約30 MJとなる。補償装置としてSMESを考える時、交流損失を考慮してSMES容量の30%を補償用に使うものとして、100 MJの容量を持つコイルを考えればよいことになる^[15]。

FW発電機の場合は、図2に示すように、交流系統に接続して補償する方式であるが、SMESの場合にはFWに置き換えて交流系統に接続することはもちろん

² <http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/HOME-J.html>

³ <http://www.rasmus.com/>

⁴ American Superconductor社がメジャーである。

⁵ Superconductivity Inc., Middleton, WI

⁶ BNL-AGSにおいてはキャパシタを用いた負荷変動補償の検討が報告されている [PAC07-MOPAS097]。

⁷ 東京電力のシミュレーションによる。

であるが、直流系統に接続する方式が採用できる。この方式は、電力変換システムの容量を小さくできる点でメリットがあり、図4のように各電源ユニットにSMESを接続する方式を検討している。この場合は補償対象となるのは偏向電磁石のみであるが、偏向電磁石電源の変動電力を補償すれば総合電力として変動が許容範囲内におさまると考えられる。これらはシミュレーション計算^[16]による検証とともに、実験室規模のSMES (10 kJ) と模擬負荷を用いた実験的検証を行っている。

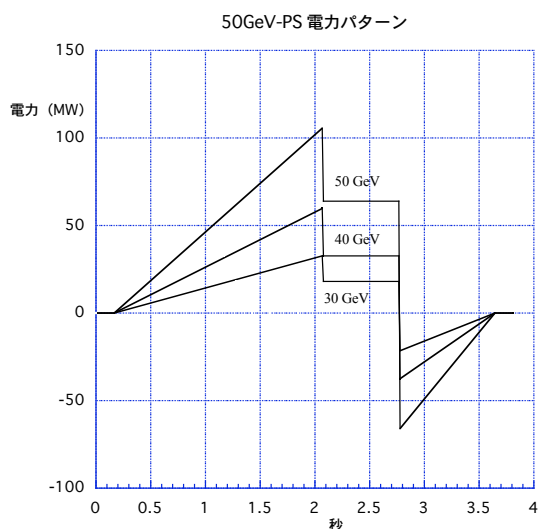


図3：J-PARC 50GeV Magnet 電源の電力

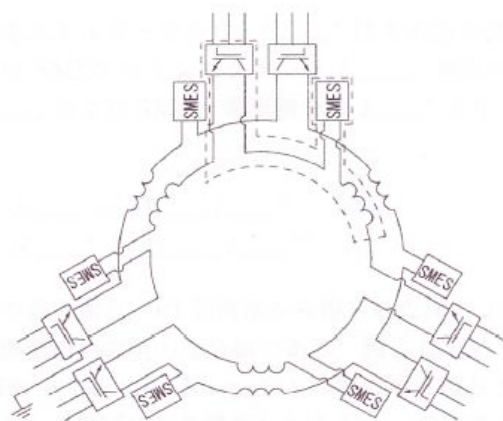


図4：直流側接続の概念図

5. まとめ

SMESの開発研究は主に国家プロジェクトとしてNEDOを中心に行われてきた。それにより、負荷変動補償装置としての要素技術開発およびコスト低減化技術の成果が得られ、瞬時停電補償用や系統安定化用の実証試験（フィールド試験）が行われている。J-PARC用にSMESの検討を開始した時には実績がないという評価であったが、その点は克服されたと言えよう。今後はむしろより過酷な使用条件（充放電の

繰り返し頻度、励磁速度の速さ）から、耐久性、交流損失といった点で逆に一般電力業界にその知見を与えるようになるであろうと期待される。

参考文献

- [1] R.W.Boom et al., "Superconductive Energy Storage for Power Systems," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-8, No.3, September, 1972, pp. 701-703 他、[3]に記載あり
- [2] M.Masuda et al., "100 KJ SUPERCONDUCTING COIL ENERGY STORAGE", Proc. of the 6th Int. Conf. on Mag. Tech., 1977, p. 254
- [3] T.Shintomi et al., "3 MJ Magnet for the Superconducting Energy Storage," Advances in Cryogenic Engineering, 25 (1979) pp. 98-104
- [4] M.Masuda et al., Proceedings of the 1st Meeting of Superconductive Coil Energy Storage, Tsukuba, January 29, 1977 (in Japanese), KEK-77-6 June 1977
- [5] M.Masuda et al., Proceedings of the 2nd Meeting of Superconductive Coil Energy Storage, Tsukuba, February 17-18, 1978 (partially in English), KEK-78-26 February 1979 A
- [6] 核融合研究部炉設計研究室、"トカマク型核融合炉用超電導誘導エネルギー蓄積装置の設計研究"、1977年8月、JAERI-M 7201
- [7] "九州電力における1kWh-SMESの研究成果" 平成14年10月29日 九州電力総合研究所
- [8] 長屋重夫、"SMESの実証試験と開発状況"、OHM 2007, 02, pp. 44-50
- [9] 嶋田隆一監修、佐藤義久著：図説「電力システム工学 電気をつくる・送る・ためる」丸善 2002年
- [10] 超電導エネルギー貯蔵研究会平成16年度研究報告書 超電導エネルギー貯蔵研究会平成18年度研究報告書
- [11] 伊瀬敏史、"海外におけるSMESの実用化例"、パワーエレクトロニクス研究会論文誌、Vol. 25, No. 1, 1999, pp. 93-98
- [12] Thomas R. Abel, Power Quality/Power Value Proceedings, September 1997, pp.404-417
- [13] R. Gehring et al., "SMES-Based Power Supply for Accelerator Magnets", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 16, No. 2, June 2006, pp. 594-597
- [14] Accelerator Technical Design Report for J-PARC, KEK Report 2002-13/JAERI-Tech 2003-044/J-PARC 03-01, March 2003
- [15] T. Shintomi et al., "SMES FOR ELECTRIC POWER COMPENSATION OF THE J-PARC HIGH INTENSITY PROTON SYNCHROTRON", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 16, 2006, pp. 628-631
- [16] T. Ise et al., "Magnet Power Supply With Power Fluctuation Compensating Function Using SMES for High Intensity Synchrotron", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, June 2003, pp. 1814-1817