

Research of Energy Storage System for the J-PARC 50GeV-PS

Hikaru Sato^{1,A)}, Shirabe Akita^{B)}, Toshihumi Ise^{C)}, Ryuichi Shimada^{D)}, Takakazu Shintomi^{A,E)},
Shinichi Nomura^{D)}, Satoshi Morozumi^{F)}

A) High Energy Accelerator Research Organization Accelerator Laboratory
1-1 Oho Tsukuba-shi Ibaraki-ken, 305-0045, Japan

B) Central Research Institute of Electric Power Industry, 2-6-1 Nagasaka, Yokosuka, Kanagawa 240-0196, Japan

C) Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

D) Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, Japan

E) Nihon University, 4-2-1 Kudan-kita, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0073, Japan

F) Mitsubishi Research Institute, Inc., 2-3-6 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan

Abstract

The J-PARC 50GeV-PS magnets power supplies are constructed with IGBT and IEGT, then the power factor is 100%. However, the swing of active power become almost 170MW, although the dissipation power is about 30MW. In order to overcome the fluctuation in power line, it is inevitable to use an energy storage system. An Adjustable Speed Flywheel System has been designed in original plan. In this report, research of active power compensation using Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) System to save the power instability will be described.

J-PARC 50GeV-PS用SMES装置の検討

1. はじめに

KEKと原研の共同事業による大強度陽子加速器 (J-PARC) が原研東海キャンパスに建設中である。加速器はカスケード型であり、最終的には前段加速器と600 MeVリニアック、3 GeV (RCS)、50 GeVシンクロトロン (50GeV-PS) で構成される。50GeV-PSは3.6秒周期で台形波励磁されるが、電源はIGBTとIEGTで構成されており力率1の運転を行うので無効電力は発生しないとされている。しかし、ピーク実効電力の変動振幅は170MWにもなり、実効電力の変動による電源ラインへの影響が大きくなる^[1]。従って、電源の安定化のためになんらかのエネルギー補償装置が必要である。

2007年度運用開始予定のJ-PARC第I期計画では、FWの建設はせず、50GeV-PSは30GeVあるいは40 GeVで運転することにより、電源系統に与える擾乱を許容値以下とし、電力変動補償装置が無くても運転が可能となっている。しかし、第II期計画で加速器を50GeVに増強する場合には、系統に与える擾乱が許容値以上になり、何らかの電力変動補償装置が必要である。

エネルギー貯蔵システムとしては、様々な方式があるが、シンクロトロン電磁石電源のような数秒の繰り返しによる充放電に対処できるものとしては、可変速フライホイール発電機 (FWG) または超電導磁気エネルギー貯蔵 (SMES) 装置、が適当である。

FWGは可変速方式により交流側において負荷変動補償をするには適当であり、当初設計においてはFWGの導入が検討されている。しかし、エネルギーを充放電する際に回転数が変化することによる応力疲労の問題や、応力的には良いとしても発電機の熱サイクルに対する検討が必要であり、それだけの耐力を持つものとしなければならない。この加速器の一生での繰り返しパルス回数は $10^7 \sim 10^8$ になると予想されるので十分な耐久性が要求される。そこで、回転部分を持たない静止器であり、効率、耐久性の点でメリットがあると考えられているSMES装置の導入可能性について検討を行った。

2. 50GeV-PS電源の構成とライン電圧変動

50GeV-PSは3回対称の電磁石配置になっている。電磁石群は、96台の二極電磁石と216台の四極電磁石で構成される。図1に示すように、加速器の対称性に従って3セクションに分割され、夫々のセクションは2ユニットで構成される。各電源ユニットは、upper coil用とlower coil用に分けられており、すべての電源ユニットが直列接続に、かつupper coilとlower coilの電流が逆向きになるよう接続され、リング全体として大きなダイポール磁場ができないようになっている。50GeV-PSはビームの加速、取出しに伴って繰り返し3.6秒でパルス運転され、パルス運転に伴って負荷である主リング電磁石と電

¹ E-mail: Hikaru.sato@kek.jp

力系統との間で有効電力がやり取りされる。50GeV運転と40GeV運転における電力変動量はそれぞれ、170MW、108MWで、40GeV運転では66kVラインでの変動量はガイドラインの±1.225%以下になると見積もられている^[2]。

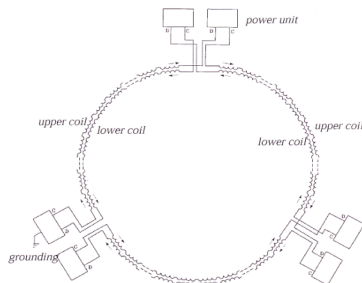


図1：電源構成と接続

3. SMES装置の検討

SMES装置を交流側に設置して負荷変動補償を行う場合はフライホイールと同等の働き・効果としての機能となる。また、SMESコイルの開発技術はほぼ確立している^[3]。

FWの場合においても同様であるが、貯蔵エネルギー容量と変動負荷を補償するために出し入れするエネルギー容量をどう考えるかでエネルギー貯蔵装置の蓄積容量が決定される。ここでは50 GeVで運転する場合の電力変動を40 GeV運転時の電力変動分までに抑えるとして、超過変動の60 MWを補償することを考える。その部分のエネルギー量は約30 MJとなる。エネルギー蓄積容量の30%を補償用に使うとして、100 MJの容量を持つSMES装置について電磁力支持材料、建設コスト、運転時の損失を検討する。

電磁力支持材量の最小化：これについては電磁力平衡コイル(FBC:Force-Balanced Coil)^[4,5]の概念を適用し、ソレノイドとの比較検討を行った。詳細についてはSMES研究会報告書^[6]を参照されたい。これによると、電磁力平衡コイルはソレノイドに比べ1.7倍の超電導導体量を必要とするが、電磁力支持材量については36%にまで低減可能となる。超電導素線6本につき補強材1本の割合で電磁力を支持する導体を使用する場合、電磁力平衡コイルは、およそ150 A/mm²程度の通電電流密度を維持することができる。一方、ソレノイドの場合、通電電流密度を31 A/mm²程度にまで低減させる必要があり、別途外部支持材が必要となる。

建設コストの推定：SMES装置の建設コストの推定に際しては、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託により国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）が検討した平成12年度報告書^[7]と平成15年度報告書^[8]における15kWh系統安定化用SMES、500kWh負荷変動補償・周波数制御用SMESコスト評価

結果を基に、報告書に記載されている法則に従って変換した。また検討に際して、量産時には省略する各製造ステップでの試験工程が組み込まれるとして、コイル構造・容器が2倍になると想定する等、非量産時のコストアップも考慮した。

SMES容量の違いによるコストの評価は、これらの報告書に記載されているように、以下の法則に従って変換する。

- 導体 : kWh容量の0.7乗則
- コイル・容器製作 : kWh容量の0.65乗則
- 冷凍設備 : kWh容量の0.75乗則
- ※冷凍負荷はkWh容量に比例するとした。
- 変換器+電気設備 : 変換器kVA容量に比例

表1にコイルをソレノイドとした場合の2つのケースについて特注を想定した算定結果を示す。これにより100 MJ-55 MWの容量を持つソレノイドコイルのSMESの場合では価格は特注を想定して38～46億円と算定された。

表1：ソレノイドで特注を想定した価格算定結果

コスト（億円）	特注を想定した価格
導体	8.9 ～ 8.5
コイル構造+真空容器	6.7 ～ 6.3
冷凍設備	2.8 ～ 0.7
電気設備	19.1 ～ 30.0
合計	37.6 ～ 45.5

数値の左側は15kWh、右側は500kWhからの計算値

損失の評価：超電導コイルに生じる損失について、繰り返し3.6秒周期で30 MJの貯蔵エネルギーを0.8秒で充放電するとして計算した。計算はITERのCSモデルコイルのパルス試験における測定結果^[8]を参考にSMES装置の超電導コイルにおける最大磁束密度と超電導導体量で換算し見積もった。結果を表2に示す。同条件の繰り返し充放電によるFWにおける風損による1周期あたりの損失エネルギーは、500 rpmで130～150 kJ程度、600 rpmで220 kJ～250 kJ程度となり500 rpmの場合40 kW程度、600 rpmの場合60～70 kWの損失と評価されている^[6]。

これらの結果より、50 GeV運転1周期分のエネルギー貯蔵装置本体で生じる運転損失についてFWよりも低減できる可能性があることがわかる。定格回転数500 rpmのフライホイールの損失エネルギーと比較した場合、100 MJ級のSMESは、50 GeV運転1周期分の損失エネルギーを電磁力平衡コイル方式で20%～75%に、ソレノイド方式で12%～45%にまで低減させることが可能となる。

表 2 J-PARC用途100 MJ – 55 MW級SMES装置の交流損失概算結果

SMES装置仕様	100MJ-55 MW (利用貯蔵エネルギー30 MJ)							
	電磁力平衡コイル				ソレノイド			
最大磁束密度 $B_{\max}$ (T)	3.0	5.0	7.0	10	3.0	5.0	7.0	10
最小磁束密度 $B_{\min}$ (T)	2.5	4.2	5.9	8.4	2.5	4.2	5.9	8.4
励磁速度 dB/dt (T/s)	0.6	1	1	2	0.6	1	1	2
$0-B_{\max}$ 損失 $P_{AC\max}^{*1)}$ ($\times 10^2$ kJ)	1.6	2.9	3.6	5.9	0.98	1.8	2.2	3.6
$0-B_{\min}$ 損失 $P_{AC\min}^{*2)}$ ($\times 10^2$ kJ)	1.3	2.4	3.1	4.9	0.82	1.5	1.8	3.0
50 GeV 運転1周期分損失 $^{*3)}$ (kJ)	26	48	60	97	16	29	36	59
50 GeV 運転1周期分平均交流損失 $^{*4)}$ (kW)	7.3	13	17	27	4.4	8.0	10	16

*1) 0 Tから $B_{\max}$ までの片振り台形波を発生させたときの交流損失 $P_{AC\max}$

*2) 0 Tから $B_{\min}$ までの片振り台形波を発生させたときの交流損失 $P_{AC\min}$

*3) $P_{AC\max}$ と $P_{AC\min}$ との差分($P_{AC\max}-P_{AC\min}$)

*4) $P_{AC\max}-P_{AC\min}$ を50 GeV運転周期3.6秒で割った平均損失

直流側での連系方式：以上はSMES装置を交流側に設置して負荷変動補償を行う場合についての検討であるが、SMES装置の電流源としての特徴を生かして変換器の直流側で連系させる方式も可能である。この場合、図2に示すようにチョッパ2によりコンデンサ電圧を一定に制御し、チョッパ1を介して接続する。この方式を50GeV-PS電源に適用すれば、増強時の改造において交直変換器を増設する代わりに、チョッパとSMESを設置すればよいことになる。この方式は変換器容量を軽減でき、入出力システムをスリム化できるメリットがある。しかし、SMES装置の資材が多くなり建設コストは大きくなる。また、設置場所についても詳細な検討が必要とされる。

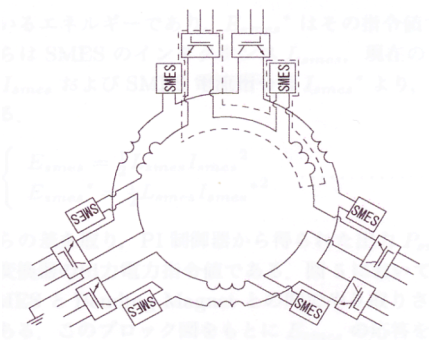


図 2 : PS電源と直流系統接続SMES装置の結線

4. まとめ

J-PARC 50GeV-PS電磁石電源の電力変動補償用SMESについてFWとの比較も含めて検討を行った。

SMESコイルの形状として、ソレノイドと電磁力支持材料を最適化できるFBCを検討した。パルス運転に伴いSMESに交流損が発生するが、FWの風損によって生じる運転損失と比較検討した結果、SMES装置の運転損失を低減できる可能性を示唆することができた。要求される冷凍機容量に関する検討が今後必要であるが、J-PARCには第I期計画において速い取り

出しラインに超電導電磁石を採用しているし、第II期計画で超電導線形加速器用冷凍機設備の設置も計画されており、これらとの連係を考慮すると冷凍機設備の有効活用も考えられる。設備・価格・損失等の検討は1カ所に置くSMES装置について行ったが、他にSMES装置の特色を生かした直流側に接続する方式についても検討した。この方式は変換器容量を軽減でき、入出力システムをスリム化できるメリットがあるが、建設場所と建設コストに問題がある。

以上の検討の結果、冷凍機系、あるいは交流損失低減など今後の検討課題があるものの、SMESは回転部分を持たないメリットがあり、建設コストも必ずしも回転機と大きな差が無いと予想され50GeV-PS用変動負荷補償装置として導入の可能性は十分にあると考えられる。ただし、導入にあたってはFWの場合にはその振動の、SMESの場合には貯蔵コイルからの漏れ磁場の影響について十分な検討が必要がある。

本研究は高エネルギー加速器研究機構共同開発研究として行われた。また、超電導エネルギー貯蔵研究会の協力のもとに行われた。

参考文献

- [1] 武藤、他、KEK Report 98-14, February 1999 A
- [2] 平成13年10月31日東電設計(株) 発電部検討資料
- [3] 低温工学、Vol. 40 No. 5 2005 特集記事
- [4] 筒井広明、野村新一、嶋田隆一、プラズマ・核融合学会誌、77 (3), 300-308 (2001).
- [5] S. Nomura et. al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 12 (1), 792-795 (2002).
- [6] 平成16年度SMES研究会報告書、近日発行
- [7] 「超電導電力貯蔵システム技術開発 平成12年度報告書」(NEDO委託、ISTEC)
- [8] 「超電導電力貯蔵システム技術開発 平成15年度報告書」(NEDO委託、ISTEC)
- [9] 松井邦浩 他、CSモデル・コイル実験グループ: “CSインサート・コイルの交流損失特性”, 低温工学, 36(6), 361-367 (2001).