

## Pulse Electric Power Compensation for Accelerator Power Supply

Hikaru Sato<sup>1,A)</sup>, Takakazu Shintomi<sup>B)</sup>, Toshifumi Ise<sup>C)</sup>, Shinichi Nomura<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization

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

<sup>B)</sup> Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities, Nihon University

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

<sup>C)</sup> Graduate School of Engineering, Osaka University

Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871

<sup>D)</sup> Research Laboratory for Nuclear Reactors in Tokyo Institute of Technology

2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550

### Abstract

Some synchrotron accelerators are excited by pulse operation. Especially, 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. Energy storage system, such as a SMES system, will be required for compensating the pulse electric power and reducing the disturbances. A SMES system is also expected to protect the instantaneous voltage drop and the load levelling so far. Load levelling is essential to reduce the running cost of medical use accelerators. Present status of R & D for SMES and other energy storage systems is presented. An application example for an accelerator power supply is also discussed.

## 加速器用電源のパルス電力補償

### 1. はじめに

シンクロトロンはビームを取り出すためにパルス運転される。とりわけ、J-PARC 50GeVシンクロトロン、CERN-PS やBNL-AGSなどの大型シンクロトロンでは、パルス運転による電力変動が大きく、接続された電力系統に擾乱を与えるので、何らかの電力変動補償装置が必要となる。

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。小型加速器では負荷変動は小さいものの、一般商用線から受電する 경우가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、瞬時停電対策用のためのエネルギー貯蔵装置について検討する。

### 2. エネルギー貯蔵装置開発の状況

電力変動補償装置として表1に示すような幾つかの方式が考えられる。今回これらの装置の比較をし、その得失を述べるとともに、SMESによるJ-PARC用電力補償の新しい方式について述べる。また、医療用小型シンクロトロン電力補償についても概観する。

表1から分かるように、大型装置で早い応答が求められる機器にはFWGおよびSMESが適当であろう。FWG

は比較的早い段階から実用化されていた<sup>[1]</sup>が、保守および耐久性に問題がある。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がある。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<sup>[2]</sup>。

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<sup>[3]</sup>。

表1:種々の電力補償装置と実施例

| 装置        | 特徴                       | 実施例 ( )内は検討中   |
|-----------|--------------------------|--|
| FWG       | 早い応答<br>繰り返し応力<br>メンテナンス | 電鉄:京浜急行 25 kWh<br>核融合:JT-60 1300 MJ<br>電力:沖縄電力 200 MJ<br>(加速器:J-PARC)  |
| SMES      | 早い応答<br>高効率<br>交流損失      | 加速器:BNL NSLS $\mu$ -SMES 2.4 MJ<br>UPS:シャープ亀山工場 10 MJ<br>電力:国プロ負荷変動補償 20 MJ<br>ESK 3.6 MJ<br>(加速器:J-PARC, CERN-PS/SPS) |
| Capacitor | 早い応答<br>中小規模<br>寿命       | UPS:シャープ亀山工場 200kVA<br>(加速器:BNL-AGS)<br>HEVトラック 50-500kW<br>~100,000回  |
| Battery   | 中小規模<br>寿命<br>メンテナンス     | HEVトラック 50-500kW<br>~1,000回  |

<sup>1</sup> E-mail: [hikaru.sato@kek.jp](mailto:hikaru.sato@kek.jp)

キャパシタおよび電池は、やはり繰返し回数で制限があるものの、HEVトラック積載などに容量の大きな物が開発されてきており、電気二重層キャパシタでは寿命の点でも注目される。

### 3. 加速器電源とエネルギー貯蔵装置

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。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<sup>[4]</sup>。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システム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建設が進んでいるが、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1MJ級のSMESが市販(MICRO-SMES)されており、BNLのNSLSには瞬時停電対策用のMICRO-SMESが設置されている<sup>[5]</sup>。負荷変動補償用にはJ-PARC他、CERN-PS、BNL-AGSにおいても検討が始まっている<sup>[6,7]</sup>。表2にパルス運転される主な加速器を示すが、エネルギー貯蔵装置が普及すればGSI等でも有効となろう。

### 4. 大型加速器におけるパルス電力補償の検討

パルス運転される大型加速としてJ-PARCを例として検討する。J-PARC MR-PSの場合はRCSからの3 GeVのビームを入射し、30ないし50 GeVまでの加速、減磁、を2.8~3.6秒で繰り返す。50GeV運転の場合には、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システムとの間でやり取りされるため、電力システムに擾乱が加わる。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<sup>[8]</sup>。図1に総合電力を示す。40GeV-3.6秒周期であれば負荷変動補償の必要はないとされており、変動電力補償装置の設計にあたっては50 GeV運転時の変動電力を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。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<sup>[9]</sup>。

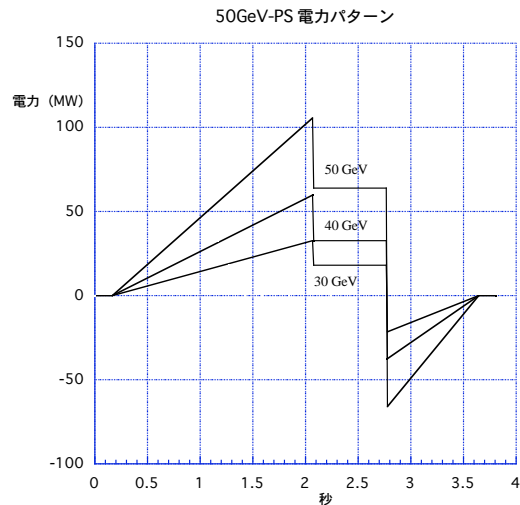


図1: J-PARC 50GeV Magnet 電源の電力

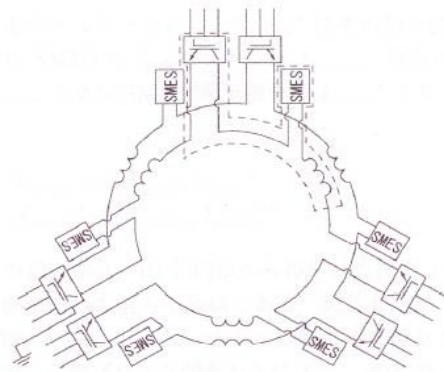


図2: 直流側接続の概念図

FWGの場合についても、容量的にはほぼ同様である。FWGの場合は交流システムに接続して補償する方式となるが、SMESの場合にもFWGと同様に交流システムに接続する方式もあるが、直流システムに接続する方式も採用できる。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2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<sup>[10]</sup>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<sup>[11]</sup>。

### 4. その他の方式と小型加速器

医療用などの小型シンクロトロンについては、建設予定も含めすでに国内において20ヶ所以上になろうとしている。パルス運転に伴う入出力エネルギー量は比較的少ないが、大型加速器のように特別高圧受電線を引かず、一般商用線から受電することが多く、やはり負荷変動補償は必要である。また負荷平準化をすれば運転コ

ストの低減も期待できる。電力波形の例を図3に示す。施設によって多少の違いはあるが、概ねピーク電力を2500kWとし、それを再生エネルギーとして蓄積した場合電力変換器の効率を90%として、338kJが次の励磁時に有効利用できる。これは1日8時間、年間250日の運転として、676MWhの電力の節約になる。エネルギー貯蔵方式としてはパルス運転されるので電池では寿命の面で難がある。やはりFWGやSMESが有用であるが、最近の電気二重層キャパシタでは容量的にも寿命の点でも応用可能な域に迫っている。充放電の繰り返しがさほどない瞬時停電補償の用途にはキャパシタも十分使う。また、それに小規模のメガソーラータイプの太陽光発電を取り込むことも装置の省エネ運転および運転経費の削減のためには有効と考えられる。

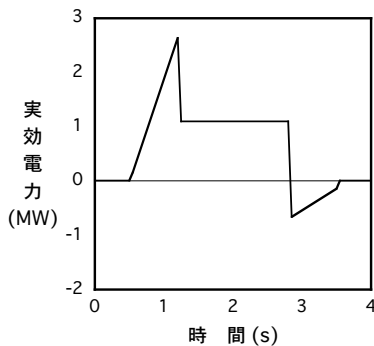


図3: 粒子線治療用シンクロトロン電力波形の一例

## 6. まとめ

エネルギー貯蔵装置としてFWGは比較的早くから実用化されてきた。それに匹敵する容量のSMESの開発研究は主に国プロとしてNEDOを中心に行われてきた。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。小型医療用加速器にもエネルギー貯蔵装置を付加することが望ましいと考えられるが、この場合には最近技術革新の進んでいる電気二重層キャパシタもFWG, SMESと並んで応用可能と考えられる。J-PARCのような大型加速器

にはFWGあるいはSMESの応用が適当であろう。

## 参考文献

- [1] 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  
宮里明典, “可変速フライホイールで電力を安定供給”, 電気学会誌, Vol.116, No.9, 1996, p.611
- [2] “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
- [3] 長屋重夫, “SMESの実証試験と開発状況”, OHM 2007, 02, pp.44-50
- [4] M. Masuda et al., “100 kJ superconducting coil energy storage”, Proc. of the 6th Int. Conf. on Mag. Tech., 1977, p. 254  
T. Shintomi et al., “3 MJ Magnet for the Superconducting Energy Storage,” Adv. Cry. Eng., 25 (1979) pp. 98-104
- [5] 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  
Thomas R. Abel, Power Quality/Power Value Proceedings, September 1997, pp.404-417
- [6] R. Gehring et al., “SMES-Based Power Supply for Accelerator Magnets”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 16, No. 2, June 2006, pp. 594-597
- [7] I. Marnieris et al., “Simulations of the AGS MMPS Storing Energy in Capacitor Banks”, Proceedings of the PAC07, Albuquerque, New Mexico, pp. 652-654
- [8] Accelerator Technical Design Report for J-PARC, KEK Report 2002-13/JAERI-Tech 2003-044/J-PARC 03-01, March 2003
- [9] T. Shintomi et al., “SMES for electric power compensation of the J-PARC high intensity proton synchrotron”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 16, 2006, pp. 628-631  
超電導エネルギー貯蔵研究会平成16年度、18年度、19年度研究報告書
- [10] T. Ise et al., “Magnet Power Supply With Power Fluctuation Compensating Function Using SMES for High Intensity Synchrotron”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 13, No. 2, June 2003, pp. 1814-1817

表2 パルス運転加速器のパラメーターの例

| 研究所                     | KEK             | KEK/JAEA               | CERN  |                     | BNL         |   | FNAL |                    |
|-------------------------|-----------------|------------------------|---|---------------------|-------------|---|------|--------------------|
|                         | 12GeV-PS        | J-PARC                 | PS  | SPS                 | Booster     | AGS   | MI   | SF-MR              |
| 加速器名                    | 12GeV-PS        | J-PARC                 | PS  | SPS                 | Booster     | AGS   | MI   | SF-MR              |
| 繰返し (s)                 | 2.5 - 4.0       | 3.64                   | 2.5   | 8.94                | 0.13-1.1    | 1.4-3.0                                     | 2.9  | 2                  |
| P <sub>total</sub> (MW) | 23.6            | 105                    | 40  | 152                 | 12          | 50/70                                       | 11.9 | 198                |
| 受電電圧 (kV)               | 154/66/6.6      | 66/22/6.6              | 130/18  | 400/18<br>400/66/18 | 138/69/13.6 | 138/69/13.6                                 | 13.8 | 13.8               |
| 補償装置                    | 20MVA<br>SVC    | 51MVA-FW<br>90MVA-SMES | 7MW-Motor<br>90MVA FW<br>(233MJ)<br>SVC or SMES | 100MVA<br>SVC       |             | 9MJ MG<br>(34MJ MG)<br>⇨12.6MJ<br>Capacitor |      | Harmonic<br>Filter |
| Comments                | 2006年3月<br>稼動停止 | 50 GeVに増強<br>したとき必要    | LHC入射器  | LHC入射器              |             |   |      |                    |