

A CAPACITIVE ENERGY STORAGE AND THE ENERGY RECOVERY SYSTEM FOR SYNCHROTRON MAGNET

Kunio KOSEKI^{A)}, Yoshinori KURIMOTO^{B)}, Yuichi MORITA^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization, Institute of Particle and Nuclear Studies,
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization, Accelerator Laboratory
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract (英語)

Various R&D works are now under way at the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) to increase its beam power. One of the promising solutions to achieve MW-class proton beam is to increase a repetition cycle of the synchrotron. The electrical power variation at AC main grid is a serious concern at the magnet power supply. A fly-wheel-generator or a Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) was a candidate for the solution.

Recently Self-healing metalized polypropylene film capacitor gains technological advantage in its energy storage capability and life time. This is the reason why we have initiated our R&D works for “Capacitive Energy Storage”.

In this article, test results from POP system of capacitive energy storage combined with novel PWM converter are reviewed. Simulation results from case study of bending magnet family at J-PARC to demonstrate the possibility to drastically reduce electrical power variation and the operation cost are also presented.

シンクロトロン電磁石におけるコンデンサを用いたエネルギー貯蔵と電力変動抑制技術

1. はじめに

J-PARC[1]ではビーム強度増強のための様々な研究開発が行われている。シンクロトロンにおいてビーム強度を上げるための一つ的手段として加速サイクルを速める事がある。しかしこのためには、電磁石電源の瞬時出力電力を上げる必要があり、これに伴って交流電力系統での電力変動が問題になる。この問題を解決するため、古くはフライホイール発電機の利用や、最近では超電導コイルによるエネルギー貯蔵 (SMES ; Superconducting Magnetic Energy Storage) が検討されてきた[2-5]。フライホイール発電機では力行及び回生動作時に発生するトルクに起因してシャフトの長期信頼性やメンテナンス性等の問題点があり、SMES では急峻な励磁電流変化によるクエンチや電磁応力等の懸案事項が残る。

近年の自己回復能力を有するフィルムコンデンサの技術進歩は目覚ましく、現在我々は、コンデンサを用いたエネルギー貯蔵装置[6, 7]の開発を行っている。自励式半導体素子である IGBT を用いた整流回路によりエネルギー貯蔵用コンデンサバンクの電圧をパターン電圧制御し、電磁石に蓄えられた磁気エネルギーをコンデンサバンクへ高効率に回生し、次のサイクルで再利用する技術を開発したので報告する。またこの技術により受電電力を大幅に低減し、シンクロトロンにおける運転経費を大幅に削減する目処を得たので併せて報告する。

2. PWM コンバータを用いたパターン電圧制御

2.1 回路構成

シンクロトロン電磁石におけるパターン運転において電磁石に蓄えられた磁気エネルギーをコンデンサに回生するためには回生エネルギーに応じてコンデンサ電圧を制御する必要がある。そこで交流電圧を整流するための変換器として IGBT を用いた PWM コンバータを採用した。図 1 に概略主回路構成を示す。

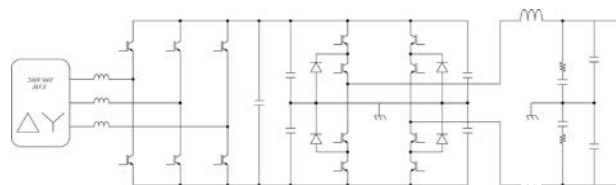


図 1 PWM コンバータ及び NPC インバータの概略回路構成

2.2 電圧フィードバック制御

電磁石をパターン励磁する際に電源から出力されるエネルギーは、ジュールロス分を無視すると、

$$E(t) = \frac{1}{2} LI^2(t) \quad (\text{式 1})$$

となる。この磁気エネルギーをコンデンサから供給

し、ジュールロス分だけを交流系統から受電するためには、コンデンサバンク電圧を適切に制御する必要がある。つまりコンデンサバンク電圧を V_{bank} とすると、

$$V_{bank}(t) = \sqrt{\frac{2}{C_{bank}} \left\{ E_0 - \frac{1}{2} LI^2(t) \right\}} \quad (式 2)$$

に従ってコンデンサバンク電圧をパターン制御することによってコンデンサバンクを利用したエネルギー回生が可能となる。ここで E_0 は初期充電エネルギーであり、コンデンサ容量 C_{bank} 及び初期充電電圧 $V_{bank}(t=0)$ から下記で表現される。

$$E_0 = \frac{1}{2} CV_{bank}^2(t=0) \quad (式 3)$$

式 2 に従ってコンデンサバンク電圧をパターン電圧制御するための PWM コンバータにおけるフィードバック制御の概略構成を図 2 に示す。

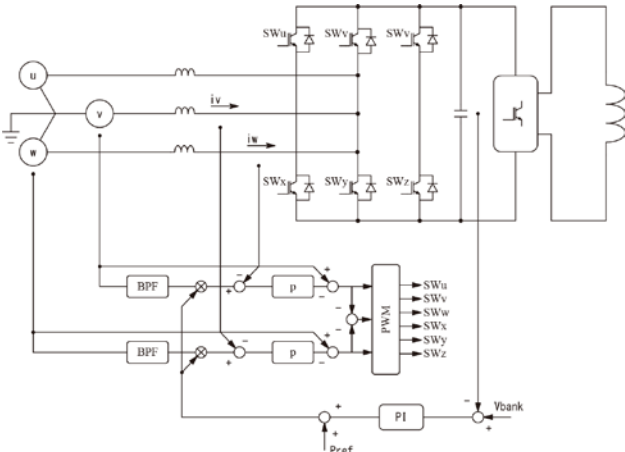


図 2 PWM コンバータにおけるフィードバック制御の概略構成

制御アルゴリズム自体は非常に一般的なものであるが、電圧指令値に対して式 2 のパターン電圧波形を予め計算し、パターンメモリ上に保存する事で適時読み出しを行うものとした。実際には負荷インダクタンスを電磁石のヒステリシスも含めて精度良く把握する事は困難であるため電力フィードフォワードも追加している。フィードフォワードを追加する事で精度の良い電力制御も可能になるが、交流電圧の変動に起因してコンデンサ電圧が変動する事が予測される。これに対しては、インバータのフィードバック制御において対処する方法を構築している。また交流位相の入力段には不要なノイズ成分等による不安定を回避するため、経験的に中心周波数 50Hz のバンドパスフィルターを挿入している。

3. プロトタイプ電源による原理実証

現在我々が提案しているコンデンサを用いたエネルギー貯蔵方式の有用性を検証するため、小型電源による原理実証試験を行った。試験に用いたパラメータを表 1 に纏める。また電源回路構成は図 1 に示す 3 相 PWM コンバータ及び出力回路は NPC インバータ及びフィルタ回路である。

表 1 原理実証試験に用いた電磁石の基本仕様及び運転パラメータ

負荷インダクタンス	129 mH
負荷抵抗	87 mohm
フラットトップ電流	70 A
フラットベース電流	10 A

原理実証試験の結果を図 3 から図 6 に示す。図 4 の様にコンデンサバンク電圧を予め計算したパターンで制御する事により系統回生を行わずに、磁気エネルギーをコンデンサから供給出来ているのが分かる (図 6 参照)。

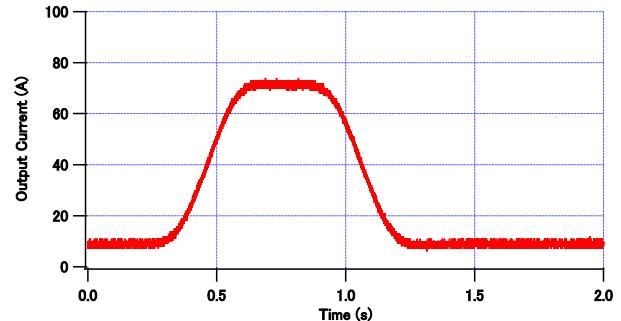


図 3 小型電源による原理実証試験結果における電磁石励磁電流波形。

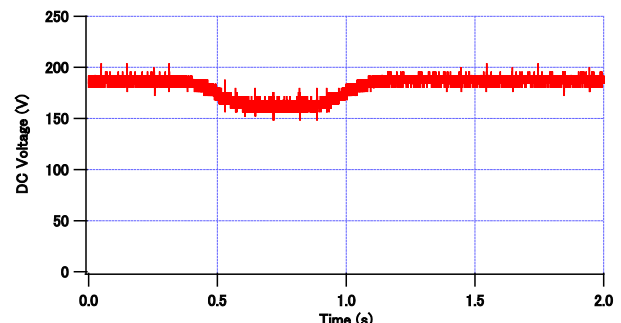


図 4 小型電源による原理実証試験結果におけるコンデンサバンク電圧波形

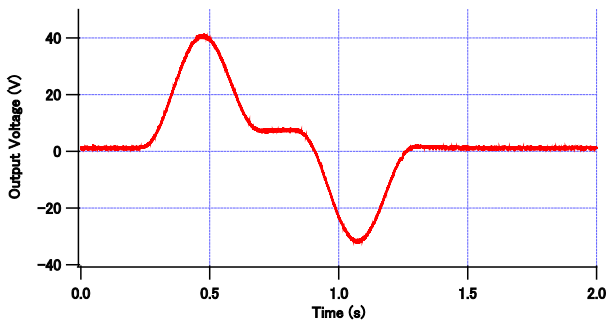


図5 小型電源による原理実証試験結果における出力電圧波形

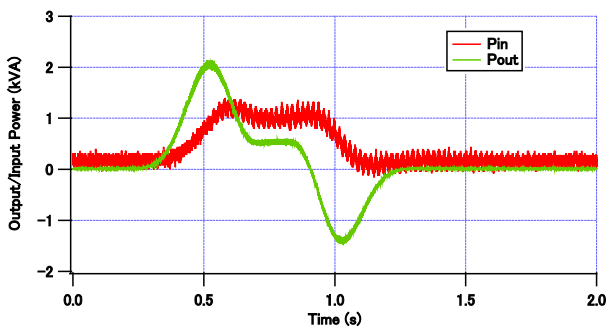


図6 小型電源による原理実証試験結果における受電電力（赤）及び出力電力（緑）。

流系統から受電し、電磁石を励磁するために必要となった磁気エネルギー分はコンデンサバンクから供給しているためである。

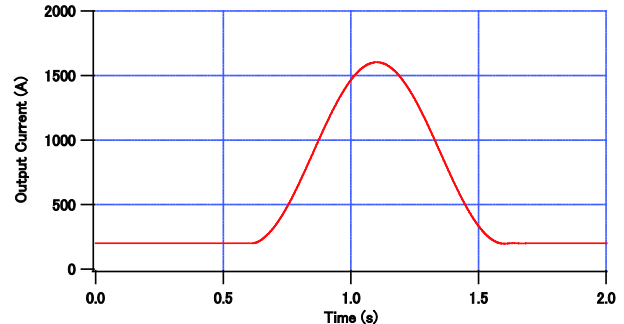


図7 シミュレーションにおける出力電流波形

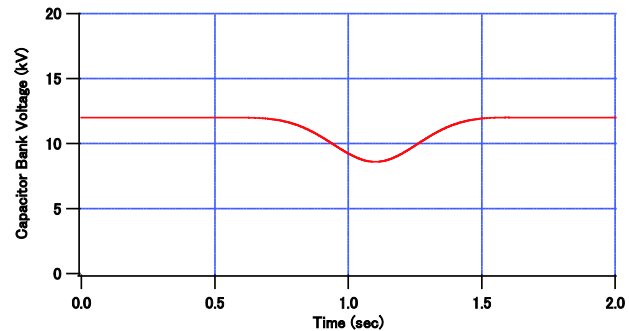


図8 シミュレーションにおけるコンデンサバンク電圧波形

4. J-PARC 主リング電磁石への適用検討

現在我々が提案しているコンデンサを用いたエネルギー貯蔵による電力変動抑制技術を J-PARC 主リング電源へ適用するため、シミュレーションによる検討を行った。負荷となる電磁石は主リング偏向電磁石 1 ファミリー（表 2 参照）とした。

表 2 シミュレーション検討に用いた J-PARC 主リング偏向電磁石のパラメタ

インダクタンス	1.656 H
コイル抵抗	0.68 ohm
フラットトップ電流	1600 A
フラットベース電流	200 A
台数/ファミリー	16 台

シミュレーション結果を図 7～図 10 に示す。図 7 は電磁石励磁電流波形、図 8 は予め式 2 によって計算し、PWM コンバータによって制御したコンデンサバンク電圧波形、図 9 は電源出力電圧波形及び図 10 は電源からの出力電力及び交流系統からの受電電力波形である。一般的な PWM コンバータでは出力電力と受電電力はほぼ同程度であるのに対して、本方式では受電電力のピーク値が非常に小さくなっているのが分かる。これは電源からの出力電力のうち、ケーブルやコイルでのジュールロス分だけを交

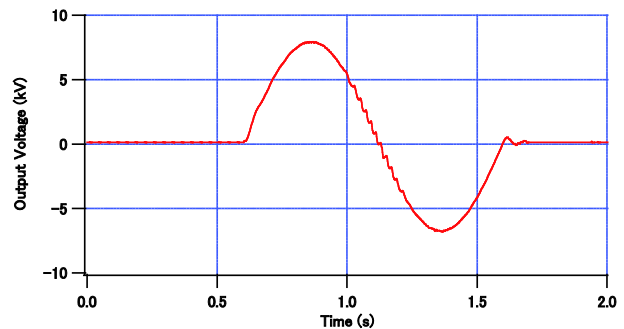


図9 シミュレーションにおける出力電圧波形

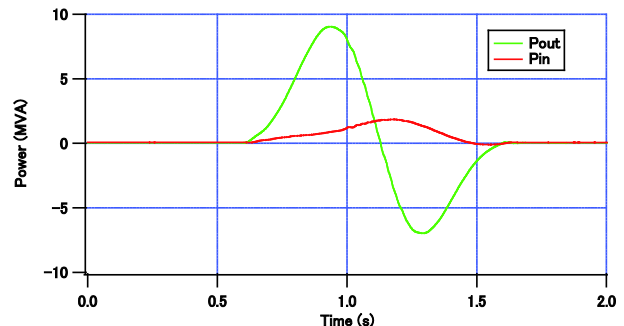


図10 シミュレーションにおける出力電力（緑）及び受電電力波形（赤）。

コンデンサへのエネルギー回生を行わず、全ての磁気エネルギーを交流電力系統との間で受電・回生する場合、予想される電力変動は出力電圧と出力電流との積となる。本シミュレーションでは9MVAと予想され（電力変動としては16MVApp）、コンデンサへのエネルギー回生を用いたシミュレーション結果の2MVAの4.5倍となる。J-PARC主リングでは偏向電磁石が6ファミリー（96台）存在し、全ての偏向電磁石を1Hzの高繰り返しで運転をした場合、変換器やケーブルでの損失を無視した場合でも96MVAの電力変動が予測される。これに対して、我々の提案するコンデンサを用いたエネルギー貯蔵方式では、12MVAの電力変動に抑えられる事が分かった。これにより本方式では交流電力系統の安定化及び運転経費を大幅に削減出来る事が示せたと言える（表3参照）。

表3 J-PARC 偏向電磁石（96台）における電力変動及び最大受電電力の比較

	系統回生	コンデンサ回生
電力変動	96 MVApp	12 MVApp
受電電力	54 MVAp	12 MVAp

5. 今後の課題

J-PARC主リングにおいてコンデンサを用いたエネルギー貯蔵を行う場合、約20MJにも及び莫大なエネルギーをコンデンサに蓄える必要がある。そこで今後、コンデンサ及び周辺回路における信頼性向上及びコンデンサのコンパクト化（高エネルギー密度化；電位傾度向上）へ向けた研究開発を行ってゆく予定である。

謝辞

本研究を遂行するに当たり予算等様々な面で支援頂いた高エネルギー加速器研究機構、加速器研究施設主幹・内藤富士雄氏及び小関忠氏に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] “Accelerator Technical Design Report for J-PARC”, KEK Report 2002-13, (2003).
- [2] S. Sato, et al., “UPGRADE SCHEME FOR THE J-PARC MAIN RING MAGNET POWER SUPPLY”, Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, 2006
- [3] R. Gehring, et al., “A SMES-Based Power Supply for Accelerator Magnets”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 16, NO. 2, JUNE, 2006.
- [4] T. Ise, et al., “Magnet power supply with power fluctuation compensating function using SMES for high intensity synchrotron”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, June, 2003.
- [5] T. Shintomi, et al., “SMES for Electric Power Compensation of the J-PARC High Intensity Proton Synchrotron”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, June, 2006.
- [6] C. Fahrni, et al., “A novel 60 MW pulsed power system based on capacitive energy storage for particle accelerators”
- [7] C. Fahrni et al., “A Multilevel Power Converter with Integrated Storage for Particle Accelerators”, Power Conversion Conference 2007, Nagoya, Japan, 2007.