

# STABILIZATION OF THE CONTROL SYSTEM ON MAGNET POWER SUPPLIES IN J-PARC MAIN RING

Shu Nakamura <sup>#,A)</sup>, Shuei Yamada<sup>A)</sup>, Koji Ishii<sup>A)</sup>, Shigenori Hiramatsu<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> HIGH ENERGY ACCELERATOR RESEARCH ORGANIZATION

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

<sup>B)</sup> NIPPON ADVANCED TECHNOLOGY CO.,LTD

3129-45 Hibara Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1112

## Abstract

Commissioning of Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) main ring (MR) was started on May 2008. Very large magnetic field ripples of the order of  $10^{-2}$  were found in the dipole, the quadrupole and the sextupole magnets in the MR. In order to reduce the ripples, we modified the magnet-power supplies, which includes removal of the 600Hz trap filter. Due to the removal of the trap filter, major components of current ripple frequency is 600Hz and the higher orders. We have to re-install the 600Hz trap filters on the magnet-power supplies. Thus analysis of the control circuit has done at first.

## J-PARC MR の主電磁石電源の制御安定性向上について

### 1. 主電磁石電源の現状

茨城県那珂郡東海村に建設された大強度陽子加速器研究施設 (J-PARC : Japan Proton Accelerator Research Complex) の MR では、この 6 月までの運転において、遅い取り出しによってハドロン実験施設 (HD) に対しては最大 2.6kW、速い取り出しによってニュートリノ施設 (NU) に対しては最大 70kW (瞬間的には 100kW) のビームを供給した。MR の主電磁石 (偏向、四極、六極電磁石) 電源<sup>[1]</sup> は今年の運転再開からこれまで、ノイズによると考えられる制御異常の頻発といったトラブルはあったものの、運転サイクルの合間に行った制御プログラムの修正によって解決した。

ビーム出力が増加するに伴って、電源の出力電流リプルに起因するビーム不安定性が問題となっている。特に HD に供給する遅い取り出し法によって取り出したビーム強度が、出力電流リプルに起因するとみられるビーム不安定性によってスパイク状となるため、取り出しビーム強度をあげられない原因の一つとなっている。そのため、取り出しのタイミングで四極電磁石のトリムコイルを短絡させることによって、一時的に磁場リプルを低減させる手法<sup>[2][3]</sup> や、ピックアップコイルによって測定した磁場リプルを相殺する電流を補助コイルに流す手法<sup>[4]</sup> を試みている。

図 1 に現在の典型的な電磁石電源 (QFN 電源) の性能を示す。上段から出力電流、電流偏差 ([電流指令値]-[出力電流]) / [電流指令値]、Flat Bottom での電流偏差の FFT 結果である。電流偏差は Flat Bottom で最も大きく、peak-peak で  $1.3 \times 10^{-3}$  程度となっている。主なりプル成分は電源の整流リプルの 600Hz とその高調波 (1200, 1800Hz) である。出力パターンへの追従性は電流リプル以下である。

図 1 の下段にみられる 600, 1200, 1800Hz のよう

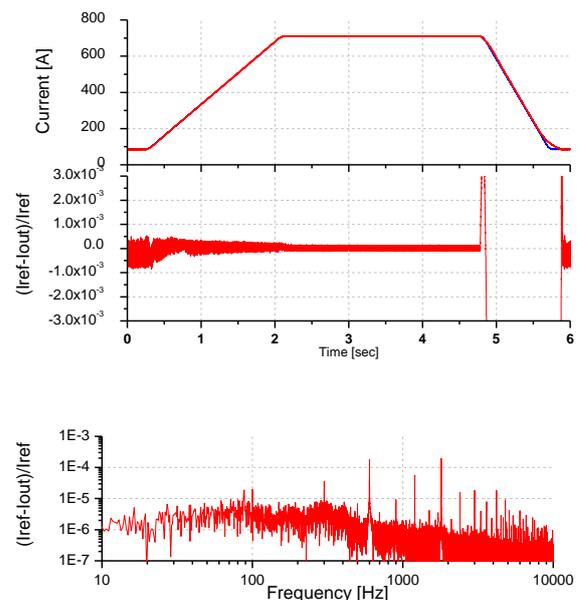


図 1 : 現在の典型的な電源 (QFN 電源) 性能。上段から出力電流、電流偏差、Flat Bottom での電流偏差の FFT 結果。

な単一周波数のリプルに対しては、その周波数に調整した同調フィルタが効果的で、MR の主電磁石電源群にも 600Hz の同調フィルタを設置しているが、主回路に接続すると加速途中で出力電流が発振するため、現在は切り離して運転を行っている。

### 2. 主電磁石電源の周波数応答特性

#### 2.1 現状での周波数応答特性

電源の安定性については、その周波数応答特性を

# shu.nakamura@j-parc.jp

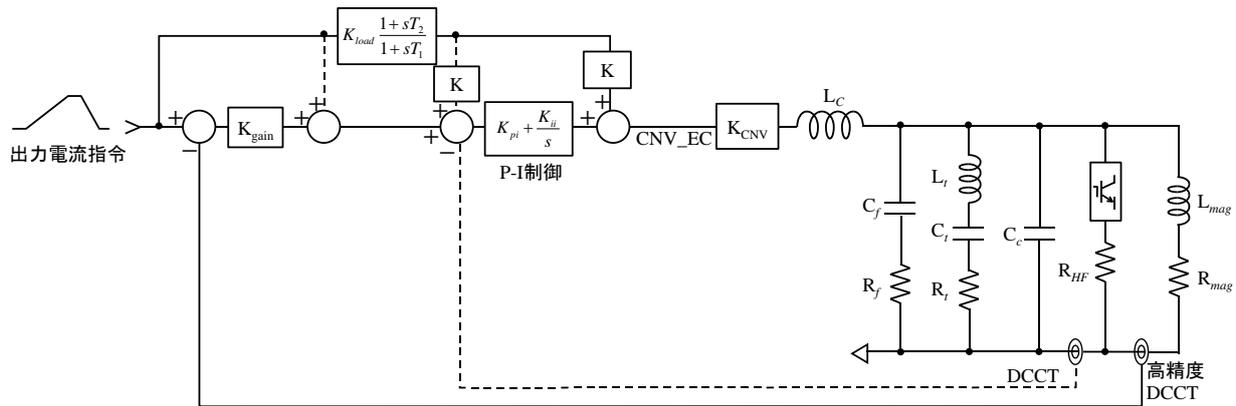


図 2 : 主電磁石電源の典型的なブロック図。一般的なフィードバックループの他に点線で示したマイナーループがいくつか存在する。

評価することによって判断することが可能である。図 2 に主電磁石電源の典型的な制御ブロック図を示す。一般的なフィードバックループの他に点線で示したマイナーループがいくつか存在する。一般的にこのようにマイナーループを含む系の場合、ボード線図によって制御の安定性を判断することはできない。この制御ループをリニアテクノロジー社の LTSpice IV<sup>[5]</sup>を用いて周波数解析を行った。図 3 に LTSpice IV による計算と実測したボード線図を示す。

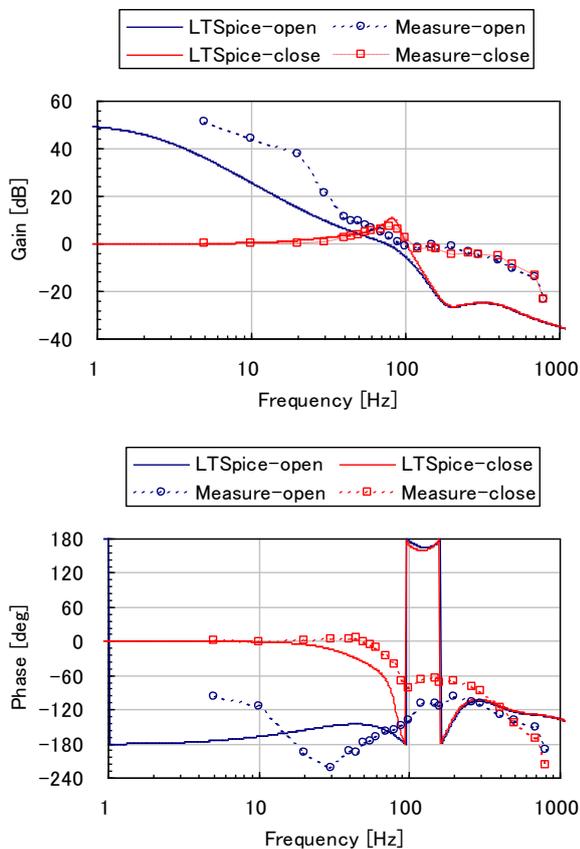


図 3 : 主電磁石電源のボード線図。上段は応答ゲインで下段は位相。

上段は応答ゲインで下段は位相である。

実際の電源での周波数応答特性は、出力電流指令に適切な振幅と周波数のサイン波を入力し、電源のモニター端子から電流偏差と出力電流とを得てボード線図を作成した。LTSpice IV による計算と実測との差は以下に述べる負荷インピーダンスのモデル化と変換器ゲイン( $K_{CNV}$ )の非線形性に原因があると考えられるが、それだけでは説明できない部分も存在する。

## 2.2 負荷インピーダンス

図 4 に QFN 電磁石 1 台の等価回路を示す。1 台あたり 60mH のインダクタンスと 39mΩ の抵抗、約 20nF の浮遊容量、N 側と S 側それぞれに 79Ω のバイパス抵抗とでなっている。これが 48 台直列に電力ケーブルによって接続されている。電力ケーブルの抵抗や浮遊容量は無視できないため、MR トンネル一周分の抵抗(0.13Ω)と浮遊容量(1.3μF)を三分割して電磁石の間に挿入し、LTSpice IV による計算を行った。その計算結果と実測を図 5 に示す。インピーダンス、位相とも 100Hz 付近まではよくあっている。100Hz を越えて浮遊容量の寄与が大きい周波数帯になってくると徐々に計算と実測との差が現れる。これは実際には分布定数である部分を、集中定数として計算したためであると考えられる。

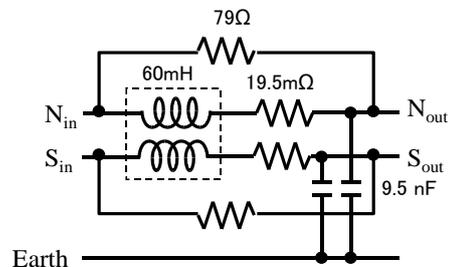


図 4 : QFN 電磁石 1 台の等価回路

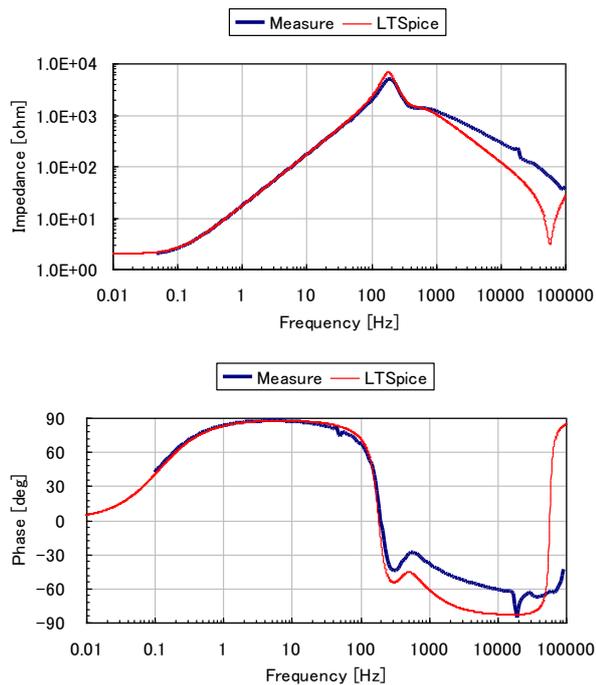


図 5 : 負荷インピーダンスのモデル計算と実測。上段はインピーダンスで下段は位相。

### 2.3 変換器ゲイン

図 2 中で変換器のゲインは比例ゲイン： $K_{CNV}$  として記述している。一般的には単純な線形応答ではなく、非線形性を持ち合わせている。しかし、MRの主電磁石電源はその非線形性が特に顕著であった。図 6 に変換器への入力信号(CNV\_EC)と出力電圧との関係を示す。

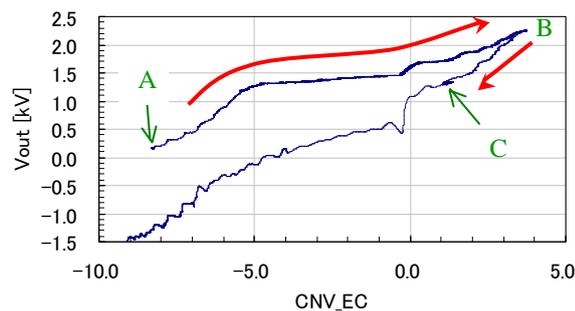


図 6 : 変換器のゲイン。横軸は変換器への入力信号(CNV\_EC)で、縦軸は出力電圧(Vout)。

ビームを入射する Flat Bottom である点 A から、加速に応じて出力電流をあげるにつれて出力電圧は矢印の向きに上昇し、出力電流を上げる途中で出力電圧は最大となる(点 B)。ビームを出射する Flat Top では出力電圧は最大電圧より低い点 C となる。MRの主電磁石電源は電流の立ち下がりを見事に精密制御していないため、点 C から点 A への変移はここで議論しない。しかし、すくなくとも、電圧上昇時と

下降時とで変換器ゲインが違う経路を通ることがわかる。

この非線形性は主電磁石電源の変換器方式によるものである。主電磁石電源の変換器は、スナバ再生方式の電流型自励式コンバータ<sup>6)</sup>と呼ばれるもので、交流電流をスイッチング素子によって直接出力パターン電流に変換する。スイッチング素子の ON 時間とその交流に対する位相によって、出力電流を制御している。

このように変換器ゲインが変化する点は、制御ループからはフィードバックゲインが変化しているように見える。そのため、シンクロトロン用電磁石のようにパターン出力する電源では、変換器ゲインが変化する電流値を横切る際に、発振または逆に追従性が悪くなったように見える。

### 3. まとめ

MR 主電磁石電源をより安定に、電流リップルを小さくするため、電源の周波数応答や変換器ゲインの測定、計算等の電源特性の評価を行った。その結果、改善案として、1)600Hz の整流リップルを減少させる同調フィルタを導入するため、現行のフィルタの Q 値を変更させる。2)変換器ゲインの非線形性を補償する回路を制御ループの中に導入する、という 2 点を検討している。この夏には実際に電源に導入し、テストを行うことにしている。

### 参考文献

- [1] S. Nakamura, et al., "J-PARC MR における電磁石電源の問題点と対策", 加速器学会誌 vol.3, No.3, pp.292-301, 2009.
- [2] H. Someya, et al., "Magnetic Field Measurement and Ripple Reduction of Quadrupole Magnets of the J-PARC Main Ring", Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, pp.3239-3241, 2010.
- [3] S. Igarashi, et al., "Magnetic Field Ripple Reduction of Main Magnets of the J-PARC Main Ring using Trim Coils", Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, pp.301-303, 2010.
- [4] S. Yamada, et al., "Research and Development of Noise-Free Magnet System in J-PARC Main Ring", 第 7 回日本加速器学会 2010
- [5] <http://www.linear-tech.co.jp/designtools/software/>
- [6] E. Ikawa and K. Noda, "Development on Advanced Current-source-type Self-commutated Converter for Accelerator Electromagnets", The 13th S.A.S.T, Suita, Osaka, Japan, pp.60-62, 2001.