

## J-PARC 主リング高繰返し化に向けた 主電磁石電源用変換器ユニットの大電力試験

### HIGH-POWER TESTING OF POWER CONVERTER UNIT OF J-PARC MR MAIN MAGNET POWER SUPPLY FOR HIGH REPETITION RATE OPERATION

森田裕一<sup>#,A)</sup>, 栗本佳典<sup>A)</sup>, 佐川隆<sup>B)</sup>, 下川哲司<sup>A)</sup>, 三浦一喜<sup>A)</sup>

Yuichi Morita<sup>#,A)</sup>, Yoshinori Kurimoto<sup>A)</sup>, Ryu Sagawa<sup>B)</sup>, Tetsushi Shimogawa<sup>A)</sup>, Kazuki Miura<sup>A)</sup>,

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

<sup>B)</sup> Universal Engineering

#### Abstract

The Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) aims at achieving a megawatt-class proton accelerator facility. One of the promising methods for increasing the beam power is to shorten the repetition cycle of the Main Ring (MR) from the current cycle of 2.5 s to 1.3 s. However, in this scheme, the increase in the output voltage and the power variation of the electric system are serious concerns for the power supplies (PSs) of the main magnets. We have been developing a new PS that provides solutions for these issues. Recently, we proposed a new method for high-power testing of the power converters that does not require a large-scale load and power source. We carried out the high-power testing of ~100 kVA for the prototype power converters of the new PS with this method. This paper introduces the design of the PS and the results of the high-power testing for the prototype power converters.

#### 1. はじめに

陽子ビームは物質科学、素粒子・原子核物理学や ADS (Accelerator-driven System)、BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) など様々な分野で利用されている。陽子シンクロトロンにおいてビーム強度向上のための方法の一つとして繰返し周期を速める方法が挙げられる。高繰返し化によってビームバンチが実験ホールへより頻繁に取り出されることにより、ビーム強度が向上する。

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) の MR (Main Ring) は大強度陽子シンクロトロンの一つである。MR から取り出されるビームを用いた実験の中に T2K (Tokai to Kamioka) 実験がある。T2K は大強度陽子ビームを必要とする長基線ニュートリノ実験である。この要求に応えるため、MR はビーム大強度化を目指して高繰返し化する計画である。

高繰返し化によって偏向、四極、六極電磁石の励磁電流は立上りが速まる。速い立上りは大きな電圧を電磁石に印加する。結果として電磁石電源の定格出力電力が増加するため、電磁石電源のアップグレードが予定されている[1]。しかし、このような大きな電源の定格出力電力試験に見合った負荷と受電設備はメーカーの工場を用意することは困難である。そのため、多くの場合、我々は電源が現場に設置され実負荷と受電設備に接続されるまで定格出力電力の試験を開始できない。なおかつ、利用者へのビーム供給時間を出来る限り確保しなければならないので電源の試験時間が限られてしまう。

この状況を改善するために我々は比較的小さな負荷と受電設備によって電力変換器の試験を行う方法を提案している。小さい電力容量(数 kVA)の電力変換器を用いた原理実証試験は既に成功している[2]。今回、約

100 kVA の出力電力による試験にも成功した。その方法と試験結果を報告する。

#### 2. 試験方法

従来の定格出力電力試験では、実負荷と大電力受電設備が必要である。そのため電源が現場に設置されるまで試験をすることができない。この方法は試験期間を大きく制限する。この状況を改善するために Figure 1 に示した方法[2]を採用。直列に接続した 2 台の電力変換器それぞれがコンデンサバンクに接続されている[3,4,5]。2 台の電力変換器が力行と回生を交互に繰返すことにより、2 つのコンデンサバンクの間でエネルギーが往復する。それゆえ、受電設備は連続運転において回路全体の抵抗損失を補う程度の小さなもので充分である。2 台の電力変換器は同じ大きさの同期した出力電圧パターンで負荷を励磁する。それぞれの電力変換器が大きな電圧を出力したとしてもこの同期した動作が負荷の両端に印加される電圧を小さく抑える。そのため、負荷が小さくても各電力変換器は大きな電圧を出力することができる。

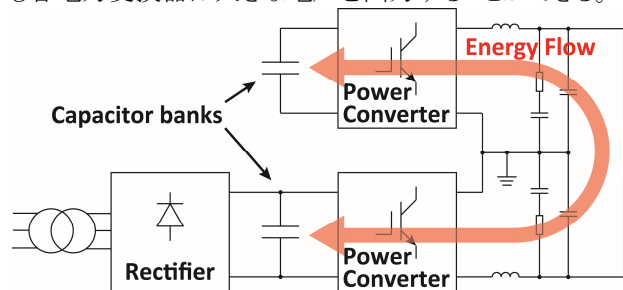


Figure 1: Schematic of high-power testing.

<sup>#</sup> yuichi.morita@kek.jp

### 3. 新電源の構成

偏向電磁石用新電源の概略図を Figure 2 に示す。出力電圧ピーク値は 5 kV を超える。高電圧を出力するために新電源では 6 台の電源ユニットを直列にする。1 台の電源ユニットは AC/DC 変換器、コンデンサバンク、DC/DC 変換器で構成される。冗長性を持たせるために全ての変換器は同一の電力変換器ユニットからなる。Figure 2 に示したように 1 つのスイッチは並列にした 2 つの IGBT (Insulated-gate bipolar transistor) で構成される。各 DC/DC 変換器は 3 台の同一な変換器が並列に接続されており、定格出力電流を 1575 A としている。電力変換器ユニットの仕様を Table 1 に示す。

系統電力の変動を抑えるためにコンデンサによるエネルギー貯蔵方式を採用する。各電源ユニットは 480 mF のコンデンサバンクをもつ。エネルギーは電磁石とコンデンサバンクの間を往復し、系統から受電されるのは抵抗損失分のみである。よって、高繰返し化後の 1.3 秒周期の主電磁石に起因する系統電力変動をエネルギー貯蔵の無い 2.5 秒周期の現状と同程度に抑えられる。

さらに回路全体が接地点に対して対称であるので出力電流に乗るコモンモードノイズを低減できる。電流リップルをさらに低減するために 6 直列の DC/DC 変換器のスイッチング位相を互いにずらすことによって等価スイ

チング周波数を向上し、出力フィルタでスイッチングリップルを落とす。

Table 1: Specifications of Power Converter Unit

スイッチング素子	CM1200HC-66H(三菱電機)
回路	ハーフブリッジ
IGBT の並列数	2
定格電圧 [V]	1667
定格電流 [A]	525
IGBT スwitching 周波数 [kHz]	1
冷却方式	水冷

### 4. 大電力試験および結果

電力変換器ユニットの大電力試験の概略図を Figure 3 に示す。試験条件は Table 2 の通りである。負荷として 1 台の電磁石を使用した。ここで使用した電力変換器はプロトタイプ機であり、IGBT として三菱電機社の CM1000DUC-34NF を用いた neutral-point-clamped (NPC)回路である。直列に接続した 2 台の電力変換器そ

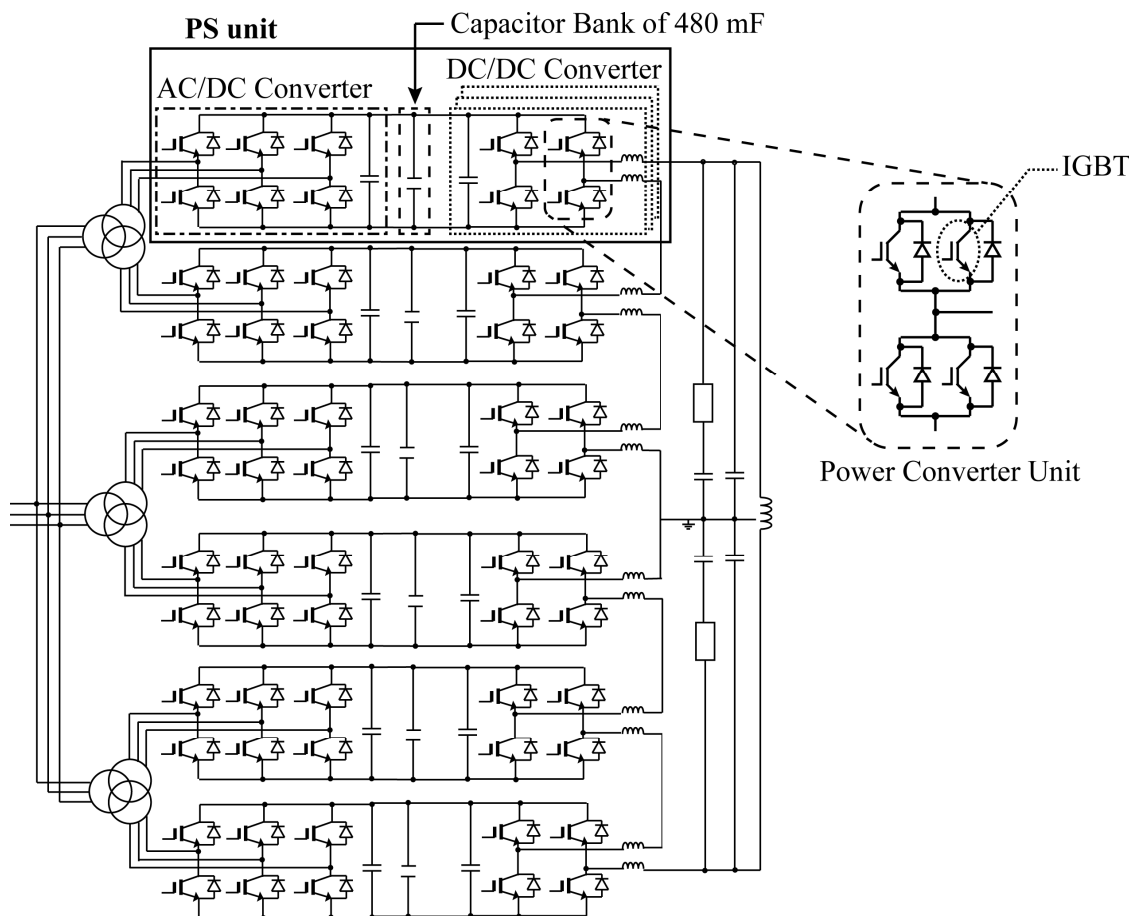


Figure 2: Schematic of new power supply.

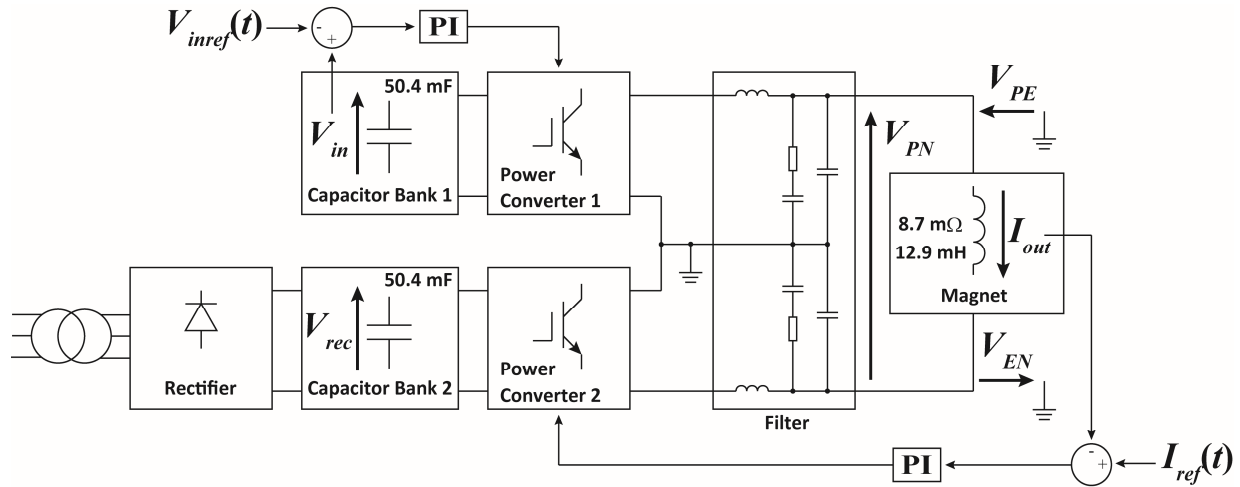


Figure 3: Control of high-power testing. An excitation current feedback is performed with the power converter 2. A capacitor voltage feedback for the capacitor bank 1 is performed with the power converter 1.

れぞれがコンデンサバンクに接続されている。Capacitor bank 2 はダイオード整流器を通して系統に接続されている。

Table 2: Parameters of High Power Testing

周期 [s]	1.2
負荷インダクタンス [mH]	12.9
負荷抵抗 [mΩ]	8.7
コンデンサバンク [mF]	50.4
出力電流 [A]	40 (bottom)-400 (top)
初充電電圧 [V]	1700 ( $V_{in}$ ), 1100 ( $V_{rec}$ )

励磁電流フィードバック制御が power converter 2 で行われ、capacitor bank 1 の充電電圧フィードバック制御が power converter 1 で行われる。Capacitor bank 1 の充電電圧指令値  $V_{inref}(t)$  は

$$V_{inref}(t) = \sqrt{V_{inref}^2(0) - \frac{2}{C} \int_0^t I_{ref}(t') V_{outref}(t') dt'} \quad (1)$$

と計算される。ここで  $C$  はコンデンサバンク 1 台のキャパシタンスである。 $I_{ref}(t)$  は励磁電流指令値である。 $V_{outref}(t)$  は接地電位と負荷の正側端子の間の電圧指令値である。これらのフィードバックはデジタル制御で行われる[6]。 $V_{PE}$  と  $V_{EN}$  はそれぞれ power converter 1 と power converter 2 の出力電圧である。この試験では  $V_{PE}$  と  $V_{EN}$  は同じ大きさで同期したパターンを持つ。この方法によって負荷の端子間電圧  $V_{PN}$  を小さく抑えつつ  $V_{PE}$  と  $V_{EN}$  を大きくすることができる。2 台の電力変換器が 2 つのコンデンサバンクを交互に充放電するので、エネルギーが 2 つのコンデンサバンクの間を往復する。そして、抵抗損失分のみが系統から供給される。以上により試験は大きな負荷や受電設備を必要としない。

試験結果を Figure 4 と Figure 5 に示す。Capacitor bank 1 と 2 の充電電圧  $V_{in}$  と  $V_{rec}$  を交互に充放電することに成

功した。 $V_{PE}$  と  $V_{EN}$  は約 800 V のピーク値をもっているが、パターンが同期しているため  $V_{PN}$  は  $\pm 200$  V 以下に抑えられている。Figure 4 において電流、電圧の追従性が悪いが、当該試験の目的は大電力出力時の電力変換器の運転安定性を実証することであるから問題とはならない。

Capacitor bank 1、2、負荷に貯えられるエネルギーをそれぞれ  $E_{C1}(t)$ 、 $E_{C2}(t)$ 、 $E_L(t)$  とする。

$$E_{C1}(t) = \frac{1}{2} C V_{in}^2(t) \quad (2)$$

$$E_{C2}(t) = \frac{1}{2} C V_{rec}^2(t) \quad (3)$$

$$E_L(t) = \frac{1}{2} L I_{out}^2(t) \quad (4)$$

ここで  $L$  は負荷のインダクタンスである。サイクル毎のスタートタイミングから 0.0 s、0.7 s、1.2 s における  $E_{C1}(t)$ 、 $E_{C2}(t)$ 、 $E_L(t)$  の値を Table 3 に示す。0.7 s は  $I_{ref}(t)$  がピーク値 400 A に達する時刻である。どの時刻であっても全エネルギーは 103 kJ に保たれている。

8 時間連続通電では電流波形と電圧波形に変化は認められなかった。連続通電中に電力変換器の冷却水の入りと戻りの冷却水温度差を測定した。2 台の電力変換器の母管部分での測定である。結果を Figure 6 に示す。温度差は 1~2 時間程度で飽和している。

なお、Table 1 に示した電力変換器ユニットでもこの方法を用いて約 100 kVA の大電力試験が完了している。

当該試験では 1 台の電磁石と ~50 kVA の受電設備を用いた。もし従来の方法で同じ電流指令値、出力電力の試験を行おうとすると、約 60 台の電磁石と数百 kVA の受電設備が必要となる。

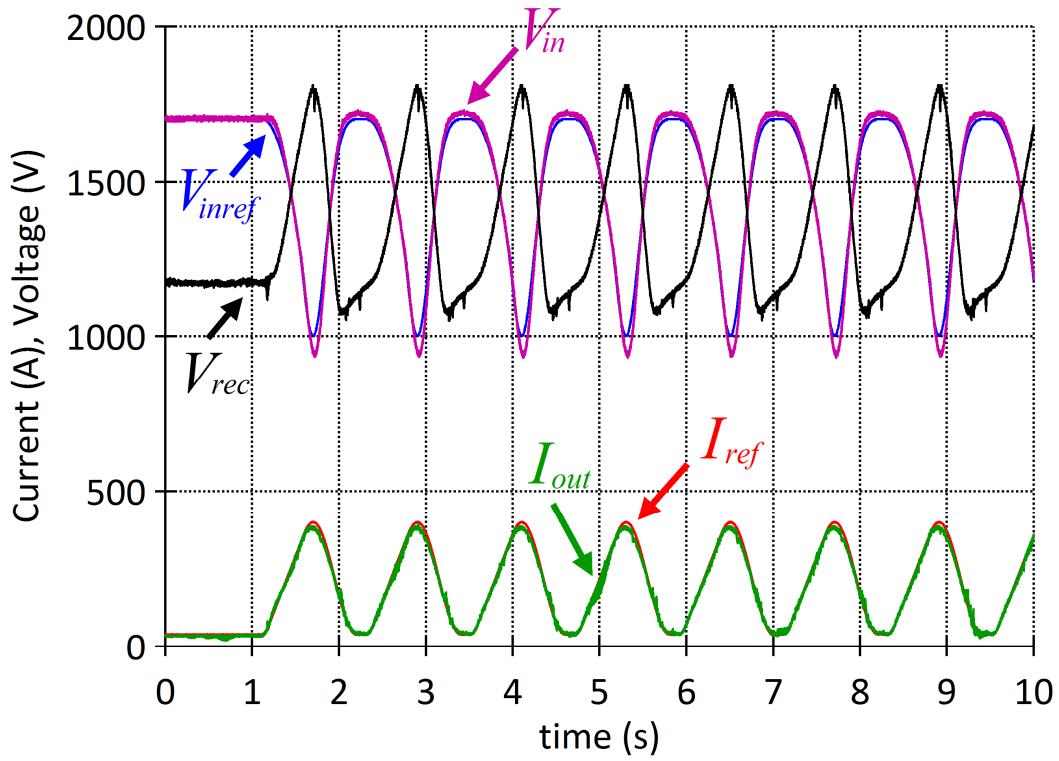


Figure 4: Excitation current of load and charged voltages of capacitor banks in high-power testing.

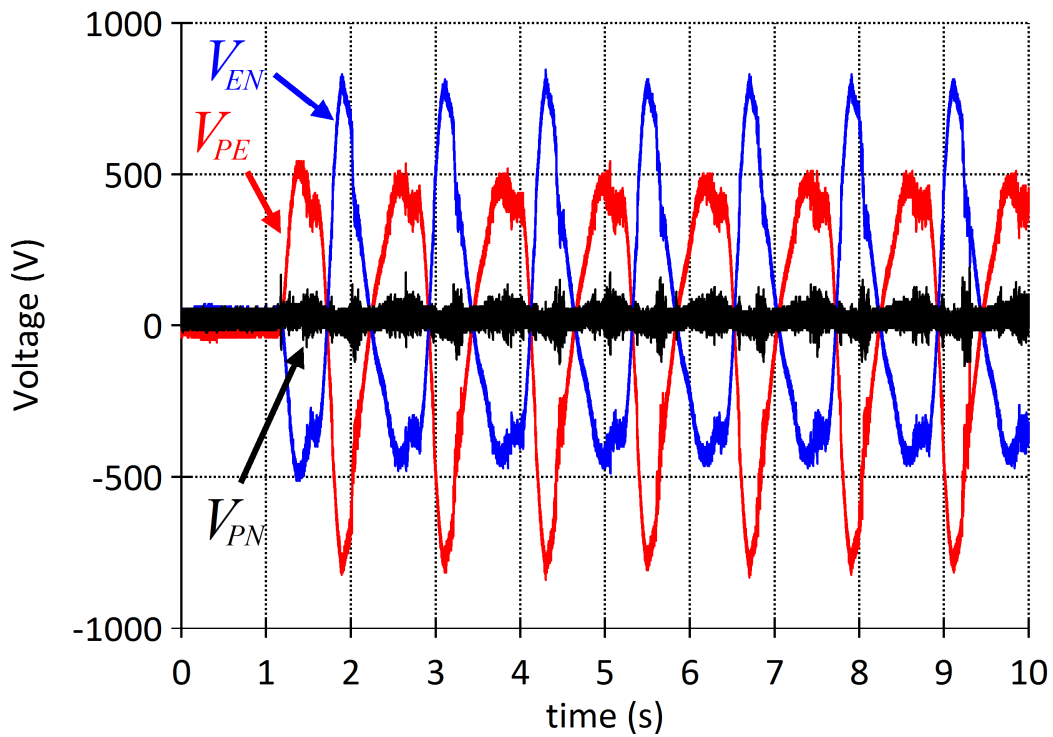


Figure 5: Output voltages of power converters in high-power testing.

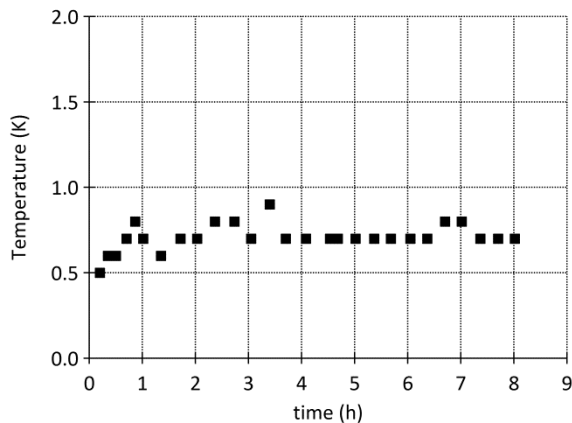


Figure 6: Water temperature difference between common inlet and outlet of power converters as function of time.

Table 3: Stored Energy of Capacitor Banks and Load

時刻 [s]	0.0	0.7	1.2
$E_{C1}(t)$ [kJ]	73	20	73
$E_{C2}(t)$ [kJ]	30	82	30
$E_L(t)$ [kJ]	0	1	0
合計 [kJ]	103	103	103

## 5. まとめ

J-PARC MR においてビーム強度を増強するために繰返し周期を短くする方法が採られる。高繰返し化に伴う主電磁石電源の課題に対処するため新しい電源を開発中である。電力変換器ユニットの大電力試験に対して大きな負荷と受電設備を必要としない方法が提案されている[1]。当該方法により、電力変換器のプロトタイプ機を用いて約 100 kVA の試験を行った。この試験では 400 A ピークの出力電流、800 V ピークの出力電圧が見られた。通電中に全エネルギーが一定値 103 kJ を保つことが確認できた。冷却水の入りと戻りの温度差は 1~2 時間程度で飽和している。8 時間連続通電中には電流波形と電圧波形に変化は認められなかった。

## 参考文献

- [1] Y. Morita *et al.*, “Development of J-PARC MR Main Magnets Power Supplies for High Repetition Rate Operation,” *JPS Conf. Proc.*, vol. 8, Sep. 2015, ID. 012006.
- [2] Y. Kurimoto *et al.*, “A High Power Test Method for Pattern Magnet Power Supplies with Capacitor Banks,” *JPS Conf. Proc.*, vol. 8, Sep. 2015, ID. 012007.
- [3] C. Fahrni *et al.*, “A Novel High Power Test Method for Pattern Magnet Power Supplies with Capacitor Banks,” *JPS Conf. Proc.*, vol. 8, Sep. 2015, ID. 012007.
- [4] T. Isobe, T. Takaku, T. Munakata, H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio, and R. Shimada, “Voltage Rating Reduction of Magnet Power Supplies Using a Magnetic Energy Recovery Switch,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 16, no. 2, pp. 1646-1649, Jun. 2006.

- [5] T. Shimogawa *et al.*, “Test Demonstration of Magnet Power Supply with Floating Capacitor Method,” *JPS Conf. Proc.*, vol. 8, Sep. 2015, ID. 012021.
- [6] Y. Kurimoto *et al.*, “A High Precision Power Supply for Fast Pulse Current with a Digital Control System,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 26, No. 4, 2016.