

J-PARC 主リング新電源の高繰り返し化時の性能見積もり

PERFORMANCE ESTIMATION OF A NEW POWER SUPPLY WITH HIGH REPETITION RATE OPERATION IN J-PARC MR

内藤 大地^{*A)}、栗本 佳典^{A)}、佐川 隆^{B)}、下川 哲司^{A)}、三浦 一喜^{A)}、森田 裕一^{A)}
Daichi Naito^{*A)}, Yoshinori Kurimoto^{A)}, Ryu Sagawa^{B)}, Tetsushi Shimogawa^{A)}, Kazuki Miura^{A)}, Yuichi Morita^{A)}
^{A)}KEK, ^{B)}Universal Engineering

Abstract

The Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) is a high-power proton accelerator facility. The current beam power is 500 kW, and we aim at achieving the beam power of more than one mega-watt. Since the beam power is proportional to the repetition rate of the beam cycle, we plan to achieve high repetition operation of the J-PARC Main Ring by replacing the power supplies of main magnets. The power supplies are designed to achieve the beam cycle of 1.3 s. We optimize control method of the power supplies to achieve the shorter beam cycle, and find out the minimum beam cycle is 1.16 s in a simulation.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は大強度陽子加速器である。現在のビーム強度は長基線ニュートリノ振動実験 (T2K 実験) [1] に対しては 500 kW である。高統計量を稼ぐ事で標準理論の精密検証を行うため、J-PARC では 1 MW 以上の大強度化を目指している。一般的にビーム強度 (P_b) は陽子数 (N_p) と陽子のエネルギー (E_p) とビームのサイクル時間 (T_{cycle}) を用いて、

$$P_b \propto \frac{N_p \times E_p}{T_{cycle}} \quad (1)$$

と、表される。そこで J-PARC Main Ring ではサイクル時間を現行の 2.48 秒から 1.3 秒周期に短縮すること (高繰り返し化) でビームの大強度化を目指している。

高繰り返し化を達成するための課題に、ビームの運動を制御している電磁石への電力供給がある。ビームサイクル中の印加電流と電圧の例として、偏向電磁石の電流と電圧パターンを Fig. 1 に示す。ビームサイクルはビーム入射のための待機、ビーム加速、取り出し、次のビーム入射への準備の 4 つの期間からなる。電流 (I) と電圧 (V) の関係は負荷のインダクタンス (L) と抵抗成分 (R) を用いて

$$V = L \frac{dI}{dt} + RI \quad (2)$$

と書ける。電流値は陽子ビームの運動量増加に合わせて増加するので、加速時間が短くなると dI/dt が大きくなる。従って 1.3 秒繰り返しになると電圧が倍増する。しかし 1.3 秒繰り返しでの印加電圧は現行の電源では出力できない。加えて電流と電圧の積で表せられる電力変動ももちろん倍増し、電力変動に対する電力会社からの要請を満たせない。そこで我々は新しい電源の開発を行ってきた [2,3]。本論

では更なるビーム強度増加のため、新電源でより短い繰り返し時間が達成できないかを MATLAB ベースの回路シミュレーションを用いて検討した。

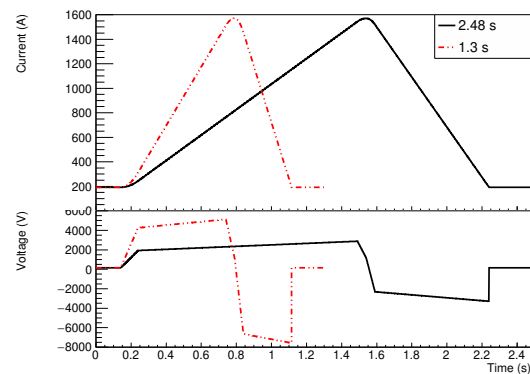


Figure 1: The current and voltage pattern in the single beam cycle.

2. 新電源のデザイン

新電源は高電圧を達成するための 6 直 DC/DC 変換器と、電力変動を抑えるための大容量コンデンサバンクを擁する。Figure 2 に回路シミュレーションに用いた新電源のモデルを示す。新電源は DC/DC 変換器とコンデンサバンク、AC/DC 変換器により構成される。それぞれの変換器は IGBT (Insulated-gate bipolar transistor) のハーフブリッジユニットにより構成されている。

6 直の DC/DC 変換器は最大で 10kV の電圧を負荷に印加できる。負荷に印加すべき電圧は Fig. 1 より 1.3 秒繰り返し時で最大 7kV 程度なので、十分な電圧供給が可能となる。

コンデンサバンクは予め充電しておき、負荷のインダクタンス成分とエネルギーのやりとりを行う。するとシステムの電力変動は負荷の抵抗成分により消費される電力だけになる。現行電源で 2.48 秒繰り返しを行った時と、新電源で 1.3 秒繰り返しを行った時の

* dnaito@post.j-parc.jp

理想的な場合の受電電力変動を Fig. 3 に示す。新電源は 1.3 秒繰り返しでも電力変動を現行電源の 2.48 秒繰り返しよりも小さく抑えられるデザインになっている。

AC/DC 変換器は負荷で消費されて不足したエネルギーをコンデンサバンクに供給する役割を担う。6 つのコンデンサバンクのうち系統に 2 つだけが接続されるフローティングキャパシタ方式をとっており、コンパクト化と低コスト化が図られている。

新電源の主な仕様を Table 1 に記述する。各変換器の耐圧はコンデンサバンクの耐圧によって制限されている。トランスの容量はコンデンサバンクに供給できる電力を制限する。従って電源を定格で駆動させるには各 DC/DC 変換器の電圧分担比と系統からの電力供給パターンの最適化が必須となる。

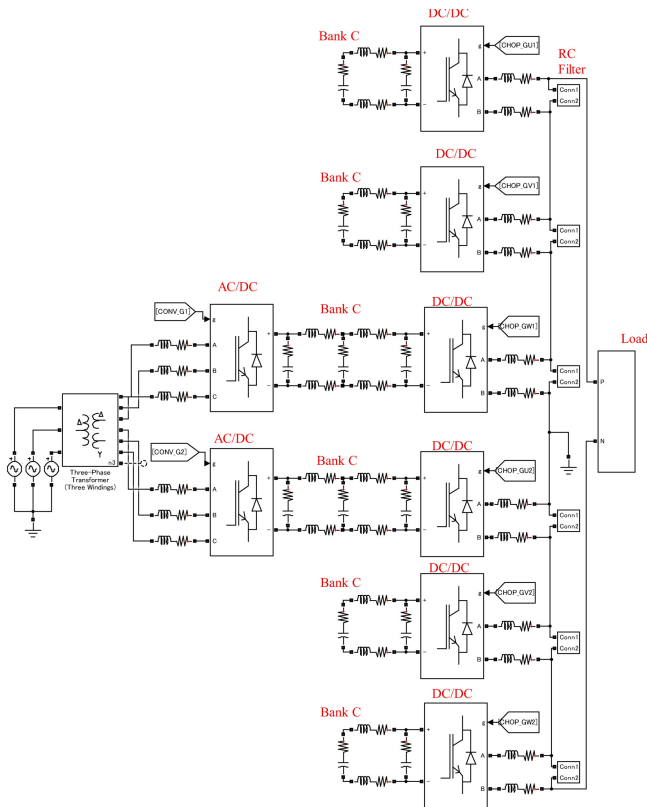


Figure 2: The schematic of new power supply.

Table 1: The Spec List of the New Power Supply

電圧定格 (各変換器)	1.7 kV
トランスの容量	2.5 MVA
電圧定格 (電源全体)	10.2 kV
電流定格	1600 A

3. 新電源の制御方法

本論で用いたシミュレーションにおける新電源の制御方法について説明する。制御方法は系統に接続されない DC/DC 変換器、系統に接続される DC/DC

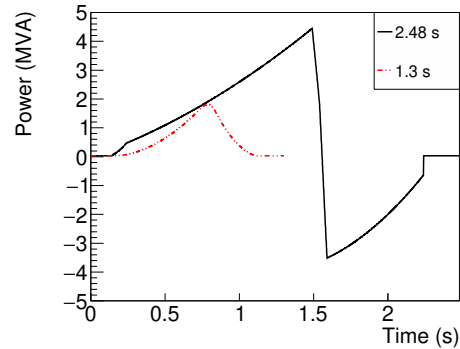


Figure 3: The ideal variation of the electrical power in the single beam cycle.

変換器、AC/DC 変換器によって異なるので、順に説明していく。

3.1 系統に接続されない DC/DC 変換器の制御

6 直の変換器全体が出力すべき電圧は、必要な電流パターンを決めると Eq. (2) より自動的に求まる。次に各変換器の出力電圧分担比を決定する。系統に接続されない変換器ではエネルギーの供給がない。従って出力電圧を V_{out} 、出力電流を I 、1 ビームサイクルを T_{cycle} とすると

$$\int_0^{T_{cycle}} V_{out} I dt = 0 \quad (3)$$

を満たさなければならない。これを満たさなければビームサイクルを一周してもコンデンサバンクの電圧が元の値に戻らず、単調増加または単調減少していき運転不可能となる。この不一致は IGBT のスイッチングによる損失によって生じるので、損失量を正しく見積もる事が重要となる。またこの際の変換器の入力側の電圧 (V_{in}) はコンデンサバンクの初期充電電圧を V_C 、静電容量を C とすると

$$V_{in}(t) = \sqrt{V_C^2 - \int_0^t \frac{V_{out} I}{C} dt} \quad (4)$$

と表され、この電圧が変換器の出力できる最大電圧となる。今回はマージンとして V_{out} と V_{in} の電圧比が 80% 以下である事を運転可能条件とした。これは新電源 1 号機 [2] での実績から、シミュレーションと実測結果には 10% 程度の差異が確認されているためである。

1.3 秒繰り返しでの V_{in} と V_{out} パターンを Fig. 4 に示す。 V_{out} パターンは Eq. (3) を満たす範囲で Eq. (4) を用いて電圧比ができるだけ常に 80% になるように自動生成するアルゴリズムを考案して作成した。制御は V_{out} パターンと実際の出力電圧が同じになるように電圧指令値を DC/DC 変換器に与える方式にした。

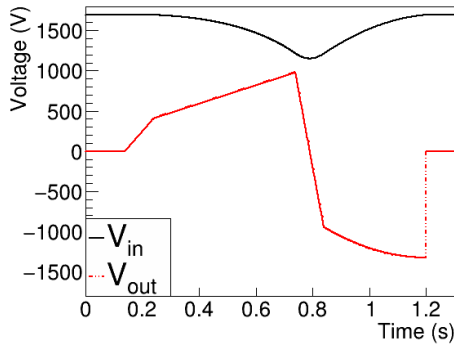


Figure 4: The input and output voltage of the DC/DC converter.

3.2 系統に接続される DC/DC 変換器の制御

系統に接続されている DC/DC 変換器の制御は新電源 1 号機と同じ制御方法 [4] を採用した。Figure 5 に制御のダイアグラムを示す。Figure 1 に示されている電流パターンと負荷に流れる電流を比較してフィードバックにより出力電圧を決定する。これは低ノイズの電流出力を得るためである [2]。

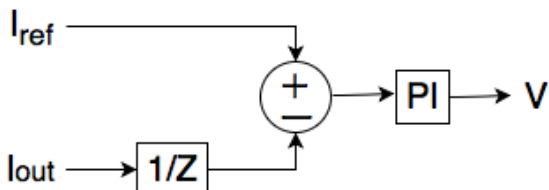


Figure 5: The control diagram of the DC/DC converter.

3.3 AC/DC 変換器の制御

AC/DC 変換器の制御方式も新電源 1 号機と同じ制御方法 [4] を採用した。Figure 6 に制御ダイアグラムを示す。まずコンデンサバンクでの電圧 (V_{DC}) と電圧指令値 (V_{ref}) を比較して電流指令値を計算する。さらに Fig. 2 のトランスと AC/DC 変換器間に流れる電流 (i_u, i_v, i_w) を 3 相-2 相変換したものと比較して AC/DC 変換器に入力する電圧を計算する。電流比較では力率が 1 になるようにフィードバックを行う。本論では新規に V_{ref} パターンの自動生成アルゴリズムの開発を行った。

1.3 秒繰り返しの際の V_{ref} パターンと系統に接続された DC/DC 変換器の電圧出力を Fig. 7 に示す。 V_{ref} パターンが下がり始める時刻はトランスから供給可能な電力と DC/DC 変換器からの出力電力が釣り合う時刻とした。これはコンデンサに蓄えられた電圧を極力下げないようにして、系統に接続された DC/DC 変換器の電圧分担比を高く保つためである。ここでのトランスから供給可能な電力は 20% のマージンをとって 2 MVA とした。また V_{ref} パターンの立ち下がりには $t^{5/2}$ 、立ち上がりには t^2 とした。立ち上がり、立ち下がりともに次数を 1/2 ずつ変化させて

回路シミュレーションを行い、系統の電力変動が最小となる組み合わせを選んだ。

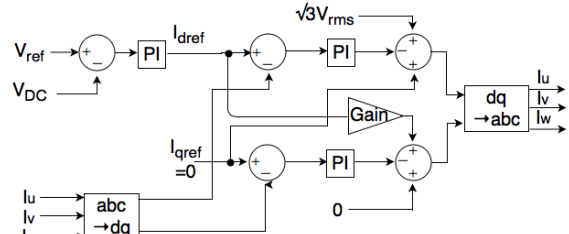


Figure 6: The control diagram of the AC/DC converter.

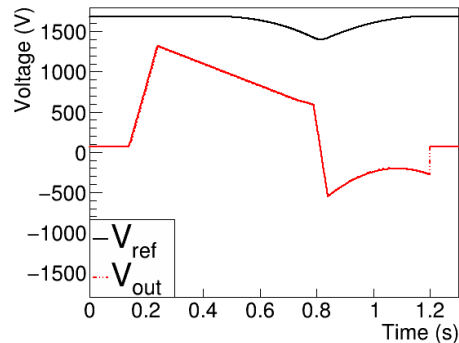


Figure 7: The input and output voltage of the DC/DC converter connected to the AC/DC converter.

4. 回路シミュレーション

回路シミュレーションは MATLAB を用いて行った。シミュレーションモデルは Fig. 2 を使った。トランス、IGBT ユニットのパラメータはカタログ値を用いた。その他に配線ケーブルのインダクタンスと抵抗、IGBT のスイッチングによる損失を組み込んだ。シミュレーションは 0.5 秒かけてビーム入射時の値まで負荷に印加する電流を増やし、その後パターン通電を 4.5 秒間、 10^{-6} 秒の時間ステップで行った。ビームサイクルの時間を 1.3 秒から徐々に短くしてシミュレーションを繰り返し、 V_{out} と V_{in} の比が全期間で 80% 未満かつトランスの電力が 2 MVA 以内に収まる最小のサイクル時間を見積もった。

繰り返しシミュレーションを行った結果、最小のビームサイクルは 1.16 秒という結果になった。1.16 秒繰り返しのシミュレーションに用いた電流パターンを Fig. 8 に示す。電流パターンはビーム入射のための待機期間を 0.14 秒、ビームの加速時間を 0.58 秒、次のビームへの準備期間を 0.34 秒とした。

1.16 秒繰り返しの V_{in} と V_{out} を Fig. 9 に示す。Converter1 は系統に接続されない DC/DC 変換器、Converter3 は接続される DC/DC 変換器を示す。 V_{in} 、 V_{out} 共に電圧降下や発振する事なく安定に動作しており、電圧指令パターンや制御に問題がない事を示している。また V_{in} と V_{out} の比を Fig. 10 に示す。全領域で比が 0.8 以下という要求値を満たしている事

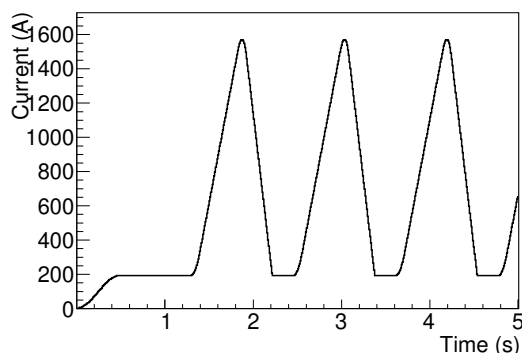


Figure 8: The current pattern at 1.16 s.

が分かる。次にトランスでの電力変動を Fig. 11 に示す。要求値である 2 MVA 以下を全領域で満たしている事が分かる。

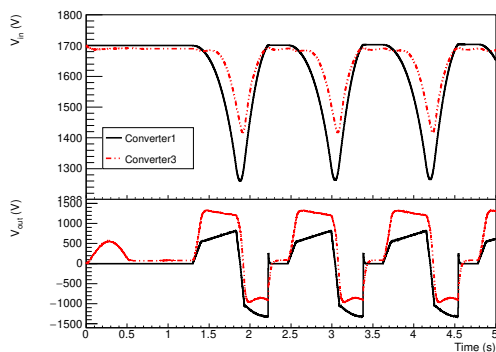


Figure 9: The input and output voltage of the DC/DC converter at 1.16 s. The converter 3 is DC/DC converter connected to the AC/DC converter and the converter 1 is the other one.

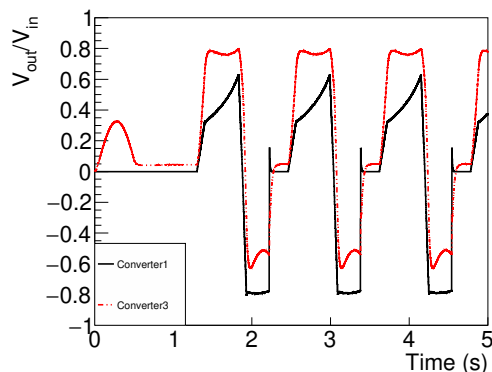


Figure 10: The ratio between the input and output voltage of the DC/DC converter at 1.16 s.

最後に何により 1.16 秒という上限値が決まっているかを説明する。Figure 10 より加速期間中は Converter1 の出力が上限値に達しておらず、より短い繰

り返しを達成するために電圧出力を上げる事ができそうに見える。しかし Eq. (3) と次のビームへの準備期間での電圧出力が上限値に達している事より、電圧出力を上げる事はできない。よって電圧出力を上げるにはコンデンサバンクの初期充電電圧を上げる他ないが、耐圧から不可能となっている。一方でトランスの電力については加速領域の途中で下がっている事から、まだ余力がある事が分かる。

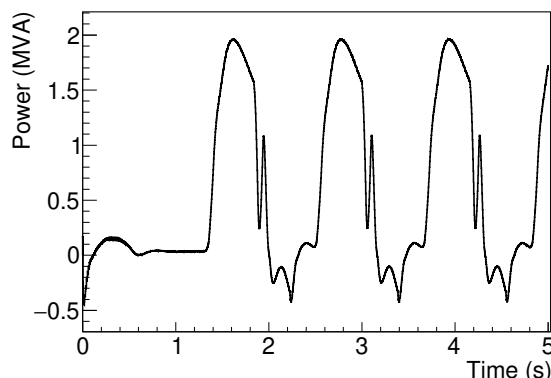


Figure 11: The variation of the electrical power at the power supply transformers.

これまでの議論より運転サイクルの長さはコンデンサバンクの耐圧によって制限される事が分かった。また最小のサイクル時間は 1.16 秒である事が分かり、デザイン値の 1.3 秒から 11% サイクル時間を短縮する事に成功した。

5. まとめと今後の展望

J-PARC MR では 1 MW 以上の大強度化のため、ビームの繰り返し時間を 1.3 秒にする事を計画している。我々はその際に問題となる電磁石への電力供給を解決するため、新しい電源の開発を行ってきた。本論ではさらなる大強度化に向けてビームの繰り返し時間の短縮をシミュレーションを用いて検討した。

フィードバックやフィードフォワードに用いる電圧パターンの自動生成アルゴリズムを最適化する事で、繰り返し時間を 1.3 秒から 1.16 秒へと 11% 短縮する事に成功した。ビームパワーは繰り返し時間の逆数に比例するので、制御方法の最適化によりビームパワーとして 12% の増強が見込める事を示せた。

今後は 2018 年冬に新電源に実負荷を繋げた通電試験、2019 年度には新電源を実トランスに繋いだ通電試験を行う。これらの試験での測定データを用いてシミュレーションを調整してマージンを無くし、より精密に達成可能な繰り返し時間を見積もる。また開発した電圧パターン生成アルゴリズムを用いて通電試験を行い、1.3 秒よりも短い繰り返し時間で運用できる事を実証する。

参考文献

- [1] K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Nucl. Instrum. Meth. **A 659**, 106 (2011).
- [2] T. Shimogawa *et al.*, “First new power supply of main magnet for J-PARC main ring upgrade”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1-3, 2017, pp.73-76.
- [3] Y. Morita *et al.*, “Development of capacitor bank of J-PARC MR main magnet power supply for high repetition rate operation”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1-3, 2017, pp.1056-1060.
- [4] T. Shimogawa *et al.*, “A Control System of New Magnet Power Converter for J-PARC Main Ring upgrade”, Conference Record of the 21st IEEE Real Time Conference, 1806.08884, 2018.