

DEVELOPMENT STATUS OF MAGNET POWER SUPPLIES FOR THE SUPERKEKB

Toshiyuki Oki [#], Tsuyoshi Sueno, Noboru Tokuda
KEK, High Energy Accelerator Research Organization
Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

Megawatt-class power supplies have been manufactured for bending magnets and wiggler magnets of SuperKEKB, which is now under construction. The requirements to the power supplies are as follows: stability of the output current is 2 ppm/day or less; and the setting resolution is 0.1 ppm (the values are relative to the maximum output current). To meet these requirements we developed a digital feedback circuit, having a DAC board for 24-bit current setting and a highly accurate DCCT for current measurement. Performance tests yielded satisfactory results.

SuperKEKB 用電磁石電源の開発状況

1. はじめに

KEKB 加速器は $21.083 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ という世界最高のルミノシティを達成した電子・陽電子衝突型加速器であったが、その 40 倍の衝突性能を目指した高度化計画として SuperKEKB 加速器の建設が現在進められている。

衝突性能を高めるためには、加速器を構成する電磁石の数や種類、配置を最適化し、ビームのエミッタンスを小さくする必要がある。SuperKEKB 加速器では、衝突点付近の超伝導電磁石群を一新し、陽電子リング (LER) 用偏向電磁石を鉄心長がより長いものに更新し、増強する四極電磁石やウィグラー電磁石、ステアリング電磁石などを新規に製作する。また、電子リング (HER) 用の偏向電磁石に代表される多くの電磁石を再利用する。さらに、陽電子ビームのエミッタンスを低減するためのダンピングリングも建設され、そのための電磁石が新規に製作される。

これら電磁石の磁場には高い安定度と精度が要求されるので、電磁石を励磁する大電力の直流電源は、その要求に見合うように高い電流安定度と設定分解能を実現する高性能のものでなくてはならない。また銅やアルミ製のビームダクトを採用する SuperKEKB 加速器では、ダクトで磁場リップルが減衰されてビームに与える影響が小さい^[1]ので、電流リップルに対する要請は厳しくない。しかしながら、電磁石電源の周囲には、制御システムなど電磁ノイズの影響に敏感な機器や、数十年間使用されてきた遮断器など高調波許容電圧の低い機器が共存するので、受電側と出力側の双方にノイズや高調波電圧を発生することがあってはならない。

これらの要求を満たす電源として、昨年度には、ダンピングリング用の電磁石電源の他、偏向電磁石およびウィグラー電磁石を励磁するための、MW クラスの電磁石電源を 10 台製作した。これら 10 台の電源では、デジタル電流帰還制御を用いて電流安定

度 2 ppm/day 以下を目指し、16 個の 20 ビットデジタルアナログコンバータ (DAC) の出力をそれぞれ 16 分の 1 にしたものを加算する方法で 24 ビットの電流設定分解能を目指した。

本報告では、これら新規に製作した偏向電磁石電源およびウィグラー電磁石電源の性能について報告する。

2. 電源の概要

2.1 定格と負荷

各電源の定格と負荷を表 1 にまとめる。B2E および B2P は、それぞれ、HER 用および LER 用偏向電磁石電源であり、それ以外は LER 用ウィグラー電磁石電源である。電磁石の定数は設計値であり、ケーブルの抵抗値は概算値である。

2.2 電源の構成

電源を構成する主な機器は、3 相 6.6 kV を受電する受電盤、トランス、電源盤である。電源盤は、整流器盤、チョッパー盤、制御盤からなる。電源は電圧型スイッチング方式であり、整流器に IGBT スイッチング素子を使用し、冷却方式は水冷式とした。また、主回路の接地方式は、負荷との接続に KEKB 加速器で既設の 600V 低圧ケーブルを使用することを想定して、電源側中点を抵抗接地できるようにした。ところで、6.6 kV 受電系統の上位にある特別高圧配電用変電所では、高調波対策のために進相コンデンサーを運用してきた。これまで使用されてきたのはサイリスタ整流方式の電源であったが、スイッチング整流方式の電源に更新して従来と同様に進相コンデンサーを運用するためには、サイリスタ整流方式と同程度の遅れ力率を発生できるように無効電力を制御する必要がある。このため、IGBT 整流器の通流位相を調節することによって無効電力を制御し、1 から 0.7 程度までの範囲で遅れ力率を選択できるようにした。

[#] toshiyuki.oki@kek.jp

表 1: 電源の定格と負荷

名称	定格			負荷			
	電力 (kW)	電流 (A)	電圧 (V)	電磁石台数	電磁石のインダクタンス (mH)	電磁石の抵抗値 (40°C) (mΩ)	ケーブル抵抗値 (mΩ)
B2E	946	860	1,100	106	1,272 (12×106)	1,071 (10.1×106)	142
B2P	946	860	1,100	100	600 (6.0×100)	1,000 (10.0×100)	90
BWHNP	770	1,400	550	58	209 (3.6×58)	302 (5.2×58)	20
BWSNP	490	1,400	350	29	194 (6.7×29)	186 (6.4×29)	16
BWDNRP	770	1,400	550	24	432 (18×24)	341 (14.2×24)	9
BWDNLP	1,050	1,400	750	34	612 (18×34)	483 (14.2×34)	15
BWHOP	770	1,400	550	54	194 (3.6×54)	281 (5.2×54)	20
BWSOP	490	1,400	350	27	181 (6.7×27)	173 (6.4×27)	16
BWDORP	630	1,400	450	20	360 (18×20)	284 (14.2×20)	9
BWDOLP	1,050	1,400	750	34	612 (18×34)	483 (14.2×34)	15

2.3 性能仕様および電流制御方式

目標とした性能仕様は、すべての電源に共通で、次の通りである。電流安定度が 2 ppm/day 以下、電流設定分解能が 0.1 ppm 以下、電流リップルが 1 ppm rms 以下 (2 kHz 以下の成分) および 10 ppm (peak-to-peak) 以下 (2 kHz 以上の成分)。

高い電流安定度を目指すため、電流制御にデジタル帰還制御方式を適用した。デジタル電流帰還制御は、次のようにして行っている: まず、出力電流を高精度の DCCT (HITEC 社製 TOPACC、温度係数 0.25 ppm/K 以下、電源の定格電流に対して 10 V 出力) で測定し、そのモニタ出力を 8 ½桁のデジタルマルチメータ-Keithley 2002 で読み取り、GPIB インターフェースを介して出力電流の直流値を高精度のデジタル値として得る。この電流現在値を電流設定値と比較し、偏差を小さくするよう演算した補正値を、電流設定を行う DAC へ加算して帰還制御する。これらデジタル電流帰還制御に用いる DCCT の制御部およびデジタルマルチメータは、温度変動が ±1.0°C 以下の恒温槽 (エスベック社製 LU-123) に内蔵し、電源周囲温度変化の影響を小さく抑えた。また、デジタル電流帰還制御は、出力電流の直流値を高精度に測定することを重視したので、比較的遅い制御となっている。このため、より高速な応答が期待できる通常のアナログ電流帰還制御を備え、電流が変化する電流掃引時などは、測定遅れの影響がでないようにデジタル電流帰還制御を自動的に OFF にし、アナログ電流帰還制御するようにした。このアナログ電流帰還制御に用いる DCCT には、前述のデジタル電流帰還制御に用いるものと同種のものを別に取り付けた。なお、デジタル電流帰還制御が OFF の時の電流安定度は、20 ppm/day 以下を目標とした。

また、電流安定度の数倍の分解能でデジタル電流帰還制御をする必要があるため、0.1 ppm 以下の電流設定分解能を目標にした。これは 23 ビット以上の分解能に相当する。こうした高い電流設定分解能



図 1: B2P 偏向電磁石電源

を目標とするため、16 個の 20 ビット DAC (Analog Devices 社製 AD5791) の出力をそれぞれ 16 分の 1 にしたものを加算する方法で 24 ビットの電流設定分解能を目指した。なお、複数の DAC を組み合わせる高分解能化を実現する方法には前例^[2]があり、この方式の参考にした。

3. 工場での性能試験

納品前に工場で行ったいくつかの性能試験のうち、電流安定度と設定分解能の試験結果について報告する。いずれの通電試験でも、負荷は工場に既設の模擬負荷 (0.5 mH, 25 mΩ) を用いた。工場試験時の B2P 偏向電磁石電源を図 1 に示す。

3.1 電流安定度試験

B2P 偏向電磁石電源で行った電流安定度試験では、定格 860 A で通電し、通電開始後 30 分ほど経過したところから計測を開始した。最初にデジタル電流帰還制御を OFF にした状態で 4 時間ほど通電し、その後デジタル電流帰還制御を ON にして 4 時間通電した。なお、試験中の電源周囲温度は 20 ± 1°C 程

度であった。

出力電流の測定は、デジタル電流帰還制御に用いている DCCT の出力（定格電流で 10 V 出力）を、デジタル電流帰還制御に用いているものとは別に用意した HP3458A デジタルマルチメーター（設定：測定レンジ 10 V（フルスケール 12 V）、積分時間 2 PLC (Power Line Cycle)）で読み取った。値の読み取り速度は 10 サンプル/秒であり、10 サンプルごとの平均値を試験結果として図 2 に示す。

測定結果は、おそらくはノイズの影響によってゆ

らぎ、幅を持っている。その中心の変化と振れ幅を図 2 から読み取ると、4 時間での電流安定度は、デジタル電流帰還制御 OFF の場合に 2.5 ppm 程度（標準偏差 0.98 ppm）、デジタル電流帰還制御 ON の場合に 1.2 ppm 程度（標準偏差 0.67 ppm）となっていた。試験時間が 4 時間と短い、仕様の目標値が、デジタル電流帰還制御 OFF/ON の場合にそれぞれ、20 ppm/day、2 ppm/day なので、十分なノイズ対策を行えば、目標を満たすと期待できる。

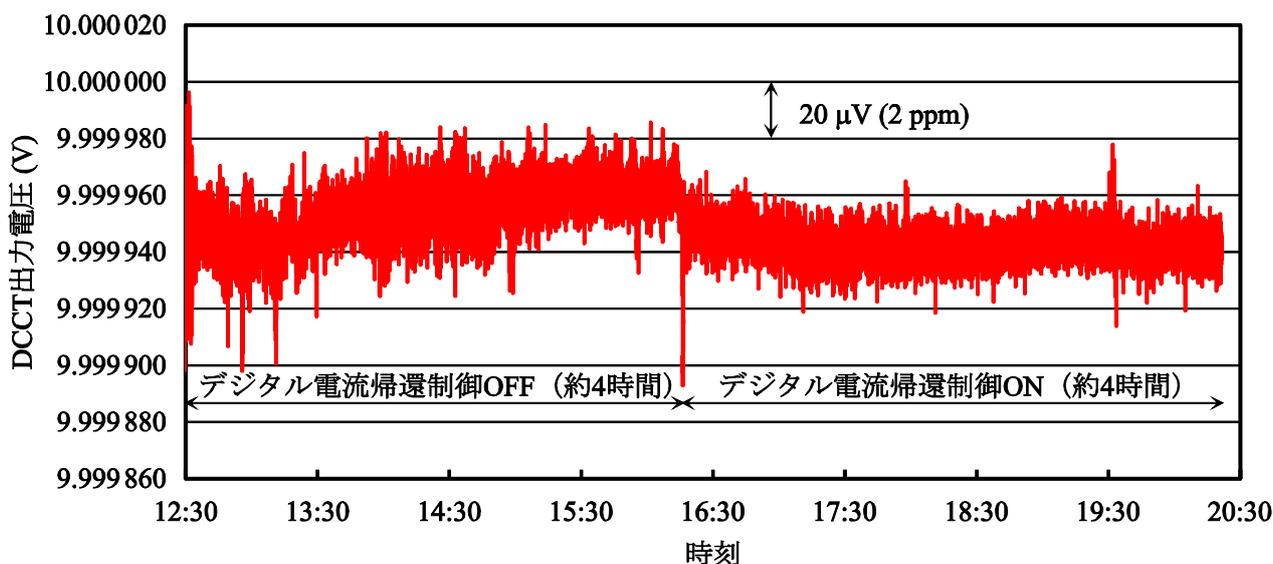


図 2: B2P 偏向電磁石電源の電流安定度の試験結果。出力は 860 A。4 時間での電流安定度は、デジタル電流帰還制御 OFF の場合に 2.5 ppm 程度、デジタル電流帰還制御 ON の場合に 1.2 ppm 程度。

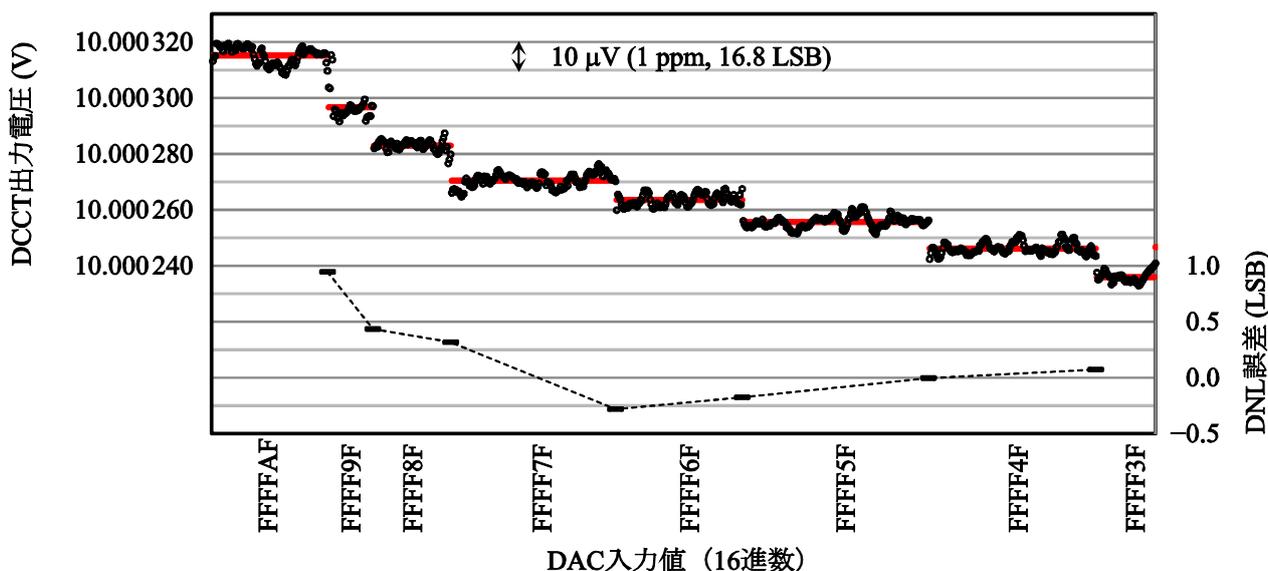


図 3: BWDNLP ウィグラー電磁石電源の電流設定分解能の試験結果。出力は 1400 A。黒丸は測定値を示し、各入力値に対応する区間での平均値を赤線で示す。各区間での揺らぎの幅は、標準偏差で 2 μ V、0.2 ppm 程度。なお、図の下部に DNL 誤差（右軸）を示す。

3.2 電流設定分解能試験

BWDNLP ウィグラー電磁石電源で行った電流設定分解能試験について述べる。定格 1400 A 出力付近において、約 30 分ごとに DAC への入力値 (16 進数) を FFFF AF から FFFF 3F まで 16 LSB (least significant bit、最下位ビット) ずつ下げ、入力値を変えた直後の 10 分から 15 分程度の間に出力量を 100 サンプル程度記録し、その変化を測定した。

電流安定度試験と同様に、出力電流の測定はデジタル電流帰還制御に用いている DCCT の出力 (定格電流で 10 V 出力) を、デジタルマルチメーターで読み取った。ただし、デジタルマルチメーターは、デジタル電流帰還制御に用いているものとは別に用意した Keithley 2002 (設定: 測定レンジ 20 V、積分時間 20 PLC、10 項移動平均処理) を用いた。測定結果を図 3 に示す。

図 3 からわかるように、およそ 1 ppm に相当する 16 LSB の段差がはっきりと現れていて、さらに高い設定分解能が期待できる。また、図 3 に示す DNL 誤差 (Differential Non-Linearity、微分直線性誤差) は、次のようにして求めた: DAC への入力を 16 ビット減らしたときの出力電圧の減分を 16 で割って $0.596 \mu\text{V} (= 10 \text{ V}/(2^{16}-1) = 1 \text{ LSB})$ を差し引いた。DAC 入力値を FFFF AF から FFFF 9F にした時の DNL 誤差が大きいが、DAC 入力値が FFFF AF の時に操作者が測定器等に触れてしまい、正しく測定できなかった可能性がある。これを除くと、DNL 誤差は $\pm 0.5 \text{ LSB}$ の範囲に収まっている。

4. まとめ

SuperKEKB 加速器用電磁石電源の開発状況として、昨年度製作した偏向電磁石およびウィグラー電磁石電源の概要と、その工場試験結果について報告

した。目標とした性能仕様は電流安定度が 2 ppm/day 以下、電流設定分解能が 0.1 ppm 以下である。これらを実現するために、デジタル電流帰還制御方式と 20 ビットの DAC を 16 個組み合わせる方式を採用した。工場試験の結果として、電流安定度は 1.2 ppm/4 時間 程度となっており、試験時間が 4 時間と短いものの目標値を満たすと期待できた。また、電流設定分解能の試験結果では、およそ 1 ppm に相当する 16 LSB の段差がはっきりと現れていて、さらに高い設定分解能が期待できた。

ところで、電流の安定度や設定分解能と異なり、電流リップルは負荷のインピーダンスに応じて大きく異なる。参考のために工場試験では模擬負荷を用いてリップルの測定も行ったが、模擬負荷は実負荷の定数と大きく異なるので測定結果の報告をここでは省略した。銅やアルミ製のビームダクトを採用する SuperKEKB 加速器ではリップルのビームへの影響は小さいと考えられるが、建設スケジュールが厳しく、実負荷に接続して調整および試験できる期間は非常に短いと思われるため、今年度に製作する電源を用いてフィルタ回路の検討などを引き続き行っていく予定である。

参考文献

- [1] KEKB 加速器における電磁石励磁電流リップルの分布測定、大木俊征ほか、第 7 回日本加速器学会年会 (2010).
- [2] Steering Magnet Power supply の高分解能化の実現、武部英樹ほか、第 2 回日本加速器学会年会 (2005).