

SuperKEKB 衝突点用超伝導電磁石電源プロトタイプの製作と試験結果

A PROTOTYPE POWER SUPPLY FOR THE SuperKEKB FINAL FOCUS SUPERCONDUCTING MAGNETS

大木俊征[#], 徳田登, 安達利一, 大内徳人, 中村衆
Toshiyuki Oki[#], Noboru Tokuda, Toshikazu Adachi, Norihito Ohuchi, Shu Nakamura
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

We developed a prototype power supply for the SuperKEKB final focus superconducting magnets. Typical aiming specifications of the power supply are as follows: rated output is DC 2 kA-10 V; current setting resolution < 0.1 ppm; current stability < 2 ppm/8 hrs.; temperature coefficient < 0.01 ppm/deg.; current ripple < 1 ppm, where the assumed magnet inductance and cable resistance are 0.88-13.28 mH and 5 mΩ. High power tests were performed, and expected results were obtained.

1. はじめに

KEKB 加速器^[1, 2]は、 $21.083 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ という世界最高のピーク・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、2010年6月に運転を終え、現在、その40倍のピーク・ルミノシティを目指した SuperKEKB 加速器^[3, 4]の建設が進められている。この5年間で加速器構成要素の製作やオーバーホールをおおよそ終え、2016年2月に予定されている運転を目指して、電磁石電源システムの立ち上げや電磁石のアライメント作業、ビームパイプやRF空洞のコンディショニングなどが行われている。

電磁石電源については、2011年度から2013年度にかけて、KEKB 加速器で使用してきた627台の電源をオーバーホールし、また、361台の電源を新規に製作した^[5]。これら新規に製作した電源に要求される性能仕様は様々だが、最も仕様が厳しい衝突点用超伝導電磁石電源については、2010年度に高分解能・高安定度制御の開発を行い、2013年度にプロトタイプの製作および超伝導電磁石を負荷とした試験を行って期待通りの性能を得て、2015年度に量産機の製作を行う予定である。

SuperKEKB 加速器の衝突点近傍に配置される超伝導電磁石^[6]は、主四極電磁石、補正電磁石、ソレノイド電磁石で構成され、これらは特に精度と安定度の高い磁場が要求される。これらの超伝導電磁石を励磁する電源は、その要求に見合う高性能のものでなくてはならない。また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。本発表では、この超伝導主四極電磁石電源プロトタイプと、その試験結果について報告する。

2. 目標性能仕様

負荷とする超伝導主四極電磁石は8種類あり、定格電流が1 kA から2 kA、電磁石のインダクタンスが0.88 mH から13.28 mHである。また、電源と電磁石間の電力ケーブルは、同一断面積を持つケーブルを定格電流に応じて並列本数を調節しているため、概算のケーブル抵抗値は5 mΩ (定格電流が2 kAの電磁石) から10 mΩ (定格電流が1 kAの電磁石) である。

これらの負荷を励磁する超伝導主四極電磁石電源プロトタイプで目標とした主要な性能仕様は次の通りである。

- 定格出力 : 2 kA, 10 V
- 電流設定分解能 : 0.1 ppm 以下
- 電流安定度 : 2 ppm/8 時間 以下 (初期変動後)
- 温度安定度 : 0.01 ppm/K 以下
- 電流リップル :
 - 1 ppm (rms) 以下 (10 kHz 以下の成分)
 - 1 ppm (0-ピーク) 以下 (10 kHz 以上の成分)
- 超伝導電磁石保護回路 :
 - 超伝導電磁石がクエンチした際にこれを保護するため、クエンチ検出器のトリガーを受けて、IGBT 遮断機で主回路を遮断し、超伝導電磁石の貯蔵エネルギーを保護抵抗で吸収する保護回路を備える。トリガー入力から遮断動作開始までの遅れを50 ms 以下、遮断時に発生する電圧を、P-N 間が200 V 以下、P-E 間およびN-E 間が100 V 以下とする。

3. 電源方式

電源は、3相420 V受電 - ダイオード整流 - 電圧型スイッチング式片極性電源とした。目標性能仕様を満たすため、下記の接地方式と制御方式に注意して電源の設計を行った。

[#]toshiyuki.oki@kek.jp

3.1 主回路接地方式

近年リップルやノイズの研究が進み、電源の対称性が重要であると指摘されている。そこで本電源では、出力端子の P 側と N 側が、それぞれ接地に対して電気回路的に対称になるように主回路を設計し、その電気回路的中点を主回路用接地端子(E)とした。コモンモード用フィルタコンデンサを P-E、N-E 間に、ノーマルモード用フィルタコンデンサを P-N 間に取り付けた。さらに、スイッチング用高周波トランスの 1 次 2 次巻線間にシールドを設け、主回路用接地端子に接続した。

3.2 電流制御方式

電流制御に使用する検出器として、P 側および N 側に各 1 台ずつ DCCT (PM Special Measuring Systems 社製の TOPACC) を取り付けた。それらの出力を演算してノーマルモードとコモンモードを区別して電流検出できるようにし、ノーマルモード電流の検出値を用いてアナログ制御を行った。アナログ制御には 20 ビットデジタルアナログコンバータ (Analog Devices 社製 AD5791) を 2 個組み合わせ、24 ビットの電流設定分解能が得られるようにした。

これらアナログ回路に用いる構成要素には、温度係数が十分小さいものを選定し、かつ、恒温槽で $\pm 0.5^\circ\text{C}$ の温度制御を行った。しかし、アナログ制御だけでは時間的にゆっくりしたドリフトは避けられない可能性があった。そこで、N 側 DCCT の出力値をデジタルマルチメータ (Keithley 社製 2002) に入力し、出力されるデジタル値を用いて DAC のデジタル指令値を補正する、デジタル帰還制御も行うこととした。



Figure 1: Prototype power supply.

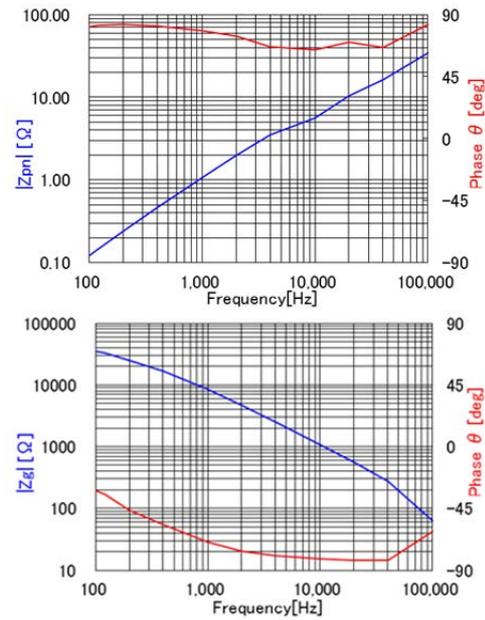


Figure 2: Measured impedance of a dummy load for normal mode (upper) and common mode (lower).

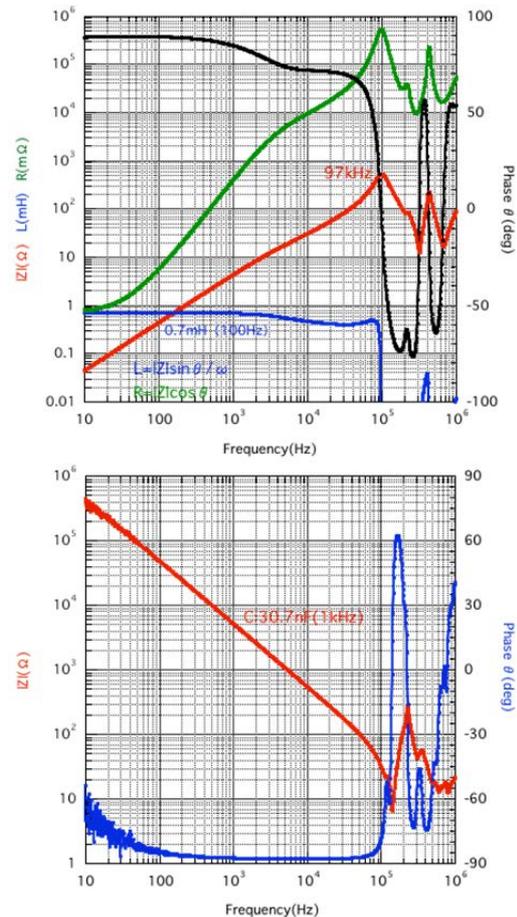


Figure 3: Measured impedance of a QC1LP for normal mode (upper) and common mode (lower).

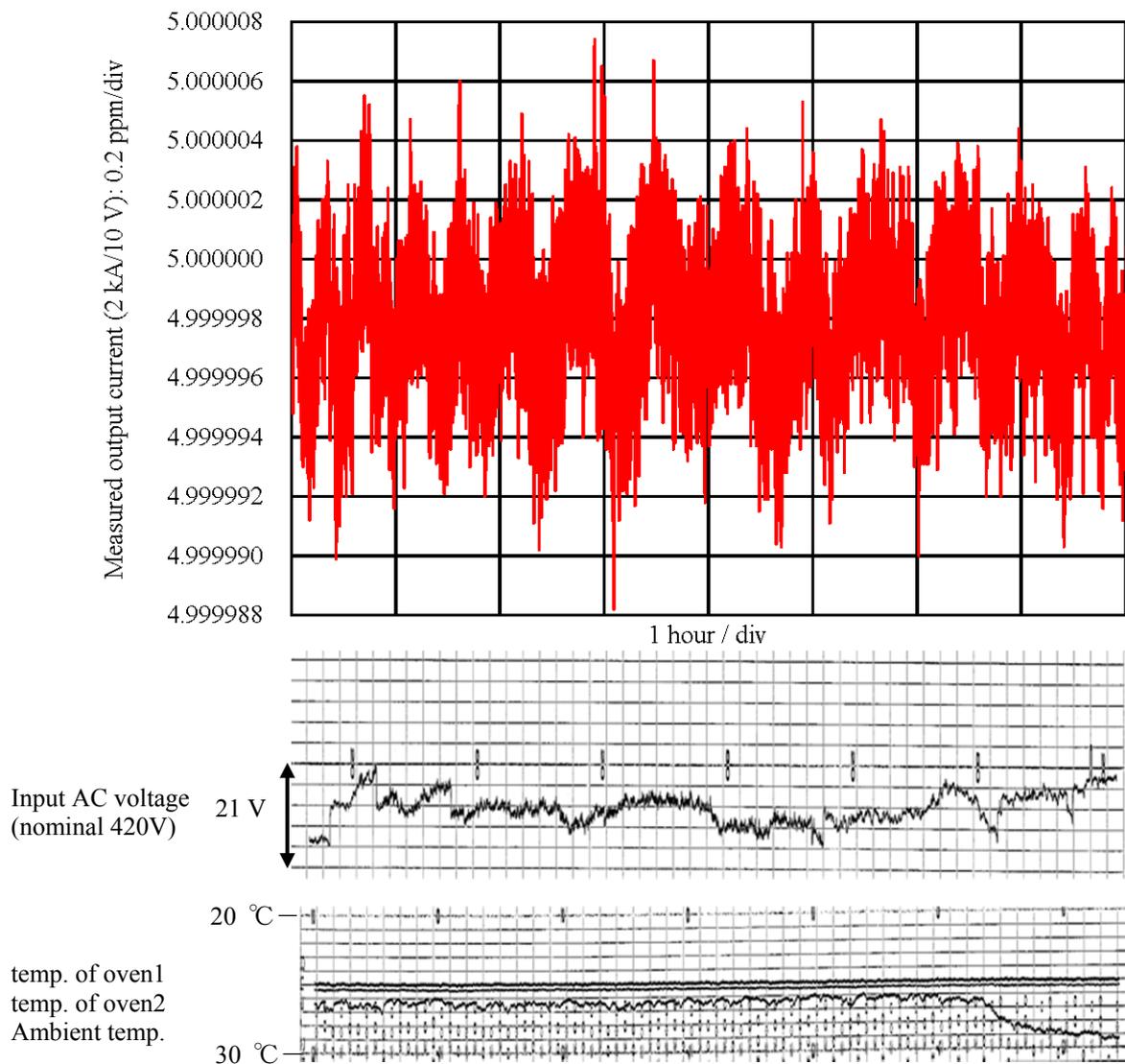


Figure 4: Test result of a current stability (upper). The output current is measured by DCCT during 8 hours. Input AC voltage and ambient temperature is also measured.

4. 性能試験

Figure 1 に工場試験中の電源プロトタイプを示す。右手に恒温槽があり、中には DCCT の制御部とデジタルマルチメーターが収まっている。

試験に使用した模擬負荷のインピーダンスを Figure 2 に示す。ノーマルモード (P-N 間) とコモンモード (P-N 間を短絡したものと接地との間) を HP 4274A LCR メーターで測定した。抵抗値は通電中の出力電圧を出力電流で割って計算した。得られたインダクタンス、抵抗値、接地容量は、それぞれ 0.175 mH (100 Hz での値)、11.7 mΩ、14.8 nF (10 kHz での値) である。

一方、実負荷の測定例として、Figure 3 に QC1LP の測定結果を示す。測定は超伝導電磁石を収めるクライオスタットの外に出た電流リードにインピーダンスアナライザ (NF 社製 FRA5097) あるいは直流抵抗計 (HIOKI 社製 RM3548) を接続して行ったの

で、電力ケーブルのインピーダンスは含まない。得られたインダクタンスと抵抗値、接地容量は、それぞれ 0.7 mH (100 Hz での値)、0.135 mΩ、30.7 nF (1 kHz での値) である。模擬負荷は実負荷と様子が大きく異なり、例えばインピーダンスの絶対値が数倍小さいことがわかるが、設備の都合でこれを模擬負荷とした。模擬負荷の抵抗値が大きく、電源の定格電圧が 10 V なので、出力電流は 1 kA 以下で試験した。

4.1 電流安定度試験

通電開始後、恒温槽の温度は 10 分ほどで定常状態となり、出力電流の初期変動もその程度で収まる。その後、8 時間にわたって 1 kA 出力した時の出力電流を DCCT (変換係数は、2 kA 測定時 10 V 出力) で測定した。結果を Figure 4 に示す。

安定度は 1.9 ppm/8 時間となり、期待通りの結果を得た。なお、数十分程度の周期で変動がみられる

が、受電電圧と電源周囲の温度を合わせて測定したものの相関はなく、原因は分かっていない。

4.2 電流リップル試験

出力端子間電圧をFFTアナライザ（小野測器 CF-7200）で測定し、ノーマルモード電圧リップルを得て、それを模擬負荷のインピーダンス、あるいは、QC1LPのインピーダンスで割り、ノーマルモード電流リップルを計算した。結果をTable 1に示す。QC1LPのインピーダンスで割った値では、10 kHz以下の成分について自乗和の平方根を取ると、1.27 ppm (rms)となった。目標とした仕様値よりも若干大きいものの、許容できる小さな値となった。また、スイッチング周波数(19 kHz)の成分も十分小さい。

さらにスイッチング周波数の高調波成分については、オシロスコープ（LeCroy社製44MXi）を用いてノーマルモードとコモンモードのリップルを測定した。すなわち、P-E間電圧、N-E間電圧をそれぞれ測定し、それらの差あるいは和を取ってノーマルモードおよびコモンモード電圧リップルを測定し、得られた結果をノーマルモードあるいはコモンモードインピーダンスで割って電流リップルを求めた。結果として、いずれの成分も0.1 ppm (0ピーク)以下となっており、目標とした仕様を満たした。

Table 1: Test Results of Normal Mode Current Ripple

Frequency (Hz)	Voltage ripple (dBVrms)	Current ripple for dummy load (ppm(rms))	Current ripple for QC1LP (ppm(rms))
60	-68.22	2.77	0.75
180	-60.07	2.36	0.55
300	-64.18	0.88	0.24
420	-61.91	0.8	0.22
540	-66.85	0.38	0.09
660	-61.08	0.63	0.16
780	-54.83	1.07	0.28
900	-63.66	0.35	0.08
1140	-50.54	1.35	0.3
1500	-45.28	1.82	0.45
1860	-43.91	1.77	0.4
2100	-51.14	0.63	0.15
2220	-51.04	0.64	0.14
2340	-57.03	0.31	0.07
2460	-54.18	0.41	0.09
2580	-59.08	0.22	0.05
2700	-58.04	0.24	0.05
19125	-40.8	0.46	0.09
38125	-38.55	0.39	0.06

4.3 クエンチ遮断試験

最後に、クエンチ遮断試験の結果をFigure 5に示す。出力電流と、出力電圧をモニターしながら、クエンチ検出器のトリガー信号でオシロスコープにトリガーをかけた。トリガーを受けて、IGBT遮断機と保護抵抗（抵抗値55 mΩ : 1 kAの電流を遮断した直後の発生電圧が55 Vであることから、保護抵抗値は55 mΩとわかる）からなる保護回路によって出力電流が遮断され、負荷のインダクタンスと負荷抵抗および保護抵抗の比で定まる時定数0.175 mH / (11.7 mΩ + 55 mΩ) = 2.62 ms程度で出力電流が減衰している様子がわかる。なおトリガーから遮断動作開始までの遅れは5 μsであり、十分高速な応答であった。

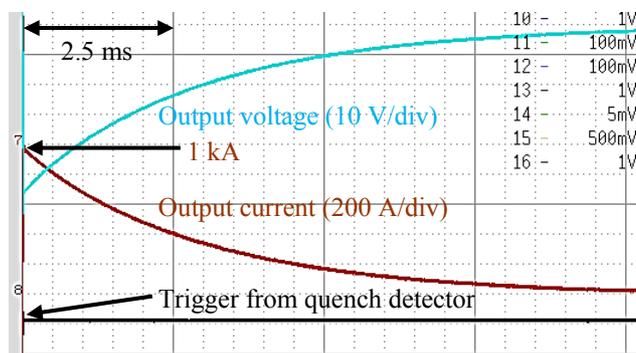


Figure 5: Quench protection test result.

5. まとめ

SuperKEKB衝突点用超伝導電磁石電源のプロトタイプを製作し、期待される結果を得た。この結果を踏まえて2015年度に量産機の製作を行う予定である。

参考文献

- [1] T. Abe, *et al.*, "Achievements of KEKB," Prog. Theor. Exp. Phys. (2013).
- [2] T. Abe, *et al.*, "Commissioning of KEKB," Prog. Theor. Exp. Phys. (2013).
- [3] T. Abe, *et al.*, "Accelerator design at SuperKEKB," Prog. Theor. Exp. Phys. (2013).
- [4] Belle II Technical Design Report, KEK Report 2010-1 (2010).
- [5] T. Oki, *et al.*, "Development Status of magnet power supplies for the SuperKEKB," in: Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Japan, p. 474, (2012).
URL http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/WEPS/WEPS043.pdf
- [6] N. Ohuchi, *et al.*, "Design of the superconducting magnet system for the SuperKEKB interaction region," in: Proceedings of NA-PAC, Pasadena, California, p. 759, (2013).
URL <http://jacow.org/pac2013/papers/weoda1.pdf>