DEVELOPMENT OF MAGNET POWER SUPPLY FOR J-PARC 50-GEV SYNCHROTRON

F.Saito[A)], E.Ikawa[B)] , T.Yoshino[B)] ,Y.Mori[C)], M.Muto[C)]
[A)] Toshiba Corporation,Industrial and Power Systems & Services
8 ,Shinsugita-cho,Isogo-ku, Yokohama, 235-8523,Japan
[B)] Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial Systems Corporation (TMEIC),
1 ,Toshiba-cho,Fuchu-shi, Tokyo, 183-8511,Japan
[C)] High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
1-1,Oho,Tsukuba-shi, Ibaraki,305-0801,Japan

Abstract

A new magnet power supply system for J-PARC 50GeV Synchrotron is proposed as solutions both in the power capacity and in the precision at the same time. The developed 10MW class magnet power supply consists of the advanced self-commutated current-source type converter (ACSC) using the new device IEGT rated at 4500V-2100A and the “hybrid filter” including the variable impedance filter with the equivalent 16kHz switching.

With 1/16 scale-model system using a prototype bending magnet , the experimental results showed the current ripple less than 1×10^{-6} and the tracking error less than $\pm0.5\times10^{-4}$.

５０ＧｅＶシンクロトロン用電磁石電源の開発

１．まえがき

現在、高エネルギー加速器研究機構（ＫＥＫ）と日本原子力研究所（ＪＡＥＲＩ）の共同による大強度陽子加速器プロジェクト（以降Ｊ－ＰＡＲＣと略す）が進められている。本プロジェクトにおける５０ＧｅＶ陽子シンクロトロンの主リングは、97台の偏向電磁石、216台の四極電磁石、72台の六極電磁石より構成され、総数20台の電磁石電源が用いられる。特に、偏向電磁石用途では10MW級の大容量電源を必要とし、かつ、最大3015Aの大電流で高精度のパターン励磁性能が要求される。

今回開発した電磁石電源は、これまで提案してきたスナバ回生方式による電流形自励式コンバータ[1]とハイブリッドフィルタ[2]を組み合わせた構成 を基に、近年開発された高耐圧･大電流の自己消弧型素子であるＩＥＧＴ(Injection Enhanced Gate Transistor)を適用して装置の大容量化かつ高性能化を図ったものである。

本論文では、開発した電源の構成、および、本電源を用いた偏向電磁石実機システムの1/16モデルで検証試験をおこなったのでその結果を報告する。

２．電磁石電源の基本構成

2.1 基本諸元

偏向電磁石のシステム全体構成を図１に示す。電磁石97台（内1台はモニタ用）は、6台の電磁石電源でパターン励磁される。電磁石電源1台当りの基本諸元、及び、基本構成を各々表１と図２に示す。

電源は、コンバータとフィルタによる従来サイリスタ電源と同様な構成であるが、各々に自己ターンオフ素子を適用することで高性能化している。

表１：電源1台当りの基本諸元

最大直流出力	7MW/12MW(増強時)
最大直流電流	3015A
最大直流電圧	4.5kV/5.5kV(増強時)
電源構成	電流形ｺﾝﾊﾞｰﾀ＋ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞﾌｨﾙﾀ
1)ｺﾝﾊﾞｰﾀ構成	(1S-2P-6A)×2ﾌﾞﾘｯｼﾞ直列 IEGT 4500V-2100A
2)ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ ﾌｨﾙﾀ構成	2S×8P IGBT 3300V-400A (2in1)

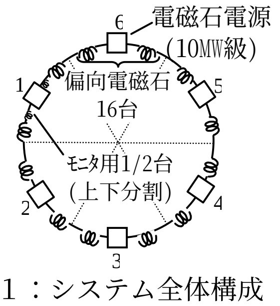


図１：システム全体構成

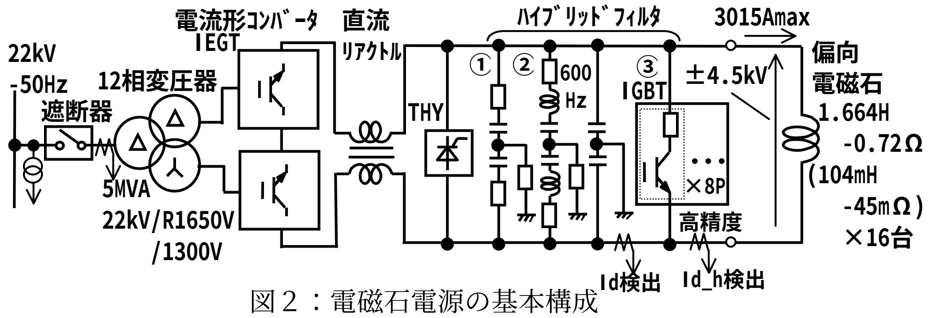


図２：電磁石電源の基本構成

2.2 電流形自励式コンバータの構成

図３に示すＩＥＧＴは、高di/dt耐量をもつ電圧駆動型の素子であり、アノードリアクトルの省略やドライブ回路の小型化が図れる。さらに、今回適用する電流形自励式コンバータは、一方向通電であるためＩＥＧＴチップを全面に搭載したタイプを適用した。その素子定格は、4500V-2100Aである。

図４に示すように、電流形自励式コンバータの１ブリッジは、１つのアームがＩＥＧＴとダイオードＤでスナバコンデンサCsを挟んで組んだ構成となる。従来の交流側にコンデンサを持つ電流形コンバータの方式と比較して、交流側の共振現象が回避可能であることと、素子の電流遮断に伴うエネルギーを回生可能である（損失が少ない）メリットをもつ。

以上から、電磁石電源要求に見合う大容量電源を２ブリッジで簡素に構成でき、コンパクト化(W3000×D2200×H2800/1ﾌﾞﾘｯｼﾞ)が図れた。

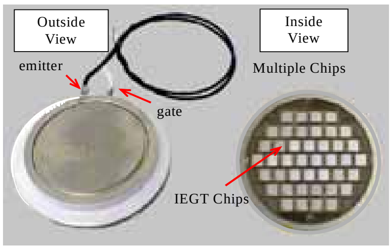


図３：ＩＥＧＴ素子の概観（外形φ125）

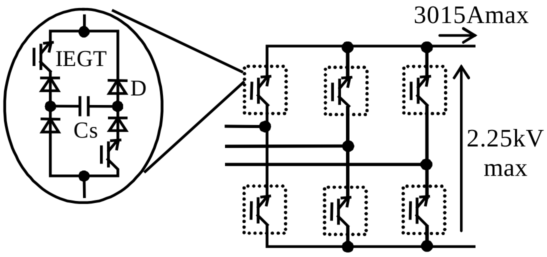


図４：１ブリッジ構成

2.3 ハイブリッドフィルタの構成

ハイブリッドフィルタは、図２で示したように、①ローパス部、②同調部、③可変インピーダンス部の３種類のフィルタを組合わせて構成される。

可変インピーダンス部は、抵抗とスイッチング素子の組合せで８多重化された構成となる。各々が45°の位相差をもち、2kHzでスイッチングするため、等価16kHzで動作する。補償電流が主電流の数%以下でよく、スイッチング素子は、高耐圧かつ定格電流が最小のＩＧＢＴ 3300V-400Aを選択して２直列で使用している。

本装置のフィルタ特性を図５に示す。200Hz程度を境界としてローパス部と可変インピーダンス部とで減衰効果領域を分担している。可変インピーダンス部は、制御ゲインを変更することで低周波領域の特性変更が可能である。また、同調部は、電源構成による12相成分(600Hz)に合わせて減衰帯域を選択している。

以上から、運転条件に合わせて常時フィルタ特性を可変できるので、高精度化が図れた。

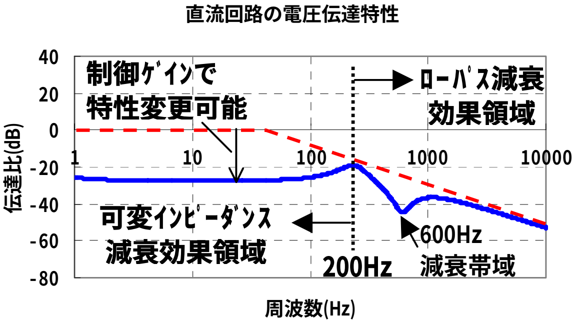


図５：フィルタ特性

３．制御装置の基本構成

制御装置の基本構成を図６に示す。汎用ＤＳＰ(Digital Signal Processor)を使用した全ディジタル制御とした。ただし、電流指令値と電磁石電流を高精度で検出して比較する最小限の部分はアナログ回路としている。アナログ回路は、ペルチェ素子を用いた小型恒温ユニットに収納することで、高精度・高安定度を確保している。

制御方式は、電流制御をメインに電流指令と電磁石定数から演算した電圧指令をフィードフォワードや可変ゲインとして適用して高精度性能を得ている。

以上により制御装置は、次のメリットをもつ。

- 安定度向上　（理論的に温度ﾄﾞﾘﾌﾄ無し）
- コンパクト化（主制御がDSP基板1枚に集約）
- 汎用性向上　（定数変更が容易）
  同一装置(ﾊｰﾄﾞ)で複数の負荷条件に対応可

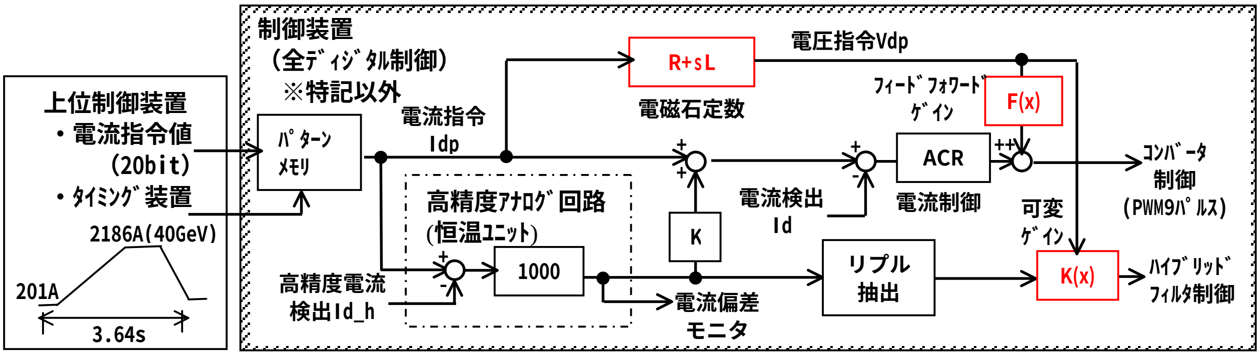


図６：制御装置の基本構成

４．電磁石組合わせ試験

4.1 試験条件

開発した電磁石電源は、５０ＧｅＶ陽子シンクロトロン実機プロトタイプの偏向電磁石1台と組合わせてパターン運転試験をおこなった。試験条件を表２に示す。最大電圧は定格の1/16となるが、最大電流は定格まで通電可能となる。

表２：試験条件

	実機	組合せ試験	
定格最大電圧	5.5kV	340V	1/16
定格最大電流	3015A	3015A	1
負荷定数	1.664H	104mH	1/16
交流入力電圧	22kV	3.3kV	1/6.7

試験風景を図７に示す。電磁石電源と変圧器は実機を使用した。電源は、左端のコンバータ盤から制御盤まで総長約13.2mの列盤となる。Ｊ－ＰＡＲＣでは本列盤6台の構成で電磁石97台を励磁する。

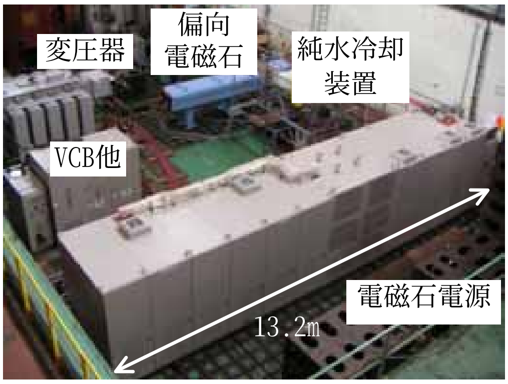


図７：電磁石組合わせ試験風景

4.2 電流リプル評価

電流リプルは、直流電流一定運転ができる最大値40GeVフラットトップ（2186A）で測定した。評価は、電磁石電源の直流出力端電圧のＦＦＴ結果を試験条件から実機条件に等価換算し、最大電流3015Aで正規化した。

電圧リプルのＦＦＴ結果を図８に示す。ＦＦＴ結果の周波数特性は、100Hz前後での平坦な減衰や600Hz同調による減衰の特徴が図５のフィルタ特性に合致した。また、表３に示す電流リプル評価は、各周波数で10^{-6}以下となった。

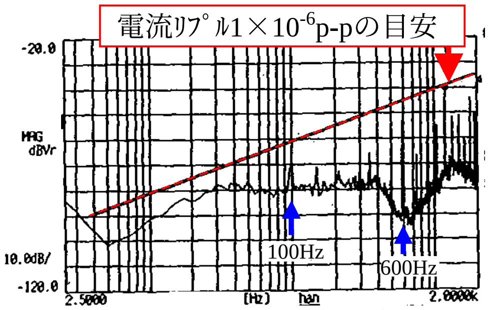


図８：電圧リプルのＦＦＴ結果

表３： 電流リプル評価（40GeVﾌﾗｯﾄﾄｯﾌﾟ）

F(Hz)	電圧ﾘﾌﾟﾙ (dBVr)	電流ﾘﾌﾟﾙ 計算値(p-p) * 等価換算
50	-76.65	0.32E-6
100	-71.09	0.31E-6
300	-73.64	0.08E-6
600	-53.10	0.41E-6
1200	-40.14	0.91E-6
1800	-43.86	0.40E-6

ﾌﾟﾛｰﾌﾞ500:1，正規化3015A

4.3 追従性評価

40GeV運転波形と追従波形を図９、図１０に示す。仕様のベース～トップ範囲内で、追従性は±0.5×10^{-4}以下となった。また、50GeV運転波形を図１１に示す。電磁石の飽和を模擬した指令値に電流値が±0.8×10^{-4}以下で追従する結果が得られた。

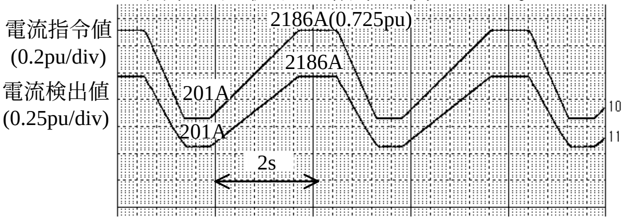
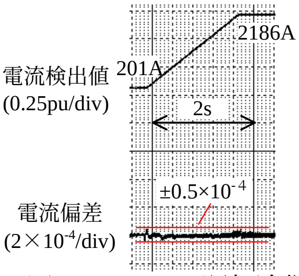


図９：40GeVパターン運転



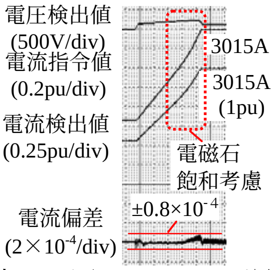


図１０：40GeV運転追従性　　図１１：50GeV運転

５．あとがき

Ｊ－ＰＡＲＣ　５０ＧｅＶシンクロトロン向けとして、大容量かつ高精度の電磁石電源を開発した。電源は、高耐圧・大電流の素子ＩＥＧＴを適用した「電流形自励式コンバータ」と可変インピーダンス制御による「ハイブリッドフィルタ」から構成された10MW級の装置となる。偏向電磁石実機システムの1/16モデルで試験をおこなった結果、電流リプル10^{-6}p-p、追従性±0.5×10^{-4}を達成する見込みを得た。

参考文献

[1] E.Ikawa, et al., “Development on Advanced Current-source-type Self-commutated Converter for Accelerator Electromagnets”, the 13th S.A.S.T, Suita, Osaka, Japan, Oct. 2001

[2] E.Ikawa, et al, “Development on Hybrid Filter for High-Precision Power Source to Accelerator Electromagnets”, the 13th S.A.S.T, Suita, Osaka, Oct.2001