

Voltage and Current control of IGBT Converter for Magnet Power Supply

Tadashi Kubo, Satoru Matsumoto, Tsuyoshi Sueno, Susumu Igarashi,
Masayuki Kumada¹, Hikaru Sato
KEK, ¹ NIRS

電磁石電源用 IGBT コンバータの電圧、電流制御

Abstract

The magnet power supplies with a new dc voltage control method would be discussed considering the configuration and operation mode of three phase IGBT rectifier elements. The high stability and ripple content of load magnet current were realized. The elegant plan for the power supply with a new configuration will be reported in detail.

1. はじめに

KEKB のような大型円形加速器では 1 台だけではなく複数の電磁石励磁用電源（以降電源と言う）を使用する。荷電粒子をビーム軌道上に確保しておき、また衝突点でのルミノシティを稼ぐためこれらの電源に対して高い電流安定度が要求される。またビームオプティクスを変更するとき、すべての電流変化を伴う電源の変化時のトラッキングを維持しなければならないという条件も加わる。さらに、シンクロトロン電磁石電源以外にも、2 次ビーム・トランスポート系エネルギーセービング（ビームを通す時だけ電源の電流を上げる等）のための電源の効率的な運転方式等が将来要求されるであろう。

サイリスタ変換器に換わり IGBT による PWM 変換器が 1990 年代中頃以降中電力以上の電源（およそ 10 KW）で使用されるようになった。IGBT を使用した電源には 2 つのタイプがある。

1 つはダイオードブリッジで整流した直流電圧を IGBT で PWM 制御し定電圧または電流出力制御を行う dc-dc 変換器である。このタイプのものは、KEK の KEBK 加速器の 360 台以上の LER (3.5 GeV e⁺リング) と HER (8 GeV e⁻リング) の中電力電源に採用された。この方式は機器の整流素子数が多くなり複雑になることから電源の形状が若干大きくなり機器の MTBF も下がるという問題点がある。また部品が高価となり大電力電源には不適である。

もう一つのタイプは上記ダイオードブリッジの素子を IGBT に換える電流形電力(ac-dc)変換器である。この方式は IGBT ブリッジの出力電流を直接交流電流により制御方式が採用され、負荷にはフィルターを通してそのまま接続する事が出来る、明らかに電源の素子数が減りコンパクトになる事が分かる。

また、IGBT 変換器はサイリスタ変換器と違って、出力電圧を絞り込んでも力率および効率が悪くならないように無効電力の抑制ができる。したがって、受電系統への負担を減らす効果があり、高調波抑制の点からも IGBT の特徴が生かされるようになってきている。

電源をパルス運転するとき、目標電流パターンへ実電流を如何に近付けるかが重要である。以前は多数の電源をパルス運転するとき、1 次遅れあるいは無駄時間を測定し、その結果で複数の電源の立ち上げ時間を調整する方法を採ったりしていた。最近では制御クロックも短くなり、目標電流パターンと実電流が 1 次遅れあるいは無駄時間を考慮しなくても一定の性能を発揮できるようになった。制御クロックを数 kHz と高くしても、直流側には強固なアクティブフィルターを設け負荷電流リップルを圧縮することが必要になっている。ここで前記の回路素子数が増え、コスト及び信頼性の点で問題になる。本稿では電流パターンだけではなく電圧パターンを参照制御し、更に学習制御を行う方法を採る事による高精度制御法の開発状況について報告する。

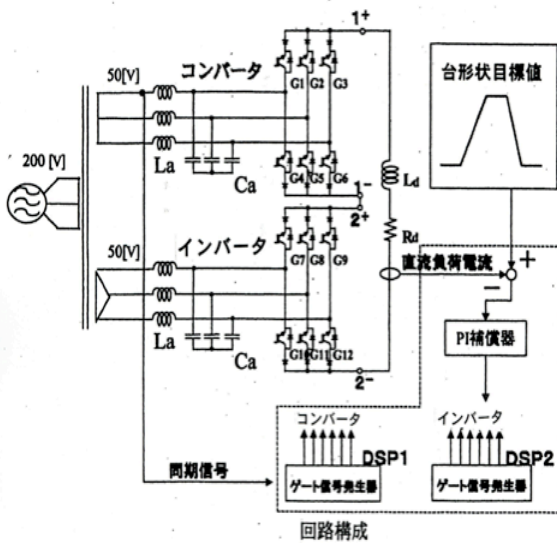
2. 新しい電圧制御方式の採用

ここでは中・大電力電磁石電源に不可欠な電流形 IGBT 三相ブリッジ電力変換器の新しい可変電圧制御方式の開発状況について報告する。

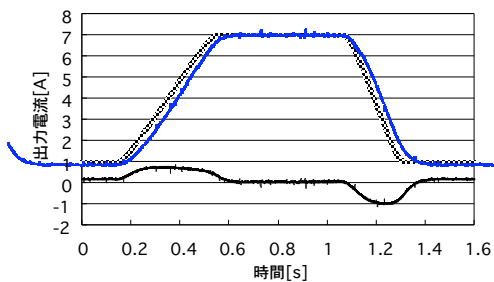
IGBT 変換器の性能向上のための研究を行い、その結果として電圧制御タイミングパルスを使用する、電流形 IGBT 三相ブリッジ回路の出力電圧を可変にする新しい dc 電圧制御方式が提案¹された。この方式の原理検証実験として千葉大と放医研との間で共同研究を行い、A/D:13bit 精度で、フラット・トップ電流 7 A でのパルス運転を実施した。その成果の一部は電源シンポジウムで報告した^{2,3}。

第 1 図に示すように 2 台の電流形変換器を直列接続した回路で PWM スwitching 周波数が 12.6kHz のときに、簡単な PI 制御ループでの電流フィードバックのみで、DC 出力側にパッシブ・フィルタなしの状態、負荷リアクトルに台形電流パターン制御を実施した。第 2 図に示すような台形電流波形が得られた。特にフラット・ベース部は可変電圧制御方式の利点を活かした 2 台の直列変換器を夫々コンバータ・インバータ・モードで運転し、加速および

フラット・トップ部は、コンバータ・コンバータモード運転をするようにした。第3図はフラット・ベースでのコンバータ・インバータ電圧波形を示す。フラット・トップ定常部での電圧、電流リップは夫々第4図、第5図に時間スケールを拡大して示した。電流偏差はスパイク成分を含めても 1×10^{-4} 以下になっている。また電流リップは単一モードで制御率 0.5 での運転をするときの 30%程度に抑制できることが確認できている。



第1図：IGBT変換器の直列回路

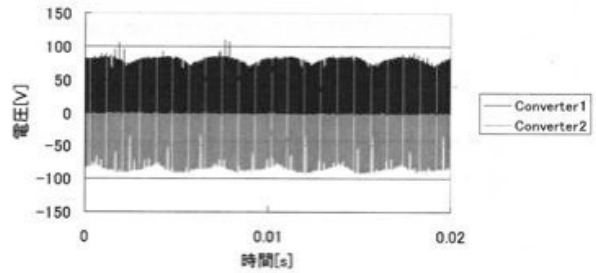


第3図：コンバータ・インバータモード運転

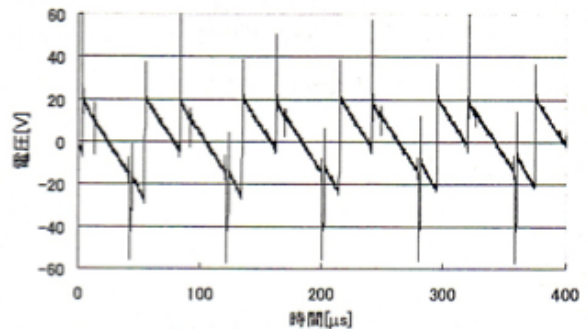
加速及びリセット期間でのスタートと電源は第2図に示されている、加速開始およびエンドを含む加速期間での目標値と実測値の遅れは既に 12GeV PS で開発された制御方式即ち繰り返し制御を含めたフィード・フォワード制御と、MAVR を構成する電圧ループおよび ACR を構成する main 電流ループによるフィード・バック制御方式の併用と A/D に 16bit 以上の分解能を持たせた制御システムを適用することで、完全に克服する事ができる。

第6図はこのようなシステムの一例としてブロック図で示す。

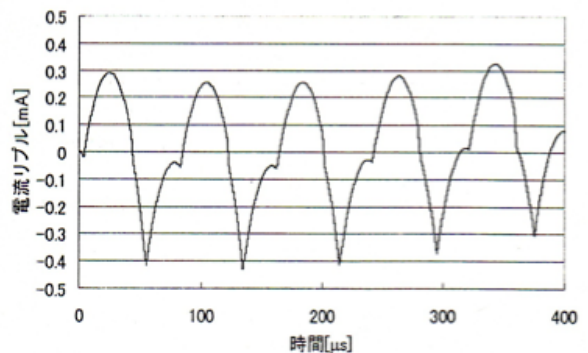
また同時にアクティブ・フィルタを使用することなく、リップル制御もフラット・トップにおいて sub - ppm レベルの制御を目標に、FPGA 制御回路の開発を進めている



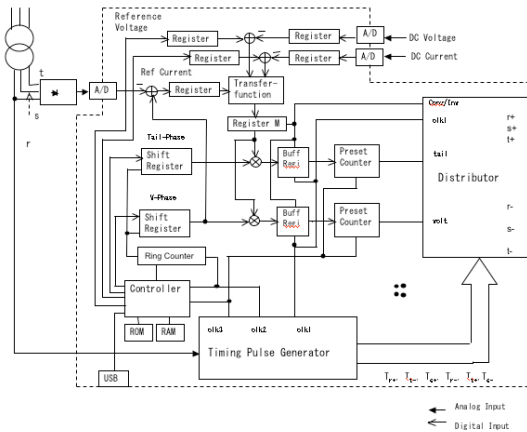
第3図：出力電圧波形



第4図：IGBT変換器2ブリッジのときのフラット・トップでの電圧リップル波形



第5図：IGBT変換器2ブリッジのときの電流リップ・フラット・トップでのプル波形



第6図：制御回路のブロック図

3. まとめ

実機に適用するにはなおいまだに多くの高精度化、信頼性の向上、等の検討事項が残されているが、少なくとも予測をふくめて以下のことが結論できる。

- 1) 電圧制御タイミングパルスを使用する電流型三相ブリッジ変換器の新しい電圧制御アルゴリズムが原理検証テストにより実行可能であることが示された。
- 2) PWM 電圧制御は電磁石電源として重要なリプル電流制御に適した制御方式であること
- 3) 現在の電流型の電流制御法に比してアルゴリズムが簡明で、計算量を大幅に削減できた。
- 4) dc 側の電圧または電流の指令値及びそれらの測定値をもちいる MAVR-, ACR-loop が構成できて、ac 側の電圧、電流を測定することなしに、十分な精度がえられることが、予測できる。
- 5) 交流電圧、電流をはじめ交流側の諸要素は繰り返し制御により implicit 補正できるため実時間測定の必要がない。
- 6) 原理的には従来の交流制御(無効電力及び高調波の抑制)と同等またはそれ以上に制御できる。
- 7) FPGA により処理の並列化をはかりリップルを含め制御性能の高速化と配線工事などの縮小化による信頼性の向上と、経費の圧縮が図れる

謝辞

千葉大学佐藤之彦教授、天沼克之講師、竹澤竜一氏には原理検証テストでご協力いただき、衷心より感謝します。

本研究は KEK 平成 17, 18 年度共同開発研究に採択され研究が推進できたことに深謝します。

参考文献

- 1) Ta. Kubo, S. Matsumoto, M. Kumada, K. Amanuma, Y. Sato: Proc. 1st Ann. Meet-ing of Particle Accel. Soc. Japan, Aug 6-8 2004, Inst. Quantum Sci., Nihon Univ., Funahashi, Japan, pp126-8 (2004)
- 2) 竹澤竜一：重粒子加速器用多重化電流形 PWM コンバータの高精度化への検討、千葉大学 大学院、自然科学研究科修士論文(電子情報システム専) (2005)
- 3) Ta. Kubo, S. Matsumoto, M. Kumada, T. sueno, S. Igarashi, H. Sato:電流型 IGBT コンバータの電圧制御, 第8回加速器電源シンポジウム, Dec 8-9 2005, JAEA, Tokai, Japan