小特集 核融合炉システムに必要な電力変換・エネルギー蓄積技術

3 . ここまで来た大型電力設備の性能と将来展望

3 5 低損失電力変換装置の最新技術動向

佐藤 義久

(大同工業大学 工学部 電気電子工学科)

Performance of Large Electric Power Equipment and Future View Latest Technical Trend of Lower Loss Electric Power Conversion Equipment

SATO Yoshihisa

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Technology, Daido Institute of Technology, Nagoya 457-8530, Japan

(Received 25 March 2004)

This paper introduces the loss reduction technology for power supply. Design and manufacture of the power supply for JT-60 was carried out using the high-power thyristor. Although the power supply for JT-60 was high-voltage and large-current, the power supply for ITER or a future nuclear fusion reactor system will be a low-voltage large-current type. It is very important to study the latest technical trend in low loss electric power conversion equipment using turn-off type power devices.

Keywords:

power electronics, power conversion, power supply, thyristor, GTO, IGBT, IEGT, GCT

3 5.1 はじめに

日本原子力研究所が建設した臨界プラズマ試験装置 JT-60 用の電力変換装置は1980年代の直流送電、周波数変換、電鉄などのパワーエレクトロニクス技術を集大成した高電圧・大電流・大容量の最先端パワーエレクトロニクス装置であった。その後1990年代後半に核融合科学研究所が建設した核融合実験装置 LHD では、プラズマ生成・閉じ込め用磁場コイルが超伝導化され、電源も低電圧・大電流電源となった。国際熱核融合実験炉 ITER あるいはその先の核融合炉システムでは、電力変換装置の低損失化がさらに重要な設計ファクタとなるであろう。将来の核融合炉用電源装置を視野に入れ、大容量電力変換装置の技術動向を低損失化の観点から把握しておくことは極めて重要である。

3 5.2 核融合用電力変換装置

JT-60ボロイダル磁場コイル用の F コイル電源は 92 kA の直流大電流 (10秒 / 10分のパルス運転) を供給するサイリスタ変換装置である。サイリスタ電源のシステム構成は Fig. 1 のとおりであり、大型サイリスタを用いた 3 相ブリッジが基本となっている。このブリッジを 2 直列 × 4 並列接続して高電圧・大電流化を図っている。変換器用変圧器の一次巻線は不平衡分による高調波の系統側への流出を抑制するため Δ 巻線とし、二次巻線 (Δ -) に 2 式のサイリ

author's e-mail: satoy@daido-it.ac.jp

スタブリッジを接続して 12 相整流とし、さらに 2 式の変換器用変圧器の一次巻線を $15^\circ (\pm 7.5^\circ)$ 移相し 24 相整流としている。基本ブリッジの 1 アームは Fig. 1 に示すように、当時世界最大容量であったサイリスタ SF3000GX21 (4,000 V - 3,000 A) を 2 直列 × 7 並列接続構成 (2S-7P-6A) としている。

その後、大容量サイリスタは光点弧方式に発展し、現在、8,000 V - 3,500 A 級の素子が世界最大級である。JT-60 用電源の設計製作から約 20 年後の現在、パワーデバイスは大型化よりも、むしろ逆阻止能力を兼ね備えた IGBT あるいはパワーモジュールなどスイッチング特性の向上、低損失化の方向に進展し、パワーエレクトロニクスは産業用から家電製品までインバータを中心として幅広い応用分野に発展した。このような状況の中で、JT-60 では常伝導コイルであった磁場コイルが LHD では超伝導になり、電源に要求される仕様も高電圧・大電流・パルス運転から低電圧・大電流・連続運転に変化した。今後建設予定の ITER あるいはその先の核融合炉システムでは、さらに低損失電力変換装置が必要不可欠となる。

3 5.3 低損失大型電力変換装置の技術動向

JT-60 の電源装置は電源電圧で電流を切るサイリスタを用いた他励式変換器で構成された。その後、半導体素子の技術進歩により、半導体素子に与える信号で電流を切る自

Fig. 1 System configuration of F-coil power supply. One arm of 3 phase bridge has composition which made 2 serial x 7 parallel connection of thyristor SF3000GX21 (4,000V-3,000A).

己消弧型素子の大容量化，低損失化の進展が著しい．自己消弧型素子を使うと電源電圧位相に関係なく電流を切ることができるため，以下の利点がある．

- 1) 無効電力の発生を抑制できる．
- 2) スwitching周波数をあげることにより，低い次数の高調波の発生を抑制できる．
- 3) スwitching周波数をあげることにより，電源の制御性が向上し多機能・高性能電源が設計・製作できる．

特に1)，2)の特徴は，交流側大容量フィルタを削除できるという利点がある．しかし，流れている電流を切るという特性から，素子およびその周辺回路が複雑になり，他励変換器に比べて損失が多かった．また，容量も50 MVA～80 MVA程度であった．

2000年に入り，80年代～90年代の大容量自己消弧型素子の主流であったGTO (Gate Turn off Thyristor) に代わり，MOS系素子である高耐圧IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)，IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor)，GTOのゲート系を改善し周辺回路の損失低減ができるGCT (Gate Commutated Turn off Thyristor) などが，大容量自己消弧型素子として適用され，それまでの装置と比較して大幅に損失を低減した装置が開発されている．ここでは，それらの新しい自己消弧型素子を応用した装置を紹介する．

(1) IEGTを応用したフリッカ抑制装置 [1]

IEGTは，MOSゲート構造による電圧駆動素子であり，電子注入促進効果を導入することにより，高耐圧化を図りながらGTOと同程度の低オン電圧を実現している．

Fig. 2にIEGTの外観とゲートドライブ基板の写真を示

Fig. 2 IEGT (4,500V - 1, 500A, outside size; $\Phi 162$ mm, thickness; 26 mm) and gate drive module.

Fig. 3 The single phase bridge circuit using IEGT.

Fig. 4 The single phase bridge circuit using GTO.

す．

Fig. 3にIEGTを適用した単相ブリッジ回路を，Fig. 4に従来のGTOを使用した単相ブリッジ回路を示す．IEGTはIGBT素子と同様にターンオン時の di/dt (電流変化率) 耐量，ターンオフ時の dv/dt (電圧変化率) 耐量が高く，GTOで必要であったアノードリアクトル回路，素子ごとの充放電スナバ回路などの周辺回路を削除することができる．そのため外形の小形化，および損失低減を図ることができる．Table 1に外形の比較を，Fig. 5に損失を比較したグラフを示す．外形は容積で約1/3，損失も素子単体の損失は増加するが周辺回路が不要になることで出力容量に対する変換器の損失比率が約1/2となり，21 MVAベースの

Table 1 Outside size comparison of IEGT and GTO.

	IEGT module	GTO module
Capacity	1,750 kVA	1,500 kVA
Volume	0.156 m ³	0.470 m ³
Rate of volume reduction	33%	100%

Fig. 5 Comparison of the main circuit loss of IEGT converter and GTO converter.

Fig. 6 GCT Thyristor (6,000V - 6,000A).

変換器単体損失は 1.5% まで低減された。

(2)GCT を応用した大容量変換装置[2]

GCT は GTO のゲート系を改善し周辺回路を不要とすることで損失低減を図った素子である。Fig. 6 に 6,000 V - 6,000 A の GCT サイリスタとゲートドライブ回路の外観を示す。GCT 外周部にリング状のゲート電極を設け、多層基板を介してゲートドライブ回路と接続されている。その構造によりゲート回路のインダクタンスが低減されターンオフ時のゲート電流を高速に制御でき、遮断時間が GTO の 1/10 程度になり、電流の局所集中がなくなり、スナバ回路が不要となる。同様にオン電流上昇率 (di/dt) 耐量が上がリアノードリアクトルが不要となる。それらの周辺回路の容量低減、削除により装置としての損失低減ができる。Fig. 7 に GTO と GCT で装置を構成した場合の損失構成を示す。GCT 変換器の損失は GTO 変換器の損失と比較して、約 45% に低減されている。GCT を応用した装置の代表的な構成を Fig. 8 に示す。Fig. 8 は米国サンディエゴガス・電力 Talega 変電所に納入されている STATCOM (無効電力補償

Fig. 7 Comparison of the main circuit loss of GTO converter and GCT converter. IEGT can delete anode reactor circuit and snubber circuit.

Fig. 8 System configuration of STATCOM.

装置)であり、12.5 MVA の変換器を 4 台リアクトルで並列接続して 50 MVA を構成し、2 群で 100 MVA としている。

(3)IEGT を応用した加速器用電磁石電源[3]

大型加速器では高精度に電流を制御する数 MVA の電源装置が必要になる。そのような加速器用電源装置に IEGT の適用を検討した例を紹介する。

Fig. 9 は IEGT を適用した加速器用電磁石電源の構成図である。負荷のコイル電流を制御するため 6 相電流形ブリッジとし、各アームには Fig. 9 に示すようにアームキャパシタ CS を設けてある。アームキャパシタ CS は従来の電流形変換器に必要であった交流フィルタコンデンサをアーム内に設けたものであり、そのエネルギーを回生することにより、損失を低減できる画期的な回路方式である。Fig. 10 に動作説明を示す。オフ時にコンデンサを充電、オン時にコンデンサの電荷を直流側に放電することでエネルギーを直流側に回生する。核融合も負荷は超大容量コイルであり、同様の回路構成で電源の大容量化を図れば低損失大容量の直流電源が構成できる。

Fig. 9 System configuration of the power supply for accelerator magnet. Arm capacitor functions as a substitute of the filter capacitor which was required for the conventional current-source-type converter.

Fig. 10 Operation principle of the advanced current-source-type self-commutated converter. The arm capacitor charged when an arm turns off and discharged to a direct-current side when an arm turns off. The energy of an arm capacitor can be used again.

3.5.4 まとめ

JT-60の電源装置は大容量サイリスタによる他励式変換器で構成された。その後、自己消弧型素子の大容量化、低損失化技術およびエネルギー回生スナバ回路の採用等主回路および周辺回路技術の進展と相まって大容量電力変換装置の損失低減化が図られてきた。これらの低損失電力変換装置の設計・製作技術がITERあるいは将来の核融合炉用電源に適用され、引き続き、我が国がパワーエレクトロニクス技術で世界をリードし続けることを期待する。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、低損失電源に関する最新データをご提供いただいた東芝三菱電機産業システム株式会社(略称 TMEIC ティーマイク)パワーエレクトロニクス部技術主幹 川上紀子氏に心より感謝致します。

参考文献

- [1] 飛田正幸, 大田 悟: 「 IEGT を使用したフリッカ抑制用 SVC について」平成15年度電気学会産業応用部門大会 1-S3-4 (2003.8).
- [2] 森嶋直樹, 玉井伸三: 「北米における GCT を使用した STATCOM について」平成15年度電気学会産業応用部門大会 1-S3-3 (2003.8).
- [3] E. Ikawa and K. Noda, "Development on Advanced Current-source-type Self-commutated Converter for Accelerator Electromagnets", *The 13th symposium on Accelerator Science and Technology* (2001.10).