

JT-60SAにおける長パルス通電に向けた電源・制御システムの改造

Refurbishment of Power Supplies and Control System to Achieve Long-Pulse Operation for JT-60SA

五味川 健治 川島 秀一

■ GOMIKAWA Kenji ■ KAWASHIMA Shuichi

臨界プラズマ試験装置 JT-60の開発成果を基に、超電導コイルを使用するJT-60SA (Super Advanced) では、高温プラズマを閉じ込める磁場を発生させるコイルが一新され、JT-60と比べて長パルスでの通電が行われる。これに対応するため、エネルギーをいったん蓄積して短時間で放出する既設の電動発電機 (MG) の統廃合や、商用電力系統から直接受電する割合の向上、磁場コイル用電源の新規製作と改造などが計画されている。

東芝は、これらの計画の一環として、交流配電システムの組換え及び既設コイル用電源の改造を受注した。これらのうち、MGのエネルギー蓄積量に応じて負荷を再分配する交流配電システムの組換えを既に完了させており、JT-60SAにおける長パルス運転の実現に向けて大きく貢献している。

Based on the results acquired through the development of the JT-60 break-even plasma test facility, the JT-60SA (JT-60 Super Advanced) facility uses superconducting coils to produce magnetic fields that confine the plasma by means of a longer pulse operation compared with the JT-60. In order to achieve this, integration and abolition of the existing motor generators (MGs) that accumulate energy and release it in a short time, improvement of the ratio of power received directly from the commercial electric power system, and development and refurbishment of the magnetic field coil power supplies are required.

As part of this plan, Toshiba has received orders for recombination of the AC power system and refurbishment of the existing magnetic field coil power supplies. We have already completed the recombination of the AC power system, which redistributes loads according to the accumulated energy of the MGs. These efforts are making a significant contribution to the realization of long-pulse operation for the JT-60SA facility.

1 まえがき

JT-60は1985年に建設された臨界プラズマ試験装置で、核融合の臨界条件であるエネルギー増倍率^(注1) $Q=1$ を上回る $Q=1.25$ を達成するなどの成果を上げた後、その役割を終えた。これに続くJT-60SA (Super Advanced) は、わが国とEU (欧州連合) の政府間協定を経て現在建設中の装置で、核融合発電の実現に向けた長パルス運転と制御方法を実証することが計画されている。

JT-60では、高温プラズマを閉じ込めるための高磁場を発生させるコイルに常電導コイルを使用していたため、コイル通電時の消費電力が大きかった。またこれに加え、建設当初のプラズマ電流の維持時間 (フラットトップ時間) が5sであったため、各種電源機器の多くがこれに合わせて大容量かつ短時間の定格機器として製作された。これに対してJT-60SAでは、コイルに超電導コイルを使用して消費電力を抑えるとともに、当面のフラットトップ時間は100sの計画となっている。

JT-60SAでは長パルス通電を行うため、既設の電動発電機 (MG) に回転エネルギーとして蓄積されるエネルギーが不足し

てしまう。そこで機能ごとに分かれていたMGを、その蓄積エネルギーが有効に活用できるように統合及び再分配する。また、商用電力系統から直接受電する割合を増やすため、交流配電システムの改造も計画されている。

更に、高温プラズマを保持する磁場を発生させるコイル用電源は、国際分担により、原則として新設電源の製作はEUが、既設電源の改造はわが国が担当することになっており、それぞれが並行して進められている。

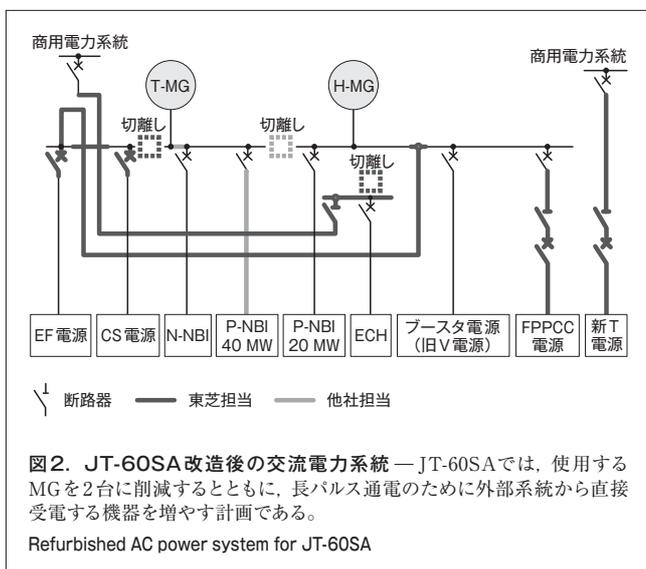
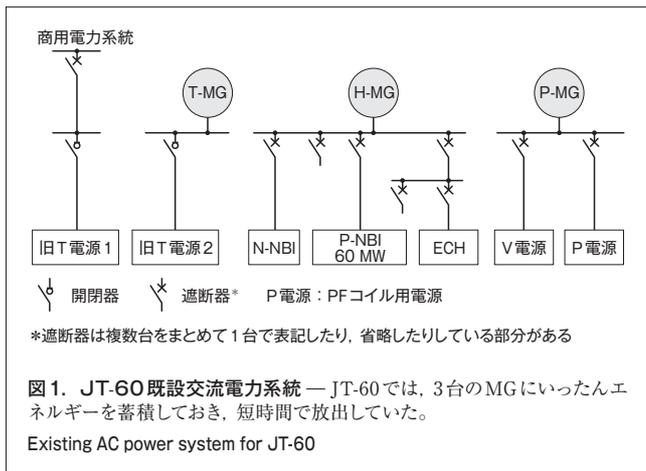
ここでは、これらの改造計画に従って東芝が受注した、交流配電システムの組換えと既設コイル用電源の改造について述べる。

2 交流配電システムの組換え

核融合装置は高温プラズマを閉じ込めておくために、高磁場が必要になる。この高磁場を発生させるために、コイルには大電流を通電する必要がある。

JT-60では、常電導コイルであったため使用電力が数百MWに達していた。これは発電所1個分にも匹敵する電力であり、この電力を商用電力系統から瞬時に受電すると系統に擾乱 (じょうらん) が発生してしまう。このためJT-60では、図1に示すように3種類の機能別MGとして、トロイダル磁場 (TF) コイル用電源MG (以下、T-MGと略記)、ポロイダル磁

(注1) 核融合反応による出力と、そのプラズマ状態を維持するために外部からプラズマに直接供給される入力との比。



場 (PF) コイル用電源MG (以下、P-MGと略記)、及び加熱用MG (以下、H-MGと略記) にいったんエネルギーを蓄積しておき、そこから電力を供給することで、電源系統の動揺を緩和していた。

一方JT-60SAでは、電圧を連続発生できずエネルギー蓄積量ももっとも小さいP-MGの使用をやめ、残る二つのT-MGとH-MGだけを使用して、MGのエネルギー蓄積量に応じて負荷を再分配するという方針が決定された(図2)。

負荷の再分配に対して、当社は、図2の濃い太線部分の変更を担当した。特別高圧閉鎖配電盤50面に及ぶ困難な工事であったが、これを乗り越えて2015年3月に完成し、引渡しを行った。主な改造内容を、次に示す。

- (1) TFコイルが常電導から超電導になり、TFコイル用電源(以下、T電源と略記)の容量が不足するため、これまで給電元がT-MGであったものを商用電力系統から直接受電できるようにする。
- (2) 新設される高速位置制御(FPPC)コイル電源(以下、

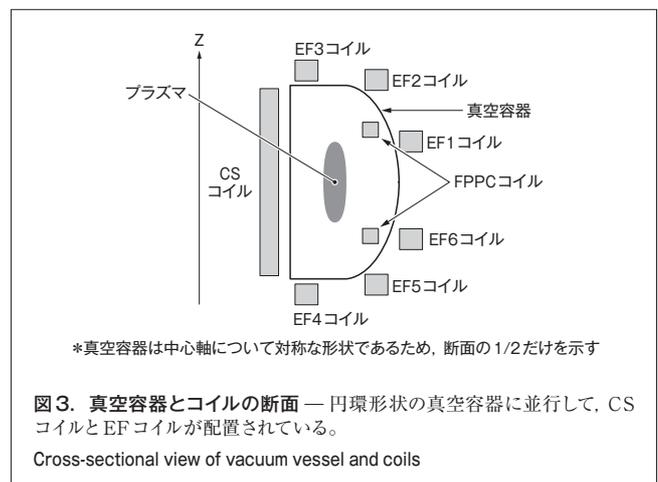
- FPPCC電源と略記)をH-MGから受電できるようにする。
- (3) 既設の垂直磁場(VF)コイル用電源(以下、V電源と略記)をブースタ電源と改称し、給電元がP-MGであったものをH-MGから受電できるようにする。
- (4) プラズマ加熱装置の一つである電子サイクロtron加熱装置(ECH)の給電元がH-MGであったものを、商用電力系統から直接受電できるようにする。
- (5) プラズマ加熱装置の一つである正イオン中性粒子入射装置(P-NBI)の一部及び負イオン中性粒子入射装置(N-NBI)の給電元がH-MGであったものを、T-MGから受電できるようにする。
- (6) 新設の中心ソレノイド(CS)コイル電源(以下、CS電源と略記)と平衡磁場(EF)コイル電源(以下、EF電源と略記)を、H-MGから受電できるようにする。その際、既設の開閉器は遮断器に置き換える。

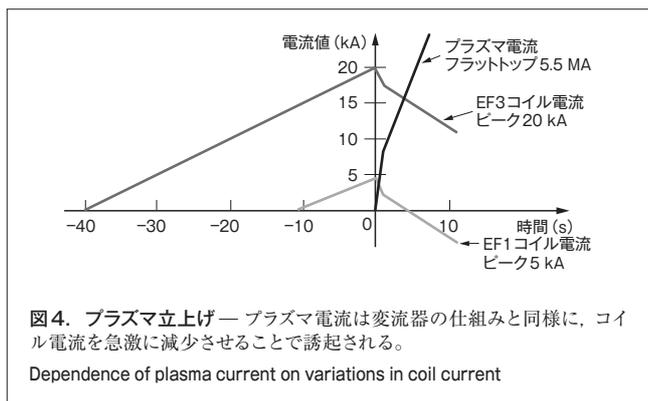
3 既設コイル用電源の活用

核融合装置には様々なタイプがあるが、JT-60SAはトカマク型と呼ばれるタイプの装置である。トカマク型核融合装置は、円環形状の高温プラズマに電流を流して、その電流が作る磁場で高温プラズマを閉じ込める方式である。高温プラズマに最初に電流を流す(プラズマ立上げ)方法としては、円環形状の高温プラズマに並行するコイルにあらかじめ電流を流しておき、その電流を急激に減少させることで高温プラズマに誘導電流を流す方法が採られている。

高温プラズマを収納する円環形状の真空容器と真空容器に並行する主なコイルの位置関係を、図3に示す。主なコイルとしてはCSコイル、EF1～EF6コイル、及びFPPCコイルがあり、各々に電源が接続されている。

プラズマ電流を立ち上げる際のプラズマ電流と代表的なEF1コイルとEF3コイルの二つのコイル電流における時間変化





を、図4に示す。図4において、時間0sにEF1コイルとEF3コイルの電流が急激に減衰することにより、プラズマ電流が誘起される。

EF3コイルの電流減衰は、時間0sに電流を抵抗器へ転流させることによって実現している。ここで、EF3コイルの場合は電流がゼロに向かって減衰するだけなので、電流を抵抗器に流しておくだけでよい。

一方、EF1コイルの場合は、プラズマ立上げ前にあらかじめ流しておく電流が小さく、プラズマ立上げ中にコイル電流が正方向から負方向に反転する。このためEF1コイルの場合は、負方向に反転した後の電流をコイル用電源で増大させる必要がある。

かりにEF1コイルの電流減衰に抵抗器を用いると、コイル電流が負方向に反転した後は、コイル用電源はコイルに電流を流すための電圧と抵抗器に電流を流すための電圧の両方が必要になり、コイル用電源の電圧定格を大きくしなければならない。したがって、EF1コイルに対しては、抵抗器で電流を減衰させるのは適切ではなく、電流を急激に減衰させることができる電源装置を設けることが必要になる。

しかし、新設のコイル用電源にこの機能を持たせる場合には、定格容量が大きくなりコストアップにつながる。そこで、この機能が必要なのはプラズマ立上げ時の短時間だけなので、高電圧出力機能を持った既設V電源のサイリスタ変換器を抵抗器に置き換えて活用することにした。

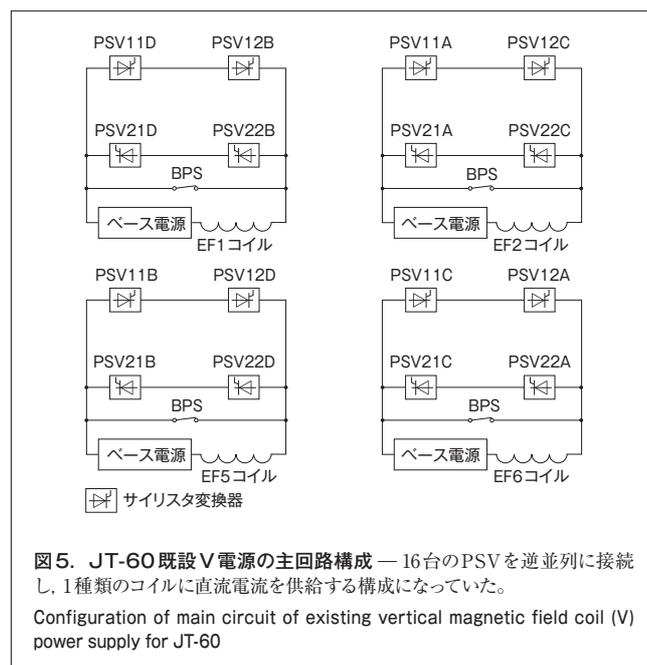
この変更は、EF2コイル、EF5コイル、及びEF6コイルの各コイル用電源についても同様である。

3.1 既設V電源の主回路構成

サイリスタ変換器が使われていた、JT-60の既設V電源の主回路構成を図5に示す。

既設V電源は、VFコイルに電流を流す電源として製作され、三相ブリッジのサイリスタ変換器(PSV)8台を2直列4並列に接続としたものを1群として、更にそれらを逆並列に接続した構成となっていた。

既設V電源は、Vコイルに流す電流とは別に、逆並列接続の群間を循環する電流を流せるようになっており、これによってVコイルに流す電流を正方向から負方向に反転させる場合で



あっても、電流ゼロ点における切換え時間なしで通電できる。

また、サイリスタ変換器の保護時には、並列接続された投入器(MS)が高速に投入され、コイル電流がサイリスタ変換器に流れ続けるのを防ぐ仕組みを搭載していた。

このように、16台のPSVは全体として一つのコイル用電源として機能するように製作されており、PSVを1台ずつ運転する機能は備えていなかった。

3.2 V電源の適用回路構成

JT-60SAでは、既設V電源の16台のPSVを4台ずつに分割してブースト電源と改称し、プラズマ立上げ時に電流の極性が反転する四つのコイル(EF1コイル、EF2コイル、EF5コイル、及びEF6コイル)用の電源の一部として組み込んでいる。

新設コイル用の電源出力電圧定格が低く抑えられているのに対し、PSVは高電圧出力定格であり電流を急激に減衰させることができる。

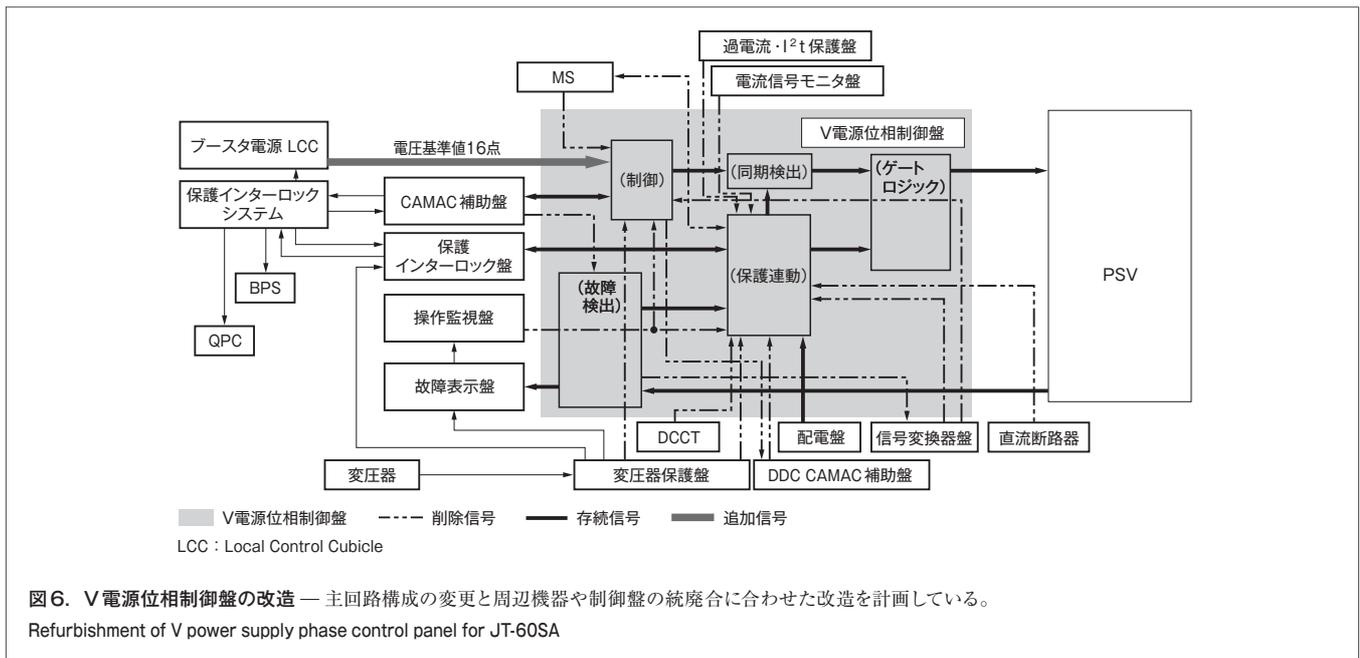
しかし、PSVは短時間の定格機器であるため、その適用にあたっては以下の事項を考慮する必要がある。

- (1) PSVの上流側の遮断器をプラズマ立上げ前後の時間にオン/オフするようなタイムシーケンスとする。
- (2) プラズマ立上げ後の長パルス通電のために、PSV停止後にPSVに並列接続されたバイパススイッチ(BPS)を投入する。

これらにより、短時間の定格機器であるPSVをプラズマ立上げ時に特化させて活用できる。

3.3 V電源の制御・保護回路の改造

既設V電源を四つのコイル用電源に振り分けるにあたり、これまで一つのコイル電源として扱っていた制御・保護機能の大改造が必要になる。複雑に入り組んだ既設システムを活用



することは、細心の注意を要する困難な作業になるが、2016年3月の完成を目指して現在精力的に取り組んでいる。

PSVの制御・保護機能を担う位相制御盤の改造を図6に示す。主な改造内容は、次のとおりである。

- (1) 16台のPSVそれぞれの制御と保護に特化するため、不要なV電源構成盤(信号変換器盤、過電流・ I^2t 保護盤、電流信号モニタ盤、及び直接デジタル制御(DDC)CAMAC(Computer Automated Measurement and Control)補助盤との取合いを削除する。
 - (2) 廃止機器となるMS、及び直流断路器との取合いを削除する。
 - (3) PSVの電圧基準値を、台数分の16点から受信できるようにする。
 - (4) V電源全体の電流計測がなくなり、EFコイル電源の電流計測に関わる機能が上位側に移ることに伴い、直流電流に関わる保護(図6の直流変流器(DCCT)との取合い)を削除する。
 - (5) システム全体の異常保護機能が上位の保護インターロックシステムに集約されることに伴い、変圧器保護盤からの故障信号の受信を削除する。
 - (6) CAMAC補助盤と操作監視盤からの保護依頼信号を削除し、保護インターロック盤からの保護依頼信号に集約する。
 - (7) 異常発生時は、サイリスタ変換器を電圧ゼロで運転する。一方、上位の保護インターロックシステムが異常信号を受けてBPSを投入するとともに、クエンチ保護回路(QPC)を動作させてコイル電流を減衰させる。
- これらの改造により、制御・保護回路の簡素化を図り、PSV

を個別に制御できる見込みである。

4 あとがき

当社は、JT-60のPFコイル用電源(P電源)を構成する多くの特殊機器を開発し、直流大電流技術をリードしてきた。また、P-NBI電源及びN-NBI電源の製作を通じて培った直流高電圧技術を加速器用電源や超電導コイルエネルギー蓄積装置(SMES)に発展させてきた。これらの技術に加え、今回蓄積した長パルス通電に向けた改造・既設活用技術を生かして、今後も核融合装置用電源の発展に貢献していく。

文献

- (1) 島田勝弘 他. "JT-60SA電源システムの設計検討". 第23回プラズマ・核融合学会年会予稿集. 筑波, 2006-11, プラズマ・核融合学会. 2006, 01aB30P.
- (2) 青柳哲雄 他. JT-60Uコイル電源サイリスタ制御のVME化改造. 電気学会論文誌D(産業応用部門誌), 115, 1, 1995, p.13-20.
- (3) 岡野文範 他. "JT-60U負イオンNBI装置開発の現状". 第21回プラズマ・核融合学会年会予稿集. 静岡, 2004-11, プラズマ・核融合学会. 2004, 25aB04.



五味川 健治 GOMIKAWA Kenji

電力システム社 原子力事業部 原子力先端システム設計部主務。
核融合システムのエンジニアリング業務に従事。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



川島 秀一 KAWASHIMA Shuichi

電力システム社 原子力事業部 原子力先端システム設計部。
核融合システムのエンジニアリング業務に従事。
Nuclear Energy Systems & Services Div.