特 集

核融合研究開発の最近の状況

6 核融合工学研究開発の現状

6.4 直流大電流電源

—超伝導トカマク装置の電源システム—

畠山昭一[†], 松川 誠, 逆井 章

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

核融合エネルギー研究開発部門

那珂核融合研究所トカマクシステム技術開発部

311-0193 茨城県那珂市向山801-1

[†]hatakeyama.shoichi@qst.go.jp

大型トカマク装置の磁場コイル電源には、数十kA/数kVの直流電源が必要である。高電圧はプラズマ着火時のみ必要で、その後は比較的低電圧で十分のため、合理的設計が求められる。また超伝導コイルを用いる最近の装置では、コイルの損傷を回避するため、数GJから数十GJの磁気エネルギーを急速に開放する保護回路が必要である。本稿では、現在建設中のJT-60SAを例に、直流電源とコイル保護回路の特徴を述べる。

Key Words: JT-60SA, superconducting magnet, power supply, quench protection, flywheel motor-generator

1. はじめに

トカマク型核融合装置では、高温の炉心プラズマを閉じ込めるために強磁場を用いる。定常運転を想定すると磁場コイルに直流大電流が必要であり、励磁電源にはサイリスタ整流器が広く使用されている。また、直流電流はコイルに磁気エネルギーを蓄積するため、磁場コイルの起動・停止には大きな電力変動を伴う。これを平滑化して電力系統への悪影響を防ぐため、蓄電設備としてフライホイール付電動発電機を利用することが多い。導体の発熱による電力消費も問題となるため、超伝導コイルの使用が必須になる。

那珂核融合研究所では、高性能プラズマの長時間運転の実証を目指して、臨界プラズマ試験装置JT-60を改修して超伝導化を進めている。超伝導化による新たな課題として、導体の一部に抵抗が発生し、局所的な発熱で焼き切れるク

エンチ現象が挙げられる。コイルを保護するために、電流を急速に立ち下げ、磁気エネルギーを外部へ放出するクエンチ保護回路が必要になる。JT-60SAを例に、超伝導大型トカマク装置のコイル電源の構成と特徴を解説する。

2. JT-60SAの超伝導コイル用電源

2.1 各コイルの通電の特徴

JT-60SAはトカマク型と呼ばれる核融合装置であり、環状の高温プラズマに電流を流して、これの作る電磁力でプラズマを閉じ込める。トカマク装置の磁場コイルは、トロイダル磁場(TF)コイルとポロイダル磁場(PF)コイルの大きく2つに分類できる。これらのコイルの配置と通電パターンの模式図を図1に示す。

JT-60SAのTFコイルは、プラズマ中心で2.25Tの強力な環状磁場を生成し、1GJもの磁気エネルギーを蓄積する。定格電流は25.7kAである。実験中は終日ほとんど定常運転のた

図1 JT-60SAのコイル配置と通電パターン。(a)装置断面図の模式図, (b)TFコイル, CS1, EF1コイル及びプラズマ電流の時間変化 (Color online)

図2 JT-60SAの受電系統とコイル電源 (Color online)

め、励磁と減磁は一度ずつ約30分かけて行う。

PFコイルは、プラズマ着火と5.5 MAのプラズマ電流を誘導する中心ソレノイド (CS)、及び電磁力でプラズマの位置と断面形状を制御する平衡磁場 (EF) コイルで構成される。定格電流はすべて ± 20 kAである。これらのコイル

は、プラズマ放電のたびに230秒通電/30分周期で起動・停止を繰り返すため、電力変動が大きい。CSは、急速に電流を減衰して電磁誘導でプラズマを着火するために、5 kVの負極性高電圧が0.1–0.3秒間の短時間だけ必要である。また、CSからの供給磁束量でプラズマの維持

時間が制限されるため、着火前に定格電流付近まで初期励磁して磁束を貯めておく。EFコイルも着火時に高電圧が必要となるが、プラズマの位置を高速に調整するため、正負両極性が必要となる点が異なる。

2.2 受電系統

図2にJT-60SAの受電系統とコイル電源の模式図を示す。TFコイルは、全18個がすべて直列に接続され、1台の電源でまとめて励磁される。電源容量は約2MVAで済むため、商用の電力系統から直接給電できる。PFコイル電源は、各コイルの通電の特色に合わせた電源が個別に用意され、立ち上げ時には全体で200MVAを超える電力が必要となる。電力系統への悪影響を避けるため、フライホイール付電動発電機(H-MG)からまとめて給電する。H-MGは約100トン・直径約6mのフライホイールを3枚有し、回転運動による蓄積エネルギーは5.2GJを誇る。プラズマ実験中には、400MVAの同期発電機を通して、最大2.6GJが放出される。上部には巻線型誘導電動機(15MW)が接続されており、待機状態の420rpmから最高回転数の582rpmまで6~8分間で加速して、30分ごとのプラズマ放電に備える。

2.3 コイル電源の構成

図3に各コイル電源の模式図を示す。TFコイル電源は、4台の並列したサイリスタ整流器で構成される。TFコイル全体の蓄積エネルギーは1GJにも達するが、高速に充電する必要はないので、低電圧・大電流(60V/25.7kA)の電源になっている。一方でクエンチの際には高速放電が必要であり、後述のクエンチ保護回路3ユニットにより時定数14秒で電流を立ち下げる。

PFコイル電源は、ベース電源と呼ばれる比較的低電圧・大電流のバイポーラ電源($\sim \pm 1\text{kV}/\pm 20\text{kA}$)と、短時間定格の高電圧発生機器を組み合わせて合理化している。ベー

図3 コイル電源の構成。(a)トロイダル磁場コイル, (b)中心ソレノイド, (c)平衡磁場コイル (Color online)

ス電源は、サイリスタ整流器を正負逆並列に接続したback-to-back方式の変換器で構成される。バンク間に相間リアクトルを介して循環電流を流すことで、コイル電流はゼロ点で滑らかに極性を反転できる。電源の時間定格は熱設計で決まり、JT-60SAの運転仕様に合わせた230秒通電/30分周期である。冷却方法は、サイリスタ変換器はすべて水冷、相間リアクトルは空冷である。

高電圧発生機器は、2.2で説明した電圧極性の特徴に基づき、CSとEFコイルで異なる。CSでは直流遮断器と抵抗からなる、高電圧発生回路(SNUと呼ぶ)を用いる。プラズマ着火前に初期電流を励磁しておき、着火のタイミングで遮断器を開いて抵抗に転流させる。抵抗での電圧降下の分だけ、負極性の高電圧がCSに印加され電流が減衰する。他方、EFコイル(EF3, 4を除く)は、正負両極性の高電圧が必要のため、ブースター電源と呼ばれる高電圧サイリスタ変換器($\pm 5\text{kV}/10\text{秒}$ 以下の短時間定格)で電圧を重ねる。

2.4 クエンチ保護回路

すべての超伝導コイルには、クエンチ保護回

図4 クエンチ保護回路の動作 (Color online)

路が直列に接続される。動作はSNUとよく似ており、遮断器で放電抵抗器に転流し、発熱させて磁気エネルギーを開放する。直流電流の遮断には、大容量の電力用半導体IGCT素子を用いる。万が一遮断に失敗した際には、水冷式の爆発型ブレーカ（パイロブレーカ）で電路を断ち切り、確実に放電抵抗器に転流して超伝導コイルの焼損を防ぐ（図4）。

3. まとめ

超伝導トカマク装置の磁場コイル電源は、サイリスタ変換器と直流遮断器で構成され、直流大電流で蓄えられる磁気エネルギーの運用システムである。以上で解説した磁場コイル電源の回路構成は、JT-60SAよりさらに大型の国際熱核融合実験炉ITERでも採用されており¹⁾、基

本的な考え方はほぼ確立されている。

文 献

- 1) 西村 新, テキスト核融合炉 (5.4 超伝導コイルと極低温システム, 電源システム), プラズマ・核融合学会誌, **87**, 161–169 (2011)

Abstract

Recent Status of Nuclear Fusion Research and Development

6 Status of Fusion Engineering Research

6.4 High Current DC power Supply

—Power Supply System for Super Conducting Tokamak Device—

Shoichi HATAKEYAMA[†], Makoto MATSUKAWA and Akira SAKASAI: National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, 801-1 Mukoyama, Naka-shi, Ibaraki Pref. 311-0193, Japan, [†]hatakeyama.shoichi@qst.go.jp

In large tokamak device, high current DC power supply several tens of kA/several kV has been used for magnet excitation. During tokamak operation, high voltage is needed for only short time at plasma initiation. Therefore, cost-effective circuit topology combined with thyristor converters and DC circuit breakers has been discussed for many years. In addition, the latest superconducting tokamak stores huge magnetic energy (~10 GJ) especially in toroidal field coils. In the case of coil quench, protection circuit has to discharge the magnetic energy by using external resistors in order to prevent coil damage. This paper describes an optimized magnet power supply system of JT-60SA which is one of the largest superconducting tokamak and being constructed in Japan.