

大容量ポロイダル電源システムの開発

Development of High Capacity Poloidal Power System

佐藤 徹^{*1} 衛藤 福雄^{*2}
 Tôru Satô Fukuo Etô
 戸松 均治^{*1} 鯉江 和裕^{*3}
 Kinji Tomatsu Kazuhiro Koie
 神谷 鉄文^{*1} 石塚 銀治^{*4}
 Tetsufumi Kamiya Ginji Ishizuka
 丹羽 裕彦^{*1} 高坂 憲司^{*5}
 Hirohiko Niwa Kenji Kôsaka

We have developed a high capacity power supply system for the poloidal field coil which is used on nuclear fusion devices. This new system consists of thyristor converters of 95kA, 36MW and 35kA, 10MW and also GTO thyristor inverters of 10kA, 10MW, which are the record high large capacity power electronics products of our company. This system was delivered to Kyushu University and has been operating satisfactorily since it was installed on their nuclear fusion device 'TRIAM-1M'.

High speed and high accuracy control of large current is required for the poloidal power supply; this cannot be accomplished without various technical developments. We intend, in this article, to explain the outline of the nuclear fusion device and the poloidal coil, and introduce the new poloidal power supply system and related technical developments.

1 まえがき

九州大学応用力学研究所におけるプラズマ核融合実験装置TRIAM-1M⁽¹⁾は世界で唯一の、Nb₃Snを用いた強磁場超伝導トカマク装置であり、実験開始以来これまで、数々の世界的研究成果を挙げて来た。

当社では、TRIAM-1M建設当初から、その電源関係などにおいて九州大学殿に協力し、既に計画の第1ステップとしてのポロイダル電源システムを製作・納入した。同研究所では、現在、電源関係の増力を図ってプラズマ電流を大幅に上昇させる第2ステップ計画を推進中である。

このたび、当社で第2ステップのポロイダル電源システムを担当することになり、新規に同電源の開発・製作を行い九州大学殿に納入した。この第2ステップの電源は、第1ステップに対して電流・電圧が約4倍、電力容量としては約16倍にも達する大規模な電源システムである。

今回の開発機は、それぞれ95kA36MW級、35kA10MW級のサイリスタ変換器電源と10kA10MW級の高速GTOサイリスタ・インバータ電源である。このような大規模なパワーエレクトロニクス機器は、当社としては今まで経験したことのない記録的な大容量製品である。実現までには、多くの技術開発・試行錯誤が必要であったが、第1ステップの経験を生かし、一つ一つ問題点を解決し、このほど完成に至った。

本稿では、まず核融合装置とポロイダルコイルについて説明して、次に今回開発したポロイダル電源システムについて概要を紹介する。

2 核融合実験装置

2.1 トカマク方式

核融合の実現をめざした実験装置には、プラズマの閉じ込め方法によって、

環状（ドーナツ状、トーラス）閉じ込めの、

- ・トカマク方式
- ・ヘリカル方式

直線閉じ込めの、

- ・ミラー方式

慣性閉じ込めの、

- ・慣性レーザー方式

の各装置がある。これらの中で、核融合の方式としてもっとも早期実現の可能性が高く、また周辺技術や各種データが豊富で、充実しているのがトカマク方式である。

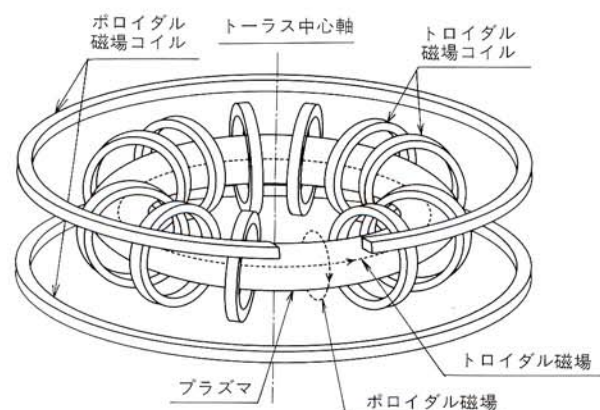


図1/トカマク装置概念図
 Fig. 1/Schematic sketch of Tokamak device

*1 システム開発本部 開発部 *3 富士電機(株) 東京工場 *5 株式会社富士電機総合研究所
 愛知電機技報No.10 *2 富士電機(株) システム事業本部 *4 富士電機(株) 千葉工場

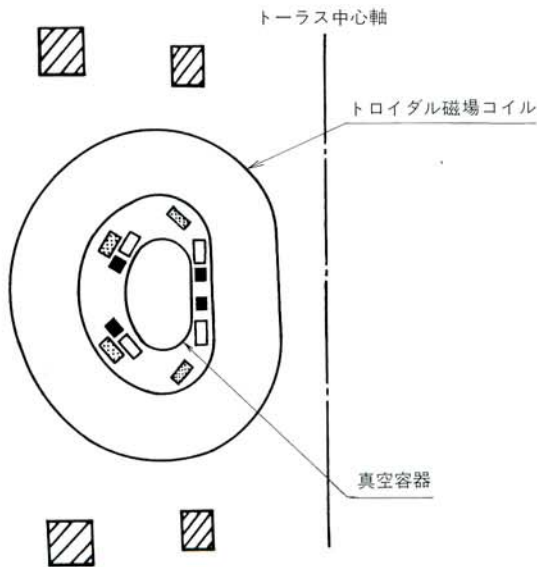
トカマク方式は図1の概念図に示すように、環状のプラズマ電流を、トロイダル磁場によって閉じ込め、ポロイダル磁場によってその断面形状、位置の安定化を図る方式である。プラズマ電流を、希薄な水素ガスを満たしたドーナツ真空容器内に発生させ、高温・高密度プラズマを、トロイダルおよびポロイダル磁場によって真空容器内壁から離して、容器断面の中心に保持させ、核融合反応の実現をねらっている。

九州大学のTRIAM-1Mは、基本的にはこのトカマク方式であるが、超伝導トロイダルコイルを使用した強トロイダル磁場(8~11T)がその大きな特徴になっている。

2.2 ポロイダルコイルシステム

トロイダルコイルは一定の安定したトロイダル磁場を発生させる役割を持つが、一方、ポロイダルコイルは、絶えず変化するプラズマ状態に応じて常に最適なポロイダル磁場を発生させる重要な役割を持つ。このことから国内・国外の各核融合装置では、各々の装置ごとにプラズマの最適安定化を図るために、色々なポロイダルコイル群の配置や磁場制御方式が試みられている。

図2がTRIAM-1Mにおける主要なポロイダルコイルシステムの断面図である。ここには図示されていないが、プラズマ電流を発生させるための変流器コイル(CTコイル)や乱流加熱コイル(THコイル)などの重要なコイル群も実機には配置されている。



ポロイダル磁場コイル
 // : BH (B-Horizontal) コイル
 ■ : BH-FB (BH-Feed-Back) コイル
 ● : SN (Shaping-Negative) コイル
 □ : SP (Shaping-Positive) コイル
 注: ポロイダル磁場コイルには紙面に垂直の電流が流れる。

図2/ポロイダル磁場コイルシステム(断面)
 Fig. 2/Poloidal field coil system (vertical section)

ポロイダルコイル群は、プラズマがドーナツの外周方向に膨張するのを抑え、プラズマ断面の形状を一定にさせるための垂直方向磁界を発生する垂直磁場コイルと、上下方向の位置を安定させるための水平方向磁界を発生する水平磁場コイルとに大別される。

TRIAM-1Mでは垂直・水平磁場コイルをそれぞれ2系統ずつ設けて、図2にも示すように、

垂直磁場	┌	非円形断面制御 正曲率磁場 (SN)
		" 負曲率磁場 (SP)
水平磁場	┌	定常水平磁場 (BH)
		フィードバック水平磁場 (BH-FB)

の4系統からなるポロイダル磁場コイルシステムを採用している。

これらのポロイダル磁場コイルに、最適な磁界の発生・制御のために必要なコイル電流を、高速・高精度で供給する装置がポロイダル磁場コイル電源(以下、ポロイダル電源という)である。

3 電源システムの概要

3.1 システム概要

本ポロイダル電源システムの単線接続図を図3に示す。第2ステップとして今回開発したポロイダル電源は、

- ・BH-FB コイル電源
- ・SN コイル電源
- ・SP コイル電源

の3電源である。BHコイル電源は、第1ステップ電源をそのまま使用している。

第2ステップでは、高压受電系は非常に大きな受電容量が必要になるため、商用電源の使用はまず不可能であり、交流電源として125MVAの発電機が用意される計画になっている。TRIAM-1Mでは長時間のプラズマ持続実験も行うため、高压を1/5~1/10の電圧にステップダウンする変圧器を設けることにより、受電容量を低減して商用電源も使用可能となる構成にしている。各ポロイダル電源には独立にVCB(真空遮断器)を装備した受電盤を設けて、各電源ごとの単独運転を可能にしている。発電機が大容量であるので、VCBには遮断容量50kAの大形器を採用している。

高速応答制御が要求されるBH-FBコイル電源にはGTO(ゲートターンオフ)サイリスタによるインバータ方式の電源を開発し、大電流が要求されるSNコイル電源およびSPコイル電源にはサイリスタ変換方式の電源を開発した。

各ポロイダル電源の外観および設置状況を図4、図5に示す。

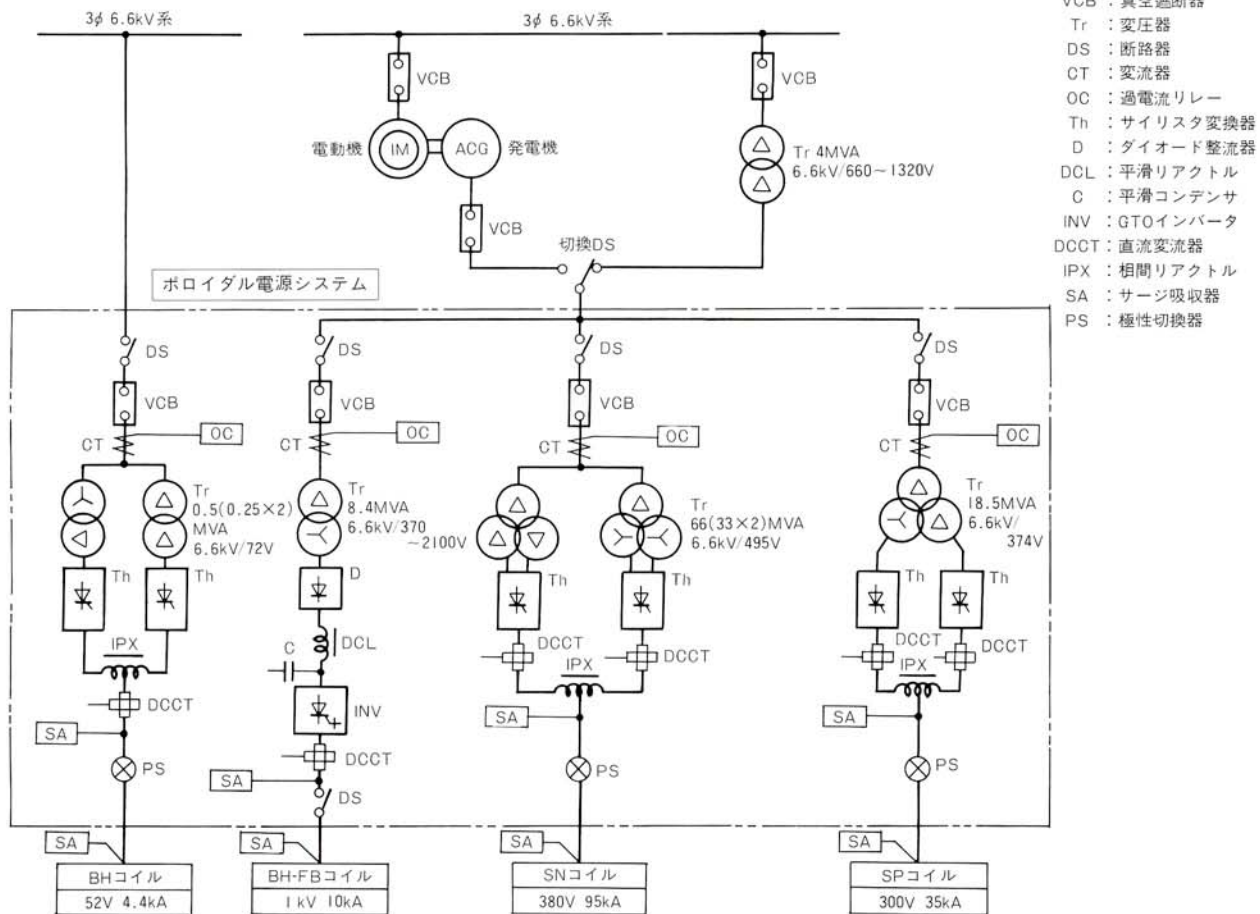


図3 /ポロイダル電源システム単線接続図
 Fig. 3 /Diagram of poloidal power system

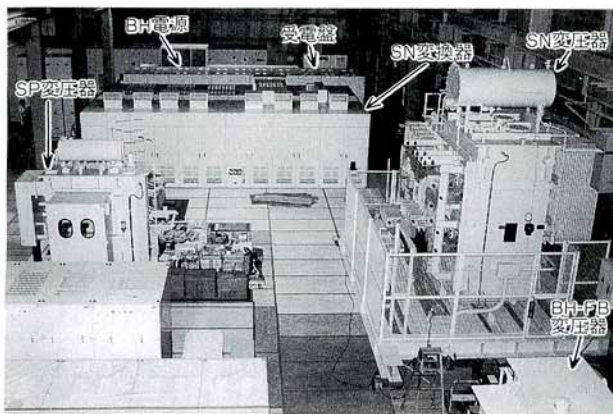


図4 /ポロイダル電源の外観
 Fig. 4 /Site view of poloidal power supplies

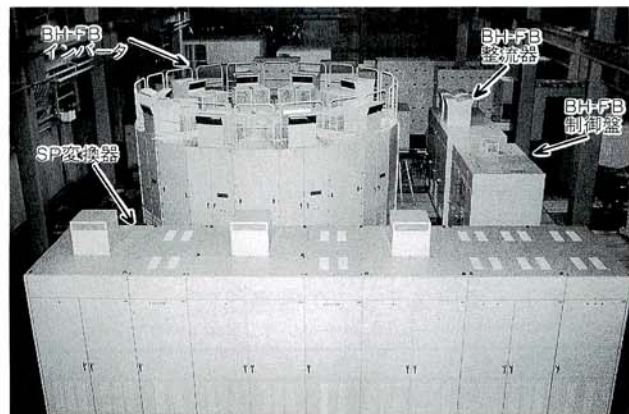


図5 /ポロイダル電源の外観
 Fig. 5 /Site view of poloidal power supplies

3.2 電源システムの出力容量

一般に、ポロイダルコイル群およびプラズマの電圧・電流については下記の回路方程式が成立する。

$$v = M \frac{d}{dt} i + Ri \dots\dots\dots(1)$$

ここで v 、 i は各ポロイダルコイルおよびプラズマの電圧ベクトルと電流ベクトルとである。プラズマはワンターンコイルと考えて良く、その電圧はワンターンループ電圧である。

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_i \\ \vdots \\ v_n \\ v_p \end{bmatrix}; \quad i = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_i \\ \vdots \\ i_n \\ i_p \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、それぞれのサフィックスは $i=1\sim n$ まではポロイダルコイル、 $i=p$ はプラズマを表している。

また、 M 、 R は各ポロイダルコイルおよびプラズマの相互インダクタンスマトリックスと抵抗マトリックスとである。

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \dots & M_{1n} & M_{1p} \\ M_{21} & M_{22} & \dots & & \\ \vdots & & \ddots & M_{ij} & \vdots \\ M_{n1} & & & M_{nn} & \\ M_{p1} & \dots & & & M_{pp} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & & & & \\ & R_{22} & & 0 & \\ & & \ddots & & \\ & 0 & & R_{nn} & \\ & & & & R_{pp} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4)$$

なお、 M_{ij} は各コイル間の相互インダクタンスで、サフィックスが $i=j$ の場合は自己インダクタンスである。また、抵抗マトリックス R は対角マトリックスになる。

ポロイダル電源システムは、回路方程式(1)の i の最大値、および $\frac{d}{dt} i$ の最大値を満足させる電圧を出力する必要がある、これによって各ポロイダル電源の最大出力容量が決まる。

第2ステップのポロイダル電源においては、 i_{max} および $\left(\frac{d}{dt} i\right)_{max}$ とともに第1ステップの約4倍の値が必要とされるため、全体としては非常に大きな電源システムになっている。第1ステップと第2ステップとの電源容量比較を表1に示す。

表1 / 第1・第2ステップの電源比較

Tab. 1/Comparison between 1st. step and 2nd. step power supply

電源種別	第2ステップ	第1ステップ
SPコイル電源		
出力電流	35kA	8 kA
電源容量	18.5MVA	0.9MVA
電力変換素子	サイリスタ	サイリスタ
SNコイル電源		
出力電流	95kA	20kA
電源容量	66MVA	3 MVA
電力変換素子	サイリスタ	サイリスタ
BH-FBコイル電源		
出力電流	10kA	2.5kA
電源容量	8.4MVA	1 MVA
電力変換素子	GTOサイリスタ	トランジスタ
BHコイル電源		
出力電流	4.4kA	4.4kA
電源容量	0.5MVA	0.5MVA
電力変換素子	サイリスタ	サイリスタ
プラズマ電流	500kA	125kA

3.3 システムの運転制御

(1) 電流/電圧制御

ポロイダル電源システムは、プラズマの位置・形状制御を行うものであるが、ポロイダルコイル群の電圧・電流およびプラズマの電圧・電流には前出(1)式の関係があり単独には制御不可能である。このため、実験装置全体を制御する上位システムから、各コイルの電流目標値を各ポロイダル電源に送信する。各電源はその目標値の電流をコイルに流すように電源内部で電流フィードバック制御を行う。このような階層的な制御を行うことにより、実験装置全体としては、プラズマ状態フィードバック制御系が構成されている。

また、各ポロイダル電源は制御モードを切替えることにより、電圧制御運転もできるようにしている。電圧制御運転では、コイル電圧（前出(1)式の v ）を、計算機から直接コントロールすることを目的にしている。

これらの制御系の構成を図6に示す。電流/電圧指令値（目標値）信号は、SNコイル電源およびSPコイル電源については主にデジタル計算機から与えられ、BH-FBコイル電源については主に高速アナログ計算機から与えられている。

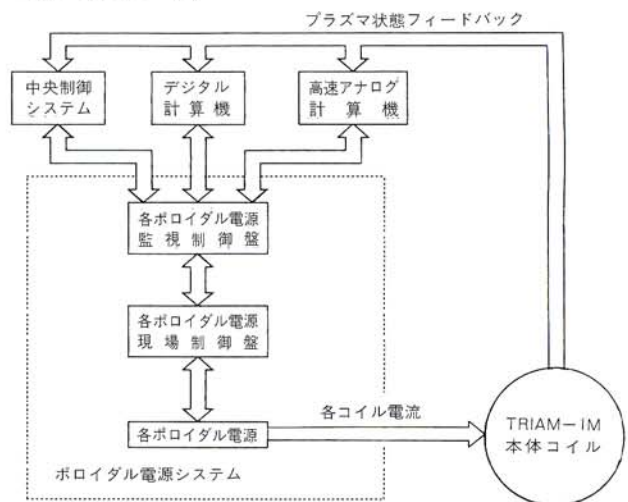


図6 / ポロイダル電源システムの運転制御系

Fig. 6/Configuration of control system for poloidal power supplies

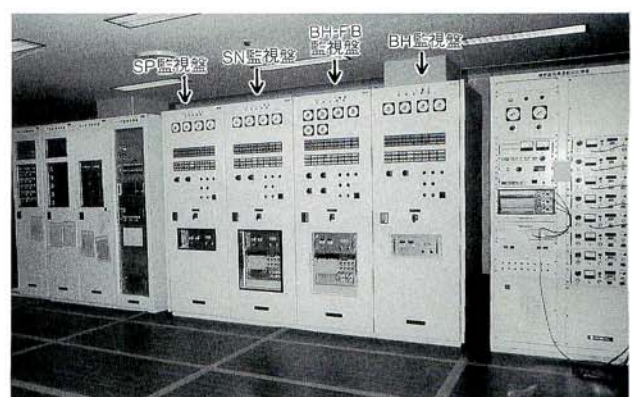


図7 / 監視制御盤の外観

Fig. 7/ Site view of supervisory control boards

(2) 運転制御

中央制御システムは主にシーケンス運転、各種保護インターロック、運転時間（タイミングパルス）などの制御を行う。

中央制御システムからの運転指令によってポロイダル電源は、全体の実験スケジュールに従って自動運転・遠隔制御される。また、各ポロイダル電源は手動運転系も備えており、個別に試験するための手動運転も可能になっている。

中央制御システムや監視制御盤は電源本体とは別に制御室に設置されているため、現場での運転も考慮して、現場にも各々制御盤を設けている。制御室に設置された監視制御盤を図7に示すが、各電源ごとに独立した構成にしている。

4 BH-FB コイル電源

4.1 概要

第1ステップのBH-FBコイル電源⁽²⁾は、出力2.5kA、300Vのトランジスタ・インバータ方式であったが、第2ステップでは、出力10kA、1kVのGTOサイリスタ・インバータ方式とした。

本電源は、他電源(SN, SP)よりも出力電流の絶対値は小さいといえども、必要とされる電流変化率は最大である。更に、負荷コイルには正負両極性の電流を流すために、通常のサイリスタ変換器では実現が困難である。そのため本機でもインバータ方式を採用している。

本機の定格出力電圧は前出の(1)式にて決定するが、BH-FBコイルは他コイルとの相互インダクタンスが小さく、特に垂直磁場コイル(SP, SN)とは、分割されたコイルが互いにインダクタンスを打消し合う。一方、自己インダクタンス分の電流変化率が非常に大きいため、電源としてはBH-FBコイル分のみを考えて、下式によって定格出力電圧を決定している。

$$(v_1)_{\max} = M_{11} \left(\frac{di_1}{dt} \right)_{\max} + R_{11} (i_1)_{\max} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、

- v_1 : BH-FBコイル電圧
- i_1 : BH-FBコイル電流
- M_{11} : BH-FBコイル自己インダクタンス
- R_{11} : BH-FBコイル直流抵抗値
- $()_{\max}$: ()内の最大値

である。

なお、電源側の定格出力電圧では、 M_{11} 、 R_{11} に電源装置から負荷コイルまでの配線ケーブル分も含めて考える必要がある。本機では電流変化率が非常に大きいので抵抗分の電圧は数%程度である。定格出力電圧は、(5)式をもとにして1kVに設計した。

一方、最大出力容量 P_1 は、

$$P_1 = (v_1)_{\max} \times (i_1)_{\max} \dots\dots\dots (6)$$

である。このことから、本機の最大出力容量は10MWにも達することになった。インバータ単機でこのような大容量製品は、未だ国内・国外に例を見ない。

本機の構成は前出図3の単線接続図に示す通りである。各種実験モードによってインバータを最適効率で運転できるように、変圧器は電動タップ切換器を装備してインバータ入力直流電圧を可変できるようにし、更に整流器をダイオード式として交流側の力率悪化を防止している。直流側には大容量のコンデンサを挿入することにより、インバータの出力ピーク電力の電源供給の確保と回生電力の吸収を行っている。このため、インバータの出力ピーク電力よりも十分少ない交流供給電力で本機の運転が可能となった。

4.2 仕様

BH-FBコイル電源の概略仕様は下記のとおりである。

交流入力電源	AC 6.6kV, 3φ, 59~67Hz
直流出力電圧	DC 0~±1kV
直流出力電流	DC 0~±10kA
定格の種類	短時間（1秒通電, 5分休止） （1/10電流では連続）
電力変換方式	GTO式, 単相ブリッジ PWMインバータ方式
チョップ周波数	3kHz
使用素子	4.5kV, 1kA, GTOサイリスタ
使用素子数	72個
定電流精度	±0.5%以内
電流可変性能	14kA/ms

4.3 GTOサイリスタ・インバータ

転流回路を用いることなく電流を遮断できる自己消弧形半導体素子のうちで、もっとも大電力を扱えるのはGTOサイリスタである。しかし、スイッチング・スピードはバイポーラ・トランジスタに比べて遅いので、本機の周波数(3kHz)がほぼ動作限界である。また、本機の出力電流も10kAに達する大電流であるので、最大級のGTOサイリスタを使用しても多数並列にする必要がある。GTOサイリスタの多数の並列運転は、通常多くの技術的困難を伴うが、第1ステップのトランジスタ・インバータで用いた並列手法⁽²⁾を発展させ本機に適用した。すなわち、図8に示すように、まず単位インバータをGTOサイリスタ4素子で構成し、2個のインバータを1筐体に収納しそれを一つのインバータ盤とする。そのインバータ盤を9面集めて、図9に示すよう同心円上に平面配置する。そして主回路の入力・出力は放射状に中心

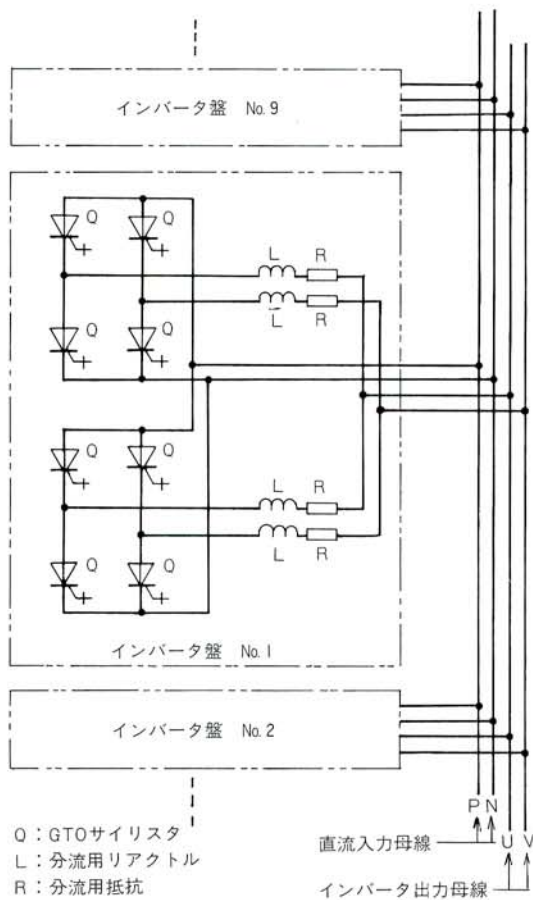


図8/GTOインバータの並列接続
Fig. 8/Parallel connection of GTO inverters

に集め、そこからそれぞれ地下ピットにケーブルで配線し、直流電源(ダイオード整流器)、負荷コイルに各々接続される。これでインバータの18並列運転となる訳である。

試験の結果、このような独自の対称構造(特許出願中)の効果により、ほとんど調整なしで十分な分流利効果が得られ、今まで困難とされて来たGTOサイリスタの多数並列が容易に実現できることが判明した。

4.4 制御回路

本機の制御回路は第1ステップのトランジスタ・インバータと基本的には同様なPWM方式であり、1.5kHzの2相キャリア三角波と入力信号とを比較して、出力3kHzのPWM波形を作っている(参考文献(2)参照)。

GTOサイリスタインバータの場合は、ターンオフタイムが長いので、インバータのデッドタイム(休止時間)を長く設定する必要がある。このような高い周波数ではデッドタイムの影響で直流電圧の利用率が悪くなるため(デューティーサイクルは0.7程度)その分、電源側の直流電圧を上げている。

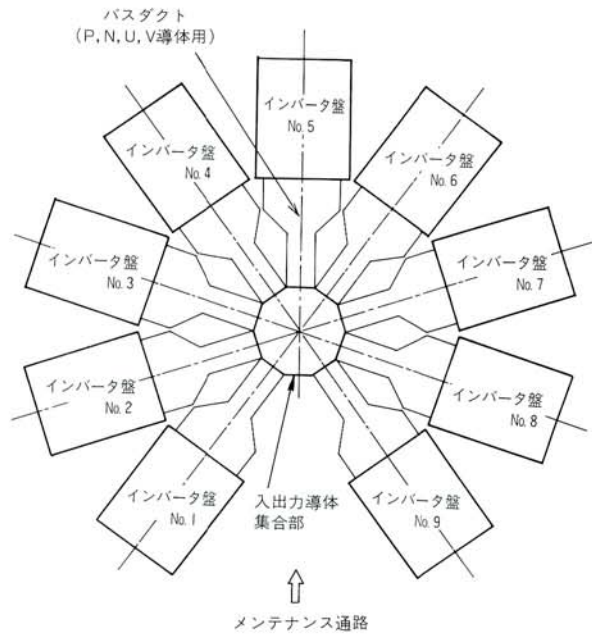


図9/インバータ盤の同心円配置(平面図)
Fig. 9/Coaxial arrangement of inverter boards (top view)

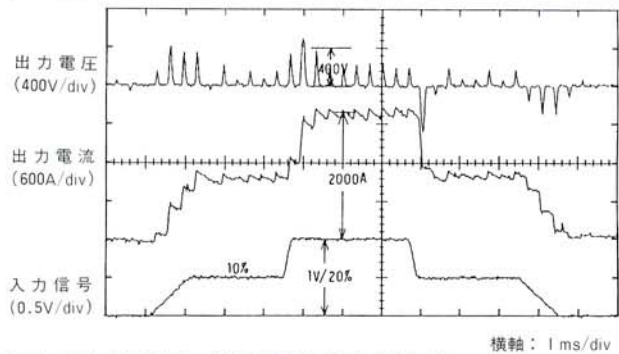


図10/入力信号・出力電流の応答波形
Fig. 10/Waveforms of output current response to input signal

GTOサイリスタのゲート駆動回路は各GTOごとにそれぞれ独立に設けてある。高電圧・大電流で高い周波数を取り扱う劣悪なノイズ環境であるため、ゲート駆動信号はすべて独立に72系統の光ファイバを用いてゲート駆動回路に送り、誤動作を防止している。

出力電流は、両極性の高速DCCT(直流変流器)を使用して検出している。DCCT出力信号を上位系統へ電流値信号として送ると同時に、電源内部では、上位系統からの任意の電流指令信号に対応した出力電流を流すための電流フィードバック信号として使用している。

電流制御系は、本電源においてもアナログ系で構成したが、応答性・精度ともに十分良好な結果が得られている。図10に、実負荷条件にて、特殊な信号波形を入力した場合の出力電流制御の応答試験の一例を示す。これは電流可変性能を確認するための試験例であるが、PWM波の2~3パルスで応答しており、ポロイダル電源としては驚異的性能であることが分かる。このような各種の任意波形信号を入力して、ポロイダル電源の性能確認試験を行っている。次に述べるSNコイル電源、SPコイル電源についても同様な試験を行い、制御性能を確認している。

5 SNコイル電源

5.1 概要

本電源は、第2ステップのポロイダル電源のうちで最大容量の装置であり、出力電流は95kAである。大電流電源装置であるため開発要素が非常に多く、電磁機械力、温度上昇、各部の電圧降下については配線ケーブルも含めて総合的に十分検討を行った上で設計・製作した。構成は前出図3の単線接続図に示すように、変圧器巻線を分割した構成であるが（ただし、変圧器としては1台）、基本的には12相のサイリスタ変換装置である。相間リアクトルは貫通形の鉄心を用いて、正側および負側の導体をそれぞれ貫通させる構造にして小形化を図った。

出力側には電動の切換器を設けて、出力電流の極性を切換えられるようにしている。また、他電源についても同様であるが、本体コイルにはサージ吸収器を設置して、本体コイルおよび電源をサージ過電圧から保護するようにした。

SNコイルはSPコイルとの相互インダクタンスが無視できないので、本電源の定格出力電圧は、前出(1)式でSPコイルとの相関を考慮して、

$$(v_2)_{\max} = M_{22} \left(\frac{di_2}{dt} \right)_{\max} + M_{23} \left(\frac{di_3}{dt} \right)_{\max} + R_{22} (i_2)_{\max} \dots\dots\dots(7)$$

によって決定した。ただし、

- v_2 : SNコイル電圧
- i_2 : " " 電流
- i_3 : SPコイル電流
- M_{22} : SNコイル自己インダクタンス
- M_{23} : SNコイルとSPコイルとの相互インダクタンス
- R_{22} : SNコイル直流抵抗値

である。

これにより、定格出力電圧は380Vに設計した。定格出力電流は95kAであるので、本電源の最大出力電力は36MWである。

5.2 仕様

SNコイル電源の概略仕様を次に示す。

- 交流入力電源 AC 6.6kV, 3φ, 59~67Hz
- 直流出力電圧 DC 0~±380V
- 直流出力電流 DC 0~95kA
- 定格の種類 短時間（1秒通電, 5分休止）
（1/10電流では連続）
- 電力変換方式 2重3相ブリッジ接続
12相変換方式
- 使用素子 2.5kV, 1kA, サイリスタ
- 使用素子数 192個

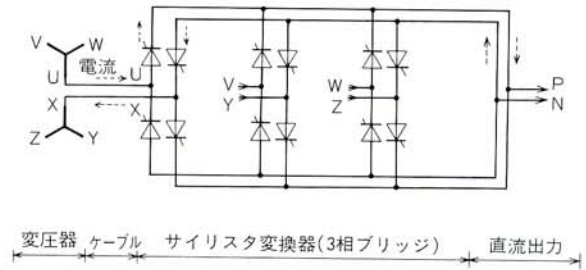


図11/同相逆並列接続
Fig. 11/Inphase contrapolarity circuit

定電流精度 ±0.5%以内
電流可変性能 2.4kA/ms

5.3 サイリスタ変換器

本機のような大電流装置においては、サイリスタ素子はもとより、盤内導体、外部ケーブル、ひいては変圧器巻線も並列接続が行われる。単純な並列接続を行うよりも、互いに打消す方向に電流を流して並列に接続した方が、インピーダンス電圧降下、局部過熱、電磁機械力、分流効果などの面で有利である。サイリスタ、ケーブル、変圧器すべてにわたり逆方向電流を流す回路を構成し、それらを互いに隣接させて配置、配線する方法を同相逆並列接続といい、これは大電流変換装置には非常に有効な方法である。本機も同相逆並列接続方式を採用し、95kAという大電流装置を実現した。

図11に本機の同相逆並列接続方式を示す。この回路は一見、6相ブリッジ（12相整流）に思われるが、これで3相ブリッジ（6相整流）である。本機では図11と同じものをもう一回路設け（ただし、変圧器は△結線で30°位相差を持つ）、相間リアクトルで並列接続して12相整流を行っている。図11では隣合ったサイリスタは同時点弧され、しかも電流方向は全く逆になるので、配線による転流リアクタンス降下は極端に小さくなる。このため、変圧器の2次電圧も低めに抑えることができ、電源装置全体を小形にすることが可能となった。

5.4 制御回路

交流電源が発電機で給電されるため、サイリスタの位相制御回路は電源周波数の変化に追従する必要があり、本機では1サイクル追従形のデジタルPLL方式によるデジタル位相制御方式を採用している。

また、ポロイダル電源において位相制御方式を採用したシステムでは、コイル電流の立上げ開始指令と交流電源とは同期している必要がある。これは、実験の各シ

ット毎の電流立上げ波形の再現性を得るために重要な点である。このため、本機から上位系統にデジタルPLLからのパルス(30°毎)を送信し、上位系統ではその信号をベースにして各ポロイダル電源の立上げ開始指令のタイミングを制御している。これらの方式は、第1ステップのBHコイル電源⁽¹⁾およびSNコイル電源⁽¹⁾に使用した方式と基本的に同じものである。

電流検出のためのDCCTは、図3に示すように3相ブリッジの1群ずつに設置し、出力電流値は、それぞれのDCCTの出力電圧を制御部で加算演算することにより求めている。また同時に、2群のDCCTの出力電圧差を各群の位相制御回路にフィードバックすることによって、各群の出力電流アンバランスを零にする循環電流(横流)制御を行っている。これにより、相間リアクトルの磁気飽和ないし励磁インダクタンスの低下を防止して、出力電流断続などの不都合が起こらないようにしている。

このように、循環電流制御と全体の電流フィードバック制御とを、出力用の大型DCCTを使用することなく、小形の2つのDCCTのみで行うことも本機の制御回路の大きな特徴である。

6 SPコイル電源

6.1 概要

本電源は、ポロイダル電源の中では中規模容量の装置に属し、出力電流は35kAであるが、一般産業用装置を含めて考えれば大容量電源といえる。また、当社の現時点の記録的大容量製品でもある。

本機においても、大容量サイリスタの並列接続技術、保護・制御技術等に関して多くの技術開発が必要になった。

本機は、図3でも分かるように、12相変換器のほぼ標準的構成を採っている。変圧器からサイリスタ変換器への配線ケーブルは3相ケーブルを多数配列することにより(3心の325mm²を4並列×2)、転流リアクタンス電圧降下、電磁機械力の低減を計っている。サイリスタには大電流容量素子を採用することにより並列数を低減して、使用部品点数を減少させ、装置の信頼性向上、コンパクト化を図った。

相間リアクトルは、当社独自の循環電流制御により、鉄心のギャッププレス化が可能になり小形化が図られた。DCCTについても当社独自のリターン導体の同軸構造により、DCCT鉄心への外部磁界の影響を極小にして、検出精度を悪化させることなく小形化することが可能となった。

本機の定格出力電圧は前出(7)式同様に、

$$(v_3)_{\max} = M_{32} \left(\frac{di_2}{dt} \right)_{\max} + M_{33} \left(\frac{di_3}{dt} \right)_{\max} + R_{33} (i_3)_{\max} \dots \dots \dots (8)$$

によって、決定できる。ただし、

- v_3 : コイル電圧
- M_{32} : SPコイルとSNコイルの相互インダクタンス
- M_{33} : SPコイルの自己インダクタンス
- R_{33} : SPコイル直流抵抗値

である。

これによって、定格出力電圧は300Vになり、また最大出力電力は10.5MWとなった。

6.2 仕様

SPコイル電源の概略仕様は下記のとおりである。

交流入力電源	AC 6.6kV, 3φ, 59~67Hz
直流出力電圧	DC 0~±300V
直流出力電流	DC 0~35kA
定格の種類	短時間(1秒通電, 5分休止) (1/10電流では連続)
電力変換方式	2重3相ブリッジ接続 12相変換方式
使用素子	2.5kV, 2.5kA, サイリスタ
使用素子数	48個
定電流精度	±0.5%以内
電流可変性能	0.9kA/ms

6.3 サイリスタ変換器

本機はSNコイル電源に比較して電流が小さいという理由もあり、同相逆並列接続を行わずに、大容量サイリスタを使用することによって簡素化を図った。サイリスタ素子の電流容量はSNコイル電源の場合が1kAであったのに対し、本機では2.5kAである。また、使用個数も同じく192素子に対して48素子と大幅に減少させている。

本機では変換器の1アームに4並列のサイリスタを使用し、貫通形の可飽和アノードリアクトル、ハイゲートドライブ、高速限流ヒューズおよび導体配線の工夫等の手法を用いて4素子が平均して電流を負担するようにしている。その結果、電流アンバランスは±20%以下に収まっている。

転流サージ吸収用のスナバ回路は各素子ごとに設け、サイリスタを転流サージ過電圧から保護している。スナバ回路のCR(コンデンサ, 抵抗)定数は、変換器の設計には重要なポイントであるので、計算機シミュレーションによって決定している。

サイリスタ変換器は、負荷コイル通電中に主電源が喪失すると(停電, VCB断等)、サイリスタの転流が行われなないので特定のアームに電流が流れ続け、回路の直流抵抗分とインダクタンス分とで決まる時定数で電流は減衰する。また、ゲートパルス喪失時も同様な現象が発生する。この時、サイリスタは通常時の3倍の電力損失を生

じ、サイリスタの接合部温度が定格温度(125°C)を超え破壊されることがある。本機では、そのような場合においても接合部は定格温度以内に収まるように設計し、安全性、信頼性を確保している。

6.4 制御回路

本機においても、制御回路は前記SNコイル電源と同じ制御方式にて、高速度、高精度制御を実現した。

SPコイルとSNコイルとは、前出(8)式で分かるように、電磁結合が密である。したがって、本体コイルについては電気的のみならず、電磁機械力についても相互の関係の検討がなされる必要がある。TRIAM-1M本体コイル側から、電源側への要求事項として、SNコイルとSPコイルの電流は下式を満足させるという制限がある。

$$|i_2 + ki_3| \leq I_m \dots\dots\dots(9)$$

ただし、 i_2 はSNコイル電流、 i_3 はSPコイル電流、そして k は、SN、SPコイルの巻数や相互配置等によって決まり、SPコイル電流を等価的にSNコイル電流に置き換える係数である。また、 I_m はコイルその他の機械的強度によって決まる電流の制限値である。

したがって、電源としては(9)式を満足させるように出力電流制限を行う必要があり、SN、SPコイル電源の出力電流を常時監視演算して、コンビネーション電流リミタ制御を行っている。

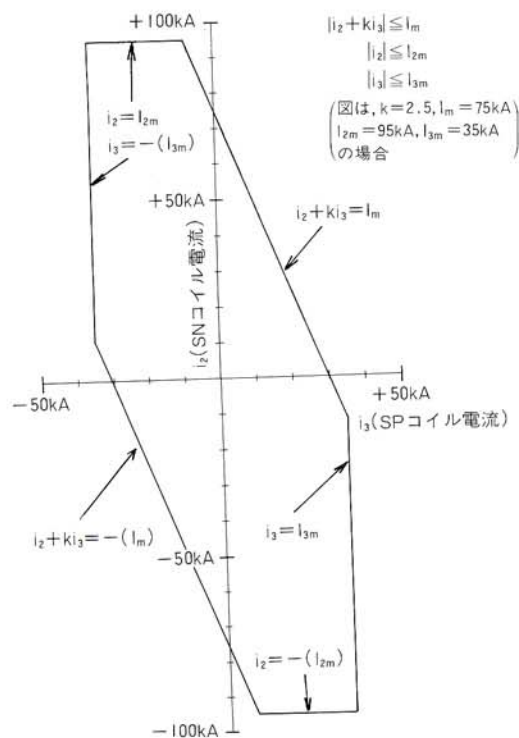


図12/コンビネーション電流リミタ特性
Fig. 12/Characteristic of combination current limiter

各電源にはそれぞれ定格出力電流リミタが設けられているため、両電源の出力領域は図12に示す範囲となる。コンビネーション電源リミタ制御は、SP/SN優先切換方式を採用している。例えばSP優先の場合では、SPコイル電流を測定して(9)式に従ってSNコイルのリミタ電流レベルを演算して、そのレベル信号をSNコイル電源の電流リミタ制御回路に送信する。その時、もしSNコイル電流が電流リミタレベルを超えるような電流を流そうとすれば、瞬時にリミタがかかり、所定電流に制限される。SN優先にすれば、SNコイル電流値によってSPコイル電源を制限するように制御する。このようなコンビネーション電流リミタ制御により本体コイルの安全運転を図っている。

リミタ制御は、特に電圧制御モードにおいては、過電流を流さないように重要な制御を行う。また、電圧制御モードでは、その動作スピードを最も速くすることが要求されているので、電圧フィードバック制御は行っていない。このため、入力信号とサイリスタの制御角 α とを比例関係のまま位相制御すると、出力電圧と入力信号とが \cos 関数の関係になってしまう。このため、本機では、系全体のフィードバックループの線形性を保つため、ハードウェアで \cos^{-1} 関数演算を行うリニアライザを設けている。

7 試験および運転

各電源は、工場製作完成後、各ポロイダルコイルと同等の定数の、新規に製作した模擬負荷コイルを用いて通電試験を行った。工場での入念なシーケンス制御試験、性能確認、連続通電試験などを実施後、現地据付・ケーブル配線工事を行った。変圧器と変換器、それに本体コイルとはそれぞれ数十mの距離を置いて設置されるため、配線工事も大がかりなものになった。特にSNコイル電源については、変圧器とサイリスタ変換器間が600V・CVケーブル・800mm²を48本、そしてサイリスタ変換器と本体コイル間には600mm²を32本、それぞれを整然と布設するという大規模な配線が行われた。

現地においても社内試験と同様な試験を実施した上で、本体コイルを接続して実負荷における通電試験を行った。現時点では発電機が設備されていないので、ステップダウン変圧器から交流電源を給電し、各電源単独では定格の約40%の電流を、ポロイダル電源全体の総合通電では約20%の電流を流して各種性能試験を行い良好な結果を得た。全電源を同時に運転する総合通電試験における各コイルの電流波形例を図13に示すが、各コイルおよび各電源間の相互干渉は十分抑制されており、良好な定電流制御が行われていることが分かる。

本電源システムは、上位系の中央制御システム・計算機との結合試験を実施した後に運転に入り、現在順調に

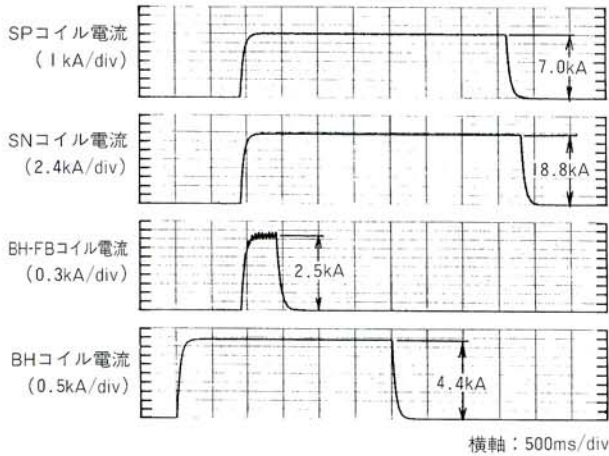


図13/総合通電試験オシログラム

Fig. 13/Oscillograms of output current under the test

稼働中である。TRIAM-1Mでは、本電源を用いて、プラズマの長時間保持の世界記録を1時間に更新するという成果を挙げている。

8 あとがき

以上、今回開発したポロイダル電源システムの概要について紹介した。

この電源は、重電技術とエレクトロニクス技術の結合したものである。当社にとっては、まさにパワーエレクトロニクスの技術の粋を結集して、技術開発を行った記録的大容量製品である。ここで開発された技術は、核融合関係にとどまらず、広く他分野にも応用・波及して行くものである。

現在、これらの開発技術を基にして、更に大容量のサイリスタ変換器の研究開発および技術開発に鋭意努力中である。

なお掉尾ながら、本ポロイダル電源システムは、当社が、九州大学殿の御指導と、富士電機㈱の協力を得て完成したものであり、あらためて関係各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1) 伊藤, 他 : 強磁場超電導トカマク型核融合装置, “TRIAM-1M” の開発, 日立評論, 66 (1984)
- (2) 佐藤, 他 : 大容量トランジスタPWM電源装置, 愛知電機技報, No.3 (1986)
- (3) 佐藤 : 大容量サイリスタ変換装置, 愛知電機技報, No.1 (1985)
- (4) 佐藤, 他 : 核融合20kAサイリスタ変換装置, 愛知電機技報, No.4 (1987)

