特集 核融合新技術

核融合電源・制御システム解析技術 System Engineering of Power Supply and Control for Nuclear Fusion

日本原子力研究所や名古屋大学プラズマ研究所で計画が進められている核融合次 期装置では、ポロイダル磁場コイルシステムを、従来の単機能コイル組合せ形から ハイブリッドコイル方式にして、特性向上及び経済化を図ろうとしている。この方 式は、電源及び制御装置に高度な機能が要求されるので、複雑多岐にわたる理論解 析が必要である。そのため、これらの解析結果の正当性をチェックするシミュレー ションが重要になる。本論文は、上記の観点に立って、特にポロイダル磁場コイル 電源に関するシミュレーション技法、及び最適化の検討を示したものである。

鳴田喹一*	Ryûichi Shimada
鈴木 登**	Noboru Suzuki
斎藤啓自**	Keiji Saitô
石垣幸雄**	Yukio Ishigaki
上山泰男***	Yasuo Ueyama
木下茂美****	Shigeyoshi Kinoshita
白濱秀文*****	Hidefumi Shirahama

1 緒 言

従来のポロイダル磁場コイルは,複数個のコイルに,そ れぞれ単一機能の電流を流すだけにとどまっていた〔以下, これを単機能(電流)コイル方式と称する〕。これに対し次期 装置用は,各コイルごとに複数の機能をもつ電流を流し,こ れを瞬時ベクトル合成して多変数制御をするもので,これを ハイブリッドコイル方式と称している。

これは、単機能コイル方式に比べ装置本体構造が簡単にな

8 プラズマ制御電源システムの解析

装置本体の基本構想と、前述した解析などによって得られ た負荷条件に基づき、電源装置のシステム設計を行なうが、 解析の主体は、EMTP(Electromagnetic Transients Program³⁾: 米国 BPA 社開発)によるシミュレーション計算である。目 的によっては、各種の汎用回路過渡解析プログラムなども併 用し、電源装置の基本構成、仕様を設定する。本章では、電 源装置のシステム設計上、解析の中心となる主要なシミュレ

り、また、コイルに必要な起磁力が減少して電源容量を小さ くできるが、その一方で電源装置の台数が増加し、制御が複 雑になる面もある。本論文は、ポロイダル磁場コイル電源シ ステムに要求されるこれらの技術課題を、計算機シミュレー ションを中心として定量的に解析し、その結果、電源装置の 基本構成や設備容量などを明らかにした。

2 プラズマ制御用ハイブリッドコイル方式

日本原子力研究所で計画が進められている次期核融合実験 炉(以下, FERと略称する。)では, 14 MeVのD-T反応中性 子によって構造材が放射化されるため, 遠隔操作に適した簡 単な構造が望ましい。ハイブリッドコイル方式は, 従来の単 機能コイル方式に比べ, 全体のコイル数が減少するので構造 が簡単になり, FERに適した方式と言える。

FERクラスの大型装置では,通常10~20本のコイルが設置 され,プラズマの放電開始から終了に至るまで,各コイルの 電流を独立に制御し,各時点でプラズマの平衡を保つために 必要な制御磁場を作る。各時点で各コイルに流す電流は,こ の制御磁場を作るように決定し,各電源装置はその電流パタ ーンを実現するように電圧を発生する。

トカマク装置でのポロイダル磁場のプラズマ平衡配位は、 円柱座標系(R, θ, Z)を用いて、ポロイダル磁束関数 $\psi(R, Z)$ に関する自由境界2次元2階偏微分方程式で表わされる。

 $\frac{\partial^2 \psi}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Z^2} = -\mu_0 R j_\theta(R, \psi) \dots \dots \dots (1)$ 図1は, FER を対象にダイバータ付プラズマの平衡配位を計 算した例で, (1)式の解法にはルジャンドル陪関数展開を用い た積分法¹⁾,自由境界の取扱いとしては逐次近似法を用いた計 ーション技法について,以下に概要を述べる。

3.1 発電設備

ハイブリッドコイル方式による電源装置の全体構成例を図 2に示す。この基本構成を設定する上で、重要な課題の一つ となるのが発電設備のシステム構成である。これは、負荷が 必要とする有効電力に対応して決まる皮相電力の大きさと、 交流同期発電機やフライホイールの単機製作限界との兼合 い、又は利用できる電力系統の受電容量でほぼ決まる。また 図3は、FERを対象としたハイブリッドコイル方式で構成さ



算コード "SPHEX"²⁾を使用した。

電流は5.3MA, ポロイダルベータは2.3である。自由境界2次元2階偏微分方 程式を解くことにより, ポロイダル磁場コイルに流れる電流とプラズマ平衡配 位の関係が求まる。

67

* 日本原子力研究所 工学博士 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所大みか工場 **** 日立製作所エネルギー研究所 工学博士 ***** 日立製作所日立研究所 698 日立評論 VOL. 66 No. 9(1984-9)







図 4 解析フロー EMTPのTACS(Transient Analysis of Control System) 機能を活用して解析を行なう。

の一例を示したものが図5で、バイパスサイリスタスイッチ



図3 FER電源の解析回路 負荷コイルL&と電源e&を直列接続した回路を、全体として並列接続したハイブリッドコイル方式による構成を示す。なおBIは、直流遮断器を、Roは高電圧発生用抵抗器を、M1~M,はハイブリッドコイル間の相互インダクタンスを表わす。

れる電源システム^{4),5)}の解析回路を示すもので, EMTPを用いてシミュレーションを実施した。なお, 各種電力量, 力率及び放出エネルギー量は, 図4に解析フローを示すように, フォートラン言語で算出式を記述して解析してある。この結果⁶⁾

と高電圧発生回路を適用したケース3では、電源容量は~ 1,500MVA,放出エネルギー量は~10GJ程度になることが判 断でき、単機発電機容量(含GD²),台数などの検討が可能と なる。

3.2 サイリスタ変換装置

サイリスタ変換装置は、発電設備から電力の供給を受け、 各コイル電流を制御する装置であり、特に経済的な設計が要 求されるところでもある。したがって、このシステム構成を 設定する上で、常にバンク構成と、他の回路構成機器間の動 作を連動させて考え、最小限の変換器容量で構成することが 重要である。この目的を達成するために、発電設備からプラ ズマまでを含めたシミュレーション、すなわちトータルシミ ュレーションが必要となる。図6は、名古屋大学プラズマ研 究所で計画が進められているハイブリッド方式の、R装置用 電源装置を対象にしたトータルシミュレーション用等価回路 の例である。本シミュレーションにより、交流側電圧の波形 ひずみや、1バンク事故時の他バンクへ及ぼす影響などの解 析が可能となり、各機器への詳細な仕様設定ができるように なった。また、結果の一部は、発電設備の設計へもフィード バックされる。

サイリスタ変換装置の使い方によっては, 無効電力を制御



図5 FERを対象とした解析結果 ケー
ストは、サイリスタ変換装置だけを、ケース2は、
各サイリスタ変換器の出力端にバイパスサイリスタ
スイッチを設け,低出力時に上記変換器の一部を短
絡状態にして力率を改善したもので、ケース3は,
更に高電圧発生回路を適用したものである。

68

核融合電源・制御システム解析技術 699



図6 R装置用電源装置のトータルシミュレ ーション回路例 実際は各変換器は12相以上に なり、その結果、変換器用変圧器の台数も増える。 運転時の遅れ要素などを考慮した制御回路(本図に 図示せず)も考慮した。



注: F*(フィードバック係数)

G*(入力フィードフォワード係数)

図7 非干渉制御システム 非干渉制御システムの基本ブロック図を示 す。

して、上位の変換器用変圧器や交流同期発電機の容量を低減 することも可能であり、これを実現するためによく用いられ るのが、バイパススイッチ方式と非対称制御方式である。す なわち、バイパススイッチ方式は、直流出力電圧が小さくて 済む運転期間に、サイリスタ変換器の一部をサイリスタスイ ッチで閉路し、力率を向上させるものである。図3に示したF ER電源の等価回路で、直流出力電圧が低くなるフラットトッ プ期間に、このバイパススイッチ方式を適用し、この期間の 所要皮相電力を100MVA程度までに低減できた⁴⁾。また、R装 置シミュレーションでは、フラットトップ期間に非対称制御 モデルを導入して力率を改善している。これらはすべて、E MTPのTACS(Transient Analysis of Control System)機能 を活用したものである。

一方, ハイブリッドコイル方式は, 原理的に, 各コイルへ

含めた電源装置全体のシミュレーションも実行可能となり、 その結果,相互干渉をもつ電源の小容量化も高精度に計画でき、 図5の例では電源容量を約50%に低減できることが分かった。

4 共通電源方式の検討

核融合装置は,負荷条件をそのまま電源装置で展開するだ けではバランスのとれた設計にすることが難しく,核融合装 置本体のシステム設計と電源装置のシステム設計とを,フィ ードバック的に収束させていくことにより,核融合装置全体 の設計がなされるものと考える。この意味で,電源装置の立 場から核融合装置本体を見て,核融合装置全体の設計を行な うことも必要と考えられ,以下に示す内容がその一つの試み である。

すなわち,図2のハイブリッドコイル方式による電源構成 で,負荷コイルの巻数を適切に調整し,高電圧発生回路に並 列に共通電源(ダイオード変換器)を設けた方式⁸⁾である。こ の方式による基本構成を図8に示す。この場合,各コイルに 直列に接続されるサイリスタ変換装置は,各コイルの特性を



複数の機能別電流を流すものであるから、サイリスタ変換装置によって機能別制御を行なうには、複数の物理量間の干渉 を解く必要があり、図7に示す非干渉制御方式⁷⁾が導入される。サイリスタ変換装置は、このアルゴリズムに従って運転されることになる。このように、大規模回路解析用プログラムを使用した解析技術の進歩によって、プラズマの制御系も

注:略語説明 V_0 (共通電源) $Vf_1 \sim Vf_6$ (補償電源) HV(高電圧発生回路)

図8 共通電源方式による基本構成 各コイルの巻数(n1~n6)を適切に設定することにより、I台の共通電源でプラズマ電流と平衡の制御も可能である。

69

700 日立評論 VOL. 66 No. 9(1984-9)

補償するよう動作する。

さて、プラズマ表面の磁束関数値 ψは、プラズマ電流 Ipと 各コイル電流I1……Inによって表わされ、プラズマ表面にコ イル数と同数の参照点を設けた場合, 各参照点での磁束関数 値 $\phi_1 \cdots \phi_n$ は次式で表わせる。ここで、 F_p は単位プラズマ電 流が作る磁束関数値, Fは単位コイル電流が作る磁束関数値 である。

(2)式に示す磁束関数値を一定の値 40とすることが、プラズマを 平衡に維持する条件である。次に(2)式を各コイル電流につい て解き、回路方程式に代入するとコイルに印加すべき電圧が 得られる。特にコイルがプラズマに接していると考えると磁 束関数値はすなわち相互誘導係数であるから各コイルに印加 すべき電圧 $V m 2 \pi \phi_0$ となることが分かる。

$$\left[\begin{array}{c}V\end{array}\right] = 2 \pi \left[\begin{array}{c}1\\ \vdots\\1\end{array}\right] \psi_0 \cdots (3)$$

このことは、各コイルの制御電源を一つにまとめて、共通電 源化できる可能性を示唆するものであり, コイルがプラズマ 表面から離れている一般の場合にも適用可能である。



図10 共通電源方式のシミュレーション例 共通電源方式によるシ ミュレーション結果を示す。ただし、プラズマに関する条件は図1、コイル配 置は図9による。また電源装置は、ダイオード電源(一定電圧)+制御電源(±1 kV のリミッタ付) である。

図9のコイル配置により、上記の考え方に基づいてプラズ マも含めてシミュレーション計算を行なった。図10に、その シミュレーション結果を示す。これをみると、プラズマ電流 は目標値にほぼ一致し, 共通電源方式によるシステム構成も 可能であることが分かる9)。実際には、コイルの巻数調整だけで 本方式を実現することは困難であり、 プラズマ条件、コイル 配置などを含めたシステム全体の最適化が必要である。

言 5 結

70

EMTPに代表される最近の汎用大規模回路過渡解析プログ



ラムの進歩によって、これまで述べた大規模回路を対象とし た、各種のシミュレーションが実行可能となった。制御系も 含んだこれらの解析により,従来FERの電源設備容量が3,000 MVA と言われていたものが、1,500 MVA 程度まで低減できる ことが分かった。更に、電源装置のシステム構成、各種機器 仕様がほぼ明らかとなり,機器配置図の作成までもが可能と なった4)。一方,技術的問題点も明確になりつつあり,例え ば,超電導エネルギー蓄積装置の導入6),高力率・高効率運 転の検討,現代制御理論の積極的な導入などが今後の重点技 術課題と考えられる。

参考文献

- 1) W. Feneberg et al.: Multipole Tokamak Equilibria, Nuclear Fusion 13, 549 (1973)
- 関,外:Legendre 陪函数展開を用いた自由境界 MHD 平衡の 2) 計算コード「SPHEX」, JAERI-M6734 (1976-10)
- EMTP Rule Book (1980-9) 3)
- 日立製作所:核融合実験炉(FER)の概念設計一電源設備計画 4) (核融合技術調査専門委員会資料No. 3-5), 1983, 5
- 電気学会:大電流技術調査専門委員会技術報告書(第9.2節) 5) 1984, 6
- R. Shimada, et al. : A Preliminary Study on Feeding Power 6) and Energy to the Poloidal Field Power Supply for a Tokamak Reactor (12th. Soft), 1983, 9
- P. L. Falb et al. : Decoupling in the Design and Synthesis of Multivariable Control Systems, 1967-12
- 嶋田:ハイブリッドポロイダル磁界コイルによるトカマクプ 8) ラズマの電流平衡制御(電気学会論文誌,昭57-9)
- R. Shimada, et al. : Control Method for Coil Currents of 9) Hybrid Poloidal Field Coil System in a Tokamak Reactor,

図 9 コイル配置 共通電源方式による負荷コイルの配置を示す。

(13th. Soft), 1984-9