核融合電源制御システムの解析とシミュレーション

Computer Simulation of Power Supply System for Nuclear Fusion Device

日立製作所は、核融合試験装置の電源システムの総合的な検討を行なうために、 電源システムシミュレーションプログラム、プラズマ位置・形状制御シミュレーションプログラム、電源制御シミュレータなどを開発した。

電源システムシミュレーションの特長は、発電機による多数負荷運転時のサイリスタ電源の相互干渉の解析ができることにあり、実験によってシミュレーションの妥当性を確認した。プラズマ位置・形状制御シミュレーションプログラムは、プラズマと負荷コイルの作る磁場との相互作用の変化の影響を考慮した点に特長があり、プラズマ中で発生する各種外乱による電源制御の解析が可能になった。また、電源制御シミュレータは、ディジタルシミュレーション結果の実験的確認、各種制御方式の検討などに利用され、核融合電源制御システムの総合的な検討が可能になった。

藪野光平* Kôhei Yabuno 植田明照* Akiteru Ueda

横島 皓* Shiroshi Yokoshima

斉藤龍生** Ryûsei Saitô 村井勝治*** Katsuji Murai

Ⅱ 緒 言

近年,核融合試験装置はますます大形化する傾向があり,それに伴い,装置を構成する各要素に対しては高度の技術開発が要求される。日立製作所は,昭和50年度に現在日本原子力研究所で建設中の臨界プラズマ試験装置 "JT-60" 電源の試作開発として,大電流しゃ断用サイリスタしゃ断器形変流器コイル電源回路の研究開発 $^{1)}$ を行ない,更に昭和54年度には,京都大学「ヘリオトロン \mathbf{E} 」用の変流器電源として,世界最初のサイリスタしゃ断器形ジュール加熱電源を完成した $^{2)}$ 。

核融合試験装置の磁場コイル電源は、大電流しゃ断だけでなくプラズマの挙動に応じた電源制御を行なわなければならない。特に、発電機をもった電源システムでは、発電機側からみて同時に多数のサイリスタ変換装置を運転することになるので、各サイリスタ電源間の相互干渉を考慮して、所定の運転特性が得られるようにしなければならない。そのためのシミュレーションとして、発電機制御シミュレーションプログラムを開発し、これによって、発電機系の詳細検討が可能になった30。

一方,負荷としてのプラズマ側からみた場合,プラズマとポロイダル磁場コイルの作る磁場や真空容器との相互作用が,電源制御に及ぼす影響は大きく,負荷と電源の関係は極めて大きい。そのためのシミュレーションとして,プラズマと各要素の相互作用を電気回路的に扱ったシミュレーションプログラムを開発し,これによって,磁場外乱によるプラズマの位置及び断面形状の制御特性の解析が可能になった4)。

更に,発電機を含めた電源制御シミュレータ⁵⁾を製作し,実験的な確認を行ない,ディジタルシミュレーションとともに核融合装置電源システムの総合的な検討が可能になった。

② ポロイダル磁場コイルとポロイダル磁場コイル電源の開発

核融合装置でのプラズマの挙動は複雑なので、コイル真空容器などとの相互作用が電源制御に大きな影響を及ぼし、コイルと電源の関係を複雑にしている。日立製作所ではそれに対処するために、プラズマシミュレーション⁶⁾、プラズマ位置形状シミュレーション、発電機シミュレーション、電源制御

シミュレータなどを駆使し、効果的な電源のシステム設計を 行なっている。

これらのシミュレーションと電源設計の関係を, ブロック 図で示すと図1のようになる。まずプラズマシミュレーショ

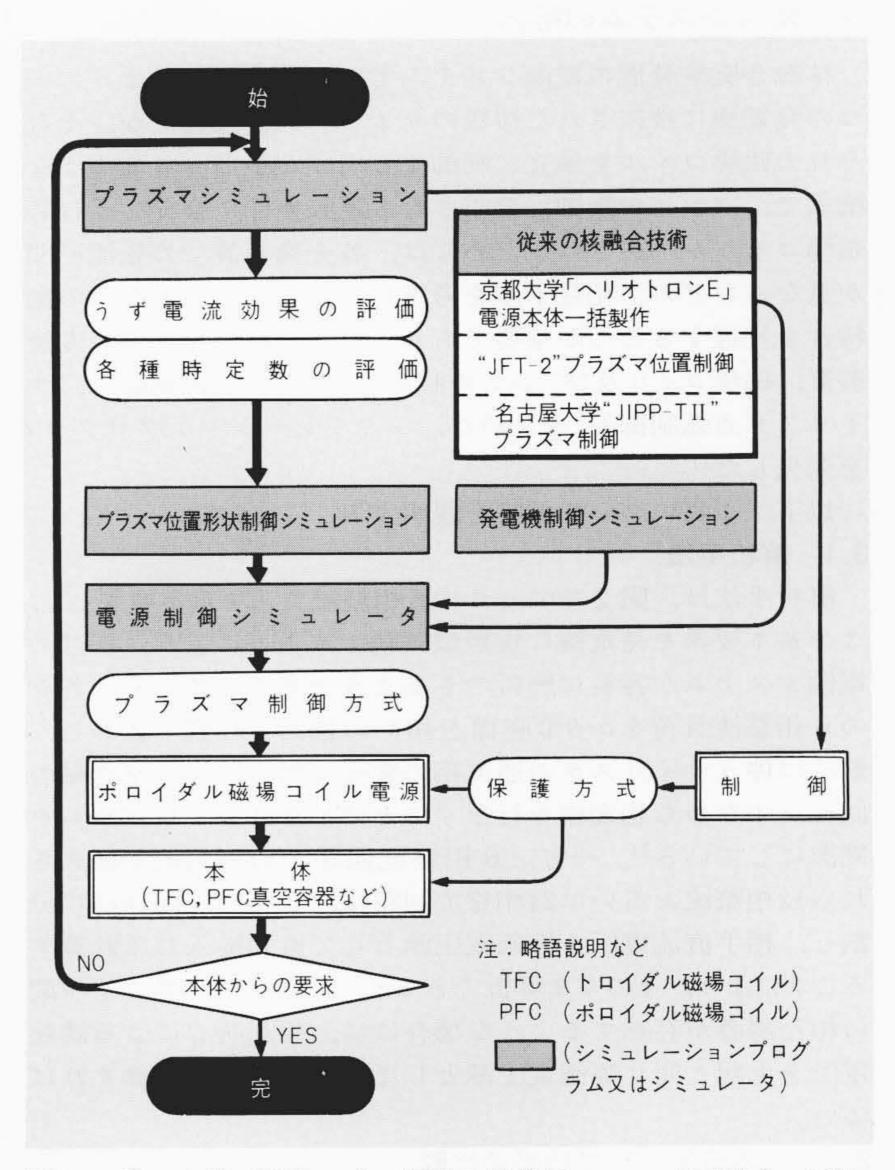


図 | ポロイダル磁場コイル電源の開発フロー PFC(ポロイダル磁場コイル)とPFC電源は密接な関係があるので、各種シミュレーションを行なって検討しなければならない。

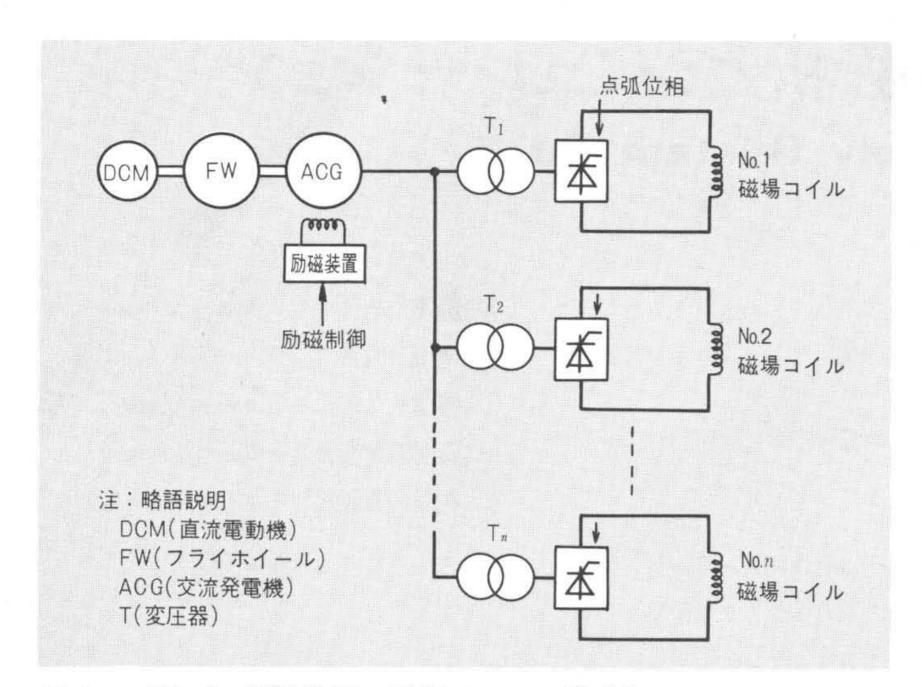


図 2 プラズマ試験装置の電源システム構成例 各磁場コイルはそれぞれのサイリスタ変換装置により、プラズマ制御の運転条件に合うよう独立に制御される。

ンでうず電流効果,各種時定数の評価を行ない,これによって、プラズマ、電源などの制御特性の検討が可能になる。更に、電源はコイル系に接続されているので、本体の要求が満たされなければ、再びシミュレーションを行なってシステムとしての要求が満たされるよう検討が行なわれる。

3 電源システムの解析

核融合実験装置の電源システムでは、図2に示すように一つの発電機に接続された複数のサイリスタ変換装置が、それぞれの磁場コイルを独立に制御する構成が多い。このような構成で、プラズマ制御に要求される運転条件に合うように各磁場コイルが励磁されるためには、各変換装置での転流期間が重なるなどの、相互干渉を考慮した電源システム全体の動特性を把握することが重要である。そのため、発電機、変換装置、磁場コイル及びこれらの制御系(発電機励磁制御系、サイリスタ点弧制御系)を含めた、シミュレーションプログラムを開発した7。

以下,これについて概略を説明する。

3.1 解析手法

解析手法は、図2での一つの6相整流負荷を基本要素とし、この基本要素を発電機に複数個接続することにより、任意の電源システムが容易に解析できるよう考慮されている。各々の6相整流負荷をα-β-0座標を用いた回路方程式で表わし、転流に伴うサイリスタの通流相の変化に対しては、座標軸の回転、すなわち相変換を行なうことにより計算プログラムを簡潔にしている⁷。一方、6相整流回路の直列接続で構成される12相整流あるいは24相整流回路は、6相整流回路群に分割し、相手直流電圧を等価電圧源として直列挿入して計算することにより、そのまま解析できる²⁾。同様に、磁場コイル間に相互誘導が存在するような場合には、相互誘導による誘起電圧を上記と同じ等価電圧源として直列挿入して計算すればよい。

3.2 実験結果と計算結果の比較

上記のシミュレーションプログラムの妥当性を確認するため,図3に示す実験回路を構成し,磁場コイルを励磁する実験を行なった。実験回路は,250kVA同期発電機に二つの6相サイリスタ変換装置を接続し,それぞれの磁場・コイルを独立に励磁する構成となっている。

実験は図3での点弧角 α_1 , α_2 を90度以上のインバータ領域に設定し、発電機電圧を確立し、その後、 α_1 , α_2 をステップ状に90度以下の所定の値に変化させ、各磁場コイルに直流電流を流す。そして、このときの各部の電圧、電流をオシログラフにより測定する。このようにして得られた実験結果の一例を図4(a)に、一方、同一条件でシミュレーションプログラムにより計算した計算結果を同図(b)に示す。両者を比較すると、各部の電圧、電流波形がよく一致していることが分かる。なお、実験結果で、t=0s以前に発電機電流 i_a が零でないのは、整流変圧器に流れる励磁電流のためであり、計算では励磁電流の影響は無視してある。

3.3 シミュレーションプログラムの特長

以上述べたシミュレーションプログラムの特長を示すと, 下記のようになる。

- (1) 多数の磁場コイルが接続された電源システムを,負荷の運転条件に従って,発電機の運転特性はもとより,制御系を含め瞬時波形として解析できる。
- (2) 12相あるいは24相の多相整流回路の現象が解析できる。
- (3) 磁場コイル間に相互誘導が存在する場合,あるいは磁場コイルに電磁結合する別の回路(例えば,プラズマ電流回路)が存在するような場合でも解析が可能である。

4 プラズマ位置・形状制御シミュレーション

4.1 解析手法

トカマク型核融合装置は一種の変圧器であるが、プラズマ

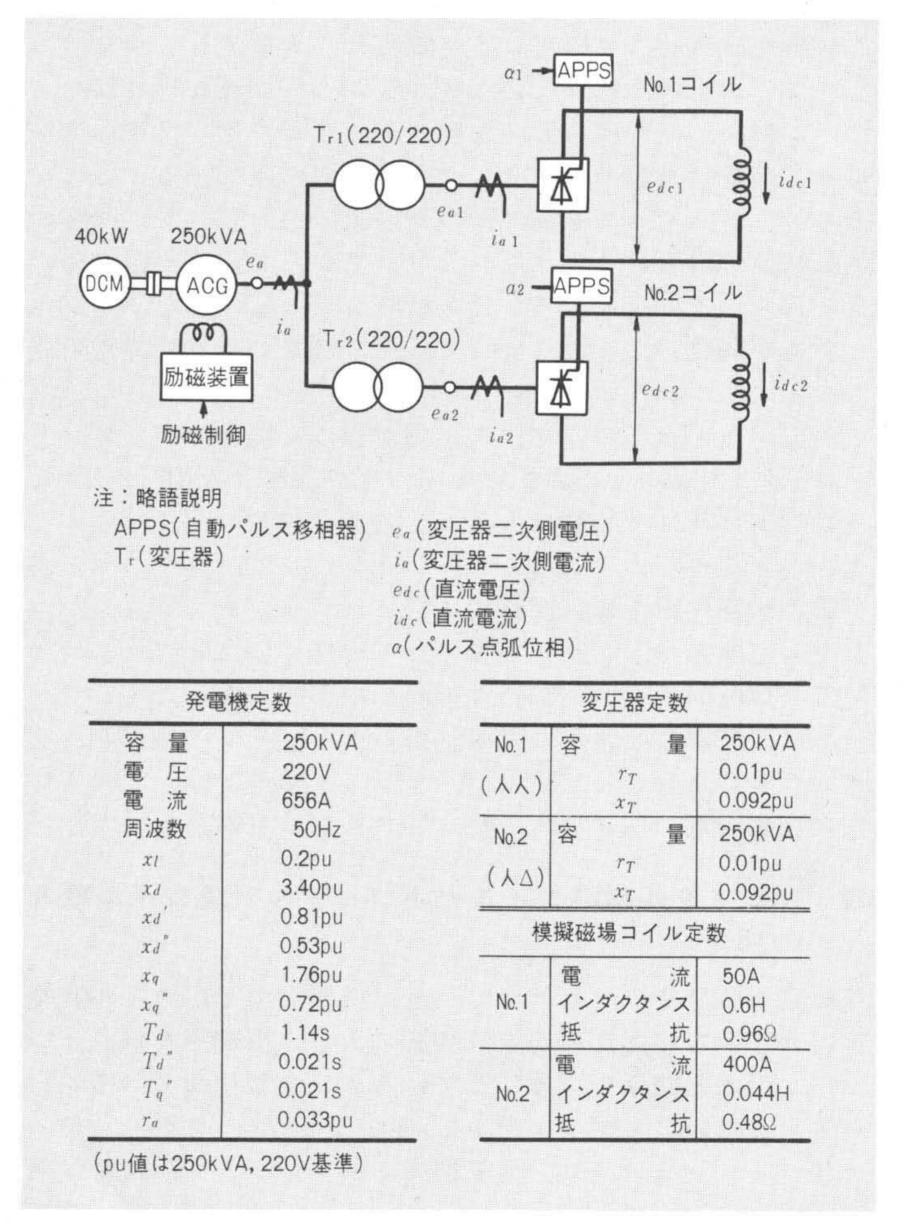


図 3 250kVA発電機を用いた実験回路 実験は点弧角 α_1 , α_2 を90度以下の所定の値にステップ状に変化させ磁場コイルを励磁し、このときの各部の電圧、電流を測定する。

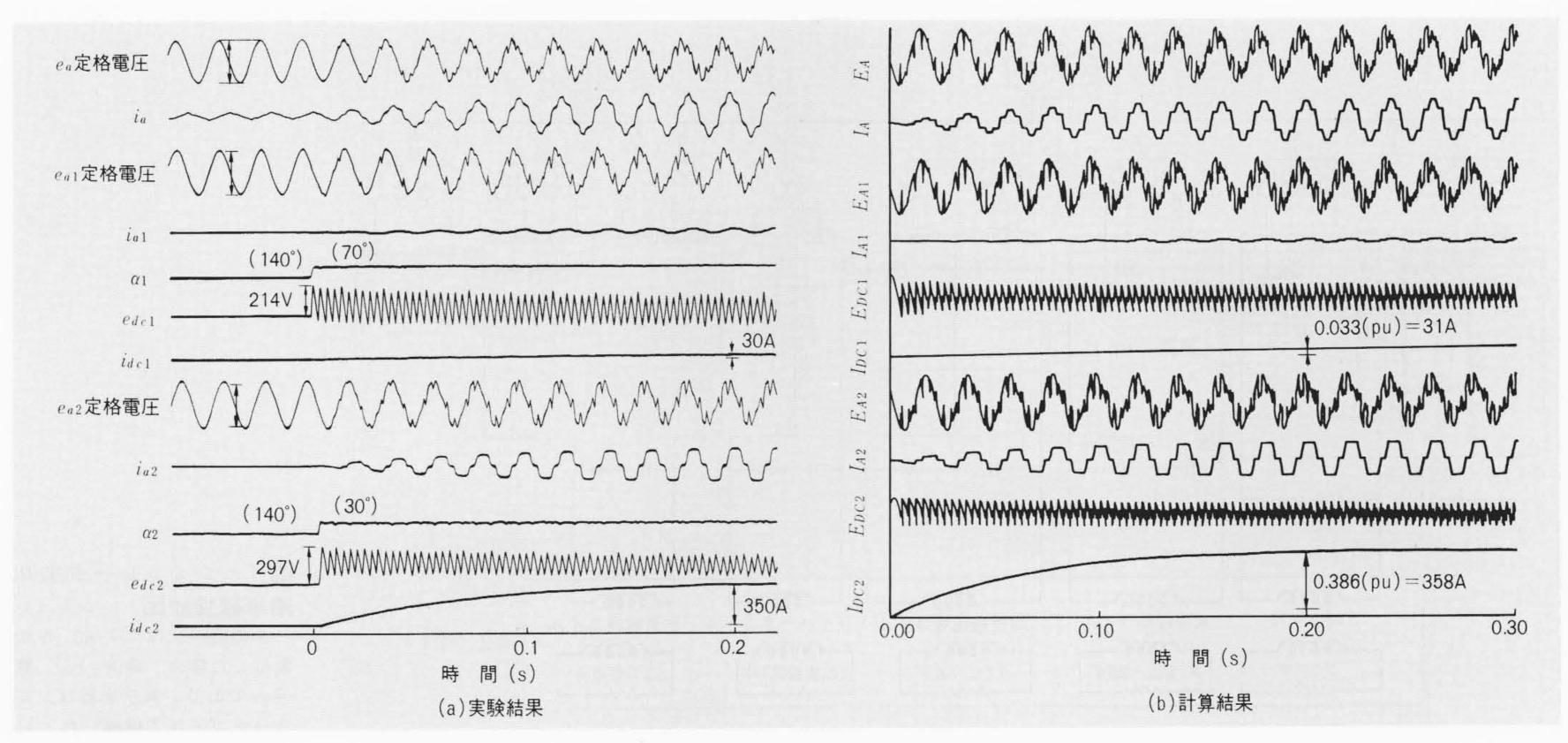


図4 実験結果と計算結果 実験と同一条件でシミュレーションプログラムにより計算した。

を電気回路として取り扱う場合、プラズマの挙動と磁場コイルの作る磁場、真空容器との相互作用を考慮しなければならない⁸⁾。そこで、プラズマの位置及び断面形状の制御を検討するために、プラズマと各要素の相互インダクタンス M_{ik} の変化を考慮した電源制御のシミュレーションプログラムを開発した。基本式は、次に示すように各要素の回路方程式、プラズマ平衡の式⁹⁾及びプラズマ断面形状の式⁸⁾から成り立つ。

$$\frac{\mu_0 I_p}{2} \left(\ln \frac{8R_p}{r_p} + \beta_p + \frac{l_i}{2} - \frac{3}{2} \right) + 2\pi R_p \cdot B_z = 0 \cdot \cdots \cdot (2)$$

$$\delta = \delta(R_p, r_p, \beta_p, l_i, n)$$
(3)

ここに I_k : 各要素の電流

*I*_b:プラズマ電流

R,: 各要素の抵抗

 E_i : 各コイル電源電圧

R_p:プラズマ大半径

rp:プラズマ小半径

 B_z : プラズマ中心位置での磁場

β_p: ポロイダルベータ

 l_i : プラズマの内部インダクタンス

n: n-index

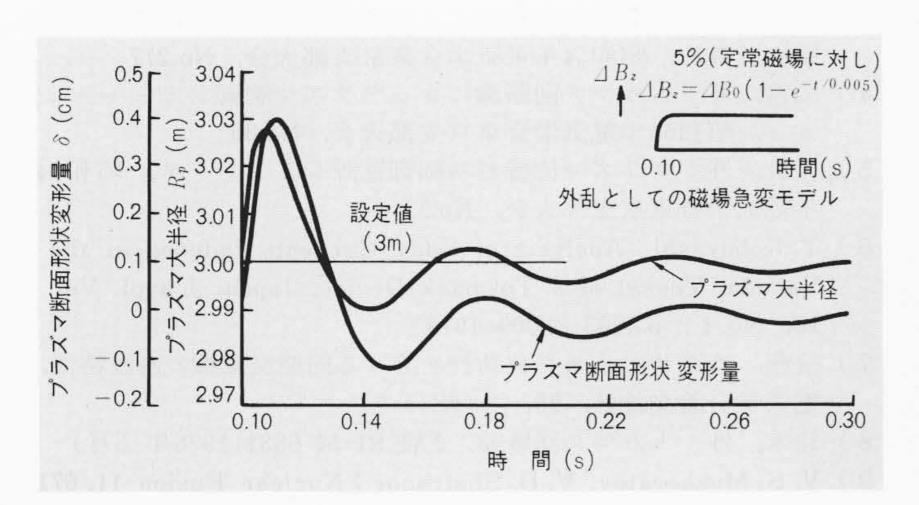


図 5 磁場外乱が加わったときのフィードバック制御 マイナAVR を設けPID制御を行なったときの制御フィードバック制御特性を示す。プラズマ大半径、プラズマ断面形状変形とも制御がよく行なわれている。

4.2 外乱によるプラズマ位置・形状の変位と制御

外乱によるプラズマの位置・形状の変位と制御について、 具体的に前記(1)式、(2)式及び(3)式からシミュレーションした 結果について述べる。図 5 は、プラズマ電流維持時間に入っ た直後(t=0.1s)に磁場外乱 ΔB_z が加わった場合のプラズマ大 半径 R_p 、プラズマ断面形状変形量 δ を示す。外乱の大きさは、 定常磁場(30kG)の 5 %の磁場が 5 msの時定数で変化すると 仮定した。制御系は、マイナAVR(Automatic Voltage Regulator:自動電圧調整器)制御系とプラズマの位置及び断面形 状の演算要素としてのPID(比例+積分+微分)要素を設けて、 シミュレーションを行なった。

シミュレーションの結果、プラズマ大半径 R_p は設定値に対し約 $1\%(3\,\mathrm{cm})$ 変位するが、外乱が入ってから約 $200\,\mathrm{ms}$ 後には定常状態にもどる。また、(3)式からも分かるように、プラズマ大半径の関数であるプラズマ断面形状も $0.4\,\mathrm{cm}$ 程度変形するが変形量は小さい。

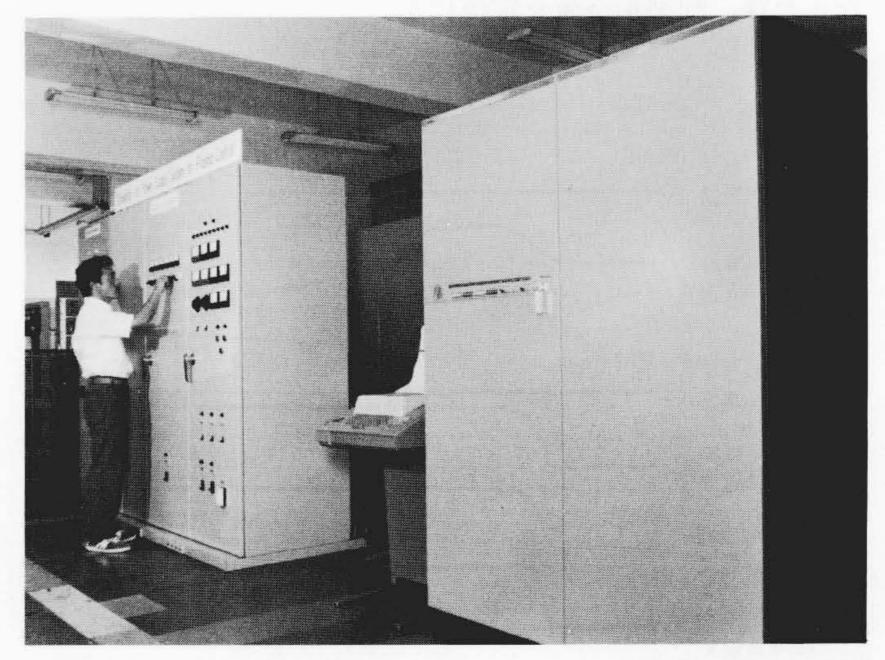


図 6 シミュレータの外観 向かって左側が電源制御装置,右側が日立制御用計算機 HIDIC 80 である。そのほかに,変換装置,負荷コイル群などがある。

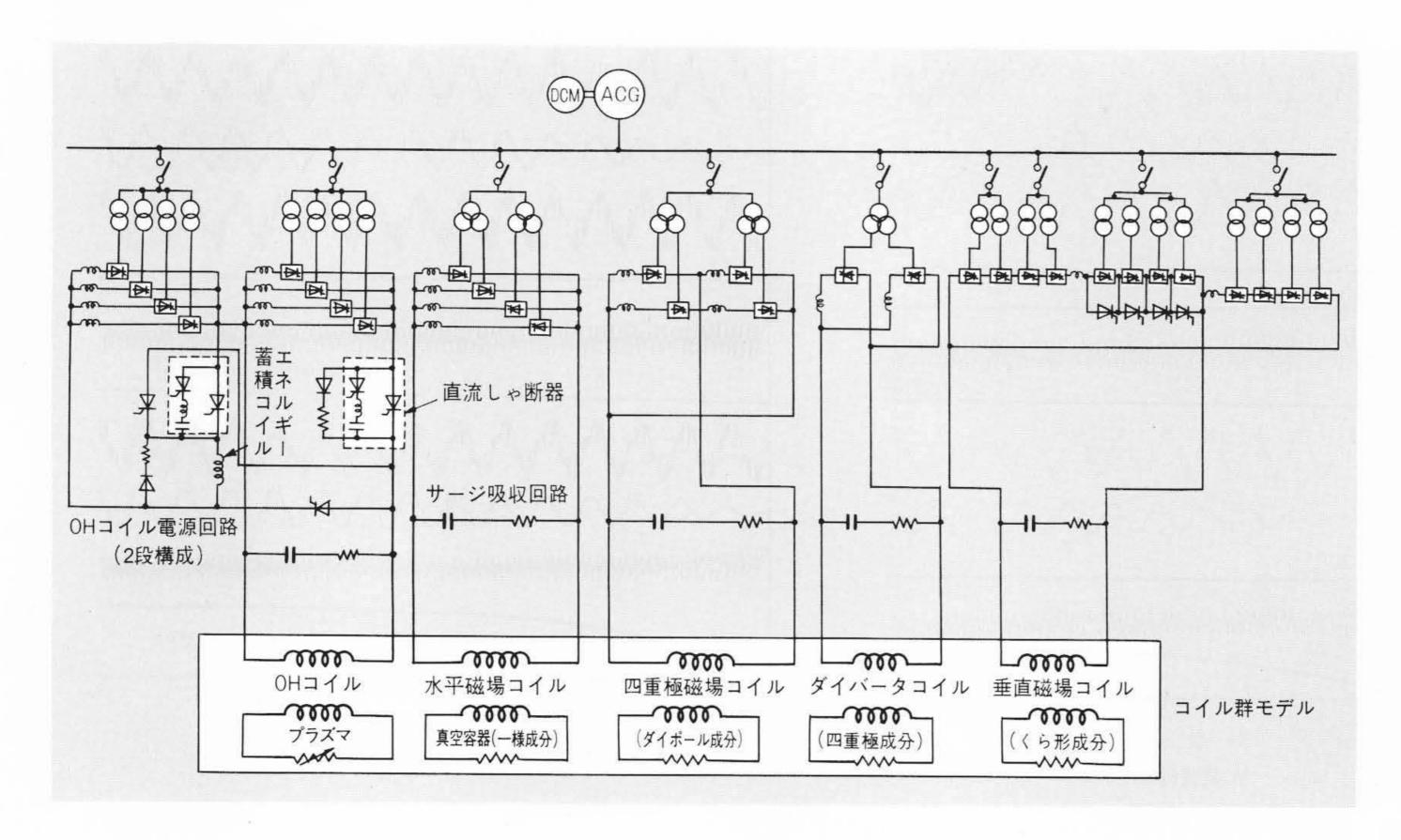


図 7 シミュレータ主回 路単線接続図 シミュレータの縮小比は"JT-60"を対象にした場合、電流 2.500、電 圧 50である。真空容器は、4 成分をコイルで模擬した。

5 電源制御シミュレータ

核融合装置の電源制御特性を実験的に検証するために、電源制御シミュレータを製作した。シミュレータの一部外観を図6に示す。この装置を"JT-60"のポロイダル磁場コイル電源実機に対して比較した場合の縮小比は、電流が $\frac{1}{2,500}$ 、電圧が $\frac{1}{50}$ である。シミュレータの主回路単線接続図を図7に示す。

電源は交流発電機(20kVA)1 台を使用し、整流装置は24相と12相で構成した。OH(Ohmic Heating)コイル電源の直流しゃ断器は、サイリスタしゃ断器で構成した。

プラズマは実物を模擬することが難しいので、コイルで模擬した。また、真空容器の電流は4成分(一様成分、四重極成分、ダイポール成分及びくら形成分)の電流¹⁰⁾で表わし、これを4種類のコイルで模擬した。

プラズマの位置と断面形状の演算は、日立制御用計算機 "HIDIC 80"を使用して行なう。計算機は各コイルの電流(プラズマ回路電流,真空容器電流及び各負荷コイル電流)を取り込み、それを基にプラズマの位置及び断面形状の演算を行なった後、制御指令値を電源に与える。

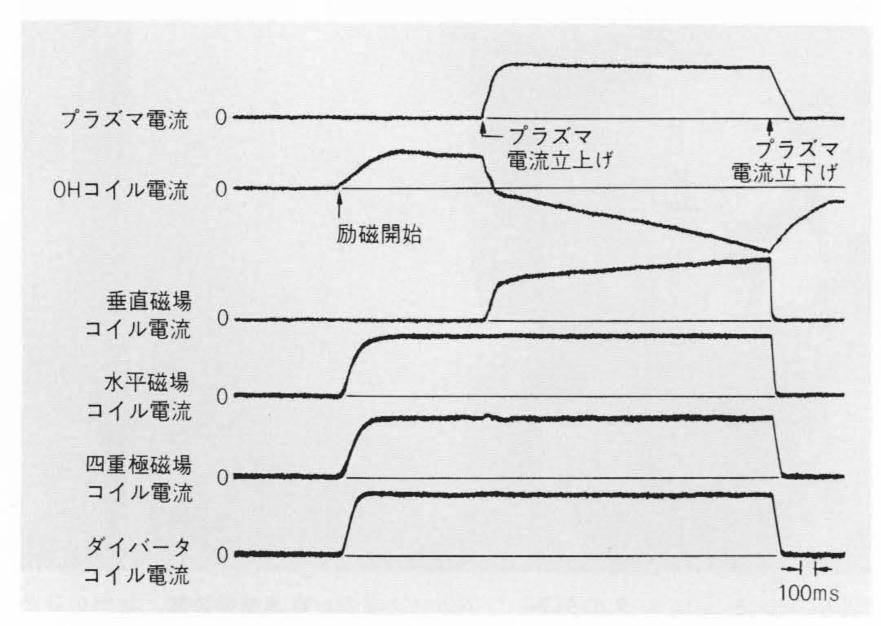


図 8 各磁場コイル電流波形 各コイル電流立上げから、プラズマ発生、プラズマ電流維持時間を経て、プラズマ電流を停止するまでの諸特性を示す。

電源運転結果の一例を図8に示す。

本シミュレータによって,次のような実験的検証が可能で ある。

- (1) 多負荷運転によるサイリスタ変換装置の相互干渉の技術 的問題の検討
- (2) プラズマ制御の制御アルゴリズムの検証
- (3) 各種電源制御方式の検証
- (4) サイリスタしゃ断器を使ったOH電源の検討

6 結 言

核融合装置電源システムで、発電機を中心にした電源解析シミュレーションプログラム、及びプラズマ位置形状を制御するシミュレーションプログラムを開発し、更に、実験的に確認を行なう電源制御シミュレータを開発することにより、システム全体を総合的に検討することが可能になった。

最後に、プラズマ位置・形状制御に関し、種々の御助言と 御指導をいただいた日本原子力研究所大型トカマク開発部の 各位に対して、深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1)田村,外:臨界プラズマ試験装置(JT-60)電源の試作開発,日 立評論,60,167~170(昭53-2)
- 2) 宇尾,外:ヘリオトロンEのジュール加熱電源,昭和54年電 気学会東京支部大会,No.296
- 3) 横島,外:発電機に多相サイリスタ負荷が接続された系の動 特性計算法,昭和54年電気学会東京支部大会,No.217
- 4) 二宮,外:トカマク回路論によるプラズマ制御シミュレーション,昭和54年電気学会東京支部大会,No.36
- 5) 天野,外:プラズマ位置形状制御電源シミュレータ,昭和54年電気学会東京支部大会,No.37
- 6) T. Kobayashi: Analysis of Eddy Currents Induced in the Vacuum Vessel of a Tokamak Device, Japan. J. appl. Vol. 18, No. 1, p.2003~2009(1979)
- 7)後藤,外:サイリスタ負荷群を有する同期発電機の過渡特性, 電気学会論文誌B,99,9(昭54-9)
- 8) 鈴木, 外:トカマク回路論, JAERI-M 6531(1976年-5月)
- 9) V. S. Mukhovatov, V. D. Shafranor: Nuclear Fusion 11, 671 (1971)
- 10) 二宮,外:トカマク回路論による渦電流の評価,昭和52年電 気学会全国大会,No.216