

JT-60SA における直流電源系の初期設計検討

Initial Design Study of a DC Power Supply System for JT-60SA

島田 勝弘 大森 栄和 岡野 潤 松川 達哉 寺門 恒久 栗原 研一

Katsuhiro SHIMADA, Yoshikazu OMORI, Jun OKANO, Tatsuya MATSUKAWA
Tsunehisa TERAKADO and Kenichi KURIHARA

核融合研究開発部門
トカマク放電システム開発グループ

Tokamak Control Group
Fusion Research and Development Directorate

March 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-
Technology

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

JT-60SA における直流電源系の初期設計検討

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門

トカマクシステム技術開発ユニット

島田 勝弘、大森 栄和、岡野 潤、松川 達哉^{*}、寺門 恒久、栗原 研一

(2008 年 2 月 22 日 受理)

臨界プラズマ試験装置 JT-60 の次世代装置として JT-60SA(Super Advanced)の改修設計検討が進められている。JT-60SA では、トロイダル磁場コイル(TF コイル)、ポロイダル磁場コイル(PF コイル)が超伝導化され、約 100s 以上のフラットトップをもつ長時間プラズマ放電が可能となる。このような超伝導コイルに直流電力を供給する電源システムを構築する必要がある。本システムは、既存の JT-60 電源を有効に再利用し、新規製作による電源機器を組み合わせる構成として、コストの低減を図った。また、超伝導コイルクエンチ時に蓄積エネルギーを急速に放出させるクエンチ保護回路も新規製作する。本報告書では、JT-60SA の直流系電源(TF コイル電源、PF コイル電源)の回路構成やそれらの制御手法の日本原子力研究開発機構内における初期検討結果について記述する。

Initial Design Study of a DC Power Supply System for JT-60SA

Katsuhiro SHIMADA, Yoshikazu OMORI, Jun OKANO, Tatsuya MATSUKAWA[※]

Tsunehisa TERAKADO and Kenichi KURIHARA

Division of Tokamak System Technology

Fusion Research and Development Directorate

Japan Atomic Energy Agency

Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received February 22, 2008)

The design study of JT-60SA (Super Advanced), which is the next generation device of JT-60, has been starting. In JT-60SA, Toroidal Field coil (TF coil) and Poloidal Field coils (PF coils) are superconducting coils and a long-pulse plasma discharge with more than 100s flattop is assumed. The power supply system is necessary to provide DC power to the superconducting coils. Designed DC power system is composed of the reused JT-60 power supply components and newly manufactured ones to reduce total cost. A quench protection circuit for superconducting coils will be newly manufactured to discharge stored energy in coil quickly. This paper describes the initial design study of JT-60SA DC power supply system for the TF and PF coils in Japan Atomic Energy Agency (JAEA).

Keywords: JT-60SA, Toroidal Field Coil Power Supply, Poloidal Field Coil Power Supply, Coil Current Control

[※]Collaborating Engineer

目次

1.はじめに-----	1
2.トロイダル磁場コイル電源の設計検討-----	3
2.1 全体回路構成-----	3
2.2 トロイダル磁場コイル電源制御系の設計検討-----	4
2.3 トロイダル磁場コイル電源シミュレーション-----	5
3.ポロイダル磁場コイル電源の設計検討-----	8
3.1 全体回路構成-----	8
3.2 ベース電源-----	11
3.3 ブースター電源/アシスト電源-----	13
3.4 バイパススイッチ-----	15
3.5 クエンチ保護回路-----	16
3.6 電源制御系の設計検討-----	17
3.7 プラズマ運転シナリオを用いたポロイダル磁場コイル電源シミュレーション-----	24
4.まとめ-----	30
謝辞-----	30
参考文献-----	30
付録1-----	31
付録2-----	34
付録3-----	36

Contents

1. Introduction -----	1
2. Design Study of Toroidal Field Coil (TFC) Power Supply -----	3
2.1 Overall Circuit Configuration for TFC Power Supply -----	3
2.2 Control System for TFC Power Supply-----	4
2.3 TFC Power Supply Simulation -----	5
3. Design Study of Poloidal Field Coil (PFC) Power Supply-----	8
3.1 Overall Circuit Configuration for PFC Power Supply -----	8
3.2 Base Power Supply-----	11
3.3 Booster / Assist Power Supply -----	13
3.4 Bypass Switch -----	15
3.5 Quench Protection Circuit -----	16
3.6 Control System for PFC Power Supply -----	17
3.7 PFC Power Supply Simulation using plasma operation scenarios-----	24
4. Summary -----	30
Acknowledgments-----	30
References -----	30
Appendix 1-----	31
Appendix 2-----	34
Appendix 3-----	36

1. はじめに

JT-60SA 計画とは、既存の臨界プラズマ試験装置 JT-60 設備を有効に再利用し、臨界プラズマクラスのプラズマ性能を発揮できる超伝導装置 JT-60SA(Super Advanced)に改造するものである。この計画は、国際熱核融合実験炉(ITER)のブローダー・アプローチ(BA)活動の一つとして、JT-60 を機動性の高いサテライトトカマク装置に改造し、ITER では出来ない先進プラズマ制御を行うとともに、原型炉に向けた ITER の補完的研究を推進することを目的としている^[1]。JT-60SA 装置では、トロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイルを超伝導化し、粒子ビーム加熱装置(NBI : Neutral Beam Injector)、高周波加熱装置(RF: Radio Frequency)の長パルス化により、高ベータ長時間プラズマ放電を実現する。想定される JT-60SA 装置断面図およびコイル配置図を Fig.1 に示す。

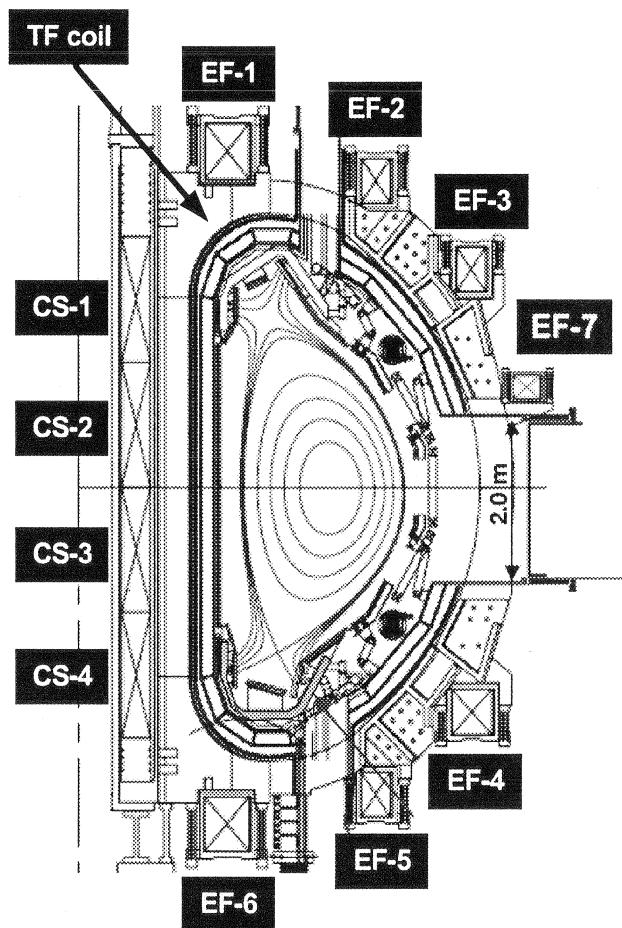


Fig.1 JT-60SA 装置断面図およびコイル配置

この超伝導化したトロイダル磁場コイルやポロイダル磁場コイルに直流の電力を供給する電源システムを新しく設計した。新しいコイル電源システムは、コストの低減を図るため、既存の JT-60 電源機器を有効に再利用する設計とした。

トロイダル磁場コイル電源は、定常的なトロイダル磁場コイル電流を制御するため低電圧大電流

の直流電源を新規製作する。ポロイダル磁場コイル電源は、プラズマの着火および立ち上げにおいてポロイダル磁場コイル電流を急激に変化させるため、高電圧出力の直流電源が必要となる。一方、着火/立ち上げ時以外は高電圧を必要としないので、その時間帯では低電圧電源で制御が可能である。また、前述のコスト低減のために、既存のパルス運転用電源は一方で高電圧を発生させることが可能であることから、短時間の高電圧発生用電源(ここでは、ブースター/アシスト電源と呼ぶ)として再利用する。長時間低電圧発生用電源は、新設で製作することになる。したがって、ポロイダル磁場コイル電源は、定的に電力を供給する低電圧大電流のベース電源と、プラズマの着火および立ち上げ時に高電圧をコイルに印加するブースター/アシスト電源が主要機器であり、この電源にコイルクエンチ時のコイルの磁気エネルギーを急速に抵抗で消費させコイルを保護するクエンチ保護回路が付け加わる構成となる。ブースター/アシスト電源は既存の JT-60 空心変流器コイル電源(F 電源)と垂直磁場コイル電源(V 電源)を再利用して構成する。

本報告書では、第 2 及び 3 章にてそれぞれトロイダル磁場コイル電源、ポロイダル磁場コイル電源の回路構成および制御手法の検討結果を述べる。

2. トロイダル磁場コイル電源の設計検討

本章では、想定されるトロイダル磁場コイルの仕様に対応したトロイダル磁場コイル電源の回路構成の設計検討および通常運転時(コイル励磁および消磁)における制御性能を評価する。

2.1 全体回路構成

トロイダル磁場コイル電源は、直流電力を供給する3相サイリスタブリッジ変換器1台、変換器用変圧器1台、クエンチ保護回路(QPC)3台で構成する。トロイダル磁場コイル電源全体回路構成をFig.2に示す。トロイダル磁場コイルは18個で構成されており、6コイルに対し1台のクエンチ保護回路を直列に接続することを想定した。トロイダル磁場コイルは、ポロイダル磁場コイルのように、プラズマ放電実験中に正負両方向のコイル電流を必要とせず、電流を連続的にゼロクロスさせることができないため、一方向のみの電流を出力する3相サイリスタブリッジ変換器を採用した。また、クエンチ保護回路動作時には、抵抗により電流を減衰させるためにコイルの端子間および対地間に電圧が印加される。想定されるトロイダル磁場コイルでは、対地電圧を1.5kV以下でかつクエンチ時電流減衰時定数 τ を12秒以下としなければならないため、クエンチ保護回路1台での構成は困難となる。そのため、クエンチ保護回路3台構成としてクエンチ時におけるコイルの対地間電圧を小さくする。クエンチ保護回路の回路構成は、現在検討中であるが、案として電力用半導体素子の一つであるIGCT(Integrated Gate Commutated Thyristor)とダイオードで構成された電流スイッチ部と、パイロブレーカーによるスイッチ不動作時のバックアップ回路部と、放電抵抗で構成する(Fig.3参照)。トロイダル磁場の極性を切り替える場合には、各電源機器要素の極性切換器により回路を変更する。

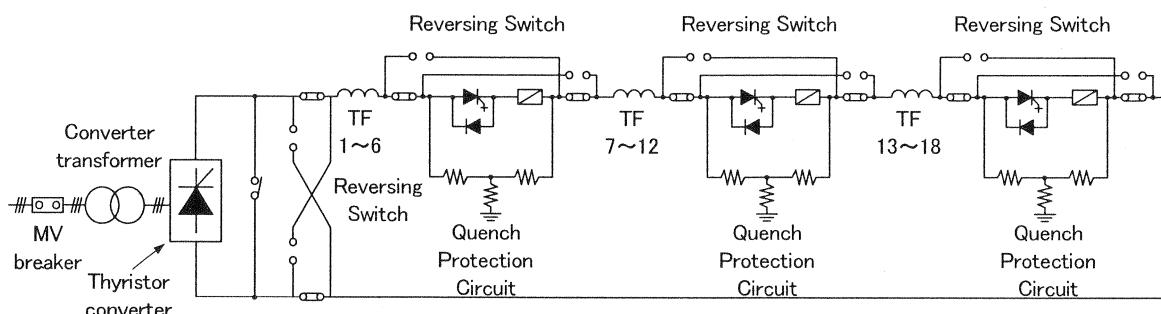


Fig.2 トロイダル磁場コイル電源回路構成

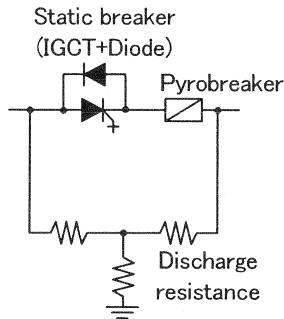
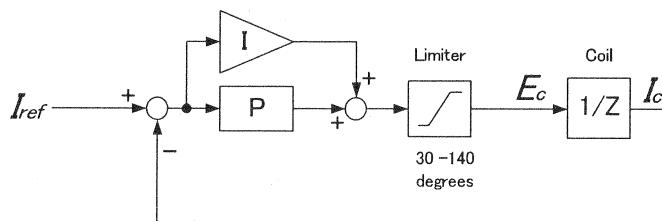


Fig.3 クエンチ保護回路(Solid state switch type)

2.2 トロイダル磁場コイル電源制御系の設計検討

トロイダル磁場コイルは、基本的に一定の磁場を発生させるために、所望される電流指令値に対して電流一定制御を行うものとした。制御ロジックは、電流指令値と回路電流の偏差を用いたPI制御(電流フィードバック制御)を採用し、その案を Fig.4 に示す。



Parameters:
 I_{ref} : Reference current (constant)
 I_c : Circuit current
 P : Proportional gain
 I : Integral gain
 E_c : E_c value for converter control angle (=Converter output voltage)
 Z : Coil impedance

Fig.4 制御ロジック図(案)

サイリスタ変換器の点弧角範囲は、サイリスタ変換器アーム間の転流失敗を防ぐために $30^\circ \sim 140^\circ$ とし、点弧角リミタ機能を設ける。トロイダル磁場コイル電源を停止させる場合には、点弧角を 120° にゲートシフト(GS モード)させて負電圧を発生することでコイル電流を減少させる。

コイルがクエンチした場合には、クエンチ検出信号をクエンチ保護回路(QPC)が受信してから、1 秒以内に動作するとした。実際には、電流遮断を半導体素子 IGCT で行うため遮断時間は短いが、本設計検討では、より厳しい条件での設計検討を行うために、1 秒と仮定している。

クエンチ保護回路動作時には、トロイダル磁場コイル電源サイリスタ変換器を GS モードに移行し、クエンチ保護回路の抵抗およびサイリスタ変換器が出力する負電圧により電流を急速に減衰させる。サイリスタ変換器に並列に接続している保護用投入器は、サイリスタ変換器が故障により開放状態になる場合のみ動作し、電流の経路を確保する。

2.3 トロイダル磁場コイル電源シミュレーション

2.1、2.2 節で述べた回路構成および制御システムについて、妥当性の第一歩としてコイル励磁およびコイル消磁における回路解析を実施した。本解析では、電源解析用ソフトウェアの一つである”PSCAD/EMTDC^[2]”を用いて、電源モデルを作成しシミュレーションを行い、その挙動を評価した。シミュレーションにおけるコイルおよび各電源要素の仕様を Table 1 に、シミュレーション回路モデル模式図を Fig.5 に示す。Fig.5において、変換器サイリスタ素子、IGCT の ON 抵抗は、それぞれ $1\text{m}\Omega$ 、 $100\mu\Omega$ と仮定し、DC フィーダのインピーダンスは、トロイダル磁場コイル電源設置予定場所である JT-60 整流器棟から実験棟本体室まで 30kA クラスのアルミフィーダを布設したと仮定して算出した。IGCT の ON 可能順方向電圧は、大電力用素子で考えると $10\text{V} \sim 50\text{V}$ 程度が一般的であり、大容量 IGCT を使用すると仮定して 50V とした。

Table 1 シミュレーションにおけるトロイダル磁場コイルおよび各電源要素の仕様

機器名	項目	仕様
トロイダル磁場コイル	インダクタンス	4.2H (18 コイル総和)
	定格電流	25.3kA
	端子間耐圧(18 コイル直列接続時)	10kV
	対地耐圧	1.5kV
変換器用変圧器	容量	5.0MVA
	巻線比	$18\text{kV} / 138\text{V}$
	%Z	10%
変換器	変換器出力電圧(No load)	160V (Control angle 30 degrees)
	定格電流	25.3kA
クエンチ保護回路	IGCT の ON 可能な順方向電圧	50V
	放電抵抗値	$0.06\Omega \times 6\text{units}$
	接地抵抗値	1000Ω

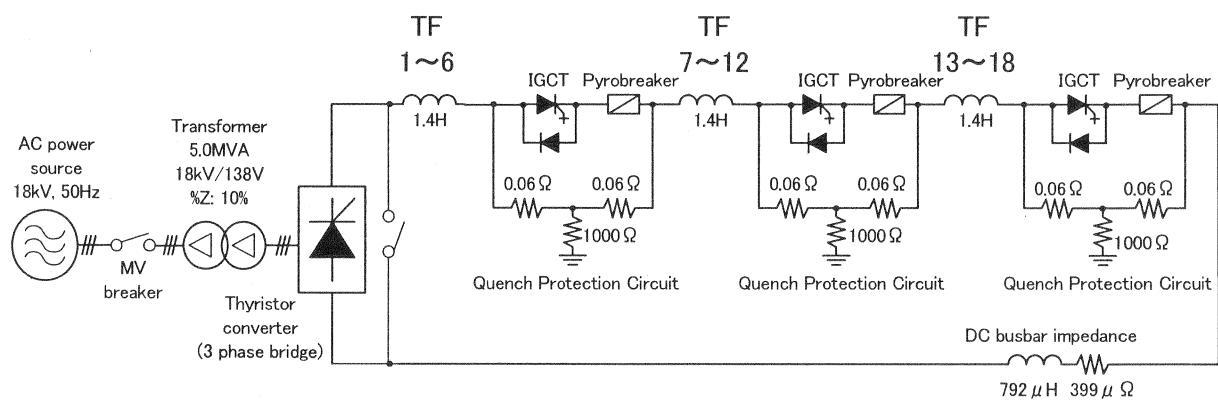


Fig.5 トロイダル磁場コイル電源シミュレーション回路モデル模式図

2.3.1 コイル励磁

トロイダルコイル励磁時における通電シミュレーションを行い、定格電流 25.3kA に到達(励磁完了)までの時間を評価した。シミュレーション結果を Fig.6 に示す。Fig.6(a)より約 950 秒で定格電流の 25.3kA に到達している。JT-60SA プラズマ実験運転において、実験効率の観点からコ

イル励磁は 30 分(=1800 秒)以内に行うことが要求されている。シミュレーション結果より設計した電源構成において、実験効率の観点からの要求を満たすことができた。

ここで、クエンチ保護回路で用いる IGCT は、サイリスタ系デバイスのため、順バイアス電圧が印加した状態でゲート信号を与えるなければならない。励磁開始時、IGCT には電圧が印加されていないため、ゲート信号を与えても ON することができない。したがって、励磁開始時は放電抵抗に電流が流れれる。Table 1 に示すように ICGT の ON 可能順方向電圧は 50V であるため、IGCT 端子間電圧が 50V 以上になった時点で、ゲート信号を与えて IGCT を ON 状態とし転流される。

シミュレーションでは、IGCT 端子間電圧を制御システムに取り込み、端子間電圧が 50V に到達した時点で自動的に IGCT ゲート信号を印加する。Fig.6(c),(d),(e)に励磁開始時におけるクエンチ保護回路の電流電圧波形を示す。IGCT に 50V の電圧が印加されるまでにかかる時間は約 70 秒であり、この時刻にてゲート信号を印加されて、抵抗から IGCT に電流が転流していることが分かった。

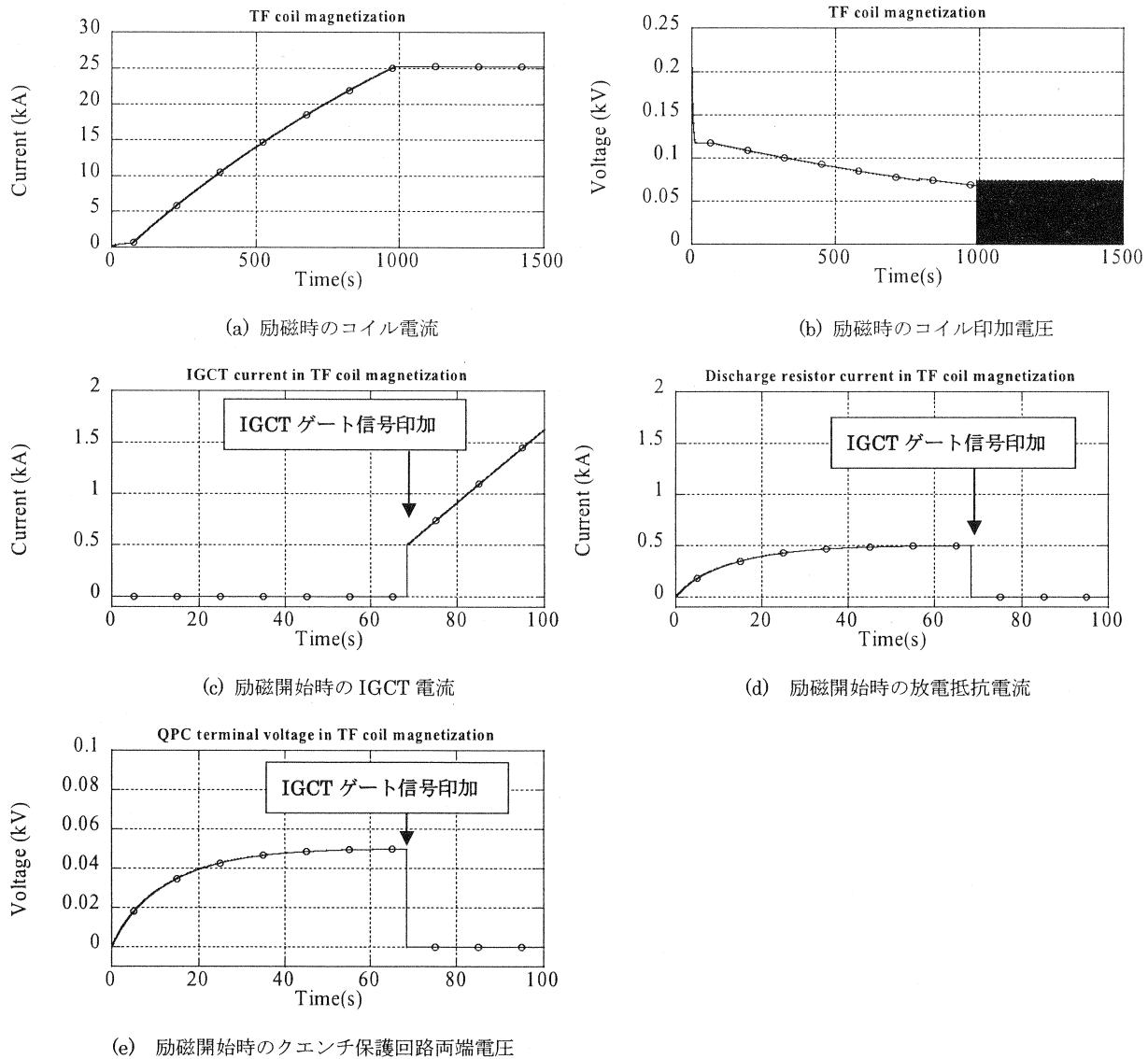


Fig.6 コイル励磁シミュレーション結果

2.3.2 コイル消磁

トロイダルコイル消磁時における通電シミュレーションを行い、定格電流 25.3kA 通電中からコイル消磁を開始し、完了するまでの時間を評価した。このシミュレーションでは消磁開始時刻を $t=50s$ とした。コイル消磁シミュレーション結果を Fig.7 に示す。Fig.7 より定格電流 25.3kA から消磁完了(コイル電流 10A 以下)までにかかる時間は、約 900 秒であった。このとき、サイリスタ変換器は点弧角を 120 度にした GS モードとし、コイル電流 10A 以下でサイリスタ変換器へのゲート信号を停止するゲートブロック(GB)モードに移行する。

JT-60SA プラズマ実験運転において、実験効率の観点からコイル消磁は 30 分(=1800 秒)以内に行なうことが要求されている。シミュレーション結果より設計した電源構成において、実験効率の観点からの要求を満たすことができた。

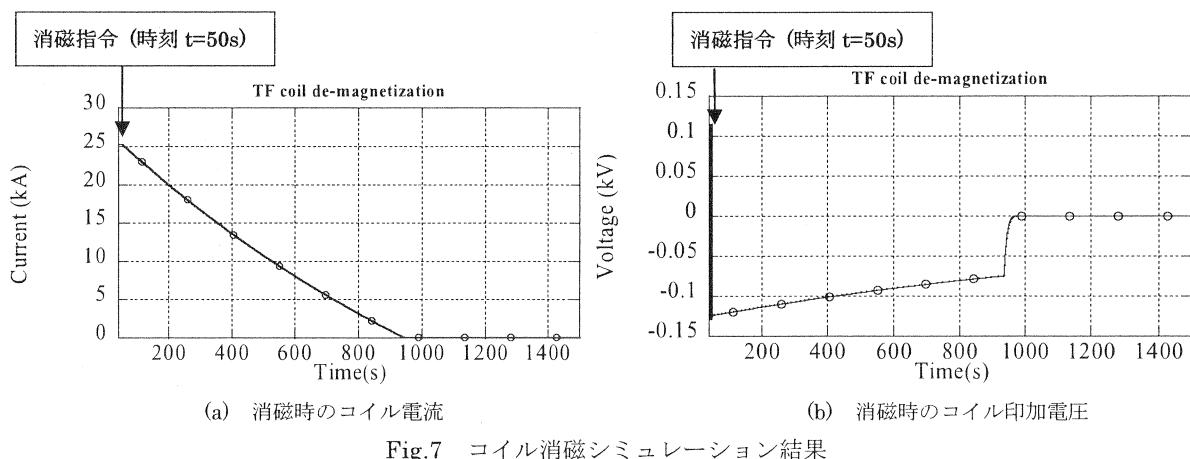


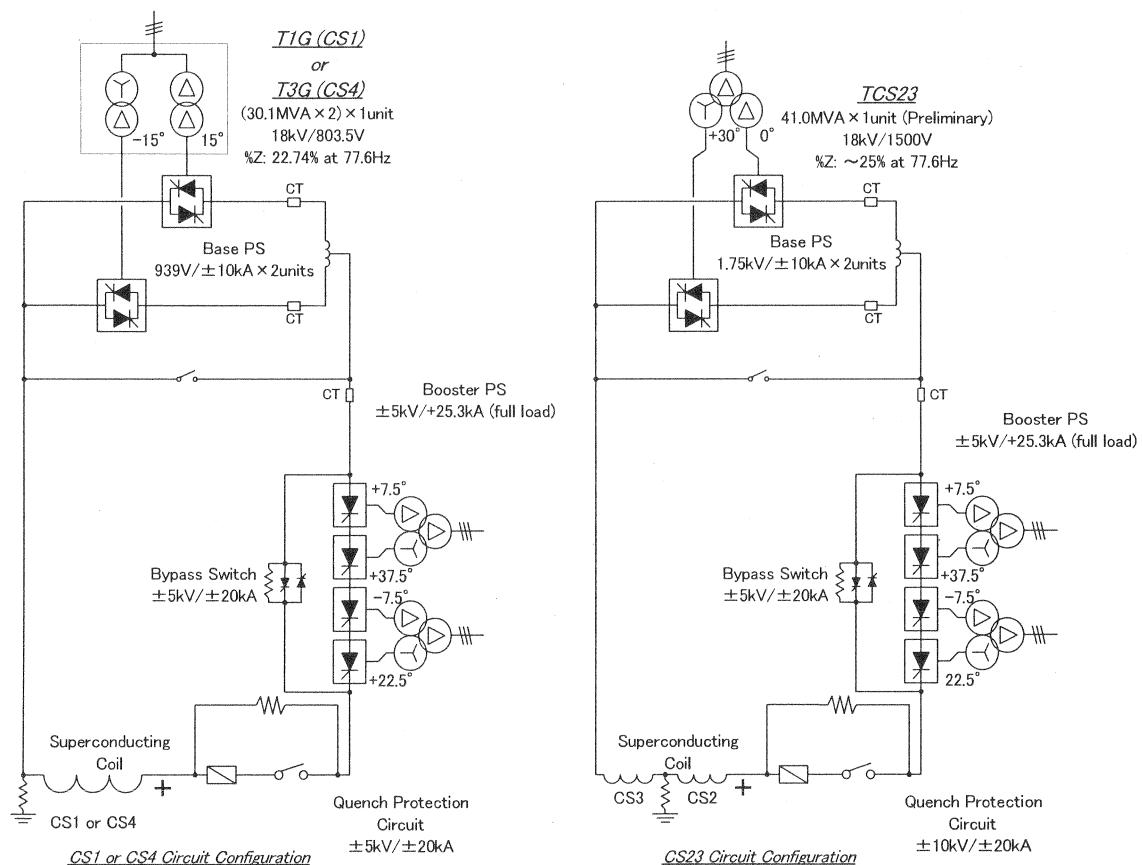
Fig.7 コイル消磁シミュレーション結果

3 ポロイダル磁場コイル電源の設計検討

3.1 全体回路構成

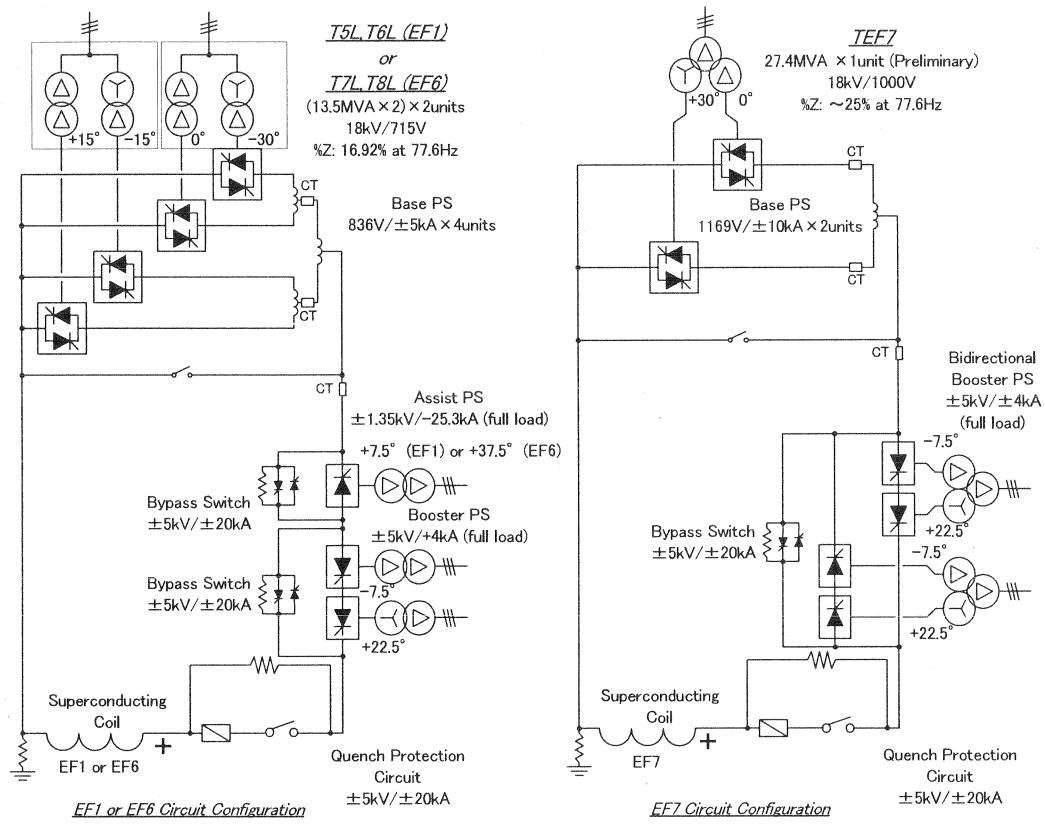
ポロイダル磁場コイルは、CS1～4, EF1～7 の計 11 個のコイルで構成されている。このうち、CS2 と CS3 は直列に接続されているので、ポロイダル磁場コイル電源は 10 セットの電源で構成する。各コイルの電源回路構成をパターンに分類して、Fig.8 に示す。本電源は、定常的にコイル電流を制御するベース電源、プラズマ着火/立ち上げ時に高電圧を発生させるブースター/アシスト電源、ブースター/アシスト電源の開時に電流の経路となるバイパススイッチ、コイルがクエンチした場合に磁気エネルギーを急速に消費してコイルを保護するクエンチ保護回路で構成される。

なお、3.6 節の制御システムにおけるコイル電流(Icur)は、ベース電源の出力端における主回路電流であり、コイル初期励磁時の電流の向きを正としている。ベース電源およびブースター/アシスト電源の両方が起動中は、Icur が両変換器に流れる。制御で用いる電流値(Icur, Iccur) は、Fig.8 中の CT にて取り込み、循環電流(Iccur)については、循環電流制御を行う変換器に対応して、どちらの変換器出力電流値を取り込むかを決定する。

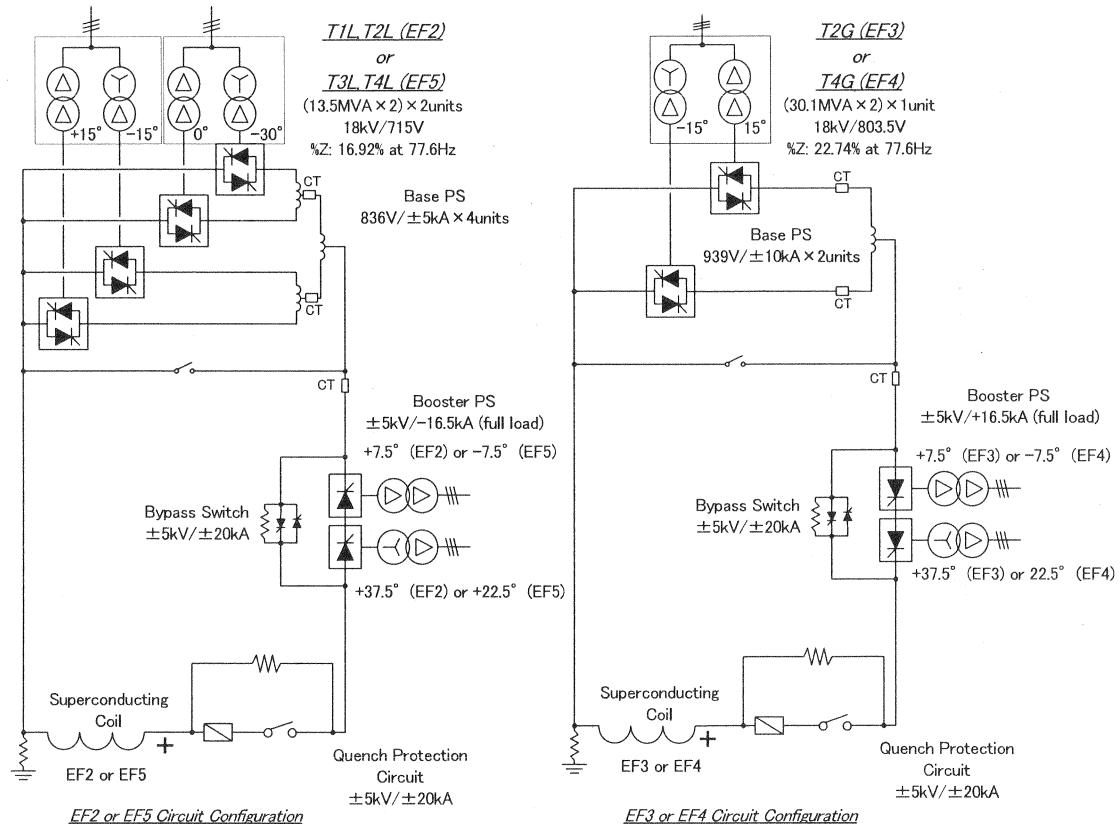


(a) CS1, CS2-3, CS4 電源

Fig.8 ポロイダル磁場コイル電源回路構成図(1/2)



(b) EF1,EF6,EF7 コイル電源



(c) EF2,EF3,EF4,EF5 コイル電源

Fig.8 ポロイダル磁場コイル電源回路構成図(2/2)

Fig.8 では、各電源機器要素を示すために各コイル電源を独立とした閉じた回路構成として示してあるが、電源機器を設置する JT-60 整流器棟とコイルを設置する JT-60 実験棟を地下で結ぶ共同構の DC フィーダ布設予定スペースが狭いという理由から、フィーダ線の本数を減らすために実際には CS 系、EF 系で各 1 本ずつの共通 DC フィーダを用いたハイブリッド結線で構成することとした。さらに、水冷アルミフィーダを用いてフィーダの径を小さくすることを予定している。ハイブリッド結線の概略図を Fig.9 に示す。Fig.9 中の太線のフィーダがハイブリッド結線部分である。これにより通常のコイル・電源間結線を採用した場合では、1 電源あたり 2 本、計 20 本必要となる DC フィーダが、ハイブリッド結線方式では計 13 本となり、フィーダ線削減効果は著しい。

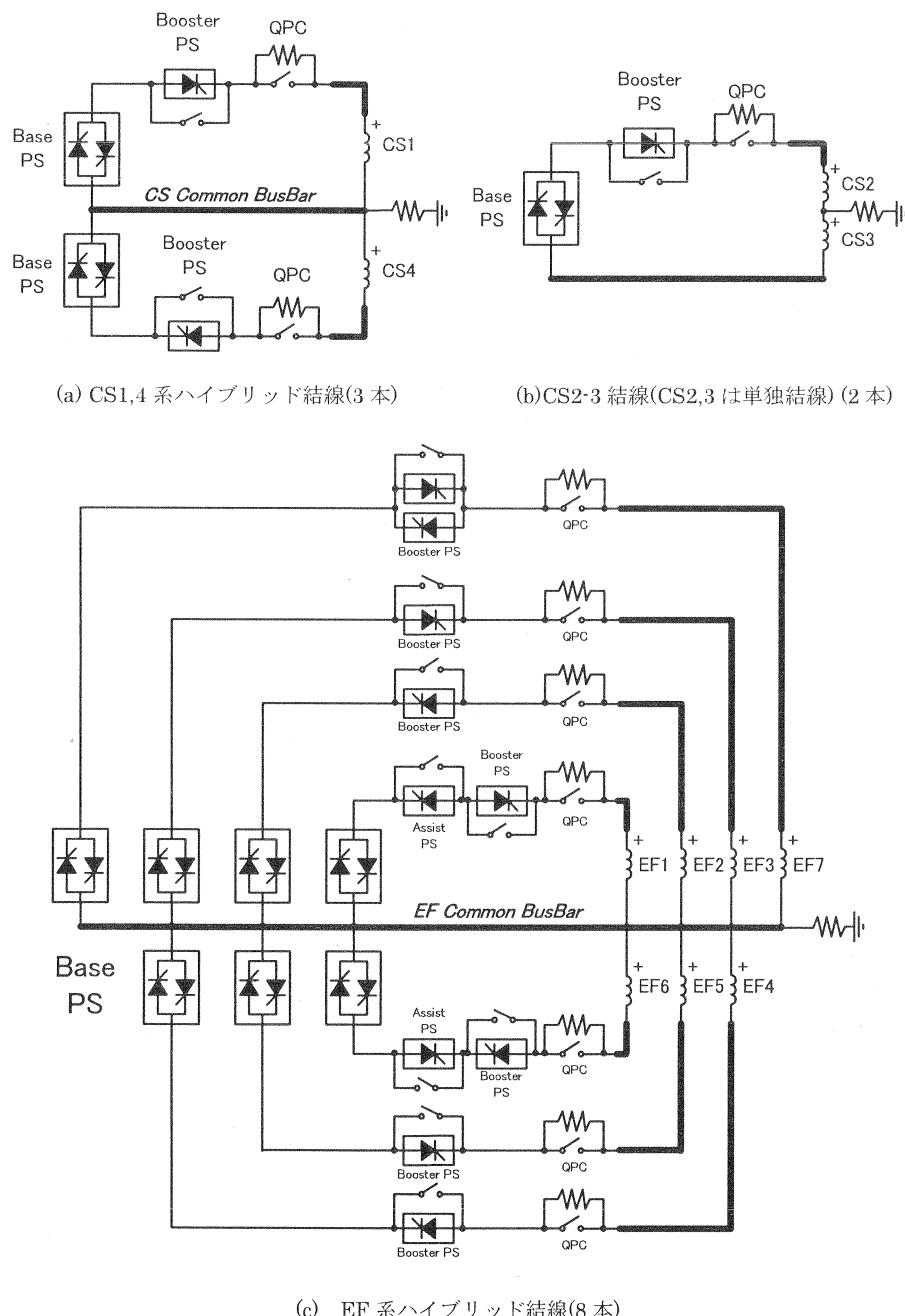


Fig.9 PF コイルハイブリッド結線概略図

また、各電源機器における対地耐圧の関係から、対地耐圧の小さい順に接地側からベース電源、アシスト電源、ブースター電源、クエンチ保護回路と接続する。

3.2 ベース電源

ベース電源は、変換器用変圧器、逆並列接続サイリスタ変換器で構成される。この電源は、定常にコイル電流を制御する役割をもつ。ベース電源の変圧器は、コスト低減を図るために既存 JT-60 トロイダル磁場コイル電源の 2 種類の変圧器(T1G～T4G : 計 4 台、T1L～T8L : 計 8 台)を再利用する。ベース電源用変圧器の仕様を Table 2 に示す。これらは、1 台につき独立した 2 系統の巻線(容量が同じで Δ - Δ 結線と Y- Δ 結線)を有している。CS1,CS4,EF3,EF4 ベース電源は、Table 2(a)の仕様の変圧器 1 台、EF1,EF2,EF5,EF6 ベース電源は、Table 2(b)の仕様の変圧器 2 台を用いる。なお、CS2-3,EF7 ベース電源用変圧器は、再利用できる変圧器がないため新規製作する予定であり、Table 3 に暫定値を示す。

Table 2 ベース電源用変圧器(既存 JT-60 トロイダル磁場コイル電源変圧器)仕様

(a) CS1,CS4,EF3,EF4 ベース電源用

名称(既存)	T1G, T2G, T3G, T4G
容量	30.1×2 MVA (短時間定格 : Duty 38 秒/10 分)
1 次側/2 次側巻線	18kV/765-803.5V
%Z	23.44%～23.83% (at 28.66MVA, 80Hz)
周波数	80～50Hz
冷却方式	油入自励

(b) EF1,EF2,EF5,EF6 ベース電源用

名称(既存)	T1L, T2L, T3L, T4L, T5L, T6L, T7L, T8L
容量	13.5×2 MVA (短時間定格 : Duty 38 秒/10 分)
1 次側/2 次側巻線	18kV/650-715V
%Z	10.90%～11.36% (at 12.2MVA, 50Hz)
周波数	80～50Hz
冷却方式	油入自励

Table 3 CS2-3, EF7 ベース電源用新設変圧器仕様(暫定)

(a) CS2-3 ベース電源用

名称(新規)	TCS23(仮)
容量	41.0MVA (連続)
1 次側/2 次側巻線	18kV/1500V
結線方式	Δ - Δ /Y
%Z	～25%(at 41.0MVA, 776Hz)
周波数	80～50Hz
冷却方式	油入自励

(b) EF7 ベース電源用

名称(新規)	TEF7(仮)
容量	27.4MVA (連続)
1 次側/2 次側巻線	18kV/1000V
結線方式	Δ - Δ /Y
%Z	～25%(at 27.4MVA, 776Hz)
周波数	80～50Hz
冷却方式	油入自励

サイリスタ変換器は、サイリスタ素子を逆並列に接続して用いる。Fig.10 にベース電源の回路構成図を示す。再利用する CS1,CS4,EF4,EF4 用変圧器(T1G～T4G)が 4 台、再利用する EF1,EF2,EF5,EF6 用変圧器(T1L～T8L)が 8 台、新規製作の CS2-3,EF7 用変圧器(△-△/Y 結線)があるために、3 通りのベース電源構成となる。このサイリスタ変換器は、同じアームに対して 2 つのサイリスタ素子を有しているので、出力電流の極性に合わせて Fig.10 に示すようにアームの相(電流極性プラス : U,V,W,X,Y,Z 相、電流極性マイナス : U',V',W',X',Y',Z' 相)を定義する。ベース電源用サイリスタ変換器は新規製作するため、ここでは暫定的な仕様として Table 4 に示す。

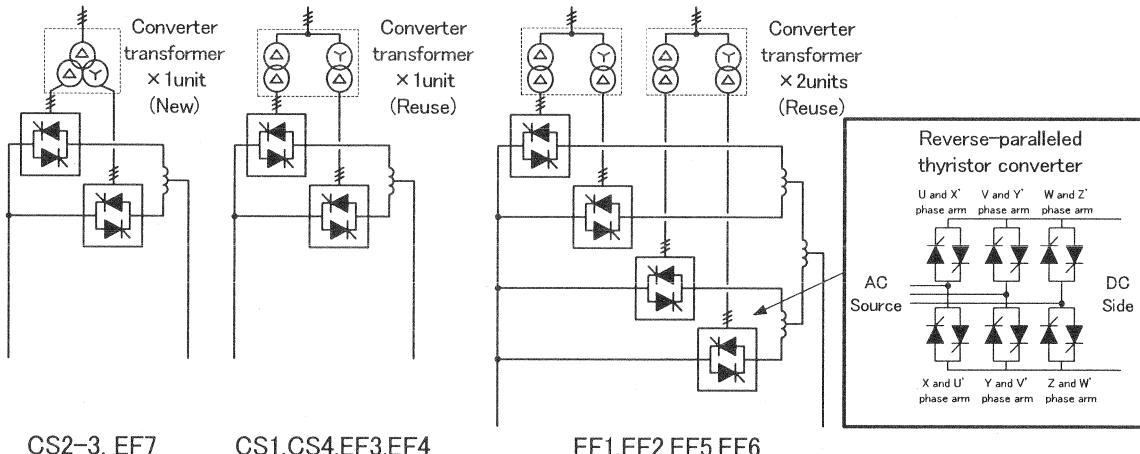


Fig.10 ベース電源用サイリスタ変換器の回路構成

Table 4 ベース電源用サイリスタ変換器仕様(暫定値) (1/2)

(a) CS1,CS4,EF3,EF4 ベース電源用

出力	9.4MW / 1unit
出力電圧(無負荷時)	±940V (点弧角 30°)
出力電流	±10kA / 1unit
周波数	77.6Hz～50Hz
定格方式	連続
結線方式	逆並列接続サイリスタブリッジ
冷却方式	水冷

(b) EF1,EF2,EF5,EF6 ベース電源用

出力	4.2MW / 1unit
出力電圧(無負荷時)	±836V (点弧角 30°)
出力電流	±5kA / 1unit
周波数	77.6Hz～50Hz
定格方式	連続
結線方式	逆並列接続サイリスタブリッジ
冷却方式	水冷

(c) CS2-3 ベース電源用

出力	17.5MW / 1unit
出力電圧(無負荷時)	±1753V (点弧角 30°)
出力電流	±10kA / 1unit
周波数	77.6Hz～50Hz
定格方式	連続
結線方式	逆並列接続サイリスタブリッジ
冷却方式	水冷

Table 4 ベース電源用サイリスタ変換器仕様(暫定値) (2/2)

(d) EF7 ベース電源用

出力	11.7MW / 1unit
出力電圧(無負荷時)	±1169V(点弧角 30°)
出力電流	±10kA / 1unit
周波数	77.6Hz～50Hz
定格方式	連続
結線方式	逆並列接続サイリスタブリッジ
冷却方式	水冷

3.3 ブースター電源 / アシスト電源

ブースター電源/アシスト電源は、プラズマ着火およびプラズマ電流ランプアップ時に必要な高電圧を発生する電源である。ブースター電源は、コイル電流が初期励磁電流方向と同一の場合に高電圧を発生させる電源、アシスト電源は、コイル電流が初期励磁電流方向と反対の場合に高電圧を発生させる電源と定義する。ブースター/アシスト電源の動作領域の違いを Fig.11 に示す。ブースター電源/アシスト電源は、JT-60 ポロイダル電源の F コイル電源(PSF)と V コイル電源(PSV)を再利用して構成する。これらのサイリスタ変換器は、一方向にしか電流を流すことができないため、各コイルの初期励磁電流の極性により変換器の向きが異なる構成となる。また、EF1 コイル, EF6 コイルは、プラズマ電流ランプアップ中にコイル電流の極性が反転するため、Fig.8(b)に示すようにブースター電源と反対の極性をもつアシスト電源が接続されている。EF7 コイルは、初期励磁の電流の極性が、プラズマ運転シナリオにより変化するため、EF7 のブースター電源は両極性での運転可能な変換器構成(2 直列 2 並列)となっている。各コイル電源のブースター電源/アシスト電源と再利用する F コイル、V コイル電源の関係を Table 5 に示す^{[3][4]}。基本的に CS 系のブースター電源は F コイル電源サイリスタ変換器を 4 直列接続、EF 系のブースター電源は V コイル電源サイリスタ変換器を 2 直列接続、EF 系アシスト電源は F コイル電源サイリスタ変換器 1 台で構成する。

Table 5 各コイル電源のブースター電源/アシスト電源で用いる F コイル V コイル電源

PFC	ブースター電源		アシスト電源	
	再利用機器名称	定格出力	再利用機器名称	定格出力
CS1	PSF12A,12B,12C,12D	±5kV / +25.3kA	-	-
CS2-3	PSF21A,21B,22C,21D	±5kV / +25.3kA	-	-
CS4	PSF22A,22B,22C,22D	±5kV / +25.3kA	-	-
EF1	PSV21B,22D	±5kV / +4kA	PSF11A	±1.35kV / -25.3kA
EF2	PSV11C,12A	±5kV / -16.5kA	-	-
EF3	PSV11A,12C	±5kV / +16.5kA	-	-
EF4	PSV11D,12B	±5kV / +16.5kA	-	-
EF5	PSV11B,PSV12D	±5kV / -16.5kA	-	-
EF6	PSV21D,22B	±5kV / +4kA	PSF11C	±1.35kV / -25.3kA
EF7	PSV21A,21C,22A,22C	±5kV / ±4kA	-	-

(*) 表中の電流の極性は、コイルの極性に対応

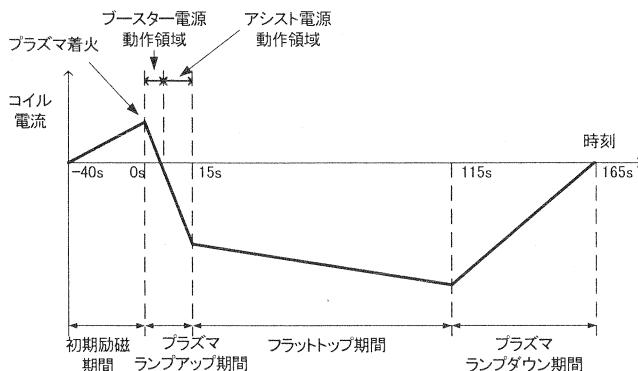


Fig.11 ブースター電源とアシスト電源の動作領域の違い(典型的な EF6 コイル電流波形)

ブースター電源、アシスト電源で流用する F コイル電源サイリスタ変換器、V コイル電源サイリスタ変換器および変換器用変圧器の仕様をそれぞれ Table 6、Table 7 に示す。

Table 6 F コイル電源サイリスタ変換器および変換器用変圧器の仕様

(a) F コイル電源変換器用変圧器仕様

機器名称 (カッコ内は接続する変換器名称を示す)	T1F(PSF11A,11C), T3F(PSF12A,12C), T4F(PSF12B,12D), T5F(PSF21A,21C) T6F(PSF21B,21D), T7F(PSF22A,22C) T8F(PSF22B,22D)
容量	107.1MVA / 1unit
1 次側/2 次側電圧	18kV / 1550V
周波数	77.6Hz – 54.2Hz
%Z	24.5% at 77.6Hz
結線方式	△ - △ / Y
定格方式	短時間定格(duty: 10sec / 10min)

(b) EF1,EF6 用アシスト電源、CS2-3 用ブースター電源に再利用する F コイル電源サイリスタ変換器仕様

機器名称 (カッコ内はコイル電源名称を示す)	PSF11A(EF1), PSF11C(EF6) PSF21A, PSF21B, PSF21C, PSF21D(CS2-3)
定格出力	34.2MW / 1unit
定格直流電圧	1350V / 1unit
定格直流電流	25.3kA / 1unit
周波数	77.6Hz – 54.2Hz
結線方式	3 相ブリッジ
定格方式	短時間定格(duty: 10 秒 / 10 分)
絶縁耐圧	主回路対大地間 : AC4.3kV / 1min 制御回路対大地間 : AC2kV / 1min

(c) CS1,CS4 用ブースター電源に再利用する F コイル電源サイリスタ変換器

機器名称 (カッコ内はコイル電源名称を示す)	PSF12A, PSF12B, PSF12C, PSF12D(CS1) PSF22A, PSF22B, PSF22C, PSF22D(CS4)
定格出力	34.2MW / 1unit
定格直流電圧	1350V / 1unit
定格直流電流	25.3kA / 1unit
周波数	77.6Hz – 54.2Hz
結線方式	3 相ブリッジ
定格方式	短時間定格(duty: 10 秒 / 10 分)
絶縁耐圧	主回路対大地間 : AC6.6kV / 1min 制御回路対大地間 : AC2kV / 1min

Table 7 Vコイル電源サイリスタ変換器および変換器用変圧器の仕様

(a) Vコイル電源変換器用変圧器

機器名称 (カッコ内は接続する 変換器名称を示す)	T1V(PSV11A,11C) T2V(PSV11B,11D)	T3V(PSV12A,12C) T4V(PSV12B,12D)	T7V(PSV21A,21C) T8V(PSV21B,21D) T9V(PSV22A,22C) T10V(PSV22B,22D)
容量	125.2MVA / 1unit	82.3MVA / 1unit	28.8MVA / 1unit
1次側/2次側電圧	18kV / 3160V	18kV / 2100V	18kV / 2900V
周波数	77.6Hz - 54.2Hz	77.6Hz - 54.2Hz	77.6Hz - 54.2Hz
%Z	23.6% at 77.6Hz	23.6% at 77.6Hz	25.2% at 77.6Hz
結線方式	Δ - Δ/Y	Δ - Δ/Y	Δ - Δ/Y
定格方式	短時間定格 10sec / 10min	短時間定格 10sec / 10min	短時間定格 10sec / 10min

(b) EF1,EF6,EF7 用ブースター電源に再利用する Vコイル電源サイリスタ変換器

機器名称 (カッコ内はコイル電源名 称を示す)	PSV21B(EF1), PSV21D(EF6) PSV21A,PSV21C(EF7)	PSV22D(EF1), PSV22B(EF6) PSV22A,PSV22C(EF7)
定格出力	9.5106MW / 1unit	9.5106MW / 1unit
定格直流電圧	2620V / 1unit	2620V / 1unit
定格直流電流	3.63kA(4kA) / 1unit	3.63kA(4kA) / 1unit
周波数	77.6Hz - 54.2Hz	77.6Hz - 54.2Hz
結線方式	3相ブリッジ	3相ブリッジ
定格方式	短時間定格(duty: 10sec / 10min)	短時間定格(duty: 10sec / 10min)
絶縁耐圧	主回路対大地間 : AC8kV / 1min 制御回路対大地間 : AC2.0kV / 1min	主回路対大地間 : AC12kV / 1min 制御回路対大地間 : AC2.0kV / 1min

(c) EF2,EF3,EF4,EF5 用ブースター電源に再利用する Vコイル電源サイリスタ変換器

機器名称 (カッコ内はコイル電源名 称を示す)	PSV11C(EF2), PSV11A(EF3) PSV11D(EF4), PSV11B(EF5)	PSV12A(EF2), PSV12C(EF3) PSV12B(EF4), PSV12D(EF5)
定格出力	41.963MW / 1unit	27.55MW / 1unit
定格直流電圧	2894V / 1unit	1900V / 1unit
定格直流電流	14.5kA(16.5kA) / 1unit	14.5kA(16.5kA) / 1unit
周波数	77.6Hz - 54.2Hz	77.6Hz - 54.2Hz
結線方式	3相ブリッジ	3相ブリッジ
定格方式	短時間定格(duty: 10sec / 10min)	短時間定格(duty: 10sec / 10min)
絶縁耐圧	主回路対大地間 : AC7.8kV / 1min 制御回路対大地間 : AC2.0kV / 1min	主回路対大地間 : AC11kV / 1min 制御回路対大地間 : AC2.0kV / 1min

3.4 バイパススイッチ

バイパススイッチは、3.3 節で述べたブースター/アシスト電源に対し並列に接続し、ブースター/アシスト電源の不使用時やトラブル時には電流の経路となる。このスイッチは両方向のコイル電流が流れるために、両極性の電流スイッチとしている。想定されるバイパススイッチの回路構成を Fig.12 に示す。サイリスタ素子を逆並列で接続した両極性電流スイッチと抵抗で構成される。サイリスタ素子は、順方向電圧が印加されないとゲート信号を印加しても ON できないため、並列に接続された抵抗に電流を流すことで順方向電圧を確立させてから、ゲート信号を印加する。また、バイパススイッチの抵抗は、抵抗値が小さいとバイパススイッチの ON 可能な順方向電圧が印加されるまでに時間がかかるだけでなく、ブースター/アシスト電源が起動した場合には大き

な電流が流れてしまう。CS、EF コイル電源において、ブースター電源の定格出力電圧は 5kV、アシスト電源の定格出力電圧は 1.5kV であり、PF コイル電源の定格電流は 20kA である。ブースター/アシスト電源の高効率運転を考えた場合、ブースター/アシスト電源起動期間において、バイパススイッチの抵抗に流れる電流を定格電流の 5%~10%(1kA~2kA)の電流に抑えたい。5kV 定格出力のブースター電源で考えると、バイパススイッチ抵抗は $2.5\Omega \sim 5\Omega$ 程度となる。したがって、バイパススイッチの抵抗値は 3Ω を想定する。

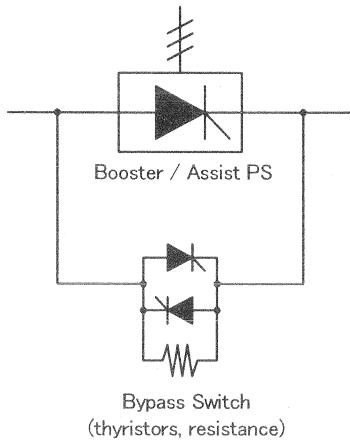


Fig.12 バイパススイッチの回路構成

3.5 クエンチ保護回路

クエンチ保護回路は、コイルがクエンチした場合にコイルが保有している電磁エネルギーを抵抗発熱にて急速に消費させコイルを保護する役割がある。クエンチ保護回路の基本構成機器は、主回路電流を遮断し放電抵抗に転流させる両極性の電流スイッチ部、電流スイッチのバックアップ回路であるパイロブレーカー、放電抵抗である。

本回路は、電流スイッチ部の違いにより Fig.13 に示す 2 種類を想定しており、最終的にはどちらかに決定する。電流スイッチを VCB(Vacuum Current Breaker)とした場合(mechanical switch type)^[5]、電力用半導体素子(IGCT etc)とした場合(solid state switch type)がある。IGCT を用いた場合には、両極性の電流に対応するためにダイオードブリッジを用いる。IGCT2 台を逆並列接続しても両極性の電流に対応できるが、高価な IGCT より安価なダイオードブリッジを用いたほうがコスト面で有利であるため、IGCT とダイオードブリッジによる電流スイッチを採用する。

Fig.13 に示す 2 種類の電流スイッチを用いたクエンチ保護回路の主な特徴を Table 8 に示す。異なる 2 つのクエンチ保護回路にはそれぞれ長所と短所があり、要求される性能やコストおよび電力損失などを考慮して選択する必要がある。

クエンチ保護回路の放電抵抗値は、ポロイダル磁場コイルの耐圧および熱設計などの観点から、クエンチ時の通電電流によるクエンチ保護回路両端電圧を 5kV(CS2-3 は 10kV)以下および電流減衰時定数 τ を暫定的に 6 秒以内となるように放電抵抗値を調整した。コイルの許容電圧、時定数を考慮した放電抵抗値の最大許容値を Table 9 に示す。

なお、本報告書のシミュレーションでは、solid state switch type のクエンチ保護回路を用いる。

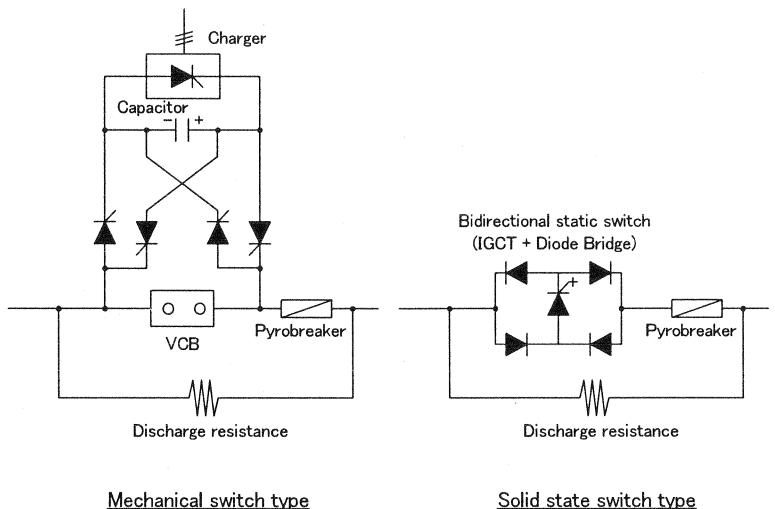


Fig.13 クエンチ保護回路の回路構成

Table 8 回路構成の違いによるクエンチ保護回路の主な特徴

回路方式(電流スイッチ部)	長所	短所
VCB (機械式スイッチ)	ON 抵抗が小さい (定常時損失が小さい)	1. VCB で直流電流を遮断するため に補助回路が必要のため回路構成 が複雑である。 2. VCB で直流大電流を遮断した実 績が少ない。(信頼性 低)
電力用半導体素子 (IGCT 素子 etc)	1. 回路構成が単純 2. 半導体素子を用いているため、 遮断動作の信頼性が高い。	ON 抵抗が大きい。 (定常時損失が大きい)

Table 9 クエンチ保護回路の放電抵抗値(最大許容値)

PFC	放電抵抗値	PFC	放電抵抗値
CS1	0.25 Ω	EF3	0.25 Ω
CS2-3	0.5 Ω	EF4	0.25 Ω
CS4	0.25 Ω	EF5	0.25 Ω
EF1	0.25 Ω	EF6	0.25 Ω
EF2	0.25 Ω	EF7	0.25 Ω

3.6 電源制御系の設計検討

ポロイダル磁場コイル電源は、基本的にベース電源、ブースター/アシスト電源、バイパススイッチ、クエンチ保護回路で構成され、所望する電流値および電流変化に対応して使用する電源機器を切り替えながら制御を行う。本節では、これらの電源機器の制御系について記述する。

3.6.1 ベース電源制御系

ベース電源は、正負方向のコイル電流を流すことが可能で、さらに電流ゼロクロスにおいて滑らかに電流を制御することができなければならない。したがって、変換器用変圧器の構成によっ

て逆並列接続のサイリスタ変換器 2 台または 4 台で構成され、コイル電流の大きさに対応して 6 つの運転モードを切り換えながら制御を行う。6 運転モードは次のとおりである。

- ① 2 台(4 台)の変換器がコイル電流を制御する “Dual Forward/Reverse mode”
- ② 1 台(2 台)の変換器がコイル電流を制御する “Single Forward/Reverse mode”
- ③ 1 台(2 台)がコイル電流を、他の 1 台(2 台)が循環電流を制御する “Circulate Current mode (forward/reverse)”

上記の運転モードにおいて、電流の極性が反転する場合(電流ゼロクロス点通過時)には、変換器間に循環電流を流して、電流を滑らかに制御するために③Circulate Current mode にする。また、Fig.10 に示す各アームにおいて素子を逆並列接続して構成したサイリスタ変換器では、アームにある 2 つの素子が両方とも ON 状態になると電源短絡してしまう。③Circulate Current mode から①Dual mode へ直接モード移行した場合、サイリスタ素子のターンオン/ターンオフ時間の違いや変換器内部の配線インピーダンスなどの影響により逆並列された二つのサイリスタ素子が両方とも ON 状態になる恐れがあるため、②Single mode を経由して制御を行う。

Fig.14 にコイル電流に対するベース電源運転モード切り換えレベル模式図、Fig.15 にベース電源の運転モードごとの電流経路の違いを示す。循環電流は、ベース電源の出力が小さいため、定格電流の 5%である 1kA とした。②Single mode と③Circulate Current mode の境界電流値は、循環電流が 1kA であるため、変換器電流を変化させずにモード切換できる $\pm 1\text{kA}$ とした。①Dual mode と②Single mode の境界電流値は、上記で述べた電源短絡を防止するために、安全マージンを大きくとり $\pm 5\text{kA}$ とした。

各運転モードを切り換える場合には運転移行モードがあり、2 台(4 台)運転を 1 台(2 台)変換器運転に移行する “Dual / Single changing mode(forward/reverse)” と循環電流を停止させ 1 台(2 台)変換器運転に移行する “Circulate current stop mode(forward/reverse)” を準備した。

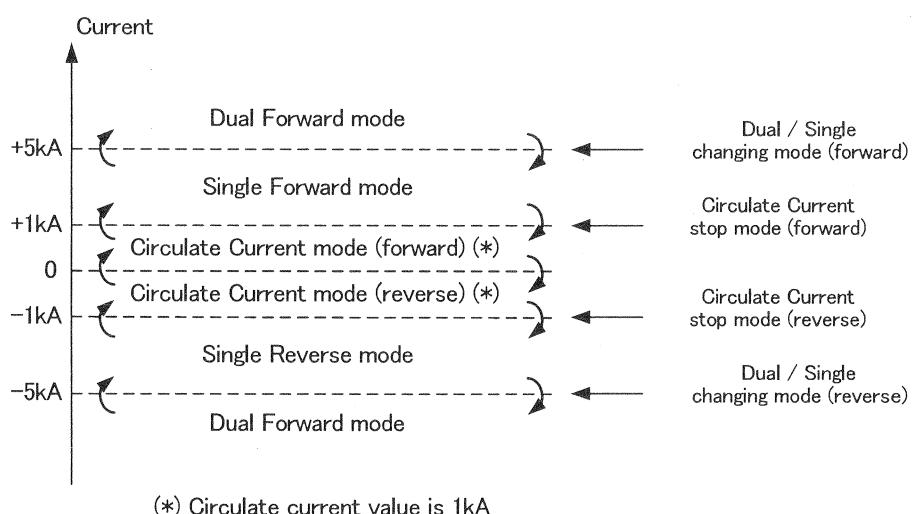


Fig.14 コイル電流に対するベース電源の運転モード切り換えレベル

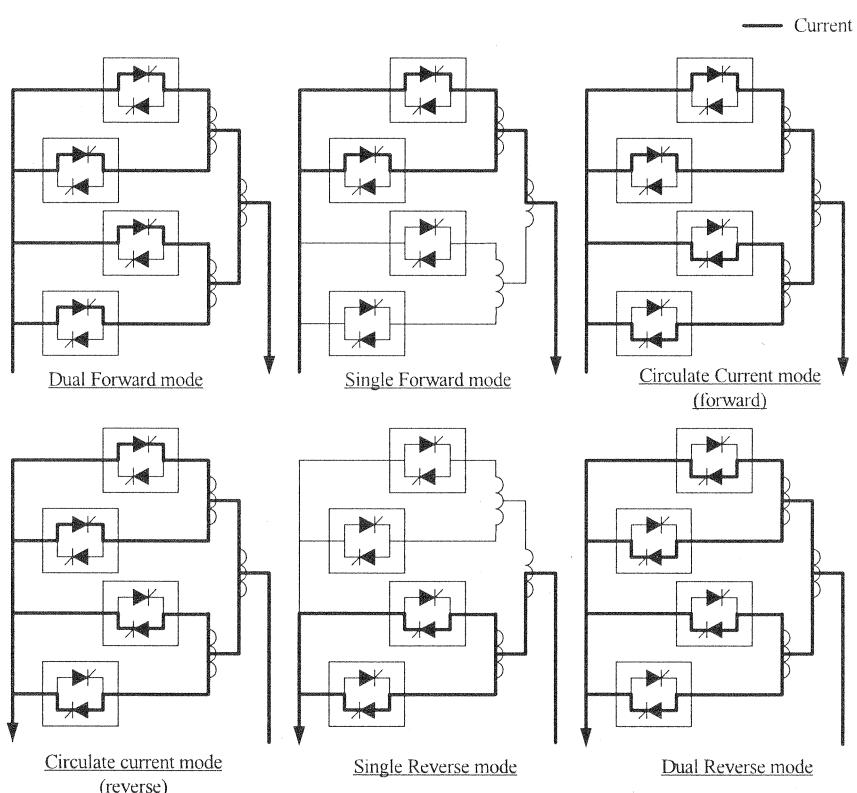
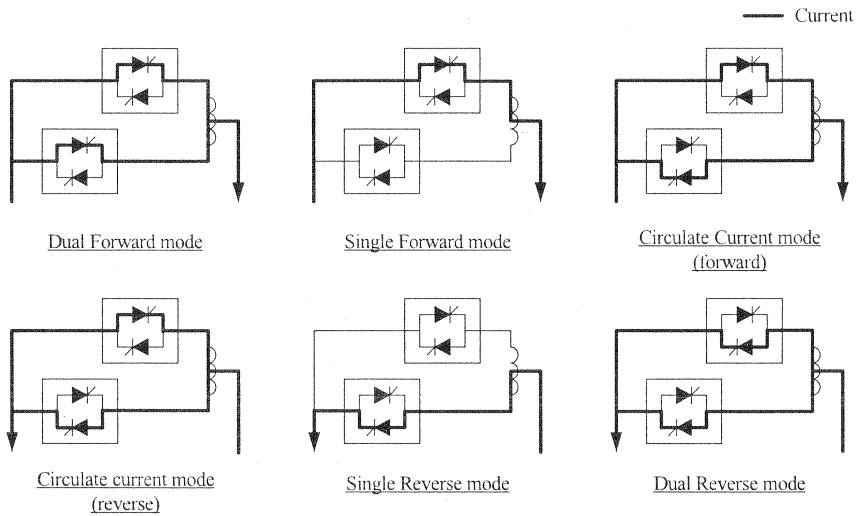
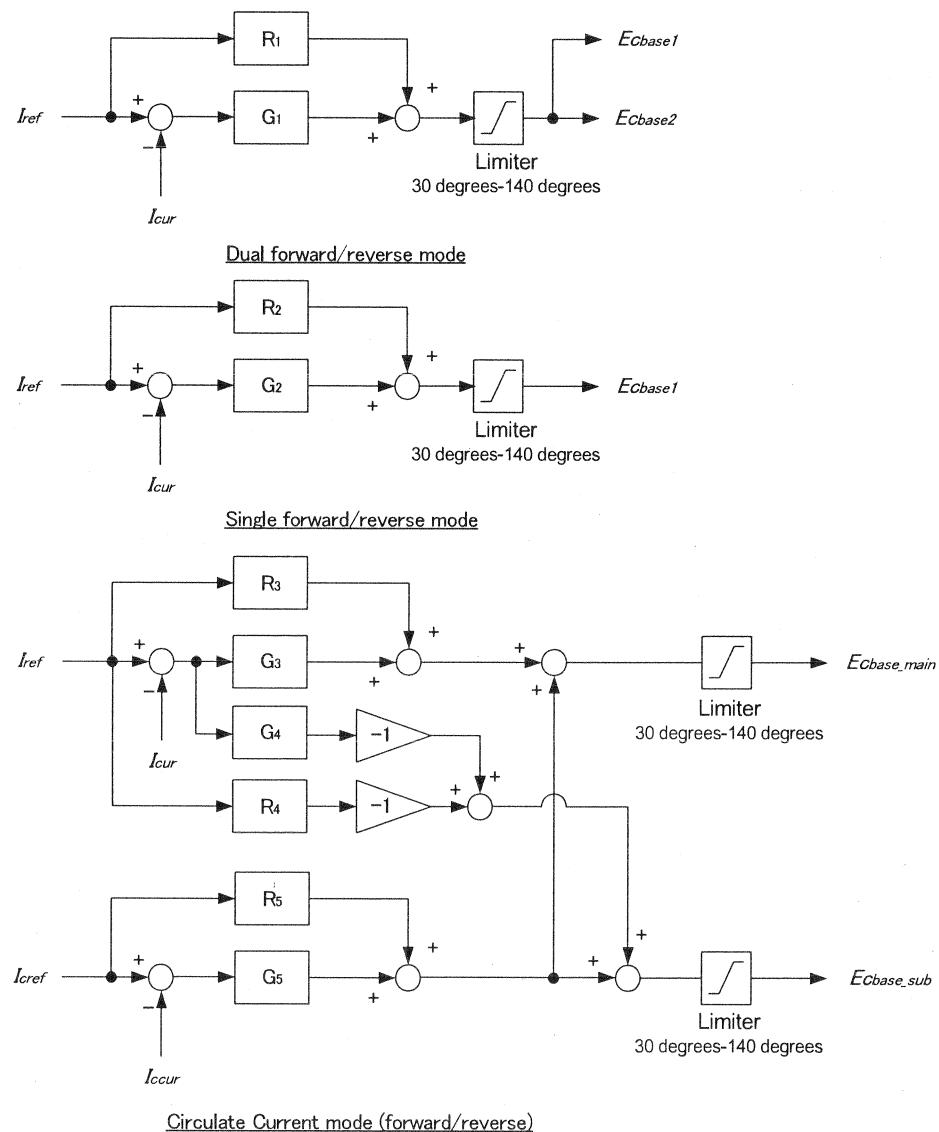


Fig.15 ベース電源の運転モード

ベース電源の電流(電圧)制御手法は、基本的には既存の JT-60 ポロイダル磁場コイル電源と同様に電流制御と電圧制御が可能なシステムとする予定である。本報告書の 3.7 節で記述するシミュレーションにおいて電流制御を採用しているので、ここではベース電源の電流制御ブロックを Fig16 に示す。所望する電流指令値(I_{ref})とコイル電流(I_{cur})の偏差(電流フィードバック)および主回路の抵抗値を用いてサイリスタ変換器の E_c 指令値を算出する。循環電流制御では、コイル電流と循環電流が相互干渉しないように制御するために、非干渉制御を採用する^{[6][7]}。なお、ベース電源

の点弧角範囲は、 $30^\circ \sim 140^\circ$ である。Circulate Current modeにおいて、 I_{ref} は所望するコイル電流値、 I_{cref} は所望する変換器間の循環電流値である。したがって、循環電流を制御する変換器出力電流は I_{curr} となり、コイル電流を制御する変換器出力電流は、コイル電流と循環電流の総和 $I_{cur} + I_{curr}$ の電流が流れる。



Parameters:

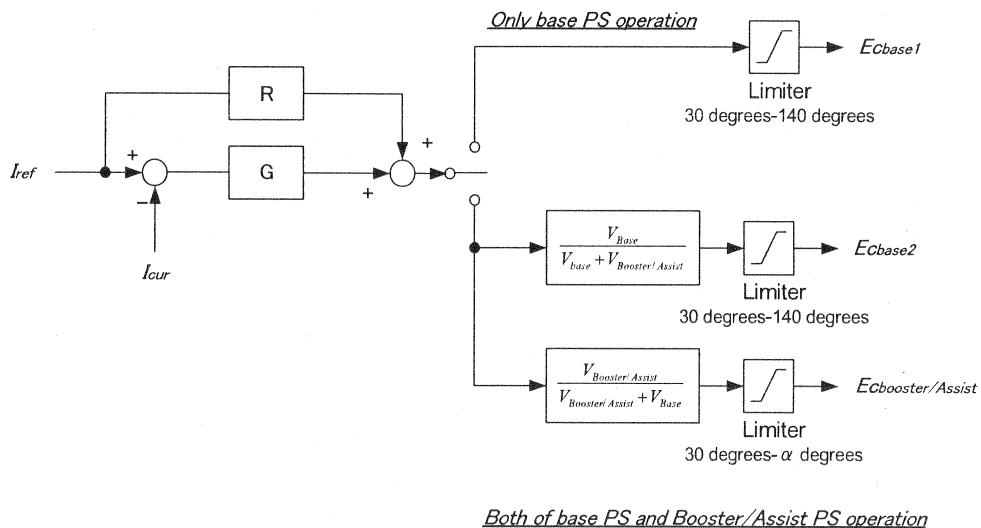
I_{ref} :	Reference current
I_{cur} :	Circuit current
I_{cref} :	Reference circulate current ($=1kA$)
I_{curr} :	Circulate current
G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 :	Current Feedback Gain
R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 :	Circuit resistance
E_{base1}, E_{base2} :	Ec value for Base PS converter (Dual/Single mode)
$E_{base\ main}, E_{base\ sub}$:	Ec value for Base PS main side / circulate side converters (Circulate Current mode,

Fig.16 ベース電源の電流制御ブロック

3.6.2 ブースター/アシスト電源制御系

ブースター/アシスト電源は、プラズマ着火やプラズマ電流ランプアップ時に必要な高電圧を発生させる。このときベース電源とブースター/アシスト電源は、所望する電圧を変換器用変圧器の2次側巻線電圧に比例して分圧した電圧を各電源にて出力する。一例として、"Dual forward/reverse mode"における電流制御ロジックをFig.17に示す。Fig.17に示す制御ブロックにおいて、2次側巻線比で決まる電圧を一定としているが、厳密には、主回路電流の大きさに依存した変圧器およびACフィーダのインピーダンスによる電圧降下があるため、一定ではない。これらの影響を考慮して、主回路電流によりベース電源とブースター/アシスト電源の出力電圧を決定する分圧比を変える必要があるが、本報告書では、初期設計段階のため分圧比一定としている。今後、交流側インピーダンスを考慮した制御システムを設計する必要がある。

本電源制御系では、変換器の出力電圧($E_{base1}, E_{base2}, E_{boost/assist}$)を印加し、ベース電源、ブースター/アシスト電源には、常に同一の電流が流れる。もしどちらかの電源の異常により所望する電圧を出力できない場合、正常な電源が不足電圧を補うことになる。しかしながら、ブースター/アシスト電源異常の場合には、ベース電源は、ブースター/アシスト電源に比べ電圧出力が小さいため、ベース電源の最大出力電圧以上の不足電圧を補うことが困難となる。この場合には、所望するコイル電流値とならないため、保護動作により両電源を停止する。



Parameters:

I_{ref} :	Reference current in scenario
I_{cur} :	Circuit current
G :	Gain
R :	Circuit resistance
V_{base} :	Secondary winding voltage for Base PS converter transformer
$V_{booster/Assist}$:	Secondary winding voltage for Booster/Assist PS converter transformer
α :	Limit control angle value calculated by constant margin angle control
E_{base1} :	E_c value for Base PS converter in case of only Base PS operation
E_{base2} :	E_c value for Base PS converter in case of both of Base PS and Booster/Assist operation
$E_{booster/Assist}$:	E_c value for Booster/Assist PS converter

Fig.17 ベース電源(Single forward/reverse mode)、ブースター/アシスト電源並列運転における電流制御ブロック

また、ブースター/アシスト電源では、定余裕角演算を用いた点弧角制御を行う。点弧角制御で用いる演算式を式(1)、式(2)に示す。

$$\cos \beta = \cos 40^\circ - \%X \times \frac{I}{I_{p.u.}} \quad \dots \text{式(1)}$$

$$\alpha = 180^\circ - \beta \quad \dots \text{式(2)}$$

α : 点弧角($^\circ$), $\%X$: 変換器交流側のインピーダンス(p.u.),

I : 主回路電流(kA), $I_{p.u.}$: ブースター/アシスト電源の定格電流(kA)

余裕角を 40° とし、主回路電流の大きさによって出力可能な点弧角範囲を設定している。したがってブースター/アシスト電源の点弧角制御範囲は、 $30^\circ \sim \alpha$ (定余裕角演算値)となる。

3.6.3 バイパススイッチの制御系

バイパススイッチは、ブースター/アシスト電源と並列に接続され、ブースター/アシスト電源が導通状態でない場合に電流の経路となる。逆接続されたサイリスタ素子で構成されているので、電流の向きに応じたサイリスタ素子を ON(導通状態)させる必要がある。制御としては、①主回路電流ゼロ付近での制御、②ブースター/アシスト電源起動時、③ブースター/アシスト電源停止時の大きく3つに分類される。

主回路電流がゼロ付近となるコイル励磁開始時では、サイリスタ素子に順バイアス電圧が印加されていないので、並列に接続された抵抗に電流が流れ。これにより発生する電圧がバイパススイッチの順バイアス電圧となり、ONできる電圧以上になってからゲート信号を与える。

電流反転時では、サイリスタ素子の保持電流以下になると自動的に OFF となり、素子並列に接続された抵抗に電流が転流する。電流極性が反転し抵抗で発生する電圧が逆方向のサイリスタ素子の ON 可能な電圧以上になってからゲート信号を与える。

ブースター/アシスト電源を起動する場合には、バイパススイッチを OFF し主回路電流を変換器に転流させなければならない。このとき、バイパススイッチを OFF させるには、逆バイアスの電圧を印加する必要があるので、ブースター/アシスト電源は、まず逆バイアス電圧をバイパススイッチに対して印加し電流が変換器に転流してから電流制御を行う。Fig.18に制御模式図を示す。

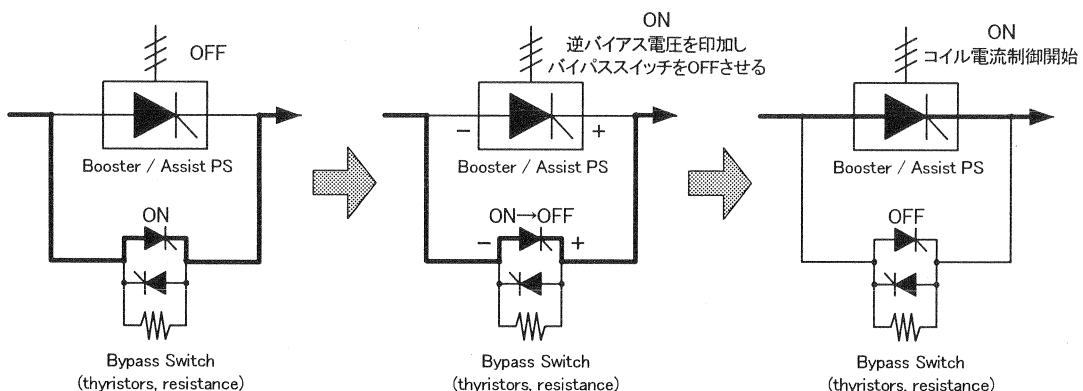


Fig.18 ブースター/アシスト電源起動時のバイパススイッチ制御

ブースター/アシスト電源を停止する場合には、ブースター/アシスト電源変換器はゲートブロックモード(GB)とする。このとき電流は変換器を流れしており、変換器の抵抗による電圧降下によりバイパススイッチに順バイアスが印加される。バイパススイッチにゲート信号を与えると、サイリスタ素子が ON し、主回路電流がバイパススイッチに転流する。Fig.19 に制御模式図を示す。

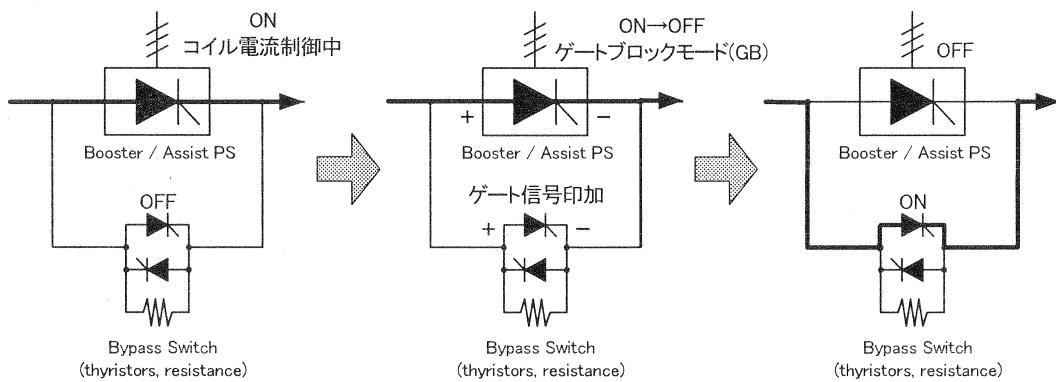


Fig.19 ブースター/アシスト電源停止時のバイパススイッチ制御

3.6.4 クエンチ保護回路の制御系

クエンチ保護回路は、クエンチ検出システムからのクエンチ検出信号を受信してから 1 秒以内に電流スイッチが OFF 動作を開始し、電流を放電抵抗に転流させることが求められている。また、電流スイッチで主回路電流を遮断できなかった場合には、クエンチ検出信号を受信してから 2 秒以内にパイロブレーカーが動作し主回路を遮断し、電流を放電抵抗に転流させる。正常動作時およびパイロブレーカー動作時の制御模式図を Fig.20 に示す。

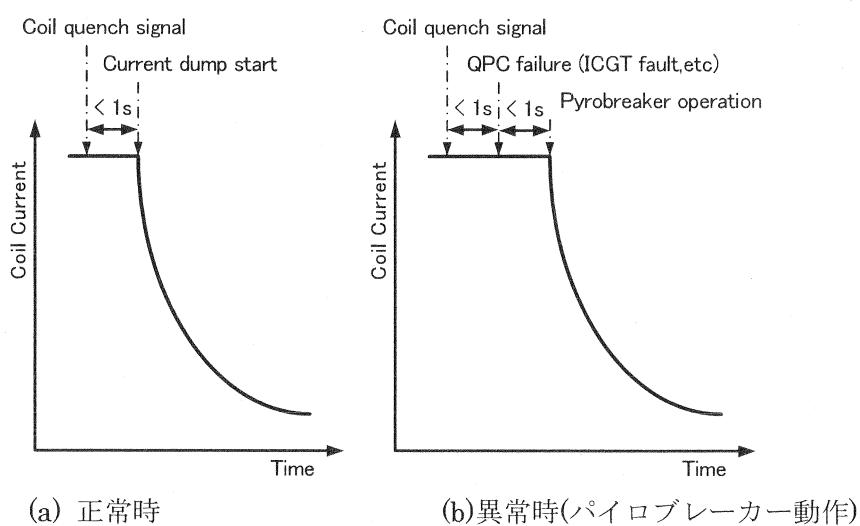


Fig.20 正常時/異常時でのクエンチ保護回路の制御シーケンス模式図

3.7 プラズマ運転シナリオを用いたポロイダル磁場コイル電源シミュレーション

前節までに述べた回路構成および制御手法を”PSCAD/EMTDC”を用いてポロイダル磁場コイル電源シミュレーションモデルを作成し、シミュレーションを行いその妥当性を評価した。全PFコイル電源の詳細モデルをシミュレーションした場合、演算時間がかかりすぎるため、電源ごとに詳細な回路モデルを作成した。一例として CS1 電源の PSCAD/EMTDC シミュレーションモデルを付録 1 に示す。PSCAD/EMTDC では、回路ボックスによる階層構造となっており、各電源機器要素に対し一つの回路ボックスを割り当て、詳細な回路および制御システムを構築している。このシミュレーションでは、二つのプラズマ運転シナリオ「5.5MA ダブルヌルシナリオ」と「3.5MA ITER 配位シナリオ」を用いて、運転シナリオに示されたコイル電流を指令値とした電流フィードバック制御を行い、主回路電流が運転シナリオの電流値になるように変換器が電圧を出力する。

シミュレーションで用いたポロイダル磁場コイルのインダクタンスマトリックスを Table 10 に示す。また、このシミュレーションではプラズマおよびコイル間の相互誘導を考慮しているが、真空容器、In-vessel コイル、バッフル板等の効果は無視している。

”PSCAD/EMTDC”のシミュレーション条件を Table 11 に示す。また、各シナリオにおけるブースター/アシスト電源の起動期間を Table 12 に示す。ブースター/アシスト電源は、短時間定格であり、最大許容運転期間は 15 秒である。

Table 10 ポロイダル磁場コイルインダクタンスマトリックス(単位 : H)

	CS1	CS2	CS3	CS4	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7
CS1	3.35E-01	7.10E-02	9.42E-03	2.76E-03	3.06E-02	2.89E-02	6.76E-02	3.83E-03	5.82E-03	1.32E-02	1.55E-02
CS2	7.10E-02	3.35E-01	7.20E-02	9.42E-03	2.53E-02	1.71E-02	2.08E-02	8.10E-03	1.04E-02	2.09E-02	1.63E-02
CS3	9.42E-03	7.20E-02	3.35E-01	7.10E-02	1.74E-02	9.27E-03	8.10E-03	2.08E-02	1.89E-02	3.09E-02	1.39E-02
CS4	2.76E-03	9.42E-03	7.10E-02	3.35E-01	1.10E-02	5.15E-03	3.83E-03	6.76E-02	3.12E-02	3.80E-02	1.02E-02
EF1	3.06E-02	2.53E-02	1.74E-02	1.10E-02	9.53E-01	2.28E-01	1.17E-01	2.62E-02	4.71E-02	1.19E-01	2.43E-01
EF2	2.89E-02	1.71E-02	9.27E-03	5.15E-03	2.28E-01	4.78E-01	1.57E-01	1.12E-02	1.97E-02	4.89E-02	8.54E-02
EF3	6.76E-02	2.08E-02	8.10E-03	3.83E-03	1.17E-01	1.57E-01	8.97E-01	7.50E-03	1.28E-02	3.11E-02	4.91E-02
EF4	3.83E-03	8.10E-03	2.08E-02	6.76E-02	2.62E-02	1.12E-02	7.50E-03	8.97E-01	1.66E-01	1.48E-01	2.66E-02
EF5	5.82E-03	1.04E-02	1.89E-02	3.12E-02	4.71E-02	1.97E-02	1.28E-02	1.66E-01	5.80E-01	3.38E-01	4.94E-02
EF6	1.32E-02	2.09E-02	3.09E-02	3.80E-02	1.19E-01	4.89E-02	3.11E-02	1.48E-01	3.38E-01	1.38E+00	1.29E-01
EF7	1.55E-02	1.63E-02	1.39E-02	1.02E-02	2.43E-01	8.54E-02	4.91E-02	2.66E-02	4.94E-02	1.29E-01	4.58E-01

Table 11 シミュレーション条件

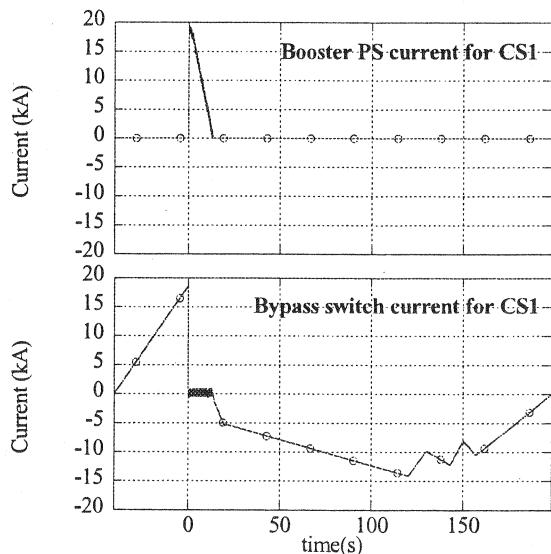
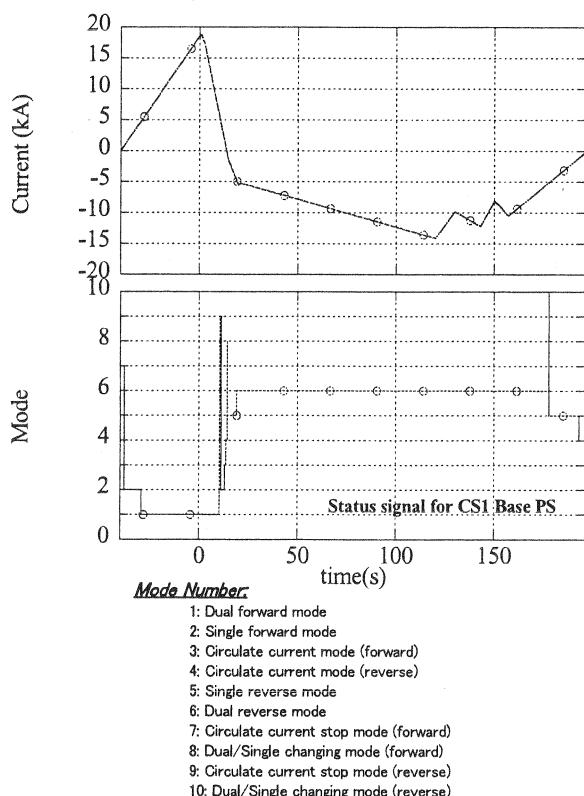
パラメータ	5.5MA ダブルヌル配位	3.5MA ITER 配位
シミュレーション期間	-40s～197s	-40s～175s
EMTDC 演算周期	100 μs	100 μs
データ間隔周期	10ms	10ms

Table 12 5.5MA ダブルヌル/3.5MA ITER 配位シナリオでのブースター/アシスト電源起動期間

PFC	5.5MA ダブルヌル配位		3.5MA ITER 配位	
	ブースター電源	アシスト電源	ブースター電源	アシスト電源
CS1	0.0s-13.5s	-	0.0s-15.0s	-
CS2-3	0.0s-11.2s	-	0.0s-7.4s	-
CS4	0.0s-11.2s	-	0.0s-15.0s	-
EF1	0.0s-1.4s	1.45s-15.0s	0.0s-3.0s	3.05s-15.0s
EF2	0.0s-15.0s	-	0.0s-5.6s	-
EF3	0.0s-15.0s	-	0.0s-15.0s	-
EF4	0.0s-11.0s	-	0.0s-15.0s	-
EF5	0.0s-15.0s	-	0.0s-2.6s	-
EF6	0.0s-1.85s	1.9s-15.0s	0.0s-2.15s	2.2s-15.0s
EF7	不使用	-	1.5s-5.3s	-

各シナリオにおけるコイル電流コイル電圧のシミュレーション結果をそれぞれ Fig.23、Fig.24 に示す。グラフ中において、たとえば”cs1ref”は、CS1 の運転シナリオ電流(指令値)を示し、“Ics1”はシミュレーションでの CS1 コイル電流を示す。また、参考のため各シナリオにおけるベース電源出力電圧、ブースター/アシスト電源出力電圧を付録 2 および付録 3 に示す。

Fig.23、Fig.24 のシミュレーション結果より、設計した回路構成、制御システムにおいてプラズマ運転シナリオどおりにコイル電流制御ができるることを確認した。また、一例として CS1 電源シミュレーションにおいて、ベース電源のモード推移結果およびブースター電源およびバイパススイッチ電流波形結果をそれぞれ Fig.21, Fig.22 に示す。各電源機器要素に対して設計した制御手法により良好な制御が可能であることを確認した。



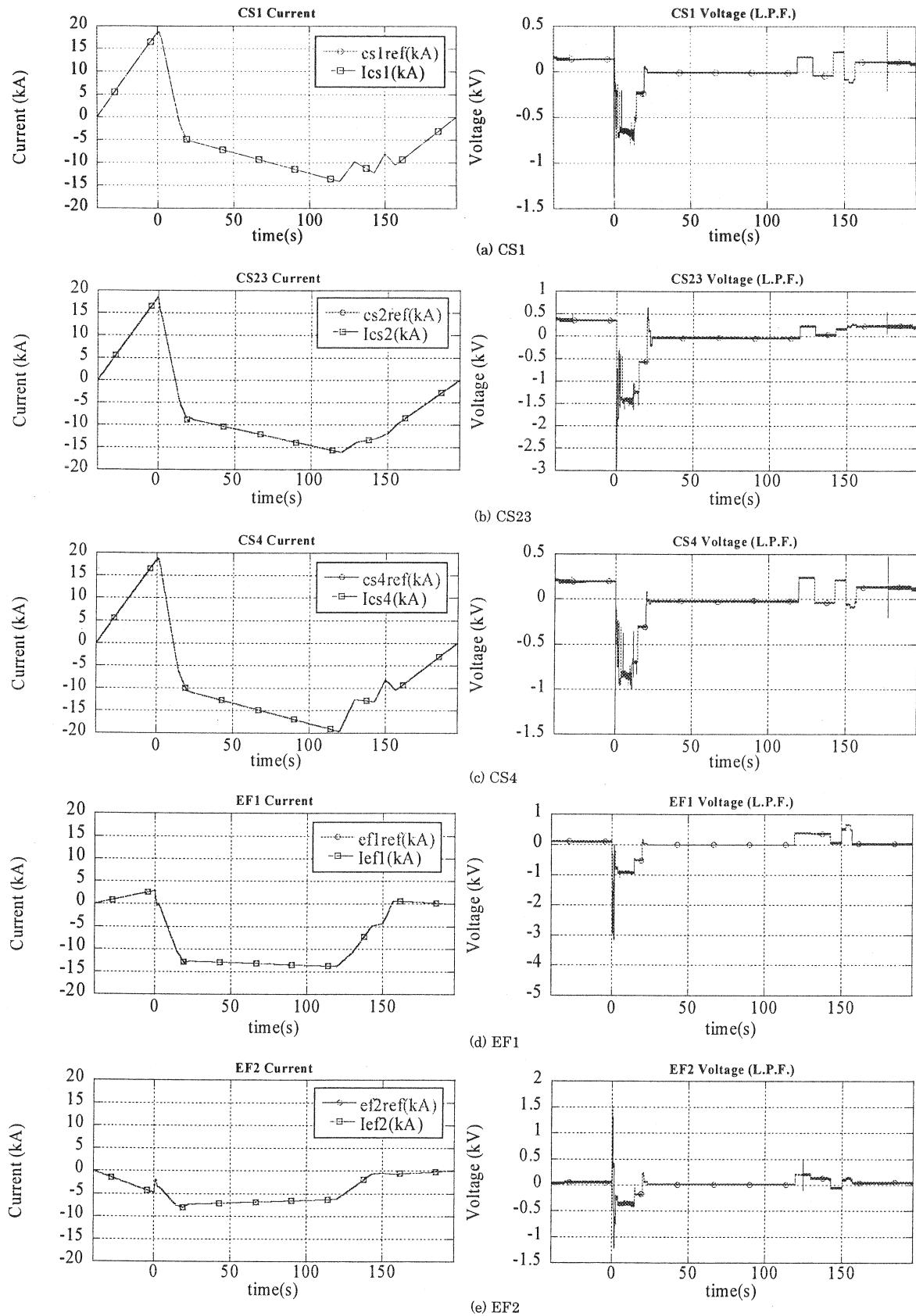


Fig.23 5.5MA ダブルヌル配位シナリオでのシミュレーション結果(コイル電流/電圧波形) (1/2)

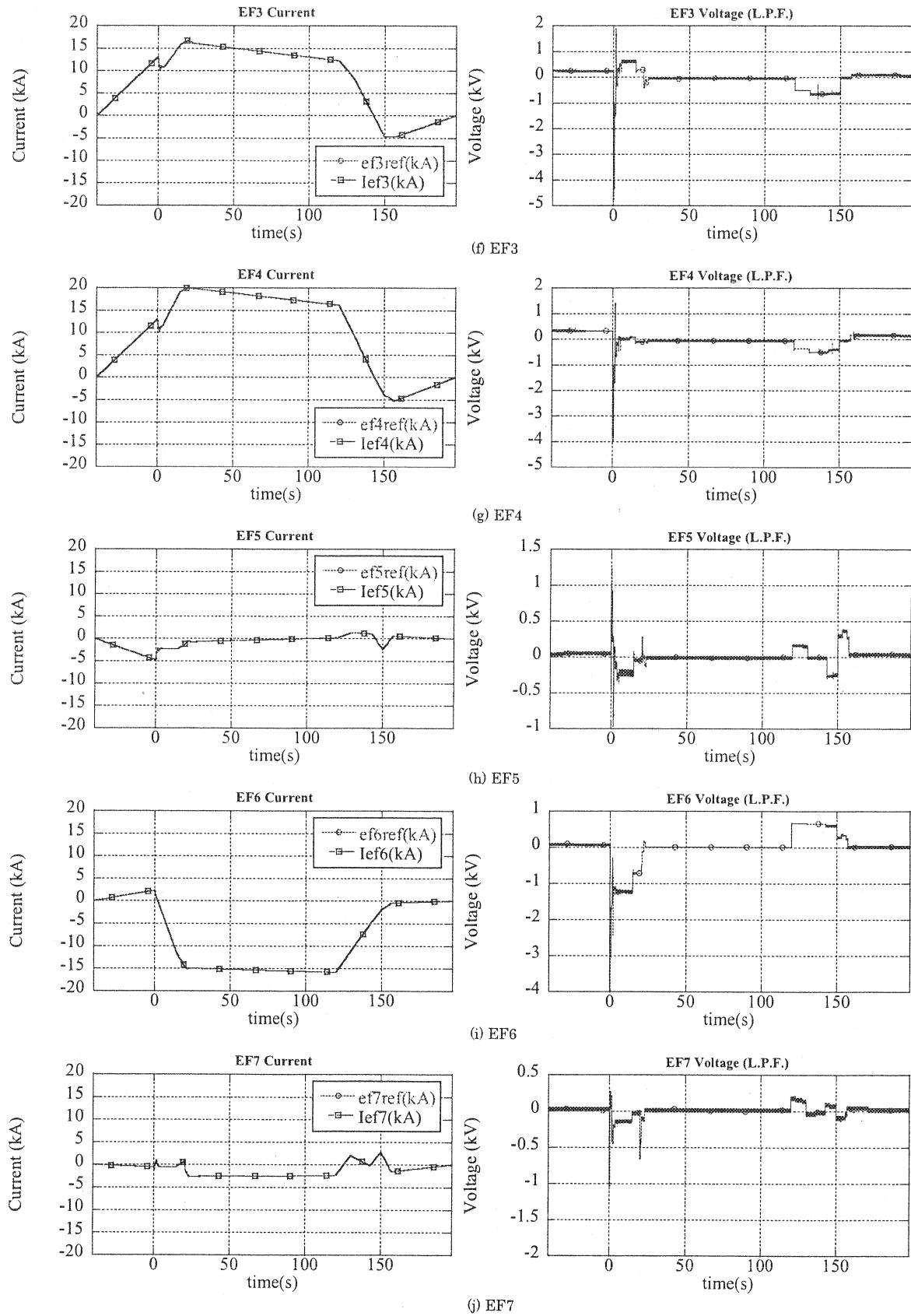


Fig.23 5.5MA ダブルヌル配位シナリオでのシミュレーション結果(コイル電流/電圧波形) (2/2)

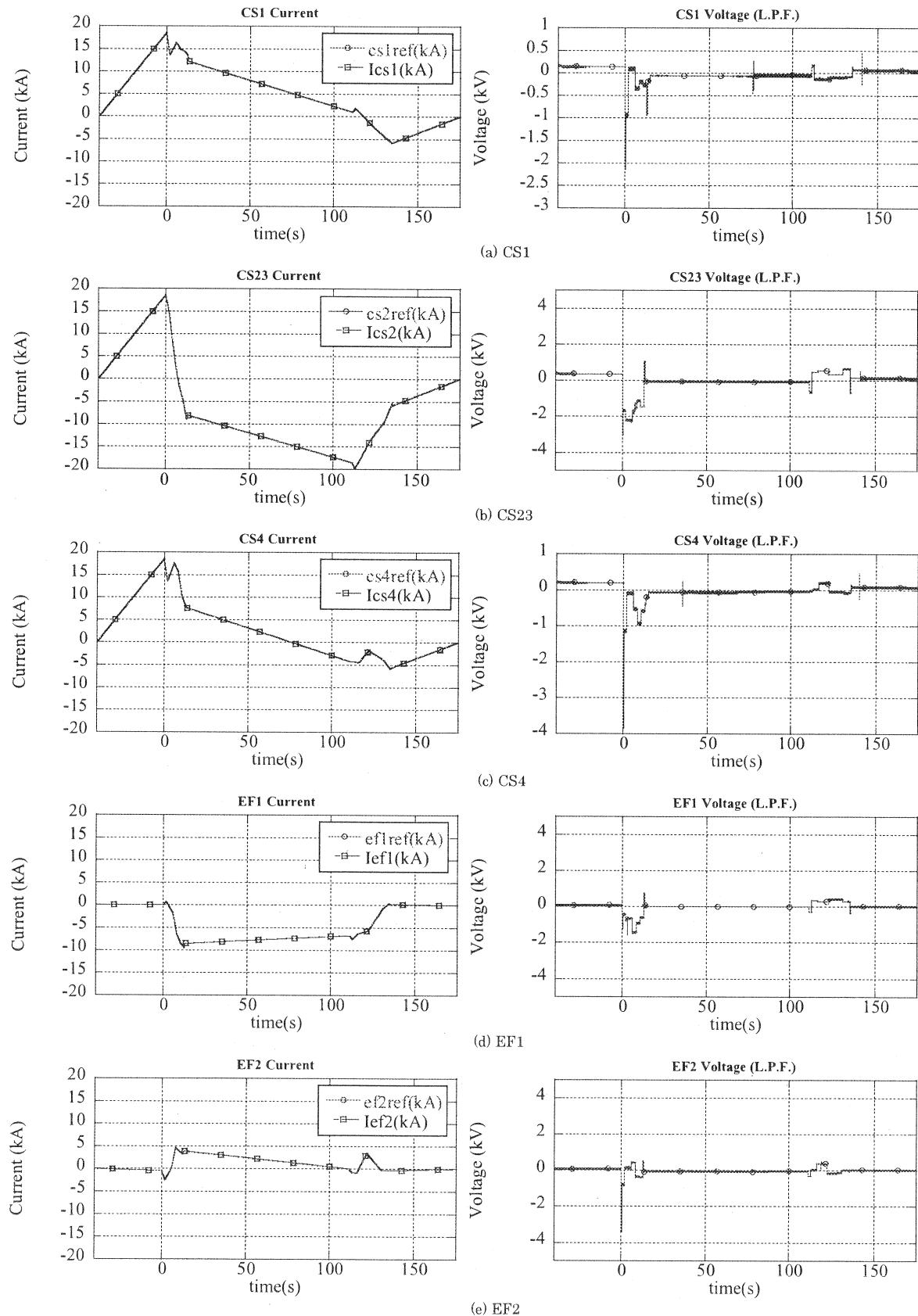


Fig.24 3.5MA ITER 配位シナリオでのシミュレーション結果(コイル電流/電圧波形) (1/2)

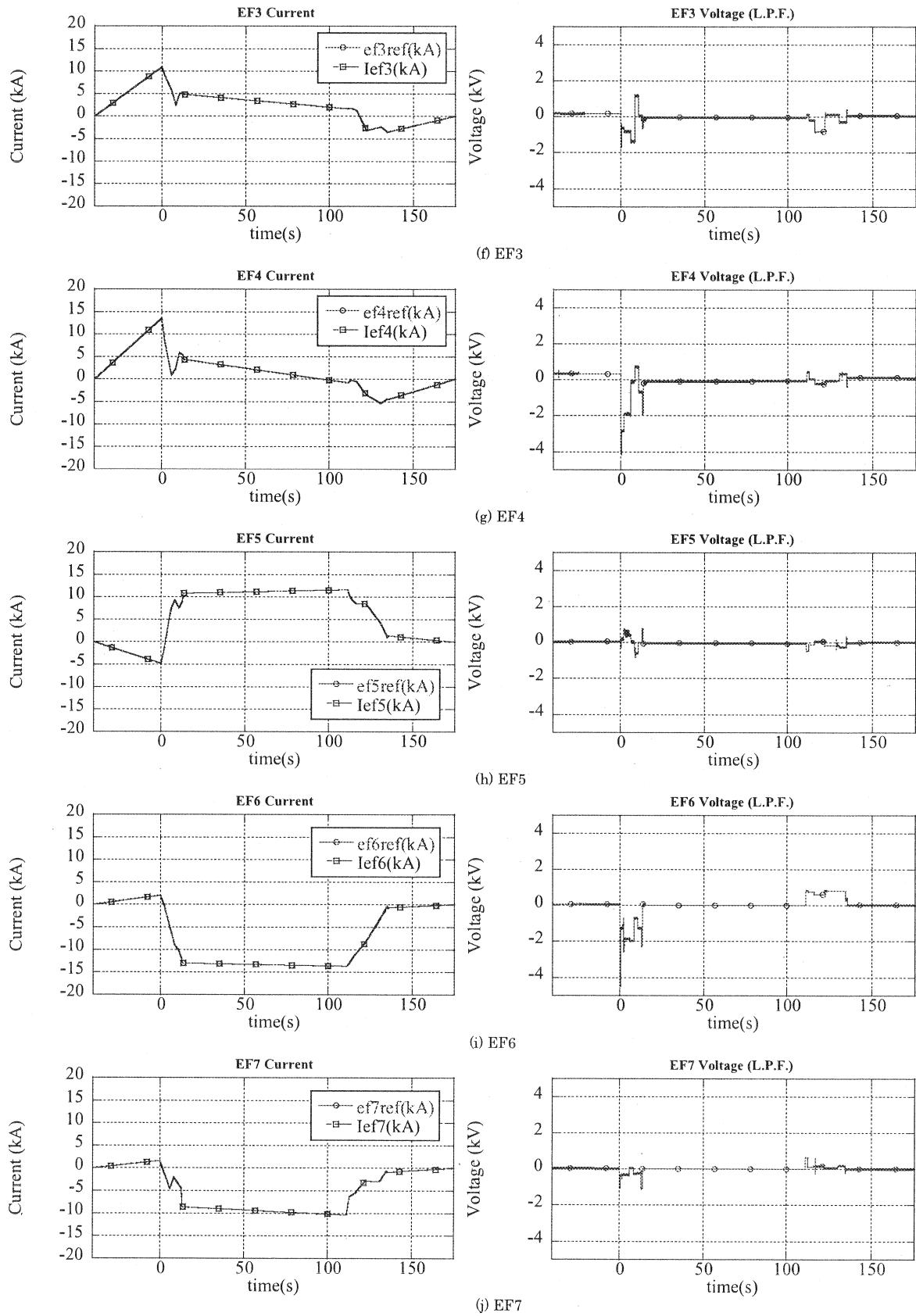


Fig.24 3.5MA ITER 配位シナリオでのシミュレーション結果(コイル電流/電圧波形) (2/2)

4. まとめ

JT-60SA におけるトロイダル磁場コイル電源、ポロイダル磁場コイル電源の回路構成および制御手法についての初期設計検討を行った。既存の JT-60 電源を有効に再利用した新しい電源構成とし、トロイダル磁場コイル/ポロイダル磁場コイルの超伝導化のため、クエンチ時にコイルを保護するクエンチ保護回路を導入した。設計した回路構成および制御手法を評価するために、PSCAD/EMTDC を用いてシミュレーションを行い、その妥当性を確認した。

今後、トロイダル磁場コイルおよびポロイダル磁場コイル電源回路の詳細な検討および想定される故障解析を行う予定である。

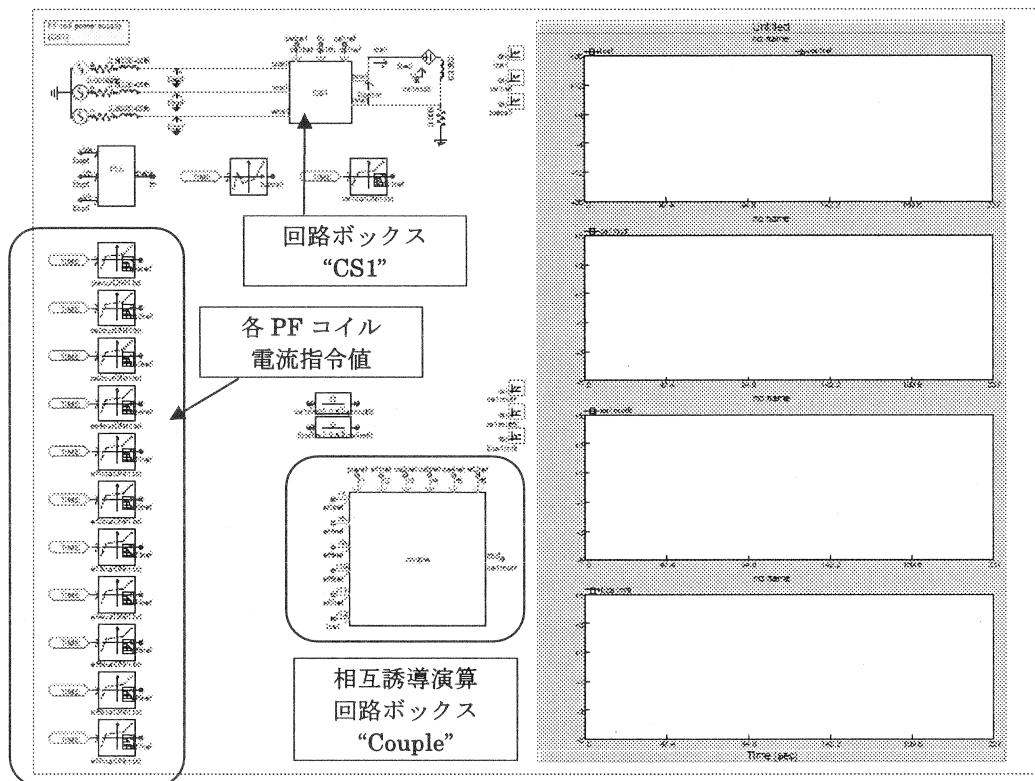
謝辞

JT-60SA 直流系電源の設計検討にあたり、有益なご助言およびご指導をいただきました SA 設計統合グループリーダー 松川 誠氏に深く感謝いたします。さらに、本報告書を纏めるにあたり御支援頂いたトカマクシステム技術開発ユニット長 細金 延幸氏、同ユニット研究主席 山本 巧氏にお礼申し上げます。

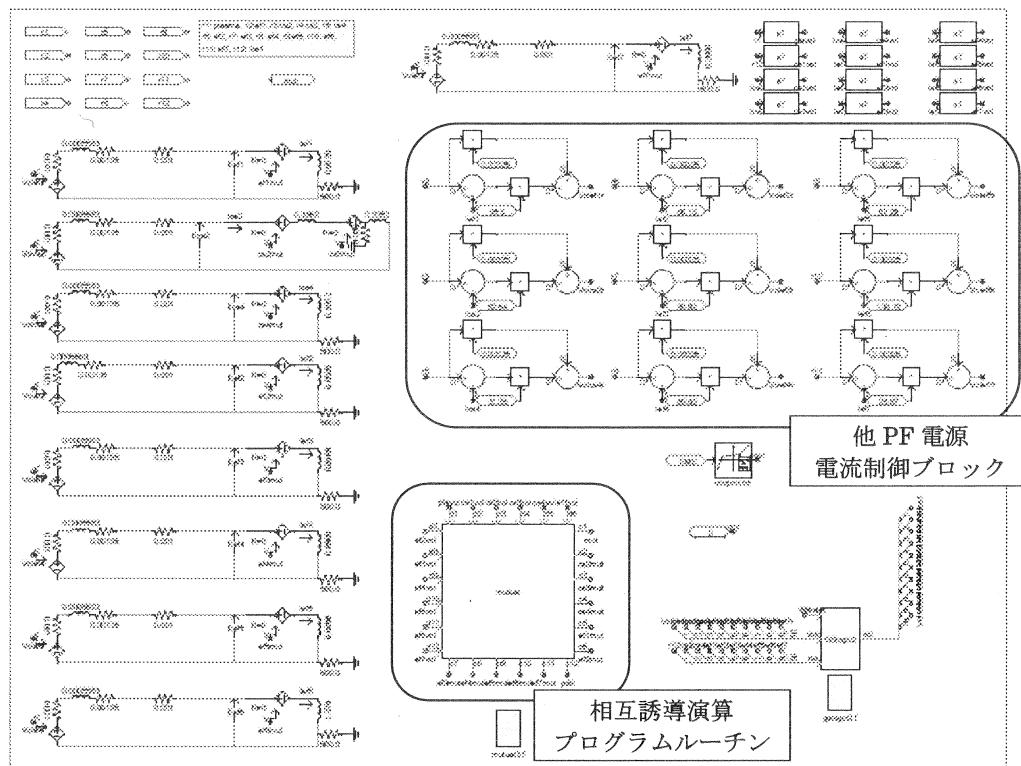
参考文献

- [1] 日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所ホームページ <http://www.naka.jaea.go.jp/>
- [2] Manitoba HVDC Research Centre “PSCAD/EMTDC” ホームページ: <http://pscad.com/>
- [3] 日本原子力研究開発機構 JT-60 電源パンフレット
ホームページ: <http://www-jt-60.naka.jaea.go.jp/japanese/jt60/index.html>
- [4] R. Shimada, M. Tsuneoka, T. Matsukawa, T. Aoyagi, K. Oumori, M. Mizuno, M. Matsukawa, S. Takahashi, M. Shiina, N. Miya, K. Arakawa and S. Tamura, “JT-60 Power Supply”, Fusion Engineering and Design, 5, pp.47-68 (1987)
- [5] 磯野高明, 塙博美, 松崎誼, 浅野克彦, 深浦圭吾, 加藤弥一, ”ITER 共通試験用 50kA, 10kV 直流遮断器の開発”, 平成 14 年電気学会全国大会予稿集 No.1183 (2002)
- [6] 青柳哲雄, 寺門恒久, 松崎誼, “JT-60U コイル電源サイリスタ制御の VME 化改造”, 電学論 D, 115, No.1, pp.13-20 (1995)
- [7] 安部可治, ”パワーエレクトロニクスとシステム制御”, オーム社, pp.168-171 (1991)

付録 1. PSCAD/EMTDC シミュレーションモデル(CS1 電源)

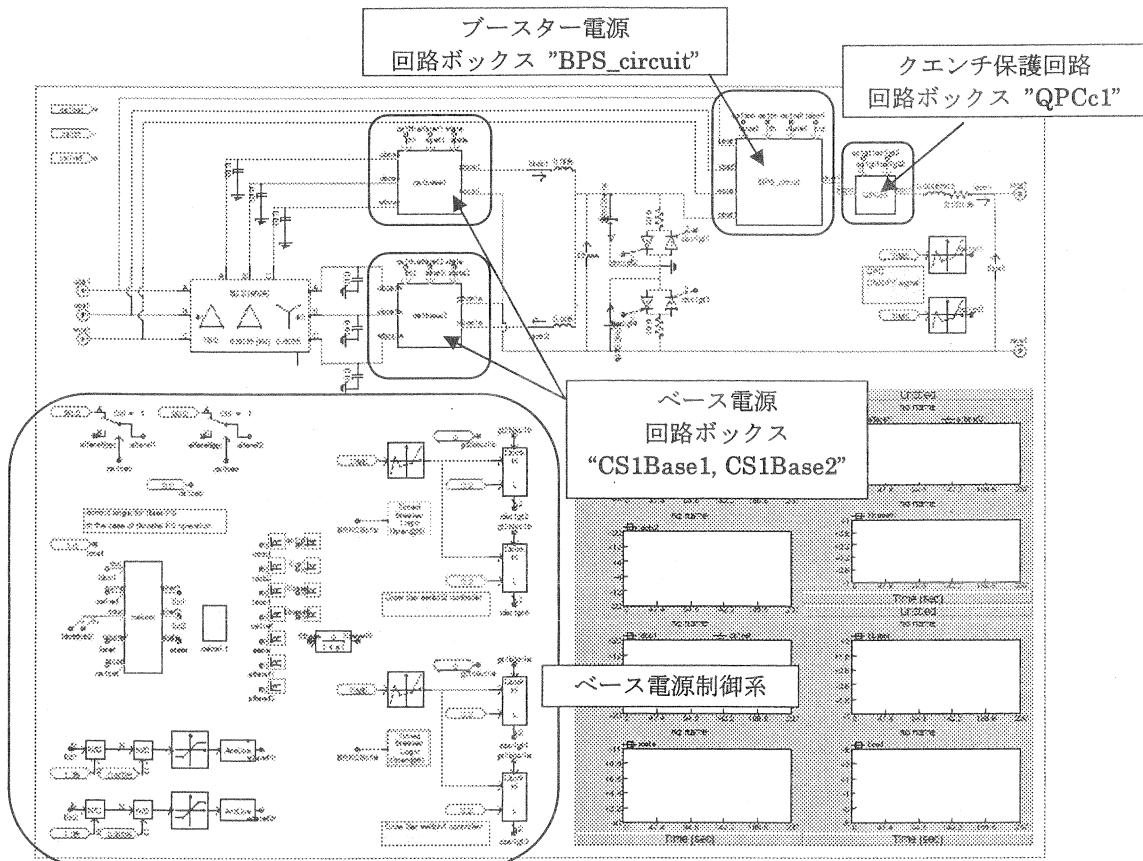


(a) メイン回路モデル

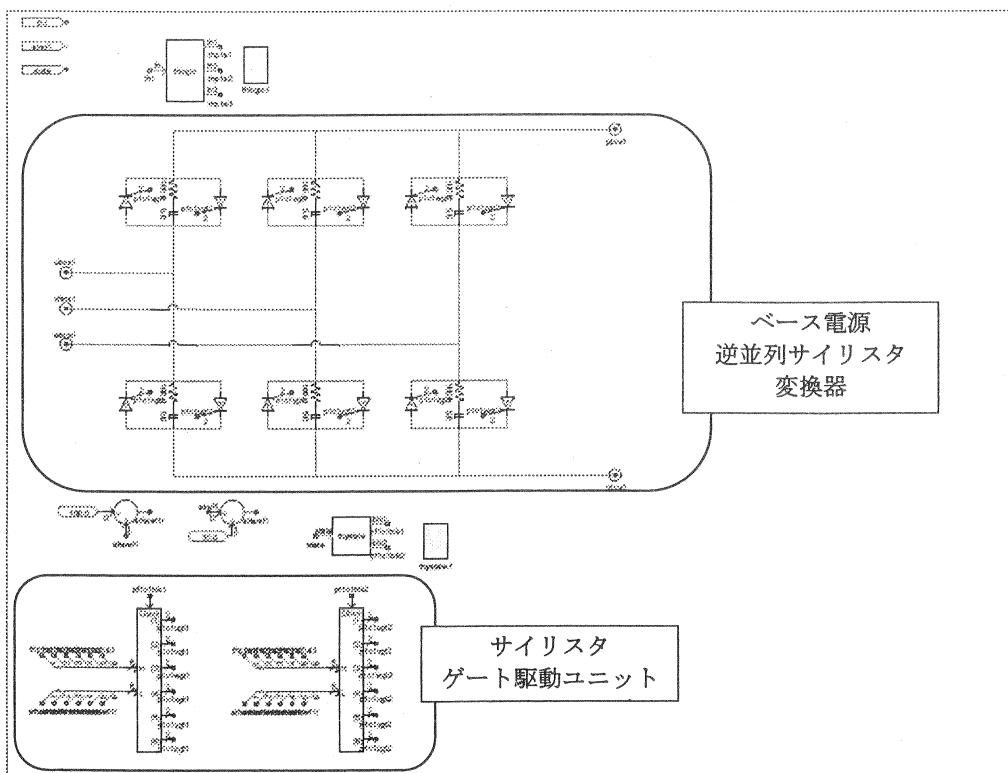


(b) プラズマおよび他 PF コイル相互誘導算出 (回路ボックス名 : couple)

Fig.A1 PSCAD/EMTDC による CS1 電源シミュレーションモデル(1/3)

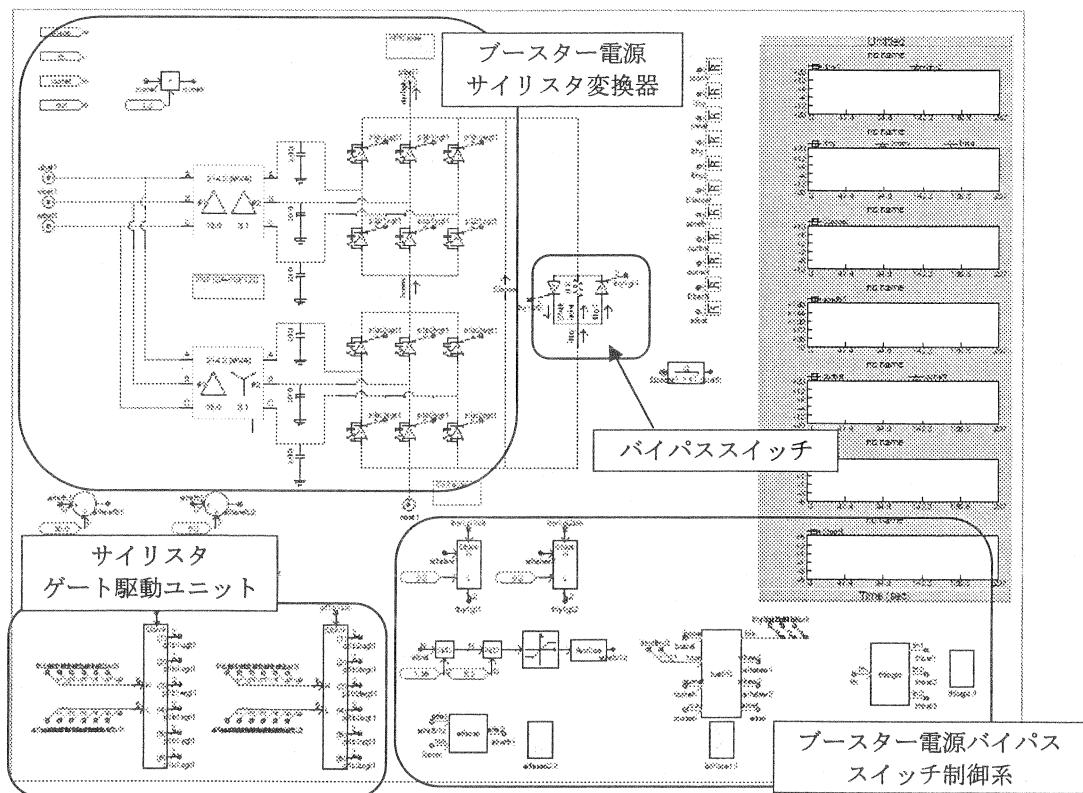


(c) 変換器構成モデル (回路ボックス名 : CS1)

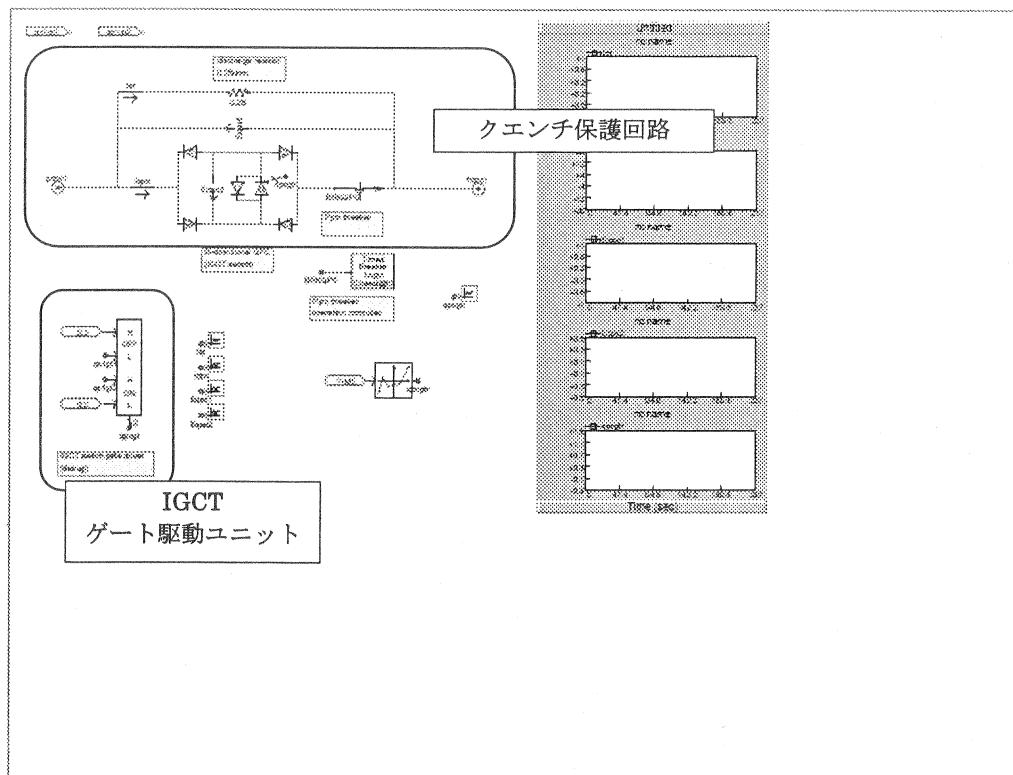


(d) ベース電源逆並列サイリスタ変換器モデル (回路ボックス名 : CS1base1,CS1Base2)

Fig.A1 PSCAD/EMTDC による CS1 電源シミュレーションモデル(2/3)



(e) ブースター電源モデル (回路ボックス名 : BPS_circuit)



(f) クエンチ保護回路モデル (回路ボックス名 : QPCc1)

Fig.A1 PSCAD/EMTDC による CS1 電源シミュレーションモデル(3/3)

付録 2. 5.5MA ダブルヌル配位シナリオにおけるベース電源、ブースター/アシスト電源出力電圧

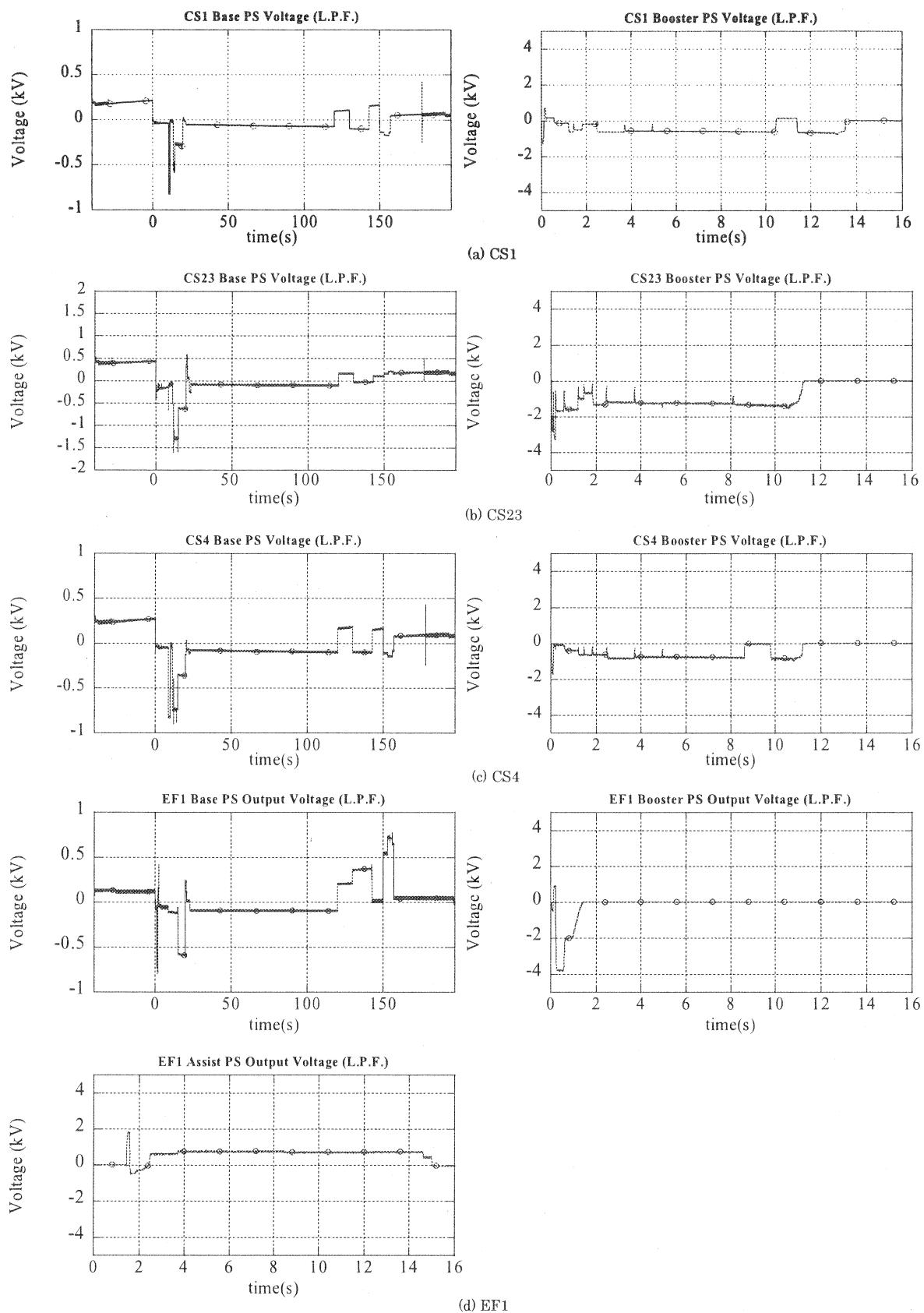


Fig.A2 5.5MA ダブルヌル配位シナリオにおけるベース/ブースター/アシスト電源出力電圧(1/3)

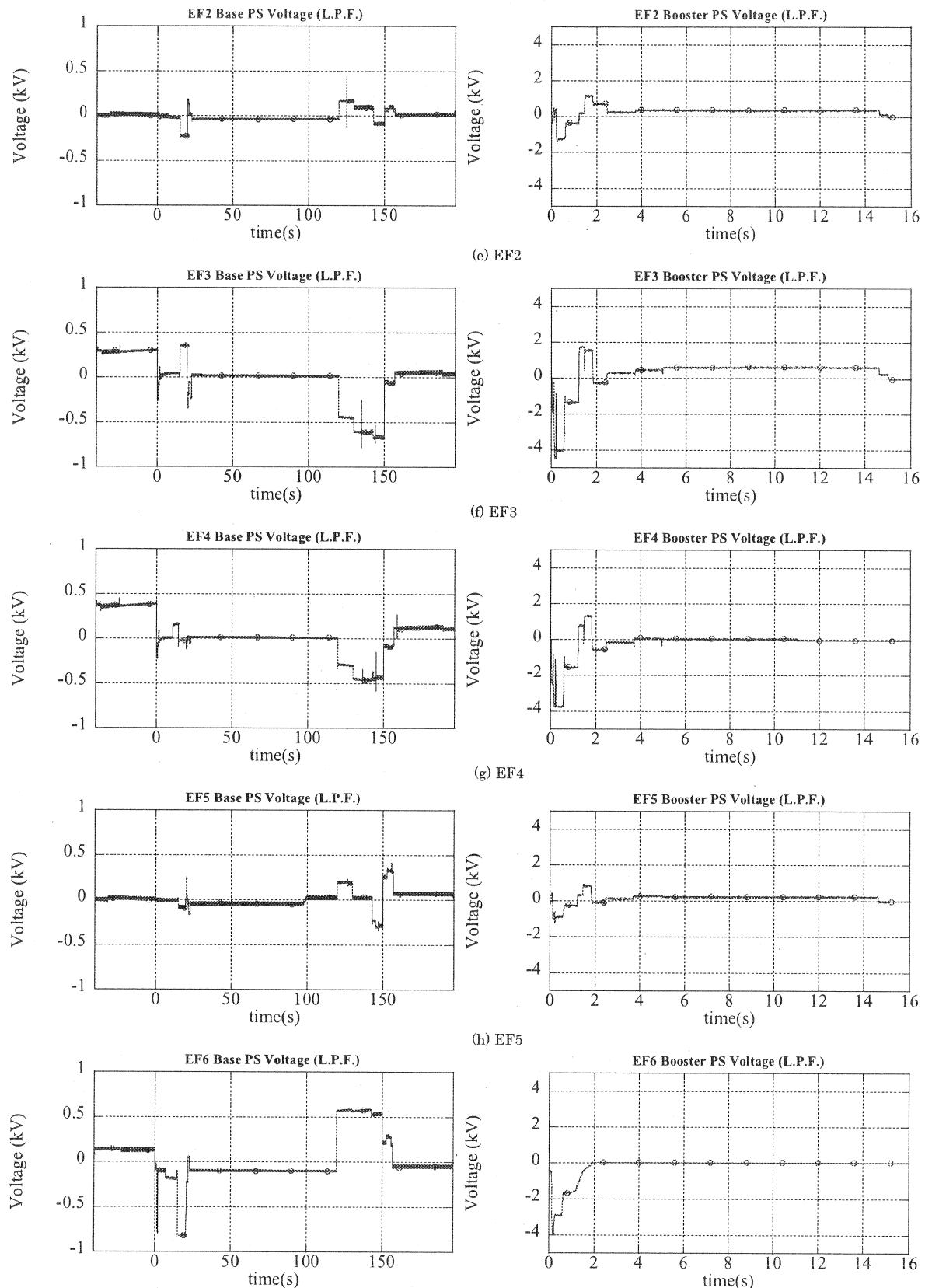


Fig.A2 5.5MA ダブルヌル配位シナリオにおけるベース/ブースター/アシスト電源出力電圧(2/3)

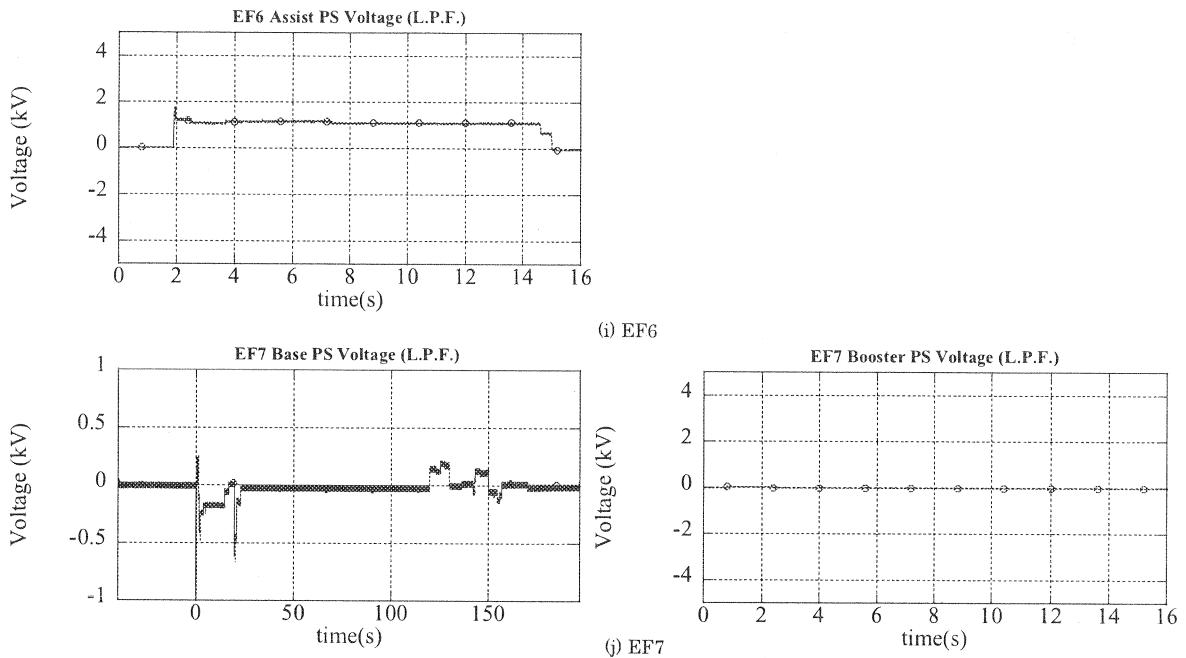


Fig.A2 5.5MA ダブルヌル配位シナリオにおけるベース/ブースター/アシスト電源出力電圧(3/3)

付録 3. 3.5MA ITER 配位シナリオにおけるベース電源、ブースター/アシスト電源出力電圧

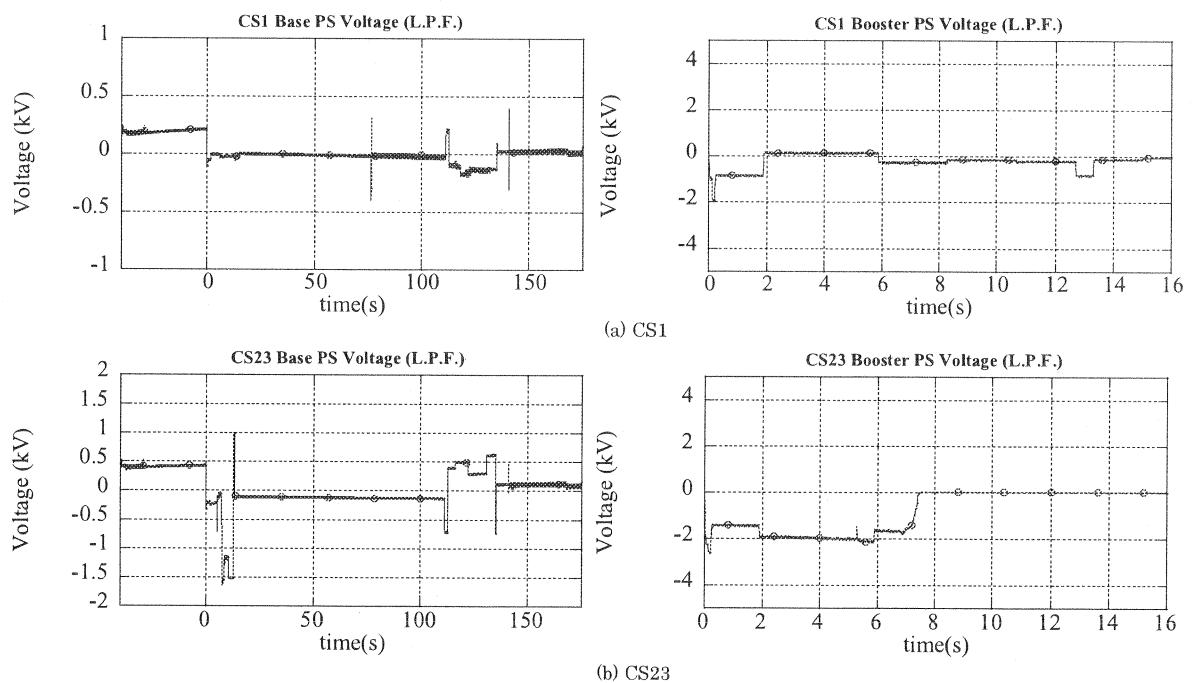


Fig.A3 3.5MA ITER 配位シナリオにおけるベース/ブースター/アシスト電源出力電圧(1/3)

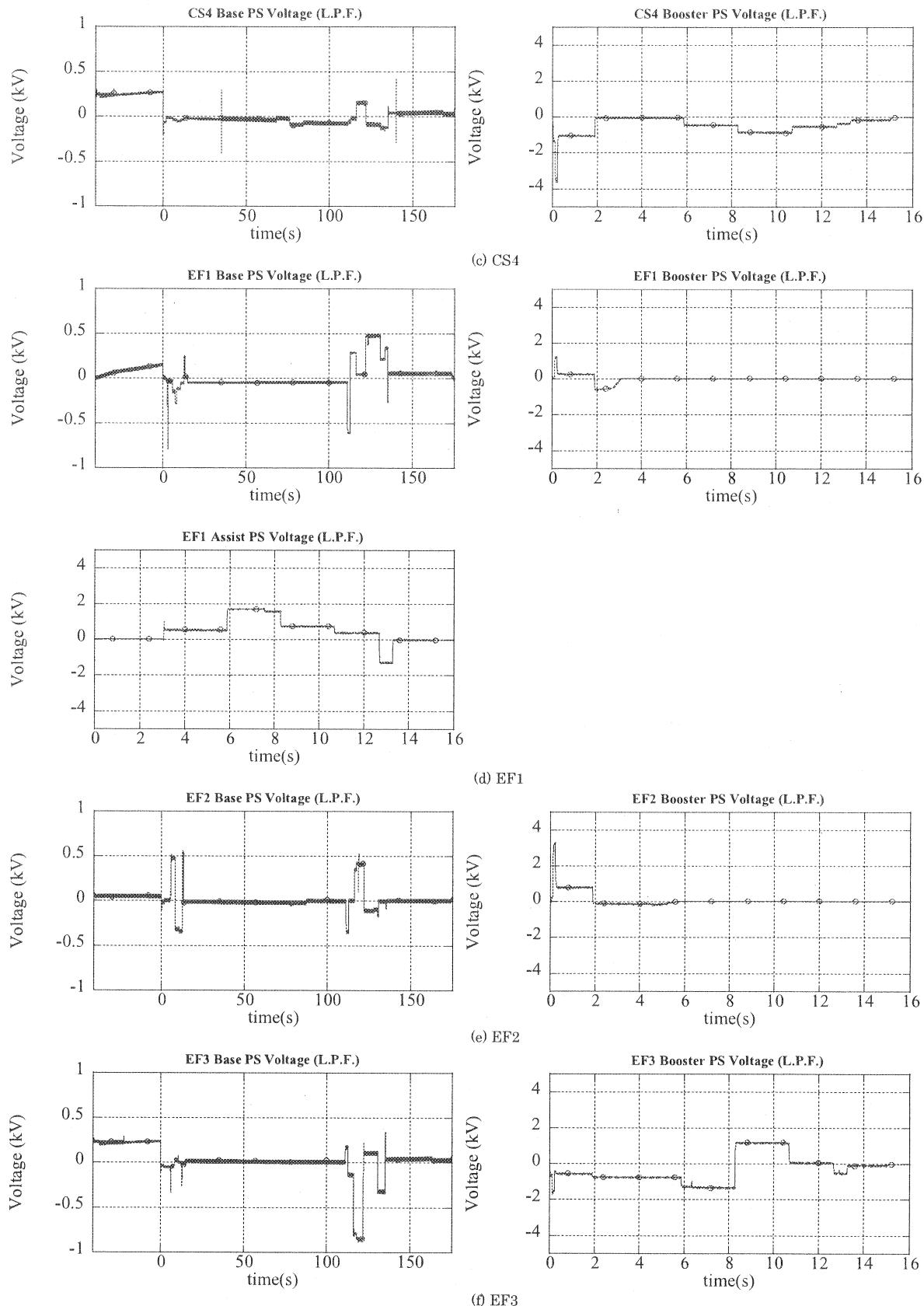


Fig.A3 3.5MA ITER 配位シナリオにおけるベース/ブースター/アシスト電源出力電圧(2/3)

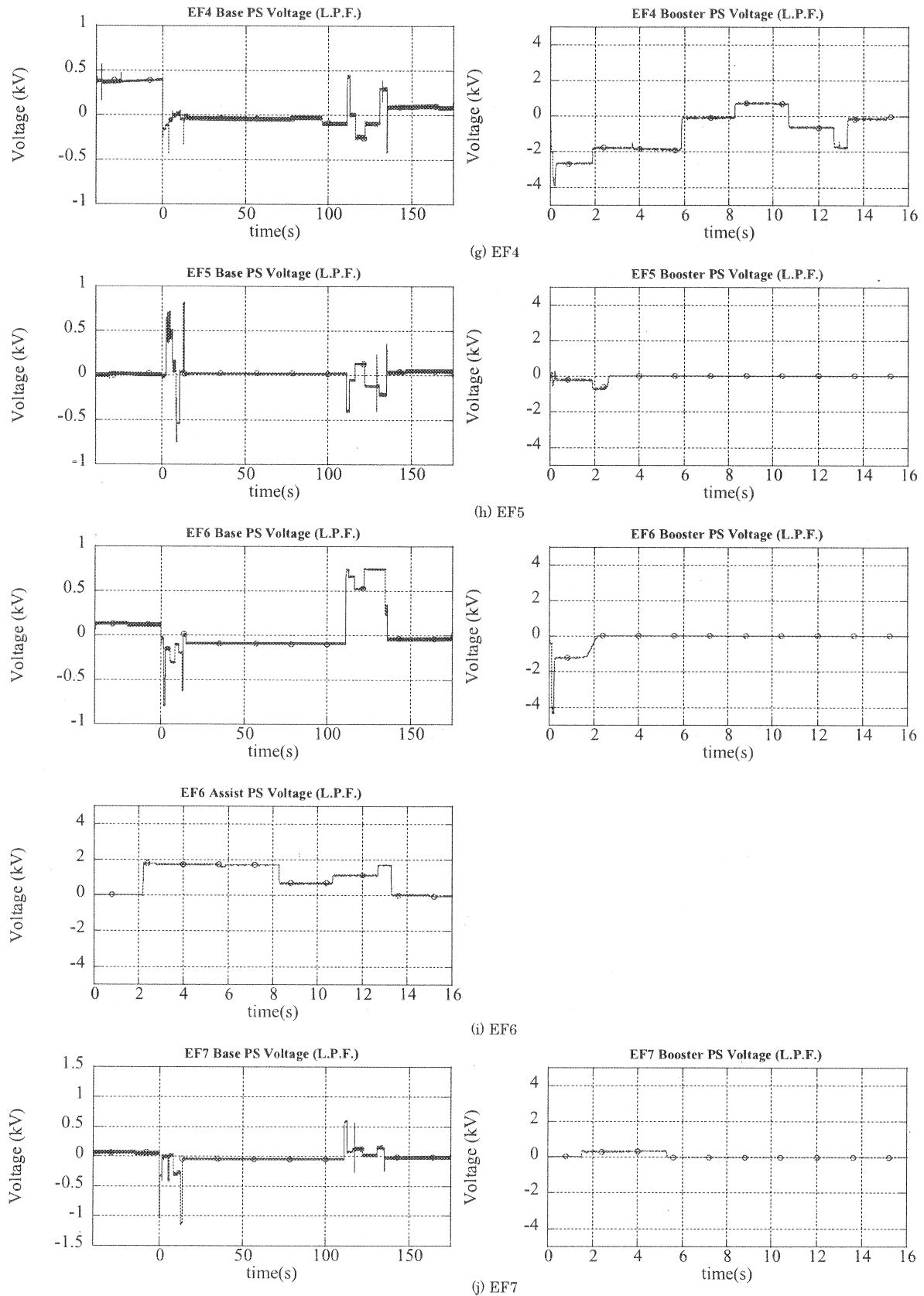


Fig.A3 3.5MA ITER 配位シナリオにおけるベース/ブースター/アシスト電源出力電圧(3/3)

