

最近の火力発電制御技術

世古 清一郎(せこ せいいちろう)

秋月 敏興(あきづき としおき)

西田 和実(にしだ かずみ)

1 まえがき

最近のエレクトロニクス技術の進歩・発展に伴い、火力発電プラントの制御・監視システムは、従来のアナログ技術と比べ、より信頼性、操作性及び保守性が高く、マンマシンコミュニケーションに優れたデジタル化が主流となってきた。すなわち、従来のコンピュータ主体の制御から、マイクロコンピュータを用いた装置を組み合わせ、それらが有機的に相互につながる総合デジタル制御監視システム化の方向にある。

本稿では、事業用火力発電プラントを対象とした最新のデジタル制御装置を中心に紹介する。

2 システム構成

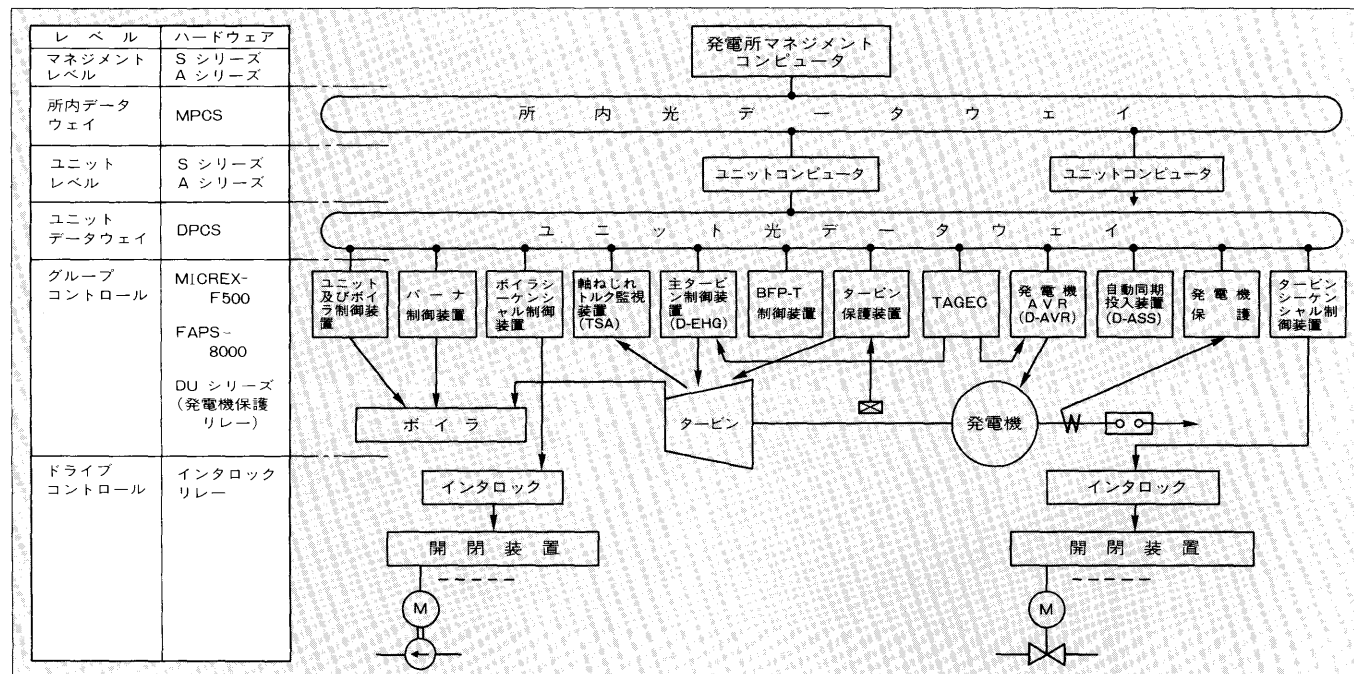
図1に将来を考慮した制御監視システムの概念構成を示

す。

最上位のマネジメントレベルには、発電所全体を総合的に管理するマネジメント用コンピュータが置かれ、所内データウェイを通し各ユニットに設置されるユニット用コンピュータと接続される。ユニット用コンピュータは、ユニットデータウェイにより、下位のグループコントロールレベルを構成する各種デジタル制御装置や監視装置と接続される。グループコントロールレベルは、更に下位のドライブコントロールレベルを通し、プラントの各機器操作端につながっている。

このような階層分散形構成において、プラント情報や各種制御装置の情報は、ユニット用コンピュータに集中され、コンピュータは、それらの情報に基づき充実したマンマシンコミュニケーションによるプラントの監視及び各制御装置の監視、性能計算、データロギングやプラント統括制御を行い、一方、各機器の制御は、グループレベルとして機

図1 システム構成図



世古 清一郎

昭和36年入社。火力発電プラントの技術計画に従事。現在、川崎工場火力制御電気部担当部長。



秋月 敏興

昭和37年入社。自家用、事業用火力及び原子力発電関係の計測制御技術に従事。現在、東京工場計測技術第一部課長。



西田 和実

昭和49年入社。発電設備の制御・保護システムの設計に従事。現在、電力システム技術統括部システム技術部課長補佐。

能分散化された個々の制御装置によって行われる。このようにして情報の集中化と制御の分散化が図られる。

これらの分散化されたデジタル制御装置は、主タービン制御装置、給水ポンプタービン制御装置、ボイラ制御装置、シーケンシャル制御装置、発電機自動電圧制御装置、自動同期投入装置、自動バーナ制御装置、ローカル制御装置などから成る。また、これらの制御装置を構成するハードウェアは、タービン制御やシーケンス制御など高速演算を要する制御に用いられる MICREX-F500と、ボイラ制御やローカル制御に用いられる FAPS-8000とに大別される。また、軸ねじれトルク監視装置やラビング診断装置などの監視装置は、各々の装置に適したハードウェアが採用される。

以下、MICREX-F500によるタービン制御装置と、FAPS-8000によるボイラ制御装置を中心に、装置ごとにその特長と内容を紹介する。

③ タービン制御装置

タービンの速度制御をつかさどるガバナは、火力発電プラントの中で最も重要な制御装置の一つである。

従来の蒸気タービンは、電気ガバナのほかに油圧ガバナを装備しており、かつ、個々の制御弁に対しては電気ガバナからの制御信号を油圧系で分配する方式であった。新しいタービンは、油圧ガバナを装備せず、個々の制御弁に対しては、電気ガバナより直接制御する弁個別制御方式を採用している。

これに対応するために開発された信頼性、制御性、保守性に優れたデジタル式電気ガバナ (D-EHG) についてその概要を説明する。

図 2 に D-EHG の外観を示す。

3.1 D-EHG の機能

D-EHG は次のような機能を備えている。

- (1) タービン起動機能
- (2) 昇速制御機能

図 2 D-EHG の外観

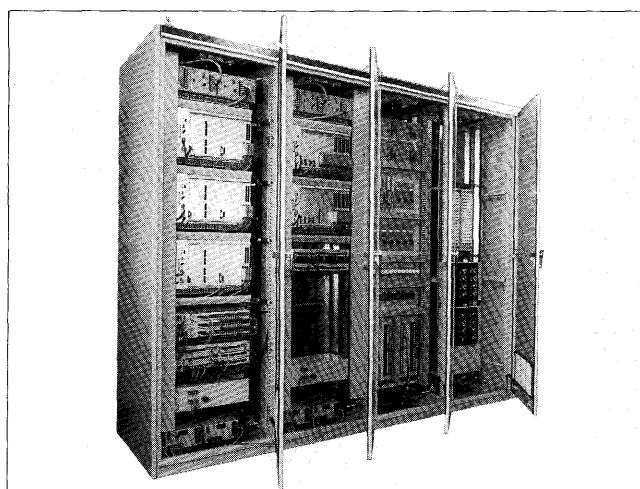
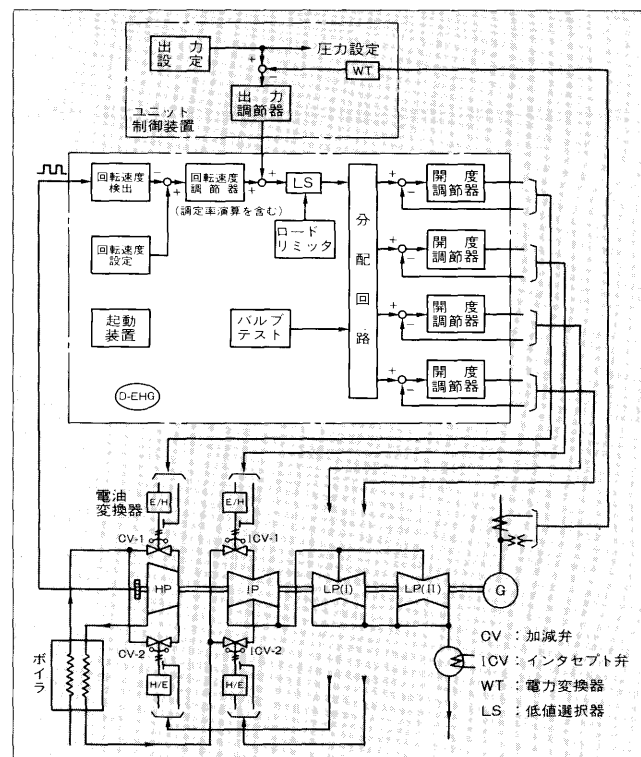


図 3 D-EHG の機能構成



- (3) 掎速制御機能
- (4) 初負荷制御機能
- (5) 負荷制御機能
- (6) 調定率演算制御機能
- (7) ロードリミッタ及びロードリミッタ自動追従機能
- (8) 弁個別弁開度制御機能
- (9) 弁テスト機能
- (10) ロードシェディングリレー機能
- (11) 負荷調整機能（オプション機能）
- (12) 圧力制御機能（オプション機能）
- (13) 復水限界圧制御機能（オプション機能）

概略機能ブロックと機械系とのインタフェースを、図 3 の D-EHG 機能構成に示す。

3.2 D-EHG の特長

3.2.1 高信頼度システム

システムとしての信頼性向上を図るために、下記を冗長化の基本思想としている。

自己判定の可能な系……………二重化

自己判定の困難な系……………三重化

多重化が困難な系……………分散化

- (1) 主制御装置 (MPU)

最重要部分であり、演算結果に対して自己判定が不可能なため三重化する。

- (2) MPU 間シリアルリンク (P リンク)

Pリンクは、自己判定可能な系であること及び用途がMPU間のデータ補正であるので二重化(待機冗長方式)とする。

- (3) 入出力シリアルリンク (T リンク)

MPU と I/O 間の伝送用シリアルリンクで自己判定可能であるが、MPU が三重化されているため、システム構成上三重化となる。

(4) 入出力関係

原則として二重化とする。三重化 MPU からの出力値は出力カードで、2 out of 3 又は中間値選択(MVG)を行う。

ただし、

- ・回転速度検出など高速を要する入力
- ・ガバナとして最重要なアナログ入力
- ・制御演算結果が、即トリップ又は大きな外乱に至る可能性のある入出力

は、直結入出力カードで直接各 MPU へ接続し、三重化を図る。

(5) 制御電源

1 系統電源断にて制御不能とならないよう 2 系統で受電し、二重化を図る。

上記の基本思想に基づいた D-EHG のシステム構成を図 4 に示す。

3.2.2 保守性の向上

下記を実現することによって保守性の向上を図っている。

- (1) 各カードに設けられた ER 表示(故障表示)と、メンテナンスパネルによる故障箇所の顕在化
- (2) モジュールチェッカによる予備カードの機能確認
- (3) カードの活線着脱によるオンラインメンテナンス
- (4) ブロック図表現によるプログラムの可視化

3.3 D-EHG のハードウェア

3.3.1 特長

富士電機の新しいプログラマブルコントローラ系列 MICREX-F シリーズの最上位に位置付けられる高速・高機能なコントローラ MICREX-F500 を使用する。そのハードウェア、ソフトウェア両面にわたる主な特長は次のとおりである。

- (1) ハードウェアの標準化と国際互換性の確保

- ・バスアーキテクチャとして "MULTIBUS II" を採用 (IEEE 標準化予定)

- ・IEC 規格のプリント板とシェルフ構造

- (2) オープンなソフトウェアシステム

- ・汎用性を志向した高機能な関数形制御用言語及び多彩なプログラム表現法への対応 (ニーモニック言語、ラダー図、ファンクションブロック図など)

- ・第三者へのソフトウェア設計の開放

- (3) 高機能・高信頼性複合化システムの構成

- ・主要機能のカスタム LSI 化とハードウェアの小型高速、高信頼性化
- ・国際標準構造と整合する冗長化 (システムの構成)
- ・マルチプロセッサ構成による多機能、複合化

3.3.2 ハードウェア

ハードウェア構成は、図 4 に示すように MPU ユニットと I/O ユニットから成る。MPU ユニットには、POW、MPU、MEM、CSM、PGA の基本カードに加え、PLA、

図 4 D-EHG システム構成

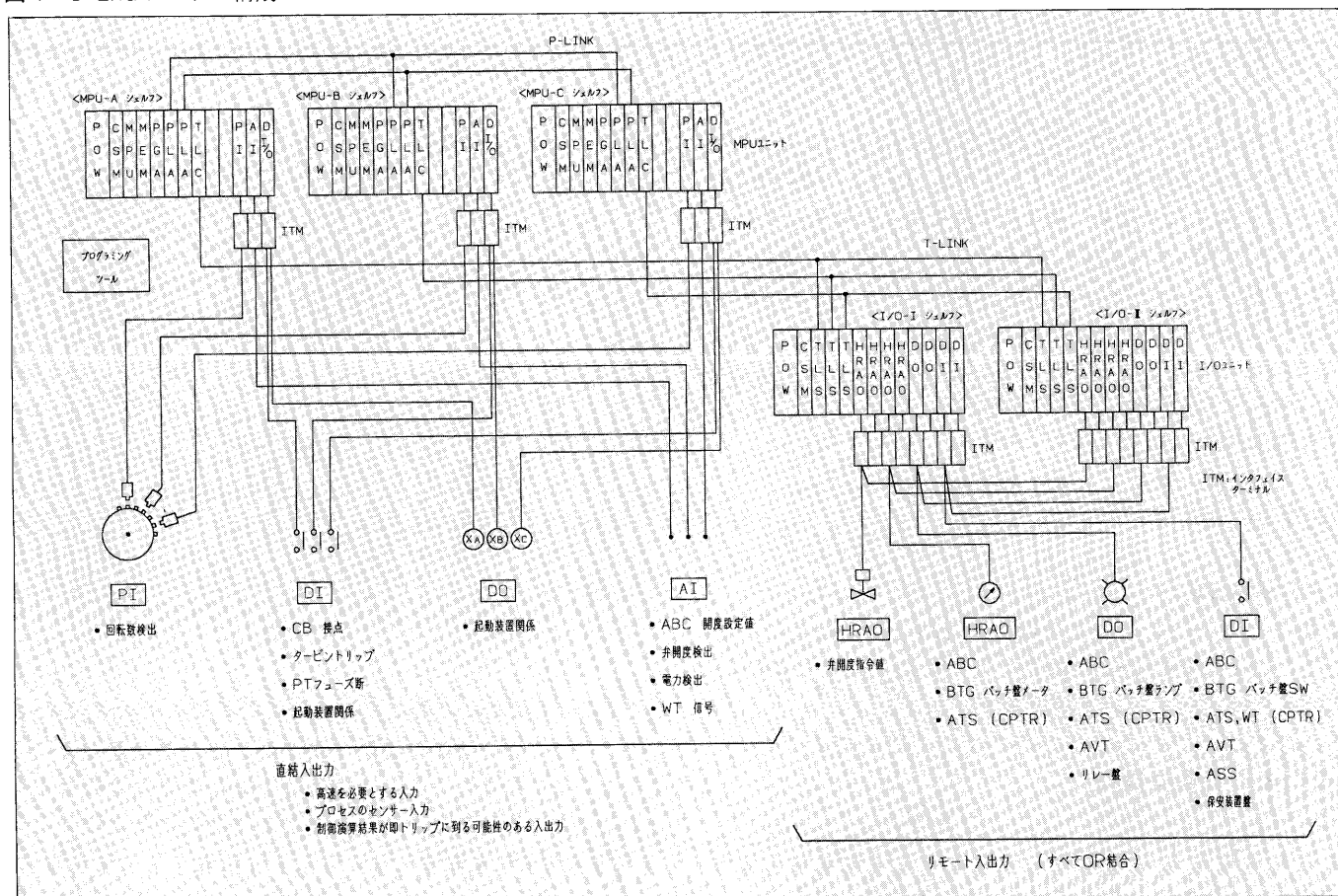


表1 MICREX-F500仕様一覧表

項 目		仕 様	備 考
制 御 方 法		ストアードプログラム方式	
制 御 機 能		サイクリック演算制御 定周期演算制御 プロセス割込制御	最小1ms定周期
命 令	言 語	制御用関数形言語	FFL
	速 度	シーケンス命令 : 1.0μs 固定小数点数値演算 : 10μs以下 浮動小数点数値演算 : 20μs以下 アナログ演算 : 20μs以下	浮動小数点演算 IEEEフォーマット (32ビット)
メ モ リ	プ ロ グ ラ ム	64kw (16ビット/w) : EPROM/RAM 選択可	システム用 : 32kw, アプリケーション : 32kw
	デ ー タ	32kw (16ビット/w) : RAM	システム用 : 16kw, アプリケーション : 16kw
入出力点数	デ ィ ジ タ ル	8,704点 max.	Tリンク : 8,192点, 直結 : 512点
	ア ナ ロ グ	1,152点 max.	Tリンク : 1,024点, 直結 : 128点
内部リレー データ メモリ	ビ ッ ト メ モ リ	8,192点	システムデータメモリ領域
	ワ ー ド メ モ リ	2kw (16ビット/w)	システムデータメモリ領域
	微 分 リ レ ー	1,024点	
	キ ー プ リ レ ー	1,024点	
	タ イ マ	1,024点	
	カ ウ ン タ	128点	
	ファイルメモリ	16kw (16ビット/w)	
伝 送 I F	P I O 伝 送	Tリンク : 500kビット/s	光伝送可
	コントローラ間	Pリンク : 5Mビット/s	
	データウェイ	DPCS-F	
制 御 電 源		・ AC100/110V -25%+10%, 50/60Hz ・ DC100V	
耐 圧		AC2,000V 1分間	
温 度		0~40℃	
湿 度		20~90%RH	

TLCの伝送カード、PI、AI、DI/Oの直結入出力カードが実装される。同様にI/Oユニットには、CSM、TLSの基本カードに加え、HRAO、DO、DIの各種入出力カードが実装される。表1に主仕様、表2にカード一覧表を示す。なお、従来のコントローラと比較して特長をまとめると次のようになる。

- (1) 高速演算が可能
- (2) 豊富な自己診断、故障診断機能
- (3) 多重化が容易
- (4) 国際規格に準じたシェルフ、カード構造
- (5) 活線着脱が可能

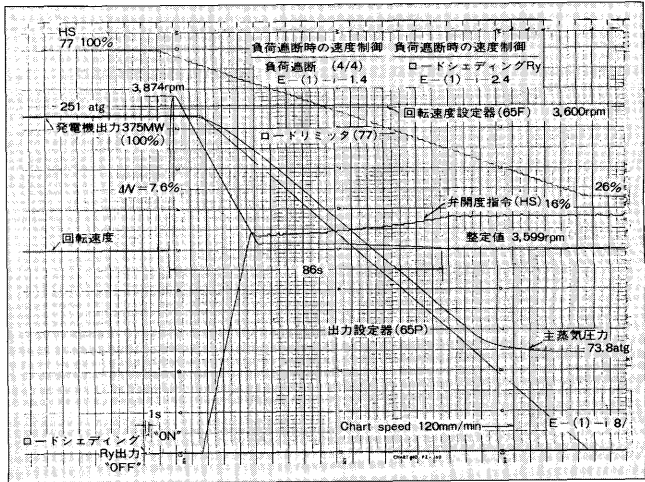
3.4 機能検証

図5にシミュレータを用いたD-EHG機能検証の一例として、4/4全負荷遮断の結果を示す。最大速度上昇率は、7.45%と期待どおりの性能を発揮している。

④ ボイラ制御装置

火力発電プラントの運用をつかさどる制御装置は、近年、発電設備の多様化、燃料の多様化及び産業構造の変化など

図5 4/4全負荷遮断時の速度制御



により、高度かつ複雑な機能を経済的に遂行するものが求められている。この高度・複雑なニーズを解決するには近年、発達の著しいデジタル制御技術を駆使した統合化デジタル計測制御装置が必要とされる。この統合化デジタル計測制御装置はまた、プラントを構成する設備の操作・制御性、保護、監視、記録からの要求と制御装置の具

表2 カードユニット一覧表

カード名	仕 様
POW	電源ユニット ・AC100/110V又はDC110V入力 ・カードと同じプラグインタイプ ・二重化可能
CSM	共通制御カード ・システム操作及びシステム状態出力 ・システムバス共通制御
MPU	FPL実行カード ・オリジナル32ビットALU使用 ・マイクロプログラム制御 (8kw) + ナノプログラム制御 ・データメモリ 32kw
MEM	FPLプログラム制御カード ・関数形言語 (FPL) プログラム制御 ・割込制御 ・プログラムメモリ 64kw
PGA	・プログラムロード結合カード ・RS-232-C×4チャンネル
TLC	Tリンク結合カード ・Tリンク (500kビット/秒シリアル) ×2回線
TLS	Tリンク結合カード (IOユニット) ・Tリンク (500kビット/秒シリアル) ×1回線
PLA	Pリンク結合カード ・Pリンク (5Mビット/秒シリアル) ×1回線 ・ROM: 8kB, RAM: 2kB
DPCF	データウェイ (DPCS) 結合カード ・DPCS×1回線
DI	ディジタル入力カード ・入力点数: 64点 ・ホトカブラ絶縁: AC500V
DO	ディジタル出力カード ・出力点数: 64点 ・ホトカブラ絶縁: AC500V
AI	アナログ入力カード ・入力点数: 16点 ・ホトカブラ絶縁: AC500V
HRAO	アナログ出力カード ・出力点数: 8点 ・ホトカブラ絶縁: AC500V

備すべき要件, すなわち操作性, 信頼性, 保守性, 高機能化性などが十分に調和していなければならない。

このような設計思想を核として, 長年のボイラ制御の実績・経験とトータル制御システム構築技術とが統合されて製作された次の装置がボイラ設備及びボイラバーナ設備に適用される。

表3 ボイラ制御装置「FAPS-8000」の特長

項目	分類	既 存 技 術	付 加 技 術
制御演算機能	ボイラ・タービン協調制御 (PID演算など)	古典制御理論形 アドバンスト制御 (IR法)	現代制御理論形 アドバンスト制御 (AR法)
信 頼 性	手動運転確保	システム冗長化による 自動運転断続 (1:1, N:1 バックアップ)	制御演算部と 手動操作部の分離独立 (手動操作モジュール)
保 守 性	ディジタル機器固有 の拡張性	アナログ制御との連続性 (可視化形保守ツール)	カードの自動試験 (モジュールチェッカ)
操 作 性	パネルオペレーション	運転状態の集中監視 及び操作 (スーパー バイザリーパネル)	自動化プラント指向 の制御ステーション (72形操作器)

4.1 ボイラ制御装置「FAPS-8000」

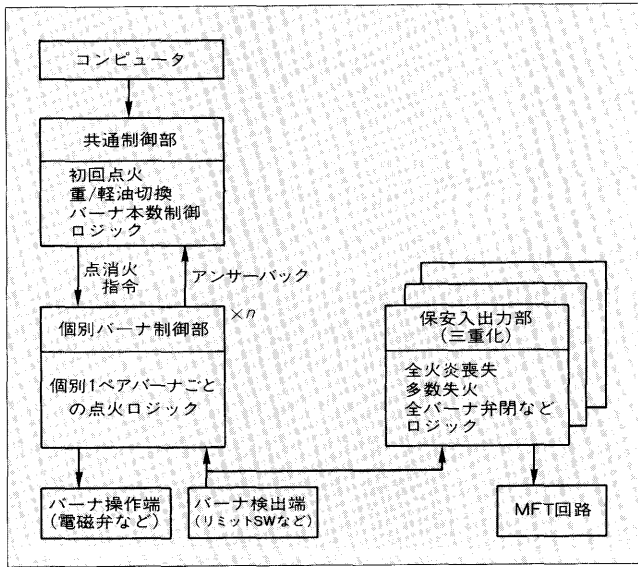
本制御装置はボイラの制御に使用されるものであり, 高信頼性, 操作性, 保守性, 拡張性を深く追求して製作されたものである。その詳細は既に紹介されているので割愛するが, その特長を既存技術との対比で表3に示す。

4.2 自動バーナ制御装置

本制御装置は火力発電設備の自動化装置の一部をなすものであり, ボイラ負荷に応じバーナの自動点消火動作を実行するシーケンシャル制御装置である。375MW級のバーナ設備の制御に使用される入出力点数は約3,300点に達しており, この処理に大容量, 高速処理機能が要求されるため, MICREX-F500によりシステムが構築される。全体システム構成図を図6に示す。

ここで, 共通制御部はコンピュータキック信号による起動バーナ点消火動作, 起動軽油/重油の切換制御及び自動本数制御などを遂行し, 個別バーナ制御部は個々のバーナの点消火動作を遂行する。保安入出力部は全火炎喪失, 多数失火及び全バーナ弁閉などボイラの保護機能を遂行してお

図6 自動バーナ制御装置システム構成図



り、本回路は三重化構成がとられている。

本制御装置は高信頼性、操作性、保守性、拡張性などを追求した種々の特長のほか、保守性向上のため IEC 準拠のブロック図表示プログラミングツール及びモジュールチェッカが用意されている。

⑤ シーケンス制御装置

富士電機は、昭和48年に中部電力(株)新清水火力発電所のタービン自動起動及び自動弁テスト装置にプログラマブルシーケンスコントローラ（以下、シーケンサと略す）を採用して以来、すべての事業用火力にシーケンサを用いた装置を納入してきた。シーケンサを用いることにより、従来のリレーシーケンスでは、実現できなかったシーケンス進行状態や渋滞のきめ細かな監視が可能である。すなわち、シーケンスの操作指令一つごとに一つのステップを設け、その操作指令が確実に実行されたことをチェックバック信号により確認し、そのチェックバックが規定時間内にこえてこない場合には、時間超過警報を出すなどのきめ細かなステップシーケンス制御方式が特長である。この方式は、14年前納入の新清水火力発電所以来すべてに適用されている。このような長年にわたる実績と経験に基づき、シーケンサを用いた総合的なデジタル制御システムが構築される。なおハードウェアとしては、前述の MICREX-F500 が用いられる。

⑥ AVR, ASS

6.1 AVR

発電機容量の増大に対応して、AVR には信頼性、保守性、更には電力系統の安定度対策などの制御性の向上が求められている。

そのため、系統安定化装置 (PSS)、無効電力調整装置 (AQR) などを含めた AVR システムのデジタル化を図っている。特に大容量機に対しては、三重化又は二重化構成をとり、信頼性の大幅な向上を図っている。

ハードウェアとしては、タービン制御と同じく MICREX-F500 を使用する。

6.2 自動併入装置

自動併入装置は、発電機電圧と系統電圧との周波数、電圧、位相を一致させ、発電機を自動的に系統に併入させるもので、主として自動揃速、自動電圧平衡、及び自動同期投入の機能を有している。

自動揃速信号は、ガバナの回転速度設定器に作用して、周波数差が大きい時は急速に、小さい時は徐々に速度調整を行い、周波数が一致するまでの時間を短縮する。

自動電圧平衡信号は、AVR の電圧設定器に作用して、発電機電圧と系統電圧とを一致させる。また両者の電圧差の大小により制御量を変えて、一致までの時間を短縮させる。自動同期投入機能は、発電機電圧と系統電圧の周波数差及

び電圧差が一定値以内の条件で、両系統の位相一致点から併入用遮断器の所要投入時間に相当する時間前に投入指令を発生するものである。本機能は多重化によりフェイルセーフとしている。

本装置は、MICREX-F500によって構成し、デジタル化を行うとともに、自動監視機能などを充実させ高信頼度化を図る。

⑦ 適応形総合発電機制御システム (TAGEC)

発電機制御系の高性能化・高機能化及び高信頼度化による系統安定化技術は、最も基本的な安定度向上対策である。このため、富士電機では関西電力(株)、(財)電力中央研究所と共同研究で、発電機を多変数適応制御し、安定度を大幅に改善するデジタル制御システム TAGEC (Total

図7 TAGEC (II) システム

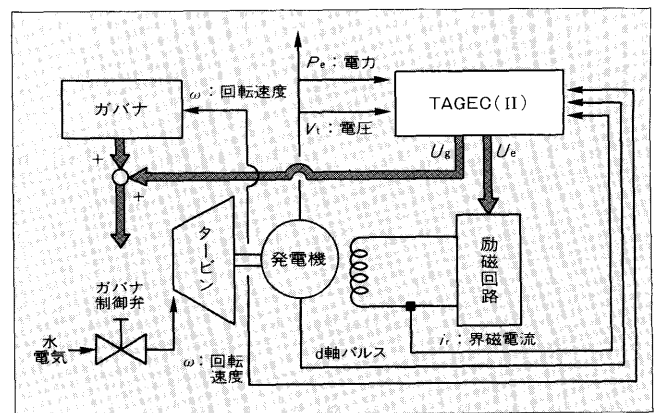
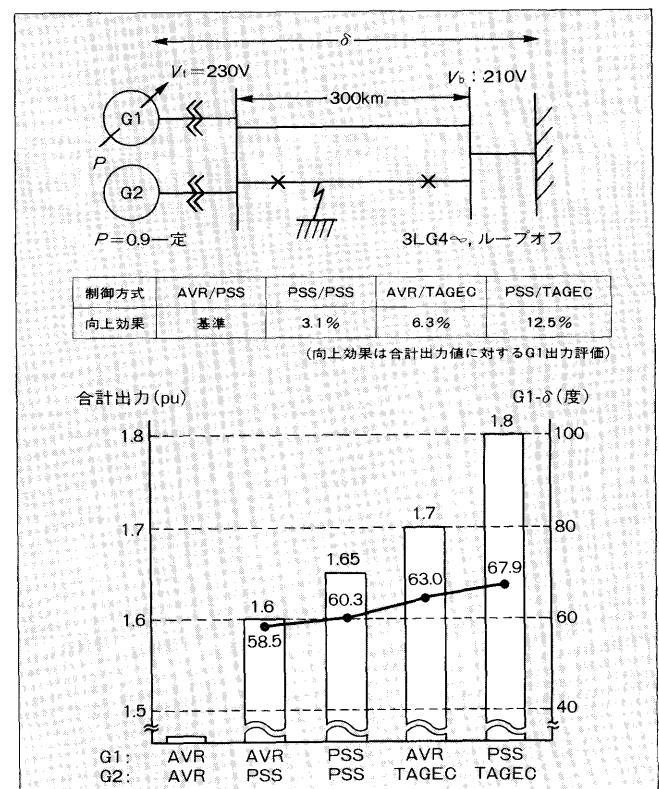


図8 電力系統シミュレータによる試験結果



Adaptive GGenerator Contoller)を開発している。本システムは、現代制御理論の多変数最適制御方式と適応制御方式を発電機制御に適用した実用的な制御システムである。

火力発電プラント用の TAGEC システム (II 形) の特徴は、

- (1) 図 7 に示すように、発電機の二つの制御系である励磁系と調速系を多変数制御するシステムであるが、調速系の制御は、調速系を安定度に寄与させる制御だけを行うガバナ補正制御形多変数制御方式である。このため技術蓄積の大きい従来形ガバナ制御系は、そのまま生かすことができる。
- (2) 発電機から見た系統の動特性や発電機の動特性は、絶えず変化している。これらの動特性の変化は、一定の制御パラメータで制御される発電機の制御特性を低下させるため、本システムでは電力系統や発電機の動特性をオンラインで推定し、その動特性変化に追従した最適な制御が行われる適応制御を行っている。
- (3) 発電機の安定度を定量的に演算するシステム ASMA RC を多変数制御の状態量演算機能としても使用している。

このため、従来は不可能であった安定度余裕の定量的な監視ができる。

図 8 は、(財)電力中央研究所における交流・直流電力系統シミュレータによる TAGEC II の検証結果の一例である。このほか、長・短の動揺周期が混在する系統の場合には、従来の制御方式に比較して 30~50% の安定度向上効果が得られることなど、火力発電プラントにおける本システムの有効性が検証されている。

⑧ 監視・診断装置

8.1 軸ねじれトルク監視装置

タービン発電機の軸寿命は、電力系統事故や再閉路などの過激な軸応力変動ばかりでなく、系統投入や負荷遮断などの通常の運用の蓄積によっても影響される。この影響は、発電機の大容量化によって強くなる傾向がある。

本装置は、タービン発電機の信頼性確保や保守の効率化のため、長期的にオンラインで軸の常時監視を行う。

本装置の特長は次のとおりである。

- (1) 軸に発生する軸ねじれトルク検出に、特別な加工が不必要であり、非接触で検出できる間接検出方式の採用。
- (2) スーパーマイクロコンピュータ FASMIC G500 による軸寿命計算、及びカップリングや発電機固定子コイルエンドにどの程度のひずみ応力が印加されたかの判定などの高速オンライン処理。

8.2 ラビング診断

蒸気タービンの異常振動発生要因の一つであるラビング現象 (回転部と静止部の接触) の有無を、運転中に精度よく診断できる装置を開発した。

発生したラビング信号は図 9 に示すように、ロータ→油

図 9 ラブ信号の伝搬経路

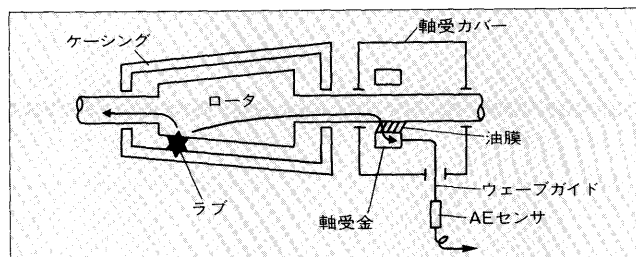
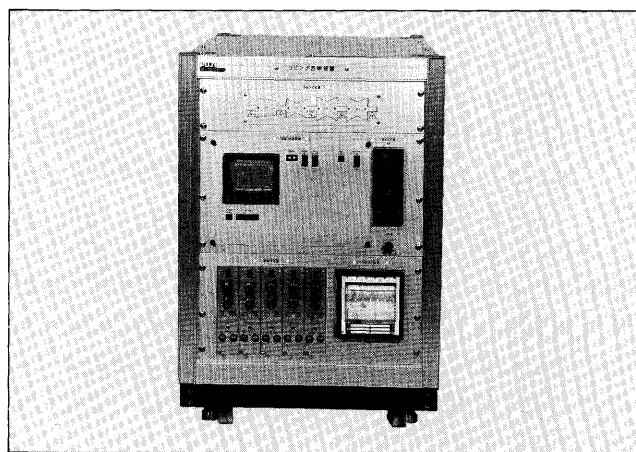


図 10 ラビング診断装置外観



膜→ウェーブガイド→AE センサの伝搬経路により検出される。診断装置は、蒸気流ノイズなどが含まれている検出信号からラビング信号を抽出し、抽出波形の特徴を定量化してラビングの有無を判定する。診断は、低速から全負荷までの運転条件に対して可能である。診断装置の外観を図 10 に示すが、診断結果のアウトプットとして以下が可能である。

- (1) ラビング有りの場合、警報信号が出力される。
- (2) ラビング位置は、タービンロータを描いたパネル面に配した LED を点灯させることによりモニタできる。
- (3) ラビングの相対強度変化を記録計により監視できる。
- (4) 低速時のラビング音はスピーカによりモニタできる。

⑨ あとがき

以上、マイクロコントローラを用いた最新のデジタル制御装置を中心に述べたが、今後、知識工学を応用した設備診断システム、事故復旧システムや現代制御理論に基づく最適制御、アドバンスド制御などがプラントの制御監視システムの中に広く組み込まれることになり、デジタル化の重要性はますます高くなるであろう。富士電機のハードウェア、ソフトウェアは、このような要求を十分満たす能力を持っているので、今後広範囲に導入していく所存である。

参考文献

- (1) 秋月敏興ほか：最近の発電用ボイラ制御システム，富士時報，Vol.57，No.9，p.552-560（1984）



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。