

火力発電プラントの計装制御

Instrumentation and Control System for Thermal Power Plant

片山 修造*

Shuzo Katayama

はじめに

最近の火力発電プラントは、電力の安定供給や資源の有効利用、環境保全等の面から燃料の多様化が進むとともに、ベース電源としての原子力発電の比率増大、電力需要の昼夜間格差の一層の拡大に伴い、負荷調整用電源として重要な役割を担うようになってきた。

このような状況のもとで、DSS（毎深夜起動・停止）運転、負荷変化率向上等による迅速な需要調整や少人数での高効率安定運転を達成するため、運転及び制御技術の一層の充実が望まれるところである。

近年は、マイクロプロセッサ応用技術等の急速な進歩とその信頼性向上により、火力発電プラントにおける計装制御技術も以前のベースロード運用火力機に比べて大きく向上しており、また今後予想される多様な運用形態に対応してなお一層向上していくものと考えられる。

以下に、当社における計装・制御装置の変遷と現況及び将来の方向性等について紹介する。

1. 火力発電プラントの計装・制御装置の変遷

火力発電プラントにおける計装・制御装置はプラントの大容量化、高温・高圧化による効率向上の推進、各設備性能の向上及び制御精度の向上、複雑化等に伴い空気式制御装置から電気式制御装置へ、アナログ式制御装置からデジタル式制御装置へとおおきく変貌を遂げてきた。また、運転・監視の面からも、少人数による高効率安定運転の要請により、運転操作の全自動化、CRTによる集中監視等数々の機能が実現されてきた。

当社においても、1950年代の電力需要急増期に、ユニットシステムとしては国内で初めての発電所である荻田発電所1号機（7万5千kW、1956年運開）を建

設し、更に荻田発電所2号機（15万6千kW、1959年運開）を建設、大容量火力時代の幕開けを迎えた。制御システムについては、1960年代前半から、それまで主流であった空気式制御装置に代わって電気式アナログ制御装置が導入されはじめ、新小倉2号機（15万6千kW、1962年運開）にて、全面的に採用された。電気式アナログ制御装置は空気式に比べ精度が高く比較的高度な制御がおこなえるため、以降広く使用されてきた。

1970年代後半になると、アナログ制御装置に加えてデジタル制御装置の採用が検討されはじめ、バーナ制御等部分的に採用されてきた。その後、マイクロプロセッサ応用技術の急速な進歩によりデジタル制御装置の性能、信頼性が向上するにじまって主要制御装置にデジタル制御が採用されはじめた。

1980年代になると、負荷調整用としての火力発電プラントへのニーズは一層増大し、高負荷変化率での頻繁な負荷変化やDSS運用に対応できる大型プラントの建設が進められた。ますます高度化、複雑化する運転・制御に対して少人数でしかも高効率・安定運転をおこなうため、高精細カラーグラフィックCRTを装備した集中監視盤を設置して集中監視する方式を採用した。また、松浦1号機（70万kW、1989年運開）や新大分1号系列（69万kW、1991年運開予定）では燃料の多様化、効率・信頼性の一層の向上を図るため、機能分散された多数のデジタル制御装置を高速の伝送ネットワークで連系した階層構成デジタル制御システムを採用し、大型石炭火力の中間負荷運用及び多数軸で構成されるコンバインドサイクルの複雑な運用を実現した。

2. 火力発電所の自動化の変遷

図-1に、当社火力発電所の自動化の変遷を示す。

電子計算機は新小倉1号機（15万6千kW、1961年運開）で初めて導入し、運転データ監視及び日報作成用のデータロガーとして運用を始めた。自動制御用とし

*九州電力㈱火力部建設課長

〒810 福岡市中央区渡辺通2丁目1番82号

発展経過 ユニット名		計算機導入 新小倉1(F1A)	タービン起動の自動化 唐津1(貫流)	バーナー自動化 大分1,2(貫流)	亜臨界火力の総合 自動化 唐津2(F1A)	超臨界定圧火力の 自 動 化 唐津3	超臨界定圧火力の総合自動化 川内1 <small>相模2, 豊前1, 新小倉3, 豊前2</small>		変圧火力の総合自動化 新小倉5 川内2	変圧火力の総合自動化 松浦1	川内1, 2, 3の総合自動化 新大分1
1	プラント 一般	出力 開 156MW S36 燃料 石炭(LNG転換)	156MW S42 石炭(重油に転換)	250 250MW S44 S45 重油	375MW S46 重油	500MW S48 重油	500MW S49 重油	500 500 600 600 500MW S1/ S2/ S3/ S4/ S5/ 重油 LNG 重油	600 500MW S58 S60 LNG 重油 + LPG	700MW H1 石炭	690MW(115MW/軸) H3 LNG
2	計算機制御		・バーナーモニタ ・TSM(タービンスタート アップモニタリング)		・TSMC(タービンスタート モニタ制御) ・BSM (バーナースタートモニタ)	・TSMC ・BSMC (起動時の計算機制御) タービン起動時のDDC化 41設定値制御(SPC)	・PSC (タービンスタートアップ制御) タービン寿命管理 タービンスタート起動 起動停止時の総合計算 機制御(DDC, SPC, IIG)	・PSC 同 左 通常運転時の蒸気温度 制御 ADC	・PSC 同 左 タービン起動時のDDC化 同 左	・PSC 同 左 起動停止時の総合監視 制御(RIC, SPC)	総合フィードバック監視 GT, ST 寿命管理 軸スラッシュ起動停止原因 全軸一括起動停止監視
3	サブシステム		タービン自動起動装置採用	同 左 バーナー遠隔手動操作化	タービン制御大幅採用 同 左 自動同期装置の採用 摘任, 摘速, 同期検定	同 左 バーナー本数制御 (ミニコン採用) 同 左	計算機のタービンコントロー ルによるタービンの制御 ・バーナー-計算機制御+ 本数制御 ・励磁, 同期, 所内系 の計算機制御	同 左 同 左 同 左	タービン制御 タービンコントロー採用 EHC採用(主タービン, BPT) 同 左 S65:APC 補完装置採用	同 左 APC, MBC, EHC等のフ ード制御装置にタービン 制御装置採用 41タービン補完装置採用	タービン出力伝送の採用 系列負荷制御装置 ・系列負荷制御 軸制御装置 ・マスター部 軸マス監視コントロー CRT監視コントロー 伝送コントロー ・ガバナ部 各装置(GT, ST, HRSG)コントロー 監視入力コントロー
4	マシン コミュニケーション				BTG補助盤のグラフィック化	同 左 CRT採用	同 左 が-CRT採用 電子チャイムの採用	同 左 同 左 電子チャイムの採用	同 左 同 左 グラフィックCRT採用 音声告知装置の採用	同 左 同 左	系列回路補助盤のグラフィック化 CRTディスプレイの採用 同 左 同 左
5	パトロールの省力化					主要補機振動監視	・主タービンチェッカー 採用 ・大型補機振動監視 ・大型補機異常音監視	同 左	同 左	同 左	
6	ルーチン操作 及び 特殊運転の自動化					バーナー操作の遠隔化 特殊運転の遠隔化	・特殊運転, バーナー操作 の自動化	同 左	同 左	同 左	同 左
7	事故波及防止	・プラントインターロック ・補機自動起動	同 左	同 左	同 左	・自動リブ ・FCB ・タービン異常時の 定値制御(起動時)	・エントリッパ, FCB成功後の再起動自 動化 ・タービン異常時の定値制 御(起動時) ・ローリミット自動追従	同 左	同 左	・エントリッパ後の再起動 自動化 ・タービン異常時の定値制 御(起動時) ・ローリミット自動追従	・自動リブ ・FCB 緊急停止

図-1 火力発電所自動化の変遷

ては唐津1号機(15万6千kW, 1967年運開)でタービンの自動起動制御系に初めて採用され電子計算機による本格的な自動化の推進が開始された。

以来、火力ユニットは電力需要の増大と発電技術の進歩により大容量化の一途をたどり、単機容量では1969年に25万kW(大分1号), 1971年には37万5千kW(唐津2号), 1973年には50万kW(唐津3号), 1978年には60万kW(新小倉3号), 1989年には70万kW(松浦1号)と増大し、制御方式も高度化、複雑化していった。この間、電子計算機のハードウェア、ソフトウェア技術も飛躍的な発展が遂げられ、川内1号機(50万kW, 1974年運開)では、電子計算機によりユニットの起動・停止を総合的に制御する総合制御方式が採用され、大幅な自動化が実現された。自動化の進展度合の一つの指標ともなる電動弁数及びケーブル布設量について当社で初めての重油火力である大分1号機と総合的な自動化を実現した川内1号機の比較を表1に示す。

表1 電動弁数とケーブル布設量の比較

項目	大分1号	川内1号	松浦1号(参考)
運開	1969年	1974年	1989年
出力	25万kW	50万kW	70万kW
燃料	重油	重油	石炭
電動弁台数	64台	228台	336台
ケーブル量	20万m	55万m	190万m

整用としての役割、重要性はますます増大してゆき、新小倉5号機(60万kW, 1983年運開)では、頻繁な負荷変化やDSSに対応するため集中監視盤を設置し全自動運転に関する必要な情報が3台のCRTで集中監視できるシステムを初めて採用し、運転員と計算機とのマンマシンコミュニケーションの強化及び運用性・信頼性の一層の向上を図った。また、音声告知装置により運転員の聴覚に働きかける情報提供も行い、運転管理がより効果的におこなえるようにした。

3. 当社の最近の火力発電プラントの計装制御

3.1 中間負荷運用石炭火力発電所(松浦1号)の計装制御

松浦発電所1号機は、70万kWの海外炭専焼火力発電所で1985年に着工し1989年営業運転を開始した。当

更に、豊前1号機(50万kW, 1977年運開)では、川内1号機での自動化の実績を踏まえて更に充実を図るとともに、計算機による最適制御理論を応用した蒸気温度制御方式(ADC)を世界で初めて開発し実用化した。この頃になると、火力発電プラントの負荷調

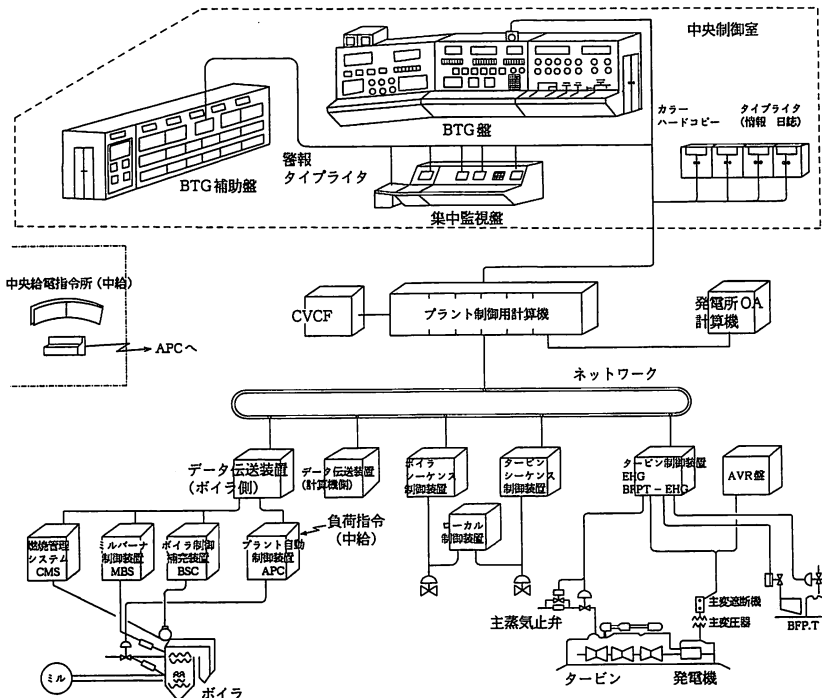


図-2 制御システム構成図(松浦発電所1号機)

表2 70万kW石炭火力設備概要
(松浦発電所1号機)

出力		70万kW
使用燃料	主燃料 補助燃料	石炭 約160万t/年 重軽油 約5万kl/年 燃焼設備容量30%MCR
貯炭容量		約33万t
ボイラ	型式	臨超界圧変圧運転貫流型(屋内式)
	蒸発量 燃焼方式 通風方式	2,300t/h コーナファイアリング方式単炉型 平衡通風
タービン	型式	串型衝動4流排気式再熱復水型(4車室)
	蒸気圧力 蒸気温度	246kg/cm ² 538℃/566℃
発電機	容量	778,000kVA
	電圧	25kV

発電所は、電源の多様化の重要な一端を担うものとして多炭種に対応可能な、しかも中間負荷機能を有するDSS運用石炭火力として計画されており全面的にデジタル制御システムを採用することによって運用性・保守性・信頼性の一層の向上を図った。さらに、少人数で安定運転可能なように起動から停止に至るほぼ全ての操作を自動化した。

表2に設備概要を、図-2に制御システム構成を示す。

制御システムとしては、計算機がプラント全体を総括制御し各制御系がその指令に基づきそれぞれ独立した制御を行う機能分散型階層制御方式を採用し、それぞれの制御装置は信号伝送用のネットワークで結合されている。運転監視・操作は集中監視盤で集中的に実施できるようにしており、グラフィックCRT、オペレーターコンソール、自動化コンソール等によりマンマシンコミュニケーション機能を充実させた。

また、発電所の管理業務の効率化を図るため発電設備の運転・保守にかかわる情報を経年的に蓄積し、設備の運転管理・保守管理業務にかかわる各種情報を利用形態に応じたかたちで提供する業務支援システムを開発・導入した。

以下に、主要制御機器について概要を示す。

(1) プラント制御用計算機

ボイラ・タービン・発電機等ユニット全体の総括監視および起動・停止時のスケジュール管理、自動化(主要工程進行操作及び管理)、プラント情報の集中表示、警報管理、音声告知等をおこなう。

(2) プラント自動制御装置(APC)

中央給電指令所(中給)の負荷指令に対して、ボイラ給水量、燃料量、空気量、タービンへの通気量等プ

ラントの諸制御量をバランスを保ちながら自動制御することにより負荷制御をおこなう。またデジタル制御装置を採用し主要制御部の冗長化、機能ループの分散化、伝送ネットワークによる情報伝達等により信頼性の向上及び制御盤の縮小化を図った。

(3) ミルバーナー制御装置(MBC)

APCでの負荷制御に連系して重油、軽油、石炭バーナーの点消火制御及び切替制御等をおこなう。

(4) 燃焼監視システム(CMS)

ボイラの燃焼性、排ガス性状等の変化を検出し基準状態からの偏差をレーダーチャートに表示して運転員に適切な運転ガイドをあたえたり、また火炉の汚れ状況を検出しスートブロワの自動起動制御をおこなう。

(5) 主タービン制御装置(EHC)

タービン起動時の昇速・揃速制御、APCと連系しての負荷制御、タービン主要弁の切替制御、タービン調速制御及びタービントスト制御等をおこなう。

(6) BFP-Tガバナ制御装置(EHG)

BFP-T(タービン駆動給水ポンプ)の自動昇速及びAPCと連系しての給水流量(回転数)制御等をおこなう。

(7) 自動電圧調整装置(AVR)

発電機電圧調整制御及び界磁電流調整制御等をおこなう。

(8) シーケンス制御装置

自動化の一端として、ユニット起動・停止時の各系統構成及び各補機の起動・停止等のシーケンス制御をおこなう。複雑で多岐にわたる制御ロジックをシーケンサーを使用してソフトウェアで構築することにより制御盤の縮小化及び信頼性の向上を図った。

(9) ローカル制御装置

復水器再循環制御、脱気器水位制御、補助蒸気圧力制御等複雑なローカル制御系についてはデジタル式ワンループコントローラーを採用して制御性の向上を図った。

3. 2 コンバインドサイクル発電プラント(新大分発電所)の計装制御

新大分発電所は、コンバインドサイクル発電方式を採用した1号系列69万kW及び2号系列87万kW総出力156万kWのLNG専焼火力発電所である。1号系列は1985年に着工し1991年7月の営業運転開始を目指して、現在順調に試運転中である。また、2号系列は1987年に着工しており1995年運開予定である。

図-3, 4にコンバインドサイクル(新大分1号系列)

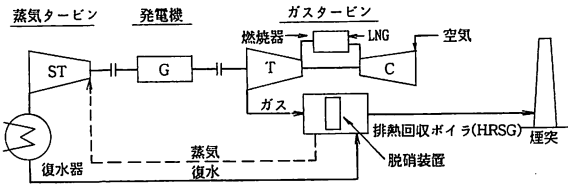


図-3 コンバインドサイクル単機（軸）構成

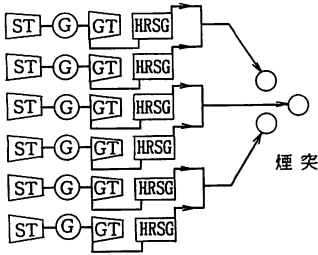


図-4 コンバインドサイクル1系列構成

の構成を示す。

当発電所は、次に示すようなコンバインドサイクル発電の特徴をいかして、従来火力に比べさらに高効率（図-5参照）の中間負荷火力として電力の安定供給に大きく貢献できるものと期待している。また、燃料にLNGを使用しており燃料の多様化という面でも重要な役割を担っている。

(1) コンバインドサイクル発電の特徴

- ・ガスタービン、蒸気タービンの2つのサイクルを組み合わせることで単一サイクルでは到達できない高効率を達成できる。
- ・構造が簡単なガスタービンが主体となり、また下流の蒸気サイクル側の蒸気条件も高くとる必要がないので、システムを単純化すれば取扱いが簡単で起動・停止が短時間で出来る。
- ・単機出力は従来火力ユニットに比べ小さいので、1系列を数台で構成することになるが、出力の増減を運転台数の増減で調整すれば、部分負荷での効率をより幅広い範囲で全負荷効率近くの高い効率に維持することが出来る。

(2) コンバインドサイクルの計装制御

コンバインドサイクル発電システムは従来火力とは全くシステムが異なるため、従来築きあげてきた自動化技術を受け継ぎながらコンバインドサイクルの特徴を十分にいかせるよう新しい発想で全自動化を図った。多数軸（ガスタービン、発電機、蒸気タービン及びHRSGによる主機構成単位を軸と呼ぶ）で構成される

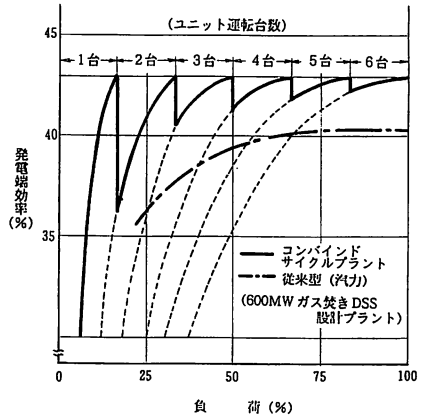


図-5 コンバインドサイクル熱効率

系列全体を少人数でしかも高効率安定運転できるようにするため、中央制御室に総括制御盤を設置し、4台のCRTにより一括運転・監視できる全自動制御システムを採用している。また、迅速な需給調整を可能とするため中給から発電所の各軸を直接起動・停止できる中給遠隔操作システムを当社で初めて採用した。

表3に設備概要を、図-6に制御システム構成を示す。

複数の軸からなるコンバインドサイクルは系列全体の制御と軸単位の制御、さらにはガスタービン、HRSG、蒸気タービン、発電機の制御をバランスよくこなす必要がある、また軸数に比例して監視情報量や操作端数も増加するため、制御システムは系列レベル、軸レベルの機能分散型階層構成とし、系列制御用計算機、系列負荷制御装置、軸マスタ制御装置、軸サブグループ制御装置がそれぞれのレベルの主な制御機能を受け持つようにしている。また、OAシステムとリンケー

表3 コンバインドプラント設備概要
(新大分発電所)

		1号系列	2号系列
発電方式		コンバインドサイクル方式	コンバインドサイクル方式
排熱回収ボイラ	種類	排熱回収二汽洞式 自然循環形（屋外式）	排熱回収二汽洞式 自然循環形（屋外式）
	蒸発量	高圧 122.8t/h/基×6 低圧 28.4t/h/基×6	高圧 213.4t/h/基×4 低圧 37.6t/h/基×4
	タービン種類	開放サイクル一軸型	開放サイクル一軸型
出力	ガスタービン	開放サイクル一軸型	開放サイクル一軸型
	蒸気タービン	混圧単流 排気式復水型	混圧単流 排気式復水型
発電機	容量	115,000kW/基×6	217,500kW/基×6
	電圧	13.8kV	20.0kV
熱効率（発電端）		約43%	約46%

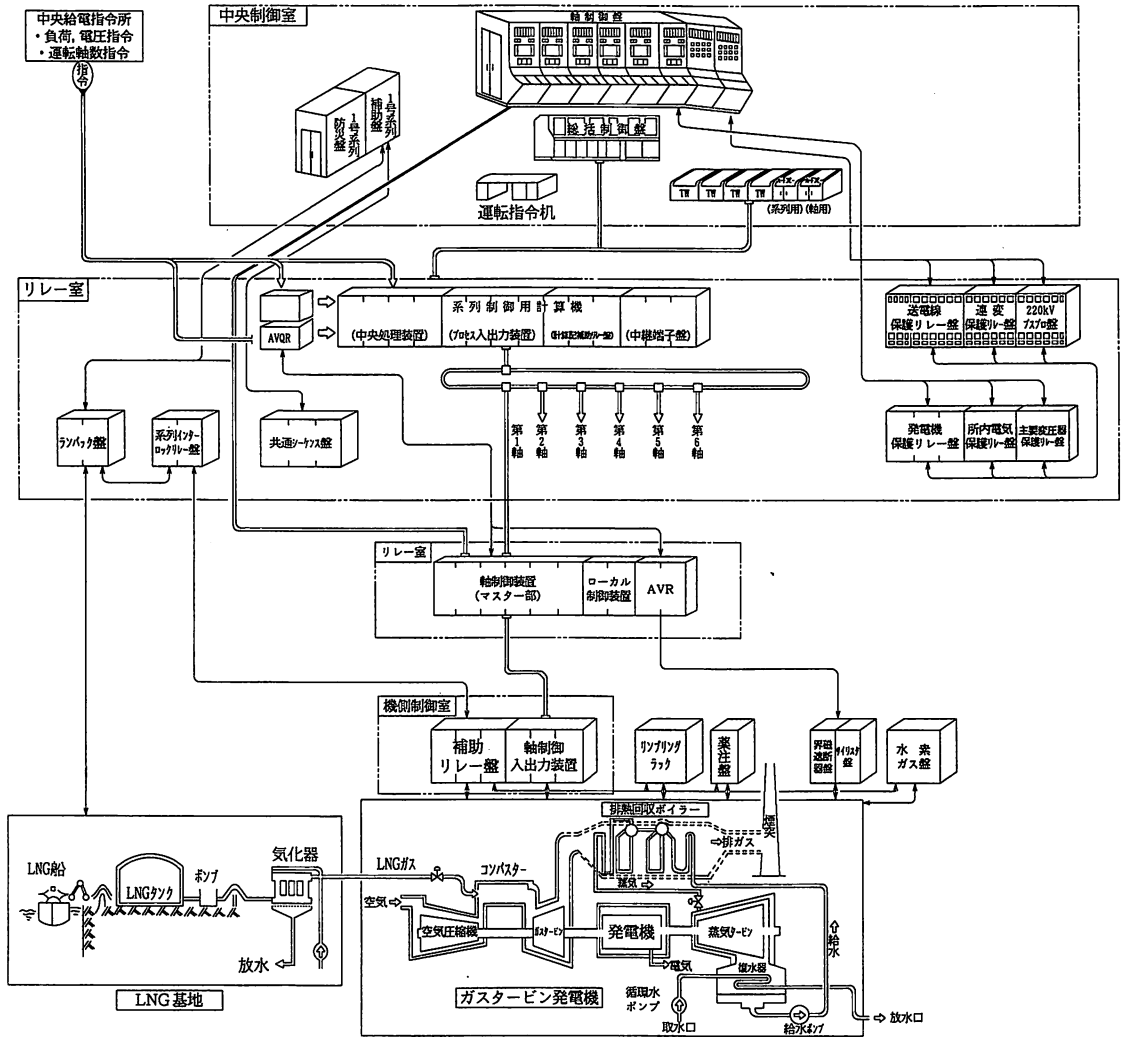


図-6 制御システム構成 (新大分発電所1号系列)

ジして、各設備の運転情報を収集・保存し運転履歴管理やガスタービンの部品レベルの寿命管理、保守管理をおこなわせている。

以下に、制御システムの主な特徴を述べる。

- 少人数運転に対応して総括制御盤から起動・停止他の通常運転時のすべての監視・操作が可能である。
- 系列レベルの装置故障や自動化渋滞時には、各軸制御盤から軸ごとの自動化進行操作、補機及び調節弁の手動操作が可能である。また、軸制御盤にはCRTオペレーションを適用し、盤の縮小化を図った。
- 高精度カラーグラフィックCRT、カラーハードコピー、音声告知など最新のマンマシンインターフェイス機器を導入し監視の強化を図った。
- 機能分散型デジタルコントローラーを採用し、信頼

性、制御性、保守性の向上を図った。

次に、主要制御構成機器について機能概要を示す。

(1) 系列制御用計算機

系列全体の総括監視、各軸の起動・停止スケジュール管理、プラント情報の集中管理及びマンマシンインターフェイス等をおこなう。

• 系列総括タイミング制御

中央給電指令所(中給)からの翌日予定スケジュールを受け、これをもとに系列内各軸の起動・停止スケジュールを決定し軸起動・停止のタイミング制御をおこなう。また、中給からの遠隔起動・停止指令により直接、軸の起動・停止制御をおこなう。

• プラントデータ収録・監視

系列の運転データを収集し、オペレーターのリクエ

ストあるいはプラントの主要イベントをとらえて収録し、トレンドグラフ等で再生・表示する。

・マンマシンインターフェイス機能

頻繁に起動・停止される複数の軸を少人数で、あたかもひとつのユニットのように一括運転・監視操作が行えるよう、4台のCRTに自動化進行操作、系統グラフィック表示、シーケンスマスタロジック表示など各機能選択キーにより所定の画面を選択表示できる。また、軸制御盤ではCRTオペレーションを採用することにより監視・操作の集中化、操作性の向上を図った。

(2) 系列負荷制御装置

中給からの系列負荷指令を各軸に配分する制御をおこなう。負荷指令は基本的には各軸に対して均等に配分する方式としている。

(3) 軸制御装置 (マスター及びサブグループ)

軸制御装置はマスター制御装置とサブグループ制御装置によって構成され、各制御装置内のコントローラー間は光信号による二重伝送路で接続されており、各コントローラーの情報が共用できるようにしている。

・軸マスター制御装置

自動化機能は従来の火力発電プラントでは制御用計算機に持たせていたが、コンバインドサイクルでは各軸ごとに必要なため、軸マスター制御装置にその機能を持たせている。また、軸の監視及びCRTオペレーションのための機能を組み込み自動化渋滞時等の手動操作を可能としている。

・軸サブグループ制御装置

サブグループ制御装置は機器を直接制御する部分であるので、機能ループごとにコントローラーを分散して設置し信頼性の向上を図った。

4. 将来の方向性について

火力発電プラントの計装制御技術はプラント設備の移り変わりとともに、より高度な内容が求められ、また、運転操作の自動化・省力化及び高効率化を達成するため大きく向上してきた。電力を取り巻く状況は、

地球規模の環境問題や原子力への関心の高まりなど新たな変化を見せており、火力発電はこれまで以上にその制御性、信頼性の向上が期待されている。こうした状況下において、少数の運転員により、プラントをさらに効率良く安定運転できるようにするためには、自動化範囲を拡大するとともにシステムを運転員により親しみ易いものとするのが重要である。より高度なセンサ技術や診断技術を取り入れ、設備診断システムや現場監視システム等の開発を図り、自動化の拡大やマンマシンコミュニケーション機能の充実、中央制御室の居住性の改善等、運転員の負担軽減の観点からも今後重要なポイントになると考えられる。

また、火力発電プラントがますます大規模化、複雑化し運用の多様化が進むなかで、運転員は常に安全に効率良く運転することが要求され、特にユニットの起動時には多様な状況に応じた適切な運転操作や異常の予知・回避操作などが求められるため、運転員を側面から支援するシステムの強化・充実が大切である。機器の異常検知、設備診断技術はこれまでも部分的に採用されてきたが、センサ技術の向上やAI、ファジィ等の新技術の適用などによって今後さらに拡大、充実の方向に進むと考えられる。

あとがき

当社における火力発電プラントの計装制御を中心にその変遷、現状等について紹介してきたが、今後ますます多様化する運用に適応して、安全性、制御性、経済性、保守性に優れた計装制御システムを構築し、電力の安定供給に貢献していくことが重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 石井國義ほか；松浦発電所1号機の特徴と試運転実績、火力原子力発電 Vol. 41 No. 4
- 2) 浅田英介ほか；制御技術の歩み、火力原子力発電Vol. 41 No. 12
- 3) 四郎丸功、浅井明久ほか；コンバインドサイクル発電プラント総合デジタル監視制御システム、日立評論 第72巻 第6号 (1990)