

火力プラントの新しい制御方式について

A New Control System for Thermal Power Plants

浦 田 星* 堀 内 俊 明* 広 吉 秀 高**
Hoshi Urata Toshiaki Horiuchi Hidetaka Hiroyoshi

内 容 梗 概

火力プラントの進歩の著しい半面、制御の複雑化に伴いその自動化の要請が漸次高まってきた。またデータ処理ならびに計算制御装置の開発と相まって、いわゆる全自動制御式プラントの構想がしばしば論議されるようになった。全自動制御方式とは起動、停止などの遷移過程の制御も自動化されたものであるが、火力プラントの起動を自動制御するには、制御装置のみならず火力プラント構成機器の制御性の改善にも大きな問題がある。その問題のよってきたところを論じ、全自動制御方式への前進を目ざしてまず起動過程自動制御化の試案を提示し、火力プラント制御方式の発展の方向について述べたものである。

1. 緒 言

現今の火力プラントの中央制御方式は、負荷運転時の運転状態の監視調整と異常時の遠隔操作による処置がそのおもなる目的となっているように思われる。また自動制御計器も定格状態の制御にかなうことをおもなる目的としているため、起動、停止などの遷移過程の制御はまったく手動操作にたよっている。ところが手動操作による起動過程は基準過程からはずれる例が少なくない。しかもこれが火力プラントの寿命に多大な影響を及ぼす事実にかんがみ、火力プラント起動過程の自動制御はあまねく要求されるであろう。

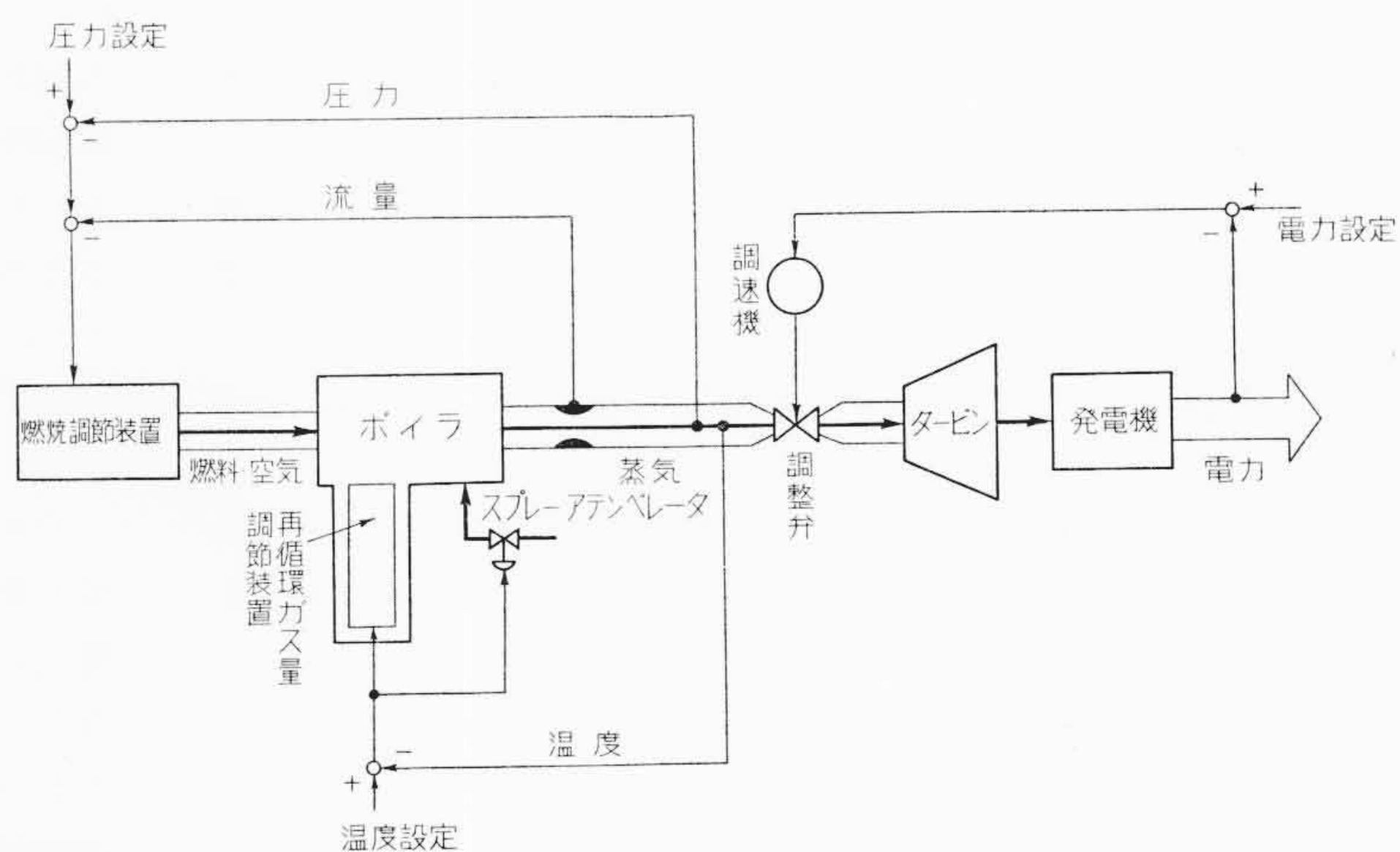
このような実情に対し、データ処理装置の発達と相まって、起動、停止などの操作も自動制御する全自動制御プラントも実現しようとしている。中央制御が真にその名にふさわしい実質を持つについて自動制御に入れるための問題点がいくつかあげられるが、本稿は刻下の急務と考えられる起動過程の自動制御化に対して一つの試案を提示し、あわせて火力プラント制御方式の発展方向について論評せんとするものである。

2. ボイラの燃焼制御

火力プラントの機能は、燃料の燃焼によって発生する熱エネルギーを最終的に電気エネルギーに変換するものであるが、従来の通則からすると発電機出力はタービン流入蒸気量の調節によって行われ、ボイラの制御は規定の圧力、温度でタービン出力に見合った量の蒸気を発生するよう燃料の燃焼量を加減するもので、タービン発電機側とボイラ側で各群ごとに平衡状態を保つ仕組みになっている。

ボイラ自動制御装置構成の原理は、発生蒸気量のいかんを問わずその圧力、温度を規定値に保持するよう、入力、出力の変動に際し最も敏感に変化を示す蒸気圧力を最も重要な検出量としている。すなわち発生蒸気圧力に変動が生じた場合は、その変動を打ち消すように燃焼量を調節するのである。しかし燃焼量の調節に際し圧力のみによると応答がおそいので、その先行値としてボイラ発生蒸気量の変化を導入するのが普通である。この制御において信号伝達経路の骨子を略記すれば第1図のようになる。

これに対しボイラ側とタービン発電機側との各群間の信号伝達おくれを短縮する方法として、前記の方式において先行値として採られた蒸気流量に代って発電機出力を導入する方式が開発された。す



第1図 ボイラ発生蒸気圧力・温度の制御方式

なわち、アメリカ Ohio Edison Co. の Niles Station 125 MW, 1,450 psi/1,000 F /1,000 F において Leeds & Northrup 社製の Tie-in Equipment をマスター・コントローラに付加したもの⁽¹⁾, Metropolitan Edison Co. の Portland Station, 150MW 2,400 psi /1,050 F /1,050 F^{(2),(3)} Philadelphia Electric Co. の Eddystone Station 350 MW, 5,000 psi /1,200 F /1,050 F /1050 F そのほかに採用された Direct Energy Balance 法⁽⁴⁾, ドイツ Phönix Reinrohr Kraftwerk 64 MW, 110 atü/530°C における周波数制御運転法のようなものがそれである⁽⁵⁾。

前記各群別制御方式においては負荷変動時ボイラ燃料消費量が新しい負荷に相当する量に落つくまでは、主蒸気圧力の偏倚は制御上不可欠のものであるが、このため燃焼制御の終了過程で主蒸気圧力が積分動作によって設定値に復する際、発電機出力が変化した方向に行き過ぎを生ずるという欠点があるが、発電機出力によって燃焼制御を行う場合は、主蒸気圧力の変化はむしろ無用のものであって上述のような不都合は改善されるといわれている⁽²⁾。概してこの制御方式のおもなねらいは、高圧高温の大容量プラントの負荷変動率がますますきびしく制限される実情にかんがみ、ボイラ、タービンの能力範囲内においてボイラ、タービンの歩調をそろえて負荷を増減することにあるようであるが、ボイラ、タービンを一体にして制御するという考え方は火力プラント制御上の一つの進歩である。しかしこれらはあくまでも蒸気条件を一定に保持した状態の運転を基盤にしているので、起動、停止などの遷移状態の運転は依然手動制御にまつものである。起動過程の制御を自動化するについては新しい考えを導入することが必要である。よって起動時の制限条件とこ

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所国分工場

の制限条件下において実際に運用されている操法，ならびに起動自動制御化の試案を述べることにする。

3. 起動操作の要点

火力プラント起動に関する問題については，世界各国で多くの検討がなされているが，要約すると次のようである⁽⁶⁾。

- (1) ボイラの点火，燃焼に際しては左右対称位置のバーナを使用し，各部の熱ひずみをなるべく小さくおさえること。
- (2) ドラム式ボイラにあっては，汽胴がその構造上特に厚肉であるから，汽胴各部に過大の温度差を生じないように汽胴内飽和水の温度上昇率を一定限度におさえること。
- (3) 起動時十分な蒸気が流れず焼損のおそれのあるボイラ過熱器に対しては，燃焼ガスの温度を過熱管材料の許容限度内に保持すること。
- (4) タービンへの送気にあたっては，特に主塞止弁，タービン蒸気室など厚肉部に対する熱衝撃防止のため，それらの構造と構成材料の強度に応じ，蒸気と壁面との温度差を一定限度に収めるようにすること。
- (5) タービン蒸気室などの厚肉部においては，厚肉壁内の温度分布の形とその大きさに従って熱応力が発生するので，壁の温度上昇率を一定限度におさえること。
- (6) 前記と同様の理由により壁内外面の温度差を一定値以下にすること。
- (7) タービン排気側にあっては発電機同期直後の負荷による排気室の温度降下率が一定限度をこえないよう，起動過程における復水器の真空の上げ方に注意する。

以上のうち眼目をなすものは非定常状態における熱応力であって，しかも実際の運転経験によればこの原因に基くきれつの発生箇所はほとんどタービン主蒸気室に集中している。これはこれら高温高圧の蒸気に触れる部分の受ける条件が最も過酷であるからで，起動過程の合理的制御は，これらの部分についてその制限条件をいかにして守るかという点を解決すれば，その大半は達成されたものと考えてよい。

そこで次に問題とすべきものは，いかにしてこの制限条件を守って起動するかということになる。一体に火力プラントは，冷機起動の場合はもちろん，熱機起動の場合といえどもごく短時間の停止を除き，停止中のボイラの自然放熱のため主蒸気圧力はかなり低下し，次回の起動は主蒸気圧力が定格よりも低い状態から行われる。主蒸気温度はこの起動過程においては圧力の上昇とともに急速に高くなるのが普通である。一方タービン流入蒸気は負荷に応じて順次開閉する調整弁によって供給されるため，第一調整弁のみを通して蒸気が供給されているときは第二調整弁以下には蒸気が流れず，この部分は主蒸気の温度上昇に追従できないままとなっている。したがってつづいて第二調整弁が開く時機には主蒸気温度はさらに高くなっているため第二調整弁につながる主蒸気通路壁面との温度差が制限値をこえてしまうという事態が起りうる。このため起動時タービン蒸気室をなるべく均一に加熱する目的で，主蒸気圧力，温度を低くおさえながら，蒸気室厚肉部の均一加熱に必要な調整弁開度が得られる負荷までできる限りすみやかに持ち込むという方法が一般に採られている。また蒸気室の均一加熱に必要な調整弁の第一番目と第二番目をほとんど同時に開ける方法が試みられた例もある⁽⁷⁾。

起動時の蒸気条件と負荷速度の制御は実際運転上かなりむずかしく，実験によって定めた基準にしたがった運転を行う場合といえどもわずかの操作の差異によって基準過程からはずれる例が少なくない。この操作方法が現今運転技術と呼ばれているもののうち，おそ

らく最たるものであろうが，タービン発電機の運転員とボイラの運転員のおおのの判断と，相互の連絡によって実施されているのである。この起動過程を 100% 成功させるには，蒸気条件と負荷速度を合理的に連けいさせて積極的に制御してやる方法を考えなければならない。

4. 起動過程自動制御化の試案

さきに述べたように起動時の問題における最重点は高圧高温の蒸気に触れるタービン厚肉部熱応力制限のための条件をいかにして守るかということであるが，結局タービン蒸気室などの厚肉部を加熱するに必要な調整弁開度においてタービンを昇速負荷できる蒸気の圧力，温度を自動的に調節することができればこの目的は達せられる。

現今のボイラ自動制御装置において，蒸気圧力，温度などすべての設定値は人為操作によって与えられ，設定値の変更もまた人為操作によらなければならない。いま要すれば蒸気の圧力ならびに温度の調節装置を改造または追加してそれらの制御性を改善し，たとえば定格の 25% 以下の負荷において発電機出力を検出して，その減少とともに蒸気の圧力ならびに温度の設定値を自動的に低減させるような方法を採用すれば，あとは発電機の負荷曲線を適当に選定することによってボイラタービン・プラントの合理的な起動が可能となるはずである。

4.1 ドラム式ボイラの場合

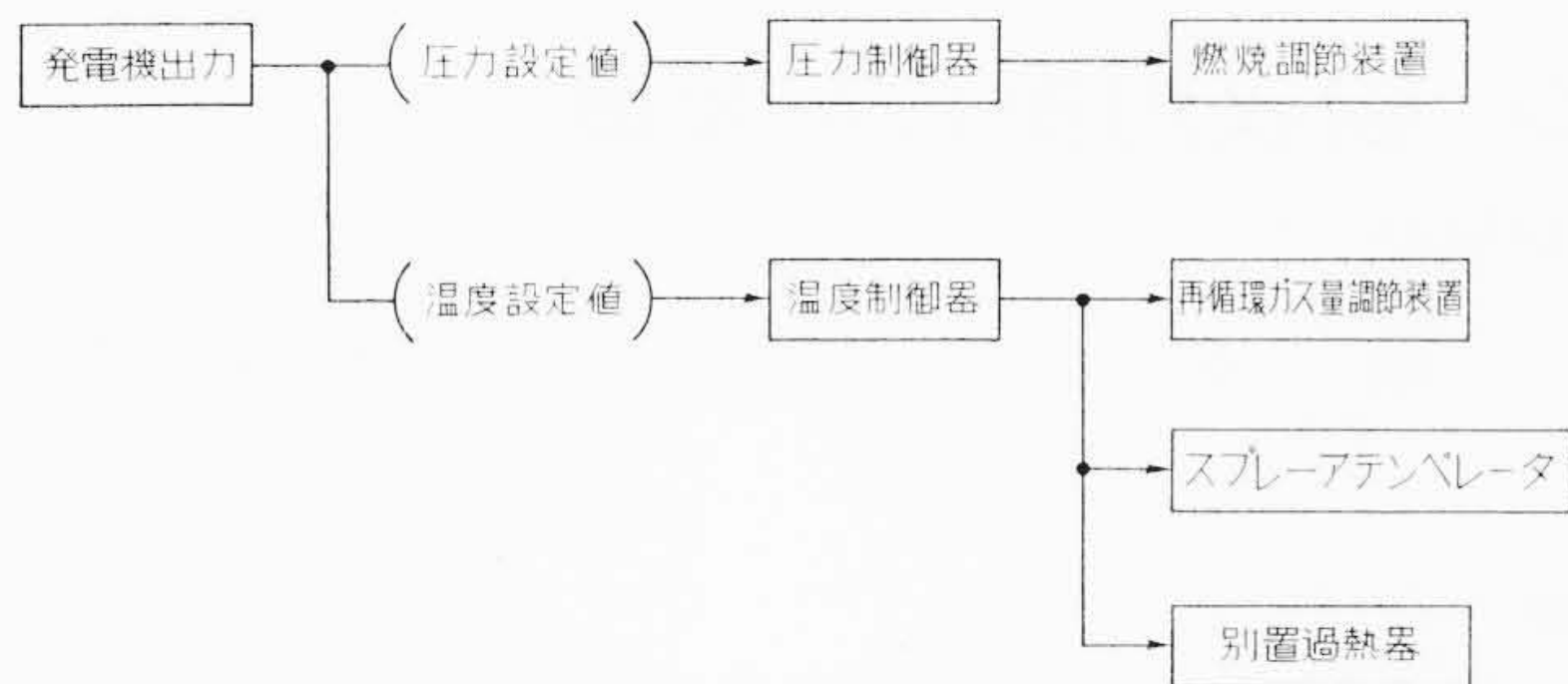
元来この形式のボイラの設計は定格負荷時に定格圧力，温度の蒸気を発生すべきことを出発点としている。また燃料の燃焼によって発生した熱は，節炭器，蒸発管，過熱器の三部で吸収される構造をなし，蒸気圧力，ならび温度の制御はいずれも燃焼量の調節にすることがその基調をなしている。しかし，節炭器，蒸発管および過熱器の伝熱面積がそれぞれ固定している関係上，ある蒸気圧力のもとで，バーナの位置変更，ガスダンパ開度の調節，ガス再循環量の調節などの方法によっても蒸気温度の調節にはおのずから限度があり，タービン起動時の蒸気条件の調節のようなものもボイラの制御可能な範囲外に置かれてしまうものが多い。よってドラム式ボイラにおいて希望する圧力，温度の蒸気をうる方法としては，圧力制御のために燃焼を調節する一方，温度低減のためにはスプレー・アテンペレータを有効に使用し，温度上昇のためには別置過熱器を付加することも考えられる。いま圧力，温度の調節機構をこのように設備し，適当な制御量変換器を介して圧力制御器および温度制御器のそれぞれの設定値を希望値に変更させるようにすれば起動過程自動化の態勢は整えられる。

4.2 貫流式ボイラの場合

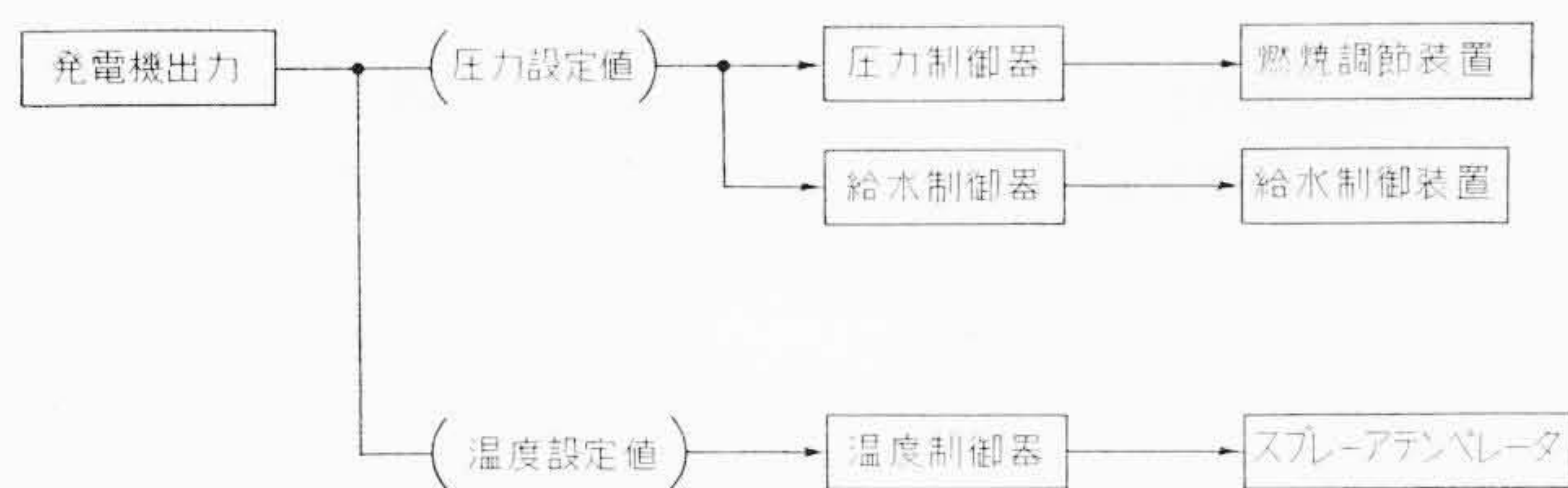
この形式のボイラは運転特性上の重要な特長の一つとして変圧運転ができるということがあげられている。貫流式ボイラの蒸気圧力の制御には，大体において燃焼量と給水量を同時に操作する例が多く，蒸気温度の調節には定格運転時においてもスプレー・アテンペレータによる方法が採用されている。また貫流式ボイラは蒸気圧力を下げて，かつ温度を高く保持する運転もできるからドラム式ボイラの場合に述べたような別置過熱器は不要である。したがって貫流式ボイラのほうがドラム式ボイラよりも前に提案した方法は適用しやすいものと思われる。

5. プラントの負荷制御

電力系統運営上より，火力プラントを一発電単位として扱えば当然最も有効かつ経済的な運用方式が定まってきて，これに対し発電設備の安全性，耐久性が許しうる限り緊密に協調して運転することが必要となる。特に最近では単機容量が増大して，全系統発電力の



第2図 ドラム式ボイラの制御方式案



第3図 貫流式ボイラの制御方式案

数%ないし10%にも及ぶに至り、その負荷変動は発電設備、系統両者に深刻な影響を与えるので一貫した負荷制御方式採用の必然性をますます高めている。

従来広く行われているタービン発電機の負荷制御は調速機によるタービン回転数一定運転である。すなわちエネルギーポテンシャルとしての回転数をほぼ一定に保つため、電気出力に平衡する蒸気入力調整を調速機で行っている。したがって系統周波数変動のフリンジ分に対してもその調速機の速応性をもって迅速に大きく応動し、周波数変動幅を小さくおさえて、電力の質の向上に貢献しうるものである。反面フリンジ分応動はボイラ自動制御装置の高ひん度の動作、大幅な急激変動によるボイラ安全性など機器側にとってかならずしも好ましいものではない。これらの両面を協調させて最近提案される負荷制御の一方式は次のようなものである。

- (イ) タービン発電機出力は定値制御とする。もちろん整定値は適当負荷範囲にわたり、任意可調整である
- (ロ) 出力整定値の上下に一定幅の不感帯を設け、その不感帯内ではタービン発電機は調速機運転を行う。
- (ハ) 出力変動が定値制御の不感帯をこえた場合には出力を調整し整定値上下の不感帯以内に復帰させる。
- (ニ) 出力整定値、すなわち発電機出力は機器側および電力系統側より定まる任意の時間的割合をもって変化させる。

この方式は負荷変動に対する安全性を確保し[(ロ), (ハ), (ニ)], できるだけ大きく速応性高い調整出力を負担して系統周波数変動の低減に貢献させ[(ロ)], 系統内発電単位として最も経済的な負荷分担を保持させる[(イ)]ものである。

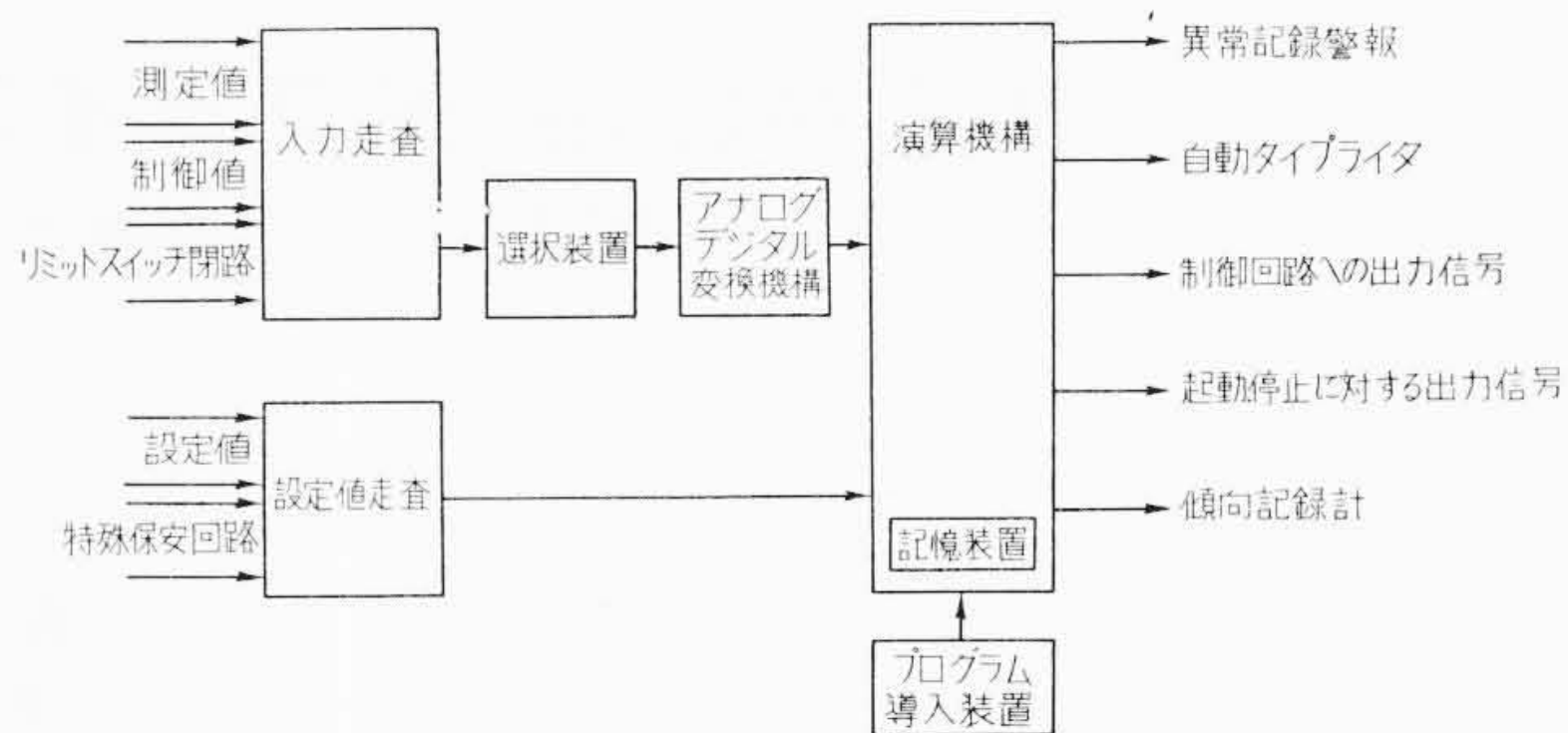
この種の制御は多種多様の諸量を導入すること、種々の複雑な計算を必要とすることなどから、自動負荷調整装置はもとより、ボイラ自動制御装置もその一環となって電気式に向う傾向にあり、速応性と相まってその特長が発揮されるようになっている。

6. データー処理および計算制御

発電設備容量の増大、蒸気条件の上昇はその制御を従来の中央制御方式から質的に大きく飛躍させる必要性を高めてきている。これにこたえるものはデーター処理、計算制御方式の採用であるといえる。

(1) データー集計方式 (Data Logging System)

記録を要する諸量のデジタル化、印字記録を行い、同時に必



第4図 Little Gypsy PS の制御方式

要諸量の異常値の警報、記録を行って、運転員の保守能力を大幅に向上させる効果がある。

(2) データー処理方式 (Data Processing System)

データー集計のほかに測定記録した諸量をあらかじめ定めた計算式にあてはめ、算出した結果を印字する機能を付加している。計算式としては機器運転制限特性、プラント運転性能、効率などである。運転員はこれらの結果を見ながら、安心して操作して安全な運転を進めうるし、また運転状態を調整して能率をいっそう高く維持することができる。

(3) 計算制御方式 (Computer Control System)

データー集計、処理機能の上に、高度の計算をもって諸種の判断を行わせて、起動、並列、負荷、停止などすべてを含めて自動運転を行うものである。多種多様の諸量をそれ自身の大きさ、他諸量との関連、時間的経過などよりすべて正しく評価判断し、適当な処理を操作、順序、時間を誤らず進めていくことは、この種の人工頭脳をもってはじめて行いうるものといえる。

これらの新技術開発は最近特に活発となり、その実施例としてデーター集計装置は1956年アメリカ Gulf State Co. Netches Station に測定量111点のものが設置されたのが最初である⁽⁸⁾。

さらに進んで1961年発電開始予定のアメリカ Louisiana Power & Light Co. Little Gypsy Station に225 MW, 2,000 psi/1,000°F / 1,000°F 全自動制御装置が採用されると発表されている⁽⁹⁾。その制御ブロック図を第4図に示す。

7. 結 言

火力プラントは高能率化に伴い装置が複雑となり、安全運転上の制限条件がますますきびしくなる一方、機器の信頼性の向上と自動制御装置の進歩に伴い、全自動制御火力プラントの構想が具体化しつつある。特に起動、停止などの遷移過程の自動制御は単に制御装置だけの問題としては解決し得ない部分がある。本稿は主として起動過程の自動制御を論じ、要点をあげて一つの解決方法を提案したが、この方法は極低負荷運転にも応用することができる。しかし実際の装置化にあたっては、実地の運転実績にまたなければならない点が種々あることと思う。

参 考 文 献

- (1) R. H. Travers ほか: Combustion, 34 (Feb. 1958)
- (2) J. G. Miller ほか: Combustion, 34 (Jan. 1958)
- (3) E. D. Scutt: ASME Paper No. 57-PWR-8 (Apr. 1957)
- (4) E. D. Scutt: American Power Conference 資料 (Apr. 1959)
- (5) W. Wittwer ほか: BWK. Bd. 10 (Feb. 1958)
- (6) たとえば R. L. Jackson ほか: ASME Paper No. 56-A-177 (Nov. 1956)
- (7) S. B. Coulter ほか: ASME Paper No. 59-PWR-10 (Nov. 1959)
- (8) J. A. Reich: ASME Trans. Vol. 76, No. 7 1652 (Oct. 1957)
- (9) Power Engineering: Vol. 63, No. 5 96 (May 1959)