

電力系統における製鉄所変動負荷の予知制御

Foreknowledge Control for Iron Steel Mill Load at Electric Power System

長 廻 圭 介* 都 築 旋 二**
Keisuke Nagasako Senji Tsuzuki
坪 井 宏 文*** 小 野 寺 傑***
Hirofumi Tsuboi Takeshi Onodera

要 旨

最近、大規模な製鉄所が各所に新設されているが、製鉄所に設置されている熱間圧延機が稼動したとき発生する電力負荷変動は、非常に大きく、急激で、ときには200 MWにも達することがある。

これらの電力負荷の変動はあまりにも急しゅんであるため、電力会社に設置されている AFC などのフィードバック方式の制御系では、これに即応した制御はできず、かえって逆制御になる場合もあり、連系線潮流を乱すことになり、その対策が必要である。

しかしながら、従来適格な制御方式も開発されなかったため、日立製作所は中国電力株式会社、電力中央研究所技術第1研究所との共同研究によって新しい方式を開発し、計算機を使用するものとしては、わが国で初めての予知制御装置の実用化に成功し、商用運転にはいつている。

本稿では、その制御方式およびシステムの概要について述べる。

1. 緒 言

熱間圧延機（ホット・ストリップ・ミル以下、ミルと略称）の電力負荷変動幅は、非常に大きく、水火力発電所のガバナ・フリー運転、AFC 運転では吸収できず、連系線の潮流変動、電力系統の周波数変動となって現われるため、連系線潮流の運用帯域が狭くなり、連系線運用の妨げとなり、電力の質的向上を大きく阻害する。

このため、ミル負荷がかかる前にそのことを検出し、発電所の出力応答時間を加味して、ちょうどミル負荷がかかる時点と発電所の出力が上昇する時点が同期するように発電所に指令を送る。一方、ミル負荷がなくなる前にそのことを検出し、ミル負荷がなくなる時点で発電所の出力がなくなるように発電所に出力の下げ指令を出す予知制御方式を開発し、制御用小形計算機 HIDIC-100 を使用して実用化した。以下その概要について述べる。

2. 予知制御の方式

2.1 ホット・ストリップ・ミルの特性

予知制御の方式を述べる前に、ミルの概要について述べることにする。製鉄所に設置されているミルは、図1(a)に示すように加熱炉によって加熱されたスラブが、粗圧延機によって圧延される。粗圧延機は4~5 スタンド配置され、スラブは同時に2 スタンド以上にかみこまれないような間隔（したがって、粗圧延最終スタンドにいくほど間隔が広がる）で配置されており、順次圧延されていく。粗圧延最終スタンドを通過したスラブの先端は、仕上圧延機にかかる直前でクロック・シャワーによって切り揃えられ、仕上圧延機にかみこまれる。仕上圧延機は5~7 スタンドが連続して設置されており、スラブは連続圧延されてシャワーによって冷されると巻取機に巻き取られる。スラブの先端が巻取機に到達すると、圧延速度は急速に

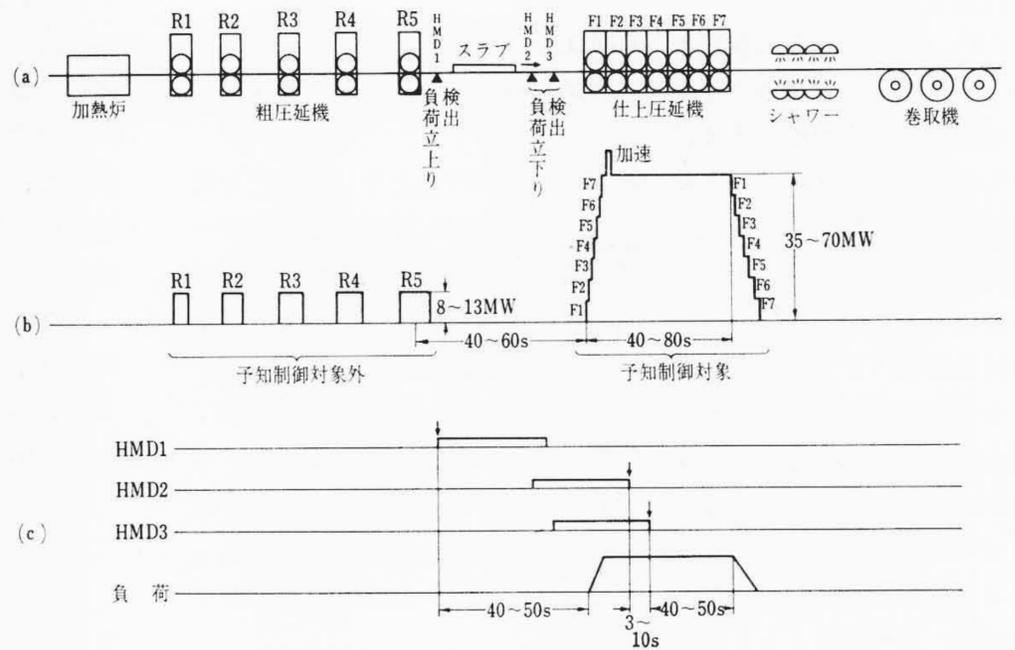


図1 ホット・ストリップ・ミルスタンド配列および負荷

上昇し、圧延された鉄板は巻取機に巻き取られる。

このときの電力負荷の様子は、図1(b)に示すように、粗圧延では8~13 MW の負荷が断続的にかかるが、仕上げ圧延のときは段階的に急激に負荷が上昇し、スラブの先端が巻取機にかかると急激に加速され、スラブの後端が仕上げ圧延機を通過すると急激に負荷が減少していく。このときの負荷は大きく、約35~70 MW 程度となる。今回の制御では最も負荷変動の大きい仕上圧延機の負荷が対象となる。また、この部分の負荷の立上りに要する時間は約10~20秒、立下りに要する時間は8~15秒程度である。

粗圧延機最終スタンド R5 から仕上圧延機最初まで、スラブが到達するのに要する時間はミルによってほぼ一定で、通常あまりばらつきがないといわれている。一方、仕上圧延機にスラブの先端がかみこまれてからスラブの後端が仕上圧延機から抜けはじめるまでの時間は40~80秒と製品の種類、圧延ロールの形状その他で異なる。

以上のように複雑に変動するミル負荷も、あとで述べるアナコンによる解析結果から近似的にはしご形負荷として扱っても、制御の仕上りに影響のないことが明らかになったので、本システムでは台

* 中国電力株式会社
** 電力中央研究所 工学博士
*** 日立製作所大みか工場

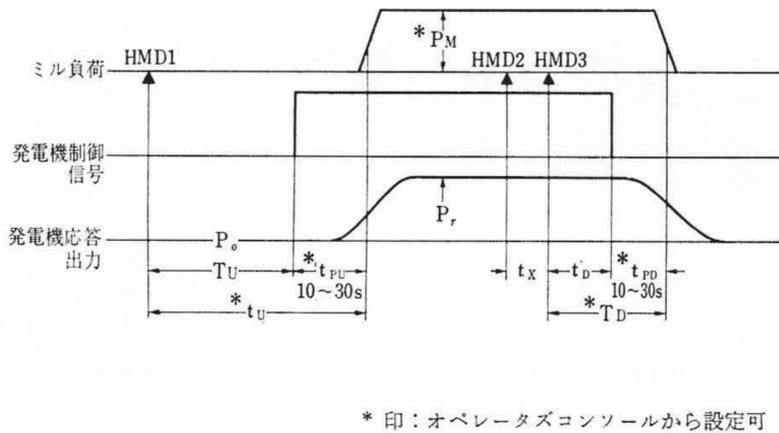


図2 制御パターン

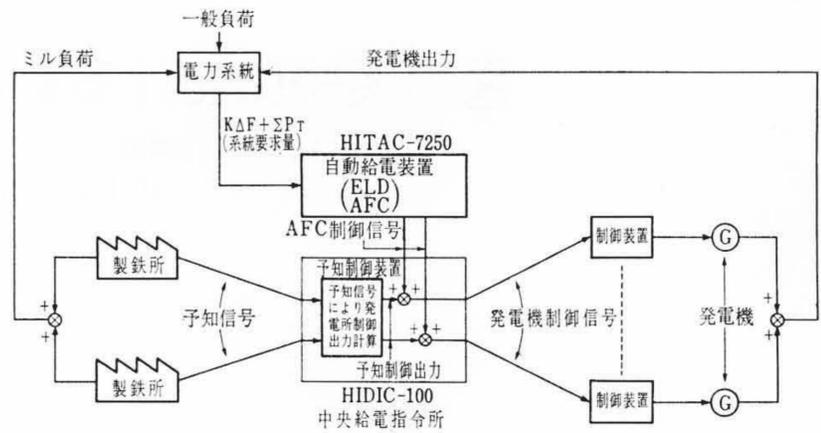


図3 予知制御システムの概要

形波として扱っている。次項ではこの台形波を正確に検出して、予知制御信号を作り出す方法を述べる。

2.2 予知制御信号の検出方法

予知制御のための信号の検出には、スラブ通過検出器（ホット・メタル・ディテクタ）3台を、図1(a)に示すように設置する。これら3台の検出器は、それぞれ次のような役割をする。

(1) 第1の検出器 (HMD 1)

ミル負荷の立上りを予知するための検出器で、スラブの先端が通過する時点を検出する。

(2) 第2, 第3の検出器 (HMD 2, HMD 3)

ミル負荷の立下りを予知するための検出器で、スラブの後端が通過する時点を検出する。

したがって、それぞれの検出器がミル負荷の立上り(立下り)を検出してから、実際に負荷が立上り(立下り)始めるまでの時間が40~50秒以上であることが、あとで述べる発電機の応答特性から必要である。このため、第1の検出器は、粗圧延機の直後に、第2, 第3の検出器は、仕上圧延機の手前、約30~50mの位置に設置する。

ミル負荷の立下りを予知するために、検出器2台を設置したのは、仕上圧延機の圧延速度が製品の種類によって大きく異なるため、スラブの後端が第2の検出器を通過してから第3の検出器を通過するまでの時間を測定して、仕上圧延機の圧延速度を求め、これによってスラブが仕上圧延機を抜けるまでの時間(ミル負荷の立下りまでの時間)を予知しようとするものである。

上記の検出器によって検出された信号と、ミル負荷の関係を示したのが図1(c)である。

これら製鉄所で検出された信号は、100~150km離れた、中央給電指令所の制御用小形計算機に送られる。この予知信号の伝送には、時間おくれがなく、しかも安価に送るために、50B/Sのアナログ衝流テレメータを使用し、中央に設置した受信装置では、これをオン・オフのリレー信号に変換して、制御用計算機の割込入力として取り込んでいる。

2.3 制御信号と発電機の関係

前節までに述べてきたように、ミル負荷の変動は非常に急激であり、このように急激な電力負荷の変動に、少しでも正確に回答させるためには、応答速度の速い発電機を選ぶことが必要である。このため、制御対象発電機として、水力発電機を選択した。水力発電機を有効に制御するために、まず、その特性について検討を行なった。

水力発電機の応答カーブは、図2に示すように10~30秒のおくれがある。これは、

- (1) 制御装置の動作時間
- (2) 電力送量器の応答おくれ時間
- (3) 発電所側受量器の応答おくれ時間
- (4) 発電所制御装置、ガバナモータ、ガイド・ベーンなどの応

答おくれ時間

(5) 水車、発電機などの応動時間

などが合成されたもので、発電機ごとに異なった特性を持っている。このため2.5で述べるようにアナコン解析を行ない、発電所固有の定数として、上げ時間および下げ時間を決定する。

2.4 予知制御方式

図3は予知制御システムの概要を示したものである。製鉄所で検出された予知信号は、中央給電指令所の制御用計算機HIDIC-100にはいり、HIDIC-100では制御時刻および発電所に指令する予知制御出力を計算し、既設自動給電装置(HITAC-7250)、AFC制御信号(系統要求量 $K\Delta F + \sum P_T$)と合成して、発電機制御信号として発電所に送出する。制御装置によって制御された発電機出力は電力系統に供給される。一方、製鉄所のミル負荷は電力系統の負荷となり、一般負荷と合成される。これらの予知信号と、ミル負荷、発電機制御信号、発電機出力の関係は図2に示すとおりである。

図2において、HMD1でスラブの先端を検出して、 t_U 秒後に負荷が立上る。一方、発電機の制御おくれ時間を t_{PU} とするとHMD1で、スラブの先端を検出してから T_U 秒後に発電機に対して上げ指令を出す。

ただし、

$$T_U = t_U - t_{PU} \dots\dots\dots (1)$$

次にスラブの後端がHMD2を通過してから、HMD3を通過するまでの時間 t_x を測定し、それに基づいて負荷の立下りまでの時間 t_D を計算する。一方、発電機の制御おくれ時間(立下り)を t_{PD} とすると、HMD3でスラブの後端を検出してから、 T_D 秒後に発電機に対して下げ指令を出す。

ただし、

$$T_D = t_D - t_{PD} \dots\dots\dots (2)$$

次に問題になるのは、各発電機の分担する、ミル負荷の大きさである。ミル負荷の大きさはスラブの仕上り品質によって異なり、製鉄所の生産計画をあらかじめ知らないと、この予測はむずかしい。一方、生産計画は製鉄会社の企業秘密に属するものであり、電力会社がこの情報を得ることは不可能である。しかし、ミル負荷のすべてを発電機の制御で吸収することが、あとで述べるアナコン解析からもできないことがわかっている。また、実運用上からも、発電機出力の上限または下限にかかって制御できない場合もあるため、給電運用者が任意に変更できるようにし、各発電機に対する指令出力 P_r は次式で求める。

$$P_r = \frac{\alpha_r}{\sum \alpha_r} \cdot P_M + P_0 \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 α_r : 発電機出力分担比率

P_M : ミル負荷の大きさ

P_0 : 発電機出力ベース (AFC 指令値)

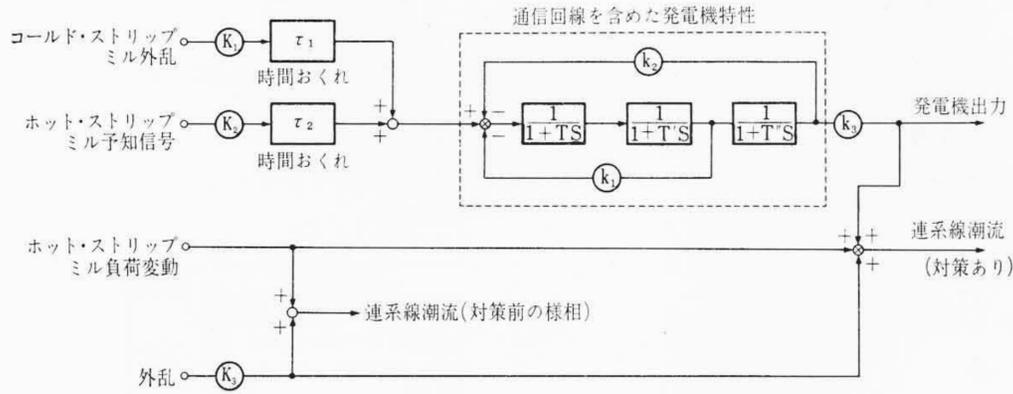


図4 予知制御アナコンブロック図

2.5 アナコン解析

以上に述べてきた予知制御方式の動特性を確認するために、アナコンによる系統解析を行なった。

アナコン解析では、予知が非常にむずかしい、コールド・ストリップ・ミルも含めて、主として下記の3点について検討した。解析に用いたブロック図は図4に示すとおりである。

- (1) 予知時間と水力特性の関係
- (2) 水力特性と潮流仕上りの関係
- (3) 予知制御容量の影響

この結果、予知制御を行なわないで、連系線潮流の変動幅を100%とした場合に、予知制御を行なった場合の連系線潮流の変動は、図5に示すようになる。また、現時点における外乱とミル負荷変動の比率の平均が110%程度と考えられることから、予知制御装置を導入することによって、約6%程度の効果が期待できることがわかった。また、

(1)については、ミル負荷の最適予知時間は水力時定数のみに関係し、ミル負荷形状の影響はみられない。

(2)については、連系線潮流の変化を分散で見ると、応答の速い水力発電機ほど制御効果が大である。

(3)については、一般には調整容量を大きくするほうが制御効果は増大するが、しだいに頭打ちになる。

ということがわかった。

なお、アナコン解析にあたって、仕上り評価は、次の三つの方式によって求めた。

ΔPL を連系線潮流変化値とすると、

- $\overline{\Delta PL}$: 平均
- $\overline{\Delta PL^2}$: 分散
- $|\overline{\Delta PL}|$: 標準偏差

このような解析を行なった結果、図6に示すような負荷変動を、

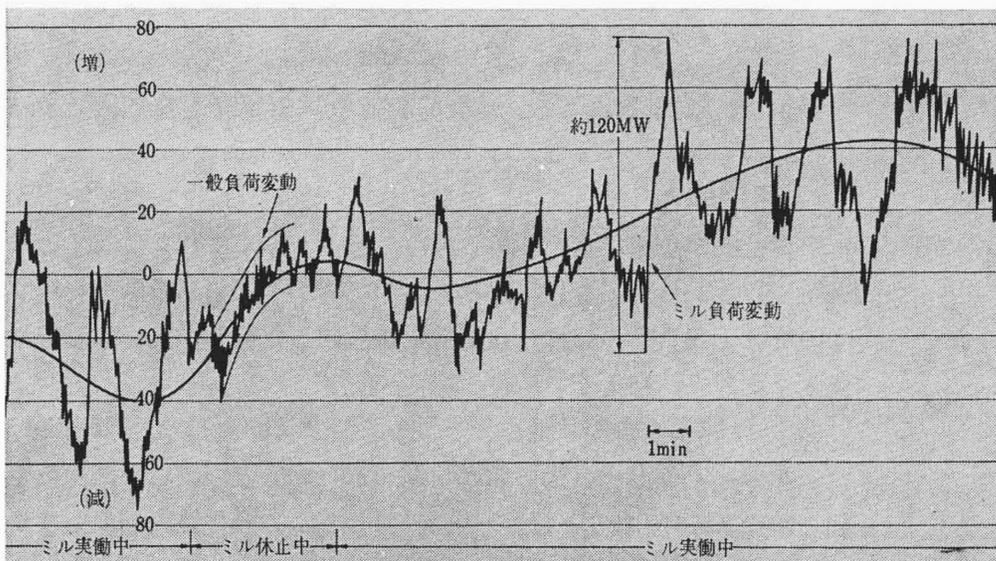


図6 系統負荷変動状況

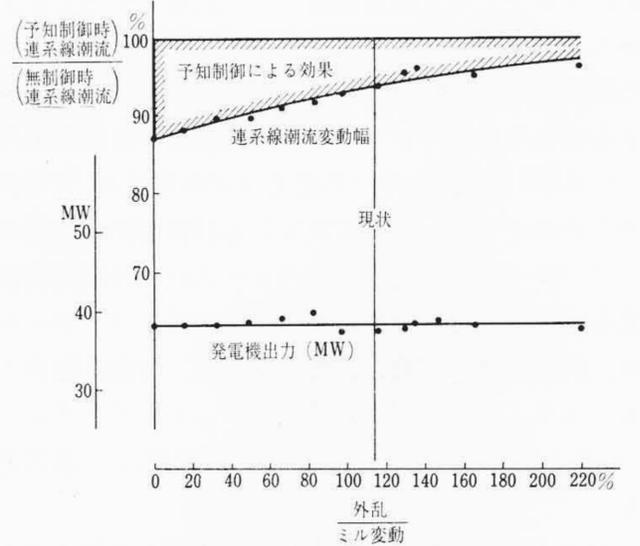


図5 予知制御の効果

図2に示すような特性を持つ水力発電機で制御することによって、図5に示すような効果があげられる見通しを得たので、装置化に踏み切ったものである。

3. システムの構成と機器の概要

3.1 システム構成

図7は予知制御システムの構成を、図8は予知制御システムの外観を示したものである。

このシステムは計算および論理判断を行なう中央処理装置と、計算機にプログラムやデータを記憶させ、また異常時の記録を行なう

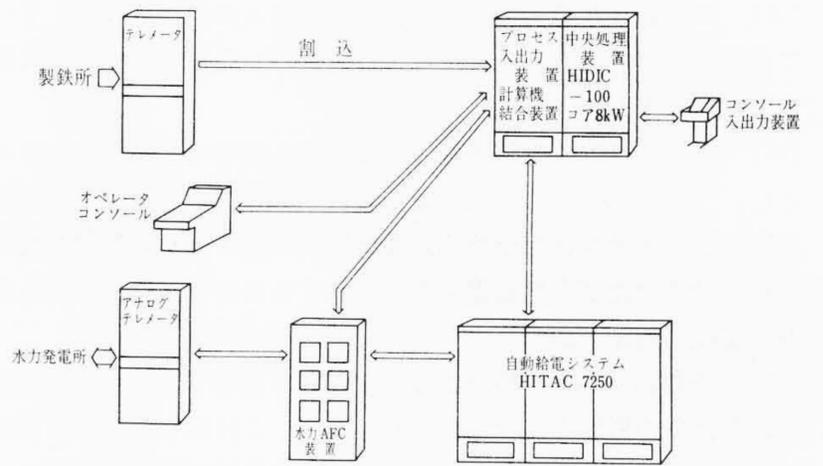


図7 予知制御システム概要

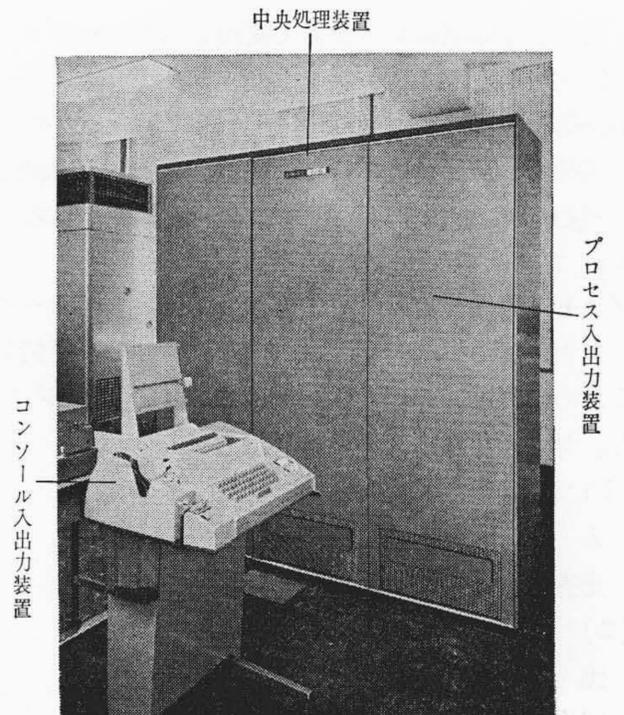


図8 予知制御システム外観

ためのコンソール入出力装置、ミル信号、オペレータズ・コンソールからの信号を取込む割込回路、オペレータズ・コンソールの設定値の取込み、発電機制御信号の出力、オペレータズ・コンソールへの表示を行なうためのプロセス入出力装置、自動給電用制御用計算機からのAFC指令値、ベース出力などの取込み、予知制御信号の受渡しのためのインターフェイスをとる計算機結合装置(CLC)、制御状態のオペレータへの表示、オペレータからの制御状態、定数などの変更を容易に行なうためのオペレータズ・コンソールなどから構成され、既設の通信回線、自動給電装置と有効に結合されている。

本システムによる制御対象は、ホット・ストリップ・ミル2個所(さらに1個所増設可)、制御対象発電所は、水力発電所5個所である。

このように、複数のそれぞれがランダムに発生するミル信号を合成し、合成した信号を個々に異なる水力発電所の特性を考慮して最適な時刻に配分、指令しているこのシステムの特長は次のとおりである。

(1) 電力系統に発生する特異な負荷に着目して、その負荷の波形、発生時刻の時間予想をして、これに即応して制御することによって電力系統に擾乱(じょうらん)として出てくるまえに、制御している。これはアナログ式の単能機を採用すると、大がかりな装置となる。また、このことによって、連系線潮流の振幅を小さく押えることができるため、連系線の運用幅が広がり、緊急時の融通余力が増大することになり、電力系統の信頼度向上にも有効な制御の一つとなる。

(2) 自動給電用計算機とファミリーを構成し、計算機結合装置によって、直接にデータの交換ができるシステムとなっている。

(3) オペレータズ・コンソールから制御に必要な定数は、すべて容易に変更できるようになっているため、系統の状況変化に直ちに対処できる。

(4) 既設の自動給電装置と、じゅうぶん調和のとれたシステムとし、予知制御装置の導入によって自動給電システムの変更を極力少ないシステムとしたため、現地搬入からシステム稼働までの期間の削減および自動給電装置と結合するためのシステム停止期間の短縮が可能である。

(5) 予知制御装置の停止あるいは起動によって、自動給電装置は、なんらの影響も受けないようにした。これによってミル運転が停止したとき、またはなんらかの理由で予知制御の必要がなくなった場合は、小形制御用計算機を他の種々の用途に使用できる余地を残した。

図9は予知制御システムで使用したフローチャートである。

3.2 中央処理装置

中央処理装置は予知制御の論理判断を行なう中核となるものであり、制御用小形計算機としての実績のある、信頼性の高いHIDIC-100を使用した。表1はその機能を示したものである。

3.3 プロセス入出力装置

プロセス入出力装置は、中央処理装置とオペレータズ・コンソール、アナログAFC装置との間に立って、両者の情報、信号を結合するための装置で、デジタル入力(DI)、デジタル出力(DO)がある。おもな仕様は次のとおりである。

- (1) デジタル入力(DI)
 - 入力: リレー接点 (2×16点)
 - 走査速度: 最高 10,000×16点/秒

- (2) デジタル出力(DO)
 - 出力: 半導体接点出力 (6×16点)
 - 送出速度: 最高 10,000×16点/秒

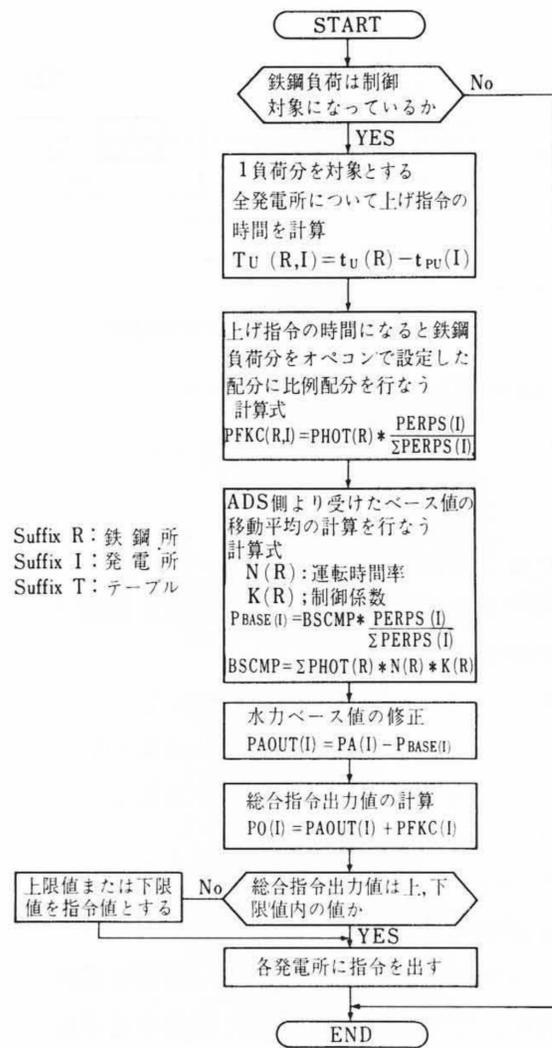


図9 フローチャート

表1 中央処理装置の機能 (HIDIC-100)

項目	機能
コア容量	8,193語 (最大 16,384語まで拡張可)
語長	16ビット+1パリティ
サイクル・タイム	2μs
演算速度	加減算 16.5μs
命令種類	基本 17種
アドレス方式	1½アドレス方式 インダイレクト指定可
インデックス	3

3.4 オペレータズ・コンソール

オペレータズ・コンソールは、予知制御の状態をオペレータに正確に伝えるとともに、ほかの自動給電業務と密接なつながりを持ちながら、オペレータの指示を装置の制御にじゅうぶん反映させるものでなければならない。

表2はオペレータズ・コンソールの機能の概要を、図10は中央給電指令所に設置されたオペレータズ・コンソールを示している。

4. 運転結果

図11は予知制御によるミル負荷変動の調整状況を原理図で表わしたものである。

(a)図に示されるように、従来のAFC制御では、ミル負荷のように負荷変動の急激なものに対しては、じゅうぶんこれを吸収することができなかった。これに対して、(b)図が予知制御の原理を示すもので、ミル負荷の急激な負荷変動を吸収して電力系統の連系線潮流変化を最小に押える。

図12は連系線潮流に現われるミル負荷の状況と、予知制御をかけたときの連系線潮流変動の制御状況を示したもので、この図からも明らかなように、ミル負荷の変動に対して水力発電機が同期して動くことによって、連系線潮流変動が大幅に減少していることがわかる。

表2 オペレータ・コンソールの機能

項目	機能	内容
総合操作表示部	予知制御装置の状態の表示、警報、制御指令の設定を行なう	○ 装置、制御状態の異常警報 ○ 計算機制御の起動停止 ○ 予知制御対象発電機を選択
呼出設定部	予知制御に関する各種定数データの呼出および設定を行なう	○ 上下限值、発電所特性定数等の設定 ○ 予知制御分担出力、各種定数の呼出
デジタル表示部	呼出操作によって呼出されたデータのデジタル表示を行なう	3けた+単位の表示



図10 オペレータ・コンソール概要

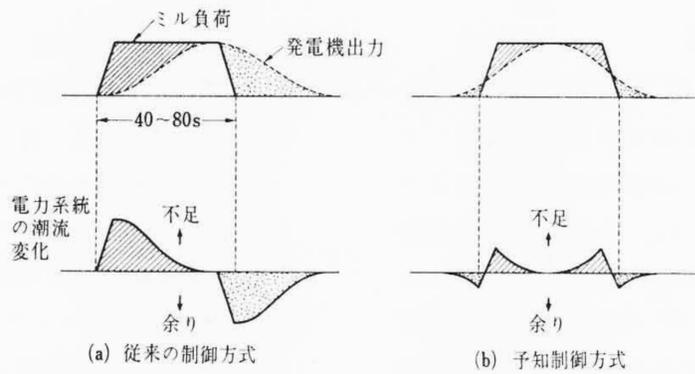


図11 予知制御によるミル負荷変動の調整

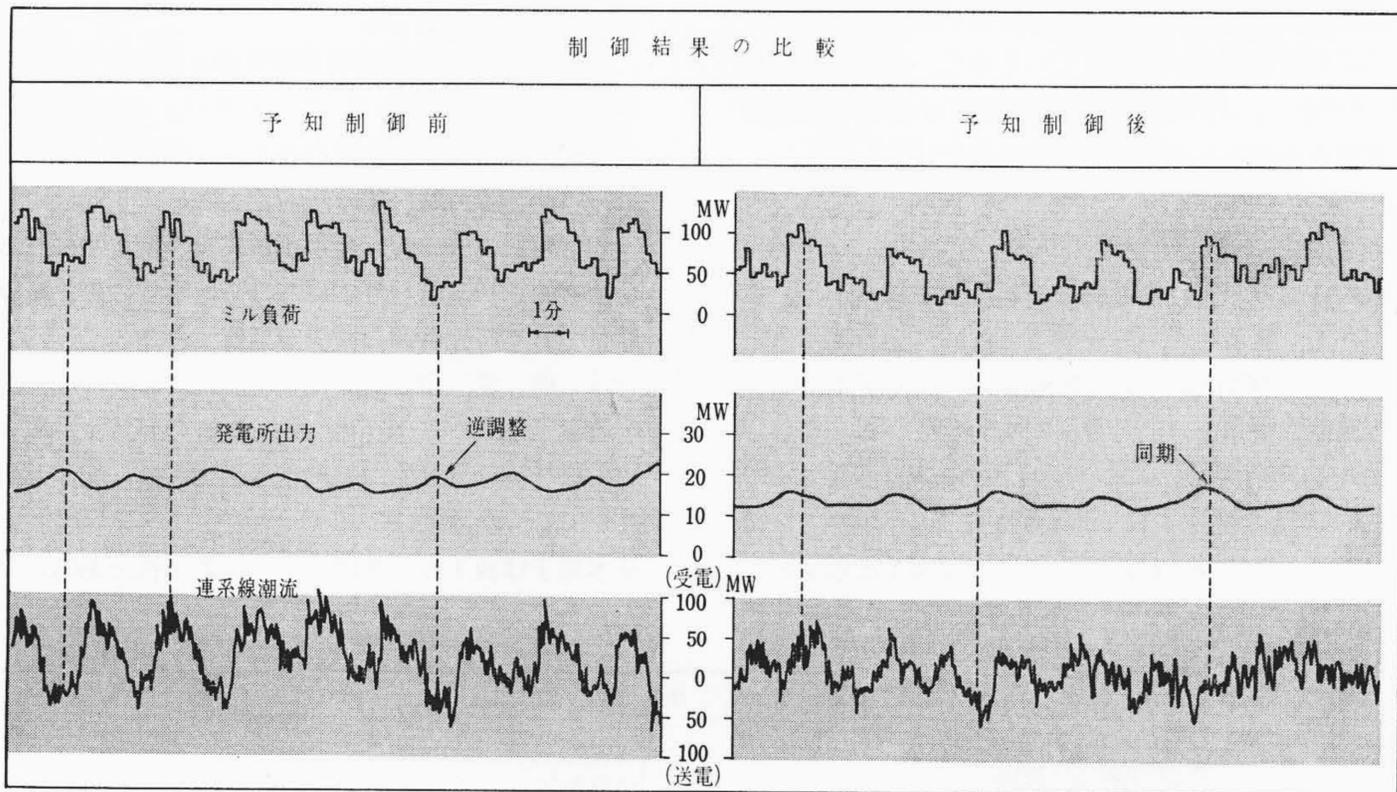


図12 制御結果

5. 結 言

以上、中国電力株式会社中央給電指令所納め予知制御装置のシステム構成および予知制御方式の概要について述べた。

これは自動給電システムの一環として行なわれたもので、今後は運用経験を取り入れて、さらに自動給電システムの内容を充実させていくとともに、次のような給電関係の自動化項目も順次実施に移していく計画である。

- (1) 電力系統監視の自動化
- (2) 総合電圧無効電力制御
- (3) 系統自動操作、信頼度運用の実現

(4) 給電記録の収集、処理の自動化

最後に本システム完成まで終始ご指導と、ご協力をいただいた中国電力株式会社、中央給電指令所三上所長、杉山氏、野利本氏、通信課網本課長代理、高松副長、電力中央研究所第1研究所尾出当任、鈴木氏そのほか関係各位に心からお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 関根泰次：電力系統工学
- (2) 三上、中野ほか：日立評論 52, 503 (昭45-6)
- (3) 末田 寛：中国電力技研時報 1971. 3, No. 39, 複数庄延機の同時稼働時の負荷シミュレーション