自家発電設備の最適負荷配分制御

十條製紙㈱石巻工場 野 本 明

Optimal Steam Allocation Control System for Plural Electrical Power Generators

Akira Nomoto

Jujo Paper Co., Ltd.

Optimal steam allocation which reduces the total cost of steam generation and purchased electrical power to a minimum, is achieved by the complex strategy of Linear Programming. This computer control system was applied to six turbine generators in Ishinomaki Mill of Jujo Paper Co., Ltd. in 1981. Since then it has provided a lot of energy saving in satisfactory operation.

Keywords : Computer control • Power Plant • Energy saving • Optimal control • Steam allocation • Purchased electrical power

1. はじめに

本システムは省エネルギー工事の一環として、54年12月にその導入を決定し、56年4月よりオンラインテストに入り、同年11月に完成を見て、その後順調に稼動しているものである。その内容は複数の自家発電設備に対して、最も経済的な負荷配分を行うことを目的とするもので、ほぼ同じものについて本誌¹⁾に詳しい報告がある。計画そのものとしては早くから着手され、メーカーによる現地調査が行われて、具体的な制御方案が作成されたが、予測されるメリットをどう評価するかについて確信が得られず、ちゅうちょせざるを得なかった。そこには後述するような当工場の特殊事情といったものがあって、期待されるメリットを削減することが懸念され、投資効果に対する評価が定まらなかった。しかし、そうした中でエネルギー事情が厳しくなり、省エネルギー工事に対する投資基準の見直しが行われて、本計画についてもそれなりのメリットを想定して実施されたものである。稼動後どれだけのメリットが得られたか、その算出はきわめて困難ではあるが、一応それに近いものが得られていると考えられる。

以下そのシステムの概要と、その中での CRT ディ

スプレーの活用について述べる。

2. 自家発電設備の概要

当石巻工場の設備の概要については、やや古いものであるが本誌²⁾の工場紹介に詳しく記載されており、参照していただきたい。その自家発電設備を構成するボイラーとタービンは、おおよそ 600m 隔てて第1原動と第2原動に分かれており、その蒸気系統図を図1に示す。そこには次に記すような当工場固有の問題がある。

1) ボイラー主蒸気圧力が 60 kg/cm² (以下 k と略記する)、80 k、100 k と 3 系統あり、それぞれにタービンがぶら下がる 1 缶 1 基の組み合わせに近く、負荷配分を行うといっても大幅な移し替えができない。

2) 回収ボイラー系の 60 k ラインの圧力制御が実施されておらず、80 k—60 k 減圧弁に頼っている。その影響を 2—6B が受け、その系統の当工場最大のタービンである 2—4T の負荷配分が、望ましい方向に行われぬ。

3) 夏、冬の工場用水の温度差が大きく、蒸気使用量に著しい季節差がある。その結果、復水発電を夏は最大に、冬は最小にといった極端な運転を強いられている。

図 1 蒸気系統図

4) 買電の時間帯特約のN帯の電力契約量が、P帯またはOP帯の2倍近くあり、上述の復水発電を最大にする夏場でも、N帯になると最小に絞り込むため、常に余裕のある運転ができない。

5) 抄紙機が10台あり、エバポレーターが3系列あって低圧蒸気の使用量が多く、紙切れ時および通紙時にボイラーは大きな影響を受けないが、その反面プロセス蒸気流量に不規則な短周期の変動がある。例えば5分ごとといった間隔の最適負荷配分制御では、プロセス蒸気圧力を所定の値に維持できないことがある。

以上のような特殊な背景を有しており、そうしたもとで計画されたものであることを考慮願いたい。

3. システムのハードウェア構成

本システムを構成するコンピュータは、日立製作所製のHIDIC-80で、設置場所別のハードウェア、およびプロセス入出力点数は次のようなものである。

3.1 第2原動力コンピュータ室

- ・計算機本体 HIDIC-80
- ・コアメモリ 64k語
- ・補助メモリ 磁気ディスク 1M語
- ・プロセス入出力装置
- ・システムタイプライター
- ・光電式紙テープリーダー
- ・MG電源 20kVA

3.2 第2原動パネル室

- ・オペレータズ・コンソール

- ・20 in カラー CRT (原動係用)
- ・20 in カラー CRT (電気係用)
- ・ロギングタイプライター (日報用)
- ・アナウンスメントタイプライター (メッセージ印字用)

3.3 第1原動制御盤室

- ・データフリーウェイ
- ・プロセス入出力装置

3.4 第1原動パネル室

- ・20 in カラー CRT (原動係・電気係共用)

3.5 プロセス入出力点数 (予備を含む)

- ・アナログ入力 304点
- ・アナログ出力 8点
- ・デジタル入力 320点
- ・デジタル出力 256点
- ・パルス入力 46点

このほか今回のシステム導入にあたっては、プラントとの信号の授受のための変換器盤、リレー盤等を製作し、従来のパネルおよび制御盤の改造を実施している。

4. 制御の概要

本システムは図1に示したような自家発電設備に対して、次の3つの制御を実施するものである。

- 1) 最適負荷配分制御
- 2) 受電デマンド制御
- 3) プロセス圧力制御

図2 最適負荷配分制御機能の概要

ここではボイラー、タービン、発電機のほか、各種の機器を監視対象とするため、コンピュータの入力信号の数は非常に多いが、制御出力の操作端は図1中に●印で示した。

- (1) 全タービンの抽気または背気の12k、および2.5kの圧力調整器
- (2) 復水タービンである2—2T、4T、および5Tの速度設定器
- (3) 2—3T大気放出量

の13個所に過ぎない。なお、2—4Tの12kの抽気圧力は外部制御になっており、本システムの制御対象には含まれていない。

図2に最適負荷配分制御を中心とした、機能の概要を図式化したものを示す。

4.1 最適負荷配分制御

最適負荷配分とは、プロセス蒸気デマンドと電力デマンドを満たして、買電コストと重油使用量に基づく蒸発コストの和が最小となるよう、上記の13個所の操作端に対する出力値を決定しようというものである。ここでは線形計画法（リニアプログラミング）と呼ばれる、不等式制約条件のもとで目的関数が最適となる解を求める手法が適用されている。その最小化にあた

っての制約条件、およびコスト要因とは次のようなものである。

4.1 電力デマンド

各発電機と買電とは併列運転されており、買電電力量の上限と、逆送防止のための下限を定めたもので、時間帯特約を実施している関係上、その上限値はあらかじめ定めたデマンドカレンダーに基づき、各時間ごとに自動的に変更される。

4.1.2 蒸気デマンド

12k、および2.5kのプロセス蒸気デマンドに対しては、これを供給できるものとして、等式制約条件となっている。

4.1.3 タービン能力

各タービンごとに主蒸気、抽気、背気、および復水の流量の最大値と最小値を定めたもので、組み合わせられるボイラーの能力の範囲内で、現在値に対する余力の形で与えられる。

4.1.4 ボイラー能力

ボイラーに対しては制御を実施しないが、重油ボイラーの使用バーナー本数により、蒸発量の最大値と最小値を定め、その範囲内で上記と同様に余力の形で与えられる。

4.1.5 減圧系統能力

80k—60k減圧弁の流量の最大値と最小値を定め、余力の形で与える。

4.1.6 大気放出能力

2—3Tの大気放出弁の流量の最大値と最小値を定め、余力として与える。

4.1.7 タービンセクション効率

本システムのタービン効率は、加減弁特性を考慮したセクションごとに求めたものになっている。すなわち、そのセクション蒸気流量とセクション機械出力との関係は、いわゆる弁点でくびれた形の極大値を有するものである。そこで各弁点間では両者の関係が2次式で表わされるものとし、その微小変化量について線形化するという、線形計画問題といっても非常に複雑なものになっている。

4.1.8 タービン発電機機械効率

機械出力と発電機出力とは、一次式の関係にあるものとする。

4.1.9 ボイラー効率

重油使用量に対する蒸気発生量の関係を表わすもので、2次式で与えられるものとする。

4.1.10 所内蒸気比

ボイラー蒸発量の変化量に対して、一定比率で与えられるものとする。

4.1.11 換算重油単位, および買電電力単位

重油単価に排脱薬品その他の薬品費を加えて, より実質的な換算重油単価として用いている。買電については上述したごとく時間帯特約になっており, 時間帯ごとの単価がそのまま使用される。

以上の制約条件の数式化にあたっては, 上述したようにその一部に非線形の要素があるため, 決定変数の微小変化量に基づく線形化を行っている。そして, それらを等式制約条件, および不等式制約条件として記述し, 目的関数である運転費用が最小となるよう, 線形計画問題として解くものである。そこでの決定変数の数は上述した出力操作端の数に等しく, 制約条件のうち, 等式の数プロセス蒸気デマンドを満たす2つに過ぎないが, 不等式の数がおびただしくあり, 非常に複雑なものになっている。とりわけタービンのセクション効率の弁点近傍では, 微小変化量といえども制限が加えられ, 丁度弁点にあるときは上げ, 下げでその変化のこう配を変える必要があるなど, その内容はきわめて高度なものである。

しかも, そこで得られた解は微小変化量に基づくものに過ぎないので, その解から微小変化量による線形計画問題を同じようにして解き, 次なる解を求める。これを次々とくり返さなければ, 目的とする最適解は得られないのである。これだけの計算を実施するとすると, コンピュータといえどもその能力には限界があって, 短時間で最適解を求めることができないことになる。今回は5分ごとに最適負荷配分計算を行って出力するようになっているが, いたずらに計算に時間を費すことは, その間にも蒸気あるいは電力デマンドは変化しており, 実態にそぐわないものになる。すなわち, 計算の基礎となったデータが, 出力する時点で変化していれば, 得られた解は最適値からずれてしまうことになり, ときにはプロセス蒸気圧力の異常を引き起こしかねない。そこで最適負荷配分の近似解を, 短時間で求める工夫がなされており, 後述するようにその出力後のプロセス蒸気圧力の監視制御を行って, 異常に対処するようになっている。

このように, いわゆるタービンの加減弁の弁点での運転を狙いとしているものであるが, その変化分に着目したコスト比較を行っていることを特徴とするものである。一般によく買電コストと復水コストの比較が論議されるが, ここでは現状から出発して, 固定した絶対値的なコストではなく, 負荷の入れ替えに基づく変化分に対するコスト比較を行っているため, より実質的なコストミニマムを達成できると考えられる。従って, 実際には予期せぬ方向の, 予想以上のメリット

が得られることになる。とくに考慮されているのは, タービン周りの入口・出口の蒸気流量の誤差に対して, 各セクションのセクション出力と蒸気流量の関係を正しいものとし, これを基準とした厳密な補正を行っている。

4.2 受電デマンド制御

受電デマンドは30分単位で管理され, 1分ごとにその監視を行う。制御のタイミングはデマンド周期30分のうち, 始めの20分間はガイダンス表示のみで, 残りの10分間について1分ごとに出力するものである。そこでまず本システムにおける受電デマンド監視の方法について述べる。その基本的な考え方を図3に示す。ある時刻をデマンド周期30分の単位の中の t 分とする。その時点までのデマンドを P , それより前 Δt 分間のデマンドの増分を Δp とする。ここではその時点のデマンド P よりも, Δt 分間の増加傾向に注目して, その増加傾向のままでデマンド周期の30分に達したときの値を, 予測デマンド P_f とする。

$$P_f = P + \frac{\Delta p}{\Delta t} (30 - t)$$

一方, デマンド時間 t 分に対して予め定めた余裕電力 α_t を, 目標デマンド P_r に加えた値を, その時点でのデマンド許容限界 P_{ut} とする。

$$P_{ut} = P_r + \alpha_t$$

ここで α_t は $t=0$ のときの α_0 が, 時間経過とともに徐々に減少し, $t=30$ では0になるよう定めたものである。そして, 予測デマンド P_f が許容限界 P_{ut} を超えるかどうかを監視し, 警報を発するものである。

これに対して受電デマンド制御は, 最適負荷分制御にとって好ましいものではなく, 上記のごとくデマンド周期の始めの20分間は実施せず, 残りの10分間で

図3 受電デマンド監視および制御の概念

目標デマンドに収めるべく、1分ごとに出力するものである。そのときの調整電力 P_c は、上記の予測デマンド P_f から次式により求められる。

$$P_c = \frac{P_f - P_r}{30 - t} \times 60$$

その出力の方法は操作可能条件が成立している復水タービンに対して、現状の復水流量比に基づいて復水量を増加するものである。いずれかのタービンが復水最大となった場合は、残りのタービンに配分し、全タービンが復水最大となった場合は、2—3Tの大气放出を行う。大气放出を行っても目標デマンドを超える場合は、オペレータに対してアナランシェータ表示し、直接負荷シャ断は行わない。

このような制御を実施して、受電デマンドは契約ギリギリの目標デマンドを、ほとんど人手を介さずに達成している。また、時間帯切替に際しても、バーナーの点火、消火は人手に依っているが、復水への移し替え、戻しは自動的に行われ、オペレータの負担を軽減している。なお、この制御は時刻修正、デマンド同期（買電時計とのずれの修正）などの操作を行ったときは、そのデマンド時間（30分間）は実施されない。

4.3 プロセス圧力制御

図1に示したようにプロセス用蒸気として2.5k系、および12k系の2つがある。それぞれについていくつかあるプロセスサイドの圧力検出端のうちから、代表的な測定点を選択し、その圧力に対して上下限值を設定し、監視制御を行うものである。その監視および制御出力の周期は、その圧力変動がプロセスに与える影響を考慮し、他の制御よりも短く30秒ごととなっている。出力の方法は上下限值を逸脱した場合に、コンピュータの制御下にあるすべてのタービンの圧力調整器に対して、同時に出力するものである。各圧力調整器に出力する操作量は一定値とし、上下限それぞれに不感帯を設けて、正常な値に回復するまで出し続ける。その操作量はプロセスの圧力検出点とタービンとの圧力損失を考慮して決められる。この制御も最適負荷配分制御にとっては好ましいものではなく、プロセス蒸気圧力の変動を極力抑えるよう、プロセスサイドで工夫をこらし、できるだけこの制御に頼らないようにしなければならない。

5. CRT の各種画面

上述したように本システムには、3台の20inカラーCRTが装備されている。コンピュータからの出力操作端の数は少ないが、オペレータがCRTとの対話を通じて、各種の情報を得、適格な判断を下すことが

図4 CRT画面のブロック分け

重要な役割を果たしている。そのCRTはやや旧型のもので、横48列、縦20行の960文字を表示するものである。図4に示すように、その画面全体を3または4ブロックに分割して使用している。

ブロック①は日付・時刻を常時表示するほか、画面ホールド、状態（後述）発生などを記号で表示する領域である。

ブロック④はオペレータがCRTと対話する、作業エリアとして用いられるもので、一般にスクラッチ・パッド・エリアと呼ばれている。

ブロック②、③、または⑤は、以下に述べる各種の画面が表示されるエリアで、ブロック⑤は画面全体を使って表示する場合であり、ブロック②とブロック③は、異質の2つの画面を同時に表示できるようにしたもので、種々の組合せが可能になっており、画面の有効活用がはかられている。

以下ブロック④を利用した設定、印字などの一般的なものを除き、ブロック別に主要な画面につき説明する。

5.1 ブロック②に表示される画面

5.1.1 状態表示

任意の計測値、積算値、計算値などのデータを監視する場合に使用されるもので、写真1の上段の部分にその一例を示す。

5.2.2 余力監視

次の各項の増方向、および減方向の余力を、蒸気流量(t/h)で表示するものである。

- 1) ボイラー主蒸気余力 1—1B, 2—4B, 2—6B)
- 2) タービン主蒸気余力 (全タービン)
- 3) 80k—60k減圧弁余力
- 4) 大气放出量余力

最適負荷配分条件を変更する場合、あるいは手動操作時の指針として役立つもので、その一例を写真2に示す。この中で停止中のものは空白とし、制御対象になっているものは緑色で、制御対象外のものは白色で表示される。

5.2.3 状態表示

一般にアラーム表示、メッセージ表示などと呼ばれるもので、ここでは、

- 1) 計測値の上下限逸脱/回復
- 2) 計算値の上下限逸脱/回復
- 3) 入力異常
- 4) 制御メッセージ
- 5) 接点データの接点オン/オフ

を表示する。画面スペースの関係で6個までしか表示できないが、バッファとしては30個まで貯え、回復したもの、および30個以上になった場合は、最も古いものから順次消去される。写真3にその一例を示す。

5.2 ブロック③に表示される画面

5.2.1 負荷配分表示2

6台の全タービンとその合計値について、次の項目を表示する。

- 1) 主蒸気流量、および圧力
- 2) 12k蒸気流量、および圧力
- 3) 2.5k蒸気流量、および圧力
- 4) 復水流量
- 5) 発電機出力

写真1にその一例を示すが、ここでも停止中のものはスペースで、最適負荷配分の制御対象となっているものは緑色で、対象外のものとは白色で表示される。

5.2.2 負荷配分ガイド

このものには2種類のものがあるが、表示される項目は同じで、上記の負荷配分表示2の圧力を除いたものである。

1) 計算結果表示

現在のデータに基づく最適負荷配分計算の結果を各項目ごとに、現在値→目標値の形で表示する。

2) 予測表示

最適負荷配分条件の変更にあたり、次項に述べる負荷配分ガイド条件の画面を操作し、条件変更後の状態を、現在値→予測値の形で表示する。

写真2に後者の例を示した。

5.2.3 負荷配分ガイド条件

負荷配分ガイド画面を選択すると、まず本画面が現われ、制御対象となっている操作端には⑥が表示される。そのまま送信要求すれば、a. 計算結果表示画面となり、もしも条件変更の操作を行ってから送信要求すれば、b. 予測表示画面が呼び出される。写真3にその例を示す。

5.3 ブロック⑤に表示される画面

5.3.1 負荷配分表示1

図1にある7缶のボイラーの運転状態とその合計値

および各所のプロセス蒸気圧力を表示するものである。

- 1) 主蒸気流量、および圧力
- 2) 重油流量、および燃焼黒液流量
- 3) 排ガス NO_x 、および O_2
- 4) 所内蒸気比率
- 5) 12k、および2.5k プロセス蒸気圧力

5.3.2 受電デマンド監視

本システムのデマンド監視、および制御の考え方については上述したが、CRT上では契約デマンドを100%とし、その割合で増加して行く場合に対して、実績デマンド、並びに予測デマンドの1分ごとの差違を表示している。そこでの予測デマンドの算法は上述したものとは変っていない。写真4にその一例を示すが、契約デマンド以内であればその差を青色で、それを超える場合は赤色で表示する。とくに前回30分の残り5分間についても表示されており、その状況から事前に的確な判断が下せるようになっている。

5.3.3 電力潮流監視

受電および発電系統が複雑な組み合わせになっており、その潮流状況を把握するためのもので、系統各電力を模擬的に表示するものである。とくに本システムにおいては、トランスあるいは発電機がトリップした場合に、系統機器の過負荷防止のため、直接出力はしないが、選択し断入/切のオペレーションガイドを表示するようになっている。

写真5はその画面例で、上段が6台のトランス電力を、最下段が6台の発電機の発電電力を表わし、停機中のものは空白になっている。下から4段目が受電母線電力を、下から2段目が発電母線電力を示している。その中間の下から3段目が各トランスの母連電力を表示しており、トランス側から見てマイナスのときは赤字で表示している。

5.3.4 SO_2 監視

使用重油量、重油S分、および脱硫効率から、排出 SO_2 量を求めて一括表示するようにしたもので、規制を受ける総量に対して現状がどうなっているかが、一目で判別できるようになっており、万一の場合の適切な処置に役立つものである。更にこのものには予測計算のモードがあり、写真6の例では2-2Bにて、重油を燃き込んだときどうなるか、といったことを表示できるようになっている。

5.3.5 デマンドカレンダー

受電デマンドの時間帯の自動的な切替を行うため、1カ月のカレンダー上で予め設定するようにしたもので、前月、今月、および翌月の3カ月分が用意されて

写真 1

写真 4

写真 2

写真 5

写真 3

写真 6

写真 7

いる。写真7がその一例で、PはP帯、OはOP帯のある日を示し、NはN帯の日を、Yは定検時に予備用の契約をしている日を表示している。

5.4 CRT 用キイボード

CRTには専用のキイボードが付属しており、それを操作することにより各種の画面の呼び出し、あるいは画面を通じてコンピュータと対話できるようになっている。そこには16個のファンクション・キイと呼ばれる割り込みキイがあり、直接画面を呼び出すことができるが、画面の種類はそれ以上あるので、3台のCRTにはそれぞれ最も使う頻度の高いものが割り付けられている。そのうちの一つに牽引用画面を呼び出すものがあり、ファンクション・キイにないものはその牽引番号により表示される。

画面をブロックに分けて使用していることもあって、ファンクション・キイの中に状態表示を優先表示させるもの、および使用頻度の高い状態表示と負荷配分表示2とを組み合わせた画面を、優先表示させるものがある。1台のCRTにより各種の監視・操作を実施する場合は、そのキイボードの活用法につき充分留意する必要がある。

6. おわりに

以下システムの概要について述べたが、そこには当工場固有の問題のほか、タービン本体の問題、タービン効率測定の問題、計測上の問題、制御上の問題、工事上の問題などがあつた。冒頭に省エネルギーとして実施され、当初見込まれたメリットに近いものが得られたむねを記したが、実際にはこうしたもののメリットの評価は、きわめてむずかしいものである。今回の評価方法は、システム完成後制御を切り離して操業し、

各時間帯ごとに最適負荷配分計算のみを実施して、それを実施したとするとどれだけメリットが得られるかを、コンピュータで算出する方法に依っている。これとても適切ではなく、実際には一回の出力量に制限を加えており、何回かで最適解に近付くことになるが、テストでは制御が切られているので、予想されるメリットは一回の出力によるものを算出したに過ぎない。そうしたテストで一応の評価が得られたということである。

本システムの導入により、省エネルギーと省力化にこれまでにない推進力が得られ、ことにパワープラントの総合的な管理といった点で、大いに貢献していると考えられる。他のコンピュータシステムと同様に、具体的に算出できないメリットは莫大なもので、とくにこうしたシステム中心のものはその傾向が強く、その評価のむずかしさを充分考慮する必要がある。

本システムはメーカーである日立製作所により構築されたものである。その内容は海外の同種のものと比較して³⁾⁴⁾、はるかに複雑かつ高度なものとなっている。担当者の現地での苦労は大変なもので、初めてのシステムには様々な予期せぬ問題が次々と発生し、それらを一つ一つ解決して行かなければ、システムとして完成しない。その労苦に感謝するとともに、ユーザーとして他社ではよりスムーズな導入を期待するものである。

参考文献

- 1) 工藤明敏：紙パ技協誌，**33**，1 (1979)
- 2) 十條製紙KK：紙パ技協誌，**33**，2 (1979)
- 3) Nils Leffler：Tappi，**61**，9 (1978)
- 4) Charles M. Worthley：PTJ，**163**，16 (1979)