

シミュレーション手法を用いた 電源開発・系統計画について

藤原 透・瀧 明・今岡幹典・松下邦雄・武智 啓・藤岡正直・石川文彦

近年の電源開発は、大容量原子力・大容量揚水式水力などによっていろいろの点で多様化、大規模化するとともに、地域的にも立地点が偏在する傾向があり、従来の一般水力、火力を中心とする電力需給特性、潮流特性とは様相を異にしつつある。

たとえば、需給面からは、

- 原子力発電は、火力発電に比べて燃料費が非常に安いなどの特性があるため、いったん運転を開始すると昼夜とも極力最大発電をすることが求められる。
- 揚水式水力は、貯水池式水力と同じく即応性にすぐれているほか、深夜の揚水によって、原子力、超臨界圧火力などのベース電源の利用効率を向上させる効果があるが、経済的には効率の悪い火力やガスタービンと似たような位置にあるため、需給が楽な場合に、毎日揚水、発電を行なうことは、必ずしも得策でない。

また、潮流面からは、

- 大容量原子力の最大フラット発電により、深夜軽負荷時のほうが、ピーク時よりも重潮流になることがある。
- 揚水式水力は深夜に負荷として運転するため、その動力源となるユニットによって、潮流が大きく変動する。

したがって、原子力、揚水式水力を含めた電力系統の需給特性、電力潮流の把握あるいは電源開発、系統増強パターンの経済的、技術的特性比較などの検討を行なう場合は、従来のマクロ的あるいは断面的な検討では十分ではなく、シミュレーション手法を用いて、年間毎日、毎時間の需給、潮流を検討する必要がある。

このような目的から、今回当社では全系の需給をシミュレートするばかりでなく、あわせて基幹系統潮流のシミュレーションをも行なえるシステムを開発したので、この概要について報告する。

1. シミュレーションの概要

(1) システムの構成

この需給・潮流シミュレーションプログラムは、指定した年度の出水（昭和17年度～51年度出水）を使用し、計算対象年の毎日、毎時間について、シ

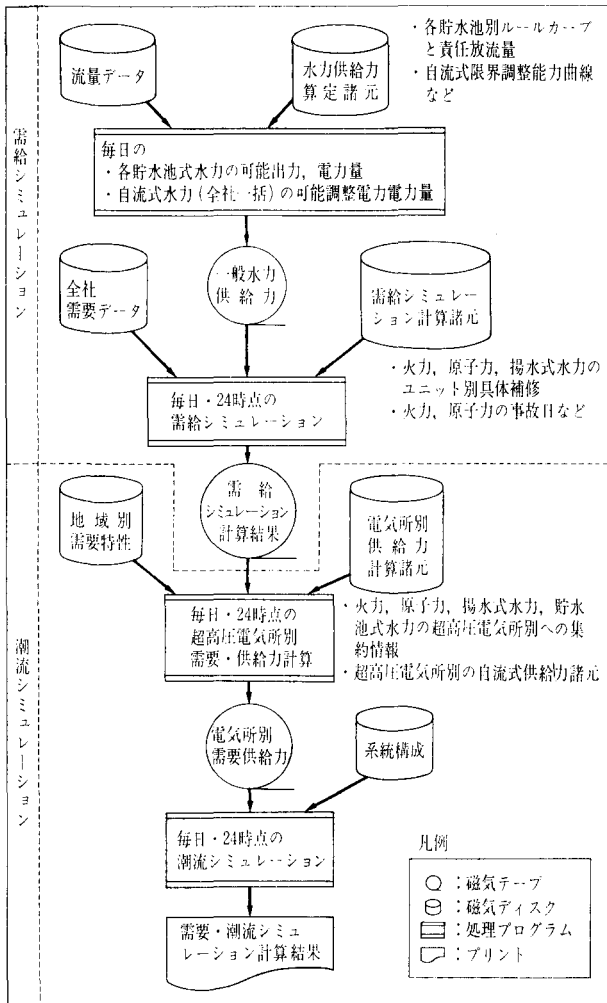


図1 システム構成図

ミュレーション計算を行なうものである。図1にそのシステム構成図を示す。

(2) データ諸元

表1にデータ諸元と変動要因の取りあつかいを示す。

一般的にシミュレーション計算はインプットデータの数、種類や繰り返し計算が多いため、計算の準備作業や計算時間が長くなり、多ケースの検討に手間がかかる傾向がある。このため、データのファイル化、プログラムの分割化、演算の簡素化などに工夫を重ね、また潮流計算については、最適順序づけによるガウス消去法と重ね合せ法とを組み合わせて、演算時間の短縮をはかった[1], [2]。

その結果、需要、事故、出水条件の1ケースあたりの1年間のシミュレーションは、CPU約5分(需給シ

ミュレーション：約1.5分、潮流シミュレーション：約3.5分 I BM370/158) 程度まで短縮することができた。

(3) 概略フローチャート

図2に需給・潮流シミュレーションプログラムの概略フローチャートを示す。

2. 需給シミュレーションの機能

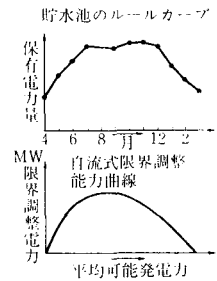
このプログラムは従来の需給シミュレーションの機能のほかに、以下の機能をもっている。

(1) 即応供給発電

冷房需要を中心とする夏季需要の伸長により、毎日の朝の立上り、昼休みの立下り、立上りなど、負荷変動が急峻となってきたため、供給力の負荷変動に対する即応能力についても検討する必要がある。

表1 データ諸元・変動要因の取りあつかい

| データ諸元と変動要因の取りあつかい | |
|-------------------|--|
| 需 要 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 別途想定した各年毎日、毎時間の全社需要をファイル化しており、計算対象年度のみを指定することによりデータを取り出せる。 ○ 需要予測の変化に対応するため、各月別需要電力量をインプットすることにより、別にファイル化されている旬別比率および各曜日、祝祭日、特例日のロードカーブにより毎日、毎時間の需要を作成することもできる。 |
| 需給シミュレーション | <p>過去の出水実績(17~51年度)をファイル化しており、豊、渇平水年度等の出水年度を指定することにより、プログラム内で、</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 貯水池式はルールカーブ法(右図)と責任放流量を考慮して各貯水池別の毎日の可能発電電力、電力量を算出する。 ○ 自流式は限界調整能力曲線(右図)により全社一括して、毎日の調整可能電力、電力量を算出する。 |
| 一般水力の供給力 | |
| 火力・原子力・揚水式水力の補修 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 各ユニットごとに補修計画(基準)をファイル化している。 ○ 基準ケースから変更する場合、変更ユニットについてのみデータを作成する。 |
| 火力・原子力の事故 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 各ユニットごとに、事故率と乱数により決定した事故日(基準)をファイル化している。 ○ 基準ケースから変更する場合、変更ユニットについてのみデータを作成する。 |
| 潮流シミュレーション | <p>地域別需要特性(月別変化、曜日別変化、日負荷曲線など)をファイル化し、プログラム内で各電気所別に全社需要に対する比率を計算して、需給シミュレーションから連系される毎日、毎時間の全社需要を各電気所別に展開する。</p> <p>火力、原子力、揚水式水力、貯水池水力については個別に各電気所への集約情報を、また、自流式水力については、各電気所別自流式水力の全社計に対する限界最大電力比率、平均電力比率、深夜最低電力比率をファイル化しており、需給シミュレーションから連系される毎日、毎時間の全社供給力をプログラム内で各電気所別に展開する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 毎年度の自社内超高圧系統構成を、その増強パターン別にファイル化しており、計算対象年度、パターンを指定することにより必要なデータを取り出せる。 ○ 系統構成を変更する場合は、変更データのみ作成する。 |
| 超高圧電気所別需要 | |
| 超高圧電気所別供給力 | |
| 超高圧系統構成 | |



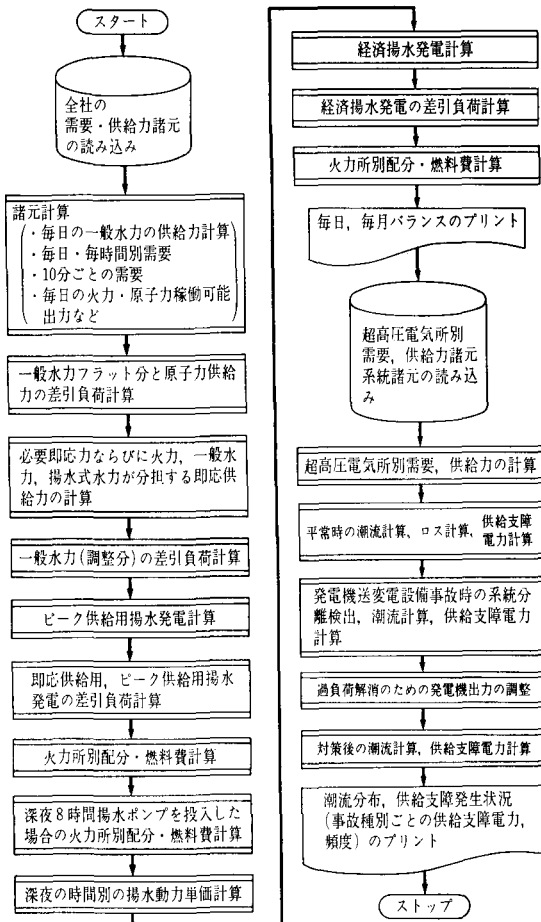


図2 概略フローチャート

このプログラムでは、負荷変動の大きい毎日の7時から14時までについて、

- ① (時間別需要) × (各月のモデル負荷曲線による10分別比率) の計算
 - ② ①の計算結果を連続した負荷曲線に修正
- の手順で10分ごとの連続したロードカーブを作成し(図3)、

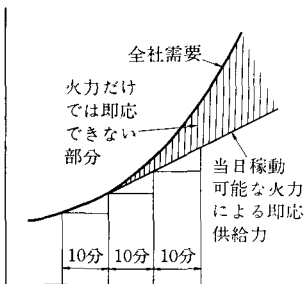


図3 火力による即応供給力の分担

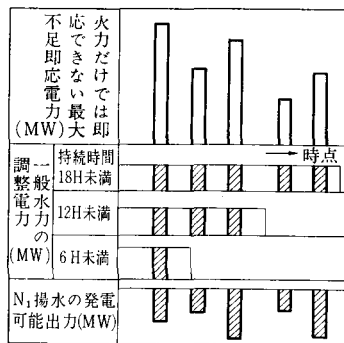


図4 一般水力・揚水発電による即応供給力の分担

④ 火力が分担する即応供給力

① 一般水力、揚水式水力が分担する即応供給力において計算を行なう。

まず、10分ごとの負荷変化と当日稼働可能な火力の出力変化率によって、火力が分担する即応供給力と火力だけでは供給できない即応供給力を計算(図3)し、1時間内の最大不足即応電力と不足即応電力量を算出する。

火力だけでは供給できない即応供給力は一般水力と揚水式水力とで分担する(図4)。

ここで一般水力は、当該日の出水、各貯水池の水位などによって、調整電力、電力量が異なるので、持続調整時間(=調整電力量/調整電力)の長さに応じて3グループに集約して、計算を簡素化した。即応供給用に使用したあとの一般水力、揚水式水力の調整電力は各時間ごとに異なるため、従来の差引負荷計算法では対応できないので、各時間ごとに調整電力の異なる水力を日負荷曲線にあてはめる新しい手法を開発した。

(2) 揚水式水力によるピーク供給発電

当該日に稼働可能な火力、原子力と一般水力の全供給力で当該日の需要に供給しても、なお供給力に不足が生じる場合に、ピーク供給用として揚水式水力の発電を行なう。

このための揚水には、当該日の深夜に揚水するケース(日間運用)と週末の軽負荷時に揚水するケース(週間運用)がある。後者の流れ図を図5に示す。

(3) 火力を揚水式水力で置き換える経済揚水発電

(a) 日間運用の場合

豊水時の深夜などに原子力が最大フラット運転をした場合、余剰電力が発生したり、排煙脱硫装置設置の火力ユニット、超臨界圧火力ユニットが最低運転をしなければならない事態が発生する。このような場合に揚水を行なって、昼間、効率の悪い上積火力を揚水発電に置き換えると、経済的にメリットを生ずる場合がある。

(i) 上積火力を停止して揚水発電と置き換える経済性

図6において、

$$\text{上積火力Lのコスト} = \text{燃料費} + \text{起動費}$$

$$\text{揚水のコスト} = \text{L火力の日量} / \text{揚水効率}$$

$$\times \text{揚水動力単価}$$

であるので、

① L火力の日量/揚水効率を揚水動力(即応供給用ピーク供給用揚水動力を除く)でまかなえること。

② 揚水のコストのほうがL火力のコストよりも安いこと、の2条件をともに、満足する場合に、L火力を停止して揚水発電と置き換える経済揚水発電が成立する。

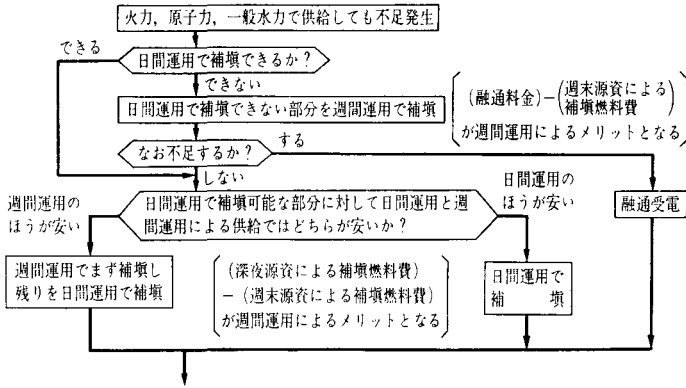


図 5 週間運用をあわせ行なう場合のピーク供給

(ii) 上積火力をしばらく運転して揚水発電と置き換える経済性

図 7 において、

M火力の増分燃料費より、毎時間の揚水発電コスト (Y_i /揚水効率) が安い場合には、M火力の最低出力以上の発電電力量を限度として揚水発電によるM火力の部分置き換えが成立する。

(b) 週間運転を行なう場合

週末に揚水する揚水動力の源資のほうが、当該日の上積火力の増分燃料費より安い場合は、日間運用の経済揚水発電に加えて週間運用による経済揚水発電が成り立つ。しかし、週末に揚水した水は、電源脱落事故など不意の供給力不足に備える必要もあるため、経済性があっても特定の日に全量使用することを避け、1日の使用水量をつぎのように制限することにした。

(最大使用量) = (週間運用用池容量) / (当日を含めた週末までの平日日数)

(4) 火力の燃料費・起動費の計算

火力燃料費の計算は、ユニット別の熱効率曲線、所内率曲線により、出力に応じた熱効率、所内率を1時間ごとに求め、S分別燃料単価により燃料費を算出する。

起動費は、需給上運転を停止したユニットについて、ユニットごとの起動費を算出する。

3. 潮流シミュレーションの機能

このプログラムは、需給シミュレーションプログラムから連系される、毎日、毎時間の、

- 全社需要
- 火力、原子力、揚水式水力の各ユニット別発電電力
- 各貯水池式水力発電電力、自流式水力発電電力 (全社一括)

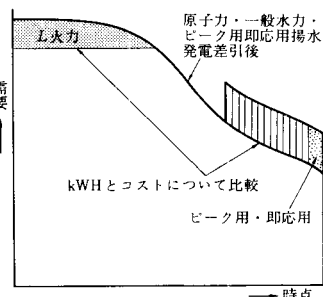


図 6 全量置き換え経済揚水発電

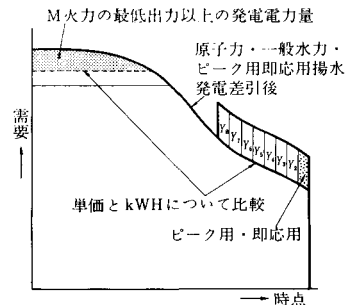


図 7 部分置き換え経済揚水発電

のデータを用いて、データファイル化した計算諸元 (表 1 参照) にしたがって超高压電気所別の需要、供給力に展開し、毎日、毎時間の潮流計算を行なうとともに以下の機能をも備えている。

(1) 平常時の送電損失電力量の計算

電力系統には電源線や負荷線が混在し、時々刻々変化する需給バランスに対応して、各送電線の電力潮流も変化する。しかも大容量電源の遠隔化、需要の増大による重潮流線路の増加などのため、送電損失電力量は上昇傾向にあるが、従来の断面計算では系統全体の送電損失電力量の把握が困難であった。

このシミュレーションでは、この点を改善して、発電機、送電線設備に事故のない状態における毎日、毎時間の潮流計算の段階で、送電損失電力の計算を合わせて行ない、送電損失電力の日電力量、月電力量、年間電力量を算出することとした。また平常時における送変電設備の過負荷の有無をもチェックして、供給支障電力を算出する。

(2) 発電機事故時の潮流計算

事故を発生させる発電所を指定することにより、当該発電所の最大発電ユニットが脱落した直後の潮流分布を求め、送変電設備の過負荷の有無をチェックするとともに供給支障電力を算出する。実系統では、発電機脱落直後は自社内の需給バランスが崩れ、負荷の周波数特性にしたがって、連系線を通じて、他社から不足分を受電するため、このプログラムでは、不足電力の他社からの受電についてもシミュレートしている。

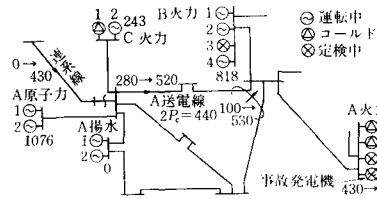
発電機脱落後はまず、できるだけ自社内で需給バランスを確保するため、運転予備力を経済順位にしたがって、ホット火力・揚水式水力の順で発動し、需給バランスを確保した状態での潮流分布を求め、送変電設備の過負荷の有無のチェック、ならびに供給支障電力の算出を行なう。

表 2 発電機脱落事故時の計算方法の具体例

状 態 図

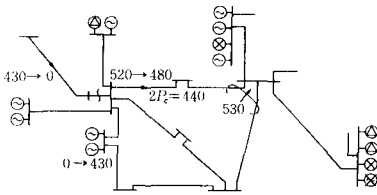
摘 要

事故直後



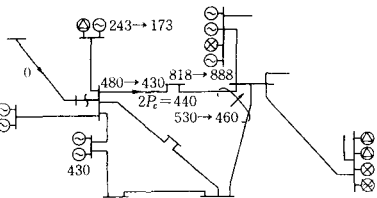
- A火力4G(430MW)に事故発生→系統より脱落
(脱落した発電機の事故前の出力に見合う電力は、他社から連系線を通して受電する)
- このような系統条件のもとで潮流分布を計算したところ、A送電線の潮流が520MWとなり、 $2P_c(=440MW)$ を80MW超過した。
(P_c とは線路の長時間容量を意味し、 $2P_c$ は2回線長時間容量のことである)

需給調整後



- 自社内の需給バランスを確保するため不足量(430MW)を増発する。
- 表3の投入順位よりA揚水に余力があるため、430MW増発させる。
- このような系統条件のもとで再び潮流分布を計算したところ、A送電線の潮流が480MWになり、 $2P_c$ を40MW超過し、過負荷となっている。

発電調整後



- 需給調整後、過負荷となっているA送電線の潮流を減少させるため、発電機の出力が変更でき、しかも潮流の低減効果(過負荷解消効果)の大きい発電所の組合せをみつけ、相互間で発電出力を振替える形で発電調整を行なう。(詳細表4,5参照)
- 本例ではB火力を70MW増発させ、C火力を70MWしぼることににより過負荷が解消できたことを示す。

表 3 発電機ユニット別の諸元表

| 発電所 | ユニット | 事故前の出力 | 出力調整可能範囲 | | 投入順位 | 備考 |
|------|------|--------|----------|-----|------|-----------|
| | | | 上限 | 下限 | | |
| A火力 | 1 | — | — | — | 13 | コールド |
| | 2 | — | — | — | 10 | " |
| | 3 | — | — | — | 3 | 定検 |
| | 4 | 430 | 437 | 123 | 6 | |
| B火力 | 1 | 134 | 208 | 134 | 9 | |
| | 2 | 342 | 342 | 143 | 7 | |
| | 3 | — | — | — | 4 | 定検 |
| | 4 | 342 | 342 | 143 | 5 | |
| C火力 | 1 | — | — | — | 12 | コールド |
| | 2 | 243 | 243 | 57 | 8 | |
| D火力 | 3 | — | — | — | 14 | コールド |
| | 4 | — | — | — | 11 | " |
| A原子力 | 1 | 538 | 538 | 538 | — | 調整能力なし |
| | 2 | 538 | 538 | 538 | — | " |
| A揚水 | 1 | 0 | 300 | 0 | 1 | ホットリザーブ扱い |
| | 2 | 0 | 300 | 0 | 2 | " |

表 5 発電所別の供給力諸元

| 発電所 | 過負荷解消効果係数 | 発電出力の調整余力 | | 備考 |
|------|-----------|-----------|------|--------------------|
| | | 出力増加 | 出力減少 | |
| A火力 | 0.6 | 120 | 330 | |
| B火力 | 0.6 | 170 | 310 | |
| C火力 | 0 | 180 | 0 | 1G:コールド 2G:最低出力 |
| D火力 | 0 | — | — | コールド |
| A原子力 | 0 | — | — | 調整能力なし |
| A揚水 | 0.1 | 0 | 600 | 1G, 2G 最大出力 |

[表3備考]

- 1) 投入順位は発電単価の安い順とする。
- 2) 本例では発電する予備力を運転予備力(ホット)だけとした。

表 4 過負荷解消のための発電調整方法の具体例

| 状 態 図 | 補 足 説 明 |
|-------|---|
| | <p>① A送電線に1回線事故発生→しゃ断した時の潮流分布を計算した結果、同線路の健全回線側の潮流が315MWとなり、$P_{15}(=295\text{MW})$を20MWほど超過した。(P_{15}とは線路の短時間容量を意味する。)</p> <p>② このような系統条件のもとで、各発電所のA送電線に対する過負荷解消効果係数(※1)および各発電所出力の調整余力を計算すると表5のような結果になった。</p> <p>③ 本例における発電調整の目的はA送電線の潮流を $P_c(=220\text{MW})$以下に抑制することである。</p> |
| | <p>④ 表5から効果係数のもっとも大きい組合せをみつけると〔A火力, C火力〕,〔B火力, C火力〕などがあるが、C火力側はすでに最低出力運転になっており、出力を低減できないからこの組合せによる発電調整はできない。</p> <p>⑤ つぎに〔A火力, A揚水〕の組合せに着目すると、発電所側だけの調整能力は120MWであるが、A火力～A揚水間の輸送経路の裕度(※2)が90MWであるとすると調整可能電力は90MWにおさえられる。</p> |
| | <p>⑥ 90MWをA火力, A揚水間で振替えると、A送電線の潮流は、$90 \times (0.6 - 0.1) = 45\text{MW}$だけ減少するが P_cに対してはまだ超過している。</p> <p>⑦ 引続いてつぎの組合せをみつけると〔B火力, A揚水〕がある。この組合せに着目すると発電所側の調整能力は170MWであり、B火力～A揚水間の輸送経路の裕度が450MWであったとすると、調整可能電力は170MWとなる。</p> <p>⑧ 170MWのうち、120MWだけB火力, A揚水間で振替えると、$120 \times (0.6 - 0.1) = 60\text{MW}$だけA送電線の潮流が減少する。</p> <p>⑨ ⑥, ⑧よりA送電線の潮流は $210\text{MW} < P_c$となり、過負荷が解消したことになる。</p> |

(※1) 過負荷解消効果係数

•たとえば上表でA火力の0.6という数値は、A火力の出力を1MW増加することにより、過負荷設備(A送電線)に0.6MWの潮流が過負荷を解消する向き。

(※2) 輸送経路の裕度

•たとえばA火力・A揚水間で発電振替をすることによ

り系統の潮流分布が変化するが、他の設備を過負荷させない範囲で振替えてできる最大電力を輸送経路の裕度とする。

•これは振替え前の潮流分布も関係してくるので、発電所の組合せが決まるとそのつど計算する必要がある。

この時点で過負荷が発生している場合は、過負荷送電線に対する過負荷解消効果係数(各地区の電源を単位量増発することにより、当該送電線の潮流を減少させることのできる割合)と発電機余力、他の送電線の裕度とを総合的に勘案して、当該過負荷設備の過負荷解消が可能か否かをチェックし、過負荷対策後の供給支障電力を算出する(表2, 3, 4, 5)。

(3) 送変電設備事故時の潮流計算

指定した送電線の1回線事故または2回線事故、ならびに連系変圧器の1バンク事故を発生させ、事故発生設備をしゃ断した後の潮流分布を求め、送変電設備の過負荷のチェックと、供給支障電力を算出する。

また、事故系統のしゃ断により、単独分離系統が発生

する場合は、分離系統の検出および、分離系統内の供給力不足を算出する。

送変電設備に過負荷が発生している場合の過負荷解消方法は前記(3)と同様である。また、分離系統発生の場合には、分離系統内の発電機ユニットの増発で対処できるか否かのチェックを行ない、バランスがとれない時には、供給支障電力を算出する。

4. アウトプット

最終のアウトプットは、需給シミュレーションでは、XYプロッタと連系してグラフ化し(図8)、毎日のピーク時需要、それをまかなう原子力、一般水力、火力・揚水式水力別の発電量、および毎日の供給予備力が一目で

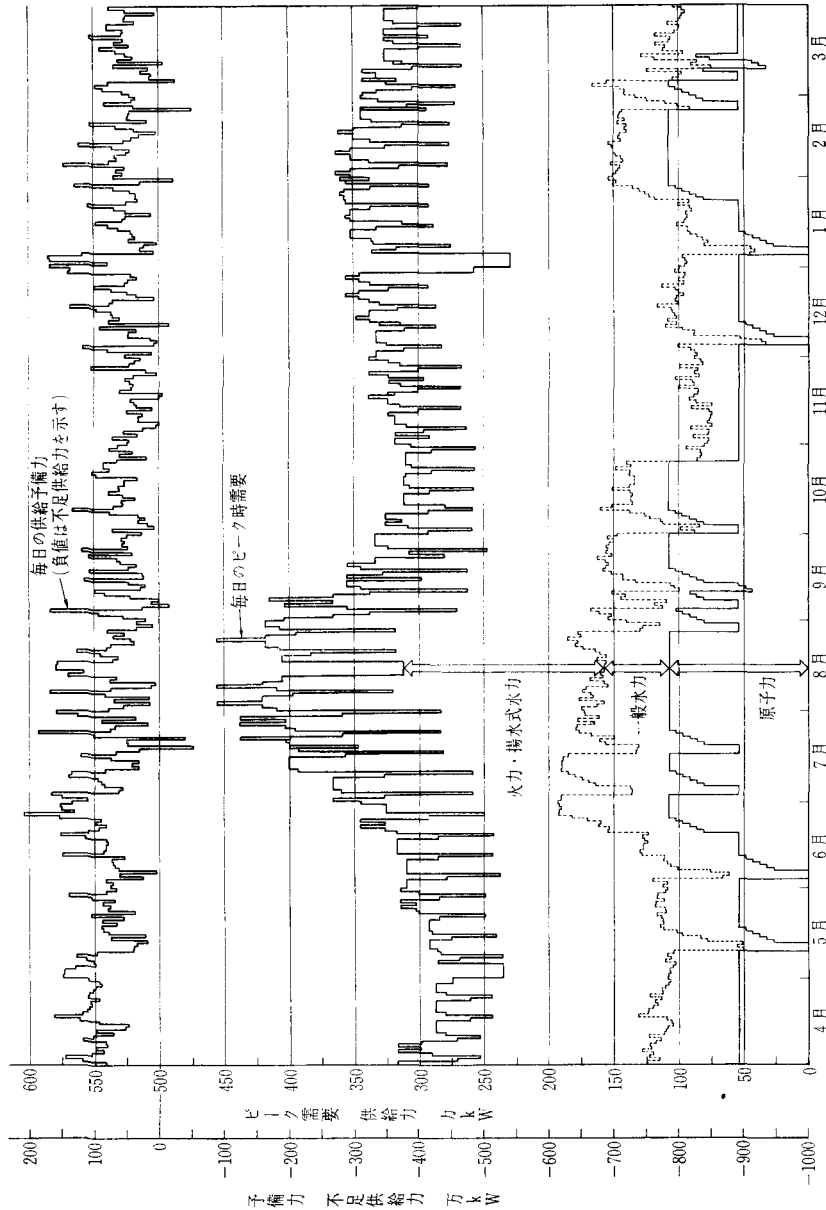


図 8 需給シミュレーション計算アウトプット例 (ピーク供給力状況)

わかるようにしている。潮流シミュレーションでは作表化している。

あとがき

今回開発した需給・潮流シミュレーションによって、当社における原子力、揚水式水力開発後の需給面、系統面の様相をきめ細かく把握できるようになったので、すでにこのシミュレーションプログラムを用いて、供給信頼度、電源構成の目標、各電源、送電線の開発規模、運開時期、系統運用面での対策などの検討に活用している。

参考文献

- [1] 松下他：昭和52年電気学会全国大会 No. 1152.
- [2] 松下他：四国電力研究期報 No. 31.
- [3] 藤岡，今岡：日本電気協会 昭和51年研究会講演論文。

(ふじはら・とおる，なだ・あきら，いまおか・もとのり，まつした・くにお，たけち・あきら，ふじおか・まさなお，いしかわ・ふみひこ，四国電力)