ファジィ協調法に基づく大規模電力システム の多目的最適運用

正員 前 川 友 哉 (東京都立大)

正員 安 田 恵一郎 (東京都立大)

正員 横 山 隆 一 (東京都立大)

正員 水 上 雄 一 (関西電力)

正員 横 山 尚 登 (関西電力)

Multi-Objective Optimal Operation of Large Scale Power System Based on Fuzzy Coordination Technique

Tomochika Maekawa, Member, Keiichiro Yasuda, Member, Ryuichi Yokoyama, Member
(Tokyo Metropolitan University), Yuichi Mizukami, Member, Naoto Yokoyama, Member
(Kansai Electric Power Co., Inc)

This paper presents an approach to obtain the optimal generation dispatch in real power system operation by solving a multi-objective optimization problem. In deciding the optimal system operation, various objectives, such as economy, quality and environmental impact, should simultaneously be attained. However, these objectives are contradictory to each other and are in trade-off relations, thus making it difficult to handle this class of problem. In the recent study, we were proposed the algorithm to treat the multi-objective optimal dispatch problems using the fuzzy coordination technique.

In the foregoing approach, however, optimization is successively conducted by nonlinear programming and the computation time is extensively increases as the size of the target power system is expanded. Thus, for the practical application of this approach to a real-scale system, we need to resort to a high-speed approximation for the reduction of computation time and storage requirement.

In this study, we propose the approach decomposed into static dispatch and dynamical adjustment so that we can apply it to a relatively large scale system. In this approach we can obtain an optimal solution by satisfying some predetermined optimality conditions, thus enabling rapid convergence and application to a real-scale system.

The effectiveness of the proposed approach is verified through numerical analysis on the test system approximating the system of Kansai Electric Power Company.

キーワード：電力系統, ファジィ理論, 多目的計画問題, 経済負荷配分, 起動停止, AFC 調整容量

1. はじめに

近年の電力システムの運用においては、経済性の追求のみにとどまらず、その他の多様な社会的要求をも勘案

した運用をなすことが必要となってきた。従って、発電費用のみを指標とした経済負荷配分 (Economic Load Dispatch; ELD) による運用では他の要求が考慮されないため、複数の目的を協調させること

が可能な運用手法の導入が必要となる。しかし、複数の目的を考慮する場合、一つの目的を達成しようとする他の目的を犠牲にしなければならないといったトレードオフ関係が存在する。しかも、これらの達成目的間には明確な優先順位が存在しないために、従来からの単一目的を対象とする手法では、こうした問題を取扱うことが困難であった⁽¹⁾。

このような問題点を解決するために、複数の目的をもつ問題を多目的計画問題 (Multi-Objective Programming; MOP) として定式化し、ファジィ協調法による最適運用状態を決定する手法を提案してきた。こうした手法を用いて、経済性、環境性などの複数の達成目的を協調した運用が可能であることを示してきた⁽²⁾。

また、大容量原子力がベース負荷の大部分をになっている大規模電力系統では、通常、火力発電機はミドル負荷あるいはピーク負荷をになうことになる。このため、火力発電機群は急峻な負荷変動に対応できることが要求される。更に、周波数偏差を極力吸収できるような出力調整能力を保持していることが望ましい。しかし、通常の運転では負荷上昇時には、発電費用の低い発電機の出力が優先的に増加されるため、これらの発電機群の一部は出力上限値に張りついて、系統全体としての出力調整能力が低下してしまうことが考えられる。また、通常の系統運用では周波数変動に対処するため AFC (Automatic Frequency Control; 自動周波数制御) がかけられているが、AFC 運用を行うためには、出力増加方向にも減少方向にも数%程度の調整容量を確保しておくことが必要となる。通常、AFC 調整容量は、あらかじめ制約をかけておくことによって確保する方法がとられている。しかし、現実にはこのように AFC 調整容量を厳密に制約として設定する必要性は乏しいと考えられるため、この部分の制約をあいまいにした多目的運用手法がこれまでに開発されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

本研究では、AFC 調整容量は出力調整幅の一部であると考え、AFC 調整容量をあらかじめ制約として設定することは行わず、経済性なども考慮しながら出力調整余力をできるだけ確保するといった柔軟な運用をなすことを試みる。従って、出力調整容量の確保を達成目的の一つであると考え、これを目的関数として取込んだ多目的動的運用に関する手法を提案する。

しかし、本手法を実規模系統に適用するにあたって、系統規模の増大に伴い所要計算時間が膨大に増加し、通常の計算機利用環境下での計算が困難となる、あるいは、運用計算の対象とすることができ時間帯が

極めて短時間の場合に限られることになる、といった問題点が生じてきた。

このような点を考慮し、本研究で開発された運用計算手法を実規模系統に適用するためには、計算時間を短縮するため高速近似解法を導入することが必要である⁽⁵⁾。そこで、本研究で用いられている評価指標は主として二次関数の形式で表現されていることに着目し、すべての評価指標を二次関数で近似し、最適解を解析的に得ることのできるラグランジュ未定乗数法を用いた手法を導入する。

更に、運用計算の対象とする時間帯をできるだけ長期にするため、発電機の起動停止を考慮した手法を導入する。これは、実際の運用においては需要の大きさに応じて発電機の運転台数を変更しているという現実に対応したものである。このため、1日の運用を考慮するにあたっては、発電機の起動パターンを考慮した運用が取扱える必要がある。本研究では、この起動停止決定手法として、優先順位法を用いた。

上述のように、本論文ではファジィ協調法に基づく電力系統の多目的運用手法を実規模系統へ適用するため、最適解を解析的に求める高速近似解法を導入する。また、発電機の起動パターンをも考慮することにより、対象となる期間が長時間にわたる運用計算が可能となる手法を提案する。更に、本手法を関西電力の実系統に適用し、その有効性を検証する。

2. 優先順位法による発電機の起動停止決定

火力発電機は、起動停止を伴うと起動損失と呼ばれる熱損失などがあるため、できるだけ連続運転することが望ましい。しかし、実際には1日における負荷需要量は昼夜間の差が大きく、夜間には一部の発電機を停止し翌朝起動する DSS (Daily Start Stop; 毎日起動停止) を行うのが普通である。火力発電機は、最低負荷運転時に比べて定格負荷運転時には熱効率が向上するので、できるだけ定格負荷運転となるように並列、解列の時期を選定する必要がある。このように、与えられた予測負荷に対して、通常、経済性を考慮した発電機の起動停止パターンが決定される⁽⁶⁾。

優先順位法による発電機起動停止決定手法では、あらかじめ何らかの方法で発電機の並列順位を決定しておき、新たに発電機の起動が必要な場合には、優先順位の高い発電機から順次系統に並列していく。また、発電機の停止が必要な場合は、優先順位の低いものから順次解列していくことになる。従って、本手法では発電機の起動費を考慮した最適な起動停止を同時に決定することはできないが、優先順位に従った起動停止

があらかじめ以下のように決定されるため、この起動停止パターンに従って、起動費を計算することもできる。

優先順位があらかじめ決められているものとする、発電機の起動台数は以下のように決定できる。

まず、予測される負荷需要に対して、負荷をになうことのできる発電機台数の集合を決定する。このとき、ピーク時には約10%程度の予備力を確保できるように、実際の予測負荷よりも予備力分だけ多めの負荷でもとれるだけの発電機台数を起動するものとする。従って、次式を満足する $N(t)$ の集合を、時刻 t における実行可能な起動台数の集合とする。

$$\sum_{i=1}^{N(t)} P_i \leq P_L(t) + P_{SR}(t) \leq \sum_{i=1}^{N(t)} \bar{P}_i \dots\dots\dots (1)$$

$\bar{P}_i, P_i$: 第 i 発電機の出力上下限值 (pu)

$N(t)$: 第 t 時間帯の発電機の起動台数 (台)

$P_L(t)$: 第 t 時間帯の総需要量 (pu)

$P_{SR}(t)$: 第 t 時間帯の予備力 (pu)

このように決定された実行可能な起動台数のすべての場合について、最経済に運用されたときの総燃料費を計算し、この総燃料費が最も小さくなる発電機の組合せをその時点での起動台数とする。

また、優先順位の決定方法としては、幾つかの方法があると考えられるが、本研究では、火力発電機は定格出力時に最経済となるように設計されていることに着目し、定格出力時の単位出力当たりの発電費用を計算し、これに基づいて優先順位を決定した。

すなわち、次式のような評価関数を与え、これに基づいて優先順位の決定を行う。

$$f_{pri} = \frac{f_c(P_i^n)}{P_i^n} \dots\dots\dots (2)$$

f_{pri} : 優先順位決定のための評価指標, P_i^n :

第 i 発電機の定格出力 (pu), f_c : 第 i 発電機の燃料費 (pu)

3. ファジィ協調法による最適化

ファジィ協調法とは、多目的計画問題の各目的関数に意思決定者のファジィ目標を特性づける「メンバシップ関数」を設定し、それらの関数を統合させることによって通常の最大化問題に帰着させ、多目的最適解を得る手法である⁽⁷⁾。すなわち、各目的関数に対して図1のようなメンバシップ関数を定義し、これらを統合した関数(ファジィ決定関数)の最大化問題を解くことにより、最適解を決定することができる。これは、一般の数理計画法にファジィ理論を適用した「ファジィ数理計画法」に基づいている。このような問題

図1 メンバシップ関数

Fig. 1. Membership function.

は、次に示すファジィ決定関数の最大化問題を解くことによって、最適解を決定することができる。

$$\begin{aligned} & \max \{ F_{DM}(x) \} \\ & F_{DM}(x) = \sum_{i=1}^N \{ \mu_i \{ f_i(x) \} \} \dots\dots\dots (3) \\ & \text{subj. to } x \in X \end{aligned}$$

F_{DM} : ファジィ決定関数, X : x の実行可能解の集合, μ_i : メンバシップ関数, $f_i(x)$: 各目的の評価関数

ファジィ協調法では、各目的ごとに定式化を行うことができるため、問題の記述が容易になり、多目的計画問題を効率良く解くことができる。また、各目的ごとの達成度を、メンバシップ関数という形で数値的に表すことができるため、運用者の意思を反映することが可能となり、解の定量的な評価も容易に行える。

4. 定式化

〈4・1〉 評価指標の定式化 出力調整容量の評価指標、経済性指標、環境性指標については以下に述べるような二次関数によって定式化される。このように、評価指標を二次関数で表現すると、ファジィ協調法を用いて多目的最適解を求める際に用いるファジィ決定関数も二次関数となるため、最適解を容易に求めることができる。

(1) 出力調整容量 出力調整を伴う発電機は、負荷が増加したときにも減少したときにも対応することが必要であるため、現運転点からの出力の増加方向だけでなく減少方向にも調整余力を確保しておかなければならない。

従って、

(i) 現時点の出力と出力上限値との差

(ii) 現時点の出力と出力下限値との差

のうちいずれか小さいほうを現時点で確保されている調整容量であると考え、(4)式のように定式化できる。このように、出力調整が可能な発電機各々について、出力調整幅をある程度確保しておくことによ

図 2 出力調整容量の評価指標

Fig. 2. Evaluation index of regulation capacity.

り、予測値を上回る負荷変動に対しても調整が可能である。

$$F_R(t) = \sum_{i=1}^{K(t)} \min(\bar{P}_i - P_{Gi(t)}, P_{Gi(t)} - \underline{P}_i) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$F_R(t)$: 第 t 時間帯の調整容量評価指標

$P_{Gi(t)}$: 第 t 時間帯の発電機 i の有効出力 (pu)

$\bar{P}_i, \underline{P}_i$: 発電機 i の出力上下限值 (pu)

$K(t)$: 調整用発電機の台数 (台)

上記の(4)式は離散関数となるため取扱いが困難であり、特に本手法においては最適解の決定にラグランジュ未定乗数法を用いているため、取扱うことができない。従って、二次関数で近似した発電機の調整容量を評価するための評価指標を導入する必要がある。

そこで、以下に示すような評価指標を導入する。

$$F_R(t) = \sum_{i=1}^{K(t)} \left(P_{Gi(t)} - \frac{\bar{P}_i + \underline{P}_i}{2} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

上式を図示すると図2のようになる。発電機出力が出力上限値あるいは出力下限値に等しいときは、この評価指標の値は最大になる。このように出力が上下限値に張りついている場合は、一方向にしか出力変化で

きないため、調整容量は全く確保されていないと考えられる。

発電機出力が出力上限値または出力下限値から遠ざかるにつれて評価指標の値は減少し、発電機出力が出力上下限値の中間の値をとるときに評価指標は最小となる。このように、出力上下限値の中間の値をとるときは、出力の増加方向にも減少方向にも最大限の出力変化が可能であるため、この運転点では最大の調整容量が得られていると考えることができる。従って、この指標を最小化することによって最適化が図られることになる。

評価指標とメンバシップ関数との関連は図2に示すとおりである。すなわち、系統運用者が最大限満足できる場合の評価指標の値と最小限許容できる場合の評価指標の値を、それぞれメンバシップ関数のパラメータとして設定する。このように、系統運用者の選好をメンバシップ関数に反映させることにより、運用者の意思を反映した系統運用を試みることができる。

(2) 経済性指標 経済性指標としては、火力発電機の燃料費を考える。火力発電機の燃料費特性関数は、通常次のように発電機出力の二次関数として近似される⁽⁸⁾。

$$F_c(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} (a_i P_{Gi(t)}^2 + b_i P_{Gi(t)} + \gamma_i) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$F_c(t)$: 対象期間での総発電燃料費用 (円)

$P_{Gi(t)}$: 第 t 時間帯の発電機 i の有効出力 (pu)

a_i, b_i, γ_i : 第 i 発電機の発電費用特性係数

$N(t)$: 第 t 時間帯で運転中の発電機台数 (台)

(3) NO_x 排出量特性関数 環境保全に対する指標として、窒素酸化物 (NO_x) 排出量を用いる。これは、発電機出力の二次関数と指数関数の和で表される⁽⁹⁾。

$$F_R(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} [a_i P_{Gi(t)}^2 + b_i P_{Gi(t)} + c_i + d_i \exp(e_i P_{Gi(t)})] \quad \dots\dots\dots (7)$$

$F_R(t)$: 対象期間での NO_x 排出量 (t)

$P_{Gi(t)}$: 第 t 時間帯の発電機 i の有効出力 (pu)

a_i, b_i, c_i, d_i, e_i : 第 i 発電機の排出量特性係数, $N(t)$: 運転中の発電機台数 (台)

本手法では、最適解決定においてラグランジュ未定乗数法を用いるため、評価指標を各発電機出力の二次関数として設定することが必要となる。従って、次式のとおり出力の二次式で近似する。

$$F_R(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} (a_i P_{Gi(t)}^2 + b_i P_{Gi(t)} + c_i) \quad \dots\dots\dots (8)$$

〈4.2〉 制約式の定式化 有効電力配分において

は、需給平衡を満足したうえで、発電機出力の上下限制約、発電機の応答速度などを考慮する必要がある。これは、次のように定式化される。

(1) 需給バランス制約 電力の供給においては、需要と供給のバランスを保つために、すべての時間帯において発電機出力の総和は、負荷需要の総和に一致していなければならない。

$$\sum_{i=1}^N P_{Gi(t)} = P_{D(t)} \quad (t=1, 2, \dots, T) \dots\dots\dots (9)$$

$P_{D(t)}$: 第 t 時間帯の総需要量 (pu)

(2) 発電機出力上下限制約 個々の発電機には、それぞれ供給できる出力の上下限があり、この範囲内でそれぞれの発電機は、負荷を分担しなければならない。

$$P_{Gi} \leq P_{Gi(t)} \leq \bar{P}_{Gi} \quad (i=1, 2, \dots, n) \dots\dots\dots (10)$$

P_{Gi} , $\bar{P}_{Gi}$: 発電機出力の下限, 上限値 (pu)

(3) 発電機応答速度制約 各時間ごとに負荷が変動するような動的なモデルでは、発電機出力の応答速度を考慮する必要がある。すなわち、発電機の単位時間当たりの出力変化量は発電機の応答限界を超えることはできない⁽¹⁰⁾。

$$\Delta P_{Gi} \leq P_{Gi(t)} - P_{Gi(t-1)} \leq \Delta \bar{P}_{Gi} \quad (i=1, 2, \dots, n) \dots\dots\dots (11)$$

ΔP_{Gi} : 出力降下速度の上限値 (pu)

$\Delta \bar{P}_{Gi}$: 出力上昇速度の上限値 (pu)

5. 実規模システムへの適用

〈5・1〉 実規模システムへの適用手法 これまでに開発してきた手法は、前章で示した定式化を用いてファジィ決定関数を定義し、これに対して非線形計画法に基づいた最適化計算を行うことにより、最適運用状態を決定してきた。また、メンバシップ関数のパラメータの決定に際しては、システム運用者にパラメータを決定する情報を提供するために、最適潮流計算を含む単一目的における最適化計算を行った。このような手法を用いると、システム全体の状態および各発電機特性を考慮した高度な運用計画の立案が可能である。しかしながら、潮流計算とともに逐次行われる非線形最適化に基づく手法では、対象とするシステムの規模が増大するに伴い所要計算時間が急激に増加することになる。また、最適化計算を行うにあたり、各評価指標についての全時間帯総和を目的関数として設定しているため、大規模システムにおいては計算機記憶容量が膨大になり、運用計算の対象とすることができる時間帯が極めて短時間の場合に限られることになる。

以上のような点を考慮し、本研究で開発された多目

的需給運用計算手法を実規模システムに適用し、オンライン運用システムに供するためには、計算時間の短縮および記憶容量の削減のため、高速近似解法を導入することが必要となってきた。

そこで、本研究で用いられる評価指標は主として二次関数の形式で表現されていることに着目し、ラグランジュの未定乗数法を用いて最適解を決定する手法を導入する。この手法では、あらかじめ設定された最適条件を解くことによって最適解を得ることが可能であるため、計算時間が高速で大規模システムにも適用可能である。また、本手法では動的負荷配分問題を静的負荷配分と動的調整とに分離して考えているため、対象とする時間帯が比較的長時間にわたる場合でも適用が可能である⁽¹¹⁾。

〈5・2〉 ラグランジュ未定乗数法による最適解の決定 発電機出力に関する二次関数になっている目的関数の最小値は、送電損失を無視して考えた場合、ラグランジュの未定乗数法によって次のように解くことができる。

負荷需要 P_D が与えられているときの各発電機の出力配分は、需給平衡を保ちながら目的関数を最小とするように決定する。各発電機出力を $P_1, P_2, \dots, P_N$ とし、そのときの各機の目的関数を $F_1(P_1), F_2(P_2), \dots, F_N(P_N)$ とすれば、最適負荷配分問題は以下のように記述される。

$$\begin{aligned} \min f &= \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \\ \text{subj. to } P_D &= \sum_{i=1}^N P_i \end{aligned} \dots\dots\dots (12)$$

これに、ラグランジュの未定乗数法を適用し、

$$\phi = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) + \lambda (P_D - \sum_{i=1}^N P_i) \dots\dots\dots (13)$$

を最小とする条件

$$\frac{\partial \phi}{\partial P_i} = \frac{dF_i}{dP_i} - \lambda = 0 \dots\dots\dots (14)$$

を解けば、次式により最適な発電機の出力配分が定まり、これは経済負荷配分における等 λ 法である。

$$\lambda = \frac{dF_1}{dP_1} = \frac{dF_2}{dP_2} = \dots = \frac{dF_N}{dP_N} \dots\dots\dots (15)$$

本論文の他の目的関数もすべて発電機出力の可分離型の二次関数であるため、(3)式のファジィ決定関数の最適化は上述の等 λ 法をそのまま適用することにより、容易に最適解を得ることができる。

〈5・3〉 負荷配分の動的調整⁽¹¹⁾

(1) 平衡調整可能時点の決定 負荷変動が急激なときは、ある発電機について給電指令値に対して応答できない、すなわち応答速度制約を満足できない場

図 3 平衡調整可能時点の決定
Fig. 3. Determination of adjustable time zone.

図 4 負荷配分の動的調整
Fig. 4. Dynamic adjustment of load dispatch.

合が生じることが考えられる。このような場合はこの時点点を「応答不可能時点」として定義し、適当な時間帯だけさかのぼって再計算することにより、応答不可能時点時点で応答可能となるような動的調整を行うことが必要である。このように再計算する場合、どの時点までさかのぼればよいかといった時点を決定する必要がある。この時点、すなわち、応答速度制約を最大限使ったときに応答不可能時点の給電指令値に応答できるような、最も新しい時間帯を「平衡調整可能時点」と定義する。

平衡調整可能時点の決定には以下に示す判別式を用いる。この判別式を満たす最大の j を求め、この j 時

点を平衡調整可能時点とする。

$$\left. \begin{array}{l} \text{負荷増加時} \\ P_{Gi(j)} > P_{Gi(k)} - (k-j)\Delta P_{Gi} \\ \text{負荷減少時} \\ P_{Gi(j)} < P_{Gi(k)} + (k-j)\Delta P_{Gi} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

$P_{Gi(k)}$: 第 k 時間帯の発電機 i の有効出力 (pu)

ΔP_{Gi} : 発電機 i 出力変化速度 (pu/3 min)

k : 応答不可能時点, j : 平衡調整可能時点

(2) 平衡調整可能時点からの動的調整 平衡調整可能時点が決定されると、この平衡調整可能時点から応答不可能時点までの動的負荷配分計算を再び行う。このときは、各時間帯の出力ゾーンを厳しく限定することにより、平衡調整可能時点から応答不可能時点までの負荷調整を行う。

負荷上昇時の場合、このときの出力ゾーンは、

- ① 応答不可能時点からの応答速度を考慮した点
- ② 調整可能時点からの応答速度を考慮した点
- ③ 発電機の出力下限値

のうち、最も大きいものを、この時間帯の出力ゾーンの下限值として設定して計算する。

また、負荷減少時の場合も同様に、

- ① 応答不可能時点からの応答速度を考慮した点
- ② 調整可能時点からの応答速度を考慮した点
- ③ 発電機の出力上限値

のうち、最も小さいものを、この時間帯の出力ゾーンの上限值として設定して計算する。

従って、動的調整では、各時間帯における発電機出力ゾーンを次のように設定しなおして再計算すればよい。

(i) 負荷増加時の出力ゾーン下限値の設定

$$\underline{P}_u(t) = \max(P_{Gi(t-1)} - (t-1)\Delta P_{Gi}, P_{Gi(t-1)} - \Delta P_{Gi}, \underline{P}_i) \dots\dots\dots (17)$$

(ii) 負荷減少時の出力ゾーン上限値の設定

$$\bar{P}_u(t) = \min(P_{Gi(t-1)} + (t-1)\Delta P_{Gi}, P_{Gi(t-1)} + \Delta P_{Gi}, \bar{P}_i) \dots\dots\dots (18)$$

$\bar{P}_u(t)$, $\underline{P}_u(t)$: 発電機 i の出力ゾーン上下限值 (pu)

$\bar{P}_i$, $\underline{P}_i$: 発電機 i の出力上下限值 (pu)

<5・4> 最適決定手順 今回導入する手法は、発電機応答速度制約付の静的負荷配分を繰返し行い、応答速度を満足できなくなった時点で調整可能時点までさかのぼって再計算を行う。

[Step 1] 各発電機特性等を示す係数など初期データの読み込み、および最適化対象期間の予測負荷データの読み込みを行う。

図 5 最適決定手順

Fig. 5. Procedure to determine optimal solution.

〔Step 2〕 与えられた負荷データに対して、優先順位法に基づいた発電機の起動停止の決定を行う。

〔Step 3〕 需給平衡、発電機出力上下限、前時間帯からの発電機出力変化速度等の制約条件のもとで、各対象時間帯について各目的の単一目的での最適解を求め、この値を参考に各目的ごとのメンバーシップ関数を設定する。

〔Step 4〕 〔Step 3〕で設定されたメンバーシップ関数をファジィ決定関数として統合し、これを最適化計算における目的関数として設定する。

〔Step 5〕 等入法による静的負荷配分計算を行う。

〔Step 6〕 発電機応答速度制約が満足できなくなった時点（応答不可能時点）が生じた場合、調整が

可能な時点（平衡調整可能時点）を判別式により決定する。応答速度が満足されていれば、時間帯を更新して〔Step 5〕に戻る。

〔Step 7〕 平衡調整可能時点から応答不可能時点までの再計算を行ってから、時間帯を更新し、〔Step 5〕に戻る。

〔Step 8〕 対象期間の全時間帯について計算終了後、負荷配分結果を出力する。

6. シミュレーション

〈6・1〉 適用系統 ここでは、これまでに述べてきたファジィ協調法に基づいた手法を関西電力のELDシステムを模擬したモデルシステムに適用し、その有効性を検討する。考慮すべき発電・受電方式は、火力発電、水力発電、原子力発電、他社受電および融通電力とし、これらにより負荷をになうものとする。しかし、本手法では制御対象を給電指令が可能な火力発電（50機）のみとしているため、火力発電機以外の設備については系統データの取扱いに留意する心要があり、以下のように取扱うこととする。

火力発電機の発電機特性は、関西電力の実データを用い、これを給電指令の対象とする。原子力発電機は定格出力で一定出力運転されているものとし、試運転中およびスケジュール運転中の火力発電設備については、実績値に基づいて発電機出力をデータとして与える。更に、他社所有の発電設備からの受電および相互接続点における融通電力についても、実績値を基にデータとして与える。

また、水力発電所は実際には制御が可能であるが、本手法は火力発電機のみを出力制御の対象としているため、これを実績値に基づいてスケジュール運転されているものと仮定して取扱う。

〈6・2〉 シミュレーション結果 ここでは、負荷の立上り時である午前8時30分から午前11時までに、本手法を関西電力の系統に適用した結果を示す。

図6に示される1日の負荷パターン（火力発電機分担分）に対して第2章で述べた優先順位法を用いることにより、図7に示される起動台数が決定できる。運用計算の対象となっている午前8時30分から午前11時までの起動台数の詳細を、図9に示す。

ここでは、通常の経済負荷配分（ELD）により、経済性のみを目的として運用した場合、ファジィ協調法を適用して運用した場合（ファジィ協調法）についてシミュレーションを行った。

図10および図11は、各目的の満足度の和を示して

図 6 火力分担分負荷
Fig. 6. Load demand for thermal units.

図 9 発電機起動台数 (8:30~11:00)
Fig. 9. Unit commitment (8:30~11:00).

図 7 1日の発電機起動パターン
Fig. 7. Unit commitment of the target day.

図 10 各目的の満足度 (ELD 運転時)
Fig. 10. The degrees of satisfaction (ELD).

図 8 負荷需要 (8:30~11:00)
Fig. 8. Load demand (8:30~11:00).

図 11 各目的の満足度 (ファジィ協調運転時)
Fig. 11. The degrees of satisfaction (fuzzy coordination).

いる。ここで、メンバシップ関数のパラメータは、電力会社の方針や系統の状態などを考慮して意思決定者が主観的に与えるあいまい量である。従って、各目的が十分満足されているか否かは、運用計画を立案する意思決定者が会社の運用方針や運用状態を加味して主観的に決定するものであり、メンバシップ関数の値に

よって定量的に示される。もし、メンバシップ関数の値が1に近ければ各目的が非常に満足されていると判断し、メンバシップ関数の値が0に近ければ不十分で

図 12 各目的の評価指標の値
Fig.12. The values of the evaluation indices.

あると判断する。図 10 の ELD 運用では経済性以外の目的の満足度が著しく劣っているが、図 11 のファジィ協調運用では経済性の満足度がわずかに劣っているが、他の目的が大きく改善されている。

図 12 は各評価指標の値を示している。これらの評

価指標は、〈4・1〉節で定義したように、値が小さいほどその目的の達成度は高い。

これらの結果から、通常の ELD 運転に比べてファジィ協調法を適用した場合には、経済性は多少犠牲にしても他の目的を大きく改善できている。また、各目的の満足度の和もファジィ協調時には高い値を示しており、すべての目的をできるだけ満足させるといった解が得られている。

また、計算時間については、非線形計画法に基づく手法では大型計算機を用いて約 12 分かかっていたのに対し、今回導入した高速近似解法による手法では、パーソナルコンピュータ (PC 9801-RX) を用いて、約 3 分で計算が終了した。従って、大型計算機を利用することにより、3 分ごとに需給運用の計算を行い負荷配分を決定するオンライン運用への適用が可能である。

7. ま と め

本研究では、ファジィ協調法に基づく電力系統の多目的運用手法を実規模系統に適用するための高速近似解法の導入を提案した。

実系統の適用にあたっては、計算時間の短縮、計算機記憶容量の削減といった問題が生じていた。従って、計算時間の短縮を図るため、評価指標を二次関数で近似し解を解析的に求める手法を導入した。また、計算機記憶容量の削減のため、全時間帯の目的関数を統合した関数を扱うのではなく、最適化計算を時間帯ごとの静的配分計算と動的調整計算に分離して扱う手法を導入した。この考え方によれば、原理的には、対象期間が十分長い場合であっても解を得ることができる。

また、発電機の起動台数についても、その運用期間中不変であると仮定するのは実際的ではなく、発電機の起動停止を伴う長期にわたる運用計算をすることが必要となっていた。そこで、実運用といった観点から、発電機の起動停止を考慮した手法を導入した。これにより、長時間にわたる運用計算を行うことができる。

また、関西電力の系統に適用した結果、火力発電機の運用において複数の目的を協調した妥当な解が得られていることが示された。

出力調整容量を考慮した電力系統の多目的最適運用にファジィ協調手法を用い、高速近似解法を導入して解くことによって、以下のような利点が得られた。

メンバシップ関数を用いたファジィ協調法を用いることにより、従来の最適化手法では取扱いが困難であった多目的計画問題を効率的に解くことができる。ま

た、各目的の評価指標を二次関数で表現すると、ファジィ決定関数も二次関数となるため、最適条件を解くことによって、解を得ることができる。更に、メンバシップ関数を用いて系統運用者の意思を反映させることができるため、運用者の経験・知識に基づいて適切なメンバシップ関数を設定することができれば、より実際に即した系統運用が可能である。

今後、更に運用者の意思を適切に反映した運用を行うためには、適切な関数回帰手法を導入することにより、メンバシップ関数の設定を行う手法を組込んでいくことが必要である。

(平成4年2月3日受付, 同4年6月29日再受付)

文 献

- (1) 玄・井田: 線形計画・目標計画プログラム (昭59) 電気書院
- (2) 松本・横山・新村: 「ファジィ協調に基づく動的有効電力配分法」, 電気学会電力技術研資, PE-89-182, 85 (平元)
- (3) 前川・安田・横山・大槻・水上: 「AFC調整容量を考慮した多目的動的負荷配分」, 平3電気学会電力・エネルギー部門大会 (論文I)-4, p.19
- (4) T. Maekawa, K. Yasuda, R. Yokoyama, H. Ohtsuki & Y. Mizukami: "Fuzzy Coordination of Economy, Security and Quality in Power System Generation Control", Third International Conference on Power System Monitoring and Control IEE U.K., p.174 (1991)
- (5) 前川・安田・横山・大槻, 水上: 「ファジィ協調法に基づく多目的運用の実規模系統への適用」, 電気学会電力技術研資, PE-91-3, 21 (平3)
- (6) 関根・林・芹沢・豊田・長谷川: 電力系統工学 (昭54) コロナ社
- (7) 坂和・湯峯・南後: 「多目的非線形計画問題に対する対話型ファジィ意志決定」, 信学論A, J66-A, 1243 (昭58-12)
- (8) A.M.Sasson: "Nonlinear Programming Solution for Load-Flow, Minimum Loss and Economic Dispatching Problems", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., PAS-88, 399 (1969)
- (9) M. R. Gent & J. W. Lamont: "Minimum-Emission Dispatch", *ibid.*, PAS-90, 2650 (1971)
- (10) 北内・餘利野・田村: 「Feasibilityの高いオンライン火力機経済負荷配分法」, 電学論B, 107, 131 (昭62-3)
- (11) 周・安田・横山: 「オンライン動的負荷配分のための一手法」, 平3電気学会全大, p.246
- (12) 青木・横山: 「発電機の応答速度を考慮した動的な経済負荷配分法」, 電気学会電力技術研資, PE-86-99, 81 (昭51)
- (13) R. Yokoyama, S. H. Bae, T. Morita & H. Sasaki: "Multiobjective Optimal Generation Dispatch Based on Probability Security Criteria", IEEE Trans. Power Syst., 3, No. 1, 317 (1988)

前川 友哉 (正員)

昭和42年6月20日生。平成4年3月東京都立大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月関西電力(株)入社。神戸電力所制御通信課に勤務, 現在に至る。主として, 大規模電力システムの最適運用に関する研究に従事。

安田 恵一郎 (正員)

昭和35年9月10日生。平成元年3月北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月東京都立大学工学部助手, 3年4月同工学部助教授となり, 現在に至る。主として, 大規模システムの計画・運用・制御に関する研究に従事。工学博士。OR学会, システム制御情報学会, 電気設備学会会員。

横山 隆一 (正員)

昭和19年8月25日生。48年3月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。49年4月(株)三菱総合研究所入社。53年9月東京都立大学工学部助教授, 平成元年4月同教授となり, 現在に至る。主として, 大規模システムの計画・運用・制御, デジタルシステム制御, エキスパートシステム, ファジィ理論応用に関する研究に従事。工学博士。計測自動制御学会, システム制御情報学会, 電気設備学会, CIGRE, IASTED, IEEE 会員。

水上 雄一 (正員)

昭和18年10月15日生。42年3月東京大学工学部電子工学科卒業。42年4月関西電力(株)入社。平成元年12月同社総合技術研究所主席研究員となり, 現在に至る。主として, 電力システムの運用およびその技術開発に従事。

横山 尚登 (正員)

昭和30年2月21日生。48年3月兵庫県立兵庫工業高等学校電気科卒業。同年4月関西電力(株)入社。現在, 同社系統運用部系統技術課に勤務。主として, 電力システムの解析および安定化技術の開発に従事。