パラメータのファジィネスと多目的性を考慮した 動的負荷配分

学生員 繆 智 勇 (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)

Dynamic Load Dispatching Considering Parameters' Fuzziness and Multi-Objectivity

Zhiyong Miao, Student Member, Keiichiro Yasuda, Member, Ryuichi Yokoyama, Member (Tokyo Metropolitan University)

In this paper, we present a new planning technique based on fuzzy set theory in order to solve the dynamic load dispatching problem. In some conventional studies on the dynamic load dispatching, the fuzziness of some parameters which is made by expert's experience and knowledge has been ignored. Furthermore, the fuzziness of the coordination of various objectives, such as economy and the total adjustable capacity of generation, has also been left out of consideration. In this paper, the fuzziness of the load forecast is selected as the fuzziness of parameters, and the fuzziness of the evaluation of economy and the total adjustable capacity of generations are selected as fuzziness of decision making. These fuzziness are treated as fuzzy sets, respectively. Under the fuzzy environment, the fuzzy dynamic load dispatching method is developed on the basis of the Bellman-Zadeh maximizing decision. Arbitrary shape of membership functions can be used in the proposed approach, since the method is based on the dynamic programming technique. The effectiveness and feasibility of the proposed approach are demonstrated on a typical power system model.

キーワード：電力系統工学，動的負荷配分，多目的最適化，動的計画法，ファジー数理解画法

1. はじめに

電源の硬直化や負荷変動の増大を背景に，近年，電力系統における動的負荷配分問題は，ますますその重要性を高めている。更に，信頼性や環境保全性をはじめとする系統運用に対する要求の多様化・高度化⁽¹⁾，あるいは負荷予測の困難さに代表されるようなあいまいな要因の増大などに伴い，このような状況への十分な適応が動的負荷配分問題における重要な課題となってきた。

しかしながら，動的負荷配分に関するこれまでの多くの研究^{(2)~(6)}は，クリスプな制約条件のもとで経済性などの単一目的を最適化する数理解画問題として定式化され，解かれてきた。更に，これらの最適化手法は従来の数理解画手法に基づいているため，実際の動的負荷配分において重要な役割をになっている，多目的性やパラメータに内在する言語的なあいまいさ(ファジィネス)を取り扱うことが極めて困難である。

これらの問題点に対して，著者らはファジー協調法に基

づいて，多目的負荷配分の決定手法を提案してきた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。これらの手法では，それぞれの目標に対するメンバシップ関数を線形関数として構成することにより，多目的協調に対する計画者の意思を動的負荷配分に近似的に取り込んでいる。しかしながら，メンバシップ関数として線形関数を用いるため，運用者の意思を忠実に反映することが困難であり，更にこれらの手法は基本的に従来の数理解画法に基づく手法であるため，負荷予測などのパラメータのファジィネスを取り扱うことも困難である。

このような問題点を解決し，多目的性とパラメータのファジィネスを同時に考慮可能な動的負荷配分を決定するため，本論文では言語的なあいまいさを含む，いわゆる多目的ファジー数理解画問題として動的負荷配分問題を新たに定式化する(以下，本論文では「多目的ファジー動的負荷配分」と呼ぶ)とともに，動的負荷配分をファジー動的計画法⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾に基づき決定する手法を提案する⁽⁹⁾。

本論文の新規性は，

(i) 電力系統をとりまく現状を踏まえ，動的負荷配分

問題を多目的ファジー数理計画問題として新たにとらえ直した。

- (ii) Ballman-Zadeh の最大化決定およびファジー動的計画法を適用することにより、動的負荷配分問題における多目的協調とパラメータのファジィネスを取り扱うアルゴリズムを構築した。

ことにあり、更に有用性は、

- (i) 動的計画法に基づいているため任意の形状のメンバシップ関数が取扱い可能であり、動的負荷配分における意思決定者の主観を忠実に反映できる。
(ii) 理論的な限定操作およびヒューリスティックな限定操作、更には逐次近似法の適用により、動的負荷配分のオンライン性に十分耐えうる高速性を有する。

ことにある。

以下、本論文では第2章において、提案手法の概要について述べ、更に第3章では本論文で考慮する各種ファジィネスを示す。最後に第4章では、10台の火力発電機を表するモデルシステムに提案手法を適用し、その有効性を検証する。

2. パラメータのファジィネスと多目的性を考慮した動的負荷配分

本章ではまず、〈2・1〉節において、本論文で提案する新たな動的負荷配分問題の定式化を与え、その問題構造の特徴を明らかにするとともに、適用する方法論との関係を明らかにする。続いて、〈2・2〉節と〈2・3〉節では、多目的ファジー動的負荷配分決定手法を構築する際に適用するファジー動的計画法と計算量軽減対策についてそれぞれまとめる。最後に〈2・4〉節において、ファジー動的計画法および計算量軽減対策を適用した多目的ファジー動的負荷配分決定手法を示す。

〈2・1〉 多目的ファジー動的負荷配分問題の定式化

従来の動的負荷配分問題は、クリスプ(非ファジー)な制約条件のもとで経済性などの単一目的を最小化する数理計画問題として定式化され解かれてきた。しかしながら、このような定式化では近年の系統運用に対する多様な要求、更には負荷予測の困難さなどに代表されるあいまいな状況に対応することは困難である。

このような現状を踏まえ本論文では、動的負荷配分問題を多目的かつパラメータのファジィネスを含む、いわゆる多目的ファジー数理計画問題として新たに次式のように定式化する。

$$\left. \begin{array}{ll} \max & G\{X(t)\} \\ \text{subj. to} & \zeta\{X(t)\} = \tilde{Q} \dots\dots\dots (1) \\ & C\{X(t)\} \leq 0 \end{array} \right\}$$

ここで、

$$X(t) = [x_1(t), \dots, x_N(t)]^T : N \text{ 次元ベクトル}$$

$$G\{X(t)\} = [g_1\{X(t)\}, \dots, g_K\{X(t)\}]^T$$

: K 個のファジー目標

$$\zeta\{X(t)\} = [\zeta_1\{X(t)\}, \dots, \zeta_M\{X(t)\}]^T$$

: M 個のファジー制約

$$\tilde{Q} = [\tilde{q}_1, \tilde{q}_2, \dots, \tilde{q}_M]^T$$

: M 個のファジー集合

$$C\{X(t)\} = [c_1\{X(t)\}, \dots, c_J\{X(t)\}]^T$$

: J 個のクリスプ制約

動的負荷配分問題においては、 g_i は発電コスト・信頼性などの言語的な目標、 $\tilde{q}_i$ は負荷予測のファジィネスなど、 c_i は発電機の出力上下限などに相当する。

このように定式化された動的負荷配分問題の特徴は

- (1) 各種のファジィネスを含む。
- (2) 時間に関して動的な問題である。
- (3) 意思決定者の主観を忠実に反映するために、任意形状のメンバシップ関数が扱えることが要求される。
- (4) オンライン問題として、オンライン性に十分耐えうる高速性が要求される。

ことにある。

上述のような特徴を踏まえ本論文では、まず特徴の(1)に対しては、Ballman-Zadeh の最大化決定⁽¹¹⁾を適用することにより、パラメータのあいまいさと多目的協調のあいまいさを統合している。

また、特徴の(2)と(3)については、目的関数や制約条件式の凸性や微分可能性を必要とせず、動的問題に適用可能なファジー動的計画法を用いている。しかしながら、動的計画法は問題の次元の増加に伴いその計算量が指数関数的に増大し、特徴(4)の高速性が必ずしも満足されない。そこで本論文では、更に逐次近似法と限定操作を導入することにより、大規模システムにおける計算量軽減を図っている。

〈2・2〉 ファジー動的計画法⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ ファジー動的計画法は、元問題に内在するファジィネスをファジー決定の概念に基づき統合したうえで、何らかの意思決定戦略を用いて動的計画法を適用するものである。つまり、多段決定過程の各段・各状態における最適決定は、メンバシップ関数によって特徴づけられるファジー目標およびファジー制約の最小成分(最小満足度)で評価され、多段決定過程全体を通して最も望ましい方策(最適決定を一次元の系列に並べたもの)となるように決定される。

さて、ファジー動的計画法を適用するにあたって、「各段・各状態の評価、すなわち各段・各状態における最適決定をいかなる戦略で評価するか」をあらかじめ選定しなければならない。つまり、代替案集合上のファジー決定のなかから、ファジー決定のメンバシップ関数を考慮した最も望ましい代替案を選択するための戦略が必要となる。

通常、ファジー決定における意思決定戦略として、最大化決定(maximizing decision)⁽¹¹⁾が用いられている。最大化決定は、「ファジー決定に帰属する度合が最大である代替案を最適決定として選択する」というものであり、これまでに提案されている意思決定戦略のなかでも、最小満足

度を最大化するという意味で、人間の常識的な状況認識(意思決定)に最も合致しているものの一つであるとされている。最大化決定は、ファジー決定を特徴づけるメンバシップ関数の値を最大化することと等価であり、 K 個のファジー目標と M 個のファジー制約とで構成される問題を考えた場合の関数漸化式は以下のように構成される。

$$\left. \begin{aligned} \mu_i^{\bar{D}}\{X(t)\} &= \max_{U(t)^{\min} \leq U(t) \leq U(t)^{\max}} \\ &[\min \{ \mu_i^{g^1}\{X(t-1), U(t)\}, \\ &\dots, \mu_i^{g^K}\{X(t-1), U(t)\}, \mu_i^{\bar{q}^1}\{X(t-1), \\ &U(t)\}, \dots, \mu_i^{\bar{q}^M}\{X(t-1), U(t)\}, \\ &\mu_{i-1}^{\bar{D}}\{X(t-1)\}] \\ X(0) &= X^0 \\ X(t) &= X(t-1) + U(t) \\ \mu_D^{\bar{D}}\{X(0)\} &= 1.0 \\ &\dots\dots\dots (2) \end{aligned} \right\}$$

ここで、 X^0 : 初期状態、 $U(t)$: t 段における決定、 $\mu_i^{\bar{D}}(\cdot)$: ファジー決定 $\bar{D}$ のメンバシップ関数、 $\mu_i^{g^i}(\cdot)$: ファジー目標 $\bar{g}_i$ のメンバシップ関数、 $\mu_i^{\bar{q}^i}(\cdot)$: ファジー制約 $\bar{q}_i$ のメンバシップ関数

更に、ファジー動的計画法における最適方策は、最終段において最大のメンバシップ関数値を与える決定から得られる方策であり、最適方策により与えられる各段の状態 $X^*(t)$ は次式により得られる。

$$\left. \begin{aligned} \mu_H^{\bar{D}}\{X^*(H)\} &= \max_{X(H)} [\mu_H^{\bar{D}}\{X(H)\}] \\ X^*(t-1) &= X^*(t) - U^*(t) \quad (t=H, \dots, 3, 2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $U^*(t)$: ファジー動的計画法の t 段における最適決定

〈2・3〉 計算量の軽減対策

(1) 逐次近似法 逐次近似法は、高次元の最適化問題を直接解かず、変数を適切なグループに分割して部分問題を構成することにより、解くべき問題の次元を下げたうえで、各グループごとに低次元の最適化手法を繰り返し適用することにより、元問題の最適解もしくは準最適解を求める手法である。特に、動的計画法のように問題の次元の増加に対して、その計算量が指数関数的に増大する手法においては、この逐次近似法の効果は極めて大きいことが知られている⁽¹²⁾。

(2) ファジー決定における限定操作

(i) 最大化決定に基づく理論的な限定操作 (2) 式の関数漸化式において、次式が成立する。

$$\mu_i^{\bar{D}}\{X(t)\} \geq \mu_H^{\bar{D}}\{X^*(H)\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、(4) 式を満足しない状態 $X(t)$ は最適解ではないことは明らかであり、このような状態を実行可能解の空間から排除できる。

(ii) ヒューリスティックな知識に基づく限定操作

運用者が最低限許容できるファジー決定のメンバシップ関数値(以下、「限定値」と略記)を経験に基づきヒューリスティックに与えることにより、各段各状態のファジー決定の計算において、ある状態のファジー決定のメンバシップ値が限定値以下になった場合、この状態を実行可能解の空間から排除できる。

〈2・4〉 多目的ファジー動的負荷配分の最適化手法

本論文で提案する多目的ファジー動的負荷配分決定手法は、〈2・2〉節と〈2・3〉節で述べた、ファジー動的計画法、逐次近似法、および限定操作に基づいている。

ファジー動的計画法の適用に際しては、発電機の出力を状態とし、時間帯を段とする。ここで、時間帯は考察期間 T を H 等分する離散的な時間区間である。このように状態と段を選択することにより、〈2・1〉節で定式化した動的負荷配分問題は、段に対して可分離となり、動的計画法が適用可能となる。

また、逐次近似法の適用にあたっては、変数のグループ分けをどのように行うかが問題となる。既に述べたように、状態として発電機出力をとっており、一方で需給バランス制約が存在するため、1 グループ当たりの発電機の最小台数は2台となる。2台ずつの発電機ペアを作り、逐次近似法を適用する手法は、既に文献(3)で提案されている。本論文でも同様に、発電機全体を2台ずつのペアに分割し、各ペアに対して一次元の動的計画法を繰り返し適用する。

更に、限定操作については、理論的な限定はあらかじめアルゴリズムに組み込むことが可能であり、ヒューリスティックな限定操作は典型的なケースに対するシミュレーションを行いつつ、その値を経験的に与える。

このような方法論に基づいた、多目的ファジー動的負荷配分決定手法の具体的なアルゴリズムは以下のとおりであ

図 1 多目的ファジー動的負荷配分の決定手法
Fig.1. Determination of multi-objective fuzzy dynamic load dispatching.

る。なお、提案手法の概要を図1に示す。

〔ステップ1〕 系統データを入力し、限定値を設定する。

〔ステップ2〕 すべての発電機を2台ずつのペアに分割し、ペアリングのリストを作成する。需給バランスを満足するように各発電機の初期値を与え、最適化すべき発電機ペアを選ぶ。

〔ステップ3〕 各種制約条件を満足するように t 時間帯のすべての状態 $x_i(t)$ を求め、各状態のファジー目標とファジー制約のメンバシップ関数値を計算する。更に、理論的な限定操作を行うとともに、限定値以下の状態を削除する。

〔ステップ4〕 (2)式に基づき最大化決定を行う。

〔ステップ5〕 最終時間帯 H であれば〔ステップ6〕へ行く。さもなければ、〔ステップ3〕へ行く。

〔ステップ6〕 最終時間帯 H において最大のメンバシップ関数値を与える決定から得られる方策を最適方策とし、最適方策から得られる全時間帯の発電機出力 $X^*(t)$ ($t=1, 2, \dots, H$)を決定する。

〔ステップ7〕 すべての発電機ペアについて〔ステップ3〕～〔ステップ6〕が終了したならば、〔ステップ8〕に行く。さもなければ、リストの次のペアを選び、〔ステップ3〕へ戻る。

〔ステップ8〕 最終時間帯における最適方策のメンバシップ関数値が改善されなければ、最適化計算を終了する。さもなければ、〔ステップ3〕へ戻る。

3. 本論文で考慮する各種ファジィネス

本論文では、動的負荷配分問題におけるファジィネスを

(1) パラメータにおけるファジィネス

(2) 多目的協調におけるファジィネス

の2種類に大別する。(1)としては負荷予測のファジィネス

ス、(2)としては系統出力調整容量および経済性のファジィネスを選択している。しかしながら、提案手法は汎用性を有しており、上述の(1)、(2)に属する他のファジィネスをもアルゴリズムに容易に取り入れることが可能であり、以下のファジィネスはあくまで提案手法の有効性を示すための一例である。

〈3・1〉 負荷予測のファジィネス 負荷需要の変化は、需要家の経済活動の傾向や気候などの要因に複雑に依存しており、高精度の負荷予測は困難である。

負荷予測の方法として、確率的な予測手法が提案されている⁽¹⁴⁾が、予測者の経験などが適切に反映できないために、得られた結果は必ずしも実用的とはいえない。従って著者らは、負荷予測において本質的な役割をになっている、予測者の経験的な判断に基づく言語的なあいまいさを考慮すべきであると考えている⁽⁹⁾。

負荷予測のファジィネスは、「20分後に負荷需要はおよそ100 MW」のように表現することができる。このようなファジィネスはメンバシップ関数で特徴づけられ、予測者の主観を反映している。このような「およそ L^0 」といった負荷予測のメンバシップ関数の一例が図2であり、以下のような特徴を有する。

図2に示すようにメンバシップ関数は、 L^0 において最も高い満足度を持ち、ある幅($L^1 \sim L^h$)をもつ領域において満足度が0~1の間で変化する。更に、この領域においては図2に示すような様々な形状により満足度が表現されている。ただし、この領域内における満足度の変化および L^1 、 L^h は個々の予測者の主観を表すものであるので、どのような形状の関数を用いるか、また L^1 、 L^h にどのような

図2 負荷予測のファジィネス
Fig. 2. Fuzziness of forecasted load.

図3 発電機の運用特性
Fig. 3. Operation characteristics of generator.

表1 表記法
Table 1. Notation.

i	: 発電機の添字	I	: 発電機の数
t	: 時間帯(段)の添字	H	: 時間帯(段)の数
Δt	: 1時間帯当たりの時間幅 (min)		
$P_L(t)$	: t 時間帯の負荷 (pu)		
$P_i(t)$	: t 時間帯の発電機 i の出力 (MW)		
$P_i^{\min}$	: 発電機 i の出力の下限 (MW)		
$P_i^{\max}$	: 発電機 i の出力の上限 (MW)		
$\Delta P_i^{\min}$	: 発電機 i の出力変化率の下限 (MW/min)		
$\Delta P_i^{\max}$	: 発電機 i の出力変化率の上限 (MW/min)		
$F_{C_i}(\cdot)$	: 状態 $X(t)$ に到達したときの総コストのベクトル		
$C_i^{\min}$	: t 時間帯の最適コスト (円)		
$\Delta C_i(\cdot)$	: 状態 $X(t)$ の最適コストからの偏差の比率		
$F_{A_i}(\cdot)$	: 状態 $X(t)$ の系統出力調整容量 (MW)		
$F_{A_i}^i(\cdot)$	: 状態 $X(t)$ の各発電機の出力調整容量 (MW)		
$F_{A_i}^{\max}$	: 最適系統出力調整容量 (MW)		
$\Delta F_{A_i}(\cdot)$	: 状態 $X(t)$ の系統出力調整容量の比率 (%)		
$\mu_i^f(\cdot)$	: 状態 $X(t)$ の負荷予測のメンバシップ関数値		
$\mu_i^a(\cdot)$	: 状態 $X(t)$ の系統出力調整容量のメンバシップ関数値		
$\mu_i^e(\cdot)$	: 状態 $X(t)$ の経済性のメンバシップ関数値		

な値を与えるかは予測者によって決められる。

〈3・2〉 系統出力調整容量のファジィネス⁽⁸⁾ 出力調整容量とは、各発電機の出力変化率制限を考慮した運用可能な範囲である。更に、系統出力調整容量とは、各発電機の出力調整容量を合計したものである。従って、図3に示すような各発電機の出力制限および出力変化率制限があるので、各発電機の出力調整容量は

$$F_{a_i}(\cdot) = \min \{ \{ P_i(t) - P_i^{\min} \}, \Delta P_i^{\min} \times \Delta t, \{ P_i^{\max} - P_i(t) \}, \Delta P_i^{\max} \times \Delta t \} \dots\dots\dots (5)$$

と定式化することができる。

更に、系統出力調整容量は(6)式で表現することができる。

$$F_{a_t}(\cdot) = \sum_{i=1}^I F_{a_i}(\cdot) \dots\dots\dots (6)$$

低い系統出力調整容量における運用は負荷変化に追従する能力が低いと考えられるので、各時間帯の系統出力調整容量をできるだけ大きくする運用計画が望ましい。

系統出力調整のファジィネスは、「各時間帯における系統出力調整容量は、その最大値のおよそ半分以上が望ましい」といったあいまいさを含む言語で表現されるものである。このような言語的なあいまいさを表すメンバシップ関数の一例が図4であり、このメンバシップ関数の特徴は以下のとおりである。

図4に示すように、系統出力調整容量のメンバシップ関数は、調整容量のある幅 ($F_{a^1} \sim F_{a^h}$) をもつ領域において満足度が0~1の間で変化し、この領域における満足度は調整容量が多いほど高くなるように表現されるのが一般的であろう。ただし、この領域内における満足度の変化およ

図4 系統出力調整容量のファジィネス
Fig. 4. Fuzziness of total adjustable capacity of generation.

図5 経済性のファジィネス
Fig. 5. Fuzziness of production cost.

び $F_{a^1} \sim F_{a^h}$ は、熟練者(運用者)によって主観的に決められるものである。

〈3・3〉 経済性のファジィネス 経済性は意思決定者によって、あいまいに評価されるものであり、例えば「最適コストからの偏差を小さく抑える」といった言語的記述により表現することができる。このような経済性のファジィネスを特徴づけるメンバシップ関数の一例が図5であり、このメンバシップ関数の特徴は以下のとおりである。

最適コストからの偏差の満足度はある幅 $\Delta C^1 \sim \Delta C^h$ において0~1の間で変化する。更に、図5に示すような様々な形状によって、この領域内における満足度は偏差が小さいほど高くなるように表現されるのが一般的であろう。ただし、この領域内における満足度の変化、および $\Delta C^1, \Delta C^h$ は、熟練者(運用者)によって主観的に決められるものである。

4. 数値計算例

〈4・1〉 数値計算モデル 提案する多目的ファジー動的負荷配分手法の有効性を検証するために、10台の発電機と16時間帯(時間帯幅 $\Delta t = 2$ 分)の負荷パターンとで構成される数値計算モデルに対してシミュレーションを行った。

各発電機の燃料費係数は表2のとおりであり、表3は各発電機の発電特性係数および各発電機の初期状態である。

表2 各発電機の燃料費係数
Table 2. Cost coefficients.

発電機	$f_{C_i} = A_i P_i^2 + B_i P_i + C_i$		
	A_i	B_i	C_i
1	0.005	5.627	261.186
2	0.006	5.506	264.634
3	0.004	6.383	190.502
4	0.005	6.295	230.154
5	0.016	6.268	154.298
6	0.030	7.667	99.960
7	0.010	11.752	100.659
8	0.007	6.654	112.922
9	0.012	6.362	143.092
10	0.012	6.515	135.334

表3 各発電機の発電特性
Table 3. Characteristics for generators.

発電機	出力上下限 (MW)		出力変化率上下限 (MW/min)		発電機初期値 (MW)
	下限	上限	下限	上限	
1	160.0	210.0	-5.0	5.0	170.0
2	160.0	200.0	-5.0	5.0	170.0
3	160.0	210.0	-8.0	8.0	200.0
4	160.0	210.0	-8.0	8.0	190.0
5	60.0	90.0	-3.5	3.5	60.0
6	40.0	70.0	-3.8	3.8	50.0
7	60.0	90.0	-3.0	3.0	60.0
8	80.0	110.0	-3.5	3.5	80.0
9	50.0	90.0	-3.5	3.5	60.0
10	60.0	90.0	-3.5	3.5	60.0

(a) 負荷予測のメンバシップ関数

(b) 系統出力調整容量のメンバシップ関数

(c) 経済性のメンバシップ関数

図 6 各ファジー集合のメンバシップ関数
Fig. 6. Membership functions of fuzzy sets.

更に、図 6 はある時間帯における各メンバシップ関数を与えるものである。ここで、負荷予測および系統出力調整容量・経済性のファジー集合のメンバシップ関数は各時間帯においてそれぞれ異なるが、基本的な形状は変わらないものとした。

また、逐次近似法における発電機のペアリングは、増分コストの安い順に 2 台ずつ組み合わせており、ペア全体のリストは文献(3)と同様に設定した。

なお、図 6 中の単位は pu (1 pu=100 MW) である。

4・2 数値計算結果 本論文では、本手法の有効性を検証するために、上記のモデル系統に対して、次の検討を行った。

(1) 各メンバシップ関数の形状について 既に、2・2 節で述べているように、提案手法の特長の一つは、各メンバシップ関数が任意の形状に設定できることである。これを検証するために、一例として階段状の関数、線形関数、および非線形関数を用いて、各メンバシップ関数を与える。

(i) 負荷予測のメンバシップ関数は階段状の関数として与える。数値計算では、図 6(a) に示すような階段状の関数を用い、各時間帯ごとの予測に応じてその形状を変えている。

(ii) 系統出力調整容量のメンバシップ関数は次式のよ

図 7 各ケースの総配分出力

Fig. 7. Total dispatched generation power for each case.

うな線形関数(図 6(b))として与える。

$$\Delta Fa_t(\cdot) = \frac{Fa_t(\cdot)}{Fa_{\max}} \times 100(\%)$$

$$\mu_t^{\bar{A}}(\cdot) = \max \left\{ \min \left(\frac{\Delta Fa_t(\cdot) - \Delta Fa^l(\cdot)}{\Delta Fa^h(\cdot) - \Delta Fa^l(\cdot)}, 1 \right), 0 \right\}$$

..... (7)

(iii) 経済性のメンバシップ関数は次式のような指数関数として与える。数値計算では図 6(c) に示すような関数を用い、簡単のために各時間帯において同一とする。

$$\Delta C_t(\cdot) = \frac{Fc_t(\cdot) - C_t^{\min}}{C_t^{\min}}$$

$$\mu_t^{\bar{C}}(\cdot) = e^{-W \times \Delta C_t(\cdot)}$$

..... (8)

(2) 多目的協調について 提案手法は従来の単一目的の動的負荷配分決定手法の自然な拡張であるので、メンバシップ関数の適切な設定により、単一目的の最適化と意思決定者の主観を反映した多目的協調のどちらも実現できる。このような本手法の有効性を示すために、次の 3 ケースを設定し、数値計算を行った。

〔ケース 1〕 経済性のみを考慮する。これは従来の経済性を目的関数とした動的負荷配分に相当し、本手法では残りの目的である系統出力調整容量に対するメンバシップ関数を以下のように設定することにより実現できる。

$$\mu_t^{\bar{A}}(\cdot) = 1.0$$

〔ケース 2〕 系統出力調整容量のみを考慮する。これは系統出力調整容量のみを単一目的とした動的負荷配分に相当し、本手法では残りの目的である経済性に対するメンバシップ関数を以下のように設定することにより実現できる。

$$\mu_t^{\bar{C}}(\cdot) = 1.0$$

〔ケース 3〕 系統出力調整容量と経済性の二つの目的の協調を行う。これは各目的に対するメンバシップ関数を意思決定者が主観的に与えることにより実現できる。こ

では一例として、図 6(b), (c)のメンバシップ関数を用いる。

上記三つのケースに対して得られた各ケースの計画案における総配分出力を図 7 に示す。横軸の単位は時間であり、時間帯の時間幅は 2 分である。同図から、各ケースでは各々の最適化目標により総配分出力の変化が異なることがわかる。

更に、系統出力調整容量指標に対して、[ケース 1, 3]

図 8 系統出力調整容量の比較

Fig. 8. Comparison of total adjustable capacities of generation.

表 4 発電コストの比較

Table 4. Comparison of generating costs.

	ケース 1 に対するコスト比率
ケース 2	1.03
ケース 3	1.02

の[ケース 2]に対する調整容量比率は図 8 に示されている。また、[ケース 2, 3]の[ケース 1]に対するコスト比率は表 4 に示されている。

図 8 と表 4 の各ケースの指標の比較により、次の結果が得られた。

[ケース 1] 経済性の指標は最大化されたが、系統出力調整容量の指標が悪化した(図 8)。

[ケース 2] 系統出力調整容量の指標は最大化されたが、経済性の指標が悪化した(表 4)。

[ケース 3] 経済性指標は[ケース 1]に対するコスト比率が 1.03 から 1.02 に改善され、系統出力調整容量指標は[ケース 2]に対する比率の平均が 49.2%から 78.8%に改善された。

これらの結果から、提案手法が従来の単一目的の動的負荷配分法を包含し、かつ多目的協調をも可能とする、より汎用的手法であることが理解できる。更に、系統出力調整容量に対するメンバシップ関数は各時間帯ごとに設定できるので、負荷急増時などのように出力調整容量が重視される時間帯については、出力調整容量を重視したメンバシップ関数を与えることにより、従来の単一目的の動的負荷配分決定手法では困難であった柔軟性の高い運用計画が立案できる。

なお、[ケース 3]の計画案(各発電機の負荷分担)および各段の系統出力調整容量、ファジー決定のメンバシップ関数値は併せて表 5 に示されている。

(3) 負荷予測のファジィネスについて 図 6(a)の負荷予測のメンバシップ関数および図 7 の総配分出力の結果から、例えば時間帯 $t=9$ では、

(i) 経済性のみを考慮した[ケース 1]では、経済性が優先されるため、 $L_0(12.2 \text{ pu})$ より小さい負荷予測値(12 pu)が選択され、しかも予測者の満足度 0.90 であり、

表 5 [ケース 3] の計画案
Table 5. Dispatched load on case 3.

時間帯 t	発電機出力 $P_i(t)$ (MW)										系統出力調整容量 Fa_t (MW)	メンバシップ関数値 μ_i^p
	発電機 1	発電機 2	発電機 3	発電機 4	発電機 5	発電機 6	発電機 7	発電機 8	発電機 9	発電機 10		
0	170.0	170.0	200.0	190.0	60.0	50.0	60.0	80.0	60.0	60.0	61.0	1.00
1	180.0	164.0	185.0	174.0	60.0	48.0	66.0	80.0	63.0	60.0	65.0	1.00
2	190.0	164.9	175.1	163.1	60.0	40.0	60.0	80.0	66.9	60.0	40.1	0.95
3	200.0	160.0	167.1	175.9	60.0	48.0	64.9	80.0	64.1	60.0	52.9	0.95
4	210.0	168.0	175.1	162.8	60.0	56.0	70.9	80.1	57.1	60.0	47.0	0.95
5	210.0	167.0	182.9	167.9	63.8	54.1	76.9	83.1	64.1	60.1	59.0	0.95
6	200.0	175.1	178.0	174.9	70.0	62.1	74.8	90.1	71.0	64.0	89.8	0.95
7	200.0	178.4	178.2	190.9	70.0	61.8	71.6	97.0	78.0	64.0	91.0	0.95
8	200.0	174.2	186.2	197.0	70.0	53.8	75.8	95.8	85.0	62.2	84.3	0.95
9	210.0	181.8	185.8	187.0	65.0	56.5	75.8	98.8	90.0	69.2	75.0	0.95
10	210.0	184.2	197.7	203.0	70.9	52.3	75.8	105.7	87.0	63.4	60.9	0.95
11	200.0	194.2	197.7	207.1	75.9	60.3	76.9	107.7	90.0	70.3	61.4	0.95
12	200.0	200.0	201.7	207.1	82.9	62.4	70.9	107.7	90.0	77.3	51.0	0.95
13	200.0	198.7	202.9	210.0	88.1	59.3	70.1	109.4	90.0	81.5	41.9	0.95
14	209.8	197.8	198.6	210.0	88.0	52.7	64.1	104.5	90.0	74.6	40.5	0.95
15	210.0	197.8	182.7	202.0	86.8	60.6	63.8	98.6	90.0	67.6	55.2	0.95
16	210.0	199.8	171.2	200.9	80.0	65.1	63.8	103.1	90.0	66.0	49.2	0.95

表 6 [ケース 3] の計算時間
Table 6. Computation times for case 3.

限定値	計算時間(s)
0	141
0.6	61
0.9	49

また、

(ii) 他の目標を考慮した[ケース 2, 3]では、それぞれ 12.3 pu と 12.2 pu の負荷予測が選択され、そのときの満足度はそれぞれ 0.97 と 1.0 であり、

多目的協調の程度に応じて、負荷予測における主観が適切に反映されていることがわかる。

(4) 計算量の軽減について 本論文では、[ケース 3]に対して、〈2・3〉節(2)項において検討したファジー決定の限定操作を行った。ここで、限定操作における限定値は、ヒューリスティックに決定されるものである。今回の数値計算では、限定値を 0.6, 0.9 とし、それぞれ計算を行った。それらの計算時間と限定操作を行わない場合(限定値=0)の計算時間を表 6 に示す。表中の各時間はいずれも VAX 9210 VP(約 80 MFLOPS)による計算時間である。表 6 に示すように、例えば限定値を 0.90 とした場合には約 1/3 に計算時間を軽減することができた。

5. あとがき

本論文は、動的負荷配分問題におけるパラメータのファジィネスおよび多目的性を同時に考慮可能な動的負荷配分を決定するため、多目的ファジー数理計画問題として動的負荷配分問題を新たに構築した。更に、ファジー集合論に基づく多目的ファジー動的負荷配分の決定手法を提案した。提案手法は、クリスプな制約条件の下で単一目的を最適化する従来の動的負荷配分決定手法の自然な拡張であり、近年の動的負荷配分問題に対する多様な要求に適応可能なより実用的な手法である。

なお、提案手法の特長は以下のとおりである。

(1) 動的負荷配分問題におけるパラメータのファジィネスと多目的性を同時に考慮できる。

(2) パラメータのファジィネスと多目的協調のファジィネスを Ballman-Zadeh の最大化決定⁽¹¹⁾に基づいて統合することができる。

(3) 動的計画法に基づいているため、任意の形状のメンバーシップ関数の考慮、すなわち意思決定者のファジィネスの忠実な反映が可能である。

(4) 10 発電機 16 時間帯モデルに対する計算時間は 49 秒(80 MFLOPS の計算機)であり、実規模システムに対しても十分適用できる。

なお、末筆ながら本論文をまとめるにあたり、多大なる御協力を賜った本学大学院博士課程 田辺隆也氏に感謝申し上げます。

(平成 5 年 4 月 5 日受付, 同 5 年 7 月 22 日再受付)

文 献

- (1) R. Yokoyama, et al.: "Multi-objective Optimal Generation Dispatch based on Probability Security Criteria", *IEEE Trans. Power System*, 3, No. 1, 317 (1988)
- (2) A. D. Patton: "Dynamic Optimal Dispatch of Real Power for Thermal Generation Units", Proc. 8th Power Industry Computer Application Conference, Minneapolis, Minnesota, IEEE 73 CHO740-1 PWR (1973)
- (3) Dale W. Ross & Sungkook Kim: "Dynamic Economic Dispatch of Generation", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-99, No. 6, 2060 (1980)
- (4) T. E. Bechert & H. G. Kwatny: "On the Optimal Dynamic Dispatch of Real Power", *ibid.*, PAS-91, 889 (1972)
- (5) 磯田, 他: 「負荷の変動特性と発電機の応答性を考慮したオンライン火力機負荷配分法」, 電学論 B, 101 (昭 56-11)
- (6) 青木, 他: 「発電機の応答速度を考慮した動的な経済負荷配分」, 電気学会電力技術研資, PE-86-99 (昭 51)
- (7) 新村, 他: 「運用者の満足度を考慮した発電機出力の多目的最適配分」, 電学論 B, 112 (平 4-1)
- (8) 前川, 他: 「ファジー協調法に基づく大規模電力システムの多目的最適運用」, 同上 B, 113 (平 5)
- (9) 繆, 他: 「ファジー DP 法に基づく動的負荷配分」, 電気学会電力技術研資, PE-91-4 (平 3)
- (10) C. C. Su & Y. Y. Hsu: "Fuzzy Dynamic Programming: An Application to Unit Commitment", *IEEE Trans. Power System*, 6, No. 3, 1231 (1991)
- (11) R. E. Bellman & L. A. Zadeh: "Decision Making in a Fuzzy Environment", *Management Science*, 17, b-141 (1970)
- (12) A. J. Korsak & R. E. Larson: "A Dynamic Programming Successive Approximations Technique with Convergence Proofs-Parts I & II", *Automatica*, 6 (1969-12)
- (13) R. E. Bellman: *Dynamic Programming* (1957) Princeton Univ. Press, New Jersey
- (14) I. Moghram & S. Rahman: "Analysis and Evaluation of Five Short-Term Load Forecasting Techniques", *IEEE Trans. PWR*, PWR-4, No. 4, 1484 (1989)

繆 智 勇 (学生員) 1959 年 10 月 27 日生。1992 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 月同博士課程進学, 現在に至る。主として, ファジー理論の大規模システムへの応用に関する研究に従事。

安 田 恵一郎 (正員) 1960 年 9 月 10 日生。1989 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, 1991 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会員。

横 山 隆 一 (正員) 1944 年 8 月 25 日生。1973 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。1974 年 4 月(株)三菱総合研究所入社。1978 年 9 月東京都立大学工学部助教授, 1989 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, ファジー理論応用など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。