

# ファジィ推論を導入した地域配電系統における 需給制御システムの開発

沖縄職業能力開発大学校 林 文 彬

Development of Supply-Demand Control Program for Local Distribution System under Fuzzy Reasoning Method

Bunhin LIN

**要約** 国際的に高いとされる電力コストの是正を目指して、電気事業審議会の基本政策部会と料金制度部会が電気事業法を改正するために、電気事業の規制緩和案の検討を進めている。この規制緩和案の検討により、民間も小規模の配電系統を建設し、特定電気事業に参入することが可能になる。また、近年、発電に伴い発生する排熱を回収して利用するコージェネレーションシステムはエネルギーの総合利用率を高めることが可能なため、産業界およびサービス業界は安い料金で需要家に電力・熱源を供給することができる。このような売電自由化の観点から、コージェネレーションシステムを導入し、限定された地点内で不特定多数の需要に応じて電気を供給する事業に参入する業者は多いと見込まれる。しかし、一般に系統の一日負荷消費量は一定の量ではなく、時間と共に刻々と変動している。このような負荷の上下変動に対し、発電機の出力はそれを追従しなければならない。本研究は特定電気事業の小規模系統を対象と想定する。発電量と負荷量の需給不均衡を小さくするためにファジィ制御を導入し、負荷変動に追従できるよう発電機の出力を制御するシステムを構築する。また、この実行例も能力開発セミナー「ファジィ制御理論とシミュレーション」の学習教材として有効に活用されている。

## I はじめに

近年、電気事業法の改正により、電気事業の規制が緩和されると考えられる。規制が緩和されると、電力会社以外のもは電力会社の供給区域内における特定需要家に電力を直接供給することができる。さらに、省エネルギーブームの中でコージェネレーションシステムが多数建設されることから、特定電気事業に参入する業者が増えてくると予想される。しかし、特定電気事業などの小規模の配電系統に、電力会社からの電力融通量は、コージェネレーションシステム容量の3%を超えると、普通より数倍の料金を請求されること

があるので、この地域内の発電量と負荷量の需給バランスを常に保たなければならない。本研究はファジィ制御を導入して、地域配電系統における発電機の出力と負荷の消費量との需給不均衡差を小さく制御する方法を検証する。

## II 問題記述

### 1 特定供給に関する規制緩和

#### (1) 一建物内における供給に対する規制緩和

従来の電気事業法によると、同じ建物であっても、

図1に示すように各階に入居するテナントが異なるならば、自家発電機からの電力を各階に供給することができない。しかし、審議を進めてきた改正案<sup>1)</sup>によると、一建物内においては、建物、発電機の所有形態に関係なく建物全体への電気の供給が可能になる。この給電の仕組みは図2に示すようになる。

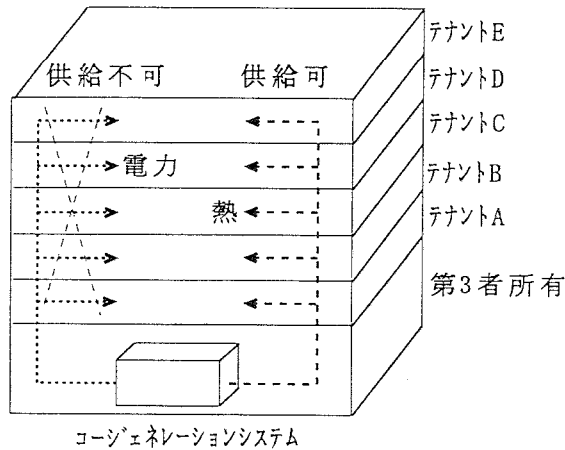


図1 従来の電気供給の規制

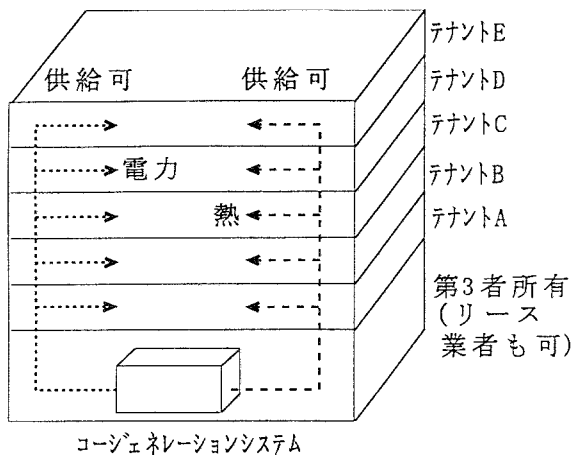


図2 緩和後の電気供給

(2) 特定地点供給事業の創設<sup>2)</sup>

特定地点供給事業とは限定された地点内において不特定多数の需要に応じて電気を供給する事業である。この新制度のイメージは図3のように示すことができる。

図3に示すように規制緩和になると、自社だけでなく近くの需要家にも電力を供給することが可能になる。しかし、この制度は事業許可制で、許可に必要な条件は次の2点がある。

第1点は自ら供給先の需要に応じられる供給能力を保有する。図3を例にすれば、A、B、C社ビルの電

気需要に対して全部責任をもって供給しなければならない。そこで、A、B、C社ビルの負荷に対し、コージェネレーションシステムの発電容量は負荷量より多いことが必要である。

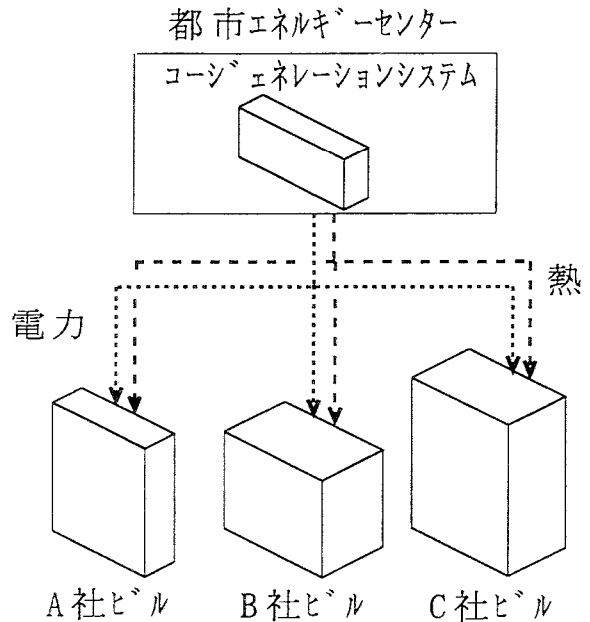


図3 特定地点供給事業のイメージ

第2点は、電気供給は電力会社が供給するより効率的である。すなわち、電力会社より安い料金で電力を供給しなければならない。

以上のような特定地点供給事業が始まると、特定地点供給事業者は地点内の電力需要に供給義務を持つようになる。一方、電力会社は電気を供給しなくなるが、バックアップ供給義務を有する。

2 電力会社のバックアップ

電力会社からのバックアップを受けるのは2つ状況がある<sup>3)</sup>。1つは事故時・定期検査時に電力会社からのバックアップ、もう1つは地域内の電力負荷の急変動が生じ、コージェネレーションシステムの出力制御が追従できないときのバックアップである。

前者の場合はバックアップ料金が自家発電補給電力（業務用）と同等レベルで抜く。これに対して、後者の場合はバックアップ料金が常時契約料金（Demand制）として徴収する。

コージェネレーションシステムの出力制御は地域内の負荷の急変動に追従できないとき、電力会社から地域系統に電気が流れ込む仕組みは図4に示すようになる。

基本的に図4における電力会社からの電力供給はゼ

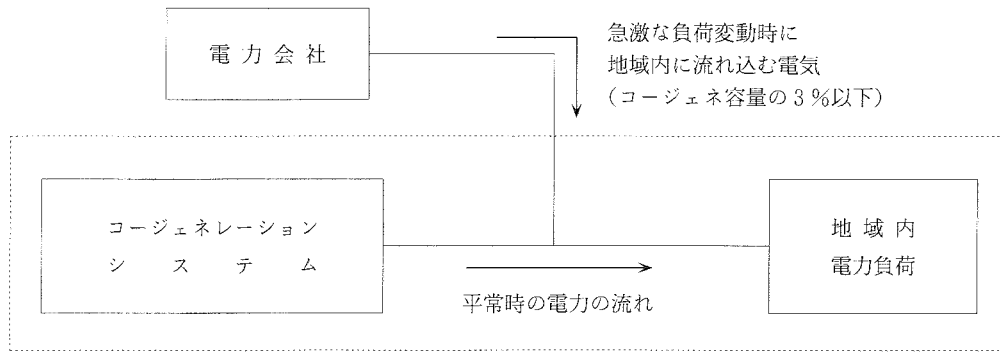


図4 負荷変動時のバックアップ

ロである。しかし、急激な負荷変動により、電力会社が地域系統に電力を供給しなければならないとき、その量をコージェネレーションシステム容量の3%までに限定する。もし電力会社から地域系統への電力流入量がコージェネレーションシステム容量の3%以上になると、電力会社の系統に悪い影響を与えることが予想されるため、常時契約料金の3倍の料金を課せられることになる。

以上のことから、特定地点供給事業にとって、地域配電系統内の発電量と負荷量との需給バランス制御がこれから対応しなければならない大きな課題の一つである。

### III 対象系統

図5は本研究の対象モデル系統と想定する。発電機  $G_1 \sim G_3$  の定格出力は1500KW、 $G_4$  の出力は4,500KWである。これらの発電機の出力は負荷である3つのビルに供給する。供給信頼度を高めるため、電力会社の系統と連係している。基本的に、3つのビルの消費電力はすべて4台の発電機から供給する。

一般的に系統の一日負荷消費量は図6の日負荷曲線が示すように一定の量ではなく、時間と共に刻々と変動している。そこで、発電機の出力もそれを追従して、上下を調整する。

しかし、発電機の起動から定格までの出力上昇特性と、定格から停止までの出力下降特性は発電機の容量と種類により異なる。図7と図8は火力発電機の出力上昇特性と出力下降特性の一例を示す<sup>2),3)</sup>。並列後の発電機は一定の出力上昇特性に従って出力が上昇し、同様に、一定の出力下降特性に従って出力が下降する。発電機の出力は負荷消費量の変動に追従して調整するとき、発電機の出力特性の変化速度を考慮しなければ

ならない。もし発電機の出力調整が消費負荷の変動に対応しきれない場合、両者の間に生じる需給不均衡は、電力会社の系統からの融通電力を受けることで解消する。本研究は発電機の出力特性と負荷特性を考慮しながら、両者の需給不均衡を小さく制御するため、ファジィ推論を導入する需給制御システムを構築し、その制御の効果を確かめる。

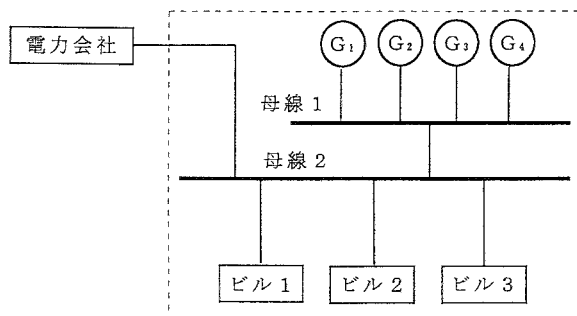


図5 系統図

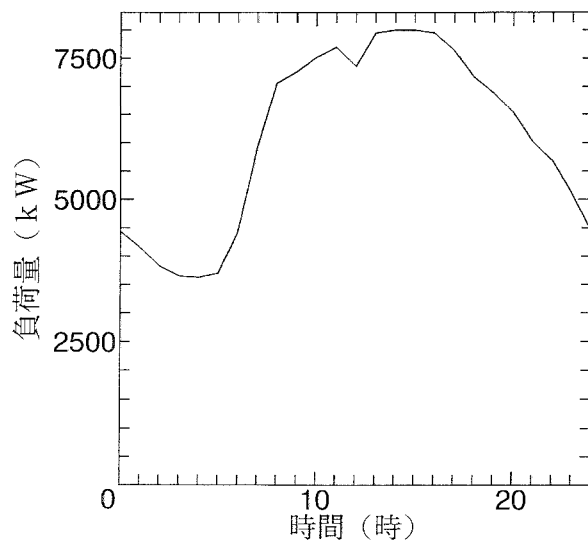


図6 系統の日負荷曲線

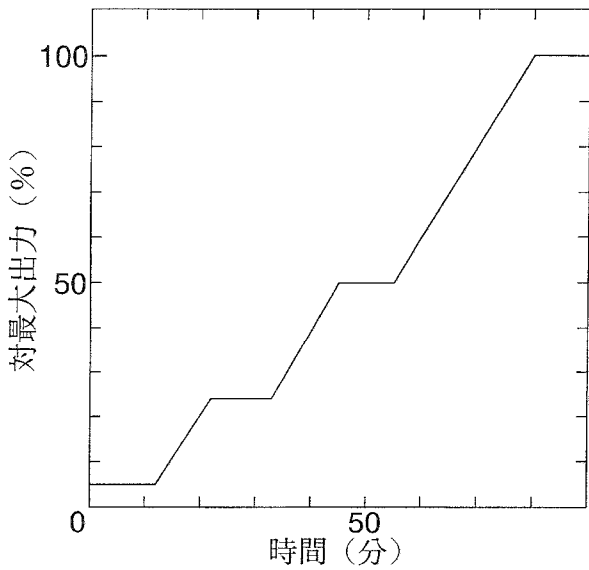


図7 発電機の出力上昇特性

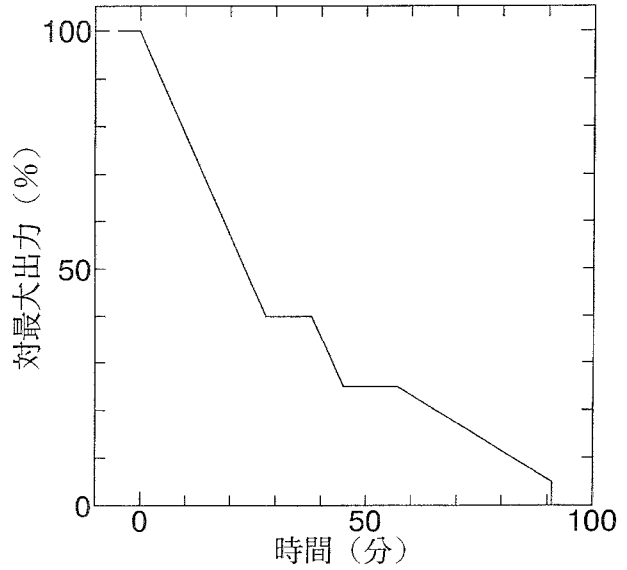


図8 発電機の出力下降特性

#### IV ファジィ推論の導入

ファジィ推論の流れは図9に示すようになる。まず、数字のようなデータをファジィ推論用の論理言語に変換する。次に、論理言語で論理演算を行う。最後に、論理演算の結果をデファジィ化することによって制御用の数字に戻して出力する。以下、その概要を説明する。

##### 1 ファジィ化

本システムの推論に使うデータは入力データの「需給不均衡量  $e$ 」(発電機出力-負荷量)、「需給不均衡量偏差  $\Delta e$ 」(現時点の需給不均衡量-10分前の需給不均衡量)および出力データの「発電機の出力調整量」がある。これらのデータをファジィ推論に導入するため、非ファジィデータ(数字)をファジィ化データ(論理言語)に変換しなければならない。その方法としては、それぞれの横軸(需給不均衡量など)の値  $x = x^*$  のとき、縦軸(グレード)の最大値1をとるメン

バースhip関数を設定する。

図10に示すように、本文では需給不均衡量、需給不均衡量偏差および発電機の出力調整量をそれぞれ7つの三角型メンバーシップ関数に設定する。ここで、需給不均衡量はNS、NM、NBのような負値を表す言葉であれば、負荷量は発電量より多く、逆にPS、PM、PBのような正値を表す言葉であれば、発電量は負荷量より多いということである。

需給不均衡量偏差と発電調整量も同じようにNB、NM、NS、ZR、PS、PM、PBの7つ三角型のメンバーシップ関数で表現する。

また、入力ファジィ集合と出力ファジィ集合の関係は49個のルールから成り立つ。表1は49個のルールからなる制御規則表の例の一つである。この表に横一列目のデータは需給不均衡量  $e$ 、縦一行目のデータは需給不均衡量偏差  $\Delta e$  である。また、 $e$  のデータと  $\Delta e$  のデータと交差するデータは出力の発電調整量である。例えば、この表に次のようなルールがある。

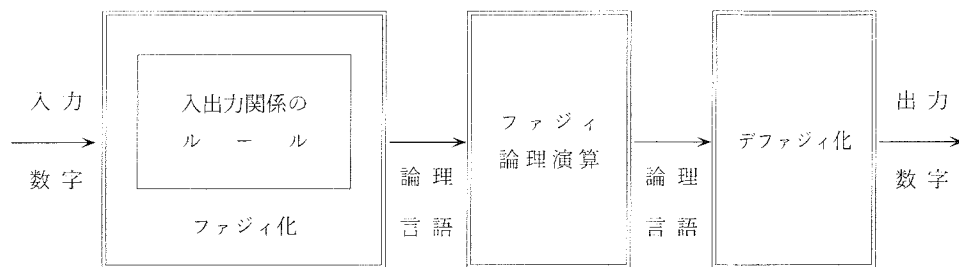


図9 ファジィ推論の流れ

ルール 1

もし (条件部)

- 1, 需給不均衡量  $e$  は NB である。
- 2, 需給不均衡量偏差  $\Delta e$  は NB である。

ならば (結論部)

発電調整量は NB である。

ルール 2

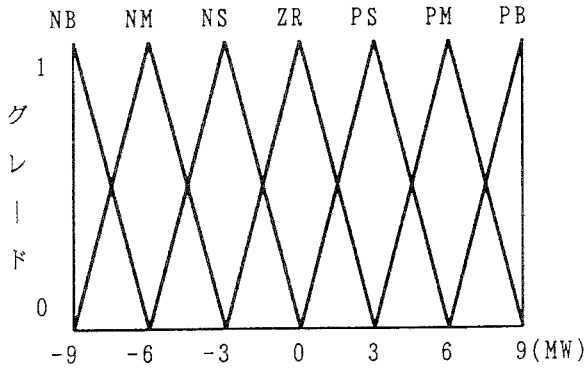
もし (条件部)

- 1, 需給不均衡量  $e$  は NB である。
- 2, 需給不均衡量偏差  $\Delta e$  は NM である。

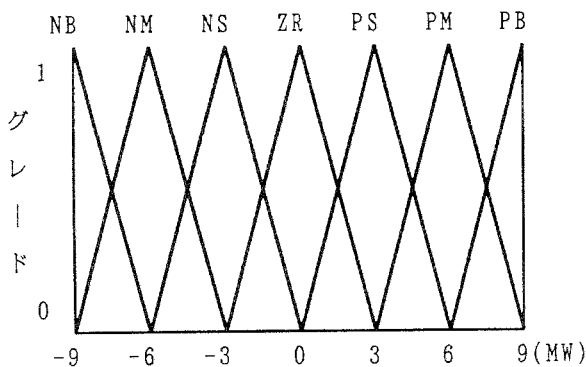
ならば (結論部)

発電調整量は NB である。

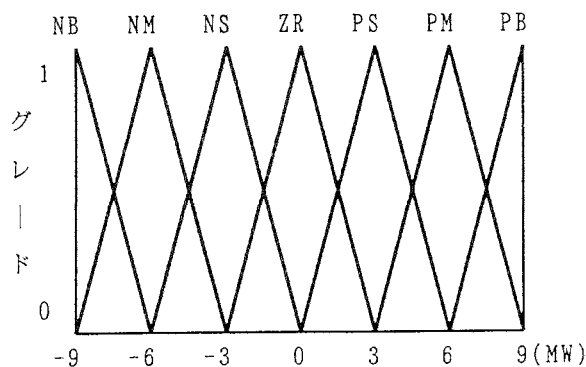
システムは入力データに基づいて以上のような49個のルールから該当するルールを選ぶ。そして、選ばれたルールで次節〈4.2〉の説明する通りにファジィ推論を行う。



(a) 需給不均衡量  $e$  (発電量-負荷量)



(b) 需給不均衡偏差  $\Delta e$  ( $e_2 - c_1$ )



(c) 発電機調整量

PB : Positive Big  
 PM : Positive Medium  
 PS : Positive Small  
 ZR : Zero  
 NS : Negative Small  
 NM : Negative Medium  
 NB : Negative Big

図10 7つの三角型ファジィ変数

表1 制御規則表

$\Delta e \backslash e$	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZR
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZR	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZR	PS	PM
ZR	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZR	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZR	PS	PM	PB	PB	PB	PB

2 ファジィ論理演算

ファジィ論理演算にはいくつかの方法があるが、本研究ではマムダニのファジィ推論 (min-max-重心法)<sup>4)</sup>を採用する。この推論は条件部2変数、結論部1変数で、制御ルール2個の場合に使う推論法である。

図11は表1から下記のような2つのルールを例にしてmin-max-重心法で推論する方法を説明する。

ルール 1 :

もし

$X_1$  is PS

$X_2$  is PS

ならば

$y$  is PM

ルール 2 :

もし

$X_1$  is PM

$X_2$  is PM

ならば

$y$  is PB

上記のルールに基づいて、min-max-重心法の推論手順は下記の通りである。

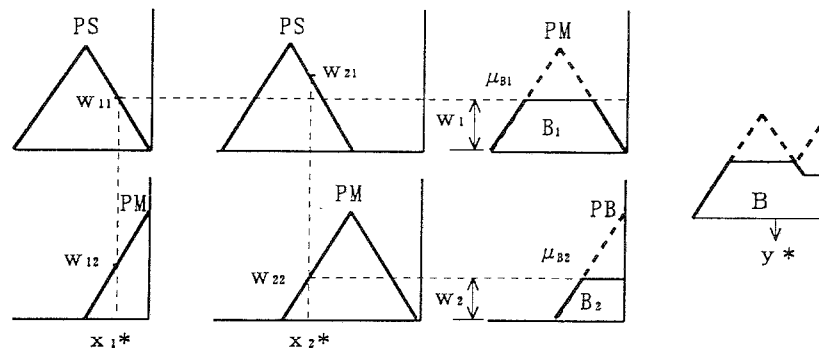


図11 min-max-重心法による推論過程

- (1) 実際の入力  $X_1^*$ 、 $X_2^*$  に対して、各ルールの前件部の適合度  $W_1$  と  $W_2$  を次の式により求める。

$$W_1 = W_{11} \wedge W_{21}$$

$$W_2 = W_{12} \wedge W_{22}$$

- (2) ルール1の推論した集合  $B_1$  は  $W_1 \wedge \mu_{B1}$  より求められる。ここで、 $\mu_{B1}$  は結論部PMの集合である。
- (3) ルール2の推論した集合  $B_2$  は  $W_2 \wedge \mu_{B2}$  より求められる。ここで、 $\mu_{B2}$  は結論部PBの集合である。
- (4) 2つのルールの推論した集合  $B_1$ 、 $B_2$  を合成し、出力のファジイ集合  $B$  は

$$B = B_1 \vee B_2 = (W_1 \wedge \mu_{B1}) \vee (W_2 \wedge \mu_{B2})$$

で求める。

- (5) 推論した集合  $B$  を次節〈4.3〉の説明通りにデファジイ化して、 $y^*$  を求める。

### 3 デファジイ化

デファジイ化はファジイ化と逆作用の機能を持ち、〈4.2〉節の推論で得られた結論  $B$  から実数値を算出する方法である。本システムのデファジイ化は重心法を採用する。方法としては、下記の式によりファジイ集合  $B$  から重心を求める。この計算した結果  $y^*$  はファジイ推論の答えである。

$$y^* = \frac{\int y \mu_B(y) dy}{\int \mu_B(y) dy}$$

ここに、式の  $y$  はファジイ集合  $B$  の横軸の発電調整量、 $\mu_B(y)$  はファジイ集合  $B$  の縦軸のメンバシップ値である。また、発電調整量  $y^*$  の値が「正」の場合は発電機が次段階で発電量を増やし、「負」の場合は発電機が発電量を減らすことである。

## V システムの概要

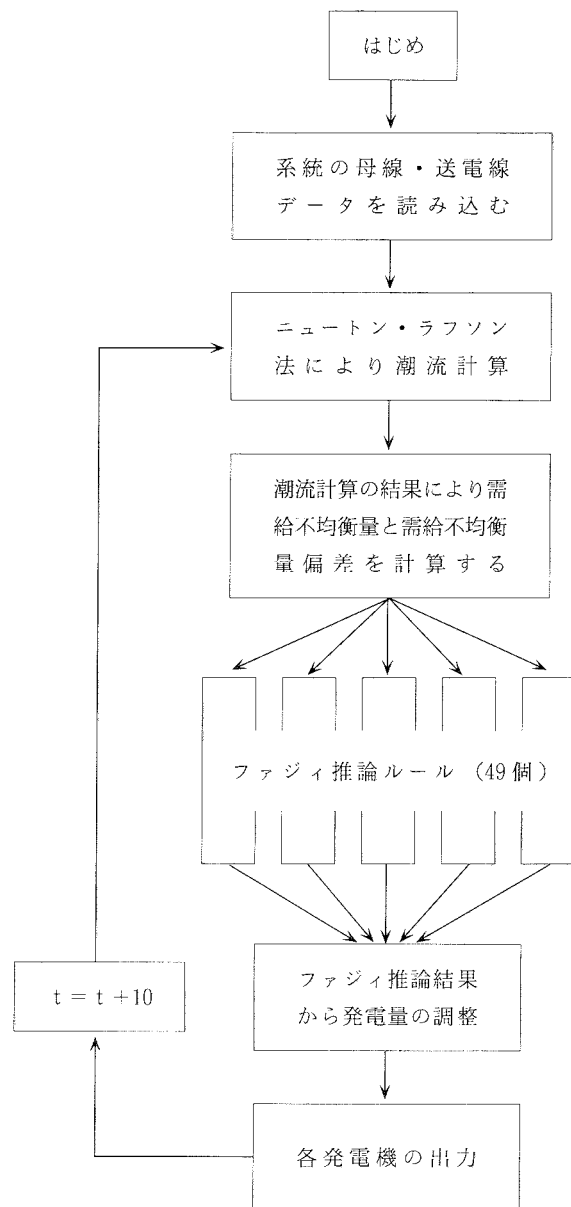


図12 プログラムの概要

本需給制御システムはFORTRAN言語で構築した。プログラムの流れは図12に示すようになる。システムでは10分ごとに一回の計算を行う。

また、ファジィ推論の入力データは需給不均衡量と需給不均衡量偏差で、出力データは発電調整量である。

発電調整量は各発電機の出力量を調整するデータである。全体計算のステップは次の通りである。

- (1) 対象システムモデルの母線データ（母線名、電圧、有効電力、無効電力および発電機または負荷の別）をファイルから読み込む。
- (2) 送電線データ（起点、終点、抵抗、リアクトル、対地容量、タップ、配電線の回線数）もファイルから読み込む。
- (3) ニュートン・ラフソン法で電力方程式を解析して潮流計算を行う。これにより各母線の電圧および位相角を計算する。
- (4) 需給不均衡量と需給不均衡量偏差を計算する。
- (5) ファジィ推論ルールにより、ファジィ論理演算を行う。
- (6) ファジィ論理演算の結果に基づいて発電調整量を計算する。
- (7) 発電調整量から各発電機の出力量を決める。
- (8) 時間を10分増やし、ステップ(3)に戻る。

以上のような計算を繰り返すと、1日（24時間）の需給不均衡量のデータを得られる。この需給不均衡量は止の場合、電力会社から電力融通量である。

## VI シミュレーション結果

この章では4章に説明したファジィ推論法に従って作成したシステムのシミュレーション結果を検討する。

まず、推論に使うルールは需給不均衡量  $e$  と需給不均衡量偏差  $\Delta e$  の両方のデータが負荷変動に対して同等の影響力を持っていると考えて、表1の制御規則表を決める。表1の制御規則表に基づいて、構築したプログラムのシミュレーション結果は図13に示すようになる。この結果から、需給不均衡量は最大で-14.6%（コージェネレーションシステムから電力会社に流入量）、また、電力会社からの融通電力も5%に達することになる。このことから融通限度（コージェネレーションシステム容量の3%）を越えたので、表1の制御規則表によるシミュレーション結果は日標を達成できないと判明した。

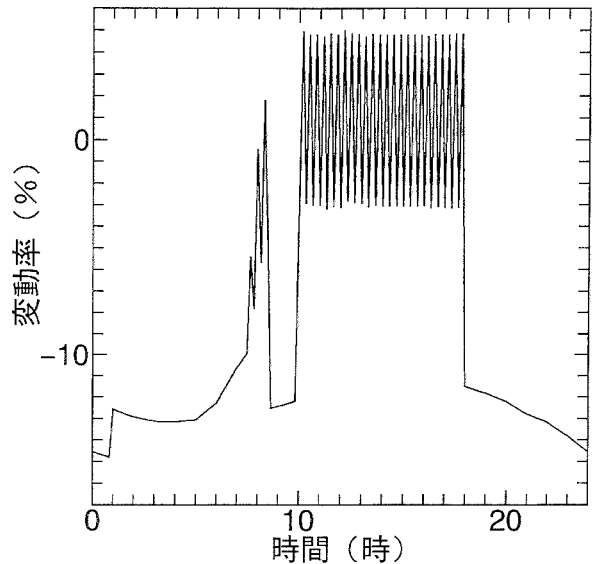


図13 制御結果

表2 制御規則表

$\Delta e \backslash e$	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	NB	NM	NS	NM	NS	PM	PB
NM	NB	NM	NS	NS	ZR	PM	PB
NS	NB	NM	NS	ZR	ZR	PM	PB
ZR	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
PS	NB	NM	ZR	ZR	PS	PM	PB
PM	NB	NM	ZR	PS	PS	PM	PB
PB	NB	NM	PS	PM	PS	PM	PB

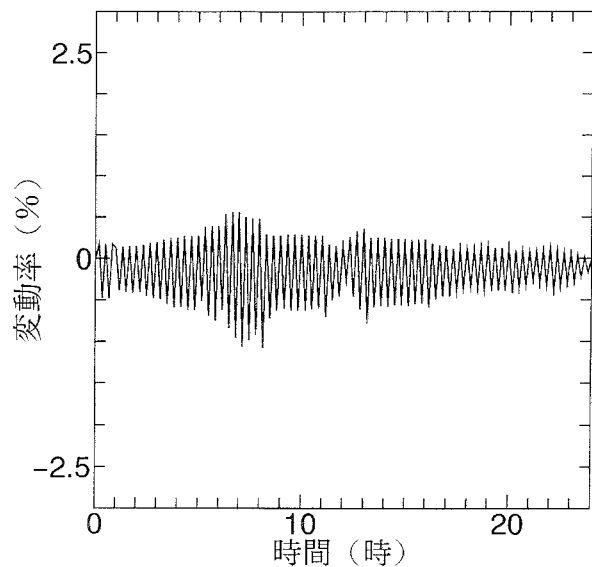


図14 制御結果

次に、需給不均衡量偏差  $\Delta e$  の影響力を小さくして、表2に示すような制御規則表に変更する。表2の制御規則表に基づいてプログラムを構築した。このプログラムのシミュレーション結果は図14に示すように、不均衡値が $\pm 1.5\%$ 以下になる。図14の結果から、本方式の制御が導入されると、需給不均衡量を規定値（コージェネレーションシステム容量の3%以下）に制御することができた。

以上、ファジイ推論の導入によって、システムの需給バランスを有効に制御できることを証明した。

## VII 結 論

電気事業法の改正により、民間企業も直接に特定地点に電力を供給することができる。しかし、地域系統内の電力需給バランスをうまく制御できないと、電力会社からのバックアップ料金が数倍請求されることがある。本研究はこの地域系統の需給バランスを有効に制御するため、ファジイ推論の手法を導入する需給制御システムを構築した。以下、その結果をまとめる。

- (1) 電気事業の規制緩和により、売電事業に参入する企業が多いと予測される。しかし、このような特定電気事業の小規模系統から急激な負荷変動が発生すると、電力系統の安定性に重大な影響を与えたと考えられる。
- (2) 6章のシミュレーション結果から、ファジイ推論が地域配電系統の需給制御に導入されると、電力需給の不均衡差を系統容量の $\pm 1.5\%$ 以下に押さえることができた。これは電力会社のバックアップ許容値3%より低いので、ファジイ推論の有効性を証明できた。
- (3) 本実行例も能力開発セミナー「ファジイ制御理論とシミュレーション」の教材として使われている。受講者のアンケート調査結果から、この例を導入するセミナーに「セミナーの内容をよく理解できた」とか「テキストの内容が適当」などの評価があった。今後はセミナー受講者の学習しやすい対話式のプログラムを開発する予定である。

### [参考文献]

- (1) 電気事業審議会電力基本問題検討小委員会中間報告書 (1994年)
- (2) 電力系統の需給制御技術調査専門委員会編：「電力系統の需給制御技術」、電気学会技術報告(II)、

No.302 (1990年)

- (3) 垣本、林、杉原：「超高圧系統全停電時の復旧操作における需給制御のエキスパートシステム化」、電気学会論文誌B、VOL.114-B、No.4、1994 PP.343~351
- (4) 村上監修：「ファジイシステム演習問題集」、工業調査会 (1992年)
- (5) 水本：「ファジイ制御向きのファジイ推論」、計測と制御、(1989年1月)
- (6) 向殿：「ファジイ理論の基礎と情報処理への応用」、情報処理学会誌解説 (平5-5)
- (7) 水本：「ファジイ理論とその応用」、サイエンス社 (1989年)
- (8) 林文彬：「ファジイ推論を用いた系統における多数分散電源導入時の負荷変動シミュレーション」、職業能力開発報文誌第11巻第1号P21~28 (1999年)
- (9) 林文彬：「ファジイ推論を用いた地域配電系統の需給制御システムの構築」、大阪職業能力開発短期大学校紀要第5号、1997年4月