

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

大阪職業能力開発短期大学校 林 文 彬

The Simulation of System Load Fluctuation by Fuzzy Inference According to Increment of Co-generation Systems

Bunhin LIN

要約 近年、省エネルギーブームの中で、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などの業者は電力・熱源として注目を集めている⁽¹⁾。さらに、電気事業法の規制緩和により、自家発電の余った電力も自由に売電できる。こういう会社経営のコスト削減と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中心とする多くの分散電源が積極的に導入されると見込まれる。本研究では、現在の業者がもっているコージェネレーションシステムの運転パターンと容量をモデルにして、将来コージェネレーションシステムが多数導入されることを想定して検討した。もし業者のコージェネレーションシステムは現在のような独自の運転パターンのままで利用されると、電力系統の需給にどのような影響が出るか、リアルタイム処理の手法でシミュレーションした。また、開発したプログラムは能開セミナー「ファジイ制御理論とシミュレーション」の応用例の一つとして利用し、セミナー受講者に本プログラムは、ファジイ制御の学習教材として有効に活用できるものと評価された。

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予想される。そこで、電気事業の緩和と共に、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を中心とする分散電源が積極的に導入されると見込まれる。しかし、一般にコージェネレーションシステムの運転は常に業者の業種別の稼働時間によって運転することが多い。それで、多数のコージェネレーションシステムが導入されれば、その発電機の起動・停止などの操作により系統の電力変動に与える影響について検討する必要がある。本システムは将来コージェネレーションシステムが多数導入されることを想定し、現在各業界の稼働しているコージェネレーションシステムの実績をモデルにして、

リアルタイム処理の手法で系統負荷の変化をシミュレーションする。さらに、系統負荷変動を小さくする方法も検討する。第II章では対象システムモデルについて述べる。第III章では負荷と分散電源の特性について分析する。第IV章では243件ユーザの発電機の起動・停止に必要な時間と出力をファジイ推論により求められる手法を提案する。第V章ではシステムの構成について説明する。第VI章では多数コージェネレーションシステムの導入により系統負荷の変動様子とその解決法を検討する。第VII章で結論を述べる。

II 対象システムモデル

本システムの対象システムは図1のように設定する。そのうち、Gは系統電力電源、負荷は対象システム管轄下の

全体需要家の消費電力の和、母線1～6は系統管轄下の各エリアのコージェネレーションシステムのまとめである。

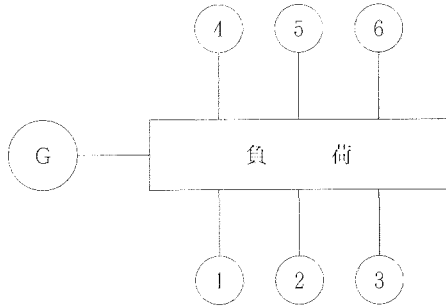


図1 対象系統

また、現在モデル系統内のコージェネレーションシステム実績⁽²⁾は表1の示すように民生用134件、産業用109件があって、母線1～6に分散している。その出力はおよそ全体負荷の2%を占める。

本論文では年平均2.4%の伸び率の電力需要に対して、コージェネレーションシステムを導入する伸び率はさらにそれを上回ると想定する。こうすると、10年後全体コージェネレーションシステムの出力は全体需要の15%になると設定し、このような場合の負荷変動に対する影響について検討する。

表1 コージェネレーションシステム実績

	1機	2機	3機	4機	合計
民生用	82件	34件	16件	2件	134件
産業用	82件	23件	3件	1件	109件

Ⅲ 負荷と分散電源の特性分析

1 負荷特性

まず、負荷には図2の(a)線は実際にモデル系統全体の消費電力の日負荷曲線である。また、予測によると、今後10年間の需要は年平均2.4%で伸びると見込まれる。そこで、対象負荷量の設定は図2の負荷曲線(a)を基にして、さらに今後10年間の伸率を加える。その結果、図2の(b)線のようになる。

2 発電機特性

本モデル系統の管轄下のコージェネレーションシステムの数には表1に示すとおりであるが、それらは全体負荷変動への影響を評価するために、コージェネレー

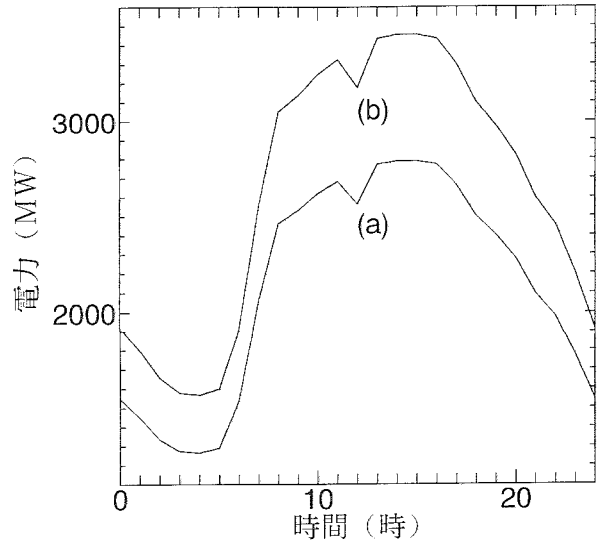


図2 日負荷曲線

ションシステム一機一機の出力変動の振る舞いを検討して導入しなければならない。まず、調査の結果によると、コージェネレーションシステムの稼働時間帯は業種別により表2のようにまとめることができる。

表2 業種別の運転パターン

起動	停止	業種
06:00	23:00	繊維、木材
07:00	22:00	化学、電機、金属、紙
07:00	24:00	ホテル
07:30	22:00	鋼鉄業
08:00	18:30	電算ビル、飲料、飼料
08:00	20:00	病院
08:00	22:00	事務所、食品
09:00	17:00	学校
09:00	18:00	娯楽
09:00	22:00	店舗
10:00	18:00	集合住宅

また、コージェネレーションシステムの発電機が起動から定格出力までの時間と出力、および定格運転から運転停止の時間と出力は発電機の容量と種類により異なる。図3に火力発電機が並列してから全負荷をとるまでの一例を示す⁽³⁾。並列後の発電機は一定の出力上昇特性に従って出力を上げる。同じように運転停止も一定の出力下降特性で出力を下げる。図4に全負荷運転の発電機は運転を停止するまでの出力の様子を

示す¹⁴⁾。表3は採取した発電機の起動および停止に必要な時間のデータである。

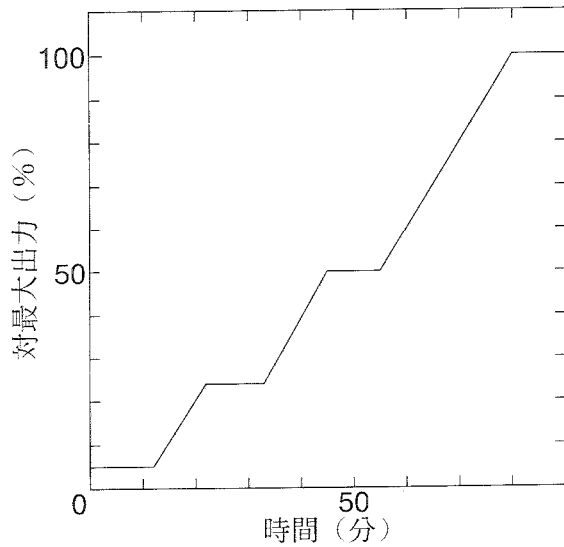


図3 発電機起動時の出力特性

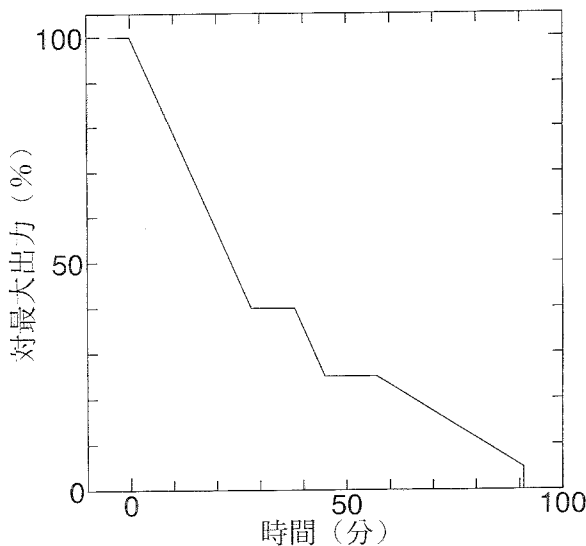


図4 発電機停止時の出力特性

表3 発電機の起動・停止に必要な時間

容量(kW)	起動(分)	停止(分)
100000	80	91
6700	27	23
2800	15	20
1850	5	8

IV ファジイ推論の導入

本システムでは系統の負荷変動をシミュレーションする際、第三章に述べた負荷特性と発電機特性の制約を考慮して行わなければならない。つまり、

- 系統の1口負荷の変動様子
- 各業種の発電機の運転時間帯
- 各発電機の起動・停止に必要な時間
- 各発電機の起動・停止時の出力パターン

などの制約がある¹⁴⁾。

しかし、それらの制約を考慮するために、表1の243件の発電機の起動・停止に必要な時間と出力のデータを集めるのは難しい。現在、採取できた発電機のデータは表3の示すような数件だけである。そこで、本研究は243件発電機の起動・停止に必要な時間と出力を正確に反映するために、表3のデータを基にしてファジイ推論(代数積・加算・重心法)¹⁵⁾を行い、各発電機の起動および停止に必要な時間を推論する。

1 前件部変数1個、後件部変数1個、ルール1個の場合

1850MW以下の発電機の起動と停止に必要な時間を推論するとき、ファジイ推論のルールはただ一個である。この一個のルールを台集合や三角集合のファジイ推論に使うと、図5の示すように2個の出力の要素があるので、どちらにしてよいかわからない。

ルール : if M=NS then Q=PS

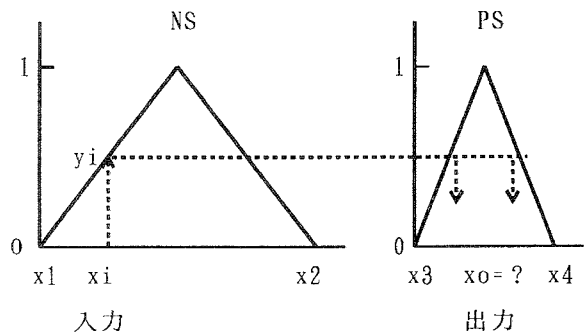


図5 単純な方法では推論できないルール

それで、ファジイ集合の一致度を用いたファジイ推論により推論を行う¹⁶⁾。推論規則は次のような例がある。

規則 : if X is A then Y is B

事実 : Y is B'

結論 : X is A'

ファジイ集合の一致度を用いたファジイ推論は、多少あいまいな規則 $A \rightarrow B$ と前件部 A と異なる事実 A' により、後件部 B と異なる結論 B' を導くことができる。これはきわめて単純なファジイ推論であり、具体的な概念図は図6の示すようである。

ルール : if $M = NL$ then $Q = NL$

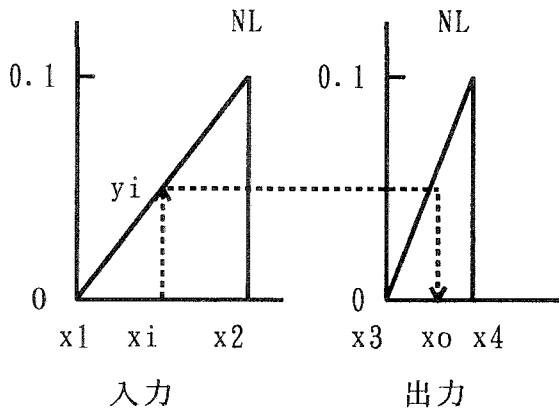


図6 ルール1個の場合の推論

また、メンバーシップ関数のグレード y_i と出力 x_o は式(1)と式(2)により、求められる (図6を参照)。

$$y_i = \frac{x_i \times (y_1 - y_2) + x_1 \times y_2 - y_1 \times x_2}{x_1 - x_2} \dots\dots\dots (1)$$

$$x_o = x_3 + \frac{x_3 - x_4}{y_3 - y_4} (y_i - y_3) \dots\dots\dots (2)$$

2 ルールが複数の場合の推論

この方法は主に1850MW以上の発電機の起動及び停止に必要な時間に推論を行う場合、「代数積-加算-重心法」を採用する。これは条件部1変数、結論部1変数で、制御ルールが2つの場合の推論である。例えば、

ルール1 : if $x_i = NM$ then $Q = PS$

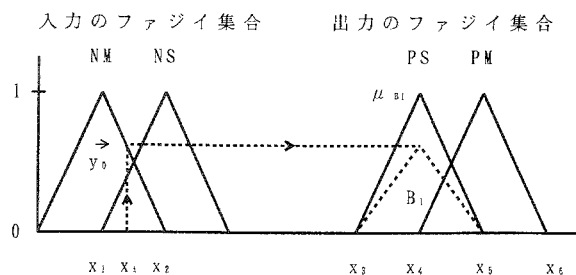
ルール2 : if $x_i = NS$ then $Q = PM$

というルールはあり、その推論手順は下記の記述のようになる (図7を参照)。

(1) 実際の入力 x_i に対して、メンバーシップ関数のグレード y_o を求める。メンバーシップ関数を式で示すと、式3のようになる。(図7(a)を参照)

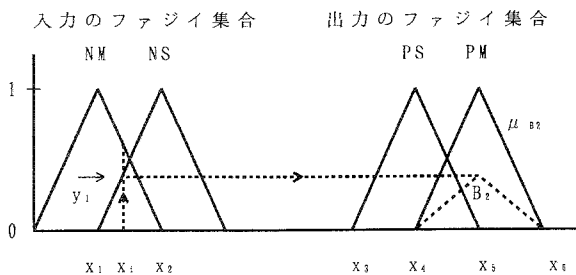
$$y_o = -\frac{1}{x_2 - x_1} (x_i - x_1) + 1 \dots (3)$$

ルール1 : if $x_i = NM$ then $Q = PS$

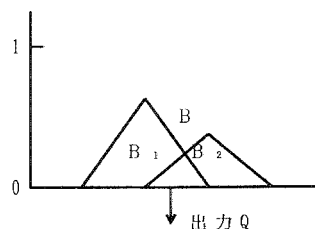


(a) ルール1によるPSの代数積演算

ルール2 : if $x_i = NS$ then $Q = PM$



(b) ルール2によるPMの代数積演算



(c) 代数和をとり重心法で出力を求める

図7 代数積・加算・重心法による推論法

(2) ルール1の推論結果 B_1 を y_o と μ_{B1} の代数積より求める (式4)。

$$B_1 = y_o \times \mu_{B1} \dots\dots\dots (4)$$

(3) 実際の入力 x_i に対して、メンバーシップ関数のグレード y_i を式5のように求める (図7(b)を参照)。

$$y_i = \frac{1}{x_2 - x_1} (x_i - x_1) + 1 \dots\dots (5)$$

(4) ルール2の推論結果 B_2 を y_i と μ_{B2} の代数積より求める (式6)。

$$B_2 = y_i \times \mu_{B2} \dots\dots\dots (6)$$

(5) 2つのルールの推論結果を合成し出力のファジイ集合 B を式7のように求める (図7(c)を参照)。

$$B = B_1 + B_2 \dots\dots\dots (7)$$

(6) ファジイ集合 B から重心を求めることによって規

則全体の推論結果Qを得る（式8を参照）。

$$Q = \frac{\int x \mu_B(x) dx}{\int \mu_B(x) dx} \dots\dots\dots (8)$$

以上、ファジィ推論により各コージェネレーションシステムの発電機は起動から定格運転するまで、または定格運転から停止するまでの必要時間（分）を推論する。そして、その時間（分）に基づき、発電機の起動運転または停止運転は現在時刻で何分間たったか、発電機の出力を求める。

V システムの概要

負荷の日負荷特性と各発電機の起動・運転特性の制約から本システムの流れは図8の示すようになる。その概要は下記の通りである。

- (1) まず、系統の母線（母線名、電圧、有効電力、無効電力および発電機か負荷）および送電線（起点、終点、抵抗、リアクトル、対地容量、タップ、送電線の本数）のデータをデータファイルから読みとる。
- (2) 計算開始時刻と計算終了時刻を設定する。
- (3) 図1の母線1～母線6に分散する243件のコージェネレーションシステムのデータファイルを順番にオープンする。そして、オープンしたファイルから一件のデータを読みとる。
- (4) 現在時刻において各件のコージェネレーションシステムは起動中、停止中、停止、稼働のいずれかを判断し、起動中または停止中の場合はファジィ推論により発電機の出力を計算する。停止の場合は発電機の出力を0、稼働中の場合は発電機の出力を定格出力とする。
- (5) (4)で計算した243件コージェネレーションシステムの出力を系統の母線1～6の出力データとしてシステムに組み込む。
- (6) 潮流計算を行い、各母線の電圧および位相角を計算する。本システムではニュートン・ラフソン法で電力方程式を解析して潮流計算を行う。このとき、LU分解法を導入して計算の高速化を図っている。
- (7) 潮流計算の結果により系統の負荷変動と変動率を求める。
- (8) 現在時刻が終了時刻であれば、本システムの実行を終了する。そうでなければ、時間は10分を増やして(3)に戻る。

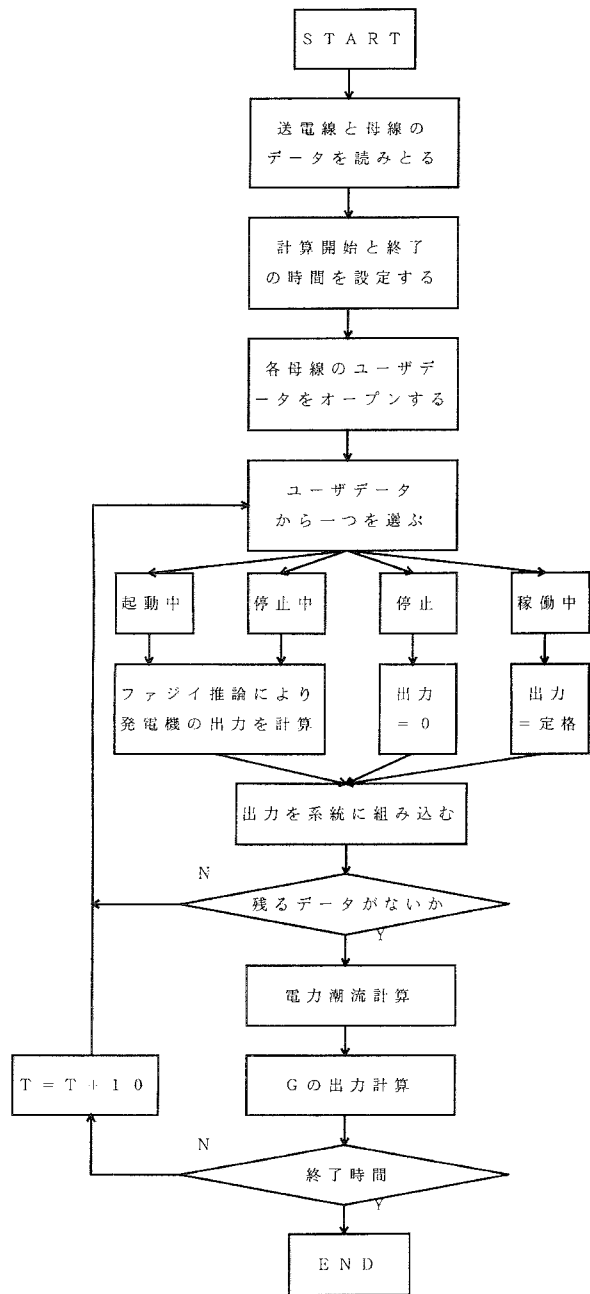


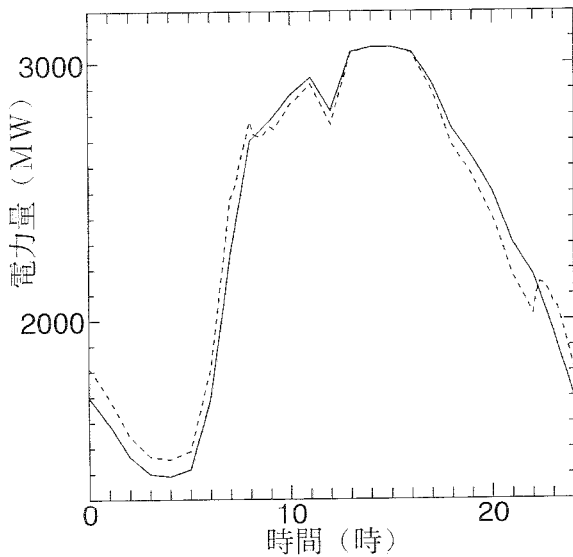
図8 システムの構造

VI 計算結果

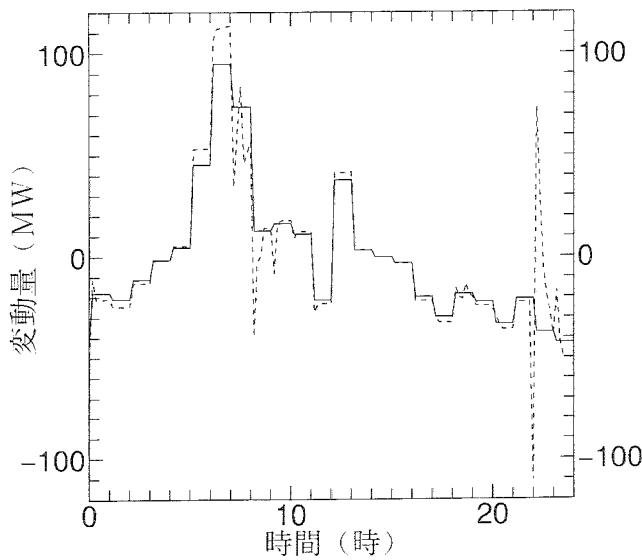
本システムは第III章に述べた各コージェネレーションシステムの運転時間帯、起動・停止時間及び出力の制約を考慮し、系統に系統容量の15%のコージェネレーションシステムを導入する場合と導入しない場合の負荷変動様子をシミュレーションして比較する。さらに2機発電機をもつコージェネレーションシステムには、システム内の各発電機の起動時間と停止時間をずらして、その負荷変動の様子をシミュレーションする。それぞれの結果は次のようになる。

1 コージェネレーションシステムの無導入と導入との比較

図9(a)はシステムの負荷変化の様子(実線はコージェネレーションシステム無導入、破線はコージェネレーションシステム導入)を示す。図9からコージェネレーションシステムを導入する場合、同じ負荷容量に対して早朝時の需要電力は増える。これは系統電力の負荷平準化に大きな効果があるといえる。



(a) 系統の負荷変化



(b) 系統の負荷変動量

図9 系統の負荷変化と変動量

しかし、コージェネレーションシステムの起動および停止の多い時間帯に際して系統負荷の変動量は22時の-110MWから22時10分の73MWの急変動が出てくることわかった(図9(b)の破線を参照)。つまり、10分間で系統負荷の6%の183MWの変動差がある。

系統電力が短時間でこのような急変動に対応するのは難しい。

現在、コージェネレーションシステムの運営はユーザが各自管理しているので、電力会社から直接にコントロールできない。将来、系統に悪い影響を与えないため、ユーザは何等かのルールを守って、系統への影響の軽減を図らなければならない。ここで、これについて検討する。

2 同じユーザの複数発電機の起動/停止時間を10分ごとにずらす場合

まず、2機以上の発電機をもつユーザは1号機、2号機の順で発電機の起動時刻をそれぞれ10分ごとにずらす場合を考える。例えば、表2の示すように電機業者の自家発電機の運転開始時刻が7時、運転停止時刻が22時である。2機以上の発電機を持つユーザは、1号機の起動時刻を朝7時、2号機を7時10分に設定する。また、各発電機の停止時刻も停止時刻前の10分ごとにずらす。例えば、1号機発電機の運転停止時刻を22時、2号機を22時10分に設定する。そのシミュレーションの結果は図10の示すようになる。

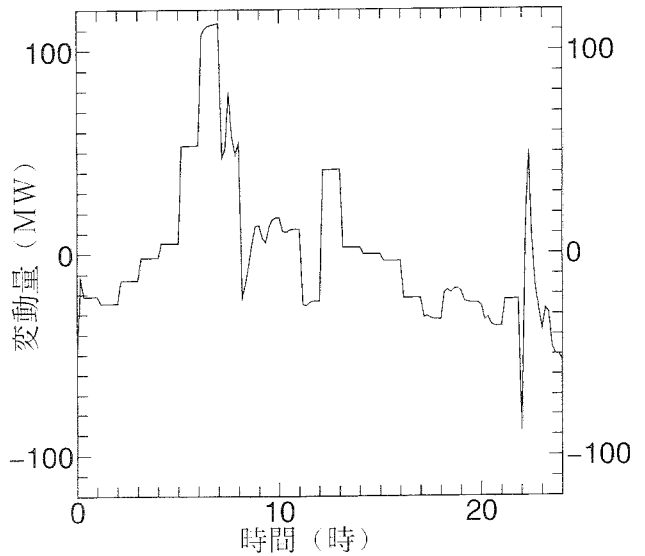


図10 系統の負荷変化と変動量

図10から変動量は22時の-88MWから22時20分の50MWに変動するので、時間は20分間で図9(b)の時間(10分)より長くなり、変動差も系統負荷の4.5%の138MWで図9(b)の183MWより小さくなった。

3 同じユーザに複数発電機の起動/停止時間を20分ごとに置く場合

VI章の2節と同じような方法で、2機以上の発電機をもつコージェネレーションシステムはそれぞれの発電機の起動時刻と停止時刻を20分ごとにずらす。そのシミュレーションの結果は図11の示すようになる。

この結果から2機をもつユーザは発電機の起動・停止を20分間の差で操業すると、系統負荷の変動量は22時の-88MWから22時20分の10MWに変動する。変動差は20分間で系統負荷の3.2% (98MW) まで大きく抑えられる。したがって、この調整による効果で系統電力に与える影響を最小限にすることができた。

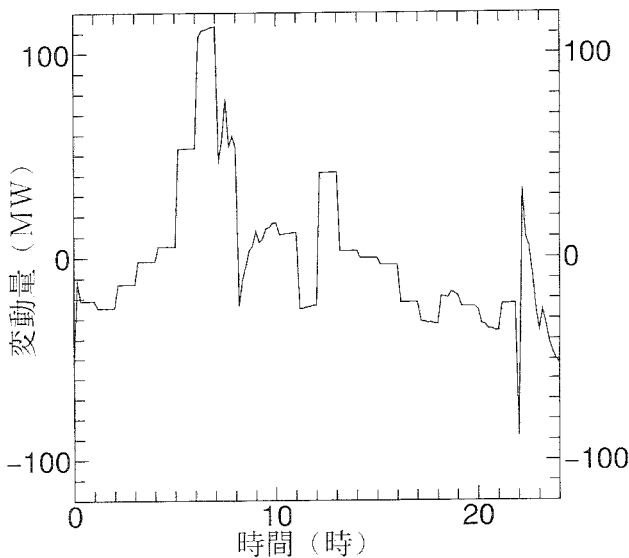


図11 系統の負荷変化と変動量

VII 結 び

本研究は将来分散電源が多数導入されることを想定し、系統への負荷変動の影響をシミュレーションするプログラムを作成した。また、本プログラムは現在大阪短大で実施している能開セミナー「ファジィ制御理論とシミュレーション」の応用例の一つとして開発したものである。以下、その結果をまとめる。

- (1) 省エネルギーブームの中で、将来コージェネレーションシステムを大量に導入されると考え、もし、大量に導入されれば、コージェネレーションシステムの導入のシミュレーション結果 (VI章1節) から系統の負荷変動が急変することがわかった。
- (2) VI章の2節と3節のシミュレーションから、コージェネレーションシステムユーザの自主管理により、2機以上の発電機をもつユーザは各発電機の

起動と停止の時間をずらして、運転すると、系統の負荷変動は大きく緩和できることを証明した。

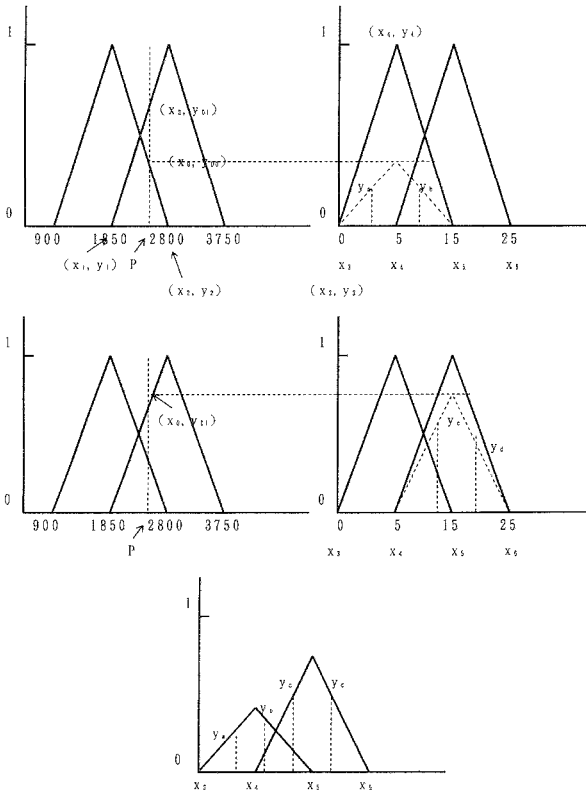
- (3) 本プログラムを大阪短大で実施する能開セミナーに導入してみると、実施結果から、学習者はこの例のプログラムを作成する練習により、ファジィ制御の理論と応用との関係をわかりやすく理解できた。したがって、本プログラムはファジィ制御の学習に効果を発揮するものと考えられる。

【参考文献】

- (1) 「コージェネレーションシステム」, 電気学会技術報告 (II) 第263号
- (2) 「コージェネレーション導入実績」, (株)日本ガス協会, 平成6年5月
- (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) 調査専門委員会: 「電力系統の需給制御技術」, 電気学会技術報告 (II)、NO.302
- (5) 水本雅晴著、コンピュータロ No.28 特集/ファジィ制御 P32-45
- (6) 横井与次郎: 「ファジィ制御とソフトファジィコン入門」, ラジオ技術社
- (7) 林文彬: 「分散電源の普及による系統負荷変動への影響シミュレーション」, 大阪職業能力開発短期大学校紀要, 第6号, 1998年3月

付録 1

能開セミナー用ファジィ演習プログラムの推論図



付録 2

能開セミナー用ファジィ演習プログラムのフローチャート

