

## 分散電源を考慮した負荷推定機構とファジー制御による負荷周波数制御

Load frequency control considering distributed generator used Demand Estimation and GA.

雪田 和人<sup>†</sup>, 八木 敬祐<sup>††</sup>, 小島 大輔<sup>††</sup>, 後藤 泰之<sup>†</sup>, 一柳 勝宏<sup>†</sup>

Kazuto Yukita, Keisuke Yagi, Daisuke Kojima, Yasuyuki Goto, Katsuhiko Ichiyanagi

水谷 芳史<sup>†††</sup>

Yoshihumi Mizutani

**Abstract** This paper examined the load frequency control method in the power system that introduced distributed generator. Examined content is the case of the distributed generator participated / nonparticipated in the frequency control of the system. Control of the power plant in each area is the case of the control method using the load demand estimation and GA, or TBC. To study the effectiveness of the distributed generator, this paper considered the computer simulation 3-area load frequency control model system which introduced the distributed generator.

### 1. はじめに

電力系統は、社会生活や産業の高度化、多様化に伴い安定で信頼性の高い電力の供給がますます要求されている。この系統において、電力市場の規制緩和や自由化に伴い独立系発電事業者(Independent Power Producer: IPP), 燃料電池発電, 風力発電, 太陽光発電など分散型電源(Distributed Generator: DG)などが系統内に増加してくるものと思われる。また、これまで地域独占であった電力の売買も他地域の電力会社やIPPからの購入も可能となり、今後系統全体がより複雑化の傾向になるものと思われる。

このような複雑多岐にわたる系統において、電力需給制御の中心に、系統の周波数および連系線潮流偏差を基準値に維持することを目的とした負荷周波数制御(Load Frequency Control: LFC)がある。代表的なLFC手法として、連系する系統の周波数を規定値に維持する定周波数制御(Flat Frequency Control: FFC)ならびに連系する系統の周波数と連系線潮流を既定値に維持する周波数偏倚連系線電力制御方式(Tie line Bias Control: TBC)がある。これまでの手法としては、大容量の系統でFFCを、FFC方式と連系する比較的中小容量の系統でTBCを実施してきた。しかしながら、電力市場の規制緩和ならびに自由化に伴い、全系においてTBCを実施しているのが現状である。

この電力自由化に伴い電力の品質に関して、系統運用補助サービス(アンシラリーサービス)が注目されつつある。アンシラリーサービスは、系統制御、周波数制御、電圧安定性などの項目から構成されている。このうち周波数制御については、調整容量の問題や制御手法の提案ならびに新しい周波数制御解析モデルに関して、盛んに研究がなされつつある<sup>(1)~(11)</sup>。

そこで本論文においては、近年増加しつつある分散電源が導入されたLFCモデルを用いて、分散電源が系統制御に参加した場合と分散電源が系統制御に参加しなかった場合について各々検討を行った。その際、分散電源で実施したLFC手法は、自地域の周波数偏差を用いたPID制御である。一方調整用発電所で実施したLFC手法としては、地域制御誤差を用いたTBCと著者らが開発してきた遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)と負荷推定機構を用いたLFC手法<sup>(12)</sup>を用いて、比較検討を行った。その結果、これまで提案してきたLFC手法は、分散電源が存在する系統においても有効であることを、3地域LFCモデルを用いて立証した。

### 2. モデル系統

本論文で用いる分散電源は、大きく2種類に分類する。ひとつは、太陽光発電、小型風力発電などが系統連系する際に、蓄電池とインバータを介して系統連系する場合である。図1に概念図を示す。もうひとつは、小型の発電機、マイクロガスタービンならびに燃料電池発電方式のようにインバータを介さないで系統連系するものである。このとき

<sup>†</sup> 愛知工業大学工学部電気工学科(豊田市)

<sup>††</sup> 愛知工業大学大学院電気電子工学専攻(豊田市)

<sup>†††</sup> 東海大学工学部電気工学科(平塚市)

の概念図を図2に示す。本論文では、このような分散電源を文献(13)と(14)などを参考にして、図3中に示す一次遅れ系で表されるものとして考慮した。

また系統全体としては、これまで検討してきたLFCシステムであり3地域くし形系統を用いた。概念図を図4に示す。各地域には、調速機(Governor), タービン(Turbin), 再熱タービン(Heat Recovery Turbin)から構成される調整用発電所を一概所考慮しているものとした。なお本論文では、調速機の上下限制約やタービンなどの増加率制限は考慮していない。

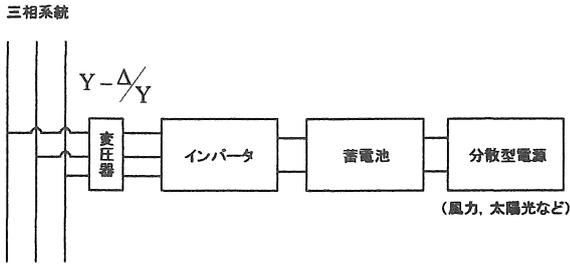


図1 蓄電池などを用いたインバータを用いた分散電源の概念図

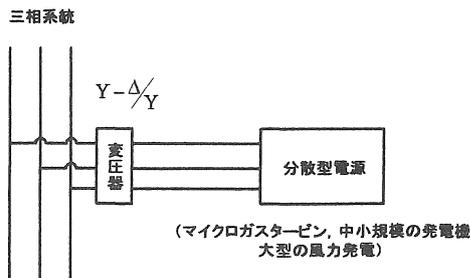


図2 インバータを介さないで系統連系する分散電源の概念図

3. 制御手法

本論文における分散電源は、分散電源が系統制御に参加した場合と系統制御に参加しなかった場合の二種類について検討を行った。分散電源が系統制御に参加した場合は、自地域の周波数偏差を入力としたPID制御を実施した。また、調整用発電所での制御手法としては、

- 1). 負荷推定機構とGAとを組み合わせた手法<sup>(12)</sup>
- 2). 地域制御誤差を用いたTBC

を実施した。

4. シミュレーション結果と検討

本論文のシミュレーションは、図3の分散電源を考慮した3地域LFCモデルにおいて、表1の定数を用いて実施した。地域1と地域2と地域3の系統容量比は1:1:1とした。また、負荷推定の制御周期は0.02sとし、さらに制御周期は0.1sとした。

シミュレーションのシナリオは、地域1の分散電源が出力0.05(P.U.MW)を地域2および地域3に融通する場合について行った。

このとき、分散電源ならびに調整用発電所は、以下に示す条件で検討を行った。

- ・分散電源が系統制御に参加しなかった場合
  - 1)調整用発電所で負荷推定機構とGAの制御を実施したとき
  - 2)調整用発電所で地域制御誤差を用いたTBCを実施したとき
- ・分散電源が系統制御に参加した場合
  - 3)調整用発電所で負荷推定機構とGAの制御を実施したとき
  - 4)調整用発電所で地域制御誤差を用いたTBCを実施したとき

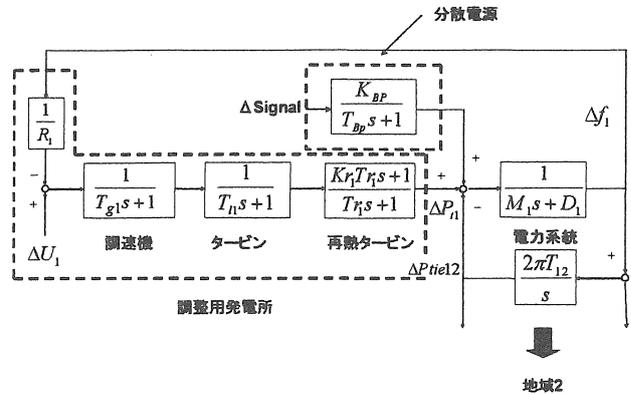


図3 地域1の構成線図

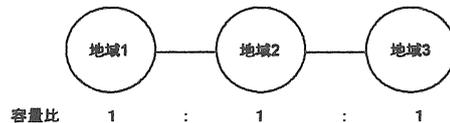


図4 3地域LFCモデルの概念図

表1. 使用定数

$M1=0.150, D1=0.0100, M2=0.200, D2=0.0120,$
$M3=0.167, D3=0.0167,$
$TT1=0.25, TG1=0.10, Tr1=10.0, Kr1=0.5,$
$TT2=0.25, TG2=0.10, Tr2=10.0, Kr2=0.5,$
$TT3=0.30, TG3=0.08, Tr3=10.0, Kr3=0.5,$
$R1=2.4, R2=2.4, R3=2.4,$
$T12=0.08674, T23=0.08674, KBP=1.0, TBP=0.026,$
$\Delta Signal=0.05$

4. 1 分散電源が系統制御に参加しなかった場合

図5は、図3のモデル系統において地域1の分散電源の出

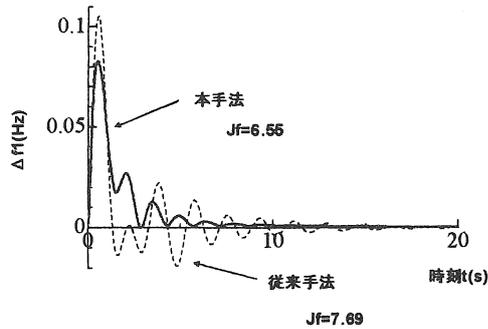
力を地域2と地域3に0.025 (P.U.MW)を各々送電した場合の制御特性である。同図(a)は地域1の周波数偏差 $\Delta f_1$ , (b)は地域2の周波数偏差 $\Delta f_2$ , (c)は地域3の周波数偏差 $\Delta f_3$ , (d)は地域1・2間の連系線潮流偏差 $\Delta P_{tie12}$ , (e)は地域2・3間の連系線潮流偏差 $\Delta P_{tie23}$ である。このとき場合、分散電源は系統制御に参加しないで、目的とする電力融通を地域2と地域3に行っているものとした。また各地域の調整用発電所は、負荷推定機構とGAを用いたLFC手法(本手法)あるいはTBC(従来法)を実施しているものとした。ここで、負荷推定とGAを用いた手法におけるパラメータは、以下の通りである。まず、PD制御器のゲインの設計範囲は比例ゲイン $K_{Pi}$ , 微分ゲイン $K_{Di}$ 共に0.1~0.1の値に経験的に設定した。個体数は100, 交差率を40%, 淘汰率を99%とし、エリート保存を実施している。

ここで、本手法と従来法を比較するために次に示す評価関数を用いるものとする。

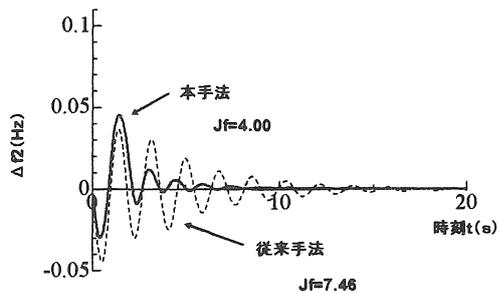
$$J_f = \sum |\Delta f_i(k)| \quad \dots (1)$$

$$J_{ptie} = \sum |\Delta P_{tieij}(k)| \quad \dots (2)$$

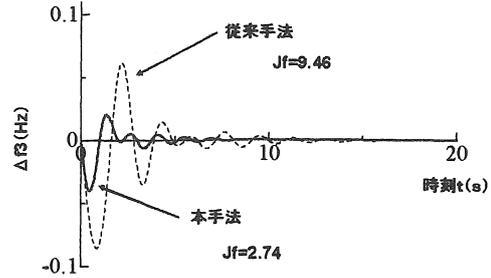
図5において、本手法と従来法を各々比較すると、図5(a), (b), (c)において、本手法は従来手法よりも最大振幅を抑制していることが分かる。また、定常状態の収束に関しては、本手法は従来手法にみられた大きな振動もなく、速やかに定常状態に収束していることを示している。図5(d), (e)の連系線潮流偏差の制御特性について比較すると、本手法は周波数偏差と同様に最大振幅を抑制し、地域1の電力を、他地域に速やかに送電していることが分かる。



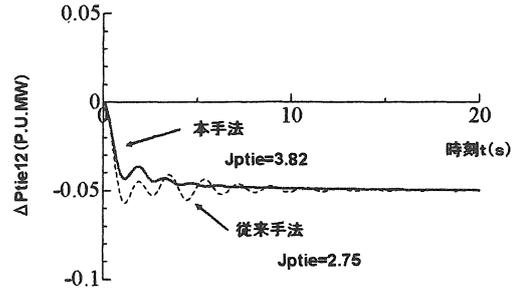
(a) 地域1の周波数偏差の制御特性



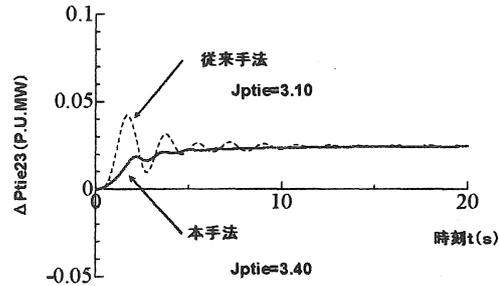
(b) 地域2の周波数偏差の制御特性



(c) 地域3の周波数偏差の制御特性



(d) 地域1・2間の連系線潮流偏差



(e) 地域2・3間の連系線潮流偏差

図5 分散電源が系統制御に参加しなかった場合

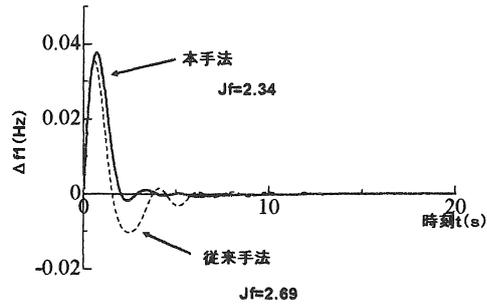
#### 4. 2 分散電源が制御に参加した場合の制御特性

図6は、分散電源が系統制御に参加した場合であり、このとき分散電源は自地域の周波数偏差を用いたPID制御を実施している。ここで、調整用発電所では負荷推定機構とGAを実施した場合(本手法)あるいはTBCを実施した場合(従来法)である。

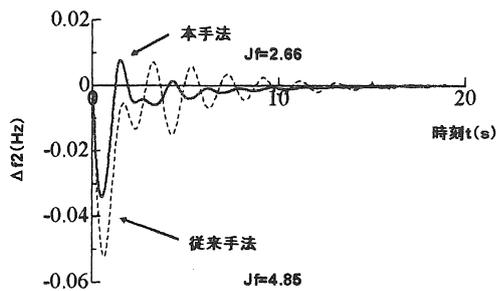
本論文では、分散電源が系統制御に参加することにより、周波数偏差と連系線潮流偏差の応答特性の改善を試みた。分散電源のPID制御器におけるゲインは比例ゲイン $K_{Pi}$ , 積分ゲイン $K_{Ii}$ , 比例ゲイン $K_{Di}$ 共に0.5とし、前章と同様に、図3のモデル系統において地域1の分散電源の出力を地域2と地域3に0.025 (P.U.MW)を送電した場合の制御特性を実施し検討を行った。図6の特性を各々比較すると、周波数偏差は最大振幅を抑制し、規定値に速やかに収束している。また、図6(d), (e)より連系線潮流偏差においては、分散電源が系統制御に参加することにより

最大振幅を抑制し, 速やかに他地域に送電していることが分かる。また, 図5の分散電源が系統制御に参加しなかった場合と比較すると, 参加した場合は制御効果により, 分散電源の出力を調整しているため, 地域1の周波数偏差に改善がみられる。しかし, 地域2と地域3の最大振幅は応答の遅れがみられる。しかし, その後は速やかに規定値に収束している。

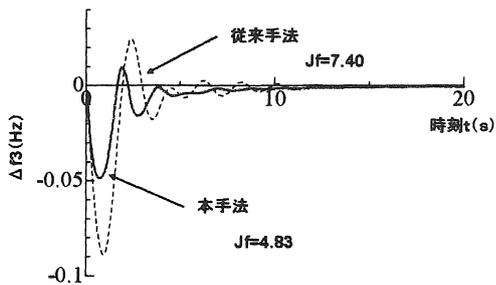
連系線潮流偏差は振動が抑えられ, 規定値を速やかに他地域に送電していることが分かる。



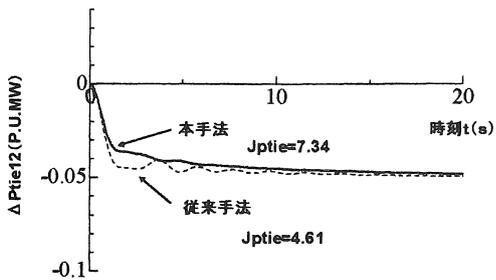
(a) 地域1の周波数偏差の制御特性



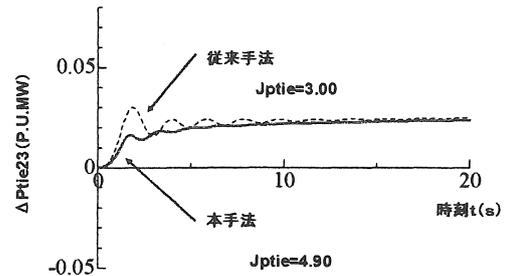
(b) 地域2の周波数偏差の制御特性



(c) 地域3の周波数偏差の制御特性



(d) 地域1・2間の連系線潮流偏差



(e) 地域2・3間の連系線潮流偏差

図6 分散電源が系統制御に参加した場合

## 5. まとめ

本論文では, 近年の規制緩和による電力市場の自由化に伴い, IPP, 自然エネルギー, マイクロガスタービンなどの分散型電源が系統内に増加してくるものと思われる。そこで, これら分散電源が系統制御に参加した場合あるいは系統制御に参加しなかった場合において, 系統の周波数偏差および連系線潮流偏差の制御特性の検討を行った。

その結果, 以下のような成果を得た。

- (1) 周波数偏差は, 従来手法よりも最大振幅を抑制することができ, また速やかに規定値に収束することが分かる。
- (2) 連系線潮流偏差は, 最大振幅を抑制することができ, 他地域に速やかに送電していることが分かる。
- (3) 分散電源が系統制御に参加することによって, 周波数制御特性の改善がみられた。

今後は, 调速機やタービンなどの増加率制限を考慮した場合や, 周波数偏差の最大振幅の抑制として, 分散型電源と調整用発電所の協調が考えられるので, 分散型電源と調整用発電所の協調についての制御手法の開発を小型発電機と小型風力発電機, 太陽光発電機および蓄電池を用いた実験的検討して行っていく予定である。

## 6. 謝辞

本研究は平成12年度科学研究費補助金(奨励研究A)課題番号12750248による研究助成の援助を受けた事を付記する。

## 文献

- (1) 給電常置専門委員会: 電力系統の負荷・周波数制御 電気学会技術報告書, 1976
- (2) 大久保編集: インターユニバーシティ 電力システム工学, オーム社, 1998
- (3) 小日向他: 電力システム工学, 丸善, 1999
- (4) 資源エネルギー庁公益事業部: 電力構造改革, 通商

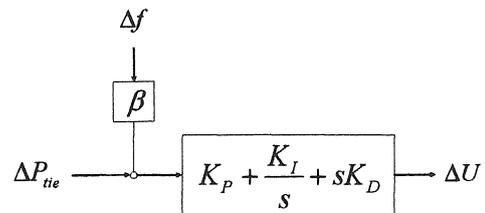
産業調査会, 2000

- (5) 電気共同研究会: 電気共同研究第 55 巻 第 3 号 電力品質に関する動向と将来展望 2000
- (6) 横山, 岡田: 諸外国の電力市場における規制緩和の現状, 電学論 B, Vol.119-b, No1, 1999
- (7) 林: 電力自由化に伴う電力システムの技術課題, OHM 3月号, 2000
- (8) BERGEN, VITAL: POWERSYSTEM, ANALYSIS, PRENTICE HALL 2000
- (9) Ilie Zaborszky: Dynamics and Control of Large Electric Power System, Wiley-interscience 2000
- (10) Ilie and Liu: Hierarchical Power Systems Control Springer, 1996
- (11) 佐々木, 榎本: 電力システムの需給制御と需給制御評価指標に関する考察, 電学論 B, 121 巻 3 号, 2001
- (12) 八木他: 負荷推定機構と遺伝的アルゴリズムを用いた負荷周波数制御, 電気学会電力技術研究会 PE-00-133, PSE-00-188, 2000
- (13) Chun-Feng Lu, Chun-Chang Liu and Chi-Jui Wu: EFFECT OF BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM ON LOAD FREQUENCY CONTROL

CONSIDERING GOVERNOR DEADBAND AND GENERATION RATE CONSTRAINT, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, September 1995

## 付録

本論文で用いた従来手法を付図に示す。



ただし,  $K_P$ : 比例ゲイン,  $K_I$ : 積分ゲイン,  $K_D$ : 微分ゲイン,  $\Delta f$ : 自地域の周波数偏差,  $\Delta P_{tie}$ : 連系線潮流偏差

(受理 平成14年 3月19日)