

琉球大学学術リポジトリ

多地域電力システムを対象としたLQI形負荷周波数制御

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2008-04-02 キーワード (Ja): キーワード (En): Control Systems, Optimal Control, Power Systems 作成者: 山下, 勝己, 宮城, 隼夫, Yamashita, Katsumi, Miyagi, Hayao メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/5575

多地域電力系統を対象としたLQI形負荷周波数制御

山下 勝己* 宮城 隼夫*

LQI-Type Load-Frequency Control for
Multi-Area Electric Energy Systems

Katsumi YAMASHITA* and Hayao MIYAGI*

Summary

This paper presents a new method of designing discrete-type load-frequency regulator for interconnected power systems. Discrete-type optimal control law is decided by defining a discrete-type quadratic performance index and then minimizing it in accordance with the dynamic programming approach. An especially attractive feature of the proposed control scheme is that it requires as inputs signals accumulative quantities of area control error. The realization of such a regulator may be easy and of low cost because of its simple construction.

In this paper, we apply the above method to 3~5-area systems provided with nonreheat type turbines. The results show that the proposed discrete-type regulator can act satisfactorily for improving dynamic responses of the load-frequency control.

Key Words : Control Systems, Optimal Control, Power Systems

1. まえがき

電力系統の負荷周波数制御(LFC)の目的は、時々刻々と変動する負荷変動に対して、各地域内の周波数偏差および連系線潮流の規定値からの偏差を許容範囲内に収めるよう各地域の発電機出力を制御することにある。従来より、このような制御に対してPIフィードバック制御からなる定周波数制御(FFC)および周波数偏き連系線電力制御(TBC)などの制御方式を実施することにより、周波数偏差の抑制については十分な制御効果をあげている。しかしながら、電力系統規模の

拡大化および系統連系の強化が進む今日では、連系線における常時変動潮流が大きくなりすぎたり、運用誤差の補正に起因すると考えられる特異な潮流現象が生じるなど様々な諸問題が表面化してきている。⁽¹⁾

近年、このような問題に対処するため最適制御理論などを応用した効果的な負荷周波数制御方式の研究が報告されるようになってきているが、その多くは連続的な制御情報の伝送に対して考えられた、いわゆる連続形負荷周波数制御方式であり、^{(2)~(5)} 離散的な制御情報に対する離散形負荷周波数制御方式の研究はあまり見あたらない。⁽⁶⁾ ⁽¹⁾ところが、制御情報の伝送方式が離散形情報

受付: 1986年5月10日

*琉球大学工学部電子・情報工学科

伝送（例えばPCM）に移行しつつあることから、また、制御装置のデジタル化が急速に進みつつあることから、離散形LFCの研究が重要な課題となりつつある。筆者らも先に、この考え方に基つきLFCの基本特性（負荷外乱に対して周波数および連系線潮流を規定値に維持すること）を満たし、また離散データを直接利用しうるデジタル制御方式として、地域制御誤差の積算値を用いるLQI形負荷周波数制御を展開した。そして、それを最も基本的な2地域電力システムモデルに適用したが、⁽⁸⁾、⁽⁹⁾ここでは、より一般的なn地域串形電力システムモデルに同手法を適用するものである。

本論文では、以上の構成法を非再熱式火力システムより構成される実用規模の3～5地域串形電力システムモデルの最適制御に適用するとともに、本制御方式の有効性を周波数偏差および連系線潮流偏差などの時間関係図を用いて明らかにしている。

2. モデル系統と制御方式の決定

2.1 n地域串形電力システムモデル

制御対象の電力系統は、一般に多数の発電所および多数の負荷需要地点と、それを結び付ける送電線から構成されており、そのシステム構成は極めて複雑・多岐化している。しかしながら、地域ごとまたは会社ごとをグループとしてみたとき、一般に、その中では地域内・会社内のつながりは、地域間・会社間のつながりに比べて非常に強いものと考えることができる。従って、ここでは系統全体を、同期化力が十分大きく一つの周波数で代表される「地域」と、これらの地域を結ぶ「連系線」とに別けて考える。いま、地域iに着目すれば、その地域の電力余剰はタービン出力偏差量と負荷変動量の差で表され、それは以下の3つの方法により吸収される。

(a) 運動エネルギー W_{kini} の増分率：

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} W_{kini} &= \frac{d}{dt} \left[W_{kini}^* \left(\frac{f_i}{f^*} \right)^2 \right] \\ &\cong \frac{d}{dt} \left[W_{kini}^* \left(1 + 2 \frac{\Delta f_i}{f^*} \right) \right] \\ &= 2 \frac{W_{kini}^*}{f^*} \frac{d}{dt} \Delta f_i \quad (\text{MW}) \quad (1) \end{aligned}$$

ただし、 W_{kini}^* 、 f^* は、地域iにおける系統の回転体の運動エネルギーと基準周波数である。

(b) 負荷消費の増分： $D'_i \Delta f_i$

D'_i は負荷周波数特性定数で $D'_i \triangleq \partial P_{di} / \partial f$ (MW/Hz) で与えられ、単位周波数変化量に対する負荷変化量の比率を示すものである。

(c) 地域iから流出される融通電力の増分：

$$\Delta P_{tiei}$$

従って、上記で示す(a)～(c)より、地域iにおける電力平衡式は次式の様になる。

$$\begin{aligned} \Delta P_{ti} - \Delta P_{di} &= \frac{2W_{kini}^*}{f^*} \frac{d}{dt} \Delta f_i + D'_i \Delta f_i \\ &\quad + \Delta P_{tiei} \quad (\text{MW}) \quad (2) \end{aligned}$$

なお、(2)式は(MW)で表されているが、地域iの系統容量 P_{ri} で割ると P_{ri} 基準の (puMW) で表すことができる。

$$\begin{aligned} \Delta P_{ti} - \Delta P_{di} &= \frac{2H_i}{f^*} \frac{d}{dt} \Delta f_i + D_i \Delta f_i \\ &\quad + \Delta P_{tiei} \quad (\text{puMW}) \quad (3) \end{aligned}$$

ただし、

$$H_i \triangleq \frac{W_{kini}^*}{P_{ri}} (\text{s}) \quad D_i \triangleq \frac{D'_i}{P_{ri}} \quad (\text{puMW/Hz})$$

一方、地域iから流出する融通電力は、地域iと連系線を通じて結合している隣接地域へ流出する連系線潮流の総和に等しいことから、

$$\begin{aligned} P_{tiei} &= P_{tiei2} \\ P_{tiei} &= P_{tiei(i-1)} + P_{tiei(i+1)} \\ &\quad (i=2, \dots, n-1) \quad (\text{puMW}) \quad (4) \end{aligned}$$

$$P_{tien} = P_{tien(n-1)}$$

となる。ここでは、連系線の抵抗分を無視しているので、連系線潮流は次式の様になる。

$$P_{tieiv} = \frac{|V_i| |V_v|}{X_{iv} P_{ri}} \sin(\delta_i - \delta_v) (\text{puMW}) \quad (5)$$

また、その偏差は

$$\begin{aligned} \Delta P_{tieiv} &= \frac{|V_i| |V_v|}{X_{iv} P_{ri}} \cos(\delta_i^* - \delta_v^*) \\ &\quad \times (\Delta \delta_i - \Delta \delta_v) \quad (\text{puMW}) \quad (6) \end{aligned}$$

となるが、

$$\Delta \delta_i = 2\pi \int \Delta f_i dt \quad (\text{Hz} \cdot \text{s}) \quad (7)$$

の関係より、次式の様に書き換えることができる。

$$\begin{aligned} \Delta P_{tieiv} &= T_{iv} \left(\int \Delta f_i dt - \int \Delta f_v dt \right) \\ &\quad (\text{puMW}) \quad (8) \end{aligned}$$

ただし、

$$T_{iv} \triangleq 2\pi \frac{|V_i||V_v|}{X_{iv}P_{ri}} \cos(\delta^*_i - \delta^*_v) \quad (\text{puMW/Hz} \cdot \text{s})$$

なお、 ΔP_{tieiv} と ΔP_{tievi} は(8)式より明らかな様に、次式の関係がある。

$$\Delta P_{tievi} = -a_{iv} \Delta P_{tieiv} \quad (\text{puMW}) \quad (9)$$

ただし、

$$a_{iv} = \frac{P_{ri}}{P_{rv}}$$

ガバナおよびタービン系は、それぞれ一次遅れ系で表されるものとして、以下の様に定義する。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta P_{ti} &= -\frac{1}{T_{ti}} \Delta P_{ti} + \frac{1}{T_{ti}} \Delta P_{gi} \\ \frac{d}{dt} \Delta P_{gi} &= -\frac{1}{T_{gi}} \Delta P_{gi} - \frac{1}{T_{gi} R_i} \Delta f_i \\ &\quad + \frac{1}{T_{gi}} \Delta P_{ci} \quad (\text{puMW}) \quad (10) \end{aligned}$$

以上より、地域 i での電力平衡、ガバナ出力偏差およびタービン出力偏差に関する式をまとめると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{2H_i}{f^*} \frac{d}{dt} \Delta f_i + D_i \Delta f_i + \sum_v \Delta P_{tieiv} &= \Delta P_{ti} - \Delta P_{di} \\ \frac{d}{dt} \Delta P_{ti} &= -\frac{1}{T_{ti}} \Delta P_{ti} + \frac{1}{T_{ti}} \Delta P_{gi} \\ \frac{d}{dt} \Delta P_{gi} &= -\frac{1}{T_{gi}} \Delta P_{gi} - \frac{1}{T_{gi} R_i} \Delta f_i + \\ &\quad + \frac{1}{T_{gi}} \Delta P_{ci} \quad (\text{puMW}) \quad (11) \end{aligned}$$

ただし、

$$\Delta P_{tieiv} = T_{iv} \left(\int \Delta f_i dt - \int \Delta f_v dt \right) \quad (\text{puMW})$$

上記の関係をブロック線図に示したのが図1である。

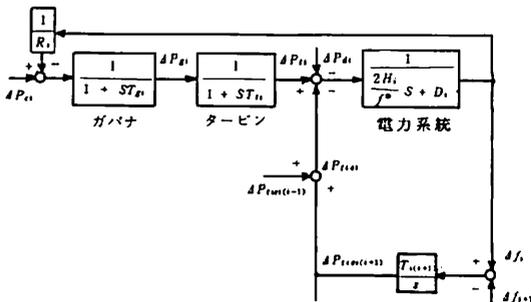


Fig. 1 Block diagram of n -area longitudinal power system.

2.2 制御方式の決定

前節で示した n 地域串形電力系統に対して、状態変数を $x = [\Delta f_1 \ \Delta P_{t1} \ \Delta P_{g1} \ \Delta P_{tie12} \ \Delta f_2 \ \Delta P_{t2} \ \dots \ \Delta P_{tie(n-1)n} \ \Delta f_n \ \Delta P_{tn} \ \Delta P_{gn}]^T$ 、また、制御変数を $u = [\Delta P_{c1} \ \Delta P_{c2} \ \dots \ \Delta P_{cn}]^T$ と定義すれば、状態方程式は次式のように与えられる。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (12)$$

ただし、 A は $(4n-1) \times (4n-1)$ 次元の状態定数行列、 B は $(4n-1) \times n$ 次元の制御定数行列とする。

なお、上式では負荷変動に関する項を省略しているが、後述で示す地域制御誤差 (ACE) の積算値を導入することにより、制御量に定常誤差が残らないことを保証できるので、この項を省略しても設計には影響がない。このとき、上式をサンプリング周期 T でサンプルし零次ホールド回路を用いれば、次式の離散形状態方程式が得られる。

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Psi u(k) \quad (13)$$

ただし、

$$\Phi = \exp(AT), \quad \Psi = [\exp(AT) - I] A^{-1} B$$

ここでは、ステップ負荷外乱に対する周波数偏差および連系線潮流偏差の定常誤差を除去するために、新しく地域制御誤差の積算

$$\tilde{x}(k) = [x_{4n}(k) \ x_{4n+1}(k) \ \dots \ x_{5n-2}(k) \ \dots \ x_{5n-1}(k)]^T \quad (14)$$

ただし、

$$x_{4n}(k+1) = \sum_{m=0}^{k+1} \{\beta_1 \Delta f_1(m) + \Delta P_{tie12}(m)\}$$

$$\begin{aligned} x_{4n+1}(k+1) &= \sum_{m=0}^{k+1} \{\beta_2 \Delta f_2(m) - \\ &\quad \alpha_{12} \Delta P_{tie12}(m) + \Delta P_{tie23}(m)\} \\ &\dots \dots \dots \end{aligned}$$

$$x_{5n-2}(k+1) = \sum_{m=0}^{k+1} \{\beta_{n-1} \Delta f_{n-1}(m) - \alpha_{(n-2)(n-1)} \times \Delta P_{tie(n-2)(n-1)}(m) + \Delta P_{tie(n-1)n}(m)\}$$

$$\begin{aligned} x_{5n-1}(k+1) &= \sum_{m=0}^{k+1} \{\beta_n \Delta f_n(m) \\ &\quad - \alpha_{(n-1)n} \Delta P_{tie(n-1)n}(m)\} \end{aligned}$$

を導入する。行列形式で示すと

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k+1) &= \tilde{x}(k) + Cx(k+1) \\ &= \tilde{x}(k) + C\Phi x(k) + C\Psi u(k) \quad (15) \end{aligned}$$

ただし、

$$A = \begin{bmatrix}
 -\frac{f^*D_1}{2H_1} & \frac{f^*}{2H_1} & 0 & -\frac{f^*}{2H_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -\frac{1}{T_{11}} & \frac{1}{T_{11}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\frac{1}{T_{g1}R_1} & 0 & -\frac{1}{T_{g1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 T_{12} & 0 & 0 & 0 & -T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{f^*a_{12}}{2H_2} & -\frac{f^*D_2}{2H_2} & \frac{f^*}{2H_2} & 0 & -\frac{f^*}{2H_2} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{12}} & \frac{1}{T_{12}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{g2}R_2} & 0 & -\frac{1}{T_{g2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & T_{23} & 0 & 0 & 0 & -T_{23} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{f^*a_{23}}{2H_3} & -\frac{f^*D_3}{2H_3} & \frac{f^*}{2H_3} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{13}} & \frac{1}{T_{13}} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{g3}R_3} & 0 & -\frac{1}{T_{g3}}
 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$B = \begin{bmatrix}
 0 & 0 & \frac{1}{T_{g1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{g2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{g3}}
 \end{bmatrix} \quad (26)$$

一方、地域制御誤差の積算量に関する方程式は、(14)式より以下の様にと与えられる。

$$\begin{aligned}
 x_{12}(k+1) &= \sum_{m=0}^{k+1} \{\beta_1 \Delta f_1(m) + \Delta p_{tie12}(m)\} \\
 x_{13}(k+1) &= \sum_{m=0}^{k+1} \{\beta_2 \Delta f_2(m) - a_{12} \Delta p_{tie12}(m) \\
 &\quad + \Delta p_{tie23}(m)\} \\
 x_{14}(k+1) &= \sum_{m=0}^{k+1} \{\beta_3 \Delta f_3(m) - a_{23} \Delta p_{tie23}(m)\}
 \end{aligned} \quad (27)$$

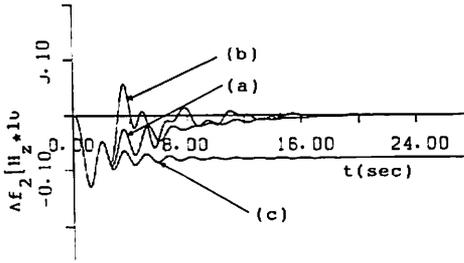
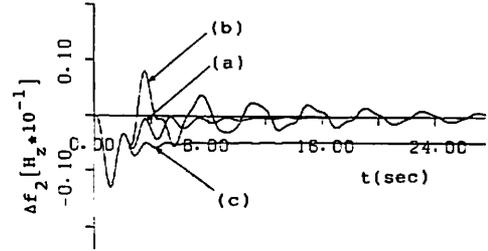
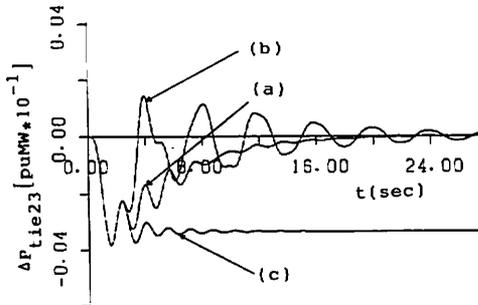
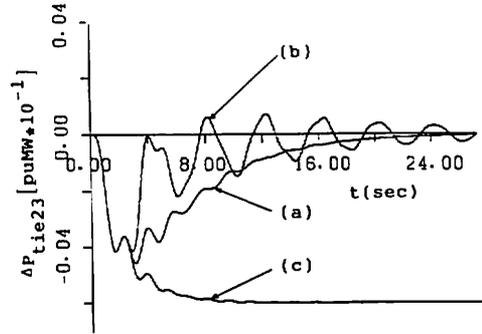
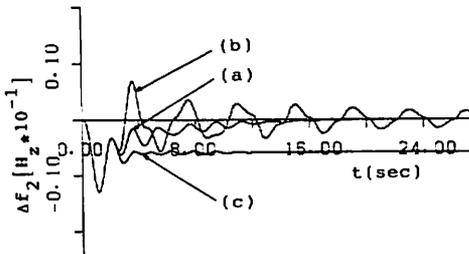
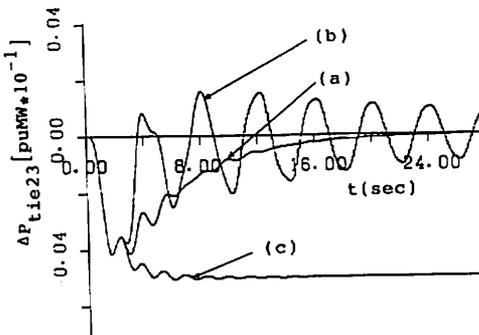
このとき、行列 C は次式となる。

$$C = \begin{bmatrix}
 \beta_1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -a_{12} & \beta_2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{23} & \beta_3 & 0 & 0
 \end{bmatrix} \quad (28)$$

上記のシステムに、本制御方式を適用した場合のデジタル・シミュレーション結果を示す。図 2, 図 3 には、 $\Delta P_{d1} = 0.01 \text{ puMW}$ のステップ負荷変動に対する周波数偏差 Δf_2 および連系線潮流偏差 ΔP_{tie23} の応答波形を示している。なお、

(a) は ACE の積算値を利用する本制御方式 (LQI 制御)、(b) は ACE の積分値を利用する従来方式 (LQ 制御)、(c) は無制御の応答波形である。図 2 から明らかな様に、周波数偏差については (c) の無制御が定常誤差を残すものの、(a)、(b) はそれぞれ 20 秒前後で零に収束している。なお、(a)、(b) に比較して過渡動揺の抑制効果が若干すぐれている。図 3 の連系線潮流偏差では、(a) が 20 秒前後で零に収束しているにもかかわらず、(b) はさらに振動を続けている。(c) については、図 2 と同様に定常誤差を残す。なお、参考のため、地域を 4 地域および 5 地域からなる大規模系統に拡張し、その場合の周波数偏差および連系線潮流偏差を示したものが図 4 ~ 図 7 である。これらの場合も 3 地域と同様な特性が得られているが、なお一層、本制御方式の有効性が現われている。

以上より、地域制御誤差の積算値を用いる本制御方式の有効性が明らかとなった。

Fig. 2 Response of Δf_2 .Fig. 6 Response of Δf_2 .Fig. 3 Response of ΔP_{tie23} .Fig. 7 Response of ΔP_{tie23} .Fig. 4 Response of Δf_2 .Fig. 5 Response of ΔP_{tie23} .

4. むすび

本論文では、LFCの基本特性を満たし、また離散データを直接利用しうるデジタル制御方式として、地域制御誤差の積算値を用いるLQI形負荷周波数制御の構成法を提案した。また、本構成法を非再熱式火力システムより構成される3～5地域串形電力システムモデルの最適制御に適用し、その有効性については、周波数偏差および連系線潮流偏差などの時間関係図を用いて示した。

今後の課題としては、直流送電、超電導エネルギー貯蔵装置などを考慮した系への拡張などが考えられる。

最後に、計算に多大な協力戴いた南西情報開発株式会社岸本憲作君に感謝の意を表します。

なお、本研究に関する数値計算は、本学科の計算機FACOM M-160Fで行ったことを付記する。

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 (II) 部, 40 号 (昭 51)
- 2) C. E. Fosha & O. I. Elgerd: "The Megawatt-Frequency Control Problem: A New Approach Via Optimal Control Theory", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., PAS-89, 4, 563 (1970)
- 3) R. K. Cavin III, M. C. Budge & P. Rasmussen: "An Optimal Linear Systems Approach to Load-Frequency Control", *ibid*, PAS-90, 6, 2474 (1971)
- 4) 水谷:「地域分割・出力フィードバック手法を用いた LFC の準最適制御」電学論 B, 101, 17 (昭 56)
- 5) K. Yamashita & T. Taniguchi: "Optimal Observer Design for Load-Frequency Control", *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems* (to appear)
- 6) E. V. Bohn & S. M. Miniesy, "Optimum Load-frequency Sampled-Data Control with Randomly Varying System Disturbances", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., PAS-91, 5, 1916 (1972)
- 7) J. Nanda, M. L. Kothari & P. S. Satsangi: "Automatic Generation Control of an Interconnected Hydrothermal System in Continuous and Discrete Modes Considering Generation Rate Constraints", Proc. Inst. Elect. Engrs, 130, D, 17 (1983)
- 8) 山下・榎田・谷口:「積算形制御器を用いた負荷周波数制御法」昭 59 電気五学会九州支部連大 No. 541
- 9) 山下・谷口:「地域制御誤差の積算値を用いる LQI 形負荷周波数制御」電学論 B, 105, 634 (昭 60)