三機無限大母線系統の OGY 制御

正員 奥野 光* 学生員 金成 靖彦*

非会員 竹下 正洋*

Control of Three Synchronous Generators Infinite-bus System by OGY Method

Hikaru Okuno*, Member, Yasuhiko Kanari*, Student Member, Masahiro Takeshita*, Non-member

Stability of a power system has been investigated in the view of chaos and bifurcation. In this paper, the OGY (Ott-Grebogi-Yorke) method for controlling chaos of three machines operating onto an infinite-bus system is investigated by computer simulations. The swing equation with the controlling input u is used. The OGY method is extended to the form in the six-dimensional space. The 8 equilibrium points are obtained. The swing equation is normalized and transformed into a discrete-time state equation from which the control input is calculated. The time series of the phase angles of generators without the control input show the chaotic irregular motion and the step-out. The time series of the phase angle of generators with the control inputs by OGY method show the stable motion. The phase angles are successfully controlled onto the unstable equilibrium points with the three unstable manifolds and the three stable manifolds.

キーワード：電力系統制御, OGY 制御, 発電機, カオス, 非線形システム

Keywords: control of electric power system, OGY control, generator, chaos, non-linear system

1. まえがき

電力の安定供給対策は、対象となるシステムが巨大複雑化し、系統の運用状況が厳しさを増す方向にあるため、その重要性はますます大きくなっている。安定度に関与する制御系としては、無効電力-電圧制御のための自動電圧調整器 (AVR) による励磁電流制御と、有効電力-周波数制御のための調速機 (GOV) によるバルブ制御が、基本となっている。これらの制御系を含めた系統の安定度解析や、サイリスタ速応励磁、電力系統安定化回路 (PSS)、調速機の高速化等の安定度向上方式に関する研究が数多く報告されている。

一方、電力系統が、巨大で複雑なエネルギー発生・消費システムであることに注目し、非線形散逸システム理論の立場から、安定性を議論する研究が報告されている^{(1)~(4)}。

巨大で複雑なシステムは、パラメータの数が多く、また強い非線形性を持っているため、安定性に関してはカオスのような不安定性を内在していると考えられるからである。最近では、分岐理論を用いて、制御系を含めた電力系統が、安

定状態から不安定なカオス状態に至る状況を解析し、動的な定態安定度限界を論じた報告もなされている⁽⁵⁾。また、カオス研究の分野では、カオスを起こしたシステムが多くの双曲型の不安定平衡点 (鞍点) を持っていることに注目し、平衡点の性質を制御に利用する提案が、Ott-Grebogi-Yorke によりなされている (OGY 法)⁽⁶⁾。この方法の要点は、システムの状態点を、不安定平衡点のもつ安定多様体上に遷移させることにより、カオス状態を安定化するものである。極の配置問題に対する手法の一種ともみなせるが、不安定平衡点の安定多様体を制御目標とするため、システムが可制御でない場合でも、可安定であれば状態フィードバックにより安定化できることを特徴とする適用条件の広い手法で、この点が線形制御理論における極配置法に対する優位点であると考えられる。

また、極配置法等の安定化制御では、補償後の極配置を安定領域に設定することにより、系に内部安定性を持たせることを基本としている。これに対し、OGY 制御法は、電力系統が安定状態から不安定なカオス状態に陥ったとき、系の不安定平衡点に一時的に収束させて、脱調を回避させる制御手法であるとみなせる。OGY 法は、このような適用範囲を想定した、内部安定性を必ずしも補償しない従来とは異なる観点による電力系統安定化の制御手法であると位置付けられる。

著者等は、上記の OGY 法を電力系統の安定化制御法の

* 筑波大学機能工学系

〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1

Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

1-1-1, Tennodai, Tsukuba 305-8573

一つとして応用することを目的とし、三機無限大母線系統を考察対象として、発電機の相角度の不安定挙動を OGY 法により制御することを検討してきた⁽⁷⁾。本論文では、系統の不安定平衡点近傍での離散形線形近似式の導出、OGY 法の制御入力印加条件の検討、計算機シミュレーションによる制御結果について報告する。

2. 三機無限大母線系統の動揺方程式

図 1 に本研究で対象とする、発電機の調速機、界磁制御装置を取り外しモデル化した三機無限大母線系統を示す。

図 1 のシステムにおいて $E_0 = E_1 = E_2 = E_3 (= E)$ となる場合、以下の動揺方程式が得られる。 $E_0 = E_1 = E_2 = E_3 = E$ という設定は、現実のシステムでは成り立たないが、OGY 法による電力システムのカオス制御を主目的としたこと、また上記の仮定は、カオスが起きる条件や、OGY 法の適用条件と無関係であることを考慮し、モデルを数学的に簡単化する目的のために便宜的に設けたものである。

$$\left. \begin{aligned} M_1 \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} + D_1 \frac{d\delta_1}{dt} + y_1 E^2 \sin \delta_1 \\ + y_2 E^2 \sin(\delta_1 - \delta_2) &= P_{m1} \\ M_2 \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} + D_2 \frac{d\delta_2}{dt} + y_2 E^2 \sin(\delta_2 - \delta_1) \\ + y_3 E^2 \sin(\delta_2 - \delta_3) &= P_{m2} \\ M_3 \frac{d^2 \delta_3}{dt^2} + D_3 \frac{d\delta_3}{dt} + y_3 E^2 \sin(\delta_3 - \delta_2) &= P_{m3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、式 (1) の各係数を $y_3 E^2$ で割って、次式のように変換する。

ここで、 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ ：無限大母線に対する発電機 1, 2, 3 の相角度、 P_{m1}, P_{m2}, P_{m3} ：発電機 1, 2, 3 への機械入力、 E_0 ：無限大母線の受電電圧、 E_1, E_2, E_3 ：リアクタンスを無視した発電機 1, 2, 3 の誘導起電力、 $-jy_1, -jy_2, -jy_3$ ：抵抗分を無視した送電線路のアドミタンス、 M_1, M_2, M_3 ：発電機 1, 2, 3 の慣性定数、 D_1, D_2, D_3 ：発電機 1, 2, 3 の制動係数

図 1 モデル化した三機無限大母線系統図

Fig. 1. Model system of three machines operating onto an infinite-bus system.

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= \frac{M_1}{y_3 E^2}, \quad m_2 = \frac{M_2}{y_3 E^2}, \quad m_3 = \frac{M_3}{y_3 E^2} \\ d_1 &= \frac{D_1}{y_3 E^2}, \quad d_2 = \frac{D_2}{y_3 E^2}, \quad d_3 = \frac{D_3}{y_3 E^2} \\ p_1 &= \frac{P_{m1}}{y_3 E^2}, \quad p_2 = \frac{P_{m2}}{y_3 E^2}, \quad p_3 = \frac{P_{m3}}{y_3 E^2} \\ K_1 &= \frac{y_1}{y_3}, \quad K_2 = \frac{y_2}{y_3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

式 (2) を式 (1) に代入して、一階の連立系に書き直すと、次式が得られる。これを用いてシミュレーションを行なう。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\delta_1}{dt} &= \omega_1 \\ \frac{d\omega_1}{dt} &= \frac{1}{m_1} \{-d_1 \omega_1 + p_1 - K_1 \sin \delta_1 \\ &\quad - K_2 \sin(\delta_1 - \delta_2)\} \\ \frac{d\delta_2}{dt} &= \omega_2 \\ \frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{1}{m_2} \{-d_2 \omega_2 + p_2 - K_2 \sin(\delta_2 - \delta_1) \\ &\quad - \sin(\delta_2 - \delta_3)\} \\ \frac{d\delta_3}{dt} &= \omega_3 \\ \frac{d\omega_3}{dt} &= \frac{1}{m_3} \{-d_3 \omega_3 + p_3 - \sin(\delta_3 - \delta_2)\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、受電電圧の定格角速度を Ω として、時間 t は $t = \Omega \tau$ (τ ：実際の経過時間) として rad 単位で扱う。

3. 不安定平衡点

このシステムは、下記の平衡点の存在条件、

$$\left. \begin{aligned} |p_1 + p_2 + p_3| &< K (= K_1) \\ |p_2 + p_3| &< K (= K_2) \\ |p_3| &< 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

が成立するとき、8 つの平衡点を持つことが分かった。

OGY 制御法では、不安定平衡点の持つ安定多様体上に状態点を遷移させ、平衡点に向かう流れを利用して平衡点上に収束し安定化させることが特徴である。対象としたシステムは、発電機 3 機を持ち、少なくとも制御入力が必要であるから、安定多様体を 3 本持つ不安定平衡点を選択した。

安定多様体を 4 本あるいは 5 本持つ不安定平衡点を選択しても OGY 法を適用できるが、この場合は、発電機の内、1 台あるいは 2 台が本質的に安定となるから、OGY 制御

を適用した時の効果を試みるケースとしては、意味が薄いと考へた。したがって、8つの平衡点の中で、不安定多様体を3本、安定多様体を3本持つ下記の(5)式の不安定平衡点8を選択した。

不安定平衡点を制御目標に選ぶことは、この制御法と制御モデルの工学的な制約に関係する。すなわち、上記の選定した制御目標は、通常の定態・動態安定限界や過渡安定限界を超えた領域にあり、一般的な安定化制御とは異なる運転点となる。これは、まえがきで述べたように、電力系統が不安定なカオス状態に陥った場合の一時的な退避制御法を検討しているからである。また、カオスに陥る領域を広範囲に調べたわけではなく、5.で述べるように発電機の制動係数と機械的入力がある場合より1桁小さい条件で起きるカオス状態を検討したものである。さらに全ての発電機端子電圧を無限大母線の電圧と等しいとするような簡略化したモデルを用いている。したがって、ここで述べる制御法とモデルが、現状のシステムに今すぐ適用できる工学的条件を持っているとは言えない。モデルがカオス状態に陥る条件と、実系統の運転条件の比較検討を行い、工学的に妥当性のある不安定平衡点の条件を明らかにすることが、解決すべき問題点である。

$$\left. \begin{aligned} \delta_{1f} &= \pi - \sin^{-1} \left(\frac{p_1 + p_2 + p_3}{K_1} \right) \\ (\omega_{1f} &= 0) \\ \delta_{2f} &= -\sin^{-1} \left(\frac{p_1 + p_2 + p_3}{K_1} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{p_2 + p_3}{K_2} \right) \\ (\omega_{2f} &= 0) \\ \delta_{3f} &= -\pi - \sin^{-1} \left(\frac{p_1 + p_2 + p_3}{K_1} \right) \\ &\quad - \sin^{-1} \left(\frac{p_2 + p_3}{K_2} \right) - \sin^{-1} p_3 \quad (\omega_{3f} = 0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

4. 平衡点近傍での線形近似式と制御入力式

上記で得られた結果をもとに、連続系で表現された三機無限大母線系統の動揺方程式を、計算機で扱うため離散系に変換し、その式から OGY 法を用いるための制御入力を求める。OGY 法を一般化し多次元に拡張したが、ここで

は6次元の形を提示する。

最初に、1階の連立系に書き直した三機無限大母線系統の動揺方程式(3)に制御入力 $u(k) = \{u_1(k), u_2(k), u_3(k)\}$ を加え、離散化すると次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \delta_1(k+1) &= \delta_1(k) + \omega_1 \Delta t \\ \omega_1(k+1) &= \omega_1(k) + \frac{\Delta t}{m_1} \{-d_1 \omega_1 + p_1 + u_1(k) \\ &\quad - K_1 \sin \delta_1 - K_2 \sin(\delta_1 - \delta_2)\} \\ \delta_2(k+1) &= \delta_2(k) + \omega_2 \Delta t \\ \omega_2(k+1) &= \omega_2(k) + \frac{\Delta t}{m_2} \{-d_2 \omega_2 + p_2 + u_2(k) \\ &\quad - K_2 \sin(\delta_2 - \delta_1) - \sin(\delta_2 - \delta_3)\} \\ \delta_3(k+1) &= \delta_3(k) + \omega_3 \Delta t \\ \omega_3(k+1) &= \omega_3(k) + \frac{\Delta t}{m_3} \{-d_3 \omega_3 + p_3 + u_3(k) \\ &\quad - \sin(\delta_3 - \delta_2)\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\delta_1(k), \omega_1(k), \delta_2(k), \omega_2(k), \delta_3(k), \omega_3(k)$ は k 回写像をくり返したときの、 $\delta_1, \omega_1, \delta_2, \omega_2, \delta_3, \omega_3$ の値であり、また、 Δt はサンプリング周期である。

OGY 制御入力は、状態点が不安定平衡点の近くに来た時に計算され印加される。したがって式(6)を不安定平衡点 $x_f = (\delta_{1f}, \omega_{1f}, \delta_{2f}, \omega_{2f}, \delta_{3f}, \omega_{3f})$ の近くで適用すればよいと考えられるので、平衡点近傍で線形化すると、

$$\bar{x}(k+1) = A\bar{x}(k) + bu(k) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $\bar{x}(k)$ は状態点と不安定平衡点の間の距離で

$$\bar{x}(k) = x(k) - x_f = \begin{bmatrix} \delta_1(k) - \delta_{1f} \\ \omega_1(k) - \omega_{1f} \\ \delta_2(k) - \delta_{2f} \\ \omega_2(k) - \omega_{2f} \\ \delta_3(k) - \delta_{3f} \\ \omega_3(k) - \omega_{3f} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

また、

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t \{K_1 \cos \delta_{1f} + K_2 \cos(\delta_{1f} - \delta_{2f})\}}{m_1} & \frac{\Delta t}{m_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta t \{\cos(\delta_{1f} - \delta_{2f})\}}{m_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\Delta t \{\cos(\delta_{1f} - \delta_{2f})\}}{m_2} & 0 & \frac{\Delta t \{K_2 \cos(\delta_{2f} - \delta_{1f}) + \cos(\delta_{2f} - \delta_{3f})\}}{m_2} & \frac{\Delta t}{m_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\Delta t \{\cos(\delta_{2f} - \delta_{1f})\}}{m_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta t \{\cos(\delta_{3f} - \delta_{2f})\}}{m_3} & 0 & \frac{\Delta t \{\cos(\delta_{3f} - \delta_{2f})\}}{m_3} & \frac{\Delta t}{m_3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{\Delta t}{m_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{m_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta t}{m_3} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

$$u(k) = \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ u_3(k) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

(7) 式から制御入力 of 式を導出するため、以下のような計算を行う。不安定平衡点は、不安定多様体を 3 本、安定多様体を 3 本持つものとするので、行列 A の固有値を、それぞれ $\lambda_{u1}, \lambda_{u2}, \lambda_{u3}, \lambda_{s1}, \lambda_{s2}, \lambda_{s3}$ とすると、

$$\left. \begin{array}{l} |\lambda_{u1}| > 1, |\lambda_{u2}| > 1, |\lambda_{u3}| > 1, \\ |\lambda_{s1}| < 1, |\lambda_{s2}| < 1, |\lambda_{s3}| < 1 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

である。これらの固有値に対する単位固有ベクトルを、 $e_{u1}, e_{u2}, e_{u3}, e_{s1}, e_{s2}, e_{s3}$ とし、 $v_u e_s = v_s e_u = 0, v_u e_u = v_s e_s = 1$ となるような行ベクトル v_s, v_u を用いて次の行列を定義する。

$$P = [e_{u1}, e_{u2}, e_{u3}, e_{s1}, e_{s2}, e_{s3}] \dots\dots\dots (13)$$

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} v_{u1} \\ v_{u2} \\ v_{u3} \\ v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

(13), (14) 式を用いると、次式が得られる。

$$A = P \begin{bmatrix} \lambda_{u1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{u2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{u3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{s3} \end{bmatrix} P^{-1} \\ = \lambda_{u1} e_{u1} v_{u1} + \dots + \lambda_{u3} e_{u3} v_{u3} + \lambda_{s1} e_{s1} v_{s1} \\ + \dots + \lambda_{s3} e_{s3} v_{s3} \dots\dots\dots (15)$$

また、次の行列を定義する。

$$V_u = \begin{bmatrix} v_{u1} \\ v_{u2} \\ v_{u3} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

$$L = \begin{bmatrix} \lambda_{u1} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{u2} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{u3} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (17)$$

状態点が、安定多様体上に乗ると、 $\bar{x}(k+1)$ と e_s が平行になるので

$$V_u \bar{x}(k+1) = 0 \dots\dots\dots (18)$$

(7), (15)~(18) 式より、OGY 制御入力は次のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ u_3(k) \end{bmatrix} = \begin{cases} -(V_u b)^{-1} L V_u \bar{x}(k) \\ \|\bar{x}(k)\| = \|x(k) - x_f\| < \varepsilon \text{ のとき} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \text{それ以外} \end{cases} \dots\dots\dots (19)$$

ただし、 ε は十分小さな正数。

5. シミュレーションの条件

発電機定数、系統定数を表 1 のように設定し、これに対応した (6) 式におけるシステムパラメータ、また初期値として表 2 の値を用いた。発電機の制動係数と機械的入力とは通常の場合より 1 桁小さい条件である。計算機シミュレーションには 4 次のルンゲ・クッタ法を用い、また、サンプリング周期は $\Delta t = 0.001 \text{ rad}$ とした。また、不安定平衡点の座標とそのときの行列 A の固有値 λ は次のような値になる。

$$\begin{aligned} & \text{平衡点の座標 } (\delta_{1f(8)}, \omega_{1f(8)}, \delta_{2f(8)}, \omega_{2f(8)}, \delta_{3f(8)}, \omega_{3f(8)}) \\ & = (2.8369, 0, -0.50605, 0, -3.74781 (= 2.53538), 0) \end{aligned}$$

表 1 発電機定数および系統定数

Table 1. System constants.

Base Voltage	V_B	13.8	kV
Base Power	P_B	120	MVA
Base Angular Frequency	ω_B	100π	rad/s
Voltage of Infinite Bus	V_∞	1.0	p.u.
Admittance	y	1.59	p.u.
Inertia of Generator	M	11.47	sec
Damping of Generator	D	0.115	p.u.
Mechanical Input	P_m	0.159	p.u.

表 2 計算に用いたシステムパラメータと初期値

Table 2. Parameters and initial values.

m_1, m_2, m_3	0.5	δ_1	2.60
d_1, d_2, d_3	0.005	δ_2	1.15
p_1, p_2, p_3	0.1	δ_3	2.17
K_1, K_2	1.0	$\omega_1, \omega_2, \omega_3$	0

表 3 平衡点における電力潮流

Table 3. Power flow.

	Effective Power	Reactive Power
Generator 1	$P_{G1} = 0.159$ p.u.	$Q_{G1} = 6.255$ p.u.
Generator 2	$P_{G2} = 0.159$ p.u.	$Q_{G2} = 6.320$ p.u.
Generator 3	$P_{G3} = 0.159$ p.u.	$Q_{G3} = 3.172$ p.u.
Infinite Bus	$P_{IB} = -0.477$ p.u.	$Q_{IB} = 3.107$ p.u.

行列 A の固有値 (λ)

$$= \left(1.00562, 1.00388, 1.00136, 0.998591, 0.996074, \right. \\ \left. 0.994327 \right)$$

これからわかるように、安定多様体を 3 本、不安定多様体を 3 本持つ不安定平衡点 8 を選択している。また平衡点における潮流を表 3 に示す。

6. OGY 制御法によるシミュレーション結果

このシステムは、初期値によっては各発電機の相差角が不規則に振動し、脱調してしまう。最大リアプノフ指数の時系列を計算したところ、6 個ある指数のうち 3 個が正の値を取ることが分かった。したがって、この不規則振動は、カオスであることが確かめられた。

そこで、OGY 法の制御入力印加条件である ε と制御指令を与えるタイミングを決めるために、以下のような量を計算した。

図 2 にシステムの状態点と 8 つある平衡点とのそれぞれの距離が、時間経過に伴ってどの程度はなれていくかを示す。図 2 の下図は、上図の 0 から 50 rad までを拡大したものである。50 rad 付近までは、平衡点との距離がそれほど大きくないが、50 rad 以降では急激に増大している。これは、システムが脱調して速度の調整ができなくなり、相差角の速度 (角速度) が増加するためである。

このことより、OGY の制御指令はカオス状態が検知されてから、50 rad 以内に与えなければならないことが分かる。また、各平衡点との距離の最下点が 2~6 程度であるので、これより大きな ε を設定しなければならない。そこで、制御指令を 20 rad で与え、 ε を 7 と設定し OGY 制御を行った。選択した ε が状態量に比して小さくなっていない理由は以下のように考えられる。

OGY 法の特徴は、システムがカオス状態になると、ストレンジアトラクター上に無数の不安定平衡点が生じるので、現在の状態点に近い不安定平衡点の安定多様体を目標にして OGY 制御を行なうものである。さらに外乱が入って状態点が移動すれば、また同様な手続きで逐次新たな不安定平衡点の安定多様体を目標にして OGY 制御を行なえばよいので、 ε を小さく取れる利点がある。

本論文では、あらかじめ解析的に求められる不安定平衡点の安定多様体を OGY 法の制御目標にしたので、上記の特徴を生かしきれていない。また、発電機は他のカオスシステムと異なって脱調が生ずるので、 ε の範囲に入るまでの

図 2 平衡点と状態点の距離

Fig. 2. Norm between a state point and equilibrium points.

待ち時間に対して、図 2 で示したように脱調が生ずるまでの余裕しかないという制限が加わる。そのため、あまり ε を小さくできず、選択した ε は状態量に比して小さくなっていないと考えられる。

制御の手順は、以下のように行う。カオスを検知するには、状態量の時系列データからリアプノフ指数を計算する方法を使う。カオス状態を検出すると同時に制御指令が出されて、状態点と安定多様体との距離が ε 以下であるかどうかの判定が開始され、 ε 以下となった時点で制御入力計算され印加される。

図 3 に OGY 制御をした場合の相差角 δ の時系列を、図 4 に相差角の速度 (角速度) ω の時系列を示す。なお図中の矢印は制御指令が与えられた時刻を示している。

図 3 に示すように、各発電機の相差角 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ は、30 rad 付近以降で平衡点上に落ち着いている。また、図 4 に示すように、相差角の速度 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ は、同じ時刻以降で 0 になっていることから、システムは定常状態になっており、OGY 制御によりシステムを安定化できたことがわかる。制御指令を与えた時刻が 20 rad に対し、安定化した時刻は 30 rad 付近である。これは、図 2 から分かるよう

図3 OGY制御時の相角 δ の時間変化

Fig.3. Time series of phase angle δ by OGY control.

に、制御指令を与えた20rad以降では、28rad付近で初めてシステムの状態点と平衡点8との距離が7以下になり、実際に制御入力に加わるのがこの付近であることによる。

図5に制御入力 u_1 、 u_2 、 u_3 の時間変化を示す。制御入力はインパルス状の入力で、27.8radの時に印加されていることがわかる。

制御モデルは、2.で動揺方程式を導出した時に、 $E_0 = E_1 = E_2 = E_3 (= E)$ すなわち全ての発電機端子電圧が無限大母線電圧に等しいと仮定した。この設定は、現実のシステムでは成り立たない。また他にも幾つかの簡略化を行っているので、制御モデルと実系統の間に差異が生じ、制御系のロバスト性が問題となる。OGY制御法では、システムがカオス状態になると、ストレンジアトラクター上に無数の不安定平衡点が生じるので、現在の状態点に近い不安定平衡点の安定多様体を目標にして制御を行なう。さらに負荷変動、事故、パラメータ変動や外乱が入って状態点が移動すれば、また同様な手続きで逐次新たな不安定平衡点の安定多様体を目標にしてOGY制御を行えばよいという特徴をもつ。したがって、脱調を回避させるという適用範囲に限定して考えれば、OGY制御法はロバスト性を持っていると考えられる。これは通常の安定化制御法における概念とは異なる、不安定状態中の安定性維持という、一種奇妙なロバスト性と言える。しかし、不安定平衡

図4 OGY制御時の相角の速度 ω の時間変化

Fig.4. Time series of velocity ω of phase angle δ by OGY control.

図5 制御入力の時間変化

Fig.5. Time series of control input.

点が無数にあるとはいえ、現在のところシステムが動的状態にある時に、それらを求める一般的な手法が見つからないので、上で述べたロバスト性を有効に利用しているとは言えない。この点は、OGY 制御を電力系統の安定化に適用する上で、3. で述べた工学的に妥当性のある不安定平衡点の条件と合わせて解決しなければならない問題の一つであると考えられる。

7. むすび

本論文は、三機無限大母線系統の安定化制御法のために OGY 法を 6 次元に拡張して適用し、計算機シミュレーションにより制御特性を調べたものであり、以下の結果を得た。

(1) 三機無限大母線系統の動揺方程式を連立系の離散式に変換し、さらに平衡点近傍で線形化した式を導出した。これから安定多様体 3 本、不安定多様体 3 本を持つ不安定平衡点の安定多様体を制御目標にした場合の OGY 法の制御入力を求めた。

(2) OGY 法による制御入力条件を検討した。発電機が脱調してしまう前に、不安定平衡点からの距離が時間経過に伴ってどの程度離れていくかを見積もった。その結果、設定したパラメータでは、50 rad 程度の時間の間、ノルムの最小値が 2~6 の距離付近にあることが分かった。

(3) 上記の結果を基に、OGY 法による制御を行なったところ、制御指令から 8 rad 程の遅れで、インパルス状の制御入力により、不安定平衡点に安定化されることが示された。

OGY 制御法は、従来の安定化制御理論とは異なり、必ずしも内部安定性を補償しない方法であり、カオス状態に陥ったシステムを不安定平衡点に一時的に収束させ、脱調を回避させることを想定したものである。この方法を実系統に適用できるようにするためには、制御モデルの持つ構造の特質を工学的な観点から明らかにすること、また制御系のロバスト性の検討とそれに関連した動的状態における不安定平衡点の探索法を見出すことなどが今後の解決すべき課題と考えられる。

(平成 14 年 2 月 28 日受付, 平成 15 年 1 月 28 日再受付)

文 献

- (1) N. Kopell and R.B. Washburn, Jr.: "Chaotic Motions in the Two-Degree-of-Freedom Swing Equation", *IEEE Trans. Circuits System*, Vol.CAS-29, No.11, pp.738-746 (1982)
- (2) P. Varaiya, F.F. Wu, and R-L. Chen: "Direct Method for Transient Stability Analysis of Power System: Recent Results", *Proc. IEEE*, Vol.73, No.12, pp.1703-1715 (1985-12)
- (3) Y. Ueda and T. Enomoto: "A Study on Basins of Attraction of a Swing Equation", Technical Report of IEICE, NLP89-11 (1989) (in Japanese)
上田亮・榎本孝史:「ある動揺方程式の引力圏について」, 信学技報, NLP89-11 (1989)

- (4) H.O. Wang, E.H. Abed, and A.M.A. Hamdan: "Bifurcations, Chaos, and Crises in Voltage Collapse of Model Power System", *IEEE Trans. Circ. System*, Vol.CAS-41, No.3, pp.294-301 (1994-3)
- (5) T. Kita, K. Nojiri, and Y. Ueda: "Chaos and Bifurcations in a Single Generator Operating onto an infinite-bus System with Control System of the Generator", *T. IEE Japan*, Vol.116-B, No.11, pp.1340-1346 (1996-11) (in Japanese)
喜多敏博・野尻弘輔・上田院亮:「発電機制御を考慮した一機無限大母線系統のカオス・分岐現象」, 電学論 B, 116, 11, pp.1340-1346 (1996-11)
- (6) E. Ott, C. Grebogi, and J.A. Yorke: "Controlling Chaos", *Phys. Rev. Lett.*, Vol.64, No.11, pp.1196-1199 (1990-3)
- (7) T. Sakata: Controlling Chaos of Non-linear System; Master Thesis, Univ. of Tsukuba (1996-2)
坂田智貴:「非線形システムにおけるカオスの制御」, 筑波大学大学院理工学研究科修士論文 (1996-2)
K. Kaneshige: Controlling Chaos of Power System, Master Thesis, Univ. of Tsukuba (1998-2)
兼重欣滋:「電力系統のカオス制御」, 筑波大学大学院理工学研究科修士論文 (1998-2)
T. Konishi: Controlling Chaos of Three Machines Infinite-bus System, Master Thesis, Univ. of Tsukuba (1999-2)
小西高志:「三機無限大母線電力系統のカオス制御」, 筑波大学基礎工学類卒業論文 (1999-2)
H. Okuno, M. Takeshita, and Y. Kanari: "Controlling Chaos of Three Machines Infinite Bus System", 2001 National Convention Record I.E.E. Japan No.6, 6-166 (2001-3) (in Japanese)
奥野 光・竹下正洋・金成靖彦:「三機無限大母線系統の OGY カオス制御」, 平成 13 年電気学会大会, No.6, 6-166 (2001-3)

奥野 光 (正員) 1951 年 1 月 23 日生まれ。1983 年 3 月大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程退学。1983 年 4 月千葉大学工学部電気工学科助手, 1989 年同助教授, 1992 年 4 月筑波大学構造工学系助教授, 1999 年同機能工学系助教授。主として、磁気応用、非線形制御の研究に従事。工博。

金成靖彦 (学生員) 1977 年 5 月 17 日生まれ。2000 年 3 月筑波大学第三学群基礎工学類変換工学専攻卒。現在、同大学院博士課程システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻在学中。主として、電力系統の安定制御に関する研究に従事。

竹下正洋 (非会員) 1976 年 8 月 17 日生まれ。1999 年 3 月茨城大学工学部機械工学科卒。現在、筑波大学大学院修士課程理工学研究科在学中。主として、電力系統の安定制御の研究に従事。