

台形型自動抽出制御を用いた種子島電力系統の 過度安定度改善について

高 田 等*・濱 田 公 介**・八 野 知 博*

On the Improvement of Transient Stability for Tanegashima's Power System Using a Trapezoid Type Automatic Choosing Control

Hitoshi TAKATA, Kousuke HAMADA, and Tomohiro HACHINO

How to improve the stability and reliability of power systems is a very important problem. The power systems in solitary islands such as Tanegashima have special characteristics, e.g. a diesel engine and capacitive load. In order to analyze such a system, one needs theoretical study and detailed simulations using a model representing a power system, generating plants and control elements. In this paper we report on computer simulations on the Tanegashima power system. Our results show that a trapezoid type automatic choosing control can remarkably improve the transient stability of the system.

1. まえがき

近年、電力系統の安定運用，ならびに信頼度向上に対する要請が一段と強くなってきている。例えば，種子島などの離島系統においては，それぞれ離島ごとの独立した系統となっており，しかもディーゼル機関で負荷や運用に特殊性がある。このため系統で事故が起こった場合，適切な制御によって系統を保護しなければならない。一般に発電機の界磁電圧制御器としては，発電機の端子電圧を一定に保つ AVR（自動電圧調整装置）が用いられている。しかし，古典制御理論により設計された AVR のみでは系統で大規模な事故が発生した場合，系統の動揺を抑えることは困難である。

そこで本稿では，非線形性の強い系に対し，非線形性を配慮して領域分割し，各分割領域毎での線形制御則を自動抽出関数により滑らかに結合する自動抽出制御法による界磁電圧制御法^{1)~4)}を考察した。種子島電力系統に対し，計算機シミュレーションを行い，従来の AVR や定常点近傍での線形化による線形制御法を用いた方法との比較によって本手法の有効性を確かめた。その結果，界磁電圧制御に本手法を用いたものが，従来の方法よりも動揺を小さく，しかも早く安定化できることがわかった。

2. 問題設定と自動抽出制御法

2.1 発電機過渡時の運動方程式

発電機過渡時の運動方程式は，一般に次式で表される。

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} + P_e = P_m \quad (1)$$

$$P_e = E_f^2 Y_{11} \cos \theta_{11} + E_f V Y_{12} \cos(\theta_{12} - \delta) \quad (2)$$

$$E_f + T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} = E_{fd} \quad (3)$$

$$E_f = E_q' + (X_d - X_d') I_d \quad (4)$$

$$I_d = -E_f Y_{11} \sin \theta_{11} - V Y_{12} \sin(\theta_{12} - \delta) \quad (5)$$

ここで， δ ：発電機相差角， P_m ：機械的入力， P_e ：電氣的出力， M ：発電機慣性定数， D ：制動係数， E_f ：内部誘起電圧， V ：基準点電圧， $Y_{11} \angle \theta_{11}$ ， $Y_{12} \angle \theta_{12}$ ：機間アドミタンス， E_q' ：過渡リアクタンス背後電圧， E_{fd} ：界磁電圧， T_{d0}' ：直軸過渡時定数， I_d ：直軸電流， X_d ：直軸同期リアクタンス， X_d' ：直軸過渡リアクタンスである。

(1)~(5)式において，さらに送電線等の抵抗分を無視できると考えれば， $\theta_{11} = -\theta_{12} = -\pi/2$ となる。

これより，(2)，(5)式は

$$P_e = E_f V Y_{12} \sin \delta \quad (6)$$

$$I_d = E_f Y_{11} - V Y_{12} \cos \delta \quad (7)$$

平成10年5月31日受理

*電気電子工学科

**博士前期課程電気電子工学専攻

となる。(6)式より,

$$\frac{dP_e}{dt} = \frac{dE_l}{dt} VY_{12} \sin \delta + E_l VY_{12} \frac{d\delta}{dt} \cos \delta. \quad (8)$$

(4), (7)式より,

$$\begin{aligned} \frac{dE_l}{dt} &= \frac{dE'_q}{dt} + (X_d - X'_d) \frac{dI_d}{dt} \\ &= \frac{dE'_q}{dt} + (X_d - X'_d) \left\{ \frac{dE_l}{dt} Y_{11} \right. \\ &\quad \left. + VY_{12} \frac{d\delta}{dt} \sin \delta \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

(9)式より,

$$\begin{aligned} \frac{dE_l}{dt} &= \frac{1}{1 - (X_d - X'_d) Y_{11}} \left\{ \frac{dE'_q}{dt} \right. \\ &\quad \left. + (X_d - X'_d) VY_{12} \frac{d\delta}{dt} \sin \delta \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

(10)式を(8)式に代入して, (3)式を使うと,

$$\begin{aligned} \frac{dP_e}{dt} &= \frac{VY_{12}}{1 - (X_d - X'_d) Y_{11}} \left\{ \frac{1}{T'_{d0}} (E_{fd} - E_l) \sin \delta \right. \\ &\quad \left. + (X_d - X'_d) VY_{12} \frac{d\delta}{dt} \sin^2 \delta \right\} \\ &\quad + E_l VY_{12} \frac{d\delta}{dt} \cos \delta. \end{aligned} \quad (11)$$

(6)式より E_l を消去して,

$$\begin{aligned} \frac{dP_e}{dt} &= \frac{1}{1 - (X_d - X'_d) Y_{11}} \left\{ \frac{VY_{12}}{T'_{d0}} E_{fd} \sin \delta - \frac{1}{T'_{d0}} P_e \right. \\ &\quad \left. + (X_d - X'_d) V^2 Y_{12}^2 \frac{d\delta}{dt} \sin^2 \delta \right\} \\ &\quad + P_e \frac{d\delta}{dt} \cot \delta \end{aligned} \quad (12)$$

よって(1), (12)式より,

$$\begin{cases} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} + P_e = P_m \\ \frac{dP_e}{dt} = \frac{1}{k} \left\{ \frac{VY_{12}}{T'_{d0}} E_{fd} \sin \delta - \frac{1}{T'_{d0}} P_e \right. \\ \quad \left. + (X_d - X'_d) V^2 Y_{12}^2 \frac{d\delta}{dt} \sin^2 \delta \right\} + P_e \frac{d\delta}{dt} \cot \delta \end{cases} \quad (13)$$

である。ここで, $Y_{11} = Y_{12} = 1/(X_d + X_e)$, $\dot{V} = 1 \angle 0^\circ$,

$$\delta = \pi/2 - \tan^{-1} \left(\frac{Q_e + V_t^2/X_q}{P_e} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{X_e P_e}{V_t^2 - X_e Q_e} \right),$$

$$X_e = \frac{1}{P_e^2 + Q_e^2} \{ V_t^2 Q_e + V_t \sqrt{P_e^2 (V^2 - V_t^2) + Q_e^2} \} \text{ ただし,}$$

$Z = P_e^2 (V^2 - V_t^2) + Q_e^2 < 0$ のときは $Z = 0$, $k = 1 - (X_d - X'_d) Y_{11}$ とする。

故に, 状態変数 $X = [X_1, X_2, X_3]^T = [\delta, \dot{\delta}, P_e]^T$, および制御変数 $U = E_{fd}$ とすると,

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(X) \\ f_2(X) \\ f_3(X) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g_3(X) \end{bmatrix} U \quad (14)$$

$$\begin{aligned} f_1(X) &= X_2, \quad f_2 = -\frac{D}{M} X_2 - \frac{1}{M} X_3 + \frac{P_m}{M} \\ f_3(X) &= -\frac{1}{k T'_{d0}} X_3 + \frac{(X_d - X'_d) V^2 Y_{12}^2}{k} X_2 \sin^2 X_1 \\ &\quad + X_2 X_3 \cot X_1 \\ g_3(X) &= \frac{VY_{12}}{k T'_{d0}} \sin X_1 \end{aligned}$$

となる。

2.2 区分線形化の適用

電力系統の過渡時非線形モデルにおいて, 非線形性の最も強い相差角 $Z(X) = X_1 = \delta$ を分離変数とし, 領域 D に対して領域分割 $D = \bigcup_{i=0}^M D_i$ を行う。各領域 D_i 毎に展開点 $\hat{X}_i = [\hat{X}_{1i}, \hat{X}_{2i}, \hat{X}_{3i}]^T$ のまわりでテーラー展開一次近似により線形化する。このとき(14)式は,

$$\dot{x} = A_i x + B_i u + w_i \quad (15)$$

と線形化される。ただし,

$$\begin{aligned} A_i &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{M} & -\frac{1}{M} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{VY_{12}}{k T'_{d0}} \sin \hat{X}_{1i} \end{bmatrix} \\ w_i &= \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$A_{31} = \frac{(X_d - X'_d) V^2 Y_{12}^2}{k} \hat{X}_{2i} \sin 2\hat{X}_{1i} - \frac{\hat{X}_{2i} \hat{X}_{3i}}{\sin^2 \hat{X}_{1i}}$$

$$A_{32} = \frac{(X_d - X'_d) V^2 Y_{12}^2}{k} \sin^2 \hat{X}_{1i} + \cot \hat{X}_{1i} \hat{X}_{3i}$$

$$A_{33} = -\frac{1}{k T'_{d0}} + \cot \hat{X}_{1i} \hat{X}_{2i}$$

$$w_1 = \hat{X}_{20} \quad w_2 = -\frac{D}{M} \hat{X}_{20} - \frac{1}{M} \hat{X}_{30} + \frac{P_m}{M}$$

$$\begin{aligned} w_3 &= \frac{(X_d - X'_d) V^2 Y_{12}^2}{k} \{ \hat{X}_{2i} (\hat{X}_{10} - \hat{X}_{1i}) \sin 2\hat{X}_{1i} \\ &\quad + \hat{X}_{20} \sin^2 \hat{X}_{1i} \} - \frac{\hat{X}_{2i} \hat{X}_{3i}}{\sin^2 \hat{X}_{1i}} (\hat{X}_{10} - \hat{X}_{1i}) \end{aligned}$$

$$+ \cot \hat{X}_{1i} \{ \hat{X}_{3i} \hat{X}_{20} + \hat{X}_{2i} (\hat{X}_{30} - \hat{X}_{3i}) \}$$

$$+ \frac{1}{k T'_{d0}} \{ VY_{12} \sin \hat{X}_{1i} \hat{U}_0 - \hat{X}_{30} \}.$$

2.3 線形制御則群

評価関数としては、定常値からの変動分 $x = X - \hat{X}_0$, $u = U - \hat{U}_0$ に関する二次形式

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (x^T Q_i x + u^T R_i u) dt \quad (16)$$

を設定する。ただし、 Q_i は $n \times n$ 準正定値対称行列で、 R_i は $r \times r$ 正定値対称行列である。

(15), (16)式に対する最適 LQ 制御則は、

$$u_i(x) = -R_i^{-1} B_i^T (P_i x - \xi_i) \quad (17)$$

で与えられる。ただし、 P_i はリカッチの実対称行列方程式の解、および ξ_i はベクトル

$$P_i A_i + A_i^T P_i + Q_i - P_i B_i R_i^{-1} B_i^T P_i = 0 \quad (18)$$

$$\xi_i = (A_i^T - P_i B_i R_i^{-1} B_i^T)^{-1} P_i w_i \quad (19)$$

である。特に定常点 \hat{X}_0 のときには、 $\xi_0 = 0$ である。区分的線形制御則群は、

$$U_i(X) = u_i(x) + \hat{U}_0 \quad (20)$$

となる。

2.4 自動抽出関数

ここで、領域 $D_i = [a_i, b_i]$ を抽出する関数として次の台形型自動抽出関数を導入する。

$$I_{0N}(X_C) = 1 - \sum_{i=1}^M I_{iN}(x) \quad (21)$$

$$I_{iN}(X_C) = \frac{1}{1 + \left(\frac{X_C - m_i}{h_i} \right)^{2N}} \quad (i \geq 1) \quad (22)$$

ただし、 N は自然数、 $h_i = (b_i - a_i)/2$, $m_i = (a_i + b_i)/2$ である。このとき抽出関数の傾きを決める N , 領域幅や分割数によって決まる h_i と m_i などは、システム毎に最適な値が選ばれることが望ましい。

2.5 準最適制御則合成

(20)式を(21)式および(22)式で乗じて結合した次のフィードバック制御則

$$U(X) = \sum_{i=0}^M U_i(X) I_{iN}(X_C) \quad (23)$$

が自動抽出制御である。これは全領域で定義された、領域毎に切り替えのない単一フィードバック制御則である。

3. 計算機シミュレーション

図1に示される種子島電力系統において、種子島第一発電所10号機に本手法を適用し、計算機シミュレーション実験を行った。

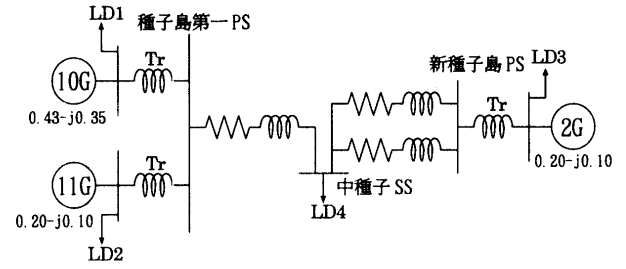


図1 種子島電力系統

シミュレーション条件：

種子島第一発電所10号機の定常状態における各パラメータ値は以下の通りである。

$$\delta_{\infty} = 49.3^\circ, \dot{\delta}_{\infty} = 0, P_{e\infty} = 0.86, Q_{e\infty} = -0.7, E_{fd\infty} = 0.834, V_{t\infty} = 0.956。$$

自動抽出制御法(ACC)：

領域分割数を $3(M=2)$ 又は $5(M=4)$ とした。 $N=8$ に固定した。各領域 D_i 毎に展開点 $\hat{X}_i = [\hat{X}_{1i}, \hat{X}_{2i}, \hat{X}_{3i}]^T$ でテーラー展開一次近似する。ただし、 $\hat{X}_{2i} = 0$, $\hat{X}_{3i} = 0.86$ の定常値とした。

3分割においては次を得た。領域 $D_0 = [0^\circ, 80^\circ]$ で、展開点 $\hat{X}_{10} = 49.3^\circ$ のとき、 LQ 制御則より $U_0(X) = 0.1(X_1 - X_{1\infty}) + 0.4564(X_2 - X_{2\infty}) - 0.7435(X_3 - X_{3\infty}) + U_{\infty}$ 、領域 $D_1 = [80^\circ, 130^\circ]$ で、展開点 $\hat{X}_{11} = 105^\circ$ のとき、 $U_1(X) = 0.1(X_1 - X_{1\infty}) - 0.4049(X_2 - X_{2\infty}) - 0.7462(X_3 - X_{3\infty}) - 0.1794 + U_{\infty}$ 、および領域 $D_2 = [130^\circ, 180^\circ]$ で、展開点 $\hat{X}_{12} = 155^\circ$ のとき、 $U_2(X) = 0.1(X_1 - X_{1\infty}) + 0.7029(X_2 - X_{2\infty}) - 0.8631(X_3 - X_{3\infty}) + 0.6622 + U_{\infty}$ 。

5分割においては、 $D_0 = [0^\circ, 66^\circ]$, $D_1 = [66^\circ, 98^\circ]$, $D_2 = [98^\circ, 122^\circ]$, $D_3 = [122^\circ, 146^\circ]$, $D_4 = [146^\circ, 180^\circ]$ 、展開点 $\hat{X}_{10} = 49.3^\circ$, $\hat{X}_{11} = 82^\circ$, $\hat{X}_{12} = 114^\circ$, $\hat{X}_{13} = 133^\circ$, $\hat{X}_{14} = 165^\circ$ 、として同様に $U_i(X)$ を求めた。

線形制御法(LOC)：

$\hat{X}_0 = [\delta_{\infty}, \dot{\delta}_{\infty}, P_{e\infty}]^T$ でテーラー展開一次近似したシステムに対し、 LQ 制御則より $U_0(X) = 0.1(X_1 - X_{1\infty}) + 0.4564(X_2 - X_{2\infty}) - 0.7435(X_3 - X_{3\infty}) + U_{\infty}$ とした場合である。

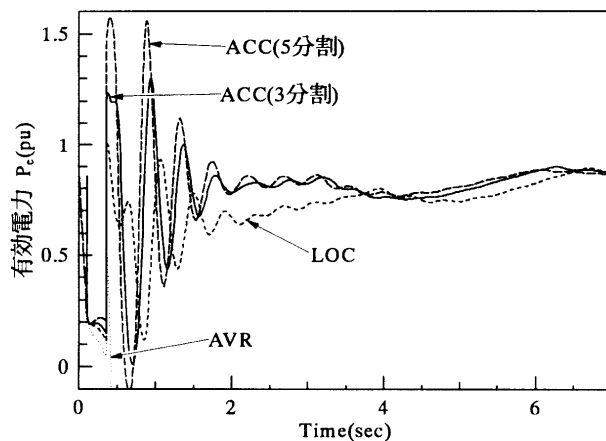
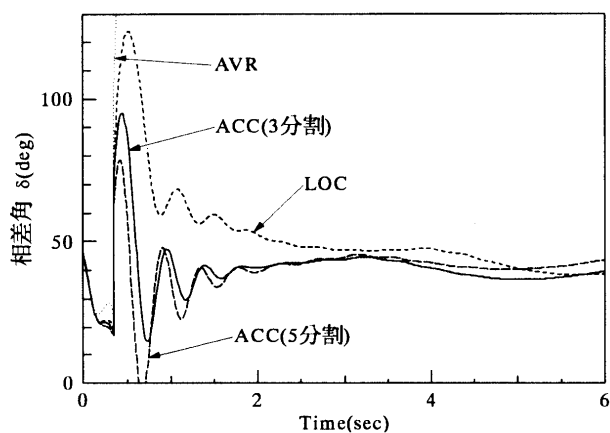
事故としては、新種子島発電所—中種子送電端での1回線三相短絡事故を想定した。図2に事故除去時間 $T_c = 0.25 \text{ sec}$ のときの、発電機端子—内部相差角および有効電力の時間応答を示す。表1に界磁電圧制御に本手法、線形制御法およびAVRを用いたときの、それぞれのシステムの安定化可能範囲を示す。

図2より界磁電圧制御に本手法ACCを用いたものが、

表1 システムの安定化可能範囲

T_c [sec]	AVR	LOC	ACC 3 分割	ACC 5 分割
0.19	○	○	○	○
0.20	×	○	○	○
0.25	×	○	○	○
0.26	×	×	○	○
0.27	×	×	○	○
0.28	×	×	×	○
0.29	×	×	×	○
0.30	×	×	×	○
0.31	×	×	×	×

(○: 安定化できる, ×: 安定化できない)

図2 発電機の時間応答 ($T_c = 0.25$ sec)

AVRやLOCを用いた場合よりも動揺を小さく、しかも早く安定化できることがわかる。表1は本手法の安定化領域拡大を示している。その際、ACC3分割より5分割の方が、さらに安定領域が広い。これらの結果より、本手法は事故の規模が大きくなってもシステムを安定化でき、事故時の系統動揺抑制に有効であることが確かめられた。

4. まとめ

非線形システムに対する台形型自動抽出制御法を提案し、これを電力系統の界磁電圧制御に適用して、安定性の解析および制御の有効性の検証を行った。種子島電力系統に対し、計算機シミュレーション実験を行った結果、従来のAVRや定常点近傍での線形化による線形制御法を用いたものよりも本手法が、動揺を小さく、しかも早く安定化できることがわかった。

本手法における、最適な領域分割幅の決定、制御則を求める際の各状態変数の重みの変更などが今後に残された研究課題である。

謝辞

本研究を行うにあたり、各種多大のご援助と便宜と御指導を賜った、九州電力株式会社と九州電機製造株式会社の各諸氏に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 高田, 宮下, 八野, 辻: 離島電力系統の動揺シミュレーション, 平成7年度計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集, pp. 5-6, (1995)
- 2) 高田, 宮下: 古典制御とLQ制御結合型の自動抽出制御法とその電力系統への応用, 平成8年度電気関係学会九州支部学術講演会論文集, p. 614, (1996)
- 3) 高田, 宮下: 種子島電力系統の動揺抑制制御について, 第15回SICE九州支部学術講演会予稿集, pp. 111-112, (1996)
- 4) 高田, 濱田, 八野, 松山: 自動抽出制御を用いた種子島電力系統の過渡安定度改善について, 第16回SICE九州支部学術講演会予稿集, pp. 319-320, (1997)