制御の遅れを考慮した高速移相器のスライディングモード制御

正 員 横 山 和 哉 (新潟大学)
正 員 貝 津 弘 幸 (新潟工科大学)

A Sliding Mode Control of High Speed Phase Shifters with Delays in Control

Kazuya Yokoyama, Member (Niigata University), Hiroyuki Kaizu, Member (Niigata Institute of Technology)

We propose a sliding mode control of high speed phase shifters to improve the transient stability of power systems. This note presents a sliding mode control with time delays in phase shifters. The occurrence condition is given and the validity is numerically tested on a single machine infinite bus power system.

キーワード：電力系統，移相器，スライディングモード制御，時間遅れ

1. はじめに

著者らは高速移相器を用いたスライディングモード制御による電力系統の過渡安定度向上を提案し、これまでに移相器制御の遅れを無視したモデルに基づいて理論的な制御系の構成方法を示してきた⁽¹⁾。一方、実系統への適用を考えた場合には制御の遅れを考慮したシステムの構成も必要と考える。本レターでは移相器制御の遅れを考慮した制御システムの構成方法を示し、例題系統で本制御システムの制御性能を検証する。

2. 系のモデル化

図1に高速移相器を接続した一機無限大母線系統および移相器制御系のブロック線図を示す。移相器の制御入力 u は発電機の相边角偏差 x_1 および角速度偏差 x_2 を用いて構成する。移相器制御の遅れは制御入力 u の一次遅れで近似し、移相角を状態変数 x_3 として表す。このとき、系の動特性式は以下のように記述できる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -a_2 x_2 - a'_1 f(\sigma) \\ \dot{x}_3 &= -a_3 x_3 + u \\ u &= -(\alpha x_1 + \beta x_2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} x_1 &= \delta - \delta_s, \quad x_2 = \frac{dx_1}{dt}, \quad x_3 = \phi, \quad a'_1 = \frac{1}{M}, \quad a_2 = \frac{D}{M}, \\ a_3 &= \frac{1}{T_p}, \quad \sigma = x_1 - x_3, \quad f(\sigma) = \frac{E'_q E_c}{X_c + X'_d} \{ \sin(\sigma + \delta_s) - \sin \delta_s \} - \frac{(X_q - X'_d) E_c^2}{2(X_c + X'_d)(X_c + X_q)} \{ \sin 2(\sigma + \delta_s) - \sin 2\delta_s \} \end{aligned}$$

ただし、

M : 慣性定数, D : 制動係数, T_p : 移相器の時定数, δ : 相边角, δ_s : 安定平衡点における相边角の値, ϕ : 移相角, $f(\sigma)$: 発電機の入出力に関する非線形関数, u : 移相器の制御入力, E'_q : 過渡リアクタンス背後電圧, E_c : 無限大母線電圧, X_c : 線路リアクタンス, X'_d : d 軸過渡リアクタンス, X_q : q 軸同期リアクタンス, α, β : 利得

図1 一機無限大母線系統
Fig. 1. Single machine infinite bus power system

つぎに、非線形関数 $f(\sigma)$ について $a'_1 f(\sigma) = a_1 \sigma$ で直線近似する。過渡時において運用点が変化するとき、傾きに関するパラメータ a_1 も変化する。そこで、 a_1 の変動範囲を $a_{1min} \leq a_1 \leq a_{1max}$ のように制限することにより、非線形特性を線形化モデルにおいてパラメータ変動として表すことができる⁽¹⁾。以上から、制御対象を

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -a_2 x_2 - a_1(x_1 - x_3) \\ \dot{x}_3 &= -\alpha x_1 - \beta x_2 - a_3 x_3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

と記述する。

3. スライディングモード制御

スライディングモード制御⁽²⁾⁻⁽⁴⁾は制御構造の切換えにより状態を状態空間内に設定した安定な超平面上に拘束し、面上を滑らせて安定平衡点に収束させる制御手法である。本制御対象は3次のシステムであり、切換え面を

$$s = c_1 x_1 + c_2 x_2 + x_3 \dots\dots\dots (3)$$

と定義する。切換え面 $s = 0$ 近傍においてスライディングモードが存在する条件は、リアプノフのテスト関数として $s^2/2$ を導入すると、

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \dot{s} < 0 \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる⁽⁵⁾。制御対象の $s\dot{s}$ は (2) 式より

$$s\dot{s} = (c_2a_1 - a_3)s^2 - \{(c_2a_1 + \alpha) + c_1(c_2a_1 - a_3)\}sx_1 + \{(c_1 - c_2a_2 - \beta) - c_2(c_2a_1 - a_3)\}sx_2 \cdots \cdots (5)$$

となる。また、非線形特性を考慮するパラメータ変動を

$$\left. \begin{aligned} a_{1min} \leq a_1 \leq a_{1max} \\ a_{2min} \leq a_2 \leq a_{2max} \\ a_{3min} \leq a_3 \leq a_{3max} \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \cdots (6)$$

のように限定し、(5) 式の右辺、 s^2 、 sx_1 および sx_2 に注目すると、スライディングモードの存在条件 (4) 式から

$$\left. \begin{aligned} c_2 \leq a_{3min}/a_{1max} \\ \alpha_1 \geq \max_{a_1, a_2, a_3} [c_1(a_3 - c_2a_1) - c_2a_1] \quad ; sx_1 > 0 \\ \alpha_2 \leq \min_{a_1, a_2, a_3} [c_1(a_3 - c_2a_1) - c_2a_1] \quad ; sx_1 < 0 \\ \beta_1 \geq \max_{a_1, a_2, a_3} [c_2(a_3 - c_2a_1) + (c_1 - c_2a_2)] \quad ; sx_2 > 0 \\ \beta_2 \leq \min_{a_1, a_2, a_3} [c_2(a_3 - c_2a_1) + (c_1 - c_2a_2)] \quad ; sx_2 < 0 \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \cdots (7)$$

が得られる。(7) 式にしたがい利得 α および β を切換えることでスライディングモードを発生させることができる。

一方、状態が切換え面に拘束されているとき、系の動特性は $c_1x_1 + c_2x_2 + x_3 = 0$ にしたがう。(2) 式の第 1 および第 2 式から行列表記した動特性式は

$$\left. \begin{aligned} \dot{X} &= AX \\ \text{ここに、} \\ X &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_1(1 + c_1) & -(a_2 + c_2a_1) \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \cdots (8)$$

で表される。上式の係数行列 A において固有値を λ とすると、特性方程式

$$\lambda^2 + (a_2 + c_2a_1)\lambda + a_1(1 + c_1) = 0 \cdots \cdots \cdots (9)$$

が得られる。系が漸近安定であるためには (9) 式の解が左半平面に存在しなければならない。また、フルビッツの安定条件から

$$\left. \begin{aligned} c_1 &> -1 \\ c_2 &\geq -a_{2min}/a_{1max} \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \cdots (10)$$

なる条件が必要となる。よって、切換え面のパラメータ c_1 および c_2 は (7) 式の第 1 式および (10) 式を満足するように選定する。

4. 数値シミュレーションによる検証

図 1 の F 点において三線短絡故障が発生したことを想定し、0.19 秒後に故障回線を除去して一回線送電に復帰した場合を想定する。図 2 にシミュレーション結果を示す。発電機の相差角偏差 (a) および電気出力 (c) の時間応答から、本制御により動揺が速やかに抑制されている。 $x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ 空間の軌跡 (d) では状態が切換え面に沿って安定平衡点に収束している。

表 1 発電機および系統の諸定数

Table 1. Machine constants and initial conditions

$X'_d = 0.2\text{pu}$, $X_q = 0.89\text{pu}$, $X_c = 1.02\text{pu}$, $M = 0.012\text{s}^2/\text{rad}$, $D = 0.011\text{s}/\text{rad}$, $T_p = 50\text{ms}$, $E'_{qs} = 1.1893\text{pu}$, $E_c = 1.0\text{pu}$, $\delta_s = 0.8833\text{rad}$, $\delta_0 = 0.6109\text{rad}$, $P_{es} = 0.6123\text{pu}$, $V_{ts} = 1.1538\text{pu}$
--

表 2 制御パラメータの一選定例

Table 2. Control parameters

$a_{1max} = 80$, $a_{1min} = 20$, $a_{2max} = 1.2$, $a_{2min} = 0.5$, $a_{3max} = 50$, $a_{3min} = 10$, $c_1 = -0.9$, $c_2 = 0.124$, $\alpha_1 = -2.5420$, $\alpha_2 = -52.6980$, $\beta_1 = 4.9405$, $\beta_2 = -1.0489$
--

図 2 シミュレーション結果
Fig. 2. Simulation results

5. まとめ

本レターでは移相器の制御遅れを考慮したスライディングモード制御系の構成手法を示した。実系統においては制御系の遅れを無視することによる制御性能の劣化も懸念されるため、本文で示した制御システムの構成方法は有効である。今後は移相器制御の遅れを考慮したモデルにおいて、切換え面への到達条件を検討する予定である。
(平成 11 年 6 月 28 日受付, 同 11 年 9 月 3 日再受付)

文 献

(1) 貝津, 横山, 佐藤, 菊池:「移相器のスライディングモード制御に基づく一機無限大母線系統安定化の実験と解析」, 電学論 B, Vol.118-B, No.1, pp.44-51, Jan. 1998
(2) R.A.Decarlo, S.H.Zak and G.P.Matthews: "Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems: A Tutorial", Proc. of the IEEE, Vol.76, No.3, pp.212-232, March 1988
(3) S.V.Drakunov and V.I.Utkin: "Sliding mode control in dynamic systems", Int.J.Control, Vol.55, pp.1029-1037, 1992
(4) 野波, 田:「スライディングモード制御」, コロナ社, 1994
(5) 原島, 橋本:「Sliding Mode とその応用-I」, システムと制御, Vol.29, No.2, pp.94-103, 1985