

输电系统自动控制的变结构方法

韩云瑞

(清华大学应用数学系·北京, 100084)

摘要: 远距离输电系统的传输能力受到暂态稳定极限的限制. 本文对于非线性变结构控制系统的切换面的设计提出一种新的方法, 并且将此方法应用于输电系统综合控制. 数值模拟表明用这种方法设计的变结构控制能够大幅度地提高输电系统的暂态稳定极限.

关键词: 变结构控制; 切换面; 综合控制; 电力系统

考察与无穷大系统并联运行的同步发电机, 其综合控制系统包含了励磁控制和快速汽门控制两部分. 描述这个系统的常微分方程如下^[1]:

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{pmatrix} = f(x) + Bu = \begin{pmatrix} x_2 \\ \frac{W}{H}(P_m + x_4 - A_1 x_3 \sin x_1 + A_2 \sin 2x_1) \\ \frac{1}{T_{d0}}(-A_3 x_3 + A_4 \cos x_1 + E_{f0}) + \frac{1}{T_{d0}} u_1 \\ \frac{1}{T_B}(-x_4 + x_5) \\ -\frac{1}{T_\mu} x_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{d0}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_\mu} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

其中 $x_1 = \delta, x_2 = W(\omega - \omega_0), x_3 = E'_q, x_4 = \Delta P_m, x_5 = \Delta \mu, E_f, \Delta V_g$ 为输入, W, H, T_{d0}, T_B, T_μ 为常数. P_m 为平衡状态时的机械功率. $A_1 \sim A_4$ 为正参数. 其中

$$A_1 = \frac{1}{x_d + x_s}, \quad A_2 = \frac{x_d - x'_d}{2(x_d + x_s)(x_d + x_s)}, \quad A_3 = \frac{x_d + x_s}{x'_d + x_s}, \quad A_4 = \frac{x_d - x'_d}{x_d + x_s}.$$

这里 $x_d = 2.534, x'_d = 0.318$ 分别为发电机的同步电抗和暂态电抗. x_s 为发电机外部电抗. 在稳定的平衡状态下, $x_s = 0.83$. 当输电系统处于稳定的平衡状态时, 励磁电动势 E_f 处于某个平衡值 E_{f0} . 当机械功率 P_m 给定后, 输电系统处于稳定的平衡状态时有 $\omega = \omega_0$. 而其它的值 $\delta_0, E'_{q0}, E_{f0}$ 可以由它们与机端电压 V_t 之间的如下关系确定^[1].

$$E_{f0} = \frac{A_3 P_m}{A_1 \sin \delta_0}, \quad E'_{q0} = \frac{E_{f0}}{A_3} + \frac{A_4}{A_3} \cos \delta_0, \quad V_t = \sqrt{V_{tq}^2 + V_{td}^2} = 1. \quad (2)$$

另外, $u_1 = E_f - E_{f0}, u_2 = \Delta V_g$, 满足 $-E_{f0} \leq u_1 \leq 4 - E_{f0}, -P_m \leq u_2 \leq 0$.

已经有不少作者将变结构控制理论应用于输电系统, 但多数文献只讨论线性控制或者只考虑到小扰动的情形^[3~5]. 本文则直接研究输电系统的非线性变结构控制问题. 对于非线性结构控制中的切换面设计提出了一种新的方法, 即先设定等效系统的方程, 然后求切换面, 使得由此导出的滑模运动与设定的方程一致.

在本文中, 我们期望通过设计切换面使系统(1)的滑模运动满足

$$\ddot{x}_2 + 9\dot{x}_2 + 20x_2 = 0, \quad \dot{x}_2 + \dot{x}_4 + \dot{x}_5 = 0. \quad (3)$$

将(3)式变成下面的标准形式

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{W}{H}(P_m + x_4 - A_1 x_3 \sin x_1 + A_2 \sin 2x_1) \\ \frac{1}{A_1 \sin x_1} \left[(2A_2 \cos 2x_1 - A_1 x_3 \cos x_1 + \frac{20H}{W})x_2 + 9(P_m + x_4 - A_1 x_3 \sin x_1 + A_2 \sin 2x_1) \right. \\ \left. + \frac{1}{T_B}(x_5 - x_4) \right] \\ \frac{1}{T_B}(-x_4 + x_5) \\ \frac{1}{T_B}(x_4 - x_5) - \frac{W}{H}(P_m + x_4 - A_1 x_3 \sin x_1 + A_2 \sin 2x_1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

可以通过适当选取切换面 $S = \{x \in \mathbb{R}^5 : \sigma(x) = (\sigma_1(x), \sigma_2(x)) = 0\}$ 实现这个目的. 这里 $\sigma_1(x)$ 和 $\sigma_2(x)$ 是连续可微函数. 为此, 研究多重非线性系统

$$\dot{x} = f(x) + B(x)u, \quad (5)$$

其中 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n, u = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T \in \mathbb{R}^m. n \times m$ 矩阵 $B(x)$ 满秩.

设切换面 S 由方程

$$S = \{x \in \mathbb{R}^n : \sigma(x) = (\sigma_1(x), \sigma_2(x), \dots, \sigma_m(x)) = 0\} \quad (6)$$

确定. 当 $x \in S$ 时, 系统(1)的运动(即等效系统)由下述方程描述^[2]:

$$\dot{x} = f_{eq}(x) := f(x) - B(x) \left(\frac{\partial \sigma(x)}{\partial x} B(x) \right)^{-1} \frac{\partial \sigma(x)}{\partial x} f(x). \quad (7)$$

其中, $\sigma_1(x), \sigma_2(x), \dots, \sigma_m(x)$ 都是连续可微函数并且满足条件

$$\det \left(\frac{\partial \sigma(x)}{\partial x} B(x) \right) \neq 0. \quad (8)$$

记 $\alpha_i = \frac{\partial \sigma_1}{\partial x_i}, \beta_i = \frac{\partial \sigma_2}{\partial x_i} (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 则 $\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 & \alpha_5 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_4 & \beta_5 \end{bmatrix}$. 将 α_i, β_i 和 $\frac{\partial \sigma}{\partial x}$ 代入(7), 整理后与(4)比较(并且注意到条件(8))可以得到

$$\alpha_1 = \frac{W}{H}(A_1 x_3 \cos 2x_1 - 2A_2 \cos x_1) - 20, \quad \alpha_2 = -9, \quad \alpha_3 = \frac{W}{H}A_1 x_3 \sin x_1, \\ \alpha_4 = -\frac{W}{H}, \quad \alpha_5 = 0, \quad \beta_1 = \beta_3 = 0, \quad \beta_2 = \beta_4 = \beta_5 = 1.$$

又因为切换面包含平衡点 $(\delta_0, 0, E_{q0}, 0, 0)$, 于是得到

$$\sigma_1(x) = \frac{W}{H}(A_1 x_3 \sin x_1 - A_2 \sin 2x_1 - x_4 - P_m) - 20(x_1 - \delta_0) - 9x_2, \\ \sigma_2(x) = x_2 + x_4 + x_5. \quad (9)$$

定理 系统(1)的稳定平衡点 $(\delta_0, 0, E_{q0}, 0, 0)$ 是等效系统(4)的渐近稳定平衡点.

证 注意到方程(3)与(4)是互相等价的, 由(3)可知, 当 $t \rightarrow +\infty$ 时 x_2 和 $\dot{x}_2$ 以指数衰减速度趋于零, 由此又推出当 $t \rightarrow +\infty$ 时, x_1 以指数衰减速度趋于某个值 δ^* . 由(4)中第四式两端对于时间 t 求导可以解出 $\dot{x}_5 = T_B \ddot{x}_4 + \dot{x}_4$, 代入(3)中的第二式得到

$$\ddot{x}_4 + \frac{2}{T_B} \dot{x}_4 = -\frac{1}{T_B} \dot{x}_2 := \varphi(t). \quad (10)$$

这是一个关于 $\dot{x}_4$ 的一阶线性非齐次常微分方程, 其右端项 $\varphi(t)$ 具有形状

$$\varphi(t) = -\frac{1}{T_B} x_2(t) = c_1 e^{-4t} + c_2 e^{-5t},$$

由常数变异法不难验证,当 $t \rightarrow +\infty$ 时, x_4 也以指数衰减速度趋向于零. 事实上,解方程(10)得

$$\dot{x}_4 = e^{-\frac{2}{T_B}t} (c + \int_0^t e^{\frac{2}{T_B}s} \varphi(s) ds) = ce^{-\frac{2}{T_B}t} + \int_0^t e^{-\frac{2}{T_B}(t-s)} \varphi(s) ds.$$

其中右端第二项满足不等式 $\left| \int_0^t e^{-\frac{2}{T_B}(t-s)} \varphi(s) ds \right| \leq M \left| \int_0^t e^{-\frac{2}{T_B}(t-s)} e^{-s} ds \right| \leq M_1 e^{-t}$, 于是由上式得

$$|\dot{x}_4(t)| \leq M e^{-\frac{2t}{T_B}},$$

由此进一步推出,当 $t \rightarrow +\infty$ 时 x_4 也以指数衰减速度趋向于某个值 a .

将 $\dot{x}_4 \rightarrow 0, \dot{x}_2 \rightarrow 0$ 代入(3)中的第二式,便知当 $t \rightarrow +\infty$ 时 $\dot{x}_5$ 以指数衰减速度趋向于零,从而 x_5 以指数衰减速度趋向于某个值 b . 将 $x_1 \rightarrow \delta^*, x_2 \rightarrow 0, x_4 \rightarrow a, x_5 \rightarrow b$ 代入 $\sigma(\delta^*, 0, x_3, a, b) = 0$, 便知道当 $t \rightarrow +\infty$ 时 x_3 将以指数衰减速度趋于某个值 q^* . 这就是说,等效系统(4)以 $(\delta^*, 0, q^*, a, b)$ 为渐近稳定平衡点. 因此在该点(4)右端皆化为零. 由(4)的第四式右端等于零推出 $a = b$. 代入到 $\sigma_2(\delta^*, 0, q^*, a, a) = 0$ 又得到 $a = 0$. 再将 $x_1 = \delta^*, x_3 = q^*, x_4 = a = 0$ 代入 $\sigma_1(x) = 0$, 即

$$0 = \sigma_1(\delta^*, 0, q^*, 0, 0) = \frac{W}{H} (A_1 \sin \delta^* - A_2 \sin 2\delta^* - P_m) - 20(\delta^* - \delta_0). \quad (11)$$

注意由方程(4)第二式右端等于零得到

$$A_1 q^* \sin \delta^* - A_2 \sin 2\delta^* - P_m = 0,$$

将这个结果代入(11)式立即推出 $\delta^* = \delta_0$. 由(2)中的第一式又得到

$$q^* = \frac{1}{A_1 \sin \delta^*} (P_m + A_2 \sin 2\delta^*) = \frac{1}{A_1 \sin \delta_0} (P_m + A_2 \sin 2\delta_0) = E'_{q0}.$$

于是原系统(1)的平衡点是等效系统(4)的渐近稳定平衡点. 证毕.

对于综合控制系统求得切换面之后,可以按照通常的方法设计控制规律. 以下是对输电系统各种故障的数值模拟结果(故障的模型由清华大学电机系提供):

1) 三相短路故障(永久). $t = 0$ 短路, $t = 0.1$ 切断故障线路, 即 $x_1 = 0.83 (t < 0), x_1 = +\infty (0 \leq t < 0.1), x_1 = 1.56 (t \geq 0.1)$. 数值计算表明, 当机械功率 $P_m \geq 0.65$ 时, 切除故障线路后的输电系统(即 $x_1 = 1.56$) 不再存在平衡点. 这就是说, 在这种故障下输电系统暂态稳定极限不可能达到或超过 0.65. 但是如果应用本文设计的控制方案, 可以使暂态稳定极限达到 $P_m = 0.64$. 图 1 是当机械功率为 $P_m = 0.64$ 时发生三相短路故障后系统的响应.

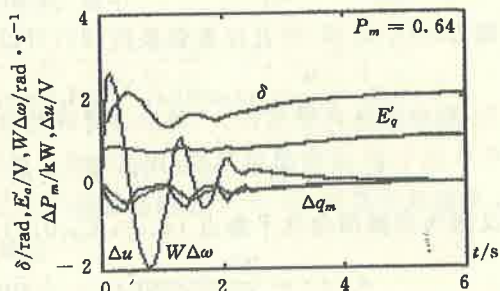


图 1 三相同时短路(永久)

2) 单相接地故障(瞬时). 设 $x_1 = 0.83 (t < 0), x_1 = 1.674 (0 \leq t < 0.1), x_1 = 0.9 (0.1 \leq t < 0.6), x_1 = 0.83 (t \geq 0.6)$. 图 2 是 $P_m = 1$ 时发生单相接地故障(瞬时)后系统的响应.

3) 单相接地故障(永久). 即 $x_1 = 0.83 (t < 0), x_1 = 1.674 (0 \leq t < 0.1), x_1 = 0.9 (0.1 \leq t < 0.6), x_1 = 1.674 (0.6 \leq t < 0.7), x_1 = 1.56 (t \geq 0.7)$. 与 1) 相同, 当机械功率达到或超过 0.65 时, 系统(8)不再有平衡状态. 但是本文的方法可以使暂态稳定极限达到 $P_m = 0.64$. 图 3 是 $P_m = 0.64$ 是系统受到单相接地故障后的响应.

结论 本文应用变结构控制理论研究输电系统的综合控制问题. 首先对于非线性变结构控制系统的切换面设计提出了一个新方法. 这种方法的要点是由设计者适当选定滑模运动的

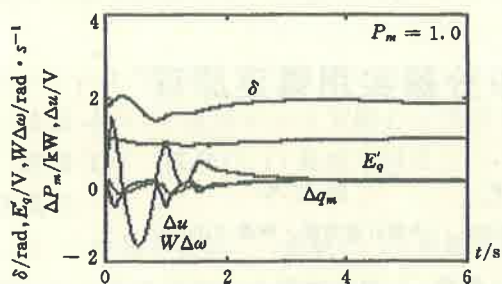


图2 单相短路(瞬时)

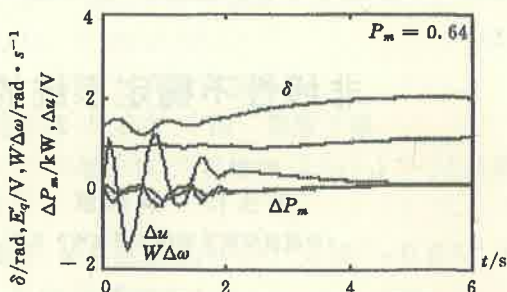


图3 单相短路(永久)

方程,然后求切换面使等效系统与选定的方法一致. 本文将这种方法应用于输电系统的综合控制问题的研究. 对于输电系统受到各种故障的冲击后的响应进行了数值模拟. 数值模拟表明, 本文的方法能够大幅度地提高输电系统在各种故障下的暂态稳定极限. 例如对于三相同步短路(永久)和单相接地故障(永久),可以使暂态稳定极限基本上达到最高的界限(即当机械功率超过这个数值时,输电系统在发生相应的事故后不可能再恢复稳定).

参 考 文 献

- 1 卢强,王仲鸿,韩英铎. 输电系统最优控制. 北京:科学出版社,1984
- 2 Decarlo, R., Stanislaw, Z. and Matthews, G.. Variable structure control of nonlinear multivariable systems; a tutorial Proc. IEEE, 1988,76(3):212—232
- 3 Subbarao, G. V. and Ashok Iyer.. Nonlinear excitation and governor control using variable structure. Int. J. Control, 1993,57(6):1325—1342
- 4 Al-hamouz, Z. M. and Abdel-Magid, Y. L.. Variable structure load frequency controllers for multiair power Systems. Int. J. Elect. Power and Energy Syst., 1993,15(5):293—300
- 5 Sivaramakrishnan, A. Y., Hariharan, M. V. and Srisailam, N. C.. Design of variable-structure load-frequency controller using pole assignment technique. Int. J. Control, 1984,40(3):487—498

Nonlinear Variable Structure Control Technique for Power Systems

HAN Yunrui

(Department of Applied Mathematics, Tsinghua University • Beijing, 100084, PRC)

Abstract: This paper studies the nonlinear variable structure (VSC) technique for designing power control systems which include an excitation controller and a fast valve controller. A new method is applied to find nonlinear switching surface in derive the control strategy. The simulation results of responses to various large perturbations show that the nonlinear VSC technique can considerably improve the transient stabilization limitation of power systems.

Key words: variable structure; switching surface; integrated control; power system

本文作者简介

韩云瑞 1942年生. 现任清华大学应用数学系副教授, 副系主任. 1964年毕业于山东大学数学系, 后就读于北京大学数学系研究生并取得硕士学位. 1981年到清华大学工作, 主要从事教学工作 and 基础数学的研究工作. 1995年开始从事输电系统自动控制的研究工作, 曾先后发表论文 20 余篇.