

新型静止无功发生器的模糊滑模控制方式研究

茅靖峰^{1,2}, 孙玉坤², 吴爱华¹

(1. 南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226007; 2. 江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

Research on Fuzzy Sliding Mode Control of STATCOM

MAO Jing-feng^{1,2}, SUN Yu-kun², WU Ai-hua¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226007, China;

2. Institute of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

摘要: 阐述了新型静止无功发生器(STATCOM)的基本原理,应用滑模变结构理论与模糊控制理论,设计了能同时改善电力系统功角稳定与装设点电压动态性能的 STATCOM 模糊滑模控制器(FSMC)。针对含 STATCOM 的单机-无穷大系统进行的电力系统暂态仿真结果表明:与常规 STATCOM 控制器相比,设计的模糊滑模控制器能更有效地提高电力系统的稳定性,改善动态响应品质。

关键词: 静止无功发生器; 滑模控制; 模糊控制

中图分类号: TM273 文献标志码: A

Abstract: The principle of static synchronous compensator was analyzed. A fuzzy sliding mode controller (FSMC) for STATCOM was proposed. The controller could improve power angle stability of power system and local voltage characteristics. The transient simulation results on a single-machine infinite-bus system including STATCOM show that the proposed FSMC can improve stability and dynamic characteristics of system more effectively in contrast to conventional controller of STATCOM.

Key words: static synchronous compensator(STATCOM); sliding mode control; fuzzy control

0 引言

采用自换相桥式变流电路进行动态无功补偿的新型静止无功发生器(STATCOM)是柔性交流输电(FACTS)家族中的重要核心设备,与传统的无功补偿设备静止无功补偿器(SVC)相比,STATCOM 调节速度更快,运行范围更宽,体积更小。在采用多重化、多电平或 PWM 技术等措施后,STATCOM 可大大减少补偿电流中的谐波含量。这些优良的补偿性能,已使 STATCOM 成为电力系统动态无功补偿装置的发展方向,受到了国内外电力界的广泛关注^[1,2]。

常见的 STATCOM 控制器是在母线电压控制环

节基础上,叠加一个表征发电机转速变化的辅助控制量,采用常规 PI 控制策略进行无功补偿电流的动态调节^[3-5]。然而,电力系统 STATCOM 控制环境非线性强,具有变结构和变参数等不确定性,基于精确数学模型设计的具有固定参数的常规线性控制器存在着普遍适应性问题。

模糊滑模控制(FSMC)是一种特殊的非线性复合变结构控制方法,它消除了传统滑模变结构控制的抖振现象,降低了经典模糊控制中模糊控制规则需要试凑的不利面,控制律兼顾二者的优点,具有较好的鲁棒特性和易于工程实现的特点。因而,得到了众多领域的重视^[6,7]。

笔者利用模糊滑模控制方法,设计了一种电力系统 STATCOM 复合非线性控制器,通过仿真实验显示了该控制器在提升系统暂稳极限和维持节点电压稳定等方面的较高品质。

1 数学模型

在远距离输电系统中,STATCOM 装置通过连接变压器安装于输电线路中点。考虑如图 1 所示的单机-无穷大(SMIB)系统。STATCOM 通过直流侧电压 U_{dc} 逆变,输出一个电压大小可控的工频交流电源,当其产生的电压小于接入节点电压时,装置发出感性无功,反之,发出容性无功。

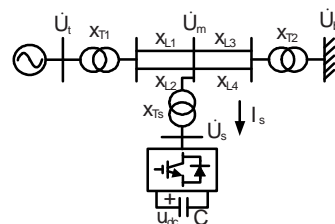


图1 含 STATCOM 的 SMIB 系统

收稿日期: 2007-06-04; 修回日期: 2007-08-13

基金项目: 江苏省高新技术研究项目(BG2004024); 江苏省南通市科委资助项目(Z5008)。

作者简介: 茅靖峰(1976-),男,博士研究生,讲师,主要研究方向为柔性交流输电系统的控制技术。

STATCOM 控制器常需分为内环控制和外环控制两层来考虑。作为一种新型的并联无功补偿装置, STATCOM 的主要功能是通过向系统提供快速而连续的无功电流来维持 STATCOM 接入点电压 U_m 的稳定, 但根据具体的应用要求, 也可在控制器外环反馈中加入系统功角、转子角速度等物理量, 以实现阻尼功率振荡和提高暂稳极限等附加功能。由外环功能控制器生成的指令电流作为内环电流控制器的给定, 内环控制的目的是快速准确地完成给定电流到输出补偿电流 I_s 的映射。因此, 根据装置的 U-I 特性(电流源特性), 在基于控制器两层模型结构设计的基础上, STATCOM 系统级(外环)描述可用一个带有一阶惯性模块的可控无功电流源来表示^[8]。

图 2 所示为含 STATCOM 的 SMIB 系统等值电路图。若发电机采用二阶经典模型, STATCOM 采用一阶可控惯性电流源模型, 忽略线路有功损耗, 则含 STATCOM 装置的 SMIB 系统非线性状态方程可以描述为

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} &= \frac{0}{2H} (P_m - P_e) - \frac{D}{2H} (\omega - \omega_0) \\ \dot{I}_s &= \frac{1}{T} (-I_s + K_u u) \end{aligned} \quad (1)$$

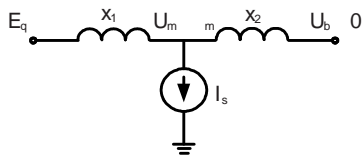


图 2 等值电路

式中 $P_e = \frac{x_1 x_2 E_q U_b \sin \delta}{(x_1 + x_2) \sqrt{(x_2 E_q)^2 + (x_1 U_b)^2 + 2x_1 x_2 E_q U_b \cos \delta}} + \frac{E_q U_b \sin \delta}{x_1 + x_2}$; $x_1 = x_d + x_{T1} + x_{L1} // x_{L2}$; $x_2 = x_{T1} + x_{L3} // x_{L4}$; δ 为发电机的功角, rad; ω 为发电机的角速度; ω_0 为发电机的同步角速度, $\omega_0 = 2\pi f_0 = 314$ rad/s; P_e 为发电机的电磁功率; P_m 为发电机机械功率; D 为发电机阻尼系数; H 为发电机惯性时间常数, s; E_q 为发电机暂态电势; U_b 为无穷大母线电压; x_d 为发电机 d 轴暂态电抗; x_1, x_2 为各支路等效电抗; I_s 为 STATCOM 输出无功电流; T 为 STATCOM 惯性时间常数, s; K 为 STATCOM 调节器放大倍数; u 为 STATCOM 的控制输入量, 对应着 STATCOM 逆变输出电压与接入点系统电压间的相位差。

2 模糊滑模控制器设计

常规滑模变结构控制方法鲁棒性强, 动态性能好, 但由于控制量不连续, 在临近稳态时, 系统输出不

可避免地会出现‘抖振’现象。采用滑模糊控制方法来实现变结构控制规律不但可有效地抑制‘抖振’问题, 而且在控制器中引入了模糊逻辑推理机制, 使 STATCOM 控制器在复杂、不确定的非线性电力系统控制环境中具有更好的控制效果和更高的鲁棒性能。

将含 STATCOM 的电力系统非线性状态方程式(1)写成标准仿射非线性系统形式

$$\dot{X} = f(X) + g(X)u \quad (2)$$

式中 $X = [\delta \quad \omega \quad I_s]^T$; $g(X) = [0 \quad 0 \quad -K/T]^T$;

$$f(X) = \begin{bmatrix} \omega - \omega_0 \\ \frac{0}{2H} (P_m - P_e) - \frac{D}{2H} (\omega - \omega_0) \\ -\frac{I_s}{T} \end{bmatrix}$$

对式(2), 可用直接线性化理论得到其坐标变换

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \\ I_s \end{bmatrix}$$

在此变换下, 非线性状态方程式(1)变为

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= z_3 \\ \dot{z}_3 &= -z_3 + (z)u \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $(z) =$

$$\begin{aligned} & -\frac{D}{2H} \omega - \frac{0}{2H} \frac{E_q U_b}{x_1 + x_2} \cos \delta - \frac{0}{2H} \frac{x_1 x_2 E_q U_b (I_s - I_{s0})}{x_1 + x_2} \\ & \left[\frac{T \cos \delta - \sin \delta}{T \sqrt{(x_2 E_q)^2 + (x_1 U_b)^2 + 2x_1 x_2 E_q U_b \cos \delta}} + \frac{x_1 x_2 E_q U_b \sin^2 \delta}{\sqrt{[(x_2 E_q)^2 + (x_1 U_b)^2 + 2x_1 x_2 E_q U_b \cos \delta]^3}} \right]; \end{aligned}$$

$(z) = -\frac{0 x_1 x_2 E_q U_b K \sin \delta}{2H (x_1 + x_2) T \sqrt{(x_2 E_q)^2 + (x_1 U_b)^2 + 2x_1 x_2 E_q U_b \cos \delta}}$ 。令

$(z) + (z)u =$, 则状态方程式(3)转变为以 (z) 为控制输入量的线性系统。选取线性滑模切换函数 $s(z)$

$$s(z) = c_1 z_1 + c_2 z_2 + z_3 \quad (4)$$

则滑动模态运动微分方程为

$$p^2 + c_2 p + c_1 = 0 \quad (5)$$

显然, 变换后的线性系统式(3)、(5)也代表了发电机转子的最终运动方程。因此, 若预设最终滑动模态极点集为 $s = \{-1, -2\}$, 它也就成为了发电机转子运动方程的期望极点, 因此, 可以从理论上确保控制器的鲁棒性。同时, 由极点配置法可求得切换函数 $s(z)$ 中的参数为

$$c_1 = -1 - 2; \quad c_2 = -(1 + 2)$$

对式(4)求导, 得切换函数的变化率

$$\dot{s} = c_1 \dot{z}_1 + c_2 \dot{z}_2 + \dot{z}_3 = -1 - 2 \omega - (1 + 2) \omega + (z) + (z)u$$

设计的模糊滑模控制器结构见图3。控制器将滑模切换函数 s 和其变化率 \dot{s} 作为模糊控制的输入, 通过模糊推理获得模糊控制输出量 U 。 s 和 \dot{s} 的值代表了相迹点距滑模面的距离和趋近速度, 根据其物理含义, 将二者及其输出量 U 在模糊集论域 $[-6, 6]$ 上非均匀离散, 并定义成7个模糊子集, 在力图满足不等式 $s\dot{s} < 0$ 的条件下设计控制量 U , 其控制目的是使系统快速地到达滑模面 s 上(滑模可达性)。设计的模糊控制规则见表1。

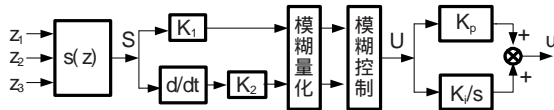


图3 模糊变结构控制器结构

表1 FSMC 模糊控制规则表

U	SC						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	ZE
NS	NM	NM	NM	NS	ZE	PS	PS
S	ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
PS	NS	NS	ZE	PS	PM	PM	PM
PM	ZE	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

由表1可见: 当 s 和 \dot{s} 都为正大 (PB), 这意味着 $s\dot{s}$ 是正大, 那么就需要控制输入一个大的正的变化, 以使 $s\dot{s}$ 快速减小; 当 $s\dot{s} < 0$ 时, 为期望的状态, 控制量应为零 (ZE); 当 s 和 \dot{s} 都为负大 (NB), 这意味着 $s\dot{s}$ 是正大, 那么就需要控制输入一个大的负的变化, 以使 $s\dot{s}$ 快速减小。由于表1中所有的控制规律是根据满足 $s\dot{s} < 0$ 这个到达滑模面的充要条件所设计的, 所以设计的模糊滑模控制器是稳定的。

采用正态分布函数作为 s 和 \dot{s} 的隶属度函数, 应用重心法反模糊化, 形成的模糊输出曲面见图4。为了消除经典模糊控制由于量化取整误差而引起的模糊调节死区影响, 将模糊输出控制量 U 的后级串连了一个常规 PI 控制器, 以改善系统的稳态性能。因此, 最后一级的 PI 输出 u 即为最终的模糊滑模控制量, 该控制量具有较强的连续变化的非线性 PID 特性^[9]。

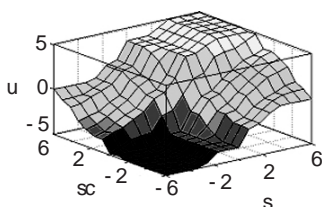


图4 FSMC 模糊输出曲面

显然, 由状态方程式(1)设计的 STATCOM 模糊滑模控制规律 u 是以改善功角特性为指标的, 为了发挥 STATCOM 支撑系统电压的能力, 需要在装置的总控制规律中加入电压反馈项, 以保证稳态时的电压调节精度。STATCOM 接入节点的电压 U_m 方程式可表述为^[10]

$$U_m = \frac{\sqrt{(x_2 E_q)^2 + (x_1 U_b)^2 + 2x_1 x_2 E_q U_b \cos \delta}}{x_1 + x_2} + \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} I_s$$

因此, 设计的 STATCOM 总体控制系统结构可由图5来表示, STATCOM 总控制规律输出 u 由 FSMC 的功角控制量 u 和节点电压偏差控制量 u 共同组成。

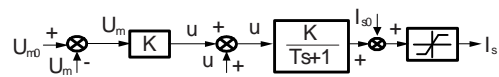


图5 STATCOM 总体控制系统原理图

3 仿真实验

针对图1所示的含 STATCOM 装置的 SMIB 系统进行电力系统暂态仿真。为了对比讨论 STATCOM 模糊滑模控制方式对提高电力系统稳定性的效果, 实验中设计了 STATCOM 常规 PI 控制规律 u , 其原理框图如图6。图中仿真参数(除注明单位外, 均为标么值, 线路基值为 $100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 500 kV), 其中 $\omega_0 = 314 \text{ rad/s}$; $D=2$; $H=5 \text{ s}$; $x_d=0.22$; $x_{d1}=x_{d2}=0.4$; $x_{L3}=x_{L4}=0.6$; $x_{T1}=x_{T2}=0.1$; $I_{\text{strk}}=0.5$; $I_{\text{srin}}=-0.5$; $I_{s0}=0$; $T=0.02 \text{ s}$; $K=1.0$ 。

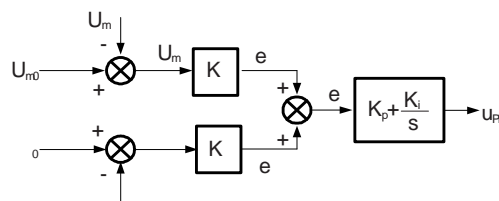
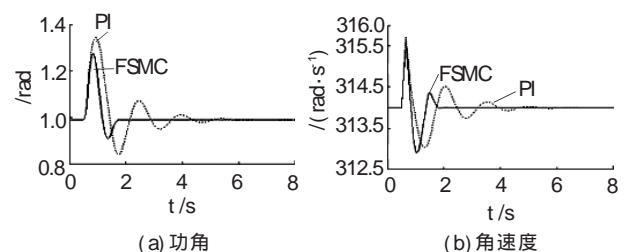


图6 STATCOM 常规 PI 控制器结构

图7、8分别为设定初始功角运行点 $P_m=1.15$, $\omega_0=57$ 和 $\omega_0=75$ 条件下: $t=0.5 \text{ s}$ 时刻在发电机出口端高压侧发生三相短路故障, $t=0.65 \text{ s}$ 时刻系统恢复正常情况时, 模糊滑模控制和常规 PI 控制下功角 δ 、角速度 $\dot{\delta}$ 、STATCOM 安装点电压 U_m 的动态响应曲线。

图7表明, 在大扰动情况下, STATCOM 模糊控



(a) 功角

(b) 角速度

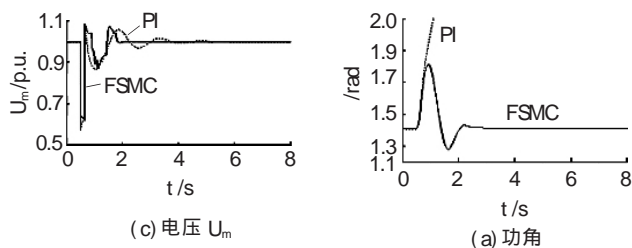


图7 暂态响应曲线($\alpha=57^\circ$)

制器能使系统的动态品质优于常规PI控制的动态品质,同时增加了系统阻尼,并在维持节点电压上有更快的响应速度和更平稳的调节过程。图8表明,在大功角、大扰动情况下,STATCOM模糊控制器较常规PI控制器能更有效地提高系统的暂态稳定极限、维持节点电压稳定。

4 结语

应用模糊滑模控制理论,设计了以同时改善系统功角特性和节点电压动态特性为目标的STATCOM模糊滑模控制器。该控制器综合了滑模变结构控制和模糊控制二者的优点,改善了动态特性,抑制了“抖振”,增强了鲁棒性,同时结合经典控制方法,提高了系统的稳态性能。仿真实验结果验证了FSMC控制器在提高电力系统稳定性能上的正确有效性。

参考文献:

[1] PADIYAR K R, PRABHU N. Design and Performance Evaluation of Subsynchronous Damping Controller with STATCOM[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2006, 21(3): 1398-1405.

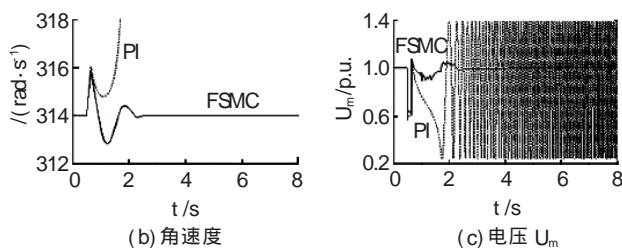


图8 暂态响应曲线($\alpha=75^\circ$)

[2] EL-MOURSI M S, SHARAF A M. Novel Controllers for the 48-pulse VSC STATCOM and SSSC for Voltage Regulation and Reactive Power Compensation [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20(4): 1985-1997.

[3] DONG SHEN, LEHN P W. Modeling, Analysis, and Control of a Current Source Inverter-based STATCOM[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 17(1): 248-253.

[4] RAO P, CROW M L, YANG Z. Statcom Control for Power System Voltage Control Applications[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2000, 15(4): 1311-1317.

[5] YANG Z, SHEN C, ZHANG L, et al. Integration of a STATCOM and Battery Energy Storage [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2001, 16(2): 254-260.

[6] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[7] KAZEMI A, SOHRFOROUZANI M V. Power System Damping Using Fuzzy Controlled FACTS Devices [C]// International Conference on PowerCon, 2004: 21-24.

[8] SCHAUDER C, GERNHARDT M, STACEY E, et al. Operation of ± 100 MVAR TVA STATCON[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1997, 12(4): 1805-1811.

[9] 章卫国, 杨向忠. 模糊控制理论与应用 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.

[10] KUMKRATUG P, HAQUE M H. Versatile Model of a Unified Power Flow Controller in a Simple Power System[J]. IEE Proc., Gener. Transm. Distrib., 2003, 150(2): 155-161.

(上接第404页)

(1) 在将真空开关的真空间隙调整为小间隙(如0.8 mm)以后,使用发射电流衰减法,不需要施加磁场,通过停电测量发射电流的衰减情况可以测得灭弧室内的真空度。

(2) 研制具有良好内外绝缘的励磁线圈以后,使用磁控放电法能以 6×10^{-2} Pa 的灵敏度在线检测真空开关真空度。

参考文献:

[1] 赵子玉, 邹积岩, 何俊佳, 等. 真空灭弧室真空度现场测试技术研究[J]. 高压电器, 1999, 35(2): 10-12, 16.

[2] 赵子玉, 陈 雾, 李兆治, 等. 不拆卸灭弧室测量真空度的技术研究[J]. 电工技术杂志, 2003(8): 32-35.

[3] 李 曼, 赵子玉. 真空灭弧室内部气体压力测试仪励磁线圈磁场计算[J]. 高压电器, 2004, 40(6): 439-441, 445.

[4] 邹积岩, 何俊佳, 程礼椿. 真空灭弧室的真空度测试与在线监测[J]. 高压电器, 1993, 29(5): 13-17.

[5] 旭光股份. 10 kV 真空开关在线监测装置简介[Z]. 成都旭光电子股份有限公司产品简介, 2005.

[6] 严金城, 邱一新, 赵学文. 真空开关真空度在线监测原理与应用[J]. 江苏电器, 2002(1): 36-38, 35.

[7] 舒乃秋, 王成江, 毛慧和, 等. 放电声发射法检测真空灭弧室内部气体压力的研究[J]. 高压电器, 2003, 39(1): 43-48.

[8] KAMAROL M, OHTSUJKA S, SAITOU H, et al. Diagnosis of Vacuum Degree in Vacuum Interrupter Based on Partial Discharge [C]// 22nd Int. Symp. on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum-matsue, 2006: 165-168.

[9] HITOSHI SAITOU, YOSHIHIKO MATSUI, MASAYUKI SAKAKI. Discharge Properties in Low Vacuum and Vacuum Monitoring Method for Vacuum Circuit Breakers[C]// 22nd Int. Symp. on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum-matsue, 2006: 181-184.

[10] 赵子玉, 宋焕生, 江秀臣, 等. 一种测量真空开关灭弧室的真空度的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 144-149.

[11] 雷银照. 轴对称线圈磁场计算 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1991.