

基于 Sugeno 模糊推理的 静止无功补偿器多模态切换方法

唐酿¹, 肖湘宁¹, 陈众²

- (1. 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;
2. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410076)

A Method of Multi-Mode Switching for SVC Based on Sugeno Fuzzy Inference

TANG Niang¹, XIAO Xiangning¹, CHEN Zhong²

- (1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control
(North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076,
Hunan Province, China)

ABSTRACT: In view of their advantages of high control accuracy and strong robustness, the multi-model controllers, which combines various advanced control algorithms such as nonlinear proportional integral differential(PID), neural network, fuzzy logical control and genetic algorithm with conventional PID controller, are applied in the field of power system control. Multi-mode control is mainly implemented by fast switching control mode, however, it is easily to lead to the dithering in controller output and system response at the switching moment by this method. To smooth the transient process, a control model switching method based on Sugeno fuzzy inference is proposed. Taking the outputs of various controller as the input and leading them into the output membership function of Sugeno system and the concept of output membership function is expanded to implement the smooth transition among models. The actual control effects of nonlinear norm transformation PID (NNTPID) and conventional PID on static var compensator (SVC) are simulated, and simulation results show that the proposed method can smooth the dithering during the control process and the switching transient process can be smoothed.

KEY WORDS: multi-mode switching; nonlinear proportional integral differential; Sugeno fuzzy inference; static var compensator (SVC)

摘要: 多模态控制主要采用快速切换控制方式实现, 此方法在切换瞬间易引起控制器输出和系统响应出现抖动现象。为平滑过渡过程, 提出了一种基于 Sugeno 模糊推理的控制模态切换方法, 将不同控制器的控制输出作为输入引入到 Sugeno 系统的输出隶属函数, 并将输出隶属函数的概念扩展以实现模态的平滑过渡。通过仿真分析基于非线性度变换比例积分微分(proportional integral differential, PID)控制和

常规 PID 控制 2 种方式在静止无功补偿器上的控制效果, 验证了该方法可以平滑抖动现象, 实现模态切换的平稳过渡。

关键词: 多模态切换; 非线性比例-积分-微分; Sugeno 模糊推理; 静止无功补偿器

0 引言

随着高频大容量开关器件和新型功率电路的发展, 灵活交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)装置越来越多地在冶金轧钢、交通、国防等重要领域得到应用, 非线性比例-积分-微分(proportional integral differential, PID)控制、神经网络、模糊逻辑、遗传算法等先进控制算法更是得到了很好的实际应用平台。针对复杂的控制系统, 各种先进算法与常规的 PID 控制相结合的多模态控制因具有控制精度高、鲁棒性强等优点开始在电力系统中得到应用。

通常多模态控制器由线性控制器和非线性控制器 2 部分组成^[1]。线性控制器的目的是保证系统的稳定性, 非线性控制器则改善被控对象的动态性能。多模态控制的核心是对状态进行归类, 对不同类别的状态采用不同的控制策略, 然而模态切换过程中状态的平稳过渡是控制的难点。本文通过在静止无功补偿器(static var compensator, SVC)控制器引入非线性度变换 PID 和常规 PID 2 种模态控制指出变结构控制中存在的抖动现象及其主要原因, 利用 Sugeno 模糊推理实现模态切换的平滑过渡, 从而更灵活快速地调节电压, 维持系统电压的稳定。

1 模态切换

多模态是指当系统状态变化时,如果原控制器不再适用,那么在系统操作过程中,需要根据当前情况选择可行的控制策略或控制器来应对状态变化。如果预先知道系统可能出现的状态,那么根据瞬时状态采用多模态控制策略来选择最佳控制方式是完全可行的。

多模态控制的一个重要研究内容就是模态和切换时机的选择以及切换后参数的调整。当系统参数(环境和控制器)和事先估计差距不大时,可以选择快速切换控制方式,切换后则可在一个较长的时间范围内调整控制器参数来改善性能^[2],在每一个切换瞬间,根据切换规则选择相应控制策略或控制器。

多模态控制技术在电力设备控制中的应用例子很多,文献[3]针对 SVC 系统,根据预先设定的偏差范围在模糊控制和 PID 2 种控制方式下自动切换。在误差大于预先设定值时,采用模糊控制实现动态过程的快速调节,而小于预定值时则采用 PID 控制实现稳态过程的精确调节。

然而控制器的切换可能导致控制输出的不连续,从而引起系统响应出现“抖振”现象。抖动是变结构控制应用中的突出障碍^[4-6],电压或电流的抖动可能造成系统的电压波动、谐波污染等问题,影响电力系统安全稳定运行。

2 基于 Sugeno 模糊推理的模态切换

2.1 Sugeno 模型

Sugeno 模型是一种非线性模型,适于表达复杂系统的动态特性。Sugeno 模糊推理与 Mamdani 模糊推理在许多方面类似,推理过程的前 2 部分——模糊化和模糊操作完全一样。2 者的主要差别在 Sugeno 模型的输出隶属函数可以是线性的或者是常数^[4],因此便于采用传统的控制策略设计相关的控制器,并对控制系统进行分析。

典型的 Sugeno 模糊推理规则为:

如果输入 1 和输入 2 分别为 x 、 y ,那么输出 $z = ax + by + c$ 。对于零阶 Sugeno 模型而言,输出 z 可以是常数($a = b = 0$)。每条模糊规则的输出 z_i 与该规则的激活强度 w_i 决定系统的最终输出:

$$z_f = \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (1)$$

激活强度 w_i 与模糊运算规则有关。如果采用与规则,则激活强度可表示为

$$w_i = F_{\text{and}}(F_1(x), F_2(y))$$

式中 $F_1(x)$ 、 $F_2(y)$ 分别为输入 1 和输入 2 的隶属函数。

设输入为 X_{in} , 输出为 Y_{out} , Sugeno 系统如图 1 所示。

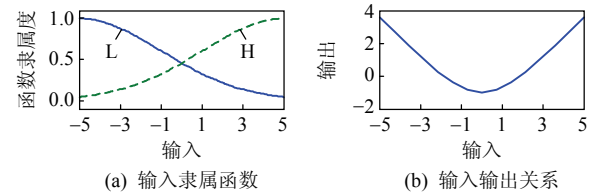


图 1 一个典型的 Sugeno 系统

Fig. 1 A typical Sugeno system

输出隶属函数:

$$l_1: Y_{\text{out}} = (-1)X_{\text{in}} + (-1)$$

$$l_2: Y_{\text{out}} = (1)X_{\text{in}} + (-1)$$

由上可知,2 个输出隶属函数分别代表 1 条关于输入的直线。其规则为:如果输入为 L,那么输出为 l_1 ;如果输入为 H,那么输出为 l_2 。

在输入从隶属度曲线 L 到 H 过渡过程中,Sugeno 推理规则平滑了 2 条直线,系统实际输入输出关系如图 1(b)所示。

2.2 利用 Sugeno 推理规则平滑不同控制模态输出

模态切换时,引起抖动的一个直接原因是对同一控制对象,在当前时刻不同控制策略或控制器的控制输出发生跃变。当系统的轨迹达到切换面时,其速度是有限的,惯性使运动点穿越切换面,从而形成抖振,叠加在理想的滑动模态上^[6-8]。因此如果能够在控制器的切换过程中,平滑不同控制器的输出,则可达到模态平稳切换的目的。

系统选定在某一条件下,需要在 2 个模态 C_i 和 C_j 之间切换,规则除了引入误差 e 和误差导数 de/dt 等进行模态切换判断外,将不同控制器的控制输出作为输入引入到 Sugeno 系统的输出隶属函数。将输出隶属函数的概念扩展,例如 2 个控制器的输出分别为 u_i 、 u_j ,修改 $l_1: Y_{\text{out}} = u_i$ 以及 $l_2: Y_{\text{out}} = u_j$,那么当输入从隶属度曲线 L 到 H 变化时,最终的控制输出可以在 u_i 和 u_j 间平滑过渡。

3 应用实例仿真

3.1 SVC 应用模型

静止无功补偿器是实际电力系统中采用最多的灵活交流输电系统装置之一,它将电力电子元件引入传统的静止无功补偿装置,从而实现补偿的快速和连续平滑调节。SVC 因具有良好的动、静态调节特性得到了广泛地应用^[9-10]。实例仿真将

基于非线性度变换的 PID 控制方式引入到 SVC 控制器内部电压调节单元，以实现与常规 PID 控制的分模态控制。对于实例的计数器采样系统而言，计算机的高速逻辑转换以及高精度的数值运算使得切换开关本身的时间和空间滞后影响几乎不存在^[6]，因此，开关的切换动作所造成的控制的不连续是抖振发生的根本原因。为验证本文提出方法的有效性，选择 Matlab 电力系统工具箱中的 SVC 详细模型为实验平台，修改三相可编程电源时间、幅值参数， $t=[0,0.1]$ s 时刻设置电压幅值为 $[1.0, 1.025]$ pu，以向系统提供一个随时间跃变的电压。利用常规模态切换来说明快速切换时模态切换抖动现象的存在，进一步设计出基于 Sugeno 模糊推理规则来平滑不同控制模态输出，实现模态切换的平滑过渡。

3.2 非线性 PID 控制器

文献[11]将一种基于非线性度变换的非线性比例-积分-微分控制器(nonlinear norm transformation PID, NNTPID)引入发电机的励磁控制中，其基本原理是在常规 PID 控制前加入一个非线性变换环节，即

$$e' = f(e, \alpha) = \text{Sgn}(e) |e|^\alpha, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (2)$$

式中： e 为误差； α 体现了信号进行非线性度变换的程度，称为非线性度。图 2 是非线性度变换 PID 与常规 PID 在 SVC 中的电压控制效果对比图。加入变换环节后，控制器改动不大，能够提高系统的响应速度^[11-14]，但在积分环节上还存在控制器输出一定精度范围内的振荡现象。

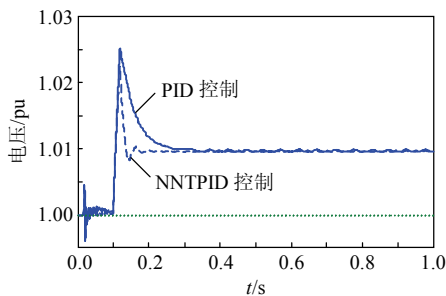


图 2 NNTPID 与常规 PID 控制效果对比

Fig. 2 Contrast of NNTPID and PID control in SVC

3.3 PID 与 NNTPID 双模态控制

为充分发挥 2 种 PID 控制器各自的优点，参考文献[2]，选择在误差较小 ($|e| \leq 0.01$) 时，从非线性度变换 PID 控制器切换到常规 PID 控制器。

依据式(2)构建非线性度变换 PID 控制单元并引入到 SVC 电压调节单元的内部结构如图 3 所示，其中 α 单元代表 NNTPID 的非线性度系数调

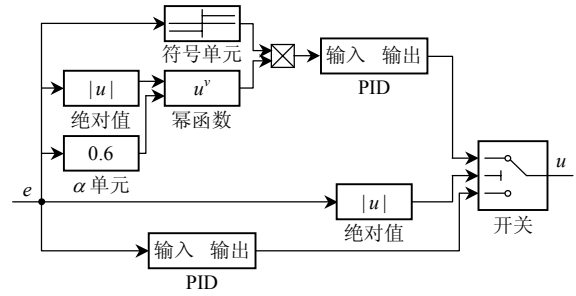
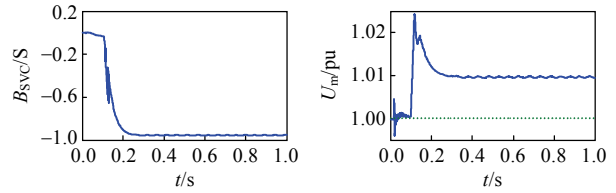


图 3 双模态快速切换控制方式

Fig. 3 Swift switching control of double modes

节单元^[15]。

设定 α 单元值 $\alpha=0.6$ ，快速切换单元参数阈值 $T_{\text{hold}}=0.01$ 后运行仿真，控制器直接输出 u (实际物理意义为 SVC 一次侧等效电纳参考值 B_{SVC}) 和 SVC 电压 U_m 调节效果如图 4 所示。



(a) 控制器输出结果

(b) SVC 电压调节效果

图 4 快速切换控制方式

Fig. 4 Fast switching control method

快速切换控制能综合非线性度变换 PID 控制器和常规 PID 控制的优点，提高系统响应速度加速稳定过程。但其在切换时存在明显的抖振现象，这主要是因为切换面附近开关的时间滞后，控制作用对状态的准确变化被延迟一定的时间。利用 Sugeno 推理规则平滑不同控制模态输出方法设计 Sugeno 模糊推理的模态切换控制系统如图 5 所示。

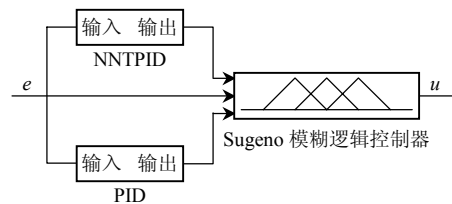


图 5 Sugeno 模糊推理的控制模态切换

Fig. 5 Control models switching based on Sugeno fuzzy inference

将非线性度变换 PID 和常规 PID 控制器的输出作为输入分别引入到 Sugeno 模型中，并设定输入隶属函数和模糊规则：当系统状态点离切换面较远时，加大控制量的幅度，使状态点以较大的速度向切换面运动，提高系统的动态性能；当系统状态点离切换面较近时，减小控制量的幅度，使状态点以较小的速度向切换面靠近，避免状态点以较大的速度穿过切换面^[6,16]。

仿真结果如图 6 所示。对比图 4 快速切换控制

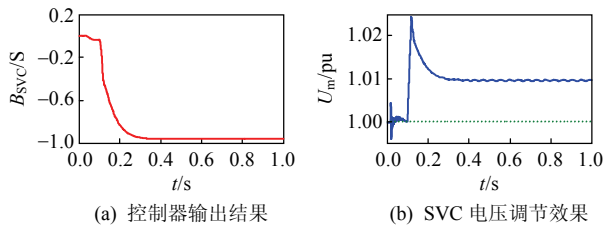


图6 基于 Sugeno 模糊推理的模态切换控制效果
Fig. 6 Control performance of the modes switching method based on Sugeno fuzzy inference

方式和图6 Sugeno 模糊推理的模态切换控制2种模态切换控制方法,本文提出的基于 Sugeno 模糊推理的控制模态切换方法明显可以平滑快速切换控制方式而引起的抖动现象,实现2种模态控制的平滑过渡^[16-17]。

4 结论

SVC 电压调节单元控制引入非线性度变换 PID 和常规 PID 控制2种模态控制可以综合2种控制方式的优点,从而更灵活快速地调节电压,维持系统电压的稳定。

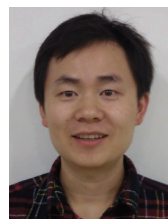
在模态切换的过程中,提出的基于 Sugeno 模糊推理的控制模态切换方法有效地削弱了模态切换过程中抖动这一难点问题,实现了系统控制模态切换时的平稳过渡。这对抑制因模态切换抖动而产生的电力系统电压波动、谐波等现象具有很大的现实意义。

参考文献

- [1] Kumpati S Narendra, Jeyendran Balakrishnan. Adaptive control using multiple models[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1997, 42(2): 171-187.
- [2] 程仁洪,涂奉生. 电机调速系统中的多模态智能鲁棒控制器[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 186-191.
Chen Renhong, Tu Fengsheng. An intelligent robust multi-model controller variable speed systems[J]. Proceeding of the CSEE, 1997, 17(3): 186-191(in Chinese).
- [3] 曾光,苏彦民,柯敏倩. 用于无功静补系统的模糊-PID 控制方法[J]. 电工技术学报, 2006, 21(6): 40-44.
Zeng Guang, Su Yanmin, Ke Minqian. Research on fuzzy-PID controlling method used in static var compensator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(6): 40-44(in Chinese).
- [4] 李士勇. 模糊控制,神经网络和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998: 483-494.
- [5] 赵辉,刘鲁源,王红君,等. 基于滑模控制的模糊电力系统稳定器[J]. 电网技术, 2004, 28(12): 9-11.
Zhao Hui, Liu Luyuan, Wang Hongjun, et al. Study of fuzzy power system stabilizer based on slide mode control[J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 9-11(in Chinese).
- [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: 109-183.
- [7] Mori S, Matsuno K, Takeda M. Development of a large static var generator using self-commutated inverters for improving power

system stability[J]. IEEE Transaction on Control System Technology, 1993, 2(1): 371-377.

- [8] Brian A, David Neevel, Todd Kusik. New results in NPID control: tracking, integral control, friction compensation and experimental results[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2001, 9(2): 399-406.
- [9] 黄敏,查晓明,陈允平. 并联型电能质量调节器的模糊变结构控制[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 11-14.
Huang Min, Zha Xiaoming, Chen Yunping. Fuzzy variable structure associated control of shunt unified power quality conditioner[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 11-14(in Chinese).
- [10] 陈坚. 电力电子学-电力电子变换和控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 78-141.
- [11] 朱发国,陈学允. 同步发电机的串级非线性 PID 励磁控制[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(5): 21-24.
Zhu Faguo, Chen Xueyun. Cascade nonlinear PID excitation controller of synchronous generator[J]. Automation of Electrical Power System, 1999, 23(5): 21-24(in Chinese).
- [12] 吴杰. 大型电弧炼钢炉 SVC 方案设计及其实际效果[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 76-80.
Wu Jie. Scheme design and its practical effect of SVC for a large scale arc furnace[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 76-80(in Chinese).
- [13] 盘宏斌,罗安,涂春鸣,等. 蚁群优化 PI 控制器在静止无功补偿器电压控制中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 41-46.
Pan Hongbin, Luo An, Tu Chunming, et al. Application of ant colony optimized pi controller in voltage control of static reactive power compensator[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 41-46(in Chinese).
- [14] 范瑞祥,孙旻,罗安,等. 大容量整流负荷谐波和无功功率综合补偿装置设计[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 18-23.
Fan Ruixiang, Sun Min, Luo An, et al. Design of comprehensive compensator for reactive power and harmonics in high-capacity rectifying load[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 18-23(in Chinese).
- [15] 陈众,颜伟,李祖枢. 基于仿人智能控制的非线性 PID[J]. 控制与决策, 2003, 4(6): 36-40.
Chen Zhong, Yan Wei, Li Zushu. NPID controller based on HSIC[J]. Control and Decision, 2003, 4(6): 36-40(in Chinese).
- [16] 张昌凡,王耀南. 滑模变结构的智能控制及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 27-29.
Zhang Changfan, Wang Yaonan. An intelligent control using sliding mode variable structure and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 27-29(in Chinese).
- [17] David Y K, Vadim U, Umit O. A control engineer's guide to sliding mode control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1999, 7(3): 328-342.



唐酿

收稿日期: 2010-10-11。

作者简介:

唐酿(1984),男,博士研究生,主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用, E-mail: tangniang84@163.com;

肖湘宁(1953),男,教授,博士生导师,从事电力电子技术在电力系统中的应用、电能质量等方面的研究工作;

陈众(1974),男,副教授,主要研究方向为人工智能及其在电力系统中的应用。

(责任编辑 褚晓杰)