

一种新型的 UPFC 控制策略设计

侯丽¹, 鲁宝春²

(1. 黄山学院信息工程学院, 安徽 黄山 245021; 2. 辽宁工业大学信息工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 针对给定的 UPFC 的控制目标, 提出了一种在全论域范围内带有自调整因子的变间距模糊交互控制策略, 并将其应用于 UPFC 的控制系统设计中, 减少了多个调整因子寻优的复杂性, 克服了等间距模糊量化在提高系统稳态精度和提高系统的动态性能之间存在的矛盾以及解耦控制在电力线运行点不确定的情况下很难做到精确解耦的缺点。并对含有 UPFC 的单机无穷大系统进行了仿真研究, 仿真结果表明所设计的 UPFC 控制系统可以有效地控制线路潮流、节点电压和 UPFC 直流侧电容电压, 并且响应速度快、超调小、控制精度高、鲁棒性强。

关键词: UPFC; 自调整; 变间距; 模糊交互控制

A new control strategy design of unified power flow controller

HOU Li¹, LU Bao-chun²

(1. Information Engineering College, Huangshan University, Huangshan 245021, China;

(2. Information Engineering College, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: A variable spacing fuzzy mutual control strategy with self-adjusting factor is proposed in the whole field, which aims at the given control object of unified power flow controller in this paper. This strategy is applied to control system of unified power flow controller so as to reduce the complexity of many adjustments factor seeking superiority and overcome the conflict of equal spacing fuzzy quantification between improving stable state precision and the dynamic performance in the whole system as well as the shortcoming that decoupled control is difficult to precise decoupling when the running point of power line is uncertain. Simulation study is applied to a single generator infinity system and simulation result indicates that line power flow, node voltage and direct current side capacitor voltage of unified power flow controller are effectively controlled with quick response, small over modulation, high control precision and strong robustness in the designed control system.

Key words: unified power flow controller; self-adjusting; variable spacing; fuzzy mutual control

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)01-0033-04

0 引言

统一潮流控制器(UPFC)是灵活交流输电系统(FACTS)的重要组成部分, 为现代电力系统的安全稳定运行提供了有效途径, 因而对 UPFC 的研究具有重要意义。目前对 UPFC 的研究主要集中在数学建模和控制策略上。针对 UPFC 的控制策略, 主要有比例-积分(PI)控制^[1]、线性最优控制^[2]、非线性系统反馈线性化^[3]、非线性控制^[4]、变结构控制^[5]、弱控制^[6]、智能控制^[7,8]。

本文在上述参考文献的基础上, 针对本文给定的 UPFC 的控制目标, 提出了一种在全论域范围内带有自调整因子的变间距模糊交互控制策略, 并将其应用于 UPFC 的控制系统设计中, 并对其进行了

仿真研究, 仿真结果证明了采用所提出的自调整变间距模糊交互控制策略在调节潮流、稳定节点电压、维持直流电容电压稳定以及提高系统的稳定性方面都具有良好的调节效果, 并且系统的响应速度快、超调小、控制精度高、鲁棒性强。

1 自调整变间距模糊交互控制策略

1.1 变间距模糊量化

对误差 e 、误差变化 ec 采用变间距模糊量化, 克服了等间距模糊量化在提高系统稳态精度和提高系统的动态性能之间存在的矛盾。具体算法如下:

第一步: 预设参变量。设 n_1 和 n_2 为可变的;
 $L_1(0), L_1(1), \dots, L_1(n_1 - 1)$ 分别对应误差 E 的 0,

$\pm 1, \dots, \pm(n_1 - 1)$ 等级的模糊子集; $L_2(1), \dots, L_2(n_2 - 1)$ 分别对应误差变化 EC 的 $0, \pm 1, \dots, \pm(n_2 - 1)$ 等级的模糊子集; 设量化函数 $Q(x)$, 如式 (1) 所示。

$$Q(x) = \begin{cases} -n_k, & x \leq -L_k(n_k - 1) \\ -i, & -L_k(i) < x \leq -L_k(i-1) \\ 0, & -L_k(0) < x \leq L_k(0) \\ i, & L_k(i-1) < x \leq L_k(i) \\ n_k, & x > L_k(n_k - 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, (n_k - 1)$; $k = 1$ 或 2 。使用量化函数 $Q(x)$ 目的是为了实现在变间距量化。

第二步: 计算 $e(nT)$ 、 $ec(nT)$, 如式 (2) 所示。

$$\begin{cases} e(nT) = S - y(nT) \\ ec(nT) = e(nT) - e(nT - T) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $e(nT)$ 、 $ec(nT)$ 是经过采样后的被控制量的误差及误差变化量。

第三步: 计算 $E(nT)$ 、 $EC(nT)$, 如式 (3) 所示。

$$\begin{cases} E(nT) = Q(e(nT)K_e) \\ EC(nT) = Q(ec(nT)K_c) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $E(nT)$ 、 $EC(nT)$ 是 $e(nT)$ 、 $ec(nT)$ 经变间距模糊量化后的误差及误差变化量。

为了同时提高控制系统的稳态精度和动态性能, 在此算法中, $L_k(i)$ 的选择遵循:

$$|L_k(i) - L_k(i-1)| > |L_k(i-1) - L_k(i-2)| > \dots > 2L_k(0)^{[9]}$$

1.2 全论域自调整模糊控制规则

设误差 E 、误差变化 EC 及控制量 U 的论域为:

$$\{E\} = \{EC\} = \{U\} = \{-N, \dots, -1, 0, 1, \dots, N\}$$

全论域自调整模糊控制规则如式 (4) 所示。

$$\begin{cases} U = -(\alpha E + (1 - \alpha)EC) \\ \alpha = \frac{1}{N}(\alpha_s - \alpha_0)|E| + \alpha_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: α 为控制规则中的自调整因子, 取值范围

$$\alpha \in [\alpha_0, \alpha_s], \quad 0 \leq \alpha_0 \leq \alpha_s \leq 1.$$

该种控制规则的特点调整因子 α 在 α_0 至 α_s 之间随着误差的绝对值 $|E|$ 的大小成线性变化, 体现了调整因子按误差的大小自动调整误差对控制作用的权重。

1.3 交互控制

针对解耦控制在电力线运行点不确定的情况下很难做到精确解耦, 从而影响了 UPFC 的控制精度, 为进一步提高电力系统的动态性能, 提出了交互控制。即: 将相互联系的两个变量分别进行 Park 变换后, 用其中一个变量的 d 轴分量去控制另一个变量的 q 轴分量或用一个变量的 q 轴分量去控制另一个变量的 d 轴分量。在本文中分别用 d 轴电压控制 q 轴电流和 q 轴电压控制 d 轴电流。

2 UPFC 的自调整变间距模糊交互控制系统的设计

2.1 UPFC 的控制目标及其控制方式

并联侧: 保持 UPFC 所接入点母线电压 V_s 为给定值 V_s^* , 所采用的控制方式是通过控制并联侧 VSI₁ 输出电压的纵分量 V_{id} 来控制注入并联侧电流的横分量 I_{iq} , 进而可控制 UPFC 所接母线电压 V_s 。

直流侧: 保持 UPFC 直流侧电容电压 V_{DC} 为给定值 V_{DC}^* , 所采用的控制方式是通过控制并联侧 VSI₁ 输出电压的横分量 V_{iq} 来控制注入并联侧电流的纵分量 I_{id} , 进而可控制直流侧电容电压 V_{DC} 。

串联侧: 保持所接线路的有功功率 P 和无功功率 Q 为给定值 P^* 和 Q^* , 但是无功给定 Q^* 会成为无功传输的瓶颈, 因此本文提出了改进的 UPFC 串联侧的控制目标, 如下:

(i) 当线路电流不越限时, 以有功功率 P 为给定值 P^* ;

(ii) 当线路电流越限时, 在确保有功功率 P 为给定值 P^* 的情况下, 再以线路极限电流 i_{lim} 为参考值所计算的无功功率 Q 为给定值 Q^* 。

针对 UPFC 串联侧提出的控制目标, 所采用的控制方式为: 通过控制串联侧 VSI₂ 输出电压的横分量 V_{jq} 来控制 UPFC 所接线路电流的纵分量 I_{jd} , 进而可控制线路的有功功率 P 。若线路电流 i 越限时,

即 $i = \sqrt{I_{jd}^2 + I_{jq}^2} > I_{lim}$ 时, 则以线路的极限电流 I_{lim} 为参考值, 令 $\sqrt{I_{jd}^{*2} + I_{jq}^{*2}} = I_{lim}$, 计算出此时线路电流的横分量的参考值 I_{jq}^* , 进而可计算出线路传输的无功功率给定值 Q^* , 此时通过控制串联侧 VSI₂ 输出电压的纵分量 V_{jd} 来控制 UPFC 所接线路电流的横分量 I_{jq} , 进而可控制线路的无功功率 Q 。

2.2 UPFC 的控制系统框图

UPFC 并联侧所接母线电压 V_s 和直流侧电容电压 V_{DC} , 以及串联侧线路的有功功率 P 和无功功率 Q 均采用在全论域范围内带有自调整因子 α 的变间距模糊交互控制策略。其控制系统框图分别如图 1~3 所示。

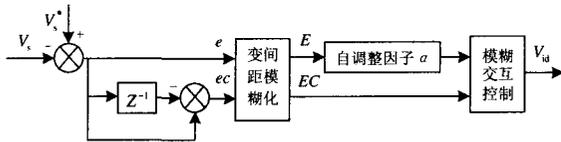


图 1 UPFC 并联侧母线电压控制框图

Fig.1 Bus voltage control of UPFC shunt side

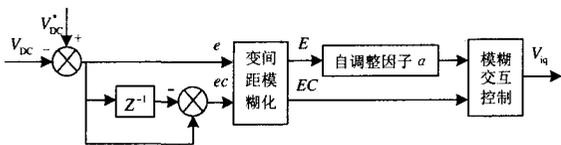


图 2 UPFC 直流侧电容电压控制框图

Fig.2 Capacitor voltage control UPFC DC side

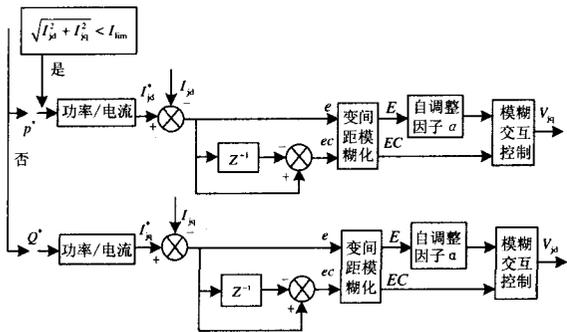


图 3 UPFC 串联侧功率控制框图

Fig.3 Power control of UPFC series side

3 仿真结果

设 UPFC 安装于单机无穷大系统中发电机出口升压变压器高压母线侧, 经双回线与无穷大系统相

连, 系统结构如图 4 所示^[10]。

仿真参数设置:

发电机: 10.5 kV / 500 MVA; 频率: $f_N = 50$ Hz; 升压变压器: 10.5 kV / 242 kV; 系统基准: 220 kV, 200 MVA; 无穷大节点母线电压: $U_s = 1$ pu; UPFC 接入点母线电压: $U_m = 1.1$ pu; 直流侧电容电压: $U_{dc} = 1$ pu; 线路潮流设定值: $P_{Lset} = 0.5$ pu; 升压变压器参数: $X_T = 0.1$ pu; 线路参数: $R_L = 0.1$ pu, $X_L = 0.6$ pu; 并联侧变压器参数: $R_1 = 0.05$ pu, $X_1 = 0.2$ pu; 串联侧变压器参数: $R_2 = 0.05$ pu, $X_2 = 0.1$ pu;

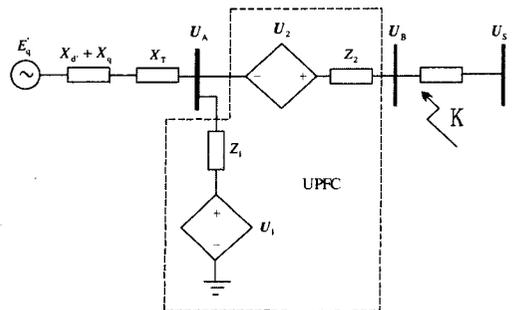


图 4 UPFC 安装于单机无穷大系统

Fig.4 UPFC in single machine infinite system

假设 $t = 1.2$ s 时, 系统在双回线的线路 1 首端发生三相对称短路, 经过 0.1 s 后故障切除, 3 s 时 P_{Lset} 跃变到 0.7。仿真结果如图 5 所示。

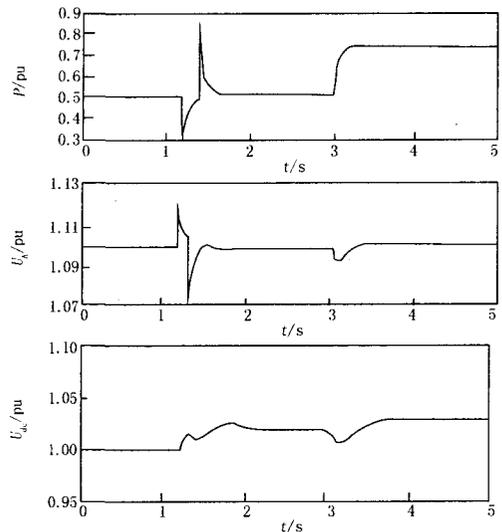


图 5 仿真结果

Fig.5 Result of simulation

4 结论

本文从传统的 UPFC 控制目标中无功给定可能会成为无功传输的瓶颈为出发点, 提出一种改进的 UPFC 控制目标; 从等间距模糊量化在提高系统稳态精度和提高系统的动态性能之间存在的矛盾为出发点, 提出了变间距模糊量化; 从带有多个调整因子模糊控制算法随调整因子数目的增加, 会增加寻优的复杂性, 并且实时性差为出发点, 提出了带有自调整因子的模糊控制策略; 从解耦控制在电力线运行点不确定的情况下很难做到精确解耦, 从而影响了 UPFC 的控制精度为出发点, 提出了交互控制策略。运用 Matlab 仿真工具对含 UPFC 的单机无穷大系统发生三相对称短路故障及负荷发生跃变进行了仿真, 由仿真结果可见: 被控支路的潮流能够较迅速地跟上系统的设定值, 稳态误差较小, 控制在 0.5% 以内; 母线电压在负荷发生跃变时, 其电压有所降低, 随对 UPFC 进行快速控制后, 其电压逐渐恢复到正常值; 直流侧电容电压的稳态值略高于系统设定值, 主要是因为系统发生波动后直流侧电容中储存一定的能量所致。相比传统的 PI 控制、线性调制控制, 本文提出的自调整变间距模糊交互控制策略具有不依赖被控对象精确的数学模型, 对调节对象的参数具有较强的鲁棒性等优点。仿真结果证明了本文所提出的控制策略的有效性以及控制器设计的正确性。

参考文献

- [1] HUANG Zheng-yu, NI Yi-xin, Shen C M, et al. Application of Unified Power Flow Controller in Interconnected Power Systems - Modeling, Interface, Control Strategy and Case Study[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000,15(2):817-824.
- [2] 颜伟, 朱继忠, 徐国禹. UPFC 线性最优控制方式的研究及其对暂态稳定性的改善[J]. 中国电机工程学报, 2000,20(1):45-49.
YAN Wei, ZHU Ji-zhong, XU Guo-yu. Enhancement of Power System Stability Using Linear Optimal Control Strategy of UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2000,20(1):45-49.
- [3] LU Bin, Boon Teck Ooi. Unified Power Flow Controller under Nonlinear Control[J]. Power Conversion Conference, 2002,(3):1118-1123.
- [4] YUAN Zhi-chang, SONG Qiang, LIU Wen-hua, et al. A Nonlinear Controller for Unified Power Flow Controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 36-39.
- [5] 杜继伟, 王奔. 基于非线性变结构控制的统一潮流控制器对电力系统稳定性改善的研究[J]. 电力科学与工程, 2005,(3):17-20.
DU Ji-wei, WANG Ben. Power System Stability Improvement Using UPFC Based on Nonlinear Variable Structure Control[J]. Electric Power Science and Engineering, 2005,(3):17-20.
- [6] 陈众, 颜伟, 徐国禹, 等. 基于直流侧电容电压弱控制策略的 UPFC 二阶段控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2004,24(1):49-53.
CHEN Zhong, YAN Wei, XU Guo-yu, et al. Design of UPFC Soft-complete Controller Based on the DC Link Capacitor Voltage Soft Control Strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(1):49-53.
- [7] 王超, 舒乃秋, 吕小静. 统一潮流控制器的模糊控制策略设计[J]. 继电器, 2003,31(10):13-17.
WANG Chao, SHU Nai-qi, Lü Xiao-jing. Fuzzy Control Strategy Design of Unified Power Flow Controller[J]. Relay, 2003, 31(10): 13-17.
- [8] 叶其革, 王晨皓, 吴捷. 一种新型的统一潮流控制器设计方法[J]. 继电器, 2005, 33(5):32-37.
YE Qi-ge, WANG Chen-hao, WU Jie. Design of a New Unified Power Flow Controller [J]. Relay, 2005, 33(5):32-37.
- [9] 侯丽, 鲁宝春. 基于自调整变间距模糊控制的 UPFC 的研究[J]. 继电器, 2006,34(7): 24-26.
HOU Li, LU Bao-chun. Study on UPFC Based on Self-adjusting and Variable Interval Fuzzy Control[J]. Relay, 2006,34(7): 24-26.
- [10] 颜伟, 朱继忠, 孙洪波, 等. UPFC 的模型的控制器研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 36-41.
YAN Wei, ZHU Ji-zhong, SUN Hong-bo, et al. Study on Model and Controller of UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(6): 36-41.

收稿日期: 2007-06-04; 修回日期: 2007-09-21

作者简介:

侯丽 (1981-), 女, 硕士, 研究方向为电力电子技术
在电力系统稳定控制中的应用; Email: houli_1981@
hsu.edu.cn

鲁宝春 (1964-), 男, 教授, 研究方向为电力系统稳定
分析与控制。