

UPFC 控制器设计

侯 丽¹, 刘 琦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 研究生院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 分内部控制和外部控制 2 部分对统一潮流控制器(UPFC)进行控制器设计。内部控制采用 SVPWM 控制, 负责提供 UPFC 串、并联侧电压源逆变器的触发信号, 并采用一种改进的相位求解方法解决了期望输出电压矢量相位计算过程中的数值溢出问题。外部控制采用在全论域范围内带有自调整因子的变间距模糊交互控制, 负责产生 UPFC 串、并联侧逆变器所需的控制矢量。运用 Matlab 仿真工具对含 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 可以有效地控制线路潮流、节点电压和 UPFC 直流侧电容电压, 并且具有响应速度快、超调小、控制精度高、鲁棒性强的优点。

关键词: UPFC; SVPWM; 自调整; 变间距; 模糊交互控制

中图分类号: TM 712; TM 761

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)09-0051-04

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。目前, 对 UPFC 的研究主要集中在数学建模和控制方法上。针对 UPFC 的控制方法, 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^[3-4]、非线性控制^[5-6]、变结构控制^[7]、弱控制^[8-9]、智能控制^[10-13]等。

本文在上述文献的基础上, 针对 UPFC 设计, 提出分为内部控制和外部控制 2 个部分来进行。其中, 内部控制采用 SVPWM 控制, 负责提供 UPFC 的串、并联侧电压源逆变器的触发信号。外部控制采用在全论域范围内带有自调整因子的变间距模糊交互控制, 负责产生 UPFC 的串、并联侧逆变器所需的控制矢量。运用 Matlab 仿真工具对含 UPFC 的单机无穷大系统进行仿真研究, 仿真结果表明所设计的 UPFC 控制器可以有效地控制线路潮流、UPFC 所接入处母

线电压以及 UPFC 直流侧电容电压, 并且在响应速度、控制精度上都具有比较理想的效果。

1 UPFC 与电力系统连接

UPFC 与电力系统连接如图 1 所示。其装置由 2 个共用直流侧电容 C 的电压源逆变器(VSI)组成, 并联侧 VSI₁ 通过降压变压器和系统母线相连, 相当于一个和母线相连的幅值和相位都可调节的交流电流源 I_c , 串联侧 VSI₂ 通过升压变压器串联接入系统, 相当于向系统注入一个幅值和相位都可调节的交流电压源 U_c 。

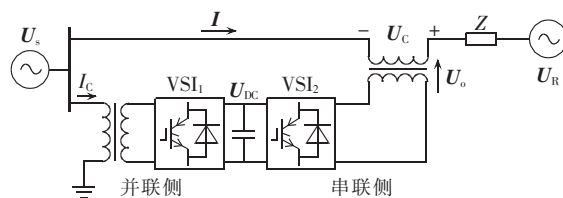


图 1 UPFC 与电力系统连接

Fig.1 Power system with UPFC

收稿日期: 2009-11-12; 修回日期: 2010-02-03

2 内部控制——SVPWM 控制

2.1 电压空间矢量介绍

对于三相 VSI, 有 8 种开关状态, 每种开关状态确定一个电压空间矢量。8 个电压空间矢量将整个空间分为 6 个扇区, 除了 2 个零矢量 U_0 、 U_7 外, 另 6 个矢量 U_4 、 U_6 、 U_2 、 U_3 、 U_1 、 U_5 有相同的幅值 $2U_{DC}/3$, 相位依次为 0 、 $\pi/3$ 、 $2\pi/3$ 、 π 、 $4\pi/3$ 、 $5\pi/3$ 。

2.2 电压空间矢量对应开关时间

第 1 扇区的控制矢量, 如图 2 所示。

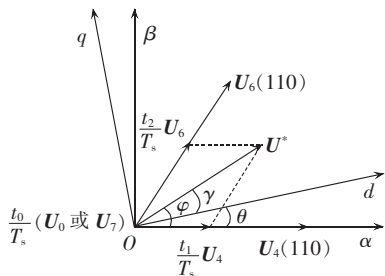


图 2 第 1 扇区的控制矢量

Fig.2 Control vectors of sector 1

由图中的三角几何关系得:

$$\begin{cases} \frac{t_1}{T_s} U_4 + \frac{t_2}{T_s} U_6 \cos \frac{\pi}{3} = U^* \cos \varphi \\ \frac{t_2}{T_s} U_6 \sin \frac{\pi}{3} = U^* \sin \varphi \end{cases} \quad (1)$$

其中, $U_4 = U_6 = 2U_{DC}/3$, T_s 为开关周期。

由式(1)可得出, 在一个开关周期 T_s 内, 计算位于第 1 扇区的控制矢量 U^* 所需的 2 个相邻矢量 (U_4 和 U_6) 和零矢量 (U_0 或 U_7) 在 dq 轴分别作用的时间 t_1 、 t_2 、 t_0 , 如式(2)所示:

$$\begin{cases} t_1 = [\sqrt{3} U^* \sin(\pi/3 - \varphi)] T_s / U_{DC} \\ t_2 = (\sqrt{3} U^* \sin \varphi) T_s / U_{DC} \\ t_0 = T_s - t_1 - t_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} U^* &= \sqrt{(U_d^*)^2 + (U_q^*)^2} \\ \varphi &= \theta + \gamma = \omega t + \arctan(U_q^* / U_d^*) \end{aligned} \quad (3)$$

为避免在求解式(3) γ 过程中发生数值溢出而影响计算精度的问题, 本文提出了一种改进的 γ 求解方法, 如式(4)所示:

$$\gamma = 2 \arctan[U_q^* / (U^* + U_d^*)] \quad (4)$$

2.3 电压空间矢量对应开关状态

在一个开关周期 T_s 中, 对于 3 种开关状态先后顺序及起点时间并无限制, 因此可通过精心安排适当的零矢量, 免除不必要的开关动作, 降低开关频率, 减少开关损耗。基于此, 确定开关模式组合如表 1 所示。

3 外部控制——自调整变间距模糊交互控制

3.1 变间距模糊量化

针对等间距模糊量化在提高系统稳态精度和提高系统动态性能之间存在矛盾的问题, 提出了变间

表 1 电压空间矢量对应开关状态表

Tab.1 Switch states corresponding to voltage space vector

扇区	3 种开关状态次序					
1	$U_7(111)$	$U_6(110)$	$U_4(100)$	$U_6(110)$	$U_7(111)$	
2	$U_6(110)$	$U_2(010)$	$U_0(000)$	$U_2(010)$	$U_6(110)$	
3	$U_7(111)$	$U_3(011)$	$U_2(010)$	$U_3(011)$	$U_7(111)$	
4	$U_3(011)$	$U_1(001)$	$U_0(000)$	$U_1(001)$	$U_3(011)$	
5	$U_7(111)$	$U_5(101)$	$U_1(001)$	$U_5(101)$	$U_7(111)$	
6	$U_5(101)$	$U_4(100)$	$U_0(000)$	$U_4(100)$	$U_5(101)$	

距模糊量化, 具体有 3 个步骤。

第 1 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, $L_2(1), \dots, L_2(n_1-1)$ 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。

设量化函数为

$$Q(x) = \begin{cases} -n_k & x \leq -L_k(n_k-1) \\ -i & -L_k(i) < x \leq -L_k(i-1) \\ 0 & -L_k(0) < x \leq L_k(0) \\ i & L_k(i-1) < x \leq L_k(i) \\ n_k & x > L_k(n_k-1) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $i=1, 2, \dots, n_k-1; k=1$ 或 2 。

第 2 步: 计算 $e(nT)$ 、 $ec(nT)$ 。

$$\begin{cases} e(nT) = S - y(nT) \\ ec(nT) = e(nT) - e(nT-T) \end{cases} \quad (6)$$

其中, T 为采样周期, $e(nT)$ 、 $ec(nT)$ 是经过采样后的被控制量的误差及误差变化量。

第 3 步: 计算 $E(nT)$ 、 $EC(nT)$ 。

$$\begin{cases} E(nT) = Q(e(nT)K_e) \\ EC(nT) = Q(ec(nT)K_e) \end{cases} \quad (7)$$

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

为确保控制器兼具较高的稳态精度和较好的动态性能, $L_k(i)$ 的选择 $|L_k(i-1) - L_k(i-2)| > \dots > 2L_k(0)$ 。

3.2 自调整模糊控制规则

为解决带有多个调整因子的模糊控制规则对多个调整因子的寻优要花费较大的计算工作量, 并且难以实时实现的问题, 现设计一种在全论域范围内带有自调整因子的模糊控制算法, 如式(8)所示:

$$\begin{cases} U = -(\alpha E + (1-\alpha)EC) \\ \alpha = \frac{1}{N}(\alpha_s - \alpha_0)|E| + \alpha_0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $0 \leq \alpha_0 \leq \alpha_s \leq 1, \alpha \in [\alpha_0, \alpha_s]$ 。

上述控制规则体现了调整因子 α 在 $\alpha_0 \sim \alpha_s$ 之间按误差 $|E|$ 的大小自动调整误差对控制作用的权重, 这种自调整过程符合人在控制决策过程中的思维特点, 本身已具有优化的特性, 且非常易于通过微机实时实现其控制算法。

3.3 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,采用了交互控制(用 d 轴电压控制 q 轴电流或用 q 轴电压控制 d 轴电流),来进一步提高电力系统的动态性能。

4 UPFC 控制器设计

UPFC 的控制器由内部控制(SVPWM)和外部控制(自调整变间距模糊交互控制)2个部分组成。先由外部控制产生并联侧 VSI₁ 所需的控制矢量 U_i 的纵分量 U_{id}^* 和横分量 U_{iq}^* ,以及串联侧 VSI₂ 所需的控制矢量 U_j 的纵分量 U_{jd}^* 和横分量 U_{jq}^* ;再经内部控制获取控制串、并联侧 VSI 的开关函数 K_{i1} 、 K_{i2} 、 K_{i3} 、 K_{j1} 、 K_{j2} 、 K_{j3} ,从而实现对 UPFC 的整体控制。UPFC 的控制目标及其控制方式详见文献[14],UPFC 设计框图如图 3、4 所示。

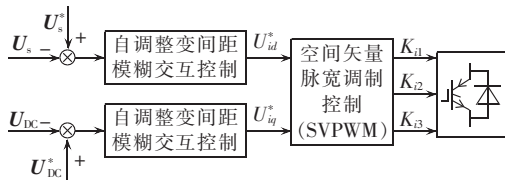


图3 UPFC 并联侧母线电压和直流侧电容电压控制

Fig.3 Control of UPFC bus voltage at shunt side and capacitor voltage at DC side

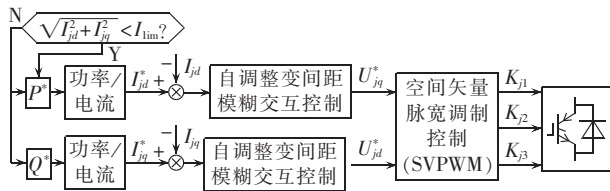


图4 UPFC 串联侧功率控制

Fig.4 Control of UPFC power at serial side

5 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的高压母线侧,经双回线与无穷大系统相连,系统结构如图 5 所示^[15]。仿真参数设置如下:

发电机 10.5 kV/500 MV·A;频率 $f_N=50$ Hz;升压变压器 10.5 kV/242 kV;系统基准 220 kV,200 MV·A;无穷大节点母线电压 $U_s=1$ p.u.;UPFC 接入点母线电压 $U_m=1.1$ p.u.;直流侧电容电压 $U_{dc}=1$ p.u.;线路潮流设定值 $P_{1set}=0.5$ p.u.;升压变压器参数 $X_T=0.1$

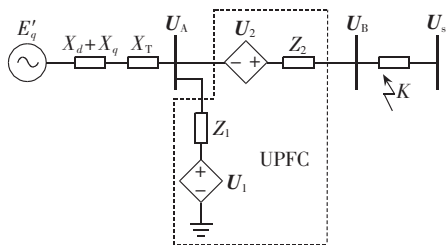


图5 UPFC 安装于单机无穷大系统

Fig.5 Single-machine infinity-bus system with UPFC

p.u.;线路参数 $R_L=0.1$ p.u., $X_L=0.6$ p.u.;并联侧变压器参数 $R_1=0.05$ p.u., $X_1=0.2$ p.u.;串联侧变压器参数 $R_2=0.05$ p.u., $X_2=0.1$ p.u.。

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_{1set} 跃变到 0.7 p.u.。仿真结果如图 6 所示。

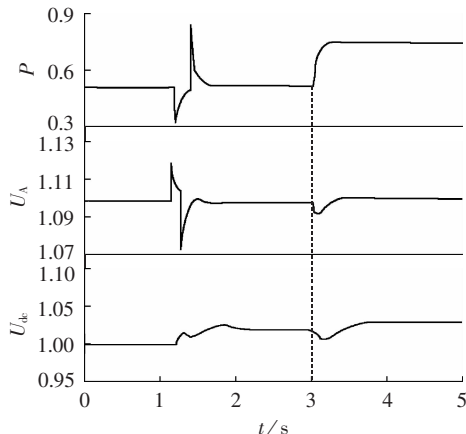


图6 仿真结果

Fig.6 Simulative results

由图 6 仿真结果可知:

- 被控支路的潮流能够迅速跟踪系统的设定值,稳态误差较小;
- 3 s 时负荷发生跃变, U_A 迅速降低,并随 UPFC 的控制逐渐恢复到正常值;
- 直流侧电容电压稳定值高于设定值,这是由短路过程中有部分能量储存在直流电容中所致。

6 结论

本文在对 UPFC 控制器进行设计时,主要分为内部控制和外部控制 2 部分进行。其内部控制采用电压空间矢量脉宽调制(SVPWM)控制负责提供串、并联侧电压源逆变器的触发信号;其外部控制,采用在全论域范围内带有自调整因子的变间距模糊交互控制,负责产生串、并联侧逆变器所需的控制矢量。运用 Matlab 仿真工具对含 UPFC 的单机无穷大系统发生大的扰动进行了仿真,通过仿真结果可以看出:被控支路的潮流、母线电压以及 UPFC 直流侧电容电压能够较迅速地跟踪系统的设定值,与传统的 PI 控制器等相比,所设计的 UPFC 可以更有效地调节潮流、稳定节点电压及直流侧电容电压,并且还具有响应速度快、超调小、控制精度高、鲁棒性强的优点。

参考文献:

- [1] HUANG Zhengyu, NI Yixin, 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 Jizhong, XU Guoyu. Enhancement of power system stability using linear optimal control strategy of UPFC [J].

- Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 45-49.
- [3] 谢桦, 梅生伟, 徐政, 等. 统一潮流控制器的非线性控制和对电力系统稳定性的改善[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(19): 1-5.
XIE Hua, MEI Shengwei, XU Zheng, et al. Nonlinear control for UPFC to improve transient stability of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(19): 1-5.
- [4] LU Bin, OOI B T. Unified power flow controller under nonlinear control[C]//Power Conversion Conference, PCC. Osaka, Japan: IEEE, 2002: 1118-1123.
- [5] 袁志昌, 宋强, 刘文华, 等. 统一潮流控制器的非线性控制(英文)[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 36-39.
YUAN Zhichang, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. A nonlinear controller for unified power flow controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 36-39.
- [6] 奚玲玲, 艾芊, 陈陈. UPFC 新型非线性控制策略[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 55-59.
XI Lingling, AI Qian, CHEN Chen. Novel nonlinear control scheme of UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(4): 55-59.
- [7] 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 Jiwei, WANG Ben. Power system stability improvement using UPFC based on nonlinear variable structure control[J]. Electric Power Science and Engineering, 2005(3): 17-20.
- [8] 陈众, 徐国禹, 颜伟, 等. UPFC 直流侧电容电压弱控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1): 49-54.
CHEN Zhong, XU Guoyu, YAN Wei, et al. Study on DC link capacitor voltage soft control strategy of UPFC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(1): 49-54.
- [9] 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 Guoyu, et al. Design of UPFC two-phase controller based on DC link capacitor voltage soft control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 49-53.
- [10] 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 Naiqiu, LÜ Xiaojing. Fuzzy control strategy design of unified power flow controller[J]. Relay, 2003, 31(10): 13-17.
- [11] 黄振宇, 刁勤华, 孙岩, 等. UPFC 的模糊调制控制研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 36-41.
HUANG Zhenyu, DIAO Qinhua, SUN Yan, et al. Study on fuzzy modulation control of UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(2): 36-41.
- [12] 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 Qige, WANG Chenhao, WU Jie. Design of a new unified power flow controller[J]. Relay, 2005, 33(5): 32-37.
- [13] DASH P K, MISHRA S, PANDA G. A radial basis function neural network controller for UPFC [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1293-1299.
- [14] 侯丽, 鲁宝春. 一种新型的 UPFC 控制策略设计[J]. 继电器, 2008, 36(1): 33-36.
HOU Li, LU Baochun. A new control strategy design of unified power flow controller[J]. Relay, 2008, 36(1): 33-36.
- [15] 颜伟, 朱继忠, 孙洪波, 等. UPFC 的模型的控制策略研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 36-41.
YAN Wei, ZHU Jizhong, SUN Hongbo, et al. Study on model and controller of UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(6): 36-41.

(编辑: 柏英武)

作者简介:

侯丽(1981-), 女, 辽宁沈阳人, 讲师, 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(E-mail: houli_1981@hsu.edu.cn);

刘琦(1982-), 男, 辽宁盘锦人, 助教, 硕士, 研究方向为电力载波通信;

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

Controller design for UPFC

HOU Li¹, LIU Qi¹, LU Baochun²

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

2. Graduate College, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: UPFC(Unified Power Flow Controller) is designed with internal and external control strategies. SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation) is applied in the internal control strategy to provide the trigger signals for the voltage source inverter at serial or shunt side, which adopts an improved phase solution to resolve the numerical overflow during the calculation of the expected output voltage vector phase. Variable interval fuzzy mutual control with self-adjusting factor is applied in the external control strategy to produce required control vectors for the voltage source inverter at serial or shunt side. A single-machine infinity-bus system with UPFC is simulated with Matlab. Result indicates that the designed controller effectively controls the line power flow, node voltage and DC capacitor voltage with quick response, small over modulation, high control precision and strong robustness.

Key words: unified power flow controller; space vector pulse width modulation; self-adjusting; variable interval; fuzzy mutual control