

文章编号: 1005—0523(2005)01—0076—04

UPFC 并联侧控制器设计及仿真

刘小园¹, 章勇高^{1,2}, 朱鹏程¹, 刘黎明¹, 康 勇¹

(1. 华中科技大学, 湖北 武汉, 430074; 2. 华东交通大学, 江西 南昌, 330013)

摘要: 分析了 UPFC 的工作原理及结构模型, 阐述了 UPFC 并联侧逆变器的控制策略. 由并联侧逆变器数学模型给出旋转 dq 坐标系中的简化模型, 并用此模型建立了基于 dq 解耦的双闭环控制结构, 进而设计双闭环电流、电压调节器参数, 并给出了 MATLAB 仿真结果.

关 键 词: UPFC; 逆变器; PI 调节器; 自动电压调节器; 解耦

中图分类号: TP391.6

文献标识码: A

1 引 言

灵活交流输电系统(FACTS)^[1]为电力系统的灵活性、可控性以及稳定性提供了新的技术手段, 并成为电力系统研究领域的一个新热点. 统一潮流控制器(UPFC: Unified Power Flow controller)^[2]作为 FACTS 家族最杰出的潮流调节控制器, 更是备受关注, UPFC 可以对有功、无功和电压分别进行控制, 对于优化电力系统的运行、提高系统的暂态稳定、阻尼系统的振荡具有显著的作用.

UPFC 由一个 STATCOM 和一个 SSSC 通过直流侧电容耦合而成, 本文将在 UPFC 动态模型的基础上, 重点分析并联侧逆变器在 UPFC 中的作用, 并以此为依据提出并联逆变器的控制策略. 通过分析逆变器模型建立该逆变器的在 DQ 坐标系下的数学方程, 给出各个控制参数设计的具体过程. 最后通过 MATLAB/SIMULINK 的仿真给出仿真波形验证设计参数的合理性, 为实验做好准备.

2 UPFC 工作原理及结构模型^[3~6]

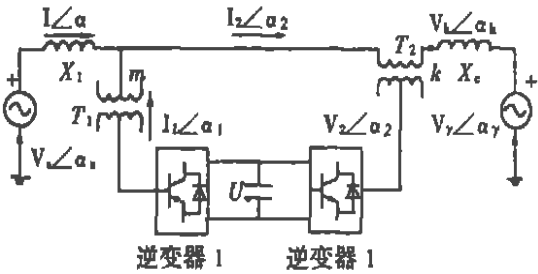


图 1 统一潮流控制器的结构示意图

如图 1, UPFC 由两个共用直流侧电容的逆变器组成, 逆变器 1 吸收电网有功为逆变器 2 提供有功和补偿有功损耗, 避免电容电压跌落厉害而使系统崩溃, 同时逆变器 1 通过并联变压器 T1 向电网提供无功以支撑电网端电压稳定. 逆变器 2 通过串联变压器 T2 向电网注入一个幅值和相位都可调的串联电压, 控制线路潮流. 控制的大小和相位可以调节逆变器 1 输出的无功和吸收的有功, 控制的幅值和相位可以调节线路的有功和无功潮流^[5].

收稿日期: 2004—04—05

作者简介: 刘小园(1975—), 男, 在读研究生.

数为:

$$W_{ci} = \frac{W_{oi}'}{1 + W_{oi}'} = \frac{K/T_{sf}}{s^2 + \frac{1}{T_{sf}}s + \frac{K}{T_{sf}}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n + \omega_n^2} \quad (5)$$

其中: $\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{KT_{sf}}}$, $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{T_{sf}}}$, $K = K_{ci}K_{pum}K_RK_{if}$

根据二阶系统的基本特征, 算出 $\xi = 0.707$ 时的环路增益 K , 进而计算出电流调节器 PI 参数.

4.2 直流电压电压调节器的设计

直流电压电压调节器作为外环调节, 可以稳定输出直流电压. 输入电流与输出直流电压之间的传递函数为^[8]

$$\text{其中 } K_0 = \frac{3R_L}{4U_{dc}}U_m, T_p = 0.5R_LC, T_z = \frac{L}{R_i}$$

$$\text{直流电压 } U_{dc} \text{ 电压调节器采用 } PI \text{ 调节, } G_{udc}(s) = K_{ui} \frac{\tau_us + 1}{s}, \text{ 式中 } \tau_u = K_{up}/K_{ui} \quad (6)$$

故直流电压 u_{dc} 电压调节环的控制原理如图 6

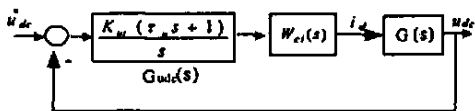


图 4 直流侧电压环原理图

由于电流闭环的作用, 动态过程中 i_q 的变化很小. 图 4 中 $W_{ci}(s)$ 表示电流的闭环传递函数. 由于 $W_{ci}(s)$ 是二阶的, 对电流闭环传递函数作降阶处理, $W_{ci}(s)$ 近似等于 $\frac{1}{2T_{sf}s + 1}$ ^[7], 故系统的开环传递函数:

$$W_{ov}(s) = \frac{K_{ui}K_0(\tau_us + 1)(1 - T_zs)}{s(1 + T_ps)(2T_{sf}s + 1)} \quad (7)$$

令, $\tau_u = T_p$, $K_1 = K_{ui} * K_0$, 简化开环传递函数为

$$W_{ov}'(s) = \frac{K_1(1 - T_zs)}{s(2T_{sf}s + 1)} \quad (8)$$

相对应的系统闭环传递函数为

$$W_{cu} = \frac{W_{ov}'}{1 + W_{ov}'} = \frac{K_1(1 - T_zs)/2T_{sf}}{s^2 + \frac{1 - T_zK_1}{2T_{sf}}s + \frac{K_1}{2T_{sf}}} \quad (9)$$

时间常数 T_s 较小可忽略, 式(11)进一步简化为

$$W_{ci} = \frac{K_1/2T_{sf}}{s^2 + \frac{1 - T_zK_1}{2T_{sf}}s + \frac{K_1}{2T_{sf}}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n + \omega_n^2} \quad (10)$$

其中 $\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2K_1T_{sf}}(1 - T_zK_1)}$, $\omega_n = \sqrt{\frac{K_1}{2T_{sf}}}$

计算电压调节器 PI 参数的方法和 4.1 节一致.

4.3 有功调节的前馈调节器设计

考虑控制的快速性而又避免电压调节的超调过大, 本文有功控制中增加了电流前馈支路(见图 2), KL 根据输入与输出功率平衡得到, 取 $1 \sim 8ms$.

4.4 电网电压调节器设计^[6]

并联侧逆变器输出或吸收无功, 防止输入无功太多使发电机工作在振荡区而导致系统崩溃. 为避免与发电机励磁调节冲突, 电网端电压调节采用自动电压模式进行电压调节(见图 2). K_{sl} 为下垂因子, $20 \sim 150ms$, $\tau_R = 20 \sim 150ms$, $\tau_s = 10 \sim 50ms$, $\tau_R = 1/(K_1 * K_{sl})$, K_p 为很小或者为 0.

5 仿真结果

用 SIMULINK 进行仿真研究, 仿真参数: 发电机单相有效值 462 V, 发电机输出与 UPFC 接入处之间有 0.1Ω 电阻和 $16mH$ 的电感, 变压器的变比为 2.5:1、Y- Δ 接法, UPFC 输出线电压为 184.8 V, UPFC 侧线路电阻 $R = 0.1 \Omega$ 和电感 $L = 6mH$. 直流侧电容 $8000 \mu F$, 直流母线电压 400 V, 等效 UPFC 串联侧和 UPFC 的损失 $R_L = 1000 \Omega$. 开关频率取 5.4 k, 计算 $K_{pwm} = 0.377$, $K_R = 10$, $K_{if} = 1$, $T_{sf} = 0.932ms$, $T_L = 60ms$, 由式(5)计算电流调节器的 PI 参数 $K_{ci} = 142$, $K_{cp} = 8.52$; 计算 $K_0 = 283$, $T_p = 4s$, $T_z = 1.3ms$, 由式(10)计算电压调节器的 PI 参数 $K_{ui} = 0.463$, $K_{up} = 1.4$; 依据 4.3 所述计算 $K_L = 1.76$, 取 τ_{dc} 为 $1ms$; 依据 4.4 所述计算 $K_{sl} = 4.27$, $\tau_R = 20ms$, $K_I = 11.7$, $K_p = 0.9$, $\tau_s = 0.03$. 直流侧电阻在 $0.5s$ 从 1000Ω 突减到 20Ω , 直流电压经过很小跌落很快恢复, 见图 5; 在 $0.3s \sim 0.6s$ 时电网侧突加无功负载 $100mH$, 下垂作用明显, 见图 6, 线 1 是经调节后的图, 线 2 是没有调节的图形. 图中横坐标 1000 代表 $0.1s$.

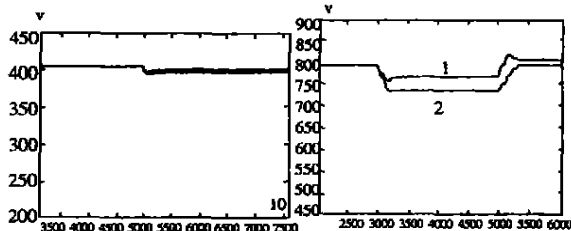


图 5 直流侧电压

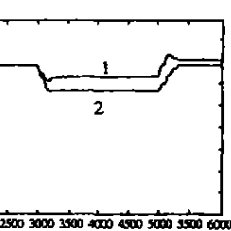


图 6 电网端电压

6 结 论

本文简要论述了 UPFC 的作用、模型及工作原理,根据原理给出并联侧相应的控制策略,然后对 UPFC 并联侧进行模型分析并给出了具体控制系统,并进行了控制系统的参数整定,最后通过仿真对设计参数进行验证,证明参数具有良好的动态和稳态性能,为实验装置的研制做好准备.

参考文献:

[1] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, “Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission systems”, IEEE press, 2000.

[2] Gyugyi L. Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems. IEEE Proceedings-C, 1992, 139(4).

[3] C.T.Chang, Y.Y. Hsu, Design of UPFC controllers and supplementary damping controller for power transmission control and stability enhancement of a longitudinal power system, IEEE Proceedings-C, 2002, 149(4).

[4] Sreenivasachar, Kannan, “Unified power flow controller: Modeling, stability analysis, control strategy and control system design”Dissertation Abstracts International, 2001, 62(2).

[5] 章良栋, 岑文辉, 刘为. UPFC 的模型及控制器研究[J]. 电力系统自动化, 1998, 22 (1).

[6] IEEE Special Stability Controls Working Group. Static var compensator models for power flow and dynamic performance simulation[J]. IEEE Trans on PWRS, 1994 ,9 (1) ;229—240.

[7] Xiong Jian, Simplified control circuit of three phase PWM rectifier, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1999, 14(1) ;229—233.

[8] 杨德刚, 赵良炳, 刘润生, 三相高功率因数整流器的建模及闭环控制[J]. 电力电子技术, 1999(5).

Control Design and Simulation of Shunt Inverter of UPFC

LIU Xiao-yuan¹, ZHANG Yong-gao^{1,2}, ZHU Peng-cheng¹, LIU Li-ming¹, KANG Yong¹

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074; 2. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The operational principle and model of UPFC are analyzed in the paper, and the control strategy of parallel inverter of UPFC is given. According to the math model of the inverter, the simple model in the synchronously rotating dq frame is given and the dq decoupling double close loop controller is built. And the parameter of the double close loop controller is calculated and the MATLAB simulate result is given in this paper.

Key words: UPFC; inverter; PI regulator; auto-voltage regulator; decoupling