

UPFC 串联换流器交叉耦合控制系统设计

李 杰¹, 周志成¹, 刘黎明², 邹旭东², 谢天喜¹

(1. 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 串联换流器是统一潮流控制器(UPFC)中的关键设备, 其控制系统的性能直接关系到 UPFC 的调节能力。文中提出了一种 UPFC 串联换流器交叉耦合控制的方法, 设计了相应的控制系统, 采用频率特性法绘制了系统的 Bode 图, 并由此确定 PI 调节器参数, 利用 MATLAB 仿真软件建立 UPFC 系统仿真模型, 计算线路有功传输功率指令发生阶跃变化时, UPFC 系统经串联部分注入电网的功率、直流母线电压以及系统发送端电压的相角等的变化情况, 结果表明本文设计的交叉耦合控制系统可以迅速独立地控制有功功率的调节, 而对无功功率影响很小, 验证了控制系统的有效性。

关键词: UPFC; 串联换流器; 交叉耦合控制; 有功功率

中图分类号: TM76

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2015)06-0014-04

统一潮流控制器(UPFC)可分别或同时实现串联补偿、并联补偿、移相控制、阻抗模拟及实时控制传输线路潮流等功能, 从而提高线路传输能力、稳定性及阻尼振荡系统振荡^[1]。UPFC 装置是由串联变压器与换流器、并联变压器与换流器、直流母线电容等构成的, 其中串联换流器的控制是 UPFC 关键所在, 本文提出了一种交叉耦合控制系统的设计方案。

1 UPFC 基本结构和原理

典型 UPFC 主要由电压源型换流器(并联换流器、串联换流器), 输出滤波器($L_{sh}, C_{sh}, L_{sc}, C_{sc}$), 直流母线电容 C_{dc} , 并联变压器 T_{Shunt} , 串联变压器 T_{Series} , 旁路开关 K1、断路器 K2 和 K3, 以及控制和保护单元构成, 如图 1 所示。两端电源电压相角差为 δ 。其中并联、串联换流器是 UPFC 实现潮流控制的主要执行部分, 并联换流器通过变压器 T_{Shunt} 并联接入系统, 可视为可控的并联静止无功补偿器(STATCOM); 串联换流器通过变压器 T_{Series} 串联接入系统, 可视为可控的静止同步串联补偿器(SSSC)。断路器 K2、K3 和旁路开关 K1 主要对控制 UPFC 在电网中的切入/出, 以及对串联、并联部分的过压和过流保护。正常情况下 K2、K3 闭合而 K1 断开, UPFC 投入到系统中运行, 此时流过串联变压器原方的电流即是流过此电网支路的电流; 在故障的情况下 K1 闭合而 K2、K3 断开实现对 UPFC 功率部分的保护^[2,3]。

串联换流器被看作是与串联变压器阻抗串联的电压源, 它可以看作是线路注入的一个串联电压源, 调节 UPFC 串联插入电压 \dot{U}_{12} 可以很方便地调节 \dot{U}_2 的幅值和相位, 若 UPFC 串联部分插入的电压 \dot{U}_{12} 垂直于线路电流 i_1 , 则 UPFC 串联部分等效为一个电容或电

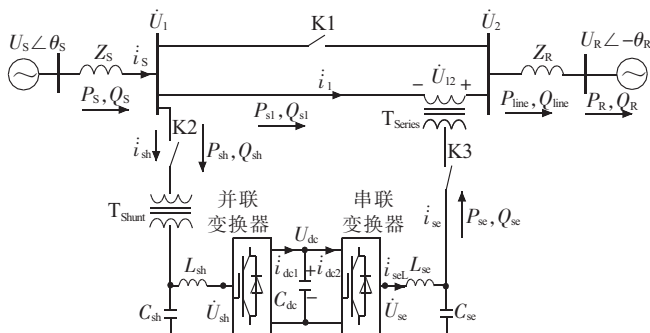


图 1 UPFC 基本结构图

抗, 可实现对传输线的线路阻抗补偿, 独立调节线路传输有功/无功功率潮流。

2 交叉耦合控制系统设计

交叉耦合控制在许多文献中都得到了应用, 基本原理就是采用 UPFC 串联部分输出电压的垂直分量 u_{12q} 来控制线路传输的有功功率潮流 P_{line} , 而采用 UPFC 串联部分输出电压的水平分量 u_{12d} 来控制线路传输的无功功率潮流 Q_{line} , 其控制系统如图 2 所示。控制系统中有 3 个环: 内环为电流环、中间为电压环, 外环为功率环, 其中电流环和电压环的设计和 SSFC 的串联换流器控制系统中的相应部分相同^[4-6]。

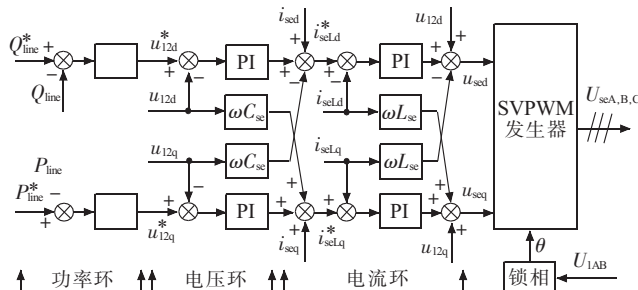


图 2 交叉耦合潮流控制方案框图

在进行功率环 PI 调节器设计的时候首先仅考虑 u_{12q} 对 P_{line} 和 u_{12a} 对 Q_{line} 的影响, 然后再根据实际情况

做出调整。为了便于分析,采用以上的简化条件,则电压对潮流变化的传递函数为^[7]:

$$G_P(s) = \frac{\omega L_R}{(L_R s + R_R)^2 + (\omega L_R)^2} \quad (1)$$

串联换流器传递函数可用一个惯性环节替代^[8]:

$$G_V(s) = \frac{1}{1 + T_V s} \quad (2)$$

采用交叉耦合设计的有功功率潮流控制器框图如图 3 所示。对于线路无功潮流控制而言与其类似。

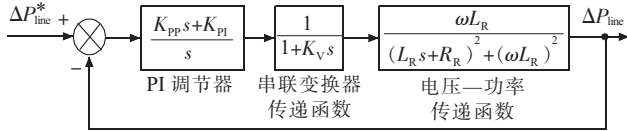


图 3 有功功率潮流控制器设计框图

根据图 3 可以得到受控系统的传递函数:

$$G_S(s) = \frac{\omega L_R}{(T_V s + 1)(L_R^2 s^2 + 2L_R R_R s + R_R^2 + \omega^2 L_R^2)} \quad (3)$$

潮流控制系统的开环传递函数:

$$G_O(s) = \frac{(K_{pp}s + K_{pi})\omega L_R}{s(T_V s + 1)(L_R^2 s^2 + 2L_R R_R s + R_R^2 + \omega^2 L_R^2)} \quad (4)$$

控制系统的闭环传递函数:

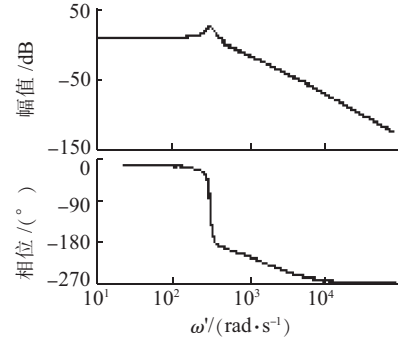
$$G_S(s) = (K_{pp}s + K_{pi})\omega L_R / [T_V L_R^2 s^4 + (2L_R R_R T_V + L_R^2)s^3 + (R_R^2 T_V + \omega^2 L_R^2 T_V + 2L_R R_R)s^2 + (R_R^2 + \omega^2 L_R^2 + K_{pp}\omega L_R)s + K_{pi}\omega L_R] \quad (5)$$

式(5)函数是一个高阶系统,且其可控参数少于系统阶数,所以很难采用零、极点配置的方法进行有效的参数选择,本文采用频率特性法,通过绘制系统 Bode 图来确定 PI 调节器参数。

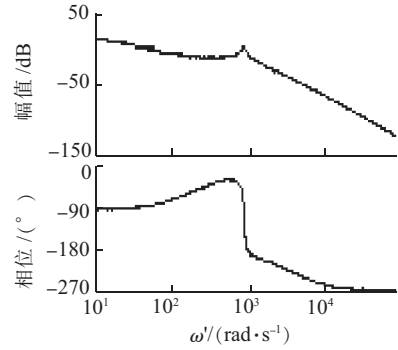
首先得到受控系统的 Bode 图,如图 4(a)所示。由图可见受控对象 $G_S(s)$ 在频率点 315 rad/s 处有谐振峰为 27.8 dB。为抑制系统谐振峰同时保持较快的响应速度,将 PI 调节器参数取值为: $K_{pp}=0.02, K_{pi}=1$ 。这样系统开环传递函数 $G_O(s)$ 在谐振点 315 rad/s 处具有 -6 dB 的衰减,如图 4(b)所示。系统闭环传递函数 $G_S(s)$ 在谐振点 322 rad/s 处的衰减为 -4.78 dB,如图 4(c)所示。在此条件下闭环控制系统的单位阶跃响应曲线如图 4(d)所示。由图 4 可见系统阻尼较好,其调节时间大致为 1 s。以上控制器的参数设计是在某一特定初始条件下完成的,若初始条件变化也要相应作出调整。

3 交叉耦合控制系统仿真分析

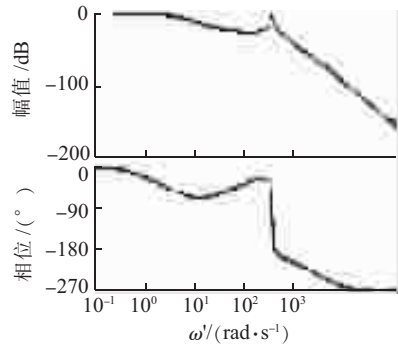
根据图 1 所示的 UPFC 结构框图,利用 MATLAB 仿真软件包中的 Power System 模块建立了 380 V 电压等级的 UPFC 系统仿真模型。仿真模型中的参数:系



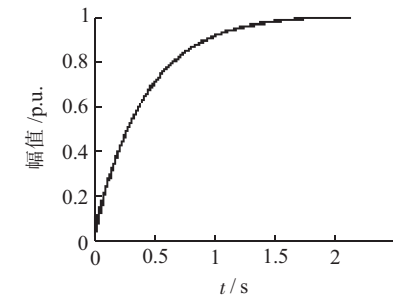
(a) 受控系统 $G_S(s)$ 的频率特性



(b) 控制系统 $G_O(s)$ 的开环频率特性



(c) 控制系统 $G_S(s)$ 的闭环频率特性



(d) 闭环控制系统的阶跃响应

图 4 系统频率特性和单位阶跃响应

统发送端电压 \dot{U}_S 和系统接收端电压 \dot{U}_R 的幅值都为 311 V,两者之间的相位差 $\delta=10^\circ$;UPFC 输入端的线路阻抗 $Z_S=0.5+j6.28 \Omega$;UPFC 输出端线路阻抗 $Z_R=0.5+j18.84 \Omega$;系统额定功率容量为 15 kV·A;串联部分和并联部分各为 7.5 kV·A。

交叉耦合潮流控制的仿真结果如图 5、图 6 所示。即在 1 s 和 5 s 线路有功传输功率指令发生阶跃变化

时,UPFC 系统经串联部分注入电网的功率、输入端电压幅值 U_1 、直流母线电压 U_{dc} 以及系统发送端电压的相角 θ_s 的变化情况。

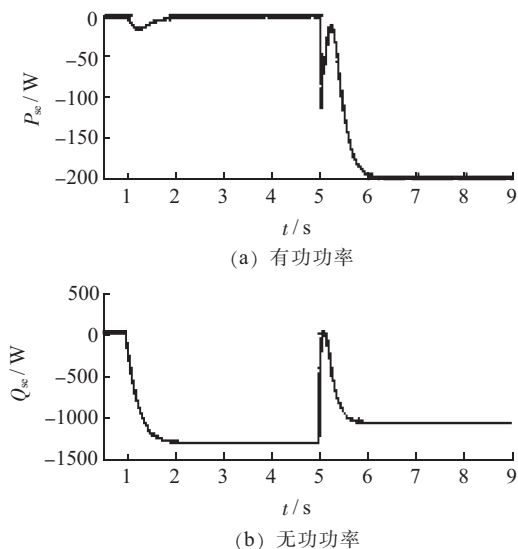


图 5 UPFC 通过串联变压器注入电网的有功功率 P_{se} 和无功功率 Q_{se}

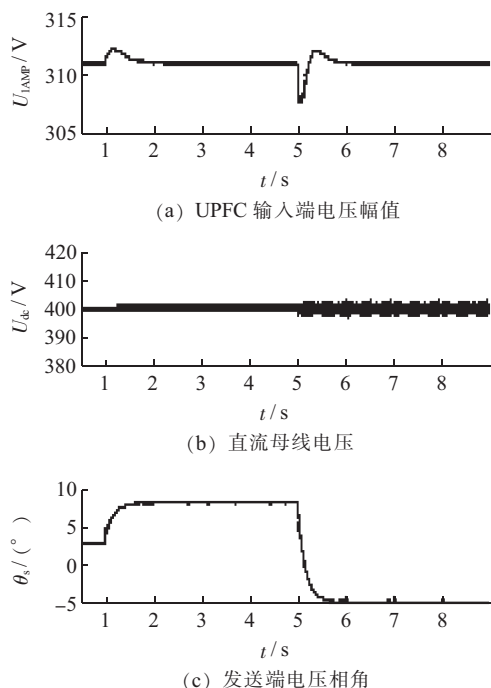


图 6 交叉耦合控制响应有功指令阶跃的效果

图 5 和图 6 反映了在线路传输有功指令 P_{line}^* 发生变化时 UPFC 系统的响应特性。初始状态下,线路传输的有功功率 P_{line}^* 为 1 kW,无功功率 Q_{line} 为 0 var。线路传输有功指令 P_{line} 突变时,UPFC 的并联变换器控制 UPFC 输入端电压 \dot{U}_1 的幅值 U_1 在 311 V 和直流母线电压 U_{dc} 稳定在 400 V,串联变换器控制线路传输的有功功率能够迅速响应指令的变化,同时保证线路传输无功功率不变。

3.1 潮流正向调节能力

在 1 s 时,线路传输的有功功率指令 P_{line}^* 由 1 kW 阶跃至 3 kW,无功功率指令 Q_{line}^* 为 0。此过程中线路有功潮流 P_{line} 的动态调节过程大约为 600 ms,由耦合引起的线路无功潮流 Q_{line} 变化为 -200 var。由图 5 中 1~5 s 的曲线可看出。

(1) 串联变换器几乎不向电网注入有功功率,并联变换器从系统中吸收 300 W 有功功率 P_{sh} ,因此整个系统的损耗为 300 W。

(2) 串联变换器向电网注入大约 -1300 var 的无功功率 Q_{se} ,大部分都被并联部分吸收,小部分用来补偿线路无功损耗,使得传输线路上的无功功率 Q_{line} 保持不变,从而维持 UPFC 输入端电压的稳定。图 6 中 1~5 s 的曲线表明 UPFC 输入端电压幅值 U_1 最高升到 312 V,然后在并联部分稳压控制器的调节下慢慢回到 311 V。这个过程中 U_{dc} 变化很小,由于 P_s 增加了,因此系统发送端电压的相角从 3° 增加到 8° 。

3.2 潮流反向调节能力

在 5 s 时,线路传输的有功功率指令 P_{line}^* 由 3 kW 阶跃至 -2 kW,无功功率指令 Q_{line}^* 等于 0。此过程中 P_{line} 的动态调节过程大约为 800 ms,由耦合引起 Q_{line} 的变化最大达到了 500 var。由图 5 中 5~9 s 的曲线可看出:

(1) 串联变换器向电网注入 -200 W 有功功率 P_{se} ,并联变换器从系统中吸收 -120 W 有功功率 P_{sh} ,因此整个系统的损耗为 80 W。

(2) 串联变换器向电网注入大约 -1100 var 的无功功率 Q_{se} ,并联变换器从电网吸收大约 -1000 var 的无功功率 Q_{sh} ,使得 Q_{line} 保持不变,从而维持 UPFC 输入端电压的稳定。图 6 中 5~9 s 的曲线表明 UPFC 输入端电压幅值 U_1 最低跌落到 307.5 V,然后在并联部分稳压控制器的调节下慢慢回到 311 V。这个过程中 U_{dc} 变化很小,由于 P_s 反向了,因此系统发送端电压的相角从 8° 变到 -5° 。

4 结束语

本文针对 UPFC 的串联换流器设计了一种交叉耦合控制系统,并建立了 380 V 电压等级的 UPFC 系统仿真模型,仿真分析了线路传输的有功功率指令变化时该控制系统的调节效果。仿真结果表明,采用本文设计的交叉耦合潮流控制结构简单,易于实现,可以使得串联变换器控制线路传输的有功功率能够迅速响应指令的变化,同时保证线路传输无功功率不变。

参考文献:

- [1] NARAIN G H, LASZLO G. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems [M]. 1st Edition, 3 park Avenue, 17th Floor, New York, NY 10016-5997, U. S. A. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1999:115-122.
- [2] 李乃湖,李 扬,陈 珩. 灵活交流输电技术在互联电网中的应用[J]. 中国电力,1995(4):2-5
- [3] MIAO Z, CHOUDHRY M A, KLEIN R L. Dynamic Simulation and Stability Control of Three-phase Power Distribution System with Distributed Generators[C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002, New York, NY, 27th-31st Jan 2002 (2): 1029-1035
- [4] WANG L, LEE C H. Damping Sub-synchronous Resonance Using Modal-control NGH SSR Damping Scheme. II. Two-machine Common-mode Study[C]. TENCON '93. Proceedings. Computer, Communication, Control and Power Engineering. 1993 IEEE Region 10 Conference on, Beijing, China, 19-21st Oct. 1993, 5(10): 115-118.
- [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):36-39.
- [6] 鞠儒生,陈宝贤,邱晓刚. UPFC 控制方法研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(6):60-65.
- [7] 王海风,李 敏,陈 珩. 统一潮流控制器的多变量控制设计[J]. 电机工程学报,2000,20(8):51-55.
- [8] 刘黎明,康 勇,陈 坚,等. 统一潮流控制器控制策略的研究与实现[J]. 中国电机工程学报,2006,26(10):114-119.

作者简介:

李 杰(1963),男,江苏扬州人,高级工程师,从事高电压、输电技术研究及管理工作;

周志成(1977),男,湖南株洲人,高级工程师,从事电力系统过电压及输电线路运行及维护等方面研究工作;

刘黎明(1975),男,黑龙江哈尔滨人,博士,研究方向为电力电子变换和控制技术研究;

邹旭东(1974),男,湖南祁东人,副教授,研究方向为电能存储与变换、新能源发电等方面研究;

谢天喜(1983),男,湖北天门人,高级工程师,从事高电压及绝缘技术研究工作。

Design of Cross-coupling Control System for UPFC Series Converter

LI Jie¹, ZHOU Zhicheng¹, LIU Liming², ZOU Xudong², XIE Tianxi¹

(1. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The series converter is the key equipment of the unified power flow controller (UPFC). The performance of its control system is directly related to the regulating ability of UPFC. This paper presents a crossing-coupled method and a system to control the series converter of UPFC. The Bode diagram of the control system is drawn to determine the PI controller parameters. A 380 V UPFC system simulation model is established in MATLAB to calculate the power injected to the line by the series part, the voltage of the DC bus and the changes of the voltage phase angle of the sending terminal. The results showed that the cross-coupling control system has a small interaction when the power flow is changed by UPFC, which verifies the effectiveness of this control system. This paper provides a reference for the future designs and applications of UPFC.

Key words: unified power flow controller (UPFC); serial converter; cross-coupling control; active power

(上接第 13 页)

Parameters Tuning for UPFC Auxiliary Damping Controller

SONG Pengcheng¹, ZHEN Hongning², WANG Zhenquan², XU Zheng¹, DONG Huanfeng¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhengjiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

Abstract: In this paper, a new method of UPFC auxiliary damping controller parameters tuning based on test signal method is proposed. First, the small signal stability of power system is analyzed using the test signal method. Then the testing signal is scanned at the line active power setting point of UPFC while the active power flow in the parallel AC tie line is oscillated. The open-loop transfer function between the line active power setting point of UPFC and the active power flow in the parallel AC tie line is identified by Fourier resolution and curve fitting. Finally, the parameters of UPFC auxiliary damping controller are tuned based on the root locus rules of the classical control theory. The proposed parameter tuning method is validated by the simulation results of a simple case and a real power grid.

Key words: unified power flow controller (UPFC); UPFC auxiliary damping controller; test signal method; parameter tuning method