

基于交叉耦合与交叉解耦的 UPFC 控制性能对比

蔡 松,段善旭,蔡 礼

(华中科技大学 电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 交叉耦合与交叉解耦控制是统一潮流控制器(UPFC)的 2 种主要控制策略,两者内环相同而外环有显著差异。交叉耦合以线路潮流为控制对象,控制结构简单易于实现,属于直接控制方式;交叉解耦的外环控制由电流反馈环与比例积分(PI)控制相结合,以线路电流为控制对象,具有快速调节潮流的能力,属于间接控制方式。交叉耦合不依赖于电流反馈,通过外环 PI 调节器对线路潮流进行独立调节,因此具有较好的鲁棒性;交叉解耦通过电流环解耦,具有解耦完全的特点。单相接地短路实验体现出交叉解耦控制在三相不平衡状态下迅速限制潮流冲击分量的特点。通过实验波形和仿真分析,对交叉耦合与交叉解耦的控制性能特点予以了证实,并针对交叉解耦控制鲁棒性较差的缺陷,提出了 PI 控制器的智能化和线路参数在线辨识 2 条改进途径。

关键词: 统一潮流控制器; 交叉耦合; 交叉解耦; 性能对比

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)05-0045-04

统一潮流控制器 UPFC(Unified Power Flow Controller)是灵活且功能强大的 FACTS 装置,可以同时控制输电线路上的有功、无功潮流和 UPFC 总线电压进行控制。目前,许多文献针对 UPFC 的控制策略进行了研究^[1-7]。现对 UPFC 的 2 种主要控制策略交叉耦合与交叉解耦部分潮流控制性能进行总结。分别作为直接控制策略与间接控制策略的代表,交叉耦合与交叉解耦控制在快速性、耦合性、鲁棒性和稳定性方面有着各自的性能特点。通过仿真,就这 4 个方面性能对 2 种控制策略加以对比分析。

1 交叉耦合与交叉解耦的工作原理简析

图 1 中相关变量的物理含义见表 1,其他相关系统参数见表 2。UPFC 串联侧交叉耦合控制框图如

图 2 所示。UPFC 串联侧交叉耦合控制就是采用 UPFC 串联部分输出电压的 q 轴分量控制线路的有功潮流, d 轴分量控制线路的无功潮流。

图 2 中的 U_{12d} 、 U_{12q} 即电压矢量 U_{12} 的 d 、 q 分量,其他如 I_{3d} 与 I_{3q} 类似。 P^* 与 Q^* 是线路潮流的指令值,其他的如 I_{2d}^* 与 I_{2q}^* 类似。图 2 电流环末端的 U_{series_d} 和 U_{series_q} 是逆变器输出的电压 d - q 指令值。

如图 2 所示,交叉耦合控制是一种三环控制策略,即内环的电流环与电压环,外环的功率环。交叉耦合的功率环直接以线路潮流为控制对象,因此交叉耦合属于直接控制方式。交叉解耦控制就是要通过解耦的方法实现线路潮流 P 与 Q 的独立调节,通过在 d - q 旋转坐标系下对线路电流实现解耦控制,以间接实现线路潮流的控制。

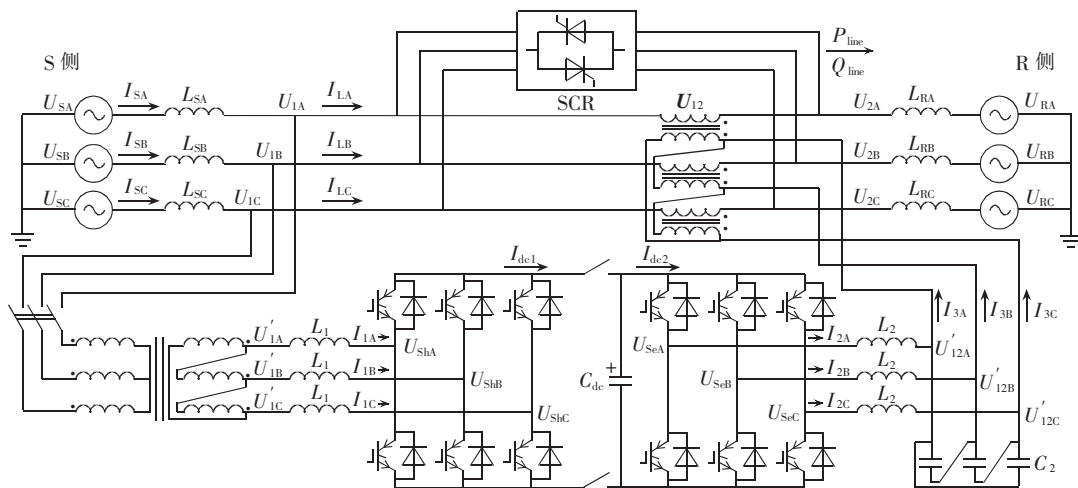


图 1 UPFC 的系统电路图

Fig.1 UPFC system

表 1 UPFC 变量及其物理意义

Tab.1 Variables and their physical meanings of UPFC

位置	变量名	物理意义
线路侧	U_1	节点电压
	U_{12}	串联侧输出补偿电压
	U_2	补偿后电压
	I_L	线路电流
UPFC 侧	P_{line}/Q_{line}	补偿电压末端瞬时有功/无功潮流
	U_{Se}	串联侧输出电压
	U_{dc}	直流母线电压
	I_2	串联侧输出电流
	I_1	并联侧电流
	U'_{12}	与 U_{12} 呈串联变压器变比关系
	I_3	与 I_L 呈串联变压器变比关系
	U'_1	与 U_1 呈并联变压器变比关系

表 2 UPFC 的系统参数

Tab.2 System parameters of UPFC

UPFC 系统参数	符号	值
发送端系统电压	U_s	380 V(线电压)
接收端系统电压	U_R	380 V(线电压)
直流母线电压设定值	U_{dc}	400 V
并联变压器变比	K_1	2.5:1(Y-Δ)
串联变压器变比	K_2	3:8(Y-Δ)
传输线路电感	L_R	27/50 mH
发送端线路电感	L_s	2 mH
并联变流器输入电感	L_1	6 mH
串联变流器输出滤波电感	L_2	1.17 mH
串联变流器输出滤波电容	C_2	10 μF
直流母线滤波电容	C_{dc}	9400 μF

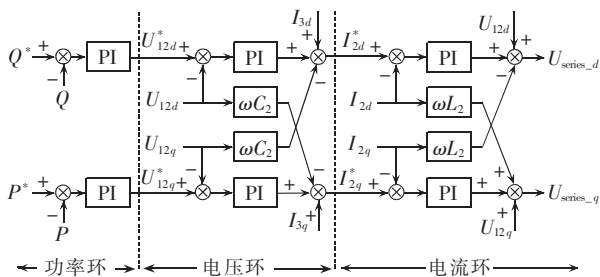


图 2 UPFC 交叉耦合控制结构框图

Fig.2 Cross coupling control of UPFC

UPFC 串联侧交叉解耦功率环控制框图如图 3 所示。交叉解耦与交叉耦合控制的内环结构相同,但在功率环有较大差异。与交叉耦合功率环直接以线路潮流为控制对象不同,交叉解耦的功率环控制对象为线路中的电流。由图 3 的功率环可知,交叉解耦控制将线路中的潮流指令转化为线路的电流指令加以控制,因此属于一种间接控制策略。

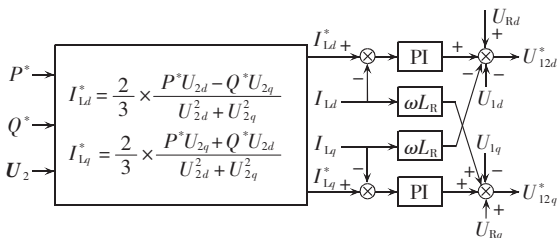


图 3 交叉解耦控制策略功率环控制框图

Fig.3 Power loop of cross decoupling control

如图 1 所示,补偿电压 U_{12} 末端的瞬时线路潮流可由补偿后电压相量 U_2 和线路电流相量 I_L 得到:

$$P_{line} = 3(U_{2d}I_{Ld} + U_{2q}I_{Lq})/2 \quad (1)$$

$$Q_{line} = 3(U_{2d}I_{Lq} - U_{2q}I_{Ld})/2$$

根据期望得到的传输线路上的有功指令 P^* 、无功指令 Q^* 和补偿后输出电压相量 U_2 ,由式(1)可以得到线路电流 $d-q$ 分量的指令值:

$$I_{Ld}^* = \frac{2}{3} \times \frac{P^*U_{2d} - Q^*U_{2q}}{U_{2d}^2 + U_{2q}^2}, I_{Lq}^* = \frac{2}{3} \times \frac{P^*U_{2q} + Q^*U_{2d}}{U_{2d}^2 + U_{2q}^2} \quad (2)$$

式(2)即是由线路潮流指令到线路电流指令的转化公式。当线路电流跟踪电流指令 I_{Ld}^* 和 I_{Lq}^* 变化的时候,线路有功潮流和无功潮流也即跟踪线路有功指令 P^* 和无功指令 Q^* 的变化。

2 交叉耦合与交叉解耦的性能对比

2.1 快速性

对比图 2、3 中交叉耦合与交叉解耦的功率环可知,在交叉解耦控制的功率环中,反馈环与 PI 调节器相配合,减轻了 PI 调节器的调节负担,较容易达到指令值。交叉耦合的功率环仅靠 PI 调节器调节线路潮流,PI 调节器调节负担重,调节速度慢。因此交叉解耦具有较快的调节速度。图 4、5 分别为交叉耦合与交叉解耦在 2kW 的有功指令下的潮流调节实验波形。仿真参数见表 2,此时线路电感为 27 mH。

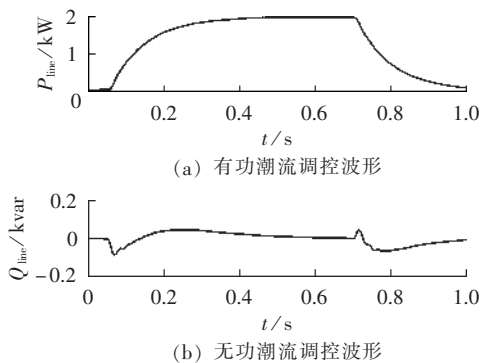


图 4 交叉耦合控制在有功指令下的潮流调节波形

Fig.4 Power flow regulation performance of cross coupling control with active power instruction

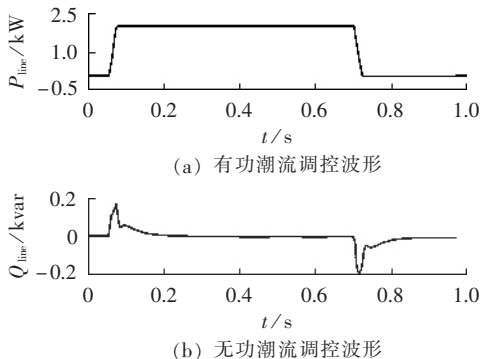


图 5 交叉解耦控制在有功指令下的潮流调节波形

Fig.5 Power flow regulation performance of cross decoupling control with active power instruction

由图4、5比较可知,在加入有功指令后,交叉解耦控制的有功潮流能够迅速达到线路潮流指令值,相比之下,交叉耦合控制达到指令值的时间较长。

2.2 耦合性

线路无功潮流由补偿后电压 U_2 与线路电流 I_L 的叉乘得到:

$$Q_{\text{Line}} = U_2 \times I_L = (U_1 + U_{12}) \times [(U_1 + U_{12} - U_R) / jX_R] \quad (3)$$

对上式展开,并取 $U_1 \approx U_S$,则上式可简化为

$$Q_{\text{Line}} = -(U_{12d}^2 + U_{12q}^2 + U_{12d}U_{1d}) / X_R \quad (4)$$

结合图2与式(4)可知,对于交叉耦合控制,当线路中仅给定有功指令时,串联变换器输出电压指令的 q 轴分量 U_{12q} 必然对线路无功潮流产生一定影响。而且交叉耦合控制调节潮流速度较慢,有功指令对无功潮流的影响时间较长。由此可知,直接以线路潮流为控制对象的交叉耦合控制是一种解耦不完全的控制方式。交叉解耦将潮流指令转化为电流指令控制,以解耦的方式实现线路潮流 P 与无功潮流 Q 的独立调节,其控制的有功潮流 P 与无功潮流 Q 之间影响小。

图4(b)与图5(b)分别为交叉耦合与交叉解耦在有功指令 2 kW 的条件下无功潮流调控波形。由于实验条件限制,难以对无功潮流作出精确的定量监控,此处以仿真波形替代。可明显看出,交叉解耦由于解耦完全,有功指令对无功潮流的影响小,作用时间短,能够迅速回到初始状态,而交叉耦合控制的无功潮流受影响时间较长。

2.3 鲁棒性

在快速性的对比中已经提到,功率环的反馈环与PI调节器的配合是交叉解耦控制有较快的调节速度的主要原因。现有的交叉解耦控制也有其固有的缺陷,即潮流调节较依赖功率环的反馈,而功率环的PI调节器对潮流的调节能力有限。从图3中可知,现有的交叉解耦控制的功率环反馈系数 ωL_R 是根据某种线路阻抗设定的,当线路阻抗未知时,就难以取得良好的潮流控制效果。换言之,若要对不同参数的线路进行潮流调控,就要修改原有的控制系统参数,否则将无法有效调节线路潮流。

交叉耦合控制的潮流调控仅由PI调节器完成,线路参数的变化对其潮流调节影响小,具有较好的鲁棒性。

图6、7分别为交叉耦合与交叉解耦在 2 kvar 的无功潮流指令时线路电感为 27 mH 和 50 mH 的潮流调节仿真波形。以图6为例,(a)(b)分别为 27 mH 的有功潮流与无功潮流波形,(c)(d)分别为 50 mH 的有功潮流与无功潮流波形。线路参数变化后,对交叉耦合与交叉解耦的控制系统都不作修改。

将图6、7比较可知,在线路阻抗变化后,交叉耦合控制除调节时间略有增加外,潮流调节波形基本保持不变。交叉解耦控制除在有功、无功潮流都出现较大的超调外,调节时间明显增加。因此交叉耦合控制具有良好的鲁棒性。

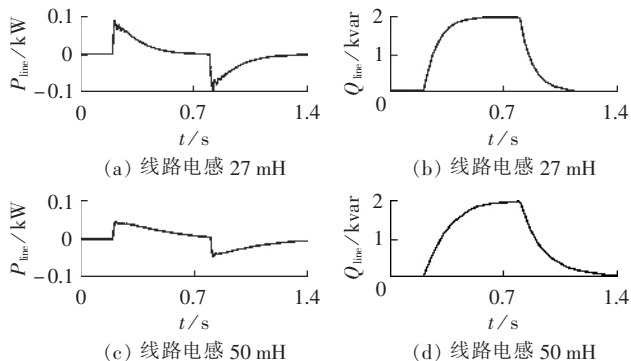


图6 不同阻抗情况下交叉耦合控制在无功指令下的潮流调节波形

Fig.6 Power flow regulation performance of cross coupling control with reactive power instruction for different impedances

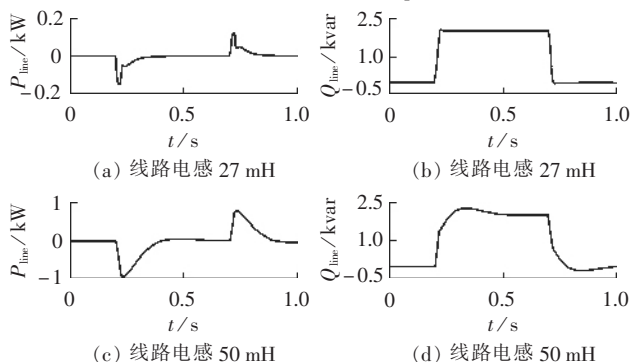


图7 不同阻抗情况下交叉解耦控制在无功指令下的潮流调节波形

Fig.7 Power flow regulation performance of cross decoupling control with reactive power instruction for different impedances

2.4 稳定性

在电力系统中,输电线路可能由于气象条件恶化等原因造成短路而使线路参数变化。在各种类型的短路中,单相短路占大多数。此处模拟单相线路中点接地短路,以考察UPFC控制系统的抗扰动能力。

选择适当的接地电阻 R_0 ,以控制线路电流过流,防止过流保护开关SCR闭合,切除UPFC装置。如图8所示,A相线路阻抗中点通过 5Ω 接地电阻 R_0 短路, 0.4 s 短路, 0.7 s 短路切除, i_{fa} 为A相接地短路电流。由于此时的UPFC装置处于低压网络中,继电保护装置不会在 0.3 s 的时间内切除故障线路,可以保证UPFC装置有足够时间完成线路潮流的回复。

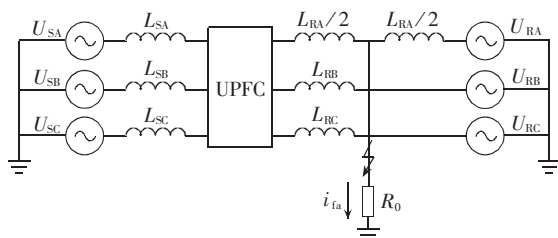


图8 UPFC单相接地短路实验图

Fig.8 UPFC experiment for single-phase grounding fault

若线路未出现过流,UPFC 对单相接地短路造成的三相不平衡系统仍能进行潮流调节。在接地短路瞬间,线路潮流中有较大冲击分量;当线路电流中瞬时分量减少,逐渐进入稳态后,UPFC 能够基于三相不平衡系统对线路潮流调节,使线路潮流回到原指令值。图 9、10 为交叉耦合与交叉解耦控制在单相接地短路三相不平衡时有功潮流指令下的调节波形。

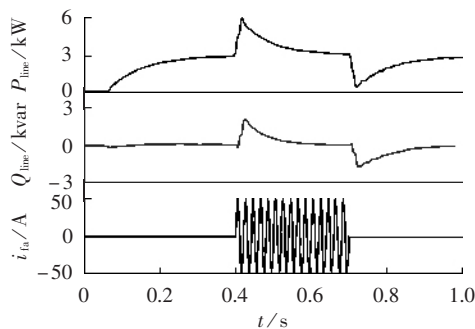


图 9 单相接地短路时交叉耦合控制在有功指令下的潮流波形

Fig.9 Power flow regulation performance of cross coupling control with active power instruction for single-phase grounding

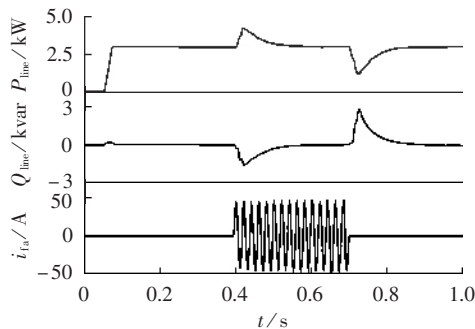


图 10 单相接地短路时交叉解耦控制在有功指令下的潮流波形

Fig.10 Power flow regulation performance of cross decoupling control with active power instruction for single-phase grounding

对比图 9、10 可知,交叉解耦控制在功率环反馈环节与 PI 调节器的共同作用下,在线路电流进入稳态后,迅速控制线路潮流回到稳态指令值,限制了线路潮流冲击分量。交叉耦合控制由于对潮流的调节速度较慢,线路潮流出现了较大的冲击分量。由仿真比较可知,交叉解耦控制具有较好的抗扰动能力。

3 结语

从以上仿真分析可知,交叉解耦控制调节潮流迅速,解耦完全,而且有较好的抗扰动能力,但鲁棒性较差。交叉耦合控制在快速性和抗扰动能力略逊于交叉解耦控制,有功潮流与无功潮流之间影响相对较大,但具有较好的鲁棒性。

交叉耦合控制结构简单,易于实现,是一种较为成熟也是在 UPFC 实验装置中应用较多的控制策略。交叉解耦控制在线路参数已知的情况下具有良好的潮流调节性能,但其在鲁棒性方面的缺陷限制

了在 UPFC 装置中的应用范围。有 2 个因素影响交叉解耦控制鲁棒性:功率环 PI 参数和反馈系数,因此线路阻抗的在线辨识与 PI 调节器的智能化是解决交叉解耦控制鲁棒性缺陷的 2 条途径。

参考文献:

- [1] KANNAN S, JAYARAM S, SALAMA M M A. Real and reactive power coordination for a unified power flow controller[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1454-1461.
- [2] FUJITA H, AKAGI H, WATANABE Y. Dynamic performance of a unified power flow controller for stabilizing AC transmission systems[C]//IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, 2002. New York: IEEE, 2002: 81-87.
- [3] FUJITA H, WATANABE Y, AKAGI H. Control and analysis of a unified power flow controller[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(6): 1021-1027.
- [4] 朱鹏程, 刘黎明, 刘小园. 统一潮流控制器的分析与控制策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 45-51.
ZHU Peng-cheng, LIU Li-ming, LIU Xiao-yuan. Analysis and study of control strategy for UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 45-51.
- [5] YU Q, ROUND S D, NORUM L E, et al. Dynamic control of a unified power flow controller[C]//27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. New York, USA: IEEE, 1996: 508-514.
- [6] YU Q, NORUM L, UNDELAND T, et al. Investigation of dynamic controllers for a unified power flow controller[C]//Proceedings of the 1996 IEEE IECON 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation. Taipei: IEEE, 1996: 1764-1769.
- [7] 陈众, 颜伟, 徐国禹, 等. 统一潮流控制器的智能解耦与结构设计研究[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 36-41.
CHEN Zhong, YAN Wei, XU Guo-yu, et al. Intelligent decoupling of UPFC controller and its structural design[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 36-41.
- [8] 郑征, 陶海军. 模糊自适应 PI 调节在三相 PWM 整流器中的应用[J]. 电气应用, 2005, 24(9): 65-68.
ZHENG Zheng, TAO Hai-jun. Fuzzy self-tuning adaptive PI adjustment in three-phase PWM rectifier[J]. Electrotechnical Journal, 2005, 24(9): 65-68.
- [9] 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.
- [10] PAPIC I, ŽUNGO P, POVH D, et al. Basic control of unified power flow controller[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(4): 1734-1739.

(责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:



蔡 松

蔡 松(1982-),男,湖南株洲人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术,在电力系统中的应用 (E-mail: plushte_2003@126.com);

段善旭(1970-),男,湖北洪湖人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力电子技术、电源系统及其控制;

蔡 礼(1983-),男,江西南昌人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行控制和直流输电技术。

Comparison of UPFC performance between cross coupling and decoupling controls

CAI Song, DUAN Shan-xu, CAI Li

(Huazhong University of Sci & Tech, Wuhan 430074, China)

Abstract: Cross coupling and decoupling controls are two main UPFC(Unified Power Flow Controller) control schemes, which have same inner control loop and different outer control loop. Taking power flow as the control object, the cross coupling control is ascribing to the direct control scheme, which is simple and easy to be implemented. Taking line current as the control object, the cross decoupling control is ascribing to the indirect control scheme, which combines PI controller with current feedback loop and has the ability of fast power regulation. The cross coupling control is independent of the current feedback and uses PI controller alone to adjust the power flow, so it has better robustness. The cross decoupling control decouples completely using current feedback, which quickly restricts the concussion current under 3-phase unbalanced condition caused by single-phase grounding fault. The performance of cross coupling and decoupling controls are validated with simulations and experiments. Two methods are proposed to improve the robustness of cross decoupling control: the intelligent PI controller and the online identification of line parameters.

Key words: unified power flow controller; cross coupling; cross decoupling; capability comparison