

统一潮流控制器控制策略的研究与实现

刘黎明, 康勇, 陈坚, 朱鹏程, 刘小园

(华中科技大学, 湖北省武汉市 430074)

Control Scheme and Implement of a Unified Power Flow Controller

LIU Li-ming, KANG Yong, CHEN Jian, ZHU Peng-cheng, LIU Xiao-yuan

(Huazhong University of SCI&TECH, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The paper describes the theory, the modeling technique, control scheme of Unified Power Flow Controller. Based on park transformation, it designs a decoupled control scheme of UPFC in d and q -axis which eliminates the dynamic interaction between active and reactive power flow through the line. The control system consists of outer power loop, middle voltage loop and inner current loop. The response of the inner current loop is much faster than response of the outer voltage loop, which ensures that input current follows input voltage and improves dynamic performance of UPFC. As a step closer to practical application of UPFC, the paper analyzes individually the functions of STATCOM and SSSC. Experimental results verify the viability and effectiveness of applying the proposed control scheme in UPFC.

KEY WORDS: unified power flow controller, decoupled control scheme, mathematical model, power flow changing

摘要: 对统一潮流控制器(UPFC)的数学模型、控制策略进行了具体的分析和设计,在两相同步旋转 dq 坐标系下建立了控制系统动态模型。考虑到有功和无功在 dq 坐标系下的相互影响,UPFC的串联逆变器采用了三环解耦控制,外环是功率环,中间环为电压环,内环为电流环,由于电流内环的快速响应,使得电流跟踪输入电压,提高系统的稳定性和动态响应性能。文中对UPFC实现的STATCOM和SSSC功能进行了系统的分析,并对其动态特性进行了深入的研究。最后利用实验验证了在UPFC中采用这种控制方式的有效性。

关键词: 统一潮流控制器,解耦控制,数学模型,潮流变化

0 引言

统一潮流控制器(UPFC)是迄今为止最为灵活、功能最全的FACTS装置,它可以理解为通过一个直流母线储能电容将STATCOM和SSSC连接在一起的装置,可以同时控制输电线路上的有功、无功潮流和UPFC节点电压以及直流母线电压进行控制。

目前许多文献针对UPFC控制策略进行了研

究^[1-12]:文献[1-2]建立了UPFC的系统模型,采用了简单的控制策略;文献[3-4]进行了有能量缓冲的UPFC控制系统设计,采用了解耦和神经网络控制策略;文献[5]研究了UPFC对动态电能质量的影响,采用了直接PI控制;文献[6]采用了带有预测控制环的解耦控制策略;文献[7]提出了一种新的UPFC有功和无功协调控制策略;文献[8]分析了直流电压的弱控制策略;文献[9]采用了自适应PID控制策略控制UPFC并联侧,采用了解耦控制策略控制UPFC的串联侧。但上述文献只进行了系统的仿真研究而没有通过实验加以验证。文献[10-11]建立了小型的实验模型,对UPFC的功能进行了分析,但所采用控制策略不能取得好的实验效果。文献[12]给出了UPFC的交叉耦合与解耦控制,但只建立了输电线路一侧的数学模型,而并没有针对UPFC装置一侧进行分析,本文将在此基础上进行UPFC控制策略的延伸。

本文分析UPFC的工作原理,建立UPFC的数学模型,利用瞬时功率理论,在 d 、 q 坐标系下建立控制系统的动态模型。为了进一步阐述UPFC的全面功能,在UPFC模型中对并联整流器和串联逆变器进行单独控制。并联整流器可以实现STATCOM的功能,对其采用双环解耦控制,利用 d 轴电压控制直流母线电压, q 轴电压来控制UPFC输入端节点。串联逆变器可以实现SSSC的功能,对其采用三环解耦控制,外环是功率环,中间环为电压环,内环为电流环。内环的快速响应将使得电流能够迅速跟踪输入电压,以提高系统的动态性能。

1 UPFC的工作原理及数学模型建立

UPFC的实验模型如图1所示,它是由2个背靠背的变换器通过直流母线电容连接在一起,并联变换器通过变压器并联接入系统中,相当于1个受

控电流源，一方面担负着与系统进行无功交换，可以稳定 UPFC 输入端节点，加强 UPFC 串联侧的潮流调节作用；另一方面根据串联侧变换器的工况进行有功吞吐，以保证直流母线电压基本恒定。串联变换器通过变压器串入到系统中，相当于一个受控电压源，通过向系统插入一幅值和相位都可调的电压来完成可控串补、节点电压调节、潮流控制的任务。当开关 SW_1 、 SW_2 、SCR 闭合时，UPFC 单独实现 STATCOM 的功能；当开关 SW_1 、 SW_2 、SCR 打开时，UPFC 单独实现 SSSC 的功能。

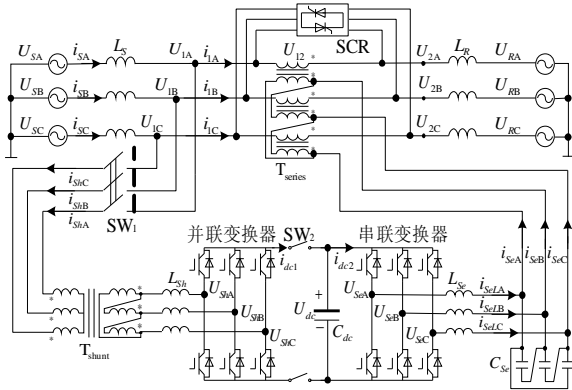


图 1 UPFC 的实验系统电路结构框图

Fig.1 Experimental system configuration of a general UPFC

根据图 1 可以得到三相静止坐标系下 UPFC 的数学模型，但其交流侧均为时变的交流量，不利于控制系统的设计。因此利用 Park 变换可将三相静止坐标系转换成以电网基波频率同步旋转的 d, q 坐标系，可得 UPFC 并联侧、串联侧以及线路侧在 d, q 坐标系下的数学模型如图 2 所示，相应的方程如下：

$$\begin{cases} U_{Shd} = U_{1d} + wL_{Sh}i_{Shq} - L_{Sh}di_{Shd}/dt \\ U_{Shq} = U_{1q} - wL_{Sh}i_{Shd} - L_{Sh}di_{Shq}/dt \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_{Sed} = L_{Se}di_{SeLd}/dt - wL_{Se}i_{SeLq} + U_{12d} \\ U_{Seq} = L_{Se}di_{SeLq}/dt + wL_{Se}i_{SeLd} + U_{12q} \end{cases} \quad (2)$$

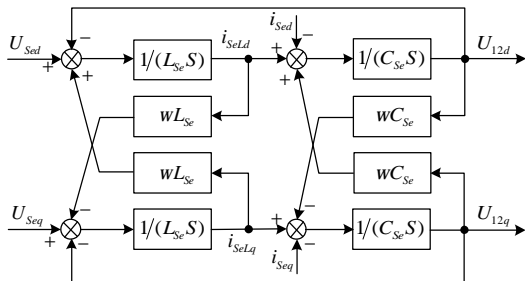


图 2 UPFC 串联侧的数学模型

Fig. 2 Mathematical model of series UPFC branch

$$\begin{cases} i_{SeLd} = C_{Se}dU_{12d}/dt - wC_{Se}U_{12q} + i_{Sed} \\ i_{SeLq} = C_{Se}dU_{12q}/dt + wC_{Se}U_{12d} + i_{Seq} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} U_{2d} = L_Rdi_{1d}/dt - wL_Ri_{1q} + U_{Rd} \\ U_{2q} = L_Rdi_{1q}/dt + wL_Ri_{1d} + U_{Rq} \end{cases} \quad (4)$$

2 UPFC 的控制策略

2.1 并联侧整流器的控制

无论是潮流控制还是 UPFC 输入端节点电压的控制，对于 UPFC 控制系统来说，最直接的控制量就是 UPFC 串、并联变换器的交流输出电压，利用潮流、电流和电压之间的关系，通过改变串、并联变换器的交流输出电压来实现 UPFC 对线路潮流和端电压的控制。

(1) UPFC 输入端节点电压控制。

UPFC 的并联侧可以看作是一个 STATCOM，提供串联侧的有功需求同时可以补偿传输线路上无功功率的变化，使得发电系统输送的无功保持不变，维持 UPFC 输入端节点电压稳定。不同于文献[13-14]中提出的电压下垂控制方式，本文将采用稳压双环解耦控制，其控制结构如图 3 所示。 q 轴电压外环的作用主要是控制 UPFC 输入端节点，传输线路上的无功指令反馈到控制系统中，可以实现串、并联之间无功的协调控制，提高系统的动态性能；电流内环的作用是按电压外环输出的电流指令进行电流控制，响应速度快。

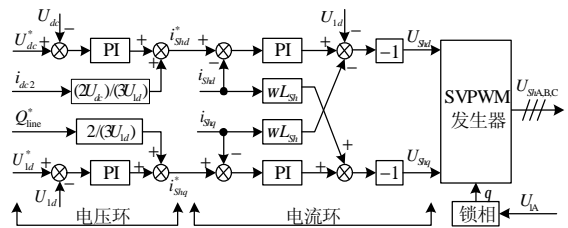


图 3 UPFC 并联侧的控制结构

Fig. 3 Shunt converter control system diagram of UPFC

(2) 直流母线电压控制。

直流母线电压用来补偿 UPFC 系统的损耗，通过调节直流母线电压来实现交流输电系统与 UPFC 之间的功率平衡。图 3 所示的控制系统中以 d 轴电压控制直流母线电压，根据功率平衡的原理，可以得到有功电流指令的前馈量，实现串、并联之间有功的协调控制。由图 4 所示的充电实验可见，UPFC 输入端 A 相节点电压 U_{1A} 与并联整流器输出 A 相电流 i_{ShA} 同相，使得直流母线电压 U_{dc} 的充电过程平稳且无超调。

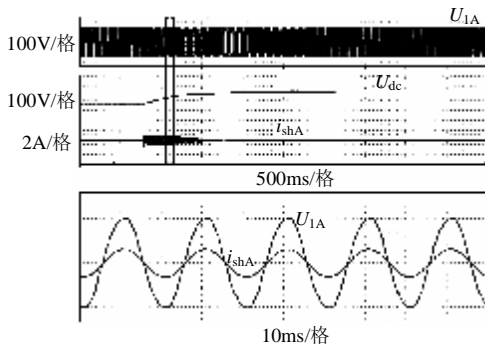


图4 UPFC的直流母线充电实验波形

Fig. 4 Performance of DC-link capacitor charging in UPFC

2.2 串联侧逆变器的控制

(1) 潮流控制。

UPFC 的串联侧主要作用是实现潮流调节，调节串联逆变器输出电压的幅值可以改变传输线路上的无功，调节输出电压的相位可以改变传输线路上的有功，因此利用输出电压的 d 轴分量来控制无功潮流， q 轴分量来控制有功潮流。由图 2 可见 d 、 q 轴之间各分量存在复杂的耦合关系，由于本实验模型中，传输线路上的各参数是确定的，为了获得良好的静、动态性能必须对 d 、 q 轴进行解耦控制，其控制框图如图 5 所示，锁相信号来自 UPFC 输入端节点 A 相电压 U_{1A} 。这种控制方案采用了功率环作为外环，电压环作为中间环，电流环作为内环，每一个环路都包含相应的状态反馈解耦量。通过解耦简化了控制对象，方便了控制器的设计。在功率外环的控制中，根据瞬时功率理论可以得到传输线路上的有功和无功：

$$\begin{cases} P_{line} = \frac{3}{2}(U_{2d}i_{1d} + U_{2q}i_{1q}) \\ Q_{line} = \frac{3}{2}(U_{2d}i_{1q} - U_{2q}i_{1d}) \end{cases} \quad (5)$$

根据期望得到的传输线路上的有功 P_{line}^* 和无功 Q_{line}^* ，采样输出电压 U_2 ，考虑串联变压器的变比 $6:8(Y-\Delta)$ ，可以得到串联逆变器输出电流参考值：

$$\begin{cases} i_{Sed}^* = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{(P_{line}^* U_{2d} - Q_{line}^* U_{2q})}{U_{2d}^2 + U_{2q}^2} \\ i_{Seq}^* = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{(P_{line}^* U_{2q} + Q_{line}^* U_{2d})}{U_{2d}^2 + U_{2q}^2} \end{cases} \quad (6)$$

当输出电流跟踪指令 i_{Sed}^* 和 i_{Seq}^* 变化的时候，线路上的有功和无功也会跟踪 P_{line}^* 和 Q_{line}^* 的变化。

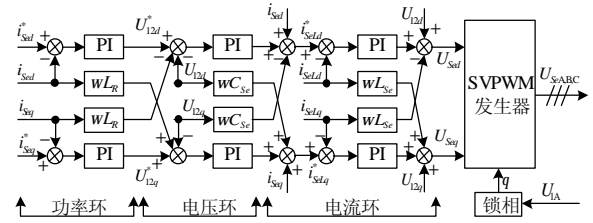


图5 UPFC 串联侧的控制结构

Fig. 5 Series converter control system diagram of UPFC (2) 电抗模拟控制

在当开关 SW_1 、 SW_2 、SCR 打开时，UPFC 单独实现 SSSC 的功能，此时将接收端的电源 U_R 用 22Ω 的电阻代替，控制串联逆变器输出电压可以调节线路上的阻抗，其控制结构如图 6 所示，锁相信号来自线路上的 A 相电流 i_{1A} 。由于没有外部能量来源，因此利用串联逆变器对直流母线电压进行自充电。控制 d 轴输出电压可以调节直流母线电压，保证系统正常工作，控制 q 轴输出电压，可以使得输出模拟电抗值 $X=U_{12q}/i_{Seq}$ 跟踪指令 X^* 的变化，图 7 出示了 SSSC 模拟电抗从电容向电感的变化。从串联逆变器输出电压 U_{12A} 与线路电流 i_{1A} 的幅相关系以及传输线路有功潮流 P_{line} 和无功潮流 Q_{line} 的变化可以看出，采用上述控制策略可以使得 SSSC 适时控制线路阻抗值，提高系统输电能力。

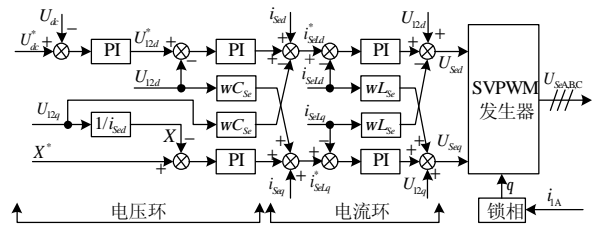


图6 模拟阻抗时 UPFC 串联逆变器的控制结构

Fig. 6 Series converter control system of UPFC to emulate reactance

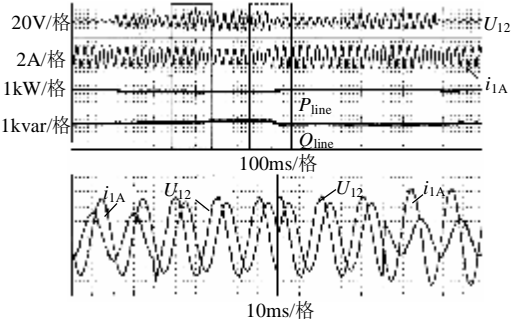


图7 UPFC 模拟电抗实验波形

Fig. 7 Performance of UPFC to emulate reactance

3 UPFC 系统特性实验研究

(1) 有功潮流的变化

如图 1 所示，实验中发送端电压 U_{Si} ($i=A, B, C$) 与接收端电压 U_{Ri} 的幅值相等，相角差为 0，系

统参数如表 1 所示。

图 8、9 反映了在传输线路有功指令发生变化的时候 UPFC 系统的响应特性。初始状态下，UPFC 控制线路上的有功潮流 P_{line} 和无功潮流 Q_{line} 为零，当有功指令突变的时候，UPFC 的并联整流器控制

表 1 UPFC 的系统参数

Tab. 1 System parameters of the UPFC

UPFC 系统参数	符号	值
发送端系统电压	U_{S1}	380V(线电压)
接收端系统电压	U_{R1}	380V(线电压)
直流母线电压设定值	U_{dc}	400V
并联变压器变比	T_{shunt}	2.5:1(Y-Δ)
串联变压器变比	T_{series}	6:8(Y-Δ)
传输线路电感	L_R	27mH
发送端线路电感	L_S	4mH
并联变流器输入电感	L_{sh}	6mH
串联变流器输出滤波电感	L_{se}	1mH
串联变流器输出滤波电容	C_{se}	10μF
直流母线滤波电容	C_{dc}	4700μF
可控功率	P	15kVA

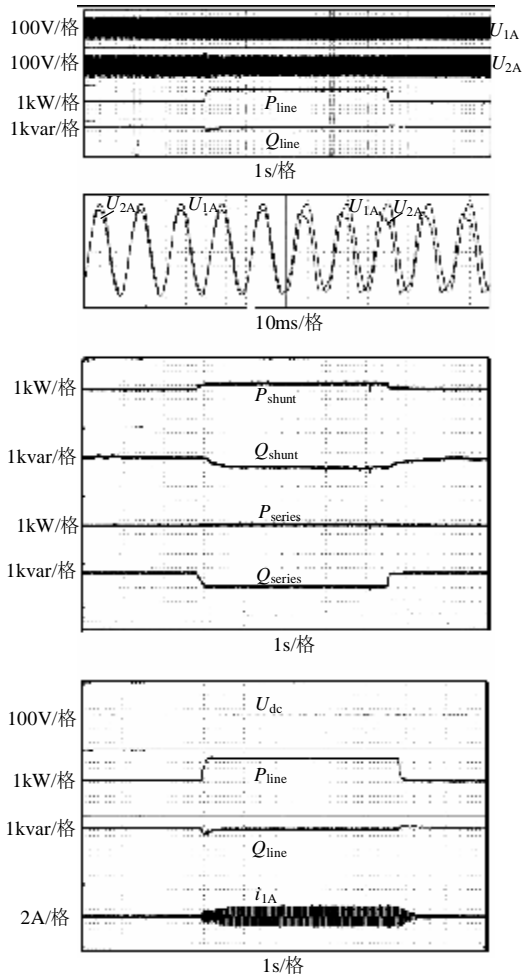


图 8 传输线路有功指令突变+3kW 时 UPFC 的响应性能
Fig. 8 Performance of UPFC to step change in the line real power reference from zero to +3kW and back

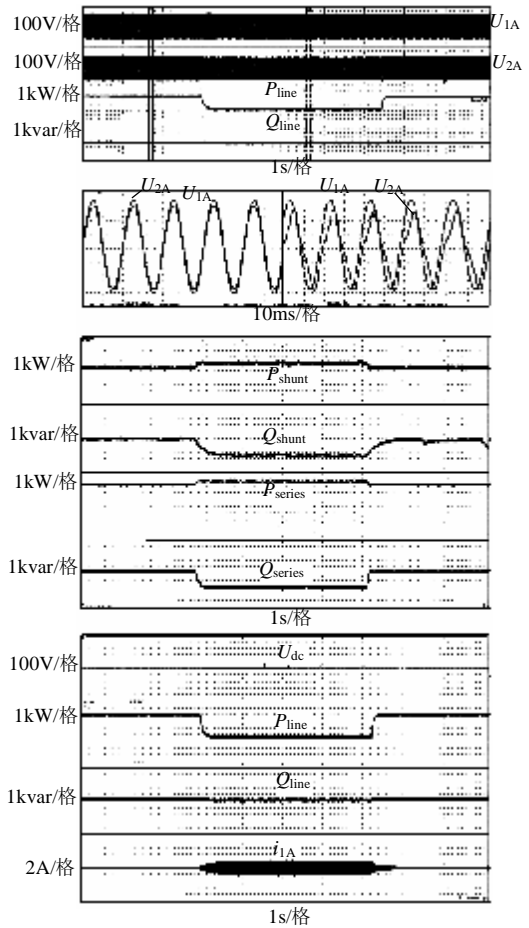


图 9 传输线路有功指令突变-3kW 时 UPFC 的响应性能
Fig. 9 Performance of UPFC to step change in the line real power reference from zero to -3kW and back

UPFC 输入端节点 A 相电压 U_{1A} 在 220V 和直流母线电压 U_{dc} 稳定在 400V，串联逆变器控制传输线路上的有功功率能够迅速响应指令的变化，同时线路上无功功率不变。

从图 8 可以看出，在传输线路上的有功阶跃指令给定为 3kW 时，系统响应时间大约为 100ms，而且有功和无功之间的相互影响很小。串联侧注入电压 U_{12A} 使得 U_{2A} 超前 U_{1A} ，有功从系统发送端流向系统接收端。在传输线路上的有功潮流发生变化的时候，并联整流器输出大约 2kvar 的容性无功功率 Q_{shunt} 与串联逆变器输出大约 2kvar 的感性无功功率 Q_{series} 相抵消，使得传输线路上的无功功率保持不变，从而维持 UPFC 输入端节点电压的稳定。并联整流器从系统中吸收 1kW 有功功率 P_{shunt} ，保证了直流母线电压稳定，串联逆变器输出 0.5kW 有功功率 P_{series} ，整个系统的损耗为 0.5kW。

在图 9 中，传输线路上的有功阶跃指令给定为

-3kW。串联侧注入电压 U_{12A} 使得 U_{2A} 滞后 U_{1A} ，从系统接收端流向系统发送端。在传输线路上的有功潮流发生变化的时候，并联整流器输出的容性无功功率与串联逆变器输出的感性无功功率平衡，使得传输线路上的无功功率保持不变，从而维持 UPFC 输入端节点电压的稳定。并联整流器从系统中吸收 1kW 有功功率，保证了直流母线电压稳定，串联逆变器输出 0.8kW 有功功率，整个系统的损耗为 0.2kW。

(2) 无功潮流的变化

图 10 和图 11 给出了在传输线路无功指令发生变化的时候 UPFC 系统的动态性能。初始状态下，UPFC 控制线路上的潮流为零，当无功指令突变的时候，UPFC 的并联整流器控制 UPFC 输入端节点电压在 220V 和直流母线电压稳定在 400V，串联逆变器控制传输线路上的无功功率能够迅速响应指令的变化，同时线路上有功功率不变。

如图 10 所示，在传输线路上的无功阶跃指令

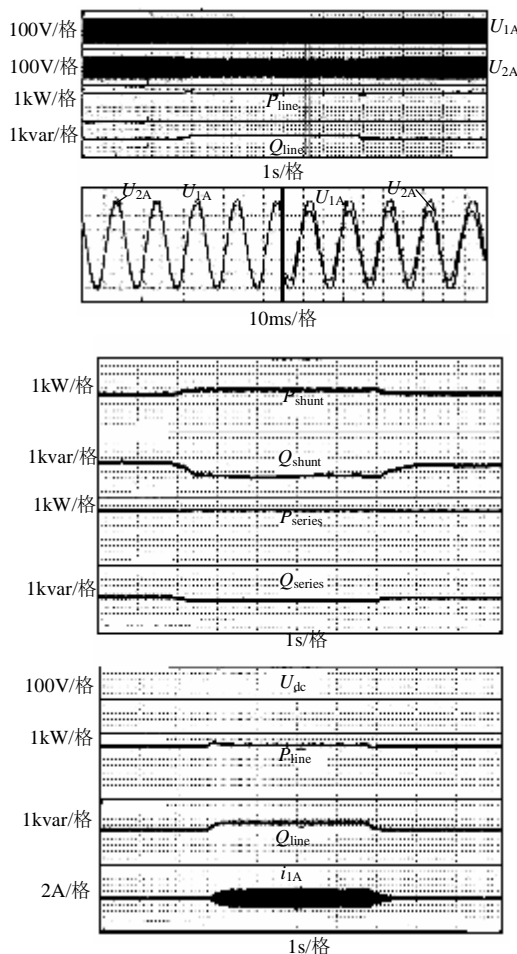


图 10 传输线路无功指令突变+1kvar 时 UPFC 的响应性能
Fig. 10 Performance of UPFC to step change in the line reactive power reference from zero to +1kvar and back

给定为 1kvar 时，系统响应时间大约 100ms，电压 U_{2A} 下降到 170V 与 U_{1A} 同相。并联侧输出大约 2kvar 的容性无功功率，串联侧输出大约 1kvar 的感性无功功率，使得传输线路上呈现容性无功功率，系统发送端输出的无功不变，从而维持 UPFC 输入端节点电压的稳定。并联整流器从系统中吸收 1kW 有功功率，保证了直流母线电压稳定，串联逆变器输出 0.5kW 有功功率，整个系统的损耗为 0.5kW。

如图 11 所示，在传输线路上的无功阶跃指令给定为-3kvar 时，电压 U_{2A} 增到 290V 与 U_{1A} 同相，此时传输线路上为感性无功，其中并联侧提供 2.4kvar 无功功率，串联侧输出大约 0.6kvar 无功功率，保证系统发送端输出的无功不变，从而维持 UPFC 输入端节点电压的稳定。并联整流器从系统中吸收 0.6kW 有功功率，保证了直流母线电压稳定，串联逆变器输出 0.2kW 有功功率，整个系统的损耗为 0.4kW。

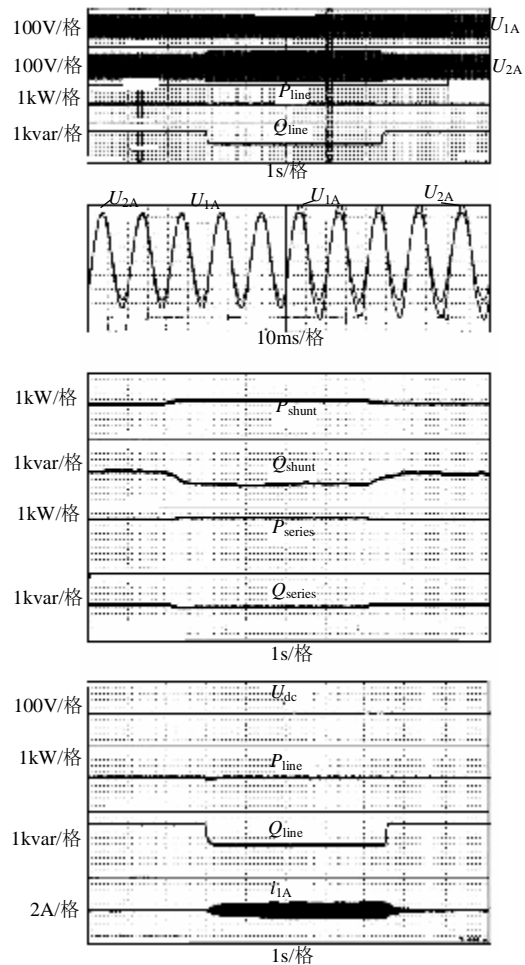


图 11 传输线路无功指令突变-3kvar 时 UPFC 的响应性能
Fig. 11 Performance of UPFC to step change in the line reactive power reference from zero to -3kvar and back

从上述实验结果可以看出: 采用文中所提的控制策略, 可以使得 UPFC 有较好的动态响应特性, 从而提高系统的稳定性。

4 结论

本文详细地阐述了 UPFC 控制系统的设计, 针对 UPFC 所要实现的功能进行了具体的分析, 对并联侧采用的双环解耦控制实现了暂态过程中 UPFC 输入端节点电压和直流母线电压的稳定, 对串联侧采用的三环解耦控制策略有效地控制了线路潮流的变化, 保证了系统有更好的稳态和动态效果。最后给出的采用本文控制策略的 UPFC 实验结果, 证明了文中所提的控制策略可以保证 UPFC 有更好的稳态和动态性能。

参考文献

- [1] 黄振宇, 刁勤华, 倪以信, 等. 统一潮流控制器的控制系统分析及控制策略设计[J]. 电网技术, 1999, 23(7): 3-9.
Huang Zhenyu, Diao Qinhu, Ni Yixin, Chen Shousun, et al. UPFC control system analysis and control strategy design[J]. Power System Technology, 1999, 23(7): 3-9(in Chinese).
- [2] 葛敏辉, 石松奇, 周贵兴, 等. UPFC 控制器设计原理及方案 [J]. 电网技术, 2000, 24(6): 31-33.
Ge Minhui, Shi Songqi, Zhou Guixing, et al. Control method of UPFC equipment[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 31-33(in Chinese).
- [3] 李浩昱, 李兰英, 李霄燕, 等. 具有能量缓冲的统一潮流控制器及其控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 9-13.
Li Haoyu, Li Lanying, Li Xiaoyan, Zhang Fuen, et al. The study on UPFC with energy snubber and its control[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 9-13(in Chinese).
- [4] 李浩昱, 吴建强. 模糊神经网络在能量缓冲统一潮流控制器中应用的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 83-88.
Li Haoyu, Wu Jianqiang. Study on UPFC with energy snubber and its fuzzy neural network control[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 83-88(in Chinese).
- [5] 王晶, 陈学允. UPFC 对动态电能质量影响的分析研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1): 44-48.
Wang Jing, Chen Xueyun. Study of the impacts of UPFC on dynamic power quality[J]. Transactions of china electrotechnical society, 2004, 19(1): 44-48(in Chinese).
- [6] I Papič, P Žunko, D Povh, M Weinhold. Basic Control of Unified Power Flow Controller[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1997, 12(4): 1734-1739.
- [7] S Kannan, Shesha Jayaram, M M A Salama. Real and Reactive power Coordination for a Unified Power Flow Controller[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2004, 19(3): 1454-1461(in Chinese).
- [8] 王官洁, 徐国禹, 颜伟, 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.
Wang Guanjie, Xu Guoyu, Yan Wei, 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(in Chinese).
- [9] 鞠儒生, 陈宝贤, 邱晓刚, 等. UPFC 控制方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 60-65.
Ju Rusheng, Chen Baoxian, Qiu Xiaogang, et al. Basic control of unified power flow controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 60-65(in Chinese).
- [10] Hideaki Fujita, Yasuhiro Watanabe, Hirofumi Akagi. Transient analysis of a unified power flow controller and its application to design of the DC-link capacitor[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2001, 16(5): 735-740.
- [11] L Dong, M L Crow, Z Yang, et al. A reconfigurable facts system for university laboratories[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2004, 19(1): 120-128.
- [12] Round S D, Yu Q, Norum L E, Undeland T M. Performance of a unified power flow controller using a d-q control system[C]. AC and DC Power Transmission Conference, London, UK, 1996: 357-362.
- [13] Amir H. Norouzi, A. M. Sharaf. A novel control scheme for the STATCOM stability enhancement[C]. IEEE-PES, 2003: 24-29.
- [14] Amir H Norouzi, A MSharaf. Two control schemes to enhance the dynamic performance of the STATCOM and SSSC[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2005, 20(1): 435-442.

收稿日期: 2006-03-21。

作者简介:

刘黎明(1975—), 男, 博士研究生, 目前主要研究方向为电力电子变换和控制技术, hyt_llm@sohu.com;

康 勇(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 目前主要研究方向为电力电子技术以及电源系统自动化;

陈 坚(1935—), 男, 教授, 博士生导师, 目前主要研究方向为高频 PWM 电力变换器最优控制理论及应用技术、现代电力电子技术在电力系统中的应用;

朱鹏程(1977—), 男, 博士研究生, 目前主要研究方向为电力电子变换和控制技术;

刘小园(1976—), 男, 硕士研究生, 目前主要研究方向为电力电子变换和控制技术。

(责任编辑 喻银凤)