

基于节点电流注入法的 UPFC 潮流控制新方法研究

陈业飞¹, 李林川¹, 张芳¹, 李传栋²

(1. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

摘要:提出了一种基于节点电流注入法的改进的统一潮流控制器潮流控制的新方法:串联侧基于电流预测法实现对线路有功、无功功率的控制,并联侧用无功注入电流控制母线电压。利用电力系统综合程序(PSASP)的用户程序接口(UPI)功能,用C++语言编写了UPFC潮流控制模型的用户程序,与潮流程序交替求解,实现UPFC的控制功能。通过算例验证了该方法的正确性及有效性。所建模型无需改变UPFC两侧接入点的节点类型,控制灵活;基于节点电流注入法的思想对柔性交流输电系统控制器与其他商业软件的接口有借鉴意义。

关键词:节点电流注入法;统一潮流控制器;电流预测法;潮流控制;PSASP/UPI

Study on novel power flow control method of UPFC based on bus current-injection

CHEN Ye-fei¹, LI Lin-chuan¹, ZHANG Fang¹, LI Chuan-dong²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China;

2. Electric Power Research Institute of Fujian Provincial Power Co., Ltd, Fuzhou 350007, China)

Abstract: A novel UPFC control method based on current-injection method is proposed. In the series side the active and reactive power control of the transmission line is realized based on current prediction, and the reactive injected current of the shunt side is used to control the bus voltage. Based on the user program interface (UPI) function of power system analysis software package (PSASP), the power flow control model of UPFC is established by user program, written in C++ language, which runs alternatively with load flow (LF) program in order to activate the control of UPFC. The accuracy and validity of the proposed model are verified through case-study. No change of the bus type is needed in the proposed model, which makes the control flexible. Furthermore, the concept of current injection is instructive for the access of flexible AC transmission system (FACTS) controllers to other business software.

Key words: bus current-injection method; UPFC; current prediction; power flow control; PSASP/UPI

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0069-06

0 引言

统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)^[1]作为功能最强大的柔性交流输电系统(Flexible AC Transmission System, FACTS)^[2]装置,可以通过控制输电系统的三大参数(电压、线路阻抗以及相角)实现对系统电压和潮流的控制^[3],达到优化系统的作用。

目前建立UPFC的潮流控制模型时主要采用解耦控制法^[4]。线路有功和无功功率可分别由串联注入电压的q轴和d轴分量控制^[5-8],或通过交叉耦合进行控制^[9-11]。并联接入点电压与直流电容电压可近似由并联变流器等效注入电压的模值和相角分别控制^[5-6],或通过双环解耦进行控制^[11-12]。

对含UPFC的系统进行潮流计算时,常采用等效功率注入法^[13-16],将UPFC对潮流的控制作用转移到所在线路的两个节点上;在用牛顿-拉夫逊法求解含控制目标的潮流方程时,需修改传统潮流方程的雅可比矩阵^[13];若UPFC两侧节点分别被指定为PV、PQ节点,可直接应用传统潮流计算方法求解,但该模型仅适用于电压、有功和无功功率同时需要控制的情况^[16]。

为了减少编程工作量,文献[17-18]基于商业软件PSASP(Power System Analysis Software Package, PSASP)建立了UPFC的潮流控制模型,但文献[17]直接将UPFC用等值发电机来表示;文献[18]忽略了串联侧变压器的阻抗;文献[19]将UPFC的并联侧接入到PV节点,仅对潮流进行控制。为了弥补目前

研究中的不足, 本文基于节点电流注入法, 利用 PSASP 的 UPI(User Program Interface, UPI)功能建立了 UPFC 的潮流控制模型; 但分析可知, 此时若直接采用串联注入电压控制线路的潮流, 会导致计算出的节点注入电流过大而使得收敛性变差。

因此, 本文对传统利用串联注入电压控制线路潮流的方法进行了改进, 提出一种新的控制方法, 串联侧通过电流预测法^[20]实现对线路有功、无功功率的控制。

1 UPFC 的基本原理

图 1 为 UPFC 的结构示意图, UPFC 加在线路 s-r 的首端, m 为新增母线节点, 并、串联变流器分别通过变压器 T1、T2 接入母线 s 和线路 s-r。

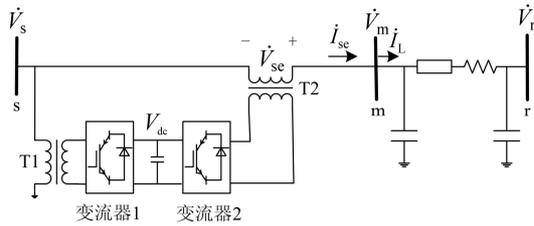


图 1 UPFC 的基本结构

Fig. 1 Basic structure of UPFC

串联侧通过向所接线路叠加一个幅值和相位均可控电压来控制线路潮流。并联侧向串联侧提供所需的有功功率, 维持直流电容电压恒定, 并通过与系统交换无功功率稳定并联接入点电压^[21]。

进行系统分析时, UPFC 可用图 2 所示的等值电路来表示。

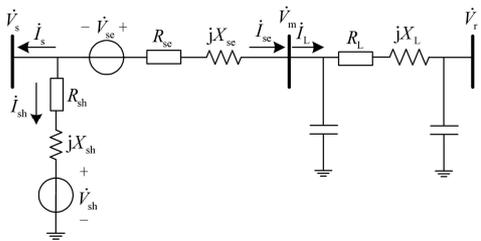


图 2 UPFC 的电压源等值电路

Fig. 2 Equivalent voltage source circuit of UPFC

图中, \dot{V}_{sh} 、 \dot{I}_{sh} 和 \dot{V}_{sc} 、 \dot{I}_{sc} 分别为并、串联变流器等效电压、注入电流; R_{sh} 、 X_{sh} 和 R_{sc} 、 X_{sc} 分别为变压器 T1 和 T2 的电阻、电抗。

2 基于节点电流注入法的 UPFC 潮流模型

由图 2 得 UPFC 的电流源等值电路如图 3 所示。

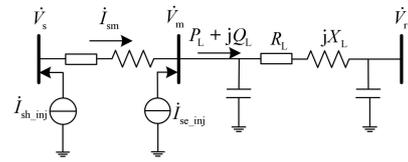


图 3 UPFC 的电流源等值电路

Fig. 3 Equivalent current source circuit of UPFC

图中, $\dot{I}_{sm} = (\dot{V}_s - \dot{V}_m) / (R_{sc} + jX_{sc})$, $\dot{I}_{sc_inj} = \dot{V}_{sc} / (R_{sc} + jX_{sc})$, $\dot{I}_{sh_inj} = \dot{I}_{sh} - \dot{I}_{sc_inj}$ 。

基于节点电流注入法建立 UPFC 的数学模型时, 关键是求出串、并联侧的注入电流 $\dot{I}_s = -(\dot{I}_{sh} + \dot{I}_{sc})$, $\dot{I}_m = \dot{I}_{sc}$ 。

2.1 UPFC 串联侧的数学模型和控制策略

设 UPFC 的两个变流器均采用正弦脉宽调制 (SPWM), 若只考虑基波分量, 则 UPFC 控制的关键是通过有效的方法得到串、并联变流器的脉宽调制比 m_{sc} 、 m_{sh} 和移相角 θ_{sc} 、 θ_{sh} 。

传统的控制方法多采用 \dot{V}_{sc} 的 q 轴分量 V_{sc_q} 和 d 轴分量 V_{sc_d} 分别控制线路的有功和无功率^[18]。采用电流注入法时, 需首先确定串联变流器注入电压 \dot{V}_{sc} , 然后根据式(1)求得串联侧注入电流。

$$\dot{I}_{sc} = \frac{\dot{V}_m + \dot{V}_{sc} - \dot{V}_s}{R_{sc} + jX_{sc}} \quad (1)$$

由于 \dot{V}_{sc} 须满足 $0 \leq |\dot{V}_{sc}| \leq V_{sc_max}$, 且 V_{sc_max} 相对较小, 因此 R_{sc} 和 X_{sc} 归算到系统侧后数值会很小, 当 \dot{V}_{sc} 变化时引起注入电流 \dot{I}_{sc} 较大改变, 导致控制参数整定困难且使潮流的收敛性变差。

因此, 本文对传统的控制策略进行了改进, 具体分析如下。

由图 3 可知, UPFC 的控制作用是通过向系统注入电流 \dot{I}_{sh_inj} 和 \dot{I}_{sc_inj} 实现的。由于 $R_{sc} \ll X_{sc}$, 忽略 R_{sc} 的影响, 则有

$$\dot{I}_{sc_inj} = \frac{\dot{V}_{sc}}{jX_{sc}} = \frac{V_{sc_d} + jV_{sc_q}}{jX_{sc}} = \frac{V_{sc_q}}{X_{sc}} - j \frac{V_{sc_d}}{X_{sc}} \quad (2)$$

由上述分析可见, UPFC 串联注入电压对系统潮流的控制作用是通过改变线路电流来实现的, 且 V_{sc_q} 主要影响线路电流的有功分量, V_{sc_d} 主要影响线路电流的无功分量。因而线路的有功和无功率分别与线路电流的有功和无功分量密切相关^[20]。

因此, 可首先根据线路潮流的控制目标预测串联注入电流即线路电流 \dot{I}_{sc} ^[20], 然后根据式(3)所示电压方程求得串联变流器注入电压 \dot{V}_{sc} , 继而确定

m_{sc} 和 θ_{sc} 。串联侧控制框图如图 4 所示, 其中, 预测环节由 PI 控制器来实现。

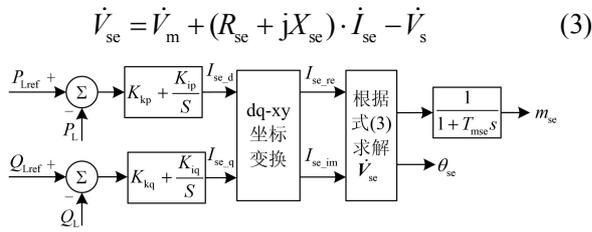


图 4 UPFC 串联侧控制框图

Fig. 4 Phasor diagram of the series side of UPFC

2.2 UPFC 并联侧的数学模型和控制策略

由瞬时功率理论, UPFC 并联侧从系统吸收的有功和无功功率如式(4)所示^[7]。

$$\begin{cases} P = V_{sd} \cdot I_{sh,d} + V_{sq} \cdot I_{sh,q} \\ Q = V_{sq} \cdot I_{sh,d} - V_{sd} \cdot I_{sh,q} \end{cases} \quad (4)$$

式中: V_{sd} 、 V_{sq} 分别为母线 s 电压的 d 轴、 q 轴分量; $I_{sh,d}$ 、 $I_{sh,q}$ 分别为并联变流器注入电流的 d 轴、 q 轴分量; P 、 Q 分别为并联侧吸收的有功和无功功率。由 \dot{V}_s 与 d 轴重合可得 $V_{sq} = 0$, $V_s = V_{sd}$ 。因此, 式(4)可转化为式(5)。

$$\begin{cases} P = V_s \cdot I_{sh,d} \\ Q = -V_s \cdot I_{sh,q} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知, 经过 dq 变换, UPFC 并联侧实现了有功和无功功率的解耦, 因此, 可以分别通过控制并联注入电流的 d 轴、 q 轴分量控制有功和无功功率。

由式(5)分析可知, 若 $I_{sh,q} > 0$, 则 $Q < 0$, UPFC 并联变流器发出无功, 提升受控母线电压; 若 $I_{sh,q} < 0$, 则 $Q > 0$, UPFC 并联变流器吸收无功, 降低受控母线电压。

根据以上分析, 采用 PI 控制的 UPFC 并联侧的潮流控制规律可表示为

$$I_{sh,q} = \left(K_{kv} + \frac{K_{iv}}{S} \right) (V_{sref} - V_s) \quad (6)$$

式中, K_{kv} 、 K_{iv} 分别为母线电压控制的比例、积分系数。

至此, 并联变流器等效电压 \dot{V}_{sh} 和注入电流 \dot{I}_{sh} 相量共 4 个变量, 可通过式(7)所示方程组求出。

$$\begin{cases} \dot{V}_s = \dot{V}_{sh} + (R_{sh} + jX_{sh}) \cdot \dot{I}_{sh} \\ I_{sh,q} = -I_{sh,re} \cdot \sin\theta_s + I_{sh,im} \cdot \cos\theta_s \\ \text{Re}[\dot{V}_{sh} \cdot \dot{I}_{sh}^*] = \text{Re}[\dot{V}_{se} \cdot \dot{I}_{se}^*] \end{cases} \quad (7)$$

其中, 第一个等式是并联侧的电压方程; 第二个等式是 $I_{sh,q}$ 的坐标变换公式; 第三个等式反映了潮流控制中 UPFC 并、串联侧的有功功率平衡关系, 其中 \dot{I}_{se} 和 \dot{V}_{se} 由 2.1 节所述方法求得。

并联变流器等效电压 \dot{V}_{sh} 求出后, 即可求得并联变流器的调制比 m_{sh} 和移相角 θ_{sh} 。

2.3 基于 PSASP 的用户接口程序

PSASP 是一套功能强大、使用方便的电力系统分析软件包, 其 UPI 功能可以使 PSASP 的潮流(LF)程序和用户程序(UP)通过接口文件传递数据, 交替运行, 共同完成一个计算任务^[18], 从而大大减少新程序开发的复杂性和工作量。本文利用 PSASP 的 UPI 功能, 用 C++语言编写了 UPFC 潮流控制模型的 UP, 与 LF 程序交替迭代, 直至收敛。

仿真过程中, 利用 UP 程序实现 UPFC 潮流控制模型的计算流程如图 5 所示。

其中, Numcall 为 UP 调用的次数; Markend 为潮流计算标志符, Markend=0 表示交替迭代已完成; Markend=1 则 LF 程序与 UP 继续迭代, 直至收敛。

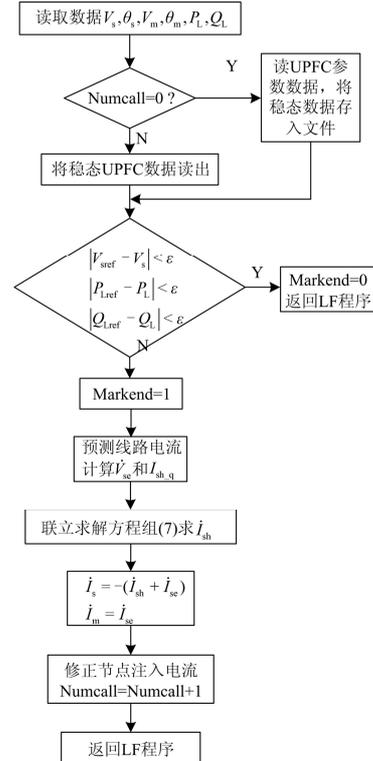


图 5 UPFC 稳态模型计算流程图

Fig. 5 Flow chart of steady-state model of UPFC

3 算例研究

采用新英格兰 39 节点系统验证本文所提模型的正确性和有效性。如图 6 所示, UPFC 安装在线

路 16-17 的 16 母线侧, 40 为新增母线节点, 线路 16-17 为受控线路, 节点 16 为受控母线, 母线 16 与母线 40 作为电流注入节点。

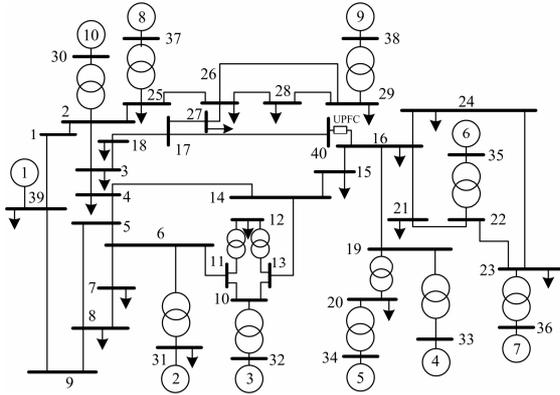


图 6 新英格兰系统
Fig. 6 New England system

UPFC 控制器的参数如下: 串联变流器注入电压最大值 $V_{se_max} = 0.1 \text{ p.u.}$, PI 控制器的参数为: $K_{kv} = 0.5$, $K_{iv} = 5$, $K_{kp} = 0.01$, $K_{ip} = 0.75$, $K_{kq} = -0.01$, $K_{iq} = -0.5$ 。

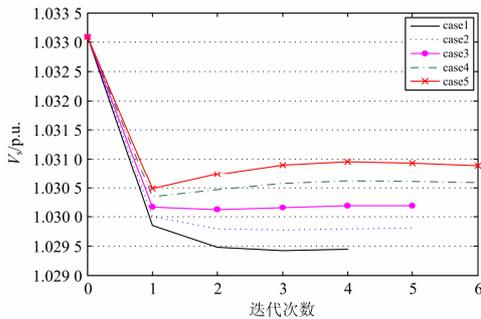
未安装 UPFC 时, 线路潮流 $P_L = 2.049 \text{ p.u.}$, $Q_L = -0.4185 \text{ p.u.}$, 母线 16 处的电压 $V_s = 1.0333 \text{ p.u.}$ 。加入 UPFC 之后, 设定 $V_{sref} = 1.03 \text{ p.u.}$, $Q_{Lref} = 0$; 改变受控线路有功功率目标值 P_{Lref} , 进行潮流计算, 控制精度为 10^{-3} 。潮流结果如表 1 所示。

由表 1 可知, UPFC 可以很好地跟踪控制目标。当线路有功功率目标值 P_{Lref} 调整到 3.22 p.u. 时, UPFC 串联变流器的注入电压接近最大值, 此时线路上传输的有功功率相对于不加 UPFC 时增加了 57.15% 。潮流计算过程中, 表 1 所述五种情况下, UPFC 接入点电压、线路有功和无功功率随迭代次数的变化曲线如图 7 所示, 其中, 迭代次数为潮流计算过程调用 UP 的次数。

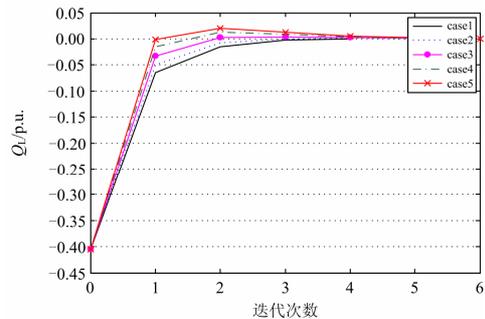
表 1 含 UPFC 的 39 节点系统的潮流

Table 1 Power flow of 39-node system with UPFC

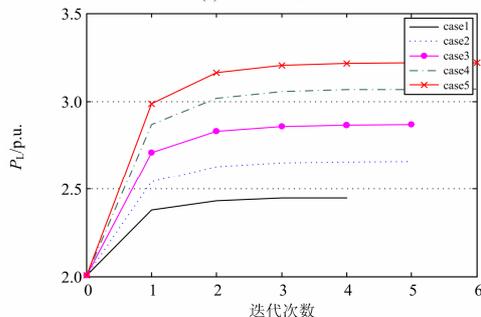
算例	控制目标			控制结果			控制量
	P_{Lref}	Q_{Lref}	V_{sref}	P_L	Q_L	V_s	\dot{V}_{se}
case1	2.45	0	1.03	2.449 2	-0.000 52	1.029 4	$0.0357 \angle 66.11^\circ$
case2	2.66	0	1.03	2.659 6	0.000 19	1.029 8	$0.0517 \angle 75.07^\circ$
case3	2.87	0	1.03	2.869 5	0.000 58	1.030 2	$0.0684 \angle 79.47^\circ$
case4	3.07	0	1.03	3.069 9	0.000 35	1.030 6	$0.0847 \angle 81.84^\circ$
case5	3.22	0	1.03	3.219 9	0.000 49	1.030 9	$0.0970 \angle 82.97^\circ$



(a) 母线 16 电压变化曲线



(c) 线路 40-17 有功功率变化曲线



(b) 线路 40-17 有功功率变化曲线

图 7 母线电压及被控线路功率变化曲线

Fig. 7 Curves of bus voltage and the controlled line load

由图 7 可知, 当控制精度为 10^{-3} 时, 只需经过 4~6 次迭代即可达到控制目标, 收敛速度快。仿真结果表明, 在本文所采用的控制策略下, UPFC 具有良好的潮流控制调节特性。

4 结语

本文对传统的潮流控制方法进行了改进, 利用

PSASP 建立了 UPFC 的潮流控制模型, 并通过算例验证了所提控制方法的正确性和有效性。该控制方法具有以下优点:

(1) 基于电流预测法控制线路的有功和无功功率, 潮流的收敛性好; 利用并联无功注入电流控制并联接入点电压, 控制效果好。

(2) 采用节点电流注入法, 在潮流控制过程中, 无需改变 UPFC 两侧接入点的节点类型, 控制简单灵活; 基于节点电流注入的思想对 FACTS 器件与其他商业软件的接口有借鉴意义。

参考文献

- [1] Hingorani N G, Gyugyi L. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems[M]. New York: IEEE Press, 2000: 297-333.
- [2] 黄柳强, 郭剑波, 卜广全, 等. FACTS 协调控制研究进展及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 138-147.
HUANG Liu-qiang, GUO Jian-bo, BU Guang-quan, et al. Research progress and prospect of FACTS coordinated control[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 138-147.
- [3] 李秋文, 李啸骢, 邓裕文, 等. 基于目标全反馈的统一潮流控制器非线性控制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 83-90.
LI Qiu-wen, LI Xiao-cong, DENG Yu-wen, et al. Nonlinear control design for UPFC based on NCOHF[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 83-90.
- [4] 杨勇, 阮毅, 吴国祥, 等. 基于 DPWM1 的无差拍解耦控制的三相并网逆变器[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 101-107.
YANG Yong, RUAN Yi, WU Guo-xiang, et al. Deadbeat decoupling control of three-phase grid-connected inverters based on DPWM1[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 101-107.
- [5] 孙海顺, 马凡, 刘黎明, 等. 一种 UPFC 模糊 PI 自整定控制[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 136-142.
SUN Hai-shun, MA Fan, LIU Li-ming, et al. An UPFC fuzzy PI self-tuning control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(9): 136-142.
- [6] 马凡, 谷双魁, 刘黎明, 等. UPFC 控制及动态特性实验研究[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 64-69.
MA Fan, GU Shuang-kui, LIU Li-ming, et al. Experimental study on control and dynamic characteristic of UPFC[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 64-69.
- [7] 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.
- [8] 侯丽, 刘琦, 鲁宝春. UPFC 控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(9): 51-54.
HOU Li, LIU Qi, LU Bao-chun. Controller design for UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(9): 51-54.
- [9] 刘黎明, 康勇, 陈坚, 等. UPFC 的交叉耦合控制及潮流调节能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 42-48.
LIU Li-ming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Cross-coupling control scheme and performance analysis for power flow control of UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 42-48.
- [10] 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 Ru-sheng, CHEN Bao-xian, QIU Xiao-gang, et al. Basic control of unified power flow controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 60-65.
- [11] LIU Li-ming, ZHU Peng-cheng, KANG Yong, et al. Power-flow control performance analysis of a unified power-flow controller in a novel control scheme[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(3): 1613-1619.
- [12] 章勇高, 康勇, 刘黎明, 等. 统一潮流控制器并联变换器的改进型双环控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 40-46.
ZHANG Yong-gao, KANG Yong, LIU Li-ming, et al. Improved double close-loop control system for shunt inverter of UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 40-46.
- [13] 吴捷, 王建. 基于 UPFC 的灵活交流输电潮流控制计算[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 3-6.
WU Jie, WANG Jian. The computation of power flow of flexible AC transmission system with UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 3-6.
- [14] 王韶, 刘光时, 邹青林. 计及 UPFC 的电力系统多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 95-100.
WANG Shao, LIU Guang-shi, ZOU Qing-lin. Multi-objective reactive power optimization incorporating

- UPFC[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 95-100.
- [15] 童强, 彭建春. 一种新的含 UPFC 的电力系统潮流算法[J]. 继电器, 2006, 34(2): 20-23.
TONG Qiang, PENG Jian-chun. A novel method for power flow calculation of power system with UPFC[J]. Relay, 2006, 34(2): 20-23.
- [16] 万波, 张焰. 一种新的 UPFC 潮流计算模型[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(12): 25-28.
WAN Bo, ZHANG Yan. A new UPFC model for power flow analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(12): 25-28.
- [17] 张扬, 毛雪雁, 徐政. 用于电网稳态和暂态分析的统一潮流控制器模型[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 30-33.
ZHANG Yang, MAO Xue-yan, XU Zheng. UPFC models for power system steady-state and dynamic analysis[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 30-33.
- [18] 刘前进, 黎雄, 孙元章. 基于 PSASP 程序的 FACTS 潮流建模[J]. 电网技术, 2000, 27(7): 6-9.
LIU Qian-jin, LI Xiong, SUN Yuan-zhang. Power flow modeling of FACTS based on PSASP[J]. Power System Technology, 2000, 27(7): 6-9.
- [19] 姚蜀军, 宋晓燕, 汪燕. 基于 PSASP 的统一潮流控制器潮流建模与仿真[J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(5): 11-16.
YAO Shu-jun, SONG Xiao-yan, WANG Yan. Power flow modeling of unified power flow controller based on power system analysis software package (PSASP)[J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(5): 11-16.
- [20] 杨勇, 赵方平, 阮毅, 等. 三相并网逆变器模型电流预测控制技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 153-159.
YANG Yong, ZHAO Fang-ping, RUAN Yi, et al. Model current predictive control for three-phase grid-connected inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 153-159.
- [21] 陈柏超, 曾永胜, 刘俊博, 等. 基于 Sen Transformer 的新型统一潮流控制器的仿真与实验[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 233-238.
CHEN Bai-chao, ZENG Yong-sheng, LIU Jun-bo, et al. Simulation and experimental research of a novel unified power flow controller based on Sen Transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 233-238.

收稿日期: 2013-05-02; 修回日期: 2013-06-22

作者简介:

陈业飞(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化, 灵活交流输电系统控制方法; E-mail: chyfd@163.com

李林川(1948-), 男, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统优化, 电力市场, 人工智能在电力系统中的应用;

张芳(1972-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向为电力系统电压稳定性控制, 灵活交流输电系统控制方法。