

· 电网技术 ·

## UPFC 抑制电网强迫振荡研究

陈 琼, 蒋 平

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**为了抑制电网系统强迫振荡,首先通过整定合理统一潮流控制器(UPFC)主控制器参数,利用UPFC自身的动态控制作用提高系统阻尼水平;然后在其主控制器中加入辅助控制器,通过跟踪强迫振荡功率波动量并输出反相功率波对其进行抵消,从而进一步提高系统阻尼,增强UPFC对系统强迫振荡的抑制能力。在PSASP仿真平台中搭建模型,验证了所提UPFC主控制器及辅助控制器能有效抑制系统区域间联络线上的强迫振荡,从而尽可能减小强迫振荡对系统造成的损害。

**关键词:**强迫振荡;统一潮流控制器;振荡平抑;辅助控制器

**中图分类号:** TM711

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)02-0056-05

### 0 引言

随着经济的快速发展和电网规模不断扩大,近年来,我国许多区域电网发生了大范围的低频振荡,振荡频率特别低,范围较广,持续时间长。这些振荡均不符合现有的经典负阻尼机理低频振荡理论<sup>[1,2]</sup>。针对这一现象,许多学者提出了基于强迫共振机理的低频振荡理论<sup>[3-5]</sup>。该理论指出,当扰动源频率与系统固有频率相近时,会引发系统大规模的强迫功率振荡,且这种振荡将会给电力系统带来巨大危害<sup>[6-8]</sup>。

为了减小强迫振荡带来的负面影响,目前现有的方法主要有:利用辨识和定位技术得到强迫振荡的扰动源所在位置<sup>[9]</sup>,并将其切除;解列机组或切换原动机控制方式<sup>[6,7]</sup>;采用电力系统稳定器直接抑制强迫振荡<sup>[8]</sup>等。但现有的辨识定位技术不成熟,定位不够准确,给切除扰动源带来了一定的困难;解列机组或切换控制方式需要人工操作,速度较慢,无法及时应对启振迅速的强迫振荡问题。电力系统稳定器能够自动抑制系统中的强迫振荡,但是其一般只能装设在原动机侧,因此对于区域间或联络线上的强迫振荡抑制效果不佳。

统一潮流控制器(UPFC)作为目前功能最全面的柔性交流输电系统(FACTS)设备,具备电压调节、串联补偿和移相等多项功能,可以快速控制输电线路中的有功功率和无功功率。此外,当采用合理的控制方法时,UPFC还能提高系统阻尼水平<sup>[10]</sup>,从而抑制系统中的低频振荡<sup>[11]</sup>,具有强大的调节能力和广阔的应用前景。本文首先分析了强

迫振荡的机理特性以及UPFC抑制强迫振荡的原理,并整定了合理的UPFC主控制器参数,利用UPFC自身的动态特性提高系统阻尼比以抑制强迫振荡;然后在UPFC主控制器中加入辅助控制器,进一步挖掘UPFC对强迫振荡的抑制能力。该方法利用线路中现有的FACTS设备配合辅助控制器,能对系统区域间联络线上的强迫振荡起到较为明显的抑制作用,具有一定的研究意义。

### 1 电力系统强迫振荡特性分析

在典型单机无穷大系统中,参照机械运动学原理,可列出发电机经典二阶运动方程<sup>[4,12,13]</sup>,并对其进行线性化,可以得到:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\delta}{dt} = \omega_0\Delta\omega \\ T_J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_T - \Delta P_e - K_D\Delta\omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_T$ 表示发电机机械功率; $P_e$ 表示发电机电磁功率; $K_D$ 表示发电机阻尼系数,与发电机励磁绕组及各阻尼绕组有关,一般为正实数。为分析方便,此处假设发电机机械功率保持恒定,因此 $\Delta P_T=0$ 。

假设此时系统中出现一强迫振荡功率扰动源 $\Delta P_d$ ,则发电机电磁功率可以表示为:

$$\Delta P_e = K_S\Delta\delta + \Delta P_d \quad (2)$$

式中: $K_S$ 为同步系数。将式(2)代入式(1),可得:

$$\frac{T_J}{\omega_0} \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + \frac{K_D}{\omega_0} \frac{d\Delta\delta}{dt} + K_S\Delta\delta = -\Delta P_d \quad (3)$$

式(3)为二阶非齐次常系数微分方程,求解该方程可得 $\Delta\delta$ 稳态响应的幅值表达式为:

$$M = \frac{-\Delta P_d}{K_S \sqrt{(1-\nu^2)^2 + (2\zeta\nu)^2}} \quad (4)$$

收稿日期:2016-12-08;修回日期:2017-02-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51577032)

式中:  $\nu = \omega/\omega_n$ , 表示频率比;  $\zeta = K_D/2\omega_n T_J$ , 表示系统阻尼比;  $\omega_n = \sqrt{\omega_0 K_S/T_J}$ , 表示系统的固有振荡频率。从式(4)中可以得出:(1) 系统响应幅值与强迫振荡功率扰动源  $\Delta P_d$  的幅值成正比。(2) 系统阻尼比越小, 系统启振难度越低, 系统的响应幅值越大。(3) 扰动源频率越接近系统固有频率, 系统的响应幅值越大。因此, 在扰动源一定的情况下, 提高系统的阻尼比能使得强迫振荡的振幅大幅衰减。

## 2 UPFC 主控制器抑制系统强迫振荡原理

以下采用单机无穷大系统研究 UPFC 抑制系统强迫振荡原理, 系统结构如图 1 所示。

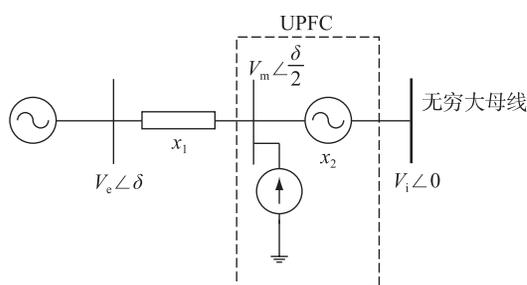


图1 含UPFC的单机无穷大系统结构

Fig.1 Structure of single machine infinite system with UPFC

在图1中, 为了简化分析, 将UPFC等效成一个串联的电压源和并联的电流源<sup>[14]</sup>。假设并联侧控制所在母线电压水平为  $V_m \angle \delta/2$ 。为方便后文推导和表示, 可假设  $|V_e| = |V_i| = V$ , 并设发电机输出功率保持不变, 则转子角的机械运动方程线性化后如下:

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = -\Delta P_e \quad (5)$$

式中:  $M$  为发电机惯性时间常数。发电机输出功率为:

$$P_e = \frac{V V_m}{x_2} \sin \frac{\delta}{2} \quad (6)$$

式中:  $x_2$  为线路阻抗。将式(6)代入式(5)并进行线性化, 可得:

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = - \left( \frac{\partial P_e}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial P_e}{\partial V_m} \Delta V_m + \frac{\partial P_e}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \Delta \delta \right) \quad (7)$$

考虑发电机端电压保持不变, 因此等号右边与  $\Delta V$  有关的项可令为 0, 将式(7)整理为:

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{\partial P_e}{\partial V_m} \Delta V_m + \frac{\partial P_e}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \Delta \delta = 0 \quad (8)$$

式(8)中, 第二项体现了UPFC设备并联侧对线路电压的控制, 而第三项则反映了串联侧对线路

潮流的调控能力。此时若先假设UPFC工作在恒电压和恒阻抗的模式下, 则式(8)的中间两项可视为 0, 即可化为:

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \Delta \delta = 0 \quad (9)$$

式(9)可以看成系统的特征方程, 此时特征根为一对共轭纯虚根, 表明系统处于临界稳定零阻尼状态。

由此可知, 如果在串联侧和并联侧的控制器中采用合适的参数, 使UPFC不工作在恒电压和恒阻抗模式下, 则式(8)第二项和第三项不为零, 即可构造出形如  $s^2 + 2\zeta s + \omega_n^2 = 0$  的特征方程。当特征方程的解落在左半平面, 系统模态呈现为正阻尼。调节UPFC对应的控制器参数大小, 能够改变解的位置, 从而对系统阻尼特性做出贡献。

提高系统的阻尼比能减小系统中强迫振荡的振幅, 因此, 当采用合理的控制方法和参数时, UPFC依靠自身的动态控制作用提高系统阻尼比, 从而对强迫振荡起到一定抑制作用。

## 3 含辅助控制器的UPFC复合控制器抑制系统强迫振荡方法

在实际应用过程中, UPFC主要用于调节线路潮流和稳定节点电压, 其控制器及控制策略一般以稳态结果为优先, 仅依靠UPFC自身的动态调节性能对系统强迫振荡的抑制效果并不理想; 且UPFC的主控制器能够调节的参数有限, 无法针对强迫振荡的特点进行优化。为进一步挖掘UPFC对系统阻尼的调节能力, 运用电力系统稳定器(PSS)的原理<sup>[15-17]</sup>, 根据强迫振荡的振荡特点设计了一个辅助控制器, 并与UPFC主控制器配合进行复合控制。

### 3.1 UPFC主控制器及辅助控制器复合结构

辅助控制器一般由增益环节, 隔直环节, 相位补偿环节等数个环节构成, 其结构如图2所示。

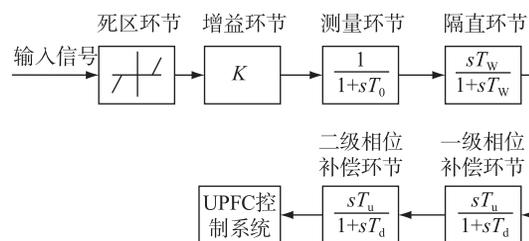


图2 辅助控制器结构

Fig.2 Structure of damping controller

辅助控制器的输入信号一般可选为线路功率、线路电压、功角等。此处可以选择联络线功率作为输入, 用以跟踪系统中的强迫振荡功率波动量, 该

输入信号通过相位补偿环节的移相作用,输出一个与波动量反相的功率量并叠加到 UPFC 的稳态调节基准值上,从而抵消强迫振荡的振荡功率,以抑制系统中的强迫振荡。

根据上述分析,可以得到在 UPFC 主控制器中加入辅助控制器的复合控制器结构,如图 3 所示。

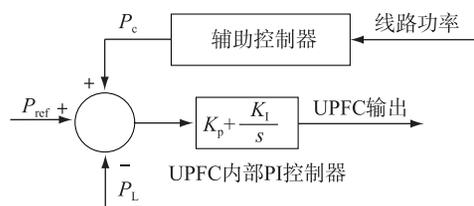


图 3 UPFC 主控制器及辅助控制器的复合结构

Fig.3 Composite structure of main controller of UPFC and the auxiliary controller

### 3.2 辅助控制器的参数整定方法

辅助控制器的各项参数应满足下式:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = 180^\circ - \varphi_s \\ \alpha = \frac{T_2}{T_1} = \frac{1 - \sin(\varphi/m)}{1 + \sin(\varphi/m)} \\ T_1 = \frac{\sqrt{\alpha}}{\omega} \\ T_2 = \frac{T_1}{\alpha} \end{array} \right. \quad (10)$$

式中: $\varphi$  表示每一级相位补偿环节的理想补偿相角; $m$  表示补偿环节个数,在图 2 所示的辅助控制器中, $m=2$ 。此外,为了方便参数的整定,两级相位补偿环节的时间常数  $T_1, T_2$  一般保持一致。

为使辅助控制器能够满足反相功率抵消强迫振荡的要求,按照以下步骤进行参数整定:

(1) 对系统进行小干扰分析,得到该系统主要的振荡模式及相关参数,选取研究对象。

(2) 测量并计算接入 UPFC 处至区域间联络线的系统功率滞后相角  $\beta$ 。

(3) 确定辅助控制器超前滞后环节的参数,保证  $\beta + \alpha = 180^\circ$ ,使得辅助控制器产生与振荡功率波形反相的对称波形并互相抵消。

(4) 对辅助控制器的增益  $K$  进行整定,增益过小,能量降低不明显,达不到较好的抑制效果;增益过大,则会过调,系统无序振荡,增加调控难度。因此需要根据系统小干扰分析结果以及强迫振荡幅值改善情况最终确定合理的增益。

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真平台及系统结构

本文采用 IEEE 典型四机两区系统在 PSASP 仿

真平台对控制方法进行仿真验证。图 4 为 IEEE 典型四机两区系统的结构。

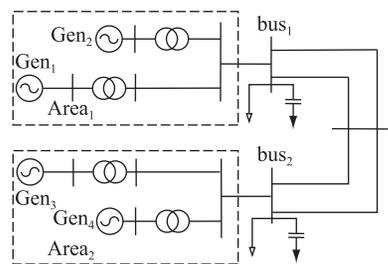


图 4 四机两区系统结构

Fig.4 Structure of four-machines and two areas system

首先对此系统进行小干扰分析,获取其振荡模态,包括固有频率和阻尼比等信息,如表 1 所示。

表 1 四机两区系统原始模态信息

Table 1 Original mode information of four-machines and two areas system

编号	频率/Hz	阻尼比/%	最大相关机组
1	1.291 68	1.759 64	Gen_2
2	1.287 55	1.776 04	Gen_4
3	0.646 817	0.836 05	Gen_3

从表 1 中可以看出,模态 1 和模态 2 属于区域内靠近发电机侧的振荡模态,而模态 3 则属于区域间联络线上的振荡模态。

### 4.2 UPFC 主控制器抑制系统强迫振荡效果

为验证 UPFC 控制器对系统区域间联络线上由周期性负荷波动诱发的强迫振荡的抑制效果,先将 UPFC 装设在图 4 中的 bus1 上,利用第二节所述原理,结合常规的 PI 控制参数整定方法确定 UPFC 的控制参数;再向该母线持续施加频率为 0.64 Hz,幅值为 0.2 p.u. 的有功功率扰动,扰动开始时间为仿真时间的第 5 s,以激发四机两区系统中模态 3 对应的强迫振荡。

观察此时 bus1 处联络线上的有功功率变化情况,并与未接入 UPFC 时的情况比较,如图 5 所示。

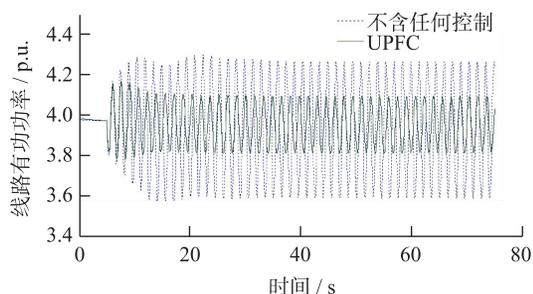


图 5 模态 3 对应的联络线强迫振荡抑制

Fig.5 Suppressing forced oscillation on the tie-line of mode 3

从图 5 中可以看出,当未接入 UPFC 时,系统大

约经过 15 s 进入稳态强迫振荡,其幅值为 0.337 0 p.u.;而接入 UPFC 以后,在 UPFC 正阻尼效应的作用下,系统经过约 5 s 进入稳态强迫振荡,且稳态的线路有功功率波动的幅值为 0.139 8 p.u.,约衰减至未接入 UPFC 时的 41.48%。由此可知 UPFC 的接入对系统的阻尼特性产生了影响,通过提高模态阻尼比,对系统中的强迫振荡起到了一定抑制作用。但是抑制效果不够理想。

### 4.3 UPFC 主控制器及辅助控制器抑制系统强迫振荡效果

在 UPFC 主控制器中加入辅助控制器进行复合控制,并整定辅助控制器各项参数,如表 2 所示。

表 2 辅助控制器参数

Table 2 Parameters of auxiliary controllers

环节名称	增益环节	测量环节	隔直环节	补偿环节	
参数名称	$K$	$T_0$	$T_w$	$T_u$	$T_d$
参数数值	1.58	0.005	5	0.021	0.665

在 bus1 上持续施加与前文一致的扰动源,频率为 0.64 Hz,幅值为 0.2 p.u.。图 6 展示了系统未接入 UPFC、仅接入 UPFC 和接入 UPFC 及辅助控制器 3 种情况下联络线的强迫振荡的抑制效果。

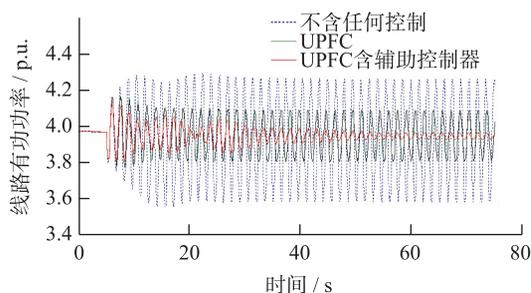


图 6 含辅助控制器模式 3 对应的联络线强迫振荡抑制

Fig.6 Suppressing forced oscillation on the tie-line of mode 3 with damping controller

在利用 UPFC 及辅助控制器对系统进行复合控制时,系统大约经过 45 s 进入稳态强迫振荡,其幅值约为 0.018 87,约衰减至未接入 UPFC 时的 5.598%;与未接入 UPFC 和仅接入 UPFC 2 种情况相比,UPFC 及辅助控制器对系统中的强迫振荡产生了更为明显的抑制效果。说明辅助控制器的加入能较好地改善系统阻尼水平,有效提高了 UPFC 整体抑制系统强迫振荡的能力。

## 5 结语

本文从强迫振荡的振荡特性出发,分析了 UPFC 控制器改善系统阻尼水平的原理,整定了合理的 UPFC 主控制器参数,并在 PSASP 仿真平台上搭建含有 UPFC 的四机两区仿真模型,仿真结果表

明;该控制器能对系统区域间联络线上的强迫振荡产生一定的抑制效果,但仍不足以保证系统在发生强迫振荡时能够安全稳定运行。而在 UPFC 的主控制器中加入辅助控制器后,仿真结果表明:相比于未配备辅助控制器的 UPFC 抑制效果而言,能够较准确地跟踪系统功率波动,有效抑制强迫振荡,从而尽可能减小强迫振荡对系统造成的损害。

### 参考文献:

- [1] 李兆伟,方勇杰,李 威,等. 电力系统强迫振荡研究综述[J]. 华东电力, 2013, 41(6):1188-1193.  
LI ZhaoWei, FANG Yongjie, LI Wei et al. Study on forced oscillation of power system[J]. East China Electric Power, 2013, 41(6): 1188-1193.
- [2] 董明齐,刘文颖,袁 娟,等. 基于增加联络线的互联电网低频振荡抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17):94-99.  
DONG Mingqi, LIU Wenying, YUAN Juan et al. Research on low frequency oscillation suppression of interconnected power grid based on increased connection line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(17): 94-99.
- [3] 汤 涌. 电力系统强迫功率振荡的基础理论[J]. 电网技术, 2006, 30(10):29-33.  
TANG Yong. Fundamental theory of forced power oscillation in power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 29-33.
- [4] 余一平,闵 勇,陈 磊. 多机电力系统强迫功率振荡稳态响应特性分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22):5-9.  
YU Yiping, MIN Yong, CHEN Lei. Study on steady state response of forced power oscillation in multi-machine power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 5-9.
- [5] 韩志勇,贺仁睦,马 进,等. 多机电力系统强迫功率振荡扰动源的对比分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3):16-19.  
HAN Zhiyong, HE Renmu, MA Jin et al. Comparative analysis of forced power oscillation disturbance source in multi-machine power system[J]. Power System Automation, 2009, 33(3): 16-19.
- [6] 刘 辉,杨寅平,田云峰. 电力系统强迫功率振荡实例及机理分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10):113-117.  
LIU Hui, YANG Yinping, TIAN Yunfeng. Examples and mechanism analysis of forced power oscillation in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 113-117.
- [7] 文贤旭,钟晶亮,钱 进. 电网低频振荡时汽轮机控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(26):107-111.  
WEN Xiankui, ZHONG Jingliang, QIAN Jin. Study on steam turbine control strategy in low frequency oscillation of power grid [J]. China Journal of Electrical Engineering, 2009, 29(26): 107-111.
- [8] 冯 双. 抑制共振机理低频振荡的 PSS 设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7):1-6.

- FENG Shuang. PSS design method for suppressing low frequency oscillation of resonance mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44 (7): 1-6.
- [9] 祁万春, 杨林, 宋鹏程, 等. 南京西环网 UPFC 示范工程系统级控制策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 92-96.
- QI Wanchun, YANG Lin, SONG Pengcheng et al. Study on system-level control strategy of UPFC demonstration project in Nanjing west ring network [J]. Power System Technology, 2016, 40 (1): 92-96.
- [10] 张芳, 房大中, 陈家荣, 等. 阻尼联络线低频振荡的 UPFC 两阶段控制方法研究[J]. 中国电力, 2006, 39 (11): 27-32.
- ZHANG Fang, FANG Dazhong, CHEN Jiarong, et al. Study on two-stage control method for low frequency oscillation of damped contact line[J]. China Power, 2006, 39 (11): 27-32.
- [11] 严伟佳, 蒋平. 抑制区域间低频振荡的 FACTS 阻尼控制[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 189-193.
- YAN Weijia, JIANG Ping. FACTS damping control for suppressing Inter-regional low frequency oscillation [J]. High Voltage Technology, 2007, 33 (1): 189-193.
- [12] 马燕峰, 赵培龙, 赵书强. 多机电力系统的强迫功率振荡特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 23-29.
- MA Yanfeng, ZHAO Peilong, ZHAO Shuqiang. Research on forced power oscillation of multi-machine power system [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41 (24): 23-29.
- [13] 余一平, 闵勇, 陈磊, 等. 周期性负荷扰动引发强迫功率振荡分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 7-11.
- YU Yiping, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Cyclic load disturbance triggers forced power oscillation analysis [J]. Power System Automation, 2010, 34 (6): 7-11.
- [14] 杨尚瑾. 统一潮流控制器 (UPFC) 多目标协调控制及稳定控制策略研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2013.
- YANG Shangjin. Study on multi-objective coordinated control and stability control strategy of unified power flow controller (UPFC) [D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2013.
- [15] 黄方能. 利用 UPFC 提高电力系统阻尼的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- HUANG Fangeng. Study on Improving damping of power system by using UPFC [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.
- [16] 邓科. PSS 在抑制电力系统低频振荡上的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008.
- DENG Ke. PSS study on suppressing low frequency oscillation of power system [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008.
- [17] 林宇峰, 徐政, 黄莹. TCSC 功率振荡阻尼控制器的设计[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 35-40.
- LIN Yufeng, XU Zheng, HUANG Ying. Design of TCSC power oscillation damping controller [J]. Power System Technology, 2005, 29 (22): 35-40.

作者简介:



陈琼

陈琼(1994—), 女, 江苏宜兴人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行控制;

蒋平(1954—), 男, 江苏溧阳人, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行控制和电力电子在电力系统中的应用。

## Research on UPFC for Suppressing Forced Oscillation in the Power System

CHEN Qiong, JIANG Ping

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In order to suppress the forced oscillation of the power system, the damping coefficient of the system is improved by setting the parameters of the UPFC main controller. Then, the auxiliary controller is added into the main controller to track the forced oscillation power fluctuation and to output the inverted power wave to suppress the system forced oscillation. It can further improve the system damping coefficient and enhance the suppression ability of the UPFC to the forced oscillation in the system. A model is built in the PSASP simulation platform to verify that the proposed UPFC main controller and the auxiliary controller can effectively suppress the forced oscillation on the tie line between the system regions. Thereby the damage to the system caused by forced oscillation can be minimized.

**Key words:** forced oscillation; UPFC; suppress oscillation; damping controller

(编辑 刘晓燕)