

# 阻尼联络线低频振荡的UPFC 两阶段控制方法研究

张芳<sup>1</sup>, 房大中<sup>1</sup>, 陈家荣<sup>2</sup>, 冯崇智<sup>3</sup>, 宋文南<sup>1</sup>

(1.天津大学电气与自动化工程学院,天津 300072; 2.香港理工大学电机工程系,香港; 3.天津城西供电局,天津 300113)

**摘要:** 提出了一种新颖的阻尼联络线低频振荡的UPFC两阶段控制方案。第1阶段是阻尼控制: 利用COI之间角速度的正、反向状态控制直流电容器的充、放电, 使得联络线总的传输功率相应地减少、增加, 从而进一步增加系统阻尼, 快速平息振荡。给出了一种利用UPFC安装处的线路功率估算COI之间角速度的方法, 估算结果准确。第2阶段是协调控制: 第1阶段控制结束后, 系统进入了新的稳态。此时利用控制理论中的相对增益矩阵(RGA)方法为UPFC在稳态条件下确定了多个控制通道之间耦合程度最为薄弱的最佳控制方案, 使得UPFC潮流控制器、交、直流电压调节器之间实现了协调控制, 从而使系统快速运行在所期望的稳态运行点。仿真结果表明, 所提出的UPFC两阶段控制方案对阻尼区域模式低频振荡是有效、可行的。

**关键词:** 低频振荡; 两阶段控制; UPFC; 相对增益矩阵; 阻尼控制; 协调控制

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1004-9649(2006)11-0027-06

## 0 引言

电力系统的低频振荡是现代互联电力系统所面临的一种稳定问题。随着系统容量的不断增加和电网结构的日益复杂, 电力系统的稳定问题愈加突出。统一潮流控制器( Unified Power Flow Controller, UPFC)是功能最为强大的FACTS装置, 因此研究UPFC的控制方法以提高系统的稳定性是一个非常现实的问题。

文献[1]、[2]利用暂态能量函数的概念设计了UPFC阻尼控制器, 但未考虑直流电容器的作用与控制。目前设计UPFC阻尼控制器常采用的方法是<sup>[3-7]</sup>: 阻尼控制器采用PSS-like结构, 输入信号采用线路功率, 输出信号产生一个与角速度差同相位的附加阻尼信号附加在潮流控制器上; 同时, 在暂态过程中对于电容器电压常采用PI控制器对其进行绝对控制。值得指出的是, 对电容电压进行绝对控制的结果就是力图使电容电压维持在其参考设定值而保持不变。而文献[8]、[9]中, 直流电容电压波动范围均达到了±3%。文献[10]提出了UPFC电容电压的弱控制概念, 并指出电容电压的上、下限正是其吸收暂态

能量的范围。因此, 在暂态过程中可以允许电容电压在其允许的上、下限范围内波动, 从而利用直流电容的充、放电与系统进行功率交换, 吸收系统的暂态能量, 这对增加系统的阻尼是有利的, 只要系统运行在所期望的稳态运行点时电容电压能够恢复到其参考设定值或额定值就可以了。

本文着眼于在阻尼控制中直流电容电压控制策略的研究, 理论分析和仿真实例均表明: 在系统阻尼控制过程中, 通过控制直流电容的充、放电允许电容电压在其上、下限范围内波动, 从而调制线路功率, 这对增强系统的阻尼是有利的。

## 1 UPFC的基本结构

UPFC的基本结构如图1所示。图1中 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 分别是2个逆变器的脉宽调制比信号和相位信号<sup>[11]</sup>, 是UPFC接受的控制信号, 由控制系统给出。

$P_1$ 、 $Q_1$ 、 $U_s$ 、 $U_c$ 分别是UPFC所在线路的有功和无功功率、交流母线电压和直流电容器电压。 $\dot{U}_s$ 、 $\dot{U}_c$ 分别是UPFC所在线路的首端和末端节点的电压相量。 $P_{g1}$ 、 $P_{s1}$ 分别是2个并、串联逆变器吸收和发出的

收稿日期: 2005-12-10; 修回日期: 2006-02-15

基金项目: 香港理工大学和香港特别行政区研究资助局资助项目(RGC No: PolyU 5102/01E)

作者简介: 张芳(1972-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 博士研究生, 讲师, 从事电力系统稳定性控制、灵活交流输电系统及其控制方法研究。E-mail: zhangfang@tju.edu.cn

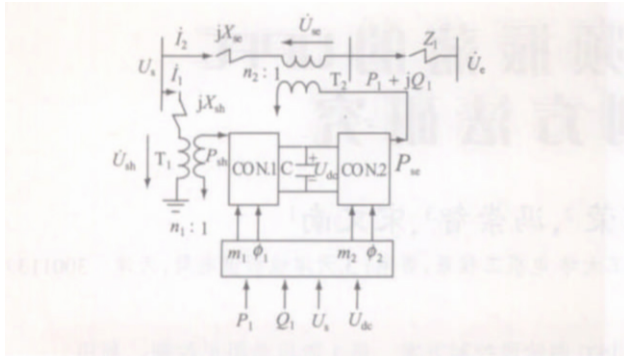


图1 UPFC的基本结构  
Fig.1 Basic structure of UPFC

有功功率。UPFC的并联和串联支路的等效电压源相量分别为  $U_{sh}e^{j(\omega t - \phi_1)}$  和  $U_{se}e^{j(\omega t - \phi_2)}$ 。UPFC直流电容器的动态过程由式(1)表示<sup>[3-7]</sup>:

$$CU_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = (P_{sh} - P_{se}) S_B \quad (1)$$

式中:

$$\begin{cases} P_{sh} = \text{Re}[\dot{U}_{sh} \dot{I}_1] \\ P_{se} = \text{Re}[\dot{U}_{se} \dot{I}_2] \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{sh} = m_1 \dot{U}_{\alpha} e^{j(\omega t - \phi_1)} & (0 \ m_1 \ m_{1,max}) \\ \dot{U}_{se} = (m_2 \dot{U}_{dc} n_2 / n_1) e^{j(\omega t - \phi_2)} & (0 \ m_2 \ m_{2,max}) \end{cases}$$

$m_1$ 、 $m_2$ 、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$  分别是脉宽调制比信号和相位信号经惯性时间延迟后的输出值;  $\dot{U}_{dc}$  为电容电压的标么值;  $S_B$  为系统的基准容量。

## 2 阻尼低频振荡的 UPFC 两阶段控制方案

### 2.1 UPFC 第一阶段控制方案

#### 2.1.1 直流电容器电压控制策略

图2所示系统中,区域A和B通过远距离输电线路互联。图中  $P_{tieA}$ 、 $P'_{tieA}$  和  $P'_{tieB}$ 、 $P_{tieB}$  分别为区域A和B之间联络线送端和受端输送的有功功率。设  $\omega_{AB}$  为区域A和B惯性中心(COI)之间的角速度差;  $M_A$  和  $M_B$  分别为区域A和B的惯性时间常数;  $P_{mA}$ 、 $P_{eA}$  和  $P_{mB}$ 、 $P_{eB}$  分别为区域A和B原动机输出总的机械功率和发电机发出总的电磁功率;  $P_{LDA}$  和  $P_{LDB}$  分别为区域A和B的有功负荷和有功网损之和。  $P_{lossA}$  和  $P_{lossB}$  分别是区域A和B侧联络线的有功损耗。

区域A和B惯性中心之间的  $\omega_{AB}$  可由式(2)表示如下:

$$\omega_{AB} = \frac{1}{M_A} (P_{mA} - P_{eA}) - \frac{1}{M_B} (P_{mB} - P_{eB}) =$$

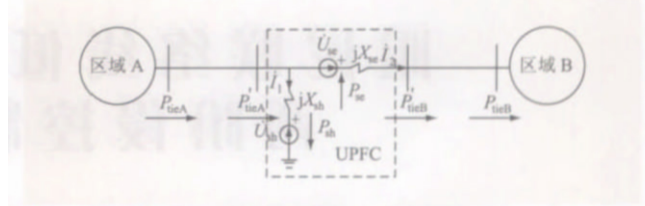


图2 装有UPFC的双区域系统

Fig.2 A two-area system with UPFC

$$\frac{P_{mA} - P_{LDA} - P_{lossA}}{M_A} - \frac{P_{mB} - P_{LDB} - P_{lossB}}{M_B} - \left( \frac{P'_{tieA}}{M_A} + \frac{P'_{tieB}}{M_B} \right) = \left( \frac{P_{A0}}{M_A} - \frac{P_{B0}}{M_B} \right) - \left( \frac{P'_{tieA}}{M_A} + \frac{P'_{tieB}}{M_B} \right) \quad (2)$$

其中,  $P_{A0}$  和  $P_{B0}$  分别是区域A和B内原动机机械功率减去负荷和网损(包括联络线)后的有功功率。式中的第1项类似于单机无穷大系统中发电机摇摆方程中的机械功率项;式中的第2项类似于单机无穷大系统中发电机摇摆方程中的电磁功率项。

如图2所示,  $P'_{tieA}$  与  $P'_{tieB}$  有如下关系:

$$P'_{tieB} = P'_{tieA} - P_{sh} + P_{se} \quad (3)$$

如果令  $-P_{sh} + P_{se} = D_{AB}$ , 则式(3)又可写为:

$$P'_{tieB} = P'_{tieA} + D_{AB} \quad (4)$$

式(4)中,  $D$  为正的阻尼系数 ( $D > 0$ )。观察式(1)、(4), 可有如下结论:

(1) 当  $\omega_{AB} = 0$  时,  $P_{sh} = P_{se}$ , UPFC串、并联侧逆变器的有功交换达到平衡, 电容电压稳定在当前值; 直流电容工作在“静止”状态, 因此经过UPFC装置后联络线输送的有功功率保持不变, 即  $P'_{tieB} = P'_{tieA}$ 。

(2) 当  $\omega_{AB} > 0$  时,  $P_{sh} < P_{se}$ , UPFC并联侧逆变器吸收的有功功率小于串联侧逆变器发出的有功功率, 电容放电, 电容电压降低; 直流电容工作在能量释放状态, 因此经过UPFC装置后联络线输送的有功功率增加, 即  $P'_{tieB} > P'_{tieA}$ 。

(3) 当  $\omega_{AB} < 0$  时,  $P_{sh} > P_{se}$ , UPFC并联侧逆变器吸收的有功功率大于串联侧逆变器发出的有功功率, 电容充电, 电容电压升高; 直流电容工作在能量存储状态, 因此经过UPFC装置后联络线输送的有功功率减少, 即  $P'_{tieB} < P'_{tieA}$ 。

通过上述分析可以看出: 联络线输送的有功功率随着COI之间角速度的正、反向状态而相应地增加、减少, 这极其类似于单机无穷大系统中发电机的阻尼功率特性, 因而通过上述直流电容电压的控制策略能够进一步增加系统的阻尼, 这个原理是不难理解的。另外, 随着系统振荡的平息, 直流电容电压将会停留在其上、下限范围内的某一值上。

#### 2.1.2 基于本地可测量信号的 $\omega_{AB}$ 估算方法

上述分析中  $\omega_{AB}$  不是UPFC装置的本地可测量信号, 在UPFC的实际运行中获得  $\omega_{AB}$  的测量值是不现实的。本文下面给出一种通过UPFC装置的本

地可测量信号来估算 COI 之间  $\omega_{AB}$  的方法。

在一个采样周期内, 对式 (2) 两边进行积分:

$$\omega_{AB}(k) - \omega_{AB}(k-1) = h \cdot \left( \frac{P_{A0}}{M_A} - \frac{P_{B0}}{M_B} \right) - h \cdot \left[ \frac{P'_{tieA}(k)}{M_A} + \frac{P'_{tieB}(k)}{M_B} \right] \quad (5)$$

式中:  $\omega_{AB}(k)$ 、 $\omega_{AB}(k-1)$  分别是 COI 之间的角速度在  $k$ 、 $k-1$  时刻的值;  $P'_{tieA}(k)$  和  $P'_{tieB}(k)$  是 UPFC 装置两侧联络线功率在  $k$  时刻的采样值;  $h$  是相邻 2 个采样时刻的时间间隔, 即采样周期。

由式 (5) 递推可得到式 (6):

$$\omega_{AB}(k+1) - \omega_{AB}(k) = h \cdot \left( \frac{P_{A0}}{M_A} - \frac{P_{B0}}{M_B} \right) - h \cdot \left[ \frac{P'_{tieA}(k+1)}{M_A} + \frac{P'_{tieB}(k+1)}{M_B} \right] \quad (6)$$

将式 (6) 与 (5) 相减, 可得到式 (7):

$$\frac{\omega_{AB}(k) - \omega_{AB}(k-1)}{h} - \frac{\omega_{AB}(k+1) - \omega_{AB}(k)}{h} = \left[ \frac{P'_{tieA}(k+1) - P'_{tieA}(k)}{M_A} + \frac{P'_{tieB}(k+1) - P'_{tieB}(k)}{M_B} \right] \quad (7)$$

式 (7) 的左端即是  $\dot{\omega}_{AB}(k) - \dot{\omega}_{AB}(k+1)$ , 该项代表的运动曲线恰恰与  $\omega_{AB}$  同相位, 称为  $\omega_{AB}$  的估算值  $\omega_{AB,es}$ 。

下面对  $\dot{\omega}_{AB}(k) - \dot{\omega}_{AB}(k+1)$  与  $\omega_{AB}$  同相位的原理进行简单分析:  $\omega_{AB}$  在一个振荡周期内可以划分为 4 个阶段, 即: (1) 正向加速:  $\dot{\omega}_{AB} > 0$ ,  $\omega_{AB} > 0$ ; (2) 正向减速:  $\dot{\omega}_{AB} > 0$ ,  $\omega_{AB} < 0$ ; (3) 反向加速:  $\dot{\omega}_{AB} < 0$ ,  $\omega_{AB} < 0$ ; (4) 反向减速:  $\dot{\omega}_{AB} < 0$ ,  $\omega_{AB} > 0$ 。在正向加速阶段, 当  $\omega_{AB}$  过零点时, 角加速度  $\dot{\omega}_{AB}$  为正的最大; 当  $\omega_{AB}$  达到波峰时, 角加速度  $\dot{\omega}_{AB}$  为零; 故在正向加速阶段,  $\dot{\omega}_{AB}$  由正的最大单调减小为零, 因此  $\dot{\omega}_{AB}(k) - \dot{\omega}_{AB}(k+1) > 0$ , 即与  $\omega_{AB}$  同相位。其他 3 个阶段可用类似方法分析。

由式 (7) 可见,  $\omega_{AB}$  估算方法简单, 仅与 UPFC 安装地点的联络线功率有关, 且均为本地可测量信号。在图 5 所示的 4 机测试系统上得到的精确计算的  $\omega_{AB}$  与估算得到的  $\omega_{AB,es}$  的比较结果如图 3 所示, 由图 3 可见:  $\omega_{AB,es}$  没有改变  $\omega_{AB}$  在系统振荡过程中正、反向的状态, 只是在数值大小和曲线平滑度上具有差别。

### 2.1.3 UPFC 第一阶段控制方案的具体设计

UPFC 第一阶段控制的目标是: 快速通过 UPFC 装置增加阻尼, 平息振荡。在此阶段控制中对 UPFC 所在交流母线电压执行绝对控制。对于直流电容电压并不执行完全的绝对控制, 而是在其允许的上、下限范围内按照上述控制策略控制直流电容的充、放电, 从而增强系统的阻尼。随着振荡的平息, 电容电压以及 UPFC 所在线路功率均将稳定在某一值上, 系统进入新的稳态。需要指出的是, 此时 UPFC 所在

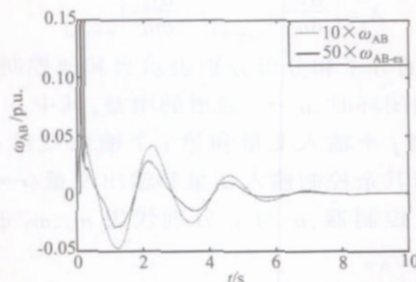


图 3  $\omega_{AB}$  与  $\omega_{AB,es}$  的比较

Fig.3 Comparison of  $\omega_{AB}$  with  $\omega_{AB,es}$

的线路功率并不正好在其参考设定值上, 只要其在允许的功率范围之内就可以, 因为在暂态过程中决定最优参考功率是困难的。图 4 详细给出了 UPFC 第一阶段控制器设计方案。

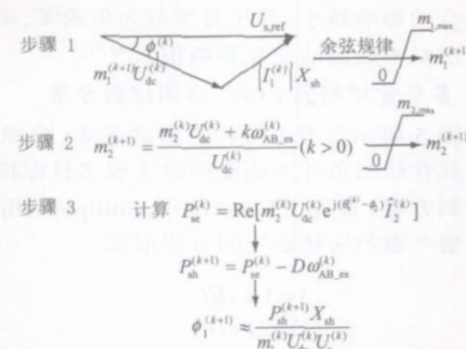


图 4 UPFC 第一阶段控制器设计方案

Fig.4 First-stage control scheme for UPFC

## 2.2 UPFC 第二阶段控制方案

第一阶段控制结束后, 系统进入了新的稳态, 此时电容电压和 UPFC 所在线路功率并不正好在其参考设定值。这时若将 UPFC 所在线路功率和电容电压均调节到其各自的参考值, 同时保持交流母线电压在其参考设定值, 则此时对于多变量控制器 UPFC 应如何控制呢? 这正是 UPFC 第二阶段控制所要解决的问题, 即在稳态条件下实现 UPFC 多个控制通道之间的协调控制。

### 2.2.1 相对增益矩阵 (RGA) 方法的基本原理

控制理论中的相对增益矩阵 (Relative Gain Array, RGA) 方法是分析多变量控制器多个控制通道之间的耦合程度, 并据此选择使出使多个控制通道之间耦合程度最为薄弱的最佳输入-输出变量配对的有效方法<sup>[12]</sup>。文献[13]将 RGA 方法应用到 UPFC 最佳变量配对选择中, 本文下面对 RGA 的基本原理做一简单介绍。

RGA 方法是以相对增益为基础的, 相对增益系数  $g_{ij}$  定义如下:



$$i_j = \left( \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_{u_i = \text{const}} / \left( \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_{y_i = \text{const}} \quad (8)$$

式(8)中的分子和分母分别表示当其他控制回路均开环和均闭环时,  $u_j$ 、 $y_i$  通道的增益, 其中  $u_j$  和  $y_i$  分别表示第  $j$  个输入变量和第  $i$  个输出变量;  $u_i$  和  $y_i$  分别表示其余控制输入变量和输出变量( $i \neq j$ )。对于 UPFC 控制器,  $u_j$  与  $y_i$  分别代表  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$  与  $P_1$ 、 $Q_1$ 、 $U_s$ 、 $U_{dc}$ 。

根据控制理论<sup>[12]</sup>, 相对增益矩阵可表示为:

$$\Lambda = RGA = G(0) \otimes (G(0)^{-1})^T \quad (9)$$

式中:  $G(0)$  为静态传递函数矩阵;  $\otimes$  为 2 个矩阵的 Hadamard 乘积。

依据 RGA 物理意义, 为使多个控制通道之间的耦合程度最为薄弱, 应从 RGA 矩阵中选择相对增益最接近 1 的控制变量和被控目标构成控制通道(最佳配对), 相对增益越靠近 1, 则构成的通道受其他通道耦合的影响越小。若相对增益为负或零, 则说明其他通道对本通道的交互影响很大<sup>[12, 13]</sup>。

### 2.2.2 多变量控制器 UPFC 协调控制方案

对图 5 所示含有 UPFC 的测试系统, 按照 RGA 方法为其在稳态条件下确定同时实现多目标控制的协调控制方案。首先, 将该系统用 Phillips-Heffron 线性化模型<sup>[14]</sup>表示为状态空间方程形式:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (10)$$

然后将其转化为频域传递函数的形式:

$$Y(s) = G(s) U(s) = [C(sI - A)^{-1}B + D] U(s) \quad (11)$$

因为 RGA 主要考察稳态增益矩阵, 所以只需将式(11)中频域传递函数中的  $s$  取为零, 然后按式(9)计算 RGA。

图 5 所示系统稳态传递函数矩阵计算结果为:

$$\begin{bmatrix} U_s \\ P_1 \\ U_{dc} \\ Q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0001 & -0.1671 & -0.0000 & 0 \\ -0.0000 & 0.1766 & 0.0000 & 0 \\ -1.8672 & -0.2353 & -3.8296 & 0 \\ -0.0000 & 0.1544 & 0.0000 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ m_2 \\ m_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

由式(11)看到: 传递函数矩阵的第 4 列全部为零, 这表明  $\phi_2$  的增量对所有输出变量的增量均无贡献。因而考虑将  $\phi_2$  从输入变量中去掉, 同时为保持输入和输出变量个数相等, 将  $Q_1$  从输出变量中去掉。去掉  $\phi_2$  和  $Q_1$  后, RGA 的计算结果如下:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \Delta U_s \\ \Delta P_1 \\ \Delta U_{dc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \phi_1 & \Delta m_2 & \Delta m_1 \\ 0.9304 & 0.0767 & -0.0071 \\ 0.0736 & 0.9233 & 0.0030 \\ -0.0041 & -0.0000 & 1.0041 \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据相对增益的物理意义, 可以得出结论:  $\phi_1$ 、 $U_s$ 、 $m_2$ 、 $P_1$ 、 $m_1$ 、 $U_{dc}$  是最佳变量配对(最佳控制通道)。这 3 个变量配对所对应的相对增益系数均介于

0.8 与 1.0 之间, 表明这 3 个控制通道之间是近似解耦的, 因而 UPFC 3 个控制目标之间同时实现协调控制也就易于实现了。

需要指出的是: 式(11)中矩阵第 4 列全部为零, 这是因为系统是在 UPFC 串联电压源被置为零的初始稳态运行点线性化的。而在不同的初始运行点和不同的运行方式下, 利用 RGA 方法所得的 UPFC 最佳变量配对具有固定性, 详细内容参见文献[13]。

## 3 UPFC 两阶段控制仿真结果

本文将所提出的 UPFC 两阶段控制方案应用于图 5 所示的 IEEE 4 机双区域测试系统中<sup>[15]</sup>, 并进行了仿真实验。仿真中发电机采用双轴模型, 励磁系统采用三阶模型, 负荷采用恒阻抗模型。系统 7 号母线在 0 s 时发生三相短路故障, 100 ms 后故障切除并且双回联络线跳一回, 再经过 100 ms 后联络线重合闸成功。

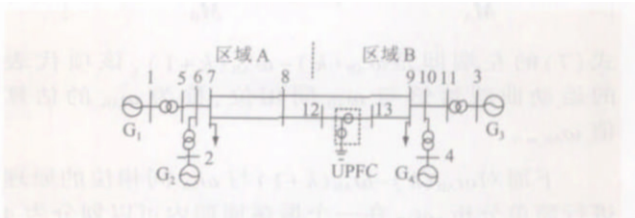


图 5 4 机双区域测试系统

Fig.5 4-generator two-area test system

UPFC 参数为:  $U_B=230$  kV,  $S_B=900$  MVA,  $n_1=20$ ,  $n_2=4$ ,  $C=0.5$  F,  $X_{T1}=0.82$  p.u.,  $X_{T2}=0.0041$  p.u.,  $U_{dref}=22$  kV,  $m_{1,max}=m_{2,max}=1.0$ 。

### 3.1 UPFC 第一阶段控制仿真结果

UPFC 两阶段控制仿真结果如图 6、7 所示, 0~10 s 为阻尼控制。由图中看出, 系统遭受大扰动后在 UPFC 阻尼控制作用下, 系统振荡逐步衰减, 系统在 8 s 后进入稳态。由图 6 可见, 由于直流电容的充、放电, UPFC 与系统之间有功率交换, 使得 UPFC 所在线路的有功功率随  $A_B$  的正、反向状态而相应地增加、减少, 从而传输走廊的总功率亦随着  $A_B$  的正、反向而相应地增加、减少, 起到了阻尼系统振荡的作用。由图 7 可见, 线路 13-9 的有功在振荡的初期较 UPFC 不作用时有所增加, 这正是通过 UPFC 对线路功率产生了调制。在此阶段中对 UPFC 所在交流母线电压进行了绝对控制, 因而系统进入稳态后交流母线电压完全维持在其参考设定值。在平息振荡的过程中, 直流电容器电压是波动的, 进入稳态后稳定在其上、下限范围内的某一值上。本例中直流电容电压的上、下限范围指定为  $\pm 5\%U_{dcN}$ 。由式(4)可见, 控制直流电容的充、放电主要是和阻尼系数  $D$  有关, 阻尼系数  $D$  越大, 电容充、放电的能量越大, 电容

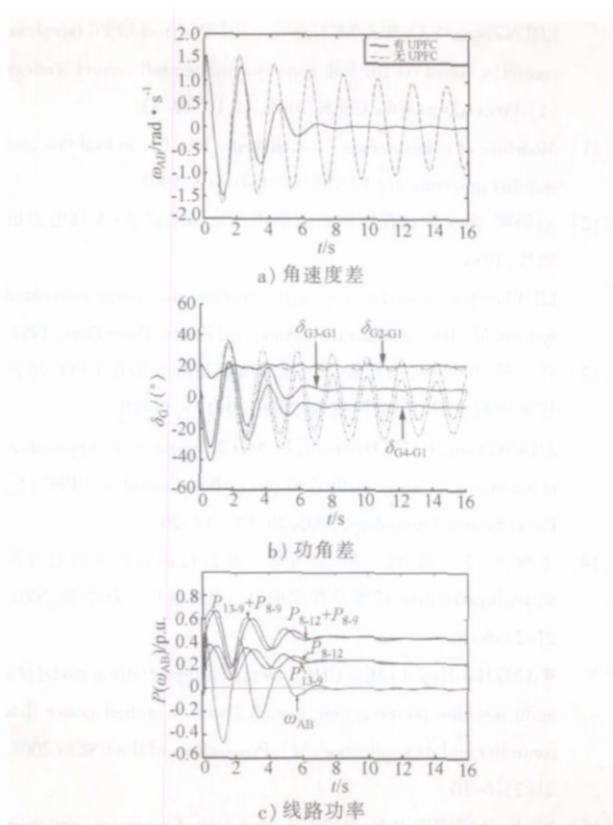


图 6 UPFC 两阶段控制中 COI 之间的角速度差, 2-4 号发电机与 1 号发电机之间的功角差以及传输走廊的线路功率随时间变化曲线

Fig.6 Variations of speed difference between two COIs, angle swing curve of generator 2,3 and 4 with respect to generator 1 and real power of the lines in the transmission corridor versus time during the two stages control for UPFC

电压的波动范围越大。在本文的测试系统仿真中, 阻尼系数  $D$  取为 30 可满足电容电压的波动范围控制为  $\pm 5\%U_{dcN}$  的要求。在 UPFC 的实际运行装置中, 为保证电容电压波动不超过允许的范围, 应当增加一个与直流电容并联的能量缓冲器, 当电容电压超过其允许波动的上、下限时, 缓冲器工作从而缓解对直流电容的冲击, 关于缓冲器的详细内容参见文献[16]。

### 3.2 UPFC 第二阶段控制仿真结果

UPFC 第二阶段控制设定在 10s 时开始, 潮流控制器, 交、直流电压调节器均采用 PI 控制。由图 7 可见, 在  $t=12s$  时 UPFC 所在的线路有功、交流母线电压以及直流电容电压均被调节到了各自的参考值设定值, 潮流控制器, 交、直流电压调节器的控制精度均小于 0.1%, 系统被快速控制到所期望的稳态运行点。

## 4 结语

本文提出一种新颖的阻尼联络线低频振荡的 UPFC 两阶段控制方案。第一阶段是阻尼控制, 在

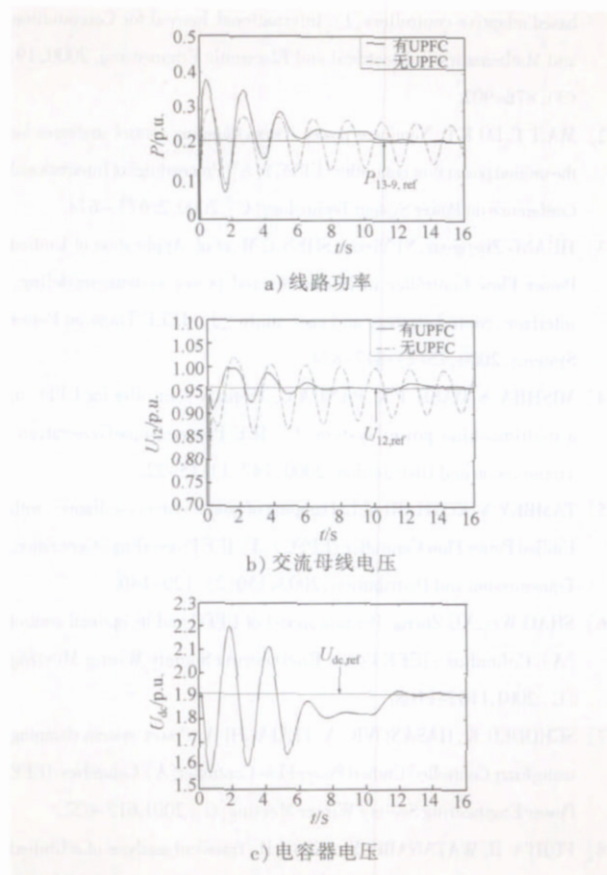


图 7 UPFC 两阶段控制中 UPFC 所在线路功率, 交流母线电压和直流电容器电压随时间变化曲线

Fig.7 Variations of real power of the line with UPFC, AC bus voltage and DC capacitor voltage versus time during the two stages control for UPFC

UPFC 阻尼系统振荡过程中对直流电容电压并不执行完全的绝对控制, 而是允许其在上、下限范围内波动, 通过控制直流电容的充、放电可以调制线路功率, 理论分析和仿真实例均表明: 这对增强系统的阻尼是有利的。本文提出的直流电容电压控制策略可与成熟的 UPFC 控制策略共同工作, 达到进一步改善控制效果的目的。文中还给出了一种利用 UPFC 安装处的本地可测量信号估算 COI 之间角速度的方法, 估算结果准确、可靠。第二阶段是协调控制, 利用控制理论中的 RGA 方法为 UPFC 在稳态条件下确定了实现 UPFC 多目标协调控制的最佳控制方案, 在此控制方案下 UPFC 多个控制通道之间是近似解耦的, 从而系统可被快速控制到所期望的稳态运行点。仿真实例表明, 本文所提出的 UPFC 两阶段控制方案对阻尼区域振荡模式是有效、可行的。

### 参考文献:

[1] MATT, LOK L. A robust UPFC damping scheme using PI and ANN

- based adaptive controllers[J]. International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2000, 19, (3): 878- 902.
- [2] MA T T, LO K L. Nonlinear power system damping control strategies for the unified power flow controller (UPFC) [A]. Proceedings of International Conference on Power System Technology[C]. 2000, 2: 673- 678.
- [3] HUANG Zheng-yu, NI Yi-xin, SHEN C M, et al. Application of Unified Power Flow Controller in interconnected power systems-modeling, interface, control strategy and case study [J]. IEEE Trans.on Power Systems, 2000, 15(2): 817- 824.
- [4] MISHRA S, DASH P K, PANDA G. TS-fuzzy controller for UPFC in a multimachine power system[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147(1): 15- 22.
- [5] TAMBEY N, KOTHARI M.L. Damping of power system oscillations with Unified Power Flow Controller (UPFC) [J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(2): 129- 140.
- [6] SHAO Wei, XU Zheng. Per unit model of UPFC and its optimal control [A]. Columbus: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting [C]. 2001.1105- 1108.
- [7] SCHODER K, HASANOVIC A, FELIACHI A. Power system damping using fuzzy Controlled Unified Power Flow Controller[A]. Columbus IEEE Power Engineering Society Winter Meeting[C]. 2001.617- 622.
- [8] FUJITA H, WATANABE Y, AKAGI H. 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.
- [9] FUJITA H, WATANABE Y, AKAGI H. Control and analysis of a Unified Power Flow Controller[J]. IEEE Trans.on Power Electronics, 1999, 14(6): 1021- 1027.
- [10] 陈众, 颜伟, 徐国禹, 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.
- CHEN Zhong, YAN Wei, XU Guo-yu, 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.
- [11] Modelling of power electronics equipment (FACTS) in load flow and stability programs[R]. CIGRE TF 38- 01- 08, 1998.
- [12] 刘晨晖. 多变量过程控制系统解耦理论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- LIU Chen-hui. General decoupling theory of multivariable process control systems[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1984.
- [13] 张芳, 房大中, 冯崇智, 等. 相对增益矩阵方法在 UPFC 潮流控制中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 14- 20.
- ZHANG Fang, FANG Da-zhong, FENG Chong-zhi, et al. Application of relative gain array method to power flow control of UPFC [J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 14- 20.
- [14] 王海风, 李敏, 陈珩. 装有统一潮流控制器的多机电力系统 Phillips-Heffron 模型及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 6- 10.
- WANG Hai-feng, LI Min, CHEN Heng. Phillips-Heffron model of a multi-machine power system installed with a unified power flow controller and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 6- 10.
- [15] XU X, MATHUR R M, JIANG J. Modeling of generators and their controls in power system simulations using singular perturbations [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1998, 13(1): 109- 114.
- [16] 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 Hao-yu, LI Lan-ying, LI Xiao-yan, et al. The study on UPFC with energy snubber and its control [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 9- 13.

(责任编辑 李博)

## Study on two-stage control for Unified Power Flow Controller to damp tie-line low frequency oscillation

ZHANG Fang<sup>1</sup>, FANG Da-zhong<sup>1</sup>, CHAN Ka-wing<sup>2</sup>, FENG Chong-zhi<sup>3</sup>, SONG Wen-nan<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Department of Electrical Engineering, the Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 3. Tianjin West City Electric Power Company, Tianjin 300113, China)

**Abstract:** This paper proposes a novel two-stage control scheme of UPFC for damping tie-line low frequency oscillation. The first-stage control is damping control: positive and negative states of the angular speed difference between the COIs (center of inertias) are used to control charge and discharge of the DC capacitor, therefore real power of tie lines is decreased and increased correspondingly, the damping of the system is intensified and the oscillation of the system is quickly suppressed. Moreover a method to estimate the angular speed difference between the COIs using locally measurable quantity at the UPFC location is proposed, and the estimation result is quite accurate. The second-stage control is coordinated control: After the first-stage control comes to a close, the system operates at a new steady state operating point. Under the steady-state condition the Relative Gain Array (RGA) method in control theory is used to determine the best control scheme, under which the interactions among UPFC control channels are the most weak. Therefore it is easy to implement the coordinated control among UPFC power flow controller, AC and DC voltage regulators and the system can operate fast at the expected steady-state operating point. Simulation results show that the two-stage control for UPFC is effective and feasible in damping area mode low frequency oscillation.

**Key words:** low frequency oscillation; two-stage control; UPFC; Relative Gain Array (RGA); damping control; coordinated control