

# UPFC 抑制系统区域间低频振荡研究

范子恺, 吴熙, 冯双  
(东南大学电气工程学院, 江苏南京 210096)

**摘要:**文中从负阻尼机理的角度出发,着重分析了统一潮流控制器(UPFC)对于区域间低频振荡的影响,指出稳定控制器(PSS)在区域间低频振荡抑制作用上的不足,并由此引出利用UPFC抑制低频振荡的必要性和优势,在此基础上提出了通过UPFC抑制区域间低频振荡的方法。通过数学分析探讨了在未引入附加阻尼控制器状态下UPFC控制系统对线路阻尼的贡献,并利用功率注入法建立UPFC的PI控制模型,采用特征值法分析UPFC在小干扰下对于系统动态稳定性能的改善,通过算例分析证实UPFC抑制低频振荡方法的效果。

**关键词:**低频振荡;柔性输电技术(FACTS);UPFC;PI控制

**中图分类号:**TM761

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-0665(2016)01-0020-04

自上世纪60年代美国在线路互联过程中发生功率增幅振荡起,低频振荡成为电力系统稳定运行的重要课题之一。系统发生低频振荡时,如果振荡不能得到有效抑制,则有可能带来事故扩大,系统解列等危害<sup>[1]</sup>。目前已有的抑制低频振荡的方法主要有利用电力系统稳定控制器(PSS)进行抑制,通过调节柔性输电技术(FACTS)设备进行抑制以及加装直流小信号调制的方法。FACTS设备在调节系统设计上具有类PSS的特点<sup>[2]</sup>,可以采用类似于PSS的方式对系统阻尼进行调控,而FACTS设备本身往往用于系统的潮流控制,因此可安装于系统联络线处,从而得以抑制系统联络线处的低频振荡。统一潮流控制器(UPFC)是一种综合了电压控制与潮流控制的串并联FACTS器件,是第三代FACTS装置的典型代表。UPFC具有尺寸小,安装方便以及成本低等优势<sup>[3]</sup>。

文中给出UPFC控制方法的设计,并通过PSASP搭建UD模型,在IEEE四机两区系统中实现了对UPFC抑制区域间低频振荡的小干扰法分析及及时域仿真,证实了方法的有效性。

## 1 区域间低频振荡问题

### 1.1 区域间低频振荡分析

低频振荡是由电力系统扰动引起的功率振荡,负阻尼机理认为低频振荡是因为系统在调节过程中会产生与原阻尼相抵消的取值为负的阻尼而引起的。电力系统低频振荡按振荡涉及的范围大致分为局部振荡模式、和区域间振荡模式两类<sup>[4]</sup>,前者是指厂站内的机组之间或电气距离较近的厂站机组之间的振荡,这种振荡局限于区域内,其影响范围较小且易于消除。这种振荡频率较高,一般在0.7~2.5 Hz。后者是指一部分机群相对于另一部分机群的振荡,在联系较薄

弱的互联系统中,耦合的两个或多个发电机群间常发生这种振荡。由于电气距离较大,同时发电机群的等值发电机的惯性时间常数较大,其振荡频率较低,一般在0.1~0.7 Hz。一个两区域系统的示意图如图1所示。

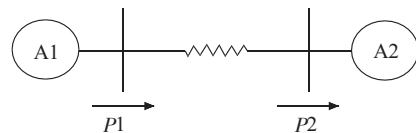


图1 两区域系统示意

假设发生区间功率振荡,区域1和区域2的惯性中心之间的角转速差和角度差分别为 $\omega_{12}$ 和 $\delta_{12}$ ,并且为了方便讨论,假设系统自身阻尼为0,则其表达式:

$$\omega'_{12} = \frac{1}{M_1} (P_{10} - P_1) - \frac{1}{M_2} (P_{20} - P_2) \quad (1)$$

$$\delta'_{12} = \omega_{12} \quad (2)$$

式(1,2)中 $P_{10}$ 和 $P_{20}$ 分别为所在区域的发电机在减去损耗后所发出的有功功率; $M_1$ 和 $M_2$ 分别为2个区域的等效惯性系数。

则在系统零阻尼情形下,假设初始角度差为一定值,初始功角差为0,则由式(1)可得:

$$\frac{1}{2} \omega_{12}^2 - \int_{\delta_{120}}^{\delta_{12}} \left[ \frac{1}{M_1} (P_{10} - P_1) - \frac{1}{M_2} (P_{20} - P_2) \right] d\delta_{12} = c \quad (3)$$

则对于零阻尼系统易得:

$$c = \frac{1}{2} \omega_{12\min}^2 = \frac{1}{2} \omega_{12\max}^2 \quad (4)$$

给出以下定义:

$$\begin{cases} W_{KE} \triangleq \frac{1}{2} \omega_{12}^2 \\ W_{PE} \triangleq - \int_{\delta_{120}}^{\delta_{12}} \left[ \frac{1}{M_1} (P_{10} - P_1) - \frac{1}{M_2} (P_{20} - P_2) \right] d\delta_{12} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,区域间振荡具有动能和势能2种形式,在零阻尼状态下振荡能量不衰减,因此也可通

过增加联络线阻尼的方法,加速振荡能量的消耗,从而达到抑制低频振荡的目的。

## 1.2 PSS抑制区域间低频振荡的不足

传统的PSS是通过引入发电机功率 $\Delta P$ 、转子频率 $\Delta f$ 或角速度 $\Delta\omega$ 信号,通过PSS的超前滞后补偿,引入附加电磁转矩 $\Delta T_s$ 与 $\Delta\omega$ 同相位,从而产生了附加的阻尼力矩,使得发电机所安装线路的阻尼比提高。PSS安装于发电机上,可以利用发电机提供的功率本身作为稳定系统的信号。FACTS安装于线路上,可以在联络线上对系统阻尼进行控制,同时完成对于系统潮流的调节,相比PSS的使用更为灵活。另外,由于PSS的安装地点受到限制,PSS对远离发电机的线路阻尼优化较小,对于如图1所示的2个区域系统而言,PSS可能无法抑制联络线上的低频振荡,即PSS对于区域间低频振荡抑制能力不理想,这时采用FACTS设备抑制低频振荡的方法就具有必要性了。

由以上分析可知,低频振荡的负阻尼机理认为低频振荡是由于系统阻尼为负值或者系统阻尼过低而产生的功率振荡现象。对于区域内振荡,其振荡过程发生在电气距离接近的设备之间,可以利用PSS抑制低频振荡。但对于区域间振荡,PSS的抑制方能不能满足系统的要求,从而需要采用UPFC来抑制低频振荡。

## 2 UPFC抑制低频振荡分析

### 2.1 UPFC提供阻尼的原理

分析UPFC抑制低频振荡的原理,且采用如图2所示的单机无穷大系统来进行数学推导。

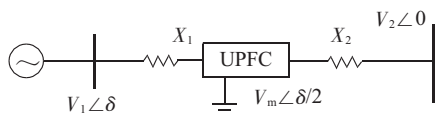


图2 单机无穷大系统

图2的单机无穷大系统中已经安装UPFC,系统在恒机械功率输入下的线性化微分方程为:

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = -\Delta P \quad (6)$$

输电线路输送的电功率为:

$$P_e = \frac{UU_m}{X_2} \sin \frac{\delta}{2} \quad (7)$$

将式(7)线性化,进一步假设送端电压保持恒定,即 $\Delta V=0$ ,得:

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{\partial P_e}{\partial U_m} \Delta U_m + \frac{\partial P_e}{\partial X_2} \Delta X_2 + \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \Delta \delta = 0 \quad (8)$$

若保持 $V_m=c, \Delta V_m=0, \Delta X_2=0$ ,式(8)可化为:

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

式(9)特征值落在复平面的虚轴上,导致转子角 $\delta$ 以频率 $\omega_n$ 作等幅振荡,系统处于临界稳定状态。从方程可以看出,如果对UPFC进行恒定电压或阻抗的控制,UPFC不能向线路提供任何阻尼,如果终点电压和线路阻抗可以进行调制,则UPFC便可以发挥增加系统阻尼的作用。不妨假设电压或线路阻抗按 $\frac{d(\Delta\delta)}{dt}$ 调制,则有 $\Delta U_m = K_1 \frac{d(\Delta\delta)}{dt}$ 或 $\Delta X_2 = K_2 \frac{d(\Delta\delta)}{dt}$ 。那么相应地式(9)变为:

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + (K_1 \left. \frac{\partial P_e}{\partial U_m} \right|_0 + K_2 \left. \frac{\partial P_e}{\partial X_2} \right|_0) \frac{d(\Delta\delta)}{dt} + \left. \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \right|_0 \Delta \delta = 0 \quad (10)$$

式(10)刻画了系统阻尼振荡的模式。

由上述内容可知,在合理的控制策略下,UPFC控制系统可提供一个正阻尼,改变特征根的形式,从而改变系统振荡衰减的形式。以上推导尽管是以单机无穷大系统为例的,但是在多机系统中也同样适用。

### 2.2 UPFC抑制振荡策略

线路中的UPFC由2个共用直流侧电容的电压源型换流器组成,换流器I通过一个并联变压器接入系统,向换流器II提供有功功率外,同时通过并联变压器向系统吸收或注入无功功率。变换器II通过串联变压器接入系统,向线路注入一个幅值和相角可调的串联电压,控制线路的潮流。可以在不同的模式下实现对无功、有功功率以及电压的多个变量的调控。采用功率注入模型等效UPFC电路。图3(a)为UPFC串联侧等效电路,UPFC的作用主要体现在串联侧电压 $U_{sc}^*$ 经过串联变压器漏抗 $X_{sc}$ 接入到系统中,如果忽略线路电阻的影响,易得线路的有功功率和无功功率为:

$$P_2 = \frac{U_2 U_1}{X_L} \sin(\theta_2 - \theta_1) \quad (11)$$

$$Q_2 = \frac{U_1^2}{X_L} - \frac{U_2 U_1}{X_L} \cos(\theta_2 - \theta_1) \quad (12)$$

若以 $U_1$ 方向为基准,相应的电压电流相量图如图3(b)所示。

由有功功率、无功功率的形式可得:

$$P_2 \frac{U_j}{X_L} U_{sc} [\sin(\theta_{sc} - \theta_j)] - \frac{U_j}{X_L} U_1 \sin \theta_j \quad (13)$$

$$Q_2 = \frac{U_1^2}{X_L} - \frac{U_1 U_j}{X_L} \cos(\theta_j) + \frac{U_{sc}^2}{X_L} - \frac{U_{sc} U_j}{X_L} \cos(\theta_{sc} - \theta_j) + \frac{2U_1 U_{sc}}{X_L} \cos \theta_{sc} \quad (14)$$

通过式(13,14)可知,线路潮流受到串联侧电压 $U_{sc}$ 的控制。

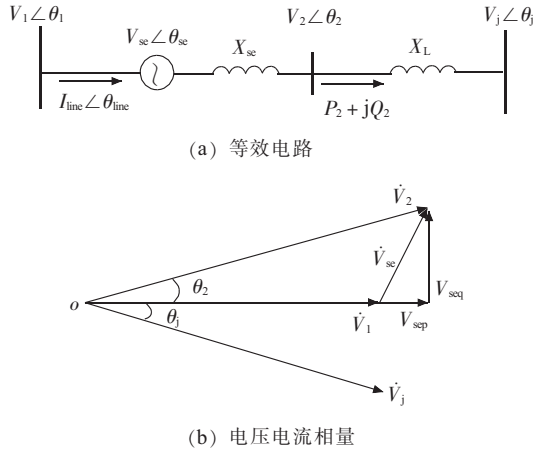


图3 串联侧等效电路及电压电流相量

根据以上分析,设  $\delta = \theta_2 - \theta_1$ ,代入式(13,14)易得:

$$P_2 + jQ_2 = \frac{U_2 U_1}{X_L} \sin(\delta) + j \left[ \frac{U_2^2}{X_L} - \frac{U_2 U_1}{X_L} \cos(\delta) \right] \quad (15)$$

通过分析可知,电压  $U_2, U_j$  的相位差主要影响线路传输的有功功率,而  $U_2$  的幅值主要影响线路传输的无功功率,因此通过  $\delta$  和  $U_2$  就可以实现对系统有功功率和无功功率的控制。将串联侧的输出电压  $U_{sc}$  以  $U_1$  为基准正交分解为  $U_{sep}$  和  $U_{seq}$ ,则  $U_{sep}$  主要通过  $U_2$  影响无功功率,  $U_{seq}$  则可实现对有功功率的控制。基于这一原理,可设计如下 PI 控制器,如图4所示。以有功功率和无功功率偏差量作为反馈,实现对串联侧控制。

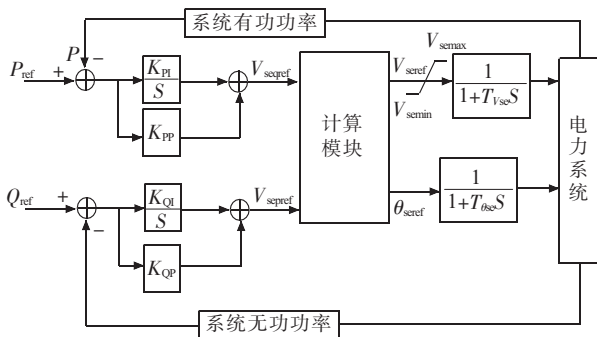


图4 UPFC 串联侧控制

其中计算环节的参考量计算方法为:

$$U_{secref} = \sqrt{U_{sepref}^2 + U_{seqref}^2} \quad (16)$$

$$Q_{secref} = \arctan \frac{U_{seqref}}{U_{sepref}} \quad (17)$$

采用类似的分析方法,分析并联侧功率控制的特点,当并联侧电压  $U_{shq}$  小于输入端电压  $U_1$ , 并联侧电流  $I_{shq}$  按规定正方向为负值,此时并联侧换流器吸收感性无功功率,反之,并联侧换流器吸收容性无功功率。因此通过控制  $U_{shq}$  的大小,可从系统吸收或发出无功功率,并调节无功功率的大小,可以得到并联侧控制策略,如图5所示。

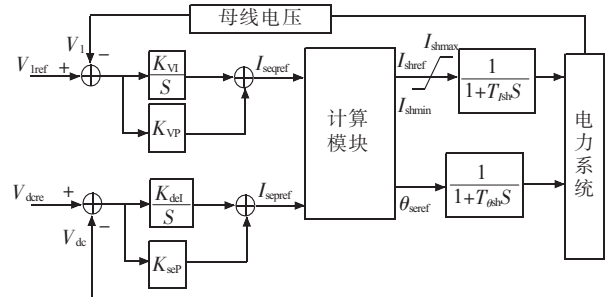


图5 UPFC 并联侧控制框图

其中计算模块的参考值计算方法为:

$$I_{secref} = \sqrt{I_{sepref}^2 + I_{seqref}^2} \quad (18)$$

$$\theta_{secref} = \arctan \frac{I_{seqref}}{I_{sepref}} \quad (19)$$

结合前文推导过程,由式(10)可知,将反馈信号引入控制信号输入节点,即可对系统产生一个正阻尼,这种阻尼控制方法可以不增加线路容量,利用本身安装在线路中的 UPFC,灵活方便,性能良好。

### 3 算例分析

#### 3.1 四机两区系统振荡模态分析

在 PSASP 软件中对 IEEE 的四机两区系统标准模型做具体的算例分析,系统接线如图6所示,系统参数已转换成 100 MV·A 的标幺值<sup>[5]</sup>。

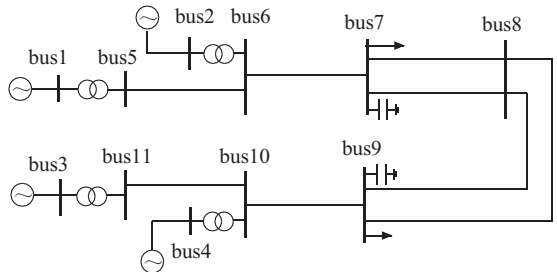


图6 四机两区系统结构

在 PSASP 中搭建四机两区模型,先对该系统进行潮流分析,得出稳定的潮流结果,然后对该系统进行小干扰分析,得出该系统振荡模式,如表1所示。系统中存在3低频振荡模式,其中特征根1为联络线上的低频振荡,而特征根2,3分别为区域左侧以及区域右侧机电振荡的振荡模式。

表1 原始系统模态分析结果

模式	特征根	频率 /Hz	阻尼比	相关比
1	-0.074 + j4.04	0.64	0.018 2	8.66
2	-0.143 + j8.08	1.28	0.017 7	35.11
3	-0.141 + j8.11	1.29	0.017 4	36.16

#### 3.2 PSS 抑制低频振荡效果分析

在发电机端安装 PSS 装置,对该系统进行小干扰分析,得出该系统振荡模式,如表2所示。从表2中可以看到,线路两侧的阻尼比分别为 3.7% 和 5.6%,系统

两侧振荡模式为强阻尼模式。但是系统联络线的阻尼比仅为 1.8%, 联络线属于弱阻尼振荡, 不能满足系统稳定性的要求。

表 2 含 PSS 系统模态分析结果

模式	特征根	频率/Hz	阻尼比	相关比
1	-0.100+j4.28	0.68	0.023 4	1.84
2	-0.313+j8.39	1.33	0.037 3	4.45
3	-0.479+j9.04	1.44	0.052 8	1.44

由此可以发现系统两侧低频振荡得到抑制, 但系统联络线仍未得到有效改善。说明仅通过 PSS 是不能满足系统要求的, PSS 受到各种因素的限制, 对区域间低频振荡的抑制效果不佳。

### 3.3 UPFC 抑制低频振荡效果分析

将 UPFC 加装在系统联络线上, 根据潮流分析的结果, 可定义 UPFC PI 控制参数, 对该系统进行小干扰分析, 得出该系统振荡模式, 如表 3 所示。可以看出联络线上阻尼比大幅度提升, 其阻尼比最高可达 23.9%, 此时联络线上的区间振荡将快速衰减, 同时区域两侧的低频振荡阻尼比也达到指标要求, 分别为 3.6% 和 5.3%, 系统内的振荡模式均为强阻尼模式, 不存在负阻尼模式与弱阻尼模式, 因此系统振荡均可在较短时间内衰减, 避免造成事故的扩大化。

表 3 含 UPFC 与 PSS 系统模态分析结果

模式	特征根	频率/Hz	阻尼比	相关比
1	-0.975+j3.89	0.62	0.238 8	1.08
2	-0.356+j8.44	1.33	0.035 9	4.32
3	-0.479+j9.05	1.44	0.052 8	1.40

图 7 为系统在非持续性小扰动下系统联络线的功率振荡情况。其中功率单位为  $MV \cdot A$ , 其稳定潮流有功功率由参数设定可知为 3.975 MW, 在系统中加入小扰动, 容易观察到, 对于不含 UPFC 的系统联络线, 系统存在弱阻尼低频振荡, 而安装了 UPFC 的振荡幅值快速衰减, 系统联络线的稳定性显著提高。证实了 UPFC 在抑制系统低频振荡方面的有效性。

图 7 中同时包含了 UPFC 与 PSS 对联络线功率振荡的影响的对比, 不难发现 UPFC 对抑制联络线功率振荡的效果明显优于 PSS, 实际上 PSS 的抑制效果并不能满足抑制低频振荡的要求。这也符合表中特征值

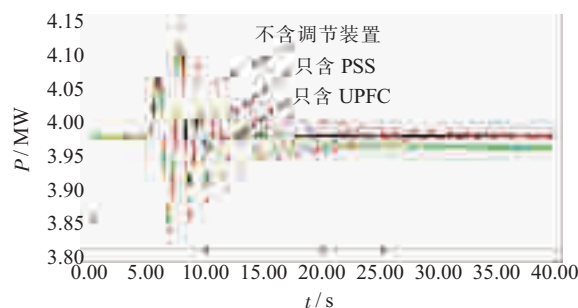


图 7 联络线功率对比

分析的结果。

## 4 结束语

在分析了低频振荡机理的基础上, 对 UPFC 抑制区域间低频振荡展开了研究。通过数学推导可知 UPFC 在合理的控制策略下可以向联络线路提供正阻尼, 从而有效抑制区域间低频振荡, 弥补 PSS 在区域间振荡上的不足。文章建立了 UPFC 的数学模型, 并在 PSASP 中根据该动态数学模型建立起 UPFC 用户自定义模型, 对其进行特征根分析和时域仿真。

### 参考文献:

- [1] 马燕峰. 电力系统低频振荡的协调阻尼控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [2] 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): 27-32.
- [3] 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.
- [4] 朱鹏程. 用于 UPFC 的串、并联双变流器控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [5] EBERHART R C, SHI Y. Comparison Between Genetic Algorithms and Particle Swarm Optimization[M]. EUolutionary Programming VII, Lecture Notes in Computer Science 1447, Springer, 1998: 611-616.

### 作者简介:

范子恺(1993), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 从事电力系统运行控制方向的研究;

吴熙(1987), 男, 江苏靖江人, 副研究员, 研究方向为电力系统运行控制;

冯双(1990), 女, 江苏南京人, 博士研究生, 从事电力系统运行与控制的研究工作。

## Study on the Restrain of Inter-area Low Frequency Oscillation by UPFC

FAN Zikai, WU Xi, FENG Shuang

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

**Abstract:** The paper has a detailed analysis on the inter-area low frequency oscillation in aspects of negative-damping effect. Then it proposes the approach of utilizing UPFC to restrain low frequency oscillation after analyzing the disadvantage of PSS in the condition of inter-area oscillation. The paper studies how UPFC contributes to the damping of lines without an additional damping controller, and then proposes a PI control model based on power injection method. A small signal analysis of transient stability with UPFC is proposed. Simulations results show that UPFC is effective to improve transient stability.

**Key words:** low frequency oscillation; FACTS; UPFC; PI control