抑制电力系统低频振荡的 UPFC 控制器设计

高正中，肖佳宜，申梦茜，李梓萌
（山东科技大学 电气与自动化工程学院，山东 青岛 266590）

摘　要：研究了统一潮流控制器（unified power flow controller，UPFC）抑制电力系统低频振荡的系统级控制策略，首先利用 Park 变换得到了 UPFC 的动态方程，并采用逆系统解耦控制方法将非线性控制系统线性化，实现了输入信号的解耦，然后结合 PI 控制策略完成了 UPFC 主控制器的设计。为提高 UPFC 抑制电力系统低频振荡的效果，以发电机角速度变化量作为反馈信号，设计了 UPFC 阻尼控制器。最后在 MATLAB/SIMULINK 平台中，对所设计的控制器进行仿真研究，仿真结果表明，UPFC 控制器具有抑制电力系统低频振荡的效果，加入阻尼控制器后，动态响应时间缩短，系统可以更快的恢复稳定状态。

关键词：统一潮流控制器；控制器设计；电力系统；低频振荡；阻尼控制器

中图分类号：TM712　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1672-3767(2017)05-0091-06

DOI：10.16452/j.cnki.sdkjzk.2017.05.013

UPFC Controller Design for Low Frequency Oscillation of Power System

GAO Zhengzhong, XIAO Jiayi, SHEN Mengxi, LI Zimeng
(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In this paper, the system level control strategy for UPFC suppression of low frequency oscillation in power system was studied. Firstly, the dynamic equation of UPFC was obtained by using Park transform, and the nonlinear control system was linearized by the inverse system decoupling control method so that the decoupling of the input signal was realized. Then, by combining with the PI control strategy, the design of the UPFC main controller was completed. To improve the effect of UPFC on low frequency oscillation of power system, the UPFC damping controller was designed with the change of angular velocity as the feedback signal. Finally, the designed controller was simulated on the MATLAB/SIMULINK platform and the results show that the UPFC controller can inhibit low frequency oscillation in power system, and that the dynamic response time is shortened and the system can reach stable state faster after damping controller is added.

Key words: UPFC; controller design; power system; low frequency oscillation; damping controller

在电网互联的大环境下多台发电机并列运行，当发生扰动时，发电机的转子之间发生相对摇摆并持续振荡，如果不采取措施及时处理，这种振荡会通过联络线波及到整个电力系统，威胁电力系统的稳定运行[1]。降低电力系统低频振荡，不仅能够提高电力系统的稳定性，使电力系统的运行安全得到更好的保障。另一方面，还能提高电力系统的区间电能传输能力，在我国积极推进“西电东送、南北互供、全国联网”的大背景下，对于我国电力系统的进一步发展有着重要意义。

近年来应用 UPFC 阻尼电力系统低频振荡逐渐成为了一个新的研究热点，UPFC 的出现为抑制低频振

收稿日期：2016-05-11
基金项目：中国博士后特别资助基金项目(2015T80729)；青岛市博士后研究人员应用研究项目(2015190)
作者简介：高正中(1971—)，男，山东济宁人，副教授，硕士生导师，主要从事智能电网技术、检测技术与自动化装置方面的研究.
E-mail：15898879844@163.com

荡，特别是区域间振荡提供了新的手段[2-4]。文献[5]采用测试信号法和极点配置法对 UPFC 附加阻尼控制器的参数进行整定。文献[6]设计 UPFC 附加阻尼控制器，将系统特征值与发电机转矩系数相结合，对振荡模式进行了分析。本文根据电力系统稳定器抑制电力系统低频振荡的机理，采用逆系统解耦控制方法设计 UPFC 主控制器，并以发电机角速度变化量作为反馈信号设计 UPFC 附加阻尼控制器。采用这种逆系统的解耦控制方法实现对 UPFC 变换器的控制，其优点是当线路参数变化时仍能取得较好的动态效果，具有较好的鲁棒性。

1 UPFC 的基本结构及工作原理

典型的 UPFC 工作原理图如图 1 所示，VSCE 通过励磁变压器(ET)并联接入系统，除了向 VSCB 提供有功功率外，还可以向系统吸收或注入无功功率，用来控制母线电压。VSCB 通过升压变压器(BT)串联接入系统，向线路注入一个幅值和相位可调的串联电压，控制线路的潮流，两个换流器间通过直流电容连接进行功率的交换[7]。

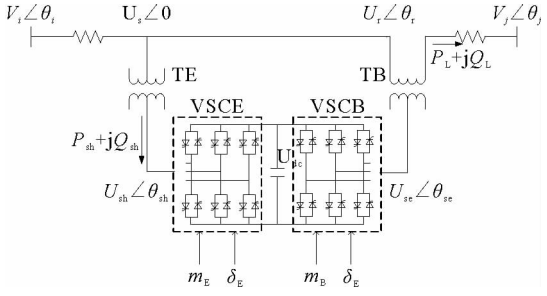

图 1 UPFC 原理图

Fig. 1 UPFC schematic diagram

将上述统一潮流控制器安装在电力系统中，设 UPFC 接入点电压为 $U_s=U_s\angle 0$，并联换流器输出端的电压为 $U_{sh}=U_r\angle\theta_{sh}$，并联换流器的阻抗设为 jX_{sh}，则由于 UPFC 的接入，系统向 UPFC 输入的功率可以表示为：

$$P_{sh}=jQ_{sh}=-\frac{U_sU_{sh}}{X_{sh}}\sin\theta_{sh}+j\left(\frac{U_s^2}{X_{sh}}-\frac{U_sU_{sh}}{X_{sh}}\cos\theta_{sh}\right)。\tag{1}$$

由于 UPFC 串联侧换流器的接入，被控线路上的潮流亦发生变化，设 UPFC 串联侧输出的电压为 $U_r=U_r\angle\theta_r$ 被控线路的等值阻抗为 jX_L，线路末端的电压为 $U_j=U_j<\theta_j$，那么 UPFC 向系统输入的功率可以表示为：

$$P_L+jQ_L=\frac{U_rU_j}{X_L}\sin(\theta_r-\theta_j)+j\left(\frac{U_r^2}{X_L}-\frac{U_rU_j}{X_L}\cos(\theta_r-\theta_j)\right)。\tag{2}$$

分析上式可以发现，通过改变线路和 UPFC 输出端的相角差 $\theta_r-\theta_j$，可以控制电力线路中的有功潮流，改变 UPFC 输出电压 U_r 可以控制线路中的无功潮流。

2 UPFC 主控制器设计

2.1 基于 PI 控制的逆系统方法解耦控制策略

UPFC 控制系统是非线性的动态系统[8]，且经过 Park 变化后得到电压横轴分量和纵轴分量间存在耦合关系。根据给定的被控对象模型，采用逆系统方法，可以实现将多变量、强耦合的非线性化系统线性化解耦[9]。逆系统方法解耦控制首先利用“积分逆系统”将原系统补偿成一个具有线性传递关系的系统，然后采用线性系统的 PI 控制策略完成整个控制器的设计。

2.2 UPFC 并联侧控制器设计

UPFC 的装置级控制器是 UPFC 功能实现的核心[10]，分析 UPFC 内部动态模型可以得到 UPFC 的三相动态微分方程[11]。由于三相静止坐标下的 UPFC 模型不利于控制器的设计，利用 Park 变换将其旋转到 d-q 坐标系，忽略 UPFC 两个变压器的电阻和暂态响应，可以得到派克变换后 UPFC 的动态方程：

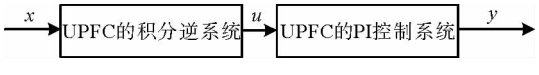

图 2 基于 PI 控制的逆系统解耦控制框图

Fig. 2 Block diagram of inverse system decoupling control based on PI control

$$\begin{bmatrix} U_{shd} \\ U_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_{sh} & \omega \\ -\omega & -R_{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{shd} - U_{sd} \\ U_{shq} - U_{sq} \end{bmatrix}。 \tag{3}$$

选取并联换流器输出端的电压作为输入变量 $\boldsymbol{U}=[u_1 \quad u_2]^{\mathrm{T}}=[U_{shd} \quad U_{shq}]^{\mathrm{T}}$；并联换流器输出侧的电流作为状态变量 $\boldsymbol{X}=[x_1 \quad x_2]^{\mathrm{T}}=[I_{shd} \quad I_{shq}]^{\mathrm{T}}$，同时取并联换流器输出侧的电流作为输出变量 $\boldsymbol{Y}=[y_1 \quad y_2]^{\mathrm{T}}=[U_{shd} \quad U_{shq}]^{\mathrm{T}}$，系统的状态方程可以表示为：

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -\dfrac{R_{sh}}{L_{sh}} x_1 + \omega x_2 - \dfrac{1}{L_{sh}}(u_1 - u_{sd}) & (4) \\ \dot{y}_2 = -\dfrac{R_{sh}}{L_{sh}} x_2 - \omega x_1 - \dfrac{1}{L_{sh}}(u_1 - u_{sq}) & (5) \end{cases}。$$

根据系统可逆定理可知此系统在领域内存在向量相对阶 $\boldsymbol{\alpha}=[1 \quad 1]^{\mathrm{T}}$，说明该系统可逆，系统的逆系统为

$$\begin{cases} u_1 = -R_{sh} I_{shd} + \omega L_{sh} I_{shq} + U_{sd} - L_{sh} U_{shd} & (6) \\ u_2 = -R_{sh} I_{shq} + \omega L_{sh} I_{shd} + U_{sq} - L_{sh} U_{shq} & (7) \end{cases}。$$

将上述得到的 UPFC 并联侧积分逆系统结合 PI 控制器，控制目标选并联侧母线电压 U_s 及直流侧电容电压 U_{dc} 对应的控制框图如图 3 所示：

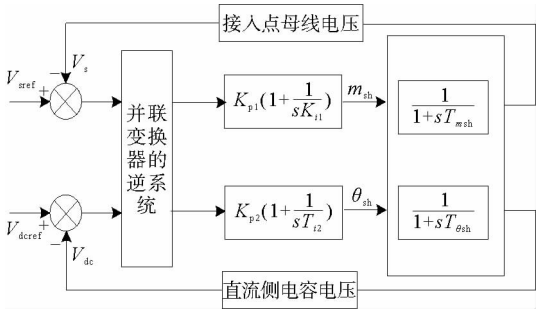

图 3　UPFC 并联侧控制框图

Fig. 3　Block diagram of UPFC shunt controller

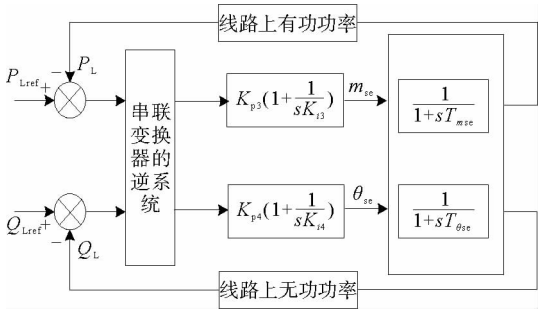

图 4　UPFC 串联侧控制框图

Fig. 4　Block diagram of UPFC series controller

其中，K_{p1}，K_{p2}，K_{i1}，K_{i2} 为 PI 控制器的比例积分控制系数，T_{msh}，$T_{\theta sh}$ 为惯性时间常数，m_{sh}，θ_{sh} 分别决定 V_{sh} 的幅值和相角。电压误差值经过控制器能够获得需要控制的调制比与相角[12]。

2.3　UPFC 串联侧控制器设计

UPFC 串联换流器的输入变量亦可以利用积分逆系统的方法实现解耦，通过将表达串联变换器动态方程进行 Park 坐标变化，取串联变流器输出侧电压作为输入变量 $\boldsymbol{U}=[u_1 \quad u_2]^{\mathrm{T}}=[U_{sed} \quad U_{seq}]^{\mathrm{T}}$，交流侧输出电流作为状态变量 $\boldsymbol{X}=[x_1 \quad x_2]^{\mathrm{T}}=[I_{sed} \quad I_{seq}]^{\mathrm{T}}$，输出变量为 $\boldsymbol{Y}=[y_1 \quad y_2]^{\mathrm{T}}=[U_{rd} \quad U_{rq}]^{\mathrm{T}}$，串联侧控制器逆系统表达式为：

$$\begin{cases} u_1 = -R_{se} I_{sed} + (2\omega L_{se} - L_{se} C_{se}) I_{seq} + L_{se} C_{se} \omega^2 U_{rd} - (U_{sed} - \dot{U}_{sed}) L_{se} C_{se} & (8) \\ u_2 = -R_{se} I_{seq} + (2\omega L_{se} - L_{se} C_{se}) I_{sed} + L_{se} C_{se} \omega^2 U_{rq} - (U_{seq} - \dot{U}_{seq}) L_{se} C_{se} & (9) \end{cases}$$

控制目标选线路中的有功潮流 P_L 及无功潮流 Q_L 对应的控制框图如图 4 所示，K_{p3}，K_{p4}，K_{i3}，K_{i4} 为 PI 控制器的比例积分控制系数，T_{mse}，$T_{\theta se}$ 为惯性时间常数，线路上有功功率、无功功率值与参考值比较后的误差经过控制器能够进一步缩小误差[13]。

3　UPFC 阻尼控制器设计

3.1　含有 UPFC 的单机无穷大系统 Heffron-Phillips 模型

为了研究 UPFC 阻尼电力系统低频振荡的机理，将 UPFC 置于单机系统中，结合方程(3)和发电机三阶

模型可以得到配备了 UPFC 的单机无穷大电力系统的非线性状态方程，在选定的系统平衡点处，借助 Taylor 展开式，以非线性函数的全微分代替其增量，可以得到装有 UPFC 单机无穷大系统状态方程[14]：

$$\begin{pmatrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{E}'_{q} \\ \Delta\dot{E}_{qe} \\ \Delta\dot{V}_{dc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 & -\frac{K_{pd}}{M} \\ -\frac{K_4}{T'_{do}} & 0 & -\frac{K_3}{T'_{do}} & -\frac{1}{T'_{do}} & -\frac{K_{qd}}{T'_{do}} \\ -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} & -\frac{K_A K_{vd}}{T_A} \\ K_7 & 0 & K_8 & 0 & -K_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_{q} \\ \Delta E_{qe} \\ \Delta V_{dc} \end{pmatrix} +$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{pe}}{M} & -\frac{K_{p\delta e}}{M} & -\frac{K_{pb}}{M} & -\frac{K_{p\delta b}}{M} \\ -\frac{K_{qe}}{T'_{do}} & -\frac{K_{q\delta e}}{T'_{do}} & -\frac{K_{qb}}{T'_{do}} & -\frac{K_{q\delta b}}{T'_{do}} \\ -\frac{K_A K_{ve}}{T_A} & -\frac{K_A K_{v\delta e}}{T_A} & -\frac{K_A K_{vb}}{T_A} & -\frac{K_A K_{v\delta b}}{T_A} \\ K_{ce} & K_{c\delta e} & K_{cb} & K_{c\delta b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta m_E \\ \Delta\delta_E \\ \Delta m_B \\ \Delta\delta_B \end{pmatrix} \tag{10}$$

其中：Δm_E，$\Delta\delta_E$，Δm_B，$\Delta\delta_B$ 为控制变量；$\Delta\dot{\delta}$，$\Delta\dot{\omega}$，$\Delta\dot{E}'_{q}$，$\Delta\dot{E}_{qe}$，ΔV_{dc} 为状态变量；T 为时间常数，K 为补偿块增益，其值可以由系统参数和初始运行条件所决定。

分析上述线性状态方程看出，系统的输入量为 UPFC 输出电压相角和调制比，用 Δu 表示控制信号 Δm_E，$\Delta\delta_E$，Δm_B，$\Delta\delta_B$ 中的一个或多个，根据线性状态方程，可以画出装有 UPFC 的无穷大系统 Heffron-Phillips 模型如图 5。

其中，$\boldsymbol{K}_{pu}=[K_{pe}\quad K_{p\delta e}\quad K_{pb}\quad K_{p\delta u}]$，$\boldsymbol{K}_{qu}=[K_{qe}\quad K_{q\delta e}\quad K_{qb}\quad K_{q\delta u}]$，$\boldsymbol{K}_{vu}=[K_{ve}\quad K_{v\delta e}\quad K_{vb}\quad K_{v\delta u}]$，$\boldsymbol{K}_{cu}=[K_{ce}\quad K_{c\delta e}\quad K_{cb}\quad K_{c\delta u}]$。通过分析装有 UPFC 单机无穷大系统 Heffron-Phillips 模型，可以得到 UPFC 阻尼功率振荡的控制机理，从而指导 UPFC 阻尼控制器的设计[15]。

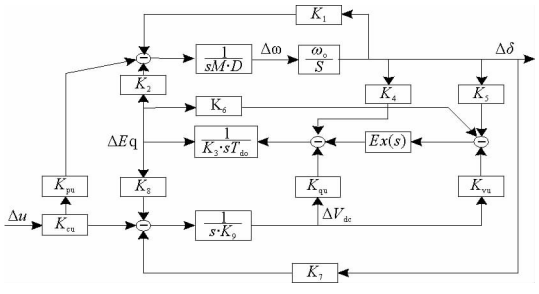

图 5　含有 UPFC 的单机无穷大系统 Heffron-Phillips 模型

Fig. 5　Heffron-Phillips model of a single machine infinite bus system with UPFC

3.2　UPFC 阻尼控制器设计

本系统以额定运行时作为初始条件设计阻尼控制器，选取能够反映系统功率振荡状态的量作为输入量，输出量是附加到主控制环节的辅助控制量。对于 UPFC 而言，通过控制 m_B、δ_B 适应线路有功无功功率的变化，通过 δ_E 控制器调节直流电容电压的稳定，通过 m_E 调节并联换流器接入点母线电压。此处选取系统角频率变化量 $\Delta\omega$ 作为输入，通过阻尼控制器输出为 $\Delta\delta_E$，UPFC 阻尼控制器控制框图如图 6 所示：

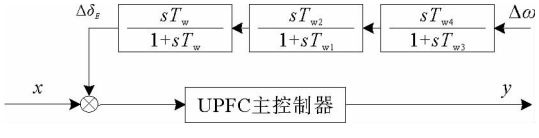

图 6　UPFC 阻尼控制器控制框图

Fig. 6　Block diagram of UPFC damping controller

其中，T_w、T_{w1}、T_{w2}、T_{w3}、T_{w4} 为阻尼控制器的时间常数，通常取值在 10～20 ms 之间。UPFC 阻尼控制器输入输出变量间有如下关系：

$$\Delta\delta_E=\frac{sT_w(1+sT_{w2})(1+sT_{w4})}{(1+sT_w)(1+sT_{w1})(1+T_{w3})}\Delta\omega。\tag{11}$$

时间常数确定以后，将上式代入式(10)中，即可以获得加入 UPFC 阻尼控制器后系统的状态矩阵。

4 仿真结果

为验证设计的基于逆系统解耦控制策略的 UPFC 主控制器和附加阻尼控制器对抑制电力系统在发生小扰动情况下低频振荡的有效性，在 MATLAB/SIMULINK 中对其效果进行了仿真实验。系统的仿真参数为：电源电压单相有效值 $U=220$ V，$M=8$，$D=0.1$，$X_d=0.973$，$X_q=0.55$，$\delta_0=15°$。PI 控制器参数设置如下：K_I 的取值范围为：0～0.05；K_P 的取值范围为：0～10，初始值设定为：$K_{p1}=K_{p2}=0.7$，$K_{i1}=K_{i2}=0.3$。

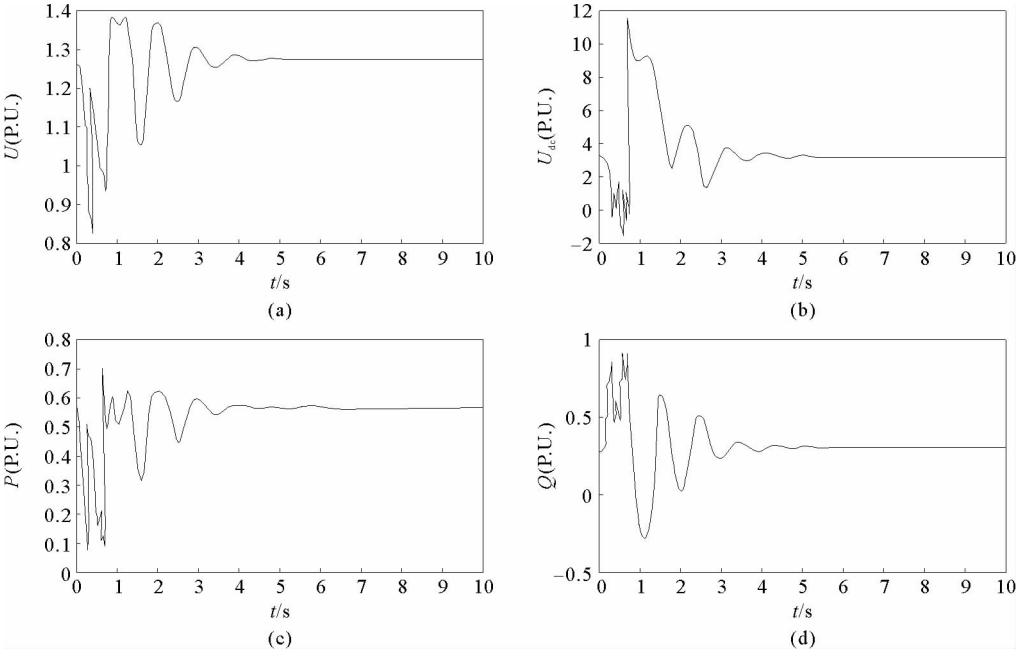

图 7 UPFC 主控制器指令值跟踪情况

Fig. 7 UPFC main controller instruction value tracking

图 7(a)表示在线路中加入 UPFC 中控制器后母线节点电压幅值变化情况，图 7(b)表示直流电容侧测得的电压波形，图 7(c)、图 7(d)分别表示串联控制器输出侧线路上有功功率、无功功率的指令跟踪波形。在小扰动情况下，采用逆系统解耦方法设计的 UPFC 主控制器可以起到抑制低频振荡、提高电力系统动态稳定性的作用，但是响应的时间较长，不能在振荡发生初期及时发挥作用。图 8 给出了在上述系统中加入 UPFC 附加阻尼控制器后发电机的转子摇摆曲线。

仿真图形可以直观的展示设计的 UPFC 装置级控制器阻尼电力系统低频振荡的效果，另外，通过特征根数值求法亦可以反应控制器的控制效果。当未安装 UPFC 时，通过求解系统特征方程得到状态矩阵，状态矩阵的特征根实部为 −0.085，靠近复平面的虚轴，说明系统在小扰动的情况下易失去稳定性。在系统中安装 UPFC 主控制器后，结合 UPFC 的动态方程求得最大特征根的实部为 −0.231，阻尼比为 0.187，说明 UPFC 主控制器在一定程度上可以抑制低频振

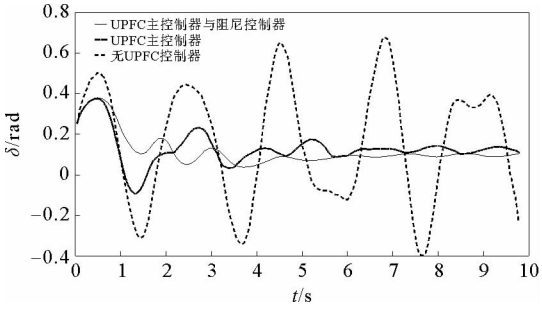

图 8 UPFC 阻尼控制器控制效果图

Fig. 8 Control effect diagram of UPFC damping controller

荡，但抑制能力有限。在装有 UPFC 主控制器的系统中加入附加阻尼控制器，最大特征根实部为－0.614，进一步得到了优化，阻尼比为－0.437，明显偏离复平面的虚轴，从图形亦可以看出，安装阻尼控制器后缩短了系统的调节时间，抑制低频振荡的能力最强。

5 结论

采用逆系统解耦方法设计了基于 PI 控制的 UPFC 主控制器，在 UPFC 主控制器设计好的基础上给出了附加阻尼控制器的设计方案。未加入附加阻尼控制器时，UPFC 主控制器本身可通过调节比例积分控制系数在一定范围内实现抑制系统低频振荡的作用，加入附加阻尼控制器以后，UPFC 控制系统可向系统提供正阻尼转矩，提高系统的动态性能。最后，在 MATLAB/SIMULINK 中验证了所设计的 UPFC 控制系统抑制低频振荡的能力，仿真结果同时表明，所设计的控制器不会影响系统及 UPFC 装置的正常运行。

参考文献：

[1]宋晓燕. 统一潮流控制器在湖南电网中的应用研究[D]. 北京：华北电力大学，2012：23-26.

[2]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，2016，44(1)：92-96.
QI Wanchun，YANG Lin，SONG Pengcheng，et al. UPFC system control strategy research in Nanjing Western power grid [J]. Power System Technology，2016，44(1)：92-96.

[3]KUMAR B V. SRIKANTH N V. A hybrid approach for optimal location and capacity of UPFC to improve the dynamic stability of the power system[J]. Applied Soft Computing，2016，32(2)：121-127.

[4]朱鑫要，金梦，李建生，等. 统一潮流控制器附加阻尼抑制次同步谐振的理论与仿真[J]. 电力系统自动化，2016，40(16)：44-48.
ZHU Xinyao，JIN Meng，LI Jiansheng，et al. Theory and simulation of supplementary damping control for unified power flow controller to mitigate subsynchronous resonance[J]. Automation of Electric Power System，2016，40(16)：44-48.

[5]ZAHALAN A，FADZAIL N F，MISRUN M I. Comparing the performance of UPFC damping controller on damping low frequency oscillations[J]. Applied Mechanics and Materials，2015，793：242-246.

[6]范子恺，吴熙，冯双，等. UPFC 抑制系统区域间低频振荡研究[J]. 江苏电机工程，2016，35(1)：20-23.
FAN Zikai，WU Xi，FENG Shuang，et al. Study on inter regional low frequency oscillation of UPFC suppression system [J]. Jiangsu Electrical Engineering，2016，35(1)：20-23.

[7]刘莎莎. 统一潮流控制器建模与控制策略研究[D]. 青岛：山东科技大学，2015：35-38.

[8]陈业飞，李林川，张芳等. 基于节点电流注入法的 UPFC 潮流控制新方法研究[J]. 电力系统保护与控制，2014，42(2)：69-74.
CHEN Yefei，LI Linchuan，ZHANG Fang，et al. Study on novel power flow control method of UPFC based on bus current injection[J]. Power System Protection and Control，2014，42(2)：69-74.

[9]郭易木，江道灼，陈峰，等. 限流式 UPFC 对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电网技术，2016(7)：2087-2093.
GUO Yimu，JIANG Daozhuo，CHEN Feng，et al. Effects of UPFC-FCL on power system transient stability[J]. Power System Technology，2016(7)：2087-2093.

[10]汪惟源，窦飞，杨林，等. UPFC 在江苏电网中的应用与控制效果[J]. 电网与清洁能源，2016(3)：92-97.
WANG Weiyuan，DOU Fei，YANG Lin，et al. Application and control effect of UPFC in Jiangsu power grid[J]. Power System and Clean Energy，2016(3)：92-97.

[11]许海，杨尚瑾，宋晓通，等. UPFC 潮流控制模型及控制特性研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版)，2015，42(1)：28-33.
XU Hai，YANG Shangjin，SONG Xiaotong，et al. Study on load flow control model and control performance of UPFC [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)，2015，42(1)：28-33.

[12]杨晓峰，郑琼林，薛尧，等. 模块化多电平换流器的拓扑和工业应用综述[J]. 电网技术，2016，40(1)：1-10.
YANG Xiaofeng，ZHENG Qionglin，XUE Yao，et al. Review on topology and industry applications of modular multilevel converter[J]. Power System Technology，2016，40(1)：1-10.

(下转第 116 页)

[16]康小宁,屈亚军,焦在滨,等. 基于最小二乘矩阵束算法的工频分量提取方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(21):66-70.
KANG Xiaoning,QU Yajun,JIAO Zaibin,et al. Power-frequency phasor extraction based on least-square matrix pencil algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(21):66-70.
[17]索南加乐,王斌,宋国兵,等. 电力系统快速相量提取算法的性能探究[J]. 电力科学与技术学报,2013,28(1):25-30.
SUONAN Jiale,WANG Bin,SONG Guobing,et al. Performance study of fast phasor calculating method for power systems [J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2013,28(1):25-30.
[18]王晨清,宋国兵,汤海雁,等. 距离保护在风电接入系统中的适应性分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(22):10-15.
WANG Chenqing,SONG Guobing,TANG Haiyan,et al. Adaptability analysis of distance protection in power systems with wind farms [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(22):10-15.

(责任编辑:吕海亮)

(上接第 90 页)

[9]BALASUBRAMANYAM C,SHETTY A B,SPANDANA K R,et al. Analysis and optimization of an 8 bar mechanism[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics,2015,6(4):655-666.
[10]KIRECCI A,DULGER L C. A study on a hybrid actuator[J]. Mechanism & Machine Theory,2000,35(8):1141-1149.
[11]DU R,GUO W Z. The Design of a new metal forming press with controllable mechanism[J]. Journal of Mechanical Design,2003,125(3):582-592.
[12]GUO W Z,HE K,YEUNG K,et al. A new type of controllable mechanical press:Motion control and experiment validation [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering,2005,127(4):731-742.
[13]LI H,ZHANG C,MENG C. Hybrid-driven nine-bar press for precision drawing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2004,17(S):197-200.
[14]ZHOU Y. Type synthesis and optimization of main driving mechanism for servo-punch press[J]. Journal of Mechanical Engineering,2015,51(11):1-7.

(责任编辑:李 磊)

(上接第 96 页)

[13]孙正龙,王雨薇. 浅谈互联电网低频振荡的分析与控制方法[J]. 黑龙江科技信息,2015(36):180-181.
SUN Zhenglong,WANG Yuwei. Analysis and control of low frequency oscillation in interconnected power system[J]. Heilongjiang Science and Technology Information,2015(36):180-181.
[14]宋鹏程,甄宏宁,王震泉,等. UPFC 附加阻尼控制器设计研究[J]. 江苏电机工程,2015,34(6):10-13.
SONG Pengcheng,ZHEN Hongning,WANG Zhenquan,et al. Parameters tuning for UPFC auxiliary damping controller design of additional damping controller[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2015,34(6):10-13.
[15]KHODABAKHSHIAN A,ESMAILI M R,BORNAPOUR M. Optimal coordinated design of UPFC and PSS for improving power system performance by using multi-objective water cycle algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2016,83:124-133.

(责任编辑:李 磊)