文章编号: 1000-8152(2010)05-0551-06

统一潮流控制器逆系统方法控制策略

奔,黄崇鑫,李 泰,邓家泽 Ŧ

(西南交通大学 电气学院, 四川 成都 610031)

摘要:统一潮流控制器在同步旋转dq坐标系下的数学模型,反映出统一潮流控制器是一个强耦合的、非线性的系 统.为解决对这个强耦合、非线性系统直接设计控制器的困难,采用逆系统方法,将原系统线性化且解耦,构造出 个伪线性系统,然后,运用变结构控制,针对构造出的这个伪线性系统,设计该系统的控制策略以实现对统一潮流控 制器综合控制.最后,通过建立仿真试验模型进行仿真,仿真的结果验证了文中提出的这种控制策略的可行性和有 效性.

关键词: 统一潮流控制器: 逆系统方法: 变结构控制: 伪线性系统 中图分类号: TM722; TM761 文献标识码: A

Inverse-system control scheme for unified-power-flow controller

WANG Ben, HUANG Chong-xin, LI Tai, DENG Jia-ze

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: The mathematical model of the unified-power-flow controller(UPFC) in a synchronous rotating dq coordinate system reflects that it is a strong coupling nonlinear system. To avoid the difficulties in designing the controllers for the system, an inverse-system control is proposed. Firstly, using the inverse-system method, we linearize and decouple the original system of UPFC into a pseudo-linear system. Secondly, employing the variable-structure-control(VSC) theory, we design the variable-structure controllers of the pseudo-linear system for controlling the system of UPFC. Finally, by performing simulations on a simulation model, we validate the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: unified-power-flow controller; inverse-system method; variable-structure control; pseudo-linear system

引言(Introduction) 1

随着电力系统的规模日益扩大,电网结构日趋复 杂,其运行的可靠性、稳定性以及灵活性变得越来 越紧迫. 统一潮流控制器(UPFC)是迄今为止调节功 率潮流最为灵活、功能最为齐全的FACTS设备^[1,2]. 它是由直流储能电容将一个并联变流器和一个串联 变流器连接在一起的装置. 它能分别或同时调节输 电线路的有功、无功^[3~5].

UPFC的功能强大,控制调节灵活,设计UPFC控 制器却比较复杂. UPFC是一个多变量、强耦合、非 线性的系统,不便于控制器设计.本文采用逆系统控 制方法,构造出UPFC的逆系统,然后将构造出来的 逆系统与原系统串联,将原系统线性化和解耦后,构 成一个伪线性系统. 然后, 针对这个伪线性系统设计 控制器,设计方法变得简单易行.本文所采用的控制 策略与基于状态反馈解耦PI控制方法^[1,4~6]相比,在

设计控制器时,用到的PI控制器数量较少,且所采用 的变结构控制方法,控制器参数镇定与PI控制器参 数镇定相比要简单. 最后, 建立仿真模型进行仿真验 证, 仿真的结果证实了本文提出的控制策略的正确 性和有效性.

UPFC的工作原理及数学模型(Working 2 principle and mathematical model of UPFC)

UPFC的电路结构图^[1]如图1,它是一个通过直流 电容器把一个并联变流器和一个串联变流器连接在 一起的装置,并联变流器可视为一受控电流源,通过 控制它流入母线的电流幅值和相位,就可以实现并 联无功补偿的功能[1,7,8]。同时,它还用于平衡串联 变流器与电网交换的有功. 串联变流器可等效为一 个受控电压源,通过控制串入输电线路电压的幅值 和相位,既可以调节输电线上的有功和无功,又可 以调节接入点母线电压的幅值和相角,同时还可以

收稿日期: 2008-06-05; 收修改稿日期: 2009-06-05.

第 27 卷

补偿输电线路阻抗.除作为串联补偿器运行方式外, 分有功交换是 串联变流器还要与输电线路发生有功交换,而这部 平衡.

分有功交换是通过直流电容器,由并联变流器来 平衡.



图 1 UPFC电龄结构框图 Fig. 1 Configuration of UPFC

由图1,可得到UPFC在三相静止坐标系下的数 学模型^[1]如下:

 $\begin{cases} L_{\rm sh}\dot{I}_{\rm shA} = U_{\rm sA} - R_{\rm sh}I_{\rm shA} - S_{\rm shA}U_{\rm dc} - U_{NO_{\rm s}}, \\ L_{\rm sh}\dot{I}_{\rm shB} = U_{\rm sB} - R_{\rm sh}I_{\rm shB} - S_{\rm shB}U_{\rm dc} - U_{NO_{\rm s}}, \\ L_{\rm sh}\dot{I}_{\rm shC} = U_{\rm sC} - R_{\rm sh}I_{\rm shC} - S_{\rm shC}U_{\rm dc} - U_{NO_{\rm s}}, \\ C_{\rm dc}\dot{U}_{\rm dc} = S_{\rm shA}I_{\rm shA} + S_{\rm shB}I_{\rm shB} + S_{\rm shC}I_{\rm shC} - I_{\rm dc}, \\ L_{\rm se}\dot{I}_{\rm seA} = -R_{\rm se}I_{\rm seA} - U_{\rm seA} + S_{\rm seA}U_{\rm dc} + U_{\rm NO}, \\ L_{\rm se}\dot{I}_{\rm seB} = -R_{\rm se}I_{\rm seB} - U_{\rm seB} + S_{\rm seB}U_{\rm dc} + U_{\rm NO}, \\ L_{\rm se}\dot{I}_{\rm seC} = -R_{\rm se}I_{\rm seC} - U_{\rm seC} + S_{\rm seC}U_{\rm dc} + U_{\rm NO}, \\ L_{\rm se}\dot{U}_{\rm cseA} = I_{\rm seA} - I_{\rm seLA}, \\ C_{\rm se}\dot{U}_{\rm cseB} = I_{\rm seB} - I_{\rm seLB}, \\ C_{\rm se}\dot{U}_{\rm cseC} = I_{\rm seC} - I_{\rm seLC}. \end{cases}$ (1)

在式(1)中: U_{sA}, U_{sB}, U_{sC} 是并联变流器接入点母 线的三相电压; $I_{shA}, I_{shB}, I_{shC}$ 是流入并联变流 器的三相电流; $S_{shA}, S_{shB}, S_{shC}$ 是并联变流器可 关断器件的三相开关函数; U_{dc} 是直流侧电容 电压, I_{dc} 是从直流侧流入串联变流器的电流; $S_{seA}, S_{seB}, S_{seC}$ 是串联变流器可关断器件的三相 开关函数; $I_{seA}, I_{seB}, I_{seC}$ 是流过串联变流器滤波 电感的三相电流; U_{CseA}, U_{CseC} 是串联变流 器滤波电容上的三相电压; $I_{seLA}, I_{seLB}, I_{seLC}$ 是流 入串联变压器的三相电流. 对式(1)作经典派克变换,得到UPFC在dq坐标 下的数学模型:

$$\begin{cases} L_{\rm sh}\dot{I}_{\rm shd} = \omega L_{\rm sh}I_{\rm shq} - R_{\rm sh}I_{\rm shd} + U_{\rm sd} - S_{\rm shd}U_{\rm dc}, \\ L_{\rm sh}\dot{I}_{\rm shq} = -\omega L_{\rm sh}I_{\rm shd} - R_{\rm sh}I_{\rm shq} + U_{\rm sq} - S_{\rm shq}U_{\rm dc}, \\ C_{\rm dc}\dot{U}_{\rm dc} = \frac{3}{2}(S_{\rm shd}I_{\rm shd} + S_{\rm shq}I_{\rm shq}) - I_{\rm dc}, \\ L_{\rm se}\dot{I}_{\rm sed} = \omega L_{\rm se}I_{\rm seq} - R_{\rm se}I_{\rm sed} - U_{\rm Csed} + S_{\rm sed}U_{\rm dc}, \\ L_{\rm se}\dot{I}_{\rm seq} = -\omega L_{\rm se}I_{\rm sed} - R_{\rm se}I_{\rm seq} - U_{\rm Cseq} + S_{\rm seq}U_{\rm dc}, \\ C_{\rm se}\dot{U}_{\rm Csed} = \omega C_{\rm se}U_{\rm Cseq} + I_{\rm sed} - I_{\rm seLd}, \\ C_{\rm se}\dot{U}_{\rm Cseq} = -\omega C_{\rm se}U_{\rm Csed} + I_{\rm seq} - I_{\rm seLq}. \end{cases}$$

$$(2)$$

在式(2)中,考虑到UPFC为三相对称系统,那么各 三相变量经派克变换后,其0轴分量均为0.

为表达方便,令UPFC系统的状态变量为

$$[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7] =$$

$$[I_{\text{shd}}, I_{\text{shq}}, U_{\text{dc}}, I_{\text{sed}}, I_{\text{seq}}, U_{\text{Csed}}, U_{\text{Cseq}}].$$

输入变量为

$$[u_1, u_2, u_3, u_4] = [S_{\text{shd}}, S_{\text{shq}}, S_{\text{sed}}, S_{\text{seq}}].$$

输出变量为

 $[y_1, y_2, y_3, y_4] = [I_{shd}, I_{shq}, U_{Csed}, U_{Cseq}].$ 则将式(2)写成含有系统输出的状态方程形式得

第5期

$$\begin{cases} \dot{x}_{1} = (\omega L_{\rm sh} x_{2} - R_{\rm sh} x_{1} - u_{1} x_{3} + U_{\rm sd})/L_{\rm sh}, \\ \dot{x}_{2} = (-\omega L_{\rm sh} x_{1} - R_{\rm sh} x_{2} - u_{2} x_{3} + U_{\rm sq})/L_{\rm sh}, \\ \dot{x}_{3} = [\frac{3}{2}(u_{1} x_{1} + u_{2} x_{2}) - I_{\rm dc}]/C_{\rm dc}, \\ \dot{x}_{4} = (\omega L_{\rm se} x_{5} - R_{\rm se} x_{4} - x_{6} + u_{3} x_{3})/L_{\rm se}, \\ \dot{x}_{5} = (-\omega L_{\rm se} x_{4} - R_{\rm se} x_{5} - x_{7} + u_{4} x_{3})/L_{\rm se}, \\ \dot{x}_{6} = (\omega C_{\rm se} x_{7} + x_{4} - I_{\rm seLd})/C_{\rm se}, \\ \dot{x}_{7} = (-\omega C_{\rm se} x_{6} + x_{5} - I_{\rm seLq})/C_{\rm se}, \\ y_{1} = x_{1}, y_{2} = x_{2}, y_{3} = x_{6}, y_{4} = x_{7}. \end{cases}$$

$$(3)$$

由式(3)可以看出, UPFC系统是一个多输入多 输出的、强耦合的、非线性的系统.

- **3 UPFC的**控制策略(Control method of UPFC)
- **3.1** 求取UPFC的逆系统(Finding inverse system of UPFC)

逆系统方法^[9], 是利用被控对象的逆系统将被 控制对象补偿成具有线性传递关系的系统, 即伪 线性系统. 然后, 可灵活地运用各种控制理论来设 计伪线性系统的控制器.

根据系统求逆方法,求解出UPFC的逆系统,求 解过程如下:

对[y1, y2]分别求导得

$$\begin{cases} \dot{y}_{1} = \dot{x}_{1} = \\ (\omega L_{\rm sh} x_{2} - R_{\rm sh} x_{1} - u_{1} x_{3} + U_{\rm sd})/L_{\rm sh}, \\ \dot{y}_{2} = \dot{x}_{2} = \\ (-\omega L_{\rm sh} x_{1} - R_{\rm sh} x_{2} - u_{2} x_{3} + U_{\rm sq})/L_{\rm sh}. \end{cases}$$
(4)

式(4)已经显含输入;

对[y3, y4]分别求导得

$$\begin{cases} \dot{y}_3 = \dot{x}_6 = (\omega C_{\rm se} x_7 + x_4 - I_{\rm seLd})/C_{\rm se}, \\ \dot{y}_4 = \dot{x}_7 = (-\omega C_{\rm se} x_6 + x_5 - I_{\rm seLq})/C_{\rm se}. \end{cases}$$
(5)

式(5)不显含输入,再对[y3,y4]二阶求导得

$$\begin{cases} \ddot{y}_{3} = \ddot{x}_{6} = [\omega C_{\rm se} \dot{x}_{7} + \dot{x}_{4} - \dot{I}_{\rm seLd}]/C_{\rm se} = \\ [-R_{\rm se} x_{4} + 2\omega L_{\rm se} x_{5} - (1 + \omega^{2} L_{\rm se} C_{\rm se}) x_{6} - \\ L_{\rm se} \dot{I}_{\rm seLd} - \omega L_{\rm se} I_{\rm seLq} + u_{3} x_{3}]/L_{\rm se} C_{\rm se}, \\ \ddot{y}_{4} = \ddot{x}_{7} = (-\omega C_{\rm se} \dot{x}_{6} + \dot{x}_{5} - \dot{I}_{\rm seLq})/C_{\rm se} = \\ [-2\omega L_{\rm se} x_{4} - R_{\rm se} x_{5} - (1 + \omega^{2} L_{\rm se} C_{\rm se}) x_{7} + \\ \omega L_{\rm se} I_{\rm seLd} - L_{\rm se} \dot{I}_{\rm seLq} + u_{4} x_{3}]/L_{\rm se} C_{\rm se}. \end{cases}$$
(6)

式(6)已经显含输入.

由式(4)~(6),可求解出UPFC的逆系统如下:

$$\begin{cases} u_{1} = (U_{\rm sd} - R_{\rm sh}x_{1} + \omega L_{\rm sh}x_{2} - L_{\rm sh}\dot{y}_{1})/x_{3}, \\ u_{2} = (U_{\rm sq} - R_{\rm sh}x_{2} - \omega L_{\rm sh}x_{1} - L_{\rm sh}\dot{y}_{2})/x_{3}, \end{cases}$$
(7)
$$\begin{cases} u_{3} = (R_{\rm se}x_{4} - 2\omega L_{\rm se}x_{5} + (1 + \omega^{2}L_{\rm se}C_{\rm se})x_{6} + L_{\rm se}\dot{I}_{\rm seLd} + \omega L_{\rm se}I_{\rm seLq} + L_{\rm se}C_{\rm se}\dot{y}_{3})/x_{3}, \\ u_{4} = (2\omega L_{\rm se}x_{4} + R_{\rm se}x_{5} + (1 + \omega^{2}L_{\rm se}C_{\rm se})x_{7} - \omega L_{\rm se}I_{\rm seLd} + L_{\rm se}\dot{I}_{\rm seLq} + L_{\rm se}C_{\rm se}\ddot{y}_{4})/x_{3}. \end{cases}$$
(8)

在式(7)(8)中, 令 $\dot{y}_1 = v_1, \dot{y}_2 = v_2, \ddot{y}_3 = v_3, \ddot{y}_4 = v_4$, 把构造出的逆系统串联在原系统之后, 如 图2所示, 原系统与逆系统构成了一个伪线性系统.





由逆系统相对阶定义^[9]可知, 系统的相对阶为 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) = (1, 1, 2, 2),$ 相对阶数 $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 6 < n = 7, n$ 为系统的阶数. 这 样, 伪线性系统存在一个隐动态, 该隐动态方程式 是式(3)中的第3式. 本文采用能量守恒的方法分析 后, 采用PI控制方法, 来给定并联变流器的有功电 流参考值 x_1^* , 这样可以稳定直流侧电压, 伪线性系 统存在的隐动态得以稳定.

原系统线被性化解耦后,所构成的伪线性系统 可以解耦成4个子线性系统如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_1, \\ y_1 = x_1, \end{cases}$$
(9)

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = v_2, \\ y_2 = x_2, \end{cases}$$
(10)

$$\begin{cases} \dot{x}_6 = z_1, \\ \dot{z}_1 = v_3, \end{cases}$$
(11)

$$y_3 = x_6,$$

 $\dot{x}_7 = z_2,$

$$\begin{cases} \dot{z}_2 = v_4, \\ y_4 = x_7. \end{cases}$$
(12)

553

3.2 设计UPFC变结构控制器(Design VSC controller for UPFC)

变结构控制具有较强鲁棒性,它既可以用于设计线性系统,也可以用来设计非线性系统.但如果直接使用变结构控制设计UPFC非线性强耦合系统,控制器设计会比较复杂.而采用逆系统方法将原系统线性化和解耦后,再采用变结构控制来分别设计各子系统则变得简单.因此,本文采用逆系统方法将UPFC系统线性化和解耦后,再运用变结构控制来设计控制器.

子系统(9)控制器设计目标: $x_1 \rightarrow x_1^*$, 根据变结构控制理论^[10], 取切换面 $s_1 = x_1 - x_1^*$, 用指数趋近律设计方法, 令

 $\dot{s}_1 = -\kappa_1 s_1 - \varepsilon_1 \operatorname{sgn} s_1 = \dot{x}_1 = v_1,$

则可以得到子系统(9)的控制律如下:

$$v_1 = \kappa_1 (x_1^* - x_1) + \varepsilon_1 \operatorname{sgn}(x_1^* - x_1).$$
 (13)

同理,可得出子系统(10)的控制律:

$$v_2 = \kappa_2 (x_2^* - x_2) + \varepsilon_2 \operatorname{sgn}(x_2^* - x_2).$$
 (14)

子系统(11)控制器设计目标: $x_6 \rightarrow x_6^*$, 令 $e = x_6 - x_6^*$, 取切换面 $s_3 = c_1 e + \dot{e}$, 并令

 $\dot{s}_3 = c_1 \dot{e} + \ddot{e} = -\kappa_3 s_3 - \varepsilon_3 \operatorname{sgn} s_3 = c_1 \dot{x}_6 + v_3,$

解得子系统(11)的控制律:

$$v_{3} = \kappa_{3}[c_{1}(x_{6}^{*} - x_{6}) - \frac{\kappa_{3} + c_{1}}{C_{se}\kappa_{3}}(\omega C_{se}x_{7} + x_{4} - I_{seLd})] + \varepsilon_{3}\text{sgn}[c_{1}(x_{6}^{*} - x_{6}) - \frac{1}{C_{se}}(\omega C_{se}x_{7} + x_{4} - I_{seLd})].$$
(15)

同理,可设计出子系统(12)的控制律:

$$v_{4} = \kappa_{4} [c_{2}(x_{7}^{*} - x_{7}) - \frac{\kappa_{4} + c_{2}}{C_{se}\kappa_{4}} (-\omega C_{se}x_{6} + x_{5} - I_{seLq})] + \varepsilon_{4} \text{sgn}[c_{2}(x_{7}^{*} - x_{7}) - \frac{1}{C_{se}} (-\omega C_{se}x_{6} + x_{5} - I_{seLq})].$$
(16)

在式(13)~(16)中, x_1^* , x_2^* , x_6^* , x_7^* 分别为 x_1 , x_2 , x_6 , x_7 的参考值; sgn(·)为符号函数; κ_1 , κ_2 , κ_3 , κ_4 , ε_1 , ε_2 , ε_3 , ε_4 , c_1 , c_2 为变结构控制器参数, 均为正数. 在保证系统不会发生振荡的条件下, 适当地增大 参数 κ_1 , κ_2 , κ_3 , κ_4 , c_1 , c_2 可以使系统获得较快的跟 踪速度, 而相应地减小参数 ε_1 , ε_2 , ε_3 , ε_4 可以使系 统减小抖动.

3.3 UPFC控制框图(Control diagram of UPFC)

3.3.1 并联变流器控制框图(Control diagram of shunt converter)

并联变流器通过控制输出电流的d轴有功分量*x*1(锁相信号来自接入点电压),来平衡并联侧自身损耗以及串联侧与电网交换的有功功率.同时,并联变流器还可以通过控制输出电流的q轴无功分量*x*2,来维持接入点电压的稳定或补偿指令无功.并联变流器的整体控制框图,如图3所示.



Fig. 3 Control diagram of shunt converter

3.3.2 串联变流器控制框图(Control diagram of series converter)

串联变流器主要功能是实现潮流调节,这种功 能是通过控制注入输电线路电压的幅值和相位来 实现的.在获得并联变流器接入点的电压、接收端 的电压以及已知输电线路阻抗的情况下,若给定 输电线路传输的指令有功和无功,可以计算出所 需注入输电线路的指令电压.计算如下:

$$U_{\rm sr} = \sqrt{(U_{\rm r} + \frac{R_{\rm L}P_{\rm L}^* + X_{\rm L}Q_{\rm L}^*}{U_{\rm r}} - U_{\rm s}\cos\delta_0)^2 + (\frac{X_{\rm L}P_{\rm L}^* - R_{\rm L}Q_{\rm L}^*}{U_{\rm r}} - U_{\rm s}\sin\delta_0)^2},\tag{17}$$

$$\tan \delta = \frac{U_{\rm r}^2 + R_{\rm L} P_{\rm L}^* + X_{\rm L} Q_{\rm L}^* - U_{\rm s} U_{\rm r} \cos \delta_0}{X_{\rm L} P_{\rm L}^* - R_{\rm L} Q_{\rm L}^* - U_{\rm s} U_{\rm r} \sin \delta_0}.$$
(18)

由(17)(18)两式计算出指令电压的有效值和相 角后,可以得出需要注入输电线路的三相参考电 压, 经派克变换后, 得到串联变流器参考输入 值*x*₆^{*}, *x*₇^{*}. 串联变流器控制框图, 如图4所示.





4 仿真试验(Simulation test)

4.1 仿真试验系统参数(Parameters of simulation system)

为验证本文所采用控制策略的可行性和有效 性,本文建立了仿真模型(暂不考虑实际系统模型 容量), 进行仿真验证. 模仿真参数如下: 发送端 与接收端相电压有效值 $U_0 = U_r = 220$ V, 功角 差为 $\delta = 15^{\circ}$;发送端线路电感 $L_{s} = 5 \text{ mH}$,输电 线路等效电阻 $R_{\rm L} = 1 \Omega$, 电感 $L_{\rm L} = 20 \text{ mH}$; 并 联变压器变比为2:1,串联变压器变比为1:1; 并联变流器滤波电感 $L_{\rm sh} = 4.5$ mH, 损耗电 阻 $R_{\rm sh} = 0.2 \Omega$; 串联变流器滤波电感和损耗 电阻分别为 $L_{se} = 2 \text{ mH}, R_{se} = 0.2 \Omega$, 滤波电 容 $C_{se} = 66 \ \mu F;$ 直流侧电容 $C = 4700 \ \mu F,$ 直 流电压 $U_{dc} = 800$ V. 并联侧控制器参数为: $\kappa_1 = \kappa_2 = 5000, \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 15, k_{p1} = 2.2, k_{i1} =$ $0.15, k_{p2} = 1.75, k_{i2} = 0.2$. 串联侧控制器参数为: $\kappa_3 = \kappa_4 = 10000, \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 20, c_1 = c_2 = 2000.$ SPWM载波频率为f = 5000 Hz.

4.2 仿真试验结果(Results of tests)

4.2.1 UPFC作为静止同步补偿器(UPFC working as STATCOM)

UPFC并联侧单独运行时,它作静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)使用,既可以工作在补偿指令无功模式,也可以工作在稳压模式.图5是STACOM工作在补偿指令无功模式下,补偿无功跟踪指令无功的响应波形.指令无功变化如下:在0~0.1 s之间,为5 Var; 0.1 s时阶越至-5 kVar; 0.2 s时,阶越至0 kVar; 0.25 s时,阶越至5 Var.由图5可以看出,STATCOM系统有较快的响应性能.图6是STATCOM工作在稳压模式下的响应波形.接入点母线,在0.3 s时,投入同时10 kW和10 kVar负荷,在0.7 s时,切除负荷,在图6中,实线是有STATCOM稳压时接入点母线电压(标幺值),虚线是无STATCOM稳压时接

入点电压.图7是STATCOM在补偿指令无功时的A 相交流侧电流,图8是A相交流侧电流的频谱图.由 图7和图8可见,交流侧电流具有较好的正弦度,避 免了并联变流器对电网电流的谐波污染.







图 6 有、无STATOM接入点电压比较











4.2.2 UPFC调节线路潮流(UPFC regulating line flow)

UPFC调节输电线路上的潮流,如图9所示.此时,UPFC控制输电线路上的潮流跟踪指令潮流.指令潮流的变化如下: 0.2~0.3 s,传输有功和无功均为0; 0.3~0.5 s,传输有功5 kW,无功-5 kVar. 从图9中可以看出,UPFC调节潮流时,具有较快的响应速度.图10是串联侧串联注入输电线路的A相电压,图11是A相电压的频谱图.由图10和图11可以看出,注入电压具有较好的正弦度,防止了对电网电压的谐波污染.



图 9 UPFC调节潮流的响应性能



Fig. 9 Performance of UPFC to regulate the line flow

图 10 串联变流器注入输电线路电压 Fig. 10 Voltage of series converter injecting into transmission line



图 11 注入输电线路电压频谱图(THD=0.21%) Fig. 11 Spectrum of voltage injecting into transmission line(THD=0.21%)

5 结论(Conclusion)

文章阐述了UPFC的数学模型,并基于此数学 模型,运用逆系统方法,将UPFC系统线性化和解 耦后,分解成4个子线性系统,再采用变结构控制,设计出各子系统控制器,来综合控制UPFC系统.这种控制方法与典型PI控制策略相比,其控制器参数更易于整定.而且,文中的仿真结果表明,所采用的控制策略可以使UPFC按照指令信号准确、快速地补偿系统无功,有效地抑制由无功引起的母线电压跌落.同时,这种控制策略可以使UPFC有效地控制输电线路潮流跟踪指令潮流.

参考文献(References):

- LIU L M, ZHU P C, CHEN J. Power flow control performance analysis of a unified power-flow controller in a novel control scheme[J]. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2007, 22(3): 1613 – 1619.
- [2] 孙琳,谢桦,梅生伟,等. UPFC混成控制器设计及其对四川电网稳定性的改善[J].控制理论与应用,2005,22(1):57-61.
 (SUN Lin, XIE Hua, MEI Shengwei, et al. Hybrid controller design for unified power flow controller and its application in Sichuan power grid[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(1): 57-61.)
- [3] 粟时平,刘桂英.静止无功功率补偿技术[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [4] 章良栋, 岑文辉, 刘为. UPFC的模型及控制器研究[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(12): 57-61.
 (ZHANG Liangdong, CEN Wenhui, LIU Wei. Study of model and control strategy of UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(12): 57-61.)
 [5] 朱鹏程, 刘黎明, 刘小元, 等. 统一潮流控制器的分析与控制策
- 略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 45 51. (ZHU Pengcheng, LIU Liming, LIU Xiaoyuan, et al. Analysis and study on control strategy for UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 45 – 51.)
- [6] 曹海江,高沁翔. 统一潮流控制器(UPFC)的控制策略研究[J]. 电 气传动, 2003, 22(10): 72 – 78.
 (CAO Haijiang, GAO Qinxiang. A study of the control strategy of UPFC[J]. *Electrical Transmission*, 2003, 22(10): 72 – 78.)
- [7] 奚玲玲, 艾芊, 陈陈. UPFC新型非线性控制策略[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 55 60.
 (XI Lingling, AI Qian, CHEN Chen. Novel nonlinear control scheme of UPFC[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2006, 30(1): 45 51.)
- [8] TAMAI S, MURAKAMI S, UCHIDA R. Control and performance of a self-commutated GTO converter operating in parallel with linecommutated thyristor converters[J]. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 2004, 51(1): 67 – 73.
- [9] 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆系统控制方法[M]. 北 京: 科学出版社, 2005.
- [10] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

作者简介:

王 奔 (1960—), 男, 教授, 研究方向为电力系统非线性和变结 构控制;

黄崇鑫 (1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为现代电力电子 技术在电力系统中的应用, E-mail: huangchongxin128@126.com;

李 泰 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与 控制;

邓家泽 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统无功 和电压稳定.