

UPFC 单机无穷大系统建模与控制策略研究

邓大磊, 王 奔, 付永良

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 对含 UPFC 的单机无穷大系统的工作机理进行了研究分析, 将 UPFC 等效为可控并联电流源与可控串联电压源, 建立了考虑发电机励磁系统和汽门调节系统的含 UPFC 的单机无穷大系统七阶非线性数学模型; 采用逆系统原理对该非线性模型进行解耦线性化。采用具有强鲁棒性的变结构控制理论为解耦后的模型设计控制器。最终计算机仿真结果验证了所建模型的正确性及其控制策略对系统稳定作用的优越性。

关键词: 统一潮流控制器; 逆系统解耦; 变结构控制; 单机无穷大系统

Abstract: The working mechanism of single machine infinite bus system with unified power flow controller (UPFC) is analyzed. The UPFC could be equivalent to a controllable parallel current source and a controllable series voltage source. A seven-order nonlinear mathematic model of the single machine infinite bus system with UPFC is established, which includes the generator excitation system and the steam valve adjustment system. The theory of inverse system is used to decouple and linearize the nonlinear model. Then, the variable structure control theory due to its strong robustness is used to design the controller for the decoupled model. The final computer simulation results verify the correctness of the model and the superiority of the control strategy in power system stability.

Key words: unified power flow controller; decoupling of inverse system; variable structure control; single machine infinite bus system

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0053-06

0 引言

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)作为柔性交流输电系统(FACTS)成功的技术实现,已广泛引起电力界的关注。UPFC的功能强大,控制调节灵活。UPFC是一个通过直流电容器把并联变流器和串联变流器连接在一起的装置^[1-2]。通过控制并联侧变流器流入母线的电流幅值和相角,可同时实现并联无功补偿和平衡串联变流器与电网交换的有功,使直流电容电压维持恒定;通过控制串联侧变流器注入输电线的电压幅值和相角,既可以控制输电线上的有功和无功潮流,又可以调节接入点电压幅值和相角,同时还起到补偿输电线电抗的作用。但是由于UPFC控制变量多,变量间耦合程度强,因此,UPFC的控制器设计较为复杂。文献[3-5]分别应用非线性控制理论和最优控制理论对UPFC进行了研究,文献[6]应用鲁棒性较强的变结构控制理论对UPFC进行控制器设计,并取得了较为良好的效果。

通过分析含UPFC的单机无穷大系统的特点及其各矢量之间关系,建立了考虑发电机励磁系统和汽门调节系统的七阶非线性数学模型,并利用逆系统解耦线性化方法、变结构控制原理设计了系统的控制器,实现了单机系统在受到大的扰动后,具有迅速维持发电机功角、发电机转速以及UPFC并联侧接入点母线电压稳定的功能,并同时保障了发电机具有向无穷大系统稳定地输送有功功率的能力。最后,仿真结果验证了所建立模型的正确性及其控制策略对系统稳定作用的优越性。

1 含UPFC单机无穷大系统模型建立

系统控制器的性能与所建立的系统模型密切相关,针对UPFC自身控制变量较多,直接建立含UPFC的单机无穷大系统数学模型较为复杂这一情况,则将UPFC的串、并联侧的变流器分别等效为串联可控电压源与并联可控电流源,进而对系统进行建模。在含有UPFC的单机无穷大系统中等效的并联可控电流源和串联可控电压源可视为两个独立的结

构,因此,串联侧的有功消耗不再需要并联侧提供,并联侧等效电源是只产生无功的电流源,其无穷大系统的等效电路图如图1所示^[7]。

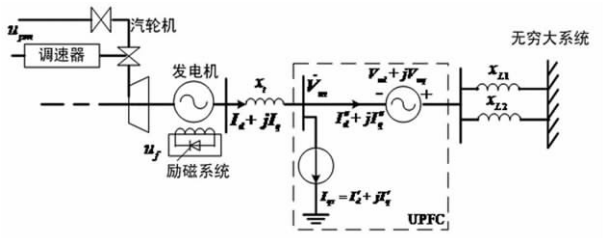


图1 含UPFC单机无穷大系统等效电路图

其中,各变量均已在dq坐标下表示, V_m 为UPFC并联侧接入点母线电压; V_u 为UPFC串联侧等效可控电压源电压; I_{qs} 为UPFC并联侧等效可控无功电流源; u_f 、 u_{pm} 分别为发电机励磁系统和汽门调节器的控制量; u_{ud} 、 u_{uq} 、 u_{qs} 分别为UPFC串联侧等效电压源控制量和并联侧等效电流源控制量,其他各变量的意义如图1标示。在图1中,各变量之间有如下关系。

$$\begin{cases} I'_d = \frac{V_{mq} + V_{uq} - V_s \cos\delta}{x_2} \\ I'_q = \frac{V_s \sin\delta - V_{md} - V_{ud}}{x_2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I''_d = 0 \\ I''_q = I_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} I_d = I'_d + I''_d \\ I_q = I'_q + I''_q \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)至式(3)可推得如下关系式。

$$\begin{cases} V_{md} = \frac{(x_1 + x_q)(V_s \sin\delta - V_{ud}) + (x_T + x_q)x_2 I_{qs}}{x_{q\Sigma}} \\ V_{mq} = \frac{E'_q x_2 + (x_T + x'_d)(V_s \cos\delta - V_{uq}}{x'_{d\Sigma}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $x_1 = x_d + x_T$; $x'_1 = x'_d + x_T$; $x_2 = \frac{x_{L1}x_{L2}}{x_{L1} + x_{L2}}$; $x_{d\Sigma} = x_1 + x_2$; $x'_{d\Sigma} = x'_1 + x_2$; δ 为电机功率角。通过图1和以上各式,可建立考虑发电机励磁、汽门调节系统的含UPFC单机无穷大系统的数学模型,如式(5)所示。

$$[\dot{\delta} \quad \dot{\omega} \quad \dot{E}'_q \quad \dot{V}_{uq} \quad \dot{I}_{qs} \quad \dot{P}_H]^T =$$

$$\begin{bmatrix} \omega - \omega_0 \\ \frac{\omega_0 P_H + \frac{\omega_0}{H} C_{ML} P_{m0} - \frac{D}{H}(\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H}}{T_{d0}} \\ \left[\frac{E'_q (V_s \sin\delta - V_{ud} + x_2 I_{qs})}{x'_{d\Sigma}} + \frac{(x_q - x'_d)(V_s \sin\delta - V_{ud} + x_2 I_{qs})(E' - V_s \cos\delta + V_{uq})}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \right] \\ - \frac{1}{T_{d0} x'_{q\Sigma}} E'_q + \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma}} (V_s \cos\delta - V_{uq}) \\ \frac{1}{T_{ud}} (-V_{ud} + V_{ud0}) \\ \frac{1}{T_{uq}} (-V_{uq} + V_{uq0}) \\ \frac{1}{T_q} (-I_{qs} + I_{qs0}) \\ - \frac{1}{T_{H\Sigma}} P_H + \frac{C_H}{T_{H\Sigma}} P_{m0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{d0}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{ud}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{uq}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_H}{T_{H\Sigma}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ u_{ud} \\ u_{uq} \\ u_{qs} \\ u_{pm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

在式(5)中, $\frac{dV_{ud}}{dt}$ 、 $\frac{dV_{uq}}{dt}$ 为UPFC串联侧等效可控电压源动态过程描述方程; $\frac{dI_{qs}}{dt}$ 为UPFC并联侧等效可控电流源动态过程描述方程; V_{ud0} 、 V_{uq0} 分别为等效电压源dq初始值; I_{qs0} 为等效电流源初始值; P_H 、 P_{m0} 分别为高压汽缸输出机械功率、发电机总机械功率初始稳态值; E'_q 为发电机暂态电势; ω 为发电机角速度; ω_0 为同步转速; V_s 为无穷大母线电压; T_{d0} 为发电机励磁绕组时间常数; $T_{H\Sigma}$ 为高压汽缸汽门调节时间常数; T_q 为UPFC并联侧变流器调节惯性时间常数; T_{ud} 、 T_{uq} 为UPFC串联侧变流器调节惯性时间常数; C_{ML} 、 C_H 分别为中低压和高压汽缸的等效功率分配系数; D 、 H 分别为阻尼系数和发电机惯性时间常数。

在设计系统的控制器时,输出量的选取与系统

的控制状态变量有很大的关系,考虑到系统功角的稳定性、UPFC 并联侧接入母线点电压的稳定性以及发电机汽门开度对发电机输出有功功率的影响,综合以上因素,这里选取系统的输出量为 $y_1 = \delta$; $y_2 = V_{md}$; $y_3 = V_{mq}$; $y_4 = P_e$; $y_5 = E'_q$ 。系统的控制输出量写成矩阵形式如式(6)所示。

$$y = [h_1(x) \quad h_2(x) \quad h_3(x) \quad h_4(x) \quad h_5(x)]^T$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{(x_T + x_q)(V_s \sin \delta - V_{ud}) + (x_T + x_q)x_2 I_{qs}}{x'_{d\Sigma}} \\ \frac{E'_q x_2 + (x_T + x'_d)(V_s \cos \delta - V_{uq})}{x'_{d\Sigma}} \\ \frac{E'_q(V_s \sin \delta - V_{ud} + x_2 I_{qs})}{x'_{d\Sigma}} \\ E'_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可见,其形式为

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)为一非线性系统。其中,状态变量为

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6 \quad x_7]^T$$

$$= [\delta \quad \omega \quad E'_q \quad V_{ud} \quad V_{uq} \quad I_{qs} \quad P_H]^T$$

控制变量为

$$u = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4 \quad u_5]^T$$

$$= [u_f \quad u_{ud} \quad u_{uq} \quad u_{qs} \quad u_{pm}]^T$$

输出变量为

$$y = [y_1 \quad y_2 \quad y_3 \quad y_4 \quad y_5]^T$$

$$= [h_1(x) \quad h_2(x) \quad h_3(x) \quad h_4(x) \quad h_5(x)]^T$$

$$= [\delta \quad V_{md} \quad V_{mq} \quad P_e \quad E'_q]^T$$

2 系统控制器设计

2.1 系统解耦线性化

由系统状态方程式(7)可以看到,含UPFC的单机无穷大系统是一个多输入、多输出、强耦合、非线性性的系统,直接对其进行控制器设计是相当复杂。这里应用逆系统方法对原系统模型进行解耦线性化。逆系统方法^[8-9],是利用被控对象的逆系统将被控对象补偿成具有线性传递关系的系统,即伪线性系统。然后,可灵活运用各种控制理论来设计该伪线性系统的控制器。

根据逆系统原理,求解出原系统的逆系统,过程如下。

对 y_1 求三次导数,得

$$\ddot{\delta} = \frac{\omega_0 \dot{P}_H}{H} - \frac{D}{H} \dot{\omega} + \frac{\omega_0 E'_q \dot{V}_{ud}}{Hx'_{d\Sigma}} - \frac{\omega_0 E'_q x_2 \dot{I}_{qs}}{Hx'_{d\Sigma}}$$

$$- \frac{\omega_0 (V_s \sin \delta - V_{ud} + x_2 I_{qs}) \dot{E}'_q}{Hx'_{d\Sigma}} \quad (8)$$

$$- \frac{\omega_0 E'_q V_s \cos(\delta) \dot{\delta}}{Hx'_{d\Sigma}}$$

对 y_2 求一次导数,得

$$\dot{V}_{md} = \frac{(x_q + x_T)x_2 \dot{I}_{qs}}{x_{q\Sigma}} - \frac{(x_q + x_T)\dot{V}_{ud}}{x_{q\Sigma}}$$

$$+ \frac{V_s \cos(\delta) \dot{\delta} (x_q + x_T)}{x_{q\Sigma}} \quad (9)$$

对 y_3 求一次导数,得

$$\dot{V}_{mq} = \frac{\dot{E}'_q x_2}{x'_{d\Sigma}} - \frac{(x'_d + x_T)\dot{V}_{uq}}{x'_{d\Sigma}}$$

$$- \frac{V_s \sin(\delta) \dot{\delta} (x'_d + x_T)}{x'_{d\Sigma}} \quad (10)$$

对 y_4 求一次导数,得

$$\dot{P}_e = \frac{\dot{E}'_q (V_s \sin \delta - V_{ud} + x_2 I_{qs})}{x_{q\Sigma}} + \frac{E'_q V_s \cos(\delta) \dot{\delta}}{x_{q\Sigma}}$$

$$+ \frac{(x_q - x'_d)(E'_q - V_s \cos \delta + V_{uq})x_2 \dot{I}_{qs}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} + \frac{E'_q x_2 \dot{I}_{qs}}{x_{q\Sigma}}$$

$$+ \frac{(V_s \sin \delta - V_{ud} + x_2 I_{qs})(\dot{E}'_q + V_s \sin(\delta) \dot{\delta} + \dot{V}_{ud})}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}}$$

$$- \frac{(x_q - x'_d)(E'_q - V_s \cos \delta + V_{uq})\dot{V}_{ud}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} - \frac{E'_q \dot{V}_{ud}}{x_{q\Sigma}}$$

$$+ \frac{(x_q - x'_d)(E'_q - V_s \cos \delta + V_{uq})V_s \cos(\delta) \dot{\delta}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \quad (11)$$

对 y_5 求一次导数,得

$$\dot{E}'_q = -\frac{1}{T_{d0}} \frac{x_{d\Sigma}}{x'_{d\Sigma}} E'_q + \frac{x_d - x'_d}{T_{d0} x'_{d\Sigma}} (V_s \cos \delta - V_{uq})$$

$$+ \frac{1}{T_{d0}} u_f \quad (12)$$

通过观察系统数学模型式(5)中后5个显含控制输入 $u_f, u_{ud}, u_{uq}, u_{qs}, u_{pm}$ 的子方程以及系统各个输出量 $y_1 = \delta, y_2 = V_{md}, y_3 = V_{mq}, y_4 = P_e, y_5 = E'_q$ 的导数可以看出,关于各个输出量导数的表达式(式(8)至式(12))中已显含控制量。由逆系统的相对阶定义^[8]可知,上述系统的相对阶: $a = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad a_5] = [3 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$,那么,系统的相对阶数 $a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 = 7$,与系统的阶数 $n = 7$ 相等,故该系统是完全可逆的。以下推导各个控制量的表达式。

由式(12)可解得系统控制输出量 u_f 的表达式为

$$u_f = T_{d0} \dot{y}_5 + \frac{x_{d\Sigma} E'_q}{x'_{d\Sigma}} - \frac{x'_d - x''_d}{x'_{d\Sigma}} (V_s \cos \delta - V_{uq}) \quad (13)$$

由式(10)可得系统状态变量一阶导数 \dot{V}_{uq} 的表达式为

$$\dot{V}_{uq} = \frac{\dot{E}'_q x_2}{x'_d + x_T} - \frac{x'_{d\Sigma} \dot{y}_3}{x'_d + x_T} - V_s \sin(\delta) \dot{\delta} \quad (14)$$

为以下求解表达简便,令

$$A_1 = -\frac{\omega_0 (V_s \sin \delta - V_{ud} + x_2 I_{qs}) \dot{E}'_q}{H x'_{d\Sigma}} - \frac{\omega_0 \dot{E}'_q V_s \cos(\delta) \dot{\delta}}{H x'_{d\Sigma}}$$

$$A_2 = \frac{V_s \cos(\delta) \dot{\delta} (x_q + x_T)}{x_{q\Sigma}}$$

$$A_4 = \frac{(V_s \sin \delta - V_{ud} + x_2 I_{qs}) (\dot{E}'_q + V_s \sin(\delta) \dot{\delta} + \dot{V}_{uq})}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} + \frac{\dot{E}'_q (V_s \sin \delta - V_{ud} + x_2 I_{qs})}{x'_{d\Sigma}} + \frac{\dot{E}'_q V_s \cos(\delta) \dot{\delta}}{x'_{d\Sigma}} + \frac{(x_q - x'_d) (\dot{E}'_q - V_s \cos \delta + V_{uq}) V_s \cos(\delta) \dot{\delta}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}}$$

$$B_1 = \frac{\omega_0 \dot{E}'_q}{H x'_{d\Sigma}}; \quad B_2 = -\frac{(x_q + x_T)}{x_{q\Sigma}}$$

$$B_4 = -\frac{(x_q - x'_d) (\dot{E}'_q - V_s \cos \delta + V_{uq})}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} - \frac{\dot{E}'_q}{x_{q\Sigma}}$$

$$C_1 = -\frac{\omega_0 \dot{E}'_q x_2}{H x'_{d\Sigma}}; \quad C_2 = \frac{(x_q + x_T) x_2}{x_{q\Sigma}}$$

$$C_4 = \frac{(x_q - x'_d) (\dot{E}'_q - V_s \cos \delta + V_{uq}) x_2}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} - \frac{\dot{E}'_q x_2}{x_{q\Sigma}}$$

那么,式(9)和式(11)可以写成

$$\begin{cases} \dot{y}_2 = A_2 + B_2 \dot{V}_{ud} + C_2 \dot{I}_{qs} \\ \dot{y}_4 = A_4 + B_4 \dot{V}_{ud} + C_4 \dot{I}_{qs} \end{cases} \quad \text{解得}$$

$$\dot{I}_{qs} = \left(\frac{\dot{y}_2 - A_2}{B_2} - \frac{\dot{y}_4 - A_4}{B_4} \right) / \left(\frac{C_2}{B_2} - \frac{C_4}{B_4} \right) \quad (15)$$

$$\dot{V}_{ud} = \frac{\dot{y}_2 - A_2}{B_2} - \frac{C_2}{B_2} \frac{B_4 (\dot{y}_2 - A_2) - B_2 (\dot{y}_4 - A_4)}{B_4 C_2 - B_2 C_4} \quad (16)$$

则,将式(15)、式(16)代入式(8)可得发电机高压汽缸输出机械功率 P_H 的一阶导数的表达式为

$$\dot{P}_H = \frac{H \dots}{\omega_0} \dot{y}_1 + \frac{D \cdot}{\omega_0} \dot{\omega} - \frac{H}{\omega_0} \left(A_1 + \frac{B_1 (\dot{y}_2 - A_2)}{B_2} - \frac{B_4 B_1 C_2 (\dot{y}_2 - A_2) - B_2 B_1 C_2 (\dot{y}_4 - A_4)}{B_2 B_4 C_2 - B_2^2 C_4} + \frac{C_1 B_4 (\dot{y}_2 - A_2) - C_1 B_2 (\dot{y}_4 - A_4)}{B_4 C_2 - B_2 C_4} \right) \quad (17)$$

根据式(5)、式(14)至式(17)便可解得系统剩余4个控制输入 u_{ud} 、 u_{uq} 、 u_{qs} 、 u_{pm} 的表达式,如式(18)至式(21)所示。

$$u_{ud} = -\frac{T_{ud}}{B_2} \frac{B_4 C_2 (\dot{y}_2 - A_2) - B_2 C_2 (\dot{y}_4 - A_4)}{B_4 C_2 - B_2 C_4} + \frac{T_{ud}}{B_2} (\dot{y}_2 - A_2) + V_{ud} - V_{ud0} \quad (18)$$

$$u_{uq} = T_{uq} \left(\frac{\dot{E}'_q x_2}{x'_d + x_T} - \frac{x'_{d\Sigma} \dot{y}_3}{x'_d + x_T} - V_s \sin(\delta) \dot{\delta} \right) + V_{uq} - V_{uq0} \quad (19)$$

$$u_{qs} = \frac{T_q (B_4 C_2 (\dot{y}_2 - A_2) - B_2 C_2 (\dot{y}_4 - A_4))}{B_4 C_2 - B_2 C_4} + I_{qs} - I_{uq0} \quad (20)$$

$$u_{pm} = \frac{T_{H\Sigma}}{\omega_0 C_H} \ddot{H} \dot{y}_1 + D \dot{\omega}$$

$$-H \left(A_1 + \frac{B_1 (\dot{y}_2 - A_2)}{B_2} - \frac{B_4 B_1 C_2 (\dot{y}_2 - A_2) - B_2 B_1 C_2 (\dot{y}_4 - A_4)}{B_2 B_4 C_2 - B_2^2 C_4} + \frac{C_1 B_4 (\dot{y}_2 - A_2) - C_1 B_2 (\dot{y}_4 - A_4)}{B_4 C_2 - B_2 C_4} \right) + \frac{1}{C_H} P_H - P_{m0} \quad (21)$$

至此,原系统的逆系统已经求出,在式(8)至式(12)中,令: $v_1 = \ddot{y}_1$, $v_2 = \dot{y}_2$, $v_3 = \dot{y}_3$, $v_4 = \dot{y}_4$, $v_5 = \dot{y}_5$, 然后把构造出的逆系统(逆系统:原系统的5个控制输入量 u_f 、 u_{ud} 、 u_{uq} 、 u_{qs} 、 u_{pm} 关于系统状态变量 δ 、 ω 、 E'_q 、 V_{ud} 、 V_{uq} 、 I_{qs} 、 P_H 以及伪线性系统控制输入量 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 、 v_5 的函数表达式)串联在原系统之前,原系统与逆系统一起就构成了一个伪线性系统。

原系统被解耦后,所构成的伪线性系统可以分解成5个伪线性系统为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = z_{11} \\ \dot{z}_{11} = z_{12} \\ \dot{z}_{12} = v_1 \\ y_1 = \delta \end{cases} \quad (22) \quad \begin{cases} \dot{V}_{md} = v_2 \\ y_2 = V_{md} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_{mq} = v_3 \\ y_3 = V_{mq} \end{cases} \quad (24) \quad \begin{cases} \dot{P}_e = v_4 \\ y_4 = P_e \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} \dot{E}'_q = v_5 \\ y_5 = \dot{E}'_q \end{cases} \quad (26)$$

其中 $z = [z_{11} \ z_{12}]$ 为中间变量。

2.2 系统控制器设计

经过逆系统解耦已经得到原系统的线性化子系统(22)、(23)、(24)、(25)、(26),那么就可采用各种线性系统控制策略对这些子系统进行控制器设计。变结构控制对系统的外在干扰和摄动在一定条件下具有较强的鲁棒性或者说不变性^[10],由逆系统解耦方法得到的伪线性系统,采用变结构控制来分别设计各个子系统的控制器则变得很简单。因此,采用变结构控制原理设计系统控制器。

根据系统设计控制器实现目标: $\delta \rightarrow \delta^*$; $V_{md} \rightarrow V_{md}^*$; $V_{mq} \rightarrow V_{mq}^*$; $P_e \rightarrow P_e^*$; $\dot{E}'_q \dot{E}'_q^*$ 及变结构控制理论趋近律的方法,可以得到5个切换面为

$$\begin{cases} s_1 = c_1(\delta - \delta^*) + c_2(\delta - \delta^*)' + c_3(\delta - \delta^*)'' \\ s_2 = V_{md} - V_{md}^* \\ s_3 = V_{mq} - V_{mq}^* \\ s_4 = P_e - P_e^* \\ s_5 = \dot{E}'_q - \dot{E}'_q^* \end{cases} \quad (27)$$

指数趋近律可以大大改善趋近 $s(x) = 0$ 的正常运动:趋近过程变快,引起的抖动大大削弱。故取指数趋近律为

$$\dot{s} = -\varepsilon \cdot \text{sgn}(s) - k \cdot s \quad (28)$$

由式(22)至式(28)可得解耦后系统的控制律为

$$\begin{cases} v_1 = -\varepsilon_1 \text{sgn}(s_1) - k_1 s_1 - c_1 \dot{\delta} - c_2 \ddot{\omega} \\ v_2 = -\varepsilon_2 \text{sgn}(s_2) - k_2 s_2 \\ v_3 = -\varepsilon_3 \text{sgn}(s_3) - k_3 s_3 \\ v_4 = -\varepsilon_4 \text{sgn}(s_4) - k_4 s_4 \\ v_5 = -\varepsilon_5 \text{sgn}(s_5) - k_5 s_5 \end{cases} \quad (29)$$

其中 $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, k_1, k_2, k_3, k_4, c_1, c_2$ 为变结构控制参数,均为正实数。各种常实数的设计原则为:在保证系统不会发生振荡的条件下,适当地增大参数 $k_1, k_2, k_3, k_4, c_1, c_2$ 可以使系统获得较快的跟踪速度,而相应地减小参数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ 可以使系统减小抖动。

3 仿真实验

为验证对含UPFC的单机无穷大系统建模的正确性、采用逆系统解耦附加变结构控制策略的可行性和有效性,以及滑模变结构对参数变化的鲁棒性,在Matlab仿真环境下,对系统进行仿真验证^[11-12]。仿真参数如表1。

表1 系统仿真参数

仿真参数	参数值	仿真参数	参数值
H	16	ε_1	0.3
D	5	ε_2	0.3
$T_{H\Sigma}$	0.45	ε_3	0.3
T_{d0}	6.9	ε_4	0.3
T_s	0.2	ε_5	0.3
C_H	0.4	k_1	10
C_{ML}	0.6	k'_2	10
T_{ud}	0.2	k_3	10
T_{uq}	0.2	k_4	10
C_1	21	C_2	10
δ_0	60	k_5	3

系统的其他仿真参数为(p.u.): $x'_{d'} = 0.299$; $x_q = 0.31$; $x_d = 0.799$; $x_T = 0.02$; $P_{m0} = 0.78$; $P_{e0} = 0.8$; $x_{L1} = 1.6$; $x_{L2} = 1.6$; $I_{q0} = 0.315$; $E'_{q0} = 0.84$; $V_m = 1.0$ 。

以下为输电系统发生故障情况下的动态响应曲线图。设置系统发生的故障:在图1中的双回供电线路其中一回 x_{L2} 发生三相短路。发生短路过程中的具体情况为:在1s时刻 x_{L2} 发生三相短路;经0.15s后故障切除,输电系统由单回线供电;然后在1.5s时刻,系统重合闸成功,使系统迅速恢复正常工作状态。系统仿真结果如图2至图5所示,图中的虚曲线为参考文献[3]和[4]设计的系统最优控制下的控制结果。

通过以上仿真结果首先可看到,由虚曲线表示的利用最优控制方法设计的系统控制器控制下的响应曲线振荡幅值较大,系统在受到大的扰动后,恢复

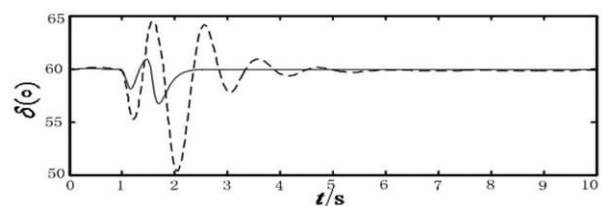


图2 发电机功角相应曲线

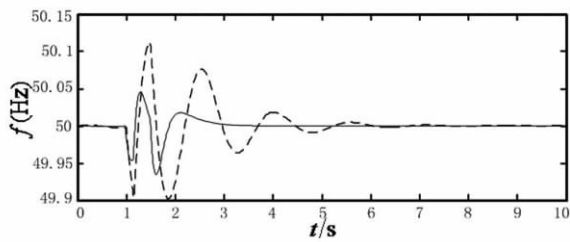


图3 发电机转速响应曲线

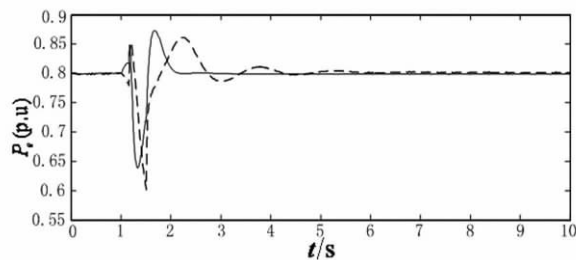


图4 传输功率响应曲线

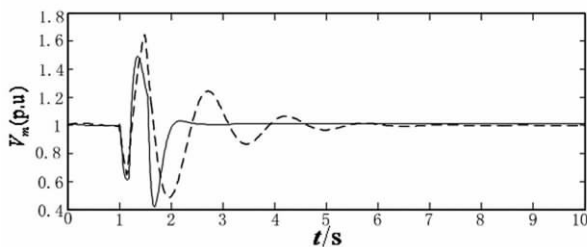


图5 并联侧接入点电压响应曲线

稳定性的能力略次与所运用的控制器设计方法。在所设计的系统控制器下,功角的第一摆动幅度明显较小,并且响应速度明显较快;同样,频率的波动也较小,响应速度和恢复稳定状态的速度较快;系统传输的功率和UPFC并联侧接入母线电压的响应曲线相对于最优控制的响应结果,虽然在摆动幅值上没有明显变化优势,但是其响应速度有明显的改善。

从以上各图都可看到,在变结构控制策略下,系统鲁棒性较好,系统在干扰作用下能够将振动幅值限制在有效范围内,不至于使发电机产生剧烈振荡;在系统故障切除并恢复到正常工作状态下时,系统迅速恢复稳定,振荡幅度小且能够迅速得到平息。仿真结果证明了所建立的含UPFC的单机无穷大系统模型的正确性以及所选解耦控制方法的有效性。

4 结论

主要研究了含UPFC的单机无穷大系统的建模与控制策略。在分析研究系统等效电路图中各个矢

量关系的基础上,建立了考虑发电机励磁系统和汽门调节系统的七阶系统模型,并利用逆系统解耦原理对系统模型解耦线性化。为增强系统的抗干扰能力,选取鲁棒性较强的变结构控制原理设计系统的控制器。仿真结果证明该建模方法及控制策略的正确性,且在输电系统出现大扰动时,与其他方法相比,在稳定性方面显示出更强的鲁棒性和抗干扰性。

参考文献

- [1] 程汉湘. 柔性交流输电技术 [M]. 北京: 机械工业出版社 2009.
- [2] 陈建业, 蒋晓华, 于音杰, 等. 电力电子技术在电力系统中的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社 2007.
- [3] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制(第2版) [M]. 北京: 清华大学出版社 2008.
- [4] 罗春雷, 孙洪波, 徐国禹. UPFC 动态建模与最优控制研究 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21(11): 4-6.
- [5] 罗春雷, 孙洪波, 徐国禹. 含 UPFC 系统的状态方程及控制系统研究 [J]. 电网技术, 1997, 21(10): 11-14.
- [6] 王奔, 黄崇鑫, 李泰, 等. 统一潮流控制器逆系统方法控制策略 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(5): 551-556.
- [7] 董良英, 房大中, 林旭军. 含统一潮流控制器的电力系统新型潮流算法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(2): 8-10.
- [8] 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: 清华大学出版社 2005.
- [9] 李东海, 姜学智, 李立琴, 等. 逆系统方法在电力系统控制中的应用 [J]. 电网技术, 1997, 21(7): 10-12.
- [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.
- [11] 钱碧甫, 王奔, 黄崇鑫, 等. 静止同步串联补偿器的变结构控制器设计 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(6): 124-129.
- [12] 杜继伟, 王奔. 静止无功补偿、励磁和汽门协调滑模静控制器的研究 [J]. 电力科学与工程, 2011, 27(6): 16-21.

作者简介:

邓大磊(1986),男,硕士研究生,研究方向为电能质量分析与控制;

王奔(1960),男,博士,教授,研究方向为电力系统非线性变结构控制与电能质量控制。

(收稿日期:2012-08-29)