

多机系统励磁与UPFC非线性协调控制策略研究

马焱,刘栋,王一珺

(国网陕西省电力公司电力科学研究院,陕西 西安 710100)

摘要:装设有统一潮流控制器(UPFC)的大电网是一个复杂且易受扰动的非线性系统。为此推导出了装设有UPFC装置的多机电力系统数学模型,在此基础上构造了系统的Hamilton能量函数,进而将此系统表示成含参数扰动的Hamilton系统形式。根据边界函数法和干扰抑制控制法得到了考虑转移电导的多机励磁与UPFC的协调控制器。在PSCAD/EMTDC仿真平台搭建四机两区域系统,对比仿真结果表明,所设计的非线性协调控制器具有良好的控制效果和较强的鲁棒性。

关键词:励磁;统一潮流控制器;广义Hamilton理论; L_2 干扰抑制控制法;协调控制

中图分类号:TM 76 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19213

Research on Nonlinear Coordination Control Strategy of Multimachine System Excitation and UPFC

MA Ye, LIU Dong, WANG Yijun

(State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract: The large grid with a unified power flow controller (UPFC) is a complex and susceptible nonlinear system. The mathematical model of multi-machine power system equipped with UPFC device was derived. Based on this, the Hamilton energy function of the system was constructed, and then the system was represented as a Hamilton system with parameter disturbance. According to the boundary function method and the interference suppression control method, a coordinated controller of multimachine excitation and UPFC considering transfer conductance was obtained. The four-machine two-area system was built on the PSCAD/EMTDC simulation platform. The simulation results show that the designed nonlinear coordination controller has good control effect and strong robustness.

Key words: generator excitation; unified power flow controller(UPFC); generalized Hamiltonian theory; L_2 interference suppression control method; coordinated control

统一潮流控制器(UPFC)是目前柔性交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)中功能最强大、综合性能最好的装置^[1-2]。由于UPFC集合了静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)和静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)的优点,在互联网潮流控制、稳定电压、提高电网稳定性方面均表现出良好的应用效果,因此其控制策略的研究是当前电力系统研究的热点^[3]。文献[4]通过将UPFC的有功和无功潮流解耦设计了UPFC并联侧的控制器,并通过三环解耦设计了其串联侧的控制器,但是这种控制方式破坏了

UPFC的非线性特性。文献[5]利用暂态能量函数法和模糊滑模控制法设计了UPFC的控制器来抑制系统的低频振荡,但控制器设计基于的模型是系统等效模型。文献[6]通过构造UPFC的Lyapunov函数和坐标变换完成了UPFC控制器设计,但是在控制器设计过程中仍进行了部分线性化处理。由于UPFC装置及电力系统都是非线性系统,因此需要利用非线性方法设计系统的稳定控制器。

Hamilton系统理论上可以根据系统的内部结构特征,在经过任何线性化处理的基础上完成控制器的设计,因此在非线性系统控制方面具有广阔的应用前景^[7]。文献[8]利用广义Hamilton理

论设计了 TCSC(thyristor controlled series compensator)的控制器并在仿真平台上搭建实际电网模型验证了其控制效果。文献[9]通过无源控制方法设计了电网稳定控制器,并在设计中考虑了相关元件的转移电导。文献[10]在考虑发电机广域励磁信号存在时滞的前提下,通过伪广义 Hamilton 理论设计了 STATCOM 与时滞励磁的协调控制器。但是,利用 Hamilton 系统理论设计 UPFC 控制器的研究还很欠缺。

本文在考虑系统相关元件转移电导的情况下根据 Hamilton 系统理论设计了多机励磁和 UPFC 的协调控制策略。在定义出 UPFC 对电网影响的前提下,建立了包含 UPFC 装置的多机电力系统数学模型。进而将此系统表示成含参数扰动的广义 Hamilton 系统形式。根据边界函数法和 L_2 干扰抑制控制法设计了相应的协调控制器。系统动态响应结果表明了本文所提非线性协调控制策略的正确性和良好应用效果。

1 广义 Hamilton 理论 L_2 干扰抑制控制法

考虑如下的含有扰动项的仿射非线性系统:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} + \mathbf{G}(\mathbf{x})\mathbf{w} \quad (1)$$

式中: \mathbf{x} 为系统的 n 维状态变量, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$; $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 为 n 维微分流形; \mathbf{u} 为 m 维控制输入向量, $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$; \mathbf{w} 为系统的 s 维扰动项, $\mathbf{w} \in \mathbf{R}^s$; $\mathbf{g}(\mathbf{x}), \mathbf{G}(\mathbf{x})$ 为适当阶数的系数矩阵。

若存在一个标量函数 $H(\mathbf{x})$, 则能将式(1)所示的系统表示为

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \partial_{\mathbf{x}} H(\mathbf{x}) + \bar{\mathbf{g}} \sum(\mathbf{x}) + \mathbf{g}\mathbf{u} + \mathbf{G}\mathbf{w} \quad (2)$$

式(2)中的 $\sum(\mathbf{x})$ 在 \mathbf{x} 的定义域上是一致有界的, 并且在系统的平衡点 \mathbf{x}_0 处的取值为零, 此式中其余变量的含义可以参考文献[11]。根据边界函数理论^[12], $\sum(\mathbf{x})$ 的表达式需要满足下式:

$$\|\sum(\mathbf{x})\|^2 \leq \rho(\mathbf{x}) \|\mathbf{g}^T(\mathbf{x}) \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}\|^2 \quad (3)$$

式中: $\rho(\mathbf{x})$ 是一个正定函数。

由于系统中含有参数扰动, 则考虑如下的惩罚函数:

$$z = \mathbf{h}\mathbf{g}^T(\mathbf{x}) \partial_{\mathbf{x}} H(\mathbf{x})$$

式中: \mathbf{h} 为权重矩阵。

当式(2)所示系统满足以下三点要求时:

- 1) 式(2)所示系统是零状态可检的;
- 2) 系统的 Hamilton 函数 $H(\mathbf{x})$ 为非负定函数;
- 3) 给定的干扰抑制水平 γ (大于零) 满足:

$$\mathbf{R}(\mathbf{x}) - \lambda/2\bar{\mathbf{g}}\bar{\mathbf{g}}^T + 1/(2\gamma^2)(\mathbf{g}\mathbf{g}^T - \mathbf{G}\mathbf{G}^T) \geq 0$$

则可令控制变量 \mathbf{u} 满足下式, 从而使系统在平衡点 \mathbf{x}_0 处渐近稳定:

$$\mathbf{u} = -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\rho(\mathbf{x})}{\lambda} + \frac{1}{\gamma^2} \right) \mathbf{I} + \mathbf{r}^T \mathbf{r} \right] \mathbf{g}^T(\mathbf{x}) \partial_{\mathbf{x}} H(\mathbf{x}) \quad (4)$$

式中: λ 为满足 $\mathbf{R}(\mathbf{x}) - \lambda/2\bar{\mathbf{g}}\bar{\mathbf{g}}^T \geq 0$ 的非负数; \mathbf{I} 为单位对角矩阵。

上述控制策略的推导过程详见文献[13]。

2 含 UPFC 装置的多机电力系统广义 Hamilton 系统实现

本文所研究的 n 机系统包含 m 个负荷节点和一台 UPFC 装置。其中发电机采用三阶模型, $1, 2, \dots, n$ 为其节点; $n+1$ 和 $n+2$ 为安装有 UPFC 的母线节点; $n+3, \dots, n+m+2$ 为负荷节点。

2.1 UPFC 的动态模型

UPFC 装置可以看成是由一台 STATCOM 和一台 SSSC 合并而成的, 其模型结构图如图 1 所示。

UPFC 的非线性动态方程^[14]如下:

$$\left\{ \begin{aligned} i'_{d1} &= \frac{k_1 \omega_s U_{dc}}{L_{s1}} \cos(\alpha_1 + \theta_{n+1}) + \omega i_{q1} - \frac{R_{s1} \omega_s}{L_{s1}} i_{d1} - \frac{\omega_s U_{n+1}}{L_{s1}} \cos \theta_{n+1} + \zeta_1 \\ i'_{q1} &= \frac{k_1 \omega_s U_{dc}}{L_{s1}} \sin(\alpha_1 + \theta_{n+1}) - \omega i_{d1} - \frac{R_{s1} \omega_s}{L_{s1}} i_{q1} - \frac{\omega_s U_{n+1}}{L_{s1}} \sin \theta_{n+1} + \zeta_2 \\ i'_{d2} &= \frac{-R_{s2} \omega_s}{L_{s2}} i_{d2} + \omega i_{q2} + \frac{k_2 \omega_s U_{dc}}{L_{s2}} \cos(\alpha_2 + \theta_{n+1}) - \frac{\omega_s}{L_{s2}} (U_{n+2} \cos \theta_{n+2} - U_{n+1} \cos \theta_{n+1}) + \zeta_3 \\ i'_{q2} &= \frac{-R_{s2} \omega_s}{L_{s2}} i_{q2} - \omega i_{d2} + \frac{k_2 \omega_s U_{dc}}{L_{s2}} \sin(\alpha_2 + \theta_{n+1}) - \frac{\omega_s}{L_{s2}} (U_{n+2} \sin \theta_{n+2} - U_{n+1} \sin \theta_{n+1}) + \zeta_4 \\ U'_{dc} &= \frac{-k_1 \omega_s}{C_{dc}} \cos(\alpha_1 + \theta_{n+1}) i_{d1} - \frac{k_1 \omega_s}{C_{dc}} \sin(\alpha_1 + \theta_{n+1}) i_{q1} - \frac{k_2 \omega_s}{C_{dc}} \cos(\alpha_2 + \theta_{n+1}) i_{d2} - \frac{k_2 \omega_s}{C_{dc}} \sin(\alpha_2 + \theta_{n+1}) i_{q2} - \frac{U_{dc} \omega_s}{R_{dc} C_{dc}} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式中; i_{d1}, i_{q1} 分别为UPFC并联部分注入的 d 轴和 q 轴电流; i_{d2}, i_{q2} 分别为UPFC串联部分注入的 d 轴和 q 轴电流; $U_{n+1} \angle \theta_{n+1}, U_{n+2} \angle \theta_{n+2}$ 分别为UPFC并联部分和串联部分接入母线的电压; R_{s1}, L_{s1} 分别为并联耦合变压器的等效电阻和漏电感; R_{s2}, L_{s2} 分别为串联耦合变压器的等效电阻和漏电感; C_{dc} 为直流侧电容器的电容; R_{dc} 为两个换流器的等效切换损失; U_{dc} 为直流侧电容电压; ω_s 为系统角频率; $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$ 为UPFC的等效有界输入扰动; k_1, k_2 分别为并联侧换流器调制比和串联侧换流器调制比; α_1, α_2 分别为并联侧换流器相位移和串联侧换流器相位移;其中的 ω_s 为有名值,其余变量均为标么值。

定义UPFC的控制输入变量为 u_1, u_2, u_3 和 u_4 ,其表达式为

$$\begin{cases} u_1 = k_1 \cos(\alpha_1 + \theta_{n+1}) \\ u_2 = k_1 \sin(\alpha_1 + \theta_{n+1}) \\ u_3 = k_2 \cos(\alpha_2 + \theta_{n+1}) \\ u_4 = k_2 \sin(\alpha_2 + \theta_{n+1}) \end{cases} \quad (6)$$

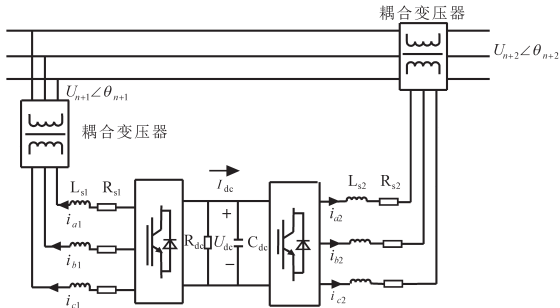


图1 UPFC的电路结构图

Fig.1 Circuit structure diagram of UPFC

2.2 多机电力系统模型

将由于UPFC装置的存在,电力系统中发电机输出的附加电磁功率和 d 轴电流定义为 ΔP_{ei} 和 ΔI_{di} 。则在 n 机电力系统中第 i 台发电机的三阶动态方程为

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = \frac{\omega_0}{M_i} P_{mi} - \frac{\omega_0}{M_i} \sum_{j=1}^n E'_{qi} E'_{qj} (B_{ij} \sin \delta_{ij} + G_{ij} \cos \delta_{ij}) - \frac{D_i}{M_i} (\omega_i - \omega_0) - \frac{\omega_0}{M_i} \Delta P_{ei} + w_{i1} \\ \dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T'_{d0i}} [(x'_{di} - x_{di}) \sum_{j=1}^n E'_{qj} (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})] + \frac{u_{fi} + E_{fis} - E'_{qi}}{T'_{d0i}} - \frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}} \Delta I_{di} + w_{i2} \end{cases} \quad (7)$$

式中:下标 i 为第 i 台发电机的相应变量, $i = 1, 2, \dots, n$; ω_i 为发电机角速度; ω_0 为发电机同步角速度; x_{di} 为发电机的 d 轴同步电抗; x'_{di} 为发电机的 d 轴暂态电抗; T'_{d0i} 为发电机的 d 轴暂态开路时间常数; E'_{qi} 为发电机的 q 轴暂态电势; G_{ij}, B_{ij} 分别为发电机 i 与发电机 j 间的互电导及互电纳; δ_{ij} 为 E'_{qi} 的复矢量与 E'_{qj} 的复矢量之间的相角差; D_i, M_i 分别发电机的阻尼系数和惯性时间常数; P_{mi} 为固定的机械输入功率; u_{fi} 为发电机励磁输入控制量; E_{fis} 为平衡状态下励磁电压值; w_{i1}, w_{i2} 为发电机的有界输入扰动。

2.3 系统的广义Hamilton形式实现

在得到UPFC装置和第 i 台发电机的数学模型后,联立式(5)和式(7)就可以得到含有UPFC装置的多机电力系统的数学模型表达式。根据实际电力系统将 $x = [\delta_1, \omega_1, E'_{q1}, \dots, \delta_n, \omega_n, E'_{qn}, i_{d1}, i_{q1}, i_{d2}, i_{q2}, U_{dc}]^T$ 作为其状态变量,系统的初始平衡点为 x_0 。为了简便,后续表述定义:

$$\begin{aligned} P_{mi} &= P'_{mi} + P''_{mi} \\ &= E'_{q0} \sum_{j=1}^n E'_{q0} B_{ij} \sin \delta_{i0j} + E'_{q0} \sum_{j=1}^n E'_{q0} G_{ij} \cos \delta_{i0j} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} E_{fis} &= E'_{fis} + E''_{fis} \\ &= E'_{q0} - (x_{di} - x'_{di}) \sum_{j=1}^n E'_{q0} B_{ij} \cos \delta_{i0j} + \\ &\quad (x_{di} - x'_{di}) \sum_{j=1}^n E'_{q0} G_{ij} \sin \delta_{i0j} \end{aligned} \quad (9)$$

构造上述系统的Hamilton能量函数为

$$\begin{aligned} H(x) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{\omega_0} (\omega_i - \omega_0)^2 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n E'_{qi} E'_{qj} B_{ij} \cos \delta_{ij} + \\ &\quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n E'_{q0} E'_{q0} B_{ij} \cos \delta_{i0j} - \sum_{i=1}^n P'_{mi} (\delta_i - \delta_{i0}) + \\ &\quad \sum_{i=1}^n \frac{(E'_{qi} - E'_{fis})^2}{2(x_{di} - x'_{di})} + \frac{1}{2} (i_{d1} - i_{d10})^2 + \frac{1}{2} (i_{q1} - i_{q10})^2 + \\ &\quad \frac{1}{2} (i_{d2} - i_{d20})^2 + \frac{1}{2} (i_{q2} - i_{q20})^2 + \frac{1}{2} (U_{dc} - U_{dc0})^2 \end{aligned} \quad (10)$$

此能量函数 $H(x)$ 具有明确的物理意义,代表了包含UPFC装置附加能量在内的系统总能量。

计算能量函数 $H(x)$ 对各个状态变量的偏导数,则多机系统的动态方程可表示为

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \partial_x H(x) + \bar{g} \sum(x) + gu + Gw \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned}
 J &= \text{diag}[J_{11}, \dots, J_{1n}, J_2] \\
 R &= \text{diag}[R_{11}, \dots, R_{1n}, R_2] \\
 \bar{g} &= \text{diag}[\bar{g}_{11}, \dots, \bar{g}_{1n}, \bar{g}_2] \\
 g &= \text{diag}[g_{11}, \dots, g_{1n}, g_2] \\
 G &= \text{diag}[G_{11}, \dots, G_{1n}, G_2] \\
 \sum(x) &= [\sum_{11}(x), \dots, \sum_{1n}(x), \sum_2(x)]^T \\
 J_{1i} &= \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 \\ -\omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R_{1i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D_i \omega_0}{M_i^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{b_i}{T'_{d0i}} \end{bmatrix} \\
 J_2 &= \begin{bmatrix} 0 & \omega & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega & 0 \\ 0 & 0 & -\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c \end{bmatrix} \\
 \bar{g}_{1i} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\omega_0}{M_i} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T'_{d0i}} \end{bmatrix} \\
 \bar{g}_2 &= \begin{bmatrix} -\sqrt{a_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sqrt{a_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sqrt{a_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sqrt{a_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\sqrt{c} \end{bmatrix} \\
 g_{1i} &= [0 \ 0 \ \frac{1}{T'_{d0i}}]^T \\
 g_2 &= \begin{bmatrix} b_1 U_{dc} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 U_{dc} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_2 U_{dc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_2 U_{dc} \\ -di_{d1} & -di_{q1} & -di_{d2} & -di_{q2} \end{bmatrix} \\
 G_{1i} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad G_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 \sum_{1i}(x) &= \begin{bmatrix} 0 \\ P''_{mi} - E'_{qi} \sum_{j=1}^n E'_{qj} G_{ij} \cos \delta_{ij} - \Delta P_{ei} \\ E''_{fis} - (x_{di} - x'_{di}) \sum_{j=1}^n E'_{qj} G_{ij} \sin \delta_{ij} - (x_{di} - x'_{di}) \Delta I_{di} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_2(x) &= \begin{bmatrix} \sqrt{a_1} i_{d10} - \frac{\omega}{\sqrt{a_1}} i_{q10} + \frac{b_1}{\sqrt{a_1}} U_{n+1} \cos \theta_{n+1} - \frac{b_1}{\sqrt{a_1}} u_{10} U_{dc} \\ \sqrt{a_1} i_{q10} + \frac{\omega}{\sqrt{a_1}} i_{d10} + \frac{b_1}{\sqrt{a_1}} U_{n+1} \sin \theta_{n+1} - \frac{b_1}{\sqrt{a_1}} u_{20} U_{dc} \\ \sqrt{a_2} i_{d20} - \frac{\omega}{\sqrt{a_2}} i_{q20} + \frac{b_2}{\sqrt{a_2}} (U_{n+2} \cos \theta_{n+2} - U_{n+1} \cos \theta_{n+1}) - \frac{b_2}{\sqrt{a_2}} u_{30} U_{dc} \\ \sqrt{a_2} i_{q20} + \frac{\omega}{\sqrt{a_2}} i_{d20} + \frac{b_2}{\sqrt{a_2}} (U_{n+2} \sin \theta_{n+2} - U_{n+1} \sin \theta_{n+1}) - \frac{b_2}{\sqrt{a_2}} u_{40} U_{dc} \\ \sqrt{c} U_{dc} + \frac{d}{\sqrt{c}} u_{10} i_{d1} + \frac{d}{\sqrt{c}} u_{20} i_{q1} + \frac{d}{\sqrt{c}} u_{30} i_{d2} + \frac{d}{\sqrt{c}} u_{40} i_{q2} \end{bmatrix} \\
 a_1 &= \frac{R_{s1} \omega_s}{L_{s1}} \quad a_2 = \frac{R_{s2} \omega_s}{L_{s2}} \\
 b_1 &= \frac{\omega_s}{L_{s1}} \quad b_2 = \frac{\omega_s}{L_{s2}} \\
 c &= \frac{\omega_s}{C_{dc}} \quad d = \frac{\omega_s}{C_{dc} R_{dc}} \\
 u &= [u_1, u_2]^T \quad u_{1i} = u_{fi} \\
 u_2 &= [u_1 - u_{10}, u_2 - u_{20}, u_3 - u_{30}, u_4 - u_{40}]^T
 \end{aligned}$$

式中: u 为多机电力系统的控制输入量; $u_{10}, u_{20}, u_{30}, u_{40}$ 分别为 UPFC 在系统平衡状态下的控制变量初始值; $i_{d10}, i_{q10}, i_{d20}, i_{q20}$ 为 UPFC 在系统平衡状态下的初始值; w 为多维扰动矩阵。

3 发电机励磁与 UPFC 装置的协调控制器设计

将装有 UPFC 的多机电力系统表示成广义 Hamilton 形式后, 要想利用式(4)所示的扩展 L_2 干扰抑制控制法设计系统的协调控制器, 需要首先验证一下系统的几个性质:

1) 当控制变量 $u = 0$ 时, 很明显多机系统是零状态可检的。

2) 从 $H(x)$ 的表达式可以看出, 在 x_0 处, $H(x)$ 的值为零, 并且 $\partial_x H(x)|_{x=x_0} = 0$ 。要想保证 $H(x)$ 为非负定函数, 就要求其 Hessian 矩阵正定。但是像 $H(x)$ 这样一个复杂函数的 Hessian 矩阵的正定条件很难用具体表达式给出, 故通常采用计算机数值算法进行判定^[15]。

3) 通过对下式进行计算来确定系统的干扰

抑制水平 γ :

$$\begin{aligned} & \mathbf{R}_{1i}(\mathbf{x}) - \frac{\lambda_{1i}}{2} \bar{\mathbf{g}}_{1i} \bar{\mathbf{g}}_{1i}^T + \frac{1}{2\gamma^2} [\mathbf{g}_{1i} \mathbf{g}_{1i}^T - \mathbf{G}_{1i} \mathbf{G}_{1i}^T] \\ &= \text{diag} \left[0, \frac{2D_i \omega_0 - \lambda_{1i} \omega_0^2}{2M_i^2} - \frac{1}{2\gamma^2}, \right. \\ & \left. \frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{doi}} - \frac{\lambda_{1i}}{2T'_{doi}} + \frac{1}{2\gamma^2} \left(\frac{1}{T'_{doi}} - 1 \right) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{R}_2(\mathbf{x}) - \frac{\lambda_2}{2} \bar{\mathbf{g}}_2 \bar{\mathbf{g}}_2^T + \frac{1}{2\gamma^2} [\mathbf{g}_2 \mathbf{g}_2^T - \mathbf{G}_2 \mathbf{G}_2^T] \\ &= \text{diag} \left[a_1 - \frac{a_1 \lambda_2}{2} - \frac{1}{2\gamma^2}, a_1 - \frac{a_1 \lambda_2}{2} - \frac{1}{2\gamma^2}, \right. \\ & \left. a_2 - \frac{a_2 \lambda_2}{2} - \frac{1}{2\gamma^2}, a_2 - \frac{a_2 \lambda_2}{2} - \frac{1}{2\gamma^2}, \right. \\ & \left. c \left(1 - \frac{\lambda_2}{2} \right) \right] + \frac{1}{2\gamma^2} \mathbf{g}_2 \mathbf{g}_2^T \end{aligned} \quad (13)$$

其中, λ_{1i} 为满足 $\mathbf{R}_{1i}(\mathbf{x}) - \frac{\lambda_{1i}}{2} \bar{\mathbf{g}}_{1i} \bar{\mathbf{g}}_{1i}^T \geq 0$ 的正数; λ_2

为满足 $\mathbf{R}_2(\mathbf{x}) - \frac{\lambda_2}{2} \bar{\mathbf{g}}_2 \bar{\mathbf{g}}_2^T \geq 0$ 的正数, $\mathbf{g}_2 \mathbf{g}_2^T \geq 0$ 。

从式(12)和式(13)可知,当给定的干扰抑制水平 γ 取值满足 $\gamma \geq \max_{i=1, \dots, n} \left(\sqrt{M_i^2 / (2D_i \omega_0 - \lambda_{1i} \omega_0^2)}, \sqrt{(T'_{doi} - 1) / [2T'_{doi}(x_{di} - x'_{di}) - \lambda_{1i}]}, 1 / \sqrt{a_1(2 - \lambda_2)}, 1 / \sqrt{a_2(2 - \lambda_2)} \right)$ 时,则下式成立:

$$\mathbf{R}_{1i}(\mathbf{x}) - \frac{\lambda}{2} \bar{\mathbf{g}}_{1i} \bar{\mathbf{g}}_{1i}^T + \frac{1}{2\gamma^2} [\mathbf{g}_{1i} \mathbf{g}_{1i}^T - \mathbf{G}_{1i} \mathbf{G}_{1i}^T] \geq 0 \quad (14)$$

$$\mathbf{R}_2(\mathbf{x}) - \frac{\lambda}{2} \bar{\mathbf{g}}_2 \bar{\mathbf{g}}_2^T + \frac{1}{2\gamma^2} [\mathbf{g}_2 \mathbf{g}_2^T - \mathbf{G}_2 \mathbf{G}_2^T] \geq 0 \quad (15)$$

并且从 $\sum(\mathbf{x})$ 的表达式可以验证 $\sum(\mathbf{x}_0) = 0$ 且在 \mathbf{x} 的定义域空间中一致有界。根据式(3)可定义出 $\boldsymbol{\rho}(\mathbf{x}) = [\boldsymbol{\rho}_{1i}(\mathbf{x}), \boldsymbol{\rho}_2(\mathbf{x})]^T$,只要找到合适的 $\boldsymbol{\rho}(\mathbf{x})$ 就可以根据式(4)来设计多机励磁与UPFC装置的非线性协调控制策略。

多机系统中第 i 台发电机励磁的控制策略为

$$\mathbf{u}_{fi} = -\frac{1}{2T'_{doi}} \left[\left(\frac{\boldsymbol{\rho}_{1i}(\mathbf{x})}{\lambda_{1i}} + \frac{1}{\gamma^2} \right) \mathbf{I} + \mathbf{h}_i^T \mathbf{h}_i \right] \frac{\partial H}{\partial E'_{qi}} \quad (16)$$

式中: \mathbf{h}_i 为特定系数。

UPFC装置的控制策略为

$$\mathbf{u}_1 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{\boldsymbol{\rho}_2(\mathbf{x})}{\lambda_2} \right) \mathbf{I} + \mathbf{h}_2^T \mathbf{h}_2 \right] [b_1 U_{dc} \frac{\partial H}{\partial i_{d1}} - di_{d1} \frac{\partial H}{\partial U_{dc}}] + u_{10} \quad (17)$$

$$\mathbf{u}_2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{\boldsymbol{\rho}_2(\mathbf{x})}{\lambda_2} \right) \mathbf{I} + \mathbf{h}_2^T \mathbf{h}_2 \right] [b_1 U_{dc} \frac{\partial H}{\partial i_{q1}} - di_{q1} \frac{\partial H}{\partial U_{dc}}] + u_{20} \quad (18)$$

$$\mathbf{u}_3 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{\boldsymbol{\rho}_2(\mathbf{x})}{\lambda_2} \right) \mathbf{I} + \mathbf{h}_2^T \mathbf{h}_2 \right] [b_2 U_{dc} \frac{\partial H}{\partial i_{d2}} - di_{d2} \frac{\partial H}{\partial U_{dc}}] + u_{30} \quad (19)$$

$$\mathbf{u}_4 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{\boldsymbol{\rho}_2(\mathbf{x})}{\lambda_2} \right) \mathbf{I} + \mathbf{h}_2^T \mathbf{h}_2 \right] [b_2 U_{dc} \frac{\partial H}{\partial i_{q2}} - di_{q2} \frac{\partial H}{\partial U_{dc}}] + u_{40} \quad (20)$$

式中: \mathbf{h}_2 为待定系数。

由式(6)可将 $u_{10}, u_{20}, u_{30}, u_{40}$ 转化成UPFC装置的触发控制变量:

$$k_1 = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (21)$$

$$\alpha_1 = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{u_2}{u_1} \right) - \theta_{n+1} & u_1 > 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{u_2}{u_1} \right) + \pi - \theta_{n+1} & u_1 < 0 \\ \sin^{-1} \left(\frac{u_2}{k_1} \right) - \theta_{n+1} & u_1 = 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$k_2 = \sqrt{u_3^2 + u_4^2} \quad (23)$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{u_4}{u_3} \right) - \theta_{n+1} & u_3 > 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{u_4}{u_3} \right) + \pi - \theta_{n+1} & u_3 < 0 \\ \sin^{-1} \left(\frac{u_4}{k_1} \right) - \theta_{n+1} & u_3 = 0 \end{cases} \quad (24)$$

4 仿真分析与验证

为验证本文所提的多机励磁与UPFC的协调控制策略的有效性,在PSCAD仿真环境中搭建如图2所示的包含UPFC装置的四机两区域仿真模型。此仿真模型中所有发电机的额定容量为900 MV·A,额定电压是20 kV。系统输出电压的额定值为230 kV。以额定值为基准值的发电机和UPFC装置的具体仿真参数分别如表1和表2所示。根据系统在平衡点处的初始值和第1节所述控制

理论的约束条件通过多次仿真优化法确定控制器参数,取 $\lambda_{i1} = \lambda_{i2} = 0.1, h_{i1} = h_{i2} = 2, \gamma = 2$,边界函数取 $\rho_{i1}(x) = k_i E_{qi}^2, \rho_{i2}(x) = 1/2(L_{s1}i_{d1}^2 + L_{s1}i_{q1}^2 + L_{s2}i_{d2}^2 + L_{s2}i_{q2}^2 + C_{dc}U_{dc}^2)$ 。通过PSCAD/EMTDC仿真平台中测量单元的测量值来模拟实际系统中PMU装置的测量值,为本仿真提供所需的发电机和UPFC装置的实时运行参数。

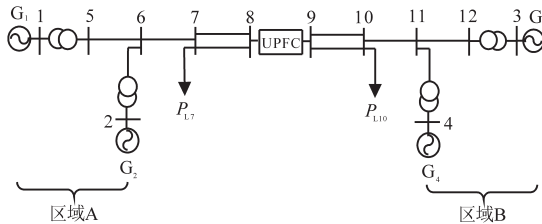


图2 四机两区域系统结构图

Fig.2 The system structure of two-area including four generators

表1 发电机仿真参数

Tab.1 Generator simulation parameters

发电机	x_d	x_q	x'_d	x'_q	T'_{d0}/s	M/s	D
1,2	1.8	1.7	0.3	0.55	8.0	13	3
3,4	1.8	1.7	0.3	0.55	8.0	12.25	3

表2 UPFC装置仿真参数

Tab.2 UPFC device simulation parameters

R_{s1}	L_{s1}	R_{s2}	L_{s2}	C_{dc}	R_{dc}	ω_s
0.01	0.15	0.001	0.015	1.133	100	377

本仿真中系统初始运行于稳定平衡点,设定的系统故障情况如下:1)UPFC装置串联母线右侧在2s时发生三相瞬时性接地短路故障,0.1s后故障切除,系统恢复正常;2)母线7处的负荷在2s时忽然减少为原来的50%,并在2.5s时恢复正常负荷。为了充分验证本文所提非线性控制策略的有效性,将其与由发电机的AVR/PSS和UPFC的PI控制组成的分散控制进行对比仿真。

故障1的设定用来验证非线性协调控制器的有效性;故障2的设定用来验证非线性协调控制器的鲁棒性。图3~图8分别展示了系统联络线传输功率、发电机功角差及母线9电压在两种故障情况下的动态响应曲线。

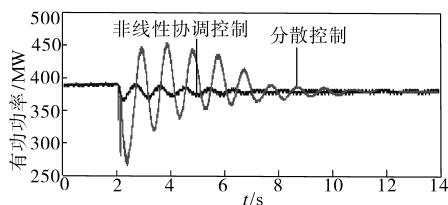


图3 G_1 和 G_3 的功角差 $\Delta\delta_{13}$ 的响应曲线(故障1)
Fig.3 Response curves of the power angle difference $\Delta\delta_{13}$ between G_1 and G_3 (fault 1)

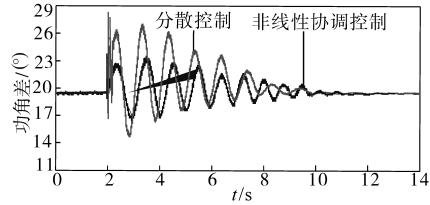


图4 联络线传输功率 P_{7-8} 的响应曲线(故障1)

Fig.4 Response curves of tie line transmission power P_{7-8} (fault 1)

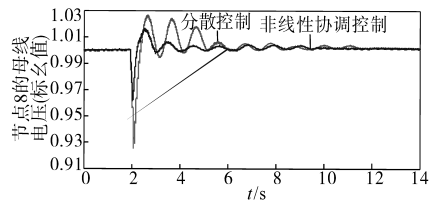


图5 母线9电压的响应曲线(故障1)

Fig.5 Response curves of bus 9 voltage (fault 1)

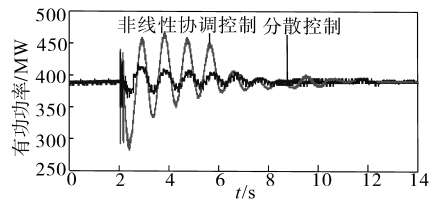


图6 G_1 和 G_3 的功角差 $\Delta\delta_{13}$ 的响应曲线(故障2)

Fig.6 Response curves of the power angle difference $\Delta\delta_{13}$ between G_1 and G_3 (fault 2)

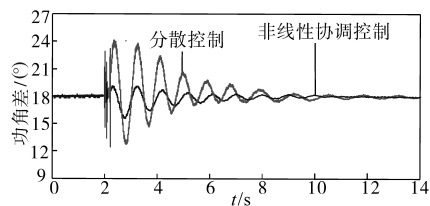


图7 联络线传输功率 P_{7-8} 的响应曲线(故障2)

Fig.7 Response curves of tie line transmission power P_{7-8} (fault 2)

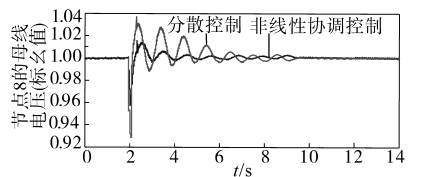


图8 母线9电压的响应曲线(故障2)

Fig.8 Response curves of bus 9 voltage (fault 2)

从图3~图8中可以看出,与传统分散控制相比,本文设计的非线性协调控制器具有较快的响应速度,并且能够以较小的超调量在较短的时间内使系统迅速恢复稳定,从而验证了本控制器的有效性和鲁棒性。

5 结论

本文利用广义Hamilton理论的扩展 L_2 干扰抑制控制法设计了多台发电机励磁与UPFC装置的协调控制器,解决了具有参数扰动的含UPFC装置的多机电力系统的稳定性问题,同时系统动态方程的建立和Hamilton函数的构造为研究多台UPFC装置和多台发电机的协调控制问题提供了基础。仿真结果验证了所提非线性控制器的有效性和鲁棒性。本文中的一些控制器参数是通过多次仿真优化得到的。下一步工作的重点是,研究一种适用于确定非线性控制器参数的简便优化方法。

参考文献

- [1] 熊莉.基于统一潮流控制器(UPFC)的电力系统潮流控制[J].电力科学与技术学报,2007,22(3):32-35.
- [2] 荆平,周飞,宋洁莹,等.采用模块化结构的统一潮流控制器设计与仿真[J].电网技术,2013,37(2):356-361.
- [3] 赵祖熠,解大,楚皓翔,等.基于STATCOM的双馈风机机网扭振抑制策略研究[J].电力科学与技术学报,2015,30(4):48-56.
- [4] 刘黎明,康勇,陈坚,等.统一潮流控制器控制策略的研究与实现[J].中国电机工程学报,2006,26(10):114-119.
- [5] 李林,宋宗勋,李峰,等.抑制区域间低频振荡的UPFC模糊滑模控制器[J].电力系统保护与控制,2017,45(10):104-109.
- [6] 阎博,汪可友,Crow Mariesa L,等.UPFC状态反馈精确线性化潮流控制策略[J].中国电机工程学报,2012,32(19):42-48.
- [7] 陈文韬,王杰.基于伪广义Hamilton理论的电力系统时滞反馈励磁控制[J].电网技术,2015,39(8):2238-2244.
- [8] 石访,王杰.基于Hamilton能量函数的发电机励磁与TCSC协调控制[J].电力系统保护与控制,2012,40(15):24-28.
- [9] Ortega R, Galaz M, Astolfi A, *et al.* Transient stabilization of multi-machine power systems with nontrivial transfer conductances[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(1):60-75.
- [10] 刘青,张立娜.多机系统发电机时滞反馈励磁与STATCOM的非线性鲁棒协调控制[J].电力自动化设备,2017,37(4):102-108.
- [11] 古丽扎提·海拉提,王杰.广义Hamilton多机电力系统的广域时滞阻尼控制[J].中国电机工程学报,2014,34(34):6199-6208.
- [12] Sun Y, Shen T, Ortega R, *et al.* Decentralized controller design for multimachine power systems based on Hamiltonian structure [C]// Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, 2001:3045-3050.
- [13] Liu Q J, Sun Y Z, Shen T L, *et al.* Adaptive nonlinear coordinated excitation and STATCOM controller based on Hamiltonian structure for multimachine-power-system stability enhancement [J]. IEE Proceedings—Control Theory and Applications, 2003, 150(3):285-294.
- [14] 雷邦军.针对FACTS设备的电力系统非线性控制研究[D].南京:东南大学,2014.
- [15] 石访,王杰.伪广义哈密顿理论及其在多机电力系统非线性励磁控制中的应用[J].中国电机工程学报,2011,31(19):67-74.

收稿日期:2018-06-24

修改稿日期:2018-08-20