

# 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

刘 青,张立娜

(华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003)

**摘要:** 广域反馈信号的时滞性使得包含广域信号的电力系统变成时滞动力系统。利用 Pade 近似逼近时滞环节,将时滞影响隐含在系统动态方程的系数中,静止同步补偿器(STATCOM)的动态特性用一阶微分方程形式的可控无功电流源表示,推导了含多台 STATCOM 的多机系统的电磁功率表达式。基于伪广义 Hamilton 系统理论,将包含 STATCOM 和时滞反馈励磁的多机系统表示成伪广义耗散 Hamilton 系统形式。利用  $L_2$  干扰抑制控制方法得到考虑广域信号时滞性及转移电导的发电机励磁和 STATCOM 的协调控制策略。4 机 2 区域系统的仿真结果表明,与传统的分散控制器相比,所提考虑时滞影响的非线性鲁棒协调控制器能够有效地抑制系统振荡,且具有一定的时滞不敏感性。

**关键词:** 电力系统; 励磁系统; 发电机; STATCOM; 动态模型; 伪广义 Hamilton 系统; 时滞; Pade 近似;  $L_2$  干扰抑制; 协调控制

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.015

## 0 引言

静止同步补偿器 STATCOM(STATic synchronous COMPensator)作为柔性交流输电系统(FACTS)的核心控制器之一,它能够连续、精确地动态补偿系统的无功功率,改善电网的电压质量。由于 STATCOM 良好的响应速度和可控性,其在系统电压支撑和静、暂态稳定性提高方面发挥着重要作用<sup>[1-2]</sup>。国内外学者在 STATCOM 装置与发电机励磁的协调控制方面取得了不少研究成果。文献[3]建立了包含 STATCOM 的单机系统的罚函数,根据目标全息反馈法得到协调控制规律。文献[4]提出一种便于控制器设计的 STATCOM 模型,基于系统微分代数方程,并结合多指标非线性控制完成协调控制器的设计。但以上方法都只针对单机无穷大系统。文献[5]采用直接反馈线性化方法及零动态原理实现了 STATCOM 与发电机励磁的非线性协调控制,但在控制器设计过程中对系统进行了部分线性化处理,减弱了所设计控制器的非线性。广域测量系统 WAMS(Wide-Area Measurement System)在电网中的成功运用为电力系统的分析和控制提供了新的方法<sup>[6]</sup>。然而,广域测量信号经过 WAMS 的传输、处理后可能存在几十甚至数百毫秒的时滞,这将使电力系统变成时滞系统<sup>[7]</sup>。时滞对电力系统的稳定性具有重要的影响,因而在忽略时滞影响的情况下设计出的控制器在实际电力系统中的控制效果将会变差甚至会恶化系统的稳定性<sup>[8]</sup>。

近年来,哈密顿(Hamilton)系统理论受到非线性

系统控制领域的广泛关注,根据此方法设计的非线性控制器具有良好的控制效果和动态性能<sup>[9]</sup>。文献[10]通过预置反馈方法完成广义拟 Hamilton 实现,提出了一种适用于此系统的镇定控制器的设计方法,并据此设计了多静止无功补偿器(SVC)的协调控制策略。文献[11]建立了包含广域阻尼控制器的多机时滞系统模型,基于 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法,得出该类时滞系统的渐近稳定判据。但上述文献均未考虑转移电导。文献[12]在广义耗散 Hamilton 实现方法的基础上计及转移电导的影响,提出了伪广义 Hamilton 理论及其镇定控制方法,但发电机励磁控制策略中未计及广域信号的时滞。

本文基于伪广义 Hamilton 理论,对多机系统时滞反馈励磁与 STATCOM 装置同时进行协调控制。STATCOM 的动态特性用一阶微分方程形式的可控无功电流源表示,利用 Pade 近似逼近时滞环节,将时滞影响隐含在系统动态方程的系数中;将考虑时滞及 STATCOM 动态调节作用的多机系统描述成伪广义耗散 Hamilton 系统形式,利用  $L_2$  干扰抑制控制方法,得到发电机反馈励磁和 STATCOM 的协调控制规律;仿真算例表明了所提考虑时滞的协调控制策略的正确性和有效性。

## 1 伪广义 Hamilton 系统理论

**定义 1** 对于包含不确定扰动项的仿射非线性系统,其状态方程为:

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

其中,  $x \in \mathbf{R}^n$  为  $n$  维系统状态变量;  $u \in \mathbf{R}^m$  为  $m$  维控制

输入向量;  $\mathbf{w} \in \mathbf{R}^S$  为  $S$  维系统扰动项;  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{G}(\mathbf{x})$  为适当阶数的系数矩阵。若存在一个有界函数  $H(\mathbf{x})$ , 则可将式(1)所示系统表示为如下形式:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{T}(\mathbf{x})\partial_x H(\mathbf{x}) + \mathbf{P}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \mathbf{T}(\mathbf{x}) &= \mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{J}^T = -\mathbf{J}$ ;  $\mathbf{R} = \mathbf{R}^T \geq 0$ ; 其余各矩阵变量的定义可参考文献[12]。设式(2)所示系统的平衡点为  $\mathbf{x}_0$ , 若  $\mathbf{T}(\mathbf{x})$  可逆, 则记  $\bar{\mathbf{P}}(\mathbf{x}) = \mathbf{T}^{-1}(\mathbf{x})\mathbf{P}(\mathbf{x})$ , 在  $H(\mathbf{x})$  的基础上构造新的能量函数<sup>[12]</sup>:

$$W(\mathbf{x}) = H(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^n \int_{x_{j0}}^{x_j} \xi_j(x_j) dx_j - H(\mathbf{x}_0) \quad (3)$$

$$\xi_j(x_j) = \bar{P}_j(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{(j-1)0}, x_{j0}, x_{(j+1)0}, \dots, x_{n0})$$

则式(2)也可表示成如下形式:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{T}(\mathbf{x})\partial_x W(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}) = \mathbf{P}(\mathbf{x}) - \mathbf{T}(\mathbf{x})[\xi_1(x_1), \xi_2(x_2), \dots, \xi_n(x_n)]^T$$

新构造的伪广义 Hamilton 函数  $W(\mathbf{x})$  在平衡点处的偏导数为:

$$\begin{aligned} \partial_x W(\mathbf{x}_0) &= \partial_x H(\mathbf{x}_0) + [\xi_1(x_{10}), \dots, \xi_n(x_{n0})]^T = \\ &= \partial_x H(\mathbf{x}_0) + \bar{\mathbf{P}}(\mathbf{x}_0) \end{aligned} \quad (5)$$

由  $W(\mathbf{x})$  的表达式容易知道其在系统平衡点处的值  $W(\mathbf{x}_0) = 0$ , 且  $\partial_x W(\mathbf{x})|_{x=x_0} = 0$ , 则  $\mathbf{x}_0$  既是伪广义 Hamilton 函数  $W(\mathbf{x})$  的一个零点, 也是它的一个极值点。

当计及转移电导与时滞时, 很难用解析表达式给出伪广义 Hamilton 函数  $W(\mathbf{x})$  的海森(Hessian)矩阵的正定条件, 但可用计算机数值计算方法判断其 Hessian 矩阵的正定性, 或者得到其正定条件<sup>[13]</sup>。若  $W(\mathbf{x})$  的 Hessian 矩阵正定, 则  $\mathbf{x}_0$  是伪广义 Hamilton 函数  $W(\mathbf{x})$  的一个极小值点, 此时  $W(\mathbf{x})$  可以作为系统的一个局部 Lyapunov 函数。

若要使系统渐近稳定, 则所构造的函数还必须满足沿式(4)所示系统轨线对时间的导数小于等于 0, 即:

$$\dot{W}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (6)$$

下面定理 1 给出的控制策略为  $W(\mathbf{x})$  满足式(6)所示的不等式提供了可能, 这也是设计系统镇定控制器的基础。

定理 1 给定一个罚信号  $\mathbf{z} = \mathbf{h}\mathbf{g}^T(\mathbf{x})\partial_x W(\mathbf{x})$ , 其中  $\mathbf{h}$  为权重矩阵, 若给定的干扰抑制水平  $\gamma > 0$  能满足  $\mathbf{R}(\mathbf{x}) + \frac{1}{2\gamma^2}[\mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{g}^T(\mathbf{x}) - \mathbf{G}(\mathbf{x})\mathbf{G}^T(\mathbf{x})] \geq 0$ , 则存在如式(7)所示控制规律使系统在平衡点  $\mathbf{x}_0$  处是渐近稳定的。

$$\mathbf{u} = -\frac{1}{2} \left[ \mathbf{h}^T(\mathbf{x})\mathbf{h}(\mathbf{x}) + \frac{1}{\gamma^2} \mathbf{I} \right] \mathbf{g}^T(\mathbf{x})\partial_x W(\mathbf{x}) \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{I}$  为单位对角矩阵, 证明过程详见文献[14]。

## 2 包含 STATCOM 的时滞多机电力系统网络方程

为了设计发电机时滞励磁与 STATCOM 的协调控制策略, 不能简单地将时滞励磁和 STATCOM 的孤立模型与系统模型相结合, 而是需要考虑时滞励磁、STATCOM 与电力系统相互关联的影响因素。

### 2.1 时滞环节的处理

广域测量信号存在的时滞, 在复数域中可用时滞环节  $e^{-\tau s}$  ( $\tau$  为信号时滞大小) 表示。当发电机励磁控制器包含广域反馈信号时, 若不考虑反馈信号的时滞性, 可能会影响所设计控制器的效果, 甚至会恶化系统的稳定性。计及广域反馈信号的时滞影响时显含时滞系统的控制策略会十分繁琐。因此利用二阶 Pade 近似方法逼近时滞环节  $e^{-\tau s}$ , 将显含时滞系统变成一个新的隐含时滞系统, 近似表达式为:

$$e^{-\tau s} = \frac{1 - \frac{1}{2}\tau s + \frac{1}{12}\tau^2 s^2}{1 + \frac{1}{2}\tau s + \frac{1}{12}\tau^2 s^2} \quad (8)$$

设  $x$  为输入变量,  $x_\tau$  为输入变量  $x$  经过时滞环节后的输出变量, 此时滞环节的微分方程为:

$$\dot{x}_\tau = \dot{x} + \frac{a}{b}x + \frac{a}{b}x_\tau + \frac{1}{b}(x_1 - y_1) \quad (9)$$

其中,  $a = -\frac{1}{2}\tau$ ;  $b = \frac{1}{12}\tau^2$ ;  $x_1, y_1$  分别为输入变量和输出变量的积分。

本文采用文献[15]给出的电力系统稳定器(PSS)模型, 如图 1 所示。为了抑制母线电压降低、增加线路传输功率, 选取远端第  $l$  条母线的电压偏差  $\Delta U_l$  作为输入信号, 则第  $i$  台发电机励磁输入信号  $U_i$  的表达式为:

$$\dot{U}_i = K_U \left[ \Delta \dot{U}_i + \frac{a_i}{b_i} \Delta U_i + \frac{1}{b_i} (x_k - y_k) \right] + \frac{a_i}{b_i} U_i \quad (10)$$

其中,  $K_U$  为 PSS 环节的放大倍数;  $x_k, y_k$  分别为  $\Delta U_l$  和  $\Delta U_{l\tau}$  的积分,  $\Delta U_{l\tau}$  为经过时滞环节后的输入信号。



图 1 含广域控制信号的 PSS 模型

Fig.1 PSS model with wide-area control signal

### 2.2 STATCOM 的动态模型及多机系统的电磁功率

分析一个多机电力系统, 其包含  $N$  个发电机节点、 $M$  台 STATCOM 装置。1、2、...、 $N$  为发电机节点;  $N+1, N+2, \dots, N+M$  为安装有 STATCOM 装置的母线节点。图 2 为 STATCOM 的可控电流源模型, 将 STATCOM 的动态特性用一阶微分方程表示<sup>[16]</sup>, 则第  $k$  台 STATCOM 装置的动态模型可表示为:

$$\dot{I}_{Sk} = \frac{-1}{T_{Sk}} (I_{Sk} - I_{Sk0}) + \frac{K_{Sk}}{T_{Sk}} u_{Sk} \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (11)$$

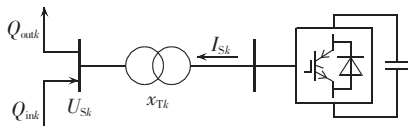


图 2 STATCOM 可控电流源模型

Fig.2 Controllable current-source model of STATCOM

其中,  $I_{Sk}$  为 STATCOM 的输出电流;  $I_{Sk0}$  为 STATCOM 输出电流的初始值;  $T_{Sk}$  为第  $k$  台 STATCOM 装置的动态惯性时间常数;  $K_{Sk}$  为放大倍数;  $u_{Sk}$  为第  $k$  台 STATCOM 装置的控制输入。

第  $k$  台 STATCOM 装置接入点的母线电压为:

$$U_{Sk} = \frac{Q_{outk} - Q_{ink}}{I_{Sk}} \quad (12)$$

其中,  $Q_{ink}$ 、 $Q_{outk}$  为第  $k$  台 STATCOM 装置接入母线两侧流通的无功功率。由式(12)可看出, 考虑 STATCOM 装置的动态调节作用后, STATCOM 接入点的母线电压  $U_{Sk}$  随着  $I_{Sk}$  的变化而变化, 即  $\partial U_{Sk} / \partial I_{Sk} \neq 0$ 。

为了推导 STATCOM 装置接入系统后发电机输出的电磁功率和发电机电流的表达式, 将系统的节点导纳矩阵收缩到包含 STATCOM 节点的发电机节点, 系统的网络模型如图 3 所示。则用收缩导纳矩阵表示的系统方程为:

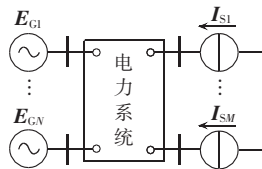


图 3 系统网络模型

Fig.3 System network model

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_G \\ \mathbf{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{GG} & \mathbf{Y}_{GS} \\ \mathbf{Y}_{SG} & \mathbf{Y}_{SS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_G \\ \mathbf{U}_S \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中,  $\mathbf{E}_G$  为  $N$  维发电机节点电压向量;  $\mathbf{U}_S$  为  $M$  维 STATCOM 接入母线节点电压向量;  $\mathbf{I}_G$  为  $N$  维发电机注入电流向量;  $\mathbf{I}_S$  为  $M$  维 STATCOM 注入电流向量;  $\mathbf{Y}_{GG}$  为发电机节点间的导纳矩阵;  $\mathbf{Y}_{SS}$  为 STATCOM 节点间的导纳矩阵;  $\mathbf{Y}_{GS}$  和  $\mathbf{Y}_{SG}$  为发电机节点与 STATCOM 节点间的导纳矩阵。

为了表述方便, 记  $\mathbf{Y}_{GG} = \mathbf{Y}_G = \mathbf{G}_G + \mathbf{j}\mathbf{B}_G$ ,  $\mathbf{Y}_{GS} = \mathbf{Y}_S = \mathbf{G}_S + \mathbf{j}\mathbf{B}_S$ , 则第  $i$  台发电机的电磁功率和  $d$  轴电流的表达式为:

$$P_{ei} = \text{Re}(\mathbf{E}_{Gi} \mathbf{I}_{Gi}^*) = E'_{qi} \sum_{j=1}^N E'_{qj} (B_{Gij} \sin \delta_{ij} + G_{Gij} \cos \delta_{ij}) + \Delta P_{ei}(\mathbf{I}_S) \quad (14)$$

$$I_{di} = \text{Im}(\mathbf{E}_{Gi} \mathbf{I}_{Gi}^*) / E_{Gi} = \sum_{j=1}^N E'_{qj} (B_{Gij} \cos \delta_{ij} - G_{Gij} \sin \delta_{ij}) + \Delta I_{di}(\mathbf{I}_S) \quad (15)$$

$$\Delta P_{ei}(\mathbf{I}_S) = E'_{qi} \sum_{k=1}^M U_{Sk} (B_{Sik} \sin \delta_{ik} + G_{Sik} \cos \delta_{ik})$$

$$\Delta I_{di}(\mathbf{I}_S) = \sum_{k=1}^M U_{Sk} (B_{Sik} \cos \delta_{ik} - G_{Sik} \sin \delta_{ik})$$

其中,  $\mathbf{E}_{Gi}$  为第  $i$  台发电机节点电压相量;  $E'_{qi}$  为第  $i$  台发电机的暂态电势;  $\delta_{ij}$  为  $E'_{qi}$  和  $E'_{qj}$  之间的相角差;

$\delta_{ik}$  为  $E'_{qi}$  和  $U_{Sk}$  之间的相角差;  $G_{Gij}$  和  $B_{Gij}$  分别为第  $i$  台发电机和第  $j$  台发电机之间的电导和电纳;  $G_{Sik}$  和  $B_{Sik}$  分别为第  $i$  台发电机和第  $k$  台 STATCOM 之间的电导和电纳。

由上述公式可知, 系统中附加的电磁功率  $\Delta P_{ei}(\mathbf{I}_S)$ 、电流  $\Delta I_{di}(\mathbf{I}_S)$  是 STATCOM 输出电流  $\mathbf{I}_S$  的函数, 则可以将  $\Delta P_{ei}(\mathbf{I}_S)$ 、 $\Delta I_{di}(\mathbf{I}_S)$  看作有界不确定参数, 即式(1)中的有界扰动项。

### 3 考虑时滞的多机电力系统励磁与 STATCOM 的非线性协调控制器设计

#### 3.1 多机电力系统的伪广义耗散 Hamilton 实现

定义  $\mathbf{x}_i = (\tilde{\mathbf{x}}_i, \tilde{\mathbf{x}}_i)^T$  为系统的状态变量, 其中  $\tilde{\mathbf{x}}_i = (\delta_i, \omega_i, E'_{qi}, U_{li})^T$ ,  $\tilde{\mathbf{x}}_k = I_{Sk0}$ 。并设  $\mathbf{x}_0$  为系统的平衡点, 则计及时滞并包含发电机励磁及 STATCOM 的多机电力系统的动态方程为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = \frac{\omega_0 - P_{mi}}{M_i} - \frac{D_i}{M_i} (\omega_i - \omega_0) - \frac{\omega_0}{M_i} \Delta P_{ei}(\mathbf{I}_S) - \\ \quad \frac{\omega_0}{M_i} \sum_{j=1}^N E'_{qi} E'_{qj} (B_{Gij} \sin \delta_{ij} + G_{Gij} \cos \delta_{ij}) \\ \dot{E}'_{qi} = -\frac{1}{T'_{d0i}} \left[ (x_{di} - x'_{di}) \sum_{j=1}^N E'_{qj} (G_{Gij} \sin \delta_{ij} - \right. \\ \quad \left. B_{Gij} \cos \delta_{ij}) \right] + \frac{U_{li} - E'_{qi} + u_{li}}{T'_{d0i}} + \frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}} \Delta I_{di}(\mathbf{I}_S) \\ \dot{U}_{li} = K_U \left[ \Delta \dot{U}_{li} + \frac{a_i}{b_i} \Delta U_{li} + \frac{1}{b_i} (x_k - y_k) \right] + \frac{a_i}{b_i} U_{li} \\ \dot{I}_{Sk} = -\frac{1}{T_{Sk}} (I_{Sk} - I_{Sk0}) + \frac{K_{Sk}}{T_{Sk}} u_{Sk} \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $\omega_i$  为发电机角速度;  $\omega_0$  为同步转速;  $D_i$ 、 $M_i$  分别为发电机阻尼系数和惯性时间常数;  $P_{mi}$  为输入机械功率;  $T'_{d0i}$  为  $d$  轴暂态开路时间常数;  $x_{di}$ 、 $x'_{di}$  分别为发电机  $d$  轴同步电抗和暂态电抗。

从能量的角度出发, 构造系统的 Hamilton 函数为:

$$\begin{aligned} H(\mathbf{x}_i) = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \frac{M_i}{\omega_0} (\omega_i - \omega_0)^2 + \sum_{i=1}^N G_{Gii} \delta_i E'_{qi}{}^2 + \\ & \sum_{1 \leq i < j \leq N} E'_{qi} E'_{qj} (G_{Gij} \sin \delta_{ij} - B_{Gij} \cos \delta_{ij}) - \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N B_{Gii} E'_{qi}{}^2 + \sum_{i=1}^N \frac{E'_{qi}{}^2}{2(x_{di} - x'_{di})} - \sum_{i=1}^N P_{mi} \delta_i + \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N C_{li} U_{li}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M C_{Sk} (I_{Sk} - I_{Sk0})^2 \end{aligned} \quad (17)$$

其中,  $C_{li}$ 、 $C_{Sk}$  分别为时滞环节和 STATCOM 惯性环节的电容<sup>[11]</sup>。构造的能量函数  $H(\mathbf{x}_i)$  表示系统的总能量, 包含了 STATCOM 在内的各个储能电气元件的能量, 也反映了暂态过程中系统能量的转移方向。将

能量函数  $H(\mathbf{x}_i)$  对各个状态变量求导,则式(16)可表示成如下向量形式:

$$\dot{\mathbf{x}}_i = (\mathbf{J} - \mathbf{R}) \partial_{\mathbf{x}_i} H(\mathbf{x}_i) + \mathbf{P}(\mathbf{x}_i) + \mathbf{g}\tilde{\mathbf{u}} \quad (18)$$

$$\mathbf{J} = \text{diag}[\mathbf{J}_i, \mathbf{J}_k] \in \mathbf{R}^{(4N+M) \times (4N+M)}$$

$$\mathbf{R} = \text{diag}[\mathbf{R}_i, \mathbf{R}_k] \in \mathbf{R}^{(4N+M) \times (4N+M)}$$

$$\mathbf{g} = \text{diag}[\mathbf{g}_i, \mathbf{g}_k] \in \mathbf{R}^{(4N+M) \times (4N+M)}$$

$$\mathbf{P} = [\mathbf{P}_i, \mathbf{P}_k] \in \mathbf{R}^{(4N+M) \times (4N+M)}$$

$$\mathbf{J}_i(\mathbf{x}_i) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\omega_0}{M_i} & 0 & 0 \\ \frac{-\omega_0}{M_i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2T'_{d0i}C_{li}} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{2T'_{d0i}C_{li}} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_i(\mathbf{x}_i) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D_i\omega_0}{M_i^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{x_{di}-x'_{di}}{T'_{d0i}} & \frac{-1}{2T'_{d0i}C_{li}} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{2T'_{d0i}C_{li}} & \frac{-a_i}{b_iC_{li}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_i(\mathbf{x}_i) = \begin{bmatrix} \frac{-\omega_0}{M_i} \Delta P_{ei}(\mathbf{I}_S) \\ \frac{2(x_{di}-x'_{di})}{T'_{d0i}} G_{Gii} \delta_{ii} E'_{qi} + \frac{x_{di}-x'_{di}}{T'_{d0i}} \Delta I_{di}(\mathbf{I}_S) + \frac{u_{fi0}}{T'_{d0i}} \\ K_U \left[ \Delta U_{li} + \frac{a_i}{b_i} \Delta U_{li} + \frac{1}{b_i} (x_k - y_k) \right] \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_k(\mathbf{x}_i) = \frac{K_{Sk}}{T_{Sk}} u_{Sk0}, \quad \mathbf{g}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T'_{d0i}} & 0 \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{g}_k = \frac{K_{Sk}}{T_{Sk}}$$

$$\tilde{\mathbf{u}}_i = [u_{fi} - u_{fi0} \quad u_{Sk} - u_{Sk0}]^T$$

其中,  $u_{fi0}$  和  $u_{Sk0}$  分别为系统平衡点对应的发电机励磁输入值和 STATCOM 装置的控制量初始值。

式(18)即为考虑转移电导并包含发电机时滞反馈励磁及 STATCOM 装置的多机电力系统的非标准广义 Hamilton 形式,而且时滞环节的作用已经隐含在式(18)的矩阵中。

### 3.2 非线性协调控制器的设计

标准的广义 Hamilton 系统模型不含有附加项  $\mathbf{P}_i(\mathbf{x}_i)$ , 因此式(18)为非标准广义 Hamilton 形式。第 1 节中构造的能量函数  $H(\mathbf{x})$  不能直接作为系统的 Lyapunov 函数来讨论系统的稳定性,也不能依此设计系统的镇定控制器,因此需对  $H(\mathbf{x})$  进行一定的改造。

构造式(18)所示系统的新的伪广义 Hamilton 函数为:

$$W(\mathbf{x}_i) = H(\mathbf{x}_i) +$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^4 \int_{x_{j0}}^{x_j} \xi_{ij}(x_j) dx_j + \sum_{k=1}^M \int_{x_{50}}^{x_5} \xi_k(x_5) dx_5 - H(\mathbf{x}_0) \quad (19)$$

$$\xi_{ij}(x_j) = \begin{cases} \bar{P}_{ij}(x_1, x_{20}, x_{30}, x_{40}, x_{50}) & j=1 \\ \bar{P}_{ij}(x_{10}, x_2, x_{30}, x_{40}, x_{50}) & j=2 \\ \bar{P}_{ij}(x_{10}, x_{20}, x_3, x_{40}, x_{50}) & j=3 \\ \bar{P}_{ij}(x_{10}, x_{20}, x_{30}, x_4, x_{50}) & j=4 \end{cases}$$

$$\xi_k(x_5) = \bar{P}_k(x_{10}, x_{20}, x_{30}, x_{40}, x_5)$$

$$\bar{\mathbf{P}}_i(\mathbf{x}_i) = [\mathbf{J}_i(\mathbf{x}_i) - \mathbf{R}_i(\mathbf{x}_i)]^{-1} \mathbf{P}_i(\mathbf{x}_i) =$$

$$[\bar{P}_{i1}(\mathbf{x}_i) \quad \bar{P}_{i2}(\mathbf{x}_i) \quad \bar{P}_{i3}(\mathbf{x}_i) \quad \bar{P}_{i4}(\mathbf{x}_i)]^T$$

$$\bar{P}_k(\mathbf{x}_i) = [\mathbf{J}_k(\mathbf{x}_i) - \mathbf{R}_k(\mathbf{x}_i)]^{-1} \mathbf{P}_k(\mathbf{x}_i)$$

则式(18)可表示为:

$$\dot{\mathbf{x}}_i = (\mathbf{J} - \mathbf{R}) \partial_{\mathbf{x}_i} W(\mathbf{x}_i) + \boldsymbol{\eta} + \mathbf{g}\tilde{\mathbf{u}} \quad (20)$$

$$\boldsymbol{\eta} = [\boldsymbol{\eta}_i, \boldsymbol{\eta}_k]^T, \quad \boldsymbol{\eta}_k = \mathbf{P}_k - \mathbf{P}_k(x_{10}, x_{20}, x_{30}, x_{40}, x_5)$$

$$\boldsymbol{\eta}_i = \mathbf{P}_i - \begin{bmatrix} P_{i1}(x_1, x_{20}, x_{30}, x_{40}, x_{50}) \\ P_{i2}(x_{10}, x_2, x_{30}, x_{40}, x_{50}) \\ P_{i3}(x_{10}, x_{20}, x_3, x_{40}, x_{50}) \\ P_{i4}(x_{10}, x_{20}, x_{30}, x_4, x_{50}) \end{bmatrix}$$

则考虑广域信号时滞与转移电导的含发电机励磁及 STATCOM 装置的复杂多机电力系统的伪广义 Hamilton 实现如式(20)所示,故可利用定理 1 设计励磁与 STATCOM 装置的非线性协调控制策略。

根据式(7)可得如式(16)所示电力系统中第  $i$  台发电机的励磁控制规律为:

$$u_{fi} = -\frac{1}{2} \left( h_i^2 + \frac{1}{\gamma^2} \right) \mathbf{g}_i^T(\mathbf{x}_i) \partial_{\tilde{\mathbf{x}}_i} W(\mathbf{x}_i) + u_{fi0} =$$

$$-\frac{1}{2T'_{d0i}} \left( h_i^2 + \frac{1}{\gamma^2} \right) \left\{ \sum_{j=1, j \neq i}^N E'_{qj} (G_{Gij} \sin \delta_{ij} - B_{Gij} \cos \delta_{ij}) - B_{Gii} E'_{qi} + \frac{E'_{qi}}{x_{di} - x'_{di}} + \right.$$

$$2G_{Gii} E'_{qi} (\delta_i - \delta_{i0}) + \sum_{k=1}^M U_{Sk} (G_{Sik} \sin \delta_{i0k} - B_{Sik} \cos \delta_{i0k}) - \frac{u_{fi0}}{x_{di} - x'_{di}} +$$

$$\left. \frac{b_i K_U}{a_i (x_{di} - x'_{di})} \left[ \Delta U_{li} + \frac{a_i}{b_i} \Delta U_{li} + \frac{1}{b_i} (x_k - y_k) \right] \right\} + u_{fi0} \quad (21)$$

第  $k$  台 STATCOM 装置的控制策略为:

$$u_{Sk} = -\frac{1}{2} \left( h_k^2 + \frac{1}{\gamma^2} \right) \mathbf{g}_k(\mathbf{x}_i) \partial_{\tilde{\mathbf{x}}_k} W(\mathbf{x}_i) + u_{Sk0} =$$

$$-\frac{K_{Sk}}{2T_{Sk}} \left( h_k^2 + \frac{1}{\gamma^2} \right) [\partial_{\tilde{\mathbf{x}}_k} (W(\mathbf{x}_i) - H(\mathbf{x}_i)) + C_{Sk} (I_{Sk} - I_{Sk0})] + u_{Sk0} \quad (22)$$

$$\partial_{\tilde{\mathbf{x}}_k} (W(\mathbf{x}_i) - H(\mathbf{x}_i)) =$$

$$\sum_{i=1}^N [E'_{qi} (G_{Sik} \sin \delta_{i0k} - B_{Sik} \cos \delta_{i0k}) + E'_{q0i} (G_{Sik} \sin \delta_{ik} - B_{Sik} \cos \delta_{ik}) - 2E'_{q0i} (G_{Sik} \sin \delta_{i0k} - B_{Sik} \cos \delta_{i0k})] \frac{\partial U_{Sk}}{\partial I_{Sk}} - C_{Sk} K_{Sk} u_{Sk0} \quad (23)$$

其中,  $h_i$  和  $h_k$  为待定系数。

上述控制策略计及了转移电导,并且将系统的时

滯量  $\tau$  隐含在  $a_i, b_i$  中。发电机的控制系统可由式 (21) 得出, 而 STATCOM 装置的非线性控制系统如图 4 所示。

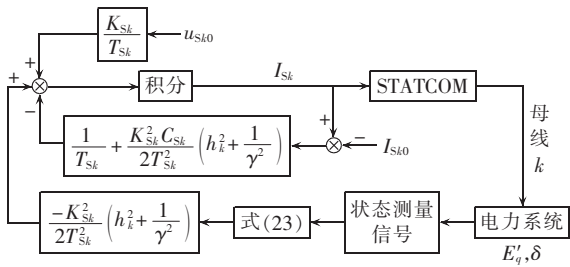


图 4 STATCOM 的非线性控制系统

Fig.4 Nonlinear control system of STATCOM

### 4 仿真分析

为了验证本文所提时滞非线性协调控制策略的有效性, 选取在区域 A 和区域 B 的联络线中点安装有 STATCOM 装置的典型 4 机 2 区域系统作为仿真算例, 如图 5 所示。设定联络线 7-8 的某回路靠近母线 7 处在 2.0 s 时发生瞬时单相接地故障, 0.1 s 后故障消失, 系统恢复正常。选定节点 8 的电压偏差  $\Delta U_8$  作为励磁的广域输入信号, 由系统的稳定初始值及定理 1 的约束条件确定控制器参数, 取  $h_i = h_k = 1, \gamma = 2$ 。

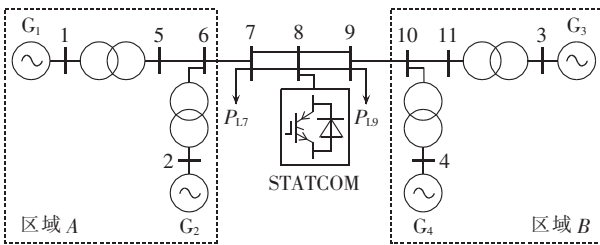


图 5 4 机 2 区域系统结构图

Fig.5 Structural diagram of four-machine two-area system

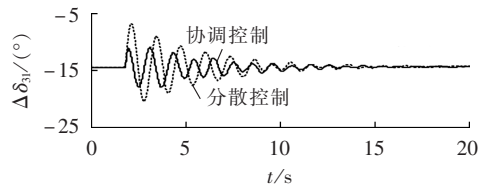
为了充分验证本文所设计的非线性协调控制器对系统暂态性能的影响, 将协调控制器仿真效果与分散控制进行对比。

#### 4.1 不考虑时滞时 2 种控制策略的仿真对比

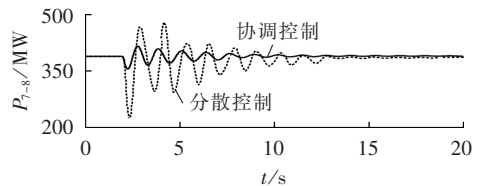
不考虑广域信号时滞时, 在 2 种控制策略作用下发电机  $G_3$  与  $G_1$  的功角差和联络线上的传输功率的响应曲线分别如图 6(a)、(b) 所示。由仿真结果可以看出, 无论是从振荡幅值还是振荡时间上来看, 本文所提的非线性协调控制策略对系统发生三相短路故障后的低频振荡的抑制效果都明显优于分散控制, 使系统快速趋于稳定。

#### 4.2 考虑不同时滞时 2 种控制策略的仿真对比

广域信号的时滞性会影响所设计控制器的控制效果, 且不同的时滞时间对控制器的影响程度不同。假设 2 种控制器的广域信号分别存在 50 ms、100 ms、



(a)  $G_3$  和  $G_1$  的功角差  $\Delta\delta_{31}$

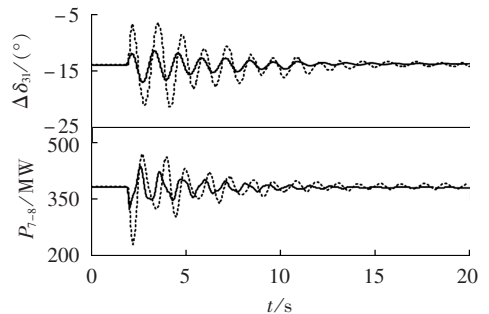


(b) 联络线传输功率  $P_{7-8}$

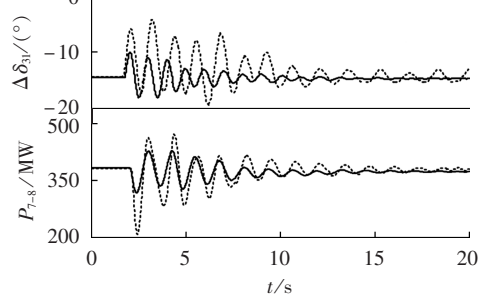
图 6 不同控制策略下系统响应曲线

Fig.6 Response curves of system with different control strategies

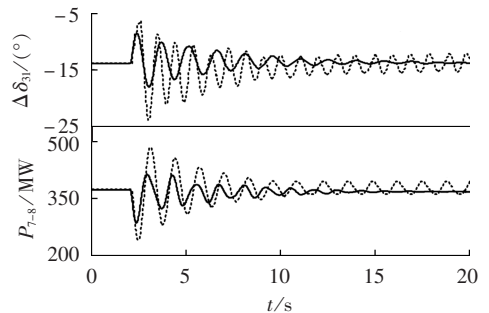
150 ms 的时滞。图 7 给出了在不同广域反馈信号时滞情况下, 系统发生三相故障时的响应曲线。



(a) 50 ms 时滞下系统的响应曲线



(b) 100 ms 时滞下系统的响应曲线



(c) 150 ms 时滞下系统的响应曲线

..... 分散控制, —— 协调控制

图 7 不同时滞下系统响应曲线

Fig.7 Response curves of system with different time-delays

由图 7 可以看出,在时滞  $\tau = 50 \text{ ms}$  时,本文所提的协调控制器可以在很短的时间内平抑系统的低频振荡;在分散控制器的作用下系统的振荡幅值较大,振荡时间也较长。当时滞  $\tau = 100 \text{ ms}$  和  $\tau = 150 \text{ ms}$  时,分散控制器已经不能平抑系统的振荡;与之对比,非线性协调控制器仍然具有良好的控制效果。由此可知,当设计含有广域信号的控制器的时滞性是十分必要的,且在不同的时滞条件下,本文所设计的考虑时滞影响的非线性协调控制器都能有效平抑系统发生大扰动后的振荡,使系统逐渐恢复稳定运行状态。

## 5 结论

广域信号的时滞性对广域控制器具有一定的影响,并且过大的时滞将会减弱控制器的性能。本文建立了计及信号时滞影响及转移电导的包含多 STATCOM 装置的多机系统模型,利用 Pade 近似将时滞影响隐含在系统动态方程的系数中,再根据  $L_2$  干扰抑制控制方法设计出发电机时滞反馈励磁控制及 STATCOM 装置的协调控制策略。将所设计的协调控制器和分散控制器进行对比仿真分析,结果表明本文所设计的协调控制器性能优于分散控制器,且在不同时滞条件下,所设计的发电机励磁与 STATCOM 的协调控制器均能有效抑制系统的低频振荡,使系统趋于稳定。

## 参考文献:

- [1] 谭树龙,杨耕,耿华. 不平衡工况下链式 STATCOM 的运行极限分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):44-49.  
TAN Shulong,YANG Geng,GENG Hua. Analysis of operating limit for cascaded STATCOM in unbalanced condition[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(1):44-49.
- [2] 徐榕,于泳,杨荣峰,等. 基于无源性理论的 H 桥级联 STATCOM 非线性控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):50-57.  
XU Rong,YU Yong,YANG Rongfeng,et al. Strategy based on passivity theory for nonlinear control of STATCOM with cascaded H-bridges [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(1):50-57.
- [3] 孙志凰,刘辉,汪磊. 同步发电机励磁 STATCOM 非线性协调控制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(17):8-14.  
SUN Zhihuang,LIU Hui,WANG Ni. Nonlinear coordinated control for synchronous generator excitation and STATCOM[J]. Power System Protection and Control,2014,42(17):8-14.
- [4] 李啸聪,谢醉冰,梁志坚,等. 基于微分代数系统的 STATCOM 与发电机励磁的多指标非线性协调控制[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):123-129.  
LI Xiaocong,XIE Zuibing,LIANG Zhijian,et al. Multi-index nonlinear coordinated control of STATCOM and generator excitation differential algebraic system[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):123-129.
- [5] GU L H,WANG J. Nonlinear coordinated control design of excitation and STATCOM of power systems[J]. Electric Power Systems Research,2007,77(7):788-796.
- [6] 戚军,张有兵. 广域电力系统中时滞控制信号的选择[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):67-71.  
QI Jun,ZHANG Youbing. Selection of time-delay control signal in wide-area power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):67-71.
- [7] WU H X,TSAKALIS K S,HEYDT G T. Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2004,19(4):1935-1941.
- [8] 戚军,江全元,曹一家. 采用时滞广域测量信号的区间低频振荡阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报,2009,24(6):154-159.  
QI Jun,JIANG Quanyuan,CAO Yijia. Design of damping controller for inter-area low-frequency oscillation using time-delay wide-area measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(6):154-159.
- [9] 王玉振. 广义 Hamilton 控制系统理论:实现、控制与应用[M]. 北京:科学出版社,2007:249-274.
- [10] 何斌,张秀彬. 基于结构保持模型的多 SVC 协调控制[J]. 中国电机工程学报,2007,27(28):34-35.  
HE Bin,ZHANG Xiubin. Coordinated control for multi-SVCs based on structure preserving model of power system[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(28):34-35.
- [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.  
GULIZHATI Hailati,WANG Jie. Wide-area time-delay damping control of generalized Hamilton multi-machine power system[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(34):6199-6208.
- [12] 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.  
SHI Fang,WANG Jie. Pseudo-generalized Hamiltonian theory and its application to multi-machine power system nonlinear excitation control[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(19):67-74.
- [13] 殷婷,王杰. 多机系统 Hamilton 实现的 Hessian 矩阵正定判定与应用[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(23):16-22.  
YIN Ting,WANG Jie. Judgment and application of Hessian matrix positive definiteness for multi-machine system Hamiltonian realization[J]. Power System Protection and Control,2013,41(23):16-22.
- [14] 石访,王杰,薛贵挺. 基于 Hamilton 理论改善多机系统暂态稳定性的励磁与 SVC 协调控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):48-52.  
SHI Fang,WANG Jie,XUE Guiting. Coordinated excitation and SVC control based on Hamilton theory for improving transient stability of multi-machine power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):48-52.
- [15] UCHIDA N,NAGAO T. A new eigen-analysis method of steady-state stability studies for large power systems S matrix method [J]. IEEE Transactions on Power Systems,1988,3(2):706-714.
- [16] 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.

#### 作者简介:

刘青(1974—),女,河北石家庄人,副教授,博士,主



刘青

要研究方向为电力系统继电保护、电力系统安全防御与恢复控制(E-mail:hddliliuqing781@163.com);

张立娜(1989—),女,河北邢台人,硕士研究生,研究方向为柔性交流输电与智能电网(E-mail:zlnncepu@163.com)。

## Nonlinear robust coordinated control of time-delay feedback excitation and STATCOM for multi-machine power system

LIU Qing, ZHANG Lina

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The power system with wide-area signals becomes a time-delay dynamic system due to the time-delay of wide-area feedback signals. Pade approximation is adopted to implicate the effect of time-delay section in the coefficients of system dynamic equations and a first-order differential equation is applied to express the dynamic characteristics of STATCOM (STATIC synchronous COMPensator) as a controllable current source, based on which, the electromagnetic power expressions of multi-machine power system with multiple STATCOMs are derived. Based on the pseudo-generalized Hamilton theory, a multi-machine power system with STATCOM and time-delay feedback excitation is represented as a pseudo-generalized dissipation Hamilton system.  $L_2$  disturbance attenuation control method is used to design a coordinated control strategy of STATCOM and generator excitation, which considers the time-delay of wide-area signals and the transfer conductance. Results of the simulation for a four-machine two-area system show that, compared with traditional decentralized controller, the proposed nonlinear robust coordinated controller with the consideration of time-delay effect restrains the power system oscillation more effectively and is insensitive to time-delay to a certain degree.

**Key words:** electric power systems; excitation system; electric generators; STATCOM; dynamic models; pseudo-generalized Hamilton system; time delay; Pade approximation;  $L_2$  disturbance attenuation; coordinated control

(上接第 101 页 continued from page 101)

## Reactive power planning considering voltage interaction among HVDCs for hybrid AC-DC system

YANG Di<sup>1</sup>, CHENG Haozhong<sup>1</sup>, MA Zeliang<sup>2</sup>, YAO Liangzhong<sup>3</sup>, ZHU Zhonglie<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. East China Grid Company Limited, Shanghai 200120, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** As multi-infeed HVDC greatly influences the safe and stable operation of hybrid AC/DC system, a method is proposed to quantitatively calculate the system voltage interaction factor and average voltage interaction factor between HVDC systems in hybrid AC/DC system. Furthermore, a reactive-power planning method considering the voltage interaction among HVDC systems is proposed, which takes the minimum voltage interaction as the objective of its upper layer while the minimum power-loss and minimum investment as the objectives of its lower layer. Simulation and analysis for IEEE 39-bus extended system show that the proposed reactive-power planning method improves the voltage stability of hybrid AC/DC system.

**Key words:** voltage stability; voltage interaction; hybrid AC/DC system; reactive power planning; bi-level programming