

# 计及反馈信号时滞影响的广域FACTS阻尼控制

江全元, 张鹏翔, 曹一家

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

## Wide-area FACTS Damping Control in Consideration of Feedback Signals' Time Delays

JIANG Quan-yuan, Zhang Peng-xiang, CAO Yi-jia

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** With the wide application of synchronized phase measurement unit (PMU) in power systems, the wide-area measurement-based stabilizing control has enabled the use of a combination of measured signals from remote locations for centralized control purpose. However, the impact of time delays introduced by remote signals' transmission and processing in WAMS has to be considered, and the closed-loop power systems have to be modeled as time-delay differential dynamic systems. This paper investigates the wide-area FACTS controller design problem of power system in the presence of output feedback delays in WAMS. In order to eliminate the negative effects of time delays, a general approach based on linear matrix inequality (LMI) technique, genetic algorithm and Schur model-reduced algorithm is proposed to design effective FACTS controller. New England test power system (NETPS) is presented to verify that the derived FACTS controllers can damp out the low-frequency oscillations in the system for various time delays of output signals.

**KEY WORDS:** power system; wide-area control; wide-area measure system; time delay; facts; linear matrix inequality

**摘要:** 随着同步相量测量单元(PMU)在电力系统中的广泛应用,开展基于广域测量系统(WAMS)的广域控制的研究具有重要的理论和实际意义。由于远方反馈信号的时滞影响,基于广域信号的闭环电力系统将是一个典型时滞微分动力系统。针对这种时滞微分动力系统,该文提出了一套基于线性矩阵不等式(LMI)理论的广域 FACTS 阻尼控制器的设计方法。对于高维、时滞电力系统,首先应用 Schur 降阶算法进行降阶处理,然后在降阶系统上应用 LMI 理论和遗传算法设计了具有最大允许时滞的广域 FACTS 控制器,以提高互联电力系统对反馈信号时滞的不敏感性。并将所提出的方法应用于广域 SVC 控制器的设计。时域仿真结果表明:当考

虑反馈输出信号的时滞后,所设计的广域 FACTS 控制器仍能有效阻尼 10 机 39 节点新英格兰测试系统中的低频振荡。

**关键词:** 电力系统; 广域控制; 广域测量系统; 时滞; 柔性交流输电系统; 线性矩阵不等式

## 0 引言

广域测量系统(WAMS)已在包括我国电网在内的许多国家电网中得到了应用<sup>[1-3]</sup>,它能够对电网运行的诸多关键变量(如电压、功角,频率等)进行同步采集和监控,为电力系统分析及其动态监测提供第一手资料。除了系统监测的功能外,充分利用 WAMS 进行广域控制将是电网运行与控制技术的发展方向<sup>[4-5]</sup>。文献[6]提出了应用广域测量信号进行 PSS 控制器设计以抑制区域间低频振荡,文献[7]提出了应用 WAMS 建立广域保护控制系统的理论。随着 WAMS 在我国电力系统中的快速建设,开展基于广域测量系统的广域稳定控制技术研究具有重要的理论和实际意义。

WAMS 给电力系统的运行和控制带来了新的契机,但也可能会带来新的问题,如反馈信号的传输时间延迟问题<sup>[8]</sup>。广域测量系统是一个由多种通信媒质(如电力线、电话线、光纤、微波以及卫星等)组成的结构复杂的网络系统。在广域控制的条件下,由于各个通信传输通道存在通信延迟,及不同的传输媒介和装置的通信延迟时间各异且具有随机性,造成了电力系统在数学上是一个典型的非线性、多时滞控制系统。时滞的存在使得电力系统的稳定分析和控制变得更加复杂和困难,且其也是系统不稳定和系统性能变差的根源之一。文献[9]对广域测量系统的通信延迟时间进行了研究,对一个实验系统

**基金项目:** 国家自然科学基金(50507018); 教育部科学技术研究重大项目(305008)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50507018).

的计算结果表明，由不同的通信介质组成的通信系统的延迟时间是不同的，但都在 100ms 以上，对于卫星通信系统甚至可能高达 700ms。文献[10]的研究结果表明，美国 BPA 电力系统的光纤数字通信系统的延时为 38ms 左右，微波系统的通信延迟时间为 80ms 以上。当考虑信号在 WAMS 中的路由时间、阻塞问题以及同步问题时，则实际的通信延迟时间可能达数百 ms 以上。文献[11]对我国江苏电网 WAMS 系统的工程实践结果表明，通信延迟时间一般可以控制在 100ms 以内。但文献[12]指出，即使是很小的时滞（如 25ms）也可能使得在不考虑时滞的电力系统中性能优越的控制器失效。

针对 WAMS 系统引入的反馈时滞，考虑到 FACTS 控制器在我国的应用前景，为抑制电力系统中可能存在的低频振荡问题而针对互联电力系统设计高性能的广域 FACTS 控制器值得深入研究。本文提出了设计广域 FACTS 控制器的一般方法，并以 SVC 为例说明了所设计的广域 FACTS 控制器在不同时滞下均能有效地阻尼电力系统的低频振荡。

### 1 含FACTS控制器的广域电力系统模型

考虑如图 1 所示的含 FACTS 控制器的多机电力系统，包含  $n$  台发电机组及其励磁、调速系统、电力网络以及各种 FACTS 控制器等。广域测量系统可实时、同步地测量电力网络、FACTS 控制器及发电机组的运行变量，这些同步信号经过 WAMS 系统传输后可能被用来控制电力系统的运行。因此，在广域控制系统中，大量的信号通过 WAMS 传输和反馈，形成了复杂的网络控制系统(NCS)<sup>[13]</sup>。在 NCS 中，信号的时滞是一个不能不考虑的重要问题。下面将介绍电力系统的数学模型。

同步发电机的数学模型有很多种，如经典模型，3~8 阶模型，还有考虑饱和的数学模型等<sup>[14]</sup>。不失一般性，不妨设同步发电机可以用以下的非线性 4 阶微分方程表示：

$$\begin{cases} \dot{d}_i = w_0(w_i - 1) \\ \dot{w}_i = [P_{mi} - P_{ei} - D_i(w_i - 1)] / 2H_i \\ \dot{E}'_{qi} = [E_{fdi} - (x_{di} - x'_{di})I_{di} - E'_{qi}] / T'_{d0i} \\ \dot{E}'_{di} = [-E'_{di} + (x_{qi} - x'_{qi})I_{qi}] / T'_{q0i} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $P_{ei} = E'_{di}I_{di} + E'_{qi}I_{qi}$ 。

FACTS 控制器种类繁多，常见的有 SVC、SMES、STATCOM、UPFC、SSSC、TCSC 等<sup>[15]</sup>。从与电力系统的连接结构上看，它们又可以分为串

联型、并联型和综合型<sup>[16]</sup>。如 SVC、SATACOM、SMES 是并联型的代表，而 TCSC、SSSC 是串联型的代表，UPFC 则是既有串联部分，又有并联部分，属于综合型。尽管 FACTS 控制器的结构、功能以及特性各异，但仍可为它们建立统一的动态模型<sup>[16]</sup>，针对图 2 所示的 FACTS 控制器的通用模型，可以列写通用的数学模型如下<sup>[17]</sup>：

$$\begin{cases} \dot{x}_c = f_c(x_c, x_s, V, q, u) \\ \dot{x}_s = f_s(x_c, x_s, V, q) \\ P = g_p(x_c, x_s, V, q) \\ Q = g_q(x_c, x_s, V, q) \end{cases} \quad (2)$$

式中  $x_c$  为控制系统变量； $x_s$  为 FACTS 控制器的控制变量（如触发角、等效导纳或电抗）； $V$  和  $q$  分别为 FACTS 装置安装点的母线电压幅值和相角； $u$  为输入控制参数（如母线电压参考值、线路潮流参考值等）； $P$  和  $Q$  分别为 FACTS 装置向系统注入的功率。

通过建立励磁系统、调速系统、负荷等其他电力元件的动态模型，与发电机的模型式(1)和 FACTS 控制器的模型式(2)一起，可以组成电力系统的非线性微分动态模型。

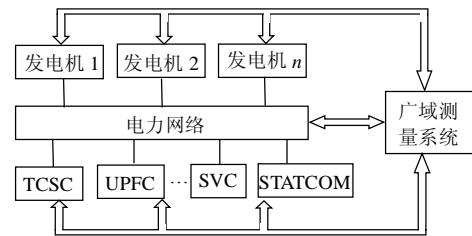


图 1 含 FACTS 控制器的广域电力系统  
Fig. 1 Wide-area power system with FACTS controllers

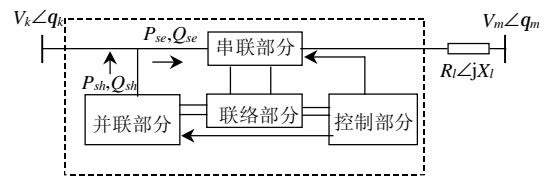


图 2 FACTS 控制器的通用模型  
Fig. 2 General model of FATCS controller

## 2 基于LMI理论的FACTS控制器设计思想

### 2.1 线性单时滞电力系统模型

在考虑 WAMS 的时滞后，电力系统将不再建模为常微分-代数方程组，而是时滞微分-代数方程组，这将需要采用时滞动力系统的分析方法加以分析。LMI 理论是研究时滞动力系统稳定性的基本理论之一<sup>[18]</sup>，本文拟采用 LMI 理论设计 FACTS 广域阻尼控制器，以抑制电力系统中的低频振荡。为了

应用 LMI 理论, 首先将电力系统的模型进行线性化, 可以得到如下的状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{x}$  为系统的状态变量; 如发电机功角  $\delta$ ; 转速  $\omega$  等;  $\mathbf{u}$  为输入变量, 即 FACTS 装置的控制量, 如触发角, 等效阻抗等;  $\mathbf{y}$  为输出反馈变量;  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{C}$  为系数矩阵。

对式(3)做特征值分析, 可以知道开环电力系统是否稳定。如果该系统是不稳定的, 有必要引入反馈控制。对于 FACTS 控制器来说, 远端发电机的功角  $\delta$ 、转速  $\omega$  或者联络线功率  $P$  通常被选作抑制电力系统低频振荡的反馈信号, 当这些远端信号经过 WAMS 系统的传输和同步后, 必然存在一定的时延。假设  $n$  个反馈信号经过同步等待后, 它们的通信延迟时间相同 (均为  $d$ ), 则 FATCS 线性输出反馈控制器可以表示为

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{y}(t-d) \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{K}$  为 FACTS 控制器的参数;  $d$  为反馈输出信号的延迟时间, 一般由 3 部分组成: 输出信号在传感器测量中的延时时间, 输出信号在传输和控制过程中的延时时间以及执行元件的延时时间。

考虑反馈时滞的闭环系统如图 3 所示。由式(3)和(4), 可以得到闭环控制系统的单时滞线性微分方程模型为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{A}_d\mathbf{x}(t-d) \quad (5)$$

式中  $\mathbf{A}_d = -\mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{C}$ 。

显然,  $\mathbf{A}_d$  是关于控制器参数  $\mathbf{K}$  的函数。

若要为式(3)设计形如式(4)的 FACTS 控制器, 使得 FACTS 控制器在不同的传输时滞  $d$  下均能有效地抑制电力系统的低频振荡, 则必须寻找合适的 FACTS 控制器参数  $\mathbf{K}$ , 使得式(5)表示的闭环时滞动力系统渐进稳定。

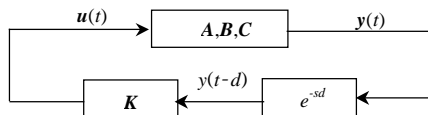


图 3 时滞反馈控制系统  
Fig. 3 Time-delay feedback control system

## 2.2 基于 LMI 理论的线性单时滞系统稳定性分析

与普通的常微分动力系统相比, 时滞微分动力系统的稳定性分析通常更加复杂。根据时滞动力系统是否依赖系统中时滞  $d$  的大小, 可以将时滞动力系统的稳定性分为两类: 时滞独立稳定性和时滞依

赖稳定性。

**定义 1** 时滞独立稳定性: 对于时滞动力系统, 如果对于所有的时滞常数  $d>0$ , 该系统均能稳定, 则称该系统具有时滞独立稳定性。

**定义 2** 时滞依赖稳定性: 对于时滞动力系统, 如果该系统仅对部分时滞常数  $d>0$  能保证稳定, 则称该系统具有时滞依赖稳定性, 即该系统的稳定性依赖于时滞的特性。

对于线性时滞动力系统式(5), 文献[19]得到了判断其具有时滞独立稳定性的充要条件, 但是该充要条件需要对时滞动力系统式(5)的特征值在复平面上的分布有一个完全的了解, 由于时滞系统是无穷维系统, 因此验证该充要条件非常困难。鉴于此, 后续研究发展了许多判断时滞稳定性的简便的充分条件<sup>[20]</sup>。通常, 依据时滞独立稳定性的充分条件得到的结果往往过于保守, 很多情况下甚至不可能得到满足闭环系统时滞独立稳定性的一组控制器参数。在许多工程实际中, 由于时滞通常是可以估计其上限的, 因此也不需要苛刻地要求闭环系统在任意大的时滞下都能保持稳定。本文主要讨论时滞依赖稳定性问题。

**定理 1**<sup>[21]</sup> 对于形如式(5)的系统, 已知  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{A}_d$ , 如果存在标量  $d_0 > 0$ , 存在对称正定矩阵  $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{V}$  和矩阵  $\mathbf{W}$ , 使得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S} & -\mathbf{W}^T\mathbf{A}_d & \mathbf{A}^T\mathbf{A}_d^T\mathbf{V} & d_0(\mathbf{W} + \mathbf{P}) \\ -\mathbf{A}_d^T\mathbf{W} & -\mathbf{Q} & \mathbf{A}_d^T\mathbf{A}_d^T\mathbf{V} & 0 \\ \mathbf{V}\mathbf{A}_d\mathbf{A} & \mathbf{V}\mathbf{A}_d\mathbf{A}_d & -\mathbf{V} & 0 \\ d_0(\mathbf{W}^T + \mathbf{P}) & 0 & 0 & -\mathbf{V} \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

式中

$$\mathbf{S} = (\mathbf{A} + \mathbf{A}_d)^T\mathbf{P} + \mathbf{P}(\mathbf{A} + \mathbf{A}_d) + \mathbf{W}^T\mathbf{A}_d + \mathbf{A}_d^T\mathbf{W} + \mathbf{Q}$$

则对于所有的  $d < d_0$ , 系统(5)均能渐近稳定。

定理 1 给出了判断线性时滞系统式(5)稳定的充分条件。如果  $d_0 > 0$  为给定的广域电力测量系统的时滞估计上限, 应用定理 1, 则 FACTS 控制器的设计问题可以转化为求控制器参数  $\mathbf{K}$ , 使得式(6)成立。如果这样的  $\mathbf{K}$  存在, 则该组控制器参数  $\mathbf{K}$  可以使得闭环系统式(5)对于所有的  $d < d_0$  均能渐近稳定。对于电力系统的广域测量系统, 通常可以假设  $d_0$  为数百毫秒以上。

对于给定的时滞  $d_0$ , 可以应用定理 1 判断某一组控制器参数  $\mathbf{K}$  是否能确保闭环系统式(5)渐进稳定。但在应用线性矩阵不等式求解器 feasp 前, 必须将式(6)进行相应的转换, 转换成标准的 LMI 可行



性问题如下：

$$\begin{bmatrix} S & -W^T A_d & A^T A_d^T V & 0 \\ -A_d^T W & -Q & A_d^T A_d^T V & 0 \\ V A_d A & V A_d A_d & -V & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -V \end{bmatrix} < \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & (W+P) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ (W^T+P) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

此外，对于给定的一组控制器参数  $K$ ，也可以依据定理 1 和 MATLAB 的 LMI 工具箱中的 feasp 求解器判断是否存在确保闭环系统式(5)渐进稳定的且  $d_0 > 0$  的可行解。如果存在  $d_0 > 0$ ，则说明该组控制器参数  $K$  使得式(5)具有时滞依赖稳定性。对于时滞依赖稳定性而言，一旦确定式(5)存在可行解，则可以求取该系统的最大允许时滞。这里，定义确保式(5)不失去渐进稳定性的最大时滞  $d_{max}$  为式(5)的最大允许时滞。

通常，求取最大允许时滞  $d_{max}$  可以转化为如下的优化问题：

$$\begin{aligned} \min -d_0 \quad \text{或} \quad d_{max} = \max d_0 \quad (8) \\ \text{s.t.} \\ \begin{bmatrix} S & -W^T A_d & A^T A_d^T V & 0 \\ -A_d^T W & -Q & A_d^T A_d^T V & 0 \\ V A_d A & V A_d A_d & -V & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -V \end{bmatrix} < \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & (W+P) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ (W^T+P) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

显然，式(8)是一个具有线性矩阵不等式约束的凸优化问题，具有广义特征值的最小化形式。因此当已知式(5)中的  $A$  和  $A_d$  后，可以利用 MATLAB 工具箱中的广义特征值最小化问题求解器 gevp 求解得到具有最大允许时滞的 FACTS 控制器。

### 2.3 基于遗传算法和 Schur 降阶算法的 FACTS 阻尼控制设计

由上节可知，对于每一组给定的控制器参数  $K$ ，通过应用 LMI 工具箱求解式(8)的广义特征值的最小化问题，可以得到最大允许时滞  $d_{max}$ ，使得式(5)对于所有的时滞  $d < d_{max}$  均能渐近稳定。如果

应用遗传算法在一个给定的区间内搜索最优的控制器参数，使得某组控制器可以具有最大的  $d_{max}$ ，则该组控制器参数可以保证闭环系统在尽可能大的时滞下仍能保证渐进稳定，亦即应用遗传算法可求解如下的最大值优化问题：

$$J = \max_K d_{max} \quad (9)$$

式中  $d_{max}$  由 MATLAB 的 LMI 工具箱中的 gevp 求解器（采用的内点法）求得。外层的最大值优化问题应用遗传算法随机优化得到。取适应度函数通常  $f(K) = d_{max}$ 。

此外必须指出，LMI 工具箱所能求解的线性矩阵不等式的阶次最多不超过 50~60 阶，而广域电力系统通常具有高维的特点，因此要运用 LMI 工具箱设计广域电力系统的 FACTS 阻尼控制器，一个不能不考虑的问题就是模型降阶，即将高阶电力系统模型降阶为低阶模型。目前，常见的降阶算法有 Hankel 算法、Schur 算法、广义奇异摄动降阶算法、均衡截断模型降阶算法等。本文采用 Schur 相对误差降阶算法<sup>[22]</sup>，目前该算法已经集成到 MATLAB 鲁棒控制工具箱。下面对 Schur 相对误差降阶算法的主要功能简介如下：

给定一个  $n$  阶稳定对象

$$G(s) = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix},$$

通过 Schur 降阶算法计算得到的  $k$  阶 ( $k < n$ ) 降阶模型  $G_k(s) = \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix}$ ，该降阶模型必须满足下面的相对误差上界条件，即：

$$\|G_k^{-1}(s)[G(s) - G_k(s)]\|_{\infty} \leq 2 \sum_{i=k+1}^n \frac{s_i}{1 - s_i}$$

其中， $s_i$  为  $G(s)$  的全通相位矩阵的第  $i$  个 Hankel 奇异值。该降阶算法是基于相对误差的随机均衡截断理论。具体介绍详见 MATLAB 鲁棒控制工具箱。

综上所述，完整的广域 FACTS 阻尼控制器设计的流程为：

- (1) 建立互联电力系统的非线性微分动态模型。
- (2) 将非线性微分动力系统模型进行线性化，得到形如式(3)所示的全阶线性微分动态模型。
- (3) 确定形如式(4)所示的广域反馈控制规律，即选择和确定系统的输出反馈变量。
- (4) 如果式(4)的阶次高于 30，则将得到的全阶线性微分动态模型通过 Schur 降阶算法进行降阶

处理, 得到低阶的线性微分动态模型。否则, 不作降阶处理, 即降阶模型和全阶模型一样。

(5) 在低阶线性模型的基础上, 应用 LMI 工具箱的 feasp 求解器解式(7)所示的可行性问题。如果可行, 则转流程(6)。否则转流程(3)。

(6) 应用遗传算法, 初始化控制器参数  $\mathbf{K}$ , 得到初始种群  $\mathbf{P}_t$ , 进化代数  $t=0$ 。

(7) 对于每一个个体  $\mathbf{K}_i \in \mathbf{P}_t$ , 计算降阶模型, 即式(5)中的  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{A}_d$ 。在低阶线性模型的基础上, 应用 LMI 工具箱的 gevp 求解器解式(6)所示的广义特征值最小化问题, 得到满足闭环系统渐进稳定的最大允许时滞  $d_{\max}$ , 将该最大允许时滞作为对应的个体  $\mathbf{K}_i$  的适应度值, 即适应度函数  $f(\mathbf{K})$  定义为:  $f(\mathbf{K}) = d_{\max}$ 。

(8) 对种群  $\mathbf{P}_t$  经过选择, 杂交和突变操作, 进化到下一代种群  $\mathbf{P}_{t+1}$ 。如果种群  $\mathbf{P}_{t+1}$  与  $\mathbf{P}_t$  中对应个体的适应度值之差的均方根大于一个给定的小正数, 则进化代数  $t=t+1$ , 转流程(7)。否则进化结束, 取最大适应度值所对应的一组控制器参数作为最终得到的最优控制器  $\mathbf{K}$ 。

(9) 在全阶非线性微分方程组模型上进行时域仿真验证。

### 3 考虑时滞影响的广域FACTS控制器设计

为了阐明基于 LMI 理论的 FACTS 控制器设计的一般原理, 本节针对新英格兰测试电力系统(New England Test Power System, NETPS)设计了广域 SVC 控制器以阻尼系统中存在的低频振荡。

NETPS 是一个用于动态研究的经典系统, 其单线图如图 4 所示。它包含 10 台发电机、39 个节点和 46 条线路, 其中第 10 台发电机等价于与该系统相联的其他电力系统, 可以看作是低阻抗、高惯性时间常数的无穷大母线。众多的研究表明, 在没有任何附加控制设备或措施的情况下, 该系统的阻尼明显不足, 存在区域间功率振荡的危险。因此, 本文考虑安装 1 台 SVC 以提高其稳定性。不同于传统的分散协调控制设计思想, 该台 SVC 不仅需要利用安装母线的电压信号作为反馈控制, 还需要利用远方发电机或者联络线上的功率作为附加阻尼控制的反馈信号, 因此属于广域 SVC 控制器。

从系统运行的角度考虑, SVC 需要安装、连接在电压偏低的母线上。一般而言, 这样的母线在电气距离上是靠近负荷中心的。此外, 对于区域互联大系统, 不同区域之间的联络线也是考虑安装 SVC

的主要地点。在 NETPS 中, 母线 15 和 16 是几个低电压节点, 而连接母线 14 和 15、16 和 17 的 2 条线路恰好将整个新英格兰测试系统分成 2 个独立区域, 即这 2 条线路为区域间联络线。综上所述, 为了降低区域间低频振荡的风险, 提高系统阻尼, 可以考虑将 SVC 并联安装在母线 16 上。

SVC 的基本功能就是控制安装地点的电压水平, 此外其附加阻尼控制也常常用来提高电力系统的静态和动态稳定性。TCR 型静止无功补偿器(SVC)的常见等效模型如图 5 所示。由图 5 可以知道, SVC 的动态数学模型如下:

$$\dot{B}_{\text{SVC}} = [K_A (V_{\text{SVCref}} - V_{\text{SVC}} - u_{\text{SVCsig}}) - B_{\text{SVC}}] / T_A \quad (10)$$

式中  $K_A$ 、 $T_A$  为 SVC 控制器的增益及其时间常数。

对于新英格兰测试系统, 设所安装的 SVC 可以发出的无功为  $-200\text{Mvar} \sim 200\text{Mvar}$ , 即  $B_{\min} = -2 \text{ pu}$ ,  $B_{\max} = 2 \text{ pu}$ 。依据第 3 节广域 FACTS 阻尼控制器设计流程, 首先建立新英格兰系统的非线性微分方程组模型, 同时加上式(10)所示的 SVC 动态模型, 则可以得到含 SVC 的新英格兰系统的非线性动态模型。进行线性化后可以得到形如式(3)和式(4)所示的

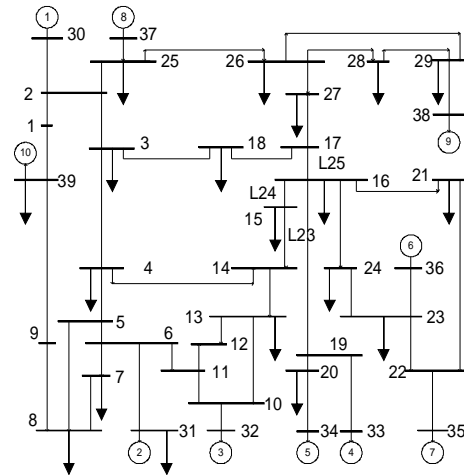


图 4 新英格兰测试系统单线图

Fig.4 Single-line diagram of NETPS

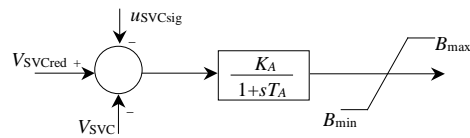


图 5 SVC 的电压调节器

Fig.5 Model of SVC voltage regulator

线性微分方程组模型。其中  $u_{\text{SVCsig}}$  为输入的控制变量,  $\mathbf{y} = [P_{2-30}, P_{35-22}]^T$  为输出变量。其中,  $P_{2-30}$  为连接母线 2 和 30 之间的线路上的有功,  $P_{35-22}$  为连接母线 35 和 22 之间的线路上的有功, 反馈信号选

取的依据是基于模态可观性分析，其原理见文献 [23]。 $\mathbf{K} = (k_1, k_2)$  为 SVC 附加阻尼控制器需要设计的参数。本文所考虑的含 SVC 的新英格兰测试系统的动态模型共为 100 阶（每台发电机组，包括励磁和调速系统共建模为 11 阶，10 台发电机中第 10 台机组取为参考机，则  $11 \times 9 = 99$  阶，加上 SVC 建模为 1 阶系统，故共为 100 阶），因此需要作降阶处理，降阶为 10 阶线性模型，降阶模型与全阶模型之间的频率响应曲线如图 6 所示，可看出，降阶模型与全阶模型在很宽的频率范围内的频率响应非常吻合。

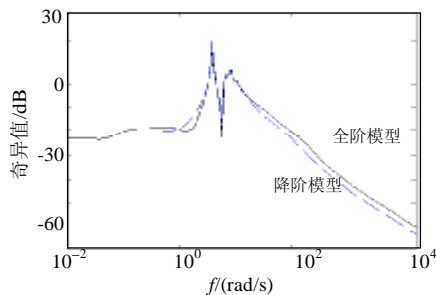
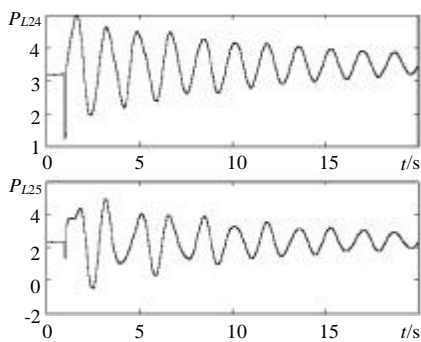


图 6 新英格兰系统的全阶和降阶模型的频率响应曲线  
Fig. 6 Frequency responses of the full and reduced model of NETPS

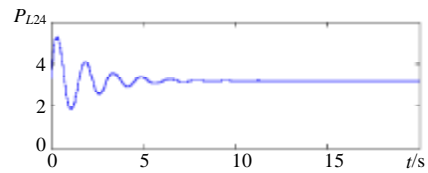
基于降阶模型，在应用遗传算法时，考虑的控制参数搜索区间为： $k_1 \in [0, 100]$ ， $k_2 \in [0, 100]$ 。最终优化结果如下：

$$k_1 = 1.02, \quad k_2 = 2.52, \quad J = \max_K d_{\max} = 530 \text{ ms}。$$

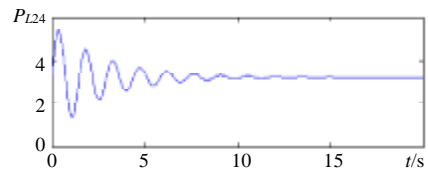
为了验证所得到的 SVC 控制器的有效性，本文应用 PSAT<sup>[17]</sup> 分别仿真了在不同反馈时滞条件下的系统动态特性如图 7 所示。图 7 中，所加的小扰动均为 SVC 母线电压参考值从  $V_{\text{SVCref}} = 1.06 \text{ pu}$  增加到 1.11 pu，所观察的物理量为区域间联络线 L24 和 L25 上的功率振荡曲线。可以看出，在没有 SVC 时，区域间联络线 L24 和 L25 上存在低频振荡的危险。从图 7 可以看出，所得到的 SVC 控制器即使在时滞达到 500ms 时仍能确保系统的稳定，但是随着时滞的增加，阻尼系统低频振荡的时间明显增加。



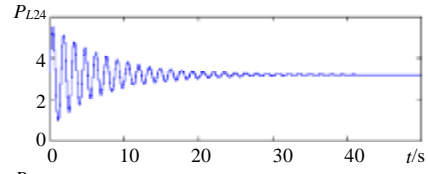
(a) 无 SVC 时区域间联络线上的功率振荡



(b) 有 SVC 且时滞  $d=100\text{ms}$  时联络线上的功率振荡



(c) 有 SVC 且时滞  $d=300\text{ms}$  时联络线上的功率振荡



(d) 有 SVC 且时滞  $d=500\text{ms}$  时联络线上的功率振荡

图 7 新英格兰系统在不同时滞下的动态响应曲线

Fig. 7 Dynamic responses of NETPS under different delays

#### 4 结论

随着全国联网战略在我国的实施，电力系统的规模和涵盖的地域日益扩大。传统的基于局部信号的控制已越来越难以确保广域电力系统具有良好的动态性能。因此，必须开展基于广域测量系统的广域稳定控制研究。本文分析了广域测量系统和广域稳定控制可能引入的时滞对电力系统动态性能的影响，说明了时滞可能对电力系统控制器带来的影响，提出了应用 LMI 理论设计 FACTS 控制器的方法，所得到的 FACTS 控制器具有较好的对时滞不敏感的特性。线性和非线性时域仿真结果验证了所得到的 FACTS 控制器在时滞达到数百毫秒时仍能有效地稳定系统。

## 参考文献

- [1] 蔡运清, 汪磊, Kip Morison, et al. 广域保护(稳控)技术的现状及展望[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 20-25.  
Cai Yunqing, Wang Lei, Kip Morison, et al. Current status and prospect of wide-area protection (stability control) technologies[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 20-25(in Chinese).
- [2] 王克英, 穆钢, 陈学允. 计及PMU的状态估计精度分析及配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 29-33.  
Wang Keying, Mu Gang, Chen Xueyun. Precision improvement and PMU placement studies on state estimation of a hybrid measurement system with PMUs[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 29-33(in Chinese).
- [3] 刘道伟, 谢小荣, 穆钢, 等. 基于同步相量测量的电力系统在线电压稳定指标[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 13-17.  
Liu Daowei, Xie Xiaorong, Mu Gang, et al. An on-line voltage stability index of power system based on synchronized phasor measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 13-17(in Chinese).
- [4] 常乃超, 郭志忠. 基于广域量测的全局非线性励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 2(24): 43-48.  
Chang Naichao, Guo Zhizhong. Global nonlinear excitation control based on wide-area measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 2(24): 43-48(in Chinese).
- [5] 刘玉田, 林飞. 基于相量测量技术和模糊径向基网络的暂态稳定性预测[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 19-23.  
Liu Yutian, Lin Fei. Application of PMU and fuzzy radial basis function network to power system transient stability prediction [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 19-23(in Chinese).
- [6] 肖晋宇, 谢小荣, 韩英铎. 利用有限时间扰动后的响应辨识电力系统的主导特征值[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 1-5.  
Xiao Jinyu, Xie Xiaorong, Han Yingduo. On-line identification of power system dominant eigenvalues based on zero-input responses following limited-time disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 1-5(in Chinese).
- [7] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防护能力[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 1-6.  
Zhang Baohui. Strengthen the protection relay and urgency control system to improve the capability of security in the interconnected power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 1-6(in Chinese).
- [8] 江全元, 邹振宇, 曹一家, 等. 考虑时滞影响的电力系统稳定分析和广域控制研究进展[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 1-7.  
Jiang Quanyuan, Zou Zhenyu, Cao Yijia, et al. Overview of power system stability analysis and wide-area control in consideration of time delay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 1-7(in Chinese).
- [9] B Naduvathuparambil, M C Valenti, A Feliachi. Communication delays in wide area measurement systems[C]. Proceedings of the 34<sup>th</sup> Southeastern Symposium on System Theory, Alabama, USA, 2002, 1: 118-122.
- [10] Carson W Taylor, Mani V Venkatasubramanian, Yonghong Chen. Wide-area stability and voltage control[C]. Proceedings of the VII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Perth, Australia, 2000. 1: 1-9.
- [11] 胡志祥, 谢小荣, 肖晋宇, 等. 广域测量系统的延迟分析及其测试[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 39-43.  
Hu Zhixiang, Xie Xiaorong, Xiao Jinyu, et al. Analysis and test on delay in the wide area measuring system[J]. Automation of Electric Power System, 2004, 28(15): 39-43(in Chinese).
- [12] Aaron F Snyder, Dan Ivanescu, Nouredine Hadjaid. Delayed-input wide-area stability control with synchronized phasor measurements and linear matrix inequalities[C]. Proceedings of the IEEE PES Summer Meeting, Seattle, USA, 2000. 2: 1009-1014.
- [13] P Antsaklis, J Baillieul. Guest editorial special issue on networked control systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1421-1423.
- [14] Kundur P. Power system stability and control [M]. The EPRI Power System Engineering Series Book, NewYork: McGraw-Hill, inc., 1994.
- [15] 苏建设, 柯宁, 陈陈. 提高暂态稳定的励磁与 FACTS 协调策略设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 6-10.  
Su Jianshe, Ke Ning, Chen Chen. Coordination design of generator excitation and FACTS for transient stability enhancement[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 6-10(in Chinese).
- [16] S Arabi, P Kundur. A versatile FACTS device model for power flow and stability study[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1944-1950.
- [17] Federico Milano. Document for power system analysis toolbox (PSAT), [EB/OL]. <http://thunderbox.uwaterloo.ca/~fmilano>, July 2004.
- [18] Xingjian Jing, Dalong Tan, Yuechao Wang. An LMI approach to stability of systems with severe time-delay [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(7): 1192-1195.
- [19] T Mori, H Kokame. Stability of  $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bx(t - t)$  [J]. IEEE Transactions on Automatic control, 1989, 34(4): 460-462.
- [20] 廖晓昕. 动力系统的稳定性理论和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [21] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [22] 魏巍. MATLAB 控制工程工具箱[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [23] N Martins, L Lima. Determination of suitable locations for power system stabilizers and static var compensators for damping electromechanical oscillations in large power systems, IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(4): 1455-1469.

收稿日期: 2005-11-28。

作者简介:

江全元(1975—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制, [jqy@zju.edu.cn](mailto:jqu@zju.edu.cn);

张鹏祥(1976—), 男, 博士后, 主要研究领域为电力系统优化与控制。

(责任编辑 喻银凤)