

# 多 FACTS 广域抗时滞协调控制

黄柳强, 郭剑波, 孙华东, 徐式蕴, 刘敏, 易俊

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 提出一种基于自由权矩阵方法的多灵活交流输电系统(FACTS)抗时滞协调控制算法。该算法采用广域测量系统(WAMS)的输出反馈信号,考虑信号的传输时滞,使用自由权矩阵时滞稳定定理作为判据,同时保证时滞系统的最小阻尼比在一定阈值之上,利用量子遗传算法寻优获得多 FACTS 协调控制器的最佳增益。2 台静止无功补偿器(SVC)算例的时域仿真结果验证了所提算法的有效性。

**关键词:** 电力系统; 灵活交流输电系统; 广域测量系统; 自由权矩阵方法; 线性矩阵不等式; 量子遗传算法; 时滞; 协调控制

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.01.007

## 0 引言

近年来,我国电网的快速发展极大增加了电网结构和运行方式的复杂程度<sup>[1]</sup>,同时,智能电网的建设要求能灵活可靠地改善潮流分布,提高系统稳定性和输电能力<sup>[2]</sup>。灵活交流输电系统 FACTS(Flexible AC Transmission System)具有快速可靠的调节特性,能很好地满足电网控制要求<sup>[3-4]</sup>。在国内外,多种 FACTS 设备先后被投入到实际电网中应用,获得了良好的控制效果。根据我国电网规划,多套、多种 FACTS 装置的同时应用将在西北等地区实施,并将在未来电网建设中大量出现<sup>[5]</sup>。

FACTS 装置种类繁多,而且多针对不同目标单独设计和安装,并基于本地信息量进行控制,设备之间缺乏协调配合。研究如何对多个 FACTS 装置进行协调控制以更大发挥 FACTS 效用,以及避免可能在 FACTS 控制器之间出现的不利交互影响<sup>[6]</sup>,已成为电力系统的一项重要研究课题。

近年来,国内外已有较多文献对此进行了深入研究,结合多种控制理论,针对不同电网控制目标进行 FACTS 间协调控制,取得了不少研究成果。文献[7-8]通过构造 Lyapunov 函数来获取 FACTS 协调控制律;文献[9-10]利用微分几何对系统实现精确线性化来设计协调控制器;文献[11-12]则采用变结构控制实现具有自适应调节切换的协调控制。这些研究成果表明,对多台 FACTS 进行协调控制确实可更好地提升系统稳定性,甚至消除了设备间的负交互影响,同时也说明了协调控制的必要性。

随着广域测量系统 WAMS(Wide-Area Measurement System)<sup>[13-14]</sup>的逐步推广与完善,获取系统

的部分状态变量和输出变量不再困难,而电力系统稳定本质上是一个全局问题,引入全局信息也有助于进一步提高全网稳定性<sup>[15]</sup>。因此,结合 WAMS 技术进行协调控制研究也逐渐兴起,主要集中在系统阻尼控制和直流系统控制方面,与此相比采用 WAMS 技术的多 FACTS 协调控制研究较少<sup>[6]</sup>。文献[15]基于广域信号设计了多 FACTS 与风电场的协调控制器;文献[16]采用三级预估算法设计多 FACTS 分层协调控制器,并用 WAMS 提供的信息确定和校正控制参数。可以预见,结合 WAMS 进行多 FACTS 协调控制将能取得更好的效果,而且这也是未来我国 FACTS 发展的主要方向之一<sup>[5]</sup>。

信号传输时滞是必须考虑的问题。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,也是系统不稳定的根源之一<sup>[17]</sup>,因此在设计协调控制策略时应考虑时滞的影响。常用的处理时滞影响的控制器设计方法主要包括时滞环节的等效处理、基于线性矩阵不等式 LMI(Linear Matrix Inequality)方法的鲁棒控制等<sup>[6]</sup>。文献[17]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,文献[18]将同样方法应用于励磁控制器设计,但均未考虑系统阻尼比的改进,因此可能会导致所得系统运行在弱阻尼模式。故针对此类问题,结合 FACTS 协调控制需求,本文根据自由权矩阵方法获取时滞系统稳定性判据,利用 WAMS 反馈的系统输出量,结合量子遗传算法设计多 FACTS 协调控制器,并考虑系统阻尼比的改进,保证了系统运行在强阻尼模式。含 2 台 SVC 的算例验证了本文所提算法的有效性,并分析了算法的时滞裕度,表明算法在较大的时滞范围内均表现出较好的控制效果。

## 1 时滞电力系统的自由权矩阵方法描述

自由权矩阵方法是基于系统的状态空间模型提

收稿日期:2013-04-09;修回日期:2013-09-23

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划重大项目(2011BAA01B02)

Project supported by the Key Project of the National Twelfth-Five Year Research Program of China(2011BAA01B02)

出的,因此在应用之前应确定系统模型和列写状态空间方程,再利用自由权矩阵方法分析。

### 1.1 电力系统采用的动态模型

简要分析起见,本文所涉及动态元件主要包括发电机和 FACTS 元件。其中发电机采用四阶实用模型,并安装一阶快速励磁。第  $i$  台发电机可以描述为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_0(\omega_i - 1) \\ \dot{\omega}_i = \frac{1}{2H_i} [P_{mi} - E'_{di} - I_{di} - E'_{qi} I_{qi} - D_i(\omega_i - 1)] \\ \dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T'_{d0i}} [E'_{fdi} - (x_{di} - x'_{di}) I_{di} - E'_{qi}] \\ \dot{E}'_{di} = \frac{1}{T'_{q0i}} [-E'_{di} + (x_{qi} - x'_{qi}) I_{qi}] \\ \dot{E}'_{fdi} = \frac{1}{T_A} [-E'_{fdi} + K_A(U_{refi} - U_i)] \end{cases} \quad (1)$$

方程中各电气量的物理意义及说明见文献[19]。

静止无功补偿器 SVC(Static Var Compensator)是目前应用最广泛的 FACTS 设备,它能有效地保持电压稳定,同时也具备一定的改善系统阻尼的作用。本文拟采用多台 SVC 为例阐述所提协调控制算法。SVC 数学模型的控制框图如图 1 所示。

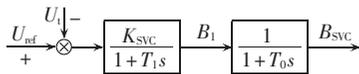


图 1 SVC 动态模型

Fig.1 Dynamic model of SVC

SVC 的动态表达式可以考虑为:

$$\begin{cases} \dot{B}_1 = \frac{1}{T_1} [-B_1 + K_{SVC}(U_{ref} - U_i)] \\ \dot{B}_{SVC} = \frac{1}{T_0} (B_1 - B_{SVC}) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $B_{SVC}$  为 SVC 的等效输出电纳值;  $B_1$  为中间变量;  $K_{SVC}$  为 SVC 控制器测量环节的增益;  $T_1$  和  $T_0$  为时间常数;  $U_{ref}$  为参考电压;  $U_i$  为 SVC 控制节点的测量电压。

### 1.2 基于 WAMS 的多 FACTS 协调控制

基于 WAMS 广域信息进行多 FACTS 协调控制在架构上一般可分为分散式和集中式。分散式协调控制通常表现为由各台 FACTS 设备自行接收 WAMS 信息,通过 FACTS 间相互通信获取区域内 FACTS 运行状态和需求,综合考虑后得出自身控制策略;集中式协调控制通常由一台协调控制器来接收 WAMS 信息,进行计算后得到各台 FACTS 设备的控制指令并下发实现协调控制。2 种控制方式各有优劣:由于强调分散,前者具有更高的可靠性,但当设备数量较大时,为每台设备设计协调控制算法、设备间架设通信线路将变得复杂且工作量巨大;后者通过统一协调能更好地实现全局控制,但需接收全

系统信息,可能会对控制速度和准确性造成影响。

本文以集中式协调控制为例,提出如图 2 所示的协调控制示意图。协调控制器利用 WAMS 数据平台同步测量系统多点状态量和输出量,进行计算后得到各台 FACTS 设备的控制指令并下发,实现 FACTS 间的协调控制。

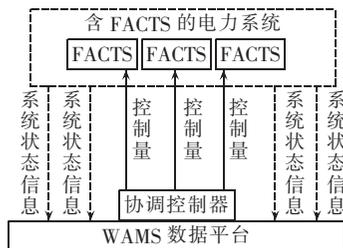


图 2 基于 WAMS 的集中式协调控制

Fig.2 Centralized coordinated control based on WAMS

对于每台 FACTS 设备而言,接收到的协调控制变量  $u$  将作为控制器输入信号的一部分,与本地控制变量一起送入控制器。以图 1 的 SVC 模型为例,叠加了协调控制变量  $u$  的控制器模型如图 3 所示。

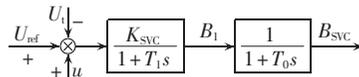


图 3 含协调控制量的 SVC 动态模型

Fig.3 Dynamic model of SVC with coordination input

由此,全系统的状态空间模型可写成:

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

其中,  $\mathbf{x}$  为系统状态变量;  $\mathbf{u}$  为输入 FACTS 的协调控制变量;  $\mathbf{y}$  为系统输出变量;  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$  为系数矩阵。

本文设计的多 FACTS 协调控制器采用系统输出变量  $\mathbf{y}$  作为输入。获取远端输出信号  $\mathbf{y}$  经过 WAMS 传输需要一定时间,而且控制变量  $u$  由协调控制器发送至 FACTS 设备也存在时滞。假设最终总的时滞大小为  $\tau$ ,则 FACTS 的静态输出反馈控制器可设计为:

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

其中,  $\mathbf{K}$  为控制器的系数矩阵。

由式(3)和式(4)可以得到含多 FACTS 协调控制的电力系统单时滞模型的状态方程:

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

其中,  $\mathbf{A}_d = \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{C}$ 。

因此,设计抗时滞协调控制器的主要任务便是寻找合适的  $\mathbf{K}$ ,使得系统式(5)保持稳定。

### 1.3 时滞系统的自由权矩阵方法分析

讨论系统式(5)的稳定性通常使用 Lyapunov-Krasovskii 稳定性定理,它的主要思想是通过构造一个合适的 Lyapunov-Krasovskii 泛函来获得使系统式(5)稳定的充分条件。目前常采用的是含有二次型双

积分项的泛函:

$$V(t, \mathbf{x}_t) = \mathbf{x}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{x}(t) + \int_{t-d(t)}^t \mathbf{x}^T(s) \mathbf{Q} \mathbf{x}(s) ds + \int_{-r}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{\mathbf{x}}^T(s) \mathbf{Z} \dot{\mathbf{x}}(s) ds d\theta \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0$ ,  $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T \geq 0$  和  $\mathbf{Z} = \mathbf{Z}^T > 0$  为待定矩阵,  $d(t)$  表示积分式中的时间导数。对于任意合适维数的矩阵

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11} & \mathbf{X}_{12} \\ * & \mathbf{X}_{22} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (7)$$

有式(8)成立。

$$\tau \boldsymbol{\eta}_1^T(t) \mathbf{X} \boldsymbol{\eta}_1(t) - \int_{t-d(t)}^t \boldsymbol{\eta}_1^T(s) \mathbf{X} \boldsymbol{\eta}_1(s) ds \geq 0 \quad (8)$$

其中,  $\boldsymbol{\eta}_1(t) = [\mathbf{x}^T(t) \quad \mathbf{x}^T(t-d(t))]^T$ 。同时, 根据牛顿-莱布尼茨公式, 对于时滞项有:

$$\mathbf{x}(t-d(t)) = \mathbf{x}(t) - \int_{t-d(t)}^t \dot{\mathbf{x}}(s) ds \quad (9)$$

那么, 根据自由权矩阵理论<sup>[20]</sup>, 对于任意合适维数的矩阵  $\mathbf{N}_1$  和  $\mathbf{N}_2$ , 有:

$$2[\mathbf{x}^T(t) \mathbf{N}_1 + \mathbf{x}^T(t-d(t)) \mathbf{N}_2] \times [\mathbf{x}(t) - \int_{t-d(t)}^t \mathbf{x}(s) ds - \mathbf{x}(t-d(t))] = 0 \quad (10)$$

此时, 计算  $V(t, \mathbf{x}_t)$  沿系统式(5)的导数, 并结合式(9)和式(10), 可得定理 1(证明过程详见文献[20])。

**定理 1** 给定时滞  $\tau > 0$ , 如果存在满足上述要求的矩阵  $\mathbf{P}, \mathbf{Z}, \mathbf{X}, \mathbf{N}_1$  和  $\mathbf{N}_2$ , 使得如下 2 个线性矩阵不等式(11)和(12)成立, 则时滞系统式(5)是渐近稳定的。

$$\begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \tau \mathbf{A}^T \mathbf{Z} \\ * & \Phi_{22} & \tau \mathbf{A}_d \mathbf{Z} \\ * & * & -\tau \mathbf{Z} \end{bmatrix} < 0 \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11} & \mathbf{X}_{12} & \mathbf{N}_2 \\ * & \mathbf{X}_{22} & \mathbf{N}_1 \\ * & * & \mathbf{Z} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (12)$$

$$\Phi_{11} = \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_1^T + \tau \mathbf{X}_{11}$$

$$\Phi_{12} = \mathbf{P} \mathbf{A}_d - \mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2^T + \tau \mathbf{X}_{12}$$

$$\Phi_{22} = -\mathbf{N}_2 - \mathbf{N}_2^T + \tau \mathbf{X}_{22}$$

定理 1 给出了判断时滞系统稳定的充分条件。在许多电力系统实际工程中, WAMS 架设好后时滞  $\tau$  通常是可以估计到的, 此时再结合系统的状态方程, 便可利用该定理作为系统稳定的判据。在获取状态方程之前, 首先要得到式(4)的  $\mathbf{K}$ , 下面将利用寻优算法来获取合适的  $\mathbf{K}$ 。

## 2 结合迭代寻优的多 FACTS 协调控制器设计

### 2.1 Hankel 降阶和量子遗传算法

电力系统是高阶非线性动态系统, 在求解其状态方程时, 其状态矩阵维数常高达数十甚至上千阶, 如

果直接应用于计算分析, 常常会带来计算困难。由于人们只关心特定的若干个模式, 那么可以通过将系统降阶成低阶系统, 保留关键的系统模式进行分析。因此, 对大系统进行降阶是控制器设计的首要步骤。本文采用 Hankel 降阶方法, 它通过保证降阶前后系统的 Hankel 奇异值误差在较小范围内来实现降阶。该算法已集成进软件 MATLAB 的鲁棒工具箱中, 具体调用方法及相关理论详见 MATLAB 帮助文件。

另外, 本文采用量子遗传算法寻求合适的控制器系数矩阵  $\mathbf{K}$ 。量子遗传算法结合了量子计算和遗传算法的特点, 在优化求解上具有种群规模小、收敛速度快、全局寻优能力强等优势。它的基本算法是: 生成个体  $\rightarrow$  测量  $\rightarrow$  求解目标函数  $\rightarrow$  与上一步最优值比较  $\rightarrow$  生成量子旋转策略  $\rightarrow$  转到第一步。经过如此反复迭代, 在一定的进化代数内通常能找到目标函数的最优值。算法具体介绍和迭代参数设置可参见文献[21], 在应用求解时只需设置  $\mathbf{K}$  的寻优范围。

在利用量子遗传算法进行寻优时, 约束条件可设置为满足定理 1 中的式(11)和式(12)的解是否存在, 以首先保证求出的系统是渐近稳定的。由于可能会存在多组可行解, 应结合电力系统的实际需求, 目标函数设定为使系统最小阻尼比最大化, 即最小系统阻尼比越大, 系统稳定水平越高, 以保证系统能运行在强阻尼模式。同时为了确保控制的合理性, 应设定一个最小阻尼比的阈值(如 7%), 当超出此阈值时可停止寻优。

### 2.2 时滞系统特征值的近似求解

要求解系统的阻尼比必先求解其特征值  $\lambda$ 。时滞系统式(5)的特征方程是:

$$\det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A} - \mathbf{A}_d e^{-\tau \lambda}) = 0 \quad (13)$$

这一方程是超越方程, 不能直接求解。因此本文采用偏微分方程(PDE)离散化方法来近似求解。由于系统式(5)的时滞微分方程在相互关联的边界条件下可转换为一组双曲型偏微分方程 H-PDE (Hyperbolic Partial Differential Equation), 因此通过对 PDE 进行精细离散化得到的增广矩阵, 其特征值可近似于式(13)的解。具体算法介绍可参见文献[22]。在该算法中需设置 Chebyshev 离散节点数, 由于只关注机电模式, 因此该值在 20~30 范围内取值计算得到的机电模式已足够精确。

### 2.3 算法实施流程

综上所述, 抗时滞的协调控制算法流程见图 4。

## 3 算例分析

考虑图 5 所示的 4 机 2 区域系统, 根据系统运行情况考虑, 节点 7 和节点 9 处电压偏低, 因此分别装

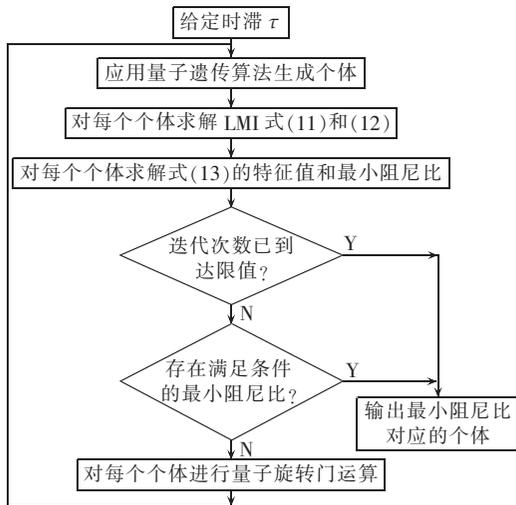


图 4 算法流程图

Fig.4 Flowchart of algorithm

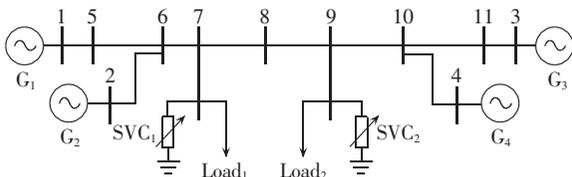


图 5 装设 2 台 SVC 的 4 机电力系统结构图

Fig.5 Structure of 4-generator power system with two SVCs

设一台 SVC 以提升电压。系统参数参见文献[19]。使用 SISO 控制器参数整定的标准方法<sup>[23]</sup>对 SVC 进行设计,可得控制器参数为: $K_{SVC}=150, T_1=0.05, T_0=0.01$ 。

由于系统存在弱阻尼的区间振荡模式,故应用协调控制算法来改善系统阻尼。由于发电机采用四阶模型,加上一阶快速励磁,以及每台 SVC 的二阶模型,全系统微分方程共 24 阶。为了加快计算速度,首先进行 Hankel 降阶,将其降为七阶模型,计算对比降阶前后的系统奇异值,观察图 6 可以看出,在较大的频率范围两者曲线几乎完全吻合。

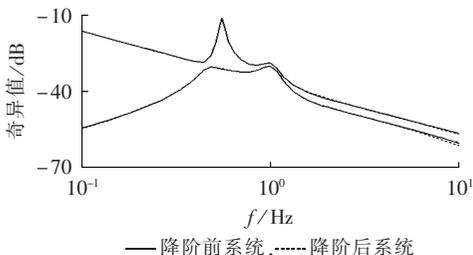


图 6 降阶前后系统的奇异值曲线图

Fig.6 Singular values of system before and after order reduction

2 台 SVC 接入系统后,对比扰动下区域联络线上的功率波动,由图 7 可以看出,原系统存在明显的弱阻尼区间振荡,接入 SVC 后对提高系统阻尼有一定帮助,图中区域联络线功率为标么值,后同。

基于降阶模型,利用本文所提算法来设计协调

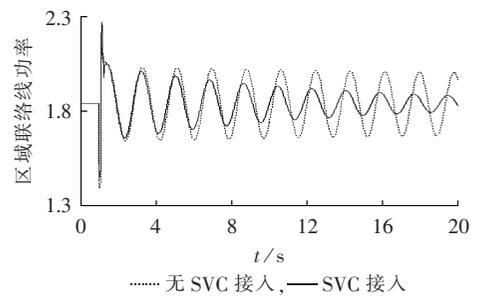


图 7 安装 SVC 前后的区域联络线功率振荡

Fig.7 Power oscillation of tie-line with and without SVCs

控制方案。首先选取最大相关机组  $G_1$  和  $G_3$  这 2 台发电机的转速差  $\Delta\omega_1$  和  $\Delta\omega_3$  作为控制器输入,假定通过 WAMS 的信号传输时滞约为 200 ms,在量子遗传算法中设置参数搜索范围为  $[-10, 10]$ ,最小阻尼比阈值为 7%,最终寻优结果为  $K=[2.5452, -2.7487, -2.6181, 2.6460]$ 。设置系统扰动如下:1 s 时  $SVC_1$  参考电压增加 0.01 p.u.,2 s 时减小 0.01 p.u.。图 8 给出了区间联络线功率响应曲线,对比了有、无协调控制的仿真结果。

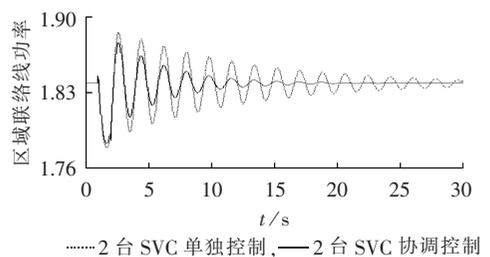


图 8 200 ms 时滞下联络线的功率振荡

Fig.8 Power oscillation of tie-line with time delay of 200 ms

由图 8 对比可以看出,由于设置了最小阻尼比的阈值,通过本文算法获取的  $K$  可使协调控制后的系统运行在强阻尼模式。因此虽然存在信号传输时滞,相对各台 SVC 单独控制而言,协调控制策略仍能体现更好的控制性能。

下面分析算法的时滞裕度。如前文所述,本文的协调控制算法是基于信号的预估时滞进行设计的,时滞预估难免会有偏差,因此有必要分析算法的时滞裕度,以掌握协调控制器能保持系统稳定的时滞范围。图 9 给出了不同时滞下系统的最小阻尼比变化曲线,其中虚线是 SVC 未进行协调控制时的系统最小阻尼比,约为 0.0276。

由于多 FACTS 协调控制算法是按照时滞为 200 ms 设计的,因此从图 9 可看出系统最小阻尼比在该时滞下达到最大,约为 0.07;当时滞小于 570 ms 时,系统都能保持强阻尼(以 0.03 为界)运行;当时滞小于 600 ms 时,采用协调控制都可以使系统阻尼水平优于单独控制。这说明本文算法具有较大的时

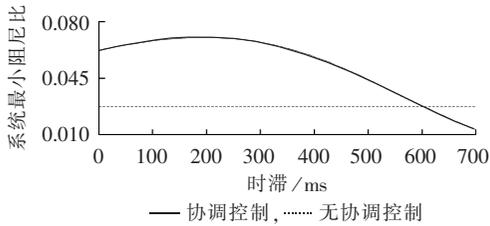


图 9 不同时滞下系统的阻尼比

Fig.9 Damping ratio of power system for different time delays

滞裕度,保证控制器在该时滞范围内仍能使系统稳定,对 WAMS 信号时滞预估的精确性要求宽松。

## 4 结论

本文对多 FACTS 广域协调控制进行了研究,针对 WAMS 信号存在的时滞问题,提出了一种基于自由权矩阵方法的抗时滞协调控制算法。通过获取 WAMS 输出反馈信号,采用自由权矩阵时滞稳定定理作为判据,同时保证时滞系统的最小阻尼比在一定阈值之上,利用量子遗传算法寻优获得控制器最佳增益。在多台 SVC 的多机算例中进行时域仿真证明了所提算法的有效性。试验结果表明:在设定的时滞大小内,本算法能提供良好的控制性能,提高系统的动态稳定性;算法具有较大的时滞裕度,在裕度范围内,算法都能保证系统稳定。

本文所提算法虽以集中式协调控制方式为例,但也可应用于分散式协调控制;只需将式(4)作为新增的比例环节集成进每台 FACTS 控制器即可。算法具体如何在工程应用中实现仍需研究。算法亦可推广至其他 FACTS 设备及各类动态元件的协调控制。另外,在算法的快速寻优,以及系统存在多时滞时如何拓展算法的应用范围等方面,仍有进一步研究的空間。

## 参考文献:

[1] 张文亮,周孝信,印永华,等. 华北—华中—华东特高压同步电网构建和安全性分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(16):1-5.  
ZHANG Wenliang,ZHOU Xiaoxin,YIN Yonghua,et al. Composition and security analysis of "North China-Central China-East China" UHV synchronous power grid[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(16):1-5.

[2] 张文亮,刘壮志,王明俊,等. 智能电网的研究进展及发展趋势[J]. 电网技术,2009,33(13):1-11.  
ZHANG Wenliang,LIU Zhuangzhi,WANG Mingjun,et al. Research status and development trend of smart grid[J]. Power System Technology,2009,33(13):1-11.

[3] 周建丰,顾亚琴,韦寿祺. SVC 与 STATCOM 的综合比较分析[J]. 电力自动化设备,2007,27(12):57-60.  
ZHOU Jianfeng,GU Yaqin,WEI Shouqi. Comprehensive comparative analysis of SVC and STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(12):57-60.

[4] 靳静,艾芊,赵岩. FACTS 装置在风电场中的无功补偿原理与仿

真[J]. 电力自动化设备,2007,27(8):58-61.

JIN Jing,AI Qian,ZHAO Yan. Reactive compensation principle and simulation of FACTS device in wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(8):58-61.

[5] 张文亮,汤广福,查鲲鹏,等. 先进电力电子技术在智能电网中的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,30(4):1-7.  
ZHANG Wenliang,TANG Guangfu,ZHA Kunpeng,et al. Application of advanced power electronics in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(4):1-7.

[6] 黄柳强,郭剑波,卜广全,等. FACTS 协调控制研究进展及展望[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(5):138-147.  
HUANG Liuqiang,GUO Jianbo,BU Guangquan,et al. Research progress and prospect of FACTS coordinated control[J]. Power System Protection and Control,2012,40(5):138-147.

[7] JAKPATTANAJIT C,HOONCHAREON N,YOKOYAMA A. A new coordinated control scheme of PSS and FACT devices for improving power system oscillations in multi-machine system[C]// International Conference on Power System Technology. Hangzhou, China:IEEE,2010:1-8.

[8] 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):34-39.  
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):34-39.

[9] WANG Keyou,CROW M L. Feedback linearization internal control for the unified power flow controller[C]//Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis,USA:IEEE,2010:1-7.

[10] 高本锋,肖湘宁,王小宁,等. 静止同步串联补偿器的系统级协调控制策略研究[J]. 华东电力,2010,38(9):45-48.  
GAO Benfeng,XIAO Xiangning,WANG Xiaoning,et al. Study on coordinate control strategy of static synchronous series compensators in system level[J]. East China Electric Power,2010,38(9):45-48.

[11] 康忠健,勾松波,孟繁玉,等. SVC 与发电机励磁的非线性变结构协调控制[J]. 高电压技术,2008,34(5):995-1000.  
KANG Zhongjian,GOU Songbo,MENG Fanyu,et al. Nonlinear variable structure controller of static var compensator cooperating with excitation system of generation [J]. High Voltage Engineering,2008,34(5):995-1000.

[12] NOROOZIAN M,ANGQUIST L,GHANDHARI M,et al. Improving power system dynamics by series-connected FACTS devices [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1997,12(4):1635-1641.

[13] 常乃超,兰洲,甘德强,等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术,2005,29(10):46-52.  
CHANG Naichao,LAN Zhou,GAN Deqiang,et al. A survey of applications of wide-area measurement system in power system analysis and control[J]. Power System Technology,2005,29(10):46-52.

[14] 孟凡超,董晓亮,高志强,等. 一种基于 WAMS/PMU 的 PSS 在线评估方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):146-149.  
MENG Fanchao,DONG Xiaoliang,GAO Zhiqiang,et al. Online PSS evaluation based on WAMS/PMU technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):146-149.

[15] 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.
- [16] WEI Qiao, VENAYAGAMOORTHY G K, HARLEY R G. DHP-based wide-area coordinating control of a power system with a large wind farm and multiple FACTS devices[C]//International Joint Conference on Neural Networks. Orlando, USA: [s.n.], 2007: 2093-2098.
- [17] 张雪焱, 黄少锋. 可控制电阻控制广域协调优化方法研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6):114-118.  
ZHANG Xueyan, HUANG Shaofeng. Wide area coordinated optimization method of thyristor controlled braking resistor controllers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(6):114-118.
- [18] 江全元, 张鹏翔, 曹一家. 计及反馈信号时滞影响的广域 FACTS 阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7):82-88.  
JIANG Quanyuan, ZHANG Pengxiang, CAO Yijia. Wide-area FACTS damping control in consideration of feedback signals' time delay[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7):82-88.
- [19] 王伟岸, 马平, 蔡兴国. 考虑广域反馈信号时滞影响的附加励磁控制器[J]. 电网技术, 2008, 32(19):50-55.  
WANG Weian, MA Ping, CAI Xingguo. Additional controller of excitation system considering time delay of wide-area feedback signal[J]. Power System Technology, 2008, 32(19):50-55.
- [20] PRABHA K. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill Companies, 1994:548-549.
- [21] 吴敏, 何勇. 时滞系统鲁棒控制[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 28-43.
- [22] HAN K H, KIM H J. Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(6):580-593.
- [23] BEKKEN M. Numerical solution of constant coefficient linear delay differential equations as abstract Cauchy problems[J]. Numerische Mathematik, 2000, 84(3):351-374.
- [24] ASTROM K J, WITTENMARK B. Computer-controlled systems-theory and design[J]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2002: 100-110.

#### 作者简介:



黄柳强

黄柳强(1984-), 男, 广西南宁人, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: huangliqiang@126.com);

郭剑波(1960-), 男, 北京人, 教授级高级工程师, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统运行与规划、电网可靠性。

## Wide-area anti-delay coordinated control among FACTS controllers

HUANG Liuqiang, GUO Jianbo, SUN Huadong, XU Shiyun, LIU Min, YI Jun

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** An algorithm based on free-weighting matrix approach is proposed for the anti-delay coordinated control among multiple FACTSs (Flexible AC Transmission Systems), which uses the output feedback signal of wide-area measurement system, considers the time delay of signal transmission, adopts the free-weighting matrix time delay stability theory as criterion, ensures the minimum damping ratio of time delay system above a given threshold, and applies the quantum genetic algorithm to obtain the best gain of multi-FACTS coordination controller. Results of time-domain simulation for a case with two SVCs show its effectiveness.

**Key words:** electric power systems; flexible AC transmission system; wide-area measurement system; free-weighting matrix approach; linear matrix inequality; quantum genetic algorithm; time delay; coordinated control

(上接第 36 页 continued from page 36)

## Fast matching of power outage event and intelligent generation of power recovery plan

LI Congshan, LIU Tianqi, LI Xingyuan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Based on the detailed summarization and analysis of massive power outage cases, their internal characteristic information is extracted and the mathematical aggregation method is applied to describe the power outage events by the mathematical model with the characteristic values as the essential elements. A hierarchical classification scheme of power outage events is given and the corresponding search strategy combining the classified search algorithm and the improved nearest neighbour algorithm is proposed. The most similar scenario will be given when the characteristic values are not completely matched and the countermeasures are intelligently generated according to the established table of characteristic measures. Results of case analysis show that, the given power outage event is quickly matched and the power recovery plan is intelligently generated, verifying the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** electric power systems; outages; emergency preplan; mathematical models; case-based reasoning; hierarchical search; nearest neighbour