

文章编号: 1001-0920(2005)12-1337-05

基于多 Agent 优化协调的电力系统二级电压控制

盛戈皞, 江秀臣, 范习辉, 曾奕
(上海交通大学 电气工程系, 上海 200030)

摘要: 在多 Agent 的二级电压控制系统基本原理的基础上, 将多 Agent 系统的相关技术引入无功电压快速协调控制, 探讨了在电力系统紧急情况下, 基于多 Agent 的二级电压控制系统的协调和协作方法以及优化控制策略。通过引入虚拟控制 Agent 分组的概念, 将多 Agent 系统中常用的合同网协议应用于二级电压控制的多 Agent 协调, 改善了紧急状态下系统的电压调控能力。以装有多个静态无功补偿器的新英格兰系统为例进行数字仿真研究, 验证了控制策略的有效性和灵活性。

关键词: 多 Agent 系统; 二级电压控制; 协调控制

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

Optimal Coordination for Multi-agent Based Secondary Voltage Control in Power Systems

SHEN G Ge-hao, JIANG X iu-chen, FAN X i-hui, ZEN G Yi

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China Correspondent: SHEN G Ge-hao, E-mail: sgh168@263.net)

Abstract Within the framework of the multi-agent based secondary voltage control system, the communication methods, collaboration protocol and optimal control strategy are investigated for enhancing the ability of fast and coordinated voltage control in power system. The performance in system contingencies is mainly discussed. The concept of virtual control agency is proposed to adapt the emergent dynamic control environment. Contract net protocol, which is widely used in coordination of multi-agent system (MAS), is introduced to realize optimal coordination and cooperation among control agents. The simulation results of the classic New England system equipped with several static var compensators (SVC) show the effectiveness and flexibility of the control scheme.

Key words: Multi-agent system; Secondary voltage control; Coordinated control

1 引言

当前, 许多电力系统为了解决传统全局电压控制存在的问题, 改善系统的电压稳定性, 采取了分级控制的策略。在分级电压控制中, 二级电压控制是维持系统电压水平和良好的无功分布, 提高系统电压稳定性的最重要环节, 因而得到广泛的关注^[1~3]。但是, 现有的二级电压控制主要采用静态模型解决正常运行条件下电压控制问题, 当系统处于紧急状态时, 控制系统难以及时恢复故障节点电压, 整体控制效果不佳。

基于多 Agent 的控制系统的思想是把控制器当作具有自治性和协作性的主动行为能力的 Agent, 通过相关 Agent 的通信和任务分享进行协调工作以实现特定的控制目标^[4,5]。近年来, 一些研究将多 Agent 控制技术用于二级电压分散协调控制, 取得了满意的效果^[6,7]。文献[6]首次提出将 Agent 技术应用于电力系统电压控制, 该方法在电力系统紧急状态下能较好地进行二级调压以快速恢复电压至正常范围。但这种方法采用的是全分布式的多 Agent 系统(MAS)技术, 没有一个全局控制的

收稿日期: 2004-12-14; 修回日期: 2005-05-23

基金项目: 中国博士后科学基金项目(20040350475)。

作者简介: 盛戈皞(1974—), 男, 长沙人, 博士后, 从事电力系统自动控制方法的研究; 江秀臣(1965—), 男, 山东郓城人, 教授, 博士生导师, 从事在线监测和电气设备自动化的研究。

Agent 来协调和管理整个系统的活动,其控制决策至多是部分最优,很难满足全局优化的要求。文献[7]根据基于多 Agent 的分层分布式控制理论,按照二级电压控制的基本要求,提出了基于多 Agent 的二级电压控制原理,该方法在正常情况和紧急情况下都能很好地完成全局电压控制任务。但文中控制 Agent 之间的协调是基于请求/响应的方式,这种方式只适用于系统结构较为简单或电压控制器较少的情况。然而,实际电力系统中存在多个负荷节点和多个电压控制器,每个电压控制器不仅向自己所在的节点提供电压支撑,而且还在相应的执行级 Agent 的帮助下向其邻近的节点提供电压支撑,这种情况下,控制 Agent 之间需要更为复杂和优化的协调协议和协作策略。

本文以多 Agent 的二级电压控制系统为基础,将 MAS 技术中 Agent 之间进行协调与协作的原理和方法引入紧急状态下的无功电压快速协调控制,通过多个控制 Agent 之间的交互,达成各控制器控制作用的优化协调,实现系统的整体控制目标。这种新型的二级电压控制系统不仅能在正常情况进行控制获得优化的电压和无功储备水平,还能在紧急情况下实时协调相关的无功电压控制设备,以最优化的方式迅速恢复系统电压的正常运行水平。

2 基于多 Agent 的二级电压控制原理框架

基于多 Agent 的二级电压控制系统的基本原理是根据多 Agent 的分层分布式控制系统理论^[5],把控制中心的二级电压控制器作为协调级 Agent,在无功电压控制设备所在节点装设执行级 Agent,构成一个完成系统二级电压控制任务的多 Agent 系统,其原理示意如图 1。这种思想是将电压控制器视为能独立完成某些控制任务,具有自治性和协作性等主动行为能力的控制 Agent,通过多 Agent 的交互与协作,达成各控制器控制作用的相

互协调,实现系统的总体控制目标,维持区域内电压水平。

控制系统中的每个执行级 Agent 可通过就地采集的电气信息得到或估算本地和邻近节点的电压值,并可通过改变对应的电压控制器整定值调节本地和邻近节点的电压,这些被监控的节点构成了该执行级 Agent 的电压控制责任范围。

当电力系统正常运行时,协调级 Agent 每隔 1~3 min 给出各执行级 Agent 的整定值,以保证系统优化运行和维持较好的无功储备。当电力系统发生故障,投切电气元件、负荷急剧变化等大扰动事件造成系统中某些母线节点电压异常时,系统进入紧急状况,如果不及时进行无功电压设备的协调控制,使母线电压迅速恢复至可接受的正常范围,可能会导致局部电压崩溃,甚至逐渐扩展到整个系统。此时,电压控制的目标是采取必要的控制手段迅速恢复异常节点电压,防止系统出现严重的电压问题。

基于多 Agent 的二级电压控制系统通过控制 Agent 之间进行协调和协作实现紧急情况下无功电压快速、协调控制,主要目标是使控制任务基于以下原则合理分布:1) 根据各个控制 Agent 的能力和当前状态合理地分配电压控制任务;2) 优化使用系统可用的无功电压控制能力,避免关键的控制设备过负荷;3) 通过控制 Agent 之间适当地组成集群以减少通信量。

3 二级电压控制的虚拟 Agent 分组

由于无功电压控制的局部特性,二级电压控制表现为局部的或区域性的协调,因此,当电网中某一个(或多个)节点电压越限,电力系统处于紧急状态时,二级电压控制系统并不需要所有的无功电压控制设备都参与调节。一般来说,针对越限节点电压的恢复,存在一个最佳的局部电压控制域和一个控制设备的最佳调整序列^[8]。所以,基于多 Agent 的二级电压控制系统应该能够在协调级 Agent 的组织下实时组成一个虚拟的小型 Agent 联盟(Agency),并通过虚拟 Agency 中各个 Agent 的协调和协作完成电压恢复的紧急控制任务。虚拟 Agency 的结合是面向特定任务的,在电力系统发生紧急情况时,选择控制效果最好的若干控制 Agent 加入虚拟 Agency,当紧急电压控制任务完成之后,虚拟 Agency 便自行解散,以释放资源,等待下一次的重组。

控制 Agent 分组的基本方法是以电压越限的故障节点为中心,根据无功电压灵敏度形成局部电压控制区域,区域内的执行级 Agent 结合组成完成紧急电压控制任务的虚拟 Agency。

一般情况下,无功电压灵敏度分析计算列写矩

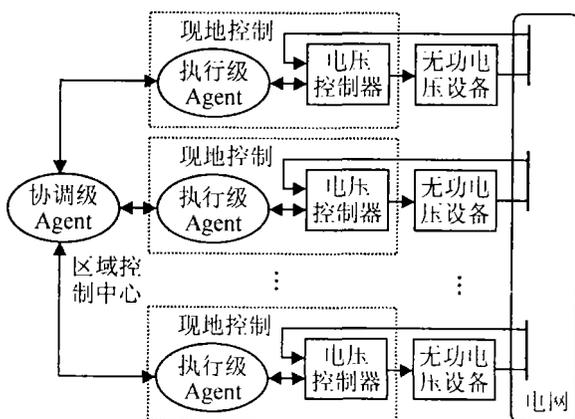


图 1 基于多 Agent 的二级电压控制系统原理

阵方程为

$$\Delta X = S \Delta U \quad (1)$$

其中: X 为状态变量, 这里指系统中各节点的电压; U 为控制手段, 包括控制 Agent 节点和其他发电机和无功补偿设备的控制量; S 是根据发生紧急情况时的状态计算出的灵敏度矩阵

从灵敏度矩阵 S 中选出故障节点对应的行和控制 Agent 节点对应的列, 形成子灵敏度矩阵 S_c , 代表各 Agent 对网络故障节点电压控制强弱程度的特征量 矩阵 S_c 归一化处理后, 选取一个阈值, 大于阈值对应的控制 Agent 节点构成完成电压紧急控制任务的虚拟 Agency. 虚拟的 Agency 是一个小型的 MAS, 实际上是初始 MAS 的子集 虚拟 Agency 形成后, 便可立即进行无功电压优化协调控制

4 二级电压控制的多 Agent 优化协调

4.1 合同网协议

合同网协议是 MAS 中常见的协调和协作策略, 主要采用动态的任务分配方法, 通过任务招标、投标和订立合同进行合作. 合同网工作时将全局任务分成一系列子任务, 由称作管理器的特定 Agent 节点负责子任务的发布和指派, 其协商过程如图 2 所示. 管理器提供任务投标, 给出子任务的合同. 标书对所有 Agent 都是开放的, 各 Agent 根据自身状态和当前可用的资源, 决定该公布的任务是否要申请执行. 管理器通过优化方法选择最适合完成合同的 Agent 节点, 将子任务交给它. 承诺完成合同的 Agent 节点确认接受合同, 负责子任务的执行. 当任务完成后, 将结果传给管理器



图 2 合同网系统中合同协商过程

4.2 基于合同网协议的协调与协作

由于无功电压的调控具有局部特性, 虚拟 Agency 一般由电气距离相对较近的执行级 Agent 组合而成. 虚拟 Agency 中 Agent 之间通过协调和协作进行优化控制, 完成电压的紧急控制任务

在基于多 Agent 的二级电压控制系统中, 各执行级 Agent 对责任范围内的节点提供电压支持, 以维持紧急状态下整个输电网络的电压水平. 在实际电力系统中, 区域中无功电压控制设备和负荷节点

较多, 控制作用较为复杂. Agent 之间的协调与协作采用合同网协议实现, 协调级 Agent 作为管理 Agent, 负责发布电压控制任务的标书和指派合同执行者. 整个二级电压控制系统的目标是以较少的代价在较短的时间内得到合格的电压水平, 以获得最大的利益. 而每个控制 Agent 的目标则是在保证系统总任务完成的前提下, 获得最大的安全稳定运行裕度. 图 3 以状态转移图的方式描述控制系统的工作过程, 给出节点电压出现异常的情况下 MAS 提供二级电压支持的相互协调和协作过程

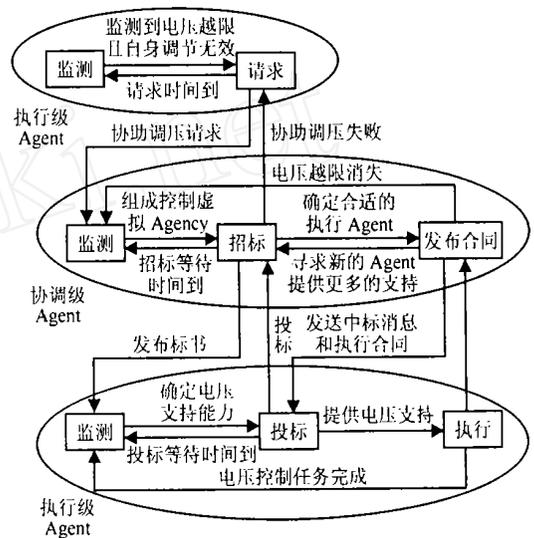


图 3 基于多 Agent 的二级电压控制的相互协调和协作过程

由图 3 可见, 协调级 Agent 有监测、招标、发布合同 3 种工作状态; 执行级 Agent 有监测、投标、请求、执行 4 种工作状态. 整个 MAS 的协调与协作过程如下:

- 1) 在电力系统正常工作时, 控制系统按常规的二级电压控制方式, 协调级 Agent 每隔 1~3 min 给出各执行级 Agent 的整定值, 保证系统优化运行并维持较好的无功储备. 各个控制 Agent 处于监测状态, 执行级 Agent 监测自己责任范围内的节点电压, 协调级 Agent 则监测系统中执行级 Agent 没有覆盖到的重要负荷节点电压
- 2) 当电力系统发生紧急情况出现电压异常时, 某个执行级 Agent 检测到责任范围内某个节点电压越限且无法通过自治控制行为使越限消失, 主动向协调级 Agent 发出协助调压请求, 并报告电压越限的地点和程度, 转为请求状态
- 3) 协调级 Agent 根据情况将对越限节点控制作用较强的执行级 Agent 组合成虚拟 Agency, 并在公告板上向该 Agency 中的成员发布请求电压支持的标书, 进入招标状态. 执行级 Agent 针对标书中的任务, 根据自身运行限制以及责任范围内节点电

压等情况估计自己的电压支持能力和优先级别,并将此作为投标的主要信息发送给协调级Agent,执行级Agent转为投标状态

4) 协调级Agent接收到多个执行级Agent的投标,用特定的优化方法选择其中的一个Agent,并向其发送中标信息和任务执行合同,请求其执行调压任务,转为请求状态。接收到中标消息的执行级Agent向协调级Agent发送应答消息,转为执行状态,并开始迅速调节相应控制设备端电压,完成现场的二级电压控制

5) 协调级Agent接收到中标的Agent完成任务的确认消息后,询问请求协助调压的执行级Agent,若电压越限消失,则返回监测状态;否则重新转为招标状态,寻求新的执行级Agent提供进一步的无功电压支持

6) 处在投标状态的协调级Agent如果在给定的时间内没有接收到执行级Agent的投标,则表明紧急情况下的电压越限已经无法通过二级电压控制消除,这时,协调级Agent向请求协助调压的执行级Agent发出协助调压失败的消息,解散虚拟Agency,返回监测状态

7) 发出协助调压请求的执行级Agent在给定的时间内没有接收到协调级Agent的调压确认消息,或接收到协助调压失败的消息,则返回监测状态

协调级Agent发出标书的主要内容包括电压越限的地点、程度等;执行级Agent投标报告的主要内容是该Agent的电压控制能力和所控制的设备运行状态;协调级Agent下达的任务执行合同包括电压调节目标和限定执行时间。执行级Agent在执行合同的过程中,与协调级Agent经常协商执行的任务是否已经满足要求,直到调节到运行限制为止

在上述电压控制协调与协作过程中,一个很重要的环节是步骤4)中协调级Agent如何选择合适的Agent执行任务合同,使控制系统以最少的控制设备和最有效的控制手段完成电压紧急控制任务,这实际上是一个组合优化问题,本文采用文献[8]的遗传算法来实现

5 仿真研究

基于新英格兰10机39节点系统进行数字仿真研究,系统接线图如图4所示。假设除了发电机外,还在节点4,8,11,13,14和17装设SVC无功补偿装置,它们在系统负荷较重区域为系统提供电压支撑。假设每台发电机和SVC均装设二级电压控制的执行级Agent,下面给出系统在紧急情况下采用基于多Agent优化协调方法的二级电压控制的效果。在仿真

过程中,认为各执行级Agent的调节裕度为设备当前注入无功与无功设备最大容许无功之比,比值越小,表示Agent的电压控制能力越强,反之电压控制能力越大,考虑到发电机稳定运行和经济运行的需要,控制SVC的执行级Agent的优先级别要高于控制发电机的执行级Agent

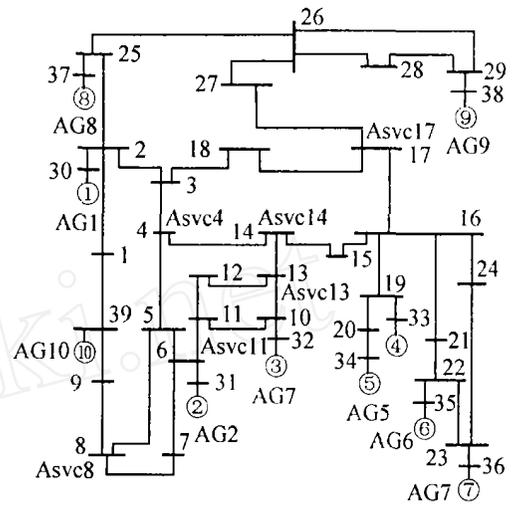


图4 新英格兰10机39节点系统图

假设1s时,节点12负荷增加200MVar,电压下降;2s时连接节点12和节点13的线路断线,使节点12的电压跌落至允许电压以下,系统处于紧急状态;并假设Asvc11的无功电压在系统受到冲击前已经达到运行上限。此时,系统在没有安装二级电压控制,安装常规的二级电压控制^[3]和装设基于多Agent的二级电压控制等3种情况下,越限节点和控制节点的电压响应曲线如图5所示,其中:点线为无二级电压控制;虚线为常规的二级电压控制;实线为基于多Agent的二级电压控制。

从图5可以看出,不采用二级电压控制时,节点12电压在受到冲击后一直低于容许值,无法恢复。常规的二级电压控制每隔一个采样周期(取为5s)调节一次控制发电机,因此需经过较长一段时间电压才能逐步恢复。而采用基于Agent的二级电压控制,AgentAsvc11首先启动自身的二级电压控制进行自治调节,由于Asvc11自身已达到运行极限,无法消除节点12的电压越限,则向协调级Agent发出协助调压请求。这种情况下,MAS协调与协作过程如下:

2~5s,协调级Agent组合成用于紧急状态控制的虚拟Agency,成员包括AG2,AG3,Asvc4,Asvc8,Asvc13和Asvc14等6个执行级Agent,并向各执行级Agent发布招标信息;5~11s,各执行级Agent将包括调节裕度和运行状态在内的电压控制能力以及优先级别作为投标信息发送,然后协调级

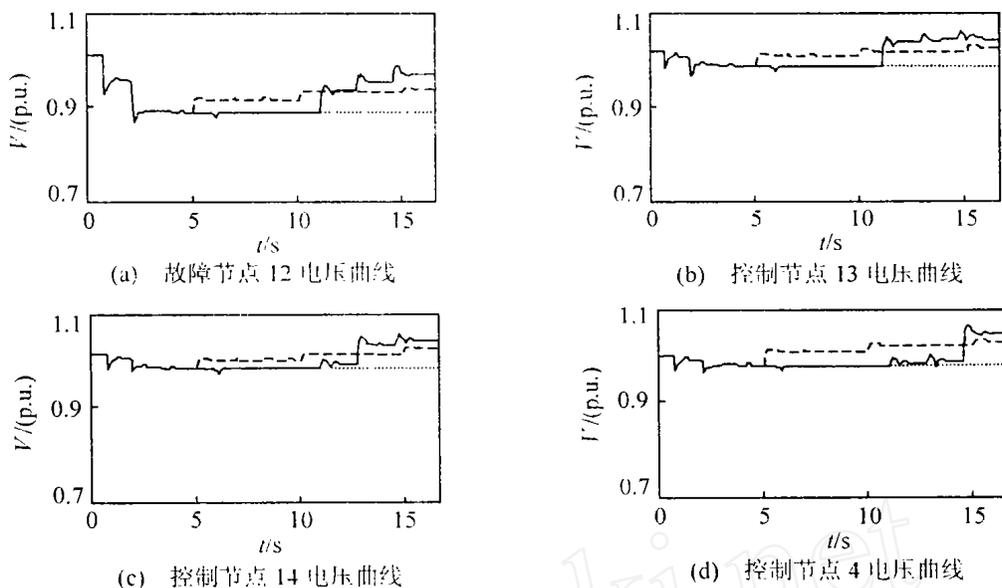


图 5 紧急情况下电压响应曲线

Agent 通过遗传算法计算 Agency 最优控制序列, 得到的最优控制序列为 [A svc13, A svc14, A svc4, A svc8, A G3, A G2]; 11 s 左右, 协调级 Agent 按照最优控制序列先给 A svc13 发出调压任务执行合同, A svc13 通过二级电压控制提升 SVC13 端电压至最高容许值, 但仍然无法消除节点 12 的电压越限; 13 s 左右, 协调级 Agent 向 A svc14 发出调压请求, A svc14 通过二级电压控制提升 SVC14 端电压, 越限节点电压仍未恢复至允许范围; 15 s 左右, 协调级 Agent 向 A svc4 发出调压请求, A svc4 通过二级电压控制提升 SVC4 端电压, 越限节点电压恢复, 紧急协调控制过程结束, 协调级 Agent 解散虚拟 Agency。若此时电压仍未恢复, 协调级 Agent 会依次调节最优控制序列中的执行级 Agent, 直到越限电压恢复为止。

由仿真结果可以看出, 采用合同网协议, 基于多 Agent 的二级电压控制系统可以充分利用区域内无功控制设备的无功储备, 优化协调各电压控制器的控制行为, 迅速有效地为系统提供电压支持, 从而较快地恢复越限节点电压, 这对提高系统在大干扰下的电压稳定性是至关重要的。

6 结 论

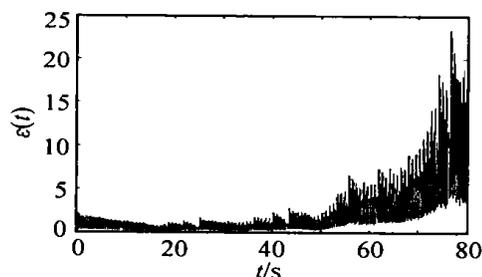
基于多 Agent 的二级电压控制系统将 MAS 的协调和协作原理应用于紧急情况下的电压控制, 采用基于合同网的协调和协作策略实现控制系统中多 Agent 的优化协调, 以最少的控制设备和最有效的控制手段对电压越限节点的电压恢复控制, 从而改善紧急情况下的控制系统性能。通过数字仿真分析可以看出, 系统中节点电压越限时, 基于多 Agent

的二级电压控制系统能实时协调控制相关的无功电压控制设备, 以最优化的方式迅速恢复系统电压的正常运行水平。

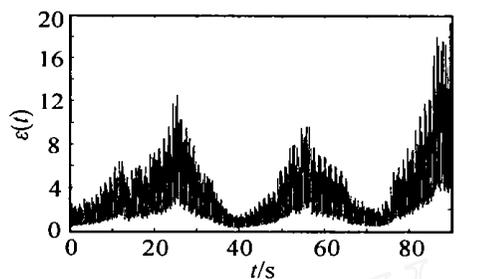
参考文献 (References)

- [1] Paul J P, Leost J Y, Tesseron J M. Survey of the Secondary Voltage Control in France: Present Realization and Investigation [J]. *IEEE Trans on Power System*, 1987, 2(2): 505-511.
- [2] 范磊, 陈珩. 二级电压控制研究[J]. *电力系统自动化*, 2000, 24(11): 18-21.
(Fan L, Cheng H. Study on Secondary Voltage Control [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000, 24(11): 18-21.)
- [3] 孙元章, 姚小寅, 刘锋. 二级电压控制对电力系统稳定性的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2000, 20(2): 28-32.
(Sun Y Z, Yao X Y, Liu F. The Impact of Secondary Voltage Control on Power System Stability [J]. *Proc of the CSEE*, 2000, 20(2): 28-32.)
- [4] Jennings N. *Cooperation in Industrial Multi-agent Systems* [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 1994.
- [5] 王俊普, 陈皞, 徐杨, 等. 基于 Agent 的集散递阶智能控制的研究[J]. *控制与决策*, 2001, 16(2): 177-180.
(Wang J P, Chen H, Xu Y, et al. Study of Realization of Agent-based Intelligent Control System [J]. *Control and Decision*, 2001, 16(2): 177-180.)
- [6] Wang H F. Multi-agent Coordination for the Secondary Voltage Control in Power System Contingencies [J]. *IEE Proc Genar Transm Distrib*, 2001, 148(1): 61-66.

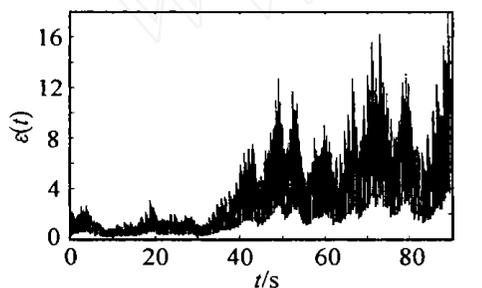
(下转第 1345 页)



(a) Lorenz 系统



(b) Lü 系统



(c) Chen 系统

图 2 混沌系统同步失去时的全局误差

3 结 语

本文讨论了非线性耦合的两个统一混沌系统同步时的参数选择问题。利用线性时变系统的稳定性理论分析其耦合混沌系统的误差系统稳定性,给出了耦合函数参数的选择范围,从而实现了两个耦合混沌系统的全局渐近同步。但是,运用线性定常系统的 Routh-Hurwitz 稳定判据来确定两个混沌系统的误差系统稳定性时,即使其系数矩阵的瞬间特征值具有负实部,并不能确保两个相同的混沌系统具有

高质量的完全同步。该分析方法可适用于其他混沌系统的同步和控制,如 Rossler, Chua 等,从而说明了该分析方法的有效性与普适性。

参考文献 (References)

- [1] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in Chaotic Systems [J]. *Physical Review Letters*, 1990, 64(4): 821-824
- [2] Wang C, Ge S S. Adaptive Synchronization of Uncertain Chaotic Systems via Backstepping Design [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2001, 12(6): 1199-1206
- [3] Agiza H N, Yassen M T. Synchronization of Rossler and Chen Chaotic Dynamical Systems Using Active Control [J]. *Physics Letters A*, 2001, 278(1): 191-197.
- [4] Yassen M T. Chaos Synchronization Between Two Different Chaotic Systems Using Active Control [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2005, 23(1): 131-140
- [5] Lü J H, Zhou T S, Zhou S C. Chaos Synchronization Between Two Different Chaotic Systems [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2002, 14(4): 529-541.
- [6] Park J H. Stability Criterion for Synchronization Linearly Coupled the Unified Chaotic Systems [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2005, 23(1): 79-85
- [7] 胡岗, 萧井华, 郑志刚. *混沌控制* [M]. 上海: 上海科技出版社, 2000.
(Hu G, Xiao J H, Zheng Z G. *Chaos Control* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 2000)
- [8] 刘永清, 宋中昆. *大型动力系统的理论与应用——分解、稳定与结构* [M]. 广州: 华南工学院出版社, 1988.
(Liu Y Q, Song Z K. *Theory and Application of Large-scale Dynamic Systems: Decomposition Stability and Structure* [M]. Guangzhou: The South China Institute of Technology Press, 1988)
- [9] Corron N J. Loss of Synchronization in Coupled Oscillators with Ubiquitous Local Stability [J]. *Physical Review E*, 2001, 63(4): 5203-5207.
- [10] Yanchuk S, Maistrenko Y, Mosekilde E. Loss of Synchronization in Coupled Rossler Systems [J]. *Physics D*, 2001, 154(1): 26-42

(上接第 1341 页)

- [7] 盛戈侠, 涂光瑜, 罗毅, 等. 基于多 Agent 的二级电压控制系统 [J]. *电力系统自动化*, 2002, 26(5): 9-14
(Sheng G H, Tu G Y, Luo Y, et al. Study on MAS-based Secondary Voltage Control System [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2002, 26(5): 9-14)

- [8] 赵彩虹, 马晓光. 基于遗传算法的局部电压分域新方法 [J]. *电网技术*, 2002, 26(9): 47-50
(Zhao C H, Ma X G. A Novel Method to Form Partial Voltage Regions Based on Generic Algorithm [J]. *Power System Technology*, 2002, 26(9): 47-50)