

基于多 Agent 系统的分层分布式 电压无功协调控制系统

郭红霞, 吴捷, 刘永强

(华南理工大学 电力学院, 广东省 广州市 510640)

Voltage and Reactive Power Coordinated Control System of Hierarchical and Distributed Structure Based on Multi-Agent System

GUO Hong-xia, WU Jie, LIU Yong-qiang

(Electrical Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: According to the features of current power system voltage and reactive power control, by use of the thinking of Agent, the apparatuses in scheduling center and individual local reactive power controllers in primary level are treated as semi-autonomous Agents, then a novel power system voltage and reactive power control oriented coordinated hierarchical and distributed multi-Agent system (MAS) is constructed and designed. The MAS consists of schedule layer and coordinated control layer. The functions such as man-machine interaction, information management of regional Agents and reactive power correction are implemented in schedule layer, and the local and inter-regional coordinated control is implemented in coordinated control layer which consists of on-site Agents. Leading the concept of Agent domain into voltage and reactive power control system to implement the management of whole power system makes it more expansible and open. With the presented system, it is hopeful to realize the overall coordinated control of power system that is a distributed and complex large system.

KEY WORDS: multi-Agent system; Agent domain; hierarchical and distributed structure; voltage and reactive power coordinated control; power system

摘要: 针对当前电力系统电压无功控制的特点, 采用 Agent 思想, 将处于各级调度中心的操作管理装置及现场控制级的各种无功控制设备看作是自治 Agent, 设计和构造了一种新颖的面向电力系统电压无功控制的分层分布协调式多 Agent

系统(multi-Agent system, MAS)组织结构。系统由调度级和协调控制级组成, 调度级实现人机交互、区域 Agent 的信息管理、无功校正等功能, 协调级由现场 Agent 组成, 实现本地及区域间的协调控制。在电压无功控制系统中引入 Agent 域的概念来实现整个电力系统的管理, 使其具有较强的扩展性和开发性。该系统有望实现电力系统这样一个分布式复杂巨系统的整体协调控制。

关键词: 多 Agent 系统; Agent 域; 分层分布式结构; 电压无功协调控制; 电力系统

0 引言

电力系统电压无功控制的对象是各母线电压和无功功率, 电压合格与否直接关系到整个电网的稳定运行^[1-3], 因此电压无功控制系统要有很高的可靠性。无功功率要满足众多节点电压的要求, 除全系统的无功功率需要平衡外, 地区系统同样需要平衡, 并要求无功功率的平衡应避免长距离输送而实现就地平衡, 因此, 在电力系统中无功功率需要分级分层就地平衡^[4]。由于同一区域的电压无功之间存在一定的联系, 整个系统需要在自治的基础上加以协调, 同时要求系统具有逐步扩展的能力, 能实现系统整体的稳定运行^[5-7]。

本文根据电力系统电压无功控制的特点和要求, 综合多 Agent 系统(multi-Agent system, MAS)现有的结构特点^[8-9], 提出了一种针对电力系统电压无功控制的分层分布协调式 MAS 组织结构, 并将 Agent 域的概念用于电压无功控制系统。这种结构的优点在于适合电力系统发展的要求, 具有较强的扩展性和开发性, 有望实现电力系统这样一个复杂

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60534040); 国家自然科学基金资助项目(60474048)。

Key Project Supported by National Natural Science Foundation of China(60534040); Project Supported by National Natural Science Foundation of China(60474048)。

分散的巨系统的整体协调控制。

1 现有电压无功控制系统结构分析

现有电压无功控制系统是在调度自动化系统的基础上构建的,其结构如图 1 所示。其控制策略由调度中心集中产生,系统包括 3 大基本组成部分:分散的过程装置、操作管理装置和通信系统,并可划分为现场控制级和调度级 2 层。

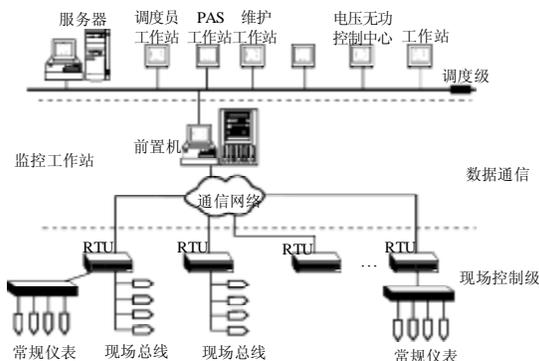


图 1 现有电压无功控制系统结构

Fig. 1 Structure of present voltage/reactive power control system

现场控制级的核心部件是远方终端单元(remote terminal unit, RTU),其基本功能是集中采集各种遥测和遥控信息量,并可收集和累积用于计算的电量脉冲信号,还可接受来自上级调度中心的各种遥控和遥调信息。

调度级位于地区调度中心,由于调度中心完成的任务比较多,典型结构是将调度中心建立在局域网上,所有的功能采用客户/服务器(C/S)模式分布于网络中,支持和管理网络中各自独立的处理节点。电压无功集中控制系统在原有调度自动化系统的基础上增设电压无功控制工作站,或将电压无功集中控制程序运行于其它计算机上,其作用是集中监控各母线电压的无功越限情况,及时生成适当的控制策略,下发到现场控制级,由现场控制级的 RTU 执行相应的控制。调度级还从全网出发负责全地区的优化管理工作,通过某种优化算法寻求优化策略,并将求得的优化策略下发给现场控制级执行。

调度级与现场控制级 RTU 之间的通信主要采用前置机系统,它是一种特殊的客户机,主要用来扩充串行通信端口。随着网络型 RTU 的出现,前置机也可通过网络互联设备与网络型 RTU 进行通信,完成系统和现场数据的接口任务。整个电压无功控制系统的流程图如图 2 所示。

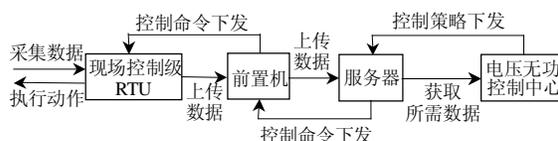


图 2 电压无功控制系统数据流程

Fig. 2 Data flow of voltage/reactive power control system

由上面的分析可以看出,现有电压无功控制系统存在如下问题^[10]:

(1) 前置机和服务器的作用至关重要,如果其一发生故障,则整个系统的监控功能将瘫痪,因此一般采用双机冗余的设计。

(2) 所有的控制策略均由调度级产生后下发给 RTU 执行,如由于主机故障或其它原因未生成控制策略,则可能在发生电压无功越限的情况下无动作策略下发。如通信系统发生故障,即使有控制策略生成,由于不能及时下发给 RTU 去执行,也会出现控制策略不能正常执行的情况。一旦发生上述情况之一,则可能导致整个系统出现电网内的无功越限而系统不能做出任何反应的情况,使电网内的越限情况加重,严重时可能导致电网崩溃。

(3) 各 RTU 拥有的权限很少,只是简单接受上级下发的控制命令然后去执行。在上级无动作策略下发的情况下,自己不能根据实际情况进行动作,以使电压无功恢复正常。

2 分层分布式电压无功协调控制系统

2.1 概述

我国电力系统的运行调度在结构上已经分层,有电网调度、省网调度、地区电网调度和县网调度 4 级。其分工大致为:网调管辖若干个省调及大型电厂和 500kV 变电站;省调管辖若干个地调及中小型电厂和 220kV 变电站;地调对其所管辖的地区电网进行安全监控,管辖若干个监控中心和 110kV 以下的变电站;县调主要监控 110kV 及以下农村电网的运行,相当于地调的一个监控中心。在以上 4 级调度的基础上再加上国家调度级就成为 5 级调度制度。

根据现有电力系统的运行调度和电压无功控制的特点和存在的问题^[11-14],采用 Agent 的思想,将处于各级调度中心的操作管理装置及现场控制级的各种无功控制设备看作是自治 Agent,本文提出了一种针对电力系统电压无功控制的分层分布协调式 MAS 组织结构^[15],其主要思想是存在提供全局信息的机构,但控制上实现分布协调,即在组织结构上分层,控制上实现分布协调。

考虑到同一区域电压无功控制设备的共同目标是维护区域电压的稳定，为减少通信和管理方便，按照区域划分，将同一区域的 Agent 组成一个区，即组成一个协调控制级，由区域 Agent(也可称为协调 Agent)管理区域内的 Agent 信息。不同区域的 Agent 通过本区域内的区域 Agent 与其它域中的 Agent 通信和交互。基于这种思想设计针对电压无功控制的 MAS，就会形成一种分层分布式协调的组织结构，如图 3 所示。

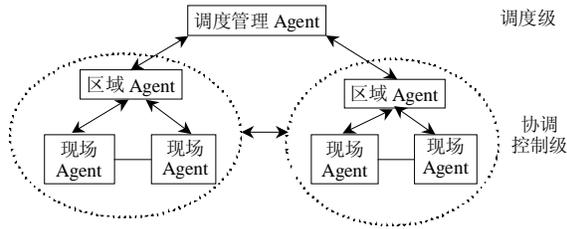


图 3 分层分布式结构

Fig. 3 The hierarchical and distributed structure

图 3 所示的 MAS 结构中，现场 Agent 由现场控制级设备、控制发电机的自动电压调节器(automatic voltage regulators, AVR)以及其它无功源的控制装置组成。区域 Agent 作为一种协调 Agent，负责管理同一区域内(即同一协调控制级内)具有相同目标的现场 Agent 的信息以及本区域内的无功优化。调度管理 Agent 处于分层结构的上层，是提供全局信息的机构，采用一定的优化算法对所管辖电网的电压进行无功优化管理，校正各区域 Agent 的无功优化结果。与图 1 相比，将协调控制级又分为 2 层，增加了区域 Agent，以真正实现管理和控制的分散自治，并取消了前置机装置，代之以全网络的方式进行数据通信。

2.2 电压协调控制系统的组成功能

由图 3 可以看出，调度管理 Agent 和区域 Agent 之间、区域 Agent 与现场 Agent 之间具有层次关系。但各个调度级 Agent 之间、区域 Agent 之间、现场 Agent 之间则是完全平等的关系。

(1) 现场 Agent。

现场 Agent 由现场控制级设备(如各种无功源的控制装置)及控制发电机的 AVR 等组成，与图 1 不同的是它具有更多的自治性，可动态加入或退出区域 Agent，当某一电压无功控制设备发生故障或新增加电压无功控制设备时，在所属的区域 Agent 中注销或登记。同时，一定数目的现场 Agent 可通过聚集形成一个新的协调控制级。

Agent 的标志是符号名(symbolic name)，由于一个区域中有多个现场 Agent，为加以区分，每个 Agent 都有唯一的符号名来标志自己以便于通信和合作。区域中的所有现场 Agent 都具有不同的符号名，从而可基于符号名来通信和交互。

由于一个现场 Agent 可完成相邻区域的电压调节任务，因此采用符号名作为一个现场 Agent 的唯一标志并基于符号名来获得通信地址，当区域 Agent 对现场 Agent 进行调节时，现场 Agent 先校验自己的能力，如果超出自己的能力范围则拒绝接受。

寻址和通信过程如下：由于每个现场 Agent 都有独立的符号名和直接通信的能力，一个区域中的现场 Agent 可通过区域 Agent 与其它区域中的现场 Agent 进行交互和合作。如果现场 Agent 需要其它 Agent 提供无功支持，则先向区域 Agent 上报自己的信息，区域 Agent 查询其它现场 Agent 的能力(是否可提供无功支持)，选择合适的候选人，并向其发送协助调压的请求。如果没有合适的候选人，则区域 Agent 向调度管理 Agent 提出查询，或采用广播的形式进行交互。图 4 说明了现场 Agent A 通过区域 Agent 请求 B 协助调压的过程。其中：①表示 B 在区域 Agent 处登记了自身信息；②表示 A 向区域 Agent 上报自己的信息，寻求协助调压；③表示区域 Agent 根据查询到的 B 的通信地址向 B 发出请求信息；④表示 B 收到区域 Agent 的消息后做出应答；⑤表示如果 B 可以调压，可协助 A 进行调压。

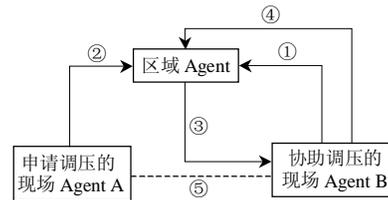


图 4 寻址和通信过程

Fig. 4 Process of finding address and communication

现场 Agent 的功能有：①采集现场电网运行数据，对数据做必要的转化，如采集变压器二次侧的电压、流过变压器或母线的有功和无功功率、电容器的投切状态以及各种保护闭锁的信息等电压无功控制所需的运行数据；②接受并执行区域 Agent 下达的协调命令；③对现场电压无功控制设备进行直接的检测、诊断及调压控制；④完成与区域 Agent 的数据通信；⑤在自身能力范围内接受其它现场

Agent 的调压请求, 协助完成调压任务。

本文定义现场 Agent 是自私的, 即它总是先保证自己所属区域的调压任务。

(2) 区域 Agent。

将同一电压等级或同一区域具有相同调压任务的现场 Agent 分成不同的区域, 即形成不同的协调控制级。在每个协调控制级中, 由一个区域 Agent 实现对它们的协调与管理。将现场 Agent 按区域分类有以下优点:

1) 将动态复杂的现场 Agent 组成区域, 通过区域 Agent 和调度管理 Agent 交互, 降低了管理的复杂性。

2) 采用区域的方法也符合电力系统电压无功控制的特点, 由于无功需要就地平衡, 同一电压等级或同一区域的电压无功控制设备通常由变电站或县调来控制和管理, 多个变电站或县调再聚集由上一级地调来管理和控制。

这里的区域是动态的, 不同的现场 Agent 可以动态加入或退出协调控制级。各区域 Agent 在调度管理 Agent 上登记自己的信息, 包括自己的符号名、网络标志及边界节点信息等。当一个区域 Agent 需要与其它区域 Agent 进行交互时, 通过调度管理 Agent 查询其它区域 Agent 的信息, 或通过广播的形式查找合适的合作伙伴。其通信和查询方式与图 4 相似。

区域 Agent 完成的主要功能有: ①与调度级 Agent、现场 Agent 进行通信; ②接受来自现场 Agent 的数据, 下发命令给现场 Agent; ③接受并执行调度级 Agent 下达的命令; ④校验现场 Agent 动作的执行情况; ⑤与现场 Agent 相协调, 一起形成域内无功优化策略; ⑥负责区域内现场 Agent 的信息管理; ⑦通过一定的无功优化算法对所辖区的电压无功进行优化管理。

区域 Agent 的引入使得管理级的管理和控制任务下放, 将原来处于调度级的电压无功控制中心要完成的任务下放到各区域 Agent 中去, 由它们分别完成。各区域 Agent 在完成所属区域的调压和优化任务时, 并不只是考虑了本区域的信息, 而是在考虑各个区域之间相互联系的基础上实现的, 因此真正做到了电压无功的分散协调控制。

(3) 调度管理 Agent。

基于 ANS(Agent name service)和 Directory

Agent^[4]的思想建立调度管理 Agent, Directory Agent 是一种系统 Agent, 包含整个环境的知识, 区域 Agent 通过它来获得熟人的模型(外部世界模型); ANS 是一种基于黄页技术(yellow page)的特殊的信息 Agent, 主要提供 Agent 的名字查询、地址的解析信息等多种服务。调度管理 Agent 主要建立在 ANS 的基础上, 是通过对其功能进行扩充而建立的一种特殊的 Agent, 可在 ANS 原有功能的基础上增加记录、管理、优化计算等功能。各区域 Agent 在调度管理 Agent 上登记自己的信息, 以便其它区域 Agent 在需要时得到自己的信息, 进行直接的交互和通信。

由于调度管理级 Agent 所要完成的实时监控电压无功的功能大部分已经分散到区域 Agent 和现场 Agent 中, 因此, 调度管理级 Agent 的任务大大减轻, 它完成的主要功能有: ①主要运行数据的显示、存储、打印; ②各种记录的查询, 各种图形、报表的生产及打印; ③提供人机接口, 调度人员能下发控制命令, 通过一定的优化算法对所管辖电网的电压无功进行优化管理, 并校正各区域 Agent 的无功优化结果; ④负责辖区内各区域 Agent 的信息管理, 即区域 Agent 的添加、删除和协调工作。

2.3 Agent 域

本文所提出的面向电力系统电压无功控制的分层分布式 MAS 组织结构与 Internet 中域的概念很相似。Internet 中的一个域由一个域名服务器和多个独立的主机组成^[16], 域名服务器负责将这些主机组织在一起, 完成登记、名字映射、地址解析等功能并负责与其它域的联系。本文将调度管理 Agent 及登记在它上面的多个区域 Agent 称为一个 Agent 域, 因此可将 Internet 中域的实现和管理方法应用于 Agent 域。Internet 的域管理技术中有一种分布式域管理技术, 可将多个小的域组织成一个大的域, 同样多个 Agent 域也可采用同样的思想和技术组成一个更大的分布式 Agent 域结构。在电力系统中, 一个地区的电压无功控制系统(地区调度)可看成是一个 Agent 域, 不同地区的电压无功控制系统可看作是不同的 Agent 域, 这些 Agent 域可聚集成一个更大的属于上一级无功控制系统管理的 Agent 域(比如省调)。

Agent 域的概念和技术保证了本文所提出的面向电力系统电压无功控制的分层分布式 MAS 组织结构的可实现性和可扩展性。

2.4 组织结构的特点

与现有电压无功控制系统的结构相比, 采用分层分布协调式 MAS 结构实现对电压无功的协调控制具有以下优点:

(1) 采用分层分布网络化的结构, 真正实现了管理和控制的协调分散化。将原来由管理级完成的任务分散到各个区域 Agent 甚至是现场 Agent 中完成。各区域 Agent 通过点对点的通信直接将数据传给管理 Agent。管理 Agent 负责管理各区域 Agent 的信息, 同时根据各区域 Agent 上传的数据进行整个网络的无功优化, 以对各区域 Agent 进行协调。

(2) 加强了整个系统的安全性。当管理 Agent 或某条通信线路出现故障时, 区域 Agent 及现场 Agent 根据自己的能力自行进行处理。

(3) 整个系统具有更高的可靠性。由于整个系统的控制任务和无功优化计算任务已经由各个区域 Agent 来完成, 因此将风险分散化, 使系统具有更高的可靠性。

(4) 采用 Agent 域的概念和技术保证了系统的开发性和可扩展性。各管理 Agent、区域 Agent 之间可通过点对点的通信方式可靠地交换数据, 并基于 ACL(Agent communication language)和相应的协作方法进行交互, 对系统的管理和维护比较方便, 当增加新的现场 Agent 或新的区域 Agent 时, 只需将其网络标识和设备信息在相应的区域 Agent 或管理 Agent 处登记, 并接入相应的通信网络就可轻松实现扩容。

(5) 现场控制级设备采用 Agent 技术, 增加了现场设备的自治性。因为它可根据自己检测到的信息对一些紧急情况做出及时的处理, 同时对于来自区域 Agent 的命令, 也可根据自己的利益做出合适的反应(接受或拒绝)。

(6) 从所提出的组织结构中的各种 Agent 的功能特点来看, 结构中管理 Agent 与区域 Agent 及区域 Agent 与现场 Agent 之间存在比较弱的控制与被控制关系, 更多的是一种协调管理的作用, 各区域 Agent 之间可通过直接的通信和交互来完成问题的求解。不同区域内的现场 Agent 可通过本区域内的区域 Agent 与其它区域中的现场 Agent 通信和交互。

综上所述, 所提出的分层分布协调式多 Agent 控制系统对于电压无功控制来说真正实现了分散协调控制。

3 结论

针对电力系统电压无功控制系统的优点, 本文提出了一种分层分布协调式 MAS 组织结构, 这种结构共分上下 2 层, 以网络化的方式进行数据通信, 其主要思想是存在提供全局信息的机构, 在组织结构上分层, 控制上实现分布协调。分层结构中处于下层的是协调控制级, 由区域 Agent 和现场 Agent 构成。现场 Agent 由现场控制级设备、控制发电机的 AVR 及其它无功源的控制装置组成。区域 Agent 作为一种协调 Agent, 负责管理同一区域具有相同目标的现场 Agent 的信息及本区域内的无功优化管理。调度管理级处于分层结构的上层, 提供全局信息, 与区域 Agent 一起生成电压无功协调控制策略, 并采用一定的优化算法对所管辖电网的电压进行无功优化管理。将基于 Internet 域的 Agent 域的概念用于电压无功控制系统中, 这种结构的优点在于适合电力系统的实际情况和发展要求, 具有较强的扩展性, 可实现电力系统这样一个复杂分散的巨系统的整体协调控制。

参考文献

- [1] 郭红霞, 吴捷, 刘永强, 等. 基于强化学习算法的静止同步补偿电压控制器[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 9-13.
Guo Hongxia, Wu Jie, Liu Yongqiang, et al. Application of reinforcement learning to STATCOM controller[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 9-13(in Chinese).
- [2] 盛戈皞, 江秀臣, 范习辉, 等. 基于多 Agent 的二级电压控制系统的实现及性能分析[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 42-48.
Sheng Gehao, Jiang Xiuchen, Fan Xihui, et al. Implementation and performance analysis of multi-Agent based secondary voltage control system[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 42-48(in Chinese).
- [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(24): 28-32.
Sun Yuanzhang, Yao Xiaoyin, Liu Feng. The impact of secondary voltage control on power system stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(24): 28-32(in Chinese).
- [4] 曹立霞, 厉吉文, 程新功, 等. 基于多 Agent 技术的分布式电压无功优化控制系统[J]. 电网技术, 2004, 28(7): 30-33.
Cao Lixia, Li Jiwen, Cheng Xingong, et al. Distributed optimal voltage/reactive power control system based on multi-agent system[J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 30-33(in Chinese).
- [5] 傅书遒. IEEE PES 2005 年会控制中心与 EMS 部分综述[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 11-14.
Fu Shutu. Summary and comments on IEEE PES 2005 general meeting: electricity market and EMS part[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 11-14(in Chinese).
- [6] 易俊, 周孝信. 电力系统广域保护与控制综述[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 7-12.

- Yi Jun, Zhou Xiaoxin. A survey on power system wide-area protection and control[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 7-12(in Chinese).
- [7] 蔡运清, 王磊, Kip Morison, 等. 广域保护(稳控)技术的现状及发展[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 20-25.
Jin Y Cai, Wang Lei, Kip Morison, et al. Current status and prospect of wide-area protection (dynamic stability control) technologies [J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 20-25(in Chinese).
- [8] Michael W, Nicholas R J. Intelligent agents: theory and practice [J]. Knowledge Engineering Review, 1995, 10(2): 115-152.
- [9] Xie Z X, Manimaran G, Vital V, et al. An information architecture for future power systems and its reliability analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3): 857-863.
- [10] 李国柱. 地区电网多变电站电压无功协调控制系统结构和策略的研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [11] 孙莹. 集中式无人值班变电站微机监控系统[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(3): 64-66.
Sun Ying. A centralized microcomputer protection and supervisory control system for unmanned substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(3): 64-66(in Chinese).
- [12] 曹茂升. 500 kV 变电站自动化若干问题的探讨[J]. 电网技术, 1998, 22(8): 38-41.
Cao Maosheng. Some problems in automation of 500 kV substation [J]. Power System Technology, 1998, 22(8): 38-41(in Chinese).
- [13] 蒋年德, 魏育成. 变电站综合自动化系统体系结构研究[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 48-51.
Jiang Niande, Wei Yucheng. Study on structure of integrated substation automation system[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 48-51(in Chinese).
- [14] 刘翔宇, 杨仁刚. 基于 GPRS 的负控终端远程 Web 监控系统[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 76-79.
Liu Xiangyu, Yang Rengang. A remote Web monitoring system for load control terminal based on general packet radio service network [J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 76-79(in Chinese).
- [15] 郭红霞. MAS 及其在电力系统中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
- [16] 郭锐锋. 多 Agent 系统及其在制作系统中的应用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2000.

收稿日期: 2006-07-13.

作者简介:

郭红霞(1971—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为多 Agent 系统、强化学习及其在电力系统中的应用, E-mail: guohx@scut.edu.cn;

吴捷(1937—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化、自组织和自适应控制。

(责任编辑 沈杰)

(上接 15 页 continued from page 15)

- [3] 舒印彪. 1000 kV 交流特高压输电技术的研究与应用[J]. 电网技术, 2005, 29(19): T1-T6.
- [4] 张运洲. 对我国特高压输电规划中几个问题的探讨[J]. 电网技术, 2005, 29(19): T11-T14.
- [5] 舒印彪, 刘泽洪, 袁骏, 等. 2005 年国家电网公司特高压输电论证工作综述[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 1-12.
Shu Yinbiao, Liu Zehong, Yuan Jun, et al. A survey on demonstration of UHV power transmission by State Grid Corporation of China in the year of 2005[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 1-12(in Chinese).
- [6] 舒印彪. 中国直流输电的现状与展望[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 1-2, 20.
Shu Yinbiao. Present status and prospect of HVDC transmission in China[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 1-2, 20(in Chinese).
- [7] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.
Yuan Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3(in Chinese).
- [8] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等. ± 800 kV 6400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.
Shu Yinbiao, Liu Zehong, Gao Liying, et al. A preliminary exploration for design of ± 800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6400 MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8(in Chinese).
- [9] 常浩, 樊纪超. 特高压直流输电系统成套设计及其国产化[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 1-5.
Chang Hao, Fan Jichao. System design and its localization of UHVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 1-5(in Chinese).
- [10] 常浩. 我国高压直流输电工程国产化回顾及现状[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 3-4, 36.
Chang Hao. Situation & overview of HVDC system localization of China[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 3-4, 36(in Chinese).
- [11] 石岩. 灵宝背靠背换流站极控系统的实现[J]. 高电压技术, 2005, 31(2): 39-41.
Shi Yan. The implementation of the pole control system for Lingbao BtoB HVDC project [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2): 39-41 (in Chinese).
- [12] 石岩. 背靠背换流站极控系统的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 37-39.
Shi Yan. The study for BtoB HVDC pole control system[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 37-39 (in Chinese).
- [13] 国家电网公司建设运行部. 西北-华中联网灵宝背靠背直流工程总结[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

收稿日期: 2006-12-28.

作者简介:

石岩(1963—), 男, 高级工程师, 从事高压直流输电工程咨询、成套设计和电力系统实时仿真研究工作, E-mail: yanshi@sgcc.com.cn;

韩伟(1969—), 女, 高级工程师, 从事直流输电系统控制保护相关研究及工程咨询工作;

张民(1974—), 男, 硕士, 从事直流输电系统控制保护相关研究工作;

王庆(1980—), 男, 硕士, 从事直流输电系统控制保护相关研究工作。

(责任编辑 马晓华)