

智能变电站关键技术及其构建方式的探讨

曹楠, 李刚, 王冬青

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 介绍了智能变电站的定义及特点, 从硬件集成、软件构件、信息管理、标准融合、分布式能源接入等方面分析了智能变电站所涉及的关键技术, 阐述了不同领域的先进技术对智能变电站建设的技术渗透。探讨了智能变电站的体系架构、智能设备、保护控制策略、测试仿真和信息安全策略等方面的问题, 总结了智能变电站实现的主要技术手段, 并对智能变电站的应用前景进行了展望。

关键词: 智能变电站; 智能控制; 信息安全; 分布式电源; 构件

Key technologies and construction methods of smart substation

CAO Nan, LI Gang, WANG Dong-qing

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

Abstract: The paper introduces the definition and characteristics of smart substation. The key technologies in different domains permeated in smart substation are described from the aspects of hardware integration, software components, information management, standards utilization and distributed energy access, and so on. Moreover, the paper discusses the architectures, intelligent electronic devices, protection control strategies, test simulation, information security, etc. and summarizes the major technical methods on the realization of smart substation. Finally, it prospects the application of the smart substation.

Key words: smart substation; smart control; information security; distributional power source; component

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0063-06

0 引言

随着电力需求的高度增长, 数字经济的发展, 环境监管的严格以及各国能源政策的调整, 电网与电力市场、客户之间的关系越来越紧密。客户对电能质量要求逐步提高, 分布式能源不断增加, 传统的电力网络已经难以满足这些发展要求。为了满足电力供应的节能、环保、高效、可靠、稳定及可持续发展的要求, 智能电网的建设势在必行。

作为智能电网中的重要节点, 智能变电站担负了变电设备状态和电网运行数据、信息的实时采集和发布任务, 同时支撑电网实时控制、智能调节和各类高级应用, 实现变电站与调度、相邻变电站、电源、用户之间的协同互动^[1]。智能变电站不但为电网的安全稳定运行提供了数据分析基础, 也为未来智能电网实现其高效、自愈等功能提供了重要的技术支持。本文就智能变电站的主要特征及可能应用到的关键技术进行探讨, 并研究了智能变电站实现的主要技术手段。

1 智能变电站的特征

根据《智能变电站技术导则》^[1]的定义, 智能变电站是采用先进、可靠、集成、低碳、环保的设备组合而成, 以全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化为基本要求, 自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能, 并可根据需要支持电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策、协同互动等高级应用功能的变电站。

智能变电站的特点首先是具有高度的可靠性, 高度的可靠性是智能变电站应用于智能电网的最基本、最重要的要求^[2]。高度的可靠性不仅意味着站内设备和变电站本身具有高可靠性, 而且要求变电站本身具有自诊断和自治功能, 能够对设备故障提早预防、预警, 并在故障发生的第一时间内对其做出快速反应, 将设备故障带来的供电损失降低到最小程度。

其次, 智能变电站具有很强的交互性^[3]。智能变电站必须向智能电网提供可靠、充分、准确、实

时、安全的信息。为了满足智能电网运行、控制的要求,智能变电站所采集的各种信息不仅要求能够实现站内共享,而且要求实现与电网内其他高级应用系统相关对象之间的互动,为各级电网的安全稳定经济运行提供基本信息保障。

第三,智能变电站具有高集成度的特点^[3]。智能变电站将现代通信技术、现代网络技术、计算机技术、传感测量技术、控制技术、电力电子技术等诸多先进技术和原有的变电站技术进行高度的融合,并且兼容了微网和虚拟电厂技术,简化了变电站的数据采集模式,形成了统一的电网信息支撑平台,从而为实现电网的实时控制、智能调节、在线分析决策等各类高级应用提供了信息支持。

最后,智能变电站还应具有低碳、环保的特点。智能变电站内部使用光纤代替了传统的电缆接线;集成度高且功耗低的电子元件广泛应用于变电站内各种电子设备;采用电子式互感器代替粗重的传统充油式互感器。这些不但节省了资源消耗,降低了变电站的建设成本,而且减少了变电站内部的电磁污染、噪声、辐射和电磁干扰,净化了变电站内部的电磁环境,优化了变电站的性能,使智能变电站更加符合环境保护的要求。

2 智能变电站关键技术

与已有的变电站形态相比,智能化变电站可以将先进的现代科学技术融入变电站自动化系统的应用中,通过对变电站内各种实时状态信息的获取和共享,高度集成了变电站内的各种功能,实现各种功能的灵活分布和重构。智能变电站中所应用到的各种先进技术不仅改变了变电站的传统架构,加强了变电站与电网内其他设备之间的信息交互共享,而且更好地实现了分层分布的控制管理方式,优化了站内的资源,进一步提高了变电站运行的可靠性和安全性。

现有的变电站技术并不能完全满足实现智能变电站的要求,各种技术之间的专业壁垒严重阻碍了智能变电站关键技术的发展。必须打破专业上的限制,才能更好地深入了解智能变电站关键技术的内涵并扩展其外延,以实现智能变电站设备信息数字化、功能集成化、结构紧凑化、检修状态化的发展要求。

2.1 硬件的集成技术

传统变电站中信息的采集和处理过程是通过中央处理器与外围芯片或设备的配合来完成的,大量数据计算和逻辑分析过程以及一些高级应用功能的实现都集中于中央处理器中,中央处理器性能的高

低决定了各种功能实现的速度与质量,这里使用的中央处理器可以是DSP (Digital Signal Processing), ARM (Advanced RISC Machines) 或CPU (Central Processing Unit) 等。这种设计的弊端在于一方面中央处理器本身集成的资源有限,不能满足智能变电站不断增加的实时处理信息的需要,从而成为智能变电站技术发展的瓶颈;另一方面,处理器本身所集成的很多其他的硬件资源因不能满足智能变电站的需要而被闲置,造成了资源浪费。另外,嵌入式系统中操作系统的删减是一项很繁琐的工作,而操作系统的复杂性也增加了系统测试的难度和出错的概率。

随着现代电子学的发展,硬件描述语言的出现使得硬件系统的设计表现出模型化、集成化、自动化的特点。这些特点使得硬件设计实现了真正的针对功能的模块化设计,可以将某些固定的逻辑处理过程在智能设备内部进行固化,将原来由某些软件实现的功能转化为硬件实现。这种设计既保证了逻辑处理的实时性、可靠性和准确性,解决了信息传输时的瓶颈问题;又节省了硬件资源的开销,提高了设备的集成度;另外,模块化的设计也便于智能设备的检修更换和升级。

硬件的集成技术在智能变电站内的应用将会打破传统变电站设备的硬件设计理念,改变变电站硬件设备的布置格局,从而翻开变电站硬件设备设计新的一页。

2.2 软件的构件技术

智能变电站内的软件系统不仅能够实现传统的测控、信息管理等功能,而且还要将PMU (相量测量单元)、录波等功能进行集成,实现站内状态估计、区域集控、在线状态监测、远程维护、电能质量评估以及智能管理等高级功能,并且能够根据工程配置文件生成系统工程数据,实现变电站系统和设备系统模型的自动重构等功能。要实现上述功能,软件的构件技术的应用必不可少。

软件构件是指具有一定功能、能够独立工作或同其他构件装配起来协调工作的程序体。软件构件技术的实质是在不同粒度上对一组代码或类等进行组合和封装,以完成一个或多个功能的特定服务,进而为用户提供接口。构件技术的核心思想是分而治之,构件技术将系统的抽象程度提高到一个比面向对象技术更高的层次。软件复用技术是实现构件技术的重要手段,如何提取可复用构件以及如何组装成系统并能实现互操作是构件技术所面临的关键问题^[4]。

软件构件技术是灵活、弹性、实时的软件系统

实现的重要基础,也是嵌入式系统软件设计实现功能集成的重要手段。软件构件技术的成熟应用必须依赖于良好的软件结构体系。目前,要实现各种高级应用功能在智能变电站内的有效集成以及灵活配置和重构,在软件技术方面所要解决的问题还有很多。如:软件体系结构,构件模型,构件接口,构件粒度,构件的获取、管理、组装与部署等诸多问题。软件构件技术在智能变电站中的应用反映在嵌入式软件系统设计、多代理技术等相关技术的应用中。

软件构件技术在智能变电站内的应用不仅可以减少智能变电站在功能软件的集成和开发活动中大量的重复性劳动,提高变电站软件的效率和灵活度,降低开发成本,缩短开发周期;而且能够加强系统功能间的互操作性,使系统功能在变电站内能够灵活分布,从而提高了系统的可靠性和自愈性。

2.3 信息的管理存储技术

智能变电站采用具有自恢复能力的高速局域网构建全站统一的数字化信息平台^[5],信息平台应具有自愈性故障恢复机制,有效保证智能变电站采集信息的服务质量。统一的数字化信息平台的构建体现了智能变电站信息集中管理的设计思想,信息的集中管理不仅为实现各种信息模型的集成、转换、调用和冗余等功能提供了方便,而且为一些简单的调度功能向变电站系统的下放提供了基础信息支撑和技术实现支撑。

高度集成的信息系统和统一的数字化信息平台不仅为智能变电站提供了很好的扩展性与经济性,也为信息资源的共享、动态扩展、分配提供了平台。但是,海量信息的采集也为信息的实时传输带来了困难。以太网的发展远未能满足智能变电站对海量信息的通信需要,因此,信息分优先级传输与信息就地存储显得尤为重要。信息优先级可以保证关键信息实时、准确、可靠地传输,而非关键信息的信息就地存储不但减少了传输网络负荷程度,而且可以为系统决策提供充分的信息依据。虚拟化的技术可以将变电站的底层硬件和网络设备虚拟成一个共享的资源库,就地存储的信息可以在库内按需分配调用。

信息优先级传输与信息就地存储技术的本质是将信息按不同粒度细化,以实现信息的分层分布调用,从而保证信息传输的准确性与可靠性。另一方面,随着智能电网的建设和发展,电力系统信息安全与防护成为一重要课题被提上日程。信息的分层管理可对信息进行分析、评估,并依据信息的不等级设计信息安全策略,从而提高了网络信息系统的安全性,最大限度地保证各级电网的信息安全和

信息权限。

2.4 标准的融合

智能电网内信息的数量和种类很多,采集渠道复杂。由于智能电网对于信息采集的设计理念的不同、算法的不同、模型的不同,导致网络内的信息差异巨大,难以充分交互利用。为了实现与智能电网的无缝通信连接,智能变电站内各种信息模型之间的转换与映射不可避免,这里就要进行标准融合。

信息模型的标准化、规范化和体系化是标准融合技术的基础。要实现信息模型的标准化和规范化,首先要有开放的通信架构,使元件之间的信息能够进行网络化的通信;其次要进一步细化信息模型,对模型的扩充及扩充原则做出标准化规定;最后要统一技术标准,形成一个多功能的多规约库,以实现各种应用系统之间的无缝通信。

目前,已发布的标准如IEC61850、IEC61970、IEC61968等在一定程度上促进了变电站信息标准化、规范化的进程,促进了与电网内各种应用系统之间的通信应用^[3]。其中,IEC61850是全面规范智能化变电站自动化通信体系的最新国际电工委员会标准,是变电站内部的统一规约。最新颁布的标准内不仅涉及到变电站内部的通信模型,而且其信息模型的覆盖范围已经扩展至变电站以外的所有公用电力应用领域,向成为电力自动化的通信网络系统内的通用标准又迈进了更大的一步^[6-7]。

2.5 分布式电源的保护控制技术

分布式电源的接入提高了智能电网的灵活性、效率和安全性,改变了配电系统单向潮流的特点,使传统的单电源辐射网络变成了一个多源网络。这使得智能变电站内保护设备之间建立起来的配合关系被打破,保护的動作行为和動作性能都将会受到较大的影响。针对大容量的分布式电源接入智能电网的保护算法的研究也是智能变电站继电保护的关键内容。

分布式能源作为一个独立的整体模块,既可以孤网运行,也可以在大电网上并网运行。分布式能源在接入系统时对电网的频率、无功以及电压稳定的影响是不容忽视的^[8]。因此,如何保证在任何工况下继电保护系统都能对分布式电源故障做出及时响应,同时在并网运行的情况下继电保护系统还具有快速感知大电网故障的能力并保证保护的选择性、快速性、灵敏性和可靠性,这是智能变电站继电保护的难点课题。

分布式能源的保护系统完全不同于常规变电站的保护控制策略。分布式能源的保护策略主要是针对分布式电源双向潮流流通、电源内部电力电子设

备大量引入的特点,通过阻抗前馈和负荷模型反馈等算法来制定的保护控制策略。保护策略包括全线速动保护、低压保护、反孤岛、高频切机和低频减载等特殊保护功能,保护策略制定的关键在于保护定值与主网架保护定值之间的配合。分布式能源的控制策略制定的主要问题在于并网控制,其并网后会改变主网架的供电格局,使系统的不稳定因素增加。因此,必须采用自动同期控制以及重合闸控制配合的控制方式。

3 智能变电站的构建

3.1 体系架构

与传统变电站的体系架构相比,智能变电站的体系架构结构紧凑、功能完善,更加符合变电站技术今后的发展趋势。

智能变电站将传统一次、二次设备进行融合,由高压设备和智能组件构成其设备层,完成变电站内的测量、控制、保护、检测、计量等相关功能^[1]。设备层的设备采用高度集成的模块化硬件设计方式,很大程度上改变了变电站内信息采集、共享的模式。分散控制的设计思路保证了设备内各模块相互之间具有独立性,既可以分工合作,也可以独立完成一项功能,从而从最大程度上保证了硬件系统的可靠性。

智能变电站的系统层不仅担负着协同、控制和监视着变电站内多种设备及与智能电网的通信任务,而且还具有站域控制、智能告警、分析决策等高级应用功能^[1]。系统层采用软件构件技术,使得各种功能可以根据变电站的实际规模进行灵活配置,并可进行功能的重新分配和重构。

智能变电站紧凑的系统架构使得变电站在电气量的数据采集及传输环节、变电站设备之间信息的交互模式、变电站信息冗余方式、变电站内各种功能的分布合理性以及功能集成等方面,均发生了巨大的变化。通过硬件集成和组件技术以及嵌入式系统软件构件技术的应用,智能变电站构造了灵活、安全、可靠的变电站功能体系,该体系的应用提高了电站自动化系统整体数字化、信息化的程度,实现了变电站与智能电网之间的无缝通信,加强了站内自动化设备之间的集成应用和自身协调的能力,简化了系统的维护和配置复杂度,节省了工程实施的开支,使变电站自动化系统进入了一个全新的发展阶段。

3.2 智能设备

智能设备的概念是为了适应智能电网建设的需求而提出的,是满足智能电网一体化要求的技术基

础。智能设备取消了传统一次、二次设备的划分,不但对传统变电站过程层和间隔层设备所具有的部分功能进行了集成,而且还能够利用实时状态监测手段、可靠的评价手段和寿命的预测手段在线判断智能设备的运行状态,根据分析诊断结果识别故障的早期征兆,并视情况对其进行在线处理维修等。

高压设备与相关智能组件的有机结合构成了智能设备。这种有机结合指的是多个高压设备与外置或内嵌智能组件的多种组合方式。智能组件是一个相对于变电站功能的灵活概念,可以由一个物理组件完成多个变电站功能,也可以由多个物理组件分散配合完成一个变电站功能。

智能设备的设计和应用使得变电站内一次设备的运行状态可被实时地监视和评估,为科学的调度系统提供了可靠的依据;对一次设备故障类型及其寿命的快速有效的判断和评估为在线指导运行和检修提供了技术保证。智能设备的投入还可以降低变电站运行的管理成本,减少新生隐患产生的几率,以增强电力系统运行的可靠性。智能设备内部功能配合的灵活性也满足了大规模分布式电源并网运行的需要。

3.3 保护控制策略

传统的继电保护以“事先整定、实时动作、定期检验”为特征,这种保护控制策略越来越难以满足参数状态在不断变化的智能电网的要求。尤其是分布式能源的接入,动态改变了电力系统的运行方式和运行状态,传统保护控制方式很难适应这种多变的运行状态。为了解决这些问题,智能变电站必需采用开放的保护控制策略。

开放的保护控制策略指的是保护控制策略不再事先固定,而是根据一定的原则随着电网运行参数的变化,动态调整保护控制策略,以满足智能电网在不同状态下的安全运行需求。开放的保护控制策略的制定需要针对不同粒度的控制系统来完成,策略的制定和执行客观上在智能变电站内部形成了一个分层分布式的控制系统。分层分布式的控制系统与分层分布的信息系统相对应,在不同层次上控制协调变电站系统运行,提高对变电站系统内故障与扰动的快速反应和决策能力,分散由控制所带来的系统风险。

开放的保护控制策略包括在线自适应整定定值;在线计算与保护性能有关的系统参数和相关指数;实时判断系统运行状态,调整保护动作方式;在信息共享的基础上自动协调区域内继电保护控制策略,保证系统内保护定值相互配置关系的合理性,保证智能电网运行的可靠性;在线校核系统内的实

时数据等。

高度的信息共享和统一的数字信息平台为开放的保护控制策略提供了制定和实施的依据, 现代控制理论的发展与先进的网络计算方法的应用为开放的保护控制策略的制定和实施提供了理论背景^[9]。开放的保护控制策略的制定和研究应是未来智能变电站提高其自动化水平的关键, 是智能变电站实现其本身自愈性的关键技术, 也是智能电网实现自愈性的控制保证。

3.4 测试仿真

智能变电站内的大多数自动化功能都需要通过网络传输的方式来实现, 这就对变电站内的调试和运行检测设备提出了新要求, 需要研究新的试验方式、手段, 制定智能变电站技术相关试验及检测标准等。智能变电站的测试活动贯穿于变电站开发的整个生命周期内。

智能变电站的测试包括系统测试和设备测试两个方面, 系统测试主要是对监控系统、通信网络系统、对时系统、远动系统、保护信息管理系统、电能信息管理系统、网络记录分析系统、不间断电源系统等子系统的测试; 设备测试主要是对测量、控制、保护、检测、计量等相关功能的测试^[10]。

为了准确把握智能变电站的运行、维护需求, 需要建立有效的检测和评估体系。智能变电站的测试活动是面向功能的一种测试, 测试系统不仅包括调试工具, 还包括相应的配置文件以及与之联系的软件辅助系统, 以便于测试的过程和结果能够被记录和分析。智能变电站的测试需要从设备单元、系统集成、总体性能三个方面综合考虑, 进而对智能变电站做出有效的整体评价。

智能变电站的测试过程可以分为单元测试、集成测试和系统测试三个步骤来完成。单元测试主要是测试系统内最基本的功能单元的特性是否满足要求, 以及通信接口模块之间的信息交互是否正常。集成测试也就是一致性测试, 主要关注的是物理设备作为系统构成单元其通信行为是否符合标准中定义的互操作性规格要求, 以及按标准设计的变电站其通信网络能否满足实现变电站自动化功能所期望的性能要求。系统测试即互操作性测试, 关注的是设备间是否可以用通用的协议通过公共的总线相连, 单一设备是否可理解其他设备提供的信息内容, 以及各设备是否可以组合起来协调完成变电站的自动化功能。系统测试验证了被测试设备是否具有互操作能力, 以及设备集成到变电站后是否真正实现

了无缝连接^[11-12]。

3.5 信息安全策略

信息安全问题是智能电网安全的核心问题之一, 智能变电站作为智能电网的重要组成部分, 其自身的信息安全与防护面临着来自多方面的严峻考验。对智能变电站内部以及其与电网内交互信息进行全面、系统的安全防护, 利用有效的信息安全防护方法和策略消除安全隐患, 合理规避信息安全风险, 是保证智能变电站乃至智能电网安全稳定运行的关键问题之一。

智能变电站内部大量应用网络技术传输信息, 其信息安全防御的策略的制定是一个系统性的问题, 仅凭借单一的防御手段是不能有效解决问题的。因此, 智能变电站需要构建一个以评估为基础, 以策略为核心, 以防护、监测、响应和恢复为技术手段和工具, 以安全管理为落实手段的动态的多层次的网络安全架构, 用来确保变电站内信息以及各种资源的实时性、可靠性、保密性、完整性、可用性等。

随着智能变电站内信息集成度的进一步提高, 实现对变电站网络通信质量的实时监控和维护, 并对网络内传输的信息进行保护, 防止来自网内外的恶意攻击和窃取, 及时响应网络故障并快速恢复网络设备等技术手段已经成为可能。除此之外, 网络防火墙技术、加密技术、权限管理和存取控制技术、冗余和备份技术等计算机网络安全技术的发展也为电力系统信息安全防护策略带来了新的发展思路^[13]。

4 结语

本文从智能变电站内可应用的关键技术和智能变电站建设所需的主要技术手段入手, 全面阐述了智能变电站的构建方式。目前, 智能变电站的研究工作刚刚起步, 集成的统一信息平台的构建尚未完成, 硬件的集成技术以及软件的构件技术仅处于初步应用阶段。由于通信方式以及通信实时性、可靠性要求的制约, 开放的控制策略的研究还有待时日。因此, 未来智能变电站的研究工作任务繁重。

作为智能电网的重要组成部分, 智能变电站必须打破以往的专业壁垒, 将先进的电力电子、通信、计算机、控制技术互相融合, 才能最终达到资源优化配置的目标, 实现智能变电站易集成、易扩展、易升级、易改造、易维护的工业化应用要求。

参考文献

- [1] Q/GDW 383-2009智能变电站技术导则[S]. 国家电网

公司, 2009.
Q/GDW 383-2009 technical guide for smart substation[S]. State Grid Corporation of China, 2009.

[2] 林宇锋, 钟金, 吴复立. 智能电网技术体系探讨[J]. 电网技术, 2009, 33 (12): 8-14.
LIN Yu-feng, ZHONG Jin, WU Fu-li. Discussion on smart grid supporting technologies[J]. Power System Technology, 2009, 33 (12): 8-14.

[3] 钟金, 郑睿敏, 杨卫红, 等. 建设信息时代的智能电网[J]. 电网技术, 2009, 33 (13): 12-18.
ZHONG Jin, ZHENG Rui-min, YANG Wei-hong, et al. Construction of smart grid at information age[J]. Power System Technology, 2009, 33 (13): 12-18.

[4] 王映辉. 软件构件与体系结构—原理、方法与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
WANG Ying-hui. Software components and architecture-principles, methods and techniques[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.

[5] 吴国阳, 王庆平, 李刚. 基于数字化变电站的集中式保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (11): 15-18.
WU Guo-yang, WANG Qing-ping, LI Gang. Study of centralized protection based on digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (11): 15-18.

[6] 庞红梅, 李淮海, 张志鑫, 等. 110 kV智能变电站技术研究状况[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 146-150.
PANG Hong-mei, LI Huai-hai, ZHANG Zhi-xin, et al. Research situation of 110 kV smart substation technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 146-150.

[7] 苏永春, 吴素农. 江西电网智能变电站研究及建设展望[J]. 江西电力, 2009, 33: 1-4, 9.
SU Yong-chun, WU Su-nong. Research and development prospect of smart substation of Jiangxi power grid[J]. Jiangxi Electric Power, 2009, 33: 1-4, 9.

[8] 丁明, 张颖媛, 茆美琴. 微网研究中的关键技术[J]. 电网技术, 2009, 33 (11): 6-11.
DING Ming, ZHANG Ying-yuan, MAO Mei-qin. Key technologies for microgrids being researched[J]. Power System Technology, 2009, 33 (11): 6-11.

[9] 潘睿, 刘俊勇, 郭晓鸣. 面向智能电网的电力系统云计算[J]. 四川电力技术, 2009, 32 (增刊): 6-10, 37.
PAN Rui, LIU Jun-yong, GUO Xiao-ming. Cloud computing of smart grid in power system[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2009, 32 (S): 6-10, 37.

[10] Q/GDW 431-2010智能变电站自动化系统现场调试导则[S]. 北京: 国家电网公司, 2009.
Q/GDW 431-2010 guide line for the site commissioning of automation systems in smart substation[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2009.

[11] 陈建民, 周健, 蔡霖. 面向智能电网愿景的变电站二次技术需求分析[J]. 华东电力, 2008, 36 (11): 37-39.
CHEN Jian-min, ZHOU Jian, CAI Lin. Substation secondary technology demand analysis for intelligent grid vision[J]. East China Electric Power, 2008, 36 (11): 37-39.

[12] 何磊, 郝晓光. 数字化变电站通信网络的性能测试技术[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 75-78.
HE Lei, HAO Xiao-guang. Acceptance test technology of communication network in digitalized substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 75-78.

[13] 莫卫东, 杨任农, 赵静波, 等. 计算机网络技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
MO Wei-dong, YANG Ren-nong, ZHAO Jing-bo, et al. Computer network technology and applications[M]. China Machine Press, 2009.

收稿日期: 2010-03-16; 修回日期: 2010-05-12

作者简介:

曹楠(1981-), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: caonan@epri.sgcc.com.cn

李刚(1978-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统及其自动化;

王冬青(1972-), 女, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统继电保护与控制。

(上接第 62 页 continued from page 62)

[11] 刘勇, 康立山, 陈毓屏. 非数值并行算法—遗传算法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
LIU Yong, KANG Li-shan, CHEN Yu-ping. Non numerical parallel algorithms-genetic algorithms[M]. Beijing: Science Press, 2000.

[12] 胡彩娥. 农村配电网无功优化方案的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2001.
HU Cai-e. Reactive power optimal for distribution systems of rural[D]. Beijing: China Agricultural University, 2001.

[13] 吴砥, 张文峰. 地区电网无功配置优化方法的探讨[J]. 高压技术, 2003, 29 (5): 21-23.
WU Di, ZHANG Wen-feng. Study on reactive power scheme in electric power network[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29 (5): 21-23.

收稿日期: 2010-03-04

作者简介:

赵昆(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网无功优化; E-mail: zhaokunfx@126.com

耿光飞(1971-), 男, 副教授, 硕导, 研究方向为电网无功优化与经济运行。