

# 变电站网络化二次系统关键技术研究及应用

张清枝<sup>1</sup>, 魏勇<sup>2</sup>, 赵成功<sup>2</sup>

(1. 新乡学院机电工程学院, 河南 新乡 453003; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 随着 IEC61850 通信建模体系及光电互感器技术的发展, 国内对数字化变电站技术的研究和工程应用蓬勃兴起。在一般数字化变电站的先进技术基础上, 创造性提出了网络化二次系统的概念, 并对其技术方案、关键技术进行了研究和工程应用。

**关键词:** IEC61850; 数字化变电站; VLAN; GOOSE; SNTP; SNMP; 过程层组网

## Research and application on key technologies of power secondary system in substation based on network

ZHANG Qing-zhi<sup>1</sup>, WEI Yong<sup>2</sup>, ZHAO Cheng-gong<sup>2</sup>

(1. Mechanical and Electrical Engineering Institute, Xinxiang University, Xinxiang 453003, China;

2. XJ Electric Corporation Limited, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** With the development of IEC61850 communication and modeling protocol and OCVT/ECVT technology in China, research and application on the technology of digital substation has mushroomed. In this paper, a concept on secondary system based on network is proposed, which is based on normal advanced technology of digital substation, the research and application of its technical scenario and key technologies are also carried on.

**Key words:** IEC 61850; digital substation; VLAN; GOOSE; SNTP; SNMP

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)08-0047-06

## 0 引言

变电站综合自动化系统经过十余年的发展目前已经成熟, 并得到了广泛的工程应用<sup>[1]</sup>。随着 IEC 61850 通信建模标准的颁布实施和光电互感器技术、智能开关技术、计算机通信网络技术的发展, 变电站自动化技术进入了数字化变电站时代<sup>[2,3]</sup>, 可以认为是继微机保护替代传统继电器保护后的新一轮技术革命, 从某种角度讲, 其影响和意义比上次技术革命还要深远<sup>[4]</sup>。

目前国内外对数字化变电站的技术应用侧重点有所差异: 国外由于电子互感器技术和智能开关技术在 IEC 61850 推出之前已经得到应用, 所以其应用主要集中在满足 IEC 61850 标准的设备间互连及互操作; 国内则更侧重于过程层的建设, 因为这样更容易看到成效, 如大量节省二次电缆, 系统结构更紧凑, 节省占地等<sup>[5]</sup>。

曾有技术文献介绍基于分布式网络的母线保护功能实现, 但要么不是基于 IEC 61850 实现, 要么只是一个单保护装置的实现, 都没有从系统化的角度对网络化二次系统做出论述<sup>[6,7]</sup>。

也有技术从数字化变电站过程层组网的角度介绍了数字化变电站的网络体系结构, 但没有对网络化二次功能的实现进行展开介绍<sup>[8,9]</sup>。

本文在国内外数字化变电站已有先进技术的基础上, 创造性地提出了变电站网络化二次系统的概念<sup>[10]</sup>, 将虚拟网 VLAN (Virtual Local Area Network) 技术首次在数字化变电站中应用, 并和 IEC 61850 的 GOOSE 通信传输机制、SMV 采样值传输机制一起实现了各种网络化的保护、控制、计量等二次功能, 新的技术实现方式较传统方式更加可靠和灵活, 利用已有网络资源, 还易于实现各种扩展应用功能。

本文给出了变电站网络化二次系统的总体技术方案和主要关键技术的阐述, 并在对这些关键技术进行了创新应用的基础上, 实现了多项创新应用功能<sup>[6]</sup>。

本文最后还结合某采用变电站网络化二次系统技术的数字化变电站工程项目, 对其实际工程实施情况, 社会经济综合效益情况等进行了量化说明。

## 1 已有数字化技术水平

目前无论国外还是国内, 对符合 IEC 61850 的

数字化变电站的研究、工程试点都是热点，典型工程应用如新宁光电公司在云南曲靖实施的 110 kV 翠峰数字化变电站，重点实现了采用值的点对点传输，取消了采集电缆；南瑞公司在浙江外陈变重点实现了国内外多个厂家（八家）的 IEC 61850 设备的互连<sup>[11]</sup>。但总体说来，这些技术应用多是集中在站控层和间隔层部分的 IEC 61850-8-1 通信实现，或者是过程层采用点对点的串行光纤以太网连接，实现采样值的数字化传输。归纳起来现有的数字化变电站技术水平具有下列特征：

1) 系统采用国际通用的变电站自动化 IEC61850 标准规约；

2) 用光电互感器取代常规电磁型互感器；

3) 用光缆取代了二次电缆；

4) 为断路器等一次设备增加智能接口单元使之具有智能化特征。

总体说来只是实现了数字化变电站的基本功能特点，并未进行更加深入的研究。

真正基于 GOOSE 通信传输机制的网络化二次系统，并在此基础上进行深层次技术应用的还未见到。

## 2 总体技术方案

网络化二次系统采用数字化变电站三层网络结构，具体包括过程层、间隔层、站控层。各层及同层设备之间采用变电站通用的 IEC 61850 标准通信规约，系统层间采用光纤以太网通信，各设备间采用光纤连接。

在过程层，在目前常用的点对点串行广播通信方式基础上，通过采用简洁的过程层网络总线模式实现过程层设备（如 PT、CT、断路器等受控设备智能终端）间的数据共享、信息互通、即插即用。

在间隔层，装置通过过程层总线获取过程层设备 GOOSE 信息实现对过程层的设备控制互锁及互操作功能，图 1 给出了网络化二次系统的网络结构图。

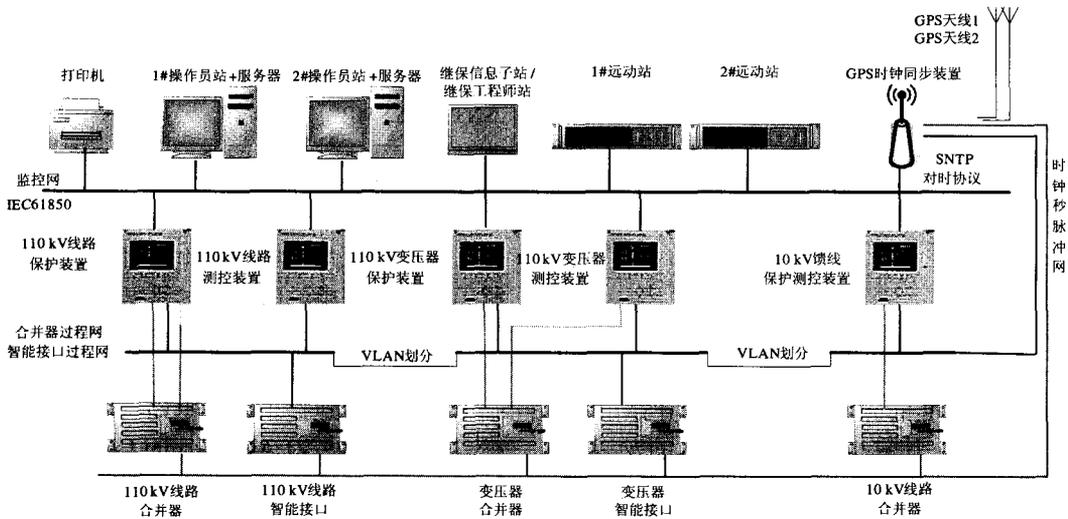


图 1 网络化二次系统网络结构图

Fig.1 Network structure of power secondary system based on network

过程层网络可以实现互联互通操作，各种操作与闭锁命令等信息以 IEC 61850 GOOSE 标准格式传送，以网络方式实现保护联跳、备自投等功能。取消专用的备自投装置以及保护联跳回路的硬件接线，借助于网络，通过备自投功能模块所在装置实现，装置直接从站层网络采集母线的电压、分接头位置、开关刀闸位置等数据，根据运行策略和当前的状态决定母联分段投切。

## 3 主要关键技术

### 3.1 VLAN 技术

VLAN 这一新兴技术主要应用于交换机和路由器中，但目前主流应用还是在交换机之中。不过不是所有交换机都具有此功能，只有三层以上交换机才具有此功能。

VLAN 技术还支持 IEEE802.1P 优先级，按照 COS (Class Of Service) 来使高优先级的数据优先通过，保证数据的实时性。

本文首次在数字化变电站中采用 VLAN 技术，将局域网内的设备按网络化保护功能逻辑划分成若干个网段，保证了控制网段的实时性和安全性，并减少了网络流量，降低了网络负载，实现了网络的

安全隔离, 提高了通信效率。

遵循 IEC61850 标准中对过程层通信网络的要求及变电站实际运行情况, 采用如下的 VLAN 划分原则<sup>[9]</sup>:

### (1) 按照间隔划分

这是最基本的划分方法, 每个间隔划成一个 VLAN。如果 10 kV 线路的间隔比较多(例如 50 多个), 而所用交换机支持的最大 VLAN 个数又比较有限(例如 RuggedCom 是 64 个), 也就是说如果最后的总间隔数大于交换机所能支持的最大 VLAN 数, 可以将多个 10 kV 间隔划成一个 VLAN, 或者将一个 10 kV 母线上的所有间隔划成一个 VLAN, 以满足交换机的性能要求。

### (2) 按照特殊功能实现划分

数字化变电站使得系统间隔层原有的很多功能实现方式发生了重大变化, 这些功能包括: 备自投, 低频减载, 低压母线保护, 主变差动保护, 母线 PT 测控功能, 防误闭锁等。为实现这些功能而进行 VLAN 划分的基本依据就是将各相关过程层设备, 如合并器, 智能接口等和间隔层设备划分到一个 VLAN 内, 使得他们之间的信息交互可以通过过程层网络实现。

各间隔交换机通过过程层主干交换机环网实现配置的 VLAN 间的数据共享。

图 2 给出了采用了网络化二次系统技术的某数字化变电站的 VLAN 划分示意图。

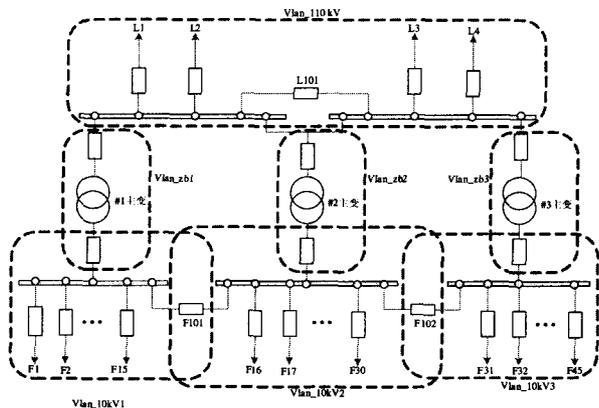


图 2 网络化二次系统 VLAN 划分示意图

Fig.2 VLAN definition of power secondary system based on network

## 3.2 GOOSE 通信传输技术

在数字化变电站自动化系统中, 智能电子设备协同完成自动化功能的应用场合越来越多, 这些功能得以完成的重要前提是众多电子智能设备之间通

信的可靠性和实时性, 为此, IEC 61850 标准体系中定义了通用变电站事件模型 (GSE), 它提供了快速和可靠的系统范围内传输输入、输出数据值。基于分布的概念, GSE 提供了一个高效的方法, 利用多播/广播服务向多个设备同时传输同一个通用变电站事件信息。GOOSE 还提供了高效的信息优先级及超时重传机制, 保证了信息传输的实时性。

GSE 用于 DataAttribute 集合值的交换, 定义了两种控制类和两种报文结构:

1) 面向通用对象的变电站事件 (GOOSE) 支持由 DataSet 组成的公共数据的交换。

2) 通用变电站状态事件 (GSSE) 传输状态变化信息。

在实际的产品应用中, GOOSE 通常用来实现间隔层设备间的快速信息传递, 如状态变化信息, 跳合闸命令信息, 操作逻辑联锁闭锁信息等, 用以实现间隔层设备间通信, 防误闭锁, 网络化业务功能, 通过智能接口实现跳合闸等功能。GOOSE 技术应用解决方案是数字化变电站的亮点之一, 它大量减少了装置之间、控制屏之间硬连接线, 使得 I/O 点配置和二次功能实现非常灵活。

将 VLAN 技术用在变电站的 GOOSE 应用中可以很好地实现间隔层设备在共享物理网络的基础上实现虚拟网络分组, 便于 GOOSE 信息的快速传递, 有效避免网络阻塞, 提高网络通信效率和信息的安全性。

在本文的网络化二次系统中, 将 GOOSE 通信传输机制应用得淋漓尽致, 恰到好处, 实现了各种网络化的快速信息传输和跳合闸操作, 并基于此实现了多项二次应用功能。

## 3.3 网络化保护控制技术

网络化保护及控制技术, 就是采用数字化变电站中特有的过程层 GOOSE 机制、间隔层 GOOSE 机制, 实现常规综自站很难实现, 或依靠专用设备实现的保护及控制功能。

网络化二次系统中对于 GOOSE 网络机制的应用体现在两个方面: 间隔层 GOOSE 网络传输和过程层网络传输。

采用间隔层 GOOSE 网络机制, 实现了变电站间隔层二次设备的网络化信息交互, 为变电站网络化二次系统各种应用功能的实现提供了根本的技术支撑。

采用过程层 GOOSE 网络机制, 实现了设备跳合闸命令信息的 GOOSE 网络传输, 保证了网络化保护动作的快速性和可靠性。

图 3 给出了基于 GOOSE 机制的网络化保护控

制技术示意图。

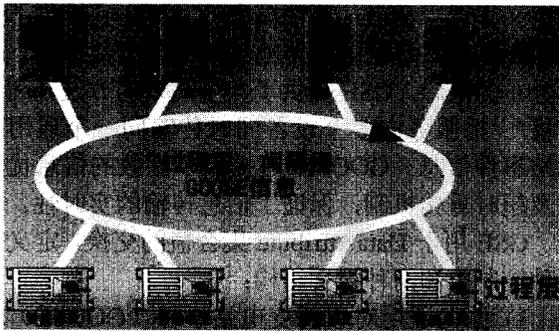


图 3 基于 GOOSE 机制的网络化保护控制技术示意图

Fig.3 Protection and control technology based on GOOSE communication mechanism

网络化控制保护功能包括网络化低频低压减载功能、网络化备自投功能、网络化母线保护功能、网络化间隔层五防功能等，所有网络化保护控制出口均采用基于 GOOSE 机制的跳合闸技术，即跳合闸命令通过过程层 GOOSE 网络到智能接口单元，实现跳合闸操作。

### 3.4 网络时钟同步技术

数字化变电站系统中，从过程层电子互感器输出的数字信号直接通过光纤以太网送到间隔层测控设备，大量减少了二次电缆的铺设，并且通过网络技术实现了数字化信息的单点发送，多点共享。这给变电站自动化系统带来了革命性的变化的同时，也引入了一个新问题：电子互感器的同步采样问题，同步采样对故障判断和系统稳定分析及控制具有重要意义。此问题在传统的电缆方式下不存在，而这些数字化的信息恰恰是数字化系统信息处理的根基，所以时钟同步技术是数字化变电站必须要解决的重大技术问题之一。

IEC 61850 标准体系中对系统的时钟同步有着明确的要求：通过开放的通信网络体系，采用 NTP/SNTP（网络对时协议）实现全站时钟同步。

在数字化二次系统的设备时钟同步方案中，借鉴了西门子高压直流输电系统的时钟同步技术解决方案，采用了“对时脉冲+SNTP”相互配合的方式，包括两部分：

- 1) 站控层和间隔层对时
  - 采用 SNTP/NTP 网络对时方式；
  - 精度：1 ms
- 2) 过程层对时
  - 采用光纤 PPS 秒同步脉冲对时方式；
  - 精度：1 μs, 4 μs, 25 μs

在具体的工程实施过程中，根据工程特点，网

络化二次系统提供了三种实现模式，这里给出其中的一种实现模式，如图 4 所示。

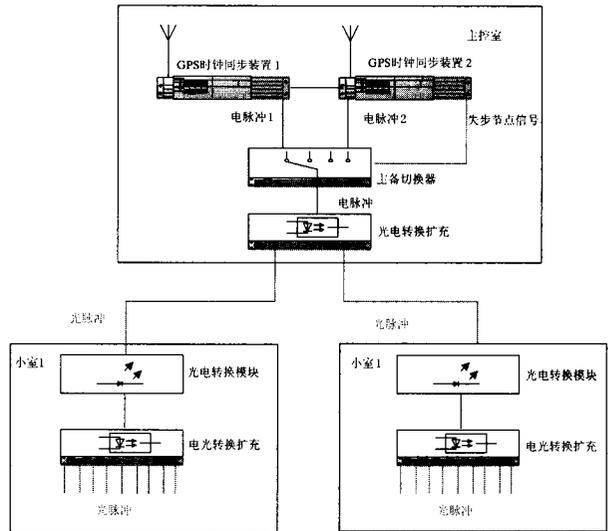


图 4 基于“SNTP+对时脉冲”的网络化对时方案图

Fig.4 Network timing method based on SNTP copped with synchronous pulse

图 4 中，在主控室设置时钟同步屏，安装 GPS 时钟装置源设备、主备切换设备、电光转换设备、光脉冲扩展设备；在各间隔小室，安装光电转换设备、电光转换设备、光脉冲扩展设备。主控室对时系统以光脉冲形式将同步时钟信息送至分散布置的各间隔小室，各间隔小室的对时系统输出多路光脉冲给过程层设备。

### 3.5 信息安全技术

变电站网络化二次系统基于 IEC 61850 通信体系，大大提高了变电站内设备的互操作性和可互换性。但 IEC 61850 通信协议本身并未对变电站网络系统的安全性做任何规定，同时协议本身的开放性和标准性给变电站的网络安全带来重大隐患，尤其是检测和控制一次设备的二次回路通信网络的安全性问题。因此必须考虑基于 IEC 61850 网络通信模式的 IED 及变电站自动化系统的信息安全防护问题，否则电网的安全将不可预料。

在变电站网络化二次系统中，原来需要通过大量二次电缆来实现信息传输的信息传输介质变成了光纤工业以太网网络，而且由于采用了基于 IEC 61850 的信息统一建模，变电站内各业务子系统通过网络共享信息，避免了信息的重复采集和配置，各逻辑功能也相互交叉渗透。但是值得一提的是，随着基于 GOOSE 机制的网络化跳合闸方式的实际应用，在使得网络化二次应用功能实现更加快捷，灵活的同时，

也带来了重大的安全隐患, 这些都需要专门的网络安全防护技术来保证电网的安全可靠运行。

在变电站网络化二次系统中, 参照 IEC 62351 安全标准对基于 IEC 61850 的 IED 产品进行了安全性设计。

### 3.6 网络可视化诊断及监视技术

变电站网络化二次系统中大量的二次应用功能都基于网络实现, 网络系统相当于整个系统的血液循环系统。网络系统的工况监视和故障诊断显得非常重要。

原来自动化系统的网络监视实现方式一般采用私有协议方式, 而且缺乏直观的表现形式, 对于新加入的设备, 如智能交换机等不能实现即插即用级的安全监视, 系统的网络安全性不能得到保证。

网络化二次系统中首次实现了网络电子眼功能, 基于 SNMP 工业标准, 可以对所有符合 SNMP 的智能网络设备实现即插即用级的安全工况监视, 系统还开发了直观的图形监控系统, 最大程度上保证了网络系统的可靠性及整个网络化二次系统的安全性。

## 4 创新应用功能

基于以上关键技术的创新应用, 变电站网络化二次系统实现了以下 6 项重点创新应用功能:

网络化母线保护

网络化备自投

网络化低频低压减载

网络化间隔层五防功能

可视化网络及二次设备安全监视

### 4.1 网络化母线保护

与常规的母线保护相比, 在不增加硬件设备, 不重复采集交流资讯的前提下, 将母线保护功能分散到各间隔保护单元中实现, GOOSE 线路即时锋取各间隔故障资讯, 然后将经过线路交互过的资讯利用 GOOSE 服务发送至间隔层设备, 由间隔层设备结合运行方式识别, 综合判定母线故障, 发送跳闸命令, 保证母线保护动作的快速性、选择性、可靠性。

### 4.2 网络化备自投

网络化备自投是以网络化方式在 GOOSE 网络底层就地实现网络化备自投, 备自投功能直接利用过程层网络集中采集的各级母线电压、进线电流、相关开关刀闸位置等信息交互, 结合当前运行方式, 根据运行策略和当前的状态以及功能逻辑判别, 使测控装置通过计算分析向过程层设备发送控制命令。

与常规备自投装置相比, 取消了专用的备自投装置及各保护之间的连接线, 避免了各间隔信息的

重复采集, 网络化采集和传输减少了信息传输环节, 提高了备自投动作的可靠性。

### 4.3 网络化低频低压减载

网络化低频低压减载, 是将母线运行信息通过网络集中采集、集中处理、集中逻辑判断, 并将得出的减载信息通过 GOOSE 服务发送到各间隔层设备分散就地执行。与常规的低周低压减载装置相比, 减少了信息的重复采集和定值的分散重复整定, 使动作逻辑更加简洁, 进一步减轻了整定校验工作量。

### 4.4 网络化间隔层五防功能

网络化间隔层五防功能完全依据底层网络信息共享和互操作, 在间隔层网络通过运行实时状态识别及逻辑判断综合判断决策, 以分散型式在网络底层实现变电站完整的五防操作逻辑闭锁功能, 取代了常规的专用五防系统, 消除了专用五防系统与综自系统之间繁杂的信息校验。

### 4.5 可视化网络及二次设备安全监视

系统安全监视可视化是通过网络“电子眼”, 在后台机界面上监视系统网络上任一节点设备及网络运行状况, 迅速定位二次故障设备和系统网络故障节点, 可有效缩短二次系统网络及二次设备故障查找时间。

## 5 工程推广应用情况

变电站网络化二次系统的研究成果对数字化变电站建设, 尤其是二次应用功能实现具有重要意义。由于创新地应用了三层结构网络的一体化应用技术、VLAN 技术、GOOSE 通信机制、基于 SNMP 的可视化网络安全监视技术等, 并基于此创新实现了系列网络化的二次应用功能, 研究成果得到工程应用实施后, 具有以下显著成效:

1) 以光纤取代大量的传输电缆, 极大地简化二次回路; 可将数十张复杂的二次施工设计图简化为一张光纤联接图; 消除了电缆的安装敷设、调试工作量, 使繁杂的回路维护工作得到极大简化; 消除了电磁干扰, 避免了回路的接地、断线、误接线缺陷的频繁出现, 防止了保护误动, 大大降低了二次系统故障率。

2) 在系统中设置网络“电子眼”, 实现对网络及节点设备运行的可视化安全监视, 并对故障设备快速定位和告警。

3) 将保护及自动装置等设备的多项二次应用功能转化为二次系统中的网络化软功能实现, 取消了诸多原有常规设备实现二次系统的网络化(采用本技术的某数字化变电站全站共减少了 19 面设备屏, 较老站减少 50%)。

4) 将变电站所有跨间隔的业务均纳入二次系统的功能范畴, 以网络化、软功能化方式高效率、低成本地实现其各项应用功能, 实现二次系统功能的大幅扩展。

上述的诸多创新应用功能的实现使得变电站网络化二次系统的技术研究成果具有广泛的推广应用前景。

## 6 结论

变电站网络化二次系统首次将当前自动化、网络通信等先进技术应用于数字化变电站中, 如利用虚拟网 VLAN 技术实现网络的安全隔离, 利用 GOOSE 信息在三层结构的网络传输等, 提高了数字化变电站的运行可靠性和保护方案配置的灵活性。第一次真正意义上实现了全数字化的变电站自动化系统, 研究成果使变电站二次系统在控制、管理上得到重大技术突破, 真正实现了对数字化变电站深层应用的实质性突破, 对于国内数字化变电站技术发展及推广应用具有极高的推动促进作用。

## 参考文献

- [1] Dolezilek D J.Power System Automation[Z].Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
- [2] Skeie T, Johannedden S, Brunner C. Ethernet in Substation Automation[J]. IEEE Control System Magazine, 2002, 22 (3): 43-51.
- [3] IEC 61850, Communication Networks and Systems in Substations[S].
- [4] 许继数字化变电站系统技术方案.国网公司版[Z]. Digital Substation System Technology Schema of XuJi-for State Grid[Z].
- [5] 国家电网科学技术进步奖申报书[Z].河南省电力公司, 许继集团公司, 2009. Declare Report for Science and Technology Advancement Award of State Grid[Z].Electric Power Company of Henan, XJ Group Corporation,2009.
- [6] 窦晓波. 基于 IEC 61850 的新型数字化变电站通信网
- 络的研究与实践(博士学位论文)[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- DOU Xiao-bo.Research and Application on Communication Network of Digital Substation Based on IEC 61850,Doctoral Disseration[D].Nanjing: Southeast University,2006.
- [7] 李营. 分布式微机母线保护的研究(博士学位论文)[D]. 保定: 华北电力大学, 2000. LI Ying.Research on Distributed Bus Protection, Doctoral Dissertation[D].Baoding:North China Electric Power University,2000.
- [8] CBZ8000 数字化变电站系统过程层组网技术规范[Z].许继电气技术中心,2007. Technical Specification of Process Level Network in CBZ8000 Digital Substation Automation System[Z].XJ Technical Center,2007.
- [9] 数字化变电站过程层组网技术研究及应用[J].农村电气化,2008. Research and Application on Process Level Network Schema in Digital Substation[J]. Village Electronic,2008.
- [10] 变电站网络化二次系统研究及应用技术报告[Z].河南省电力公司,许继集团公司,2008. Technlogy Report of Research and Application on Substation Secondary System[Z].Henan Electric Power Corporation, XJ Group Corporation,2008.
- [11] 高翔.数字化变电站应用技术[M].北京: 中国电力出版社, 2008. GAO Xiang.Application Technology of Digital Substation[M]. Beijing: China Electric Power Press,2008.

收稿日期: 2009-04-01

作者简介:

张清枝(1970-), 女, 副教授, 硕士, 主要从事电力电子技术的研究;

魏勇(1973-), 男, 硕士, 主要从事数字化变电站系统方案及相关产品的研发;

赵成功(1979-), 男, 主要从事产品研究和开发的项目管理。E-mail:chenggongzh@xjgc.com

(上接第 46 页 continued from page 46)

- [9] 陈静.供电企业服务质量评价模型及实证研究[J].沈阳航空工业学院学报, 2005, 22 (1): 89-91. CHEN Jing. Service Quality Estimate Model and Demonstration Research on Power-supplying Enterprise[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautic Engineering, 2005, 22 (1): 89-91.
- [10] Parasuraman A, Zeithaml V A, Berry L L. A Conceptual Model of Service Quality and Its Implications for Future Research [J]. Journal of Marketing, 1985, 49(4): 41-50.
- [11] Hsieh Y M, Hsieh A T. Enhancement of Service Quality with Job Standardization [J]. The Service Industries

Journal, 2001, 21 (3): 147-166.

收稿日期: 2008-07-14;

修回日期: 2008-09-01

作者简介:

曾鸣(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力市场及电力需求侧管理等;

周文瑜(1972-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场及电力需求侧管理等;

张怡(1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场等。E-mail:xenjoy@126.com