

数字化变电站网络化二次系统研究与应用

王锐¹, 曹丽璐², 杨东海², 马晓久¹

(1. 河南省电力公司, 河南 郑州 450052; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 通过分析目前数字化变电站的特点, 得出目前数字化变电站发展的技术瓶颈, 提出全数字网络化二次系统的概念, 结合洛阳金谷园数字化变电站改造工程中的先进技术应用, 阐述了利用数字化变电站网络信息交互突破设备间“互操作”本质内涵, 网络化功能的实现方式, 以及创新功能对促进数字化变电站技术发展的重要意义, 为智能变电站和智能电网的建设提供帮助。

关键词: 数字化变电站; 网络化; 功能; 应用

Research and application of network secondary systems in digital substation

WANG Rui¹, CAO Li-lu², YANG Dong-hai², MA Xiao-jiu¹

(1. Electric Power of Henan, Zhengzhou 450052, China; 2. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: The technological bottlenecks of the digital substation are summed up from the analysis of the characteristics of the digital substation and the concept of network secondary systems in digital substation is proposed. Through the introduction of the advanced technology in Luoyang Jinguyuan digital substation project, this paper breaks through the essential connotation of the interoperability between equipments using the digital substation network information exchange, and elaborates the implementation and performance comparison of network function as well as the important meaning of the innovation function for the digital substation technology promotion.

Key words: digital substation; network; function; application

中图分类号: TM764 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0059-06

0 引言

随着网络技术在变电站自动化系统中广泛应用、变电站通信网络和系统标准IEC61850正式颁布、数字式互感器技术及应用日趋成熟以及一次设备逐渐智能化发展趋势, 数字化变电站的应用推广已经具备了相应条件。

当前, 全国每年新建和改造变电站数千座, 年度新建改造、运行维护费用超千亿元。变电站在电网中占有如此重要的位置, 使得建设成本低、少维护、安全隐患少、节约占地、环境友好的理想变电站成为电力企业的不懈追求。而数字化变电站的良好特性较好地顺应了这一需求, 在当前智能电网发展潮流促进下成为当下电力企业理智而时尚的推崇, 当前的数字化变电站在技术上仍存在较大的提升空间。

1 数字化变电站技术瓶颈

经过十多年发展, 变电站自动化系统和间隔层

智能设备性能不断提升, 使二次设备进入相对成熟阶段。然而这种成熟局限于传统二次系统结构体系, 难以消除存在各种问题, 成熟与问题并存, 将成为常规变电站二次系统难以摆脱的现实。

1.1 常规综自变电站存在的问题

1) 功能依赖于设备: 每增加一项二次功能, 就需增加相应的二次设备和电缆, 造成设备种类繁多, 信息重复采集, 初建成本高。

2) 设备接口不规范: 不同应用之间缺乏统一建模规范, 通信标准不统一, 规约需转换, 设备间不具有“互操作性”, 信息难以共享。

3) 通信依赖电缆: 二次系统模拟电缆用量数千根(数十公里), 接线端子多达上万个。大量二次电缆产生的电磁干扰、信号衰耗、过电压以及直流接地等均可能造成继电保护等二次设备运行异常。复杂的二次回路维护量大、缺陷查找困难、防火成本高。

4) 模拟量采集: 传统互感器体积大、绝缘复杂、维护量大; 其动态测量范围小, 铁芯饱和、剩

磁问题等给互感器和继电保护设计带来困难；铁磁谐振、暂态特性容易造成二次设备运行异常。

5) 施工不便：调试通信协议问题使得二次系统设计、施工周期较长，“互操作”问题给施工带来极大不便。

6) 安全隐患多：变电站大量磁辐射破坏环境、影响健康；电缆老化、绝缘损坏等易引起火灾事故；互感器二次开路、爆炸事故一旦发生，将严重影响社会用电及人身安全。

7) 智能化程度低：二次设备现场操作和故障需手工查找、状态无法监控、信息不能共享、难以实现高水平的无人值班，难以构建坚强的智能化电网。

1.2 数字化变电站技术瓶颈

1) 数字化变电站技术特点

近年国内兴起的数字化变电站通常具有以下基本特征：①采用光电互感器并以光缆取代模拟电缆，实现了设备信息的数字化集中采集；②采用国际通用的IEC61850标准规约，实现了数字信息的标准化网络传输；③在二次系统中增加智能终端，使一次设备具有智能化操作特性。数字化变电站的技术成就主要是网络信息技术方面的突破，这些技术特点在使变电站过程层得以数字化的同时，也使网络成为全变电站的神经中枢，其重要意义和最大成就在于实现了二次设备间的信息互通和共享。

2) 数字化变电站技术瓶颈

如上所述，当前数字化变电站虽然实现了设备间信息交互，但在网络交互信息的互用方面却未有实质性进展，在应用功能自由分布、网络化功能灵活运用等重要技术方面仍未能实现，功能实现仍需依赖于设备的现状仍未见改变，数字化变电站“互操作”这一深刻内涵长期得不到突破，使得数字化变电站的技术优势大打折扣，其技术进步受到制约，不利于数字化变电站的应用推广，也必然影响着智能化电网的快速发展。

2 全数字网络化二次系统

2.1 项目实施背景

为解决数字化变电站技术瓶颈，2006年底，河南省电力公司经过充分研究论证，提出了建设“变电站网络化二次系统”的科研目标，即在当前国内数字化变电站水平基础上，进行网络化保护及二次系统的研发，并推出网络化保护功能为主导的创新型全数字网络化二次系统，为电网提供完整的智能化变电站二次系统解决方案，在一、二次设备的智能化管理方面取得突破。在实现数字化变电站“互

操作”应用效果的同时，有效推动数字化变电站向智能化方面发展。

在确定总体技术方案后，邀请许继电气股份有限公司确定攻关路线并完善总体思路：①体系化提出网络化二次系统设计方案，实现应用功能网络化自由分布；②利用间隔层网络信息共享，突破二次设备之间的“互操作”；③将虚拟网技术应用到数字化变电站中，实现网络信息分层分段处理；改变传统保护功能组合方式，实现跨间隔二次设备网络化保护功能；④实现二次系统功能扩展，以网络化方式实现一次专业跨间隔业务；⑤构建可视化网络及二次设备安全监视功能，实现故障的快速处理。该项目结合洛阳110 kV金谷园变电站综合技术改造实践，最终形成体系化的《变电站网络化二次系统研究与应用》成果。至2008年底，该项目成果已在河南10个变电站推广应用，4个变电站已投运，运行效果十分理想。

除了具备一般数字化变电站的技术特点，金谷园变电站实现了大量的网络化应用和功能创新，其网络化功能不仅涵盖二次设备，还扩展到变电站一次应用。至2008年底，洛阳金谷园数字化变电站已稳定运行两年，成果的稳定性得到充分的验证。

2.2 先进技术的创新应用

金谷园数字化变电站网络化二次系统与国内通常的数字化变电站有很大不同（见图1）。其将VLAN技术（按网络化功能逻辑将设备划分为若干个虚拟网段）、SNMP网络在线监视与诊断服务技术，SNTP网络对时技术等国内外一些先进技术首次在数字化变电站中创新采用，此外，还将数字化变电站中先进的GOOSE机制（Generic Object Oriented Substation Event）、IEC61850-9-1/2等先进技术进一步深层次创新应用，从而在实现数字化变电站通常技术特征基础上，首创实现变电站网络化

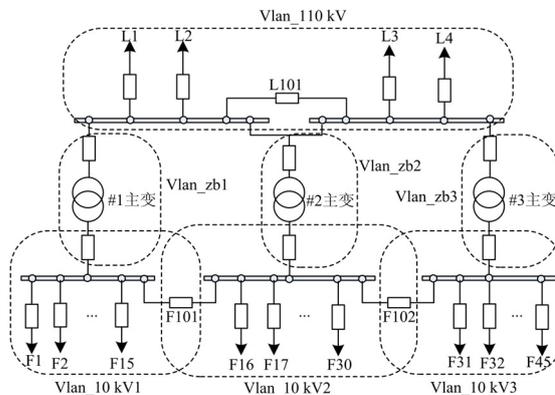


图1 变电站网络化二次系统 VLAN 划分示意图
Fig.1 VLAN division of substation network secondary systems

应用功能创新(见图2)。

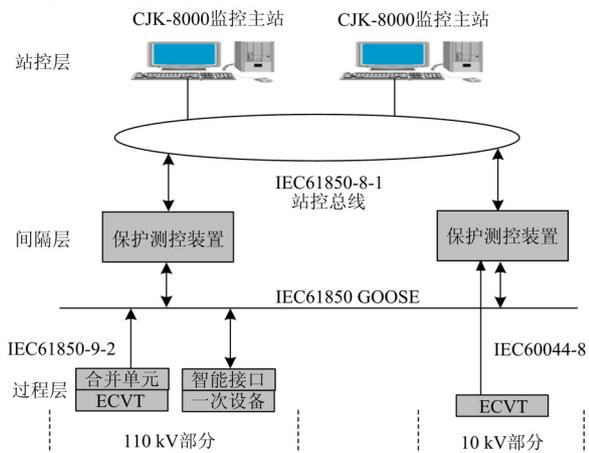


图2 虚拟网方式的采样值网络传输

Fig.2 Virtual network way of sampling value network transmission

数字化变电站先进的GOOSE机制在该项目中的创新应用体现在：①首次实现了GOOSE信息在系统间隔层、过程层中的一体化传输；②首次实现了过程层跳合闸命令的GOOSE传送，采样值网络化传输；③首次实现单间隔一次设备的“一键式”倒闸操作；④首次结合本间隔设备的逻辑闭锁功能，实现变电站三层完整一体的“五防”操作逻辑闭锁功能。

2.3 网络化创新应用功能

1) 网络化功能技术特点

网络化功能具有以下技术特点：①变电站的硬件设备被自由分布的网络化功能所取代，功能的实现基于网络信息交互和共享，而不再依赖于硬件设备冗余；②任一处的逻辑判别或中间结果可为其他功能按需取用；③功能的形成和配置可以灵活运用，设备间具有互换性，功能的执行可以是就地或分散。

2) 网络化功能的意义

网络化功能作为数字化变电站的高级应用，是数字化变电站向理想的智能化变电站发展的重要特征。其重要意义在于：①首次利用数字化变电站网络信息互通共享，突破了二次设备之间的“互操作”；②做到了二次功能的灵活配置，通过二次系统应用及设备资源的重构，有效提升了整个系统集成度；③重新优化了一次系统应用，将二次系统应用范围向变电站一次应用扩展；④可做到最大限度地精简设备，降低维护量、提高效率。

3) 网络化功能可靠性的基本技术保证

网络化二次系统的安全运行事关重大，必须有

完善的技术支撑。现代以太网交换式技术；减少通信冲突的全双工技术；减少网络流量、提高交互实时性的IEEE802.1Q VLAN分区隔离技术；保障重要信息及时发送的IEEE802.1p优先级队列技术；提供系统快速恢复的能力、构建网络冗余结构的IEEE802.1w快速生成树协议；保证数据只被需要的设备接收，降低占用网络带宽、提高设备响应性能的IGMP Snooping组播过滤等诸多成熟的现代网络技术，均为网络化二次系统的安全运行提供了坚实的可靠性保证。

2.4 网络化功能实现方式

网络化功能是在数字化变电站自动化系统中，由GOOSE将获取的不同间隔信息（开关位置、设备中间计算结果等状态信息）在网络上进行交互后，经运行策略及功能逻辑判别，再发送至间隔层保护等IED设备，由二次智能设备结合运行方式识别、综合判定后就地执行，从而实现设备应用功能的网络化。

1) 跨间隔应用网络化功能实现原则

① 传统方式实现原则

传统的跨间隔应用功能采用“功能+设备+间隔”的实现方式，即功能的实现依赖于设备和电缆，每设备占用一个间隔，每间隔设备的信息采集输入和控制输出均需有单独的通信通道，如图3所示。



图3 传统的跨间隔功能实现方式示意图

Fig.3 Realization way of traditional cross-compartment function

传统的母差、失灵保护、备自投等跨间隔功能采用集中设备处理方式；对低频减载跨间隔功能则采用分散设备处理方式。带来的问题是设备种类多、电缆连线复杂，运行维护不便、停电涉及范围大、干扰造成设备运行异常等。

② 网络化功能实现原则

创新的网络化跨间隔功能采用“信息交互+功能分散+就地实现”的实现方式。对母差、失灵保护、备自投等跨间隔功能，采用功能分散于不同的IED设备，依据设备间的数据网络交互集中处理，分散下发IED执行；对低频减载跨间隔功能采用通过数据交换集中处理、就地判别、分散执行的处理方式。其特点是：功能分配面向全站IED设备，功能实现面向对象，由多个IED协同完成同一功能。可有效减少或简化二次设备（如取消母线保护硬件设备、实现保护测控一体化等），简化二次回路，降低维护。

2) 网络化功能实现方式比较

① 母线保护

传统方式：配置集中式母线保护，所有输入输出集中一体；

网络方式：不增加任何IED设备，配置功能分布式母线保护。

② 备自投

传统方式：由一个装置集中处理，所有输出输入集中一体；

网络方式：不增加任何IED设备，将不同的功能块分散于不同IED，逻辑集中判断。

③ 低频低压减载

传统方式：功能分散到各馈线保护设备中，分散整定；

网络方式：功能集中至母线测控物理设备中（可以是其他设备），集中整定，分散到各间隔保护设备中执行。

④ 断路器失灵

传统方式：各间隔判断断路器失灵，母线保护装置集中处理；

网络方式：在间隔间直接进行信息交互，各间隔就地判别分散执行。

⑤ 防误闭锁功能

传统方式：测控装置+后台，采用站控层网络交互，传输协议各厂家自定；

网络方式：IED设备+后台，采用过程层网络交互，传输协议采用GOOSE机制。

3) 网络化应用功能举例

① 网络化母线保护功能

与常规的母线保护相比，不增加硬件设备、不设外部接线，将母线保护功能分散到各间隔保护单元中就地实现。GOOSE 网络将实时获取的各间隔故障信息经过网络交互后，再发送至间隔层设备，由间隔层各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

和选择性，如图4所示。

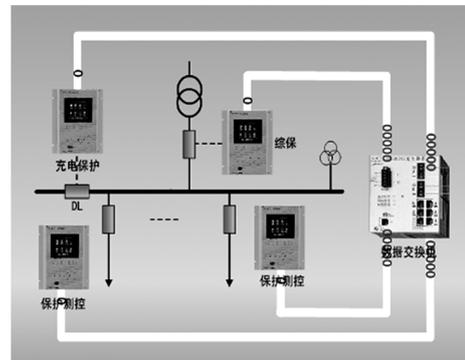


图4 网络化母线保护示意图

Fig.4 Bus protection based on the network

② 网络化低频低压减载功能

将母线运行信息通过网络集中采集、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。与常规设备相比，减少了数据的重复采集和定值的重复整定，动作逻辑更加简洁。

③ 网络化间隔层“五防”控制功能（图5）

完全依据系统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决策，以分散形式在网络底层实现变电站站控层、间隔层、过程层完整一体的“五防”操作逻辑闭锁功能。可取消常规的“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。

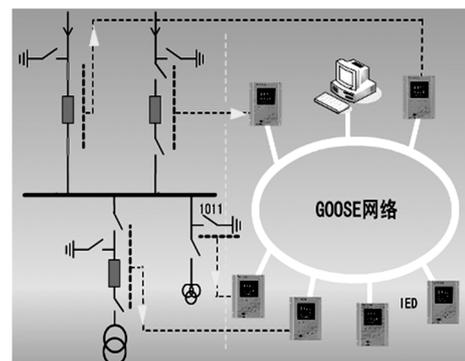


图5 网络化间隔层五防示意图

Fig.5 Five-defence block based on the network

4) 其他创新功能举例

单间隔一次设备的“一键式”操作，自动化系统的网络在线监视及二次系统网络对时，是数字化变电站迈向智能化的重要标志。这些功能在洛阳金谷园数字化变电站中均得以实现。

① “一键式”智能操作控制功能

以间隔层设备为主体,对变电站单间隔一次设备的运行状态切换实现“一键式”智能操作。与传统的站控层分步操作相比,操作环境更加优化,操作步骤更加简练快捷,有效避免人员误操作,如图6所示。

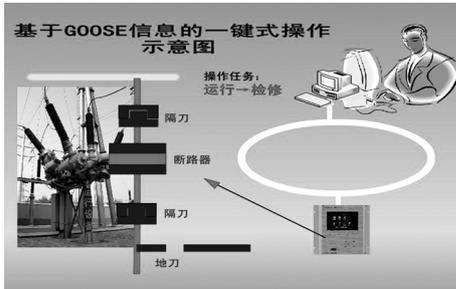


图6 基于GOOSE信息的一键式操作示意图

Fig.6 One-touch operating based on the GOOSE information

② 网络在线监视功能

采用SNMP的在线监视与诊断服务技术,作为网络工况监视的“电子眼”,实时监视各网络节点及网络传输工作情况,实现自动化系统的网络安全可视化监视。从而实现网络故障点的快速查找处理,提高系统可靠性,如图7所示。

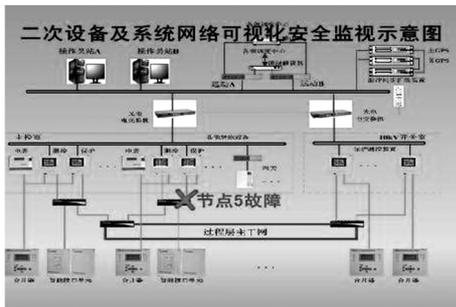


图7 基于SNMP的网络诊断在线监视屏视图

Fig.7 Network diagnosis and on-line monitoring based on SNMP

③ SNTP网络对时功能(图8)

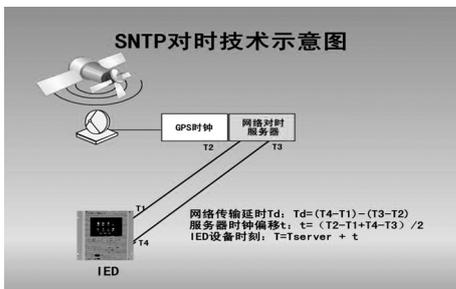


图8 SNTP 全站网络对时示意图

Fig.8 Network time setting of all substation with SNTTP

采用SNTTP协议网络对时方案,二次系统设置同

一时钟,各设备根据同一时间基准和网络延时统一对时,实现全站设备网络时钟同步。

3 项目实施效果

3.1 技术指标

①较项目实施前取消了变电站95%以上的二次电缆和接线端子,较国内普通的数字化变电站又减少20%;②将数十张复杂的二次施工设计图简化在一张光纤联接图上;③较改造前减少55%以上的设备屏(减少19面);④减少变电站占地2.6亩,节约建筑面积480 m²;⑤“一键式”倒闸操作,将以往30 min的一次设备倒闸操作减少至1 min;⑥将二次系统网络故障查找时间由以往的数十小时减少到几秒内定位;⑦实现保护等设备远方监控操作,取消远红外探测定期巡检。

3.2 实施效果

通过数字化改造,变电站站貌焕然一新,智能化水平大大提高。实现了:一次设备组合化,信息采集数字化;通信接口标准化,信息交互网络化;应用功能网络化,屏体设计紧凑化;倒闸操作一键化,控制操作智能化;时钟对时系统化,安全监视可视化。

1) 变电站站貌(图9)



图9 变电站站貌改造前后对比

Fig.9 Contrast appearance of substation before and after reconstruction

2) 二次设备屏(图10)



图10 二次设备屏改造前后对比

Fig.10 Contrast secondary equipment panel before and after reconstruction

3) 电缆夹层 (图11)

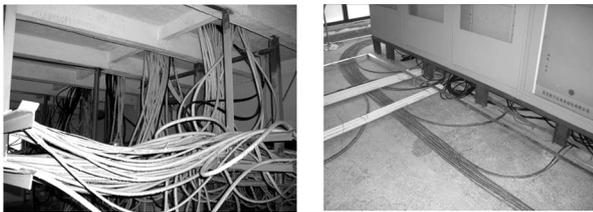


图 11 电缆夹层改造前后对比

Fig.11 Contrast cable sandwich before and after reconstruction

4) 电缆沟 (图12)



图 12 电缆沟改造前后对比

Fig.12 Contrast cable channel before and after reconstruction

5) 保护屏背面接线 (图13)

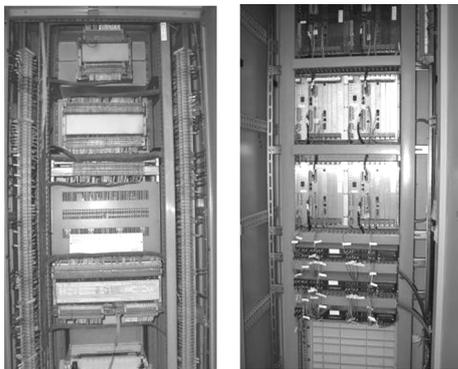


图 13 保护屏背面接线改造前后对比

Fig.13 Contrast connection structure of equipment panel before and after reconstruction

由上可见: 网络化二次系统项目做到了彻底精简二次回路, 极大减化二次施工设计, 大量减少二次设备和人员现场作业, 提高效率。

3.3 社会效益

该项目节能、环保、体积紧凑, 节约土地、降低损耗、消除大量安全隐患, 针对其所做的全寿命周期费用分析报告表明: 网络化功能的应用可大幅降低变电站的建设及维护成本。因此, 该项目有着传统变电站不可比拟的优点, 具有很好的社会效益。

4 结束语

目前, 国内的数字化变电站还处于起步阶段,

技术上还存在较大的提升空间。数字化变电站作为智能化电网的重要节点, 要切实做到与智能电网的协调发展尚需要较长的发展历程。网络化二次系统作为数字化变电站的一项高级应用, 很好地促进了数字化变电站向智能化、理想化方向发展。数字化变电站自动化技术进步应服从智能化电网大局的要求, 因此应首先探讨智能电网的功能要求, 以此来引导数字化变电站技术进步, 使数字化变电站不断满足智能化电网发展的需要, 在电网的远方控制、在线分析、优化决策等高级应用方面发挥更大的作用。

参考文献

[1] 李瑞生, 王锐, 许沛丰, 等. 基于 61850 规约的洛阳金谷园 110 kV 数字化变电站工程应用实践[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 76-78.
 LI Rui-sheng, WANG Rui, XU Pei-feng, et al. Application practice of Luoyang Jingyuan 110 kV digital substation based on IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 76-78.

[2] 王锐, 王政涛, 李海星, 等. 基于 GOOSE 方式的网络化母线保护[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 51-54.
 WANG Rui, WANG Zheng-tao, LI Hai-xing, et al. Bus Protection based on the GOOSE type network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 51-54.

[3] 李海星, 王政涛, 王锐, 等. 基于 IEC61850 标准的网络化备自投功能[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 82-85.
 LI Hai-xing, WANG Zheng-tao, WANG Rui, et al. Spare power automatic switching based on IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 82-85.

[4] IEC61850-9-1: 2003 IDT 变电站通信网络和系统第 9-1 部分: 特定通信服务映射 (SCSM) 通过单向多路点对点串行通信链路的采样值[S].
 IEC 61850-9-1: 2003 IDT communication networks and systems in substations part 9-1: specific communication service mapping (SCSM) sampled values over serial unidirectional multidrop point to point link[S].

[5] IEC61850-9-2: 2003 IDT 变电站通信网络和系统第 9-2 部分: 特定通信服务映射 (SCSM) 通过 ISO/IEC8802-3 的采样值.
 IEC 61850-9-2: 2003 IDT communication networks and systems in substations part 9-2: specific communication service mapping (SCSM) sampled values over ISO/IEC 8802-3 link[S].

(下转第 68 页 continued on page 68)

本文选取中国某市某年 12 月 6 日至 12 月 16 日的历史电力负荷数据作为学习样本,借助 Matlab 和 LabVIEW 软件对 RBF 神经网络进行训练仿真,然后用训练好的网络预测 12 月 17 日的电力负荷,并将其与传统的 RBF 神经网络预测结果相比较,结果如表 1 所示。

从表 1 所示的预测结果,从均方误差、平均绝对百分误差和最大相对误差可以看出,采用新的预测模型提高了预测精度。

5 结论

本文提出一种粒子群优化算法与神经网络相结合的短期负荷预测模型,利用粒子群算法的全局搜索能力搜索最优权值,优化 RBF 神经网络。并采用了有强大数组处理能力的 LabVIEW 软件来实现 PSO 算法,LabVIEW 的直观的编程方式也为今后进一步研究和实现粒子群的改进算法提供方便。实例表明,该预测方法能有效提高电力系统负荷预测的精度,具有较好的工程应用价值。

参考文献

- [1] 康重庆,夏清,刘梅. 电力系统负荷预测[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
KANG Chong-qing, XIA Qing, LIU Mei. Power system load forecasting[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [2] 牛东晓,曹树华,赵磊,等. 电力负荷预测技术及其应用[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
NIU Dong-xiao, CAO Shu-hua, ZHAO Lei, et al. Power load forecast technology and application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [3] Hipper H S, Pefreira C E, Souza R C. Neural network for short-term load forecasting: a review and evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16 (2): 44-54.
- [4] 徐秉铮,张百灵,韦岗. 神经网络理论与应用[M]. 广州:华南理工大学出版社,1995.
XU Bing-zheng, ZHANG Bai-ling, WEI Gang. Neural network theory and application[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1998.
- [5] 邹斌,周浩,李晓刚. 电力市场原理与实践 [M]. 北京:北京大学出版社,2006.
ZOU Bin, ZHOU Hao, LI Xiao-gang. Electricity market theory and application [M]. Beijing: Beijing University Press, 2006.
- [6] 郭伟伟,刘家学,马云龙,等. 基于改进 RBF 网络算法的电力系统短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(23):45-46.
GUO Wei-wei, LIU Jia-xue, MA Yun-long, et al. Optimal algorithm of electric power system's short-term load forecasting based on radial function neural network[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (23): 45-46.
- [7] Chiu S L. Fuzzy model identification based on cluster estimation[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 1994, 2 (3): 67-278.
- [8] 吴兴华,周晖. 基于减法聚类及自适应模糊神经网络的短期电价预测[J]. 电网技术,2007,31(19):70-71.
WU Xing-hua, ZHOU Hui. Short-term electricity price forecasting based on subtractive clustering and adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. Power System Technology, 2007, 31 (19): 70-71.
- [9] Kennedy J, Eberhart R. A new optimizer using particle swarm theory[C].//Proceeding Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science.1995. 39-43.
- [10] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. // Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks. 1995. 1942-1948.

收稿日期:2009-08-07; 修回日期:2009-09-25

作者简介:

陆宁(1980-),女,讲师,博士研究生,研究方向为人工智能技术在电力系统中的应用; E-mail: susanln@163.com

周建中(1959-),男,教授,博士生导师,研究方向为复杂系统建模的先进理论与方法;

何耀耀(1982-),男,博士研究生,研究方向为智能优化算法在水电能源系统中的应用。

(上接第 64 页 continued from page 64)

收稿日期:2009-08-11; 修回日期:2009-10-12

作者简介:

王锐(1956-),女,高级工程师,长期从事继电保

护及自动化专业技术管理工作;

曹丽璐(1983-),男,工程师,从事继电保护及自动化技术研发工作; E-mail: caolilu@xjgc.com

杨东海(1973-),男,工程师,从事继电保护及自动化技术研发工作。