

# 基于 IEC 61850 标准的智能电子设备 及变电站自动化系统的测试

吴俊兴<sup>1</sup>, 胡敏强<sup>1</sup>, 吴在军<sup>1</sup>, 奚国富<sup>2</sup>, 杜炎森<sup>1</sup>

(1. 东南大学 电气工程系, 江苏省 南京市 210096; 2. 国网南京自动化研究院, 江苏省 南京市 210003)

## Testing of IEC 61850 Based Intelligent Electronic Device and Substation Automation System

WU Jun-xing<sup>1</sup>, HU Min-qiang<sup>1</sup>, WU Zai-jun<sup>1</sup>, XI Guo-fu<sup>2</sup>, DU Yan-sen<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China;

2. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** IEC 61850 is the only international standard for communication network and system for digital substation in the future. The essential target of this standard is to realize the interoperability, thus the tests for the standard are performed around this target, which include two layers: verifying that whether the IEDs possesses interoperability or not, i.e., the conformance test; verifying that whether the integrated IEDs possesses the ability to implement substation automation or not, i.e., the interoperability test. The authors emphatically present the test flowchart of substation automation system; and combining with the developed digital protection platform, the conformance test is researched. Finally, the importance of evaluating the test quality and corresponding evaluation measures are presented.

**KEY WORDS:** IEC 61850; intelligent electronic device (IED); substation automation system; conformance test; interoperability test

**摘要:** IEC 61850 标准是未来数字化变电站通信网络与系统的唯一国际标准, 其主要目标是实现互操作, 因此标准的测试活动也就围绕该目标进行, 包括 2 个层次: 验证智能电子设备(intelligent electronic device, IED)是否具有互操作的能力, 即一致性测试; 验证 IED 集成在一起完成变电站自动化功能的能力, 即互操作性测试。文章重点介绍了变电站自动化系统的测试流程, 并结合开发的数字化保护平台对其一致性测试进行了探讨, 最后介绍了对测试质量进行评估的重要性及评估手段。

**关键词:** IEC 61850; 智能电子设备(IED); 变电站自动化系统; 一致性测试; 互操作性测试

基金项目: 江苏省科技攻关项目资助(BE2005075)。

## 0 引言

随着变电站自动化技术的发展, 越来越多的多功能智能电子设备(intelligent electronic device, IED)被集成到系统中<sup>[1]</sup>, 它们具有强大的处理能力和通信能力, 但由于缺乏统一的通信标准, IED 间无法方便地进行信息的共享, 限制了其功能的发挥。IEC 61850 标准正是在这种背景下应运而生, 实践证明, 该标准能很好地解决各厂商设备间的互操作性问题, 同时运用抽象通信服务接口(abstract communication service interface, ACS/CSI)技术将应用与具体协议分离, 是一种面向未来的标准(具有后向兼容性)。国内外的厂商、组织对该标准做了大量的研究和实践工作。在 2002 年 ABB、Siemens、Alston 等国外公司进行的各厂家 IEC 61850 系统的互操作性测试中, 参与测试的产品就已经达到了实际应用水平<sup>[2]</sup>。2006 年 3 月国内首套符合 IEC 61850 标准的变电站自动化系统顺利投运。可以预见, 该标准必将成为下一代数字化变电站通信的主流。

IEC 61850 标准的引入必将改变传统变电站自动化系统的功能结构、通信结构, 进而对变电站的设计、实现、测试、运行、培训、维护等工作提出新的要求。鉴于标准刚刚推广实施, 目前的工作主要集中在标准的完善、验证、理解和实现阶段, 各厂商的测试工作主要是对自己产品进行协议一致性测试。前期的互操作性测试是为了对标准草案的正确性、合理性进行验证, 而后期的测试则考虑到工程的实现<sup>[3]</sup>。即便如此, 实现真正意义上符合标准的

变电站自动化系统仍需进行大量的测试工作, 尤其对于稳定性运行要求很高的电力系统来说。

本文结合已开发的支持过程总线的新型架构数字化保护平台, 介绍基于 IEC 61850 标准的 IED 和变电站自动化系统的基本测试流程, 重点介绍设备的一致性测试、测试环境的建立和测试用例的设计, 同时对测试质量评估的重要性及评估手段进行介绍。

## 1 IEC 61850 标准简介

对符合 IEC 61850 标准的 IED 或变电站自动化系统进行测试, 首先必须熟悉了解标准, 介绍标准的文章很多<sup>[4-12]</sup>, 这里不再赘述, 主要介绍一下标准中涉及到测试的内容。

IEC 不是认证机构, 并不对产品是否符合标准进行评判, 这样做的好处是各厂商可以自由设计自己的产品, 充分体现了开放性。但这并不意味着产品按照 IEC 61850 标准设计就可以满足互操作性要求。标准的第 10 部分提供了评判标准, 定义了变电站设备一致性测试与性能测试的方法, 并对产品一致性及其有效性验证测试环境的建立给出了指导, 但未给出设备间互操作性测试的建议。

与传统 IED 相比, 符合标准的 IED 需要花费额外的时间处理接口与通信<sup>[13]</sup>, 因此为满足不同变电站自动化功能的需求, 除了互操作性外, 通信网络的性能测试必不可少, 必须满足标准第 5 部分定义的变电站内报文传输的性能要求及不同变电站功能的性能要求<sup>[14]</sup>。

## 2 基于 IEC 61850 标准的变电站自动化系统测试流程

IEC 61850 按照变电站自动化系统所要完成的控制、监视和保护 3 大功能提出了变电站内功能分层的概念, 无论从逻辑概念上还是物理概念上, 首次将变电站的功能分为 3 个层次, 即变电站层、间隔层和过程层, 并且定义了层与层之间的通信网络, 如图 1 所示。

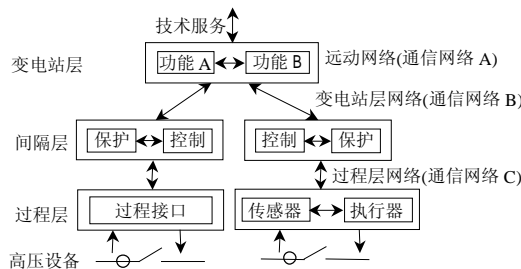


图 1 变电站功能分层模型

Fig. 1 Layer model of substation function

对于符合标准的变电站自动化系统来说, 其抽象测试模型可借鉴该分层模型, 而具体的测试模型需根据不同的应用和组网情况来确定, 这里利用分层抽象模型来定义变电站自动化系统测试的基本流程。将多功能 IED 看成是变电站的基本单元, 类似于软件的测试, 变电站的测试流程也可划分为以下步骤:

(1) 单元测试(unit level test): 从变电站的分层结构来看, 构成变电站的最小单元是 IED, 一般来说, 其结构功能模型如图 2 所示, 其中的功能模块完成 IED 的主要功能, 如保护、控制、测量、监控等, 通信接口模块负责处理与其它 IED 间的信息交换。该测试也就是标准第 10 部分定义的 type test, 一般由生产商执行, 测试关注 IED 的功能实现, 并未涉及到 IED 通信行为的测试。



图 2 功能 IED 的功能模型

Fig. 2 Functional model of IEC 61850-based IED

(2) 集成测试: 该测试就是标准中定义的一致性测试, 是 IEC 61850 标准测试的核心部分, 主要关注的是 IED 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。很明显, IED 只有在符合协议标准的前提下才能实现与其它 IED 的互操作, 测试内容既包括对 IED 的信息模型及信息交换模型(ACSI)的测试, 也包括对服务映射到具体通信协议(SCSM)和 IED 配置的测试。

(3) 系统测试: 也称为互操作性测试。实际上变电站设备的互操作性分为 3 个层次: ①从语法的角度看, 设备间可以通用的协议通过公共的总线相连; ②从语义的角度看, 设备可理解其它设备提供的信息内容; ③各设备可组合起来协调完成变电站的自动化功能。互操作性测试实际上也同样分为上述 3 个层次, 前面 2 个层次的测试也就是集成测试所关注的内容, 验证被测设备是否具有互操作能力。而最后 1 个层次属于系统测试的范畴, 需根据具体的变电站应用、实际组网情况建立测试模型, 验证符合标准的设备集成到变电站后是否真正实现了无缝连接。

(4) 性能测试: 也是一致性测试的关键部分, 本文从测试流程的角度考虑将其单列出来。测试中重点关注的是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。从前面变电站的分层模型可以看出, 变电站的数据

通信网络可分为 3 个不同层次的物理通信网络, 即运动网络、变电站层网络和过程层网络, 文献[15]对变电站内的数据流进行了分析和建模, 同时对后 2 种通信网络的实时性能进行了分析和验证。

一般来说, 测试活动贯穿于变电站开发的整个生命周期, 包括很多类型的测试, 以上介绍的仅是涉及到 IEC 61850 标准部分的测试流程, 涵盖了对符合标准的变电站自动化系统测试的基本环节, 本文将结合具体的保护装置探讨设备的一致性测试。

### 3 设备的一致性测试

#### 3.1 符合标准的数字化保护平台

按标准分层设计的数字式保护平台结构如图 3 所示<sup>[16]</sup>, 其中的通信网络 C 为过程层网络, 通信网络 B 为变电站层网络, 2 个网络均选用了 10/100 Mbps 自适应以太网, 测试的对象就是具体的保护装置。

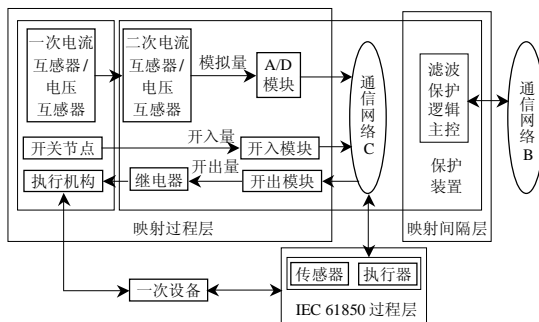


图 3 数字式保护平台的结构  
Fig. 3 Structure of IEC 61850-based digital protection platform

对设备的一致性测试必须满足以下 2 个需求: 静态一致性需求和动态一致性需求, 这些需求在以下 3 篇文档中有描述: 协议实现一致性描述 (protocol implementation conformance statement, PICS): 对被测系统或设备能力的描述; 模型实现一致性描述 (model implementation conformance statement, MICS): 对被测系统或设备支持的标准数据对象模型元素的详细描述; 协议实现额外信息描述 (protocol implementation extra information for testing, PIXIT): 对被测系统或设备能力相关的系统特有信息的描述。这些文档都是产品设计时对其提出的关于通信的需求, 也是进行一致性测试的基础。

#### 3.2 测试环境的建立

对于该保护平台的一致性测试需建立最基本的测试环境, 如图 4 所示, 该测试环境同样适用于一般 IED 的一致性测试。

基于标准的仿真器根据不同的应用场景充当

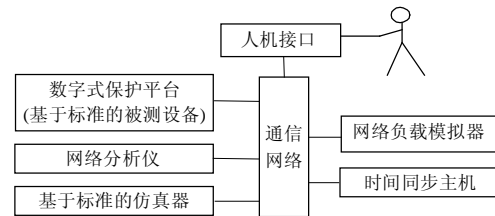


图 4 数字式保护平台的测试环境  
Fig. 4 Test environment of IEC 61850-based digital protection platform

客户机或服务、发布者或订阅者, 甚至同时充当 2 种角色, 其作用是模拟具体应用产生和发起报文, 记录并处理保护装置的响应报文, 它可以是第 3 方的测试工具, 也可以是自己开发的测试工具。

通信网络就是前面介绍的变电站层网络或过程层网络(运动网络不在讨论之列), 由于均使用了 10/100 Mbps 自适应嵌入式以太网, 可将 2 个网络合一, 所有设备都通过以太网交换机相连接。

对于传统变电站来说, 过程层与间隔层之间仍通过二次电缆连接, 其测试环境有所不同, 模拟器与被测 IED 直接通过电缆相连, 模拟器模拟一次设备的各电气量, 并接受被测 IED 发出的控制、跳闸等信号, 如图 5 所示。

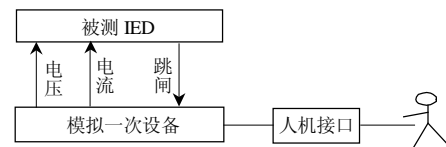


图 5 传统 IED 的测试环境  
Fig. 5 Test environment of traditional IED

但随着数字式光电流、电压互感器和智能断路器技术的不断发展, 过程层设备的智能化程度越来越高, 并具有计算机数据通信接口, 能实现现场数据和控制命令的实时、可靠、数字化传输, 传统的二次电缆连接终将被过程层数字通信网络所替代, 到时其测试环境也与图 4 类似。

网络分析仪器是测试环境中的重要角色, 用于监控网络中的 IEC 61850 信息流量, 记录、分析并报告监测的结果。

网络负载模拟器可用于变电站通信网络性能仿真与测试<sup>[17]</sup>, 其作用是模拟变电站实际运行中通信网络中的各种数据流, 根据文献[15], 它必须能产生 3 种不同类型的数据: 周期性数据、随机性数据和突发性数据, 以获取不同应用场景下的网络性能数据。

人机接口方便测试人员对设备的配置和对测试过程的监视。时间同步主机负责对被测设备提供时间同步。对于分布式应用, 测试环境中还应该有

第2台被测设备或由模拟器模拟该被测设备。

### 3.3 设备一致性测试的内容和过程

一致性测试需要结合 IED 的具体实现、信息模型和信息交换模型,以数字式保护平台实现的变压器保护为例,它包括以下功能:保护功能(差动速断保护、谐波制动的比率差动保护和电流速断保护)、测量功能、控制功能、故障录波和人机接口。其基于标准的信息模型如图 6 所示<sup>[18-19]</sup>,图中: IHMI(human machine interface)为人机接口; PDIF(differential)为差动保护; PHAR(harmonic restraint)为谐波制动; PIOC(instantaneous overcurrent)为瞬态过电流保护; MMXU(measurement)为测量功能,包括电压、电流、有功、无功和功率因数的测量; CSWI(switch controller)为断路器控制功能; XCBR(circuit breaker)为断路器; TCTR(current transformer)为电流互感器; TVTR(voltage transformer)为电压互感器。

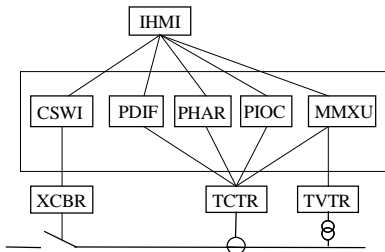


图 6 数字式变压器保护设备的信息模型  
Fig. 6 Information model of digital transformer protection device

根据 IEC 61850 标准的第 10 部分定义,数字式保护平台一致性测试的标准测试内容和过程如下:设备的版本控制及文档的审核;根据标准的第 6 部分测试设备配置文件的语法;根据标准的 7-3、7-4 部分测试设备配置文件中定义的对象模型;根据标准的第 8、9 部分测试具体协议栈的实现;根据标准的 7-2 部分测试 ACSI 服务的实现;测试基本的通信功能(不是与应用相关的特定通信功能);测试根据标准定义的与应用相关的扩展通信功能;测试设备时间同步能力与时标的精确度;测试设备的控制响应时间;测试设备商所提供的设备性能指标。

### 3.4 一致性测试用例的设计

一致性测试用例描述的是应该测试什么,是测试工作中必须遵守的准则和指导,良好的用例设计可以确保以最少的投入(人力、时间、资源)最大限度地发现产品的缺陷。对于一致性测试用例设计,需要考虑的最主要因素是用例全面性。测试用例基本上应包含所有需要实现的需求功能,覆盖率应达

100%,因此,应尽可能考虑到设备运行的各种场景,既要验证设备在正常条件下其功能的实现情况(positive test),也要验证设备能否正确地处理响应各种异常情况(negative test)。一般来说,用例要能代表并覆盖各种合理的和不合理的、合法的和非法的、边界的和越界的、极限的输入数据、操作和环境设置等情况。

标准的第 10 部分设计了部分测试服务器的用例,包括文档和版本控制测试用例、配置文件测试用例、数据模型测试用例和 ACSI 服务模型的测试用例。

### 3.5 测试用例的格式

标准中对测试用例的格式进行了规范,包括用例的编号、测试的目标、测试操作的过程、预期的操作结果、实际测试结果和备注等,笔者认为需要加上测试人员和测试时间,便于日后测试质量的跟踪和回溯。

## 4 测试工作的质量评估

以上介绍了设备的一致性测试,它是设备间互操作的基础,一致性测试的有效性直接影响到变电站自动化系统的稳定运行。IEC 61850 标准中除了介绍协议的一致性测试外,还用了很大篇幅谈到了测试的品质管理,包括测试机构的选取(符合 ISO 9001、ISO 9002 标准)、测试过程的监控,因为衡量测试有效性的标准并非关注测试本身的内容,更多的是对测试过程的监控(测试品质管理)。

在一致性测试中,测试的品质管理与软件测试评估类似,可将测试活动分为几个阶段,如图 7 所示。每个阶段都有相应的入口条件、出口条件、时间点等。入口条件包括进行该阶段测试所需的设备、人员、资金、计划、文档等准备工作,只有满足这些入口条件才能进行下一步测试活动;出口条件主要是验证该阶段测试工作的有效性,如是否完成测试、是否提供了测试报告、测试中的问题是否得到解决、测试是否按时完成、是否有遗留问题等,只有满足所有这些条件才意味着本阶段测试工作的结束,也是下一阶段测试启动的必要条件。

各阶段中间就是控制点(hold point),测试活动在该点暂停,负责对出口条件进行检查。在每个测

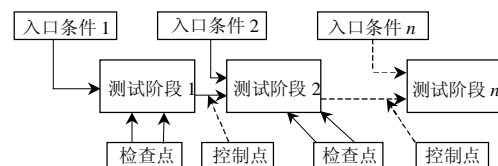


图 7 一致性测试流程  
Fig. 7 Flow chart of conformance test

试阶段中存在检查点(witness point), 但与控制点不同, 这些点仅是为了解测试的信息, 并不影响测试活动的进行, 在这些点上进行监控是为测试活动提供参考, 为相应的测试人员提供服务, 对测试中出现的偏差、变化进行相应的调整。

## 5 结论

本文探讨了数字化变电站的一致性测试, 包括测试的流程、测试环境的建立、测试用例的设计、测试内容等方面, 最后介绍了测试质量评估的重要性和评估手段。随着 IEC 61850 标准的推广实施, 越来越多的厂商加入到该阵营中, 更多的基于标准的设备将投入变电站自动化系统中, 而规约的一致性测试是产品投入使用前的必经阶段。鉴于规约一致性测试所要求的公正性、专业性、权威性和强制性, 必须建立专业的测试机构开展该项活动。

## 参考文献

- [1] 杨奇逊. 变电站综合自动化技术发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 145-146.  
Yang Qixun. Development trend of integrated protection and control in power substations[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(3): 145-146(in Chinese).
- [2] Wong G, Brand K P, Rudolph T. Interoperability testing and validation of IEC 61850 protective relays[C]. Anais do International Protection Testing Symposium, 2004.
- [3] 操丰梅, 任雁铭, 王照, 等. 变电站自动化系统互操作实验建议[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 86-89.  
Cao Fengmei, Ren Yanming, Wang Zhao, et al. Advices on interoperability test of substation automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 86-89(in Chinese).
- [4] 吴在军, 胡敏强. 变电站通信网络和系统协议 IEC 61850 标准分析[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(11): 70-72.  
Wu Zaijun, Hu Minqiang. Analysis of IEC 61850-communication networks and system in substations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(11): 70-72(in Chinese).
- [5] 任雁铭, 秦立军, 杨奇逊, 等. IEC 61850 通信协议体系介绍和分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(4): 62-64.  
Ren Yanming, Qin Lijun, Yang Qixun, et al. Study on IEC 61850 communication protocol architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 62-64(in Chinese).
- [6] 谭文恕. 变电站通信网络和系统协议 IEC 61850 介绍[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 8-15.  
Tan Wenshu. An introduction to substation communication network and system—IEC 61850[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 8-15(in Chinese).
- [7] 谭文恕. IEC 61850 和 IEC 60870-6(TASE.2)的比较[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 1-4.  
Tan Wenshu. Comparison of IEC 61850 with IEC 60870-6(TASE.2) [J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 1-4(in Chinese).
- [8] 任雁铭, 秦立军, 杨奇逊. UCA 通信协议体系介绍[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 69-72.  
Ren Yanming, Qin Lijun, Yang Qixun. An introduction to UCA

- communication architecture[J]. Power System Technology, 2000, 24(8): 69-72(in Chinese).
- [9] 吴在军, 胡敏强. 基于 IEC 61850 标准的变电站自动化系统研究[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 61-65.  
Wu Zaijun, Hu Minqiang. Research on a substation automation system based on IEC 61850[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 61-65(in Chinese).
- [10] 徐立子. IEC 61850 对变电站自动化系统报文性能的要求[J]. 电网技术, 2002, 26(11): 1-3,19.  
Xu Lizi. Requirement of IEC 61850 to performance of messages for substation automation system[J]. Power System Technology, 2002, 26(11): 1-3,19(in Chinese).
- [11] 张结. IEC 61850 目标内涵分析[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 76-80.  
Zhang Jie. Analysis on intension of objectives in IEC 61850 [J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 76-80(in Chinese).
- [12] 张结, 卢德宏. 自动机理论在 IEC 61850 中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 34-38.  
Zhang Jie, Lu Dehong. Analysis on application of automata theory in IEC 61850[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 34-38(in Chinese).
- [13] Apostolov A, Vandiver B. Functional testing of IEC 61850 based IEDs and systems[C]. IEEE Power Systems Conference and Exposition, New York, USA, 2004: 640-645.
- [14] IEC 61850. Communication networks and system in substation[S].
- [15] 吴在军. 变电站内部通信网络与系统的研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- [16] 窦晓波, 吴在军, 胡敏强. 借鉴 IEC 61850 功能分层的保护装置的设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 65-70.  
Dou Xiaobo, Wu Zaijun, Hu Minqiang. Design of protection by referring to function leveling in IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 65-70(in Chinese).
- [17] 谷米, 贺仁睦. 变电站通信网络性能的仿真研究[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 70-74.  
Gu Mi, He Renmu. Simulation and research of performance of communication network in substation[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 70-74(in Chinese).
- [18] 窦晓波, 吴在军, 胡敏强, 等. IEC 61850 标准下合并单元的信息模型与映射实现[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 80-86.  
Dou Xiaobo, Wu Zaijun, Hu Minqiang, et al. Information model and mapping implementation of merging unit based on IEC 61850 [J]. Power System Technology, 2006, 30(20): 80-86(in Chinese).
- [19] 吴在军, 窦晓波, 胡敏强. 基于 IEC 61850 标准的数字保护装置建模[J]. 电网技术, 2005, 29(21): 81-84.  
Wu Zaijun, Dou Xiaobo, Hu Minqiang. Modeling of digital protective device according to IEC 61850[J]. Power System Technology, 2005, 29(21): 81-84(in Chinese).

收稿日期: 2006-09-01。

作者简介:

吴俊兴(1972—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统保护及变电站自动化, E-mail: [dino\\_wu@126.com](mailto:dino_wu@126.com);

胡敏强(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事工程电磁场计算、电机及其控制技术、电气主设备状态监测与故障诊断等方面的研究; 吴在军(1975—), 男, 讲师, 主要从事变电站自动化系统的研究; 奚国富(1965—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为调度自动化系统、农网自动化系统;

杜炎森(1942—), 男, 教授, 长期从事电气主设备的微机检测、控制及故障诊断等方面的教学和研究开发工作。

(责任编辑 沈杰)