

以 IR46 电表测试为例的硬件检测综述

黄吉涛¹, 周媛奉¹, 梁飞¹, 樊博¹, 胡婷婷¹, 张家宁², 李开慧³

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750002; 2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;
3. 河南许继仪表有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 随着泛在电力物联网概念在电网建设中的不断推行, 以智能电表为代表的电力物联网末端智能感知设备面临着越来越多的新要求。因此, 关于符合 IR46 国际标准的智能电表的设计和测试受到了广泛的关注。智能电表的设计过程需要使用硬件测试技术进行完善设计和质量验证。以 IR46 电表的硬件测试过程为例, 对同类产品的硬件测试问题进行了综述, 并结合 IR46 电表的特点进行了分析。通过探讨新一代智能电表的硬件测试技术, 为泛在电力物联网的推进做出了必要研究。

关键词: 泛在电力物联网; IR46; 智能电表; 硬件测试

A survey of hardware detection using IR46 meter test as an example

HUANG Jitao¹, ZHOU Yuanfeng¹, LIANG Fei¹, FAN Bo¹, HU Tingting¹, ZHANG Jianing², LI Kaihui³

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750002, China;
2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
3. Henan Xuji Instrument Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: With the continuous implementation of the Ubiquitous Power Internet of Things (UPIoT) concept in power grid construction, the smart IoT terminal intelligent sensing device represented by smart meter is facing with more and more new requirements. Therefore, the smart meter conforming to the IR46 international standard is taken as an example, whose design and testing has received wide attention. The design process of smart meter needs to use hardware test technology to improve design and quality verification. This paper takes the hardware test process of IR46 meter as an example, combining with the characteristics of the IR46 meter, summarizes the hardware test process of similar products. By discussing the hardware testing technology of the new generation of smart meters, the necessary research has been done for the promotion of the ubiquitous power IoT.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5229DK18003G).

Key words: UPIoT; IR46; smart meter; hardware test

0 引言

泛在电力物联网^[1-3]理念要求在推进电网建设的过程中充分利用智能化、先进的设备和新技术, 将新一代电力系统与“大云物移智”等信息通信技术进行深度融合和渗透^[4-8], 其中新一代智能电表作为泛在电力物联网体系中重要的通信和末端智能感知设备^[9-11], 是完成对电网全面创新、构建国家能源互联网高质量建设中的重要环节。OIML TC12 在 2014 年针对智能电表发布了 IR46 建议^[12]并被国家

标委会收入了国标, 为了完善智能电表的生产和使用规则, 国网和南网也将以此为标准建立企标, 设计生产符合新标准的电能表的相关工作已展开。

目前, 已有学者对 IR46 标准新型智能电表(以下简称 IR46 电表)的设计进行了研究^[13], 当下国内对 IR46 电表的设计理念一般采用“双芯智能电表”的设计理念, 对应的对 IR46 电表的检测研究提出使用故障注入等方法进行电能表软件的可靠性测试^[14]。面对新标准带来的新要求, 智能电表在设计 and 生产中会遇到更多的挑战^[15], 同时, 新规定下智能电表的设计过程必然需要配合硬件测试来验证电能表产品的设计, 对 IR46 电表的软件可靠性测试需要在硬

件测试的流程中进行。

当下成熟的产品设计和实用性检测流程中,硬件测试作为对产品设计正确性的验证受到越来越广泛的关注,好的硬件测试对设计产品和验证产品质量都有重要的作用。目前已有学者对电子产品的硬件测试技术研究进行过简要探讨^[16]。综上所述,本文以 IR46 标准智能电表为代表的电子产品的硬件测试技术为对象进行研究和总结,试图为同类产品的硬件测试提供综述性的参考,并结合新型智能电表的特点进行具体分析,配合已有的物联网配电系统检测、测试等技术^[17-20],为泛在电力物联网的智能化终端建设中的关键仪器智能电表的生产和测试提供指导。

为实现上述目的,本文第 1 节总结了硬件测试的相关概念,并以 IR46 电表为例进行了举例说明;第 2 节介绍了智能电表硬件测试相关标准,给出了 IR46 电表的概念并根据其特点分析了硬件测试中

的着重点;第 3 节介绍了硬件测试的故障模式影响分析和 IR46 电表的硬件测试需求。

1 硬件测试概述

本文以 IR46 智能电表硬件测试为例进行通用的硬件测试研究,在介绍通用的硬件测试概念和一般步骤的同时结合了 IR46 电表的特性和要求等进行探讨,本节首先对硬件测试技术进行概述。

1.1 硬件测试的概念

对智能电表等相关电子设备进行硬件测试是以发现设备错误为目的的操作过程,整个测试过程是为了证明设计有错,而不是证明设计无错,因此优秀的硬件测试的目的是发现设备使用至今未发现的错误,成功的硬件测试定义为:测试出“至今未发现的错误”的测试。图 1 所示为硬件测试的一般流程,各阶段测试过程对应的测试计划与准备、测试应生成的结果。

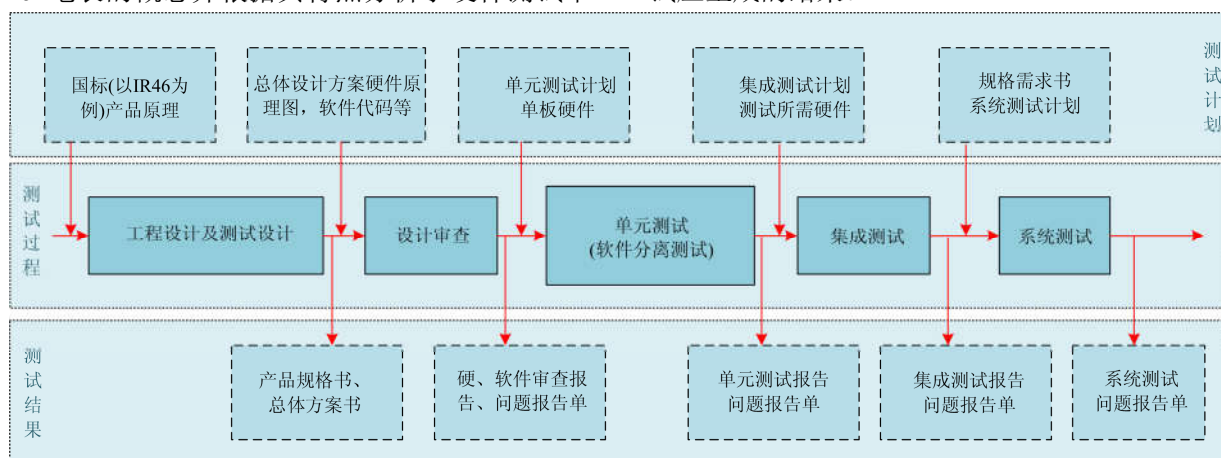


图 1 以 IR46 电表检测为例的硬件检测一般流程

Fig. 1 General procedure for hardware detection using IR46 meter as an example

1.2 硬件测试的目的

对智能电表等电子设备的硬件测试的关注点有以下几点:首先是产品规格功能的实现,IR46 标准对新一代智能电表提出了新的要求,因此相关的硬件测试要实现智能电表是否符合 IR46 标准功能。其次硬件测试需要检测产品的可靠性,对从传统电能计量装置升级的智能电表的可靠性检测需综合考虑传统电表和新型电表的薄弱环节。此外,硬件测试还应该关注被检测设备的可测试性和易用性等。通过关注以上方面可以实现对电子设备硬件测试的目标:实现产品零缺陷。

为了尽可能地逼近产品规格功能实现的零缺陷,对设备进行硬件测试的作用是对潜在故障和设计隐患等的排除,是实现产品零缺陷目标的保障。

需要说明的是,产品零缺陷的实现需要产品在最底层设计时开始构建,对于满足 IR46 标准的智能电表,其功能的实现依赖于软件和硬件的可靠设计,硬件测试能对产品缺陷和不足进行查找,结合改进产品中的函数代码和硬件中的每一个单元电路等,才能最终达到使产品逼近零缺陷的目的。

图 2 给出了一般意义上的硬件测试的种类及其代表性的测试,对硬件测试的种类进行了列举,其中硬件测试可靠性数包括可靠度(availability)、平均故障时间(Mean Time Between Failure, MTBF)、平均失效时间(Mean Time To Failure, MTTF)、平均拆卸间隔时间(Mean Time Between Removals, MTBR)、平均修复时间(Mean Time To Repair, MTTR)、可靠度 $R(t)$ 和失效率,其中可靠度指规定工况和时间内产品完成规定功能的概率,失效率的计算如式(1)所示,

其中 γ 为失效率, $MTBF$ 为平均故障时间, $Fits$ 是失效率的单位。

$$\gamma = 1/MTBF(Fits) \quad (1)$$

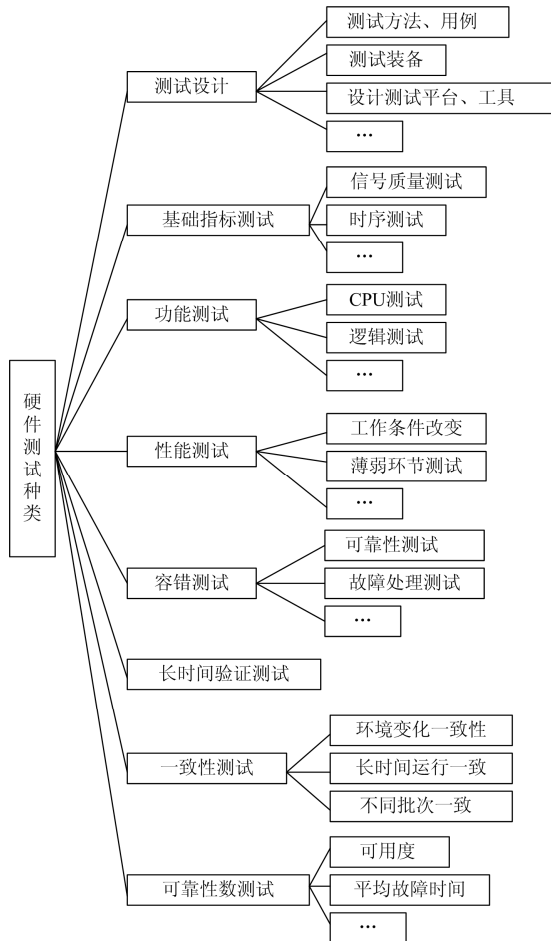


图 2 通用的硬件测试种类

Fig. 2 General types of hardware testing

1.3 硬件测试的意义

随着国家标委会开始推进将 IR46 标准纳入国标,将电能表设计与 IR46 标准相结合,设计和生产能在泛在电力物联网系统中承担末端智能感知能力的新电能表,需要面对许多新改变和新挑战^[21],因此在设计和生产的过程中需要通过硬件测试来辅助产品的设计和改良。换言之,对产品的硬件测试的目的不仅仅是为了找出错误,通过分析错误原因和错误的分布特征等,总结设备设计过程中出现的疏忽和错误,可以完成对产品的改进。同时,随着测试的深入和经验的积攒,结合具体产品的特性,对测试过程中产品独具的运行关键点进行分析,根据产品本身的设计特点着重地进行检测方法的改良,可以不断地改善测试的有效性。

值得一提的是,硬件测试作为完善产品功能和

纠正当前设计缺陷的必要步骤,即使在测试的过程中没有发现错误,也是有价值的测试。首先,在测试的过程中可以完善测试方法,使硬件测试不断针对产品的特殊性进行改良。其次,完整的测试是评定测试质量的方法之一,通过硬件测试可以完成质量评定的检查。

1.4 目前业界硬件测试的开展情况

随着人们消费水平和对产品质量要求的不断提高,越来越多的硬件测试工作在产品研发阶段被投入,并且投入比例开始由开发倾斜向测试。目前,国际知名企业中有很大一部分的产品研发部门的人员配比已经出现了测试人员远远多于开发人员的现象,同时由于硬件测试人员需要对产品运行到产品设计进行全局把控,企业对硬件测试人员的技术水平要求也高于开发人员。

2 IR46 标准智能电表及其测试特点

IR46 标准是国际法制计量组织制定的智能电表制作标准,与传统智能电表的区分在于 IR46 标准规定电表有更高的计量部分的可靠性,因此针对 IR46 标准的智能电表的设计和检测应更多地倾向于计量部分是否满足标准要求的可靠性,本节对 IR46 标准电表进行介绍,为其设计硬件测试做必要准备。

2.1 智能电表测试标准

从功能上定义一般认为智能电表是一种具有双向通信功能的智能化的、具有计量功能的电能表仪器,可以理解为在传统电能表的基础上添加双向通信技术功能的仪表,根据其标准化工作,可以将智能电表的工作模块分为传统电能表模块、通信模块和附加功能模块三个部分。因此,在针对智能电表的检测中,单元测试可分为对传统电能表模块的检测、对通信模块的检测和对附加功能模块的检测。

其中,对传统电能表模块的检测由于历史悠久,相关经验丰富,有关于此模块的标准和相关检测工作已经成熟和完善:国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)对 IEC62052/53、EN5047 以及 ANSI 12 等系列传统电能表的检测都有对应的系统的规定,智能电表是由传统普通型电能表发展而来,因此相应的传统电能表模块的硬件测试应该参照相应规定。国际法制计量组织(OIML)制定的电能表国际性技术法规 IR46 国际建议也从指导生产和法制管理方面对智能电表的电能表模块进行规范性建议,相应地催生了主流国家和组织编写了适应地区和国家的标准,其中有代表性的有欧

盟 EN50470 标准以及美国的 ANSI12 系列标准。

由于通信模块和附加功能模块的功能定义具有发展迅速、换代速度较快以及地区差异大等特点,因此寻找一个通用的检测规范进行直接套用的实际意义不大。目前国际上倾向于对智能电表的硬件架构和软件部分达成相应的功能和技术条件的要求,一般对于一个智能电表的开放式硬、软件架构要求包括:

- 1) 智能电表架构可升级;
- 2) 智能电表架构应兼容当前通信介质,并有能力适应未来通信介质;
- 3) 智能电表可进行双向通信;
- 4) 智能电表架构的通信标准需要优先考虑计量模块,可以安全地进行数据交换。
- 5) 智能电表架构的通信协议开放,支持用户和供应商进行先进的信息管理;
- 6) 智能电表方案支持模块化、完全一体化等各种方案。

2.2 IR46 标准电表

IR46 标准要求优先保障智能电表的计量性能,因此在对 IR46 标准电表的性能和测试标准中需要着重考虑电能表的计量性能保护,IR46 电表的计量性能保护主要包括软件标识、防误操作、防欺诈、参数保护、电子设备和组件分离、软件分离、数据存储、通信传输参数保护、自动存储、传输延时和传输中断、时间戳、维护和重新配置等方面内容。

智能电表的软件程序是典型的嵌入式程序,嵌入式系统本身具有实时性、内容丰富度差和 I/O 通道少的特点,因此目前没有针对于 IR46 标准的软件分离要求的通用检测平台,需要针对软件 and 具体要求进行进一步的分析和测试。目前有方法提出使用基于错误的测试、软件故障测试和探索性测试等非正常测试方法对电能表的性能进行测试。

软件方面,目前使用优化测试路径的白盒测试等方法^[22-23]对 IR46 标准的电表软件的测试项目包括:对最大允许误差符合度的测试(5 项)、对影响量的测试(16 项)、对干扰的测试(16 项)、对组合误差的评估(2 种形式)。其中测试有两种综合误差评估形式:基于本标准要求的组合的最大允许误差的评估和基于型式测试结果和特定条件的组合误差的评估。

同时,针对 IR46 标准电表的硬件测试需要从标准本身的着重点、电能表升级为新型智能电表中遇到的新问题和新要求出发寻找测试的重点。其中,传统电表转换为国网根据 IR46 标准制定的智能电表要求的新电表面临的新问题主要包括:电池欠压问题、需求不能变更问题和通信协议问题等三个

主要问题。由于 IR46 标准的重要设计理念是将电能计量单位和管理功能端作为独立的模块在物理层进行隔离,两者中管理端如果发生故障计量端也能正常地运行,因此对电能表的各个模块提出了新要求,图 3 直观地表现了智能电表各模块需要迎合 IR46 标准产生的新需求。

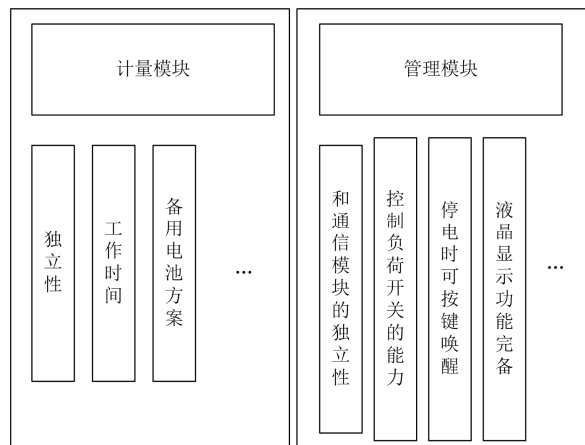


图 3 IR46 标准对智能电表各模块的需求

Fig. 3 IR46 standard requirements for smart meter modules

3 硬件测试研究

由于针对不同产品的硬件测试具有比较大的差异性,需要结合具体产品的特点进行测试设计。本文无法给出通用且准确的测试步骤和测试条件,但硬件测试的方法和通用的分析手段有较大的参考意义,可以结合不同产品具体的测试需求进行设计,本节介绍硬件测试的故障模式影响分析和 IR46 电表的测试需求。

3.1 硬件测试前的故障模式影响分析

在对产品进行硬件测试前,需要对产品在测试中可能出现的故障进行分析,研究故障模式和可能对系统造成的影响,此时需要进行故障模式影响分析^[24](Failure Mode Effects Analysis, FMEA)。FMEA 是分析产品或系统中每一个部分可能产生的故障,并对其可能对系统造成的影响进行推断,按照潜在故障可能对系统产生的影响,对故障模式的严重程度、检测难易程度和发生频度特性进行评估的一种归类分类方法。

FMEA 的层次可根据级别分为信号级、器件级和系统级。其中信号级的任务是对接口信号和相关的特殊器件进行分析,对 IR46 电表来说信号级对应的硬件测试更多地面对通信模块;器件级是指以产品的各个功能模块为对象分析其可靠性,不同标准对产品的具体功能模块的可靠性要求不同,以 IR46 标准为例,要求智能电表的计量性能作为设计和测

试的优先考虑对象,因此针对 IR46 标准的器件级故障模式影响分析的重要对象应针对传统电能表模块;故障模式影响分析的第三个层面为系统级,是面对产品自身分析整体可靠性。为了定义并有效地进行测试中的故障模式影响分析,对产品的硬件测试通常需要事先进行严酷度等级的设置,根据不同的故障对设备的影响程度可以将严酷度分级别定义,如表 1 所示。

表 1 严酷度定义

Table 1 Operating status of SCSM

类别	名称	描述
1 类	灾难的	致人死亡、系统毁坏的故障
2 类	致命的	引起人员严重伤害、产生重大经济损失、导致系统严重损坏
3 类	临界的	引起人员轻度伤害、一定的经济损失或导致系统延误
4 类	轻度的	不威胁人员安全,不威胁系统但是会导致非计划的维护

通用的 FMEA 的分析步骤如图 4 所示。主要步骤有故障检测和检测到故障的处理流程等,图中对检测到故障的处理流程具体步骤进行了说明。其中风险分析方法常用的有:风险优先数法(Risk Priority Number, RPN)和危害性分析法(Criticality Analysis),前者常用于民用领域,后者更多地被运用在军工领域,以 IR46 电表硬件测试为应用场景的硬件测试可使用 RPN 进行风险分析。

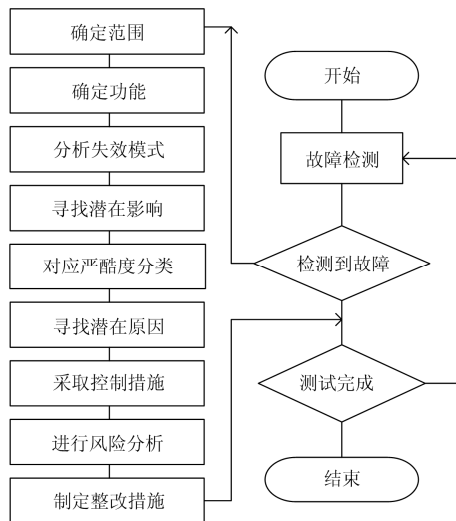


图 4 通用的 FMEA 的分析步骤

Fig. 4 General FMEA analysis steps

在硬件测试和实际的产品使用中,故障是无法避免的,因此通过故障处理将故障产生的影响降到最低并产生有意义的故障记录和分析是进行硬件测

试过程的重要一环,通常,故障处理的步骤如下:

1) 故障检测

故障检测是故障处理的前提,故障检测的定义是:明确到故障已经发生的过程。目前故障检测的过程一般通过软硬件结合的方法让系统在故障发生后自动地进行检测,对于可能误测的故障还有多次检测确认的必要。

2) 故障定位

故障定位的对象是现场中可更换的最小单元,准确的故障定位是故障维修的基础,方便维修工程人员进行现场的故障维修。

3) 故障隔离

为了将已被检测到和定位的故障所产生的影响尽可能地降低,需要考虑将故障限定在尽可能小的功能单元。

4) 故障恢复

故障恢复是在对故障进行处理后将系统工作状态恢复到故障前,该步骤决定了系统运行的稳定程度。

3.2 IR46 标准电表的测试需求

针对产品的硬件测试设计的出发点是各产品依照的设计规格,根据具体的产品规格标准,一般从产品设计功能、可靠性、指标性能需求和组网等方面对具体产品的测试进行设计。

由于电能表的关键功能是准确地根据法定计量进行金额计算,目前 IR46 电表的设计和检测重点为将智能电表软件部分中的计量部分和通信模块等进行分离设计和测试。在对 IR46 电表进行测试时对计量基表和其他功能模块的独立性和容错能力等性能进行验证时,一种合理的测试方法是使用故障注入的方式,需要测试的被注入故障^[25]的测试一般包括:测试外设越权访问是否影响到计量程序和计量准确度、测试内存越界访问时是否干扰电能表的计量精度甚至造成死机等、电能表被恶意修改堆栈和出现 PC 跑飞时是否干扰到电能的技术和造成死机等。

4 结论

泛在电力物联网是现阶段我国发展能源互联网的重要一环,实现泛在电力物联网的构建是我国电网公司从传统电网企业转型综合能源服务企业的关键点,在推进泛在电力物联网的过程中,生产研发和使用新规定下的电能表需要配合硬件测试技术。为此,本文对硬件测试技术进行了综述,介绍了硬件测试的概念、目的和意义等,对通用的硬件测试步骤和硬件测试种类进行了介绍。本文中硬件

测试介绍以 IR46 电表为应用对象,介绍了目前与智能电表测试相关的测试标准,在介绍了 IR46 电表的概念的情况下对 IR46 标准在硬件测试中提出的新要求与测试重点进行了介绍。本文在第 3 节介绍了硬件测试中通用的故障模式分析和 IR46 电表的测试需求。

本文中的介绍对 IR46 电表和其他相类似产品的硬件测试均具有指导意义,但是本文只是对此做出综述和研究,没有进行具体的测试设计和实现,相关的工作还需要更进一步的研究。

参考文献

- [1] 余贻鑫. 智能电网实施的紧迫性和长期性[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 1-5.
YU Yixin. Urgency and long-term nature of smart grid implementation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 1-5.
- [2] 姚力. 基于 OIMLR46 国际建议的智能电表设计[J]. 电测与仪表, 2017, 54(16): 95-99.
YAO Li. A design of smart meter based on OIML R46 international recommendation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(16): 95-99.
- [3] 杨东升, 王道浩, 周博文. 泛在电力物联网的关键技术与应用前景[J]. 发电技术, 2019, 40(2): 107-114.
YANG Dongsheng, WANG Daohao, ZHOU Bowen. Key technologies and application prospects of ubiquitous power internet of things[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(2): 107-114.
- [4] 张勇军, 陈泽兴, 蔡泽祥, 等. 新一代信息能源系统: 能源互联网[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 1-7.
ZHANG Yongjun, CHEN Zexing, CAI Zexiang, et al. New generation of cyber-energy system: energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 1-7.
- [5] 钱峰, 陈艺, 刘俊磊, 等. 大规模风电接入的电力系统协调控制策略[J]. 广东电力, 2019, 32(11): 12-18.
QIAN Feng, CHEN Yi, LIU Junlei, et al. Coordinated control strategy for power systems with large-scale wind power integration[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(11): 12-18.
- [6] 任江波, 孙仲民, 顾乔根, 等. 计及储能全寿命周期运维的综合能源系统优化配置[J]. 广东电力, 2019, 32(10): 71-78.
REN Jiangbo, SUN Zhongmin, GU Qiaogen, et al. Optimizing configuration of integrated energy system considering full life cycle operation and maintenance of energy[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(10): 71-78.
- [7] WU F F, PPHUIRSY V. Smart grids with intelligent periphery: an architecture for the energy internet[J]. Engineering, 2015, 1(4): 436-446.
- [8] 曹军威, 万宇鑫, 涂国煜, 等. 智能电网信息系统体系结构研究[J]. 计算机学报, 2013, 36(1): 143-167.
CAO Junwei, WAN Yuxin, TU Guoyu, et al. Information system architecture for smart grids[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(1): 143-167.
- [9] 王建龙, 蒙根. 实验室环境下的智能电表载波模块通信测试[J]. 电测与仪表, 2012, 49(4): 38-41.
WANG Jianlong, MENG Gen. The PLC module communication test of smart meters under the laboratory's environment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(4): 38-41.
- [10] 高强, 张保航, 谷海青. 用户端电能管理系统的研究现状与发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 148-155.
GAO Qiang, ZHANG Baohang, GU Haiqing. Current situation and development of client electric management system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 148-155.
- [11] Energy-Smart Grids. Findings from Indian Institute of Science update understanding of smart grids (application of smart meters in high impedance fault detection on distribution systems)[J]. Energy Weekly News, 2019.
- [12] 郜波. 一种基于 IR46 理念的智能电能表设计方案研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(17): 77-81.
GAO Bo. Research of smart meter design scheme based on IR46[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(17): 77-81.
- [13] 闫书芳, 张晓东, 朱国富, 等. 符合 IR46 标准的电能表设计研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(8): 144-147.
YAN Shufang, ZHANG Xiaodong, ZHU Guofu, et al. Research on design of smart meter complying with IR46 standard[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(8): 144-147.
- [14] 欧习洋, 曾幼松, 冉晓红, 等. IR46 智能电能表软件可靠性设计与测试研究[J/OL]. 电测与仪表: 1-6[2019-10-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20190821.1509.006.html>.
- [15] 王姐. 智能电表计量误差来源分析及其抑制方法探究[J]. 电子测试, 2019(7): 92-93.
WANG Dan. Analysis of measurement error sources of smart meters and exploration of its suppression methods[J].

- Electronic Test, 2019(7): 92-93.
- [16] 陶建光. 电子产品硬件测试分析与研究[J]. 信息与电脑(理论版), 2019(11): 15-16.
TAO Jianguang. Electronic product hardware test analysis and research[J]. China Computer & Communication, 2019(11): 15-16.
- [17] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [18] 高淑萍, 胡振宇, 张保会, 等. 一种适用于 MMC-HVDC 直流输电线路的保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 13-20.
GAO Shuping, HU Zhenyu, ZHANG Baohui, et al. A new relay protection principle of MMC-HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 13-20.
- [19] BERNIERI A, BETTA G, FERRIGNO L, et al. Electrical energy metering in compliance with recent european standards[C] // 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceeding, May 13-16, 2012, Graz, Austria: 1541-1545.
- [20] 胡致远, 杨炳炉, 朱咏梅, 等. 输变电设备物联网在线监测系统 通信网络设计[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2252-2258.
HU Zhiyuan, YANG Binglu, ZHU Yongmei, et al. Design for communication network of internet in on-line monitoring system for power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2252-2258.
- [21] PANTELI M, MANCARELLA P. The grid: stronger, bigger, smarter[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2015, 13(3): 58-66.
- [22] GHIDUK A S. Automatic generation of basis test paths using variable length genetic algorithm[J]. Information Processing Letters, 2014, 114(6): 304-316.
- [23] VIVEKANANDAN K, MEGALA T, CHANDINI P. Automatic generation of basis test path using clonal selection algorithm[C] // Proceedings of International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES). [S.l.]: IEEE Press, 2016: 1-4.
- [24] 储呈晨, 李斌, 郑蕴欣. 医用超声诊断仪设备探头故障模式分析[J]. 中国医疗设备, 2019, 34(10): 6-9, 1.
CHU Chengchen, LI Bin, ZHENG Yunxin. Analysis of the fault mode of the probe of medical ultrasonic equipment[J]. China Medical Devices, 2019, 34(10): 6-9, 1.
- [25] LIANG Gaoqi, WELLER S R, ZHAO Junhua, et al. The 2015 Ukraine blackout: implications for false data injection attacks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3317-3318.

收稿日期: 2019-09-17; 修回日期: 2019-10-21

作者简介:

黄吉涛(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智慧能源数据采集与应用; E-mail: 252477315@qq.com

周媛奉(1982—), 女, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电能计量装置检验检测; E-mail: 78380112@qq.com

梁飞(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为用电信息采集技术。E-mail: 2740918454@qq.com

(编辑 魏小丽)