

IEC 61850一致性测试技术

一致性测试试验是智能电子设备（IED）投入使用前对其IEC 61850兼容性进行检测的必要手段。首先简要介绍了IEC 61850一致性测试技术发展的历史和现状；其次根据一致性测试的基本内容，详细总结配置文件一致性测试和IED设备一致性测试存在的问题，并结合形式化描述技术，提出使用扩展Petri网和Pi演算描述IED设备服务模型的方法；最后根据现场实际运行情况总结一致性测试技术存在的问题并提出解决措施。

周鸿鹄^{1,2} 郑永康¹ 栗然² 刘明忠¹ 刘涛¹ / 1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 2. 新能源电力系统国家重点实验室（华北电力大学）

0 引言

按照工业生产的流程，变电站自动化系统的测试技术可分为4步^[1]。第一步主要针对单个智能电子设备，由制造商执行，可在制造厂进行的测试，主要包括例程测试（Routing Test）、型式试验（Type Test）、系统相关测试（System Related Test）和工厂验收（Factory Acceptance Test, FAT）。第二步主要由第三方检测机构执行，检测智能电子设备的通信实现是否符合IEC 61850协议的要求，即一致性测试（Conformance Testing）。一致性测试的要求由协议实现一致性陈述（Protocol Implementation Conformance Statement, PICS）文件给出。第三步主要由不同设备厂商共同完成，检测来自不同厂家或同一厂家的多个智能电子设备能否实现互操作，即互操作性测试（Interoperability Testing）。第四步现场验收（Site Acceptance Test, SAT），即

对现场变电站自动化系统（SAS）的每一个数据和控制点进行功能验证。

需指出的是，第一步所进行的各种测试已经融入IED设备生产制造的过程中，为制造商生产合格IED产品提供保证，且不能被一致性测试和互操作性测试所取代。一致性测试是互操作性测试的基础，实现IED设备之间和变电站网络模型各层设备之间的互操作是一致性测试的最终目标^[2]。现场验收则是SAS投入运行的先决条件。

1 国内外历史及研究现状

IEC 61850 Ed1.0标准在制定过程中融入了一系列的互操作试验^[3]。早在1998年1月German utility VEW、Research Institute FGH就开始组织ABB、Siemens等公司进行互操作试验。1998~2004年，国外先后进行了5次互操作试验，文献[3]详细介绍了各次互操作试验的情况。在2004年举行的国际大电网会议展示上，ABB、Siemens等厂家推出相对成熟的产品^[4]。2005~2010年，国际上没有进行大范围的互操作试验，只进行小范围的展览性活动。随着各厂家对IEC 61850协议认识的进一步深入，IED设备的数量和种类都大幅增加，不同厂家IED产品的互操作问题也日趋严重，阻碍了IEC 61850协议的进一步推广。因此，UCA用户协会成立专门的测试方案工作组，进行相关测试方案的编写，并发起国际互操作大会。2011年3月28日，国际互操作大会在法国巴黎举行。此次互操作试验主要针对网络性能、变电站配置



周鸿鹄/硕士研究生

关键词/Keywords

IEC 61850 ·
一致性测试 ·
IED设备一致性测试 ·
形式化描述 ·

国网四川省电力公司2014年科技项目
(5219991351VN)。

语言 (SCL) 配置、客户/服务器、GOOSE事件和SV发布/订阅5个方面进行^[5]。试验发现了许多导致IED设备之间互操作问题的因素,并给出相关的建议,促进了IEC 61850 Ed2.0的修订和相关工程规范的编写。2011年11月和2012年7月在印尼先后进行了两次国际互操作测试^[6],由国内外八大电力设备厂家共同完成,为国内企业增加了海外配置的经验。2013年国际互操作试验规模为历次最大,SCL测试用例、SV互操作测试用例和Client/Server互操作测试用例的数目均比上届大幅增加,测试更加全面。

国内的互操作试验相对于国外起步较晚。2005~2006年,国家电网调度中心先后组织了6次IEC 61850的互操作试验,并邀请国内外厂家共同参与^[7]。这6次互操作试验主要实现了厂家通信服务之间的互联,测试项目有限,缺少评判标准,所使用的产品大部分为试验品,因此具有很大的局限性,离实际工程应用仍有较大差距。2006~2007年,中国电力科学研究院对西安供电公司的两个110 kV变电站进行测试,发现了数据模型方面的问题,但是该测试仅限于间隔层和站控层之间通信,没有涉及过程层^[8]。2008年起,广东电网公司全面推进变电站自动化系统建设,并根据IEC 61850标准,搭建了测试平台,总结国内外的测试经验,并进行了较为全面的互操作性测试。此次测试被测产品众多,测试内容丰富,总计发现1 934项错误,为国内IED产品规范化生产和应用打下了基础^[9]。与此同时,国内还进行了包括对220 kV鹿鸣变电站^[10]和500 kV桂林变电站^[11]的一致性测试。2011年,四川省电力科学研究院使用KEMA一致性测试工具对220 kV昭觉变电站^[12]进行了测试,丰富了现场测试技术,发现并解决了现场存在的问题。

2 一致性测试工具

一致性测试工具可分为报文分析器、仿真模拟器、观测器以及SCL语法检查工具。报文分析器能够自动分析并显示报文,检测出报文中的错误信息,并提供报文存储功能。仿真模拟器用于

模拟控制中心、变电站和IED设备等功能,可细分为GOOSE报文模拟器、客户端模拟器和IED模拟器。观测器用于在线获取通信数据,存储日志文件并提供给报文分析器进行离线分析。SCL语法检查工具用于检测配置文件是否符合Schema的定义。

目前市场上使用较多的测试系统是由KEMA公司提供。KEMA公司的测试系统由UniCA 61850 Analyzer (报文分析器)、UniCASim 61850 GOOSE Simulator (GOOSE报文模拟器)、UniCASim 61850 Client Simulator (客户端模拟器)、UniCASim Multi 61850 IED Simulator (IED模拟器)和61850 Observer (观测器)组成。通过KEMA测试的产品,由KEMA公司颁发权威认证^[12]。德国TUV一致性测试软件,在2012年8月底获得UCA认可,此测试软件的底层MMS库由澳大利亚一家公司提供,测试逻辑和测试步骤基本与KEMA类似。

变电站配置描述语言 (SCL) 基于可扩展标记语言 (XML),而XML是一种简单的数据存储语言,已经成熟应用于通信网数据传输领域,其语法检查工具已经十分成熟。因此能够对ICD、IID、SSD、SED和SCD文件进行语法检查的工具相对较多^[13]。其中,Altova XMLSpy提供了一种灵活创建、编辑和管理XML文档的开发环境,主要检查配置文件是否符合XML的语法定义。IEC 61850 SCL-Validator提供了一种配置文件在线测试方法,其测试效率较低,适合初期开发配置文件较少的测试。IED Scout测试工具的Checking Model只提供简单的配置文件测试,测试不全面。UniCA SCL Checker是KEMA公司提供的配置文件测试工具,能够根据IEC 61850定义的XSD文件全面检测ICD、SSD和SCD配置文件的合法性,测试结果较为权威。

IEC 61850 Ed2.0新增了IID和SED文件,并对IEC 61850 Ed1.0中的部分错误进行修订;因此相应的专业测试软件应进行版本更新,提供对IID和SED文件测试的技术支持^[14-15]。目前,UniCA SCL Checker已经能够提供对符合IEC 61850 Ed2.0标准的测试文件的检测。此外,IEC 61850 Ed2.0还新增了IED配置工具和系统配置工具的一致性测试。

3 一致性测试内容

3.1 协议内容简介

IEC 61850 Ed1.0测试项目繁多,大体上分为配置文件测试项、数据模型测试项与ACSI模型和服务映射测试项^[2]。配置文件测试主要检测ICD文件与SCL文件类型定义是否一致、ICD文件与实际DUT的参数描述是否一致,以及ICD、SSD和SCD文件是否符合IEC 61850 Ed1.0标准定义的Schema文件的规定。数据模型测试主要包括检测强制对象、条件对象及对象的数据类型和属性值等方面。ACSI模型和服务映射测试的每一项都包括肯定测试和否定测试,肯定测试使用正常条件验证,并检测响应正确,否定测试使用异常条件验证并检测响应错误。ACSI模型和服务映射测试项目较多,涉及应用关联、属性、定值组、日志、控制模型、取代模型、时间同步和文件传输等。

IEC 61850 Ed2.0对服务器端测试案例、性能测试案例进行了补充,包括对GOOSE通信延迟的测试;并新增了对客户端、SV和工程工具一致性的测试案例,弥补了IEC 61850 Ed1.0的不足。在配置文件方面,IEC 61850 Ed2.0明确规定IED文件只能由IED配置器修改,SCD文件只能由系统配置器修改;并新增了IID和SED文件,分别用于对系统集成过程中IED模型文件的修改和变电站内多个项目之间SCD文件交互的描述^[15]。

3.2 配置文件一致性测试

工程配置流程中所使用的配置文件如图1所示^[15],包括:IED能力描述文件(ICD)、IED配

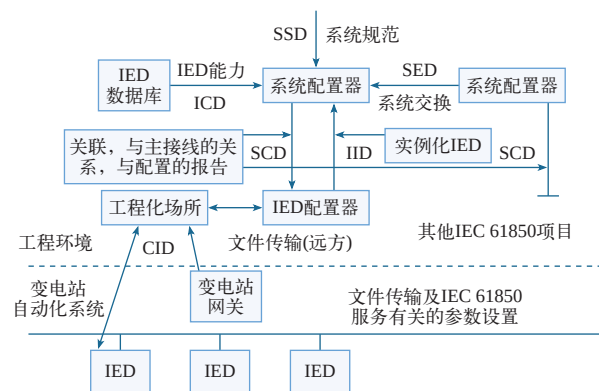


图1 工程配置过程信息流参考模型

置描述文件(CID)、系统规范描述文件(SSD)和变电站配置文件(SCD),以及IEC 61850 Ed2.0中新增的实例化IED描述文件(IID)和系统交换描述文件(SED)。

配置文件测试内容包括文件良构性、文件有效性、信息完整性、信息一致性、配置一致性和模型一致性。文献[13]对此进行了细致的描述,并深入探讨了对扩展数据项和数据属性类型的测试方法,以及工程中的实际应用。

IEC 61850 Ed2.0中新增了IID和SED文件。IID文件用于描述系统集成过程中ICD文件的修改,因此,测试时应检查ICD文件修改的内容和IID文件中的修改记录是否一一对应。SED文件描述多个项目之间SCD文件交互,因此,测试时也需结合相应的SCD文件。文献[13]提出的配置文件测试内容及方法能否应用于IID和SED文件,以及对IID和SED文件进行一致性测试时应增加哪些测试项目仍需进一步讨论研究。

3.3 IED设备一致性测试

IED设备一致性测试主要检测IED设备通信接口与标准规定的一致性,可分为静态一致性测试和动态一致性测试。静态一致性测试根据静态一致性测试要求对IED设备的协议实现一致性陈述(PICS)文件和模型实现一致性陈述(MICS)文件进行静态一致性检查。动态一致性测试主要检测IED设备的动态行为是否符合PICS文件、MICS文件和测试协议实现之外的信息(PIXIT)文件的描述。一致性测试流程如图2所示。文献[16]指出IED测试难点主要是由于模型多样化(信息模型、服务模型、模型可扩展和功能的自由分布)、模型语义隐含、发布者/订阅者模型引入和IED自描述服务对关键消息的影响。IED设备一致性测试系统结构如图3所示^[16]。

IEC 61850 Ed2.0对数据类型和逻辑节点的扩充必然会增加IED一致性测试的复杂性,因此,相应的IED一致性测试工具应进行升级。此外,对于建设周期较长的智能变电站,可能出现前期施工使用的IED设备符合IEC 61850 Ed1.0标准,而后期

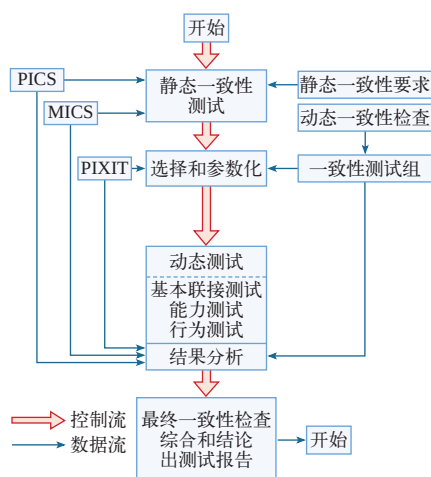


图2 一致性测试评估过程

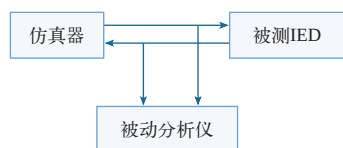


图3 一致性测试系统结构

施工使用的IED设备符合IEC 61850 Ed2.0标准的情况。按照不同版本的IEC 61850协议开发的IED设备共网运行将带来一系列的问题，例如，两种IED设备间通信、客户端对两种IED设备的兼容性、交换机端口流量控制对两种IED设备的影响、报文内容及格式的改变等都需进一步研究。

随着IED设备种类和服务数量的增加，其功能趋向专一化，现有的KEMA和TÜV的一致性测试系统将不能满足如此种类繁多的IED设备模型及服务一致性测试的要求，需针对功能不同的IED设备开发专用一致性测试平台。文献[17]开发了一种保护IED装置通信模型规范化测试平台，能够实现对基于IEC SCL schema和Q/GDW 396—2009标准开发的保护IED装置的模型测试；文献[18]分析了在线监测系统各部分的功能，开发了在线监测IED设备一致性测试仿真系统，针对在线监测系统的各个部分提出一致性测试方案。

专一化IED设备一致性测试系统的研制方法可借鉴文献[19]提出的在线监测IED设备功能测试方法，其基本思想是以测试用例为对象，采用面向对象技术开发测试代码，用系统引擎控制测试流程，完成自动测试。这种方法的优点是：对于功

能相同，版本或厂家不同的IED设备，测试代码只需开发一次，代码重复利用率高，开发周期短，开发成本低；对IED装置进行升级时，只需针对新增功能进行代码开发和系统引擎维护，可扩充性强。IEC 61850协议的制定采用了面向对象技术，因此IED设备一致性测试自动化系统的开发也应采用该技术。

3.4 通信延迟和时间同步与准确度测试

IEC 61850—10将通信网络性能测试的通信延迟和时间同步与准确度囊括其中，并且在第二版中增加GOOSE通信延迟的测试方案。因此，网络延迟和时间同步与准确度可看作一致性测试的一部分。文献[20]研究了500 kV智能变电站的通信特点，分析了网络延迟的影响因素主要包括交换机固有延时、存储转发延时、排队延时、链路传输延时和交换机的层数，并针对具体的通信网结构给出测试方法；文献[21]利用OPENT Modeler建立两层星形拓扑结构的智能变电站通信网络模型，并分析了不同采样频率下的SV报文延迟；文献[22]分析了交换机组网后的网络延迟原因，并指出网络负载重的情况下延迟会大幅增加；文献[23]总结了智能变电站时间同步技术的关键技术问题，并提出采用GPS实现全站时间同步的技术；文献[24]通过研究IRIG—B码对时和IEC 61588对时两种方案的各项指标，确定过程层时间同步方式。文献[25]分析了网络时间同步系统在智能变电站应用中的优势与不足，并给出时间同步系统的安全评估方法，对智能变电站的安全运行有一定的意义。

IEC 61850 Ed2.0新增了80多种逻辑节点，不可避免地带来了网络流量的增加，因此对支持IEC 61850 Ed1.0的智能变电站进行系统升级，使其支持IEC 61850 Ed2.0协议时，应重新进行通信延迟测试。此外，IEC 61850 Ed2.0将通信标准扩展到风力发电、水力发电等领域。对于大型的风电场，风机数量众多，采用IEC 61850协议作为通信标准，对其通信网进行性能测试时，负载模拟器能否模拟满足要求的数据内容和流量需进一步研究。目前几乎所有的网络延迟测试都是针对单一

的智能变电站系统，对于含有多个智能变电站的通信网系统的延迟测试研究鲜有报道。

4 一致性测试模型形式化描述

IEC 61850通信协议内容采用自然语言描述。由于自然语言存在二义性，协议实现者对协议的不同理解将导致协议的不同实现，进而出现互操作问题，甚至错误^[26]。采用流程图或信号流图等方法，对智能变电站一致性测试模型进行形式化描述，将有助于消除自然语言的二义性，减少互操作问题。

文献[26]提出了基于扩展的有限状态机(EFSM)的方法，对智能变电站的一致性测试模型进行描述。该方法突出事件的状态转移，克服了流程图描述过于繁琐的问题，但用该方法描述复杂系统时，因状态空间以及事件执行动作的增多而导致描述复杂化。文献[27]采用行为树(BT)对IED设备互操作模型进行描述。该方法采用按功能划分的子树结构，有效分解了IED设备互操作的复杂过程。文献[28]在顺序通信进程(CSP)的基础上加入时间相关操作，形成Timed CSP形式化描述语言，描述IED设备交互功能及系统行为，该方法能有效检测模型中的潜在缺陷。

目前一致性测试模型的形式化描述研究主要集中在交互模型方面，缺少服务模型方面的形式化描述研究。一致性测试模型方面的形式化描述研究仍处于起步阶段，因此所提出使用扩展Petri网和Pi演算的方法对一致性测试服务模型进行形式化描述。

4.1 一致性测试模型的Petri网描述

Petri网在离散事件系统建模中有着广泛的应用。文献[29]提出了一种适用于通信网络仿真建模的扩展Petri网，通过对传统Petri网的扩展，可实现对通信网节点的建模。采用扩展Petri网对文献[26]中的“读单个条目的目录”测试重新建模，“转移”包括输入条件 $\text{pre}(t)$ 和功能动作 $\text{fn}(t)$ ，建模结果如图4所示。

P 为位置集， $P = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$

T 为转移集， $T = \{t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9\}$

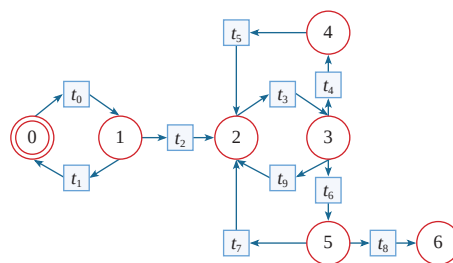


图4 测试“读单个条目的目录”的Petri网模型

$t = (\text{pre}(t), \text{fn}(t))$

$\text{pre}(t_0) = (\text{True})$

$\text{fn}(t_0) = (\text{type} = 21, \text{INF} = 243, \text{COT} = 42,$

$\text{ComAddr} = x, \text{NOG} = 1, \text{RII} = y, \text{GIN} = z, t_1 = 0)$

$\text{pre}(t_1) = (t_1 > T_1)$

$\text{pre}(t_2) = (\text{ACD} = 1)$

$\text{fn}(t_2) = (t_i = 0, t_m = -T_i)$

$\text{pre}(t_3) = (t_i > T_i)$

$\text{fn}(t_3) = (t_1 = 0)$

$\text{pre}(t_4) = (C = 0x19)$

$\text{fn}(t_4) = (t_i = 0)$

$\text{pre}(t_5) = (t_m > T_m)$

$\text{pre}(t_6) = (\text{type} = 11, \text{VSQ} = 0x81, \text{FUN} = 254, \text{INF} = 243, \text{ComAddr} = x, \text{RII} = y, \text{GIN} = z, n_NDE = \text{count}, f_NDE = F_NDE)$

$\text{fn}(t_6) = (t_i = 0, F_NDE = F_NDE \wedge 1)$

$\text{pre}(t_8) = (m_NDE = 0)$

$\text{pre}(t_9) = (t_1 > T_1, \text{ack0} = \text{True})$

P 中“位置”的含义与文献[26]中状态定义相同， t 中各变量含义与文献[26]中各变量定义相同，增加 t_9 是为了区分是否接收到确认帧。

通过使用扩展Petri网对“读单个条目的目录”测试项建模，不仅刻画了测试过程的动态行为，而且可以引入数学方法对网络的性质，包括状态可达性、位置有界性和变迁活性等进行形式化的证明分析，进一步验证服务模型构建的合理性。

4.2 一致性测试模型的Pi演算描述

进程代数中的Pi演算方法在Web服务的形式化描述中已有应用^[30]，Web服务和IED设备服务有相似的特点，因此可以考虑将该方法引入到IED设备服务的形式化描述中。IED的定值组设定服务如图5

所示,使用文献[30]中Pi描述方法对其进行建模。

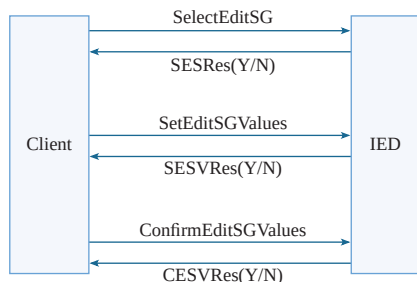


图5 定值组设定服务

客户端和IED进程描述如下。

$c=d=\{x, SES, SESResY, SESResN, SESV, SESVResY, SESVResN, CESV, CESVResY, CESVResN\}$

$Client(c) = x \langle SES \rangle. x(msg). ([msg = SESResN] Client(c) + [msg = SESResY] (x \langle SESV \rangle. x(msg1) ([msg1 = SESVResN] Client(c) + [msg1 = SESVResY] (x \langle CESV \rangle. x(msg3) ([msg3 = CESVResN] Client(c) + [msg3 = CESVResY] Client(c))))))$

$IED(d) = x(msg). ([msg = SES](x \langle SESResY \rangle + x \langle SESResN \rangle) + [msg = SESV](x \langle SESVResY \rangle + x \langle SESVResN \rangle) + [msg = CESV](x \langle CESVResY \rangle + x \langle CESVResN \rangle))$

其中, x 为客户端和IED设备之间的唯一通道; “{ }” 表示自由名集 “ $x \langle \rangle$ ” 表示通道 x 发送消息; “ $x()$ ” 表示通道 x 接收消息; “[]” 表示消息匹配; “|” 表示并行执行。

定值组设定服务可以描述如下。

$s = c = d$

$IEDserver(s) = Client(c) | IED(d)$

上述进程描述可通过MWB工具校验其正确性。

此处将IED设备简化为单一进程,而在实际工程一个IED设备内部往往包含多个进程。对涉及多个IED内部进程通信的一致性测试服务建模时,应使用内部通道,处理方法与文献[30]中订票服务和机票数据服务间的 y 通道类似。

IEC 61850 Ed2.0 在多个领域进行了扩展,协议二义性的问题不可避免的会增加,对协议内容合理、统一的形式化描述将大大减少标准的二义性,提高系统的互操作性能。

5 现阶段一致性测试存在的问题

5.1 一致性测试软件存在的问题

一致性测试软件发展相对成熟,但依然存在以下几个方面的问题: ① 测试用例的设计没有考虑日志服务和SV收发服务。在实际工程中,日志服务和SV收发服务已经大量应用,缺少这两个方面测试用例,将影响测试的严谨性和权威性; ② 测试用例的设计仅考虑了IEC 61850标准的测试需求,并没有考虑国内电力企业的实施和测试规范,不利于国内规范的推广; ③ 测试软件仅面向通信服务做孤立测试,不考虑各种CDC模型下的服务处理情况,影响测试的全面性; ④ 被测IED和测试软件系统之间没有形成闭环,测试过程中需要测试人员手动改变多种物理量,操作繁琐,且影响测试结果的质量和可信度; ⑤ 测试软件对测试人员素质要求较高,没有采用图形化测试的方法,让用户通过搭建简单的测试逻辑来完成一致性测试。

5.2 现场运行环境下存在的问题

由于实验室测试环境和现场运行环境存在差异,厂家提供的用于一致性测试试验的IED设备和现场实际运行的IED设备之间也存在差别。因此,即使通过了一致性测试的IED设备在现场实际运行中也会存在诸多问题。由于智能变电站现场运行环境下IED设备数量大种类多,某个IED设备模型或者服务等信息的改变导致全站配置信息修改的工作量大,现场调试人员需要花较多的时间进行信息校核。本文根据现场实际运行情况对现场一致性测试存在的问题总结如下。

1) 现场设备的模型、服务、私有配置和全站配置的问题层出不穷,调试人员的技术参差不齐,调试工作量大、耗时多,缺少一套完整的一致性系统解决方案。

2) 各个厂家ICD文件的改变、虚端子和虚端子连接关系变化、IED的通信参数(MAC、IP地址)的变化、后续工程改扩建设计等,导致SCD版本不断变化。因此,亟需能够输入任意两个版本SCD文

件作对比,并能直观差异的SCD文件比对工具。

3) SCD文件配置设计工具是否完善,设计师技术水平的高低和工作细节的处理都影响虚端子连线配置的正确性。许多虚端子连线错误只有在施工和调试阶段才能发现,有些错误甚至在投运后的跳闸事故中才能发现。因此,迫切需要能够依据设计规范或规则,自动校核虚端子连线正确性的工具。

4) 由于各个厂家存在私有的配置文件,导致过程层通信离线配置和在线配置很难管控。同时,GDW396—2012提出采用CRC来管理过程层的配置文件。现场管理的需要以及技术发展的趋势,都需要采用CRC管理过程层通信。

5) 各个厂家的设备技术水平不同,国内规范和国际标准也在不断完善,V2版本的推出,考验着设备服务的一致性。面对现场众多的IED设备,若有一致性测试工具能够依据最新的国内规范和国际标准,自动核实设备服务的一致性,将大大减轻现场调试的工作量。

6 结束语

对IEC 61850协议一致性测试技术的内容、发展历史及现状进行了简要概括,并结合IEC 61850 Ed2.0对配置文件测试、IED设备测试和网络延迟及时钟同步与准确度测试分别进行阐述,总结了IEC 61850 Ed2.0协议对各个测试环节的影响,简要介绍了一致性测试模型形式化描述方法,并引入扩展Petri网和Pi演算的方法,对协议一致性测试服务进行建模,提出了目前一致性测试软件和现场一致性测试技术存在的问题。本文对一致性测试工作的开展具有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] IEC 61850—10 Communication networks and systems in substations: part 10 conformance testing [S]. 2006.
- [2] 崔厚坤,汤效军,梁志成,等. IEC 61850一致性测试研究[J]. 电力系统自动化,2006,30(8): 80-83, 88.
- [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.
- [4] 何卫,王永福,缪文贵,等. IEC 61850深层次互操作试验方案[J]. 电力系统自动化,2007,31(6): 103-107.
- [5] 贺春,张冉. IEC 61850国际互操作试验经验总结[J]. 电力系统自动化,2012,36(2): 6-10.
- [6] 王自成,曹卫国. IEC 61850国际互操作的总结和思考[C]. 2013年中国电机工程学会年会论文集,2013: 5.
- [7] 辛耀中,王永福,任雁铭. 中国IEC 61850研发及互操作试验情况综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(12): 1-6, 72.
- [8] 张燕涛,黄伦,王庆平,等. IEC 61850标准一致性测试的方案和现场应用[J]. 电力系统自动化,2008,32(4): 98-102.
- [9] 陈炯聪,高新华,潘璠. IEC 61850互操作测试分析[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(15): 121-123, 127.
- [10] 王勇,何光宇,梅生伟. 基于IEC 61850的数字化变电站互操作试验[J]. 电力自动化设备,2009,29(2): 136-139.
- [11] 潘勇斌,申狄秋,杨乘胜. 基于IEC 61850的变电站自动化系统一致性测试[J]. 电力自动化设备,2009,29(4): 143-146.
- [12] 郑永康,刘明忠. 使用KEMA测试工具开展IEC 61850一致性测试[J]. 四川电力技术,2011,34(2): 18-20, 68.
- [13] 王珍珍,孙丹. IEC 61850配置文件测试的研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(6): 95-98, 123.
- [14] 李永亮,李刚. IEC 61850第2版简介及其在智能电网中的应用展望[J]. 电网技术,2010,34(4): 11-16.
- [15] 任雁铭,操丰梅,张军. IEC 61850 Ed 2.0技术分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(3): 1-5, 53.
- [16] 徐天奇,尹项根,游大海,等. 兼容IEC 61850标准的智能电子设备测试[J]. 电力自动化设备,

- 2009, 29 (3): 132-137.
- [17] 丁国兴, 王宏彦, 邱建斌, 等. 继电保护装置 IEC 61850通信模型规范化测试软件开发 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (17): 96-101.
- [18] 王德文, 阎春雨, 毕建刚, 等. 变电设备在线监测系统中IEC 61850的一致性测试 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (2): 79-85.
- [19] 王德文, 葛亮. 变电站在线监测智能电子设备的自动化测试 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (14): 84-89.
- [20] 刘昊昱, 左群业, 张保善. 智能变电站过程层网络性能测试与分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (18): 112-116.
- [21] 窦晓波, 胡敏强, 吴在军, 等. 数字化变电站通信网络性能仿真分析 [J]. 电网技术, 2008, 32 (17): 98-104.
- [22] 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.
- [23] 雷霆, 李斌, 黄太贵. 220 kV变电站GPS时间同步系统实现技术 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (11): 71-74.
- [24] 韩本帅, 孙中尉, 崔海鹏, 等. 智能变电站过程层时间同步方式研究 [J]. 中国电力, 2012, 45 (11): 86-90.
- [25] 黄鑫, 王永福, 张道农, 等. 智能变电站IEC 61850时间同步系统与安全评估 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (13): 76-80.
- [26] 王延安, 余义传, 张丹, 等. 一种基于EFSM的变电站通信协议一致性测试模型描述方法 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (4): 91-94.
- [27] 熊海军, 朱永利, 张凡, 等. 基于行为树的IEC 61850智能电子设备互操作性描述与验证 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (24): 66-71.
- [28] 张其林, 王先培, 杜双育, 等. 基于IEC 61850的智能电子设备交互模型形式化描述与验证 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (17): 72-76.
- [29] 曹阳, 张维明, 沙基昌, 等. Petri网在通信网络仿真建模中的应用 [J]. 计算机仿真, 2001, 3 (18): 38-41.
- [30] 廖军, 谭浩, 刘锦德. 基于Pi-演算的Web服务组合的描述和验证 [J]. 计算机学报, 2005, 28 (4): 635-643.
- (收稿日期: 2015-06-30) **EA**

(收稿日期: 2015-06-30) EA

(上接第37页)

- source inverter [C]. 2014 Electronics and Application Conference and Exposition, 2014 : 572-577.
- [5] 徐聪, 程启明, 李明, 等. Z源逆变器及其多种改进拓扑结构的比较 [J]. 电网技术, 2014, 38 (10) : 2926-2931.
- [6] 蔡春伟, 曲延滨, 盛况. 增强型Z源逆变器 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (S1) : 259-266.
- [7] 张邵华, 汤雨, 谢少军. 改进Z源逆变器的三次谐波注入控制策略 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (10) : 114-119.
- [8] Anderson J, Peng F Z. Four quasi-Z-source inverters [J]. IEEE Power Electronics Specialist Conference, Greece, 2008: 2743-2749.
- [9] Zhu M, Yu K, Luo F L. Switched inductor Electronics, 2010, 25 (8) : 2150-2158.
- [10] Gajanayake C J, Lin L F, Hoay G, et al. Extended boost Z-source inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25 (10) : 2642-2652.
- [11] Shen M, Joseph A, Wang J, et al. Comparison of traditional inverters and Z-source inverter [C]. 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, 2005: 1692-1698.
- [12] Tang Yu, Xie Shaojun, Zhang Chaochua, et al. Improved Z-source inverter with reduced Z-source capacitor voltage stress and soft-start capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24 (2) : 409-415.
- (收稿日期: 2015-07-10) EA

(收稿日期: 2015-07-10) EA