

DOI: 10.7667/PSPC161960

## IEC 61850 应用剖析及其发展探讨

高志远<sup>1</sup>, 黄海峰<sup>1</sup>, 徐昊亮<sup>2</sup>, 倪益民<sup>1</sup>, 窦仁晖<sup>1</sup>, 靳攀润<sup>2</sup>, 曹阳<sup>1</sup>, 张鸿<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003; 2. 国网甘肃省电力公司经济技术研究院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 作为智能变电站的数字化基础, IEC 61850 在促进变电站技术进步的同时, 本身在应用中也反映出若干设计上的缺陷。在深入剖析 IEC 61850 标准现状和应用实践情况的基础上, 反思了其成败得失。针对智能变电站的部分发展需求, 不再完全局限于标准约束, 提出了 IEC 61850 补充性框架设计思路。提出 IEC 61850 的变电站设备模型及其相关的服务模型可以简化, 变电站配置描述语言需要摆脱低效、庞大的弱点, 需要利用特定通信服务映射机制设计新的高效通信协议栈, 并增强与调度端的无缝通信能力。最后利用 CIM/E 语言、电力通用服务协议等成果对 IEC 61850 进行了补充性的改进设计示例。

**关键词:** 智能变电站; IEC 61850; 面向服务; IEC 标准; 变电站自动化系统

### Discussion on applications of IEC 61850 and its development

GAO Zhiyuan<sup>1</sup>, HUANG Haifeng<sup>1</sup>, XU Haoliang<sup>2</sup>, NI Yimin<sup>1</sup>, DOU Renhui<sup>1</sup>, JIN Panrun<sup>2</sup>, CAO Yang<sup>1</sup>, ZHANG Hong<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 2. State Grid Gansu Electric Power Company Economic Research Institute, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** As a digital basis of smart substation, IEC 61850 has promoted the advancements of the substation technologies. But at the same time, several design defects are also reflected in the applications. Based on in-depth analysis of the status and practical applications of IEC 61850, its advantages and defects are summed up. According to some of the requirements for smart substation development, a complementary architecture for IEC 61850 is put forward, which is no longer confined to the current standard constraints. It is pointed out that, the intelligent electronic device (IED) models of IEC 61850 and its related service models may be simplified, the Substation Configuration Description Language (SCL) needs to get rid of the weakness of low efficiency and hugeness, a new efficient communication protocol stack needs to be designed by using the Specific Communication Service Mapping (SCSM) mechanism, and the seamless communication ability with dispatching ends need to be strengthened. Finally, an improvement design as supplementary protocols for IEC 61850 standard is put forward by using the CIM/E language and the general service protocol for electric power systems.

**Key words:** smart substation; IEC 61850; service-oriented; IEC standard; substation automation system

## 0 引言

21 世纪以来, 变电站自动化技术取得了长足的进步, 迅速从传统变电站、综合自动化变电站向数字化变电站发展, 在中国甚至已经广泛开展了智能变电站的研究和应用<sup>[1-8]</sup>。

数字化(或者说网络化)是以上进步的一个重要基础, 突出体现在电子式互感器、智能操作箱和各类智能组件的引入以及网络化技术在变电站内的广

泛使用。这一基础在很大程度上决定了变电站自动化技术的系统架构、模型和数据的处理方式、设备交互模式甚至各项自动化和智能化应用所能达到的先进程度和性能极限。

IEC 61850 是当前变电站数字化基础方面最重要的标准<sup>[9-13]</sup>, 获得了全球各级研究机构和主要二次设备厂商的广泛认同。中国已将 IEC 61850 ED 1.0 版本等同引用为国内电力行业标准 DL/T 860, 并在变电站自动化建设中进行了大规模的应用。IEC 61850 在 2004 年发布之初, 从标准发布的及时性、标准内容的系统性和技术的先进性等各方面来说, 都是非常成功的。它在已有相关标准的基础上, 引

**基金项目:** 国家电网公司科技项目“基于通用服务协议的主子站网络化接入关键技术及应用研究”

入了美国电科院 UCA 2.0(Utility Communication Architecture 2.0)和部分国际厂商的成果<sup>[9-11]</sup>,代表了当时变电站网络化发展最先进的标准和技术。

经过十余年的发展,从当时全球零星可见的数字化变电站到今天中国国内上千座智能化变电站,IEC 61850 获得了广泛的应用<sup>[14-16]</sup>,也在各种新情况和需求中暴露出诸多不足<sup>[17-18]</sup>。为此国内外也在实际工程应用中对其进行了大量修补性的研究<sup>[19-26]</sup>,取得了丰富的第一手成果和经验,为进一步改进创造了技术条件。

本文在已有各类工程应用经验和研究成果的基础上,剖析了 IEC 61850 标准现状和应用实践情况,反思了其成败得失,不再完全局限于标准约束,对 IEC 61850 的应用及其改进和完善进行了探讨。

## 1 IEC 61850 标准现状剖析

在传统电磁式设备向数字化变电站设备演进的大背景下,IEC 61850 标准由 IEC TC57 WG10(国际电工委员会第 57 技术委员会第 10 工作组)于 2004 年发布了第 1 版,名称是《变电站通信网络和系统》<sup>[9]</sup>。2009 年以后,针对在应用中发现的第 1 版中的不足和扩展需要,陆续发布了第 2 版各部分,名称也改为《电力自动化通信网络和系统》<sup>[10]</sup>。按目前的趋势,它将作为基础通信协议扩展到电力系统各个环节和应用场景中。

当前第 2 版各部分组成及现状详见附录。在其各组成部分中,最核心的当属设备模型表达、服务接口定义、通信协议栈定义和配置描述 4 类机制。其紧密关联关系如图 1 所示。设备模型描述是所有其他部分的基础,ACSI 抽象了所用到的服务,具体应用的通信协议则由 SCSM 机制确定,设备模型、ACSI 服务和通信协议等都可以在 SCD(Substation Configuration Description, 变电站配置描述)文件中配置,全面支持变电站网络通信和功能配置管理。

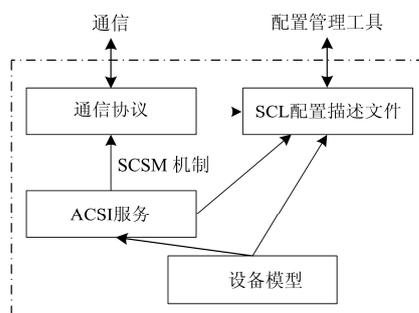


图 1 期 IEC 61850 核心部分的相互关系

Fig. 1 Relations among IEC 61850's core parts

IEC 61850 本身所明确定义的目标只在于标准化和实现设备互操作,但是智能变电站的发展还对它(或者说变电站的数字化基础)赋予了更多要求,分析如表 1 所示。

表 1 智能变电站对标准支撑的需求分析

Table 1 Analysis on smart substation's requirements for the related supporting standards

序号	需求和目的	含义
1	标准化	实现变电站各环节通信规范的全面覆盖,实现无歧义的通信协议
2	互操作	实现二次设备之间及其与各类自动化系统的互联互通
3	高效率	实现高效率的通信
4	易实施	易于实施
5	互换性	不同厂家的二次设备及其功能互换 <sup>[22]</sup>
6	即插即用	自动化实现二次设备的投入和退出使用各环节之间在协议、模型、数据和应用
7	无缝通信	之间的充分协同,目前主要指调度和变电站之间

## 2 IEC 61850 标准应用剖析

IEC 61850 自发布起便成为世界电力行业研究和应用的热点。在起步阶段,欧美国家是有优势的,标准本身就是以美国电科院的 UCA 2.0 项目研究成果为基础,SIEMENS、ABB、ALSTOM、AREVA 等国际公司当时具备一定的全球领先技术和装备优势。事实上,直到现在,欧美在标准管理和技术发言权等方面仍然具有一定的优势,以现在的 IEC TC57 WG10 构成为例,在总共 240 名工作组人员中,美国占 30 位,法国占 25 位,德国占 21 位,西班牙占 19 位,英国占 12 位,中国才占 5 位<sup>[27]</sup>。

这种占比和中国的实际情况是不相符的。中国国内从 IEC 61850 第 1 版开始就进行了深入和广泛的研究,在国内先后进行了 4 次大范围的互操作测试,大量研究性论文已被 EI 检索。中国国内从 2010 年开始智能变电站试点建设,如今已经全面推广,截至 2015 年底,已有 2400 多座智能变电站建成投运<sup>[24]</sup>,这在世界上是创纪录的规模。但是中国在变电站自动化方面取得的技术成果还需要进一步加强国际交流和相互认可。可以看到,国内的研究性论文和国际 IEC 61850 论文的及时相互引用不多,而国内变电站建设中,设备供应已经基本国产化,国外进口设备由于价格、技术路线和用户习惯等原因能进入国内市场的很少。

在十几年来的广泛应用中,IEC 61850 的优劣得失得到了充分的验证和暴露。它所带来的根本性技术进步在于:1) 奠定了网络技术在变电站自动化

中的核心基础地位。它保障和促进了电子式互感器、智能操作箱、合并单元乃至智能化一次设备的应用,以数字网络替代或简化了二次接线,实现了二次系统电气隔离,突破了传统变电站在电磁干扰、过电压和接地等方面的困境。2) 规范了二次设备乃至整个变电站自动化系统的实现。事实上网络技术的应用方式是多种多样的,相互间的接口和协议更加复杂,IEC 61850 借助国际标准的强制约束力提供了统一规范。3) 引入了变电站网络化应用的一系列先进机制,包括以数字化方式定义二次系统模型和服务、变电站配置描述、服务接口与具体网络协议灵活映射等。4) IEC 61850 良好的可推广性,加上 IEC TC57 的影响力,使得它有可能作为统一的通信规范应用于电力系统各环节。事实上,它已经开始在配电自动化、光伏发电、风电厂和电动汽车等众多领域获得推广(目前还主要是 IEC 技术报告和草案形式)和参考。

但是也应看到,智能变电站发展中很多难以突破的问题,都可以归结到以 IEC 61850 为代表的数字化基础本身。更由于国际标准的强制约束力,使得其对技术的发展也有一定的束缚和阻碍作用。从已有各类研究成果和应用总结看,它所暴露出的系统性问题在于:

1) 规范本身的全面性和完善性。比较突出的例如电子式互感器和合并单元之间的通信协议缺失。又例如 IEC 61850 中对于站控层和间隔层设备之间的通信(8-1 部分定义)在会话层、表示层和应用层上采用了以 MMS、ASN.1(抽象语法标记)为核心的协议,虽然可行,但效率有限<sup>[28]</sup>,对相关 IT 资源也是一种浪费。又例如对于变电站和调度之间的无缝通信,早在第 1 版的 7-1 附录 D 中就进行了设计,但直到现在仍存在模型、数据和协议适用性等诸多问题,已发布的几个技术报告距离国际标准和实际解决问题仍有很大距离。

2) 规范本身还需要深入验证。例如网络本身承载全站数据通信的长期稳定性,怎样应对网络设备的可能故障,“N-1 原则”是否也应该把网络设备考虑在内等问题,除了实验室论证,在工程应用中也不得不对这些问题进行大量补充完善性研究。又例如基于 IEC 61850 9-2 部分的网络采样实现,不论是基于点对点采样还是基于组网采样都存在一定的技术问题。对于点对点采样,其实就是以光纤代替了原来的电缆,对于某些跨间隔保护,甚至难以集成那么多的光口于一台装置上;对于组网采样方式,则一方面采样的同步性影响了保护装置的可靠性,另一方面整个间隔层系统又严重依赖于外部时钟同

步系统。

3) 可操作性和可实施性。例如基于网络以光纤和交换机代替了原来大量的电缆是技术进步,但工程现场复杂的“网络回路”(原来是“二次回路”)也带来了检测、调试、运维和检修等方面的新特点,这些新的“困难”甚至引起了部分地区行业人员的抵制<sup>[28]</sup>。又例如 SCD 文件本来是对变电站配置进行开放描述的机制,是二次设备实现即插即用的重要基础,但它过于庞大且内部各部分关联复杂,同时采用了低效的基于可扩展标记语言(XML)的 SCL(变电站配置描述语言)来描述,修改和维护复杂,应用中不得不采用串行甚至全站停电的方式来维护和验证<sup>[16,23]</sup>。

4) 应用中遇到新需求和新问题。例如可靠性要求,特别是对网络冗余和保护双重化的问题。中国国内变电站应用通常要求双网通信,在 IEC 61850 第 1 版中没有支持,导致 SCD 配置和系统部署等方面的混乱,在 IEC 61850 第 2 版中增加了对平行冗余协议(PRP)和高可用无缝冗余协议(HSR)的支持,具体应用效果还有待验证。对于保护装置类的高可靠要求,例如双重化配置等,IEC 61850 还没有特别的支持,实际应用中出现了众多完善性设计,增加了变电站网络复杂性。又例如设备集成的问题。在中国智能变电站建设中特别关注通过设备集成达到减少占地面积和节约建设成本的目的,这给 IEC 61850 的应用带来许多复杂要求,过程层合并单元与智能终端的集成以及间隔层保护、测控和计量等类型装置的集成,都对原来 IEC 61850 SCD 文件的表达和网络协议的适用性、实际网络系统的部署和系统的整体可靠性提出新的挑战。

面对实际工程需要,已经开展了大量补充完善性研究,例如 SCD 文件的解耦研究、将 ACSI 通过 SCSM 机制映射到 TCP/IP 的研究和从变电站模型到调度模型的映射研究等。这些研究一定程度上暂时解决了工程应用问题,但也削弱了标准的统一性和规范性。

回顾智能变电站对相关数字化标准的支持性要求,IEC 61850 基本实现了标准化目标,但还有个别环节没有覆盖(例如电子式互感器和合并单元之间的通信协议缺失);通过 IEC 61850 7-2、8-1、9-2 等部分基本实现了互操作性目标;在实现效率方面则还有很大的提升空间;在易实施性方面则还有很大不足;在即插即用方面虽然已有 SCL 机制的支撑,但距离实用还有很大距离;在无缝通信方面,则还遗留有大量问题,并且涉及 IEC TC57 中其他工作组的工作。

### 3 对 IEC 61850 的扩充和完善探讨

从 IEC 61850 第 2 版的发布来看, 基本是顺延第 1 版的思路, 许多不足短期内难以改善, 更难以满足变电站自动化建设迅速发展的需要。所以不能再局限于标准的限制, 而需要对其进行系统性的完善, 部分内容如果暂不合适作为标准, 则可以作为智能变电站在应用中的配套技术补充。这是一项系统工程。

从变电站自动化基础层面的高效率、易实施、无缝通信和设备即插即用等目标着眼, 对 IEC 61850 的部分核心内容分析如表 2 所示。

表 2 对 IEC 61850 标准的部分核心内容分析

Table 2 Analysis on parts of the core contents of IEC 61850

序号	标题	核心内容	分析
1	设备模型表达机制	用逻辑节点标识所有变电站自动化系统已知功能, 并细化定义逻辑节点结构。比较复杂, 并且可以肯定会越来越复杂。	实际应用中, 不能指导二次设备的设计和实现, 反而是在投运前增加了大量工作。从标准主要是规范定义接口这个出发点, 应该简化。
2	ACSI 服务接口	有 60 多个服务模型, 打破了传统的以“四遥”点表访问数据的方式, 实现了面向服务的模式。协议开销较大。	服务模型的思路相对于点表数据交互的方式是一种进步, 应该保留。但从系统开销和效率考虑, 有改进空间。
3	SCSM 映射机制	提供了一种服务与具体通信协议栈灵活映射的机制。影响深远, 诸如 9-2 所阐述的快速报文机制已获得广泛借鉴和应用。8-1 提出的映射到 MMS 等协议, 效率较低。	服务与具体通信协议栈灵活映射的机制是一种进步, 应该保留。但目前作为国际标准的 8-1 存在效率问题, 9-2 部分对许多新需求和复杂情况没有考虑。需要开展新的 SCSM 映射设计, 并力争成为国际标准。
4	变电站配置描述语言 SCL	提供变电站设备和通信配置描述机制, 获得广泛认同。实际应用效果欠佳, 主要是因为文件本身过于庞大, 内容各部分关联紧密, 不利于工程现场运维, 文件格式效率低等。	作为一种以开放语言描述变电站配置, 支持“即插即用”的机制, 是一种进步, 应该保留。但现在 SCL 存在本身效率低、包含内容过多、工程运维困难等问题, 需要改进。

从表 2 中的分析可见, IEC 61850 中的许多内容和机制是值得保留的, 改进其不足并不是全部推倒重来。对于 SCL 文件低效、运维困难的问题, 需要找到一种满足需求而又高效的文件机制, 近年来的 CIM/E 语言对完善 IEC 61850 的配置文件机制具有重要参考价值。对于通信协议的高效和适用性问题, 实际上 IEC 61850 的 SCSM 机制本身就是一种

扩展机制, 利用它可以选择和扩展适当的通信协议, 而在具体的电力通信协议方面, 国内外多年来一直在不断地探索和实践, 有许多成果值得参考。对于各环节的无缝通信问题, 有一个重要基础, 那就是对象命名和数据编码的一致性, 这项工作可以减少大量的转化和识别操作。此外还需要根据 IEC 61850 在实际应用中各方面的反馈和需求, 对相关的模型和服务进行选择和补充。

基于以上思路, 参考近年来的部分研究, 特别是国内电力自动化领域已经取得的一些成果, 形成了如图 2 所示的 IEC 61850 补充性架构。

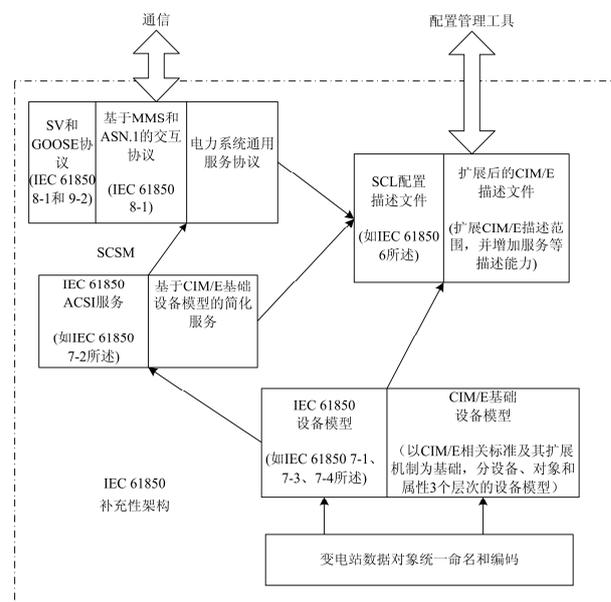


图 2 IEC 61850 补充性架构设计

Fig. 2 Design of complementary architecture for IEC 61850

其设计特点在于:

1) 作为补充, 与 IEC 61850 并行服务。一方面 IEC 61850 是现行国际标准, 另一方面支持它也就意味着对许多既有设备和系统的继续支持。所以, 保留所有现有 IEC 61850 标准的一切技术要求, 而在二次自动化设备的实现中可选地增加对改进型协议体系的支持。

2) 变电站对象数据的统一命名和编码。包括数据对象的编码标准化、对象内部结构的标准化、对象之间关系的标准化等。此项设计有助于实现数据和模型的全局可辨识, 是不同机构、不同专业间业务系统模型和数据交互的重要基础, 也是广域电网调度和变电站无缝通信的必然要求。此项研究国内已有一定基础, 例如《DL/T 1171-2012 电网设备通用数据模型命名规范》等。

3) CIM/E 基础设备模型的采用。CIM/E 作为中

国的推荐性标准(GB/T 30149-2013)<sup>[29]</sup>和 IEC TC 57 的技术规范(IEC TS 61970-555:2016)<sup>[30]</sup>, 当前在中国国内已经经过深入研究, 形成了相关系列模型标准, 并获得了大量应用实践。其核心优势在于高效和简洁, 在中国国内与调度端应用兼容性好。同时也应该看到, 目前中国国内标准中 CIM/E 定义的变电站设备类主要是从调度角度出发需要的模型, 对变电站内模型描述远没有 IEC 61850 深入和详细, 所以在智能变电站中引入基于 CIM/E 基础设备模型的基础上, 还需要适当扩展 CIM/E 类。考虑到 IEC 61850 设备模型的复杂性, 建议去除其中的逻辑节点层次, 而以变电站、设备、对象和属性的层次定义变电站设备模型, 同时利用 CIM/E 语言的类定义模版功能, 留下可由厂家和用户使用的模型扩展机制。图 3 是一个扩展示例, 它在已有的 CIM/E 一次设备类定义基础上, 扩充了众多的变电站站控层和间隔层设备类。

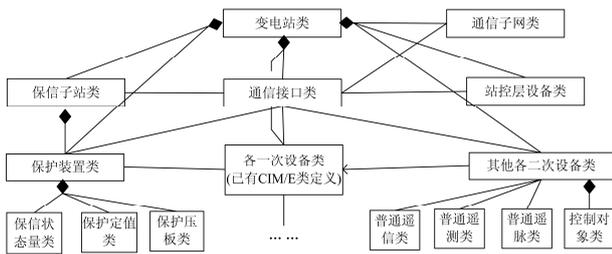


图 3 CIM/E 风格变电站设备模型设计示例

Fig. 3 Design examples of CIM/E style substation devices model

4) 基于 CIM/E 基础设备模型的简化服务。在扩充 CIM/E 类描述的变电站设备模型基础上, 定义相关的服务模型。参考原来 IEC 61850 7-2、7-3 和 7-4 对 ACSI 的定义, 以精简和实用为原则, 主要设计了 4 类服务: ① 握手和交互规范类服务模型, 例如握手和应用关联类模型等; ② 设备、对象和属性的读取服务, 主要是支持变电站设备和各级对象的数据采集和监视; ③ 设备、对象和属性的控制服务, 主要是支持变电站设备和各级对象的控制类应用; ④ 高级和辅助类应用, 例如跨间隔和多个设备的数据集服务、时钟同步服务等。

5) 新的实用化 SCSM 映射。为提高效率起见, 把“基于 CIM/E 基础设备模型的简化服务”映射到适当的通信协议, 例如当前国内正在研究和应用的“电力通用服务协议”<sup>[31]</sup>(简称 GSP 协议, 它采用 M 编码机制), 替代原来 IEC 61850 8-1 中的 MMS 和 ASN.1 编码机制。目前 GSP 协议可以支持: ① 服务的动态注册、查询和代理, 支持服务的广域综

合管理。毕竟, 在变电站配置描述文件中只能描述静态的服务配置, 而动态的服务在线状态管理则需要通信协议的机制支持。② 通过 M 编码, 提供针对不同传送对象性质和通信环境需求的高效灵活编码方式。其典型协议栈如图 4 所示。

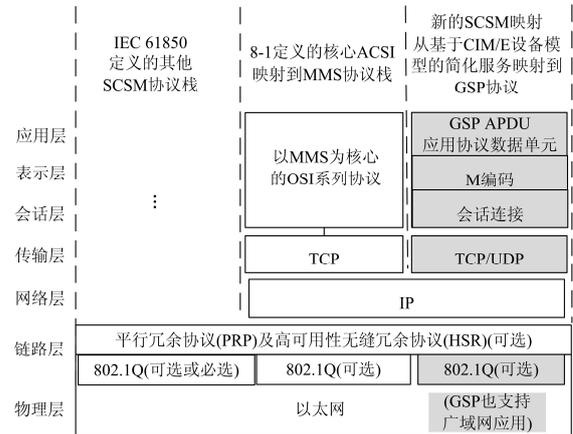


图 4 新的 SCSM 映射协议栈

Fig. 4 Communication protocol stack for the new SCSM

6) CIM/E 风格的变电站配置描述文件。CIM/E 语言的引入有助于辅助解决原来 SCL 语言的低效问题, 同时增强了与调度端的无缝通信<sup>[28, 32]</sup>。但目前 CIM/E 还不支持对服务的描述, 只能以静态二维表模式描述系统对象, 而缺乏对对象动态行为的描述。通过扩充 CIM/E 语言, 使之支持对变电站服务的描述(目前是增加对新扩充的基于 CIM/E 基础设备模型的简化服务的描述能力), 从而完整地描述变电站的静态数据和动态服务进行描述。

### 4 结语

面对智能变电站的迅速发展所带来的新环境、新需求, IEC 61850 逐渐暴露出一些不足, 由于各种原因, 在标准体系下短期内很难解决。正如中国在调度端实际已经逐步摆脱了 IEC 61970 的种种限制<sup>[28]</sup>, 在此重要时期, 需要我们跨越 IEC 61850 的技术窠臼, 加大创新步伐。

在保留 IEC 61850 的某些成功技术和机制的基础上, 探索性地对 IEC 61850 的改进和完善进行了初步探讨。显然这是一项长期复杂的工作, 需要工程上不断验证完善, 特别是 CIM/E 扩充和 GSP 协议等基础性工具需要加大验证力度。

标准具有至高点意义。通过更好地发展智能变电站技术, 还需要进一步及时地把应用中的成功技术和规范向国际标准提升, 需要中国智能变电站领域的技术和标准进一步向国际输出。

## 附录

附表 1 IEC 61850 第二版状态 (截至 2016 年 11 月 10 日)

Table 1 Status of IEC 61850 Ed2.0 (up to November 10, 2016)

编号	名称	类型	发布时间
1	介绍和概览	技术报告(TR)	2013
2	术语	技术规范(TS)	2003
3	一般需求	国际标准(IS)	2013
4	系统和工程管理	国际标准	2011
5	功能和设备模型的通信需求	国际标准	2013
6	与智能电子设备(IED)相关的变电站通信配置描述语言	国际标准	2009
7-1	基本通信结构——原则和模型	国际标准	2011
7-2	基本通信结构——抽象通信服务接口(ACSI)	国际标准	2010
7-3	基本通信结构——公共数据类	国际标准	2010
7-4	基本通信结构——兼容逻辑节点类和对象类	国际标准	2010
7-410	基本通信结构——水电厂监控通信	国际标准	2015
7-420	基本通信结构——分布式能源逻辑节点	国际标准	2009
7-510	基本通信结构——水电厂模型概念和导则	技术报告	2011
8-1	特定通信服务映射(SCSM)——映射到制造报文规范(MMS)和 ISO/IEC 8802-3	国际标准	2011
9-2	特定通信服务映射(SCSM)——基于 ISO/IEC 8802-3 的采样值	国际标准	2011
9-3	电力自动化精确时间协议轮廓	国际标准	2016
10	一致性测试	国际标准	2012
80-1	使用 IEC 60870-5-101 或者 60870-5-103 交换基于公共数据类的模型信息的导则	技术规范	2016
80-3	映射到 Web 协议的需求和技术选择	技术报告	2015
80-4	从 IEC 62056 COSEM 对象模型到 IEC 61850 数据模型的翻译	技术规范	2016
90-1	在变电站之间使用 IEC 61850 通信	技术报告	2010
90-2	在变电站和控制中心之间使用 IEC 61850 通信	技术报告	2016
90-3	在状态监测诊断和分析应用中使用 IEC 61850 通信	技术报告	2016
90-4	网络工程导则	技术报告	2013
90-5	依据 IEEE C37.118 使用 IEC 61850 传送同步向量信息	技术报告	2012
90-7	分布式能源系统的电力转换器用对象模型	技术报告	2013
90-8	电动交通对象模型	技术报告	2016
90-12	广域网工程导则	技术报告	2015

## 参考文献

- [1] 唐涛. 电力系统厂站自动化技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 92-97.  
TANG Tao. Development and prospects for the automation technology of power plants and substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(4): 92-97.
- [2] 高志远, 曹阳, 朱力鹏. 智能变电站未来发展的分析方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(2): 11-18.

- GAO Zhiyuan, CAO Yang, ZHU Lipeng. Research on the analysis method of future development of smart substation[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 37(7): 11-18.
- [3] 陈锦山, 唐志军, 何燕玲, 等. 智能变电站二次系统信息安全测试方法[J]. 广东电力, 2017, 30(9): 75-80.  
CHEN Jinshan, TANG Zhijun, HE Yanling, et al. Testing method for information security of secondary system of intelligent substation[J]. Guangdong Electric Power, 2017,

- 30(9): 75-80.
- [4] 邹磊, 薛明军, 姚亮, 等. 智能变电站采样异常处理方法的研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(4): 39-43.  
ZOU Lei, XUE Mingjun, YAO Liang, et al. Research and analysis on SV exception treatment method in smart substation[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(4): 39-43.
- [5] 陈桥平, 姚亮, 梁博, 等. 智能变电站不停电改造扩建方案的应用[J]. 陕西电力, 2016, 44(9): 89-92.  
CHEN Qiaoping, YAO Liang, LIANG Bo, et al. Application of smart substation reform & extension scheme with uninterrupted power bay[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(9): 89-92.
- [6] 刘世丹, 袁亮荣, 曾耿晖, 等. 一种基于 IEC 61850 统一建模的多智能变电站数据共享方案[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 109-112.  
LIU Shidan, YUAN Liangrong, ZENG Genghui, et al. Unified modeling data sharing plan for multi-intelligent substations based on IEC 61850[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(8): 109-112.
- [7] 胡春潮. 基于 IEC 61850 动态数据集的源端维护技术研究[J]. 广东电力, 2016, 29(12): 57-61.  
HU Chunchao. Substation data source-side maintenance based on IEC 61850 dynamic dataset[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(12): 57-61.
- [8] 赵国生, 束娜, 周志勇, 等. 新型变电站电压无功综合控制算法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 37-42.  
ZHAO Guosheng, SHU Na, ZHOU Zhiyong, et al. New substation voltage and reactive power control algorithm[J]. Journal of Henan Normal university (Natural Science Edition), 2015, 43(3): 37-42.
- [9] IEC 61850 communication networks and systems in substations[S]. Ed 1.0, 2003.
- [10] IEC 61850 communication networks and systems for power utility automation[S]. Ed 2.0, 2010.
- [11] 谭文恕. 变电站通信网络和系统协议 IEC 61850 介绍[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(9): 8-15.  
TAN Wenshu. An introduction to substation communication network and system-IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(9): 8-15.
- [12] 仁雁铭, 操丰梅. IEC 61850 新动向和新应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 1-6.  
REN Yanming, CAO Fengmei. New development and new application of IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 1-7.
- [13] 仁雁铭, 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.  
REN Yanming, CAO Fengmei, ZHANG Jun. Technical analysis of IEC 61850 Ed 2.0[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 1-5.
- [14] 樊唯钦. 数字化变电站的发展与应用[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 97-100.  
FAN Weiqin. Development and application of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(S): 97-100.
- [15] 高翔, 张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 67-71.  
GAO Xiang, ZHANG Peichao. Main features and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 67-71.
- [16] 杨毅, 高翔, 朱海兵, 等. 智能变电站 SCD 应用模型实例化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 107-113.  
YANG Yi, GAO Xiang, ZHU Haibing, et al. Case study on SCD application based on demo smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 107-113.
- [17] 宋璇坤, 闫培丽, 吴蕾, 等. 智能变电站试点工程关键技术综述[J]. 电力建设, 2013, 34(7): 10-16.  
SONG Xuankun, YAN Peili, WU Lei, et al. Review of key technology for smart substation pilot projects[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(7): 10-16.
- [18] 许洁, 陆剑云, 王峥. 智能变电站运行过程中若干问题的探讨[J]. 华东电力, 2014, 42(12): 2644-2647.  
XU Jie, LU Jianyun, WANG Zheng. Several issues in the process of intelligent substation operation[J]. East China Electric Power, 2014, 42(12): 2644-2647.
- [19] 樊陈, 倪益民, 申洪, 等. 中欧智能变电站发展的对比分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 1-7.  
FAN Chen, NI Yimin, SHEN Hong, et al. Comparative analysis on development of smart substation in China and Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 1-7.
- [20] 李瑞生, 李燕斌, 周逢权. 智能变电站功能架构及设计原则[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 24-28.  
LI Ruisheng, LI Yanbin, ZHOU Fengquan. The functional frame and design principles of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 24-28.
- [21] 陈文升, 钱唯克, 楼晓东. 智能变电站实现方式研究及展望[J]. 华东电力, 2010, 39(10): 1570-1573.  
CHEN Wensheng, QIAN Weike, LOU Xiaodong. Study and prospect of realization way of smart substation[J].

- East China Electric Power, 2010, 39(10): 1570-1573.
- [22] 李晓朋, 裘愉涛, 钱建国, 等. 智能变电站二次设备互换性探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 76-81.  
LI Xiaopeng, QIU Yutao, QIAN Jianguo, et al. Discussion on interchangeability of secondary devices in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 76-81.
- [23] 梅德冬, 周斌, 黄树帮, 等. 基于 IEC 61850 第二版变电站配置描述的集成配置[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 132-136.  
MEI Dedong, ZHOU Bin, HUANG Shubang, et al. Decoupling integrated configuration of substation configuration description based on IEC 61850 edition 2.0[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 132-136.
- [24] 杨志宏, 周斌, 张海滨, 等. 智能变电站自动化系统新方案的探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 1-7.  
YANG Zhihong, ZHOU Bin, ZHANG Haibin, et al. Discussion on novel scheme of smart substation automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 1-7.
- [25] 易永辉, 王雷涛, 陶永健. 智能变电站过程层应用技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 1-5.  
YI Yonghui, WANG Leitao, TAO Yongjian. Process level application scheme in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 1-5.
- [26] 邓洁清, 车勇, 单强, 等. 基于标准中间过程文件的SCD 版本比对的优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 95-99.  
DENG Jieqing, CHE Yong, SHAN Qiang, et al. Optimal research of SCD version comparison based on the standard middle process files[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 95-99.
- [27] TC 57/WG 10 convenor & members[EB/OL]. [2016-09-25]. <http://www.iec.ch/>.
- [28] 辛耀中. 智能电网调度控制技术国际标准体系研究[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 1-10.  
XIN Yaozhong. Research on international standard architecture for smart grid dispatching and control technology[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 1-10.
- [29] 电网通用模型描述规范: GB/T 30149—2013[S].
- [30] Energy management system application program interface (EMS-API)-part 555: CIM based efficient model exchange format (CIM/E): IEC TS 61970—555:2016[S].
- [31] 电力系统通用服务协议(国家标准报批稿)[S]. 2016.
- [32] 刁东宇, 翟明玉, 王海峰, 等. 一种基于 CIM/E 的 IEC 61850 SCL Schema[J]. 浙江电力, 2016, 35(8): 13-17.  
DIAO Dongyu, ZHAI Mingyu, WANG Haifeng, et al. A description method of IEC 61850 SCL schema file based on CIM/E[J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(8): 13-17.

收稿日期: 2016-11-24; 修回日期: 2017-07-11

作者简介:

高志远(1972—), 男, 硕士, 研究员级高工, 研究方向为智能电网、厂站自动化系统; E-mail: gaozhiyuan@epri.sgcc.com.cn

黄海峰(1969—), 男, 博士, 教授级高工, 研究方向为电网调度自动化系统、电力自动化系统检测;

徐昊亮(1981—), 男, 高级工程师, 从事电力系统自动化、智能电网规划应用研究工作。

(编辑 葛艳娜)