

DOI: 10.7500/AEPS201210114

智能变电站通信网络状态监测信息模型及配置描述

朱 林, 王鹏远, 石东源

(强电磁工程与新技术国家重点实验室, 华中科技大学, 湖北省武汉市 430074)

摘要: 建立统一的通信网络状态监测信息模型, 并对通信网络配置进行详细描述是实现通信网络状态监测的前提。利用功能分解/信息提取、映射管理信息库等方法, 初步建立了智能变电站通信网络的状态监测信息模型。对变电站配置描述语言(SCL)进行了扩展, 提出了通信网络拓扑以及交换机等网络设备的描述方法, 并针对某 220 kV 变电站, 给出了描述其过程层通信网络的 SCL 文档实例。

关键词: 智能变电站; 通信网络; 状态监测信息模型; IEC 61850; 变电站配置描述语言; 管理信息库

0 引言

近年来, 以全站信息数字化、通信平台网络化和信息共享标准化为基本特征的智能变电站得到了迅猛发展^[1-2]。通信网络是智能变电站的重要组成部分, 承担着实时和可靠传输采样值、断路器分合状态, 甚至是跳闸命令、时钟同步信号等关键信息的重要任务^[3-4]。实现通信网络在线状态监测, 对于保障智能变电站和电网的安全运行具有重要意义。

目前, 网络报文记录分析装置在智能变电站通信网络状态监测方面发挥了重要作用, 其主要功能是记录通信网络上传的各种报文, 检测报文编码的正确性、时序的合理性及数据的合法性等^[5-6]。然而, 通信网络中的各种设备(如交换机、保护装置等)都含有表征通信网络运行状态的参数, 如果能直接对这些参数进行在线监测和分析, 就可以更准确地掌握通信网络的运行状态, 更好地实现网络状态监测、告警、故障诊断及故障定位等功能。

建立统一信息模型对各种表征网络运行状态的参数进行规范化表达, 是实现通信网络状态监测的前提。但是 IEC 61850 标准中主要提供了保护、测控等二次设备的信息模型, 未建立通信网络的状态监测信息模型。尽管该标准的第 2 版中提出了少量与通信网络相关的逻辑节点模型^[7-8], 如通信信道监视(LCCH)、通信服务跟踪(LTRK)、主时钟监视(LTMS)等, 但上述模型还较为简单, 难以满足通信

网络状态监测的应用需求。文献[9-10]提出将交换机作为独立的二次设备来进行监测和管理, 并建立了基于 IEC 61850 的交换机状态监测信息模型, 但未能涉及保护、测控等装置通信状态的信息模型。此外, 现有的通信网络配置描述方法还难以满足通信网络状态监测的需求。变电站配置描述语言(SCL)主要描述了变电站一次拓扑和二次设备, 但对通信网络的描述则较为简单, 仅描述了二次设备间的逻辑连接关系和网络地址, 缺少对网络拓扑和通信网络状态监测信息模型的详细描述^[11-12]。

鉴于以上分析, 本文利用功能分解/信息提取、映射管理信息库(MIB)的方法初步建立了智能变电站通信网络状态监测信息模型, 并提出了基于扩展 SCL 的通信网络配置描述方法。

1 通信网络状态监测需求分析

图 1 所示为智能变电站通信网络示意图, 该网络主要由交换机、各种智能电子设备(IED)及通信链路等组成, 图中 PRP 表示并行冗余协议。

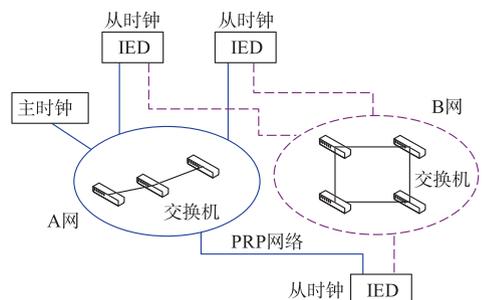


图 1 智能变电站通信网络示意图

Fig. 1 Schematic diagram of communication network in smart substations

收稿日期: 2012-10-15; 修回日期: 2013-02-27。

国家自然科学基金资助项目(51107048); 中国博士后科学基金资助项目(20110491133)。

交换机是智能变电站通信网络的核心元件,也是数据汇集、存储和交换的中心,各类信息能否实时、可靠地传输与交换机的运行状态密切相关,因此,有必要对交换机的运行状态进行有效监测。

但是,仅对交换机的运行状态进行监测还难以全面掌握整个通信网络的运行状态。随着 PRP、高可用无缝环协议(HSR)以及 IEEE 1588 精确时钟协议等在智能变电站中的应用,普通 IED 中也含有一些可以表征网络运行状态的参数。例如:智能变电站通信网络可通过冗余配置来满足高可靠性及零故障恢复时间的要求。如图 1 所示,IED 通过 2 个端口分别接入 PRP 网络的 A 网和 B 网,实现数据的“双发双收”。此时,IED 能否正确发送或接收数据报文取决于 IED 中 PRP 协议的运行状态(即针对冗余报文的处理)。如果能直接对 IED 的通信运行状态进行监视,则可以更方便地实现网络故障告警、诊断及定位等功能。此外,在 IEEE 1588 时钟同步体系中,IED 一般作为从时钟,可以监测到从时钟端口状态、时钟同步报文传输延迟、主从时钟偏差以及主时钟性能等信息。因此,对普通 IED 的通信状态进行监测也很有必要。

2 通信网络状态监测信息模型

2.1 建模方法

IEC 61850 信息模型主要表达了 IED 内需要与外界进行交互的信息,本质上是对功能的抽象表达。因此,建立智能变电站通信网络的状态监测信息模型,可以从分析通信网络的主要功能入手,再从中提取所需的状态信息。此外,通信领域常采用简单网络管理协议(SNMP)对网络进行管理,SNMP 的 MIB 中已经建立了反映通信网络状态的常用数据对象,将其映射成 IEC 61850 信息模型,也是通信网络信息建模的一种可行方法。MIB 中主要包括 4 种常见的对象类型:普通对象类型(OBJECT-TYPE)、告警对象类型(NOTIFICATION-TYPE)、列表对象类型(SEQUENCE)和对象组类型(OBJECT-GROUP)。这 4 种对象类型可分别映射 IEC 61850 中的对象类型:数据对象、数据对象、逻辑节点、数据集,其中列表对象类型应建模成逻辑节点类,是因为列表的每一个记录都应建模为该逻辑节点类的一个实例。本文将采用功能分解/信息提取和映射 MIB 这 2 种方法,对交换机运行状态和普通 IED 通信状态 2 类信息进行建模。

2.2 交换机状态监测信息模型

智能变电站通信网络中交换机的主要功能包括数据交换(透明网桥)、服务质量、虚拟局域网、快速

生成树、端口镜像、多播过滤、广播风暴抑制和时钟同步等^[13]。文献[9-10]已建立了较为完善的交换机状态监测信息模型,本文通过映射 MIB 对现有模型进行补充。利用 2.1 节所述建模方法可建立交换机状态监测信息模型,如表 1 所示。交换机可建模为 2 个逻辑设备:逻辑设备零(LD0)和网络状态逻辑设备(NTWK),其中 LD0 内的逻辑节点主要表征交换机及其端口的基本运行状态,NTWK 内的逻辑节点主要表征交换机各种协议的运行状态,各逻辑节点的详细模型见附录 A。

表 1 交换机状态监测信息模型
Table 1 Status monitoring information model for switch

逻辑设备	逻辑节点	说明	MIB 文件
LD0	LPHD	物理设备逻辑节点	
	LLN0	逻辑节点零	
	NBBA	网桥基本信息	文献[14-15]定义
	NBPB	网桥端口基本信息	文献[14-15]定义
NTWK	LPHD	物理设备逻辑节点	
	LLN0	逻辑节点零	
	NGRT	动态组注册表	文献[14-16]定义
	NSUE	静态单播表	文献[14-16]定义
	NSME	静态多播表	文献[14-16]定义
	NPTT	网桥端口	文献[14-16]定义
	NPPT	端口优先级	文献[15-16]定义
	NUPR	自定义优先级	文献[15-16]定义
	NTCT	流量分类表	文献[15-16]定义
	NOAP	输出优先级表	文献[15-16]定义
	NGPT	GARP 端口	文献[15-16]定义
	NGMR	GMRP 端口配置状态	文献[15-16]定义
	NVLB	VLAN 基本信息	文献[15-16]定义
	NVLS	VLAN 统计表	文献[15-16]定义
	NVCP	VLAN 端口配置表	文献[15-16]定义
	NVSP	VLAN 端口统计表	文献[15-16]定义
NVPG	VLAN 协议组表	文献[15-16]定义	
NVPP	VLAN 端口表	文献[15-16]定义	
NTDE	透明时钟默认数据	文献[17]定义	
NTPT	透明时钟端口	文献[17]定义	

2.3 普通 IED 通信状态监测信息模型

以基于 PRP 网络的 IED 为例,说明应用功能分解/信息提取的方法建立普通 IED 状态监测信息的过程。图 2 所示为 PRP 网络的状态信息图。PRP 网络可监测的状态信息包括 2 类:一类是 PRP 节点自身的运行状态及统计信息;另一类是 PRP 节点所监测的网络其他节点信息。各种具体的状态信息如表 2 所示。PRP 节点自身的运行状态可用逻辑节点类 NPRP 来表示,而被监测的节点可用逻辑节点类 NNOD 来表示,每一个被监测的实际节点均为该逻辑节点类的一个实例。表 3 中的只读和可控信息应分别采用 IEC 61850 标准中的整数状态(INS)和整数可控状态(ING)公共数据类。此外,

文献[18]中定义了 PRP 网络和 HSR 网络的 MIB, 通过映射 MIB 也可以补充相关的数据对象, 如制造商、软件版本、运行模式等。

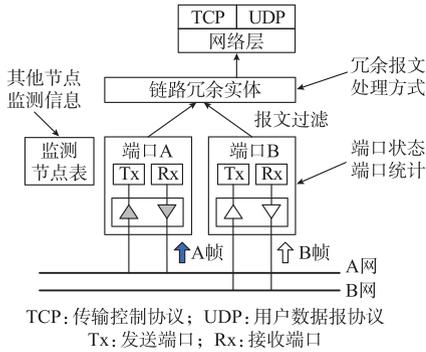


图 2 PRP 状态信息图

Fig. 2 Sketch of status monitoring information for PRP

表 2 PRP 网络可监测的状态信息

Table 2 Status information monitored by PRP network

逻辑节点	可监测信息	备注	公共数据类型
NPRP	冗余节点类型	可控	ING
	冗余报文处理方式	可控	ING
	是否移除标示字段	可控	ING
	发送 PRP 报文数	只读	INS
	接收 PRP 报文数	只读	INS
	接收错误 PRP 报文数(网络标示)	只读	INS
	接收错误 PRP 报文总数	只读	INS
	端口运行状态	只读	INS
	端口状态控制	可控	ING
	监测节点数	只读	INS
NNOD	清空监测节点表	可控	ING
	被监测节点媒体访问控制(MAC)地址	只读	ING
	最后收到被监测节点报文时间	只读	ING
	被监测节点类型	只读	ING

表 3 普通 IED 通信状态监测信息模型(基于 PRP)

Table 3 Status monitoring information model of IED based on PRP

逻辑设备	逻辑节点	说明	MIB 文件
LD0	LPHD	物理设备逻辑节点	
	LLN0	逻辑节点零	
	NBBA	网桥基本信息	文献[14-15]定义
	NBPB	网桥端口基本信息	文献[14-15]定义
NTWK	LPHD	物理设备逻辑节点	
	LLN0	逻辑节点零	
	NODE	普通时钟默认数据	文献[17]定义
	NOCU	普通时钟当前数据	文献[17]定义
	NOPA	普通时钟父时钟数据	文献[17]定义
	NOTP	普通时钟时间属性	文献[17]定义
	NOPT	普通时钟端口	文献[17]定义
	NPRP	并行冗余协议	文献[18]定义
NNOD	被监测节点表	文献[18]定义	

在基于 IEEE 1588 的时钟同步系统中, 普通 IED 一般作为从时钟。应用上述方法并结合文献[17]提出的时钟同步相关 MIB, 也可建立时钟同步的状态监测信息模型。表 3 所示为普通 IED 的通信状态监测信息模型, 即新增一个网络状态逻辑设备对 IED 内 PRP(或 HSR)、时钟同步等协议的运行状态进行表达。各逻辑节点的详细模型见附录 A。

3 通信网络配置描述

3.1 配置描述方法

通信网络配置描述的内容应包括以下 3 个方面: 交换机状态监测信息、IED 通信状态监测信息和通信网络拓扑。交换机和 IED 通信状态监测信息的描述均可参照 SCL 中已有的描述方法, 其中交换机可作为一个独立的 IED 来进行描述, IED 通信状态监测信息可在相应的 IED 中新增一个网络状态逻辑设备来进行描述。本节主要阐述通信网络拓扑的描述方法。

图 3 所示虚线框以外部分为 IEC 61850 标准 SCL 中的变电站通信网络统一建模语言(UML)图。通信网络被描述成分层的树形结构: 元素 tCommunication(通信网络)包含子元素 tSubNetwork(通信子网), tSubNetwork 又包含属性 tBitRateMbPerSec(带宽)和子元素 tConnectedAP(连接访问点), 其中 tConnectedAP 又包含 4 个子元素: tAddress(网络地址)、tPhyConn(通信介质)、tGSE(开关量通信控制块)和 tSMV(采样值通信控制块)。从图中可以看出, 目前 SCL 对通信网络仅描述了 IED 的网络地址和 IED 之间的逻辑连接关系, 不包括网络物理拓扑及网络冗余。

通信网络拓扑的描述主要表达各种设备利用何种物理网络来进行连接, 其描述内容和变电站一次拓扑较为相似, 因此, 可以参照变电站一次拓扑的描述方法来进行描述, 即将 IED 视为具有多个端口的一次设备, 将连接 IED 设备的通信链路作为连接点。本文对原有 SCL 的通信网络模型进行了扩展, 扩展后的变电站通信网络 UML 图如图 3 所示。图 3 中虚线框内部分为本文扩展的内容。在子元素 tSubNetwork 下增加子元素 tPhysTopo(物理拓扑)。该子元素包含 tIED(设备)和 tConnectivityNode(连接点)2 个子元素, 其中 tIED 又包含子元素 tTerminal(终端), 每个 tTerminal 被连接到一个指定的 tConnectivityNode 上。在对网络冗余的描述方面, 由于 HSR 仍是一个环状网络,

因此, HSR 网络拓扑仍可作为一个单独的子网来描述。根据 PRP 网络的定义, PRP 网络的 A 网和 B 网是 2 个独立的网络, 但在已有的 SCL 中并未对网络冗余进行描述, 而是用一个子网表示了 IED 之间的逻辑连接关系, 为便于与当前版本的 SCL 兼容,

可将 PRP 网络视为同一个子网来进行描述。基于 PRP 或 HSR 的普通 IED 等可作为一个双端口设备来进行描述, 而交换机视为多端口设备来进行描述。

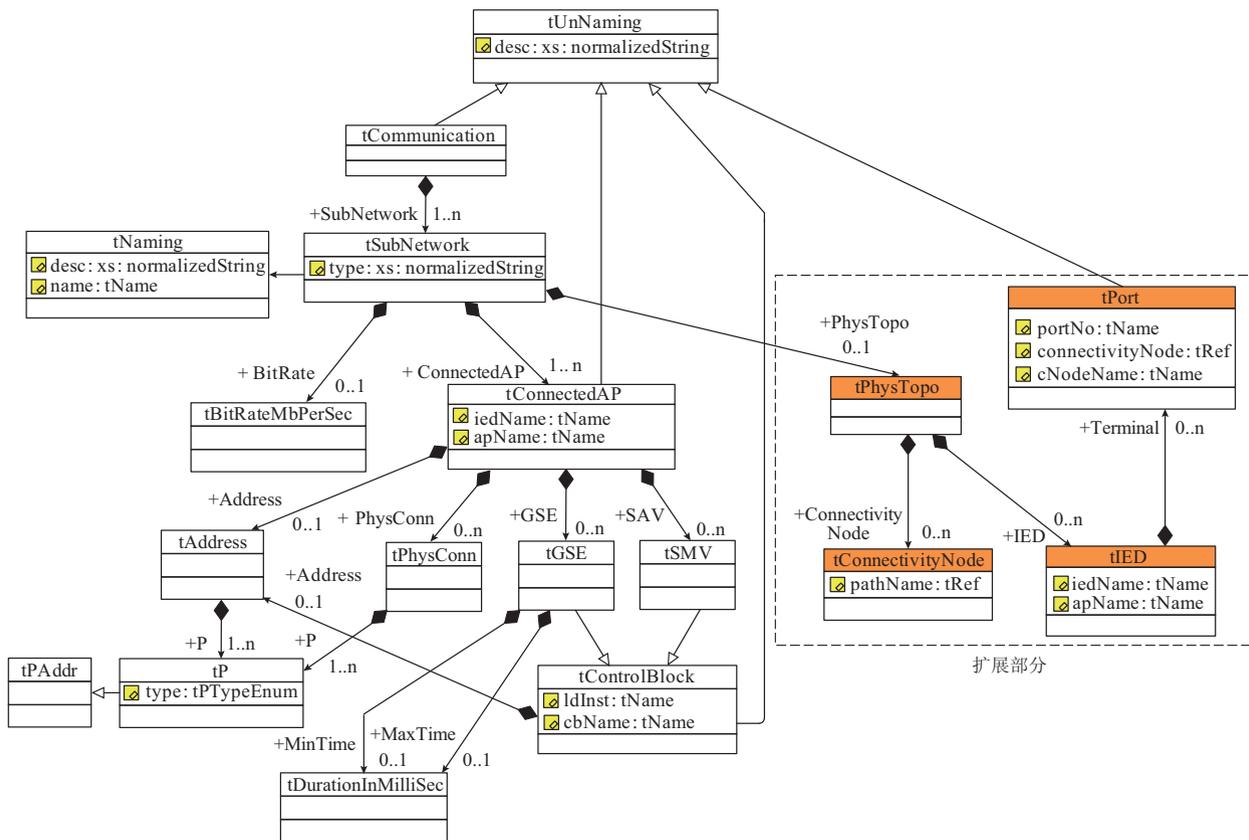


图 3 扩展的变电站通信网络 UML 图
Fig. 3 Extended UML diagram of substation communication model

3.2 配置描述文件实例

以实际变电站的过程层通信网络为例, 建立其相应的状态监测信息模型, 并在变电站配置描述文件 (. SCD) 和 IED 实例配置文件 (. CID) 中对通信网络进行描述。附录 B 图 B1 给出了某 220 kV 变电站的一次系统接线图以及电流/电压互感器、合并单元及智能终端的配置方案。附录 B 图 B2 给出了基于 PRP 和 HSR 的过程层通信网络组网方案。该变电站过程层通信网络的描述如下。

```
<Communication>
<SubNetwork name="Process bus_220kV_I" type="GOOSEAndSV"
<PhysTopo>
  <IED iedName="220. L1. PIED. I" apName="G1">
    <Terminal portNo="1A" connectivityNode="Process bus_220kV_I/LK101" cNodeName="LK101"/>
    <Terminal portNo="1B" connectivityNode="Process
```

```
bus_220kV_I/LK102" cNodeName="LK102"/>
</IED>
<IED iedName="220. L1. ST. I" apName="G1">
  <Terminal portNo="1A" connectivityNode="Process bus_220kV_I/LK102" cNodeName="LK102"/>
  <Terminal portNo="1B" connectivityNode="Process bus_220kV_I/LK103" cNodeName="LK103"/>
</IED>
:
<IED iedName="220. L1. RB. IA" apName="G1">
  <Terminal portNo="1A" connectivityNode="Process bus_220kV_I/LK106" cNodeName="LK106"/>
  <Terminal portNo="1B" connectivityNode="Process bus_220kV_I/LK101" cNodeName="LK101"/>
  <Terminal portNo="1C" connectivityNode="Process bus_220kV_I/LK602" cNodeName="LK602"/>
</IED>
:
```

```

</PhysTopo>
<ConnectedAP iedName="220. Bus. PIED. I" apName=
"G1">
...</ConnectedAP>
<ConnectedAP iedName="220. L1. PIED. I" apName=
"G1">
...</ConnectedAP>
:
</SubNetwork>
<SubNetwork name="Process bus_220kV_II" type=
"GOOSEAndSV">...</SubNetwork>
<SubNetwork name="Process bus_110kV" type=
"GOOSEAndSV">...</SubNetwork>
</Communication>

```

过程层网络共包括 3 个 SubNetwork: 2 个 220 kV 过程层网络 (Process bus_220kV_I 和 Process bus_220kV_II), 1 个 110 kV 过程层网络 (Process bus_110kV)。每个 SubNetwork 中除了描述网络中各设备的接入访问点 (ConnectedAP) 之外, 均包含 PhysTopo 以对通信网络拓扑进行描述。以附录 B 图 B2 中 220. L1 间隔为例, 220. L1. PIED. I 的 2 个端口 (1A 和 1B) 分别连接到链路 LK101 和 LK102 上, 220. L1. ST. I 的 2 个端口 (1A 和 1B) 分别连接到链路 LK102 和 LK103 上, 则表明 220. L1. PIED. I 的端口 1B 和 220. L1. ST. I 的端口 1A 通过链路 LK102 进行连接。通过描述网络中各个 IED 端口与链路的连接, 可对 HSR 网络和整个过程层网络的拓扑结构进行描述, 详细的 .SCD 文档见附录 C。

在 220 kV 线路 L1 保护装置 (220. L1. PIED. I) 的 CID 文档中, 描述了该设备所能提供的抽象通信服务能力和访问点列表。通过其过程层访问点, 可以访问该服务器中的 2 个逻辑设备: LD0 和 NTKW。LD0 中主要包含了设备端口的基本信息。NTKW 主要描述该设备支持的 2 个网络协议的状态信息模型: HSR 和时钟同步。NTKW 逻辑设备下主要包括 NHSR, NNOD, NODE, NOCU, NOPA, NOTP 和 NOPT 等逻辑节点的实例。类似地, 在 220 kV 过程层中心交换机 (220. PSwitch. IA) 的 CID 文档中, 主要描述了交换机相关协议的状态信息模型, 如透明网桥、服务质量、虚拟局域网和透明时钟等。上述 2 个设备的 CID 描述文件见附录 D 和附录 E。

4 结语

建立智能变电站通信网络的状态监测信息模型, 是实现基于 IEC 61850 的网络在线状态监测的

重要前提。本文利用功能分解/信息提取、映射 MIB 等方法, 初步建立了智能变电站通信网络的状态监测信息模型, 提出了基于扩展 SCL 的通信网络配置描述方法, 并针对某 220 kV 变电站的过程层通信网络, 给出了描述通信网络拓扑、交换机和保护装置的 SCL 文档实例。该描述方法仅需要对现有 SCL 进行较小的扩展, 与当前版本的 IEC 61850 具有较好的兼容性。本文所建立的状态监测信息模型仍有较多有待改进的地方, 希望本文能引起国内同行的进一步关注, 共同完善智能变电站通信网络的状态监测信息模型。

附录见本刊网络版 (<http://aeaps.sgepri.sgcc.com.cn/aeaps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] Q/GDW 383—2009 智能变电站技术导则[S]. 北京: 国家电网公司, 2009.
- [2] SCHUMACHER M, HOGA C, SCHMID J. Get on the digital bus to substation automation [J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(3): 51-56.
- [3] 王宾, 戈政, 董新洲, 等. 智能配电网变电站过程总线信息共享通信特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 62-66. WANG Bin, GE Zheng, DONG Xinzhou, et al. Analysis of communication characteristic with process bus data sharing for smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 62-66.
- [4] 樊陈, 倪益民, 窦仁辉, 等. 智能变电站过程层组网方案分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 67-71. FAN Chen, NI Yimin, DOU Renhui, et al. Analysis of network scheme for process layer in smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 67-71.
- [5] 许伟国, 蒋峰, 张亮, 等. 数字化变电站中网络通信黑匣子的设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 92-94. XU Weiguo, JIANG Ye, ZHANG Liang, et al. Design and application of the network communication black box in digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 92-94.

· 广告 ·

Mexon 兆越®
http://www.mexontec.com

IEEE 1588 24GE+2G 全千兆
工业以太网交换机

Cronet CC-3952M 48G+4T 模块化
三层万兆工业以太网交换机

网管型工业以太网交换机

上海兆越通讯技术有限公司
HOTLINE: 400-66-12508

- [6] 王治民, 陈炯聪, 任雁铭, 等. 网络通信记录分析系统在数字化变电站中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 92-95.
WANG Zhimin, CHEN Jiongcong, REN Yanming, et al. Application of network communication recorder and analyzer in digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 92-95.
- [7] IEC 61850-7-4 Communication networks and systems for power utility automation: Part 7-4 basic communication structure—compatible logical node classes and data object classes[S]. 2nd ed. 2010.
- [8] Draft IEC 61850-90-4 TR—communication networks and systems for power utility automation: Part 90-4 network engineering guidelines for substations[R]. 2011.
- [9] 李锋, 谢俊, 赵银凤, 等. 基于 IEC 61850 的智能变电站交换机 IED 信息模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 76-80.
LI Feng, XIE Jun, ZHAO Yinfeng, et al. IEC 61850 based information model of switch intelligent electronic device for smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 76-80.
- [10] 刘明慧, 胡绍谦, 王文龙, 等. 智能变电站交换机 IEC 61850 信息建模[J]. 电气技术, 2012, 13(1): 30-35.
LIU Minghui, HU Shaoqian, WANG Wenlong, et al. The IEC 61850 modeling of the switch used in smart substation[J]. Electrical Engineering, 2012, 13(1): 30-35.
- [11] DL/T 860 变电站通信网络与系统第 6 部分: 与智能电子设备有关的变电站内通信配置描述语言[S]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2008.
- [12] IEC 61850-6 Communication networks and systems for power utility automation: Part 6 configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs[S]. 2nd ed. 2009.
- [13] Q/GDW 429—2010 智能变电站网络交换机技术规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2010.
- [14] RFC 4188 Definitions of managed objects for bridges[S]. 2005.
- [15] IEEE Std. 802.1ap (Amendment to IEEE Std. 802.1Q™—2005) IEEE standard for local and metropolitan area networks—virtual bridged local area networks amendment 8: management information base (MIB) definitions for VLAN bridges[S]. 2008.
- [16] RFC 4363 Definitions of managed objects for bridges with traffic classes, multicast filtering, and virtual lan extensions [S]. 2006.
- [17] IEEE Std. C37.238 IEEE standard profile for use of IEEE Std. 1588 precision time protocol in power system applications [S]. 2011.
- [18] IEC 62439-3 Industrial communication networks—high availability automation networks: Part 3 parallel redundancy protocol (PRP) and high-availability seamless redundancy (HSR)[S]. 2011.

朱林(1982—), 男, 通信作者, 博士, 主要研究方向: 智能变电站、工业以太网技术及其在电力系统中的应用、继电保护整定及在线校核。E-mail: zh_l_hustcee@163.com

王鹏远(1987—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能变电站、工业以太网技术及其在电力系统中的应用。

石东源(1974—), 男, 副教授, 主要研究方向: 电力系统分析计算、继电保护整定及在线校核、信息技术在电力系统中的应用。

(编辑 章黎)

Status Monitoring Information Model and Configuration Description of Communication Network in Smart Substations

ZHU Lin, WANG Pengyuan, SHI Dongyuan

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Unified status monitoring information model and configuration description of communication network is highly desirable to achieving status monitoring of communication network in smart substations. A status monitoring information model of communication network is developed to represent the operation state of different network functionalities by means of function decomposition/information extracting and mapping of the management information base (MIB). The description method of physical network topology, protection devices and switch devices is also proposed based on the extension of substation configuration description language (SCL). The process level communication network of a high voltage level substation is described in standard SCL files as an example, which demonstrates the availability of the proposed status monitoring information model and configuration description.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51107048) and Post-doctoral Science Foundation of China (No. 20110491133).

Key words: smart substation; communication network; status monitoring information model; IEC 61850; substation configuration description language (SCL); management information base