

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201585

适应变电站智能运维的智能协议转换方法

李精松¹, 刘路翊², 曹尚¹, 罗晓通¹, 苏鑫¹, 王少荣¹

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 国网福州供电公司, 福建 福州 350000)

摘要: 为了实现多源数据的融合应用, 需要将采用不同数据交换协议的在线检测装置接入变电站智能运维诊断平台。针对这种实际需求, 提出了一种具有“对方协议自动识别功能”和“自适应配置互转协议参数功能”的智能协议转换方法。通过判断数据帧的多个特殊字段, 以初步确定报文遵循的数据交换协议。进而, 试探数据帧的命令类型字段和校验码字段, 以最终确定对方遵循的数据交换协议。通过“通信报文 A—数据库—通信报文 B”的相互转换模式, 实现了“一对多”、“多对一”以及“多对多”的数据交换协议的相互转换。详细介绍了所提智能协议转换方法的实现方案及其技术细节。所提方法弥补了传统“一对一”协议转换器存在的不足, 为各类在线检测装置接入变电站智能运维诊断平台提供了一种便捷方法。

关键词: 变电站智能运维; 智能协议转换; 协议转换器; 自动识别; 自适应配置

An intelligent protocol conversion method for intelligent substation operation and maintenance

LI Jingsong¹, LIU Luyi², CAO Shang¹, LUO Xiaotong¹, SU Xin¹, WANG Shaorong¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Grid Fuzhou Power Supply Company, Fuzhou 350000, China)

Abstract: To realize the fusion application of multi-source data, online detection devices with different data exchange protocols need to be connected to the intelligent operation and maintenance diagnosis platform of a substation. In response to this need, an intelligent protocol conversion method with the functions of automatically identifying the protocol used in the other side of communication and adaptively configuring the parameters of the interconversion protocols is proposed. By judging multiple special fields of the data frame, the data exchange protocol followed by the data message is preliminarily determined. The data exchange protocol followed by the other side of communication is finally determined by tentatively testing the command type field and the check code field of the data frame. Through the conversion mode of "communication message A-database-communication message B", the protocol conversion modes of "one-to-many", "many-to-one" and "many-to-many" are realized. An implementation scheme, and its technical details, of the proposed intelligent protocol conversion method are introduced in detail. The proposed method makes up for the deficiency of the traditional "one to one" protocol converter and provides a convenient method for all kinds of online detection devices to access the intelligent operation and maintenance diagnosis platform of a substation.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902800) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52094017003D).

Key words: intelligent operation and maintenance of substation; intelligent protocol conversion; protocol converter; automatic identification; adaptive configuration

0 引言

随着社会信息化和数据化程度的加深, 数据和

信息的共享与交流已经成为工业领域实现自动化、智能化的关键。在线检测数据的融合应用是实现变电站运维智能化的必经之路^[1-3]。然而, 或因为制造商出于知识产权保护原因, 或因为技术发展过程中的必然, 企业或生产厂商往往在其产品中采用不同的数据交换协议: 有可能使用公用数据交换协议;

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902800); 国家电网公司科技项目(52094017003D)

也有可能采用在公用数据交换协议基础上进行了修改的数据交换协议; 甚至有可能采用自定义数据交换协议。显然, 大量变电站在线检测装置的数据交换协议各不相同, 给数据的共享和融合应用带来了困难^[4-8]。众所周知, 遵循不同数据交换协议的两个系统的通信互联以实现数据共享的最简洁方法是采用协议转换器。然而, 目前的协议转换器要么仅互转两种数据交换协议, 要么在使用时需要非常繁琐的配置过程^[9-10]。因此, 研究新的数据交换协议的转换方法, 为变电站智能运维融合应用多源数据提供简便的在线检测系统接入手段, 具有重要的实际意义。

长久以来, 许多工业控制系统都采用“一对一”的协议转换器^[11-13]。这种方法, 对于少量系统的通信互联是非常有效的。但是, 对于大量在线检测装置接入变电站智能运维诊断平台不是优选方案。因为: 其一, 随着在线检测装置数量不断增加, 协议转换器的数量也同步增加, 从而协议转换器的安装和维护工作量也同步增加^[14]; 其二, 采用这种模式通信线长且多, 通信可靠性不高, 同时智能运维诊断平台需要配备很多通信接口^[15-18]。因此, 研究多端口协议转换器是非常有必要的。

为了解决现有技术的不足, 本文提出了一种智能协议转换方法, 实现了“对方协议自动识别功能”和“自适应配置互转协议参数功能”, 为各类在线检测装置接入变电站智能运维诊断平台提供了一种便捷解决方案。本文对所提智能协议转换方法的转换原理、转换过程和实现方案进行了详细介绍。

1 对方数据交换协议自动识别方法

1.1 数据交换协议的基本结构

数据交换协议在数据通信中充当“语法”的角色, 它对数据报文的格式和内容进行了详细的约定^[19-26]。按照这些约定, 通信互联的两个及两个以上系统就能够相互正确接收和解析彼此之间发出的数据报文, 并理解其内容。通常, 一份完整的数据交换协议包含变量定义、字段定义、数据报文定义和问答关系定义四个部分。

1.1.1 变量定义

变量定义是数据交换协议中最为基础的部分, 其主要作用是为需要组织的各种数据进行命名, 并规定其数据长度。例如, 将 A 相电流测量值命名为 IA、指明其为正整数、用 2 字节二进制数据表示且高字节先发送, 等等。

1.1.2 字段定义

将若干字节的数据构成的数据块称为字段。其中, 将变量进行有序组织构成了变量字段。例如,

三相电压数据的变量名分别为 VA、VB、VC, 将其组织在一起并命名为 V 字段, 即 VA、VB、VC。而在实际数据交换协议中还存在着某些特殊字段, 比如, 数据报文的帧头字段、帧尾字段、地址字段、数据报文类型字段以及校验码字段等。一般而言, 特殊字段的内容不包含变量, 且某些特殊字段的内容是固定的。

1.1.3 数据报文定义

数据报文定义, 是一种描述多个字段以什么样的有序组合以形成数据报文的约定。也就是说, 数据报文是按数据交换协议要求(或约定)将若干字段进行有序排列而生成的。

1.1.4 问答关系定义

问答关系定义部分规定了通信互联系统的主从关系。在实际的数据交换过程中, 大多采用询问-应答方式有序地进行数据交换控制, 从而, 数据交换协议中的各条数据报文通常都需要确定其问答关系。比如, 系统 A 发出一条数据报文, 需要系统 B 给出测量数据, 那么, 称系统 A 发出的报文为查询命令报文, 而系统 B 的响应报文称为查询响应报文; 又如, 系统 A 发出一条数据报文, 需要系统 C 进行控制操作, 则称系统 A 发出的数据报文为控制命令报文, 系统 C 的响应报文为控制命令确认报文。在实际中, 也有没有响应报文的命令报文, 譬如, 广播报文。下面给出了一种数据交换协议示例, 以对上述内容进一步阐明。

//变量定义部分

AF: 1 //查询内容标志, 数据长度 1 字节

IA: 2 //A 相电流, 数据长度为 2 字节

IB: 2 //B 相电流, 数据长度为 2 字节

IC: 2 //C 相电流, 数据长度为 2 字节

VA: 2 //A 相电压, 数据长度为 2 字节

VB: 2 //A 相电压, 数据长度为 2 字节

VC: 2 //A 相电压, 数据长度为 2 字节

DAD: 1 //接收端地址, 数据长度为 1 字节

SAD: 1 //发送端地址, 数据长度为 1 字节

LEN: 1 //数据区长度变量, 数据长度 1 字节

CRC: 1 //CRC 校验码, 数据长度为 1 字节

SUM: 1 //累加和校验码, 数据长度为 1 字节

//字段定义部分

SZ: 7EH, E7H, 7EH //数据报文帧头字段, 标志数据报文开始

AD: DAD, SAD //地址字段, 说明接收端和发送端地址编码

LZ: LEN //数据报文长度字段, 说明数据报文数据区长度, 单位为字节

QS: AF //查询内容标志字段, 说明查询的内容
 DZ1: IA, IB, IC //数据字段 1
 DZ2: VA, VB, VC //数据字段 2
 CHK: CRC, SUM //校验字段, 存放校验码
 EZ: 0DH //数据报文帧尾字段, 标志报文结束
 //报文定义及问答关系约定
 #Q1: SZ AD LZ QS CHK EZ //查询报文
 #A1: SZ AD LZ DZ1 DZ2 CHK EZ //应答报文

在该示例中, 数据交换协议首先作了变量定义, 其次作了字段定义, 进而作了数据报文定义和问答关系约定, 并采用了“#”标志问答关系, “#Q”表示查询报文, “#A”表示应答报文。

需要说明的是, 以上示例仅用于说明数据交换协议的简单结构形式。实际上, 数据交换协议往往还要约定通信波特率、通信接口的电气特性以及机械特性等等。由于这些内容属于业内技术人员的常识, 同时也受限于篇幅, 此处不赘述。

1.2 主从关系确定

图 1 为一个已经连接在通信网络之中的六端口智能协议转换器。假设所有的通信接口均为异步串行通信接口, 其连接的六个系统 A、B、C、D、E、F 各自通信接口的电气特性和机械特性明确且已经正确连接, 那么, 在已知六个系统 A、B、C、D、E、F 各自采用的通信波特率以及每字节通信位数的情况下(例如, 常用的每字节 10 位通信, 1 个起始位、8 个数据位、1 个停止位), 基于仅知道系统 A、B、C、D、E、F 可能采用的数据交换协议集合但不知道它们各自采用了什么具体数据交换协议的条件, 图 1 所示的智能协议转换器应该如何自动确定系统 A、B、C、D、E、F 的主从关系和自动识别各个通信接口所连接的对方的数据交换协议呢?

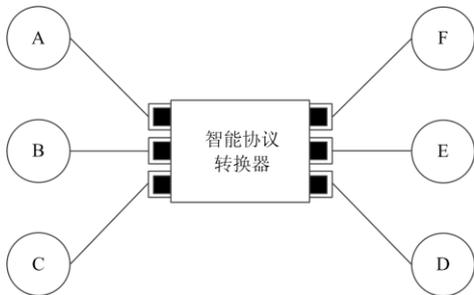


图 1 多端口智能协议转换器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-port intelligent protocol converter

首先, 我们讨论主从关系的自动识别问题。因为智能协议转换器仅承担“接收—协议转换—转发”任务而非通信系统中的“主”, 所以, 当某一

通信接口(假设 C 端口)接收到一帧数据报文时, 图 1 中的智能协议转换器就会把该端口(此时为 C 端口)连接的对方确认为本次通信的“主”方。接着, 智能协议转换器就需要识别接收到的数据报文所采用的数据交换协议, 如何识别将在后面的 1.3 小节介绍, 这里假设已经能够识别以便于继续叙述。当已经识别出接收到的数据报文所使用的数据交换协议之后, 智能协议转换器第一次将从 C 端口接收到的数据报文不作转换地同时从 A、B、D、E、F 端口发出去, 以试探其中的哪个系统是该报文的信宿。此时, 如果智能协议转换器的 A、B、D、E、F 端口中的某一个接收到响应报文, 那么此次试探已经成功; 如果等待一定时间(根据整个通信系统的实际情况, 等待响应最慢的那个系统的延时时间, 比如等待 50 ms), 智能协议转换器的 A、B、D、E、F 端口均未接到响应报文, 则此次试探失败, 因而要将从 C 端口接收到的报文随机转换成数据交换协议集合中的另一种报文, 再同时从智能协议转换器的 A、B、D、E、F 端口发出去, 再次试探 A、B、D、E、F 系统的响应情况, 直至获得响应报文为止。显然, 上述过程所需的最长时间可用式(1)计算。

$$T_{\max} = 2T_{R\max} + nT_{S\max} + (n-1)T_{\text{transf}\max} + nT_{\text{delay}\max} \quad (1)$$

式中: T_{\max} 为上述过程需要的最长时间, 单位为 ms; n 为在智能协议转换器能够转换的数据交换协议集合的元素个数(即能够实施 n 种数据交换协议的相互转换); $T_{R\max}$ 为数据交换协议集合中接收时间最长的报文所需时间(注意: 这个时间与波特率相关, 所以应考虑各种影响因素后确定), 单位为 ms; $T_{S\max}$ 为数据交换协议集合中发送时间最长的报文所需时间(这个时间也与波特率相关, 同样应考虑各种影响因素后确定), 单位为 ms; $T_{\text{transf}\max}$ 为数据交换协议集合中两帧不同协议数据报文转换所需的最长时间(这个时间与智能协议转换器的 CPU 运算速度相关, 应考虑各种影响因素后确定, 在实际中这个时间参数很小), 单位为 ms; $T_{\text{delay}\max}$ 为接入智能协议转换器的所有系统中响应报文发送最长延时, 单位为 ms。

由以上分析可以看出, 当智能协议转换器的所有通信接口的对方数据交换协议均被试探完毕, 则其通信接口之间的互转协议及互转端口对应情况就可以确定, 将试探结果存储起来, 后续转换就可直接进行而无需再次试探, 从而数据传输效率可以保证。顺便指出, 对于智能协议转换器来说, 一旦互转协议和互转端口关系通过试探确定, 可以不再

关注“主-从”问题,而是接到了数据报文后,立即进行转换,接着将转换好的数据报文从对应的端口发出去;等接收到响应报文后,又立即进行反向转换,然后从先前接收到报文的端口返回响应报文。

1.3 对方数据交换协议的自动识别方法

从本文 1.1 小节的分析可知,遵循数据交换协议的数据报文中一定存在着一些特殊字段,其内容不随数据报文中的变量变化而变化,同时,不同数据交换协议的某些特殊字段内容完全不同,所以,特殊字段的这种特性可用于识别数据交换协议的种类。这里,我们将上述可用于识别数据报文种类的数据报文特征称为第一特征。本文我们采用 1.1 节示例,约定第一特征的特殊字段为数据帧的帧头字段和帧尾字段。

考虑到仅采用第一特征进行数据报文的自动识别可能会出错,所以,还需研究数据报文的第二特征。比如,当通信波特率较高且受到通信干扰时,智能协议转换器未能从数据报文的帧头开始判断,而数据报文的变量字段中刚好出现了与某种数据交换协议的帧头字段完全相同的字节组时,智能协议转换器将会出现错误判断。为了避免这种错误判断的发生,本文作者考虑将数据报文中命令类型字段的许用码作为数据报文的第二特征。因为,每种数据交换协议的报文形式是有限的,所以其命令类型字段存在着许用码和禁用码。譬如,某种数据交换协议的所有报文形式共 100 种,其命令类型字段为 1 个字节,显然,其命令类型只能选用 256 种中的 100 种为许用码,而剩下的 156 种为禁用码。所以,将命令字段许用码作为数据报文的第二特征进行数据交换协议的自动识别是可行的。

为了进一步提高对方数据交换协议自动识别的准确性,本文将数据报文的校验码字段作为其第三特征,并用于数据报文所属数据交换协议的判断。众所周知,为了能够进行数据报文的错误检测,几乎所有数据报文均有校验码字段。同时,还应注意,不同数据交换协议可能采用不同的校验码生成方法,校验码也可能处于数据报文的不同位置。因此,将校验码字段作为数据报文的第三特征进行数据交换协议的自动检测时,同时可以判断数据报文可能采用什么数据交换协议以及接收到的数据报文是否正确。

综上所述,本文提出数据报文所属数据交换协议的自动识别方法通过以下三个步骤完成:

(1) 将接收到的数据报文帧头和帧尾字段与数据交换协议集合中“随机选中”的数据交换协议的数据报文比对,即数据报文的第二特征确认。

(2) 将接收到的数据报文“猜测”命令类型字段与数据交换协议集合中在步骤(1)“随机选中”数据交换协议的命令类型许用码进行比对,即数据报文的第二特征确认,并记下对应的命令类型码以便步骤(3)使用。

(3) 将接收到的数据报文“猜测”校验码字段与采用数据交换协议集合中在步骤(1)“随机选中”数据交换协议中步骤(2)确认的命令类型对应的数据报文的校验码计算方法计算得出的校验码比对,即数据报文的第三特征确认。

如果上述三个步骤都确认通过,则在步骤(1)“随机选中”的数据交换协议就是对方所采用的数据交换协议。如果第一轮没有成功,则排除上一轮“随机选中”的数据交换协议,进行第二轮自动识别操作。如此做法,直至识别成功为止。

可见,上述方法简便易行,具备可操作性和实用性,因为采用了数据报文的三个特征比对,具有很高的准确性。

2 互转协议参数自适应配置问题及解决方法

2.1 基于数据库的协议转换思路

在对方数据交换协议自动识别的基础上,如何实现不同数据交换协议之间的数据报文转换是另一必须解决的问题。在此,本文提出一种基于数据库的数据交换协议的互转方法,其关键是实现了互转协议的参数自适应配置。

假设采用数据交换协议 A 的通信接口接收到了数据报文 y_A , 经过协议转换后,采用数据交换协议 B 的通信接口发送出数据报文 y_B , 那么,数据报文 y_A 到数据报文 y_B 的协议转换可以看作一种映射。再考虑双向转换,即有

$$\begin{cases} y_B = f(y_A) \\ y_A = g(y_B) \end{cases} \quad (2)$$

本文提出将数据报文中的数据作为“跳板”,即采取“从数据报文 A 提取数据,再将数据编辑到数据报文 B 中”的模式实现数据协议转换。因此,采用了两个映射。

首先,对遵循数据交换协议 A 的数据报文 y_A 进行解析得到数据集合 $[x]$, 即

$$[x] = f_A(y_A) \quad (3)$$

式中, f_A 表示对数据交换协议 A 的数据报文 y_A 进行解析并得到数据集合 $[x]$ 。

然后,遵循数据交换协议 B 将数据集合 $[x]$ 进行重新组织形成数据报文 y_B , 即

$$y_B = f_B(x) \quad (4)$$

依据上述原理可以直接对各种数据报文进行两种数据交换协议之间的数据报文转换。然而，对于多端口的智能协议转换器，数据报文的逐条转换极为繁琐，且通用性不强。因此，本文设计了基于数据库的智能协议转换方法，其原理如图 2 所示。

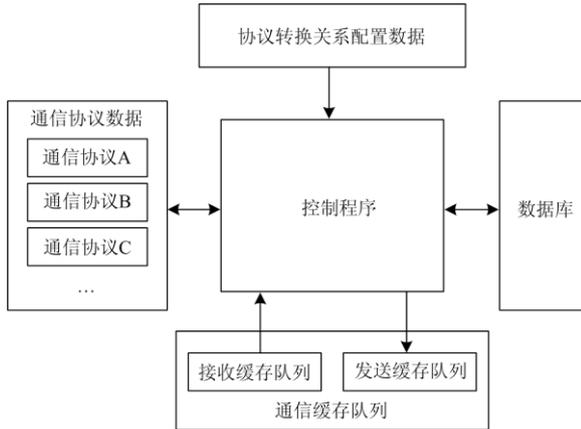


图 2 基于数据库的智能协议转换原理示意图
Fig. 2 Schematic diagram of intelligent protocol conversion based on database

图 2 中的“通信协议数据”是指智能协议转换器存储的数据交换协议集中所有报文的数据字段及其准确、详细表达，以供协议转换时查询。在图 2 右侧的“数据库”中存放的当前数据的排列摆放次序和位置与左侧的“通信协议数据”完全一致。又因为在“协议转换关系配置数据”已经明确了智能

协议转换器各个端口之间的转换关系，所以，一旦接收到一帧新的数据报文，立即按照对应的数据交换协议进行解析，并将当前数据存放到数据库的对应位置中。进而，将根据互转协议关系而生成的新数据报文排入发送缓存队列。

显然，上述过程是在已经完成协议转换关系配置的基础上进行的，是智能协议转换器正常运行的过程。2.2 小节我们将介绍互转协议参数的自适应配置方法。

2.2 互转协议参数的自适应配置方法

本文所设计的基于数据库的互转协议参数自适应配置方法的原理如图 3 所示。在智能协议数据器的 EEROM 中存储了数据交换协议报文的全集。在智能协议转换器的对方数据交换协议的自动识别过程中，自动识别出各个通信端口连接的对方使用的数据交换协议的报文字集(因为不一定所采用的数据交换协议的所有报文类型都使用了)，并在在线可改写的非易失性存储器中用“Yes”和“No”标记相应通信报文的使用状态；智能协议转换器运行时，在随机存储的数据库中开辟对应的存储区，分别存储数据交换协议的报文全集、使用报文字集的解析数据以及对应端口当前发送报文内容(图中红色文字)和当前接收报文(图中蓝色文字)内容。其中，当前发送报文和当前接收报文不一定存在。但它们应该准确地存储在对应的报文编号指定的存储区内。

通信端口编号 ID				
数据交换协议名称编号				
在线可改写 EEROM 中存储		随机存储器 RAM 中存储		
数据交换协议数据报文全集	数据交换协议数据报文字集	数据交换协议数据报文字集映射	数据交换协议数据报文全集映射	
报文 001 编号及其内容	yes	存储当前发送报文内容	报文 001 解析数据存储区	报文 001 编号及其内容映射
报文 002 编号及其内容	no	存储当前接收报文内容	报文 002 解析数据存储区 (配置但不操作)	报文 002 编号及其内容映射
报文 003 编号及其内容	yes
...
报文 a ₂ a ₁ a ₀ 编号及其内容	yes	...	报文 a ₂ a ₁ a ₀ 解析数据存储区	报文 a ₂ a ₁ a ₀ 编号及其内容映射

图 3 互转协议参数自适应配置原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the adaptive parameter configuration principle of interconversion protocols

上述配置方法虽然牺牲了一定的随机存储器 RAM 的存储空间, 但是简化了解析数据和组合数据的过程, 通过数据复制的方式实现了数据层面的数据交换协议的相互转换, 大大加快了协议转换的速度, 对于需要快速转换的应用场合具有明显优势。

3 多端口智能协议转换器的实现方案

多端口智能协议转换器的实现方案包括硬件系统和软件系统两个部分。其中, 在本文的前面部分比较详细地说明了所提出的智能协议转换方法的原理和过程, 因而对软件系统的设计具有较好的指引作用。同时, 考虑到不同的硬件系统, 软件设计存在较大差异, 本文不再对所提智能协议转换方法的软件实现展开详细讨论。下面我们重点介绍多端口智能协议转换器的硬件实现方案, 并以所有通信接口均为异步串行通信端口为例进行叙述, 但其中的思想也适合于其他形式的通信接口。

所提出的多端口智能协议转换器的硬件系统方案如图 4 所示。在图 4 中, 主 CPU 为高速、高性能微处理器, 可以是 DSP 芯片或是基于 ARM 内核的高性能微处理器, 承担协议转换的高速运算任务。非易失性存储器 ROM 用于存储程序和配置参数, 其中存储配置参数部分应该为可在线改写的非易失性存储器, 在图 4 中未做区分标识, 在此特别说明。随机存储器 RAM 用于存储当前的数据报文, 构成前文所说的数据库, 同时也包括缓存需要的随机存储区。硬件直接设置 SETTINGS 用于端口波特率选择等设置, 为方便现场应用而配置。

从图 4 还可看出, 配置了 n 个通信接口。在每个通信接口中, 专门配置了双口 RAM(图 4 中的 B_1 、 B_2 、 \dots 、 B_n)和负责通信的 CPU(图 4 中的 A_1 、 A_2 、 \dots 、 A_n)。这样的配置, 能够保证多端口协议转换器的高速性能, 且非常方便升级和拓展。同时, 软件系统移植也十分方便。

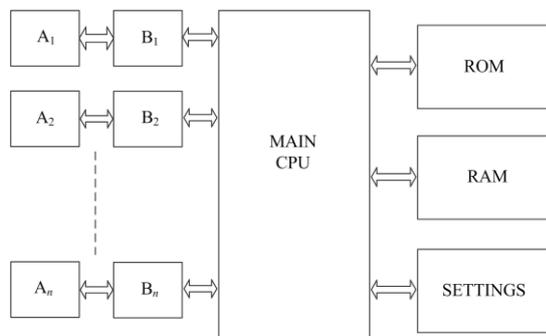


图 4 多端口智能协议转换器硬件方案

Fig. 4 Hardware solution of multi-port intelligent protocol converter

图 4 所示的多端口智能协议转换器, 其正常运行过程为: 当某一端口接收到一帧数据报文时, 其通信 CPU 将接收到的数据报文存入对应的双口 RAM 中, 并给出标记。当主 CPU 扫描到相应标记, 便根据已经配置好的协议转换关系解析数据报文, 并将解析获得的数据存至数据库的对应区域。接着, 主 CPU 将根据解析得到的数据而生成的转换后的数据报文存储到对应发送端口的双口 RAM 中, 并给出标记。对应端口通信 CPU 检测到需要发送数据报文, 立即进行数据报文发送流程。

从上述介绍可知, 本小节提出的多端口智能协议转换器的硬件方案, 能够实现本文提出的智能协议转换方法。

4 结论

本文提出了一种具有“对方协议自动识别功能”和“自适应配置互转协议参数功能”的适应变电站智能运维的智能协议转换方法, 弥补了传统协议转换器存在的不足, 为大量变电站电气设备在线检测系统接入电气设备智能运维诊断平台提供一种便捷方式。本文对所提智能协议转换方法的转换原理、转换过程和实现方案进行了详细介绍。首先, 提出的对方协议自动识别方法, 基于通信接口电气特性兼容和通信波特率相同的前提条件, 通过判断数据帧的多个特殊字节初步确定报文遵循的数据交换协议, 进而试探数据帧的报文类型字段和校验码字段, 以确定对方遵循的数据交换协议。其次, 提出的互转协议的参数自适应配置方法, 基于通过“通信报文 A—数据库—通信报文 B”的相互转换模式, 可实现“一对多”、“多对一”以及“多对多”的数据交换协议的相互转换。本文还设计了所提智能协议转换方法的实现方案, 并详细介绍了相关技术细节。

参考文献

- [1] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [2] 卓怀忠, 张玉姣, 陶颖军, 等. 变电站网络数据管理系统设计与实现[J]. 自动化与仪表, 2017, 32(9): 37-39. ZHUO Huaizhong, ZHANG Yujiao, YAO Yingjun, et al. Design and implementation of substation network data management system[J]. Automation and Instrumentation, 2017, 32(9): 37-39.
- [3] 何晶金. 智能化变电站运维检修管理模式的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.

- HE Jingjin. Research on intelligent substation operation and overhaul management model[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [4] 张巧霞, 王广民, 李江林, 等. 变电站远程运维平台设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 164-172.
- ZHANG Qiaoxia, WANG Guangmin, LI Jianglin, et al. Design and implementation of remote operation and maintenance platform for substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 164-172.
- [5] 苗世洪, 王少荣, 刘沛, 等. 智能装置通信协议转换器的设计与实现[J]. 自动化仪表, 2000(5): 27-28.
- MIAO Shihong, WANG Shaorong, LIU Pei, et al. Design and implementation of communication protocol converter for intelligent device[J]. Automation Instrument, 2000(5): 27-28.
- [6] 李涛, 王双友. 智能化配电系统中 Modbus 协议转换的实现[J]. 自动化与仪表, 2016, 31(1): 30-33.
- LI Tao, WANG Shuangyou. Realization of Modbus protocol conversion in intelligent power distribution system[J]. Automation and Instrumentation, 2016, 31(1): 30-33.
- [7] 彭志强, 周航, 韩禹. 智能变电站自动化设备透明运维系统构建与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 156-163.
- PENG Zhiqiang, ZHOU Hang, HAN Yu. Construction and application of transparent operation and maintenance system for intelligent substation automation equipment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 156-163.
- [8] 胡绵超. 变电站综合自动化系统网络协议转换的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2000.
- HU Mianchao. Research on network protocol conversion of integrated automation system of substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2000.
- [9] 笃峻, 张海宁, 柏杨, 等. 智能变电站设备状态监测系统通信关键技术及实现[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 151-156.
- DU Jun, ZHANG Haining, BAI Yang, et al. Key technology of communication and its implementation for equipment status monitoring[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 151-156.
- [10] 张娟锋, 师卫, 刘振国. 通用通信协议转换接口的研究与实现[J]. 电脑开发与应用, 2009, 22(5): 25-26.
- ZHANG Juanfeng, SHI Wei, LIU Zhenguo. Research and implementation of general communication protocol conversion interface[J]. Computer Development and Application, 2009, 22(5): 25-26.
- [11] 张晓瑞, 纪陵, 檀庭方, 等. 智能变电站二次设备在线故障运维平台架构研究[J]. 华电技术, 2019, 41(2): 1-5, 13.
- ZHANG Xiaorui, JI Ling, TAN Tingfang, et al. Research on the architecture of online fault operation and maintenance platform for secondary equipment in smart substation[J]. Huadian Technology, 2019, 41(2): 1-5, 13.
- [12] 张科, 张红娟. 多接口协议转换器的设计与实现[J]. 信息化研究, 2009, 35(7): 33-35, 39.
- ZHANG Ke, ZHANG Hongjuan. Design and implementation of multi-interface protocol converter[J]. Information Research, 2009, 35(7): 33-35, 39.
- [13] 丁超, 范征宇. 通信协议转换在嵌入式控制器上的实现[J]. 自动化仪表, 2007(9): 35-37.
- DING Chao, FAN Zhengyu. Realization of communication protocol conversion on embedded controller[J]. Automation Instrument, 2007(9): 35-37.
- [14] 张宪军, 赵谦, 梁志宝, 等. 智能变电站交换机基于 GOOSE 管理技术设计与实现[J]. 华电技术, 2020, 42(2): 42-49, 57.
- ZHANG Xianjun, ZHAO Qian, LIANG Zhibao, et al. Smart substation switch is designed and implemented based on GOOSE management technology[J]. Huadian Technology, 2020, 42(2): 42-49, 57.
- [15] 高志远, 黄海峰, 徐昊亮, 等. IEC 61850 应用剖析及其发展探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 162-169.
- GAO Zhiyuan, HUANG Haifeng, XU Haoliang, et al. Discussion on applications of IEC 61850 and its development[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 162-169.
- [16] HE J, LIU L, LI W, et al. Development and research on integrated protection system based on redundant information analysis[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 108-120. DOI: 10.1186/s41601-016-0024-y.
- [17] 袁敬中, 胡楚叶, 陆亦齐, 等. 一种输变电工程智能设计平台[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 97-105.
- YUAN Jingzhong, HU Chuye, LU Yiqi, et al. An intelligent design platform for power transmission and transformation engineering[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 97-105.
- [18] 梁旭东, 潘洪湘, 王海峰, 等. 基于电力系统通用服务协议的主子站程序化控制方法[J]. 电气应用, 2017, 36(23): 16-21.
- LIANG Xudong, PAN Hongxiang, WANG Haifeng, et al. Master substation program control method based on general service protocol for electric power system[J]. Electrical Application, 2017, 36(23): 16-21.

- [19] 陈军, 庞晓燕, 赵子涵, 等. 应对特高压换流站紧急故障的负荷快切通信关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 157-163.
CHEN Jun, PANG Xiaoyan, ZHAO Zihan, et al. Research on key technology of load fast control communication for critical fault in ultra high voltage converter station[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 157-163.
- [20] 魏本成. 智能变电站验收及运检方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
WEI Bencheng. Research of intelligent substation check and operation[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [21] 陆路, 杜积贵, 全思平, 等. 变电站遥信功能自动校验系统[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(2): 40-43.
LU Lu, DU Jigui, QUAN Siping, et al. Automatic verification system of telecommunication function in substations[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(2): 40-43.
- [22] 李志勇, 孙发恩, 瞿晓宏. 智能变电站综合测试仪的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 149-154.
LI Zhiyong, SUN Fa'en, QU Xiaohong. Research and implementation of integrated tester for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 149-154.
- [23] 鲁东海, 孙纯军, 王晓虎. 智能变电站中在线监测系统设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 134-137.
LU Donghai, SUN Chunjun, WANG Xiaohu. Online monitoring system for smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 134-137.
- [24] 李珏, 刘灏, 田建南, 等. 适用于主动配电网 PMU 的
数据传输协议与通信性能分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 3-10.
LI Yu, LIU Hao, TIAN Jiannan, et al. Communication protocol and performance analysis for the PMU of distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 3-10.
- [25] 邱帆, 陈兰兰, 林楠, 等. 基于 SM9 的配电网 Modbus 报文安全性分析及改进[J]. 中国电力, 2019, 52(10): 18-25.
QIU Fan, CHEN Lanlan, LIN Nan, et al. Security analysis and improvement of Modbus message for distribution network based on SM9[J]. Electric Power, 2019, 52(10): 18-25.
- [26] 袁安富, 于海, 缪文贵, 等. 智能变电站 MMS 报文捕获分析的研究与实现[J]. 电测与仪表, 2013, 50(9): 74-78.
YUAN Anfu, YU Hai, MIU Wengui, et al. Research and implementation on capturing and analyzing the MMS packet in smart substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(9): 74-78.

收稿日期: 2020-12-22; 修回日期: 2021-02-18

作者简介:

李精松(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: 236765791@163.com

刘路翊(1994—), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: 849352898@qq.com

曹尚(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化。E-mail: caoshang311@qq.com

(编辑 张爱琴)