

[控制系统]

预制舱式二次组合设备调试系统研究

文/中国电力科学研究院 姜玉磊 左娟 倪益民
许继电气股份有限公司 李晓朋 张莹

分析了预制舱式二次组合设备的调试特点，提出了一种针对预制舱式二次组合设备的调试系统，介绍了调试系统的设计方案，通过对FPGA方式实现试验信号输出、虚回路校核技术、网络故障分析及定位三方面的叙述，详细说明了调试系统的关键技术。该系统适用于预制舱式二次组合设备的现场调试，与常规调试系统相比，具有较为完备的调试工具，能够有效提高调试效率，对智能变电站的现场调试工程实践具有参考意义。

2013年国家电网公司提出并开展了智能变电站模块化式的建设，大力推行“标准化设计、工厂化加工、装配式建设”的核心理念。智能变电站模块化建设采用预制舱式二次组合设备（由二次设备预制舱舱体、二次设备屏柜、舱体辅助设施等组成），就近布置于配电装置附近。预制舱式二次组合设备在工厂内完成相关配置、配线、调试等工作，整体配送至变电站现场，可有效缩短施工周期，同时还能提高工程安全性，提升工艺质量，降低全寿命周期成本。相较于传统土建方式，模块化建设方式取消了主控室等建筑物，在安装调试方面具有如下特点：

①采用合并单元及智能终端就地布置方式，舱内交流电缆较少，通过光纤以太网接入SV采样值及GOOSE报文，网络调试工作量大②舱内空间较为狭小，操作及试验仪器布置空间较小③在生产厂家已进行过集成调试，现场主要为验证性试验。

结合预制舱式二次组合设备的技术特点，为提高现场调试效率，本文在现有的数字式继电保护测试仪功能基础上，设计了针对预制舱式二次组合设备的智能变电站调试系统。

调试系统设计

1. 调试系统需求及功能设计

随着智能变电站的发展，目前智能变电站中绝大部分自动化功能的实施都依赖于通信，实现数据数字化采样、网络化传输，这为全数字化的调试装置开发带来了契机。全站的配置模型SCD文件是整个调试过程中的核心文件之一，文件包含了全站设备的通信配置和虚拟连接，是虚回路检测的依据。通过对SCD文件与设计文件的比对，最终可确定虚回路是否已正常连通。通信网络的状态是智能变电站二次系统能否正常运行的关键因素之一，交换机是通信网络中的关键设备，交换机各端口状态及数据的监视对网络故障的诊断具有重要意义。

依据智能变电站，尤其是预制舱式二次组合设备的特点，本文设计了智能变电站调试系统，其功能主要包括以下3个部分。

（1）数字化采样数据发送、保护试验、GOOSE监视及站控层报文监视功能

通过SV、GOOSE信号发生技术，实现数字化采样值输出及GOOSE报文收发；研发保护试验模块，实现继电保护校验功能；开发站控层MMS

报文监视模块,在保护试验同时对站控层网络报文输出进行检查。因预制舱内调试空间狭小,调试过程中站控层报文监视及核对工作相对困难,本文设计的系统同时考虑了MMS报文监视功能,在保护试验的同时,可对站控层报文信息进行监视,同时判定动作行为及通信报文的正确性。

(2) SCD文件校核及虚回路配置自动校核功能

对SCD文件进行解析,图形化展示文件内IED信息、GOOSE/SV控制块信息、虚端子配置信息等内容,按照标准语法及SCHEMA规则进行校验,并通过对SCD文件中虚回路工程配置提取,与标准化设计的虚端子表进行比对,试验结果以表格形式保存起来,实现对虚回路配置正确性的校验功能。

(3) 网络故障自动分析及定位功能

基于SNMP协议对站控层及过程层的网络状态信息进行采集及分析,通过工程化配置对各交换机网口分配固化后实现对站控层及过程层两级网络状态的自动诊断。

2. 系统架构

本文所设计的智能变电站调试系统由上位机+下位机组成。上位机的系统控制软件采用模块层次化设计思想,提供SCD校验及虚回路校验工具、网络诊断工具,与下位机通信进行保护校验及报文监视功能。下位机以数字式继电保护试验仪的硬件平台为基础,依据预制舱式二次设备的调试特点进行裁剪,结构小型化轻便化,去掉传统的开入开出量及直流量输出通点,全数字化输入输出。系统结构如图1所示。

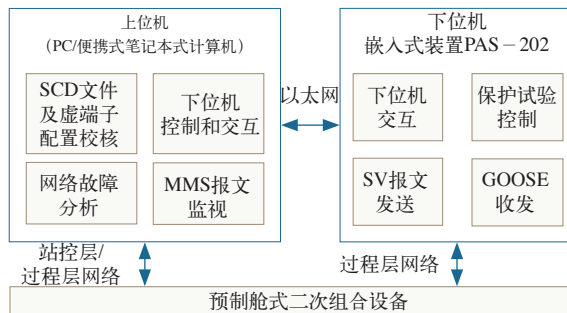


图1 系统结构

系统上位机采用PC或便携式笔记本式计算机,适用于Windows操作系统,下位机采用自行研发的数字化测试仪平台(PAS-202),具备4个百兆光纤以太网口和一个普通百兆网口。考虑到预制舱式二次组合设备多应用于220 kV及以下电压等级智能变电站,普遍采用合并单元及智能终端,舱内调试

过程中硬接点形式的开入开出基本不存在,硬件平台取消了常规开入开出接口,4路光纤以太网口直接向保护测控设备或交换机传送IEC61850-9-2格式数据帧;具备SV/GOOSE共网传输功能,可满足继电保护试验的要求。同时,具备一个独立的百兆网口,用于与上位机系统的通信功能。

由于测试功能需求较多,上位机系统采用分层化设计软件组织结构。由图2可以看出,系统分为基础模块和应用模块。基础模块包括SCD文件解析模块及通信管理模块,SCD文件解析是各应用功能的基础,文件解析结果以树状存储形式供各应用功能模块公用;通信管理模块用于与下位机建立通信进行保护试验、报文监视,同时也用于监测以太网口其他通信信息进行网络故障分析。

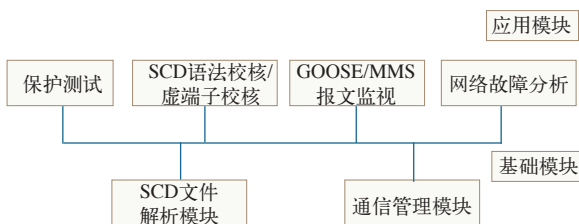


图2 上位机软件模块层次

关键技术

1. FPGA方式实现试验信号输出

本文所设计的下位机装置采用了FPGA与PowerPC芯片相结合的模式,充分利用了FPGA可编程且多I/O口的特点以及PowerPC芯片数据处理能力强、通信功能强大的特点。

调试系统中,下位机装置的主要功能是报文采集、解析和报文发送,其中关键的设计是PowerPC芯片(MPC8377E)与FPGA与之间的数据传输及FPGA实现4路SMV报文的等间隔输出。

以下详细描述本文的设计方案。

(1) CPU板架构设计

图3所示为下位机装置的CPU板结构。

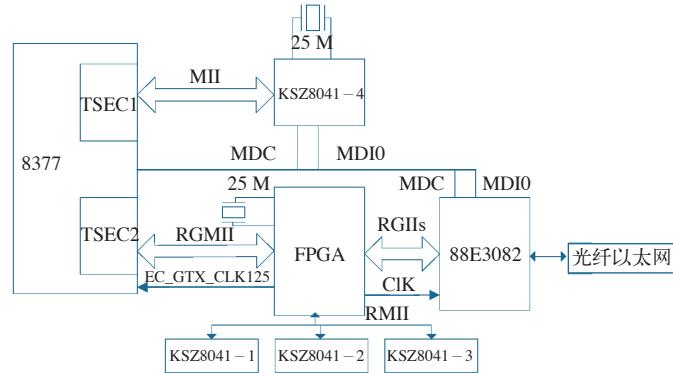


图3 下位机CPU板架构

CPU主板采用PowerPC + FPGA的架构，PowerPC作为主控制器实现对整个系统的控制。FPGA用于各类数据的接收和发送，包括IEC61850 9-2数据及FT3数据的收发、配置参数的处理、同步信号接收等。PowerPC和FPGA之间以并行总线的方式进行数据交互。PowerPC主控制器采用Freescale公司的MPC8377，由CPU和CPM双核组成。FPGA完成SMV报文的发送与GOOSE报文收发，然后将报文通过PCIe与PowerPC之间进行传输。

平台使用MPC8377的两个片内口，并通过和FPGA配合，来管理所有的网络接口。其中，TSEC1通过一个KSZ8041来实现调试口的管理，TSEC2通过RGMII总线来和FPGA进行通信，经由一个88E3082可实现光口的管理和数据通信，用于实现过程层的网络数据接口。另外，FPGA管理了3个PHY光口，用于实现通信交互。

(2) 以太网收发设计

FPGA支持4个光纤以太网收发模块，每组模块具备32个以太网接收缓冲和8个以太网发送缓冲，每个接收缓冲数据集最大512 KB，每个发送缓冲数据集最大512 KB。

PowerPC芯片与FPGA采用定时中断方式交互数据。FPGA定时产生250 μs中断并通知PowerPC，每次中断来临，PowerPC通过FPGA读取以太网模块状态、读取以太网接收数据集、写入以太网模块配置、写入以太网发送数据集，完成一次数据交互。

1) 以太网接收。PowerPC通过FPGA配置以太网接收成功后，“以太网状态字”内的“以太网初始化正常”和“以太网接收使能”状态将有效置位，以太网模块开始数据接收。

每接收到1点以太网数据，FPGA将其保存至以太网接收缓冲，并记录“接收延迟时间”等相关信息。本次中断到达后，FPGA更新本次中断已处理的以太网接收BD状态标（有待接收数据/无数据）。PowerPC响应中断后，根据以太网接收BD状态访问相关以太网接收缓冲，然后通过写入以太网接收BD操作标（无操作/清空BD），通知FPGA将已访问的接收缓冲清空，准备新的数据接收。

FPGA接收到新的以太网数据后，若没有可用的接收缓冲，则放弃该点接收。

PowerPC进行BD操作时（发送BD操作及接受BD操作）要保证：①每个BD的操作只写入一次。②每次操作BD序号应与上次操作BD序号对应。③

每次操作BD序号不跳点。

2) 以太网发送。PowerPC通过FPGA配置以太网发送成功后，“以太网状态字”内的“以太网初始化正常”和“以太网发送使能”状态有效置位，以太网模块开始数据发送。

每次中断到达，PowerPC读取当前以太网发送BD状态标（可写入待发数据/不可访问），将待发数据写入对应缓冲，然后更新对应的以太网发送BD操作标（无操作/发送BD），通知FPGA将该BD数据发送。下次中断到达后，FPGA根据以太网发送BD操作标发送对应缓冲数据，发送完毕后更新以太网发送BD状态标。

2. 虚回路校核技术

全站配置模型SCD文件是整个调试过程中的核心文件之一，文件包含了全站设备的通信配置和虚拟连接，是虚回路检测的依据。通过对SCD文件与设计文件的比对，最终可确定虚回路是否已正常连通。本文对SCD及虚端子校核模块设计的主要功能如表1所示。

表1 SCD及虚端子校核模块功能列表

功能名称	功能说明
SCD文件加载	加载SCD文件，得到各个IED的模型信息
SCD文件检验	将SCHEMA的校验标准做成控制台程序，输入参数为SCD文件名称，如果检验标准变化，只需要更换控制台程序即可
虚回路展示	虚回路各个IED的虚回路连线及虚端子信息的可视化展示
设计文件加载	加载虚回路设计文件，得到对应IED的内部和外部索引
虚回路检验	将SCD提取的信息和虚回路设计文件提取的信息，进行校验分析，并提供一致性检验结果
结果存储	对检验结果进行存储，形成测试记录文件

(1) 虚端子信息可视化展示

将SCD文件与虚回路设计文件进行校核时，首先需将SCD文件进行解析并进行语法校核，确定SCD本身的正确性。因SCD文件难以人工阅读，为了便于校验结果的比对及查找，同时设计了虚端子连线的可视化展示功能，通过图形及列表展示方式更加直观化地表达IED之间的连接信息。图4为经解析后进行可视化展示的装置连接信息，图中连线上的符号G示意有GOOSE虚端子连接，S示意有SV虚端子连接。

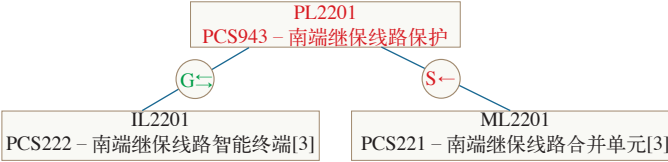


图4 虚端子连接关系图形界面

双击装置模块图标，可显示虚端子连接详细信息，包括有每块虚端子连线的类型、对端IED名称、APPID、MAC地址、通道数、控制块ID。进一步展开后可显示每条虚端子连线细节，包括内部地址，信号来源、外部信号地址和外部信号描述。SV外部信号描述格式为iedName + IdInst + lnClass + lnInst + doName，GOOSE外部信号地址描述为：prefix + lnClass + DOIname + DAIname。

(2) 虚端子设计文件格式

模块进行校验的虚端子设计蓝图是由设计方提供的虚端子描述文件，主要信息内容为发送端、接收端对应的虚端子名称及其描述。示例文件为某变电站的设计文件，格式如图5所示，每个装置的GOOSE输入输出模块、SV输入输出模块单独列出，每个模块单行数据从左到右分别为：装置虚端子序号、本装置数据属性、本装置数据描述、设计描述、接收方装置名称、接收装置数据描述。

110kV长阳线智能终端—GOOSE输出				
序号	本装置数据属性	本装置数据描述	设计描述	
1	RPIT/Q0XCBR1.Pos.t	断路器总位置 t	110kV长阳线断路器位置1	
2	RPIT/Q0XCBR1.Pos.stVal	断路器总位置	110kV长阳线断路器位置	
3	RPIT/Q0XCBR2.Pos.stVal	断路器总位置	110kV长阳线断路器位置	
4	RPIT/Q61XSW11.Pos.t	隔离刀1位置 t		
5	RPIT/Q62XSW11.Pos.t	隔离刀2位置 t		
6	RPIT/Q63XSW11.Pos.t	隔离刀3位置 t		
7	RPIT/Q64XSW11.Pos.t	隔离刀4位置 t		
8	RPIT/Q601ASW11.Pos.t	接地刀1位置 t	110kV长阳线S1位置	
9	RPIT/Q602ASW11.Pos.t	接地刀2位置 t		
10	RPIT/Q603ASW11.Pos.t	接地刀3位置 t	110kV长阳线SAL位置	
11	RPIT/Q604ASW11.Pos.t	接地刀4位置 t		
12	RPIT/BinInG6IO1.Ind30.stVal	KKJ合后	110kV长阳线KKJ合后	
接收方装置名称		接收装置数据描述	备注	
110kV长阳线路保护		PIG002/GOINGGIO2.DPCS01.du	网络	
110kV长阳线路保护		PIG001/GOINGGIO1.DPCS01.du	点对点	
110kV长阳线路保护		PIG002/GOINGGIO2.DPCS02.du	网络	
110kV长阳线路保护		PIG002/GOINGGIO2.DPCS03.du	网络	
110kV长阳线路保护		PIG002/GOINGGIO2.DPCS03.du	网络	
110kV长阳线路保护		PIG002/GOINGGIO2.DPCS03.du	网络	

图5 虚端子设计文件格式

当前虚端子设计文件通常是按间隔进行设计，以每个间隔的虚端子连接构成一个文件，以便于设计过程中的分工协作及文件的处理和检查。为适应这种设计方式，便于对同一个SCD下多个虚端子设计文件的处理检查，在虚端子校核时需增加文件归并功能，对多个设计文件可在同一界面下逐一选择，并在加载后进行检查，校对其中是否有重复内容。校对结束后还需对遗漏内容进行检查，对无对应设计的情况给出提示。

(3) 校验过程

SCD文件包含5个主要元素：Header（信息头）包含SCD文件自身的信息；Substation（变电站描述）描述一次设备及一次拓扑；IED（智能

电子设备描述）描述各个IED的配置信息，包含访问点、逻辑设备、逻辑节点、数据对象、数据属性、互联关系等信息；Communication(通信系统描述)描述通信配置信息；DataTypeTemplates(数据类型模版)描述SCD文件中逻辑节点类型、数据对象类型、数据属性类型和枚举类型。虚回路连接描述就在IED内部，按照IED→Server→AccessPoint→LNode的顺序进入，通过inputs元素描述了本IED的虚端子与其他IED的虚端子之间的互联关系，将intAddr中连接接点与虚回路配置表中本地IED数据描述进行比较，在虚回路配置表中找到相关位置并将daName、doName、iedName、IdInst、lnClass、prefix相关数据与虚端子配置表中数据属性和数据描述进行对比，如若相同无误进行下一列对比，如若配置不同，将虚端子配置中不同的一行标注出来，最终生成一张虚回路配置差异表以便检查修改。

例如某装置的数据属性为RPIT/Q0XCBR1.Pos.stVal时，首先通过虚端子表判断该装置为某线路智能终端—GOOSE输出模块，在SCD文件中找到该IED下AccessPoint→Sever→LDevice→LN下逻辑节点相关信息，RPIT/Q0XCBR1.Pos.stVal代表inst/prefix + lnClass.DOI.name.DAI.name。判断此节点存在后，查找对应接收方线路保护装置，接收装置数据在SCD文件中AccessPoint→Sever→LDevice→LN0→Inputs中可找到PIG001/GOINGGIO1.DPCS01.du对应接点，通过判断发送方和接收方虚端子节点存在从而判断该行虚端子接线正确，未找到则判断错误。软件按照虚端子表格逐行判断，并最终形成校验报告进行保存，从而实现不同厂家不同型号的虚端子自动判断。

3. 网络故障分析及定位

在智能变电站中，越来越多地用到了网络，对网络的依赖性越来越高。因此，及时发现网络中的某个组成部分发生故障，并能迅速定位和排除对保障二次系统的运行是非常重要的。对支持网络管理的设备来说，使用SNMP协议是一个很好的网络管理、监控和故障排除的方法。

简单网络管理协议（SNMP）由一组网络管理的标准组成，包括管理信息结构SMI、管理信息库MIB和SNMP协议三部分。SMI的用途是定义SNMP使用的管理对象，管理信息库MIB是一个按层次树结构定义的数据库，也叫数据字典。SNMP协议规定了命令和响应报文的格式，以及授权和

鉴别机制。管理站和代理站(被管理对象)之间的通信有检索 (get)、设置 (set) 和陷阱 (trap) 3种基本类型。

(1) 诊断系统结构

交换机是组成网络的核心部件,在智能变电站工程应用中,站控网和过程网都使用带管理功能的二层交换机,这类交换机一般都支持SNMP协议。带管理功能的二层交换机都自身带一个IP地址,用于Web登录管理、telnet访问或者是SNMP网络管理。在网络故障定位时,把SNMP管理机接入目标交换机,与交换机的管理IP通信,使用SNMP协议可以获取交换机的端口状态和流量信息,进而判断每一个交换机端口的工作状态。依据全站的SCD文件,可获取各IED的端口信息,并根据现场连接情况在测试软件中进行手动配置每个网口连接的IED名称及端口类型,依据IED端口类型及交换机的端口状态、流量信息,可对网络工作状态进行判断及故障定位。

图6展示了智能变电站中基于SNMP网络故障定位示意图。

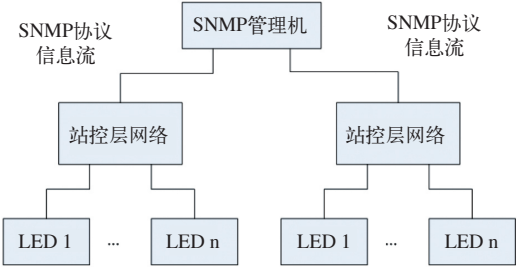


图6 网络故障定位示意图

(2) 诊断方法

SNMP是一个内容十分庞大的协议,交换机普遍支持的协议内容是端口状态和流量信息的获取。表2所示的是端口状态和流量信息在MIB中的信息。

表2 端口状态和流量信息在MIB中的信息联系表

oid	名称	含义
1.3.6.1.2.1.2.2.1.8	ifOperStatus	当前接口状态: 1: 工作; 2: 不工作; 3: 测试
1.3.6.1.2.1.2.2.1.10	ifInOctets	收到的字节总数,包括组帧字符
1.3.6.1.2.1.2.2.1.16	ifOutOctets	分发的字节总数,包括组帧字符

在网络故障诊断定位测试过程中,端口状态可以用查询的方式获取,启动查询可以获取某交换机的全部端口状态,测试人员把端口状态和工程设计端口状态相比较,如果发现某个端口应该

处于工作状态而处于非工作状态,就证明此端口出现了问题,此端口物理不通,应进一步查明原因。

在SNMP中能获得的端口数据是收到的字节数和分发字节数,如果要判断网络流量,可采用定时查询的方式,每隔一段时间(定时查询的时间间隔以30 s为典型值)查询一下每个端口的收发字节数,这样就得到一组基于时间轴的收发字节数数据。首先计算基于上次时间点的收发字节数差值,除以时间差得到端口流量,计算公式为

$$\text{端口流量} = \frac{\Delta \text{ifInOctets} + \Delta \text{ifOutOctets}}{\Delta t}$$

交换机的端口,如果处于工作状态下,不论是过程层网络还是站控层网络,不论是传送GOOSE、SV还是MMS报文,因有基础的测试帧存在,流量都应该大于0。结合配置端口时确定的端口类型,可有效判别端口的工作状态。SV网络流量应该是一个稳定值,而且不能大于网络风暴阈值。如果流量超过网络风暴阈值,就会形成网络风暴。现在要求IED能够适应网络风暴带来的冲击,IED接收处于网络风暴状态下的报文,应不死机,风暴过后,IED能恢复正常工作状态。但是网络处于风暴状态时,IED处于非正常工作状态,影响了变电站的正常运行。应尽量避免发生网络风暴,如果发生了网络风暴,应尽快定位并隔离产生网络风暴的IED。对于GOOSE及MMS端口,网络流量为0意味着IED处于异常状态。多种原因都会造成IED不发送数据而网络端口处于异常工作状态,比如IED程序崩溃,IED没有崩溃但是程序存在BUG导致网络数据发送失败等,调试人员可结合测试结果进行进一步处理。

结束语

针对预制舱式二次设备调试需求,本文研发了集成保护试验、报文监视、虚端子校核、网络故障诊断等多项功能的智能变电站调试系统,为现场调试提供了较为完善的调试工器具。对于220 kV及110 kV智能变电站,预制舱式二次设备已成为主要建设模式之一,通过本文的研发实践,可以将调试人员从烦琐的检查、校对工作中解脱出来,提高测试工作效率及测试结果的准确可靠性,进而产生良好的经济效益和社会效益。**EA**

(收稿日期: 2016.09.29)

(编辑: 杨得润)