

数字化集成保护控制系统的实现方案

曹润彬¹,董新洲¹,王 宾¹,施慎行¹,BAK Dominik¹,何世恩²,孙辰军³

(1. 清华大学 电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室,北京 100084;

2. 甘肃省电力公司风电中心,甘肃 兰州 730050;3. 河北省电力公司,河北 石家庄 050021)

摘要: 变电站数字化、智能化为站域信息共享提供了技术保障,因此开发了一种新型数字化集成保护控制(DIPC)系统。系统主要由设备层智能终端(IT)、合并单元(MU)和系统层多功能保护控制器(MPCU)三大核心部分构成,分别给出了它们的硬件架构和软件设计方案。该系统基于 IEC61850 标准,采用两级相量计算和保护起动判据,提高了保护的快速性和可靠性。测试结果表明,该系统可对故障作出快速、可靠的反应,其集成通信和运算能力满足保护跳闸的要求。

关键词: 变电站; 数字化集成保护控制系统; 多功能保护控制器; 智能终端; 合并单元

中图分类号: TM 614; TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.05.024

0 引言

近年来,线路切除引发的潮流转移和后备保护的不合理跳闸成为了多起大停电事故的导火索^[1-3]。在结构日益复杂、运行方式愈加灵活的电网中,传统保护选择性和灵敏性、保护元件和保护系统之间的矛盾以及与安全稳定控制装置配合不当的问题越发突出。为此,文献[4-5]在现有保护的基础上增加了新的判据,文献[6-7]分别研究了基于潮流转移识别和故障电压分布的广域后备保护算法,此方案对通信可靠性和实时性要求较高,实现较为困难。文献[8]提出了基于变电站站域信息集成的系统保护,将消除过负荷而不是简单切除过负荷电气设备为目标,革新了现有保护的准则和理念,切实可行,是继电保护和安全稳定控制技术发展的必然结果和趋势。

电子式互感器、合并单元 MU(Merging Unit)和网络通信技术的发展,给电力系统带来了数字化的变革。一个变电站内的各种数据完全可以通过网络方式和统一的 IEC61850 标准得到共享。充分利用这些信息,可以构成智能变电站集成保护控制系统^[9],使得 1969 年由美国学者 Rockfeller 提出的计算机保护变成现实。研发基于站域信息的集成保护控制系统势在必行。

文献[10-12]研究了基于 IEC61850 标准的集中式保护,将变电站中分散的保护功能模块集中在一台智能电子设备(IED)中完成,实现了硬件和功能的

整合,然而对冗余信息的挖掘利用不足。基于多智能体技术,文献[13]提出了一种多保护算法的集成保护方案,文献[14]提出了集合保护的概念,上述方案引进了有限广域信息,存在通信和计算的问题。文献[15]提出了数字化集成保护控制 DIPC(Digital Integrated Protection and Control)系统的构想,旨在实现整个变电站保护和控制系统的集成,达到智能变电站二次系统的硬件集成、功能集成和信息集成。

本文在文献[15]的基础上,研制开发了多功能保护控制器、合并单元和智能终端全套 DIPC 系统,给出了其硬件方案及主要软件设计流程,同时给出了该系统的测试结果。

1 DIPC 系统结构

DIPC 系统是基于 IEC61850 标准的二次保护控制系统,由设备层智能终端 IT(Intelligent Terminal)、合并单元和系统层多功能保护控制器 MPCU(Multi-functional Protection and Control Unit)三大核心部件及光纤以太网、交换机等网络设备组成,配置方案如图 1 所示。

智能变电站组网方式灵活,图 1 所示为采样值(SV)报文和 GOOSE 报文共享双网且网采网跳的情况,多功能保护控制器 A、B 及交换机 A、B 均为双配

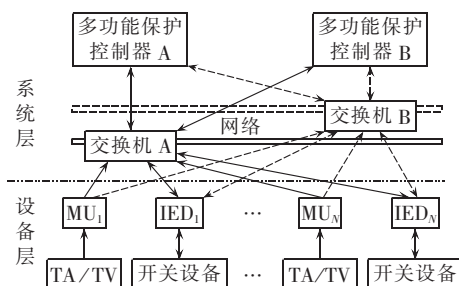


图 1 智能变电站 DIPC 系统结构框图

Fig.1 Structure of DIPC system for smart substation

收稿日期:2013-07-12;修回日期:2014-03-25

基金项目:国家自然科学基金重大国际合作项目(51120175001);
国家自然科学基金资助项目(50937003,51007045,51107062);
甘肃省电力公司项目(2012KJ-1006LT)

Project supported by the Key International Cooperation Program of National Natural Science Foundation of China(51120175001), the National Natural Science Foundation of China(50937003, 51007045,51107062) and the Program of State Grid Gansu Electric Power Company(2012KJ-1006LT)

置。在 DIPC 系统中,电流/电压互感器(TA/TV)数据经合并单元采集,通过以太网发送 SV 报文给多功能保护控制器,实现变电站信息共享与集成;多功能保护控制器收集多个合并单元传送的 SV 报文,利用站域信息提高保护性能、优化控制功能,保证系统的安全稳定运行;当需要开合本站设备时,通过以太网下发 GOOSE 报文给智能终端,对一次开关设备进行操作。

2 多功能保护控制器的实现方案

多功能保护控制器负责整个系统的数据运算和逻辑判断,是 DIPC 的核心元件,也是研究的重点和难点^[16]。多功能保护控制器研制有 2 个难点:一是通信瓶颈,即大量数据的同步采集问题;二是处理瓶颈,即大量数据的快速处理问题。针对这 2 个问题,本文在硬件平台、软件构架、代码执行效率等方面进行了相应设计。

2.1 硬件构成

多功能保护控制器采用 T 型插件式结构,主要由功能板、监控板构成,另外还有电源板、母板、前面板等。功能板接收 SV 报文和 GOOSE 报文并进行解析,完成保护、测量和控制功能所要求的计算,将计算结果以 GOOSE 报文的形式下发给特定的智能终端进行操作。监控板和各功能板之间采用高速的 CAN 总线通信。

功能板既需要进行高强度的通信,又要承担大量的计算任务,对速度和可靠性都有较高要求,采用嵌入式微处理器(ARM)AT91SAM9263 和数字信号处理器(DSP)TMS320C6713 双 CPU 构架模式。其中,ARM 专门负责 SV 报文和 GOOSE 报文的收发、解析以及以太网通信的控制,其外围包括了存储系统、以太网通信系统、CAN 通信系统等;DSP 专门负责保护计算和逻辑判断,其外围主要是存储系统。双 CPU 间通过一个高速双口静态随机存取存储器(RAM)和 4 根中断信号线交换数据。2 个 CPU 的协同工作极大提高了功能板的处理能力,对解决集成保护平台的数据处理瓶颈提供了帮助。硬件设计如图 2 所示。

监控插件在多功能保护控制器中负责对整个装置进行监控和管理,同时提供人机交互的界面,采用

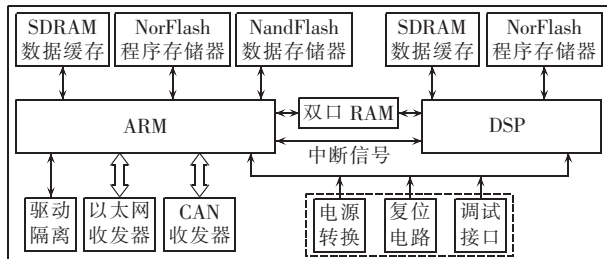


图 2 MPCU 功能板硬件框图

Fig.2 Block diagram of functional board of MPCU

ARM 单 CPU 配置,并包含存储系统、通信模块、液晶显示、电源、复位电路、调试接口等外设接口。

2.2 软件构成

功能板 DSP 负责核心的保护控制程序,主程序流程图见图 3,各保护对象的处理程序相同,图中进行了简化。

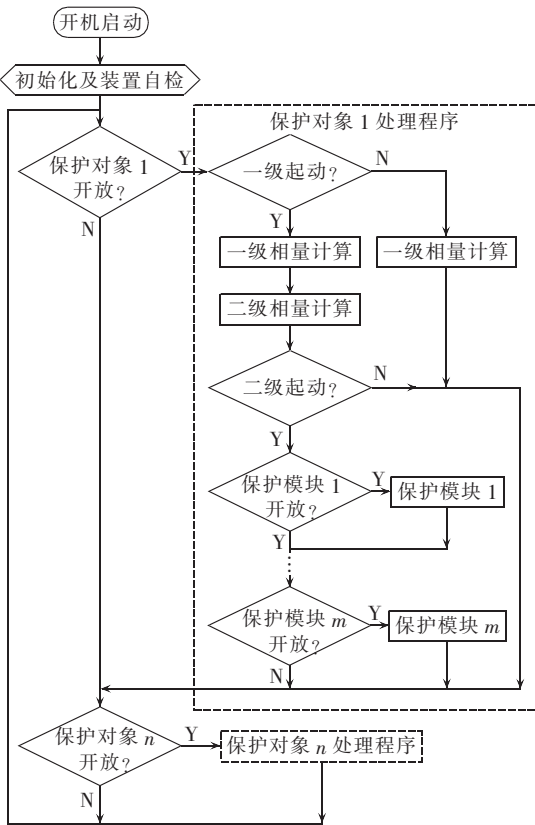


图 3 MPCU 保护控制主程序流程图

Fig.3 Flowchart of main protection and control program of MPCU

对保护对象(线路)依次进行处理。如果该保护对象开放,则先对其进行起动判断和相量计算。如果二级起动则进入保护模块的处理区,否则直接进入下一个保护对象的处理。在保护模块的处理区,根据该对象的压板投入情况判断是否开启该保护模块的判断处理。

传统全周波或半周波傅里叶算法及在此基础上的起动判断,不能满足多功能保护控制器对多个保护对象的冗余信息进行快速可靠处理的要求。为解决此问题,设计了两级相量计算和两级起动方法。

本文相量计算采用级数形式的滑动离散傅里叶变换(DFT)优化算法^[16],其计算形式如下:

$$\mathbf{X}^p = \frac{2}{N} \left(\sum_{k=0}^p x_k e^{-j2\pi k/N} - \sum_{k=0}^{p-N} x_k e^{-j2\pi k/N} \right) = \frac{2}{N} (\hat{\mathbf{X}}^p - \hat{\mathbf{X}}^{p-N}) \quad (1)$$

其中, N 为每周周期采样点数; x_k 为第 k 点 SV; $\mathbf{X}^p$ 为第 p 点相量; $\hat{\mathbf{X}}^p$ 为第 p 点采样值累积级数和。将相量分为两级求解,一级相量求累积级数和,即:

$$\text{Re}(\widehat{X}^p)=\text{Re}(\widehat{X}^{p-1})+x_p\cos\frac{2\pi p}{N}\tag{2}$$

$$\text{Im}(\widehat{X}^p)=\text{Im}(\widehat{X}^{p-1})+x_p\sin\frac{2\pi p}{N}\tag{3}$$

每增加 1 个采样点,进行一级相量计算,包括 2 次乘法和加法,较式(1)大幅减小了计算量。

二级相量计算求 DFT 有效值,利用时间上相差 1 个周期的 2 个累积级数和的差得到这 1 个周期采样点的级数和(需考虑越限问题),再计算该相量的实部、虚部以及幅值等。电压/电流相量的实部和虚部分别为:

$$\text{Re}(X^p)=\frac{2}{N}[\text{Re}(\widehat{X}^p)-\text{Re}(\widehat{X}^{p-N})]\tag{4}$$

$$\text{Im}(X^p)=\frac{2}{N}[\text{Im}(\widehat{X}^p)-\text{Im}(\widehat{X}^{p-N})]\tag{5}$$

其中, $p>N$ 。

对电流 SV 相间突变量进行一级起动判断,如果判定为一级起动,则进行二级相量计算,并在此基础上对相电流工频变化量、负序过流和零序电流进行二级起动判断。

正常情况下,只需执行一级相量计算和一级起动判据;发生故障或扰动时,才进行二级相量计算和二级起动判据。这样,不仅减少了计算量,灵活运用 CPU 资源,保证了保护的快速性,而且可以避免在非故障情况下保护误动,提高保护的可靠性^[17]。

2.3 功能板 ARM 程序

功能板 ARM 是核心通信模块,既负责板卡内部 ARM 与 DSP 通信,又负责板卡间 CAN 通信以及装置外部以太网通信。程序设有以太网接收中断、CAN 接收中断、定时器中断和外部中断 4 类中断。

3 智能终端的实现方案

智能终端采用电缆与一次设备连接,采用光纤

与测控、保护等二次设备连接,采集并以 GOOSE 方式上传一次设备的状态信息,同时接收来自二次设备的下行控制命令,实现对一次设备的实时控制。智能终端研发重点在于对一次开关设备及时可靠的控制^[17]。

3.1 硬件构成

智能终端装置主要由主控板、开出板、联锁板、开入板、操作箱板和模拟输入板等部分组成。其中,开入板采集开关设备状态信号,模拟输入板采集开关设备传感信号,并送至主控板处理。为满足功能要求,主控板采用 ARM 和现场可编程门阵列(FPGA)双 CPU 构架模式,主要由核心控制模块、通信模块、同步时间模块和事件记录模块组成,带 8 个以太网光纤通信接口和 1 个以太网电缆通信接口,如图 4 所示。

开出板通过控制继电器触点分合来实现对开关设备一次回路的通断、告警和闭锁。其中,发送给变电站系统层或设备层 IED 装置的闭锁、告警信号通过开出板 1 实现;对隔离开关以及接地刀闸的操作通过联锁板的联锁继电器串联控制;针对断路器的开出信号需要再经过操作回路板实现跳位监视、合闸保持、重合闸、防跳、手合、手跳、保护跳闸、跳闸保持、合位监视等功能。三者的关系见图 5。

3.2 软件构成

智能终端的软件主要包括配置记录、开关量采集、开关控制、通信、模拟量采集、同步对时 6 个部分,在主控板 FPGA 和 ARM 中实现。

其中,FPGA 主要完成对开入、开出、联锁板模拟开关的操作,片选以太网控制器和同步对时。ARM 程序由一个主程序和以太网接收中断、定时器中断、串口接收中断 3 类中断构成。初始化、CRC 校验、SOE 记录在主程序中实现;通过以太网接收中断实

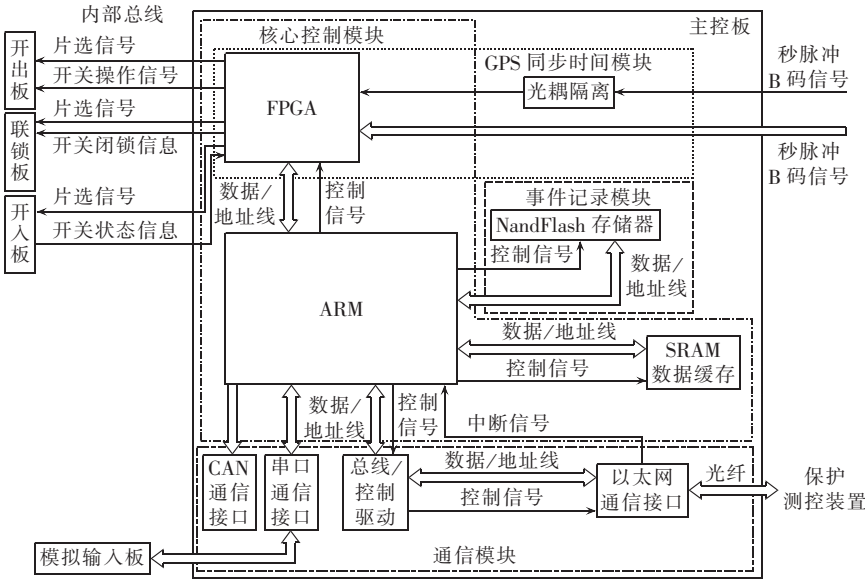


图 4 智能终端主控板硬件框图

Fig.4 Block diagram of main board of intelligent terminal

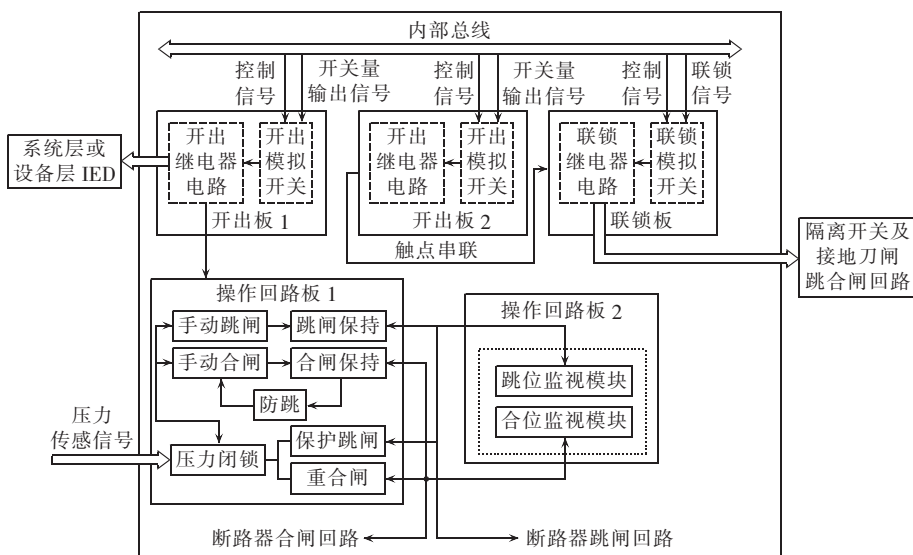


图 5 智能终端开出板、联锁板及操作回路板连接示意图

Fig.5 Connection of intelligent terminal's output board, interlock board and operation circuit board

现后台配置和 GOOSE 报文接收,接收到跳闸报文后调用 FPGA 中的开出控制模块实现开关操作;定时器中断实现开入量采集,并调用同步对时和以太网发送模块;模拟输入板定时向主控板经串口发送模拟采样数据,并调用模拟量采集模块进行滤波以及向系统层发送数据。

4 合并单元的实现方案

合并单元采集一次侧信号,经过一定的预处理后,按 IEC61850-9 协议或 IEC60044-7/8(FT3)协议接口输出。对于 SV 组网传输的方式,合并单元需提供相应的以太网口,对于 SV 点对点传输的方式,合并单元应分别对保护、测控、录波、计量等不同的二次设备提供足够的输出接口^[18]。在老站改造或新建变电站中,存在电磁式互感器和电子式互感器混合使用或单独使用的情况,需考虑对传统互感器的兼容。灵活多变的通信配置,数据同步采样、实时可靠传输的高要求和大量通信数据流,都是合并单元设计中面临的挑战。

4.1 硬件构成

针对上述问题,兼顾模拟采样和数字输入、SV 和 FT3 报文输出、开关状态 GOOSE 采集和电缆接入、母线和线路间隔,合并单元设计的总体架构如图 6 所示。

针对电磁式互感器,本文在设计中加入 TA/TV 模块;针对电子式互感器,设计 FT3 报文接收模块。另外,如果间隔二次设备需要母线电压,安装于间隔的合并单元还应接入母线合并单元的母线电压信号,多采用 FT3 报文格式传输;同理,如果合并单元安装于母线处,则需要考虑 FT3 报文输出。针对 2 种报文的输出情况,本方案设计最多 6 路光纤以太网收/

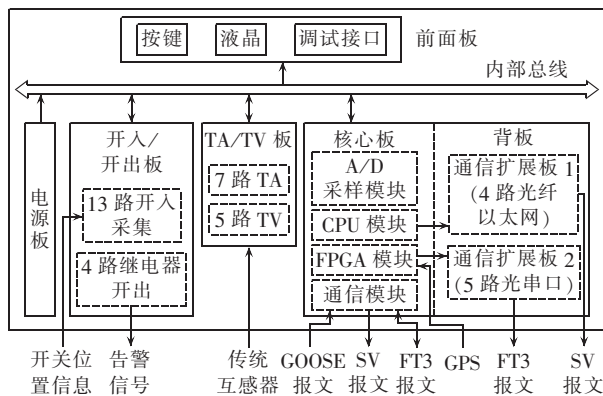


图 6 合并单元总体硬件构架图

Fig.6 Overall hardware framework of MU

发接口和 8 路光串口。其中,核心板上布置 3 路光串口、2 路光纤以太网接口,增加 2 块带 4 路光纤以太网接口的通信扩展板 1 和带 5 路光串口接口的通信扩展板 2,可根据需求灵活配置。

合并单元可通过开入开出板直采开关位置接点,也可接收 GOOSE 报文获取开关信息。TA/TV 板需满足测量电流精度不低于 0.2S 级、测量用电压精度不低于 0.2 级、保护用电流精度不低于 5P 级、保护用电压精度不低于 3P 级的要求。核心板采用了 ARM+FPGA 双 CPU 配置。考虑到采样同步和实时传输的要求,A/D 采样、同步对时和 FT3 报文接收、解析、发送等功能均在 FPGA 中完成,给 ARM 预留足够资源完成数据处理、以太网通信、人机接口等功能。GPS 秒脉冲和 IRIG-B 码作为同步时钟源以 TTL 电平或光纤接入。考虑到同步对时的可靠性,可采用双 GPS 主从模式。

4.2 软件构成

根据合并单元的功能要求,其软件主要由数据接收、同步对时、开入开出、数据输出和数据处理五

大模块构成,由 ARM 和 FPGA 协作完成。

数据接收模块在 FPGA 中实现,可分为数字数据和模拟数据 2 类。接收的数字量是来自母线合并单元的母线电压信号,以 FT3 报文格式传输,标准传输速度为 2.5 Mbit/s,采用曼切斯特编码,处理程序包括解码和 CRC 校验。接收的模拟量首先经过有源二阶低通滤波器,再由 FPGA 驱动 A/D 采样模块进行采样并采集数据。FPGA 程序用 3 个进程实现同步采样,其中前 2 个进程根据时间同步信号产生一个启动采样的方波信号,采样率可调,第 3 个进程则为 A/D 采样模块和采集数据的进程。

同步定时程序在 FPGA 中完成,主要包括 2 个部分:对 IRIG-B 码解码提取时间信息,为避免解码时差,将解码时间加 1 s 在下一个秒脉冲来到时写入作为当前时刻(精确到 s);对秒脉冲在上升沿来到时,进行触发重新分频和计数器清零,分频信号供 A/D 采样模块进行同步采样,计数器提供当前时刻的 μs 级计数。需检查秒脉冲判断是否合理。若秒脉冲丢失,可根据 IRIG-B 码码元进行时延补偿式定时。

开入/开出模块主要实现 3 个功能:接收开关设备的状态信息;对安装于线路间隔的合并单元,实现母线电压切换,对母线合并单元实现电压并列;对开关异常情况发出告警信号。电压并列和电压切换与变电站一次接线相关,具体逻辑在此不详述。

数据处理模块主要有数字滤波、重采样和组帧 3 个功能,其中,数字滤波针对内设 TA/TV 板的情况。IEC60044-8 中对数据有线性相位的要求,并且要求数据精度高、噪声小,测控部分要求可以处理 13 次及以下谐波,故选择 15 阶 FIR 滤波器,截止频率为 650 Hz。

根据 IEC61850-9-2le 可知:对于保护数据,每周波采样 80 个点,发送 80 个 SV 报文;对于测量数据,每周期采样 256 个点,每周期向二次单元发送 32 个 SV 报文。由于 IEC60044-8 协议传输速率有限,不能传输采样率高于 4000 点/s 的 SV 数据,因此对 FT3 报文输入、SV 报文输出的测量数据,需要在 ARM 中完成重采样。对于其他数据,由于 FPGA 采样率可调和 FT3 报文速率限制,无需重采样。

根据变电站要求,合并单元可提供 FT3 报文和 SV 报文 2 种数据输出,其中 FT3 报文由 FPGA 直接发送,SV 报文由 ARM 发送。当多台合并单元共同工作时,需考虑时序配合,详见 5.2 节。

5 实验测试

在 DIPC 系统平台上,已编写三段式距离保护、三段式过电流保护、重合闸等算法,下面对保护功能、集成通信和计算能力进行测试。

5.1 保护功能测试

5.1.1 距离保护算法

为对 DIPC 系统的距离保护算法进行验证,搭建测试平台,该平台由 2 台继电保护测试仪、4 台合并单元、1 台 GPS 同步对时装置、1 台网络交换机和多功能保护控制器构成。

将保护动作出口信号接入继电保护测试仪的输入端子,并以“单相故障跳单相,多相故障跳三相”的方式向继电保护测试仪发出动作信号。通过继电保护测试仪的实验波形、出口时间等信息,验证保护算法的正确性,并根据监控界面显示的故障报文检验故障测距和选相等功能。对不同故障类型和故障距离进行测试,统计结果表明基于 DIPC 系统的距离保护算法可以正确起动并正确选相,满足相关行业标准。典型测试结果见图 7,图中,保护 I 段范围内 A 相接地,故障继电器在 21.1 ms 动作出口。

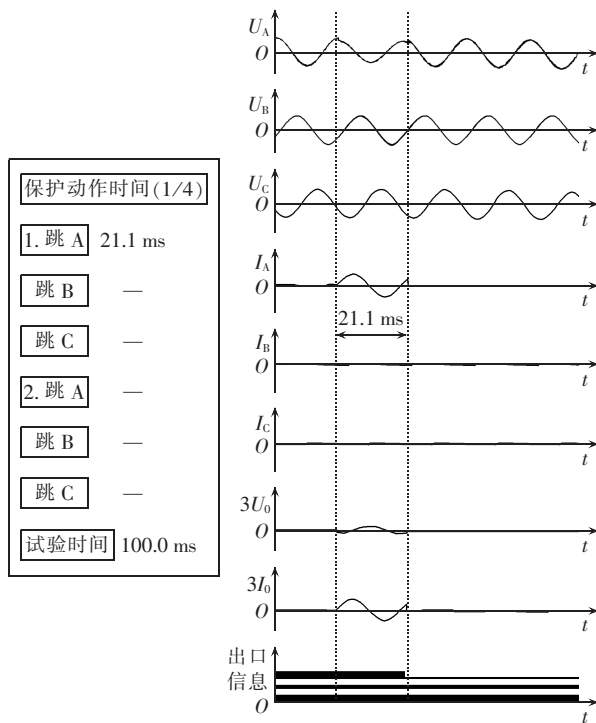


图 7 距离保护功能测试结果
Fig.7 Test results of distance protection

5.1.2 过流保护算法与重合闸

利用 RTDS 能实现 DIPC 系统闭环实验,验证过流保护及重合闸算法,测试平台如图 8 所示。

利用 RSCAD 建立 35 kV 模型,仿真故障发生在

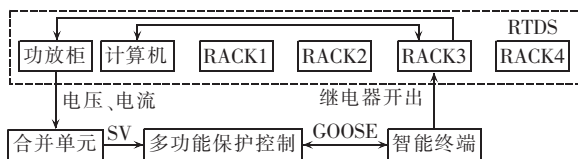


图 8 RTDS 闭环仿真测试平台
Fig.8 Test platform of RTDS close-loop simulation

下一段线路出口处,过流Ⅲ段应起动。图9为永久故障下的保护及重合闸情况,图中,由上至下分别为线路电流、电压及保护出口合闸信息。由图9可见,当重合于永久性故障时,保护Ⅲ段加速跳闸,延时约20 ms 保护出口。实验结果表明,在故障情况下,DIPC 系统能做出快速可靠的反应。

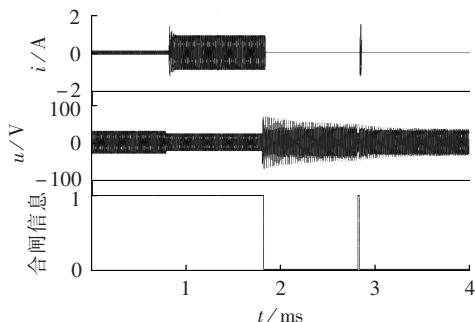


图9 永久故障下保护和重合闸动作情况
Fig.9 Behavior of protection under permanent fault

5.2 集成通信与计算能力测试

针对集成保护算法的集成通信和运算能力,对4间隔 ARM 通信处理时间和4条线路同时故障状态下 DSP 相关程序运行时间进行测试。由图10可知,在增加合并单元发包延时的基础上,ARM 可以处理4间隔 SV 报文,耗时160 μs。图11中,上面的波形为功能模块 DSP 进行一级启动判断和一级相量计算的时间信号,时长约25 μs;下面的波形为 DSP 进行二级相量计算的时间信号,当4条线路同时故障时,DSP 主程序的运行周期约为20 ms,可以满足保护跳闸的要求。

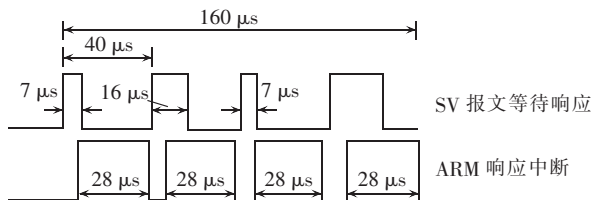


图10 4间隔 ARM 通信处理时间
Fig.10 Processing time of ARM communication for four bays



图11 4个保护对象故障状态下 DSP 处理时间
Fig.11 Calculation time of DSP for four faulty elements

本实验验证了 DIPC 系统在极端条件下的集成计算能力。在实际运行情况下,4个保护对象同时发生故障的概率极小。在只发生1条线路故障的情况下,由于 DSP 对其他无故障保护对象的处理运算相

对很小,保护程序的总体运行时间增加比例不大。保护装置对故障的响应速度较之传统的单一对象保护装置增加不明显。

6 结论

本文针对智能变电站的特点,并考虑对传统一次设备的兼容,设计研制了 DIPC 系统。该系统由多功能保护控制器、智能终端和合并单元三大核心部件构成,具有如下性能。

a. 多功能保护控制器能及时接收并处理4间隔 SV 报文,可集成距离保护、过流保护、重合闸等基本算法,能在故障后20 ms 左右发出 GOOSE 跳闸报文,满足继电保护要求。

b. 智能终端可以采集80路开关量信息和10路模拟量信息,具备完善的断路器控制功能和 GOOSE 上/下传通信功能,信息处理延时不超过5 ms。

c. 合并单元具备和电子式互感器、传统互感器的接口,采样精度满足规程要求,通信稳定可靠,可以满足不同应用场合的需求。

d. 系统支持直采直跳、直采网跳等形式,软件模块可灵活配置,适用于220 kV 及以上智能变电站集成后备保护和110 kV 及以下配网站域保护控制。

本文提出的 DIPC 系统具备节省资源、减少运行和维护工作量等优势,其构成模式对智能变电站站域保护控制的实现具有重要指导意义。后续工作将基于此平台进一步研究信息集成和功能集成的软件算法,充分挖掘基于变电站信息共享的故障二次扰动和系统扰动等动态信息,促进保护和控制技术的融合,进一步提高变电站的数字化、智能化水平和电力系统的稳定性。

参考文献:

- [1] U.S.-Canada Power System Outage Task Force. Final report on the August 14th blackout in the United States and Canada: causes and recommendations[EB/OL]. [2004-03-31]. <http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/Blackout-Final-Web.pdf>.
- [2] 华中电网“7.1”事故调查组. 华中电网“7.1”事故调查报告[R]. 武汉:华中电网,2006.
- [3] Report of the enquiry committee on grid disturbance in Northern Region on 30th July 2012 and in Northern, Eastern & North-Eastern Region on 31st July 2012[EB/OL]. (2012-08-16). http://www.powermin.nic.in/pdf/GRID_ENQ_REP_16_8_12.pdf.
- [4] 柳焕章,周泽昕. 线路距离保护应对事故过负荷的策略[J]. 中国电机工程学报,2011,31(25):112-117.
LIU huanzhang,ZHO U Zexin. Post-fault over-load maloperation countermeasure of transmission line distance protection[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(25):112-117.
- [5] 朱晓彤,赵青春,李园园,等. 防止过负荷时相间距离Ⅲ段保护误动的新方法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(9):7-11.

- ZHU Xiao tong,ZHAO Qingchun,LI Yuanyuan,et al. A new method to prevent maloperation of phase-to-phase zone III relays due to overload[J]. Power System Protection and Control,2011,39(9):7-11.
- [6] 徐慧明,毕天姝,黄少锋,等. 基于广域同步测量系统的预防连锁跳闸控制策略[J]. 中国电机工程学报,2007,27(19):32-38.
- XU Huiming,BI Tianshu,HUANG Shaofeng,et al. Study on wide area measurement system based control strategy to prevent cascading trips[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(19):32-38.
- [7] 汪华,张哲,尹项根. 基于故障电压分布的广域后备保护算法[J]. 电力系统自动化,2011,35(7):48-52.
- WANG Hua,ZHANG Zhe,YIN Xianggen. A wide area back-up protection algorithm based on fault voltage distribution[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(7):48-52.
- [8] 董新洲,丁磊,刘琨,等. 基于本地信息的系统保护[J]. 中国电机工程学报,2010,30(22):7-13.
- DONG Xinzhou,DING Lei,LIU Kun,et al. System protection based on local information[J]. Proceedings of CSEE,2010,30(22):7-13.
- [9] ROCKERFELLER G D. Fault protection with digital computer[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1969,88(4):438-464.
- [10] 易永辉,曹一家,张金江,等. 基于 IEC61850 标准的新型集中式 IED[J]. 电力系统自动化,2008,32(12):36-40.
- YI Yonghui,CAO Yijia,ZHANG Jinjiang,et al. A new centralized intelligent electrical device based on IEC61850[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(12):36-40.
- [11] 刘东超,王开宇,胡绍刚,等. 基于数字化变电站的集中式保护[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):117-121.
- LIU Dongchao,WANG Kaiyu,HU Shaogang,et al. Integrated protection based on intelligent substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(4):117-121.
- [12] 熊剑,刘陈鑫,邓烽. 智能变电站集中式保护测控装置[J]. 电力系统自动化,2013,37(12):100-103.
- XIONG Jian,LIU Chenxin,DENG Feng. Centralized protection and monitoring devices of smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(12):100-103.
- [13] 和敬涵,朱光磊,薄志谦. 基于多 Agent 技术的电力系统集成保护[J]. 电工技术学报,2007,22(6):141-147.
- HE Jinghan,ZHU Guanglei,BO Zhiqian. Integrated protection for power systems based on the multi-agent technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2007,22(6):141-147.
- [14] 王慧芳,何奔腾. 输电线路集合保护及其实现[J]. 电网技术,2005,29(14):49-53.
- WANG Huifang,HE Benteng. Transmission line aggregate protection and its implementation[J]. Power System Technology,2005,29(14):49-53.
- [15] 董新洲,丁磊. 数字化集成保护与控制系统结构设计方案研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(1):1-5.
- DONG Xinzhou,DING Lei. Research on design of digital integrated protection and control system[J]. Power System Protection and Control,2009,37(1):1-5.
- [16] PHADKE A G,THORP J S. Synchronized phasor measurements and their applications[M]. [S.l.]:Springer,2008.
- [17] 国家电网公司. Q/GDW428—2010 智能变电站智能终端技术规范[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [18] 国家电网公司. Q/GDW426—2010 智能变电站合并单元技术规范[S]. 北京:中国电力出版社,2010.

作者简介:



曹润彬

曹润彬(1986-),女,湖南郴州人,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制、智能变电站综合自动化技术(E-mail:caorb08@mails.tsinghua.edu.cn);

董新洲(1963-),男,陕西周至人,教授,博士研究生导师,博士,IET成员,研究方向为行波保护、行波测距及小波变换在电力系统中的应用;

王宾(1978-),男,山东烟台人,副教授,博士,研究方向为电力系统继电保护、智能变电站综合自动化技术、电能质量监测分析等。

Implementation of digital integrated protection and control system

CAO Runbin¹,DONG Xinzhou¹,WANG Bin¹,SHI Shenxing¹,

BAK Dominik¹,HE Shien²,SUN Chenjun³

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments,Tsinghua University, Beijing 100084,China;2. Wind Power Technology Center,Gansu Electric Power Corporation, Lanzhou 730050,China;3. Hebei Electric Power Corporation,Shijiazhuang 050021,China)

Abstract: Since the digitization and intelligentization of substation technically supports the substation-wide information sharing,a digital integrated protection and control system is thus developed,which consists of three kernels:IT(Intelligent Terminal) at equipment layer,MU(Merging Unit),and MPCU(Multifunctional Protection and Control Unit) at system layer. Their hardware structure and software design scheme are given. Based on IEC61850 standard,the developed system adopts two-step phasor calculation and two-step protection startup criterion to improve the rapidity and reliability of relay protection. Test results show that, it responses to fault rapidly and reliably,and its capability of centralized communication and calculation satisfies the requirements of protective trip.

Key words: electric substations; digital integrated protection and control system; multifunctional protection and control unit; intelligent terminal; merging unit