

DOI: 10.7667/PSPC170279

一种基于数据冗余校验的数字化变电站 继电保护装置防误方法

许宗光, 文继锋, 李彦, 顾浩

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 为了防范数字化变电站保护装置在单一器件故障的情况下误发跳闸报文的危险, 提出了一种保证智能变电站保护装置跳闸可靠性的方法。该方法以双处理系统为硬件基础, 通过数据冗余校验的方式, 提高保护装置防误能力, 确保装置不会由于自身单一器件故障导致误发跳闸报文。通过在模拟试验平台上注入错误的方式, 验证了本设计在各种关键位置发生单一故障时均能有效防止装置误发跳闸报文。同时, 实际运行效果也表明, 该系统能够显著增强设备防误能力, 降低了变电站误动作的风险, 提高系统的可靠性以及稳定性。

关键词: 数字化变电站; 继电保护; 双处理系统; IEC61850; 冗余校验

An anti-maloperation method based on redundancy data check for relay protection devices in digital substations

XU Zongguang, WEN Jifeng, LI Yan, GU Hao

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to prevent the risk of relay protection misoperation when single components failure occurring, a method to enhance the reliability of digital substation protection device is put forward. Based on dual processing system hardware architecture, this method used redundancy data check to ensure that signal unknown error will not led to tripping operation. By injecting errors in protection device at experiment environment, verified that this design can effectively prevent the occurrence of false tripping when single fault happened in various key positions. Meanwhile, the practical application results also show that the system can significantly enhance the equipment anti-maloperation ability, reduce the risk of substation malfunction and improve the system reliability and stability.

Key words: digital substation; relay protection; dual processing system; IEC61850; redundant check

0 引言

数字化变电站是当前变电站自动化系统的发展方向^[1], 尤其是颁布的变电站通信网络系统国际标准(IEC61850), 为数字化变电站建设提供了标准规范^[2], 大大推动了数字化变电站应用建设的发展^[3]。

在传统变电站中, 继电保护装置的跳闸防误是采用启动加保护逻辑实现^[4], 通过继电器回路闭锁的方式保证在未启动的状态下装置任何动作行为都不能操作断路器^[5]。只有在保护先启动, 而且满足动作逻辑条件后, 装置才会动作, 操作断路器跳闸。

在智能数字化变电站应用中, 对于开关量和跳闸信号的传输是通过 IEC61850 标准实现的^[6], 它是一种替代传统智能电子设备之间硬接线的网络数据

通信方式^[7]。处理器输出跳闸命令的信号已经不是简单的电信号, 而是通过通信端口发出带跳闸标志的面向通用对象的变电站事件 GOOSE(Generic Object Oriented Substation Event)数据报文^[8]。处理器发出的网络报文经过网络控制器 MAC 和物理层网络接口 PHY, 最终通过过程层网络发送到智能终端, 由智能终端驱动断路器跳闸。

根据继电保护可靠性设计思路, “除出口继电器外, 单一器件故障引发误动” 在电力系统二次设备中是不允许的^[9]。传统变电站中, 得益于继电器的电源和出口两个输入, 能够较为方便地实现启动加跳闸的出口方式, 而在数字化变电站应用中, 因为链路数据上数据帧只有一份, SV 数据输入和 GOOSE 跳闸命令输出从实现的本质上来说都是单

处理器的处理过程, 较难在这种单路数据处理过程中实现单一器件异常防止保护误动作。本文提出的方案很好地解决了这一难题, 通过特殊的软硬件设计, 保证了继电保护装置不会因为自身单一器件故障引发一次设备误动作。

1 解决方案

数字化变电站中, 以太网成为最主要的通信介质^[10], 应用通信网络取代二次电缆, 取消了传统保护测控装置的交流模块和控制模块, 所有信息均通过过程层网络来传输^[11]。如图 1 所示, 合并单元将采样得到的模拟电压电流转换成符合 IEC61850-9-2 标准的网络报文, 经过程层网络发送给各个继电保护装置。继电保护装置通过接收合并单元发出的 IEC61850-9-2 报文获得采样数据, 经处理后通过保护算法得出保护结果^[12], 当保护动作时, 通过 IEC61850-GOOSE 报文^[13]发出跳合命令到智能操作箱, 智能操作箱根据收到的命令执行开关的分合操作^[14]。

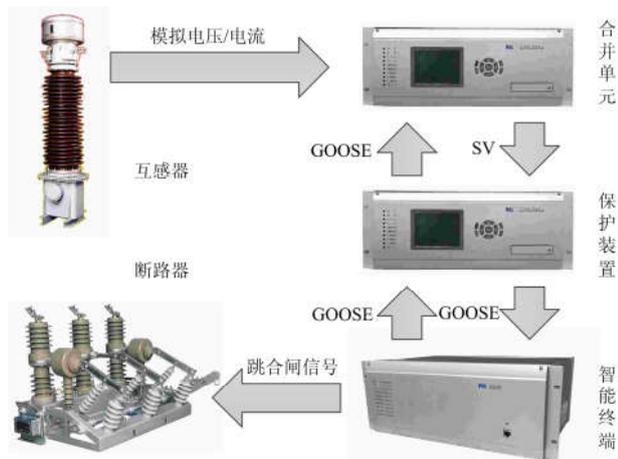


图 1 数字化变电站继电保护系统图
Fig.1 Diagram of relay protection system in digital substation

本方法应用于图 1 保护系统中的保护装置上, 通过冗余数据处理和发送校验的方式确保跳闸报文的正确性。为了实现高可靠性的保护跳闸方案, 保护装置控制插件采用了双处理系统冗余架构, 每个处理系统中又由 CPU 和 FPGA 组成。

主处理系统和从处理系统的数据处理功能采用相同的保护逻辑, 并各自处理同一份数据源, 而跳闸结果的输出则采用主从校验的方式。只有主处理系统具备发送 IEC61850-GOOSE 报文的硬件接口, 从处理系统将保护计算的结果通过双系统间通道发

送到主处理系统, 通过一致性校验后的跳闸报文才能通过网络发出, 保证异常的跳闸报文不会被发出。

2 硬件设计

2.1 数据处理冗余

为了实现保护结果校验, 本方案采用双处理系统冗余处理结构, 其硬件结构如图 2 所示, 网络数据经过 PHY 芯片后被复制成两路分别输入主从 FPGA, 从此两套处理系统开始独立处理数据。

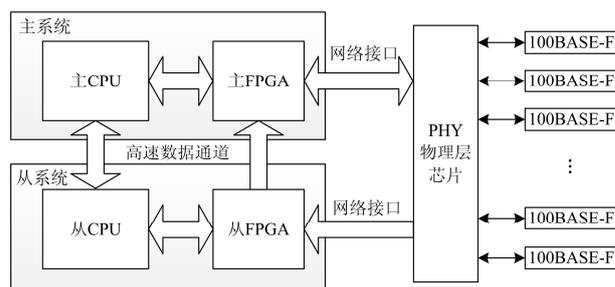


图 2 双处理系统硬件架构图
Fig.2 Diagram of dual processing system hardware architecture

报文接收通过 CPU 和 FPGA 配合完成, 报文的处理经过完整性校验、白名单过滤、网络风暴抑制、流量控制、报文解码、采样插值、保护计算等处理流程, 得出保护输出, 流程图如图 3 所示。

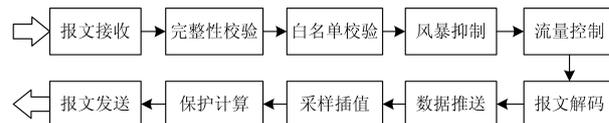


图 3 数据处理流程图
Fig.3 Flow chart of data processing

由于数据源相同, 数据处理算法和流程完全一致, 在装置正常运行的情况下, 理论上的保护动作结果也应该完全一致。保证双 CPU 计算出的动作结果一致是互校验的前提。

2.2 保护结果校验

主从 CPU 分别根据同一个数据源计算出保护结果, 并根据结果判断是否发出跳闸 GOOSE 报文。在此方案中, 主从 CPU 分别在计算得出保护结果后, 将计算数据发送给各自的 FPGA, 只有主 FPGA 可以将数据发送到网络接口。

通过双系统间的高速通信通道, 从 FPGA 的数据被同步到主 FPGA 中。随后主 FPGA 将双 CPU 计算出的保护计算结果数据按照一定的逻辑进行比较, 当报文中的跳闸结果一致时, 则将相应的 GOOSE 报文发出, 否则将其丢弃。

数据冗余校验结构图见图 4。

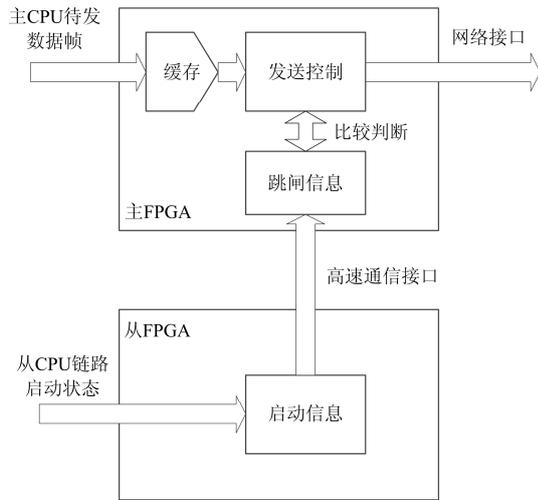


图 4 数据冗余校验结构图
Fig 4 Diagram of redundant data checking

3 软件设计

3.1 跳闸数据结构设计

两个处理系统中的CPU得出保护结果发送给各自的FPGA，主FPGA和从FPGA对接收到的数据进行预处理。主从CPU到各自FPGA间数据帧结构有所不同，主CPU填入主FPGA的跳闸数据中包含帧头、跳闸动作信息、动作信息的校验、完整GOOSE报文、GOOSE报文对应的CRC值、帧尾。

其中跳闸动作信息和动作校验是可选字段，普通非跳闸报文可以不填写，表示本帧不必校验可以直接发出，则主FPGA直接将完整GOOSE报文和CRC发送至保护装置的物理层。而从CPU填入从FPGA的跳闸数据中则只包括帧头、跳闸启动信息、启动信息校验、帧尾。即从FPGA只用将启动信息同步到主FPGA即可。

图 5 为跳闸帧数据结构图。

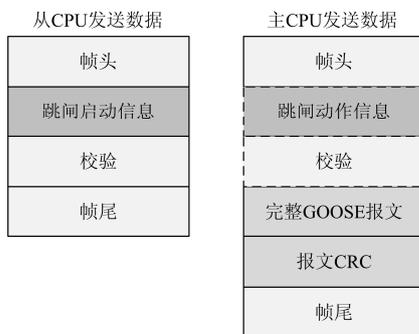


图 5 跳闸帧数据结构
Fig.5 Data Structure of trip operation frame

跳闸启动信息通过双系统间的通道同步到主FPGA后，主FPGA同时获取了主从CPU的保护计算结果。若本帧为跳闸报文，主FPGA对来自主CPU的当前的跳闸动作信息与来自从FPGA的当前跳闸启动信息进行一致性比较，若一致，则主FPGA直接将完整GOOSE报文和相应CRC发送至保护装置的物理层，否则，在超时后丢弃本帧报文数据。而在整个校验和处理流程中不对GOOSE数据帧做任何修改。

3.2 防误校验逻辑

对于一台多LD的保护装置，其启动信号支持16个。主FPGA的每一帧跳闸GOOSE报文，可以在跳闸动作信息字段指定需要检查那些启动信号。若需要检查的信号都已启动，则校验通过发出本帧GOOSE跳闸报文，否则一直等待到超时丢弃。

跳闸动作校验时，为了降低拒动作的概率，并不需要主CPU的跳闸状态和从CPU的启动状态完全一致，只需要跳闸状态时，有效的开关在启动状态有效之列即可。例如现场有开关ABCDE，AB对应QD1，C对应启动QD2，D对应启动QD3，如表1所示。

表 1 启动信号和开关对应关系
Table 1 corresponding relations between active information and breaker number

序号	开关	启动
1	A、B	1
2	C	2
3	D	3
4	E	4

根据应用场景拟碰到以下情况时，逻辑处理方式如表2所示。

表 2 冗余校验处理逻辑示例
Table 2 Examples of redundant check operation

序号	需跳开关	跳闸状态	启动状态	发送处理结果
1	ABC	12	12	发送
2	ABC	12	1234	发送
3	ABC	12	134	超时丢弃

即保护需检查的启动信号，必须全包含在启动状态中，启动状态中有效的信号必须多于或等于对应的需要检查的启动信号。否则不会将本帧跳闸报文发出。软件流程如图6所示。

主CPU在向主FPGA发送报文时，同时发送报文对应的CRC，即报文的CRC由组帧的CPU计算，主FPGA在发送过程以太网报文时将此CRC直

接附在帧尾发出, 不再自行计算 CRC, 且主 FPGA 不改变任何报文内容。若是在 FPGA 内部处理期间发生 SE 未知错误导致数据内容改变, 报文内容和 CRC 都不可能保持对应, 发出的报文会在接收侧的物理层被抛弃。

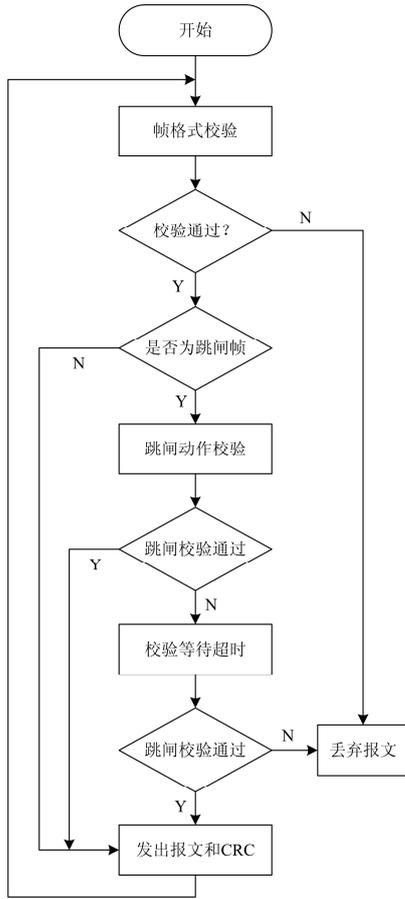


图 6 防误校验逻辑流程图

Fig.6 Flow chart of anti-maloperation check

4 验证测试

本设计采用双处理系统冗余处理, 通过互校验的方案, 能够很好地防止装置因为各种软硬件异常导致的误动作风险。对于数据处理异常、保护算法异常、软件跑飞等常规异常, 双机冗余校验的机制能明显有效地防止装置误动作。

为了验证提出的冗余校验防误方案的可行性和效果, 按照应用环境搭建了实验环境, 并通过软件注入单比特变位来模拟未知的发生, 注入的位置可以在任何地方。但不考虑保护装置双处理系统同时同一位置发生未知错误, 也不考虑电网发生故障时装置发生未知错误的情况。实验系统结构如图 7 所示。

测试中, 针对多个关键位置注入了软件错误, 测试项目和结果如表 3 所示。



图 7 实验系统结构图

Fig.7 Structure diagram of experimental system

表 3 错误注入实验测试记录

Table 3 Test records of fault injection

序号	测试内容	测试结果
1	装置正常工作, 输入过流采样数据。	能正确发送跳槽报文, 保护动作。
2	装置正常工作, 采样数据正常, 某一 CPU 算法参数错误, 出现极大采样值。	双系统保护计算结果不一致, 校验失败, 未发出跳闸报文。
3	装置正常工作, 采样数据正常, 某一 CPU 内存错误, 跳闸计算结果翻转。	双系统跳闸结论结果不一致, 校验失败, 未发出跳闸报文。
4	装置正常工作, 采样数据正常, 某一 FPGA 待发数据缓存发生错误, 跳闸帧关键数据发生翻转。	双系统保护计算结果一致, 报文发出, 但报文内容和 CRC 不一致, 被接收侧丢弃。

通过测试, 保护装置均能按照预期的处理效果工作, 引用该方案设计的几点保护装置已经在多个变电站工程中使用, 实验、测试、运行均达到用户要求。

5 结语

本方法基于特殊的软硬件设计, 通过数据链路冗余检验机制, 在不增加外部光纤连接的前提下, 确保继电保护装置不会因为自身单一器件故障引发误动作。能够显著增强设备防误能力, 降低了变电站误动作的风险, 提高系统的可靠性以及稳定性。

参考文献

[1] 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): 71-75.
GAO Xiang, ZHANG Peichao. The main features of

digital substation and key technologies[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 71-75.

[2] 谭文恕. 变电站通信网络和系统协议 IEC61850 介绍[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 8-11.
TAN Wen-shu. An introduction to substation communication network and system-IEC61850[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 8-11.

[3] 黄欣, 贺春. IEC 61850 标准对电力系统工作的影响[J]. 继电器, 2007, 35(13): 53-56.
HUANG Xin, HE Chun. Impact of IEC61850 Standards upon Work of Electric Power System[J]. RELAY, 2007, 35(13): 53-56.

[4] 杜浩良, 李有春, 盛继光, 等. 基于 IEC61850 标准数字化与传统继电保护的比较[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 172-176.
DU Hao-liang, LI You-chun, SHENG Ji-guang, et al. Comparison between standard digital on the IEC61850 and traditional protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 172-176.

[4] 陈继瑞, 刘立功, 李旭, 等. 一种新模式常规采样 GOOSE 跳闸变压器保护的设计及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10):98-103.
CHEN Jirui, LIU Ligong, LI Xu, et al. Design and application of a new model conventional sampling and GOOSE tripping transformer protection, 2016, 44(10): 98-103.

[5] 梁雪梅. 基于 IEC61850 标准的变电站通信模式[J]. 华北电力技术, 2005, (S1): 101-105, 126.
LIANG Xue-mei. Substation communication model based on IEC61850[J]. North China Electric Power, 2005,(S1): 101-105, 126.

[6] 高鹏宇, 游大海, 刘国民. 符合 IEC 61850 标准的数字化变电站内部通信的实现[J]. 继电器, 2006, 34(12): 69-72.
GAO Peng-yu, YOU Da-hai, LIU Guo-min. Implement of Communications According to IEC 61850 in the Digital Substation[J]. RELAY, 2006, 34(12): 69-72.

[7] 曹海欧, 严国平, 徐宁. 数字化变电站 GOOSE 组网方案[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 143-146.
CAO Haiou, YAN Guoping, XU Ning. GOOSE networking scheme for digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 143-146.

[8] 戴志辉, 王增平. 继电保护可靠性研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 161-166.
DAI Zhi-hui, WANG Zeng-ping. Overview of research on protection reliability[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 161-166.

[9] 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.

[11] 苏麟, 孙纯军, 褚农. 智能变电站过程层网络构建方案研究[J]. 电力系统通信, 2010, 31(213): 10-13.
SU Lin, SUN Chunjun, CHU Nong. Network construction scheme for process level in smart substations [J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(213): 10-13.

[11] 冯亚东, 李彦, 王松, 等. IEC 61850-9-2 点对点采样值传输在继电保护中的实现与应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 82-85.
FENG Yadong, LI Yan, WANG Song, et al. Realization and application of peer-to-peer IEC61850-9-2 sampled value transmission in digital substation protections[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 82-85.

[12] 段雄英, 尹睿涵, 孟晗. 基于 ARM 的 GOOSE 通信系统研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14):130-135.
DUAN Xiongying, YIN Ruihan, MENG Han, et al. GOOSE communication system based on ARM, 2016, 44(14):130-135.

[13] 蔡泽祥, 王海柱. 智能变电站技术及其对继电保护的影响[J]. 机电工程技术, 2012, 21(5): 1-4.
CAI Zexiang, WANG Haizhu. Technology of smart substation and its influence to relay protection system [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2012, 21(5): 1-4.

[14] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6):58-66.
WANG Tongwen, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Analysis of reliability for relay protection systems in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 58-66.

收稿日期: 2017-02-28; 修回日期: 2017-05-27

作者简介:

许宗光(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事数字化变电站保护控制平台开发工作; E-mail: xuzongguang@nrec.com

文继锋(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护;

李彦(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事变电站自动化系统、智能变电站系统研发工作。

(编辑 姜新丽)