

基于 SoC 的单芯片保护装置架构设计优化

姚 浩^{1,2}, 习 伟^{1,2}, 陈浩敏^{1,2}, 陈 波^{1,2}, 周 涛³, 陈秋荣³, 徐万方³

(1. 南方电网数字电网研究院有限公司, 广东 广州 510670; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663;
3. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘 要:智能变电站对保护安装方式和检测要求提高, 原有保护系统存在传输速度慢和架构复杂导致可靠性不高等问题, 在此背景下, 提出对数据进行分流处理交换, 采用 k -means 算法与业务优先级分层管理技术保证数据实时性, 并以 FPGA 作为通信并行的协处理器, 提高处理器和 FPGA 之间的传输效率。基于以上架构研发出基于 k -means 算法的电力系统 SoC 芯片继电保护装置。该装置通过实时数字仿真系统 RTDS(RTDS)的故障录波图确定保护装置的动作时间, 证明该装置的可靠性和实用性, 最后将研发的继电保护装置应用于南方电网部分智能变电站中进行了三年的运行, 结果表明其运行可靠稳定, 实现保护就地化, 装置小型化、高防护、低功耗, 达到预期的效果。

关 键 词:智能变电站; 优化聚类算法; 保护装置; 保护就地化

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.003 中图分类号: TM77 文章编号: 1673-9140(2021)05-0020-08

Structure optimization of intelligent substation relay protection device based on SoC

YAO Hao^{1,2}, XI Wei^{1,2}, CHEN Haomin^{1,2}, CHEN Bo^{1,2}, ZHOU Tao³, CHEN Qiorong³, XU Wangfan³

(1. Digital Grid Research Institute, CSG, Guanzhou 510670, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 3. Beijing Quartet Following Automation Limited by Share Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: The protection installation mode and detection requirements in intelligent substation is enhanced, and the low reliability problem of previous protection system due to the slow transmission speed and the overly complex architecture need to be handled. In this paper, a k -means algorithm-based priority management method is proposed to divide and exchange the data, and to ensure the real-time performance of the data. The FPGA is used as the parallel communication coprocessor to enhance the transmission efficiency to the processor. Thus, a SoC chip protection device is developed. The operation time of the protection device is determined by the fault oscillogram of simulation by the RTDS, which can prove the reliability and practicability of the devices. Finally, the protection device is applied in some substations of Southern Power Grid for three years. The results show that the operation of the device is reliable and stable, the protection can therefore be localized, miniaturized, and the protection and power consumption can also be ameliorated.

Key words: intelligent substation; optimization clustering algorithm; protection device; protection localizatio

收稿日期: 2019-08-10; 修回日期: 2019-09-02

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0904900, 2018YFB0904902)

通信作者: 姚 浩(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统继电保护、数字化变电站研究; E-mail: yaohao@csg.cn

随着智能电网与继电保护技术的不断地发展,作为坚强智能电网最关键的一环,智能变电站的建设和相关的保护技术研究也进行得如火如荼^[1-2]。根据“十三五”期间的相关数据,智能电网建设总投资预计约 2 万亿元,按照智能变电环节约 20% 的份额计算,智能变电环节投资额度达到 4 000 亿元,可见智能电网给智能设备发展带来了更大市场^[3]。

变电站经由数字化变电站到智能变电站的发展,基于 IEC 61850 提出的变电站智能化,使得保护变电站投资、提升设备标准化水平大大进步,继电保护装置就地化也更为简单易行,为运行设备实时监测能力和保护自动化设备运行可靠性提供了理论上的提升空间^[4-5]。在此基础上的智能变电站可以实现变电站运行操作自动化、变电站信息共享化和变电站分区统一管理,利用计算机仿真技术实现智能化电网调度和控制的基础单元^[6]。然而在更新换代过程中,原有保护系统存在传输速度慢,架构复杂等问题。为解决上述问题,一方面从构架的简单化和数据处理优化角度出发,有的学者提出利用单芯片的微机保护技术,使保护装置具有小型化、易于分布式布置的特点。

与此同时,随着全球芯片制造技术的不断提升,集成芯片也逐步替代大型电子元器件。片上系统(system on chip, SoC)是一种将 CPU、SSD、I/O 等封装在一块集成芯片的集成电路,相对于传统继电保护系统,片上系统具备高集成度、强大的运算能力和更小的体积。因此在就地保护和分散式保护需求较高的线路中,片上系统优势更加明显。文献[7]充分利用 SoC 系统高可靠性的优点,提出了基于双核 Cortex-A9 的自研智能就地化保护 SoC 芯片,构成一种高性价比的继电保护平台,但其实际将系统应用于就地化保护装置中;文献[8]提出一种大容量单芯片微机电保护装置解决方案,很好地解决了存储容量较小的问题,然而从整体设计上分析还存在一定的不足;文献[9]提出一种基于多信息采集融合技术与 AHP-层次分析的辅助决策系统,通过 JDL 模型对状态参数进行处理,将该模型中处理流程进行设计,以此完成对数据的预处理和对数据的分析,但对实现界面进行开发具有较大的难度。国内外有

学者先后提出了不少聚类算法应用在统计分析中,其中, k -means 聚类算法是一种基于形心的划分技术,是最为常用的聚类方法之一,其具有较快的聚类速度和良好的聚类效果等优点,在数据挖掘领域有着广泛的应用。为了适应现在新出现的保护安装方式和检测要求,继电保护装置由集中式向就地化演变,是建设智能变电站的一个趋势。继电保护装置就地化是指将继电保护装置靠近一次设备安放,大致有 4 种安装形式,包括继保小室、预制小室、就地柜/汇控柜、与一次设备集成^[10]。保护就地化可以使得二次回路更加清晰、简单、可靠,设备分层分布式布置,节约建设投资,减少小室、主控室建设面积,减少电缆、光缆连接数量和长度;通过增加中间环节,如智能交换机、报文记录仪等。就地化也可以提高运行维护的水平。保护实现就地化布置以后,同一间隔信号就地化采集处理,层次更清晰,方便运行维护^[11-12]。但就地化保护装置需要提升防变电站在正常或非正常故障情况下产生的极强的电磁干扰^[13-14]。

为此,该文提出基于 k -means 聚类算法的 SoC 芯片就地化继电保护装置系统,实现现场就地化安装和运行保护,提高经济型和可靠性,也使数据耦合关系明确。

1 电力系统芯片继电保护系统设计

1.1 片上系统继电保护方法

电力系统 SoC 芯片继电保护系统如图 1 所示。其中包括数据输入、数据传输、数据计算与命令执行保护、数据显示等功能。

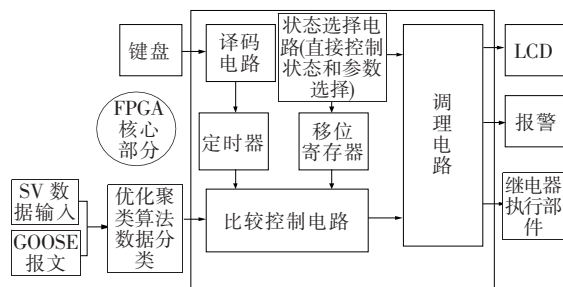


图 1 电力系统继电保护系统

Figure 1 Block diagram of power system relay protection system

1) 采样值 (sampling value, SV) 数据进入 FP-GA, 按照配置进行 SV 订阅解析, 将保护 CPU 需要的采样数据写入内存。

2) 开关状态以开关量 (generic object oriented substation event, GOOSE) 报文的形式进入 FPGA, 按照配置筛选 GOOSE 报文, 写入特定内存进行 GOOSE 解析, 解析出的开关量信息通过变量传递给保护 CPU。

3) 保护 CPU 计算得到工频和谐波矢量, 比较启动、动作条件, 配合开关状态和输出开关动作命令, GOOSE 任务通过变量得到开出信息, 转换为 GOOSE 报文通过 FPGA 发往智能操作箱。

由图 1 可知, SoC 芯片保护相比标准的插箱架构, 采样值和开关量信息都是在芯片内通过内存交换。对于保护 CPU 来说, 关键数据都以特定内存地址映射的形式提供, 无需再关心数据处理过程的同步调度, SoC 芯片保护有着天然的数据同步和共享的优势。由于交换信息所需的数据格式被大量简化, 相应的时间开销也大大降低, 通信任务调度的时间颗粒度可以保持在 100 μs 级别, 相比付氏计算等保护方法识别物理量所需要的时间, 这些信息传递开销几乎可以忽略不计^[15-16], 因此 SoC 芯片保护大幅度地缩减了数字化保护的動作时间。目前国内使用的数字化保护装置, 由于内部各逻辑节点往往分布在不同板卡或处理芯片内, 通过内部通信总线交换数据、数据处理和交换时间增加, 通常比常规保护增加 10 ms 左右的延时。

1.2 k-means 聚类方法

如 1.1 节所述, 若直接将 SV、GOOSE 及管理信息直接传输至保护 CPU 中, 导致数据量十分庞大, 容易造成数据溢出及丢失, 需要对数据进行一定的分类处理后再将数据并行传输, 才能使数据在传输过程中比较稳定。

以采样值为例, 对于原始无标签信息, 传统学习方法如支持向量机 (support vector machines, SVM)、 k 近邻等监督学习算法无法实现对数据的有效分类, 需要引进无监督学习算法。相对于自组织映射 (self-organizing map, SOM) 及奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 等降维方法,

k -means 聚类是一种目前运用较广泛且分类效果较好的学习方法。

k -means 算法又称 k 均值算法, 通过从 n 个 m 维样本集 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 中随机选取 k 个样本作为簇中心 ($k < n$), 计算所有样本与这 k 个“簇中心”的距离, 对于每一个样本, 将其划分到与其距离最近的“簇中心”所在的簇中, 对于新的簇计算出各个簇的新“簇中心”。一般 k -means 算法分为 3 步。

1) 选取簇个数 k 的值。

2) 计算各个样本点到“簇中心”的距离, 构成邻近矩阵。

3) 根据新划分的簇, 更新“簇中心”。

对于距离度量常采用欧式距离, 即

$$d(x_i, x_j) = \sum_{k=1}^m (x_{ki} - x_{kj})^2 = \|x_i - x_j\|^2 \quad (1)$$

定义样本与类中心和为损失函数, 即

$$W(C) = \sum_{l=1}^k \sum_{C(i)=l} = \|x_i - \bar{x}_l\|^2 \quad (2)$$

其中, $\bar{x}_l = (\bar{x}_{1l}, \bar{x}_{2l}, \dots, \bar{x}_{ml})^T$, 为 l 类的中心。使损失函数值最小, 便可达到最佳分类效果, 即

$$C^* = \arg \min_C W(C) = \arg \min_C \sum_{l=1}^k \sum_{C(i)=l} \|x_i - \bar{x}_l\|^2 \quad (3)$$

故对于采样值、开关量及管理信息数据, 可通过 k -means 聚类方法进行前端数据分类后再分流等操作, 为后续数据处理提供保障。

2 基于聚类算法的芯片继电保护系统实现

2.1 器件选型

SoC 芯片保护系统按照通用的保护划分功能模块, 分为信号 IO、保护数据处理、人机通信接口等功能模块, 系统功能构架如图 2 所示, 为满足带宽要求, 选用了千兆网作为网络接口。该继电保护装置依据高防护等级、小型化、可靠性、维护简单和软件功能模块化的设计原则进行单芯片保护系统设计。

考虑到保护特殊的实时性和可靠性要求, 图 2

双核 ARM 系统采用了非对称多处理 (asymmetric multiprocessing, AMP) 架构,由 1 个裸核 (bearmetal, BM) 和一个操作系统 (operating system, OS) 组成。将实时性要求高的任务 (保护功能等),放在 BM 核,而实时性要求不高的管理通信接口、本地数据管理等功能则布置在 OS 核。

参照两大可编程器件制造厂商 Xilinx 和 Altera 推出的基于 ARM 双核 + FPGA 的 SoC 系列芯片。该文选用 Xilinx 公司的 Zynq 系列芯片实现 SoC 处理系统。Zynq 如图 3 所示。

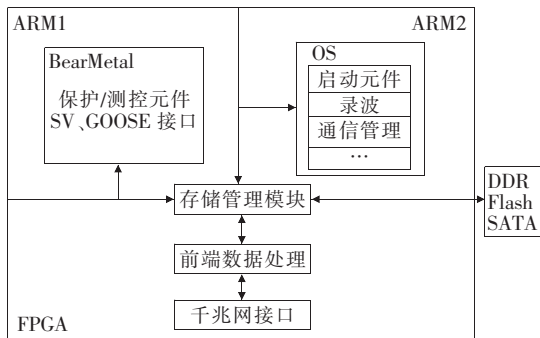


图 2 系统功能构架

Figure 2 Framework of system function

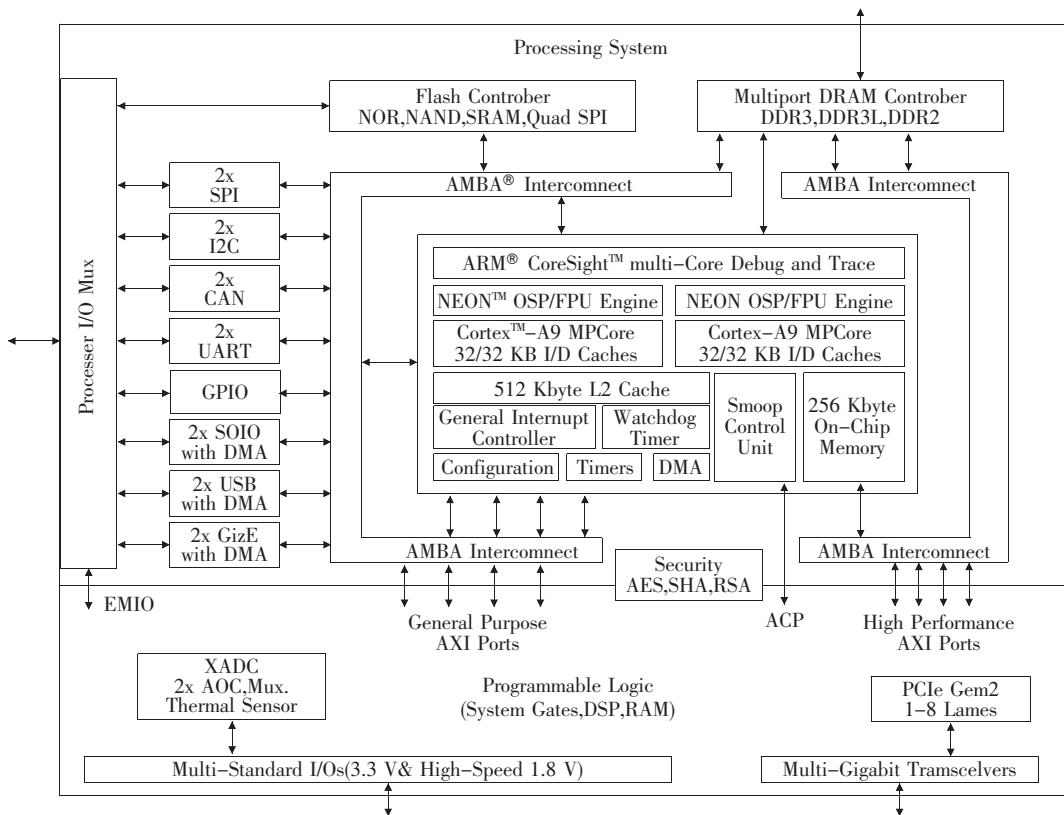


图 3 Zynq

Figure 3 Block diagram of Zynq

由图 3 可知,在 Zynq 的双核物理上共享地址空间,出于安全考虑,增加了额外的保护机制,保证双核使用的内存空间互不影响,保证高可靠要求。

2.2 软件标准化设计

功能标准化、模块化,对于提高大规模工业生产效率、提高产品可靠性具有重要意义。通过分层设计,保证保护核心算法完全独立于硬件,保障了功能扩展和移植。从上往下,将软件分为应用层软件、系统层软件和驱动层软件。

应用层参照 IEEE C37.2 对各种原理的保护元件的定义,将各种功能模块分为以下几种。

- 1) 保护元件。包括差动保护、距离保护、零序过流保护等。
- 2) 测控元件。遥信、遥测、遥控等连锁功能。
- 3) 通信模块。与后台监控、调试工具、保护 CPU 等接口。
- 4) 录波功能。标准 comtrade 格式录波。
- 5) 基于 OS(操作系统, LINUX 等)的系统服务。

6) 基于 BM (BearMetel, 裸跑, 无操作系统参与, 适用于实时性要求很高的保护功能) 的驱动和基础服务。主要包括驱动管理、内存管理、时间服务标准化应用数据接口和降低应用软件和硬件耦合度。

驱动层软件设计主要包括 Zynq 各外设功能驱动设计, 包括 ARM 内核相关驱动、通用事件 (外部中断、定时器等) 管理等。从驱动层往下, 已经和硬件关联, 不同的硬件设计, 只需维护驱动层以下的功能。

2.2.1 前端数据处理

目前国内智能变电站常用的网络拓扑形式有“直采直跳”, 即过程层和间隔层设备间光纤直连, 在提高可靠性的同时, 带来了拓扑过度复杂, 导致智能变电站通信网络架构复杂, 光纤接线繁杂, 建设成本高, 运维压力大等问题。因此该系统提出了“共网共口”解决方案, 即对于保护装置来说, 在芯片化保护中使用 FPGA 实现了通信前端处理层。对于大流量的以太网数据, 进行并行、灵活的处理, 实现“三网合一”输入。

2.2.2 基于数据聚类算法的数据分流与交换

采用 k -means 算法优化聚类对智能变电站采集相关数据的网络报文, 包括 SV、GOOSE、信息管理系统 (messaging management system, MMS) 及 1588 等辅助信息, 对其进行预分类, 经一部的分流处理, 数据分流流程如图 4 所示。

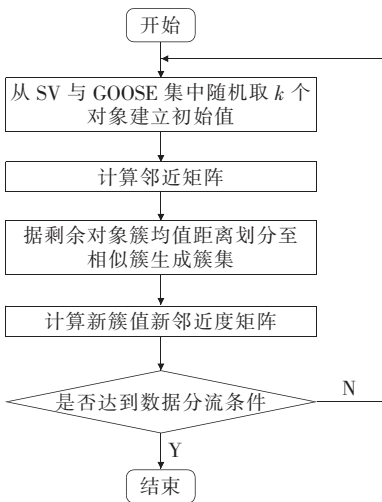


图 4 智能变电站数据聚类分析

Figure 4 Flow chart of data clustering in smart substation

图 4 中 k 的选择一般是按照实际需求进行决定, 在实现算法时直接给定 k 值, 距离的度量则大多通过有序、无序、混合属性距离度量计算。对于划分好的各个簇, 计算各个簇中的样本点均值, 作为新的簇中心。

k -means 算法从 SV 与 GOOSE 数据集中随机选取 k 个对象, 每个对象代表一个簇的初始值或中心。为更好地将分类结果直观展示, 需将相关数据降维处理, 该 SoC 系统采用主成分分析法 (principal component analysis, PCA), 来实现降维提取特征数据, 再建立邻近降维后矩阵。

将处理后的采样数据、报文信息及 MMS 可视化后如图 5 所示, 其中图 5(a) 为原始无标签数据, 当数据无标签输入时, 数据特征十分相识; 图 5(b) 为原始带标签数据; 图 5(c) 为 k -means 分类后数据。采用 k -means 分类后找到 3 类数据质心, 质心坐标分别为 $[1.3497, 1.2133]$ 、 $[-0.5304, 1.1744]$ 、 $[0.5151, 0.5191]$ 。对比图 5(b)、(c) 可得, 采用 k -means 算法可得到较好的分类效果。

因 SVM 多用于二分类, 在前期测试中传统 SVM 无法满足多分类需求, 多分类 SVM 在损失函数及其他参数调试需花费大量时间, 不太适用于 SoC 系统的继电保护装置。

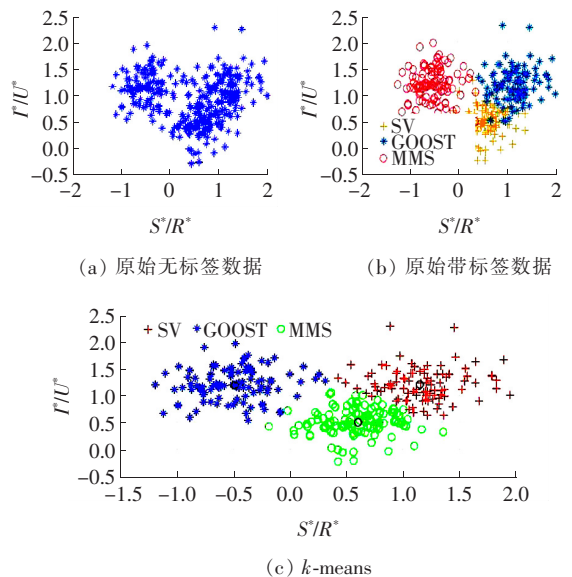


图 5 数据预分类处理

Figure 5 Preclassification of data

根据对剩余的每个对象与各个簇均值的距离,将其划分到最相似的簇,然后计算各个簇的新均值,这个过程不断重复直到满足 SV 与 GOOSE 数据达到分流处理的条件。由于各种报文物理上混杂在一个通道,带来了网络负荷增加、分拣开销加大、优先级需要区分等问题,该装置系统首先通过 *k*-means 优化聚类算法对 SV、GOOSE 和 MMS 进行分流处理;然后采用业务优先级分层管理技术,保证 SV/GOOSE 数据的实时性;最后加入网络风暴处理机制,防止无效数据造成网络异常或瘫痪。以 FPGA 作为通信并行的协处理器,提高处理器和 FPGA 之间的传输效率,简化传输流程以提高数据交换的可靠性,这种架构设计要比传统的处理器 + FPGA 架构和代码的设计要简单。

2.2.3 SoC 架构优化处理流程

1)处理器和 FPGA 之间的通信带宽几乎可以做到无上限。Zynq 内处理器和 FPGA 之间有多种数据交换渠道,从简化数据交互机制出发,该文选用了 FPGA 主导的 ACP 通道,数据带宽可以达到 8 Gbits/sec 的级别,比处理器和 FPGA 架构提高了一个数量级。

2)FPGA 根据配置将分拣过滤后的数据封装为描述信息 + 数据信息的结构,直接写入内存,和处理器查询处理数据完全解耦,大大降低了处理器的任务复杂度和处理开销。

3)即使一帧数据传输由于可能的小概率事件失败,也不会影响到下一帧的传输,而 DMA 方式遇到这种异常,往往需要重启传输机制。从系统鲁棒性来说,SoC 机制提高了一个级别。其前置处理如图 6 所示。

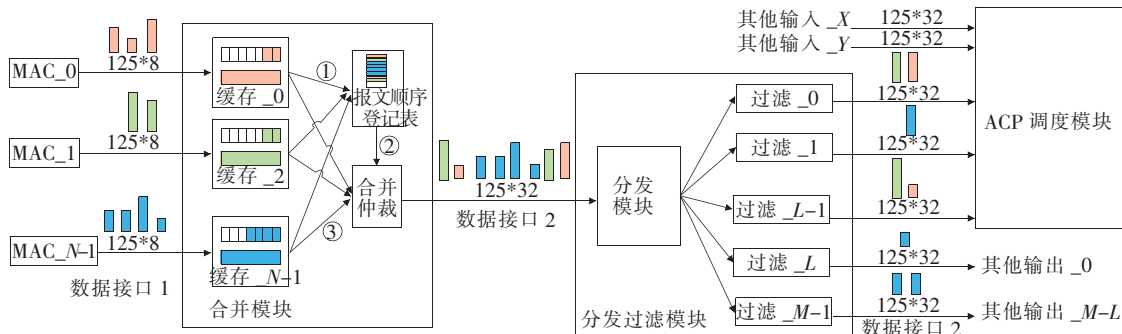


图 6 前置处理

Figure 6 Block diagram of Pre-processing

3 动模测试结果

110 kV 线路模型主接线如图 7 所示,其中线路保护安装于 L1 线路 M 侧。线路参数如表 1 所示。

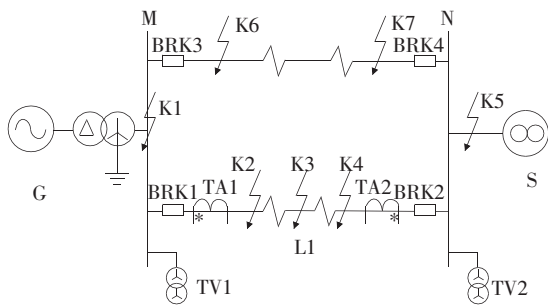


图 7 110 kV 线路模型主接线

Figure 7 Main wiring diagram of 110 kV line model

基于 SoC 芯片开发的小型就地化线路保护实物图和 RTDS 测试中区内金属性故障动作如图 8、9 所示,其中保护装置已通过国家继电保护及自动化设备质量监督检验中心测试。实时数字仿真技术平台 RTDS 的故障录波如图 9 所示。

表 1 线路参数

Table 1 Line parameters

项目	单位	参数
正序电阻	Ω/km	0.1
正序感抗	Ω/km	0.4
正序并联容抗	MΩ · km	0.530 52
零序电阻	Ω/km	0.5
零序感抗	Ω/km	1.2
零序并联容抗	MΩ · km	0.786 3
线路长度	km	长线路:150.0 短线路:15.0



图8 芯片化线路保护装置

Figure 8 Chip circuit protection

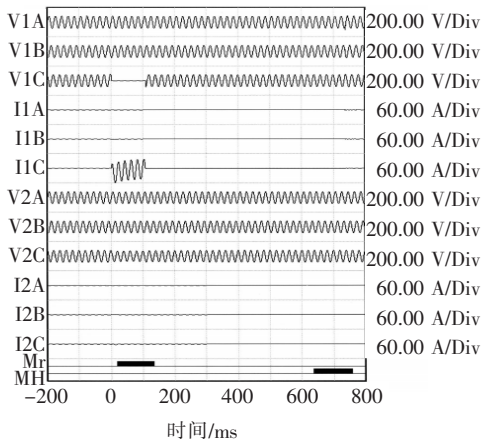


图9 RTDS故障录波

Figure 9 Fault oscillograph of the RTDS

由图9可以看出,所记录的是区内金属性故障波形,保护装置的动作时间为17.6ms,采用基于 k -means聚类算法对数据优化处理,SV接口到保护CPU的数据传递、开关量输入接口到保护CPU的数据传递、开关量输出从保护CPU到GOOSE模块的信息传递、各功能模块间的对时同步过程都有不同程度的时间缩短,整组动作时间较传统方法平均缩短了5ms,整体性能指标有所提升,能有效地解析了网络中的交互信息,迅速判断并排除了故障,证明了该装置的有效性与实用性。开发的基于聚类算法的芯片继电保护系统装置在南方电网部分智能化变电站已进行了3a的运行,其运行可靠稳定,实现了保护就地化。

4 结语

随着智能变电站建设不断地推进,继电保护系统从信号采集、数据处理,到开关设备控制,二次自动化控制系统发生显著的变化。该文开发的装置具有以下特点。

1)采用基于 k -means聚类算法对数据优化处理,缩短了继电保护系统整组动作的时间,提升了故障判断的速度。

2)基于SoC芯片实现的单片式保护,带来了小型化、便于就地化安装、提高经济型和可靠性、维护简单的优势。

3)采用基于 k -means优化聚类算法的变电站保护装置可以将采集数据的耦合关系表现得更加明显,降低了数据的冗余度和保护误动作几率,对于保护就地化推广和实施应用具有一些借鉴价值。

参考文献:

- [1] 李岩军,艾淑云,王兴国,等. 继电保护就地化及测试研究[J]. 智能电网,2014,2(3):16-21.
LI Yanjun, AI Shuyun, WANG Xingguo, et al. Locally installed mode and test research of relay protection[J]. Smart Grid,2014,2(3):16-21.
- [2] 何金栋,王宇,赵志超,等. 智能变电站嵌入式终端的网络攻击类型研究及验证[J]. 中国电力,2020,53(1):81-91.
HE Jindong, WANG Yu, ZHAO Zhichao, et al. Type and verification of network attacks on embedded terminals of intelligent substation[J]. Electric Power,2020,53(1):81-91.
- [3] 王同文,刘宏君,邵庆祝,等. 智能变电站二次回路智能预警及故障诊断技术研究[J]. 电测与仪表,2020,57(8):59-63+98.
WANG Tongwen, LIU Hongjun, SHAO Qingzhu, et al. Research on intelligent early warning and fault diagnosis technology for thesecondary loop of smart substation [J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2020,57(8):59-63+98.
- [4] 叶远波,陈晓东,项忠华,等. 基于间隔CRC校验码的智能变电站改扩建配置文件定位研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(6):173-179.
YE Yuanbo, CHEN Xiaodong, XIANG Zhonghua, et al. Research on configuration file location of smart substation reconstruction and extension based on bay CRC code[J]. Power System Protection and Control,2020,48(6):173-179.
- [5] 高旭,刘宏君,杜丽艳,等. 基于综合评价识别法的智能变电站虚回路在线状态监测技术研究[J]. 电力系统保

- 护与控制,2019,47(3):182-187.
- GAO Xu, LIU Hongjun, DU Liyan, et al. Study on the online status monitoring technology of intelligent substation virtualcircuit based on comprehensive evaluation and recognition method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3):182-187.
- [6] 王勇, 韩少晓, 尚力, 等. 智能变电站监控系统新型体系架构研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8):145-151.
- WANG Yong, HAN Shaoxiao, SHANG Li, et al. Research and practice of novel architecture of supervision and control system in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8):145-151.
- [7] 于同伟, 丁岳, 李良, 等. 用于就地化保护关键技术的SoC设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21):150-155.
- YU Tongwei, DING Yue, LI Liang, et al. SoC design for key technologies of outdoor installation protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21):150-155.
- [8] 李会新, 谢俊, 王玉龙, 等. 超高压输电线路保护装置自适应整定及性能优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17):148-154.
- LI Huixin, XIE Jun, WANG Yulong, et al. Adaptive setting and performance optimization of protection devices on extra-highvoltage transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17):148-154.
- [9] 祁建怀, 邓帅. 基于多信息采集的继电保护状态检修辅助决策系统构建[J]. 自动化与仪器仪表, 2018(4):179-182.
- QI Jianhuai, DENG Shuai. Construction of auxiliary protection decision-making system for relay protection based on multi-information acquisition[J]. Automation and Instrumentation, 2018(4):179-182.
- [10] 张春合, 陆征军, 李九虎, 等. 数字化变电站的保护配置方案和应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6):122-125.
- ZHANG Chunhe, LU Zhengjun, LI Jiuhu, et al. Protection configuration scheme and application in digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6):122-125.
- [11] 周文越, 李霞, 刘明忠, 等. 就地化保护检验机制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7):162-167.
- ZHOU Wenyue, LI Xia, LIU Mingzhong, et al. Study on the localization protection inspection mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7):162-167.
- [12] 叶远波, 谢民, 王嘉琦, 等. 基于Markov模型与GO法的智能变电站继电保护系统实时可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2):47-55.
- YE Yuanbo, XIE Min, WANG Jiaqi, et al. Real-time reliability analysis of intelligent substation relay protection system based on Markov model and GO method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2):47-55.
- [13] 李浩, 林湘宁, 喻锟, 等. 基于连续时间马尔可夫链的继电保护装置动作行为预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(S1):121-128.
- LI Hao, LIN Xiangning, YU Yu, et al. Based on continuous time markov chain prediction model of action behavior of relay protection device[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1):121-128.
- [14] 李凯. 主保护就地化的分布集中式继电保护方案研究[J]. 企业改革与管理, 2014(16):155.
- LI Kai. Research on distributed centralized protection scheme of main protection in situ distribution[J]. Enterprise Reform and Management, 2014(16):155.
- [15] 张惠娟, 韩叶, 凌跃胜, 等. 变电站电磁干扰预测分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1):412-417.
- ZHANG Huijuan, HAN Ye, LING Yuesheng, et al. The forecast analysis in substation electromagnetic interference[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1):412-417.
- [16] 嵇建飞, 袁宇波, 庞福滨. 智能变电站就地智能设备电磁兼容抗扰度实验分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(S1):52-58.
- JI Jianfei, YUAN Yubo, PANG Fubin. Experimental analysis of EMC immunity for field installed intelligent equipment of intelligent substation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1):52-58.