

基于嵌入式 PLC 软核的通用保护平台设计与实现

郭玮^{1,2}, 田录林¹, 张永良², 崔葛安², 杨芸²

(1. 西安理工大学, 陕西 西安 710049; 2. 国网陕西省电力公司检修公司, 陕西 西安 710049)

摘要: 提出了基于嵌入式 PLC 软核的通用配网保护平台设计方案。针对传统保护软件编程灵活性差, 现场可配置能力弱的问题, 在分析嵌入式 PLC 软核的特性并讨论了基于 PLC 软核技术实现 110 kV 及以下配网综合保护的可行性和优势的基础上, 实现了基于嵌入式 PLC 软核的通用保护平台。设计了基于 PLC 软核的保护平台系统结构, 然后在以 ARM9200 芯片为核心的硬件平台上实现了 PLC 软核的移植和调试。采用模块化设计思路, 通过结构化文本语言 (Structure Text) 实现了差动保护、零序电压保护、反时限电流保护等面向配网主设备的保护功能。最后, 以 10 kV 电动机为被保护对象, 从保护特性和电磁兼容性等方面进行测试。实验分析表明, 所实现的保护平台具有配置灵活, 通用性好的优点, 各保护参数满足 GB/T 7261-2008 和 GB/T 14598 国标要求。

关键词: 嵌入式; PLC 软核; ARM9200; 配网综合保护

Design and implement of protection platform based on embedded PLC soft-core

GUO Wei^{1,2}, TIAN Lu-lin¹, ZHANG Yong-liang², CUI Ge-an², YANG Yun²

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Shaanxi Electric Power Company Maintenance Company, Xi'an 710049, China)

Abstract: This paper proposes a universal protection platform based on embedded soft-core PLC. Traditional software programming has poor flexibility and weak field configurability. After analyzing the characteristics and advantage of embedded PLC soft-core, we implement a universal protection platform based on embedded PLC soft-core. We design the system structure of protection platform based on PLC soft-core, then transplant and debug the PLC soft-core on ARM9200-based hardware platform. We realize the widely used distribution grid protections, such as the differential protection, zero-sequence protection, inverse-time current protection by Structured Text Language, using modular design concept. At last, we take a 10 kV motor as protect object. Experimental analysis shows that the protection platform has good flexibility and versatility. The protection parameter meets GB/T 7261-2008 and GB/T 14598 GB requirements.

Key words: embedded; PLC soft core; ARM9200; distribution grid integrated protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)16-0122-05

0 引言

微机保护不但在快速、灵敏等方面达到和超过了传统的保护装置, 而且其智能化的特点日益突出^[1]。然而自微型继电器保护装置诞生以来, 系统设计一直都是面向处理器的, 硬件平台的通用性差, 上层应用程序可移植性弱, 缺乏开放性、重用性和互操作性。这样会带来两个方面的问题: 首先, 当硬件改变时, 常常需要将系统在新的硬件上重新设计^[2]。其次, 保护装置的功能可配置性弱, 用户基

本不能对装置所具备的保护功能进行选择 and 配置。

平台化设计是解决上述问题的一个方案。简单地说, 平台化设计就是基于微处理器强大的计算能力, 配备以充足和灵活的外围标准硬件, 形成适合于电力系统控制和保护需要的专用微计算机^[3]。同时, 如果在应用层采用可配置性较强的 PLC 完成各保护功能, 则用户可以在很大程度上实现对装置保护功能的选择, 保护对象改变时, 只需要重新使用 PLC 编程语言对保护功能进行配置便可。

为此, 本文提出了一种基于嵌入式 PLC 软核的通用保护平台设计方案, 在以 ARM9200 芯片为核心的硬件平台上建立 PLC 软核运行环境。在 PLC

基金项目: 陕西省科学技术研究计划资助项目 (2010JK733)

上位机编译环境中使用结构化文本语言 (Structure Text, 后文简称 ST 语言) 对各类保护功能进行编译和封装。10 kV 电动机在电力拖动系统中的应用广泛, 地位重要^[4], 故本文选取 10 kV 交流异步电机为被保护对象对通用保护平台性能进行测试。

1 PLC 软核概述及设计可行性

PLC 软核技术的实现主要在于编辑、编译和执行 3 个部分, 编辑和编译在上位机编译环境中完成, 编译链接成为 IEC-IL 语言向下位机装置下载执行。而执行机构则为本文所指的 PLC 软核, 可以作为独立任务嵌入到保护装置中。

PLC 的上位机编译环境主要完成: 采用 IEC61131-3(梯形图、功能块图、顺序功能图或结构化文本)的标准语言作为编程语言; 采用双向图分析或有限自动机进行编译生成中间语言; 上位机调试界面命令传递和逻辑代码编程语言反编译定位。

嵌入保护装置的 PLC 软核主要实现: 执行引擎采用“虚拟机”解释执行, 与具体硬件脱离; 输入、输出和虚拟机之间内部数据的交换; 保护逻辑中间数据和虚拟机中间数据交换; 调试命令的处理和虚拟机的状态跟踪^[5]。

将 PLC 软核技术应用到 110 kV 以下配网系统, 主要需要考虑故障时保护的動作特性是否满足要求, 主要是从速动性、灵敏性和可靠性三个方面考虑^[6]。

1) 保护速动性: 随着硬件运算速度的提高, 本文所采用的 ARM9200 芯片在 180 MHz 主频时, 指令运行速度高达每秒 2 亿条指令, PLC 软核全部指令执行一遍的时间可以有有效的控制在微秒级, 这样的执行速度是可以满足配网保护对动作延时的要求的。

2) 保护可靠性: 动作可靠性是考量保护装置性能的另一个重要指标。各类保护逻辑最终是以与、或、非的逻辑关系表述的, PLC 软核继承了传统可编程逻辑控制器指令执行严密, 抗干扰能力好的特性。只要所依托的硬件平台 EMC 性能可靠, PLC 软核执行保护任务时的可靠性是有保障的。

3) 保护灵敏性: 保护的灵敏性强调保护装置对故障的反应准确性。通过通用平台对电气量的精确测量和 PLC 软核严格的逻辑执行能力可以有效地确保装置对故障的准确判断和正确反应。

通过以上分析, 使用 PLC 软核技术实现配网保护具有很高的可行性。

2 通用平台系统结构设计

本文所提出的以 PLC 软核为核心的保护平台

设计思路, 具体是指将所有可能用到的保护功能在 PLC 上位机编译环境中进行编辑、封装成功能模块。在实际应用中, 根据被保护对象的实际需要选择相应的保护功能模块, 链接生成中间语言, 并下载到 PLC 软核中执行。通用平台应该满足 110 kV 以下配网系统保护对系统运算速度、运行稳定性、IO 接口数量的要求。结合市场调研和课题组自身科研水平, 本文采用基于 AT91RM9200 芯片的硬件平台, 通用平台的硬件结构可以分为 CPU 最小系统、外部接口模块、通信模块。

1) CPU 最小系统: 采用 ARM9200 芯片配以 MT48LC16M 型号 SDRAM 以及 SST39VF3201 型号 NOR 型 FLASH 组成 CPU 最小系统, 外设铁电存储器 FM3116 实现掉电非易失存储。

2) 交流信号测量: 传统由电磁式互感器组成的电气测量系统将模拟量送入保护装置, 采样在内部进行^[7]。保护所需要的相关电压、电流信号由外设的采样芯片进行采样, 并设二阶低通滤波器用于滤波, 由数据处理模块对采样数据进行软件滤波后完成傅里叶变换, 提取波形基波和各次谐波作为保护判据。

3) 开关量信号 I/O 接口: 完成对外围开关量的输入和输出。均采用符合国标要求的参数设计。

4) 通信模块: 通信模块完成远方通信功能, 采用 TCP/IP 通信协议, 应用层使用 Modbus 协议。

由此, 得出通用平台系统结构图如图 1 所示。出于平台通用性考虑, 对于开关量和电压、电流信号接口的数量应具备较高的灵活配置能力。因为本文采用背板总线结构, 开关量板、交流输入板均可以根据对保护对象的接口端子数量要求进行增减。开关量信号最大支持 150 路开关量输入, 20 路继电器输出。交流信号接口最大支持 9 路电流信号和 6 路电压信号, 可以满足配网设备保护的主要接口要求。

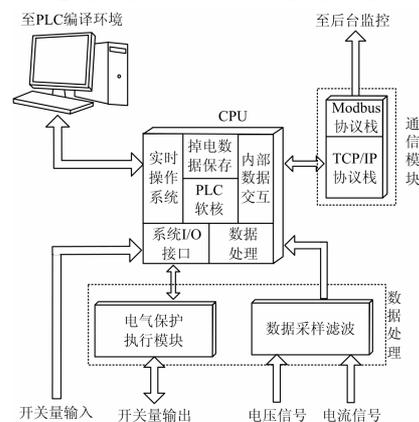


图 1 系统结构图

Fig. 1 System structure

通用平台的外部接口输入、输出均应按照配电网综合保护要求的最快反应速度设计，以确保保护平台可以满足各类配网保护对接口反应速度的要求。

3 嵌入式 PLC 软核设计

3.1 OpenPCS PLC 软核解读

本文所使用的 Infoteam 公司的 OpenPCS 系列 PLC 软核分为上位机编译环境和下位机解释核心两部分。PLC 语言在上位机编译环境中进行编写，编译器将 PLC 语言编译标准 IEC-IL 代码准备向下位机下载。与下位机软核的通信方式包括 RS232 串行通信和使用 TCP/ip 协议的以太网通信两种。

OpenPCS 的编译器是一个标准的前后端编译环境。其前端编译器 (CFE) 完成对编辑器内的 PLC 语言的语法检查、语法校验、生成错误提示信息，最终向后端编译器 (CBE) 提供内部 IEC-IL 中间代码。

下位机软核将接收到的帧数据进行组合成为完整的信息段，然后内核解释器将其解释成为标准机器代码得以执行。由此构成一个独立的 PLC 编译执行环境。PLC 编译器结构框图如图 2 所示。

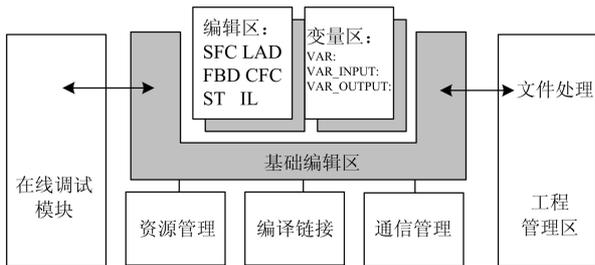


图 2 PLC 编译器结构框图

Fig. 2 PLC compiler structure

3.2 OpenPCS PLC 软核移植

下位机软件包分为 PLC 软核和端口程序两部分。实际代码量为 124 K，其中 PLC 软核部分为 119 K，端口程序为 4 K。向 ARM9200 平台的移植过程主要是完成三部分的工作：通信接口 (RS232) 的编写，数字及模拟量 I/O 接口的编写和代码存储读取接口编写。

3.2.1 RS232 串行通信接口程序编写

在本装置中，使用 AT91RM9200 处理器的调试串口 (DEBUG) 作为与 OpenPCS 上位机进行通信的接口。串口驱动程序在 OpenPCS 下位机软件端口程序部分的 Ser.c 文件中实现。

3.2.2 数字及模拟量 I/O 接口的编写

OpenPCS 软件系统定义了一套 I/O 映射机

制，实现 PLC 软核的 I/O 量与实际物理 I/O 量，以及上位机操作信号的关联。灵活的映射机制也构成了嵌入式 PLC 软核的一个主要特性。

定义映射区主要是通过 PLC 软核程序中提供的 1 个全局指针 pProcImgSeg_p，其指向 I/O 映像变量区起始地址，通过功能函数分别实现映射区的初始化、完成输入区数据导入、PLC 软核输出数据导出。图 3 所示为完成移植后由在线编译环境向 PLC 软核下载程序的界面。



图 3 PLC 编译环境

Fig. 3 PLC compiler environment

4 配网通用保护功能实现

在使用 ST 语言封装各保护功能模块时，主要需要解决以下几个问题。

- 1) 时间响应速度。差动速断保护要求在故障发生几十个毫秒内发出跳闸信号。对响应速度的要求非常高。因此保护执行机构的设计需要考虑执行速率的问题。
- 2) 延时时间准确性。各类保护都会用到延时功能，延时的准确性也是考查保护性能的主要指标。
- 3) 动作的可靠性。装置需要对电磁干扰有很好的抵抗能力，避免因为干扰而造成保护误动作。

110 kV 及以下配网综合保护功能主要包括：变压器保护、母线保护、线路保护、电动机保护、电抗器保护、串联补偿装置保护等。需要实现的保护功能包括：差动保护、三段过流保护、零序电压保护、反时限保护、电流不平衡保护、充电保护模块、过电压欠电压、阻抗保护、距离保护、复压闭锁过流保护、重合闸等。上述保护均可以通过 ST 语言完成封装，以零序电压保护为例，简要的 ST 语言程序流程图可如图 4 所示。

本文分别对上述保护保护功能模块进行编写并封装为功能模块，如图 5 所示。在针对具体的被保护对象进行配置时可以对上述保护功能模块进行组合。下面就面向各种配网保护对象的保护模块组成做以描述。

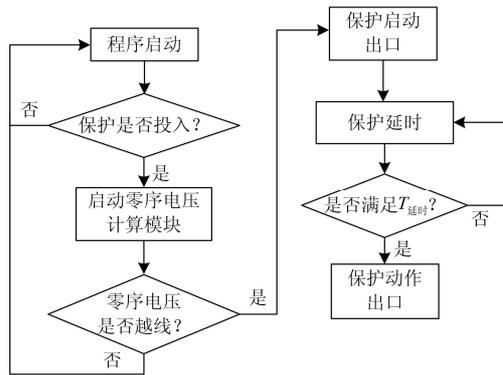


图4 零序电压保护程序流程图

Fig. 4 Flow chart of zero-sequence voltage protection



图5 三段过流保护功能模块封装

Fig. 5 Three-section over-current protection function module wrapping

1) 变压器保护: 差动保护模块、过流保护模块、阻抗保护模块、零序电压保护模块、复压闭锁过流保护模块。

2) 母线保护: 差动保护模块、充电保护模块、复压闭锁过流保护。

3) 线路保护: 三段过流保护模块、距离保护模块、零序电压保护模块、重合闸。

4) 电抗器保护: 差动保护模块、过流保护模块。

5) 串联补偿装置: 电流不平衡保护模块、过流保护模块、过电压欠电压保护模块。

6) 电动机保护: 差动保护模块、反时限过流保护模块、过电压欠电压保护模块。

5 试验验证

为了验证本文实现的通用保护平台的可行性, 我们选取 10 kV 电动机为被保护对象, 向通用保护平台配置带二次谐波制动的差动保护模块^[8-9]、过电压欠电压保护、反时限过流保护保护模块。根据实验用电动机实际情况设定了各保护的動作整定值。

经过保护特性测试和 EMC 电磁兼容性试验,

本文所实现的 PLC 软核运行良好, 满足稳定性和实时性的要求。同时电磁兼容性良好, 顺利通过瞬变脉冲群试验和浪涌试验。

5.1 保护特性测试

本文使用凯弦 K1066+ 继保测试仪对整个系统进行了包括速断保护试验、反时限保护试验、差动保护试验、二次谐波制动试验、工艺系统联锁停机试验等多项试验, 试验结果良好, 符合本文设计要求。表 1、图 6 所示为测试仪提供的差动保护特性图和差动谐波制动试验截图。

表 1 差动保护动作值精度

Table 1 Differential current protection operation value accuracy

相别	机端			中性点		
	整定值	五次平均动作值	误差/ %	整定值	五次平均动作值	误差/ %
A	1	1.00	0.00	1	1.00	0.00
	5	4.99	0.20	5	4.99	0.20
	10	9.99	0.10	10	10.01	0.10
B	1	1.00	0.00	1	1.00	0.00
	5	5.00	0.00	5	5.00	0.00
	10	10.01	0.10	10	9.99	0.10
C	1	1.00	0.00	1	1.00	0.00
	5	5.00	0.00	5	4.99	0.00
	10	10.01	0.10	10	10.01	0.10

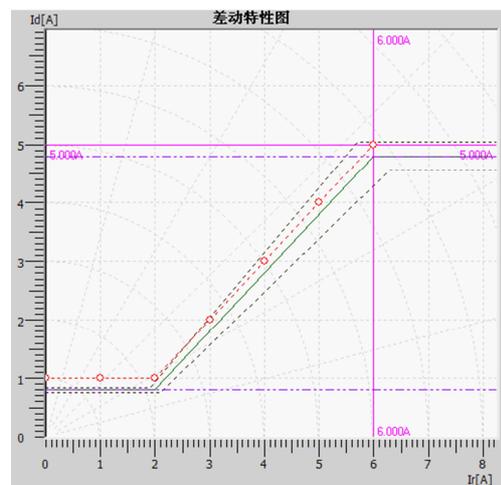


图6 差动保护动作特性图

Fig. 6 Differential protection action characteristic

从表 1 可以得出, 动作值的最大相对误差为 0.20%, 低于国标要求的 $\pm 5\%$ 。1.5 倍整定值时, 五次动作平均时间为 22.6 ms, 满足误差不超过 30 ms 的要求。在图 6 中, 黑色折线为比率曲线, 圆点线

为差动保护动作出口值,可见通过 PLC 软核实现的比率差动保护的動作特性与所定义的比率曲线吻合。

5.2 电磁兼容性试验

本文按照 EMC 三级标准对系统进行了浪涌试验和电快速瞬变群脉冲试验。

对所有硬件板卡进行了电快速瞬变群脉冲试验,装置未出现异常事件记录和报警跳闸情况。模拟量读数未出现异常。

对互感器板、继电器板、开关量输入板进行了浪涌试验,在共模 1 kV 差模 1.5 kV 试验中,所有板卡工作正常,未出现继电器误动、拒动情况。未出现异常事件记录和异常报警跳闸情况。

6 结语

本文所提出的基于嵌入式 PLC 软核的通用保护平台实现方法经试验验证是可行的。将各功能模块使用 ST 语言封装成为功能块提高了软件的可移植性,增强了保护装置的通用性。然而,PLC 软核的稳定运行对硬件平台的要求较高,如何更好地发挥 PLC 软核的性能有待开展更广泛的研究。

参考文献

[1] 焦坡,常玉峰,常琦.一种高性价比的继电保护平台[J].电力系统保护与控制,2010,38(17):135-137.
JIAO Po, CHANG Yu-feng, CHANG Qi. A cost-effective platform of relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 135-137.

[2] 张爱民,蒋刚,张连原,等.软 PLC 的设计思想在继电保护装置中的应用[J].高压电器,2007,43(6):444-447.
ZHANG Ai-min, JIANG Gang, ZHANG Lian-yuan, et al. Application of the design of soft PLC in relay protection equipments[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(6): 444-447.

[3] 罗海云,董慧娟.微机保护平台研究[J].电力系统自动化,2005,29(8):92-95.
LUO Hai-yun, DONG Hui-juan. Microcomputer based protective relay platform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 92-95.

[4] 戴光武,都洪基,贾磊,等.基于 P89LPC952 单片机的电动机保护装置研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(2):73-79.
DAI Guang-wu, DU Hong-ji, JIA Lei, et al. Motor protection equipment research based on P89LPC952

microcontroller[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 73-79.

[5] 谢志迅,徐礼葆.微机保护装置中 PLC 功能的实现和应用[J].电力自动化设备,2007,27(2):121-123.
XIE Zhi-xun, XU Li-bao. Realization and application of PLC function in microcomputer based protective relay platform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(2): 121-123.

[6] 印吉景,吴水兰,许云龙,等.中低压线路速断保护躲涌流的改进措施[J].电力系统保护与控制,2012,40(22):139-145.
YIN Ji-jing, WU Shui-lan, XU Yun-long, et al. Improvement of the line quick-break protection of low and medium voltage system avoiding effect of magnetizing inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 139-145.

[7] 王业,陆于平,徐以超,等.一种用于差动保护的新型重采样方法[J].电工技术学报,2012,27(11):239-247.
WANG Ye, LU Yu-ping, XU Yi-chao, et al. A novel resampling method for differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 239-247.

[8] 朱国防,陆于平.扇环型制动区差动保护算法[J].电工技术学报,2009,24(11):172-177.
ZHU Guo-fang, LU Yu-ping. A novel differential protection with sectoring restraint region[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 172-177.

[9] 王雪,王增平.基于广义基波功率的新型变压器主保护方案[J].电工技术学报,2012,27(12):191-198.
WANG Xue, WANG Zeng-ping. Novel transformer main protection scheme based on generalized fundamental power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 191-198.

收稿日期:2013-11-04; 修回日期:2013-12-12

作者简介:

郭玮(1989-),女,硕士研究生,助理工程师,研究方向为智能电网、智能仪器;

田录林(1959-),男,硕士,教授,硕士研究生导师,研究方向为智能仪器仪表;

崔葛安(1984-),男,通讯作者,硕士研究生,工程师,研究方向为智能电网、智能仪器。E-mail: cgaagc@126.com