

“十三五”普通高等教育本科规划教材

DIANLI XITONG WEIJI JIDIAN BAOHU

电力系统微机 继电保护

(第二版)

高亮 编

 中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

电力系统微机 继电保护

(第二版)

高 亮 编
张 举 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

全书共分八章，主要内容包括微机继电保护装置硬件原理、微机继电保护装置软件原理、中低压线路微机保护原理、高压输电线路微机保护原理、超高压输电线路快速纵联保护、电力变压器微机保护原理、微机母线及电容器保护和智能变电站保护控制。本书将继电保护原理与微机的实现方法相结合，具有理论联系实际的特点。同时，在编写过程中，还注意基本工作原理的介绍，由浅入深，逐步展开，力求从基本概念上阐明问题，具有可读性和适用性。

本书主要作为普通高等学校电气工程及其自动化专业、电力系统及其自动化方向及相关专业的本科教材，也可作为高职高专及函授教材和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统微机继电保护/高亮编. —2版. —北京: 中国电力出版社, 2018. 4

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5198-1771-8

I. ①电… II. ①高… III. ①微型计算机—计算机应用—电力系统—继电保护—高等学校—教材 IV. ①TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 034104 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 牛梦洁

责任校对: 闫秀英

装帧设计: 左 铭

责任印制: 吴 迪

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2007 年 11 月第一版 2018 年 4 月第二版

印 次: 2018 年 4 月北京第十六次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 16.25

字 数: 400 千字

定 价: 40.00 元



版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前 言

本书第一版自 2007 年出版以来,受到了广大读者的肯定和欢迎,重印已超过 15 次。随着新型数字通信技术、IEC61850 网络标准的发展,电力系统微机继电保护装置的硬件与软件都有了新的变化和发展,目前以微机保护为基础的数字化、智能化变电站技术正在不断推广应用。同时,根据多年来的使用情况及教学的需要,第一版中第八章微机继电保护装置及实验的内容已独立出版《微机继电保护装置实验指导》作为实验指导用书。因此,本次修订在原体系基本不变的基础上,重新编写了第八章智能变电站保护控制的内容,可作为当前电力系统微机继电保护课程的内容讲授,以适应现代电力技术发展对应用型人才培养的需要。

本书共八章,依次为微机继电保护装置硬件原理,微机继电保护装置软件原理,中低压线路微机保护原理,高压输电线路微机保护原理,超高压输电线路快速纵联保护,电力变压器微机保护原理,微机母线及电容器保护,智能变电站保护控制。本书是电力系统继电保护原理的后续教材,可作为电气工程及其自动化、电力系统及其自动化等相关专业高年级教材使用,也可作为成人函授、高职高专教育的教学用书,也适合从事电力系统继电保护运行、检修的专业人员培训使用。应用本教材应具有“继电保护原理”、“网络通信基础”等相关课程的基础。

本书在编写过程中,参阅了许多单位的技术资料和使用说明书,在此谨向他们表示衷心感谢。由于编者水平所限,书中难免存在不妥和错误之处,恳切希望广大师生和读者批评指正。

编者

2017 年 8 月于上海

第一版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

微机继电保护装置在电力系统中已获得广泛的应用，随着计算机通信技术、超大规模集成电路技术的飞速发展，微机继电保护装置在原理和技术上都有很大的提高。各生产厂家的微机保护硬件与软件都在不断地更新换代，新原理、新技术也不断地获得应用。

近年来，国内关于微机继电保护方面已经陆续出版了一些很好的书籍，并在教学、科研和生产实践中发挥了重要的作用。但既结合生产实际中广泛应用的继电保护装置，同时又以继电保护原理讲授为主的微机保护教材并不多。作者结合多年从事微机保护教学、培训与工程实践的经验，编写了这本有关微机继电保护原理及实验方面的教材，具有内容新颖、实用性强的特点。

鉴于微机保护的硬件与软件都在不断更新换代，因此本书对微机保护的硬件和软件部分只做一般原理介绍。本书主要以近年来在电力系统中获得广泛应用的微机保护装置实现原理、保护动作逻辑和试验方法为主，详细介绍了微机继电保护实现的基本原理，并结合典型的保护装置介绍微机保护实验和测试方法。本书将继电保护原理与微处理机的实现方法相结合，具有理论联系实际的特点。同时，在编写过程中，还注重基本工作原理的介绍，由浅入深，逐步展开，力求从基本概念上阐明问题，具有可读性和适用性。

全书共八章，依次为微机继电保护装置硬件原理，微机继电保护装置软件原理，中低压线路微机保护原理，高压输电线路微机保护原理，超高压输电线路快速纵联保护，电力变压器微机保护原理，微机母线及电容器保护，微机继电保护装置及实验。本教材是电力系统继电保护原理的后续教材，可作为电气工程及其自动化、电力系统及其自动化等相关专业高年级教材使用，也可作为成人函授、高职高专教育的教学用书，也适合从事电力系统运行、管理的工程技术人员培训使用。应用本教材应具有“继电保护原理”、“微机原理”、“数字信号处理”等相关课程的基础。

本书在编写过程中，参阅了许多正式出版的参考文献和相关单位的技术资料；华北电力大学张举教授审阅了全稿，并提出了宝贵的意见和建议，在此谨向他们表示由衷的感谢。

限于编者水平，书中难免存在不妥之处，恳切希望广大师生和读者批评指正。

编者

2007年7月于上海

目 录

前言	
第一版前言	
绪论	1
第一章 微机继电保护装置硬件原理	3
第一节 微机继电保护装置的基本硬件构成	3
第二节 逐次逼近原理 A/D 芯片构成的数据采集系统	9
第三节 采用压—频变换(VFC)原理的数据采集系统	16
第四节 开关量输入及输出回路	20
第五节 微机继电保护的发展趋势	23
第六节 微机继电保护装置的功能编号	25
第二章 微机继电保护装置软件原理	27
第一节 微机继电保护软件系统介绍	27
第二节 微机继电保护的算法	30
第三章 中低压线路微机继电保护原理	55
第一节 相间短路的阶段式电流保护	55
第二节 低频减载及低压减载	62
第三节 输电线路三相自动重合闸	67
第四节 备用电源自动投入	71
第四章 高压输电线路微机继电保护原理	78
第一节 接地短路的零序电流保护	78
第二节 距离保护	82
第三节 工频故障分量距离保护	106
第五章 超高压输电线路快速纵联保护	113
第一节 输电线路纵联保护概述	113
第二节 纵联保护中的方向元件原理	115
第三节 闭锁式纵联保护	121
第四节 允许式纵联保护	125
第五节 纵联电流差动保护	127
第六节 综合自动重合闸	134
第七节 超高压电网的特点及对继电保护的影响	149
第六章 电力变压器微机继电保护原理	153
第一节 变压器的故障、不正常运行及保护配置	153

第二节	变压器纵差动保护相位的校正	155
第三节	变压器差动保护比率制动特性	160
第四节	变压器纵差动保护的励磁涌流	165
第五节	变压器相间短路故障的后备保护	171
第六节	变压器的零序（接地）保护	174
第七节	电力变压器本体保护及过励磁保护	177
第七章	微机母线及电容器保护原理	179
第一节	微机母线保护	179
第二节	微机电容器保护	190
第八章	智能变电站保护控制	196
第一节	智能变电站概述	196
第二节	智能变电站过程层设备	206
第三节	IEC 61850 标准	221
第四节	层次化保护与控制	238
参考文献	254

绪 论

一、微机继电保护的发展

基于数字计算机和实时数字信号处理技术实现的电力系统继电保护被称为数字式继电保护。在电力系统继电保护的学术界和工程技术界,数字式继电保护又常被称作计算机继电保护、微型机继电保护、微机继电保护等。本书采用微机继电保护这个名称,也简称微机保护。

微机继电保护的产生与发展是从 20 世纪 60 年代开始的。1965 年开始有人倡议用计算机构成继电保护装置,20 世纪 70 年代,微机保护的研究工作主要是在理论探索阶段,着重于算法的研究、数字滤波的研究及实验室样机试验,为计算机继电保护的发展奠定了比较完整和牢固的基础。经过不断的努力,现在计算机继电保护的算法已经比较完善和成熟。在 20 世纪 70 年代中期,计算机硬件出现了重大突破,大规模集成电路技术飞速发展,微型计算机和微处理器进入了实用阶段,而且价格大幅度下降,可靠性、运算速度大幅度提高,这使得微机继电保护的研究出现了热潮。20 世纪 70 年代后期国外已经有少数微机继电保护样机在电力系统中试运行。

电力系统的发展对继电保护不断提出新的要求,而微电子技术、计算机技术与通信技术的飞速发展又为继电保护技术的发展不断地注入新的活力。20 世纪 90 年代微处理器、计算机网络的重大发展则不仅仅是在硬件上集成度更高、运算速度更快、存储容量更大,而且在通信、结构、可靠性等整体性能上发生了质的变化,保护越来越向智能化、网络化、信息化方向发展。

我国从 20 世纪 70 年代末开始了计算机继电保护的研究,高等院校和科研院所起着先导的作用。华北电力大学杨奇逊院士在微机保护的研究方面率先取得了实质性突破,之后一大批高等院校、科研院所都相继取得了进展。20 世纪 90 年代中期,国内几大继电保护生产厂家相继开发出了高压线路微机保护装置的系列产品,满足了电力系统的运行要求,为我国电力系统的安全稳定运行做出了贡献。

国内微机保护的发展大致经历了三个阶段,第一阶段至第三阶段微机保护的硬件设计重点是如何使总线系统更隐蔽,以提高抗干扰水平。第一阶段微机保护装置是单 CPU 结构,几块印刷电路板由总线相连组成一个完整的计算机系统,总线暴露在印刷电路板之外。第二阶段微机保护装置是多 CPU 结构,每块印刷电路板上以 CPU 为中心组成一个计算机系统,因此实现了“总线不出插件”。第三阶段微机保护技术创新的关键之处是利用了一种特殊单片机,将总线系统与 CPU 一起封装在一个集成电路块中,因此具有极强的抗干扰能力,即所谓的“总线不出芯片”原则。当今,数字信号处理器(DSP)在微机保护硬件系统中得到广泛应用,DSP 先进的内核结构、高速运算能力及与实时信号处理相适应的寻址方式等许多优良特性,使许多由于 CPU 性能等因素而无法实现的继电保护算法可以通过 DSP 来轻松完成。以 DSP 为核心的微机保护装置已经是当今的主流产品。此外,在微机保护硬件发展的同时,各种保护原理方案和各种算法的微机线路保护和微机主设备保护相继问世,为电力系统提供了一批性能优良、功能齐全、工作可靠的微机继电保护装置,同时积累了丰富的运行经验。随着微机保护装置的深

入研究,在微机保护软件、算法等方面也取得了很多理论成果。

根据国家电力调度通信中心统计的“九五”末全国 220kV 及以上系统微机线路保护、微机变压器保护,100MW 及以上微机型发电机保护的运行情况,微机线路保护正确动作率已经高达 99% 以上,远远高于常规继电保护装置。110kV 以下微机继电保护普及率更高,我国继电保护技术已进入了微机保护的时期,并带动发电厂与变电站自动化的发展。

二、微机继电保护的特点

微机继电保护区别于传统模拟式保护的本质特征在于它是建立在数字技术基础上的。在微机保护装置中,各种类型的输入信号(通常包括模拟量、开关量、脉冲量等类型的信号)首先将被转化为数字信号,然后通过对这些数字信号的处理来实现继电保护功能。与常规的保护装置相比较,微机继电保护具有以下显著特点:

(1) 由于采用了微机技术和软件编程方法,大大提高了继电保护的性能指标。

1) 利用计算机强大的计算功能实现常规继电保护难以实现的复杂动作特性和功能。

2) 由于采用全数字处理技术,动作特性和保护定值就不需要定期检验。

3) 由于采用数字滤波技术及优化的计算方法,使测量精度大大提高。

4) 利用计算机强大的记忆功能,可方便地实现故障分量保护等。

5) 可引进自动控制、新的数学理论和技术改善保护性能,如自适应算法、状态预测、模糊控制、人工智能及小波算法等。

6) 易获得多种附加功能,如负载检测、事件记录、故障录波、测距等。

(2) 由于很多功能都集成到一个微机保护装置中,使保护装置的硬件设计简洁。

(3) 由于集成了完善的自检功能,减少了维护、运行的工作量,带来较高的可用性。

(4) 由软件实现的动作特性和保护逻辑功能不受温度变化、电源波动、使用年限的影响。

(5) 硬件较通用,装置体积较小,盘位数量较少,装置功耗低。

(6) 更加人性化的人机交互,就地的键盘操作及显示。

(7) 简洁可靠地获取信息,通过串行口同 PC 通信就地或远方控制。

(8) 采用标准的通信协议(开放的通信体系),使装置能够同上位机系统通信。

微机保护装置不仅能够实现其他类型保护装置难以实现的复杂保护原理、提高继电保护的时期,而且能提供诸如简化调试及整定、自身工作状态监视、事故记录及分析等高级辅助功能,还可以完成电力系统自动化要求的各种智能化测量、控制、通信及管理任务,同时也具有优良的性价比。其普遍特点可归纳为维护调试方便,具有自动检测功能;可靠性高,具有极强的综合分析和判断能力,可实现常规模拟保护很难做到的自动纠错,即自动识别和排除干扰,防止由于干扰而造成的误动作,并具有自诊断能力,可自动检测出保护装置本身硬件系统的异常部分,配合多重化配置可有效地防止拒动;保护装置自身的经济性;可扩展性强,易于获得附加功能;保护装置本身的灵活性大,可灵活地适应于电力系统运行方式的变化;保护装置的性能得到很好的改善,具有较高的运算和大容量的存储能力等。这些特点在很大程度上反映了保护软件设计的重要性和灵活性特征。一方面,新型保护软件的设计强调保护系统多重原理的实现以及保护数据处理流程的透明性(即在一定条件下,配备相应的保护测试软件,继电保护对于用户是开放的)。另一方面,保护将具有多功能特性、增强的网络功能及用户界面友好等特点。

第一章 微机继电保护装置硬件原理

第一节 微机继电保护装置的基本硬件构成

一、微机继电保护装置硬件系统构成

微机继电保护装置硬件主要包括数据采集部分(包括电流、电压等模拟量输入变换、低通滤波回路、模数转换等),数据处理、逻辑判断及保护算法的数字核心部件(包括 CPU、存储器、实时时钟、WATCHDOG 等),开关量输入/输出通道以及人机接口(键盘、液晶显示器)。从功能上可分为 6 个组成部分:数据采集系统(也称模拟量输入系统),数字处理系统(CPU 主系统),开关量输入/输出回路,人机接口,通信接口,电源回路。典型微机继电保护装置的硬件系统结构如图 1-1 所示。

1. 数据采集系统

微机继电保护数据采集系统包括隔离与电压形成、低通滤波回路、多路开关及模/数变换,其主要功能是采集由被保护设备的电流电压互感器输入的模拟信号,并将此信号经过适当的预处理,然后转换为所需的数字量。

根据模数转换的原理不同,微机保护装置中模拟量输入回路有两种方式,一是基于逐次逼近型 A/D 转换的方式,二是利用电压/频率变换(VFC)原理进行 A/D 转换的方式。前者包括电压形成回路、模拟低通滤波器(ALF)、采样保持回路(S/H)、多路转换开关(MPX)及模数转换回路(A/D)等功能块;后者主要包括电压形成、VFC 回路、计数器等环节,如图 1-2 所示。

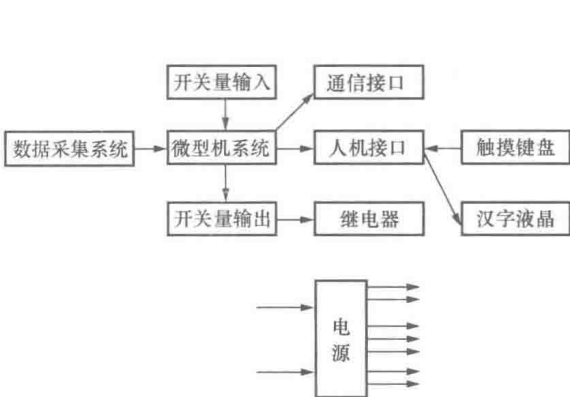


图 1-1 典型微机继电保护装置硬件系统结构

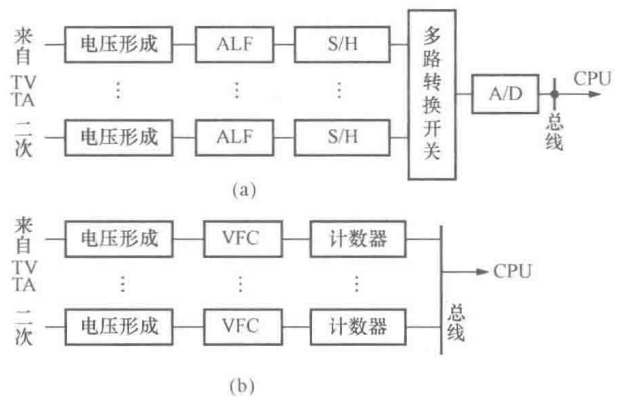


图 1-2 模拟量输入回路框图

(a) 逐次逼近 A/D 转换方式; (b) VFC 原理的 A/D 转换方式

2. 数字处理系统 (CPU 主系统)

微机继电保护装置是以中央处理器 CPU 为核心,根据数据采集系统采集到的电力系统的实时数据,按照给定算法来检测电力系统是否发生故障以及故障性质、范围等,并由此做出是否需要跳闸或报警等判断的一种自动装置。微机保护原理由计算程序来实现,CPU 是

计算机系统自动工作的指挥中枢，计算机程序的运行依赖于 CPU 来实现。因此，CPU 的性能好坏在很大程度上决定了计算机系统性能的优劣。

(1) 微处理器 CPU。采用数据总线为 8、16、32 位等的单片机、工控机以及 DSP 系统。单片机通过大规模集成电路技术将 CPU、ROM、RAM 和 I/O 接口电路封装在一块芯片中，因此具有可靠性高、接口设计简易、运行速度快、功耗低、性能价格比高的优点。使用单片机的微机保护具有较强的针对性，系统结构紧凑，整体性能和可靠性高，但通用性、可扩展性相对较差。DSP 的突出特点是计算能力强、精度高、总线速度快、吞吐量大，尤其是采用专用硬件实现定点和浮点加乘（矩阵）运算，速度非常快。将数字信号处理器应用于微机继电保护，极大地缩短了数字滤波、滤波和傅里叶变换算法的计算时间，不但可以完成数据采集、信号处理的功能，还可以完成以往主要由 CPU 完成的运算功能，甚至完成独立的继电保护功能。

(2) 存储器。它包括电擦除可编程只读存储器 EEPROM、紫外线擦除可编程只读存储器 EPROM、非易失性随机存储器 NVRAM、静态存储器 SRAM、闪速存储器 FLASH 等。其中，EEPROM 存放定值，EPROM、FLASH 存放程序，NVRAM 存放故障报文、采样数据，计算过程中的中间结果、各种报告存放于 SRAM 中。

3. 开关量输入、输出

开关量输入输出回路一般采用固态继电器、光电隔离器、PHTOMOS 继电器等器件组成，以完成各种保护的出口跳闸、信号报警及外部接点输入等工作，实现与 5V 系统接口。一般而言，柜内开关量输入信号采用 24V 电源，柜间开关量输入信号采用 220V 或 110V 电源。计算机系统输出回路经光隔器件转换为 24V 信号，驱动继电器实现操作。国外也有通过 5V 电源驱动继电器的。

4. 人机接口

人机交互系统包括显示器、键盘、各种面板开关、实时时钟、打印电路等，其主要功能用于人机对话，如调试、定值调整及对机器工作状态的干预等。现在一般采用液晶显示器和流行的 6 键操作键。人机交互面板一般应包括：

- (1) 可以由用户自定义画面的大液晶屏人机界面。
- (2) 可以由用户自定义的报警信号显示灯 LED。
- (3) 可以由用户自定义用途的 F 功能键。
- (4) 光隔离的串行接口。
- (5) 就地、远方选择按钮。
- (6) 就地操作键。

5. 通信接口

微机继电保护装置的通信接口包括维护口、监控系统接口、录波系统接口等。一般可采用 RS485 总线、Profibus 网、CAN 网、LON 网、以太网及双网光纤通信模式，以满足各种变电站对通信的要求，满足各种通信规约：IEC61870-5-103、PROFIBUS-FMS/DP、MODBUS RTU、DNP 3.0、IEC61850 以太网等。

微机继电保护对通信系统的要求是快速、支持点对点平等通信、突发方式的信息传输、物理结构采用星形、环形、总线形、支持多主机等。

6. 电源

可以采用开关稳压电源或 DC/DC 电源模块，提供数字系统 5、24、±15V 电源，也有

的系统采用多组 24V 电源。+5V 电源用于计算机系统主控电源；±15V 电源用于数据采集系统、通信系统；+24V 电源用于开关量输入、输出、继电器逻辑电源。

二、微机继电保护装置的几种典型结构

在实际应用中，微机继电保护装置分为单 CPU 和多 CPU 的结构方式。在中低压保护中多采用单 CPU 结构方式，而高压及超高压复杂保护装置广泛采用多 CPU 的结构方式。

1. 单 CPU 微机继电保护装置的结构

单 CPU 的微机继电保护装置是指整套微机继电保护共用一个单片微机，无论是数据采集处理，还是开关量采集、出口信号及通信等均由一个单片微机控制。但目前人机接口一般另外采用独立的 CPU。模拟量输入回路、单片微机系统（包括 CPU、EPROM、RAM、EEPROM 等）、开关量输入输出各部分均通过总线（BUS）联系在一起，由 CPU 通过 BUS 实现信息数据传输和控制。

单 CPU 结构的微机继电保护虽然结构简单，但其容错能力不高，一旦 CPU 或其中某个插件工作不正常就影响到整套保护装置。由于后备保护与主保护共用同一个 CPU，因此主保护不能正常工作时往往也影响到后备保护，其可靠性必然下降。

2. 多 CPU 微机继电保护装置的结构

为了提高微机继电保护的可靠性，高压及超高压变电站微机继电保护都已采用多 CPU 的结构方式。所谓多 CPU 的结构方式就是在一套微机保护装置中，按功能配置多个 CPU 模块，分别完成不同保护原理的多重主保护和后备保护及人机接口等功能。显然这种多 CPU 结构方式的保护装置中，如有任何一个模块损坏均不影响其他模块保护的正常工作，有效地提高了保护装置的容错水平，防止了一般性硬件损坏而闭锁整套保护。

多 CPU 结构的保护装置还提供了采用三取二保护启动方式的可能性，大大提高了保护装置启动的可靠性。多 CPU 结构的微机继电保护装置硬件框图如图 1-3 所示，这是我国 11 型微机保护装置的典型结构框图。

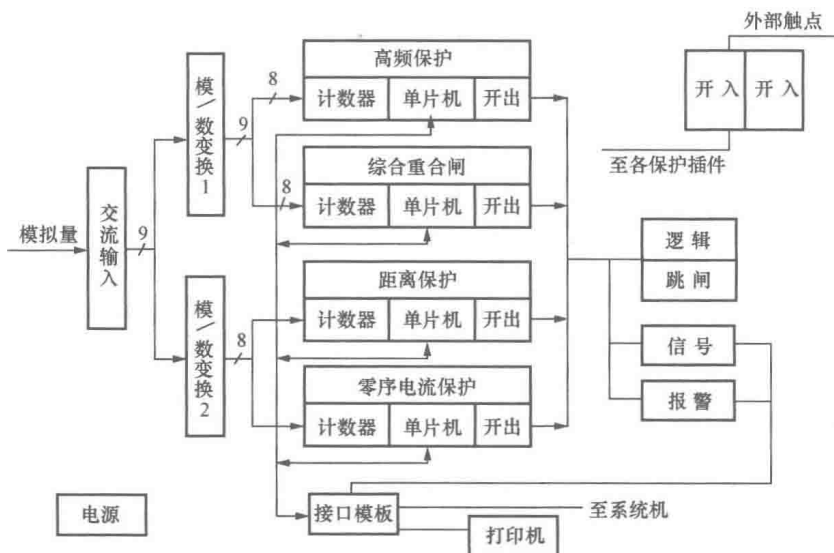


图 1-3 多 CPU 结构的微机继电保护装置硬件框图

该保护装置由 4 个硬件完全相同的保护 CPU 模块构成，分别完成高频保护、距离保护、零

序电流保护以及综合重合闸等功能。另外还配置了一块带 CPU 的接口模板 (MONITOR), 完成对保护 (CPU) 模块巡检、人机对话和与监控系统通信联络等功能。由图 1-3 可见, 整套保护装置仍然由模拟量输入、单片微机系统、人机接口及开入开出回路、电源等组成。模拟量输入回路包括交流输入、模数变换 1、模数变换 2; 单片微机系统即保护 CPU 模块由高频、距离、零序电流、综合重合闸等保护组成; 人机接口模块由带 CPU 的接口模板和打印机等构成; 开关量输入、开关量输出通道包括逻辑、跳闸、信号、报警电路。此外还有逆变电源部分。

单片微机保护部分由 4 个独立的保护 CPU 模块组成, 其中高频保护和综合重合闸共用一块模数变换插件, 距离保护和零序电流保护共用另一块模数变换插件。这样的接线方式增加了保护的冗余量, 从而进一步提高了保护的可靠性, 但相对增加了保护的复杂性。

多 CPU 结构的保护装置中, 每个保护 CPU 插件都可以独立工作。各保护之间不存在依赖关系。例如高频保护是由高频距离和高频零序方向两个主保护组成, 其中距离元件和零序方向元件都是独立的, 不依赖于距离保护 CPU 和零序保护 CPU 插件中的距离元件及零序方向元件。保护 CPU 的完整性和独立性又大大提高了保护可靠性。

多 CPU 结构的保护装置实质上是主从分布式的微机工控系统, 人机接口部分是主机, 完成集中管理及人机对话的任务。而单片机保护部分是 4 个从机, 它们分别独立完成各种保护任务。4 种保护综合完成一条高压输电线路的全部保护, 即输电线路各类相间和接地故障的主保护和后备保护, 并能完成综合重合闸功能。

3. 采用 DSP 的微机继电保护装置的结构

数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 是进行数字信号处理的专用芯片, 它是微电子学、数字信号处理技术、计算技术综合的新器件。由于它特殊的设计, 可以把数字信号处理中的一些理论和算法予以实时实现, 并逐步进入控制器领域, 因而在计算机应用领域中得到广泛的使用。

大多数 DSP 采用了哈佛结构, 将存储器空间划分成两个, 分别存储程序和数据。它们有两组总线连接到处理器核, 允许同时对它们进行访问。这种安排将处理器和存储器的带宽加倍, 更重要的是同时为处理器核提供数据与指令。在这种布局下, DSP 得以实现单周期的 MAC 指令。DSP 速度的最佳化是通过硬件功能予以实现的, 每秒能够执行 10M 以上的指令; 同时, 采用循环寻址方式, 实现了零开销的循环, 大大增进了如卷积、相关、矩阵运算、FIR 等算法的实现速度。另外, DSP 指令集能够使处理器在每个指令周期内完成多个操作, 从而提高每个指令周期的计算效率。

由于 DSP 技术有着强大、快速的数据处理能力和定点、浮点的运算功能, 因此将 DSP 技术融合到微机继电保护的硬件设计中, 将极大地提高微机继电保护对原始采样数据的预处理和计算的

能力, 提高运算速度, 更容易做到实时测量和计算。例如, 在保护中可以由 DSP 在每个采样间隔内完成全部的相间和接地阻抗计算, 完成电压、电流测量值的计算, 并进行相应的滤波处理。

采用 DSP 的微机线路保护装置硬件框图如图 1-4 所示。采用单片机加 DSP (数字信号处理器) 的结构, 将主、后备

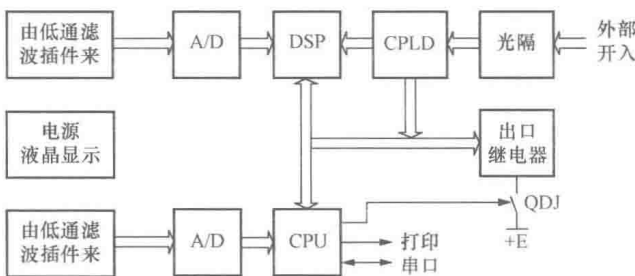


图 1-4 采用 DSP 的微机线路保护装置硬件框图

保护集成在一块 CPU 板上, DSP 和单片机各自独立采样, 由 DSP 完成所有的数字滤波、保护算法和出口逻辑, 由 CPU 完成装置的总启动和人机界面、后台通信及打印功能。图 1-4 中, QDJ 为保护装置的启动继电器。人机接口显示面板单设一个单片机 (图中未画出), 专门负责汉字液晶显示、键盘处理, 显示面板通过串口与主 CPU 交换数据。显示面板还提供一个与 PC 通信的接口。

整个保护装置设计由多个插件模块组成, 包括直流插件 (DC)、交流插件 (AC)、低通滤波插件 (LFP)、CPU 插件 (CPU)、通信插件 (COM)、24V 光耦插件 (OPT1)、高压光耦插件 (OPT2)、信号插件 (SIG)、跳闸出口插件 (OUT1、OUT2) 和显示面板 (LCD)。

其中, CPU 插件是装置核心部分。装置采样率为每周波 24 点, 在每个采样间隔内对所有保护算法和逻辑运算进行实时计算, 使得装置具有很高的可靠性及安全性。

启动 CPU 内设总启动元件, 启动后开放出口继电器的正电源, 同时完成事件记录及打印、保护部分的后台通信及与面板通信; 另外还具有完整的故障录波功能, 录波格式与 COMTRADE 格式兼容, 录波数据可单独从串口输出或打印输出。

交流输入变换插件 (AC) 用于三相电流 (I_A 、 I_B 、 I_C)、零序电流 (I_0)、三相电压 (U_A 、 U_B 、 U_C) 及线路抽取电压 (U_x) 的输入。通信插件的功能是完成与监控计算机或 RTU 的通信连接, 有 RS485、光纤和以太网接口可供选择。

4. 网络型微机继电保护装置的结构

网络化的微机继电保护装置典型硬件框图如图 1-5 所示, 与保护功能和逻辑有关的标准模块插件仅有三种, 即 CPU 插件、开入 (DI) 插件和开出 (DO) 插件。在图 1-5 中 CPU 插件包含了微机主系统和大部分的数据采集系统电路; 开入 (DI)、开出 (DO) 插件的设计, 使 CPU 构成了智能化 I/O 插件; 通信网络采用 CAN 总线方式, 利用 CAN 总线的可靠性和非破坏性总线仲裁等技术, 合理安排传输信号的优先级, 完全可以保证硬件电路和跳闸命令、开入信号传输的可靠性、及时性。另外, 已有许多 CPU 中都集成了 CAN 总线的接口电路, 使得网络化的成本较低。

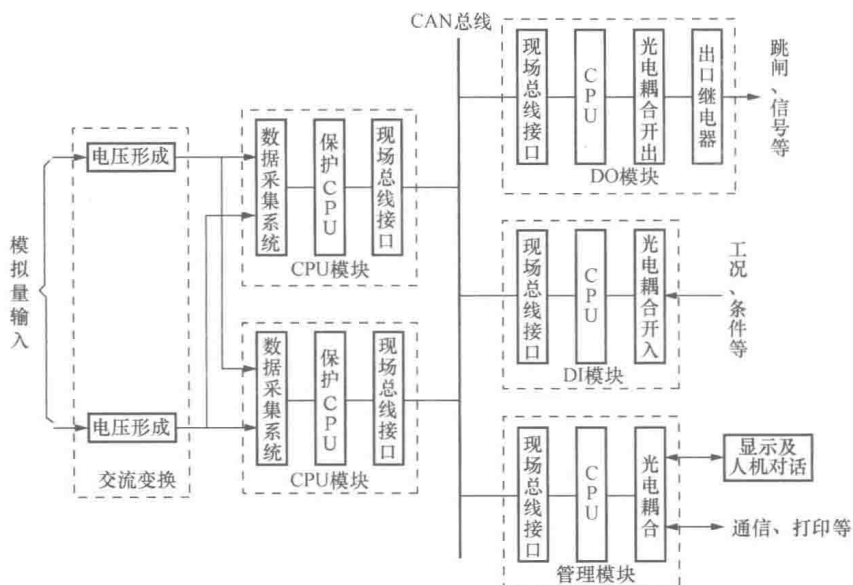


图 1-5 网络化的微机继电保护装置典型硬件框图

由于将网络作为各模块间的连接纽带，所以，每个模块仅相当于网络中的一个节点，不仅可以很方便地实现模块的增加或减少，满足各种各样的功能配置要求，构成积木式结构，而且每个模块可以分别升级。无论模块升级与否，对于网络来说，模块仍然为网络的一个节点，唯一要遵循的是要求采用同一个规约。网络化后，用 CAN 网络代替一对一的物理导线连接，各插件之间的连接只有两条网络导线和相应的电源线，极大地简化了 CPU 与开入、开出之间的连线。当然，如果需要的话，也可以采用双 CAN 网的方式。

现场总线接口部分，对于编程来说，操作过程相当于对串行接口的操作，至于传输协议、仲裁、检测、重发等功能和机制均集成在接口电路内。其余的电路构成、工作原理等均与单 CPU 是一样的，如 DO 模块是由 CPU、光电耦合开出、出口继电器三部分组成的电路。但为了提高可靠性，DO 模块中的启动继电器应由保护或启动 CPU 模块来控制。网络化硬件结构的优点有以下几个方面：

(1) 模块之间的连接简单、方便。仅通过一对双绞线，就可完成一条现场总线的连接，既可以传递信息，又可以发送控制命令，还避免了插件端子数量的限制。

(2) 可靠性高、抗干扰能力强。CAN 总线的特点是高可靠性和高抗干扰能力，同时，CAN 总线设置于装置内部，又极大地减少了受干扰的次数和程度。

(3) 扩展性好。由于每个模块接入网络时，仅相当于接入一个节点，所以方便了各种模块的组合，实现积木式的结构，即插即用，满足不同硬件配置的要求。如一个 DO 模块不够用时，可以在不改变装置内部电路和结构的情况下加入另一个 DO 模块。

(4) 升级方便。如微型机模块升级，只改变了节点内部的电路和结构，对 CAN 总线而言，升级后的微型机模块仍然是总线上的一个节点，因此，开入、开出模块可以保持不变，保护对外的接口、连接电缆基本不用更改。

(5) 便于实现出口逻辑的灵活配置。在变压器、发电机保护中，根据不同容量、不同主接线等情况，保护的一个动作逻辑有可能组合成多个出口对象，因此，出口逻辑的灵活配置完全满足了这种要求。由于每个模块均设置了微型机或微控制器，所以有两种方式可以实现出口逻辑的灵活配置：①在 DO 模块中实现出口逻辑的灵活配置；②在保护微型机模块中实现出口逻辑的灵活配置。从出口功能来看，后一种方式中的 DO 模块仅仅执行命令，更适合于 DO 模块的通用化，适应不同保护的需要。

(6) 降低了对微型机或微控制器并行口的数量要求。对于非网络化硬件结构，因为出口继电器由并行口控制，所以不同出口对象的继电器数量完全取决于并行口的数量。

三、现代数字继电保护装置的基本特征

(1) 采用 32 位 CPU 提高保护系统的性能。

(2) 采用 14~16 位模数转换器 (A/D) 提高数据采集系统的精度。

(3) 采用高级语言编程，实现软件标准化、模块化、可编程，并且尽可能地采用实时多任务操作系统。

(4) 采用液晶或场效应型平面显示器件实现人机接口。

(5) 采用 LAN 及 GPS 构成强大、可靠的通信网络。通信网络满足以下要求：

1) 良好的电磁兼容。

2) 良好的系统扩展。

3) 高速、大容量数据传输。

- 4) 采样数据的同步。
- 5) 增强的系统自检功能。
- 6) 丰富的系统分析工具。
- 7) 系统具有较高的可靠性及较好的升级、扩展能力。

基于现场总线的多 CPU 分布式保护系统结构代表了我国微机继电保护装置的发展方向,也是现今比较流行的硬件平台。CPU 采用了 32 位带浮点运算的 DSP, 保证保护系统更可靠。其中各 CPU 分别为独立的单片机系统, 完成各个保护功能及录波。各 CPU 采用单片机, 如 M77、Intel80196 等。多 CPU 系统可共享数据采集系统数据, 简单的通信网络构成了性能价格比优良且可靠的体系结构, 系统针对性较强、结构紧凑、整体性能和可靠性较高。同时, 由于采用 16 位高性能的单片机, 总线不出芯片, 构成的独立子系统抗干扰能力强。在我国, 90% 以上的微机继电保护装置都沿用这种模式。但这种模式的硬件系统在通用性、可扩展性以及系统升级等方面比较困难。此外, 单片机的硬件资源十分有限, 一些高级应用程序难以实施。

微机继电保护装置使用的处理器、数据采集系统、数字通信方式对其工作性能影响很大, 因此, 在保证硬件结构相对稳定的情况下, 应尽可能地采用新型高性能硬件芯片。

微机继电保护硬件系统设计要考虑以下因素:

- (1) 必须实现高速数据采集, 以便详细地记录故障突变过程。
- (2) 必须解决由于高速数据采集所带来的对数据的实时处理及存储。
- (3) 必须确保保护系统数据处理各环节的高可靠性, 并考虑对系统数据处理同步性的要求。
- (4) 具备良好的人机接口。
- (5) 具有增强的系统自检功能和灵活多样的分析与检测手段。
- (6) 保护系统在软硬件方面应有较高的可靠性和升级、扩展能力等。只有硬件平台资源丰富, 才能实现各种软件功能。

此外, 在硬件设计时, 以下几个方面要着重考虑:

- (1) 继电保护装置最重要的指标是鲁棒性好, 简单而可靠。
- (2) 采用新的保护原理而必须大幅度提高对硬件复杂性的要求时, 要很好地权衡得失。
- (3) 该快必须快, 如果允许慢一些时, 放慢一些大有好处。
- (4) 灵敏度必须保证, 太灵敏大可不必。
- (5) 元器件可靠性的提高及完善的自检引起的对可靠性设计观念的变化。

第二节 逐次逼近原理 A/D 芯片构成的数据采集系统

逐次逼近原理的 A/D 转换器在许多保护特别是元件保护中得到了广泛的应用。在要求真实反映输入信号中的高频分量的场合下, 逐次逼近式 A/D 应该是首选。当今各种逐次逼近式的 A/D 器件不断推出, 且价格适中, 如带有同步采样器, 具有并行/串行输出接口的快速 14 位、16 位 A/D 器件, 它们可以满足各种保护装置的要求, 是今后的发展趋势。

电力系统中的电量信号都是在时间和数值上连续变化的信号, 因此, 都属于模拟信号。而微机继电保护装置是对数字信号进行处理, 所以必须把模拟信号转变为计算机能够处理的

数字信号。

数字信号是在时间上离散、在数值上量化的一种信号，为了把模拟信号变换为数字信号，首先要对模拟信号进行预处理。这包括信号幅度的变换、利用模拟低通滤波器滤除信号中频率大于采样频率一半的信号、采样/保持等环节。经过预处理的信号才可以输入到 A/D

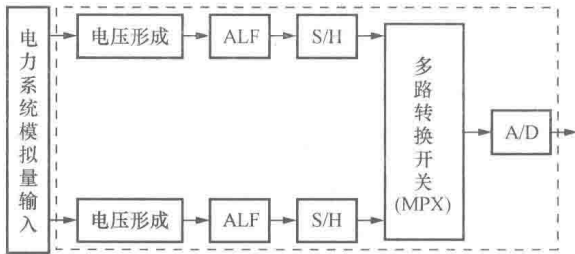


图 1-6 逐次逼近原理 A/D 数据采集系统构成框图

转换芯片，进行模拟信号到数字信号的变换。

对于一个采用逐次逼近原理 A/D 芯片构成的典型数据采集系统，其框图如图 1-6 所示。它包括电压形成回路、模拟滤波器 ALF、采样保持器 S/H、多路开关 MPX 及 A/D 转换五部分，现分别介绍其基本工作原理及作用。

一、电压形成回路

同传统保护一样，微机继电保护的输入信号来自被保护线路或设备的电流互感器、电压互感器的二次侧。这些互感器的二次电流或电压一般数值较大，变化范围也较大，不适应模数转换器的工作要求，故需对它进行变换。一般采用各种中间变换器来实现这种变换，如电流变换器 (TA_m)、电压变换器 (TV_m) 和电抗变换器 (TX_m) 等，其实现方法如图 1-7 所示。将电流互感器 (TA)、电压互感器 (TV) 的二次电流、电压输出转化为计算机能够识别的弱电信号，一般输出信号为 ±5V 或 ±10V，具体决定于 A/D 芯片的型号，由此可以决定上述各种中间变换器的变比。对于电流的变换，一般采用电流变换器，并在其二次侧并联电阻以取得所需电压，改变电阻值可以改变输出范围的大小；也可以采用电抗变换器，两者各有优缺点。电流变换器最大的优点是只要铁芯不饱和，其二次电流及并联电阻上电压的波形基本保持与一次电流波形相同且同相，即它的变换可使原信息不失真。但是，电流变换器在非周期分量的作用下容易饱和，线性度较差，动态范围小。电抗变换器的优点是铁芯带气隙而不易饱和，线性范围大，同时有移相作用；其缺点是抑制直流分量，放大高频分量。因此当一次流过非正弦电流时，其二次电压波形将发生畸变，其抑制非周期分量作用在某些应用场合也可能成为优点。

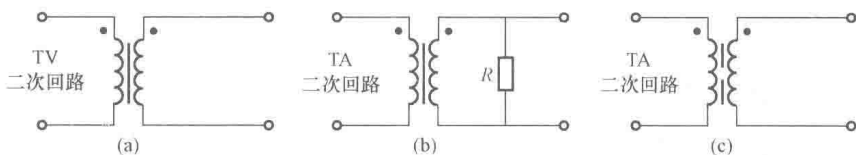


图 1-7 输入变换及电压形成回路的原理图

(a) 电压输入变换；(b) 电流变换器形成电压；(c) 电抗变换器形成电压

电压形成回路除了上面所述的电量变换作用外，还起着屏蔽和隔离的作用，使得微机电路在电气上与强电部分隔离，从而阻止来自强电系统的干扰。在设计辅助变换器时可在一次、二次绕组之间加入屏蔽层并可靠接地。

图 1-8 所示为典型的微机继电保护电压形成回路接线，用于三相电流 (I_A 、 I_B 、 I_C)、零序电流 (I_0)、三相电压 (U_A 、 U_B 、 U_C) 及线路电压 (U_x) 的输入。需要说明的是，虽然保护