



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Computer Relaying for Power Systems

电力系统 微机保护

刘鑫蕊 杨珺 梁雪 编著
孙秋野 主审



39

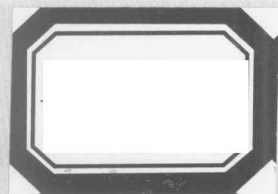


人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning



Computer Relaying for Power Systems

电力系统 微机保护

刘鑫蕊 杨珺 梁雪 编著

孙秋野 主审

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

电力系统微机保护 / 刘鑫蕊, 杨珺, 梁雪编著. —
北京: 人民邮电出版社, 2013.10
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
ISBN 978-7-115-32038-4

I. ①电… II. ①刘… ②杨… ③梁… III. ①计算机
应用—电力系统—继电保护装置—高等学校—教材 IV.
①TM774-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第186158号

内 容 提 要

本书对电力系统微机保护的基本概念、基础知识、原理与特点进行了系统的介绍,并辅之以电力系统的相关内容,使其更加完善。

全书共分为11章,主要内容包括电力系统微机保护硬件原理、电力系统微机保护软件原理、电力系统故障分析基础知识、电力系统横向短路故障分析、电力系统纵向短路故障分析、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、母线和电容保护、智能电网的微机保护原理。此外,为了便于读者对各章节内容的理解和应用,在每章前面附有本章重点,后面附有习题。

本书适合高等学校电气工程及自动化专业、电力系统及自动化专业以及相关专业的师生使用,也可以作为成人高等教育、高职高专教育相关专业的师生使用,还可以作为电力工程技术人员的参考用书。

◆ 编 著 刘鑫蕊 杨珺 梁雪

主 审 孙秋野

责任编辑 李海涛

责任印制 彭志环 杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号

邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 15

2013年10月第1版

字数: 374千字

2013年10月河北第1次印刷

定价: 35.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

电力系统继电保护是指继电保护技术和由各种继电保护装置组成的继电保护系统。随着大电网发展的需要,超高压电网和大容量技术的发展使电网结构日益复杂,确保电网安全稳定运行成为电力行业重中之重的问題,这对电力系统继电保护技术和管理水平提出了更高的要求。

近年来,计算机技术、通信技术、超大规模集成电路技术的飞速发展,成为了电力系统继电保护新技术不断产生的动力源泉。继电保护装置从机电式、电磁式、整流式、晶体管、集成电路发展到现在的微机型继电保护,这是科学进步与技术发展的必然产物。微机继电保护指的是以数字式计算机(包括微型机)和数字信号处理技术为基础而构成的继电保护。微机继电保护(以下简称微机保护)以它独特的优势在电力系统中被广泛应用,继电保护技术向微机化发展已成为不可逆转的趋势。目前电力系统对微机保护的要求也在不断提高,除了保护的基本功能外,还应具有大容量故障信息和数据的长期存放空间,快速的数据处理功能,强大的通信能力,与其他保护、控制装置和调度联网以共享全系统数据、信息和网络资源的能力,以及高级语言编程等功能。

随着微机保护新技术、新原理、新装置不断出现,微机保护新人员不断补充,为了适应电力系统微机保护技术的发展需要,使在校电力系统自动化专业以及相关专业的学生全面了解和掌握电力系统微机保护技术,也为了不断提高微机保护人员素质和微机保护技术及装置的运行管理水平,培养一支高素质的管理队伍和技术队伍,迫切需要一本系统阐述电力系统微机保护原理与实用技术的教材。

本书对微机保护的基本概念、原理和特点进行了系统介绍,并结合了电力系统的相关内容,力求将知识点介绍得系统、清晰和完善。全书共分为11章,第1章介绍了电力系统微机保护硬件原理;第2章介绍了电力系统微机保护软件原理;第3章介绍了电力系统故障分析基础知识;第4章介绍了电力系统横向短路故障分析;第5章介绍了电力系统纵向短路故障分析;第6章介绍了中低压线路微机保护原理;第7章介绍了高压输电线路微机保护原理。第8章介绍了超高压输电线路快速纵联保护;第9章介绍了电力变压器微机保护原理;第10章介绍了母线和电容保护;第11章介绍了智能电网的微机保护原理。此外,为了便于读者对各章节内容的理解和应用,在每章前后分别附有本章重点与习题。本书内容力求由浅入深,通俗易懂,层次分明,理论联系实际,重点突出,逻辑性强,易于讲授,便于自学。

本书由刘鑫蕊、杨珺和梁雪共同编写。其中，刘鑫蕊编写了第1~4章，杨珺编写了第5~8章，梁雪编写了第9~11章。孙秋野副教授在本书编写过程中进行了悉心指导并担任全书主审，同时还得到了冯健教授、王占山教授、王迎春副教授的大力支持，同时张婧、余云霞、王春玲、陈雪、周建国、张瑶瑶、侯硕楠、王馨漪等也参加了本书素材整理和校对的工作，在此对他们表示最诚挚的谢意！

本书的出版得到了国家自然科学基金（项目编号：61203026、61104099）和中央高校基本科研业务费（项目编号：N110304004、N110404031）的资助，在此表示感谢。

由于编著水平有限，书中难免存在一些不足或者错误之处，恳望广大读者批评指正。

编 者

2013年5月

目 录

第 1 章 电力系统微机保护硬件原理	1
1.1 微机保护装置的硬件构成	1
1.1.1 微机保护装置的硬件系统构成	1
1.1.2 微机保护装置的几种典型结构	3
1.1.3 微机继电保护硬件系统的设计	6
1.2 逐次逼近原理型 A/D 芯片构成的数据采集系统	7
1.2.1 电压形成回路	7
1.2.2 模拟滤波单元	8
1.2.3 采样保持电路	8
1.2.4 多路转换开关	9
1.2.5 模/数转换器	9
1.3 采用压—频变换原理的数据采集系统	11
1.4 开关量输入及输出回路	13
1.4.1 光电耦合器	13
1.4.2 开关量输入回路	14
1.4.3 开关量输出回路	15
1.5 微机继电保护发展趋势	15
1.5.1 计算机化	16
1.5.2 网络化	17
1.5.3 保护、控制、测量、数据通信一体化	18
1.5.4 智能化	18
1.6 微机继电保护装置的功能编号	18
小结	20
习题	20
第 2 章 电力系统微机保护软件原理	21
2.1 微机保护装置软件介绍	21
2.1.1 微机继电保护的程序结构	21
2.1.2 系统管理程序	22
2.1.3 人机交互管理程序	23
2.1.4 微机系统软件系统配置	24

2.2 微机保护的算法	25
2.2.1 概述	25
2.2.2 正弦函数模型的算法	26
2.2.3 解微分方程算法	31
2.2.4 傅立叶算法	32
2.2.5 最小二乘法	34
小结	36
习题	36
第 3 章 电力系统故障分析基础知识	37
3.1 电力系统概述	37
3.1.1 电力系统的基本概念	37
3.1.2 电力系统的发展概况	37
3.1.3 电力系统的基本参量	38
3.1.4 电力系统运行的特点和要求	38
3.2 标么值	39
3.2.1 标么值的定义	40
3.2.2 基准值的选取	40
3.2.3 不同基准值的标么值间的换算	40
3.2.4 变压器联系的多级电网网络中标么值的计算	41
3.2.5 标么制的特点	42
3.3 网络化简	43
3.4 对称分量化应用	44
3.5 电力系统各元件序阻抗及其相应的等值电路	45
3.5.1 同步发电机	45
3.5.2 变压器	46
3.5.3 电抗器	52
3.5.4 异步电动机	53
3.5.5 综合负荷	54
3.5.6 输电线路	54
小结	54
习题	55

第4章 电力系统横向短路故障分析	56	6.1.1 无时限电流速断保护 (I段保护)	78
4.1 三相短路故障分析	56	6.1.2 带时限电流速断保护 (II段保护)	80
4.2 两相短路故障分析	57	6.1.3 定时限过电流保护 (III段保护)	81
4.3 单相接地短路故障分析	58	6.1.4 反时限过电流保护	82
4.4 两相接地短路故障分析	59	6.1.5 低压闭锁的方向电流保护	84
4.5 横向短路故障综合特点	60	6.2 低频减载及低压减载	86
4.6 发电机匝间短路故障分析	61	6.2.1 低频减载	87
4.7 变压器匝间短路故障分析	62	6.2.2 自动低频减载逻辑	88
4.7.1 瓦斯保护原理	62	6.2.3 自动低压减载逻辑	89
4.7.2 纵联差动保护	63	6.3 输电线路三相自动重合闸	90
4.8 三绕组自耦变压器公共绕组零序 电流和接地中性点电流	64	6.3.1 微机保护中的自动重合闸 装置	90
小结	65	6.3.2 单侧电源线路的三相一次 自动重合闸	91
习题	65	6.3.3 双电源线路的三相自动重 合闸	92
第5章 电力系统纵向短路故障分析	66	6.3.4 重合闸与继电保护的配合	93
5.1 纵向不对称故障分析方法	66	6.3.5 重合闸和加速保护逻辑	94
5.2 单相断线分析	67	6.4 备用电源自动投入	95
5.3 两相断线分析	68	6.4.1 备用电源自投装置的基本 要求	96
5.4 单相、两相断线时的电气特点	69	6.4.2 备用电源自动投入方式	96
5.4.1 单相、两相断线时的序电流 比较	69	6.4.3 备用电源自投控制的动作 逻辑	98
5.4.2 单相断线时 j_2^1 、 j_0^1 与 $\frac{X_{1\Sigma}}{X_{0\Sigma}}$ 比值的关系	70	6.4.4 变电站多分段母线的备用 电源自投方式	100
5.5 串联补偿电容保护间隙击穿时的 复合序网	70	6.5 中低压线路微机保护设计方法	102
5.5.1 保护间隙一相击穿时的复合 序网	71	6.5.1 中低压线路微机保护基本 要求	102
5.5.2 保护间隙两相击穿时的复合 序网	72	6.5.2 中低压线路微机保护装置	102
5.6 单相重合闸的潜供电流	72	6.5.3 微机保护设计	104
5.7 电压互感器回路断线	73	小结	105
5.7.1 电压互感器一次侧单相 断线	73	习题	106
5.7.2 电压互感器二次回路断线	74	第7章 高压输电线路微机保护原理	107
小结	76	7.1 接地短路的零序电流保护	107
习题	77	7.1.1 阶段式零序电流保护	108
第6章 中低压线路微机保护原理	78		
6.1 相间短路的阶段式电流保护	78		

7.1.2 零序方向电流保护	109	8.2.3 闭锁式纵联方向保护的停信 逻辑	143
7.1.3 零序方向电流保护动作逻辑	110	8.2.4 闭锁式方向纵联保护实例	144
7.2 距离保护	111	8.3 允许式纵联保护	145
7.2.1 距离保护的工作原理	111	8.3.1 允许式纵联保护的基本原理	145
7.2.2 距离保护的组成	112	8.3.2 允许式纵联保护发信元件 逻辑	146
7.2.3 距离保护的阻抗测量元件	113	8.3.3 允许式方向纵联保护实例	147
7.2.4 振荡与振荡闭锁	124	8.4 纵联电流差动保护	148
7.2.5 二次回路断线闭锁	128	8.4.1 电流差动保护基本原理及 特性分析	148
7.2.6 距离保护中的相继速动	129	8.4.2 纵联电流差动保护元件	149
7.2.7 距离保护中的后加速	130	8.4.3 光纤通信原理及其在纵联 保护中的应用	150
7.2.8 距离保护动作逻辑	131	8.5 综合自动重合闸	151
7.3 工频故障分量距离保护	132	8.5.1 概述	151
7.3.1 工频故障分量距离保护故障 原理	132	8.5.2 基本功能和原理	152
7.3.2 工频故障分量距离保护的 动作特性	134	8.5.3 对自动重合闸装置的基本 要求	155
7.3.3 工频故障分量距离保护的 特点及应用	135	8.5.4 输电线路综合重合闸逻辑	155
7.4 高压输电线路微机保护设计	136	8.5.5 分相跳闸逻辑	160
7.4.1 高压输电线路保护功能 配置要求	136	小结	161
7.4.2 高压输电线路微机保护设 计方法	136	习题	162
7.4.3 高压线路微机保护装置	137	第 9 章 电力变压器微机保护原理	163
小结	138	9.1 电力变压器的故障、不正常运行及 保护装置	163
习题	139	9.1.1 中、低压变电所主变压器的 保护配置	164
第 8 章 超高压输电线路快速纵联保护	140	9.1.2 高压变电所主变压器的保护 配置	164
8.1 超高压电网的特点及对继电保护的 影响	140	9.2 故障量经变压器的传递	165
8.1.1 超高压电网的特点	140	9.2.1 简化假设	165
8.1.2 超高压电网对继电保护提出的 要求	140	9.2.2 Y/ Δ -11 变压器高压侧单相 接地短路	165
8.1.3 超高压电网对继电保护的 影响	141	9.3 变压器纵差保护	167
8.2 闭锁式纵联保护	141	9.3.1 不平衡电流产生的原因及 消除措施	167
8.2.1 闭锁式纵联保护的工作 原理	141	9.3.2 比率制动式纵差动保护	170
8.2.2 闭锁式方向保护应满足的 基本要求	142	9.4 其他差动保护	171

第 1 章 电力系统微机保护硬件原理

本章重点：掌握微机保护装置基本结构、逐次逼近型 A/D 芯片构成的数据采集系统的工作原理，了解微机保护装置的发展趋势以及相应的功能编号。

1.1 微机保护装置的硬件构成

1.1.1 微机保护装置的硬件系统构成

微机保护装置的硬件按照其功能可以分为：数据采集系统（或模拟量输入系统）、数字处理系统（微机系统）、开关量输入/输出回路、人机接口、通信接口和电源回路，共 6 个组成部分。图 1-1 所示为典型微机保护装置的硬件系统结构图。

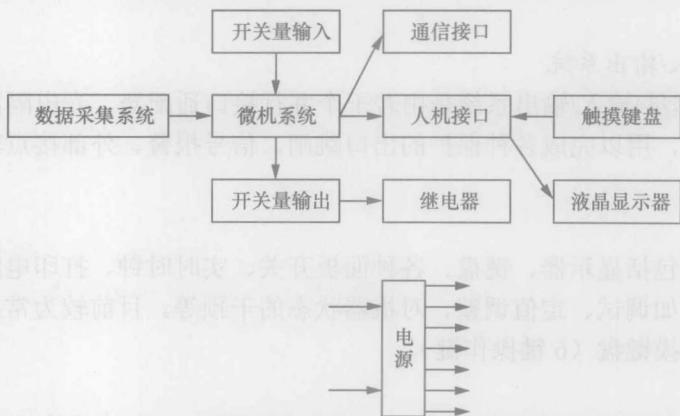


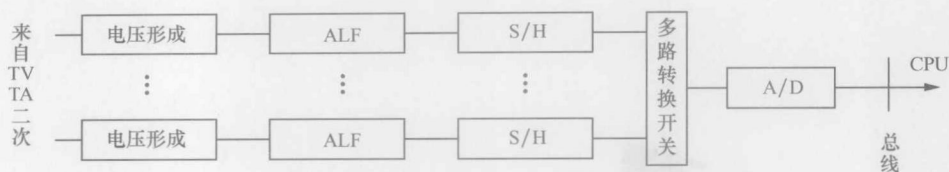
图 1-1 典型微机保护装置的硬件系统结构图

1. 数据采集系统

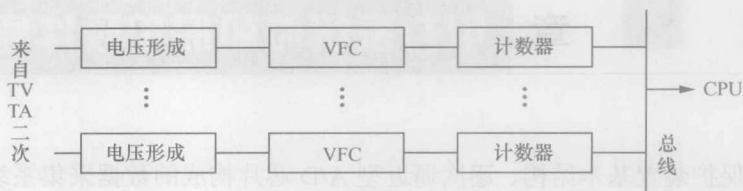
数据采集系统（或模拟量输入系统）包括电压形成、模拟滤波（ALF）、采样保持（S/H）、多路转换开关（MPX）反模数转换（A/D）等功能模块，其功能是将模拟输入量准确地转换为所需的数字量。

根据 A/D 转换的原理不同，微机保护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。逐次逼近方式主要包括电压形成回路、ALF 回路、S/H 回路、MPX、A/D 回路等功能模块；利用电压/频率

变换方式主要包括电压形成、VFC 回路、计数器等环节，如图 1-2 所示。



(a) 逐次逼近 A/D 转换方式



(b) VFC 原理的 A/D 转换方式

图 1-2 模拟量输入回路框图

2. 数字处理系统

微机保护装置以中央处理器（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的性质和范围等。微机保护原理由计算机程序来实现，CPU 系统主要包括微处理器（MPU）、只读存储器（一般用 EPROM）、随机存取存储器（RAM）、定时器等。MPU 的作用是执行存放在 EPROM 中的程序，将数据采集系统得到的信息输入至 RAM 区的原始数据进行分析处理，以完成各种继电保护的功能。

3. 开关量输入/输出系统

开关量(或数据量)输入/输出系统是由若干个并行接口适配器、光电隔离器件、有接点的中间继电器等组成，用以完成各种保护的出口跳闸、信号报警、外部接点输入等功能，实现与 5V 系统接口。

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，其主要功能是用于人机对话，如调试、定值调整、对机器状态的干预等。目前较为常用的人机接口设备有液晶显示器和触摸键盘（6 键操作键）。

5. 通信接口

微机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、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，满足通信规约 IEC61850 等。

微机保护对通信系统的要求是快速、支持点对点平等通信、支持突发方式的信息传输，物理结构采用星形或环形或总线形，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 $\pm 5V$ 、 $\pm 15V$ 、 $\pm 24V$ 电源。 $\pm 5V$ 电源用于计算机系统主控电源； $\pm 15V$ 电源用于数据采集系统、通信系统； $\pm 24V$ 电源用于开关量输入、输出、继电器逻辑电源。

1.1.2 微机保护装置的几种典型结构

微机保护装置的核心是单片机系统。单片机系统是由单片机和扩展芯片构成的一台小型工业控制微机系统,该系统除了硬件之外,还有存储在存储器里的软件系统。这些硬件和软件构成的整个单片微机系统主要完成数值测量、逻辑运算及控制和记录等智能化任务。除此之外,现代的微机保护应具备各种远程功能,包括发送保护信息并上传给变电站微机监控系统,接收集控站、调度所的控制和管理信息。

这种单片微机系统可以是单 CPU 也可以是多 CPU 系统。一般为了提高保护装置的容错水平,目前大多数保护装置已采用多 CPU 系统,尤其是较复杂的保护装置,其主保护和后备保护都是相互独立的微机保护系统。它们的 CPU 是相互独立的,任何一个保护系统的 CPU 或芯片损坏均不影响其他保护系统。除此之外,各保护系统的 CPU 总线均不引出,输入及输出的回路均经光隔离处理,能将故障锁定在插件或芯片,从而大大提高了保护装置运行的可靠性。

在实际应用中,微机保护装置分单 CPU 的结构方式和多 CPU 的结构方式。在中、低压保护中多采用单 CPU 结构方式,而在高压及超高压复杂保护装置中广泛采用多 CPU 的结构方式。

1. 单 CPU 微机保护装置的结构

单 CPU 的微机保护装置是指整套微机保护共用一个单片机,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微机控制,但是目前该类装置的人机接口一般采用独立的 CPU。装置中的模拟量输入回路、微机系统、开关量输入输出各部分通过总线(BUS)联系在一起,由 CPU 通过总线实现信息数据的传输和控制。

单 CPU 结构的微机保护虽然简单,但其容错能力不高。由于后备保护与主保护共用一个 CPU,因此主保护不能正常工作时往往也影响到整套保护装置,其可靠性必然下降。

2. 多 CPU 微机保护装置的结构

为了提高微机保护的可靠性,高压及超高压线路及元件的微机保护都采用多 CPU 的结构方式。所谓多 CPU 的结构方式就是在套微机保护装置中,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,多 CPU 结构方式有效地提高了保护装置的容错水平,如有任何一个模块损坏均不影响其他保护模块的正常工作,防止了由于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 结构的微机保护装置硬件框图如图 1-3 所示。

该保护装置由 4 个硬件完全相同的 CPU 保护模块构成,分别完成高频保护、距离保护、零序电流保护及综合重合闸等功能。另外该保护装置还配置了一块带 CPU 的接口模板,用于完成对保护模块巡检、人机对话,与监控系统通信联络等功能。

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;单片机保护部分是 4 个从机,它们分别独立完成各自的保护任务。四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。

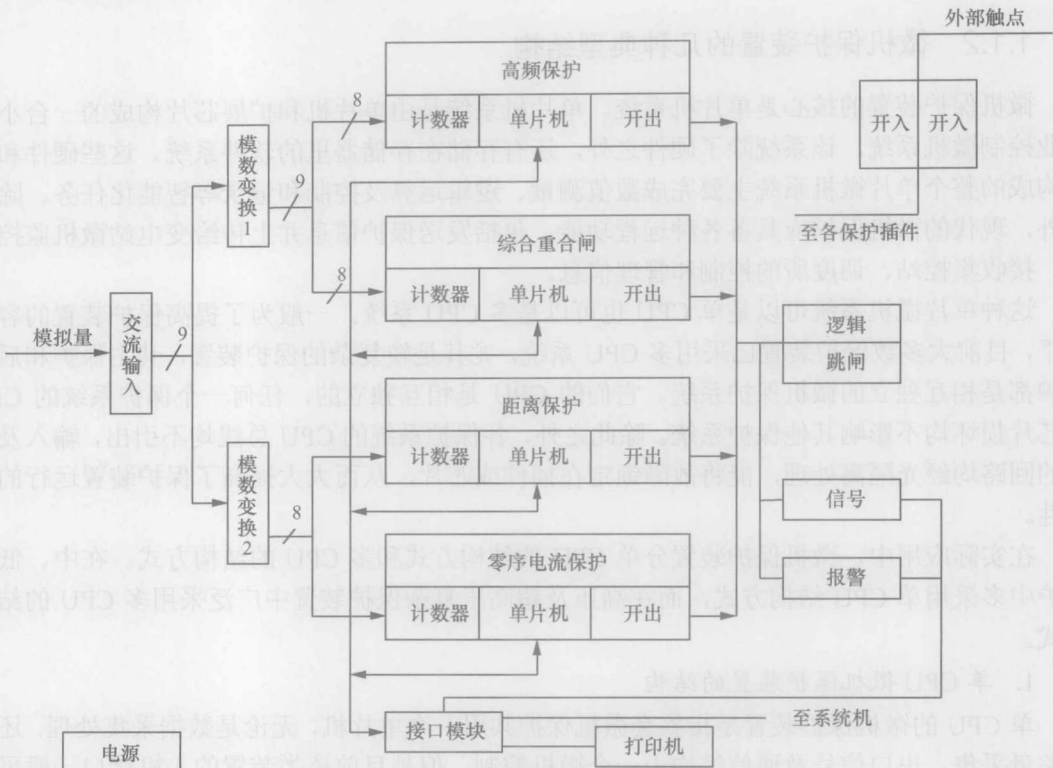


图 1-3 多 CPU 结构的微机保护装置硬件框图

3. 采用 DSP 的微机保护装置的结构

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, 它是综合了微电子学、数字信号处理技术、计算机技术的器件。由于它特殊的设计, 可以对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得到广泛应用。

大多数 DSP 采用了哈佛结构, 即将存储器空间划分成两个, 分别存储程序和数据。它们由两组总线连接到处理器核, 允许同时对处理器核进行访问。这种安排将处理器和存储器的带宽加倍, 更重要的是可以同时为处理器核提供数据与指令。

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 技术融合到微机保护硬件设计中, 可以极大地提高微机保护对原始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。

采用了 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 的结构, 将主、后备保护集成在一块 CPU 板上, DSP 和单片机各自独立采样, 由 DSP 完成所有的数据滤波、保护算法和出口逻辑, 由 CPU 实现装置的总启动和人机界面、后台通信及打印功能。

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)、跳同出口插件 (OUT1、OUT2) 和显示面板 (LCD)。

CPU 插件是装置的核心部分。装置采样率为每周期 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。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。还具有完整的故障录波功能,录波数据可单独从串口输出或打印输出,录波格式与 COMTRADE 格式兼容。

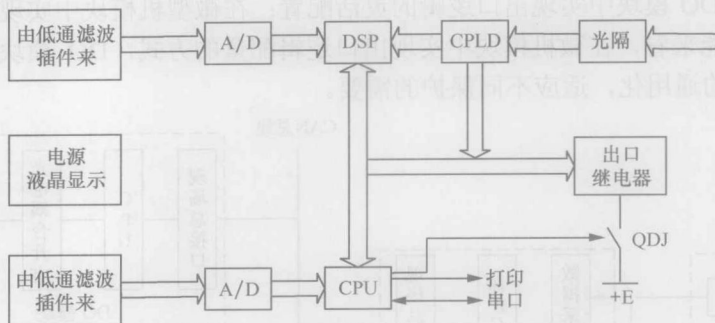


图 1-4 采用 DSP 的微机线路保护装置硬件框图

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、光纤和以太网可供选择。

4. 网络型微机保护装置的结构

网络型微机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 3 种,即 CPU 插件、开入(DI)插件和开出(DO)插件。CPU 插件包含了微机主系统和大部分的数据采集系统电路;开入插件和开出插件的设计,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。目前,已有许多 CPU 都集成了 CAN 总线的接口电路,使得网络化的成本更低。

由于将网络作为各模块间的连接纽带,因此每个模块仅相当于网络中的一个节点,这不仅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。另外,如果需要的话,可以采用双 CAN 网的方式。

现场总线接口部分,对于编程而言,操作过程相当于对串行接口的操作。传输协议的仲裁、检测、重发等功能和机制均集成在接口电路内。网络化硬件结构的优点表现在以下几个方面。

(1) 模块之间的连接简单、方便。仅通过一对导线,就可以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,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,CAN 总线设置于装置内部,因而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,方便了各种模块的组合。即,网络化后,实现了积木式的结构,即插即用,满足不同硬件配置的要求。

(4) 升级方便。若微机模块升级,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各种要求。由于每个模块均设置了微机或控制器，所以有两种方式可以实现出口逻辑的灵活配置：在 DO 模块中实现出口逻辑的灵活配置；在微型机模块中实现出口逻辑的灵活配置。从出口功能来看，在微机模块中实现出口逻辑配量的方式，DO 模块仅执行命令，更适用于 DO 模块的通用化，适应不同保护的需要。

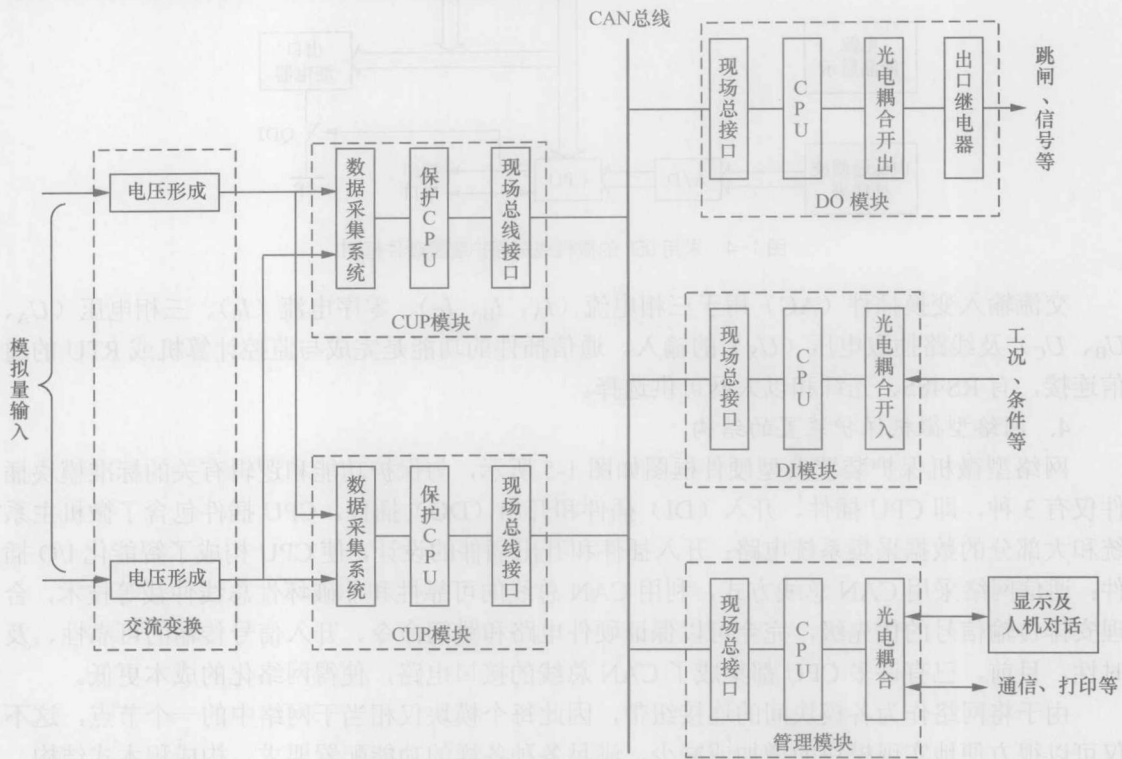


图 1-5 网络化的微机保护装置典型结构

(6) 降低了对微机或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。

1.1.3 微机继电保护硬件系统的设计

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，也是目前比较流行的硬件平台。CPU 采用了 32 位带浮点运算的 DSP，以保证保护系统更加可靠。其中各 CPU 分别为独立的单片机系统，可以完成相应的保护功能及录波。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价比优良且可靠的体系结构，系统针对性强、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，构成了独立的子系统，具有抗干扰能力强的特点。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，一些高级应用难以实施。

微机继电保护硬件系统的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数据实时处理及储存问题。

- (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,以下几个方面在硬件设计时要着重考虑。

- (1) 继电保护装置最重要的指标是鲁棒性好,简单而可靠。
- (2) 在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,放慢一些也大有好处。
- (4) 灵敏度必须保证,但大可不必太过灵敏。
- (5) 元器件可靠性提高及完善的自检引起的对可靠性设计观念的变化。

1.2 逐次逼近原理型 A/D 芯片构成的数据采集系统

电力系统中的电量显然都是模拟量,而计算机保护的实现则是基于由微机对数字量进行计算和判断。所以为了实现微机保护,必须对来自被保护设备和线路的模拟量进行一系列预处理,从而得到所需形式的数字量以便提供给保护功能处理程序。

由电力系统输入到继电保护装置的模拟信号主要有两类:一类是来自电压互感器(或电流互感器)的交流电压(或电流)信号;另一类是来自分压器(或分流器)的直流电压(或电流)信号。这些信号首先被转换为与微机相匹配的电平,通过模拟滤波器滤去其中的高频成分,然后由采样保持环节将连续信号离散化。由于输入的信号往往不止一个,因此需要由多路转换开关逐个交给 A/D 转换器变为数字量。这些数字量还应在存储器中按先后顺序排列以方便功能处理程序取用。

信号预处理还包括隔离和抑制随有用信号进入的干扰,这对提高继电保护装置的可靠性非常重要。还有一类信号,如断路器、隔离开关等设备的辅助接点以及其他继电器接点的开关量信号,或者来自其他微机保护或数字设备的数字量信号,这些信号通过干扰隔离环节,由输入/输出接口进入微机。

逐次逼近原理型的 A/D 转化器在许多保护,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情况下,逐次逼近式 A/D 应该是首选。目前,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,都可以满足各种保护装置的要求,这种 A/D 转化器是未来的发展趋势。采用逐次逼近式 A/D 芯片构成的典型数据采集系统的方框图如图 1-2(a)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 5 部分,下面分别介绍各部分的基本工作原理及应用。

1.2.1 电压形成回路

微机保护要从被保护的电力线路或设备的电流互感器、电压互感器或其他变换器上取得信息。但这些互感器的二次数值、输入范围对典型的微机继电保护电路却不适用,需要降低和变换。由于在微机继电保护中,通常要求输入为 $\pm 5\text{V}$ 或 $\pm 10\text{V}$ 的电压信号,具体取决于所用的 A/D 转换器,因此一般采用中间变换器来实现以上的变换。交流电流的变换一般采用电流中间变换器,此外,也可采用电抗变换器。电抗变换器有阻止直流、放大高频分量的作用,而当一次存在非正弦

电流时, 其二次电压波形将发生严重的畸变, 这是不希望出现的。电抗变换器的优点是线性范围较大, 铁心不易饱和, 有移相作用。电流中间变换器的最大优点是, 只要铁心不饱和, 则其二次电流及并联电阻上的二次电压的波形可基本保持与一次电流波形相同且同相, 即它的转变可使原信号不失真。转变的信号不失真对微机继电保护是很重要的, 因为只有在这种条件下做精确的运算或定量分析才有意义。对于移相、提取某一分量等, 在微机继电保护中根据需要可轻松地通过软件来实现, 但电流中间变换器在非周期分量的作用下容易饱和, 线性度较差, 动态范围也较小。

1.2.2 模拟滤波单元

采样频率的选择是微机保护数据采集系统中硬件设计的重要内容, 需要综合考虑多种因素。首先, 采样频率的选择必须满足采样定理的要求, 即采样频率必须大于原始信号中最高频率的二倍, 否则将造成频率混叠现象, 采样后的信号不能真实代表原始信号。其次, 采样频率的高限受到 CPU 的速度、被采集的模拟信号路数、A/D 转换后的数据与存储器的数据传送方式的制约。如果采样频率太高, 而被采集的模拟信号又特别多, 则在一个采样间隔内难以完成对所有采样信号的处理, 就会造成数据的积压, 导致微机系统无法正常工作。

在电力系统发生故障时, 故障初, 瞬电压、电流中往往含有频率很高的分量, 为了防止频率混叠, 根据采样定理, 最低采样频率必须是信号频率的二倍, 这就必须选择很高的采样频率, 就会对硬件提出相当高的要求, 而目前绝大多数微机保护的原理都是基于反应工频信号的, 因此为了避免采用过高的采样频率, 可在采样之前先用一个模拟低通滤波器将频率高于采样频率一半的信号滤掉。例如选择采样频率为 600Hz, 则模拟低通滤波器应将 300Hz 及以上频率的信号滤除 (如 5 次以上谐波)。

采用模拟低通滤波器使数据采集系统满足采样定律, 限制输入信号中的高频信号进入系统。模拟低通滤波器包括有源滤波和无源滤波两种, 无源滤波器一般为一阶或二阶的 RC 阻容滤波器, 这种滤波器的频率特性是单调衰减的, 不能做到通带平坦和过渡带陡峭, 可用于反映基波分量的保护, 而对于反映谐波分量的保护, 这种 RC 滤波器对本来在数值上就较小的谐波分量衰减较大, 将对保护性能产生不良影响。但由于这种 RC 滤波器电路具有结构简单、可靠性高、能承受较大的过载和浪涌冲击等优点, 也得到了广泛的应用。

1.2.3 采样保持电路

时间取量化的过程称之为采样。采样过程是将模拟信号 $f(t)$ 首先通过采样保持器, 每隔 T_s 秒采样一次 (定时采样) 输入信号的即时幅度, 并把它存放在保持电路里供 A/D 转换器使用。经过采样以后的信号称为离散时间信号, 它只表达时间轴上一些离散点 ($0, T_s, 2T_s, \dots, nT_s, \dots$) 上的信号值 ($f(0), f(T_s), \dots, f(nT_s), \dots$), 从而得到一组特定时间下表达数值的序列。

采样电路的工作原理如图 1-6 所示, 它由一个电子模拟开关 AS、电容 C_h , 以及两个阻抗变换器组成。开关 AS 受逻辑输入端电平控制。高电平时 AS 闭合, 此时, 电路处于采样状态, 电容 C_h 迅速充电或放电到 u_{in} 在采样时刻的电压值。

电子模拟开关 AS 的闭合时间应满足使 C_h 有足够的充电或放电时间, 即采样时间。显然, 由于理想状态下采样时间越短越好, 因而应用阻抗变换器 I, 它在输入端呈高阻抗, 而输出阻抗很低, 使 C_h 上的电压能迅速跟踪 u_{in} 值。