

电 气 技 术 丛 书

微机保护技术

● 赵新红 张慧丽 袁洪 编



化学工业出版社

电气技术丛书

微机保护技术

赵新红 张慧丽 袁 洪 编



化学工业出版社

北 京 ·

微机保护是用微型计算机构成的继电保护。本书对电力系统微机保护的硬件组成和软件算法、抗干扰措施等方面作了全面系统的介绍,使读者对微机保护系统组成结构、工作原理设计方法有一个系统的认识。

本书适合从事电力系统和继电保护工作的技术人员学习和参考,也可作为高等院校电气类相关专业学生的教材。

微机保护技术

张慧丽 袁洪编

图书在版编目(CIP)数据

微机保护技术/赵新红,张慧丽,袁洪编. —北京:化学工业出版社,2008.8
(电气技术丛书)
ISBN 978-7-122-03485-4

I. 微… II. ①赵…②张…③袁… III. 计算机应用-电力系统-继电保护 IV. TM774-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第116420号

责任编辑:刘哲

装帧设计:于兵

责任校对:周梦华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张10 字数226千字 2009年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:25.00元

版权所有 违者必究

丛书前言

进入 21 世纪,科学技术在许多领域,特别是在信息、先进制造、先进材料、生物、能源技术等高新技术领域的飞速发展,使社会、经济和人民生活发生了巨大的变化。现在机遇和挑战并存,全球范围的竞争主要表现在人才的竞争。国家“十一五”时期推进实施人才强国战略的主要任务之一,是实施专业技术人才知识更新工程和战略高技术人才培养工程。

科学是技术的源头,但直接作用于生产实际的是技术。加强工程教育,重视工程技术人才的培养,是一项长期的系统工程。“十一五”规划提出:加快构建终身教育体系,建立继续教育、终身学习的平台,完善终身学习保障机制,着力提高全民科学文化素质,提高公民的学习能力、实践能力和创新能力,加快建立学习型社会。对每一个投身工程领域的人员,继续教育、终身学习已成为适应社会发展和科技进步的必需。科学发展和技术进步,体现在生产一线和工程实际中。已走出校门的工程技术人员除应当具有本专业领域比较深厚的理论基础外,相关领域的专业知识和新技术也是要关注和涉猎的,这是专业交叉,学科融合的大趋势给我们提出的要求。

电能与其他二次能源相比,具有易于传输、方便控制、利于环保的优点。随着经济的发展和科技的进步,电能的利用越来越广泛,社会对电气工程人才的需求越来越大,要求越来越高。针对电气工程人才的社会需求,以及工程技术人员对电气工程领域的专业知识和新技术的关注,南京师范大学电气与自动化工程学院组织编写了这套“电气技术丛书”,希望通过这套丛书将电气工程领域的有关技术和发展奉献给读者,以达到联系工科教育、工程技术和生产实际的目的。这套丛书从规划选题开始就确立了以基本原理为基础、以工程应用和新技术为主线的编写思路,内容涵盖了电气工程领域中发电、变电、继电保护、防雷与接地、绝缘技术、电源技术、电气控制技术、电气测量技术、电梯与照明技术以及变频器技术等。在编写上注意以基础理论够用,强调工程应用为原则,反映新技术,注重启发性和实践性。

这套丛书的编者有从事工科教育的高等学校教师,有生产一线的工程师。大家都怀着为读者奉献高质量图书的良好愿望,但不足之处在所难免,真诚地希望读者及时给予批评和指正。

南京师范大学电气与自动化工程学院
2006 年 11 月

前言

近年来微机保护在电力系统中得到了广泛的应用,随着微电子技术、计算机技术和通信技术的突飞猛进,微机保护也获得了显著的发展与进步。

本书是为了适应电力系统微机保护技术不断深化与发展的需要,使从事电力系统继电保护工作的技术人员及高校相关专业学生能够比较全面地了解和掌握微机保护技术而编写的。

本书对电力系统微机保护的硬件组成和软件算法、抗干扰措施等方面作了全面系统的介绍,使读者对微机保护系统组成结构、工作原理和设计方法能有一个系统的认识。在编写中,力求内容系统性与先进性统一,强调基本概念和基本工作原理的阐述,注重理论讲解和实例分析的结合。希望读者通过本书的学习,能对电力系统微机保护知识有比较全面的掌握。

全书共分七章,第一、四、五、六章由南京师范大学电气与自动化工程学院赵新红、国电南自股份有限公司袁洪编写,第二、三、七章由南京理工大学动力工程学院张慧丽、南京师范大学电气与自动化工程学院赵新红编写。

本书在编写过程中得到许多同仁的支持与帮助,尤其是南京师范大学电气与自动化工程学院领导的关心和大力支持,并得到江苏省电力公司、国电南京自动化股份有限公司和南瑞继保电气有限公司各位专家的大力帮助,在此一并致以衷心的感谢。

由于科学技术的飞速发展以及我们的水平有限,书中肯定会存在许多不足,热诚地希望得到社会各界和广大读者的批评指正。

编者

目 录

第一章 绪论	1
第一节 微机保护的发展过程	1
第二节 微机保护装置的优越性	2
第三节 微机保护的总体结构	3
第四节 微机保护的发展趋势	4
第二章 微机保护的数字信号处理	6
第一节 离散系统的基本概念	6
第二节 常用数字滤波器	9
第三节 数字滤波器的主要性能指标	20
第三章 微机保护的算法	22
第一节 微机保护的基本算法	23
第二节 微机保护的继电器算法	36
第三节 数字继电器实现的基本方法	40
第四章 微机保护软件原理	50
第一节 微机保护软件系统配置	50
第二节 微机保护主程序框图	52
第三节 采样中断服务程序原理	54
第四节 故障处理程序框图原理	57
第五节 微机保护软件举例	60
第五章 微机保护硬件系统	66
第一节 微机保护硬件系统的基本构成	66
第二节 数据采集系统	68
第三节 微机保护的数字核心部分	85
第四节 开关量输入输出系统	87
第五节 人机对话回路微机系统	90
第六节 微机保护装置硬件举例	95
第六章 提高微机系统可靠性的措施	99
第一节 干扰及抑制	99
第二节 故障的自动检测	112
第三节 多重化与容错技术	116
第七章 微机继电保护的实际应用	120
第一节 线路距离保护	120

第二节 微机发电机保护.....	128
第三节 微机变压器保护.....	136
第四节 微机母线保护.....	146
参考文献.....	152

目 录

I	.....	引言 第一章
1	.....	第一章 绪论
2	.....	第二章 电力系统继电保护
3	.....	第三章 电力系统微机保护
4	.....	第四章 电力系统微机保护
5	.....	第五章 电力系统微机保护
6	.....	第六章 电力系统微机保护
7	.....	第七章 电力系统微机保护
8	.....	第八章 电力系统微机保护
9	.....	第九章 电力系统微机保护
10	.....	第十章 电力系统微机保护
11	.....	第十一章 电力系统微机保护
12	.....	第十二章 电力系统微机保护
13	.....	第十三章 电力系统微机保护
14	.....	第十四章 电力系统微机保护
15	.....	第十五章 电力系统微机保护
16	.....	第十六章 电力系统微机保护
17	.....	第十七章 电力系统微机保护
18	.....	第十八章 电力系统微机保护
19	.....	第十九章 电力系统微机保护
20	.....	第二十章 电力系统微机保护
21	.....	第二十一章 电力系统微机保护
22	.....	第二十二章 电力系统微机保护
23	.....	第二十三章 电力系统微机保护
24	.....	第二十四章 电力系统微机保护
25	.....	第二十五章 电力系统微机保护
26	.....	第二十六章 电力系统微机保护
27	.....	第二十七章 电力系统微机保护
28	.....	第二十八章 电力系统微机保护
29	.....	第二十九章 电力系统微机保护
30	.....	第三十章 电力系统微机保护
31	.....	第三十一章 电力系统微机保护
32	.....	第三十二章 电力系统微机保护
33	.....	第三十三章 电力系统微机保护
34	.....	第三十四章 电力系统微机保护
35	.....	第三十五章 电力系统微机保护
36	.....	第三十六章 电力系统微机保护
37	.....	第三十七章 电力系统微机保护
38	.....	第三十八章 电力系统微机保护
39	.....	第三十九章 电力系统微机保护
40	.....	第四十章 电力系统微机保护
41	.....	第四十一章 电力系统微机保护
42	.....	第四十二章 电力系统微机保护
43	.....	第四十三章 电力系统微机保护
44	.....	第四十四章 电力系统微机保护
45	.....	第四十五章 电力系统微机保护
46	.....	第四十六章 电力系统微机保护
47	.....	第四十七章 电力系统微机保护
48	.....	第四十八章 电力系统微机保护
49	.....	第四十九章 电力系统微机保护
50	.....	第五十章 电力系统微机保护
51	.....	第五十一章 电力系统微机保护
52	.....	第五十二章 电力系统微机保护
53	.....	第五十三章 电力系统微机保护
54	.....	第五十四章 电力系统微机保护
55	.....	第五十五章 电力系统微机保护
56	.....	第五十六章 电力系统微机保护
57	.....	第五十七章 电力系统微机保护
58	.....	第五十八章 电力系统微机保护
59	.....	第五十九章 电力系统微机保护
60	.....	第六十章 电力系统微机保护
61	.....	第六十一章 电力系统微机保护
62	.....	第六十二章 电力系统微机保护
63	.....	第六十三章 电力系统微机保护
64	.....	第六十四章 电力系统微机保护
65	.....	第六十五章 电力系统微机保护
66	.....	第六十六章 电力系统微机保护
67	.....	第六十七章 电力系统微机保护
68	.....	第六十八章 电力系统微机保护
69	.....	第六十九章 电力系统微机保护
70	.....	第七十章 电力系统微机保护
71	.....	第七十一章 电力系统微机保护
72	.....	第七十二章 电力系统微机保护
73	.....	第七十三章 电力系统微机保护
74	.....	第七十四章 电力系统微机保护
75	.....	第七十五章 电力系统微机保护
76	.....	第七十六章 电力系统微机保护
77	.....	第七十七章 电力系统微机保护
78	.....	第七十八章 电力系统微机保护
79	.....	第七十九章 电力系统微机保护
80	.....	第八十章 电力系统微机保护
81	.....	第八十一章 电力系统微机保护
82	.....	第八十二章 电力系统微机保护
83	.....	第八十三章 电力系统微机保护
84	.....	第八十四章 电力系统微机保护
85	.....	第八十五章 电力系统微机保护
86	.....	第八十六章 电力系统微机保护
87	.....	第八十七章 电力系统微机保护
88	.....	第八十八章 电力系统微机保护
89	.....	第八十九章 电力系统微机保护
90	.....	第九十章 电力系统微机保护
91	.....	第九十一章 电力系统微机保护
92	.....	第九十二章 电力系统微机保护
93	.....	第九十三章 电力系统微机保护
94	.....	第九十四章 电力系统微机保护
95	.....	第九十五章 电力系统微机保护
96	.....	第九十六章 电力系统微机保护
97	.....	第九十七章 电力系统微机保护
98	.....	第九十八章 电力系统微机保护
99	.....	第九十九章 电力系统微机保护
100	.....	第一百章 电力系统微机保护

第一章 绪 论

第一节 微机保护的发展过程

电力系统继电保护能否可以用数字计算机实现,这方面的研究始于 20 世纪 60 年代。这一时期,数字计算机正在缓慢且系统化地代替着传统的电力系统离线分析工具,如潮流计算、短路计算及稳定问题的求解正逐步转化为计算机程序,从而代替了直流计算台及网络分析器。到了 60 年代后期,Rockefeller 提出了用计算机实现输电线线路保护的概念,但由于当时计算机价格昂贵,计算能力也不能满足继电保护高速处理的要求,因此并未工程化运用。70 年代初期,数字化保护的理论探索有了发展,特别是保护算法、数字滤波等方面的研究发展尤为迅速,发表了大量的这方面的论文。70 年代中期,大规模集成电路和数字技术高速发展,特别是微处理器的出现,给计算机继电保护的发展应用提供了有利条件,从而引起了广大继电保护工作者的兴趣和关注,开始了微机保护的研究热潮。

我国从 20 世纪 70 年代末已开始了微机继电保护的研究,高等院校和科研院所起着先导的作用。华中理工大学、东南大学、华北电力学院、西安交通大学、天津大学、上海交通大学、重庆大学和南京电力自动化研究院都相继研制了不同原理、不同形式的微机保护装置。1984 年原华北电力学院研制的输电线线路微机保护装置首先通过鉴定,并在系统中获得应用,揭开了我国继电保护发展史上新的一页,为微机保护的推广开辟了道路。在主设备保护方面,东南大学和华中理工大学研制的发电机失磁保护、发电机保护和发变组保护也相继于 1989 年、1994 年通过鉴定,投入运行。南京电力自动化研究院研制的微机线路保护装置也于 1991 年通过鉴定。天津大学与南京电力自动化设备厂合作研制的微机相电压补偿式方向高频保护、西安交通大学与许昌继电器厂合作研制的正序故障分量方向高频保护也相继于 1993 年、1996 年通过鉴定。至此,不同原理、不同机型的微机线路和主设备保护各具特色,为电力系统提供了新一代性能优良、功能齐全、工作可靠的继电保护装置。

目前国内微机保护的发展已经经历了 3 个阶段:第一代至第三代微机保护硬件设计的重点是如何使总线系统更隐蔽,以提高抗干扰水平。第一代微机保护装置是单 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。第二代微机保护是多 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”。第三代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了广泛的应用,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主流产品。此外,在微机保护硬件的发展同时,各种保护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研究,在微机保护软件、算法等方面也取得了很多理论成果。可以说从 20 世纪 90 年代开始我国继电保护技术已进入了微机保护的時代。

第二节 微机保护装置的优越性

微机保护装置能够被推广和应用,并逐步取代传统保护,是因为它具有传统继电保护无法比拟的优越性。

1. 可以实现继电保护的各種動作特性,提高继电保护的性能力指标

(1) 利用计算机强大的计算功能实现常规继电保护已有的功能以及不能获得的功能。微机保护是通过软件算法实现保护功能的,因而可以实现很复杂的保护功能,有些保护特性在传统的保护中是很难实现的,例如距离保护的阻抗继电器的复杂形状的阻抗特性、系统振荡和短路的判别、变压器差动保护的励磁涌流和内部故障的识别、母线差动保护的区外故障、电流互感器饱和区内故障的判别。对于这些复杂的保护,传统保护作出的特性很难满足要求,而只要能作出算法,都可以在微机中实现。因此,微机保护在性能上大大地超过了传统保护。

(2) 由于采用全数字处理技术,测量特性就不需要定期检验。

(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更好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,如自适应算法、状态预测、模糊控制、人工智能及小波算法等。

2. 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。

计算机保护系统可以对其硬件系统的各部分进行连续实时的监视,这样可以跟踪装置系统可能出现的故障。一旦检测到故障,则可以闭锁相应元件的功能,同时发出报警信号,以利于及时处理,避免保护的误动作。

微机保护在硬件上采取电磁屏蔽、光电隔离等手段,使微机系统与外界没有电气上的联系;在软件上可以采取数据有效性分析、多点判别等手段自动识别和排除干扰。这些措施都有效地提高了微机保护装置的电磁兼容能力,可靠性较以往的保护装置,特别是晶体管和集成电路的装置有了很大的提高。

3. 灵活性大

可灵活地适应于电力系统运行方式的变化。

各种类型的微机保护所使用的硬件和外围设备可以通用,不同原理和功能的保护主要取决于软件,这为大规模生产和调试创造了有利条件。

同时,一套软件程序中可以设置很多保护功能和不同定值,用户可以根据需要选择。

例如，当运行方式变化需要改变保护整定值时，只需在存储器中预制几套保护定值，通过面板的按钮或菜单操作切换到相应的定值区即可。一套装置内设置多种保护功能，也使保护配置更加灵活。微机保护装置的这些灵活性是传统保护所不能比拟的。

4. 硬件通用，装置体积较小，功耗低，维护调试简单

传统的继电保护装置，如电磁型、晶体管型、集成电路型装置，尤其对复杂的保护，调试的工作量很大，需要的调试时间很长。保护受电源电压波动、环境温度变化、元件老化等外界因素影响较大，因此相应的定检周期也短，给正常的运行带来不便。而微机保护对硬件有很好的自检能力，成熟的软件逻辑也不会受外界因素的干扰而变化，因此无需逐一检验保护的各项功能是否正确，一般只需做整组试验，检查装置的出口是否正确即可，因此微机保护的维护调试工作量很小，定检周期也可以放长，大大减少了保护退出运行的时间。

5. 辅助功能强，设计简洁且成本较低

微机保护具有事件记录、故障测距、故障录波、报告打印等功能，方便了故障分析。此外，微机保护还可以有很强的通信功能，可以将保护、控制和监视等功能统一设计、协调配合，实现电力系统监视、控制、保护的综合自动化，进一步实现电力系统计算机的网络控制管理。

第三节 微机保护的总体结构

微机保护由硬件和软件两部分构成。
微机保护的硬件系统由多个子系统构成，图 1-1 给出了微机保护系统的主要子系统构成。从电压和电流互感器来的交流信号通过隔离互感器转换成小的电压信号，由低通滤波

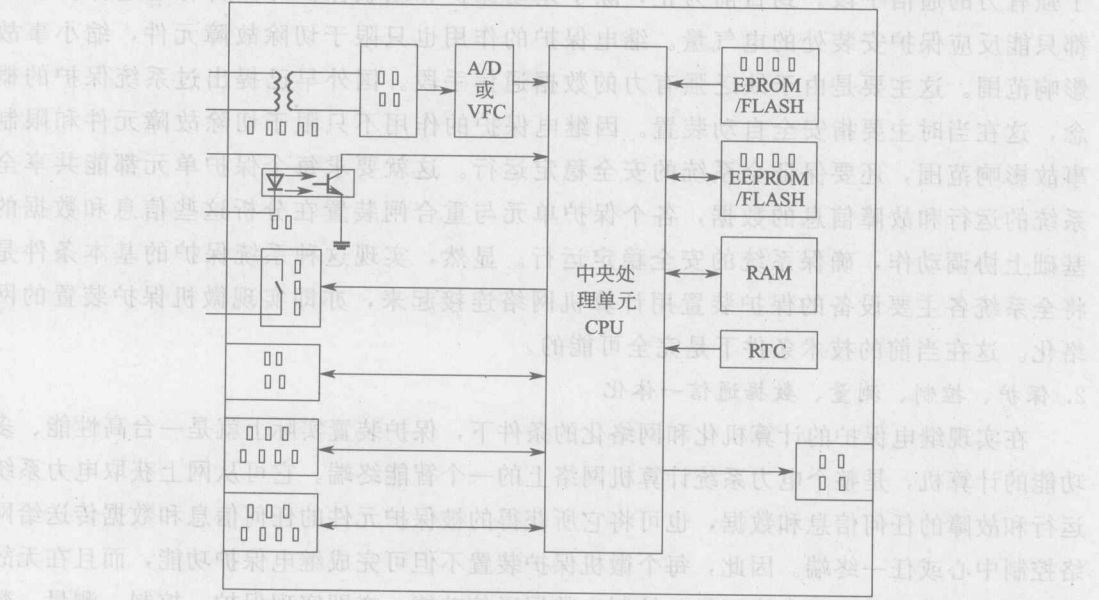


图 1-1 微机保护系统硬件结构图

单元对小电压信号进行滤波，一般采用无源或有源的低通滤波器。模数转换单元（VFC、A/D）将交流信号转换成计算机可以处理的二进制数，供保护程序逻辑处理。中央处理单元（CPU）是核心部分，负责对采样的数据进行处理、硬件的自检以及保护功能的计算，并根据自检和计算结果发出相应的控制命令。程序存储区（EPROM、FLASH）负责存放程序及程序运算需要的常数等。随机存储器（RAM）用于存放程序运算处理的临时数据。定值存储器（EEPROM、FLASH）用于存放保护用的定值，可以在线修改。开关量输入单元、压板投退、断路器位置等保护需要的位置状态经过光耦（必要时可经过中间继电器等）转换为电压信号，由 CPU 完成开关量的采集。开关量输出单元由继电器构成，完成保护出口跳闸、信号输出等功能。人机对话单元用于显示保护的各種信息，接收运行人员对装置的操作命令，如整定定值、打印报告等，目前的微机保护装置人机对话单元大都有独立的 CPU，通过通信接口与主 CPU 相连。保护用通信接口负责保护用数据的实时通信，如线路纵差保护等。后台通信用于连接变电站综合自动化等的通信接口。RTC 负责装置的实时时钟，打印接口接打印机完成报文的打印。

微机保护的软件模块也和各个硬件模块基本对应，分为采样滤波模块、保护启动逻辑、保护算法模块、保护出口逻辑、报告整理模块、装置以及二次回路的自检模块、后台通信模块等。

第四节 微机保护的发展趋势

1. 网络化

计算机网络作为信息和数据通信工具已成为信息时代的技术支柱，使人类生产和社会生活的面貌发生了根本变化，它深刻影响着各个工业领域，也为各个工业领域提供了强有力的通信手段。到目前为止，除了差动保护和纵联保护外，所有继电保护装置都只能反应保护安装处的电气量。继电保护的作用也只限于切除故障元件，缩小事故影响范围。这主要是由于缺乏强有力的数据通信手段。国外早已提出过系统保护的概念，这在当时主要指安全自动装置。因继电保护的作用不只限于切除故障元件和限制事故影响范围，还要保证全系统的安全稳定运行。这就要求每个保护单元都能共享全系统的运行和故障信息的数据，各个保护单元与重合闸装置在分析这些信息和数据的基础上协调动作，确保系统的安全稳定运行。显然，实现这种系统保护的基本条件是将全系统各主要设备的保护装置用计算机网络连接起来，亦即实现微机保护装置的网络化。这在当前的技术条件下是完全可能的。

2. 保护、控制、测量、数据通信一体化

在实现继电保护的计算机化和网络化的条件下，保护装置实际上就是一台高性能、多功能的计算机，是整个电力系统计算机网络上的一个智能终端。它可从网上获取电力系统运行和故障的任何信息和数据，也可将它所获得的被保护元件的任何信息和数据传送给网络控制中心或任一终端。因此，每个微机保护装置不但可完成继电保护功能，而且在无故障正常运行情况下还可完成测量、控制、数据通信功能，亦即实现保护、控制、测量、数据通信一体化。目前，为了测量、保护和控制的需要，室外变电站的所有设备，如变压

3. 智能化

第二章 微机保护的数字信号处理

微机是对数字量进行运算处理的设备。微机保护装置对于通过硬件电路从电力系统中取到的电压、电流等模拟量并不能直接运算处理，而是首先以一定的时间间隔采样这些模拟量，然后通过模/数转换装置将模拟量转换成微机能接受的数字量，再对数字量进行运算和判断。这个由模拟量到数字量的过程就是对信号数字化处理的过程。

第一节 离散系统的基本概念

数字计算机具有很高的计算速度、精确性、智能化分析与判断功能。计算机直接参与控制，形成计算机控制系统，这是当今控制系统发展的主要方向和趋势。但是，由于数字计算机工作的特点，在计算机控制系统中既包含有连续时间的模拟信号，还包含有在时间上是离散的、幅值上是数字的信号，这些信号与连续时间系统中的信号不同。尽管计算机控制系统与连续时间系统不同，但是它们都具有控制系统的基本特征，从控制系统中信号的特点来看，计算机控制系统也称为采样控制系统，又称为离散控制系统。

离散控制系统可用如图 2-1 所示的方框图来表示。

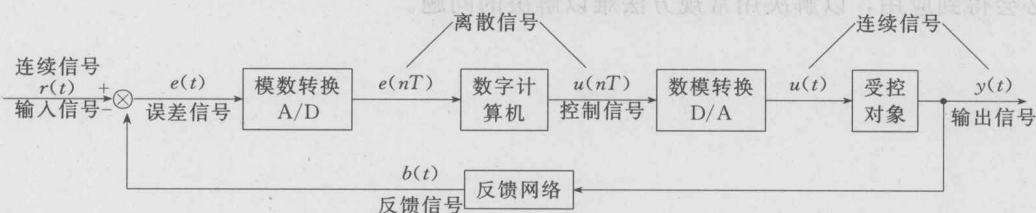


图 2-1 离散控制系统组成方框图

图 2-1 中模数转换 (A/D) 的作用有两个：①对连续时间的误差信号 $e(t)$ 进行定时周期采样；②将采样值编制成数字码，即把连续时间的误差信号 $e(t)$ 转换成计算机能够接受的离散型数字信号。通常模数转换 (A/D) 的精度足够高，所产生的量化误差可以忽略不计，因此可以把模数转换部分用周期为 T 的采样开关来代替。误差信号 $e(nT)$ 以二进制码的形式送入数字计算机，按照预定的要求进行运算之后，以数字代码的形式输出控制信号 $u(nT)$ 。这样，计算机以采样周期 T 输出数字量，可以用一个周期为 T 的同步采样开关的输出量代替。由于受控对象的执行装置通常按连续时间的模拟量进行控制，所以应将计算机输出的数字代码先转换成对应的模拟控制量并加以保持后，再去作用于受控对象的执行装置。由计算机作为控制器的采样数字控制系统可等效成一个典型控制系统，如图 2-2 所示。

电力系统的微机继电保护装置则是以电压和电流等运行变量为输入量、以微机作为控

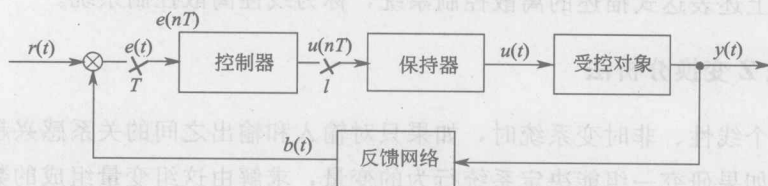


图 2-2 等效离散控制系统

制器、以输电设备的断路器作为受控对象构成的一个开环控制的离散控制系统。

分析离散控制系统包括以下内容。

(1) 建立系统的数学模型 根据实际的系统,由元件特性和它们之间的相互作用列出数学方程。对于时域中分析的离散系统,一般是用差分方程和状态方程来描述。

(2) 求解数学模型 分析和求解数学方程,对于离散系统可以在时域中进行,也可以在变换域(Z域、频域)中进行。

(3) 用硬件或软件实现一个系统 硬件实现是指实际物理器件实现对信号的相加、相乘或延迟等运算,完成输入信号到输出信号的转换;而软件实现则是指编制程序,涉及一个由输入映射到输出的算法。

一、线性非时变离散系统的差分方程

在连续时间系统中输入和输出信号都是时间的连续函数,它们内在的关系可用连续时间的微分方程来描述;而对于离散控制系统其输入信号是离散信号以脉冲序列的形式出现的,例如 $x(kT)$ ($k=0,1,2,\dots,n$)。对于系统的这种行为,很难用微分方程来描述,它的运算规律必然是前、后序列数之间的关系式,这就是差分方程所描述的输出序列和输入序列之间的差分方程关系式。差分方程就是描述离散系统的输入和输出序列之间的运算关系式。

以一个一阶系统为例,离散时间系统和连续时间系统方框图如图 2-3 所示。

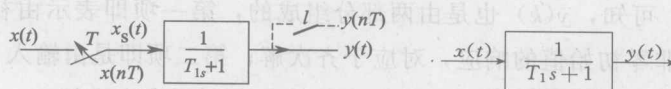


图 2-3 离散时间系统和连续时间系统方框图

离散时间系统输入脉冲序列 $x(nT)$ 和输出脉冲序列 $y(nT)$ 与系统结构参数之间的差分方程式可由下式表示

$$y(nT) - e^{-T/T_1} y[(n-1)T] = (1/T_1) x(nT) \quad (2-1)$$

对于一阶系统,由于系统结构并不复杂,故单位冲激响应较为简单,因而较容易求出系统的差分方程式;但对于复杂的高阶系统,由于其单位冲激响应表达式复杂,求差分方程时,可能会遇到一定的困难。对于高阶系统,其输入脉冲序列 $x(n)$ 和输出脉冲序列 $y(n)$ 与系统结构参数之间的差分方程可用下述方程来描述

$$y(k) + a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + \dots + a_n y(k-n) = b_0 x(k) + b_1 x(k-1) + \dots + b_m x(k-m) \quad (2-2)$$

凡是能用上述表达式描述的离散控制系统,称为线性离散控制系统。

二、离散系统 Z 变换分析法

在分析一个线性、非时变系统时,如果只对输入和输出之间的关系感兴趣,则称为输入、输出法;如果研究一组能决定系统行为的变量,求解由这组变量组成的数学方程,则称为状态变量法。由于时域上的序列与 Z 平面上的函数是一一对应的,对于这两种方法既可以在时域中应用,也可以在复数域中对函数进行分析时应用。

对输入、输出关系在时域中进行分析时,描述输入和输出序列之间关系的数学方法是差分方程。用 Z 变换求差分方程是方便的,此外用 Z 变换较容易推出实现网络的不同结构,如串联、并联、级联等。

1. 差分方程的 Z 变换法求解

一般而言,一个线性、非时变系统可用 n 阶差分方程描述,如式(2-2)。

这是一个 n 阶差分方程,因方程中所涉及的时刻数为 n 。 $y(k)$ 为 k 时刻系统的输出, $x(k)$ 、 $x(k-1)$ 、 $x(k-m)$ 分别表示 k 、 $k-1$ 、 $k-m$ 时刻的输入值。由式(2-2)可知, k 时刻的输出,不但与 k 时刻和前面 m 个时刻的输入有关,而且与前面 n 个时刻的输出量有关。对式(2-2)采用单边 Z 变换并应用时域中的位移定理有

$$Y(z) = M(z)/A(z) + B(z)X(z)/A(z) \quad (2-3)$$

$$A(z) = 1 + a_{n-1}z^{-1} + a_{n-2}z^{-2} + \cdots + a_n z^{-n}$$

$$B(z) = b_m + b_{m-1}z^{-1} + \cdots + b_0 z^{-m}$$

$$M(z) = -[a_{n-1}p_1(z) + a_{n-2}p_2(z) + \cdots + a_0 p_n(z)]$$

显然, $A(z)$ 和 $B(z)$ 是由系统特性决定的已知量,只要知道初始值和冲激序列,即已知 $M(z)$ 和 $X(z)$,则可求出 $y(n)$ 的 Z 变换表达式 $Y(z)$ 。再对上式求逆变换即可求出 $y(k)$,即

$$y(k) = z^{-1}[M(z)/A(z)] + z^{-1}[B(z)X(z)/A(z)] \quad (2-4)$$

由式(2-4)可知, $y(k)$ 也是由两部分组成的,第一项即表示由初始条件非零造成的输出值,称为非零初始值的响应,对应于齐次解;第二项即是由输入(冲激)形成的输出(响应),对应于特解。可见用 Z 变换法求解差分方程可求出全解。

2. 系统函数

在初始条件为零时,一个线性、非时变系统对任意输入序列 $x(n)$ 的响应 $y(n)$,可用该系统对单位序列 $\delta(n)$ 的响应 $h(n)$ 和 $x(n)$ 的卷积和来表示,即

$$y(n) = x(n) * h(n) \quad (2-5)$$

式(2-5)的 Z 变换式为

$$Y(z) = X(z)H(z) \quad (2-6)$$

故有

$$H(z) = Y(z)/X(z) \quad (2-7)$$

对于一个给定的线性、非时变系统, $H(z)$ 是一个固定的函数,它是对 $\delta(n)$ 的响应 $h(n)$ 的 Z 变换式,不会因不同的输入序列而变,因而描述了一个线性、非时变系统本身的属性,描述了将输入序列变成输出序列的变换特性。故把 $H(z)$ 定义为系统函数,又

称转移函数、传输函数，式(2-7)即是系统函数的定义式。

对上述 n 阶差分方程式(2-2) 进行 Z 变换，并应用式(2-3)，可以推得一个线性、非时变系统函数 $H(z)$ 为

$$H(z) = \frac{\sum_{r=0}^M b_r z^{-r}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}} \quad (2-8)$$

式(2-8) 中如果所有的 a_k 均为零，对应于式(2-2)，即系统的输出只与本时刻以及前面 M 个时刻的输入有关，而与前面一切时刻的输出值无关，则有

$$H(z) = \sum_{r=0}^M b_r z^{-r} \quad (2-9)$$

对式(2-9) 求逆变换，可得到该系统对单位采样序列 $\delta(n)$ 的响应 $h(n)$ ，即

$$h(n) = \sum_{r=0}^M b_r \delta(n-r) \quad (2-10)$$

由式(2-10) 可见：当 $M=0$ 时输入为 $\delta(n)$ ，其输出为 $h(0)=b_0$ 、 $h(1)=b_1$ 、 $\dots$ 、 $h(m)=b_m$ ；当 $n>M$ 时 $h(n)=0$ ，即用式(2-8) 所描述的系统；当输入为单位冲激时，只会产生有限个时刻的输出，称这种系统为有限冲激（脉冲）响应（Finite Impulse Response）系统，记为 FIR 系统。

如式(2-3) 所描述的系统函数公式中有一个或多个 a_k 不为零，这时系统的输出不仅与本时刻和前面若干时刻的输入有关，而且与前面若干时刻的输出有关。它对单位冲激的响应将无限延续，称为无限冲激响应（Infinite Impulse Response）系统，记为 IIR 系统。

通过以上分析可知，线性连续系统与线性离散系统的分析求解方法有一一对应的关系：

线性连续系统

线性离散系统

微分方程

差分方程

拉氏变换

Z 变换

传递函数

转移函数

第二节 常用数字滤波器

滤波器在继电保护中是一个重要环节。因为在电力系统正常运行时，常有奇次谐波出现，主要为 3 次及 5 次谐波。在超高压的 330~500kV 系统，常在后半夜轻负载时最为严重。低压系统也不例外。电力系统在故障起始瞬间，除电压和电流信号中含有衰减的直流分量和复杂的谐波成分外，还由于线路分布电容的影响，会产生暂态的高频分量。目前，绝大多数保护装置的原理是建立在反映正弦基波或某些整数次谐波基础上的，所以在微机保护中，对模数转换后得到的数字信号进行分析运算和判断之前，一般要先经过数字滤波，以取得信号中有用的分量，滤去无用的分量。在硬件系统中提到的设置，即在采样前的模拟低通滤波器，只是为了防止频率混叠，它的截止频率一般都是很高的。采用数字滤波器还可以抑制数据采集系统引入的各种噪声，例如模数转换的整量化噪声、电压形成回路

中各中间变换器的励磁电流造成的波形失真等。

对一个滤波器来说,要把衰减的直流分量、高频分量及谐波同时滤除,在技术上是很难的。如要做到这一点,滤波结构将很复杂,带来的计算量也很大,因此在超高压线路和保护中,对各种量分别进行处理。往往采用隔离电抗互感器来消除非周期衰减的直流分量,由于经过电抗互感器,采样得到的电流实际上是实际电流微分后的值,滤波得到的电流和实际的电流形状是不同的,有时不便于故障的分析,因此目前微机保护多采用隔离电流互感器,通过数字滤波的方法滤除衰减的直流分量。用模拟式低通滤波器(为采样定理而必须装设的)来消除谐波及高频分量,一般滤除6次以上的谐波及高频分量即可满足常规继电保护的要求。至于剩下的3次、5次谐波及短路故障产生的6次以下的非工频分量,可用保护算法或独立的数字滤波器来消除。

数字滤波实质上也是一种算法。它的输入是一组经过量化的采样值 $X(K)$,输出是经过变换或处理的另一组数字量 $Y(K)$ 。数字滤波器的作用就是从 $X(K)$ 序列中提取有用的信息 $Y(K)$,而将无用成分滤去或尽可能地衰减。在微机保护装置中一般都通过程序也就是用软件来实现数字滤波器。它有如下突出的优点。

① 精度高。对高精度的系统和测量尤为有效。不存在与负载阻抗匹配的问题。只要有足够的字长位数,就能够提高数字滤波的精度,扩大动态范围。

② 可靠性高。不受环境温度变化等因素影响。

③ 灵活性好。只要改变存放在存储器中的数据,就可改变滤波器的参数。

④ 便于模块化。

⑤ 可获得很高的性能指标。

正因为数字滤波器有上述特点,几乎所有微机保护都采用了数字滤波器。这里需要再次指出的是数据采集单元中的模拟滤波器是为了满足采样定理而设的。

数字滤波器也像模拟滤波器一样,分低通、高通、带通、带阻等滤波器。在继电保护中,一般都不用高通滤波器。数字滤波器也有它自己的特点,一般尽量用加减运算,少用乘除运算,以求运算量少;力争数据窗短,以求延时小。因此采用陷波器或梳状滤波器较为普遍。

一、数字滤波器的一般结构形式

令 $X(K)$ 和 $Y(K)$ 分别为数字滤波器输入和输出信号序列。一个线性时不变数字滤波器的输出和输入的离散信号可用图2-4及下面常系数线性差分方程描述

$$Y(K) = \sum_{n=0}^K a_n X(K-n) - \sum_{n=0}^K b_n Y(K-n) \quad (2-11)$$

式中, $a_n, b_n (n=0, \dots, K)$ 为常数。

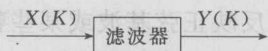


图 2-4 数字滤波器结构形式

当式(2-11)中 b_n 全部等于零时,系统的当前输出只是当前和过去输入值的函数,这样的滤波器称为非递归型滤波器。当系数 b_n 不全为零时,系统的当前输出还受过去输出的影