

中等专业学校教材

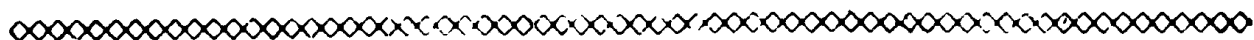


电力系统继电保护

重庆电力学校 陈继森
杭州电力学校 熊为群 合编



中等专业学校教材



电力系统继电保护

重庆电力学校 陈继森
杭州电力学校 熊为群 合编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书为中等专业学校统编教材。

全书共十二章，分别为继电保护概述；继电保护的基础元件；输电线路相间短路的电流、电压保护；输电线路相间短路的方向电流保护；输电线路的零序保护、距离保护、差动保护及高频保护；电力变压器保护；同步发电机保护；母线保护及电动机保护。为配合教学，每章均附有复习思考题及练习题。附录为短路保护的灵敏系数。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统继电保护/陈继森，熊为群编. -北京：中国电力出版社，1992. 11

中等专业学校教材

ISBN 7-80125-368-X

I. 电… I. ①陈… ②熊… III. 电力系统-继电保护-专业学校-教材 IV. TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 06108 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

飞龙印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

1992 年 11 月第一版 1999 年 7 月北京第九次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17 印张 378 千字

印数 80921—83920 册 定价 20.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

前 言

本书是根据中国电力企业联合会“1989~1993年电力中等专业学校教材编审出版规划”，按照电力工程类发电厂及电力系统专业电力系统继电保护课程教学大纲编写的。

本书着重阐述继电保护的基本原理和基本知识，密切联系我国电力系统继电保护实际，反映继电保护的一些新技术。在内容结构、阐述方法和文字表达上，顾及学生的知识水平，力求循序渐进、通俗易懂、便于阅读。书中附有“*”的内容，供教学时选用。

本书由重庆电力学校陈继森和杭州电力学校熊为群合编，陈继森统稿。

全书共十二章，第一、二、八、九、十、十一章由陈继森编写，第三、四、五、六、七、十二章由熊为群编写。

本书由西安电力学校高永昌副教授主审。南京电力专科学校、沈阳电力专科学校、北京电力专科学校、郑州电力学校、江西电力学校、新疆电力学校、西安电力学校、武汉电力学校、广西水电学校、贵州电力学校、山东电力学校、云南电力学校、成都水电学校等单位的有关同志参加了本书编写提纲讨论会或审稿会，提出了宝贵意见。此外，南京电力自动化设备厂、上海继电器厂等单位，提供了技术资料。在此一并表示感谢。

诚恳希望广大读者对本书的缺点和错误提出批评和指正。

编 者

1990.12

符 号 说 明

一、设备、元件、名词符号

B	变压器、	C	电容器
DL	断路器	DKB	电抗变压器
F	发电机	J	继电器
LH	电流互感器	Y	与门电路
YH	电压互感器	H	或门电路
LB	电流变换器	JZ	禁止(否)门电路
YB	电压变换器	MK	发电机灭磁开关
ZBL	自耦变流器	TQ	断路器跳闸线圈
ZLH	中间电流互感器	ZCH	自动重合闸装置
T	晶体三极管	SCR	可控硅
D	二极管、电动机	UJT	单结晶体管
WY	稳压管	L	输电线路、电感
$d, d_1, \dots$	故障点	SBH	速饱和变流器

二、电压、电流、阻抗符号

E_A, E_B, E_C	电源的三相电势	I_1, I_2, I_0	正、负、零序电流
U_A, U_B, U_C	母线或保护安装处三相电压	$I_{b.p.}$	不平衡电流
U_{d1}, U_{d2}, U_{d0}	短路点正、负、零序电压	$I_{fh \cdot \max}$	最大负荷电流
U_e	额定电压	I_e	额定电流
$U_{b.p.}$	不平衡电压	R	电阻
U_{dA}, U_{dB}, U_{dC}	短路点三相电压	X	电抗
U_{x-x}	相间电压	Z_Σ	总阻抗
I_A, I_B, I_C	三相电流	$Z_{fh \cdot \min}$	最小负荷(或负载)阻抗
$I_{d \cdot \max}$	最大短路电流	Z_{xI}	系统阻抗
$I_{d \cdot \min}$	最小短路电流		

三、保护及继电器的有关参数

$I_{d \cdot}$	保护的動作电流	$U_{dz \cdot I}$	继电器的動作电压
I_h	保护的返回电流	$U_{h \cdot I}$	继电器的返回电压
U_{dz}	保护的動作电压	$Z_{dz \cdot I}$	继电器的動作阻抗
U_h	保护的返回电压	$Z_{h \cdot I}$	继电器的返回阻抗
Z_{dz}	保护的動作阻抗	Z_{zd}	继电器的整定阻抗
Z_h	保护的返回阻抗	I_j	加入继电器的电流
$I_{dz \cdot I}$	继电器的動作电流	U_j	加入继电器的电压
$I_{h \cdot I}$	继电器的返回电流	Z_j	继电器的测量阻抗

四、常用的系数

K_k	可靠系数	K_h	返回系数
-------	------	-------	------

K_{lm}	灵敏系数	K_{lx}	同型系数
K_{jx}	接线系数	K_{ph}	配合系数
K_{fz}	分支系数	K_{zq}	电动机自启动系数
K_{fzq}	非周期分量影响系数		

目 录

前 言

符号说明

第一章 继电保护概述	1
第一节 继电保护的的任务	1
第二节 对继电保护的基本要求	2
第三节 继电保护的基本工作原理及组成	3
第四节 继电器	4
第二章 继电保护装置的基础元件	7
第一节 互感器	7
第二节 测量变换器	9
第三节 对称分量滤波器	12
第四节 电磁式继电器	17
第五节 静态继电器	22
第三章 输电线路相间短路的电流、电压保护	30
第一节 瞬时电流速断保护	30
第二节 限时电流速断保护	32
第三节 定时限过电流保护	34
第四节 电流保护的接线方式	37
第五节 阶段式电流保护	41
第六节 电流电压联锁速断保护	51
第四章 输电线路相间短路的方向电流保护	57
第一节 电流保护方向性问题的提出	57
第二节 功率方向继电器	59
第三节 功率方向继电器的接线方式	61
第四节 非故障相电流对功率方向继电器动作行为的影响	64
第五节 方向电流保护的整定计算	66
第五章 输电线路的零序保护	70
第一节 中性点直接接地电网接地短路时的零序电压和零序电流	70
第二节 中性点直接接地电网的零序电流保护	72
第三节 零序电流方向保护	76
第四节 中性点不接地电网单相接地时的零序电压和零序电流	78
第五节 中性点不接地电网的保护方式	80
第六章 输电线路的距离保护	84
第一节 距离保护的基本原理	84
第二节 阻抗继电器的构成原理	87
第三节 具有插入电压的方向阻抗继电器	95
第四节 阻抗继电器的接线方式	104

第五节	影响阻抗继电器正确测量的因素	109
第六节	距离保护的整定计算	119
第七节	距离保护装置举例	126
第七章	输电线路的差动保护	137
第一节	输电线路纵差动保护的基本工作原理	137
第二节	平行线路的横联方向差动保护	139
第三节	平行线路的电流平衡保护	143
第八章	输电线路的高频保护	146
第一节	高频保护的基本概念	146
第二节	高频通道	148
第三节	高频闭锁方向保护	151
第四节	高频闭锁距离保护	157
第五节	相差高频保护	159
第九章	电力变压器的继电保护	171
第一节	电力变压器的故障、不正常工作状态及其保护方式	171
第二节	变压器的瓦斯保护	172
第三节	变压器的电流速断保护	174
第四节	变压器的纵差动保护	174
第五节	变压器相间短路的后备保护和过负荷保护	189
第六节	变压器接地短路的后备保护	194
第七节	自耦变压器保护的特点	198
第八节	变压器的过励磁保护	199
第九节	变压器保护接线全图举例	200
第十章	同步发电机的继电保护	205
第一节	同步发电机的故障、不正常工作状态及其保护方式	205
第二节	发电机的纵差动保护	206
第三节	发电机定子绕组匝间短路保护	210
第四节	发电机定子绕组单相接地保护	213
第五节	发电机励磁回路接地保护	218
第六节	发电机的失磁保护	220
第七节	发电机的后备保护与反时限负序电流保护	224
第八节	发电机的逆功率保护	227
第九节	发电机-变压器组保护的特点及其原理接线图举例	228
第十一章	母线保护	234
第一节	母线故障及其保护方式	234
第二节	母线完全电流差动保护	235
第三节	电流相位比较式母线差动保护	238
第四节	双母线同时运行时的母线保护	241
第五节	$1\frac{1}{2}$ 断路器接线母线保护	245
第六节	断路器失灵保护	247
第十二章	电动机保护	251

第一节	电动机的故障、不正常工作状态及其保护方式·····	251
第二节	电动机的相间短路保护·····	251
第三节	电动机的单相接地保护·····	255
第四节	电动机的低电压保护·····	256
第五节	同步电动机的失步保护·····	258
附录	短路保护装置的灵敏系数·····	260

第一章 继电保护概述

第一节 继电保护的任務

电力系统在运行中，可能出现故障和不正常工作状态。电力系统最常出现且最危险的故障是短路。电力系统短路的基本形式有三相短路、两相短路、两相接地短路、单相接地短路及电机和变压器同一相绕组不同线匝之间的短路（简称匝间短路）等。电力系统的正常工作遭到破坏，但未形成故障，称为不正常工作状态。电气设备的过负荷、由于功率缺额引起系统频率的下降、发电机突然甩负荷产生的过电压以及系统振荡等，都属于不正常工作状态。

电力系统短路可能产生如下的后果：

- （1）故障点的电弧使故障设备损坏。
- （2）比正常工作电流大得多的短路电流产生热效应和电动力效应，使故障回路中的设备遭到伤害。
- （3）部分电力系统的电压大幅度下降，使用户的正常工作遭到破坏，影响产品质量。
- （4）破坏电力系统运行的稳定性，引起系统振荡，甚至使电力系统瓦解，造成大面积停电的恶性事故。

故障和不正常工作状态若不及时正确予以处理，都可能引起事故。事故是指对用户少送电、电能质量降低到不允许的程度、人身伤亡及电气设备损坏。

继电保护是一种重要的反事故措施，它的基本任务是：

- （1）当电力系统出现故障时，继电保护装置应能快速、有选择地将故障元件从系统中切除，使故障元件免受损坏，保证系统其他部分继续运行。
- （2）当系统出现不正常工作状态时，继电保护能及时反应，一般发出信号，告诉值班人员予以处理。在无值班人员的情况下，保护装置可作用于减负荷或跳闸。这种保护，一般具有一定的延时，以免不必要的动作。

电力工业的发展，对继电保护不断提出新的更高的要求。电工理论和元件制造技术的进步，提供继电保护技术更新、适应要求的必要条件。从继电保护原理来看，从早期反应系统基本电量（电流、电压等）的变化，发展到反应复杂量（对称分量、阻抗等）的变化。近年来，又从反应稳态量的变化，发展到反应暂态量，从原理上为进一步提高保护的性能提供了条件。再从构成继电保护装置的元件来看，早期是有触点的继电器；由于半导体整流元件及晶体管的发展，出现了整流型和晶体管型继电保护装置，因为采用了电子电路，便于实现新原理的保护装置，且提高了保护的性能。目前，晶体管保护已由分立元件式向集成电路式过渡。近年来，计算机，特别是微处理器，已在继电保护领域得到应用，使继电保护技术发生了重大的变革。传统的继电保护都是模拟式的，计算机保护则是数字式的，只要采用不同的软件，同一种计算机保护装置便可实现不同的保护功能，而且可以构成任

意特性的保护，以适应电力系统的需要。

第二节 对继电保护的基本要求

对于反应短路故障的继电保护，在技术上一般应满足选择性、速动性、灵敏性和可靠性等四个基本要求。

1. 选择性

继电保护的选择性是指继电保护动作时，只能把故障元件从系统中切除，使系统的无故障部分继续运行。在图1-1所示的网络中，当线路 L_4 上 d_2 点发生短路时，保护6动作跳开断路器6DL，将 L_4 切除，继电保护的这种动作是有选择性的。 d_2 点故障，若保护5动作，将5DL跳开，则变电站C和D都将停电，继电保护的这种动作是无选择性的。同样， d_1 点故障时，保护1和保护2动作于跳开1DL和2DL，将故障线路 L_1 切除，才是有选择性的。

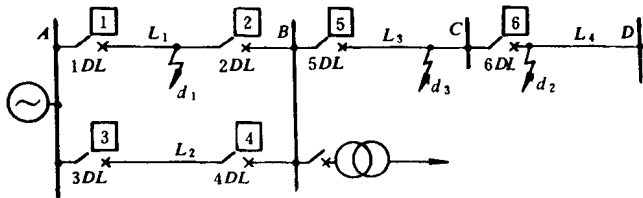


图 1-1 电网保护选择性动作说明图

必须指出，继电保护和断路器都可能因失灵而拒动，因此需要设置后备保护。如在 d_3 点故障，而保护5或断路器5DL拒动，保护1和保护3应动作于跳开1DL和2DL，将故障切除。保护1和保护3即为线路 L_3 的后备保护。由于这种后备作用是在远处实现的，称为远后备保护。后备保护也可采用近后备方式，即在被保护元件上装设两套保护，一套为主保护，另一套为后备保护。当主保护拒动时，由后备保护动作切除故障。采用近后备保护时，应装设断路器失灵保护，当断路器失灵拒动时，失灵保护动作于切除故障。例如在 L_3 上 d_3 点故障而保护5中的主保护拒动，由保护5中另一套后备保护动作于跳开5DL，将故障切除。如果5DL拒动，则由断路器失灵保护动作，将2DL和4DL跳开，把故障切除。

实现远后备保护简单、经济，且对相邻元件的保护或断路器拒动，都能起到后备作用，因此，应当优先采用。当实现远后备保护有困难时，才采用近后备保护。

2. 速动性

切除故障的时间包括继电保护的動作时间和断路器的跳闸时间，因而保护動作速度快，可以缩短切除故障的时间。快速切除故障，可以减小故障元件的损坏程度，缩短用户在低电压下的工作时间，以及提高系统并列运行的稳定性。

应该指出，不能片面追求保护的快速动作。因为速动而有选择性的保护装置，一般都比较复杂，而且价格较高。应当根据电力系统的实际情况，对保护的速动性提出适当的要求。如在高压电网中，为了保证系统并列运行的稳定性，必须快速切除故障，要求保护的動作时间为0.02~0.04s。但是，电力系统在许多情况下，允许继电保护带一定的延时切除

故障。

3. 灵敏性

继电保护的灵敏性是指其对保护范围内发生的故障或不正常工作状态的反应能力。继电保护的灵敏性，通常用灵敏系数来衡量。灵敏系数应根据对继电保护动作最不利的条件进行计算。

对于反应故障时参数增大的继电保护，其灵敏系数为

$$K_{lm} = \frac{\text{保护区末端金属性短路时故障参数的最小计算值}}{\text{继电保护的動作参数}} \quad (1-1)$$

对于反应故障时参数降低的继电保护，其灵敏系数为

$$K_{lm} = \frac{\text{继电保护的動作参数}}{\text{保护区末端金属性短路时故障参数的最大计算值}} \quad (1-2)$$

考虑到故障可能是非金属的短路等因素，因此要求 $K_{lm} > 1$ 。在部颁《继电保护和自动装置技术规程》中，对各类保护的最小灵敏系数都作了规定（参见附录）。对于各种保护灵敏系数的校验方法，将在该保护的整定计算中分别讨论。

4. 可靠性

继电保护的可靠性是指，保护在应动作时，不拒动，而在不应动作时，不误动的性能。一般说来，保护装置组成元件的质量好、接线简单、运行维护调试水平高，保护的可靠性就高。保护动作不可靠，是系统事故的原因之一。为了提高保护动作的可靠性，发电厂、变电所及电力系统的工作人员，应加强职业责任感，提高技术水平，高质量地完成岗位工作。

在实现提高继电保护可靠性的措施中，防止保护误动与防止其拒动的措施往往是矛盾的。若采用两套保护分别作用于同一出口跳闸回路，有利于防止保护拒动，但是，增加了其误动作的可能性。若采用两套保护以“与”方式作用于出口跳闸回路，有利于防止保护误动，但不利于防止其拒动。因此，提高保护可靠性的措施，是以防止拒动为主还是以防止误动为主，应根据系统的具体情况，适当加以选择。

对于上述四个基本要求，对于动作于跳闸的继电保护，都应同时满足。但是这个满足，只能是相对的。因为在四个性能的要求之间，存在着矛盾。如速动性和选择性较高的保护，往往接线和技术都比较复杂，可靠性就比较低；为了提高保护的灵敏性，将增加其误动作的可能性，从而降低了可靠性；为了求得选择性，往往要降低速动性。为此，必须从电力系统的实际情况出发，适当处理这些矛盾关系，使得继电保护能全面满足这四个要求。

此外，在选择继电保护装置时，尚应考虑经济性。经济性首先要着眼于对整个国民经济有利，而不应局限于节省继电保护的投资。同时，对于那些次要而数量很大的电气元件，也不应装设复杂而昂贵的继电保护装置。

第三节 继电保护的基本工作原理及组成

为了实现继电保护的功能，它必须能够区分系统正常运行与发生故障或不正常工作状

态之间的差别。

电力系统发生短路故障时，有些参数发生变化，与正常运行时不同。例如电流增大、电压降低、线路始端测得的阻抗减小以及电流与电压之间的相位差发生变化等。利用这些差别，可以构成各种不同原理的继电保护。反应电流增大而动作的保护为过电流保护；反应电压降低而动作的保护为低电压保护；反应故障点到保护安装处之间的距离（或线路始端测量阻抗的减小）而动作的保护为距离保护（或低阻抗保护）。此外，尚可根椐线路内部故障时，线路两端电流相位差发生变化构成各种差动原理的保护。各种原理的保护，将在以后各章中分别讨论。

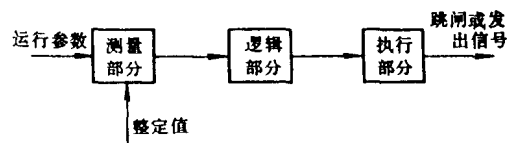


图 1-2 继电保护装置基本组成框图

继电保护装置一般是由测量部分、逻辑部分和执行部分组成，如图1-2所示。测量部分测量被保护元件的某些运行参数，并与保护的整定值进行比较，以判断被保护元件是否发生故障。如果运行参数达到或超过整定值，测量部分向逻辑部分发出信号，表明发生了故障，且保护装置已经起动。逻辑部分接受测量部分送来的信号后，按照预定的逻辑条件，判断保护装置是否应该动作于跳闸，即实现选择性的要求，并向执行部分发出信号。执行部分根据逻辑部分送来的信号，按照预定的任务，动作于断路器跳闸或发出信号。

第四节 继 电 器

继电器是组成继电保护装置的基本元件，是当输入量（激励量）的变化达到规定要求时，在电气输出电路中，使被控量发生预定阶跃变化的一种自动器件。如图1-3所示，正常情况下，继电器的输入量 x 较小，其产生对衔铁4的吸力小于弹簧2的反作用力，因而触点1打开，继电器无信号输出。当输入量 x 变化到产生的吸力大于弹簧的反作用力时，触点接通，被控制量 Y 有一阶跃变化，继电器动作。

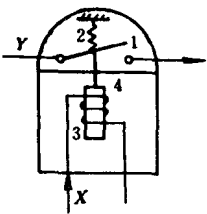


图 1-3 继电器的基本构成原理图

- 1—触点；2—弹簧；
3—线圈；4—衔铁

继电器的种类很多。按照其构成原理可分为电磁型、感应型、整流型、晶体管型（静态）等继电器；按照其反应的物理量可分为电流、电压、功率方向、阻抗、周波、气体等继电器；按照其用途可分为测量继电器与辅助继电器等。

国产继电器，一般用汉语拼音字母表示其型号。第一位字母代表继电器的工作原理。第二（或第三）位字母代表继电器的用途。例如“电”磁型电“流”继电器用DL表示，整“流”型“差动”继电器用LCD表示，详见表1-1。

继电器的一般图形符号为一个方框。框内标以字母或限定符号，表示该继电器的名称。常用继电器的符号示例参见表1-2。继电器的线圈和触点的图形符号示例如表1-3所列。

表 1-1

常用保护继电器型号中字母的含义

第一位 (原理代号)	第二位或第三位 (用途代号)	
D “电”磁型	L 电“流”继电器	FL “负”序电“流”继电器
G “感”应型	Y 电“压”继电器	FY “负”序电“压”继电器
L 整“流”型	G “功”率方向继电器	CD “差动”继电器
B “半”导体型	S “时”间继电器	CH “重合”闸继电器
J “极”化或“晶”体管型	X “信”号继电器	ZS “中”间有延“时”继电器
Z “组”合型	Z “中”间或“阻”抗继电器	DZ “低周”继电器
W “微”机型	P “平”衡继电器	
	D 接“地”继电器	

表 1-2

常用继电器的符号示例

名 称	图形符号	文字符号	名 称	图形符号	文字符号
电流继电器		LJ	时间继电器		SJ
电压继电器		YJ	信号继电器		XJ
功率方向继电器		GJ	中间继电器		ZJ
阻抗继电器		ZKJ	反时限电流继电器		LJ
差动继电器		CJ	瓦斯继电器		WSJ

表 1-3

继电器线圈和触点图形符号示例

名 称	图形符号	名 称	图形符号	名 称	图形符号
一般线圈		具有两个线圈继电器线圈		延时闭合的动合触点	
交流继电器的线圈		缓吸和缓放继电器线圈		延时断开的动合触点	
缓放继电器的线圈		动合 (常开) 触点		延时闭合的动断触点	
缓吸继电器的线圈		动断 (常闭) 触点		延时断开的动断触点	
极化继电器的线圈		先断后合的转换触点			

继电器的动合（常开）触点是指继电器有预定激励时闭合，无激励时断开的触点组件。
动断（常闭）触点是指有预定激励时断开，无激励时闭合的触点组件。

复 习 思 考 题

- 1-1 何谓电力系统的故障、不正常工作状态与事故？它们之间有何联系？
- 1-2 常见的短路故障有哪些种类？短路故障有哪些后果？
- 1-3 继电保护的主要任务是什么？
- 1-4 对继电保护有哪些基本要求？它们之间存在什么关系？试举例说明。
- 1-5 试述继电保护的基本原理。
- 1-6 继电保护装置一般由哪几部分组成？它们的作用各如何？
- 1-7 何谓继电器？保护继电器有哪些种类？
- 1-8 何谓动合（常开）触点和动断（常闭）触点？
- 1-9 对继电保护的经济性应如何考虑？
- 1-10 后备保护的作用是什么？何谓近后备和远后备？

第二章 继电保护装置的基础元件

第一节 互 感 器

继电保护装置一般是通过电压互感器、电流互感器接入被保护元件的。电压互感器的二次额定电压为100V，电流互感器的二次额定电流为5A或1A。互感器的二次侧都应有可靠的保安接地，以防互感器的一、二次绕组间绝缘损坏时，高电压对二次设备及人身的危害。运行中电流互感器的二次绕组不允许开路，以防数值很大的二次绕组感应电势，造成设备和人身事故。

电力系统中广泛采用电磁式电压互感器。由于电容式电压互感器造价低，且能比较真实地反映一次系统的暂态过程，因此它的应用日益增多。高压电网中快速保护所用的电流互感器，其铁心有的具有不大的气隙，以减小铁心饱和对保护的影响。

一、继电保护用互感器的极性和一、二次电气量的正方向

互感器绕组的极性问题，对继电保护装置能否正确动作有直接的关系。因此对互感器一、二次绕组的同极性端子都应注明标记。通常用 L_1 与 K_1 、 L_2 与 K_2 分别表示一、二次绕组的同极性端子。如只需标出相对极性关系时，也可在同极性端子上注以“·”号，如图2-1所示。通常只用“·”标示即可。图中也示出了互感器的一、二次电压（或电流）的正方向和相应的相量图。与电机学中对变压器规定的正方向有所差别，继电保护用互感器一次电压（或电流）的正方向规定为从“·”端指向无“·”端。电压互感器二次电压的正方向规定为从“·”端指向无“·”端；电流互感器二次电流的正方向规定为从无“·”端指向“·”端。相应地，二次电压 $\dot{U}_2$ 与经折合后的一次电压 $\dot{U}'_1$ 在理想条件下，其大小相等、相位相同。 $\dot{I}_2$ 与 $\dot{I}'_1$ 也是如此。这就好像继电器 YJ （或 LJ ）直接接于一次系统，分析问题，直观方便。

二、继电保护用电流互感器的选择与校验

图2-1（b）所示的 $\dot{I}_2 = \dot{I}'_1$ 是在不计励磁电流的理想条件下才成立的。根据变压器磁势平衡原理

$$\dot{I}_1 W_1 - \dot{I}_2 W_2 = 0$$

$$\text{所以} \quad \dot{I}_2 = \frac{W_1}{W_2} \dot{I}_1 = \frac{\dot{I}_1}{n_I} = \dot{I}'_1 \quad (2-1)$$

式中 W_1 、 W_2 ——一、二次绕组的匝数；

n_I ——电流互感器的变比。

实际上，由于励磁电流的存在，使 $\dot{I}_2 \neq \dot{I}'_1$ ，因而出现了电流互感器的误差。电流互感器一、二次电流大小的误差称为电流误差，又称变比误差，用 f_I 表示，且

$$f_I = \frac{I_2 - I'_1}{I'_1} \times 100\% = \frac{\Delta I}{I'_1} \times 100\% \quad (2-2)$$

二次电流相位的误差称为角度误差，用 δ 表示。

电流互感器在运行中产生的误差，主要取决于下列两个因素：

(1) 电流互感器的二次负载阻抗 Z_{fh} 。如果负载阻抗增大，电流互感器的输出电压增大，其铁心趋向饱和，励磁电流增大，故误差增大。

(2) 一次电流倍数 m 。一次电流倍数是指流过电流互感器的一次电流 I_1 与一次绕组额定电流 I_{1e} 之比，即

$$m = \frac{I_1}{I_{1e}} \quad (2-3)$$

如图2-2所示，当 m 较小时，随着 m 的增大，二次电流 I_2 线性增大。当 m 大到一定程度时，其铁心开始饱和， I_2 不随着 m 的增大而线性增大，而是增大得较慢，这就出现了电流互感器的误差。当 $m = m_{10}$ 时，其变比误差 $f_i = 10\%$ ， m_{10} 为饱和电流倍数。

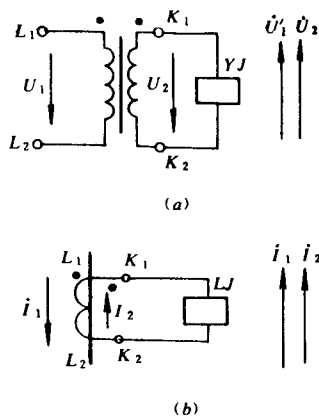


图 2-1 互感器的极性、正方向与相量图
(a) 电压互感器; (b) 电流互感器

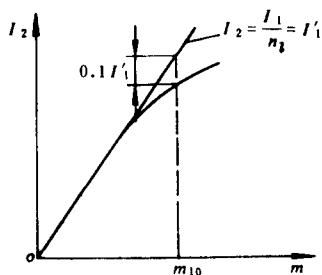


图 2-2 电流互感器二次电流与一次电流倍数的关系

对于继电保护用电流互感器，要求其变比误差不超过 10% ，角度误差不超过 7° 。因此，继电保护用电流互感器应根据所谓 10% 误差曲线校验选择。 10% 误差曲线，是指电流互感器变比误差为 10% ，角度误差不超过 7° 时，饱和电流倍数 m_{10} 与允许负载阻抗 Z_{fh} 之间的关系曲线。为了便于选择与校验电流互感器，制造厂对各种型号的电流互感器，都给出了相应的 10% 误差曲线，其形状大致如图2-3所示。如果实际计算所得的 m 与 Z_{fh} 值所确定的交点，位于曲线之下，其误差不会超过允许值。 10% 误差曲线也可用来验证电流互感器的二次负载阻抗是否超过允许值。

如果经 10% 误差曲线校验，电流互感器的误差不满足要求，可以采取两个变比相等的电流互感器串联的方法来弥补，其等效电路，如图2-4 (b) 所示 (图2-4, a 为一个电流互感器的等值电路)， R_x 为连接导线电阻和端子接触电阻之和。 Z_{fh} 为负荷阻抗，若不考虑二次回路各元件阻抗的相位差，则二次绕组端子间的电压

$$U_2 = I_2(Z_{fh} + 2R_x) \quad (2-4)$$