

《小水电培训教材》

电气二次回路 运行与维护



河海大学出版社

3

(R)

小水电培训教材(四)

电气二次回路运行与维护

(修订本)

虞 放 张新干 编

河海大学出版社

内 容 摘 要

主要介绍小型水电站常用的继电保护的结构原理、全部二次回路的构成、原理及动作过程、常见的自动装置的构成、原理及动作过程。重点在于培养识读二次图的能力,提高分析和处理事故的能力,并简要介绍调试方法。文字通俗易懂,理论结合实际,是作者长期从事电气技术工作和技工教育、技术培训工作的经验总结,可用作对电气运行检修工人进行技术培训的教材和技工学校有关专业的教材,对从事电气工作的技术人员也有一定的参考价值,每篇后附有各章节的习题与思考题,有助于教学和自习。全书教学时数 120 学时左右。

本书第二篇中的第六章至第十三章由张新干编写,其余均由虞放编写并负责全书的统稿及编附习题和思考题。本书由浙江省水利水电勘测设计院周宁垦工程师审稿。

责任编辑:谢业保

责任校对:张世立

电气二次回路运行与维护

(修订本)

虞 放 张新干 编

河海大学出版社出版发行

(210024 南京市西康路 1 号)

河海大学印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张:11.875 插页:4 字数:304 千字

1991 年 3 月第 2 版 2002 年 10 月第 5 次印刷

印数:16001—21000

ISBN 7-5630-0279-0/TK·13

定价:12.00

发展小水电的关键
是培训人才

钱正英
一九九一年十一月廿日

全国政协副主席、原水利电力部部长钱正英同志为《小水电培训教材》题词。

《小水电培训教材》编委会

主 审：单克明

主 任：王经权

副 主 任：查一民 周仲钺 陈彩云

编 委：陈建农 虞 放 李淑勤 方勇耕

李永国 张新干 程泾川 唐文品

余国治

编委会秘书：吴俊燕

加強專業培訓
提高職工素質

楊振懷

水利部部長楊振懷同志一九九一年二月為《小水電培訓教材》
題詞。

为发展祖国水电

事业而奋斗

陈绍沂

一九五十年

浙江省水利厅厅长陈绍沂题词

序

我国幅员广大、山峦起伏、河流纵横、水力资源十分丰富，理论蕴藏量为6.8亿千瓦，可开发蕴藏量为3.7亿千瓦，居世界首位。建国四十年来，我国农村水电事业取得了很大成绩。到1990年底，全国农村水电装机容量已达一千四百万千瓦，年发电量四百八十八亿千瓦时。与此同时，建成了具有相当规模的配套电网，拥有高、低压输、配电线路二百零八万公里，变电设备四千六百万千伏安，担负着全国三分之一以上县（市）的工农业生产和广大人民生活的供电任务。为全国五百二十万平方公里国土上的三亿亩耕地、三亿人口提供了廉价的电力。

农村水电关系着国民经济中农业和能源两个战略重点，农村水电的建设和地方电网的发展，有力地促进了这些地区的经济发展和精神文明建设，对发展地方工业特别是乡镇企业、改善人民生活、脱贫致富方面起着十分重要的作用。

如何把这些工程设施和机电设备管好用好，使其充分发挥作用，这是摆在我们全国农村水电战线上五十万职工的一项迫切而艰巨的任务，当前最大的问题是管理人员素质偏低，技术水平和技术装备远远赶不上发展的需要。

由浙江省水利部门的领导和专家历经辛苦编写的《小水电培训教材》现已由河海大学出版社出版。

这套培训教材图文并茂，内容简明扼要、生动而丰富，教材实用性强，第一版发行后，经过几期培训班的教学，深受广大职工的普遍欢迎。这套教材可以作为我国农村水电职工学习基本知识和进行岗位培训的教材，这对加强专业培训、提高广大职工的技术素质和岗位生产工作能力将发挥积极的促进作用。

水利部农村水电司司长邓秉礼

一九九一年六月

再 版 前 言

“八五”计划和十年规划的实施，将使我国小水电事业进一步迅猛发展。新形势对小水电提出了新要求，为了提高职工素质和对新职工进行上岗技术培训，就必须进行系统的教育，“百年大计，教育为本”。我们在1990年6月出版了“小型水电站培训教材”，全套书共六本：（一）《水轮机及辅助设备运行与维修》；（二）《调速器调试与故障处理》；（三）《电气一次设备运行与维修》；（四）《电气二次回路运行与维护》；（五）《低压水轮发电设备运行与维修》；（六）《小型水电站运行规程与管理》。本书第一版一万一千余套，时仅数月，即告售缺。各地纷纷要求再版，经水利部农电司邓秉礼司长同意，决定再版后本书为全国小水电系统统一的职工培训专用教材，并指定作为统考命题的根据。有鉴于此，水利电力出版社音像部以这套教材为依据，正在配套制作音像教材。

再版前，水利部老部长、全国政协副主席钱正英同志，水利部杨振怀部长都肯定了这套教材，并分别为本书题了词。

这套书除《低压水轮发电设备运行与维修》一书外，其余都是针对高压机组的机电设备进行编写的，因此全套书可供不同工作类型的水电站职工选用。整套书的内容涉及面广，包括小型水电站全部机电设备的运行、维修和故障处理等。读者依据本教材经过技术培训后，能直接上岗对设备进行操作运行，并能独立进行一般的设备故障处理和完成常规的设备检修工作。

考虑到读者大部分为初中文化程度这一特点，在编写过程中，我们力求“短小精悍，通俗实用”。对必需用到的理论公式一般不作深入的推导，在简明扼要地导出公式后，重点放在公式所揭示的物理意义和应用中需着重解决的问题上。对复杂的设备，我们尽量多地配置插图，并以立体图、透视图作辅助手段，以便于读者看懂图，建立实物空间概念。对运行、维修的常规操作和处理手段，书中提供了较多实例，以便于读者针对工作中遇到的实际问题及时查阅。

本书曾作为浙江省小水电系统统一的职工培训教材和考试发证用书，于1984年前后在浙江省水电系统内部发行了八千余套，得到读者普遍好评。1988年又被定为浙江省小水电行业农民技术职称评定的理论考试用书。1984年10月原水电部在广西恭城县召开的全国小水电培训工作座谈会上，各地选送推荐了一批教材，对这套教材反映较好。会后，根据各方面的反映，原水电部农电司有关负责同志多次函告浙江省水利厅，要求对这套书进一步修改充实后，作为全国小水电统一的职工培训教材。

本书出版一年多来，各地反映良好，并提出了不少的宝贵意见，在此基础上，我们又组织原班人马进行了修订，聘请专家作了核实，其中有的还作了较大的改动，使全书的内容更为全面、翔实。

这套书由浙江省水利厅再次组织编写，编写委员会主任为浙江水利水电专科学校王经权，副主任为河海大学出版社查一民，水利电力出版社杭州发行站周仲钺、浙江省水电开发管理中心陈彩云，委员为陈建农、虞放、李淑勤、方勇耕、李永国、张新干、程泾川、唐文品、余国治。浙江省水利水电勘测设计院张道宏、苏孝焯、吕诚源、胡文宝、周宁垦、陈家骢负责审稿。

在再版过程中，得到了浙江水利水电专科学校、水利电力出版社杭州发行站、浙江省水电开发管理中心、浙江省水利水电勘测设计院、浙江水电技工学校等单位大力协助，在此表示衷心感谢。

全书再版时虽作了认真的修改，但难免还会存在缺点和错误，热忱希望读者予以批评指正。

单克明

一九九一年七月

注：再版前言作者单克明同志为浙江省水利厅副厅长。

目 录

第一篇 继电保护

第一章 继电保护的基本知识

- 第一节 继电保护的任務 (1)
- 第二节 对继电保护的基本要求 (2)
- 第三节 几种常用的电磁式继电器及其表示符号 (4)

第二章 输电线路的继电保护

- 第一节 定时限过电流保护 (13)
- 第二节 电流速断保护 (16)
- 第三节 三段电流保护 (19)

第三章 小接地电流系统的绝缘监察和接地保护

- 第一节 电力系统中性点接地方式 (22)
- 第二节 绝缘监察和接地保护装置 (24)

第四章 电力变压器的继电保护

- 第一节 概述 (28)
- 第二节 纵联差动保护装置 (29)
- 第三节 变压器的电流速断保护 (37)
- 第四节 瓦斯保护 (38)
- 第五节 低电压起动或复合电压起动的过电流保护 (42)
- 第六节 变压器的过负荷保护 (45)
- 第七节 双绕组变压器保护接线总图例 (45)

第五章 水轮发电机的继电保护

- 第一节 概述 (49)
- 第二节 纵差动保护 (51)
- 第三节 低电压起动或复合电压起动的过电流保护 (52)
- 第四节 过电压保护 (52)
- 第五节 发电机转子一点接地保护 (52)
- 第六节 对称过负荷保护 (55)
- 第七节 发电机继电保护接线总图 (56)

习题和思考题

第二篇 二次回路

第六章 概述

- 第一节 原理接线图 (63)
- 第二节 展开接线图(原理展开图) (64)
- 第三节 安装接线图 (65)

第七章	距离控制	
第一节	控制开关	(66)
第二节	操作机构(操动机构)	(70)
第三节	对控制电路的基本要求	(70)
第八章	小水电站中常见的信号装置	
第一节	事故信号	(73)
第二节	预告信号	(78)
第三节	保护装置动作和自动重合闸动作信号	(79)
第九章	隔离开关回路和电压互感器回路	
第一节	隔离开关的闭锁回路	(81)
第二节	电压互感器回路接线	(81)
第十章	同期系统接线	
第一节	1T1—S 型同步表	(83)
第二节	组合式同步表	(83)
第三节	同期接线	(85)
第十一章	测量表计的接线	
第一节	测量表计的设置	(87)
第二节	测量表计的接线	(88)
第十二章	直流系统接线	
第一节	直流系统供电接线图	(93)
第二节	蓄电池运行方式和充电装置的操作	(94)
第三节	绝缘监察装置	(95)
第四节	电压监察装置	(98)
第五节	整流操作的直流系统	(98)
第十三章	二次安装接线图	
第一节	回路编号及电缆编号	(103)
第二节	屏面布置图	(106)
第三节	端子图	(107)
第四节	屏后接线图	(108)
第十四章	二次线装配	
第一节	二次配线	(111)
第二节	配电盘的安装	(112)
第三节	二次线的检修及试验	(115)
习题和思考题		

第三篇 自动装置

第十五章	自动重合闸	
第一节	概述	(119)
第二节	重合熔断器和带弹簧操作机构断路器的自动重合闸	(121)
第三节	单端电源线路三相电气式可自动复归的一次自动重合闸装置	(122)

第四节	双电源供电线路的检查线路无电压及检查同期的重合闸简介	(127)
第五节	自同期重合闸 (ZZCH) 简介	(128)
第十六章	同步发电机的自动调节励磁装置	
第一节	概述	(129)
第二节	带电压校正器的复式励磁装置	(130)
第三节	快速相复励自动调节励磁装置	(138)
第四节	继电强行励磁装置和继电强行减磁装置	(141)
第五节	可控硅励磁装置	(145)
第十七章	水轮发电机组突然甩负荷时防止飞车的自动保护装置	
第一节	装设水电阻自动投入装置	(163)
第二节	装设闸门自动关闭装置	(164)
习题和思考题		
附 录	(167)

第一篇 继电保护

第一章 继电保护的基本知识

第一节 继电保护的任務

继电保护装置是确保水电站和电力系统安全运行的重要设备。水电站中各主要电气设备，如发电机、变压器和输电线路等，都装设有专门的继电保护装置。继电保护装置，通常由若干继电器组成。

由于设计、安装及运行维护不当或设备缺陷、陈旧、老化，以及其他原因，电站及电力系统中某些设备会发生故障或不正常运行状态。（说明：目前电站运行中通常把不能继续运行，必须跳闸或停机的设备故障称之为“事故”，把虽出现了某些不正常反映，但尚能继续运行的设备故障称之为“故障”。本篇所指“故障”和“不正常运行状态”就是指“事故”和“故障”而言。）常见的故障主要是各种形式的短路，常见的不正常运行状态主要是过负荷、中性点不接地系统的单相接地、变压器发生轻瓦斯、二次电压回路断线等。其中各种短路故障是最常见和最严重的故障。

短路的种类有：单相接地短路 $[D^{(1)}]$ 、两相接地短路 $[D^{(1,1)}]$ 、两相短路 $[D^{(2)}]$ 、三相短路 $[D^{(3)}]$ ，其中最常见的是架空线路的单相接地短路，而最严重的则是三相短路，特别是电源三相短路。

短路的原因有：①绝缘损坏；②不正常运行状态的发展；③设计、安装、调试不当；④自然灾害；⑤误操作责任事故（主要由于运行人员技术水平低、不遵守操作规程、工作不负责任等）。

短路故障所造成的危害归纳起来有如下几个方面：

1. 比正常电流大得多的短路电流流过电气设备时产生大量的热量，严重损害绝缘材料。短路时产生的巨大的电动力，使电气设备结构遭受严重损坏，同时在短路点产生强大的电弧，会烧坏电气设备，使电站停产、用户停电。

2. 短路故障将导致电力系统的电压和频率下降，影响电力用户的正常工作，或使产品数量减少、质量下降、多出次品或废品。

3. 短路故障有可能导致发电机乃至整个电力系统并列运行稳定性的破坏，引起系统解列和崩溃，从而造成大面积停电事故，使国民经济受到巨大损失。

水电站和电力系统中最容易发生事故的元件有：①架空线路（由于线路长，暴露于旷野之中，环境条件差）；②开关电器（经常在带负荷或短路情况下跳、合闸）；③旋转电机（由于受到电气和机械的作用，特别是电弧容易引起短路和火灾）。

不正常运行状态也会带来不良后果，例如过负荷，会使电气设备过热，加速绝缘材料的老化和损坏，并有可能发展成为故障。

继电保护的任務是：

1. 当某一个被保护的电气元件（或设备）发生故障时，继电保护装置能自动地、迅速地、

有选择地动作，并借助于断路器跳闸机构的作用，把故障的电气元件(或设备)从电力系统中切除，使非故障部分能迅速恢复正常运行，并使故障元件(或设备)免遭继续破坏，以减少或消除故障所引起的严重后果。

2. 当某一个被保护的电气元件(或设备)出现不正常运行状态时，继电保护装置经过一定的时限后能发出警告信号，引起运行人员注意，并采取相应措施，以消除不正常运行状态。

3. 继电保护和自动装置相配合，一方面提高供电的可靠性；另一方面可以不断地自动调整系统的电压与频率，保证电能质量及自动进行有功功率和无功功率的经济分配，提高经济效益。

鉴于目前我国小水电的规模和特点，本书未介绍 110 千伏电压级输电线路及电网的功率方向和距离保护，且限于篇幅，也未详细介绍晶体管继电保护。

第二节 对继电保护的基本要求

为了使继电保护能及时、正确地完成它所担负的任务，对继电保护提出了选择性、迅速性、灵敏性和可靠性等四个基本要求。

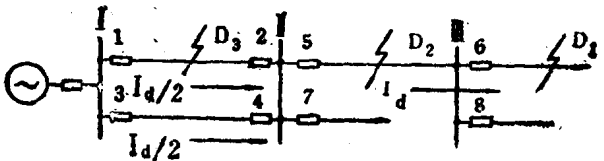


图1-1 继电保护动作具有选择性图例

以图1-1为例，来说明继电保护动作选择性。

在图1-1所示电路中，各断路器都装有一套继电保护装置。若 D_1 点发生短路，则短路电流 I_d 将同时流过断路器 1、2、3、4、5、6，最后流至故障点 D_1 处，在这种情况下，相应的继电保护装置有可能同时动作于断路器跳闸，这样就会造成无选择性动作，从而扩大停电范围。例如，当 D_1 点短路时，若继电保护动作于首先使断路器 5 跳闸，则将造成变电所 II 全部停电，而根据选择性的要求，应首先使断路器 6 跳闸，把故障切除，使非故障部分能迅速恢复正常运行。同理，当 D_2 点发生短路时，继电保护应首先动作于使断路器 5 跳闸将故障切除。 D_3 点短路时，则应动作于使断路器 1、2 同时跳闸而将故障切除。

应当指出，上一元件的保护装置还应起到下邻元件的后备保护作用。例如，当 D_1 点短路时，由于某种原因，断路器 6 所在处的继电保护装置或断路器及其操作机构拒绝动作，则应由断路器 5 所在处的继电保护动作于使断路器 5 跳闸，将故障切除，这种对下邻元件的后备保护作用，称为远后备。而每一断路器所在处的几套继电保护中，总有一套是主保护，其余的为后备保护，当主保护不动作或拒绝动作时，应由后备保护动作于使断路器跳闸，将故障切除，这种后备保护称为近后备。

二、迅速性

若能快速切除故障，有如下好处：

1. 可以减少短路电流对电气设备造成的损害；
2. 可以加速系统电压的恢复过程，为电动机的自启动创造有利条件；
3. 可以提高发电机并列运行和电力系统并列运行的稳定性；
4. 可以防止故障的扩展，提高自动重合闸的成功率。

切除故障所需要的时间等于继电保护动作时间与断路器跳闸至灭弧时间的总和，为此，必须采用快速继电保护和快速断路器。目前常用的油断路器的跳闸时间为0.1~0.15秒，空气断路器的跳闸时间约为0.05~0.08秒，最快速的继电保护装置的动作时限约为0.02~0.04秒。

应当指出，迅速性和选择性往往是有矛盾的，当两者发生矛盾时，一般应首先满足选择性。另外，在许多场合，电网允许有一定延时来切除故障，就不一定都要选用价格昂贵的快速动作的断路器和继电保护装置，以降低设备费用。

三、灵敏性

灵敏性是指继电保护对被保护电气设备可能发生的故障和不正常运行状态的反应能力。一般是用被保护电气设备故障时，通过保护装置的故障参数（例如短路电流）与保护装置的動作参数（例如动作电流）的比值大小来判断的，这个比值称为灵敏系数，用 K_{lm} 表示。

1. 对于反应故障参数量增加而动作的保护装置，其灵敏系数的定义为：

$$\text{灵敏系数} = \frac{\text{保护区末端金属性短路时故障参数的最小计算值}}{\text{保护装置动作参数的整定值}}$$

例如：对于过电流保护， $K_{lm} = \frac{I_{D \cdot zx}}{I_{dz \cdot j}}$

式中： $I_{D \cdot zx}$ ——被保护区末端金属性短路时的最小短路电流（二次值）。

$I_{dz \cdot j}$ ——过电流继电器的动作电流。

2. 对于反应故障参数量降低而动作的保护装置，其灵敏系数的定义为：

$$\text{灵敏系数} = \frac{\text{保护装置动作参数的整定值}}{\text{保护区末端金属性短路时故障参数的最大计算值}}$$

例如：对于低电压保护， $K_{lm} = \frac{U_{dz \cdot j}}{U_{D \cdot zd}}$

式中： $U_{dz \cdot j}$ ——低电压继电器的动作电压。

$U_{D \cdot zd}$ ——被保护区末端金属性短路时，保护安装处的最大残压（二次值）。

在《继电保护和自动装置规程》中，对于各种保护装置的最小灵敏系数都作了具体规定，其中主保护的灵敏系数一般要求不小于1.5~2。

如果保护装置的灵敏系数达不到要求，则保护装置就不能可靠动作，或者使保护范围缩小。为此，要求保护装置不但在最大运行方式下三相金属性短路时能可靠地动作，而且在最小运行方式和经过较大的过渡电阻两相短路时也能可靠地动作。

最大运行方式是指被保护线路末端短路时，系统等值阻抗最小，而通过保护装置的短路电流为最大的运行方式。

最小运行方式是指被保护线路末端短路时，系统等值阻抗最大，而通过保护装置的短路电流为最小的运行方式。

四、可靠性

根据可靠性的要求，凡投入运行的继电保护装置，应经常处于准备动作的状态，当被保护的电气元件（或设备）发生故障或不正常运行状态时，保护装置应能正确动作，不应拒动，而其他非故障电气元件（或设备）的保护装置则不应误动。如果不能满足可靠性的要求，则继电保护装置本身便成为扩大事故或直接造成事故的根源。继电保护装置的任何拒动或误动，都会给电力系统的安全运行带来严重威胁。为了提高保护装置动作的可靠性，应尽量采用高

质量的继电器和其他电气元件，简化保护装置接线（即所采用的继电器个数及串联的接点数目应尽可能少些），提高安装和调试质量，以及加强运行维护等。

除上述四个基本要求外，对各种继电保护装置，还应根据运行的需要，尽量考虑降低设备的投资和维护费用，提高使用效果和利用率。

第三节 几种常用的电磁式继电器及其表示符号

继电器按构成原理可以分为电磁式、电动式、感应式、整流式、晶体管式、单板机式等。现主要介绍电磁式继电器，对晶体管式继电器也在有关章节中作简要介绍。

一、电磁式继电器的结构和工作原理

1. 电磁式继电器的结构

电磁式继电器的结构型式主要有三种，即螺管线圈式、吸引衔铁式及转动舌片式（见图1-2），每种结构型式皆包括六个基本组成部分，即电磁铁铁芯1、可动衔铁（或舌片）2、线圈3、接点4、反作用弹簧5和止挡（或称限位器）6。

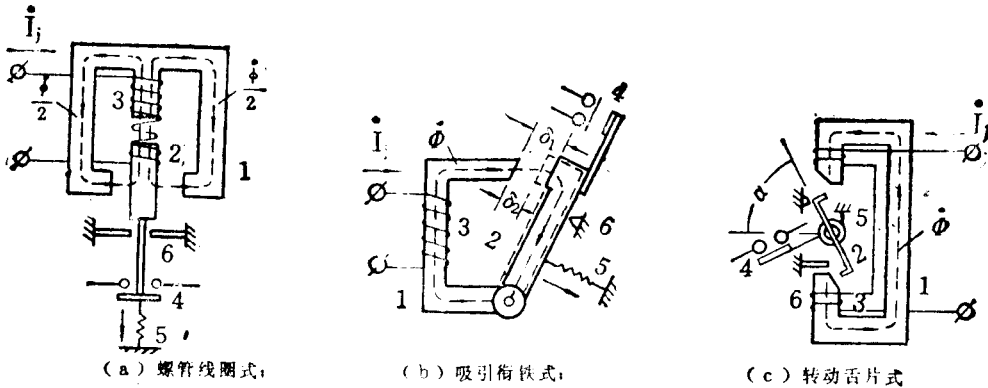


图1-2 电磁式继电器三种基本结构型式

2. 电磁式继电器的工作原理

当电磁铁的线圈中通过电流 I_j 时，在导体中就立即建立起磁通 ϕ ，该磁通经过电磁铁的铁芯、空气隙和衔铁（或舌片）而形成闭合回路。由于可动衔铁（或舌片）被磁化，产生了电磁力 F_{dc} 或电磁力矩 M_{dc} ，使图1-2（a）中衔铁被吸上，图1-2（b）中衔铁2被吸向左，图1-2（c）中的舌片顺时针旋转。当然只有电磁力（电磁力矩）大于弹簧及轴与轴承摩擦所产生的反作用力（或力矩）时，上述情况才能发生，并使接点闭合。

根据电磁学的原理可知，电磁力 F_{dc} 与磁通 ϕ 的平方成正比，当磁路未饱和时，磁通 ϕ 又与通过继电器线圈中的电流 I_j 成正比，用数学公式表达如下：

$$\text{因为 } F_{dc} \propto \phi^2, \text{ 即 } F_{dc} = K_1 \phi^2 \quad (1-1)$$

$$\text{当磁路未饱和时, } \phi \propto \text{磁势 } F = I_j \cdot W_j$$

$$\text{根据磁路欧姆定律可知, } \phi = \frac{F}{R_m} = \frac{I_j W_j}{R_m} \quad (1-2)$$

将（1-2）式代入（1-1）式得：

$$F_{dc} = K_1 \left(\frac{I_j W_j}{R_m} \right)^2 = K_1 \frac{W_j^2}{R_m^2} I_j^2 = K_2 I_j^2 \quad (1-3)$$