

电厂新技术岗位培训教材

电气部分

电力主设备继电保护的 理论实践及运行案例

中国华电集团公司电气及热控技术研究中心 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

电厂新技术岗位培训教材

电气部分

电力主设备继电保护的 理论实践及运行案例

中国华电集团公司电气及热控技术研究中心 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统地介绍了电力系统主设备（包括发电机、变压器、母线、高压电动机及厂用低压变压器）保护的配置、各种微机型保护的构成原理、交流接入回路、逻辑框图及定值整定计算等；阐述了电流互感器、电压互感器的工作特点、特性、误差、接地及配置问题；叙述了发电厂及变电站的直流系统及厂用快切等问题；并提出了电力系统短路电流的简化计算方法及列举了 600MW 发电机组全套保护的整定计算实例。

此外，在书中收集并分析了国内各地主设备保护的许多不正确动作的案例，并提出了进一步提高主设备保护动作可靠性的相应对策和措施。

本书适用性及可操作性较强，可作为发电、供电及用电企业的工程技术人员、技师及技术工人提高专业技术水平的培训教材及工作的参考资料，还可作为电力设计部门、技术管理部门及大专院校有关人员的技术参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力主设备继电保护的理论与实践及运行案例/中国华
电集团公司电气及热控技术研究中心编. —北京：中国水
利水电出版社，2009

电厂新技术岗位培训教材. 电气部分

ISBN 978 - 7 - 5084 - 6347 - 6

I. 电… II. 中… III. ①电气设备-保护-技术培训-
教材②电气设备-运行-技术培训-教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 034058 号

书 名	电厂新技术岗位培训教材
作 者	电气部分 电力主设备继电保护的理论与实践及运行案例
出版发行	中国华电集团公司电气及热控技术研究中心 编 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
刷 印	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 23.25 印张 551 千字
版 次	2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	49.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《电厂新技术岗位培训教材》编委会成员

主 任：邓建玲

副 主 任：张 涛 胡日查 姜家仁 张东晓 刘传柱

徐 刚 白绍桐

委 员：张国新 江炳思 黄 湘 杨铁军 严新荣

许全坤 毕诗方 刘志明 彭刚平 郭效军

丛书主编：彭刚平 郭效军

执行主编：陈云仑 乔旭梅

本分册主要编写人员

主要编著者：李玉海 陈雪峰 李 鹏

参编人员：唐 瑞 刘 昕 季新超 程克源 奚科伟
胡 昀 李 伟

技术顾问：陆于平 浦南楨

序一

在电力工业的发展进程中，特别是厂网分开以来，发电装机容量容量的增长速度是前所未有的，单机容量已突破百万千瓦，发电技术已实现超超临界发电和空冷发电等。发电规模成倍增加及预期经济和社会效益充分发挥的关键是确保发电机组安全、稳定、高效运行，同时满足国家节能环保要求，这也是广大发电企业一个永恒的主题。

在电厂安全稳定运行中，电气控制技术（含继电保护、励磁、变频节能、除尘节能控制等）和热工控制技术（含分散控制系统、计算机网络技术、单元机组自动控制、PLC 可编程控制等）所起的作用是不言而喻的，而熟练掌握相应专业技术人才的不足已成为企业科学发展的瓶颈。因此，不断提高发电厂电气和热控专业技术人员的素质及运行管理水平，是电力企业的一项重要工作。为了充分体现发电技术的发展现状，给电气及热控专业人员培训提供系统、实用、可操作、案例丰富的教材，造就一支能力强、业务精、能打硬战的专业人才队伍，中国华电集团公司电气及热控技术研究中心组织编写了“电厂新技术岗位培训教材”。

本套教材是总结多年电厂岗位培训实践的结果，汇集了多位专家、教授和现场技术人员的集体智慧，反映了最新技术应用成果，具有一定的超前性和很高的实用性。以能力培养为主，全面提升继电保护、热工自动化、运行管理检修等专业人员的技术、技能水平；突出实用性、完整性和先进性，适合集中培训和自主学习。本套教材的出版必将有助于电气专业和热控专业及相关人员的学习和培训，有助于提高电厂运行、检修、管理人员应用继电保护（电气控制）及热工自动化基础理论解决生产运行中实际问题的能力，有助于发电企业运行、管理人员以及有关设计、研制人员提高业务素质，从而提高设备的运行管理水平。

本套教材的正式出版，是电力体制改革后，中国华电集团在缺少原有电力技术体系支撑的情况下，根据自身的发展需要，从实际需求出发，结合多年的技术进步，完全依靠自己的专家和技术优势编写而成。它区别于一般专业技术学历教育用教材，也不同于一般的技术交流和经验总结性丛书。它立足于发电企业，充分运用案例的示范效果，强化实用和解决实际问题，填补了该领域应用型技术在岗学习教材的空白，完全适用于国内其他发电集团的相关技术人员学习。特别是本套教材在出版之前已进行了一年多的培训试用，获得了受训学员的一致好评和电力系统同行的广泛认可，是近年来难得的专业培训用教材。

希望通过本套教材的出版，能促进发电企业运行、检修岗位涌现出更多专家；更希望通过不断总结经验，不断提高运行、检修水平，为发电系统安全稳定、经济、节能环保运行作出贡献。

中国华电集团公司



2009年4月

序二

随着国民经济的发展和电力系统迅速扩大,电力主设备日益增多。电力主设备(发电机、变压器)的单机容量也迅速增大(1000MW、1200MVA),电压等级也随之越来越高。

为了确保电力主设备的安全经济运行,提高其继电保护的正确动作率是十分重要的。而提高继电保护动作可靠性,其保证继电保护装置性能良好、二次回路正确、整定值合理是相当重要的。此外,还需要对保护装置进行正确的试验检查及运行维护。

目前,在电力主设备上广泛采用数字式保护装置,其实现原理也在不断创新。对于不同容量及不同类型的电力主设备,其保护的配置、构成原理、选型以及整定值都各不相同。为使主设备保护配置合理、选型正确、正确的维护试验以及定值计算,需要从事继电保护工作的人员应具有较高的理论水平、工作能力及事故分析能力。

近几年来,由于电力事业迅速发展,从事电力主设备继电保护工作的人员猛增。而大量从业人员的继电保护专业理论水平参差不齐,工作实践经验缺乏等原因,往往导致对故障分析较困难,不能胜任较复杂的定值计算。因此,需要有实践经验且实用的教材对从事继电保护工作人员进行培训。本书能满足从事继电保护工作的有关人员提高技术水平的要求。

本书的作者长期从事电力主设备的研究、试验及技术改造工作,具有丰富的现场工作实践经验,同时又对数字式电力主设备保护的结构、制造、工艺、原理特点及调试有系统的分析和研究,在大机组保护整定计算方面也实践经验丰富。

通过对本书的阅读,一定能为读者在继电保护整定、调试运行、管理等诸多方面带来有益的帮助。

东南大学教授

陆子平

2008年12月

前 言

随着电力工业的发展,电力主设备的容量不断增大,电压等级越来越高。电力主设备容量及电压等级的不同,其继电保护的配置、选型及整定值也不同。

为满足不同电力主设备对继电保护的要求,其全套保护的合理配置、正确选型以及定值的正确整定是必要的。这要求从事该项工作的人员应具有相应的理论水平。

运行中的电力系统出现异常,或系统故障时继电保护动作,这时要求继电保护人员能迅速排除异常并进行故障定位,对继电保护的動作行为进行评估,对此更需要有较高的理论水平和实践经验。

继电保护包括保护装置及其二次回路。只有保护装置本身状态良好和二次回路正确,才能保证继电保护动作的可靠性。为此,继电保护工作人员应对电流互感器、电压互感器及二次回路有充分的了解。

总之,为提高电力主设备继电保护的動作可靠性,从事继电保护的人员应具有扎实的理论基础、丰富的现场实践经验、故障定位及故障分析的能力,并能根据电力主设备的特点提供合理的继电保护整定值。

本书是为提高继电保护工作人员的理论水平,丰富其实践知识及提高整定计算能力编写的。

本书的主要内容如下:

(1) 系统地论述了发电机、变压器、母线、高压电动机及厂低变的故障及保护的配置,各种保护的构成、原理及定值计算。

(2) 较详细地介绍了电磁式电流、电压互感器的额定参数、工作特点、误差及接地等问题。

(3) 提出了发电厂短路电流的实用计算方法、步骤及计算实

例,介绍了一台大型机组保护的整定计算实例。

(4) 介绍了电力主设备差动保护、接地保护、过激磁保护、发电机失磁保护等的不正确动作案例,提出了相应的提高可靠性措施,论述了断路器偷跳的机理及对策措施。

(5) 介绍了发电厂的快切装置及直流系统问题。

本书是由中国华电集团公司电气及热控技术研究中心组织编写的。在编写的过程中,得到了国电南自公司电厂自动化分公司领导及国电南自凌伊公司的大力支持,得到了陆于平、浦南桢、邵家琪、杨炜、周栋骥、曹良、李莉等专家教授的大力支持,并提出了十分宝贵的建议,在此表示感谢。

本书在介绍大型机组保护的计算问题时,采用了某些电厂机组及主接线的有关计算参数,在此表示谢意。

另外,在编写过程中得到了国电南自公司电厂自动化分公司唐瑞女士的大力帮助,深表谢意。

东南大学教授、博士生导师陆于平先生审核了全书,提出了十分宝贵的建议并欣然作序,在此表示感谢。

由于时间仓促及我们水平所限,书中出现谬误在所难免,诚恳希望批评指正。

编 者

2009年1月

下角标对照表

k	短路点	m	中
rel	可靠	h	高
unb	不平衡	s	过负荷, 下限
set	整定	up	过负荷, 上限
op	动作	0	零序
0op	零序动作	1	正序
op. 0	初始动作	2	负序
res	制动	f	励磁
res. 0	拐点电流	er	误差
0res	零序制动	br	分支
d	差动	0br	零序分支
0d	零序差动	sen	灵敏
l	低	co	配合

目 录

序一	
序二	
前言	
下角标对照表	

第 1 章 发电机保护	1
1.1 基本概念	1
1.2 发电机纵差保护	4
1.3 发电机横差保护	9
1.4 纵向零序电压式发电机定子匝间保护	12
1.5 定子接地保护	16
1.6 发电机失磁保护	26
1.7 发电机负序过负荷及过电流保护	39
1.8 发电机反时限对称过负荷及过电流保护	43
1.9 发电机转子绕组过负荷及过电流保护	45
1.10 发电机复合电压闭锁过流保护	48
1.11 发电机转子接地保护	49
1.12 发电机失步保护	54
1.13 其他保护	57
第 2 章 变压器保护	63
2.1 基本概念	63
2.2 故障量经变压器的传递	66
2.3 变压器纵差保护	74
2.4 其他差动保护	95
2.5 差动保护的 TA 断线闭锁	100
2.6 短路故障的后备保护	101
2.7 发电机及变压器过激磁保护	110
2.8 变压器中性点间隙保护	114
2.9 三绕组自耦变压器保护的特点	116
2.10 非电量保护	120

2.11 功率方向元件动作方向正确性检查	122
第3章 母线保护	131
3.1 基本概念	131
3.2 母线差动保护	133
3.3 母联过流及充电保护	150
3.4 母联断路器失灵保护及死区保护	151
3.5 断路器非全相运行保护	152
3.6 断路器失灵保护	154
3.7 母线保护的整定计算	158
第4章 高压电动机保护	163
4.1 基本概念	163
4.2 电动机的纵差保护	166
4.3 电动机的电流速断或延时速断保护	169
4.4 其他电流保护	171
4.5 单相接地保护	175
4.6 电动机的其他保护	178
第5章 厂用低压变压器保护	181
5.1 基本概念	181
5.2 过电流保护	183
5.3 过负荷及负序过电流保护	187
5.4 厂低变的接地保护	188
第6章 发电厂短路电流简化计算及 600MW 机组保护整定计算	191
6.1 概述	191
6.2 阻抗标么值的换算	193
6.3 等值网路的化简	197
6.4 不对称短路时的序网图	199
6.5 短路电流的计算	202
6.6 短路电流的计算实例	204
6.7 主设备保护整定计算	214
6.8 600MW 发电机组保护整定计算实例	218
第7章 互感器	236
7.1 概述	236
7.2 电流互感器	237

7.3 电压互感器	256
7.4 电流—电压变换器	268

第8章 提高主设备保护动作可靠性问题 271

8.1 基本问题	271
8.2 提高主设备纵差动保护的動作可靠性	275
8.3 提高发电机定子匝间保护可靠性	287
8.4 提高基波零序电压式定子接地保护动作的可靠性	292
8.5 提高三次谐波电压式定子接地保护的可靠性	299
8.6 发电机失磁保护	309
8.7 发电机过激磁保护	315
8.8 转子接地保护	319
8.9 电厂全厂停电事故原因的调查和分析	323
8.10 断路器的偷跳问题	326

第9章 直流系统 333

9.1 直流系统的构成及对其的要求	333
9.2 直流系统的绝缘检测	336
9.3 直流系统接地位置的检查	340
9.4 直流系统的其他问题	341

第10章 厂用电源快速切换装置 344

10.1 基本概念	344
10.2 快切装置的构成及基本功能	346
10.3 对厂用系统及某些继电保护的要求	351
10.4 切换方式	352
10.5 整定计算	352

参考文献 355

第1章 发电机保护

1.1 基本概念

1.1.1 发电机

发电机的作用是将汽轮机、水轮机或燃汽轮机输出的机械能转换成电能。

1.1.1.1 主要构成

发电机主要由定子和转子两部分构成，旋转的转子，静止的定子。在定子与转子间留有适当的间隙，通常将该间隙称作为气隙。发电机的定子由圆筒形的铁芯和绕组两大部分构成。定子铁芯由电工钢片锻压而成。发电机的转子由圆柱形铁芯、磁极及单相绕组构成。

转子上的极对数为1的三相交流同步发电机的结构示意图如图1-1所示。

在定子铁芯的内环上设置有槽，每个定子槽分上槽和下槽，上槽及下槽中分别设置有一根线棒。线棒多为铜管子，其外层包着一层较厚的绝缘。将不同的线棒按一定规律连接起来组成定子绕组。每台发电机的定子绕组为三相对称式绕组，如图1-1所示中的 $a-x$ 、 $b-y$ 、 $c-z$ 。所谓三相对称绕组是指三个绕组（即 $a-x$ 、 $b-y$ 、 $c-z$ ）的匝数相等，其空间分布相对位置相距 120° 。在定子铁芯的上槽与下槽之间设置有屏蔽层，屏蔽层直接接地。

在转子铁芯上有磁极及槽，槽内设置有转子绕组，有的转子绕组也是铜管子。绕组绕在磁极上。（如图1-1所示中的 $w-j$ ）。

为提高发电机的单机容量及降低铁芯及绕组的温度，各种发电机均设置有冷却系统。小型发电机一般采用空气冷却方式，也有采用氢冷方式；对于大型汽轮发电机，通常采用水内冷及氢冷方式。

目前，大型汽轮发电机的定子均采用水内冷方式，即定子绕组管内通冷却水。

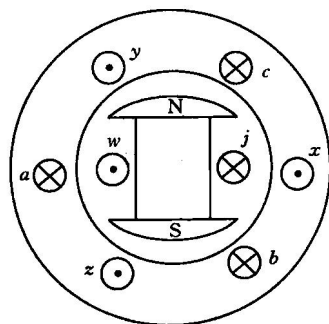


图 1-1 三相同步交流发电机结构示意图

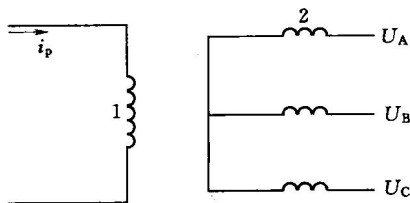


图 1-2 发电机电气接线图
1—转子绕组；2—定子三相绕组
（每相定子绕组有多分支的）

1.1.1.2 作用原理

发电机电气接线图如图 1-2 所示。

在转子绕组中（图 1-1 中的 $w-j$ ）通入直流，产生一恒定磁场（其两极极性分别为 N-S）。发电机转子由汽轮机或水轮机拖着旋转，恒定磁场变成旋转磁场（通常称之谓气隙磁场）。转子旋转磁场切割定子绕组，必将在定子绕组产生感应电势。

由于转子磁场在气隙中按正弦分布，而转子以恒定速度旋转，从而使定子绕组中的感应电势按正弦波规律变化。

发电机的作用原理，实质上是两种旋转磁场的相互作用。

1. 转子旋转磁场

在同步发电机转子上装设有转子绕组，通入直流后产生直流激磁的磁场，当转子旋转时，在气隙形成旋转磁场。该旋转磁场与转子无相对运动。气隙旋转磁场的转速与转子的转速相同。发电机正常运行时，转速为同步速。

转子旋转磁场切割三相对称的定子绕组，在绕组中产生三相对称电势，所谓三相对称电势，是指三相电势大小相等，其相位依次顺时针相差 120° 。

2. 定子旋转磁场

发电机并网后，产生三相对称电流。发电机定子三相对称电流流过三相对称绕组时，将在气隙中产生旋转磁场。该旋转磁场由三相交流产生，故称交流激磁的旋转磁场，也叫定子旋转磁场。

发电机正常运行时，两种旋转磁场的转速均等于同步速，它们之间无相对运动。又因为转子的转速也等于同步速，因此，定子旋转磁场与转子之间无相对运动。发电机的工作原理，实质是指转子磁场紧拉着定子磁场旋转转动，而将原动机机械功率变成电磁功率，传送给系统。

1.1.1.3 发电机的额定转速

转子磁场旋转时，每转过一对磁极，定子绕组中的电势便历经一个周期。因此，定子绕组中电势的频率可由每秒钟转过磁极的极对数来表示。设发电机的极对数（即一个 N、一个 S）为 P ，每分钟的转速为 n 。

$$\text{则频率} \quad f = \frac{Pn}{60}$$

$$\text{转速} \quad n = \frac{60f}{P}$$

汽轮发电机的极对数 $P=1$ ，当电网的频率 $f=50\text{Hz}$ 时， $n=3000\text{r/min}$ 。对于水轮发电机，其极对数较多，故允许其转速转低。当 $P=4$ 时，水轮机的转速 $n=750\text{r/min}$ ；当极对数 $P=24$ 时，其转速为 125r/min 。

1.1.1.4 发电机的冷却方式

根据冷却介质流通的路途，同步发电机的冷却方式，可分为外冷式及内冷式两种。

外冷式又称之谓表面冷却方式，其冷却介质有空气及氢气两种；内冷式称之谓直接冷却方式，其冷却介质有氢气及水两种。

当采用水冷方式时，绕组为空心铜制绕组，冷却水直接由绕组内流通。

目前,大型汽轮发电机定子绕组的冷却方式,多采用水冷方式。有些发电机的转子绕组也采用水内冷方式。将转子绕组及定子绕组均由水内冷冷却的发电机,称之为双水内冷发电机。

1.1.1.5 发电机的铭牌参数

1. 额定参数

- (1) 额定电压(相间电压),通常单位为 kV。
- (2) 额定电流,通常单位为 A。
- (3) 额定容量,通常单位为 MW。
- (4) 额定功率因数,通常单位为 $\cos\varphi_N$ 。
- (5) 转子额定电流及额定电压。

2. 发电机的阻抗

若不计电阻分量,发电机的阻抗有同步电抗、暂态电抗、次暂态电抗、负序电抗和零序电抗。

(1) 同步电抗。发电机的同步电抗也称正序电抗。正常运行时发电机的电抗,称之为同步电抗。

(2) 负序电抗。发电机不对称运行时,负序电流产生负序旋转磁场,负序旋转磁场以两倍同步转速切割转子绕组。负序电抗等于机端负序电压与定子绕组中负序电流的基波分量之比。

(3) 零序电抗。零序电抗具有漏抗的性质,其大小决定于零序电流产生的漏磁通。

(4) 暂态电抗 X'_d 。当定子电流突然变化时,在转子绕组中产生感应电势(像变压器一样),在转子回路中产生感应电流。该电流的作用使定子电抗减小,将减小后的电抗称之为暂态电抗 X'_d 。

(5) 次暂态电抗。当转子上有阻尼绕组时,若定子电流突然变化,由于阻尼绕组回路的磁通不能突变,致使磁路的磁阻很大,相应的电抗更小,将此时的电抗称之为次暂态电抗 X''_d 。

1.1.1.6 发电机中性点的接地方式

目前,国内外运行的发电机中性点的接地方式有三种:

- (1) 中性点不接地或经单相 TV 接地。
- (2) 经消弧线圈接地。
- (3) 经配电变压器接地。

1.1.2 发电机的故障及不正常运行方式

1.1.2.1 发电机的故障

1. 定子绕组的故障

定子绕组的故障主要有:①相间短路(二相短路、三相短路);②接地故障:单相接地、两相接地短路故障;③匝间短路(同分支绕组匝间短路,同相不同分支绕组之间的短路)。

2. 转子绕组的故障

转子绕组的故障主要有:转子绕组一点接地及两点接地,部分转子绕组匝间短路。

1.1.2.2 发电机异常运行方式

发电机不正常运行方式主要有：定子绕组过负荷，转子绕组过负荷，发电机过电压，发电机过激磁，发电机误上电、逆功率、频率异常、失磁、发电机断水及非全相运行等。

1.1.3 发电机保护的配置

发电机定子绕组或输出端部发生相间短路故障或相间接地短路故障，将产生很大的短路电流，大电流产生的热、电动力或电弧可能烧坏发电机线圈、定子铁芯及破坏发电机结构。

转子绕组两点接地或匝间短路，将破坏气隙磁场的均匀性，引起发电机剧烈振动而损坏发电机；另外，还可能烧伤转子及损坏其他励磁装置。

发电机异常运行也很危险。发电机过电压、过电流及过激磁运行可能损坏定子绕组；大型发电机失磁运行除对发电机不利之外，还可能破坏电力系统的稳定性。在其他异常工况下，长期运行也会危及发电机的安全。

为确保发电机安全经常运行，必需配置完善的保护系统。

1.1.3.1 短路故障的主保护

发电机内部短路故障的主保护有：纵差保护、横差保护（单元件横差及三元件横差保护），发电机定子绕组匝间保护（纵向零序电压匝间保护及负序功率方向保护），转子两点接地保护，励磁机纵差保护等。

1.1.3.2 短路故障的后备保护

发电机短路故障的后备保护主要有：复压闭锁过流保护；对称过流及过负荷保护；不对称过流及过负荷保护及负序过电流保护；转子过流及过负荷保护；带记忆的低压闭锁过流保护。

1.1.3.3 其他故障保护

发电机单相接地保护，发电机失磁保护。

1.1.3.4 发电机异常运行保护

发电机异常运行保护有：发电机过电压保护；发电机过激磁保护；逆功率保护；转子一点接地保护；定子过负荷保护、非全相运行保护、大型发电机失步保护、频率异常保护等。

1.1.3.5 开关量保护

开关量保护主要有发电机断水保护等。

1.1.3.6 临时性保护

临时性保护是指发电机正常运行时应退出的保护。其中，有发电机误上电保护及发电机启、停机保护等。

1.2 发电机纵差保护

发电机纵差保护，是发电机相间故障的主保护。其构成原理是克希荷夫第一定律，在正常工况或外部故障时，发电机中性点的电流等于机端电流。即

$$\sum \dot{I}_N + \sum \dot{I}_S = 0$$