

ELECTRIC POWER EQUIPMENT RELAY PROTECTION

TECHNICAL HANDBOOK

电力设备继电保护 技术手册

毛锦庆 屠黎明 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

ELECTRIC POWER EQUIPMENT RELAY PROTECTION

TECHNICAL HANDBOOK

电力设备继电保护

技 术 手 册

毛锦庆 屠黎明 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

随着电力技术装备的快速发展,大型发电机和变压器、高压母线和电动机以及电容器和电抗器等电力主设备不断涌现,因此为了保证电力设备安全、稳定、可靠地运行,继电保护能够正确、可靠地动作,组织编写了《电力设备继电保护技术手册》一书。

本手册共分九章,全面系统地介绍了电力主设备结构知识、继电保护配置、整定计算、故障分析、检测手段和自动装置保护等内容,具体有发电机基础知识、发电机保护、变压器保护、母线保护、并联电抗器保护、电容器保护、电动机保护、发电厂厂用电系统保护和抽水蓄能水轮发电机保护等。

本手册可作为从事电力设备继电保护的设计人员、生产人员、运行人员、检修人员和调试人员必备工具书,还可作为大专院校电力设备继电保护教学课程。

图书在版编目(CIP)数据

电力设备继电保护技术手册/毛锦庆,屠黎明编. —北京:中国电力出版社,2014.4

ISBN 978-7-5123-5078-6

I. ①电… II. ①毛… ②屠… III. ①电力设备-继电保护-技术手册 IV. ①TM77-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 250057 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 4 月第一版 2014 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.75 印张 595 千字

印数 0001—3000 册 定价 69.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



毛锦庆，浙江杭州人，1933 年 4 月生，毕业于清华大学电机工程系，教授级高级工程师。1953~1998 年在东北电力系统继电保护专业工作，曾任东北电业管理局继电保护负责人。1982 年评为国家首批高级工程师。1992 年评为东北电网专业技术专家，1992 年享受国务院特殊津贴。曾获得国家科技进步二等奖及 5 项部级科技进步奖。

参与抗震式气体继电器及流速试验台、光线式故障录波器、200~600MW 发电机整流型继电保护研制工作。1985 年以来参与 220~500kV 线路微机保护装置、500kV 变压器微机保护装置、大型发电机微机保护装置的研制工作。



屠黎明，浙江黄岩人，1972 年 9 月生，毕业于东南大学，博士，教授级高级工程师，长期从事电力设备保护的开发和管理工。获得部级科技进步二等奖。曾任北京四方继保自动化股份有限公司研发中心副主任，现任工业及公共业务总经理，IEC TC95/MT3 成员，电力行业标准化技术委员会委员兼副秘书长，中国水力发电工程学会继电保护专委会委员，中国电机工程学会高级会员，CIGRE 成员。



序 言

我国电力工业正面临着深刻的改革，随着超高压、特高压电网的建设和全国联网局面的形成，电力设备（发电机、变压器、电抗器、母线、电动机等）向着大容量、高电压的方向快速发展。电力设备造价昂贵且重要性高，其运行状况在很大程度上会影响电力系统的安全稳定运行，因此对保护装置的选择性、快速性、可靠性和灵敏性提出了更高的要求。

长期以来，电力设备保护的正确动作率远低于线路保护，如何提高电力设备保护的正确动作率是继电保护技术人员面临的主要课题。本手册以一种精心组织同时又提供充分信息的方式，涵盖了电力系统各种电力设备的保护，包括发电机、变压器、电容器、电抗器、母线、电动机、厂用电系统特殊内容和抽水蓄能水轮发电机。手册中系统地介绍了相关的基础知识、典型的保护配置及各种保护原理，非常详细。作者还结合自身多年从事继电保护产品研发，对于存在的主要问题进行了分析。

作者多年来长期从事继电保护产品研发和技术管理工作，为我国微机保护的诞生和推广做出了卓越的贡献。作者以其丰富的实践经验和充实的专业理论，全面系统地介绍了电力设备保护及相关技术。这本手册给我的印象是介绍的内容非常广泛、信息量非常大、知识点非常多。除保护原理外，本手册还介绍了很多相关的知识，比如电机学知识、互感器知识等，实用性很强。相信本手册的出版一定能为我国电力设备继电保护技术的发展做出重要贡献。

杨奇逊

2013年10月



前言

电力工业快速发展，超临界大容量汽轮发电机组、巨型水轮发电机组、高电压等级的变压器和电抗器等电力主设备得到广泛应用，这对电力设备的继电保护技术提出了更高的要求。另外，新的电力电子技术在电力系统不断应用，给原有的保护配置方式带来了新的问题。同时，计算机和微电子学的飞速发展也为继电保护技术的创新提供了技术基础。为了帮助继电保护人员掌握新技术、解决新问题，编者结合多年工作经验，编写了《电力设备继电保护技术手册》一书。

为适应我国电力建设发展的需要，本手册介绍了各种电力设备的基础理论知识及相关的继电保护技术，并介绍了当前特高压电网建设和电力电子等新技术应用引入给继电保护带来的新问题及其解决方案。

本手册的主要特点有以下几点：

- (1) 本手册涵盖的电力设备种类多且全，包括发电机、变压器、母线、并联电抗器、电容器、电动机、发电厂厂用电系统和抽水蓄能水轮发电机的保护等；
- (2) 各章节系统地介绍了各种电力设备的保护配置、各种类型保护的原理和整定计算原则等，实用性很强，并将各种基础知识与对应的保护介绍相结合，方便读者阅读和理解；
- (3) 调试非常方便是微机保护广泛被应用的主要原因之一，本手册主要基于目前广泛应用的微机继电保护来介绍，也偶尔穿插有传统、有特色的继电保护内容；
- (4) 结合国内应用情况，介绍了主流继电保护厂家产品的原理和特色；
- (5) 结合新的电力电子技术在电力系统应用出现的新问题，本手册对于可控高压并联电抗器等新型设备的继电保护方案及配置，以及对加装变频器后的变频电动机保护配置和实现均做了介绍。

本手册的主要内容有：第一章介绍了发电机的基础知识，本章中的发电机的基本概念、运行特性、功率特性等作为发电机保护原理的基础知识，既可以作为第二章学习的基础知识，也可以在第二章保护原理理解存在困难时及时查阅。第二章发电机保护，总体介绍了发电机的各种故障及保护配置，重点总结了配置中存在的问题，接着分别介绍了每种保护原理、保护存在的主要问题及保护的整定计算原则。第三章变压器保护，系统介绍了变压器保护的特殊问题、保护配置和各种保护原理，并总结了变压器相关知识。第四章母线保护，系统介绍了各种类型

母线保护的原理、整定计算、各种母线保护类型和国内主流母线保护装置的功能特点。第五章并联电抗器保护，除了介绍常规的高压并联电抗器，还介绍了新型可控高压并联电抗器的保护配置和保护原理。第六章电容器保护，介绍了各种类型的电容器组及其应用场合，故障电流分析计算及保护配置和原理；还介绍了并联电容补偿装置保护。第七章电动机保护，不仅介绍了高压/低压异步电动机保护、同步电动机保护，还介绍了加装变频器后的变频运行电动机保护。第八章发电厂厂用电系统保护，介绍了发电厂厂用电系统及相关各种类型变压器、电缆保护等。第九章抽水蓄能水轮发电机保护，介绍了抽水蓄能机组特殊的启动方式、各种运行工况和机组的各种保护原理及特点。

本手册在编写过程中，得到了中国工程院杨奇逊院士全稿审阅并题了序言，华北电力大学王增平教授、华中电网公司柳焕章专家提出宝贵意见，北京四方继保自动化股份有限公司李营、张涛等领导的支持和帮助，在此深表感谢。同时，对北京四方继保自动化股份有限公司邹卫华、苏毅、聂娟红、彭世宽等高级工程师所提供的资料、技术说明书等表示衷心的感谢。

另外，在编写中还参阅了相关参考文献、技术标准和技术说明书等，在此对以上专家和相关作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，错误和疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2013 年 10 月



目 录

序言
前言

第一章 发电机基础知识	1
第一节 发电机基本概念	1
一、同步发电机基本工作原理(1) 二、同步发电机额定转速(1) 三、两种旋转 磁场(2) 四、同步发电机冷却方式(2) 五、铭牌(2)	
第二节 同步发电机运行特性	3
一、空负荷特性(3) 二、短路特性(3) 三、负荷特性(4) 四、外特性(4) 五、调整特性(4) 六、同步发电机有功功率的输出(5)	
第三节 同步发电机电抗	5
一、隐极同步发电机同步电抗 X_d (5) 二、凸极同步发电机同步电抗 X_d 、 X_q (6) 三、纵轴暂态电抗 x'_d 、纵轴次暂态电抗 x''_d 及其表示式(6) 四、横轴瞬态电抗 x'_q 、 次暂态电抗 x''_q 及其表示式(8) 五、同步发电机序分量电抗 X_1 、 X_2 、 X_0 (9)	
第四节 同步发电机功率特性及静态稳定极限角	9
一、同步发电机功率特性(9) 二、静态稳定极限角(11)	
第五节 发电机与电力系统同步运行稳定性及振荡	12
一、静态稳定(13) 二、暂态稳定(13) 三、动态稳定(13) 四、发电机与系统 之间振荡(14)	
第六节 同步发电机失磁物理特性	19
一、发电机失磁运行及其产生的影响(19) 二、发电机失磁后机端测量阻抗(20)	
第七节 同步发电机内部故障及异常运行	23
第二章 发电机保护	24
第一节 发电机故障及其保护配置	24
一、同步发电机故障及不正常工作情况(24) 二、发电机应装设的保护(25) 三、发电机—变压器组继电保护配置总体要求(26) 四、水轮发电机—变压器组继电 保护配置的特点(27) 五、装设发电机—变压器组大差动保护的问题(27) 六、发电 机—变压器组反应相间和接地故障的后备保护装置设置切母联(分段)断路器的 问题(27) 七、发电机、变压器装设阻抗保护的问题(27) 八、发电机保护种类及其 出口方式(28)	
第二节 发电机纵联差动保护	30

一、保护原理(30)	二、完全纵差保护特点(36)	三、对纵联差动保护的要求(36)	四、逻辑图(36)
第三节	发电机匝间保护	.....	38
一、发电机匝间短路故障特点(38)	二、匝间保护动作原理(38)		
第四节	发电机短路后备保护	.....	42
一、概述(42)	二、发电机相间短路后备保护及整定(42)	三、自并励发电机外部短路电流计算(44)	四、电力系统振荡时阻抗继电器动作特性分析(46)
五、变压器电抗计算(47)			
第五节	发电机定子接地保护	.....	47
一、发电机中性点接线方式(47)	二、发电机装设定子绕组单相接地保护(48)	三、现代大型发电机应装设 100% 定子接地保护(49)	四、同步发电机定子绕组单相接地的零序电压和零序电流(49)
五、利用基波零序电压的发电机定子单相接地保护的特点(51)	六、利用三次谐波电压构成的 100% 发电机定子绕组接地保护的工作原理(52)	七、反应基波零序电压和利用三次谐波电压构成的 100% 定子接地保护(52)	八、发电机定子接地保护的整定计算(55)
九、外加交流电源式 100% 定子绕组单相接地保护(58)	十、零序方向型定子接地保护(64)		
第六节	发电机转子接地保护	.....	65
一、发电机励磁回路故障(65)	二、发电机转子一点接地保护(66)	三、转子绕组两点接地保护(76)	
第七节	发电机过负荷保护	.....	78
一、发电机过负荷(78)	二、定子绕组过负荷保护(78)	三、励磁绕组过负荷保护(80)	四、负序过负荷保护(81)
第八节	发电机过电压保护及过励磁保护	.....	85
一、过电压保护(85)	二、过励磁保护(87)		
第九节	发电机逆功率保护	.....	91
一、逆功率保护(91)	二、程序跳闸(92)	三、整定计算(92)	
第十节	发电机失磁保护	.....	93
一、发电机失磁电气特征(93)	二、发电机失磁对系统和发电机本身影响和汽轮发电机允许失磁运行的条件(93)	三、准静稳极限阻抗苹果圆(93)	四、发电机失磁保护装置组成和整定原则(94)
五、失磁保护中 U_e-P 元件和汽轮发电机与水轮发电机 U_e-P 元件的动作特性曲线(95)	六、由阻抗继电器构成的失磁保护工作原理(98)	七、具有自动减负荷的失磁保护装置的组成原则(99)	八、发电机低励失磁保护判据(99)
九、系统联系电抗 X_{con} 计算(100)			
第十一节	发电机失步保护	.....	101
一、大型发电机组装设失步保护的原因(101)	二、双阻抗元件失步保护(103)	三、遮挡器原理失步保护(104)	四、三元件失步保护(104)
五、多区域特性失步保护(106)			
第十二节	发电机频率异常保护	.....	107
一、频率异常对发电机的危害(107)	二、大型汽轮发电机组对频率异常运行的		

要求(109) 三、对发电机频率异常运行保护的要求(109) 四、整定计算(109)	
第十三节 发电机其他保护	110
一、启动和停机保护(110) 二、误上电保护(111) 三、断口闪络保护(113)	
四、轴电流保护(115)	
第十四节 发电机低功率保护(主变压器正功率突降保护)	115
一、主变压器正功率突降保护动作条件(115) 二、参数整定(116) 三、不同工	
况下的保护行为(120) 四、有关说明(121) 五、新型零功率保护(122)	
第十五节 发电机自动装置	123
一、发电机自动励磁调节(123) 二、发电机同期并列装置(124)	
第十六节 电流互感器和电压互感器	126
一、电流互感器(126) 二、电流互感器饱和与剩磁(132) 三、电流互感器应用	
实例(137) 四、电磁式电压互感器(140) 五、发电机—变压器组保护对电压互感器	
的要求(141) 六、电容式电压互感器(141)	
第三章 变压器保护	142
第一节 变压器概述	142
一、变压器励磁涌流(143) 二、变压器和应涌流(144) 三、变压器外部故障切	
除后的恢复性涌流(146) 四、变压器过励磁(146)	
第二节 变压器瓦斯保护	147
第三节 变压器纵联差动保护	148
一、纵差保护工作原理及其特殊问题(148) 二、差电流速断保护(151) 三、速	
饱和特性的差动继电器(151) 四、防止励磁涌流采取的闭锁措施(152) 五、变压器	
励磁涌流和差动接线的问题(155) 六、比率制动特性的纵差保护(156) 七、关于变	
压器纵差保护的几个观点(159) 八、新研制的比率制动差动保护(160) 九、标积制	
动式差动保护(162) 十、故障分量比率制动式差动保护(163) 十一、分侧纵联差动	
保护(164) 十二、零序纵联差动保护(165) 十三、纵联差动保护电流回路的断线闭	
锁措施(167)	
第四节 变压器电流速断保护	168
第五节 变压器后备保护	169
一、过电流保护(169) 二、低电压过电流保护(170) 三、复合电压过电流保护	
(171) 四、电流限时速断保护(171) 五、负序电流保护(171) 六、阻抗保护(171)	
七、500kV 变压器反时限过电流保护(175) 八、66kV 及以下电压等级变压器接地保	
护(176) 九、大电流接地系统变压器接地保护(176) 十、后备保护段多段时间的跳	
闸问题(178) 十一、特殊问题处理(179)	
第六节 变压器过励磁保护	180
第七节 变压器过负荷保护	180
第八节 电压互感器断线检测	181
第九节 微机型变压器保护	181
一、微机型变压器保护的构成(182) 二、微机型变压器保护配置(182) 三、微	
机型变压器保护功能特点(185)	

第十节 变压器相关知识	186
一、系统接地(186) 二、变压器正序、负序、零序参数(187) 三、变压器匝间 短路电气量特点分析(187) 四、不对称短路故障时变压器两侧电流、电压关系(188) 五、自耦变压器(190) 六、变压器零序阻抗等值电路(194) 七、Vv接线变压器短路 阻抗及等值电路(196) 八、接地变压器(198) 九、线路—变压器组保护(200) 十、断路器非全相运行保护(201) 十一、变压器断路器失灵保护(202)	
第四章 母线保护	204
第一节 母线概述	204
第二节 母线差动保护	204
一、母线完全差动保护(204) 二、固定连接方式差动保护在发生区内、外故障 时的电流分布(205) 三、固定连接破坏后差动保护在发生区内、外故障时的电流分 布(205) 四、对母线保护的基本要求(205) 五、对电流互感器的要求(207) 六、复 合电压闭锁元件(209) 七、母线差动保护整定计算(209)	
第三节 母线保护类型	210
一、带速饱和变流器电流差动式保护(210) 二、母联电流比相式母线保护(211) 三、中阻抗比率制动式母线保护(212)	
第四节 微机母线保护	216
一、BP-2B微机母线保护装置(216) 二、RCS-915微机母线保护装置(220) 三、CSC-150微机母线保护装置(223)	
第五节 母联保护	230
一、母联死区保护(230) 二、母联充电保护(230) 三、母联失灵保护(231) 四、母联过电流保护(231) 五、母联非全相运行保护(231)	
第六节 断路器失灵保护	232
一、概述(232) 二、双母线接线方式断路器失灵保护设计原则(232) 三、断路 器失灵保护(233) 四、断路器失灵保护整定计算(235) 五、3/2接线方式断路器失 灵保护(236)	
第七节 低压系统母线保护	238
一、母线不完全差动保护(238) 二、馈线电流闭锁式母线保护(238)	
第五章 并联电抗器保护	239
第一节 电抗器保护	239
一、概述(239) 二、瓦斯保护(239) 三、纵联差动保护(239) 四、过电流保护 (240) 五、匝间短路保护(240) 六、过负荷保护(241) 七、零序小电抗器保护 (241) 八、过电压保护(242) 九、零序差动保护(242) 十、负序功率方向原理的匝 间保护(244) 十一、绝对值比较式负序及零序复合型方向的匝间保护(246)	
第二节 可控高压并联电抗器	246
一、概述(246) 二、保护配置(248) 三、纵联差动保护(248) 四、大差动保护 (249) 五、容错复判自适应匝间保护(250) 六、电抗器二次侧后备保护(251)	

第六章 电容器保护	253
第一节 概述	253
一、电容器组接线方式(253) 二、并联补偿电容器组保护方式(254) 三、电容器内部故障电流(254)	
第二节 电容器继电保护	254
一、熔断器保护(254) 二、过电流保护(256) 三、不平衡电压保护和不平衡电流保护(256) 四、过电压保护(264) 五、低电压保护(264)	
第三节 并联电容器补偿装置	264
一、过电流保护(265) 二、电流速断保护(265) 三、差电流保护(265) 四、谐波过电流保护(265) 五、过电压保护(265) 六、低电压保护(265) 七、差电压保护(265)	
第七章 电动机保护	267
第一节 概述	267
第二节 电动机保护装置装设原则	267
第三节 高压电动机保护	268
一、电流保护(268) 二、速断保护(269) 三、纵联差动保护(269) 四、接地保护(269) 五、磁通平衡式纵差保护(270) 六、负序电流保护(270) 七、电动机过负荷保护(271) 八、电动机低电压保护(271)	
第四节 微机电机保护	272
一、异步电动机特性(272) 二、电流速断保护(274) 三、纵联差动保护(275) 四、电动机堵转保护(276) 五、电动机长启动保护(277) 六、过负荷保护(277) 七、负序电流保护(不平衡电流保护)(278) 八、热过负荷保护(281) 九、接地保护(284) 十、低电压保护(285) 十一、高压熔断器(286)	
第五节 同步电动机保护	287
一、同步电动机失步(287) 二、反应定子过负荷的过负荷保护兼作失步保护(287) 三、反应转子回路出现交流分量的失步保护(288) 四、失步保护(288) 五、失磁保护(289) 六、非同步冲击保护(290)	
第六节 低压电动机保护	291
一、相间短路保护(291) 二、过负荷保护(291) 三、接地保护(292) 四、低电压保护(292)	
第七节 应用变频器高压电动机保护	292
一、变频器(292) 二、变频电动机继电保护(295) 三、变频后电动机微机型保护的问题(295) 四、变频电动机微机保护(297) 五、变频电动机电流互感器(300) 六、应用变频器后高压电动机的继电保护整定(300) 七、应用软启动器后电动机的继电保护(301)	
第八章 发电厂厂用电系统保护	302
第一节 高压厂用电系统中性点接地设备	302
第二节 高压厂用系统短路电流及自启动电流计算	303

一、高压厂用系统短路电流计算(303)	二、380V 动力中心短路电流计算(304)	
三、电动机正常启动时的电压计算(305)	四、电动机群自启动时厂用母线电压的计算(306)	
五、电动机启动电流值的计算(306)	六、电动机群自启动电流值计算(306)	
第三节 启动/备用变压器和高压厂用变压器		307
一、变压器纵联差动保护(307)	二、变压器高压侧过电流保护(308)	
三、变压器高压侧接地保护(309)	四、变压器低压侧分支限时速断保护(310)	
五、变压器低压侧分支过电流保护(311)	六、变压器低压侧接地保护(312)	
第四节 高压厂用电电缆馈线		312
一、电缆纵差保护(313)	二、定时限过电流保护(313)	
三、电流速断及延时速断保护(314)	四、单相接地保护(314)	
第五节 低压厂用变压器		315
一、电流速断保护(315)	二、过电流保护(315)	
三、反时限过电流保护(316)	四、负序过电流保护(317)	
五、高压侧单相接地零序过电流保护(317)	六、低压侧中性点零序过电流保护(319)	
第九章 抽水蓄能水轮发电机保护		320
第一节 概论		320
第二节 抽水蓄能机组启动方式		320
一、异步启动(320)	二、同轴小电动机启动(320)	
三、同步启动又称“背靠背”启动(321)	四、半同步启动(321)	
五、变频启动(321)	六、低频启动时低频特性(323)	
第三节 抽水蓄能机组各种运行工况		323
一、电气接线及其对工况转换的有关设备(323)	二、抽水蓄能机组各种工况的转换(324)	
三、运行工况识别(325)		
第四节 抽水蓄能机组各种保护		325
一、差动保护(326)	二、负序过电流保护(328)	
三、低压过电流保护(329)	四、次同步过电流保护(329)	
五、定子接地保护(329)	六、逆功率保护(330)	
七、低功率保护(330)	八、溅水功率保护(331)	
九、低频保护(331)	十、过励磁保护(331)	
十一、电压相序保护(331)	十二、失磁保护和失步保护(332)	
十三、低阻抗保护(332)	十四、发电机断路器失灵保护(332)	
十五、主变压器过电流保护(333)	十六、电动机锁滞保护(333)	
参考文献		334



第一章

发电机基础知识

第一节 发电机基本概念

发电机是将汽轮机、水轮机或其他动力机械的机械能转化为电能的电力设备。本手册主要以汽轮机和水轮机为对象进行讲解，它们是同步发电机。

一、同步发电机基本工作原理

发电机主要由定子和转子两部分构成。在定子与转子间留有适当的间隙，通常将该间隙称为气隙。

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。

在定子铁芯上设置有槽，每个定子槽分上槽和下槽，上槽及下槽中设置有定子绕组。每台发电机的定子绕组为三相对称式绕组，如图 1-1 中的 a-x、b-y、c-z 所示。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。

在转子铁芯上也有槽，槽内设置有转子绕组（见图 1-1 中的 R-L 所示）。

在转子绕组中（见图 1-1 中的 R-L）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（通常称为气隙磁场）。转子旋转磁场切割定子绕组，必将在定子绕组产生感应电动势。

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动势按正弦波规律变化。

发电机并网运行时，定子绕组中出现感应电流，向系统输出电能。

二、同步发电机额定转速

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

频率为

$$f = \frac{pn}{60}$$

转速为

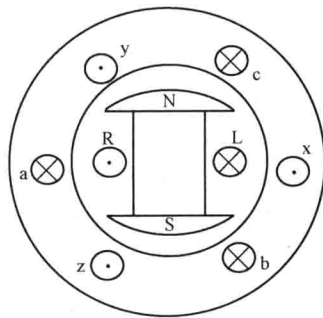


图 1-1 三相交流同步发电机的结构示意图

$$n = \frac{60f}{p}$$

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，故允许其转速较低，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 。

三、两种旋转磁场

1. 直流励磁旋转磁场

直流励磁旋转磁场，又称为机械旋转磁场、主磁场。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励磁的磁极，当转子旋转时，在气隙中形成旋转磁场。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。

2. 交流励磁旋转磁场

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，故称交流励磁的旋转磁场，又称为电枢反应磁场。

发电机正常运行时，这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，而转子磁场紧拉着定子旋转磁场转动。

当发电机带上负荷，三相绕组中的定子电流（电枢电流）在气隙中合成的旋转磁场与转子以同速度、同方向旋转，故称为同步发电机。

四、同步发电机冷却方式

同步发电机的种类按原动机不同来分，可分为：

汽轮发电机——一般是卧式的，转子是隐极式的，为一个极对数。

水轮发电机——一般是立式的，转子是凸极式的，为多个极对数。

根据冷却介质流通的路径，同步发电机的冷却方式，可分为外冷式及内冷式两种。

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

当采用水冷却方式时，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，称为双水内冷发电机。

大型发电机的冷却介质和方式还可以有不同的组合，如水-氢-氢（定子绕组水内冷，转子绕组氢内冷，铁芯氢冷），水-水-空（定子、转子水内冷，铁芯空冷），水-水-氢（定子、转子绕组水内冷，铁芯氢冷）等。

五、铭牌

电机上的铭牌是制造厂向使用单位介绍该台电机的特点和额定数据用的。其所标的量，如容量、电流、电压等都是额定值。所谓额定值，就是能保证电机正常连续运行的最大限值，即在此额定数据的情况下运行，发电机寿命可以达到预期的年限。

铭牌上标的主要项目有：

（1）额定电流。额定电流是该台电机正常连续运行的最大工作电流。

（2）额定电压。额定电压是该台电机长期安全运行的最高电压。发电机的额定电压指的是线电压。

（3）额定容量。额定容量是指该台电机长期安全运行的最大输出功率。有的制造厂用有功功率的千瓦数来表示，也有的是用视在功率的千伏安数来表示。

(4) 额定功率因数 $\cos\varphi$ 。同步发电机的额定功率因数是额定有功功率和额定视在功率的比值。铭牌上一般标有功功率和 $\cos\varphi$ 值, 或标视在功率和 $\cos\varphi$ 值。

第二节 同步发电机运行特性

同步发电机的运行特性, 一般是指发电机的空负荷特性、短路特性、负荷特性、外特性和调整特性五种。从运行的角度看, 外特性和调整特性是主要的运行特性, 根据这些特性, 运行人员可以判断发电机的运行状态是否正常, 以便及时调整, 保证高质量安全发电。空负荷特性、短路特性和负荷特性则是检验发电机基本性能的特性, 用于测量、计算发电机的各项基本参数。

一、空负荷特性

发电机空负荷特性是指发电机以额定转速空负荷运行时其电动势 E_0 与励磁电流 I_1 之间的关系曲线。当发电机处于空负荷运行状态, 其端电压 U 就等于电动势 E_0 , 因此该曲线也就是空负荷时端电压与励磁电流的关系曲线。

电动势决定于气隙磁通, 空负荷时的气隙磁通决定于转子磁动势, 转子磁动势又决定于励磁电流, 所以这曲线表达了发电机中“电”与“磁”的联系。

如图 1-2 所示为空负荷特性曲线, $E_0 = f(I_1)$ 。做空负荷特性试验时, 应维持发电机转速不变, 逐渐增加励磁电流, 直至端电压等于额定电压的 130% 时为止。

空负荷特性曲线实际上是一条具有发电机这样一个特定磁路的磁化曲线, 因此它有磁化曲线的特征。它的开始部分接近于直线, E_0 与 I_1 成直线关系, 说明铁芯未饱和。曲线的后一段弯曲, E_0 与 I_1 不成直线关系, 说明铁芯已经逐渐饱和, 而且随着 I_1 的增大, 饱和越来越严重。

空负荷特性曲线是发电机的一条最基本的特性曲线。可以用它来求发电机的电压变化率、未饱和的同步电抗值等参数。在实际工作中, 它还可以用来判断励磁绕组及定子铁芯有无故障等。

二、短路特性

所谓短路特性, 是指发电机在额定转速下, 定子三相绕组短路时, 定子稳态短路电流 I 与励磁电流 I_1 的关系曲线, 即 $I = f(I_1)$, 如图 1-3 所示。

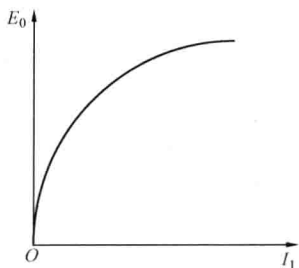


图 1-2 空负荷特性曲线

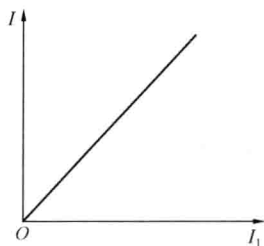


图 1-3 短路特性曲线

在做短路特性试验时, 要先将发电机三相绕组的出线端短路。然后, 维持转速不变, 增加励磁, 读取励磁电流及相应的定子电流值, 直到定子电流 I 达到额定电流值时为止。

短路试验测得的短路特性曲线, 不但可以用来求取同步发电机的重要参数未饱和的同步电抗与短路比外, 在电厂中, 也常用它来判断励磁绕组有无匝间短路等故障。显然, 励磁绕组存在匝间短路时, 因安匝数的减少, 短路特性曲线是会降低的。

短路比是同步发电机的一个重要数据, 就是在对应于空负荷额定电压的励磁电流激励下, 定子稳态短路电流与定子额定电流之比。短路比大则同步电抗小, 静态稳定极限高, 电压随负荷波动

小，短路电流大。

三、负荷特性

负荷特性是当转速、定子电流为额定值，功率因数 $\cos \varphi$ 为常数时，发电机电压与励磁电流之间的关系，即 $U = f(I_1)$ 。如图 1-4 所示为不同功率因数时的负荷特性曲线。

当 $\cos \varphi$ 值不同，即可得到不同负荷种类的负荷特性曲线。

最有实用意义的是纯感性负荷特性曲线，即 $\cos \varphi = 0$ 的负荷特性曲线，它是一条与空荷特性曲线 $E_0 = f(I_1)$ 大体上平行的曲线，如图 1-4 所示， $\varphi > 0^\circ$ 表示滞后， $\varphi < 0^\circ$ 表示超前。

用负荷特性与空负荷、短路特性，可以测定发电机的基本参数，是发电机设计、制造的主要技术数据。

四、外特性

发电机带上负荷以后，端电压就会有所变化，外特性就是反映这种变化规律的曲线。所谓外特性，就是指励磁电流、转速、功率因数为常数的条件下，变更负荷（定子电流 I ）时端电压 U 的变化曲线，即 $U = f(I)$ 。如图 1-5 所示为几个不同功率因数下的外特性曲线。从图中可以看出，在滞后的功率因数（ $\cos \varphi$ ）的情况下，当定子电流增加时，电压降落较大，这是由于此时电枢反应是去磁的。在超前的功率因数 $\cos -\varphi$ 的情况下，定子电流增加时，电压反应升高，这是由于电枢反应是助磁的。在 $\cos \varphi = 1$ 时，电压降落较小。 $\cos \varphi$ 表示滞后， $\cos -\varphi$ 表示超前。

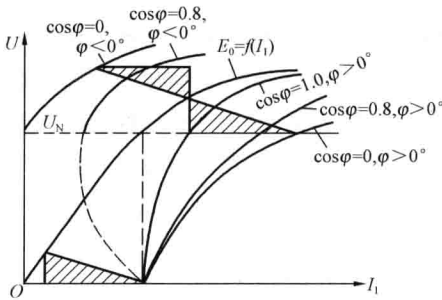


图 1-4 负荷特性曲线

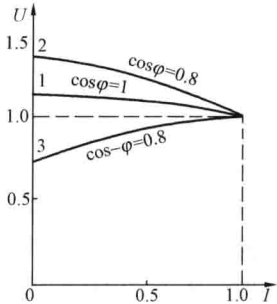


图 1-5 外特性曲线

外特性可以用来分析发电机运行中的电压波动情况，借以提出对自动调节励磁装置调节范围的要求。

一般用电压变化率来描述电压波动的程度。从发电机的空负荷到额定负荷，端电压变化对额定电压的百分数，称为电压变化率 ΔU ，即

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_N}{U_N} \times 100\%$$

式中 E_0 ——发电机空负荷电动势或电压；

U_N ——额定电压。

汽轮发电机的 $\Delta U = 30\% \sim 48\%$ 。

五、调整特性

电压会随负荷的变化而变动，要维持端电压不变，必须在负荷变动时调整励磁电流。所谓调整特性，就是指电压、转速、功率因数为常数的条件下，变更负荷（定子电流 I ）时励磁电流 I_1 的变化曲线，即 $I_1 = f(I)$ ，如图 1-6 所示。

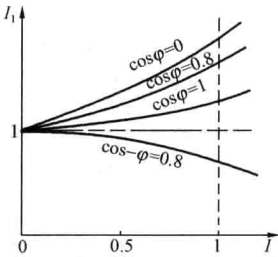


图 1-6 调整特性曲线