



压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材

核电厂电气原理与设备

Electrical Principle and Equipment of
Nuclear Power Plants

顾颖宾 王略 等 编著



原子能出版社

压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材

核电厂电气原理与设备

Electrical Principle and Equipment of Nuclear Power Plants

顾颖宾 王 略 等 编著



原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核电厂电气原理与设备 / 顾颖宾, 王略等编著. —北京: 原子能出版社, 2010. 5

(压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材)

ISBN 978-7-5022-4899-4

I. ①核… II. ①顾… ②王… III. ①压水型堆-核
电厂-电气设备-技术培训-教材 IV. ①TM623.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 084987 号

内 容 简 介

本书主要介绍压水堆核电厂各类电气设备的结构特点、工作原理、测量与控制、运行及维护, 电气主接线、厂用电接线的形式和结构, 厂用电系统的运行及继电保护配置的原理和维护等, 讲述了一些大型电气设备正常运行、非正常运行及事故处理, 突出了核安全的重要性, 同时对不同堆型的重要电气设备进行了介绍和比较。

本书是压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材之一, 也可供从事核电工程的相关技术人员及高等院校相关专业的师生参考。

核电厂电气原理与设备

策 划 刘 朔 张 琳

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 张 琳

技术编辑 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市中国画美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 17 字 数 420 千字

版 次 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-4899-4

印 数 1—2500

定 价 72.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

《压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材》

编 委 会

主 任：王乃彦

副主任：李和香 李济民 肖 武

顾 问：邵向业 罗璋琳 李文埏 郑福裕 浦胜娣

委 员：（按姓氏拼音顺序排列）

丁云峰 顾颖宾 郭文琪 韩延德 郝老迷

黄兴蓉 李和香 李吉根 李济民 李文埏

李泽华 刘国发 罗璋琳 浦胜娣 阮於珍

邵向业 王 略 王乃彦 夏延龄 肖 武

阎克智 俞尔俊 臧希年 赵郁森 郑福裕

周一东

编委会办公室

主 任：肖 武

成 员：章 超 高小林 梁超梅 周 萍 宋 慧

樊 勤 付 冉

《压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材》

校审专家

(按姓氏拼音顺序排列)

一审专家:

高秀清	高永春	李文埏	李永章	刘耕国
罗璋琳	彭木彰	浦胜娣	吴炳祥	夏益华
张培升	赵兆颐			

二审专家:

陈 跃	付卫彬	黄志军	蒋祖跃	李守平
马明泽	毛正宥	潘泽飞	唐锡文	王瑞正
魏 挺	薛峻峰	杨 炜	朱晓斌	

统审专家:

曹述栋	丁卫东	丁云峰	宫广臣	苟 峰
顾颖宾	郭利民	何小剑	黄世强	廖伟明
刘志勇	马明泽	毛正宥	缪亚民	戚屯锋
苏圣兵	孙光弟	王晓航	魏国良	吴 放
吴 岗	杨昭刚	俞卓平	张福宝	张志雄
周卫红				

前 言

核电厂操纵人员的素质关系到核电厂的安全运营,而培训工作是保证人员素质的基本环节之一。为适应当前我国大力发展核电的形势,保证核电厂操纵人员的培训质量,使基础理论培训满足国家核安全法规与行业规定的要求,便于对培训过程实施统一规范的管理,国家主管部门决定编写一套适用于核电厂操纵人员的基础理论培训教材——《压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材》。鉴于核工业研究生部在近20年的核电基础理论培训中,积累了丰富的教学及管理经验,具有稳定的师资队伍和较完整的教材体系,故由核工业研究生部具体承担教材编写的组织工作。

为了编好操纵人员培训教材,核工业研究生部牵头组织长期从事核电培训的专家、教授进行认真分析和讨论,根据我国现有堆型的特点,从压水堆核电厂入手,由核电厂、核动力运行研究所、操纵人员资格审查委员会等单位的专家共同参与编写。这套教材共十二册,包括《核反应堆物理》、《核反应堆热工水力学》、《核电厂辐射防护》、《核电厂材料》、《核电厂通用机械设备》、《核电厂水化学》、《核电厂电气原理与设备》、《核电厂核蒸汽供应系统》、《核电厂蒸汽动力转换系统》、《核电厂仪表与控制》、《核电厂核安全》、《核电厂运行概论》。这套教材内容以核电厂相关专业的基本概念、基本原理及基础知识为主,可为操纵人员下一步培训打下良好的理论基础。

本套教材是经过充分准备、精心组织而完成的。首先,根据核电厂操纵人员的培训目标,按照《核电厂操纵人员的执照考核标准》(EJ/T 1043—2004)的相关内容和要求进行课程设置、制定教材编写原则、明确每种教材应涵盖的内容;在总结以往教学经验的基础上,充分征求各核电厂专家的意见,形成了内容完整、要求明确的教材编写大纲。其次,聘请既有较高的专业水平又有较强的实际工作能力和丰富的教学

经验的专家担任本套教材的编者,并为编者提供教材编写技巧、《著作权法》等相关知识的讲座和模拟机现场观摩学习;编者根据教材编写原则和大纲编写具体内容,力求做到既符合学员的认知规律又贴近核电站的实际。再次,请理论功底扎实、教学经验丰富的教授、专家根据教学原则对教材内容的准确性、系统性等进行审查,并广泛征求任课教师的意见;同时请经验丰富的核电厂专家结合实际进行审查。编者根据上述意见对教材进行认真修改后,再征求各方意见,最终由操纵人员资格审查委员会审定。

本套教材中《核电厂电气原理与设备》由江苏核电有限公司具有丰富实际工作经验的专家编写。其余的各分册由核工业研究生部多年从事核电培训教学工作、教学及实践经验丰富的教授、专家编写。

在本套教材的编审过程中,核工业研究生部的任课教师们认真参与教材的编审和研讨;江苏核电有限公司专门成立“电气教材编写专项组”,精心组织编审;各核电厂积极推荐审稿专家,提供编写教材所需资料;核电秦山联营有限公司组织一线人员与编者进行对口交流,创造条件为编者提供模拟机现场演示与讲解;各核电厂、核动力运行研究所、操纵人员资格审查委员会等单位的专家们认真审稿,提出许多宝贵意见;原子能出版社自始至终给予通力合作,提前介入指导,缩短了出版周期。

本套教材的编制出版,凝聚着编、审、校、印及组织管理人员的大量心血,同时得到各相关单位的大力支持和热情帮助,在此深表谢意!

编委会

2010年11月

编者的话

《核电厂电气原理与设备》是根据核电基础理论培训教材编写大纲要求,在广泛听取核电专家意见的基础上编写的,是《压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材》之一,也可供核电厂相关人员参考。

本书根据《核动力厂运行安全规定》(HAF103)和《核电厂人员的配备、招聘、培训和授权》(HAD103/05)的要求,内容以基础理论知识、基本概念和基本原理为主,涵盖了《核电厂操纵人员的执照考核》标准(EJ/T 1043—2004)附录A和B的有关内容。

本书在编写上,以压水堆核电厂电气系统及设备的结构、原理、功能及性能为重点,力求突出压水堆核电厂机组的技术特点,尽量从原理上着重讲清楚概念,将这些基本原理与核电厂的运行实际相结合。在内容选择和安排上,为便于读者理解,力求做到由浅入深,尽量避免艰深的理论,做到既重点突出,又具有一定的全面性、系统性。

本教材共分10章。第1章概述由顾颖宾编写;第2章核电厂开关电器与导体、第3章成套配电装置由王略编写(其中第2章第9节由燕伟编写);第4章核电厂的直流与UPS系统由李洪伟编写;第5章变压器由李雪岩编写;第6章交直流电动机由佟强编写;第7章同步发电机由舒新宽编写;第8章核电厂的电气主接线及厂用电由苏小军编写(其中第6节、第7节分别由李伟、燕伟编写);第9章电气设备的测量和控制由彭雄伟、刘佳奇编写;第10章继电保护由张炳池、于绍涛、王爽编写。全书由王略统稿。

在编写的过程中,邵向业教授对初稿提出了建议和意见,吴炳祥、黄志军等专家审校了全文,在此表示诚挚的谢意。

书中如有不妥之处,恳请批评指正。

编者

2010年11月

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 核电厂的电气设备	(1)
1.2 核电厂的电气设备安全分级	(1)
1.3 核电厂电气原理及设备课程的重点	(2)
1.4 课程安排	(2)
第 2 章 核电厂开关电器与导体	(4)
2.1 开关电器的电弧	(4)
2.1.1 电弧的产生	(4)
2.1.2 电弧的熄灭	(4)
2.1.3 交流电弧的特性及熄灭	(4)
2.2 熔断器作用及技术特性	(8)
2.2.1 熔断器的作用	(8)
2.2.2 熔断器的分类	(8)
2.2.3 熔断器的工作原理与特性	(9)
2.2.4 熔断器的主要参数与选择	(10)
2.3 低压断路器	(11)
2.3.1 低压断路器的定义及分类	(11)
2.3.2 低压断路器的结构	(11)
2.3.3 低压断路器的工作原理	(13)
2.3.4 低压断路器的主要技术参数	(13)
2.4 高压断路器	(13)
2.4.1 高压断路器的用途及分类	(13)
2.4.2 高压断路器的基本要求	(14)
2.4.3 高压断路器的基本参数	(15)
2.4.4 真空断路器	(17)
2.4.5 SF ₆ 高压断路器	(18)
2.5 断路器的操动机构	(20)
2.5.1 操动机构概述	(20)
2.5.2 操动机构的性能要求	(21)
2.5.3 操动机构的种类及特点	(21)
2.6 隔离开关	(23)

2.6.1	隔离开关的用途	(23)
2.6.2	隔离开关的特点	(24)
2.6.3	隔离开关的额定参数与分类	(24)
2.6.4	隔离开关操动机构	(24)
2.6.5	隔离开关型号和参数表示	(25)
2.7	真空接触器	(25)
2.7.1	真空接触器的动作原理	(25)
2.7.2	真空接触器的主要优点	(26)
2.7.3	真空接触器的额定参数	(26)
2.8	载流导体	(26)
2.8.1	载流导体的发热	(26)
2.8.2	材料与形状的选择	(27)
2.8.3	导体的选择和校验	(27)
2.8.4	封闭母线	(29)
2.9	核电厂电气贯穿件	(31)
2.9.1	概况	(31)
2.9.2	电气贯穿件的结构	(32)
2.9.3	电气贯穿件的密封	(34)
2.9.4	电气贯穿件的现场试验	(36)
2.10	核电厂的防雷和接地装置	(36)
2.10.1	核电厂外部防雷和接地	(37)
2.10.2	核电厂内部防雷和接地	(37)
2.10.3	避雷器	(37)
	复习题	(39)

第3章	成套配电装置	(41)
3.1	低压开关柜	(41)
3.1.1	低压开关柜的分类	(41)
3.1.2	低压开关柜的应用	(41)
3.2	中压开关柜	(43)
3.2.1	中压开关柜的分类	(43)
3.2.2	中置式金属铠装开关柜	(44)
3.2.3	防止误操作闭锁保护	(46)
3.2.4	中压接触器—熔断器组合电器	(47)
3.3	气体绝缘金属封闭组合电器	(48)
3.3.1	GIS 封闭组合电器的特点	(48)
3.3.2	气体绝缘金属封闭电器的结构	(48)
3.3.3	智能化系统的应用	(51)
3.4	发电机断路器	(52)

3.4.1 发电机断路器的发展..... (52)

3.4.2 发电机断路器的功能与优越性..... (53)

3.4.3 发电机断路器的分类与结构..... (54)

3.4.4 发电机断路器的基本参数..... (55)

复习题 (56)

第 4 章 核电厂的直流与 UPS 系统 (57)

4.1 直流系统概述..... (57)

4.1.1 直流系统的作用..... (57)

4.1.2 直流系统的电压等级划分..... (57)

4.1.3 直流系统的组成和接线方式..... (57)

4.2 蓄电池..... (59)

4.2.1 富液式铅酸蓄电池..... (60)

4.2.2 密封阀控式铅酸蓄电池..... (65)

4.3 整流器..... (66)

4.3.1 相控型整流电源..... (66)

4.3.2 高频开关整流电源..... (67)

4.3.3 运行方式..... (68)

4.4 直流系统的绝缘监测装置..... (70)

4.4.1 母线绝缘监测..... (70)

4.4.2 支路监测..... (71)

4.5 交流不停电电源系统..... (72)

4.5.1 UPS 规格的确定 (72)

4.5.2 UPS 系统的典型配置方式 (73)

4.5.3 UPS 的输出要求 (75)

4.5.4 逆变装置..... (76)

复习题 (77)

第 5 章 变压器 (78)

5.1 变压器的工作原理..... (78)

5.1.1 理想变压器..... (78)

5.1.2 实际变压器..... (79)

5.1.3 变压器的阻抗参数..... (80)

5.1.4 变压器的效率..... (80)

5.2 变压器的结构..... (81)

5.2.1 结构部件的名称和作用..... (81)

5.2.2 变压器磁路系统..... (84)

5.2.3 绕组的连接方式和连接组..... (85)

5.2.4 变压器器身绝缘典型结构..... (87)

5.3 变压器的分类与铭牌	(88)
5.3.1 变压器的分类	(88)
5.3.2 变压器的型号表示方法	(89)
5.3.3 变压器铭牌	(90)
5.4 变压器的空载运行和负载运行	(90)
5.4.1 变压器的空载运行	(91)
5.4.2 变压器的负载运行	(92)
5.5 变压器的运行性能	(95)
5.5.1 变压器的外特性	(95)
5.5.2 变压器的电压变化率	(95)
5.5.3 变压器运行条件	(96)
5.5.4 变压器并列运行条件	(96)
5.5.5 变压器的热性能	(97)
5.5.6 变压器耐受短路的能力	(97)
5.5.7 变压器的励磁涌流	(98)
5.5.8 变压器的噪声	(99)
5.5.9 变压器油中溶解气体分析	(99)
5.6 特殊变压器	(101)
5.6.1 自耦变压器	(101)
5.6.2 电压互感器	(101)
5.6.3 电流互感器	(105)
复习题	(106)

第6章 交直流电动机	(107)
6.1 异步电动机的结构及应用	(107)
6.1.1 异步电动机的结构	(107)
6.1.2 异步电动机的铭牌	(109)
6.1.3 异步电动机的特点及分类	(111)
6.2 异步电动机的工作原理	(112)
6.2.1 异步电动机的转动原理	(112)
6.2.2 转差率	(114)
6.2.3 异步电动机的物理状况分析	(114)
6.2.4 电磁转矩	(116)
6.2.5 机械特性曲线	(117)
6.3 异步电动机的启动	(118)
6.3.1 异步电动机的启动转矩平衡	(118)
6.3.2 异步电动机的启动性能	(119)
6.3.3 异步电动机的启动方式	(119)
6.3.4 绕线式异步电动机的启动	(122)

6.3.5 各种启动方式的比较	(123)
6.4 异步电动机的调速	(123)
6.4.1 变极调速	(124)
6.4.2 变频调速	(124)
6.4.3 变转差率调速	(124)
6.5 异步电动机的运行	(125)
6.5.1 异步电动机的运行维护	(125)
6.5.2 异步电动机的简单故障分析	(125)
6.6 直流电动机的基本原理及结构	(126)
6.6.1 直流电动机的工作原理	(126)
6.6.2 直流电动机的结构	(127)
6.7 直流电动机的励磁方式	(128)
6.7.1 他励直流电动机	(128)
6.7.2 并励直流电动机	(128)
6.7.3 串励直流电动机	(128)
6.7.4 复励直流电动机	(129)
6.8 直流电动机的运行	(129)
6.8.1 直流电动机的基本方程	(129)
6.8.2 直流电动机的机械特性	(129)
6.8.3 对直流电动机启动特性的要求	(131)
6.8.4 直流电动机的启动方法	(131)
6.8.5 直流电动机的制动	(131)
6.8.6 直流电动机的反转	(132)
6.8.7 直流电动机的运行检查	(132)
6.9 直流电动机的调速	(132)
6.9.1 他(并)励直流电动机的调速	(133)
6.9.2 串励直流电动机调速	(134)
6.10 厂用电机的选择与自启动	(134)
6.10.1 厂用电机的选择	(134)
6.10.2 电动机自启动校验	(135)
复习题	(136)

第7章 同步发电机	(137)
7.1 同步发电机工作原理	(137)
7.2 汽轮发电机的结构	(138)
7.2.1 发电机定子结构	(139)
7.2.2 发电机转子结构	(142)
7.2.3 氢气冷却器	(144)
7.2.4 支撑轴承	(145)

7.2.5	轴密封	(145)
7.2.6	发电机的冷却方式	(147)
7.3	发电机励磁系统	(148)
7.3.1	励磁系统分类	(148)
7.3.2	无刷励磁机	(150)
7.3.3	自动励磁调节装置	(154)
7.3.4	励磁系统的控制方式	(154)
7.3.5	励磁系统的辅助功能	(155)
7.4	同步发电机的运行	(156)
7.4.1	发电机电枢反应	(156)
7.4.2	发电机功率	(157)
7.4.3	发电机电压方程与向量图	(159)
7.4.4	同步发电机的运行特性	(160)
7.4.5	同步发电机的容许运行范围	(162)
7.4.6	同步发电机的正常运行	(165)
7.5	同步发电机的并联运行	(166)
7.5.1	电压的允许变动范围	(167)
7.5.2	频率的允许变动范围	(168)
7.6	发电机非正常运行工况	(169)
7.6.1	发电机对称过负荷	(169)
7.6.2	发电机不对称过负荷	(169)
7.6.3	发电机的失磁运行	(170)
7.6.4	以同步电动机方式运行	(172)
7.6.5	定子电压偏差大于允许值	(173)
7.6.6	发电机及其辅助系统氢气泄漏	(173)
复习题		(174)

第8章	核电厂的电气主接线及厂用电	(175)
8.1	核电厂电气系统	(175)
8.2	电气主接线的要求和形式	(175)
8.2.1	电气系统主接线的基本要求	(175)
8.2.2	电气主接线的基本形式	(176)
8.3	核电厂电气主接线的选择	(176)
8.3.1	发电机出口主接线方式	(176)
8.3.2	升压站主接线的选择	(178)
8.3.3	核电厂备用电源主接线的选择	(182)
8.4	核电厂厂用电系统的构成	(183)
8.4.1	核电厂厂用电设计原则	(184)
8.4.2	厂用负荷的分级	(184)

8.5 电力系统的接地方式及选择	(185)
8.5.1 中性点接地方式的划分	(185)
8.5.2 中性点直接接地系统	(185)
8.5.3 中性点不接地系统	(186)
8.5.4 中性点经消弧线圈接地系统	(186)
8.5.5 中性点经电阻接地系统	(187)
8.5.6 各种接地方式的比较	(187)
8.5.7 核电厂接地方式的选择	(188)
8.6 核电厂棒控电源	(188)
8.6.1 从厂用母线获取交直流电源	(189)
8.6.2 取自电动发电机的棒控电源	(190)
8.7 核电厂应急柴油发电机	(191)
8.7.1 概述	(191)
8.7.2 应急柴油发电机的工作原理	(192)
8.7.3 应急柴油发电机系统的构成	(193)
8.7.4 柴油发电机的热备用	(196)
8.7.5 程序带载试验	(197)
8.7.6 定期试验	(197)
复习题	(198)

第9章 电气设备的测量和控制	(199)
9.1 电气设备的测量回路	(199)
9.1.1 概述	(199)
9.1.2 常见电气量测量	(200)
9.1.3 常用二次回路附件	(202)
9.2 基本控制回路和自动装置	(203)
9.2.1 概述	(203)
9.2.2 断路器控制	(204)
9.2.3 同期回路	(205)
9.2.4 信号回路	(206)
9.2.5 自动重合闸	(207)
9.2.6 备用电源自动投入装置	(207)
9.2.7 故障记录装置	(207)
9.2.8 向量测量装置	(208)
9.3 核电厂电气监控系统	(208)
9.3.1 传统的核电厂电气监控系统	(208)
9.3.2 电气 DCS 系统	(209)
复习题	(216)

第 10 章 继电保护	(217)
10.1 概述	(217)
10.1.1 继电保护的基本原理	(217)
10.1.2 继电保护的基本要求	(219)
10.2 厂用电保护	(220)
10.2.1 6 kV 电动机保护	(220)
10.2.2 低厂变保护	(222)
10.2.3 6 kV 母线及电源馈线保护	(224)
10.2.4 厂用电源的切换	(224)
10.3 发电机保护	(225)
10.3.1 发电机的故障和异常工况	(225)
10.3.2 发电机保护配置及出口方式	(227)
10.3.3 发电机保护原理	(228)
10.4 变压器保护	(238)
10.4.1 变压器的故障与异常工况	(238)
10.4.2 变压器的保护配置	(239)
10.4.3 变压器保护原理	(239)
10.5 高压输电线路及母线保护	(243)
10.5.1 光纤差动保护	(243)
10.5.2 高频纵联保护	(245)
10.5.3 距离保护	(247)
10.5.4 接地保护	(248)
10.5.5 过电压保护	(249)
10.5.6 自动重合闸	(250)
10.5.7 短引线保护	(251)
10.5.8 断路器失灵保护	(251)
10.5.9 母差保护	(251)
复习题	(252)
 索引	 (253)
 参考文献	 (254)

第 1 章 概 述

电气设备是在电力系统中对发电机、变压器、电力线路、断路器等设备的统称。主要工作是生产、输送和分配电能,根据负荷变化的要求启动、调整 and 停止机组,对回路进行必要的切换,并不断地监视主要设备的工作。

核电厂与常规电站的主要区别除了核电厂本身建造的复杂性和高难度外,它对安全性和可靠性的要求甚高。因此,核电厂的核反应堆,对其各个运行和安全系统的组成设备有着极高的质量要求。尤其是近年来的三哩岛和切尔诺贝利事故之后,世界各国对核电厂的安全性和可靠性较之以前更为注重。鉴于核电厂的这种特殊性,对其有关安全系统的组成设备及非安全系统的组成设备的要求就显得非常重要。

1.1 核电厂的电气设备

核电厂的电气设备可以分为一次设备和二次设备,一次设备是直接生产和输配电能的设备。主要包括:

- (1) 发、变、送、用电设备:发电机、变压器、电缆、电动机等;
- (2) 汇集和分配电能的设备:母线;
- (3) 开关设备:断路器、隔离开关以及各种低压开关电器;
- (4) 限制短路电流和防雷设备:限流电抗器、避雷器等;
- (5) 将一次电路与二次电路相联系的设备:互感器。

通常我们把一次设备构成的系统分为两部分:主系统和厂用电系统,其中:主系统部分主要包括发电机、主变压器、超高压主接线及其配电装置;厂用电系统主要包括厂用高压系统和厂用低压系统。

二次设备是对一次设备的工作进行监察、测量、控制和保护的辅助设备。主要包括:

- (1) 仪表和信号装置;
- (2) 继电保护和自动装置;
- (3) 远动装置和控制装置。

1.2 核电厂的电气设备安全分级

电气设备是核电厂实现各项安全和正常功能的重要组成部分,通常分为安全级设备、安全相关设备 and 非安全重要设备。

(1) 安全级设备

安全级(简称 1E 级)电气设备,是完成反应堆安全停堆、安全壳隔离、堆芯冷却以及从安全壳和反应堆排出热量所必需的,或者是防止放射性物质向环境过量排放所必需的。安全级电气设备要限制其功能范围和复杂程度,以保证其高度的可用性和可靠性。