

普通高等教育“十三五”规划教材

●●●● 第2版

风电场电气系统

Electrical System of Wind Farm

◎ 主编 朱永强 张旭

非
外
借



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

风电场电气系统

第 2 版

主编 朱永强 张旭
参编 尹忠东 夏瑞华

机械工业出版社

本书主要讲述风电场电气部分的系统构成和主要设备,包括与风电场电气相关的各主要内容。全书分为8章,重点涵盖风电场和电气部分的基本概念,风电场电气部分的构成和主接线方式,风电场主要一次设备及其选择,风电场电气二次系统,配电装置,风电场的防雷和接地,风电场中的电力电子设备等内容。书中提供了大量的实物照片和结构示意图,使读者对电气设备有直观的感性认识。

本书既可作为高等院校的教材,也适合作为风力发电领域相关从业人员的培训教材及自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

风电场电气系统/朱永强,张旭主编.—2版.—北京:机械工业出版社,2019.1

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-61578-1

I. ①风… II. ①朱… ②张… III. ①风力发电—电厂电气系统—高等学校—教材 IV. ①TM62

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第288911号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王雅新 责任编辑:王雅新 路乙达

责任校对:张薇 封面设计:张静

责任印制:张博

唐山三艺印务有限公司印刷

2019年2月第2版第1次印刷

184mm×260mm·14.25印张·343千字

标准书号:ISBN 978-7-111-61578-1

定价:38.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

序

好的教材既要能够引领学生将专业基础知识用于对工程实践的认知，又要培养学生面对工程实际问题时的理解和分析能力。本书正是着眼于此，在编写过程中，在追求内容丰富的同时，也强调学生的领受程度，这一点很难得。

曾经见过一些教材，内容很丰富，遗憾的是，忽略了学生的感性认知，致使很多学了相关课程的学生在面对实际的电气设备时仍然所识甚少。而且一些教材往往试图面面俱到，致使重点不够突出，结论也不明确，冗长的篇幅、繁多的文字，在有限的学习时间内，给学生留下的印象并不深刻。本书从撰写风格和内容编排上很好地避免了上述问题，比较适合高校的教学和其他从业人员的自学。

《风电场电气系统》第1版曾是国内相关课程的第一本教材，不仅填补了空白，及时地满足了相关专业的教学需要。本书在第1版的基础上修订完善，其内容更加丰富、重点突出、图文并茂，既是高质量的学校教材，又是优质的科普著作，对风力发电专业的学科建设和知识普及都会有良好的促进作用。

物勇子

前 言

风电场电气系统（或风电场电气部分），是高等院校风能与动力工程专业的必修课程，也是相关领域的从业人员必修的基本知识。该课程理论和实践结合相当紧密，学习这门课是初学者应用专业基础知识，认知风电场电气系统工程实际的重要步骤。

风电场电气系统主要讲述风电场电气部分的系统构成和主要设备，包括与风电场电气相关的各主要内容。全书分为8章，重点涵盖风电场和电气部分的基本概念，风电场电气部分的构成和主接线方式，风电场主要一次设备及其选择，风电场电气二次系统，配电装置，风电场的防雷和接地，风电场中的电力电子设备等内容。

本书在撰写风格上具有如下特色：

第一，提供了大量的实物照片和示意图，使读者对电气设备有直观的感性认识，提高学习兴趣并加深对理论知识的理解。

第二，在每一章的开头，明确了章节的主要内容和学习重点，并设定了预期的教学或自学目标。

本书在广泛调研、广泛收集素材的基础上，结合多位教师的教学实践经验，精心编制，力求反映广大师生的要求，做到好读易教；也可为风力发电领域的相关从业人员的培训及自学提供参考。

第1、2、8章及第3章的设备原理部分由朱永强编写，第4、6章及第3章的其他内容由张旭编写，第5章由张旭、朱永强、夏瑞华共同编写，第7章由尹忠东、朱永强共同编写。

参加本书第1版编写工作的还有国网北京市电力公司电力科学研究院王文山，国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院唐佳能、韩明、赵娟、杨林娜、张凯等。

参加本书第2版编写工作的有国网天津市电力公司东丽供电分公司梁艳红，国网山东省电力公司检修公司蔡冰倩，华北电力大学研究生李翔宇、刘康等。

另外，在本书的编写过程中，还得到了中国电力科学研究院新能源研究所王伟胜所长和朱凌志博士，龙源电力集团范子超博士，清华大学姜齐荣教授和张春朋博士，华能文昌风电厂卢业平和刘利等同志的支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

作 者

目 录

序

前言

第1章 风电场和电气部分的基本概念 ... 1

- 1.1 风力发电概述 1
- 1.2 风电场的概念 2
- 1.3 电气和电气部分 3
 - 1.3.1 电气的基本概念 3
 - 1.3.2 电气部分的一般组成 4
- 1.4 电气部分的图示 7
- 1.5 本书的主要内容 9
- 习题 10

第2章 风电场电气部分的构成和 主接线方式 11

- 2.1 风电场电气部分的构成 11
 - 2.1.1 风电场与常规发电厂的区别 11
 - 2.1.2 风电场电气部分的构成 12
- 2.2 电气主接线及设计要求 13
 - 2.2.1 电气主接线的基本概念 13
 - 2.2.2 电气主接线的设计原则 15
- 2.3 常用的电气主接线形式 16
 - 2.3.1 电气主接线的分类 16
 - 2.3.2 电气主接线的常见形式 17
- 2.4 风电场电气主接线设计 20
 - 2.4.1 风电机组的电气接线 20
 - 2.4.2 集电环节及其接线 20
 - 2.4.3 升压变电站的主接线 21
 - 2.4.4 风电场厂用电 21
 - 2.4.5 风电场电气主接线举例 21
 - 2.4.6 风电场电气主接线方案设计 22
- 习题 26

第3章 风电场主要一次设备 27

- 3.1 风力发电机 27
 - 3.1.1 发电机的结构 27
 - 3.1.2 发电机的工作原理 30
 - 3.1.3 大型风力发电机的主流机型 33
- 3.2 变压器 34
 - 3.2.1 变压器的工作原理 34

- 3.2.2 变压器的结构 37
- 3.2.3 变压器的型号表征 46
- 3.2.4 风电场中的变压器 47
- 3.3 开关设备 48
 - 3.3.1 电弧的基本知识 48
 - 3.3.2 断路器 52
 - 3.3.3 隔离开关 58
 - 3.3.4 熔断器 60
 - 3.3.5 各种开关设备的功能比较 61
- 3.4 载流导体 61
 - 3.4.1 导体的材料 61
 - 3.4.2 导体的形状 62
 - 3.4.3 导体的功能 64
- 3.5 电抗器和电容器 65
 - 3.5.1 电抗器 65
 - 3.5.2 电容器 66
- 3.6 互感器 68
 - 3.6.1 互感器简介 68
 - 3.6.2 电流互感器 68
 - 3.6.3 电压互感器 75
- 习题 80

第4章 风电场一次设备的选择 81

- 4.1 导体的发热和电动力 81
 - 4.1.1 导体长期发热和载流量 81
 - 4.1.2 导体的短时发热 82
 - 4.1.3 导体短路时的电动力 83
- 4.2 电气设备选择的依据 83
 - 4.2.1 电气设备选择的一般条件 83
 - 4.2.2 电气设备选择的技术条件 84
 - 4.2.3 电气选择的环境因素 85
 - 4.2.4 环境保护 86
- 4.3 变压器的选择 86
 - 4.3.1 变压器的容量和台数 86
 - 4.3.2 变压器的型式 87
- 4.4 开关电气设备的选择 90
 - 4.4.1 断路器的选择 90
 - 4.4.2 隔离开关的选择 92

4.4.3 熔断器的选择	92	5.6.3 升压变电站的操作电源系统	125
4.5 互感器的选择	93	5.6.4 升压变电站的图像监控	126
4.5.1 电流互感器的选择	93	5.7 变电站综合自动化技术	126
4.5.2 电压互感器的选择	95	5.7.1 引言	126
4.6 导体的选择	97	5.7.2 变电站综合自动化的功能	127
4.6.1 导体截面积的选择	97	5.7.3 变电站综合自动化系统的特点	130
4.6.2 电晕电压校验	98	5.7.4 变电站综合自动化系统的结构	132
4.6.3 热稳定校验	98	习题	137
4.6.4 硬导体的动稳定校验	98	第6章 配电装置	138
4.6.5 硬导体的共振校验	102	6.1 配电装置的图示	138
4.6.6 封闭母线的选择	102	6.2 配电装置的设计要求	140
习题	102	6.2.1 满足安全净距的要求	140
第5章 风电场电气二次系统	103	6.2.2 施工、运行和检修的要求	143
5.1 继电器	103	6.2.3 噪声的允许标准及限制措施	144
5.1.1 继电器的结构和原理	103	6.2.4 静电感应的场强水平和限制措施	144
5.1.2 继电器的表示符号	104	6.2.5 电晕无线电干扰和控制	145
5.1.3 常用的继电器类型	105	6.3 配电装置的分类	145
5.1.4 继电保护的接线图	109	6.3.1 装配式和成套式	145
5.2 二次部分的其他元件	110	6.3.2 屋内配电装置	146
5.2.1 接触器	110	6.3.3 屋外配电装置	151
5.2.2 控制开关	112	6.4 风电机组的位置排列	157
5.2.3 小母线	114	6.5 升压变电站电工建筑物的布置	158
5.2.4 接线端子、电缆和绝缘导线	114	6.5.1 电工建筑物的总平面布置	158
5.2.5 成套保护装置和测控装置	114	6.5.2 升压变电站电工建筑物的总布置	159
5.3 二次回路	115	习题	160
5.3.1 保护回路	116	第7章 风电场的防雷和接地	161
5.3.2 控制回路	116	7.1 雷电的产生机理、危害及防护	161
5.3.3 测量回路	116	7.1.1 雷电的产生机理	161
5.3.4 信号回路	116	7.1.2 雷电的危害	164
5.3.5 操作电源系统	117	7.1.3 雷电的一般防护	164
5.4 相对编号法与安装接线图	118	7.2 接地的原理、意义及措施	166
5.5 风电场的二次部分	120	7.2.1 接地的基本原理	166
5.5.1 风电机组的保护、控制、测量、信号	120	7.2.2 接地的意义	170
5.5.2 箱式变电站中变压器的保护、控制、测量、信号	121	7.2.3 接地的一般要求	171
5.5.3 风电场控制室的控制、测量、信号	121	7.2.4 降低接地电阻的措施	176
5.5.4 遥测和遥信系统	121	7.3 大型风力发电机的防雷保护	177
5.6 升压变电站的二次部分	121	7.3.1 风力发电机防雷保护的必要性	177
5.6.1 升压变电站的控制、测量、信号	122	7.3.2 叶片的防雷保护	178
5.6.2 升压变电站的继电保护	123	7.3.3 机舱的防雷保护	180
		7.3.4 塔架的防雷保护	180
		7.3.5 风力发电机的接地	181

7.3.6 电气系统的防雷保护	182	8.1.1 电力电子技术简介	199
7.3.7 关于风力发电机防雷保护的 思考	182	8.1.2 电力电子器件	200
7.4 集电线路的防雷与接地	183	8.1.3 变流技术	201
7.4.1 集电线路的感应雷过电压	183	8.1.4 PWM 控制	204
7.4.2 集电线路的直击雷过电压和耐雷 水平	184	8.2 风电机组并网换流器	207
7.4.3 集电线路的雷击跳闸率	189	8.2.1 直驱式永磁同步机组的并网 换流器	207
7.4.4 集电线路的防雷保护措施	190	8.2.2 交流励磁双馈式机组的并网 换流器	209
7.5 升压变电站的防雷与接地	191	8.2.3 无刷双馈式机组的并网换流器	211
7.5.1 升压变电站的直击雷保护	191	8.2.4 总结	211
7.5.2 升压变电站的侵入波保护	193	8.3 无功补偿与电压控制装置	212
7.5.3 升压变电站的进线段保护	194	8.3.1 风电场的无功和电压控制需求	212
7.5.4 升压变电站的变压器防雷保护	196	8.3.2 静止无功补偿器	213
习题	198	8.3.3 静止同步补偿器	215
第8章 风电场中的电力电子设备	199	习题	216
8.1 电力电子技术基础	199	参考文献	217

第 1 章 风电场和电气部分的基本概念

关键术语：

风电场，电气部分，电气设备的图形符号。

知识要点：

重要性	能力要求	知识点
★	了解	风电场的基本概念
★★	了解	电气和电气部分的概念
★★★★	理解	电气部分的一般组成及各部分的作用
★★★★	识记	电气部分的图形表示方法

预期效果：

通过本章内容的阅读，应能了解风电场的基本概念和风电场电气部分的含义，初步理解和掌握电气部分的大致构成及表示方法，尤其是重要电气设备及其图形符号。

1.1 风力发电概述

风是最常见的自然现象之一，风能资源的储量非常巨大，一年之中风所产生的能量大约相当于 20 世纪 90 年代初全世界每年所消耗燃料的 3000 倍。

人类很早就认识到了风资源所蕴含的巨大能量，利用风能的历史已有数千年，早期主要是直接利用风力或由风力机将风能转换为机械能提供动力，例如船帆、风车提水、风车碾米磨面等。19 世纪末，风能开始被用于发电，并且迅速成为其最主要的应用领域之一。

风电技术是可再生能源技术中最成熟的一种能源技术，对于应对那些与传统能源有关的迫在眉睫的环境和社会问题，风电是个切实可行而且立竿见影的解决方案。风力发电由于环保清洁、无废弃物排放、施工周期短、使用历史悠久，受到了各国的广泛重视和大力推广。

20 世纪 70 年代以后风力发电首先在美国、西欧等发达国家和地区蓬勃发展起来。由于风能开发有着巨大的经济、社会和环保价值及良好的发展前景，如今风力发电在世界范围内都获得了快速的发展，风力发电规模及其在电力能源结构中的份额都增长很快。例如，我国 2017 年风电新增装机容量占全球比重的 37.40%，累计装机容量占全球比重的 34.88%，稳居世界第一。据专家们的测估，全球可利用的风能资源为 200 亿 kW，约是可利用水力资源的 10 倍。如果利用 1% 的风能资源，可产生世界现有发电总量 8%~9% 的电量。

风力发电就是利用风力机获取风能并转化为机械能，再利用发电机将风力机输出的机械能转化为电能输出的生产过程。风力机有很多种类型，用于风力发电的发电机也呈现出多样性，但是其基本能量转换过程都是一样的，如图 1-1 所示。用于实现该能量转换过程的成套设备称为风力发电机组。

单台风力发电机组的发电能力是有限的，目前在内陆地区应用的主流“大型”机组的



图 1-1 风力发电的能量转换过程

额定功率不超过 1.5MW，海上风电机组的平均单机容量在 3MW 左右，最大已达 6MW。即使在今后若干年风电机组的功率可以翻倍，与常规火电厂或水电站的上百 MW 发电机组相比，仍然是很小的。大规模风力发电都是在风电场中实现的，风电场的概念参见 1.2 节。

风力发电机组输出的电能经由特定电力线路送给用户或接入电网。风力发电机组与电力用户或电网的联系是通过风电场中的电气部分得以实现的。电气部分的概念参见 1.3 节。

1.2 风电场的概念

风电场是在一定的地域范围内由同一单位经营管理的所有风力发电机组及配套的输变电设备、建筑设施、运行维护人员等共同组成的集合体。

选择风力资源良好的场地，根据地形条件和主风向，将多台风力发电机组按照一定的规则排成阵列，组成风力发电机群，并对电能进行收集和管理，统一送入电网，是建设风电场的基本思想。

应根据风向玫瑰图和风能玫瑰图[⊖]确定风电场的主导风向，在平坦、开阔的场址，要求主导风向上机组间相隔 5~9 倍风轮直径，在垂直于主导风向上要求机组间相隔 3~5 倍风轮直径。按照这个规则，风电机组可以单排或多排布置。多排布置时应成梅花形排列。图 1-2 为某陆地风电场的照片。



图 1-2 陆地风电场

⊖ 在平面上，按照“上北、下南、左西、右东”的定位，再细分成 16 个方位（例如正东、东东南、东南东、东南南、正南……），相邻两个方位间隔 22.5°，代表 16 种风向。用从原点出发的线段的长度表示某一地区在某一时段内各方向的来风数据（数据标注在线段末端），连接各线段的末端形成类似玫瑰花的图形，称为“玫瑰图”。风向玫瑰图表示各方向有风的概率，风能玫瑰图表示各风向的平均风能大小。

按照风电场的规模，风电场大致可以分为：小型、中型和大型（特大型）风电场，见表1-1。

表 1-1 风电场的规模划分

	风能资源	场地	说 明
小型	较好	较小	可建几 MW 容量的风电场，接入 35 ~ 66kV 及以下电压等级的电网
中型	较好	合适	可建几十 MW 容量以下风电场，接入 110kV 及以下电网
大型（特大型）	丰富	开阔	可建容量在 100 ~ 600MW 或更大的风电场，例如我国的江苏东台 200MW 海上风电项目

风电场是大规模利用风能的有效方式，20 世纪 80 年代初兴起于美国加利福尼亚，如今已在世界范围内获得蓬勃发展。目前，风电场的分布几乎遍布全球，风电场的数量已成千上万，最大规模的风电场可达上百万千瓦级，例如我国甘肃玉门的特大型风电项目。

随着风电场规模的不断扩大，风电场与电网或电力用户的相互联系越来越紧密，学习和掌握风电场电气部分具有相当重要的意义。

1.3 电气和电气部分

1.3.1 电气的基本概念

我们在生活中常常会听到电气工程、电气部分、电气专业这样的词语，电气化水平也常用于衡量一个国家技术发展情况，那什么是电气呢？

在 20 世纪初，“Electrical Engineering”作为外来名词被引入我国，被翻译为电工程，后来为了符合汉语的口语习惯逐步衍化为“电气工程”，而电气的本意也即为：带电的、生产和使用电能相关的。对于电气部分可以泛泛地理解为：由所有带电设备及其附属设备所组成的全部。

在日常生活中，人们对于用电的依赖是如此的严重，以至于成了一种生活习惯，现在即使很短时间内的断电都让人们感到不适应，计算机、照明、空调、电视、风扇等在给人们带来精彩生活的同时也使得人们高度依赖电能的供给，而且科技的进步也将更多的电器设备投入到人们生活中。

此外，在各种生产活动中，对于电能的需求也越来越大。工厂中的电动机驱动泵、风机和空气压缩机需要电能来运行，工业冶炼中需要电弧炉来融化金属，公路铁路中都有由电动机所驱动的车辆，这些都说明现代文明对于电能的依赖，因此电气化成为衡量一个国家文明进步水平的标准。

作为消费者，人们常常关心的是用电设备的正常工作，这些电能又是从何而来的呢？

发电厂中的发电机是一般意义上的电源，它将其他能源转化为电能，如煤炭、石油、水

能、风能、太阳能、地热、潮汐等。也就是说，人们生产生活中所使用的电能无法由自然界直接获取，是一种二次能源，那些存在于自然界可以直接利用的能源被称为一次能源。

发电厂中发电机生产的电能一般需要经过变压器升高电压后送入其所在电网中，这是因为在输送同样功率时，较高的电压意味着较低的电流（ $P = UI$ ），也就意味着较低的输送损耗（ $Q = I^2 R$ ）。电能由电网输送到用户所在地，经降压后分配给最终用户，如驱动风扇的电动机、照明用的日光灯、空调的压缩机等。

由此可见，在电能生产到消费之间需要有电能可以传导的路径，由于一定区域内发电厂和用户的分布非常复杂，因此这一路径自然形成了网状结构，即所谓的电网。电能由发电厂生产出来以后在电网中根据其结构按照物理规律自然分配。现代电网的覆盖范围日益扩大，比如北美电网包括美国和加拿大，而我国也已经实现全国联网。

1.3.2 电气部分的一般组成

包括风电场在内的各类发电厂站、实现电压等级变换和能量输送的电网、消耗电能的各种设备（用户或负荷）共同构成了电力系统，即用于生产、传输、变换、分配和消耗电能的系统。电力系统各个环节的带电部分统称为其各自的电气部分。

图 1-3 为发电、输电、变电、供配电及用电的简单示意。下面结合图 1-3 所示的例子，介绍电气部分的一般组成。

注意：这里的说明适用于风电场、火电厂、水电站等各类发电厂站。如果只关心风电场，可以将其中的发电厂都当作风电场来看待。

发电厂和变电站是整个电力系统的基本生产单位，发电厂生产电能，而变电站则将电能变换后分配给用户。发电厂和变电站内部的带电部分即为其自身的电气部分。电气部分不仅包括电能生产、变换的部分，还包括其自身消耗电能的部分（即厂用电或所用电）。以上用于能量生产、变换、分配、传输和消耗的部分称为电气一次部分。此外，为了实现对厂站内设备的监测与控制，电气部分还包括所谓的二次部分，即用于对本厂站内一次部分进行测量、监视、控制和保护的部分。

电气一次部分和二次部分都是由具体的电气设备所构成的，一次部分最为重要的是发电机、变压器、电动机等实现电能生产和变换的设备，它们和载流导体（母线、线路）相连接实现了电力系统的基本功能，即电能的生产、变换、分配、输送和消耗。其中发电机用于电能生产，变压器用于电能变换，母线用于电能的汇集和分配，线路用于能量的输送，电动机和其他用电设备用于电能的消耗（电能变换为其他能量形式）。

思考：根据生活实际，电能可以转换为哪些能量形式？

生活中，当人们使用台灯的时候，常需要开关来控制台灯的工作和不工作，即带电和不带电。在需要检查台灯的时候则应将插头从插座上拔下来，以保证和电源没有直接联系。同理，为了使人们可以任意地控制发电机、电动机、变压器等设备的起停（带电/不带电），也需要有相关的开关，这就是断路器。在分合电路的断路器旁边也常伴有用于检修时起电气隔离作用的隔离开关。

提示：断路器分合电路所使用的触头装设于灭弧装置中，无法直接看到，而隔离开关的

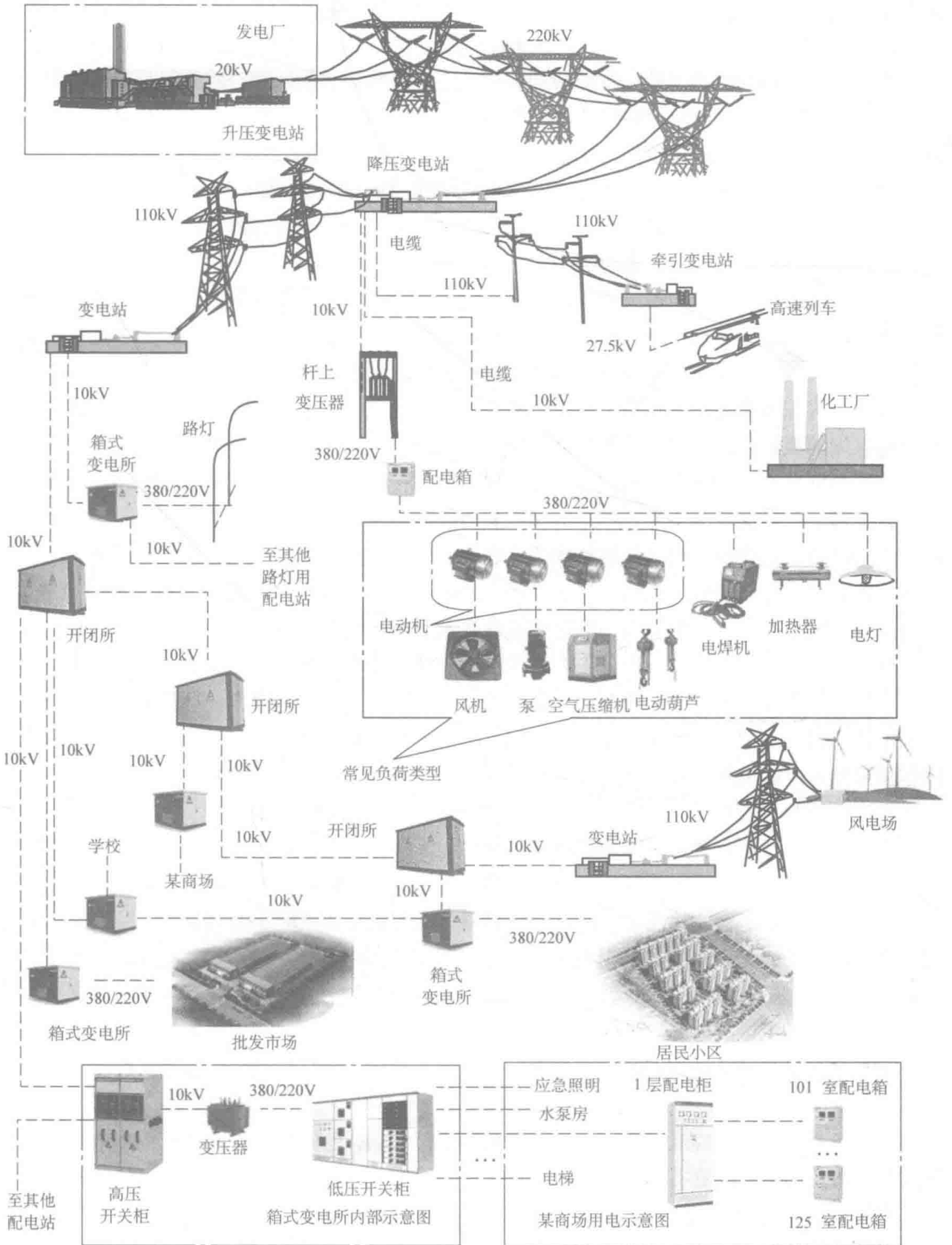


图 1-3 发电、输电、变电、供配电及用电的简单示意

触头暴露于空气中；断路器一般采用复杂的自动操作机构，而隔离开关常采用简单的人工操作机构。

除了断路器和隔离开关外，常见的开关电器还有熔断器和接触器。熔断器是最早的保护电器，用于电路故障时的过流熔断。而接触器是操作电器，用于正常时电路的分合。这两种开关电器常配合使用在电压较低的场所（如6kV），以替代价格较为昂贵的断路器。

有了上述三类设备（生产消耗电能、传输分配电能、开关电器）以后，人们不仅实现了电力系统的能量生产、变换、消费、分配和输送，还实现了其基本的控制功能，即可以有选择地将设备投入运行或退出运行。

在电力系统中，为了保证人员和设备的运行安全以及满足电力系统本身中性点接地的要求，还需要有相应的接地装置。在发电厂和变电站中常采用埋于地下的人工接地体构成接地网。接地网要求可以覆盖厂站内全部的电气设备，以保证设备的可靠接地。

此外，为应对电力系统中可能的故障或异常，在电气设备中还需要加装一些防止过电压和短路电流的装置，包括避雷器和串联电抗器。

以上的电气设备相互连接构成了发电厂和变电站内的一次部分，这些设备称为一次设备。为了对一次设备及整个系统的运行状态进行监视、测量、控制与保护，还需要在厂站内装设二次设备，这些设备相互连接构成了发电厂和变电站的二次部分（系统）。

二次系统是传递信号的电路，通过电压互感器和电流互感器将被测的一次设备和系统的高电压和大电流变换为低电压和小电流传递给测量和保护装置，测量和保护装置对所测得的电压和电流进行判别以监视一次设备和系统的运行状态并作出记录。以此为基础，人员可以使用控制设备去分合相对的开关电器，如断路器、隔离开关等。这样的设计使得二次系统可以采用低功耗标准化的小型设备来实现功能。特别需要注意的是，电压互感器和电流互感器按作用来分可以认为是二次设备，但其直接并联和串联于一次电路中，实际上是一次系统和二次系统的连接设备。

继电保护及自动装置可以认为是电力系统的卫兵。当电气设备发生故障时，对应的继电保护装置会根据采集到的电流和电压进行分析，判定发生故障后便动作触发与故障设备相连的断路器。断路器断开，将发生故障的电气设备从运行的电力系统中分离出来，从而保证系统的其余部分仍能正常运行。由于电力系统中线路的故障多为瞬时性故障（即故障存在的时间很短），在线路故障后常常允许断路器重合一次，以检验故障是否继续存在。如果故障仍在，则继电保护再次动作切除故障；否则断路器就重合成功，线路可以继续运行。重合闸及备用电源自投装置是电力系统中常见的自动装置，它用故障后断路器的合闸来缩小故障对于系统的影响。

在二次系统中为了实现测量、监视、控制和保护功能，还需要装设必要的控制电器和信号设备。常见的控制电器有断路器的控制开关。断路器分合过程中有可能由于电弧未能熄灭而发生爆炸，因此断路器的分合需要在远方操作，一般在变电站的主控制室内由控制开关来操作断路器的分合。

装设于变电站主控制室内的控制屏，常见于常规控制变电站。控制屏上装设有用于监视的仪表（电流表、电压表、有功功率表、无功功率表）、用于灯光告警的电子牌、用于操作

断路器的控制开关和指示断路器位置的红绿指示灯。在主控制室的布置中，一般将控制屏布置于最前列，以便人工监视和控制。在控制屏的最中央一般布置有中央信号屏，控制屏的前方是用于值班员工作的监控台，各类继电保护装置和远动及电能表屏通常按列布置于控制屏后，交直流电源装置可以布置于控制屏后或两旁。

上述设备运行的时候需要消耗电能，是作为耗电设备存在的，如继电保护装置，而断路器和其他设备的控制也需要消耗电能（由电动机驱动或进行储能），因此还需要装设相应的直流电源设备。采用直流的好处是可以利用蓄电池进行电能存储。在正常运行时，直流系统对一次系统送来交流电进行整流，提供给二次系统中的设备使用，并对蓄电池组进行充电。而当厂站内一次系统故障或还未带电时，由蓄电池组对二次设备进行供电，保证了二次系统的独立可靠运行。

在发电厂和变电站内，二次设备由控制电缆连接，构成了功能不同的二次回路，如用于实现继电保护功能的保护回路，用于实现断路器控制功能的断路器控制回路和用于信号和告警的信号回路。这些不同的回路间的信息传递依靠二次装置中的继电器来实现。




除了连接一次系统和二次系统的互感器以外，二次系统的设备一般集中布置于发电厂和变电站的主控制室内，并由控制电缆相互连接。

1.4 电气部分的图示

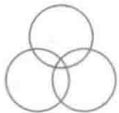









对于风电场等各类发电厂和变电站内电气部分的设计、施工、运行及研究等工作都需要依赖其图形方法，即用图形符号结合文字符号在平面上使具体问题抽象化。最为常见的就是电气接线图，包括一次接线图和二次回路图，它们以规定的图形和文字符号描述了厂站内一次部分和二次部分电路的基本组成和连接关系。

建立电气接线图，首先需要规定具体电气设备的图形符号。主要电气设备的图形符号见表1-2，其他用到的电气符号将在后文分别说明，更为详细的电气符号请参阅相关的电气设计手册。

表 1-2 主要电气设备的图形符号

图形符号	代表的电气设备	补充说明
	发电机	发电机的一般表示
	交流发电机	—
	双绕组变压器	—

(续)

图形符号	代表的电气设备	补充说明
	三绕组变压器	—
	母线	粗实线
	导线	细实线
	断路器	工程现场也称为开关
	隔离开关	工程现场也称为刀闸
	熔断器	—
	电抗器	—
	接地	—
	电压互感器	在同一接线图上, 互感器的圆圈比变压器的小, 圆圈中的符号表示绕组连接方式
	电流互感器	每一相安装电流互感器的导线都应加注小圆圈

在发电厂和变电站中,电气设备根据其作用和具体要求按照一定方式由导体连接形成了传输能量(一次部分)和信号(二次部分)的电路,这个电路就被称为电气接线,对这个电路的图形描述被称为一次接线图(又称电气主接线图)和二次回路图。

1.5 本书的主要内容

随着风电场规模的不断扩大,风电场与电网或电力用户的相互联系越来越紧密。了解风电场的电气特点,学习风电场电气部分的接线及设计方法,学习风电场电气设备的原理和选择方法,对于风电场安全运行与可靠供电具有相当重要的意义。

本书第1章介绍风电场与电气部分的基本概念和表示方法,使读者了解风电场电气部分的含义。

第2章介绍风电场电气部分的特点和基本构成,在介绍电气主接线的基本概念和设计原则的基础上,列举电气主接线的常见形式,并重点说明风电场电气主接线的基本形式,使读者了解风电场电气部分的整体布局和组成部分,掌握风电场电气接线设计的基本思想和依据。

第3章详细介绍风电场中的各主要一次电气设备的结构和工作原理,包括风电机组、变压器、断路器和隔离开关、母线和输电线路、电抗器和电容器、电压互感器和电流互感器等,以及变压器、断路器等重要一次设备的型式、参数,使读者对风电场电气设备的原理、功能、结构、外观等有具体认知。

第4章介绍风电场一次电气设备选择的一般条件和技术条件,以及热稳定校验、动稳定校验和环境校验方法,使读者了解和掌握电气设备的型式、参数与其在风电场中运行环境的关系,并且能对风电一次设备的选择进行初步分析和简单计算。

第5章介绍电气二次部分的含义和功能,以及电气二次系统的主要设备及其原理,使读者了解风电场和升压变电站电气二次系统的构成及电气二次系统的图形表示方法,并对我国目前已普遍采用的变电站综合自动化技术有一定的认知。

第6章介绍风电场中配电装置的概念和表示方法,描述各种常见配电装置的结构和作用,说明配电装置的设计要求、选型和布置方法,介绍风电场发电机组的排列布置和升压变电站电工建筑物的布置。

第7章介绍风电场的防雷和接地问题,首先说明雷电的形成机理和雷电的危害,介绍雷电防护的一般方法;然后对接地的意义和作用,尤其是对接触电压和跨步电压等重要概念进行具体的说明,给出接地设计的一般要求;最后全面介绍风电场发电机组、集电线路和升压变电站的防雷保护措施,有助于读者了解风电场电气设备安全方面的知识和解决办法,提高安全生产意识。

第8章介绍风电场中的电力电子设备,在简述电力电子技术应用和常见电力电子器件的基础上,深入浅出地阐述变流技术和PWM技术的基本原理;重点介绍主流大型风电机组的并网换流器,包括其电路结构和基本工作原理;最后简单介绍风电场的无功补偿与电压控制需求,以及SVC和STATCOM等无功补偿设备。