



“十二五”“十三五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

风电场 电气系统

FENGDIANCHANG
DIANQI XITONG

马宏忠 杨文斌 刘峰 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



NUAA2017029377

“三五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

风电场 电气系统

马宏忠 杨文斌 刘峰 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一，主要讲述风电场电气系统方面内容。全书共 11 章，包括风电场电气系统概述、风电场电气主接线、风电场短路电流计算、风电场的导体、风电场主要电气设备与选择、风电场集电线路设计、风电场防雷与接地系统、风电场的控制与安全保护系统、海上风电场电气系统、风电场内集电线路及光缆线路施工技术以及风电场无功补偿等内容。

本书既可作为风力发电行业各类技术人员的培训教材，也可作为高等学校有关专业师生和相关工程技术人员的教学、参考用书。

图书在版编目 (C I P) 数据

风电场电气系统 / 马宏忠等编著. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2017. 3
(风力发电工程技术丛书)
ISBN 978-7-5170-4837-4

I. ①风… II. ①马… III. ①风力发电—电厂电气系统 IV. ①TM62

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第257370号

书 名	风力发电工程技术丛书 风电场电气系统
作 者	FENGDIANCHANG DIANQI XITONG 马宏忠 杨文斌 刘峰 等 编著
出版发行	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、68545874 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
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 23 印张 546 千字
版 次	2017 年 3 月第 1 版 2017 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	79.00 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

《风力发电工程技术丛书》

编 委 会

顾 问 陆佑楣 张基尧 李菊根 晏志勇 周厚贵 施鹏飞

主 任 徐 辉 毕亚雄

副 主 任 汤鑫华 陈星莺 李 靖 陆忠民 吴关叶 李富红

委 员 (按姓氏笔画排序)

马宏忠 王丰绪 王永虎 申宽育 冯树荣 刘 丰

刘 玮 刘志明 刘作辉 齐志诚 孙 强 孙志禹

李 炜 李 莉 李同春 李承志 李健英 李睿元

杨建设 吴敬凯 张云杰 张燎军 陈 刚 陈 澜

陈党慧 林毅峰 易跃春 周建平 郑 源 赵生校

赵显忠 胡立伟 胡昌支 俞华锋 施 蓓 洪树蒙

祝立群 袁 越 黄春芳 崔新维 彭丹霖 董德兰

游赞培 蔡 新 糜又晚

丛 书 主 编 郑 源 张燎军

丛 书 总 策 划 李 莉

主要参编单位 (排名不分先后)

河海大学

中国长江三峡集团公司

中国水利水电出版社

水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心

水电水利规划设计总院

水利部水利水电规划设计总院

中国能源建设集团有限公司

上海勘测设计研究院有限公司

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司

长江勘测规划设计研究院

中水珠江规划勘测设计有限公司

内蒙古电力勘测设计院

新疆金风科技股份有限公司

华锐风电科技股份有限公司

中国水利水电第七工程局有限公司

中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司

华北电力大学

同济大学

华南理工大学

中国三峡新能源有限公司

华东海上风电省级高新技术企业研究开发中心

浙江运达风电股份有限公司

本书编委会

主 编 马宏忠

副主编 杨文斌 刘 峰 陈涛涛

参编人员 (按姓氏笔画排序)

田 新 孙长江 杨林刚 吴秋池 张 琳

施朝晖 徐珊珊 黄春梅 崔杨柳 傅春翔



风能作为可再生能源中最具有经济开发价值的清洁能源，具有蕴量大、分布广、可再生、无污染等优点。世界主要国家均非常重视风电的开发利用，据报道，截至2015年年底，全球风电累计装机容量达432GW。推进风资源的开发利用，建设风力发电工程符合我国能源发展战略的需要。我国政府高度重视并鼓励风电的开发利用，促进了我国风电事业连续、高速发展。2015年我国风电新增装机容量30.5GW，约占全球新增风电装机容量的45%，截至2015年年底，累计风电装机容量达145.1GW，约占全球累计风电装机容量的31%。

风电场电气系统是风电技术的重要环节，随着风电的迅速发展，需要更多的掌握风电知识的技术人员，特别是广大从事风电相关研究、设计、安装及运行维护的人员需要掌握风电场电气系统方面的知识，因此，很多高校均陆续开设风电专业，社会上很多单位也开办各种风电知识普及和风电专业基础教育的培训班。应对这些专业教育和培训，虽然已有少量资料 and 文章介绍风电场电气系统的相关知识，但仍缺少完整、系统的风电场电气方面的专业书籍，特别是风电场集电系统、海上风电、风电线路施工等方面的教学用书。本书在风电场电气系统理论分析的基础上，结合我国多个风电场电气系统设计、安装和运行维护方面的经验，翔实地讲述风电场电气系统的相关知识，供从事风电场电气系统的技术人员学习。本书既可作为从事风力发电工作的各类技术人员学习、培训教材，也可作为高等院校有关专业的教学参考用书。

全书共分11章。第1章介绍风电场电气系统的基本概念；第2章分析风电场电气主接线，主要介绍风电场电气主接线基本形式、风电场升压变电站电气主接线以及典型的风电场电气主接线实例；第3章进行风电场短路电流计算分析；第4章分析导体的发热与选择方法；第5章详细介绍风电场主要电气

设备及其选择,包括风力发电机、变压器、高压开关设备、电抗器和电容器、互感器、支柱绝缘子和穿墙套管、低压电气设备等;第6章讲述风电场集电线路设计,包括场内架空集电线路、场内电缆集电线路等,并进行集电线路经济成本与可靠性评估;第7章介绍风电场防雷与接地系统,包括风电机组、风电场升压站和风电场集电线路的防雷与接地等;第8章讲述风电场的控制与安全保护系统,包括风电场接入系统技术要求、风力发电的电气控制系统、风电场有功功率控制、风电场系统安全、风电机组的运行维护技术和操作电源与中央信号系统等;第9章对海上风电场电气系统进行详细分析;第10章介绍风电场内集电线路及光缆线路施工技术;第11章介绍风电场无功补偿技术。

本书第6章、第7章和第10章由中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司杨文斌编写,第11章由中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司刘峰编写,其余各章由河海大学马宏忠以及江苏省电力检修公司陈涛涛编写。全书由河海大学马宏忠负责统稿。参加本书编写工作的还有河海大学的黄春梅、张琳、崔杨柳、吴秋池,中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司的杨林刚、傅春翔、孙长江、施朝晖,中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司的田新、徐珊珊等。

感谢中国水利水电出版社李莉、汤何美子的大力支持,感谢河海大学鞠平、陈星莺和郑源等教授及河海大学能源与电气学院相关老师的大力支持。

本书的研究工作得到国家自然科学基金51177039、51577050的资助,特此感谢。

本书编写过程中参考了大量的文献资料,对所引用的资料已尽可能列在书后的参考文献中,但其中难免有所遗漏,特别是有些资料经反复引用,已很难查到原始出处,在此特向被遗漏参考文献的作者表示歉意,并向所有文献作者表示衷心的感谢。

由于能力与精力有限,书中内容仍有局限与欠缺之处,有待不断充实与更新,衷心希望读者不吝赐教。

编者

2017年1月



目 录

前言	
第 1 章 风电场电气系统概述	1
1.1 风力发电概述	1
1.2 电气系统和电力系统	3
1.3 风电场电气系统	6
1.4 风电场电压与频率	11
第 2 章 风电场电气主接线	12
2.1 电气主接线概述	12
2.2 电气主接线的基本形式	13
2.3 风电场升压变电站电气主接线	17
2.4 风电场电气主接线典型方案	19
第 3 章 风电场短路电流计算	31
3.1 短路的一般概念	31
3.2 短路计算的目的是和方法	32
3.3 风电场短路电流计算	34
第 4 章 风电场的导体	43
4.1 风电场载流导体	43
4.2 载流导体的发热与电动力	60
4.3 载流导体的选择	64
第 5 章 风电场主要电气设备与选择	70
5.1 风力发电机	70
5.2 变压器	83
5.3 高压开关类设备	102
5.4 电抗器和电容器	119
5.5 互感器	124

5.6	支柱绝缘子和穿墙套管	132
5.7	低压电气设备	133
5.8	电气设备选择的条件与依据	141
5.9	风电场电气设备的选择	146
第6章	风电场集电线路设计	160
6.1	集电系统概述	160
6.2	场内集电线路接线方式	160
6.3	场内架空集电线路设计	164
6.4	场内电缆集电线路设计	179
6.5	集电线路经济成本与可靠性评估	182
第7章	风电场防雷与接地系统	189
7.1	防雷与接地概述	189
7.2	风电机组的防雷与接地	198
7.3	风电场升压站的防雷与接地	213
7.4	风电场集电线路的防雷与接地	219
第8章	风电场的控制与安全保护系统	223
8.1	风电场接入电力系统基本技术要求	223
8.2	风力发电的基本运行电气控制系统	230
8.3	风电场有功功率控制	234
8.4	风电场系统安全	242
8.5	风电场电气系统的运行与维护	246
8.6	操作电源与中央信号系统	261
第9章	海上风电场电气系统	266
9.1	概述	266
9.2	海上风电传输形式	268
9.3	集电系统	275
9.4	电气系统主要电气设备	281
9.5	电力传输与海底光电复合缆的选择	284
9.6	升压变电站电气布置	289
第10章	风电场内集电线路及光缆线路施工技术	296
10.1	概述	296
10.2	线路施工特点及工艺流程	297
10.3	架空线路的施工	299
10.4	地埋电缆及光缆的施工	316
第11章	风电场无功补偿	325
11.1	现状及电网要求	325

11.2 风电场无功补偿装置及补偿方式·····	326
11.3 静止式无功发生器·····	331
11.4 无功补偿装置的控制与保护·····	337
附录·····	345
参考文献·····	352

第 1 章 风电场电气系统概述

1.1 风力发电概述

1. 风力发电的发展

风能作为一种蕴藏量巨大的可再生清洁能源，越来越受到世界各国的重视，全球的风能约为 2.74×10^9 MW，其中可利用的风能为 2×10^7 MW，比地球上可开发利用的水能总量还要多 10 倍。目前全世界每年燃烧煤所获得的能量只有风力在一年内所能提供能量的 1/3。因此，国内外都很重视利用风力来发电，开发风能。

利用风能进行发电，早在 20 世纪初就已经开始了。20 世纪 30 年代，丹麦、瑞典、苏联和美国应用航空工业的旋翼技术，成功地研制了一些小型风力发电装置。这种小型风力发电机广泛在多风的海岛和偏僻的乡村使用，其发电成本比小型内燃机的发电成本低得多。不过，当时的发电量较低，大多在 5kW 以下。

随着全球经济的发展，风能市场也迅速发展起来。自 2004 年以来，全球风力发电发展迅猛，图 1-1 所示为 2004—2014 年全球风电总装机容量情况，到 2015 年年底，全球总装机容量达 432GW，仅 2015 年比 2014 年就增加了 63.013GW。预计未来 20~25 年内，世界风能市场每年将递增 25%。随着技术进步和环保事业的发展，风能发电在商业上将完全可以与燃煤发电竞争。

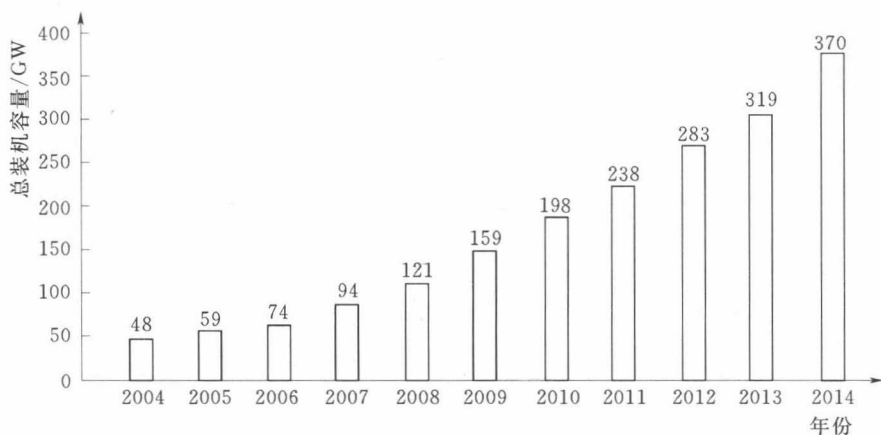


图 1-1 2004—2014 年风电总装机容量情况

中国风能协会 2010—2015 年中国风电装机情况分析见表 1-1。2015 年中国风电新增装机容量 30.5GW，同比增长 30.6%，累计装机容量 145.1GW，同比新增 26%。



表 1-1 2010—2015 年中国风电装机情况

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015
新增装机容量/GW	13	20	12.96	16.09	23.35	30.5
增速/%	43.2	53.8	-35.2	24.2	45.1	30.6

2. 风力发电与风电场

把风的动能转化成机械能，再把机械能转化为电能，这就是风力发电。风力发电的原理，是利用风力带动风车叶片旋转，再通过增速机将旋转的速度提升，驱动发电机发电。风力发电的能量转换过程如图 1-2 所示。依据目前的风电技术，大约 3m/s 的微风风速就可以开始发电。风力发电正在世界上形成一股热潮，因为其不需要使用燃料，也不会产生辐射或空气污染。



图 1-2 风力发电的能量转换过程

单台风电机组的发电能力有限，其单机容量与常规火电厂或水电站的百兆瓦级发电机相比小得多，大规模风力发电都是在风电场中实现的。

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。风电场是大规模利用风能的有效方式，目前，风电场的分布几乎遍布全球，风电场数目已成千上万，最大规模的风电场可达上百万千瓦级。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。图 1-3 所示为典型的风电场实景图。



图 1-3 某海上风电场

3. 风力发电的特点

风电场运行与常规能源发电厂在很多方面具有共性，需要解决的主要是风力发电产生的特殊问题。风力发电与常规能源发电（例如火电、水电和核电）相比，基本区别有以下 4 点：



(1) 由于风能的随机性和间歇性,风电场的有功输出也具有随机性,大小取决于风速的变化,而常规能源的有功输出和无功输出都可以准确地预测。

(2) 风力发电有很强的地域性。不是任何地方都可以建风电场,而是必须建在风力资源丰富的地方,即风速大、持续时间长的地方。风力资源大小与地势、地貌有关,山口、海岛常是优选地址。如新疆达坂城年平均风速为 6.2m/s ;内蒙古辉腾锡勒年平均风速为 7.2m/s ;河北张北年平均风速为 6.8m/s ;广东南澳年平均风速为 8.5m/s ;福建平潭年平均风速为 8.4m/s 。其中,福建平潭县海坛岛年平均风速为 8.5m/s ,年可发电风时数为 3343h ,为目前中国之最。

(3) 相对于常规能源的发电机组,风电机组的单机容量较小,大量风电机组并列运行是风电场的重要特点。

(4) 常规能源发电机组对电网调频和调压有着重要的作用,往往需要运行人员值守;目前,风电机组一般不参与系统调整,可以做到无人值守,系统运行参数超过一定范围时,风电机组自动停机。

风能的随机性和间歇性决定了风力发电机的输出特性也是波动和间歇的。当风电场的容量较小时,这些特性对电力系统的影响并不显著,但随着风电场容量在系统中所占比例的增加,风电场对系统的影响就会越来越显著。

1.2 电气系统和电力系统

1.2.1 电气系统

从学科角度来说,电气学科是以电能、电气设备和电气技术为手段来创造、维持与改善限定空间和环境的一门科学,涵盖电能的转换、利用和研究 3 个方面,包括基础理论、应用技术、设施设备等;从使用的角度来说,它是人们高度依赖的能量供给物,电气存在于人们日常生活的各个方面,用电也成了一种生活习惯。

电气系统在范围上有广义和狭义之分,广义的电气系统与传统意义上的电力系统相同,是由发电厂、变电站、输电线路、配电线路、电力用户等连成一体的系统,从功能上通常分为发电、输配电、用电三部分;狭义的电气系统可理解为电能并网之前的系统,不包含并网后的输电、用电等环节,重点在于场内发电、配电、并网等环节。由于本书针对的是风电场电气系统,所以重点讨论狭义上的电气系统。

1.2.2 电力系统

传统电力系统即广义的电气系统,如图 1-4 所示。

在电力系统中,通常将输送、交换和分配电能的设备称为电力网,它由变电站和各种不同电压等级的输电线路组成。电力网按电压等级的高低和其供电范围的大小可分为地方电力网、区域电力网及超高压远距离输电网 3 种类型。变电站是联系发电厂和用户的中间环节,由电力变压器和配电装置组成,起变压、交换和分配电能的作用。根据变电站在电力系统中地位不同,可分为枢纽变电所、中间变电所和终端变电所等。而配电站只用来接

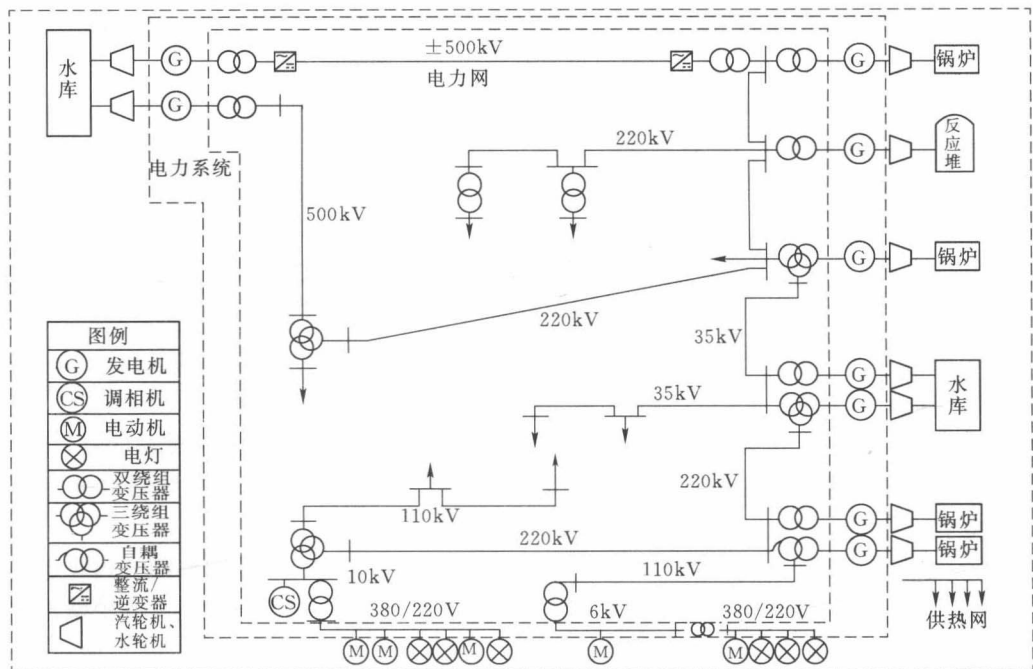


图 1-4 电力系统示意图

收和分配电能而不承担电压变化的任务，多建于工业企业内部。

1. 运行特点

与其他工业产品相比，电能的生产、输送、分配和消费有着极其明显的特殊性，主要有以下几个特点：

(1) 电能与国民经济各个部门的关系密切。由于电能与其他能量之间的转换十分方便，而且容易进行大量生产、远距离输送和控制，因此电能使用非常广泛，电能在国民经济和日常生活中起着极其重要的作用，其供应的中断或不足将影响国民经济的各个部门。

(2) 电能不能大量储存。由于电能不能大量储存，电能的生产、输送、分配和使用实际上是在同一时刻进行的。这就是说，发电设备在任何时刻生产的电能必须与该时刻用电设备所需的电能和输电过程中电能损耗的总和相平衡。

(3) 快速性。由于电能的传播速度接近光速，所以它从一处传至另一处所需的时间极短；电力系统从一种运行方式转变到另一种运行方式的过渡过程非常快；电力系统中的事故从发生到引起严重后果所经历的时间常以秒甚至毫秒计；从发生故障到系统失去稳定性通常也只有几秒的时间；因事故而使系统全面瓦解的过程一般也只以分钟计。所以，为了使设备不致因暂态过程的发生而导致损坏，特别是为了防止电力系统失去稳定或发生崩溃，必须在系统中采用相应的快速保护装置和各种自动控制装置。

2. 基本要求

根据以上特点，对电力系统的运行有 5 点基本要求。

(1) 保证供电的安全性。保证供电的安全性是对电力系统运行的基本要求。为此，电力系统的各个部门应加强现代化管理，提高设备的运行和维护质量。应当指出，



目前要绝对防止事故的发生是不可能的，而各种用户对供电可靠性的要求也不一样。因此，应根据电力用户的重要性不同区别对待，以便在事故情况下把给国民经济造成的损失限制到最小。通常可将电力用户分为以下类型：

1) 一类用户。指由于中断供电会造成人身伤亡或在政治、经济上给国家造成重大损失的用户。一类用户要求有很高的供电可靠性。对一类用户通常应设置两路以上相互独立的电源供电，其中每一路电源的容量均应保证在此电源单独供电的情况下就能满足用户的用电要求，确保当任一路电源发生故障或检修时，都不会中断对用户的供电。

2) 二类用户。指由于中断供电会在政治、经济上造成较大损失的用户。对二类用户应设专用供电线路，条件许可时也可采用双回路供电，并在电力供应出现不足时优先保证其电力供应。

3) 三类用户。一般指短时停电不会造成严重后果的用户，如小城镇、小加工厂及农村用电等。当系统发生事故，出现供电不足的情况时，应当首先切除三类用户的用电负荷，以保证一类用户和二类用户的用电。

(2) 保证电能的良好质量。频率、电压和波形是电能质量的 3 个基本指标。当系统的频率、电压和波形不符合电气设备的额定值要求时，往往会影响设备的正常工作，危及设备和人身安全，影响用户的产品质量等。因此，要求系统所提供电能的频率、电压及波形必须符合其额定值的规定。其中，波形质量用波形总畸变率来表示，正弦波的畸变率是指各次谐波有效值平方和的方根值占基波有效值的百分比。

我国规定电力系统的额定频率为 50Hz，大容量系统允许频率偏差为 $\pm 0.2\text{Hz}$ ，中小容量系统允许频率偏差为 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。35kV 及以上的线路额定电压允许偏差为 $\pm 5\%$ ；10kV 线路额定电压允许偏差为 $\pm 7\%$ ，电压波形总畸变率不大于 4%；380V/220V 线路额定电压允许偏差为 $\pm 7\%$ ，电压波形总畸变率不大于 5%。

电力系统频率允许偏差和用户供电电压及波形畸变率允许变动范围见表 1-2 和表 1-3。

表 1-2 电力系统频率允许偏差

运行情况		允许频率偏差/Hz
正常	大容量系统	± 0.2
	中小容量系统	± 0.5
事故	300min 以内	± 1
	15min 以内	± 1.5
	不允许	-4

表 1-3 用户供电电压及波形畸变率允许变动范围

线路额定电压或用户类别	电压允许变化范围/%	允许波形畸变率/%
110kV		2
35kV、66kV	± 5	3
10kV	± 7	4
380V/220V	± 7	5
低压照明	+5~-7	
农业用户	+5~-10	



(3) 保证电力系统运行的稳定性。当电力系统的稳定性较差, 或对事故处理不当时, 局部事故的干扰有可能导致整个系统的全面瓦解 (即大部分发电机和系统解列), 而且需要长时间才能恢复, 严重时会造成大面积、长时间停电。因此稳定问题是影响大型电力系统运行可靠性的一个重要因素。

(4) 保证运行人员和电气设备工作的安全。保证运行人员和电气设备工作的安全是电力系统运行的基本原则。这一方面要求在设计时合理选择设备, 使之在一定过电压和短路电流的作用下不致损坏; 另一方面还应按规程要求及时地安排对电气设备进行预防性试验, 及早发现隐患, 及时进行维修。在运行和操作中要严格遵守有关的规章制度。

(5) 保证电力系统运行的经济性。电能成本的降低不仅会使各用电部门的成本降低, 更重要的是节省了能量资源, 因此会带来巨大的经济效益和长远的社会效益。为了实现电力系统的经济运行, 除了进行合理的规划设计外, 还须对整个系统实施最佳经济调度, 实现火电厂、水电厂及核电厂等负荷的合理分配, 同时还要提高整个系统的管理技术水平。

1.3 风电场电气系统

风电场电气系统按其作用的不同可分为一次系统和二次系统。担负电能输送和分配任务的系统称为一次系统。一次系统中的所有电气设备称为一次设备。对一次系统进行监视、控制、测量和保护的系统称为二次系统。二次系统中的所有电气设备称为二次设备。

1.3.1 风电场一次系统

风电场电气一次系统的基本构成如图 1-5 所示。

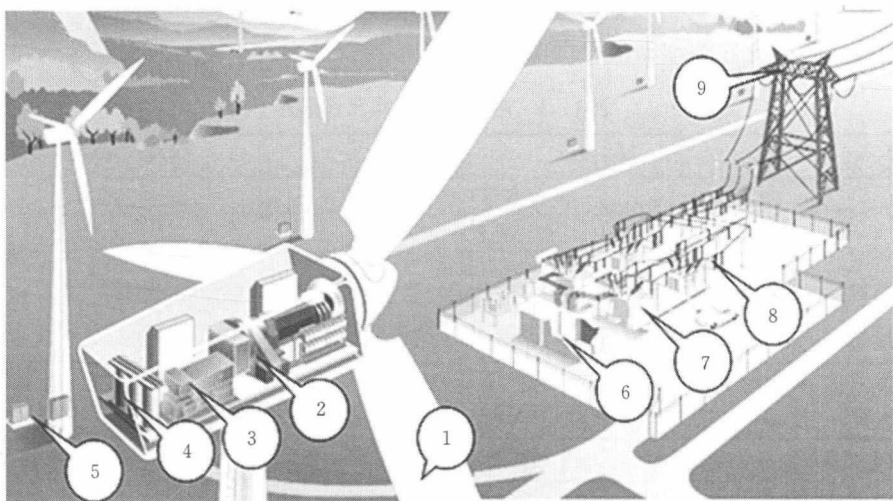


图 1-5 风电场电气一次系统的基本构成示意图

- 1—风机叶轮; 2—传动装置; 3—发电机; 4—变流器; 5—机组升压变压器; 6—升压站中的配电装置;
- 7—升压站中的升压变压器; 8—升压站中的高压配电装置; 9—架空线路