



“十三五”普通高等教育规划教材

Offshore Wind Turbine  
Commissioning and Maintenance

# 海上风力发电机组 调试与维护

金风科技海上风电技术研究院 组编  
于永纯 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材

Offshore Wind Turbine  
Commissioning and Maintenance

# 海上风力发电机组 调试与维护

金风科技海上风电技术研究院 组编

主 编 于永纯

副主编 刘 玮

编 写 冯延晖 郭艺倩 赵海亮

常州大学图书馆藏  
冯泽方 蔡海锋  
王涛章 王永刚 朱 敏



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书系统介绍了我国海上风力发电机组的调试管理,包括人员管理、安全管理、质量管理、进度管理、调试工具及设备备件管理、风险管理等,以海上直驱永磁风力发电机组为例,详细介绍了海上风力发电机组各系统的调试与维护技术;对目前我国已经运行的海上风电场进行了可靠性分析及维护策略介绍。

本书可作为我国海上风力发电从业人员培训和学习的专用教材,也可作为我国海上风电研发人员和技术人员了解海上风力发电机组相关信息的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

海上风力发电机组调试与维护/于永纯主编;金风科技海上风电技术研究院组编.  
—北京:中国电力出版社,2017.8  
“十三五”普通高等教育规划教材  
ISBN 978-7-5198-1048-1

I. ①海… II. ①于…②金… III. ①海上—风力发电机—发电机组—调试方法—高等学校—教材②海上—风力发电机—发电机组—维修—高等学校—教材  
IV. ①TM315.07

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第190509号

---

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:王 娟(010-63412522)

责任校对:太兴华

装帧设计:赵姗姗

责任印制:吴 迪

---

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次:2017年8月第一版

印 次:2017年8月北京第一次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:8.25

字 数:195千字

定 价:32.00元

---

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换


海上风电是我国清洁能源发展主要战略方向之一，在中国海域建设海上风电场，能有效解决我国风资源集中地与沿海高耗能地区距离远，电能长途传输所带来的技术问题。国家能源局出台多个政策支持海上风电场建设，江苏沿海是国内规划的第一个海上风电千万千瓦示范基地，第一批海上风电特许权项目全部位于江苏中部沿海区域。

随着海上风电的迅猛发展，培养海上风电的人才成为当前及未来较长一段时间的迫切需要。然而国内对海上风电风险及价值规律的认识、人才培养及教材配套方面几乎为空白。

《海上风电从业人员系列教材》的出版非常及时，该套教材较为全面地介绍了适合于我国国情的海上风电项目开发、施工、调试、维护、评估技术及管理方法。该套丛书以海上风电项目开展的关键工程技术和项目管理为主要线索，在消化欧洲较为成熟的海上风电项目经验同时，融入我国早期在上海、江苏等地探索实施示范性海上风电项目宝贵实践经验，实用性较强。

该丛书由六本书组成，分别介绍了海上风电项目的不同方面，将基础概念、工程技术和项目管理有机地结合在一起。这套教材推荐给我国海上风电产业相关的每一位工程师、研究人员、管理人员、政府决策者仔细阅读和用于指导实践。

规划出版的《海上风电从业人员系列教材》系列丛书是目前国内第一套针对海上风电场开发的教材，以理论与实际相结合的方式对海上风电场开发进行介绍和论述。该丛书由国内领先的风电整体解决方案供应商金风科技策划和主



编，南京理工大学从事风电研究的教授主要参与并编写部分教材，由中国电力出版社出版。

该丛书编写队伍由具有海上风电机组设计经验的工程师、海上风电场开发业主、海上风电项目投资顾问以及在风能领域有多年科研和教学经验的高校教师组成。这套丛书已被金风科技金风大学列入海上风电培训课程的指定教材。该丛书将成为海上风电教育的第一套具有代表性的教材。

中国可再生能源学会风能专业委员会名誉主任

贺德馨

新疆金风科技股份有限公司 董事长

武翔

新疆金风科技股份有限公司 执行副总裁

吴凯







作为与金风科技有限公司在“风电机组可靠性分析与运维策略优化”项目开展合作研究多年的一名科技工作者，应作者之邀来写这个序言，深感荣幸。

可再生能源的开发利用关系到社会的可持续发展，近年来在我国已形成了一个巨大的产业。其中风力发电占据了该产业的半壁江山。除了需要对风电机组的核心技术继续开展广泛而深入的研发外，风电机组的调试与维护也是值得高度关注的领域。通过科学管理，合理使用，周期检修与维护，确保风电机组处于良好的技术状况，实现机组的高效、可靠、安全运行。为达此目的，制造商和运营商需要应对大量的挑战，包括安装、调试和维修过程的质量保证；维修工艺、修程修制的开发；机组状态监测、故障诊断和失效预测技术的运用；后勤保障以及各种信息技术和工具的集成和运用。

金风科技有限公司作为我国风力发电的龙头企业，秉持“为人类奉献白云蓝天，给未来创造更多资源”的理念，在风电机组的运维技术领域积累了丰富的现场经验，并进行了大量的探索性研究。研究包括基于现场数据的关键零部件可靠性建模与分析，环境因素对机组可靠性的影响，从数据采集与监控系统（SCADA）提取风电机组健康状态有关的信息，构建和优化预防维修制度，探索成组维修、机会维修和状态维修政策的联合运用，以及配件分类、需求预测与控制策略研究。呈现在读者面前的这本《海上风力发电机组调试与维护》教材，只是他们这类努力所产生的成果中的一个代表。

该书由工作在风电机组研发与运维一线的技术与管理人员合作编写，其实用性自不待言，其工匠精神令人钦佩。一本好书提供给读者以相对系统的领域



知识，并以此为起点引领读者向着更远、更深处独立前行。我预祝本书能成功地扮演好这一角色。风电技术领域仍然存在诸多的挑战，需要一代又一代的风电工作者持续地做出不懈的努力。我相信本书作者也会以它为起点，不断地获得新的发现，累积新的知识，取得更大成就。


长沙理工大学汽车与机械工程学院教授、博士生导师 蒋仁言



海上风力发电由于具有资源丰富、风速稳定、不与其他发展项目争地、可大规模开发等优势,在国内外一直受到关注和重视。研究数据表明,海上的平均风速比陆地上的平均风速高出 20%,海上风电场可在水深 50m 以内、距海岸线 50km 以内的近海大陆架区域建设。与陆上风电场相比,海上风电场不占用宝贵的土地资源,基本不受地形和地貌的影响,风速更高,风能资源更为丰富,而且运输条件和吊装条件优越,风力发电机组单机容量更大,年利用小时数更高。目前,海上风力发电机组的单机容量多在 3~5MW,年利用小时数一般在 3000h 以上,有的高达 4000h。

1991 年,丹麦建成了第一个海上风电场以来,海上风力发电技术进入缓慢发展阶段。2000 年,在哥本哈根湾建设了世界上第一个具有商业化意义的海上风力发电场,安装了 20 台 2MW 的海上风力发电机组并运行至今,可利用率高达 98% 以上,为海上风力资源的开发积累了经验。从此,世界各国开始考虑海上风力发电的商业化发展。目前,世界上最大功率的 Vestas 8MW 海上风力发电机组已经上线并开始进行测试。世界上主要的风力发电机组供应商都通过不断提升产品的技术含量、不断研发新产品,来获取更多的市场份额。

我国第一个海上风力发电项目是上海东海大桥海上风力发电场,位于东海大桥旁,安装了 34 台 3MW 海上风力发电机组,总装机容量为 102MW,距离海岸线 8~13km。目前,我国多个沿海城市正在着手编制海上风力发电发展规划,其中规模最大的是江苏省近海千万千瓦的海上风力发电基地。江苏省海上风力发电可开发容量约为 18GW,其中潮间带可开发容量为 2.5GW,近海可





开发容量为 15.85GW。浙江省也确定了 14.9GW 装机容量的海上风力发电发展规划，其中潮间带 500MW，近海 7.35GW，中深海域 7.05GW。

相比陆上机组，海上风力发电机组主要考虑的是出海交通工具、机组基础设计、防腐设计、可靠性设计、维护策略等，由于机组运行在复杂的海洋环境之中，海上风力发电机组拥有更多的设计约束条件并且维护困难，因此，技术人员不仅要具备机组调试维护、排除故障等技术性知识，还要具备水文、地质方面的知识。

本公司编写此书，旨在为我国海上机组从业人员提供海上机组调试与维护指导，同时给海上风电研发人员与技术人员提供一定的帮助。本书共 8 章，系统介绍了海上风力发电机组的调试、维护技术与相关要求。

第 1 章主要介绍了海上风力发电机组的调试管理相关内容，从人员管理、安全管理、质量管理、进度管理、工具及备品备件管理、风险管理六个方面系统说明海上风力发电机组调试过程中各方面的管理活动。对海上机组调试管理，可避免机组运行的风险、提升机组发电量和风电场的经济效益。

第 2 章详细介绍了海上直驱风力发电机组各系统的调试技术，对直驱机组调试的系统进行了较为详细的介绍，并对各系统具体调试步骤进行了较为详尽的操作描述，规范直驱机组的调试操作活动，避免调试过程出现故障。

第 3 章介绍了海上风力发电机组的可靠性分析及设计，对国内已建成的海上机组常见故障和高频次故障进行原因分析。

第 4 章详细介绍了海上风力发电机组的维护工器具、海上风电场的运维交通工具及维护策略，为我国海上风电场提供宝贵的运维经验。

第 5 章对海上风力发电机组机械部分的维护进行详细描述。

第 6 章对海上风力发电机组电控系统的维护进行详细描述。

本书的编写参阅了与海上风电机组相关的书籍及大量文献，同时本公司多个部门的技术人员、研发人员积极参与其中，为本书的编写提供了丰富的理论资料、分享了宝贵的实践经验，在此对他们表示感谢！





序一  
序二  
前言

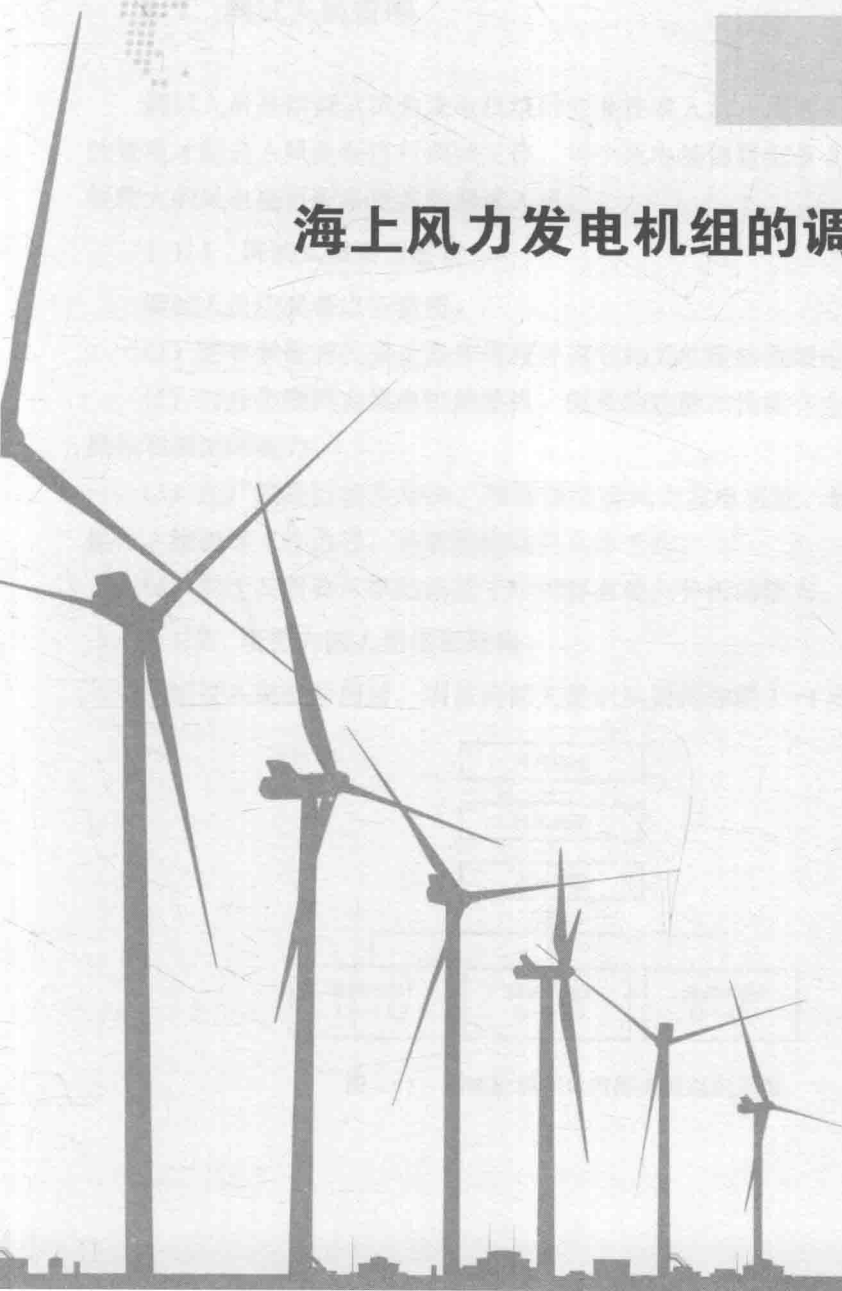
<b>1</b>	<b>海上风力发电机组的调试管理</b> .....	1
<b>1.1</b>	<b>调试人员管理</b> .....	3
1.1.1	调试人员资质要求 .....	3
1.1.2	项目内部人员组织架构 .....	3
1.1.3	项目内部人员岗位职责 .....	4
<b>1.2</b>	<b>调试安全管理</b> .....	5
1.2.1	调试安全管理目标 .....	5
1.2.2	调试安全规范 .....	5
<b>1.3</b>	<b>调试质量管理</b> .....	7
1.3.1	调试质量目标 .....	7
1.3.2	调试质量把控 .....	7
<b>1.4</b>	<b>调试进度管理</b> .....	7
1.4.1	调试进度计划 .....	8
1.4.2	调试步骤管理 .....	8
<b>1.5</b>	<b>调试工具及备品备件管理</b> .....	9
1.5.1	调试工器具配备 .....	9
1.5.2	调试备件管理 .....	11

1.6	调试风险管理	12
1.6.1	调试操作风险分析表	12
1.6.2	调试风险管理	14
<b>2</b>	<b>海上直驱风力发电机组调试技术</b>	<b>17</b>
2.1	调试前的注意事项	19
2.1.1	安装条件	19
2.1.2	调试前的安全注意事项	19
2.1.3	调试前的操作注意事项	20
2.2	海上风力发电机组各系统调试	20
2.2.1	主控系统的调试	20
2.2.2	水冷系统的调试	23
2.2.3	变流系统的调试	25
2.2.4	机舱部分的调试	27
2.2.5	变桨系统的调试	29
2.2.6	环控系统的调试	31
2.2.7	并网调试	37
<b>3</b>	<b>海上风力发电机组的可靠性分析及设计</b>	<b>39</b>
3.1	海上风力发电机组的可靠性分析	41
3.1.1	海上风力发电机组的可靠性基本原理	41
3.1.2	海上风力发电机组的可靠性设计	41
3.2	海上风力发电机组常见故障及分析	43
3.2.1	国内某海上风电场 TOP10 故障排名	43
3.2.2	国内某海上风电场的常见故障分析	44
<b>4</b>	<b>海上风力发电机组的维护策略</b>	<b>47</b>
4.1	海上风力发电机组的维护准备工作	49
4.1.1	维护工具	49
4.1.2	维护工作开始前的准备工作	49

4.1.3	维护完成后的检查工作 .....	50
<b>4.2</b>	<b>海上风力发电机组的运维交通工具 .....</b>	<b>50</b>
4.2.1	潮间带交通工具及注意事项 .....	51
4.2.2	非潮间带交通工具及注意事项 .....	55
<b>4.3</b>	<b>海上风力发电机组的维护策略 .....</b>	<b>60</b>
4.3.1	预防性维护策略 .....	60
4.3.2	事后维护策略 .....	62
4.3.3	机会维护策略 .....	62
4.3.4	影响海上风电场运维成本的因素 .....	62
<b>5</b>	<b>海上风力发电机组机械部分的维护 .....</b>	<b>65</b>
<b>5.1</b>	<b>叶轮的维护 .....</b>	<b>67</b>
5.1.1	叶片介绍 .....	67
5.1.2	叶片的维护检查 .....	68
5.1.3	轮毂介绍 .....	69
5.1.4	轮毂的维护检查 .....	70
<b>5.2</b>	<b>发电机的维护 .....</b>	<b>71</b>
5.2.1	发电机介绍 .....	71
5.2.2	发电机的维护检查 .....	73
5.2.3	发电机散热系统介绍 .....	75
5.2.4	发电机散热系统的维护检查 .....	75
<b>5.3</b>	<b>偏航系统的维护 .....</b>	<b>76</b>
5.3.1	偏航系统介绍 .....	76
5.3.2	偏航系统的维护检查 .....	78
<b>5.4</b>	<b>液压系统的维护 .....</b>	<b>79</b>
5.4.1	液压系统介绍 .....	79
5.4.2	液压系统的维护检查 .....	81
<b>5.5</b>	<b>润滑系统的维护 .....</b>	<b>82</b>
5.5.1	润滑系统介绍 .....	82
5.5.2	润滑系统的维护检查 .....	82

5.6	机舱控制和测量系统的维护	83
5.6.1	机舱控制和测量系统介绍	83
5.6.2	机舱控制和测量系统的维护检查	84
5.7	塔筒的维护	85
5.7.1	塔筒介绍	85
5.7.2	塔架及基础的维护检查	87
<b>6</b>	<b>海上风力发电机组电控系统维护</b>	<b>91</b>
6.1	主控系统的维护	93
6.1.1	主控系统介绍	93
6.1.2	主控系统的维护检查	96
6.2	水冷系统的维护	97
6.2.1	水冷系统介绍	97
6.2.2	水冷系统的维护检查	101
6.3	变流系统的维护	102
6.3.1	变流系统介绍	102
6.3.2	变流系统的维护检查	104
6.4	变桨系统的维护	105
6.4.1	变桨系统介绍	105
6.4.2	变桨系统的维护检查	106
6.5	环境控制系统的维护	114
6.5.1	环境控制系统介绍	114
6.5.2	环境控制系统的维护检查	118
	参考文献	119

# 海上风力发电机组的调试管理







海上风力发电机组安装完毕后，必须进行系统性能的检测，并按照调试工艺规定对各个系统及零部件进行调整与测试，使风力发电机达到技术文件所规定的性能指标，确保风力发电机正常稳定运行。机组调试过程中涉及人员管理、安全管理、质量管理、进度管理、风险管理等多个方面。

## 1.1 调试人员管理

调试人员是指调试风力发电机组的专业技术人员，调试人员必须具备相应的资质才能进入风电场进行调试工作。每个风电场通常配备3组调试人员，规模较大的风电场可配备更多的调试人员。

### 1.1.1 调试人员资质要求

调试人员应具备以下资质：

- (1) 需要掌握相关安全操作规程并遵守相关危险防范规定。
- (2) 对此类型风力发电机的整机、组件的功能和性能有全面的理解，具备操作和调试的能力。
- (3) 经厂家进行相关培训，理解该类型风力发电机软、硬件系统的安装、操作、维护等工作内容，且能胜任此类具体工作。
- (4) 对于其所要从事的调试工作内容有预判分析的能力。

### 1.1.2 项目内部人员组织架构

机组进入调试阶段后，项目内部人员组织架构如图1-1所示。

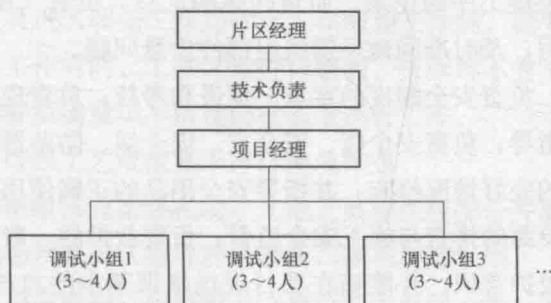


图 1-1 调试阶段项目内部人员组织架构



### 1.1.3 项目内部人员岗位职责

依据合同及风电场机组上电情况，为满足风电场调试进度需求，项目共配置调试小组若干。其中包括项目经理1名，单个调试小组包含负责人1名、调试人员3名，单个项目至少有质检员1名、安全员1名，并依据实际工程进度对人员进行增减。各岗位职责如下。

(1) 项目经理：全面负责项目的安全生产、行政管理与技术工作；合理调配人力、物力，做好保障风力发电机正常调试的协调工作；完成项目成果交付，赢得客户满意。

(2) 调试小组负责人：负责落实项目现场施工质量标准、及时反馈质量问题及质量信息；负责项目质保期间质量问题的质量事务系统登录、跟踪处理、完结《质量信息反馈单》及其他质量信息的填写，及时准确反馈机组部件质量问题；负责对产品技术文件提出更改建议、对工艺更改进行验证；负责培养、监督项目成员现场操作行为的规范化；负责按照项目和公司要求进行现场调试过程中的各项记录、汇总和反馈等工作；对调试过程中机组的质量问题及时进行反馈，协调解决。

(3) 调试人员：负责风力发电机组的调试工作，依据《风力发电机组现场调试手册》进行调试，对在调试过程中出现的问题进行记录、分析、处理，以保证调试的进度。

(4) 质检员：负责落实项目现场施工质量标准、及时反馈质量问题及质量信息；负责项目调试期间质量问题的服务请求登录、跟踪处理、完结；负责调试报告的编写、关键工序的记录、质量问题的汇总；负责《质量信息反馈单》及质量信息的填写，及时准确地反馈机组部件质量问题。

(5) 安全员：负责安全制度的宣贯、推进和考核；负责现场安全设备的配置、检查、使用指导；负责安全帽、安全衣、安全绳、防坠器的使用申请，以及负责安全设备的完好情况检查，并指导安全用品的正确使用方式；负责项目施工和生活区危险源的排查与施工安全监督；负责救护的一般常识的掌握与培训；掌握一般的救护常识，并能够在项目现场培训基本的自救和他救的方式、方法；负责监督、检查项目安全的执行情况，并提出整改措施和奖惩建议。