



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

海上风力发电： 控制、保护与并网

**Offshore Wind Energy Generation:
Control, Protection, and Integration to
Electrical Systems**

[英] 奥林波·安纳亚-劳拉 (Olimpo Anaya-Lara)

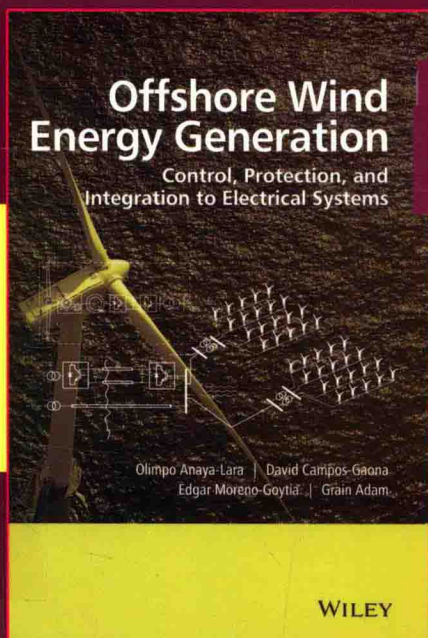
[墨] 大卫·坎波斯-高纳 (David Campos-Gaona)

[墨] 埃德加·莫雷诺-戈伊蒂亚 (Edgar Moreno-Goytia)

[英] 格兰·亚当 (Grain Adam)

著

高强 等译



- ◎ 作者都是在海上风电领域经验丰富的专家或研究人员
- ◎ 部分内容源自作者主持的多项欧洲海上风电项目所取得的研究成果
- ◎ 内容涵盖了海上风力发电所涉及的大部分关键技术，并提供易于学习的范例



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

海上风力发电：控制、 保护与并网

[英] 奥林波·安纳亚-劳拉 (Olimpo Anaya - Lara)

[墨] 大卫·坎波斯-高纳 (David Campos - Gaona)

[墨] 埃德加·莫雷诺-戈伊蒂亚 (Edgar Moreno - Goytia) 著

[英] 格兰·亚当 (Grain Adam)

高强 等译



机械工业出版社

Copyright © 2014 John Wiley & Sons, Ltd.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Offshore Wind Energy Generation; Control, Protection, and Integration to Electrical Systems, ISBN 978 - 1 - 118 - 53962 - 0, by Olimpo Anaya - Lara, David Campos - Gaona, Edgar Moreno - Goytia, Grain Adam, Published by John Wiley & Sons, Ltd. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01 - 2014 - 6196 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

海上风力发电: 控制、保护与并网/ (英) 奥林波·安纳亚-劳拉 (Olimpo Anaya - Lara) 等著; 高强等译. —北京: 机械工业出版社, 2017. 1

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Offshore Wind Energy Generation: Control, Protection, and Integration to Electrical Systems

ISBN 978-7-111-55506-3

I. ①海… II. ①奥…②高… III. ①海洋发电-风力发电
IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 287393 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: 刘星宁 责任编辑: 刘星宁

责任校对: 刘雅娜 封面设计: 马精明

责任印制: 李 洋

三河市国英印务有限公司印刷

2017 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 15.5 印张 · 362 千字

0 001 — 3 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 55506 - 3

定价: 99.00 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

服务咨询热线: 010 - 88361066

读者购书热线: 010 - 68326294

010 - 88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com



本书第1章介绍了风电机组的技术、海上输电网络、风力发电对电力系统运行的影响以及风电并网规范等基本知识。第2章从机组组成、数学建模及其控制策略、不同类型故障下的动态响应以及故障穿越策略等多方面详细地解释了双馈感应风力发电机。第3章侧重于全功率变流器风力发电机,对永磁同步型和笼型感应全功率风力发电机的控制、电力系统阻尼器等进行了分析,本章还详述了典型的电励磁同步发电机的建模和控制。第4章从海上风电场电气系统的组成、电力汇集器、海上输电系统、海上变电站、无功功率补偿装置和海底电缆等方面出发,对海上风电场电气系统的主要组件所涉及的关键技术和原理、运行和控制等进行了阐述。第5章通过丰富的范例展示了海上风电场的不同并网方式,并给出了各方式下的仿真运行结果。第6章涉及海上风电场中各个保护区的划分、交流输电线故障研究、以及通过直流并网的海上风电场的保护等内容。第7章介绍了在海上风电并网方面涌现的诸多新兴技术,如风力发电机载荷柔化技术、直流传输保护、储能技术、故障限流器、超导电缆等。附录A对运用于海上风力发电中的电压源换流器,如二电平换流器、三电平换流器、模块化多电平换流器等的拓扑和调制等进行了原理性介绍,便于读者理解前述章节的内容。附录B提供了不少算例,便于读者深入理解本书介绍的部分关键内容。

本书内容较全面地涵盖了海上风力发电所涉及的关键技术,对海上风电场以及输电系统等各组成部分从基本原理到控制和运行等方面都有较全面和由浅入深的描述,不仅适合高等院校电气工程方向高年级本科生和研究生学习,也适合从事风力发电、特别是从事海上风力发电的生产制造、运行与控制等领域的工程技术人员参考。

译者序

海上风电由于其可开发潜力巨大、不占用土地资源、通常距离负荷中心较近等优点而成为未来风力发电发展的重点方向之一。目前欧洲各国在海上风电的研究和建设方面处于世界领先地位，截至2015年年底，欧洲累计海上风电容量达到11GW，占全球海上风电装机的91%，每年可以发电40.6TWh。我国海上风电从2007年开始获得了稳步的发展，至2015年年底，累计装机容量已经达到约1014MW。尽管如此，相对于陆上风电，我国海上风电的发展步伐仍稍显滞后，从海上风电机组的研制、海上输电技术以及海上风电场的控制等关键技术方面还需进一步提高。

在此背景下本书的引入恰逢其时。本书作者都是在风电领域，特别是海上风电领域有多年积累的专家或研究人员，书中内容多来自他们所讲授的研究生课程讲义、近年来国际顶级期刊上发表的众多研究论文以及作者主持的多项欧洲海上风电项目的研究成果，既有一定的理论深度，又和实践紧密结合，具有比较高的参考价值，对我国海上风电的进一步发展具有很高的启示意义。总体而言，本书涵盖了海上风电中所涉及的大部分电气工程领域的内容。本书正文从典型的变速风电机组——双馈机组和全功率机组——的原理、建模与控制出发，再对海上风电场中电气系统的各个主要子系统，如电力集电器、海上输电系统、海上变电站等进行了较完整的原理性剖析和介绍，然后运用不同的案例来实际比较海上风电场运用不同的输电方案时的效果，再对海上风电场的保护，如保护区间划分、通过直流进行并网的海上风电场的保护等内容进行了较深入的探讨，最后还向读者展现了当前海上风电领域出现的众多新技术，如风力发电机的先进控制技术、储能、高温超导、状态检测、智能电网技术等。本书的附录不仅为有兴趣的读者提供了海上风电中出现的各种电压源换流器的常用拓扑及其典型的调制策略，还由浅入深地设计了不少例题，以加深读者对书中正文所述原理的理解。

本书不仅适合高等院校电气工程专业高年级本科生、研究生学习使用，也适合从事风力发电、特别是从事海上风力发电的生产制造、运行与控制等领域的工程技术人员参考。

本书的主要译者为上海交通大学电气工程系/风力发电研发中心的高强副教授，宣谢贤、李子义和马泽宇等同学也参加了部分内容的翻译。本书内容所覆盖的领域非常广泛，而囿于译者的学识水平，虽竭力确保原汁原味地还原原作的內容，但恐仍难免出现翻译不当甚至错误之处，还请广大读者谅解。最后希望通过本书的翻译，能为我国海上风电的发展贡献绵薄之力。

译者

原 书 前 言

撰写本书的目的，一方面是为了应对当前海上风力发电系统的飞速发展，另一方面，则是为了揭示海上风电发展对电力系统的运行、控制与保护所带来的启示。随着风力发电机技术和电力电子换流器技术的提高以及新颖控制策略的提出，海上风力发电系统的性能获得了提升。本书作者认为当下急需一部涵盖海上风电领域内从基础到各最新热点研究问题的书籍，应不仅适合初学者，也应对有较高理论水平读者有参考意义。有鉴于此，本书详述了当今海上风力发电系统的技术发展趋势，阐明了变速风力发电机的详细建模方法，并提供了易于使用的海上风电并网的范例。因此，本书对高年级本科生、研究生，以及工作于风能领域并对风力发电机及其并网有兴趣的工程师和研究人员有借鉴意义。

本书共分为7章和2个附录，第1章首先对风力发电机基础进行回顾，然后讨论海上风电场连接方式及并网规范等方面存在的挑战；第2章详细描述了双馈风力发电机在正常工况和异常工况下的运行；第3章着笔主要集中于全功率换流器技术；第4章涵盖了电力集电器和海上输电方案，包括多端直流输电；第5章则描述了海上风电场并网所面临的一系列技术挑战，并提供了不同的案例以供学习；第6章讨论了海上风力发电系统的保护问题；第7章归纳了海上风电并网领域涌现的新技术，包括储能和状态监测；附录A包含了电压源换流器（VSC）的拓扑、控制与运行；附录B提供了许多样例，很适合在读的大学生们学习使用。

本书的内容汇集了海上风电场电力系统的各方面资料，如有来自作者在英国大学多年研究生教学的课程，有来自大量发表于IEEE和IET的论文，以及来自一些与海上风力发电密切相关的研究项目，如英国工程和自然科学研究委员会（EPSRC）资助的SUPER-GEN Wind Technologies项目，亦如英国能源技术研究院（ETI）资助的Helmwind项目。作者就William Leithead教授在上述研究项目所给予的强有力和持续的指导与支持深表感谢。作者特别感谢John O. Tande先生和Kjetil Uhlen教授，感谢他们通过挪威海上风力发电技术研究中心（NOWITECH）提供的支持和协助。作者还要感谢Giddani O. A. Kalcon博士在第4章中在电压源换流器高压直流（VSC-HVDC）输电方面对本书的贡献，并要感谢Nolan Caliao博士很慷慨地允许将他博士论文的材料纳入第3章。作者还想借此机会致谢Gustavo Quinonez-Varela博士和Ryan Tumilty博士，以感谢他们在准备此书稿中参与的有益讨论，并就William Ross先生、Alexander Giles先生、Edward Corr先生和Philip Morris先生在文稿校对和Kamila Nieradzinska女士在制图等方面所做的工作表示感谢。

Olimpo Anaya-Lara, David Campos-Gaona, Edgar Moreno-Goytia, Grain Adam

作者简介

Olimpo Anaya - Lara 目前就职于英国斯特拉斯克莱德大学 (University of Strathclyde) 能源与环境学院, 任准教授 (reader)。在其职业生涯中, 他成功地在电力电子设备、控制系统设计以及具有高风电穿透率的电力系统控制方面进行了研究。作为欧洲能源研究联盟 (EERA) 联合风能项目 (JP Wind) 所属的风电并网子项目的一名主要参与者, Anaya - Lara 博士目前在领导英国斯特拉斯克莱德大学参与推进此子项目。受挪威船级社资助, 他曾于 2010—2011 年前往挪威科技大学, 任风电领域的访问教授之职。他曾是国际能源署附件二十一“电力系统用风电场动态模型”和附件二十三“海上风能技术开发”的成员。他是 IEEE 与 IET 会员, 已出版了 3 部专著, 并在国际期刊和会议上合计发表了超过 140 篇论文。

David Campos - Gaona 毕业于墨西哥莫雷利亚技术学院 (Instituto Tecnológico de Morelia), 获博士学位。他目前在该学院担任博士后研究员。他在有同行评议的期刊和会议上发表或合作发表有论文, 并担任 IEEE 和 Wiley 期刊论文的审稿人。他的研究兴趣为风电并网和高压直流输电中电力电子设备的控制。

Edgar Moreno - Goytia 现任墨西哥莫雷利亚技术学院电气工程研究生院教授。他目前的研究兴趣包括电力电子技术在电网中的应用 [高压直流输电、柔性交流输电系统 (FACTS) 和电子电力变压器]、直流电网开发、大型风电系统和其他新能源并网。他主持了许多相关的研究项目, 并已在国际期刊和会议上发表了 20 余篇论文。他是 IEEE 和 IET 会员。

Grain Adam 分别于 1998 年和 2002 年获得位于喀土穆的苏丹科技大学 (Sudan University of Science and Technology) 电机和电力系统优等一级本科学位和硕士学位, 并于 2007 年获得英国斯特拉斯克莱德大学电力电子专业博士学位。目前, 他就职于英国斯特拉斯克莱德大学电子与电气工程系, 其研究兴趣包括多电平换流器、电机、电力系统控制与稳定性。

缩略语与物理量符号

AC	Alternating Current	交流电
AFC	Active Flow Control	流场主动控制
AVR	Automatic Voltage Regulator	自动电压调节器
CB	Circuit Breaker	断路器
CC	Current Control	电流控制
CCC	Capacitor - Commutated Converter	电容换相换流器
CIA	Constant - Ignition Angle	恒定导通角
CM	Condition Monitoring	状态监测
CSC	Current Source Converter	电流源换流器
DC	Direct Current	直流电
DFIG	Doubly - Fed Induction Generator	双馈感应发电机
DG	Distributed Generation	分布式发电
EMF	ElectroMotive Force	电动势
ESCR	Effective Short - Circuit Ratio	有效短路比
ESR	Equivalent Series Resistance	等效串联电阻
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System	柔性交流输电系统
FC	Flying Capacitor	飞跨电容
FCL	Fault - Current Limiter	故障电流限制器
FRC	Fully - Rated Converter	全功率换流器
FRT	Fault Ride - Through	故障穿越
FSIG	Fixed - Speed Induction Generator	定速感应发电机
GIL	Gas - Insulated Line	空气绝缘导线
GIT	Gas - Insulated Transformer	空气绝缘变压器
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
GSC	Grid - Side Converter	网侧换流器
GTO	Gate Turn - Off thyristor	门极关断晶闸管
GW	Giga - Watt	十亿瓦
hp	horse power	英马力
HTS	High - Temperature Superconducting	高温超导
HTSC	High - Temperature Superconducting Cable	高温超导导线
HV	High Voltage	高压
HVAC	High - Voltage Alternating Current	高压交流
HVDC	High - Voltage Direct Current	高压直流
IG	Induction Generator	感应发电机

IGBT	Insulated - Gate Bipolar Transistor	绝缘栅双极型晶体管
IMC	Internal Model Control	内模控制
IPC	Individual Pitch Control	独立变桨控制
LCC	Line - Commutated Converter	电网换相换流器
LVRT	Low - Voltage Ride - Through	低电压故障穿越
MIMO	Multiple - Input Multiple - Output	多输入多输出
MTDC	Multi - Terminal DC	多端直流
MVA	Mega Volt - Ampere	兆伏安
MW	Mega Watt	兆瓦
NIST	National Institute of Standards and Technology	美国标准与技术研究院
NSC	Network - Side Converter	网侧换流器
ODE	Ordinary Differential Equation	常微分方程
O&M	Operation & Maintenance	运行与维护
PCC	Point - of Common Coupling	公共连接点
PD	Phase Disposition	相移
PDC	Power system oscillations Damping Controller	电力系统振荡阻尼控制器
POD	Phase Opposition Disposition	反相
PI	Proportional Integral	比例积分
PLL	Phase Lock Loop	锁相环
PM	Permanent Magnet	永磁
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator	永磁同步发电机
PMU	Phasor Measurement Unit	相角测量仪
PWM	Pulse Width Modulation	脉宽调制
PSS	Power System Stabiliser	电力系统稳定器
pu	per unit	标么值
RF	Radio Frequency	射频
RMS	Root - Mean Square	有效值
rpm	revolutions per minute	转/分钟
RSC	Rotor - Side Converter	转子侧换流器
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition	监控与数据采集
SCIG	Squirrel - Cage Induction Generator	笼型感应发电机
SCR	Silicon - Controlled - Rectifier	晶闸管
SISO	Single Input Single Output	单输入单输出
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage	超导磁能储能
STATCOM	Static Synchronous Compensator	静止同步补偿器
SVC	Static Var Compensator	静止无功补偿器
TCR	Thyristor - Controlled Reactor	晶闸管控制电抗器
TSC	Thyristor - Switched Capacitor	晶闸管控制电容器
TSO	Transmission System Operator	输电系统运营商

UHF	Ultra High Frequency	超高频
var	volt - ampere reactive	伏 - 安无功
VCO	Voltage - Controlled Oscillator	压控振荡器
VDCOL	Voltage - Dependent Current - Order Limit	低压限流单元
VPP	Virtual Power Plant	虚拟电站
VSC	Voltage - Source Converter	电压源换流器
WAMS	Wide - Area Measurement System	广域测量系统
WT	Wind Turbine	风电机组
WTG	Wind Turbine Generator	风力发电机
XLPE	Cross - Linked PolyEthylene	交联聚乙烯

第 1 章中使用的符号

P_{air}	气流功率
ρ	空气密度
A	转子的扫略面积 (m^2)
v	上风处自由风速 (m/s)
C_p	功率系数
$P_{\text{wind turbine}}$	风轮转子捕获的功率
λ	叶尖速比
ω	转子角速度
R	转子叶尖半径
V_m	年平均风速
V_{dc}	直流电压

第 2 章中使用的符号

$v_{\text{as}}, v_{\text{bs}}, v_{\text{cs}}$	定子 abc 相电压
$r_{\text{as}}, r_{\text{bs}}, r_{\text{cs}}$	定子 abc 相电阻
$i_{\text{as}}, i_{\text{bs}}, i_{\text{cs}}$	定子 abc 相电流
$\psi_{\text{as}}, \psi_{\text{bs}}, \psi_{\text{cs}}$	定子 abc 相磁链
$v_{\text{ar}}, v_{\text{br}}, v_{\text{cr}}$	转子 abc 相电压
$r_{\text{ar}}, r_{\text{br}}, r_{\text{cr}}$	转子 abc 相电阻
$i_{\text{ar}}, i_{\text{br}}, i_{\text{cr}}$	转子 abc 相电流
$\psi_{\text{ar}}, \psi_{\text{br}}, \psi_{\text{cr}}$	转子 abc 相磁链
$[L_{\text{IG}}]$	感应发电机电感矩阵
L_{ms}	定子磁化电感
L_{ls}	定子漏电感
L_m	磁化电感
L_{lr}	转子漏电感
N_s	定子绕组有效匝数

N_r	转子绕组有效匝数
μ_0	真空磁导率
r_a	感应发电机空气隙半径
l	电机的有效长度
Θ_{dq}	感应发电机中旋转坐标系的直轴（d 轴）与定子 a 相轴线之间的夹角
ω_{dq}	dq0 旋转坐标系的角速度
i_{ds}, i_{qs}, i_{0s}	定子电流的 dq0 分量
v_{ds}, v_{qs}, v_{0s}	定子电压的 dq0 分量
$\psi_{ds}, \psi_{qs}, \psi_{0s}$	定子磁链的 dq0 分量
i_{dr}, i_{qr}, i_{0r}	转子电流的 dq0 分量
v_{dr}, v_{qr}, v_{0r}	转子电压的 dq0 分量
$\psi_{dr}, \psi_{qr}, \psi_{0r}$	转子磁链的 dq0 分量
S_{dq0}	感应发电机在 dq0 旋转坐标系的瞬时功率
T_e	电磁转矩
T_{shaft}	机械系统上来自转轴的转矩
J_g	发电机的转动惯量
ω_1	风力发电机（风轮）的角速度
J_1	风力发电机的转动惯量
$T_{torsion}$	转轴弹性
$T_{damping}$	转轴阻尼转矩
θ_1	风力发电机转子角度
θ_r	感应发电机转子角度
K_{tot}	转轴转矩系数
D	转轴阻尼系数
S_{B2B}	背靠背换流器功率等级
v_{dc}	背靠背换流器直流电压值
r_{cb}	撬棒电阻
$Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$	电压源换流器的 IGBT
$D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$	电压源换流器的反并联二极管
Q_s	感应发电机无功功率
ω_s	同步角速度
ω_r	转子角速度
J	风力发电机与发电机的总转动惯量
C	直流侧电容
'	折算到定子侧的量
r	电压源换流器与电网之间的电阻
L	电压源换流器与电网之间的电感
pwm	脉宽调制信号

d_a, d_b, d_c	a、b、c 相占空比
m_a, m_b, m_c	a、b、c 相调制信号
W	电容存储的能量
L_s	定子自感
L_r	转子自感
P_{gsc}	网侧换流器有功功率
Q_{gsc}	网侧换流器无功功率
$P_x(s)$	受控对象
$K_x(s)$	比例积分控制器
Kp_x, Ki_x	比例与积分增益
$l_x(s)$	开环增益
$B_x(s)$	闭环传递函数
τ_x	闭环时间常数
G_x	内环反馈回路增益
$M_x(s)$	带内环反馈回路增益的受控对象
\rightarrow	空间矢量标示
T_s	定子时间常数
T_r	转子时间常数
u	电压跌落幅度
t_0^-, t_0^+	故障发生前和发生后时刻
$\overrightarrow{v_1}, \overrightarrow{v_2}, \overrightarrow{v_0}$	交流电压的正序、负序和零序分量
s_ω^+, s_ω^-	正序与负序转差速度
T_e^+, T_e^-	正序与负序电磁转矩
$s_{\omega\max}$	感应发电机最高速度
P_r	转子有功功率
P_{ag}	气隙功率
$P'(s)$	受控对象模型
$G(s)$	内模控制器
$L(s)$	内模控制器滤波器
$M_x(s)$	具有内部反馈环增益的受控对象模型
a_x	内模控制器滤波器带宽
$F_x(s)$	传统控制器形式的二自由度内模控制器
l_m	模型不确定
η	控制器性能
$\bar{\omega}$	标么化控制系统输入

第 3 章中使用的符号

Over_ 标么化变量

b	基值
ϕ_s	定子磁通
ϕ_r	转子磁通
i_{ds}, i_{qs}	dq 轴定子电流
v_{ds}, v_{qs}	dq 轴定子电压
ψ_{ds}, ψ_{qs}	dq 轴定子磁链
T_e	电磁转矩
T_m	机械转矩
P_e	电磁功率
P_m	机械功率
Q	无功功率
ω_b	基值同步速
ω_s	同步速
ω_r	转速
J	转动惯量
H	标么化的转动惯量常数
K	转轴刚度
f	系统频率
C	电容
i_f	励磁电流
i_{kd}, i_{kq1}, i_{kq2}	阻尼绕组的 dq 轴电流
L_{lkd}, L_{lkq}	阻尼绕组的 dq 轴漏感
L_{mdl}, L_{mq}	dq 轴互感
L_{lf}	励磁绕组的漏感
L_{ls}	定子绕组漏感
r_s	定子绕组电阻
r_f	励磁绕组电阻
r_{kd}, r_{kq1}, r_{kq2}	阻尼绕组 dq 轴电阻
v_{fd}	励磁电压
v_{kd}, v_{kq1}, v_{kq2}	阻尼绕组 dq 轴电压分量
ψ_f	励磁绕组匝链磁链
$\psi_{kd}, \psi_{kq1}, \psi_{kq2}$	阻尼绕组匝链磁链的 dq 轴分量
δ_r	转子角度
C_s	同步功率系数
C_d	阻尼功率系数
i_{dr}, i_{qr}	转子电流 dq 轴分量
v_{dr}, v_{qr}	转子电压 dq 轴分量
ψ_{dr}, ψ_{qr}	转子磁链 dq 轴分量
e_d, e_q	反电动势 dq 轴分量

L_m	定转子绕组互感
X_m	励磁电抗
L_r, L_s	定转子绕组自感
X_r, X_s	定转子电抗
L_{lr}	转子绕组漏感
L_{ls}	定子绕组漏感
r_r	转子绕组电阻
r_s	定子绕组电阻
s	感应发电机转差率
p	极数

第 4 章中使用的符号

S	三相对称短路水平
P_{de}	额定直流功率
Q_C	在额定直流功率下的三相基波无功功率 (Mvar)
γ	熄弧角度
α	延时角度
I_m	电流裕度
τ	直流电容时间常数
C	电容值
X_T	变压器漏感
R_T	变压器绕组电阻
X_F	平滑电感电抗
V_{dc}	电压源换流器直流电压
R_{dc}	直流链电阻
L_{dc}	直流链电感
δ	系统交流电源与电压源换流器之间的相角差
θ_s	系统交流电压与流入或流出换流器电流之间的相角差
θ_c	电压源换流器电压与交流电流之间的相角差
x1	送端
x2	受端
P	有功功率
v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	交流电源三相电压
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	交流电源与电压源换流器之间流过的电流
v_{ca}, v_{cb}, v_{cc}	电压源换流器端口三相电压
i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}	流过电压源换流器端口的电流
L_t	耦合变压器电感
R_F	耦合电抗器电阻
L_F	耦合电抗器电感
I_{dc}	直流链电流

i_{sd}, i_{sq}	系统交流电源与电压源换流器之间流过电流的 dq 轴分量
v_{sd}, v_{sq}	系统交流电源电压的 dq 轴分量
ω	同步速
M	调制比
θ	换流器相角
Q	无功功率
B	晶闸管控制电抗器电纳
Q_{SVC}	静止无功补偿器功率触发角
X_{SVC}	静止无功补偿器有效电抗
X_{TCR}	晶闸管控制电抗器基频等效电抗
X_L	晶闸管控制电抗器电感电抗
σ	晶闸管控制电抗器导通角
V_{VSC}	静止同步补偿器电压
δ	静止同步补偿器角度

第 5 章中使用的符号

GS - VSC	网侧换流器
B_G	公共连接点交流电压
B_{WF1}	风电场交流电压
P_g	风电场有功功率
Q_g	风电场无功功率
P_g^*	风电场有功功率参考值
Q_g^*	风电场无功功率参考值
G	交流电网
WF - VSC	风电场侧换流器
VSC	电压源换流器
V_{dc}	电压源换流器直流电压
P	电压源换流器有功功率

第 6 章中使用的符号

I_{pickup}	过电流保护动作电流
I_{max}	最大负载电流
I_{scmin}	最小短路电流
v_{dc_sc}	相间故障期间高压直流链的等效直流电压
i_{dc_sc}	相间故障期间高压直流链的等效直流电流
C, L_{dc}, r_{dc}	相间故障期间高压直流链的等效电容、电感和电阻
v'_{dc_sc}	单相接地故障期间高压直流链的等效直流电压
i'_{dc_sc}	单相接地故障期间高压直流链的等效直流电流
C', L'_{dc}, r'_{dc}	单相接地故障期间高压直流链的等效电容、电感和电阻
r_f	高压直流链单相接地故障时的接地电阻

目 录

译者序	
原书前言	
作者简介	
缩略语与物理量符号	
第 1 章 海上风力发电系统	1
1.1 背景	1
1.2 典型子系统	1
1.3 风力发电机技术	3
1.3.1 基础知识	3
1.3.2 构架	5
1.3.3 海上风力发电机技术现状	6
1.4 海上输电网	7
1.5 对电力系统运行的影响	8
1.5.1 电力系统动态与稳定	8
1.5.2 无功功率与电压支撑	9
1.5.3 频率支撑	9
1.5.4 风力发电机惯量响应	10
1.6 风电并网规则	10
致谢	11
参考文献	12
第 2 章 双馈感应风力发电机	13
2.1 介绍	13
2.1.1 感应发电机 (IG)	14
2.1.2 背靠背换流器	14
2.1.3 齿轮箱	14
2.1.4 撬棒保护	14
2.1.5 风力发电机变压器	14
2.2 双馈感应风力发电机的结构和数学建模	15
2.2.1 感应发电机在 abc 坐标系下的模型	15
2.2.2 感应发电机在 dq0 坐标系下的模型	19
2.2.3 机械系统	22
2.2.4 撬棒保护	24
2.2.5 双馈感应发电机背靠背换流器的建模	25
2.2.6 电力电子换流器的平均值模型	27

2.2.7	直流回路	29
2.3	双馈感应风力发电机的控制	30
2.3.1	转速 PI 控制	31
2.3.2	双馈感应风力发电机无功功率的 PI 控制	32
2.3.3	转子电流的 PI 控制	33
2.3.4	直流电压的 PI 控制	34
2.3.5	网侧换流器电流的 PI 控制	36
2.4	双馈感应风力发电机动态性能评估	38
2.4.1	三相故障	38
2.4.2	对称电压跌落故障	41
2.4.3	非对称电压跌落故障	42
2.4.4	单相接地故障	43
2.4.5	相间短路故障	44
2.4.6	对称短路故障下的转矩特性	45
2.4.7	不对称短路故障下的转矩特性	46
2.4.8	电网故障对感应发电机无功功率消耗的影响	47
2.5	故障穿越能力与电网导则	48
2.5.1	撬棒保护的利弊	48
2.5.2	双馈感应风力发电机变量对其故障穿越能力的影响	49
2.6	提高双馈感应风力发电机故障穿越能力的先进控制策略	50
2.6.1	二自由度内模控制 (IMC)	50
2.6.2	转速 IMC 控制器	51
2.6.3	转子电流 IMC 控制器	52
2.6.4	直流电压 IMC 控制器	53
2.6.5	网侧换流器电流 IMC 控制器	54
2.6.6	双馈感应风力发电机 IMC 控制器的鲁棒性调节	55
2.6.7	鲁棒稳定性原理	56
	参考文献	57
第 3 章	全功率换流风力发电机	58
3.1	同步电机基础	58
3.1.1	同步发电机结构	58
3.1.2	同步发电机的气隙磁场	59
3.2	同步发电机 dq 坐标系模型	62
3.2.1	稳态运行	63
3.2.2	带阻尼绕组的同步发电机	65
3.3	大型同步发电机的控制	67
3.3.1	励磁控制	68
3.3.2	原动机控制	69
3.4	全功率换流风力发电机	69
3.5	基于同步发电机的全功率换流风力发电机	70
3.5.1	永磁同步发电机	71