



国家科学技术学术著作出版基金资助出版



国家电网公司
电力科技著作出版项目

并网双馈异步风力发电机 运行控制

贺益康 胡家兵 Lie XU (徐烈) 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

国家科学技术学术著作出版基金资助出版
国家电网公司电力科技著作出版项目

并网双馈异步风力发电机 运行控制

贺益康 胡家兵 Lie XU (徐烈) 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书共分9章,主要内容涉及变速恒频风力发电系统的运行控制基础,双馈异步(风力)发电机(DFIG)的运行理论,理想电网条件下DFIG的矢量变换控制,有功、无功功率解耦调节和最大风能捕获追踪运行,电网故障对DFIG运行性能影响及控制对策,对称电网故障下DFIG的低电压穿越运行,快速短接保护(crowbar)装置结构和优化投/切控制技术,不对称电网故障下DFIG的运行理论,电网电压不平衡时DFIG用励磁变换器的电流控制技术,增强运行性能的网侧、转子侧PWM变换器的协调控制,DFIG的直接功率控制等,同时还对电网电压不平衡下正、负相序系统控制基准检测用新型PLL技术作了深入探讨,完善了并网双馈异步风力发电机运行控制的基础理论与关键技术研究。

本书可作为从事新能源开发的广大高校师生特别是从事风电技术研究的研究生教材,也可供从事风电产品研发、生产制造和运行管理的研究人员及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

并网双馈异步风力发电机运行控制 / 贺益康, 胡家兵, 徐烈著. —北京: 中国电力出版社, 2011. 12

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2487 - 9

I. ①并… II. ①贺… ②胡… ③徐… III. ①风力发电机 - 发电机运行 - 控制系统 IV. ①TM315. 06

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 260824 号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 周 娟 杨淑玲 责任印制: 蔺义舟 责任校对: 闫秀英

航远印刷有限公司印刷 · 各地新华书店经售

2012 年 4 月第 1 版 · 第 1 次印刷

700mm × 1000mm 1/16 · 19 印张 · 341 千字

定价: 68.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前言

能源是关系到国家社会、经济发展全局性的重大战略问题，是我国国民经济、社会生产力持续发展的重要基础，因而节能减排及新能源开发就成为我国当前生产、经济生活中的国策，而风力发电的技术及产业则成为当前电工技术研究及机电产品生产的热点方向和内容。尽管近年来我国的风电产业获得了迅猛发展，然而因起步较晚，其总体水平仍远落后于国外，研发、生产中尚有很多基础理论、关键技术和工程设计等核心问题亟待解决。特别是我国风电开发采取大规模、高集中的模式，风电场多建于电网末端，电网中存在各种瞬态、稳态，严重、轻度，对称、不对称故障和各类电力谐波，使得并网风力发电机组（以下简称“风电机组”）的运行环境十分恶劣和非理想化，以往基于理想大电网环境设计的风电机组及其运行控制策略无法应对实际电网条件下的并网和高性能运行要求，进而直接影响到所并电网的运行稳定性和所生产的电能质量。国外已从电力系统安全角度对风电机组并网提出了明确的规范，进行了电网故障下风电机组的不脱网（穿越）运行深入研究，并实现了工程化，这正是我国现有风电开发中的严重欠缺和瓶颈，是风电技术中亟待深化研究的重要内容和方向，需求形势十分紧迫。本书的撰写目的就是基础理论和关键技术的层面上进行探讨和提出解决思路。

本书以交流励磁变速恒频双馈异步风力发电机系统为对象，从发电机本体、交流励磁变换器、电网状态及风电机组运行工况紧密相结合的形式，采取理论分析、计算机仿真和实验验证的有效方式进行深入研究，其内容是作者们多年来国家级科研项目研究成果的总结和研究生培养工作的升华，理论上具有追赶国际先进风电技术水平的重要意义，学术上具有明显的创新性，技术上具有相当的实用价值。

本书对于从事风电产品研发、生产制造和运行管理的研究人员、工程技术人员有直接的帮助，对于从事新能源开发的广大高校师生、特别是学习风电技术的研究生是一本有理论意义和工程实用价值的高水平理论教材。

本书由浙江大学教授贺益康、华中科技大学教授胡家兵博士、英国女王大学（Queen's University, Belfast, U. K.）副教授 Lie XU（徐烈）博士共同撰写。刘其辉博士、赵仁德博士、周鹏博士、Dawei Zhi（智大为）博士等对本书的研究工作成果作出了不可磨灭的重大贡献。

本书撰写的基础研究工作获得了国家自然科学基金委、国家高技术研究发展计划（863 计划）的多个项目资金资助，出版过程中得到了国家科学技术学术著作出版基金资助以及 2010 年国家电网公司电力科技专著出版资金资助，撰写过程中得到了韩桢祥院士、严陆光院士、李崇坚研究员的大力支持，在此一并表示衷心感谢。此外，本书撰写中参阅了不少国内、外相关文献，在此，向作者们致谢。

本书在编写中难免存在不足之处，望请广大读者不吝赐教。

作 者

主要符号表

C	变换器直流母线电容
C_p	风能利用系数
C_{pmax}	最大风能利用系数
$C_{3s/2s}$	三相静止坐标系至两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系的变换矩阵
$C_{3s/2r}$	三相静止坐标系至两相同步速旋转 dq 坐标系的变换矩阵
$C_{2r/3s}$	两相同步速旋转 dq 坐标系至三相静止坐标系的变换矩阵
$C_{2s/2r}$	两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系至两相同步速旋转 dq 坐标系的变换矩阵
$C_{2r/2s}$	两相同步速旋转 dq 坐标系至两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系的变换矩阵
D	阻尼系数
D_w	叶轮直径
E_r	转子感应电压（反电动势）矢量
F	广义三相电磁量的空间矢量
F_{dq}	dq 分量表达的广义电磁量的空间矢量
F_{dq+}, F_{dq-}	dq 分量表达的广义电磁量的正序和负序空间矢量
$F_{\alpha\beta}$	$\alpha\beta$ 分量表达的广义电磁量的空间矢量
$F_{\alpha\beta+}, F_{\alpha\beta-}$	$\alpha\beta$ 分量表达的广义电磁量的正序和负序空间矢量
f_a, f_b, f_c	广义三相电磁量（瞬时值）
f_{a+}, f_{b+}, f_{c+}	广义三相电磁量的正序分量
f_{a-}, f_{b-}, f_{c-}	广义三相电磁量的负序分量
f_m	与转子转速对应的机械频率
f_{m+}	广义电磁量正序分量幅值
f_{m-}	广义电磁量负序分量幅值
f_1	定子输出频率
f_2	转子（励磁电流）频率
$I = [I_s, I_r]^T$	定、转子电流矢量

I_g	电网电流矢量
I_{gdq}	d、q 轴分量表达的电网电流矢量
$I_{g\alpha\beta}$	α 、 β 轴分量表达的电网电流矢量
I_{gmax}	网侧变换器输出电流幅值上限
I_{ms}	定子等效励磁电流
I_r	转子电流矢量
I_{rdq}	d、q 轴分量表达的转子电流矢量
$I_{r\alpha\beta}$	α 、 β 轴分量表达的转子电流矢量
I_{rmax}	转子侧变换器输出电流幅值上限
I_{rp}	转子电流有功分量
I_{rQ}	转子电流无功分量
I_s	定子电流矢量
I_{sdq}	d、q 轴分量表达的定子电流矢量
$I_{s\alpha\beta}$	α 、 β 轴分量表达的定子电流矢量
I_{sp}	定子电流有功分量
I_{sQ}	定子电流无功分量
$i_{ga}、i_{gb}、i_{gc}$	电网三相电流（瞬时值）
i_{load}	PWM 变换器直流侧负载电流
$i_{ra}、i_{rb}、i_{rc}$	转子三相电流（瞬时值）
$i_{sA}、i_{sB}、i_{sC}$	定子三相电流（瞬时值）
J	转动惯量
K	弹性扭转系数
$k_{irp}、k_{iri}$	转子电流控制器比例、积分系数
$k_{igp}、k_{igi}$	电网电流控制器比例、积分系数
$k_{vp}、k_{vi}$	直流电压控制器比例、积分系数
$k_{pp}、k_{pq}$	有功、无功功率控制器比例系数
$k_{ip}、k_{iq}$	有功、无功功率控制器积分系数
$k_{rp}、k_{rq}$	有功、无功功率谐振控制器系数
$k_{igpm}、k_{igim}$	网侧变换器主电流控制器比例、积分系数
$k_{irpm}、k_{irim}$	转子侧变换器电流主控制器比例、积分系数
$k_{igpa}、k_{igia}$	网侧变换器辅电流控制器比例、积分系数
$k_{irpa}、k_{iria}$	转子侧变换器电流辅控制器比例、积分系数
$k_{igp}、k_{igr}$	网侧变换器 PR 电流控制器比例、谐振系数
$k_{irp}、k_{irr}$	转子侧变换器 PR 电流控制器比例、谐振系数
$k_{igp}、k_{igi}、k_{igr}$	网侧变换器 PIR 电流控制器比例、积分和谐振系数

k_{ip}, k_{ir}, k_{irr}	转子侧变换器 PIR 电流控制器比例、积分和谐振系数
L_g	网侧变换器一相进线电感值（三相相等时）
L_{ga}, L_{gb}, L_{gc}	网侧变换器三相进线电感
L_{lr}	转子漏电感
L_{ls}	定子漏电感
L_{mr}	转子最大相间互感值
L_{ms}	定子最大相间互感值
$L_r = L_m + L_{lr}$	转子绕组全自感
L_{rr}	转子电感矩阵
$L_s = L_m + L_{ls}$	定子绕组全自感
L_{sr}	定、转互感矩阵
L_{ss}	定子电感矩阵
N	变速齿轮箱增速比
N_{sr}	定、转子绕组折算系数
n_m	发电机转速
n_r	转子转速
p_n	发电机极对数
n_w	风力机转速
n_1	同步转速
n_2	转子旋转磁场相对于转子的转速
P_{Cus}	定子铜耗
P_{Cur}	转子铜耗
P_e	DFIG 气隙电磁功率
P_{es}	定子电磁功率
P_{er}	转子电磁功率
P_{field}	磁场储能变化引起的电磁功率
P_g	变换器输出至电网有功功率
P_{loss}	定子、转子总铜耗
P_{max}	风力机输出最大功率
P_{opt}	最佳功率点
P_r	转子有功功率
P_s	定子有功功率
P_t	DFIG 输出总有功功率
P_v	输入叶轮旋转面的风能

P_o	风力机的输出机械功率
Q_g	网侧变换器输出至电网无功功率
Q_r	转子无功功率
Q_s	定子无功功率
R	定、转子电阻矩阵
R_g	网侧变换器每相进线电阻值（三相相等时）
R_{ga}, R_{gb}, R_{gc}	网侧变换器三相进线电阻
R_r	转子电阻
R_s	定子电阻
R_w	风轮半径
s	DFIG 运行转差率
S_a, S_b, S_c	三相开关信号
S_d, S_q	开关函数的 d、q 轴分量
S_g	网侧变换器输出复功率
S_{ga}, S_{gb}, S_{gc}	PWM 变换器三相桥臂开关函数
S_p, S_q	有功、无功功率变化标志
S_w	风力机叶片迎风扫掠面积
S_s	定子视在功率
S_α, S_β	PWM 变换器开关函数的 α 、 β 轴分量
S_o	网侧变换器交流侧复功率
T_e	电磁转矩
T_L	驱动转矩
T_1	电网电压周期
$U = [U_s, U_r]^T$	定、转子电压矢量
U_A, U_B, U_C	故障前电网高压端三相电压
U'_A, U'_B, U'_C	故障后电网高压端三相电压
U'_a, U'_b, U'_c	故障后发电机端三相电压
U_g	电网电压矢量
U_{gdq}	d、q 轴分量表达的电网电压矢量
$U_{g\alpha\beta}$	α 、 β 轴分量表达的电网电压矢量
U_m, U'_m	故障前、后电网高压端相电压幅值
U_r	转子电压矢量
U_{rdq}	d、q 轴分量表达的转子电压矢量
U_{rmax}	转子侧变换器输出电压的最大值
$U_{r\alpha\beta}$	α 、 β 轴分量表达的转子电压矢量

U_s	定子电压矢量
U_{sdq}	d、q 轴分量表达的定子电压矢量
U_{sm+}, U_{sm-}	定子正、负序相电压幅值
$U_{s\alpha\beta}$	α 、 β 轴分量表达的定子电压矢量
u_{ga}, u_{gb}, u_{gc}	三相电网相电压（瞬时值）
u_{ra}, u_{rb}, u_{rc}	三相转子相电压（瞬时值）
u_{sA}, u_{sB}, u_{sC}	三相定子相电压（瞬时值）
v	未扰动风速
U	电压空间矢量
U_{dc}	PWM 变换器直流侧电压
V_g 或 U_c	网侧变换器交流侧电压矢量
v_{ga}, v_{gb}, v_{gc} 或 u_{ca}, u_{cb}, u_{cc}	网侧变换器交流侧三相电压（瞬时值）
U_{gdq}	d、q 分量表达的网侧变换器交流侧电压矢量
$U_{g\alpha\beta}$	α 、 β 分量表达的网侧变换器交流侧电压矢量
$U_1 \sim U_6$	有效电压空间矢量
U_0, U_7	零电压空间矢量
X_m	定、转子互感电抗
X_r	转子全电抗, $X_r = X_{r\sigma} + X_m$
X_s	定子全电抗, $X_s = X_{s\sigma} + X_m$
$X_{r\sigma}$	转子漏抗
$X_{s\sigma}$	定子漏抗
Z_g	变换器进线阻抗
$(\alpha\beta)_r$	两相转子旋转坐标系
$(\alpha\beta)_s$	两相静止坐标系
β	风力机桨距角
δ	电网电压不平衡度
θ_1	d 轴与 α 轴间空间位置角
θ_r	定、转子空间位置角
λ	叶尖速比
λ_{opt}	最佳叶尖速比
ρ	空气密度
σ	漏磁系数
τ_s	定子时间常数
ϕ_+	正序分量初相位

ϕ_-	负序分量初相位
$\psi = [\psi_s, \psi_r]^T$	定、转子磁链矢量
ψ_c	网侧变换器交流侧磁链矢量
ψ_{cdq}	d、q 轴分量表达的网侧变压器交流侧磁链矢量
$\psi_{c\alpha\beta}$	α 、 β 轴分量表达的网侧变压器交流侧磁链矢量
ψ_g	电网磁链矢量
ψ_{gdq}	电网磁链矢量 d、q 轴分量
$\psi_{g\alpha\beta}$	电网磁链矢量 α 、 β 轴分量
ψ_r	转子磁链矢量
ψ_{rdq}	转子磁链矢量 d、q 轴分量
$\psi_{r\alpha\beta}$	转子磁链矢量 α 、 β 轴分量
$\psi_{ra}, \psi_{rb}, \psi_{rc}$	三相转子磁链（瞬时值）
$\psi_{sA}, \psi_{sB}, \psi_{sC}$	三相定子磁链（瞬时值）
ψ_s	定子磁链矢量
ψ_{sdq}	定子磁链矢量 d、q 轴分量
$\psi_{s\alpha\beta}$	定子磁链矢量 α 、 β 轴分量
ψ_{sdc}	定子磁链直流分量
Ω_1	同步机械角速度
ω	任意角速度
ω_1	电网交变角频率，同步角速度
ω_c	谐振（R）控制器截止角频率
ω_{igc}	网侧变换器谐振（R）控制器截止角频率
ω_{irc}	转子侧变换器 PR 电流控制器的截止角频率
ω_r	转子旋转角速度
$\omega_{slip} (\omega_{slip+})$	（正转）转差角频率
ω_{slip-}	反转转差角频率
ω_w	风力机旋转角速度
上标：	
$\wedge$	共轭量，观测值（估算值）
$*$	参考值
$+$	正转同步速旋转坐标系
$-$	反转同步速旋转坐标系
r	转子速旋转坐标系
下标：	
$+, -$	正、负序分量

c	网侧变换器交流侧
com	补偿量
dc	直流量
d, q	d、q 轴分量
g	电网侧
N	额定值
cos2	二倍频余弦量
sin2	二倍频正弦量
s, r	定、转子侧
α, β	α 、 β 轴分量
0	平均量
其他约定:	
$p = d/dt$	微分算子
Im	取虚部算子
j	虚部
Re	取实部算子
粗体大写字母变量	矢量
小写字母变量	分量, 瞬时值

主要缩略语表

AFO	气隙磁链定向
CSCF	恒速恒频
DFIG	双馈异步（风力）发电机
DPC	直接功率控制
DTC	直接转矩控制
DVR	动态电压恢复器
EESG	电励磁同步发电机
EMI	电磁干扰
FRT	故障穿越
GSC	网侧变换器
GTO	门极关断（晶闸管）
GVO	电网电压定向
IGBT	绝缘栅双极型晶体管
LUT - DPC	查表法直接功率控制
LVRT	低电压穿越
MSC	电机侧变换器
P - DPC	预测直接功率控制
PGSC	（并联）网侧变换器
PI（控制器）	比例积分（控制器）
PIR（控制器）	比例积分谐振（控制器）
PMSG	永磁同步发电机
PR（控制器）	比例谐振（控制器）
PWM	脉宽调制
R（控制器）	谐振（控制器）
RSC	转子侧变换器
SCIG	笼型异步发电机
SGSC	串联网侧变换器
SFO	定子磁链定向
SOGI	两阶广义积分器

STACOM	静止无功补偿装置
SVM – DPC	空间矢量调制直接功率控制
SVO	定子电压定向
SVPWM	空间矢量脉宽调制
VSCF	变速恒频
VC	矢量控制
VFO	虚拟磁链定向
WRIG	绕线转子异步发电机

目 录

前言

主要符号表

主要缩略语表

第 1 章 绪论	1
1.1 可再生能源的利用与风力发电	1
1.1.1 能源、环境危机和绿色能源的开发	1
1.1.2 风能开发与风力发电的历史、现状与趋势	2
1.2 风力发电技术的发展概述	13
1.2.1 风力机的基础理论与运行特性	13
1.2.2 恒速恒频与变速恒频的风力发电技术	16
1.2.3 双馈风电变换器的控制策略	21
1.2.4 风电技术研究中值得关注的若干问题	23
第 2 章 变速恒频风力发电系统的运行控制基础	29
2.1 变速恒频风力发电系统的运行控制	29
2.1.1 风力机的运行特性	29
2.1.2 变速恒频风力发电系统的运行控制策略	31
2.2 风力发电系统的最大风能追踪运行机理	33
2.3 双馈异步风力发电机的最大风能追踪控制	34
2.3.1 有功功率参考值 P_s^* 的计算	35
2.3.2 无功功率参考值 Q_s^* 的计算	36
2.3.3 最大风能追踪控制的实现	37
2.4 双馈异步风力发电机用交流励磁电源	38
2.4.1 两电平电压型双 PWM 变换器	39
2.4.2 交-直-交电压源与电流源并联型变换器	40
2.4.3 晶闸管相控交-交变换器	43
2.4.4 矩阵式变换器	44
2.4.5 多电平变换器	46

2.4.6 五种变换器的比较	48
第3章 双馈异步风力发电机的运行理论	52
3.1 双馈异步风力发电机的系统结构	52
3.2 双馈异步风力发电机的数学模型	54
3.2.1 三相静止坐标系中 DFIG 的数学模型	54
3.2.2 任意速旋转坐标系中 DFIG 的数学模型	57
3.3 双馈异步风力发电机的功率关系	60
3.3.1 同步速 ω_1 旋转坐标系中 DFIG 风电系统的等效电路	60
3.3.2 同步速 ω_1 旋转 dq 坐标系中 DFIG 风电系统的功率表达	60
3.4 双馈异步风力发电机的并网与运行控制	64
第4章 理想电网条件下双馈异步风力发电机的运行控制	69
4.1 网侧 PWM 变换器及其控制	70
4.1.1 网侧 PWM 变换器的数学模型	70
4.1.2 网侧 PWM 变换器的稳态特性	74
4.1.3 网侧 PWM 变换器的运行控制	77
4.1.4 网侧 PWM 变换器的无电网电压传感器虚拟电网磁链定向矢量控制	79
4.2 转子侧 PWM 变换器及其控制	85
4.2.1 转子侧 PWM 变换器的数学模型	85
4.2.2 转子侧 PWM 变换器的运行控制	86
4.3 理想电网电压条件下双馈异步风力发电机的传统矢量控制技术	88
4.3.1 定子磁链定向矢量控制	88
4.3.2 电网电压定向矢量控制	90
4.3.3 双馈异步风力发电机最大风能追踪控制的实现	92
4.4 双馈异步风力发电机的实验运行研究	93
4.4.1 并网前空载稳态运行实验	94
4.4.2 并网运行实验	96
4.4.3 网侧变换器无电网电压传感器虚拟电网磁链定向矢量控制实验	100
第5章 电网故障对双馈异步风力发电机运行的影响	101
5.1 电网故障类型	102
5.2 三相电网电压对称跌落对 DFIG 风电系统运行的影响	105
5.3 三相电网电压不平衡或不对称跌落对 DFIG 风电系统的影响	110
5.3.1 电网电压不平衡对网侧变换器运行的影响	110

5.3.2	电网电压不平衡对转子侧变换器运行的影响	110
5.3.3	电网电压不对称跌落对 DFIG 风电系统运行的影响	113
5.4	现代风电并网规范	117
5.5	电网电压故障下增强 DFIG 风电系统运行能力的控制对策 和保护措施	120
第 6 章	双馈异步风力发电机的低电压穿越运行	122
6.1	现有 DFIG 风电系统的低电压穿越技术	122
6.1.1	改进控制策略	123
6.1.2	定子侧低电压穿越方案	125
6.1.3	转子侧低电压穿越方案	126
6.2	计及定子磁链动态过程的改进矢量控制	129
6.2.1	定子电压定向 (SVO) 的 DFIG 矢量控制改进方案	130
6.2.2	定子磁链定向 (SFO) 的 DFIG 矢量控制改进方案	132
6.2.3	运行仿真	133
6.3	基于 Crowbar 保护装置的低电压穿越运行	136
第 7 章	电网电压不平衡条件下双馈异步风力发电机系统的建模 与控制	145
7.1	电网电压不平衡条件下双馈异步风力发电机的动态模型	145
7.1.1	不对称三相电磁量的瞬时对称分量及其表达形式	146
7.1.2	电网电压不平衡条件下网侧变换器的动态模型	148
7.1.3	电网电压不平衡条件下转子侧变换器的动态模型	155
7.2	电网电压不平衡条件下双馈异步风力发电机的运行控制策略	161
7.2.1	电网电压不平衡条件下转子侧变换器的控制目标	161
7.2.2	电网电压不平衡条件下网侧变换器的控制目标	166
7.2.3	运行仿真	170
7.3	电网电压不平衡条件下 DFIG 风电系统控制基准的检测技术	174
7.3.1	理想电网条件下的锁相环原理	174
7.3.2	电网电压不平衡条件下现有的锁相环技术	176
7.3.3	正、负序双 dq 型锁相环技术	177
7.3.4	基于正、负序分解原理的锁相环技术	179
7.3.5	基于广义积分器原理的锁相环技术	184