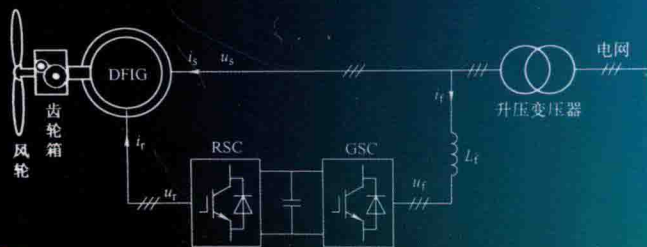


电力电子

新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics



◎ 凌禹 著

双馈风力发电系统的建模、仿真与控制

SHUANGKUI FENGLI FADIAN XITONG
DE JIANMO FANGZHEN YU KONGZHI



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电力电子新技术系列图书

双馈风力发电系统的建模、 仿真与控制

凌禹 著



机械工业出版社

本书主要介绍双馈感应电机风力发电系统的建模、仿真与控制技术。在介绍风力发电系统基本概念及其基本理论的基础上,系统地介绍了双馈感应电机稳态数学模型及其运行、双馈感应电机动态数学模型、背靠背功率变换器数学模型及其控制技术、双馈感应电机矢量控制技术以及基于MATLAB/SIMULINK 仿真软件完成的双馈感应电机风力发电系统仿真。

本书主要供工程技术人员在从事风电产品研发、生产制造和运行时参考,也可作为从事风电研究的教师和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

双馈风力发电系统的建模、仿真与控制/凌禹著. —北京:机械工业出版社, 2017. 10

(电力电子新技术系列图书)

ISBN 978-7-111-57768-3

I. ①双… II. ①凌… III. ①双馈电机-风力发电系统 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第200813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:罗莉 责任编辑:罗莉

责任校对:刘岚 封面设计:马精明

责任印制:张博

三河市国英印务有限公司印刷

2017年10月第1版第1次印刷

169mm×239mm·14.5印张·267千字

0001-3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-57768-3

定价:69.00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

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

第2届
电力电子新技术系列图书

编辑委员会

主任：徐德鸿

副主任：白继彬 牛新国 康 勇 李崇坚 杨 耕

委员：（按姓名拼音字母排序）

白继彬 陈 坚 陈道炼 陈守良 陈治明

高艳霞 郭 宏 郭世明 康 勇 李崇坚

李永东 刘进军 吕征宇 牛新国 潘三博

阮新波 孙流芳 孙玉坤 王旭东 王兆安

肖湘宁 徐德鸿 徐殿国 杨 耕 杨 旭

查晓明 张 波 张 兴 张承慧 张卫平

赵善麒 赵争鸣 钟彦儒 周 波 周维维

秘书组：陈守良 孙流芳 杨 旭 罗 莉

电力电子新技术系列图书

序言

1974年美国学者 W. Newell 提出了电力电子技术学科的定义, 电力电子技术是由电气工程、电子科学与技术和控制理论三个学科交叉而形成的。电力电子技术是依靠电力半导体器件实现电能的高效率利用, 以及对电机运动进行控制的一门学科。电力电子技术是现代社会的支撑科学技术, 几乎应用于科技、生产、生活各个领域: 电气化、汽车、飞机、自来水供水系统、电子技术、无线电与电视、农业机械化、计算机、电话、空调与制冷、高速公路、航天、互联网、成像技术、家电、保健科技、石化、激光与光纤、核能利用、新材料制造等。电力电子技术在推动科学技术和经济的发展中发挥着越来越重要的作用。进入 21 世纪, 电力电子技术在节能减排方面发挥着重要的作用, 它在新能源和智能电网、直流输电、电动汽车、高速铁路中发挥核心的作用。电力电子技术的应用从用电, 已扩展至发电、输电、配电等领域。电力电子技术诞生近半个世纪以来, 也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前, 电力电子技术仍以迅猛的速度发展着, 电力半导体器件性能不断提高, 并出现了碳化硅、氮化镓等宽禁带电力半导体器件, 新的技术和应用不断涌现, 其应用范围也在不断扩展。不论在全世界还是在我国, 电力电子技术都已造就了一个很大的产业群。与之相应, 从事电力电子技术领域的工程技术和科研人员的数量与日俱增。因此, 组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列图书, 以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考, 促进电力电子技术及应用知识的普及。

在 20 世纪 80 年代, 电力电子学会曾和机械工业出版社合作, 出版过一套电力电子技术丛书, 那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近, 电力电子学会经过认真考虑, 认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此, 成立了专门的编辑委员会, 负责确定书目、组稿和审稿, 向机械工业出版社推荐, 仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色:

本系列图书属专题论著性质, 选题新颖, 力求反映电力电子技术的新成就和新经验, 以适应我国经济迅速发展的需要。

理论联系实际, 以应用技术为主。

本系列图书组稿和评审过程严格, 作者都是在电力电子技术第一线工作的专

家，且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于阅读学习。

本系列图书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书
编辑委员会

前 言

能源是整个世界发展和经济增长的最基本的驱动力，是人类赖以生存和发展的基础。然而在近代人类发展的长河中，世界各国能源消费结构一直以来几乎没有发生大的变化，仍然以石油、天然气、煤炭等常规能源为主。但是作为世界能源主要支柱的常规能源的储量是非常有限的。在全球经济急剧增长的今天，对能源的需求越来越大，世界常规能源的储量越来越少，能源危机越来越严重，已经成为阻碍人类进一步发展的桎梏。除了能源危机之外，常规能源的大量消耗还给人类带来了严重的环境污染问题，甚至到了影响地球生态系统自律功能正常运转的严重程度。

为了应对能源与环境既相互矛盾又相互联系的两大难题，人们经过艰难的探索，逐步认识到可再生能源的开发和利用是有效的解决途径之一。这主要是因为可再生能源比如风能、太阳能、潮汐能等不仅可再生，而且对环境友好，对环境的影响是局部的、可控的、可以忽略不计的。目前，开发利用绿色能源已成为保护环境，促进可持续发展的有效途径，是当今世界各国政府达成的共识。近年来，尤其是对风能资源的开发和利用，已受到世界各国的高度重视，并取得了长足的发展。

本书首先回顾了目前国内外风力发电的发展及双馈感应电机风力发电系统的研究成果。然后，在风力机的空气动力学原理和能量转换原理的基础上，系统地介绍了风力发电系统结构、风轮功率的控制方法以及变速风力发电系统功率控制和转速控制在不同运行区域的控制任务和控制策略。从实际风力发电系统的功率曲线出发分析了变速风力发电系统中低风速时追踪最大风能的可能性及其控制策略。

双馈感应电机风力发电系统是目前风电市场上主流技术之一。因此，本书对该机型作了系统的介绍。从双馈感应电机的稳态数学模型和运行入手，先后介绍了双馈感应电机的动态数学模型及其控制、背靠背功率变换器数学模型及其控制以及系统仿真模型的实现和仿真。

作者自 2005 年在中国矿业大学攻读硕士以来，乃至在上海交通大学攻读博士期间，一直从事风力发电的科学研究工作，尤其是对双馈感应电机风力发电系统有着系统性的研究。因此，希望本书能对读者了解双馈感应电机风力发电系统有所帮助和启迪。

在本书撰写过程中，也得到了山西省自然科学基金（2015011065）和大同市基础科研项目（2015112）资金的大力支持，作者借此向他们表示感谢！

本书主要供工程技术人员在从事风电产品研发、生产制造和运行时参考，也可作为从事风电研究的教师和研究生的参考用书。

限于作者水平，书中错误之处在所难免，恳求读者批评指正！

作者

2016年8月

本书涉及的常用符号表

一、常用缩写符号

CSCF	恒速恒频 (Constant Speed Constant Frequency)
DFIG	双馈感应电机 (Doubly Fed Induction Generator)
DPC	直接功率控制 (Direct Power Control)
FRT	故障穿越 (Fault Ride Through)
GSC	网侧变换器 (Grid-Side Converter)
GWEC	全球风能理事会 (Global Wind Energy Council)
IGBT	绝缘栅双极晶体管 (Insulated-Gate Bipolar Transistor)
MPPT	最大风能跟踪 (Maximum Power Point Tracking)
PI	比例积分调节器 (Proportional Integral)
PWM	脉宽调制 (Pulse Width Modulation)
RSC	转子侧变换器 (Rotor-Side Converter)
SCIG	笼型感应发电机 (Squirrel Cage Induction Generator)
SHEPWM	消除指定次数谐波 PWM (Selected Harmonic Elimination PWM)
SPWM	正弦波脉宽调制技术 (Sinusoidal PWM)
VC	矢量控制 (Vector Control)
VDPC	基于电网电压的直接功率控制 (Voltage Direct Power Control)
VFOVC	基于虚拟磁链定向的矢量控制 (Virtual Flux Oriented Vector Control)
VFDPC	基于虚拟磁链的直接功率控制 (Virtual Flux Direct Power Control)
VOVC	电压定向的矢量控制 (Voltage Oriented Vector Control)
VSCF	变速恒频 (Variable Speed Constant Frequency)

二、常见上角标

*	表示共轭复数、标幺值系统
T	转置矩阵

三、常见下角标

A	A 相绕组
b	基准值 (basic)
lim	极限, 限制 (Limit)
m	极限值, 峰值; 励磁 (magnetizing)

max	最大值 (maximum)
min	最小值 (minimum)
N	额定值, 标称值 (Nominal)
r	电机转子 (rotor)
ref	参考值 (reference)
s	电机定子 (stator)

四、参数和物理量文字符号

B	磁通密度
C_{dc}	背靠背变换器直流侧电容
C_F	推力系数
C_p	功率系数
C_{pmax}	最大功率系数
C_T	转矩系数
C_{Tmax}	转矩系数最大值
e	转子一个线圈的感应电动势
e_{ra}, e_{rb}, e_{rc}	双馈感应电机转子三相绕组的反电势
E	单位体积流体动能; 感应电动势
E_r	折算到定子侧且频率相同的转子感应电动势相量
E'_r	折算到定子侧的转子感应电动势相量
E''_r	气隙磁通在转子每相绕组中感应电动势的有效值
E''_r	气隙磁通在转子每相绕组中感应电动势相量
E_s	气隙磁通在定子每相绕组中感应电动势相量
E_s	气隙磁通在定子每相绕组中感应电动势的有效值
f_1	三相电源频率, 双馈感应电机定子频率
f_2	双馈感应电机转子频率
f_b	频率基准值
f_N	双馈感应电机定子绕组额定频率
F	电磁力
F_d	风作用在激励盘上的力
F_{wt}	风轮遭受的风的推力
g	重力加速度
H	惯性时间常数
i	转子线圈中的电流
i	电机定转子瞬时电流列矩阵
i_a, i_b, i_c	电机转子三相瞬时相电流

i_c	背靠背功率变换器直流侧电容电流
i_{eq}	背靠背功率变换器直流侧流过等效电阻的直流电流
i_{gxy}	同步旋转 xy 坐标系下网侧电流空间矢量
i_{gx}, i_{gy}	同步旋转 xy 坐标系下的变换器输出电压 x 、 y 分量
$i_{g\alpha\beta}$	两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下网侧电流空间矢量
$i_{g\alpha}, i_{g\beta}$	两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下的变换器输出电流 α 、 β 分量
i_{gdc}	网侧变换器直流侧电流
i_{ms}	定子励磁电流空间矢量
i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}	转子侧变换器交流侧三相电流
i_{rdc}	转子侧变换器直流侧电流
i_A, i_B, i_C	电机定子三相瞬时相电流
I_b	电流基准值
I_{ga}	网侧变换器输出 a 相电流相量
I_m	双馈感应电机励磁电流相量
I_{ms}	定子励磁电流空间矢量幅值
I_N	电机额定电流
I_r	折算到定子侧的转子电流相量
I_r	转子电流折算到定子后的有效值
I'_r	折算前转子电流相量
I'_r	折算前转子电流有效值
I_s	定子电流相量
I_s	定子电流的有效值
J	电机转动惯量
k	等效理想变压器匝间比
k_{opt}	功率最佳控制系数
k_{w1}	定子基波绕组系数
k_{w2}	转子基波绕组系数
K_i	PI 控制器积分调节增益
K_p	PI 控制器比例调节增益
l	磁场中运动导体的长度
L	电机电感矩阵
L_{AA}, L_{BB}, L_{CC}	定子各绕组的自感
L_{AB}, L_{AC}, L_{BA}	定子三相绕组间的互感
L_{BC}, L_{CA}, L_{CB}	定子三相绕组间的互感
L_{Aa}, L_{Ab}, L_{Ac}	定转子绕组间的互感
L_{Ba}, L_{Bb}, L_{Bc}	定转子绕组间的互感

L_{Ca}, L_{Cb}, L_{Cc}	定转子绕组间的互感
L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}	转子各绕组的自感
L_{ab}, L_{ac}, L_{ba}	转子三相绕组间的互感
L_{bc}, L_{ca}, L_{cb}	转子三相绕组间的互感
L_{aA}, L_{aB}, L_{aC}	转定子绕组间的互感
L_{bA}, L_{bB}, L_{bC}	转定子绕组间的互感
L_{cA}, L_{cB}, L_{cC}	转定子绕组间的互感
L_b	电感基准值
L_{lr}	折算到定子侧的转子绕组电感
L'_{lr}	转子绕组漏感
L_{ls}	电机定子绕组漏感
L_m	双馈感应电机互感
L_{mr}	与转子一相绕组交链的最大互感磁通对应的定子互感
L_{ms}	折算后与定子一相绕组交链的最大互感磁通对应的定子互感
L_r	转子绕组自感
L_s	定子绕组的自感
m_a	幅值调制度
m_f	频率调制度
m_{wind}	白噪声
n_1	气隙磁场同步转速
n_2	电机转速差
n_r	电机转子转速
n_p	电机极对数
n_{wt}	风轮的转速
N	线圈匝数
N_1	定子每相绕组串联匝数
N_2	转子每相绕组串联匝数
p_0	空气压强
P_d	激励盘抽取的有用输出功率
P_{d+}	激励盘前面承受到的压强
P_{d-}	激励盘后面承受到的压强
P_{conv}	电机转换功率
P_{em}	电机电磁功率
P_f	网侧变换器输出有功功率
P_{Fe}	电机铁耗
P_{FW}	风摩损耗 (包括摩擦损耗和风阻损耗)

P_g	电网侧有功功率
P_m	转子轴上输出的机械功率
P_{misc}	电机杂散损耗
P_r	双馈感应电机转子侧有功功率, 转子侧变换器有功功率
P_s	双馈感应电机定子侧有功功率
P_{scu}	电机定子铜耗
P_w	气流所具有的功率
P_{wt}	风轮从风中捕获的功率
Q_f	网侧变换器输出无功功率
Q_g	电网侧无功功率
Q_s	双馈感应电机定子侧无功功率
R	电机电阻矩阵
R_r	折算到定子侧的转子绕组电阻
R'_r	转子电阻
R_s	定子电阻
R_{wt}	风轮半径
s	转差率, 复频率
S	流体流过的截面积
S_a, S_b, S_c	开关信号
S_1	上游横截面面积
S_2	下游横截面面积
S_b	功率基准值
S_d	激励盘的面积
T_b	转矩基准值
T_e	电机电磁转矩
T_L	负载转矩
T_v	时间常数
T_{wt}	风轮的转矩
u	电机定转子瞬时相电压列矩阵
u_1	参考电压信号中的基波分量
u_3	参考电压信号中的三次谐波分量
u_a, u_b, u_c	转子三相瞬时相电压
$u_{\text{aref}}, u_{\text{bref}}, u_{\text{cref}}$	变换器输出每相的参考电压
$u_{\text{fa}}, u_{\text{fb}}, u_{\text{fc}}$	网侧变换器输出参考到电网中心点 N 的三相相电压
u_{fxy}	同步旋转 xy 坐标系下变换器输出电压空间矢量
$u_{\text{fx}}, u_{\text{fy}}$	同步旋转 xy 坐标系下变换器输出电压 x、y 分量

$u_{f\alpha\beta}$	两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下变换器输出电压空间矢量
$u_{f\alpha}, u_{f\beta}$	两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下变换器输出电压 α 、 β 分量
u_{gxy}	同步旋转 xy 坐标系下网侧电压空间矢量
u_{gx}, u_{gy}	同步旋转 xy 坐标系下变换器输出电压 x 、 y 分量
$u_{g\alpha\beta}$	两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下网侧电压空间矢量
$u_{g\alpha}, u_{g\beta}$	两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下网侧电压 α 、 β 分量
u_{ga}, u_{gb}, u_{gc}	三相电网瞬时电压
u_i	载波
u_A, u_B, u_C	定子三相瞬时相电压
U_{1m}	变换器输出相电压基波分量的幅值
U_{3m}	参考电压信号中的三次谐波分量幅值
U_{aN}	网侧变换器输出参考到 N 点的 a 相电压相量
U_b	电压基准值
U_{conv}	转换电压相量
U_{ga}	电网 a 相电压相量
U_g	电网电压的幅值
U_N	电机定子额定电压
U_r	折算到定子侧的转子电压相量
U_r	折算后的转子电压的有效值
U'_r	转子电压相量
$-U_s$	定子电压相量
U_s	定子电压的有效值
v	气流的速度、风速、导体相对于磁场旋转的相对速度
v_0	中等风速
v_1	气流上游速度
v_2	气流下游速度
v_{avg}	平均风速
v_d	激励盘处的气流速度
v_{in}	切入风速
v_{out}	切出风速
v_{turb}	紊流速度
v_{wind}	风速
X'_{lr}	转子绕组漏感抗
X_{ls}	定子漏感抗
z	气流中心水平高度；风轮轮毂高度
Z_b	阻抗基准值

a	轴流诱导因子或流入因素; 电流信号反馈系数
\mathbf{a}	单位空间矢量算子
β	风轮桨叶节距角; 转速信号反馈系数
γ_i	定子电流相量和定子磁链相量之间的相角
γ_u	定子电压相量和定子磁链相量之间的相角
δ	定子磁链相量和转子磁链相量之间的相角
η	双馈感应电机的效率
θ_s	定子磁链矢量的相位角
λ	叶尖速比
λ_{opt}	最优叶尖速比
λ_{Tmax}	转矩系数最大值对应的最大叶尖速比
ρ	流体密度
φ	功率因数角
φ_1	定子电压和定子电流相角差, 即定子侧功率因数角
φ_2	转子电压和转子电流相角差, 即转子侧功率因数角
φ_i	转子流相量和转子磁链相量之间的相角
φ_u	转子电压相量和转子磁链相量之间的相角
Φ	磁通
Φ_m	每极气隙磁通量
ζ	转子感应电动势和转子电压相量之间的相角
σ	电机漏磁系数
ψ	电机定转子绕组磁链列矩阵
ψ_a, ψ_b, ψ_c	转子三相绕组磁链
ψ_A, ψ_B, ψ_C	定子三相绕组磁链
Ψ_b	电感基准值
Ψ_r	电机转子磁链相量
Ψ_s	电机定子磁链相量
Ψ_s	定子磁链的幅值
ω_1	同步角速度, 同步角频率
ω_2	双馈感应电机转子角频率
ω_b	角频率基准值
ω_g	电网电压角频率
ω_r	双馈感应电机转子角速度
Ω_b	机械角速度基准值
Ω_r	双馈感应电机机械角速度
Ω_{wt}	风轮的机械角速度

目 录

电力电子新技术系列图书序言

前言

本书涉及的常用符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 风能开发与利用	1
1.1.1 能源危机问题	1
1.1.2 生态环境问题	1
1.1.3 风能开发与利用	2
1.2 风力发电系统技术发展	6
1.2.1 恒速恒频风力发电系统	7
1.2.2 变速恒频风力发电系统	7
1.3 双馈感应电机风力发电系统描述	12
1.3.1 双馈感应电机风力发电系统接入电网方式	12
1.3.2 双馈感应电机风力发电系统功率变换器技术	14
1.3.3 双馈感应电机技术	18
1.3.4 双馈感应电机风力发电系统典型拓扑结构及其优点	19
1.3.5 双馈感应电机风力发电系统控制技术	21
1.4 本书内容概述	24
参考文献	26
第 2 章 风力发电系统基本概念及其基础理论	30
2.1 风力发电系统的基本概念	30
2.1.1 风力发电系统基本组成	30
2.1.2 风轮结构	32
2.1.3 风轮功率控制	32
2.2 风力发电系统理论基础	34
2.2.1 风能	34
2.2.2 贝兹极限	35
2.2.3 风轮的特性系数	37
2.2.4 $C_p - \lambda$ 曲线	39
2.2.5 $C_T - \lambda$ 曲线	40
2.2.6 风轮输出功率表达式	41
2.2.7 风轮输出转矩表达式	43

2.3	变速风力发电系统功率控制分区	44
2.4	变速风力发电系统转速控制分区	46
2.4.1	变速风力发电系统最小和最大转速控制	47
2.4.2	变速风力发电系统额定功率控制	48
2.4.3	变速风力发电系统最大风能跟踪控制	49
2.5	小结	51
	参考文献	52
第3章	双馈感应电机稳态数学模型及其运行	53
3.1	双馈感应电机的结构及其优点	53
3.2	双馈感应电机基本概念	54
3.2.1	双馈感应电机的电磁力	54
3.2.2	转速差和转差率概念	55
3.2.3	双馈感应电机转子频率	56
3.2.4	双馈感应电机稳态等效电路	57
3.2.5	双馈感应电机稳态数学模型及其相量图	62
3.3	双馈感应电机的稳态运行	66
3.3.1	双馈感应电机基本有功功率流动及其平衡关系	66
3.3.2	转子铜耗和转换功率的分解	67
3.3.3	双馈感应电机有功功率计算	70
3.3.4	双馈感应电机电磁转矩计算	72
3.3.5	双馈感应电机无功功率计算	73
3.3.6	双馈感应电机有功功率、电磁转矩和转速之间的近似关系	74
3.3.7	双馈感应电机四象限运行	75
3.3.8	双馈风力发电系统变速恒频运行	78
3.3.9	双馈感应电机稳态数学模型标幺值系统	79
3.4	小结	82
	参考文献	83
第4章	双馈感应电机动态数学模型	84
4.1	三相自然静止 ABC/abc 坐标系下双馈感应电机的数学模型	84
4.2	两相正交坐标系下双馈感应电机数学模型	91
4.2.1	坐标变换	91
4.2.2	两相任意旋转 dq0 坐标系下的双馈感应电机数学模型	93
4.2.3	静止 $\alpha\beta$ 坐标系下的双馈感应电机数学模型	100
4.2.4	同步旋转 xy 坐标系下的双馈感应电机数学模型	102
4.3	双馈感应电机在正交坐标系下的状态方程	104
4.3.1	任意旋转 dq0 坐标系下双馈感应电机状态方程	104
4.3.2	两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下双馈感应电机状态方程	106
4.3.3	两相同步 xy 坐标系下双馈感应电机状态方程	107