

| 新能源科技译丛 |

双馈风电机组建模

(德) 詹恩斯·福特曼 著
张玉珍 译



中国三峡出版传媒
中国三峡出版社

新能源科技译丛

双馈风电机组建模

(德) 詹恩斯·福特曼 著

张玉珍 译

(节选版)

中国三峡出版传媒
中国三峡出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

双馈风电机组建模/ (德) 詹恩斯·福特曼 (Jens Fortmann) 著; 张玉珍译.
—北京: 中国三峡出版社, 2016. 7

书名原文: Modeling of Wind Turbines with Doubly Fed Generator System
ISBN 978 - 7 - 80223 - 941 - 8

I. ①双… II. ①詹… ②张… III. ①双馈电机 - 风力发电系统 - 系统建模
IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 247400 号

Translation from the English language edition:

Modeling of Wind Turbines with Doubly Fed Generator System

by Jens Fortmann

Copyright © Springer Vieweg | Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

Springer Vieweg is part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

北京市版权局著作权合同登记图字: 01 - 2016 - 4970

责任编辑: 彭新岸

中国三峡出版社出版发行

(北京市西城区西廊下胡同 51 号 100034)

电话: (010) 66117828 66116228

http: //www. zgsxcbs. cn

E - mail: sanxiaz@ sina. com

北京市十月印刷有限公司印刷 新华书店经销

2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 10.5

字数: 187 千字

ISBN 978 - 7 - 80223 - 941 - 8

定价: 40.00 元

致 谢

本书是我在杜伊斯堡艾森大学电力系统学院任职期间编写完成的。首先，我要感谢 Matthias Schubert、Peter Quell 和 Jörg Zeumer，他们对我这位工业博士的构思给予了充分的肯定和支持，即使在非常困难的时期，他们依然一如既往地为我提供了无私的支持。

我还要衷心地感谢杜伊斯堡艾森大学电力系统学院院长 Ing. habil István Erlich 教授。感谢他为本书提供了悉心的指导和支持，并在某些技术领域提出了具有建设性的意见和建议。

此外，还要感谢埃因霍温理工大学的 i. r. W. L Kling 教授能够担任本书的第二评审人。

我还要感谢 Senvion SE 公司和 Woodward 公司的同事，以及杜伊斯堡艾森大学电力系统学院的工作人员。感谢他们给予的鼎力支持，以及对专业探讨的积极参与。

最后，我要感谢我的妻子 Sabine 和我的儿子，感谢他们在过去几年中对我的支持和理解。

Jens Fortmann

于柏林

目 录

命名法	(VII)
1 引 言	(1)
1.1 编写目的	(1)
1.2 风电机组	(2)
1.2.1 风电机组分类	(3)
1.2.2 风电机组模型结构	(4)
1.3 本书编制目的	(6)
1.3.1 通用模型的开发	(6)
1.3.2 风电场无功功率控制设计	(6)
1.4 本书架构	(7)
2 风电机组气动模型	(9)
2.1 简介	(9)
2.2 风能捕集	(9)
2.3 风轮气动特性	(11)
2.3.1 简化表示	(12)
2.4 采用 $c_p - \lambda$ 表进行模拟	(13)
2.4.1 $c_p - \lambda$ 表的泛函表示法	(14)
2.4.2 $c_p - \lambda$ 表的多项式拟合表示法	(16)
2.5 线性气动模型	(16)
2.5.1 运行轨迹的线性化	(17)
2.5.2 稳态工作轨迹	(18)
2.5.3 偏导数 ΔP_θ : 对桨距角的功率变化	(21)
2.5.4 偏导数 $\Delta P_{\Omega,WR}$: 对叶轮转速的功率变化	(23)

双馈风电机组建模

2.5.5	模型结构	(27)
2.5.6	风速初始值计算	(27)
2.5.7	设有功率限制的风电机组的运行	(28)
2.5.8	与 $c_p - \lambda$ 表的表示法进行比较	(31)
2.5.9	与其他 $c_p - \lambda$ 表示法的比较	(32)
2.6	动态流入现象的表示	(34)
2.7	与测定结果的比较	(34)
2.8	小结	(36)
3	风电机组结构动力学模型	(39)
3.1	简介	(39)
3.2	传动链、叶片及塔架的高阶表示法	(39)
3.2.1	齿轮箱表示法	(40)
3.2.2	高阶传动链固有频率的表示	(41)
3.2.3	叶片结构的详细表示	(41)
3.2.4	塔影、转子不平衡及转子固有频率	(43)
3.2.5	生产公差影响及老化效应	(43)
3.2.6	塔架表示	(44)
3.3	传动链的单质量块和双质量块表示	(45)
3.3.1	传动链的单质量块表示	(46)
3.3.2	传动链的双质量块表示	(46)
3.3.3	单质量块表示和双质量块表示对比	(48)
3.4	小结	(51)
4	风电机组控制系统模型	(53)
4.1	简介	(53)
4.2	定速/限速风电机组的控制	(54)
4.3	变速风电机组的控制	(56)
4.3.1	低于额定风速运行	(56)
4.3.2	以额定风速及超额定风速运行	(59)
4.4	变桨距控制回路	(60)
4.4.1	桨距-转速控制器	(60)
4.4.2	桨距补偿器	(61)

4.4.3	桨距角 FRT 增大	(62)
4.4.4	桨距执行机构模型	(62)
4.4.5	桨距控制器及执行机构模型	(63)
4.5	转矩/有功功率控制回路	(63)
4.5.1	功率或转矩 PI 控制	(63)
4.5.2	传动链衰减对功率输出的影响	(65)
4.6	小 结	(67)
5	发电机与变流器	(69)
5.1	概 述	(69)
5.2	双馈发电机模型	(70)
5.2.1	不带直流母线吸能器的双馈发电机设计局限性	(70)
5.2.2	新型双馈发电机系统的升级保护	(71)
5.2.3	双馈发电机系统的基础方程	(71)
5.2.4	双馈发电机系统模型表示法	(72)
5.2.5	机侧变流器控制表示	(74)
5.2.6	双馈发电机与机侧变流器的集成模型	(76)
5.2.7	网侧变流器 (LSC) 模型表示	(77)
5.2.8	双馈发电机的聚合模型	(79)
5.2.9	参考坐标系的选择	(81)
5.2.10	模型参数的选择性识别	(82)
5.2.11	采用一阶时滞得到的双馈发电机简化聚合模型	(82)
5.3	全功率变流器模型	(83)
5.3.1	全功率变流器模型表示	(84)
5.4	模型结构	(84)
5.4.1	诺顿等效 (电流源) 的实现	(84)
5.4.2	电流限制	(86)
5.4.3	风电机组变压器	(88)
5.4.4	全功率变流器的直流母线吸能器	(88)
5.4.5	发电机与变流器模型	(89)
5.5	验证结果	(90)
5.5.1	双馈发电机式风电机组的测量与模拟	(90)

双馈风电机组建模

5.5.2	推荐双馈发电机模型与简化双馈发电机模型对比	(92)
5.5.3	全功率变流器式风电机组的实测和模拟	(93)
5.5.4	验证结果	(94)
5.6	小结	(94)
6	风电场的无功功率控制	(95)
6.1	简介	(95)
6.1.1	现有电网规范要求的局限性	(95)
6.1.2	典型的风电场配置	(95)
6.2	发电站和风电场的无功功率要求	(97)
6.2.1	正常系统条件下的无功功率控制	(97)
6.2.2	应对电压突变的快速电压控制	(97)
6.2.3	总结	(99)
6.3	同步发电机的无功电流贡献	(100)
6.3.1	详细的同步发电机模型	(100)
6.3.2	电网故障期间电流计算的简化模型	(103)
6.3.3	同步发电机无功电流增益的静态计算	(104)
6.3.4	同步发电机无功电流增益的动态模拟	(106)
6.4	风电场无功功率控制的实施	(109)
6.4.1	风电场的控制器设计	(109)
6.4.2	风电机组使用参考电压的控制结构	(111)
6.4.3	在风电机组层面使用无功功率或无功电流参考的控制结构	(115)
6.5	推荐无功功率控制结构的评估	(119)
6.5.1	风电场和同步发电机的对比	(120)
6.5.2	电网故障期间使用死区进行风电机组无功功率控制的背景	(125)
6.5.3	带死区的无功功率控制风电场的比较	(127)
6.5.4	测定值的比较	(130)
6.6	小结	(132)
7	总结和结论	(133)
7.1	通用风电机组模型的发展	(133)
7.1.1	通用空气动力学模型	(133)
7.1.2	通用机械模型	(134)

7.1.3	风电机组控制模型	(134)
7.1.4	通用双馈发电机和全功率变流器式发电机和变流器模型	(134)
7.2	风电场无功功率控制	(135)
7.2.1	电网要求分析	(135)
7.2.2	风电场无功功率控制	(136)
8	参考文献	(137)
8.1	论 文	(137)
8.2	专 著	(143)
8.3	专 利	(147)
8.4	专利申请书	(147)
A	附件	(149)
A.1	空间向量	(149)
A.1.1	控制表达	(149)
A.1.2	负序表达	(150)
A.1.3	零序分量	(150)
A.2	符号法则	(151)
A.2.1	有效值	(152)
A.2.2	对称分量	(152)
A.3	IEC 61400-21 中规定的对称分量计算	(153)
A.4	故障穿越测试程序	(154)

命名法

标 记

类 型	实 例	说 明
斜 体	I, l, x	标量物理量或数值变量
下划线	$\underline{V}, \underline{z}$	利用下划线表示相量和复数值
大 写	V, I	大写字母表示物理单位（国际单位制）中的数值
小 写	i, r, \underline{z}	小写字母表示与瞬时变量一致的常态量 [有时使用符号 $v(t)$ 、 $i(t)$ 和 $\psi(t)$ 表示其时间依赖性]
粗体小写	\mathbf{a}, \mathbf{h}	粗体小写字母表示矢量
粗体大写	\mathbf{A}, \mathbf{H}	粗体大写字母表示矩阵

通用定义

$\underline{V}, \underline{I}, \underline{\psi}$	复电压，复电流，复磁链（数量用大写字母表示，为复数时用下划线表示）
$v/\underline{v}, i/\underline{i}, \psi/\underline{\psi}$	瞬时电压、电流和磁链值的标量/复数 [小写字母表示瞬时值，有时用符号 $v(t)$ 、 $i(t)$ 、 $\psi(t)$ 表示其时间依赖性]
$\hat{v}, \hat{i}, \hat{\psi}$	正弦电压、电流和磁链的幅值

符 号

A_{WR}	风轮扫掠面积
-----------------	--------

双馈风电机组建模

E_W	风能
H	风力涡轮机旋转质量的惯性常数
D_{Shaft}	涡轮轴阻尼
J_{WR}	风力涡轮机转子的转动惯量
J_R	风力发电机转子的转动惯量
K_{DT}	假定为刚性转子的风电机组传动链刚度
K_{Shaft}	风电机组传动链的修正刚度
F_L, F_D	风轮叶片的升力和阻力
P	功率
P_W	气动功率
R_{WR}	风轮半径
Θ	桨距角
α_A	气动攻角
c_L, c_D	风轮叶片的升力和阻力系数
c_P	气动功率系数
f_{Edge}	风轮叶片的一阶摆振固有频率
$\underline{i}_S, \underline{i}_R$	定子/转子复电流
$l_{\sigma S}, l_{\sigma R}$	定子/转子漏感（标么值数，与电抗 $x_{\sigma S}$ 、 $x_{\sigma R}$ 对应）
l_m	互感系数（标么值数，与电抗 x_m 对应）
m	质量
λ	叶尖速比
$\lambda_n, \lambda_{\text{opt}}$	额定转速时的叶尖速比，最佳 c_p 值时的叶尖速比
ω_R, ω_0	转子角速度，同步速度
φ	电角度
ρ	空气密度
$\underline{\psi}_S, \underline{\psi}_R$	定子/转子复磁链
r_S, r_R	定子/转子电阻
s	感应电机滑差（小写字母）（在转移函数中，“ s ”指拉普拉斯算子）
t_{el}, t_m	电磁/机械转矩
$\underline{v}_S, \underline{v}_R$	定子/转子端复电压
$\underline{v}_{\text{DC}}$	变流器直流母线电压

v_w	风速
v_{wi}	诱导风速
v_{wr}	风轮转速引起的风速分量
v_{w1}, v_{w2}, v_{w3}	风轮平面前/中/后风速
z'	感应电机的瞬时阻抗 ($z' = r_s + j\omega_0 l'$)

上标/下标

a, b, c	三相系统的初始分量
α, β	静止参考坐标系中的直轴/交轴分量
d, q	旋转参考坐标系中的直轴/交轴分量
1, 2, 0	正/负/零序分量
P, Q	电流的有功/无功分量 (大写字母)
S, R, WR	定子, 发电机转子, 风力涡轮机转子
m, σ	互感磁场, 磁漏
\angle	用于说明参考坐标系 (一般指任意参考坐标系)
$\angle 0$	静止参考坐标系, 例如: $i_{sd}^{\angle 0}, i_{sq}^{\angle 0}, i_s^{\angle 0}$ ($i_{sd}^{\angle 0} = i_{s\alpha}, i_{sq}^{\angle 0} = i_{s\beta}$)
$\angle \omega_0$	同步旋转参考坐标系, 例如: $i_{sd}^{\angle \omega_0}, i_{sq}^{\angle \omega_0}, i_s^{\angle \omega_0}$
$\angle v_s$	直轴沿定子电压导向的参考坐标系, 例如: $i_{sq}^{\angle v_s}, i_s^{\angle v_s}$
$\angle \psi_s$	交轴沿定子磁链导向的参考坐标系, 例如: $i_{sq}^{\angle \psi_s}, i_s^{\angle \psi_s}$

缩略词

DFG	双馈发电机系统
FSC	全功率变流器系统
MSC	机侧变流器
LSC	网侧变流器
OLTC	有载分接开关
PCC	公共耦合点
WP	风电场
WT	风力涡轮机, 风力涡轮机终端

1 引言

1.1 编写目的

在大多数工业化国家，风能在能源供应中发挥着日益重要的作用，预计在未来几年内，其在发电系统中的市场份额会呈现持续增长趋势。欧盟计划到 2020 年将可再生能源在能源中的占比提升至 20%，而风力发电将在这一预期增长中占据重要位置^[1]。近年来的发展结果表明，可再生能源在某些地区的占比有望超过 20%^[2]（见图 1.1）。

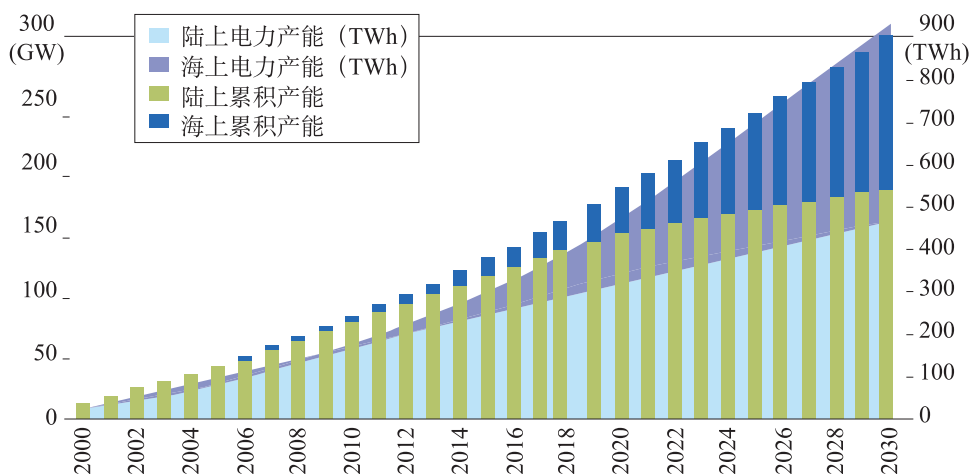


图 1.1 风力发电增长示意图

资料来源：欧洲风能协会，纯电力方案。

从电网稳定性的角度考虑，关键问题不是能源，而是电力。在具备低负荷和强风力的地区，风电产能可满足 100% 的用电量需求^[3]（见图 1.2）。现有的发电厂不仅仅供应电力，还需提供频率控制、电压控制、备用电力供应等辅助服务，并且具备在电网发生故障后的非正常运行情况下，确保电网暂时运行的能力。

一种方案是维持传统电站的运营，以便在电网出现故障时，为电网的稳定运行提供必要的无功功率。从经济角度考虑，这一方案并没有很好的可行性。

在提升可再生能源供电比重的大背景下，为了分析系统的稳定性同时制定新的

双馈风电机组建模

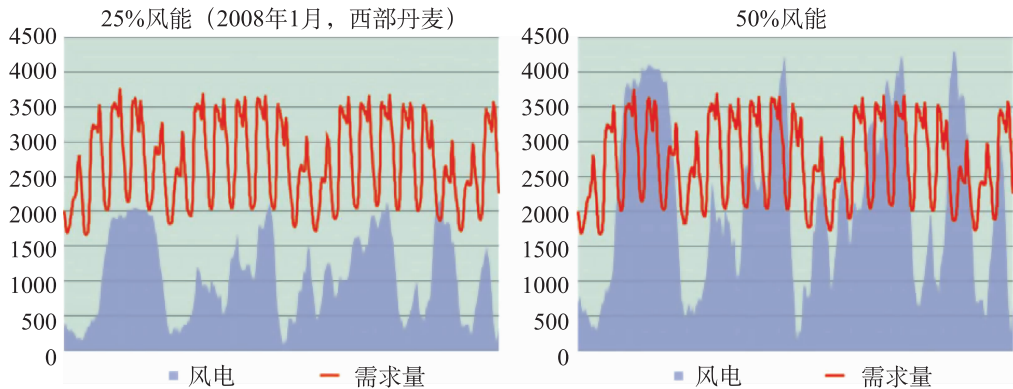


图 1.2 增长至 50% 时的风电产能与需求量的测量值与假定值

资料来源：欧盟智能生态电网^[3]。

运营策略，需要采用可靠的模型，仿真模拟风电机组对电网故障的反应情况。这些模型可广泛应用于短时电网故障研究，以及电压崩溃等可持续数分钟的故障分析。

风电机组的生产厂家通常都配备有详细的风电机组模型。但是，如果系统运营商要采用这类模型，还面临着一些困难。因为，这些模型通常都是“黑箱”式模型，电网运营商了解和认识得不够充分，出现问题或故障时只能依赖生产厂家。甚至模拟环境的改变或更新，都可能导致此类模型无法正常工作，只能由生产厂家对相关模型进行升级更新，而且很可能无法在电网运营商期望的时间内完成模型更新。

因此，有些国家的电网运营商要求生产厂家配套提供所谓的通用模型，希望对模型结构进行充分记录归档，同时确保这种模型能够适用不同的模拟环境。模型完成后，生产厂家只需进行参数设定。与生产厂家提供的特定模型相比，通用模型缺点是，可能会降低模拟准确度。通用模型开发的一个难点就是在预期准确度与模型复杂度之间找到平衡点。

开发模型的前期步骤包括：(1) 描述风力发电机部件的物理背景；(2) 分析建模的精细程度对风力发电机有功电流和无功电流（如有）输出的影响。分析表明，在许多情况下，增加模型的复杂度对于提高建模精准度并没有显著意义。

因此，本书的一个主要目的就是阐明模型说明的哪些部分是必需的，哪些部分对提高建模精准度没有帮助，甚至可以忽略。

1.2 风电机组

目前有多种风电机组概念，其主要差异是有功功率控制方式。定速风电机组采

用的最简单的控制方式是被动失速控制。风轮叶片以固定叶片桨距角方式安装。如果风速增加超过某个固定风速点时，通过气动失速，降低叶片效率，从而减少气动功率。失速控制是小型风电机组最常采用的方法，但与其他设计方法相比，这一方法的载荷更高而控制能力有限，通常限制在低于 1.3 ~ 1.5MW 的小型风电机组上应用。

控制大型风电机组气动功率最常用的方法是，一旦达到额定风速时，就将叶片向顺桨位置旋转，这被称为变桨距控制，是当前最常用的方法。与失速控制相比，这种变桨距控制更容易实现变速操作。

对失速控制的调节称为主动失速控制。与变桨距控制一样，可以转动叶片，但又有所不同，主动失速控制时，当超过额定风速时叶片远离顺桨位置，以改善失速的效果。如果使用定速机组，主动失速控制造成的气动功率波动较小，但与变速变桨距控制的风电机组相比，容易产生更高的载荷，因此只适用于小型和定速型的发电机组。

1.2.1 风电机组分类

依据与电网电力的连接情况，将风电机组进行了分类，具体信息见图 1.3。实际应用中的组合方式可能不至于此，例如，定速变桨距控制或变速主动失速控制，但不会影响机组分类的实际应用效果。

I 型机组采用鼠笼式感应发电机，以固定速度运行。通过被动气动失速或主动失速叶片控制，取得气动功率的控制。利用电容器组或其他有功功率电子装置，对无功功率进行控制。

II 型机组利用绕线式转子感应发电机，在限定工作范围内运行。利用在发电机转子电路中的受控电阻器，实现变速。一般采用桨距控制模式，限制/控制气动功率。利用电容器组或其他有功功率电子装置，对无功功率进行控制。

III 型机组利用绕线式转子感应发电机及在转子侧偏载所需的变频器进行运行。在一个宽松的转速工作范围内，实现对有功功率和无功功率的独立控制。采用变桨距控制模式，限制气动功率。因为转子和定子都可以向电网供电，这种机组称之为双馈发电机系统 (DFG)^①。

IV 型机组主要基于连接到发电机定子侧的全功率状态变频器，称之为全功率变

① 其他常见电机包括双馈感应发电机 (DIFG)、双馈异步发电机 (DFAG) 和双馈感应机 (DFIM)。

双馈风电机组建模

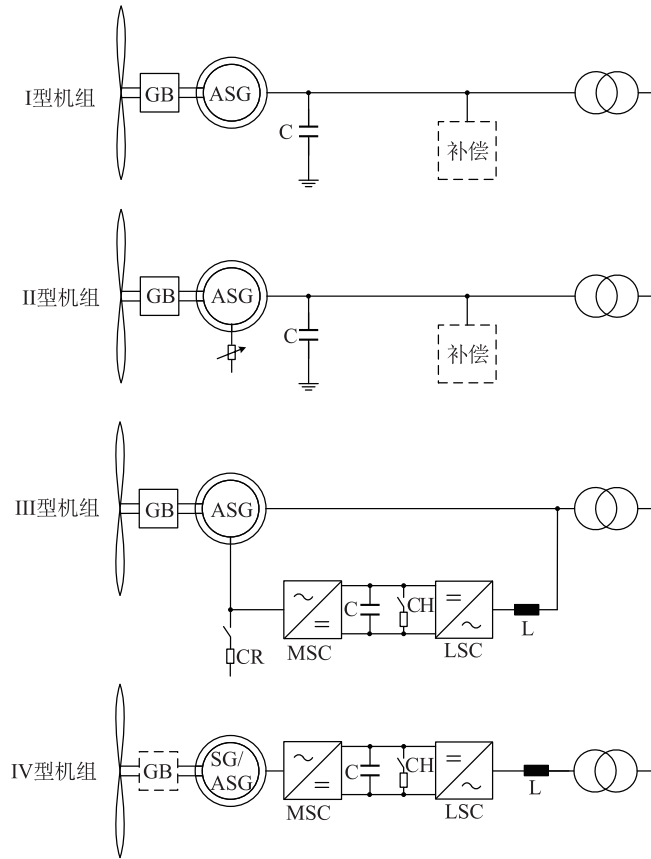


图 1.3 依据与电网连接情况进行的风电机组分类图

频器机组（FSC）。一般采用变桨距控制模式，限制气动功率。常见的发电机有绕线式转子同步发电机、永磁同步发电机和鼠笼式感应发电机。是否需要采用齿轮箱，视发电机本身的情况而定。

1.2.2 风电机组模型结构

风电机组模型的结构对模型的依赖程度非常高。进行风电机组设计和机械类型认证时，必须要有非常精细的气动模型和对应的风力模型，而电力动态模拟研究通常不需要如此精细。

图 1.4 中概述了风电机组的模型结构。这种模型结构均以文献 [4] 介绍的结构为基础。采用这种结构，各个模块的精细程度清晰可见，因此可以采用模块化的方法进行模拟仿真。在特殊条件下，单个模块可用多个更加精细的模块取代，以便研究特定作用的效果或情况。

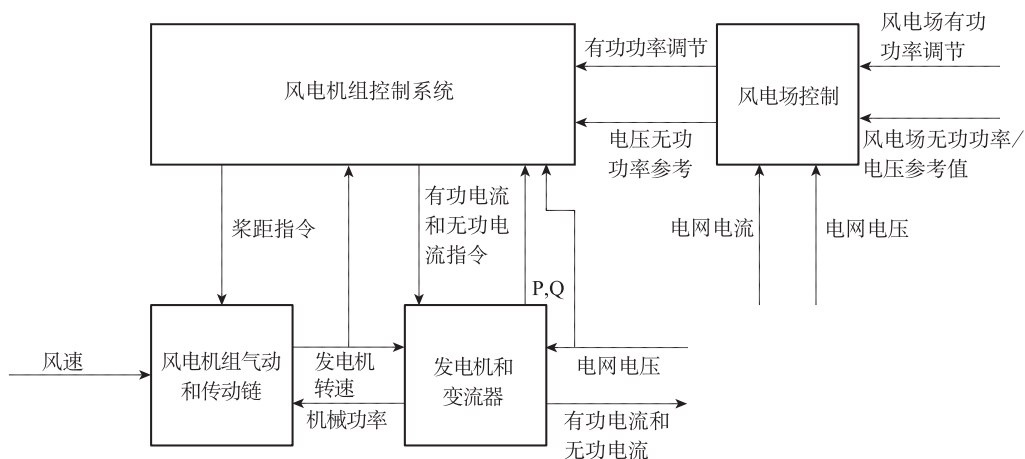


图 1.4 风电机组模型结构图

风电机组气动及传动链模块由包含变桨驱动器的风电机组的完整机械表示与用以说明风速与机械力转换的气动模型组成。机械模型可以体现出风电机组传动链的单质量块表示及风电机组的高阶机械表示。本模块输入信息包括风速、桨距角以及发电机的机械动力等参数，输出参数为电机转速。

发电机和变流器模块代表发电机和变流器（包括机侧变流器和电网侧变流器，以及直流母线吸能器）的电气模块。向发电机模型输入发电机转速、有功功率和无功功率参考值，以及电网电压等参数，便可以获得送入电网的有功功率和无功功率，以及发电机机械轴功率。

风电机组控制模块由负责控制转子转速和机组有功功率和无功功率的风电机组控制器组成。输入发电机转速、机组电压及机组一侧有功功率和无功功率输出，以及另一侧风电场控制的参照值，该风电机组控制器可输出桨距系统的参考桨距角及变流器有功电流和无功电流的参照值。在实际运行中，电网出现故障时的传动链阻尼和电流参考值计算等功能函数既可以根据变流器导出，也可以根据风电机组控制导出。将这些功能函数集中在这一控制模块上，使得模型结构更加清晰。

风电场控制模块包含风电场控制器，这个控制器既可以接收来自电网运营商的参考值，也可以将参考值发送到各个单独的风电机组。风电场控制器通常由一个有功功率控制回路和一个无功功率控制回路组成。本书只涉及电厂控制器的无功功率控制回路。电网运营商给出的外部参考值需要的有功功率限制需求，直接转发给机组，在电厂级别不再另行设置控制回路。

1.3 本书编制目的

本文重点介绍了以下两方面内容：

(1) 开发一个可用于电网模拟研究的新型风电机组通用模型。该研究以模型所有组件的物理推导为基础；

(2) 为风电机组和风电场设计一个控制系统。较之传统电场，这一控制系统提高了电压/无功功率方面的控制能力。

1.3.1 通用模型的开发

系统建模就是使用数学方法，尽可能详细地将技术可行性表达出来。通过这种方法建模，可以获得更加详细的结果。但缺点是计算要求较高，模型的执行速度缓慢，而且还需要提供足够的参数。

现有的通用模型则恰恰相反，他们使用相对简单的表示法，这种表示法不是以直接的物理背景为基础，而是使用了将该模型与测量值或更精细的模型关联起来的经验法。

本书介绍通用模型开发的主要目的：

(1) 确定风电机组动态建模所需的最低精细标准。

(2) 以风电机组物理学为基础将模型尽可能简化；在风电机组控制时，所有参数都应有一个物理等式或都应该能够从物理数量或控制参数推导得出。

(3) 为风电机组开发一个不同于生产厂家特定实施目的的通用模型，重点在于为气动系统、控制系统和发电机/变流器系统创建新的通用子模型。

(4) 开发一个能够用于双馈发电机系统（DFG）（III 型）和全功率变流器系统（FSC）（IV 型）风电机组的模型。

1.3.2 风电场无功功率控制设计

连接到高压系统的风电场中的风电机组取代了同步发电机。将来，有必要使用限制性或甚至不同步的发电模式来运作电网。新发布的电网法规已经对同步发电机的某些隐式能力给出了较为明确的规定。例如，通过提供无功电流，实现稳定电压的（固有）能力，响应快速的电压变化。但是，这种电网新法规均是以假设具有足够的同步发电基本能力作为前提条件，以确保电网的稳定运行。

较之同步发电机，基于变流器的风电机组〔配备有双馈发电机系统（DFG）或

全功率变流器系统 (FSC)], 具有更加优越的控制能力。根据同步发电机动态响应的分析以及电网需求分析, 为风电场和风电机组开发出了一种分级式的控制结构。与基于同步发电机的传统发电厂相比, 这种结构能够提升电压和无功功率的性能。

为了应对可能出现的电网故障和风电机组电压阶跃变化设定的要求, 通常对风电机组有相应的要求和规定。根据风电场控制器 (收集器) 系统、各类高压变压器以及风电机组的分布式特点, 单纯的同步发电机响应和中压级别风电场对比无法满足建模要求, 因此, 本书还介绍了高压终端的相关内容, 作为一个参考点。

本书中无功功率控制设计的主要目的:

- (1) 根据电网需求分析, 确定高压终端的动态无功电流要求;
- (2) 设计一个分级的风电场和风电机组的控制系统, 较之现有电力系统, 能够提供高压终端的改进型动态无功电流响应;
- (3) 展示为电气远近故障以及电压阶跃变化进行控制器设计的能力, 并与现有的基于同步发电机的发电厂进行比较;
- (4) 将提出的控制结构响应与风电机组和风电场无功功率控制系统的现有执行情况对比。

1.4 本书架构

第一章介绍了建模的概况及编制目的。

第二章讲述了风电机组动态模拟的气动模型。提出了通用气动模型, 该模型可替代动态仿真模型中常用的 $c_p - \lambda - \Theta$ 表。与其他现有的概念进行对比, 本模型大大降低了气动表示法的复杂性。

第三章分析了风电机组主要机型组件建模必要的精细程度。将采用更高阶机械表示法获得的动态建模精准度与传动链采用单质量块和双质量块表示法可能产生的故障误差进行了对比。

第四章介绍了初级风电机组控制建模必要的关键概念。文章对叶片桨距角和发电机转矩控制的不同方法进行过对比, 并提出了一种更为通用的方法。

第五章介绍了双馈发电机系统 (DFG) 风电机组和全功率变流器系统 (FSC) 风电机组的发电机和变流器模型。该模型由发电机、变流器硬件和变流器控制系统的物理等式推导得出。通过这种方法推导得出的通用模型要比现有通用模型的准确度更高, 结构也更加简单。双馈发电机系统 (DFG) 风电机组和全功率变流器系统 (FSC) 风电机组均可采用本建模方法。

双馈风电机组建模

第六章阐述了风电场无功功率电压控制系统的设计。根据高压终端的电网需求分析，得出了风电机组分级控制结构和两种替代式控制执行系统。另外，还将本控制结构在发生电网故障和电压阶跃变化的响应情况，与采用其他控制方法的同步发电机和风电机组进行了对比。

第七章是本书的总结部分，同时介绍了针对推荐模型和无功功率/电压控制结构的应用前景。

2 风电机组气动模型

2.1 简介

如果发生重大电网扰动，在扰动得到彻底解决或者造成断电故障前，电网动态研究的相关时域可长达 10 ~ 30s。在设定时间范围内，通常假设风速恒定不变^[4]。阵风 and 湍流风等短时风速变化，通常不会对变速风电机组的稳定性产生影响。因为影响是局部性的，平均不超出一座风电场。

在稳定性研究中，较之对每个风力发电机进行详尽表示的方法，单机聚合模型的使用范围更加广泛^{[5],[6]}。不过，2003 年发生在意大利的大面积断电和系统干扰故障^[7]，以及 2006 年发生在 UCTE 系统的类似大规模故障^[8]的分析结果均表明，相关时域可长达几分钟。针对此类情况，应建立一个气动模型，采用简单的形式对桨距角、风速和风电机组转速等气动参数的偏差量进行模拟仿真。

定速发电机组建模需要采用更为精细的气动模型^{[9],[10]}。图 1.4 列出了风电机组模型结构中的气动模型概况。

2.2 风能捕集

风能捕集理论最早由 Betz 提出^[11]。风的动能 E_w 和其功率 P_w 可通过下列两式求得：

$$E_w = \frac{1}{2} m_w v_w^2 \quad (2.1)$$

$$P_w = \dot{E}_w = \frac{1}{2} \dot{m}_w v_w^2 = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 \quad (2.2)$$

其中，空气流量 $\dot{m}_w = \rho A v_w$ ， ρ 为空气密度， A 为气流通过的面积。假设一根均质管进口处风速为 v_{w1} ，出口处风速为 v_{w3} ，两者之间的风速为 v_{w2} （见图 2.1）。

$$\rho A_1 v_{w1}^2 = \rho A_2 v_{w2}^2 = \rho A_3 v_{w3}^2 \quad (2.3)$$

假设空气密度 ρ 在管段前后为一个常数，则上式成立。可从风中捕获的能量和功率的计算公式为：

双馈风电机组建模

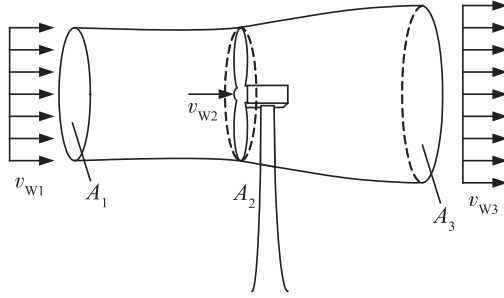


图 2.1 风力涡轮机气流图

$$E_w = \frac{1}{2} m_w (v_{w1}^2 - v_{w3}^2) \quad (2.4)$$

$$P_w = \dot{E}_w = \frac{1}{2} \dot{m}_w (v_{w1}^2 - v_{w3}^2) \quad (2.5)$$

其中，风轮平面上的空气质量流量由下式求得：

$$\dot{m}_w = \rho A_2 v_{w2} \quad (2.6)$$

利用 Froud-Rankine 定理（见文献 [12]，S. 184）可证明，风轮平面上的风速为风轮前后风速的平均值，即：

$$v_{w2} = \frac{v_{w1} + v_{w3}}{2} \quad (2.7)$$

采用从 (2.7) 式中求得的 v_{w2} ，将 (2.6) 式代入 (2.5) 式中，则可将已知风力发电机风轮平面 ($A_{WR} = A_2$ ，见图 2.5) 捕获的风能表述为：

$$P_{WR} = \underbrace{\frac{1}{2} \rho \pi R_{WR}^2 v_{w1}^3}_{\text{风能}} \underbrace{\left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_{w3}}{v_{w1}} \right) \left(1 - \left(\frac{v_{w3}}{v_{w1}} \right)^2 \right) \right]}_{\text{功率系数 } c_p} \quad (2.8)$$

其中， R_{WR} 为风轮半径。通过代换 $x = v_{w3}/v_{w1}$ ，可将 c_p 表示为 x 的函数：

$$c_p(x) = \frac{1}{2} (1 + x)(1 - x^2) \quad (2.9)$$

令函数 $c_p(x)$ 的一阶导数为 0，求得 $c_p(x)$ 取最大值时 $x = 1/3$ 。由 (2.7) 式可知，当风轮风速满足 $v_{w2} = 2/3 v_{w1}$ 条件时，可捕获最大功率值。将该结果代入 (2.8) 式中，通过 Betz 定理计算得出的最大功率系数 c_p 为：

$$c_{p, \text{Betz}} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (2.10)$$

这个常数表示可从风中捕获的最大能量。最大功率系数表示一个理论极限，与叶片数量或叶片设计等因素无关。采用现代叶片，达到最佳工作点的功率系数 c_p 约

为0.5。

2.3 风轮气动特性

为了计算风轮的气动特性，将叶片划分成不同微元 Δr 。每个微元的升力 F_L 和阻力 F_D 均可表述为诱导风速 v_{wi} 与弦长攻角 α_A 的函数。诱导风速 v_{wi} 由风轮上降低的风速 $v_{w2} = 2/3 v_{w1}$ 与风轮转速引起的风速 $v_{wr} = \Omega_{WR} R_j$ 合成（其中 R_j 为轮毂中心至微元的距离，下标采用 j 。为了方便说明，下文省略这一下标。）图 2.2 中所示攻角 α_A 由风轮前来流风速 v_{w1} 、风轮转速引起的风速 v_{wr} 、风轮平面与叶弦夹角 θ 得出。

升力 dF_L 和阻力 dF_D 计算公式如下：

$$dF_L = \frac{1}{2} \rho v_{wi}^2 c \cdot dr \cdot c_L(\alpha_A) \quad (2.11)$$

$$dF_D = \frac{1}{2} \rho v_{wi}^2 c \cdot dr \cdot c_D(\alpha_A) \quad (2.12)$$

式中， dr 为微元的径向长度， c 为微元的深度。升力系数 c_L 和阻力系数 c_D 主要取决于选定的微元，可作为攻角 α_A 的函数。

诱导风速 v_{wi} 沿风轮从轮毂向叶尖方向递增。因此，为了获得恒定的攻角，微元沿转子轴线旋转。选定的微元同样也沿叶片随诱导风速的增加而发生变化。由此产生的每个微元的面内力，是计算提取风能的基础。具体公式如下：

$$dF = \frac{\rho}{2} v_{wi}^2 c \cdot dr [c_L(\alpha_A) \sin \alpha - c_D(\alpha_A) \cos \alpha] \quad (2.13)$$

其中， α 为诱导风速与风轮平面形成的夹角（见图 2.2）。

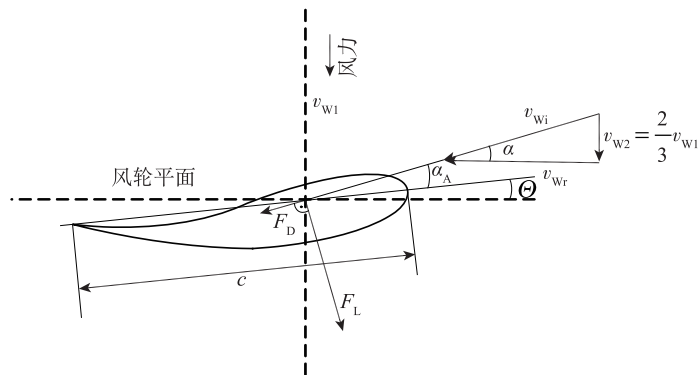


图 2.2 风轮平面内叶片的升力和阻力

双馈风电机组建模

为了实现更精确化的模拟，对风轮叶片采用的每个微元的升力和阻力进行了计算，并将其作为攻角的函数。此外，还应计算由风轮叶片的自转引起的损耗^[13]，由叶片叶尖引起的损耗^[12]，以及由选定叶片微元引起的损耗。气动学理论和叶片设计的详细分析可参考文献 [12]、[14] 和 [15]。利用上述精细化模型，可以计算得出下文列出的简化表示输入数据。

2.3.1 简化表示

转子捕获的能量值为各个微元捕获能量的总和。在稳态运行条件下，无量纲叶尖速比通过下式求得：

$$\lambda = \frac{\Omega_{WR} R_{WR}}{v_W} \quad (2.14)$$

式中， R_{WR} 为风轮半径， Ω_{WR} 为风轮转速，可用于对风电机组转子的功率系数进行简化表示，并将其作为桨距角 θ 与叶尖速比 λ 的函数。风轮产生的功率的计算公式为：

$$P_{WR} = \frac{1}{2} \rho \pi R_{WR}^2 v_W^3 \cdot c_p(\lambda, \theta) \quad (2.15)$$

其中， $c_p(\lambda, \theta)$ 通常以一个定值表的形式呈现，依据给定叶片设计的叶素理论进行精细气动学模拟计算得出。

风速 v_W 与公式 (2.3) — (2.8) 中使用的 v_{W1} 相对应，在图 2.3 中，功率系数为不同桨距角的叶尖速比 λ 的一个函数。从中可以看出，桨距角为 0° ，给定风速时，可实现最大发电能力时的最佳叶尖速比 λ_{opt} 约为 9。 λ_n 的值与额定风速时的运行情况相对应。

在实际应用过程中，会设有叶尖速度上限，起到限制噪音和机械应力的作用。同时也设有速度下限值，由于受电气系统有效运行范围的控制，可避免叶片与塔架的固有频率之间发生共振。图 2.3 中显示的黑色曲线为一种理想稳态运行轨迹，可对风力开发进行优化。 λ_{max} 为风电机组运行时，位于转子转速下限值和最低转速时的工作点。

图 2.4 显示出了各风速条件时的理想稳态运行轨迹。风速低于额定风速 (12m/s) 时，桨距角为零。风速增大时，桨距角相应增大，因此，功率受风电机组额定功率限制。桨距角为零，风速高于额定风速时，吸收风能增大，但电气系统的等级要求更高，机械设计要求也更强。但是，此类高风速的出现频率较低，一年发生不了几次。因此，从经济方面考虑，风电机组的额定风速应始终处于受限制状态。

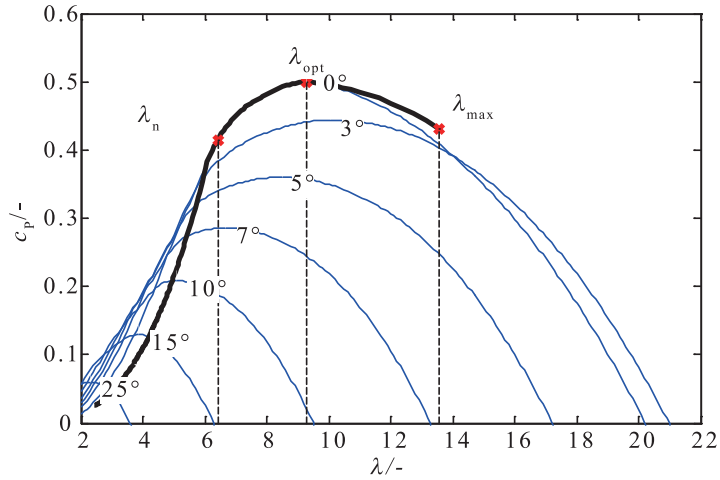


图 2.3 不同桨距角功率系数 c_p 曲线（细线）和稳态运行轨迹（粗线）

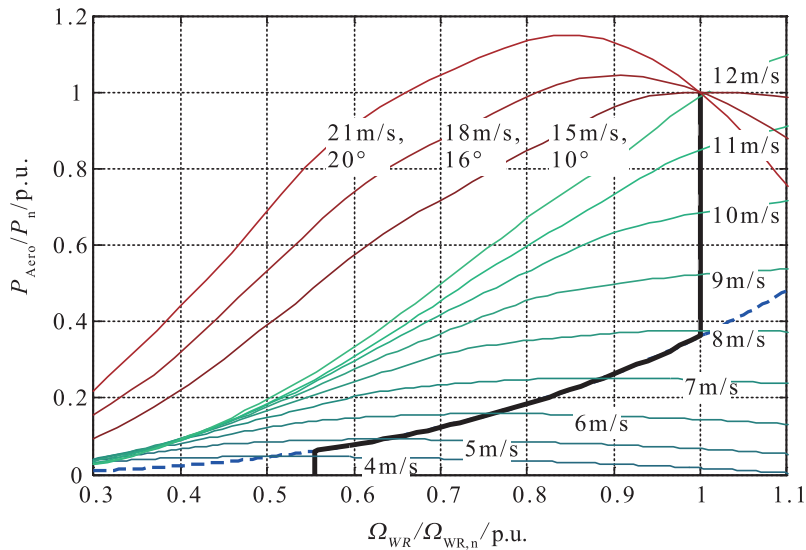


图 2.4 风力涡轮机转子功率（作为不同风速时转子转速的函数）曲线（细线）、最佳轨迹（虚线）和稳态运行轨迹（粗线）

2.4 采用 $c_p - \lambda$ 表进行模拟

功率系数 c_p 可以表示为叶尖速比 λ 与桨距角 θ 的一个函数，如图 2.5 所示。图中粗线为从叶尖高速率时的低风速至叶尖低速率时的高风速的不同风速的运行轨迹，可以从图 2.3 和图 2.4 显示的不同表示方法中体现出来。风速非常高时，功率受扩大桨距角形成的额定功率限制。而在风速极低条件下，如果转子的低转速受到限制，

双馈风电机组建模

桨距角的扩大可以提高 c_p 值，同时也能从一定程度上提高从风中捕获的功率。功率系数 c_p 表述成 λ 与 θ 的一个函数（通常称为 $c_p - \lambda$ 表），便于在更广的运行范围内计算风电机组的功率。

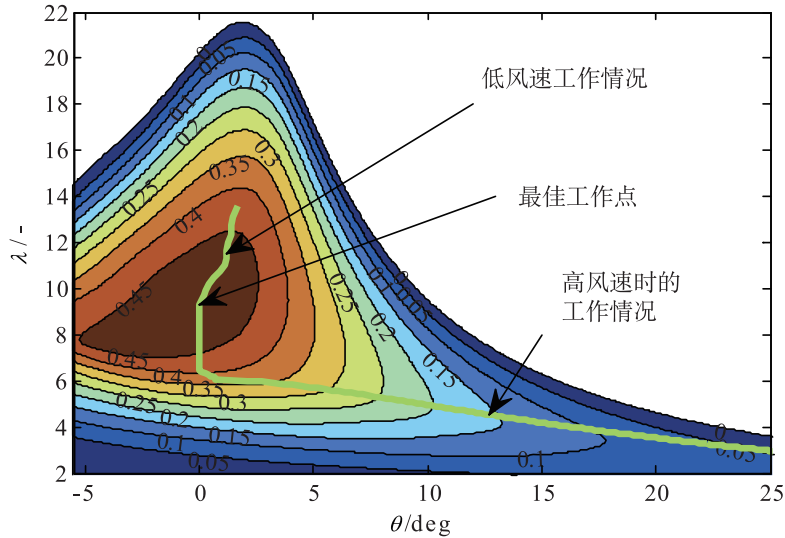


图 2.5 功率系数 c_p （作为桨距角 θ 与叶尖速比 λ 的函数）曲线

不过， $c_p - \lambda$ 表通常比较大，因此，这种方法的效率在模拟中不甚理想，尤其是要呈现出多个不同的风电机组时，难以取得理想效果。此外，在二维表中查询正确的工作点时，需要在每个模拟时步中进行补插，而产生大量时间消耗。因此，在精确度要求不是太苛刻的情况下，可以采用 c_p 的简单表示法，这也是电网研究的常规做法。

2.4.1 $c_p - \lambda$ 表的泛函表示法

许多论著已对减少 $c_p - \lambda$ 表的参数数量的可行性进行了研究。本文提出了一种泛函表示法及其修正结果，并将在第 2.5.9 节中进行分析。

2.4.1.1 Anderson 和 Bose 提出的泛函表示法

当前常用的泛函表示法最初由文献 [16] 在 1983 年提出，后经文献 [17] 按文献 [18] 提出的形式对 GROWIAN 的发展进行了修正。表示法如下：

$$c_p(\theta, \lambda) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \theta - c_4 \theta^{c_5} - c_6 \right) e^{c_7/\lambda_i} \quad (2.16)$$

式中

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + c_8 \Theta} - \frac{c_9}{\Theta^3 + 1} \quad (2.17)$$

系数

$$c_{1-9} = [0.5 \quad 116 \quad 0.4 \quad 0 \quad 2 \quad 5 \quad 21 \quad 0.08 \quad 0.035] \quad (2.18)$$

2.4.1.2 修正后的泛函表示法

与目前风电机组中使用的叶片数据进行比较后发现，(2.16) 式的精确度无法满足当前风电机组的要求，作者提供的参数集也无法与目前市场上使用的叶片进行良好拟合（见图 2.6）。将表示法中的数据与一台 2MW 风电机组的真实数据进行比较，结果表明可以通过重新调整桨距角，对表示法进行修正。

通过添加额外系数 c_{10} 并将 (2.16) 和 (2.17) 式中的 Θ 代换为 Θ' ，用下式实现这一目的：

$$\Theta' = c_{10} \Theta \quad (2.19)$$

第二步，对系数进行升级。利用非线性参数拟合度^[19]，计算出一台 2MW 风电机组的下列系数：

$$c_{1-10} = [0.297 \quad 118 \quad -0.50 \quad 0.922 \quad 1.12 \quad 3.33 \quad 15.6 \quad 0.102 \quad 0.017 \quad 0.751] \quad (2.20)$$

该修正可以明显提高通过 (2.16) 式计算真实风电机组数据求得的 $c_p - \lambda$ 数据的关联性（见图 2.7）。函数求得的结果将在第 2.5.9 节中作进一步分析。

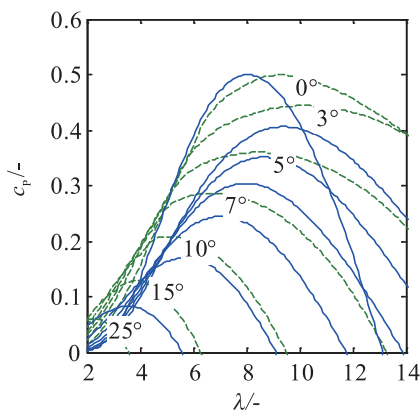


图 2.6 根据 (2.16) 式 (实线) 和参考坐标 (虚线) 得到的原始泛函表示法的 c_p 系数值

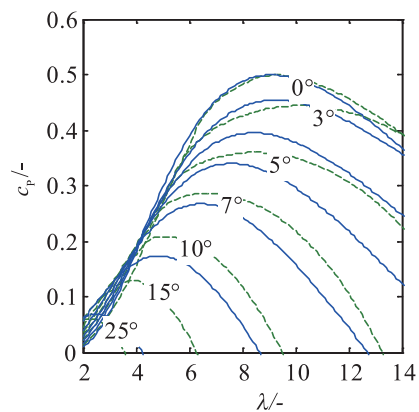


图 2.7 根据 (2.17) 式 (实线) 和参考坐标 (虚线) 得到的修正后泛函表示法的 c_p 系数值

2.4.2 $c_p - \lambda$ 表的多项式拟合表示法

多项式拟合表示法^[20]较之 $c_p - \lambda$ 表，可以减少使用的参数数量。

$$c_p(\Theta, \lambda) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{i,j} \Theta^i \lambda^j \quad (2.21)$$

其中，系数 $\alpha_{i,j}$ 和多项式顺序由 n 和 m 给出。

偶数参量可以改进函数外边界的表达力度，运用 16 个系数的 4×4 表示法，可以很好地表示出 $\lambda = [2; 13]$ 和 $\Theta = [0^\circ; 25^\circ]$ 的限定范围。

$$[\alpha_{i,j}] = \begin{bmatrix} 8.4018e-008 & -8.2359e-007 & 9.8303e-006 & -1.8864e-005 \\ -8.4245e-006 & 7.5152e-005 & -5.8513e-004 & 7.3378e-004 \\ 7.2467e-005 & -1.0032e-003 & 1.5504e-003 & 1.1218e-002 \\ 5.8657e-005 & -9.0477e-003 & 1.6776e-001 & -3.3920e-001 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

图 2.8 展示了多项式表示法与一台 2MW 风电机组的 $c_p - \lambda$ 曲线对比情况。这一函数结果将在第 2.5.9 节中作进一步分析。

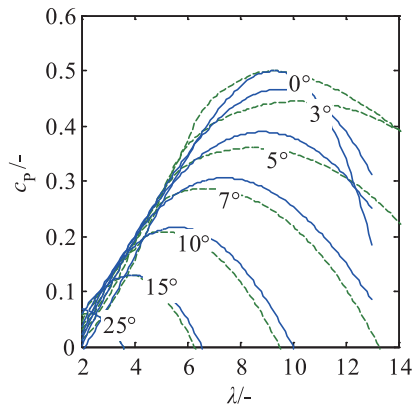


图 2.8 三阶多项式气动模型（实线）与参考坐标（虚线）的 c_p 系数值曲线图

2.5 线性气动模型

气动模型的共性：

- 需要大量参数，有些属于机密性数据，不易获取；
- 无法深入了解模型的物理关系；
- 属于高度非线性模型，只能通过迭代方法计算模型初始值。

线性气动力学模型的潜在优势：

- 减少了参数数量；
- 利用能够显示明确物理关系的参数；
- 直接计算初始值；
- 减少了模拟工作量。

文献 [4] 提出了一种线性气动模型方法，将求得的结果与文献 [21] 中的精细化模型的模拟结果进行了比较。但是，该模型的使用存在一定的限制，其中传输系统的故障解决时间不能超过 150 ~ 200ms，并且需假定风速恒定^[22]。

改进模型纳入了转子转速变化及风速变化的影响因素，因此电网故障分析模型的精确度得以提升，适应范围也相应扩大，可应用于较长相关时域的类型电压崩溃/电压骤降等事件^[7]的分析。

2.5.1 运行轨迹的线性化

(2.15) 式表述的风电机组的气动功率通过 (2.14) 式代入叶尖速比 λ 求得，是自变量桨距角 Θ 、转子转速 Ω_{WR} 和风速 v_w 的一个函数。

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots \quad (2.23)$$

利用一个带三个变量的且限于一阶导数的泰勒级数函数 $f(x)$ ，得出下式：

$$\begin{aligned} f(x, y, z) \approx \\ f(a, b, c) + f'_x(a, b, c)(x-a) + f'_y(a, b, c)(y-b) + f'_z(a, b, c)(z-c) \end{aligned} \quad (2.24)$$

其中， $f(a, b, c)$ 是指一个计算点，用 f'_x 、 f'_y 、 f'_z 分别代表对应点的 X 、 Y 和 Z 轴的偏导数。

由 Θ_0 、 $\Omega_{WR,0}$ 和 $v_{w,0}$ 确定的已知工作点的气动功率可改写为：

$$\begin{aligned} P_{Aero}^*(\Theta, \Omega_{WR}, v_w) \approx P_{Aero}^*(\Theta_0, \Omega_{WR,0}, v_{w,0}) \\ + \frac{\partial P_{Aero}^*}{\partial \Theta} \Big|_{(\Theta_0, \Omega_{WR,0}, v_{w,0})} \Delta \Theta + \frac{\partial P_{Aero}^*}{\partial \Omega_{WR}} \Big|_{(\Theta_0, \Omega_{WR,0}, v_{w,0})} \Delta \omega + \frac{\partial P_{Aero}^*}{\partial v_w} \Big|_{(\Theta_0, \Omega_{WR,0}, v_{w,0})} \Delta v_w \end{aligned} \quad (2.25)$$

从该工作点求得的偏差值通过 $\Delta \Theta = \Theta_0 - \Theta$ 、 $\Delta \Omega_{WR} = \Omega_{WR,0} - \Omega_{WR}$ 和 $\Delta v_w = v_{w,0} - v_w$ 进行说明^①。

① 请注意，较之 (2.23) 式， Δ 在文中使用了不同的符号约定。

双馈风电机组建模

在模拟过程中，通常假定风速为常量（见第 2.5 节），因此，风力偏导数可以忽略不计。气动功率的算法可以进行如下简化：

$$P_{\text{Aero}} = P_0 + \Delta P_{\theta} + \Delta P_{\Omega_{\text{WR}}} \quad (2.26)$$

注：在下文中，分析偏导数和数值偏导数均使用了算子 ∂ 。

用泰勒公式 (2.25) 和其简化公式 (2.26) 表述的气动功率函数，说明了由 P_0 和导数项 ΔP_{θ} 和 $\Delta P_{\Omega_{\text{WR}}}$ 给出的某个工作点附近的功率值。通过图 2.3—2.5 可知，可以通过轨迹对风电机组的稳态工作点进行说明，扩大每个轨迹工作点的泰勒级数气动功率函数在 (2.25) 式和 (2.26) 式中的说明范围，阐明稳态工作点和对应导数。

2.5.2 稳态工作轨迹

通过 $P_0 = P_{\text{Aero}}(\theta_0, \Omega_{\text{WR},0}, v_{w,0})$ 确定 (2.26) 式中的稳态工作点，其中 P_0 为三个自变量的函数。但是，图 2.3—2.5 显示了与 Ω_{WR} 、 θ 和 v_w 三个数相关联的稳态工作轨迹。变量 P 、 Ω_{WR} 和 θ 可以表示为风速 v_w 的函数，将个工作轨迹定义为风速的一个函数，并以此为依据，将 (2.26) 式拓展成一个在稳态工作轨迹的任意工作点都有效的函数。

2.5.2.1 稳态桨距角的计算

风电机组低于额定风速运行时，桨距角 θ 等于 $0^{\text{①}}$ 。图 2.9 展示了不同风速情况（风电机组大部分的工作范围）下的静态桨距角 θ_{Stdy} 。利用文献 [22] 中提出的二次曲线拟合度，可以算出桨距角，并将其作为风速的函数。

利用单个参数（风速为额定风速两倍时的桨距角 $\theta_{v_{w2}}$ ）可以通过下式获得近似值。

$$\theta_{\text{Stdy}}(v_w^*) = \theta_{v_{w2}} \frac{4}{3} \left(1 - \frac{1}{v_w^{*2}} \right) \quad (2.27)$$

其中， $v_w^* = v_w/v_{w,n}$ 为风速（按标么值）。

由此可知，带 2 个或 3 个参数的高阶拟合度，不会提升表示法结果的精确度，在靠近额定风速的相关区域尤其如此。

2.5.2.2 稳态转子转速的计算

如图 2.4 所示，风电机组仅可在有限工作范围内以最佳 c_p 值运行。随着风速加

① 低风速时桨距角的增加造成的功率增量，在大多数模拟工作中可以忽略不计，见图 2.3。

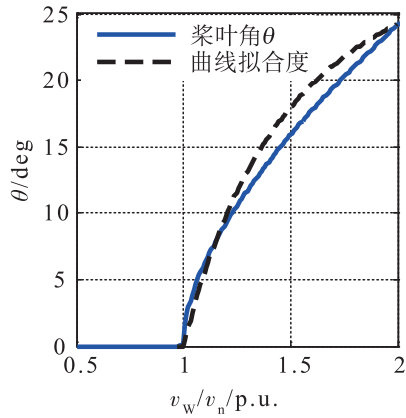


图 2.9 稳态叶片轨迹（作为风速与利用单个参数所获得近似值的一个函数）

快，因为叶轮转速已经达到了允许限值，叶尖速比会降低。参照 (2.14) 式，稳态风速与转子转速之间的稳态关系可由下式计算得出（按标么值）：

$$\omega_{WR,Stdy}(v_w^*) = \frac{\lambda_{opt} v_{W,n}}{R_{WR} \Omega_{WR,n}} v_w^* = k_{\omega v} v_w^* \quad (2.28)$$

叶轮转速范围受风电机组限值的限制。稳态风电机组转速作为风速的一个函数，见图 2.10。

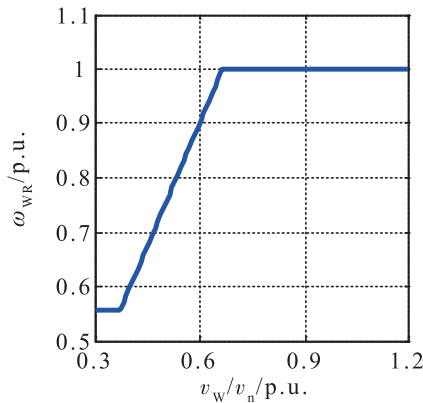


图 2.10 稳态风电机组转子转速（作为风速的一个函数）

2.5.2.3 稳态风电机组功率

从图 2.4 中可以看出，稳态气动功率可以分三步进行模拟和评估：

(1) 风电机组运行速度低于额定叶轮转速时，风电机组在最佳工作点运行，并假定 c_p 为常数。从图 2.3 可知，叶尖速比 λ 应为常数。根据 (2.28) 式得出的结果，叶轮转速确定为风速的一个函数。等式 (2.15) 为叶轮转速达到其额定转速之

双馈风电机组建模

前，风速与功率在常数 c_p 时的立方关系。在这种情况下，桨距角保持不变。

(2) 在额定转子转速条件下，风速达到额定风速时，可以观测到风速与功率之间的近似线性关系 ($P = av_w + b$) (见图 2.11 和文献 [22])。叶轮转速与桨距角均为恒定值，保持不变。

(3) 运行速度高于额定风速时，假设气动功率为常数 (1 标么值)。

因此，可以将稳态工作轨迹的气动功率 P_{Stdy} 模拟为风速的一个函数。功率曲线的立体部分 (1) 和线性部分 (2) 的过渡区域，可以用额定转子转速到达的工作点的功率进行说明，见图 2.4。针对不同类型的风电机组，值的设定也不同，如果值的设定过高，模拟近似值的精确度就会下降。

选择功率值为 $P = 0.3$ 标么值，确保曲线的立体部分依据风电机组类型变化。过渡点可以表述为风速的一个函数，作为达到功率输出值 $P = 0.3$ 标么值时的风速，是说明稳态气动功率必要的唯一参数 (称为 v_{WP03})。

气动功率可表述为下式：

$$P_{\text{Stdy}}(v_w^*) = \begin{cases} \frac{0.3}{v_{\text{WP03}}^3} v_w^{*3} & v_{\text{Wmin}} < v_w^* < v_{\text{WP03}} \\ 1 + (v_w^* - 1) \frac{0.7}{1 - v_{\text{WP03}}} & v_{\text{WP03}} < v_w^* < 1 \\ 1 & v_w^* \geq 1 \end{cases} \quad (2.29)$$

其中， v_{Wmin}^* 为风电机组运行必需的最低风速，所有数据均采用标么值单位，且 v_n 为额定风速。利用 (2.29) 式的近似值法，计算得出气动功率，具体见图 2.11。

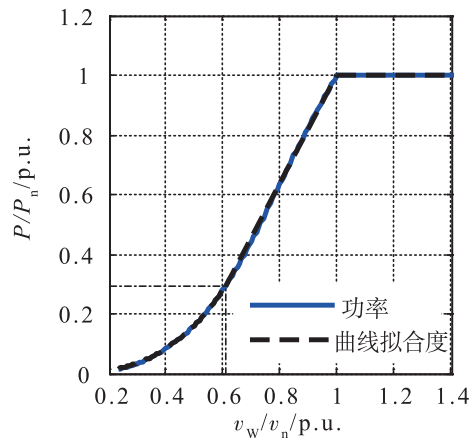


图 2.11 稳态风电机组气动功率 (作为风速与利用单个参数获得的近似值的一个函数) 曲线

2.5.3 偏导数 ΔP_θ : 对桨距角的功率变化

(2.26) 式中的偏导数 ΔP_θ 应说明桨距角变化对稳态工作轨迹确定的工作点附近的功率输出的影响。计算的出发点是将气动功率表述为桨距角与风速的一个函数，可利用图 2.5 所示的叶片数据，通过 (2.15) 式计算得出。图 2.12 显示的是 2MW 风电机组的气动功率值，图中粗实线为表示稳态条件下桨距角、风速和气动功率间关系的稳态工作轨迹。运行超过额定风速时，桨距角增大，将气动功率限制在 1 标幺值。

根据图 2.12，计算得出了 (2.25) 式中针对气动功率的对应桨距角偏导数 $\partial P / \partial \theta$ (见图 2.13)。粗实线即图 2.12 中显示的稳态工作轨迹。

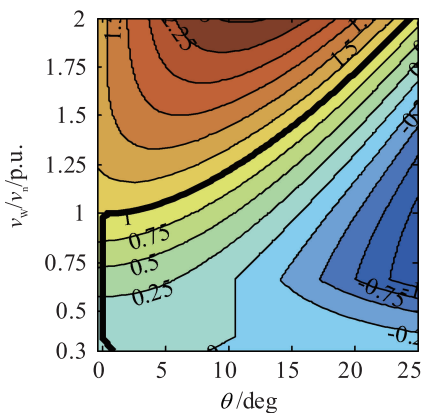


图 2.12 风电机组转子气动功率（按标幺值）等值线图（作为桨距角 θ 与风速 v_w 的一个函数）。风电机组沿粗实线表示的稳态工作轨迹工作

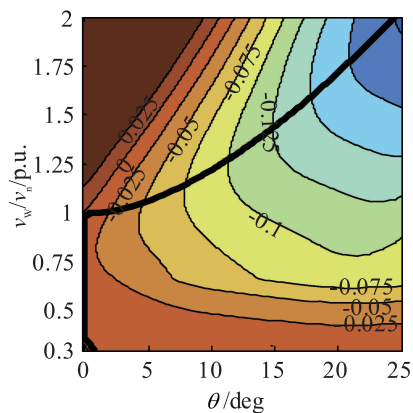


图 2.13 偏导数 $\partial P / \partial \theta$ （按标幺值）等值线图（作为桨距角 θ 与风速 v_w 的一个函数）。粗实线代表风电机组的稳态工作轨迹，与图 2.12 中的粗实线相对应

未经中国三峡出版传媒有限公司的书面许可，任何媒体及个人不得转载、摘编该节选内容。违者将被依法追究其侵权责任。

如有需要请购买原版书。



三峡小微



中国三峡出版传媒



中国三峡出版社