

| 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

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. zgscbs. 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

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	$\boldsymbol{a}, \boldsymbol{h}$	粗体小写字母表示矢量
粗体大写	$\boldsymbol{A}, \boldsymbol{H}$	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
$F_{\text{L}}, F_{\text{D}}$	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
$c_{\text{L}}, c_{\text{D}}$	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
$\underline{i}_{\text{S}}, \underline{i}_{\text{R}}$	定子/转子复电流
$l_{\sigma\text{S}}, l_{\sigma\text{R}}$	定子/转子漏感（标么值数，与电抗 $x_{\sigma\text{S}}, x_{\sigma\text{R}}$ 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
$\lambda_{\text{n}}, \lambda_{\text{opt}}$	额定转速时的叶尖速比，最佳 c_{p} 值时的叶尖速比
$\omega_{\text{R}}, \omega_0$	转子角速度，同步速度
φ	电角度
ρ	空气密度
$\underline{\psi}_{\text{S}}, \underline{\psi}_{\text{R}}$	定子/转子复磁链
$r_{\text{S}}, r_{\text{R}}$	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）
$t_{\text{el}}, t_{\text{m}}$	电磁/机械转矩
$\underline{v}_{\text{S}}, \underline{v}_{\text{R}}$	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: $i_{Sd}^{\angle 0}, i_{Sq}^{\angle 0}, \underline{i}_S^{\angle 0}$ ($i_{Sd}^{\angle 0} = i_{s\alpha}, i_{Sq}^{\angle 0} = i_{s\beta}$)
$\angle \omega_0$	同步旋转参考坐标系, 例如: $i_{Sd}^{\angle \omega_0}, i_{Sq}^{\angle \omega_0}, \underline{i}_S^{\angle \omega_0}$
$\angle v_s$	直轴沿定子电压导向的参考坐标系, 例如: $i_{Sq}^{\angle v_s}, \underline{i}_S^{\angle v_s}$
$\angle \psi_s$	交轴沿定子磁链导向的参考坐标系, 例如: $i_{Sq}^{\angle \psi_s}, \underline{i}_S^{\angle \psi_s}$

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

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	新型双馈发电机电系统的升级保护	(71)
5.2.3	双馈发电机电系统的基础方程	(71)
5.2.4	双馈发电机电系统模型表示法	(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)

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）。

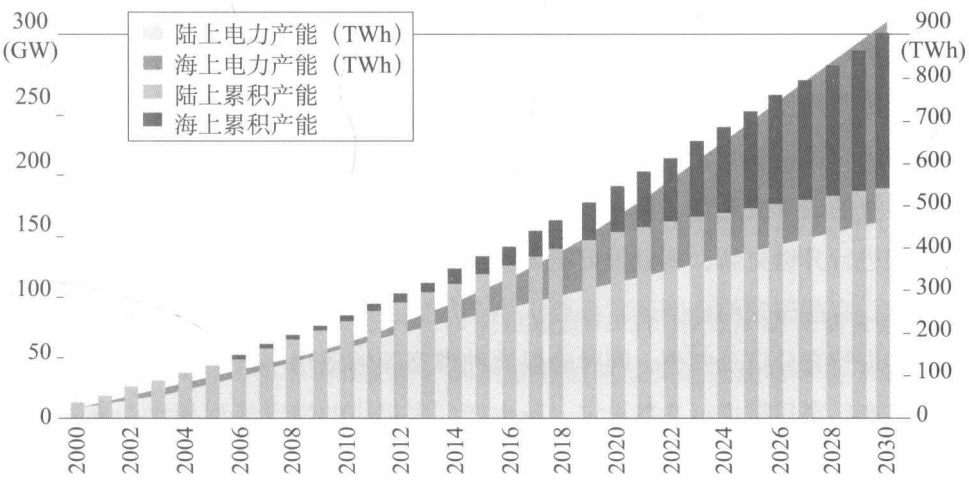


图 1.1 风力发电增长示意图

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

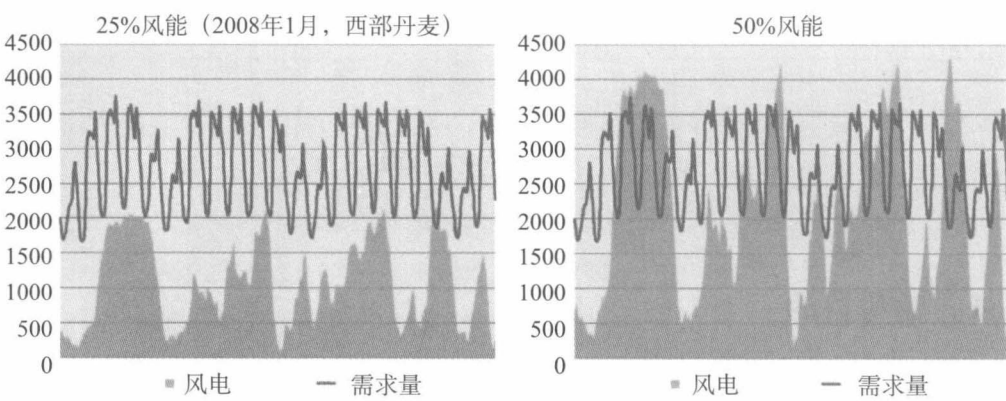


图 1.2 增长至 50% 时的风电产能与需求量的测量值与假定值

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)。

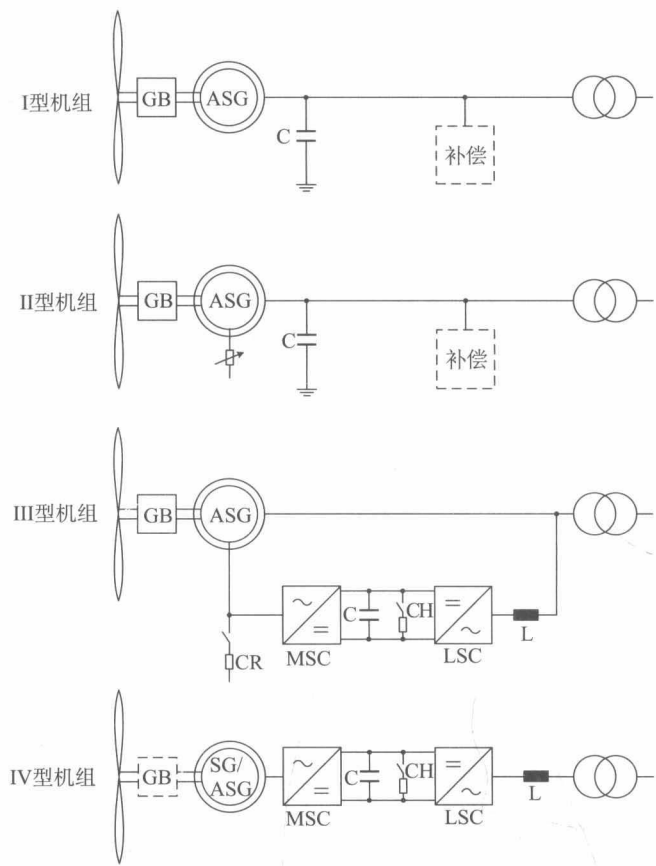


图 1.3 依据与电网连接情况进行的风电机组分类图

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。

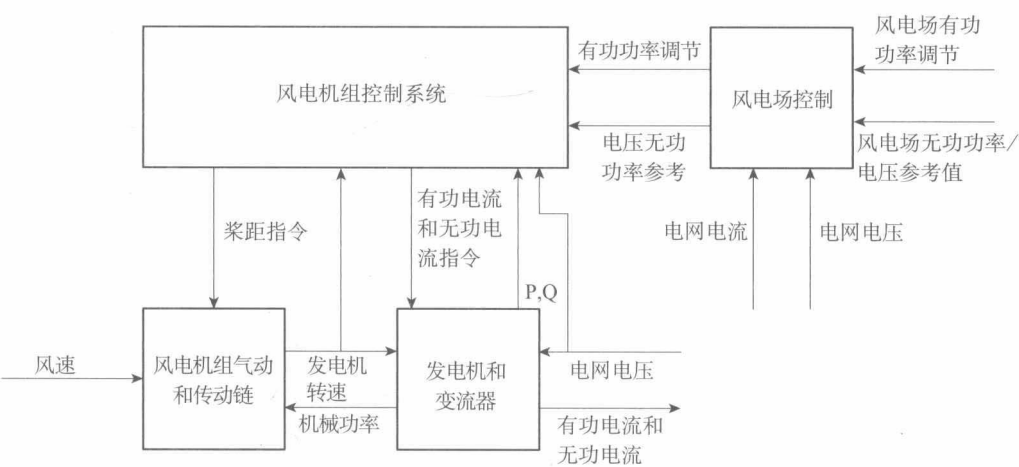


图 1.4 风电机组模型结构图

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。