国际电气工程先进技术译丛

Springer

风力发电并网及其动态影响

Grid Integration and Dynamic Impact of Wind Energy

（美） Vijay Vittal
Raja Ayyanar 著

周京华 陈亚爱 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

关于本书

本书密切关注了风电渗透率上升对风力发电系统性能的影响，主要介绍了各类风力发电技术的重要特征，电力电子变换器及相关控制方法的详细情况，并针对风力发电机对电网系统动态性能的影响进行了综合讨论。

本书适合于从事风力发电系统和风力发电并网技术研究的科研工作人员或企业研发人员，同时可作为该专业的高校本科生、研究生和教师的参考用书。



国际电气工程先进技术译丛

风力发电并网及其动态影响

（美）Vijay Vittal
Raja Ayyanar 著
周京华　陈亚爱　译

机械工业出版社

本书密切关注了风力发电渗透率上升对风力发电系统性能的影响，主要介绍了各类风力发电技术的重要特征、电力电子变换器及相关控制方法，并针对风力发电机对电网系统动态性能的影响进行了综合讨论。

本书适合从事风力发电系统研究的科研工作人员和企业研发人员阅读，同时可作为新能源专业的高年级本科生、研究生和教师的参考用书。

Translation from English language edition: Grid Integration and Dynamic Impact of Wind Energy by Vijay Vittal and Raja Ayyanar.

Copyright © 2012 Springer London.

Springer London is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社独家出版。

版权所有，侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2013-4242 号。

图书在版编目（CIP）数据

风力发电并网及其动态影响/（美）维塔（Vittal, V.），（美）安亚娜（Ayyanar, R.）著；周京华，陈亚爱译．—北京：机械工业出版社，2014.6

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Grid integration and dynamic impact of wind energy

ISBN 978-7-111-46658-1

Ⅰ.①风… Ⅱ.①维…②安…③周…④陈… Ⅲ.①风力发电系统－电力系统运行－研究 Ⅳ.①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 093096 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：江婧婧 责任编辑：江婧婧 版式设计：赵颖喆

责任校对：肖 琳 封面设计：马精明 责任印制：杨 曦

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 7.5 印张 · 139 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-46658-1

定价：38.00 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
社服务中心：(010)88361066	教 材 网：http://www.cmpedu.com
销 售 一 部：(010)68326294	机工官网：http://www.cmpbook.com
销 售 二 部：(010)88379649	机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：(010)88379203	**封面无防伪标均为盗版**

译 者 序

风能是自然产生的取之不尽、用之不竭而又不会产生任何污染的可再生资源。它是空气流动作功而提供给人类的一种可利用的能量，因此被人们广泛应用。由于科学水平的进步，以及风能自身清洁、环保的特点，风能被应用到发电行业。

过去的十年里，基于风能的可再生能源发电量的增长速度越来越快，这主要得益于变速风力发电机在技术上的不断进步，其中包括双馈异步风力发电机和配有全功率变换器的永磁同步风力发电机。风电技术的发展直接推动了全球范围内与电网互联的风电场数量的增长；同时，也激发了人们研究、分析风力发电在电力系统中渗透率升高对互联电网的稳态性能和动态性能的影响的兴趣。

本书对风力发电并网系统关键技术及其电力系统的动态影响进行了详细的介绍，主要内容包括电力电子技术基础、几力并网电力电子变换器拓扑结构、风力发电机控制技术、风力发电机动态模型、双馈异步风力发电机渗透率上升对系统动态性能的影响，双馈异步风力发电机对系统频率响应的影响，重点关注了风力发电在电力系统中渗透率升高对互联电网的稳态性能和动态性能的影响。

本书适合从事风力发电系统研究的科研工作人员和企业研发人员阅读，同时可作为新能源专业的高年级本科生、研究生和教师的参考用书。

本书第 1～3 章由陈亚爱教授翻译，第 4～6 章由周京华教授翻译。全书由周京华教授统稿。

本书的翻译及出版得到 2014 年北京市自然科学基金项目、2012 年北京市优秀人才项目、2009 年北京市科技新星计划资助。

由于时间仓促加之经验不足，书中译文难免存在不妥之处，请读者谅解，并提出宝贵意见。

译者

2014 年 4 月

原书前言

在过去的十年里，基于风能的可再生能源发电经历了一个重要的复苏历程。这主要得益于变速风力发电机在技术上的不断进步，其中包括双馈异步风力发电机和配有全功率变换器的永磁同步风力发电机。这些风力发电机的有效利用在很大程度上是由于电力电子变换器技术的发展。这些变换器不仅可以实现发电机的变速运行，还能提供更多的电网支撑功能。风电技术的发展直接推动了全球范围内与电网互联的风电场数量的增长；同时，也激发了人们研究、分析风力发电在电力系统中渗透率升高对互联电网的稳态和动态性能的影响的兴趣。理解、深入分析这种影响的必要性促使人们密切关注不同类型的风力发电机模型的发展，并把这些模型纳入到分析工具中。

现代风力发电机是非常复杂的设备。考察它们对系统的影响，必须仔细研究风力发电机及相关的控制方法。为了达到这一目标，需要更加深入地理解与风力发电机相关的关键技术内容，包括风力发电机的机械和动态特性、发电机的电气和动态特性、电力电子变换器的特性及相关的控制方法。

本书作者与他的同事、学生密切关注了风电渗透率上升对系统性能的影响。其他研究人员也对这一领域做出了重大的贡献。我们编写本书的目的在于将以下内容呈献给读者：各类风力发电技术的重要特征、电力电子变换器及相关控制方法的详细情况、风力发电机对电网系统动态性能影响的综合讨论。我们希望本书能为读者理解风电技术及其对系统性能的影响打下良好的基础。最后，在此衷心感谢研究生们对我们的帮助，尤其感谢 Youyuan Jiang、Siddharth Kulasekaran 和 Durga Gautam 为我们提供了大量的插图和仿真结果，感谢 Sunanda Vittal 为本书所做的认真仔细的校对工作。

Vijay Vittal
Raja Ayyanar
美国亚利桑那州坦佩市，2012 年 2 月

目　　录

译者序
原书前言

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　风力发电概述 …… 1
1.2　风力发电机技术 …… 3
1.2.1　Ⅰ型风力发电机 …… 3
1.2.2　Ⅱ型风力发电机 …… 4
1.2.3　Ⅲ型风力发电机 …… 4
1.2.4　Ⅳ型风力发电机 …… 5
1.3　Ⅲ型风力发电机分析及建模 …… 6
1.3.1　次同步转速下双馈异步发电机作发电机运行 …… 7
1.3.2　超同步转速下双馈异步发电机作发电机运行 …… 8
1.3.3　风力发电机功率模型 …… 8
1.3.4　机械传动链模型 …… 10
1.3.5　双馈异步发电机模型 …… 10
1.4　Ⅲ型风力发电机的控制 …… 12

第 2 章　电力电子技术基础 …… 14

2.1　电力电子变换系统的组成 …… 14
2.1.1　反馈控制器 …… 15
2.1.2　脉宽调制器 …… 15
2.1.3　电力电子变换器电路拓扑 …… 16
2.1.4　具有外部电力系统和负载的直流环节与接口 …… 17
2.2　基本功率转换单元分析 …… 17
2.2.1　开关信号和占空比 …… 18
2.2.2　基本功率转换单元的 PWM …… 19
2.2.3　变换器输出电流和直流环节电流分析 …… 22
2.2.4　基本功率转换单元的平均模型 …… 23
2.3　单端输出变换器 …… 24
2.4　双端输出变换器 …… 29

2.4.1 双端输出变换器的平均模型 …… 29
2.4.2 单极性 PWM …… 29
2.4.3 单极性 PWM 的高频纹波 …… 32
2.5 适用于三相应用的三端输出变换器 …… 35
2.6 其他变换器拓扑结构和 PWM 方法 …… 39

第 3 章 用于风力发电并网的电力电子变换器拓扑结构 …… 41

3.1 变速运行和电网支持要求 …… 41
3.2 用于双馈异步发电机的电力电子变换器 …… 42
3.2.1 变换器的控制目标 …… 43
3.2.2 电力电子变换器的额定值 …… 43
3.2.3 电网故障期间的保护 …… 44
3.3 用于Ⅳ型风力发电机的电力电子变换器 …… 45
3.3.1 电网故障时的性能和其他电网支持特性 …… 46
3.4 其他新型电力电子变换器的拓扑结构 …… 47

第 4 章 风力发电机控制技术 …… 49

4.1 双馈异步风力发电机控制系统概述 …… 49
4.2 双馈异步发电机单相等效电路的稳态分析 …… 50
4.2.1 单相等效电路的建立过程 …… 50
4.2.2 不同转子电压的角速度-转矩特性 …… 54
4.2.3 不同风速和转子转速下的稳态分析 …… 55
4.3 双馈异步发电机的动态分析和控制器设计 …… 62
4.3.1 转矩或有功功率和无功功率的参考值 …… 63
4.3.2 电网电压定向控制 …… 65
4.3.3 转子 d 轴和 q 轴的电流参考值 …… 66
4.3.4 转子电流回路的控制器设计 …… 67
4.3.5 网侧变换器的控制 …… 68
4.3.6 仿真结果 …… 72

第 5 章 风力发电机动态模型 …… 76

5.1 引言 …… 76
5.2 用于功率分析的风力发电机建模 …… 76
5.3 用于瞬态稳定性分析的风力发电机建模 …… 78
5.3.1 空气动力学模型 …… 79
5.3.2 机械控制和主轴动态特性 …… 80

5.3.3　发电机特性 …… 80
5.3.4　电气控制 …… 81
5.3.5　Ⅲ型风力发电机的通用模型 …… 81
5.4　风电场的表示 …… 84

第 6 章　双馈异步风力发电机渗透率上升对系统动态性能的影响 …… 88

6.1　引言 …… 88
6.2　渗透率上升对转子角度稳定性的影响 …… 88
6.2.1　对小信号转子角度稳定性的影响 …… 88
6.2.2　小信号稳定性问题的公式化表示 …… 89
6.2.3　特征值灵敏度 …… 91
6.2.4　对小信号转子角度稳定性的影响——实例分析 …… 92
6.2.5　对瞬态转子角度稳定性的影响 …… 95
6.2.6　对瞬态转子角度稳定性的影响——实例分析 …… 96
6.3　渗透率上升对电压响应和稳定性的影响 …… 99
6.3.1　双馈异步风力发电机的运行模式 …… 99
6.3.2　电压穿越 …… 100
6.3.3　双馈异步发电机的功率容量曲线 …… 100
6.3.4　双馈异步风力发电机对稳态电压稳定性的影响 …… 102
6.4　双馈异步风力发电机对系统频率响应的影响 …… 103
6.4.1　双馈异步风力发电机提供的频率支持 …… 104
6.4.2　桨距补偿调整 …… 105
6.4.3　最大功率序列调整 …… 105
6.4.4　辅助惯性控制效果示例 …… 105

参考文献 …… 109

第1章　绪　　论

1.1　风力发电概述

在过去的几年里，风力发电的发展速度在美国和世界各地都持续超过了预期目标，打破了一连串的年度记录。仅2009年美国新增风电装机容量就达10GW，比2008年的风电装机容量提高了20%，占2009年新增总装机容量的39%[1]。如图1-1[1]所示为将实际风电装机容量与2030年风电可满足全国20%用电需求的发展规划[2]叠加在一起的对比图。由图1-1可见，过去四年里的实际增量和2010～2012年的年度计划增量均远远超过了发展计划。

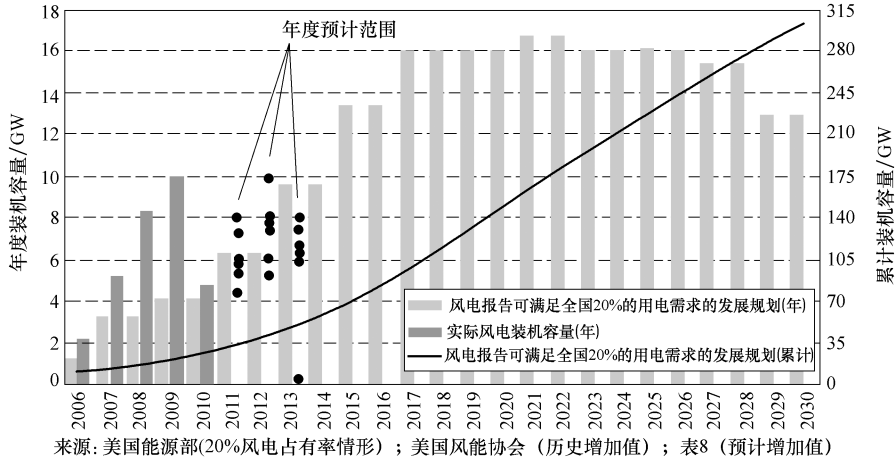


图1-1　实际风电装机容量与2030年计划风电占有率达到20%设定的发展规划的对比[1]

增长速度尽管在2010年如预期的那样有所放缓，但预计2011年和2012年的风电装机容量将再度飙升。在北美电力可靠性公司（North American Reliability Corporation，简称NARC）发布的未来10年规划里，计划新增风电装机容量达到了210GW[3]，再次超过了之前计划的增量——2030年新增总量300GW，渗透率达到20%。即使是现阶段，一些地区已经达到了很高的风电渗透率，如爱荷华州总发电量的19.7%来自于风能，其系统内风电渗透率超过10%的公共电网估计多达9个。来自各类国际标准化组织（International Organ-

ization for Standardization，ISO）的互联队列和公共电网的聚合数据也证实了风电的重要性及其持续增长的事实。2009 年 33 个互联队列的发电资源对比结果如图 1-2 所示，可以看出，来自风能的发电量远远超过了其他发电资源[1]。

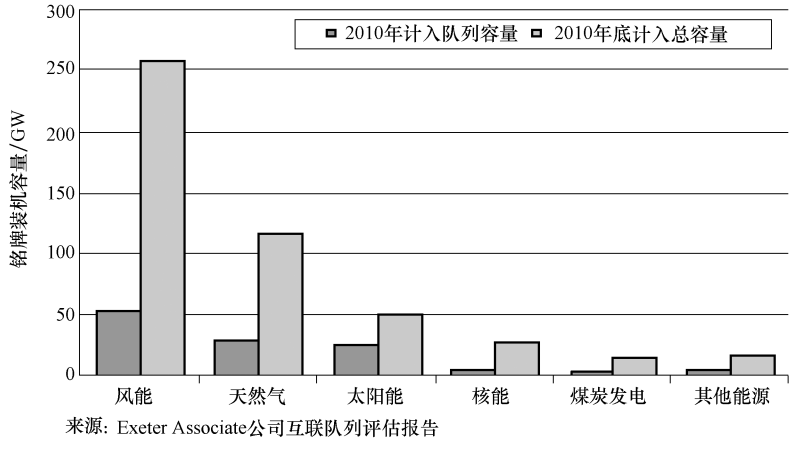


图 1-2　2009 年 33 个不同互联队列显示的包括风能、太阳能等不同发电能源对应的装机容量[1]

一些国家正在积极采取措施大力开拓风电市场。根据全球风能协会（Global Wind Energy Council，简称 GWEC）发布的消息，截至 2009 年底，全球风电装机容量的总和超过了 157.9GW，增加了 31%[4]。中国在 2008 年的总装机容量为 12.1GW，2009 年增加了 100% 以上，达到了 25.1GW（新增装机容量为 13GW），这使其成为新型风电装置的最大市场。2009 年美国新增近 10GW 的风电装机容量，占全球风电总装机容量的 22.3%，在风电领域内仍领先于其他国家。紧随其后的国家分别为中国、德国、西班牙，它们的风电装机容量分别为 25.8GW、25.77GW 和 19.14GW。鉴于风电渗透率在美国和世界范围内的其他国家都在不断增高，深入研究高风电渗透率对电力系统的性能及可靠性的影响具有非常重要的意义。

大规模的风能资源已被接入到大容量输电系统中，成了风能输送至负载的主要手段。大多数现有的风力发电机都采用异步发电机进行发电。与传统的同步发电机相比，这意味着转子的磁通矢量不再取决于转子的物理位置，也不会存在同步转矩角[5]。风力发电机的这一特殊性，再加上风力资源的可变性，使得理解、评价风电在电力系统中渗透率的升高对系统性能的影响更加复杂，需要考虑的因素更多。

按照风力发电机采用的技术，可将其分为定速或变速两类。定速风力发电机直接与电网系统连接在一起，变速风力发电机则通过电力电子设备与电网相连。变速风力发电机具有机械结构应力较小、噪声低、可实现有功功率和无功功率独立控制等优点。目前风力发电获得大范围的应用，这在很大程度上取决于额定容量为 1.5 ~5MW 大型风力机的出现。现代大型风力机均采用变速发电技术，通常都包含变桨距控制系统和一台双馈异步发电机（Doubly Fed Induction Generator，简称 DFIG）或永磁同步发电机（Perma-

nent Magnet Synchronous Generator，简称 PMSG）。目前，风力机制造商们为了制造出更大的风力机，使得双馈异步发电机技术得到了更为广泛的应用。这一技术也是 2005 年以后建立的大多数风电场所采用的主流技术。采用双馈异步发电机技术的投资成本相对较低，但这种技术也存在一些不足：电能质量不够理想；齿轮箱削弱了系统的可靠性；就运行频率分别为 50Hz 和 60Hz 的系统而言，对齿轮箱和发电机的要求有所不同。

1.2　风力发电机技术

目前有 4 种风力发电机技术实现了商业化应用，且能满足公共电网在设备尺寸方面的要求。它们分别为：

1. 配有笼型异步发电机（Squirrel Cage Induction Generator，简称 SCIG）的定速风力发电机——Ⅰ型。

2. 配有绕线转子异步发电机（Wound Rotor Induction Generator，简称 WRIG）的风力发电机，可通过外接电阻在一定范围内调速——Ⅱ型。

3. 变速双馈异步发电机——Ⅲ型。

4. 配有全功率变换器的变速永磁同步发电机或异步发电机（笼型或绕线转子）——Ⅳ型。

下面将简要介绍这些风力发电机技术。基于双馈异步发电机的Ⅲ型风力发电技术是当前最为主流的技术。本章第 1.3 节将介绍与这种发电机相关的模型和控制技术。

1.2.1　Ⅰ型风力发电机

Ⅰ型风力发电机原理图如图 1-3 所示。这种发电方式直接将异步发电机与电网连接在一起。风力发电机的固定转速取决于齿轮箱和异步发电机的极对数。

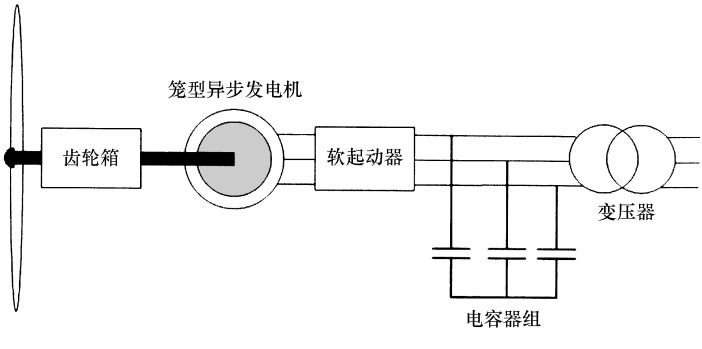


图 1-3　Ⅰ型风力发电机的原理图

Ⅰ型风力发电机是造价最低的风力机，结构中不包含任何滑环装置，具有良好的坚固性和可靠性。然而，由于这种发电机以固定转速运行，通常无法达到最佳的能量获取效果。另外，还需要电容器组提供无功功率支持。为了弥补无法获取最佳能量的不足，

丹麦制造商对其结构进行了改进[6]。采用的能量获取改进方案为：用两台额定值和极对数不同的发电机，或用一台具有两套独立绕组、能获得不同额定值和极对数的发电机。这种配置不仅能改善能量获取效果，还能减少低风速下的磁化损失。

1.2.2　Ⅱ型风力发电机

Ⅱ型风力发电机通常由一台绕线转子异步发电机组成，且转子绕组上串联外置的可变电阻，这种电阻可在一定范围内实现调速[7]。改变外置电阻的阻值即可改变发电机转矩—角速度曲线。这种可变电阻通常安装在发电机的轴上，并通过光信号进行控制。因此，这种配置不需要滑环装置。外置电阻受占空比可变的直流斩波电路发出的脉冲信号控制，不需要使用任何运动部件。这种配置可在 10% 左右的范围内实现发电机转速的有限调节，可保证风速变化时发电机输出功率的恒定，风力发电机始终以高于同步转速的可变滑差运行。该配置显然不如双馈异步发电机那样灵活，但其成本非常低。这种风力发电机仍不具备独立控制无功功率的能力，还需借助外接电容器组来实现。另外，外置电阻的引入也增加了转子损耗，且随着滑差的增加而增大，转速变化范围也受到了限制。Ⅱ型风力发电机原理图如图 1-4 所示。

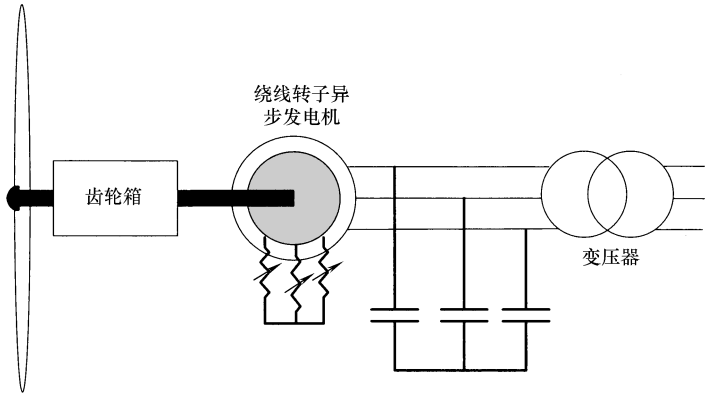


图 1-4　Ⅱ型风力发电机的原理图

1.2.3　Ⅲ型风力发电机

Ⅲ型风力发电机具有转速可变的特点，由一台风力机和一台双馈异步发电机组成。双馈异步发电机的定子直接与电网连在一起，转子绕组通过滑环与转子侧变换器连在一起。转子侧变换器通过直流母线电容器与网侧变换器相连，后者通过变压器与电网相连。通过变频控制转子电路即可实现对发电机转速的控制。在这种设计方案里，发电机的总输出功率为定子和转子（通过变换器）输入至电网的功率之和。当发电机运行于超同步转速时，发电机的转子通过变换器将功率输送至电网。然而，当发电机运行于次同步转速时，发电机的转子将通过变换器吸收电网内的有功功率。发电机刚好运行于同步转速时，转子与电网之间不存在任何功率交换。

大多数基于Ⅲ型设计方案的风力发电系统都能通过发电机定子向电网提供无功功率支持——改变转子 d 轴的励磁信号即可达到这个目的。利用矢量控制可将转子电流分解为 d 轴（产生磁通）分量和 q 轴（产生转矩）分量，这样就可单独控制这两个分量。控制 d 轴分量可实现发电机功率因数的调节，控制 q 轴分量可实现发电机的电磁转矩的控制，使其维持在一个固定值上。设计网侧变换器时，采用四象限电压源型变换器是提供无功功率的另一种方法，此时它将起到静止同步补偿器（Static Synchronous Compensator，简称 STATCOM）的作用，根据实际需要提供或吸收无功功率。无论风力发电机处于运行状态还是已经脱离于整个系统，该装置均可正常运行。但是，获得这种附加功能的同时也会产生额外的费用。Ⅲ型风力发电机的原理图如图 1-5 所示。

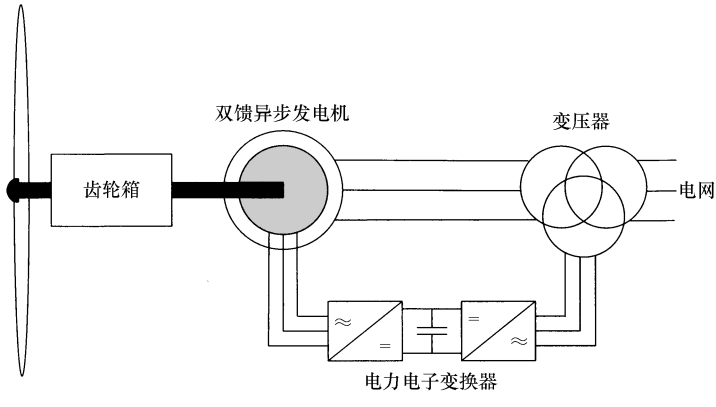


图 1-5　Ⅲ型风力发电机的原理图

Ⅲ型风力发电机通常被称为双馈异步风力发电机。这种发电机是现阶段世界各地的风电场中最常用的风力发电机类型。本章的后续内容将进一步详细讨论这种发电机的建模。

1.2.4　Ⅳ型风力发电机

Ⅳ型风力发电机配有一套全功率变换器，它将发电机的定子与电网连在了一起，也属于可变速发电机。系统采用的发电机可以是笼型或绕线转子异步发电机，也可以是永磁同步发电机。这些类型的发电机转速范围较宽，能够实现最大功率获取。另外，这类发电机均可实现有功和无功功率的独立控制。一般而言，由于Ⅳ型发电机系统配有两台功率变换器来处理全额定功率，通常造价较高。如图 1-6 所示为Ⅳ型风力发电机的原理图。这类风力发电机正逐步获得广泛的认可。由于它们能在很宽的风速范围内正常运行，且属于无齿轮箱设计，预计它们将成为未来风电场中的标准设备。

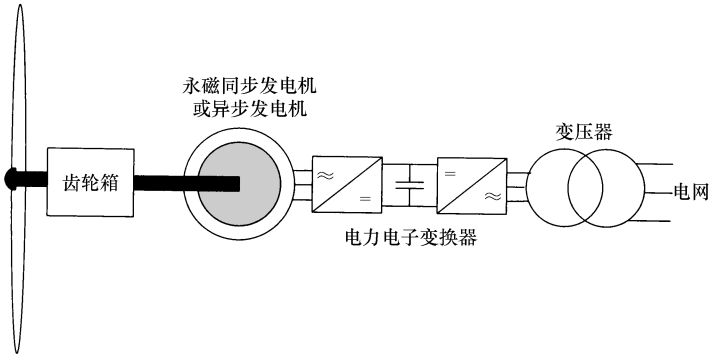


图 1-6　Ⅳ型风力发电机的原理图

1.3　Ⅲ型风力发电机分析及建模

目前，Ⅲ型风力发电机是该领域内使用最广泛的一项技术，在国际范围内也得到了认可。基于此，本节将详细介绍其功能、数学建模、控制方法，并在时域内对其机电模型进行仿真分析。

对于变速范围局限于同步转速 ±30% 的情况，基于双馈异步发电机的Ⅲ型风力发电机是一种可行的变速配置方案。限制转速变化范围的主要因素在于电力电子变换器仅能处理总功率的 20% ~30%。与Ⅳ型风力发电机中的全功率变换器相比，这一特性降低了电力电子变换器的损耗，相应的变换器成本也较低。如图 1-5 所示，Ⅲ型发电机组中双馈异步发电机的定子电路直接与电网相连，转子则通过滑环与一套背靠背变换器（由两台变换器组成，分别为转子侧变换器和网侧变换器）连在一起。两台变换器之间是直流储能电容器，该电容器可有效限制直流环节内的电压变化。采用网侧变换器控制直流环节电压的同时，可通过转子侧变换器对双馈异步发电机的转矩或转速、定子侧的功率因数进行控制。双馈异步发电机的转矩—角速度特性如图 1-7 所示[8]。

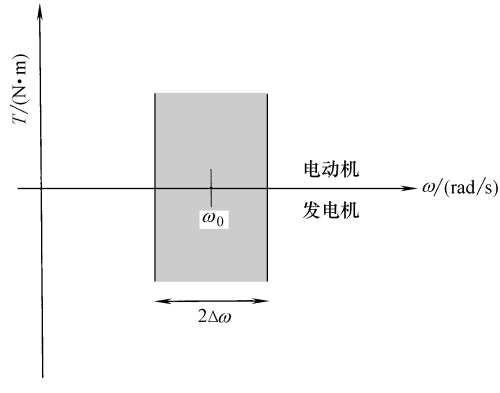


图 1-7　双馈异步发电机的转矩—角速度特性

由图 1-7 可见，双馈异步发电机在次同步转速和超同步转速下均可作为电动机或发电机运行。以双馈异步发电机作发电机运行为例，如图 1-8 和 1.9 所示分别为次同步转速和超同步转速下功率在整个发电系统内的流动情况。

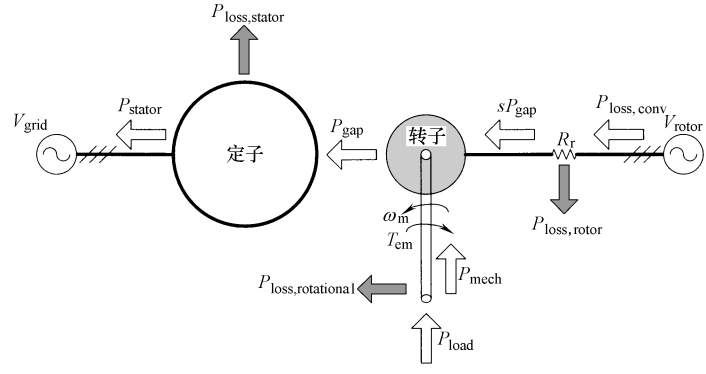


图 1-8　次同步转速下双馈异步发电机的功率交换示意图

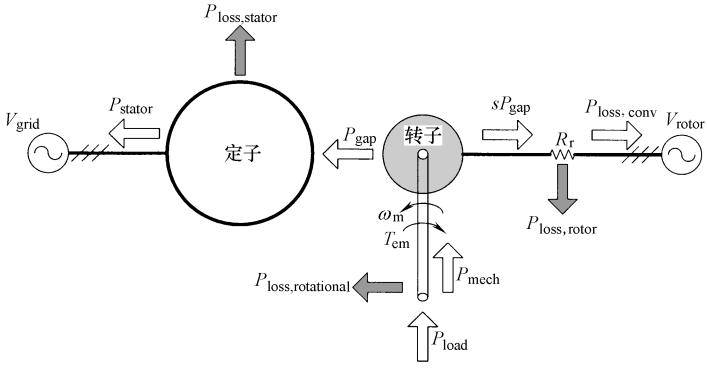


图 1-9　超同步转速下双馈异步发电机的功率交换示意图

1.3.1　次同步转速下双馈异步发电机作发电机运行

双馈异步发电机在次同步转速下作发电机运行时，功率的交换情况及相关损耗如图 1-8 所示。发电机的转差率为正值，即

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \tag{1-1}$$

式中，n_r 为转子转速（r/min）；n_s 为同步转速（r/min），$n_s = 60f/p$；f 为定子电流的频率；p 为极对数。

转子转速可表示为

$$n_r = (1 - s)n_s = \left(1 - \frac{f_r}{f}\right)n_s \tag{1-2}$$

式中，f_r 为转子电流的频率。

电磁转矩 T_{em} 为

$$T_{em} = \frac{P_{gap}}{\omega_{syn}} \tag{1-3}$$

式中，P_{gap}为通过气隙传递的功率；$\omega_{syn}=2\pi f$为同步角频率（rad/s）。

机械功率为

$$P_{mech}=(1-s)P_{gap}=\left(1-\frac{f_r}{f}\right)P_{gap} \tag{1-4}$$

1.3.2　超同步转速下双馈异步发电机作发电机运行

图 1-9 给出了双馈异步发电机在超同步转速下作发电机运行时的功率交换情况。

这种情况下，按照式（1-1）计算出的转差率 s 为负值。转子转速 n_r 可表示为

$$n_r=(1-s)n_s=\left(1+\frac{f_r}{f}\right)n_s \tag{1-5}$$

机械功率 P_{mech}可表示为

$$P_{mech}=(1-s)P_{gap}=\left(1+\frac{f_r}{f}\right)P_{gap} \tag{1-6}$$

1.3.3　风力机功率模型

风力机从风能中获取的机械功率是一个复杂的函数，变量包括风速、叶片桨距角和轴转速。可通过代数方程描述获取的功率，即

$$P_m=\frac{1}{2}\rho v_w^3\pi r^2C_p(\lambda) \tag{1-7}$$

式中，P_m 为从风能中获取的机械功率（W）；ρ 为空气密度（kg/m^3）；r 为风轮叶片的扫掠半径（m）；v_w 为风速（m/s）；C_p 为功率系数；λ 为叶尖速比，即风力机叶尖速度与风速之比，则有

$$\lambda=\frac{\omega_t r}{v_w} \tag{1-8}$$

式中，ω_t 为机械转子角速度（rad/s）。

由式（1-7）可以看出，空气密度、风速和风轮叶片的扫掠半径都不是受控量。因此，在风能能量输出最大化的过程中，唯一可控的参数就是功率系数 C_p。按照贝兹理论（Betz's law），其最大理论值为 0.593。

对于给定的叶片桨距角和旋转速度，功率系数 C_p 与风速之间为非线性关系。C_p 通常会在特定的 λ 下达到峰值，然后在更高的叶尖速比下再次下降至 0。C_p 的特性由制造商确定，不同制造商生产的风力机的这一特性都不相同。C_p 与 λ 之间的典型曲线如图 1-10 所示。图 1-10 中还给出了 C_p 随叶片桨距角调整的变化情况。

低风速至中等风速条件下，可控制桨距角以确保风力机运行于最佳状态。高风速条件下，系统将调整桨距角以放弃部分空气动能。设计风力机时，通常认为风速在 10～15m/s 范围内变化时最有可能从风能中获取最多的能量。风速超过 15m/s 时，大多数风力机都会放弃部分能量；风速超过 20～25m/s 时，它们会完全切出。Ⅲ型风力发电机组通常用动态叶片变桨距控制技术达到这一目的。这样就可根据风速来控制风力机的转速，进而实现输出电功率的最大化，可在很宽的功率范围内实现最大功率点运行。图 1-11以风力机转速和风速的函数的形式给出了一组典型的输出功率—速度曲线。图 1-11 中输出电功率和风力机转速均使用各自的额定值进行了标幺化处理。