双馈风力发电机并网稳定性分析与对策

王　亮◎ 著

STABILITY ANALYSIS AND SOLUTIONS FOR GRID-CONNECTED DFIG

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

双馈风力发电机并网稳定性分析与对策

王　亮　著

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书主要研究双馈风力发电机并网发电后与电力系统交互时存在的稳定性问题，在分析发生稳定性事故机理的基础上，探讨了可应用于实际工程的解决方案。本书的主要内容共分为6章，包括：风力发电背景知识介绍、双馈风力发电机组的基本控制策略、电力系统稳定性的基本分析方法、双馈风力发电机与线路固定串补间的次同步振荡、双馈风力发电机的电压穿越问题和双馈风力发电机参与系统的频率调整等。

本书可供从事电力系统稳定性和风力发电领域的研究人员、工程技术人员及研究生参考。

版权专有　侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

双馈风力发电机并网稳定性分析与对策/王亮著. —北京：北京理工大学出版社，2021.3

ISBN 978-7-5682-9622-9

Ⅰ.①双…　Ⅱ.①王…　Ⅲ.①双馈电机-风力发电机-稳定性-研究　Ⅳ.①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字（2021）第043341号

出版发行／北京理工大学出版社有限责任公司
社　　址／北京市海淀区中关村南大街5号
邮　　编／100081
电　　话／（010）68914775（总编室）
（010）82562903（教材售后服务热线）
（010）68948351（其他图书服务热线）
网　　址／http：//www.bitpress.com.cn
经　　销／全国各地新华书店
印　　刷／
开　　本／787毫米×1092毫米　1/16
印　　张／16　　责任编辑／张鑫星
字　　数／279千字　　文案编辑／张鑫星
版　　次／2021年3月第1版　2021年3月第1次印刷　　责任校对／周瑞红
定　　价／68.00元　　责任印制／李志强

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

前　言

随着环境保护意识的提高和技术的快速进步，可再生能源发电得到了迅猛发展。其中，由于技术成熟和具备一定的经济性，风力发电的占比越来越高。随着并网容量的逐步提高，风力发电的问题开始显现出来。本书主要针对双馈风力发电机组在大规模并网发电过程中存在的次同步振荡、电压穿越和频率调整问题进行分析，研究了相应的对策。

双馈风力发电机的次同步振荡问题和电压穿越问题已经在实际电力系统中多次出现，严重威胁着系统的稳定运行和设备安全；同时，高风电渗透率降低了系统的惯性时间常数和一次调频能力，不利于系统的频率稳定性。本书对这些问题的发生机理进行了深入的研究，在此基础上给出了相应的对策，并进行了仿真验证。本书内容可供电力系统稳定性与风力发电技术的工程技术人员、科研人员和从事相关研究的研究生参考。

本书共分为六章，第 1 章主要介绍了风力发电的背景知识，第 2 章详细阐述了双馈风力发电机组的基本工作原理和控制策略，第 3 章介绍了电力系统稳定性的基础理论和分析方法，第 4 章分析了双馈风力发电机与线路固定串补间次同步振荡的发生机理并提供了几种可行的抑制策略，第 5 章研究了双馈风力发电机的低电压穿越和高电压穿越问题，第 6 章对双馈风力发电机参与系统频率调整的问题进行了研究。

在本书的撰写过程中得到了清华大学姜齐荣老师、东南大学洪芦城老师和清华大学王玉芝博士的帮助，研究生杨洪泰、李宁、韩培东、李良和李子颜等参与了本书部分内容的撰写，在此一并表示感谢。

本书的部分研究工作得到了国家自然科学基金－智能电网联合基金集成项目（U1866601）的资助。

由于时间和水平有限，对本书中存在的错误和不妥之处，恳请广大读者不吝指正。

著　者

目　录

第 1 章　绪论 …… 001

1.1　能源与风能的利用 …… 002
1.1.1　能源利用的发展现状 …… 002
1.1.2　风能的利用与风力发电 …… 004
1.2　风力发电机组的类型与发展趋势 …… 005
1.2.1　风力发电机组的类型 …… 005
1.2.2　风力发电技术的发展趋势 …… 007
1.3　双馈风力发电机并网稳定性概述 …… 008
1.3.1　电力系统的稳定性概述 …… 008
1.3.2　电力系统常见的稳定性问题 …… 009
1.3.3　双馈风力发电机的并网稳定问题 …… 011
参考文献 …… 013

第 2 章　双馈风力发电机组的基本控制策略 …… 017

2.1　风力机及其运行特性 …… 018
2.1.1　风力机的主要类型 …… 018
2.1.2　风力机的功率调节 …… 019
2.1.3　变桨距风力机的数学模型 …… 020

2.1.4 变桨距风力机的空气动力学特点 …… 021
2.2 风力机的最大风能追踪 …… 022
2.2.1 最大风能追踪控制在不同风速下的控制目标 …… 022
2.2.2 最大风能追踪控制的实现方式 …… 024
2.3 双馈风力发电机的结构 …… 026
2.4 双馈发电机的数学模型 …… 028
2.4.1 理想双馈发电机假设 …… 028
2.4.2 三相静止坐标系下双馈异步发电机的数学模型 …… 028
2.4.3 两相旋转坐标系下双馈异步发电机的数学模型 …… 031
2.4.4 双馈异步发电机的运行特性 …… 034
2.5 机组变换器的控制策略 …… 036
2.5.1 网侧变换器建模与控制策略 …… 036
2.5.2 转子侧变换器建模与控制策略 …… 040
参考文献 …… 044

第3章 电力系统稳定性的基本分析方法 …… 045

3.1 时域仿真法 …… 047
3.1.1 微分方程的数值算法 …… 047
3.1.2 *RLC* 电路的时域仿真 …… 050
3.2 特征值分析法 …… 053
3.2.1 小信号建模与特征值分析 …… 053
3.2.2 *RLC* 电路的小信号分析 …… 054
3.3 李雅普诺夫直接法 …… 056
3.3.1 李雅普诺夫稳定性及其李雅普诺夫函数 …… 056
3.3.2 *RLC* 电路的直接法稳定性分析 …… 057
参考文献 …… 058

第4章 双馈风力发电机与线路固定串补间的次同步振荡 …… 059

4.1 固定串补技术与次同步振荡 …… 060
4.2 国内外风电场次同步振荡介绍 …… 061
4.2.1 美国得克萨斯州 CREZ 地区风电场的次同步振荡事件 …… 062
4.2.2 华北沽源地区风电场的次同步振荡事件 …… 063
4.2.3 吉林省通榆风电基地的次同步振荡事件 …… 068

4.3　风电场次同步振荡的仿真分析 …… 074
4.3.1　沽源地区风电场及其输电系统的等值模型 …… 074
4.3.2　风电场次同步振荡现象的仿真复现 …… 077
4.4　风电场次同步振荡的特征值分析 …… 079
4.5　风电场次同步振荡的发生机理 …… 085
4.6　风电场次同步振荡的抑制手段 …… 089
4.6.1　优化和改进 DFIG 的控制参数 …… 089
4.6.2　RSC 采用直接转速控制 …… 090
4.6.3　基于 STATCOM 的附加阻尼控制器 …… 100
4.6.4　次同步阻尼器 …… 118
4.6.5　其他振荡防御手段 …… 124
参考文献 …… 125

第 5 章　双馈风力发电机的电压穿越 …… 131

5.1　风电机组电压穿越问题概述 …… 132
5.2　系统电压故障对发电机的影响 …… 138
5.2.1　电压故障对网侧变换器的影响 …… 138
5.2.2　转子绕组开路情况下机组的故障特性 …… 139
5.2.3　磁链暂态对转子侧变换器的影响 …… 144
5.2.4　转子绕组等值阻抗的去磁特性 …… 148
5.3　风电机组的低电压穿越策略 …… 156
5.3.1　用于辅助风电场低电压穿越新型 DVR 拓扑选型 …… 158
5.3.2　LVRT 策略及算法设计 …… 162
5.3.3　LVRT – DVR 控制方案 …… 166
5.3.4　控制器稳定性分析及参数设计 …… 176
5.3.5　仿真验证及结果分析 …… 181
5.4　风电机组的高电压穿越策略 …… 187
5.4.1　网侧变换器的高电压穿越策略 …… 188
5.4.2　转子侧变换器的高电压穿越策略 …… 192
5.4.3　仿真结果与分析 …… 196
参考文献 …… 203

第 6 章　双馈风力发电机参与系统的频率调整 …… 207

6.1　风电接入后电力系统的频率特性 …… 208

6.1.1 传统电力系统的频率特性 …… 208
6.1.2 最大风能追踪控制下风电并网对系统频率稳定性的影响 …… 210
6.1.3 最大风能追踪控制在风电参与频率控制中的局限 …… 219
6.2 风力机的减载控制策略 …… 220
6.2.1 变速与变桨距控制实现减载运行的机理 …… 221
6.2.2 基于协调控制的全风况减载方案的设计 …… 224
6.2.3 减载仿真结果与分析 …… 226
6.3 风电场参与调频的场站级策略 …… 229
6.4 基于减载运行的附加调频控制策略 …… 232
6.4.1 风机功率控制策略 …… 232
6.4.2 调频过程中风力机气动特性分析 …… 235
6.5 风电场参与系统调频的仿真验证 …… 238
6.5.1 风电替换火电场景下调频策略对频率的影响 …… 238
6.5.2 增加风电场景下调频策略对频率的影响 …… 242
6.5.3 参与调频时的风电机组运行状态 …… 245
参考文献 …… 246

第 1 章

绪　　论

1.1 能源与风能的利用

1.1.1 能源利用的发展现状

能源是指可产生各种能量（如热量、电能、光能和机械能等）或可做功的物质的统称，是能够直接取得或者通过加工、转换取得有用能的各种资源，是人类社会活动的物质基础，也是人类社会发展水平的重要体现。人类已经经历了柴草能源时代和化石能源时代，目前正处于由化石能源时代向多能源时代的过渡阶段。自然界现成存在的能源称为一次能源，一次能源直接或间接转换成其他形式的能量资源称为二次能源。一次能源可分为不可再生能源和可再生能源。不可再生能源在自然界中经过亿万年形成，短期内无法恢复且随着大规模开发利用，储量越来越少，总有枯竭的一天，如煤、石油、天然气和核燃料等。可再生能源指可以得到不间断补充并可持续利用的能源，如太阳能、水能、风能、生物质能和波浪能等。可再生能源是取之不尽、用之不竭，开发应用过程对环境危害极小甚至无害，而且资源分布广泛，适宜就地开发利用。当前，人类社会的能源利用仍以不可再生的化石能源为主。英国石油公司 BP 的研究报告指出，2018 年，全球总共消耗一次能源 13 864.9 百万吨油当量，其中石油占 33.6%，天然气占 23.9%，煤炭占 27.2%，化石能源合计 84.7%[1]。1990—2017 年全球主要一次能源消费量如图 1－1 所示。

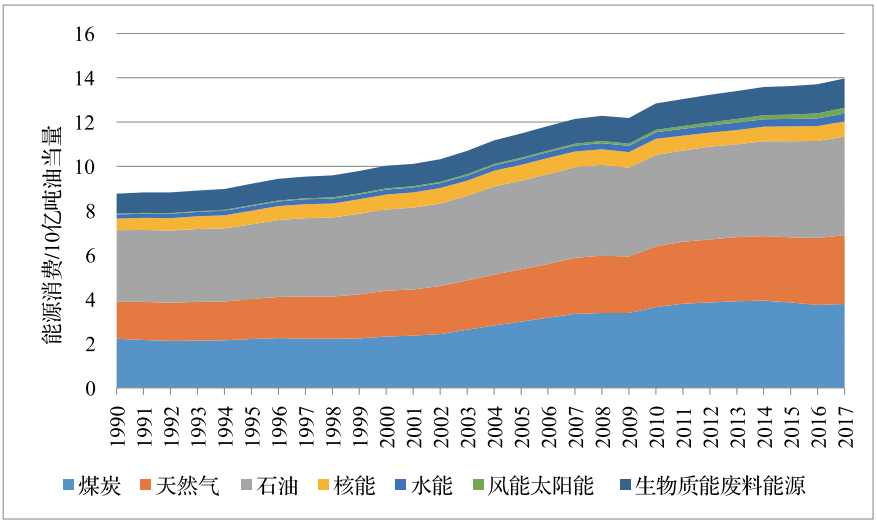


图 1－1　1990—2017 年全球主要一次能源消费量

一方面，化石能源面临即将临枯竭；另一方面，化石能源的大量消耗给世界环境带来了巨大的压力，主要问题包括温室气体排放和大气污染。当前，减少碳排放已经是不可改变的发展趋势[2]。近年来，世界各主要国家都在大力推进可再生能源的利用，可再生能源在终端能源消费中的比重不断增加，如图 1－1所示。2017 年，可再生能源在全球能源消费中的比重已经达到了 17.3%[1]。

在众多的能源利用形式中，电能是当今人类能源利用的最重要的一种形式，是第二次科技革命的核心和第三次科技革命的基础。电力是以电能作为动力的能源，发明于 19 世纪 70 年代，电力的发明和应用掀起了第二次工业化高潮。20 世纪出现的大规模电力系统是人类工程科学史上最重要的成就之一，是由发电、输电、变电、配电和用电等环节组成的电力生产与消费系统。它将自然界的一次能源通过机械能装置转化成电力，再经输电、变电和配电将电力供应到各个用户。2018 年，全球发电量达到了 26 614.8 TW·h[3]，可再生能源发电的占比已经达到了 26.2%，在所有终端能源中是最高的[4]。其中，我国的发电量为 7 422.1 TW·h，排名世界第一[1]。2018 年，全世界 76 亿人口中，有 90% 的人用上了电[4]。在我国，2018 年电能占终端能源消费比重（终端电气化）已达到 25.5%[5]。1990—2017 年全球电力生产结构如图 1－2 所示。

在可再生能源发电中，水电所占比例最大，2018 年为 60.3%。但是，近些年来风力发电和太阳能发电的发展速度很快。1990—2017 年可再生能源发电结构如图 1－3 所示。

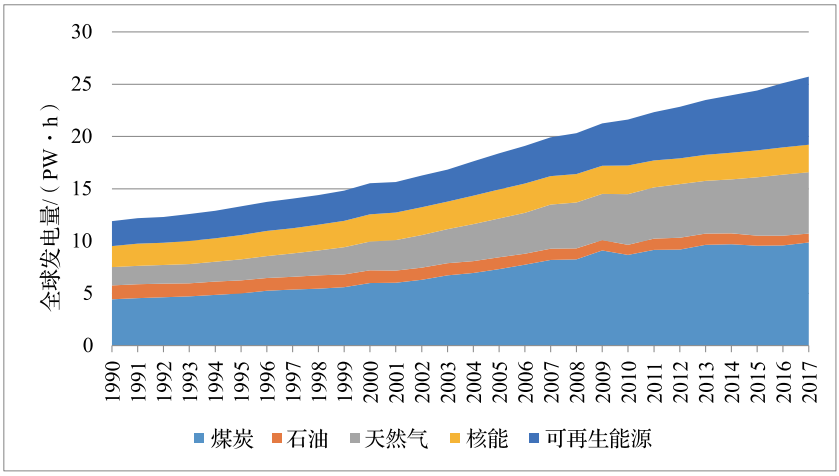


图 1－2　1990—2017 年全球电力生产结构

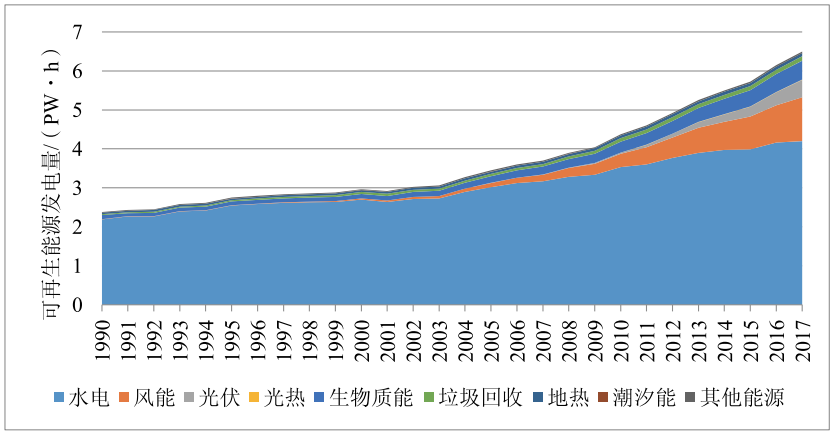


图 1－3　1990—2017 年可再生能源发电结构

1.1.2　风能的利用与风力发电

风是由太阳辐射热引起的一种自然现象。太阳辐射到地球表面后，由于各处受热不同而产生温差，引起大气对流而形成风[6]。尽管到达地球的太阳能中仅有极少部分转化成为风能，但其总量仍非常可观。风能资源受地理环境影响较大，大多集中在沿海和开阔大陆的收缩地带。地理统计资料表明，风能资源最好的地区是美国、加拿大南部和中欧，比较好的地区有中国东部、俄罗斯西部和澳大利亚沿海地区。我国的风能理论储量在 40 亿 kW 以上，理论技术可开发量为 6 亿 ~ 10 亿 kW；海上风能资源的理论技术可开发量在 1 亿 ~

20 亿 kW[7]。这些丰富的蕴藏量使得风能有潜力成为未来能源结构中的重要组成部分。

人类利用风能的历史可以追溯到 5 000 年之前，使用风能发电则始于丹麦。19 世纪末，丹麦气象学家 Poul La Cour 制造出世界上第一台风力发电机，随后各国相继建造了大批风电机组，其中 1931 年苏联首先研制出当时世界上最大的 30 kW 水平轴风电机组，1941 年美国建造出一台 1 250 kW 风电机组[7]。在接下来的时间里，风力发电技术发展比较缓慢[9]。20 世纪八九十年代风电技术开始在欧洲得到快速发展，风电机组单机容量从几十千瓦发展到数百千瓦。世纪之交至今是风电产业高速发展时期，兆瓦级容量机组成为发展趋势，并成功走向商业化，双馈异步式和永磁直驱式变桨距的变速恒频风电机组是兆瓦级风电机组的主流技术形式[10]。目前，3 MW 以下风电机组的制造技术业已非常成熟，单机容量已经达到 12 MW[11]。截至 2019 年，全球风电装机总容量已达 651 GW，如图 1－4 所示。

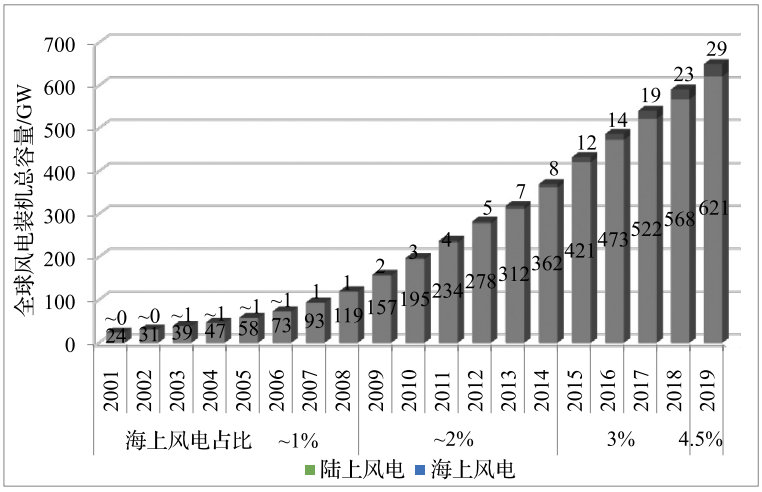


图 1－4　2001—2019 年全球风电装机总容量

1.2　风力发电机组的类型与发展趋势

1.2.1　风力发电机组的类型

风力发电机组（简称风电机组）的种类很多，其结构也各有区别。根据风

力机转速是否恒定，风力发电机组主要分为定速风力发电机组和变速风力发电机组两大类[14]。

1. 定速风力发电机组

定速风力发电机组由风力机、高速齿轮变速箱、异步发电机、电容和变压器构成，其结构如图 1－5 所示。这种结构的风力发电机组由丹麦风力发电机组制造商在 20 世纪八九十年代研制，并由于结构简单在当时应用得相当成功。由于使用的是异步发电机，需要在定子绕组出线端接入电容以提供无功励磁电流，因此该系统功率因数较低。又由于是定速运行，捕获风能的能力较差，机组容量很难扩大，单机容量很少超过 1 MW，使用的异步发电机主要有 4/6 极感应发电机。

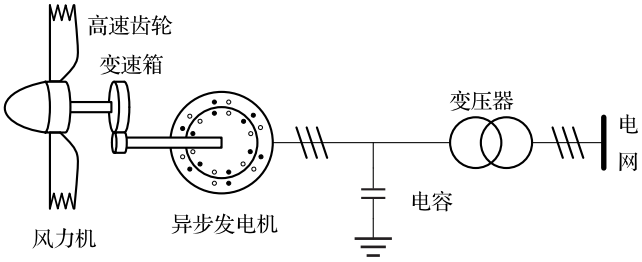


图 1－5　定速风力发电机组结构

2. 变速风力发电机组

目前兆瓦级并网型风力发电机组都采用变速机型，这样可以实现变速恒频发电和最大风能跟踪（MPPT）。变速风力发电机组可以按照两个标准进一步分类：按照有无齿轮箱增速可分为直驱、半直驱和多级增速型；按照发电机的类型又可分为永磁同步发电机、电励磁同步发电机和双馈风力发电机。

1）直驱风力发电机组

直驱风力发电机组没有齿轮箱，风力机直接带动发电机的转子转动，该结构效率高、可靠性好。但是，发电机运行转速低，发电机结构尺寸大，发电机经由全功率变换器并网。发电机可采用永磁同步发电机（Permanent Magnetic Synchronous Generator，PMSG）或电励磁同步发电机，如图 1－6 所示。

2）多级增速风力发电机组

多级增速风力发电机组在风力机与发电机之间增加了一个 3 级增速齿轮箱，将风力机的转速提高到了发电机同步速附近（4 极发电机为 1 500 r/min），因此风力发电机的体积可以大大缩小，但是由于齿轮箱的加入，加大了系统的

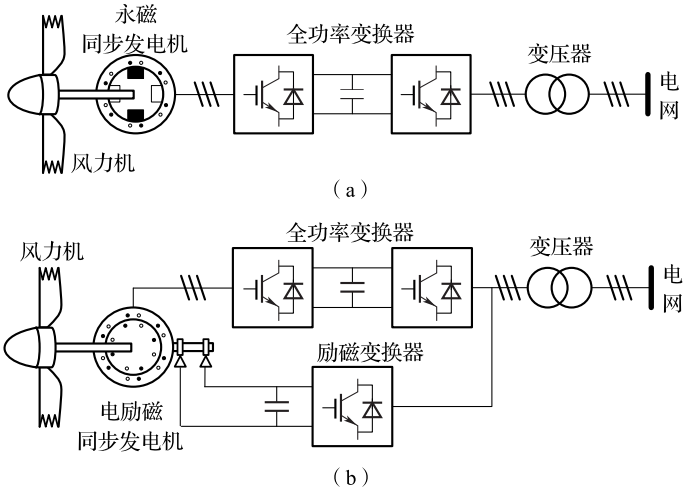


图1-6 直驱风力发电机组结构

（a）永磁同步发电机；（b）电励磁同步发电机

维护率和故障率。最典型的多级增速风力发电系统是双馈风力发电机，它使用双馈感应发电机（Doubly-Fed Induction Generator，DFIG），其定子直接接入电网，转子通过一个功率变换器与电网相连，通过控制转子电流的幅值和频率，实现变速恒频发电，由于变换器接在转子侧，只需要转换转差功率，因此变换器容量相对发电机容量较小，一般为发电机容量的30%～40%。双馈风力发电机组结构如图1-7所示。

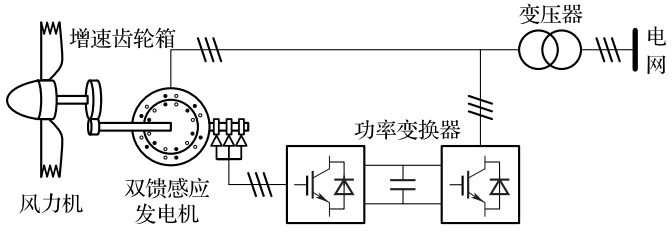


图1-7 双馈风力发电机组结构

3）半直驱风力发电机组

半直驱风力发电机组只采用一级或两级齿轮增速，如图1-8所示，这种技术可以使齿轮箱和发电机的体积都有所减小，是直驱风力发电和多级增速风力发电方案之间的折中选择。

1.2.2 风力发电技术的发展趋势

作为一种已具有较大规模且技术不断成熟的能源利用方式，风力发电在未

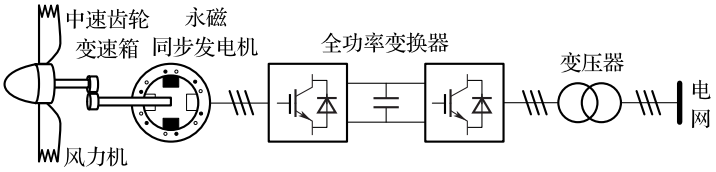


图 1－8　半直驱风力发电机组结构

来能源供应中将占据十分重要的地位，具有广阔的发展前景。风力发电技术的发展主要有以下趋势：

（1）海上风能资源丰富且受环境影响小，伴随着陆上优质风能资源的逐步开发，建设海上风电场将成为世界各国风能利用的重点。

（2）风电机组单机容量将不断增大。单机容量的增大将会提高风能利用率，减小风电场的使用面积，从而降低运行与维护的成本，提高风电在电网中的市场竞争力。因此，随着各项技术的成熟，更大容量的风力发电机组将实现商业应用。

（3）更多的新拓扑和新技术将被采用，变速恒频技术和变桨距调节技术将应用于风电机组发电功率的调节。

（4）将风电场与电网作为一个整体进行运行控制成为当前风电机组控制的一个热点。随着风电机组在电力系统中的增加和单机容量的快速提高，发电机与电网之间的相互影响也越来越大，必须将风力发电机和电网作为一个整体来实施运行控制，不仅要考虑发电的经济性，同时要考虑系统的稳定性。

1.3　双馈风力发电机并网稳定性概述

1.3.1　电力系统的稳定性概述

现代电力系统是一个巨大而复杂的动态系统，安全稳定性是其运行的基本要求。随着电网大规模互联，高压直流输电（High Voltage DC transmission，HVDC）和灵活交流输电（Flexible AC Transmission System，FACTS）设备的广泛应用，以及新能源发电比例不断提高，电力系统的动态特性与稳定性已经发生了深刻的变化[15－17]。

电力系统稳定性是指，在给定的初始运行条件下，电力系统受到物理扰动或者故障后，重新达到一个平稳的运行状态，各种状态变量满足约束条件，从