

双馈风力发电机 励磁控制技术

刘新宇 ◆ 著

 中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

双馈风力发电机 励磁控制技术

刘新宇 ◆ 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是作者多年从事大型双馈风力发电并网励磁控制技术研究的总结和体现,反映了国内外在风电并网领域的科研成果和工程应用。书中详细论述了大型双馈风力发电并网励磁控制技术的基本原理、仿真方法和试验技术。全书共分五章,主要内容包括大型双馈式风电机组并网运行的研究内容和关键技术、双馈式风力发电机组的数学模型及运行特性、双馈风力发电机组并网的滑模变结构控制方法、DFIG风电场并网对系统暂态稳定性的影响及控制策略、风电场与VSC-MTDC并网控制策略等内容。

本书适用于从事新能源发电并网技术的研究人员和技术人员,也可作为高等院校新能源发电专业以及其他理工科相关专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

双馈风力发电机励磁控制技术/刘新宇著. —北京:中国电力出版社, 2015.9

ISBN 978-7-313-13412-4

I. ①双* II. ①刘… III. ①双馈电机-风力发电机-励磁控制 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第173963号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年9月第一版 2015年9月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 6.75印张 113千字

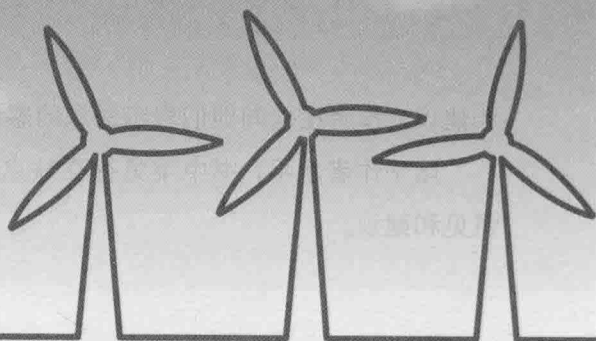
印数0001—2000册 定价20.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言



风力发电作为一种清洁的可再生能源的获取手段,已经在世界各地迅速发展起来。但是风能具有随机性、间歇性和不稳定性的特点,加之风力发电机组本身就是一个非线性、多变量、强耦合的复杂系统,当大规模的风电场接入超高压输电系统时,可能会对整个电力系统原有的动态特性和稳定机理产生影响。因此,深入研究风力发电并网控制技术,为大规模风电顺利并网提供理论基础和技术支撑,成为了风电上网安全运行的关键。在我国曾出版过不少关于风力发电并网控制方面的书籍,但这些成果大部分论述都比较分散和各有侧重,很难保证其通用性。因此,编著一本内容新颖并具有理论意义和工程背景的大型双馈风电并网励磁控制技术方面的专著,是作者多年的梦想。与其他同类专著相比,本书具有以下几个方面的鲜明特色:

(1) 贴近实际,突出技能。本书以企业的实际需求为出发点,强化实践环节,立足实际,突出实用。本书在风力发电并网控制技术上不求多、求全,而是立足于一点,做精、做细,力求内容新颖和实用,本书的内容来自作者近年来发表的一些学术论文及学习心得,以及在企业中的实际科研项目,并吸收了国内外同行的研究成果。

(2) 覆盖面宽,内容翔实。本书对现代大多数领域的风力发电并网励磁技术都进行了较为详细的阐述和对比分析,并针对相关内容给出了相应的典型仿真和试验实例,使读者能尽快掌握风电并网励磁控制技术。

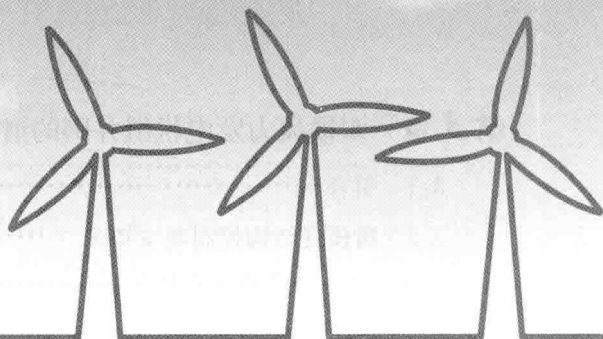
本书的研究工作得到了河南省郑州市科技攻关项目(43204-522)、河南省教育厅科技攻关计划项目(14B413005)、华北水利水电大学高层次人才科研启动项目(40421)以及华北水利水电大学青年科技创新人才项目(70478)的资助,以及其他横向课题的支撑,特此向所有关心和支持作者研究工作的单位和个人表示衷心的感谢!另外,在本书的研究和形成过程中,还得到导师郑州大学陈铁军教授、贵州大学郝正航教授的悉心指导和帮助,我校同事也给予了不少宝贵的意见

和建议，作者在此向他们表示深深的感谢！

限于作者水平，书中难免存在缺点和不足，衷心地希望广大读者提出宝贵的意见和建议。

作者 2015 年 8 月

目 录

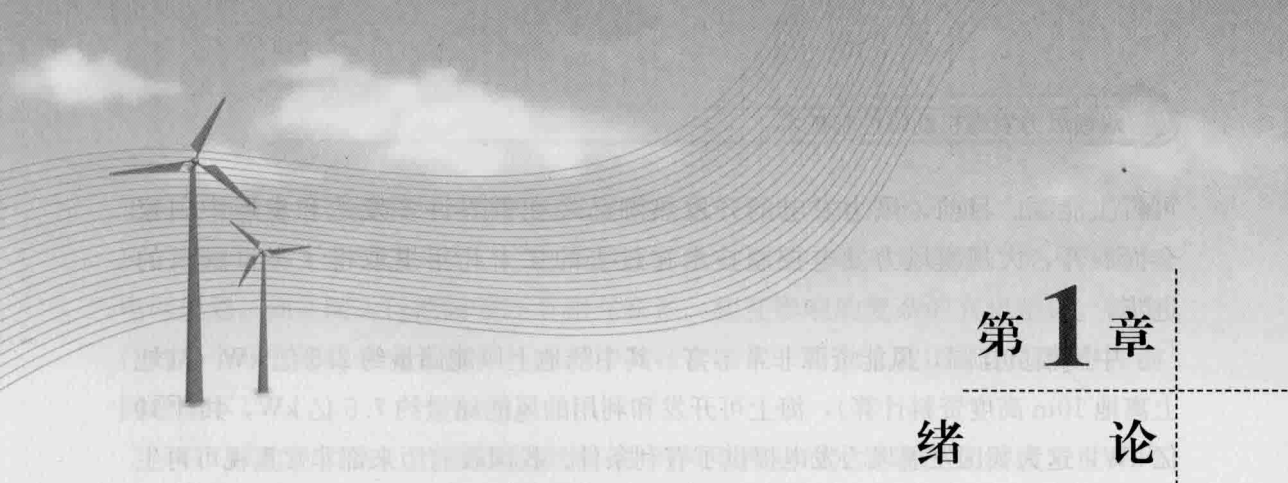


前言

第1章 绪论	1
1.1 课题研究的背景和意义	1
1.2 我国风电发展存在的几个关键问题	2
1.3 双馈式风电机组的组成	4
1.4 双馈式风电机组并网运行的研究内容和关键技术	6
1.4.1 双馈式风电机组并网控制技术研究现状	6
1.4.2 双馈式风电机组的建模	12
1.4.3 双馈感应发电机并网的暂态稳定性和低电压穿越能力	12
1.4.4 双馈式风力发电的网源协调技术	13
1.5 本书的主要工作	14
第2章 双馈式风力发电机组的数学模型及运行特性分析	15
2.1 引言	15
2.2 双馈风力发电机组的组成及运行原理	15
2.2.1 双馈风力发电机组的组成	15
2.2.2 双馈风力发电机的运行原理	16
2.3 风速数学模型	17
2.4 风力机数学模型	19
2.5 机械传动轴系模型	21
2.5.1 三质量块数学模型	21
2.5.2 二质量块数学模型	22
2.5.3 一质量块数学模型	23
2.6 dq 坐标系下的双馈电机数学模型	24
2.7 dq 坐标系下双馈电机的简化数学模型	26
2.8 本章小结	28

第3章 双馈风力发电机组并网的滑模变结构励磁控制	29
3.1 引言	29
3.2 滑模变结构控制基本知识	30
3.2.1 滑模可达性条件	30
3.2.2 滑动模态的不变性	32
3.2.3 滑模变结构控制系统设计	33
3.3 双馈风力发电机组并网的滑模变结构励磁控制	36
3.3.1 双馈风力发电机空载并网控制策略分析	37
3.3.2 双馈风力发电机并网的空载运行状态分析	37
3.3.3 双馈风力发电机并网发电运行状态分析	39
3.4 双馈风力发电机空载并网的终端滑模励磁控制器设计	42
3.4.1 滑动模态对干扰和参数摄动的不变性条件分析	42
3.4.2 双馈风力发电机空载并网励磁电流终端滑模控制器设计	43
3.4.3 双馈风力发电机空载并网自适应终端滑模控制器设计	46
3.5 双馈风力发电机组空载并网控制算例仿真	49
3.5.1 双馈风力发电机理想空载运行仿真分析	51
3.5.2 广义扰动下双馈风力发电机空载运行仿真分析	53
3.5.3 双馈风力发电机空载并网全过程仿真分析	54
3.6 本章小结	56
第4章 DFIG 风电场并网对系统暂态稳定性的影响及控制策略	58
4.1 双馈风力发电系统和电网的交互	58
4.1.1 双馈风力发电系统和电网的功角及特性	59
4.1.2 DFIG 和同步电机的功角及输出功率动态仿真分析	61
4.1.3 动模试验分析	63
4.2 DFIG 功角的动态特性对电网的影响	66
4.3 电网故障对 DFIG 动态特性的影响	70
4.4 DFIG 并网运行的控制策略	72
4.4.1 DFIG 并网运行控制机理分析	72
4.4.2 转子磁链控制策略设计	73
4.4.3 DFIG 和 SG 并列运行时转子磁链的终端滑模控制器设计	74
4.4.4 DFIG 和 SG 并列运行时桨距角附加控制策略设计	79

4.5	DFIG 磁链与桨距角联合优化控制算例分析	79
4.6	本章小结	83
第5章	风电场与轻型直流输电并网控制	84
5.1	概述	84
5.2	新型多端直流输电系统	84
5.2.1	VSC-MTDC 的接线方式	84
5.2.2	VSC-MTDC 的控制原则	85
5.2.3	多端直流输电系统结构	85
5.3	VSC-MTDC 系统上层控制	87
5.4	风电场通过 VSC-MTDC 并网控制策略	89
5.4.1	风电场通过 VSC-MTDC 并网结构分析	89
5.4.2	VSC-MTDC 系统的风电场并网控制分析	89
5.4.3	VSC-MTDC 与风电场协调控制策略	91
5.5	仿真分析	91
5.6	小结	93
	参考文献	94



第 1 章

绪 论

1.1 课题研究的背景和意义

随着科学技术和世界经济的快速发展,被人类广泛依赖的化石能源(煤炭、石油、天然气等)正在逐步减少,并将最终走向枯竭。而且,在人们大量消耗这些化石能源的同时,工业废气、废水、废渣也在不断污染着我们原本美丽的地球家园,能源危机和环境污染已经成为阻碍人类社会健康发展的两大世界难题。

我国是世界人口大国,与其他发展中国家相比,人均自然资源占有量很低。据统计,我国的自然资源可利用量均低于世界平均水平,具体来讲,煤炭占 55.4%、石油占 11.1%、天然气占 4.3%。相比较而言,石油资源更加紧张,仅为世界总量的 3%。然而,在能源低占有量水平的同时,中国却有多种产品的单位能耗比国际平均水平高出 46%。近几年来,由于二氧化碳等气体的排放而引起的温室效应给我们原本健康的生态环境造成了巨大的影响,这其中最根本的原因在于能源的粗放式消耗。目前,温室气体排放、气候变暖问题已引起国际社会的高度重视。中国目前正处于经济高速发展时期,在经济高速增长的同时,作为最大的发展中国家,中国也早已把环境保护问题提上了发展日程。2009 年,中国在哥本哈根气候大会上向世界承诺,到 2020 年,中国单位 GDP 能耗、二氧化碳排放要降低 40%~45%。而实现这一承诺的关键就是要加紧进行可再生绿色能源的开发利用,优化能源配置。

可再生能源(比如太阳能、风能、潮汐等能源)是可持续的、取之不尽的清洁型能源,不会对环境造成任何污染。综合考虑这些可再生能源,风力发电是技术相对成熟、最具大规模开发条件、成本相对较低的一种。因此,风能作为清洁的可再生能源日益受到全球的关注,成为了近几年来发展最快的



可再生能源。目前,风力发电的开发热潮已经在世界许多发达和发展中国家全面展开,大规模风力发电控制技术在过去的二十几年里取得了举世瞩目的进步。

中国幅员辽阔,风能资源非常丰富,其中陆地上风能储量约 2.5 亿 kW (陆地上离地 10m 高度资料计算),海上可开发和利用的风能储量约 7.5 亿 kW,共计 10 亿 kW,这为我国发展风力发电提供了有利条件。我国政府历来都非常重视可再生自然资源的利用和开发,早在 2005 年,我国就颁布了《可再生能源法》,并于 2006 年 1 月 1 日起正式实施,重点支持可再生能源发电。风力发电作为国家发展的重点工程,国家在税收和上网发电等方面提供了一系列优惠政策,对风力发电给予高度重视和大力扶持。在我国的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年)》中明确将“可再生能源低成本规模化开发利用”以及“间歇式电源并网及输配技术”列为重点领域和优先发展的主题。2007 年 6 月 7 日,国务院审议通过并发布了《可再生能源中长期发展规划》,规划明确指出,当前和今后一个时期,要加快风能、太阳能、生物质发电等开发利用,为可再生能源的快速发展创造了良好的政策环境。2008 年 8 月 22 日,为了配合《可再生能源中长期发展规划》的顺利实施,财政部又公布了《风力发电设备产业化专项资金暂行管理办法》,对符合条件的新能源企业给予大力资助。国家相继出台的这一系列政策和措施大大推进了风电事业的发展,使我国风电产业规模呈现出爆发式增长的趋势。2008 年底风电累计装机 10 000 MW,到了 2009 年,中国以 25 800 MW 的总累计装机容量超过德国,成为世界第二。2013 年中国风电装机容量新增 18 GW,同比增长 39%,至此,我国风电累计装机容量达到 62.7 GW,在装机方面继续保持全球第一的领先地位。全球风能理事会的专家们对中国风力发电的发展作出预测,中国的风电装机容量将会在 2015 年达到 1.3 亿 kW,2020 年达到 2.5 亿 kW,2030 年超过 5 亿 kW。风电将在 2020 年占全国总电力供应的 10%,到 2030 年达到 16.7%。

1.2 我国风电发展存在的几个关键问题

毋庸置疑,中国风电在良好的国内政策扶持下正在以爆发式的速度发展,风电项目的审批和基地的规划及建设更是突飞猛进。然而,过快的速度却带来了与风电相关的一系列的矛盾。例如,近几年来我国的风电场数量剧增,但真正能上网的风电较少,即使已经并网发电,其风电质量往往得不到保证。还有如何

正确处理风电标准滞后与风电快速发展的矛盾、风电与电网的矛盾，也是急需解决的问题。历史经验告诉我们，电网的建设是一个从电源基地建设、接入方案与电网规划，到并网运行控制等环节相互联系、相互影响的复杂的有机整体，缺少任何一个环节都将带来无法弥补的经济和社会损失。目前，我国风电发展存在的问题如下：

(1) 风电的消纳。在过去几年中，中国风电产业的发展速度远远高于世界风电平均发展速度，目前已经占据了世界第一的位置，但风电量占总发电量的比重却只有 1.68%（2011 年数据），尚有 100 亿 kWh 风电的浪费。与荷兰、美国等风电发达的国家相比，中国风电产业的经营管理还处于初级阶段，整体管理水平较低、风能浪费较大。而且风电管理标准不完善，工艺流程较简单，产品质量也较粗糙。可见，在风电消纳方面可以说是任重而道远。一些发达国家，尤其是美国的风电建设经验值得我们借鉴。首先，风电建设离不开政府的“有形之手”的行政干预。美国发展可再生能源的总战略十分明确，在电力行业推行强制配额，即用法律的形式对可再生能源发电的市场份额做出强制性的规定，要求在总电力中必须有规定比例的电力来自可再生能源。并在价格方面不因外部条件特别是传统能源价格的波动而随意调整，形成了对风电建设以激励性政策为主，同时也有约束性规定的良性发展体系。其次，要充分发挥市场在风电建设进程中的资源配置功能，让那些管理水平较高，能给社会带来较好经济效益的企业在资源配置中占据主导地位，真正实现适者生存，促进产业的良性发展。目前，美国对可再生能源实行配额制，其可再生能源可以在通过市场中利用信用证进行交易。这种做法，实际上是利用市场实现优胜劣汰，使政府一方面降低了管理成本，另一方又实现灵活的资金周转与资源的优化配置，使可再生能源产业走上了良性发展的道路。

(2) 风电的并网。在飙涨的风电装机容量背后，许多风场的风机却因无法稳定并入电网而遭“弃风”，形成多个风场的成百上千台风机“晒太阳”的现象。

目前，风电并网存在很多技术难题，这和风能的特点是密切相关的。风能具有间歇性、不稳定性和随机性的特点，加之风力发电机组本身就是一个强耦合、多变量、非线性的复杂系统，这使得大规模风电场接入电网后，很多未知或人们尚未完全掌握的理论和技术问题，比如百万千瓦级风电场接入系统的方案、现代大型风电机组稳定机理、风电机组与常规发电机组交互作用、含大容量风电场的输电系统协调运行与以及电能质量分析与控制等问题将会等待我们去努力探索和



解决。

国内外风力发电的经验和实践告诉我们,大规模风电场的并网运行对电网电能质量、安全稳定及经济运行等诸多方面将会带来较多问题和困难,而且有的问题相当棘手,也是世界性难题。尤其随着我国千万千瓦级大型风电场的规划建设,将有更多大规模风电场群接入电网,风电对整个电网的影响也愈加明显,甚至可能会引起整个电力系统的动态行为和稳定机理发生显著的变化。因此,风电并网和电网安全运行成为如何协调好“源”、“网”之间的矛盾,在获取最大风能的同时,保障电网具有承受一定抗干扰能力,使大规模风电功率接入需求与保证电网安全性需求之间的矛盾不被激化,成为目前风力发电亟待解决的热点问题,具有重要的理论研究意义和实际应用价值。

(3) 国产风电关键设备技术创新能力不足。虽然一部分中国风电企业已经基本掌握了兆瓦级风电机组的制造技术,并初步形成了规模化的生产能力,但一些关键零部件如变频器、变桨距系统等关键设备还要依赖进口。尤其在风机整机的研发和设计上,一些核心技术还没有自己独立的知识产权。目前的欧洲风电市场正在进行新一轮对风机技术的革新,对风力发电系统的调压、调频、无功输出都提出了具体的要求,最终实现风电像火电一样的具有电网调节能力,而我国投运的风电机组显然还不具备上述的运行能力。总之,我国风电设备制造业在大型风电机组的研发方面尚缺乏自主知识产权的核心技术,同国外先进的风电企业相比,仍然存在较大差距。上述问题急需我国风电科研人员不断提高创新意识,在自主创新能力、自主知识产权和应用技术方面跟上时代科技的发展步伐,使我国的风力发电技术达到世界先进水平。

1.3 双馈式风电机组的组成

风力发电机组是将风能转换为电能的发电装置,其分类方法通常有两种。按照其容量大小可以将其分为三类:小型(10kW及以下)、中型(10~100kW)、大型(100kW及以上);按其主轴和地面的相对位置可以分为两类:水平轴风力发电机组(主轴与地面平行)和垂直轴风力发电机组(主轴与地面垂直)。水平轴风力发电机的风轮轴与风向基本平行,工作时,风轮的旋转平面与风向垂直。垂直轴风力发电机工作时的风轮轴和风向相互垂直,其主要特点是不需要专门的对风装置,对于风向没有特殊要求,整体结构比较简单。本书的主要研究对象是水平轴风力发电机组。

水平轴风力发电机组基本结构如图 1-1 所示。

从整体上来看,水平轴风力发电机组是由风轮、机舱、偏航系统、塔架、塔底控制系统、基础等几部分组成的。风轮是将风能转化为动能的装置,由叶片和轮毂组成,风力带动叶片旋转,通过轮毂将转矩输入到主传动系统。

机舱包容着风力发电机的关键设备,如底盘、刹车装置、齿轮箱、发电机、机壳等,在塔底安装有主控制器等主要部件。系统测风装置和风向仪位于机舱罩后部上方,塔身牢牢固定

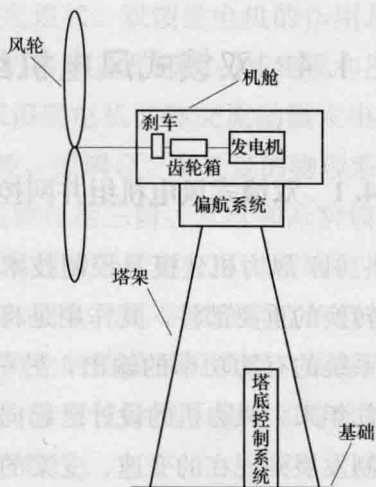


图 1-1 水平轴风力发电机组基本结构图

定在塔底基础之上。风力发电刹车制动方式有气动制动与机械制动。由于风速度的间歇性和不稳定性特点,在大风的情况下,叶轮会越转越快,系统有可能被吹垮,因此常常在齿轮箱的输入端或输出端设置刹车装置,配合叶尖制动(定桨距叶轮)或变桨距制动装置共同对机组传动系统进行联合刹车制动。齿轮箱是传动装置的主要部件。齿轮箱主要作用是将风轮在风力作用下所产生的动力矩传递给发电机并使其得到相应的转速。发电机是将风能转化为电能的装置,一般分为同步发电机和异步发电机两种类型。

偏航系统的作用是使叶轮扫掠面积总是垂直于主风向,它一般由风向仪、偏航电机、偏航行星齿轮减速器、回转体大齿轮等部件组成。

塔架的主要作用是支撑机舱,使其达到工程设计的高度。另外,塔架还是动力电缆、控制和通信电缆的通道,其内部装有供操作人员上下机舱的扶梯。

塔底控制系统是整个风力发电系统的神经中枢。它的主要作用是在各种风况条件下,根据测得的风速、风向,施加相应的控制作用,使风力发电机发出电能的电压、频率和相位与电网保持一致,并能自动地并网和脱网运行。另外,控制系统的监测装置还可以对齿轮箱运行状况、发电机的实际温度、液压系统的油压情况等进行实时监控,自动进行异常报警,在发生严重故障时自动停机。

风力发电系统的基础通常采用钢筋混凝土结构,基础上留有将来与塔架连接的钢构件,以便将塔架牢牢固定在上面,塔架上装设有防雷接地装置。



1.4 双馈式风电机组并网运行的研究内容和关键技术

1.4.1 双馈式风电机组并网控制技术研究现状

(1) 风力机建模及控制技术研究现状。在风力发电系统中,风力机是进行能量转换的重要部件,其作用是将风能转化为机械能。它一方面决定了整个风力发电系统的有功功率的输出,另一方面直接影响着机组的安全、稳定、可靠运行。近几年来,风力机的设计已趋向大型化,其控制方法也从最早的恒速、失速简单控制发展到现在的变速、变桨的优化控制。目前风力机的建模方法主要包括基于叶素理论的建模方法和基于气动设备子模型的建模方法,前者的思想是将叶片分为若干个称之为叶素的微元,然后对单个叶素进行受力分析,求得其微元转矩,则风力机总的输出转矩就是叶片上所有微元转矩的叠加。后者的建模思想是根据风力发电机特性,即风力机获得的风功率大小是由风轮从风中吸收的能量决定的。

对风力机控制的目的就是在不同的风况下,通过调节桨距角,使风力机的运行效率达到最优。针对单一工况点,可以在该工况点附近建立风力机的近似线性化模型,并在此模型基础上设计线性二次高斯控制器。但这种方法的前提基础是要求系统工作于工况点附近,而风力机系统是一个具有偶然性、随机性和不确定性的系统,其工况点时刻在发生大范围的变动。因此,利用这种近似线性化模型设计出的控制器,当风场的风速大范围发生变化时,控制器的性能肯定会受到线性化带来的误差影响,当实际工况点偏离设定工况点太多时,可能会导致系统的失控。因此,有学者针对单一工况点的缺陷,可以分别对多个工况点进行线性化处理,并设计相应的控制器。这样带来的问题是工况点的频繁变化,会使控制器切换频率过高,对系统的电器和机械部分都会造成较大的冲击,使系统寿命大大缩短。于是有学者提出采用微分几何建立系统的精确线性化模型,并给出了相应的反馈控制算法。但这种方法严重依靠精确的数学模型,而实际上由于系统参数的摄动和外界的不确定性扰动,在建模过程中肯定会存在或多或少的模型误差,因此这种方法对来自系统内部和系统外部的扰动的较敏感,抗扰能力较差。近几年来,基于动态逆的非线性内模控制方法在风力发电机组的桨距角控制中也得到了一定的应用,但这种控制方法采用PID控制,控制性能的优劣与控制器参数有很大关系。另外,像美国GE等国外的大的能源公司,其研制的大容量风电机组控制技术,已经从传统的PID控制转向现代智能控制,其控制技术日趋成熟。

(2) 双馈风力发电机系统建模与控制技术研究现状。双馈发电机的作用是将风轮提供的机械能最终转换为电能,是风力发电机组的重要部件,其建模和控制一直受到国内外学者和研究机构的广泛重视。双馈发电机又称交流励磁发电机,它和普通的交流电机特性相似,本质上都是非线性、强耦合、多变量的物理系统。双馈发电机的建模研究相对比较成熟,其模型主要包括三阶、五阶和八阶模型。其中八阶模型包括完整的传动系统模型、定子模型和转子模型,可以精确模拟电机的动态特性。但这类模型阶次较高且过于复杂,通常只具有理论研究价值,工程中很少应用。五阶模型包括定子、转子模型和简化的传动系统模型,其特点是可以模拟较精确的响应特性,且时间也较短。三阶模型包括转子模型和简化的传动系统模型,仿真时间最短且可以得到较好的响应特性。

双馈风力发电机的控制方法较多,除了传统的PID控制,现代比较有代表性的方法主要有基于空间矢量理论的矢量控制、直接转矩控制和智能控制。双馈发电机的矢量控制是将原来时间域中的电压、电流等相关变量变换成空间域内的矢量,然后利用坐标变换构建双馈发电机的电压、磁链、功率及运动方程。并通过分别控制输入电机的有无功励磁电流来控制双馈发电机的有功功率和无功功率,最终实现双馈风力发电的功率解耦控制。由矢量理论来研究双馈发电机的解耦控制已经成为当前简洁而有效的方法,目前对绕线式感应双馈发电机的控制方法主要包括基于气隙磁通定向、定子磁链定向和定子电压定向的三种常见控制方法,它们有着各自的优缺点及应用范围。另外,通过对双馈风力发电机组组成环节的分析,建立双馈异步风力发电机的空间矢量模型,并对交流励磁和转子磁场的交互作用进行了分析,在一定程度上揭示交流励磁的电磁本质,对双馈风力发电机的建模也具有一定的参考意义。直接转矩控制是在定子坐标系下,通过控制双馈电机的励磁电压来实现对电机磁链的控制,结构较简单,在一定程度上克服了矢量控制坐标变换复杂的缺点。但是这种方法如果用在双馈发电机中用于解决同步速附近励磁频率困难,则会出现输出功率难以恒定、电流波动较大等问题,直接影响了直接转矩控制的性能发挥。另外,随着现代控制理论的迅速发展,许多现代先进控制算法也开始在风电控制中得到了广泛的应用。针对双馈发电机的非线性特点,可以把非线性解耦控制和模糊控制应用于双馈感应发电机的控制之中,其中采用模糊控制可以实现低风速时获得最大风能利用系数,高风速时保持在额定功率发电。这类控制方法的优点是不需要精确的数学模型,鲁棒性强,适用于非线性时变、滞后系统的控制。缺点是知识库的建立缺乏系统的方法,只能靠人工经验和反复的试凑。尤其是模糊规则一旦建立很难在线调整,不能很好的适应

工况的变化。针对这种情况,可以把神经网络和模糊控制结合起来,采用多变量模糊神经网络解耦控制策略来实现对双馈电机的控制,该控制策略不依赖于精确的电机参数和数学模型,能够实现双馈电机有功和无功的解耦控制,控制策略算法简单,系统鲁棒性强。另外,针对双馈感应发电机的特性,可以采用非线性多输入多输出状态反馈解耦控制方案,通过非线性坐标变换和非线性状态反馈,实现双馈电机磁链和转速的完全解耦。该方法优于传统的矢量控制方法,抗干扰能力也较强。上述的这些先进的控制算法在仿真时都表现出了良好的性能,但并没有真正付诸于工程实践,其实用性距离实际需要还有一定的差距。

(3) 双馈风力发电机励磁控制技术研究现状。变流器作为交流励磁双馈风力发电机的励磁电源,是风力发电系统中的关键器件。励磁控制的作用是保障网侧变换器直流链电压波动较小和转子侧变换器能有效控制转子电流,从而实现发电机的不间断运行。由于变流器控制效果的好坏直接决定了双馈风力发电机的电能质量和并网运行的性能,所以对其对象特性和控制方法的研究一直都受到中外学者的高度关注。

双馈电机变流器拓扑结构如图 1-2 所示。

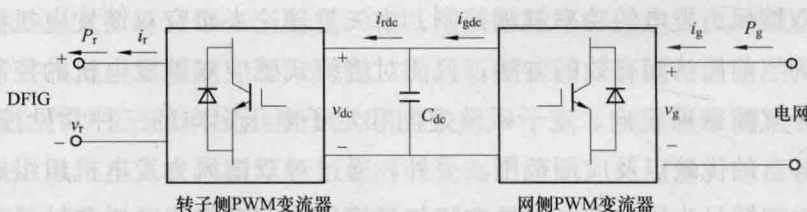


图 1-2 双馈电机变流器拓扑结构

双馈电机变流器采用背靠背结构,其中,网侧变流器与电网相连,转子侧变流器与发电机相连。网侧变流器的任务是配合转子侧变流器的运行,实现能量的双向流动,并维持直流母线电压的稳定。转子侧变流器的任务是向转子绕组提供所需的励磁电流,并通过调节励磁电流的频率和相位,保障电机在变速运行的情况下,定子侧始终感应出恒频电动势,并实现风力发电系统的最大风能跟踪和定子输出无功功率的调节。

双馈风力发电机变流器有许多类型,主要包括交—交变流器、矩阵式交—交变流器、交—直—交双 PWM 变流器和多电平 PWM 变流器,其中双 PWM 整流器因其结构简单、功耗低、控制方便,成为了双馈风力发电机变流器的理想选择。在变流器的建模方面,其方法主要有基于坐标变换的 PWM 整流器连续、离散动态数学模型。在此模型的基础上,各国研究学者对 PWM 整流器模型展开了更加

深入细致的研究。根据频域理论,可以采用微分变换法建立电压型双 PWM 整流器时域上的高频和低频模型,并进一步利用小信号法得到近似线性模型。也可以基于开关电路的变压器等效电路,采用 $d-q$ 坐标变换建立 PWM 整流器的低频等效模型,经过进一步优化处理后,得到 PWM 整流器的小信号降阶模型。这样可以对整流器的动态特性和稳态性能进行深入地分析研究。

控制技术决定了双馈风力发电机变流器的性能好坏,近几年来,有关风力发电 PWM 控制技术研究主要围绕网侧 PWM 变换器和转子侧的 PWM 变换器的控制策略来展开。

网侧变流器的控制方法主要包括基于定子磁场定向的矢量控制、基于电网电压定向的矢量控制和直接功率控制。其中采用定子磁链定向的矢量控制方法,一般使用双闭环 PI 调节器对网侧变换器进行控制。基于电网电压定向的网侧 PWM 变换器控制策略,一方面实现了和定子磁链定向矢量控制相同的功能,另一方面克服了当电机的参数变化时,定子磁链定向的矢量控制方法的不稳定问题,而且简化了算法。直接功率控制针对基于定子磁场定向的矢量控制和基于电网电压定向的矢量控制的缺点,对变流器的有功功率和无功功率直接进行控制。该控制策略检测并网的电压与电流,计算出瞬时的有功与无功功率,并与给定的有功与无功功率进行比较,根据并网电压矢量所在的扇区,按开关表给出开关管的控制信号。通过直接对系统的有功与无功进行控制,实现变流器向电网馈送能量的单位功率因数运行。

转子侧变流器的控制方法和网侧的控制方法相类似,近几年来,有学者采用内模控制来替代常规的 PI 控制,简化了数学模型,提高了系统的跟踪性能,抗干扰能力强。还有的学者将滑模控制应用到双馈风力发电系统中,设计出了定子电压滑模控制器,并将之应用于转子侧变流器的非线性控制,提高了系统的鲁棒性。此外,也有学者将模糊控制引入到风力发电中,在双馈发电机的转子侧采用模糊 PI 控制器取代传统的 PI 控制器,改善了系统的动态响应速度,提高了控制精度。

(4) 风力发电机组并网励磁优化控制技术研究现状。风力发电机组是由不同环节组成的一个复杂整体,具有非线性、不确定性和多干扰等特点。只有通过合适的控制技术,协调好每一个环节,达到整体性能上的优化控制,才能保障风力发电机组并网后的安全高效运行。风力发电机组整体优化控制的基本要求是首先保障风电机组的安全运行。在这个基础之上,其控制目标有两个,首先是确保低风速时保持最佳叶尖速比,跟踪最大风能;高风速时通过调节桨距角,保持机组输出功率恒定。其次是能将发出的电能软切入至电网,保证并网冲击电流小于额