



# 双馈风力发电机组 控制技术

张军利 著

西北工业大学出版社

非外借

SHUANGKUI FENGLI FADIAN JIZU KONGZHI JISHU

# 双馈风力发电机组控制技术

张军利 著

西北工业大学出版社

西安

**【内容简介】** 本书在借鉴国内外相关领域研究成果的基础上,结合作者正在开展的研究实践工作,对双馈风力发电机组中交流励磁电源的控制方法和系统的故障穿越关键技术进行了较为系统、全面的介绍。

全书共分为七章,分析我国风力发电的发展过程和趋势,并分别介绍风力机基础技术、双馈发电机的矢量控制技术、交流励磁电源的控制技术、双馈风力发电机组故障穿越控制、双馈风力发电机组的系统设计以及风力发电的研究总结与展望。

本书主要供高等学校相关教学科研人员和学生使用,也可供电力系统管理人员和技术人员使用,还可供政府部门、企事业单位相关人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

双馈风力发电机组控制技术/张军利著. —西安:  
西北工业大学出版社, 2018. 7  
ISBN 9787-5612-6137-8

I. ①双… II. ①张… III. ①双馈电机—风力  
发电机—控制系统 IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 174993 号

策划编辑: 张 晖  
责任编辑: 王 静

---

出版发行: 西北工业大学出版社

通信地址: 西安市友谊西路 127 号 邮编: 710072

电 话: (029)88493844 88491757

网 址: www.nwpup.com

印 刷 者: 西安日报社印务中心

开 本: 787 mm×960 mm 1/16

印 张: 10.375

字 数: 216 千字

版 次: 2018 年 7 月第 1 版 2018 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 48.00 元

# 前 言

风能是一种可再生的清洁能源,风力发电是风能利用的一种重要形式。世界上第一台风力发电机是在 19 世纪末由丹麦人研制成功的,世界上第一座风力发电站于 1891 年建成。当时的风力发电主要是离网型的,没有成为电网中的新能源。直到 1973 年石油危机爆发后,欧美发达国家投入了大量的科研经费,开始研制现代风力发电机组,于 20 世纪 80 年代建立了示范风电场,开创了并网发电的新局面。

欧盟国家对风力发电技术的研究开发起步较早,现如今已经取得了令人瞩目的成就。目前他们不仅拥有全世界最大的风电装机容量,而且拥有全世界最先进的风电技术和全世界最领先的生产能力。德国是风力发电应用较为成熟的国家之一,其早在 1991 年就立法鼓励风力发电等可再生能源的开发和利用,设立了可再生能源进网电价的保障机制,风力发电得到了大力发展,21 世纪初德国的风力发电总装机容量一直居世界第一位。风力发电设备不仅为德国的电力系统提供了高质量的电能,而且大量风电设备的出口也为德国创收颇丰。德国风力机制造业是目前该行业的领头羊,占全球市场份额的 1/5 多。

根据我国气象台风能资料估算,全国陆地可开发风电装机容量约为  $2.5 \times 10^9$  kW,海上风电的可开发装机容量为 7.5 亿千瓦左右,总共可开发装机容量约为  $10^{10}$  kW。我国第一座风力发电厂是 1986 年建成于山东荣成。近年来,随着国家风电特许权项目的实施以及一系列法律 and 政策的正式实施,我国的风电场开发建设进入了快速发展时期。

国内对大型风力发电技术的各项研究还较为薄弱,目前我国大型风力发电机组一半以上为国外进口产品,深入研究风力发电的各项技术对于持久开发风能和实现大型风力发电机组国产化具有重要的意义。

由于风速的随机性、可变性和不可控性,要获得最大风能,风力发电机的转速往往是随风速变化而变化的。采用变速恒频双馈风力发电技术可以在发电机转速变化的情况下

使其输出频率恒定。本书重点研究变速恒频双馈风力发电用交流励磁电源的 PWM (Pulse Width Modulation) 变流器的控制方法; 变速恒频双馈风力发电机组的故障穿越控制方法。

由于水平有限, 书中难免有疏漏之处, 敬请批评指正。

编者  
2018年3月

# 目 录

<b>第一章 风力发电概述</b> .....	1
第一节 风力发电的研究背景 .....	1
第二节 双馈风力发电概述 .....	2
第三节 交流励磁电源的控制 .....	4
第四节 双馈风力发电的故障穿越控制技术 .....	7
<b>第二章 风力机基础技术</b> .....	10
第一节 风资源基础分析 .....	10
第二节 风力机结构 .....	14
第三节 风力机功率调节技术 .....	17
<b>第三章 双馈发电机的矢量控制技术</b> .....	20
第一节 双馈发电机的工作方式 .....	20
第二节 双馈发电机的模型 .....	23
第三节 双馈发电机的功率关系分析 .....	30
第四节 双馈发电机的控制技术 .....	37
<b>第四章 交流励磁电源的控制技术</b> .....	42
第一节 PWM 变流器概述 .....	42
第二节 PWM 变流器的模型 .....	46
第三节 PWM 变流器的优化控制技术 .....	52

第四节	PWM 变流器的比例积分谐振控制技术 .....	58
第五节	交流励磁电源的比例积分谐振控制技术 .....	72
<b>第五章</b>	<b>双馈风力发电机组故障穿越控制 .....</b>	<b>85</b>
第一节	双馈风力发电机组故障特性分析 .....	85
第二节	双馈风力发电机组故障穿越控制 .....	90
第三节	仿真分析 .....	103
<b>第六章</b>	<b>双馈风力发电机组的系统设计 .....</b>	<b>123</b>
第一节	双馈风力发电机组实验系统 .....	123
第二节	双馈风力发电机组的控制软件 .....	126
<b>第七章</b>	<b>风力发电研究总结与展望 .....</b>	<b>133</b>
第一节	研究总结 .....	133
第二节	行业展望 .....	135
<b>附录</b>	.....	137
附录 1	主要符号表 .....	137
附录 2	主要偏略语表 .....	147
<b>参考文献</b>	.....	148



# 第一章 风力发电概述

作为新能源中非常重要的一种发电技术,风力发电具有非常广阔的应用市场和发展前景。本章对变速恒频双馈风力发电技术的基本内容进行分析和介绍。

## 第一节 风力发电的研究背景

能源是指向自然界提供能量转化的物质,它包括各种能够直接取得或者通过加工、转换而取得有用能的资源。工业革命快速发展,以煤和石油为代表的化石能源成为人们从自然界采集的主要能源,化石能源的储存量越来越匮乏。相对于传统的化石能源,新能源是一种可再生的清洁能源,太阳能、水能、潮汐能、地热能、风能等为常见的新能源。

### 一、可再生能源的开发

化石能源为人类文明的发展做出了巨大贡献,对生产力的提升、知识的增长、科技的进步以及生活水平的提高发挥了重要作用。但由于化石能源是不可再生能源,如果不加控制地开采和挖掘,人类会在数百年之内把地球上现有的化石能源使用殆尽。在某种程度上,仅仅依赖化石能源会对人类的生存和生产力的快速发展造成制约。

新能源和再生能源是以新技术和新材料为基础,使传统的可再生能源得到现代化的开发利用,其具有取之不尽、用之不竭、对环境污染小等特点,它将成为未来可利用的主要能源,与化石能源一起为人类社会服务。在各种形式的新能源和可再生能源中,风能是一种非常重要的能源形式。风是由太阳辐射热引起的一种自然现象,具有蕴藏量大、分布广、无污染、取之不尽、用之不竭的特点。早期人类对风的利用主要是将风能转换为机械能,用风车来提水、磨面、碾米、助航等,现如今在电气化时代,希望将风能转换为电能,再将其传输和变换后为人类的生产和生活服务。

风力发电技术是将风能转换为电能的技术,它具有广阔的应用前景。风力发电具有



生产过程安全可靠,生产电能而不消耗资源、对环境污染小,风力发电场的建设周期短、见效快,装机规模灵活、运行简单、无人值守、占地少、对土地环境要求低等特点。风力发电机组可以带蓄电池离网运行,也可以并网运行。虽然目前风力发电成本较高,但是随着规模化程度的增加,发电成本将会大幅降低。

全世界的风能储存量巨大,大约有  $2.74 \times 10^{15}$  W,能够开发利用的数量也极为可观。我国也有非常丰富的风能资源,主要分布在东南沿海、辽宁沿海、山东、内蒙古、甘肃和新疆等地区,而且具有很好的开发利用条件,随着国家基础设施建设覆盖面的增加,在大多数风资源丰富的地区都可以开展风力发电场的规划建设。

## 二、风力发电的特点

风力发电是风能利用的一种重要形式,其特点表现在以下几个方面:

- (1) 风能是可再生的、洁净的能源,取之不尽、用之不竭。
- (2) 风力发电可靠性高、成本低且规模效益显著,是发展最快的新能源之一。
- (3) 风力发电机组有并网型的,也有离网型的,还可以形成风光互补发电系统,应用形式灵活多样。
- (4) 风力发电场建设时间短,投资规模小,投入产出比小。

# 第二节 双馈风力发电概述

## 一、风力发电技术的运行方式

风力发电技术通常包括恒速恒频(Constant Speed Constant Frequency, CSCF)的发电机运行方式和变速恒频(Variable Speed Constant Frequency, VSCF)的发电机运行方式。

恒速恒频的发电机运行方式是发电机在发电过程中的转速保持不变,发电机输出频率是恒定值,通常情况下是采用风轮储能技术调整风速变化引起的风力机输入机械功率的波动,使得发电机获得固定的风速,尽可能地保持风能利用系数达到最佳值,最大限度地捕获风能。当风速增大时,控制风轮加速旋转,吸收部分能量,存储于高速旋转的风轮中;当风速减小时,将高速风轮所存储的能量释放出来,尽量维持风速几乎不变,实现恒速恒频风力发电。由于风轮的速度可以变化,当风速较高时,风轮速度加快;当风速较低时,风轮速度减慢,大大降低了风力发电系统内部机械部件应力。

相比较于恒速恒频发电机运行方式,变速恒频发电机运行方式在风速变化时,发电机的转速也发生变化,控制系统可以确保发电机输出频率为恒定值。变速恒频风力发电技术最早出现于 20 世纪 70 年代,相比于恒速恒频风力发电,变速恒频风力发电的优点体现在:①风力机可以运行于最佳叶尖速比、可以工作在最大功率点附近,风力发电系统的效率较高,发电量比恒速恒频风力发电系统提高较多;②风速突变时,风力机的机械惯性元件可以用来储存多余的能量,从而减小风力机承受的机械应力和疲劳损耗,延长机组使用寿命;③励磁控制系统通常采用新型控制方法,使风力发电系统捕获最大风能,也可实现有功功率和无功功率的解耦控制,提高风力发电系统的动、静态性能;④转速运行范围宽,以适应风速变化引起的风力机转速变化;⑤转子励磁为可调的三相交流系统,可实现发电机和电网之间的“柔性连接”,并网时冲击电流较小且并网运行后一般不会发生失步。由于以上诸多优点,变速恒频风力发电是今后风力发电的主流技术。

## 二、变速恒频双馈风力发电技术

变速恒频双馈风力发电技术的发电机采用交流励磁双馈感应发电机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG),交流励磁双馈感应发电机简称双馈发电机,它同时具有异步发电机的结构和同步发电机的优点。DFIG 工作原理类似于绕线式异步电动机的串级调速,采用交流励磁电源连接于 DFIG 转子侧,调节交流励磁电源的相位和频率就可以改变流过转子回路功率的大小和方向;调节交流励磁电源的频率,可以跟随 DFIG 转速的变化,确保发电机输出频率恒定。

在变速恒频双馈风力发电技术中,由于 DFIG 不需要同步速运行或在固定速度运行,当风速发生变化时,风力机为了捕获更多的风能,可以改变其转速,而 DFIG 速度可以随着风力机速度的变化而变化,同时其输出电压的频率、幅值、相位基本不受转速的干扰,可实现柔性并网连接。图 1-1 为变速恒频双馈风力发电机组的结构图。

在变速恒频双馈风力发电技术中,流过 DFIG 转子回路的功率是转差功率,转差功率与转差率密切相关,转差率可以正负变化,转差功率也可以有正有负,而且转差功率相比 DFIG 输出功率小,大概为其 1/3。DFIG 转子侧连接的交流励磁电源多采用电力电子变流器实现,相比较于直驱型永磁同步风力发电机组,其大小、质量和成本都较低。改进交流励磁电源的控制方法,可以提高 DFIG 输出的功率因数,降低其输出的谐波含量,提高变速恒频双馈风力发电机组运行的可靠性和动、静态性能指标。

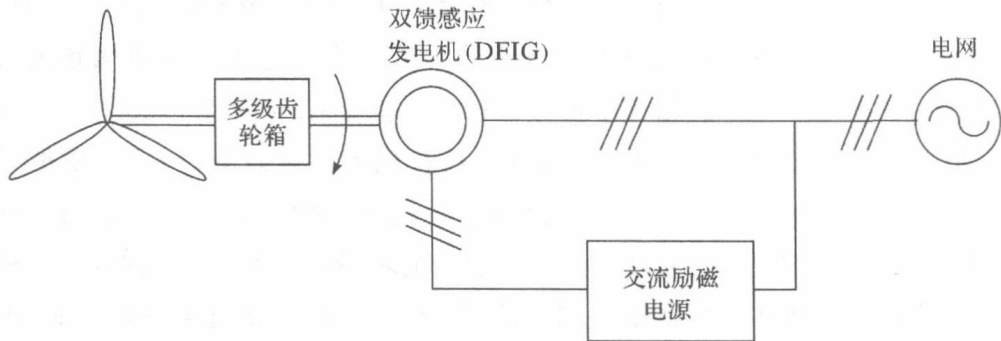


图 1-1 变速恒频双馈风力发电机组结构

从图 1-1 可以看出,变速恒频双馈风力发电机组包括多个重要组成部分。风力机作为风能捕获装置,其调节技术及控制性能的改进需要深入研究;多级齿轮箱作为故障率较高的部件,也需要提高其性能;DFIG 需要完成能量转换,将机械能转换为电能输出给电网,它的性能优劣对整个风力发电系统的性能影响非常大,其控制性能的提高是通过交流励磁电源来实现的。变速恒频双馈风力发电机组成功并网运行后,当电网电压发生故障时,风力发电机组需要加装硬件装置或改进控制方法以实现故障穿越。

### 第三节 交流励磁电源的控制

变速恒频双馈风力发电机组中的交流励磁电源是其非常重要的组成部分,使交流励磁电源输出频率跟随 DFIG 转速的变化而变化,确保 DFIG 输出频率恒定;提高交流励磁电源的控制性能可以改善变速恒频双馈风力发电机组输出的电能质量。本书的变速恒频双馈风力发电机组交流励磁电源采用背靠背的三相电压型 PWM 变流器作为主电路,有必要对 PWM 变流器的控制方法进行深入研究。

#### 一、PWM 变流器的对称控制技术

电网电压平衡时,PWM 变流器常作如下假设:①连接点的电网电压三相对称、幅值固定不变;②PWM 变流器的直流侧负载用电阻  $R_L$  和直流电动势  $e_L$  串联来等效;③并网用的连接电抗器  $L$  是线性非饱和元件;④开关器件为理想元件,不考虑其损耗。

三相电压型 PWM 变流器可以采用间接电流控制方法,电压调节采用 PI 控制器,使 PWM 变流器的输出电压跟随参考电压,电压 PI 控制器的输出作为 PWM 变流器输出电

流给定值的幅值,该幅值与三相正弦信号合成 PWM 变流器交流侧电流的给定值,交流侧电流的给定值通过连接电抗器产生压降,该压降与电网电压可以合成 PWM 变流器交流侧电压调制信号,生成 PWM 触发信号。也可以采用电压电流双闭环控制技术,电压外环采用间接电压控制,以直流侧电压的平方值作为被控量;电流环为内环,采用同步旋转坐标变换,实现 PWM 变流器电流的解耦控制。PWM 变流器动态性能差的根源在于电流响应性差,可以增加串联校正,同时增加输出直流电压微分负反馈环节,以抑制电压超调,该控制方案可提高 PWM 变流器的动态性能,具有直接电流控制的效果。

电压型 PWM 变流器的双闭环控制方法,内环控制交流电流,而外环控制直流电压,电流内环控制可以有多种控制方法,如滞环电流控制、三角载波比较法控制、静止坐标系中 PID 控制、同步旋转坐标系中 PID 控制、比例谐振控制、反馈线性化控制、预测控制等线性化控制方法和非线性控制方法等。

对三相电压型 PWM 变流器预测电流控制技术进行改进,可以应用于不同的场合,具有较好的效果。将有限开关序列模型预测电流控制(FSS-MPCC)策略应用于 PWM 变流器,以 12 组开关序列划分系统控制集,并用开关系列构建目标函数,目标函数包含电流偏差与开关切换次数,利用无差拍控制方式依次求取各组开关序列作用时间,采用在线寻优从系统控制集中选取使目标函数最小和作用时间大于零的开关序列作为整流器最优开关序列,该控制方法能在较低的采样频率下实现对三相电压型 PWM 变流器的定频控制,且其具有良好的动、静态性能。采用模型自校正预测控制,估算实际模型参数,根据电压型 PWM 变流器的模型计算预测电流值和实际电流值的偏差,该算法可实时修正模型参数,消除模型参数不匹配对系统的影响,增强控制系统鲁棒性,其模型自校正预测控制的鲁棒性很强,可以提高 PWM 变流器的模型自校正预测控制的性能。

在改善船舶轴带发电机的工况性能时,可以采用电压型 PWM 变流器来对发电机进行可控整流,采用电压电流平方双闭环控制方法来提高输出直流侧电压和输入交流侧电流的动态响应速度以及抗负载扰动能力,该控制方案具有所需传感器数量较少、数字化实现相对简单等优点。基于三闭环控制的三相 PWM 整流技术应用于蓄电池充电中,应用预测电流控制技术来校正网侧电压电流相位,提高整流装置的功率因数并降低网侧电流谐波含量,充电控制系统中引入三闭环调节实现恒流充电,此整流技术在蓄电池充电环节摒弃了传统蓄电池充电装置中 AC/DC 变换电路部分,将 PWM 变流器直流输出电压可调性直接用于蓄电池充电。

三相电压型 PWM 变流器的预测直接功率控制方法,辅矢量的作用时间在某段时间

内会出现偏大现象,由于控制周期是固定值,主矢量、辅矢量和零矢量进行平均化处理,这种处理方法会引起变流器交流侧电流的较大谐波,同时引起输出功率波动;采用预测直接功率控制方法,基于功率变化原则确定每个扇区中主矢量、辅矢量和零矢量的作用时间,在该扇区中矢量的选择合理,矢量作用时间都符合实际系统的要求,不仅解决了传统预测直接功率控制中开关频率不固定的缺陷,还提高了功率响应速度、减小了稳态功率误差、降低了变流器输出电流的谐波含量,而且该方法不需要坐标变换和空间矢量调制,实现过程简单。

## 二、PWM 变流器的不对称控制方法

在电网电压平衡情况下,电压型 PWM 变流器都具有可输入正弦电流、单位功率因数、可以四象限运行、直流侧电压稳定等优点,故其具有非常广阔的应用空间。由于电网电压不平衡是实际中经常会遇到的情况,因此有必要对电网电压不平衡时 PWM 变流器的性能进行研究。电网电压的不平衡情况会带来变流器交流侧电压和电流的不对称,应用对称分量法分析可以发现交流电压和电流中包含有正序分量、负序分量和零序分量,对于三相三线制接线方式,零序分量没有流通路径,它对变流器的运行没有影响;由于电压电流的负序分量的存在,直流侧电压中将会出现偶数次谐波,交流侧电流中将会出现质数奇数次谐波,如果不采取有效的措施,这些有害成分的存在会影响变流器变换电能的质量;当交流电流中只存在基波正序电流分量时,直流侧的电压将会保持恒定,变流器将实现高效的电能质量变换,所以有必要从控制方法入手,减小负序电流分量等有害成分对 PWM 变流器性能的影响,提高其电能质量。

无源控制方法应用于电网电压不平衡时电压型 PWM 变流器的控制,具有消除或抑制所有谐波,只需要电压电流的实时值,不需要各次谐波的正、负序分量检测和处理,具有很强的鲁棒性和易于实现等优点。功率谐振补偿控制方法,在电网电压定向矢量控制的基础上增加了在两相同步旋转坐标系中的比例谐振功率控制环节,控制系统分情况进行切换,当电网电压正常时,主控制器工作,当电网电压不平衡时,辅助控制器工作,该系统包括两套控制器,用来控制整流器的工作。两套控制器分时工作,不需要对电网电压不平衡情况引起的负序分量进行分解,可同时抑制整流器输出的有功和无功功率波动。

应用对称分量理论对 PWM 变流器交流侧电流和直流侧电压进行了深入研究,发现传统控制方法不能有效地降低直流侧电压的二次纹波,不能有效地减小变流器交流侧电流的谐波含量,主要原因是:传统控制方法只能控制直轴电流而不能有效地控制交轴电

流,它不能有效地同时控制直流电流和交轴电流,从而使得变流器直流侧电压存在二次纹波,交流侧电流的谐波含量较高,分析比例谐振控制算法可以有效地控制谐振点的电压或者电流,并分析了比例谐振控制方法的工作原理,对该控制方法进行了改进,应用于不平衡电网电压下 PWM 变流器的控制器设计中,它可以有效地减小变流器直流侧电压的二次纹波,同时降低了变流器交流侧电流的谐波含量,比例谐振控制方法应用于不平衡电网电压下 PWM 变流器是有效的。

#### 第四节 双馈风力发电的故障穿越控制技术

根据国家颁布的电网安全运行准则《风电场接入电力系统技术规定 GB/T1963—2011》,电网安全运行准则要求接入电网的风力发电系统要提高自己的控制性能,必须在电力系统连接点电压故障期间的一定条件下不能脱网而停止运行,在必要的时候,为了帮助电网故障恢复,风力发电系统还应该向电网提供一定的无功功率,只有电网电压跌落幅度非常大或持续时间较长时,发电系统可以脱离电网从而保护发电系统自身,即风力发电系统的故障穿越技术。电网运行准则会给出发电系统需要尽可能并网且保证自身安全的运行曲线,并网运行的风力发电系统必须提高自身的安全运行能力,从而满足电网运行准则的要求。图1-2所示为国家标准中规定的风力发电机组低电压运行能力曲线。

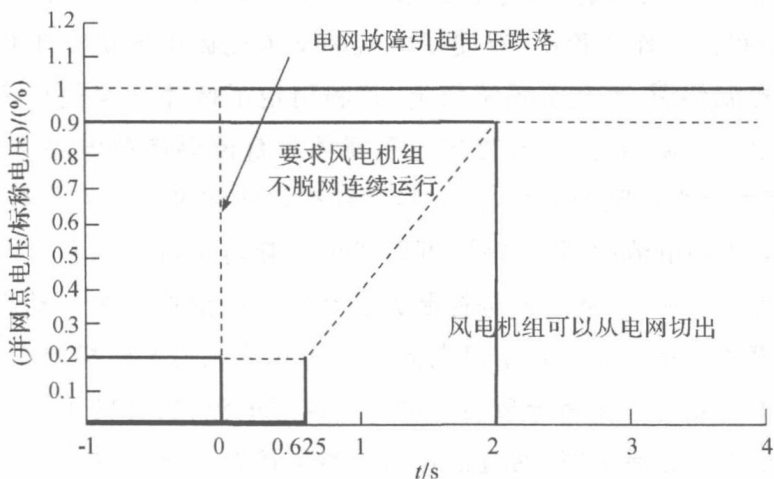


图 1-2 国家标准中风力发电机组低电压运行曲线



图 1-2 中,风电场并网点电压跌至 20% 标称电压时,风电场内的风电机组应保证不脱网连续运行 625ms;风电场并网点电压在发生跌落后 2s 内能够恢复到标称电压的 90% 时,风电场内的风电机组应保证不脱网连续运行。电力系统发生不同类型故障时,若风电场并网点考核电压全部在图 1-2 中电压轮廓线及以上的区域,风电机组必须保证不脱网连续运行;否则,允许风电机组切出。对电力系统故障期间没有切出的风电场,其有功功率在故障清除后应快速恢复,自故障清除时刻开始,以至少 10% 额定功率/秒的功率变化率恢复至故障前的值。总装机容量在百万千瓦级规模及以上的风电场群,当电力系统发生三相短路故障引起电压跌落时,每个风电场在低电压穿越过程中应具有动态无功支撑能力。

### 一、对称故障穿越控制技术

双馈风力发电机组的故障穿越能力受到交流励磁电源容量的限制,其对电网电压的故障比较敏感,需要采取保护措施,抑制 DFIG 转子侧过电流,保护交流励磁电源。采用 DFIG 转子串电阻和直流侧卸荷电路协调控制的故障穿越方案,该方案中转子串电阻可以有效抑制故障过程中双馈发电机转子过电流,直流侧卸荷电路可以抑制交流励磁电源的直流侧过电压,两者协调控制也抑制了发电机过快的转速,改善了发电机的转速稳定性和瞬态行为,评估不同限流电阻对机组瞬态特性的影响,可以选择合适的电阻值。将撬棒 Crowbar 保护技术作为双馈风力发电机组实现故障穿越的有效手段之一,其带来的问题是,撬棒 Crowbar 投入工作过程中,双馈发电机的交流励磁电源退出工作,交流励磁电源失去对发电机的控制作用,不利于系统稳定,其利用定子撬棒方案代替传统撬棒保护,为了保证直流母线电压在限值之内,其提出定子撬棒和直流侧卸荷电路协调的故障穿越方案,分析和优化定子所串电阻的大小,该方案具有有效性和可行性。分析电网电压对称故障时 DFIG 转子电压和电流的瞬态特性,可以找出引起转子过电压和过电流的原因,在不增加励磁系统硬件的条件下,通过改进控制方法在转子中形成一个主动阻尼电阻,有效地抑制由定子磁链直流分量引起的转子过电流。分析双馈风力发电机组在电网电压故障以及故障恢复情况下的磁链变化将导致转子过电压或过电流,威胁转子侧的变流器,采用串联耦合补偿的新型电压穿越方案,通过耦合变压器串接在发电机输入端,克服电网多种故障对风力发电系统的影响,该控制方法能削弱故障下机组定子、转子电流暂态成分,克服了定、转子绕组不对称发热的问题,延长了风力发电机组使用寿命,在电网故障下发电机组仍能平稳输出有功和无功功率,在整个故障运行过程中,双馈风力发电机组转子侧变流



器始终可控,从而为故障电网提供无功功率支撑。

## 二、不对称故障穿越控制技术

电网电压不对称跌落时,为提高双馈风力发电机组三相不对称故障穿越能力,采用动态电压恢复器帮助双馈风力发电机组实现故障穿越,通过锁相环与 pqr 变换检测方法结合对电压跌落检测系统加以改进,从而提高检测系统精度。应用撬棒保护电路实现双馈风力发电的低电压穿越,撬棒电阻取值、切除时间以及直流母线稳定影响着风力发电系统的低电压能力,为了提高双馈异步电机的故障穿越能力,在电网电压不对称故障发生时,基于双馈发电机的负序电流的大小来确定撬棒电路的切除时刻,并采用超级电容器来稳定交流励磁电源的直流侧电压。为了在不对称电网故障穿越第 2 阶段内,维持双馈风力发电机组自身不脱网安全运行,同时满足并网导则中无功支撑的要求,需要确定转子侧变流器的控制目标及其电流限制条件下的控制优先级,进而设计相应的电流指令值算法,通过在风力发电场引入无功补偿装置来降低风力发电场内部双馈风力发电机组中发电机端电压的不对称度。双馈风力发电中交流励磁电源采用比例谐振控制方法,其变流器的比例谐振电流控制方法可以在电网电压发生不对称故障时为风力发电系统提供精确的稳态电流调节能力,而且在电网电压发生不对称故障过程中具有良好的动态响应性能。采用基于电压的功率补偿算法,消除电网电压不对称情况下直流电压的 2 次脉动对输出电流控制环的影响。电网电压发生不对称跌落故障时,以最小化转子电流为目标,基于最优控制理论设计交流励磁电源最优控制方法,可以得到不对称故障下转子励磁控制方法的极限,进而衡量转子励磁控制下风力发电系统的不对称故障的穿越能力。双馈发电机交流励磁电源的双 dq-PI 转子电流控制器,能够控制双馈发电机在电网电压发生三相不对称跌落故障时转子电流的正序分量和负序分量,根据风力发电机在电网电压不对称故障条件下的运行规程,实现 4 种控制目标,同时基于正序定子电压定向进行简化并得到了转子电流调节器的正、负序电流参考值。

## 第二章 风力机基础技术

风力机主要用来捕获风能,并将其转换为机械能,为发电机的运行提供能量,本章介绍风速的四种基本模型,重点给出风力机的结构形式和分类方法,并分析风力机的功率调节技术。

### 第一节 风资源基础分析

作为风力发电机组输入能量的来源,风是自然界取之不尽、用之不竭的资源,大多数情况下风速和风向都不是固定不变的,它是在不断发生变化的,为了实现风力发电,需要对风资源有较为详细的认识,有必要对其进行研究。

#### 一、风力等级

英国人蒲福(Francis Beaufort, 1774—1859年)在1805年给出了风力等级的划分标准,后人称其为“蒲福风级”。国际上普遍采用“蒲福风级”将自然界的风从静风到飓风依次划分为13个等级,后来从1964年以来又增加了4个等级,现在的风力等级为17个等级,表2-1所示为部分风力等级的描述。

表 2-1 蒲福风级表

风级	名称	平地上离地 10m 处的风速			陆地地面物象	海面波浪	平均浪高/m	最高浪高/m
		nmile/h	m/s	km/h				
0	无风	<1	0.0~0.2	<1	静,烟直上	平静	0.0	0.0
1	软风	1~3	0.3~1.5	1~5	烟示风向	微波峰无飞沫	0.1	0.1
2	轻风	4~6	1.6~3.3	6~11	感觉有风	小波峰未破碎	0.2	0.3
3	微风	7~10	3.4~5.4	12~19	旌旗展开	小波峰顶破裂	0.6	1.0
4	和风	11~16	5.5~7.9	20~28	吹起尘土	小浪白沫波峰	1.0	1.5
5	劲风	17~21	8.0~10.7	29~38	小树摇摆	中浪折沫峰群	2.0	2.5
6~8	强风	22~40	10.8~20.7	39~74	步行困难	破峰白沫成条	4.0	5.5