

风电场建模 技术及应用



◎ 曹娜 于群 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

风电场建模技术及应用

曹娜 于群 著



机械工业出版社

本书从研究风电场运行特性以及对电力系统影响的角度出发,计及风电场内风电机组排列布置、风速和风向等因素建立风电场尾流模型,确定风电机组分组方法,进而建立考虑风电场拓扑结构、风速和风向变化的风电场等效模型,探索风电场建模方法在风电场并网研究中的应用。全书分七章,内容包括绪论、双馈变速风电机组建模、风电场拓扑结构、基于风电场尾流效应的风电机组分组方法、计及风速和风向变化的风电场建模、风电场的无功电压控制、风电场对电力系统继电保护的影响。

本书适合从事风力发电技术研究的人员以及高等院校电气工程相关专业的研究生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

风电场建模技术及应用/曹娜,于群著. —北京:机械工业出版社,2015.3
ISBN 978-7-111-49105-7

I. ①风… II. ①曹… ②于… III. ①风力发电系统—系统建模
IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第002784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:王雅新 责任编辑:王雅新

版式设计:常天培 责任校对:刘秀芝

封面设计:张静 责任印制:刘岚

涿州市京南印刷厂印刷

2015年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·6.75印张·147千字

标准书号:ISBN 978-7-111-49105-7

定价:25.00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

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

随着风电装机占全网容量比例的不断增长，大规模风电并网后将对现有电力系统带来一系列冲击。因此，研究大规模风电并网对系统动态特性的影响具有现实意义，而建立风电场模型，较为真实地模拟风电场运行状态，是风电场并网研究的重要课题。

全书共七章。第1章介绍我国风力发电的发展、风电场建模的发展和研究现状。第2章建立双馈变速风电机组的数学模型。第3章介绍风电场拓扑结构，包括风电场内风电机组的排列布置和电气连接。第4章论述风电机组排列布置、风速和风向对风电场尾流效应及风电机组分组方式的影响，建立风电场尾流模型，定义反映风速和风向以及风电机组编号的风电场三维风速系数矩阵，并给出基于风电场三维风速系数矩阵的风电机组分组方法。第5章计及风速和风向变化，建立风电场模型，并对风电场尾流效应和集电系统对风电场运行特性影响进行分析。第6章主要研究大规模风电场的电压控制，以某实际风电场为例，建立风电场模型，分析风速和风向波动时风电场的无功电压控制策略，介绍风电场综合控制系统的框架。第7章主要研究风电场对电力系统继电保护影响，以某实际风电场为例，建立风电场模型，研究风电场对风电场主变压器、送出线路继电保护的影响，给出相应的应对策略。

本书的完成离不开前人所做的贡献，在此对本书所参考的有关书籍、文献、标准等内容的原作者表示感谢。

由于国内外对风电场建模的研究尚处于探索阶段，加之作者水平有限，书中难免存在不足之处，真诚地希望读者能够给予批评和指导。

作 者

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 风力发电的现状和发展	1
1.2 风电场建模的研究现状	2
1.2.1 双馈变速风电机组模型	3
1.2.2 风电场尾流效应模型	4
1.2.3 风电场模型	6
参考文献	7
第2章 双馈变速风电机组建模	10
2.1 引言	10
2.2 风力机建模	10
2.2.1 风力机空气动力学建模	10
2.2.2 桨距角控制建模	11
2.3 双馈变速风电机组轴系建模	11
2.4 双馈感应发电机建模	12
2.5 变流器建模	13
2.5.1 电网侧变流器建模	14
2.5.2 转子侧变流器建模	16
2.6 小结	18
参考文献	18
第3章 风电场拓扑结构	19
3.1 引言	19
3.2 风电机组排列布置	19
3.2.1 风电机组排列布置的基本原则	19
3.2.2 风电机组排列布置的方式	20
3.3 风电场电气系统接线	20
3.4 小结	23
参考文献	23
第4章 基于风电场尾流效应的风电机组 分组方法	24
4.1 引言	24
4.2 常用尾流模型简介	24
4.2.1 无黏近场尾流模型	24
4.2.2 简化尾流模型	25
4.2.3 Jensen 尾流模型	25
4.2.4 AV 尾流模型	26
4.3 计及风电场风向变化的尾流效应 建模	29
4.3.1 风向确定时的尾流效应建模	30
4.3.2 风向变化时的尾流效应建模	31
4.4 风电机组分组方法	33
4.4.1 计及风速和风向变化的风电机组 分组方法	33
4.4.2 风电机组风速系数计算	33
4.4.3 基于风电场系数矩阵的风电机组 分组方法	34
4.5 仿真算例与结果分析	35
4.5.1 算例系统介绍	35
4.5.2 风力机尾流影响边界	36
4.5.3 风速和风向变化对风力机输入风速 的影响	37
4.5.4 计及风速和风向变化的风电机组 分组结果	38
4.6 小结	40
参考文献	40
第5章 计及风速和风向变化的风电场 建模	42
5.1 引言	42
5.2 确定风向下的风电场建模	42
5.2.1 确定风向下的风电场静态建模	43
5.2.2 确定风向下的风电场动态建模	47
5.3 计及风向变化的风电场建模	49
5.4 仿真算例与结果分析	49
5.4.1 算例系统介绍	49
5.4.2 风电场等效模型的建立及合理性 验证	51
5.4.3 尾流效应对风电场运行特性的 影响	55
5.4.4 馈线对风电场运行特性的影响	57
5.5 小结	61
参考文献	61
第6章 风电场的无功电压控制	63
6.1 引言	63

6.2 风电场的功率和电压特性	63	7.3.1 风电场主变压器继电保护配置	83
6.2.1 风电场的有功功率	63	7.3.2 故障电流频率偏移对风电场主变 压器差动保护的影响	84
6.2.2 风电场的无功功率	64	7.3.3 算例介绍与仿真分析	86
6.2.3 风电场的电压特性	67	7.4 风电场对其送出线路继电保护的影响 ...	89
6.2.4 算例分析	68	7.4.1 风电场送出线路继电保护配置	89
6.3 风电场接入电网的无功电压控制	72	7.4.2 风电场送出线路故障时的电压、 电流特性	89
6.3.1 风电场接入电网引起的无功电压 问题及应对措施	72	7.4.3 故障量对风电场送出线路保护的 影响	90
6.3.2 风电场接入电网的无功电压控制 策略	73	7.4.4 算例介绍与仿真分析	90
6.4 风电场综合控制系统	80	7.5 小结	97
6.5 小结	81	参考文献	97
参考文献	81	附录	98
第7章 风电场对电力系统继电保护的 影响	82	附录 A 图 4-11 中风电场中风电机组坐标 ...	98
7.1 引言	82	附录 B 图 5-7 中 220kV 变电站负荷	98
7.2 双馈变速风电机组故障电流的特征	82	附录 C 双馈风电机组参数	99
7.3 风电场对其主变压器继电保护的影响	83	附录 D 直埋电缆和架空线的参数	99

第 1 章 绪 论

1.1 风力发电的现状和发展

受化石能源价格上涨和全球气候变化的影响,可再生能源因其可持续性、清洁、环保,日益受到国际社会的重视,是未来能源的发展方向。在当今世界可再生能源开发中,风力发电是除水能外,技术最成熟、最具有大规模开发和商业开发条件的可再生能源发电形式。世界许多国家都制定了包括发展风力发电等可再生能源的发展规划和战略目标,使得风力发电技术水平不断提高,产业规模逐渐扩大,风力发电已成为促进能源多样性和实现可持续发展的重要能源。

我国风能资源丰富,风力发电正快速发展^[1]。自 1986 年起,山东荣成进口了 3 台 Vestas 的容量为 55kW 的风电机组,建立了我国第一个风电场,到 2013 年底,我国累计装机容量为 91412.85MW,新增装机容量为 16088.7MW。2001~2013 年,我国新增及累计风电装机容量如图 1-1 所示^[2]。目前,我国新增装机容量和累计装机容量均居世界第一。

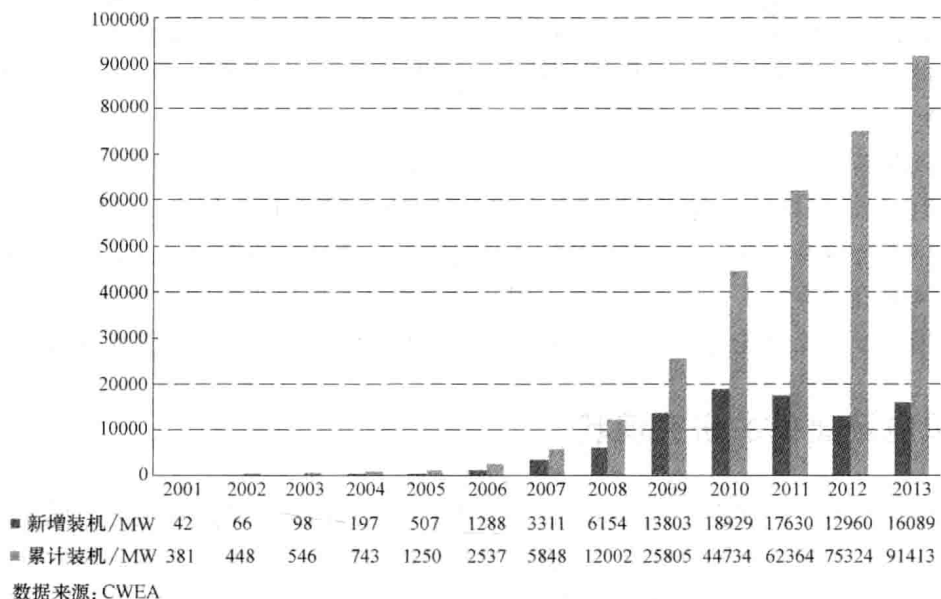


图 1-1 2001~2013 年我国新增及累计风电装机容量

我国风能资源丰富且分布相对集中,主要分布在西北、东北和华北的部分地区,以及东部和东南沿海地区^[1],这一特点决定了我国风电呈大规模、基地式集中开发的模式。2007~2013 年,我国各区域累计风电装机容量如图 1-2 所示^[2]。由图可见,我国 90% 以上的风电集中在“三北”地区,截止 2013 年底,内蒙古、河北、甘肃和辽宁的风电并网容量占各省总

装机比例已超过了 20%，分别为 20270.31MW、8499.9MW、7095.95MW、6758.01MW。

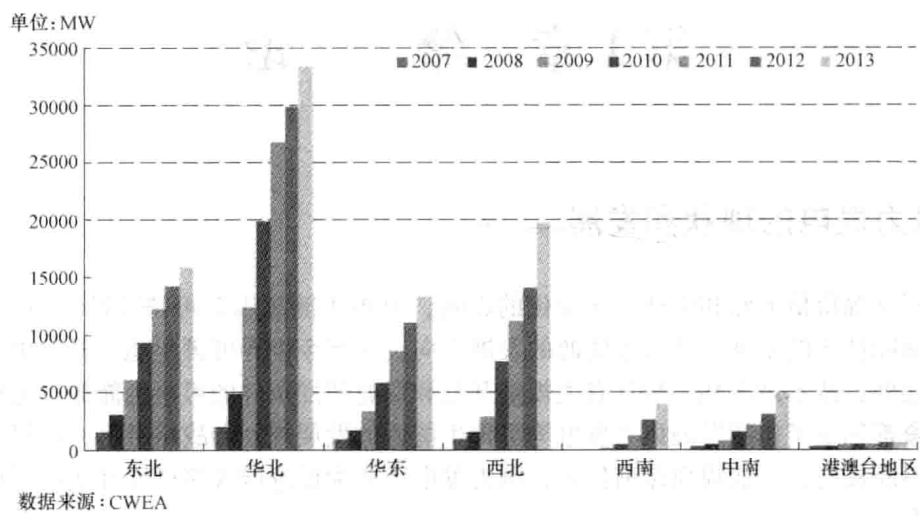


图 1-2 2007 ~ 2013 年我国各区域累计风电装机容量

伴随着风电机组单机容量的不断增加，风电场装机容量也大幅度增长，我国规划的若干千万千瓦级的风电基地，已形成了集中分布的、大规模的风电场群。

与常规电源发电方式相比，风力发电输出功率具有明显的间歇性和波动性，大规模风电并网运行势必会给电网的潮流、电能质量、安全稳定运行和实时调度等带来影响，因此有必要对大规模风电场接入电网后的电网运行特性进行深入研究。其中，风电场建模^[3,4]是必须解决的首要问题。

因为风电场内尾流效应的影响造成风力机的输入风速不同，相应风电机组工况也不同^[5,6]，所以风电场接入电网运行仿真时，若对风电场内每台风电机组、机组变压器及其场内集电线路进行建模，则将增加模型结构复杂度以及计算量和仿真时间，但若把运行状态差异较大的风电机组等效成一台风电机组，则又无法表征风电机组实际运行状态^[4,7,8]。因此，建立风电场模型，较为真实地模拟风电场运行状态是风电场并网研究的重要课题。

1.2 风电场建模的研究现状

风电机组从风中获取能量的同时会在风力机下游形成风速下降的尾流区，尾流区沿着风向向下游发展。如果下游风力机位于上游风力机尾流区域内，下游风力机的输入风速就会低于上游风力机的输入风速，这就是尾流效应^[9]。风电场往往装有几十台甚至几百台风电机组，风力机间尾流效应造成的风电场内风力机的输入风速不同，实际表现为风电机组工况的不同，它们共同决定着整个风电场的工况。对电力系统而言，由于所关心的不是风电场内单台风电机组对电网的影响，而是风电场作为一个整体对电网的影响^[3,4,7,8]，因此，需要全面考虑影响风电场运行工况的因素，对由几十台甚至几百台风电机组组成的风电场进行适当简化，确定风电场等效模型和参数。

对风电场建模的研究主要包括风电机组建模、风电场尾流效应建模、风电机组分组、风

电场建模以及风电场模型参数辨识等方面的研究。这里将以双馈变速风电机组构成的风电场为主要研究对象,对所涉及的上述主要问题进行综述,介绍目前该研究领域的新思路、新方法和新进展。

1.2.1 双馈变速风电机组模型

双馈变速风电机组由双馈感应发电机、机械传动系统和变流器等组成,如图 1-3 所示。其中,风电机组机械传动系统由风力机、低速轴 (LS)、齿轮箱和高速轴 (HS) 等部分组成,在风电机组并网研究中可简化为风力机、轴系和桨距角控制。

由于风的随机性以及风力机叶片翼型的不同,风力机从风中捕获风能而转化成风力机输出的机械功率具有很强的非线性特性。目前,风力机的空气动力学建模方法主要有两种:一种是基于叶素理论的建模方法^[10,11],将叶片分为若干个微元(称为叶素),通过对叶素的受力分析求得微元转矩,把所有微元转矩相加而得到风力机总的输出转矩;一种是基于流体能量转换过程的建模方法^[12],通过设计参数、统计数据或者经验公式求得风能利用系数或者转矩系数,然后根据功率或转矩公式计算得到风力机的输出功率或转矩。

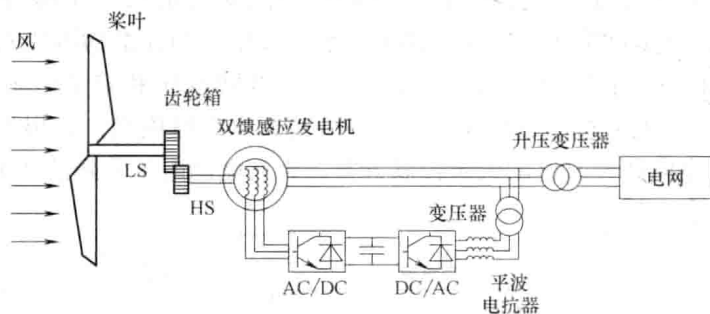


图 1-3 双馈变速风电机组的组成

为了使发电机输出工频电能,风力机和发电机通过刚度较低的齿轮箱相连,组成了风电机组轴系。风电机组运行时轴系的扭振会引起发电机转速波动,发电机转速和发电机其他参数之间为强耦合关系,因此风电机组轴系特性会影响风电机组的运行^[13]。在风电机组建模中,轴系模型有考虑机组轴系扭振的双质块轴系模型和不考虑机组轴系扭振的单质块轴系模型,与单质块简化模型相比,双馈变速风电机组采用双质块轴系模型可以较准确地进行风电机组动态特性分析与控制^[13,14]。为了提高风能利用率,在低风速时,风电机组通过转速调整使风力机获取最大风能;在高风速时,风电机组通过桨距角控制使机械功率维持在额定值附近,保证风电机组安全可靠运行。桨距角控制系统的输入量通常为风电机组的电气量(输出的有功功率)^[15]、机械量(如发电机转速)^[16]或电气量和机械量组合(如输出的有功功率和发电机转速)^[17]。

双馈变速风电机组通过双馈感应发电机把机械能转换成电能,并通过发电机和变流器控制实现可靠并网。双馈感应发电机是一个时变、多变量、强耦合的系统,其模型包括磁链方程、电压方程和机械运动方程等。根据分析需要,可对双馈感应发电机的数学模型进行不同程度的简化。例如,文献[18-20]建立了双馈型风力发电机的 8 阶、5 阶、3 阶模型,分析

和比较了双馈变速风电机组的动态响应特性；为了对双馈感应发电机建模进行简化，文献[21]将发电机和电网变流器作为一体简化建模，以反映双馈变速风电机组和换流器的动态行为；在文献[22]中，考虑到发电机电流控制比机组的机电暂态快得多，对电力系统的暂态稳定影响不大，采用降阶微分方程研究双馈变速风电机组暂态特性。

双馈感应发电机转子通过变流器与电网相连，为双馈感应发电机提供励磁电流。变流器由两个完全相同的三相两电平电压型双 PWM 变流器通过直流母线连接而成，其中与电网相连的为电网侧变流器，与发电机相连的为转子侧变流器^[23]，如图 1-4 所示。电网侧变流器的主要任务是维持直流母线电压的稳定，并提高其抗负载扰动能力；转子侧变流器可控制转子电流，并对直流母线电压保持恒定有一定影响，对它们的有效控制主要取决于双馈感应发电机的控制模型^[24,25]。基于定子磁链定向和基于电网电压定向的同步旋转坐标系下双馈感应发电机控制模型应用最广，因此形成了变流器基于定子磁链定向和基于电网电压定向的两种矢量控制策略^[26]。为了简化仿真过程，在文献[27]中假设电网侧变流器为理想变流器，并假设直流母线电压保持恒定，然后将转子侧变流器等效为电压控制电流源，再基于定子磁链定向控制对双馈发电机的有功、无功功率进行解耦控制。目前，在双馈感应发电机及变流器建模中，都是假设电网电压恒定、忽略双馈感应发电机定子电流动态过程。文献[28]的研究表明，在电网电压恒定时，两种传统的矢量控制方案均可使双馈变速风电机组获得良好的动态和稳态特性。但是，电网故障时，电网电压和定子电流是变化的。文献[29]计及定子电压、电流过渡过程建立了双馈变速风电机组模型，提出了分别基于定子磁链定向和电网电压定向两种改进的矢量控制方案，为在电网电压骤降的情况下进行有效控制奠定了基础。

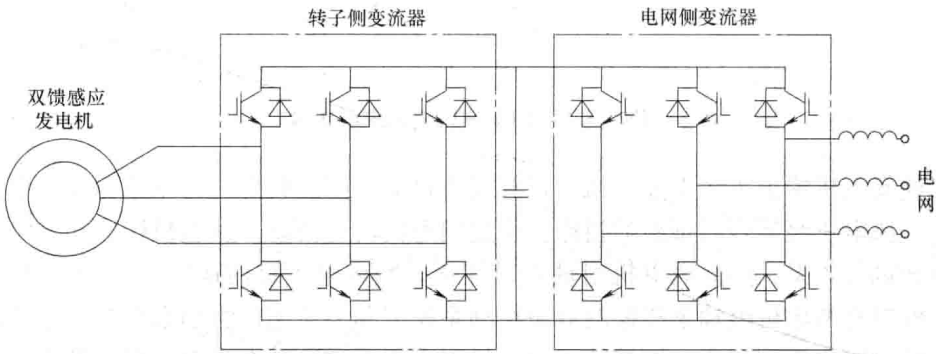


图 1-4 三相两电平电压型双 PWM 变流器拓扑结构

1.2.2 风电场尾流效应模型

风电机组从风中获取能量的同时会在风力机下游形成风速下降的尾流区，尾流区沿着风向向下游发展。国内外目前对风力机尾流的研究大致分为两类^[30]：一是风力机的尾流数学模型，旨在研究处在尾流区域内风力机的疲劳载荷、输入风速和输出功率等；二是尾流流动机理，旨在揭示尾流流动的基本特征。

在风电场并网研究中所关注的是风力机的尾流模型，有一维尾流模型和三维尾流模型^[31]。在研究分析风力机尾流区速度分布和风力机功率输出时，常用一维尾流模型^[30]。自

20 世纪起,专家们建立了多种风力机一维尾流模型。1980 年 James J R 提出了无黏近场尾流模型,这种模型只能近似描述风轮下游某点到风轮平面的轴向距离小于 5 倍风轮直径时的风力机尾流速度分布^[32]。Lissaman 在瑞典 Kalkugen 实测数据的基础上,基于湍流喷射的相似理论,提出了单风力机尾流 Lissaman 模型^[33]。还有一种简化尾流模型^[34],利用这种尾流模型计算风力机尾流区的速度分布只与风轮轴向推力系数 C_T 和尾流区内离开风轮平面距离有关,与来流湍流强度无关。丹麦 RISø 的 Jensen 等提出了 Jensen 尾流模型^[35],该模型不考虑湍流效应的影响,近似地认为尾流影响区域随距离线性扩张,风轮影响区是圆锥形,运算效率较高。目前在风电场并网研究中,很多专家采用 Jensen 尾流模型研究风力机的尾流特性^[36-41]。但因为在气流通过旋转风轮、风力机从气流中获取能量的同时,风轮后风力机轴向尾流气流速度降低,旋转的风轮还对周围气流产生扰动形成机械湍流,随着风轮下游离开风轮平面距离的增加,尾流区的速度和机械湍流逐渐下降,而且经过一段距离后,在周围气流的作用下,风速才逐渐得到恢复,所以, Jensen 尾流模型无法更准确地描述风力机尾流效应。因此, Ebeble W R. 采用 Abramovich 射流理论建立了全场尾流模型 (AeroViroment 尾流模型,简称 AV 尾流模型)^[30,34],该模型将风力机尾流区分成三个区域,分别为初始尾流区 (区域 I,其尾流区长度大约为风轮直径的 2 倍)、过渡区 (区域 II,其尾流区长度大约为风轮直径的 3 倍)和远场尾流区 (区域 III),如图 1-5 所示。

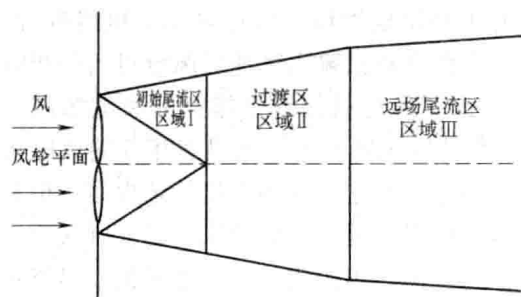


图 1-5 AV 尾流模型

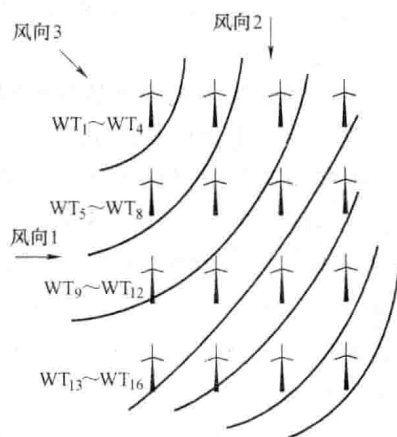


图 1-6 风电机组排列布置

在风电场内,尾流效应造成风电场内每台风力机的输入风速不同,并且受风力机的风轮直径、推力系数、机组间的距离、周围环境及风速和风向等因素的影响^[42]。目前对尾流效应的建模主要有两种方式:一是考虑风电场内风电机组排列布置和风向变化对尾流效应的影响,如对于风电机组排列布置规则的风电场^[43],如图 1-6 所示,考虑了特殊的三个风向,对于水平风向 1,在垂直方向上的每列风力机输入风速相同,对于垂直风向 2,在水平方向上每行风力机输入风速相同,对于 45° 风向 3,每条弧线内的风力机输入风速相同;并将上游风力机对下游风力机的尾流影响近似用功率衰减系数表示,功率衰减系数典型值在 0.025 ~ 0.063 之间^[40,43]。二是不考虑风电机组排列布置、风速、风向变化等,仅将风电场内每台风电机组在相同风速下的输出功率之和乘以功率衰减系数(文献[44-46]中功率衰减系数取值为 0.92),但由于风向是在 0 ~ 360° 范围内变化,并且风电场内风电机组的排列布置也是

各种各样的,因此,这种建模方式不能较准确地模拟风电场内尾流效应。

1.2.3 风电场模型

风电场等效建模研究主要集中在两个方面:一是用单台等效风电机组还是多台等效风电机组模拟风电场;二是把风电场等效成多台风电机组时,如何对风电场内风电机组进行分组。

将风电场等效成单台风电机组的方法主要有两种:一是假设整个风电场风速分布谱密度相等,利用谱密度法建立风电场等效风速模型,通过改变风速中湍流强度大小模拟风速波动时风电场动态特性,研究风电场对电力系统电压稳定性和电能质量的影响^[47,48];二是忽略风电场尾流效应,认为所有风电机组输入风速相同,其容量等于所有风电机组容量之和,通过改变风电机组有功出力,模拟风速变化时风电场动态特性^[49-51]。另外,在对电网故障下风电场动态特性进行仿真时,通常假设每台风电机组运行在额定状态^[52-56]。

对于实际风电场而言,由于尾流效应的影响,风电机组的输入风速存在差异,因此会导致风电机组工况不同。即如果假设风电场内每台风电机组输入风速相同并等效成一台风电机组,则无法表征等效前风电场的实际运行状态;如果再将风电场内每台风电机组设定在额定运行状态,则在分析风电场运行特性对电力系统影响时,仿真结果会存在较大的误差,使结论偏于保守^[57]。因此,对于装机容量较大的风电场,应考虑采用多台等效风电机组模拟风电场。

在建立风电场多机组等效模型时,首先需要对风电机组分组,再对归为一组的风电机组进行等效,并考虑风电场内部馈线。目前的研究主要是根据输入风速对风电机组进行分组,由于风电场尾流效应随输入风速、风向而变化,因此在根据输入风速对风电机组分组时,分组方式不是固定的,而是变化的。文献[43]提出了风电机组规则排列的风电场风向变化时机组分组方法,如图1-5所示。这种方法在三个特殊风向下把输入风速相等的风电机组归为一组,然后把归为一组的风电机组等效成一台机组,建立风电场多机等效模型,但是没有建立其他任一风向下风电场等效模型;对于风电机组不规则排列的风电场,则认为连接在同一集电线路上的风电机组输入风速相同,并归为一组,等效成一台风电机组,最终把风电场等效成几台风电机组。显然,这种处理方法没有考虑风电场尾流效应的影响以及风速、风向的变化,认为风电机组分组是唯一的,风电场模型也是唯一的^[58,59],因此,利用这种分组方法进行风电场建模,是不符合风电场实际运行情况的。

除了根据风力机输入风速对风电机组分组外,还有根据电网故障清除时风电机组转速^[60]、电网故障时双馈变速风电机组的桨距角控制动作情况^[41]、风电机组仿真过程中的状态变量矩阵^[40]等对风电机组分组的方法。文献[60]以故障清除时风电机组转速为机组分组指标,把风电场等效为多台风电机组,给出了风电机组各参数的计算方法、风电场集电线路的化简方法以及仿真建模过程,其仿真表明,所建立的多机表征模型能够准确地反映风电场并网点的动态特性;文献[41]为了解决风电场单机表征模型准确性差的问题和风速分类等效法的等效机组数目过多问题,以电网故障时双馈变速风电机组的桨距角控制动作情况为风电机组分群原则,提出了风电场动态等效建模方法,通过同群机组的合并、等效将风电场模型等效成三机表征模型,与传统的单机等效方法相比,三机表征模型能更准确地反映双馈变速风电机组风电场并网点的动态特性;文献[40]以双馈变速风电机组状态变量矩阵

作为分群指标,利用聚类算法将矩阵中的数据进行分群,将同群的风电机组等效成为一台风电机组对风电场进行动态等效,利用等效模型与详细模型进行仿真比较验证了模型的合理性。

本书将从研究风电场运行特性以及对电力系统影响的角度出发,计及风电场内风电机组排列布置、风速和风向等因素建立风电场尾流模型,确定风电机组分组方法,进而建立考虑风电场拓扑结构、风速、风向变化的风电场等效模型,探索风电场建模方法在风电场并网研究中的应用。

参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会. 可再生能源中长期发展规划 [J]. 可再生能源, 2007, 25 (5): 1-5.
- [2] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2013 年中国风电装机容量统计 [J]. 风能, 2014 (2): 44-55.
- [3] 刘振亚. 智能电网技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [4] 鞠平, 秦川, 黄桦, 等. 面向智能电网的建模研究展望 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (11): 1-6.
- [5] 王承煦, 张源. 风力发电 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [6] 陈树勇. 大型并网风力发电场规划与研究 (博士学位论文) [D]. 北京: 中国电力科学研究院, 1998.
- [7] 陈树勇, 王聪, 申洪, 等. 基于聚类算法的风电场动态等值 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (14): 11-21.
- [8] 米增强, 苏勋文, 杨奇逊, 等. 风电场动态等值模型的多机表征方法 [J]. 电工技术学报, 2010, 25 (5): 162-169.
- [9] Vermeer L J, Sørensen J N, Crespo A. Wind turbine wake aerodynamics [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2003, 39 (6-7): 467-510.
- [10] Wilson R E, Lissaman P B S, Walker S N. Aerodynamic performance of wind turbine [M]. Oregon State University, 1976.
- [11] Tony Barton, David Sharpe, Nick Jenkins. Wind energy handbook [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [12] Kenneth Thomse, Heige Aagaard Madsen Peration. A new simulation method for turbine in wake-applied to extreme response during operation [J]. Wind Energy, 2005, (8): 35-47.
- [13] Akhmatov V, Knudsen H, Nielsen A H. Advanced simulation of windmills in the electric power supply [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2000, 22 (6): 421-434.
- [14] Salman S K, Teo A L J. Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power-based embedded generator [J]. IEEE Transactions on power Systems, 2003, 18 (2): 793-802.
- [15] Hinrichsen E N. Controls for variable pitch of wind turbine generators [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus System. 1982, 101 (8): 2640-2648.
- [16] Akhmatov V. Variable speed wind turbines with doubly-fed induction generators, Part I: Modeling in dynamic simulation tools [J]. Wind Engineering, 2002, 26 (2): 85-107.
- [17] Akhmatov V. Voltage stability of large power networks with a large amount of wind power [J]. In fourth international workshop on large-scale integration of wind power and transmission networks for offshore wind farms. Billund, Denmark, 2003: 1-10.
- [18] 尹明, 李庚银, 周明, 等. 双馈感应风力发电机组动态模型的分析与比较 [J]. 电力系统自动化,

- 2006, 30 (13): 22-27.
- [19] Lei Y Z, Mullane A, Lightbody G, et al. Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21 (1): 257-264.
- [20] Petersson A, Thiringer T, Lundberg S. Modeling and experimental verification of grid interaction of a DFIG wind turbine [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20 (4): 878-886.
- [21] 石立宝, 戴世强, 徐政. 大规模双馈型风电场并网的系统暂态稳定仿真 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21 (4): 1-6.
- [22] Ledesma P, Usaola J. Doubly fed induction generator model for transient stability analysis [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20 (2): 388-397.
- [23] Baroudi J A, Dinavahi V, Knight A M. A review of power converter topologies for wind generators [J]. Renewable Energy, 2007, 32 (14): 130-135.
- [24] 张崇魏, 张兴. PWM 整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [25] 赵仁德, 贺益康, 刘其辉. 提高 PWM 整流器抗负荷干扰性能研究 [J]. 电工技术学报, 2005, 19 (8): 67-72.
- [26] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly fed induction generator using Back-to-Back PWM converters and its application to variable-speed wind energy generator [J]. IEE Pro. Electric Power Applications, 1996, 143 (3): 213-241.
- [27] 王忱, 石立宝, 姚良忠, 等. 大规模双馈型风电场的小扰动稳定分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (4): 63-70.
- [28] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究 (博士学位论文) [D]. 浙江大学, 2005.
- [29] 胡家兵. 双馈异步风力发电机电网故障穿越 (不间断) 运行研究——基础理论与关键技术 (博士学位论文) [D]. 浙江大学, 2009.
- [30] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [31] 祝贺, 徐建源, 滕云, 等. 风力机风轮气动性能三维流场数值模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (17): 85-90.
- [32] James J R, Edward W G, Max D C, et al. A review of wind turbine wake effects [R]. DOE/ET/23160-80/1, 1980.
- [33] Sanderhoff P. Park: user's guider [M]. Roskilde, Denmark: Riso National Laboratory, 1993.
- [34] Ebeble W R. Wind flow characteristics in the wake of large wind turbines [J], Vol. I-Analytical Development, DOE/NASACR-165-380.
- [35] Katic I, Højstrop J, Jensen N O. A simple model for cluster efficiency [C]. Pro. European Wind Energy Conference, 7-9 October, 1986, Rome, Italy.
- [36] 石立宝, 赵阳, 倪以信, 等. 计及风电间歇性的电力系统电压稳定评估 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (7): 18-24.
- [37] 郑睿敏, 李建华, 李作红, 等. 考虑尾流效应的风电场建模以及随机潮流计算 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (12): 1515-1520.
- [38] 汪海瑛, 白晓民. 大规模风电场的发电充裕度与容量可信度评估 [J]. 电网技术, 2012, 36 (6): 200-206.
- [39] 曹娜, 赵海翔, 任普春, 等. 风电场动态分析中风速模型的建立及应用 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (36): 68-72.
- [40] 徐玉琴, 张浩林, 王娜. 计及尾流效应的双馈机组风电场等值模型研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 423 (1): 70-76.
- [41] 苏勋文. 风电场动态等值建模方法研究 (博士学位论文) [D]. 华北电力大学, 2010.

- [42] Srensen Poul, Cutululis, Nicolaus Antonio. Power fluctuations from large wind farms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22 (3): 958-965.
- [43] Akhmatov V. Variable speed wind turbines with doubly-fed induction generators, Part II: Power system stability [J]. Wind Engineering, 2002, 26 (3): 171-188.
- [44] 蔺红. 直驱式风电场动态等值建模研究 (博士学位论文) [D]. 新疆大学, 2012.
- [45] 张新燕, 王维庆, 何山. 风电并网运行与维护 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [46] Suvire G O, Mercado P E. Wind farms: Dynamic model and impact on a weak power system transmission and distribution conference and exposition [C]: Latin America, 2008 IEEE/PES13-15: 1-8.
- [47] Morton A B. Model aggregation of wind farms and other ensemble systems [C]. 2007 Australasian Universities Power Engineering Conference, Perth, Western Australia, 2007.
- [48] Sedighzadeh M, Rezazadeh A. A wind farm reduced order model using integral manifold theory [C]. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, Cairo, Egypt, 2008.
- [49] Kazachkov Y A, Feltes J W, Zavadil R. Modeling wind farms for power system stability studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 4 (2): 1526-1533.
- [50] 黄梅, 万航羽. 在动态仿真中风电场模型的简化 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (9): 147-152.
- [51] Fernandez L M, Garcia C A, Saenz J R, et al. Equivalent models of wind farms by using aggregated wind turbines and equivalent winds [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50 (3): 691-704.
- [52] Kanellos F D, John Kabouris. Wind farms modeling for short-circuit level calculations in large power systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24 (3): 1687-1785.
- [53] Slootweg J G, Kling W L. Modeling of large wind farms in power system simulations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 10 (2): 503-508.
- [54] 李辉, 王荷生, 吴旭阳, 等. 基于遗传算法的风电场等值模型研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (11): 1-9.
- [55] 杨晓波, 岳程燕, 谢海莲. 用于电磁暂态仿真分析的永磁同步发电机风电场模型聚合方法 [J]. 电网技术, 2011, 35 (2): 115-120.
- [56] Peterson A, Petru T, Thiringer T. Grid disturbance response of wind turbines equipped with induction generator and doubly fed induction generator [C]. IEEE PES General Meeting, Toronto, Canada, 2003 (3): 1542-1547.
- [57] Perdana A. Dynamic models of wind turbines: a contribution towards the establishment of standardized models of wind turbines for power system stability studies [D]. PHD Thesis of Chalmers University of Technology, 2008.
- [58] Luis M Fernandez, Francisco Jurado, Jose Ramon Saenz. Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines [J]. Renewable Energy, 2008, 33 (2): 129-140.
- [59] Poul Sorensen, Anca Hansen, Lorand Janosi, et al. Simulation of interaction between wind farm and power system [R]. RISØ-R-1281 (EN).
- [60] 苏勋文, 米增强, 王毅. 风电场常用等值方法的适用性及其改进研究 [J]. 电网技术, 2010, 34 (6): 175-179.

第2章 双馈变速风电机组建模

2.1 引言

随着电力电子和控制技术的快速发展,相比于传统的恒速风电机组,双馈变速风电机组可以更有效地利用风能,为电网提供无功及电压支持,且其转子侧变流器容量仅为发电机容量的20%~30%,这些优势使得双馈变速风电机组得到了广泛应用。

双馈变速风电机组由风力机、机械传动系统(轴系)、双馈感应发电机、变流器及其控制系统等组成。本章把双馈发电机和转子侧变流器分开处理,搭建双馈变速风电机组完整模型。

2.2 风力机建模

2.2.1 风力机空气动力学建模

风力机从风中捕捉的功率可表示为

$$P_{\text{turb}} = \frac{1}{2} C_p(\beta, \lambda) \rho \pi R^2 v^3 \quad (2-1)$$

式中, P_{turb} 为风力机从风中捕获的风能(W); ρ 为空气密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); R 为风轮半径(m); v 为风电机组输入风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); β 为叶片桨距角($^{\circ}$); λ 称为叶尖速比, $\lambda = \frac{\omega_t R}{v}$, ω_t 为风力机转速($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$); C_p 为风力机的功率系数。

对于给定的叶尖速比 λ 和叶片桨距角 β , 风力机的功率系数 C_p 可表示为^[1]

$$C_p(\beta, \lambda) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5.0 \right) e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}} \quad (2-2)$$

$$\text{式中, } \lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}}.$$

由式(2-2)根据不同的 β 、 λ 计算得到的 C_p — λ 关系曲线如图2-1所示。

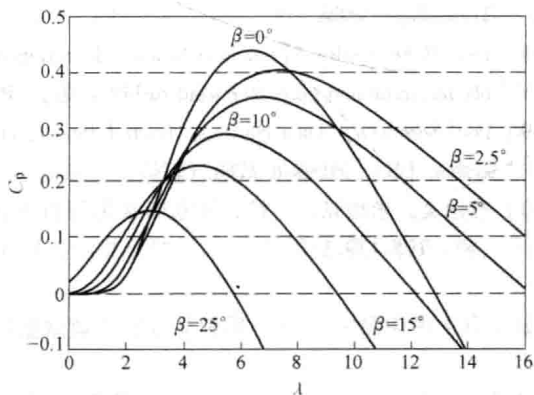


图2-1 $C_p(\lambda, \beta)$ — λ 关系曲线

2.2.2 桨距角控制建模

为了获得最大的输入机械转矩,通常情况下叶片的桨距角保持在 0° ,当桨距角控制系统输入量超过限值时,控制器动作增大叶片的桨距角。桨距角控制系统模型如图2-2所示,控制方程为

$$\begin{cases} X'_{\text{err}} = K'_D X_{\text{err}} + T_D \frac{dX_{\text{err}}}{dt} \\ \beta_{\text{ref}} = K_I X'_{\text{err}} + \frac{1}{T_I} \int_0^t X'_{\text{err}} dt \\ T_{\text{serv}} \frac{d\beta}{dt} = \beta_{\text{ref}} - \beta \end{cases} \quad (2-3)$$

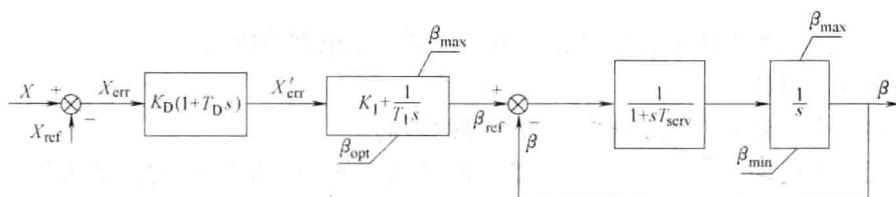


图2-2 桨距角控制系统模型

式中, K_D 、 T_D 为比例微分控制器的比例系数和微分系数; K_I 、 T_I 为比例积分控制器的比例系数和积分系数; T_{serv} 是桨距角控制器中伺服系统的时间常数; β 为桨距角; X_{err} 为误差信号; β_{ref} 为桨距角基准值。

图2-2中, X_{ref} 为控制量的基准值; β_{max} 为桨距角的最大值; β_{opt} 为桨距角最优值; β_{min} 为桨距角的最小值。 X 为控制量,可选择以下几种变量^[2]: ①电气量,如风电机组输出的有功功率;②机械量,如发电机转速;③电气量和机械量的组合。

桨距角控制系统将控制量 X 与其基准值 X_{ref} 比较,将误差信号 X_{err} 送入比例微分(PD)控制器,然后传到比例积分(PI)控制器生成桨距角基准值 β_{ref} 。

2.3 双馈变速风电机组轴系建模

由于风力机轴的刚度度较低,本文采用双质块轴系模型来表示风电机组的机械传动系统。将风力机和齿轮箱等效成一个质块,发电机等效为另一个质块,风电机组双质块轴系模型为^[2]

$$\begin{cases} J_t \frac{d\omega_t}{dt} = T_{\text{turb}} - T_m \\ J_g \frac{d\omega_g}{dt} = T_e - T_m \\ \frac{d\theta_{\text{tg}}}{dt} = \omega_t - \omega_g \\ T_m = K_s \theta_{\text{tg}} + D(\omega_t - \omega_g) \end{cases} \quad (2-4)$$