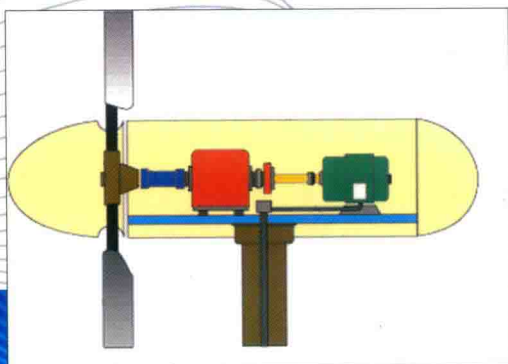


 普通高等教育风能与动力工程专业系列教材

风力发电机组 监测与控制

第2版

WIND GENERATOR'S
MONITORING AND CONTROL



© 叶杭冶 主编

普通高等教育风能与动力工程专业系列教材

风力发电机组监测与控制

第2版

主编 叶杭冶

参编 许国东 史晓鸣 孙 勇

机械工业出版社

本书介绍风力发电机组控制与测试技术研究的基础内容及控制系统的设计方法。首先介绍与风力发电控制技术相关的基本概念,包括风力机的能量转换,风力发电机组的运行工况与约束条件;然后介绍风力发电机组的特性和建模,在此基础上介绍变速恒频风力发电机组的基本控制目标、控制策略与控制方法;接下来介绍控制系统的设计方法及工具软件的应用;再讨论双馈异步发电机和永磁同步发电机的并网技术及对电网的适应性控制技术;最后介绍风力发电机组的状态监测与性能测试技术。

本书可作为高等学校本科生和研究生教学用书,也可供从事风力发电技术研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组监测与控制/叶杭冶主编.—2版.—北京:机械工业出版社,2018.12

普通高等教育风能与动力工程专业系列教材

ISBN 978-7-111-61235-3

I. ①风… II. ①叶… III. ①风力发电机-机组-监测-高等学校-教材②风力发电机-机组-控制-高等学校-教材 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第245115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 张珂玲

责任校对:张薇 封面设计:张静

责任印制:张博

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2019年1月第2版第1次印刷

184mm×260mm·12印张·295千字

标准书号:ISBN 978-7-111-61235-3

定价:32.00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

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

自本书第1版2011年出版后,我国风力发电技术产业经历了从新兴的高速发展时期走向成熟的稳定发展时期。这期间风力发电机组的检测与控制技术有了很大的进步,第1版中的许多内容已不再适用,需要更新补充。在征求了高校相关专业教师的意见后,编者对第1版进行了全面修订。

与第1版相比第2版在以下章节进行了较大修改:

第一章绪论中补充了风力发电机组控制技术未来发展趋势的内容。

第二章由定桨恒速风力发电机组的控制改为风力发电机组的运行条件,介绍与风力发电控制技术相关的基本概念,包括风力机的能量转换、风力发电机组的运行工况与约束条件。

第三章改为风力发电机组的特性和建模,增加了变桨系统与塔架的动态特性。

为了与第三章内容更好地衔接,将第1版第五章、第六章的内容改至第2版的第四章、第五章中。

第六章改为风力发电机组的基本控制逻辑,将风力发电机组开机、停机、偏航、安全保护等基本控制逻辑专门作为一个章节介绍。

第七章控制系统的执行机构及传感器的内容并入其他相关章节,其余内容被删除。

第1版的第四章改为第七章,即风力发电机组的并网控制技术。其中内容按最新的国家(国际)标准、规范做了修改和补充。

本次修订由叶杭冶、许国东、史晓鸣、孙勇等完成,由叶杭冶负责统筹定稿。沈阳工业大学王晓东老师对本书的修订提出了宝贵的意见和建议,在此向他表示衷心感谢。

近10年来风力发电技术的发展远远超出了本书涉及的范围,本书的修订只局限于基础知识与基本概念。书中若有疏漏与错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 风力发电机组的总体结构	1
第二节 控制系统的作用	3
第三节 控制系统的基本任务	4
第四节 控制系统的结构与通信协议	5
练习题	8
参考文献	8
第二章 风力发电机组的运行条件	9
第一节 风力机的能量转换	9
第二节 风力发电机组的运行工况	15
第三节 风力发电机组运行的约束条件	21
练习题	23
参考文献	23
第三章 风力发电机组的特性和建模	24
第一节 风力机特性及数学模型	24
第二节 传动链特性及数学模型	29
第三节 电气特性及数学模型	31
第四节 变桨系统特性及数学模型	39
第五节 塔架的特性与数学模型	48
练习题	53
参考文献	54
第四章 风力发电机组控制策略	55
第一节 风力发电机组的控制目标	55
第二节 变速变桨风力发电机组的基本控制策略	56
第三节 辅助的控制方法与手段	64
第四节 控制策略的改进	66
练习题	75
参考文献	76

第五章 控制器的设计及实现	77
第一节 控制系统的设计方法	77
第二节 控制系统的设计过程	82
第三节 外部控制器的设计	91
第四节 外部控制器的实现	95
第五节 使用 Bladed 软件进行载荷计算	103
练习题	114
参考文献	114
第六章 风力发电机组的基本控制逻辑	115
第一节 风力发电机组的启机过程	115
第二节 风力发电机组的停机过程	117
第三节 风力发电机组的偏航控制	121
第四节 风力发电机组的安全保护	124
练习题	129
第七章 风力发电机组的并网控制技术	130
第一节 定桨恒速风力发电机组的并网过程	130
第二节 变速恒频风力发电机组的并网过程	137
第三节 风力发电机组的电网适应性控制	141
练习题	152
参考文献	153
第八章 风力发电机组的状态监测与性能测试	154
第一节 风力发电机组的状态监测	154
第二节 风力发电机组的性能测试	163
练习题	187
参考文献	187

第一章 绪 论

风力发电机组的控制与检测技术是实现能源互联网化与智能化的基础。人们对清洁能源的巨大期望，促使风电产业高速发展，从而促进了风力发电技术的不断进步，为风电产业更大规模的发展提供了可能。在风力发电技术的发展过程中，控制与检测技术始终起着主导作用，并且随着能源互联网与智能化的推进，其重要性更加突出。

第一节 风力发电机组的总体结构

并网型风力发电机组已从定桨恒速风力发电机组（见图 1-1）发展成变速恒频风力发电机组。目前变速恒频风力发电机组主要有采用双馈式异步发电机（见图 1-2）和采用永磁式同步发电机（见图 1-3）两种。

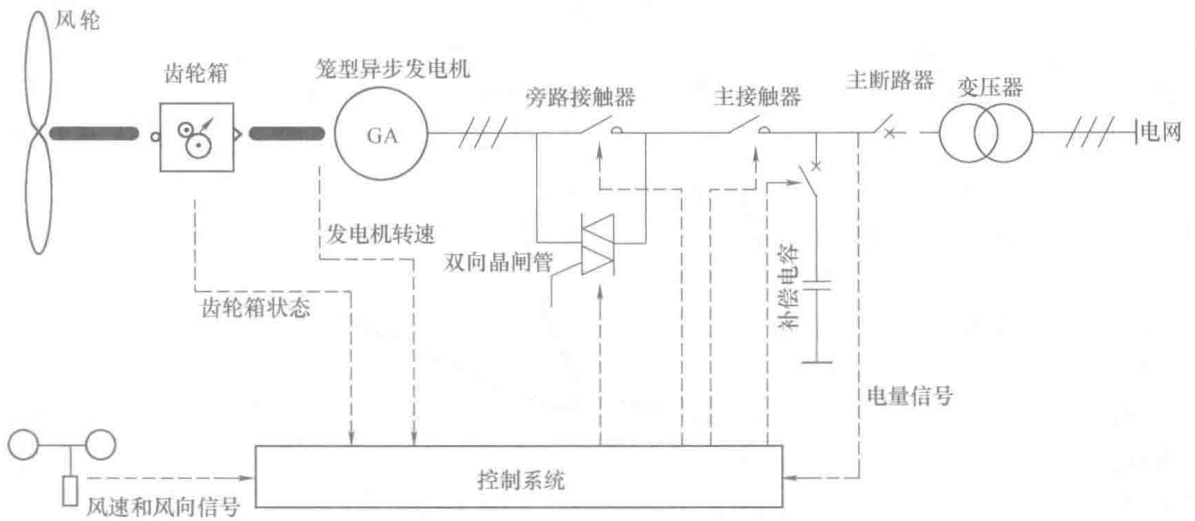


图 1-1 定桨恒速风力发电机组总体结构

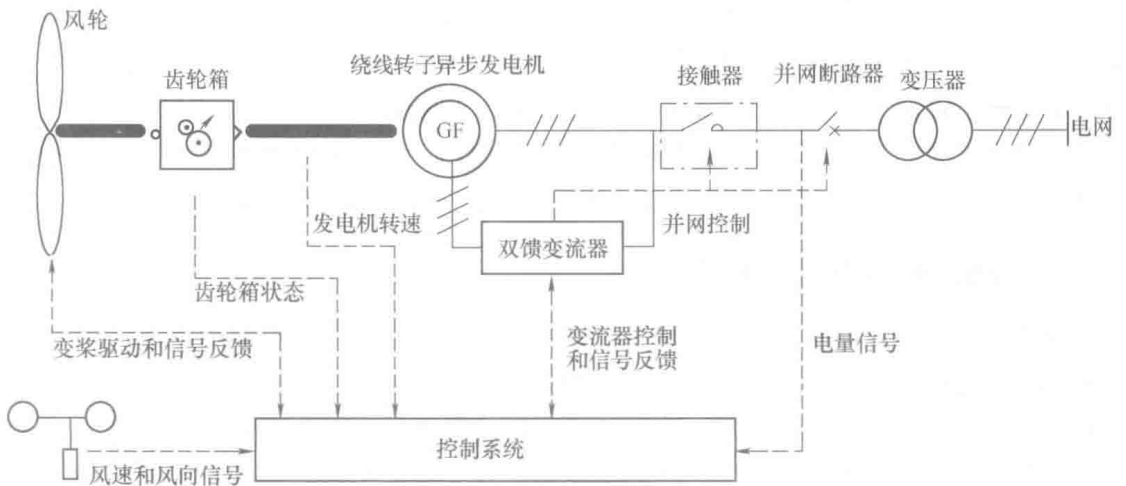


图 1-2 双馈异步式变速恒频风力发电机组总体结构

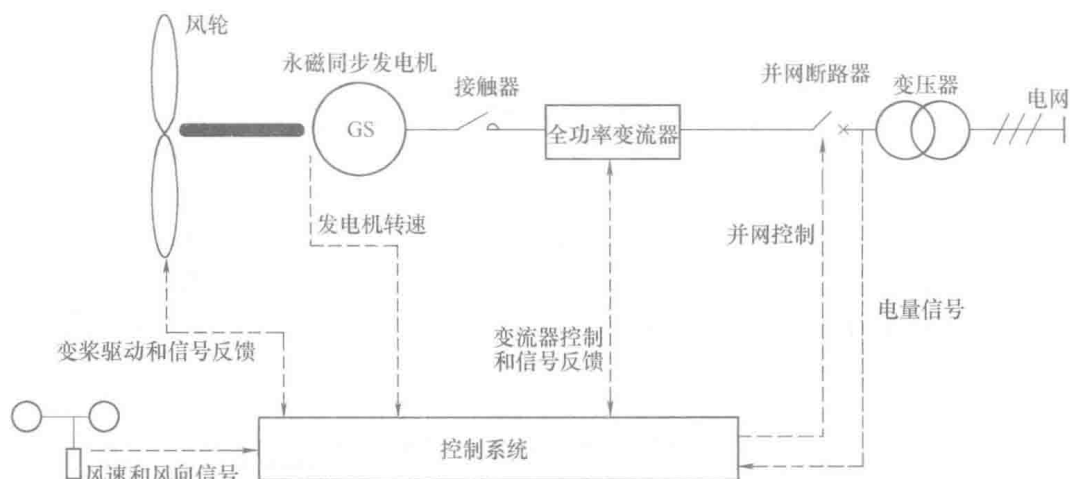


图 1-3 永磁同步式变速恒频风力发电机组总体结构

一、定桨恒速风力发电机组

风力发电机组通过风轮将风能转换成机械能。风以一定的速度和攻角作用在桨叶上，使桨叶产生旋转力矩而转动。各种机型的风轮一般采用水平轴、三叶片结构，按上风向布置。风轮通过增速齿轮箱带动发电机，或者也可直接带动低速发电机发电。

定桨恒速风力发电机组的风轮大都采用桨叶与轮毂刚性连接的结构，即所谓定桨距风轮，并且采用具有自动失速性能的桨叶，当风速超过额定风速后，作用在桨叶上的气动力矩不再增加，使输入功率限制在额定功率以下。桨叶尖部 1.5 ~ 2.5m 部分一般设计成可控制的叶尖扰流器。当风力发电机组需要脱网停机时，液压系统按照控制指令将叶尖扰流器释放并将液尖扰流器旋转一个大角度形成气动阻力，使风轮转速迅速下降，这一功能通常称为空气动力制动。

由于风力发电机组启动/停车频繁，风轮又具有很大的转动惯量，为了可靠制动，风轮的转速一般设计在 20r/min 左右，机组容量越大，设计的转速越低，因此，在风轮与发电机之间需要设置增速器。大型风力发电机组的机械传动系统都沿中心线布置，因此增速器大多采用结构紧凑的行星齿轮箱。

风力发电机组中的发电机一般采用异步发电机，对于定桨恒速风力发电机组，一般采用双绕组双速笼型异步发电机，这不仅解决了低功率时发电机的效率问题，而且改善了低风速时的叶尖速比，提高了风能利用系数并降低了运行时的噪声。

对于定桨恒速风力发电机组在发电机并网过程中采用晶闸管限流软切入方式，当过渡过程结束时，旁路接触器合上，晶闸管被切除，风力发电机组进入发电运行状态，如图 1-1 所示。

二、变速恒频风力发电机组

在变速恒频风力发电机组出现以前，大型风力发电机组已采用变桨距风轮，桨叶与轮毂不再采用刚性连接，而是通过专门为变距机构设计的变距轴承连接在一起。这种风轮可根据风速的变化调整气流对叶片的攻角，当风速超过额定风速后，输出功率可基本稳定地保持在额定功率上；特别是在大风情况下，风力发电机组处于顺桨状态，这样就使桨叶和整机的受力状况大为改善。由于变桨控制的响应速度跟不上风速的变化，在变速恒频控制出现以前，

采用的是高滑差发电机（转差率可控），这种变速方式可以在有限的范围内实现变速运行，以稳定功率输出。

变速恒频风力发电机组在变桨距风力发电机组的基础上采用了转速可以在大范围变化的双馈式异步发电机或永磁式同步发电机及相应的电力电子技术，通过对最佳叶尖速比的跟踪，使风力发电机组在所有的风速下均可获得最佳的功率输出。

变速恒频风电机组的主流机型是双馈异步式风力发电机组和永磁同步风力发电机组。双馈异步式变速恒频风力发电机组的发电机定子直接与电网相连，转子通过变流器与电网相连，变流器采用交流励磁变速恒频技术，控制发电机定子以恒压恒频向电网输电，如图 1-2 所示。低速永磁同步式变速恒频风力发电机组不带增速齿轮箱，发电机转子为永磁体，由定子通过全功率变流器向电网输电，如图 1-3 所示。这两种机组都可以由变流器实现无冲击并网和脱网。

在风力发电机组的控制中，变桨控制和变速控制一般不是独立地用作风力发电机组控制的两种控制方案，而是互相支持、互相依存的两种技术。没有变速控制的变桨距风力发电机组或没有变桨控制的变速风力发电机组都是难以稳定运行的。

第二节 控制系统的作用

风力发电机组的动态特性是由机组的各部件的动态特性构成的，它包括风轮（桨叶）的气动特性、传动系统的动态特性、发电机的动态特性及控制系统的动态特性，如图 1-4 所示。

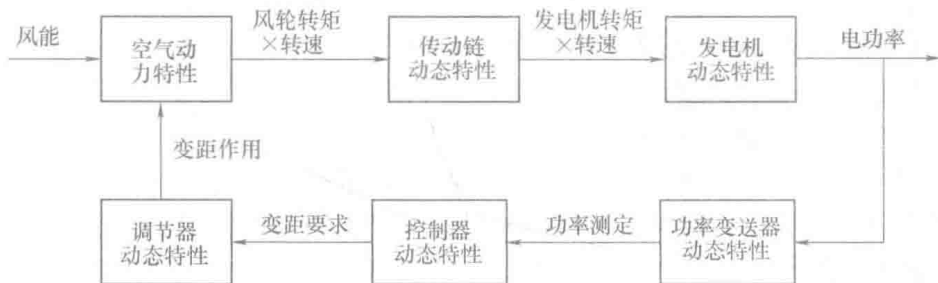


图 1-4 风力发电机组的动态特性

对于风力发电机组，特别是变速恒频风力发电机组的设计，还应考虑整机的结构动力学问题，以便机组在运行或调节过程中避开系统的自振频率。

一台已设计好的风力发电机组，其动态特性是确定的，即对于任何给定的输入，它有一个确定的输出响应。如果输入是恒定的，可以通过设计使得系统具有最佳输出；如果输入是变化的，我们希望系统能根据变化来进行适当的调整，使系统保持最佳输出。控制系统的作用就是根据它所接收到的机组及其工作环境信息，调节机组使其按照预先设定的要求运行。

对于定桨恒速风力发电机组，当输入变化时，控制系统对机组的调整非常有限，如当风向改变时，通过偏航系统调整其风轮方向，或在风速变化时切换发电机绕组，进行变极调速，对其动态响应特性没有施加任何影响，因此，在输入变化的情况下，风力发电机组只有很小机会运行在最佳状态下。机组的控制方式如图 1-5 所示。



图 1-5 定桨恒速风力发电机组的控制方式

对于变速恒频风力发电机

组，由于采用了闭环控制（如图 1-2 所示），因此控制系统可以完全决定系统的动态响应特性，并且控制系统可以根据输入的变化对输出进行控制。

表示风力发电机组动态特性的微分方程通常写成如下形式：

$$I\Phi'' + B\Phi' + K\Phi = F_A \quad (1-1)$$

式中， I 为风力发电机组的转动惯量； B 为阻尼系数； K 为传动系统的刚性系数； F_A 为驱动力； Φ 为轴的旋转角度。

当系统加入控制力 F_C 后，其动态特性方程改变为

$$I\Phi'' + B'\Phi' + K\Phi = F_A - F_C \quad (1-2)$$

假定控制力 F_C 是以比例加积分的方式作用在旋转轴上的，即

$$F_C = k_1\Phi + k_2\Phi' \quad (1-3)$$

这时，微分方程可以写成

$$I\Phi'' + (B + k_2)\Phi' + (K + k_1)\Phi = F_A \quad (1-4)$$

其中阻尼系数从 B 增加到 $(B + k_2)$ ，刚性系数从 K 增加到 $(K + k_1)$ 。

从式(1-4) 可以看到，由于控制系统的作用，改变了系统的动态特性，但系统的物理参数和所受的外力并没有改变。

第三节 控制系统的基本任务

风力发电机组控制系统的基本任务是对风力机的能量输入和发电机的能量输出进行控制。它不仅要根据风速与风向的变化对机组进行优化控制，以保证机组稳定、高效地运行；而且还要监视电网和机组的运行参数，接受电网的调度指令，满足电网的运行要求，应对电网的各种瞬时故障，以确保运行的安全性与可靠性。

20 世纪 80 年代中期，定桨恒速风力发电机组开始进入风力发电市场，它主要解决了风力发电机组的功率控制和并网及脱网停机的安全性问题。定桨恒速风力发电机组利用风力机桨叶的自动失速性能进行功率控制；采用软并网技术解决了对电网的冲击问题；采用空气动力制动解决了脱网停机问题；采用偏航跟踪与自动解缆技术解决了对风问题，解决的这些问题都是并网运行的风力发电机组控制系统最基本的问题。由于功率输出是由桨叶自身的性能来决定的，叶片的桨距角在安装时已经固定，而发电机的转速受到电网频率的限制。因此，只要在允许的风速范围内，定桨恒速风力发电机组的控制系统在运行过程中对由于风速变化引起输出能量的变化是不作任何控制的。这就大大简化了控制系统和相应的执行机构结构，使得定桨恒速风力发电机组能够在较短的时间内实现商业化运行。

20 世纪 90 年代初期，基于高转差异步发电机进行有限变速的全桨变距风力发电机组开始进入风力发电市场。采用全桨变距的风力发电机组，起动时可对转速进行控制，并网后可对功率进行控制，使风力发电机组的起动性能和功率输出特性都有显著改善。在控制系统的执行机构方面，液压系统不再是简单的以制动为目的的执行机构，为实现变桨控制，它采用电液比例阀或电液伺服阀组成了闭环控制系统，随后又开发了基于机电伺服系统的独立变桨系统，使风力发电机组的控制水平提高到了一个新的阶段。

由于有限变速的全桨变距风力发电机组在额定风速以下运行时的效果仍不理想，到 20 世纪 90 年代中期，基于变速恒频技术的全桨变距风力发电机组开始进入风电市场。变速恒

变频风力发电机组与定桨恒速风力发电机组的根本区别在于，变速恒频风力发电机组允许风轮转速跟随风速在相当宽的范围内变化，从而使机组获得最佳功率输出特性。变速恒频风力发电机组的主要特点：当低于额定风速时，它能最大限度地跟踪最佳功率曲线，使风力发电机组具有较高的风能转换效率；当高于额定风速时，它可以增加传动系统的柔性，使功率输出更加稳定，特别是解决了电网故障穿越、参与电网电压调控、惯量响应与一次调频等问题后，它达到了高效率、高质量地向电网提供电能的目的。风力发电机组从定桨距恒速运行发展到基于变速恒频技术的变速运行，实现了从能够向电网提供电能到理想地向电网提供电能的转变。

今后，运用互联网、大数据、云计算和物联网等技术提升风力发电系统的运行可靠性和发电效率、降低风电系统故障率和运维成本，将成为风电技术的一个重要发展趋势。风力发电智能化控制包括机级控制和场级控制两个方面。

在机级控制方面，基于现代传感检测技术的风力发电机组健康监测、振动监测、智能润滑、智能偏航、智能变桨、智能解缆等将是必然的发展趋势。在风力发电机组各部件内布置成百上千个传感器，实时监测风力发电机组的运行状态，并经通信网络传送到远端和云端服务器，服务器根据高效算法和大数据信息，实时给出最优的控制策略，可极大地增强风力发电机组的控制效率，提高其自诊断和自适应能力，显著降低人工干预和现场维护的频率。大型风力发电机组的故障主要集中在齿轮箱、发电机、叶片、电气系统和偏航系统等关键部件上。这些关键部件一旦出现故障，会造成风力发电机组停机，且维修维护成本很高，严重地影响了风力发电系统的经济效益，对于海上大型风力发电机组来说这一问题更为突出。目前，大型风力发电机组虽然已经普遍安装了在线监测系统，但是在数据采集的全面性、数据处理的实时性、大数据的应用、故障诊断和控制策略优化等方面与智能化还有很大的差距，因此，风力发电机组在控制方面还有很大的技术提升空间。

在场级控制方面，风电场机组的协同智能控制和风电场全寿命周期智能管理是两个重要发展方向。风力发电机组协同智能控制着眼于风电场整体的发电效率，根据风电场整体气象数据和风电场内局部对风的测量数据，在机级智能控制的基础上，实时综合运用尾流控制，前馈控制以及场内机组信息共享等多种智能技术，实现风电场发电效益的最大化和整体故障率的降低。风电场全寿命周期智能管理是风电场在规划、建设、运行、维护和电网协同等多个方面长周期效益最大化的管理智能化集成。它将风资源评估、风力发电场建设、风功率预测、故障诊断与预警、风电场能量管理、电力调度与交易等各个环节整合起来，形成基于大数据和云计算的智能管理平台。智能型风电场管理平台具备信息的标准化采集、监控和存储，在线式的健康状态分析与评估等功能，并基于检测和数据挖掘技术的大数据运维系统可将造成问题的隐患及时排除并制定与之相对应的运维策略，从而将风电运维成本降到最低。

第四节 控制系统的结构与通信协议

一、控制系统的结构

图 1-6 是一个典型的双馈式变速恒频风力发电机组控制系统的总体结构图。

控制系统由机舱控制部分和塔基控制部分组成，变桨系统控制风力发电机组的能量输入；变流器控制发电机组能量输出。控制系统采用模块化分布式配置。机舱控制部分主要由

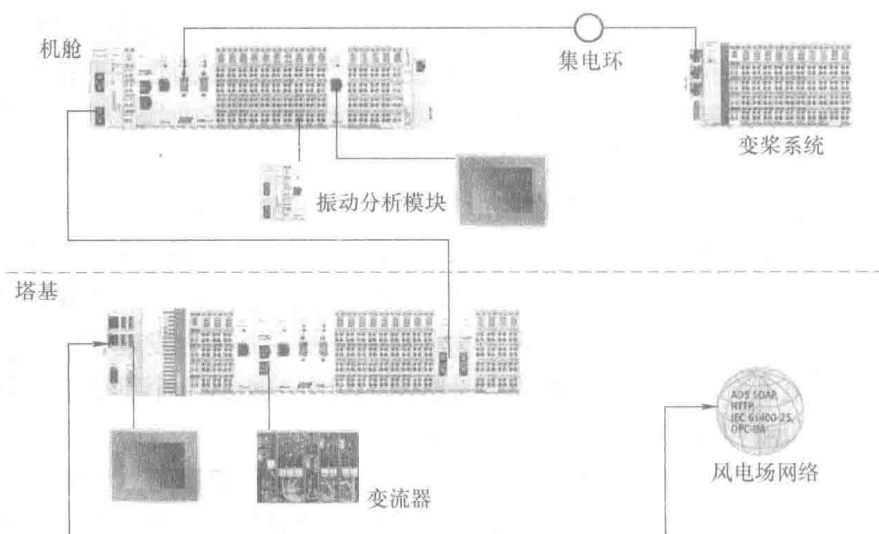


图 1-6 控制系统的总体结构

通信模块和输入/输出模块组成，其中，输入/输出模块提供数字量和模拟量的输入/输出与 PT100 输入接口，可实现风速、风向、风轮转速、发电机转速、机舱位置、环境温度、发电机绕组与轴承温度、液压系统压力及安全链等信号的测量以及偏航系统与液压系统等执行结构的控制；通信模块可实现与振动传感器及变桨系统等子系统的通信。塔基控制部分主要由主控制模块、通信模块、电网测量模块和输入/输出模块组成，其中，塔基通信模块可实现与变流器等子系统的通信；电网测量模块实现对电网参数如电压、电流的采集和计算；主控制模块实现控制软件的实时运行，实现数据采集与运算、机组起停控制、变速变桨核心算法以及数据的存储与转发等功能。

在一般情况下，控制系统的核心模块位于塔基控制柜内，机舱控制器采集到的传感器等状态信息由光纤通信模块转换为光纤信号经塔架传输到达塔基控制柜的光纤通信模块中，经中央处理器处理后，由光纤通信模块返回给机舱控制器，控制各个子系统执行元器件的输出。

机舱控制柜的主要作用：

1) 采集机舱内振动开关、油位、压差、左右扭缆、磨损、预磨损、发电机电刷、机组润滑与断路器反馈等开关量信号；采集并处理风轮转速、发电机转速、风速风向、温度及振动等模拟量信号，并由光纤通信模块转换为光纤信号经塔架传输到达塔基控制柜内，经中央处理器处理后，由光纤通信模块返回给机舱控制器，控制各个子系统执行元器件的输出。

2) 通过集电环给变桨系统供电，建立通信和开关量之间的信号交互，通过紧急顺桨指令 (Emergency Feather Command, EFC) 可控制变桨系统紧急顺桨。通过与变桨系统通信，发送位置信号给变桨系统，实现风轮桨距角的动态控制与功率控制。

塔基控制柜的主要作用：

1) 控制系统的主 CPU 模块位于塔基控制柜内，主要完成数据采集、处理、逻辑运算与判断、信号输出以及数据存储；对外围执行机构发出控制指令；与机舱控制柜进行通信，接收机舱信号，返回控制信号；与变流器通信，实现风力发电机组有功功率、无功功率以及变速恒频控制；与风电场中央监控系统通信，实现对机组运行状态的监控。

2) 对变流器、变桨系统、液压系统状况、偏航系统状况、润滑系统状况、齿轮箱状况及机组关键设备的温度和环境温度等监控；通过对变流器和变桨系统的协调控制，实现机组

变速恒频运行、有功功率与无功功率调节、并网与脱网控制；实现偏航自动对风、自动解缆、发电机和主轴的自动润滑、主要部件的除湿加热和散热器的开停等控制功能。

3) 对机组三相电压与电流进行测量与计算，实现对电网电压、电流、相位与频率的监控，以及机组有功发电量、有功耗电量、无功发电量与无功耗电量的统计。

4) 通过和机舱相连的信号线，实现机组起动、停机与安全链保护、手动偏航与手动变桨等功能。

在塔基上，风力发电机组所接入的传感器主要有塔基温度传感器、塔基柜温度传感器、变流器网侧与机侧温度传感器等，分别用于检测塔基温度、塔基柜内部温度、变流器网侧与机侧温度等。

在机舱上，齿轮箱所接入的传感器主要有润滑油压力传感器、油温温度传感器、油位传感器与滤芯堵塞传感器，分别监测齿轮箱润滑油油压、油温、油位以及滤芯堵塞状态；发电机所接入的传感器主要有绕组温度传感器、轴承温度传感器与集电环室温度传感器，分别监测发电机各个绕组温度、驱动轴承温度、非驱动轴承温度与集电环室温度；液压系统所接入的传感器主要有系统压力传感器、油位传感器与偏航回路压力传感器，分别监测液压系统压力、油位与偏航回路压力；偏航系统所接入的传感器主要有偏航接近开关与扭缆保护开关，分别用于计算机组偏航位置、扭缆状态以及防止机组过度扭缆的监测。除此之外，还有风轮转速与发电机转速监测接近开关、机组振动传感器、风速风向传感器、环境温度传感器、环境湿度与气压传感器等。为提高风力发电机组运行的可靠性，大型风力发电机组一般都安装在线监测系统，实现机组传动链的监测和保护，如监测主轴承、齿轮箱、联轴器与发电机的受力和振动情况，可以提前发现主要部件存在的隐患与问题，以减少风力发电机组的维护成本。

主控系统和在线监测系统可通过风电场级数据服务器，实现风电场的远程监控与故障诊断。借助能源互联网技术，构建基于大数据的风电系统信息化云平台，通过整合运行、气象、电网、电力市场等的的数据，进行大数据分析、负荷预测、发电预测与机器学习，打通并优化能源生产和能源消费端的通道，提升运作效率，使需求和供应可以随时进行动态调整，实现风电大数据的采集分析、智能监控与管理、预测性的维护与检修、故障预测与健康管理和性能评估与优化、能量智能调度等功能。打造一个智能、健康、友好、高效的智慧型新能源发电站。

二、CANopen 通信协议

风力发电机组主控系统与变流器、变桨系统等部件之间的通信协议通常采用 CANopen。CANopen 是一种架构在控制器局域网络 (Controller Area Network, CAN) 上的高层通信协议，该协议着重定义了应用层以及相关部件的通信架构，详细内容包括对象字典、网络管理、启动配置、各种传输对象等。其中，对象字典是 CANopen 的关键，它保存了一个 CANopen 节点所有的配置参数和通信数据，也提供了 CANopen 应用层和用户程序交流的接口。一个标准的 CANopen 节点结构如图 1-7 所示，在数据链路层之上，添加了应用层。

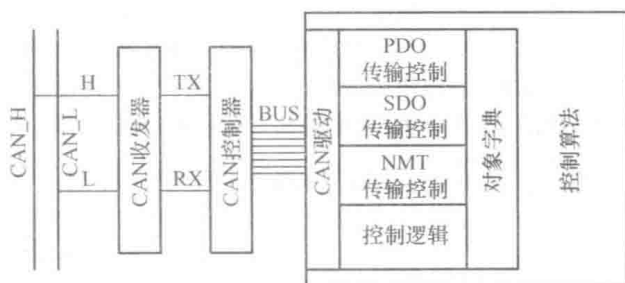


图 1-7 CANopen 节点结构

CANopen 应用层协议细化了 CAN 总

线协议中关于标识符的定义。定义标准报文的 11 位标识符中高 4 位为功能码，后 7 位为节点号，并将其重命名为通信对象标识符 (COB-ID)。功能码将所有的报文分为 7 个优先级，按照优先级从高至低依次为：网络 (NMT) 命令报文、同步 (SYNC) 报文、紧急 (EMERGENCY) 报文、时间 (TIME) 戳、过程数据对象 (PDO)、服务数据对象 (SDO) 和节点状态 (NMT Error Control) 报文。7 位节点号表明 CANopen 网络最多可支持 127 个节点共存 (0 号节点为主站)。

NMT 命令为最高优先级报文，由 CANopen 主站发出，用以更改从节点的运行状态。SYNC 报文定期由 CANopen 主站发出，所有的同步 PDO 根据 SYNC 报文发送数据。EMERGENCY 报文由出现紧急状态的从节点发出，任何具有紧急事件监控与处理能力的节点会接收并处理紧急报文。TIME 报文由 CANopen 主站发出，用于同步所有从站的内部时钟。PDO 分为 4 对发送和接收 PDO，每一个节点默认拥有 4 对发送 PDO 和 4 对接收 PDO，用于过程数据传递。SDO 分为发送 SDO 和接收 SDO，用于读写对象字典。优先级最低的为 NMT Error Control 报文，由从节点发出，用以监测从节点的运行状态。

每个节点都维护了一个对象字典 (Object Dictionary, OD)。该对象字典保存了节点信息、通信参数和所有的过程数据，是 CANopen 节点的核心。同时，上层应用程序也主要通过读写对象字典和 CANopen 应用层进行交互。

CANopen 的对象字典为两级数组结构。第一级数组称为主索引，宽度为 FFFFh。每一个主索引可拥有一个宽度为 FFh 的子索引表。因为 CANopen 的对象字典支持的索引范围巨大，所以 CANopen 对象字典的实现也是 CANopen 应用层开发的一个难点。不过，并非所有索引都需实现，一个节点只需实现能完成其功能的最小对象字典集合就可正常工作。

CANopen 的每一个节点都维护了一个状态机。该状态机的状态决定了该节点当前支持的通信方式以及节点行为。当初始化时，节点将自动设置自身参数和 CANopen 对象字典，发出节点启动报文，并不接收任何网络报文。当初始化完成后，自动进入预运行状态。在该状态下，节点等待主站的网络命令，接收主站的配置请求，因此可以接收和发送除了 PDO 以外的所有报文。运行状态为节点的正常工作状态，可接收并发送所有通信报文。停止状态为临时状态，只能接收主站的网络命令，以恢复运行或者重新启动。

练 习 题

1. 风力发电机组控制技术的基本任务是什么，包含哪些内容？
2. 定桨恒速风力发电机组的控制系统主要解决了哪些关键技术问题，有什么特点？
3. 变速恒频风力发电机组除了可以对能量的输入与输出进行控制以外，还能控制哪些目标？
4. 风力发电机组控制技术主要经历了哪几个阶段，取得了哪些进步？
5. 风力发电机组由哪几个主要部件构成，各起什么作用？
6. 控制系统由哪几部分构成，主要控制对象有哪些？
7. 根据风力发电机组变桨距运动规律，写出其运动特性的微分方程组？假设 1.5MW 风机参数表述如下： β —桨距角， I —为叶片的转动惯量， B —阻尼系数， K —传动系统刚度系数， T_A —驱动转矩，当系统加入控制力 $T_F = k_1\beta + k_2\dot{\beta}$ 时，求微分方程组的解，并讨论系统的控制过程？

参 考 文 献

李家春，贺德馨. 中国风能可持续发展之路 [M]. 北京：科学出版社，2018.

第二章 风力发电机组的运行条件

第一节 风力机的能量转换

风力发电机组将通过风轮扫掠面的风能有限地转换为机械能，继而由发电机转换为电能。

一、风的能量

由流体力学可知，气流的动能

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2-1)$$

式中， m 为气体的质量； v 为气体的速度。

设单位时间内，气体流过截面积 A 的气体体积为 V ，则

$$V = Av \quad (2-2)$$

如果以 ρ 表示空气密度，该体积的空气质量为

$$m = \rho V = \rho Av \quad (2-3)$$

这时，该气流具有的动能为

$$E = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2-4)$$

式(2-1)~式(2-4)即为风能的表达式。在国际单位制中， ρ 的单位是 kg/m^3 ， V 的单位是 m^3 ， v 的单位是 m/s ， E 的单位是 W 。

从风能的表达式可见，风能的大小与气流的密度和流过截面的面积成正比，与气流速度的三次方成正比。其中 ρ 和 v 随地理位置、海拔、地形、气温及气压等因素而变化。

二、风能转换为机械能

气流通过风力机风轮时，推动风轮旋转，将一部分气流的动能转换为机械动能，对这一能量转换过程的分析与计算目前主要有以下三种模型：①叶素-动量理论模型（Blade Element and Momentum Model, BEM）。②涡方法模型（Vortex Method Model）。③计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）模型。不同计算模型所需的计算时间以及能够得到的流场信息如图 2-1 所示。

BEM 是目前应用中使用最广泛的气动计算模型。该模型以一维动量理论和二维叶素理论为基础，在来流方向上假设流体无黏性，根据伯努利方程建立风轮前后流动气体的动量关系，理想的风轮在这一过程中被称为“致动盘（Actuator Disc）”。在叶片的展向方向上，假设不同位置处的流场之间不存在相互干扰，利用二维翼型的实验升阻力系数，引入轴向和切向诱导因子来实现模型的封闭计算。

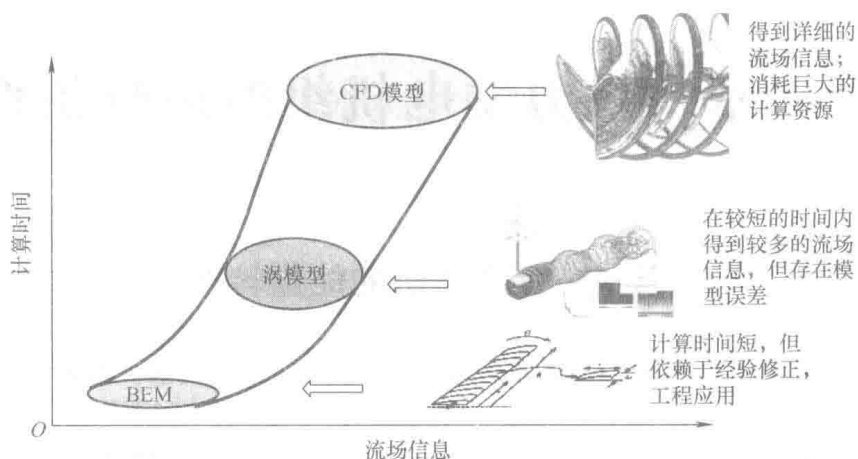


图 2-1 风电机组气动计算模型比较图

一维动量理论模型的依据是对理想风轮的假设, 该假设认为风力机是理想的吸功装置且旋转平面的无穷薄、气流与风轮之间不存在摩擦作用、尾流中也没有反向旋转的速度分量。理想风轮假设与“致动盘”的概念一致, 即将风轮抽象为一个具有体积力分布的圆盘, 来近似模拟风轮与流场之间的相互作用。图 2-2 为一维动量理论的示意图, v_1 为流入风速, v_4 为流出风速。

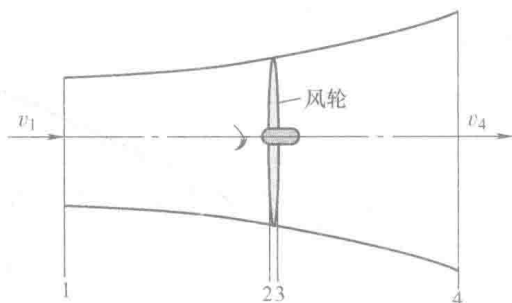


图 2-2 一维动量理论示意图

基于以上假设可以认为, 包围风力机旋转平面的外部流管可以分为两个部分: 来流区域 (1~2 流场) 和尾流区域 (3~4 流场)。在来流和尾流区域内, 假设流体无黏性、不可压, 并且能量守恒。因而在来流区域和尾流区域内, 伯努利方程 (Bernoulli's equation) 成立, 即:

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2 \quad (2-5)$$

$$\frac{1}{2}\rho v_3^2 + p_3 = \frac{1}{2}\rho v_4^2 + p_4 \quad (2-6)$$

式中, v 为气体流动速度; p 为气体静压; ρ 为气体密度。下标 1、2、3、4 分别表示图 2-2 中所示的位置: 1 为无穷远来流处, 2 为风轮前, 3 为风轮后, 4 为无穷远尾流处。

根据连续性方程可知风轮平面前后的流速相同, 并且设该速度具有以下形式

$$v_2 = v_3 = (1 - a)v_1 \quad (2-7)$$

式中, a 为轴向诱导因子。

从式(2-7)中可以看到, 轴向诱导因子 a 表征了风轮对来流速度的干扰作用。此外, 由于 1、4 平面均位于无穷远处, 因此可以认为在 1、4 平面位置处的静压均与大气压力相同。从而, 将式(2-5) 和式(2-6) 相减, 可得

$$p_2 - p_3 = \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_4^2) \quad (2-8)$$

设风轮平面的面积为 A ，则作用在风轮平面上的推力为

$$F = \frac{1}{2} \rho A (v_1^2 - v_4^2) \quad (2-9)$$

而根据一维动量方程，作用在风轮平面上的推力即为 1、4 平面位置处气体的动量变化率，因此推力又可以表示为

$$F = \rho A v_3 (v_1 - v_4) \quad (2-10)$$

将式(2-9)和式(2-10)联立，可得

$$v_3 = \frac{1}{2} (v_1 + v_4) \quad (2-11)$$

通过式(2-11)可以看到，风轮位置处的气流速度为无穷远流位置处和无穷远尾流位置处速度的平均值。根据式(2-7)，可以看到无穷远尾流位置处的流速与轴向诱导因子之间存在以下关系：

$$v_4 = (1 - 2a)v_1 \quad (2-12)$$

综上所述，作用在风轮平面上的推力和功率可以分别表示为

$$\begin{aligned} F &= \rho A v_3 (v_1 - v_4) = \rho A (1 - a) v_1 [v_1 - (1 - 2a)v_1] \\ &= 2\rho A a (1 - a) v_1^2 \end{aligned} \quad (2-13)$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \rho A v_3 \left(\frac{1}{2} v_1^2 - \frac{1}{2} v_4^2 \right) = \rho A (1 - a) v_1 \left[\frac{1}{2} v_1^2 - \frac{1}{2} (1 - 2a)^2 v_1^2 \right] \\ &= 2\rho A a (1 - a)^2 v_1^3 \end{aligned} \quad (2-14)$$

三、风力机的特性系数

在讨论风力机的能量转换与控制时，以下特性系数具有特别重要的意义。

1. 风能利用系数 C_p

风力机从自然风能中吸取能量的大小程度用风能利用率系数 C_p 表示，即

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho v^3 A} \quad (2-15)$$

式中， P 为风力机实际获得的轴功率 (W)； ρ 为空气密度 (kg/m^3)； A 为风轮的扫风面积 (m^2)； v 为上游风速 (m/s)。

2. 叶尖速比

为了表示风轮在不同风速中的状态，用叶片的叶尖圆周速度与风速之比来衡量，称其比值为叶尖速比 λ 。

$$\lambda = \frac{2\pi R n}{v} = \frac{\omega R}{v} \quad (2-16)$$

式中， n 为风轮的转速 (r/s)； ω 为风轮角频率 (rad/s)； R 为风轮半径 (m)； v 为上游风速 (m/s)。

3. 转矩系数 C_T 和推力系数 C_F

为了便于把气流作用下风力机所产生的转矩和推力进行比较，常以 λ 为变量作成转矩和推力的变化曲线。因此，转矩和推力也要无因次化。

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho v^2 AR} = \frac{2T}{\rho v^2 AR} \quad (2-17)$$

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} = \frac{2F}{\rho v^2 A} \quad (2-18)$$

式中, T 为转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$); F 为推力 (N)。

由式(2-13)和式(2-14)可得, 风轮的推力系数和功率系数为

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho A v_1^2} = 4a(1-a) \quad (2-19)$$

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A v_1^3} = 4a(1-a)^2 \quad (2-20)$$

求功率系数对轴向诱导因子的导数可得

$$\frac{dC_P}{da} = 4(1-a)(1-3a) \quad (2-21)$$

令式(2-21)等于0有两个解, 当轴向诱导因子为1时, 没有意义; 当轴向诱导因子为1/3时, C_P 达到最大值, 这时 $C_{P_{\max}} = 59.3\%$, 这就是风力发电机组的理论最大效率(或称理论风能利用系数), 又称为贝兹极限(Betz's Law), 由于实际条件的限制, 风力机的 C_P 值比理论值要小得多。对风力机进行控制的主要目标就是使其尽可能运行在高的风能利用系数条件下。

四、作用在风力机桨叶上的力

1. 升力系数与阻力系数

气流通过叶片截面时, 由于翼型作用, 会在叶片的上表面和下表面形成压力差, 同时也会由于流动而产生反作用力, 该反作用力可以分解到两个方向, 分别为垂直于来流速度方向的升力 F_l 和平行于来流速度方向的阻力 F_d 。

升力系数 C_l 和阻力系数 C_d 分别定义为

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2}v^2 S} \quad (2-22)$$

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} \quad (2-23)$$

式中, v 为流入叶片的气流速度; S 为桨叶面积。

对于低速运动的风电机组叶片, 升力系数 C_l 和阻力系数 C_d 分别是攻角 α 和雷诺数 Re 的函数。

当气流流经上下翼面形状不同的叶片时, 因弯曲的凸面使气流加速, 所以压力较低; 而凹面较平缓, 使气体流动的速度缓慢, 所以压力较高, 因而产生升力。叶片的失速性能是指它在最大升力系数 $C_{l_{\max}}$ 附近的性能。一方面, 当桨叶的桨距角 θ 不变, 随着风速增加, 攻