

现代大型风电机组现状与发展趋势

刘德顺¹ 戴巨川¹ 胡燕平¹ 沈祥兵^{2,3}

1. 湖南科技大学,湘潭,411201 2. 湘电风能有限公司,湘潭,411000
3. 海上风力发电技术与检测国家重点实验室,湘潭,411000

摘要:在各种可再生能源利用中,风能是使用最为广泛和发展最快的可再生能源之一,是近期内最具有大规模开发利用前景的可再生资源。通过对风力发电产业现状进行梳理、归纳和分析,总结了风电机组未来发展趋势,并对风电机组风轮气动分析、载荷计算与分析、结构动力学与控制、能量流传递与调控和变桨距系统等研究现状和面临的问题进行了分析。指出风电机组是涉及多学科理论的复杂非线性系统,包含多物理场和多物理过程,在进一步深入研究过程中,应充分运用多学科知识,采用系统科学的思想方法才能获得全面深入的研究结果。

关键词:可再生能源;风能;大型风电机组;多学科理论;系统科学

中图分类号:TK83

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.01.025

Status and Development Trends of Modern Large-scale Wind Turbines

Liu Deshun¹ Dai Juchuan¹ Hu Yanping¹ Shen Xiangbing^{2,3}

1. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan, 411201
2. Xiangtan Electric Manufacturing Corporation Ltd., Xiangtan, Hunan, 411000
3. State Key Laboratory of Offshore Wind Power Generation
Technology and Detection, Xiangtan, Hunan, 411000

Abstract: In various renewable energy sources, wind energy is one of the fastest-growing energy sources worldwide and has a good prospect of development and utilization. The present situation of wind turbines industries was outlined and analyzed herein. The development tendency of wind turbines was summarized; the research situations and problems were analyzed, including aerodynamic analysis on wind rotors, analysis and calculation of loads, structure dynamics and control, energy transfer and control and pitch system. Finally, it is pointed out that since the wind turbine is sophisticated nonlinear system related to theory of multi-disciplines, involving multi-physical coupling field and multi-physical process, the thinking method of system science should be adopted in the future research based on multi-discipline knowledge.

Key words: renewable energy; wind energy; large scale wind turbine; multi-discipline theory; system science

0 引言

大量不可再生能源的消耗,以及随之而来的气候变暖、生态破坏和大气污染等一系列环境问题,使世界能源和环境问题日趋严峻,因而对于可再生能源的开发和利用变得尤为急切。风能是使用最为广泛和发展最快的可再生能源之一,亦是近期内最具有大规模开发利用前景的可再生资源。根据世界风能协会(WWEA)产业报告数据^[1],2011年全世界新增风电装机容量4200万千瓦,风电装机总量达到23900万千瓦,较2010年增长了21.4%。2011年我国风电装机量新增1800万千瓦,装机总容量超过6200万千瓦,继2010年后继续保持全球第一。由此可见,风能已

从一种可有可无的补充能源,转变为解决世界能源问题不可或缺的重要能源。风电机组运行环境恶劣,机组部件难免出现破坏性事故^[2]。随着全球风能快速发展,风电机组运行数量不断增加,各类风电机组事故也不断出现。风电机组一些故障甚至事故产生的原因无法得到合理的解释,给风电场风电机组和电网安全可靠运行留下了极大的隐患,对风电技术的健康发展带来了不良影响,迫切要求对风电技术理论进行深入研究。

1 风力发电产业概况

现代风电产业的发展始于1973年石油危机,美国、西欧等发达国家为寻求替代化石燃料的能源,研制了现代风力发电机组,并于20世纪80年代开始建立示范风电场,成为电网新电源。根据WWEA产业报告数据^[1],截至2010年底,全世界风电机组年发电量已超过英国的电力需求,约

收稿日期:2011-10-25 修回日期:2012-11-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975086);湖南省自然科学基金资助项目(11JJ8002,10JJ9006)

占全球电量总需求的 2.5%，这一数字在 2011 年底增加至 3%。在一些国家和地区，风电已成为最大的电力来源之一，如丹麦、葡萄牙、西班牙和德国，2010 年风电在其整个电力供应中所占比例分别为 21%、18%、16% 和 9%。由于中国和印度风电的快速发展，2010 年亚洲风电产业增长率已超过欧洲，成为世界风电发展的焦点。相关数据表明，中国 2010 年市场增长率为 73.3%，2011 年为 40.2%；印度是亚洲另一风电快速发展的国家，装机总量为全球第五，市场增长率 2010 年为 10.7%，2011 年增加至 20.9%。预计到 2015 年，全球装机总量达 6 亿千瓦；到 2020 年，全球装机总量达 150 000 万千瓦。

我国风能资源丰富，在东南沿海、山东半岛、辽东半岛以及海上岛屿、内蒙古、甘肃北部、黑龙江南部和吉林东部都有极佳的风能区域；全国可开发和利用的陆地上风能储量约有 2.5 亿千瓦，近海可开发和利用的风能储量约有 7.5 亿千瓦，共计约 10 亿千瓦。我国在 20 世纪 80 年代开始风电项目的探索和示范工作，1986 年第一个风电场在山东省荣城市建成后，风电场建设在全国各地陆续展开，装机容量逐年增加，不过发展比较缓慢，到 2002 年底，我国的风电装机容量仅为 45 万千瓦。随着国家在产业政策上的鼓励、扶持（如风力发电特许制度）和科研上的大力投入，近年来风电技术得到高速发展，风电装机年增长率超过了 70%，装机总量在 2009 年超过德国成为世界第二，2010 年开始超过美国成为世界第一。在建设风场的同时，国内风电制造企业通过引进、消化吸收国外先进技术，开始自行研制开发大型风力发电机组，加速大型风力发电机组国产化，取得了显著的成绩，用几年的时间走完了欧美发达国家将近 30 年的路程。根据中国风能协会的数据，到 2010 年底，我国已累计安装风电机组 34 485 台，装机总容量达 4473.3 万千瓦，2011 年装机总容量超过 6200 万千瓦。为了进一步促进风电等可再生能源发展，我国政府颁布了一系列政策法规，如 2005 年颁布的《中华人民共和国可再生能源法》，2006 年颁布的《可再生能源发电有关管理规定》、《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》，2010 年颁布的《中华人民共和国可再生能源法修正案》等，这对于推动我国风能产业的进一步规范化发展，具有里程碑式的意义。表 1 列出了中国近十年来风电装机量（数据来源：CWEA 和 WWEA）。

表 1 中国风电机组装机量

| 年 | 装机容量(MW) | 市场增长率(%) |
|------|----------|----------|
| 2002 | 465 | 16.6 |
| 2003 | 563 | 21.1 |
| 2004 | 760 | 34.9 |
| 2005 | 1267 | 66.68 |
| 2006 | 2554 | 101.6 |
| 2007 | 5865 | 129.6 |
| 2008 | 12 019 | 104.9 |
| 2009 | 25 805 | 114.8 |
| 2010 | 44 733 | 73.3 |
| 2011 | 62 733 | 40.2 |

2 现代大型风电机组发展趋势

2.1 水平轴式风电机组为主流

按风轮轴方向不同，风电机组包括水平轴式风电机组和垂直轴式风电机组。水平轴式风电机组风能转换效率高、传动轴距短、经济性好，是目前国内外研制最多、技术最成熟、使用最为广泛的一种风电机组（包括上风向与下风向两种），在整个风电市场中占到 95% 以上。垂直轴式风电机组可分为两个主要类型：一类是利用气动阻力做功的阻力型风电机组，如萨渥纽斯型和涡轮型；另一类是利用翼型升力做功的升力型风电机组，如达里厄型^[3]。与水平轴式风电机组相比，垂直轴式风电机组可以接收任何方向的来风，无需迎风装置，因此系统整体结构简洁，便于维护，成本较低。但由于在空气动力学以及结构构造力学等方面的技术积累不足，与水平轴式风电机组相比，大型垂直轴式风电机组的研发滞后许多^[4]。因此，在未来相当长一段时间内，水平轴式风电机组仍将是主流。

2.2 多种大容量机型并存

在 20 世纪 90 年代，国际上风电机组主流为 600 千瓦级；2001 年以后，基本上以兆瓦级以上风电机组为主流。2004 年，德国 Repower 公司生产了 5 兆瓦风电机组，2008 年世界上运行的风电机组单机容量最大为 6 兆瓦（风轮直径达到 127m）。目前，8~10 兆瓦风电机组的设计和制造也已经开始。我国风电机组主流机型在 2005 年为 600~1000 千瓦，2008 年为 750~1500 千瓦，2009 年为 850~2000 千瓦，2010 国内单机容量为 2 兆瓦的机组也开始批量生产和安装，2.5 兆瓦、3 兆瓦等机型也在个别风场开始安装。2011 年 5 月，中国首台 6 兆瓦风电机组在江苏盐城正式出产。虽然风电机组单机容量不断扩大，甚至向 10 兆瓦及以上级别巨型风电机组发展，但 2~3 兆瓦及以下单机容量的机组技术成熟，必将长期存在，也就是说，多种大容量机型长期并存，以满足市场的多样化需求。

2.3 变桨距风电机组替代定桨距风电机组

与定桨距风电机组相比,变桨距风电机组叶片安装角可以根据风速的变化而改变,气流攻角在风速变化时可以保持在一定的合理范围,在相同的额定功率点,额定风速比定桨距风电机组要低,在额定功率点有更高的功率系数。事实上,在现代风电机组研制初期,设计人员就认识到通过改变桨距角来调整空气动力转矩的重要性,将风电机组设计成全桨叶变距型,但由于技术积累不够,灾难性事故时有发生,限制了变桨距风电机组的商业化运行^[5]。经过多年的发展,变桨距技术已较为成熟,在多种机型中得到应用。2009年以后,世界上新安装的风电机组中有95%以上采用了变桨距方式。

2.4 变速运行取代恒速运行

在风电机组与电网并网时,要求风电机组输出电频率与电网频率一致,即保持频率恒定。风力发电机保持转速不变得到恒频电能,称为恒速恒频运行;风电机组转速随风速变化,通过其他控制方式来得到恒频电能,称为变速恒频运行。变速运行风电机组可以通过调节发电机转速跟随风速变化,使叶尖速比保持在最佳值,从而最大限度利用风能,提高运行效率。现有的失速型恒速运行风电机组一般采用双绕组结构(4极/6极)的异步发电机双速运行。在高风速段,发电机运行在较高转速上,4极(大容量)电机工作;在低风速段,发电机运行较低转速上,6极(小容量)电机工作。双速运行的优点是控制简单,可靠性好;缺点是由于转速基本恒定,风电机组经常工作在风能利用系数较低的点上,风能得到充分利用,即使通过变桨距系统改变桨叶的攻角以调整输出功率,也只能使异步发电机在两个风速下具有较佳的输出系数,无法有效地利用不同风速时的风能。变速风电机组一般采用双馈异步发电机或多极同步发电机。双馈电机的转子侧通过小容量能量双向流动功率变换器连接到电网;多极同步发电机的定子侧通过全功率变换器连接到电网。在新增风电机组中,绝大多数都采用了变速运行方式,可以预计变速运行全面代替恒速运行将成为趋势。

2.5 异步双馈、直驱和半直驱多种形式并存

风力发电机组按结构形式可以分为异步电机双馈式机组、永磁同步电机直接驱动式机组以及半直驱型(中传动比齿轮箱)机组。双馈风电机组风轮将风能转变为机械转动的能量,经过齿轮箱增速驱动异步发电机,应用励磁变流器励磁而将发电机的定子电能输入电网,在这种机型里,保证

齿轮箱可靠性至关重要^[6]。直驱式风电机组采用多极永磁发电机直接连接风轮,可以避免增速箱的不利影响,但发电机体积和重量庞大。半直驱式风电机组多采用增速比适当的(双馈型机组的1/10左右)一级齿轮传动,配以类似直驱式风电机组的多级永磁同步发电机,发电机体积比直驱形式的有了较大的缩小,质量明显减轻^[7]。近年来,在新增风电机组中,双馈风电机组虽然占据主导地位,直驱式风电机组得到快速发展,半直驱式风电机组开始出现。

2.6 陆上风电机组向海上风电机组发展

在目前的各类风电机组中,以陆上风电机组为主,但陆上风力资源远没有海上风力资源丰富,国际上的风电机组技术不断向海上专用风电机组发展^[8-11]。海上风力发电的方式分为两种,即在深海的浮体式和在浅海的座底式。海上大型浮体式风电机组最早由Massachusetts大学的Her-onemus教授于1972年提出^[12],但由于其开发难度远远大于陆地风电机组,直至20世纪90年代才有一些国家开始尝试^[13],现仍处于探索阶段;座底式海上风力发电已在部分地区推向实用化。位于英国肯特海滩附近的Thanet风电场是目前世界上最大的海上风电场,耗资7.5亿多英镑,拥有100台涡轮机,产生的巨额电力足以满足20万户家庭的需要^[14]。上海东海大桥10万千瓦海上风电场是我国第一个海上风电示范项目。该项目位于东海大桥东侧的上海市海域,总装机容量102兆瓦,于2010年完成安装。随着海上风电技术的提高和开发成本的下降,以及各国政策的积极支持,未来海上风电将向更大规模发展。

3 理论研究现状与存在的问题

3.1 风轮气动分析

大型风电机组在运转过程中,气动机理十分复杂,一些物理现象至今尚未弄清。有关大型风电机组气动分析理论与方法的研究一直是风电技术领域的热点问题之一。目前对风电机组气动特性的分析主要是基于二维空气动力学^[15],即假定在给定风电机组叶片径向位置处的气流是二维(2D)的;虽然三维(3D)空气动力学能够更加真实反映风电机组气动特性,但由于理论和技术上的复杂性尚难以用于工程实际中。在风电机组气动计算方法方面,主要有基于叶素—动量理论(blade element momentum, BEM)模型^[16]、基于动态入流理论(generalized dynamic wake, GDW)模型^[17]以及基于计算流体力学(computational

fluid dynamics, CFD)方法^[18]等。BEM 理论模型是在实际工程中应用最为广泛的一种方法,但是作为一种近似的计算方法,在使用中需要进行一定的修正;与 BEM 理论模型相比,GDW 模型一个显著的优点是允许风轮上更宽的气流压力分布,但在低风速、大气湍流和大叶轮锥角等条件下,可能出现较大偏差甚至不稳定现象^[19];更先进的风电机组气动分析 CFD 模型中,研究对象被划分为计算网格,对每一个网格都进行纳维—斯托克斯方程(Navier—Stokes equation)组离散化,产生的规模巨大非线性耦合方程组必须数值求解,需要花费巨大的计算时间^[15]。因此,在未来的许多年里以 BEM 模型为主进行大型风电机组气动分析仍是学术界和工程界的主流。

在运用叶素—动量理论时必须充分考虑到非定常条件下叶素—动量理论的修正,特别是复杂的动态失速现象。这主要是由于风轮偏航、塔架及湍流,以及大型风电机组受风切变等因素影响,叶片上任一点经历的风速处在不断变化中,从而导致攻角的时变。攻角的时变会导致翼型升力系数、阻力系数及力矩系数等气动参数异于静态值,这种改变不会在气动载荷中立即显示出来,而是有一个时间延迟。Theodorsen 理论可对附着流动条件下的时间延迟进行计算^[20],而在边界层分离时,需用动态失速理论进行分析。动态失速是指在非定常流场条件下的翼型失速行为,其典型特征是流场分离的延迟。动态失速现象十分复杂,早期的研究主要集中于直升机技术领域,随着风电技术的发展,动态失速研究逐步扩展到风电技术领域。过去几十年内,研究人员一直通过实验^[21-23]、数值仿真^[24-28]等手段开展研究。Carr^[29]、Beddoes^[30]对动态失速过程进行了描述,主要包括四种状态:流场分离延迟、涡流、全失速和重新附着流。然而,到目前为止,对动态失速的机理并没有完全掌握,也没有一种通用的动态失速模型,即使采用 CFD 理论进行计算,也无法得到精确的结果^[28,31],因而,采用半经验模型成为工程实际应用的主要方式。

此外,应用叶素—动量理论时,假设桨盘上的诱导速度分布是均匀的,而实际上风电机组尾涡诱导的速度是不均匀的,即使来流是均匀定常流,流经风轮叶片的气流仍然是不均匀的非定常流,为了研究由尾涡产生的不均匀流,各国学者发展了多种尾流模型,如平衡尾流模型、冻结尾流模型以及动态入流模型等^[32]。

通过上述分析不难看出,目前气动分析中采

用的理论往往是近似理论或经验修正模型,如半经验动态失速模型中部分方程来自经验构建,缺乏理论支撑,对于不同翼型不能直接移植。在不过分增加计算量的条件下,寻求和发展更可靠的气动计算理论与方法将是今后继续努力的目标。

3.2 载荷计算与分析

风电机组在运行过程中,外部环境复杂多变,承受的载荷十分复杂,其来源主要有空气动力载荷、重力载荷、惯性载荷和运行载荷。当风电机组运行在海上风场时,海水波浪形成的载荷对风电机组也有显著影响。按照载荷性质又可分为静态载荷、稳态载荷、周期载荷、瞬载、脉动载荷、随机载荷等。确定风电机组承受的多源载荷是进行风电机组零部件强度分析、结构应力特性分析、寿命设计时的重要依据。目前,国际上有不少规范、标准对风电机组载荷进行了规定,包括国际电工委员会制定的 IEC 61400—1 标准、德国船级社制定的 GL 标准、丹麦的 DS 472 标准以及中国船级社制定的《风力发电机组规范》^[32]等。IEC 61400—1 标准定义了四个不同的风电机组等级,以适应不同地区的风力情况。GL 标准采用了与 IEC 61400—1 一样的风电机组分类方法,但加入了轮毂高度处的湍流强度;DS472 标准是基于四种地形等级下不同极限风速的设计标准,载荷选择的观念与 IEC 61400—1 和 GL 标准类似,只是载荷情况的数量较少^[33]。

在风电机组载荷分析方面,由于现有气动分析理论的不确定性,相关研究主要集中在空气动力载荷的分析中,目前主要依据叶素—动量理论进行计算,如在 BLADED、AERODYN 等软件中都采用了此方法。而随着海上风电机组向海上风电机组发展,一些研究者进行了线性和非线性,规则与不规则波浪及波浪载荷建模研究,如 Sarpkaya 等^[34]通过线性边界条件下速度势拉普拉斯方程求解来进行线性波建模;Longuet—Higgins^[35]通过在非线性边界条件下采用摄动方法求解拉普拉斯方程进行了深水时非线性波建模;Sharma 等^[36-37]和 Agarwal 等^[38]基于 Longuet—Higgins 研究基础采用近似方法建立了有限水深时波浪模型,采用 Morison 方程建立了波浪载荷模型;Henderson 等^[39]对海上风电机组波浪模型设计、波浪载荷模型选择等进行了分析;Gravesen 等^[40]进行了风、波和海冰同时存在时风电机组载荷模型分析;Seide 等^[41]进行了风波联合作用下的风电机组支撑结构载荷模型研究、动力响应数值分析。

在载荷分析方法方面,通常采用数值仿真和试验测量两种途径。在数值仿真方面,Jonkman 等^[42]借助多种仿真软件联合的方式构建了海上大型风电机组耦合模型,并进行载荷、系统动力学响应特性分析,进而识别系统潜在载荷及发现系统存在的不稳定性; Moriarty 等^[43]和 Buhl 等^[44]通过采用平均风速和湍流度联合分布的方式借助 FAST_AD 代码得到载荷数据,并建立了长期载荷概率模型和极端载荷参数化模型;在现场测试方面,Agarwal 等^[45]基于海上风电机组塔架载荷(弯矩)现场长期测试数据,利用波高阈值法获得了载荷长期分布模式; Peeringa 等^[46]通过对风速和载荷的测量,进行了风电机组塔架载荷实测值与计算值的比较分析,并建立了极端载荷统计模型。对于新型风电机组而言,一般没有现场载荷实测数据,因此多基于载荷计算相关理论运用仿真分析手段得到载荷数据,通过概率统计获得风电机组生命周期内载荷分布^[47]。

尽管如此,风电机组实际运行过程中的载荷特性并未完全厘清,如变桨距风电机组在变桨距过程中变桨距载荷的变化规律,电网负载变化和风载变化的联合作用,台风、冰灾和海啸等计算条件下的载荷。今后,通过理论分析、数值仿真和现场试验等多种途径进一步推进风电机组载荷计算与分析研究十分必要。

3.3 风电机组动力学与控制

现代大型风电机组是由叶片、轮毂、传动系统、发电机、机舱、塔架等构件组成的复杂多体系统。即使在直驱式风电机组中,传动系统得到简化,风电机组的结构动力特性仍十分复杂。如果风电机组部件(如叶片)在外部载荷作用下发生弯曲和扭转变形,这些变形会改变叶片的气动载荷。气动载荷和机械振动是相互作用(气动弹性问题)的。如果这种相互作用是相互减弱的,则风电机组运动稳定,否则出现颤振、发散。特别是现代风电机组不断大型化,柔性叶片和柔性塔架广泛使用,使得结构动力学问题更加复杂。在风电机组结构动力学研究中,主要的振动体是叶片和塔架,机舱刚性较好,主要是以质量惯性参与振动^[48]。对于变桨距风电机组而言,变桨距执行机构特性对叶片的动力学特性也有显著影响。

在风电机组动力学建模方面,已有一些学者采用不同的建模方法从不同的角度出发进行了研究。如 Paluch 等^[49]建立了树状拓扑结构风电机组柔性多体动力学模型,并进行了载荷预测计算机辅助设计方法研究; Lee 等^[50]采用刚柔混合多

体动力学建模的方法构建了风电机组动力学模型,进行了风电机组动态稳定性分析;李德源等^[51]运用现代柔性多体动力学方法,研究了水平轴风力机柔性叶片空间旋转运动与其弹性变形间的相互耦合关系及其所导致的动力学效应,导出了旋转叶片的有限元动力学方程及其数值求解方法,对大型风力机叶片在机械和气动载荷作用下的弯曲变形进行了动态模拟,此外,将圆筒形塔架用空间梁单元建模,求解塔架在环境载荷作用下的位移、速度、加速度以及动力响应等; Geyler 等^[52]在进行风电机组载荷缩减控制时,将风电机组叶片和塔架简化为弹性铰模型,以方便建立系统控制模型;刘雄等^[53]把叶片简化成悬臂梁,利用二结点梁单元进行离散化建模,运用 Newmark 法和模态叠加法原理对风电机组叶片的动态响应进行计算;陆萍等^[54]将有限元技术与模态分析理论相结合,在有限元软件的基础上研制了用于风力机塔架结构的动态分析程序系统。

在风电机组振动控制方面, Skaare 等^[55]阐述了风电机组控制策略对风电机组振动、疲劳寿命有明显影响; Larsen 等^[56]认为塔架运动与风电机组气动特性及变桨距控制耦合可能导致负阻尼出现,从而形成很大的瞬时载荷,导致塔架振动失稳,提出一种通过极点配置的控制方法来确保塔架振动的稳定性; Lackner 等^[57-58]对风电机组结构主动和被动控制进行了对比研究,以塔架底部疲劳载荷缩减为目标,设计了鲁棒多变量控制器,研究结果表明主动结构控制能够更有效缩减塔架前后弯曲疲劳载荷;此外, Lackner 等^[59]还对通过统一变桨距和独立变桨距来缩减大型风电机组载荷进行了对比分析; Namik 等^[60-61]探讨了塔架振动的状态空间控制技术,以及独立变桨距控制技术在减小海上大型风电机组漂浮平台波动率方面的应用。

但是,已有理论和方法并不能完全揭示风电机组运行过程中的动力学现象。风电机组一些故障甚至事故产生的原因无法得到合理的解释,给风电场风电机组和电网安全可靠运行留下了极大的隐患,对风电技术的健康发展带来了不良影响。

3.4 能量流传递与调控

风电机组作为一种复杂机电系统,存在着物质流、能量流和信息流的传递和变换^[62],主要特征和功能可以从物质流、能量流和信息流中体现出来。气流通过风电机组风轮可以看成是风电机组与外部环境之间的物质流;在风电机组内部主要存在能量流和信息流。图 1 给出了风电机组物质流、能量流、信息流示意图,图中能量流界面①

和②处为机械能的流动,界面③和④处为电能流动,并且这种能量流动是双向的;除了主能量的流动外,在各子系统内还存在机械摩擦、电力电子器件开关等导致的能量损失。在信息流界面(1)处,采集的风速、风向等气流信息流向信息处理系统;在信息流界面(2)处,与风轮相关的信息包括:风轮转速、叶片节距角和变桨速率等;在信息流界面

(3)处,与传动与支撑系统相关的信息包括:扭矩、振动及扭转等信息;在信息流界面(4)处,与发电机相关的信息包括:电压、电流、功率和转子转速等信息;在信息流界面(5)处,与变流器相关的信息有:电压、电流、功率及开关频率等信息;在信息流界面(6)处,与电网相关的信息包括:电网电压、电流和电频率等信息。

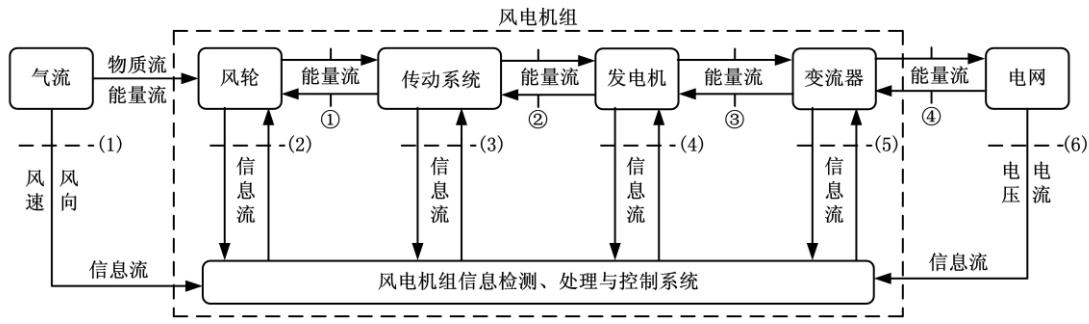


图1 风电机组物质流、能量流与信息流

风电机组从风中吸收能量,然后在风电机组内部转换、分解、存储并最终传递至电网,从而构成了系统的混合能量流,能量流的动态变化与风电机组多物理过程演变密切相关,根据风电机组运行状态和目标,信息流通过控制和调整系统能量流状态实现系统期望的状态和目标。在复杂服役环境下实现风电机组多能域的能量高效转化、传递与控制研究是风电机组的核心研究内容之一。从图1可以看出,风电机组的能量流系统可以划分为多个界面或子系统,目前针对风电机组能量流系统建模基本上采取按界面(子系统)划分的方式,如图1中划分为气流、风轮、传动系统、发电机、变流器、电网等子系统。

对于气流(风)模型的研究,不少研究者已经取得重大进展,如Anderson等^[63]在研究中采用了由基本风、阵风、斜坡分量和背景噪声四种分量组成的来风模型;Veers等^[64]提供的方法能产生包含功率谱密度函数和相关函数的三维风场;Welfonder等^[65]将来风速序列看作是白噪声序列通过整形滤波器的输出,建立了风速模型;李东东等^[66]建立了满足一定功率谱密度特性的自回归滑动平均风速模型。

对于风轮的建模研究,主要是利用空气动力学理论进行气动建模。本文选取直驱式风电机组为例进行进一步分析,在直驱式风电机组中,风轮与发电机转子直接相连,所以传动系统的建模得到极大的简化,因此大型直驱式风电机组能量流建模与动态特性分析的研究,目前主要集中在电气系统(发电机、变流器和电网等)建模和控制方面。在这一研究领域,Hansen等^[67]建立了多级

永磁同步大型风电机组电气和控制模型,描述了全功率变频控制能量策略;Strachan等^[68]建立了2兆瓦离岸型直驱式风电机组风能转换和储能系统动态模型;Tan等^[69]分析了无机械传感器条件下,风电机组最大风能追踪鲁棒控制技术;金一丁等^[70]根据风力机运行特性及最大风能跟踪原理,基于PSCAD/EMTDC设计了一套由永磁式同步电机与AC-DC-AC脉宽调制(PWM)变流器组成的风电机组软件平台;尹明等^[71]建立了包括风轮模型、传动系统模型和发电机模型的整机数学模型,提出了桨距角和发电机转速的控制策略;赵仁德等^[72]提出了基于最佳电磁转矩给定的最大功率追踪方案和一种发电机的转子初始位置检测方法;Morren等^[73]研究了风电机组各部分控制方法,提出了结合桨距角控制提高低电压穿越能力的必要性;杨晓萍等^[74]建立了背靠背双PWM变流器并网的永磁同步风力发电系统仿真模型,提出按电网电压跌落幅度减小发电机输出功率的低电压穿越控制策略。随着各种新型风电机组结构的出现,有关大型风电机组控制策略的研究报道还在不断涌现。

风能的吸收、转换和传递控制是风电机组需要解决的根本问题,随着风电机组的不断大型化,面临的困难随之增加。今后,从能量流、信息流协同的角度出发,进一步完善对吸收风能的转换、传递控制技术,是实现风电机组高效、低耗和可靠运行的重要途径。

3.5 变桨距系统研究

在风电机组中,通过对桨距角的主动控制(变桨距)可以克服定桨距/被动失速调节的许多缺

点。变桨距直驱式风电机组中的一个重要组成部分是变桨距执行机构,通过变桨距技术改变叶片桨距角,可以有效改变风电机组气动特性,与定桨距风电机组相比,起动与制动性能更好,风能利用系数更高,在额定功率以上输出功率也更加平稳。变桨距执行机构有液压执行机构和电动执行机构两种:液压变桨距系统主要由动力源液压泵站、控制模块、蓄能器与执行机构油缸等组成;电动变桨距系统主要由驱动电机、减速箱、控制模块、蓄电池与执行机构减速器等组成。电动变桨距执行机构结构紧凑、控制灵活、动作可靠,不存在液压执行机构中的非线性、漏油、卡塞等现象,已逐渐占据市场优势地位。

在变桨距方式上包括统一变桨距和独立变桨距两种。同步改变所有桨叶节距角的方式称为统一变桨,国内外学者对定桨距和统一变桨距已进行了深入的研究。采用统一变桨时,风轮扫掠面内的来流风速一般假定为均匀分布,但真实的来流风速存在切变现象,并受塔架、上升流等影响,因而即使在来流风速稳定的前提下,叶片在旋转过程中,一周内不同位置承受的载荷也是不同的。而且,随着现代风电机组的大型化,风轮直径不断增大(5兆瓦风电机组的叶轮直径可达130m),受风切变,塔架、上升流等影响更大。叶片在旋转过程中,一周内不同位置承受的载荷差异十分明显,造成齿轮箱及塔架等部件载荷波动,对风电机组(尤其是叶片)寿命产生了严重影响,显然对桨叶进行单独控制更为合理。大型风电机组每个桨叶采用独立节距角控制已经成为大型风电机组发展的期望目标。对桨叶进行单独控制,每个桨叶都有自己独立驱动执行机构和节距角的变化规律,风电机组既能满足功率输出性能指标,还能有效缩减叶片、齿轮箱、塔架等部件的波动载荷,从而延长风电机组生命周期。此外,多个变桨距执行机构可以被认为是独立的刹车系统^[75],甚至还能取代原有的大型刹车系统。对独立变桨距理论的研究开始于20世纪90年代。一些学者已在独立变桨距领域进行了大量的研究工作。Bossanyi等^[76-77]由测量的叶根应力信息,提出了基于线性二次型高斯(LQG)控制器的桨叶节距角控制方法;Geyler等^[52,78]基于风电机组简化线性模型,采用 H_{∞} 控制理论,设计了独立变桨距系统控制器;Selvam等^[79]基于叶根应力测量值,采用风电机组线性化简化模型,设计了独立变桨控制器,该控制器由一个反馈型LQG控制器和一个前馈型扰动注入控制器组成;Larsen等^[80]提出了一种基

于来流风速测量的风电机组独立变桨距控制算法;郭洪澈等^[81]对基于永磁同步电机的独立桨叶预见控制技术进行了研究;由于风电机组是一个多维高阶的复杂非线性系统,在实际运行过程中得到其准确状态方程比较困难,以风电机组状态方程为基础进行独立变桨距控制,给控制器精确设计带来较大难度。林勇刚等^[82]设计了基于加速度权系数分配的变桨距模糊控制方案,简化了控制器设计难度。这些成果对风电机组独立变桨距系统的进一步深入研究起到了极大的推动作用。

然而,目前针对变桨距系统的研究与应用主要局限于风能捕获方面。虽然对通过变桨距控制实现疲劳载荷控制、系统振动控制也有研究,但是尚没有普遍的工程应用,相关的控制途径、策略和实施方式仍需要大量的研究工作。

4 结束语

风能是使用最为广泛和发展最快的可再生能源之一,是近期内最具有大规模开发利用前景的可再生资源。本文对风力发电产业现状进行了梳理、归纳和分析,总结了风电机组未来发展趋势:水平轴式风电机组为主流;多种大容量机型并存;变桨距风电机组替代定桨距风电机组;变速运行取代恒速运行;异步双馈、直驱(半直驱)多种形式并存等。对风电机组风轮气动分析、载荷计算与分析、动力学与控制、能量流传递与调控和变桨距系统等的研究现状和面临的问题进行了分析。

由于现代大型风电机组是涉及空气动力学、机械学、电机学、控制理论等多学科的复杂非线性系统,包含多物理场和多物理过程,因此今后对风电机组进一步深入研究过程中,应充分运用多学科知识,以系统科学的思想方法开展研究。

参考文献:

- [1] World Wind Energy Report[EB/OL]. [2011-10-25]. <http://www.wwindea.org>.
- [2] 周安美,于德介,吴雪明,等.基于本体的大型风力发电机组故障智能诊断研究[J].中国机械工程,2012,23(17): 2075-2080.
- [3] Zhou Anmei, Yu Dejie, Wu Xueming, et al. Research on Intelligent Fault Diagnosis for Large-Scale Wind Turbines Based on Ontology[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(17): 2075-2080.
- [4] 戴庚,徐璋,皇甫凯林,等.垂直轴风力机研究进展[J].流体机械,2010, 38(10): 39-43.
- [5] Dai Geng, Xu Zhang, Huangfu Kailin, et al. Recent

- Research Progress in the Vertical Axis Wind Turbine [J]. Fluid Machinery, 2010, 38(10): 39-43.
- [4] 李岩. 垂直轴风力机应用及其发展前景[J]. 可再生能源, 2009, 27(6): 118-120.
- Li Yan. Application and Prospect of Vertical Axis Wind Turbine [J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(6): 118-120.
- [5] 叶杭治. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [6] 孙伟, 董荣梅, 许换卫. 基于键合图的风电齿轮传动系统稳健优化设计[J]. 中国机械工程, 2009, 20(21): 2549-2553.
- Sunwei, Dong Rongmei, Xu Huanwei. Robust Optimization Design of the Gear Transmission of Wind Turbine Based on Bond Graph[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(21): 2549-2553.
- [7] 姚兴佳, 宋俊. 风力发电机组原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [8] 李晓燕, 余志. 海上风力发电进展[J]. 太阳能学报, 2004, 25(1): 78-84.
- Li Xiaoyan, Yu Zhi. Developments of Offshore Wind Power[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2004, 25(1): 78-84.
- [9] 黄东风. 欧洲海上风电的发展[J]. 能源工程, 2008(2): 24-27.
- Huang Dongfeng. The Survey of Off-Shore Wind Power Development in Europe[J]. Energy Engineering, 2008(2): 24-27.
- [10] Rademakers L W M M, Braam H, Zaaijer M B, et al. Assessment and Optimization of Operation and Maintenance of Offshore Wind Turbines [C]//Proceedings of the European Wind Energy Conference. Madrid, Spain, 2003.
- [11] Obdam T, Rademakers L, Braam H, et al. Estimating Costs of Operation & Maintenance for Offshore Wind Farms [C]//European Offshore Wind Energy Conference. Milan, Italy, 2007: ECN-M-07-045.
- [12] Heronemus W E. Pollution-Free Energy From Offshore Winds[C]//8th Annual Conference and Exposition Marine Technology Society. Washington D C, 1972.
- [13] Butterfield S, Musial W, Jonkman J, et al. Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines [C]//Copenhagen Offshore Wind Conference. Copenhagen, Denmark, 2005: NREL/CP-500-38776.
- [14] Thanet Offshore Wind Farm[EB/OL].[2011-10-25]. <http://www.vattenfall.co.uk/en/thanet-offshore-wind-farm.htm>.
- [15] Hansen M O L. Aerodynamics of Wind Turbines [M]. 2nd Edition. London, UK: Eathscan, 2008.
- [16] Lanzafame R, Messina M. Fluid Dynamics Wind Turbine Design: Critical Analysis, Optimization and Application of Bem Theory [J]. Renewable Energy, 2007, 32(14): 2291-2305.
- [17] He C. Development and Application of a Generalized Dynamic Wake Theory for Lifting Rotors[D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 1989.
- [18] Hartwanger D, Horvat A. 3d Modelling of a Wind Turbine Using CFD[C]//Nafems UK Conference. Cheltenham, United Kingdom, 2008.
- [19] Moriarty P, Hansen A. Aerodyn Theory Manual [M]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2005.
- [20] Theodorsen T. General Theory of Aerodynamic Instability and the Mechanism of Flutter[R]. Washington D C: NACA, 1935: 413-433.
- [21] Mccroskey W, Carr L, Mcalister K. Dynamic Stall Experiments on Oscillating Airfoils[J]. Aiaa Journal, 1976, 14(1): 57-63.
- [22] Wilby P. The Aerodynamic Characteristics of Some New Rae Blade Sections, and Their Potential Influence on Rotor Performance[J]. Vertica, 1980, 4(2): 121-133.
- [23] Leishman J. Dynamic Stall Experiments on the Naca 23012 Aerofoil[J]. Experiments in Fluids, 1990, 9(1): 49-58.
- [24] Akbari M, Price S. Simulation of Dynamic Stall for A Naca 0012 Airfoil Using a Vortex Method[J]. Journal of Fluids and Structures, 2003, 17(6): 855-874.
- [25] Ekaterinaris J, Platzer M. Computational Prediction of Airfoil Dynamic Stall[J]. Progress in Aerospace Sciences, 1998, 33(11/12): 759-846.
- [26] Guilmeneau E, Queutey P. Numerical Study of Dynamic Stall on Several Airfoil Sections[J]. Aiaa Journal, 1999, 37(1): 128-130.
- [27] Osswald G, Ghia K, Ghia U. Simulation of Dynamic Stall Phenomenon Using Unsteady Navier-Stokes Equations[J]. Computer Physics Communications, 1991, 65(1/3): 209-218.
- [28] Spentzos A, Barakos G, Badcock K, et al. Investigation of Three-Dimensional Dynamic Stall Using Computational Fluid Dynamics [J]. Aiaa Journal, 2005, 43(5): 1023-1033.
- [29] Carr L. Progress in Analysis and Prediction of Dynamic Stall[J]. Journal of Aircraft, 1988, 25(1): 6-17.
- [30] Beddoes T. Representation of Airfoil Behaviour[J]. Vertica, 1982, 7(2): 183-197.
- [31] Tan C, Carr L. The Afdd International Dynamic Stall Workshop on Correlation of Dynamic Stall Models with 3-D Dynamic Stall Data[R]. Houston: NACA, 19960047109.

- [32] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [33] Burton T, Sharpe D, Jenkins N, et al. Wind Energy Handbook[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2005.
- [34] Sarpkaya T, Isaacson M, Wehausen J. Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures[J]. Journal of Applied Mechanics, 1982, 49(2): 466-467.
- [35] Longuet-Higgins M. the Effect of Non-Linearities on Statistical Distributions in the Theory of Sea Waves [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1963, 17(3): 459-480.
- [36] Sharma J N, Dean R G. Development and Evaluation of A Procedure for Simulating A Random Directional Second Order Sea Surface and Associated Wave Forces [R]. Newark: University of Delaware, 1979.
- [37] Sharma M S R, Hensel J, Baxter C D P, et al. Development of a Technology Type Factor for Jacket Structures for Offshore Windturbines in Rhode Island [R]. Rhode Island: University of Rhode Island, 2010.
- [38] Agarwal P, Manuel L. Wave Models for Offshore Wind Turbines [C]//46th Aiaa Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, 2008: AIAA-2008-1336.
- [39] Henderson A R, Zaaijer M B, Camp T R. Hydrodynamic Loading on Offshore Wind Turbines [C]//Owemes Conference. Naples, Italy, 2003.
- [40] Gravesen H, Tarp-Johansen N J, V Lund P. Combined Loads From Wind, Waves and Ice on Offshore Wind Turbine Foundations[C]//European Wind Energy Conference. Copenhagen, 2001.
- [41] Seidel M, Mutius M, Rix P, et al. Integrated Analysis of Wind and Wave Loading for Complex Support Structures of Offshore Wind Turbines [C]//Conference Proceedings Offshore Wind. Copenhagen, 2005.
- [42] Jonkman J M, M L Buhl J. Loads Analysis of A Floating Offshore Wind Turbine Using Fully Coupled Simulation[C]//Windpower 2007 Conference & Exhibition. Los Anaeles, California, 2007: NREL/CP-500-41714.
- [43] Moriarty P J, Butterfield S. Effect of Turbulence Variation on Extreme Loads Prediction for Wind Turbines [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2002, 124(4): 387-395.
- [44] Buhl Jr M L, Jonkman J M, Wright A D, et al. Fast User's Guide[M]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2002.
- [45] Agarwal P, Manuel L. Empirical Wind Turbine Load Distributions Using Field Data[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2008, 130(1): 011006.
- [46] Peeringa J. Comparison of Extreme Load Extrapolations Using Measured and Calculated Loads of A Mw Wind Turbine [C]//European Wind Energy Conference. Marseille, France, 2009: ECN-M-09-055.
- [47] Fitzwater L R M, Winterstein S R. Predicting Design Wind Turbine Loads from Limited Data: Comparing Random Process and Random Peak Models[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2001, 123(4): 364-371.
- [48] 李本立, 宋宪耕, 贺德馨, 等. 风力机结构动力学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999.
- [49] Paluch B, Berlu P. A Computer-Aided Approach of Loads Prediction for Hawt Based on Flexible Multi-body Dynamics[C]//European Wind Energy Conference. Nice, France, 1999: 270-276.
- [50] Lee D, Hodges D, Patil M. Multi-Flexible-Body Dynamic Analysis of Horizontal Axis Wind Turbines [J]. Wind Energy, 2002, 5(4): 281-300.
- [51] 李德源, 叶枝全, 黄小华. 风力机旋转叶片动力学方程的 Neumann 级数解法[J]. 太阳能学报, 2007, 28(3): 280-284.
Li Deyuan, Ye Zhiquan, Huang Xiaohua. The Neumann Series Solution of Rotating Blade Dynamic Equations of Horizontal Axis Wind Turbine [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2007, 28(3): 280-284.
- [52] Geyler M, Caselitz P. Robust Multivariable Pitch Control Design for Load Reduction on Large Wind Turbines[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2008, 130(3): 031014.
- [53] 刘雄, 李钢强, 陈严, 等. 水平轴风力机叶片动态响应分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 128-134.
Liu Xiong Li Gangqiang Chen Yan, et al. Dynamic Response Analysis of the Blade of Horizontal Axis Wind Turbines [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 128-134.
- [54] 陆萍, 秦惠芳, 栾芝云. 基于有限元法的风力机塔架结构动态分析[J]. 机械工程学报, 2002, 38(9): 127-130.
Lu Ping, Qin Huifang, Luan Zhiyun. Dynamic Analysis of Tower Structure for Wind Turbine Based on Finite Element Method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(9): 127-130.
- [55] Skaare B, Hanson T D, Nielsen F G. Importance of Control Strategies on Fatigue Life of Floating Wind Turbines[C]//Asme Conference Proceedings. Galfornia, 2007: 493-500.
- [56] Larsen T J, Hanson T D. A Method to Avoid Negative Damped Low Frequent Tower Vibrations for a Floating, Pitch Controlled Wind Turbine[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2007, 75(1): 012073.

- [57] Lackner M A, Rotea M A. Passive Structural Control of Offshore Wind Turbines [J]. *Wind Energy*, 2011, 14(3): 373-388.
- [58] Lackner M A, Rotea M A. Structural Control of Floating Wind Turbines [J]. *Mechatronics*, 2011, 21(4): 704-719.
- [59] Lackner M A. Controlling Platform Motions and Reducing Blade Loads for Floating Wind Turbines [J]. *Wind Engineering*, 2009, 33(6): 541-554.
- [60] Namik H, Stol K, Jonkman J. State-Space Control of Tower Motion for Deepwater Floating Offshore Wind Turbines [C]//27th AIAA/Asme Wind Energy Symposium. Reno, Nevada, 2008: AIAA-2008-1307.
- [61] Namik H, Stol K. Individual Blade Pitch Control of Floating Offshore Wind Turbines [J]. *Wind Energy*, 2010, 13(1): 74-85.
- [62] 钟掘. 复杂机电系统耦合设计理论与方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [63] Anderson P, Bose A. Stability Simulation of Wind Turbine Systems [J]. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, 1983, 12: 3791-3795.
- [64] Veers P. Three-Dimensional Wind Simulation, SAND-88-0152C [R]. Albuquerque, NM: Sandia National Labs., 1988.
- [65] Welfonder E, Neifer R, Spanner M. Development and Experimental Identification of Dynamic Models for Wind Turbines [J]. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(1): 63-73.
- [66] 李东东, 陈陈. 风力发电系统动态仿真的风速模型 [J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(21): 41-44.
Li Dongdong, Chen Chen. Wind Speed Model for Dynamic Simulation of Wind Power Generation System [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2005, 25(21): 41-44.
- [67] Hansen A, Michalke G. Modelling and Control of Variable-Speed Multi-Pole Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine [J]. *Wind Energy*, 2008, 11(5): 537-554.
- [68] Strachan N, Jovicic D. Dynamic Modelling, Simulation and Analysis of An Offshore Variable-Speed Directly-Driven Permanent-Magnet Wind Energy Conversion and Storage System (WeCSS) [C]//Oceans 2007-Europe. Aberdeen, 2007: 1-6.
- [69] Tan K, Islam S. Mechanical Sensorless Robust Control of Wind Turbine Driven Permanent Magnet Synchronous Generator for Maximum Power Operation [J]. *International Journal of Renewable Energy Engineering*, 2001, 3(3): 379-384.
- [70] 金一丁, 宋强, 刘文华. 直驱永磁同步风电机组的建模与仿真分析 [J]. *水电自动化与大坝监测*, 2008, 32(5): 47-51.
Jin Yiding, Song Qiang, Liu Wenhua. Modeling and Analysis of Direct-drive Permanent Magnet Synchronous Wind Generation System [J]. *Hydropower Automation and Dam Monitoring*, 2008, 32(5): 47-51.
- [71] 尹明, 李庚银, 张建成, 等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略 [J]. *电网技术*, 2007, 31(15): 61-65.
Yin Ming, Li Gengyin, Zhang Jiancheng, et al. Modeling and Control Strategies of Directly Driven Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator [J]. *Power System Technology*, 2007, 31(15): 61-65.
- [72] 赵仁德, 王永军, 张加胜. 直驱式永磁同步风力发电系统最大功率追踪控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(27): 106-111.
Zhao Rende, Wang Yongjun, Zhang Jiasheng. Maximum Power Point Tracking Control of the Wind Energy Generation System with Direct-Driven Permanent Magnet Synchronous Generators [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2009, 29(27): 106-111.
- [73] Morren J, Pierik J, De Haan S. Voltage Dip Ride-Through Control of Direct-Drive Wind Turbines [C]//39th International Universities Power Engineering Conference. Bristol, UK, 2004: 934-938.
- [74] 杨晓萍, 段先锋, 田录林. 直驱永磁同步风电系统低电压穿越的研究 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 9(8): 228-234.
Yang Xiaoping, Duan Xianfeng, Tian Lulin. Low Voltage Ride-through of Directly Driven Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator [J]. *Journal of Northwest A & F University*, 2009, 9(8): 228-234.
- [75] Burton T, Sharpe D, Jenkins N, et al. *Wind Energy Handbook* [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2005.
- [76] Bossanyi E. Individual Blade Pitch Control for Load Reduction [J]. *Wind Energy*, 2003, 6(2): 119-128.
- [77] Bossanyi E. Further Load Reductions with Individual Pitch Control [J]. *Wind Energy*, 2005, 8(4): 481-485.
- [78] Geyler M, Caselitz P. Individual Blade Pitch Control Design for Load Reduction on Large Wind Turbines [C]//Proceedings of the European Wind Energy Conference. Milan, Italy, 2007.
- [79] Selvam K, Kanev S, Van Wingerden J, et al. Feedback-Feedforward Individual Pitch Control for Wind Turbine Load Reduction [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2008, 19(1): 72-91.

汽车质心侧偏角估计的研究现状及发展

林 菜 黄 超

南京航空航天大学,南京,210016

摘要:阐述了汽车质心侧偏角估计对于汽车稳定性控制的重要意义。从量测仪器、估计算法、物理模型、轮胎模型四个方面对国内外的质心侧偏角估计的研究进行了归纳、分析,重点列举比较了各类估计算法的优缺点,最后指出了建模的准确性、不同传感器信号的融合问题、传感器误差的处理、参数的自适应四个方面存在的问题以及发展趋势,并着重指出了参数自适应将是算法研究的重点。

关键词:汽车;质心侧偏角;状态估计;参数自适应

中图分类号:U461.6

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.01.026

State-of-the-Art of Vehicle Side Slip Angle Estimation

Lin Fen Huang Chao

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: The significance of the side slip angle estimation for vehicle stability control was discussed. The research of vehicle side slip angle estimation was divided into four aspects: measuring instrument, estimation algorithm, physical model and tire model. Then research progresses on vehicle side slip angle estimation were summarized and analyzed both at home and abroad. The emphasis was put on the comparison of advantages and disadvantages for each estimation algorithm. Finally, the problems and development were presented, which contained model accuracy, signal fusion, error elimination of sensors and parameter adaptation. The parameter adaptation will be the key for research of estimation algorithm.

Key words: vehicle; side slip angle; state estimation; parameter adaptation

0 引言

对于汽车稳定性控制系统而言,质心侧偏角是重要的控制逻辑。许多汽车电子稳定性控制系统需要准确掌握汽车质心侧偏角,并根据其确定汽车当前所处的状态,以判断是否需要对汽车进行主动干预来保证汽车的安全行驶^[1]。国外一些汽车及零部件制造公司开发的汽车动态控制系统主要由估计器和控制器两部分组成。其中估计器的功能就在于实时估计汽车的质心侧偏角。在此基础上,控制器通过在某个车轮上增加制动力或驱动力,产生一定的横摆力矩,使侧偏角保持在特

征值以下^[2]。目前质心侧偏角的测量仍十分困难,且测量成本很高,因此对其进行估计具有重要的工程意义。

1 国内外研究现状

质心侧偏角估计问题的研究具有很广阔的应用前景,国外研究已较为成熟,国内起步晚,但近几年的研究步伐已经加快。本文总结大量国内外文献,以文献[3]的大类为基础,从量测仪器、估计算法、物理模型、轮胎模型四方面对质心侧偏角估计问题的最新研究进展进行论述。

1.1 量测仪器

量测仪器的选择受到成本与质心侧偏角估计精度两方面的制约。在保证估计精度的前提下尽

收稿日期:2011-10-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10902049);中国博士后科学基金资助项目(2012M521073)

- [80] Larsen T J, Madsen H A, Thomsen K. Active Load Reduction Using Individual Pitch, Based on Local Blade Flow Measurements[J]. Wind Energy, 2005, 8 (1): 67-80.
- [81] 郭洪澈. 兆瓦级风电发电机组变桨距系统控制技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2008.
- [82] 林勇刚. 大型风力机变桨距控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

(编辑 郭伟)

作者简介:刘德顺,男,1962年生。湖南科技大学机械设备健康维护省重点实验室教授、博士研究生导师。主要研究方向为机械动力学、风电技术与装备等。戴巨川,男,1979年生。湖南科技大学机电工程学院讲师。胡燕平,男,1957年生。湖南科技大学机电工程学院教授。沈祥兵,男,1974年生。海上风力发电技术与检测国家重点实验室(湘电风能有限公司)工程师。