

直驱永磁同步风力发电机组研究现状与发展前景

薛玉石, 韩力, 李辉

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为了促进我国直驱永磁同步风力发电机系统的理论研究和应用, 结合国内外研究现状, 对直驱永磁同步风力发电机的结构和设计特点以及系统的控制技术和发电成本等进行了综述。通过分析, 总结了其技术特点和发展趋势, 指出了该技术的应用前景。

关键词: 永磁同步发电机; 直驱; 控制技术; 成本

中图分类号: TM315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6540(2008)04-0001-05

Overview on Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Power System

XUE Yu-shi, HAN Li, LI Hui

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To promote the research and application of direct-drive permanent magnet synchronous generator for Chinese wind power system, the structure and design features of the generator, the control techniques and generation costs of the system are overviewed by discussing the current research all over the world. And then, the technical features, development and application prospect of the direct-drive permanent magnet synchronous generator are summarized.

Key words: permanent magnet synchronous generator; direct-drive; control technology; cost

0 引言

常见的笼型异步发电机和双馈异步发电机, 由于存在齿轮箱, 双馈异步发电机还存在碳刷和滑环, 使得系统成本高、可靠性差、维护量大, 且噪声污染严重。并且当其低负荷运行时, 效率较低, 特别是随着单机容量的增大, 问题更加突出。直驱和无刷化越来越受到人们的关注。因此, 基于变速运行、变桨距调节、低转速、高效率、高功率因数的直驱永磁同步风力发电机 (DDPMG) 已成为研究开发的热点之一。该类型发电机采用永磁体励磁, 消除了励磁损耗, 提高了效率, 实现了发电机无刷化; 并且运行时, 不需要从电网吸收无功功率来建立磁场, 可以改善电网的功率因数; 采用风力机对发电机直接驱动的方式, 取消了齿轮箱, 提高了风力发电机组的效率和可靠性, 降低了设备的维护量, 减少了噪声污染。我国在该领域正处于研究、试验阶段, 主要研究 DDPMG 组的总体设

计技术、关键部件的设计与制造技术以及大型 DDPMG 的功率调节技术等。

本文从结构和设计特点以及控制技术和制造成本等方面综合介绍了 DDPMG 组的研究现状, 分析了其技术特点和发展趋势, 指出了其应用前景, 希望为我国 DDPMG 的理论研究和应用提供参考。

1 结构和设计特点

大型风力机的转速一般较低, 约每分钟几十转甚至十几转。直驱永磁同步发电机直接与风力机相连接, 其转速低、极数多, 定、转子尺寸大, 呈扁平状结构, 具有转动惯量大的特点, 有利于平抑风力起伏引起的电势波动。

永磁同步发电机是整个 DDPMG 组的关键部分, 在设计上除具有普通永磁电机的共性外, 还应注意以下问题。

1.1 合理设计磁路结构

在永磁同步风力发电机中,常见的磁路结构有径向式和轴向式,此外还有横向式和复合式等^[2-5]。径向式结构如图 1、2 所示。它具有结构简单、制造方便、漏磁小等优点,其中外转子径向结构的转子可靠性好、转动惯量大,但存在定子冷却及安装和运输方面的问题。与径向式结构相比,切向结构在性能上没有明显的优势,在实践中应用较少。轴向式发电机结构如图 3 所示,其中双定子中间转子盘式结构用得较多,它具有结构紧凑、转动惯量大、硅钢片利用率高、通风冷却效果好等优点,还可消除轴向磁拉力,但同等电磁负荷下,效率略低^[6-8]。横向充磁发电机结构如图 4 所示,它具有尺寸小、重量轻、输出力矩大、材料利用率高、可靠性高、过载能力强等优点,但制造与控制技术复杂,有待进一步研究^[9]。复合励磁发电机兼有永磁和电励磁的优点,调节灵活,但结构和控制方式还有待改进^[10]。因此,实用中必须综合考虑成本、材料、结构和性能等各方面因素的影响,合理选择发电机的磁路结构。

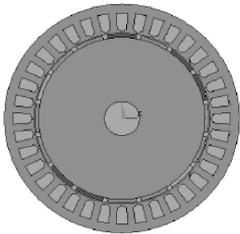


图 1 内转子径向式结构

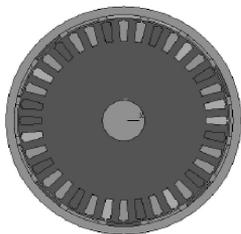


图 2 外转子径向式结构



图 3 轴向发电机结构

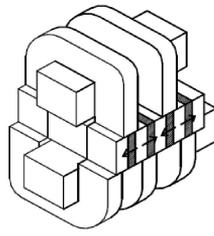


图 4 横向充磁发电机结构

1.2 合理选择极数和槽数

由于风速一般较低,为了获得一定的频率,必然要求直驱永磁同步电机极数较多。因此,在有限的定子铁心尺寸以及满足工艺要求的前提下,如何使用较少的槽数获得较多的极数是设计中非常重要的问题。目前,设计中常采用分数槽绕组。文献 [11] 对极、槽数的选取进行了分析,提出了一种新的极、槽数配合方案。目前,该领域的研究较少,有待进一步深入。

一种新的极、槽数配合方案。目前,该领域的研究较少,有待进一步深入。

1.3 降低起动阻力矩

起动阻力矩是 DDPMG 设计中的一个重要参数,它来自于齿槽效应所引起的磁阻转矩。降低起动阻力矩,可以增加风力机组的稳定运行范围,提高风能的利用率,减小转矩波动。理论分析与工程实际应用表明,采用定子斜槽、转子斜极和定子分数槽等方法均可减小起动阻力矩^[12]。但定子斜槽和转子斜极方法的效果均不明显。因此,实践中常采用分数槽来减小起动阻力矩^[13]。

1.4 满足冷却与散热条件

大型风力发电机通常安装在距离地面较高的机舱内,会因散热不畅而导致电机部件出现故障,维护和保养非常不便。特别是位于近海的风力发电机组,其对于散热的可靠性要求更高。另外,永磁材料对温度异常敏感,温度过高将造成永磁材料性能的降低,甚至不可逆去磁。同时,加强冷却能力可以提高电磁负荷,减小发电机的体积,降低成本。因此,永磁同步风力发电机的温升计算和冷却系统设计非常重要。对于兆瓦级永磁同步风力发电机组的冷却设计,关键是从风电工程的实际出发,需要考虑整个系统的效率、尺寸和工艺实现的难度等。目前常见的冷却方式有空冷、氢内冷、氢外冷和直接液冷等^[14]。文献 [15] 对大型风电机组的冷却方式进行了分析。

2 控制技术

2.1 控制策略

风速具有随机波动性,导致风能的利用率时大时小,必须通过一定的控制策略,在保证电能质量的同时,最大限度地捕获风能。早期通常采用恒速恒频 (CSCF) 的控制策略。其运行范围较窄,能量转换效率较低。而变速恒频 (VSCF) 的控制方式具有运行范围宽、风能利用率高、控制灵活等特点,在研究和应用中的比重正逐渐增大。研究表明,采用 VSCF 控制方式的风电系统,其效率比采用 CSCF 控制方式的效率提高了 10% 左右。目前,VSCF 控制的实现方式主要有齿轮箱驱动的双馈式风力发电机组 (DFIG) 和 DDPMG 组两种。表 1 列举了几种常见的 VSCF 控制方式的运行特点^[16]。

表 1 几种 VSCF 控制方式的对比分析

变速恒频控制方案	直驱永磁发电机	有刷双馈发电机	无刷双馈发电机	笼型异步发电机	开关磁阻发电机
变频器能量的流动方向	单向	双向	双向	单向	单向
变频器容量	全额容量	部分容量	部分容量	全额容量	全额容量
运行范围	较宽	宽	宽	较窄	宽
特点	可靠性高,效率高,噪声小,维护量小,对电网的冲击小	有功、无功功率可灵活控制	无集电环和电刷,既降低了成本,又提高了可靠性	结构简单、运行可靠	结构简单,电流检测环节少,主功率器件少,成本低

通过比较可以看出,DDPMG组的优点有:可以实现最大风能获取,效率高,转速运行范围较宽,可在额定转速的 $-30\% \sim 15\%$ 范围内稳定运行,可靠性高,控制简单,可灵活地调节有功和无功功率^[17]。目前,国内外对直驱风力发电机组的控制策略研究较多^[18-20],其主要思想是使风力机的运行特性满足最大风能跟踪原理。研究表明,通过控制风力机组输出的电功率,可以控制风力发电系统跟踪最佳风能获取曲线,达到最大限度获取风能的目的。如图 5 所示。

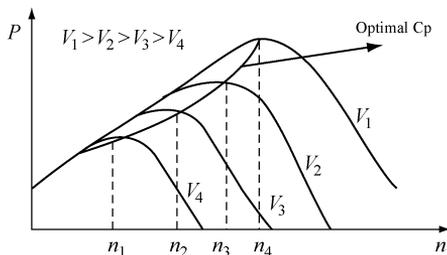


图 5 风机转速和功率曲线关系图及最佳功率曲线图

2.2 运行控制技术

DDPMG 的运行可分为两个主要阶段,即最大功率输出运行阶段和额定功率输出运行阶段,如图 6 所示。在风机起动至达到额定风速的过程中,风机在优化桨距角下定桨距变速运行,通过控制变频器的输出功率来控制电机转矩,从而调节风机转速保持在最佳叶尖速比,实现系统追踪最佳功率曲线和捕获最大风能;当风机运行在额定风速以上时,桨距调节系统开始动作,调节风轮的受力,减小吸收的风能,保持风机的转速不变,使风机输出可以稳定地保持在额定功率,防止风机超过转速极限和功率极限而发生故。目前,风力发电中主要运用“爬山法”的最大能量追踪

(MPPT)控制方式^[21]。相关文献主要是提出更加完善的算法,例如风机转速扰动调节、转速同步来消除由于电力电子器件引起的功率波动以及一些智能化算法等,其目的都是为了提高能量转换效率,提高最大能量追踪的快速性和稳定性。这些问题也是目前研究的热点。

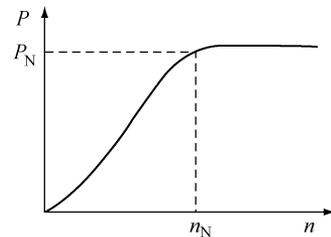


图 6 风力发电机两个运行阶段曲线

2.3 并网控制技术

当风力发电机接入电网后,有功与无功的注入会影响电网的静态和动态稳定性,造成电网电压波动和闪变;其次,电网中的有功损耗会由于风电场的接入而改变,其改变与电网的结构、电网潮流、接入点位置以及风电场装机容量等因素均有关;另外,各种电力电子装置的开通和关断会引起节点电压下降,同时产生大量谐波。当大容量的风力发电机组从电网中切除时,会对电网造成一定的冲击,需要保护装置和控制系统来限制电网的过电压以及频率波动,使风力发电机组在发生故障的暂态过程中,具有一定的稳定调节能力。

DDPMG 通过变频器与电网相连,其频率和电网的频率彼此独立,不存在并网时产生冲击电流、冲击力矩以及并网后失步的问题,逆变器不仅可以调节并网电压和频率,而且还可调节有功功率,是一种稳定的并网方式。

并网前,逆变器以保证满足并网条件为目标,当条件完全满足后并入电网;并网后,逆变器输出电压跟随电网电压以工频变化,此时以获取最大风能作为控制目标,通过对逆变器输出功率的控制实现对发电机转矩的控制,进而实现对风机转速的控制,同时保证系统的功率因数可调。

DDPMG控制技术研究的热点是变频电路拓扑结构的设计和风力发电机组对电网暂态稳定性的影响。目前,常见变频电路结构有双脉宽调制(PWM)型和不可控整流+升压斩波+PWM型两种。文献[22]还提出了一种基于电流源的新型拓扑结构。文献[23]比较了不同风力发电机组对电网暂态稳定性的影响。结果表明,DDPMG能够提高电网发生故障后同步发电机短期电压的稳定性,减小系统所需的无功储备,有利于电网电压稳定。随着风力发电机组运行要求的不断提高,在这些领域的研究仍有待进一步深入。

3 发电成本

3.1 风力发电技术的经济性分析

经济成本是制约风力技术推广的一个重要因素。目前,全球建设风力发电的造价大约为1000美元/kW,我国风力发电的初始投资从1994年的约12000元/kW降低到8000~9000元/kW。这个费用约为煤电单位造价的2~2.5倍^[24]。但是考虑到生物质能发电成本是煤电的2.5~3倍,太阳能发电成本是煤电的11~18倍,以及减少环保投入、降低能源损耗、舒缓运输压力等方面问题,风力发电比其他新型发电方式的优势更多。

尽管风力发电成本受到很多因素的制约,但其总体趋势是逐年降低的。图7列举了2002~2020年全球风机累计装机容量与发电成本的预测^[1]。随着风力发电技术的改进、单机容量的增加、风力发电机组可靠性的提高以及融资成本的降低,风力发电成本将不断降低。

3.2 DDPMG组的经济性分析

DDPMG组省去了成本较高的齿轮箱,但需要全额变频装置。以3MW机组为例,表2列举了DDPMG和3极齿轮箱驱动的DFIG经济性能的比较^[25]。可以看出,直驱风力机组总损耗低、效率高、年发电量高,但成本是制约其发展的关键因素。通过对发电机进行优化设计,可以降低发电

机的材料成本;同时,随着电力电子技术的发展,变频装置的成本也在不断降低。综合考虑长期运行、维护等各方面的成本,DDPMG组具有良好的发展前景。

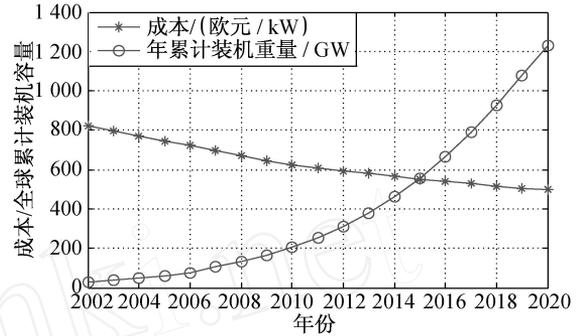


图7 2002~2020年全球风机累计装机容量与发电成本预测

表2 DDPMG和3极齿轮箱驱动的DFIG经济性比较

比较因素	DFIG	DDPMG
总成本 / kEuro	1 870	1 982
总损耗 / MWh	763	513
年发电量 / MWh	7 730	8 040
单位成本年发电量 / (kWh/Euro)	4.13	4.05

4 研究趋势

目前,国内外对DDPMG技术的研究具有以下趋势:

(1)研究并提出新型的定、转子结构,优化极、槽配合,定子超高压,发电机大型化,提高系统的集成度,降低成本;

(2)结合直驱风力发电机的特点,优化磁路结构设计,推广、应用性能优越的新型永磁材料;

(3)改善大功率变频电路拓扑结构;提高能量转换效率,削弱谐波影响,增强电磁兼容性;

(4)采用单极齿轮箱驱动永磁同步发电机,该技术结合了齿轮箱驱动和直驱的优点,成本低、年剪发电量高、安装尺寸小、集成度高,具有较高的研究及工程应用价值;

(5)分析DDPMG组对电网暂态稳定性的影响,并提出相应的评价标准及控制策略;

(6)由于桨距角与风机转速的非线性关系,在恒速运行区及额定风速以上运行时,有效的桨距角控制以及桨距角与电气的协调控制方法有待

进一步研究。

5 结 语

DDPMG组具有效率高、运行可靠、噪声低、维护量小、对电网的冲击小、风速适应范围宽、控制简单、有功和无功功率调节灵活等突出优点。随着电力电子技术和永磁材料制造技术的发展,占成本比例相对较高的开关器件和永磁体,在其性能不断提高的同时,成本也不断下降,使得直驱永磁同步风力发电系统从众多变速恒频风力发电系统中脱颖而出,具有广阔的发展前景,受到学术界和工程界的广泛关注。

【参考文献】

- [1] 欧洲风能协会,国际绿色和平组织. 关于 2020 年风电达到世界电力总量 12% 的蓝图 [R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [2] Dubois M R. Optimized permanent generator topologies for direct-drive wind turbines [M]. The Netherlands: Delft Univ Technology, 2004.
- [3] Hwang Don-Ha, Lee Ki-Chang, Kang Do-hyun, et al. An modular-type axial-flux permanent magnet synchronous generator for gearless wind power systems [J]. IEEE Industrial Electronics Society, 2004 (2): 1396-1399.
- [4] Khan M A, Dosiek L, Pillay P. Design and analysis of a PM wind generator with a soft magnetic composite core [J]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2006 (3): 2522-2527.
- [5] Chalmers B J, Spooner E. An axial-flux permanent magnet generator for a gearless wind energy system [J]. IEEE Trans On Energy Conversion, 1999, 14 (2): 251-257.
- [6] Eduard Muljadi, Butterfield C P, Wan Yih-huie. Axial-flux modular permanent magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications [J]. IEEE Trans on Industry Application, 1999, 35 (4): 831-836.
- [7] Dubois M R, Polinder H, Ferreira J A. Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines [J]. IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, 2002, 13 (16): 22-26.
- [8] Chen Yicheng, Pillay P, Khan A. PM wind generator topologies [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41 (6): 1619-1626.
- [9] Polinder H, Mecrow B C, Jack A G, et al. Conventional and TFRM linear generators for direct-drive wave energy conversion [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20 (2): 260-267.
- [10] 徐峰. 兆瓦级直驱式复合励磁同步风力发电机组主控制器研制 [D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [11] Wang Fengxiang, Bai Jianlong, Hou Qingning, et al. Design features of low speed permanent magnet generator direct driven by wind turbine [J]. IEEE Electrical Machines and System, 2005, 2 (2): 1017-1020.
- [12] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [13] 周晓燕, 史贺男, 王金平, 等. 低速永磁风力发电机的分析计算 [J]. 中小型电机, 2005, 32 (2): 15-17.
- [14] 张兆强. MW 级直驱永磁同步风力发电机设计 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [15] 元伟伟, 蒋彦龙. 风力发电冷却技术 [J]. 世界科技研究与发展, 2007, 29 (2): 80-85.
- [16] 钟伟强. 国内外风力发电简述 [J]. 青海科技, 2004 (2): 25-26.
- [17] 王星华. 变速恒频同步直驱风力发电机控制系统研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [18] Chinchilla, A maltes M, Burgos S, et al. Control of permanent magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21 (1): 130-135.
- [19] 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.
- [20] Yang Chuanwei, Liang Hui, Jiang Jiuchun. Modeling and simulation of AC-DC-AC converter system for MW-level direct-drive wind turbine grid interface [C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006: 1-4.
- [21] 王丰收, 沈传文, 孟永庆. 基于 MPPT 算法的风力永磁发电系统的仿真研究 [J]. 电气传动, 2007, 37 (1): 6-10.
- [22] Dai Jingya, Xu Dewei, Wu Bin. A novel control system for current source converter based variable speed PM wind power generators [C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2007: 1852-1857.

(下转第 21 页)

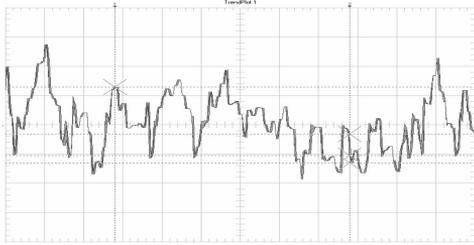


图 8 直流电机模拟风力机的转矩输出

将这套风力机模拟系统结合变频器系统和风机主控制器,就能够完整地在实验室中模拟各种工况下,整个风力发电系统的起动、并网和运行。

4 结 语

本文通过研究风速的变化规律,提出了一种基于自回归理论的风速模型;并且通过对风力机叶片的受力分析,构建了一种适用于不同风速和运行状态的风轮转矩计算模型。在此模型的基础上,设计并搭建了风场和风力机模拟系统的物理试验平台和相应的控制监控界面。实际试验表明,该模拟系统能够实时地接收风力发电主控制器系统的指令信号,同时采集相应的电机状态参数,准确地模拟了风力机的实际运行状态。风场与风力机模拟系统的设计与实现,解决了在实验室条件下对风力机运行状态的模拟问题,为风力发电技术整体系统的研究开发提供了一套完整而有效的辅助实现方案。

【参 考 文 献】

- [1] Bhowhik S, Spee R, Euslin J R. Performance optimization for doubly fed wind power generation system [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1999, 35 (4): 949-958.
- [2] 卞松江,潘再平,贺益康. 风力机特性的直流电机模拟 [J]. 太阳能学报, 2003, 24 (3): 360-364.
- [3] 刘其辉,贺益康,赵仁德. 基于直流电动机的风力机特性模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (7): 134-139.
- [4] Anderson P M, Bose A. Stability simulation of wind turbine systems [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1983, 102 (12): 3791-3795.
- [5] Nichrta C, Luca D, Dakyo B. Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators [J]. IEEE Trans Energy Conversion, 2002, 17 (4): 523-529.
- [6] Leithead W E, Salle S, Reardon D. Role and objectives of control for wind turbines [J]. IEE Proc -C, 1991, 138 (2): 135-148.
- [7] Manwell J F, McGowan J G, Rogers A L. Wind energy explained theory, design and application [M]. London: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [8] Welfönder E, Neifer R, Spanner M, et al. Application of models of dynamic models for wind turbines [J]. Control Engineering Practice, 1997, 5 (1): 63-73.
- [9] 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.
- [10] Ding Feng. Generalized yule-walker and two-stage identification algorithms for dual-rate systems [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2006 (4): 338-342.
- [11] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术 [M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [12] 贾要勤. 风力发电实验用模拟风力机 [J]. 太阳能学报, 2004, 25 (6): 735-739.
- [13] SIEMENS SMOREG DC Master Guide [G]. 2006.
- [14] SIEMENS Specification USS Protocol [G]. 2006.
- [23] 曹娜,李岩春,赵海翔,等. 不同风电机组对电网暂态稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2007, 31 (9): 53-57.
- [24] 李豪,郑衡,何国锋. 风力发电设备优化选型与电价关系的分析 [J]. 广东电力, 2003, 16 (2): 53-55.
- [25] Henk Polinder, Frank FA, Pijl van der, et al. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21 (3): 725-733.

收稿日期: 2007-11-09

收稿日期: 2008-01-20

(上接第 5 页)