

## 大功率直驱式变速恒频风力发电技术综述

包广清<sup>1</sup>, 施进浩<sup>2</sup>, 江建中<sup>3</sup>

(1. 兰州理工大学, 陕西兰州 730050 2 中国电子科技集团公司第 21 研究所, 上海 200233 3 上海大学, 上海 200072)

摘要: 采用无齿轮箱的直驱式风力发电系统已成为大功率风电机组的主导技术之一。传统风电系统的齿轮传动装置不仅降低了风电转换效率, 产生噪声污染, 更成为发生机械故障的主要原因之一, 同时为减少机械磨损, 还需要润滑清洗等定期维护。直驱式风电机组虽然增加了电机的设计成本, 但却有效提高了系统效率及运行可靠性。在对大功率直驱式风电机组发电机及其功率控制进行对比、分析的基础上, 指出今后的发展方向。

关键词: 风力发电; 永磁同步发电机; 功率变换器; 变速恒频

中图分类号: TM341; TM315 文献标识码: A 文章编号: 1004-7018(2008)9-0052-04

A Survey on Variable Speed Constant Frequency Wind Power System with Direct Coupled Generators

BAO Guang-qing, SHI Jin-hao, JIANG Jian-zhong

(1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. No. 21 Research Institute under CETC, Shanghai 200233, China

3. Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Direct drive turbines were the latest predominant design concepts in turbine technology. These machines had no gearbox or drive train, and consequently no high speed mechanical (or electrical) components. Direct drive turbines were therefore much quieter than gearbox machines as they do not produce mechanical or tonal noise. Eliminating the gearbox eliminated the huge maintenance costs. A special purpose directly driven generator was more expensive, but this was compensated by saving the cost of a gearbox and improving the energy capture. Based on the discussion of different direct wind generators and control methods, the future trends were indicated in this paper.

Key words: wind power generation; permanent magnet synchronous generator; power converter; VSCF control strategy

## 0 引言

随着人类社会的发展, 能源与环境问题已成为全球可持续发展所面临的主要问题, 风力发电以其无污染和可再生性, 日益受到世界各国的重视, 并保持增长最快的能源地位。近年来, 风电技术取得了突飞猛进的发展。单机容量不断提高, 兆瓦级风电机组实现商品化; 风力机的变桨距功率调节取代了定桨距调节, 发电机的变速恒频运行取代了传统的恒速恒频运行, 系统效率进一步提高; 实现了风电场的实时监控、远程测控及计算机群控, 提高了分布或并网运行的稳定性和电能质量。

在风力发电系统的机电能量转换过程中, 发电机及其控制系统具有十分关键的作用, 它不仅直接影响整个系统的性能、效率和供电质量, 而且也影响到风能吸收装置的运行方式、效率和结构。因此, 研究适合于风电转换的运行可靠、效率高、控制简单及供电性能良好的发电系统具有重要的理论意义和应用价值。目前, 风电机组朝着高可靠性、低维护量、

少组件、低成本、高集成度方向发展, 传统风电机组中齿轮箱的存在成为制约其进一步发展的重要因素之一。上世纪末, 许多欧洲国家开展了无齿轮箱的直驱式风电机组研究, 其市场份额迅速扩大, 德国在 2004 年安装的风电机组中, 就有 40.9% 采用了无齿轮箱系统。直驱式风电系统通过将风力机与发电机转子直接耦合, 机组性能得到改善:

(1) 由于省去了齿轮箱, 没有传动磨损和漏油所造成的机械故障, 减少了机组维护, 降低了噪声污染, 提高了机组的可靠性和使用寿命。

(2) 取消了齿轮箱传动轴, 机组水平方向长度大大缩短, 增加机组稳定性。

(3) 直驱式永磁风力发电系统不需要电励磁装置, 提高了发电效率, 具有重量轻、可靠性好等优点。

本文从发电机的性能、设计、可控性及功率控制等方面, 对不同类型的多极永磁同步电动机在直驱式风电领域的应用进行分析比较, 并介绍了相关的发电控制技术。可以相信, 随着电力半导体器件和铁磁材料的发展, 在直驱式风力发电系统中, 占成本比例相对较高的功率变换器和发电机, 其性价比不断提高, 这种省去齿轮箱的直驱式风电系统将成为

今后大功率风力发电的主要发展方向。

### 1 直驱式风力发电系统结构

图 1 是以永磁发电机和全功率变换器为核心的直驱式风力发电系统拓扑。由于采用永磁体励磁, 发电机不必从电网或发电机侧变流器得到无功功率; 中间直流环节的存在, 发电机与电力系统没有无功能量交换; 根据风能变化, 通过变速恒频控制优化系统输出功率; 网侧变流器可以改善功率因数, 并在一定范围调节输出电压。

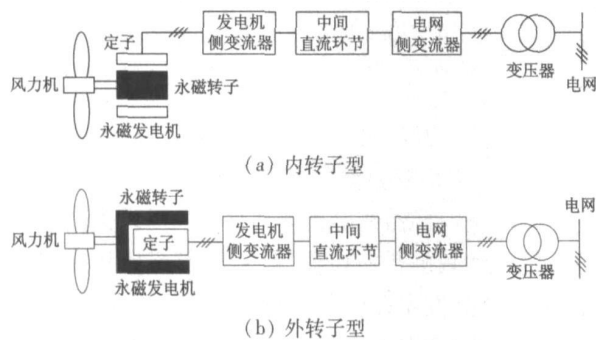


图 1 直驱式永磁风力发电系统拓扑

根据发电机结构的不同, 直驱式风电系统有内转子型和外转子型两种拓扑。内转子型是一种常规发电机形式, 风力机和永磁体内转子同轴安装。这种结构的发电机定子绕组和铁心通风散热好, 温度低, 定子外形尺寸小; 外转子型是风力机与发电机的永磁体外转子直接耦合, 定子电枢安装在静止轴上。这种结构易于永磁体安装固定, 缺点是对电枢铁心和绕组通风冷却不利, 永磁体转子直径大, 不易密封防护。

### 2 直驱式风力发电机

根据发电机中主磁通方向的不同, 可以把发电机分成径向磁通电机、轴向磁通电机和横向磁通电机三大类。

#### 2.1 径向磁通发电机 (RFPG)

如图 2 所示, 在 RFPG 中导体电流呈轴向分布, 主磁通沿径向从定子经气隙进入转子, 这是最普通

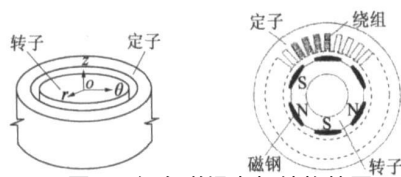


图 2 径向磁场电机结构简图

的永磁发电机形式。多极永磁同步发电机可以与风力机同轴运行, 适于兆瓦级以上系统, 电机结构简单, 维护量相对较少, 功率密度高, 避免了双馈发电机复杂绕组结构和机组损耗较大等缺点, 不足之处

是电机功率密度不高。

#### 2.2 轴向磁通发电机 (AFPG)

如图 3 所示, AFPG 的绕组物理位置被转移到端面, 电机的轴向尺寸相对较短。电机中导体电流呈径向分布, 这样有利于电枢绕组散热, 可取较大电负荷, 尤其采用双边永磁体结构便于提高气隙磁密, 转矩质量比大。缺点是在永磁体结构轴向不对称时, 存在单边磁拉力, 如果磁路设计不合理, 漏磁通很大。

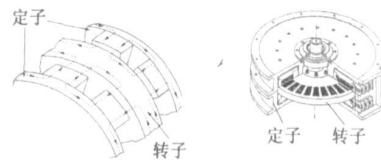


图 3 轴向磁通电机结构简图

#### 2.3 横向磁通电机 (TFPG)

如图 4 所示, TFPG 电枢绕组与主磁路在结构上完全解耦, 完全可以根据需要调整磁路尺寸和线圈窗口来确定电机的电磁负荷, 不存在传统电机在增加气隙磁通与绕组电流密度之间结构上的相互制约关系, 从而获得较高的转矩密度, 缺点是电机结构复杂, 制造成本高。

有文献对这三种电机进行比较<sup>[3]</sup>, 表明在相同外径尺寸条件下, 虽然 AFPG 产生的转矩密度是 RFPG 的两倍以上, 但其材料成本/转矩比也是 RFPG 电机的 2~3 倍 (因转子有效材料的用量增加), 而 TFPG 产生的转矩密度大约是 RFPG 电机的 2~3 倍, 其有效材料成本/转矩比只是 RFPG 的 1/2。因此, 就电机性能而言, 横向磁通永磁电机因其低速发电性能好、效率高、转矩密度高, 可以缩小电机的体积和重量, 非常适合对电机体积、重量要求苛刻的应用场合, 尤其适用于直驱式风力发电系统。



图 4 横向磁通电机结构简图

### 3 变速恒频控制系统

#### 3.1 功率变换器拓扑

为了实现发电机定子与电网用户之间的“柔性”连接和电能的“绿色”变换, 风力发电机组应采用变速恒频控制策略。变速恒频发电是 20 世纪末发展起来的一种新型发电方式, 它将电力电子技术、矢量控制和计算机技术引入发电机控制, 直驱式变速恒频风电机组功率变换系统主要有以下几种拓扑形式:

大功率直驱式变速恒频风力发电技术综述

(1) 交直交变换器

如图 5 所示, 这种“背靠背”变换器是典型的直驱式风电机组功率变换器, 具体有以下几种衍生结构: (a) 发电机侧和网侧均采用自关断器件<sup>[3]</sup>, 易于实现有功和无功的解耦控制, 缺点是硬件成本高, 控制复杂; (b) 发电机侧采用不控整流, 网侧采用晶闸管变流器<sup>[4]</sup>, 通过触发角的变化实现逆变控制, 简单方便, 器件功率等级高, 成本低, 缺点是谐波污染大, 需要进行无功补偿; (c) 发电机侧采用不控整流, 中间电容滤波, 网侧变流器采用自关断器件<sup>[5]</sup>。相对结构 (c), 系统器件成本降低, 但网侧变流器控制算法复杂, 器件开关损耗大; (d) 中间直流环节采用斩波电路<sup>[5]</sup>。通过 DC/DC 升压或升降压变换器控制直流电压, 有利于提高系统的低风速工作性能, 最大限度地利用风能, 是目前直驱式风电机组的主流变换器, 但大电容的存在导致系统臃肿, 使用寿命下降。

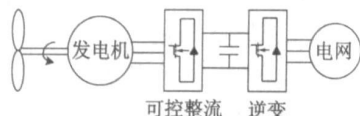


图 5 交直交功率变换器拓扑

(2) 混合式变换器<sup>[6]</sup>

如图 6 所示, 电流源逆变器 ( PWM— CSC ) 作为主逆变器, 电压源逆变器 ( PWM— VSI ) 作为副逆变器, 作为有源滤波器进行补偿谐波畸变。混合式变换器包括四个可控变换器, 控制灵活, 易于实现发电机矢量控制, 保证电能质量。尤其是主逆变器电流采用矩形波控制模式, 显著降低了器件开关频率, 从而降低开关损耗; 副逆变器工作在高频开关状态, 但其工作电流仅是负载电流的一部分, 逆变器功率等级相对较低。这种变换器的最大缺陷是所需的功率器件和传感器数量大, 导致系统的软、硬件成本上升, 同时由于发电机输出电压由副逆变器决定, 所以副逆变器将承受较大的电压应力。

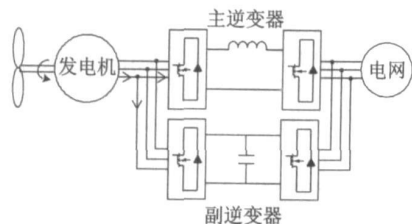


图 6 混合式功率变换器拓扑

(3) 矩阵变换器

如图 7 所示, 为了简化变换器的结构, 避免中间直流环节, 将矩阵变换器引入风力发电系统<sup>[7]</sup>, 保证了系统在最大限度捕获风能的同时, 实现有功功率与无功功率的解耦控制。然而矩阵变换器技术还

存在很多缺陷: 输出电压比输入电压低, 要得到与“背靠背”变换器相同的输出功率, 矩阵变换器必需输出 1.15 倍的电流, 造成变换器更高的功率损耗; 由于没有中间直流环节, 矩阵变换器输入侧和输出侧具有强耦合作用, 在非理想状态下如负载不平衡或输入电压畸变时, 输入电流和输出输出电压也会发生畸变。同时, 故障情况下矩阵变换器的保护也是一个尚未很好解决的问题。

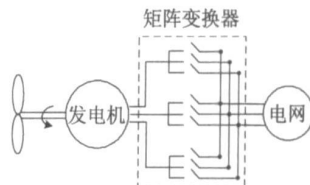


图 7 矩阵功率变换器拓扑

(4) 多电平变换器和谐振变换器

多电平变换器和谐振变换器分别可以提高输出电压等级和减小开关损耗, 但变换器拓扑和控制却更加复杂, 并没有在风电领域得到广泛应用。

3.2 最大风能跟踪控制算法

选择恰当的最大风能跟踪控制方法已成为提高风电机组效率的关键因素之一, 由于空气动力系统的不确定性和电力电子模型的复杂性, 使风电机组成为一个复杂多变量非线性系统, 具有显著的不确定性和多干扰等特点, 因此很难对其进行准确的数学建模, 再加之同轴联结各部件之间巨大的惯性差异, 导致传统控制方法在风力发电系统中很难达到预期效果。

风力发电系统的控制方法根据控制器的不同可分为两大类: 以数学模型为基础的传统控制方法和模拟人类智能活动及其信息传递机理的智能控制。目前实现变速恒频发电系统的最大风能捕获控制主要有几类算法:

(1) 尖速比控制<sup>[5-7]</sup>。需要实时测量风速和转轴速度, 机械测量增加了系统成本和复杂性, 对风力机、发电机特性的依赖使得系统设计只能是“量体裁衣”。

(2) 功率信号反馈控制<sup>[8-11]</sup>。需要提供风电机组的最大功率曲线, 并通过反馈控制实现最大功率点的跟踪, 该最大功率曲线只有通过仿真计算或实际测量得到, 成本高, 可实施性差。

(3) 登山搜索法控制<sup>[12-14]</sup>。虽然登山搜索法克服了尖速比和功率信号反馈对风机特性的强依赖性缺陷, 但它要求转速对风速变化具有瞬时响应特性, 而风力机是一个大时滞系统, 登山搜索法的实际控制效果并不理想。

(4) 模糊控制和神经网络控制<sup>[15-17]</sup>。以模糊

控制和神经网络控制为代表的智能控制具有非线性、变结构、自寻优等特点,较好地克服了系统参数的时变与非线性因素,在风电机组控制领域已逐步得到应用。模糊控制在一定程度上简化了系统结构,提高了系统鲁棒性,但控制精度并不高,同时需要专家知识,缺乏自适应能力。神经网络控制具有较强的非线性映射能力和自学习、自收敛性,可以根据历史风速数据预测风速变化。然而,由于风能变化的随机性,很难实现真正意义上的最优控制。

#### 4 风电发展趋势

为提高风力发电效率,降低成本,改善电能质量,减少噪声,实现稳定可靠运行,风力发电技术将继续向大容量、无刷化、智能化及变速恒频控制等方向发展,今后主要有以下发展趋势:

(1)单机容量继续稳步上升。单机容量增大后的直接好处是能以数目较少的风电机组完成相同的发电量,从而节省土地使用面积。

(2)风电并网研究。当大规模的风电并入电网后,风电与电网间的相互影响及相互作用规律还是需要进一步研究。

(3)从风机到发电机的新型驱动方式研究。通过对纯齿轮装置驱动和直接驱动技术的融合,进行混合式驱动系统研究,从而取长补短,提高风电机组性能。另外,改善轴传动效率,满足高风速或低风速地区以及复杂地形的运行要求等也是风电机组设计的发展趋势。

(4)智能最大风能跟踪控制。研究人类智能一直是科学发展中最有意义,也是空前困难的挑战性课题之一。其中,基于数据的机器学习是现代智能技术的一个重要分支,研究从观测数据出发寻找规律,对无法观测数据或高成本观测数据进行预测,建立一种基于风能特征信息提取的新型智能最大风能捕获控制算法,避免对风速的实时测量,这种算法具有可移植性,具有可靠性高,成本低等特点,是解决风电机组控制问题的重要途径之一。

#### 参考文献

[1] Spooner E, Williamson AC. Direct coupled permanent magnet generators for wind turbine applications [J]. IEEE Proceedings of

Electric Power Applications, 1996, 143(1): 1-8.

[2] D'Abos M R, Polinder H, Ferreira J A. Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines [M]. IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, 2000, 22-26.

[3] Datta R, Ranganaathan V T. A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system [J]. IEEE Trans Energy Conv, 2003, 18: 163-168.

[4] Chen Z, Spooner E. Current source thyristor inverter and its active compensation system [J]. Proceedings of IEEE Generation of Trans. Mission and Distribution, 2003, 150: 447-454.

[5] Chen Z, Spooner E. Grid interface options for variable-speed permanent-magnet generators [J]. IEEE Proc Electric Power Applications, 1998, 145(4): 273-283.

[6] Trzynański A, Blabjerg F. A Hybrid Current-source/Voltage source Power Inverter Circuit [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2001, 16(6): 472-478.

[7] 黄科元, 贺益康. 矩阵式变换器交流励磁变速恒频风力发电系统研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 100-105.

[8] Kobayashi M, Nakamura H, Kobayashi M, et al. Study on maximum power point tracking of wind turbine generator using a flywheel [C] // Proceedings of IEEE PCC, 2002, 1: 322-327.

[9] Thiringer T, Linders J. Control by variable rotor speed of a fixed-pitch wind turbine operating in a wide speed range [J]. IEEE Trans Energy Conv, 1993, EC-8: 520-526.

[10] Ermiş M, Ertan H B, Akpınar E, et al. Autonomous wind energy conversion system with a simple controller for maximum-power transfer [J]. Proc Inst Elect Eng B, 1992, 139: 421-428.

[11] Chedid R, Mrad F, Basma M. Intelligent control for wind energy conversion systems [J]. Wind Eng, 1998, 22(1): 1-16.

[12] GL Johnson. Wind Energy Systems [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2003.

[13] Hilbowala R, Sharm A M. A rule-based fuzzy logic controller for a PWM inverter in a stand alone wind energy conversion scheme [J]. IEEE Trans Ind Application, 1996, IA-32: 57-65.

[14] Chedid R, Mrad F, Basma M. Intelligent control of a class of wind energy conversion systems [J]. IEEE Trans Energy Conv, 1999, EC-14: 1597-1604.

[15] Simoes MG, Bose BK, Spigal RJ. Fuzzy logic-based intelligent control of a variable speed cage machine wind generation system [J]. IEEE Trans Power Electron, 1997, PE-12: 87-94.

[16] Tan K, Islam S. Optimum control strategies in energy conversion of FMSG wind turbine system without mechanical sensors [J]. IEEE Trans Energy Convers, 2004, 19(2): 392-399.

[17] Li H, Shi KL. Neural-Network-Based Sensorless Maximum Wind Energy Capture With Compensated Power Coefficient [J]. IEEE Trans Ind Appl, 2005, 41(6): 1548-1556.

(上接第 45 页)

[4] Jiangcheng L, Li Koji, YAKUSHI Takafumi, KOSEKI J. Degree of Freedom Magnetic Levitation Control of a 4-Pole Electromagnet By using Observer [J]. Journal of the Japan Society of AME,

2001, 9(2): 27-30

作者简介: 赵琦 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事小型磁悬浮运输系统研究。