

兆瓦级风电机组主传动系统结构研究进展

杨 柳, 赵 萍, 吕杏梅, 王永胜

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 根据国内外大型风力发电机组制造厂商的产品及其技术特点, 对主流兆瓦级风机的主传动系统结构特点进行了深入剖析。同时, 从发电量、度电成本、可靠性、可维护性和大容量拓展5个方面, 对主传动系统的性能和可靠性进行了对比研究, 为主传动链形式的选择提供了依据。最后, 介绍了近年来风电领域的新技术、新产品的开发及其在风机上的应用情况, 为风机主传动链的改良以及环境适应性提出了合理化建议。

关键词: 风力机组; 主传动链; 结构特点; 可靠性; 环境适应性

中图分类号: TM315

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2013)04-0028-07

Advance Research on Main Drive System Structures of Multiple Megawatt Wind Turbines

YANG Liu, ZHAO Ping, LV Xing-mei, WANG Yong-sheng

(CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: According to products and technical characteristics of multiple megawatt wind turbines at home and abroad, this paper analyzes the characteristics of main drive train system structures on the mainstream of MW-level wind turbines. Moreover, from the aspects of generating capacity, cost of electricity, reliability, maintainability and capacity expansion, the main drive train performance and reliability were studied, which provides a basis for the choice of main transmission chains. Finally, this paper introduces the development of new technology and new products of wind power and wind turbine application in recent years, and proposes some reasonable suggestions for wind turbine main drive chain improvement and environmental adaptability.

Key words: wind turbine; main transmission chain; structure characteristic; reliability; environmental adaptability

0 引言

煤、石油、天然气等常规能源的短缺危机已愈演愈烈, 供不应求已是大势所趋。同时2011年日本福岛地震和海啸造成福岛核电站泄漏, 引起世界各地、特别是日本和欧洲的反核呼声, 这一事件直接引发德国议会通过了2022年德国全部退出核电的决定, 也导致日本境内所有核电站于2012年上半年全部关停^[1]。面对全球不断增长的能源需求及人们对核电安全问题的担忧, 风电等可再生能源一时间获得了一些环保意识较强国家的青睐。

风力发电行业发展初期代表性国家之一的丹麦, 最早批量生产风力发电机组是在20世纪70年代末, 机组的输出功率仅22 kW。从20世纪80年代起, 风电行业的商业制造规模越来越大, 从1981年55 kW的突破, 到1985年的225 kW、1995年660 kW。而在1998年兆瓦级风机产业化之前, 600 kW和750 kW风机一直是主流。在1995年和1996年, NEGMicon 1.5 MW和Vestas 1.5 MW风机已相继问世。直至21世纪初, 全球兆瓦级风电机组产业开始迅猛发展, 从2000年的Nordex 2.5 MW, 到2003年GE 3.6 MW, 2007年最大的海上风机Repower 5 MW, 以及如今单机容量最大的Enercon 7 MW。随着风机的单机容量逐年提升, 这些大容量机型主要应用范围也转向安装地点稀少的陆地和海上区域。

收稿日期: 2013-04-17

作者简介: 杨柳(1990-), 男, 助理工程师, 主要从事机械系统动力学仿真及CAE优化设计工作。

在种类繁多的风力发电机机型中,双馈齿轮箱驱动技术、无齿轮箱直驱技术和半直驱技术是当今世界兆瓦级风电产业的主流技术。本文综述以上3种技术的特点及优缺点,介绍各机型的发展状况;同时结合产业内新兴的技术及产品,对风机的主传动链改良提出一些合理化建议。

1 主传动链的典型结构及各部件的功能

当今兆瓦级以上的大型风力发电机组技术臻于成熟,一般为水平轴传动形式,其传动链的基本结构由风轮、主轴、齿轮箱、制动器、联轴器、发电机等部件组成,如图1所示。风以一定的速度和攻角作用在叶片上,使叶片产生旋转力矩,带动风轮转子转动,从而将风能转化为机械能;主轴、齿轮箱、联轴器、制动器、发电机等一系列传动链部件均安装在机舱内,风轮产生的转矩经过这些部件的传递,驱动发电机发出电能并通过变流器和变压器输入电网。

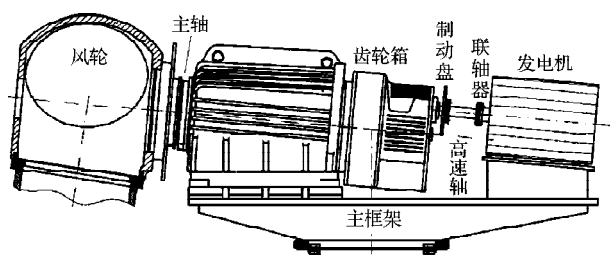


图1 主传动的典型结构

Fig. 1 Typical main drive structure

各部件的功能如下:

(1)风轮。风轮由具有气动特性的叶片和轮毂组成,其功能是将风能转化为机械能。叶片是风力发电机组的关键零部件之一,兆瓦级风机通常配2~3片,材质多采用玻璃钢,也有使用竹制材料和碳纤维材料制作。轮毂一般是用铸铁或铸钢铸造而成,叶片通过轮毂与机舱相连。

(2)主轴。主轴是风力发电机组传动链的关键组成

部分,连接风轮与机舱内部的传动部件,承载着风轮转矩、重力等复杂载荷,因此必须具备足够的刚度、极限强度、屈服强度和疲劳强度。主轴一般选用34CrMoNi6/42CrMo或者其他高强度合金钢,经调质处理,保证在强度、刚度等方面都具备良好的机械性能。

(3)增速齿轮箱。齿轮箱的有无是双馈与直驱两种技术方案本质区别。兆瓦级风电机组叶轮输入转速一般不超过20 r/min,但双馈机型的发电机工作需要高转速。为了实现风力机转速与发电机转速匹配,必须采用增速齿轮箱,使转速从低于20 r/min提升至600~2 200 r/min。目前市场主流1.5~3.0 MW双馈机型的齿轮箱增速比为80~120,输出转速一般在1 000~2 000 r/min。直驱机型无齿轮箱,风轮与发电机直接相连。

(4)发电机。兆瓦级风电机组常用的发电机主要有同步发电机和异步发电机两类。同步发电机根据励磁场产生的不同可分为永磁同步发电机和电励磁同步发电机;异步发电机根据有无滑环碳刷可分为双馈有刷电机和双馈无刷电机。经过一系列传递后,风轮转矩最终在发电机中转化为电能。

(5)制动器。制动器是风机的刹车装置,限制风机的转速,使风机运动部件减速、停止或保持停止状态等功能的装置。制动器有机械制动和空气制动两类,常安装在齿轮箱的输入端或输出端。

(6)联轴器。联轴器是连接齿轮箱高速轴与发电机转轴的柔性轴,补偿两者的平行性偏差和角度误差。联轴器在传递扭矩的同时,还具备扭矩限制的功能,防止机组因扭矩过载发生机械损坏。

2 国内外大型兆瓦级风力发电机组主传动链的主要型式及应用情况

双馈型、直驱型和半直驱型是当前兆瓦级风机市场上的主要型式,其本质区别就体现在各自主传动系统的结构组成。主传动链对比如图2所示。

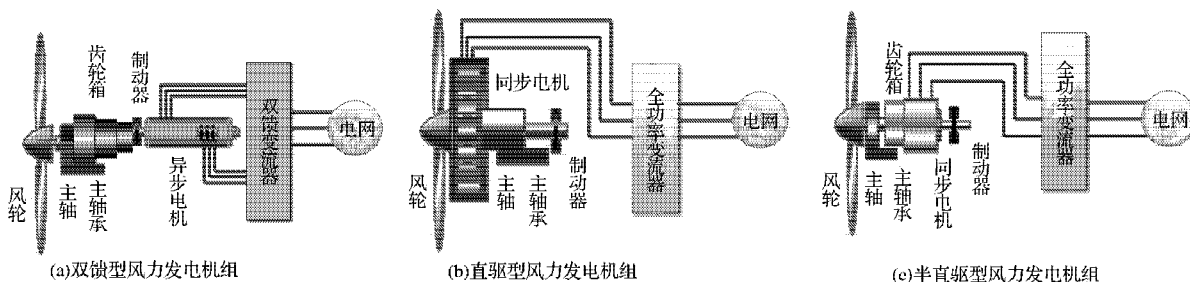


图2 风机主传动链对比

Fig. 2 Category of wind turbine main drive chain

2.1 双馈型风力发电机组

主传动链组成:风轮+主轴+增速齿轮箱+联轴器+

双馈异步发电机(+双馈变流器)。

双馈型风力发电机组结构也被称为丹麦型,是传

统机型的代表, 占据着世界市场85%左右的份额, 其主传动系统主要由风轮、主轴、齿轮箱、联轴器、绕线型感应电机组成, 如图2(a)所示。主轴较长, 一端悬挂支撑风轮总成, 一端与齿轮箱相联。按布置形式可将其分为两点支撑、三点支撑和一点支撑结构方案。齿轮箱为二级或三级增速箱, 主要通过行星轮系和平行轴系或者行星平行混合轮系来实现额定转速的输出, 传动比很大。此种传动链的发电机通常使用双馈绕线型感应发电机, 发电机通过绝缘装置安装在机组的底座上。

双馈发电机的转子通过滑环与双馈变频器相连, 转子和定子发出的电能经过有源IGBT整流和IGBT逆变, 最终通过箱式变压器输入电网^[2]。

2.2 直驱型风力发电机组

主传动链组成: 风轮+主轴+永磁(电励磁)同步发电机(+全功率变流器)。

直驱式风力发电机近年来发展迅速, 且备受业内人士看好。其主传动系统主要由风轮、主轴、低速同步电机组成, 整个传动链结构紧凑, 如图2(b)所示; 风轮与发电机固接, 根据连接方式可分为外转子直驱、内转子直驱和盘式直驱; 主轴小巧且短, 仅起支撑作用, 不传递风轮转矩; 发电机采用低速同步发电机, 根据励磁场的产生可分为电励磁直驱和永磁直驱, 但电励磁直驱因体积大结构复杂, 使得成本较高的永磁直驱更受青睐。由于风轮转速较小, 没有使用齿轮箱或其他升速部件, 所以直驱机型传动链常采用低速永磁发电机, 而为了满足发电机中磁感线切割的速度, 发电机的直径通常比较大^[3]。

永磁同步发电机将风轮转矩转化为电能, 输出不停变化的交流电压, 通过全功率变频器变化成直流, 再逆变成与电网一致的交变电流, 最后通过箱式变压器输入电网。

2.3 半直驱型风力发电机组

主传动链组成: 风轮+主轴+增速齿轮箱+永磁同步发电机(+全功率变流器)。

半直驱方案是介于双馈技术和直驱技术之间的方案。其传动链结构形式与双馈机型类似, 风轮总成通过主轴与齿轮箱连接, 齿轮箱通常使用一级或二级增速箱, 结合低速或中速永磁同步发电机, 有效降低了整个传动链的尺寸, 同时也减少了永磁同步发电机的体积和成本, 结构紧凑, 简单可靠, 如图2(c)所示。另一方面, 很多半直驱设计方案体现了将齿轮箱与发电机进行集成化模块设计的概念, 齿轮箱输出轴与发电机转轴直接相联, 能使整个传动系统总长度更短, 并消除两部件

轴向对中不良等问题。

半直驱型风力发电机组采用永磁同步发电机, 发电机输出时同样需要全功率变频器来适应变速运转, 电能通过箱式变压器输入电网^[4]。

3 主传动链性能及可靠性对比分析

3.1 发电量比较

3.1.1 风速范围

从水平轴风力机的空气动力学中可知, 机组从风能中实际获得的轴功率为:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho V^3 S$$

式中: P ——等价于空气动力的输出功率; ρ ——空气密度; V ——风力机上游风速; S ——叶片扫风面积; C_p ——风能利用系数, 体现了风力发电机从自然风能中吸取能量的大小程度, 其最大利用系数即贝兹极限, 为0.593。

不同技术方案的 C_p 曲线如图3所示, 各技术方案的运行转速范围差异主要体现在低风速区间, 即4.5 m/s以下, C_p 系数相差在5%~10%, 这正是直驱机型厂商认为其产品低风速发电性能比双馈机型高5%~10%的原因。

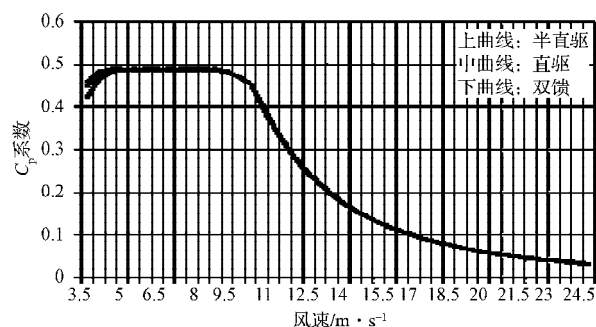


图3 不同技术方案的 C_p 曲线
(来源: 南车株洲所风电事业部统计数据)

Fig. 3 C_p curve of different technical solution (From: Wind Power Business Unit, CSR)

3.1.2 电能质量

双馈转子变流器和全功率变流器的电网适应性差异在于低电压穿越能力。

直驱风机的变流器为全功率并网, 电能质量高, 对电网影响小, 更容易满足低电压穿越要求^[5], 甚至可以实现零电压穿越, 适应电网对风电并网日益严格的要求; 同时在电网异常和故障状态下, 变流器的兼容能力更强, 比如电网跌落和不对称时, 由于电机和电网隔离, 还可以运行在不对称状态。但全功率变流谐波含量高, 需进行滤波处理, 在这一点上不如双馈变流器的电能质量好。

双馈变流器仅有转差功率经过变频器, 所以变频器容量小, 价格低, 亦能满足各种并网标准要求, 并且

电能谐波含量可控制在较低水平。但双馈发电机需运行在特殊控制算法之下,控制策略复杂,否则电流冲击和畸变均很严重,对发电机的安全性有影响^[6]。

3.2 度电成本

将2 MW以及2.5 MW双馈机型和直驱机型的制造成本进行对比分析,如表1所示。直驱机型的主传动链制造成本比双馈机型的高80%~95%,直驱机型的发电机成本比双馈机型电机高出495%~505%。根据某双馈整机厂家和某直驱整机厂家的报价详情,了解到直驱机型的发电机与变流器总造价比双馈机型齿轮箱、发电机、变流器总造价约高出68%~81%。

表1 各机型传动链成本比较

Tab. 1 Cost comparison of each type drive chain

机型	2 MW			2.5 MW		
	直驱	半直驱	双馈	直驱	半直驱	双馈
发电机占传动链成本的比重	53.20%	34.20%	16.10%	55.18%	33.40%	17.78%
主传动链成本对比	180.1%	144.3%	100.0%	194.8%	135.6%	100.0%
发电机成本对比	595.4%	306.8%	100.0%	604.5%	254.5%	100.0%

风电机组价格走势如图4所示,其中华锐风电和上海电气的产品以双馈机组为主,金风科技和湘电风能产品主打直驱机型,他们均是国内乃至全球装机容量排名靠前的整机厂商。从图中的市场走势表现来看,双馈型风电机组更具价格竞争优势,同直驱机型相比,每千瓦时约便宜200元。

由于排除了齿轮箱的能量损失,永磁直驱设计比传

表2 双馈机型与直驱机型的可靠性比较^[8-9]

Tab. 2 Reliability comparison of doubly-fed and direct drive wind turbines

	双馈机型	直驱机型
传动链载荷	(1) 传动链部件多,可以有效地、合理地分布载荷; (2) 载荷分布复杂,导致故障率增多,特别是发生于齿轮箱高速轴的故障; (3) 风轮扭矩经过主轴及齿轮箱传递至发电机,过滤了部分冲击载荷,保证发电机的稳定性。	(1) 永磁同步机组在低转速下运行,旋转部件较少,增加了可靠性; (2) 风轮与发电机直接连接会增加叶片的冲击载荷,并且将其直接传递到发电机上,增加发电机的故障率; (3) 机头载荷集中,导致机身大,使用钢材更多;机头重量过重容易使机舱与轮毂的连接部件加速磨损,甚至还会引发偏航故障。
齿轮箱故障	虽然双馈机型存在齿轮箱故障,但齿轮箱技术从20世纪90年代起就臻于成熟,其故障率已经非常低。(如图5)	无齿轮箱故障。
冷却方式	(1) 齿轮箱使用油冷,需要定期维护。 (2) 发电机及变频器均使用水冷,简便且可靠性高。	(1) 永磁同步发电机使用空冷系统,空气中含有的带电粒子、灰尘等会在永磁场的作用下附着在永磁体的表面,造成风机磁隙发生变化,从而影响机组性能,而且由于存在强磁场,附着后的带电粒子和灰尘很难去除; (2) 全功率变频器耗能高,发热大,电气控制系统复杂,散热投入大。
环境适应性	双馈机组的环境适应能力大大优于直驱机组,目前已在各种环境下装机。	(1) 永磁材料在震动、冲击、高温情况下容易发生不可逆的失磁现象;而且材料中含铁,在海上强盐雾的情况下防腐问题难以解决; (2) 目前永磁直驱机组只能配备风冷系统,因此其温度运行范围较窄,因空气中的带电粒子、灰尘的附着,永磁直驱机组在高原多云雾、西北多沙尘、海上强盐雾地区的可靠性会降低。
结论	双馈机型与直驱机型各有优劣,都可达到高可靠性要求,也均存在一定的不足。	

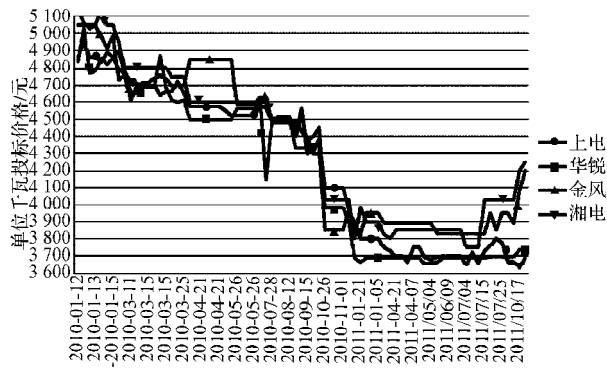


图4 风电机组价格走势(来源:上海电气)

Fig. 4 Wind turbine price trend (From: Shanghai Electric)

统的带有齿轮箱的双馈感应电机效率高约1.4%~6.9%;并且不需要电流励磁,永磁直驱机组在低风速条件下更有优势,节省了从电网中吸收的励磁功率。

由于双馈技术日益成熟,双馈机组稳定性变得更高而成本也逐渐降低,在价格上较直驱机型处于优势地位。直驱机型因普遍使用的永磁同步电机和全功率变频器均比较昂贵,使得直驱机型的制造成本要比双馈机型高出不少,但直驱技术较双馈技术有更高效率的发电、更稳定的性能,使其度电成本并不处于劣势^[7]。

3.3 可靠性

结合Vestas 2 MW(V80-2.0 MW、V90-1.8/2.0 MW、V100-1.8/2.0 MW)2012产品手册与新疆金风科技2012产品手册,对直驱与双馈机型进行客观的分析,其可靠性比较如表2所示。

图5整理自国际上用于风机可靠性分析的标准数据库:德国Windstats(WSD)数据库,丹麦Windstats(WSDK)和Land Wirtschafts Kammer(LWK)数据库,以及德国的WMEP数据库。

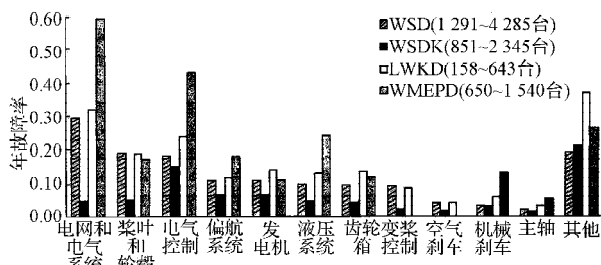


图5 1993-2005年欧洲4个风场的风力发电机组组件年故障率统计^[10]

Fig. 5 Distribution of failure rates of subassemblies in wind turbines in four European wind farms from 1993 to 2005^[10]

3.4 可维护性

分析直驱机型与双馈机型各自主传动系统的结构特点,从可维护性角度给予两者客观的评价(表3)。

表3 直驱机型与双馈机型的可维护性比较^[8-9]

Tab. 3 Maintainability contrast between direct drive and doubly-fed wind turbines

机型	可维护性的优劣势
直驱机型	(1) 永磁直驱机型没有齿轮箱,因此减少了机械系统的维护量;
	(2) 永磁同步电机转子上无绕组、电刷、滑环,因此其维护内容远少于双馈机型;
	(3) 由于永磁体在高温、振动等环境下存在失磁,在过流冲击下存在不可逆退磁现象,直接导致电机报废;
	(4) 由于永磁材料存在永久强磁性,无法在现场条件下检修,所以一旦出现问题只有吊装至地面或者返厂维修,更换维护的时间成本和经济成本都比较高昂。
双馈机型	(1) 双馈机组主传动链部件较多,主轴承、齿轮箱、联轴器及发电机都存在一定的故障率;
	(2) 齿轮箱技术从20世纪90年代起就已经发展得非常成熟,其故障率非常低;
	(3) 双馈式异步发电机较低速永磁电机技术成熟可靠、重量轻,虽然其存在电刷滑环等部件,使维护点增加,但均易维护;
	(4) 齿轮箱、发电机都能单独维修,其维护难度和维护成本远低于直驱机型。
结论	双馈机型维护点多、难度较小;直驱机型维护点少、难度较大。

3.5 大容量拓展

无论是双馈机型还是直驱机型,发展到大型甚至超大型风机时均会遇到发电机或者齿轮箱尺寸过大的问题,如图6所示。双馈机型受到齿轮箱传动比的限制、直驱机型的发电机过于庞大等原因,导致加工、运输、吊装对风机的容量都有很大限制。如ENERCON公司位

于汉堡的6.3 MW电励磁直驱样机因其发电机太大,吊装耗时达3个月之久。湘电风能的XE128-5MW海上永磁直驱机组较电励磁直驱的尺寸小得多,但发电机仍重135 t,风轮直径为128 m,轮毂高度为特定设计的100 m;Repower公司的5 MW双馈型风机齿轮箱长4.1 m、宽4.6 m、高3 m、重63 t,发电机长4 m、高2 m、重17 t。可见不论双馈还是直驱,超过5 MW的单机容量后,过于庞大的传动系统使得重量和体积这两个要素将成为设计者研发新机型的重要参考标准。

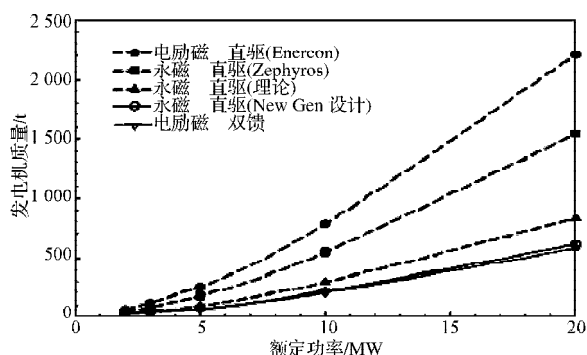


图6 发电机质量与功率关系^[11]

Fig. 6 Relationship between generator weight and power^[11]

从目前的发展来看,风机设备的大型化还没有出现技术限制,即单机容量将继续增大。特大型风机设计中仍以丹麦型(双馈型)为主导,但5 MW以上的双馈机型的主传动链尺寸太大,电励磁直驱尺寸更大,而永磁直驱越发凸显造价昂贵的劣势,同时大容量机型面对的海上市场对风机可靠性的要求更加严苛。所以,在未来风机大型化、高容量的道路上,不论是双馈机型还是永磁直驱机型都会遇到坎坷^[12]。

4 新技术、新产品的应用

4.1 主传动链优化——紧凑型半直驱技术

介于传统双馈机型与直驱机型之间的半直驱技术兼容了两者的绝大部分优点:

(1) 增速箱采用两级或者一级齿轮传动,避免直驱机型机头载荷的集中,也省去齿轮箱最易出故障的高速级,减少了齿轮箱故障和损耗,提高了机械转换效率;

(2) 以中速永磁电机替换低速永磁电机,大大减小永磁同步电机的体积和成本,水冷方式可以明显改善发电机散热,也避免了空冷中的微粒对永磁体的损害;

(3) 齿轮箱可以过滤叶轮传递至发电机的部分冲击载荷,对永磁电机有很大保护作用;

(4) 主轴采用双轴承支撑,从而优化载荷承载路径,有效降低传动链的载荷;

(5) 全功率变流器并网, 电能质量高, 对电网影响小。

结合近年来各厂家推出的新产品, 例如, 明阳SCD两叶片超级紧凑型风机、华创风能3.6 MW半直驱机型、西班牙Gamesa公司的G128-4.5 MW, 对以上紧凑型主传动链进行如下分析:

SCD超级紧凑型风机是由明阳风电和德国Aerodyn公司联合开发的。这款机型结合了传统双馈型和直驱型机组的传动链布局优势, 其传动链由主轴承、两级行星齿轮和中速永磁发电机组成, 将主轴承、齿轮箱和发电机组合为一个紧凑整体, 充分利用了机舱的内部空间, 缩短了风轮与塔架之间的距离。

华创风能3.6 MW半直驱风机采用齿轮箱输入轴(行星架)与轮毂主轴直接相连, 输出轴(太阳轮轴)与中速永磁发电机直接相连的联接方式, 实现了主传动链的紧凑结构和优化。

Gamesa公司的G128-4.5 MW半直驱机型的特点^[13]是: 紧凑型传动系统, 对主轴、2个主轴承和二级行星齿轮箱进行集成化设计, 减少了组件数量。

二级齿轮箱与一点式主轴支撑结合、齿轮箱输出轴与永磁发电机直接相连、主传动链的一体化设计有效地缩小了齿轮箱和发电机的体积, 缩短了主传动链的长度, 充分利用了机舱的内部空间, 使得重量更轻、成本更低、体积更小、效率更高, 这就是紧凑型半直驱传动链的特点。

4.2 海上大功率——多永磁分流式半直驱

纵观全球整机厂商, 目前的机型已基本满足陆用需求; 然而对于潮间带、近海甚至深海海域用途的风机, 风电机组功率更高、结构尺寸更大、承受荷载的大小和形式更加多样, 恶劣的环境对风机的可靠性要求更高。

大型永磁发电机设计主要包括电磁设计和机械设计两大部分。电磁设计即根据性能要求确定电负荷、绕组形式、磁极、槽尺寸等。过大的齿槽转矩可能使发电机无法再预定风速启动, 并造成转矩波动。因运行环境的改变, 大量的经验系数不再适用, 需不断研究校核, 提出新的计算方法。此外, 永磁电机功率的增加, 成本上升得更快。因此大型永磁发电机的设计不仅在技术突破, 还在成本控制上都有很大的难度^[14]。

多永磁分流式半直驱方案是对现有的半直驱机型进行的优化升级。其传动链结构由风轮、多路输出齿轮箱和相应多组中速永磁电机组成。多路输出齿轮箱采用单级或双级增速箱, 而风轮转矩经过齿轮箱升速后

多路输出, 每个输出轴联接一个中速永磁发电机, 使发电机的个数从一个增加到两个甚至更多。永磁电机的个数需根据度电成本进行合理选择, 因此这种结构更适用于超大容量机型。在电气系统上, 每个永磁同步发电机都通过独立的全功率变流器输出交变电流, 整流后输入公共直流母线, 再通过电气系统的逆变器转换成交流电流, 最终升压并入电网。

半直驱机型的结构虽然综合了双馈与直驱传动链的优点, 但是其紧凑型的结构与一体化设计在拓展到10 MW以上的超大容量风机时, 依然会遇到相当多的技术瓶颈。基于半直驱风机传动链的特点, 多永磁分流式半直驱方案不但具有高可靠性和稳定性, 而且提高了单个电机的实效利用率, 其独特的功率分流模式使单个永磁同步电机的设计功率至少降低了一半。这种对风机容量进行翻番式拓展的特点, 使其较直驱风机对于10 MW甚至15 MW超大功率发电机的开发更具可行性。

4.3 新技术变革——差速控制技术

4.3.1 WinDrive转速调节系统(图7)

WinDrive是一种高度动态的机电一体化传动组件, 其工作方式与自动变速装置类似, 可将风轮的可变速度转化为适合于同步发电机的恒定输出速度。WinDrive的设计基于液力变矩器与行星齿轮的完美集成。

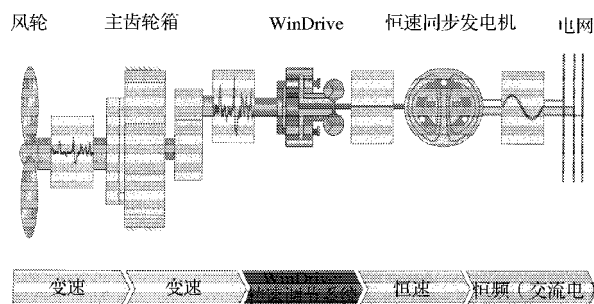


图7 WinDrive传动系统示意图^[15]

Fig. 7 WinDrive drive train^[15]

WinDrive位于风力发电机组传动系统中, 可将风轮转速在WinDrive输出侧调节成恒定的输出转速。这一过程意味着风轮根据风速不断调节, 始终维持在最高效的工作点运行。在满负荷工作范围内, WinDrive通过控制转速限制最大扭矩。

作为一种流体机械, WinDrive通过与“叠加”行星齿轮组成联接的液力变矩器来实现这种控制。此设计允许在输入转速和输出转速之间设定各种齿数比率。WinDrive技术能使风电具有和传统电厂一样的电能质量。

截至2010年9月, WinDrive已在德国、阿根廷、美国的6个风场安装调试成功, 近海、高海拔(4 200 m)、低温

环境(低至 -30°C)、弱电网等运行条件下传动系统可用性为100%,能适应恶劣环境,保持着高可靠性。

4.3.2 DSgen-set®机电差速系统

涡轮机DSgen-set®高动态机电差速驱动系统,安装于主齿轮箱和发电机之间,通过差速驱动对风轮通过增速箱传递过来的转矩进行有效的调节,转化为适合同步发电机的恒定输入转速。当风速范围小于基本风速的时候,它的作用如同一个发动机;而当风速范围大于基本风速的时候,则相当于一个发电机。从能量角度分析,这意味着差速系统在作为发动机的时候,它需要补足风能输出功率对发电机输出功率的差值(-),从电网吸收功率;而当其作为发电机的时候,则是从此差值(+)中取回能源,向电网输出功率,此时整个机电差速驱动输入电网的能源等于发电机功率与差速驱动功率之和。

机电差速系统包括一个差动齿轮箱和一个差速驱动。如图8所示,差动齿轮箱是一级行星轮传动的结构形式;差速驱动包含了伺服马达(通常是一个三相交流电发电机)以及变频器,变频器通过变压器连入高压电网,其中也有一个400 V的插座用以辅助风机。

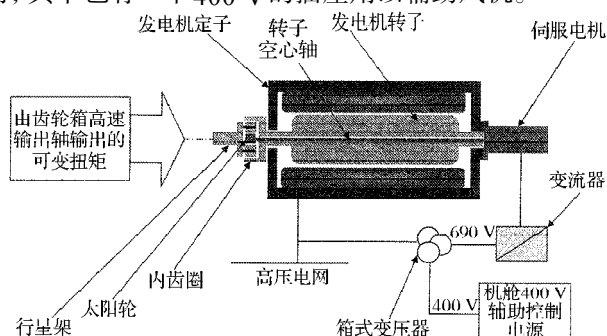


图8 DSgen-set®传动系统示意图^[16]

Fig. 8 DSgen-set® drive train^[16]

在DSgen-set®机电差速系统传动链中,风轮传递转矩至主齿轮箱,在主齿轮箱和发电机之间有一个差阶,主齿轮箱输出轴与差动行星轮的行星架相连,传递扭矩。而发电机被联接在差速齿轮箱的内齿圈上,并被其驱动。差速齿轮的太阳轮通过一个轴连接在伺服马达上,并利用一个转子空心轴通过发电机。差速驱动系统通过伺服马达控制转速,一方面是保证风机叶片的变速在发电机处被转换成恒定速度,另一方面控制传动系统的转矩。

目前,DSgen-set®已具有3 MW/10 kV试验台以及样机。

5 结语

双馈技术与直驱技术各有所长,都能达到当下市

场的可靠性要求。但两种机型在大功率机组开发的道路上,双馈机型受齿轮箱传动比限制,直驱机型体积愈来愈大,均存在技术瓶颈,是风机大型化发展的阻碍。

度电成本已经成为开发商选择风机设备和系统时的重要考虑因素。通过优化初期投资成本和降低部件全生命周期内的运行维护成本来最大限度地降低产品在整个生命周期的成本,因此加大对风机成本的投入获得更稳定的传动结构,是降低度电成本的有效方式。

半直驱技术综合双馈、直驱的优势,中速齿轮箱与中速永磁电机相辅相成,不仅减少了发电机尺寸,降低了齿轮箱的故障,而且紧凑型结构更适合大功率的设计、高容量的拓展,是一个很有前途的方案。

海上风力发电是全球未来发展的热点,海上风场呈现大型化趋势,并且向深海海域发展。相对于超大型永磁直驱发电机组,多永磁分流式半直驱结构在已有的技术层面上更容易实现,但在成本投入与控制策略上仍需要不断完善。

WinDrive与DSgen-set®产品作为区别于齿轮箱和发电机的另一个传动链部件,其结构简单精确而有效,功能和环境适应性同样相当强大。由于它们不仅作为发电装置,还是耗能部分,在低容量风机区域并不具备多少竞争力。但是,风机在大型化、高容量越走越远时,它们新颖的设计概念和独特的性能将会大放异彩。

参考文献:

- [1] 李俊峰. 2012中国风电发展报告[R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [2] 李姗姗, 何凤友, 吕现钊, 等. 变速恒频交流电机风力发电技术[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(4): 13-16.
- [3] 金玉洁, 毛承雄, 王丹, 等. 直驱式风力发电系统的应用分析[J]. 能源工程, 2006(3): 29-33.
- [4] 刘卫. 风电机组传动链设计及评价研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [5] Erlich I, Wilch M, Feltes C. Reactive power generation by DFIG based wind farms with AC grid connection[C]//European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, 2007.
- [6] 王建维. 双馈异步和永磁同步风力发电机特性分析[J]. 自动化博览, 2010(9): 28-30.
- [7] 高超, 于晓慧. 风力发电机组驱动系统方案对比[J]. 防爆电机, 2009, 44(6): 18-20.
- [8] 朱金凤. 直驱VS双馈: 风机主技术大比拼[J]. 电气制造, 2010(9): 18-19.
- [9] 张胜男, 潘波. 双馈、直驱风力发电机特点分析[J]. 防爆电机, 2012, 47(3): 1-6.
- [10] 刘天羽, Tavnor P J. 风电高速发展下的中国风力发电机可靠性的研究[J]. 上海电机学院学报, 2010, 13(6): 318-319.
- [11] Bang D. Possible Solutions to Overcome Drawback of Direct-drive Generator for Large Wind Turbines[R]. 摩根士坦利研究报告, 2010.

(下转第42页)

