

2.5MW 双馈绕线型三相异步 风力发电机的研制和开发

李松田 贺建华

摘要 双馈绕线型异步风力发电机是通过调节转子绕组的频率、相位、幅值和相序来实现对发电机变速恒频控制,一般采用“交-交”、“交-直-交”或“矩阵式”双向变频器对转子功率加以双向控制。本文介绍了2.5 MW 双馈绕线型三相异步风力发电机的运行原理、基本参数、总体结构,以及双馈绕线型异步发电机、半直驱和直驱同步发电机各自特点,为我国大型双馈绕线型异步风力发电机全面国产化铺平道路。

关键词 风力发电 双馈 绕线型异步发电机 变速恒频控制 变频器
直驱 半直驱

1 引言

风力发电作为清洁、丰富、可再生能源,日益受到全世界广泛重视,特别是在近年得到了迅猛发展。当风流过风力机叶片,带动风力机转动时,风能转化为机械能,风力机又拖动发电机转子旋转,发电机遂向电网供电,机械能转化为电能。采用双馈绕线型异步发电机的变速恒频风力发电系统与传统的恒速恒频风力发电系统相比具有显著优势:风能利用系数高,不但能吸收由风速突变所产生的能量波动且避免主轴及传动机构承受过大的扭矩和应力,还可以自由调整有功和无功功率,改善系统的功率因数,可实现对频率和电压的方便调节等。目前,双馈风力发电技术是应用最为广泛的风力发电技术之一。

2 双馈绕线型异步风力发电系统

的组成和实现变速恒频的两种基本方式

变速恒频 VSCF (Variable Speed Constant Frequency) 双馈绕线型异步风力发电系统主要由风力机、增速齿轮箱、双馈绕线型异步发电机 DFIG (Doubly-fed Induction Generator)、双向变频器和控制单元等组成。双馈发电机定子绕组接工频电网,转子绕组接“交-交”、“交-直-交”或“矩阵式”双向变频器,该变频器可实现对转子绕组的频率、相位、幅值和相序等调节控制。控制系统采用 SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) 正弦波脉宽调制技术和 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 绝缘栅双极晶体管控制技术,可四象限运行,变速运行范围一般在同步转速的 $\pm 35\%$ 左右。

实现变速恒频的基本方式一般有两种:一种是采用传统直流电励磁或永磁同

步发电机(以及笼型异步发电机等),另一种是采用交流励磁的同步化双馈绕线型异步发电机。

当系统采用传统直流电励磁或永磁同步发电机(以及笼型异步发电机等)时,变频器设置在发电机定子侧。随着转速不断变化,发电机发出变频交流电,经整流和逆变,最终转换成恒频电源再并网发电。永磁直驱同步发电机系统结构如图1(永磁半直驱同步发电机系统须在风力机和发电机之间增加增速齿轮箱):

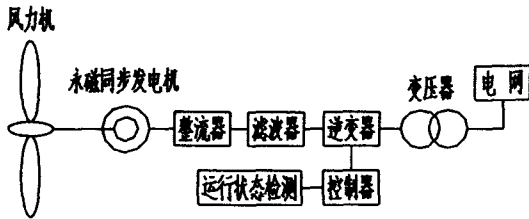


图1 永磁直驱同步发电机系统结构图

采用传统直流电励磁或永磁同步发电机风力发电系统,有如下主要优点:

- (1) 由于采用同步电机,控制回路少,控制比较简单,系统稳定性高,维护费用低;
- (2) 省去了增速用齿轮箱或仅需一级低速齿轮箱;
- (3) 永磁同步发电机无需集电环和刷架系统,维护更加方便。

其主要缺点如下:

- (1) 需要对发电机输出的全部功率进行变频控制,故需配备全功率变频器,变频器成本较高,控制系统体积庞大;
- (2) 永磁发电机使用高导磁率的钕铁硼和钕钴等,这些磁性材料价格很高;
- (3) 永磁发电机功率因数特性差,必须由变频器来进行补偿;
- (4) 要求永磁材料具有很高的稳定性,而高温电机短路、振动以及电枢反应等原因可能导致永磁材料失磁。

当系统采用交流励磁的同步化双馈绕线型异步发电机时,变频器设置在转子侧。变速恒频双馈绕线型异步风力发电机系统结构如图2:

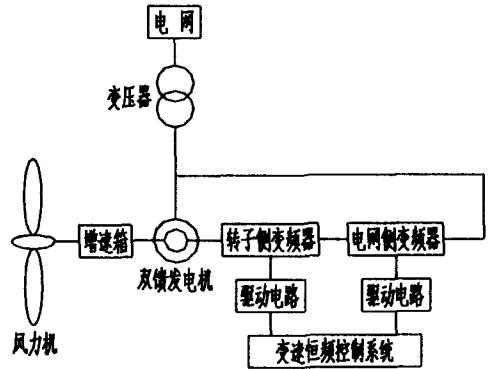


图2 变速恒频双馈绕线型异步风力发电机系统结构图

采用双馈绕线型异步发电机风力发电系统,具有如下主要优点:

- (1) 因变频器仅需对转子功率进行变频控制,而转子功率约为总功率的20%~30%,故变频器功率小,变频损耗小,变频器成本低,控制系统体积小;
- (2) 变频控制灵活,具有良好的调节特性:通过调节转子绕组的频率、相位、幅值和相序,可以较为方便、平滑地控制发电机有功、无功、功率因数等,使其具有良好的动态和暂态特性,实现有功和无功的解耦控制;

(3) 良好的稳定性及转速适应能力:在定子电源频率一定时,通过改变转子励磁频率就可以实现对转速的调节,发电机的运行转速既可高于同步转速,也可低于同步转速,有利于系统最大限度捕获风能。

其主要缺点如下:

- (1) 需要采用双向变频器,变速恒频控制回路多,控制技术复杂,维护成本高;
- (2) 发电机需安装集电环和刷架系统,且须定期维护、检修或更换。

3 双馈绕线型异步风力发电机变速恒频控制的基本原理

电机要持续进行机电能量转换,就必须满足定、转子绕组产生的旋转磁场相对静止。基于这一原理,可以得出 VSCF 双馈风力发电机运行时电机机械转速与定、转子绕组频率有如下关系:

$$f_1 = P \times n / 60 \pm f_2$$

f_1 为发电机定子频率,因定子与电网相连,故定子频率即为电网频率;

$P \times n / 60$ 为发电机转子旋转机械频率, P 为发电机的极对数, n 为发电机的实际运行转速, f_2 为发电机转子频率,也即发电机转子侧变频器频率。

由此可见,定子频率 f_1 维持恒定,随着电机转速 n 的改变,一般通过连接在发电机非轴伸端的编码器将转速 n 变化信号传送至变频器,通过调节转子侧变频器来改变转子频率 f_2 就可使上面等式左右两边相等,并且保持恒定 f_1 不变,使电机定、转子产生的旋转磁场相对静止。最后再通过电网侧逆变器将转子频率 f_2 逆变成电网频率 f_1 向电网馈电,实现风力发电机的 VSCF 变速恒频控制。

4 双馈绕线型异步风力发电机定子、转子功率流向

对于双馈绕线型异步风力发电机,在忽略定子和转子铜耗、铁耗等各种损耗,且定子取发电机惯例,转子取电动机惯例情况下: $P_{em1} = P_{em2} + P_{mech}$

P_{em1} ——发电机定子电磁功率

P_{em2} ——发电机转子电磁功率

P_{mech} ——发电机转轴输入的总机械功率

发电机转子电磁功率 $P_{em2} = s \times P_{em1}$

转差率 $s = (n_N - n) / n_N$

n_N ——发电机同步转速

n ——发电机实际运行转速

由于 $P_{mech} = P_{em1} - P_{em2} = (1 - s) \times P_{em1}$,可见当 $0 < s < 1$,即发电机在低于同步转速(亚同步转速)运行时,此时转子电磁功率 $P_{em2} > 0$,发电机转轴输入的总机械功率 $P_{mech} < P_{em1}$,这说明定子电磁功率分别由转子和风力机提供,此时转子从电网吸收功率。 $s = 0, f_2 = 0$ 时,变频器将向转子提供直流励磁,此时该异步发电机作为同步发电机状态运行在同步转速 n_N 。而当 $s < 0$,即发电机高于同步转速(超同步转速)运行时,转子电磁功率 $P_{em2} < 0, P_{mech} > P_{em1}$,这说明转子从风力机吸收一个转差功率 $s \times P_{em1}$ 回馈电网,此时风力机供给发电机的总功率增加至 $(1 + |s|) \times P_{em1}$ 。双馈风力发电机的功率流向如图 3 所示。

通过调节转子频率、转子电压幅值以及定、转子电压的相位角,可以平滑地调节双馈发电机的无功功率和功率因数,调节风力机变桨距控制系统以及发电机变频器等使发电机运行在最佳转速状态。

双馈风力发电机的无功功率流向具有如下特点:

(1) 当转子励磁电压较小时发电机欠励,定子从电网吸收感性无功功率;当励磁电压增加到某值时,定子侧无功功率为零,此时发电机所需的无功功率全部由转子励磁系统供给;当转子励磁电压较大时发电机过励,定子从电网吸收容性无功功率。

(2) 当定、转子电压的相位角和转子励磁电压保持不变时,转差率较大时发电机欠励,定子从电网吸收感性无功功率;当转差率较小时发电机过励,定子从电网吸收容性无功功率。

(3) 当转子励磁电压及转差率保持不变时,定、转子电压的相位角的变化也将引起无功功率的变化。定、转子电压的相位角较小时发电机欠励,定子从电网吸收感

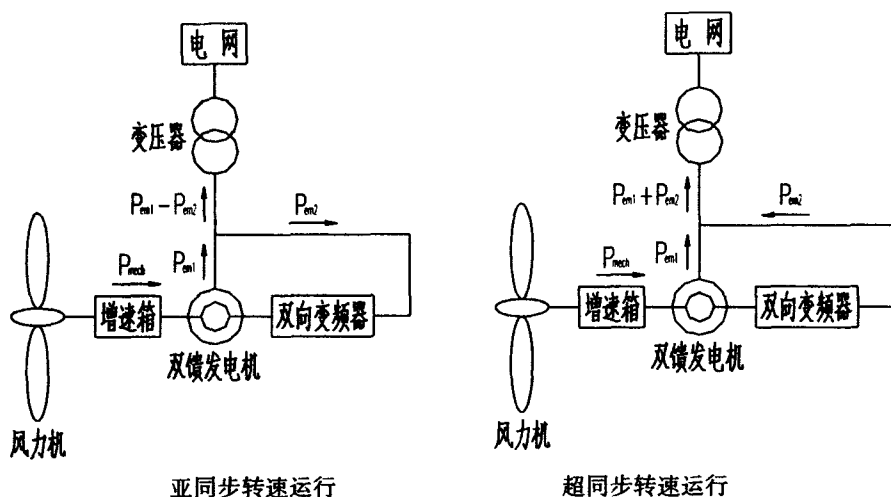


图3 双馈风力发电机的功率流向图

性无功功率;定、转子电压的相位角较大时发电机过励,定子从电网吸收容性无功功率。

工作制	S1
安装型式	IMB3
冷却方法	空-水冷却
额定功率因数	1
效率	97%

5 2.5MW 双馈绕线型异步风力发电机主要技术参数

型号	SKYF2600-6
额定功率	2600kW
额定定子电压	690V
额定定子电流	1820A
转子开路电压	1797V
额定转子电压	360V
额定转子电流	790A
额定频率	50Hz
额定转速	1200r/min
转速范围	612 ~ 1380r/min
转动惯量	330kg·m ²
绝缘等级	180(H)
	{温升按 155(F)考核}
防护等级	IP54(集电环部分 IP23)
定/转子接法	Y/Y
极数	6
相数	3
中心高	630mm

6 2.5MW 双馈绕线型异步风力发电机主要结构特点

发电机主要由定子、转子、空水冷却器、端盖、轴承、集电环罩、集电环、刷架、定子和转子出线盒、辅助出线盒等组成。电机为卧式、全封闭箱式结构,在发电机两端采用端盖滚动轴承把转子支撑在端盖上。冷却器自带风机强迫通风,空水冷却器放置于电机机座顶部,以带走电机内部热量。在电机非传动端安装集电环和刷架,集电环罩顶部装有冷却风机,加强集电环、刷架的通风冷却。发电机具体结构如下:

(1) 发电机为箱式结构,卧式安装,采用端盖滚动三轴承结构。

(2) 发电机顶部安装一个强迫通风高效空水冷却器,冷却器两端各带一个强迫通风冷却风机。冷却器设有进、出风测温元件和进、出水测温元件。

(3) 发电机定子机座为箱式钢板焊接机座, 定子铁心采用外装压结构, 定子铁心叠片和定子绕组下线完成后再整体套入机座, 将铁心定位筋与机座辐板焊牢。定子绕组采用常规双层圈式线圈, 定子铁心和线圈采用 VPI 真空压力整体浸漆。

(4) 发电机定子冲片为整圆冲片, 定子铁心设有 20 个宽 5 mm 的径向通风沟, 加强铁心和绕组的通风冷却。定、转子铁心冲片均采用冷轧无取向低损耗硅钢片。

(5) 发电机转子为轴焊筋结构, 主轴采用耐低温材料锻钢, 焊接筋板也采用低温材料钢板。

(6) 转子冲片与定子冲片套裁, 同样为整圆冲片。转子铁心由冷轧无取向低损耗硅钢片叠压而成, 通过两端转子压圈及弧键把整个转子铁心在轴焊筋上压紧。转子铁心内圆通过三对径向、切向组合键固定在轴焊筋上。转子铁心同样设有 20 个宽 5 mm 的径向通风沟, 加强铁心和绕组的通风冷却。

(7) 转子绕组为双层波绕组, 绕组在铁心部分用槽楔固定, 而绕组端部采用无纬带绑扎固定。转子同样采用 VPI 真空压力整体浸漆。

(8) 轴承固定在轴承端盖轴承室内, 轴承端盖把合固定在定子机座两端。转子由电机两端端盖滚动轴承支撑, 采用三轴承结构。即电机传动端采用单列短圆柱滚子轴承和单列深沟球轴承, 非传动端采用单列短圆柱滚子轴承。轴承润滑脂选用 Klüberplex BEM 41 - 132 润滑脂。两端轴承端盖经绝缘处理阻断了在轴承之间出现环流。

(9) 集电环、刷架布置于电机非传动端外侧, 集电环罩顶部安装一个冷却风机, 以加强集电环、刷架冷却。

(10) 在发电机传动端和非传动端均

安装接地碳刷, 非传动轴端还安装光电编码器, 用于监控电机转速和旋转方向。

(11) 发电机机座下部两侧布置有 220 V 防潮电加热器, 停机时加热防潮用。发电机定子绕组每相设二只, 三相共六只 PT100 测温元件, 用于监测绕组的温升情况, 其中三只为备用; 每个轴承装有两只 PT100 测温元件, 用于监测轴承温度, 其中一只为备用。定子、轴承测温元件以及加热器等引线均引至辅助出线盒内, 并在出线盒内做出相应标记。

(12) 定、转子出线盒: 在定、转子出线盒内各安装 3 根导电铜母排, 电机定、转子引出电缆通过接头与其相连接。定、转子出线盒内导电铜母排再通过屏蔽电缆与电网或变频器连接。

在双馈发电机结构设计过程中, 充分考虑到电机运行环境极端恶劣: 夏天处于极端高温, 冬天处于极端低温。冰冻不至于影响设备运行, 腐蚀盐雾等对电机结构不至于产生危害。同时还须进行静态、动态、疲劳强度、冲击载荷、波动载荷等计算, 使电机的整体结构更加安全可靠。经过轴承润滑和寿命等计算, 证明发电机轴承结构选取是正确可靠的, 样机采用的轴承结构完全满足发电机在最大负荷、最高转速等情况下长期安全可靠运行的要求, 电机实际运行情况也印证了这一点。电机制造、安装、维护的简单化和方便性也是我们考虑的一个重要方面。

同时, 双馈发电机防雷技术是我们关注的另一重要方面。建筑物越高, 受雷击的概率越大, 发电机常处于几十米乃至一两百米高空, 遭遇雷击的风险很大, 因雷击产生的电涌可能导致发电设备停运, 造成发电损失。所以采用安全可靠的防雷击技术, 合理选用防雷击和过电压产品, 是电机稳定运行的必要保障。

7 2.5MW 双馈绕线型异步风力发电机的研制与开发

我公司很早就开展了双馈绕线型异步风力发电机电磁设计等方法的研究,并通过试验方法验证其设计理念的正确性,为电机电磁设计提供可靠依据,并在此基础上进行电磁设计软件编程,最终完成工程样机设计开发。

我公司还针对双馈绕线型异步风力发电机的特殊性,编制了专门的通风冷却计算程序,对该电机通风及温升进行计算研究。一般同步电机的励磁功率约为电机功率的3%左右,转子的热负荷较小。交流励磁双馈绕线型异步风力发电机的转子功率,一般约为电机总功率的20%~30%。有必要重点进行电机通风及温升的计算和分析研究,设计合理风路,对风量进行合理分配,保证定、转子温升控制在合理范围内。

由于双馈发电机常处于超同步转速运行,转子结构件承受较大的离心力,再加上转子热负荷高,与常规绕线型异步电机结构有较大差异,开展转子结构设计分析研究也显得尤为重要。为了尽量减小变频器带来的电磁谐波,改善变频器的运行状况,一般要求发电机转子开口电压高,再加上转子运转速度高等特点,都导致转子槽数、槽形、绕组结构、绕组连接和固定方式等与一般绕线型异步电机比较具有不同特点。

风力发电机常安装在高原和沿海以及风沙地区。高原环境特点是气压低,气温低,且气温日照变化大,绝对湿度低,太阳辐射强烈。低气压时,空气密度低,冷却效果下降,对于空气冷却的电机可能使其温升增高;同时,空气的介电强度会下降,所以要加强电机的防晕处理。同时还必须考

虑盐雾、风沙等侵蚀,设备必须具有耐湿热和防霉菌等性能。由于变频器 dU/dt 较大,转子热负荷很高,所以必须对电机绝缘结构的特殊性进行研究。为此,我公司专门开发了“双馈异步风力发电机绝缘规范”,发电机定、转子均进行VPI真空压力浸漆,绝缘耐热等级选用180(H)级,温升按155(F)级考核。

通过对发电机较为详尽的型式试验,验证了我公司开发的双馈绕线型异步风力发电机电磁设计程序的正确性,通过试验得出的电机等值电路与初步设计得出的电机等值电路基本吻合,其他电机参数和性能也与设计基本一致,同时该电机运行温度低,效率高,振动小,噪声低,运行平稳,达到或超过了风力发电系统对发电机的性能要求。

发电机运行在额定工况下进行试验,其定子线圈槽部最高温升为69 K,定子线圈端部最高温升为52 K,定子铁心最高温升为50 K,转子线圈端部最高温升为45 K,转子铁心齿部最高温升为50 K,集电环最高温升为49 K,轴承温度为35℃(环境温度20℃时),定、转子线圈和铁心等温升均在允许限值范围之内,且裕度较大,能够保证发电机内部长期安全稳定运行。发电机内部冷热风温差在22~26 K之间,进出水温差在4~6 K之间,表明发电机通风系统运行状况良好,通风设计合理,冷却效果较佳。在额定工况下,发电机效率为97.34%,噪声为97.5 dB。发电机在刚性支撑最大振动速度有效值为1.0 mm/s。在弹性支撑最大振动速度有效值为2.37 mm/s,最大振动幅值为0.083 mm。

通过2.5 MW双馈绕线型异步风力发电机的开发,工程样机试制,为下一步真机批量投产打下了坚实的基础。接下来我们要做的重点工作就是如何提高劳动生产

率,以适应批量生产需要;降本增效,提高原材料利用率,减少加工和制造费用;改进、优化结构,全面提高产品质量。

8 结 论

双馈和半直驱、直驱风力发电系统是日前风电市场发展的两个主要方向,目前双馈风力发电系统所占市场份额更大,占据主导地位,随着半直驱、直驱风力发电系统更加成熟和完善,半直驱、直驱风力发电系统将会得到更加广泛的应用。最终,可能会形成双馈和半直驱、直驱风力发电系统并驾齐驱的风力发电局面。

我公司选择自主研发、自主制造和不断创新之路,依托 50 年的技术创新优势,成功开发 2.5MW 双馈绕线型异步风力发

电机。通过样机试验验证,自主研发的国内首台 2.5MW 双馈绕线型异步风力发电机,达到国际同类产品先进水平。由于其技术含量高、创新性强,填补了国内自制 2.5MW 以上大型双馈风力发电机的空白,为实现 2.5MW 双馈风力发电机全面国产化打下坚实基础。缩短国内自主创新产品与国外同行的差距,一直是我们不懈努力和奋斗追求的目标。在产品的设计、新材料选用等方面综合考虑,进行优化平衡设计,保证产品质量、降低产品成本,也是我们长期追求的目标。我公司 2.5MW 双馈绕线型异步风力发电机工程样机成功开发、试制,以其优良的性能指标,将会逐渐改变我国大型风力发电机技术长期依赖引进的现状,为其批量生产迈出坚实的一步。

· 信息 ·

中国二重锻制出国内首支 1100MW 核电半速转子

2009 年 5 月 18 日国内首支 1100MW 核电发电机半速转子在中国二重 160MN 水压机上锻制成功。该转子直径 2050mm,总长 16400mm,毛坯重 310t,半速转子的成功锻制是我国核电产品制造的重大突破。

核电半速转子是核电发电机组中的核心部件,产品重量大、体积大,内部质量要求苛刻,因而制造难度大,制造风险也大,目前,国内尚无核电半速转子出产,世界范围也只有日本等少数国家能够制造。

1100MW 核电半速转子采用国内第一支实重 560t 特大型钢锭锻制,由于钢锭巨大,锻制中钢锭的变形、锻透、压实存在着很大困难。为了保证 1100MW 核电半速转子锻制成功,中国二重对核电半速转子的生产进行工艺交底和技术指导;提前对相关设备进行了全面的维护检查,要求维修人员全程待命,确保设备正常运转,并对锻造的关键工序进行了演练。从 4 月 21 日开始,经过近 30 天多火次的锻制,中国二重成功锻制出了我国第一支核电半速转子,填补了我国制造核电半速转子的空白。