

并网型双馈风力发电机设计中的关键技术

李进泽, 王建良

(南车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 双馈风电机组为目前并网型风电机组的主力机型, 而双馈风力发电机是影响双馈风电机组性能和可靠性的重要部件。文章从电磁计算、绝缘结构、滑环系统及轴承电蚀等方面对双馈风力发电机设计关键技术进行了总结和探讨, 阐述了一些主要设计原则, 为完善双馈风力发电机设计提供了方法和思路。

关键词: 并网型; 双馈风力发电机; 关键技术

中图分类号: TM315; TM302

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2013)03-0021-05

Key Technology in the Design of Double-fed Induction Generator for High Power Wind Turbine

LI Jin-ze, WANG Jian-liang

(CSR Zhuzhou Electric Motor Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Wind driven DFIG (double fed induction generator) is the mainstream model of grid-connected high power wind turbine and DFIG is the key part that influence the performance and reliability of wind turbine. Key technologies of DFIG such as electromagnetic design, insulation structure, slip ring system and bearing electric erosion have been analyzed and illustrated in this article and some design principles have been presented, which gives new ideas and concepts to improve DFIG design.

Key words: grid-connected; DFIG; key technology

0 引言

双馈风力发电机(以下简称“双馈发电机”)由于其所需的变频器功率容量小、造价低、重量轻且运输安装方便,已成了并网型风力发电机的主流机型^[1]。风力发电机的工作场所在风资源丰富且空旷的野外地区,那里大多气候条件恶劣且交通不便。发电机被安装在高空塔上,风电机组的功率越大,其机舱位置高度越高(如5 MW风电机组的塔高可达126 m,而8 MW和10 MW风电机组的塔高则为160 m^[2]),且机舱空间有限,极不便于维修操作。发电机一旦发生故障,维修需下塔,有时甚至还需为维修的吊装设备专门修建简易道路,因

此其日常检修的难度很大、成本也很高。从使用维护的角度出发,其运行可靠性显得尤为重要;加之发电机的结构复杂,涉及的零部件多,与直驱永磁风力发电机相比,影响其可靠性的因素也更多。因此对双馈发电机的设计关键技术进行深入研究、准确地掌握其设计原则显得尤为重要。

1 双馈发电机的基本结构

双馈发电机是一种绕线式异步电机,其定子三相绕组直接与电网相联;而转子的三相励磁绕组与四象限变频器相联,通过调节变频器的频率、幅值、相位及相序,从而调节定子绕组的输出功率和功率因数,并使定子绕组的输出电压与电网电压同频、同相且同幅值。双馈发电机的结构与普通绕线式异步电机的大体相同,主要包括定子、转子、滑环系统、端盖、

收稿日期: 2013-03-19

作者简介: 李进泽(1967-),男,首席技术专家,教授级高级工程师,主要从事电机的开发和技术研究工作。

轴承配置和冷却器等部件,图1示出箱式空—空冷却双馈发电机的结构。作为风力发电机,因使用要求特殊,双馈发电机还具有普通绕线式异步电机所不常具备的部件,如转速编码器、防雷器、集中润滑器及接地碳刷系统等。

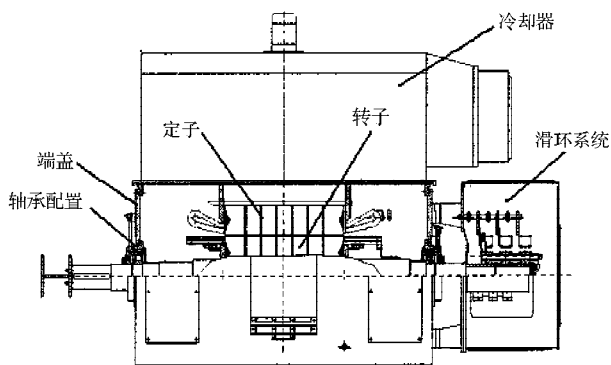
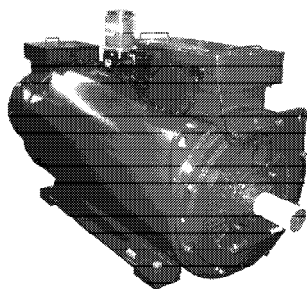


图1 双馈发电机（箱式空—空冷却）结构

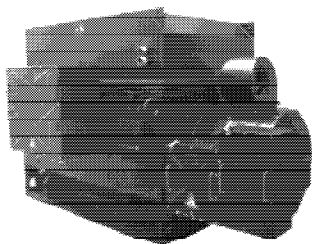
Fig.1 Structure of DFIG (box-type air-to-air cooling)

目前主流双馈发电机的冷却方式包括机壳水冷、箱式空—水冷、箱式空—空冷及紧凑型空—空冷等。图2示出采用不同冷却方式的双馈发电机的外形结构。



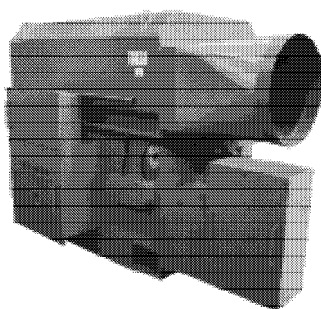
(a)机壳水冷的双馈发电机

(a)Water-shell-cooling DFIG



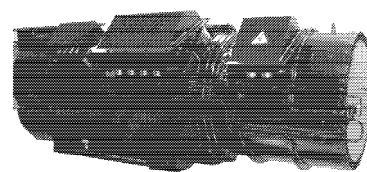
(b)箱式空—水冷的双馈发电机

(b)Box-type air-to-water cooling DFIG



(c)箱式空—空冷的双馈发电机

(c)Box-type air-to-air cooling DFIG



(d)紧凑型空—空冷的双馈发电机

(d)Compact type air cooling DFIG

图2 不同冷却方式的双馈发电机外形结构

Fig.2 Structures of DFIG with different cooling system

2 设计关键

2.1 电磁设计

双馈发电机电磁设计时须注意以下几方面:(1)转子电流,双馈发电机的励磁电流由转子提供,因此转子电流比普通发电机的更大,且转子变频器的谐波会造成转子铁损及定子和转子绕组的铜损增加、定子和转子绕组温升的增大;(2)热负荷及磁密,定子所联接的电网电压波动范围较大(90%额定电压~110%额定电压),功率因数波动范围较大(-0.9~1,容性;0.9~1,感性),使得双馈发电机在极限工况下的热负荷和磁密远高于额定工况时的;(3)转速,转速范围宽,最大可为同步转速的 $\pm 30\%$,须注意的是其低速运行时的通风散热能力会降低;(4)双馈发电机输出电流谐波畸变率不能大于5%(国家标准要求);(5)转子开路电压的选取必须考虑其转速范围,转速范围越宽、转差率越大,受变频器输出电压能力的限制,其转子开路电压的要求就越低。

在双馈发电机电磁设计时,其电磁负荷、热负荷、温升的设计值应留有一定的裕度。

(1)热负荷

在确定额定电磁负荷后,考虑到双馈发电机的工作范围较宽,须对各工况下的热负荷进行全面核算。双馈发电机定子和转子的电流密度及线负荷均应低于普通绕线式异步电机的^[3],额定热负荷设计值比普通绕线式异步电机的约低30%。

机壳水冷式双馈发电机,其定子和转子的热负荷取值可相当,同时考虑到转子未安装绕组温度传感器,其温度无法监控,从运行安全性考虑,转子的热负荷最好取得比定子的略低;空—空冷式双馈发电机,由于冷却风先冷却转子线圈后冷却定子线圈,因此转子的热负荷可取得比定子的略高;对于同功率等级的机壳水冷式、箱式空—水冷式及空—空冷式双馈发电机,其热负荷依次降低,降低程度随功率的增大而降低。在确定额定电磁负荷后,考虑到双馈发电机的工作范围较宽,还需对其它各工况下的热负荷进行全面核算。

(2) 磁负荷

双馈发电机的磁负荷选取值应略低于常规发电机的^[3], 特别需注意核算高网压工况下(如: 110% 额定电压)的磁负荷。

气隙磁密 B_g 的选择值不宜过大, 否则将影响转轴的临界转速和挠度, 同时发电机功率因数将会变差, 转子电流将增大, 且系统变频器的容量也相应要增加; 但如果 B_g 取得太低, 发电机的用铜量将增大, 生产成本将升高。因此, 实际设计时应综合考虑, 额定工况时, B_g 一般选 0.6~0.8 T 较为合适。

对于齿部磁密, 若取值过低, 将影响发电机的材料利用率; 但取值若过高, 发电机的磁路将过于饱和, 影响发电机的电能质量、噪音和效率。一般, 高网压工况时的齿部磁密不应超过 1.8~2.0 T。

对于轭部磁密, 出于减少铁损的考虑, 一般比齿部磁密略低。

(3) 转子开路电压

转子开路电压的选取须考虑转速范围的限制, 转速范围越宽, 双馈发电机的转差率越大。考虑变频器输出电压能力的限制, 双馈发电机转子开路电压就要求越低。

转子开路电压的选取应注意与变频器参数相匹配。由于受 IGBT 耐压水平的限制, 额定电压 (690 V) 下双馈风电机组变频器的直流母线电压一般为 1 000~1 200 V。在目前采用较多的两电平 SPWM 控制策略下, 变频器最大输出电压为 $0.707 \times 1\,200 = 850$ V; 考虑变频器滤波电路的压降影响, 实际输出到双馈发电机转子上的最大电压一般将在 800 V 左右。双馈发电机的调速范围为同步转速的 30%, 此时双馈发电机的最大转差率 $s=0.3$, 因此定子输入额定电压时转子开路电压的最大值为
$$\frac{U_{\max}}{ks} = \frac{800}{1.1 \times 0.3} = 2\,424 \text{ V}$$
 (其中 $U_{\max}$ 为转子最大输入电压, k 为电网电压的波动率)。转子开路电压取值若过高而超过极限值, 将不得不缩小双馈发电机的调速范围, 导致机组最低并网风速值升高; 取值若较低, 因定子额定电压 U_1 为定值, 则定子和转子绕组的电压变比 k_e 将增大, 而转子绕组输入电压 U_2 (在忽略定转子电阻及漏抗的压降情况下, $U_2 = U_1 s / k_e$) 将随之降低, 不能充分利用变频器 IGBT 功率开关器件的耐压能力, 从而使转子电流升高。因此转子开路电压的最低值将取决于双馈发电机转子及变频器所能承受的最大热负荷, 考虑相关的设计裕量和最佳的经济性, 转子开路电压一般选 1 800~2 300 V 较合适。

2.2 绝缘结构

运行时, 双馈发电机的定子接 50 Hz 或 60 Hz 标准正弦波电网电压, 转子由最大工作频率约为 20 Hz 的变频器供电, 因此绝缘结构设计时应对其定子和转子区别对待, 同时还需综合考虑对应影响因素。

2.2.1 影响因素

(1) 环境因素

对于“三北”地区, 应考虑低温、昼夜温差大(易凝露)、风沙大、海拔高等运行环境影响; 而对于沿海和海上地区, 则应考虑盐蚀、潮湿性(空气湿度: 95%, 最大达到 100%)等运行环境影响。

(2) 电因素

受自然风速随机变化及电网电压波动的影响, 发电机电流和电压的变化频繁且无规律可循; 同时由于机组都安装于野外高塔上, 定子和转子绕组易遭受因雷电引起的过电压冲击; PWM 变频器极短促的开关动作产生的波前时间极短且电压极高的交变尖峰电压, 会使双馈发电机转子线圈绝缘承受额外的高电压, 同时可能导致转子线圈绝缘层发生局部放电现象。这些循环交变电应力的作用会加速发电机绝缘层的老化。

(3) 热因素

相对普通电机而言, 双馈发电机对环境温度的要求更高, 一般使用环境温度范围为 -30~50℃, 备用环境温度范围为 -40~60℃; 在“三北”地区运行时, 还须考虑低温、昼夜温差大的影响; 若在高海拔地区运行, 则应考虑因空气密度减小使发电机散热能力降低而造成发电机温升增高的问题; 按国家标准 GB/T23479.1《风力发电机组 双馈异步发电机 第 1 部分 技术条件》要求, 双馈发电机在温升试验后, 应能承受 1.15 倍额定负载运行 1 h。因此, 双馈发电机的绝缘结构既要能承受较高的运行温度(特别是极限工况时), 又要能承受较低的环境温度, 还要能承受频繁的冷热循环冲击。

(4) 机械因素

双馈发电机安装在机组风塔上, 其发电机绝缘须承受机组风塔振动、频繁启动、转速频繁波动和大范围变化而带来的复杂的机械应力; 由于双馈发电机转子采用 PWM 变频器供电, 转子绕组中含有的各次时间谐波与电磁部分固有空间谐波相互作用, 形成各种电磁激振力; 同时由于双馈发电机转速变化大, 工作频率范围宽, 一旦与各种机械结构的固有频率相一致, 很可能出现共振现象; 在机械应力、电磁激振力和震动影响下, 发电机的绝缘层会因循环交变的机械应力作用而加速老化。

2.2.2 设计原则

据上所述,根据双馈发电机的工作特点,其绝缘结构设计时需从电磁线的选择、绝缘结构的整体性、绝缘机械强度以及绝缘工艺等方面加以完善和加强^[4],并遵循以下设计原则:

(1) 电磁线的选择

目前双馈发电机的定子和转子常用散嵌绕组或成型绕组。对于散嵌绕组(即漆包线绕组),不仅要注意漆包线的耐热性和柔软性,还应关注漆膜的连续性和机械性、软化击穿性、介损曲线及耐脉冲电压性能。综合考虑,既可选用漆膜加厚的漆包线(如:三级线);也可选择圆形耐电晕漆包电磁线,其漆膜采用在现有有机材料基础上添加纳米级 TiO_2 的绝缘材料(如:聚酰胺—聚酰亚胺绝缘漆)。目前国内可供选择的漆包线类型主要有Q(ZY/XY)-3/180和QP-3/200等。对于采用成型绕组的中低压双馈发电机,可采用绝缘厚度为0.2~0.3 mm的Kapton—CR耐电晕薄膜烧结绕包的矩形电磁线,或采用0.3~0.5 mm厚、电晕性能优良的云母复合材料绕包的矩形电磁线,而绕组的外包对地绝缘可采用耐电晕性能优良的云母复合材料。

(2) 采用无气隙绝缘

采用无气隙绝缘,即应选择合理的嵌线间隙和恰当的浸漆工艺(如VPI),使线圈内及线圈与铁心间的空隙填满浸渍漆,以提高发电机绝缘的电气强度和机械整体性。

嵌线间隙若太小,线圈绝缘在嵌线时易受到机械损伤,增加了嵌线难度;嵌线间隙若太大,线圈间及线圈与铁心间的绝缘漆易流失,易在线圈内及线圈与铁心间形成气孔。在满足双馈发电机电压及功率技术要求并适合制造商工艺水平的前提下,成型绕组宽度和高度方向的嵌线间隙可取0.3~0.8 mm左右,散嵌绕组可取75%左右的槽满率。

浸渍漆应采用固化速度快的无溶剂漆,以减少浸渍漆在烘焙固化时溶剂挥发在线圈内产生气孔;同时采用真空压力浸漆工艺(VPI),使浸渍漆能充分地填充到绝缘结构中的各个部位,以充分填充其中的“空隙”;如再配合旋转烘焙工艺,将能实现十分完善的无气隙绝缘。

2.3 滑环系统

滑环系统在电气上连接双馈发电机转子和变频器,其结构包括刷架、碳刷和滑环(3个励磁环和1个接地环)。设计时须考虑以下使用要求:

(1) 寿命。滑环设计寿命需超过6年,碳刷设计寿命

需大于10个月。

(2) 供电电源。滑环上连接的供电电源为变频器。

(3) 防护等级。滑环罩的防护等级一般为IP23。

(4) 使用环境。对于沿海地区使用的滑环系统,需考虑潮湿、盐雾等环境条件的影响;对于“三北”地区使用的滑环系统,要考虑风沙、低温及昼夜温差大等环境条件的影响;对于高原地区使用的滑环系统,则需考虑空气稀薄、空气含氧量低的影响。

针对上述要求,在滑环系统设计时应注意:

(1) 滑环表面的跳动量不能过大^[5],否则将会引起电刷与滑环分离而产生电弧,既会加快电刷的磨损,又会加剧滑环的损伤。根据实际双馈发电机的大小和具体情况,控制滑环表面的跳动量以不超过0.03~0.08 mm为合适;滑环表面粗糙度的高低将影响滑环系统的机械损耗和磨损速度,进而影响碳刷与滑环接触处表面的温度,一般以0.4~1.6 μm 较为合适。

(2) 为便于在滑环表面建立氧化膜,滑环与碳刷接触处的表面温度以60~95 $^{\circ}\text{C}$ 为佳,环境湿度最佳为8~15 g/m^3 ,最小湿度不低于4.65 g/m^3 ;碳刷电流密度一般以12~15 A/cm^2 为最佳,过低或过高都不利于氧化膜的形成;选取碳刷型号时应根据地域特点针对性地选取,如针对高湿度地区,应选用吸湿性不强的碳刷,而对于低湿度地区,可在碳刷内添加一些吸湿性的材料以便更好地形成滑环氧化膜。

(3) 滑环绝缘结构设计时,既要考虑绝缘材料的吸湿性和温度变化时滑环尺寸的稳定性,又须考虑转子变频器的高频分量对绝缘的影响。绝缘材料可采用环氧树脂和无碱玻纤布浸渍浇注层压成型,绝缘层厚度可为2 mm左右,太薄,不利于隔离变频器的高频分量;太厚,对于滑环的内环与外环之间的机械整体性不利。为验证结构的适宜性,应进行相关的验证试验,如机械稳定性、动平衡、耐电压及绝缘电阻等试验。

(4) 为适应高负荷和带有碳粉的特殊运行环境要求,滑环系统设计时,还须保证具有与之相适应的通风条件和足够的净空尺寸^[6]。

2.4 轴承

双馈发电机设计时,应仔细分析轴电流产生原因,充分考虑轴电流的影响,并采取有效的轴承绝缘措施,防止轴承电蚀的产生。

2.4.1 轴电流产生原因

双馈发电机中易产生较大的轴电流^[7]的原因在于:

(1) 磁路不对称

由于定子和转子铁心轭部结构不对称(如扣片槽、

通风道、冲片材料的各向异性等)、径向通风结构的焊筋轴及转子由变频器供电等原因都将会引起发电机内部的磁路不对称,这些不对称的磁路会在发电机内形成一定的漏磁场。漏磁场将同主磁场一样会在发电机内旋转切割转轴,产生轴电压。此轴电压将通过发电机轴承、端盖、机座、转轴形成一个循环通路,产生流经轴承的轴电流。

(2) 变频电源的高频分量

由于转子绕组直接与变频器相联,变频电源的高频分量将通过转子绕组的杂散电容泄漏到转轴上,并通过轴承、端盖、机座、接地电缆回到变频器。

(3) 零序分量电压

转子采用变频器供电,施加到绕组上的为一非对称电源,将会在发电机三相绕组内形成零序分量电压(即共模电压)。此共模电压将在发电机内形成共模电流,并通过转轴、轴承、端盖、机座和系统的公共接地点回到变频器。

如果双馈发电机设计时没有对以上情况进行充分的考虑,并采取有效的轴承绝缘措施,在以上三类轴电流的作用下,发电机运行时将会产生严重的轴承电蚀,影响发电机的运行可靠性。

2.4.2 防止轴承电蚀的措施

根据相关标准^[8]和轴承实验数据^[9],发电机在空载电动机状态下运行时,轴电压应不大于0.5 V;轴电流不超过0.7 A/mm²,轴承将不会发生电蚀。因此,为有效防止双馈发电机的轴承电蚀,就必须采取措施消除或减少轴承上的轴电压和轴电流。

(1) 采用绝缘轴承

发电机采用陶瓷球绝缘轴承、内圈或外圈绝缘的绝缘轴承,可防止或减少发电机的轴承电蚀。

内圈或外圈绝缘的绝缘轴承,其绝缘层较薄(即在轴承内圈内表面或外圈外表面喷涂的约100 μm厚的氧化铝涂层)、电容较大,而双馈发电机的轴电压/电流含高频分量,因此难以有效阻止轴承电蚀的产生。

陶瓷球绝缘轴承,由于其整个滚珠为绝缘体,绝缘层处于滚珠两边的内圈外表面和外圈内表面之间,相对而言绝缘距离大得多,绝缘层的等效电容小得多,可有效地隔离高频轴电压/电流分量,防止轴承电蚀的效果较好。

(2) 采用绝缘端盖

对于比较大的双馈发电机,或为降低制造成本,采

用绝缘端盖也是一种防止轴承电蚀的好措施。其绝缘层的厚度设计应与双馈发电机转子绕组的绝缘厚度相匹配,可通过分析双馈发电机轴电流的等效电路及轴电压/轴电流的频率计算得到,在没有等效电路时,绝缘端盖的绝缘厚度可参考转子绕组的绝缘厚度选取。

(3) 完善接地措施

采取相应的接地措施将轴电流导出,使其不流过轴承或减少流过轴承。可通过在转轴的传动端或/和非传动端上加装接地环,并使之与联在端盖上的碳刷相接,以旁路短接轴电压或轴电流,从而减小轴承上的轴电压或轴电流。

(4) 采用绝缘联轴器

采用绝缘型联轴器,可避免发电机因流经齿轮箱的雷击过电压冲击造成发电机轴承电蚀。

3 结语

本文依据实际设计、制造与运行经验,着重从电磁计算、绝缘结构、滑环系统、轴承电蚀等方面对双馈发电机设计的关键技术进行了总结和探讨,并提出相关的设计原则,为从设计源头提高双馈发电机的性能和运行可靠性提供了方法和思路。

参考文献:

- [1] 姚兴佳. 风力发电技术的研究现状[J]. 太阳能, 2006(1): 47-51.
- [2] 宁玉泉. 新型风电机组发展趋势[J]. 电气技术, 2009(8): 22-27.
- [3] 杨强. 兆瓦级双馈风力发电机的设计研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [4] Brandes H, Allison J A. Insulating systems for inverter-driven motors status and developments[J]. Power Engineering Journal, 2000, 14(4): 164-168.
- [5] 唐德尧, 曾承志, 李合林. 双馈风力发电机电刷滑环故障信息分析及维修建议[J]. 风能, 2010(8): 50-58.
- [6] 詹先伟. 双馈异步发电机的设计特点[J]. 国外大电机, 2006(4): 1-5.
- [7] 上海电器科学研究所(集团)有限公司. GB 21209-2007 变频器供电笼型感应电动机设计和性能导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [8] International Electro-technical Commission. IEC 60034-17: Rotating electrical machines-Part 17: Cage induction motors when fed from converters- Application guide[S]. Switzerland: IEC, 2010.
- [9] Busse D, Erdman J, Kerkman R, et al. System electrical parameters and their effect on bearing currents[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(2): 577-584.