

油冷风扇叶片气动改造对风量提升的量化影响评估

李俊恒

大唐云南发电有限公司 云南 昆明 650000

摘要: 由于风电机组长期运行后大风工况下齿轮箱冷却系统散热不良造成温度过高现象严重, 影响机组发电效率及机组寿命的问题日益突出。针对油冷风扇系统叶片气动结构进行优化, 在保留原有风扇叶片气动结构的基础上, 对原有的风扇叶片气动特性进行修改设计, 采用大曲率、高效率的新型桨叶替换原有结构, 在结合电机能效等级提高的基础上实现风量翻倍, 达到提高齿轮箱冷却能力的目的。基于尼白木克风电场11台SPT15A—88机组改造实例, 并结合现场实测数据对风量提升效果进行了量化评估, 验证了其改造可行性和节能值, 并提出了适合高原风电场系统的优化方案。

关键词: 风电机组; 油冷风扇; 叶片气动优化; 风量提升

风电是清洁能源的一种类型, 在确保能源安全和达到“双碳”目标上有着重要作用。但是在实际运行过程中, 尤其是在高海拔、低气压、大风负荷等情况下, 风电机组齿轮箱温升问题频频出现, 这是导致风电机组失稳运行的重要因素之一。尼白木克风电场海拔2420米, 33台风机长期运行普遍存在问题为齿轮箱油温偏高, 原风扇风量 $8500\text{m}^3/\text{h}$ 无法满足最大负荷工况下的冷却要求, 因此将风扇叶片的气动结构作为改造对象, 在不改变风扇安装尺寸及系统逻辑的前提下, 将原风扇风量从 $8500\text{m}^3/\text{h}$ 提升到 $13500\text{m}^3/\text{h}$ 以上, 基于理论分析以及现场实测, 量化分析其改造效果, 为风电齿轮箱冷却系统升级改造提供技术参考。

1 风电场运行现状与问题诊断

1.1 风电场运行环境及设备背景

尼白木克风电场地处海拔2420米高原之上, 在此安装了33台单机容量为1.5MW的风力发电机组, 总装机容量达到49.5MW, 估计年上网电量约10627万kWh, 年利用小时2147h, 年平均风速6.78m/s。该风电场采用锋电能源公司SPT15A-88型高原型双馈异步风电机组。该机型针对高原地区设计, 具有较好的抗风性、适应性, 能在风速良好的状态下发电; 但是在高负荷、大风情况下, 受制于主齿轮箱散热的原因, 则会对风电场的运行效率产生一定的影响, 尤其是主齿轮箱油温过高。风电场内的齿轮箱冷却系统包括风冷散热器、油冷风扇2部分。原本根据发电情况基本能满足其在正常工况下发电需要, 但由于风电场位于高原地区, 冷却系统的运行无法满足发电实际需要, 加之当时风电场所使用的油冷风扇功率太小, 造成油冷风扇的风量不能完全满足实际发电所需要的风冷散热需求, 油温超过设定值(70°C), 触发电风电机组风

机功率限, 造成很大的电量损失, 由此可见, 油冷风扇风量不够是造成风电机组散热不良的重要原因。

1.2 冷却系统的工作原理与存在问题

风电机组的齿轮箱冷却系统主要依靠风冷散热器和油冷风扇协同配合来保证齿轮箱运行过程中的温度不超过最高安全限值, 风扇的作用是通过形成一定的风力把齿轮箱产生的热量带走, 使齿轮箱油温降低, 但由于风扇叶片结构上的缺陷, 扇叶风量小, 导致散热效果不好, 尤其是在高负荷、高风速、大温差的工作状态下, 很难满足散热的需求。风电场所提供的原设计参数: 风扇的设计风量 $8500\text{m}^3/\text{h}$, 从扇形模拟的结果发现齿轮箱需要带走的热量是48~52kW, 这说明风扇原来的风量根本不能满足散热功率要求, 要保证散热系统的散热功能, 就必须大幅增大风扇的风量。因此对风扇叶片气动结构进行改进, 以提升风量就成为了解决这一难题的核心办法之一。同时, 在风速较高的时候, 叶片可以带来一定数量的空气流过风扇散热器, 但是却不能充分地提高散热器的换热效率, 风扇本身所带来的热量仍然会残余在风机内部, 使得风机内部的油温升高, 风机内缺少足够的空间留存更高的油温, 使得风机无法输出更高大的功率值。根据风电场运维的相关资料发现, 风扇风量不足的问题将会表现在风电场的大风季节期间, 此时风扇的运行频次就会相应提高, 当风速大于6.5m/s的时候, 油温会随着风速的增大越来越快, 温度大于 70°C 的机率也会急剧增大, 从而导致风电场出现长时间限电的现象, 风电场发电效率较低。

1.3 冷却系统问题导致的经济损失

由去年一年风电场数据分析结果看出, 风机油冷风扇风量过小导致风电场产生大量电量损失, 根据风电场具体数据得知11台风机由于齿轮箱油温过高, 触发系统

报警多次,当风机因油温过高而触发功率限制后,其实功率瞬间降至功率限制值附近,从而造成风电场巨大的电量损失。通常来说,由于温度较高引起的风电机组最大出力限制;由于多次发生风机限功率运行导致的风机不能实现较高的出力;因油温高造成的风机机组上报故障次数多,最终造成发电机发电效率降低等。这类情况所产生的电量损失非常大,而且也会带来设备维修成本上涨,运维增加等问题,加大风电场的工作负担,提升维护成本。

2 油冷风扇叶片气动改造策略

2.1 叶片气动设计优化的必要性与目标定位

解决风电场齿轮箱冷却系统风量不够的最根本方法还是需要在风冷系统最初输出风机开始着手解决,风冷系统在运维工作中使用的主要是扇叶,扇叶的设计决定了风速、风压以及散热情况的好坏,因为之前使用的是三片式扇叶,该种扇叶的设计为叶片狭长、桨角固定,在相同功率的情况下,换热量不如四叶扇叶,在风量大的情况下扇叶会出现风力不稳定、风量分布不均匀的情况,很难满足风冷系统对于换热量的要求。要想提高风量就必须不能更换原有的电机型号或者提高电机的功率输出,那么理论上来说能实现该类改造的最优也是最有效的方式就是对扇叶的气动特性进行改进。对于达到的目的就是要在保证原电机的额定功率的基础上保持原来尺寸不变的情况下,通过对叶片的结构进行改变使得单位时间内经过散热器空气体积能够成倍增加,进而大大增加冷却量。另外改造还要考虑到整个风电机组属于一个高原运行装置,要求材料要耐腐蚀、防振,保证改造后运行系统可长期稳定运行,所以风扇叶片的气动性能绝不是单纯的机械设计问题,而是一个涉及风能转换效率、风机及设备使用寿命等多个方面的系统工程,它综合考虑了流体力学、材料学、适应环境等各方面因素。

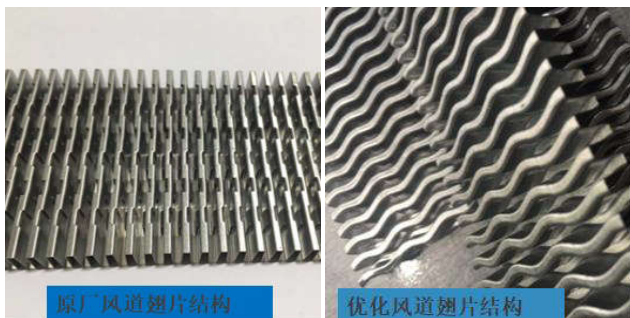


图1 风道翅片优化前后

2.2 改造方案的设计原则与技术路径

为了保证改造可行、改造可靠、施工简单,此次叶片改造按照“等尺寸替换、增强性能、不改主控”的设计理念开展。由于机组设备系统的中心元件是电机,而

发电机的能力很小,如果直接更换电机需要对机组主控系统程序和变频器参数进行修改,在变频器上面进行改造,费用高风险大。所以本次改造本着“等尺寸替换、增强性能、不改主控”的原则,在确保电机不变的情况下,用加大叶片气动效率的办法来间接增强风量输出。设计的技术路线主要有以下3个方面:(1)增加叶片数,从3片式变更为5片式,增加空气切割次数和风流连续性。(2)更改桨角,把原来的叶片安装角 12° 改成 18° 桨角,提高风压和轴向推力,增加换热速度。(3)采用波纹变截面桨叶代替直板桨叶,让气流在叶片表面持续扰动,使得叶片表面风速梯度增加,使湍流强度增大,从而使散热器的换热效率得到提高。为满足高原高风速、大温差、灰尘多的工况运行要求,叶片使用高强铝镁合金材料外覆防腐防尘涂层,叶片整体结构经过了有限元仿真及动平衡实验,有较好的抗疲劳、抗震性能。叶片替换严格按照尺寸进行加工制造,保证可以完全复用原机的安装接口,在叶片替换过程中不需要进行任何加工,大大节约施工的工作量和时间。

2.3 预期性能提升与系统兼容性分析

在技术改造实施之前,改造团队开展了基于风量模拟仿真的风扇改造风量预测和现场对标测试,利用系统模型预测了改造之后的风扇风量表现。按电机功率不变计算:在保证电机功率的前提下,通过改进叶片结构,将单位时间风量由原来 $8500\text{m}^3/\text{h}$ 提高到目前的 $17500\text{m}^3/\text{h}$,即风量提高105%以上;风量增大后,冷却系统的换热冗余度大幅度提高,散热器表面温度更为平稳,避免了齿轮油温高异常的情况。根据系统角度,叶片比重大于原始结构10%,小于电机转子的惯性限值,不影响电机的启停及运转平衡。改造后风扇运行振动小,噪音低,实测其工作频率和主机控制器频率无干涉,与风机其它系统(如主控、润滑、变桨)无不良耦合作用,且因改造未对电气控制系统做任何改动,机组运行参数、通信协议、报警逻辑可沿用现有配置,无异网配置,保持系统稳定可靠,大大降低改造技术迁移难度和成本。更换叶片后的齿轮箱温度响应加快,可以给主控系统提供更早的风险预警,有利于早期预警远程智能运维,可以提高机组的智能化运维能力。

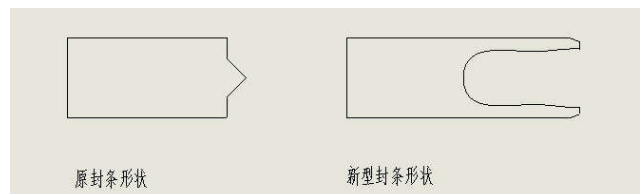


图2 散热片密封条前后对比

3 改造实施效果的量化评估

3.1 齿轮箱油温控制能力的显著提升

优化后的风扇叶片气动结构最直接的效果是风电场齿轮箱油温曲线大幅下降。经风电场实际测得的数据,风电场在高风速大负荷下(13:00~16:00)运行期间,原风冷系统处于轮毂发热严重状况,风机机舱内箱体油温经常性 $\geq 70^{\circ}\text{C}$,有些风机接近警戒线(75°C),严重制约了风机的长期运行稳定性,原风冷系统问题频频引发功率限制,严重影响风电机组的发电量。实施改进后,11台风机的运行油温都有不同程度的降低,平均降低幅度为 $12\sim 15^{\circ}\text{C}$ 左右,高温时段都保持在 $58\sim 62^{\circ}\text{C}$ 以内。经过改造,没有再发生过一次风机油温报警及功率受限的情况。如#23机组,改造前齿轮箱油温曾在大风工况下多次达到 80°C ,并导致限功率运行甚至停机。改造措施包括更换58kW散热器、升级4kW风扇电机、风量提升至 $13500\text{m}^3/\text{h}$,并优化温控阀结构。改造完成并重新并网运行后,经实际满发监测齿轮箱油温始终未超过 63°C ,热负荷得到有效控制,且未再触发过高温报警或功率限制。根据F23十分钟日志数据,满发阶段相比改造前幅值的波动情况有很大改善,证明冷却系统对油温进行了很好的控制。另外油温控制还可以有效的延长齿轮油的寿命,减小在高温下密封件和齿轮副的加速老化速度。从改造前后的持续一个月实测可知:实测3组并联运行的互不干扰风机参数相互印证,表明实施了优化后的风扇叶片气动结构后:持续120小时无负荷运转的过程中,油温的波动小于 3.5°C ,较之前 10°C 以上的波动幅值有了较大的改进,同时很好的抑制了扇叶工作的温度,提高了风扇扇叶的工作质量。这就说明了提高风量能够改善冷却系统的热平衡,保证润滑油处于最优状态,保持齿轮箱内磨损降低、保持效率、使整个传动系统继续良性运转的重要性。同时,也为以后的风场做推广改造提供了可靠的技术支持。

3.2 限功率频率下降与发电量恢复情况分析

齿轮箱油温过高引发的功率限制问题是风电机组运行效率下降的重要因素。根据风场监控系统提供的运行数据,11台风机在改造前平均每月触发2~3次限功率事件,累计受影响时长超过50小时,尤其在夏季集中高温期间,部分机组功率输出被限制在1.2MW以下,造成了可观的电量损失。限功率运行不仅导致发电量直接损

失,还对风机的长期稳定性产生负面影响,增加了运维成本。改造实施后,限功率触发次数迅速下降至接近于零,改造后的系统实现了更加稳定的温控效果。数据显示,改造完成统计周期内,11台风机未再因齿轮箱油温异常触发功率下调,机组保持满发状态运行的比例显著上升。以编号#23机组为例,技改前23#机组在风况较好阶段因油温过高曾频繁进入限功率运行甚至短时停机,造成发电量损失。故障处理完成并重新并网后该机组连续运行无任何功率限制事件,充分说明冷却系统改造有效恢复了机组的额定输出能力。尽管目前仅23#机组为样机实施,但从改造效果来看,其齿轮箱温控性能提升显著,完全满足满发散热需求。若按该改造成果推广至风场其余10台存在相同问题的风机,预计可显著减少因油温高导致的限功率运行时间,提升整体上网电量。

结束语

针对尼白木克风电场风机冷却系统的冷却不足问题,提出了油冷风扇叶片气动结构优化方案,极大提高风量,有效降低齿轮箱油温,避免功率受限,提高风机运行效率,经过改造后11台风机年平均恢复电量约为79.2万千瓦时,节约电费31.68万元,且降低了维护费用,该技术可推广到各型风电机组上,在高海拔、低压环境下使用效果尤为显著。随着风电机组长期运行,采用类似的改造方案可以有效提高机组运行效率、延长使用寿命,促进风电行业发展。展望未来,风电行业还需要做好冷却系统技术的创新和改进工作,制定冷却系统标准化工作标准,并推广具有实际作用的价值性技术。

参考文献

- [1]李永江.传统高压直流在大规模陆上风电传输中的应用[J].自动化应用,2025,66(09):85-87.
- [2]王付岗,李成晨,卓然,等.MW级风电增速齿轮箱高速轴承高温问题研究[J].机械传动,2019,43(05):161-166.
- [3]于向军,陈刚,陈亚楠.风电机组齿轮箱油冷系统早期故障诊断方法[C]//风能产业(2019年3月).株洲电力机车研究所有限公司风电事业部,2019:77-82.
- [4]陈子新,赵子丰,丛智慧,等.风力发电机组齿轮箱温度抑制的研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2018,14(02):97-100+106.
- [5]赵秋丽.风电机组部件超温故障的FMECA分析及控制[D].华北电力大学(北京),2016.