

基于永磁直驱技术的大型风电机组可靠性提升研究

文 雄 李 智 高 翔 郭世昌 尹红春
三峡新能源发电(弥勒)有限责任公司 云南 弥勒 652300

摘要：本文针对大型风电机组应用永磁直驱技术时可靠性不足的问题展开研究，通过剖析技术原理、应用益处及现存麻烦，全面探讨机械系统、电气系统、环境载荷及制造工艺对机组可靠性的影响机制，推荐结构优化、多源监测、智能运维等系统化提升途径，覆盖预防、处置与改进全流程的管理办法，其目的为降低机组的失败率，加大运行的稳定性，为强化永磁直驱风电机组可靠性提供理论和实践层面的参考。

关键词：永磁直驱技术；大型风力发电机群组；提升手段

引言

伴随风电产业的规模化进程，因为有高效节能的特性，永磁直驱技术在大型风电机组中普遍应用，复杂工况与环境因素引起机组故障频繁出现，对风电产业实现可持续发展形成严重制约，面向该技术可靠性增强的研究还存在不足，急切需要一套系统方案^[1]。本文依托实际工程需求开展，对可靠性的影响因素进行全面分析，制定多维度提升办法，对维护风电机组稳定运行、促进风电产业高质量发展意义非凡。

1 永磁直驱技术在大型风电机组中的应用现状与挑战

1.1 永磁直驱技术的核心原理与系统构成

永磁直驱技术对传统风力发电传动模式进行了颠覆，其核心创新点是利用永磁体替代电励磁结构，传统电励磁发电机运行依靠电刷与滑环向励磁绕组供电来生成旋转磁场，此结构存在显而易见的弊端，机械磨损、接触电阻大等问题会引起能量损耗高达8%-12%。与之有着明显对照的是，永磁直驱系统借助高性能钕铁硼永磁体（其剩磁强度能达到1.2-1.4T，最大磁能积超出了350kJ/m³）在转子表面形成恒定磁场，当风轮汲取风能推动转子旋转之际，定子绕组凭借切割磁力线直接输出电能，跟传统机型比，能量转换效率提高了5%-7%^[2]。从系统架构层面看，永磁直驱风电机组由风轮气动系统、刚性主轴、全功率变流器跟永磁同步发电机构成，各部分彼此协同运作，风轮把15-25m/s风速转换成80-120rpm的低速转动，依靠无齿轮箱直驱结构输送至发电机转子，此设计造成传动链长度缩短40%，转动惯量降低达30%，变流器采用三电平的拓扑结构，实现0至50Hz宽频发电，并网电能里的谐波含量不超过2.5%，符合IEEE 519标准给出的规范。

1.2 大型风电机组可靠性的关键评价指标

估量大型风电机组可靠性得从多个层面出发，建立

全面且合理的指标体系，机组可用率作为核心考核指标，直接体现设备持续稳定发电的本领，其计算办法是特定时间段当中正常运行时长占总时长的比例数值，在实际落实应用的阶段，永磁直驱风电机组仗独特的结构设计，表现出明显的可用率好处。依据行业统计数据说，传统双馈风电机组因齿轮箱等复杂传动部件易产生损坏，平均可用率大致为85%-90%这个水平；而永磁直驱机组鉴于去掉了齿轮箱，把机械故障点减少了70%以上，其平均可用率可实现92%-95%，部分高品质机型的可用率甚至达到96%以上^[3]。

1.3 永磁直驱技术的应用优势

就提高能量转换效率而言，其废止了齿轮箱设计构想，有效减少传动部件机械摩擦引起的能量损耗，依照相关研究表明，与传统带了齿轮箱的风电机组对比，永磁直驱风电机组在能量转换的阶段里，大概可减少10%-15%的机械传动损失，极大增进风能转化成电能的效率，为风电场赢取更高的发电收益。

就维护与运行的稳定性而言，把齿轮箱取消掉，较大幅度降低了设备维护工作量，减少因齿轮箱故障造成的停机检修时段，统计资料说明，传统风电机组每年因齿轮箱故障引发的平均停机时间约为80-100小时，而永磁直驱机组鉴于把此部件去除，非计划停机时长大概降低40%，切实增强机组运行时间与可用比率。

1.4 现存可靠性问题分析

大型风电机组采用永磁直驱技术运行时，诸多可靠性隐患逐步显现。永磁体在多变的工况条件下，面临不可逆退磁风险，高温环境与剧烈振动共同作用，加速永磁体性能劣化，致使发电机输出功率稳定性遭受影响。直驱结构虽然精简了传动系统，但带来主轴负载显著增加的问题，长时间运转过程中，轴承磨损与主轴疲劳裂纹等故障频发，对机械系统可靠性造成冲击^[4]。电气系统

内，变流器作为实现电能转换的关键设备，其功率器件在持续不断的电能转换工作中，因发热累积和电压波动干扰，故障发生概率居高不下。风电机组所处的户外环境充满挑战，盐雾、沙尘侵蚀与极端气温变化，叠加机械应力与电磁效应的影响，形成复杂的多物理场耦合作用，极大地加速设备部件的老化失效进程。

2 永磁直驱风电机组可靠性影响因素与失效机理

2.1 机械系统可靠性影响因素

永磁直驱风电机组机械系统的可靠运行面临多重挑战。主轴作为连接风轮与发电机转子的关键构件，持续承受风轮气动推力、转子自身重力及运行过程中产生的振动载荷，在轴颈过渡、键槽等应力集中区域，极易因交变应力作用萌生疲劳裂纹，随着运行时长增加，裂纹不断扩展，最终可能引发主轴断裂事故^[5]。轴承在机组运行中承担着轴向与径向的双重负荷，频繁的启停操作、工况变化带来的冲击，使得轴承在复杂受力状态下运转，一旦润滑系统失效或密封性能下降，轴承磨损速度加快，振动与噪声异常加剧，严重时会导致轴承卡死故障。

2.2 电气系统可靠性影响因素

永磁直驱风电机组电气系统的稳定运行面临诸多潜在风险。变流器充当核心枢纽，高频电能转换让功率器件的产热升高，散热不足极易引发热击穿，电网侧电压和频率若出现异常也会干扰控制模块，可采用液冷散热技术把器件温度下降25-35°C，且配备了智能温控模块；给控制模块实施冗余设计，配置备用单元，采用自适应的算法，同时添装电能质量调节器以稳定输入。交变磁场影响着发电机定子绕组，电晕放电跟过热侵蚀了绝缘层，能利用使用电气强度增长至40%的纳米复合绝缘材料、完善绕制的工艺、安装局部放电监测传感器，阻止短路故障出现，永磁体容易受到电磁干扰以及电流冲击发生退磁，可装上复合电磁屏蔽装置减少90%的干扰，优化电路结构后再涂覆防护涂层，维持电机电磁转换的效率。

2.3 环境载荷作用下的多物理场耦合效应

大型永磁直驱风电机组在户外运行时，环境载荷通过多物理场耦合对设备可靠性形成复合威胁。强风作用不仅使叶片承受气动载荷发生机械形变，还会引发整机振动，这种机械应力与温度变化导致的材料热胀冷缩相互叠加，在主轴、机舱连接部位产生复杂应力分布，加速金属材料疲劳与性能劣化。沿海地区盐雾环境中，富含盐分的潮湿空气会降低电气设备表面绝缘性能，海风引起的持续振动进一步加剧连接部件的腐蚀与松动。

2.4 制造工艺与装配精度的影响

永磁直驱风电机组的可靠性与制造工艺、装配精度

紧密相连。发电机制造过程中，永磁体充磁工艺的精准度直接影响磁场分布状态，充磁偏差会导致磁场不均匀，致使电机发电效率降低、运行稳定性变差，长时间运转还可能引发局部过热现象。定子绕组绕制环节，线径尺寸把控不严、绝缘层包裹质量不佳，会使匝间绝缘性能弱化，为短路故障的发生创造条件。机械部件制造方面，主轴锻造若存在气孔、夹杂物等内部缺陷，在复杂载荷作用下，这些缺陷部位极易产生裂纹，进而削弱主轴整体结构强度。

3 永磁直驱风电机组可靠性提升技术路径

3.1 结构优化设计技术

针对永磁直驱风电机组机械及电气结构当下的现存问题，结构优化设计技术可明显增强可靠性，以机械结构中的主轴为例进行说明，传统阶梯轴在应力集中的地方容易出现疲劳断裂，优化后的主轴选取渐变式圆锥过渡结构模式，按照有限元分析精准调整轴颈过渡处的圆角半径与锥度，把应力集中系数降低大概30%。在主轴内部设计出空心结构，不仅实现了重量减少15%-20%，还可在其内部配置温度、应力传感器，实时对运行状态进行监测，就加工工艺而言，采用超声波滚压强化方式处理表面，让表层材料形成残余压应力，提升抗疲劳水平，该处理会让主轴的疲劳寿命延长40%以上，就轴承支撑结构而言，把结构改成双列圆锥滚子轴承组合，增强轴向及径向的承载能力；电气结构采用优化磁路的办法，采用Halbach阵列的形式布局永磁体，加大发电效率。

3.2 多源监测与故障预警技术

多源监测以及故障预警技术是提升永磁直驱风电机组可靠性的主要手段，在机组关键区域布置振动、温度、应力等多种传感器，实时采集机械系统和电气系统的工作数据，涵盖主轴振动状态的相关信息、轴承温度变化的相关信息、变流器功率器件发热情况的相关信息^[6]。凭借数据融合算法对多源异构数据开展深度分析，构建起故障特征模型，精准辨认反常信号，若监测数据偏离正常的阈值，系统按照既定规则迅速触发预警，预先识别出轴承磨损、绕组过热、永磁体退磁等潜在故障，让运维人员可于故障开始萌芽阶段介入处理，杜绝故障进一步扩大，减少设备停机引发的损失，大大提升机组运行的可靠水平与维护便捷性。

3.3 智能运维策略与寿命管理

智能运维策略与寿命管理以维系机组全生命周期健康运行为核心要点，借助大数据跟人工智能技术实现精准化运维，于机组关键部位安装振动、温度、应力等不同类型传感器，即时采集海量运转数据，也运用机器

学习中的随机森林算法对数据做深度挖掘，建立部件性能衰退的模型，以主轴为例进行说明，结合历史的振动数据与应力数据，可以精准预估疲劳裂纹开始萌生的时间，误差控制范围为正负7天；凭借分析温度跟磨损颗粒的浓度，可在3-6个月前对磨损程度进行预判。采用强化学习算法对运维计划做动态优化，以设备健康指数、运维成本及发电收益为优化方向，要是轴承温度连续3小时超出阈值的15%，系统自动把巡检周期缩短，再推送针对性的维护方案；若设备健康状况良好，则智能延长维护间隔，将运维成本降低至原来的75%以下。利用孪生技术创建1:1虚拟机组，模拟极端工况下设备的应力分布和性能变化，为改造升级方案提供仿真验证，预计可延长机组整体寿命12%-18%。

3.4 极端环境适应性改进

就极端环境对永磁直驱风电机组引发的挑战而言，得从多个维度提升它的环境适应性，处在高盐雾的地带，采用优化电气设备的密封设计操作，采用抗腐蚀涂层和耐盐雾材质，提升对变流器、发电机等关键部件的防护水平，减小盐分侵害的风险，面对沙尘弥漫的环境，更新机舱通风结构，增添高效过滤装备，防止沙尘进入轴承、散热通道等相关部位，减少机械的磨损以及散热失效现象。位于极冷的地带，对液压系统、润滑油脂实施低温性能优化，采用加热保温暖招，保证设备处于低温时正常轮转。

3.5 故障优化与故障率降低策略

若要优化故障和降低故障率，要从多维度实施系统性策略，以直驱机组频繁出现的故障为例，主轴疲劳断裂大都是因为长期承受交变应力，在应力集中之处形成裂纹；变流器功率器件碰到的过热故障，时常是因散热

不足引起，就这类问题而言，就故障预防这一层面，按照历史运行数据以及材料力学特性，搭建机械部件疲劳寿命预测的模型。此模型采用有限元分析跟机器学习算法，结合主轴所涉及的应力分布、转速、载荷等参数，可提前6至12个月预估出疲劳寿命，当部件剩余的实际寿命低于安全规定阈值时，自动触发替换预警。

结论

研究表明，永磁直驱风电机组可靠性提升需综合考量多方面因素。通过结构优化设计增强部件性能，利用多源监测实现故障预警，结合智能运维与极端环境适应性改进，构建故障优化闭环管理体系，可有效降低故障率。本文提出的技术路径与策略，为提升机组可靠性提供可行方案，但实际应用中仍需根据不同工况持续优化，以进一步提升风电系统整体效能。

参考文献

- [1]胡文波,贾祺,刘侃,等.面向次同步振荡分析的直驱风电机群建模[J].太阳能学报,2022,43(02):424-435.
- [2]薛易,陈元,郭明良,等.混合储能系统直驱风电机不对称故障穿越的控制策略[J].黑龙江科技大学学报,2022,32(01):128-133.
- [3]苏勋文,安鹏宇,王添再,等.LCL逆变器型直驱风电机的稳定性[J].黑龙江科技大学学报,2021,31(05):619-627.
- [4]薛易,陈元,张帅.超级电容储能直驱永磁风电机的高电压穿越控制策略[J].黑龙江科技大学学报,2021,31(03):338-343.
- [5]林立,何洋,周建华,等.直驱永磁风电机侧的新型终端滑模控制设计[J].控制工程,2021,28(05):992-998.
- [6]李唯兵.直驱永磁风电机定子线圈非标准涨形机的开发[J].机械工程与自动化,2017,(05):105-106+108.