

双馈风力发电机组变桨系统关键电气故障分析

杜春

国电联合动力技术有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i10.6600

[摘要] 研究将聚焦双馈风力发电机组变桨系统中控制器、驱动器、电机的关键电气故障,深入剖析故障产生机理,探究硬件冗余、信号分析、模型诊断等技术方法,给出故障预防、定期维护及状态预测性维护方面的策略。目的是厘清故障成因与诊断方式,为科学维护方案的制定提供参考,进而提高机组可靠程度,减少运维成本,助力风电行业稳定发展。

[关键词] 双馈风力发电机组; 变桨系统; 电气故障; 故障机理; 故障预防

中图分类号: TH183.3 **文献标识码:** A

Analysis of Key Electrical Faults in the Pitch Control System of Doubly Fed Wind Power Generators

Chun Du

GUO DIAN UNITED POWER TECHNOLOGY COMPANGY LTD

[Abstract] The research will focus on critical electrical faults in the pitch system of doubly-fed wind turbines, including controllers, actuators, and motors. It will conduct an in-depth analysis of fault mechanisms and explore technical methods such as hardware redundancy, signal analysis, and model diagnostics. Strategies for fault prevention, regular maintenance, and predictive condition-based maintenance will be proposed. The aim is to clarify fault causes and diagnostic approaches, providing references for the development of scientific maintenance plans. This will ultimately enhance turbine reliability, reduce operational and maintenance costs, and support the stable growth of the wind power industry.

[Key words] Double-fed wind power generation unit; pitch system; electrical fault; fault mechanism; fault prevention

引言

全球能源转型进程不断加快,风电作为清洁可再生能源的重要组成部分,装机容量不断上升。双馈风力发电机组并网性能优异,成为主流机型之一。而变桨系统是该机型实现功率调节与安全防护的关键装置,其电气部分稳定运行对机组持续发电十分关键。近年来,因变桨系统电气故障引发的机组非计划停机多次出现,影响发电量,并增加运维成本。深入开展相关故障研究,对提高风电设备可靠程度、促进风电产业高质量发展具有重要意义。

1 双馈风力发电机组变桨系统关键电气故障机理

1.1 控制器故障机理

控制器是变桨系统的指令中枢,故障多来自核心电路与信号处理模块异常。主控制芯片长期承受变桨柜内温度波动,引脚可能氧化造成接触不良,让运算周期延长或指令输出延迟。信号采集电路中,模拟量转换芯片精度随使用时间下降,造成风速、角度等关键参数测量偏差,引发变桨动作与实际需求脱节。数字量

输入模块的光电隔离元件若老化,会导致外部开关信号无法准确传入,例如紧急停机信号传输中断可能使系统失去安全保护触发机制。

1.2 驱动器故障机理

驱动器故障集中体现为功率变换与控制电路的异常运行,IGBT模块失效,IGBT模块高频开关时,栅极电荷持续积累,导致导通电阻增大、器件发热加剧。若变桨柜散热通道被粉尘、油污堵塞、散热风扇损坏等,导致热量无法及时散出,将加速IGBT模块老化,最终造成开关功能失效。续流二极管若反向恢复时间延长,会在关断瞬间产生尖峰电压,击穿相邻元件。电流检测电路中的霍尔传感器若零点漂移,会使过流保护阈值偏离设定值,导致正常运行时误触发保护,或真正过流时无法及时响应。驱动板上的隔离光耦若性能退化,会造成栅极驱动信号延迟,使IGBT开关时序错乱,产生额外功耗^[1],进一步加剧模块发热与老化。

1.3 电机故障机理

电机故障与电磁转换、机械传动过程中的应力作用密切相关,定子绕组绝缘劣化,变桨电机定子绕组长期处于频繁变桨产生的交变磁场中,绝缘层因局部放电逐步老化。尤其是槽口位置的绕组,长期承受机械振动,绝缘层易出现磨损,最终引发相间短路、对地漏电故障,导致电机输出转矩下降、变桨速度放缓,甚至无法驱动叶片调节桨距角。转子结构损伤,转子鼠笼条与端环焊接处若存在工艺缺陷,启动时的冲击电流会使焊接部位产生疲劳裂纹。随着运行时间累积,裂纹持续扩展,最终导致转子导条断裂,电机输出转矩大幅下降、变桨速度明显减慢,严重影响机组对风速变化的响应能力^[1]。

2 双馈风力发电机变桨系统电气故障诊断方法研究

2.1 硬件冗余故障诊断

硬件冗余故障诊断通过设置多重备份组件实现故障实时监测,核心在于构建主、备并行运行架构。控制器采用双CPU设计,主控制器负责实时运算与指令输出,备用控制器同步接收相同输入信号并独立运算,两者每10ms交换一次运算结果,若连续三次偏差超过5%,则判定主控制器异常并自动切换至备用模式,同时触发故障报警。传感器冗余针对关键参数采用三取二原则,如变桨角度测量同时部署绝对值编码器、旋转变压器和激光测距传感器,通过比较三组数据一致性判断传感器是否失效。当某组数据与其余两组偏差持续大于0.5°时,系统自动剔除异常数据并启用剩余两组平均值作为有效输入。

2.2 信号分析故障诊断

信号分析故障诊断通过提取电气信号特征量识别潜在故障,针对控制器故障,可采集输出的PWM波信号,正常状态下脉冲宽度应随变桨指令平滑变化,若出现脉冲缺失或宽度突变,结合历史数据比对可判断为控制芯片运算异常。对通信总线信号进行频谱分析,当特定频率如115.2kHz信号幅值衰减超过20%时,提示通信接口芯片老化。驱动器故障诊断可通过监测直流母线电压波动实现,正常运行时电压纹波应小于额定值5%,若纹波突然增大且伴随100Hz左右低频分量,多为母线电容性能退化;采集IGBT的集电极-发射极电压波形,开通时电压尖峰超过1.2倍额定值,表明续流二极管反向恢复特性下降。电机故障诊断侧重电流与振动信号分析,三相电流不平衡度超过10%时,可能存在绕组短路;对定子电流进行傅里叶分解,当在50Hz±f(f为转子故障特征频率)处出现明显峰值,提示转子导条断裂。

2.3 模型故障诊断

模型故障诊断依托系统数学模型与实测数据的残差分析完成,针对变桨系统建立状态空间方程,需明确状态变量集,涵盖电机转子位置、变桨齿轮箱转速、驱动器输出扭矩等,进而依据电磁感应定律与机械传动方程推导状态转移矩阵。把三相电压有效值、直流母线电压、定子电流峰值设为输入量,变桨角度实时值、电机运行转速设为输出量,借助卡尔曼滤波器进行状态估算,需每20ms更新协方差矩阵,保证估算精度。估算角度与实测角度残差连续5个采样周期超过0.3°时,进一步对比转速残差变化趋势,两者同向偏离即判定电机存在异常;反向偏离则指向

传动链故障。神经网络模型采用三层BP网络结构,输入层12个节点与具体监测参数形成对应关系(见表1),隐含层20个节点用Sigmoid激活函数,输出层8个节点分别对应控制器程序错误、驱动器IGBT老化、电机轴承磨损等故障类型。训练时,1000组样本按7:3比例划分为训练集与验证集,学习率设为0.01,迭代次数500次,调整权值矩阵让训练误差降至5%以下。诊断时,实时采集的特征参数经归一化处理后输入模型,输出层概率值最高的节点即为诊断结果。

表1 神经网络模型输入层节点与监测参数对应关系

输入节点序号	对应监测参数	输入节点序号	对应监测参数
1	定子A相电压有效值	7	电机壳体温度
2	定子B相电压有效值	8	驱动器壳体温度
3	定子C相电压有效值	9	变桨角度反馈值
4	定子A相电流峰值	10	变桨指令值
5	定子B相电流峰值	11	直流母线电压
6	定子C相电流峰值	12	电机运行转速

构建故障树模型,先借助故障模式与影响分析确定各事件逻辑关系,“变桨系统失效”作为顶层事件,中层事件按控制器、驱动器、电机划分为三个分支,每个分支下的底层事件需明确故障触发条件。例如“电容容量衰减”触发条件为实测容量低于额定值80%，“霍尔传感器漂移”触发条件为电流测量误差超过3%。借助布尔代数求解最小割集,得到23组导致顶层事件发生的基本事件组合^[2]。

3 双馈风力发电机变桨系统电气故障预防维护策略

3.1 故障预防措施

故障预防需从硬件选型与运行环境控制两方面同时着手,控制器芯片选用工业级器件,保证在-40℃~85℃温度区间稳定工作,焊接工艺采用无铅回流焊技术,减少引脚氧化风险。信号采集电路中模拟量转换芯片加装温度补偿电路,使测量精度保持在±0.5%以内,避免参数偏差引发控制异常。驱动器功率回路选用耐高压IGBT模块,反向耐压值不低于1200V,栅极驱动电路增加RC缓冲网络,降低开关过程中电压尖峰。直流母线电容采用纹波电流耐受值高于额定值1.5倍的产品,延长使用寿命。电机绕组采用真空浸漆工艺,绝缘层厚度增加至0.3mm,提升抗磨损能力,轴承选用双面密封结构,防止润滑脂流失与污染物侵入。运行环境控制方面,变桨柜内加装温控风扇,温度超过40℃时自动启动,相对湿度通过除湿装置维持在50%~60%之间^[3]。

3.2 定期维护策略

日常维护每天开展,检查控制器指示灯状态,确保电源灯、运行灯常亮且无故障灯闪烁,记录变桨角度反馈值与指令值的偏差,正常应小于0.2°。驱动器冷却风扇运行声音要均匀无杂音,电机表面温度用红外测温仪检测,不得超过65℃。月度维护重点

在连接部位检查,控制器与驱动器的接线端子用扭矩扳手紧固,紧固力矩按规格执行,M5螺栓为 $5\text{N}\cdot\text{m}$,M6螺栓为 $8\text{N}\cdot\text{m}$ 。用软毛刷清理传感器探头表面灰尘,绝对值编码器的信号电缆插头需重新插拔一次,确保接触良好。测试驱动器的急停功能,触发后应在1s内切断电机电源。季度维护开展性能检测,用绝缘电阻表测量电机绕组绝缘电阻,数值应大于 $100\text{M}\Omega$,否则需进行干燥处理。驱动器输出电压的三相不平衡度用示波器检测,偏差不得超过2%。控制器程序进行一次备份,对比与上次备份的差异,防止程序被意外篡改。

3.3 状态预测性维护

搭建在线监测系统时,在电机轴承座安装振动传感器,采样频率设定为 2kHz ,实时采集振动加速度信号,通过频谱分析识别 1000Hz 以下的异常频率成分。控制器与驱动器的关键参数如CPU负载率、IGBT结温等通过工业总线传输至后台,形成趋势曲线,参数连续3天偏离均值10%以上时发出预警。基于故障诊断数据建立维护模型,对绕组绝缘电阻进行趋势预测,预测值将在3个月内降至阈值以下时,提前安排停机维护。利用神经网络模型对驱动器的开关损耗进行评估,损耗值超过初始值50%时,判定IGBT进入老化阶段,制定更换计划。建立维护决策系统,综合设备运行年限、故障历史与预警信息,生成个性化维护方案。运行超过5年的机组,缩短振动监测的采样间隔至 1kHz ,增加电容量检测的频次。维护完成后需进行变桨测试,连续运行10个完整

变桨周期,各项参数均符合标准方可投入运行^[4]。

4 结束语

总而言之,双馈风力发电机组变桨系统电气故障分析要贯穿机理、诊断与维护全链条。理清控制器、驱动器、电机故障机理是基础,硬件冗余、信号分析与模型诊断方法搭起多层防护网,科学预防维护策略能从源头降低故障概率。三者协同能提升系统可靠程度,减少非计划停机。后续还得结合实际运行数据持续优化,为风电设备安全高效运行提供更坚实支撑,助力风电产业稳健发展。

[参考文献]

- [1]张毅博.江苏滨海现场#B28风电机组变桨距控制系统电容电压低故障分析及处理[J].电力设备管理,2023(5):189-191.
- [2]谭韶毅,白聪儿,王瑞良,等.风电机组变桨轴承滑移仿真及变桨系统振动分析[J].机电工程技术,2023,52(3):300-303.
- [3]宋宁.风力发电机电动变桨系统故障诊断研究进展[J].电力设备管理,2023(10):51-53.
- [4]冯猛,尹海天,黄燃.基于故障树的风电机组变桨系统故障诊断研究[J].数字化用户,2023,29(4):220-222.

作者简介:

杜春(1987--),男,汉族,山西太原人,本科,单位:国电联合动力技术有限公司,研究方向:风力发电机组研发设计、风场安装、运行故障分析。