

# 风电箱变常见电气故障诊断、检修及电网安全防护措施

马世杰

新疆龙源新能源有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

DOI:10.61369/ME.2026060035

**摘 要 :** 在“双碳”目标全面推进的背景下,我国陆上及海上风电装机容量持续攀升,箱式变压器(简称风电箱变)作为风电机组与集电线路、公共电网衔接的核心变电设备,承担着风机低压交流电升压、电能汇集、配电保护及并网隔离的关键功能。风电箱变长期运行于野外风沙、高温高湿、盐雾腐蚀、雷电频发等恶劣工况,设备绝缘老化、开关器件损坏、回路短路等电气故障高发,不仅会造成单台风机停机弃风、发电量损失,严重时还会引发集电线路跳闸、电网电压波动甚至区域性电网故障,威胁风电并网系统稳定运行。本文结合陆上平原、沿海滩涂两类典型风电场运维经验,系统梳理风电箱变高压侧、变压器本体、低压侧、二次测控回路四大类常见电气故障,阐述故障在线诊断与离线试验诊断技术,制定标准化检修工艺流程,同时针对性提出风电并网场景下的电网安全防护策略,为风电场箱变全生命周期运维管理、降低设备故障率、保障风电安全并网提供理论参考与实操依据。

**关 键 词 :** 风电箱变; 电气故障; 故障诊断; 设备检修; 电网安全防护; 风电并网

## Common Electrical Fault Diagnosis, Maintenance, and Grid Safety Protection Measures for Wind Power Substations

Ma Shijie

Xinjiang Longyuan New Energy Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830000

**Abstract :** Against the backdrop of comprehensive advancement towards the "dual carbon" goals, China's onshore and offshore wind power installed capacity continues to rise steadily. As core substation equipment connecting wind turbines to collector lines and the public power grid, box-type transformers (referred to as wind power box transformers) perform critical functions including voltage boosting for low-voltage AC power from turbines, energy collection, distribution protection, and grid integration isolation. These transformers operate under harsh conditions such as sandstorms, high temperatures, humidity, salt spray corrosion, and frequent lightning strikes, leading to frequent electrical faults like insulation degradation, switch component failures, and circuit short circuits. Such issues not only cause turbine downtime and power generation losses but may also trigger collector line tripping, grid voltage fluctuations, or even regional power grid failures, jeopardizing the stability of wind power grid integration systems. Drawing on operational experience from both onshore plain and coastal tidal flat wind farms, this paper systematically identifies four major categories of common electrical faults in wind power box transformers—high-voltage side, transformer body, low-voltage side, and secondary measurement/control circuits. It elaborates on online fault diagnosis and offline test-based diagnostic techniques, establishes standardized maintenance procedures, and proposes targeted grid safety protection strategies for wind power grid integration scenarios, providing theoretical references and practical guidelines for full-life-cycle operation and maintenance management of wind farm transformers, fault rate reduction, and secure grid integration of wind power.

**Keywords :** wind power transformer; electrical fault; fault diagnosis; equipment maintenance; grid safety protection; wind power grid integration

## 引言

风电属于波动性极强的新能源发电形式,风机出力受风速、风向实时影响,导致箱变长期处于负荷频繁波动、电压电流动态变化的运行状态,相较于传统变电站变压器,风电箱变运行工况更为苛刻。目前国内风电场主流配置美式箱变、欧式箱变两种机型,额定参数多为0.69kV/35kV,单台箱变对应一台或两台风机,分散布置于风场全域,设备巡检难度大、故障隐蔽性强。运维数据显示箱变故障占

风电电气故障 38.2%，高发故障含绝缘、开关、二次保护失效、过电压四类。多数中小风场仍靠人工定期巡检、故障后抢修，缺少前置精准诊断；且应对功率波动的并网防护体系不足，易出现谐波、电压越限、保护误动等问题。本文结合现场运维，剖析箱变故障机理，优化检修方案、完善并网防护，提升设备可靠度与电网适配能力。

## 一、风电箱变结构及运行工况特点

### （一）基本结构与工作原理

风电箱变集成高压开关室、变压器室、低压配电室、二次测控保护室于一体化封闭箱体，无需建设独立配电室，具备占地面积小、安装便捷、模块化集成度高的优势。工作流程为：风电机组发电机输出 0.69kV 低压交流电，经低压柜进线至升压变压器，升压至 35kV 高压交流电后，通过高压环网柜接入风电场集电线路，最终输送至风电场升压站并入公共电网。同时箱变内置测控装置、继电保护模块、温湿度控制模块，实现设备运行参数实时监测、故障自动跳闸、箱体环境自动调控功能<sup>[1]</sup>。

### （二）恶劣运行工况带来的故障诱因

环境腐蚀诱因：沿海风电场盐雾、内陆风电场风沙与昼夜温差，加速箱体密封件老化、绝缘材料劣化，引发绝缘闪络、柜体凝露短路；

负荷波动诱因：风速随机变化导致变压器负荷骤升骤降，绕组频繁热胀冷缩，加剧绕组绝缘开裂、引线松动；

雷电过电压诱因：野外空旷区域雷电活动频繁，直击雷与感应雷易侵入箱变高低压回路，击穿绝缘器件；

运维局限诱因：箱变分散布置，人工巡检频次有限，微小潜伏性故障无法及时发现，逐步发展为恶性电气故障。

## 二、风电箱变常见电气故障及故障机理分析

结合现场故障台账，将风电箱变电气故障分为变压器本体故障、高压侧电气故障、低压侧电气故障、二次测控与保护回路故障四大类，各类故障表现、产生机理如下。

### （一）变压器本体电气故障

#### 1. 绕组匝间 / 层间短路故障

该故障为箱变最高发本体故障，诱因包括长期负荷波动导致绕组绝缘疲劳老化、雷电过电压击穿局部绝缘、变压器油受潮污染降低绝缘强度。故障初期无明显外部征兆，仅出现轻微油温升高、三相电流不平衡；故障发展后会产生局部电弧，变压器油裂解产生乙炔、氢气等特征气体，最终引发绕组烧毁、箱变紧急跳闸。

#### 2. 铁芯多点接地故障

变压器铁芯正常仅允许单点接地，若铁芯硅钢片绝缘破损、金属杂物搭接铁芯与箱体，会形成多点接地回路，产生持续性涡流损耗，导致铁芯过热、油温异常升高，加速绝缘油老化，长期运行会诱发绕组绝缘热击穿。

#### 3. 分接开关接触不良故障

有载 / 无载分接开关长期运行后触头氧化、弹簧压力不足，会

造成接触电阻增大，负荷电流通过时产生发热烧蚀，引发局部放电、电压偏移，严重时出现开关触头烧熔，导致变压器三相电压失衡，影响风机正常并网发电。

### （二）高压侧电气故障

#### 1. 高压环网柜开关故障

高压负荷开关、接地开关机械卡涩、操作机构储能不足，会出现开关拒分、拒合问题；开关触头磨损、氧化会引发接触过热、局部放电。同时风沙、凝露导致高压柜内绝缘件表面污秽，易发生沿面闪络短路，造成集电线路越级跳闸。

#### 2. 高压电缆终端头故障

电缆终端头制作工艺不达标、密封失效进水，是高压侧频发故障。进水后终端头绝缘强度下降，产生内部局部放电，逐步发展为单相接地短路、相间短路，是风电场箱变起火事故的主要诱因之一。

### （三）低压侧电气故障

#### 1. 低压母线短路与接触过热

低压侧连接风机进线，柜体凝露、小动物短路、母线绝缘老化，易引发低压相间短路；母线螺栓松动、搭接面氧化，会导致母线发热变色，轻则低压回路电压压降过大，重则烧毁低压配电柜。

#### 2. 低压电容补偿装置故障

为补偿风机无功功率，箱变低压侧配置并联电容器组，电容长期受谐波电压冲击易出现鼓包、击穿、渗漏油故障，不仅失去无功补偿作用，还会放大电网谐波，恶化并网电能质量。

### （四）二次测控与保护回路故障

二次回路是箱变安全运行的“大脑”，常见故障包括：电流 / 电压互感器精度漂移、二次回路开路；继电保护装置定值漂移、元件老化导致保护拒动或误动；测控装置对时异常、通信中断，无法上传现场运行数据至后台监控系统；温湿度控制器、加热器失灵，箱体凝露无法自动消除，进一步加剧一次设备绝缘故障。该类故障隐蔽性极强，往往一次设备无异常，但保护系统失效，失去故障应急屏障。

## 三、风电箱变电气故障诊断技术

结合风电运维场景，采用在线实时监测诊断 + 离线预防性试验诊断相结合的分层诊断模式，实现潜伏性故障早期预警、显性故障精准定位<sup>[2]</sup>。

### （一）在线非停电诊断技术

油色谱在线监测：针对油浸式风电箱变，实时监测绝缘油中氢气、甲烷、乙炔等故障特征气体含量，根据气体组分比值判断

故障类型：乙炔含量超标判定为电弧放电故障，氢气含量突增判定为局部放电或铁芯过热故障，无需停电即可预判绕组、铁芯潜伏性缺陷。

局部放电在线检测：采用超高频局部放电传感器，实时采集柜内绝缘件、开关设备放电信号，识别绝缘闪络、触头放电缺陷，适配野外无人值守风电场远程监测需求。

电参量与环境在线监测：后台监控系统实时采集三相电压、电流、油温、柜体温湿度数据，通过三相电流不平衡度、油温变化曲线，快速识别绕组短路、负荷异常故障；依托温湿度数据预判柜体凝露风险。

### （二）离线停电预防性试验诊断技术

在线监测发现异常后，利用风机停机窗口期开展停电试验，精准定位故障点位，核心试验项目及判定标准如下：

绝缘电阻与吸收比测试：测量绕组对地、绕组相间绝缘电阻，环境温度25℃时，高压绕组绝缘电阻低于1000M $\Omega$ 判定为绝缘受潮；吸收比小于1.3、极化指数低于1.5，确认绝缘介质老化受潮。

绕组直流电阻测试：三相绕组直流电阻相间不平衡度超过2%，判定绕组引线松动、匝间短路或焊接接头缺陷。

变比测试：变压器变比偏差超过 $\pm 0.5\%$ ，判定分接开关档位错位或触头接触不良。

回路电阻测试：高压开关、低压母线回路电阻超标，直接定位触头接触不良、螺栓松动故障。

### （三）故障诊断流程优化

建立“监控告警→在线数据分析→停电试验复核→故障点位定位”标准化诊断流程，摒弃传统盲目拆机检修模式，缩短故障排查时长。现场运维数据表明，该分层诊断方式可将故障排查时间缩短60%以上，有效减少风机停机时长<sup>[3]</sup>。

## 四、风电箱变标准化检修工艺与故障处理方案

按照故障严重程度，分为一般缺陷检修、重大故障抢修两类，制定适配风电场野外作业的标准化检修方案，同时落实检修安全管控措施。

### （一）变压器本体故障检修

绕组短路故障检修：轻微匝间短路需返厂开展绕组干燥、绝缘补强处理；严重绕组烧毁直接更换变压器绕组，检修后完成耐压试验、直流电阻测试，合格后方可复电。

铁芯多点接地故障检修：停电后清理铁芯表面金属杂物，排查接地引线搭接点位，拆除多余接地点，修复硅钢片破损绝缘层，复测铁芯接地电流至合格范围。

分接开关故障检修：拆解开关触头进行打磨除锈，调整弹簧压紧力，档位多次切换后复测回路电阻；触头严重烧蚀直接更换分接开关，校准电压变比。

### （二）高低压一次设备故障检修

高压开关与电缆终端头检修：开关操作机构卡涩开展机械润滑、储能机构调试；终端头进水受潮直接重新制作电缆终端头，做好双层密封防水处理，沿海风电场额外增加防盐雾涂层。

低压母线与电容装置检修：紧固母线连接螺栓，打磨氧化搭接面并涂抹电力复合脂；更换鼓包、击穿的电容器，同时检测回路谐波含量，匹配适配的无源滤波装置抑制谐波。

### （三）二次回路故障检修

针对保护误动/拒动问题，重新校核继电保护定值，匹配风电负荷波动特性优化过流、速断、零序保护参数；修复开路的互感器二次回路，落实二次回路两点接地防护；统一全站箱变测控装置时钟，保障故障录波数据同步，提升故障溯源准确性；维修或更换失效的温湿度控制器、加热器，实现箱体凝露自动防控。

### （四）检修通用安全管控要求

野外箱变检修必须严格执行停电、验电、接地、装设遮拦与警示牌安全措施；检修前后完整留存试验数据、故障录波波形；完成检修后开展带负荷试运行，观测三相电流、油温、局部放电参数无异常，方可正式并入集电线路。

## 五、风电箱变并网运行电网安全防护措施

风电箱变作为并网接口设备，其故障不仅影响自身设备安全，还会向电网传递谐波、电压波动、无功失衡、过电压等扰动，结合风电并网导则要求，从过电压防护、继电保护优化、电能质量治理、并网协同控制、运维体系升级五方面制定电网安全防护措施<sup>[4]</sup>。

### （一）多级过电压防护，抵御雷电与操作过电压

一级防护：箱变高压进线侧装设氧化锌避雷器，抑制直击雷与线路感应过电压；

二级防护：低压母线侧加装低压浪涌保护器，阻断过电压向风机发电机组反向传导；

三级防护：二次测控电源端口加装信号防雷模块，避免过电压击穿精密二次元器件；同时定期检测避雷器泄漏电流，及时更换老化失效防雷器件。

### （二）适配风电波动特性，优化继电保护定值

传统电网变压器保护定值适配稳定负荷，无法匹配风电频繁波动负荷，易出现保护误动。结合风机出力特性，采用自适应继电保护策略：增设风电专用负荷波动闭锁逻辑，规避风速骤变导致的瞬时过电流误跳闸；优化零序保护、距离保护定值，区分箱变内部故障与电网侧扰动，避免集电线路大范围越级跳闸；完善故障录波与电网联动功能，故障发生后第一时间隔离故障箱变，缩小电网故障影响范围。

### （三）综合治理并网电能质量，降低电网扰动

无功功率补偿优化：根据风机实时无功出力，动态调节低压侧电容器组投切容量，解决风电间歇性无功波动问题，将并网电压偏差控制在 $\pm 5\%$ 额定电压范围内；

谐波抑制治理：在低压侧加装有源电力滤波器（APF），抵消风机变流器产生的3、5、7次特征谐波，保证并网电流谐波总畸变率低于5%，满足国家风电并网电能质量标准<sup>[5]</sup>。

### （四）源网协同监控，实现并网风险前置预警

搭建箱变-风机-升压站一体化监控平台，打通设备运行数

据与电网调度数据通信链路。实时上传箱变电压、电流、故障信号至电网调度端，电网调度可根据全网负荷状态，提前下发风机出力调节指令，规避风电大发时段电网电压越限、线路过载问题；同时实现电网侧故障与箱变保护联动，电网异常时箱变快速解列，保障设备与电网双向安全。

**（五）差异化环境防护，从源头降低故障并网风险**

针对不同风场环境开展差异化防护：沿海风电场箱变柜体喷涂加厚防盐雾涂层，提升密封等级；内陆风沙风电场加装通风防尘滤网；高温区域强化箱体散热系统，低温区域升级加热除湿装置。从设备运行环境层面减少绝缘故障、短路故障发生概率，从源头降低箱变故障对电网的冲击。

**六、结论与展望**

风电箱变故障本质是恶劣野外工况、风电负荷波动、运维管

控不足三者共同作用的结果，绕组绝缘故障、开关设备缺陷、二次保护失灵、过电压损坏是当前风电箱变最核心的电气故障类型。本文提出的在线监测+离线试验分层诊断模式，可实现潜伏性故障早期预警；标准化分级检修工艺适配风电场野外停机检修场景，能够高效消除设备缺陷；配套的多级过电压防护、自适应继电保护、电能质量治理、源网协同监控措施，可有效阻隔箱变故障向公共电网扩散，提升新能源并网系统稳定性<sup>[6]</sup>。

随着风电智能化、无人值守场站建设推进，后续风电箱变将全面搭载物联网感知、人工智能故障诊断模块，可实现故障自主研判、自愈控制、电网扰动主动抑制。未来风电运维工作需进一步结合大数据与AI技术，构建箱变全生命周期健康管理模型，实现从“故障后检修”向“状态检修、预测性维护”转型，持续提升风电设备运行可靠性，助力新能源电力系统安全、高效、稳定运行。

**参考文献**

[1] 胡卫, 翁洪杰. 沿海风电场 10kV 集电线路短路引起箱变着火故障分析 [J]. 浙江电力, 2026, 45(01): 78-83.  
[2] 李刚. 风力发电 690V 转 35kV 箱式变压器的维护与故障诊断技术研究 [J]. 电工技术, 2025(14): 189-191.  
[3] 王健. 风电场箱式变压器日常维护策略与实践研究 [J]. 设备管理与维修, 2025(12): 132-134.  
[4] 张磊. 风电场集电线路典型故障原因分析及处理措施研究 [J]. 中国设备工程, 2020(22): 236-237.  
[5] 卢鑫鑫, 纪代颖. 考虑电缆故障情况下风电场电气内部故障诊断方法 [J]. 电气自动化, 2024, 46(2): 72-75.  
[6] 国家能源局. GB/T19963-2011 风电场接入电力系统技术规定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.