

新能源输变电系统中电力电子设备的可靠性分析

郑勇

(安徽龙源新能源有限公司)

【摘要】为了应对新能源输变电系统中电力电子设备在复杂工况下高失效率的问题，文章结合风电场升压站关键设备实例，构建失效模式与成因分析模型，并采用蒙特卡罗模拟法对设备可靠性进行量化评估。研究方法不仅依托历史运行与试验数据建立失效概率分布，还引入智能化监测理念，强调利用传感器实时采集与边缘计算修正模型参数，以提升预测精度。结果表明该评估框架能够有效识别典型故障环节，验证其在新能源场景下的适用性。进一步提出在高湿盐雾与功率冲击等特殊环境下，通过优化设计、引入新型半导体器件及智能监测与诊断系统，可显著提高设备可靠性。研究为新能源输变电系统的智能化运维提供了理论与方法支撑，对推动大规模新能源安全并网具有参考价值。

【关键词】新能源；输变电系统；电力电子设备；可靠性分析

中图分类号：TM72

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.057

Reliability Analysis of Power Electronic Equipment in New Energy Transmission and Transformation Systems

ZHENG Yong

(Anhui Longyuan New Energy Co., Ltd.)

【Abstract】In order to address the problem of high failure efficiency of power electronic equipment in complex operating conditions in new energy transmission and transformation systems, this article combines key equipment examples of wind farm boosting stations to construct a failure mode and cause analysis model, and uses Monte Carlo simulation method to quantitatively evaluate equipment reliability. The research method not only relies on the historical operation and test data to establish the failure probability distribution, but also introduces the intelligent monitoring concept, emphasizing the use of real-time sensor acquisition and edge computing to modify model parameters to improve the prediction accuracy. The results indicate that the evaluation framework can effectively identify typical fault links and verify its applicability in new energy scenarios. Furthermore, it is proposed that in special environments such as high humidity salt spray and power shock, equipment reliability can be significantly improved by optimizing design, introducing new semiconductor devices, and intelligent monitoring and diagnostic systems. The research provides theoretical and methodological support for the intelligent operation and maintenance of new energy transmission and transformation systems, and has reference value for promoting the safe grid connection of large-scale new energy.

【Keywords】new energy; power transmission and transformation system; power electronic equipment; reliability analysis

1 引言

全球能源结构转型加速背景下，新能源发电占比攀升，输变电系统作为新能源并网与消纳枢纽，运行稳定可靠愈发关键。国际能源署(IEA)预测，2030年新能源发电量占比将超45%，这对输变电环节电力电子设备提出更高要求。运行数据显示功率器件失效、散热异常及控制电路误动作等是新能源系统故障率主因。人工智能、智能传感与边缘计算融合下，智能化监测与预测性维护成为提升设备可靠性可行路径。本文结合新能源场景下关键设备实例，提出基于蒙特卡罗模拟与智能监测理念的可靠性分析框架，为新能源输变电系统安全稳定运行提供理论与方法支撑。

2 电力电子设备失效模式及原因

2.1 失效模式

新能源输变电系统中电力电子设备失效模式呈多样复杂特性^[1]。表1列出经实地调研与文献梳理的主要失效模式，涵盖元器件至系统层面，包括功率器件退化、开关损耗增加、热循环疲劳损伤、电磁干扰误操作、控制电路逻辑错误及散热系统性能下降等，影响设备运行或导致电系统性能下降甚至停机。

表1 电力电子设备主要失效模式

失效模式	说明	新能源场景典型触发因素
功率器件退化	器件结温过高、栅极氧化层劣化、载流能力下降	储能PCS频繁大功率充放电→结温波动加剧

续表

失效模式	说明	新能源场景典型触发因素
开关损耗增加	高频开关动作导致开关器件发热严重,效率降低	光伏逆变器昼夜交替运行→开关频率高、应力集中
热循环疲劳	温度反复升降引起焊点裂纹、键合线疲劳	光伏场站昼夜温差大→热循环加速焊点老化
电磁干扰误操作	强电磁环境下触发保护电路误动作	风电场升压站大功率并网→电磁干扰源更复杂
控制电路逻辑错误	设计或外界干扰引起控制信号异常	储能系统频繁切换工况→控制逻辑负荷加大
散热系统性能下降	散热器堵塞、风扇失效导致结温上升	海上风电场盐雾腐蚀→散热片效率衰减

2.2 失效原因分析

通过失效案例统计分析,图1揭示失效主要原因分布:设计缺陷(电路布局不合理、热设计不足等),材料性能问题(器件选型不当、材料老化等),环境因素(温度、湿度、尘埃等),操作维护问题及制造工艺问题(焊接不良、组装误差等)。

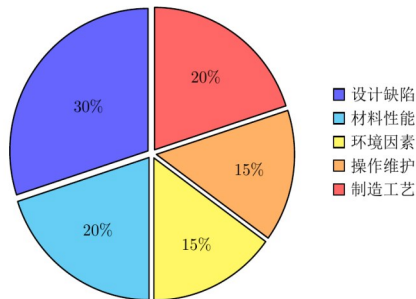


图1 电力电子设备失效原因分析

新能源场景设备失效风险呈现显著应用特征:风电场升压站高湿、高盐雾环境致功率模块和散热系统腐蚀与接触劣化;光伏逆变器昼夜温差大,热循环频繁导致焊点疲劳和器件封装老化加速;储能系统PCS大功率充放电承受瞬时冲击电流与高热流密度,功率半导体与电容器易过热或介质击穿。这些工况关联失效机制使设备在不同场景中呈现复杂退化路径,亟需针对性设计与可靠性保障措施^[2]。

3 可靠性评估方法

为确保新能源输变电系统中电力电子设备稳定运行,本文运用蒙特卡罗模拟法进行可靠性评估。该方法基于概率统计,通过随机抽样模拟组件失效,结合大量样本统计分析实现系统可靠性预测,适用于含相互依赖组件的复杂系统,依托现场运行与试验数据定义失效概率,确保评估的准确性。

1)建立可靠性模型

基于设备组成结构及失效模式,构建可靠性框图表征组件逻辑关系。图2示框图包含功率器件、驱动电路、控制电路、散热系统等关键组件及其逻辑关系。节点定义: U_s (输入—功率器件)、 U_d (功率器件—驱动电路)、 U_c (驱动电路—控制电路)、 U_o (控制电路—输出)、 U_m (监测诊断系统—控制电路)。

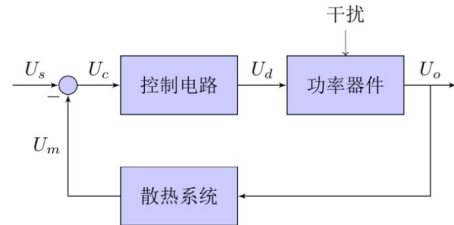


图2 电力电子设备可靠性框图

2)设定参数

依据设备实际运行数据与可靠性试验结果,为各组件设定失效概率^[3]。表2列出各组件失效概率,数据经统计分析得出反映不同组件实际运行的可靠性水平。参数准确性直接影响模拟结果精确度。

表2 电力电子设备组件失效概率

组件类别	失效概率/%
功率器件	2.5
驱动电路	1.8
控制电路	1.2
散热系统	1.5
其他辅助组件	0.9

3)模拟计算

设了可靠性模型和参数,利用蒙特卡罗模拟法进行模拟计算。①随机数生成:用于模拟各组件的失效事件。可使用rand函数或unifrnd函数,从[0,1]区间抽取n个随机数 $\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$,其中n为模拟次数。②组件失效概率判断:判断每次模拟中哪些组件发生了失效。使用if语句或logical函数,比较随机数与对应的失效概率,随机数 $\leq$ 失效概率,该组件失效,反之则正常。将每次模拟中的失效情况记为逻辑向量 $\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ ($s_i(j)=1$ 失效,0正常),其中 s_i 表示第i次模拟的失效情况,其是长度为k的逻辑向量,其中k为组件个数。③系统失效判断:按框图逻辑,用“and”和“or”运算判断每次模拟中系统是否失效。将每次模拟中的系统失效情况记为逻辑标量 $\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ ($f_i=1$ 失效,0正常),其中 f_i 表示第i次模拟中的系统失效情况。④指标计算:根据系统的失效情况,计算系统可靠性指标。用mean函数求系统失

效概率 p ,系统可靠性 $R = 1 - p$;用“std”函数求系统失效情况标准差 σ ,标准误差 $\delta = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$,可用可靠性和标准误差,构建系统可靠性置信区间,即 $R \pm \delta$ 。新能源场景中,结合温度、电流等在线监测数据可动态修正失效概率,为预测维护提供数据支撑^[4]。

4 实例分析

本研究以风电场升压站关键设备开展实例分析,该场景高湿、盐雾环境对电力电子设备稳定性要求更高。选取风电变流器、升压变压器及无功补偿装置为研究对象,结合设备结构、失效模式建立模型,依托历史数据和试验结果设定失效概率。通过蒙特卡罗模拟法模拟失效行为,结果如表3所示,为设备可靠性评估和维护策略提供量化依据和建议。

表3 电力电子设备可靠性评估结果

组件类别	失效概率/%	期望寿命/h	可靠性指标/%
风电变流器	3.2	50000	96.8
升压变压器	1.5	150000	98.5
无功补偿装置	2.1	75000	97.9
控制系统	1.8	100000	98.2
散热系统	1.3	80000	98.7

分析表明所采用方法可有效识别主要失效风险,为设备管理提供决策支持。评估结果表明,设备整体可靠性较高,但仍有提升期望寿命和降低失效概率的优化空间。结合智能监测手段(传感器+在线诊断),可修正失效概率,提升评估精度。

5 提高电力电子设备可靠性的措施

新能源输变电系统电力电子设备可靠性提升不仅依赖结构优化与元器件升级,更需结合智能化技术实现主动感知与预测性运维。

1) 优化设备设计

新能源场景工况特殊:风电场高盐雾、光伏电站昼夜温差大、储能系统频繁功率冲击,对设备设计要求更高。优化需兼顾电磁兼容性与环境防护:电磁层面采用差分走线、地平面分割减少干扰;结构层面,在电路板与功率模块表面增加防盐雾涂层,外壳用耐腐蚀合金及三防漆处理。结合热流场与电磁仿真工具,提前预测极端环境耦合效应与散热瓶颈,实现新能源工况专用化设计^[5]。

2) 选用高性能、高可靠性的元器件

面临高温、高湿及波动冲击等复杂工况,优先考虑碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)等新型宽禁带器件,

凭借高耐压、低损耗及耐高温特性提升逆变器、变流器和储能变换装置稳定性。结合新能源场站历史运行数据开展环境适应性测试与加速老化试验,建立元器件寿命数据库,通过在线诊断系统动态修正失效概率,实现元器件在极端环境下的可靠应用。

3) 智能散热与预测性冷却

设备在高温、强辐射及高功率冲击下易过热失效,散热系统智能化升级尤为关键。硬件采用高热材料、热管技术与CFD模拟优化翅片式散热器;控制层面部署多传感器,结合边缘计算实时采集运行数据,利用预测性控制算法提前识别温升趋势。

4) 构建智能监测与故障诊断系统

部署温度、电压等多类型传感器采集关键元件状态,边缘计算节点提取特征并标记异常,云平台结合AI模型跨场站深度学习与比对,精准识别高阻接触等早期隐患。诊断结果反馈至运维平台触发预测性维护,减少非计划停机。“传感器—边缘计算—AI诊断—维护决策”的智能监测闭环,赋予场站主动防御与自适应诊断能力,提升设备全寿命周期可靠性。

6 结语

本研究针对新能源输变电设备可靠性问题,结合风电场升压站案例识别高湿、盐雾及功率冲击下的失效风险,利用蒙特卡罗模拟量化评估。结果显示,环境因素对设备寿命影响显著。结合在线监测与数据驱动预测方法,可动态修正失效概率提升评估精度。通过优化设计、引入宽禁带器件、智能温控及AI诊断系统,可构建新能源场站智能化可靠性提升路径,为设备健康管理和系统稳定运行提供支撑。

参考文献

[1] 唐炬. 大规模新能源接入后输变电装备及系统运行安全问题[R].2019.
[2] 杨高峰, 胡文, 方钦, 等. 高比例新能源电力系统可靠性高效评估和薄弱环节辨识方法[J]. 电工电能新技术, 2024, 43 (4): 43-52.
[3] 杨超. 新能源与电力电子设备电力系统管理研究[J]. 电力设备管理, 2024 (1): 120-123.
[4] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (15): 4719-4731+中插1.
[5] 盐城电力设计院有限公司. 一种新能源输变电节能装置: CN202210064489.3[P].2022-05-27.