

高负荷条件下电气安装可靠性评估方法

张文斌, 李安强, 赵娟

(山东百聚建筑工程有限公司, 山东 泰安 271000)

摘要 基于高负荷条件下电气安装结构在热、电、力多应力叠加作用下呈现的快速退化特性, 构建由多维指标解析、概率统计建模与负荷驱动耦合计算组成的可靠性评估方法。通过分析温升、接触电阻与电动力等参数的动态演化, 建立失效概率推断模型, 并以典型配电场景开展时序仿真验证, 旨在为高负荷工况下电气安装结构的状态评估、寿命预测与运维策略制定提供技术参考。结果显示, 热应力贡献在高负载区间显著提升, 整体失效概率呈非线性跃迁特征。

关键词 高负荷条件; 电气安装; 可靠性评估; 应力耦合

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.036

0 引言

高负荷运行使电气装置长期处于高电流密度与快速升温状态, 热、电、力多应力叠加导致退化速率明显加快^[1]。定值化方法难以反映负荷波动引起的应力动态变化, 需以多维指标解析、概率量化与负荷驱动耦合计算构成统一评估体系。本研究围绕三类应力的联合表征与失效概率推断展开, 并结合典型场景验证其适用于高负荷工况的连续可靠性刻画能力, 为后续状态评估与运维策略设定提供依据。

1 高负荷条件下电气安装可靠性问题分析

高负荷运行使电气安装长期处于高电流密度状态, 导体温升按 I^2R 关系呈非线性增长, 接触界面微观凸点软化后导致接触电阻进一步攀升, 形成“温升—电阻”正反馈链条, 电缆接头温度在高载率条件下常超过 $95\text{ }^\circ\text{C}$, 绝缘耐压裕度显著压缩。大电流冲击产生的电动力与 I^2 成正比, 使母排产生瞬态位移并削弱紧固件预紧力, 若叠加负荷频繁波动形成循环应力, 则螺栓松动与金具疲劳成为主要隐患。绝缘系统方面, 热老化遵循 Arrhenius 规律, 温度每提升 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 会使寿命衰减约 50%, 高温引起的电场畸变又会推动局部放电幅值提升, 进一步加剧介质损伤^[2]。在此作用下, 常见失效包括接触点烧蚀、绝缘碳化、电缆护套龟裂、母排连接点松弛及断路器触头磨损, 其触发概率受温升速率、负荷波动幅度和界面初始状态共同影响, 需在可靠性评估中进行量化建模。

2 可靠性评估方法

2.1 多维解析指标构建

在界定高负荷条件下的主导应力后, 将热、电、机械三类量化参数组构为可计算的状态向量, 通过统一归一化规则形成可输入模型的特征集。温升 ΔT 取自接头与母排布点温度传感器, 按 1 s 周期采集并以滑动窗口计算梯度 dT/dt ; 电气侧采用在线接触电阻 R_c 与局部放电幅值 q , 分别通过四线法与超声传感器获取; 机械侧以螺栓预紧力损失率 η 和母排位移 δ 为核心指标, 利用应变计与位移编码器同步测量。各指标经量纲压缩后形成综合状态量 H , 计算式为:

$$H=w_1\Delta T+w_2R_c+w_3q+w_4\eta+w_5\delta \quad (1)$$

式(1)中, $w_1 \sim w_5$ 为基于历史工况分布的权重系数, 通过区间约束优化确定^[3]。

2.2 概率统计模型

基于综合状态量 H , 采用随机过程描述高负荷引起的参数波动特性, 将其转化为可计算的失效概率。首先以 1 min 分辨率构建 H 的时间序列, 对 ΔT 、 R_c 、 q 、 η 、 δ 等子量提取极值、均值与涨落特征, 采用偏最小二乘法消除多重共线性后输入寿命分布拟合器。各应力通道的退化速率以 Weibull 分布表征, 形状参数 k 由最大似然法求取, 尺度参数 λ 依据区间工况重采样得到。多应力间的相关性通过构建 Clayton-Copula 函数完成, 耦合系数 θ 取自 H 向量的 Spearman 秩相关系数回归结果^[4]。失效概率 P_f 由以下关系给出:

作者简介: 张文斌 (1974-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电气安装。

$$P_f = 1 - C[F_1(t), F_2(t), \dots, F_n(t)] \quad (2)$$

式(2)中, $C[\cdot]$ 为 Copula 联合分布函数, $F_n(t)$ 为第 n 类应力的边缘分布。该公式用于在指定运行时间窗口内计算高负荷应力叠加下的总体失效概率, 通过对 $F_n(t)$ 的参数更新可在不同负荷水平下生成对应的可靠性曲线^[5]。

2.3 负荷—应力耦合评估

在获得各应力通道的边缘分布后, 以实际负荷序列 $P(t)$ 作为驱动变量构建耦合求解流程^[6]。首先对 $P(t)$ 按 10 s 步长离散并输入导体电流模型得到瞬态电流 $I(t)$, 随后更新温升 $\Delta T(t) = k_1 I^2(t) R_c(t)$ 。接触电阻 $R_c(t)$ 依据界面退化速率与瞬态温度按指数递推式计算, 时间步间保持与 $\Delta T(t)$ 同步更新。电动力 $F(t) = k_2 I^2(t)$ 用于求解母排位移 $\delta(t)$, 并将 $\delta(t)$ 作为接触压力修正量作用于 $R_c(t)$, 形成电、热、力三通道的联动演化^[7]。局部放电幅值 $q(t)$ 按 $\Delta T(t)$ 及电场畸变量即时求取。上述量形成耦合应力向量 $S(t)$, 输入疲劳损伤模块并以 Miner 准则递推等效损伤 $D(t)$, 其表达式为:

$$D(t) = \sum_{i=1}^m \frac{n_i(t)}{N_i(S(t))} \quad (3)$$

式(3)中, $n_i(t)$ 为第 i 类应力在时刻 t 的循环数, $N_i(S(t))$ 为该应力幅对应的疲劳寿命。该结构支持在全时域内生成负荷扰动下的连续损伤序列。

2.4 不确定性处理策略

将负荷预测偏差、温度测量噪声及接触界面初始状态差异视为独立不确定源并进行参数区间化处理^[8]。负荷侧以历史 30 d 负荷序列构建置信区间, 上下边界按 95% 分位设定, 并在耦合模型中对 $P(t)$ 实施随机扰动注入; 温度测量侧采用零均值高斯噪声模拟传感器误差, 并以实时残差决定噪声方差更新, 保持与现场工况一致的统计结构; 接触界面状态以三类初始粗糙度等级离散

建模, 通过随机抽样生成 $R_c(t)$ 的初值集合。各不确定源在统一调度器内按时间步独立采样并驱动耦合链路迭代, 通过 1×10^4 次蒙特卡洛运行生成损伤分布区间。最终以分布的上置信边界作为输入, 构建不同载荷水平下的可靠性曲线, 为工程验证提供稳健的参数集合。

3 工程应用与验证

3.1 典型场景模拟

选取数据中心 10 kV 配电柜作为验证对象, 负载率在 0.65 ~ 1.00 区间接 5min 记录并输入求解链路, 导体电流 $I(t)$ 据此换算并驱动温升、接触电阻及局部放电的联合演化。如图 1 所示, 负荷在 0 ~ 24 h 呈峰谷分布, 09:00-12:00 与 20:00-23:00 负载率超过 0.92, 温升随之快速上升, 接头温度在负载率大于 0.95 时突破 96 °C。温升变化速率 dT/dt 在峰段分别达到 1.8 °C/min 与 1.5 °C/min, 对 $R_c(t)$ 的指数递推产生显著放大, 使末期值较初始增加约 38%。母排位移 $\delta(t)$ 在大电流冲击下出现三次突升, 最大 0.42 mm, 接触压力下降进一步提升 $R_c(t)$ 迭代结果, 强化热—力耦合特性。局部放电 $q(t)$ 在温升超过 90 °C 后产生阶梯式跃迁, 峰值提升约 22%。上述时序结果构成连续损伤轨迹集, 为后续失效概率计算提供完整输入。

3.2 性能指标分析

在获得全时域的损伤序列后, 将等效损伤 $D(t)$ 分解至热、电气、机械三类应力通道, 分别计算其对应的边缘失效概率并构建联合分布。如图 2 所示, 在负载率从 0.75 上升至 1.00 的过程中热应力主导性最为明显, 其失效概率贡献从 45% 提升至 63%, 对应 $\Delta T(t)$ 与 $R_c(t)$ 的同步加速特征; 电气应力贡献主要由局部放电跃迁驱动, 在负载率高于 0.9 后由 14% 上升至 22%, 与电场畸变与温升组合效应一致; 机械应力贡献受 I^2 驱动的电动力变化影响, 贡献率从 18% 升至 27%, 并在

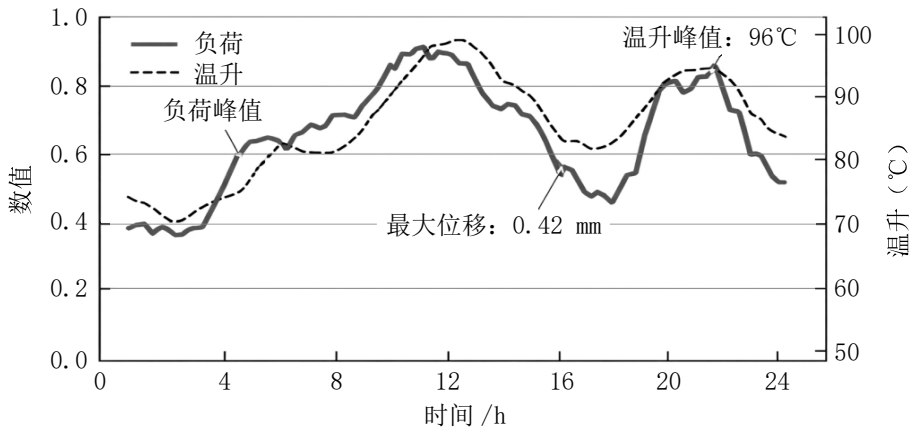


图 1 负荷—温升时序曲线图

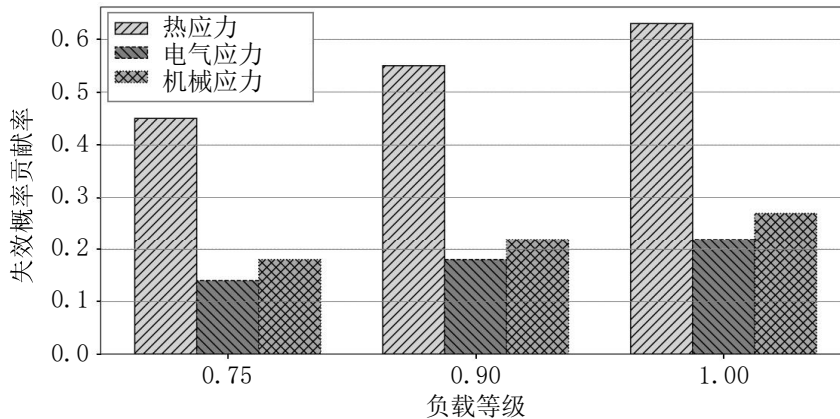


图2 多应力失效概率对比条形图

三次电流冲击段出现峰值。联合失效概率 P_f 由 Copula 结构输出, 在最高负载区间达到 1.8×10^2 , 较中负载区间提升约 2.6 倍。该结果体现出负荷驱动应力分布的非线性增强特征, 高负载区间的概率跃迁主要由热应力与机械应力共同作用所触发。

3.3 经济性评估

在失效概率与损伤序列获得后, 以对比表形式建立不同策略下的寿命与成本数据, 如表 1 所示, 通过将等效寿命、年均故障率及全寿命周期成本在传统安装策略与可靠性评估驱动策略之间进行差异化, 得到

表1 不同策略下的寿命与成本对比

指标	传统安装策略	可靠性评估驱动策略	差异
接头等效寿命 (年)	1.8	3.2	↑ 77.8%
年均故障率 (%)	4.5	1.6	↓ 64.4%
年均停运时长 (h)	12.4	4.1	↓ 66.9%
年均维护成本 (万元/年)	28	17	↓ 39.3%
全寿命周期成本 LCC (万元/10年)	260	190	↓ 26.9%
高负荷区段失效概率	1.8×10^2	6.9×10^2	↓ 61.7%

其在寿命延展、停运时长减少与维护成本削减方面的量化结果, 并可据此反推高负荷运行下的运维策略边界。

4 结束语

高负荷条件下电气安装体系的可靠性演化规律可通过多维指标解析、概率统计建模与负荷驱动的应力耦合机制实现定量刻画, 相关方法经典型场景验证后形成可用于工程决策的参数体系。后续工作将围绕复杂负荷波动下的多物理场联动特征、在线监测数据的动态校准策略及面向长周期退化过程的模型更新机制展开, 以进一步提升高负荷条件下电气装备的全寿命安全保障能力。

参考文献:

[1] 杜尊峰, 刘治余, 杨源, 等. 基于 CREAM 方法的海上风机安装人因可靠性评估 [J]. 中国海洋平台, 2024, 39(03): 27-34.

[2] 张华龙, 郑正国, 李忠为. 基于 ISO13849 的核电数控桥式起重机电气控制回路的可靠性分析 [J]. 装备制造技术, 2022(09):128-132.

[3] 金国喜, 韩丽冰, 孙辉. 船舶电力系统调试负荷测试评估研究 [J]. 船舶物资与市场, 2025, 33(03):46-48.

[4] 郑锋. 基于 S-LPIM 的复杂机械设备可靠性评估方法 [J]. 设备管理与维修, 2024(09):21-26.

[5] 郑兰疆, 王广金, 周天. 核电站电气贯穿件导体组件老化寿命评估研究 [J]. 中国测试, 2021, 47(06):156-160.

[6] 廖恺, 孟旭, 丛楨, 等. FMEA 在风电安装船绕桩起重机电控系统的应用 [J]. 船舶工程, 2024, 46(S01):531-535, 542.

[7] 严彭, 许悦, 季定胜. 发动机附件可靠性试验谱设计方法研究 [J]. 环境技术, 2024, 42(11):44-48, 54.

[8] 刘盼. 机电设备电气安装常见故障及应对措施 [J]. 中国厨卫, 2022(01):148-150.