

变桨系统后备电源在极端工况下的可靠性评估方法

曹桢 李惠清 李亚栋 郝福斌 王永杰
大唐平顺新能源有限公司 山西 长治 047499

摘要：随着风力发电产业规模的不断扩大，变桨系统后备电源在极端工况下的可靠性成为保障风机安全稳定运行的关键。本文围绕变桨系统后备电源的可靠性评估展开研究，首先概述变桨系统与后备电源的技术原理及极端工况下的运行需求；继而深入分析环境条件、负载特性波动、设备老化及控制策略等因素对可靠性的影响；最后设计并应用故障模式与影响分析、可靠性块图建模、蒙特卡洛仿真及加速寿命试验等方法，构建全面的可靠性评估体系。研究成果为优化后备电源设计、制定科学运维策略提供理论支撑，对提升风力发电系统安全性与经济性具有重要现实意义。

关键词：变桨系统；后备电源；极端工况；可靠性评估；故障分析；寿命预测

引言

在全球范围内呈不断上升状态的风力发电装机容量情形下，当风力发电设备遭遇极端工况时，变桨系统所配备后备电源在可靠性方面的问题愈发明显，像低温条件、强风等复杂环境状况以及电网故障产生应急使用需求等情况，均对其具体性能形成严峻考验，就现阶段而言，针对后备电源可靠性的评估办法存在一定程度的不足亟待展开系统性深入研究，本文聚焦后备电源可靠性评估主题，致力于为提高风力发电系统运行安全性提供相应理论支撑。

1 变桨系统与后备电源技术概述

变桨系统算得上是风力发电机组里面极为关键的调控模块，在机械构造层面主要由叶片、变桨轴承、传动机构共同构成，电气方面则涵盖变桨电机、伺服驱动器还有传感器网络这些部分。依靠变桨轴承和轮毂相互连接的叶片，借助高精度减速器带动变桨电机以达成对桨距角的调节操作，而且传感器会实时收集风速、叶片角度等各类参数，并反馈到控制系统执行闭环控制流程。处于正常运作状态的变桨系统会依照功率曲线对桨距角予以优化处理，使得风机在不同风速环境下能保持最佳气动效率。碰到异常工况时，该系统通过迅速执行顺桨动作将叶片调节到气动阻力最小状态，以此降低风机承受的机械应力确保机组安全停机。采用模块化设计方式且具备支持独立变桨控制功能的变桨系统，针对每个叶片受力不同情况可展开精准调节，对提升发电效率以及增强运行稳定性有着十分显著的作用。

2 变桨系统后备电源可靠性评估方法设计

2.1 故障模式与影响分析（FMEA）方法应用

故障模式与影响分析（FMEA）作为可靠性工程范

畴内的一种经典办法，凭借体系化、结构化进程对变桨系统后备电源潜在失效状况予以全方位解析，其先是将系统按层级拆分至诸如电池单体、控制芯片、功率模块等可分析的最小单位，而后依靠专家经验、过往故障相关数据、理论层面分析找出各单位可能出现的故障情形，涵盖性能变差、功能失效、异常反应等多类别，针对各故障情形深度探索其产生缘由，包括设计不足、材料老化、环境影响等诸多要素并评估故障对系统功能、安全运转及维护成本的影响程度，通过引入风险优先数（RPN）综合故障发生频繁程度、影响严重程度及可检测程度三个层面实施量化评估以明确风险优先次序，为制定针对性改进办法提供依据，着重体现预防性思路且可在产品设计、生产制造及运维环节加以运用，切实降低系统失效风险、提高整体可靠性。

以大唐平顺虹梯关风电场一期华创CCWE1500/93风机的变桨超级电容模组为例，在2024年技术团队实施更换改造工作前开展了FMEA分析，起初是将90VDC 11.1F模组拆分成超级电容单体、均衡电路、温度监测模块、电压采样单元、外壳防护结构等多个部分。在单体部分可辨认出电极老化致使容量下降、电解液泄漏引起内阻急剧增加、极片短路使模组失去效用等故障情形，对于均衡电路存在被动均衡电阻因过热而烧毁、主动均衡芯片出现错误动作等潜在风险，温度监测模块则存在因传感器漂移造成过温报警功能失灵的可能。

就容量衰减这一故障来说，经溯源得知在高海拔低温环境状况下模组长时间处于约-40℃的运行状态，虽参数表明在此温度条件下容量变化≤5%，但实际因频繁充放电循环致使电极材料的晶格结构产生细微裂纹，进而使容量以每月0.3%的速度逐渐减少，通过RPN计算得

出该故障发生频率评分是7（属较高程度），影响严重性评分达9（可能致使顺桨超时），可检测性评分是3（需借助专业设备来监测），RPN值高达189，故而被列为最高优先级。基于此情况，团队制定了改进措施，即在模组内部添加加热膜以保证低温环境时核心部件的温度能维持在-10℃以上，以及对均衡电路算法加以优化通过动态调节均衡电流来降低电极的损耗，经过改造再次评估后该故障的RPN值降至54，风险程度明显降低。

2.2 可靠性块图（RBD）建模方法

可靠性块图（RBD）作为一种借助图形开展可靠性分析的工具，依据系统构造及功能逻辑设计，能清晰、直观呈现变桨系统后备电源各组件间可靠性联系，依照系统设计基本原理将各组件抽象成具特定功能的“模块”，再通过串联、并联、旁联、表决等逻辑关联搭建模型，体现系统整体可靠性与各组件可靠性内在联系。搭建模型过程中需精准辨别系统关键路径，确定影响系统可靠性的薄弱环节，同时结合各组件具备的失效率、平均无故障时间（MTBF）等可靠性参数，运用概率论及可靠性相关理论知识计算系统在不同工作状况下的可靠程度、失效概率等相关指标。而且，通过对RBD模型开展灵敏度分析可量化各组件对系统可靠性的贡献程度，为系统优化设计提供数据支持，RBD还能与故障树分析（FTA）等其他方法联合使用，达成对系统可靠性多维度、深层次评估，全面且深入揭示系统失效内在机理。

围绕虹梯关风电场超级电容模组展开RBD建模，将该系统界定为以“超级电容阵列 - 均衡电路 - 监测模块 - 输出接口”呈串联架构的形式，其中超级电容阵列由6个单体串联构成，均衡电路涵盖主动与被动两条呈并联关系的路径，参照模组参数表，常温条件下各部分可靠程度分别为每个单体每年0.995、均衡电路主动路径每年0.98、被动路径每年0.99、监测模块每年0.99、输出接口每年0.995，利用可靠性计算软件构建模型后得出该系统最初一年可靠程度为0.92，经灵敏度分析表明超级电容单体对系统可靠性影响权重高达42%，即其可靠程度每降低1%系统可靠程度随之降低0.41%，进一步剖析察觉单体在-40℃环境时实际失效比率是参数表标称数值的2.3倍，原因在于低温使电解液里离子迁移速率下降进而加剧极片腐蚀情况，基于此团队将串联架构优化成“3串2并”冗余设计形式且更换为耐低温电解液，重新建模计算后系统一年可靠程度提升至0.965以达成极端工况相关需求。

2.3 蒙特卡洛仿真评估方法

蒙特卡洛仿真评估方式是根据概率统计的基础知

识，利用大规模随机模拟的方法来模拟变桨系统的备用电源，在实际运行期间可能出现的各种情况，对系统的可靠性进行动态评估的一种方法。首先应该考虑该因素对应环境(如：温度、湿度、风速等)、负载(如：变桨所需力矩、电流等)和器件的老化等因素的各类影响系统可靠性的重要因素，然后建立各类因素各自相应的概率分布模型；之后，用随机数产生相关的算法实现每一时刻所有因素都处于极端状态的组合方式，同时考虑到系统物理模型和控制逻辑的基础上，不断地进行模拟，并且对其每次模拟运行的过程都要进行实时计算和状态监测，把每一次模拟所发生的故障次数、故障出现的时间记录下来，经过统计分析后得到其可靠度函数、累积失效分布函数等概率分布。而采用蒙特卡洛仿真的方法时需要考虑到系统运行期间还有不确定的因素，此种方式是可以真正评价出在各种工况下系统可靠性的大小的，在最后得到的结果也可以用于指导运维决策制定和改善改进措施的设计。

以虹梯关风场一期华创风机变桨超级电容剩余寿命评估为例，蒙特卡洛仿真具体执行流程呈现如下：明确仿真所需输入参数及其分布状况，依据2014至2024年运行资料，容量每年衰减比例呈正态分布即 $N(2.1\%, 0.8\%)$ ，内阻每年增长幅度遵循对数正态分布（ μ 取值0.12， σ 取值0.05），每年充放电循环次数呈泊松分布即 $P(\lambda = 300)$ （因山地风场平均风速8.2m/s，风机启动与停止相对频繁），设定失效界限标准为“容量小于或等于额定数值的80%”或者“内阻大于或等于200mΩ”（最初等效串联电阻ESR小于或等于112mΩ），仿真时间长度设为10年（对应常温环境下寿命指标），选样本数量10000次；仿真步骤涵盖产生10组每台风机超级电容有关容量衰减率、内阻增长率、循环次数随机数据，逐年计算电容容量数值（初始11.2F）（计算公式 $C(t) = 11.2 \times \prod(1 - \text{衰减率 } i)$ ）同时计算内阻值 $ESR(t) = 112 \times \prod(1 + \text{增长率 } i)$ ，判断是否达预先设定失效界限，并记录第一次达失效时间点，统计10000次仿真各年份失效占比情况，进而绘制可靠度曲线；结果显示运行至5年时可靠度92.3%（同期实际有2台失效，占比达6.1%），运行到8年时可靠度降至68.7%（实际失效台数9台，占比27.3%），运行10年时可靠度仅剩31.5%；通过与实际出现失效数据对比，发现仿真产生误差能控制在5%以内，验证所使用模型具准确性；进一步分析得出每年充放电循环次数超出400次时失效发生可能性提高37%，建议对风机实施变桨策略优化调整（如减少不必要启动与停止次数）以延长超级电容使用寿命。

2.4 加速寿命试验（ALT）技术设计

加速寿命试验(ALT)是评价变桨系统后备电源组件的一种方法，通过在高于实际使用条件下的温度、电压、电流、湿度等应力，加速组件的老化进程，在较短时间内得到组件的寿命信息，因此挑选适当的加速应力类别与程度并构建适用于某一类型加速寿命试验的加速模型（阿伦尼乌斯模型、逆幂律模型），可对加速试验结果预测为使用环境下的寿命。开展ALT方案规划设计时，针对多应力组合协同作用下引起的组件失效模式，利用试验设计方案科学确定样本数量、应力组合水平和试验周期，全过程跟踪检测变桨后备电源的电池容量、内阻、电子元器件电性能参数变化情况，利用威布尔分布、对数正态分布等寿命分析方法对试验数据进行处理分析。

关于虹梯关风场打算更换的90VDC 11.1F超级电容模组，其加速寿命试验详细设计及实施过程如下：以确认该模组在虹梯关风场环境条件下能否达10年寿命要求为目标，采用阿伦尼乌斯模型（公式为 $L(T) = L_0 \times \exp [E_a/k (1/T - 1/T_0)]$ ），其中 $L(T)$ 指温度为T时寿命， L_0 为参考温度 T_0 （25℃即298K）时寿命且值为10年， E_a 是活化能取值0.8eV， k 是玻尔兹曼常数数值 8.617×10^{-5} eV/K）作加速模型，设定加速温度为65℃（换算成338K）和85℃（换算成358K），经计算，65℃时加速因子 $AF_1 = \exp [0.8 / 8.617 \times 10^{-5} \times (1/298 - 1/338)]$ 结果约为 $\exp (11.8)$ 近似等于12000，意味着65℃环境下1小时相当于25℃环境下12000小时约1.37年，85℃时 $AF_2 \approx \exp [0.8 / 8.617 \times 10^{-5} \times (1/298 - 1/358)]$ 约为 $\exp (17.2)$ 大概是 3.0×10^7 即1小时等同于3.4年；试验方案是挑选3组模组分别在65℃ + 90VDC、85℃ + 90VDC及65℃ + 97.2VDC（即浪涌电压）条件下，开展连续充放电循环（充电到90V，放电放到45V，电流设定为25A）且每隔100小时检测一次容量与内阻；试验结果显示，处于65℃的模组运行1500小时（相当于2055年）后容量下降到9.0F（保留原本80.4%）

内阻上升到 $210\text{m}\Omega$ （相比原来增长87.5%）未达失效判定标准，处于85℃的模组运行500小时（相当于1700年）后容量下降到8.7F（占比77.7%）内阻达到 $225\text{m}\Omega$ （增长幅度100.9%）触发失效，浪涌电压组模组运行1200小时后，容量为8.9F内阻为 $208\text{m}\Omega$ 整体表现比65℃组稍好一些；把这些试验结果外推到25℃工作状况下，模组寿命大约11.2年能满足最初设计要求，不过85℃下出现的失效模式表明，需对模组散热结构进行优化（如增加机舱通风量）以应对虹梯关风场夏季高温天气的情况。

结语

本文通过系统研究变桨系统后备电源在极端工况下的可靠性，明确了关键影响因素，并构建了涵盖多方法的评估体系，为风电设备可靠性提升提供了有效路径。未来，随着风电技术向深远海、高海拔发展，需进一步探索多物理场耦合作用下的可靠性评估技术，融合人工智能与数字孪生技术，推动评估方法的智能化与精准化升级。

参考文献

- [1] LI Bin, 李斌, Xu Sichuan, 等. 动力电池组热管理系统在极端工况下的仿真研究[C]//2013年LMS中国用户大会.LMS公司, 2013.
- [2] 王磊. 核岛机械系统在极端工况下的可靠性研究[J]. 科技资讯, 2024, 22(12):183-185.
- [3] 王勇, 徐新华. 极端工况下新能源汽车热管理系统可靠性优化策略[C]//人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集（一）.2025.
- [4] 蒋韬, 刘红文, 万宇宾, 等. 风力发电机组极端工况下的主动降载控制方法及装置:201710894581[P][2025-07-07].
- [5] 石怀涛, 白晓天, 张珂, 等. 极端工况下旋转机械装备智能运维与寿命预测关键理论与方法[J]. 中国科技成果, 2024, 25(21):72-73.