

## 电力技术

## 风力发电可靠性评估研究

高坡

国华(山西)新能源有限公司 山西太原 030000

【摘要】风力发电的特点是随机性、间歇性和波动性，风力发电系统容易受到外部环境和故障的影响。电力供应节点影响风力发电系统的可靠性，节点故障导致风力发电系统故障，导致人力、物力和财力资源的损失。由于恶劣运行条件，风力发电的失败率仍然很高。因此，在寻求发电时有必要考虑发电系统的可靠性。

【关键词】风力发电系统；可靠性建模；评估；维护策略；

Reliability assessment study of wind power generation

Gao Po

Guohua (Shanxi) New Energy Co., LTD., Shanxi Taiyuan 030000

【Abstract】The characteristics of wind power generation are randomness, intermittency, and volatility, and the wind power generation system is easily affected by external environment and faults. The power supply nodes affect the reliability of the wind power generation system, and node failures lead to wind power generation system failures, resulting in the loss of human, material, and financial resources. Due to harsh operating conditions, the failure rate of wind power generation remains high. Therefore, it is necessary to consider the reliability of the power generation system when seeking power generation.

【Key words】wind power generation system; Reliability modeling; assessment; Maintenance strategy;

随着中国风力发电技术的不断进步，风力发电机在实际生产中的应用越来越普遍。随着风力发电机组装能力的不断提高，风力发电的结构正变得越来越复杂。就目前中国使用的风力设备而言维护技术还不成熟。

## 一、研究背景

风能是一种可再生和清洁的自然能源。为了防止全球变暖和减少二氧化碳排放，世界各国政府正在放弃化石燃料的使用。由于各国的支持、技术进步和商业模式的更新，风能正在迅速发展。尽管风力发电技术不断发展，但风力发电系统仍有许多问题需要解决，如高回收率、复杂的维护过程、不稳定的电力质量、噪音污染、环境污染等。其中，风力发电的故障和停止降低了它们的可靠性和可用性。目前，中国风力发电机组装能力正在迅速增长，大型数百兆瓦的风电场正在迅速发展。由于风力发电运行的特殊性可靠性对风力发电行业的发展至关重要，也是影响风力发电厂成功运行的关键因素。当出现故障时就会影响发电造成经济损失。因此及时全面准确地监测和评估风力发电的运行状况和可靠性，有效地预防故障及其后果，对于优化风力发电厂的运行和维护策略，实现风力发电的安全高效运行至关重要。

## 二、风力发电可靠性分析研究

可靠性分析包括故障和影响分析、预危害分析和故障树分析。定量可靠性分析通常包括概率可靠性分析、可靠性建模和分布以及事件树分析。预危害分析也称为预危害分析，其主要功能是识别与系统相关的重大危害。找出危险的原因；可靠性分析，以确定危险水平，并实施技术和管理措施，以消除或控制危险。事件树分析是一种归纳推理方法，通常用于安全工程系统，它起源于决策树分析。这是一种通过按事故发展的时间顺序从最初事件中推断可能后果来识别危险的方法。这种方法使用一个称为事件树的树来说明系统中可能发生的事与导致事故的各种原因之间的逻辑联系。通过对事件树的定性和定量分析为确定安全措施提供可靠的基础，以实现事故的预测和预防目标。

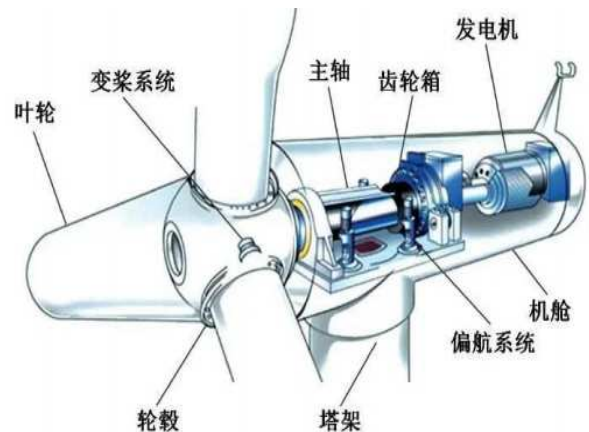


图1 风机主要子系统结构图

### 三、风力发电可靠性模型

大型风力发电机组子系统介绍。本文以发电机 A 发电机风场的双馈式风力发电机组为研究对象,介绍风力发电机及子系统的基础知识。图 1 展示了风力发电机的主要子系统和部件。

风电机组可靠性分析基本模型。包括以下六个方面:(1) 发电机确定设备运行可靠性的要求以及评价可靠性的对应指标;(2) 发电机明确设备的结构和功能划分,及设备需完成这个任务内容;(3) 发电机根据前面可靠性要求和功能任务,针对不同部件实际建立可靠性分析模型;(4) 发电机按照设备结构类型收集运行数据,尤其重点收集设备故障相关的信息;(5) 发电机对收集到的数据进行预处理并采取合适的可靠性指标进行评估;(6) 发电机得到设备的可靠性评估结论,并找到影响设备可靠性的关键因素;针对不同的设备运行环境及评价要求,应使用不同的量化指标来开展设备的可靠性评价。如通过设备可靠度指标来反映设备统计期内完成规定功能的概率;对于一些关键部件的可靠性可以用失效率、使用寿命以及平均无故障时间等指标来反映。

### 四、风力发电可靠性评估方法

目前有两种主要方法来评估风力发电机的可靠性。第一种方法是手动设置某些可靠性评估参数的最小值,以确定风力发电机的运行状态是否满足预定义的要求。低于目标的风机将被指定为关键的校准和维护设备;第二种方法是选择几个可靠性评估指标,对单个指标进行分类,根据专家的经验确定指标的重要性,并根据风机的性能计算每个指标的权重。每个指标的分类结果乘以该指标的权重,得到一个可靠性估计。发电机是风机发电机组中最重要的部件。一般发电机由转子、定子及发电机轴承及部分构成。由于机舱内运行环境恶劣,高温、粉尘及振动等,且发电机长时间在高转速下运行,导致发电机也会存在各种故障模式。但由于当前发电机技术比较成熟,结构简单,且大部分发电机已开发出免维护系统,所以整体故障率不是很高。支撑系统结构简单,故障模式也比较单一,外部环境如暴风雨、强风、雷击等恶劣环境造成的塔架倒塌概率最高,风暴、强风是塔身安全的主要威胁。因此,需要完善的天气预报和应急计划来减少损失。

在其使用寿命内,风机是可再生系统,不同的维护方法和策略对机组的可靠性有不同的影响。目前,中国风机的维护主要采用补救维护和预防性维护相结合的方式。根据维修的内容和数量,调整维修通常使用立即故障排除技术将机组恢复到故障前的性能水平,这是最小维修策略的一部分。根据风电场运行的实际情况,利用数据在机组运行过程中选择输出功率、风速、天气等测量,当场测量机组功率曲线。即

使您可以按照标准要求安装风力塔和其他设施,由于风力发电厂机组的广泛分布,考虑到风力发电厂的效益,机组之间的交互可能无法满足既定的测试条件。在单元运行期间,系统记录风速、气压、环境温度和输出功率等信号并给出 10 分钟内数据的统计平均值。

为了提高分析结果的可靠性,所使用的分析数据必须在设备正常运行时收集,并且不能损坏。因此以下情况下的数据应被删除。(1) 除风速外,外部条件超过风力发电机的工作范围;(2) 风机故障导致停止;(3) 测试或维护时手动关闭;(4) 测量仪器的故障或退化。在商业风机交易合同中,设备性能验收标准通常有两个:1) 机组功率曲线必须大于制造商承诺的功率曲线的 95%;2) 在保修期内,机组的平均利用率应高于 95%。考虑到实际操作过程的不确定性,机组在不同风速条件下的输出功率被认为是随机数。风电场的实践表明,高可靠性的机组具有低失败率、易于维护和高性能的特点。可用平均指数通常用于评估风力发电机的可靠性,但它往往不能准确反映可靠性水平;在生产实践中可靠性水平和不明确之间没有明确的界限。因此,以混合集理论为基础,利用机组运行信息,探索了多指标可靠性的混合综合评估方法,为评估并网可靠性提供了理论基础。

权重的确定是直接影响评估结果的混合评估方法的一个关键步骤。通常采用直接压力法或专家评分法,根据权重的重要性将权重分配给不同的指标。然而由于专家的知识理解不同,他们对影响因素的重要性的看法不同,所获得的权重往往包括主观因素,而主观因素反过来又影响评估结果。权重的大小只取决于这些指标的变化程度。可变性越高,权重越大,可以客观地区分指标之间的差异。虽然电力对指标的重要性不敏感,但它不能反映某一指标在整个指标体系中的重要性,也不能帮助监测关键指标。本部分结合了称重法和专家评估法来确定权重的优势,以构建复合权重减少评估过程中专家的主观因素,以及称重法对指标重要性的不敏感性,使块可靠性评估的结果更加合理。机组章根据性能和运营数据的使用和故障信息,使用可靠性理论分析,研究分析方法和评估全面可靠的风力发电机只要有足够的数据:可以有效利用未使用的示例数据开现场操作简单、可行的,适用风力发电的可靠性。

### 五、基于可靠性的风力发电运维策略

以可靠性为中心的运维方式(RCM)是一种设备维修决策方法,以设备故障模式分析入手,综合考虑设备故障模式对应的失效特征,以及对整个设备系统的影响程度,从而科学合理的制定有针对性的设备运维策略。目前大部分风电场的运维策略时根据以往的经验判断和制定一个对应确定寿命区间的运维计划,并按照此计划开展定期的检修维护工作,无论风电机组当前运行状况如何,是否出现异常,都必

须按照事先制定的检修维护计划时间点开展相应的运维工作。这种工作方式在风电场运行前期,由于风机各部件工作比较稳定,一般没有出现老化、腐蚀等现象,所以运维效果比较好。但随着风电场内风机持续运行,风机的工况也在不断变化,甚至有些风机在出现故障后没有得到及时的维护,如果依然按照之前的运维策略进行工作,就会造成设备的故障状态和特性与制定的维护计划工作时间点难以对应的情况,风机故障率也会明显提高。另外,随着风电技术的持续发展,功率更大,结构更为复杂的风电机组也开始运行,如果依然按照之前的运维策略进行维护,也会导致维修计划和设备实际状态不匹配的情况,即所谓的“欠维护”和“过维护”,造成不必要的电量损失和成本浪费。

预防性维护是一种维护活动,主要是在设备发生故障前进行的,以保持设备处于良好的状态。这种类型的维护活动通常包括润滑、清洗调整、检查拆卸更换等。为了确保设备在故障发生前有时间采取某些修复措施,提前防止设备故障的风险。预防性维护主要是为了减少在设备完成后发生故障和危险时的重大经济损失。预防性维护策略被广泛认为是解决系统故障和降低维护成本的有效方法。预防性服务频率的增加降低了生产效率,反之亦然,提高了生产效率。因此,预防性护理应在明确的时间间隔内进行。在充分了解设备故障的基础上,有必要按照规定的时间间隔或考虑到累积的工作时间进行计划的维修。如果设备处于一定的状态,进行计划维修的条件是设备已明确分析了正常的磨损期,设备的故障期之间有明确的联系,设备的大部分部件可以在预期的时间内工作。在发生故障时,可以通过定期维护及时改进,有效地减少工作重复。

风机运维策略概述。风力发电机组的运维策略是建立在各系统及设备的重要度分析的基础上,并结合故障后果性质及影响情况进行选择和确定的。一般风电场的运维策略分为预防性维护和故障性维护。想要确定合理的运维策略和周期,就要掌握风电机组及零部件的失效率分布,以及失效率随时间变化的曲线。在得到了零部件失效率的情况下,确定合理的维护周期,才能提高零部件的可靠性和利用率,同时保证风电机组的正常运行,从而降低运维成本。预防性维护包括日常巡检和周期性定检,而故障性维护是指当风机子系统或部件出现故障时,在处理故障的同时,对该故障可能产生影响的系统或部件单独进行额外的检查和维护。风机故障模式和影响分析结果以及基于故障树分析的失效率统计可

以为风电场风机的运维策略提供依据。故障风险程度(RPN)可以判断故障模式失效的影响,从而判断故障模式的重要度及维修成本;而通过各子系统的失效率可以判断维护周期,估算平均故障间隔,从而制定合理的运维方式。运维策略判断依据如表 1 发电机所示:在制定出维护策略模型后,还需要根据系统故障分布制定合理的维护方案。首先根据风电机组的运维记录和系统故障率分布,确定合理的维护对象和维护时长,结合维护人员人数和天气情况等客观因素,制定合理的运维方案。

表 1 风机运维策略判断依据

重要度	重要		不重要
平均故障间隔	长		短
维护成本	费用高	费用低	
失效形式	运维策略		
明显损耗	定期	视情	故障性维护
明显损耗	定期	视情	故障性维护
一定损耗	视情		改进 故障性维护
随机故障	视情		改进 故障性维护
早期故障	视情		改进 故障性维护

未来在风电机组故障模式和影响分析方面,随着风机功率及新技术的不断变化,对设备的故障模式和种类的分类还需要进行细化和升级,从而得到更为准确的故障模式描述,为后续计算故障风险等级提供更好的依据。在对风电机组故障树分析方面,随着风电行业的发展,各个零部件的稳定性也有了相应的提高,目前应用的失效率数据也会应该随之不断更新,所以未来风机子系统失效率也会有相应的变化。本文中所提出的运维策略目前只有在一个风场中进行实际应用验证,且只针对单一机型分析优化,所以缺乏更多的实践验证数据的支撑,希望后续能有更多的机会在其它项目中进行实施,不断的收集风机运行数据和故障数据,从而不断改进本文中提出的运维策略,更好的应用于实际的工作中。

## 本文总结

风力发电是复杂的系统,结合了具有不同故障模式和工作条件的机械和电气组件。通过对风力发电可靠性的分析,有效提高了风力发电运行和维护周期的准确性,为进一步优化风力发电厂运行和维护战略提供了理论和统计基础,为风力发电领域的实际应用奠定了坚实的基础。

## 参考文献

- [1]王可芳.兆瓦风力发电机系统可靠性设计理论研究[M].节能, 2023, (11): 21-24.
- [2]郭汉山.风力机可靠性工程[M].北京:化学工业出版社, 2023: 215-221.
- [3]李丹焰, 纪卓尚.基于模糊集理论事件树分析方法在风险分析中应用[J].大连理工大学学报, 2023: 97-100.