

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240793

大规模风电机群服役质量调控方法研究综述

黄晟^{1,2} 凌吉莉^{1,2} 魏娟^{1,2} 秦国军^{1,2} 黄守道^{1,2}

(1. 湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082

2. 海上风力发电装备与风能高效利用全国重点实验室 长沙 410082)

摘要 大力发展风电是构建新型电力系统和保障国家能源安全的重要举措,风电机群高性能服役是实现国家“双碳”战略目标的重要保障。随着单机容量和装机规模持续增大,风况、海况等复杂环境使大规模风电机群服役性能-安全运行能力-发电效益之间的协同优化难度增加,机组安全准确预警与服役质量调控面临严峻挑战。为此,该文主要针对风电机群服役质量动态调控需求,首先,从关键部件层面论述齿轮箱、变桨系统、变流器、发电机和叶片的故障诊断方法,以及齿轮箱和变流器的可靠性分析方法,在此基础上,对各种方法的优缺点进行梳理与比较;然后,就健康度、环境因素对单机服役质量的影响展开分析,从高品质发电、维保优化和尾流控制对机群服役质量影响展开论述;最后,对未来风电机群服役质量调控的发展趋势及潜在的研究热点进行探讨与预测,旨在为提升风电机群的服役性能和促进风电产业的健康可持续发展提供理论借鉴。

关键词: 风力发电 风电机群 风电机组 服役质量 动态调控

中图分类号: TM614

0 引言

大规模发展风电是新能源开发和利用的重大需求,是实现我国“双碳”战略目标的关键支撑^[1]。根据国家能源局数据,截至2023年底,我国风电累计装机容量达4.4亿kW,同比增长15%,其中陆上风电3.68亿kW,海上风电3189万kW。预计未来五年,平均每年风电新增装机容量将达到136GW,实现15%的年复合增长率^[2-3]。大规模发展风电已成为我国抢占新一轮全球能源变革和经济科技竞争的制高点。

随着风电机组装机容量的增长,冲击风况、极端海况等复杂自然条件及电网故障工况给风电高效运维带来诸多挑战。虽然我国风电机组设计技术已从逐渐并跑到领跑世界先进水平,但在机组特别是机群服役质量评估和运维优化的关键技术和标准方面明显不能完全满足实际需求。随着风电机群规模

的不断增长,特别是海上风电场的快速建设,服役全周期质量与服役效能评估及调控,将在降低运维成本、提高发电效率、优化新机型设计和提高全系统高质量稳定发展中有着举足轻重的地位。

在风电机群服役质量的调控方面,国内外对风电场调度管理比较重视,相关企业开展了质量监管维护平台和调度系统的研发,国外公司如丹麦维斯塔斯公司研发了维斯塔斯托管式运维服务平台;西门子公司研发了风电齿轮箱测试台,集成了故障分析与诊断模块;瑞典SKF公司研发了WindCon监测系统与WindLub系统用于监测和诊断关键部件的剩余使用寿命;德国Wind Guard公司研发了Wind Guard WONDER 3.0软件用于风电场及可再生能源系统的运维管理、数据处理和真实性检查、基于时间及发电量损失的风电机组可利用率评估、发电量长期相关性分析、故障后维护时间统计分析等。国内的主要研究机构如国家电网公司研发了新能源消纳评估与并网稳定分析一体化仿真平台、新能源发电功率预测系统以及新能源调度计划系统等;金风科技股份有限公司研发了满足发电企业分散式、集中式电场监控、远程监视服务等多种应用场景的新能源场站中央监控系统用于实现发电量、可利用率、

国家重点研究计划(2022YFF0608700)、国家自然科学基金(52207050)和中央高校基本科研业务费专项资金(531118010920)资助项目。

收稿日期 2024-05-15 改稿日期 2024-07-31

损失电量、可靠性、故障状态等运营指标的量化管理；龙源电力集团有限公司研发了新能源安全生产运营监控中心系统、新能源生产管理系统等用于风电机组智能诊断和运维。

风电机组服役质量^[4]根据关键部件、机组、机群的不同范围研究的范畴不同，本文对关键部件和机组主要就大部件的健康情况、故障诊断、部件与整机可靠性以及环境友好性等方面展开研究；对于风电机组的服役质量涉及电能品质、运行维护策略、尾流控制策略等。

风电机组群在服役后结构逐渐退化，出现故障及服役质量下降问题，服役质量动态调控通过关键部件故障诊断、机组健康度评估、电能品质以及运行维护等方式进行动态调整和辅助决策，以提高机群服役质量、降低运维费用、提升服役效能。

(1) 机组关键部件层面。机组关键部件在“电-磁-热-流体”多物理场耦合作用下，容易导致关键部件寿命加速损耗，因此服役质量调控的难点之一在于对关键部件故障诊断的准确性。

(2) 风电机组层面。机组服役环境通常较为恶劣，受风浪流、海拔、温度等环境因素的影响，机组的健康度随着服役时间的推移而下降，因此服役质量调控的难点之二在于提升风电机组的环境友好性以及对风电机组健康度的准确评估；机组参与系统调频时是一个多机协同工作的复杂过程，涉及机组的调频能力与机组间的协调控制，同时不同的调频策略适应的工况不同，服役质量调控的难点之三在于在兼顾风电机组服役质量调控目标的基础上，制定参与电力系统频率调节的策略。

(3) 风电机组群层面。随着风电机组规模的扩大和风电装机容量的增加，尾流效应、故障工况以及多机协调控制成为影响风电机组服役质量调控的关键问题，因此服役质量调控的难点之四在于研究面向发电量最大、载荷最小的短期服役质量动态调控优化模型与多级容错控制策略；机群运维策略的制定是一个多维、强耦合的优化问题，需同时考虑运维成本、运行效果以及风电运维资源的调控，但是由于风能的高随机性以及低可及性，风电机组群的维护需求随风机状态特征的变化而变化，因此服役质量调控的难点之五在于抽取与分析基于多工况多维的风电运维数据，建立面向运维的风电机组服役质量调控模型。

本文按照关键部件-风电机组-风电机组群的层次化思路，深入分析大规模风电场服役质量的影响因

素，创新点在于：

(1) 首先，对风电机组关键部件的状态监测与故障诊断、可靠性评估的优缺点进行梳理和比较，研究其服役质量调控现状；其次，针对风电机组健康度、腐蚀环境以及雷暴天气对风电机组服役质量的影响进行阐述，归纳分析风电机组调频策略的特性对服役质量的影响；最后，针对影响风电机组服役质量的因素，剖析了电压控制策略、运维以及尾流控制的特征。

(2) 在分别研究关键部件-风电机组-风电机组群的服役质量调控方法的基础上，对大规模风电机组服役质量的调控现状与发展趋势的研究热点进行探讨与预测，有利于风电机组服役质量调控方法的创新和突破。

本文首先分析了关键部件的故障诊断与可靠性及其优缺点；其次在风电机组层面分析了健康情况、环境友好性和机组调频策略及其优缺点；最后在风电机组群层面就高质量发电、运维策略和尾流效应及其优缺点进行了研究分析，并对未来可能的发展方向做出了展望。

1 风电机组关键部件服役质量调控方法

风电机组是风力发电的重要设备，包含多个关键部件，如叶片、齿轮箱、变桨系统、偏航系统、发电机、变流器等，在风力发电过程中起着关键作用。由于风电机组多安装在偏远地区，长期运行在恶劣环境中，受极端气候的影响，同时其内部结构复杂，各关键部件之间存在着非线性强耦合关系，在这种复杂运行工况下极易导致风电机组在发电过程中发生故障，甚至引起重大安全事故。由于风电机组关键部件故障导致的运维成本在风电机组成本中占比较高，为降低风电机组故障率以及运维成本，提高风电机组关键部件的服役质量至关重要。

通过对风电机组关键部件的故障诊断可以及时发现并预警潜在问题，及时制定精确的运维计划，避免故障的发生或扩大，减少运维成本的同时确保风机运行在最佳状态，还可以减少停机时间，提高风机的发电效率，因此风电机组关键部件的故障诊断准确性对于风电机组服役质量的提升至关重要，为后续风电机组可靠性评估、健康度评估以及运维计划的制定提供了基础数据和信息。

通过对齿轮箱、主轴、轴承、发电机和叶片等关键部件的失效机理进行深入分析，可以为这些部件的检修时机和维护提供科学合理的技术支撑，可

可靠性评估可以基于故障诊断提供的数据,进一步分析系统的可靠性水平,并确定其是否满足既定的可靠性要求。关键部件的可靠性评估需要考虑影响因素和服役时间,以提升风电机组的可靠性和可用性。因此本节将针对风电机组关键部件的服役质量进行研究探讨。

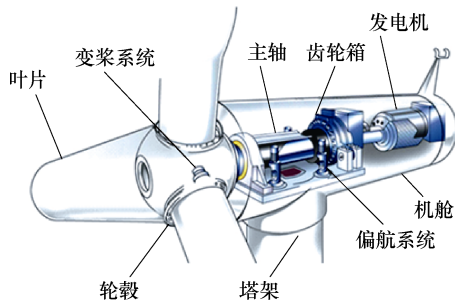


图1 风电机组关键部件示意图

Fig.1 Schematic diagram of key components of wind turbine

1.1 风电机组齿轮箱的服役质量调控方法

齿轮箱是双馈型和半直驱型风电机组的重要大部件,对于风电齿轮箱的服役质量研究,现有研究主要集中在故障机理分析、信号处理以及数据驱动等方面。在故障机理分析方面,主要是以齿轮箱系统动力学模型为基础,采用状态估计、参数估计等方法进行分析,从动态响应的角度研究故障检测^[5-6]。然而,故障机理分析方法对模型精度有较高的要求,由于齿轮箱是一个复杂的耦合系统,建模时需要经过大量的简化或假设,因此机理建模的方法无法反映真实工作环境的某些复杂特性,且计算难度大。

在信号处理方面,文献[7]将齿轮箱原始振动信号利用谱峰度进行滤波,对滤波信号利用时间小波能谱分析法进行特征提取。文献[8]针对齿轮箱非平稳信号,采用集成固有尺度分解法可防止信号失真,再利用维格纳双谱熵提取信号特征,在两种及以上故障特征接近时,可有效提取故障特征与识别故障类型。文献[9]针对齿轮箱的非线性混合信号,利用经验模态分解法将原始问题转化为欠定盲源分解问题,然后利用核独立分量分析实现齿轮箱的故障诊断。

数据驱动方面,在不依赖系统原理或专家经验的前提下,通过挖掘和评估齿轮箱的运行历史数据,避免了复杂的机理建模步骤。文献[10]利用门控循环网络对齿轮箱运行数据的时序特征进行融合,根据残差的变化趋势进行齿轮箱的故障预警。文献[11]

利用随机森林袋外估计选取特征变量,构建基于灰狼算法的齿轮箱故障预警模型,通过模型的输出偏差值与故障阈值的对比实现故障精确预警。文献[12]结合距离相关系数与正则化互信息提出改进集成K近邻(K-Nearest Neighbors, KNN)模型,通过规则采样和正则化互信息优化模型性能,提升齿轮箱故障预警精度。但上述为浅层模型方法,学习能力有限,难以准确挖掘齿轮箱运行数据中隐藏的非线性关联。深度学习是机器学习中一个新的分支,能够从多层次非线性数据中抽取出具有层次性、紧密性、抽象的数据,并能拟合复杂的映射关系。文献[13]结合深度学习与序贯概率比检验(Sequential Probability Ratio Test, SPRT),通过降噪自编码器和长短期记忆网络建立故障诊断模型,可对齿轮箱轴承异常进行预警。文献[14]将齿轮箱运行数据与振动信号作为输入数据,并针对输入数据利用卷积神经网络模型设计特定结构,能从状态信息中提取特征,实现对齿轮箱状态的有效监测。但齿轮箱运行数据极易受到强噪声、随机干扰等因素的影响,需深入分析齿轮箱的运行数据,结合多元时序深度模型实现齿轮箱监测数据的高效融合。

在齿轮箱的可靠性评估方面,齿轮箱在运转过程中长期受到较大的负荷和摩擦,易发生故障且难以维修,齿轮箱可靠性评估有助于降低运维成本,提高风电机组齿轮箱的服役性能。文献[15]采用主成分分析法融合齿轮箱温度、振动信号数据,建立基于退化失效与突发失效的竞争失效可靠性评估模型。文献[16]通过故障树分析与贝叶斯网络计算可靠性指标,推理出齿轮箱传动的薄弱环节,通过设计合理的齿轮箱结构提高齿轮箱的可靠性。文献[17]改进了威布尔分布模型,通过分析可靠度函数曲线与失效率函数曲线实现齿轮箱的可靠性分析,同时考虑非停机故障与停机故障位置。文献[18]将疲劳失效状态嵌入马尔科夫模型中来评估齿轮箱的可靠性。

综上所述,关于齿轮箱的服役质量调控方法的研究,可从故障机理分析、信号处理、数据驱动三个方面着手分析,其优缺点见表1。

从表1可知,对齿轮箱故障机理进行分析可以深入了解齿轮箱的运行原理,结合数学模型进行故障诊断,但高度依赖专业知识且在复杂工况下的适用性有限;信号处理分析方法可以实时监测齿轮箱运行状态,但需要额外的传感器,易受到噪声干扰,并且信号特征提取需要复杂的算法进行分析,未来可以研究优化信号处理算法以及自适应滤波器来提

表 1 齿轮箱服役质量调控方法的优缺点

Tab.1 Advantages and disadvantages of gearbox service quality studies

	优点	缺点
故障机理分析	根据齿轮箱机理建立数学模型, 减少无效检查, 降低运维成本	对模型的精确度要求高, 在数学模型建立过程中需要简化和假设, 不能充分体现实际工况中的一些复杂特征
信号处理	根据预先设置的判别准则或统计量, 对特征提取后的信号进行故障诊断	(1) 需额外的传感器, 成本较高 (2) 获取特征信息的效果, 直接影响状态监测与故障诊断的精准性
数据驱动	(1) 不依赖于系统机理或专家先验知识 (2) 通过对历史数据进行挖掘与评价, 避免了复杂的机理建模环节 (3) 深度学习可对复杂的映射关系进行建模与拟合	(1) 机器学习能力有限, 针对监控数据中隐含的非线性关系难以精确挖掘 (2) 监控数据极易受到强噪声、随机扰动的影响, 鲁棒性较低

高信号处理方法的准确性和鲁棒性; 数据驱动方法利用大数据和机器学习方法, 避免了复杂的机理建模环节, 但需要大量故障数据进行训练, 对模型的泛化程度要求较高, 未来可以研究数据融合技术, 结合多源数据提高齿轮箱故障诊断的准确性。

1.2 风电机组变桨系统的服役质量调控方法

变桨系统安装在风电机组轮毂内, 具有变桨与制动功能, 一旦其发生故障将影响机组安全与稳定高效运行, 变桨系统故障的准确预警可以提升风电机组群的服役效能。

针对风电机组变桨系统的状态检测与故障预警, 按研究方法大致有分析模型、统计学、人工智能方法三种。基于分析模型的故障检测方法, 通常采用残差信号和阈值检测故障。文献[19]利用卡尔曼滤波产生残差, 利用 H_{∞} 范数和线性矩阵不等式技术设置残差评估阈值, 对变桨系统进行故障检测。由于变桨系统的复杂性及强耦合性, 且风电机组变桨系统需面对复杂多变的运行工况, 难以对其进行精确测量和分析, 因此基于分析模型的研究较少。在统计学方法方面, 通常是基于数据利用概率学理论研究变桨系统数据的规律, 总结所得信息用于变桨系统的故障诊断, 文献[20]利用故障树分析法对变桨系统进行故障分析, 优化了故障诊断模型, 可准确迅速地诊断出故障原因。文献[21]进行数据相

关性分析, 建立基于核密度估计法的故障预警模型, 利用伯努利二项分布的假设检验来进行预警。但统计学方法大多依赖经验调参的部分比较多, 智能化程度亟须加强。

随着大数据的飞速发展, 人工智能算法逐渐成为状态监测与故障诊断的主流研究方向之一。文献[22]采用主成分分析法对运行数据进行特征提取, 利用基于高斯核的支持向量机算法进行故障诊断。文献[23]将风电机组三相电流作为故障特征量, 利用深度自动编码器提取特征向量后使用支持向量机进行特征分类与故障诊断。文献[24]基于相关向量机回归设计了一个正常行为模型, 采用人工蜂群算法进行优化, 再根据优化相关性向量机的概率输出, 设计自适应阈值进行服役质量评估。文献[25]建立了基于支持向量机的变桨系统故障诊断模型, 结合熵权法与方均根误差分析故障数据, 实现变桨系统故障诊断。

随着风电场的规模不断增大以及对状态监测与故障预警快速性和准确性的要求, 深度学习因其强大的特征学习能力, 可以自动从大量数据中提取有用的而不需要人工干预的特征, 成为当前研究的趋势。文献[26]利用历史运行数据与先验知识进行控制逻辑反演, 根据建立的数字孪生模型进行仿真分析, 实现变桨系统故障诊断。文献[27]建立基于长短时记忆的故障预警模型, 选取与变桨系统运行状态相关的参数作为输入量, 再设置变桨系统故障预警阈值进行故障诊断。文献[28]通过相关性分析选取特征量, 建立基于径向基函数 (Radial Basis Function, RBF) 神经网络的故障诊断模型, 通过核密度估计设置故障阈值来实现变桨系统故障诊断。文献[29]通过引入马氏距离选取故障预警判据, 进一步优化反向传播 (Backpropagation, BP) 神经网络的权值和阈值, 可提高故障诊断的准确性。然而, 目前将深度学习应用在风电机组变桨系统状态检测与故障诊断的技术并不成熟, 所用模型的可靠性亟须提高。变桨系统服役质量调控方法研究的优缺点具体见表 2。

从表 2 可知, 分析模型方法基于物理原理建立模型, 但模型可能需要复杂的参数校准, 还容易受到外部因素干扰导致模型精度下降, 未来研究可以聚焦于非线性特性以及环境因素等实际因素的影响下建立分析模型; 统计学方法利用历史运行数据和统计分析进行变桨系统的故障诊断, 但需要大量数据且对数据的完整性要求较高, 对于未知故障模式

表2 变桨系统服役质量调控方法研究的优缺点
Tab.2 Advantages and disadvantages of quality of service studies of pitch systems

	优点	缺点
分析模型	根据系统的工作原理,运用定理、定律和原理推导出描述系统的数学模型,减少无效巡视,可降低运维成本	变桨系统模型难以建立精确模型,无法完全反映实际运行工况,受到环境影响且需要大量数据支持
统计学	利用概率学理论研究变桨系统数据的规律,方法简单	数据太多,处理速度较慢且多依赖于经验调参,结果可能存在较大误差
人工智能	通过学习和匹配模式,从海量数据中提取有用信息,快速诊断出故障原因,可提高诊断的精确性和效率,减少对专家经验的依赖,提高可靠性	人工智能诊断的有效性和准确性很大程度上依赖于训练数据的可靠性和质量,当数据存在噪声、缺失、不完整的问题,就会影响到故障诊断的可靠性和准确性

难以进行诊断,未来可以结合现代统计学理论提高故障诊断的准确性;人工智能方法能够处理大量运行数据并快速诊断故障原因,但对训练数据的完整性要求较高,模型的泛化能力也有待提高,未来研究可以聚焦于开发更智能的算法,提高模型的泛化能力。

1.3 风电机组变流器的服役质量调控方法

1.3.1 变流器状态检测与故障诊断

变流器长期工作在复杂恶劣的环境中,随着风电机组投入使用年限的增加,变流器故障问题逐渐显现,严重影响了风电机组的安全稳定运行。针对变流器的故障诊断主要有基于模型分析、信号处理法和数据驱动三种。

模型分析主要利用状态估计、参数估计、联合状态和参数估计方法进行变流器的故障诊断。文献[30]利用状态观测器对转子侧电流进行在线计算,通过对比阈值与计算值的残差分析变流器的服役状态。文献[31]构建系统状态观测器来估计相电流,利用电流残余矢量的特征幅值和相位实现高可靠性高效故障在线诊断。文献[32]基于构造的双线性电流观测器得到电流残差信息,通过自适应阈值比较法实现故障准确定位。文献[33]提出了一种基于加权最小二乘的三相变流器故障识别方法,在平衡和不平衡状态下均获得了高精度的诊断结果。基于模型分析的故障诊断由于系统复杂耦合难以建立精确的解析模型,导致故障诊断的准确性较低,鲁棒性

不高。

基于信号处理的变流器服役质量评估方法首先需分析风电变流器在不同部件发生故障时的特征行为,然后根据实测信号生成诊断变量和阈值,最后通过特征分析识别变流器的故障状态。文献[34]将三相电流信号作为特征信号,使用局部均值分解法对其进行分解处理,再利用能量熵做特征提取,可实现对变流器的故障诊断与定位。文献[35]将电流信号进行非均匀采样,可有效防止在外部环境影响下引起的故障误报。文献[36]采用加权滑动 Hilbert 变换得到相电流瞬时频率的估计结果,通过归一化得到故障特征量,再根据改进的相电流均值法实现故障诊断与定位。文献[37]对 Park 矢量的模取绝对值,然后进行归一化以实现故障诊断的方法,通过求取电流的平均值并经过归一化处理实现故障定位。文献[38]采用归一化定子电流的平均绝对值作为永磁风电系统中风电变流器的实时故障诊断,可以检测出单个和多个开路故障。基于信号的方法简单直接,不需要精确的变流器系统模型,但其需要系统的先验知识。

数据驱动方法使用基于数学的数据挖掘技术或统计方法来诊断变流器故障,不需要建立精确的解析模型,解除了复杂系统故障诊断模型难以构建的限制。文献[39]利用定子电流均值和协变两个相关特征来训练人工神经网络,不需要额外的传感器和收集大量数据。文献[40]从三相电流信号的失真和包络变化中提取主要分量作为故障特征,采用单极值归一化方法进行有效归一化,能够方便、低成本地实现故障诊断。文献[41]提出了基于集成经验模态分解(Integrated Empirical Mode Decomposition, IEMD)范数熵(Norm Entropy, NE)的风电变流器故障诊断方法,用固有模态函数-范数熵(Intrinsic Mode Function Norm Entropy, IMF-NE)描述故障特征,诊断结果具有较高的准确率和较好的鲁棒性。文献[42]对变流器输出电流进行变分模态分解,利用小波包方法减少故障特征的维数,将约简的故障特征向量输入支持向量机(Support Vector Machine, SVM)中进行训练和故障识别。文献[43]通过全连接层的 Softmax 激活函数获得变流器故障诊断结果,能实现变流器故障的准确诊断,在权值共享和移位不变性方面表现出优先性。文献[44]采集变流器在不同故障情况下的三相桥臂电压作为原始信号,利用小波变换对信号进行分解重构再进行特征分析和判断。数据驱动方法可以在没有风电变流器

系统的精确模型和系统先验知识的情况下进行故障诊断,但需要大量的历史数据来训练和学习分类器,计算成本高,耗时长。

变流器的故障诊断可以从机理模型、信号处理以及数据驱动着手分析,其中机理模型方法基于变流器的物理和电气特性,能够准确提高故障结果,但是需要复杂的建模和参数校准,且对未知故障的诊断能力有限;信号处理方法通过分析变流器运行时产生的电气信号来进行故障诊断,对数据采集的准确性要求较高且易受到噪声的干扰;数据驱动方法可以处理大量运行数据,无需复杂的机理模型,但对数据训练的准确性要求较高,未来研究可聚焦于优化故障诊断算法,研发新型传感器以及信号处理方法,以实现故障的快速定位。

1.3.2 变流器可靠性评估

变流器可靠性研究与服役性能提高紧密相关,变流器的可靠性既与内部电路结构相关,还与其运行工况、工作环境等息息相关。

变流器可靠性导则通常是由相关政府机构或企业基于大量故障数据统计分析以及可靠性试验分析颁布制定,广泛应用于可靠性评估之中。现有可靠性评估手册主要包括:RDF2000、MIL-HDBK-217F、GJB/Z 299C-2006 以及 FIDES 2009。文献[45]根据 MIL-HDBK-217F 导则对大功率变流器进行可靠性设计,考虑了运行平均结温、结温波动幅度、器件制造水平等对变流器可靠性的影响。然而该设计方式只适用于变流器运行在稳定的工况下,不适用于风速随机波动运行工况。

故障率统计数据分析基于海量的故障数据,从统计学角度出发,研究风电机组变流器的故障分布规律,需要长期、大量的故障率数据,大型风电机组投入使用时间较短,因此目前尚没有足够的变流器故障率数据,采用该方法进行可靠性评估在一定程度上受到了制约。同时,这种方法也仅限于事后分析,无法对可靠性评估起到指导作用。

变流器电力电子器件的失效与其所承受的热、电应力的累计疲劳损耗和外部工作环境等因素紧密相关。文献[46]根据功率大小与波动程度引起的变流器结温对变流器故障的影响,利用雨流法进行结温信息提取,进行变流器的可靠性评估。文献[47]根据风速、气温数据计算变流器整年结温,利用线性累计损伤理论与 Bayerer 寿命模型进行变流器可靠性评估。文献[48]根据风速与换相引起的结温波动,对风速均值与风湍流强度利用热应力与温度循

环因子评估对变流器可靠性的影响,同时对换流引起的结温波动利用多状态概率评估进行可靠性评估。变流器服役质量调控方法研究的优缺点见表 3。

表 3 变流器服役质量调控方法的优缺点

Tab.3 Advantages and disadvantages of converter service quality studies

	优点	缺点
状态监测与故障诊断	机理模型 基于变流器结构机理或工作模式建立数学模型,结果准确	由于系统复杂耦合难以建立精确的解析模型,导致故障诊断的准确性较低,鲁棒性不高
	信号处理 信号处理法通常是采用不同的信号处理方法对风电机组变流器所得信号数据进行处理以提取与故障相关的特征信息进行故障诊断,简单直接,不需要精确的转换器系统模型	需要先验知识,会受到大量随机冗余数据的影响,且故障信息提取能力不足时对诊断准确性影响较大,且需增加额外的传感器,成本较高
	数据驱动 无需建立精确的解析模型与专家先验知识,解除了复杂系统故障诊断的限制	故障诊断的准确性很大程度上取决于信号处理和特征提取算法,且需要大量的历史数据来训练,计算成本高,耗时长
可靠性评估	故障率统计数据分析 利用统计学处理海量的故障数据挖掘风电机组变流器的故障分布规律,原理简单	需要长期、大量的故障率数据,风电机组目前没有足够的变流器故障率数据;仅适用于事后分析
	物理失效分析 仅需获取局部结温波动信息,就可发现全寿命周期内变流器结温变化,进而获得故障率结果	仅适用于恒定运行工况

从表 3 可知,故障率统计方法通过收集大量运行数据来评估变流器的可靠性,可以提供定量的可靠性指标,但依赖运行数据的完整性和准确性,且仅适用于事后分析;物理失效分析方法侧重于分析变流器内部结构失效机理,但需要复杂的专业知识。未来的研究可聚焦于如何结合故障率统计和物理失效分析,形成综合的可靠性评估框架,以及通过新材料应用来提高变流器的固有可靠性。

1.4 风电机组发电机的服役质量调控方法

风电机组发电机的运行状态对整个风电机组的正常运行起着关键作用,为减少由发电机故障引起风电机组故障停机甚至更严重的事故,对风电机组的状态监测与故障诊断研究必不可少。现有的关于

发电机状态监测与故障诊断基本是基于数据驱动方法。在支持向量机的方法方面,文献[49]利用混合核函数的支持向量机方法得到发电机温度预测值与实际值的残差,根据计算得到的残差分布特性,设置故障报警阈值。文献[50]运用最小二乘向量机对发电机振动数据进行特征学习,建立故障模型进行训练优化,结果表明,该方法可以有效实现发电机多故障诊断。在神经网络方面,文献[51]利用BP神经网络对发电机正常运行下的温度数据进行建模,根据预测的温度数据的残差超过设定阈值时发出故障预警。文献[52]对发电机运行历史数据进行分析并提取特征量,利用门控递归单元神经网络建立预测模型并计算残差,最后使用LightGBM算法进行状态监测。在深度学习方面,文献[53]对故障运行工况下的发电机数据利用堆叠自编码模型计算残差,根据残差变化趋势进行故障诊断。发电机服役质量调控方法研究的优缺点对比见表4。

表4 发电机服役质量调控方法研究的优缺点

Tab.4 Advantages and disadvantages of generator service quality studies

	优点	缺点
支持向量机	能够处理高维数据,具有较强的泛化能力,适用于小样本数据,可以处理非线性问题	计算复杂度高,噪声数据影响较大,需提前去除
神经网络	利用数据库中现有的故障样本进行训练,建立网络输入与输出之间的一一映射关系,达到故障辨识的目的,应用广泛	成本较高,冗余信号影响大
深度学习	通过采用多层结构将最低层特征组合成更加抽象的属性,以发现原始数据中隐藏的特征,精确度高	特征提取研究需深入,需更精确的算法进行数据处理

从表4可知,支持向量机在处理小样本、非线性问题上表现优秀,具有很好的泛化能力,能够有效诊断发电机故障,但在处理大规模数据时效率较低,未来可结合其他算法进行特征选择和降维,提高故障诊断的准确性和效率;神经网络方法适用于处理发电机复杂故障模式,可以通过大量训练故障数据来自动提取特征,但易受到局部最小值影响,对未训练的故障模式泛化能力不足,未来可以将更多神经网络方法与发电机故障诊断相结合;深度学习方法对于复杂故障诊断问题具有较强的处理能力,但需要大量训练数据,且对数据的质量与数量要求较高,未来研究可聚焦于提高模型的训练速度和

模型的可解释性,以便提高故障诊断结果的准确性。

1.5 风电机组叶片的服役质量调控方法

风电机组叶片结冰监测主要分为直接方法与数据驱动的方法。直接方法利用高光谱成像、红外温度测量、超声波检测等方法,直接对风电机组叶片实现结冰的监测。采用高光谱成像是将光纤光栅传感器安装在叶片的不同位置,然后对风力机叶片进行测试,从而对风力机叶片进行检测,得到损伤信号的特征,并对实验数据进行分析,实现对叶片损伤的识别与判定。在使用红外温度测量时,热源在被测叶片中形成表面热源,被测叶片表面温度在热传导过程中下降,叶片表面缺陷会影响叶片表面的冷却过程,红外热成像仪检测表面区域的冷却过程,对声发射信号进行分析处理后得到内部信息。超声波监测是利用材料超声波传播与反射的差异和能量在传输时间内的变化来检测材料内部缺陷的一种无损探伤方法。文献[54]提出一种基于超声导波的风机叶片覆冰方法,研究了不同温度、覆冰厚度与Lamb波各模态群速度变化间的对应关系,并通过冰洞实验来验证方法的可行性。

随着人工智能技术和信号处理技术的发展,人工智能神经网络、专家系统、模糊逻辑和支持向量机、小波分析等技术被应用于风电叶片的运行状态检测和故障诊断。针对风机叶片覆冰影响机组运行可靠性的问题,文献[55]针对叶片覆冰数据的故障数据进行处理并分析其与其他故障之间的灰色关联度。文献[56]根据结冰机理和运行数据选取特征量,建立基于小波去噪的长短时记忆神经网络模型实现叶片结冰预警。文献[57]对叶片历史运行数据进行时间序列重采样,将BP神经网络与Adaboost算法相结合对叶片运行状态进行状态监测。文献[58]利用支持向量回归算法从数据采集与监视控制(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)数据中选取特征值,构建叶片结冰辨识模型,实现叶片故障诊断。叶片服役质量调控方法研究的优缺点具体见表5。

从表5可知,高光谱成像有助于发现叶片早期故障但易受到环境条件的影响,红外温度测量可以远程检测,但对轻微损伤可能不够敏感,超声波检测方法可以发现内部损伤但需较长时间,直接方法的成本都相对较高;数据驱动方法利用机器学习算法来分析叶片运行数据,可以处理大量运行数据,但模型的建立优化过程复杂。未来的研究方向可聚焦于将多种故障诊断技术相结合,提高故障诊断的

表 5 叶片服役质量调控方法研究的优缺点

Tab.5 Advantages and disadvantages of blade service quality studies

	优点	缺点
直接方法	直接方法通过利用高光谱成像、红外温度测量、超声波检测等方法, 直接对风电机组叶片实现结冰的监测, 方法直观	受设备精度影响, 成本较高
数据驱动	无需解析模型, 精度较高, 速度较快	特征提取研究需深入, 需更精确的算法进行数据处理

准确性和可靠性。

2 风电机组整机服役质量调控方法

2.1 风电机组健康度服役质量

风电机组大多安装在环境、气候恶劣的地方, 风电机组受到的载荷变化频繁, 导致故障频发, 极大地降低了风电机组服役性能, 因此, 开展风电机组健康度评估十分必要。目前, 对风电机组健康度的评估研究主要有模糊评价法、灰色关联法、人工智能法等。

在模糊评价方面, 文献[59]结合组合赋权和云模型构建风电机组健康状态评估方法, 集成主客观权重, 精准评判机组状态。文献[60]基于随机组合权重与隶属度函数建立评价的数学模型, 再通过分层评估法搭建风电机组健康状态指标体系。

在灰色关联方面, 风电机组运行数据冗余利用关联规则的可伸缩性提取有用的信息来进行风电机组的健康评估。文献[61]将灰色关联分析法与层析分析法结合归一化指标权重, 建立基于故障频次与时长的健康状态评估指标体系。文献[62]基于风速变化对机组振动与温度的影响以及特征信息之间的冲突问题, 利用证据推理的健康状态评估模型。

在神经网络方面, 文献[63]将健康衰退指数作为风电机组健康度评价指标, 利用高斯混合模型建立了多状态特征融合的健康状态评估模型。文献[64]采用多源数据特征广义回归神经网络进行风机健康评估, 精确划分风机健康状态评估区域, 提高风机健康状态评估的准确性。文献[65]根据风机运行数据, 利用主元评价和非线性自回归时间序列神经网络, 建立风机健康度评估模型。文献[66]改进了传统栈式自编码器来进行风电机组健康状态监测, 计算模型残差并提取健康指标, 对其进行概率融合处

理以此来评估健康度。

模糊评价法充分考虑风机运行参数与健康状态之间的模糊性与随机性, 但在构建指标体系、权重分配、健康等级划分等方面存在很大的主观性, 从而增加了评估的不确定性。此外, 由于风电机组运行环境的复杂多变, 评估指标的选取及赋权也会有一定的偏差, 进而影响其健康评估的精确性与可靠性。灰色关联法在风电机组内部信息不明确的情况下, 可以通过关联规则的可扩展性, 从中抽取有价值的信息, 灰色关联法不要求数据描述的准确性, 便于应用运行数据。基于神经网络的研究主要是直接应用算法, 且主要以风机的运行参数作为输入数据, 但设置参数阈值需要大量的先验知识, 因此, 评价结果的科学性和稳定性还有待提升。

2.2 风电机组服役质量的环境影响研究

2.2.1 腐蚀环境对风电机组服役质量的影响

腐蚀是海上风电发展、运营及维护面临的重大难题, 加强防护是减少风电设备全寿命周期度电成本、提升设备可靠性和安全性的关键, 是提高风电机组环境服役质量研究的关键之一。叶片工作在大气区, 大部分是以环氧树脂、聚酯树脂等为基础的玻璃纤维增强复合材料, 自身具备抗腐蚀能力, 但风电机组长期运行在高盐雾、高湿度等严苛的环境中, 仅靠自身的抗腐蚀能力远远不够, 可在叶片表面涂防腐涂料进行保护。目前, 市面上使用的溶剂型涂料的抗溶剂性能和抗老化性能发挥良好, 但受力的时候容易从叶片上脱落, 丧失了对叶片的保护。文献[67]通过调整聚酯多元醇预聚物、多异氰酸酯三聚体及颜填料比例研发了一种聚氨酯风电叶片保护涂料, 克服了上述缺点。当前, 在环境保护意识不断增强的背景下, 聚氨酯防腐涂料和各类改性树脂涂料已成为研究的重点, 传统溶剂型涂料将逐步退出主流市场。

塔架防护措施都是采用防腐涂层联合预留的腐蚀余量进行防腐, 文献[68]通过牺牲阳极阴极保护和涂层联合保护的方法对如东海上浪花飞溅区的风机钢管桩进行防腐蚀处理。为提高电气设备的防腐蚀度, 可通过加装盐雾过滤器和除湿器, 对海洋大气中的盐雾进行过滤、除湿以及散热。文献[69]针对风电机组内部腐蚀速率以及影响其腐蚀的主要环境因子进行现场监测。海底电缆长时间与海水接触后, 容易造成电缆的腐蚀破坏, 电流造成的电腐蚀又会加速铠装层的破坏, 严重影响其寿命与发电效率。文献[70]利用各种实验对风电海底电缆进行防

腐蚀测试,得到了腐蚀电缆的主控因素。文献[71]模拟研究了感应电流对电缆铠装层腐蚀的影响规律,通过X-射线衍射分析得到了感应电流对电缆腐蚀的影响机理。

风电机组防腐蚀方法主要分为主动防腐蚀保护与被动防腐蚀保护。在风电机组设计安装时,会在不影响机组安全稳定运行的前提下预留防腐余量,以及设计缺口、开口、加强筋等避免腐蚀,也会采用牺牲阳极法、外加电流法进行风电机组防腐,但牺牲阳极法极易受电解质电阻率的影响,保护电流小,具有易损耗、耐久性差的缺点,外加电流法刚好弥补了牺牲阳极法的缺点。被动防腐蚀保护除了防腐涂层,还有包覆防腐保护,主要有复层矿脂包覆防腐、矿脂防腐带冷缠两种包覆技术,其中复层矿脂包覆防腐可有效防止腐蚀介质腐蚀钢材,密封缓冲层和腐蚀防护罩的综合性能良好,不仅可以隔离海水,还可以抵抗对钢结构的机械性损坏;与复层矿脂包覆防腐相比,矿脂防腐带冷缠主要是采用不同的材料、防蚀膏,两者的抗冲击特性有一定差异。

由于环保意识的增强,未来环保型防腐涂料会成为涂层防腐的研究重点,以减少对海洋环境的影响;随着人工智能的发展,对风电机组可以应用智能化检测,实时观测防腐系统的状态,及时进行维护,避免因防腐措施失效造成的机组故障;针对风电机组本身,可以研究新型材料或纳米技术,提高风电机组本身的防腐性能以及耐久性。

2.2.2 雷电环境对风电机组服役质量的影响

随着风机整体高度的增大,其遭遇雷击的频率也随之升高,对风机设备造成了一定程度的破坏,雷击造成的损害不仅需要高昂的维护费用,而且还会造成巨大的发电损失,因此进行防雷研究对于提升其服役质量至关重要。目前,对风机的防雷防护主要是采用IEC/TR 61400-24《风力涡轮发电机系统—雷电防护》。雷电的危害主要是雷电的热效应、电磁感应、电涌过电压等。根据德国、丹麦等国家的故障事故数据,每年雷击造成的重大经济损失和人员伤亡事件约为100~200起;在北欧,一年中,每100台风力发电机因闪电而遭受的破坏高达4~8起^[72]。红海湾风电场自建成投产以来,遭受过许多次雷击事故。浙江苍南风电场曾经发生过一起由于雷击导致叶片从叶顶至叶根断裂而报废的事故,维护成本高达数百万元。

叶片是风电机组最易遭受雷击的部件之一,因

此对叶片的防雷保护是研究的重点。文献[73]针对碳纤维叶片易遭受破坏的问题,利用接闪器和金属网的防雷优势,设计了一种双回路叶片防雷系统。文献[74]分析了叶片雷击损伤机理,将风电机组叶片防雷方法相结合可最大程度上预防叶片雷击事故。轴承作为雷击电流通路中的重要部件,通常使用炭刷来分流,但仍有部分雷击电流通过轴承。在主轴承、齿轮箱及机舱底板之间加装绝缘垫,可有效地阻止闪电的通过。另外,齿轮箱与发电机之间还加有绝缘连接件,避免雷电电流进入发电机。机舱极易遭雷击,通常的防雷结构是内置法拉第罩,顶层装有避雷设备。风机塔架为金属件,在设计中仅需考虑两个塔架间的过渡形式。风机接地一般都是采用塔架自身的钢筋混凝土地基作为天然地线,再沿其形成环状的地网。

上述防雷措施虽然可以有效降低雷击带来的损害,提高风电机组的安全性和可靠性,但是也存在一些缺点,如直击雷防护需要传动部件中使用导电集电环,增加了系统的复杂性以及维护成本;电涌保护器需要定期的检测与更换,以确保其工作的有效性;防雷接地的安装和维护也需要专业技术与监测。

未来防雷击措施可能发展智能化和自动化的防雷技术,提高防雷技术的可靠性、降低安装成本和维护成本、加强对风电机组雷电保护的监测与预警,确保及时发现故障并进行维护,减少机组故障。

3 风电机组服役质量调控方法

3.1 风电机组高品质发电方面的研究

近年来,随着风电机组规模的扩大和风电装机容量容量的增加,大规模风电机组在复杂运行条件下的高品质发电问题成为研究风电机组服役质量提升的关键,本节从影响风电机组高品质发电的暂态电压、稳态电压以及频率调节三个方面进行归纳。

3.1.1 风电机组暂态电压控制

风电机组内部风速分布与电压波动的复杂性要求暂态电压控制策略不仅要保持单台风电机组的稳定,还要考虑风电机组内不同机组间的耦合特性,从而实现全局最优运行,提升风电场运行的稳定性,减少因电压故障导致的风电机组损坏以及电量损失。因此,风电机组暂态电压控制与风电机组的服役质量紧密相关,通过优化电压穿越控制策略,可以有效提升风电机组的运行稳定性、健康度服役性能以及经济效益,降低运维成本。面对电网故障等

暂态工况时,风电机群的暂态电压控制能力直接影响风电机组的电压穿越能力和风电场的电压稳定性。文献[74]提出一种同步发电机励磁柔性调节控制方案,在对称和非对称电网故障情况下,具有出色的低电压穿越能力,可以产生足够的无功功率用于电网电压恢复。文献[75]提出了一种低电压穿越策略,在电网发生故障且直流电压超限时,控制送端变流器降低风电场的交流电压,从而降低风电场输出的有功功率。文献[76]提出了一种在静止同步补偿器(Static synchronous Compensator, STATCOM)、双馈感应发电机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)定子和电网侧变流器之间分配无功电流的优化方案,可以最大化有功电流输出并提高低电压穿越能力。文献[77]提出一种瞬态电压控制策略,以提升风电场的低电压穿越能力。在严重的电压骤降条件下,风电场应保持在线以支持电网电压,可提高直流侧和定子侧的电压稳定性。文献[78]在超导磁储能装置储能侧变流器和转子侧变流器中分别采用了电感仿真控制和瞬态电压控制两种低电压穿越策略,能在不同故障初始角度下有效提高电网电压。文献[79]提出了基于两相静止坐标系下改进的模型预测电流控制方法的双馈异步发电机低电压穿越控制策略,可以实现低电压穿越期间双馈感应发电机的自我保护和支持两个控制目标。低电压穿越控制策略一般是在转子侧增加硬件、改进转子侧的控制策略或在定子侧增加硬件。在转子侧加装硬件设计较复杂、投资成本较高。改进转子侧控制策略是在不增加其他硬件的情况下利用转子侧变流器的可控性来控制转子侧电流输出以及抑制转子侧过电流,但低电压穿越效果一般。在定子侧加装硬件投资成本低,低电压穿越效果良好,但在故障恢复期间容易引起转子侧变流器过电流。

现有研究对高电压穿越主要集中在直流母线侧及风电机组并网点增加额外的辅助硬件设备以及改进风电机组控制策略来实现机组的高电压穿越。文献[80]提出了一种基于转子侧变流器虚拟阻抗控制的高电压穿越控制策略,以缩短电流电压下降的时间并提高系统的高电压穿越能力。文献[81]提出了一种高电压穿越策略,能保证在高电压穿越时风机不脱网运行,还能为故障电网提供动态无功功率支持,有助于快速恢复电网电压。文献[82]利用下垂控制和自适应模型预测控制来提高风力发电场的高电压穿越能力,通过优化下垂系数,实现了电压的快速降低和恢复。文献[83]提出了一种基于分层事

件触发模型预测控制的电压控制策略,用于提高大型风电场的高电压穿越和电压恢复能力,减轻计算负担。附加装置的特点是将风机与电网故障隔离,或通过卸荷回路释放或消耗多余电能,以保证系统不脱网安全运行,但附加装置会增大系统成本和运行成本,同时提高风电机组复杂性和协调控制的难度;改进的风电机组控制策略利用自身无功支撑能力可以节约运行成本、灵活调节,但缺少对于直流母线电压升高过程中的机理分析,需要进一步研究如何精确计算所需要吸收的无功电流。

3.1.2 风电机群稳态电压控制

风电机群的稳态电压控制首先可以保证风电机群的供电品质,提升风电机群的发电效率与稳定性;其次可以对风电机组的运行状态进行优化,通过调整有功功率与无功功率,保证风电机群在各种系统环境下的高效稳定运行;最后通过电压控制,降低电压波动带来的损耗,延长风机服役寿命,提高风机的服役性能。

文献[84]提出了一种适用于大型风电机群的分布式电压控制方案,协调风电机群及其内部风机的无功功率输出,确保集电极母线电压和风机终端电压维持在安全范围内,同时力求最小化有功功率损耗。文献[85]提出了一种基于分析目标级联的分布式最优电压控制方案,最大限度地减少风电场内连接点、集电母线和风机终端母线的电压波动,同时调节母线电压使其接近额定电压,并平滑风机的无功功率输出。文献[86]基于最优功率流和模型预测控制提出了一种协调电压控制方案,通过交流电网与风力发电机之间的相互协调,确保电压维持在安全可行的范围内,同时降低有功损耗,并优化海上风电场间的无功功率分配。文献[87]提出了一种基于自适应下垂的分层优化电压控制方案,通过风机与风电场侧电压源变流器的协调,有效减小风电场内母线电压与额定电压的偏差,并缓解风机的无功功率波动,以提高整个系统的电压稳定性。

上述电压控制策略往往需要大量数据的传输和处理,系统的响应速度和灵活性受到了制约,因此文献[88]提出了一种基于可变梯度投影的分散式电压/电压波动控制方法,可以抑制随机风力和外部电压扰动引起的风电场内部电压波动,实现每个风电机组的快速无功响应。文献[89]提出了一种两阶段的风电场分散式电压控制方法,在用于识别和控制的数据有限时,可在考虑拓扑变化的情况下实现风电场电压和无功功率的协调优化,减少由随机风功

率和外部电网电压扰动引起的电压偏差。分散控制简化了集中控制的复杂性,降低了对通信系统的要求,通过局部信息进行决策还可以提升系统对电压波动的响应速度,避免了集中控制导致的整个风电机组故障的风险,提升了风电机群的稳定性和可靠性。

文献[90]将电压控制与健康度指标进行协调优化控制,上层通过模型预测控制实现全局优化,确保满足系统电压安全;下层则将塔位移和交流器温度等风机健康指标纳入多目标优化,优化电力潮流并预防风机故障,从而提高风电机群服役质量。储能装置的引入可以提高风电机群参与系统电压调节的能力,实现风储集群与电力系统的协调控制,文献[91]针对配备分布式储能系统的风电场提出了一种两级电压控制,分布式电池-超级电容器混合储能系统部署在风电场内的每台风机中,以调节功率输出,同时确保电压稳定性并增强无功支持能力。

3.1.3 风电机群频率控制

风机参与系统调频是一个多机协同工作的复杂过程,不仅要求风机具备参与调频的能力,还要求其在机组间进行协调控制。当前,风电机组调频控制策略如图2所示。

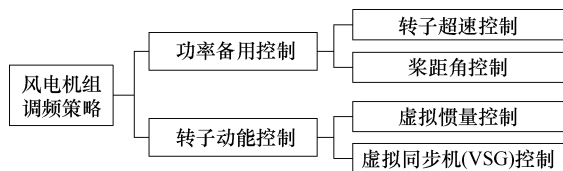


图2 风电机群调频控制策略

Fig.2 Wind turbine frequency control strategy

转子超速控制是指在转子超速运行,使风机响应系统次优功率捕获点,并为风机提供一定的有功功率储备,只有在低于额定风速时才能使用超速控制。文献[92]分析风机转子超速调频时的双向功率约束影响,计算出可实现风机调频的调差系数域。文献[93]将状态空间模型与小信号增量法结合建立基于转速控制的调频模型,仿真分析得出更大的初始风速具有更强的调频能力。文献[94]基于减少超速控制成本利用概率加权求和法计算得出变减载率曲线,可在低控制成本的基础上实现机组动态调频。上述研究表明,合理设置转速控制与超速参数十分重要,转子超速控制适用于大多数风速情况,且不需要额外的转动机械部件,响应频率变化速度快。桨距角控制是将转速控制在额定转速,具有较大的可调范围,可以在整个风速区间内进行控制。文献[95]开展阶跃干扰实验、电网频率干扰实验和挂网

试验,发现仅利用桨距角控制来对整个风速范围进行调频,经济性较差且缩短了机组寿命。

虚拟惯量控制通过模拟同步发电机的惯量特性,在电网频率跌落时通过增大有功功率参考值,释放转子动能调节系统频率。文献[96]建立两段调频时的下垂控制频率响应的解析时域模型,以避免复杂的分段调频控制分析,实现在不增加调频能量的情况下替代虚拟惯性。文献[97]提出一种改进的虚拟惯量控制策略,通过减少低通滤波器的滞后效果,提高了风力发电机的虚拟惯量控制速度。文献[98]提出一种结合虚拟惯量控制和辅助阻尼控制器的自适应控制方案,以解决风电并网系统中的系统惯性和阻尼不足的问题,抑制风电并网的频率振荡。文献[99]提出一种模糊逻辑驱动的自适应虚拟惯量控制方法,根据电网实时偏差和变化趋势自动调整虚拟惯量,用以维持电压和频率的稳定,同时结合不同惯量大小的优势,显著提升了系统在各种运行模式下的动态响应能力。文献[100]提出基于移动功率跟踪曲线的虚拟惯量控制策略,通过调整风机工作点,从最大功率跟踪曲线转移到虚拟惯性控制曲线,以释放额外的动能,从而增强电网的惯性并改善高风电渗透电网的动态频率响应。文献[101]提出一种优化虚拟惯量控制方法,通过指数函数渐进趋近策略,有效降低风电机组转速恢复时的机械载荷冲击,减小功率跌落,提升风电并网稳定性。文献[102]在系统频率降至最低点时,设定特定的有功出力维持时间,以减少不必要的转子动能释放,在转速恢复阶段,有功出力会根据时间逐渐调整至最大功率跟踪点,有效缓解频率的二次跌落现象。文献[103]提出了一种风电机组自适应惯量控制方法,通过分析系统动态响应和风电机组的双向支撑能力,在不同风速条件下改善了系统的频率稳定性。文献[104]提出了一种风电机组的虚拟惯性控制参数优化方法,利用模糊逻辑控制技术,根据系统频率变化和优先级,设计了调频控制规则,能充分挖掘风电机组的调频潜力,提升系统频率稳定性,同时确保风机安全运行。

储能与风电场虚拟惯量控制结合对于提升电网稳定性和促进新能源消纳具有重要意义,文献[105]对比分析了传统发电机的固有惯量、风电机组的虚拟惯量与储能系统的惯性支撑特性,并根据储能配置量化了其虚拟惯量,为系统的频率安全提供了评估基础;文献[106]建立风储系统的频率动态响应模型,确立频率安全的关键参数,并在安全运行条件

下量化了储能的虚拟惯量，并基于定频率控制提出了储能的频率主动支撑技术。

文献[107]提出一种风储系统的虚拟同步机（Virtual Synchronous Generator, VSG）协调控制策略，通过风电机组和储能系统的并行出力，在减少储能需求的同时，利用风电机组的惯性响应，提升了系统的调频效率和频率稳定性，同时优化了风电机组和储能系统的调频性能。文献[108]通过分析风电和储能的响应特性，构建了包含虚拟惯量的系统频率响应模型，可以显著提升电网频率稳定性，延长储能系统的使用寿命，并有效减少频率恢复过程中的超调现象。文献[109]提出一种混合储能系统控制方法，考虑荷电状态自恢复，通过模型预测控制和改进的加权滑动平均-模糊控制策略，有效平衡了储能寿命与风电波动平抑之间的矛盾，提高了功率分配的合理性。

VSG 控制是指在变流器控制算法中引入同步机的数学模型，利用这种方法实现的并网设备具有惯性、阻尼、有功调频等同步机的运行特性。文献[110]基于传统虚拟同步机控制策略，利用力学原理证明了虚拟同步机的实时可变性并设计了自适应惯量综合控制算法，可对风电机组实现虚拟惯量与虚拟阻尼控制。文献[111]分析各参数对输出特性的影响，在虚拟同步机控制基础上结合转动惯量与阻尼系数控制，仿真表明其具有快速调频性与稳定性。风电机组频率控制的优缺点见表 6。

表 6 风电机组频率控制的优缺点

Tab.6 Advantages and disadvantages of wind turbine frequency control

风电机组调频策略	优点	缺点
转子转速控制	响应频率变化速度较快，且不需要额外转动机械部件	只在低于额定风速的工况适用，经济性不高
桨距角控制	适用于全风速工况，可调节范围大，输出功率平稳	响应频率变化速度慢，受风速波动影响较大，缩短风机寿命，经济性较差
虚拟惯量控制	响应频率变化的速度快，可为电网提供有功功率支撑	持续时间短，容易导致频率的二次跌落
VSG 控制	响应频率变化的速度较快，可抑制负载扰动导致的频率波动	参数配置复杂，逆变器容易发生耦合振荡

3.2 风电运维策略对服役质量的影响

目前，关于风电的运维策略主要包括事后维护、定期维护、状态维护和混合维护四种^[112]，其中事后维护是指在风机出现故障之后才进行维修，可以减少维修次数和费用，但由于可达性、气候等限制，使得维修延迟和停机时间变得 longer，经济效益不高。定期维护无论风机状态如何，均按照预先规定的时间周期进行维护。定期维护的维护周期过短则存在过度维护的问题，增加运维成本；周期过长可能会发生停机故障，造成发电量的损失。状态维护是基于状态监测、故障诊断以及寿命预测制定维护方案。文献[113]计入部件成组时由于提前或延迟维护的损失，以维护总费用最小为目标、日维护时长为约束，建立了基于状态自适应评估的海上风电机组预防性维护模型。文献[114]结合后续维护周期内风速预测结果，构建了以单个维护周期内维护成本最小为目标、以海上有限维护时间与可及性为约束的海上风电场短期预防性维护决策模型。混合维护优势在于风机组件失效规律与维修要求存在差异，使得单个维修策略难以实现总体维修成本最低，同时对其余未到维护期的设备进行维护则会降低运维成本。

随着大数据时代的来临，研究新型智能监控系统，通过集控中心采集与处理现场运行数据，实现场站无人值守。欧洲关于风力发电的研究较早，风机制造商旗下的风电机组均配备有较为完整的数据采集与监视控制系统（Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA）或状态监测系统（Content Management System, CMS）可实现对风机的状态监测、数据采集与远程控制等^[115]。美国通用电气公司推出数字化风电场，其核心在于建立风电机组数字化模型，结合收集的运行数据制定维修方案，在合适时机进行定期维护。远景能源基于自己的技术优势，研发了集智能控制、功率预测、绩效管理三大功能的 WindOs 智能软件，可以提高风场的整体管理能力，促进风电场运维管理的智能化，从而实现少人或无人值守^[116]。远景能源公司还率先研究智能运维，通过对风机数据收集、监测与分析，实现风电功率损耗分析，大幅减少风电运行维护费用^[117]。

对于风电机组运维优化主要涉及风电场的操作要求及其对可用性和人员操作的影响，主要包括风电机组的可达性、运维资源的配置以及天气预报的准确性。文献[118]提出基于故障分析的风电机组不同组件的最佳运维策略，通过故障分析为不同的风

机组选择最佳维护策略,并利用现场数据库优化可用性选择最佳的维护策略。文献[119]提出一种多部件系统的动态维护分组方法,结合滚动视界和优化算法,以实现在可达性约束和有限维修人员条件下的最佳维护规划。文献[120]提出了以随机天气和备件管理为考虑因素的风电机群机会性维护策略,通过马尔科夫链模型生成风速时间序列,并根据天气限制得出维护等待时间,能够降低运营和维护成本。文献[121]提出一种统一的基于状态的维护和运营调度方法,以确定多个风电场运维的最佳决策,可显著提升风电场的运维资源可用性和市场收益,降低维护成本。文献[122]提出了一种基于数字孪生的海上风电场运维框架,构建了海上风电场全生命周期内复杂环境的动态虚拟模型,并将运维人员安全和环境保护纳入运维规划以得出最优运维策略。

通过定期维护、智能监控以及预防性运维策略结合,可以减少风电机群意外停机时间,提升发电量以及风电机群可靠性,降低运维成本和停机损失。同时合理的运维策略和适时风机维护可以延长风电机群的服役时间,提升风力发电的经济效益。

3.3 尾流对机群服役质量的影响

尾流效应是指风电机群捕获风能后,其下游区域的风速降低、湍流强度增加的现象。对于风电机群,尾流效应的存在将导致下游风电机的功率输出减少10%~25%,并致使疲劳载荷增加^[123],是风电机群服役质量提升面临的巨大挑战。如何对风电机群内各机组进行协调控制以减弱尾流效应的影响,提高整体发电量,优化疲劳载荷分布,是风电机群高质量运行亟需解决的问题。

风电机群引发的尾流风速衰减与其推力系数正相关,而推力系数与功率系数近似呈正相关关系^[124]。现有风电场通常让所有风电机群工作于最大功率点跟踪模式,被称为“贪婪控制”策略,这种策略会造成风电机群的发电量损失。为了提高风电机群的整体发电量,现有研究通过变桨、变转速和偏航等方式主动降低上游风电机群的功率输出以削弱其引起的尾流效应,进而换取下游风电机群的功率提升。文献[125]通过协调各机组的有功和无功功率输出,对双馈风电场内尾流损失和电气损耗进行联合优化,最大程度地提高了风电场输出的有功功率;文献[126]提出一种单机的稳定偏航控制方法,并通过差分算法计算各机组的偏航角设定值,实现风电机群功率输出的协同优化;文献[127]提出一种偏航尾流模型并使用计算流体力学(Computational

Fluid Dynamics, CFD)数据对参数进行拟合,再使用博弈算法对各机组的偏航角和轴向诱导因子进行联合优化,提高了整体发电量。然而上述研究没有考虑风电机群动态特性和风速不确定性,没有对最大发电量输出时风电机群的载荷情况进行分析,工程适用性存疑。

贪婪控制策略下,风电机群中上下游机组的功率出力相差较大,疲劳载荷幅值存在明显差异,这会导致上游机组服役寿命比下游机组更短,增加潜在的运维费用^[128]。文献[129]提出一种基于模型预测控制的载荷幅值均衡策略,相比于传统PI控制方法,平均载荷幅值减少了45%以上;文献[130]指出尾流传播的延迟特性,提出一种适应突变风况的模型预测稳态控制策略,在突变风况下能够很好地限制机组变桨的过动作;文献[131]根据最小二乘支持向量机预测的入流风速对风电机群的尾流分布进行多步预测,构建考虑尾流时延的尾流风电场动态载荷抑制控制模型,实现了损伤等效载荷的综合降低。此外,在功率提升与载荷抑制之间的权衡也得到了许多研究者的关注,文献[132]提出一种基于两自由度控制的风机模型,并进一步提出了一种无尾流模型的风电场增效控制方法,在尾流环境下验证了所提方法在疲劳载荷抑制与功率提升上的效果;文献[133]通过尾流有向图的修剪算法对大规模风电机群进行分区,提出一种分散式的风电机群优化控制方法,在典型工况下整体功率提升4.9%、疲劳载荷降低4.5%。然而功率提升与疲劳载荷降低是两个相互冲突的优化目标,现有研究通常简单地赋予两个不同的权重来实现优化的侧重,缺乏数学上的分析,难以实现理论上的最优控制。

此外,为了刻画尾流效应在风电机群内的分布特性,并在大规模风电机群的优化控制中使用,对如何开发适用于工程应用的尾流模型进行了许多研究,可分为数值尾流模型和工程尾流模型两大类^[134]。数值尾流模型主要采用计算流体力学等方法,通过构建二维纳维-斯托克斯方程得到相对精确的尾流动态特性,例如美国国家能源实验室开发的高精度风电场模拟器高精度风电场模拟器(Simulator of Wind Farm Applications, SOWFA)^[135]、德国汉诺威莱布尼茨大学开发的并行大涡模拟模型(Parallelized Large-eddy simulation Model, PALM)等^[136]。文献[137]基于大涡模拟方法,考虑不同叶片桨距角大型风力机体系表面流场信息和气动力分布模式进行模拟,并与规范及实测结果进行对比验证大涡模拟的

有效性。文献[138]使用非稳态雷诺平均纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes, NS) 方法研究了风机在静态和动态偏航条件下的气动特性。CFD 方法可以得到风电机尾流场中的详细信息, 准确模拟复杂的湍流流动对机组尾流特性的影响, 但需要耗费极高的计算资源, 无法在实际工程中应用。工程尾流模型基于部分理想情况, 根据动量定理来推导数学模型, 以表征尾流效应的基本特性, 例如, Jensen 模型^[139]、Frandsen 模型^[140]等。但一维尾流模型较为粗糙, 在风机下游的任何位置, 整个尾流平面处的风速都是恒定的。文献[141]为弥补一维尾流模型的不足, 研究单台机组尾流的演化规律, 基于动量定理和质量守恒提出了两个高精度的二维解析模型。文献[142]针对经典 Jensen 尾流模型存在的精度不足问题, 提出一种更能准确反映风电机尾流流场分布情况的 2-D Jensen 尾流模型。但无论一维还是二维尾流模型, 在实际应用中均存在局限性, 尤其随着风电机群的规模和容量的增加, 风切变效应不可忽视, 使用一维或二维尾流模型估计输出功率会产生较大的误差。如何提出一种兼备计算效率与计算精度的动态尾流模型, 是扩展尾流模型在风电机群的应用亟需解决的一大难题。

3.4 其他对风电服役质量影响的因素

由于风电出力的波动性和不可预测性, 同时电网调节能力不足, 导致大量风电无法并网, 国家能源局在政策上作出了相应的调整和规划, 以改善风电限电、消纳以及售电情况^[143]。风电限电的研究需要在储能技术、智能调度等技术层面进行优化, 还需考虑市场机制、政策支持、价格机制等多个方面的影响。文献[144]构建一个多阶段协同调度模型, 通过日前、日内和实时调度阶段, 有效整合蓄热电采暖和需求响应资源, 以促进风电的高效消纳。文献[145]基于奖惩阶梯碳交易和需求响应机制, 以电力和热力的供需平衡、室内温度等为约束条件, 最小化电热联合系统的总成本为目标, 构建精细化的建筑虚拟储能模型, 来增强风电的消纳能力。未来可发展储能技术和其他调节资源, 如抽水蓄能、电池储能等, 以提高系统对风电的调节能力, 同时积极推动电力市场改革, 建立健全与新能源特性相适应的市场机制, 优化电力资源配置。

在上网电价结算方面, 风电售电采用的是统一标杆的电价, 没有考虑到风电出力时的不确定性和波动性给电力系统带来的平衡成本。文献[146]提出一种结合中长期电量交易和风力发电参与的电力市

场日前交易与结算机制, 针对风力发电的不确定性问题, 引入多概率场景分析方法, 并开发了一个同时考虑日前电量交易和备用需求的联合优化模型。文献[147]引入反映风电预测的不准确和变化对电力系统运营成本影响的调整因子, 形成以风电调整价格为基础的日前电力市场再平衡模型。在日前电力市场的出清过程中, 还需将碳排放成本纳入发电成本中, 使得风电在电力市场竞争中更具优势。文献[148]基于碳排放权交易市场的作用提出一种新型的日前电力市场两阶段出清模型, 将外部碳成本纳入考量, 旨在最小化系统运营成本和碳排放成本的多目标优化。文献[149]提出一种针对风电不确定性的调频市场多时间尺度出清调度策略, 通过风险量化指标评估风电的可调容量风险, 并在日前和日内出清中应用条件风险价值方法, 有效降低调频市场风险, 提升优质机组的市场参与度。文献[150]建立了绿证交易 (Green Certificate Trading, GCT) 和碳交易 (Carbon Emission Trading, CET) 机制, 并结合这两种机制, 通过评估新能源发电的碳减排效果, 激励系统增加新能源吸纳, 降低碳排放, 减少综合成本, 并降低风电弃用率。未来的研究重点可聚焦于完善电力市场体系、推动风电参与电力现货市场和辅助服务市场。其次通过电压控制等技术创新提高风电机发电效率, 降低运营成本, 提高风电的市场竞争力, 同时研究建立更为精确的风电售电预测模型, 考虑多种影响因素, 如天气、政策变化等。最后可以探索市场机制在风电售电中的应用, 如绿色证书交易、碳交易等。

4 讨论与展望

作为提高风电运行寿命、降低运维成本的一项关键技术, 大规模风电机群的服役质量调控逐渐获得广泛关注和较为深入的研究, 但目前仍有一些问题有待进一步探索:

(1) 针对风机关键部件的故障诊断与可靠性研究方法普遍存在灵敏度和准确性低、可预测时间范围小、实时性差等问题, 且多数研究方法过于依靠专家经验, 主观性较强; 由于风电机群在服役过程中长期处于运行状态, 导致 SCADA 数据中故障数据相较于正常数据存储量少且密度低, 如何快速、有效地提取关键部件的故障特征是亟待解决的问题; 在针对关键部件的故障诊断与可靠性研究相关方法领域尚缺乏针对性研究, 将关键部件的故障诊断与可靠性研究与风电机群的运维系统高度结合技

术仍需深入研究,以满足提升风电机组全寿命周期服役质量的需求,此外现有技术在实时性方面的表现一般,无法满足快速故障响应的需求。

风电机组关键部件的故障诊断与可靠性是提高大规模风电机组服役质量的主要研究方向之一,未来的研究方向应着重开发更为精确和高效的故障诊断技术,包括利用机器学习和人工智能技术来提高故障特征的自动提取能力,以及构建更为复杂的模型来处理数据不平衡问题。同时,研究应关注提高系统的实时监控和响应能力,确保能够在故障发生的初期阶段迅速作出反应。此外,需要开发更为综合的故障诊断与可靠性评估工具,这些工具不仅能够预测故障,还能够评估故障对风电机组整体性能和寿命的影响。通过这些研究,可以为风电场运营商提供更为全面和深入的故障管理策略,从而提高风电机组的运行效率和可靠性。

(2) 目前大多数针对风电机组健康度评估的研究方法未综合考虑风电机组的不同运行工况,受气象、气候、地理位置和控制策略等因素的影响,均会造成健康指标值的变化,从而降低健康评估的可靠性;风机防腐问题同样严峻,尤其是海上风机,盐雾、湿度等环境因素加速了材料的腐蚀过程,降低了结构的耐久性,这不仅增加了维护成本,还缩短了风机的使用寿命,影响了风电场的整体运行效率;风机由于其高大的结构,易成为雷电的击中目标,而现有的防雷系统可能无法完全适应各种复杂气象条件,导致雷击事件频发,同时还缺乏对雷电先导的物理机理和影响因素的深入研究。

未来的研究方向为了提高健康度评估的准确性和可靠性,需要采用更为综合的方法,考虑多种运行工况的影响,并能适应不同环境条件和云习惯工况,包括开发更先进的数据采集和分析技术,利用机器学习和人工智能算法来处理数据,以及建立更为复杂的模型来模拟风电机组在不同条件下的行为。此外,研究还应关注如何更好地整合来自风电机组各部件的监测数据,以及如何更有效地利用这些数据来预测潜在的故障和性能下降,从而实现更精确的健康度评估。其次应当聚焦于开发更为高效和可靠的防雷与防腐技术,在防腐策略方面,需要研发新型防腐材料和涂层,提高风机部件的耐腐蚀性能。此外,还应加强风机腐蚀的在线监测技术,实现早期发现和及时维护。对于防雷策略,需要深入研究雷电的物理机理,开发新型的雷电监测和预警系统,以及更先进的雷电保护装置,如改进的避

雷针和电涌保护器。同时为减少雷击对风机的危害,需构建风机整体的电磁瞬态数学模型,并给出相应的抑制方法。通过这些研究,可以有效提升风机的防雷和防腐能力,从而提高风机的服役质量,延长其使用寿命,并保障风电场的稳定运行。

(3) 风电机组的暂态电压控制对于应对电网故障或负荷变化至关重要,但当前控制策略在响应速度和调节精度上存在不足,难以适应多变的运行模式和电网环境,且频繁的电压波动可能损害电气设备,影响风电机组的长期可靠性和服役寿命。稳态电压控制策略面临的挑战包括风电机组的分散特性,这使得集中控制策略不适用,需要更灵活的分散式控制方法来适应不同地理位置和环境条件下的风电场。此外电压控制策略的参数整定常依赖经验,缺乏对风电机组动态行为的深入理解,限制了控制策略的优化。电网规范和标准对风电机组的电压控制提出了更高要求,而现有控制策略在满足这些要求的同时要保证经济性和操作简便性存在困难。风电机组参与电网调频的能力受到运行特性和控制策略局限性的限制,调频响应需要快速且精确,但风速变化和机械结构限制了其实际响应速度和调节精度。频繁的调频指令可能对关键部件造成额外的机械负荷,加速部件磨损,缩短服役寿命。现有的调频控制策略多依赖模型预测和经验设定,缺乏对风电机组实际运行状态的实时优化。

在风电机组的暂态电压控制方面,未来的研究将致力于开发更高效和智能的控制策略,利用机器学习算法分析数据,预测电压变化,提前调整控制策略,优化控制参数以适应不同的电网条件和运行模式,从而提高对暂态电压波动的抑制能力,增强风电机组在复杂电网中的稳定性和可靠性。在稳态电压控制方面,研究将聚焦于结合人工智能技术,提升控制策略的自适应性和预测能力,通过深入分析运行数据,开发精确模型预测电压变化,实时调整控制参数,并研究分散式控制策略,确保每个风电机组都能根据其特定条件进行优化控制,提高控制策略的鲁棒性,减少对风机设备的不利影响,延长服役寿命以及提升整体服役质量。对于风电机组的频率控制,研究将着重于优化调频控制策略并增强其适用性,利用先进传感器技术和物联网进行实时监测以及运用大数据和人工智能算法优化调频策略,提高响应速度和调节精度的同时研究如何减少调频过程中对风电机组的伤害,并深入探讨风电机组在不同电网条件下的调频潜力和限制,以及如何

与其他电网控制协调作用,提高电网稳定性以及风电机组的服役质量。

(4) 当前风电场运维面临的核心问题之一是运维成本的高昂和运维难度的加大,智能化程度不足导致运维工作依赖大量的人工操作,这不仅增加了人力成本,也难以保证运维的及时性和准确性。例如,人工巡检无法实现对风电场的全面覆盖,且在恶劣天气条件下工作风险较高。其次智能运维系统的集成和优化仍处于发展阶段,需要解决数据采集、处理和分析的实时性、准确性问题。此外智能监测技术虽然能够提供大量运行数据,但如何有效利用这些数据进行决策的支持,提高运维效率仍是风电运维需要面临的难题之一。未来的研究应聚焦于开发更加灵活和响应迅速的运维策略,以适应不同风电场的特定需求和环境条件。此外还需开发和应用无人巡检技术,如无人机巡查和机器人自动化检测系统,以减少对运维人员的依赖,提高运维效率和安全性。此外单一的运维模式往往难以平衡可靠性和经济性,因此发展混合运维策略,结合定期巡检、状态监测和预测性维护等多种方法,将成为提高风电场运维效率的关键。通过这些研究,可以显著提升风电机组的服役质量和风电场的整体运行效率,降低运维成本,提高风机的服役质量。

(5) 风电机组尾流控制面临的挑战包括尾流效应对下游风机性能的负面影响,如降低风速和增加湍流,这可能导致风机出力下降和机械负载增加,进而影响风机的可靠性和服役寿命。此外现有的尾流控制策略多依赖经验和简化模型,缺乏对复杂流动特性的深入理解,难以实现对尾流效应的精确预测和有效控制。而且风电机组规模的不断扩大也增加了尾流控制的复杂性,需要考虑更多风机之间的相互作用。未来的研究方向应聚焦于优化尾流控制技术,以提高风电场的能量利用效率和保障风机的长期稳定运行。主要为利用计算流体动力学和大数据分析,对风电场内的流动特性进行深入研究,建立更为精确的尾流模型。同时需要探索新的尾流控制策略,如通过优化风机布局、调整桨叶角度和转速等手段,来减轻尾流效应的负面影响。此外研究还应关注智能控制技术的应用,如利用机器学习算法对风电场的运行数据进行实时分析,实现尾流控制的自适应调整,从而提高风电机组的服役质量。

(6) 风电机组服役质量调控方法的研究能够提升机群的整体运行性能,提高风电机组的消纳能力,

可以一定程度上解决风电系统的限电消纳以及售电等方面的难题。未来综合考虑风电机组服役质量的调控措施,将其与风功率预测、风电限电工况、新能源售电方式有机结合,是提升新型电力系统综合运行能力的重要研究方向之一。

5 结论

随着装机量的增长,冲击风况、极端海况等复杂自然条件及电网故障工况给风电服役质量调控带来诸多挑战,研究大规模风电机组服役质量的动态调控方法对于保证风电机组的安全高效运行具有重要意义。为此,本文紧密围绕国家新能源发展重大战略需求,针对大规模风电机组服役质量调控方法,从关键部件-风电机组-风电机组三个层面对风电机组服役质量的调控策略进行了深入分析,归纳总结了当前常见影响风电机组服役质量的调控策略,并指出了风电机组服役质量调控的发展趋势以及面临的挑战,为大规模风电机组服役质量的提升提供可借鉴的思路。

参考文献

- [1] 国网能源研究院. 中国能源电力发展展望[R]. 2020.
- [2] Global Wind Energy Council (GWEC). Global wind report: annual market update 2024[R]. Brussels, Belgium, 2023.
- [3] 国家能源局. 国家能源局发布 2023 年全国电力工业统计数据[J]. 电力科技与环保, 2024, 40(1): 95.
- [4] 蒋仁言. 工程系统服役质量指数和性能评价指标体系: 文献综述[J]. 机械工程学报, 2019, 55(18): 206-214.
Jiang Renyan. In-service quality indices and performance evaluation indicator system of engineered systems: literature review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(18): 206-214.
- [5] Mohammed O D, Rantatalo M, Aidanpää J O. Dynamic modelling of a one-stage spur gear system and vibration-based tooth crack detection analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 54: 293-305.
- [6] Mohammed O D. Dynamic modelling and vibration analysis for gear tooth crack detection[D]. Luleå: Luleå Tekniska Universitet, 2015.
- [7] General Department of the National Energy Administration. Notice on the development and construction

- of wind power and photovoltaic power generation in 2021 (draft for comments)[R]. 2021.
- [8] Kong Yun, Wang Tianyang, Li Zheng, et al. Fault feature extraction of planet gear in wind turbine gearbox based on spectral kurtosis and time wavelet energy spectrum[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2017, 12(3): 406-419.
- [9] Hu Aijun, Xiang Ling, Gao Nan. Fault diagnosis for the gearbox of wind turbine combining ensemble intrinsic time-scale decomposition with Wigner bi-spectrum entropy[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2017, 19(3): 1759-1770.
- [10] 雍彬, 陈进, 张方红, 等. 基于门控循环网络融合多源数据的风电齿轮箱状态预警方法[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(8): 421-425.
Yong Bin, Chen Jin, Zhang Fanghong, et al. State warning of wind turbine gearbox based on gated recurrent unit network fusing multi-source data[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42(8): 421-425.
- [11] 刘杰, 曹静, 赵昕. 基于 OOB-GWO-SVR 的风电机组齿轮箱故障预警[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(12): 97-105.
Liu Jie, Cao Jing, Zhao Xin. Wind turbine gearbox fault warning based on OOB-GWO-SVR[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(12): 97-105.
- [12] 张书瑶, 王梓齐, 刘长良. 基于改进集成 KNN 回归算法的风电机组齿轮箱状态监测[J]. *动力工程学报*, 2023, 43(6): 759-767.
Zhang Shuyao, Wang Ziqi, Liu Changliang. Condition monitoring of wind turbine gearbox based on improved ensemble KNN regression algorithm[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2023, 43(6): 759-767.
- [13] 刘旭斌, 郭鹏, 林峰. 基于深度学习与 SPRT 的风电机组齿轮箱轴承状态监测[J]. *动力工程学报*, 2020, 40(11): 889-896.
Liu Xubin, Guo Peng, Lin Feng. Condition monitoring of wind turbine gearbox bearings based on deep learning and SPRT[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2020, 40(11): 889-896.
- [14] 刘华新, 刘红艳, 韩中合, 等. 基于卷积神经网络的风电机组齿轮箱状态监测方法[J]. *可再生能源*, 2020, 38(1): 53-57.
Liu Huaxin, Liu Hongyan, Han Zhonghe, et al. A method of gearbox condition monitoring for wind turbine based on convolutional neural network[J]. *Renewable Energy Resources*, 2020, 38(1): 53-57.
- [15] 赵琴, 袁逸萍, 孙文磊, 等. 基于竞争失效的风电机组齿轮箱轴承剩余寿命分析[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(4): 438-444.
Zhao Qin, Yuan Yiping, Sun Wenlei, et al. Remaining useful life analysis of gearbox bearing of wind turbine based on competition failure[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42(4): 438-444.
- [16] 寇海霞, 安宗文, 刘波, 等. 基于贝叶斯网络的风电齿轮箱可靠性分析[J]. *兰州理工大学学报*, 2016, 42(1): 40-45.
Kou Haixia, An Zongwen, Liu Bo, et al. Reliability analysis of wind turbine gearbox based on Bayesian network[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2016, 42(1): 40-45.
- [17] 秦子川, 苏宏升. 基于改进威布尔分布的风电机组关键部件可靠性评估[J]. *电测与仪表*, 2021, 58(3): 68-73.
Qin Zichuan, Su Hongsheng. Reliability evaluation of key components of wind turbine based on improved Weibull distribution[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(3): 68-73.
- [18] 宋天昊, 韩肖清, 梁琛, 等. 计及风电机组齿轮箱疲劳的风电场可靠性评估[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(7): 304-312.
Song Tianhao, Han Xiaoqing, Liang Chen, et al. Reliability assessment of wind farm considering fatigue of wind turbine gearbox[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2020, 41(7): 304-312.
- [19] Cho S, Gao Z, Moan T. Model-based fault detection of blade pitch system in floating wind turbines[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 753: 092012.
- [20] 李洪川, 王旭东, 王东明, 等. 基于故障树的风电机组变桨系统故障诊断研究[J]. *设备管理与维修*, 2022(15): 168-169.
Li Hongchuan, Wang Xudong, Wang Dongming, et al. Research on fault diagnosis of variable pitch system of wind turbine based on fault tree[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2022(15): 168-169.

- [21] Yang Xianglong, Yang Ming, Zeng Xiangjun, et al. Fault warning of pitch system of wind turbine based on kernel density estimation[C]//8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019), Shanghai, China, 2019: 1-5.
- [22] 熊中杰, 邱颖宁, 冯延晖, 等. 基于机器学习的风电机组变桨系统故障研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(5): 85-90.
Xiong Zhongjie, Qiu Yingning, Feng Yanhui, et al. Fault analysis of wind turbine pitch system based on machine learning[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2020, 41(5): 85-90.
- [23] 张真真, 吴立东, 陈晓敏, 等. 基于支持向量机的风电机组变桨系统故障诊断[J]. 分布式能源, 2021, 6(3): 70-75.
Zhang Zhenzhen, Wu Lidong, Chen Xiaomin, et al. Fault diagnosis of wind turbine pitch system based on support vector machine[J]. Distributed Energy, 2021, 6(3): 70-75.
- [24] Wei Lu, Qian Zheng, Zareipour H. Wind turbine pitch system condition monitoring and fault detection based on optimized relevance vector machine regression[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2326-2336.
- [25] 王伟, 吕丽霞, 张厚. 基于机器学习的风电机组变桨系统故障预警[J]. 电力科学与工程, 2019, 35(10): 73-78.
Wang Wei, Lu Lixia, Zhang Hou. Fault early warning of wind turbine pitch system based on machine learning[J]. Electric Power Science and Engineering, 2019, 35(10): 73-78.
- [26] 伍云浩, 滕伟, 王罗, 等. 数字孪生驱动的风电机组变桨系统故障诊断[J]. 风机技术, 2023, 65(2): 63-69.
Wu Yunhao, Teng Wei, Wang Luo, et al. Fault diagnosis of pitch system of digital twins driven wind turbines[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2023, 65(2): 63-69.
- [27] Li Xiongwei, Lv Guanghua, Zhu Runze, et al. Research on fault early warning of wind turbine pitch system based on long short-term memory neural network[C]//2021 China Automation Congress (CAC), Beijing, China, 2021: 7691-7696.
- [28] 顾军民, 陈思函, 马永光. 基于 RBF 神经网络的风电机组变桨系统故障预警[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(12): 37-43.
Gu Junmin, Chen Sihan, Ma Yongguang. Research on fault early warning of wind turbine pitch system based on RBF neural network[J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(12): 37-43.
- [29] 陈思函, 马永光, 马良玉. 基于大数据分析的风电机组变桨系统建模及故障预警研究[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(9): 24-29.
Chen Sihan, Ma Yongguang, Ma Liangyu. Research on wind turbine pitch system modeling and fault warning based on big data analysis[J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(9): 24-29.
- [30] 毛永梅, 彭涛, 韩华, 等. 基于状态观测器的双馈风电机组变流器开关管开路故障检测[J]. 计算机辅助工程, 2015, 24(3): 57-61.
Mao Yongmei, Peng Tao, Han Hua, et al. Open-circuited fault detection on switch of convertor in double-fed wind power generator set based on state observer[J]. Computer Aided Engineering, 2015, 24(3): 57-61.
- [31] Yong Chen, Zhang Jianjian, Chen Zhangyong. Current observer-based online open-switch fault diagnosis for voltage-source inverter[J]. ISA Transactions, 2020, 99: 445-453.
- [32] 赵洪山, 程亮亮. 基于双线性观测器的双馈风电机组变流器功率管开路故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 72-79.
Zhao Hongshan, Cheng Liangliang. Open-circuit fault diagnosis based on bilinear observer for converter power-switch of doubly-fed wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 72-79.
- [33] Zhang Yi long, Zhang Xue guang. The output filter identification of three-phase PWM converter using weighted least square method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 734: 877-886.
- [34] 张瑞成, 白晓泽, 董砚, 等. 基于 LMD 能量熵和定位分析的风电变流器开路故障诊断[J]. 太阳能学报, 2023, 44(6): 484-494.
Zhang Ruicheng, Bai Xiaoze, Dong Yan, et al. Open-circuit fault diagnosis of wind power converter based on LMD energy entropy and location analysis[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(6): 484-494.

- [35] 段其昌, 荣先亮, 张莉, 等. 双馈风力发电系统双 PWM 变频器的开路故障诊断[J]. 电气传动, 2010, 40(4): 32-35.
Duan Qichang, Rong Xianliang, Zhang Li, et al. Open circuit faults diagnosis of double-PWM converter for doubly-fed wind power generation system[J]. Electric Drive, 2010, 40(4): 32-35.
- [36] 许水清, 陶松兵, 何怡刚, 等. 基于相电流瞬时频率估计的永磁直驱风电变流器开路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2022, 37(2): 433-444.
Xu Shuiqing, Tao Songbing, He Yigang, et al. Open-circuit fault diagnosis for back-to-back converter of PMSG wind generation system based on estimated instantaneous frequency of phase current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 433-444.
- [37] Ben Mahdhi H, Ben Azza H, Jemli M. Experimental investigation of an open-switch fault diagnosis approach in the IGBT-based power converter connected to permanent magnet synchronous generator-DC system[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(8): e12436.
- [38] Li Zhan, Wheeler P, Watson A, et al. A fast diagnosis method for both IGBT faults and current sensor faults in grid-tied three-phase inverters with two current sensors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 5267-5278.
- [39] Tan Yanghong, Zhang Haixia, Zhou Ye. Fault detection method for permanent magnet synchronous generator wind energy converters using correlation features among three-phase currents[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(1): 168-178.
- [40] Huang Zhanjun, Wang Zhanshan, Yao Xianshuang, et al. Multi-switches fault diagnosis based on small low-frequency data for voltage-source inverters of PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6845-6857.
- [41] Liang Jinping, Zhang Ke, Al-Durra A, et al. A novel fault diagnostic method in power converters for wind power generation system[J]. Applied Energy, 2020, 266: 114851.
- [42] 顾建锋, 杨维满, 赵春娟, 等. 基于 VMD 小波包能量熵的风电机组变流器故障诊断方法[J]. 机械研究与应用, 2023, 36(3): 163-167.
Gu Jianfeng, Yang Weiman, Zhao Chunjuan, et al. Fault diagnosis method for wind turbine converter based on VMD wavelet packet energy entropy[J]. Mechanical Research and Application, 2023, 36(3): 163-167.
- [43] 吴一斐, 黄伟, 李晓锋, 等. 基于 CNN-GRU 的风力发电变流器故障诊断技术[J]. 科技与创新, 2022(2): 168-170.
Wu Yifei, Huang Wei, Li Xiaofeng, et al. Fault diagnosis technology of wind power converter based on CNN-GRU[J]. Science and Technology & Innovation, 2022(2): 168-170.
- [44] Zhang Jingxuan, Sun Hexu, Sun Zexian, et al. Fault diagnosis of wind turbine power converter considering wavelet transform, feature analysis, judgment and BP neural network[J]. IEEE Access, 2019, 7: 179799-179809.
- [45] Burgos R, Chen Gang, Wang F, et al. Reliability-oriented design of three-phase power converters for aircraft applications[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(2): 1249-1263.
- [46] 李辉, 季海婷, 秦星, 等. 考虑运行功率变化影响的风电变流器可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 1-8.
Li Hui, Ji Haiting, Qin Xing, et al. Reliability evaluation considering operational active power variation of wind power converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 1-8.
- [47] 杜雄, 李高显, 孙鹏菊, 等. 考虑基频结温波动的风电变流器可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 258-265.
Du Xiong, Li Gaoxian, Sun Pengju, et al. Reliability evaluation of wind power converters considering the fundamental frequency junction temperature fluctuations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 258-265.
- [48] 季海婷, 李辉, 吴建梅, 等. 考虑不同时间尺度的风电变流器功率模块可靠性评估模型[J]. 电测与仪表, 2016, 53(21): 28-34, 64.
Ji Haiting, Li Hui, Wu Jianmei, et al. Multi-time scales reliability evaluation model of power modules in wind power converter[J]. Electrical Measurement

- & Instrumentation, 2016, 53(21): 28-34, 64.
- [49] 曹力, 潘巧波, 王明宇, 等. 基于混合核函数支持向量机的风电机组发电机温度预警方法[J]. 华电技术, 2020, 42(5): 43-49.
Cao Li, Pan Qiaobo, Wang Mingyu, et al. Early warning method for wind turbine generator temperature based on HK-SVM[J]. Huadian Technology, 2020, 42(5): 43-49.
- [50] Zhang Yuxian, Yan Shuqing, Qian Xiaoyi, et al. A fault diagnosis based on LSSVM and Bayesian probability for wind turbines[C]//2020 39th Chinese Control Conference (CCC), Shenyang, China, 2020: 4101-4106.
- [51] 宋谷月, 王滨, 刘博睿. 基于 BP 神经网络的风电机组发电机状态监测研究[J]. 吉林电力, 2012, 40(5): 29-32.
Song Guyue, Wang Bin, Liu Borui. Wind turbine generator condition monitoring based on BP[J]. Jilin Electric Power, 2012, 40(5): 29-32.
- [52] 于航, 尹诗. 基于 GRU-LightGBM 的风电机组发电机前轴承状态监测[J]. 中国测试, 2022, 48(9): 105-111.
Yu Hang, Yin Shi. Wind turbine generator front bearing condition monitoring based on GRU-LightGBM algorithm[J]. China Measurement & Test, 2022, 48(9): 105-111.
- [53] 赵洪山, 刘辉海, 刘宏杨, 等. 基于堆叠自编码网络的风电机组发电机状态监测与故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 102-108.
Zhao Hongshan, Liu Huihai, Liu Hongyang, et al. Condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine generator based on Stacked autoencoder network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 102-108.
- [54] 王鹏. 基于超声导波方法的风机叶片覆冰检测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Wang Peng. Detection of icing on fan blades based on ultrasonic guided wave method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [55] 王宇晨, 成斌. 基于灰色 FTA 的风机叶片覆冰对机组运行可靠性影响研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(4): 598-602.
Wang Yuchen, Cheng Bin. Research on the influence of fan blade icing on the operation reliability of unit based on grey FTA[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(4): 598-602.
- [56] 刘杰, 杨娜, 谭玉涛, 等. 基于 WD-LSTM 的风电机组叶片结冰状态评测[J]. 太阳能学报, 2022, 43(8): 399-408.
Liu Jie, Yang Na, Tan Yutao, et al. Assessment of icing state of wind turbine blades based on WD-LSTM[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(8): 399-408.
- [57] 董健, 柳亦兵, 滕伟, 等. 基于 BP_Adaboost 算法的风电机组叶片结冰检测[J]. 可再生能源, 2021, 39(5): 632-636.
Dong Jian, Liu Yibing, Teng Wei, et al. Wind turbine blade ice detection based on BP_Adaboost algorithm[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(5): 632-636.
- [58] 董兴辉, 张劲草, 李佳, 等. 基于数据特性分析的风电机组叶片结冰辨识[J]. 可再生能源, 2023, 41(1): 53-59.
Dong Xinghui, Zhang Jincao, Li Jia, et al. Identification of wind turbine blade icing based on data characteristic analysis[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(1): 53-59.
- [59] 戴乾军. 基于组合赋权-云模型的风电机组健康状态评估[J]. 兰州工业学院学报, 2022, 29(1): 68-73.
Dai Qianjun. Health status assessment of wind turbine based on combined weighting-cloud model[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2022, 29(1): 68-73.
- [60] 李进友, 李媛, 冯冰, 等. 基于随机组合赋权模糊评价的风电机组健康状态评估[J]. 太阳能学报, 2022, 43(8): 340-351.
Li Jinyou, Li Yuan, Feng Bing, et al. Wind turbine health state assessment based on stochastic combination weighting fuzzy evaluation[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(8): 340-351.
- [61] 郭煜涛, 谢丽蓉, 包洪印, 等. 基于多参数融合和组合赋权的风电机组健康状态评估[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2022, 39(1): 119-128.
Guo Yutao, Xie Lirong, Bao Hongyin, et al. Evaluation of health status of wind turbine based on multi-parameter fusion and combination weighting[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition in Chinese and English), 2022, 39(1): 119-

- 128.
- [62] 胡姚刚, 李辉, 刘海涛, 等. 基于多类证据体方法的风电机组健康状态评估[J]. 太阳能学报, 2018, 39(2): 331-341.
Hu Yaogang, Li Hui, Liu Haitao, et al. Evaluation of health status of wind turbine based on multiple evidence method[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(2): 331-341.
- [63] 董玉亮, 李亚琼, 曹海斌, 等. 基于运行工况辨识的风电机组健康状态实时评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(11): 88-95, 15.
Dong Yuliang, Li Yaqiong, Cao Haibin, et al. Real-time health condition evaluation on wind turbines based on operational condition recognition[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(11): 88-95, 15.
- [64] 李进友, 李媛, 王海鑫, 等. 基于XGBoost-Bin自动功率极限计算的风电机组健康性能评估及预测[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(6): 2172-2185.
Li Jinyou, Li Yuan, Wang Haixin, et al. Health performance assessment and prediction of wind turbines based on XGBoost-Bin automatic power limit calculation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(6): 2172-2185.
- [65] 邢幼圣, 庄圣贤, 侯正南, 等. 基于PCA-NAR神经网络的风电机组健康趋势评估[J]. 电气自动化, 2020, 42(1): 64-66, 91.
Xing Yousheng, Zhuang Shengxian, Hou Zhengnan, et al. Evaluation of wind turbine health trend based on the PCA-NAR neural network[J]. Electrical Automation, 2020, 42(1): 64-66, 91.
- [66] 林涛, 赵成林, 刘航鹏, 等. 基于改进栈式自编码器的风电机组发电机健康评估[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(3): 517-522.
Lin Tao, Zhao Chenglin, Liu Hangpeng, et al. Health assessment of wind turbine generator based on improved stacked auto-encoder[J]. Computer Engineering & Science, 2020, 42(3): 517-522.
- [67] 顾剑东, 魏超, 王志强, 等. 耐磨耐候聚氨酯风电叶片涂料的研制[J]. 现代涂料与涂装, 2022, 25(10): 1-3.
Gu Jiandong, Wei Chao, Wang Zhiqiang, et al. Development of polyurethane coatings for turbine blade with wear-resistant and weather-resistant[J]. Modern Paint & Finishing, 2022, 25(10): 1-3.
- [68] 江海涛, 李岩, 孙二平, 等. 海上风机钢管桩的阴极保护和防腐涂层性能研究[J]. 船舶工程, 2020, 42(增刊1): 508-511.
Jiang Haitao, Li Yan, Sun Erping, et al. Study on cathodic protection and anticorrosive coating performance of offshore wind turbine steel pipe piles[J]. Ship Engineering, 2020, 42(S1): 508-511.
- [69] 黄祥声. 福建海上风电机组环境条件及腐蚀失效分析[J]. 环境技术, 2023, 41(2): 19-23, 34.
Huang Xiangsheng. Environmental conditions and corrosion failure analysis of Fujian offshore wind turbines[J]. Environmental Technology, 2023, 41(2): 19-23, 34.
- [70] 胡家元, 钱洲亥, 张娣, 等. 海底电缆铜铠装层在舟山海水模拟溶液中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(5): 16-21.
Hu Jiayuan, Qian Zhouhai, Zhang Di, et al. Corrosion behavior of submarine cable copper clad layer in seawater simulation solution in Zhoushan[J]. Corrosion & Protection, 2020, 41(5): 16-21.
- [71] 许志军, 周自强, 李特, 等. 感应电流作用下海底电缆铜铠装层腐蚀规律研究[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 280-286.
Xu Zhijun, Zhou Ziqiang, Li Te, et al. Influence of induction current on corrosion of copper armor layer in submarine cable[J]. Surface Technology, 2020, 49(7): 280-286.
- [72] 付斌, 曾明伍, 林淑, 等. 海上风电机组碳纤维叶片防雷系统设计及仿真分析[J]. 分布式能源, 2020, 5(2): 35-38.
Fu Bin, Zeng Mingwu, Lin Shu, et al. Lightning protection system design and simulation analysis of carbon fiber blades of offshore wind turbines[J]. Distributed Energy, 2020, 5(2): 35-38.
- [73] 周家东, 韩敏, 黄虎. 风电机组叶片雷电损伤机理及防护方法研究[J]. 风能, 2018(2): 74-78.
Zhou Jiadong, Han Min, Huang Hu. Study on lightning damage mechanism and protection method of wind turbine blades[J]. Wind Energy, 2018(2): 74-78.
- [74] Zhu Rongwu, Chen Zhe, Wu Xiaojie, et al. Virtual damping flux-based LVRT control for DFIG-based wind turbine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(2): 714-725.

- [75] Wang Xiaohe, Yang Renxin, Shi Zhaohui, et al. Coordinated low voltage ride-through of MMC-HVDC transmission system and wind farm with distributed braking resistors[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 87860-87869.
- [76] Li Botong, Zheng Dingchuan, Li Bin, et al. Analysis of low voltage ride-through capability and optimal control strategy of doubly-fed wind farms under symmetrical fault[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(2): 1-15.
- [77] Xiao Xianyong, Yang Ruohuan, Zheng Zixuan, et al. Cooperative rotor-side SMES and transient control for improving the LVRT capability of grid-connected DFIG-based wind farm[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(2): 0600204.
- [78] Rafiee Z, Heydari R, Rafiee M, et al. Enhancement of the LVRT capability for DFIG-based wind farms based on short-circuit capacity[J]. *IEEE Systems Journal*, 2022, 16(2): 3237-3248.
- [79] Ding Can, Chen Yunwen, Nie Taiping. LVRT control strategy for asymmetric faults of DFIG based on improved MPCC method[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 165207-165218.
- [80] 谢震, 张兴, 杨淑英, 等. 基于虚拟阻抗的双馈风力发电机高电压穿越控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(27): 16-23.
Xie Zhen, Zhang Xing, Yang Shuying, et al. High voltage ride-through control strategy of doubly fed induction wind generators based on virtual impedance[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(27): 16-23.
- [81] 徐海亮, 章玮, 陈建生, 等. 考虑动态无功支持的双馈风电机组高电压穿越控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(36): 112-119, 16.
Xu Hailiang, Zhang Wei, Chen Jiansheng, et al. A high-voltage ride-through control strategy for DFIG based wind turbines considering dynamic reactive power support[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(36): 112-119, 16.
- [82] Wei Juan, Cao Yijia, Wu Qiuwei, et al. Coordinated droop control and adaptive model predictive control for enhancing HVRT and post-event recovery of large-scale wind farm[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(3): 1549-1560.
- [83] Wei Juan, Wu Qiuwei, Li Canbing, et al. Hierarchical event-triggered MPC-based coordinated control for HVRT and voltage restoration of large-scale wind farm[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(3): 1819-1829.
- [84] Huang Sheng, Wu Qiuwei, Guo Yifei, et al. Distributed voltage control based on ADMM for large-scale wind farm cluster connected to VSC-HVDC[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(2): 584-594.
- [85] Huang Sheng, Wu Qiuwei, Zhao Jin, et al. Distributed optimal voltage control for VSC-HVDC connected large-scale wind farm cluster based on analytical target cascading method[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(4): 2152-2161.
- [86] Wang Pengda, Wu Qiuwei, Huang Sheng, et al. Coordinated voltage control of offshore wind farms combined with AC grid based on OPF-MPC method[C]//2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Nanjing, China, 2020: 1-5.
- [87] Huang Sheng, Wu Qiuwei, Liao Wu, et al. Adaptive droop-based hierarchical optimal voltage control scheme for VSC-HVDC connected offshore wind farm[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(12): 8165-8176.
- [88] Peng Hanzhi, Huang Sheng, Wu Qiuwei, et al. Decentralized volt/var control based on variable gradient projection for PMSG-based wind farm[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(3): 1305-1314.
- [89] Peng Hanzhi, Huang Sheng, Wang Pengda, et al. An online feedback-based local method for topology identification and var/volt control in radial wind farms[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024, 20(3): 4292-4304.
- [90] Huang Sheng, Yang Yu, Wei Juan, et al. Hierarchical service quality regulation method in wind farms based on optimal generating strategy[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2024, 15(3): 1450-1461.
- [91] Peng Hanzhi, Huang Sheng, Wei Juan, et al. Two-stage decentralized optimal voltage control in wind farms with hybrid ESSs[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(5): 6552-6565.

- [92] 穆钢, 蔡婷婷, 严干贵, 等. 双馈风电机组参与持续调频的双向功率约束及其影响[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1750-1759.
- Mu Gang, Cai Tingting, Yan Gangui, et al. Bidirectional power constraints and influence of doubly fed induction generator participating in continuous frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1750-1759.
- [93] 李世春, 黄悦华, 王凌云, 等. 基于转速控制的双馈风电机组一次调频辅助控制系统建模[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7077-7086, 7422.
- Li Shichun, Huang Yuehua, Wang Lingyun, et al. Modeling primary frequency regulation auxiliary control system of doubly fed induction generator based on rotor speed control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7077-7086, 7422.
- [94] 姜莹, 边晓燕, 李东东, 等. 基于可变减载率超速控制的双馈异步风机参与微电网调频研究[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(9): 118-124.
- Jiang Ying, Bian Xiaoyan, Li Dongdong, et al. Research on doubly fed induction generator participation in microgrid frequency modulation based on variable load shedding ratio over-speed control[J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(9): 118-124.
- [95] 万天虎, 李华, 唐浩, 等. 基于全场控制的风电场一次调频控制方式及其工程化应用[J]. 智慧电力, 2019, 47(1): 41-46.
- Wan Tianhu, Li Hua, Tang Hao, et al. Primary frequency regulation control method for wind farm and its engineering application based on full-field control[J]. Smart Power, 2019, 47(1): 41-46.
- [96] 高海淑, 张峰, 丁磊. 风电机组两分段下垂调频控制策略及参数整定方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 111-121.
- Gao Haishu, Zhang Feng, Ding Lei. Two-segment droop frequency regulation control strategy and parameter setting method for wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 111-121.
- [97] Xie Zhen, Feng Yantao, Ma Mingyao, et al. An improved virtual inertia control strategy of DFIG-based wind turbines for grid frequency support[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 5465-5477.
- [98] Wang Tong, Jin Mingxin, Li Yongda, et al. Adaptive damping control scheme for wind grid-connected power systems with virtual inertia control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 3902-3912.
- [99] Hosny M, Marei M I, Mohamad A M. Adaptive hybrid virtual inertia controller for PMSG-based wind turbine based on fuzzy logic control[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 3757.
- [100] Zhu Xiaorong, Wang Yi, Xu Lie, et al. Virtual inertia control of DFIG-based wind turbines for dynamic grid frequency support[C]//IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011), Edinburgh, 2011: 1-6.
- [101] 秦世耀, 代林旺, 王瑞明, 等. 考虑风电机组功率跌落和机械载荷优化的虚拟惯量控制方法[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1665-1672.
- Qin Shiya, Dai Linwang, Wang Ruiming, et al. Virtual inertia control method considering power droop and mechanical load optimization of wind turbines[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1665-1672.
- [102] 林旭, 李军, 杨德健, 等. 基于功率轨迹预设的双馈风电机组虚拟惯量控制策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(10): 47-53.
- Lin Xu, Li Jun, Yang Dejian, et al. Virtual inertia control strategy for doubly-fed induction generator based on preset power trajectory[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 47-53.
- [103] 胡正阳, 高丙团, 张磊, 等. 风电机组双向支撑能力分析自适应惯量控制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(19): 5224-5240.
- Hu Zhengyang, Gao Bingtuan, Zhang Lei, et al. Bidirectional support capability analysis and adaptive inertial control strategy of wind turbine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5224-5240.
- [104] 李可心, 安军, 石岩, 等. 基于可用调频能量的风电机组综合虚拟惯性控制参数整定方法[J/OL]. 电工技术学报, 1-13 [2025-02-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2188.TM.20240522.1314.004.html>.
- Li Kexin, An Jun, Shi Yan, et al. Parameter tuning method for integrated virtual inertia control of wind

- turbines based on available frequency regulation energy[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1-13 [2025-02-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2188.TM.20240522.1314.004.html>.
- [105] 付媛, 万恠, 张祥宇, 等. 储能虚拟惯量主动支撑与调频状态转移控制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2628-2641.
Fu Yuan, Wan Yi, Zhang Xiangyu, et al. Energy storage virtual inertia active support and frequency modulation state transfer control[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2628-2641.
- [106] 杨黎, 兰怡希, 林玲, 等. 风储系统中储能虚拟惯量评估与频率支撑技术[J]. 浙江电力, 2024, 43(6): 52-60.
Yang Li, Lan Yixi, Lin Ling, et al. A virtual inertia assessment and frequency support technology for wind-storage power generation system[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(6): 52-60.
- [107] 张冠锋, 杨俊友, 王海鑫, 等. 基于虚拟同步机技术的风储系统协调调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(增刊 1): 83-92.
Zhang Guanfeng, Yang Junyou, Wang Haixin, et al. Coordinated frequency regulation control strategy for wind-storage system based on virtual synchronous generator technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1): 83-92.
- [108] 张祥宇, 胡剑峰, 付媛, 等. 风储联合系统的虚拟惯量需求与协同支撑[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 672-685.
Zhang Xiangyu, Hu Jianfeng, Fu Yuan, et al. Virtual inertia demand and collaborative support of wind power and energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 672-685.
- [109] 林莉, 林雨露, 谭惠丹, 等. 计及 SOC 自恢复的混合储能平抑风电功率波动控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 658-671.
Lin Li, Lin Yulu, Tan Huidan, et al. Hybrid energy storage control with SOC self-recovery to smooth out wind power fluctuations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 658-671.
- [110] 李东东, 朱钱唯, 程云志, 等. 基于自适应惯量阻尼综合控制算法的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 72-77.
Li Dongdong, Zhu Qianwei, Cheng Yunzhi, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on self-adaptive rotor inertia and damping combination control algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 72-77.
- [111] 杨赞, 梅飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 125-131.
Yang Yun, Mei Fei, Zhang Chenyu, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.
- [112] 符杨, 黄路遥, 刘璐洁, 等. 基于状态自适应评估的海上风电机组预防性维护策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 1-9.
Fu Yang, Huang Luyao, Liu Lujie, et al. Preventive maintenance strategy for offshore wind turbine based on state adaptive assessment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 1-9.
- [113] 李锁, 黄玲玲, 刘阳, 等. 基于风电机组状态信息的海上风电场维护策略[J]. 现代电力, 2022, 39(1): 26-35.
Li Suo, Huang Lingling, Liu Yang, et al. An offshore wind farm maintenance strategy based on wind turbine condition information[J]. Modern Electric Power, 2022, 39(1): 26-35.
- [114] 蒋究. 基于 SVG 的风电场 SCADA 系统 Web 客户端的设计与实现[D]. 南京: 东南大学, 2015.
Jiang Jiu. Design and implementation of Web client for SCADA system of wind farm based on SVG[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [115] 于强强. 基于 WindOS 智慧软件提高风电场运维管理效益[C]//中国农机工业协会风能设备分会, 深圳, 2018: 106-108.
- [116] 席菁华. 风电运维混战[J]. 能源, 2018(1): 48-52.
Xi Jinghua. Wind power operation and maintenance melee[J]. Energy, 2018(1): 48-52.
- [117] 徐树彪. 风电机组故障预警及智能分析系统[Z]. 云南滇能智慧能源有限公司, 2021-08-31.
- [118] El-Naggar M, Sayed A, Elshahed M, et al. Optimal maintenance strategy of wind turbine subassemblies to improve the overall availability[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2023, 14(10): 102177.

- [119] Do P, Vu H C, Barros A, et al. Maintenance grouping for multi-component systems with availability constraints and limited maintenance teams[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 142: 56-67.
- [120] Zhang Chen, Gao Wei, Yang Tao, et al. Opportunistic maintenance strategy for wind turbines considering weather conditions and spare parts inventory management[J]. *Renewable Energy*, 2019, 133: 703-711.
- [121] Fallahi F, Bakir I, Yildirim M, et al. A chance-constrained optimization framework for wind farms to manage fleet-level availability in condition based maintenance and operations[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 168: 112789.
- [122] Xia Jiajun, Zou Guang. Operation and maintenance optimization of offshore wind farms based on digital twin: a review[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 268: 113322.
- [123] 胡阳, 张冲, 房方, 等. 基于主动尾流控制的风电机群协同优化调度[J]. *动力工程学报*, 2024, 44(4): 566-574.
- Hu Yang, Zhang Chong, Fang Fang, et al. Cooperative and optimal scheduling of wind turbine groups based on active wake control[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2024, 44(4): 566-574.
- [124] 邵振州. 风电场尾流快速模拟方法及应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- Shao Zhenzhou. Research on fast simulation method of wind farm wake and its application[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [125] 李丽霞. 考虑尾流和电气损耗的风电场有功功率提升控制策略研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- Li Lixia. Research on active power boost control strategy of wind farm considering wake and electrical loss[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [126] 张子良, 郭乃志, 易侃, 等. 基于稳定偏航的风电场协同控制[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(6): 530-535.
- Zhang Ziliang, Guo Naizhi, Yi Kan, et al. Coordinated control of wind farm based on steady yaw[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2024, 45(6): 530-535.
- [127] Gebraad P M O, Teeuwisse F W, van Wingerden J W, et al. Wind plant power optimization through yaw control using a parametric model for wake effects—a CFD simulation study[J]. *Wind Energy*, 2016, 19(1): 95-114.
- [128] 王俊, 周川, 蔡彦枫, 等. 考虑疲劳均衡的海上风电场主动尾流控制研究[J]. *可再生能源*, 2021, 39(2): 208-214.
- Wang Jun, Zhou Chuan, Cai Yanfeng, et al. Active wake control of offshore wind farm considering fatigue equilibrium[J]. *Renewable Energy Resources*, 2021, 39(2): 208-214.
- [129] Vali M, Petrović V, Pao L Y, et al. Model predictive active power control for optimal structural load equalization in waked wind farms[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2022, 30(1): 30-44.
- [130] 魏赏赏, 许昌, 阎洁, 等. 考虑迟延的风电场模型预测尾流优化控制[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(5): 1813-1823.
- Wei Shangshang, Xu Chang, Yan Jie, et al. Wake control of wind farm based on model predictive control considering propagation delay[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(5): 1813-1823.
- [131] Chen Weimin, Wang Pengda, Huang Sheng, et al. MPC-based fatigue load suppression of waked wind farm with 2Dof WT control strategy[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2024, 15(4): 2219-2233.
- [132] 姚琦, 梁泽民, 胡阳, 等. 不依赖尾流模型的风电场能效提升与机组载荷抑制控制[J/OL]. *中国电机工程学报*, 2024, 1-11 [2024-08-17].
- Yao Qi, Liang Zemin, Hu Yang, et al. Control for wind farm efficiency improvement and load reduction without wake models[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 1-11 [2024-08-17].
- [133] Shu Tong, Song Dongran, Joo Y H. Decentralised optimisation for large offshore wind farms using a sparsified wake directed graph[J]. *Applied Energy*, 2022, 306: 117986.
- [134] 陈振宇. 风电机组尾流动态演化特性与多机协同优化控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- Chen Zhenyu. Study on dynamic evolution characteristics of wind turbine wake and multi-machine collaborative optimal control[D]. Beijing: North

- China Electric Power University, 2022.
- [135] Fleming P A, Gebraad P M O, Lee Sang, et al. Evaluating techniques for redirecting turbine wakes using SOWFA[J]. *Renewable Energy*, 2014, 70: 211-218.
- [136] Maronga B, Gryscha M, Heinze R, et al. The parallelized large-eddy simulation model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives[J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(8): 2515-2551.
- [137] Ye Zhaoliang, Wang Xiaodong, Chen Ziwen, et al. Unsteady aerodynamic characteristics of a horizontal wind turbine under yaw and dynamic yawing[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2020, 36(2): 320-338.
- [138] Onel H C, Tuncer I H. A comparative study of wake interactions between wind-aligned and yawed wind turbines using LES and actuator line models[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1618(6): 062009.
- [139] Hansen K S, Barthelmie R J, Jensen L E, et al. The impact of turbulence intensity and atmospheric stability on power deficits due to wind turbine wakes at Horns Rev wind farm[J]. *Wind Energy*, 2012, 15(1): 183-196.
- [140] Lee Sang, Vorobieff P, Poroseva S. Interaction of wind turbine wakes under various atmospheric conditions[J]. *Energies*, 2018, 11(6): 1442.
- [141] 武英. 风电机组尾流二维解析模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
Wu Ying. Study on two-dimensional analytical model of wind turbine wake[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [142] Wang Xiaodong, Ye Zhaoliang, Kang Shun, et al. Investigations on the unsteady aerodynamic characteristics of a horizontal-axis wind turbine during dynamic yaw processes[J]. *Energies*, 2019, 12(16): 3124.
- [143] 国家能源局. 关于做好新能源消纳工作 保障新能源高质量发展的通知[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/202406/content_6956393.htm.
- [144] 祝东, 陈武晖, 郭小龙, 等. 蓄热电采暖与需求响应协同消纳风电的混合时间尺度调度策略[J/OL]. *中国电机工程学报*, 1-12 [2025-02-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240508.1329.004.html>.
- Zhu Dong, Chen Wuhui, Guo Xiaolong, et al. Hybrid time-scale dispatch strategy for wind power consumption by thermal storage electric heating and demand response[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 1-12 [2025-02-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240508.1329.004.html>.
- [145] 侯俊禹, 袁至, 王维庆, 等. 利用建筑虚拟储能提升风电消纳能力的电热联合系统优化调度方法[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(5): 206-216.
Hou Junyu, Yuan Zhi, Wang Weiqing, et al. Optimal scheduling method of combined electric and thermal system by using building virtual energy storage to improve wind power accommodation capability[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2024, 45(5): 206-216.
- [146] 周明, 武昭原, 贺宜恒, 等. 兼顾中长期交易和风电参与的日前市场出清模型[J]. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49(8): 1050-1065.
Zhou Ming, Wu Zhaoyuan, He Yiheng, et al. A day-ahead electricity market-clearing model considering medium- and long-term transactions and wind producer participation[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2019, 49(8): 1050-1065.
- [147] 黄大为, 李赛龙, 孔令国. 计及中长期合同电量分解与风电报价的日前市场出清模型研究[J]. *东北电力大学学报*, 2023, 43(4): 45-56.
Huang Dawei, Li Sailong, Kong Lingguo. Research on day-ahead electricity market clearing model considering medium and long-term contracts decomposition and wind power producer bidding[J]. *Journal of Northeast Electric Power University*, 2023, 43(4): 45-56.
- [148] 卢治霖, 刘明波, 尚楠, 等. 考虑碳排放权交易市场影响的日前电力市场两阶段出清模型[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(10): 159-170.
Lu Zhilin, Liu Mingbo, Shang Nan, et al. Two-stage clearing model for day-ahead electricity market considering impact of carbon emissions trading market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(10): 159-170.
- [149] 陈春宇, 黄宸恺, 王剑晓, 等. 考虑风电不确定性的调频辅助服务市场多时间尺度出清调度策略[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(21): 6804-6818.

Chen Chunyu, Huang Chenkai, Wang Jianxiao, et al. Multi-time-scale frequency regulation market clearing and dispatch strategy considering wind power uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(21): 6804-6818.

[150] 刘晓军, 熊健, 王艺博, 等. 考虑不确定变量VMD及绿证-碳联合交易的综合能源系统经济优化调度[J/OL]. 电工技术学报, 1-17 [2025-02-11]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240967>.

Liu Xiaojun, Xiong Jian, Wang Yibo, et al. Economic dispatch of integrated energy systems considering uncertain variables VMD and joint green certificate-

carbon trading[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1-17 [2025-02-11]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240967>.

作者简介

黄 晟 男, 1987 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为风电机组群协调优化控制理论与技术、风力发电并网及载荷控制技术、面向新能源发电的人工智能及大数据技术等。

E-mail: huangsheng319@hnu.edu.cn

魏 娟 女, 1990 年生, 副研究员, 研究方向为风电机组建模及协同优化控制等。

E-mail: weijuanba@hnu.edu.cn (通信作者)

A Review of Regulation Method of Service Quality of Large-Scale Wind Farm

Huang Sheng^{1,2} Ling Jili^{1,2} Wei Juan^{1,2} Qin Guojun^{1,2} Huang Shoudao^{1,2}

(1. School of Electrical and Information Engineering Hunan University Changsha 410082 China

2. State Key Laboratory of Offshore Wind Power Equipment and Efficient Utilization of Wind Energy
Changsha 410082 China)

Abstract The large-scale development of wind power is a major demand for the development and utilization of new energy sources, and the high-performance service of the wind turbine fleet is an important guarantee for realizing the goal of the national carbon peaking and carbon neutrality goals. With the continuous increase of stand-alone capacity and installed capacity, wind conditions, sea conditions, and other complex environments make the synergistic optimization between service performance of large-scale wind turbine fleet-safe operation capacity-power generation benefits complex, and the unit safety and accurate warning and service quality control face serious challenges.

Firstly, the advantages and disadvantages of condition monitoring and fault diagnosis of key components of WTGs and reliability assessment are sorted out and compared. The current status of their service quality regulation is investigated. Secondly, the impacts of WTG's healthiness, corrosive environment, and thunderstorms on the service quality of WTGs are elaborated, and the impacts of WTG FM strategy on the service quality are summarized. Then, the factors that affect the service quality of the wind turbine fleet are analyzed. The characteristics of voltage control strategy, operation and maintenance, and tail current control are analyzed.

High-quality power generation, operation and maintenance strategies, and tailing effects are analyzed at the level of the wind turbine fleet based on the service quality control methods of key components, wind turbines, and the wind turbine fleet. An outlook of the possible future direction is made to enhance the service performance of the wind turbine fleet and promote the healthy and sustainable development of the wind power industry.

Keywords: Wind power generation, wind farm cluster, wind turbine, service quality, dynamic regulation

(编辑 崔文静)