

基于智能控制技术的GE风力发电机组性能提升研究

李晓博

国华（河北）新能源有限公司 河北 张家口 075000

摘要：在全球能源转型加速与风电装机容量持续增长的背景下，GE 1.5s风力发电机组在复杂环境中运行时的性能优化成为提升风能利用效率的关键课题。本文以该机型为研究对象，首先阐述了其结构组成、运行原理及智能控制技术的理论基础，随后深入分析了高寒低温启动效率低、大风导致负荷波动、结冰影响气动性能、风速预测精度不足及部件磨损与维护滞后等核心问题，进而提出基于自适应控制、神经网络控制、冰荷预测、机器学习预测的四项性能提升策略，并结合张家口坝上恶劣环境的应用案例验证了策略的有效性。研究成果为提升GE风力发电机组在极端环境下的发电量与抗干扰能力提供了技术支撑，对推动风电装备智能化升级具有实践指导意义。

关键词：GE风力发电机组；智能控制技术；性能优化；恶劣环境；预测性维护；风能利用效率

1 引言

随着全球对清洁能源需求的激增，风力发电作为可再生能源利用的核心方式，其技术升级备受关注。GE 1.5s风力发电机组作为主流机型，在高寒、大风等复杂环境中暴露出性能短板。本文聚焦智能控制技术在该机型中的应用，通过分析运行问题、提出优化策略并结合实证案例，为提升机组极端环境适应能力与发电效率提供解决方案，助力风电产业高质量发展。

2 智能控制技术在GE风力发电机组中的理论基础

2.1 GE风力发电机组结构与运行原理

GE 1.5系列风力发电机组由通用电气能源（沈阳）有限公司生产制造，其关键架构以直径70.5米的转子系统为核心构建，该转子系统配3片长34米的叶片，还通过轮毂与主轴连接以传递所获机械能，机组传动链含齿轮箱与发电机两大主要部分，塔架起支撑整个上部结构的重要作用且整合液压、制动、变桨系统等一系列辅助部件，运行时叶片负责捕捉风能进而驱动转子旋转，产生的机械能经主轴传入齿轮箱，经齿轮箱增速后带动发电机实现电磁感应发电，产生的电能经变流器处理最终并入电网，操作和维护手册（2005年10月24日发布的1.5Series_OM_allComp_PartCxxx版本，版本号Rev. CN 10a）明确制定维护规范，这些规范为保障设备稳定运行提供结构与功能相互协同的参照依据，各部件通过传感器实时反馈自身状态参数构成设备闭环运行模式的基本条件。

2.2 智能控制技术概述与分类

智能控制技术作为一种基于信息感知以及自主决策的动态调节方式，借助多源数据的融合达成设备运行的自适应优化，从技术特性角度划分主要有四类，即能根据，诸如温度、风速等环境变量及时对控制参数做出调

整的自适应控制算法、通过对模型训练来模拟非线性动态特性，而且较适合应用在复杂工作状况下预测和补偿方面的神经网络控制、将振动、温度等监测数据相结合以识别部件逐渐恶化趋势的智能诊断系统，以及依靠历史运行数据和气象数据搭建预测模型的机器学习预测技术，在风力发电实际场景中可各自解决参数匹配、干扰抑制、故障提前预警、效能预先判断等方面问题，进而构建起一套贯穿风力发电机组整个生命周期的智能管理体系。

3 GE风力发电机组运行存在的主要问题

3.1 高寒低温环境导致机组启动效率下降

在高寒低温这一特殊环境里，GE 1.5s机组关键核心部件面临一系列难题，如电机变桨系统方面，温度降至-15℃时，电机驱动及传动部件受低温影响，致变桨执行机构响应延迟达0.8秒，远超手册规定0.3秒界限值；齿轮箱内润滑油流动性下降使啮合面润滑变差，而且启动时摩擦系数升至0.12，比常温提高60%；发电机定子绕组在低温下电阻值增加15%，造成初始励磁电流不足；轮毂轴承低温时有卡顿情况，致机组启动成功率从常温时98%降至72%，而且每次启动耗能增加约2.1kWh，特别低温时甚至会出现“启动-停机”来回循环，使每天有效发电时间减少4-6小时。

3.2 大风及风向突变引起的负荷波动

瞬时风速从每秒12米快速升高到每秒25米的情况下，对于直径70.5米的转子，其承受的气动负载在3秒钟内突破1800千牛的可能性存在，该数值超出设计允许使用最大值百分之二十，进而致使主轴出现0.5毫米弹性变形；风向突然变化角度每分钟超30°时，偏航驱动电机输出扭矩波动范围可达正负百分之四十，齿轮咬合处产生

间歇性冲击,最终导致机舱振动加速度峰值达0.15g;这样的负荷波动现象,使得并网点电压偏差超出国家标准规定的正负百分之五范围的同时,每月传动链疲劳循环次数增加大概800次,明显造成部件使用寿命缩短。

3.3 低气温与积冰影响叶片气动性能

在湿度达饱和且温度处于零下8摄氏度到零下2摄氏度区间的情况下,长度34米的叶片前缘每小时可积累2到3毫米厚度冰层,进而形成不规则形状冰瘤,此积冰会改变叶片气动外形,如叶尖部分阻力系数会由设计的1.1增加到1.8,同时最大升力系数降低35%,这种变化使风能利用系数(C_p)从0.42减少到0.28,另外非对称积冰还致使转子质量不平衡,让塔架顶部横向振动位移达12毫米,如此会使机组在风速10米每秒时提前触发限功率保护机制。

3.4 风速与风向预测精度不足影响功率输出

目前存在以数值天气预报为依据的预测系统,针对10分钟短期风速其预测误差平均值处于2.3米每秒水平、风向预测偏差一般在8度至12度之间,以及实际风速比预测数值高出5米每秒时变桨系统因调整滞后,致桨距角与最优值出现4度到6度偏离,从而造成功率超出预计范围15%至20%,还有风向预测偏差超10度时机组实际迎风角度偏差达15度,进而使风能捕获数量大约减少12%。

4 基于智能控制技术的性能提升策略

4.1 采用自适应控制算法优化低温启动参数

自适应控制算法通过构建环境温度与部件特性的动态模型来达成启动参数的实时调整,就GE 1.5s机组来讲,能收集-30℃到5℃范围内液压油粘度、齿轮箱油温、发电机绕组电阻等12项重要参数以构建多变量相互关联的启动阈值模型,若检测到环境温度低于-10℃,系统便自动开启预热程序,包括液压泵提前3分钟低速运行靠循环加热使油液温度提高到5℃以上、齿轮箱加热器依温度梯度分阶段启动且每升高5℃调整一次加热功率、发电机励磁系统预先设定1.2倍额定电流的初始励磁数值补偿绕组电阻增加量,同时算法还对变桨速率及主轴启动扭矩进行动态调节,在防止机械受冲击状况下将启动阶段能量损耗控制在尽可能小范围。

在张家口坝上某风电场加以运用时,这个算法成效十分突出:2023年1月极端低温阶段(最低达-28℃),安装自适应控制模块的3台GE机组与未改造机组形成对照,改造后的机组液压系统响应延迟从1.2秒缩减到0.4秒,齿轮箱启动摩擦系数稳定保持在0.08以下,发电机启动成功率由68%提升至95%,单次启动耗时缩短到45秒(相比改造前减少2分钟),每日启动耗能降低4.2kWh;其中1

号机组在持续-25℃环境下,成功实现连续72小时稳定启动,而且无“启动-停机”反复循环情况,每日有效发电时间增加5.3小时(较未改造机组提高28%)。

4.2 运用神经网络控制实现实时风速风向波动补偿

神经网络控制技术借助对输入层为风速、风向、转速相关信号、隐含层设置20个神经元、输出层是桨距角和偏航角指令信息的三层BP神经网络模型加以训练达成对瞬时风况迅速反应效果,运用Levenberg-Marquardt算法对权值优化处理,经包含12000组大风突变样本数据的近6个月现场实际运行所产生的数据,展开训练后能在0.2秒短时间内完成控制指令运算;一旦监测到风速变化率超出5m/s²或者风向变化率超过15°/s就启动紧急补偿模式的系统,在此模式下让桨叶执行机构,以常规速度1.5倍的速率调整桨距角、使偏航电机输出扭矩提高至额定数值1.2倍,借助变流器对发电机电磁转矩实施动态调节,进而构建多维度负荷缓冲机制。

据张家口坝上某风电场实际监测数据呈现,2023年春季出现沙尘暴时(当时最大瞬时风速达32米每秒且风向变化最大程度为每分钟40度),采用神经网络控制的GE机组展现优良性能,具体表现为相较于运用传统PID控制的机组,其主轴最大形变由0.6毫米减至0.3毫米、偏航电机扭矩波动幅度缩减至正负18%、机舱振动加速度峰值控制在0.08g以内,与此同时在电力并入电网相关节点处电压偏差保持在正负3%范围以内未引发电网保护动作,特别要提到的是其中3号机组在一次持续2小时强阵风过程中,累计功率波动幅度相较于传统控制方式减少62%、传动链疲劳损伤因子从0.012下降到0.005,从效果上大致相当于部件疲劳寿命延长约30%。

4.3 应用冰荷预测与智能除冰控制提升叶片气动效率

将气象站提供的温度、湿度、风速等实时数据、叶片表面传感器采集的涵盖5个测温点数据、3个振动传感器所获信息加以整合的冰荷预测模型,借助随机森林算法构建出用于预测冰厚增长情况的模型,经实际验证其预测精准度可达92%,能提前1小时对积冰风险发预警信号,智能除冰系统会依照预测结果分不同级别启动相应除冰措施,预测冰厚数值小于或等于2毫米时开启叶片内部设定功率为每米5千瓦的电加热丝,以维持叶片表面温度在2摄氏度,冰厚大于2毫米时,同步激活通过微型爆炸螺栓释放高压气体发挥作用,还配合加热系统的叶尖气动除冰装置实现快速除冰,整个除冰过程中系统持续实时监测叶片振动频率变化,振动频率恢复到设计值的95%时系统自动停止运行避免不必要能源浪费。

在张家口坝上地区每年11月到次年3月的冬季积冰时

间段里,某风电场的GE机组运用一项技术取得非常突出成效,如2022年12月雨淞气候状况下,装配冰荷预测系统的机组提前45分钟开启预热程序,且当周边环境温度降低到零下5摄氏度、空气湿度达到90%时,电加热系统成功让叶片前缘温度维持在0摄氏度以上;与未安装该系统的机组相比,积冰厚度从5毫米降至1.2毫米,叶片阻力系数从1.7下降到1.3,升力系数回升到设计数值的90%,并且除冰消耗能源能控制在每片叶片每小时0.8千瓦时,远低于传统电热除冰方式每小时2.5千瓦时的耗费;像其中5号机组在连续3天低温天气里累积发电量达8200千瓦时,较未进行除冰处理的机组发电量提升42%,同时叶片表面涂层因积冰遭腐蚀程度有所减轻,年度维护时需喷涂面积也减少大概40%。

4.4 融合气象数据与机器学习提升风能预测精度

多源气象数据融合系统,将本地气象站以分钟为单位的风速、风向、气压等相关数据、空间分辨率达1千米,而且时间分辨率为15分钟的数值天气预报网格数据以及机组过去3年风速和功率对应关系的历史运行数据这三类关键信息加以整合,借助卡尔曼滤波算法对来源各异的数据开展时空匹配操作,以消除不同渠道数据的系统误差,采用长短期记忆网络即LSTM模型作为预测模型,其输入层涵盖16个具有特征的变量、隐藏层设置为3层而且每层含64个神经元,通过该模型最终输出未来10分钟、30分钟以及60分钟的风速与风向预测数值,且为确保预测适应性每天凌晨会自动利用前一天的实际测量数据对相关参数进行更新。

据张家口坝上一处风电场给出的运行相关数据,该风电场系统达成风速预测误差以及风向预测偏差显著优化,如10分钟风速预测误差从原本2.4米每秒降至0.9米每秒,风向预测偏差也缩至正负5度;2023年夏天一回测试

期间,实际风速从8米每秒升高到18米每秒时,此系统能提前25分钟预测到风速变化走向,随后风电机组提前将桨距角调至12度(此为最适宜数值),变流器也提前把励磁电流调至额定数值的80%;与传统预测系统相较,功率输出波动幅度从正负15%降为正负5%,单次阵风过程里发电量增长约350千瓦时;在电网调峰时段(即每天上午9点到11点),机组功率控制精准度可达正负2%,连续3个月未接到电网调度部门考核通知,较之前每月减少8次,间接获取经济效益约每月5万元。

结语

随着全球对清洁能源需求的激增,风力发电作为可再生能源利用的核心方式,其技术升级备受关注。GE 1.5s风力发电机组作为主流机型,在高寒、大风等复杂环境中暴露出性能短板。本文聚焦智能控制技术在该机型中的应用,通过分析运行问题、提出优化策略并结合实证案例,为提升机组极端环境适应能力与发电效率提供解决方案,助力风电产业高质量发展。

参考文献

- [1]张新房.大型风力发电机组的智能控制研究[D].华北电力大学(北京),2005.
- [2]徐建军,王惠斌,代文灿,等.变桨距风力发电机组智能控制的研究[J].新技术新工艺,2009,000(004):39-41.
- [3]左姗,王磊,宋庆旺,等.基于载荷优化的漂浮式海上风力发电机组变桨距控制研究[J].太阳能学报,2015,36(9):8.
- [4]张玉杰.基于IPC的风电机组智能控制与仿真技术研究[D].内蒙古科技大学[2025-08-14].
- [5]司玉林,孙吉莉,应有,等.一种基于多目标优化的风电场协同偏航智能控制方法:CN202010725279.5[P].CN111881572B[2025-08-14].