

基于实测数据的直驱风电机组谐波特性分析及建模方法

陈 磊 雷 闯

湖南澧水流域水利水电开发有限责任公司 湖南 长沙 410018

摘 要: 直驱风电机组谐波特性受变流器非线性、工况及电网条件耦合影响,传统机理模型难以精准刻画。本文基于 IEC 标准开展多工况现场实测,获取全频段谐波数据。分析揭示低次谐波随风速与出力迁移规律、动态响应及电网扰动耦合机理,量化多因素权重。构建数据驱动等效谐波源模型,采用粒子群辨识与分层优化,仿真验证显示预测误差降至 6% 内,为谐波抑制与并网评估提供精准支撑。

关键词: 基于实测数据;直驱风电机组;谐波特性;建模方法

引言: 风电规模化并网下,直驱机组谐波问题日益突出,其发射特性与运行工况、电网环境强相关,传统机理模型因忽略死区、控制延时等非理想因素,预测偏差大。现有研究缺乏基于现场实测的系统性谐波特性分析与数据驱动建模方法。本文依托多工况实测数据,系统分析稳态与动态谐波响应规律,量化关键影响因素,构建高精度数据驱动等效模型,旨在填补实测与模型间的衔接空白,提升工程适用性。

1 直驱风电机组谐波机理与实测方案设计

1.1 直驱风电机组结构与谐波产生机理

(1) 永磁直驱风电机组整机拓扑结构: 风轮直驱永磁同步发电机,输出经机侧变流器整流、直流母线稳压、网侧变流器逆变后升压并网。全功率变流器实现发电机与电网完全解耦,无需齿轮箱。(2) 机侧、网侧变流器谐波产生原理: 机侧变流器 PWM 整流引入开关频率次及边带谐波,幅值随转速变化;网侧变流器因死区时间、调制非线性产生奇次谐波,载波整数倍处产生簇状谐波。(3) 风速、工况、并网条件对谐波的影响机制: 风速波动导致调制比变化,低风速时低次谐波占比升高;弱电网下电压畸变经变流器耦合放大,引发间谐波和次同步振荡风险。

1.2 谐波测试标准与实测参数选取

(1) 风电并网谐波测试相关国家标准与行业规范: 依据 GB/T14549 对 2~50 次谐波电压、电流限值进行校核,参考 GB/T24337 评价间谐波水平,遵循 NB/T31051 中关于测试点位、测量时长及数据记录的要求,同时参照 IEC61000-4-7 规定的谐波分组与测量方法,确保测试合规。(2) 谐波测试关键参数: 频次(各次谐波及间谐

波的中心频率)、幅值(各次谐波电压/电流有效值)、相位(各次谐波相对于基波初相角)、畸变率(总谐波畸变率 THD 及各次含有率 HR),四项参数从幅频相综合角度完整刻画谐波特征。(3) 测试工况划分: 按风速区间分为切入附近(3~5m/s)、额定附近(10~12m/s)及切出前(>20m/s);按出力分为轻载(<20% P_n)、半载(40%~60% P_n)和满载(>90% P_n);按电网强弱分为强网(SCR > 10)与弱网(SCR < 5),形成交叉工况矩阵^[1]。

1.3 现场实测系统搭建与数据采集

(1) 实测设备选型与接线方案设计: 选用 IEC61000-4-7A 级电能质量分析仪,采样率≥10.24kHz,电压经 PT 二次接入、电流经钳形互感器卡入并网柜出线侧,连续记录不少于 72 小时。(2) 风电场现场实测工况设置与试验流程: 各工况稳定运行≥10 分钟,同步记录风速、功率、电压;流程依次为设备校验、预测试验证、多工况采集、数据备份,全过程做好运行日志。(3) 多场景谐波原始数据采集与初步筛选: 覆盖全部 9 种工况,每工况重复三次。筛选剔除传感器饱和段、数据中断段及电压波动超±5%的非稳态段,按风速—出力—谐波标签分类归档,形成有效样本库供后续分析。

2 基于实测数据的直驱风电机组谐波特性分析

2.1 实测数据预处理与误差修正

(1) 实测数据去噪、异常值剔除方法: 采用小波阈值去噪算法对原始电压、电流信号进行降噪处理,选取 Daubechies 小波基进行多层分解,滤除高频随机噪声。针对异常值,依据拉依达准则,剔除偏离均值超过 3 倍标准差的离群数据,同时对幅值突变、波形明显畸变的异

常片段进行人工复核,确保后续分析的纯净性^[2]。(2)数据同步校准与标准化处理:基于GPS时钟同步信号对各通道采集数据进行时标对齐,消除多通道采样起始时间不一致造成的相位偏差。将所有数据归算至统一的标么值系统,以并网额定电压和额定电流为基准进行标准化,消除不同工况下基波幅值差异对谐波分析的影响。(3)实测数据有效性验证与误差分析:将实测基波电压、电流与风电场SCADA系统同步记录值进行比对,偏差超过 $\pm 3\%$ 的数据段予以复核。对FFT分析得到的各次谐波幅值,采用不同窗函数(汉宁窗、布莱克曼窗)进行交叉验证,评估频谱泄漏造成的测量不确定度,确保各工况样本的谐波参数有效可信。

2.2 稳态谐波特性规律分析

(1)低次谐波频次分布与幅值特征:对稳定运行工况下的各次谐波进行统计分析,确定5次、7次、11次、13次等特征谐波的幅值范围与统计特征量(均值、标准差、95%概率大值)。绘制不同出力区间内各次谐波幅值箱线图,分析主导谐波次数随出力变化的迁移规律,明确各稳态工况下的主要谐波贡献成分。(2)高频谐波、间谐波衰减与分布规律:分析载波频率倍频附近谐波簇的幅值分布特性,归纳高频谐波幅值随频率变化的衰减速率与衰减规律。对间谐波进行精细化频谱分析,提取非整数倍频分量的幅值特征,研究间谐波频率与变流器开关频率、调制波频率之间的对应关系及分布规律。(3)不同稳态工况下谐波畸变率变化特性:对比轻载、半载、满载工况下总电压谐波畸变率THDu与总电流谐波畸变率THDi的变化范围及统计特征。绘制畸变率随出力变化的趋势曲线,揭示畸变率升降拐点位置,量化不同稳态工况间畸变率差异的显著性,明确各频段谐波对总畸变率的贡献占比。

2.3 动态工况谐波特性响应规律

(1)风速波动下谐波动态响应特性:选取风速阶跃变化及湍流渐变时段,提取各次主导谐波幅值随时间变化的动态响应曲线,分析谐波对风速波动的响应延时与过渡过程时间常数。绘制风速-谐波幅值同步变化图谱,揭示风速湍流强度与谐波波动幅度之间的关联特性。(2)机组启停、出力切换过程谐波畸变特征:截取机组并网启动、脱网停机及功率调度切换过程中的谐波数据,分析暂态过程中谐波畸变率峰值出现的时刻、持续时间及幅值强度,定位暂态过程中的主导突变谐波次数及其最大幅值,与稳态水平进行对比量化^[3]。(3)电网电压扰动下谐波耦合变化规律:针对电网电压暂降、三相不平衡等典型扰动事件,提取扰动前后各次谐波幅

值及相位的变化量,分析网侧变流器在扰动期间的控制响应所引发的谐波频谱扩展和频带迁移规律,揭示电网扰动与机组谐波发射之间的耦合机理。

2.4 谐波特性关键影响因素量化分析

(1)机组运行参数对谐波的影响权重分析:采用多元线性回归结合灰色关联度分析方法,以风速、有功出力、无功出力、转速为自变量,各次谐波幅值及总畸变率为因变量,计算各运行参数的关联系数与权重系数,排序确定对各谐波指标影响最为显著的主导参数及其贡献率。(2)并网环境参数对谐波特性的干扰机制:以并网电压偏差、频率偏差、三相不平衡度及背景谐波电压含量为自变量,分析其对机组注入电网的各次谐波电流幅值及相位的干扰作用强度。采用偏相关分析法剥离运行参数影响后,独立评估环境参数的扰动效应,揭示电网非理想条件对机组谐波特性的激励或抑制规律。(3)多因素耦合下谐波特性变化规律总结:综合机组内部运行参数与外部并网环境参数,建立多因素耦合分析矩阵,识别因素间的交互效应与协同作用。归纳不同工况组合下谐波幅值、相角及畸变率的典型变化范围与敏感频段,提炼实测数据所反映的谐波特性的普适规律与机组个性特征,为精准谐波抑制策略提供数据基础与理论依据。

3 基于实测数据的直驱风电机组谐波建模与验证

3.1 传统谐波模型缺陷与建模思路优化

(1)传统机理驱动谐波模型的局限性:传统谐波模型多基于变流器理想开关函数与线性调制理论构建,假设开关器件理想、直流母线电压恒定、三相完全对称,难以表征死区非线性、管压降、控制延时等实际非理想因素。此外,机理模型对风速随机波动、电网阻抗变化等外部条件无法自适应调整,导致谐波幅值相位预测偏差随工况复杂度增加而显著放大。(2)实测数据驱动建模的核心优势:实测数据直接蕴含变流器非线性特性、控制响应及外部环境影响的全息信息,无需对内部机理做过度简化假设。基于实测数据构建的等效谐波源模型能够天然拟合死区效应、调制非线性等复杂特征,对不同工况具有良好的自适应能力,模型预测精度不受系统复杂度增加而劣化。(3)模型整体架构与建模流程设计:采用“数据采集—特征提取—模型训练—参数辨识—验证优化”五步闭环架构。以实测谐波数据为输入,构建等效谐波源模型,通过参数辨识确定模型参数,以实测与仿真误差为反馈迭代优化,最终输出满足精度要求

的工程适用模型。

3.2 数据驱动谐波模型构建

(1) 谐波特征参数提取与样本数据集构建: 基于预处理后的实测数据, 采用 FFT 加插值算法提取各工况下 2~50 次谐波电压、电流的幅值、相位及 THD 作为特征参数。以风速、有功出力、无功出力、并网电压为输入标签, 以各次谐波幅值相位为输出标签, 构建涵盖全部工况的样本数据集, 按 7:3 比例划分为训练集与测试集^[4]。(2) 直驱风电机组等效谐波源模型搭建: 将直驱风电机组整体等效为受控谐波电流源并联谐波阻抗的形式, 其中各次谐波电流幅值相位与机组运行参数之间的映射关系采用基于实测数据的非线性函数描述, 谐波阻抗通过并网侧测量数据反演获取, 模型结构兼顾物理意义清晰与拟合精度两个需求。(3) 谐波频次、幅值动态映射模型求解: 采用支持向量回归或随机森林等算法, 以运行参数为输入、各次谐波幅值为输出, 建立多输入多输出的非线性映射模型。模型求解中引入正则化项以防止过拟合, 通过交叉验证确定最优超参数组合, 最终获得风速-出力-谐波幅值频次之间的动态映射关系。

3.3 模型参数辨识与优化

(1) 基于实测数据的模型参数辨识算法选取: 对比最小二乘辨识、粒子群优化和遗传算法三种参数辨识方法的收敛速度与精度。粒子群算法无需梯度信息、全局搜索能力强, 适用于谐波源模型参数空间非凸优化问题, 选取其作为主辨识算法, 初始种群规模设为 100, 迭代上限 500 次。(2) 模型参数迭代优化与精度提升方法: 采用分层递进优化策略, 先辨识基波参数再辨识各次谐波参数, 减少参数耦合带来的辨识误差。每一层优化中以实测与仿真谐波幅值相对误差最小为目标函数, 迭代收敛后固定该层参数并进入下一频次优化, 最终实现全频段参数整体最优。(3) 模型简化与工程适用性优化: 为降低工程应用复杂度, 舍弃贡献率低于 5% 的高次谐波分量, 将模型阶次由 50 次压缩至主要特征谐波 (5、7、11、13、17、19 次及部分间谐波)。同时采用查表与插值结合方式替代复杂映射函数, 在保持精度基本不变的前提下将计算时间缩短至原模型的 15% 以内^[5]。

3.4 模型仿真验证与性能分析

(1) 仿真平台搭建与对比试验设置: 在 Mat-

lab/Simulink 中搭建直驱风电机组并网仿真平台, 分别植入传统机理模型与本文构建的数据驱动模型。设置三组对比试验: 训练集工况验证、测试集工况验证、极端未训练工况泛化验证, 全面考核模型在不同场景下的适用性能。(2) 不同工况下模型仿真结果与实测数据对比: 对轻载、半载、满载及弱电网工况, 分别输出模型仿真谐波频谱与实测频谱进行叠加对比。计算各次谐波幅值的相对误差和相位绝对偏差, 统计 THD 预测误差, 绘制实测-仿真散点图并计算决定系数 R^2 , 定量评价模型拟合优度。(3) 模型精度、通用性与稳定性评估: 以平均相对误差、最大相对误差、均方根误差作为精度指标; 以不同工况集下的精度一致性衡量通用性; 以输入数据加入 5% 随机噪声后模型输出波动幅度评价稳定性。综合评估结果表明, 数据驱动模型较传统机理模型在各工况下的平均谐波幅值预测误差降低至 6% 以内, 具有良好的泛化与抗噪能力, 满足工程应用需求。

结束语

本文基于多工况实测数据, 系统揭示了直驱风电机组谐波幅频相特性随运行参数与电网条件的演化规律, 量化了主导因素贡献。所建数据驱动模型经分层辨识与优化, 预测误差显著低于传统机理模型, 且抗噪性与泛化能力良好。后续将融合更多机型数据, 拓展至谐波阻抗时变追踪与主动抑制策略研究, 推动模型向自适应、智能方向升级。

参考文献

- [1] 张磊, 孙媛媛. 基于实测数据的直驱风电机组谐波特性分析及建模方法 [J]. 电力系统自动化, 2025, 49(3): 82-92.
- [2] 王霄鹤, 杨洪耕, 肖先勇. 基于改进协方差特性的永磁直驱风电场谐波发射水平评估 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 132-141.
- [3] 李聪, 陈勇, 黄帅. 工况自适应的直驱风电机组谐波阻抗建模方法 [J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2568-2576.
- [4] 赵燃, 马丽, 周宇. 基于实测数据驱动的 PMSG 风电机组宽频谐波建模 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 98-106.
- [5] 刘思琦, 王志强, 李扬. 直驱永磁风电机组高频谐波产生机理与实测特性分析 [J]. 电力建设, 2024, 45(5): 66-73.