

风力发电场谐波治理的仿真研究

刘旭

国华(乾安)风电有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i7.8216

[摘要] 本文主要是对风力发电场负荷特性进行全面深入的研究, 分别对单相负荷和三相负荷的谐波特性进行了一系列的分析。通过分析风力发电场的建筑中已经产生的谐波, 得出合理的谐波治理措施。利用 Matlab 中 simulink 系统搭建谐波治理的仿真模型对比前后滤波效果, 最终得出最有效实用的治理方案。

[关键词] 风力发电场建筑; 谐波特性; 抑制谐波; 滤波器

Simulation Study on Harmonic Control of Wind Farm

Liu Xu

Guohua (Qian'an) Wind Power Co., Ltd

[Abstract] This article mainly conducts a comprehensive and in-depth study on the load characteristics of wind power plants, and analyzes a series of harmonic characteristics of single-phase and three-phase loads. By analyzing the harmonics already generated in the buildings of wind power plants, reasonable harmonic control measures are derived. Using the Simulink system in Matlab to build a simulation model for harmonic control and compare the filtering effects before and after, ultimately obtaining the most effective and practical control solution.

[Keywords] Wind power plant buildings; Harmonic characteristics; Suppress harmonics; filter

风力发电场谐波治理不仅是满足法规的被动需求, 更是提升系统可靠性、降低全生命周期成本的核心技术措施, 对推动能源转型具有战略意义。

一、风力发电场配电网谐波特性概述

1. 谐波对称性。奇次谐波主导, 风电机组变流器(如双馈机组)产生的谐波以奇次谐波为主, 典型特征为 $6n \pm 1$ 次(如 5、7、11、13 次)。这是由于三相桥式整流/逆变电路的开关特性导致的固有规律。偶次谐波抑制, 在理想对称的三相系统中, 偶次谐波因相位抵消被显著削弱, 实际谐波频谱以奇次谐波为核心。

2. 谐波相序特性。相序分类明确, 正序谐波: 4、7、10... 次 ($3h+1$ 次), 旋转方向与基波相同; 负序谐波: 2、5、8... 次 ($3h-1$ 次), 旋转方向与基波相反;

零序谐波: 3、6、9... 次 ($3h$ 次), 三相相位相同。风电场特殊性, 双馈风机变流器产生的谐波以负序分量(如 5 次)和零序分量(如 3 次)为主, 可能加剧电网三相不平衡问题。

3. 谐波独立性。与运行工况强相关, 谐波幅值受风速波动、机组出力、变流器控制策略影响显著, 呈现时变性特征, 与传

统固定谐波源(如工业整流器)不同。传播路径复杂性, 谐波通过风电场内部集电线路、变压器多级耦合传递至并网点, 其传播特性受电网阻抗频率特性影响, 存在谐振放大风险。叠加非线性叠加, 多机组谐波在并网点叠加时, 因相位差异可能产生部分抵消或增强, 需通过概率统计模型(如蒙特卡洛仿真)评估。

二、风力发电场用电负荷特点

1. 负荷波动性与发电量呈反向关联。风速依赖性, 风机辅助系统(如变桨、偏航、冷却系统)的功耗随风速实时变化。低风速时需启动更多辅助设备维持待机状态, 场区用电负荷反而较高; 高风速满发时辅助设备占比降低, 形成“发电量低, 自用电比例高”的特点。发电-用电负相关, 风速不足导致发电量下降时, 升压站、控制系统等基础负荷占比上升, 加剧负荷波动性。

2. 空间分布层级化。分散式负荷, 单台风机塔基内的箱变、控制系统、加热除湿装置等构成分布式负荷点, 遍布风场全域。集中式负荷, 升压站(含主变、SVG 无功补偿)、监控中心、运维建筑等形成高密度用电核心区, 需持续保障电网接入与控

制功能。

3. 智能化运维新增稳定负荷。数字化监控平台、数据中心服务器等 IT 设备持续耗电，成为新兴恒定负荷点。

三、风力发电场建筑无源滤波器谐波治理

1. 无源滤波器的工作原理与结构。基本构成，由电感(L)、电容(C)、电阻(R)组合成 LC 滤波电路，通过串联谐振原理为特定谐波频率提供低阻抗通路，吸收谐波电流。常见类型包括单调谐滤波器(针对 5、7、11 次等主要谐波)、双调谐滤波器和高通滤波器。技术优势，成本低：无需外部电源，结构简单，维护便捷。可靠性高：无源元件(电抗器、电容器)稳定性强，适合海上风电等恶劣环境。双重功能：兼具谐波抑制和无功补偿能力。

2. 风电场景下的应用设计策略。针对性谐波治理，风力发电机组的变流系统主要产生 5、7、11、13 次谐波，需设计对应谐振频率的 LC 滤波器。例如：针对风电变流器输出的 5 次谐波，设置谐振频率为 250Hz 的单调谐滤波器。抗干扰优化措施，阻抗匹配：考虑电网阻抗变化，避免滤波器与系统发生谐振(如串联电抗器提升电容耐压能力)。参数漂移补偿：定期校正电容/电感值，防止元器件老化或温度变化导致滤波性能下降。

3. 局限性及改进方向。固有缺陷，频率适应性差：仅能滤除预设次数的谐波，无法动态响应宽频段谐波变化。谐振风险：系统阻抗突变可能引发谐振，需配置阻尼电阻或后备保护。混合治理方案，无源+有源联合：无源滤波器处理主要谐波(如 5、7 次)，有源滤波器(APF)动态补偿剩余高频谐波，提升整体效率。

四、风力发电场建筑有源滤波器谐波治理

1. 必要性：风电谐波的特性与危害。谐波来源：风电机组的变流器、变频器等非线性设备产生大量 5 次、7 次奇次谐波，且谐波频率随风速波动而变化。主要风险：导致变压器损耗增加、继电保护误动作、通信干扰，严重时引发电网谐振。

2. 有源滤波器(APF)的技术优势。动态补偿能力：实时检测谐波电流，注入反向补偿电流，抵消 2~50 次宽频谐波；响应时间<300 μs，适应风电波动性。

抗谐振设计：不受电网阻抗影响，避免无源滤波器(LC)可能引发的谐振风险；

采用 3DSP+CPLD 数字控制，自动抑制系统谐振。高兼容性与效率：模块化设计支持灵活扩容，体积仅为传统设备的 1/6；效率达 97.2%，年节电超 6500kWh。

3. 风电场景应用方案。海上风电特殊应对：高压有源滤波器通过宽频滤波抵消特定频率谐波，谐波电流降低超 60%；采用四相线技术消除中性线电流过载问题。协同治理策略：混合

方案：无源滤波器(LC)补偿固定次谐波，APF 动态处理残余谐波，提升性价比；参数优化：如华电新能源采用粒子群算法动态整定 PI 参数，提升谐波抑制精度。有源滤波器凭借动态响应、宽频治理及抗谐振特性，已成为风电场谐波治理的主流选择。结合无源滤波器混合应用或算法优化(如粒子群整定)，可进一步平衡成本与效果，保障电网安全稳定运行。

五、风力发电场建筑混合型滤波器谐波治理

1. 风电谐波治理的核心挑战。谐波来源特性，风力发电机组的变流器、箱变等电力电子设备产生宽频谐波(主要为 5、7、11、13 次)，且谐波幅值随风速波动动态变化。并网薄弱性问题，风电场多位于偏远地区，电网阻抗较高，易引发 LC 谐振放大背景谐波电压。

2. 混合型滤波器方案设计。(1) 拓扑结构优化如表 1。

表 1 混合型滤波器拓扑结构优化

组件类型	功能与优势	适用场景
无源单元	采用 LCL 滤波器组，针对主导次谐波(如 5、7 次)提供固定低阻抗路径，降低成本	集中治理高幅值特征谐波
有源单元	并联有源电力滤波器(APF)，动态补偿高频/非特征谐波，抑制谐振	应对波动性谐波及谐振抑制
协同控制策略	基于谐波实时检测，分配无源/有源单元出力，避免过补偿	全频谱谐波精准治理

(2) 关键技术创新，自适应参数整定，采用粒子群算法动态调整 APF 的 PI 控制器参数，提升谐波跟踪精度(如华电新能源专利方案可使 THD 降至 2.1%)。

相位协同控制，引入驻波移相技术(SWPS-APF)，优化谐波电压分布，抑制线路谐振放大效应。

3. 工程实施规范。I APF=S_{tr}×K×THD_i×1.3，S_{tr}:变压器容量，K:负载率(风电建议取 0.6~0.8)，THD_i:初始谐波畸变率(实测或取 20%)。示例：1600kVA 变压器需配置≥400A APF 单元。安装位置规划，集中治理：APF 置于无功补偿柜与出线柜之间，采样 CT 就近安装。就地治理：在大型变流器群出口加装模块化混合滤波器。

4. 风电场特殊要求。海上风电：需选用防腐型滤波器，并强化 SVG 谐波抑制功能。零线电流治理：分散式 A 型处理器消除单相负载 3N 次谐波，降低中性线过热风险。

六、谐波治理的仿真研究

1. 风力发电场无源滤波器仿真分析。以下是针对风力发电场无源滤波器仿真分析的综合整理，结合谐波特性、设计方法、仿真工具及优化策略等关键点：(1) 风电谐波特性与无源滤波器作用，谐波来源，风电场谐波主要由变流器等电力电子设备产生，其频谱范围宽且含有间谐波，可能引发电网谐振及设备损耗。无源滤波器优势，结构简单、成本低、可靠性高，通过 LC 参数设计对特定次谐波形成低阻抗通路，实现谐波抑制

与无功补偿。(2) 无源滤波器设计核心步骤, 滤波器选型, 单调谐滤波器: 针对主导谐波(如 5、7 次), 通带窄、损耗小, 但易受电网阻抗影响。高通滤波器(二阶或 C 型): 适用于宽频谐波或含间谐波的场景, 阻尼特性更优。组合方案: 常采用“单调谐+高通”混合结构, 兼顾特定次谐波与宽频抑制。参数计算, 基于系统谐波阻抗、目标谐波次数及补偿容量, 计算关键参数: 谐振频率: $f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (针对 n 次谐波), 品质因数(Q 值): 影响滤波精度与阻尼效果。需避免过补偿及与电网阻抗的谐振风险。动态调谐设计, 引入可变电抗器或分段投切电容, 应对风速波动导致的谐波变化及元件老化问题。(3) 仿真工具与流程如表 2。

表 2 仿真工具与流程

工具	应用场景	案例
MATLAB/Simulink	电路建模、传递函数分析、动态响应验证	低通滤波器幅频特性仿真; 谐波抑制效果对比
PSCAD	电力系统电磁暂态仿真	脉冲换流器负载的滤波器参数优化
多学科联合仿真	机械-电气耦合分析	风电机组传动链与滤波器的协同仿真

仿真关键点: 验证滤波器在基波频率下的无功补偿能力及谐波频率下的阻抗特性; 注入故障信号(如电容容量下降), 测试动态调谐性能。(4) 优化与挑战, 优化策略, 采用改进遗传算法, 优化 L/C 参数以提升滤波精度; 结合有源设备(如 SVG) 构成混合滤波系统, 弥补无源滤波器频响局限。运维挑战, 环境温度、电容老化导致谐振点偏移, 需定期监测与参数校准; 高渗透率风电场景下, 需考虑虚拟惯性控制对谐波特性的影响。

2. 风力发电场有源滤波器仿真分析。(1) 仿真模型构建, 风电谐波源建模, 基于实测数据构建风力发电机组的谐波特性模型, 模拟风电波动性引起的谐波频谱(如 5 次、7 次谐波)及无功功率突变。风速模型需考虑湍流、阵风等动态特性, 为系统提供真实的输入环境。APF 主电路结构, 主流采用三电平逆变拓扑, 通过双闭环控制(电流内环+电压外环)提升响应速度和补偿精度。直流侧电容参数需结合风电波动范围设计, 避免电压波动影响补偿效果。谐波检测算法, 瞬时无功功率理论: 通过 pq 或 ip-iq 法分离基波与谐波分量, 其中 ip-iq 法对电网电压畸变鲁棒性更强。低通滤波器(LPF)选用二阶巴特沃斯型, 截止频率通常设为 20Hz 以平衡动态响应与滤波精度。(2) 控制策略实现, 电流跟踪控制, 滞环 PWM 控制: 简单易实现, 但开关频率不固定, 可能增加损耗。无差拍控制: 基于预测模型生成 PWM 信号, 动态响应更快, 适用于风电谐波快速补偿场景。

并网稳定性优化, 网侧变换器采用电网电压前馈控制, 抑制风电并网引起的电压闪变。通过 STATCOM 协同 APF 调节无功功率, 维持母线电压稳定。(3) 仿真流程与验证, 仿真平台选择, MATLAB/Simulink: 搭建系统级模型, 集成风速模拟、DFIG 控制、APF 补偿等模块。dSPACE 硬件在环: 验证控制算法实时性, 缩短工程部署周期, 关键性能指标如表 3。

表 3 有源滤波器仿真关键性能指标

指标	验证方法	目标值
谐波畸变率 (THD)	对比补偿前后电网电流频谱	<5% (IEEE 519 标准)
动态响应时间	阶跃负载突变下的电流跟踪测试	<1ms 8
直流电压波动	风速阶跃变化时监测直流母线电压	波动范围<10%

3. 风力发电场混合型滤波器仿真分析。

1. 混合型滤波器的结构与原理基本构成, 无源部分(PF): 由 LC 单调谐支路(如 5 次、7 次)滤除特定次谐波, 并补偿基波无功功率。有源部分(APF): 通过 PWM 变流器生成与谐波相位相反的补偿电流, 动态抑制剩余谐波, 同时改善 PF 的滤波特性。混合方式: APF 通过耦合变压器或电感串联/并联接入电网, 与 PF 协同工作, 显著降低 APF 的容量需求。(2) 仿真分析关键技术, 谐波检测方法, 采用同步旋转 Park 变换(d-q 法), 将三相电流转换至旋转坐标系分离谐波分量, 适用于对称/不对称系统。控制策略设计, 分层控制: 上位机(工控机)分析谐波频谱, 下位机(DSP)生成 PWM 信号驱动 IGBT 逆变桥; 自适应调节: 通过晶闸管切换 LC 组合, 动态优化无源支路结构以适应电网变化。

本篇论文主要研究风力发电场建筑谐波特性及治理措施, 针对风力发电场建筑中三相负载的谐波特性问题进行了分析研究。论文以风力发电场建筑中的谐波为控制对象, 以实际工程为实例, 利用 MATLAB 对所研究的三种抑制谐波的方法进行仿真模拟。

[参考文献]

[1]李培海.变压器谐波损耗计算方法比较与仿真[J].电力系统保护与控制,2020,38(18):63-64.
 [2]王栋.无源滤波器设计思路的探索[J].四川电力技术,2021,26(3):17-21.
 [3]王建军.有源电力滤波器直流侧电压控制瞬时能量平衡建模[J].电工技术学报,2022,27(2):229-242.