

Substation noise control scheme based on active noise reduction technology

Gaoyuan Qin

China Energy Engineering Group Yunnan Electric Power Design Institute Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650021, China

Abstract

As an essential component of power systems, substations generate noise during operation that significantly interferes with the surrounding environment and residents' lives. Traditional passive soundproofing and absorption methods are limited in addressing low-frequency noise and open structure scenarios. Active noise reduction technology, with its notable suppression capability within specific frequency bands, offers a new approach to noise control. By analyzing the characteristics and propagation paths of typical noise sources in substations and combining this with the core principles of active noise reduction systems, a governance plan suitable for power transformation scenarios is constructed. This plan aims to reduce sound pressure levels in target areas while ensuring the normal operation of substation equipment. This paper systematically studies the engineering integration, signal processing mechanisms, and effectiveness evaluation methods of active noise reduction technology, proposes adaptive optimization strategies for substations, and verifies their practicality and stability under different operating loads and environmental conditions, aiming to promote the coordinated development of green power facilities and urban environments.

Keywords

substation noise; active noise reduction; propagation path; control algorithm; treatment scheme

基于主动降噪技术的变电站噪音治理方案

秦高远

中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司, 中国·云南 昆明 650021

摘要

变电站作为电力系统的重要组成部分,其运行过程中所产生的噪声对周边环境及居民生活构成了显著干扰。传统的被动隔音与吸声手段在面对低频噪声及开放性结构场景时效果有限,主动降噪技术以其在特定频段内的显著抑制能力,为噪声治理提供了新路径。通过对变电站典型噪声源特性与传播路径的分析,结合主动降噪系统的核心原理,构建适用于电力变电场景的治理方案,在实现目标区域声压级降低的同时保障变电设备正常运行。本文围绕主动降噪技术的工程集成、信号处理机制及效果评估方法展开系统研究,提出面向变电站的适配性优化策略,并验证其在不同运行负荷及环境条件下的实用性与稳定性,旨在推动绿色电力设施建设与城市环境协调发展。

关键词

变电站噪声; 主动降噪; 传播路径; 控制算法; 治理方案

1 引言

变电站在电力系统中发挥着承上启下的枢纽作用,然而其运行过程中伴随的噪声污染问题日益突出,成为制约城市电力设施与周边环境协调发展的重要因素。典型噪声源如主变压器、风冷系统及断路器装置,其频谱以低频和中频为主,具备传播范围广、干扰持续性强等特征,且传统隔声手段在结构开放或空间受限条件下难以奏效。在此背景下,主动降噪技术作为一种通过声波相消原理降低噪声能量的新型治理手段,展现出较强的针对性和实用价值。本文将从

主动降噪系统的工作原理出发,结合变电站特有的声源结构与运维要求,探讨该技术在复杂电力场景下的集成设计、实施路径与评估机制,为变电站噪声治理提供理论支持与工程参考。

2 变电站噪声污染特性分析

变电站在运行过程中产生的噪声具有频率宽、强度大、波及广的特点,主要来源包括主变压器电磁噪声、电抗器、冷却系统风机噪声以及高压开关设备操作噪声等。这些声源往往处于低频至中频段,声波具有较强的绕射能力和远距离传播特性,导致即使在设置围墙和绿化带的情况下,周边居民区仍可感受到干扰。噪声的传播路径不局限于空气传播,还包括结构传播与地面反射增强,综合影响了噪声的衰减速度和空间扩散形态。实际监测数据显示,变电站边界处的等

【作者简介】秦高远(1982-),男,中国重庆人,硕士,高级工程师,从事环境工程研究。

效声级在未采取措施的情况下可达到60dB(A)以上,超过《工业企业厂界噪声排放标准》中2类区域的限值要求(昼间60dB(A)/夜间50dB(A))。特别在夜间运行阶段,低频噪声穿透力更强,容易引起睡眠干扰和心理不适,进而激发周边居民的投诉和舆情风险。噪声污染问题已成为制约变电站选址与扩容规划的环境瓶颈,亟需技术手段加以系统治理^[1]。

3 主动降噪技术原理与系统构成

3.1 主动降噪的物理机理与控制逻辑

主动降噪技术以相干声波干涉原理为基础,通过在目标声场中引入相位相反、幅度相近的反向声波,从而在空间中实现对原始噪声的抵消效果。其工作机制依赖于实时感知环境噪声信号并以极低延迟进行数字信号处理,再由扬声器发出控制信号干预声场。在控制逻辑方面,主动降噪系统以误差最小准则为核心,通过自适应算法动态调节反向声源的幅度与相位,提升降噪效率。该技术对低频持续性噪声具有良好控制能力,适用于变电站此类稳定且重复的声源环境中。系统运行过程中需要同时保证控制延迟在毫秒级以下,以避免因响应滞后而引发声压叠加,造成干扰增强现象。主动降噪不依赖于材料阻隔,具备轻量、灵活、实时性强等优势,已在交通、工业等领域展现出良好的应用前景。

3.2 主动降噪系统的核心设备与布设模式

主动降噪系统主要由前置传感器、控制器、执行扬声器及误差传感器组成,其中前置传感器用于捕捉原始噪声信号,控制器进行信号处理与输出控制策略,执行扬声器发出反向声波,误差传感器用于监测降噪效果并反馈修正参数。系统布设以噪声源传播路径为依据,采用线性阵列或面阵结构,布点间距控制在0.5米至1米之间,确保干涉声场连续覆盖。针对主变压器区域的低频噪声控制需求,通常配置功率型低频扬声器,输出声压级可达90dB,满足10米范围内的有效干扰消除。在风冷系统噪声治理中,辅以阵列扬声器组进行宽频段声波调控,可实现6dB至15dB的声压级衰减。设备需与现有电力设施物理隔离,避免电磁干扰,并通过屏蔽结构保证运行安全。

3.3 信号采集与反馈控制算法设计

主动降噪系统中的信号采集与反馈控制环节直接决定其降噪效果与稳定性。系统采用高灵敏度MEMS麦克风进行前端噪声采集,采样频率设定为48kHz,以保证涵盖20Hz至4kHz的主要噪声频段。控制算法采用基于最小均方误差(LMS)和其变种的改进型LMS算法,通过实时计算误差信号并更新滤波器权重,实现对动态环境的快速响应。为进一步提升系统稳定性与响应速度,引入二阶广义预测控制机制,处理延时信号干扰与相位漂移问题。反馈回路中的误差传感器每秒处理采样点数达到48000个以上,系统延迟控制在3毫秒以内,有效避免因时差而造成干扰声残留。在变电站多源共振场景下,该设计可提升降噪幅度至

10dB,具备优良的工程适应性与数据鲁棒性^[2]。

4 变电站主动降噪技术的适配性研究

4.1 高频与低频噪声的控制效果分析

主动降噪技术在低频噪声控制方面具备明显优势,主要依赖声波相消原理对稳定周期性信号进行有效抑制。在变电站典型工况下,主变压器工频噪声集中在50Hz至500Hz区间,属于低频连续波形,主动控制系统可实现6dB至12dB的声压级削减。风冷装置产生的中高频噪声分布在500Hz以上,频谱宽度大、波动性强,主动控制在此频段的降噪效率受限,常配合被动吸声材料形成复合控制结构以提升整体效果。在高频段采用分布式扬声器与延迟补偿算法处理技术,可以在特定区域实现3dB左右的局部衰减。不同频段的响应特性需通过频域分析与自适应滤波模型调整参数,确保系统输出符合目标频谱覆盖要求,提升降噪系统的综合声场调控能力。

4.2 变电设备运行特性与降噪协同关系

变电设备运行状态直接决定主动降噪系统的响应策略与运行模式。主变压器处于连续稳态运行状态,噪声波形稳定,便于建立预测模型并实现相对恒定的降噪输出;风冷系统根据负荷波动自动调节转速,噪声源频率呈周期变化,要求主动降噪系统具备动态调参能力以维持抑制效果。断路器及开关装置产生的脉冲式冲击噪声能量高但持续时间短,主动控制系统虽响应滞后,但可通过瞬时阻断策略实现预防干扰。降噪系统在实际部署中必须综合考虑设备运行模式、启停频次与空间布设关系,避免因噪声源变化频繁造成声场扰动。在负载高峰期,设备运行噪声增强,降噪系统需提升工作功率与响应速率以适应环境变化,实现声学控制与电力运维的协调统一^[3]。

4.3 复杂环境条件下的技术适应性

变电站环境复杂多变,空间结构开放、噪声源多点分布、电磁干扰显著,对主动降噪系统的运行稳定性和适应能力提出更高要求。在结构开放区域,声波传播方向性弱,干扰源易被叠加,降噪系统需通过多通道传感与区域分布式控制器协调工作,形成协同干扰声场。在高温高尘等恶劣气候条件下,系统元器件需具备IP65及以上等级的防护能力,并采取电磁隔离措施避免信号干扰。设备运维区域要求控制系统不能干扰日常检修流程,因此系统结构设计应轻量、可拆卸、易维护。对于部分声反射强的混凝土或金属表面区域,还需结合材料吸声装置减少反射干扰。系统在不同气温、湿度与负荷波动条件下经过多次实验验证,其响应时间控制在5毫秒内,能够保障在非理想条件下的持续运行与稳定输出。

5 主动降噪治理系统的工程实施策略

5.1 降噪系统与变电站结构的集成方式

主动降噪系统的工程集成需充分结合变电站现有建筑

与设备布局,实现功能兼容与空间协调。由于主变压器区为主要噪声源区域,系统布设应优先围绕该区域进行,扬声器阵列可安装于变压器基础周边、围栏内侧或设备间走廊顶部,形成封闭式控制声场。控制单元应设于隔离区或控制室内部,通过耐高温防电磁干扰的信号电缆与传感器节点连接,实现集中处理与远程监控。风冷系统噪声控制可采用挂壁式设备安装方式,利用现有通风通道结构进行分布式布设,确保声波传播路径最短。系统结构设计应兼顾维护操作空间,满足设备检修间距标准。控制装置箱体应采用金属屏蔽壳体并设置双层接地系统,防止电磁干扰扩散。设备选型需根据声场模拟分析结果匹配对应频段的扬声器型号,保障控制带宽与覆盖范围满足降噪需求^[4]。

5.2 降噪设备布点优化与空间布局分析

布点优化需基于变电站声场仿真结果与现场测量数据,明确噪声源强度分布、传播路径与反射干扰位置。通过布设前端采样麦克风 and 误差传感器,采集各节点声压级,形成噪声等效地图,作为设备布设依据。在主变压器区建议设置至少8个前端传感器和6个误差传感器,布点间距控制在0.5米至1米,确保信号采样覆盖噪声主传播路径。扬声器阵列与传感器布设形成封闭反馈回路,避免降噪盲区的产生。在风冷系统周边建议采用线性布置策略,扬声器按风道长度每1米设1组单元。为避免系统声波相位叠加失效,应控制各设备之间相对相位差不超过15度。控制主机统一安装于值班室内,采集信号经光纤传输,提高数据实时性与抗干扰能力。整体布局需综合考虑空间利用率、设备功率覆盖范围与结构遮挡影响,以实现全局协同控制,图1为变电站降噪治理模拟效果图。

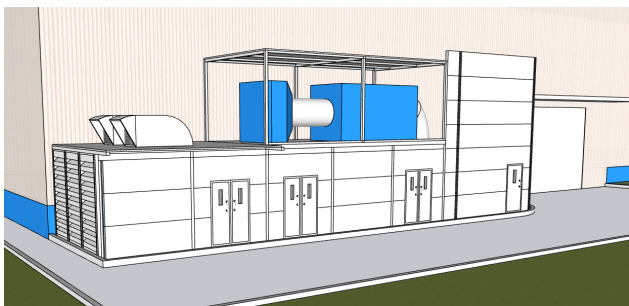


图1 变电站降噪治理模拟效果图

5.3 降噪工程施工组织与运维保障机制

工程施工需在不停电条件下开展,严格遵守变电站作业安全规范,施工人员需持有高压作业资格证,施工区域设置明显标识并与带电区域保持安全距离。施工前应完成声学模拟、结构加固设计与布线线路走向规划,施工过程中控制电缆穿设顺序、设备调试顺序与测试验收程序,确保各环节无缝衔接。运维阶段需建立定期巡检制度,对传感器灵敏度、扬声器输出功率与控制算法更新情况进行检测,每季度进行一次全系统功能测试并提交运行报告。对于扬声器与传感器可能受雨雪、高温或粉尘影响的场景,配置防护罩并定期更换滤网。控制主机与供电系统应接入UPS电源,防止因停电导致系统中断。建立专职技术支持小组,负责设备维修、软件升级与运行培训保障,提升系统运行稳定性与工程长期效益^[5]。

6 结语

主动降噪技术在变电站噪声治理中的应用展现出较高的工程适配性与环境协同能力。通过对声源特性、传播路径及声场结构的系统分析,结合实时信号采集与反馈控制算法,构建了具有精准响应与稳定输出的主动控制体系。降噪设备与变电站结构的集成布设在工程实践中具备可操作性,优化布点布局与施工组织方案为系统的稳定运行提供了有力保障。在多源干扰、开放场地和复杂气候条件下,技术在稳定性、鲁棒性与安全性方面均通过验证,具备广泛推广价值。未来可结合智能化控制平台,实现降噪系统与电力设备运维数据的联动调节,推动变电站噪声治理水平持续提升,为构建和谐绿色电力设施环境提供支撑。

参考文献

- [1] 王永永,陈晓坤. 绿色建筑理念下变电站建筑施工噪声污染控制技术研究[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(06): 109-111.
- [2] 陈周,翁杰,刘尚瑜. 噪声控制技术在电网变电站噪声控制中的应用[J]. 电声技术, 2024, 48(12): 34-36+40.
- [3] 钱泽伦,钱程晨,徐晓明. 500 kV 杨高变电站噪声治理方案的研究及实施[J]. 电世界, 2024, 65(05): 7-11.
- [4] 徐强,毛西吟,吴望冰,曾添,吴妃. 基于小波变换的变电站放电噪声抑制研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(09): 25-29.
- [5] 贾本康. 基于变压器噪声及故障分析的变电站轮式巡检机器人研究[J]. 电力设备管理, 2024, (17): 166-168.