

±800 kV 换流站多物理场耦合缩尺声源模型的建立与仿真

王绿^{1,3}, 耿明昕^{1,3}, 吴健², 魏小龙^{1,3}, 王育佳¹, 李雷^{4*}

(1 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西省 西安市 710000;

2 国网陕西省电力有限公司, 陕西省 西安市 710000;

3 国网(西安)环保技术中心有限公司, 陕西省 西安市 710000;

4 华北电力大学环境科学与工程系, 河北省 保定市 071000)

Establishment and Simulation of Multi-physics Coupled Scale Sound Source Model for ±800 kV Converter Station

WANG Lv^{1,3}, GENG Mingxin^{1,3}, WU Jian², WEI Xiaolong^{1,3}, WANG yujia¹, LI Lei^{4*}

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710000, Shaanxi Province, China;

2. State Grid Shaanxi Electric Power Co, Ltd, Xi'an 710000, Shaanxi Province, China;

3. State Grid (Xi'an) Environmental Protection Technology Center Co, Lt., Xi'an 710000, Shaanxi Province, China;

4. Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, Hebei Province, China)

Abstract: The rapid expansion of UHV DC transmission projects, owing to their advantages in long-distance power transmission, has led to increasingly severe noise issues in converter stations. Converter station noise, characterized by low-frequency components and low attenuation, poses significant health risks to both on-site personnel and nearby residents, while being particularly challenging to control during propagation. This study conducted a full-scale measurement of a ±800 kV converter station in Jiangxi. Based on the measured data, a scaled multi-physics coupled acoustic-structural model of the entire converter station was established in COMSOL Multiphysics. By setting reasonable boundary and initial conditions, the simulation results revealed an irregular spherical diffusion pattern in the station's overall sound field distribution. The comparison between simulated and measured data showed an average error of ≤ 5 dB, validating the model's accuracy. Furthermore, by modeling the converter transformer and predicting its noise emissions at different voltage levels, the results were incorporated into the station-wide noise prediction model. This enabled analysis of how the converter transformer influences the station's boundary noise under varying operational voltages. The research results are of significance to the construction of green power grid and the prediction and analysis of converter station noise.

Key words: multi-physics coupling; scale sound source model; converter station; sound field distribution

摘要: 由于远距离输电优势, 特高压直流输电工程的建设骤增, 随之而来的换流站噪声问题也愈发严重。换流站噪声具有低频、低衰减等特点, 危害站内工作人员和周边居民的身心健康, 且在传播过程中进行控制十分困难。本文通过对某±800 kV换流站进行全站实测, 并基于实测数据在COMSOL Multiphysics中构建换流站全站声-固多物理场耦合缩尺声源模型, 设置合理边界与初始条件, 计算得到换流站整体声场分布呈不规则球形扩散, 将仿真与实测数据进行对比, 平均误差 ≤ 5 dB, 验证了该模型的准确性。通过对换流变压器的建模, 预测其在不同电压等级下的噪声, 将其代入换流站整体噪声预测模型, 分析了换流变在不同电压等级下对换流站厂界噪声的影响。研究结论对绿色电网建设与换流站噪声的预测和分析均具有一定意义。

关键词: 多物理场耦合; 缩尺声源模型; 换流站; 声场分布

0 引言

电力系统是国民经济发展的基础, 随着我国经济的稳步增长, 电力能源的需求量也在急剧上升^[1-3]。由于我国的电力一次能源储备区域与电力供应中心的地理分布极不平衡, 极度依赖远距离、大容量的电能输送技术^[4-7]。特高压直流工程作为国家西电东送重点工程, 能够有效缓解我国能源供需分布情况^[8-11]。因其输电容量大、传输距离长、系统稳定性好、线路面积小等优点, 目前已经被广泛应用^[12-15]。换流站作为高压直流输电系统中最关键的设施, 是高压直流输电工程中不可或缺的一环, 承担着交流与直流电相互转换的核心功能^[16-17]。其在运行时会产生较强的可听噪声, 对厂界周边噪声敏感建筑物的声环境影响突出, 对工作人员及附近居民身心健康以及附近生态环境都会造成严重的影响^[18-20]。

通过对换流站的声场模拟, 可以完成对换流站的声场预测和更直观及全面的分析^[21-22], 对换流站的新建、改建、扩建以及换流站噪声控制改造以及寻求有效降低换流站噪声的措施有重要意义。

肖鲲等^[23]针对 ± 800 kV 布拖换流站各声源特性和周边环保要求, 通过改进常规模型来模拟站内布置及区域环境, 使用 SoundPLAN 对厂界噪声及站外敏感点处噪声进行分析。阳金纯等^[24]通过现场录波、噪声与振动同步测试等方法, 对换流站噪声影响进行分析预测, 成功识别了特高压换流站内换流变压器噪声特性及交流滤波器场电抗器噪声特性。张鸣等^[25]根据实测结果绘制站内噪声分布图, 完成特高压换流站内可听噪声特征及分布规律研究, 对各区域噪声级进行了比较。陈传敏等^[26]采用有限元声学分析对换流站调相机机房内外的声场分布状况进行有效计算, 并分析了机房声压分布情况。石剑波等^[27]对某换流站全域进行不同时刻的声场仿真, 分析了其声场分布及变化情况。赵诗雅等^[28]对某换流站声屏障声学性能进行了测试, 并提出相应的降噪提升方案, 采用 SoundPLAN 对其降噪效果进行了预测。关林坤等^[29]使用 SoundPLAN 对古泉换流站没有采取任何降噪措施时的周边环境进行了噪声预测, 根据预测结果提出了合理的降噪措施, 并对采取各降噪措施后该站的噪声环境进行了预测, 依此对换流变采取 BOX-IN 和声屏障后的降噪效果进行了对比分析。韩钰等^[30]通过采集 ± 800 kV 换流站户外换流变压器的风机空气动力噪声、

平波电抗器的电磁噪声、交/直流滤波器场的电磁噪声的声压信号, 分析了负载条件下各位置噪声声压信号的频谱特性, 对各位置噪声大小进行了比较。

尽管已经有大量学者对换流站噪声预测进行了研究, 但仍有许多研究依赖数学计算, 实测绘图等方法, 采用仿真模拟进行研究的也多依赖 SoundPLAN 软件进行计算。SoundPLAN 对物理机理建模的局限性较大, 复杂声场处理相对不足, 本文通过 COMSOL Multiphysics 多物理场耦合的方式对换流站噪声进行仿真, 可以实现对复杂几何结构和多物理场耦合现象的模拟, 同时更易于开展后续研究, 为换流站噪声的分析和控制提供科学依据。

1 声源测试

换流站主要的噪声源为换流变压器、主变压器、交流滤波器、平波电抗器和直流滤波器等设备, 源强相对较大, 对环境的影响显著^[31-33]。

选取某 ± 800 kV 换流站为测试及模拟对象, 对该换流站主要声源进行调研, 设置噪声测点进行声压法测试。该换流站主要声源为 24 台换流变压器, 五组交流滤波器组, 两台平波电抗器, 两组直流滤波器组及两台降压变压器。

1.1 换流变压器

换流变压器是换流站内单体噪声最大的室外声源, 是换流站噪声问题的主要产生原因, 其噪声水平大大高于普通电力变压器^[34-36]。根据实际情况, 对换流变压器进行两种不同的测点布置, 如图 1 所示。在各测点使用声级计分别在主体 1/3 及 2/3 高度处进行测量, 各换流变压器平均有效声压级数据如表 1 所示。

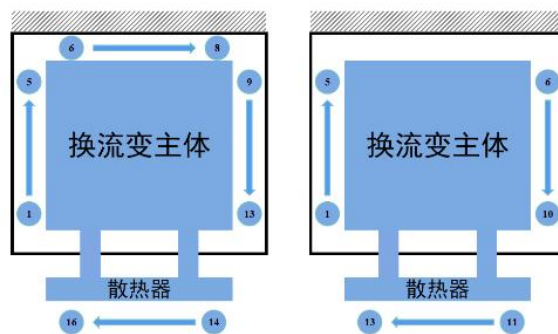


图 1 换流变压器测点布置

Fig. 1 Measuring points arrangement of converter transformer

表 1 换流变压器平均有效声压级

Table 1 Average effective sound pressure level of converter transformer

声源测点	声压级/dB(A)		
	A 相	B 相	C 相
极 I 高端 Y/y 换流变	75.0	75.5	75.4
极 I 高端 Y/d 换流变	73.8	72.0	73.0
极 I 低端 Y/y 换流变	76.3	78.5	77.2
极 I 低端 Y/d 换流变	79.2	79.9	80.8
极 II 高端 Y/y 换流变	75.1	76.2	76.8
极 II 高端 Y/d 换流变	76.2	76.5	74.4
极 II 低端 Y/y 换流变	78.5	80.4	80.6
极 II 低端 Y/d 换流变	80.8	80.3	80.1

1.2 交流滤波器场

交流滤波器场位于换流站北侧, 其交流滤波器类型为 HP12/24, 测试期间有 5 组投入运行。在 5 组交流滤波器场界围栏处分别布置测点 14 组, 测点位置如图 2 所示, 各交流滤波器平均有效声压级数据如表 2 所示。

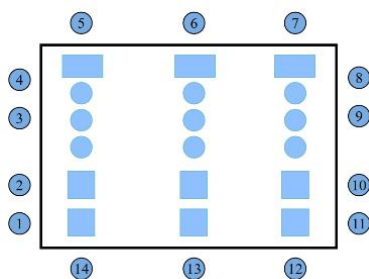


图 2 交流滤波器测点布置

Fig. 2 AC filter measuring points arrangement

表 2 交流滤波器平均有效声压级

Table 2 Average effective sound pressure level of AC filter

交流滤波器编号	5611	5633	5642	5643
声压级/dB(A)	56.6	53.0	55.8	57.0

1.3 直流滤波器场

直流滤波器场位于站区东侧, 有 2 组投入运行。在平波电抗器场界围栏处及直流滤波器场界围栏处各布置测点 14 组, 测点位置如图 3、图 4 所示, 平均有效声压级如表 3 所示。

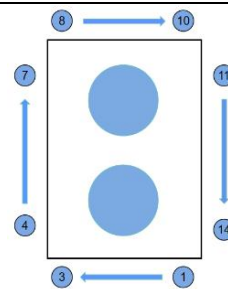


图 3 平波电抗器测点布置

Fig. 3 Layout of measuring points for flat-wave reactor

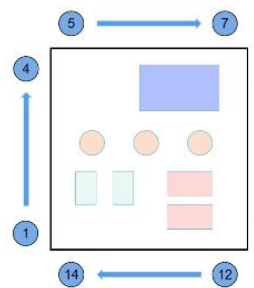


图 4 直流滤波器测点布置

Fig. 4 DC filter measuring points arrangement

表 3 直流滤波器场平均有效声压级

Table 3 Average effective sound pressure level of DC filter field

声源	场			
	极 I 平波电抗器	极 I 直流滤波器	极 II 平波电抗器	极 II 直流滤波器
声压级/dB(A)	53.2	53.1	51.7	52.0

1.4 降压变压器

该站现投入运行降压变压器 2 台, 位于换流站西侧, 对两台降压变压器在轮廓线 1 m, 高度 1.2 m 处分别布置测点, 测点位置如图 5、图 6 所示, 使用声级计对降压变压器噪声数据进行测试, 平均有效声压级如表 4 所示。

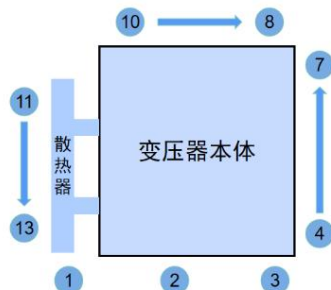


图 5 降压变压器噪声测点布置 1

Fig. 5 Step-down transformer noise measurement points arrangement 1

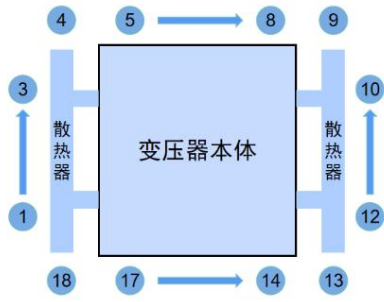


图 6 降压变压器噪声测点布置 2

Fig. 6 Step-down transformer noise measurement points arrangement 2

表 4 降压变压器平均有效声压级

Table 4 Average effective sound pressure level of step-down transformer

声源	500 kV511B 变压器	500 kV512B 变压器
声压级/dB(A)	67.9	66.1

2 换流站整体声场模型建立

2.1 有限元算法

对于难以求得解析解的物理问题, 可根据不同的离散化类型构造出近似方程, 得到数值模型方程, 并以此求解, 得到所求问题近似解。在 COMSOL Multiphysics 压力声学模块中, 将流体控制方程处理并假设系统中的热力学过程绝热可逆, 并且黏度和导热系数可以忽略不计, 将其离散化。压力声学模块频域求解数值方程为:

$$-\frac{1}{\rho_0}(\nabla \cdot p - q) - \frac{\omega^2 p}{\rho_0 c^2} - Q \quad (1)$$

式 (1) 中: ρ_0 为流体介质密度; p 为声压; q 为偶极源; c 为流体介质中声速; ω 为角频率; Q 为单极源。

2.2 换流站整体模型建立

该换流站占地面积为 223800 m², 很难直接用软件以此尺寸建立模型并完成计算, 因此对换流站模型进行简化处理, 将其尺寸进行缩小, 进行缩尺模型的建立。缩尺模型噪声仿真是通过物理相似性原理, 按比例缩小实际声源或传播环境, 保证模型与原型的声学行为一致, 从而通过小尺度实验推断全尺寸噪声分布。仿真模拟的基础声波方程在缩尺后保持形式不变, 可以以建立缩尺模型的方式进行

噪声模拟。该模型以 1: 10 的比例构建, 模型中部为换流阀厅, 以长方体表示, 是换流站内最大的建筑物。交流滤波器场位于换流站北侧, 布置在模型的上端, 站内有五组滤波器投入运行, 以线声源表示; 换流阀厅右侧布置直流滤波器场, 以线声源表示; 平波电抗器、降压变压器等设备以点声源表示。同时以长方体构建换流站整体模型的围墙, 地面和其它建筑物。得到换流站整体有限元网络模型如图 7 所示。

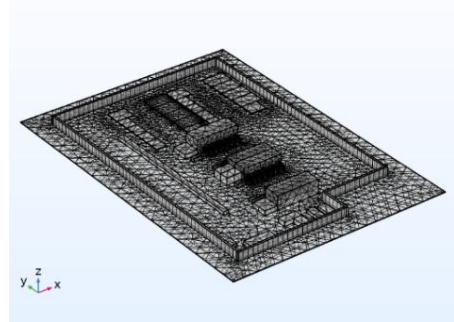


图 7 换流站有限元网络模型

Fig. 7 Finite element network model of converter station

对换流站声学有限元模型进行材料定义。其中, 围墙与地面材料定义为混凝土, 站内其他建筑物定义为结构钢。流体域定义为空气, 并将其密度等比缩小。

3 仿真结果与分析

将以上各声源声压级计算得到的声功率值输入到声源模型中, 在频率 100 Hz 条件下, 基于所建立的模型进行压力声学 and 固体力学的多物理场耦合计算, 得到换流站声压级分布如图 8、图 9 所示, 换流站声压级多切面图如图 10 所示。

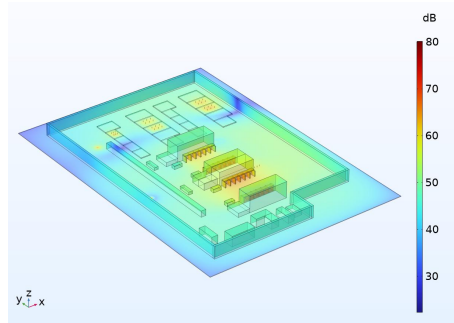


图 8 换流站声压级整体分布图

Fig. 8 Overall distribution of sound pressure level of converter station

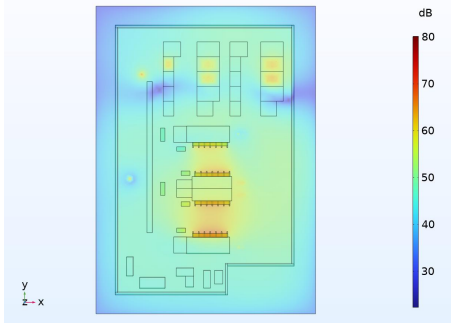


图 9 换流站声压级平面分布图

Fig. 9 Plane distribution of sound pressure level of converter station

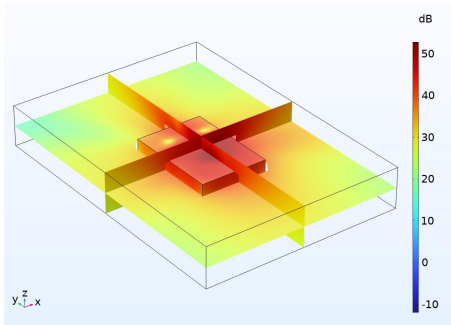


图 10 换流站声压级多切面图

Fig. 10 Multi-sectional diagram of sound pressure level of converter station

换流站整体声场模型中声源较多, 声场情况复杂。声压级较高的区域集中在模型中部, 为换流阀厅区域, 即换流变压器声源所在的位置。该位置声源较多, 声强度较大, 并基于换流变压器的分布, 附近声场呈现不规则的球型扩散状态。由此可知, 需要在换流阀厅附近位置对噪声加强控制, 比如在换流变压器风机附近加装新的降噪设备等。

将部分厂界实测点声压级数据与相应的仿真声压级数据进行对比, 其对比结果如图 11 所示。

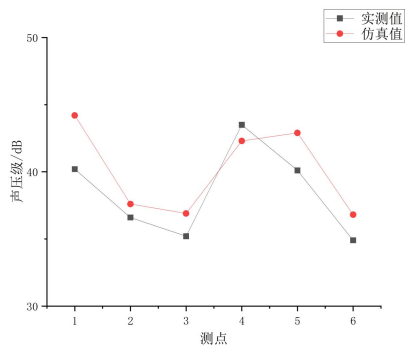


图 11 换流站厂界测点声压级对比

Fig. 11 Comparison of sound pressure level at plant boundary measuring point of converter station

根据厂界实测点声压级数据与相应的仿真声压级数据的对比可知, 仿真数据与实测数据基本一致。仿真模型分析与实测数据吻合度较高, 平均误差 ≤ 5 dB, 验证了所建立换流站声场仿真模型的准确性。

4 换流变噪声影响分析

换流站整体噪声水平主要受换流变压器噪声影响, 而通过对换流变压器的仿真模拟, 得到处于不同电压等级的换流变压器噪声对换流站噪声的影响。利用 COMSOL Multiphysics 对换流变压器进行建模, 建模如图 12、13 所示, 换流变压器建模图中已将空气域与完美匹配层隐藏。

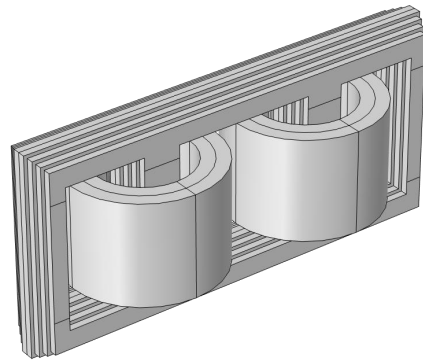


图 12 铁芯及绕组建模

Fig. 13 Modeling of iron cores and windings

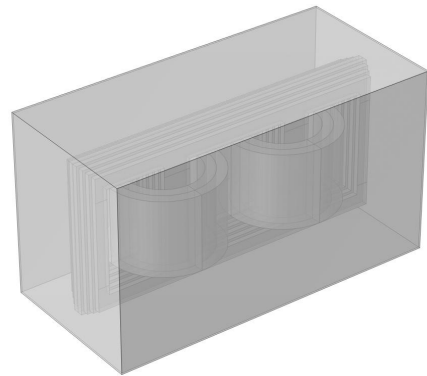


图 13 换流变压器仿真模型

Fig. 13 Converter transformer simulation model

将固体力学、压力声学、磁场、电路进行多物理场耦合, 以电压源为激励, 通过计算, 对不同电压等级的换流变压器噪声进行预测, 其电压等级分别为额定电压 303.1kV、0.8 倍额定电压 242.5kV、0.9 倍额定电压 272.8kV、1.1 倍额定电压 333.4kV、1.2 倍额定电压 363.7kV, 预测结果如表 5 所示。

表 5 换流变压器在不同电压等级的声压级预测结果

Table 5 Prediction results of sound pressure level of converter transformer at different voltage levels

电压等级/kV	242.5	272.8	303.1	333.4	363.7
平均有效声压级/dB	69.1	71.1	73.0	74.6	76.1

将预测结果代入换流站模型, 取各电压等级的噪声预测结果图中相同厂界预测点, 其对比结果如图 14 所示。

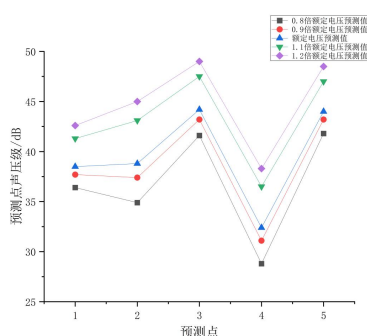


图 14 不同电压等级噪声预测结果

Fig. 14 Noise prediction results at different voltage levels

可以发现, 在额定电压预测的基础上对模型进行修改, 对额定电压减小或增加, 随电压等级提高, 换流变压器噪声也随之提高, 对换流站整体噪声影响越大。除额定电压预测值与相邻电压等级预测值差距较大外, 随电压等级提升, 提升相同电压等级对厂界噪声的提高总体上呈减弱的趋势。

5 结语

换流站产生的噪声问题日益受到关注, 解决换流站噪声问题意义重大。通过对换流站的声场模拟, 可以完成对换流站的声场预测以及更直观, 更全面的分析。本文利用 COMSOL Multiphysics, 结合实际测量数据, 以压力声学及固体力学耦合对换流站整体声场分布状况进行仿真计算。结果显示换流站噪声主要来自换流变压器等声源, 这些设备在该频段内产生显著的低频噪声, 而这些电磁振动和机械振动引起的噪声对长期暴露的人员影响较大, 声压级达到 80 dB, 集中在设备附近区域。

换流站整体声场呈现不规则的球型扩散状态。声压级较高的区域集中在模型中间, 为换流阀厅附近区域。由此可知, 需要在换流阀厅附近位置对噪

声加强控制。通过仿真结果与实测数据进行对比, 平均误差 ≤ 5 dB, 说明仿真结果与实测数据具有较好的一致性。同时通过对换流变压器的建模, 预测其在不同电压等级下的噪声, 并将其代入换流站整体噪声预测模型, 发现随电压等级提高, 换流变压器噪声也随之提高, 对换流站整体噪声影响越大, 且随电压等级提升, 提升相同电压等级对厂界噪声的提高总体上呈减弱的趋势。研究结论对绿色电网建设与换流站噪声的预测和分析具有一定意义。

参考文献

- [1] 曹晨, 闫帅. 我国电力结构及电力市场发展的研究[J]. 中国市场, 2024, (14): 61-64.
- [2] 孙梦翔. 换流站站界处可听噪声的预测和特性规律研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
Sun Mengxiang. Research on Prediction and Characteristic of Audible noise of Boundary of Converter Station[D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2023(in Chinese).
- [3] 杨振宇, 张耀云. 构网型800 kV换流站控制策略研究[J]. 电工材料, 2024, (05):81-84.
YANG Zhenyu, ZHANG Yaoyun. Research on Control Strategy of 800 kV Grid-forming Converter Station[J]. Electrical Engineering Materials, 2024, (05): 81-84 (in Chinese).
- [4] 刘吉臻, 王庆华, 胡阳, 等. 新型电力系统的内涵、特征及关键技术[J]. 新型电力系统, 2023, 1(01): 49-65.
LIU Jizhen, WANG Qinghua, HU Yang, et al. Connotation, Characteristics and Key Technologies of New Power Systems[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(01): 49-65(in Chinese).
- [5] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 高压直流输电系统可靠性分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(09): 174-187.
LI Kang, HUANG Meng, ZHA Xiaoming, et al. An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(09): 174-187(in Chinese).
- [6] Shu Y, Chen W. Research and application of UHV power transmission in China[J]. High Voltage, 2018, 3(1): 1-13.
- [7] 程建登, 吴斌, 毛文俊, 等. 特高压换流站故障统计与反措[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 292-298.
CHENG Jiandeng, WU Bin, MAO Wenjun, et al. Failure Statistics and Countermeasures of UHVDC Converter Stations[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 292-298(in Chinese).
- [8] 骆钊, 张涛, 阮彦俊, 等. 基于APSO-SSD-SVD的特高压换流站OLTC振动信号降噪方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(21):13-23.
LUO Zhao, ZHANG Tao, RUAN Yanjun, et al. Noise reduction method for the OLTC vibration signal of a UHV converter station based on APSO-SSD-SVD[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(21): 13-23(in Chinese).
- [9] 王洪彬, 周念成, 王伟, 等. 基于行波模式分解的特高压直流输电线路双端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(01):109-120.
WANG Hongbin, ZHOU Niancheng, WANG Wei, et al. A double-terminal fault location method for UHVDC transmission lines based on traveling wave mode decomposition[J]. Power

- System Protection and Control, 2024, 52(01): 109-120. (in Chinese).
- [10] 王秋楠, 晋宏杨, 刘东, 等. LCC-HVDC换流站无功电压控制问题综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(02):10-17.
WANG Qiunan, JIN Hongyang, LIU Dong, et al. Review on Reactive Voltage Control of LCC-HVDC Converter Station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(02): 10-17(in Chinese).
- [11] 梁曦东, 仵超, 左周, 等. 高电压有机外绝缘发展综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7412-7426.
LIANG Xidong, WU Chao, ZUO Zhou, et al. Review and Prospects for Development of High Voltage Outdoor Organic Insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7412-7426(in Chinese).
- [12] 徐炎炎, 樊争科, 侯琳, 等. 高压输变电带电作业用屏蔽织物的开发[J]. 合成纤维, 2024, 53(11):18-22.
- [13] 郭贤珊, 厉璇, 王庆, 等. 特高压直流输电技术发展现状与思考[J]. 新型电力系统, 2024, 2(03): 237-250.
GUO Xianshan, LI Xuan, WANG Qing, et al. Status and Thoughts on the Development of Ultra High Voltage Direct Current (UHVDC) Transmission Technology[J]. New Type Power Systems, 2024, 2(03): 237-250(in Chinese).
- [14] 黄世鸿. 特高压直流线路与接地极线路共塔设计探讨[J]. 黑龙江电力, 2023, 45(03):255-258.
HUANG Shihong. Discussion on design of UHVDC line and grounding line sharing tower[J]. Heilongjiang Electric Power, 2023, 45(03): 255-258(in Chinese).
- [15] 李林卓, 周国伟, 孙启贺, 等. 特高压换流站交流滤波电容组件电热特性分析[J]. 河北电力技术, 2024, 43(06):30-35.
LI Linzhuo, ZHOU Guowei, SUN Qihe, et al. Analysis of Electrothermal Characteristics of AC Filter Capacitor Components in Ultra Voltage Converter Station[J]. Hebei Electric Power, 2024, 43(06): 30-35(in Chinese).
- [16] 马林. 高压直流输电系统中的换流阀技术[J]. 电气时代, 2024, (12): 105-108.
- [17] 陈广泽. 换流站关键设备电磁-振动噪声多物理场仿真研究[D]. 沈阳工业大学, 2023.
- [18] 孙海涛. 建筑声学缩尺模型测量关键技术研究[D]. 华南理工大学, 2014.
SUN Haitao. Research on key technology of architectural acoustic scale model measurement[D]. South China University of Technology, 2014(in Chinese).
- [19] Zhang Y, Yong Z, Lianke X, et al. Computer Simulation Analysis and Control of Vibration and Noise in UHVDC Converter Station[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1648(3): 032185-.
- [20] 周兵, 王延召, 胡静竹, 等. 特高压变电站厂界环境噪声排放量及计算[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(06): 289-294.
ZHOU Bing, WANG Yanzhao, HU Jingzhu, et al. Measurement and Calculation of Environmental Noise Emission at UHV Substation Boundary[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(06): 289-294(in Chinese).
- [21] 王首魁, 房小健, 王辉, 等. 典型高压直流换流站噪声治理研究[J]. 当代化工研究, 2022(22):186-188.
WANG Shoukui, Fang Xiaojian, Wang Hui, et al. Research on Noise Control of Typical HVDC Converter Station[J]. Modern Chemical Research, 2022, (22): 186-188(in Chinese).
- [22] 鲁伟, 高湛, 张华, 等. 特高压换流站噪声控制设计研究[J]. 电力勘测设计, 2021, (02):27-33.
LU Wei, GAO Zhan, ZHANG Hua, et al. Study on Noise Calculation of HVDC Converter Station[J]. Electric Power Survey & Design, 2021, (02):27-33(in Chinese).
- [23] 肖鲲, 高岩, 雷晓燕, 等. ± 800 kV布拖换流站声环境影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(09): 47-54+66.
XIAO Kun, GAO Yan, LEI Xiaoyan, et al. Analysis on Acoustic Environmental Impact of ± 800 kV Butuo Converter Station[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(09): 47-54+66(in Chinese).
- [24] 阳金纯, 吴晓文, 吕建红, 等. 特高压换流站噪声源测试与预测技术研究[J]. 中国环境监测, 2018, 34(01): 138-144.
YANG Jinchun, WU Xiaowen, LYU Jianhong, et al. Research on Noise Source Measurement and Prediction Technology of UHV Converter Station[J]. Environmental Monitoring in China, 2018, 34(01): 138-144(in Chinese).
- [25] 张鸣, 商文念, 王亚平, 等. 特高压换流站内可听噪声特征及分布规律研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(12): 82-89.
ZHANG Ming, SHANG Wennian, WANG Yaping, et al. Acoustic Characteristics and Distribution Law of Audible Noise in HVDC Converter Stations[J]. Building Science, 2017, 33(12): 82-89(in Chinese).
- [26] 陈传敏, 杜鹏宇, 郭兆枫, 等. 基于LMS Virtual. Lab调相机房噪声仿真分析[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(06):216-220.
CHEN Chuanmin, DU Pengyu, GUO Zhaofeng, et al. Noise Simulation Analysis of a Synchronous Condenser Room Based on LMSVirtual. Lab[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(06): 216-220(in Chinese).
- [27] 石剑波, 张驰, 赵洪南, 等. 基于多点测量值的 ± 500 kV换流站厂界噪声反演计算研究[J]. 湖北电力, 2023, 47(5):54-62.
SHI Jianbo, ZHANG Chi, ZHAO Hongnan, et al. Research on Inversion Calculation of ± 500 kV Converter Station Boundary Noise Based on Multipoint Measurement Values[J]. Hubei Electric Power, 2023, 47(5): 54-62(in Chinese).
- [28] 赵诗雅, 石硕, 顾建新, 等. ± 500 kV换流站降噪提升方案研究[J]. 建材世界, 2023, 44(05):113-115.
ZHAO Shiya, SHI Shuo, GU Jianxin, et al. Research on Noise Reduction and Enhancement Scheme for ± 500 kV Converter Station[J]. The World of Building Materials, 2023, 44(05): 113-115(in Chinese).
- [29] 关林坤, 高湛, 鲁伟. ± 1100 kV古泉换流站噪声治理研究与优化[J]. 电力勘测设计, 2020(z1):13-17.
GUAN Lin-kun, GAO Zhan, LU Wei. Research and Optimization of Noise Control Scheme for ± 1100 kV Guquan Converter Station[J]. Electric Power Survey & Design, 2020(z1): 13-17(in Chinese).
- [30] 韩钰, 樊超, 王广克, 等. 基于频谱分析的 ± 800 kV换流站噪声特性[J]. 中国电力, 2019, 52(10): 40-44+177.
HAN Yu, FAN Chao, WANG Guangke, et al. Noise Characteristics of ± 800 kV HVDC Convert Station Based on Spectrum Analysis[J]. Electric Power, 2019, 52(10): 40-44+177(in Chinese).
- [31] 常伟, 王俊生, 李志刚, 等. 特高压换流站降噪围墙结构设计优化[J]. 电力科技与环保, 2022, 38(05): 378-385.
CHANG Wei, WANG Junsheng, LI Zhigang, et al. Structural design optimization of noise reduction enclosure in UHV Converter Station[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2022, 38(05): 378-385(in Chinese).
- [32] 樊小鹏, 李丽, 刘嘉文. ± 500 kV换流站噪声污染分析及控制措施研究[J]. 电力科技与环保, 2017, 33(02): 5-8.
FANG Xiaopeng, LI Li, LIU Jiawen, Analysis of noise pollution and control of domestic ± 500 kV converter stations[J]. El.ectric Power

- Technology and Environmental Protection, 2017, 33(02): 5-8.(in Chinese).
- [33] 徐鹏, 姚为方, 华雪莹, 等. ± 1100 kV换流站BOX-IN装置降噪效果的测试与分析[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2022, 27(02): 59-63.
XU Peng, YAO Weifang, HUA Xueying, et al. Test and Analysis of Noise Reduction Effect of BOX-IN Device in ± 1100 kV Converter Station[J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College. 2022, 27(02): 59-63(in Chinese).
- [34] GB/T 22075—2008 高压直流换流站可听噪声[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [35] 阮学云, 邵良友, 胡坤, 等. 基于可靠度的变压器声功率遗传算法研究[J]. 中国环境监测, 2023, 39(04): 213-220.
RUAN Xueyun, SHAO Liangyou, HU Kun, et al. Research on Genetic Algorithm of Transformer Sound Power Based on Reliability[J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(04): 213-220(in Chinese).
- [36] 赵亮, 臧英, 樊纪超, 等. 换流变压器原理样机电磁振动与噪声研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(02): 71-79.
ZHAO Liang, ZANG Ying, FAN Jichao, et al. Research on Electromagnetic Vibration and Noise of Prototype for Converter Transformer[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2021, 48(02): 71-79(in Chinese).

作者简介:



王绿

王绿(1990), 女, 工程师, 研究方向为噪声与振动控制, E-mail:973291937@qq.com。

李雷(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为噪声与振动控制。通信作者, E-mail:llei4708@ncepu.edu.cn。