

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.03.006

桥臂电抗器的噪声测试与分析

赵倩, 闫维娜, 行新鹏

(西安合容电力设备有限公司, 西安 710200)

摘要:近年来随着电力系统的快速发展,电抗器产品的需求越来越多,同时电抗器运行所产生的噪声污染越来越受人们的关注,分析电抗器设备噪音来源、制定噪音估算方法及研究电抗器设备的降噪措施也成了电气科研者的工作重点。本文针对柔性直流输电所用的桥臂电抗器的噪声问题,通过现场测试、选取样点采用 Matlab 分析了桥臂电抗器的噪声频谱特性,并在厂内进行了噪声试验,发现低处噪声情况确实更为明显,故在电抗器下部采取降噪措施很有必要,最后从桥臂电抗器本体角度提出了相应的降噪措施,包括在电抗器设计过程中注意使电抗器固有频率远离电磁力频率、加装防护罩、采用防松螺母等。

关键词:桥臂电抗器; 噪声; 声谱分析; 降噪措施

Test and Analysis for Noise of Bridge Arm Reactor

ZHAO Qian, YAN Weina, XING Xinpeng

(Xi'an Herong Electric Power Equipment Co., Ltd., Xi'an 710200, China)

Abstract: In recent years, with the rapid development of power system, the demand of reactor product keep increasing. However, the noise pollution of reactor generated during the operation is more and more concerned. Therefore, how to analyze the sources of the noise, formulate the noise estimation method and study the noise reduction measures of the reactor equipment have become the key point to the electrical researchers. As for the noise of bridge arm reactor for flexible DC transmission, the noise spectrum characteristic of the bridge arm reactor is analyzed by the Matlab through site test and selection of sampling point and the the noise test is performed in the factory, finding that the low noise situation is indeed more remarkable. It is therefore necessary to take the noise reduction measures at the bottom of the reactor. Finally, from the perspective of the bridge arm reactor body, the corresponding noise reduction measures, including making the natural frequency of the reactor far away from the electromagnetic force frequency, installing protective cover, using locking nuts, are proposed.

Keywords: bridge arm reactor; noise; spectrum analysis; noise reduction measures

0 引言

桥臂电抗器是柔性直流输电工程中的核心设备之一。桥臂电抗器在正常运行时,其线圈里会流过直流电流、工频交流电流、二倍频环流及高次谐波电流等复合电流。由于大容量柔性直流输电工程中桥臂电抗器体积大、高度高,且通常布置在室外区域,噪声影响范围大,当输送容量提高时,引起的辐射噪声问题不容忽视^[1]。因此,研究大容量柔性直流输电桥臂电抗器噪声特性,并从设备本体提出噪声治理措施对提高柔性直流工程的环境友好性具有重要意义^[2-5]。

1 电抗器噪声产生机理

干式空心电抗器作为目前最为主流的电抗器结构型式,鉴于其结构简单、免维护、成本相对低廉等优点^[6-7],被越来越多的换流站采用。柔直输电中阀组桥臂侧所采用的桥臂电抗器,也基本都采用此种结构型式。

干式空心电抗器在运行中,其绕组中流过基波叠加多个谐波分量的交变电流^[8-14]。该交变电流在电抗器周围空间中产生交变的磁场,磁场频率与电流频率相同^[15-17]。载有电流的绕组在磁场中会受到交变磁场力作用,该磁场力的频率是电流各频率的

差频与和频。磁场力在电抗器的绕组上的分布并不均匀,通常端部的磁场力更大。在磁场力的作用下,电抗器结构会产生微小形变而出现机械振动。该机械振动通常与磁场力频率相同。电抗器外表面上的机械振动会带动周围的空气产生声波,进而发出可听噪声。

根据干式桥臂电抗器的运行机理及结构形态,分析其噪声产生的原因如下^[18]:

- 1)电抗器在运行时,会受到巨大的电动力的牵引,绕组在电动力的作用下会产生振动^[19],进而向外辐射出噪声;
- 2)电抗器自身结构的固有机械振动频率与基波电流或各次谐波电流所产生的电磁力频率相近时会产生共振^[20-21],加剧噪声问题;
- 3)结构设计不合理或过程工艺控制不到位,线圈运行时会产生噪声;
- 4)电抗器在组装时通过大量的连接件相连,连接件松动亦会产生噪声。

2 换流站现场噪声测试

为了对干式桥臂电抗器所产生的噪声水平建立初步了解,笔者联合西安交通大学高电压技术教研室对位于某柔性直流输电金牛站的室内桥臂电抗器的噪声和振动情况进行了现场测量,测量设备为AWA6290A型多通道噪声与振动分析仪,采集相关数据,为后期对桥臂电抗器噪声问题的深入研究提供依据。

该站直流系统电压等级为±160 kV,桥臂电抗器电流为174 A/105 A(AC/DC),电感为180 mH。不同采集时间的电流情况见图1。

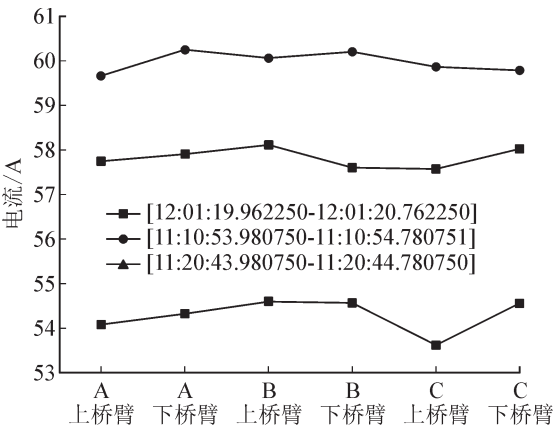


图1 不同采集时间的电流
Fig. 1 Current at different acquisition times

图1为 $t=8\text{ h}$ 、 12 h 和 16 h 3个时间采集点的瞬时电流情况,因未满负荷运行,电流未达到额

定。但根据历史运行情况,在输送容量满载时,电流达到额定值。由于此站桥臂电抗器位于室内,噪音反馈问题不是很明显,但作为测试试验,其提供的完整数据足以用来噪声分析研究。

现场对6台电抗器噪音情况进行测量,测量位置距离线圈边沿1.5 m处,沿圆周方向每隔1 m采集一次时域信号,见图2。

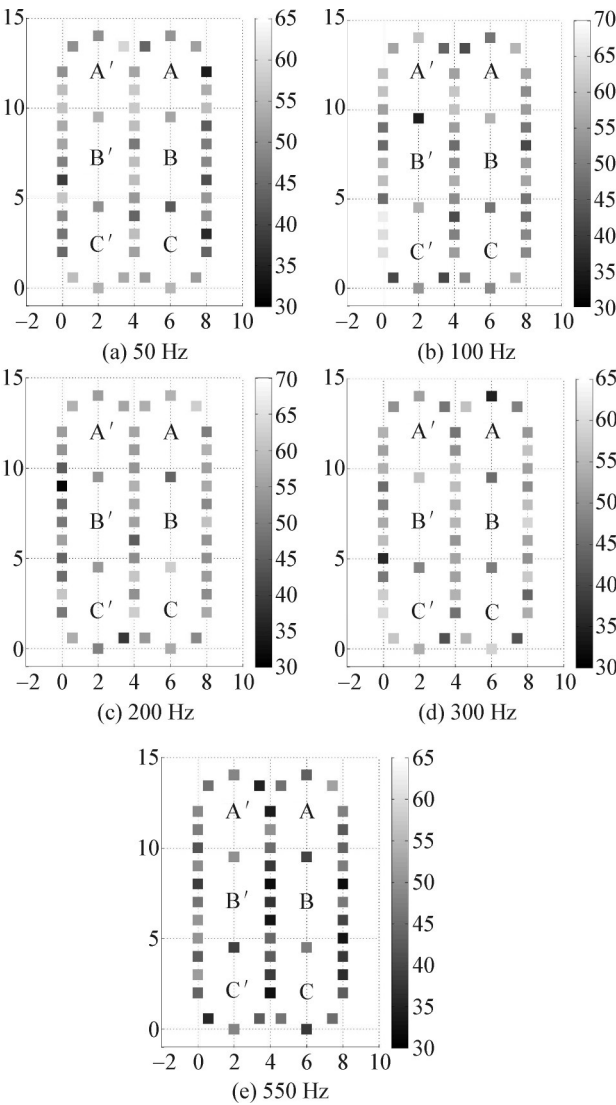


图2 不同频率下噪声分布
Fig. 2 Noise distribution at different frequencies

从以上分布图可知,同激励电流频率下,不同位置处电抗器噪声情况并不相同。

根据不同频率分解出各个频率的结果。通过Matlab变换,可得出声压级的频谱图,图3为49个点的平均值频谱图。

声压级的计算公式为

$$L_p = 20 \lg \frac{p_e}{p_{ref}}$$

式中: L_p 为声压级,dB; p_e 为声压有效值,Pa; p_{ref}

为基准声压,在空气中取 2×10^{-5} Pa。由傅里叶变换可知,测试结果中 $p_e=0.013\ 386$ Pa,代入式中计算可得最高点声压级为 56.5 dB。

虽然测试结果显示噪音较小,但测量时 6 台电抗器运行电流均未达到额定,如若达到额定电流,电抗器的运行噪声肯定会更大。

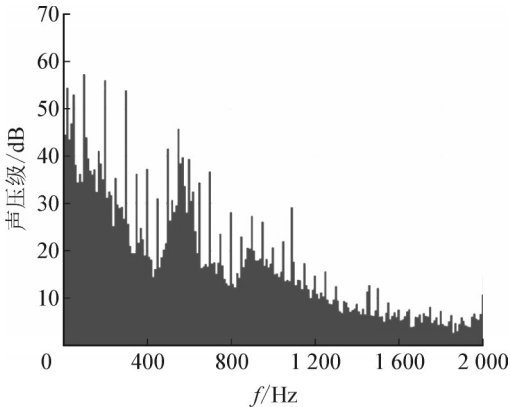


图3 平均声压频谱图
Fig. 3 Average sound pressure spectrum

3 厂内噪声测试

前述现场噪声的初步测试过程中,发现不同激励电流频率下,不同位置处电抗器噪声情况亦不相同。为了明确电抗器辐向和轴向在不同频率下的噪声特征,笔者在厂内进行了试验。试验过程中采用噪声测量装置 AWA6290 A,具体测试过程见图 4。

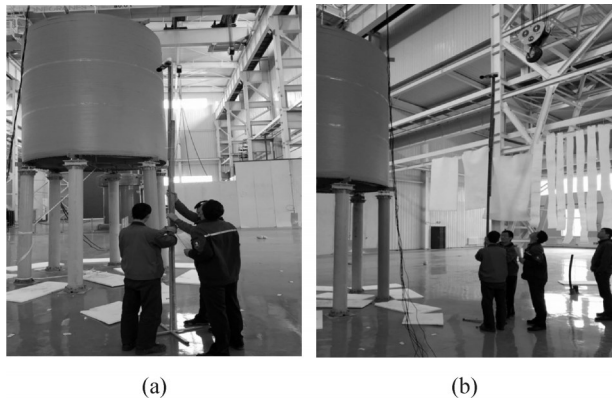


图4 厂内测试过程
Fig. 4 Test process in the factory

3.1 测试方法

- 1)首先进行 550 Hz 下,距电抗器 1 m、2 m、3 m、10 m 处的轴向 9 个点的测量,因传感器数量有限,分下 6 上 3 两次进行测量(电抗器上端 3 米处因距离较远,此次不予考虑),轴向测点分布见图 5。
- 2)完后进行 50 Hz、250 Hz、300 Hz 频率下的测量。

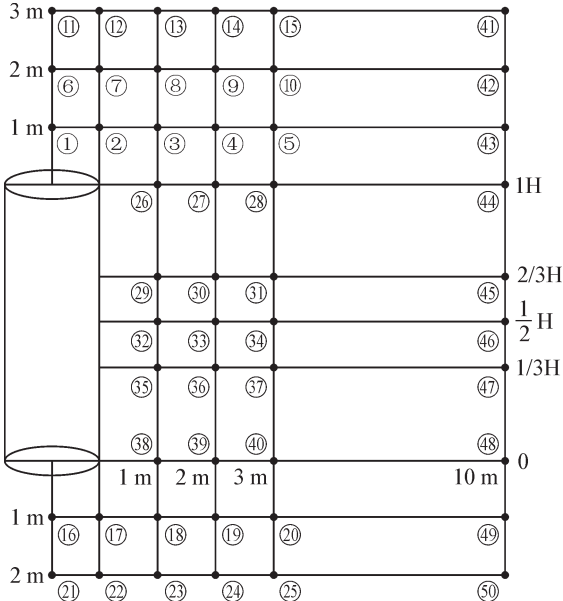


图5 轴向测点分布
Fig. 5 Distribution of axial measuring points

3)最后测试圆周方向,测量 1/3、2/3 处的点,在额定电流下测量,一个频率完后更换另一个频率。圆周测点分布见图 6。

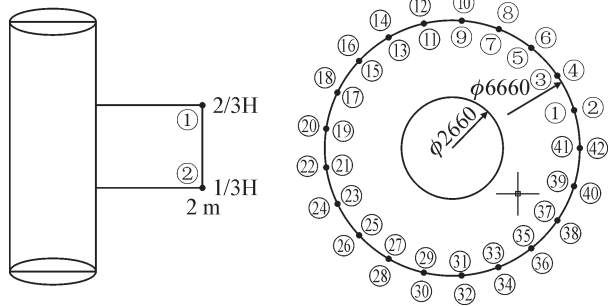


图6 圆周测点分布
Fig. 6 Distribution of peripheral measuring points

3.2 施加电流

具体施加电流见表 1。

表1 施加电流情况 Table 1 Current application	
频率/Hz	施加电流/A
50	11.2/22.2/33.1/43.8/54.1/64/82.3/98/110.8/120.3/126.1/128
	19.7/39.2/58.5/77.3/95.5/113/145.3/173.1/195.7/212.4/222.6/226
250	19.7/39.2/58.5/77.3/95.5/113/145.3/173.1/195.7/212.4/222.6/226
	17.4/34.7/51.8/68.4/84.5/100/128.6/153.2/173.2/187.9/196.9/200
550	

3.3 测试结果

测试结果见表 2。

表2 圆周方向测试结果
Table 2 Test result at circumferential direction

测点	高度	频率/Hz	施加电流/A	典型测点平均 A 计权声压级/dB
1	1/3H	50	128	41.8
2	2/3H	50	128	42.5
1	1/3H	250	226	75.2
2	2/3H	250	226	75.4
41	1/3H	250	226	78.5
42	2/3H	250	226	81.0
3	1/3H	300	226	80.2
4	2/3H	300	226	80.4
25	1/3H	300	226	76.5
26	2/3H	300	226	74.7
33	1/3H	550	200	81.5
34	2/3H	550	200	80.0
17	1/3H	550	200	77.1
18	2/3H	550	200	77.1

上述测点选择为每个频率下的最大和最小测试值点,从测试值及测点位置可见,并未出现在同一位置各个频率噪声最大的规律性表现。

从表中数据可见,在相同工况下的 1/3 高度处和 2/3 高度处的平均 A 计权声压级基本一致。而且在 550 Hz 下的噪声情况最为明显,而且频率越高,电流越大,噪声愈明显,见表 3。

表3 轴向方向 550 Hz 试验电流下噪声值
Table 3 Noise value at 550 Hz test current in axial direction

电流/A	最大值 测点	噪声值/ dB	电流/A	最大值 测点	噪声值/ dB
34.7	16	51.3	128.6	16	66.4
51.8	16	56.5	153.2	16	69.8
68.4	16	59.5	173.2	16	69.6
84.5	16	63.2	187.9	16	72.8
100.0	16	65.0	200.0	16	72.9

从表 3 可知,当激励电流频率为 550 Hz 时,电抗器噪声测点最大值的位置始终出现在距离电抗器下端面 1 m 的轴心线上(即 16 测点处)。

轴向方向 300 Hz 试验电流下噪声值见表 4。

表4 轴向方向 300 Hz 试验电流下噪声值
Table 4 Noise value at 300 Hz test current in axial direction

电流/A	最大值 测点	噪声值/ dB	电流/A	最大值 测点	噪声值/ dB
39.2	16	52.9	145.3	39	75.9
58.5	16	57.7	173.1	39	79.5
77.3	16	62.2	195.7	39	82.4
95.5	16	65.1	212.4	39	83.9
113	39	67.8	226	39	85.2

从表 4 可知,当激励电流频率为 300 Hz,激励电流小于 113.0 A 时,电抗器径向噪声测点最大值的位置出现在距离电抗器下端面 1 m 的轴心线上(即 16 测点处),激励电流大于 113.0 A 时,电抗器径向噪声测点最大值的位置出现在径向距离电抗器下沿表面 2 米处(即 39 测点处)。

轴向方向 250 Hz 试验电流下噪声值见表 5。

表5 轴向方向 250 Hz 试验电流下噪声值
Table 5 Noise value at 250 Hz test current in axial direction

电流/A	最大值 测点	噪声值/ dB	电流/A	最大值 测点	噪声值/ dB
39.2	18	56.7	145.3	18	80.1
58.5	18	64	173.1	18	82.5
77.3	18	68.8	195.7	18	85.4
95.5	18	72.3	212.4	18	87.2
113	18	75.5	226	18	88.8

从表 5 可知,当激励电流频率为 250 Hz 时,电抗器径向噪声测点最大值的位置始终出现在距离电抗器下端面 1 m 处(即 18 测点处)。

从以上 4 个频率可见,所有最大噪声点都出现在靠近地面一侧,不排除存在地面反射的叠加。根据实际工况考虑,低处噪声情况确实更为明显,故在电抗器下部采取降噪措施很有必要。

4 典型干式空心电抗器固有频率测试

为准确预测干式空心电抗器的固有频率,本文选取力锤作为试验模态分析的激励设备进行测试。

4.1 测试方法

锤击法测试只要有两通道的数据采集设备即可,即一个通道接压电式加速度单向相应传感器,一个通道接模态力锤。分别对激励力锤点、响应传感器测点进行固定,可以得到两种锤击方法。对于移动力锤、固定传感器的方法,虽然不需要固定安装、更容易安装,但是由于力锤敲击所需要的空间较大,测点可能由于空间限制无法敲击,因此本项目的模态试验测试方案选择的是力锤固定锤击的方法,这种测试方式可以得到频响函数矩阵完整的一列。

需要注意的是,力锤的锤击过程为人工操作,因而锤击手法包括锤击的力度、方向和锤击点位置都会对模态试验的结果造成影响。试验锤击时要以人的手腕为轴,手臂保持不动,挥动力锤时动作要利落干脆,以免造成“二次连击”现象。理论上要求每次都锤击同一点,每次锤击的应为同一方向。

力锤锤击位置是模态参考点,锤击点的选择原则是避开关心的所有模态的节点位置,尽可能多的

激励出各阶模态,并且机器的峰值点多而明显;加速度传感器测点布设要充分考虑振动结构的特点、试验时间安排、试验模态的测试要求等要求,要求能够表征出振动结构的大致形状,测点位置要易于策略、尽可能布点方便,避免遗漏主要模态,使得测点数目和位置分布能唯一、充分描述所有关心的模态振型。

在进行模态试验时,采集到激励和响应的时域信号后,首先查看时域的相关信息。加速度响应传感器采集到的振动时域信号单位为 m/s^2 ,但在振动测量中更为广泛接受的方式是标准加速度 g 作单位。

在时域信号图中,从激励可以看到力脉冲作业的时间小于 1 ms ,力锤激励提供的是冲击瞬态激励;从响应可以看出在采样周期末端,信号自然地衰减到零,说明采样长度设置较为合理。

4.2 测试结果

首先确定系统极点,即获取频率和阻尼信息,接下来根据测点数据计算模态振型。

系统极点是全局特征,任一传感器测点可以获得电抗器振动结构的极点即固有频率和阻尼信息,因此,测量中只要避开各阶模态的节点,极点不会随着测点位置变化而变化,不论在什么位置布设测点,最少只需要选择一条就可确定系统极点。

干式空心电抗器的主体包封作为圆柱结构,其模态振型可以用一组坐标 (m,n) 来表示,其中 m 表示干式空心电抗器包封结构的轴向振型阶数, n 表示环向振型阶数。轴向振型含 m 个轴向半波,环向振型含 n 个环向波。前 6 阶固有频率见表 6。

表 6 干式空心电抗器固有频率

Table 6 Inherent frequency of dry-type air-core reactor

阶数	振型	固有频率/Hz
1	(0,2)	123.94
2	(0,3)	363.72
3	(1,3)	504.69
4	(0,4)	582.41
5	(1,4)	646.69
6	(0,5)	861.65

5 噪音分析及控制措施

根据噪声的传播机理,结合此次测量结果及电抗器的运行特性,噪声控制应在避免设备结构共振、阻碍噪声的传播等方面采取措施,实现降噪的目的^[22-26]。

1)对典型干式空心电抗器固有频率进行研究性测试,掌握电抗器结构、重量与固有频率之间的

关系,从而在电抗器设计过程中注意使电抗器固有频率远离电磁力频率,以此避免因共振而使噪声问题加剧。

2)对于户外放置的桥臂电抗器在设计中加装防护罩^[27-28],防护罩在具备防雨功能的同时兼顾降低电抗器上下部向外辐射的噪声;另在线圈外侧增加抗性吸声筒,可以在声波传播的路径上起到阻碍作用^[19-21],同时在防护罩内侧增加环保吸声棉,在反复反射的过程中吸收噪声能量,从而降低电抗器向外辐射的噪声,减小对周围环境的影响^[32-34]。

3)本体与附件连接采用防松螺母^[35],确保紧固件安装牢固,避免因紧固件松动而产生高频噪声。

6 结语

随着空心电抗器容量与电压等级的提高,其在运行时的噪音问题凸显的越来越明显,从根本上降低电抗器的噪音对电抗器自身安全稳定运行以及环境影响都具有重大意义。作为电抗器生产商,从电气设计环节和降噪装置两大方面寻找更为有效简便的方式,都需要结合实际运行情况并考虑理论及试验数据,不断慢慢积累和改进,本次针对桥臂电抗器的噪声测试可为电抗器噪声控制研究提供一定的理论依据,具有一定的实际指导意义。

参考文献

[1] 樊小鹏,李丽,刘嘉文. $\pm 500\text{ kV}$ 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(2):5-8.
FAN Xiaopeng, LI Li, LIU Jiawen. Analysis of noise pollution and control of domestic $\pm 500\text{ kV}$ converter stations[J]. Electric Power Environmental Protection, 2017, 33(2): 5-8.

[2] 黄莹,麦慧婷,傅亮,等. 平波电抗器噪声辐射特性研究[C]//2015年全国声学设计与噪声振动控制工程学术会议. 2015.

[3] 宋新伟. 干式空心电抗器振动特性研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2018.

[4] 傅亮. 干式空心电抗器噪声测量问题的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.

[5] 杨建立,徐政勋,聂京凯,等. 干式空心电抗器温升仿真技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(6):68-72.
YANG Jianli, XU Zhengxun, NIE Jingkai, et al. Study on temperature rise simulation technology of dry-type air core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6): 68-72.

[6] 王亚杰,刘利强,张梦彬,等. 干式空心电抗器匝间绝缘检测综述[J]. 电力电容器与无功补偿,2018,39(1):91-95.
WANG Yajie, LIU Liqiang, ZHANG Mengbin, et al. Review on inter-turn insulation detection of dry-type air core

- reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(1): 91-95.
- [7] 陈炯,付唐强,魏泽民,等. 匝间短路状态下干式空心电抗器电感量的分析[J]. 高压电器, 2019, 55(2): 195-200.
CHEN Jiong, FU Tangqiang, WEI Zemin, et al. Analysis on inductance of dry-type air-core reactor under inter-turn short circuit[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 195-200.
- [8] 欧健良,杨鹏,曾智,等. 500 kV 高压并联电抗器的故障分析与防范措施[J]. 变压器, 2022, 59(2): 56-60.
OU Jianliang, YANG Peng, ZENG Zhi, et al. Analysis and preventive measures for failure of 500 kV high-voltage shunt reactor[J]. Transformer, 2022, 59(2): 56-60.
- [9] 辛妍丽,周文婷,余泽远,等. 40.5 kV 真空断路器分闸并联电抗器重燃过电压及抑制方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 231-240.
XIN Yanli, ZHOU Wenting, YU Zeyuan, et al. Reignition overvoltages caused by 40.5 kV vacuum circuit breaker switching-off shunt reactors and suppression methods[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 231-240.
- [10] 赵琳,邵先军,金涌涛,等. 局放重症监测技术在特高压电抗器内部缺陷检测中的应用[J]. 浙江电力, 2022, 41(2): 60-66.
ZHAO Lin, SHAO Xianjun, JIN Yongtao, et al. Application of partial discharge critical monitoring technology in internal defect detection of ultra-high voltage reactors[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(2): 60-66.
- [11] 彭晶,邓云坤,王科,等. 真空断路器预击穿特性对选相关合电容器组抑制涌流的影响[J]. 电器与能效管理技术, 2022(1): 7-13.
PENG Jing, DENG Yunkun, WANG Ke, et al. Effect of vacuum circuit breakers prestrike characteristics on inrush current suppression of controlled switching capacitor banks[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(1): 7-13.
- [12] 王南,李东,周志强,等. 一起 500 kV 高压电抗器内部过热故障案例分析[J]. 变压器, 2022, 59(2): 72-80.
WANG Nan, LI Dong, ZHOU Zhiqiang, et al. Case analysis of a 500 kV HV reactor internal overheating fault[J]. Transformer, 2022, 59(2): 72-80.
- [13] 刘传永,王明,赵普志,等. 基于电抗器开断过电压特征分析的匝间绝缘短路故障在线辨识[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(8): 7-15.
LIU Chuanyong, WANG Ming, ZHAO Puzhi, et al. On-line identification of inter-turn insulation short circuit faults based on analysis of reactor breaking overvoltage characteristics[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(8): 7-15.
- [14] 晁武杰,唐志军,林国栋,等. 基于桥臂电抗器耦合的 MMC-HVDC 系统故障过流抑制方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(12): 111-116.
Chao Wujie, Tang Zhijun, Lin Guodong, et al. Fault overcurrent suppression method for MMC-HVDC system based on bridge arm reactor coupling[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 111-116.
- [15] 雷潇,廖文龙,白欢,等. 一起换流站直流滤波器干式电抗器过电压损坏分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(4): 140-145.
LEI Xiao, LIAO Wenlong, BAI Huan, et al. Fault analysis of dry-type air-core reactor of DC filter in HVDC substation caused by overvoltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(4): 140-145.
- [16] 袁妮,侯晓楠,陈欢,等. 干式空心电抗器振荡型冲击电压检测方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 121-127.
YUAN Ni, HOU Xiaonan, CHEN Huan, et al. Research on detection method of oscillating impulse voltage of dry-type air-core reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 121-127.
- [17] 窦宇宇,齐四清,郑博文,等. 基于新型磁控电抗器的直流系统暂态压升抑制方法[J]. 电瓷避雷器, 2023(6): 55-65.
DOU Yuyu, QI Siqing, ZHENG Bowen, et al. Suppression method of new magnetic controlled reactor to transient voltage rise of dc system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6): 55-65.
- [18] 陆居志,李健,汲胜昌,等. 干式空心电抗器噪声等效电流测试方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(1): 77-85.
LU Juzhi, LI Jian, JI Shengchang, et al. Study on equivalent current test method of noise of dry-type air-core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 77-85.
- [19] 戴锋,高爽,宋博,等. 基于有限元的干式空心电抗器振动特性研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(5): 104-109.
DAI Feng, GAO Shuang, SONG Bo, et al. Study on vibration characteristic of dry-type air-core reactor based on finite element method[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(5): 104-109.
- [20] 阮学云,张明发,李志远,等. 高压直流换流站噪声预测与控制研究[J]. 噪声与振动控制, 2013(z1): 291-294.
RUAN Xueyun, ZHANG Mingfa, LI Zhiyuan, et al. Study on the noise prediction and control for HVDC converter stations[J]. Noise and Vibration Control, 2013(z1): 291-294.
- [21] 张嵩阳,祝令瑜,汲胜昌,等. 基于频响函数干式空心电抗器噪声预估方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(6): 71-77.
ZHANG Songyang, ZHU Lingyu, JI Shengchang, et al. Noise predicting method of dry-type air-core reactor based on the frequency-response function[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(6): 71-77.

- [22]毛丹君. ± 800 kV 换流站噪声治理[J]. 吉林电力, 2015, 43(6): 44-46.
MAO Danjun. Treatment on noise of ± 800 kV convertor station[J]. Jilin Electric Power, 2015, 43(6): 44-46.
- [23]苏伟, 申永成, 王增军, 等. 换流站降噪方案研究[J]. 山东电力技术, 2016, 43(5): 66-68.
SU Wei, SHEN Yongcheng, WANG Zengjun, et al. Research on noise reduction scheme of converter stations[J]. Shandong Electric Power, 2016, 43(5): 66-68.
- [24]周兵, 裴春明, 倪园, 等. 特高压交流变电站噪声测量与分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1447-1453.
ZHOU Bing, PEI Chunming, NI Yuan, et al. Measurement and analysis of noise in UHV AC substation[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1447-1453.
- [25]彭任华, 郑成诗, 丁茫, 等. 高压变电站噪声分离算法及其应用[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1680-1686.
PENG Renhua, ZHENG Chengshi, DING Mang, et al. Separation algorithm of the noise in high voltage substation and its application[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1680-1686.
- [26]张劲松. 高压直流换流站噪声综合治理研究[J]. 电力建设, 2007, 28(8): 14-16.
ZHANG Jinsong. Research on comprehensive treatment of HVDC converter station noise[J]. Electric Power Construction, 2007, 28(8): 14-16.
- [27]张林, 孙刚, 沈加曙, 等. 电抗器隔声罩设计和试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(12): 1352-1355.
ZHANG Lin, SUN Gang, SHEN Jiashu, et al. Design and experimental study of acoustical enclosure for reactor[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(12): 1352-1355.
- [28]沈加曙. 电力电抗器的隔声设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [29]戴锋, 高爽, 宋博, 等. 基于有限元的干式空心电抗器振动特性研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(5): 104-109.
DAI Feng, GAO Shuang, SONG Bo, et al. Study on vibration characteristic of dry-type air-core reactor based on finite element method[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(5): 104-109.
- [30]张祖安, 黄莹, 朱学文, 等. 声压法与声强法测定电力电容器单元噪声试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 112-117.
ZHANG Zuan, HUANG Ying, ZHU Xuewen, et al. Study on noise test of power capacitor by sound pressure and sound intensity method[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 112-117.
- [31]陆居志, 李健, 汲胜昌, 等. 干式空心电抗器噪声等效电流测试方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(1): 77-85.
LU Juzhi, LI Jian, JI Shengchang, et al. Study on equivalent current test method of noise of dry-type air-core reactor[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 77-85.
- [32]陈勇勇, 王小鹏, 杨威. 城市变电站噪声的声品质烦躁度评价试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(13): 214-218.
CHEN Yongyong, WANG Xiaopeng, YANG Wei. Research on evaluation of sound quality annoyance of urban substation noise[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(13): 214-218.
- [33]田聪, 李琳, 宋雅吾, 等. 并联电抗器铁心振动的模型实验与仿真研究[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(3): 64-70.
TIAN Cong, LI Lin, SONG Yawu, et al. Model experiment and simulation of core vibration for shunt reactor[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(3): 64-70.
- [34]王晋伟, 应黎明, 刘勤, 等. 基于扰动跟踪法的变压器有源降噪系统研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 1-8.
WANG Jinwei, YING Liming, LIU Qin, et al. Study on transformer active noise control system based on disturbance tracking method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 1-8.
- [35]梁丽萍, 张林. 变电站吸隔声屏体的研制及工程实践[J]. 环境工程学报, 2017, 11(9): 5326-5332.
LIANG Liping, ZHANG Lin. Research and application of sound absorption-insulation barriers in transformer substation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(9): 5326-5332.

作者简介:

赵倩(1985—),女,工程师,从事电力电抗器的技术研究工作。

闫维娜(1989—),女,工程师,从事电力电抗器的技术研究工作。

行新鹏(1985—),男,工程师,从事电力电抗器的测试试验工作。