

换流变压器原理样机电磁振动与噪声研究

赵亮¹, 臧英², 樊纪超³, 代双寅⁴, 张民⁵, 孙建涛⁶, 金兆伟³, 罗隆福^{1†}

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 山东电工电气集团有限公司 山东电力设备有限公司, 山东 济南 250022;

3. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209;

4. 河南省电力科学研究院, 河南 郑州 450052;

5. 国家电网公司, 北京 100031; 6. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要:针对换流变压器噪声超标问题,采用 6 台 20 kVA、220 V、阻抗 18% 的单相四柱式变压器(仅器身),与两套 6 脉波整流桥一起,连接成 12 脉波整流装置,模拟高压直流输电系统中的整流站.运用实验方法测定各种工况下单台换流变压器的振动和噪声,对实验数据的分析表明,阀侧绕组高次谐波电压是导致换流变压器的振动及噪声加剧的主要因素.进而提出在换流变压器阀侧并联电容的方案,通过该电容减小阀侧高次谐波电压,从而降低换流变压器的振动及噪声.实验结果表明该方法降噪效果明显.

关键词:换流变压器;振动;噪声;谐波电压;并联电容

中图分类号:TM419

文献标志码:A

Research on Electromagnetic Vibration and Noise of Prototype for Converter Transformer

ZHAO Liang¹, ZANG Ying², FAN Jichao³, DAI Shuangyin⁴,
ZHANG Min⁵, SUN Jiantao⁶, JIN Zhaowei³, LUO Longfu^{1†}

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Shandong Electrical Engineering & Equipment Group CO. LTD, SPECO, Jinan 250022, China;

3. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China;

4. Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

5. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;

6. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Six single-phase four-column transformers of 20 kVA, 220 V, and short-circuit impedance of 18% (only as the body of the transformer) connected with two sets of 6-pulse rectifier bridges were regarded as 12 pulse rectifier devices to simulate the rectifier stations in the HVDC transmission system. The noise of single-phase converter transformer was measured by means of the experimental method under various conditions. Through the analysis of the experimental data, it is concluded that the higher harmonic voltage of the valve side winding is the main factor

* 收稿日期:2020-04-27

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5200-201955096A-0-0-00), Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5200-201955096A-0-0-00)

作者简介: 赵亮(1991—), 男, 湖南益阳人, 湖南大学博士研究生

† 通信联系人, E-mail: llf@hnu.edu.cn

leading to the vibration and noise of the converter transformer. The shunting capacitor at the valve side was proposed to reduce high-order harmonic voltage of valve side, as well as the vibration and noise of converter transformer. The experimental results show that this proposed method is effective in noise reduction.

Key words: converter transformer; vibration; noise; harmonic voltage; shunt capacitor

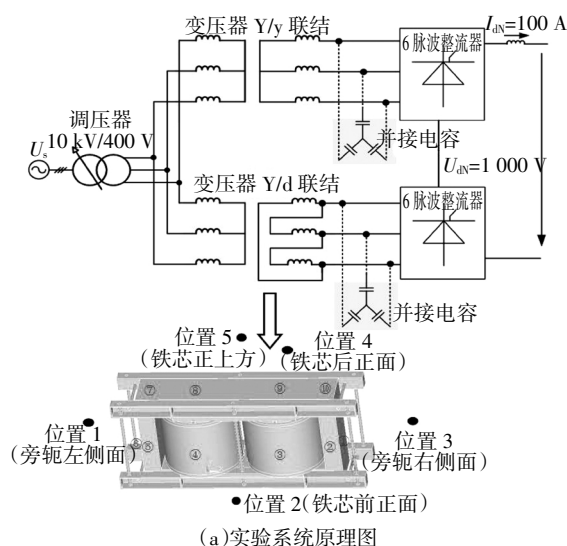
随着我国(特)高压直流输电的快速发展,换流站的环境噪声影响已受到公众、环保部门及电网公司的广泛关注.晶闸管换流器在运行时会产生大量的谐波,而这些谐波会在换流变压器产生谐波交变磁通,引起铁芯谐波磁通增大,从而导致换流变压器振动和噪声增大,因此换流变压器是换流站主要噪声源之一^[1-2].现场中的换流变压器的噪声水平大大高于普通电力变压器,可超过 110 dB.换流变压器本体噪声主要由绕组振动及铁芯振动引起^[3],其中,绕组振动是绕组在交变磁场中受洛伦兹力引起的^[4-5],铁芯振动产生的主要原因是铁芯硅钢片的磁致伸缩效应^[6-7].换流变压器属于高压电力设备,其运行工作环境较为复杂,如何准确测量它的噪声并实时反映它的声学 and 振动特性尤其重要^[8].

目前,国内外学者已对变压器振动和噪声进行了大量研究^[9-13],文献[14]采用一台精度为 10 nm/m 的磁致伸缩测量装置测量基波叠加三次谐波磁场下的单片电工钢片磁致伸缩特性,得出加大磁场三次谐波比重,会导致磁致伸缩的四、六次谐波分量的增加,进而导致振动噪声值增加.文献[15]通过增加开关频率降低了三相三柱变压器铁芯在正弦和不同频率相同调制系数的 PWM 电压激励下的振动和噪声.文献[16]在高次谐波的正弦磁化条件下,对硅钢片的磁致伸缩性能进行了测试,给出了磁致伸缩行为的宏观描述.文献[17]通过“磁-机械”耦合场理论得到了变压器绕组在电磁力激励下正常与松动状态下的振动特性.多数文章集中研究硅钢片磁致伸缩特性或传统电力变压器的振动和噪声特性^[18-20],研究换流变压器的振动和噪声特性相对较少.

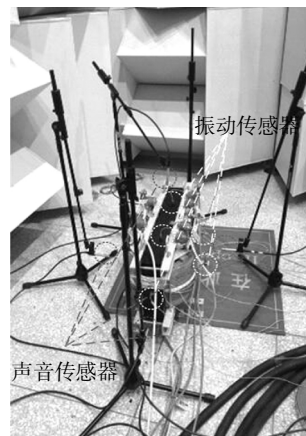
本文通过 12 脉波整流原理样机实验系统研究换流变压器器身的电磁振动与噪声,详细分析了各工况下换流变压器振动和噪声特性,确认了是换流变压器阀侧绕组谐波电压导致了换流变压器电磁噪声显著增加;在此基础上,提出了换流变压器阀侧绕组并联电容的方案,该方案能够显著降低换流变压器电磁噪声.

1 实验系统简介

图 1 给出测量换流变压器振动和噪声的实验系统.图 1(a)为实验系统原理图,它由供电电源、调压器、6 台单相四柱式变压器、12 脉波整流装置及电容器组成,10 kV 调压器可以实现电压 0 ~ 1.2 倍额定电压的无级调压,单相四柱式变压器具体参数如表 1 所示.同时给出了 10 个振动传感器和 5 个声音传感器测量单相四柱式变压器振动和噪声的具体实测位置.



(a) 实验系统原理图



(b) 半消声室

图 1 测量换流变压器振动与噪声的实验系统
Fig.1 Experimental system for measuring vibration and noise of converter transformer

表1 换流变压器参数

Tab.1 Parameters of converter transformer

参数	数值
额定容量/(kVA)	20
额定电压/V	220/220
额定电流/A	91.16/91.16
短路阻抗/%	18
额定磁通密度/T	1.506

图1(b)给出半消声室示意图,实验环境的背景噪声为18 dB.声音传感器和振动传感器型号分别为B&K2270-B-000和B&K4534-B-001,测量精度高.6台单相四柱式变压器连接成Y/y和Y/d组成2组三相变压器,两个6脉波整流桥,共12个晶闸管,其触发角可以单个调节.直流电压、直流电流大小可以闭环调节;可以完成变压器直接短路、直流母线短路等实验.在空载运行、短路、直接带电阻负载运行、整流系统带负载运行以及直流偏磁下,测量Y/y接线三相变压器a相的振动和噪声数据.

测得换流变压器5个位置的A计权噪声值后,其平均值由下式计算得出^[21]:

$$\bar{L}_{pA} = 10 \lg \left(\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \right) \quad (1)$$

式中: L_{pA} 为各测点A计权噪声值.

2 实验数据分析

2.1 多种工况下的换流变压器噪声水平

为了研究电压与电流对换流变压器振动与噪声的影响,进行了如下实验.

2.1.1 空载运行的噪声水平

空载运行时,换流变压器振动主要体现在铁芯振动,其振动加速度可用下式表示:

$$a = \frac{d^2(\varepsilon l)}{dt^2} = -\frac{2\alpha l U^2}{N^2 S^2} \cos 2\omega t \quad (2)$$

式中: ε 为磁致伸缩率, l 为铁芯等效长度, α 为磁致伸缩系数, U 为励磁电压, N 为绕组匝数, S 为铁芯等效截面积.

在空载运行时,实测换流变压器噪声水平,如表2所示.噪声变化趋势,如图2所示.

由表2和图2可知,当空载电压在92.26 V以下时,5个实测位置的噪声在25 dB以下,此时换流变压器噪声很小.

表2 空载运行换流变压器噪声水平

Tab.2 Noise level of converter transformer under no-load condition

空载电压/V	实际磁通密度测试值/T	各位置噪声声压级 A 计权/dB					
		1	2	3	4	5	平均
47.26	0.324	17.6	18.4	18.4	17.4	18.1	18.00
92.26	0.633	23.7	22.6	24.1	24.4	23.0	23.61
138.42	0.950	25.2	32.1	29.8	32.9	31.6	31.01
183.87	1.262	43.1	48.0	44.0	46.3	45.9	45.80
229.98	1.578	50.3	57.7	51.9	56.7	55.7	55.29
252.13	1.731	53.7	59.4	57.2	58.6	56.8	57.53
背景噪声	—	19.1	18.4	18.8	18.3	18.7	18.67

注:噪声声压级A计权的平均值按式(1)计算,下同.

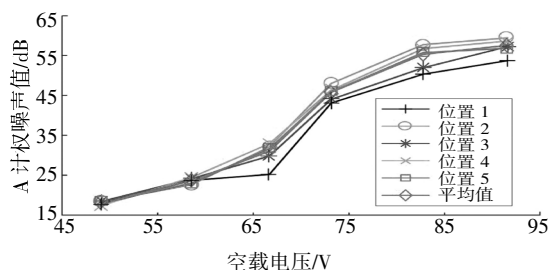


图2 空载运行换流变压器各位置噪声变化趋势
Fig.2 The noise variation trend at various positions of converter transformer under no-load condition

当空载电压调到229.98 V(约100% U_n)时,5个实测位置的噪声达到55 dB左右,从而说明随着电压的升高,噪声也随之显著增加;当空载电压调到252.13 V时,5个实测位置的噪声达到57 dB左右,此时换流变压器硅钢片磁通密度为1.731 T,并未超过硅钢片饱和磁通密度1.85 T,故可排除硅钢片磁通密度饱和对换流变压器振动和噪声的影响.可以得出:电压对换流变压器噪声的影响较大,当电压接近额定值时噪声显著增加,之后增加趋势放缓;各实测位置点的噪声变化趋势大致相同,噪声均随着电压的升高而单调增加.

2.1.2 短路时换流变压器噪声水平

换流变压器短路时,由于励磁电压很低,此时由硅钢片磁致伸缩引起的铁芯振动相对较小,可排除铁芯振动对绕组振动的影响.理论分析可知,绕组电动势与电流的平方成正比^[22]:

$$f \propto i^2, f = KI^2 [\cos(2\omega t + 2\theta) + 1] \quad (3)$$

式中: θ 为初始相位; K 为电磁力系数,常数; I 为绕组电流有效值.

采用质量-弹簧-阻尼系统分析绕组轴向电力,每层线饼等效为质量块 m ,绕组线饼之间的绝缘垫块等效为弹簧 k ,阻尼 c 由变压器油产生.洛伦兹力 f 作用下的绕组振动位移 x 的微分方程为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f \quad (4)$$

设初始状态为零,解得:

$$a(t) = \ddot{x}(t) = KI^2 \cos(2\omega t + 2\theta + \varphi) \quad (5)$$

式中: $a(t) = \ddot{x}(t)$ 为振动加速度, φ 为初始条件下变压器自身参数相关常数.

换流变压器短路时,实测换流变压器噪声水平如表 3 所示.噪声变化趋势,如图 3 所示.

表 3 短路时换流变压器噪声水平

Tab.3 Noise level of converter transformer under short circuit

A 相 电压/V	A 相 电流/A	各位置噪声声压级 A 计权/dB					
		1	2	3	4	5	平均
23.2	49.09	17.6	18.7	19	18.2	18	18.33
27.8	58.51	18.2	18.7	18.5	18.6	18.7	18.54
31.6	66.68	18.1	19.5	19.3	19.6	19.5	19.23
34.7	73.16	17.8	19.5	19.3	18.4	18.5	18.74
39.2	82.76	18.7	20.1	20.2	18.9	19.2	19.46
43.6	91.59	20.2	21.8	22	22.5	21.6	21.68

由表 3 可知,短路时换流变压器噪声平均值在 18.33~21.68 dB 之间,明显低于额定电压空载运行时的噪声水平,说明短路电流的大小对噪声的影响较小,即绕组振动对换流变压器噪声影响较小.

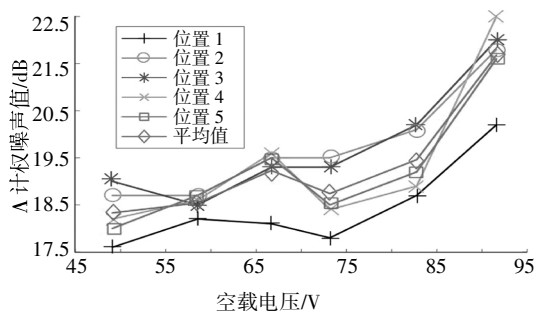


图 3 短路时换流变压器各位置噪声变化趋势

Fig.3 The noise variation trend at various positions of converter transformer under short-circuit

由图 3 可知,实测位置点 3 的噪声在短路电流 55~60 A 范围内出现拐点,其余位置点的噪声在 65~75 A 范围内出现拐点.由此说明:1)实测位置不同,噪声大小随短路电流的变化趋势也不完全相同;2)当短路电流增加时,各位置点的噪声并不一定单调

增加,其中可能出现拐点.

2.1.3 直接带电阻负载运行时换流变压器噪声水平

为了对比分析换流变压器与电力变压器振动噪声特性,在换流变压器阀侧绕组直接接入电阻负载,从而把它等效为电力变压器.通过实验,实测直接带电阻负载运行时换流变压器噪声水平,如表 4 所示.换流变压器噪声变化趋势,如图 4 所示.

表 4 直接带电阻负载时换流变压器噪声水平

Tab.4 Noise level of converter transformer with resistive load

A 相 电压/V	A 相 电流/A	各位置噪声声压级 A 计权/dB					
		1	2	3	4	5	平均
229.6	49.5	50.2	57.1	52.0	56.1	55.7	54.93
228.94	69.5	49.7	56.6	51.6	55.4	55.6	54.49
228.00	82.0	49.0	56.3	51.3	54.9	55.4	54.14
227.56	88.5	48.3	56.1	51.0	54.6	55.2	53.87
226.04	94.0	47.5	55.7	50.5	54.3	54.9	53.50

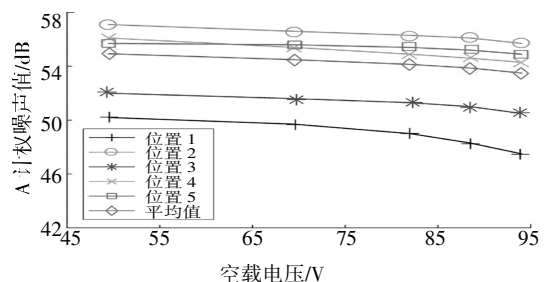


图 4 直接带电阻负载时换流变压器各位置噪声变化趋势

Fig.4 The noise variation trend at various positions of converter transformer with resistive load

由表 4 和图 4 可知,直接带电阻负载时换流变压器的噪声平均值在 53.5~54.93 dB 之间.实测各位置点的噪声变化趋势随 A 相电流增大,噪声值反而略有下降,但直接带电阻负载下的噪声整体水平比短路时要高,原因是直接带电阻负载运行时的网侧电压值接近额定电压值,此时,网侧的运行电压大大高于短路时的运行电压,噪声水平前者明显高于后者,进一步说明了绕组振动对换流变压器噪声影响较小.

2.1.4 整流系统带负载运行时换流变压器噪声水平

整流系统带负载运行时实测换流变压器噪声水平,如表 5 所示.此时,换流变压器噪声变化趋势如图 5 所示.

由表 5 和图 5 可知,在整流系统带负载的实验中,随着负载的增大,绕组电流随之增大,其噪声平

均值在 63.8 ~ 68.1 dB 间波动,但换流变压器各位置噪声变化趋势不呈线性增长.与变压器带电阻负载下的噪声水平平均值相比,要高出 15 ~ 20 dB.

表 5 整流系统带负载运行时换流变压器噪声水平

Tab.5 Noise level of converter transformer under rectification system with load

负载与 额定比	各位置噪声声压级 A 计权/dB					
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	平均值
直流 0.4A	60.7	60.3	61.9	62.7	58.9	61.1
10%	65.6	62.0	65.9	63.1	59.5	63.8
20%	69.2	64.6	69.6	65.3	60.5	67.0
30%	70.5	65.7	70.7	65.7	61.7	68.0
40%	70.6	66.0	70.7	65.6	61.3	68.1
50%	69.5	65.4	69.4	65.4	61.7	67.2
60%	68.6	64.8	68.5	65.3	61.8	66.5
70%	67.3	63.8	67.9	64.9	62.1	65.7
80%	67.5	63.9	69.0	65	62.7	66.2
90%	68.5	64.4	70.3	65.2	62.8	67.1
100%	69.4	64.9	71.3	65.6	63.1	67.9

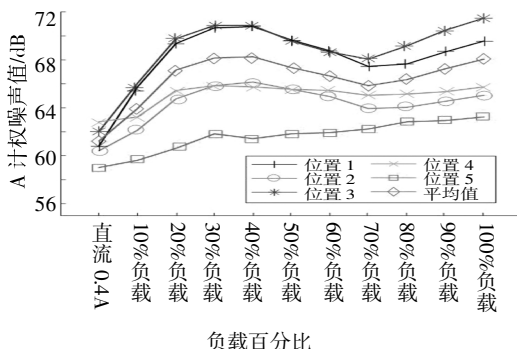


图 5 整流系统带负载运行时换流变压器各位置噪声变化趋势

Fig.5 The noise variation trend at various positions of converter transformer under rectification system with load

要特别注意表 5 中,当直流电流仅为 0.4 A 时,换流变压器的噪声就达到了 61.1 dB,此时变压器绕组中谐波电流含量很小.这否定了我们的传统认知:换流变压器绕组中通过谐波电流导致换流变压器电磁噪声显著增加.进一步实验研究,才清楚了换流变压器超高电磁噪声的真正原因.

2.2 换流变压器超高电磁噪声原因实验分析

为找出换流变压器振动与噪声显著增加的原因,对以下三种工况的实验数据进行分析:

工况 1:换流变压器空载额定电压运行.

工况 2:换流变压器带整流负载启动,直流电流为 0.4 A.

工况 3:换流变压器带额定整流负载.

实验数据如表 6 所示.

表 6 各工况电能质量及噪声数据

Tab.6 Power quality and noise data under various conditions

工况	网侧电压		阀侧电压		噪声 平均值/dB
	有效值/V	THD/%	有效值/V	THD/%	
工况 1	231.42	0.78	229.79	1.62	55.3
工况 2	231.41	1.32	229.72	4.42	61.1
工况 3	228.43	5.20	208.01	28.88	67.0

由表 6 可知,随着阀侧电压畸变率的增大,换流变压器噪声水平明显提高.工况 2 时网侧绕组电流有效值为 4.41 A,阀侧绕组电流有效值仅为 0.09 A,但此时换流变压器噪声明显增大,平均值为 61.1 dB.因此,可以得出:阀侧绕组谐波电压是引起换流变压器噪声增大的主要原因.

考虑谐波电压的影响时,式(2)可变形为:

$$a = \frac{d^2(\varepsilon l)}{dt^2} = -\frac{2\alpha l}{N^2 S^2} \left[\sum_{n=1}^N 2U_n^2 \cos(2\omega_n t + 2\theta_n) + \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=n+1}^N \frac{U_n U_m}{n \cdot m} (n-m)^2 \cos((n-m)\omega t + \theta_n - \theta_m) + \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=n+1}^N \frac{U_n U_m}{n \cdot m} (n+m)^2 \cos((n+m)\omega t + \theta_n + \theta_m) \right] \quad (6)$$

由式(6)可知,在谐波的影响下,换流变压器铁芯振动不仅包含基波与各次谐波的 2 倍频分量,同时包含基波与各次谐波叠加的分量,在这些振动的相互作用下,铁芯振动更加剧烈.

图 6 给出工况 3 阀侧电压实测波形.通过频谱分析,换流变压器阀侧电压的谐波含量如图 7 所示.

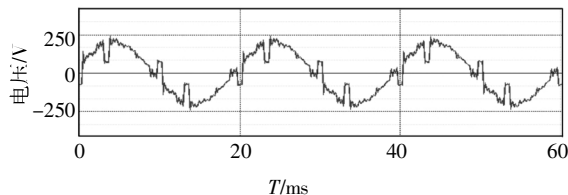


图 6 工况 3 时阀侧电压实验波形

Fig.6 Valve side voltage waveform under scenario 3

由图 7 可知,工况 3 时阀侧基波电压有效值为 229.72 V,谐波电压总畸变率为 28.88%,阀侧电压含有大量的谐波.

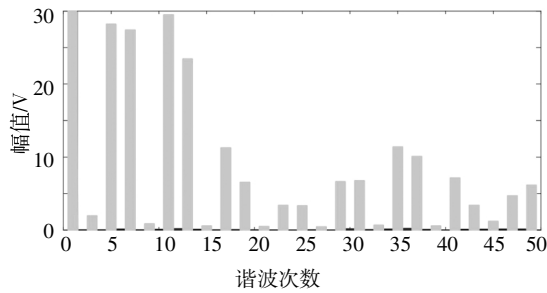


图7 换流变压器阀侧谐波分析

Fig.7 Harmonic analysis of converter transformer at the valve side

在工况 3 时, 实测换流变压器位置 5 的噪声水平, 并对其频谱分析, 如图 8 所示. 由图 8 可知, 在频率 400 ~ 5 000 Hz 范围内, 噪声水平较高, 在 50 dB 上下波动, 变化值比较均衡, 在 2 kHz 时噪声值最大, 可达 56.6 dB. 因此, 阀侧谐波电压的高频分量引起换流变压器噪声增大.

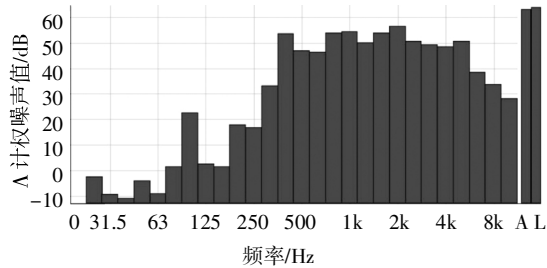
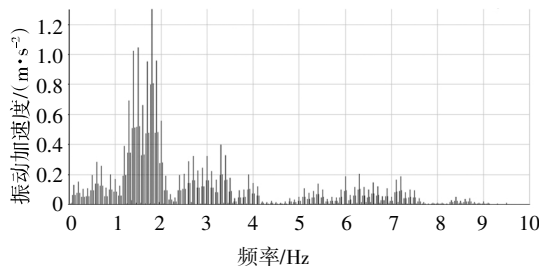


图8 工况 3 时换流变压器测量位置 5 频谱

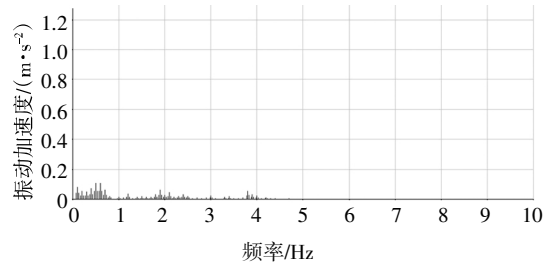
Fig.8 Converter transformer noise measurement position 5 spectrum under scenario 3

图 9 给出工况 3 时换流变压器的振动频谱, 其中, 图 9(a)给出工况 3 时换流变压器振动测量点 1 (旁轭宽面) 和测量点 3 (绕组) 的频谱图, 图 9(b)给出工况 3 时换流变压器绕组振动频谱.

由图 9 可知, 绕组振动要远远小于铁芯振动, 验证了绕组振动对换流变压器噪声影响小, 同时也说明了换流变压器短路实验时的噪声远远小于空载运行时的噪声. 同时, 铁芯振动频率集中在 1 ~ 2 kHz 范围内变化, 说明阀侧绕组高频谐波励磁电压是引起换流变压器铁芯振动的主要原因.



(a) 工况 3 时换流变压器旁轭宽面振动频谱



(b) 工况 3 时换流变压器绕组振动频谱

图9 工况 3 时换流变压器的振动频谱

Fig.9 Vibration spectrum of converter transformer under scenario 3

基于上述结论, 采用阀侧并联电容的方案, 利用电容的高通滤波作用, 滤除阀侧高次谐波电压, 从而达到降噪的效果. 下面对该方案进行详细分析.

2.3 阀侧绕组并联电容降噪理论分析

以换流站最小换流单元 6 脉波换流器为例, 分析阀侧并联电容降低换流变压器振动与噪声的机理.

并联电容前, 换流变压器谐波阻抗 Z_{ln} 可由下式表示:

$$Z_{ln} = jX_{ln} = jnX_L \quad (7)$$

式中: X_{ln} 为 n 次谐波短路阻抗, $X_{ln} = nX_L$; X_L 为工频短路阻抗.

假设基频下并联电容容抗为 X_C , 则 n 次谐波下并联电容等效容抗为: $X_{Cn} = \frac{X_C}{n}$.

并联电容后, 换流变压器的谐波等效电路如图 10 所示. 换流变压器的 n 次谐波阻抗变为 Z'_{ln} .

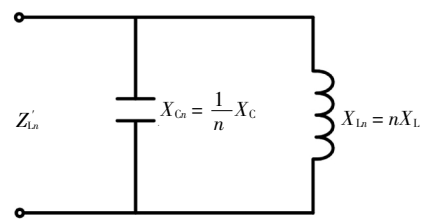


图10 换流变压器谐波等效电路

Fig.10 Converter transformer harmonic equivalent circuit

由式(7)可见, 并联电容后, 换流变压器谐波阻抗发生变化. 假设电流源第 n 次谐波电流为 I_n , 流入换流变压器的谐波电流为 I_{ln} , 流入并联电容的谐波电流为 I_{Cn} . 依据并联电路分流原理, 有:

$$I_{ln} = \frac{X_{Cn}}{X_{ln} + X_{Cn}} \cdot I_n = \frac{X_C}{n^2 X_L + X_C} \cdot I_n \quad (8)$$

$$I_{Cn} = \frac{X_{ln}}{X_{ln} + X_{Cn}} \cdot I_n = \frac{X_L}{X_L + \frac{X_C}{n^2}} \cdot I_n \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可以看出,谐波次数越大,流入换流变压器的谐波电流 I_{Ln} 越小,流入并联电容的谐波电流 I_{Cn} 越大,即谐波次数越大,并联电容滤波效果越好.

2.4 阀侧绕组并联电容降噪实验

按照换流站无功补偿原则:无功补偿为有功的 50%~60%^[22],在换流变压器阀侧并联电容 183 μ F,6 个电容共补偿无功 49.78 kvar,约为 50%.如图 1(a)中虚线部分所示,并在工况 3 下完成相应的实验.图 11 给出并联电容时换流变压器阀侧绕组电压的实测波形.与图 6 对比,电压波形较为光滑,没有明显的缺口和毛刺,说明通过并联电容能有效吸收换流变压器阀侧的高次谐波电压.

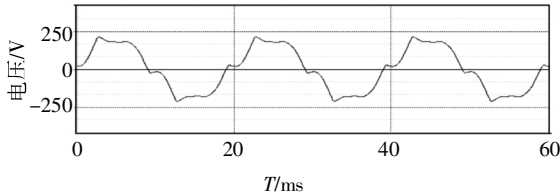


图 11 并联电容时阀侧绕组电压实测波形
Fig.11 Measured voltage waveform of valve side winding with shunt capacitor

表 7 给出并联电容前后阀侧绕组电压谐波对比.

表 7 并联电容前后阀侧绕组电压谐波对比 单位 V

Tab.7 The comparison of harmonic voltage at the valve side windings before and after shunt capacitor Unint V

谐波次数	工况	
	未并联电容	并联电容
基波	208.01	224.64
5	28.20	34.41
7	27.41	13.24
11	29.49	5.53
13	23.43	1.62
17	11.27	1.37
19	6.55	1.24
23	3.37	0.94
25	3.32	0.49

由表 7 可知,并联电容器后,除五次谐波稍微放大外,七次以上的谐波电压均得到有效抑制,因此阀侧绕组电压高次谐波成分已基本滤除,滤波效果明显.

表 8 给出了并联电容前后换流变压器噪声数据.

表 8 并联电容前后换流变压器噪声数据

Tab.8 Noise data of the converter transformer before and after shunting capacitor

工况	网侧电压		阀侧电压		噪声平均值/dB
	有效值/V	THD/%	有效值/V	THD/%	
未并联电容	228.43	5.20	208.01	28.88	67.0
并联电容	228.49	0.83	224.73	16.70	54.6

由表 8 可知,并联电容器后,由于电容器的无功补偿作用,阀侧电压有效值稍微抬升,而网侧电压基本保持不变.因为有效抑制了换流变压器阀侧高次谐波电压,噪声平均值由原来的 67.0 dB 降为 54.6 dB,基本为变压器带电阻负载的噪声.图 12 给出并联电容与未接入电容、直接带电阻负载运行时换流变压器噪声数据的对比图.

图 13 给出并联电容后换流变压器噪声测量位置 5 频谱.与图 9 对比可知,高频噪声明显降低,较高的噪声水平值集中在 400 Hz~1 kHz,且 1 kHz 时噪声值最大,为 51.7 dB.

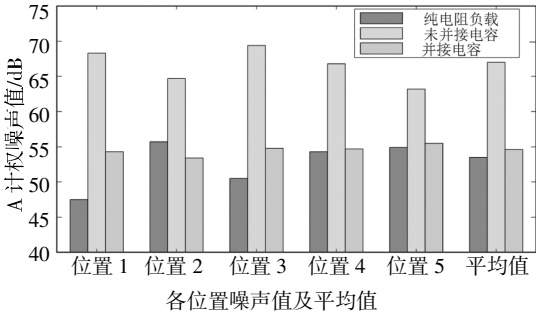


图 12 降噪对比
Fig.12 Comparison on noise reduction

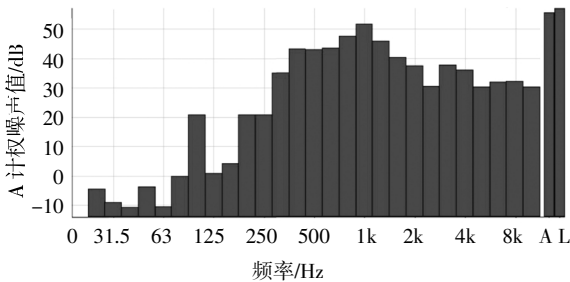
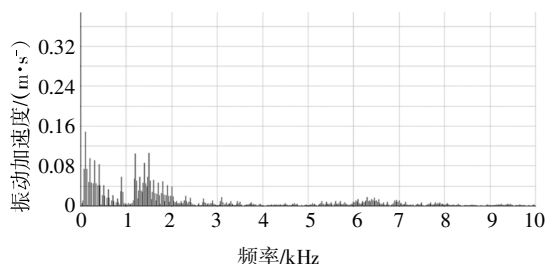
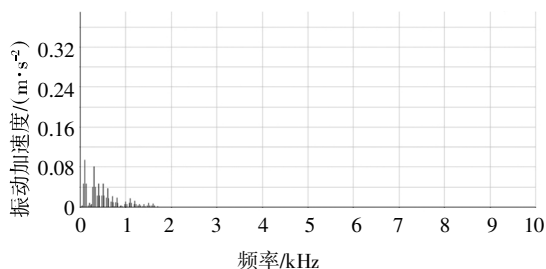


图 13 并联电容后换流变压器噪声测量位置 5 频谱
Fig.13 Noise spectrum of converter transformer measured position 5 with shunt capacitor

图 14 给出并联电容后换流变压器振动频谱,其中,图 14(a)给出并联电容换流变压器旁轭宽面振动频谱;图 14(b)给出并联电容换流变压器绕组振动频谱.



(a) 并联电容换流变压器绕组宽面振动频谱



(b) 并联电容换流变压器绕组组振动频谱

图 14 并联电容后换流变压器振动频谱

Fig.14 Vibration spectrum of converter transformer with shunt capacitor

与图 9 对比,由图 14 可知,并联电容后,铁芯振动频率为 0 ~ 1 kHz,在此频率范围内振动加速度幅值明显减小,而 1 ~ 2 kHz 范围内振动加速度基本趋于 0。

3 结 论

在半消声室,本文通过 12 脉波整流原理样机实验系统研究换流变压器器身的电磁振动与噪声,得出如下结论:

1)验证了变压器绕组电压励磁导致铁芯振动与噪声,是变压器电磁振动与噪声的主要原因,绕组振动引起的变压器噪声较小。

2)工况 3 时换流变压器的铁芯振动远远大于变压器绕组振动,铁芯振动集中在 1 ~ 2 kHz 的高频范围内变化,此时换流变压器的噪声较大,为 72.95 ~ 76.62 dB,从而说明阀侧高次谐波电压引起换流变压器噪声过大。

3)在换流变压器阀侧绕组并联电容可以有效抑制换流变压器阀侧高次谐波电压,减小换流变压器的振动和噪声。

本文所提出的换流变压器阀侧绕组并联电容方案具有良好的降噪效果,但对于不同电容取值对降噪效果的影响以及换流变压器阀侧并联电容对换流

器换相的影响仍需开展进一步的研究。

参考文献

- [1] 罗晨曦,徐政,陆韶琦,等. ± 1100 kV 换流站高频干扰源模型的研究[J]. 高电压技术,2017,43(10):3248—3255.
LUO C X, XU Z, LU S Q, *et al.* Analysis of equivalent high frequency interference characteristics of ± 1100 kV converters [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3248—3255. (In Chinese)
- [2] 胡雨龙,李兴,赵明. 高压直流换流站噪声综合治理[J]. 南方电网技术,2009,3(1):49—52.
HU Y L, LI X, ZHAO M. Comprehensive control and treatment of HVDC converter station noise[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(1): 49—52. (In Chinese)
- [3] 顾晓安,沈密群,朱振江,等. 变压器铁芯振动和噪声特性的试验研究[J]. 变压器,2003,40(4):1—4.
GU X A, SHEN M Q, ZHU Z J, *et al.* Test research on vibrations and noise level in transformer core[J]. Transformer, 2003, 40(4): 1—4. (In Chinese)
- [4] 张凡,汲胜昌,师榆航,等. 电力变压器绕组振动及传播特性研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(9):2790—2798.
ZHANG F, JI S C, SHI Y H, *et al.* Research on transformer winding vibration and propagation characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2790—2798. (In Chinese)
- [5] 汲胜昌,张凡,钱国超,等. 稳态条件下变压器绕组轴向振动特性及其影响因素[J]. 高电压技术,2016,42(10):3178—3187.
JI S C, ZHANG F, QIAN G C, *et al.* Characteristics and influence factors of winding axial vibration of power transformer in steady-state operation condition [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3178—3187. (In Chinese)
- [6] 祝丽花,杨庆新,闫荣格,等. 考虑磁致伸缩效应电力变压器振动噪声的研究[J]. 电工技术学报,2013,28(4):1—6.
ZHU L H, YANG Q X, YAN R G, *et al.* Research on vibration and noise of power transformer cores including magnetostriction effects [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 1—6. (In Chinese)
- [7] 张艳丽,孙小光,谢德馨,等. 无取向硅钢片各向异性磁致伸缩特性模拟[J]. 中国电机工程学报,2014,34(27):4731—4736.
ZHANG Y L, SUN X G, XIE D X, *et al.* Modeling of anisotropic magnetostriction property of non-oriented silicon steel sheet [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4731—4736. (In Chinese)
- [8] 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 B, PEI C M, NI Y, *et al.* Measurement and analysis of noise in UHV AC substation [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1447—1453. (In Chinese)
- [9] 王佳音,白保东,刘宏亮,等. 直流偏磁对变压器振动噪声的影响[J]. 电工技术学报,2015,30(8):56—61.
WANG J Y, BAI B D, LIU H L, *et al.* Research on vibration and

- noise of transformers under DC bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 56—61. (In Chinese)
- [10] WEISER B, PFUTZNER H, ANGER J. Relevance of magnetostriction and forces for the generation of audible noise of transformer cores [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5): 3759—3777.
- [11] TANZER T, PREGARTNER H, LABINSKY R, *et al.* Magnetostriction and its relation to the no-load noise of power transformers[C]// 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). 2017: 1—6.
- [12] KITAGAWA W, ISHIHARA Y, TODAKA T, *et al.* Analysis of structural deformation and vibration of a transformer core by using magnetic property of magnetostriction[J]. Electrical Engineering in Japan, 2010, 172(1): 19—26.
- [13] ERTL M, VOSS S. The role of load harmonics in audible noise of electrical transformers [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(8): 2253—2270.
- [14] 张艳丽, 李强, 王洋洋, 等. 谐波磁场下硅钢片磁致伸缩特性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 545—550.
ZHANG Y L, LI Q, WANG Y Y, *et al.* Analysis on magnetostrictive properties of silicon steel sheet under harmonic magnetic field[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 545—550. (In Chinese)
- [15] YAO X G, PHWAY T P P, MOSES A J, *et al.* Magneto-mechanical resonance in a model 3-phase 3-limb transformer core under sinusoidal and PWM voltage excitation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11): 4111—4114.
- [16] GORJI GHALAMESTANI S, DARBA A, VANDEVELDE L, *et al.* Macroscopic description of the magnetostrictive behavior of electrical steel in the presence of high-order harmonics in the magnetization[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(5): 1—4.
- [17] 王丰华, 段若晨, 耿超, 等. 基于“磁-机械”耦合场理论的电力变压器绕组振动特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2555—2562.
WANG F H, DUAN R C, GENG C, *et al.* Research of vibration characteristics of power transformer winding based on magnetic-mechanical coupling field theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2555—2562. (In Chinese)
- [18] 刘勇, 杨帆, 张凡, 等. 检测电力变压器绕组变形的扫频阻抗法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4505—4516.
LIU Y, YANG F, ZHANG F, *et al.* Study on sweep frequency impedance to detect winding deformation within power transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4505—4516. (In Chinese)
- [19] 胡静竹, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于有限元法的变压器电磁振动噪声分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 81—88.
HU J Z, LIU D C, LIAO Q F, *et al.* Analysis of transformer electromagnetic vibration noise based on finite element method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 81—88. (In Chinese)
- [20] 马宏忠, 弓杰伟, 李凯, 等. 基于 ANSYS Workbench 的变压器绕组松动分析及判定方法 [J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 192—199.
MA H Z, GONG J W, LI K, *et al.* Analysis and determination method for transformer winding looseness based on ANSYS workbench[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 192—199. (In Chinese)
- [21] 电力变压器 第10部分: 声级测定: GB/T 1094.10—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
Power transformers: Part 10: Determination of sound levels: GB/T 1094.10—2003 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004. (In Chinese)
- [22] 周建平, 林爱弟, 吴劲晖, 等. 电力变压器振动监测的测点位置选择[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(12): 1100—1107.
ZHOU J P, LIN A D, WU J H, *et al.* Selection of the measuring position for on-line monitoring on power transformer vibration[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(12): 1100—1107. (In Chinese)
- [23] 文俊, 殷威扬, 温家良, 等. 高压直流输电系统换流器技术综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 16—24.
WEN J, YIN W Y, WEN J L, *et al.* Review of converter technology for HVDC transmission systems [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 16—24. (In Chinese)