

110 kV 油浸式电力变压器噪声抑制措施研究

潘军¹, 王玮², 徐斌山³, 杨青斌⁴

- (1. 阜阳市第一高级职业中学, 安徽 阜阳 236000; 2. 天富西热电厂, 新疆 石河子 832000;
3. 特变电工新疆变压器厂, 新疆 昌吉 831100;
4. 中国电力科学研究院新能源研究所, 江苏 南京 210003)

摘要: 居民区和商业区附近 110 kV 油浸式电力变压器高分贝噪声污染已成为影响人们生活的一个突出问题。为此, 在深入分析变压器本体噪声与非本体噪声产生及辐射机理的基础上, 提出了一种融合铁心优化、绕组预紧力优化及箱壁增设隔音与吸音材料的 110 kV 油浸式电力变压器噪声综合控制与抑制方法。铁心优化与绕组预紧力优化从源头上降低变压器噪声产生水平, 箱壁增设隔音与吸音材料阻隔变压器噪声辐射。搭建的 110 kV 大容量油浸式电力变压器噪声控制与抑制实验系统验证了该方法的正确性与可行性。

关键词: 变压器噪声; 铁心优化; 绕组预紧力; 噪声阻隔

Abstract: The high - decibel noise pollution from 110 kV oil - immersed power transformers nearby residential areas and business districts has become a prominent issue for people's life quality. After analyzing the transformer body noise and non - body noise and its radiation mechanism, a new comprehensive control and suppression method for the noise of 110 kV oil - immersed power transformers is proposed by compromising core optimization and winding pre - tightening force optimization and adding sound insulation and absorption materials on the wall of boxes. Core optimization and winding pre - tightening force optimization can reduce the level of transformer noise from the source, and Adding the sound insulation and absorption materials on the wall of boxes can obstruct transformer noise radiation. The established noise control and suppression model for 110 kV high - capacity oil - immersed power transformers verifies the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: transformer noise; core optimization; winding pre - tightening force; noise obstruction

中图分类号: TM411 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2017)04 - 0053 - 06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.04.011

0 引言

近年来, 愈来愈多的 110 kV 变电站建设于居民区和商业区附近, 由于人们认知水平与环保意识的提高, 使得先前满足 JB/T 10088 - 2004 《6 ~ 500 kV 级电力变压器声级》噪声要求的 110 kV 电力变压器难以满足用户对噪声抑制的要求。因此, 研究 110 kV 电力变压器噪声产生的机理、控制与抑制措施以及开发可工程化应用的电力变压器降噪实施方法与工艺已成为亟待解决的难题。

针对 110 kV 电力变压器噪声产生机理、噪声控制与抑制策略及开发可工程化应用的电力变压器降

噪手段和工艺, 国内外专家与学者的研究焦点主要集中在以下几个方面: 1) 基于 110 kV 油浸式电力变压器和干式变压器的工作机理, 深入探讨与分析电力变压器噪声产生的机理、过程及主要影响因素^[1-10]; 2) 在上述研究成果的基础上, 从改善电力变压器铁心构造、线圈排列、各组件有序装接以及变压器壳体外采用降噪及消音等措施, 开发可工程化与商业化应用的大容量电力变压器噪声控制与抑制方法以及生产工艺^[4-7, 11-18]; 3) 基于大容量电力变压器噪声产生的机理, 研究可反映变压器实际噪声水平的噪声测试方法和手段^[19-22]; 4) 依据电力变压器多运行场景的噪声产生过程及机理, 研究依赖于噪声特征分析的大容量电力变压器故障诊断措施

与方法^[23]; 5) 研究应用于电冶、电解、电镀、直流传动等工业场景的特殊类型变压器的噪声产生机理以及控制与抑制手段^[24]。

上述文献虽然就大容量电力变压器噪声产生机理及控制或抑制方法进行了大量研究,并取得了一系列重要成果,但鲜有针对广泛应用于输配电系统中的110 kV 电力变压器噪声产生机理及噪声控制或抑制进行详细的分析与研究,而且研究结论多偏重于“概念解说”或“定性因果关系推导”,缺乏强有力的理论支撑,难以大规模商业化推广与普及。为此,在深入分析变压器本体噪声与非本体噪声产生及辐射机理的基础上,提出了一种融合铁心优化和箱壁增设隔音与吸音材料且可工程化应用的110 kV 油浸式电力变压器噪声综合控制与抑制方法。该方法不仅通过了LSND 软件平台的仿真验证,而且还通过了所搭建的110 kV 大容量油浸式电力变压器噪声控制与抑制实验系统的实测验证。

1 110 kV 油浸式电力变压器噪声产生机理及影响因素

基于文献[1-2]研究结论,110 kV 大容量油浸式电力变压器的噪声可大致分为两类: 1) 各类型大容量电力变压器均存在的由铁心、绕组及油箱振动而引起的变压器本体噪声; 2) 由冷却系统中广泛使用的冷却风扇、冷却油循环泵及水冷却器引起的变压器非本体噪声。

1.1 本体噪声及影响因素

110 kV 大容量油浸式电力变压器本体噪声产生的根本原因在于铁心硅钢片磁致伸缩引起的变压器噪声、负载电流变化引起的铁心振动噪声、漏磁引起的振动噪声、铁心电磁力引起的振动噪声、直流偏磁引起的振动噪声以及箱壁振动产生的噪声。

在上述因素中,负载电流变化引起的铁心振动噪声主要由电力变压器所载负荷变化特征所决定; 直流偏磁引起的振动噪声多由太阳磁暴的发生规律以及交直流混联的电力能源互联互通运行方式所决定,而且随着大容量变压器现代生产工艺的改进铁

心漏磁引发的振动噪声已降到极低程度。因此,110 kV 大容量油浸式电力变压器本体噪声产生的主要因素为铁心硅钢片磁致伸缩、电磁力引起的铁心振动以及箱壁振动等。

1.2 非本体噪声及影响因素

为保证长时间稳定可靠工作,大容量电力变压器需配置合适的冷却装置,而冷却装置的高速旋转与冷却油的流动引起的振动构成了110 kV 大容量油浸式电力变压器的非本体噪声。

由于冷却装置风机高速旋转以及冷却油的不间断流动引起的变压器噪声,可通过冷却风机容量、台数及布点位置的优化得到有效降低^[19],因此110 kV 大容量油浸式电力变压器非本体噪声的主要影响因素为冷却装置与箱壁间的机械连接机构或连接基础。

2 110 kV 油浸式电力变压器噪声抑制措施

基于对上述大容量油浸式电力变压器噪声产生机理及各因素分析,采用一种融合铁心优化、绕组夹紧力优化以及箱壁增设隔音与吸音材料的110 kV 大容量油浸式电力变压器噪声综合控制与抑制方法,最大程度地降低其噪声的产生与辐射水平。

2.1 变压器铁心降噪措施

所采用的110 kV 大容量油浸式电力变压器铁心降噪措施主要包括以下几个方面: 1) 选用硅含量适中的硅钢片加工出磁致伸缩较低的变压器铁心; 2) 铁心叠片过程中,在铁心片中增加减震脚垫,减小变压器运行中铁心振幅; 3) 变压器铁心出尖处增设包角,降低变压器出尖处噪声产生。

2.1.1 选用硅含量适中的硅钢片以降低变压器铁心噪声

大量研究表明,磁致伸缩 ε 决定了电力变压器中硅钢片的周期性伸缩与振动,过大的或不当的磁致伸缩 ε 将使电力变压器中硅钢片间、硅钢片与铁心主体间产生较为明显的机械振动,而硅钢片的磁致伸缩主要取决于硅的含量与晶粒取向。为尽可能地降低电力变压器中硅钢片的磁致伸缩所带来的变压器铁心振动,选用含硅量约6.5 wt%的型号为30ZH120的硅钢片来加工制造110 kV 大容量电力变压器铁心。该

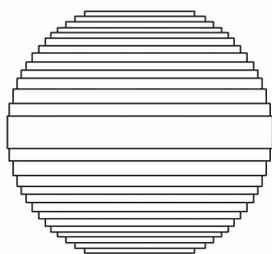
型硅钢片卷为冷轧无取向型,具有较低的铁损值,较强磁场下磁感应强度高,表面光滑、平整、厚度均匀及表面绝缘膜的附着性与焊接性良好,其主要性能及与其他型号硅钢片对比如表1所示。

表1 30ZH120 硅钢片卷主要性能参数

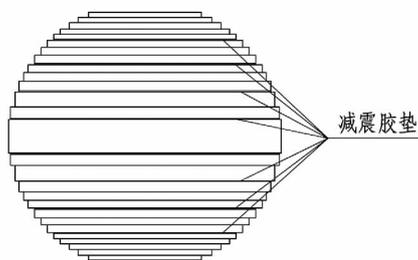
型号	密度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.7 T 时单位铁损/W		800 $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ 最小磁感 强度/T
		50 Hz	60 Hz	
30ZH110	7.65	1.1	1.45	1.88
30ZH120	7.65	1.2	1.58	1.88
30Z110	7.65	1.1	1.45	1.80
30Z120	7.65	1.2	1.58	1.80

2.1.2 铁心叠片过程中添加减震脚垫

在铁心叠装传统工艺过程中,多硅钢片直接叠装压制成变压器铁心,磁致伸缩致使的硅钢片变形力使硅钢片间直接相互作用,引起变压器铁心较大振动^[11-12]。为克服上述问题,将多硅钢片间(60 mm 厚度左右)增设一层0.5 mm 厚的丁晴橡胶,用以降低因磁致伸缩致使的硅钢片间相互作用力,减轻大容量电力变压器噪声,图1为110 kV 大容量油浸式电力变压器铁心硅钢片间增设丁晴橡胶示意图。



(a) 铁心硅钢片间未增设丁晴橡胶示意图



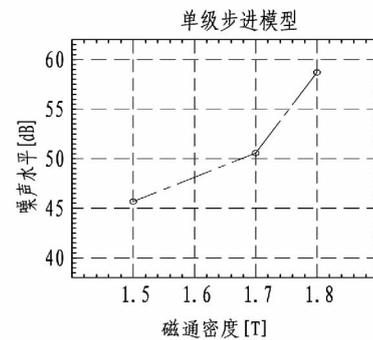
(b) 铁心硅钢片间增设丁晴橡胶示意图

图1 变压器铁心硅钢片间增设丁晴橡胶示意图

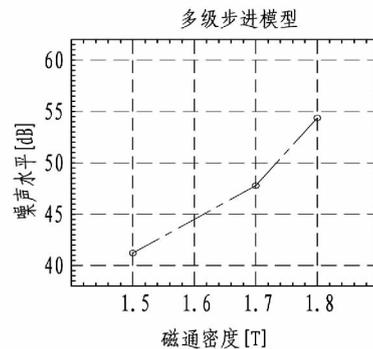
2.1.3 铁心叠片过程中铁心步进级数优化

图2为大容量油浸式电力变压器铁心采用单级步进与多级步进时其噪声水平与磁通密度间的关系曲线。分析可知,在相同磁通密度条件下,铁心采用多级步进方式可显著降低大容量油浸式电力变压器噪声与辐射水平,例如在磁通密度为1.7 T处,相比

单级步进方式,铁心采用多级步进方式时变压器噪声可降低2.5 dB(A)。进一步基于大容量电力变压器生产实践,这里采用硅钢片互错5 mm的5级步进方式降低110 kV 大容量油浸式电力变压器铁心的噪声水平。



(a) 单级步进时铁心噪声与其磁通密度关系



(b) 多级步进时铁心噪声与其磁通密度关系

图2 不同步进方式时变压器铁心噪声与其磁通密度关系

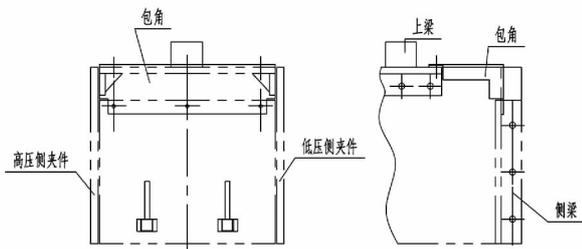
2.1.4 铁心出尖处增设包角

大容量油浸式电力变压器在实际运行中,由于漏磁的存在其铁心出尖处(诸如拐角或不平整之处)易出现较大幅度的振动,产生较大幅值噪声。为缓解上述问题,将变压器铁心的各出尖处增设包角,将铁心四角出尖处产生的噪声进行有效的降低与隔离。其中,包角为一种两层1 mm 绝缘纸板间夹一层6 mm 耐油减震胶板的共计8 mm 的降噪与隔噪物质。图3为110 kV 大容量油浸式电力变压器铁心出尖处增设包角示意图。

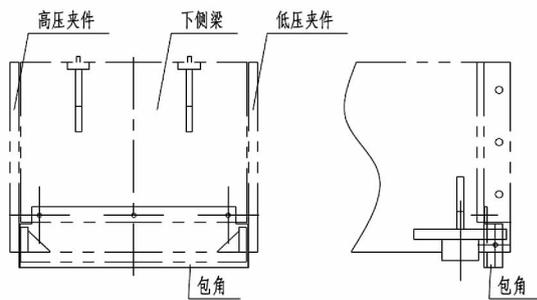
2.2 变压器绕组降噪措施

大容量电力变压器在实际运行中受安培力特性约束,其绕组间、线饼间、线匝间产生动态电磁力,引起绕组振动从而产生噪声。图4为相同信号激励作用下不同预紧力时无铁心绕组噪声辐射曲线。分析可知:1) 在相同频率激励信号作用下,较低的预紧

力致使绕组结构松散,垫片的刚度减小,其振动幅值增大,产生的噪声增大;2)随着激励信号频率的增大,绕组振动加速度呈先增大后降低的趋势,说明在控制绕组振动时应注意其固有振动频率,避免其与铁心或箱体产生共振,致使电力变压器噪声激增。



(a) 电力变压器铁心上出尖处增设包角



(b) 电力变压器铁心下出尖处增设包角

图3 变压器铁心出尖处增设包角示意图

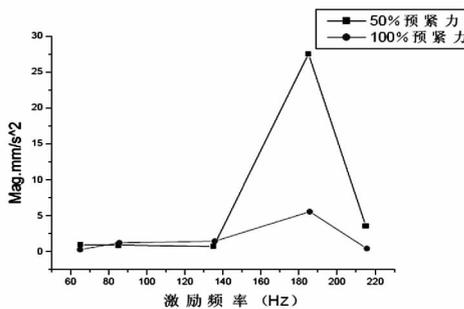


图4 绕组振动加速度与预紧力关系曲线

因此,为尽可能降低因漏磁引发的绕组振动,110 kV 大容量油浸式电力变压器绕组采用100%预紧力,可控制其噪声辐射水平。

2.3 增设隔音与吸音材料降噪措施

因磁致伸缩引发的铁心振动与因漏磁引发的绕组振动主要通过铁心主体与箱壁连接机构和冷却油流动两种途径传递给变压器箱壁,引发箱壁振动,致使变压器向四周辐射噪声。因此,有效地对变压器铁心与绕组振动传递进行衰减以及在变压器箱壁内外增设吸音与隔音材料,将会较大幅度地降低110 kV 电力变压器的噪声辐射水平。

2.3.1 变压器主体与箱壁刚性连接机构增设金属

橡胶减震垫片

大容量油浸式电力变压器主体与箱壁主要通过铁心夹件和器身定位组件进行接连,因此合理优化机械连接机构是有效降低变压器铁心与绕组能量传递的可靠手段。图5为用于替换变压器主体与箱壁刚性连接机构的金属橡胶减震垫片。其为经过洗丝、烧丝、拉伸、毛坯编织模压成型的一种带有无数小孔的、金属性阻尼材料,且具有与普通橡胶制品相似的外观与弹性。



图5 变压器主体与箱壁连接时采用的金属橡胶减震垫片

2.3.2 变压器油箱壁隔音与吸音材料

大容量油浸式电力变压器油箱铁心与绕组振动亦通过冷却油流动方式传递给箱壁,引起箱壁振动与噪声辐射。因此,合理增设隔音与吸音材料是有效降低110 kV 油浸式电力变压器噪声辐射的有效途径之一。

1) 油箱内壁增设隔音与吸音材料

图6为110 kV 大容量油浸式电力变压器油箱内壁增设的厚度0.8~4.0 mm的纯木浆绝缘纸板示意图。该型绝缘纸板具有显著的吸音与隔音功能,可长期耐温105℃,主要铺设于变压器油箱内壁的前后墙壁处。



图6 变压器油箱内壁增设绝缘纸板示意图

2) 油箱外壁增设隔音与吸音材料

为提升变压器油箱壁较高的机械强度与较快的散热效率,在110 kV 大容量油浸式电力变压器油箱外壁布置了大量的加强拱,用于增强其箱壁的机械强度与散热效率。因此,油箱外壁加强拱的合理利用亦可一定程度上降低其噪声的辐射水平。

图7为110 kV 大容量油浸式电力变压器油箱

外壁加强拱灌沙示意图。其中,图7(a)为大容量油浸式电力变压器油箱外壁加强拱传统灌沙方式,图7(b)为所采用的变压器油箱外壁加强拱灌沙方式。分析可知,相比油箱外壁加强拱传统灌沙方式,所采用的110 kV大容量油浸式电力变压器油箱外壁加强拱灌沙方式可大幅度地增加灌沙面积与灌沙量,更大幅度地对传递至油箱外壁的振动能量进行衰减吸收,降低变压器噪声辐射水平。

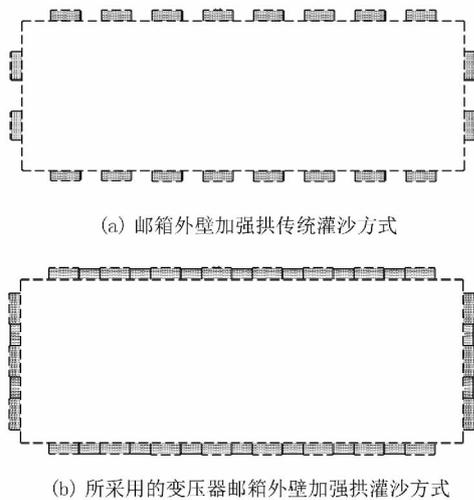


图7 变压器油箱外壁加强拱灌沙示意图

3 实验验证

3.1 实验简介

为验证所提出的融合铁心优化、绕组夹紧力优化以及箱壁增设隔音与吸音材料的110 kV大容量油浸式电力变压器噪声综合控制与抑制方法的正确性与工程化可行性,依据广泛应用于电力系统中型号为SZ-63000/110的变压器技术参数,基于变压器生产平台搭建了110 kV大容量油浸式电力变压器噪声控制与抑制实验系统模型,如图8所示。



图8 电力变压器噪声控制与抑制实验系统
在上述110 kV大容量油浸式电力变压器噪声

控制与抑制实验系统中,变压器噪声测试点为6个,各测试点与变压器箱体水平距离为0.3 m,与地面垂直高度取1.8 m,噪声测试结果为6个测试点噪声平均值,图9为测试点分布俯视图。

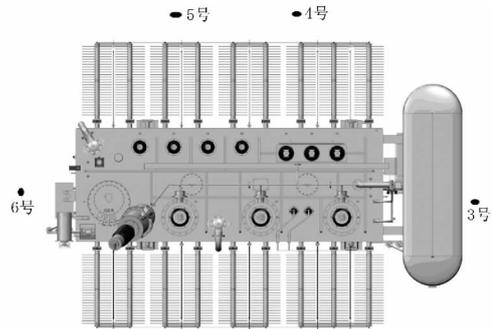


图9 变压器噪声测试点分布俯视图

3.2 实验结果及分析

表2 各降噪措施对变压器噪声控制与抑制影响

降噪措施	运行状态	试验结果	说明
普通硅钢片 (30Q120)	100%空载	63.21	同一图纸,铁心是否添加减震胶垫的两台SZ-63000/110变压器
	100%负载	64.02	
Hib硅钢片 (30ZH120)	100%空载	61.03	同一图纸,铁心是否添加减震胶垫的两台SZ-63000/110变压器
	100%负载	62.85	
铁心不加减震胶垫	100%空载	63.21	同一台产品,垫脚下加减震胶垫及不加减震胶垫
	100%负载	64.02	
铁心加减震胶垫	100%空载	62.35	同一台产品,油箱内壁是增设隔音板及无隔音板
	100%负载	63.58	
垫脚处无减震胶垫	100%空载	63.82	同一台产品,按箱外壁加强拱传统灌沙及灌沙
	100%负载	64.76	
垫脚处有减震胶垫	100%空载	62.93	同一台产品,按箱外壁加强拱传统灌沙及灌沙
	100%负载	64.27	
油箱内部无隔音板	100%空载	63.82	同一台产品,按箱外壁加强拱传统灌沙及灌沙
	100%负载	64.76	
油箱内部有隔音板	100%空载	62.94	同一台产品,按箱外壁加强拱传统灌沙及灌沙
	100%负载	64.02	
油箱外壁加强拱传统灌沙	100%空载	63.82	同一台产品,按箱外壁加强拱传统灌沙及灌沙
	100%负载	64.76	
油箱外壁加强拱灌沙	100%空载	61.42	同一台产品,按箱外壁加强拱传统灌沙及灌沙
	100%负载	62.33	

表2为所提出的变压器各种降噪措施对110 kV大容量油浸式电力变压器噪声控制与抑制的结果。分析可知:在同一实验验证平台,所提出的铁心降噪、绕组降噪及增设隔音与吸音材料的变压器噪声控制与抑制措施均可使110 kV大容量油浸式电力变压器噪声辐射水平得到降低,说明所提出的各种变压器噪声抑制措施是正确的、可行的,表明上述

噪声抑制措施适用于 110 kV 大容量油浸式电力变压器噪声的抑制。

表 3 为所提出变压器综合降噪措施对 110 kV 大容量油浸式电力变压器噪声控制与抑制影响。分析可知: 所提出的变压器噪声综合抑制措施是正确的、可行的, 并且可有效抑制 110 kV 大容量油浸式电力变压器噪声的产生与辐射水平。

表 3 变压器综合降噪措施对变压器噪声控制与抑制影响

降噪措施	运行状态	试验结果
普通硅钢片、未运用以上各项降噪措施	空载	68.74
	负载	69.86
Hib 硅钢片、运行了以上各项降噪措施	空载	53.26
	负载	54.62

4 结 论

在深入分析变压器本体噪声与非本体噪声产生及辐射机理的基础上, 提出了一种融合铁心优化、绕组夹紧力优化及箱壁增设隔音与吸音材料的 110 kV 油浸式电力变压器噪声综合控制与抑制方法。铁心优化与绕组夹紧力优化从源头上降低变压器振动, 变压器主体与箱壁连接机构采用金属橡胶减震垫片以及箱壁增设隔音与吸音材料阻隔变压器噪声辐射。搭建的 110 kV 大容量油浸式电力变压器噪声控制与抑制实验系统验证了所提出的变压器降噪措施的正确性与可行性。

参考文献

[1] 李友山. 110 kV 油浸式变压器的噪声控制[J]. 机电工程技术 2002, 31(4): 55-56.

[2] 虞兴邦, 姜在秀, 韩涛. 变压器的噪声及其降低[J]. 噪声与振动控制 2001(5): 35-38.

[3] 徐兵, 马吉恩, 杨华勇. 液压变压器瞬时流量特性分析[J]. 机械工程学报 2007, 43(11): 47-49.

[4] 林明芳. 变压器的噪声及其合理控制[J]. 韶关学院学报(自然科学版) 2004, 25(9): 45-47.

[5] 刘宏亮. 变压器铁心振动噪声的多物理场耦合问题研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学 2014.

[6] 刘路, 刘瑾. 变压器直流偏磁现象的两种成因及其实验分析[C]. 云南电力技术论坛文集 2011: 1-5.

[7] 蒯狄正. 电网设备直流偏磁影响检测分析与抑制[D]. 南京: 南京理工大学 2005.

[8] 石碧薇. 变压器在谐波条件下的损耗及热问题分析[D]. 北京: 华北电力大学 2014.

[9] 余磊. 变压器噪声的产生与影响因素探讨[J]. 装备制造技术 2010(10): 184-185.

[10] 江川. 城区变电站变压器噪声分析及治理[J]. 山东电力技术 2002(3): 72-74.

[11] 陈爱云, 田卫东, 常立, 等. 变压器噪声产生的原因及降低措施[J]. 电气制造 2011(6): 62.

[12] 奚晓勤. 变压器噪声产生的原因及降低噪声的措施[J]. 华东电力 2012, 40(4): 687-688.

[13] 蒯狄正, 万达, 邹云. 变压器中性点注入反向抗偏磁直流的应用分析[J]. 华东电力 2005, 33(6): 44-45.

[14] 钟佩莲, 李拓. 干式变压器噪声分析及控制研究[J]. 机电工程技术 2010, 39(8): 166-168.

[15] 王林. 户内变电站降温通风数值模拟研究[D]. 南昌: 南昌大学 2014.

[16] 徐禄文, 钱伟鑫. 户外箱式变压器噪声治理技术研究[J]. 声学技术 2013, 32(4): 491-497.

[17] 牛春芳, 耿荣林. 降低变压器噪声方法的探讨[J]. 变压器 2010, 47(12): 20-23.

[18] 李冰, 胡国清. 降低变压器噪声的措施初探[J]. 变压器 2004, 41(8): 40-42.

[19] 郭欣. 220kV 变电站变压器噪声研究[J]. 科技情报开发与经济 2011, 21(8): 192-194.

[20] 宋健. 振速法在电力变压器噪声测量中的应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学 2013.

[21] 黎文辉. 高压变电站噪声污染预测与防治技术研究[D]. 广州: 广东工业大学 2015.

[22] 牛磊. 电力变压器噪声实验室测量方法的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学 2013.

[23] 柳泽荣. 变压器安装与运行(13) [J]. 变压器 2008, 45(3): 42-44.

[24] 刘重轩, 周镭, 赵爱众. 变流变压器噪声分析及抑制[J]. 西北纺织工学院学报 1996, 10(1): 66-70.

作者简介:

潘 军(1982) 本科, 研究方向为电气工程软件开发及应用;

王 玮(1985) 硕士研究生, 研究方向为电力系统控制与保护;

徐彬山(1984) 助理工程师, 研究方向为变压器优化设计;

杨青斌(1988) 助理工程师, 研究方向为新能源发电及其并网检测研究。

(收稿日期: 2017-03-29)