基于可听声的变压器故障诊断技术综述

谢荣斌[1]，薛　静[1]，张　霖[1]，申　峻[1]，徐舒蓉[2]，赵莉华[2]
（1. 贵州电网有限责任公司贵阳供电局，贵州，贵阳　550001；
2. 四川大学电气信息学院，四川，成都　610065）

摘　要： 针对变压器故障类型判断及故障预警问题，从信号采集、信号消噪、特征量提取、故障诊断4个方面综述了基于可听声的变压器故障诊断技术研究的新进展，对其诊断效果及研究动向进行分析和展望。研究结果表明：该技术在（1）变压器可听声产生机理研究及故障原因与趋势预测；（2）变压器声信号的消噪技术及频谱分析；（3）振动声信号的专家智能分析系统的研究方面具有广阔的发展前景。

关键词： 变压器；故障诊断；可听声；特征量提取
中图分类号： TM406　　**文献标志码：** B　　**文章编号：** 1672-3643（2017）02-0055-07
有效访问地址： http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2017.02.011

Overview on transformer fault diagnosis technology based on audible sound

XIE Rongbin[1], XUE Jing[1], ZHANG Lin[1], SHEN Jun [1], XU Shurong[2], ZHAO Lihua[2]
(1.Guiyang Power Supply Filiale of Guizhou Power Grid Company, Guiyang Guizhou 550001, China;
2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: Aiming at the problem of fault diagnosis and fault warning of power transformer, reviews the new developments of transformer fault diagnosis technology based on the audible sound from the four parts such as signal acquisition, signal denoising, feature extraction and fault diagnosis, analyzes and brings forward the expectation of diagnosis effect and the research trend. The research result shows that this technology has broad development prospect in the following three aspects: (1) the research of transformer audible sound occurrence mechanism, and the prediction of fault reason and fault trend; (2) the analysis of the transformer acoustic signal, including spectral analysis and noise elimination technology; (3) the research of the expert intelligent analysis system for vibration acoustic signal.

Keywords: transformer; fault diagnosis; audible sound; feature extraction
DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2017.02.011

收稿日期： 2017-01-23
作者简介： 谢荣斌（1970），男，工程师，主要从事高电压技术研究与管理工作。

电力系统中，变压器数量大，规格种类繁多，运行时间长，因此故障率较高。国家电网设备事故统计数据[1]显示，2005年，110 kV及以上电压等级的变压器事故率高达18台次，导致设备维修及停电经济损失高达几亿元。所以对变压器运行情况进行监测及故障诊断，提前发现故障隐患并消除，提高变压器可靠性，对于保证变压器可靠运行具有重要意义。

变压器故障诊断方法主要有振动诊断、光谱诊断、油色谱诊断、声学诊断、红外和热成像诊断、无损监测以及铁谱诊断等。油色谱诊断技术是目前发展得比较完善的变压器故障诊断方法，文献[2]指出，我国电网中有50 %以上变压器故障是通过油色谱分析结果检出的。虽然油色谱检测结果准确，但是需要停运变压器和“吊心取油”，不适用于在线监测。振动检测法是近几年变压器故障诊断的研究热点，振动监测设备与被监测设备没有电气连接，不影响被测设备的稳定运行，不足之处主要在信号检测方面，需要将传感器与变压器接触甚至需要将传感器置于箱体内部，使传感器的安装与维护不方便，可听声诊断技术可以克服这些缺点。

1 可听声诊断技术研究现状

可听声诊断技术是近年来发展起来的新型诊断技术，通过分析噪声频段为20 Hz至20 kHz的可听声信号判断变压器运行状态。它的优点：声学探头安装简便，声信号易于测取，非接触式测量，速度快，无须事先粘贴传感器，可对移动目标进行在线监测，在声信号的采集和传播过程中不产生电磁信号，与设备没有电气连接，因此对设备本身无干扰[3]。

目前各界对可听声分析法在设备故障诊断方面进行了不少研究，如Li与Hessel等[4-5]使用神经网络对设备的声音信号展开分析，然后进行故障分类，研究表明该方法能有效诊断设备故障。侯温良等[6]提出，通过设备正常与异常声音信号频谱相关系数来进行故障诊断。文献[7-8]研究了声音信号在汽车变速齿轮上的故障诊断，取得了明显的诊断效果。文献[9]基于电机声音信号，设计了一个基于Android的BP神经网络声音信号故障诊断系统。该系统可实现电机声信号消噪、提取特征量以及判别故功能，并可输出判别结果。文献[10]提出基于振动与声波联合分析断路器故障的方法。得出声波信号的高频分量能够体现断路器的工作状态，有助于进行状态评估和故障诊断。

可见，可听声诊断技术已经在各种设备故障诊断中有良好的运用，并已取得了一定的成果。目前，国内外对变压器声音诊断的研究方向及重点有3个方面：

(1)变压器可听声产生机理研究，如故障产生原因、发展趋势；

(2)变压器可听声信号处理，如消噪技术、频谱分析；

(3)是专家诊断系统的开发。

但是，目前对可听声诊断技术的信号采集、信号数据处理、信号消噪、信号特征量4个部分的研究较少，本文的研究主要是为了解决以下问题：

(1)变压器可听声数据采集方法及所需的信号采集设备。

(2)数据预处理方法。

(3)特征量提取方法。

(4)不同特征量提取方法下故障诊断依据。

(5)变压器可听声诊断技术的阶段性成果以及研究趋势。

2 变压器可听声诊断技术

2.1 变压器可听声产生机理

变压器可听声信号产生机理是变压器可听声技术诊断的理论依据，是变压器噪声中频率为20Hz至20 kHz的声信号，主要来自绕组、铁心、油箱(包括磁屏蔽等)振动以及安装的冷却风扇装置转动时产生的声音。

2.1.1 铁心振动发声

硅钢片磁致伸缩特性是引起铁心振动发声的主要原因[11]。在交变磁场作用下硅钢片发生形变，即与磁力线平行方向，硅钢片被拉伸，宽度增大；与磁力线垂直的方向，硅钢片被压缩，其宽度缩小。磁致伸缩率可通过磁致伸缩量表征，磁致伸缩率可表示为[12]：

$$\lambda = \frac{\triangle L}{L} \tag{1}$$

式中：λ——铁心柱轴向磁致伸缩率；

$\triangle L$——硅钢片轴向最大伸缩量；

L——硅钢片轴向尺寸。

设磁致伸缩力为 F_C，由简化励磁模型，磁致伸缩力 F_C 定义如式(2)所示：

$$F_c = \frac{1}{2}\nabla(H^2\tau\frac{\partial\mu}{\partial\tau}) = F_{c\max}\sin 2\omega t \tag{2}$$

式中：$F_{c\max}$——磁致伸缩力幅值；

ω——交变电磁场的频率；

H——磁场强度；

μ——铁磁介质磁导率；

τ——介质的体积密度；

∇——旋度符号；

磁致伸缩力导致变压器铁心振动发声，根据式(2)可知 F_C 是以2ω角频率使铁心振动，因此铁心发声频率为电力频率的2倍，即100 Hz。研究指出，由于变压器磁场中存在的漏磁通导致铁心的磁致伸缩现象具有非线性，使铁心振动与绕组振动不同步，磁通偏离正弦波，导致高次谐波的存在（如200~600 Hz等高次谐波）。

2.1.2　绕组振动发声

变压器绕组在绕组电流与漏磁场作用下产生电动力[13-14]，双绕组变压器绕组受力情况如图1所示。高压绕组或低压绕组上流过各线匝中的电流大小及方向一致，因此高压绕组或低压绕组各自线匝间相互吸引，产生轴向力 F_X；流过高压侧线圈和低压侧线圈的电流相位差180°，方向相反，二者产生径向力 F_{rad}。

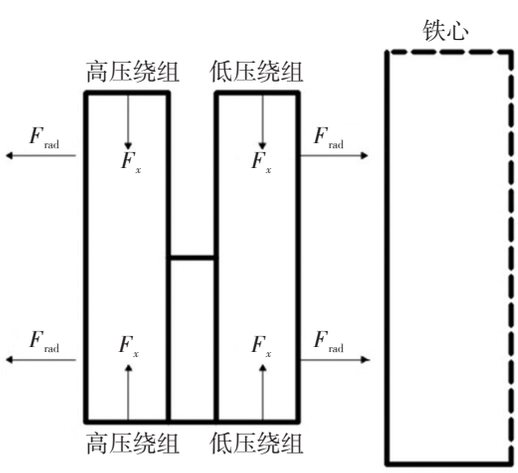

图1　变压器绕组受力分布

F_X 导致绕组轴向振动，F_{rad} 导致绕组辐向振动。轴向振动使线饼周围的变压器绝缘油向外喷射，并可通过铁心传递，因此研究中将轴向振动作为绕组振动的主要作用力。绕组轴向力 F_X 正比于负载电流的二次方，又因为绕组振动加速度正比于其所受电动力，所以绕组振动声信号近似正比于负载电流二次方，从而得到由于绕组振动产生的声信号频率为电网电流频率的2倍，即100 Hz。

2.1.3　箱体及冷却发声

变压器实际运行中，其铁心及绕组产生的振动经各种路径传播至变压器箱体表面，使变压器箱体振动发出声音信号[15]。

冷却可听噪声是针对有冷却系统的变压器而言。冷却可听噪声来自2个方面：一方面是冷却风扇和油泵运行时振动发出声音；另一方面是其本体振动通过油管接头等装置传导至变压器冷却装置使变压器冷却设备产生振动声信号。文献[16]对变压器噪声进行了深入研究，并指出冷却设备产生的可听声的频谱小于100 Hz。

2.2　可听声信号采集

变压器声信号通常从空气介质中提取，通过声音传感器获取变压器可听声信号，采用录音笔对采集到的信号进行保存。通常采用传声器作为声传感器，选择传声器时需考虑以下因素[17]：

(1)考虑可靠性，要保证在环境温度、湿度、振动冲击变化时能避开干扰，获取真实的音频信号；

(2)频率响应，指传声器正常工作的频带宽度，根据需要合理选择；

(3)抵抗干扰信号的能力，变电站中存在大量的电磁干扰信号，获取变压器可听声信号的传声器必须要有较好的抗干扰能力；

(4)灵敏度，即声电转换的能力。根据传声器的测试标准，灵敏度被设定为0 dB=1V，所以传声器的灵敏度级均为负值。文献[12]对变压器在不同运行情况下的噪声等级进行了测定及分析，研究结果表明在额定磁通密度范围内，变压器声音幅值最小为25 dB，因此选择传声器灵敏度必须能识别最小声压幅值下的声信号。

变压器可听声信号采集常用的主要有动圈式、电容式及驻极体传声器[12,17-18]。其中驻极体电容传声器是电容式传声器中的一种新型传声器，采用驻极体材料制成。除了具有普通电容式传声

器的优点外，突出特点是使用时不需要外加直流极化电压，使用时可减少一个传声器供电电源，因而结构简单、体积轻巧、方便使用。除此之外，其全响应稳定性好、动态范围宽、噪声等级低，适用于可听声信号的采集。

文献[18]对驻极体电容式传声器进行了研究，表明能满足现场采集要求。文献[12]中采用了CHZ型3 Hz~18 kHz驻极体电容传声器，对运行中的变压器进行可听声信号采集，检测结果表明该类型传声器能够采集正确且真实的数据。

2.3 声信号数据预处理

对采集到的信号进行前期消噪、奇异点检测等预处理措施可以使数据真实性与稳定性得到提高，因此选择合理的前期数据预处理技术可以保障后期对数据分析的准确程度。目前常用的预处理措施主要有预加重、加窗、分帧以及消噪等[17]。

目前，在变压器可听声检测技术方面的研究重点集中在对信号特征量的提取，对预处理的研究相对较少，大多采用音频软件直接截取一段平稳可分析的声信号。文献[17-19]中均运用音频剪辑软件(Gold Wave)将得到的信号进行处理，获取一段平稳信号并保存为wav格式进行分析。

2.4 消噪措施

变压器运行时发出的声信号通常是一维信号且较平稳的低频信号，而噪声主要为类似于脉冲状高频间断性不稳定的信号。当可听声信号中干扰噪声信号特征和承载有效信息信号特征相同时，必须选取合适的消噪方法。目前主要方法有传统阈值法、小波法、分层阈值法等。

2.4.1 传统阈值法

传统阈值消噪算法[20]一般分为：线性小波阈值法和软阈值估计法。

2.4.1.1 线性小波阈值法

线性小波阈值法适用于特性明确、可以直接展开分析的噪声信号，可运用经验公式选取阈值。主要的经验公式模型有缺省阈值模型、小波包变换模型。

2.4.1.2 软阈值估计法

软阈值估计法适用于特征不确定的噪声信号。软阈值估计法确定阈值的方法有：固定阈值法，基于Stein无偏似然估计原理的软阈值估计法，选择启发式阈值法及极大极小准则法。

软阈值方法得到的估计信号不会产生振荡，但当某层小波系数大于选定阈值时，小波系数总存在恒定的偏差，对重构信号与原始信号的逼近程度有一定影响，使重构信号产生一定误差，因此文献[20]针对软阈值函数的特点及不足提出了一种改进的软阈值函数。工程实例表明，改进的软阈值法与软阈值法相比去噪效果更佳，很好地保留了原始信号的重要特征，克服了软阈值法中估计小波系数和带噪小波系数间的恒定偏差问题。

2.4.2 小波法

一个含噪声的一维信号模型可表示为

$$s(n)=f(n)+\sigma e(n) \tag{3}$$

式中：$s(n)$ ——含噪声信号；

$f(n)$ ——原始信号；

σ ——信号噪声强度；

$e(n)$ ——噪声信号。

对信号 $s(n)$ 消噪的目的是要抑制信号中的背景干扰噪声，恢复真实信号 $f(n)$ 。利用小波变换分析可将原始信号分解为一系列近似分量和细节分量，高频脉冲状的噪声信号主要融合在细节分量上，使用某种阈值处理细节分量，再经小波重构可得到真实信号。文献[21]针对工程中常见的具有稀疏概率密度形式的信号，研究了基于最大似然估计准则的小波消噪方法，对比研究结果表明，该方法消噪效果更优越。文献[20]研究了小波去噪，结果表明小波去噪具有更优越的数据处理能力，能更好地逼近真实信号。

2.4.3 小波分层阈值消噪法

小波分层阈值消噪法[22]是在非线性小波阈值法基础上的改进。分层阈值消噪法可实现在较低尺度上保留有用信号，在最大尺度上消除部分噪声信号。

小波分解层数对于消噪效果影响很大，小波分解层数的选择既要考虑提高信噪比又要考虑去除低频噪声。文献[23]对小波分层阈值法进行了研究，结果得出采用基于小波算法的分层阈值消噪法消除噪声干扰，消噪效果显著。文献[24]提出了基于小波细节系数自相关性分析的分层阈值

降噪算法，并对模拟的含噪声振动声信号进行了试验研究，结果表明：该方法具有较好的降噪效果，可有效抑制背景噪声，适用于较高频率。

2.5 可听声信号特征提取

特征提取过程指从状态信号中提取出承载着故障信息的特征数据，如频谱、能量谱、功率谱、幅值等。目前可用的变压器可听声特征信号提取方法主要有：基于短时傅里叶变换的传统频谱分析特征提取技术，小波包算法特征提取技术，基于Hilbert-Huang变换的特征提取方法。

2.5.1 基于FFT变换的传统频谱分析法

变压器原始声信号中频率成分复杂，不同的频率分布特性蕴含着变压器不同的运行状况。快速傅里叶变换（FFT）算法是传统频谱分析信号处理的重要工具。根据FFT变换将声信号的时域图转化成频谱图，可较清晰地判别声源信号中的频谱分布情况。不管其处于正常或者异常运行状态下，可听声信号的频率分布是一定的，通过频率分布即可判断变压器故障情况。

2.5.2 基于小波包算法的特征量提取

小波包由2组正交小波基滤波器系数生成。小波包分解具有多分辨率分析的特点，克服了FFT变换这方面的缺陷，可在时域、频域2个方面表征信号承载的信息。小波包分析对信号高频成分进行类似于对低频成分的处理，将高频成分逐渐细化分割，实现对频率分辨率的提高[23,25]。

基于小波包算法的提取技术包括3个部分：对信号进行小波包分解，求取各频带信号总能量，构造特征向量。最后通过不同类型故障情况下能量特征向量的比较，依据特征量的特点对信号进行识别处理，判断是否发生故障及故障类型[32]。

2.5.3 基于Hilbert-Huang变换的特征量提取法

希尔伯特黄（Hilbert-Huang）变换简称HHT变换，其具有自适应性与完备性，是分析非线性、非平稳数据的有效工具。该方法由2大部分组成：

（1）经验模态（Empirical Mode Decomposition，EMD）分解，这部分将数据分解成若干个固有模态函数（Intrinsic Mode Function，IMF），IMF是基于原始信号的分量，是时域范围内的函数，其承载了原信号内的真实物理信息，因此IMF经Hilbert变换后得到的结果能够反映信号真实情况的物理信息。

（2）Hilbert谱分析（Hilbert Spectral Analysis，HSA），对分解得到的各个IMF分量作Hilbert变换，从而得到时频平面上的能量分布谱图（Hilbert谱）[26]，即得到瞬时频率和能量，Hilbert谱能准确反映出该信号能量在空间或时间各种尺度上的分布规律。通过分析变压器正常与故障状态下的分布规律可判别其运行状态。

3 基于可听声的变压器故障诊断效果分析及下一步研究重点

3.1 可听声诊断技术效果分析

目前已经有很多学者对该方法在变压器故障诊断和预警中进行了研究和使用，并且取得了良好的效果。

文献[18]针对变压器内部火花放电故障发出的频率在20 Hz~20 kHz的可听声展开了研究，采用快速傅里叶变换法提取原始信号的频谱图，结果表明，变压器正常运行时的可听声频谱主要集中在100 Hz以及其倍频200 Hz、300 Hz等。火花放电时频谱主要集中在0~1 kHz，频谱为包络线状的连续谱。文献[17]对变压器内部电晕放电、火花放电等绝缘故障进行了模拟试验，并采集可听声信号，运用传统的快速傅里叶变换和短时傅里叶变换等方法对信号进行了分析，得到了不同放电情况下的可听声信号频谱分布特征规律，为故障诊断装置的开发提供了数据基础。文献[27]对变压器可听噪声检测法进行了研究，研究结果显示，可听噪声主要频率集中在100～400 Hz以内，300 Hz最为突出，超过1 kHz的高频分量很少，该研究成果对利用噪声信号进行变压器检测具有积极的意义。

文献[12]研究了基于声波识别的电气设备故障诊断专家系统的总体方案，给出小波包提取电气设备实测声波信号特征向量的算法，结果表明该方法突出了故障特征，可提高故障诊断的正确率。文献[28]对变压器声波信号展开研究，提出了基于可听声信号的发展趋势预测新算法。经过对实测变压器运行声波信号的分析试验，证明小波包算法在声波消噪、奇异性检测法和发展趋势

预测中是有效的处理技术。文献[25]提出了一种基于小波包改进的特征提取方法，引入区间能量的概念，从区间能量的角度提取声波信号的有效特征，实验研究表明：该方法能提取出可听声信号中最能反映变压器真实运行状态的特征信息，可有效诊断变压器故障。

文献[12]对HHT变换特征提取技术展开了研究，对变压器不同工况下实测信号进行噪声滤除后，通过HHT变换分析其特征，进一步指出，HHT变换对变压器声波信号的特征分辨能力因声场远近的变化而变化，它在分析近声场信号时分辨力较强，而对远声场信号的分析能力较弱。文献[17]提出了一种基于声波分析的变压器故障诊断实施方案，并结合人工智能构建了变压器状态监测专家系统。经理论分析及实例验证，证明该系统具有实用性，是变压器故障诊断研究的新趋势。

可见，基于可听声的变压器故障诊断方法在实验阶段已经取得了很大进展，该方法克服了油色谱诊断技术“吊心取油”的困难，解决了振动检测法传感器与设备直接接触的问题。具有良好的发展前景。

3.2 基于可听声的变压器诊断技术下一步研究重点

虽然国内外专家在可听声诊断技术方面已经取得一定的理论和实验研究成果，但是该技术在变压器故障诊断与预警中的应用中仍然存在很多需要深入研究的问题，主要有：

(1)原始数据采集与数据库的建立。目前缺乏大量原始可听声数据，能识别的故障种类有限。在后续研究中，可通过电力部门配合逐步积累设备故障时数据，不断充实、完善原始数据库。

(2)数据预处理。对于采集到的原始数据，可以采取如预加重、端点检测、消除趋势项等预处理措施，选用合适的预处理方法处理数据可提高信号可识别化特征，这是处理原始数据下一步需要改进和深入研究的问题。

(3)原始数据的采集位置。目前对于声信号的采集位置并没有系统地提出选取方案，对于不同位置上采集到的信号没有进行深入研究其对最终判别结果的影响，可进一步从采集信号位置的角度出发，研究其规律性。

(4)在分析特征量方面，目前多采用频谱、能量作为特征元素，应进一步采用多种声学物理参数识别特征信号，可将频率作为主要参数，结合其他物理参数的特征共同研究声信号的物理信息，可使故障诊断技术更加有效、准确。

(5)智能诊断系统。开发集数据处理与故障识别、故障预警于一体的软件系统，结合硬件、软件实现智能诊断系统是未来的发展方向。

4 结论

(1)基于可听声的变压器故障诊断技术具有检测设备简单、传感器灵活、测试方法简便的特点，为进一步设计故障信息智能数据库提供了新的思路，具有良好的发展前景，是变压器故障诊断研究的新方向。

(2)基于可听声的变压器故障诊断技术可实现变压器潜在故障隐患的预警，可对现存在的故障作初步类型判断，具有广阔的实用价值。

(3)基于可听声的变压器故障诊断技术的下一步研究重点可以分为3个方面：(1)对变压器可听声产生机理进行研究；(2)对变压器声信号数据处理方面的研究，包括数据预处理、信号消噪技术、频谱分布规律等；(3)对振动声信号的专家智能分析系统的研制。

参考文献

[1] 王梦云. 2004年度110 kV及以上变压器事故统计分析[J]. 电力设备. 2005(11): 35-41.

[2] 严莉，王维建，周东华.变压器故障诊断的油色谱分析综述[J]. 控制工程.2003；10(6)：489-491.

[3] 吴松. 基于声学特征的变压器故障诊断研究[D]. 武汉：华中科技大学，2012.

[4] Li WD, Robert M, Parkin JC. Acoustic based condition monitoring of a diesel engine using self-organizing map networks[J]. Applied Acoustics, 2002, 63:699-711.

[5] Hessel G, Schmitt FP. Aneural network approach for acoustic leak monitoring in pressurized plants with complicated topologies[J]. Control Engineering Practice, 1996, 4(9):1271-1276.

[6] 侯温良. 振动噪声判别机器故障—谱相关法[J]. 声学学报, 1983, 8(6): 339-344.

[7] 舒大文，廖伯瑜. 用振动和噪声信号诊断汽车变速箱齿轮故障的研究[J]. 昆明理工大学学报,1997, 22(4): 54-61.

[8] 卢学军,魏智. 变速箱噪声的频谱分析与故障诊断[J]. 振动与冲击, 1999, 18(2): 75-78.
[9] 梁国荣, 谷爱昱, 沈训欢. 基于噪声源估计的电机故障诊断研究[J]. 防爆电机. 2013,48(04):32-39.
[10] 李建鹏. 基于振-声联合分析的高压断路器机械故障诊断研究[D]. 北京:华北电力大学.2012.
[11] 汲胜昌,何义,李彦明等. 电力变压器空载状况下的振动特性研究[J]. 高电压技术. 2001; 27(5): 47-48.
[12] 潘亮亮.基于声波识别的变压器状态诊断系统开发[D].北京:华北电力大学,2007.
[13] 何平, 文习山. 变压器绕组变形的频率响应分析法综述[J]. 高电压技术. 2006,(05):37-41.
[14] Garcla B, Bursos J.C., Alonso A.M. Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations-part I: theoretical foundation[J]. Electric Power Systems Research, 2005,74:129-138.
[15] 钟星鸣. 干式变压器的振动与噪声研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.
[16] 董志刚. 变压器的噪声1[J]. 变压器,1995;32(11):27-31.
[17] 杜一明. 基于声信号的变压器故障诊断系统研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
[18] 符劲松. 基于可听声的变压器内部火花放电故障诊断研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
[19] Aguiar P R, Serni P J A, Bianchi E C, et al. In-process grinding monitoring by acoustic emission[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004. Conference Location: Montreal, Que., Canada. IEEE, 2004: V-405-8 vol.5.
[20] 刘文涛, 宋文爱. 信号消噪的小波处理方法[J]. 弹箭与制导学报. 2008; 28(2):213-223.
[21] 杨洁, 华宇宁, 张勇. 应用小波变换对语音信号消噪处理的研究[J]. 高新技术. 2006;32(05):6-7.
[22] Kwak JS, Song JB. Trouble diagnosis of the grinding process by using acoustic emission signals[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41:899-913.
[23] 张静远, 张冰, 蒋兴舟. 基于小波变换的特征提取方法分析[J]. 信号处理,2000;16(2): 156 -162, 155.
[24] 臧玉萍, 张德江, 王维正. 小波分层阈值降噪法及其在发动机振动信号分析中的应用[J]. 振动与冲击.2009; 28(08):57-60.
[25] 潘亮亮, 赵书涛, 李宝树. 基于声波信号分析的电气设备故障诊断新方法[J]. 电力自动化设备. 2009,29(08):87-90.
[26] 肖志. Hilbert-Huang变换及其在语音特征提取中的应用[D]. 无锡:江南大学,2008.
[27] 杨琦. 基于振动噪声的变压器运行状态监测装置的开发[D]. 北京:华北电力大学,2010.
[28] 潘亮亮, 赵书涛, 李宝树. 基于区间能量提取的变压器声测诊断[J]. 变压器. 2010, 47(4):61-65.

(上接第42页)

成的直接经济损失约48万元。对于部分重要负荷用户而言,在该故障情况下造成的间接经济损失将无法估量。采用本文提出的改进回路,可以有效避免上述情况,最大幅度减少损失,具有显著的经济和社会效益。

4 结论

(1)在110 kV扩大内桥接线方式下,改进回路能满足110 kV扩大内桥接线所有运行方式且能够实现二次电压自动切换,有效解决了2号主变压器高压侧二次电压失压的问题。

(2)改进回路能够保障110 kV扩大内桥接线的主变压器安全稳定运行,减少电网企业和用户的经济损失。

(3)改进方案为110 kV扩大内桥接线方式的无人值守变电站二次电压切换回路提供了新的思路,在新建及改扩建工程中有极大的推广作用。

参考文献

[1] 尹志. 内桥型接线中TV并列装置智能设计[J]. 云南电力技术,2012,40(1):43-44.
[2] 秦传明,黄璐,冯秋辉,等. 扩大内桥接线备自投和TV并列回路的分析[J]. 自动化应用,2014(8):104-106.
[3] 国家电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
[4] 吴燕,陆晓芸,舒杨,等. 关于扩大内桥主接线PT安装位置的设计探讨[J]. 云南水力发电,2012,(21):88-89.
[5] 张闻勤,黄向前,张学超.电压并列装置设计缺陷浅析与改进对策[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2013,18(1):59-62.
[6] 郭碧媛,张丰.110 kV扩大内桥接线备自投逻辑分析[J].电力系统保护与控制,2010,38(7):124-128.
[7] 钱玉春,郑立. 扩大内桥接线变电站自投装置配置及整定原则[J]. 华北电力技术,2010(3):23-26.
[8] 肖硕霜,修荣垄,党政. 电压切换回路隐患分析及其改进措施[J].电气技术,2016,17(1):90-93.