

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.12.036

基于时频变换的变压器绕组振荡波信号分析方法

刘红文¹, 王 科¹, 周祥宇², 林 桐²

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650214; 2. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 为能进一步提高变压器绕组状态检测的可靠性,文中提出一种高压直流作用下通过开关切换产生的暂态激励获得绕组振荡波来分析绕组状态的方法。基于现场试验,文中通过连续小波变换对振荡波信号进行去噪,并分析其时频特性,通过引入图像识别方法与总矩阵相似度量时频信号特征。结果表明:该方法测试效率高,矩阵相似度可较好反映不同幅值、不同输出侧下振荡波的重复性和规律性,并能较好反映变压器相间绕组的差异性,为研究变压器绕组变形检测提供了参考。

关键词: 时频变换; 变压器; 振荡波; 连续小波变换; 矩阵相似度

Analysis Method of Transformer Winding Oscillation Wave Signal Based on Time-frequency Transformation

LIU Hongwen¹, WANG Ke¹, ZHOU Xiangyu², LIN Tong²

(1. Power Science Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650214, China; 2. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to further improve the reliability of transformer winding state detection, this paper presents a method to analyze winding state by using winding oscillation wave under HVDC transient excitation. Based on field experiments, this paper denoises the oscillating wave signal by continuous wavelet transform, and analyses its time-frequency transformation characteristics. By introducing image recognition method and total matrix similarity, the time-frequency signal characteristics are measured. The results show that the method has high testing efficiency, and the matrix similarity can reflect the repeatability and regularity of oscillation waves under different amplitudes and output sides, and can better reflect the difference of transformer windings between phases, which provides a reference for the study of transformer winding deformation detection.

Key words: time-frequency transformation; transformer; oscillation wave; continuous wavelet transform; matrix similarity

0 引言

电力变压器作为电能传输和转换必不可少的变电设备,是电力系统中最为核心的设备之一^[1-2]。特别是大型电力变压器,其结构复杂、造价昂贵,一旦发生故障就会导致大面积的停电,造成巨大经济损失。据统计,110 kV 等级以上的电力变压器,因绕组变形而导致变压器故障占变压器故障类型的50%~60%。

短路故障是造成绕组变形的主要原因,反复经

受短路电流将逐渐降低绕组的机械承受能力,进而产生严重变形^[3],准确、有效的变压器绕组变形检测方法将有效确保电力系统的安全可靠运行。短路阻抗测量、频率响应法等方法是目前应用最为广泛的绕组变形检测方法,但上述方法在评估方面仍存在一些不确定性。近年来,为了能进一步提高现场绕组变形检测的可靠性,国内学者针对不同的变压器绕组变形检测方法进行了大量的研究。西安交通大学的刘勇结合频率响应法和阻抗法,提出了扫频阻抗法,该方法在实验室试验结果较好^[4];西安交

收稿日期:2020-06-11; 修回日期:2020-08-02

基金项目:云南电网有限责任公司科技项目编号(KJQT2017025)。

Project Supported by Science and Technology Project of Yunnan Power Grid Co., Ltd.(KJQT2017025).

通大学的高佳平在频率响应法的基础上采用伪随机序列作为激励信号进行绕组变形检测, 结果表明该方法有一定的优越性^[5]; 重庆大学的赵忠勇通过从变压器套管末屏注入脉冲信号, 并基于复合小波变换(CCWTT)获得在线脉冲频率响应, 取得了一定的效果^[6]; 上海交通大学的团队张坤利用 Morlet 小波对变压器短路故障时实测振动信号进行时频分析, 根据振动信号的频域特征来判断绕组状态^[7]; 哥伦比亚的 Eduardo 利用连续小波变换(CWT)仿真分析固定频率暂态信号下绕组的频率响应, 获得了变压器响应时域和频域的关系^[8]。上述方法对于变压器绕组状态检测及分析在某些方面具有一定的优越性, 为绕组变形检测及分析方法提供了很好的借鉴。研究表明随着激励电压等级的提升, 绕组响应的信噪比将会提高, 故响应信号精度也随之提高^[9]。为此, 文中基于高压直流电源激励, 也提出一种基于变压器绕组振荡波的分析方法, 并通过时频变换分析的方法来获取变压器振荡波的特征参量, 来探究在高压直流电源激励下, 变压器绕组振荡波的变化情况, 及其用于变压器绕组变形检测的可行性。

文中以一台 220 kV/160 MVA 大型三相三绕组电力变压器为试验研究对象, 搭建了一套高压直流暂态发生实验装置, 通过现场试验获得了不同等级暂态激励下以及不同绕组下的振荡波。针对该波形, 提出了振荡波基于连续小波时频变换进行振荡波分析的方法, 该方法通过计算振荡波的时频特性, 并通过提取特征参量, 对比分析在不同输入输出情况下的时频特性, 研究振荡波用于变压器绕组变形检测的可行性。

1 振荡波产生机理及现场测试

1.1 振荡波产生机理

变压器绕组在频率较高时(>1 kHz)可以等效为由分布式参数电阻(R)、电感(L)、电容(C)构成的电路模型^[9-11]。频率响应法的基本原理是在绕组的任意一端口输入一个幅值较低, 频率较高且在变化(1~1 000 kHz)的正弦信号, 在绕组的另一相异端口下接受扫频响应信号, 并通过计算获得变压器绕组的幅频响应特性^[12-14]。基于频率响应法的原理, 文中提出一种利用高压可控开关控制通断的方式获得高压直流电源下的暂态输入信号, 并通过暂态信号激励获得振荡响应信号的方法。见图 1。文中的试验方法是在变压器星型绕组的中性点套管上注入高压直流作用下开关切换产生的暂态激励, 在变压器套管末屏电容处, 连接一个接地分压电容, 形成

一个变压器 RLC 等效电路回路, 通过变压器绕组内部间等效电容、电感间的耦合, 获得绕组末端的振荡波。

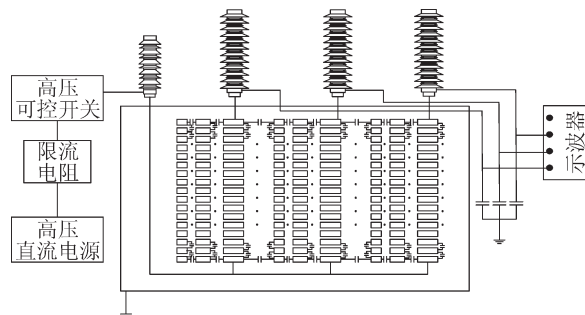


图1 振荡波产生原理图

Fig. 1 Principle of oscillating wave generation

从上述振荡电路和原理可以看出, 变压器绕组的等效电路参数是影响振荡波的主要因素, 当变压器内部绕组发生变形, 其等效电路参数发生变化, 其中电感、电容参数的改变尤为明显, 而电感、电容参数的大小对振荡波的特性有决定性的作用。故研究振荡波的获取方法, 能够为识别变压器绕组状态提供重要参考。

1.2 开关暂态特性对振荡波的影响

为选取合适的开关关断时间, 文中基于等效电路模型, 在 Multisim 中模拟了不同开关关断时间下的绕组末端的信号振荡情况, 其中模型共有 48 阶, 包含高、中、低压侧电路模块, 参数计算方法根据文[10]得到, 计算结果见图 2。由图 2 可知, 当开关关断时间为 ms 级别的, 绕组难以产生振荡信号, 而在 ms 以及 ns 级别才会产生一定频率的振荡波, 且开关的时延越小, 振荡波频率越高, 振荡越明显。考虑到现有电力电子开关的性能和成本, 本次试验选取关断时间为 10 ms 的开关, 为保证测试的精度, 信号采集采用 DPO5204B 示波器, 采样率达到 10^6 ; 而为保证振荡波在特定频率下的稳定性及重复性, 电力电子开关在自动关断后及下一次闭合前应留出足够的时间裕度(20 ms), 使振荡波完全衰减至稳定状态。

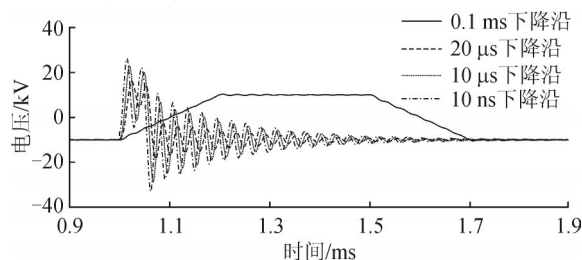


图2 高压侧振荡波时沿仿真

Fig. 2 Time-margin simulation of high-voltage side oscillation wave

由仿真可知开关的暂态特性对振荡波有重要的影响, 而同时输入暂态激励电压幅值的提高, 对于电力电子开关耐压性能也有较高的要求。高压

直流信号切除的那一瞬间可能会产生开关引起的暂态过电压干扰,其主要原因就是开关间隙电弧产生的一种电快速脉冲群现象^[1]。文中做实验采用的是220 kV/160 MVA变压器,其自身的绝缘等级是远大于输入暂态激励等级(10~30 kV),且所采用的电力电子开关内部使用绝缘油作为介质,对于开关装置而言难以产生暂态过电压干扰。

1.3 现场振荡波测试及处理

为了验证振荡波产生的机理,文中在变压器厂进行了振荡波的产生及测试。试验现场见图3,在输入端,采用了一个高压直流发生器,最大幅值可达到110 kV,一个高耐压可控电力电子开关,两者构成了高压暂态激励源。在高压直流发生器与开关之间串联限流电阻,以预防开关接地时,巨大的电流将开关烧坏。从变压器的高压侧中性点输入直流脉冲,在变压器的高、中、低压侧套管的末屏电容处引出导线,接一个分压电容并接地。利用示波器在分压电容处测量输出的电压波形,获得的振荡波见图4。

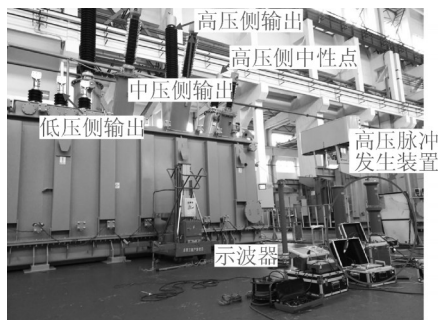


图3 现场试验图

Fig. 3 Field test diagram

试验测量了10 kV, 30 kV暂态电压等级下的振荡波。从图4可以观察在不同幅值激励下的振荡波幅值、振荡频率都有明显的区别。在同一幅值下的A、B、C三相振荡波振荡频率没有明显差异,幅值接近。对比分析不同的输出侧下的自激振荡,高压侧的振荡波有较好的平滑性,以及衰减规律性,三相振荡波形整体相似度很高。在中压侧、低压侧绕组,没有直接输入高压暂态激励,而是通过高压侧和中、低压侧之间的耦合,获得振荡信号。耦合的过程中,暂态激励信号频率较高,而常规变压器铁心在超过1 kHz时,其导磁能力就会急剧下降,且在耦合过程中,因此通过耦合产生的中、低压侧响应信号幅值相对较小;相对于高压侧信号直接在绕组上传播,通过电磁耦合的方式,更易耦合进现场试验干扰噪声,输出的振荡波毛刺及噪声相对较多,可以通过后续数据去噪处理进行分析;而由于变压器绕组耦合分布电容、电感具有一定的差异性,振

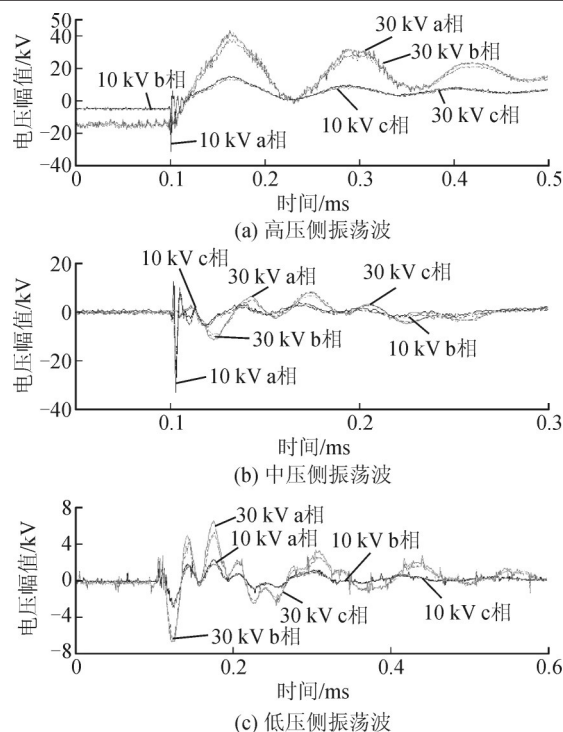


图4 实测振荡波

Fig. 4 Measured oscillatory waves

荡波会产生一定畸变,其谐振点也会相对增多。为了探究不同激励幅值,不同相下以及不同输出侧下的振荡波细节以及规律性,并用于绕组状态分析可行性,需要对振荡波进行有效的提取分析。文中通过基于连续小波下的时频分析,对比三相振荡波的时频图的矩阵相似度,分析其在健康绕组时的时频特性,作为绕组变形检测的基准。应用时频分析同时考虑了振荡波的时域和频域特性,解决了暂态信号在时域内并不能刻画其自身特性。

从图4中看到,变压器振荡波在高压侧输出时噪声较小,中、低压侧输出噪声相对较多,为有效分析实测数据,去除实测波形中突变的毛刺和其余噪声,减小噪声对研究振荡波的干扰,需要对现场数据进行去噪处理。对信号去噪有多种方法,常用的有快速傅里叶变换以及小波变换^[15-16]。经过大量的仿真研究,文中对比了快速傅里叶变换、小波变换去噪的效果,经对比发现利用小波变换的去噪方法要优于快速傅里叶变换。见图5,FFT去噪后的波形依旧有少量毛刺,在主要谐振点附近存在一些误差谐振点,曲线光滑度不高。用小波变换去噪后的信号,毛刺相对减少,突变量几乎全部消除,曲线平滑度更好,更加有利于分析波形的特征值。在对仿真信号进行降噪处理的过程中,预设含噪信号的信噪比为30 dB,采样点数为2 000个点。

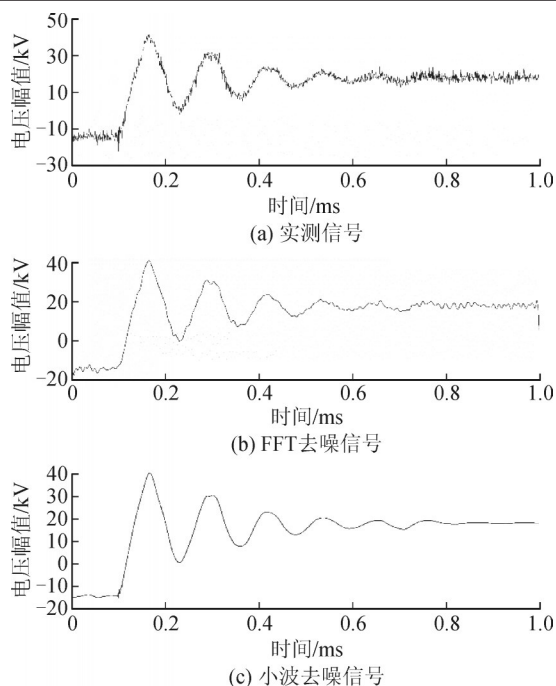


图5 振荡波去噪

Fig. 5 Oscillation wave denoising

2 振荡波时频信号的获取及分析

在上述振荡波去噪后,为了能够直观的对自激振荡信号做出评估,需要获取相应特征参量。时域波形较为直观,但其为衰减信号,包含多个频率成分,其波形简单,包含的信息较少,因此文中综合考虑了频域、时域和时频域分析方法的优劣,采用时频分析方法获取振荡波的特征参量。振荡波是一种非线性非平稳信号,为了能够准确的获得振荡波的频率和能量的时变特性,采用连续小波变换对振荡波时频特性分析^[13]。

2.1 连续小波变换基本原理

小波变换提出了变换的时间窗,当需要精确的低频信息时,采用长的时间窗,当需要精确的高频信息时,采用短的时间窗。小波变换用的不是时间—频率域,而是时间—尺度域^[17-18]。在连续小波变换中能够就信号的时域和频域分辨率进行独立优化,通过自由伸缩的时频盒,满足对不同域的分辨率需求,与传统的傅里叶变换以及短时傅里叶变换相比,对处理非平稳信号有独特的优势^[19-24]。

设 $\psi(t) \in L^2(R)$,其傅里叶变换为 $\psi(w)$,当 $\psi(w)$ 满足下列条件(完全重构条件或恒等分辨率条件)

$$C_\psi = \int_R \frac{|\psi(w)|}{|w|} dw < \infty \quad (1)$$

此时称 $\psi(t)$ 为一个基本小波。将 $\psi(t)$ 经伸缩和平

移后得

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R; a \neq 0 \quad (2)$$

式(2)中: a 为伸缩因子; b 为平移因子。

在任意 $L^2(R)$ 空间中的函数 $f(t)$ 在小波基下展开,称这种展开为函数 $f(t)$ 的连续小波变换(CWT),其表达式为

$$W_f(a,b) \leq f \psi_{a,b} \geq |a|^{-1/2} \int_R f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

其重构公式(逆变换)为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a,b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (4)$$

由于基小波 $\psi(t)$ 生成的小波 $\psi_{a,b}(t)$ 在小波变换中对被分析的信号起着观测窗的作用,所以 $Y(t)$ 还应该满足一般的函数的约束条件^[25]

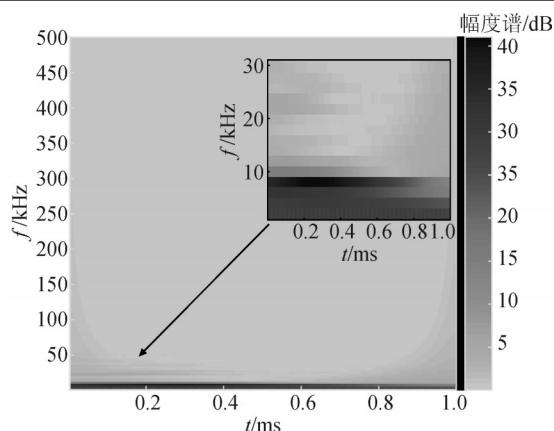
$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)| dt < \infty \quad (5)$$

2.2 振荡波的时频分析

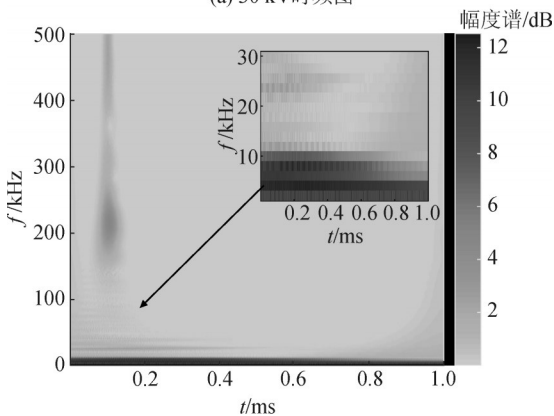
当应用小波变换进行信号处理时,应用不同的小波基对同一信号处理所获结果可能差异较大,因此小波基的选择在小波变换前期参数设定中尤为重要。文中研究的振荡波是高压脉冲下产生的一种暂态信号,在处理电力暂态信号检测和特征参数提取时,应考虑具有一定消失矩的小波。在提取频率范围较宽的暂态信号和抑制低频载波的混入,因此在检测暂态信号,应选择中心频高的小波基^[18]。考虑到 Morlet 小波具有适中的中心频率以及窗宽,文中选用 Morlet 小波基用于变压器绕组振荡波时频分析。

将去噪后的不同幅值下高压侧振荡波信号利用连续小波变换进行时频特性分析。见图6。高压侧输出振荡波时频图,不同幅值下的幅度谱主要分布均匀在低频部分(0~0.5 kHz),而在高频段部分幅度主要集中在时间域的前端和后端且幅度较小,在10 kV的时频图左侧,高频段有明显的亮点,表明在高频段有高密度能量分布,强于30 kV下的高端频段能量密度。这样对应了幅值为10 kV时,时域响应信号在左侧出现剧烈的幅值变化。

中压侧的时频图见图7。不同幅值下低频段幅度谱分布在整個时间段,但是30 kV下的时频图在低频段(20~40 kHz)幅度明显要大于10 kV的时频图。在高频段,幅度谱主要分布在时域前端,且10 kV下的幅度明显大于同一位置的30 kV下的幅度。



(a) 30 kV时频图



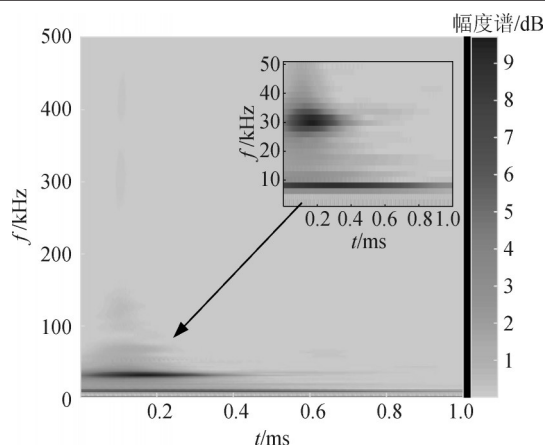
(b) 10 kV时频图

图6 高压侧振荡波时频图

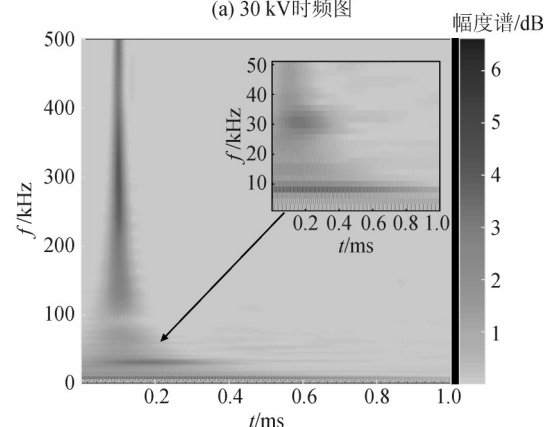
Fig. 6 Time-frequency diagram of high-voltage side oscillation wave

低压侧振荡波时频图见图8。图8中,在低频段(0~10 kHz)不同幅值下的幅度谱分布相似,能量相似,且分布在整个时间段。在频率为(20~40 kHz)内,幅度值较大,但是幅度谱只分布在时间轴的前端。这刚好和低压侧的时域信号相对应,时间轴的前部分幅值振荡剧烈。在高频段,10 kV下的时频图幅度谱分布比30 kV大(特别是在时间轴的前端)。

通过上述分析,可以看到不同的激励幅值以及不同绕组下的时频图,并直观地表达出振荡波的时频特性。无论是高压侧、中压侧、还是低压侧,振荡波在整个时域中都有能量的分布,而在频域中,高频段的能量分布几乎没有,能量主要集中在50 kHz以下。对比图4不同幅值下时域图的末端,可知时频图不仅在振荡波的初始阶段直观的刻画了幅度的差异性,而且在衰减到一定程度后依然可以准确的表达出幅度的差异性。对比不同侧绕组时域图,时频图通过振荡波幅度能量的分布刻画了不同侧下振荡波的关联性 & 振荡波的重复性。为了能够更加直观的表达出上述时频图的差异性和重复性,文中提出了以矩阵相似度^[21-26]为时频图的特征参量,量化了时频图的差异性和重复性。



(a) 30 kV时频图



(b) 10 kV时频图

图7 中压侧振荡波时频图

Fig. 7 Medium voltage side oscillatory wave]time-frequency diagram

3 讨论分析

振荡波信号经CWT小波变换获得时频图,可以将其视作一个模时频矩阵,在不同的时间和频率下表示一个信号模值。为了能够量化不同相和不同幅值下时频图的差异,文中提出了一种矩阵相似度的方法分析振荡波的时频特性。矩阵相似程度是一种信号的模值矩阵作为模版,来分析其他矩阵和模版之间的差异。设 $S(m,n)$ 为模版自激振荡的信号矩阵, $T(m,n)$ 是比对信号矩阵,两者之间的元素相似度可以用式(6)表示

$$D = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S(m,n) - T(m,n)] \quad (6)$$

式(6)中, M, N 分别表示信号时频图中的频率和时间参数,将式(6)展开有

$$D = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S(m,n)]^2 - 2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S(m,n)T(m,n) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T(m,n)]^2 \quad (7)$$

式(7)中:第1、3项表示两个矩阵各元素的平方和;第2项表示两个矩阵的互相关度,当选取的对比

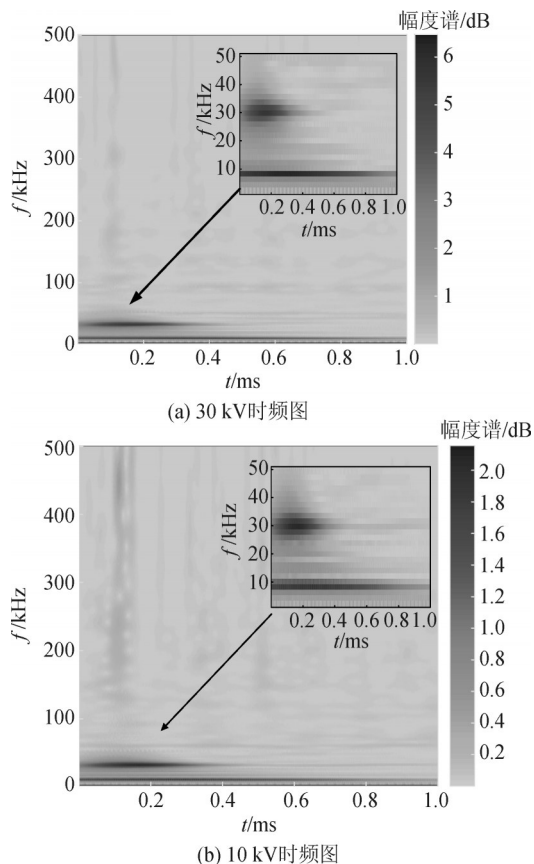


图8 低压侧振荡波时频图

Fig. 8 Time-frequency diagram of low-voltage side oscillations

自激振荡信号不一致,互相关度也有差异,当两个矩阵的数值元素相似时,则 D 的值相应也较大。对式(7)做归一化处理得到

$$R = \frac{D = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S(m,n)T(m,n)]}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S(m,n)]^2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T(m,n)]^2}} \quad (8)$$

式(8)中, $R \leq 1$,当 R 接近1时,表示两个矩阵相似度较高,当 R 接近0时,表示两个矩阵相似度低^[27-28]。利用矩阵相似度分析不同相不同幅值下的振荡波的时频特性,从而识别变压器绕组自激振荡的差异性。变压器相间绕组振荡波的关联程度见表1-3。

表1 30 kV下同侧两相间矩阵相似度

Table 1 Similarity of matrix between two phases on the same side under 30 kV

输出相	矩阵相似度		
	高压侧	中压侧	低压侧
A/B	0.998 3	0.985 1	0.991 7
A/C	0.998 5	0.989 1	0.992 3
B/C	0.998 7	0.991 7	0.996 1

从表1、2可以看出,在不同幅值下的变压器A、B、C相绕组振荡波时频图相似度都接近1表明三相

表2 10 kV下同侧两相间矩阵相似度

Table 2 Similarity of matrix between two phases of the same side under 10 kV

输出相	矩阵相似度		
	高压侧	中压侧	低压侧
A/B	0.991 2	0.935 7	0.986 0
A/C	0.991 4	0.937 0	0.986 3
B/C	0.994 5	0.967 1	0.993 6

表3 同侧同相下不同幅值矩阵相似度

Table 3 Similarity of matrix with different amplitudes in the same phase on the same side

输出相	矩阵相似度		
	高压侧	中压侧	低压侧
A	0.927 8	0.586 3	0.947 4
B	0.943 6	0.665 3	0.939 8
C	0.935 3	0.633 1	0.945 3

振荡波相似度很高,但是从其相似度的差异也可以获得振荡波的规律性。从表1、2得知,10 kV以及30 kV下的A/B、A/C、B/C相间的相似度是成梯度增加的,这种重复性可以作为振荡波的一个特征来作为以后的研究绕组变形的一种评估依据。对比10 kV、30 kV下同一输出侧以及同两相的时频图相似度,可以得知30 kV下的两不同相间的相似度明显大于10 kV下的相似度。表明电压等级的提高,三相振荡波的时频特性相似度更高,重复性更好,这也符合文中在一开始提出来的激励电压等级的提高有利于判断变压器三相绕组状态。

表3反映的是在不同幅值下同一相振荡波时频特性的相似度。从表3可以看出高压侧和低压侧同相间相似度也接近1,但是并没有同一幅值下的两相相似度高。这是由于不同激励幅值输入下,振荡波幅值不一致在同一矩阵点处能量密度值有差异,但是在整个振荡周期里振荡趋势是一致的因此在时频图中能量分布是相似的。表3中压侧的相似度最低,这也符合图7的10 kV、30 kV的时频图对比,在时间轴的前端部分可以看出能量密度分布并不一致,且能量大小也有较大差异,因此在利用矩阵相似度作为一个特征参量分析时,将这种差异性放大。

4 结论

文中研究了高压直流作用通过开关切换产生的暂态激励下变压器绕组振荡波产生机理,并通过实测的振荡波去噪处理以及连续小波变换获得时频图,在时频域内对振荡波提取分析。所得主要结论如下:

1)文中提出了一种高压直流作用通过开关切换产生的暂态激励下振荡波的获取及分析方法,并通过现场试验对该方法的可行性及可重复性进行了论证,该方法可一次性测试所有端口的振荡波信号,检测效率高,能够一定程度反映绕组的结构特征。

2)通过对实测信号去噪和连续小波变换,获得振荡波时频图,经分析得:高压侧振荡波在低频段能量分布均匀,在高频段的振荡波能量分布稍有差异,可能是由于低压干扰影响较大所致。中压侧高、低压幅值输入下振荡波能量分布差异性较大,可能是由于高压幅值暂态下高压侧向中压侧耦合时,中压侧出现了冲击干扰信号。低压侧时频图能量分布极其均匀,不同幅值下重复性高。

3)提出了矩阵相似度量振荡波时频特性差异的分析方法,并通过分析不同相不同激励幅值下绕组振荡波信号时频特性,获得了相间振荡波的规律性。同一幅值下振荡波的不同相间能量分布重复性很好,且A/B、A/C、B/C相间的矩阵相似度成梯度增加。同相间、不同幅值下的高、低压侧矩阵相似度相对降低,但也达到了0.9以上,表明能量分布一致。中压侧的相似度最低,表明高压输入时中压侧所受干扰最强。故振荡波可作为变压器绕组状态检测的一种新的方法。

参考文献:

- [1] 李 朋,张保会,郝治国,等.基于电气量特征的变压器绕组变形监测技术现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2006,26(2):28-32.
LI Peng, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. The present situation and prospect of transformer winding deformation monitoring technology based on electrical quantity characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(2):28-32.
- [2] ABU-SIADA A, HASHEMNIA N, ISLAM S M, et al. Under-standing power transformer frequency response analysis signatures[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(3): 48-56.
- [3] 赵志刚,李光范,李金忠,等.基于有限元法的大型电力变压器抗短路能力分析[J]. 高电压技术, 2014,40(10): 3214-3220.
ZHAO Zhigang, LI Guanfan, LI Jinzhong, et al. Analyzing the short-circuit withstanding ability of large power transformer based the FEM method[J]. High Voltage Engineering, 2014,40(10): 3214-3220.
- [4] 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 Yong, YANG Fan, ZHANG Fan, et al. Study on sweep frequency impedance to detect winding deformation within power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (17):4505-4516.
- [5] 高佳平,沈 煜,陈 鹏,等.用伪随机M序列激励的绕组变形试验方法[J]. 中国电机工程学报, 2016,36(20): 5678-5687.
GAO Jiaping, SHEN Yu, CHEN Peng, et al. A test method of winding deformation excited by pseudorandom M-sequences[J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(20):5678-5687.
- [6] ZHAO Zhongyong, TAN Chao, YAO Chenguo, et al. Improved method to obtain the online impulse frequency response signature of a power transformer by multi scale complex CWT[J]. IEEE Open Access Journal, 2018,6(3):48934-48945.
- [7] 张 坤,王丰华,廖天明,等.应用复小波变换检测突发短路时的电力变压器绕组状态[J]. 电工技术学报, 2014,29 (8):327-332.
ZHANG Kun, WANG Fenghua, LIAO Tianming, et al. Detection of transformer winding deformation under sudden short-circuit impact based on complex wavelet algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29 (8):327-332.
- [8] GÓMEZ-LUNA E, MAYOR G A, GUERRA J P, et al. Application of wavelet transform to obtain the frequency response of a transformer from transient signals—Part 1: Theoretical analysis[J]. IEEE Trans. Power Del., 2013, 28(3): 1709-1714.
- [9] WANG M, VANDERMAAR A J, SRIVASTAVA K D. Improved detection of power transformer winding movement by extending the FRA high frequency range[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3):1930-1938.
- [10] LUNA E G, MAYOR G A, GUERRA J P. Application of wavelet transform to obtain the frequency response of a transformer from transient signals—Part II: Practical assessment and validation[J]. IEEE Trans. Power Del., 2014, 29(5):2231-2238.
- [11] 姚陈果,胡 迪,赵仲勇,等.基于有限元法的电力变压器绕组集总参数电路仿真建模[J]. 高电压技术, 2018,44 (11):3517-3523.
YAO Chenguo, HU Di, ZHAO Zhongyong, et al. Simulation modeling of lumped parameter circuit for power transformer winding based on the finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2018,44(11):3517-3525.
- [12] 闫 格,吴细秀,田 芸,等.开关电弧放电电磁暂态干扰研究综述[J]. 高压电器, 2014,50(2):119-129.
YAN Ge, WU Xixiu, TIAN Yun, et al. Review of electromagnetic transient interference in switching arc discharge [J]. High Voltage Apparatus, 2014,50(2): 119-129.
- [13] 江俊飞,周利军,李 威,等.自耦变压器分裂式绕组 FRA 建模与故障绕组识别[J]. 中国电机工程学报, 2017, 29(00):1-8.

- JIANG Junfei, ZHOU Lijun, LI Wei, et al. FRA modeling and fault winding identification of autotransformer with split windings[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 29(00): 1-8.
- [14] 梁贵书, 张喜乐, 王晓晖, 等. 特快速暂态过电压下变压器绕组高频电路模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 144-148.
- LIANG Guishu, ZHANG Xile, WANG Xiaohui, et al. Research on high-frequency circuit model of transformer windings in VFTO[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 144-148.
- [15] 鲁 非, 金 雷, 刘思维, 等. 基于有限元分析的电力变压器绕组故障诊断[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 123-130
- LU Fei, JIN Lei, LIU Siwei, et al. Winding fault diagnosis of power transformer based on finite element analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 123-130.
- [16] 唐友福, 刘树林, 刘颖慧, 等. 基于非线性复杂测度的往复压缩机故障诊断[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 102-107.
- TANG Youfu, LIU Shulin, LIU Yinghui, et al. Fault diagnosis based on nonlinear complexity measure for reciprocating compressor[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 102-107.
- [17] ABEYWICKRAMA N, SERDYUK Y V, GUBANSKI S M. High-frequency modeling of power transformers for use in frequency response analysis (FRA)[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2042-2049.
- [18] 何正友, 钱清泉. 电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 45-48.
- HE Zhengyou, QIAN Qingquan. Selection principle of Wavelet base in power system transient signal analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 45-48.
- [19] 钱国超, 赵仲勇, 邹德旭, 等. 基于连续小波变换的变压器绕组变形故障类型检测[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 2016-2023.
- QIAN Guochao, ZHAO Zhongyong, ZOU Dexu, et al. Detection of transformer winding deformation fault types based on continuous wavelet transform[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6): 2016-2023.
- [20] 张 菀, 贾民平, 朱 琳. 一种自适应 Morlet 小波滤波方法及其在滚动轴承早期故障特征提取中的应用[J]. 东南大学学报, 2016, 46(3): 457-463.
- ZHANG Wan, JIA Minping, ZHU Lin. An adaptive Morlet wavelet filter method and its application in detecting early fault feature of ball bearings[J]. Journal of Southwest University, 2016, 46(3): 457-463.
- [21] 刘守亮, 肖先勇, 杨洪耕. 基于 S 变换模时频矩阵相似度的短时电能质量扰动分类[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 67-71.
- LIU Shouliang, XIAO Xianyong, YANG Honggeng. Classification of short duration power quality disturbance based on module time-frequency matrixes similarity by S-transform[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 67-71.
- [22] 郭谋发, 刘世丹, 杨耿杰. 利用时频谱相似度识别的配电线路接地选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 183-190.
- GUO Moufa, LIU Shidan, YANG Gengjie. A Novel approach to detect fault lines in distribution network using similarity recognition based on time-frequency spectrum[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 183-190.
- [23] 张钟睿, 金 能, 林湘宁, 等. 基于波型相似度比较的可控电抗器快速纵联保护[J]. 广东电力, 2019, 32(5): 118-126.
- ZHANG Zhongrui, JIN Neng, LIN Xiangning, et al. Fast pilot protection of controllable reactor based on comparison of similarity of waveform pattern[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(5): 118-126.
- [24] 王继生, 郭 锐, 刘方方, 等. 基于信息相似度的配电网故障培训评价方法[J]. 智慧电力, 2018, 46(6): 95-100.
- WANG Jisheng, GUO Rui, LIU Fangfang, et al. Distribution Network Fault Training Evaluation Method Based on Information Similarity[J]. Smart Power, 2018, 46(6): 95-100.
- [25] 尤向阳, 葛笑寒, 吴 萍. 基于零序电流波形相似度的接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 125-130.
- YOU Xiangyang, GE Xiaohan, WU Ping. Grounding fault location method based on waveform similarity of zero-sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 125-130.
- [26] 张 伟. 基于隔离信息相似度的配电网故障仿真培训评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 158-164.
- ZHANG Wei. A distribution network fault training evaluation method based on isolation information matrix similarity[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 158-164.
- [27] 高敬贝, 周毓颖, 吴季浩, 等. 基于时频相似度的 GIS 多源局部放电信号分离方法[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 245-250.
- GAO Jingbei, ZHOU Yuying, WU Jihao, et al. Separation method of GIS multi-source partial discharge signal based on time-frequency similarity[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 245-250.
- [28] 李宏坤, 张学峰, 徐福健, 等. 基于时频分析的欠定信号盲分离与微弱特征提取[J]. 机械工程学报, 2014, 50(18): 14-22.
- LI Hongkun, ZHANG Xuefeng, XU Fujian, et al. Investigation on blind source separation for under-determined mixtures based on time-frequency analysis and weak feature extraction[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(18): 14-22.

刘红文(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事电力设备方面的研究工作(E-mail: zhoxiangt@163.com)。