基于优化TQWT和LE的变压器绕组状态检测

杨 贤¹,周 丹¹,王 朋²,林春耀¹,王丰华³,马佳琪³,盛戈皞³
(1. 广东电网公司有限责任公司电力科学研究院,广东 广州 510080;
2. 南方电网数字电网研究院有限公司,广东 广州 510623;
3. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200240)

摘要:为实现短路冲击下变压器绕组状态的准确检测,提出了优化可调品质因子小波变换(TQWT)和拉普拉 斯特征映射(LE)相结合的方法对变压器短路冲击下的振动信号进行分析。提出归一化奇异值熵作为TQWT 分解过程中关键特征参数的选取准则,然后对TQWT分解后的振动信号子带能量序列进行LE,用以获取表 征绕组状态的振动信号敏感特征。对某110 kV变压器短路冲击试验下振动信号的计算结果表明:优化 TQWT算法可有效提高短路暂态振动信号分解的准确性,经LE获取的振动信号敏感特征可更加清晰地反映 变压器绕组机械状态的劣化过程。当特征向量距离的变化超过3倍时,需要重点关注变压器绕组状态,从而 为变压器绕组状态检修策略的制定提供依据。

0 引言

作为电力系统中核心且昂贵的设备之一,变压器的安全可靠运行一直是电力行业运维人员的关注 热点,尤其是随着运行年限的增长及变压器出口短路故障的存在,松动、变形等变压器绕组故障不可避免^[1]。据统计,由绕组损坏引发的变压器事故约占 其总事故的30%,且居高不下^[23],迫切需要一种能够及时有效地检测变压器绕组运行状态的方法,提 升变压器的精益运维水平,助推碳达峰、碳中和。

运行中的变压器箱壁振动信号主要源于绕组振 动和铁芯振动,且与其机械状态密切相关,故从变压 器绕组机械动力学特性出发的振动分析法已成为绕 组状态监测领域的关注热点^[46]。尤其是在变压器 遭受短路冲击时,短路电动力所引发的绕组振动成 为其箱壁振动的主要来源,蕴含着丰富的绕组状态 信息。相应地,如何从遭受短路冲击的变压器箱壁 振动信号中挖掘表征绕组状态的敏感特征尤为关 键。考虑到变压器短路暂态振动信号的强时变和非 线性特征,文献[7]使用复数小波变换法分析了变压 器短路暂态振动信号的时频特征,定义了短路冲击 总能量对变压器绕组的机械稳定性进行分析;文献 [8]提出了自适应筛选经验模态分解算法对变压器 短路暂态振动信号进行分解,据此基于振动信号的 Hilbert能量谱定义了中心频率分布系数检测变压器

收稿日期:2022-07-27;修回日期:2022-11-15

在线出版日期:2023-04-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFB1709701) Project supported by the National Key R&D Program of China(2020YFB1709701) 绕组状态;文献[9]依据变压器短路暂态振动信号的 特征向量分布,基于优化*K*-means聚类算法提取了 振动信号特征向量的簇中心,据此根据簇中心向量 的模值和角度对变压器绕组状态进行判别;文献 [10-11]依托某35kV变压器短路暂态振动信号小波 包分解结果的能量分布,提出了基于相关向量机的 变压器绕组故障诊断模型,并结合绕组短路电抗实 现了松散绕组和形变绕组的准确监测。但是,这些 分析方法不可避免地会存在诸如能量泄露、模态混 叠、自适应性差等固有缺陷,在对非线性和强时变信 号中潜在信息的挖掘和敏感特征的提取上表现乏 力,仍需进一步研究。

由 Selesnick 提出的可调品质因子小波变换 (tunable Q-factor wavelet transform, TQWT)是一种 新型的离散小波变换方法^[12],其通过选取与待分析 信号最为匹配的小波基函数,在分析诸如变压器短 路暂态振动信号此类具有不同振荡特性的信号时有 更强的自适应性。故本文尝试使用TQWT算法获取 最优的变压器短路暂态振动信号分解结果,然后使 用拉普拉斯特征映射(Laplacian eigenmaps, LE)方 法寻求表征变压器绕组状态的敏感特征并定义评判 指标,从而提高变压器绕组状态检测的准确性。对 某 110 kV 变压器短路冲击试验下的暂态振动信号 进行分析,分析结果验证了本文所提方法的有效性。

1 TQWT分解及其优化

1.1 TQWT分解方法

作为一种品质因子可调控的过完备离散小波变 换方法,TQWT是根据信号的振荡特性选取小波基 进行匹配,完成信号分解并保留其重要特征。具体 而言,TQWT是根据信号的品质因数Q设计多层变 尺度高通低通滤波器,在频域上实现小波分解与重 构。其中,品质因数Q是评价信号能量聚集度的技 术指标,可表示为:

$$Q = f_0 / B_{\rm W} \tag{1}$$

式中: f_0 为信号频域极值对应的中心频率; B_w 为3 dB 频带宽度。

在对变压器短路暂态振动信号进行 TQWT 分解 时,可依据品质因子设计变尺度小波滤波器组,获得 表征短路冲击下变压器振动信号不同振荡特性的子 序列,进而提取特征参数进行分析,具体步骤如下。

1) 确定参数。

根据待分析信号的频谱与长度确定TQWT分解 时滤波器组的尺度因子、最大分解层数为^[13]:

$$\beta = 2/(Q+1) \tag{2}$$

$$\alpha = 1 - \beta/r \tag{3}$$

$$J_{\max} = \left[\ln \left(\beta N/8 \right) / \ln \left(1/\alpha \right) \right] \tag{4}$$

式中: α 、 β 为滤波器的尺度因子;r为冗余度; J_{max} 为最大分解层数;N为信号长度;[\cdot]表示取整。

为使 TQWT 严格过采样,尺度因子 α 与 β 应满 足 α + β >1^[13]。

2)设计变尺度滤波器。

结合 Daubechies 频响函数 $\theta(\omega)$ 设计多层小波 变尺度滤波器组,其中,第 j 层滤波器组中的低品质 因子滤波器的频响函数 $H_0^{(j)}(\omega)$ 与高品质因子滤波 器的频响函数 $H_1^{(j)}(\omega)$ 可分别表示为:

$$H_{0}^{(j)}(\omega) = \begin{cases} 1 & 0 \le |\omega| \le (1-\beta)\alpha^{j-1}\pi \\ \prod_{m=0}^{j-1} \theta \left(\frac{\omega/\alpha^{m} + (\beta-1)\pi}{\alpha+\beta-1} \right) & (5) \\ (1-\beta)\alpha^{j-1}\pi < |\omega| \le \alpha^{j}\pi \\ 0 & \alpha^{j}\pi \le |\omega| \le \pi \end{cases}$$

$$H_{1}^{(j)}(\omega) = \begin{cases} 0 & 0 \le |\omega| \le (1-\beta)\alpha^{j}\pi \\ \theta \left(\frac{\alpha\pi - \omega/\alpha^{j-1}}{\alpha+\beta-1} \right) H_{0}^{j-1}(\omega) & (6) \\ (1-\beta)\alpha^{j-1}\pi < |\omega| \le \alpha^{j}\pi \\ 1 & \alpha^{j}\pi \le |\omega| \le \pi \end{cases}$$

式中: $j=1, 2, \dots, J_{max}; \omega = 2\pi f f_s, f \pi f_s 分别为信号 频率和采样频率。$

3)分解信号获得子带信号矩阵。

使用待分析信号的频谱作为上述多层变尺度小 波滤波器组的输入信号,记第*j*层滤波器组对应的 高、低品质因子分量分别为 $w^{(j)}(\omega)$ 、 $v^{(j)}(\omega)$,其由第 *j*-1层的输入信号分解获取, $v^{(j)}(\omega)$ 将作为下层滤波 器的输入量。对 $w^{(j)}(\omega)$ 进行傅里叶反变换得到其 对应的时域分量 $w^{(j)}(t)$,将其作为TQWT的第*j*层小 波分解系数。将1—*J*层对应的小波分解系数存入 分解系数矩阵 W的相应行,获得 J 层分解系数矩阵 W,第 J+1 层系数为分解余量。具体过程如图 1 所示。图中: $X(\omega)$ 为输入信号的频谱;分解层数 $J \leq J_{max}$ 。



图 1 使用 TQWT 变尺度滤波器组分解振动信号的过程 Fig.1 Decomposition process of vibration signals using TQWT variable-scale filter bank

显然,使用变尺度滤波器分解出的各层子序列 信号具有不同的振荡能量特性,能够对原信号进行 多尺度表征。

4)子序列特征量提取。

计算经TQWT分解获取的变压器短路暂态振动 信号的所有J层子序列能量作为待分析信号的时频 域特征量序列,第j层子序列能量E_i的计算公式为:

$$E_{j} = \sum (w^{(j)}(t))^{2}$$
(7)

1.2 特征参数的选取

由前述过程可见,品质因数Q与冗余度r是 TOWT分解中实现信号精细化分解的关键,其合理 取值可以有效解决传统小波分解选取的固定小波基 与振动信号匹配不精准的问题。已有研究中,0与r 大多需要根据经验预先设定[14],即认为3~8之间的 高Q值匹配振荡剧烈的小波,r应严格大于1,且推荐 r≥3。而不合理的0和r取值会导致信号分解不完 全并集中于分解余量,使得生成的特征量序列无法 有效精细化表征原信号的能量特性。因为小波能量 的分布反映了小波基函数对所分析的信号的表示情 况,且TQWT的小波能量依赖尺度选择,即其关键参 数(Q,r)的合理选择,当小波能量的信息熵达到最小 值时,意味着TOWT使用较少的子带实现了对待分 析信号的有效分解。此外,随着其关键参数(Q,r)的 调控,TOWT分解所得的小波系数序列长度并不固 定,故本文提出将归一化奇异值熵作为TQWT的关 键参数(Q,r)的选取依据,其对应的计算步骤如下。

1)设定参数(Q,r)的搜索区间。

根据变压器暂态振动信号设定搜索区间 $\{(Q,r) | Q \in [Q_1: d_q: Q_2], r \in [r_1: d_i: r_2] \}$,其中, (Q_1, r_1) 和 (Q_2, r_2) 分别为搜索区间的下限和上限; d_q 和 d_r 分别 为参数(Q, r)的搜索步长。

2)计算TQWT小波分解系数。

对任一参数(Q,r),依据式(2)—(4)计算分解层数与尺度因子,据此对变压器短路暂态振动信号进行TQWT分解。此处,记第j层的小波分解系数

为 g_j , $j=1, 2, \dots, J_{\max}+1_{\circ}$

190

3)获取TQWT各层小波分解系数矩阵。

对每层小波分解系数,选取第 J_{max} 层对应的小 波系数长度为帧长L,对各层小波系数进行分帧处 理,构造各层小波系数矩阵,其中,第j层小波系数 矩阵的行数为L,列数为第j层小波系数的长度除 以帧长L后取整。若有未填满部分,则进行补0。

4)构造变压器短路暂态振动信号小波系数 矩阵。

将所有各层小波系数矩阵依次按列进行排布, 组成短路暂态振动信号小波系数矩阵。对其进行奇 异值分解,计算所有c个奇异值 $\sigma_1 - \sigma_c$ 的奇异值熵, 并按照式(8)进行归一化处理。

$$S_{\rm nor} = S/\ln c = -\sum_{i=1}^{c} s_i \ln s_i / \ln c$$
 (8)

$$s_i = \sigma_i / \sum_{i'=1}^c \sigma_{i'} \tag{9}$$

式中:Snar和S分别为归一化奇异谱熵和奇异值熵。

5)确定最优关键参数(Q,r)。

选取归一化奇异值熵最小值对应的(Q,r)作为 TQWT分解时的最优关键参数组合,依据TQWT的 分解过程对变压器短路暂态振动信号进行分析。

2 LE**方法**

作为一种非线性降维方法,LE方法能充分挖掘 非线性高维数据的本质结构,并可直接从原始数据 构建的高维流形中找到有效的低维表征,实现高维 流形的最优低维嵌入^[15-16]。对给定的*k*个样本*x*₁ *x_k*,即对变压器各次短路冲击下振动信号的子序列 能量而言,其LE的计算过程如下。

1)构建加权图。

将每个样本视为1个节点,构造一个具有 k 个节 点的加权图。具体构造方式为:当节点 i 在节点 j 的 m个最近邻节点中或节点 j 在节点 i 的 m 个最近邻节 点中时,节点 i 和节点 j 之间有边相连。

2)构造节点间的权值矩阵 W。

权值矩阵₩的任一元素w_{ij}可表示为:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & \bar{\tau} \le i \ \pi \bar{\tau} \le j \ \pi \bar{\tau} \le j \\ 0 & \bar{\tau} \le i \ \pi \bar{\tau} \le j \ \pi \bar{\tau} = \end{cases}$$
(10)

3)进行特征映射。

定义所构建的加权图的度矩阵D, D为一对角矩阵,其对角线上的值 $\sum_{j} w_{ij}$ 表示该点的连接数。

计算加权图的拉普拉斯矩阵L=D-W,然后求解 $L\varepsilon=\lambda D\varepsilon$,其中, $\lambda \pi \varepsilon$ 分别为矩阵L的特征值和矩阵 D的特征向量,高维数据的低维嵌入由 $\varepsilon_1 - \varepsilon_d$ 组成, d为维数。

依据上述LE方法对变压器短路暂态振动信号

进行分析时,可从变压器短路振动信号的TQWT优化分解结果中获取表征绕组状态的最敏感特征,从 而有效提高变压器绕组机械状态检测的准确性。

3 变压器短路冲击试验描述

试验对象为一台额定电压为110 kV的三绕组 变压器,分别对其三相绕组进行了多次不同短路电 流作用下的高对中和高对低短路冲击试验,其中,短 路电流的持续时间为0.25 s。同时,在各次短路冲击 试验后对变压器绕组的短路阻抗进行测试,若该试 验相绕组的短路阻抗超标,则认为发生了绕组变形, 停止试验。限于篇幅,本文主要对C相绕组高对中 多次突发短路试验下的振动信号进行分析,对应的 试验过程如表1所示。表中,I_s为试验变压器能承 受的最大短路电流,即在考虑系统短路容量的前提 下按照三相对地短路故障计算稳态短路电流后乘以 冲击系数得到。编号1-3的5次短路冲击试验在 同一时间段进行,编号4-6的6次短路冲击试验在 时隔1个月后进行。在试验变压器高对中突发短路 试验中,当外加130% I。第1次短路冲击试验后,发 现C相绕组的短路电抗超出国家标准,即高对低短 路阻抗由试验前的17.38%变为17.91%,变化率为 3.05%,判断试验变压器C相绕组发生了绕组变形。

表1 C相绕组高对中短路冲击试验结果

Table 1 High-voltage to medium-voltage short

circuit impact test results of phase-C winding

编号	短路冲击电流	试验次数	短路阻抗
1	$70\% I_{\rm sc}$	第1次	正常
2	$90\% I_{\rm sc}$	第2次	正常
3	$100 \% I_{sc}$	第2次	正常
4	$110\% I_{\rm sc}$	第2次	正常
5	$120 \% I_{sc}$	第3次	正常
6	130 % I _{sc}	第1次	超标

使用6台灵敏度为10 mV/g、量程为50g的振动加速度传感器对试验变压器各次短路冲击试验中的箱壁振动信号进行测试,振动加速度传感器的型号为美国PCB的352C33型,其在变压器箱壁上的放置位置主要根据变压器振动机理、箱壁机械结构及前期多台变压器的箱壁振动信号测试经验进行确定。具体而言,与试验变压器的三相绕组对应,分别在试验变压器高压侧与低压侧箱壁下方距离下箱沿约1/4油箱高度处进行放置,且注意避开变压器油箱壁上的加强筋,如附录A图A1所示。图中,编号 ①一③代表的振动加速度传感器分别对应试验变压器高压侧的三相绕组,编号④一⑥代表的振动加速度传感器分别对应试验变压器低压侧的三相绕组

图2为试验变压器C相绕组在施加不同短路电

流高对中短路冲击试验时的暂态振动信号时域波 形,对应试验变压器编号为⑥的振动加速度传感器。 图中:g为重力加速度。由图可见,短路冲击下的变 压器暂态振动信号形态与短路电流的作用机制及变 压器的复杂机械结构密切相关,呈现强时变和非线 性特征,其幅值随外加电流的增大而增大,持续时间 略长于短路电流的作用时间0.25 s。当短路电流消 失后,变压器暂态振动信号呈现振荡衰减。





4 结果分析

4.1 TQWT分解结果

以试验变压器 C 相绕组外加 110% *I*_{sc}第 1 次短路冲击时的暂态振动信号为例进行说明。

变压器短路暂态振动信号TQWT分解时的归一 化奇异值熵随关键参数(Q,r)的计算结果见附录A 图 A2。图中: 0 的搜索范围为 2~6; r 的搜索范围为 3~6;搜索步长为0.1。为进行对比,图中同时给出了 归一化小波熵随其关键参数(Q,r)的计算结果^[17]。 由图可见:归一化奇异值熵和归一化小波熵均随着 品质因数0与冗余度r的变化而改变,当0和r分别 为3.9和3.1时归一化奇异值熵为最小,即为该组变 压器短路暂态振动信号进行TQWT分解时的最优参 数,据此可计算出变压器短路暂态振动信号TOWT 的分解层数并对其进行 TQWT 分解, 获取子带序列 能量分布。而当归一化小波熵为最小值时,对应的 Q和r分别为7.7和3.4,显然,基于归一化小波熵选 取的参数(Q,r)均大于本文所提归一化奇异值熵的 计算结果。由参数Q与信号振荡的关系易知,其值 越大,意味着小波基的振荡周期越长,会导致小波基 函数不能匹配待分析信号的振动特性而产生奇异信 号。同时在所分析的信号频域范围一定的情况下, 参数(Q,r)的取值越大,则需要更多的信号分量来覆 盖相同的频域分析范围,导致计算负担过重[18]。

类似地,可给出不同短路暂态振动信号进行 TQWT分解时参数(Q,r)的优选结果如表2所示,表 中同时给出了基于归一化小波熵的参数(Q,r)选取 结果。在确定了参数(Q,r)后,可根据式(4)计算 TQWT的最大分解层数。

表 2 不同短路暂态振动信号进行 TQWT 分解时的 参数优选结果

Table	2	Optimized	para	ameters	of	Q	and	r	for	TQWT
	dec	omposition	for	differer	nt v	ibr	ation	s	igna	ls

短路冲击 电流	试验 次数	(2	r		
		奇异 值熵	小波熵	奇异 值熵	小波熵	
90 % I _{sc}	第1次	3.1	6.4	3.1	3.2	
$110\%I_{ m sc}$	第1次	3.9	7.7	3.1	3.4	
$120\% I_{\rm sc}$	第1次	2.8	7.7	3.0	3.0	
$120\% I_{\rm sc}$	第3次	3.0	7.7	3.0	3.0	
$130\% I_{sc}$	第1次	3.0	7.9	3.1	3.2	

变压器短路暂态振动信号经TOWT分解后的子 带序列能量分布见附录A图A3。由图可见:经 TOWT分解后的暂态振动信号子带能量主要集中在 第14-25层之间,呈现不均匀分布,且在分解层数 达最大值后仍残余少部分子带能量;在外加120% I。 时第3次短路冲击试验后,暂态振动信号子带能量 分布变化明显,表现为第15-25层对应能量幅值的 改变,较好地体现了变压器绕组早期松动或变形的 存在及其累积效应,需要引起关注;在外加130% Isc 第1次短路冲击试验后,暂态振动信号子带能量在 第15—22 层之间的能量分布更加集中且幅值趋向 于接近均匀分布,且在第1-5层之间也出现了一定 幅值的能量,预示着变压器绕组变形或松动故障的 发生,这也与绕组短路电抗的测试结果较为吻合。 同时,不同短路电流作用下的变压器短路暂态振动 信号的子带序列能量分布及其最大值随分解层数呈 现小幅改变,这主要是由于对振动信号进行TOWT分 解时关键参数(Q,r)的取值差异所引起的,但亦对变 压器绕组状态的判别分析带来了影响,因此,本文进 一步基于 LE 方法对振动信号的子带序列能量分布 进行分析,以寻求表征变压器绕组状态的敏感特征。

相比较而言,使用归一化小波熵获取的参数 (Q,r)所得到的变压器暂态振动信号子带序列能量 分布主要集中在第38—55层之间,分析结果与高Q 值下的小波基作用机制一致。同时,当外加短路电 流增大时,对应的振动信号子带序列能量分布亦随 之变化,但部分暂态振动信号子带能量序列的主特 征子带(如110% I_{se})并不明显。此外,分解层数越 大,会导致冗余分量过多,且这些分量由于高Q值导 致的带宽太窄而无法囊括足够多的特征信息,对待 分析信号所包含的故障特征提取而言意义不大,要 求的计算资源也较大。显然,经本文所提归一化奇 异值熵得到的参数(Q,r)更加合理。

为进一步说明基于优化TOWT对变压器短路暂 态振动信号进行分解的准确性,本文同时给出了基 于小波包的变压器短路暂态振动信号分解结果如附 录A图A4所示。图中:小波基是在对比主流小波 基,如Harr小波、db小波系、bior小波系等的基础上 综合考虑计算速度和信号特征识别准确度,最终选 取db10小波^[19];横坐标的1个小波包数对应1个频 率区间,其大小为40 Hz,共展示了14个小波包的小 波包能量,总频率区间为0~560 Hz。由图可见,随着 短路冲击电流的增大,短路暂态振动信号的小波包 能量及其分布随之变化,表现为频谱分量的逐渐丰 富和主频带能量的增大。在外加130%L第1次短 路冲击试验后,振动信号的小波包分解结果在各个 频率区间对应的能量分布发生了明显变化。具体而 言,相比前10次短路暂态振动信号的小波包分解结 果,其在第3个小波包的能量有所递减,但第1、4、5、 8、12等多个小波包能量存在不同程度的增加,意味 着变压器绕组变形的发生,与变压器绕组短路阻 抗的测试结果吻合良好。但是,对于第3次施加 120% L。时的变压器短路暂态振动信号而言,其对应 的小波包分析结果无明显变化,无法较好地体现变 压器绕组变形的累积效应。为清晰起见,表3中同 时给出了优化TQWT与小波包分解变压器暂态振动 信号的结果对比。显然,经参数优化后的TQWT得 到的变压器短路暂态振动信号分解结果更加准确。

4.2 LE计算结果

对表1所示的试验变压器C相绕组高对中短路 冲击试验时测点6处的暂态振动信号进行分析,共 有11组暂态振动信号子带序列能量分布数据。为 进行对比,本文同时给出了LE映射和主成分分析 (principal component analysis, PCA)的计算结果^[20], 分别如附录A图A5和图A6所示,图A5中同时给出 了LE计算结果的三维显示及XY、XZ、YZ平面的映 射结果。图中,LE的低维嵌入维数为3。表4给出 了LE与PCA对暂态振动信号子带能量序列的分析 结果对比。由图 A5、A6、表4 可见:经 LE 处理后的 变压器短路暂态振动信号子带序列能量分布特征呈 离散点分布,其分布特性与各次短路冲击试验中外 加电流的大小较为一致,较为清晰地反映了绕组状 态随短路冲击电流的变化过程;其中,外加120% I。 短路电流第3次短路冲击试验和外加130% L。短路 电流第1次短路冲击试验时的振动信号特征分量的 分布明显偏离其他各次试验的分析结果,预示着变 压器绕组状态处于劣化边缘及绕组变形的发生;而 经PCA降维后的各次短路冲击试验对应的振动信 号特征量对短路冲击电流的变化及变压器绕组状态 的识别聚类效果一般,尤其在其特征向量的YZ平面 无法区分外加120% L.第3次短路冲击试验和外加 130% 1。第1次短路冲击试验下的情形,与实际情况 存在偏差,从而有效说明了本文所提变压器短路暂 态振动信号子带序列能量分布LE方法的有效性。

为进一步定量描述变压器暂态振动信号特征分量,定义变压器暂态振动信号子带能量经LE后的特征向量距离(feature vector distance,FVD)作为变压器绕组机械状态的评判指标,其表达式为:

 $D_{FV} = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_d - y_d)^2}$ (11) 式中: $X = [x_1, x_2, \dots, x_d]$ 和 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_d]$ 为维数为 d 的特征向量。具体计算时,以外加 70% I_{sc} 短路电 流时的暂态振动信号经 LE 处理后的特征向量为基 准值,分别计算不同短路电流下变压器暂态振动信

表3 优化TQWT与小波包分解暂态振动信号的结果对比

Table 3 Comparison of decomposition results of transient vibration signals by optimized TQWT and wavelet package

对比项	优化TQWT	小波包
分解层数	30	14
小波系数序列长度	变化,与尺度因子有关	固定
能量最大值所在频带	变化,与尺度因子或参数(Q,r)有关	恒定,第3层
能量分布	不均匀,有明显主频带且与短路电流的变化正相关, 其所在层数与尺度因子或参数(Q,r)有关	不均匀,有明显主频带且与短路电流的变化 正相关,其所在层数恒定
绕组变形时的能量分布 (外加130% I _{se})	无明显主频带,第15-22层能量分布更加集中且 幅值趋向均匀分布	主频带能量减小,第4、5层小波包能量增大

表4 LE与PCA对暂态振动信号子带能量序列的分析结果对比

Table 4 Comparison of analysis results of sub-band energy sequence for transient vibration signals by LE and PCA

对比项	LE	PCA
整体分布	空间散点分布与短路电流变化较为一致	空间散点分布有明显重叠
XY平面	散点分布区分度较明显,与短路电流变化较为一致	散点分布区分较明显,但随短路电流变化趋势不明显
XZ平面	散点分布区分度较明显,与短路电流变化较为一致	散点分布区分较明显,但随短路电流变化趋势不明显
YZ平面	散点分布有部分重叠,但120% I _{sc} 第3次与130% I _{sc} 第1次 短路冲击试验下的特征明显	120% Ise第3次与130% Ise第1次短路冲击试验特征接近

号特征向量与基准值之间的FVD,结果如图3所示。 图中,试验序号依次对应表1中的编号2—6的各次 短路冲击试验。由图可见,所定义的FVD随不同短 路电流呈现总体递增趋势,尤其是在外加120%*I*_{se} 第3次短路冲击试验后,FVD明显递增,相较于前次 短路暂态振动信号的FVD约增大了4倍之多,预示 着变压器绕组状态处于劣化边缘。进一步地,外加 130%*I*_{se}第1次短路冲击试验后,即试验变压器发生 绕组变形时,FVD继续增大。



图 3 FVD 随短路电流的变化曲线

Fig.3 Variation curves of FVD with short circuit currents

实际应用时,可通过计算遭受短路冲击时的变 压器暂态振动信号的 FVD,比较其与历史记录或同 型号的变压器暂态振动信号之间的变化,当这一变 化倍数超过3倍后,建议关注变压器的绕组状态,并 辅以其他测试手段进行核验。需要指出的是,这一 阈值的合理性还需要进一步积累数据进行验证,这 也是笔者下一步的工作。

5 结论

本文所得主要结论如下:

1)基于归一化奇异值熵的TQWT关键参数优选 方法可准确描述变压器短路暂态振动信号的振荡特征,有助于提高变压器短路暂态振动信号TQWT分 解结果的准确性;

2)经参数优化TQWT处理后的变压器短路暂态 振动信号子带序列能量随分解层数呈现不均匀分 布,主要能量主要集中在第14-25层间,分解层数 达到最大值之后仍有少部分残余子带能量;

3)经LE获取的变压器短路暂态振动信号特征 分量对变压器绕组状态变化更加敏感,能较为清晰 地展示绕组状态随短路冲击电流的增大而出现结构 劣化及变形的演变过程;

4)当变压器暂态振动信号的FVD变化超过3倍时,可初步判别变压器绕组濒临变形状态,建议关注 变压器的绕组状态,并辅以其他测试手段进行核验。

后续研究将进一步基于本文所提方法对抽检变 压器的短路冲击试验及运行中主变短路冲击后的绕 组状态进行分析,验证其普适性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]赵洪山,李字吴.基于比例强度模型的变压器不完全检修策略
 [J].电力自动化设备,2021,41(6):179-183,191.
 ZHAO Hongshan, LI Yuhao. Imperfect maintenance strategy of transformer based on proportional strength model[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(6):179-183,191.
- [2] 周利军,周祥宇,吴振宇,等.变压器绕组振荡波建模及轴向移 位故障分析[J].电力自动化设备,2021,41(3):157-163,188.
 ZHOU Lijun, ZHOU Xiangyu, WU Zhenyu, et al. Oscillation wave modeling and axial shift fault analysis of transformer winding[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41 (3):157-163,188.
- [3]李鹏,毕建刚,于浩,等.变电设备智能传感与状态感知技术及应用[J].高电压技术,2020,46(9):3097-3113.
 LI Peng, BI Jiangang, YU Hao, et al. Technology and application of intelligent sensing and state sensing for transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3097-3113.
- [4] 赵莉华,张振东,张建功,等.运行工况波动下基于振动信号的 变压器故障诊断方法[J].高电压技术,2020,46(11):3925-3933.

ZHAO Lihua,ZHANG Zhendong,ZHANG Jiangong, et al. Diagnosis methods for transformer faults based on vibration signal under fluctuating operating conditions[J]. High Voltage Engineering,2020,46(11):3925-3933.

- [5] 王丰华,杨毅,何苗忠,等.应用有限元法分析变压器绕组固有振动特性[J].电机与控制学报,2018,22(4):51-57.
 WANG Fenghua,YANG Yi,HE Miaozhong, et al. Inherent vibration features of power transformer winding by finite element method[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(4): 51-57.
- [6] ZHANG Fan, JI Shengchang, MA Hui, et al. Operational modal analysis of transformer windings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3):1285-1298.
- [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 shortcircuit impact based on complex wavelet algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(8):327-332.
- [8] 杨毅,王丰华,段若晨,等.基于自适应筛选EMD和CFDC的变压器绕组状态检测[J].振动与冲击,2017,36(19):106-111,144.
 YANG Yi, WANG Fenghua, DUAN Ruochen, et al. Detection of transformer winding condition based on the self-adaptive sifting EMD and CFDC[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017,36(19):106-111,144.
- [9]杨贤,王丰华,段若晨,等.基于优化K-Means的变压器绕组机 械状态检测[J].高电压技术,2018,44(6):2027-2032.
 YANG Xian,WANG Fenghua,DUAN Ruochen, et al. Detection of transformer winding condition based on optimal K-Means algorithm[J]. High Voltage Engineering,2018,44(6):2027-2032.
- [10] 曹辰,林莘,李辉,等. 电力变压器绕组变形状态信息融合评估 方法[J]. 高电压技术,2018,44(4):1107-1113.
 CAO Chen,LIN Xin,LI Hui,et al. Method for state evaluation of transformer winding deformation based on information fusion[J]. High Voltage Engineering,2018,44(4):1107-1113.
- [11] 曹辰,徐博文,李辉. 基于振动与电抗信息的变压器绕组形变 状态综合监测方法[J]. 高电压技术,2022,48(4):1518-1530.
 CAO Chen,XU Bowen,LI Hui. Composite monitoring method for the state of transformer winding deformation based on vibration and reactance information[J]. High Voltage Engineering,2022,48(4):1518-1530.

- [12] SELESNICK I W. Wavelet transform with tunable Q-factor [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59 (8): 3560-3575.
- [13] XIE Fangxin, WANG Fenghua, ZHENG Yiming, et al. Vibration monitoring of on-load tap-changer by resonance-based sparse signal decomposition [C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Portland, OR, USA: IEEE, 2018:1-5.
- [14] 王丰华,谢方鑫,汪卫国,等. 绝缘油对变压器有载分接开关振动信号的影响[J]. 高电压技术,2019,45(10):3273-3279.
 WANG Fenghua, XIE Fangxin, WANG Weiguo, et al. Effect of insulation oil on vibration signals of on-load tap-changer of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45 (10):3273-3279.
- [15] 石家宇,陈博,俞立.基于拉普拉斯特征映射学习的隐匿FDI 攻击检测[J].自动化学报,2021,47(10):2494-2500.
 SHI Jiayu, CHEN Bo, YU Li. Stealthy FDI attack detection based on Laplacian eigenmaps learning strategy[J]. Acta Automatica Sinica,2021,47(10):2494-2500.
- [16] 张鑫,郭顺生,李益兵,等.基于拉普拉斯特征映射和深度置 信网络的半监督故障识别[J]. 机械工程学报,2020,56(1): 69-81.
 ZHANG Xin, GUO Shunsheng, LI Yibing, et al. Semi-supervised fault identification based on Laplacian eigenmap and deep belief networks[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020,56(1):69-81.
- [17] 孔运,王天杨,褚福磊. 自适应TQWT滤波器算法及其在冲击 特征提取中的应用[J]. 振动与冲击,2019,38(11):9-16,23.
 KONG Yun, WANG Tianyang, CHU Fulei, et al. Adaptive TQWT filter algorithm and its application in impact feature extraction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(11):

9-16,23.

- [18] HE Wangpeng, ZI Yanyang, CHEN Binqiang, et al. Tunable Q-factor wavelet transform denoising with neighboring coefficients and its application to rotating machinery fault diagnosis[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(8): 1956-1965.
- [19] 肖勇,李博,尹家悦,等.基于小波变换和小波包变换的间谐波 检测[J].智慧电力,2022,50(1):101-107,114.
 XIAO Yong,LI Bo,YIN Jiayue, et al. Interharmonic detection based on wavelet transform and wavelet packet transform[J].
 Smart Power,2022,50(1):101-107,114.
- [20] 王鹤,余中枢,李筱婧,等.基于主成分分析方法的多类型电动 汽车接入配电网的综合风险评估[J].电力自动化设备,2021, 41(11):57-65.

WANG He, YU Zhongshu, LI Xiaojing, et al. Comprehensive risk assessment of multiple types of electric vehicles connected to distribution network based on principal component analysis method[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(11): 57-65.

作者简介:



杨 贤(1986—),男,高级工程师,博 士,主要研究方向为电力变压器高压试验及 故障诊断技术(E-mail:yxhust@163.com); 王丰华(1973—),女,副教授,博士, 通信作者,主要研究方向为电力设备振 声监测与故障诊断及装备智能化(E-mail: fhwang7723@sjtu.edu.cn)。

杨贤

(编辑 任思思)

Detection of transformer winding condition based on optimized TQWT and LE

YANG Xian¹, ZHOU Dan¹, WANG Peng², LIN Chunyao¹, WANG Fenghua³, MA Jiaqi³, SHENG Gehao³

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Electric Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

2. CSG Digital Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510623, China;

3. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To accurately detect the winding condition of power transformer under sudden short circuit impact, the optimized tunable *Q*-factor wavelet transform(TQWT) and Laplacian eigenmaps(LE) are proposed to analyze the vibration signals of transformer under sudden short circuit impacts. The normalized singular value entropy is applied to select the key parameters of quality factor and redundancy in the decomposition process of TQWT. With the sub-band energy sequence of vibration signals decomposed by TQWT, the most sensitive features of vibration signals are obtained by LE to represent the winding condition. The calculated results of vibration signals for an 110 kV transformer under sudden short circuit tests show that the optimized TQWT algorithm can effectively improve the decomposition accuracy of the transient vibration signals under short circuit. The sensitive features of vibration signals obtained by LE method is capable of clearly reflecting deformation process of mechanical condition of transformer winding. When the variation of transformer winding, so as to provide the reference for the proposal of transformer winding state maintenance strategy.

Key words: power transformer; Laplacian eigenmaps; winding condition; tunable *Q*-factor wavelet transform; vibration signals

附录 A



(a)高压侧



(b) 低压侧



Fig.A1 Schematic diagram of placement of vibration sensors in transformer tank



(b) 归一化小波熵 图 A2 归一化奇异值熵及归一化小波熵随参数 Q 和 r 的变化

Fig.A2 Variations of normalized singular value entropy and normalized wavelet entropy with parameters of Q and r









图 A5 LE 绕组状态检测结果 Fig.A5 Detection results of winding condition by LE



图 A6 PCA 绕组状态检测结果 Fig.A6 Detection results of winding condition by PCA