

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2005982

基于小波包尺度-能量占比的变压器三相不平衡绕组振动特征辨识^{*}

潘超¹, 陈祥¹, 蔡国伟¹, 王成建¹, 李勇²

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学) 吉林 132000;

2. 国网山东省电力公司滨州供电公司 滨州 256600)

摘要:针对变压器不平衡运行模式绕组振动问题,研究变压器不平衡运行模式振动原理,构建不平衡运行模式下的绕组电磁-振动模型,利用小波包变换进行振动信号的分解重构,研究不同频域尺度的能量分布规律,提出了基于尺度-能量占比的振动特征辨识方法。通过动模实验获取绕组振动信息,通过小波包分解重构信号确定尺度-能量占比特征值,研究不平衡运行绕组振动特性,为变压器不平衡异常工况提供新的诊断手段。变压器正常运行时,二倍频分量信号占总信号能量的46.72%,当不平衡运行 α 为-20%、20%时,二倍频能量占比分别下降75.67%和升高42.07%,且不平衡运行时三相绕组振动特征差异较大,所产生的不平衡振动力矩将会危害变压器绕组整体结构的稳定性。

关键词:小波包分解;尺度-能量占比;不平衡运行;绕组振动

中图分类号: TH70 TM412 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Identification of winding vibration characteristics of three-phase unbalanced transformer based on scale-energy ratio of wavelet packet

Pan Chao¹, Chen Xiang¹, Cai Guowei¹, Wang Chengjian¹, Li Yong²

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education

(Northeast Electric Power University), Northeast Electric Power University, Jilin 132000, China;

2. Binzhou Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Binzhou 256600, China)

Abstract: This paper aims at the winding vibration problem of transformer in unbalanced operation mode, studies the vibration principle of transformer in unbalanced operation mode. The winding electromagnetic vibration model under unbalanced operation mode is constructed, the wavelet packet transformation is used to decompose and reconstruct the vibration signal. Then, the energy distribution law at different frequency domain scales is studied. Furthermore, the vibration feature identification method based on the scale-energy ratio is proposed. Dynamic-model experiment was conducted to obtain the vibration information of the winding. The scale-energy ratio eigenvalue is determined by the reconstructed signal of wavelet packet decomposition. The vibration characteristics of unbalanced operation winding are studied, which provides a new diagnostic means for transformer unbalanced abnormal operation condition. When the transformer is in normal operation, the double frequency component signal accounts for 46.72% of the total signal energy. When the unbalanced operation α is -20% and 20%, the energy ratio of the double frequency decreases by 75.67% and increases by 42.07%, respectively. In unbalanced operation condition, the vibration characteristics of the three-phase windings differ greatly. The generated unbalanced vibration moment will endanger the stability of the overall structure of the transformer windings.

Keywords: wavelet packet decomposition; scale-energy ratio; unbalanced operation; winding vibration

0 引言

电力变压器作为电网中的核心设备,其安全可靠是整个电网稳定运行的重要保证,据国内外研究统计,绕组机械故障是导致变压器故障的重要原因之一^[1-3]。我国配电网电力用户众多且存在大量时空分布不平衡的单相负荷,导致多数配电台区存在不同程度的三相负荷不平衡问题^[4-6]。变压器三相不平衡运行造成绕组承受偏心电磁力矩及振动加剧,传统的电气参量监测虽然能够表明其内部电磁状态,但无法反映绕组的振动特性^[7-8],长期运行会造成设备故障甚至电网瘫痪等事故。

针对变压器三相不平衡问题,文献[9]定量分析变压器三相不平衡所导致的附加损耗及电压偏移,但未深入研究变压器内部结构的变化情况。在变压器振动方面,文献[10]建立变压器绕组多自由度数学模型,利用经验小波变换研究固有频率振动衰减特性,提取绕组结构模态信息;文献[11]基于“磁-机械”耦合理论分析变压器电动力激励与绕组振动响应的过程分析,研究绕组在正常与松动状态的振动特性;文献[12]建立了绕组径向振动及油中振动的传播模型,通过定义功率传播比研究了绕组振动的传递规律,为基于振动分析的变压器绕组机械状态监测提供了依据。目前变压器振动信号的采样主要针对变压器箱体进行,不平衡模式下,箱体的振动信号很难反映绕组振动的变化情况,易出现对运行情况的错误判断。综上所述,变压器不平衡运行对绕组的影响不容忽视,但关于不平衡运行状态下的绕组振动与识别并未做系统深入的研究。

本文针对变压器三相不平衡绕组振动问题,研究变压器不同运行模式下的绕组振动特性。构建变压器绕组轴向振动模型和径向振动模型,并分析其振动原理;对绕组振动信号进行小波包分解与重构,提取不同小波包空间振动信号的频域尺度-能量占比特征,通过分析采样信号在小波包某一分解层次上不同时频分辨率上的能量占比,判断变压器绕组运行状态,为基于绕组振动信号辨识的变压器不平衡运行诊断提供可行方法。

1 三相不平衡模式绕组振动机理

1.1 绕组轴向振动模型

变压器绕组电磁力包含轴向及径向分量^[13-14],在研究绕组轴向振动过程时,可将其视为由弹性联系的质量块所组成的机械系统^[15-16],绕组质量-弹簧-阻尼系统如图1所示。

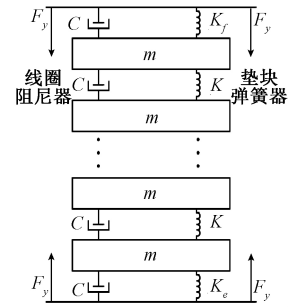


图1 绕组质量-弹簧-阻尼系统

Fig.1 Mass-spring-damper system of the winding

绕组线饼以刚体质量块 m 表示,其线圈阻尼以阻尼器的形式表征,阻尼系数为 C ;同理,垫块以受压弹簧表征,设定首末端垫块预紧力 F_y 、刚度 K 及正杨氏模量 E 完全一致,建立绕组轴向机械振动动力学模型^[17]:

$$nmg(t) + \sum_i C v(t) + [K_f(F_y, E) + K_e(F_y, E)] s(t) = F(t) + G \quad (1)$$

式中: n 为线饼数量; m 为单个线饼质量; C 为阻尼系数; K_f 、 K_e 分别为首、末端垫块刚度系数; G 为线饼总重力, $F(t)$ 为绕组动态电磁力荷载矢量; $g(t)$ 、 $v(t)$ 、 $s(t)$ 分别为绕组节点加速度矢量(位移矢量二阶导数)、速度矢量(位移矢量一阶导数)、位移矢量。其中 C 、 K_f 、 K_e 由变压器结构及材料及预紧力决定,当预紧力一定时,质量-弹簧-阻尼材料参数可视为定值^[17]。

可通过磁场模型计算绕组单元的电磁力:

$$F = \sum_{n_p} \int J \times B dV \quad (2)$$

式中: J 、 B 分别为绕组单元电流密度及磁密度; n_p 为单个线饼绕组总单元数。

当施加激励为正弦激励时,绕组单元电磁力可表示为:

$$F = 0.5BI_m^2(1 + \cos 2\omega t) \quad (3)$$

式中: I_m 为正弦电流有效值; ω 为角频率。

根据振动位移可计算轴向振动加速度 g 为:

$$g = d^2s/dt^2 \quad (4)$$

初步理论分析, F 变化快慢取决于施加激励的频率。当施加激励为工频激励时, g 在 100 Hz 下的分量幅值最大。

1.2 绕组径向振动模型

绕组径向电磁力沿线饼圆周分布,变压器运行时线饼中出现拉压及弯曲应力^[18],考虑绕组结构,可将绕组径向振动视为固定约束弯拱的受迫振动,绕组径向振动模型如图2所示。

图2中, F_e 为均布电磁力; M 为绕组弯矩; h 为拱高

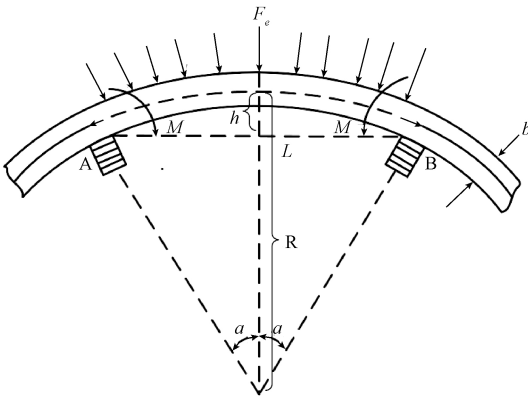


图2 绕组径向振动模型

Fig.2 Radial vibration model of the winding

度; \$L\$ 为拱跨度; \$R\$ 为绕组计算半径; \$b\$ 为绕组线饼厚度; \$A\$、\$B\$ 为绕组支撑构件; \$a\$ 为绕组支撑构件与绕组弯拱模型中心线间的夹角。

绕组线饼欧拉伯努利拱形梁动力学方程为:

$$EM_I \frac{\partial^4 h(L,t)}{\partial L^4} + \rho_0 \frac{\partial^4 h(L,t)}{\partial t^4} = F_e(L,t) \quad (5)$$

式中: \$M_I\$ 为绕组线饼截面惯性矩; \$\rho_0\$ 为绕组材料密度。

采用达朗贝尔原理及模态叠加法^[18]可求解式(5), 得到径向振动位移 \$dh\$, 并代入式(4)可计算径向振动加速度。

2 振动信号频域尺度-能量占比辨识方法

2.1 小波包分解重构原理

小波分析(wavelet analysis, WT)是傅里叶分析的一种延伸, 傅里叶变换能得到全时段的整体频域特征信号, 但不能提供局部时段的频域信息。小波变换在时域和频域同时具有局部性, 即具有可变的时频窗口, 通过调整时频分辨率的, 对高频信号分析采用小时窗, 对低频信号分析采用大时窗^[19]。图3所示为小波变换及小波包变换(wavelet packet transform, WPT)原理, “A”为低频重构信号, “D”为高频重构信号。

在小波变换中, 如果尺度函数变大, 与其对应的时间域窗口会随之变大, 频域窗口则会变窄。相对而言, 小波包变换既可以对低频信号进行分解, 也可以对高频部分进行分解, 而且这种分解无冗余和疏漏, 对包含大量中、高频信息的信号能够进行更好的时频局部化分析^[19]。鉴于变压器绕组振动信号的复杂性, 且量测过程中无法避免由铁芯等构件影响所产生的中频信号(400~600 Hz)和低频信号(600~1 000 Hz)^[20]。因此, 对于绕组振动信号的分析可以采用小波包变换, 并通过对重构信号的频域尺度-能量占比解析, 得到不同运行状态下绕组振

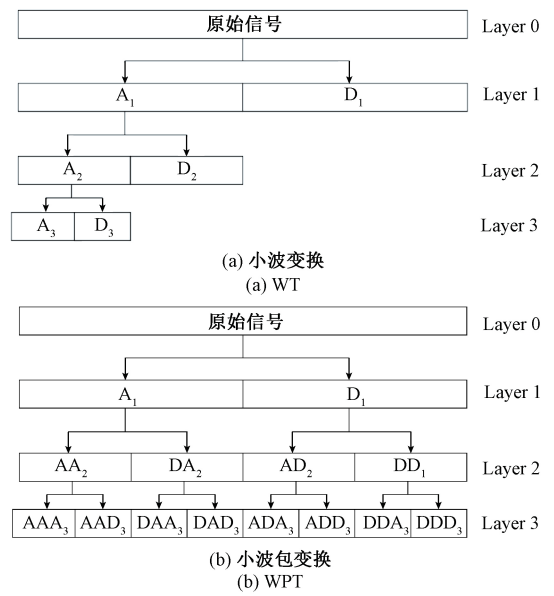


图3 小波变换及小波包变换原理

Fig.3 principle diagram of WT and WPT

动信号的特征。小波包分解具备将信号无泄漏、不重叠的正交分解到相邻频带上的能力。小波包分解采用多尺度分解的树状算法, 其原理为:

$$\begin{cases} C_{\xi, \eta, 2f} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k h_{k-2\eta} C_{\xi+1, k, f} \\ C_{\xi, \eta, 2f+1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k g_{k-2\eta} C_{\xi+1, k, f} \end{cases} \quad (6)$$

式中: \$C_{\xi, \eta, 2f}\$ 和 \$C_{\xi, \eta, 2f+1}\$ 为下一层小波分解结果; \$C_{\xi+1, k, f}\$ 为上层分解结果; \$\xi\$ 为尺度系数; \$\eta\$ 为位置系数; \$f\$ 为采样频率; \$h\$ 和 \$g\$ 为正交共轭低通和高通滤波器。

2.2 频域尺度-能量占比特征辨识

根据帕斯瓦尔定理, 变压器绕组时域振动加速度信号 \$g(t)\$ 的能量为:

$$\|g(t)\|_2^2 = \int_R |g(t)|^2 dt \quad (7)$$

式中: \$R\$ 为全实数域。

绕组振动加速度信号 \$g(t)\$ 在小波域用小波包分解得出的系数 \$C_{\xi, k}\$ 的平方和等于原始振动加速度信号 \$g(t)\$ 在时域的能量, 即:

$$\int_R |f(t)|^2 dt = E_{\xi, k} = \sum_N |C_{\xi, k}|^2 \quad (8)$$

式中: \$N\$ 为采样信号的长度。

将各频带的能量进行归一化处理, 得到对应的尺度特征值:

$$E'_{\xi, k} = \frac{E_{\xi, k}}{\sum_n E_{\xi, k}} \quad (9)$$

通过小波包变换对绕组采样信号进行分解重构, 计

算各频带归一化能量,提取信号频域尺度-能量占比占比作为绕组振动特性特征值,实现不平衡模式下绕组振动特性的监测与辨识。

3 不平衡运行绕组振动信号采集

利用变压器不平衡度(负载率)表征其不平衡模式下的运行状态。参照文献[21], α 的计算方法为:

$$\alpha = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: $I_{\max}$ 为不平衡相副边电流最大值; $I_{\min}$ 为副边电流最小值。当不平衡相电流减小时 α 为负,对应模式 S_1 ;当电流增加时 α 为正,对应模式 S_2 ;正常运行对应模式 S_0 。

3.1 不同运行模式振动信号采集实验

搭建变压器三相不平衡动模实验平台,获取绕组振动信息,振动信号采集实验如图4所示,具体实验步骤如下:

1)将实验变压器(SR10-10 kVA/1 kV/0.22 kV)原边与三相调压器连接,副边与三相可调负载连接,同时接入电流监测模块及高精度加速度传感器(JF2001-T),并调试传感器与振动监测模块。

2)参照变压器运行规程^[22],调节负载阻值,使实验变压器处于50%负载运行,采集变压器正常运行绕组振动加速度信号,设置采样频率为2 kHz。

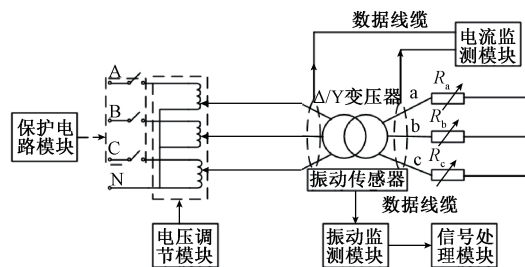
3)分别调节A相负载电阻值令变压器处于不同的不平衡运行模式, α 范围为 $[-20\%, 20\%]$,测量变压器端口电流及振动加速度并记录相关实验数据。

3.2 绕组振动信号处理

绕组振动信号采集过程中,由于压电加速度传感器外部由非导磁外壳包裹,因此具备较好的电磁屏蔽作用。同时,本文针对外绕组振动信号进行采集,由于绕组结构及绝缘的存在,漏磁较少^[23],因此电磁干扰小。目前,绕组振动加速度信号的采集过程中,包含一定的铁芯振动加速度信号,针对该问题,采用基于径向基神经网络的盲源分离方法。利用振动信号采集实验平台采集变压器空载、短路运行时的铁芯及绕组振动信号,将空载状态下所量测的铁芯振动数据作为铁芯振动源信号,将短路状态下的绕组振动信号作为绕组振动源信号,通过快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)分析其频谱,采用径向基神经网络学习铁芯和绕组振动频谱的构成特性,形成各自的振动源模式集合;在此基础上通过测试多种不平衡条件下的铁芯-绕组振动混合信号,建立训练样本,将铁芯振动作为扰动信号并从绕组振动信号中分离。



(a) 实验变压器
(a) The tested transformer



(b) 实验接线原理
(b) Principle diagram of the test wiring

图4 振动信号采集实验

Fig.4 Acquisition test diagram of the vibration signal

4 不平衡运行绕组振动信号分析

4.1 S_0 运行模式振动信号分析

以A相不平衡为例,结合Z1采样点振动信号分析 S_0 运行模式下绕组的振动情况,采样得到绕组振动原始信号如图5所示,图中横轴为采样时间 t ,纵轴为绕组振动信息 g 。

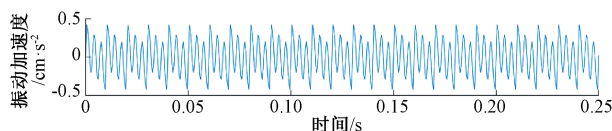


图5 Z1采样点绕组振动原始信号

Fig.5 The original winding vibration signal at Z1 sampling point

结果表明,变压器绕组振动信号具有较强的周期性,但通过原始采样信号较难判别变压器绕组的具体运行状况,因此进一步对Z1采样信号使用db3小波进行4层小波包分解和重构,第4层重构波形及小波包分解能量谱分别如图6、7所示。

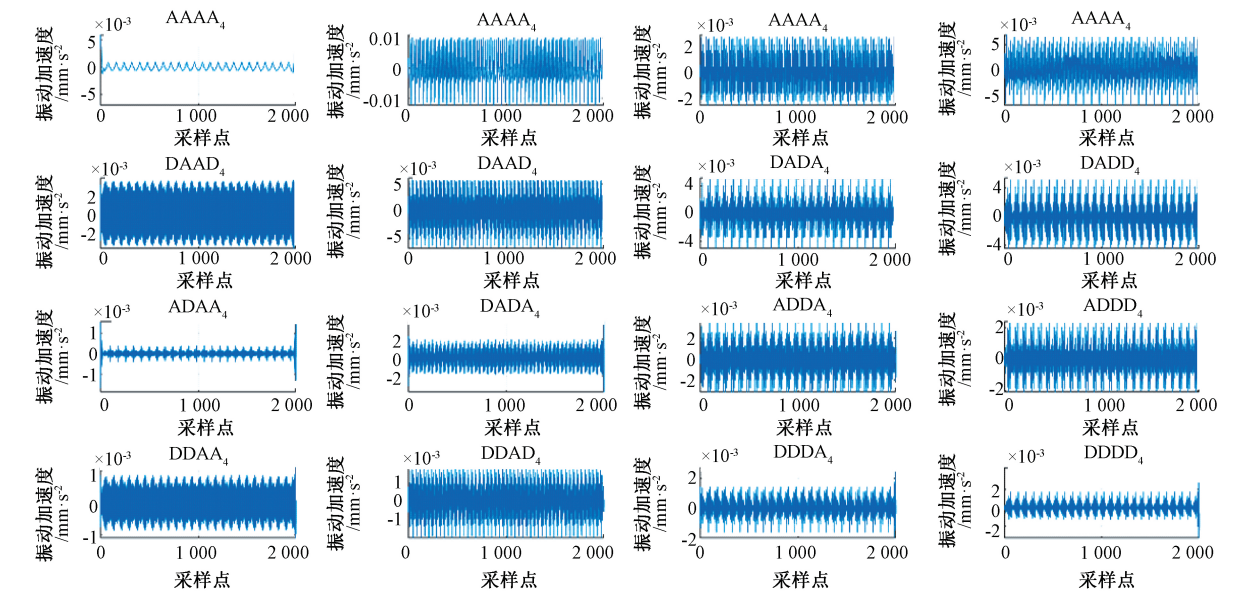


图6 小波包分解重构波形

Fig.6 The reconstructed waveforms of WPT

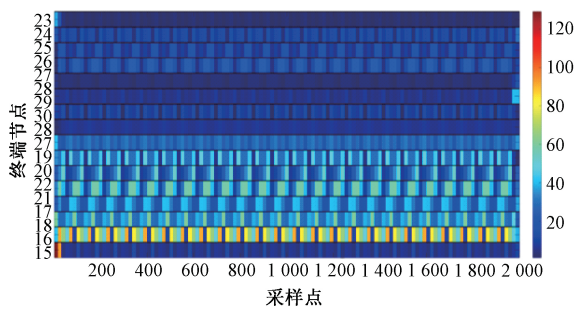


图7 小波包重构能量谱

Fig.7 The reconstructed energy spectrum of WPT

根据奈奎斯特-香农采样定理,可确定采样频率为1 000 Hz,结合图6、7,各层分解重构的振动信号仍具有明显的周期波动性, g 信号的能量频谱主要集中于62.5~125 Hz。为了更直观的对变压器绕组振动信号进行辨识,绘制小包波变换分层重构信号频域尺度-能量占比谱,结果如图8所示。

深入分析图8的能量谱,可知:

1)第1层尺度-能量占比表明,0~500 Hz 分量占总信号能量的94.58%,500~1 000 Hz 信号能量占比为5.42%,说明绕组振动加速度信号主要集中于0~500 Hz,但受到铁芯等机械构件的影响, g 信号中包含中、高频能量分量。

2)随着分层数增加, g 信号能量在各频段的比重更加细化。由第4层频域尺度-能量占比结果可知,62.5~125 Hz 频段内 g 信号能量约占总能量的1/3,其中由于激磁工频电流的作用,使其两倍频(100 Hz)分量占比较

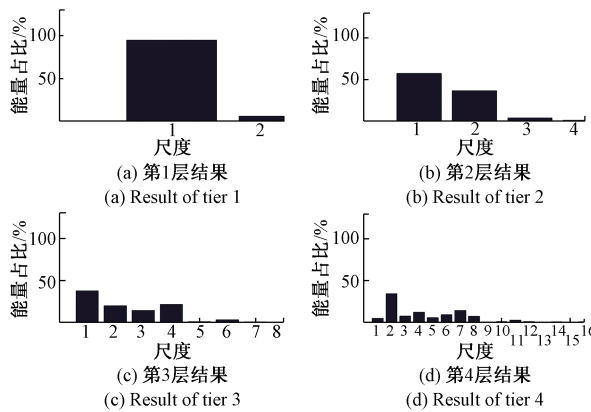


图8 分层重构信号尺度-能量占比谱

Fig.8 Scale-energy ratio spectrums of the stratified reconstructed signal

高,这与绕组振动原理分析相符。

4.2 不平衡运行模式振动信号分析

调节负载使变压器处于单相不平衡运行模式,监测绕组电流及Z1~Z3 采样点振动信号,并对Z1 信号采用db3 小波进行4层小波包变换,提取第4层重构信号频域尺度-能量占比数据,得到电流结果如表1所示。

由表1可以看出,变压器不平衡相绕组电流有效值随 α 基本呈线性变化,而正常相绕组电流变化较小。由于负载率较低(50%),虽然 α 较高,但 I 未超出限值,因此传统的电气参量监测方法不能有效识别不平衡绕组的振动变化情况。进一步分析绕组 g 的频域尺度-能量占比特征值变化,结果如表2所示。

表 1 不平衡运行模式电流有效值

Table 1 Current effective value in unbalanced operation mode					
电流有效值	operation mode				
	S_1/α		S_0	S_2/α	
	-20%	-10%	0	10%	20%
I_A	0.96	0.85	0.83	0.66	0.61
I_B	0.82	0.75	0.81	0.77	0.73
I_C	0.89	0.81	0.83	0.81	0.80
I_a	3.46	2.79	2.48	2.17	1.96
I_b	2.37	2.46	2.39	2.29	2.25
I_c	2.68	2.48	2.42	2.35	2.27

表 2 不平衡运行模式振动信号

Table 2 Vibration signal in unbalanced operation mode			
频段/Hz	S_1	S_0	S_2
	(-20%/-10%)		(10%/20%)
0~62.5	4.21/4.37	4.61	4.31/4.22
62.5~125	30.11/32.67	34.23	35.90/36.87
125~187.5	6.96/7.01	7.22	6.89/6.63
187.5~250	10.32/11.63	12.21	11.88/11.62
250~312.5	5.17/5.22	5.39	5.06/4.79
312.5~375	8.01/8.37	8.88	8.55/8.29
375~437.5	15.23/14.79	14.11	13.78/13.52
437.5~500	7.31/6.90	6.93	6.60/6.34
500~562.5	2.15/1.17	0.42	0.67/0.73
562.5~625	2.33/1.53	0.87	0.92/0.93
625~687.5	3.73/2.99	2.43	2.63/2.81
687.5~750	1.99/1.04	0.91	0.96/1.13
750~812.5	1.12/0.63	0.26	0.28/0.31
812.5~875	1.21/0.84	0.56	0.56/0.73
875~937.5	0.71/0.47	0.28	0.31/0.35
937.5~1 000	0.89/0.77	0.68	0.69/0.71

表 2 表明,不平衡模式下 g 信号的能量占比发生较大变化,以 62.5~125 Hz 频段的能量为例, S_1 模式 α 为 -10% 时其占比与 S_0 模式相比下降 52.92%,当 α 达到 -20% 时,能量占比下降 75.67%; S_2 模式 α 为 10% 时能量占比升高 26.93%,当 α 达到 20% 时,能量占比升高 42.07%。结合表 1 分析其变化,62.5~125 Hz 频段能量占比主要受绕组电流的影响,当不平衡运行时,62.5~125 Hz 频段能量占比也随着 α 线性变化,375~437.5 Hz 频段的中频信号呈现出与 62.5~125 Hz 频段信号相反的变化规律,高频 g 信号分量基本无变化。

4.3 振动信号频域尺度-能量占比聚类分析

研究 A 相不平衡运行时三相绕组振动信号的变化情况,提取 Z1~Z3 采样点信号(25 组信号,每组信号长度 2 000),分别求取小波包变换第 4 层频域尺度-能量占比特征,将能量占比作为横坐标,频域尺度作为纵坐标表示在 2 维平面中,其聚类结果如图 9 所示。

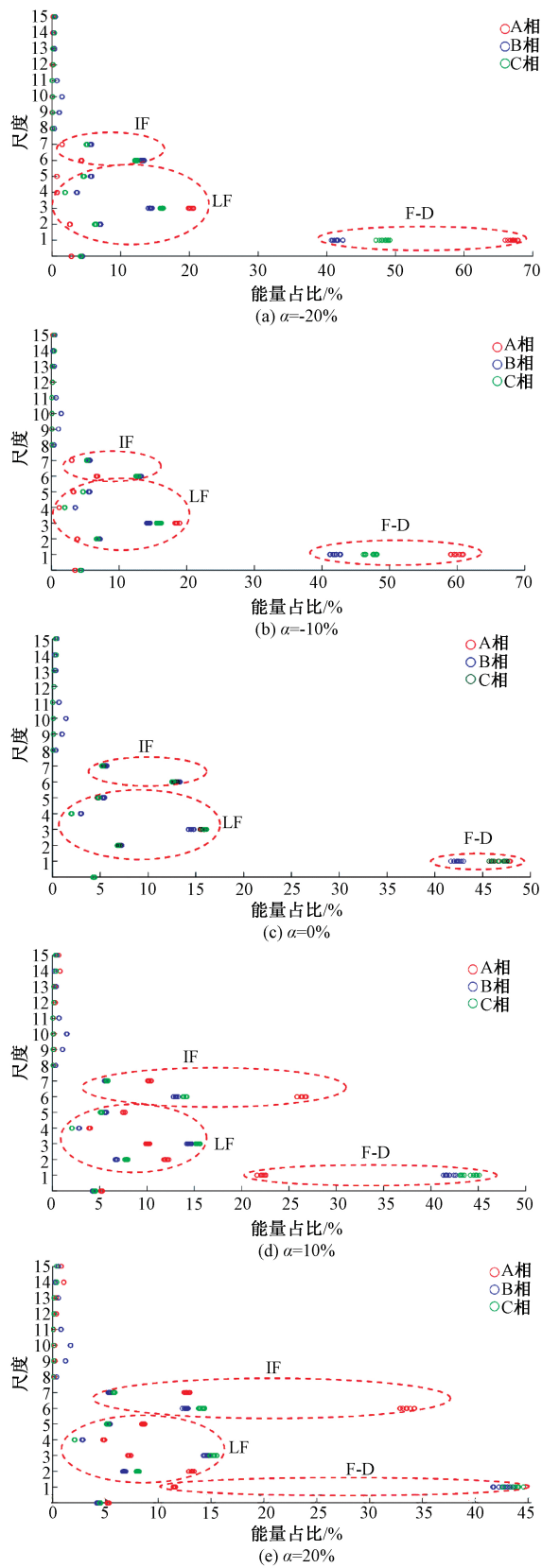


图 9 不同运行状态频域尺度-能量占比特征分布
Fig.9 Eigenvalue distribution of scale-energy ratios in frequency domain under different operation states

通过聚类可以将变压器绕组频域尺度-能量占比特征划分成3个区域,其中二倍频区域(frequency-doubled, F-D)频率为100 Hz,低频区域(low frequency, LF)频率范围为100~300 Hz,中频区域(intermediate frequency, IF)频率范围为400~600 Hz,其他散点为测试过程中出现的随机扰动及铁芯等构件振动造成的溢出点。

由图8的聚类结果可以得出以下规律:

1)当变压器正常运行时,F-D区域三相绕组振动信号能量占比较高,其中B相绕组受到其余两相绕组漏磁的影响,F-D区域能量占比低于其余两相,LF及IF区域能量占比高于其余两相。

2)当变压器不平衡运行时,不平衡相(A相)绕组的小波包频域尺度-能量占比特征 $E'_{4,1}$ (62.5~125 Hz)变化较为明显(表1), $E'_{4,1}$ 的变化导致F-D区域在不平衡模式下分布范围增大, $E'_{4,3}$ 与 $E'_{4,1}$ 变化规律基本一致,而 $E'_{4,6}$ 变化规律与 $E'_{4,3}$ 及 $E'_{4,1}$ 变化情况相反,导致LF及IF区域出现偏移及分布范围的变化。分析其主要原因, $E'_{4,1}$ 、 $E'_{4,3}$ 、 $E'_{4,6}$ 分别对应的振动频段为62.5~125 Hz、187.5~250 Hz、375~437.5 Hz,变压器三相不平衡运行时,不平衡相绕组电磁力与 α 呈线性关系,且低频信号能量占比与电磁力数值亦呈线性关系,因此 $E'_{4,1}$ 、 $E'_{4,3}$ 变化情况相同,该结论与文献[12]一致。结合小波包变换原理, $E'_{4,1}$ 受电磁力影响较大, $E'_{4,6}$ 则主要取决于各次谐波。 S_1 模式中绕组电磁力下降,产生的高次谐波分量较多,致使 $E'_{4,6}$ 升高;反之, S_2 模式中绕组承受的电磁力加剧,并产生高次谐波,使得 $E'_{4,1}$ 升高幅度较大, $E'_{4,6}$ 呈现下降趋势。相对而言,正常相绕组(B、C相)小波包分解重构信号的频域尺度-能量占比特征变化较小。

3)对比Z1~Z3采样点小波包重构信号的频域尺度-能量占比变化情况可以发现,变压器正常运行时,二倍频分量信号占总信号能量的46.72%,当不平衡运行时,不平衡相振动加速度信号频域尺度-能量占比特征发生变化: S_1 模式 α 为-10%时二倍频信号能量占比与 S_0 模式相比下降52.92%,当 α 达到-20%时,能量占比下降75.67%; S_2 模式 α 为10%时能量占比升高26.93%,当 α 达到20%时,能量占比升高42.07%,并且产生大量中频信号。结果表明,小波包重构信号的频域尺度-能量占比特征能够有效表征变压器不平衡绕组的振动特性。三相不平衡运行模式下,绕组振动加速度出现较大差别,三相绕组振动能量的不平衡会导致绕组结构内产生随时间变化的偏心力矩,若变压器长期运行在该状态下,不平衡力矩会导致绕组结构受到破坏,严重危害变压器的结构稳定性,甚至影响配电网的安全可靠运行。

5 结 论

本文针对变压器不平衡运行绕组振动特性变化问

题,提出基于能量占比的振动特征辨识方法。利用小波包变换进行振动采集信号的分解重构,通过不平衡运行振动信号量化分析及能量占比聚类分析,实现不平衡运行绕组振动状态特征辨识。不平衡运行状态下绕组振动信号不同频域尺度的能量分布规律表明,不平衡相与平衡相频域尺度-能量占比特征变化差异较大,所产生的不平衡振动力矩将会危害变压器绕组整体结构的稳定性,而采用小波包重构信号的频域尺度-能量占比特征辨识方法能够快速识别各绕组振动情况,判断绕组异常振动状况,从而为基于绕组振动信号辨识的不平衡运行问题提供新的辅助决策。

参考文献

- [1] 张明泽,刘骥,吕佳璐,等.换油周期对变压器油纸绝缘老化性能影响规律[J].电工技术学报,2019,34(22):4827-4838.
ZHANG M Z, LIU J, LV J L, et al. Effect of oil change period on aging performance of oil paper insulation of transformer [J]. Journal of Electrical Technology, 2019, 34 (22): 4827-4838.
- [2] 叶志军,苟炬龙,蔡金星,等.变压器一次侧匝间短路参数与特征分析[J].电力系统自动化,2019,43(21):213-220.
YE ZH J, GOU J L, CAI J X, et al. Analysis of parameters and characteristics of inter turn short circuit on primary side of transformer [J]. Power System Automation, 2019, 43 (21): 213-220.
- [3] 井永腾,王宁,李岩,等.电磁-热-流弱耦合的变压器绕组温升研究[J].电机与控制学报,2019,23(10):41-48.
JING Y T, WANG N, LI Y, et al. Study on temperature rise of transformer winding with weak coupling of electromagnetic heat current [J]. Journal of Motor and Control, 2019, 23 (10): 41-48.
- [4] 鲁文波,曲光磊.油浸式自耦变压器振动噪声研究[J].振动与冲击,2019,38(15):273-280.
LU W B, QU G L. Study on vibration and noise of oil immersed autotransformer [J]. Vibration and Shock, 2019, 38 (15): 273-280.
- [5] 陈嘉宁,杨璐,叶承晋,等.基于缺失数据修复的变压器在线故障诊断方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(15):86-92.
CHEN J N, YANG X, YE CH J, et al. On line fault diagnosis method of transformer based on missing data repair [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47 (15): 86-92.

- [6] 韩赛赛,刘宝柱,艾欣.基于 MCMC 方法和油色谱数据的变压器动态故障率模型[J].电力系统保护与控制, 2019,47(15):1-8.
HAN S S, LIU B ZH, AI X. Transformer dynamic failure rate model based on MCMC method and oil chromatography data [J]. Power System Protection and Control, 2019,47(15):1-8.
- [7] 刘达,彭敏放,万勋,等.基于行波分析的变压器绕组匝间短路故障定位[J].仪器仪表学报,2015,36(9):2091-2096.
LIU D, PENG M F, WAN X, et al. Fault location of transformer winding turn to turn short circuit based on traveling wave analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015,36(9):2091-2096.
- [8] 谢松,邹阳,蔡金锭.基于模糊粗糙集的变压器油纸绝缘状态评估[J].仪器仪表学报,2017,38(1):190-197.
XIE S, ZOU Y, CAI J D. State evaluation of oil paper insulation of transformer based on fuzzy rough set[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(1):190-197.
- [9] 杨云龙,王凤清.配电变压器三相不平衡运行带来的附加损耗、电压偏差及补偿方法[J].电网技术, 2004(8):73-76.
YANG Y L, WANG F Q. Additional loss, voltage deviation and compensation method caused by three-phase unbalanced operation of distribution transformer[J]. Grid Technology, 2004(8):73-76.
- [10] 洪凯星,章俊涛,许素安,等.基于经验小波变换的变压器绕组结构衰退特征提取方法[J].振动与冲击,2019,38(14):89-95.
HONG K X, ZHANG J T, XU S AN, et al. Feature extraction method of transformer winding structure deterioration based on empirical wavelet transform[J]. Vibration and Shock, 2019,38(14):89-95.
- [11] 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, DUN R CH, GENG CH, et al. Study on the vibration characteristics of power transformer windings based on the “magnetic mechanical” coupling field theory [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2016,36(9):2555-2562
- [12] 张凡,汲胜昌,师愉航,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):2790-2798,2849.
ZH F, JI SH CH, SH Y H, et al. Study on vibration and propagation characteristics of power transformer winding [J]. Journal of China Electrical Engineering, 2018,38(9):2790-2798,2849.
- [13] PATEL M R. Dynamic response of power transformers under axial short circuit forces part I - winding and clamp as individual components [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1973, PAS-92(5):1558-1566.
- [14] AHMAD A, JAVED I, NAZAR W, et al. Short circuit stress analysis using fem in power transformer on H-V winding displaced vertically & horizontally [J]. AEJ - Alexandria Engineering Journal, 2016, 57(1), DOI: 10.1016/j.aej.2016.10.006.
- [15] BAKSHI A, KULKARNI S V. Eigenvalue analysis for investigation of tilting of transformer winding conductors under axial short-circuit forces[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4):2505-2512.
- [16] 邓祥力,熊小伏,高亮,等.基于参数辨识的变压器绕组变形在线监测方法[J].中国电机工程学报,2014,34(28):4950-4958.
DENG X L, XIONG X F, GAO L, et al. On line monitoring method of transformer winding deformation based on parameter identification[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2014,34(28):4950-4958.
- [17] BAKSHI A, KULKARNI S V. Coupled electromagnetic-structural analysis of the spiraling phenomenon in a helical winding of a power transformer [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1):235-240.
- [18] 谢金哲,吴斌,杨浩文.基于能量守恒的平面大变形欧拉梁逐步积分算法[J].振动与冲击,2019,38(15):157-162,181.
XIE J ZH, WU B, YANG H W. A step-by-step integration algorithm for plane large deformation Euler beams based on energy conservation[J]. Vibration and Impact, 2019,38(15):157-162,181
- [19] 陈泽昊,许永鹏,李喆,等.基于小波包分解的直流电缆泄漏电流分析研究[J].仪器仪表学报,2018,39(9):163-170.
CHEN Z H, XU Y P, LI ZH, et al. Analysis of DC cable leakage current based on wavelet packet decomposition[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(9):163-170
- [20] 孙健,王成华,杜庆波.基于小波包能量谱和 NPE 的模拟电路故障诊断[J].仪器仪表学报,2013,34(9):

2021-2027.

SUN J, WANG CH H, DU Q B. Analog circuit fault diagnosis based on wavelet packet energy spectrum and NPE[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34 (9): 2021-2027

- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家标准 供配电系统设计规范: GB 50052—2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. PRC National Standard-Specifications for design of power supply and distribution systems: GB 50052- 2009 [S]. Beijing: China Planning Press, 2009.

- [22] 中华人民共和国国家能源局. 中华人民共和国电力行业标准 配电变压器运行规程: DL/T 1102-2009[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

National energy administration, PRC. Power industry standard of the People's Republic of China-Operation Rules of Distribution Transformers: DL/T 1102-2009[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.

- [23] 潘超, 陈祥, 蔡国伟, 等. 单相变压器中部匝间短路电磁特性研究[J]. 东北电力大学学报, 2019, 39(5): 34-40.
PAN CH, CHEN X, CAI G W, et al. Study on the electromagnetic characteristics of short-circuit between turns in single-phase transformer [J]. Journal of

Northeast Electric Power University, 2019, 39(5): 34-40.

作者简介



潘超, 2004 年于北华大学获得学士学位, 2007 年于东北电力大学获得硕士学位, 2013 年于华北电力大学获得博士学位, 现为东北电力大学电气工程学院副教授, 主要研究方向为电力系统及其自动化、电力系统稳定与电磁兼容、新能源并网运行。

E-mail: 31563018@qq.com

Pan Chao received B. Sc. degree from Beihua University in 2004, M. Sc. degree from Northeast Electric Power University in 2007, and Ph. D. degree from North China Electric Power University in 2013. He is now an associate professor in Electrical Engineering College, Northeast Electric Power University. His main research interests include power system and its automation, power system stability and electromagnetic compatibility, and new energy parallel operation.



陈祥(通信作者), 2018 年于东北电力大学获得学士学位, 现为东北电力大学硕士研究生, 主要研究方向为变压器故障监测与识别。

E-mail: 978483400@qq.com

Chen Xiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Northeast Electric Power University in 2018. Now, he is a M. Sc. candidate in Northeast Electric Power University. His main research interests include transformer fault monitoring and identification.