

考虑垫块瞬态应变的绕组变刚度动力学模型及 暂态振动特征分析

吕安强¹, 张子康¹, 王平^{1*}, 张书琦², 刘云鹏¹, 耿江海¹, 高树国³

(1. 华北电力大学燕赵电力实验室, 河北省 保定市 071003; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192; 3. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北省 石家庄市 050021)

Variable-stiffness Winding Model With Cushion Block Transient Strain Dynamics and Transient Vibration Characteristics Analysis

LYU Anqiang¹, ZHANG Zikang¹, WANG Ping^{1*}, ZHANG Shuqi², LIU Yunpeng¹,
GENG Jianghai¹, GAO Shuguo³

(1. Yanzhao Electric Power Laboratory, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China;
2. China Electrical Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China; 3. Electric Power Research Institute of
State Grid Hebei Electric Power Supply Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, Hebei Province, China)

ABSTRACT: To study the quantitative correlation between the deformation characteristics of windings and the deterioration of the structure, a winding deformation identification method based on the combination of numerical calculation and transient test analysis of the actual transformer is proposed. Firstly, an axial dynamic model with variable stiffness coefficients for the middle-voltage winding of the SFSZ7-31500/110 actual transformer considering the transient compression strain of the blocks is established. Quantitative analysis is carried out on the variation laws of the amplitude energy and natural frequency of the winding due to the sudden change in the height of the blocks. Subsequently, multiple short-circuit impact tests are conducted for transient vibration signal acquisition, and the structural parameters of the faulty winding are obtained through the inspection of the housing removal. Finally, the changes in the modal and mechanical parameters of the winding are calculated based on the proposed model, and quantitative calculations are carried out for the mechanical deterioration characteristics of the winding. The wavelet energy of the transient vibration signal is verified through the time-frequency distribution. The calculation results show that after the winding deforms, the amplitude of the vibration displacement decreases by 0.002 m, and the second-order natural frequency increases by 18.269 Hz. The wavelet energy of the forced vibration signal's main frequency continuously

decays over time, the proportion of the fundamental frequency energy significantly decreases, and the distribution of the frequency band of the natural frequency in the free vibration stage becomes more complex. The proposed model and transient characteristic analysis in this paper enable accurate calculation of the mechanical deterioration parameters of the winding structure and rapid identification of winding deformation.

KEY WORDS: winding deformation; dynamics model; natural frequency; cumulative effects; binary distribution

摘要: 为研究绕组形变特征与结构劣化之间的量化关联关系, 该文提出一种基于数值计算和真型变压器暂态试验分析相结合的绕组形变辨识方法。首先, 建立 SFSZ7-31500/110 真型变压器中压绕组考虑垫块瞬态压缩应变的变刚度系数轴向动力学模型, 针对垫块高度突变引起绕组振幅能量及固有频率的变化规律开展量化分析; 随后, 进行多次短路冲击试验暂态振动信号采集, 经吊罩检查获取故障绕组的结构参数; 最后, 基于所提模型计算绕组模态及力学参量的变化情况, 针对绕组机械劣化特征开展量化计算, 并通过暂态振动信号小波能量时频分布进行验证。结果表明, 绕组发生形变后, 振动位移幅值减小 0.002 m, 二阶固有频率升高 18.269 Hz。受迫振动信号主频小波能量随时间持续衰减, 基频能量占比显著降低, 自由振动阶段固有频率频带的分布更加复杂。该文所提模型及暂态特征可准确计算绕组机械结构劣化参量, 实现绕组形变的快速辨识。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52177141)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52177141).

关键词: 绕组形变; 动力学模型; 固有频率; 累积效应; 二值分布

0 引言

变压器在电网输变电环节承担着关键作用,其安全稳定运行同供电、经济、民生息息相关,突发性故障必然导致难以估量的经济损失^[1-2]。因短路冲击造成的变压器事故率居高不下,其中绕组变形、松动、失稳故障占比高达30%以上,对于突发短路后的绕组进行机械状态的在线监测十分必要^[3-4]。

变压器长期运行可能遭受多次外部短路冲击,绕组及垫块受累积效应的影响逐渐产生不可逆的形变^[5]。通常,绕组结构的改变会导致其振动特性的改变,其特征易体现在振动信号中,研究人员多借助非侵入式的振动信号或声纹监测实现绕组的机械状态诊断^[6-7]。对经典的绕组振动模型研究发现,辐向振动因其位移幅度小、固有频率高的特点难以对特征分析产生有效贡献,因此基于“质量-阻尼-弹簧”模型的绕组轴向振动机理研究是目前热门方向^[8-9]。

自 Watts 建立了轴向振动质量-弹簧-阻尼模型以来^[10],大量学者从材料非线性、预紧力、磁-机动态耦合等方面对轴向振动模型的相关研究进行了完善。文献[11]基于磁-结构耦合作用对绕组轴向动态振动模型进行了研究,得出绕组固有频率满足激励的倍数会出现多倍频共振得结论;文献[12]考虑绕组电磁力与位移之间的双向耦合作用,通过修正位移对漏磁分布的影响,提出振动过程中影响绕组失稳的特征参量;文献[13-14]建立了绕组非线性动力学模型,基于该模型提出了动态短路应力计算方法和可用于绕组机械状态评估的特征;文献[15]基于绕组结构耦合特性,考虑了阻尼力的动态变化对绕组振动过程的影响,从机理上解释了绕组振动非线性的外在表现特征。已有研究重点研究了磁机双向耦合作用的非线性轴向模型,针对抗短路能力评估标准进行了修正,并基于倍频振动规律开展了特征分析,但相关研究并没有解决绕组机械状态劣化与振动特征的量化关联问题。

绕组振动特征大多是基于现有的非线性倍频振动规律提出,例如主频占比、振动熵、高次谐波及各类时频特征^[16-19]。突发短路的暂态过程中,铜导线无法预测的形变状态对轴向振动的影响难以量化计算,亟需开展垫块结构力学参数对振动特性影响的深入研究。文献[20]对不同加载速度下的垫块力学特性开展了研究,提出了计及垫块动态应变率的非线性轴向振动模型,计算了高应变率载荷对

垫块弹性模量的影响;文献[21]讨论了层压垫块在短路累积效应影响下的塑性应变发展规律,基于弹性模量与短路力的非线性关系,提出变压器轴向预紧力的损失计算方法;文献[22]开展了饼间结构阻尼对绕组的轴向稳定性的影响研究,基于结构模态试验分析了结构模态参数改变对振动响应及动态稳定性的影响。针对绕组轴向振动模型中结构力学参数的研究已有一定进展,然而,如何建立结构参数劣化与绕组振动特征外在表现之间的量化关系,仍缺乏有效的方法。

为解决上述问题,本文首先建立考虑垫块瞬态压缩总应变的变刚度系数轴向动力学模型,针对突发短路垫块压缩应变对绕组动力学特性的影响开展量化分析;然后,开展真型变压器短路冲击试验并采集暂态振动信号,基于各层垫块瞬态压缩应变计算绕组模态力学参数的变化情况;最后,分别对受迫阶段及自由振动阶段信号进行独立分析,确定反映绕组劣化特征的计算方法及变化规律。本文提出的模型可准确计算绕组机械结构劣化参量,实现绕组形变的快速辨识。

1 考虑绕组变刚度的非线性轴向动力学模型

1.1 绕组轴向暂态振动计算模型

变压器遭受短路冲击时,短路电流瞬间激增,在短路电流及漏磁场的共同作用下,导线内产生在极短时间内衰减的短路电磁力,引起轴向的强烈振动。绕组轴向振动迅速达到峰值,随后因电流的衰减以及绝缘油的阻尼作用逐渐衰减,该过程伴随着垫块的收缩与形变,导致饼间油隙高度发生变化,从而改变结构的模态参数。

110 kV 及以上电压等级变压器普遍采用饼式绕组,轴向上通过绝缘垫块分割出油道,考虑其轴向结构特点以及振动过程的动力学特性,可将各层线饼等效为集中质量块,垫块等效为无质量弹簧,绝缘油等效为阻尼。以某 110 kV 退役真型变压器为参考,变压器基本信息如表 1 所示,搭建其中压绕组的“质量-阻尼-弹簧”轴向动力学模型,如图 1 所示。

该模型包括绕组上下压板在内共 66 个自由度,图中: m_i 为压板和线饼质量; k_i 为垫块刚度系数; c_i 为绝缘油作用产生的阻尼; F_z 为预紧力; f_i 为电磁力; f_k 为相邻垫块的弹力; f_c 为相邻垫块的阻尼

表1 110 kV 变压器基本信息

Table 1 Basic parameters of 110 kV transformer

序号	名称	数值
1	型号	SFSZ7-31500/110
2	额定容量/MVA	31.5/31.5/31.5
3	电压比/kV	(110±3×2.5%)/(38.5±2×2.5%)/10.5
4	联结组别	YN yn0 d11
5	额定电流/A	165/472/1732
6	各绕组线饼数	68/64/108

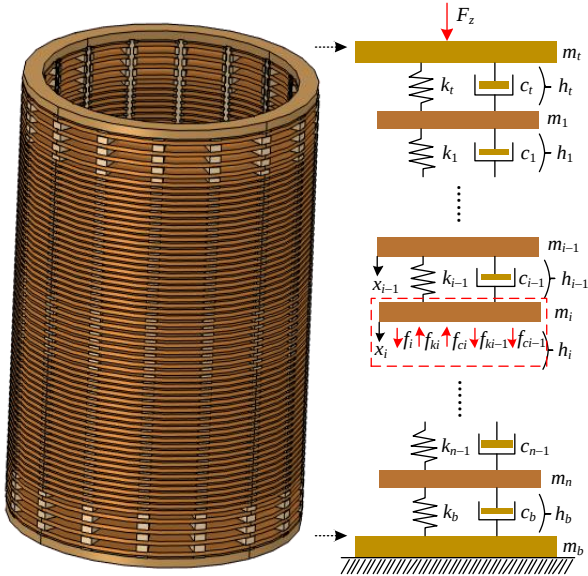


图1 绕组轴向振动模型

Fig. 1 Winding axial vibration model

力； x_i 为线饼在电磁力作用下的位移； $\dot{x}_i$ 为速度； $\ddot{x}_i$ 为加速度。第*i*层线饼的动力学方程为

$$m_i \ddot{x}_i + c_i \dot{x}_i + k_i x_i - c_{i-1} \dot{x}_{i-1} - k_{i-1} x_{i-1} = F_z + f_i + m_i g \quad (1)$$

1.2 绝缘垫块非线性力学特性本构拟合

为研究垫块抗压状态下的力学行为，开展垫块压缩试验。首先，通过真空环境箱对垫块样品进行干燥预处理，环境温度设置为(105±2)℃，压强为1 kPa；接着，将规格为77 mm×39 mm×2 mm的绝缘垫块按照5块一组进行叠放，进行致密化预处理；最后，通过万能试验机进行常温下的压缩试验，载荷加载速率为1 mm/min，处于准静态区间，达到载荷上限时缓慢撤去载荷，重复4次后达到致密状态。试验设备及试验垫块的应力-应变曲线如图2所示。

对压缩试验曲线进行拟合，得到其非线性本构方程，垫块的应力-应变关系及弹性模量可由式(2)、(3)表示。

$$\sigma = a\varepsilon + b\varepsilon^3 \quad (2)$$

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = a + 3b\varepsilon^2 \quad (3)$$

式中： σ 、 ε 分别为垫块的应力、应变； a 为垫块的

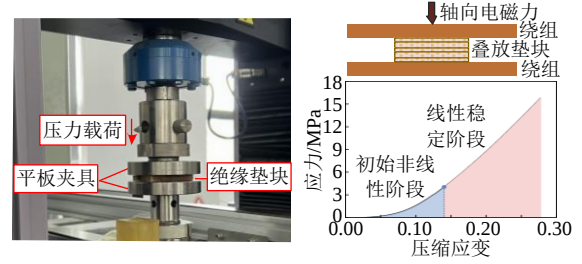


图2 垫块压缩试验及应力应变曲线

Fig. 2 Compression test and stress-strain curve of cushion blocks

线弹性常数； b 为硬化系数的常数。拟合结果 $a=1.69 \times 10^7$ 、 $b=5.83 \times 10^8$ 。

1.3 变刚度的非线性动力学建模

绕组铜导线的弹性模量远高于垫块的弹性模量数个数量级，因此在轴向力作用下可不考虑绕组的轴向变形^[23]，只需考虑垫块收缩带来的等效刚度变化影响，同时认为垫块应变具有各向同性。相邻两线饼的振动位移差记为 $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$ ，则绕组振动过程中各层等效刚度系数 k_i 可表示为

$$k_i = \frac{df_i}{d\Delta x_i} \quad (4)$$

动态电磁力 f_i 在数值上等于每层垫块应力 σ_i 与接触面积 S 的乘积，即 $f_i = S\sigma_i$ ，同时 Δx_i 可表示为每层垫块高度 h_i 和应变 ε_i 的乘积， $\Delta x_i = h_i \varepsilon_i$ ，代入式(4)，可将刚度的动态变化通过相邻线饼振动产生的位移进行表示：

$$k_i = \frac{dS\sigma_i}{dh_i \varepsilon_i} = \frac{S}{h_i} \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} = \frac{S}{h_i} (a + 3b(\frac{x_{i+1} - x_i}{h_i})^2) \quad (5)$$

等效阻尼数值 c_i 取值为并联弹簧等效刚度系数 k_i 的 1×10^{-4} 倍^[24]，将计算结果代入式(2)，可得第*i*层线饼的动力学方程为

$$m_i \ddot{x}_i - \frac{10^{-4} S}{h_{i-1}} [a + 3b(\frac{x_i - x_{i-1}}{h_{i-1}})^2] (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) - \frac{S}{h_{i-1}} [a + 3b(\frac{x_i - x_{i-1}}{h_{i-1}})^2] (x_i - x_{i-1}) + \frac{10^{-4} S}{h_i} [a + 3b(\frac{x_{i+1} - x_i}{h_i})^2] (\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + \frac{S}{h_i} [a + 3b(\frac{x_{i+1} - x_i}{h_i})^2] (x_{i+1} - x_i) = F_z + f_i + m_i g \quad (6)$$

对于绕组等效模型，须分析其不同的固有频率和对应的模态振型，该系统无阻尼振动特征方程为

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{X} = 0 \quad (7)$$

式中： $\mathbf{K}$ 为绕组等效刚度矩阵； $\mathbf{M}$ 为绕组线饼质量矩阵； ω 为绕组轴向振动固有频率； $\mathbf{X}$ 为模态振型。

表2给出中压绕组轴向振动的动力学模型所用

结构参数, 包括线饼质量 m 、饼间油隙高度 h 。根据参数可求得中压绕组前 4 阶固有振型如图 3 所示: 一阶振型呈“U”型分布, 频率为 55.54 Hz; 二阶振型呈“S”型分布, 频率为 115.53 Hz; 三、四阶振型频率分别为 185.14 和 254.66 Hz。

表 2 110 kV 变压器中压绕组振动模型参数
Table 2 Vibration model parameters of medium voltage winding of 110 kV transformer

参数	数值	参数	数值
m_1 、 m_6 /kg	109.196	$m_1 \sim m_6$ /kg	54.375
h_1 、 h_2 、 h_6 、 h_3 /m	2.3×10^{-2}	h_3 、 h_6 /m	23×10^{-3}
h_4 、 h_{60} /m	1.5×10^{-2}	h_1 、 h_6 、 $h_5 \sim h_{26}$ 、 $h_{38} \sim h_{59}$ /m	6×10^{-3}
$h_{27} \sim h_{37}$ /m	9×10^{-3}	—	—

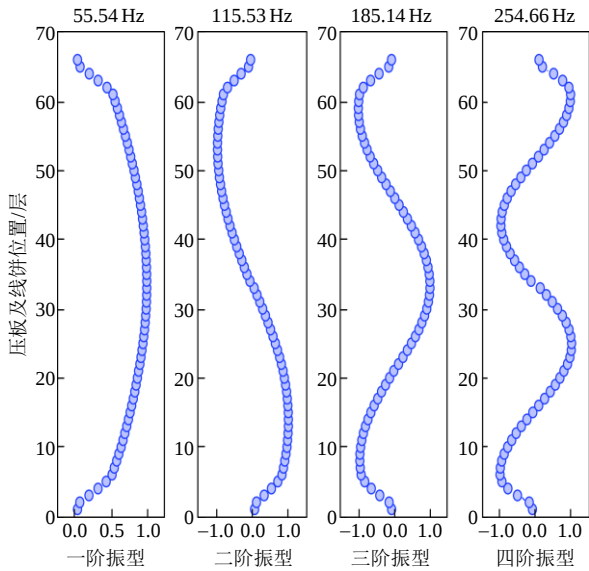


图 3 绕组固有模式

Fig. 3 Natural mode of winding

由于经过短路冲击试验后本文所用型号变压器绕组已经产生损伤, 为证实本文所提动力学模型的准确性与可推广性, 另选取 SSZ-40000/110 真型变压器完好的低压侧绕组开展了力锤模态试验。该绕组同为饼式绕组, 共 107 层线饼, 模态试验与模型计算结果对比如表 3 所示, 各阶模态频率误差较小, 证明了本模型的可推广性。

表 3 SSZ-40000/110 变压器低压绕组模态试验及计算

Table 3 Modal testing and calculation of the low-voltage winding of the SSZ-40000/110 transformer

模态频率	试验值/Hz	计算值/Hz	误差/%
一阶	37.5	37.86	0.96
二阶	56.25	57.90	2.93
三阶	73.75	69.35	-5.97
四阶	93.75	95.11	1.45

2 短路冲击下绕组结构模态变化研究

2.1 考虑垫块瞬态压缩应变的轴向动力学模型

以 GB/T 19264.2-2013 为参考, 在垫块阶段压缩试验处理中, 施加较大载荷后垫块高度恢复至初始应力阶段需至少维持 5 min 以上的时间静置, 使其状态满足测量标准^[25]。而实际绕组因预紧力的存在, 垫块产生较大的形变量时, 在一定时间内将保持该状态, 且短路故障持续时间极短, 产生瞬态压缩应变后将维持暂态振动的全过程。

垫块在压缩方向的初始弹性模量远小于铜材质绕组, 因此短路初期低应力状态下垫块会先于绕组产生一定程度的变形^[26]。并且, 垫块应变的发展时间远小于电磁力的周期, 因此在工程上可近似认为垫块压缩应变是瞬时产生的, 即电磁力达到幅值后, 绕组每层线饼之间的垫块高度随即产生突变, 发生短路冲击后的振动过程存在阶跃型变化。记发生短路后, 垫块高度变化量 Δh_i , 变化后的刚度、阻尼分别记为 k'_i 、 c'_i , 电磁力达到最大的时刻为 $t_{\max}$ 。理论上, 垫块高度突变后相邻两线饼的位移差值应为 $\Delta x_i = (x_i + \Delta h_i) - (x_{i-1} + \Delta h_{i-1})$, 但由于绕组本身即为压紧状态, 相邻线饼 Δh_i 的差值较小, 可忽略不计, 本节重点讨论刚度变化的影响, 此时动力学方程可以写为分段函数:

$$\begin{cases} m_i \ddot{x}_i - c_{i-1}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) - k_{i-1}(x_i - x_{i-1}) + \\ \quad c_i(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + k_i(x_{i+1} - x_i) = \\ \quad F_z + f_i + m_i g, \quad t < t_{\max} \\ m_i \ddot{x}_i - c'_{i-1}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) - k'_{i-1}(x_i - x_{i-1}) + \\ \quad c'_i(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + k'_i(x_{i+1} - x_i) = \\ \quad F_z + f_i + m_i g, \quad t \geq t_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

分别对线性、变刚度非线性、考虑瞬态压缩应变的非线性 3 个模型进行计算, 产生最大位移的线饼振动加速度变化如图 4 所示。初始时刻, 三模型振动趋势相同, 考虑瞬态压缩应变的非线性模型最大振动加速度幅值分别为变刚度非线性模型的 0.92 倍、线性模型的 1.65 倍。受迫振动信号的高次谐波分量较多, 成分复杂, 激励撤去后自由振动信号频率明显降低, 以绕组自身的低阶固有频率为主, 成分较为单一。

2.2 绕组暂态振动力学特性分析

针对式(8)所示的变刚度非线性动力学模型, 迭代计算过程如图 5 所示。根据线饼初始位置及式(5)确定初始刚度, 求出下一时刻绕组振动分布, 从而

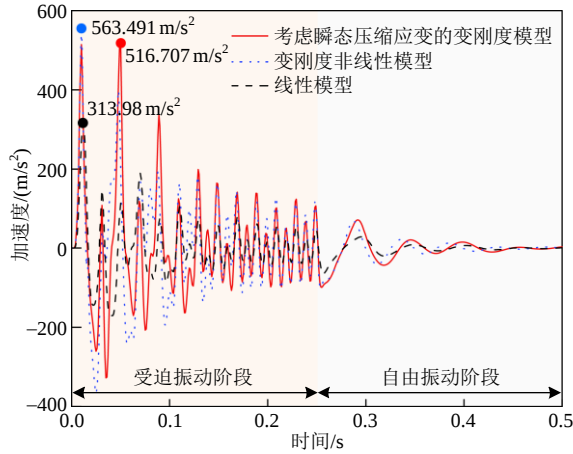


图4 各模型最大位移线饼振动加速度

Fig. 4 The linear cake vibration acceleration at the maximum displacement of each model

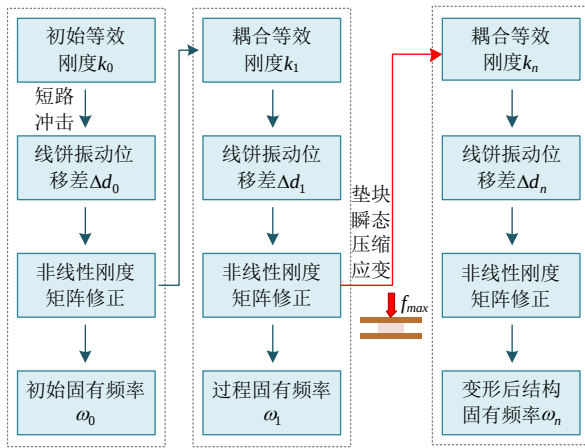


图5 刚度耦合修正流程

Fig. 5 Stiffness coupling correction process

修正下一时刻的刚度,同时可求出该时刻刚度对应的固有频率。

图6为短路冲击过程中绕组的刚度以及固有频率的变化情况。当垫块产生一定程度的累积压缩应变后,绕组的刚度及固有频率均存在不同程度的升高。

借助 ODE45 非线性微分方程求解器,对该模型进行求解,计算出中压绕组各线饼振动的时空分布如图7所示。沿绕组轴向观察,短路初始时刻绕组振动位移幅值处于第53层线饼,整体高度的上、下各1/4数量左右的线饼振动位移明显。而垫块高度的分布会在一定程度上影响线饼振动的位移,导致在冲击过程中,振幅会逐渐转移到位于绕组两端垫块高度大的位置。说明绕组在遭受短路冲击时下端部响应更明显,容易引发绕组机械故障。

绘制每层线饼位移达到幅值时刻、受迫振动时刻以及自由振动时刻振型在平面的投影。在受迫振

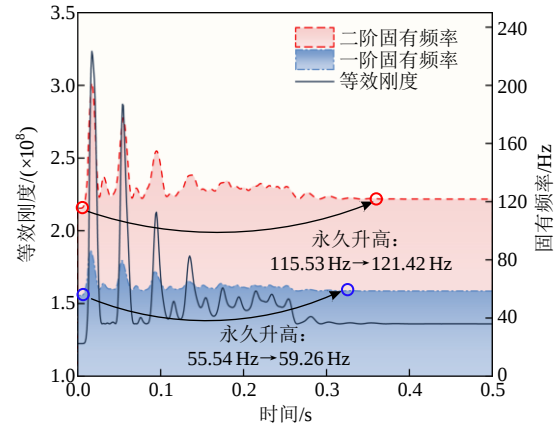


图6 刚度及固有频率变化情况

Fig. 6 Changes in stiffness and natural frequency

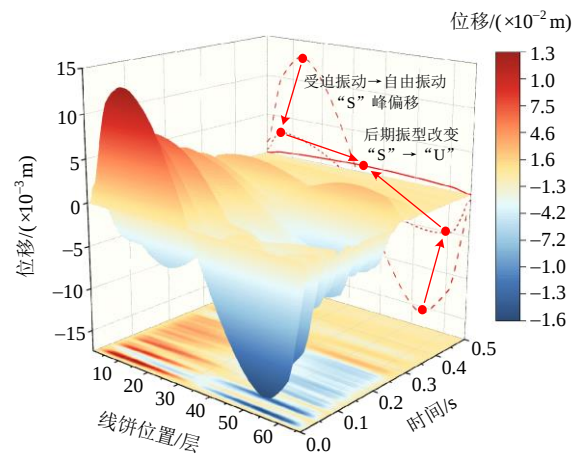


图7 绕组振动的时空分布

Fig. 7 Space-time distribution of winding vibration

动阶段,振型均为近“S”型,与图3中2阶振型相似,此时振动主频为100 Hz,接近二阶固有振型的频率。自由振动阶段,高频分量快速衰减,前期仍保持“S”型振型,位移峰值逐渐靠近垫块高度大、刚度小的两端。振动幅值衰减至10%的过程持续约0.2 s,此时接近一阶振型“U”型,频率更接近一阶固有频率。自由振动阶段初期的主振型仍会维持二阶振型,但振动频率会更加接近二阶固有频率,在进行在运变压器暂态振动信号的处理过程中,可对受迫振动阶段与自由振动阶段分别开展分析。

3 垫块瞬态压缩应变对绕组劣化特征的影响

3.1 垫块形变对振动特征的影响机理分析

2节已讨论过,垫块高度会影响绕组的振动分布,压缩应变会引起振幅的降低,而刚度的改变会导致固有频率发生改变。实际变压器遭受短路冲击的瞬间,绕组必然产生难以恢复的瞬态压缩应变,结构的改变必然导致垫块产生压缩形变,引起整体

结构的振动力学特性变化。绕组受简谐驱动力的动力学方程一般形式为

$$\begin{cases} \ddot{x}_i + 2\beta\dot{x}_i + \omega_0^2 x_i = F_z \cos(\omega t) \\ \omega_i = \sqrt{\frac{k_i}{m}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: ω_i 为固有频率; β_i 为阻尼系数。

在受迫振动的情况下, 其稳态振幅公式为

$$A_{\text{Forced}} = \frac{F_z}{m\sqrt{(\omega^2 - \omega_n^2)^2 + (2\beta\omega)^2}} \quad (10)$$

在电力系统的工频激励下, 激励电磁力的频率满足工频的二倍, 即 $\omega=100\text{ Hz}$, 绕组接近二阶振型。短路冲击导致绕组结构发生改变, 固有频率受垫块产生形变的影响而升高, 根据上文计算结果, ω_i 增大, 系统激励更加远离共振点, 则振动位移幅值 A_{Forced} 减小。即固定激励下, 振幅与固有频率成反比。

短路故障切除, 绕组进入自由振动阶段, 自由振动的位移幅值 A 满足能量守恒:

$$\frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}kx_i^2 + \frac{1}{2}m\dot{x}_i^2 \quad (11)$$

$$A_{\text{Free}} = \sqrt{x_i^2 + \frac{\dot{x}_i^2}{\omega_i^2}} \quad (12)$$

振幅 A_{Free} 与进入自由振动阶段的振幅与速度均有关, 在二者不变的情况下, ω_i 增大, 振动位移幅值减小。因此, 绕组在突发短路的情况下, 必然导致以下结果: 1) 结构改变, 等效刚度增大; 2) 系统各阶固有频率升高; 3) 主频振动位移幅值降低, 频带能量降低。

为验证该规律, 基于本文所提轴向动力学模型, 对绕组最大位移第 53 层线饼处垫块的等效刚度系数及整体结构的一、二阶固有频率进行计算, 结果如表 4 所示。

结果表明, 垫块瞬态压缩应变分别达到 0.01~0.3 时, 等效刚度系数由 1.215×10^8 升高至 1.718×10^8 , 一阶固有频率由 55.865 Hz 升高至 66.393 Hz, 二阶固有频率由 116.131 Hz 升高至 138.101 Hz, 绕组最大位移由 0.0152 m 变为 0.0131 m, 减小 0.0021 m。受迫振动阶段, 主频能量随着振动位移幅值的降低而加速衰减, 最终将导致主频能量降低, 自由振动阶段绕组将在非倍频处形成新的共振点, 会引起该频带能量的异常升高。

表 4 绕组结构参数及位移计算结果

Table 4 Vibration model parameters of medium voltage winding of 110 kV transformer

垫块压缩 应变	等效刚度系数 /($\times 10^8$ N/m)	一阶固有 频率/Hz	二阶固有 频率/Hz	绕组 最大位移/m
0.01	1.215	55.865	116.131	0.0152
0.05	1.266	56.994	118.559	0.0150
0.1	1.336	58.554	121.81	0.0146
0.15	1.414	60.252	125.333	0.0143
0.2	1.503	62.103	129.181	0.0140
0.25	1.602	64.135	133.408	0.0136
0.3	1.718	66.393	138.101	0.0131

因此, 在对绕组短路冲击振动信号进行监测时, 可重点关注切除短路故障后的自由振动阶段。

3.2 基于时空分布的振动信号特征计算

为充分体现模型计算得到的暂态振动信号的时空分布特征, 分别计算振动波形的傅里叶频谱以及小波能量时频分布, 如图 8 所示。信号的频谱成分主要包括 50、100 Hz 及其部分倍频分量, 并且以 0~500 Hz 为主, 小波能量图中主要频带信号的能量分布和能量占比与频谱对应, 同时在时间尺度上体现了在受迫振动阶段与自由振动阶段能量的分布与衰减变化。绕组暂态振动特征在小波能量时频分布中可得到更好的呈现, 分别对振动的两个阶段开展分析。

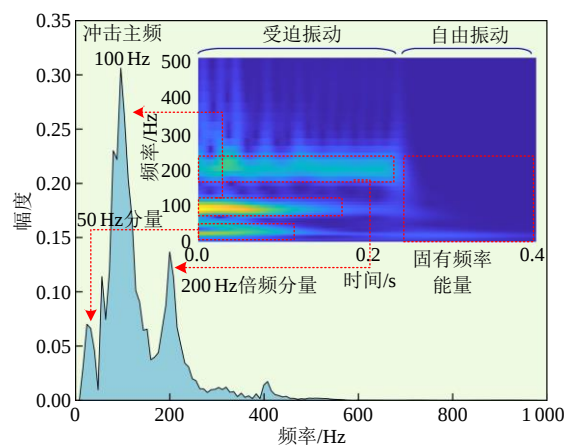


图 8 振动波形能量分布

Fig. 8 Energy distribution of vibration waveform

在短路冲击过程的受迫振动阶段, 短路电流引起绕组的剧烈振动, 此时计算得振动信号的主频主要由电流驱动, 为工频的二倍, 即 100 Hz, 接近二阶固有频率。由于绕组振动的倍频特性^[27], 在高频部分同样存在能量分布, 以 200 Hz 较为明显, 但由于振幅与频率负相关, 高频振动分布整体保持在较低水平。短路切除后, 自由振动阶段基频 100 Hz

及倍频分量持续衰减,振动信号末端绕组的共振频率接近其一阶固有频率,证明图 7 振型变化规律的正确性。

4 基于暂态全阶段振动信号的绕组状态辨识

固有频率的变化情况可根据垫块的瞬态压缩总应变量计算,通过建立二者的关系可实现绕组机械状态的在线监测。

4.1 真型变压器短路冲击结果计算

依据 GB 1094.5-2008 中的规定进行了 110 kV 变压器短路冲击试验^[28],短路冲击持续 250 ms,传感器安装及绕组形变分布如图 9 所示。大电流短路工况下,绕组轴向振动将以横波形式经绝缘油传播至附近油箱表面,因此选择最靠近绕组的油箱主体正面安装振动传感器,采集短路冲击过程中的振动加速度信号^[29]。以高对中 B 相短路冲击试验为例,短路电流从 60%逐步增加到 105%,并测量短路前后的电抗变化率,超过 2%即停止试验,期间共对绕组进行了 8 次冲击。所有试验结束后,对变压器进行吊罩观察,B 相中压绕组在遭受多次冲击后发生严重形变,绕组下端部 1/4 处至绕组底部发生内凹的辐向形变。

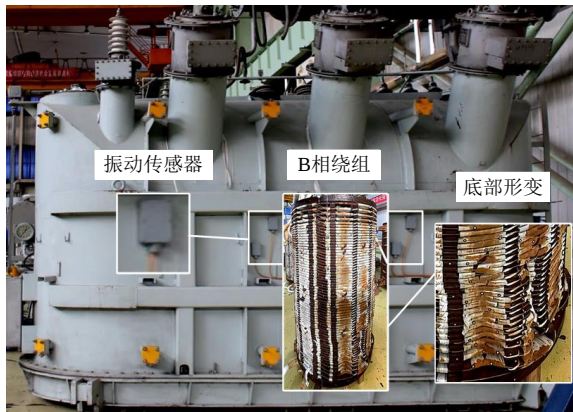


图 9 B 相中压绕组形变

Fig. 9 Deformation of B phase medium-voltage winding

根据导线和垫块的应力-应变曲线规律,垫块的弹性模量较小,在短路初期会先一步发生形变。为探究垫块在短路冲击过程中产生力学特性的变化及大冲击载荷下产生瞬态压缩应变的影响,将绕组发生形变位置沿轴向分布的所有油隙垫块依次取出并测量了高度变化情况,如图 10 所示。

各层垫块均产生了一定的压缩,应变量整体差距较小。在绕组底部至 1/4 高度严重形变处,垫块压缩应变量明显高于其他位置,说明此处垫块受线饼变形后的振动、挤压幅度更大,产生了更大的变

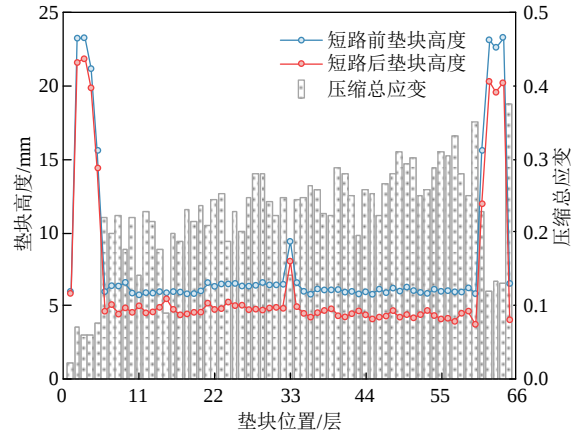


图 10 B 相中压绕组垫块压缩总应变分布

Fig. 10 Total compressive strain distribution of B phase medium-voltage winding cushion blocks

形。计算绕组未发生形变部分的垫块平均应变 $\varepsilon_1=0.213$,发生形变部分的垫块平均应变 $\varepsilon_2=0.286$ 。

垫块不规律的累积压缩量分布导致振动特征发生明显变化,本节以 105%短路电流冲击试验结束后各层垫块产生的实际压缩应变数据代入动力学方程中,计算真型绕组形变后的二阶固有频率由 115.532 Hz 升高至 133.801 Hz,最大位移由 0.015 3 m 减小至 0.013 3 m,结果如图 11 所示。

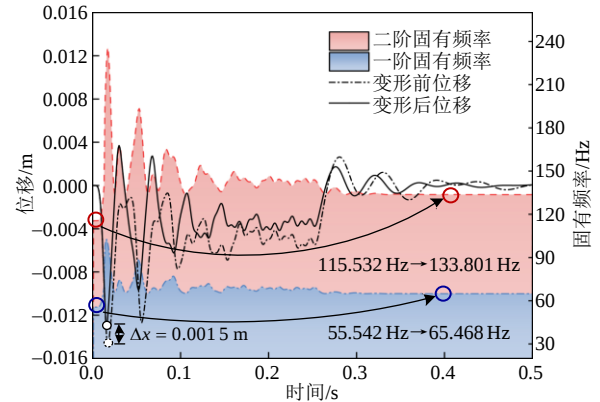


图 11 线饼最大位移及固有频率变化

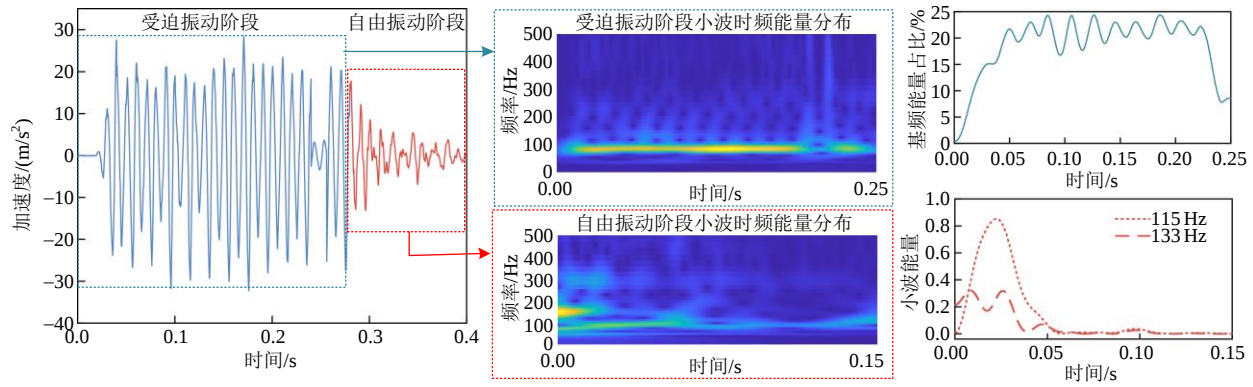
Fig. 11 Maximum displacement and natural frequency change of cake

4.2 多次短路冲击下绕组劣化特征分析

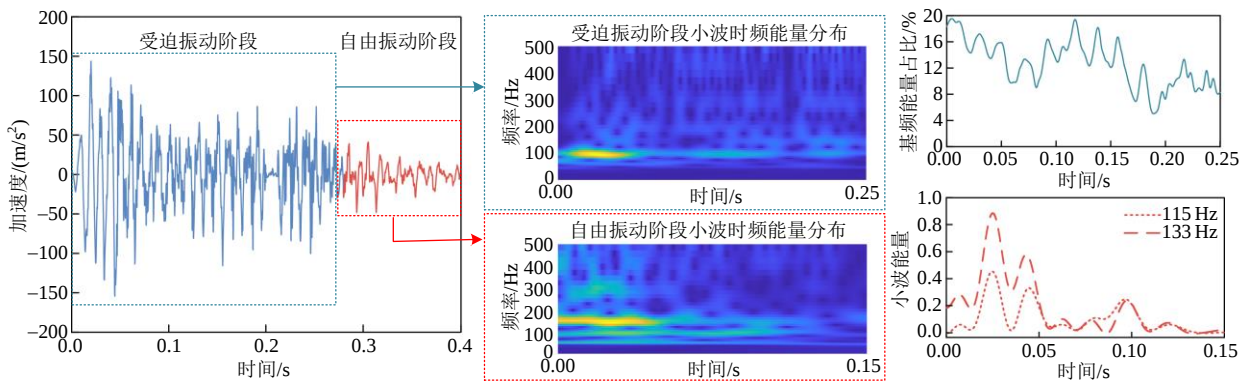
将高对中 B 相短路冲击振动信号进行时频转化,计算其小波能量分布。同时对时频矩阵进行最小-最大归一化处理,消除能量累积升高的影响,以便分析主频能量的实际变化情况,参考式(13),时频分布结果如图 12 所示。

$$W_{\text{new}} = \frac{W - w_{\min} \cdot W}{w_{\max} - w_{\min}} \quad (13)$$

式中: W 为小波时频矩阵; $w_{\min}$ 为矩阵最小值; $w_{\max}$ 为矩阵最大值; W_{new} 为归一化后的矩阵。



(a) 60%短路冲击暂态全阶段时频特征分析



(b) 105%短路冲击暂态全阶段时频特征分析

图12 短路冲击暂态全阶段时频特征分析

Fig. 12 Analysis of time-frequency characteristics of short-circuit impact transient in all stages

短路冲击前 250 ms 的受迫振动阶段,信号的小波能量主要集中在基频 100 Hz 处,基频振幅更大,自由振动阶段更容易在二阶固有频率附近发生共振。因此,根据图 12 计算结果,分别读取自由振动阶段 115 Hz 以及 133 Hz 处的小波能量变化趋势。60%短路电流时,绕组未发生形变,受迫区间内任一时刻的基频能量占比保持较高水平,经线性拟合其时域能量的衰减系数为-0.061 2;自振区间 115 Hz 附近的能量更高,其产生与变化更加明显,说明共振点更接近 115 Hz。105%短路电流时,绕组已发生形变,高频谐波分量升高,基频能量占比降低且在短路期间呈下降趋势,衰减系数为-0.089 6,较初次试验增大 46%;自振区间固有频率升高导致 133 Hz 附近的能量超过 115 Hz,说明共振点已转移至 133 Hz 附近。

对 105%短路电流试验暂态振动信号的自由振动小波时频能量进行二值化处理,通过确定阈值将矩阵转化为只包含 0 和 1 两个值的矩阵,只保留小波能量的分布特点,忽略其他影响。分别通过概率阈值、分位数阈值和最大类间方差阈值(Nobuyuki Otsu method, Otsu)对小波能量进行二值化矩阵的构

建,同时计算结构相似性系数、皮尔逊相关系数及均方误差 3 个参量来表征二值化分布与原小波能量分布的相似度,计算结果如图 13 所示。基于 Otsu 阈值法的二值化处理结果与原图结构相似度最高且误差最小,说明其处理效果最好,可最大限度地保留原分布的视觉特征。基于 Otsu 二值化分布矩阵,计算 8 组高对中短路冲击试验在 0~500 Hz 带宽范围内 133 Hz 附近频带的分布占比的变化情况,以其在总分布的占比作为固有频率升高造成的主频带间的粘连程度,来表征绕组发生形变后,自由振动阶段固有频率异常升高造成的影响,同时基于受迫振动阶段的小波能量矩阵计算基频能量占比的变化情况,特征量计算式为

$$\begin{cases} \eta_{\text{cwt}} = \frac{E_{\text{base}}}{\sum E_f}, & \text{基频能量占比} \\ \eta_{\text{Otsu}} = \frac{D_{\text{IMF2}}}{\sum D_f}, & \text{频带分布占比} \end{cases} \quad (14)$$

式中: η_{cwt} 为受迫振动阶段 100 Hz 基频能量占比; η_{Otsu} 为自由振动阶段升高后的固有频率频带分布占比; E_f 、 D_f 为分别为 0~500 Hz 范围内的小波能量值及其二值分布值; E_{base} 为振动基频能量,取 100 Hz

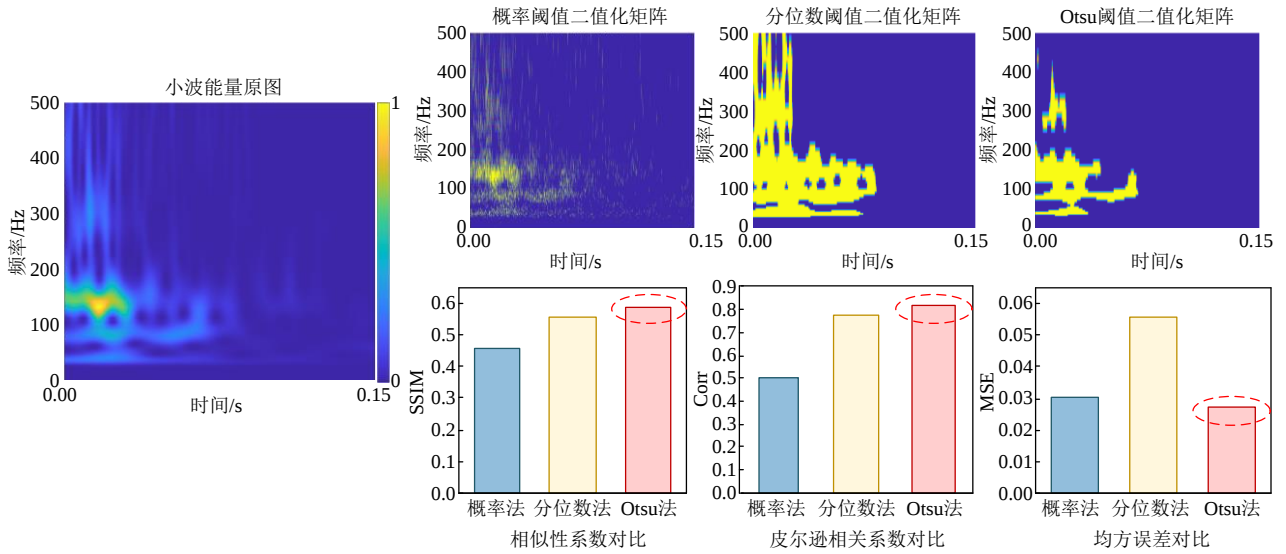


图 13 自由振动阶段小波能量二值化分布处理

Fig. 13 Wavelet energy binary distribution processing in free vibration stage

处的能量； D_{IMF2} 为二阶固有频率的二值化分布，根据模型计算结果取 133 Hz 处的分布，特征计算结果如图 14 所示。

可实现绕组的故障辨识。

5 结论

本文提出了一种基于数值计算和真型变压器暂态试验分析相结合的绕组形变辨识方法；建立了考虑绕组垫块瞬态压缩总应变的变刚度轴向动力学模型，并通过对一真型绕组开展模态试验，证明了该模型的计算准确性与可推广性；通过对 SFSZ7-31500/110 真型变压器短路冲击试验结果进行数理结合分析，提出了简单、高效的绕组机械状态劣化辨识特征。得到结论如下：

1) 建立了考虑垫块瞬态压缩总应变的变刚度轴向动力学模型，实现了暂态振动过程中对刚度的实时修正。绕组结构参数的变化会导致振型及固有频率的变化，受迫振动阶段绕组振型为 2 阶“S”型，随后两个峰值向刚度较小的两端移动，进入自由振动阶段尾期振型衰减为“U”型。

2) B 相中压绕组发生形变后，形变附近垫块产生的平均总应变较其余部位高出 0.073，导致该次短路冲击线饼的振动位移幅值减小 0.002 m，绕组二阶固有频率升高 18.269 Hz，证明自由振动阶段的主频变化可反映绕组的形变。

3) 根据短路电流持续时间提出将暂态信号划分为受迫振动和自由振动独立分析的方法。计算暂态信号的小波能量分布，发生形变时受迫振动阶段的基频占比在衰减系数增大 46%，自由振动阶段的 Otsu 二值分布共振点由 115 Hz 升高至 133 Hz 附近。受迫段基频 100 Hz 能量占比与自振段共振点 Otsu

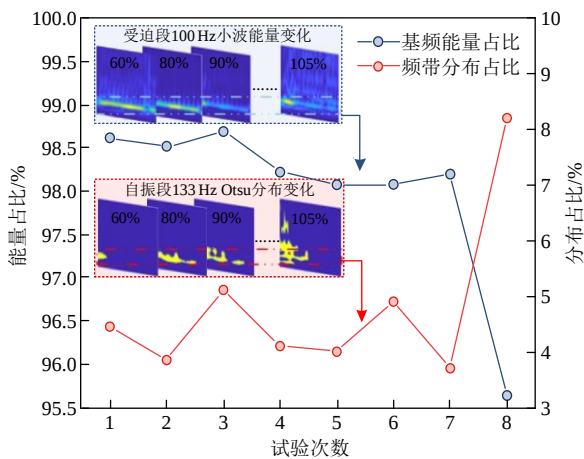


图 14 多次短路冲击绕组劣化特征

Fig. 14 Multiple short-circuit impact winding deterioration characteristics

133 Hz 频段分布占比前几次短路呈现出较为平缓的波动状态，最后明显上升，基频能量占比在前几次短路缓慢下降，最后显著降低。结果表明，基于垫块累积效应计算得到绕组固有频率改变的特征，可通过受迫振动信号的小波能量图以及自由振动信号的二值化分布图体现。固有频率升高，引起的自由振动阶段共振能量分布异常，可借助固有频率频带分布占比来表征，固有频率升高导致的绕组振动位移幅值减小，主频带能量降低也可通过基频能量占比来表征。在绕组正常的情况下， η_{cwt} 和 η_{Otsu} 的变化量不会超出 2%，若超出该范围则表示绕组机械状态出现异常，对两组特征数据加以分析

分布占比两特征量的突变可清晰反映绕组机械状态的劣化。

参考文献

- [1] 郭红兵, 杨玥, 郑璐. 电力变压器故障诊断技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022: 35-43.
GUO Hongbing, YANG Yue, ZHENG Lu. Power transformer fault diagnosis technology[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2022: 35-43(in Chinese).
- [2] BARROS R M R, DA COSTA E G, ARAUJO J F, et al. Contribution of inrush current to mechanical failure of power transformers windings[J]. High Voltage, 2019, 4(4): 300-307.
- [3] 杨擎柱, 程养春, 李斐然, 等. 基于现场数据的变压器首次故障率研究[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1855-1864.
YANG Qingzhu, CHENG Yangchun, LI Feiran, et al. Study on the first failure rate of transformer based on field data[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1855-1864(in Chinese).
- [4] 李鹏, 隋华泽, 徐征宇, 等. 基于等效短路试验的变压器绕组线累积效应[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(6): 2411-2423.
LI Peng, SUI Huaze, XU Zhengyu, et al. Cumulative effect of winding wires in transformer based on equivalent short-circuit test[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(6): 2411-2423(in Chinese).
- [5] 汪鑫宇. 短路冲击下变压器绕组与垫块力学特性及形变辨识研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2024.
WANG Xinyu. Research on mechanical characteristics and deformation identification of winding and cushion blocks under short-circuit impacts[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2024(in Chinese).
- [6] 张占龙, 肖睿, 武雍桦, 等. 换流变压器振动信号多层次特征提取模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7093-7103.
ZHANG Zhanlong, XIAO Rui, WU Yongye, et al. Research on multi-level feature extraction model of converter transformer vibration signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 7093-7103(in Chinese).
- [7] 刘联璧, 李金程, 王玉兴, 等. 基于传递路径分析方法的变压器远场噪声预测与路径贡献量评估[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(15): 6153-6163.
LIU Lianyun, LI Jincheng, WANG Yuxing, et al. Transformer far-field noise prediction and path contribution evaluation using transfer path analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(15): 6153-6163(in Chinese).
- [8] ZHENG Jing, HUANG Hai, PAN Jie. Detection of winding faults based on a characterization of the nonlinear dynamics of transformers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(1): 206-214.
- [9] WANG Shuhong, ZHANG Haijun, WANG Song, et al. Cumulative deformation analysis for transformer winding under short-circuit fault using magnetic-structural coupling model[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 0606605.
- [10] WATTS G B. A mathematical treatment of the dynamic behaviour of a power-transformer winding under axial short-circuit forces[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1963, 110(3): 551-560.
- [11] WANG Ping, TENG Fuyun, GENG Jianghai, et al. Axial vibration characteristics analysis of transformer windings based on magnetic-structural coupling correction model [J]. IET Electric Power Applications, 2024, 18(10): 1408-1420.
- [12] 靳铭凯, 郭鹏鸿, 陈维江, 等. 磁场-结构场双向耦合作用对变压器绕组轴向振动过程的影响[J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3296-3304.
JIN Mingkai, GUO Penghong, CHEN Weijiang, et al. Two-way magnetic-structural coupling effect on vibration process of power transformer windings[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3296-3304(in Chinese).
- [13] 张凡, 吴书煜, 徐征宇, 等. 变压器绕组非线性动力学模型及多次短路冲击下的振动特征[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4882-4892.
ZHANG Fan, WU Shuyu, XU Zhengyu, et al. Nonlinear vibration model of transformer windings and their vibration characteristics during multiple short circuits[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4882-4892(in Chinese).
- [14] WU Shuyu, ZHANG Fan, DANG Yongliang, et al. A mechanical-electromagnetic coupling model of transformer windings and its application in the vibration-based condition monitoring[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(4): 2387-2397.
- [15] JIANG Peiyu, YIN Fanghui, WANG Liming. Modeling, simulation and measurement of converter transformer winding multi-frequency vibration Based on electromagnetic structure coupling[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2025, 166: 110587.
- [16] 律方成, 汪鑫宇, 王平, 等. 基于振动偏离及加权熵的多次短路冲击下变压器绕组机械形变辨识[J]. 电工技术学报, 2023, 38(11): 3022-3032.
LYU Fangcheng, WANG Xinyu, WANG Ping, et al. Mechanical deformation identification of transformer winding under multiple short-circuit impacts based on vibration deviation and weighted entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(11): 3022-3032(in Chinese).
- [17] 张子康, 耿江海, 汪鑫宇, 等. 基于绕组短路冲击响应时频特性的多特征联合形变判定方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(20): 6564-6576, 6590.
ZHANG Zikang, GENG Jianghai, WANG Xinyu, et al. Multi-feature joint deformation determination method

- based on time-frequency characteristics of winding short-circuit impulse response[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(20): 6564-6576, 6590 (in Chinese).
- [18] SUN Yongteng, MA Hongzhong. Interpretable analysis of transformer winding vibration characteristics: SHAP and multi-classification feature optimization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2025, 166: 110585.
- [19] NEZHAD A E, SAMIMI M H. A review of vibration-based techniques for the condition assessment and failure detection of transformers[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2025, 13(1): 95.
- [20] WANG Xinyu, WANG Ping, GENG Jianghai, et al. Study on the dynamic mechanical properties of winding-block axial structure considering short circuit strain rate effect[J]. High Voltage, 2024, 9(2): 380-390.
- [21] 徐征宇, 李鹏, 李林达, 等. 基于等效短路试验的变压器用层压垫块累积效应[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4535-4543.
- XU Zhengyu, LI Peng, LI Linda, et al. Cumulated effect of spacers in transformers based on equivalent short-circuit test[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4535-4543(in Chinese).
- [22] 李鹏, 隋华泽, 张书琦, 等. 基于结构模态试验的变压器绕组饼间阻尼研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(14): 5679-5689.
- LI Peng, SUI Huaze, ZHANG Shuqi, et al. Study on inter-disk damping of transformer coils based on structural modal testing[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(14): 5679-5689(in Chinese).
- [23] 王胜辉, 许育帅, 孙凯旋, 等. 多物理场耦合下不同短路与接地故障对变压器绕组状态影响的仿真研究[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2397-2407.
- WANG Shenghui, XU Yushuai, SUN Kaixuan, et al. Simulation study on the influence of different short circuit and ground fault on transformer winding state under the coupling of multiple physical fields[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2397-2407(in Chinese).
- [24] 张凡, 马程, 李秀广, 等. 计及振动响应的变压器绕组轴向机械强度动态评估方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(16): 6494-6504.
- ZHANG Fan, MA Cheng, LI Xiuguang, et al. Dynamic assessment of windings' axial mechanical strength in power transformers considering the vibration response [J]. High Voltage Engineering, 2023, 43(16): 6494-6504(in Chinese).
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电气用压纸板和薄纸板 第2部分: 试验方法: GB/T 19264.2—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Pressboard and presspaper for electrical purposes-Part 2: methods of test: GB/T 19264.2—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013(in Chinese).
- [26] 钱国超, 胡锦, 代维菊, 等. 基于振动非线性特征的变压器绕组状态检测[J]. 电力工程技术, 2024, 43(6): 194-202.
- QIAN Guochao, HU Jin, DAI Weiju, et al. Transformer winding condition detection based on the nonlinear characteristics of vibrations[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6): 194-202(in Chinese).
- [27] 师愉航, 汲胜昌, 张凡, 等. 变压器绕组多倍频振动机理及特性[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2536-2544.
- SHI Yuhang, JI Shengchang, ZHANG Fan, et al. Multi-frequency vibration mechanism and characteristics of transformer windings[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2536-2544(in Chinese).
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电力变压器 第5部分: 承受短路的能力: GB/T 1094.5—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power transformers-Part 5: ability to withstand short circuit: GB/T 1094.5—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009(in Chinese).
- [29] 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.
- ZHANG Fan, JI Shengchang, SHI Yuhang, et al. Research on transformer winding vibration and propagation characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2790-2798(in Chinese).



吕安强

在线出版日期: 2025-07-31。

收稿日期: 2025-04-01。

作者简介:

吕安强(1979), 男, 博士, 教授, 从事电力物联网技术、光纤传感技术、新型电力系统智能感知技术方面的研究, lvaqdz@163.com;

*通信作者: 王平(1982), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为高电压技术与电磁兼容, pingwang0501@163.com。

(编辑 张蕾)