

DOI: 10.7667/PSPC170361

基于CRP和RQA的变压器绕组压紧状态检测

黄春梅¹, 马宏忠¹, 吴明明¹, 刘勇业¹, 王春宁², 许洪华²

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 国网江苏省电力公司南京供电公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 为了掌握绕组压紧力状况, 通过分析变压器表面振动变化情况, 提出了基于交叉递归图(Cross Recurrence Plot, CRP)和递归定量分析(Recurrence Quantification Analysis, RQA)的绕组压紧状态检测方法。首先, 从振动信号的递归特性出发, 对多元和一元振动信号进行相空间重构。然后, 分别采用CRP和RQA对相轨迹进行定性和定量分析, 据此对绕组压紧状态进行检测。实验数据的分析结果表明, CRP中对角线结构的变化能定性反映绕组压紧状态的变化, 多元与一元振动信号的RQA度量能够分别从整体和局部角度对绕组压紧状态进行定量检测。研究结果为从非线性动力学角度监测绕组松动故障提供了理论依据。

关键词: 电力变压器; 绕组振动; 压紧状态; 交叉递归图; 递归定量分析

Transformer winding pressed state detection based on CRP and RQA

HUANG Chunmei¹, MA Hongzhong¹, WU Mingming¹, LIU Yongye¹, WANG Chunning², XU Honghua²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Nanjing Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: For the purpose of identifying situation of winding clamping force, this paper presents a method of transformer winding pressed state detection based on Cross Recurrence Plot (CRP) and Recurrence Quantification Analysis (RQA) by analyzing the change of transformer surface vibration. Firstly, it makes use of phase space reconstruction to reconstruct phase curves of multivariate and univariate vibration signals based on recurrence characteristics. And then, CRP and RQA are used to analyze phase curves qualitatively and quantitatively. Consequently, winding pressed state can be detected successfully. The analysis results of vibration signals show that the change of diagonal structure of CRP can qualitatively reflect the change of winding pressed state. Meanwhile, the RQA metrics of multivariate and univariate vibration signals can detect winding pressed state quantitatively from the overall and local perspective. The results provide a theoretical basis for monitoring winding looseness fault from the viewpoint of nonlinear dynamics.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577050).

Key words: power transformer; winding vibration; pressed state; cross recurrence plot; recurrence quantification analysis

0 引言

电力变压器是电力系统最关键的设备之一, 也是当前智能电网建设与未来实现能源互联网战略的核心设备^[1]。据统计, 大型变压器因外部短路造成绕组松动等故障已上升到变压器事故的首位^[2]。因此, 对绕组压紧状态进行检测, 及早发现绕组松动隐患意义重大。目前, 基于振动对绕组压紧状态进行评估是当前一个研究热点^[3-6]。文献[4]通过有限元分析了不同预紧力对变压器振动信号的影响。文

献[5]基于振动法采用小波包和支持向量机对绕组状态进行分类。文献[6]利用振动信号共振谱峰的位置规律进行绕组压紧状态的在线评估。

机械结构故障或损伤的演变过程一般是非线性的, 绕组也不例外。绕组振动自身具有明显的非线性特征, 再加上振动传播过程中振动信号的衰减、相移变化, 其动力学特性随压紧力变化的演变过程是复杂多变的, 既有压紧力变化带来的漏磁场分布的变化, 又有绕组机械结构变化带来的变压器刚度和阻尼的变化。在这种情况下, 采用传统的线性方法去度量这种变化往往由于忽略其中的某些因素而不能达到很好的效果。

基于此, 本文采用非线性动力学中的交叉递归图(Cross Recurrence Plot, CRP)和递归定量分析(Recurrence Quantification Analysis, RQA)方法对绕组振动信号进行分析。CRP 对来自不同动力系统的相轨迹进行比较以研究其相似性^[7-8], 非常适合用于对压紧力完好和压紧力减小的绕组系统进行统计意义上的动力学特性对比分析。从 CRP 中提取的 RQA 度量对系统结构动力学的细微变化比传统分析方法更加敏感^[9-10], 采用其对绕组压紧状态进行检测具有更高的灵敏性。本文为了衡量绕组整体压紧程度, 将同步采样的多路信号纳入分析, 建立检测绕组整体压紧状态的 RQA 度量。同时, 对单个测点信号直接进行 RQA 分析并建立局部压紧状态度量。

1 绕组振动的基本原理

1.1 变压器振动来源

变压器表面振动与绕组和铁芯的压紧状态密切相关。变压器本体振动主要来源于磁致伸缩及漏磁引起的铁芯振动和电磁力引起的绕组振动^[2]。由漏磁引起的铁芯振动与其他振动相比非常微弱, 可忽略漏磁的影响。当二次绕组短路时, 外加电压很小, 铁芯中磁通很少, 此时磁致伸缩引起的铁芯振动可忽略不计, 则通过变压器油和箱壁传递到油箱表面的振动主要由绕组引起。

1.2 绕组振动分析

根据毕奥萨伐尔定律, 在漏磁场中绕组所受电力正比于电流平方^[3,6], 即 $F=ki^2$ 。电力变压器稳定运行时的电流为 $i=I_0\cos(\omega t)$, 则

$$F=(1/2)kI_0^2[1+\cos(2\omega t)] \quad (1)$$

由式(1)可知, 电力可以分为一个直流分量和一个 2 倍于工频的交流分量。直流分量对绕组线圈的作用相当于施加一个恒定力, 该作用力相对于压紧力可以忽略不计^[11]。由此可见, 在工频电源下, 绕组振动的激励力频率为 100 Hz。由于磁化曲线的非线性以及变压器结构复杂等, 使得绕组振动信号中含有高次谐波。所以, 由电力引起的绕组振动频率以 100 Hz 为基频, 并伴有高次谐波。

1.3 绕组压紧状态对绕组振动的影响

绕组压紧状态对绕组振动的影响主要体现在漏磁场分布和变压器机械结构上。压紧力减小会造成绕组松动, 使漏磁场分布发生改变, 进而影响绕组振动。变压器箱壁对于不同频率振动分量的响应具有差异性, 频率为固有频率的振动分量将在箱壁上产生较大响应, 引起油箱共振。同时, 绕组松散会减弱绕组振动的传递能力, 还会使得变压器结构刚

度减小, 使得变压器整体结构的固有频率减小。这样固有频率引起的油箱共振频段将减小, 进而改变油箱的振动响应。

2 交叉递归图和递归定量分析

2.1 递归图 RP

递归图(Recurrence Plot, RP)以相空间重构为基础, 是分析时间序列周期性和非平稳性的一个重要方法^[9]。将一维时间序列重构到高维相空间中, 构成吸引子的非稳态轨道, 轨道不断地近似逼近又远离, 形成递归现象。递归图在高维相空间中提取时间序列的递归特性, 并在二维平面展示这种递归行为, 实现对系统动力学特性的可视化。

根据 Takens 嵌入定理^[12], 对于变压器振动信号 $\{x(i)\}(i=1, 2, \dots, n)$, 若嵌入维数为 m , 时间延迟为 τ , 则重构信号为

$$X(i)=\{x(i), x(i+\tau), \dots, x(i+(m-1)\tau)\} \quad (2)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N$; $N=n-(m-1)\tau$, 为相空间的点数。

由 Takens 定理^[12]可知, 对于没有噪声的无限长时间序列, 可以任意选择重构参数 m 和 τ 。但变压器实测振动信号长度有限, 且一般都有噪声污染, 因此需要选择合适的 m 和 τ 值。本文通过 G-P 算法计算嵌入维数^[13], 使用平均位移法并借助曲线拟合思想选择时间延迟^[14]。绕组振动信号的嵌入维数确定为 3, 时间延迟值确定为 8。

重构信号的递归矩阵 R_{ij} 为

$$R_{ij}=\theta(r-\|X_i-X_j\|) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中: r 为距离阈值, 一般按小于于时间序列标准差 σ 的 15% 选择^[7]; $\|\cdot\|$ 为向量范数, 主要有 1-范数、2-范数和 ∞ -范数, 每种范数对应的邻域形状不同, 在给定的阈值常数 r 下, 由于 ∞ -范数对应的领域最大且计算最为简单, 因此本文采用 ∞ -范数^[9]; $\|X_i-X_j\|$ 为相轨迹上任意两点的距离; $\theta(\cdot)$ 为 Heaviside 函数, 若 $x \geq 0$, 则 $\theta(x)=1$; 若 $x < 0$, 则 $\theta(x)=0$ 。

RP 与 R_{ij} 相对应, R_{ij} 由 0 和 1 组成, 由 R_{ij} 绘制的二维图形即为 RP。RP 主要包括孤立点、对角线段和水平线段这几类结构^[10]。不同结构具有不同含义, 孤立点表示偶然发生的动力学行为或者噪声; 对角线段表示存在有规律的振荡, 与系统确定性和周期性有关; 水平线段表明信号间歇性的存在。

2.2 交叉递归图 CRP

交叉递归图(CRP)是 RP 的二元扩展^[8], RP 研究同一相轨迹不同部分之间的递归关系, CRP 则对两个不同动力学系统的相轨迹进行比较。CRP 与交

又递归矩阵 C_{ij} 相对应。

$$C_{ij} = \theta(r - \|X_i - Y_j\|) \quad i=1,2,\dots,N; j=1,2,\dots,M \quad (4)$$

式中, X 和 Y 分别是两个不同系统 m 维重构空间的相轨迹。

CRP 主要由对角线段和孤立点构成^[7], 对角线段刻画了两个系统间动力学行为相似部分的位置和大小。整体动力学行为越相似, 形成的对角线段就越长; 当系统间动力学特性相差很大时, CRP 中将不出现任何对角线段。因此, CRP 非常适合用于对压紧力完好和压紧力减小的绕组系统进行统计意义上的动力学特性对比分析。

2.3 递归定量分析 RQA

RP 和 CRP 采用二维图像来刻画时间序列的递归性, 只能进行定性分析, 无法定量描述。为此, Webber 等人^[15]提出递归定量分析(RQA)方法, 引入基于 RP 和 CRP 中递归点和对角线结构分布情况的度量来进行量化分析。RQA 度量较多, 本文使用基于递归点密度的递归率和基于对角线结构的确定度、平均对角线长度和熵这四个 RQA 度量。

递归率(Recurrence Rate, RR)是 RP 或 CRP 中递归点所占比值。

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{ij} \quad (5)$$

确定率(Determinism, D)是构成对角线结构的递归点占有所有递归点的百分比。

$$D = \left(\sum_{l=l_{\min}}^N lP(l) \right) / \left(\sum_{l=1}^N lP(l) \right) \quad (6)$$

式中: $P(l)$ 是对角线结构中长度为 l 的个数; l_{\min} 是对角线结构中所取的长度初值, 一般取 $l_{\min}=2$ 。

平均对角线长度(Average Diagonal Line Length, ADLL)为对角线长度的平均值, 表示相空间中两段相轨迹相互靠近的平均时间。

$$ADLL = \left(\sum_{l=l_{\min}}^N lP(l) \right) / \left(\sum_{l=l_{\min}}^N P(l) \right) \quad (7)$$

熵(Entropy, E)描述的是对角线结构长度分布的信息熵, 用来说明 RP 或 CRP 的复杂程度。熵越大, 则 RP 或 CRP 确定性结构就越复杂。

$$E = - \sum p(l) \ln p(l) \quad (8)$$

式中, $p(l)$ 是长度为 l 的对角线出现的概率。

绕组压紧状态检测时, 首先使用压紧力完好的绕组振动信号构成递归图, 计算得到此时的 RQA 度量。当绕组压紧状态变化时, 计算得到压紧力完好和压紧状态变化时绕组振动信号的交叉递归图, 从而得到绕组压紧状态变化时的 RQA 度量。当绕组压紧状态逐渐发生变化时, 系统间振动数据差异

逐渐增大, 交叉递归图的递归点逐渐减少, 对角线结构会逐渐消失, 从而反映在 RQA 度量中。

2.4 振动信号的多测点融合

振动信号采集时, 对布置在箱体表面不同部位的测点进行同步采样。由于不同位置振动信号包含着不同信息, 本文将同步采样的多路信号纳入分析, 建立检测绕组整体压紧状态的 RQA 度量。同时, 对单个测点信号直接进行分析并建立检测绕组局部压紧状态的 RQA 度量。类似于文献[16], 本文将多测点振动数据按测点顺序排成一个时间序列, 进行相空间重构后再进行多元信号的 RQA 分析。

假设从 M 个振动测点得到的 M 个一维时间序列 $x_k(i) (i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, M)$, 则多测点信号融合后多元振动信号的一维时间序列可以表示为 $x(i) = [x_1(i), x_2(i), \dots, x_M(i)] (i=1, 2, \dots, n)$ 。由于不同测点振动信号的周期特征相同, 因此多测点信号重构参数的选择与单测点一致。将多测点数据融合完成之后, 就可以按与一元信号 RQA 度量相同的步骤来计算多元信号的 RQA 度量。

3 实验系统与实验过程

3.1 实验系统

本文使用型号为 JF2020 的振动加速度传感器和 Nicolet 数据采集仪(如图 1 中的①所示)对某变压器公司的多台 110 kV 变压器进行了实验。限于篇幅, 在此只给出对其中一台 SFZ10-31500/110 型油浸式电力变压器中的一相绕组进行实验的过程和分析结果(实验所得结果在多台变压器中具有一致性)。变压器联接组标号为 YNd11, 低压侧额定电压为 10.5 kV, 额定电流为 1 732 A。

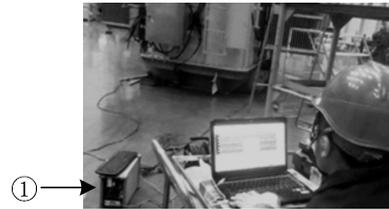


图 1 数据采集

Fig. 1 Data collection

3.2 绕组压紧力设置

实验对 B 相绕组设置三种压紧状态: 完全压紧(额定压紧力, 28 MPa)、不完全压紧(0.5 倍额定压紧力, 14 MPa)和压紧力为零。根据实验方案人为对绕组压紧状态进行设置。对变压器进行抽油、吊罩操作, 然后通过液压系统中的油压泵(如图 2 中的②所示)控制绕组压紧力, 以实现绕组不同压紧状态的改变。首先使用扳手拧松压紧螺母, 将液压千斤顶(如

图 2 中的③所示)放置在绕组和结构件之间。压力表(如图 2 中的④所示)显示千斤顶所受压力, 控制液压, 待压力稳定后, 拧紧压紧螺母, 使得千斤顶可以抽出。然后再将变压器罩恢复、注油。针对不同压紧状态, 每次均按上述方法进行抽油、吊罩、调整压紧力等操作。

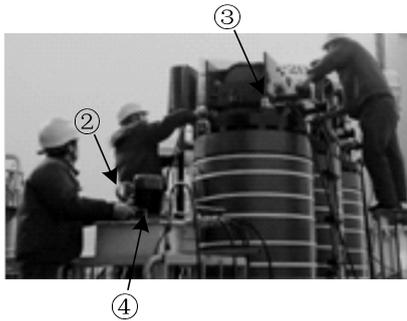


图 2 绕组压紧状态设置

Fig. 2 Setting winding pressed states

3.3 振动信号采集

振动测点布置如图 3 所示, 在变压器油箱顶面布置三个测点, 测点正下方对应着 ABC 三相绕组。考虑到变压器振动信号的频率范围, 采样频率设为 10 kHz。实验时, 为采集绕组振动信号, 进行变压器短路实验。先将变压器低压侧绕组三相短路, 在高压侧通过调压器调节外加电压, 使低压侧短路电流接近额定电流, 模拟变压器额定运行时的大电流情况。当短路电流达到额定电流时, 测取变压器油箱表面振动信号。

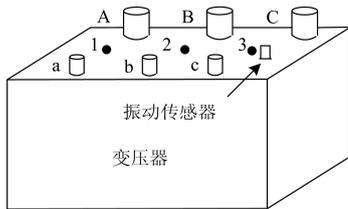


图 3 振动测点布置图

Fig. 3 Layout of vibration measuring point

4 实验结果与分析

4.1 振动信号的时域图和交叉递归图

限于篇幅, 本文选择靠近 B 相的 2 号测点进行分析。经降噪处理后, 2 号测点在不同压紧状态下信号时域图如图 4 所示。由图 4 可知, 三种压紧状态下振动信号幅值基本相同, 差异不大, 不完全压紧时的振幅较完全压紧状态下稍大, 压紧力为 0 时的振幅最大。因此, 振动信号与绕组压紧状态有关, 但仅从振幅变化难以区分绕组不同压紧状态。

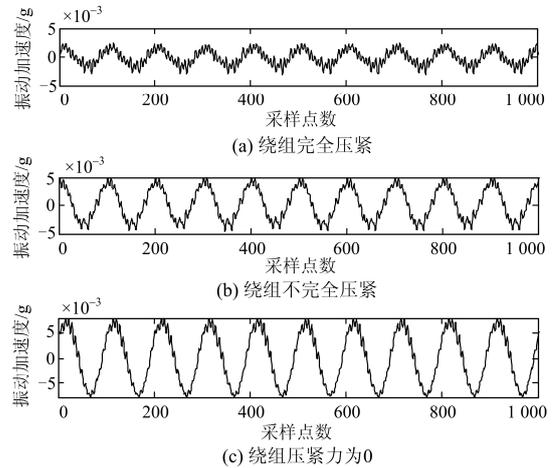


图 4 振动信号时域图

Fig. 4 Time domain diagram of vibration signals

基于此, 对振动信号进行递归图和交叉递归图分析, 如图 5 所示。图 5(a)为绕组压紧力完好(48 MPa)时的递归图, 图 5(b)和图 5(c)分别为压紧力完好与压紧力为 24 MPa 以及压紧力完好与压紧力为 0 的交叉递归图。

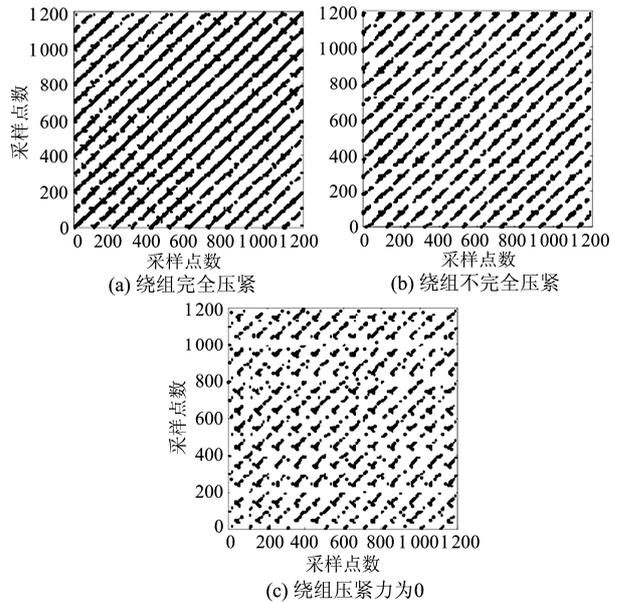


图 5 不同绕组压紧状态下的 RP/CRPs 图

Fig. 5 RP/CRPs under different winding pressed states

由 5 可以看出, 绕组振动信号主要与 RP 和 CRP 的对角线结构有关, 三种绕组压紧状态下的对角线结构存在明显差异。随着绕组压紧力的减小, CRP 中递归点明显减少, 对角线长度逐渐减小, 对角线结构逐渐消失, 甚至退化为离散分布的递归点。这表明随着绕组压紧力的减小, 绕组逐渐产生松动, 系统动力学行为逐渐偏离原先的正常状态, 系统间相似性逐渐降低。因此, CRP 中对角线结构的变化

可以直观地反映出绕组压紧状态的变化趋势。

由图 5 还可以看出, RP 中存在主对角线, CRP 不存在主对角线。这是由于 $\|X_i - X_i\| = 0$, 故 RP 中总具有主对角线, 且始终关于主对角线对称。而 CRP 中对角线与系统间相似性有关, 只有当两系统完全相同时, CRP 中才会出现完整的主对角线。

4.2 振动信号的递归定量分析

对变压器顶面三个测点振动信号按 2.4 节所述原理进行多测点融合并提取多元信号的 RQA 度量, 如表 1 所示。

表 1 三种绕组压紧状态下多元 RQA 度量
Table 1 Multivariate RQA metrics under three kinds of winding pressed states

压紧力/MPa	RR	D	ADLL	E
28	0.047 9	0.760 1	5.382 6	0.480 1
14	0.034 5	0.608 5	4.029 7	0.701 4
0	0.024 1	0.510 4	2.839 1	1.120 4

由表 1 可得, 随着绕组压紧力的下降, 递归率 RR、确定度 D 和平均对角线长度 ADLL 逐渐减小, 而熵 E 逐渐增大。说明选取的四个 RQA 度量都可以体现绕组压紧状态的变化趋势, 能够用于检测绕组压紧状态是否发生变化。

同时, 为从整体和局部角度对绕组压紧状态的变化进行衡量, 将多元 RQA 度量与一元 RQA 度量进行对比, 如图 6 所示(其中, 一元信号包含 1、2、3 号测点信号)。从图 6 可以看出, 多元 RQA 度量和一元 RQA 度量呈现出不同的变化趋势, 且多元 RQA 度量近似等于三个测点一元 RQA 度量的平均。这与本文将多测点信号进行融合来计算绕组压紧状态的整体压紧系数的目标一致, 说明了构建绕组整体压紧状态的 RQA 度量的可行性与正确性。

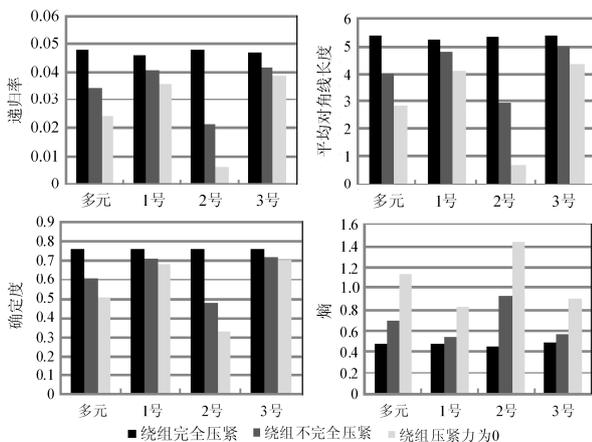


图 6 不同绕组压紧状态下多元和一元 RQA 度量

Fig. 6 Multivariate and univariate RQA metrics under different winding clamping forces

对于三个测点的一元 RQA 度量, 由图 6 可得, 随着压紧力的下降, 1 和 3 号测点的递归率、确定度和平均对角线长度略有减小, 熵值略微增大, 但变化幅度不大。2 号测点的递归率、确定度和平均对角线长度明显减小, 熵明显增大。这是因为 2 号测点正下方对应着 B 相绕组, 受 B 相绕组压紧状态变化影响最大; 1 和 3 号测点远离 B 相, 受 B 相绕组压紧状态变化影响小。

这表明不同测点对系统结构变化的灵敏度不同, 靠近故障位置的测点灵敏度更大, 其 RQA 度量变化更明显。因此, 这可以为绕组松动的故障定位提供有益的借鉴。这也是分别计算全局压紧状态 RQA 度量和局部压紧状态 RQA 度量的意义所在。当多元信号的 RQA 度量从总体上检测出绕组因压紧力减小而发生松动时, 一元信号的 RQA 度量可以进行初步的故障定位, 判断出具体的绕组故障相。

5 结论

1) 绕组振动是一个非线性过程, 振动信号具有明显的非线性特征。绕组随压紧状态变化的振动演变过程是非线性的, 这是由漏磁场分布变化和绕组机械结构变化所导致。

2) 交叉递归图可以很好地体现具有相似动力学系统之间的联系, 适合对绕组在不同压紧状态下所产生的相似振动信号进行分析。多元 RQA 度量能够表征绕组全局压紧状态变化, 从总体上检测绕组是否因压紧力减小而发生松动。一元 RQA 度量则表现与测点位置相关的绕组局部压紧状态的变化, 当多元信号的 RQA 度量显示绕组产生松动时, 一元 RQA 度量则可以为故障定位提供有益的借鉴, 判断出具体的绕组故障相。

3) 本文通过短路实验采集绕组振动信号, 忽略了铁芯振动对变压器箱体振动的影响。在变压器实际运行中, 变压器油箱表面振动信号是绕组振动和铁芯振动的混合, 如何区分绕组振动和铁芯振动是下一步研究的工作。

参考文献

[1] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.

[2] 刘宝稳, 马宏忠, 李凯, 等. 大型变压器绕组轴向固有频率振动分布特性与试验分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2329-2337.

LIU Baowen, MA Hongzhong, LI Kai, et al. Distribution characteristics and experiment analysis of natural

- frequency vibration of large transformer winding[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2329-2337.
- [3] 刘凯, 彭维捷, 杨学君. 特征优化和模糊理论在变压器故障诊断中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 54-60.
LIU Kai, PENG Weijie, YANG Xuejun. Method of fault diagnosis for power transformer based on optimizing characteristics and the fuzzy theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 54-60.
- [4] 弓杰伟, 马宏忠, 姜宁, 等. 电力变压器的有限元建模与绕组松动分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 78-84.
GONG Jiewei, MA Hongzhong, JIANG Ning, et al. Finite element modeling and winding looseness analysis for power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 78-84.
- [5] 张彬, 徐建源, 陈江波, 等. 基于电力变压器振动信息的绕组形变诊断方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2341-2349.
ZHANG Bin, XU Jianyuan, CHEN Jiangbo, et al. Diagnosis method of winding deformation based on power transformer vibration information[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2341-2349.
- [6] 马宏忠, 周宇, 李凯, 等. 基于振动的变压器绕组压紧状态评估方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 127-132.
MA Hongzhong, ZHOU Yu, LI Kai, et al. Evaluation method of transformer winding pressed state based on vibration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 127-132.
- [7] 徐进. 基于递归相似性的非线性振动损伤敏感识别[J]. 应用力学学报, 2015, 32(4): 636-641.
XU Jin. Damage detection for non-linear vibration using recurrence similarity[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(4): 636-641.
- [8] 郭洁, 陈祥献, 黄海. 交叉递归图在变压器铁芯压紧力变化检测中的应用[J]. 高电压技术, 2010, 11(26): 2731-2738.
GUO Jie, CHEN Xiangxian, HUANG Hai. Application of CRP to detection of transformer core clamping force drop[J]. High Voltage Engineering, 2010, 11(26): 2731-2738.
- [9] 黄满义. 基于混沌特性和递归图的输油管道泄漏检测与定位方法[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
HUANG Manyi. Pipe leak detection and location method based on chaotic characteristic and recurrence plot[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [10] 张淑清, 包红燕, 李盼, 等. 基于 RQA 和 GG 聚类的滚动轴承故障识别[J]. 中国机械工程, 2015, 26(10): 1385-1390.
ZHANG Shuqing, BAO Hongyan, LI Pan, et al. Fault diagnosis of rolling bearings based on RQA and GG clustering[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(10): 1385-1390.
- [11] 洪凯星, 潘再平, 黄海. 电力变压器绕组轴向振动的建模与分析[J]. 变压器, 2010, 47(12): 32-36.
HONG Kaixing, PAN Zaiping, HUANG Hai. Modeling and analysis of winding axial vibration of power transformer[J]. Transformer, 2010, 47(12): 32-36.
- [12] 宋晓, 李平, 徐公林. 基于相空间重构的变压器励磁涌流识别[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 27-31.
SONG Xiao, LI Ping, XU Gonglin. Transformer excitation inrush current recognition based on the phase space reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 27-31.
- [13] 马东娟, 李玲玲. 接触电阻时间序列的混沌特性识别与预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 57-61.
MA Dongjuan, LI Lingling. Research on chaotic characteristics identification and predication of contact resistance time series[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 57-61.
- [14] 顾熹, 廖志伟. 基于相空间重构和高斯过程回归的短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 73-79.
GU Xi, LIAO Zhiwei. Short-term load forecasting based on phase space reconstruction and Gaussian process regression[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 73-79.
- [15] WEBBER C L, ZBILUT J P. Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies[J]. Journal of Applied Physiology, 1994, 76(2): 965-973.
- [16] 杨栋, 任伟新. 基于递归矩阵奇异熵的损伤识别方法[J]. 振动与冲击, 2012, 31(3): 60-63.
YANG Dong, REN Weixin. Structure damage detecting using singular entropy of recurrence matrix[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(3): 60-63.

收稿日期: 2017-03-14; 修回日期: 2017-07-30

作者简介:

黄春梅(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力设备状态监测与故障诊断; E-mail: m18251826953@163.com

马宏忠(1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力设备状态监测与故障诊断. E-mail: hhumhz@163.com

(编辑 张爱琴)