

基于合闸宽频振动信号的绕组机械状态评估*

朱昊¹, 马宏忠¹, 刘宝稳¹, 颜锦¹, 张玉良¹, 许洪华²

(1. 河海大学能源与电气学院 南京, 211100)

(2. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司 南京, 210019)

摘要 针对基于离散频率振动信号的绕组机械状态诊断方法无法真实反映绕组结构特性,且对于绕组早期松动故障灵敏度低的问题,提出了基于合闸暂态宽频振动信号的变压器绕组机械状态检测方法。首先,研究了变压器空载合闸时绕组轴向振动机理,基于最小作用原理建立了双导线振动模型动力学方程;其次,通过鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, 简称 WOA)优化的变分模态分解(variational mode decomposition, 简称 VMD)得到包含绕组基频和机电耦合效应下高频分量的模态分量;最后,计算信号的样本熵值(sample entropy, 简称 SampEn)和频谱峰值,依据样本熵及频谱峰值的变化对变压器绕组机械状态进行检测。研究表明:伴随固有频率的变化绕组会出现参变谐振;WOA-VMD 算法降噪效果优于普通 VMD 算法;基于宽频振动信号的绕组机械状态诊断方法能够有效反映绕组松动故障,验证了基于宽频响应变压器绕组故障诊断的可行性。

关键词 电力变压器;宽频振动信号;绕组;鲸鱼优化算法;变分模态分解;机械状态评估

中图分类号 TB535;TM41

引言

电力变压器承担电网互联及电能输送-配置-转换的关键任务,是电网中的枢纽设备。变压器如果发生故障,往往波及范围广、造成的损失大^[1-3]。与其他部件相比,绕组是变压器中最重要也最易损坏的部件^[4],其运行过程中受到电气、热和机械应力的作用,使得绕组抗短路能力不断下降,并最终发展为绕组变形故障。据统计,我国由绕组松动变形引起的变压器故障约占变压器总故障的 41%。超过 50% 的绕组变形由轴向力引起,径向变形的比例约为 20%^[5-6]。因此,迫切需要对变压器绕组机械状态进行检测与评估,以掌握绕组运行状况,尽早发现绕组潜伏性松动故障,保障电网安全可靠运行。

相较于以短路电抗法、频率响应法及绕组对地电容测试等为主的离线检测法、脉冲注入法及在线电抗法等在线方法^[1,7],振动信号分析法因其与系统无直接的电气联系并可以灵敏反映绕组机械状态的优点受到研究人员的重视。张凡等^[8]基于欧拉梁建立了变压器绕组轴向、径向振动模型和变压器油中传播模型。赵莉华等^[9]在稳态运行工况下提取振动信号在时域、频域以及信息域上的特征量,并利用线

性判别分析算法(linear discriminant analysis, 简称 LDA)对变压器绕组正常和松动状态进行识别。Kornatowski 等^[10]提出了一种综合频率响应法和振动法互补测量、诊断变压器绕组松动故障的方法,并指出振动法在检测绕组松动故障方面具有更高的灵敏度。

上述研究都是基于离散频率的振动信号(稳态基频或稳态多频特征),然而变压器绕组在磁场中的受迫振动是由多个独立模态叠加构成,基于离散频率的振动信号因受频带宽度限制,无法真实反映绕组的模态特征。张坤等^[11]采用复数小波变换对突发短路冲击下的振动信号进行了研究,得到了绕组松动和变形时振动信号的特征量。Steurer 等^[12]对比研究了变压器空载合闸励磁涌流和突发短路冲击下绕组线圈的机械应力,发现额定短路电流 70% 的励磁涌流峰值即可引起与短路时相同数量级的绕组振动。文献[13]将 Jiles-Atherton 矢量磁滞模型与有限元法相结合对变压器铁芯和绕组进行了更加精确的建模,以研究空载合闸励磁涌流下施加在绕组轴向上的电磁力。王涛云等^[16]针对绕组松动前后振动信号的能量分布差异明显,利用小波包-能量谱分析空载合闸宽频振动信号,得到了绕组正常和松动时

* 国网江苏省电力有限公司重点科技资助项目(J2020042);国家自然科学基金资助项目(51577050)

收稿日期:2021-01-27;修回日期:2021-05-19

振动信号的特征量。

笔者提出了基于合闸暂态宽频振动信号的变压器绕组机械状态检测方法。首先,建立绕组双导线振动模型,对空载合闸时绕组的多倍频现象进行了分析,完善了绕组宽频振动机理;其次,搭建了试验平台,针对变压器绕组正常状态和不同程度松动故障,在空载合闸条件下进行绕组故障试验,采集正常和故障后的暂态宽频振动信号;最后,通过鲸鱼优化算法优化的变分模态分解,对绕组轴向振动信号进行降噪处理,得到一组平稳的模态分量,依据振动信号的样本熵和基频、高频分量幅值变化,识别变压器绕组是否存在松动并判断故障程度。

1 空载合闸绕组参变振动特性

1.1 绕组双导线振动模型

绕组是使用连续绝缘扁导线或圆导线绕制而成的变压器电气部分。绕组的基本组成部分称为线圈,通常将其缠绕成圆形线匝,再依据一定规律进行排列和连接。不同电压等级和容量的变压器绕组有不同的绕线方式,通常分为饼式和层式2种。经典质量-弹簧-阻尼模型主要针对饼式绕组,往往不具备通用性^[6]。因此,为了全面考虑绕组的非线性振动特性,必须抽象出同时具有机械和电磁场特性且具有代表性的基本物理单元。变压器绕组线圈基本单元如图1所示,提取由2个垫块支撑的铜导线的一部分,作为绕组结构的基本物理单元进行研究。

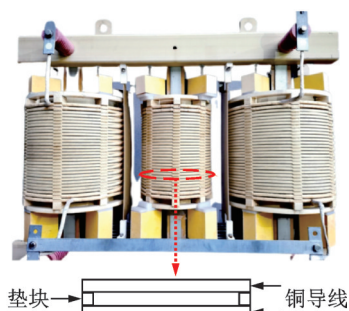


图1 变压器绕组线圈基本单元

Fig.1 Basic unit of transformer winding coil

图1中绕组线圈被抽象成一个双导线共振模型,该模型简化了实际绕组的电气与机械特性。在忽略导线集肤效应和邻近效应,且由于绕组振动频率较低而将变压器油视为无热传导、无黏性和不可压缩的理想流体情况下,所构建双导线振动数学模型如图2所示。

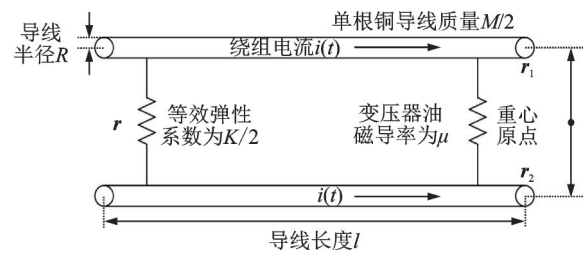


图2 双导线振动数学模型

Fig.2 Mathematical model of double wire vibration

图2中的2根导线长度均为 l ,间距为 r ,半径为 R ,质量均为 $M/2$,且具有大小、方向完全相同的电流 $i(t)$, μ 为变压器油磁导率。因为质点系统的内力不能影响其质心的运动,所以可以将双导线系统的质心标识为其重心原点。当变压器绕组发生振动时,2根导线的位移分别为 r_1 和 r_2 ,导线间的相对位移为 $r=r_1-r_2$ 。由上述条件可知,图2中模型的电感 L 为

$$L = \frac{\mu l}{\pi} \left(\ln \frac{r}{R} + \frac{1}{4} \right) \quad (1)$$

1.2 双导线振动模型动力学方程

变压器绕组所受电磁力不仅与变压器铁芯漏磁通和流经绕组的电流有关,还受绕组线圈间距影响。导体在变化漏磁通的作用下受到了变化的洛伦兹力,这导致了绕组的受迫振动^[1]。绕组振动时线圈间距不断变化,反作用于绕组所受洛伦兹力。因此,绕组受到的电磁力和线圈振动相互影响并相互耦合。笔者基于最小作用原理建立双导线振动模型动力学方程。

与经典力学体系相比,最小作用原理基于整个系统的能量关系^[17]。双导线系统的总能量为

$$E = \int \left[\frac{1}{2} M \dot{r}^2 - E_p(r) + \frac{1}{2} L i^2(t) \right] dt \quad (2)$$

其中: M 为2根导线总质量; $E_p(r)$ 为机械势能; \dot{r} 为位移的导数(即速度); $1/2 L i^2(t)$ 为磁势能。

由式(2)可知,双导线振动模型关于系统总能量的拉格朗日函数为

$$L_\lambda = \frac{1}{2} M \dot{r}^2 - E_p(r) + \frac{1}{2} L i^2(t) \quad (3)$$

将 $r=r_0$ 设为系统的平衡位置和零势能点,并将机械势能和磁场势能在 r_0 处按幂级数展开为二阶项,可得

$$E_p(r) = E_p(r_0) + \left. \frac{\partial E_p}{\partial r} \right|_{r=r_0} (r-r_0) + \left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E_p}{\partial r^2} \right|_{r=r_0} (r-r_0)^2 + \dots \quad (4)$$

$$\frac{1}{2}Li^2(t) = \frac{\mu l}{2\pi} i^2(t) \left(\ln \frac{r_0}{R} + \frac{1}{4} + \frac{r-r_0}{r_0} - \frac{(r-r_0)^2}{2r_0^2} \right) \quad (5)$$

因为双导线系统振动时偏离平衡位置很小,可取平衡位置为系统势能零点,即 $E_p(\mathbf{r})=0$, 此时有 $\partial E_p / \partial \mathbf{r} \Big|_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_0} = 0$; 令 $\partial^2 E_p / \partial^2 \mathbf{r} \Big|_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_0} = K$, 可将式(4)化简为

$$E_p(\mathbf{r}) = K(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)^2 \quad (6)$$

将式(5)和式(6)代入式(3),并令2根导线的间距相对于平衡位置的位移量 $x = \mathbf{r} - \mathbf{r}_0$, 则有双导线振动模型运动方程为

$$Mx'' + Kx - \frac{\mu l}{2\pi r_0} i^2(t) + \frac{\mu l}{2\pi r_0^2} i^2(t)x = 0 \quad (7)$$

其中: x'' 为位移量 x 的二次导数。

此外,双导线振动模型运动方程为变参数非线性非齐次微分方程。式(7)中 $\frac{\mu l}{2\pi r_0^2} i^2(t)x$ 表示电源激励与绕组振动的相互作用,即代表导体振动与漏磁通之间的相互耦合。

设 $y = x - r_0$ 并将其代入式(7),可得双导线振动模型的动力学方程为

$$My'' + \left[K + \frac{\mu l}{2\pi r_0^2} i^2(t) \right] y = -Kr_0 \quad (8)$$

1.3 空载合闸绕组多倍频现象

在绕组线圈振动时,线圈之间的间距将周期性变化,此时存在机电耦合效应,即导线产生的磁场不仅随电流周期变化,且受其自身周期性振动的影响。

变压器空载合闸时流过绕组的励磁涌流可以表示为

$$i(t) = I_m [\cos(\omega t + \alpha) + \cos \alpha e^{-\beta t}] \quad (9)$$

其中: I_m 为对称励磁涌流峰值; α 为电源合闸角; $\beta = -t/T$, T 为涌流非周期分量的时间衰减常数。

将式(9)代入式(8)并设置电源合闸角度 $\alpha = 0$, 则空载合闸时两导线振动模型的动力学方程为

$$\frac{dy^2}{d^2\tau} + [\xi + \lambda(1 + \cos 2\tau + e^{-2\beta\tau} + 2e^{-\beta\tau} \cos \tau)] y = v \quad (10)$$

其中: $\tau = \omega t$ 为电源激励相位; $\xi = K/M\omega^2$ 为固有频率与激励频率之比的平方; $\lambda = \mu l I_m^2 / 2\pi r_0^2 M\omega^2$ 和 $v = -Kr_0/M\omega^2$ 为机电耦合作用的无量纲参数。

式(10)为一个不能得到显式解的变参数非齐次微分方程。本研究集中在变压器空载合闸时油箱表

面振动的频率分量上,故不考虑振幅衰减和相位变化,所以式(10)可化简为

$$\frac{dy^2}{d^2\tau} + (\xi + \lambda \cos 2\tau) y = 0 \quad (11)$$

因为式(11)为马蒂厄方程,可以通过林兹泰德-庞加莱参数(L-P)摄动法求解,其每一步都基于保持近似解的周期性来消除长期项。对于实际绕组,由于垫片刚度大,所以 $\xi \gg \lambda$, 可以将式(11)的近似解设置为

$$\begin{cases} y(\tau) = y_0(\tau) + \lambda y_1(\tau) + \lambda^2 y_2(\tau) + \dots \\ \xi = \xi_0 + \lambda \xi_1 + \lambda^2 \xi_2 + \dots \end{cases} \quad (12)$$

其中: $y_i(\tau)$ 为第 i 阶 λ 的系数; ξ_i 为第 i 阶 ξ 的系数。

将式(12)代入式(11),令 λ 的各次幂的系数等于0,可得各阶近似线性方程组为

$$\begin{cases} \lambda^0: y_0'' + \xi_0^2 y_0 = 0 \\ \lambda^1: y_1'' + \xi_0^2 y_1 + \xi_1 y_0 + y_0 \cos 2\tau = 0 \\ \lambda^2: y_2'' + \xi_0^2 y_2 + \xi_2 y_0 + \xi_1 y_1 + y_1 \cos 2\tau = 0 \\ \vdots \end{cases} \quad (13)$$

下面分别讨论 ξ_0 取不同值时的情况。

1) $\xi_0 = 1$ 时,由于绕组形变的累积作用,绕组已经存在潜伏性故障进而导致绕组固有频率下降,此时绕组固有频率与激励频率接近,可得

$$\begin{cases} \xi_0 = 1, y_0 = \cos \tau \\ \xi_1 = -\frac{1}{2}, y_1 = \frac{1}{16} \cos 3\tau \\ \xi_2 = -\frac{1}{32}, y_2 = -\frac{1}{256} \cos 3\tau + \frac{1}{768} \cos 5\tau \\ \vdots \end{cases} \quad (14)$$

所以

$$y(\tau) = y_0(\tau) + \lambda y_1(\tau) + \lambda^2 y_2(\tau) = \cos \tau + \left(\frac{\lambda}{16} - \frac{\lambda^2}{256} \right) \cos 3\tau + \frac{\lambda^2}{768} \cos 5\tau \quad (15)$$

2) $\xi_0 = 2$ 时,即绕组尚未存在松动等潜伏性故障或松动程度极低,此时绕组固有频率为激励频率的2倍,可得

$$\begin{cases} \xi_0 = 4, y_0 = \cos 2\tau \\ \xi_1 = 0, y_1 = -\frac{1}{8} + \frac{1}{24} \cos 4\tau \\ \xi_2 = \frac{5}{48}, y_2 = \frac{1}{1536} \cos 6\tau \\ \vdots \end{cases} \quad (16)$$

所以

$$y(\tau) = y_0(\tau) + \lambda y_1(\tau) + \lambda^2 y_2(\tau) = -\frac{\lambda}{8} + \cos 2\tau + \frac{\lambda}{24} \cos 4\tau + \frac{\lambda^2}{1536} \cos 6\tau \quad (17)$$

由以上分析可知,当变压器空载合闸出现励磁涌流时,变压器绕组的固有频率与激励频率在一定条件下存在机电耦合效应,进而引起参数共振。具体表现为:当绕组固有频率与激励频率接近时,出现激励电流的奇次谐波 $(2n-1)\omega(n=1,2,\dots)$;当绕组固有频率为激励频率2倍时,出现偶次谐波 $2n\omega(n=1,2,\dots)$ 。

变压器空载合闸时励磁涌流中除50 Hz基频分量外还含有大量二次谐波^[18],因此在50和100 Hz电流激励下,绕组正常状态或发生早期松动故障时轴向振动信号以100和200 Hz的偶次谐波为主。伴随绕组松动故障程度加深,绕组固有频率下降发生共振,振动信号中由涌流100 Hz激励形成的300 Hz奇次谐波分量和400 Hz偶次谐波分量将明显增大。

在以往的基于稳态基频特征和基于稳态多频特征的诊断方法中,常将奇次谐波振动当作测量系统的空间电磁耦合干扰而忽略,但这样就丢失了绕组重要的机械状态信息。

2 基于WOA-VMD算法的宽频振动信号分析

2.1 变分模态分解原理

变分模态分解的整体框架是变分问题,包括构造变分问题和变分问题的求解^[19]。VMD的核心为将原始信号 f 分解为 k 个模态 u_k (具有中心频率的有限带宽)。约束变分问题,即使每个模态的带宽估计之和最小,其模型为

$$\min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \partial_t \left\| \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (18)$$

$$\text{s.t.} \sum_k u_k = f$$

其中: $\{u_k\} := \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ 为分解后各阶IMF分量; $\delta(t)$ 为冲激函数; $\{\omega_k\} := \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\}$ 为各IMF的中心频率。

为将约束变分问题转化为非约束变分问题以求解式(18)的最优解,引入二次惩罚因子 α 和增广拉格朗日函数,再利用交替方向乘子法(alternate direction method of multipliers,简称ADMM)交替更新 u_k, ω_k 和 λ ,解式(19)的鞍点即可得到最优解

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) :=$$

$$\alpha \sum_k \partial_t \left\| \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \rangle \quad (19)$$

2.2 鲸鱼优化算法

鲸鱼优化算法是一种新型的基于种群的自然启发元启发式优化算法^[20],其受海洋中座头鲸特有捕食行为启发,通过包围猎物、气泡捕食(局部搜索)和搜索猎物(全局搜索)3个阶段实现优化搜索目的^[21]。目前,鲸鱼优化算法因参数少、性能优及鲁棒性强等优点被广泛应用于实际工程问题中。

鲸鱼算法假设鲸鱼种群规模为 N ,待求解 D 维优化问题的解空间内第 i 只鲸鱼的位置为 $X_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^D)$, $i = 1, 2, \dots, N$,算法假设待优化问题变量及其解为最优鲸鱼(猎物)的位置。

在包围猎物阶段,假设当前最优候选解接近最佳鲸鱼位置,其他鲸鱼会自动更新自身位置。位置更新公式为

$$\begin{cases} D = |CX_r(t) - X(t)| \\ X(t+1) = X_r(t) - AD \\ A = 2ar - a \\ C = 2r \end{cases} \quad (20)$$

其中: D 为最优候选解位置; A 和 C 为系数; $t \in (1, t_{\max})$ 为当前迭代次数; $X_r(t)$ 为第 t 次迭代的最优解; $X(t)$ 为第 t 次迭代鲸鱼的位置; $r \in [0, 1]$ 为随机数。

在局部搜索阶段,算法有相同的可能性选择包围机制或螺旋气泡模式,则局部搜索位置更新数学模型为

$$X(t+1) = \begin{cases} X^*(t) - AD & (p < 0.5) \\ D' e^{bl} \cos(2\pi l) + X^*(t) & (p \geq 0.5) \end{cases} \quad (21)$$

其中: $p \in [0, 1]$ 为随机数; $D' = |X^*(t) - X(t)|$ 为第 i 只鲸鱼与最优鲸鱼间的距离; $l \in [-1, 1]$ 为随机数; b 为螺旋常数。

在全局搜索阶段,个体鲸鱼会依据其他伙伴的位置随机搜索,因此为避免陷入局部最优,在此阶段使用收敛因子 $|A|$ 允许算法进行全局搜索。当 $|A| > 1$,执行全局搜索,位置更新方程为

$$\begin{cases} D = |CX_{\text{rand}}(t) - X(t)| \\ X(t+1) = X_{\text{rand}}(t) - AD \end{cases} \quad (22)$$

其中: X_{rand} 为当前迭代种群中随机1只鲸鱼的位置。

2.3 WOA-VMD宽频振动信号分析方法

笔者运用WOA算法优化VMD的参数,其核心思想就是确定分解层数 k 和惩罚因子 α 的最佳组合。因此,以各阶模态函数能量熵 H_{E_k} 平均值的倒数为

适应度函数 F_{fit} , 即

$$H_{E_k} = -p_k \lg p_k \quad (23)$$

$$F_{fit} = k / \left(\sum_{i=1}^k H_{E_i} \right) \quad (24)$$

其中: E_k 为第 k 阶 IMF 分量的能量; $p_k = E_k / E$ ($E = \sum_{i=1}^k E_i$) 为第 k 阶 IMF 分量的能量占信号总能量比重。

本研究 WOA-VMD 宽频振动信号分析方法的主要步骤如下:

- 1) 采集变压器轴向原始振动信号, 利用 WOA 优化 VMD 参数 k 和 α , 设其初值分别为 5 和 2 000;
- 2) 初始化 WOA 种群规模、迭代次数以及自适应权重值, 并取适应度函数 F_{fit} 为各 IMF 能量熵平均值的倒数;
- 3) 计算每只座头鲸的适应度值, 并相互比较, 确定当前适应度最优鲸鱼;
- 4) 进入算法主循环, 若 $p < 0.5$ 且 $|A| \leq 1$ 则按式 (20) 更新位置, 若 $|A| > 1$ 则按式 (21) 更新位置, 若 $p \geq 0.5$ 则按式 (22) 更新位置;
- 5) 对整个群体进行评价, 确定全局最优鲸鱼位置;
- 6) 重复步骤 3~5, 直到达到最大迭代次数, 输出最佳 k 和 α 组合;
- 7) 以最佳 k 和 α 参数初始化 VMD, 并分解振动信号为一系列 IMF 分量;
- 8) 将原始振动信号重构到相空间, 分析提取振动信号样本熵特征;
- 9) 依据空载合闸变压器绕组参变振动特性提取合适特征频段作为特征量, 与样本熵构成复合特征向量实现绕组松动早期故障诊断。

3 变压器空载合闸试验信号分析

3.1 试验环境

笔者对国网南京供电公司某台型号为 S13-M-200/10 的配电变压器进行绕组松动故障模拟试验, 采集变压器 80% U_N , 90% U_N , 100% U_N , 110% U_N 和 120% U_N (U_N 为额定空载电压) 电压下, 绕组正常状态、90% 标准压紧力 (绕组松动 10%)、70% 标准压紧力 (绕组松动 30%) 和 50% 标准压紧力 (绕组松动 50%) 时空载合闸暂态过程中油箱表面轴向振动信号。试验中使用 DH5922D 型动态信号采集仪与 1A212E 型振动加速度传感器, 采样频

率为 20 kHz。变压器空载合闸试验平台如图 3 所示。试验变压器及轴向测点布置如图 4 所示。

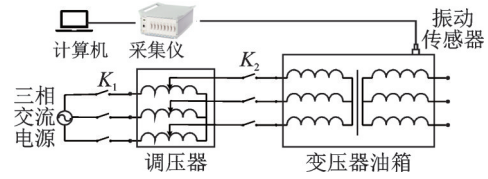
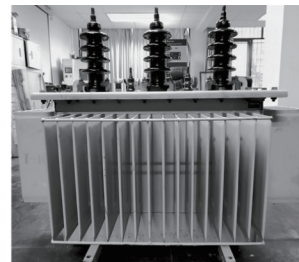
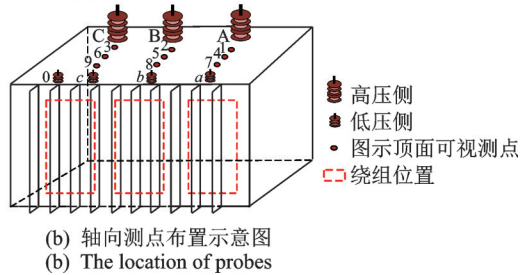


图3 变压器空载合闸试验平台

Fig.3 Transformer no-load switching-on experiment platform



(a) 试验变压器
(a) Test transformer



(b) 轴向测点布置示意图
(b) The location of probes

图4 试验变压器及轴向测点布置示意图

Fig.4 Test Transformer and the location of probes

3.2 绕组正常状态

按 3.1 节试验方案, 采集到不同电压下绕组正常状态轴向振动信号, 本研究仅列出 100% U_N 时绕组振动信号。试验过程中, 为最大限度减少剩磁和合闸角对试验的影响, 每种工况下试验重复 10 次, 并对每一测点的 10 次测量数据求取平均值。

对变压器顶面 4 号测点所测量 A 相绕组正常状态下 VMD 分解后各阶分量, 其所使用参数为 WOA 优化后最优解, 分解层数 $k=6$, 惩罚因子 $\alpha=5 000$ 。

为实现绕组松动故障的识别并判断故障程度, 本研究从信息域提取振动信号的样本熵^[22], 以表征信号的复杂程度。

计算振动信号样本熵的步骤如下。

- 1) 选择嵌入维数 m , 将原始振动信号 $x = \{x_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, L$) 重构到相空间, 可得状态向量 $x_j = \{x_j, x_{j+1}, \dots, x_{j+m-1}\}$ ($j = 1, 2, \dots, L - m$)。
- 2) 计算步骤 1 中所有不同元素 x_i 间的距离

$$d_{ij} = d(x_i, x_j) = \max_{l=0,1,\dots,m-1} (|x_{i+l} - x_{j+l}|) \quad (25)$$

$(i, j = 1, 2, \dots, L - m; i \neq j)$

3) 假设 r 为相似性容限, 按式(26)计算与信号 x_i 的相似状态数量比, 并按式(27)计算其平均值

$$B_j^m(\mathbf{r}) = \frac{\sum_i H(\mathbf{r} - d_{ij})}{L - m - 1} \quad (26)$$

$$B^m(\mathbf{r}) = \frac{\sum_j B_j^m(\mathbf{r})}{L - m} \quad (27)$$

4) 将步骤1中嵌入维数加1, 得到新的嵌入维数 $m+1$, 重复步骤1~3, 得 $B^{m+1}(\mathbf{r})$ 。

5) 按式(28)可得振动信号样本熵值估计 SampEn 为

$$\text{SampEn}(x, m, \mathbf{r}) = \ln B^m(\mathbf{r}) - \ln B^{m+1}(\mathbf{r}) \quad (28)$$

基于以上计算, 在本试验中, A相绕组正常状态下变压器空载合闸轴向振动信号的样本熵为 0.629 18, 此时振动信号序列呈复杂、随机状态。

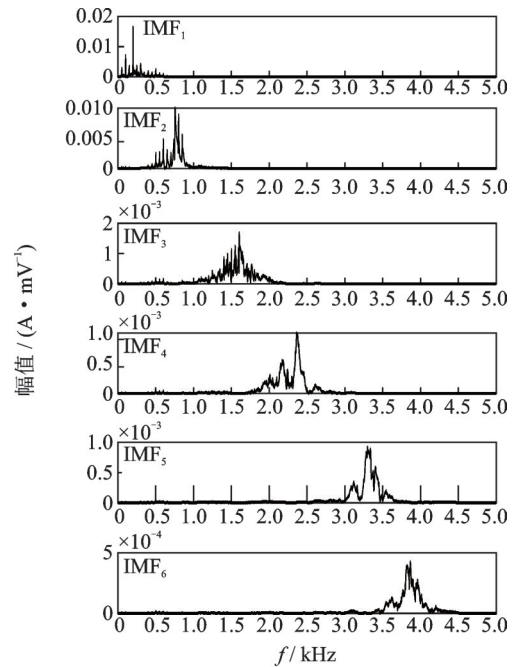
为验证本研究所提方法的有效性, 利用未优化 VMD(分解层数 $k=5$, 惩罚因子 $\alpha=2\ 000$)对绕组正常状态振动信号进行分解。WOA-VMD 与未优化 VMD 各模态分量频谱如图5所示。

由分解结果可知: 图5(a)中经 WOA-VMD 分解后信号各模态中心频率明确, 各次谐波清晰可见, 且未发现过分解、欠分解以及模态混叠现象; 图5(b)中经固定参数 VMD 分解后信号, IMF₁ 及 IMF₂ 分量在 500 Hz 前后出现明显模态混叠现象, 不利于后续故障特征量的提取。因此, 从算法鲁棒性和提取微弱故障特征有效性两方面评价, 本研究提出的 WOA-VMD 算法的性能优于未优化参数 VMD 算法。

3.3 绕组松动故障

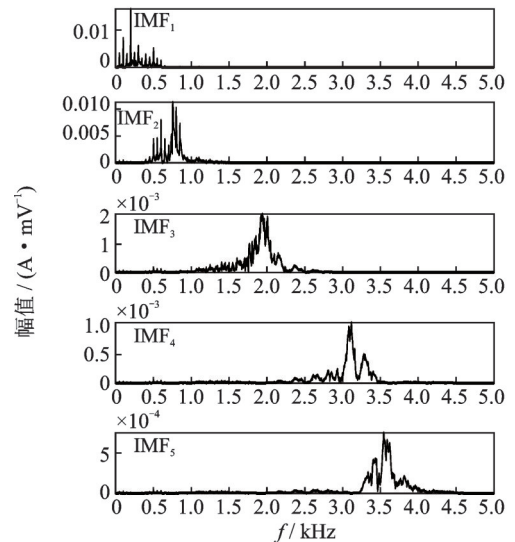
按 3.1 节试验方案采集 90% 标准压紧力(绕组松动 10%), 70% 标准压紧力(绕组松动 30%) 和 50% 标准压紧力(绕组松动 50%) 时空载合闸油箱表面轴向振动信号。经 WOA-VMD ($k=6$, $\alpha=5\ 000$) 分解后可得绕组正常状态及不同故障程度 IMF₁ 分量频谱, 再采用原始 VMD 对绕组 3 种松动故障下轴向振动信号进行分解。

由试验结果可知: 经本研究所提 WOA-VMD 算法分解后, 绕组松动故障特征频率明显, 而原始 VMD 算法针对绕组 10% 松动故障振动信号分解后的故障特征频率完全湮没在 500 Hz 油箱表面固有频率^[23]下, 无法有效识别绕组早期松动故障; 对绕组 30% 和 50% 松动故障振动信号分解后, 噪声干扰和模态混叠也十分明显。



(a) WOA-VMD 各模态分量频谱

(a) WOA-VMD modal component spectrum



(b) VMD 各模态分量频谱

(b) VMD modal component spectrum

图5 WOA-VMD 与未优化 VMD 各模态分量频谱

Fig.5 Spectrum of each modal component of WOA-VMD and unoptimized VMD

因此, 本研究所提 WOA-VMD 算法降噪效果更好, 分解出的故障特征频率明显, 在实际应用时具有更好的故障识别能力, 更有利于绕组早期松动故障的诊断。

由 1.3 节可知, 绕组轴向振动信号存在 100 和 200 Hz 基频分量, 并且当绕组压紧力降低时, 绕组固有频率逐渐下降, 此时由于机电耦合效应而发生的参变谐振使振动信号中的 300 和 400 Hz 分量增大。表 1 给出了不同机械状态下绕组振动信号样本熵值及其频谱峰值。

表1 样本熵与频谱峰值

Tab.1 SampEn and the peak of marginal spectrum

绕组机械 状态	样本熵	IMF ₁ 分量/Hz			
		100	200	300	400
正常	0.629 18	0.007 17	0.013 89	0.004 35	0.001 83
90%压紧力	0.581 58	0.010 09	0.014 47	0.007 06	0.001 92
70%压紧力	0.563 00	0.005 61	0.003 59	0.016 88	0.027 58
50%压紧力	0.456 04	0.001 80	0.003 11	0.031 52	0.045 50

由表1可知:当绕组机械状态逐渐恶化,绕组抗短路能力下降时,振动信号能量集中于基频或高频分量处,信号复杂程度降低,样本熵值减小;当绕组处于正常状态或出现早期松动时,振动信号主要为100和200 Hz的基频分量,高频分量所占比重较小,且发生轻度松动故障时,基频分量幅值随故障程度逐渐增大;当绕组发生30%或50%松动时,由于此时绕组固有频率逐渐下降至与激励频率相近并产生机电耦合效应,绕组轴向振动信号中基频与高频分量幅值均发生突变,基频能量转移至高频分量,且随着故障程度的加深,300和400 Hz幅值显著增大。

为了定量诊断绕组机械状态,分别计算绕组不同机械状态下各频率频谱峰值占比,如表2所示。由表2可知:绕组正常状态或出现早期松动时,基频分量占总能量的75%以上;当故障程度加深,高频分量占比达到80%以上,其中300 Hz分量对绕组松动程度灵敏度高且与故障程度正相关,其原因在于绕组固有频率随松动程度增大而减小,固有频率与合闸励磁涌流激励频率越接近,机电耦合效应越明显,进而引起参数共振,出现100 Hz励磁涌流的奇数次谐波分量。依据轴向振动信号样本熵和IMF₁分量各频率频谱峰值占比,可判断变压器绕组的机械状态,有助于及早发现绕组早期松动隐患。

表2 各频率频谱峰值占比

Tab.2 Spectrum peak ratio of each frequency %

绕组机械 状态	100 Hz	200 Hz	300 Hz	400 Hz
	分量占比	分量占比	分量占比	分量占比
正常	26.32	50.99	15.97	6.72
90%压紧力	32.77	43.14	21.05	3.04
70%压紧力	10.45	6.69	31.46	51.40
50%压紧力	2.20	3.80	38.47	55.53

综合以上分析可知,笔者所述励磁涌流激励下和绕组参变谐振得到的多倍频特征量能有效进行变压器空载合闸时绕组的故障诊断。将合闸轴向振动信号样本熵和各特征频率频谱峰值占比变化作为特征量,可对绕组机械状态进行有效评估。

4 结 论

1) 运用两导线振动模型分析绕组轴向振动,可得伴随变压器空载合闸时励磁涌流的出现,若绕组未发生机械故障,绕组轴向振动信号以100和200 Hz基频分量为主。当绕组发生松动故障时,其固有频率下降,若满足固有频率是激励频率整数倍这一条件时,出现激励电流的奇次或偶次谐波。

2) 鲸鱼算法优化的变分模态分解能够精确地将原始振动信号分解为一系列包含更少噪声干扰的模态分量,性能优于固定参数VMD算法,更加有利于绕组松动故障特征量的提取。

3) 利用变压器轴向振动信号样本熵值与经WOA-VMD分解后的IMF₁分量频谱峰值,可以有效反映绕组机械状态。振动信号样本熵值的减小可以反映绕组发生松动,基频分量幅值增加可以反映绕组轻度松动的故障程度,基频至高频分量的能量突变预示着故障由轻度松动转变为30%及以上中等程度松动,其中300 Hz分量对绕组松动程度灵敏度高且与故障程度正相关。

参 考 文 献

- [1] 汲胜昌,张凡,师愉航,等.基于振动信号的电力变压器机械状态诊断方法研究综述[J].高电压技术,2020,46(1):257-272.
JI Shengchang, ZHANG Fan, SHI Yuhang, et al. Review on vibration-based mechanical condition monitoring in power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 257-272. (in Chinese)
- [2] 肖怀硕,李清泉,施亚林,等.灰色理论-变分模态分解和NSGA-II优化的支持向量机在变压器油中气体预测中的应用[J].中国电机工程学报,2017,37(12):3643-3653,3694.
XIAO Huaishuo, LI Qingquan, SHI Yalin, et al. Prediction of dissolved gases in oil for transformer based on grey theory-variational mode decomposition and support vector machine improved by NSGA-II[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3643-3653, 3694. (in Chinese)
- [3] ZHANG C, HE Y, DU B, et al. Transformer fault diagnosis method using IoT based monitoring system and ensemble machine learning[J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 108: 533-545.
- [4] ZHOU H, HONG K, HUANG H, et al. Transformer winding fault detection by vibration analysis methods [J]. Applied Acoustics, 2016, 114: 136-146.
- [5] CAO C, XU B, LI X. Monitoring method on loosened

- state and deformational fault of transformer winding based on vibration and reactance information[J]. IEEE Access, 2020, 8:215479-215492.
- [6] 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)
- [7] ZHAO Z Y, TANG C, YAO C G, et al. Improved method to obtain the online impulse frequency response signature of a power transformer by multi scale complex CWT[J]. IEEE Access, 2018, 6:48934-48945.
- [8] 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.
ZHANG Fan, JI Shengchang, SHI Yuhang, et al. Research on transformer winding vibration and propagation characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9):2790-2798,2849. (in Chinese)
- [9] 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 Jianguo, et al. Diagnosis methods for transformer faults based on vibration signal under fluctuating operating conditions[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11):3925-3933. (in Chinese)
- [10] KORNATOWSKI E, BANASZAK S. Diagnostics of a transformer's active part with complementary FRA and VM measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 29(3):1398-1406.
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] STEURER M, FROHLICH K. The impact of inrush currents on the mechanical stress of high voltage power transformer coils [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(1):155-160.
- [13] MIKHAK-BEYRANVAND M, REZAEALAM B, FAIZ J, et al. Impacts of ferroresonance and inrush current forces on transformer windings[J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(7):914-921.
- [14] 王涛云,马宏忠,姜宁,等. 基于空载合闸振动信号的变压器绕组松动诊断[J]. 中国电力, 2016,49(5):39-43.
WANG Taoyun, MA Hongzhong, JIANG Ning, et al. Diagnosing of winding looseness of a transformer based on no-load switching-on vibration signals [J]. Electric Power, 2016,49(5):39-43. (in Chinese)
- [15] 叶志军,于旺,郑荣显,等. 变压器空充下的励磁涌流二次谐波特性分析[J]. 电力系统自动化, 2020,44(24):145-154.
YE Zhijun, YU Wang, ZHENG Rongxian, et al. Characteristic analysis of second harmonic of magnetizing inrush current with No-Load transformer energization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24):145-154. (in Chinese)
- [16] 张宁,朱永利,高艳丰,等. 基于变分模态分解和概率密度估计的变压器绕组变形在线检测方法[J]. 电网技术, 2016,40(1):297-302.
ZHANG Ning, ZHU Yongli, GAO Yanfeng, et al. An on-line detection method of transformer winding deformation based on variational mode decomposition and probability density estimation[J]. Power System Technology, 2016,40(1):297-302. (in Chinese)
- [17] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.
- [18] 蔡赛男,宋卫星,班利明,等. 基于鲸鱼算法优化LSS-VM的滚动轴承故障诊断[J]. 控制与决策, 2022, 37(1):230-236.
CAI Sainan, SONG Weixing, BAN Liming, et al. Fault diagnosis method of rolling bearing based on LSS-VM optimized by whale optimization algorithm [J]. Control and Decision, 2022, 37(1):230-236. (in Chinese)
- [19] 但长林,李三雁,张彬. 基于样本熵和SVM的滚动轴承故障诊断方法研究[J]. 中国测试, 2020,46(11):37-42.
DAN Changlin, LI Sanyan, ZHANG Bin. Research on fault diagnosis method for rolling element bearings based on sample entropy and SVM[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(11):37-42. (in Chinese)
- [20] 赵宏飞,马宏忠,李凯,等. 电力变压器油箱固有频率测试及其影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013,33(11):165-169.
ZHAO Hongfei, MA Hongzhong, LI Kai, et al. Test and analysis of inherent frequency of power transformer tank[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11):165-169. (in Chinese)



第一作者简介: 朱昊,男,1997年4月生,硕士生。主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断、现代信号处理方法。
E-mail: hhu_zhuhao@hhu.edu.cn