

变压器绕组多故障条件下的振动信号特征提取

李 莉¹,朱永利²,宋亚奇¹

(1. 华北电力大学 控制与计算机工程学院,河北 保定 071003;

2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要: 针对变压器绕组多种故障并发的工况,在分析变压器绕组振动机理的基础上,提出一种基于集合经验模式分解(EEMD)的振动信号特征提取方法。采用 EEMD 方法对变压器绕组振动信号进行分解得到各阶本征模函数(IMF),利用 IMF 能量和 2 范数构造特征矢量,将该特征矢量作为变压器绕组状态识别的判据。利用 Fisher 判别法对所提方法的有效性进行验证。试验结果表明,利用所提方法提取的各状态特征矢量区别明显,与快速傅里叶变换(FFT)方法相比,所提方法可准确识别出变压器绕组的混合故障状态。

关键词: 变压器; 绕组故障; 故障分析; 识别; 振动分析; 信号处理; 集合经验模式分解; 本征模函数; 特征矢量

中图分类号: TM 407

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.08.024

0 引言

变压器绕组变形是电力系统安全运行的一个重大隐患,据统计绕组在电力作用下发生机械变形而导致的严重故障占绕组总故障的 70%^[1],事故率已上升到首位。目前,变压器绕组变形的诊断方法主要有低电压脉冲法、短路阻抗法、频率响应法和振动检测法^[2]。其中,变压器振动监测系统安装简单、监测灵敏、安全可靠,在线监测时整个监测系统与电力系统无电气连接,在监测变压器绕组和铁芯的状态时表现出良好的性能^[3]。特别地,针对一些老旧大型电力变压器抗短路能力较低和电力系统短路电流增大而造成的变压器损坏等事故,通过分析振动信号可以在故障早期诊断出变压器绕组、铁芯所存在的隐患和故障,因此近年来变压器振动信号分析逐渐成为了国内外研究的热点。

20 世纪 80 年代中期开始,各国学者尝试利用振动信号检测绕组及铁芯的状态,并进行了现场试用,证实了振动信号检测方法是有效的,且适用于各种类型变压器^[4-6]。近年来,许多学者应用振动分析法在变压器铁芯松动、绕组变形状态监测技术方面作了大量的研究^[7-12],取得了很多成果。但是,这些研究工作主要是针对单故障源的特征提取和故障识别方法。笔者在对变压器振动信号进行分析的过程中,观察到变压器绕组有多种故障并发的案例。例如变压器运行中遭受各种突发性短路电流冲击时,每个线圈都将受强大的径向力和轴向力共同作用,在累积效应的作用下,绕组可能同时发生轴向和径向的

形变,本文将此种工况称为绕组发生混合故障。绕组发生多种变形故障时,产生的振动波通过变压器结构件和冷却油传播到箱壁的过程中会相互叠加和干涉^[4],此时获取的振动信号虽然与单个故障振动相似,但故障振动波之间的互相影响导致其振动信号形态更加丰富,不完全是多个单故障信号的简单叠加,这使得绕组监测诊断问题更复杂和困难。目前尚无相关文献对变压器绕组出现混合故障时产生的振动信号进行分析研究。如何从复杂的动态振动信号中提取到有效的故障特征信息,区分绕组轴向故障、径向故障以及混合故障,是一个值得研究的问题。

目前针对变压器振动信号常用的研究方法有快速傅里叶变换 FFT(Fast Fourier Transform)^[10-14]、小波包分析^[11,15-16]、希尔伯特-黄变换^[9,12,17]等。文献^[10]对振动信号进行傅里叶变换,提出除基频分量外,利用 50 Hz 分量及其倍频分量、基频的倍频分量的能量,构造 3 个绕组变形诊断模型及诊断方法,该方法对易产生 50 Hz 及其倍频分量的绕组轴向故障识别率高,但笔者经过试验发现当绕组发生径向变形故障和混合故障时,该方法所用特征量变化不明显,易产生漏检。另一方面,FFT 只适合处理平稳信号,不能有效提取动态非平稳信号的特征,而变压器振动信号在一定程度上具有非平稳特征^[12],因此使用 FFT 分析该信号可能会漏检,甚至误判某些故障工况,所以一些学者研究利用小波分析和小波包分析处理振动信号。文献^[11]利用小波包分析变压器铁芯及绕组的状况,提出“能量-故障”诊断模式识别方法,将 3 层小波包分解后各个频段能量的增减作为故障判据,该方法的判断准确性依赖大量经验数据作参考,对于不同的变压器而言其适应性较差。另外,小波和小波包变换虽然可用于分析非平稳信号,但实际应用时还需解决小波基的选择问题^[18],不具备

收稿日期:2013-08-20;修回日期:2014-06-29

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(13XS-30,13MS88)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(13XS30,13MS88)

自适应性。对此,文献[12]提出利用振动信号的希尔伯特能量谱及边界谱的分布特征,来判断铁芯是否发生故障及故障严重程度,其给出的分析图例能明显看出正常工况与故障工况的区别,但该文献并未给出可作为判据的具体状态指纹参数。

集合经验模式分解 EEMD(Ensemble Empirical Mode Decomposition)^[19]方法是由 Flandrin 的经验模式分解(EMD)算法小组和 Huang 的研究小组针对 EMD 方法的不足,提出的一种噪声辅助数据分析方法。EEMD 方法选择参数少,能根据信号自适应分解出具有良好的时频局部性的本征模函数(IMF),且分解结果稳定,非常适用于对非平稳故障微弱信号的分析处理,这为解决变压器绕组多种故障条件下的振动信号特征提取问题提供了全新的思路。Fisher 判别法借助方差分析的思想,选择一组最优的投影向量,使得投影到低维空间的样本数据具有较好的可分离性,能很好地区分内距离较小而类间距离较大的特征,目前主要应用在气体绝缘开关设备(GIS)放电识别、绝缘老化判别等方面。

本文提出一种基于 EEMD 方法的变压器多故障条件下振动信号特征提取方法,并对实验室测得的变压器绕组正常工况、轴向故障、径向故障和混合故障 4 种工况下的振动信号进行了特征矢量提取。将 Fisher 判别法应用于变压器振动信号故障分类,验证本文提取的特征矢量性能,实现变压器绕组混合故障与单个故障的自动分类识别。

1 变压器绕组振动机理及与振动信号的关系

电流通过变压器时,绕组周围将产生漏磁场,电流与漏磁场相互作用于绕组,在绕组内产生电动力,并随着负载电流变化而变化。绕组的振动响应分量正比于电流的平方^[4],即:

$$F_w \propto i^2 \quad (1)$$

其中, F_w 为绕组中通过负载电流引起的电动力; i 为负载电流。因此判断绕组的状况必须考虑负载电流的大小,特别是短路电流连续冲击的影响。

随着电网容量的不断增大,变压器出口或近区短路造成的大电流冲击力对绕组构成了很大的威胁,特别是一些老旧大型电力变压器,如果电动力超过了变压器绕组承受力的范围,常会导致变压器绕组发生变形。虽然在遭受冲击后变压器仍能“带病”运行一段时间,但由于绕组变形具有累积效应,当变形累积到一定程度时会严重破坏绕组的机械动稳定性,同时绕组变形也会降低其绝缘强度,给变压器运行带来很多事故隐患^[21]。

变压器运行时,绕组受到的电动力作用是一个复杂的动态过程^[21],主要包括径向电动力、轴向电

力以及周向电动力作用。径向电动力由漏磁场的轴向分量与电流相互作用产生,作用于内绕组与外绕组上,分别产生压应力与拉应力。当径向电动力的压(拉)应力大于绕组内壁撑条支撑的弯曲应力时,绕组将产生位移,随着绕组位移增大,这种变形的累积将破坏匝绝缘,最终导致变压器发生故障。绕组承受的轴向电动力是轴向内力与轴向外力的矢量和。轴向内力压缩内外绕组,且沿线圈高度不均匀分布;轴向外力使这种不对称性增大,较其他短路力更容易造成绕组事故^[22]。周向电动力一般情况下相对较小,仅当多个电流并行流过螺旋式高压调压绕组上时,轴向短路逐渐加重,需考虑周向电动力问题。

文献[7]计算了绕组轴向振动方程的动态响应过程,可知变压器绕组振动信号与绕组运行状况之间的关系。在变压器的运行过程中,绕组层压木板的下压螺钉返松、压紧力的变化、绕组变形等故障隐患可以通过绕组的振动加速度值的变化反映出来。特别是当绕组强迫振动频率接近固有频率时,加速度大幅增加。因此可以通过监测绕组的振动信号,提取其振动特征,以判断绕组的当前状态。

2 变压器振动信号特征提取及分类方法

2.1 利用 EEMD 方法提取特征矢量

Huang 提出的 EEMD 方法很好地解决了 EMD 方法中由于信号极值点分布不均匀而出现的模态混叠问题。利用白噪声具有零均值的特性,EEMD 方法在待分解信号中加入白噪声后进行 EMD,分解结果经过多次平均后,噪声将相互抵消,集成均值的结果作为最终的 IMF 分量。

对大量变压器绕组振动信号数据进行试验,结果表明 EEMD 得到的 IMF 能很好地体现变压器绕组的振动特性,并具有明确的物理意义。变压器振动信号中绕组单个故障和混合故障的变化在各阶 IMF 瞬时频率与能量中都能够准确有效地表现出来。因此,将变压器振动信号进行 EEMD,选择能有效反映变压器振动信息的 IMF,计算其范数构成信号的特征矢量,可以定量地表示变压器绕组当前状态。具体过程如下。

a. 初始化 EMD 次数 M ,选择白噪声的幅值系数 A 。根据文献[12]的建议与笔者的试验分析,在对变压器绕组振动信号进行 EEMD 时, M 取 100~300 的情况下, A 值选择信号标准偏差的 10%~30% 较为适宜。

b. 向原始信号 $x(t)$ 中加入 M 次($M > 1$)均值为 0、幅值标准差为 C_A 的高斯白噪声序列 $n_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, M$),即:

$$X_i(t) = x(t) + C_A n_i(t) \quad (2)$$

c. 对 $X_i(t)$ 分别进行 EMD, 得到各个 IMF 分量和余项, 即:

$$X_i(t) = \sum_{j=1}^n c_{ij} + r_{in} \quad (3)$$

其中, c_{ij} 为第 i 次加入高斯白噪声后, 对 $X_i(t)$ 进行分解得到的第 j 个 IMF 分量; r_{in} 为第 i 次加入高斯白噪声后, 对 $X_i(t)$ 进行分解后的余项; n 为分解层数。

d. 利用高斯白噪声频谱的零均值原理, 将以上步骤对应的 IMF 分量进行总体平均运算, 消除高斯白噪声作为时域分布参考结构带来的影响, 最终得到的 EEMD 后的 IMF 分量为:

$$c_j(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M c_{ij} \quad (4)$$

其中, $c_j(t)$ 为对原始信号进行 EEMD 后所得到的第 j 个 IMF 分量。

e. 按式(5)计算出每个 IMF 分量的能量 E_j 。选择前 N 个 IMF 分量, 其能量总和应占原始信号能量的 85% 以上(除剩余分量能量外)。

$$E_j = \sum_{i=1}^{n_{\text{IMF}}} A_j^2(i) \quad (5)$$

其中, $A_j(i)$ 为第 j 个 IMF 分量的振幅; n_{IMF} 为每个 IMF 的长度。

f. 对每组振动信号计算所选前 N 个 IMF 分量的 2 范数 v_j 构成其特征矢量 \mathbf{V} :

$$\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_N] \quad (6)$$

$$v_j = \sqrt{E_j}$$

该特征矢量 \mathbf{V} 能综合表征变压器绕组的状态信息。

2.2 基于 Fisher 判别法的振动信号分类步骤

判别分析是多元统计分析中判别样本所属类别的一种重要方法, 其思想是找到一个(或一组)投影轴, 使得样本投影到该空间后能在保证方差最小的情况下, 将不同类的样本很好地分开。为验证 2.1 节中提取的振动信号特征矢量对变压器绕组混合故障识别的有效性, 采用的基于 Fisher 判别法的振动信号分类步骤如下。

a. 按 2.1 节所列步骤提取变压器振动信号在正常、轴向故障、径向故障和混合故障 4 种工况下的特征矢量 $\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_N]$ 。针对 4 种工况, 各选 m 组作为经验样本, 得到一个 $4m \times N$ 的训练矩阵 \mathbf{R} ; 各选 k 组作为未知样本, 得到一个 $4k \times N$ 的测试矩阵 \mathbf{R}' 。

b. 对训练矩阵 \mathbf{R} 根据式(7)按列做归一化处理得矩阵 $\mathbf{X} = [x_{ij}]$ 。

$$x_{ij} = \frac{(y_{\text{max}} - y_{\text{min}})(r_{ij} - r_{j\text{min}})}{r_{j\text{max}} - r_{j\text{min}}} + y_{\text{min}} \quad (7)$$

其中, x_{ij} 为 \mathbf{R} 中元素归一化后的数据; y_{max} 和 y_{min} 分别为归一化的数值范围, 分别默认为 1 和 -1; $r_{j\text{max}}$ 和

$r_{j\text{min}}$ 分别为矩阵 \mathbf{R} 中第 j 列的最大值和最小值。

c. 利用归一化后的训练矩阵 \mathbf{X} 计算 4 种工况下的类内散布矩阵 \mathbf{S}_w 和类间散布矩阵 \mathbf{S}_b 。

$$\mathbf{S}_w = \frac{1}{4m} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^m (X_{ij} - m_i)(X_{ij} - m_i)^T \quad (8)$$

$$\mathbf{S}_b = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{4} (m_i - \bar{x})(m_i - \bar{x})^T \quad (9)$$

其中, X_{ij} 为 \mathbf{R} 中第 i 组训练样本中的第 j 个样本; m_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为第 i 类训练样本的均值; \bar{x} 为总体样本的均值向量。

d. 利用步骤 b 处理后的训练矩阵构造 Fisher 准则函数, 进行最大值求解, 取前 2 个非零特征值对应的特征向量 $[\alpha_1, \alpha_2]$ 为投影方向。

$$\alpha_1 = [\alpha_{11} \ \alpha_{12} \ \dots \ \alpha_{1N}]$$

$$\alpha_2 = [\alpha_{21} \ \alpha_{22} \ \dots \ \alpha_{2N}]$$

e. 对 \mathbf{X} 进行式(10)所示的 $[\alpha_1, \alpha_2]$ 方向的投影转换, 得训练样本的二维投影图。

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_N]^T \quad (10)$$

其中, Y_1, Y_2 分别为二维投影图的横、纵坐标。

f. 对测试矩阵 \mathbf{R}' 重复步骤 b—e, 得到测试样本的二维投影图。

3 变压器振动试验分析

为验证上述基于 EEMD 的变压器器身振动信号特征提取方法, 笔者利用上海电力公司提供的一台三相变压器对 4 种工况下获取的振动数据进行了分析研究。

3.1 试验环境和条件

在实验室对该三相绕组变压器进行了短路试验和空载试验。短路试验中, 电流分 10 次加载至试验条件所能加载的最大电流; 空载试验中, 电压分 8 次加载到变压器额定电压 35 kV。在各种试验条件下均采集了绕组 4 种工况下的振动数据。

振动传感器布置参考了文献[23]的分析结论, 将 6 个 ICP 型加速度振动传感器(灵敏度为 100 mV/g)以永磁体方式, 分别放置在变压器低压侧三相绕组对应箱壁上, 每相绕组对应的箱壁中部和底部部位各布置 1 个, 获取 6 个通道的采样数据。振动数据采样频率为 10240 Hz。

3.2 绕组故障模拟和设置

试验中除获取变压器正常状态下振动信号外, 还模拟了变压器绕组的 3 种故障状态, 即绕组轴向变形故障、绕组径向变形故障和绕组混合故障。

故障均为人为设置, 其中, 绕组轴向变形故障是抽取低压绕组顶部 2 层绕组垫块, 模拟绕组垫块脱落; 绕组径向变形故障是指低压绕组上端的侧绕

面发生内凹变形,径向变形量不超过 1 cm;绕组混合故障是指绕组同时发生内凹变形故障及绕组垫块脱落故障。图 1 为绕组故障设置的示意图,其中 A 点出现垫块脱落,绕组发生轴向变形;B 点处绕组发生内凹变形。

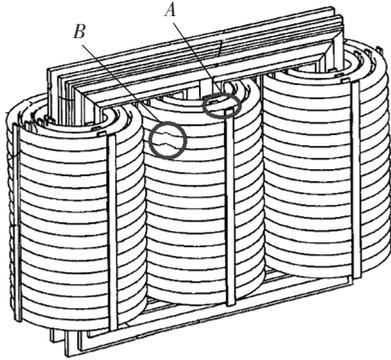


图 1 绕组故障设置示意图

Fig.1 Schematic diagram of winding faults

3.3 单一故障分析

由于测点所在位置变压器结构不同,试验中各通道振动信号幅值各不相同,响应幅值大的测点一般线性度偏差较小,信号的信噪比较高^[23]。本文选择了试验中第 6 通道数据,即最靠近绕组故障点的传感器采集的数据,其信号振动幅值最大,能较好地反映绕组故障特征。以下对 4 种工况下所有信号的特征提取和分析均取同一个电压、电流下的测量值。

3.3.1 现有方法局限性

利用 FFT 分析绕组出现单一故障时的特征。图 2 是变压器正常状态与 3 种故障工况下测得的振动信号的 FFT 频谱图。为了突出幅值较小的特征信号,对图 2 的纵坐标进行了对数坐标转换。

从图 2 可以看出,变压器正常运行工况下,基频分量(100 Hz)幅值最大,为主要频率分量,印证了变压器绕组和铁芯振动基频为电网频率的 2 倍。

对比变压器绕组发生轴向变形故障和正常工况

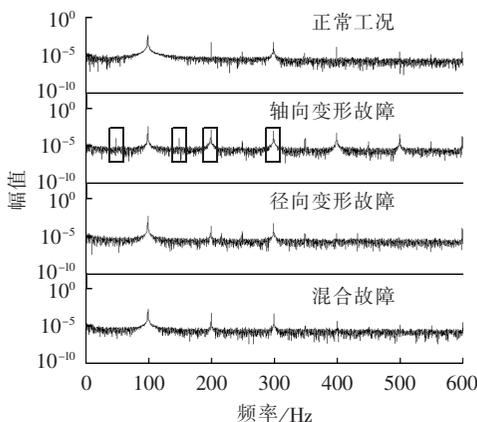


图 2 变压器绕组振动信号的 FFT 频谱图

Fig.2 FFT spectrums of transformer winding vibration signal

下的 FFT 频谱可知,发生轴向变形故障后,绕组的振动信号中除 100 Hz 分量发生变化外,50、150、200、300 Hz 等分量的幅值均发生了变化,如图中实线框中波形所示,据此可以明显区分变压器绕组的正常状态与轴向变形故障状态。

已有相关文献中对绕组径向故障分析较少,结合试验数据本文对绕组径向故障进行了分析研究。对比变压器绕组发生径向变形故障和正常工况下的 FFT 频谱可知,两者的 FFT 频谱特征信息相差无几,可见仅利用 FFT 频谱信息,基本上不能发现变压器绕组已出现了径向变形故障。

3.3.2 基于 EEMD 的特征矢量提取试验

为了能识别出变压器绕组的轴向变形或径向变形故障,本文将 EEMD 方法应用于变压器振动信号分析,图 3 是变压器正常工况下的 EEMD 结果,图 4 是变压器径向变形故障工况下的 EEMD 结果。EEMD 方法分解出 7 个主要 IMF 分量并自适应地投影到对应的频率空间(0~5000 Hz 由高到低)。图 3 和图 4 中 c_3 — c_5 的瞬时频率在 100~800 Hz 之间,能反映绕组振动特性且振动能量集中。

比较图 3 和图 4 中对应的各个 IMF,可以发现它们有明显区别。例如图 3 中振动能量主要集中在 c_3 和 c_4 ,而图 4 中的振动能量则分散到 c_3 、 c_4 和 c_5 。

表 1 是利用 2.1 节中的方法提取的变压器正常

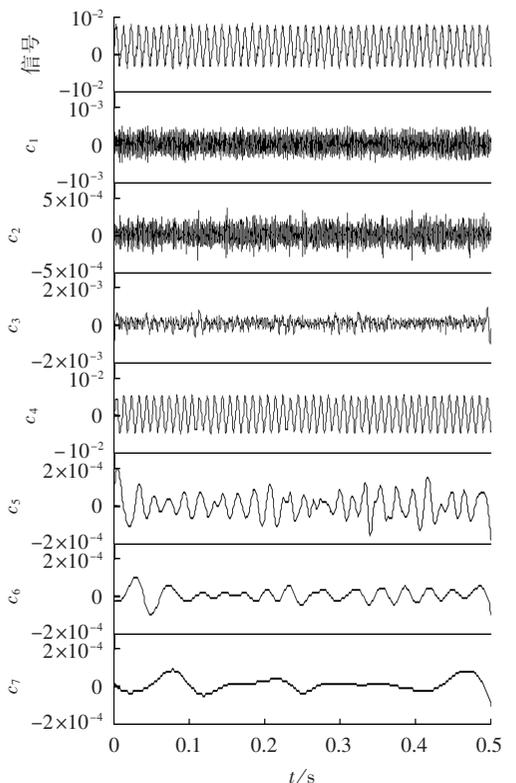


图 3 变压器绕组正常状态下振动信号的 IMF 分量
Fig.3 Vibration signal IMFs of transformer winding in normal state

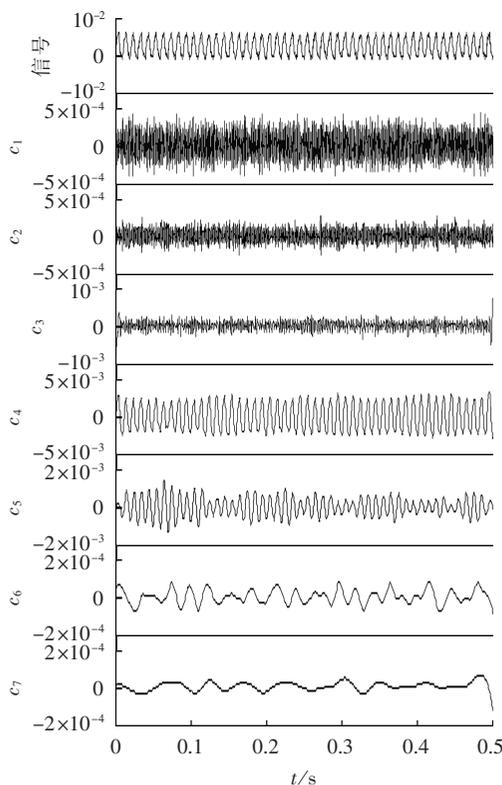


图 4 变压器绕组径向变形故障状态下振动信号的 IMF 分量

Fig.4 Vibration signal IMFs of transformer winding in radial deformation state

表 1 变压器绕组正常和 3 种绕组故障工况下特征矢量
Tab.1 Feature vectors of transformer winding vibration signal for normal and three faulty states

工况	V
正常	[0.012 4, 0.006 5, 0.018 4, 0.228 7, 0.004 7, 0.002 0]
轴向变形	[0.016 1, 0.019 0, 0.043 2, 0.071 0, 0.121 3, 0.007 3]
径向变形	[0.010 3, 0.004 9, 0.008 8, 0.127 2, 0.033 8, 0.003 6]
混合故障	[0.014 4, 0.006 0, 0.005 0, 0.024 3, 0.085 8, 0.007 1]

工况和 3 种绕组故障工况下振动信号的一组特征矢量 $V=[v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6]$ 。

由表 1 可知, 4 种工况在不同频率段上的特征数值变化都比较明显, 以此可识别绕组的轴向或径向故障。

3.4 混合故障分析

当绕组同时发生内凹变形故障及绕组垫块脱落故障时, 绕组尺寸在轴向和径向都发生了变化, 此时若用 FFT 方法进行识别, 由图 2 可以看出, 混合故障和正常工况下, 绕组的频谱特征非常相似, 不能相互区分。

本文利用 EEMD 方法分解绕组混合故障时的振动信号, 如图 5 所示。将图 5 与图 2、4 进行比较, 可以发现此时信号的能量更多扩散到了 c_4, c_5 上, 与绕组发生其他故障时特征不同, 所以 EEMD 结果能反映出绕组振动特性的变化。量化绕组混合故障与绕组其他状态的特征, 结果见表 1。由表中数据可知,

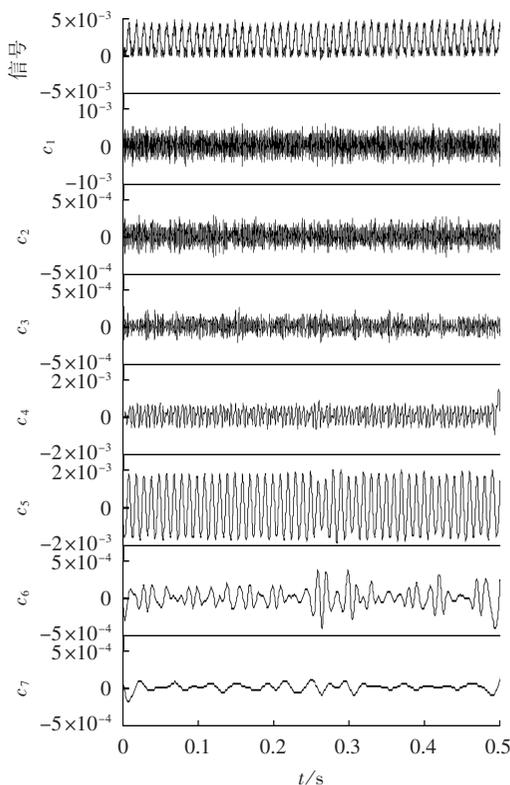


图 5 变压器绕组混合故障状态下振动信号的 IMF 分量
Fig.5 Vibration signal IMFs of transformer winding in multi-fault state

混合故障状态和其他状态的特征矢量区别明显。

为了进一步验证表 1 中提取特征矢量的有效性, 介于目前所获故障工况下的试验样本较少, 本文采用 Fisher 判别法对变压器振动信号进行分类验证, 步骤见 2.2 节。选择了 24 组经验样本构造 Fisher 判别函数, 计算各样本特征向量的 2 个判别函数值, 对 96 组未知样本做有监督的聚类, 结果如图 6 所示。

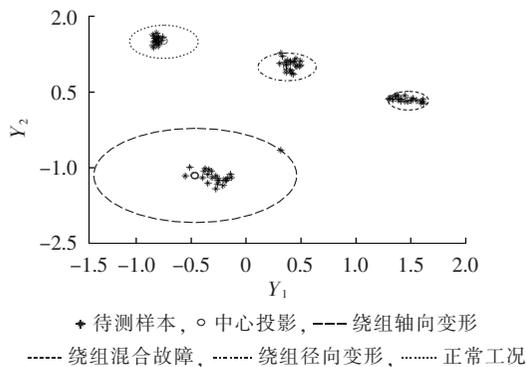


图 6 测试样本投影图

Fig.6 Projection of test samples

由图 6 可见, 4 种变压器绕组工况被有效地区分开来, 且类内的聚类效果明显。所以本文提取的变压器振动信号特征矢量能很好地区分设置的正常工况与 3 种绕组故障工况, 与其他方法相比, 尤其能很好区分变压器绕组的径向变形与混合故障故障工况。

4 结论

本文基于 EEMD 理论,对电力变压器绕组径向变形、轴向变形以及绕组混合故障等多种故障工况下的振动信号进行分析和特征提取。首先分析了变压器绕组的振动机理及与振动信号的关系,在此基础上,首次尝试采用 EEMD 对变压器绕组混合故障的振动信号进行分析,提出一种基于 EEMD 的变压器组合故障振动信号特征提取方法。其次,将 Fisher 判别法应用于变压器振动信号混合故障分类。最后,对实验室测得的变压器绕组正常状态、绕组轴向故障、绕组径向故障和绕组混合故障 4 种工况下的振动信号进行了特征矢量提取和 Fisher 判别分析,结果验证了本文提取的特征矢量能很好地聚类变压器绕组振动信号,实现变压器绕组单个故障与混合故障的自动分类识别。相对相关文献中其他的特征矢量提取方法,本文方法能更好地区分变压器绕组的径向变形与混合故障故障工况,适应性更强。在下一步的工作中,将考虑融合多通道振动数据特征作为综合判据,进一步提高高故障诊断的准确性。

参考文献:

- [1] 黄新波. 变电设备在线监测与故障诊断[M]. 北京:中国电力出版社,2010:9.
- [2] 李朋,张保会,郝治国. 基于电气量特征的变压器绕组变形监测技术现状与展望[J]. 电力自动化设备,2006,26(2):28-32.
LI Peng,ZHANG Baohui,HAO Zhiguo. Actuality and prospect of transformer winding deformation monitoring based on electric characteristic[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(2):28-32.
- [3] 程锦,李延沐,汲胜昌. 振动法在线监测变压器绕组及铁心状况[J]. 高电压技术,2005,31(4):43-45.
CHENG Jin,LI Yanmu,JI Shengchang. Application of vibration method on monitoring the winding and core condition of transformer[J]. High Voltage Engineering,2005,31(4):43-45.
- [4] GARCIA B,BURGOS J C,ALONSO A M. Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations—part I:theoretical foundation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(1):157-163.
- [5] GARCIA B,BURGOS J C,ALONSO A M. Winding deformations detection in power transformers by tank vibrations monitoring [J]. Electric Power Systems Research,2005,74(1):129-138.
- [6] GARCIA B,BURGOS J C,ALONSO A M. Transformer tank vibration modeling as a method of detection winding deformations—part II :experimental verification[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(1):164-169.
- [7] 谢坡岸. 振动分析法在电力变压器绕组状态监测中的应用研究[D]. 上海:上海交通大学,2008.
XIE Po'an. Study on application of vibration analysis to the condition monitoring of power transformers windings[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2008.
- [8] 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):165-168.
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):165-168.
- [9] 熊卫华. 经验模态分解方法及其在变压器状态监测中的应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.
XIONG Weihua. Empirical mode decomposition method and its application research on transformer's condition monitoring [D]. Hangzhou:Zhejiang University,2006.
- [10] 马宏忠,耿志慧,陈楷,等. 基于振动的电力变压器绕组变形故障诊断新方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(8):89-95.
MA Hongzhong,GENG Zhihui,CHEN Kai,et al. A new fault diagnosis method for power transformer winding deformation based on vibration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(8):89-95.
- [11] 汲胜昌,刘味果,单平,等. 小波包分析在振动法监测变压器铁芯及绕组状况中的应用[J]. 中国电机工程学报,2001,21(12):24-27,49.
JI Shengchang,LIU Weiguo,SHAN Ping,et al. The application of the wavelet packet to the monitoring of the core and winding condition of transformer[J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(12):24-27,49.
- [12] 熊卫华,赵光宙. 基于希尔伯特-黄变换的变压器铁心振动特性分析[J]. 电工技术学报,2006,21(8):9-13.
XIONG Weihua,ZHAO Guangzhou. Analysis of transformer core vibration characteristics using Hilbert-Huang transformation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,21(8):9-13.
- [13] BARTOLETTI C,DESIDERIO M,di CARLO D,et al. Vibroacoustic techniques to diagnose power transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(1):221-229.
- [14] JI Shengchang,LUO Yongfen,LI Yanming. Research on extraction technique of transformer core fundamental frequency vibration based on OLCM[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(4):1981-1988.
- [15] YEN G G,LIN K C. Wavelet packet feature extraction for vibration monitoring[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2000,47(3):650-667.
- [16] WU S,HUANG W,KONG F,et al. Extracting power transformer vibration features by a time-scale-frequency analysis method[J]. Journal of Electromagnetic Analysis & Applications,2010,2(1):31-38.
- [17] WU S,HUANG W,KONG F,et al. Vibration features extraction of power transformer using an time-scale-frequency analysis method based on WPT and HHT[C]//IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference,2009. [S.l.]: IEEE,2009:2577-2581.
- [18] 黄建才,朱永利. 提取绝缘子泄漏电流特征时母小波的选择[J]. 电磁避雷器,2012(6):14-18,25.
HUANG Jiancai,ZHU Yongli. Mother wavelet selection for feature extraction of insulator leakage current[J]. Insulators and Surge Arresters,2012(6):14-18,25.
- [19] WU Z,HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis,2009,1(1):1-41.
- [20] 汲胜昌,程锦,李彦明. 油浸式电力变压器绕组与铁心振动特性研究[J]. 西安交通大学学报,2005,39(6):616-619,658.

- JI Shengchang, CHENG Jin, LI Yanming. Research on vibration characteristics of windings and core of oil-filled transformer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(6): 616-619, 658.
- [21] 邵宇鹰, 徐剑, 饶柱石, 等. 短路冲击下变压器绕组状态在线诊断[J]. 振动与冲击, 2011, 30(2): 173-176.
- SHAO Yuying, XU Jian, RAO Zhushi, et al. On-line diagnosis for a transformer winding's state under short-circuit shock[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2): 173-176.
- [22] 变压器制造技术丛书编审委员会. 变压器绕组制造工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [23] 徐方, 邵宇鹰, 金之俭, 等. 变压器振动测点位置选择试验研究[J]. 华东电力, 2012, 40(2): 274-277.

XU Fang, SHAO Yuying, JIN Zhijian, et al. Experimental study of measuring point selection for transformer vibration detection [J]. East China Electric Power, 2012, 40(2): 274-277.

作者简介:



李莉

李莉(1980-),女,重庆人,讲师,博士研究生,主要研究方向为现代信号处理方法在电力系统故障诊断等方面的应用(E-mail: haolily12@163.com);

朱永利(1963-),男,河北冀州人,教授,博士研究生导师,博士,从事网络化监控和智能信息处理方面的研究工作。

Feature extraction for vibration signal of transformer winding with multiple faults

LI Li¹, ZHU Yongli², SONG Yaqi¹

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The mechanism of transformer winding vibration is analyzed and a feature extraction method based on EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition) is proposed for the vibration signal of the transformer winding with multiple faults. The vibration signal is decomposed by EEMD method to get the IMF (Intrinsic Mode Function) of each order and the feature vector is constructed with the IMF energy and 2-norm, which is then used as a criterion for the transformer winding state identification. Fisher discriminant is applied to verify the effectiveness of the proposed method. Experimental results show that, the feature vector extracted by the proposed method is significantly different among different transformer winding states and, compared with the FFT (Fast Fourier Transformation) method, the proposed method can properly identify the multi-fault state of transformer winding.

Key words: electric transformers; winding fault; failure analysis; identification; vibration analysis; signal processing; ensemble empirical mode decomposition; intrinsic mode function; feature vector

(上接第139页 continued from page 139)

Time-domain parameter identification based on measurable variables for synchronous generator

TANG Kunming¹, KANG Lihong¹, YIN Jiamin², FENG Shuhui^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Changshou Power Supply Bureau, Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 401220, China; 3. Weifang Power Supply Company, Weifang 261021, China)

Abstract: The immeasurable variables of synchronous generator model make its parameter identification difficult. Based on Park model, a parameter identification model only with measurable state variables is derived for synchronous generator, based on which and according to the two-step strategy, the generator parameters are identified by applying the direct integral least square principle. With the proposed model and algorithm, all state variables are directly obtained by integration and the complex differential equations are avoided, which simplifies the parameter identification, improves the identification efficiency and decreases the impact of noise on identification results. Case simulation is carried out on MATLAB and the comparison among the proposed model, Park model and a reference model shows that, the proposed model and algorithm are correct, simple and more accurate.

Key words: synchronous generators; parameter identification; measurable variables; direct integral least square algorithm; time domain analysis; models