

基于数字孪生的电网变压器故障诊断方法

张代友

枣庄矿业(集团)电力有限公司, 山东 枣庄 277000

[摘要]为降低供电安全隐患, 保证用户正常供电, 提供了采用数字孪生的电网交流变压器故障诊断方案。在该孪生中, 通过使用正交全局和局部保持的嵌入算子, 将初步事故特点组合变换到高维核空间内, 通过计算映射矩阵, 得到投影矢量的最佳特性, 获取低维敏感特性; 同时根据已获取的事件特性, 在规则模式中引入概率神经网络算子, 构建概率密度函数, 并采用差分进化方式, 确定初始种群, 通过进行多次的变异、交叉操作, 丰富群体复杂性, 确定最佳的平滑因子, 在达到最佳迭代频率时, 提供最优化的诊断效果。仿真实验结果表明, 所提算法可以合理划分各种事故特点, 缩短检测时间, 并得到较为准确的检测结论。

[关键词]数字孪生; 电网交流变压器; 故障诊断

DOI: 10.33142/hst.v5i7.7576

中图分类号: TM407

文献标识码: A

Fault Diagnosis Method of Power Transformer Based on Digital Twins

ZHANG Daiyou

Zaozhuang Mining (Group) Electric Power Co., Ltd., Zaozhuang, Shandong, 277000, China

Abstract: In order to reduce the hidden danger of power supply safety and ensure the normal power supply of users, a digital twinning fault diagnosis scheme for power grid AC transformer is provided. In this digital twins, the initial accident feature combination is transformed into a high-dimensional kernel space by using the orthogonal global and local preserving embedding operators, and the optimal characteristics of the projection vector are obtained by calculating the mapping matrix, and the low-dimensional sensitivity characteristics are obtained; At the same time, according to the acquired event characteristics, the probabilistic neural network operator is introduced into the rule pattern to construct the probability density function, and the differential evolution method is adopted to determine the initial population. Through multiple mutation and crossover operations, the population complexity is enriched, the optimal smoothing factor is determined, and the optimal diagnosis effect is provided when the optimal iteration frequency is reached. The simulation results show that the proposed algorithm can reasonably divide the characteristics of various accidents, shorten the detection time, and obtain more accurate detection conclusions.

Keywords: digital twins; power grid AC transformer; fault diagnosis

引言

变压器是供电系统安全工作的重点装置, 担负着压力变化和电力传递的重要任务, 同时也是为人们生活提供正常供电的重要保证, 如果变压器在运行中发生较多问题, 不仅将带来重大损失, 而且还将造成巨大的社会危害。随着科学技术的发展, 越来越多智能化设备运用到实际工作中, 电力行业将受到巨大冲击。因此, 以下研究中以传统变压器检测方法为基础, 进行了检测。虽然这些方法确实能够降低事故发生频率, 但是随着设备规模的高速扩大, 检测不充分、检测不当的问题将造成巨大资金损失, 有时甚至还会干扰正常供电系统。而现场监测技术的出现也推动着传统变压器检测方法的变革, 对问题进行正确检测已经成为了变压器检修的必备基础。据此, 准确高效判断设备事故状况, 同时科学有效制定维护方案, 对设备安全工作有着重大作用^[1]。

因此, 许多专家也相继投身此项工作中。例如有的专家学者采用的是粒子群算法以及动态加权算法的方式来

对其故障进行深入分析, 并借助粒子群算法方式在研究中构建起 ELM 模式, 通过多分类器理论加以分析探究, 从而对变压器内故障内容进行全面分析。张哲铭等研究采用电子传感式电流振荡冲击的检测技术, 通过计算高低压绕组的电流波浪状掌握其变化情况以及变化程度, 在对比的过程中更加深入的分析其故障原因以及原因所具有的特性。

如果设备出现的故障比较多, 那么采用以上所说的方法进行检测就会出现一定的问题, 最为主要的就是在检测过程中, 不仅仅需要花费更多的检测时间以及经历, 最后所获得的检测结果也会受到时间因素影响而难以获得实时诊断结果, 对最终试验产生影响^[2]。

1 数字孪生故障诊断简介

所谓数字孪生(digitaltwinning)是一种基于现代计算机信息科学技术和智能控制算法而构建出来的虚拟仿真平台, 通过建立物理世界与数字化世界之间相互作用的数学模型, 利用计算机模拟人脑思维方式进行推理处理从而达到对现实环境中各种复杂情况的有效模拟, 进而实

现对变压器故障的准确判断、及时预警及高效维修。为了更加精准地掌握电力系统各类设备的运行状况以及相关参数变化趋势等,应要实时获取大量的信息并且能够在短时间内做出正确反应,因此提出了数字孪生技术来完成这项工作。

2 基于数字孪生的电网变压器故障诊断

2.1 数字孪生体建立

通过建立数字孪生的方式,能借助其中所具有的传感器,对相关的信息进行快速全面的收集与整合,并且能够借助神经网络模拟的方式,来帮助相关人员对电网变压器内部的故障进行分析和诊断。数字孪生是一种综合性较强的方法,在使用过程中结合了物理、集合、规则以及行为等等多个方面。其中在诊断的过程中,用于表示设备长度的设备为几何模型,同时也能够对空间防伪以及外形大小等一些基础的数据进行全方位地表示,能够比较全面的对受损变压器的各个部位进行检测。而行为模拟则是在对变压器进行检测时,会在受到冲击电流影响之下开展进行,借助仿真电气设备进行检测^[3]。

数字孪生体当中,主要是通过变压器以及传感器两个部分所构成的物理组成部分,借助传感器来收集相关的信号,并且能够将其存储在孪生数据库当中,而孪生数据库当中则是能够将变压器所收集到的所有的信号都进行保存,其中还包括对检测结果数据的保存。

2.2 基于 OGLPE 的故障特征提取

在此次的研究中,为了更加全面的整合样本以及全域的数据内容,在保证获取数据的完整性以及全面性的前提之下获取变压器信息内容,对一个正交全域和局部具有嵌入性(OGLPE)的特征提取方法进行全面的论述。这种算法方式保留了数据的部分非线性特征,而不损害其全域结构特征,并根据正则性方法消除了信息冗余^[4]。

计算流程的一般表述如下:在初始 R 零空间中的集合 $X=[X_1, X_2, X_3, X_n]$ 利用映射函数 ϕ 转换在高维核中,即 $F:\phi(X)=[\phi(X_1), \phi(X_2), \phi(X_n)]$,再通过投影矩阵 A 来满足 X 在低维空间 R^d 的映射,获得了 X 的最低维嵌入公式 $Y=[Y_1, Y_2, Y_3, Y_n]$,且 $Y_i=A^T\phi(X_i)$ 。从中可以发现,在这一算法方式当中,其主要的核心点就在能够通过目标函数的方式,将其特性进行了充分的描述,以此两对投影矩阵 A 进行计算。

而通过投影矩阵 A 的计算,就能够直观的展示出整体数据集合在坐标方面发生的变化: $Y=A^T\phi(X)$,进而实现数据化,用 A 的目标函数表示如下:

$$J_1=\operatorname{argmax}_{tr}(A^T\phi(X)\phi(X)^TA)(1)$$

因 A 由 $\phi(X)=[\phi(X_1), \phi(X_2), \phi(X_n)]$ 组成,所以 A 使 $A=\phi(X)a$,通过核算法解决高维矢量中积计算复杂提问,假定 $K=[K_{ij}]$,将 $K_{ij}=K(X_i, X_j)$ 代入到式(1)中,求得了目标函数为:

$$J_2=\operatorname{argmax}_{tr}(a^T\phi(X)\phi(X)^T\phi(X)a)=\operatorname{argmax}_{tr}(a^TK)(2)$$

K 为 Mercer 的核矩阵。

以下所使用的高斯核函数为:

$$K(X_i, X_j)=\exp(-\delta^2/2)(3)$$

δ 为核的宽度。

添加了正交约束条件,去除冗余特征信息,即:

$$aa^T=I, 1, 2, k-1(4)$$

A_k 是映射矩阵 a 的第 k 个向量。

把式(2)和式(4)都转换成最大值的问题,则矩阵 a 的第 k 个向量的函数表达式为:

$$L(a_k)=a_k^TM-\lambda(a_k^TD)-\sum_{i=1}^{k-1}\mu_ia_ka_i^T(5)$$

其中的对角矩阵是为公式中的 D ,而中间矩阵则是为其中的 M 。

考虑 $L(a_k)$ 对 a_k 的偏导,可以得到关系式,即: $=2(D-M)Ka_k-2\lambda_kDa_k-\sum_{i=1}^{k-1}\mu_ia_i=0(6)$

假设矩阵变量为 $A^{k-1}=[a_1, a_2, a_{k-1}]$ 和 $U^{k-1}=[\mu_1, \mu_2, \mu_{k-1}]^T$,则可建立矩阵为:

$$(A^{k-1})^T(K-1A^{k-1}U^{k-1})=2(A^{k-1})^T(D-1Ma_k)(7)$$

通过反复迭代得到的多少个正交映射向量,可以得到 a_k 的运算表示为:

$$[I-2(A^{k-1})^T(A^{k-1})-1(A^{k-1})^T] \times D-1_k(D-M)Ka_k=\lambda a_k(8)$$

通过以上的第(8)个公式就能够让我们获取到映射矩阵 a 以及第 k 个分量。

综合以上的公式内容,我们可以将 OGLPE 的算法在对变压器进行计算时的步骤简单的分为以下的三个方面:

第一,借助非线性函数的方式,将其中最为初始数据集合转移到以为空间中;

第二,在计算时创建相对应的无向图,并且利用以上第(5)个算式,来对样本的近邻匹配进行选取,并且对其匹配的相似率进行计算和数据获取;

第三,借助运算映射矩阵的方式,获取到其中的投射矢量最大级别变量特征值,再在反复的计算以及迭代当中,获取到更加全面和完整的正交映射向量,以此来获取到更加完整的投射矩阵。

2.3 故障诊断模型建立

在以下的实验当中,数字孪生体的规则模型是借助概率神经网络来构成,而前馈型网络同样是借助神经网络进行构建,这种方法在构建过程中比较的简单与快速。在使用概率神经网络进行变压器检测过程中,主要是通过四个阶段进行检测,包括输入阶段、数据阶段、求和阶段以及输出阶段等,这样能够实时的对各个阶段所完成的数据进行处理,相比较于数字孪生体的检测,能够获得更加丰富和

全面的数据内容^[5]。

在对变压器故障诊断过程中, 概率神经网络需要使用到概率密度函数, 而其中概率密度函数中各个未知数的含义分别是: X 在函数中表示的是等待检测的故障样本; $X_{i'}$ 为某故障类型的第 i' 的训练量; P 为样本维数; M 为训练样本量; δ 是平滑系数。这些函数内容都对最后的故障检测结果有着重要的影响作用, 而其中的 δ 平滑系数更是因为在设置过程中缺乏良好的可行性, 就会导致如果使用人工设计的方式, 就会极大的降低判断准确性。所以在计算过程中, 应该使用差分进化方式对平滑因子进行定义。差分进化技术有着较高的效率以及全局寻优的能力, 这种技术方式包含有缩放与交叉因素 F 、 CR 、种群数量 H 、进化频率 G 等主要的参数内容, 其方法实现过程的主要内容:

A: 确立函数中的原始种群。在 n 维空间里可以任意产生满足有关约束条件的 H 个实体, 并生成表达式为:

$$X_{i'j'}(0) = \text{rand}_{i'j'}(0, 1) (X_{iS_{i'j'}} - X') + X'$$

X' 与 X' 均是第 j' 个染色体组型具有的限制条件; $\text{Rand}_{i'j'}$ 是随机小数。

B: 变异过程。在群体中, 随机选择了三只个体 X_{P1} 、 X_{P2} 和 X_{P3} , 设 $i' = P_1 = P_2 = P_3$, 此时将变异过程叙述清楚如下:

$$h_{i'j'}(t+1) = X_{P1j'}(t) + F X_{P2j'}(t) - X_{P3j'}(t)$$

X' (t) - $X_{P3j'}$ (t) 之间的差异矢量; X' 是现阶段群体中的最优个体。

C: 交叉过程。

$R \in [0, 1]$ 为交叉概率。

D: 选取过程。判断 $X_{i'}$ (t) 是否属于下一轮种群更新程序中的个体, 可以使用目标矢量 $X_{i'}$ (t) 和实验矢量 $v_{i'}$ (t+1) 对评价函数比较, 即:

$$v_{i'}(t+1)$$

$$X_{i'}(t+1) = \text{人} \quad (13)$$

$$X_{i'j'}(t)$$

通过以上的步骤之后, 还需要对 B~D 的计算进行重复, 这样就能够获得最大迭代次数 G 的参数内容。

计算中的平滑因子是为了能够保证将目标函数值最小化, 并得出最准确的检测结论。这种方法不仅能够迅速进行最优分析, 提升检测效率, 而且可以改变平滑因子的不准确性, 从而提高检测准确性。数字孪生算法是通过不断收集变压器的真实工作情况, 在数字化平台上进行数据整合, 获得的故障情况信息, 根据离散后的数据信息, 通过特定方法迅速感知事故情况。

3 仿真实验数据分析与研究

3.1 故障特征提取性能测试

变压器在运行中以及故障时主要分为三种类型, 分别是正常型、过热型以及放大型故障, 而造成变压器故障的

原因又是多种多样的。例如过热型是由于热应力的作用而产生的故障, 会大大降低产品寿命; 而放电的故障原因主要是由于电应力引起绝缘物质的迅速变化, 如局部释放、电弧释放等^[6]。

在特性选择预备期间, 所需要使用到的方法主要包括三种, 分别是 POSELM 融合动态加权法、感应式震荡冲击技术以及大数据清晰知识迁移模型等, 借助这些方法来对变压器故障特征提取性能测试, 获取到更加完整和准确的信息。

从模型变化中能够了解到, 虽然 PSOELM 的融合动态特征加权方式并不能完全对正常状态下的电压器以及特殊故障状态下的变压器加以区分, 因为两种故障特征有着较高的相似性; 而使用感应式震荡冲击技术则是更优于以上的方法, 能够有效的区分电压器在过热时的状态; 数据清洗方式更是有助于故障的分析, 能够有效的将不同故障类型间重叠程度进行缩小, 类型间区分度较好; 而以下方法所获得的特性也具备了良好的聚类特性, 各个类型的采样间隔度加大, 并且在检测和训练综合也具有较高准确性。

3.2 故障诊断结果对比

因装置型式、容量和工作环境差异, 在仿真试验中选取了五百组最有代表性的变压器装置。这些装置的电压等级和厂家都有所不同, 在此次的实验当中选择这 500 组不同变压器装置进行工作, 并且使用上述计算方法进行诊断并得出相应数据报告。使用以上的四种计算, 已经对这些变压器系统完成了诊断。

在采用的四种算法中, 四种算法的迭代时间在四十次时适应度的数值就基本固定了, 能够很明显的看出四种算法都大致在同一个次数阶段, 适应度逐渐变得平缓, 并且从图中还能够了解到四种算法适应程度在四十次后适应度的高低差异性, 而融合动态加权算法则在经过一百多次迭代后才确定了其适应度最大值, 并且能够看出融合动态加权算法是这四种算法中, 适应度最高的一种算法, 在经过四十次后就已经超过数据清洗知识迁移算法成为适应度最高。通过平滑因子提高了概率的网络能力, 从而增强了搜索功能, 缩短寻优时限, 提升了训练准确度。结合不同的测试类型, 能够得出以下表格的结果数据。

表 1 不同故障类型诊断结果

样本编码	真是故障类型	本文诊断结果
1	局部低温过热	低温过热
2	铁芯接地	铁芯接地
3	局部放电	局部放电
4	围屏放电	围屏放电
5	间层绝缘损坏	间层绝缘损坏
6	放电兼过热	放电兼过热

从表一中可发现, 针对六种不同故障形式, 以下方法

中只有对样本编码一局部温度过热故障不能提供更精确的检测结果,而该结论也和实验结果比较接近。从以上试验可以得出,在对变压器故障检测中,数字孪生体能够发挥出良好的检测作用。

4 结语

综上所述,变压器在供电系统当中是一种非常关键的装置设备,对能否提供稳定供电起到重要决定性作用。而现有方法在样本总量很大时候,很难得出较精确的检测结论。因此,在上述实验中则是借助数字孪生的方式进行变压器故障检测分析,并且在检测中引入概率神经网络技术来逐渐的构建一个更加完整的故障诊断过程与模式。经仿真试验证实,以下分析方法所获得的故障特性差别明显,但聚类特性均良好,训练误差也较少,因此可以在较短时间内得出正确诊断结论,从而为供电的安全与持续提供保障。

[参考文献]

[1]黄新波,王享,田毅,等.基于 PSOELM 融合动态加权 AdaBoost 的变压器故障诊断方法[J].高压电

器,2020,56(5):3946.

[2]张哲铭,靳宇晖,吴邦,等.基于感应式振荡冲击耐压试验的变压器故障诊断技术[J].高电压技术,2019,45(2):549556.

[3]白浩,王昱力.基于数据清洗和知识迁移的变压器故障诊断模型[J].电工电能新技术,2020,39(1):2835.

[4]廖伟涵,郭创新,金字,等.基于四阶段预处理与 GBDT 的油浸式变压器故障诊断方法[J].电网技术,2019,43(6):21952203.

[5]刘云鹏,付浩川,许自强,等.基于 AdaBoostRBF 算法与 DSMT 的变压器故障诊断技术[J].电力自动化设备,2019,39(6):166172.

[6]王伟,唐庆华,刘力卿,等.基于加权综合损失优化深度学习和 DGA 的变压器故障诊断方法[J].南方电网技术,2020,14(3):2934.

作者简介:张代友(1995.6-),男,毕业院校:山东科技大学;所学专业:电气工程及其自动化,当前工作单位:枣庄矿业(集团)电力有限公司,职务:技术员,