基于重复脉冲法的变压器绕组匝间短路故障诊断

唐治平1,彭敏放1,李光明1,万 勋1,2,刘荣胜1

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082;2. 国网湖南省电力公司电力科学研究院,湖南 长沙 410007)

摘要:针对变压器绕组轻微匝间短路故障难以检测的问题,提出利用重复脉冲法的特征曲线进行匝间短路故 障诊断的方法。分析了脉冲信号在变压器绕组内的传播过程,建立了反映该传播过程的变压器绕组分布参 数电路模型,推导了发生匝间短路后波阻抗的变化规律。通过在变压器绕组一端输入一个低压脉冲,在另一 端采集响应特性曲线,结合绕组匝间短路前后的2条响应特性曲线得到其特征曲线。分析特征曲线是否突 起以此来判断是否发生匝间短路故障,从而实现故障诊断,而特征曲线的突起程度反映了绕组短路故障的严 重程度。结合人工神经网络算法,对所提方法的故障识别率进行分析,仿真样本分析显示其故障识别率可达 95%左右。仿真和实例分析结果表明了重复脉冲法对诊断变压器绕组匝间短路故障的可行性及准确性。 关键词:变压器;匝间短路;重复脉冲法;特征曲线;人工神经网络;故障诊断

中图分类号:TM 41 文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.024

0 引言

变压器是电力系统中最重要的设备之一,能够 及时发现变压器潜在的和现有的故障,是确保电力 系统安全运行的重要措施^[1]。绕组是变压器完成功 率传送的关键部件之一,但是绕组之间的绝缘也是 其比较脆弱的环节。如果匝间短路故障不能被及时 发现,在故障初期,潜在的匝间绝缘缺陷特别是轻微 的匝间短路故障,发展速度很快。如果任其长期运 行下去,容易使故障进一步发展为股间短路或者层 间短路,甚至发生相间短路,最终导致变压器的烧毁 事故。因此,准确诊断变压器绕组的轻微匝间短路 故障,对研究和探索变压器保护新原理和变压器的 检修维护都将具有重要的意义。

为了及时发现变压器绕组的匝间短路故障,目前主要的诊断方法有变压器油中溶解气体分析 (DCA)、局部放电检测技术、行波法、专家系统(ES) 和人工神经网络(ANN)等技术融合的诊断方法^[2-5]。 其中,变压器油中溶解气体分析和局部放电检测技 术在匝间短路故障的定性诊断方面取得了很大的成 功,但对轻微匝间短路故障诊断的准确度和有效性 有待提高。

近年来,重复脉冲法 RSO(Repetitive Surge Oscillograph)由于具有试验操作简单和灵敏度高等优 点,被成功应用于诊断发电机转子绕组的匝间短路 故障^[6]。本文将重复脉冲法引入变压器绕组匝间短 路故障诊断的研究中,通过分析脉冲行波在变压器 绕组的传播特性,根据传播特性建立了变压器绕组 的分布参数等值模型。在绕组线端输入一个低压脉 冲信号,从另外一端采集输出电压信号作为故障诊 断的电气量。通过监测并分析信号输出点处的响应 特性曲线来判断绕组中是否存在匝间短路故障及故 障严重程度,其严重程度由2条响应特性曲线相结 合得到的特征曲线的突起程度反映。再结合人工神 经网络算法^[7]进行数据样本的分析。因此,即使绕 组中仅出现了1匝的短路故障,重复脉冲法对故障 的检测也具有很高的灵敏度,在早期绕组匝间短路 诊断领域具有十分巨大的优势。仿真和实验结果证 明了本文方法的可行性。

1 重复脉冲法试验原理分析

1.1 行波理论

波的折射和反射是行波的基本特征。在电力线路中,行波理论已在线路测距和电缆故障定位等方面得到应用。当行波沿导线运动时,在导线不同波阻抗的连接点或集中参数阻抗连接点上会发生反射和折射现象^[8]。

图 1 为电压波传输至线路故障点 A 处时,电压 波发生的反射与折射现象。行波的反射与折射程度 可以分别用反射系数与折射系数来表示。即当发出 的行波沿着检测的线路进行传播遇到线路阻抗的突 变点时,会有反射波和折射波的形成。如图 1 所示, 电压波 U_i 到达点 A 时,由于波阻抗不连续,两侧波 阻抗分别为 Z_1 和 Z_2 ,从而得到反射波 U_i 和折射波 U_a 。 P_a 为电压折射系数,由行波折射性质可得^[9]:

$$U_{\rm g} = 2Z_2 U_{\rm i} / (Z_1 + Z_2) \tag{1}$$

$$P_{\rm u} = 2Z_2 / (Z_1 + Z_2) \tag{2}$$

$$\begin{array}{c|c} U_{i} & U_{q} \\ \hline \\ Z_{1} & \hline \\ U_{f} \end{array} \xrightarrow{U_{q}} Z_{2} \end{array}$$

图 1 行波的折射与反射

Fig.1 Refraction and reflection of traveling wave

1.2 重复脉冲法原理

收稿日期:2017-05-02;修回日期:2018-06-06

重复脉冲法基于波过程理论(行波技术),主要

应用于发电机绕组匝间短路故障的早期发现及其短路故障位置的定位。重复脉冲法的主要原理^[10]是向发电机转子绕组发射一个低压脉冲信号,当信号发生器发出的低压冲击脉冲波沿绕组传播时,一旦遇到任何绕组上的阻抗突变点都会导致反射波和折射波的出现,此时检测点将测得与正常回路无阻抗突变点时不同的响应特性曲线信号。所以若测得与正常回路无阻抗突变点时不同的响应特性曲线信号。所以若测得与

154

变压器绕组与发电机绕组具有一定的相似性, 将重复脉冲法引入变压器绕组匝间短路故障诊断, 也可以通过绕组波阻抗的变化来进行检测。绕组匝 间短路的严重程度可以通过故障点处波阻抗的变化 大小来反映,即通过检测到的 2 个波形合成的特征 曲线突起程度来判断,有突起即说明匝间存在异常, 而突起的程度就表示匝间短路故障的严重程度^[11]。

本文采用 PSpice 软件进行仿真,通过对不同状态绕组重复注入同一个脉冲信号,采用 2 个不同状态下响应特性曲线波形相减的方法得到特征曲线, 通过特征曲线是否突起判断是否存在匝间短路故障。再利用人工神经网络算法结合 MATLAB 对仿 真数据进行数据分析。

1.3 重复脉冲法在线监测方法分析

就目前变压器绝缘性能在线监测方法而言,对 于油浸式变压器发生匝间短路故障,油中溶解气体 分析法和局部放电监测法均可实现运行中的变压器 绝缘性能监测。在线监测方法最关键的环节是如何 在线准确安全地获取所需的测量信号,同时保证电 力变压器的正常运行。而基于电容耦合原理研制的 套管耦合电容传感器以及相应的电容分压器[12]已 经用于在线测量侵入变压器绕组的过电压信号以及 经过绕组传播后的响应信号,并由此构建变压器绕 组的频率响应曲线。绕组在线监测模型如图 2 所 示。变压器高压侧和低压侧套管的耦合电容传感器 构成了2个电容分压器,分别测量套管内部导杆的 电压激励信号和经过绕组传播后的响应信号,对响 应信号进行预处理、采集和数据处理后绘制绕组的 响应曲线,进行绕组状态在线评估。这种由金属薄 带和套管导杆以及它们之间的陶瓷、绝缘油构成电





容结构而形成的耦合电容传感器可以实现套管内部 导杆电压信号的耦合测量,这种测量方式具有不改 变电力系统接线、非侵入式的特点,使得将重复脉冲 法应用于变压器绕组的在线故障诊断具有可行性。

2 变压器绕组匝间短路仿真模型

变压器绕组的形式主要有层式、饼式和交错式。 在大中型变压器中应用最广泛的是饼式绕组,其特 点是沿轴向高度绕组由若干水平的、与油道垂直的 线饼所组成^[13]。在不考虑绕组的损耗和各部分之 间的互感,并且假设绕组中电感、电容都是均匀分布 参数的情况下,分布参数模型类似于均匀传输线模 型,其中只包含电阻、电感和电容参数,可以用1个 RLC等值电路来代替变压器绕组^[14-15]。分布参数 模型理论上是由无限个这样的 RLC等值电路模型 进行串联得到。本文选用12个集中参数模型串联 得到变压器绕组等效仿真模型,并在绕组前端加入 了套管等效电路,使仿真更趋于实际情况。

2.1 绕组等效电路

已有的对变压器绕组进行的有限元和漏磁场的 研究和分析表明,变压器绕组无论是在轴向还是纵 向上都具有对称性^[16-17]。为了简化分析,忽略绕组 内的互感影响并假设槽内部分和端部的各参数相等 且均匀分布^[18],则变压器绕组的等效电路如图 3 所 示,其可以看成是 1 根有损传输线。图 3 中,*R*、*L* 分 别为绕组线圈的自阻和自感;*C* 为匝间电容;*C*_g 为绕 组的对地电容^[19]。



Fig.3 Equivalent model of winding

而在实际情况中,对变压器进行检测时,无论是 "在线"还是"离线"都需要通过套管将输入信号加 载到变压器绕组上,所以加入套管模型可以更好地 模拟实际情况。因此,本文在图 3 的基础上,加入了 如图 4 所示的套管等效模型^[20],仿真信号将通过套 管等效模型输入变压器绕组。图中,*R*_t和 *L*_t分别为 套管导杆电阻和电感;*C*_t为套管的等效电容,其由 *n* 个屏间电容串联等效得到,如式(3)所示。

$$C_{t} = 1/(1/C_{1} + 1/C_{2} + 1/C_{3} + \dots + 1/C_{n})$$
(3)



图 4 套管等效模型 Fig.4 Equivalent model of bushing

2.2 绕组响应特性曲线

变压器饼式绕组每匝线圈存在明显换位,电磁 边界在线匝换位处不连续,相邻线匝换位处的波阻 抗有比较明显的变化^[21]。结合变压器绕组的多导 体传输线模型和行波的折反射性质,当向变压器绕 组一端注入脉冲信号时,在绕组的每一匝线圈的换 匝处都会发生行波的折射与反射。

图 5 为一个 m 匝绕组线圈展开示意图^[22],当向 变压器绕组线端注入合适的脉冲信号 U_i时,由于相 邻匝连接处存在明显的波阻抗变化,所以注入脉冲 每经过一个匝连接点都会发生一次折射与反射,折 射波作为下一匝的输入波继续沿导线传播,而反射 波则作为对应匝的特征波返回输入端。如第 k 匝绕 组 Z_k 处产生反射波 U_k 和折射波 U_k,其中折射波 Uka将再经过 m-k 匝线圈传播到输出端的检测点;而 反射波 Ukt 将在向注入点回传时再经过 k-1 匝线圈 的反射传至检测点。经过上述分析,行波在变压器 绕组上传播时,每经过1匝线圈都会在匝与匝的连 接处产生一个对应的折射波继续向下一匝线圈传 播,随着绕组匝数的增加,折反射次数增多,对应的 波形也会发生相应变化。因此理论上在对变压器绕 组注入一个脉冲信号时,会在输出端采集到一个该 状态下绕组的响应特性曲线。



图 5 行波在绕组中的传播过程

Fig.5 Dissemination process of travelling wave in windings

线路波阻抗 $Z = \sqrt{L/C}$,其值取决于单位长度线路的电感和匝间电容。当第 k-1 匝线圈与第 k 匝线圈发生匝间短路时,第 k 匝线圈被短接,原本在第 k 匝线圈首端连接处的波阻抗不连续点变成了第 k+1 匝线圈的首端连接点^[23]。由于第 k 匝线圈被短接相当于不存在,根据饼式变压器绕组结构,匝间距离增大对应匝间电容减小、波阻抗增大,所以发生匝间短路后第 k-1 匝线圈与第 k 匝线圈的波阻抗变化量小于第 k-1 线圈匝与第 k+1 匝线圈的波阻抗变化量小于第 k-1 线圈匝与第 k+1 匝线圈的波阻抗变化量,即: $Z_k = Z_{k-1} < Z_{k+1} - Z_{k-1}, Z_k < Z_{k+1}$ 。根据式(2),令 $P_u = f(x) < Z_2 = x < Z_1 = Z_{k-1}, 可得:$

$$f(x) = \frac{2x}{x + Z_{k-1}} = 2 - \frac{2Z_{k-1}}{x + Z_{k-1}}$$
(4)

由式(4)可见,f(x)为增函数,进而可推导出 $f(Z_k) < f(Z_{k+1})$,即有:

$$\frac{Z_{k}-Z_{k-1}}{Z_{k}+Z_{k-1}} < \frac{Z_{k+1}-Z_{k-1}}{Z_{k+1}+Z_{k-1}}$$
(5)

所以发生匝间短路故障后对应匝的电压折射系

数将增大。根据式(1),对应短路匝的折射电压幅 值也会相对正常时对应匝的折射电压幅值增大,即 响应特性曲线也会发生改变。因此可以根据发生匝 间短路故障前后响应特性曲线的变化来判断是否存 在匝间短路故障。

3 仿真试验及结果分析

3.1 仿真试验

向变压器绕组一端注入一个高频低压方波脉冲, 令注入信号的电压幅值为 50 V、脉宽为 10⁻⁸ s。利用 PSpice 软件搭建的 12 匝变压器绕组匝间短路故障模 型如图 6 所示。为了进行变压器绕组的在线监测, 添加 1 个 220 V、50 Hz 的工频电源来模拟工频状态 下变压器的运行,此模型中可直接用导线短接相邻 匝来模拟绕组匝间短路故障。



Fig.6 Winding simulation model

离线状态下,绕组分别发生1匝、2匝和3匝短路故障时的响应特征曲线如图7所示。由图7可知,离线状态下,当转子绕组内存在匝间短路故障时,信号注入端的响应特征曲线与无故障时的响应



特征曲线存在区别,二者结合得到的响应特征曲线 存在明显的畸变。其中,当匝间无短路情况时其响 应特征曲线基本上与横轴平行。由图 7 可知,在绕 组分别短路 1 匝、2 匝和 3 匝的情况下,匝间短路程 度越严重,其响应特征曲线的突起畸变越明显,即响 应特征曲线与横轴所围的面积越大。

通过添加1个工频电源模拟工频状态下变压器 的运行时,可得到如图8所示的响应特征曲线。由于 工频电源的存在,响应特征曲线呈现类正弦波分布。 由图8可见,和离线状态类似,在线状态下匝间短路 程度越严重,其响应特征的突起畸变越明显。这表明 重复脉冲法在变压器在线运行时同样具有可行性。



图 8 在线状态下,发生匝间短路故障时的响应特征曲线 Fig.8 Response characteristic curves of inter-turn short fault in on-line state

3.2 基于人工神经网络的故障结果分析

人工神经网络算法在变压器故障诊断方面已经 有了大量的研究和成果。本文在 PSpice 软件仿真 的基础上,利用 MATLAB 的神经网络工具箱对输出 的数据进行数据分析。

实验将从 PSpice 软件仿真导出的变压器绕组 状态数据集分成 2 组,每组各 90 个样本,每组中各 种短路状态均有 30 个样本数据。即 1 匝、2 匝和 3 匝短路状态分别随机取 60 个样本,将这 180 个数据 样本分为 2 组,每组总共 90 个样本,每组中每种短 路状态各有 30 个样本。其中 1 组作为人工神经网 络程序的训练样本,另外 1 组作为检验样本。为了 便于分类输出,将 1 匝、2 匝和 3 匝短路故障分别编 号为 1、2、3。利用上述数据训练一个 4 输入、3 输出 (分别对应该样本属于某种短路故障的可能性大 小)的前向网络,即通过已有的数据训练1个神经网络用作故障诊断的分类器。

通过程序运行结果可知,在神经网络训练的目标误差设为10⁻⁷的情况下,训练391次可达到所需的精度要求,对3种不同程度的匝间短路故障的识别率稳定在95%左右,训练曲线如图9所示。因此,可以将匝间短路故障划分为轻微、一般和严重3个等级,通过人工神经网络算法实现故障的分类。





4 实例分析

实验采用1台定制的SC-63K型号三相干式实验变压器,容量为63kV·A,额定电压为10kV/0.4kV,额定电流为3.64 A/95.6 A,其A、B、C 三相绕组均在高压侧设置12个抽头,其中10个抽头从绕组中部引出,2个抽头分别从高压侧三相绕组的首、尾引出。实验变压器主要用于模拟绕组匝间短路故障。

通过上文分析,研制了如图 10 所示的变压器绕 组匝间短路故障检测装置,装置由检测仪主机、分析 主机、2 个脉冲发生器及检测电缆等组成,其中,检 测仪主机是该装置的核心部分,由高速采样、现场可 编程门阵列(FPGA)模块、数据存储模块、通信总线 模块、双核处理器模块、USB 通信模块等组成。检测 时,2 个脉冲发生器分别在绕组两端输入 1 个行波 信号,并分别检测反射信号,通过比较两端检测到的





电压波形或纵向对比某绕组历史波形,判断变压器 匝间短路情况。

通过 USB 线连接检测仪主机 USB 接口与分析 主机的 USB 接口,按下分析主机的机箱电源开关,此 时检测主机通电。启动分析主机,在桌面上点击 PicoScope 6 图标,进入 TW-RSO 软件分析系统界面。

因为变压器绕组 A、B、C 三相具有相同的结构, 故将脉冲发生器输出分别接在变压器的 A 相和 B 相绕组。调整 Test Simulator 的故障模拟按钮至 Normal 位置,然后调节可调电位器 Inner 和 Outer 使得 输出信号精细重合,所得重复脉冲法测试的时域波 形如图 11 所示。未发生匝间短路故障情况下,响应 特征曲线是一条直线,如图 11(a)所示;发生 5 匝和 10 匝短路故障时,响应特征曲线(响应特征曲线突 起方向只由 2 个脉冲相减顺序决定,实验时为了便 于观察,故用 A 相减 B 相)与仿真结果吻合,如图 11 (b)、(c)所示。匝间短路故障的严重程度与重复脉 冲法所得到的响应特征曲线的突起程度有关,即匝 间短路越严重,响应特征曲线突起越明显。



Fig.11 Experimental results

5 结论

本文提出将重复脉冲法用于变压器绕组匝间短路故障的诊断,通过 PSpice 软件对变压器绕组进行 分布参数电路的仿真建模,基于该模型,结合重复脉冲法的原理,讨论了脉冲在绕组中的传播过程。仿 真结果表明,采用重复脉冲法进行变压器绕组匝间短路诊断时,可以通过所得到的响应特征曲线的突起来 判断是否存在匝间短路故障,响应特征曲线突起越明 显,则匝间短路故障越严重。利用 MATLAB 中的人工 神经网络算法进行数据结果分析。仿真以及实例分 析结果均验证了本文方法的可行性及正确性。

参考文献:

- [1]郑含博.电力变压器状态评估及故障诊断方法研究[D].重庆: 重庆大学,2012.
 - ZHENG Hanbo. Power transformer state evaluation and fault diagnosis method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [2] 高骏,何俊佳. 量子遗传神经网络在变压器油中溶解气体分析 中的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,30(30):121-127. GAO Jun,HE Junjia. Application of quantum genetic neural network in analysis of dissolved gas in transformer oil[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(30):121-127.
- [3]张卫华,苑津莎,王杉,等. 基于改良三比值法的变压器故障基本信度分配计算方法[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(7): 115-121.
 ZHANG Weihua, YUAN Jinsha, WANG Shan, et al. A calculation method for transformer fault basic probability assignment based on
- improved three-radio method [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7);115-121.
 [4]郑书生,陈金祥,李成榕,等.变压器绕组对局部放电特高频定位方法的影响[J].高电压技术, 2013, 39(2);324-329.
- ZHENG Shusheng, CHEN Jinxiang, LI Chengrong, et al. Influence of windings on locating partial discharge in transformers by using ultra-high frequency method [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2):324-329.
- [5] 梁永亮,李可军,牛林,等. 一种优化特征选择一快速相关向量机 变压器故障诊断方法[J]. 电网技术,2013,37(11):3262-3267.
 LIANG Yongliang, LI Kejun, NIU Lin, et al. A fault diagnosis method for transformer selection based on feature selection-fast correlation vector machine [J]. Power System Technology, 2013, 37 (11):3262-3267.
- [6] 贾志东,陈海,张征平,等.采用重复脉冲法诊断发电机转子绕 组匝间短路故障[J].高电压技术,2012,38(11):2927-2933. JIA Zhidong,CHEN Hai,ZHANG Zhengping, et al. Inter-turn short faults diagnosis on rotor windings of generator using repetive surge oscilloscope[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11):2927-2933.
- [7] 阮羚,谢齐家,高胜友,等.人工神经网络和信息融合技术在变 压器状态评估中的应用[J].高电压技术,2014,40(3): 822-828.

RUAN Ling, XIE Qijia, GAO Shengyou, et al. Application of artificial neural network and information fusion technology in transformer state evaluation [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3):822-828.

- [8] 马仪,申元,王磊,等. 基于行波理论的输电线路雷击定位方法 研究与应用[J]. 高电压技术,2014,40(5):1382-1390.
 MA Yi,SHEN Yuan,WANG Lei, et al. Research and application of transmission line lightning positioning method based on traveling wave theory[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5):1382-1390.
- [9]杨钰,王赞基.用于特快速暂态仿真的大型电力变压器线圈频 域分段建模[J].中国电机工程学报,2010,30(10):66-71.
 YANG Yu,WANG Zanji. Segmented modeling of large power transformer coil frequency domain for special fast transient simulation
 [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(10):66-71.
- [10] 王庚森. 基于重复脉冲法的汽轮发电机转子匝间短路故障的识别[D]. 保定:华北电力大学,2012.
 WANG Gengsen. Recognition of interturn short-circuit fault of turbine rotor based on repeated pulse method [D]. Baoding: North China Electric Power University,2012.
- [11] 范天明. 基于重复脉冲法的汽轮发电机转子绕组匝间短路探测 [D]. 保定:华北电力大学,2007.

FAN Tianming. Study on rotor winding inter-turn short circuit of

turbogenerator based on repeated pulse method[D]. Baoding:North China Electric Power University,2007.

[12] 姚陈果,赵仲勇,李成祥,等. 基于暂态过电压特性的电力变压 器绕组变形故障在线检测[J]. 高电压技术,2015,41(3): 873-880.

158

YAO Chenguo, ZHAO Zhongyong, LI Chengxiang, et al. Online detection of deformation fault of power transformer based on transient overvoltage[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(3):873-880.

- [13] 李琳,谢裕清,刘刚,等. 油浸式电力变压器饼式绕组温升的影响因素分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):83-88.
 LI Lin,XIE Yuqing,LIU Gang, et al. Analysis of influencing factors of temperature rise of cracked windings in oil-immersed power transformers[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(12): 83-88.
- [14] ABU-SIADA A, HASHEMNIA N, ISLAM S, et al. Understanding power transformer frequency response analysis signatures [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(3):48-56.
- [15] 李剑,夏珩轶,杜林,等. 变压器绕组轻微变形 ns 级脉冲响应分 析法[J]. 高电压技术,2012,38(1):35-42.
 LI Jian,XIA Hengyi,DU Lin, et al. Remote sensing technology for transformer windings with small deformation [J]. High Voltage Technology,2012,38(1):35-42.
- [16] 王璋奇,王孟. 电力变压器绕组轴向振动稳定性分析[J]. 中国 电机工程学报,2002,22(7):24-28.
 WANG Zhangqi, WANG Meng. Stability analysis of axial vibration of power transformer winding[J]. Proceedings of the CSEE,2002, 22(7):24-28.
 [17] 郭健,林鹤云,徐子宏,等. 用有限元方法分析电力变压器绕组
- [17] 郭健,林眄云,标丁宏,寻. 用有限几方法分析电力变压器绕组 轴向稳定性[J]. 高电压技术,2007,33(11):209-212. GUO Jian,LIN Heyun,XU Zihong, et al. Analysis of axial stability of power transformer windings by finite element method[J]. High Voltage Technology,2007,33(11):209-212.
- [18] WANG M, VANDERMAAR A J, SRIVASTAVA K D. Improved detection of power transformer winding movement by extending the FRA high frequency range [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3):1930-1938.
- [19] 邓祥力,高亮,刘建峰,等. 特高压变压器模型漏感参数的稳态 识别方法[J]. 电工技术学报,2014,29(5):254-260.

DENG Xiangli, GAO Liang, LIU Jianfeng, et al. Steady-state parameter identification of UHV transformer model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5):254-260.

- [20] 刘勇,崔彦捷,秦睿,等. 套管故障对变压器频响曲线影响的仿 真研究[J]. 高电压技术,2014,40(8);2406-2415.
 LIU Yong, CUI Yanjie, QIN Rui, et al. Simulation of influence of casing fault on transformer frequency response curve[J]. High Voltage Technology,2014,40(8);2406-2415.
- [21] 刘勇,杨帆,张凡,等. 检测电力变压器绕组变形的扫频阻抗法研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(17):4505-4516.
 LIU Yong, YANG Fan, ZHANG Fan, et al. The detection of winding deformation of power transformer by sweep frequency impedance method[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(17):4505-4516.
- [22] 刘达,彭敏放,万勋,等. 基于行波分析的变压器绕组匝间短路 故障定位[J]. 仪器仪表学报,2015,36(9):2091-2096.
 LIU Da, PENG Minfang, WAN Xun, et al. Inter-turn short-circuit fault location for transformer winding based on traveling wave analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (9):2091-2096.
- [23] 李卓昕,彭敏放,黄清秀,等. 行波反射法在变压器绕组匝间短路故障定位中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2016,44 (21):84-89.

LI Zhuoxin, PENG Minfang, HUANG Qingxiu, et al. Application of traveling wave reflection method in fault diagnosis of transformer winding inter turn short circuit [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21):84-89.

作者简介:



唐治平(1992—),男,湖南湘阴人,硕 士研究生,主要研究方向为电气设备状态 监测与故障诊断、智能信息处理等(E-mail: tangzhiping1992@163.com);

彭敏放(1964—),女,湖南湘乡人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为 电气设备状态监测与故障诊断、智能配电

网等(E-mail:pengminfang@hun.edu.cn)。

Diagnosis of inter-turn short circuit fault of transformer winding based on repetitive surge oscillograph

TANG Zhiping¹, PENG Minfang¹, LI Guangming¹, WAN Xun^{1,2}, LIU Rongsheng¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to detect the slight inter-turn short circuit fault of transformer winding, a method of inter-turn short circuit fault diagnosis based on the characteristic curve of RSO (Repetitive Surge Oscillograph) is proposed. The propagation process of the pulse signal in the transformer winding is analyzed, and the distribution parameter circuit model of the transformer winding reflecting the propagation process is established. The variation law of wave impedance after inter-turn short circuit is derived. By inputting a low-voltage pulse at one end of the transformer winding, the response characteristic curve can be collected at the other end, and the characteristic curve is obtained by combining the two response characteristic curves before and after the inter-turn short circuit fault occurs or not is determined by the characteristic curve is raised or not. The characteristic curve's protrusion degree reflects the severity of the intern-turn short circuit fault. Combined with artificial neural network algorithm, the fault identification rate of the proposed method is analyzed, and the simulation sample analysis shows that fault identification rate of the proposed method is up to 95%. Simulation and case analysis show the feasibility and accuracy of RSO method for diagnosing transformer winding inter-turn short circuit fault.

Key words: power transformers; inter-turn short circuit; repetitive surge oscillograph; characteristic curve; artificial neural network; fault diagnosis