

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201913

基于零模电流与环流比例关系的变压器漏感参数获取方法

尹湘源^{1,2}, 尹项根^{1,2}, 曹文斌^{1,2}, 王育学³, 潘远林^{1,2}, 陈永昕^{1,2}

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;

2. 电力安全与高效湖北省重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;

3. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600)

摘要: 从分析变压器暂态涌流特性出发, 致力于得到变压器各侧漏感值。首先推导了变压器回路方程, 然后得到了原方零模电流和三角绕组环流的比例关系, 并求出了自漏感表达式。针对 220 kV 变压器三角绕组环流无法测量的问题, 基于三角绕组环流与原方不饱和相电流平衡的特点, 采用原方不饱和相电流代替环流。从而求出零模电流与选定的不饱和相电流的准比例系数, 进一步通过判别不饱和时间区间, 以该区间内的平均值作为所求的比例系数, 最后通过上述表达式计算出自漏感。该方法通过了改进变压器模型仿真验证和现场录波的应用。

关键词: 变压器自漏感; 环流; 零模电流; 不饱和相电流; 比例系数

Method for obtaining leakage inductance parameter of transformer based on proportional relationship between zero-mode current and circulating current

YIN Xiangyuan^{1,2}, YIN Xianggen^{1,2}, CAO Wenbin^{1,2}, WANG Yuxue³, PAN Yuanlin^{1,2}, CHEN Yongxin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Electric Power Dispatching Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: In order to analyze the transient inrush current characteristics of the transformer, it is necessary to obtain the accurate leakage inductance value on each side of the transformer. In this paper, the transformer loop equation is first deduced, the proportional relationship between the primary zero-mode current and the delta circulating current is got, and the self-leakage expression is obtained. For the problem that the delta winding current of 220 kV transformer cannot be measured, the primary unsaturated phase current is used instead of the circulating current based on the balance of the delta winding circulating current and the primary unsaturated phase current. After determining the quasi-proportional coefficient of the selected unsaturated phase current and the zero-mode current, the unsaturated time interval is further determined, and the average value in the interval is used as the obtained proportional coefficient. Finally, the self-leakage is calculated by the above expression. The improved transformer model simulation and on-site recording verify the method.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600) and Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJXM20162461).

Key words: transformer leakage inductance; circulating current; zero-mode current; unsaturated phase current; proportional coefficient

0 引言

变压器短路试验测量获得的漏感为变压器原方

绕组和副方绕组的漏感之和, 即变压器制造厂家提供的变压器的短路电抗 x_k ($x_k = \omega L_k$)。一般认为, 原方绕组和副方绕组的漏感相等, 即两侧自漏感各为总漏感的一半^[1], 并且许多文献基于此假设分析励磁涌流和三角绕组环流问题^[2-3], 但实际上两侧自漏感并不相等。在变压器回路微分方程中, 自漏感

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900600);
广东电网有限责任公司科技项目资助(GDKJXM20162461)

代表仅与自身绕组交链的磁链所对应的电感, 该磁链的大小会受铁芯绕组结构和尺寸等因素的影响。因此, 在某些特殊变压器中, 两侧漏感数值并不相等。如在高阻抗变压器中, 低压侧的漏感将比正常变压器大很多, 而高压侧的漏感几乎不变^[4]。如依旧按照两侧自漏感相等分析问题, 将导致较大误差, 不利于变压器暂态过程的分析。

高阻抗变压器由于具备极佳的限制电网短路电流的能力, 已得到广泛的应用^[5]。但近几年, 电网中多次出现高压内置型高阻抗变压器(简称“内置变”)投运合闸时, 引发母线开关甚至是其上一级线路的零序过流保护误动的状况^[5-6], 已严重威胁电网安全运行。通过现场录波分析, 内置变空投时三相涌流呈现较大不平衡特征。零序过流保护误动的直接原因是, 零模涌流初始值较大且衰减缓慢, 其工频分量幅值衰减到整定值的时间大于保护延时。从现场误动事故变压器类型来看, Y0/Y/ Δ 联结的三相五柱式内置变误动事故频繁, 但采用相同铁芯联结方式且短路阻抗相同的低压绕组串联电抗型高阻抗变压器(简称“串抗变”)却鲜有该类误动问题。

针对变压器励磁涌流已有较多文献进行研究, 其中, 文献[7-9]对励磁涌流的识别、测量与仿真进行分析研究, 文献[10-12]对复杂工况下变压器励磁涌流特性进行分析研究。但是, 对于变压器空投时的零模涌流的研究分析还略显不足。涌流特性受变压器饱和励磁电感(励磁特性 UI 曲线饱和后渐缓段的斜率)影响较大, 空心电感为铁芯完全饱和时以空气近似替代的高压绕组全自感, 一般为自漏感与饱和励磁电感之和^[4]。为了得到饱和励磁电感的大小, 探究和比较内置变和串抗变的涌流特性, 无论是从理论分析还是从仿真分析的角度, 都需要准确地得到变压器空投侧的自漏感。除此之外, 在其他场合如三角绕组环流的求解计算, 也同样需要用到准确的两侧漏感^[13]。

目前已有几种关于漏感求取的方法研究。文献[14]的方法需要获取低压三角绕组电流, 而本文所述 220 kV 变压器三角绕组环流无法测量, 该方法并不适用。文献[15-16]基于构造变压器保护的角度, 提出了漏感参数在线计算方法, 可以根据漏感参数变化来区分故障和涌流, 方法虽然不需要三角绕组环流, 但是需要获取高压侧电压电流、低压侧电压及出线电流。而电压互感器一般装在母线上, 空投时无法获取电压数值, 应用性不强。上述方法都需要采集多组电量, 较为复杂。文献[17-18]基于变压器绕组在线监测的角度, 提出了基于有限元的漏感参数计算方法, 可以根据计算漏感来判断变压器内

部绕组是否变形, 但需要获取变压器铁芯绕组尺寸, 来构建精确的有限元仿真模型, 较难实现且缺乏应用验证。文献[19]提供了识别涌流的新方向, 但是检测困难, 应用性不高。

为了理论和仿真分析变压器暂态涌流特性, 需要获取变压器各侧准确漏感值。本文首先推导了变压器回路方程, 得到了原方零模电流和三角绕组环流的比例关系。基于比例关系和短路电感, 求出了自漏感表达式。针对 220 kV 三角绕组环流无法测量的问题, 基于变压器空投时三角绕组环流与原方不饱和相电流相平衡的特点, 提出了采用原方不饱和相电流代替环流的方法。首先判断出不饱和相, 求出零模电流与该不饱和相电流的准比例系数, 进一步判别不饱和时间区间, 以该区间内的平均值作为所求的比例系数, 最后通过上述表达式计算出自漏感。本方法通过了改进变压器模型仿真验证并采用现场录波数据得到了应用。

1 变压器回路方程和漏感表达式

图 1 为 Y0/ Δ 接线变压器接线图。 u_A 、 u_B 、 u_C 为系统电压; u_a 、 u_b 、 u_c 为变压器副方绕组端口电压; L_s 与 L_{s0} 分别为系统正序和零序电感; 假设 ABC 三相绕组漏感大小相同, 其中: L_σ 为变压器原方自漏感, $L_{\sigma D}$ 为变压器副方自漏感; e_a 、 e_b 、 e_c 为变压器三相励磁支路感应电动势; i_A 、 i_B 、 i_C 为原方绕组三相电流, 令 $i_A+i_B+i_C=3i_0$, 为“零序性质的电流”, 严谨地称为零模电流^[20]; i_a 、 i_b 、 i_c 分别为副方绕组电流; i_D 为三角绕组环流。

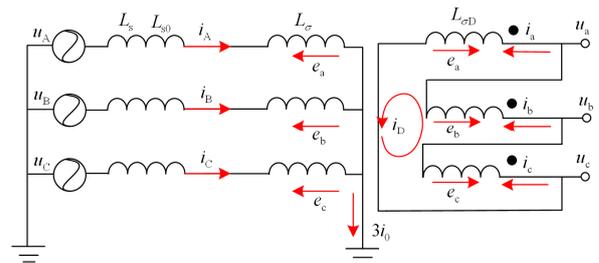


图 1 Y0/ Δ 接线变压器接线图

Fig. 1 Wiring diagram of transformer with Y0/ Δ connection

列写三相变压器回路方程^[4,21], 忽略电阻分量^[16], 得到:

$$\begin{aligned} u_A &= (L_s + L_\sigma) \frac{di_A}{dt} + (L_{s0} - L_s) \frac{di_0}{dt} + e_a \\ u_B &= (L_s + L_\sigma) \frac{di_B}{dt} + (L_{s0} - L_s) \frac{di_0}{dt} + e_b \\ u_C &= (L_s + L_\sigma) \frac{di_C}{dt} + (L_{s0} - L_s) \frac{di_0}{dt} + e_c \end{aligned} \quad (1)$$

副方绕组满足方程:

$$\begin{cases} u_{ab} = u_a - u_b = L_{\sigma D} \frac{di_a}{dt} + e_a \\ u_{bc} = u_b - u_c = L_{\sigma D} \frac{di_b}{dt} + e_b \\ u_{ca} = u_c - u_a = L_{\sigma D} \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (2)$$

$$i_D = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \quad (3)$$

联立式(1)、式(2), 消去非线性项的感应电动势, 因为统电压三相平衡 ($u_A + u_B + u_C = 0$), 得到

$$(L_{s0} + L_{\sigma}) \frac{di_0}{dt} = L_{\sigma D} \frac{di_D}{dt} \quad (4)$$

结合绕组初始电流都为 0, 得到

$$i_D = \frac{L_{s0} + L_{\sigma}}{L_{\sigma D}} i_0 \quad (5)$$

根据式(5)可知, 变压器原方绕组零模电流和副方绕组环流存在比例关系, 定义该比例系数为 λ 。

$$\lambda = \frac{i_0}{i_D} = \frac{L_{\sigma D}}{L_{s0} + L_{\sigma}} \quad (6)$$

原方漏感和副方漏感之和为短路漏感, 满足:

$$L_{\sigma} + L_{\sigma D} = L_k \quad (7)$$

根据式(6)和式(7), 便可以求解得变压器自漏感表达式, 如式(8)所示。

$$L_{\sigma} = \frac{L_k - \lambda L_{s0}}{\lambda + 1} \quad (8)$$

因此, 可以通过式(8)求解自漏感参数。其中变压器短路漏感 L_k 和系统零序电感 L_{s0} 已知。

2 基于零模电流与环流比例的参数获取

本章将着重介绍原方绕组零模电流 i_0 与三角绕组环流 i_D 的比例系数 λ 的求取方法。原方绕组零模电流 i_0 可以通过 $i_A + i_B + i_C = 3i_0$ 测量得到。对于环流 i_D , 500 kV 及以上电压等级的变压器三相分体设置, 低压绕组电流可以直接测量, 环流可以根据式(3)得到; 但对于 220 kV 以下电压等级的变压器, 三角绕组电流无法测量。基于三角绕组环流与原方不饱和和相电流平衡的特点, 这里提出一种利用原方不饱和和电流代替环流的方法。

2.1 确定不饱和相

对于变压器空载合闸时, 三相铁芯不会同时饱和。总会存在某一相始终不饱和, 或者进入饱和的时间较晚, 如图 3(a)中的 B 相和 C 相。从这两相中选取数值较小的 B 相作为“不饱和相”, 而该相不饱和时, 励磁电流很小, 可以认为 $i_m = 0$ 。但此时受副方三角绕组环流的影响, 不饱和相的原方绕组会

产生与副方环流相抵消平衡的一次电流 i_X (假设不饱和相为 X 相, $X \in A, B, C$), 则在该区间内有

$$i_X = -i_D \quad (9)$$

不饱和相 X 为空载合闸后短时间内原方绕组电流绝对值最小的相。此时用 $-i_X$ 来代替 i_D 代入式(9)中, 即可直接通过(10)求解原方绕组零模电流和三角绕组环流存在的准比例关系 λ_w 。

$$\lambda_w = \frac{i_0}{-i_X} \quad (10)$$

在一个时间周期中, 不饱和相仅在部分时间区间是不饱和的, 剩下的时间都处于饱和或过渡状态, 而只有在其不饱和的时间区间内才满足式(9)条件。因此, 通过式(10)得到的 λ_w 是随时间变化的, 此时获得的 λ_w 仅为准比例系数。为了得到准确的比例系数, 还需要判别选定饱和相的不饱和时间区间。

2.2 不饱和相时间区间判别及参数计算

对于不饱和相, 由于事先并不知道不饱和的精确时间区间, 甚至该区间的两端边界也是模糊的。因此, 判别不饱和时间区间是获取漏感参数的关键。理论上, 在不饱和区间内, 计算得到的准漏感值就等于真实漏感值, 即 $\lambda_w = \lambda$ 。而在这段区间内, 时域上会存在一段“平缓区间”, 如图 3(b)中虚线框所示。因此, 可以通过判断任意连续两个准漏感值的差值是否低于设定阈值 ε 来识别出时间区间。然后取这段时间区间的平均值, 进而得到了较为准确的漏感值。进一步根据式(8)求解变压器自漏感。

3 仿真实验

为了验证本文提出的漏感计算方法的正确性, 利用 PSCAD 软件建立变压器仿真系统模拟实际情况。以容量为 240/80 MVA, 额定电压变比为 220/10.5 kV 的高阻抗变压器为原型, 高低压短路电抗百分数为 34%(有名值: 0.218 2 H)。仿真设置高压侧、低压侧漏抗百分数分别为 13%(有名值: 0.083 4 H)、21%(有名值: 0.134 8 H)。

由于在 PSCAD 中, 仿真模型参数设置只能输入总漏感百分数, 高低压两侧漏感大小在模型中平均分配, 无法对两侧漏感分别设置。为模拟高阻抗变压器, 本文采取一种等效变换方法。将模拟励磁支路的饱和和电流源设置在高压侧, 同时在系统侧补加变压器高压侧阻抗, 而低压侧自漏抗作为短路阻抗输入进仿真模型, 如图 2 所示。经过计算, 高压侧补加的电阻为 0.2 Ω 和电感为 0.083 4 H(图 2 中的 L_{ext})。设置的系统零序电感 L_{s0} 为 0.09 H。获取变压器空载合闸时的电量数据进行计算。

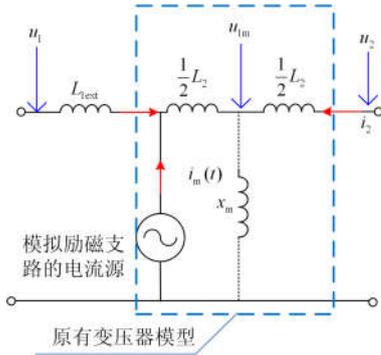


图 2 仿真模型构建方法

Fig. 2 Construction method of simulation model

变压器空载合闸，图 3 (a)分别作出了三相电流和零模电流，分析可知不饱和相为 B 相，因此三角绕组环流 $i_D = -i_B$ 。按照式(7)进行计算，得到如图 3(b)所示的准比例系数 λ_w 时域分布图。可以轻易判断出不饱和区间如图 3(b)中红色虚线框所示，对饱和区间中对应的准漏感取平均值计算，得到了比例系数 λ 的数值， $\lambda = 0.781$ 。得到比例系数后，代入式(5)，求得漏感 L_σ 的数值为 0.083 0 H。

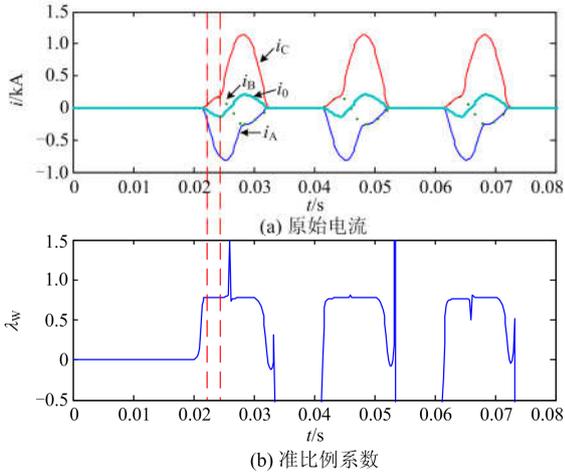


图 3 准比例系数计算值(一)

Fig. 3 Calculation of quasi-proportional coefficient (No. 1)

同理，图 4(a)为另一种合闸角下的变压器三相电流和零模电流波形，此时不饱和相选为 C 相，三角绕组环流 $i_D = -i_C$ ，进行同样的计算得到图(4)所示的准比例系数 λ_w 时域分布图，根据上述方法计算得到 $\lambda = 0.785$ ，进一步得到漏感 L_σ 的数值为 0.082 7 H。

从图中可以发现，在产生涌流的半个周期内就可以获取漏感参数，响应速度快，简单方便。同时，与设置的实际值 0.083 4 H 相比，两个计算结果十分精确。该方法通过了仿真验证。

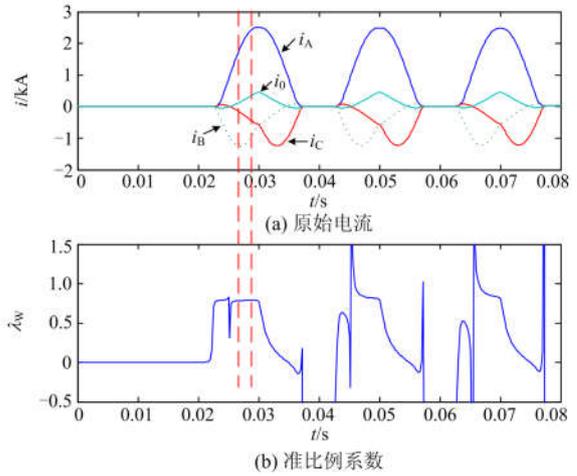


图 4 准比例系数计算值(二)

Fig. 4 Calculation of quasi-proportional coefficient (No. 2)

4 现场录波应用

上面通过软件仿真，预先设置初始值，然后根据本文的方法计算得到漏感值，证明了方法的有效性。下面通过某次现场录波数据来计算变压器的漏感值，实现对本方法的测试和应用。某高压绕组内置型高阻抗变压器(SSZ11-240 MVA/220 kV)进行多次变压器高压侧空载合闸充电，高低压短路电感为 36%，归算到实际值为 $L_k = 0.231 1$ H。实际系统零序电感 L_{s0} 为 0.028 H。图 5 和图 6 分别为选取的两次录波数据的数据处理结果。

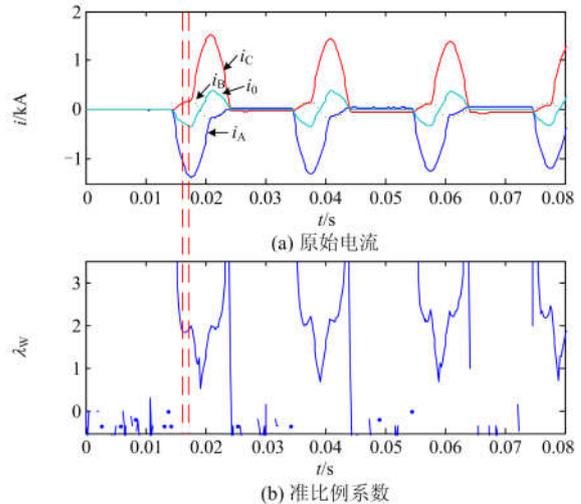


图 5 准比例系数计算值(录波一)

Fig. 5 Calculation of quasi-proportional coefficient (record No. 1)

图 5 做出录波一的三相电流和零模电流以及准漏感计算值。通过确定不饱和时间区间，并进一步计算时间区间内的平均值，得到了较为准确的比例

系数为 $\lambda = 1.87$, 代入式(5), 求得高压侧自漏感的数值为 0.0622 H 。图 6 为录波二的计算结果, 同理得到比例系数为 $\lambda = 1.89$, 代入式(5), 求得高压侧自漏感的数值为 0.0617 H 。可以看到, 两次录波得到的结果比较接近。采用不同录波能够得到相同的漏感值, 说明该方法通过了现场录波的应用。

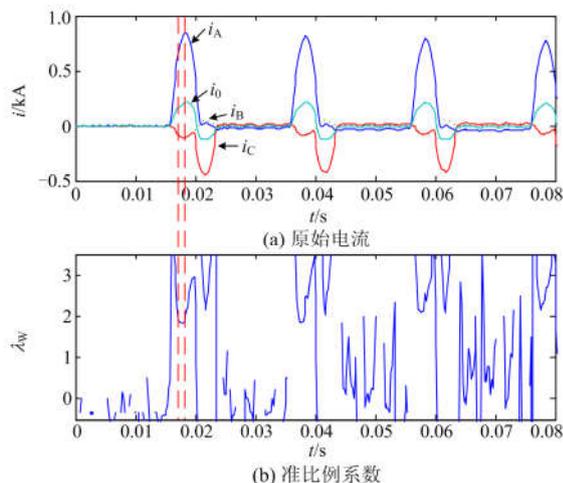


图 6 准比例系数计算值(录波二)

Fig. 6 Calculation of quasi-proportional coefficient (record No.2)

5 结语

变压器高低压侧准确的自漏感有利于分析变压器暂态涌流特性及保护整定。为了获取变压器各侧准确漏感值, 本文推导了变压器回路微分方程, 得到了原方零模电流和三角绕组环流的比例关系。基于比例关系和短路电感, 求出了自漏感表达式。但是 220 kV 三角绕组环流无法测量, 为了求解比例系数, 基于变压器空投时三角绕组环流与原方不饱和相电流相平衡的特点, 采用原方不饱和相电流代替环流。首先判断出不饱和相并求出零模电流与该相原方电流的准比例系数, 进一步判别不饱和时间区间, 以该区间内的平均值作为所求的比例系数, 最后通过上述表达式计算出自漏感。本方法通过了改进变压器模型的仿真验证, 并采用现场录波数据得到了应用。

参考文献

[1] SONNEMANN W K, WAGNER C L, ROCKEFELLER G D. Magnetizing inrush phenomena in transformer banks[J]. Power Apparatus & Systems Part III Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1958, 77(3): 884-892.

[2] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[3] 袁宇波, 陆于平, 李澄, 等. 三相涌流波形特征分析及差动保护中采用二次谐波相位制动的原理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 23-28.

YUAN Yubo, LU Yuping, LI Cheng, et al. The characteristic analysis of three phase transformer inrush and the discussion of second harmonic restrained method using phase angle and amplitude[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 23-28.

[4] 尹项根, 曹文斌, 潘远林, 等. 高阻抗电力变压器涌流特性及其对保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 1-11.

YIN Xianggen, CAO Wenbin, PAN Yuanlin, et al. Inrush current characteristic of high-impedance transformers and its impact on protective relays[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 1-11.

[5] 李晓华, 罗龙波, 谢金泉, 等. 高压内置型高阻抗变压器涌流特性对保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 108-114.

LI Xiaohua, LUO Longbo, XIE Jinquan, et al. Impact of inrush current characteristics of high-voltage built-in high-impedance transformer on relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 108-114.

[6] 李勇, 苏钟焕, 王然丰, 等. 高压内置型高阻抗变压器励磁涌流计算分析[J]. 变压器, 2017, 54(8): 1-5.

LI Yong, SU Zhonghuan, WANG Ranfeng, et al. Calculation and analysis of magnetizing inrush current of high impedance transformer with built-in high voltage winding[J]. Transformer, 2017, 54(8): 1-5.

[7] 姚东晓, 张凯, 贺要锋, 等. 变压器多特征励磁涌流识别方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 149-154.

YAO Dongxiao, ZHANG Kai, HE Yaofeng, et al. Research on multi feature recognition scheme of transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 149-154.

[8] 姚陈果, 刘鑫, 胡迪, 等. 变压器空载电流谐波低频测量方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 115-122.

YAO Chenguo, LIU Xin, HU Di, et al. No-load current harmonics measurement of transformers using low-frequency method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 115-122.

[9] 张鹏宁, 李琳, 程志光, 等. 并联电抗器与变压器模型铁心振动仿真与试验对比[J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5273-5281.

ZHANG Pengning, LI Lin, CHENG Zhiguang, et al. Vibration simulation and experiment comparison of shunt reactor and transformer model core[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5273-5281.

- [10] 姚东晓, 邓茂军, 倪传坤, 等. 变压器多侧励磁涌流产生机理及对差动快速动作区影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 36-41.
YAO Dongxiao, DENG Maojun, NI Chuankun, et al. Transformer's multi-side inrush current generation mechanism and its influence on the differential protection's fast action zone[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 36-41.
- [11] 王格万, 潘超, 郑迤丹, 等. 变压器直流扰动下励磁谐波与铁心饱和失稳研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 49-55.
WANG Gewan, PAN Chao, ZHENG Yidan, et al. Research on excitation harmonics and core saturation instability of transformer under DC disturbance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 49-55.
- [12] 潘超, 衣双园, 蔡国伟, 等. 交直流混杂模式下变压器励磁-振动特性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34: 1-9 [2019-04-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2188.TM.20190404.1317.010.html>.
PAN Chao, YI Shuangyuan, CAI Guowei, et al. Excitation-vibration characteristics of transformer in AC-DC hybrid operation[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34: 1-9 [2019-04-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2188.TM.20190404.1317.010.html>.
- [13] 毕大强, 梁武星, 柴建云, 等. 变压器三角形绕组中环流的构造方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 39-43.
BI Daqiang, LIANG Wuxing, CAI Jianyun, et al. Research on constructing algorithm of circulating current in delta winding of transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 39-43.
- [14] 邓祥力, 王传启, 张哲. 基于回路平衡方程和励磁感应的特高压变压器保护[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 147-153.
DENG Xiangli, WANG Chuanqi, ZHANG Zhe. UHV transformer protection based on equivalent circuit equation and excitation inductance[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 147-153.
- [15] 马静, 王增平, 王雪. 基于等效瞬时漏电感的变压器保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(23): 64-68, 103.
MA Jing, WANG Zengping, WANG Xue. Novel principle of power transformer protection based on equivalent instantaneous leakage inductance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(23): 64-68, 103.
- [16] 索南加乐, 焦在滨, 康小宁, 等. Y/Δ 接线变压器漏感参数的识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 84-90.
SUONAN Jiale, JIAO Zaibin, KANG Xiaoning, et al. Algorithm to identify leakage inductances of power transformer with Y-Delta connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 84-90.
- [17] 邓祥力, 熊小伏, 高亮, 等. 基于参数辨识的变压器绕组变形在线监测方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4950-4958.
DENG Xiangli, XIONG Xiaofu, GAO Liang, et al. Method of on-line monitoring of transformer winding deformation based on parameter identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4950-4958.
- [18] 李朋, 郝治国, 张保会, 等. 基于有限元法的变压器漏感计算在绕组变形中的应用[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(7): 49-53.
LI Peng, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Leakage inductance calculation based on finite element method for power transformer and its application to winding deformation analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(7): 49-53.
- [19] 张召峰, 孙庆森, 张海峰, 等. 变压器励磁涌流中的信息熵识别[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 107-111.
ZHANG Shaofeng, SUN Qingsen, ZHANG Haifeng, et al. Identification of information entropy in transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 107-111.
- [20] 王育学, 曹文斌, 黄明辉, 等. 变压器零模涌流解析分析及其等值电路[J]. 电网技术, 2018, 12(12): 3960-3968.
WANG Yuxue, CAO Wenbin, HUANG Minghui, et al. Mathematical analysis for zero-mode inrush current of transformer and its equivalent circuit[J]. Power System Technology, 2018, 12(12): 3960-3968.
- [21] 史世文. 大机组继电保护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.

收稿日期: 2019-03-18; 修回日期: 2019-06-05

作者简介:

尹湘源(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: yinxu@hust.edu.cn

尹项根(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与安全自动控制; E-mail: xgyin@hust.edu.cn

曹文斌(1992—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护. E-mail: 1019097704@qq.com

(编辑 葛艳娜)