

基于磁路特征的三相三柱式变压器励磁参数识别

索南加乐, 许立强, 焦在滨, 杜斌

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

Identification Method for Excitation Inductances of Three-phase Three-limb Transformer Based on Characteristics of Magnetic Circuit

SUONAN Jiale, XU Liqiang, JIAO Zaibin, DU Bin

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: For the application of excitation parameters in transformer protection, the inductance identification method of three-phase three-limb transformer was proposed. Based on the characteristic of magnetic circuit, a mathematic model which links the voltages induced by the main fluxes and the currents of the windings was established. For transformers with Y/Y connection, using main flux induced voltage, the excitation inductances can be calculated accurately and steadily under conditions of normal operation, inrush current and external faults, and the characteristics are distinct from internal faults. The delta side circulating current is no part of excitation currents of three-phase three-limb transformers, so with main flux induced voltage replaced with winding voltage, the proposed method can be applied to transformers with Y/ Δ connection directly. In this case, the excitation inductances can be calculated under inrush condition, and can be taken as identification criterion for inrush current in differential protection of the transformer. The proposed method is validated by unified magnetic equivalent circuit (UMEC) transformer model.

KEY WORDS: three-phase three-limb transformer; magnetic equivalent circuit; excitation inductance; inrush current

摘要: 针对励磁参数在变压器保护中的应用, 提出了三相三柱式变压器励磁电感参数的识别方法。根据三相三柱式变压器的磁路特征建立了反映主磁通感应电压降与励磁电流关系的简化数学模型。对于Y/Y接线的变压器, 在求得主磁通感应电压降后, 根据所建模型可稳定、准确地求取其在非内部故障情况下的励磁参数, 所求参数与内部故障相比特征明确。 Δ

侧环流不是三相三柱式变压器的励磁电流, 在用绕组端电压代替主磁通感应电压降后, 可直接应用于Y/ Δ 接线变压器, 励磁涌流时仍可准确计算其励磁参数, 其特征明确, 可与差动保护配合, 构建励磁涌流识别判据。通过统一电磁等效电路(unified magnetic equivalent circuit, UMEC)仿真模型验证了该方法的正确性。

关键词: 三相三柱变压器; 磁等值回路; 励磁电感; 励磁涌流

0 引言

变压器保护存在的主要问题是准确地区分励磁涌流和内部故障电流。目前应用的方法都是根据励磁涌流的波形特征进行识别。励磁涌流的波形受系统电压、等值阻抗、合闸初相角和铁心剩磁等因素的影响, 使得励磁涌流和内部故障时电流的波形特征界限模糊, 难以保证保护装置的正确动作^[1-4]。

保护工作者已认识到单纯变压器的电流量对故障信息反映不足, 近年来所提出的变压器保护新原理往往都引入了变压器的端电压量^[5-12]。文献[10-12]提出了基于励磁电感参数的保护原理, 利用变压器端电压和电流来计算变压器的励磁电感参数, 并根据该参数在变压器励磁涌流和区内外故障时的不同特征来判别变压器内部故障。励磁参数能够反映励磁涌流产生的本质原因, 使得该原理对变压器内部故障的判断不受励磁涌流的影响。该原理具有很好的应用前景, 因而成为目前变压器保护的研究热点。

然而目前对该方法的研究都是基于单相变压器的T型等效电路模型, 所做的仿真和实验也都采用单相变压器组成的三相变压器组。相比于三相变压器组, 三相三柱式变压器各相绕组通过铁心存在互感, 而且由于铁心结构的原因, 其各相励磁参数

基金项目: 国家自然科学基金项目(50907048, 51037005); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090201120018)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50907048, 51037005); Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20090201120018)。

是不对称的，不对称程度还受铁心饱和程度的影响。在变压器的常用计算(如短路电流计算中)，实际上分析的是变压器不饱和时电压和绕组电流的关系，此时励磁电流所占绕组电流的比重很小，三相三柱式变压器铁心励磁参数的不对称可以忽略。而变压器励磁参数反映的是绕组电压和励磁电流的关系，是由变压器的铁心结构和饱和程度决定的。在计算三相三柱式变压器励磁参数时，应用 T 型等效电路所求得的参数没有明确的物理意义，难以分析和整定。

此外对于 Y/Δ 接线的情况，三相三柱式变压器角侧环流在励磁电流中所起的作用与三相变压器组也是有区别的。对于三相变压器组，Δ 侧环流也是构成励磁电流的一部分，在利用变压器绕组端电压、励磁电流求其励磁电感参数时不应忽略。而对于三相三柱式变压器，绕组零模电流分量不能产生经铁心闭合的主磁通，其磁通经变压器油及油箱导通，即 Δ 侧环流并不是对应其主磁通的励磁电流，这也是与三相变压器组不同的地方。

针对以上问题，本文根据三相三柱式变压器的磁路特征及其所体现出的各励磁参数的相互关系，建立了适用于计算其励磁电感参数的模型。讨论了 Y/Y 和 Y/Δ 2 种接线情况的励磁电感参数计算方法及变压器不同运行情况下所求励磁参数的特征，并通过仿真对本文算法进行了验证。

1 三相三柱式变压器数学模型

本文采用双绕组变压器分析三相三柱式变压器的数学模型，其磁通分布如图 1 所示^[13-16]。

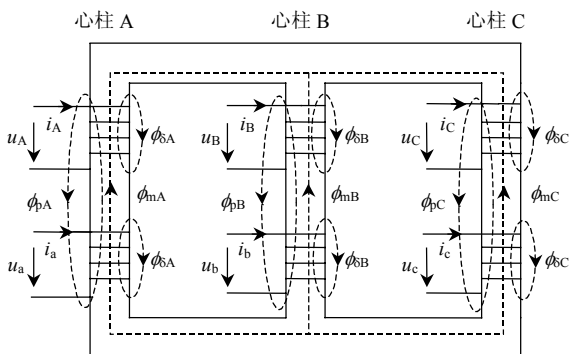


图 1 三相三柱式变压器磁通分布示意图

Fig. 1 Magnetic flux distribution of three-phase three-limb transformer

图 1 中： u_H 、 i_H ($H=A, B, C$) 为一次侧各绕组的端电压和绕组电流； u_h 、 i_h ($h=a, b, c$) 为二次侧各

绕组的端电压和绕组电流。

设两侧绕组匝数分别为 n_1 、 n_2 ，则每个绕组所交链的磁通可以分为 3 部分：1) $\phi_{\delta H}$ ($\phi_{\delta h}$) 为只交链一个绕组的漏磁通；2) ϕ_{pH} 为同时交链各心柱上 2 个绕组的漏磁通；3) ϕ_{mH} 为同时交链所有绕组的主磁通，即完全在铁心构成闭合回路的磁通。

ϕ_{pH} 和 ϕ_{mH} 同时交链每个心柱上的 2 个绕组，可将两侧参数归算到一次侧，则一次侧绕组端电压可表示为

$$\begin{cases} u_A = L_{1\delta} \frac{di_A}{dt} + L'_{AA} \frac{di_{dA}}{dt} + L_{AB} \frac{di_{dB}}{dt} + L_{AC} \frac{di_{dC}}{dt} \\ u_B = L_{1\delta} \frac{di_B}{dt} + L_{AB} \frac{di_{dA}}{dt} + L'_{BB} \frac{di_{dB}}{dt} + L_{BC} \frac{di_{dC}}{dt} \\ u_C = L_{1\delta} \frac{di_C}{dt} + L_{AC} \frac{di_{dA}}{dt} + L_{BC} \frac{di_{dB}}{dt} + L'_{CC} \frac{di_{dC}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $L_{1\delta}$ 为一次侧绕组漏感； i_{dH} 为归算后的各心柱绕组差流，其表达式为

$$\begin{cases} i_{dA} = i_A + ki_a \\ i_{dB} = i_B + ki_b \\ i_{dC} = i_C + ki_c \end{cases} \quad (2)$$

式中 $k=n_1/n_2$ 。

式(1)为常用的三相三柱式变压器的数学模型，以心柱 A 上绕组为例，讨论式(1)中各电感参数的物理意义。除只交链一个绕组的漏磁通外，心柱 A 上绕组激励产生的磁通包括 ϕ_{pA} 和能完全在铁心中形成闭合回路的磁通 ϕ_{mAA} 2 部分。 ϕ_{mAA} 经心柱 B、C 闭合，分别在 B、C 心柱的绕组产生互感应磁通 ϕ_{AB} 、 ϕ_{AC} ，则 $L'_{AA}=n_1 d(\phi_{pA} + \phi_{mAA})/di_{dA}$ ， $L_{AB}=n_1 d\phi_{AB}/di_{dA}$ ， $L_{AC}=n_1 d\phi_{AC}/di_{dA}$ 。

根据变压器的数学模型，由变压器端电压和绕组电流可计算变压器的各瞬时电感参数。单一的工频信号只包含幅值和相位 2 个信息量，即实质上只能列写 2 个独立方程。即使在忽略漏感或漏感参数已知的情况下，式(1)中每个方程式含有 3 个待求参数，其励磁参数的求解要求所用电压、电流是具有丰富频谱的暂态信号。该条件一般只有在变压器受到较大扰动后存在，使得该计算方法难以在变压器各种运行状态下稳定求解。

2 适用于参数辨识的模型

2.1 适用于参数辨识的模型

以一次侧绕组为例，通过每个绕组的磁通由 $\phi_{\delta H}$ 、 ϕ_{pH} 和 ϕ_{mH} 构成，其对应感应电压分别用 $u_{\delta H}$ 、

u_{pH} 和 u_{mH} 表示, 则:

$$u_H = u_{\delta H} + u_{pH} + u_{mH} \quad (3)$$

主磁通感应电压降 u_{mH} 由 3 个心柱上绕组电流共同激励产生:

$$\begin{cases} u_{mA} = L_{AA} \frac{di_{dA}}{dt} + L_{AB} \frac{di_{dB}}{dt} + L_{AC} \frac{di_{dC}}{dt} \\ u_{mB} = L_{AB} \frac{di_{dA}}{dt} + L_{BB} \frac{di_{dB}}{dt} + L_{BC} \frac{di_{dC}}{dt} \\ u_{mC} = L_{AC} \frac{di_{dA}}{dt} + L_{BC} \frac{di_{dB}}{dt} + L_{CC} \frac{di_{dC}}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中各自感参数对应的是能在铁心中形成闭合回路的主磁通, 不包含同时交链各心柱上 2 个绕组的漏磁通, 自感参数的物理意义与式(1)中不同。以 L_{AA} 为例, 其物理意义为 $n_1 d\phi_{mAA}/di_{dA}$, 互感参数 L_{AB} 、 L_{AC} 与式(1)物理意义相同, 分别对应 ϕ_{mAA} 流通 B、C 心柱而产生的互感应磁通。

通过以上讨论可知, 三相三柱式变压器的铁心结构决定了任一心柱绕组的主磁通只能经过另外 2 个心柱形成闭合回路, 式(4)中各电感参数满足以下关系:

$$\begin{cases} L_{AA} = -(L_{AB} + L_{AC}) \\ L_{BB} = -(L_{AB} + L_{BC}) \\ L_{CC} = -(L_{AC} + L_{BC}) \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)可得:

$$\begin{cases} u_{mA} = L_{AA} \frac{d(i_{dA} - i_{dB})}{dt} + L_{AC} \frac{d(i_{dC} - i_{dB})}{dt} \\ u_{mB} = L_{BB} \frac{d(i_{dB} - i_{dC})}{dt} + L_{AB} \frac{d(i_{dA} - i_{dC})}{dt} \\ u_{mC} = L_{CC} \frac{d(i_{dC} - i_{dA})}{dt} + L_{BC} \frac{d(i_{dB} - i_{dA})}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)描述了三相三柱式变压器主磁通感应电压与励磁电流的关系。式中电流为各心柱绕组差流的差, 消去了其中的零模分量, 说明绕组电流中的零模分量只能激励产生不经铁心闭合的漏磁通, 不是三相三柱式变压器的励磁电流。可见利用了三相三柱式变压器铁心结构特征后, 所得模型更加能够明确体现变压器励磁特点, 而且各方程待求电感参数减少为 2 个, 即使利用稳态信号也能求解。

2.2 Y/Y 接线的情况

实际中能够测量到的是变压器绕组端电压, 若要利用式(6)准确求解励磁参数, 需要求得各绕组主磁通感应电压。

$$u_{mH} = u_H - u_{\delta H} - u_{pH} \quad (7)$$

$u_{\delta H}$ 可由漏感参数和绕组电流求得:

$$u_{\delta H} = L_{1\delta} \frac{di_H}{dt} \quad (8)$$

ϕ_{pH} 只交链同心柱上的绕组, 其分别由同心柱上绕组共同激励产生, 对应的磁路即为三相三柱式变压器的零序磁路, 由铁心、变压器油及油箱构成, 励磁电感即为变压器的零序励磁电感 L_0 。

$$u_{pH} = L_0 \frac{di_{dH}}{dt} \quad (9)$$

如果漏感 $L_{1\delta}$ 和零序励磁电感 L_0 是已知的, 可分别由式(8)和式(9)求得变压器绕组各漏磁通感应电压, 再根据式(7)计算各绕组主磁通感应电压降, 而实际上变压器绕组漏感和零序励磁电感并不能由变压器铭牌值获取。

变压器两侧漏感 $L_{1\delta}$ 和 $L_{2\delta}$ 的计算如下:

$$u_A - u_a = i_A R_A + L_{1\delta} \frac{di_A}{dt} - i_a R_a - L_{2\delta} \frac{di_a}{dt} \quad (10)$$

式中 R_A 和 R_a 为绕组电阻, 可以现场测量得到, 即使忽略绕组电阻也不会带来很大的误差, 从而使式(9)中的待求参数减为 2 个^[17]。也可以利用铭牌值给出的两侧漏感和 L'_δ , 利用 $L'_\delta = L_{1\delta} + L_{2\delta}$ 进一步减少待求参数。

对于零序励磁电感的确定, 由于 ϕ_{mA} 、 ϕ_{mB} 、 ϕ_{mC} 为完全在铁心中形成闭合回路的磁通, 满足:

$$u_{mA} + u_{mB} + u_{mC} = 0 \quad (11)$$

故由式(9)–(11)可得:

$$u_A + u_B + u_C - u_{\delta A} - u_{\delta B} - u_{\delta C} = L_0 \frac{d(i_{dA} + i_{dB} + i_{dC})}{dt} \quad (12)$$

式中 $u_{\delta A}$ 、 $u_{\delta B}$ 、 $u_{\delta C}$ 由式(8)求得, 只有零序励磁电感 L_0 是未知量, 因此由式(12)可求得变压器的零序励磁电感。

可见对于 Y/Y 接线的三相三柱式变压器, 不论是励磁涌流、正常运行还是区外故障, 都可以在求得主磁通感应电压降后由式(6)计算其各励磁电感参数。

2.3 Y/Δ 接线的情况

对于 Y/Δ 接线的三相三柱式变压器, Δ 侧线电流就是两不同心柱上绕组电流的差, 而且 Δ 侧环流不能产生经铁心回路闭合的主磁通, 故其励磁电流可由变压器两侧线电流直接获得。以图 2 所示接线方式为例, 其 Δ 侧各电流的关系如下:

$$\begin{cases} i_{1a} = i_a - i_c \\ i_{1b} = i_b - i_a \\ i_{1c} = i_c - i_b \end{cases} \quad (13)$$

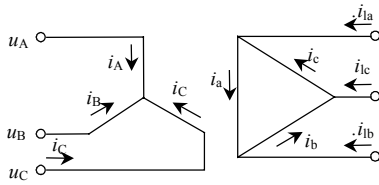


图2 Y/Δ接线变压器电流关系图

Fig. 2 Current relation of transformer with Y/Δ connection

式中 i_{a} 、 i_{b} 、 i_{c} 为能够直接测量得到的Δ侧各线电流。则图2所示Y/Δ接线的三相三柱式变压器励磁电流可直接由变压器各侧线电流求得：

$$\begin{cases} i_{dA} - i_{dB} = i_A - i_B - i_{ib} \\ i_{dB} - i_{dC} = i_B - i_C - i_{ic} \\ i_{dC} - i_{dA} = i_C - i_A - i_{ia} \end{cases} \quad (14)$$

由于三角形侧环流不能测量，不能准确地求取其零序励磁电感以及各绕组的主磁通感应电压。考虑到变压器铁心磁路对应的励磁电感远大于漏感：一般情况下变压器两侧的漏抗之和小于 $0.3 \text{ pu}^{[18]}$ ，零序励磁电抗一般在 0.6 pu 左右^[19-20]，而铁心磁路在非饱和状态下对应的励磁电抗可高达 100 pu 。本文讨论忽略各漏磁通感应电压影响，以绕组端电压代替主磁通感应电压来求取励磁电感参数的情况。

发生励磁涌流时变压器铁心回路在饱和状态和非饱和状态之间交替变化。当绕组磁通对应的铁心回路没有饱和时，其相应的励磁电感数值较大，此时绕组交链的总磁通主要为经过铁心回路闭合的主磁通，主磁通感应电压近似为绕组端电压，此时采用端电压计算励磁参数是准确的。当该绕组对应的铁心回路工作在饱和状态时，其相应的励磁电感数值为非饱和状态时的几百分之一，两部分漏磁通占绕组总磁通的比例相对增大，但由于此时励磁电感数值本身就很小，采用端电压所得的电感参数即使存在较大的相对误差，也应是数值很小的值。所以发生励磁涌流时，用绕组端电压和励磁电流所得的电感参数随铁心工作状态交替变化，能够反映铁心的工作状态。

这与单相变压器组成的三相变压器组不同。对于三相变压器组，三角形侧环流也是励磁电流的构成部分，忽略其影响实际上是忽略了角侧环流对应的主磁通的影响。所以对于有三角形接线的三相变压器组，忽略其角侧环流时，发生励磁涌流的情况下所得励磁电感参数误差较大^[21]。

变压器发生区外短路故障时，采用端电压计算

励磁参数的误差与短路电流大小有关。虽然此时变压器铁心一般不会饱和，但较大的短路电流会相应增大漏感电压占总磁通电压的比例，进而使得所求励磁电感参数误差变大。例如星形侧母线出口短路时主磁通感应电压降与漏感形成回路，而使得绕组端电压接近于零的情况。

3 仿真实验

3.1 仿真模型为线性励磁的三相三柱式变压器

采用统一电磁等效电路(unified magnetic equivalent circuit, UMEC)三相三柱式变压器模型，文献[22-23]详细论述了该模型原理和实现方法。变压器铁心尺寸参考文献[24]中的 220 kV 变压器，铁轭与铁心等效长度比为 1.58 ，额定容量为 240 MVA ，零序励磁电感为 0.6 pu ，空载损耗为 130 kW ，负载损耗为 600 kW 。对 Y/Y 和图3所示的 Y/Δ 2种接线情况分别进行仿真。

1) Y/Y 接线的情况。

变压器的励磁参数是非线性的，在各个时刻其真实值难以确定。如果采用线性励磁的变压器仿真模型，其各励磁参数是定值，可直接与本文方法计算结果进行比较。故首先采用线性励磁的三相三柱式变压器仿真模型验证本文提出的计算方法。为了验证算法中对交链同心柱上2个绕组漏磁通的描述，仿真区外金属性单相接地故障的情况。表1所列列为变压器仿真模型的各个真实参数。

表1 线性励磁变压器模型的各个真实参数

Tab. 1 Real inductances of non-saturation model H

L_{AA}	L_{BB}	L_{CC}	L_{AB}	L_{AC}	L_{BC}
50.46	72.50	50.46	-36.82	-14.16	-36.82

图3为采用本文算法所得的变压器区外A相接地故障前后各相瞬时励磁自感和互感。对比表1可见，在变压器正常运行时所得各自感和互感参数误差很小，且满足式(5)各参数关系。区外单相接地故障使得故障相绕组端电压接近于零，但仍可由式(7)计算出其主磁通感应电压降。此时由于绕组的短路电流很大，使得忽略绕组电阻和励磁等效电阻的影响增大，所得励磁参数出现一定的误差。

如果采用基于单相变压器等效电路的方法计算该三相三柱式变压器的励磁参数，正常运行时所得A相励磁电感如图4所示。可见采用T型等效电路所得电感没有明确的物理意义，不能准确地反映铁心的工作状态。

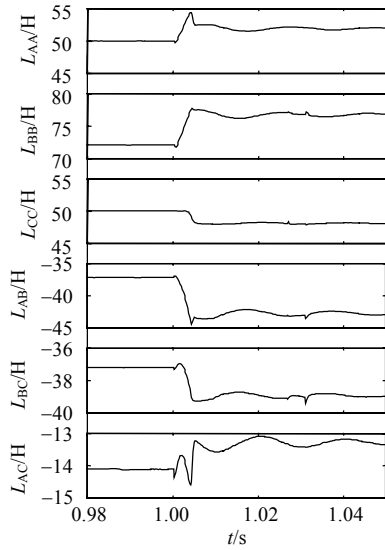


图 3 Y/Y 接线变压器各瞬时电感参数
Fig. 3 Instantaneous inductances of transformer with Y/Y connection

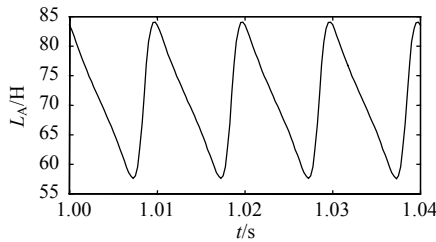


图 4 基于 T 型等效电路算法所得 A 相瞬时电感
Fig. 4 Instantaneous inductance of phase A calculated based on T type equivalent circuit

2) Y/Δ接线的情况。

图 5 为 Y/Δ接线变压器 Y 侧母线出口 A 相金属性接地故障前后，由 Y 侧绕组端电压代替主磁通感

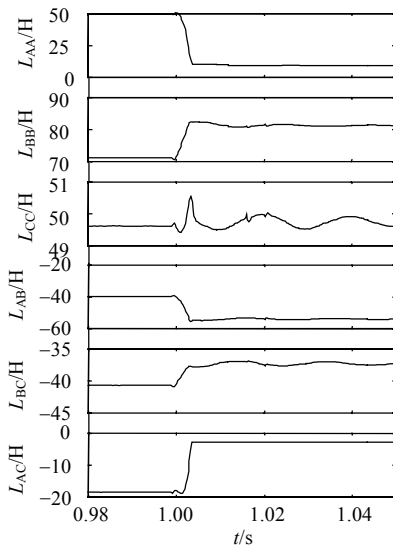


图 5 Y/Δ接线变压器各瞬时电感参数
Fig. 5 Instantaneous inductances of transformer with Y/Δ connection

应电压所得各瞬时励磁电感。由仿真结果可见，正常运行时所得参数仍较为准确，但故障后由于主磁通感应电压与漏感形成回路，绕组端电压数值接近于零，导致所得励磁电感误差很大。

3.2 仿真模型为非线性励磁的三相三柱式变压器

实际中运行的变压器是非线性励磁的，且往往工作在饱和点附近，以下采用非线性励磁的变压器模型进行仿真，所采用的磁化曲线如表 2 所示，铁心在 $1.1U_N$ 处开始饱和，其他参数同本文线性变压器模型。考虑到变压器自感较互感数值大，特征更为明确，以下仿真只给出自感的计算结果。

表 2 变压器磁化曲线数据表

Tab. 2 Magnetization curve data of the transformer

$I/10^{-2}$ pu	U /pu	$I/10^{-2}$ pu	U /pu
0.000	0.0	1.320	0.90
0.678	0.5	1.500	1.00
0.857	0.6	1.750	1.05
1.001	0.7	4.460	1.10
1.170	0.8	15.600	1.15

1) Y/Y 接线的情况。

图 6 为变压器在 1 s 时刻发生区外 A 相接地故障时采用本文算法所得的各瞬时自感。正常运行和区外故障时变压器铁心没有饱和，所得各瞬时自感数值较大，而且随变压器铁心的饱和程度有一定的变化范围。

图 7 为空载合三相三柱式变压器时产生的励磁涌流，此时采用本文算法所得各瞬时自感如图 8 所示。变压器在励磁涌流时，由于铁心会在磁化曲线的非饱和段和饱和段交替变化，所得的各相瞬时自感也相应地在较大值和接近零的极小值之间交替变化，其变化幅度很大。

图 9 为三相三柱式变压器 A 相绕组发生 1%匝间故障时由本文算法所得的各瞬时自感。此时其故

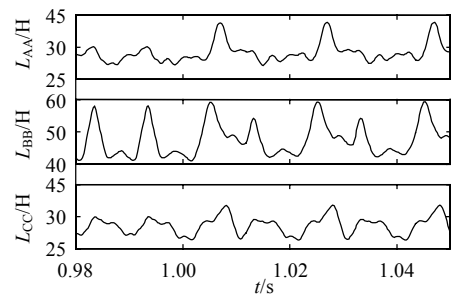


图 6 区外发生 A 相故障时各相瞬时自感
Fig. 6 Instantaneous self inductances with external fault

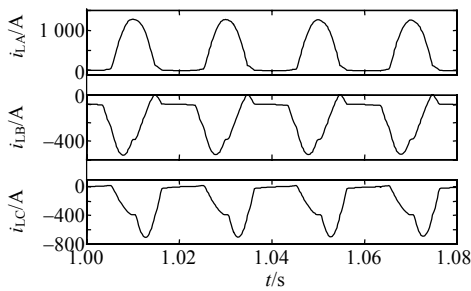


图7 变压器励磁涌流

Fig. 7 Inrush current of the transformer

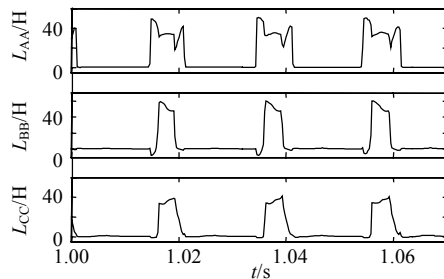


图8 励磁涌流时各相瞬时自感

Fig. 8 Instantaneous self inductances under inrush condition

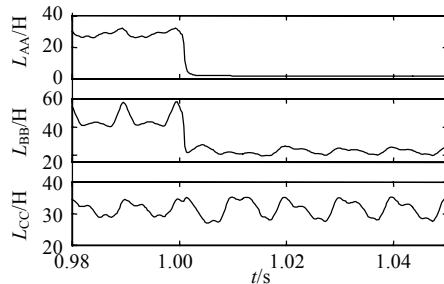


图9 A相绕组匝间故障时各相瞬时自感

Fig. 9 Instantaneous self inductances of the transformer with internal coil-coil fault

障相瞬时自感数值和变化幅度都很小,明显区别于区外故障和励磁涌流时变压器的各瞬时自感特征。

由以上仿真结果可见,对于Y/Y接线的三相三柱式变压器,在求得其主要磁通感应电压降后采用本文算法可以准确求得其在发生励磁涌流、正常运行以及外部故障时的励磁电感参数,所得励磁电感参数特征明显区别于内部故障的情况,可用于构建基于励磁电感参数的变压器保护判据。

2) Y/Δ接线的情况。

为了比较发生励磁涌流时忽略漏磁通对求励磁参数的影响,设定Y/Δ接线变压器铁心、漏感、零序励磁电感以及绕组电压合闸初相角与仿真1)中Y/Y接线变压器相同。

图10为从Δ侧合闸时变压器的励磁涌流和Δ侧环流。将此时用绕组端电压所得的各瞬时励磁自感

参数和图8中Y/Y接线变压器用主磁通感应电压降所得励磁电感参数比较,如图11所示。图中虚线表示Y/Δ接线变压器用端电压计算所得的各瞬时励磁自感,实线表示Y/Y接线变压器用主磁通感应电压计算所得的各励磁自感。

由图11可见,2种合闸情况下由于铁心工作状态相同,所得各励磁自感差别很小。但这并不是说在初始条件相同的情况下,三相三柱式变压器的励磁涌流几乎完全由绕组端电压和铁心回路对应的励磁参数决定,而漏感和零序励磁电感的影响可以忽略。

在变压器铁心未饱和时,对应铁心回路励磁电感远大于漏感,此时决定励磁电流幅值的是绕组端电压和对应铁心回路的励磁电感,漏磁通的影响很小。故此时用绕组端电压代替主磁通感应电压所得励磁电感误差很小。当铁心工作在饱和区时,铁心回路励磁电感数值很小,是未饱和时的几分之一,此时决定励磁电流大小的是绕组端电压、漏感和励磁电感,忽略漏感会产生较大的相对误差。但由于此时励磁电感本身数值就很小,所以此时用绕组端电压所得的励磁电感虽有一定的相对误差,但误差的数值很小。

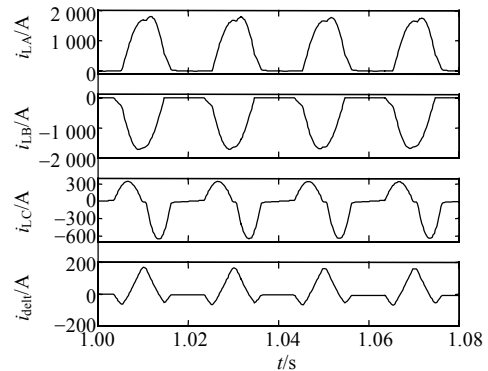


图10 变压器的励磁涌流和Δ侧环流

Fig. 10 Inrush current and delta side circulating current under switch condition

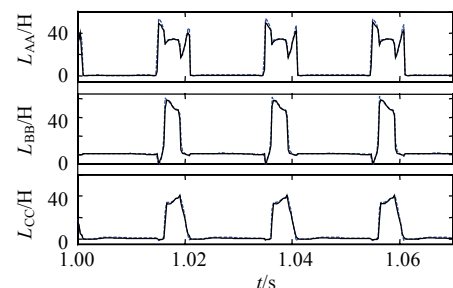


图11 2种合闸情况下所得变压器瞬时自感

Fig. 11 comparison of self inductances of the transformer under two switch conditions

所以图 11 中 2 种情况所得的励磁电感是基本重合的, 说明对于 Y/Δ接线的三相三柱式变压器, 用绕组端电压求励磁电感时产生的误差数值很小, 能够反应铁心的工作状态。

Y/Δ接线变压器, 不论是 Y 侧还是Δ侧绕组匝间故障, 所得励磁参数典型特征如图 12 所示。与 Y/Y 接线变压器一样, 其故障相自感很小, 且基本不变。

图 13 为 Y/Δ接线变压器 Y 侧 A 相金属性接地故障时由故障侧绕组端电压和励磁电流所求得各瞬时自感。此时所得各自感参数误差很大, 而且

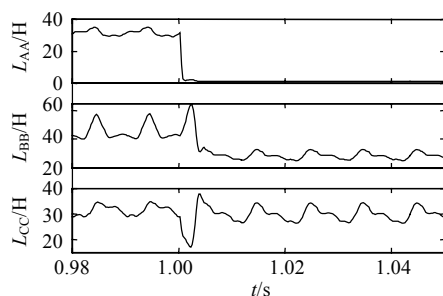


图 12 A 相绕组匝间故障时各相瞬时自感
Fig. 12 Instantaneous self inductances of the transformer with internal fault

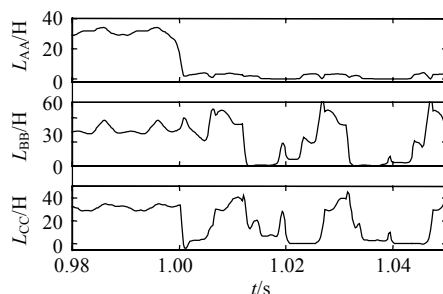


图 13 区外发生 A 相故障时各相瞬时自感

Fig. 13 Instantaneous self inductances of the transformer with external fault

L_{AA} 接近于内部故障时的参数特征。

对于 Y/Δ接线的三相三柱式变压器, 采用绕组端电压所得的励磁参数能够反映励磁涌流时变压器铁心饱和状态的交替变化, 所得参数特征能够区别变压器励磁涌流与内部故障。但区外严重故障会使所求得的励磁参数特征与变压器内部故障时相近。此时励磁参数需与变压器差动保护配合, 在差动保护动作后用以识别励磁涌流。

4 结论

本文根据三相三柱式变压器铁心磁路特征, 分析了主磁通对应各励磁电感参数关系, 建立了适用

于励磁参数辨识的变压器模型, 对 Y/Y 和 Y/Δ 2 种接线情况的变压器励磁参数计算进行了讨论。

1) 对于不含三角形接线的变压器, 利用主磁通感应压降和本文方法可以准确求得其各励磁电感参数。在正常运行、励磁涌流和外部故障下所求得的参数能够准确反映变压器的工作状态, 其特征明显区别于变压器内部故障的情况, 可以用于构建变压器的保护判据。

2) 对于有Δ接线的变压器, Δ侧环流不能激励产生经铁心闭合的主磁通, 其励磁电流由两侧线电流构成。发生变压器励磁涌流时利用绕组端电压所求参数能够反映变压器铁心的饱和状态变化, 能够区别与变压器内部故障的情况, 但严重外部故障会导致所求参数特征与内部故障相近, 可与差动保护配合来构建励磁涌流识别判据。

参考文献

- [1] 葛宝明, 王祥珩, 苏鹏声, 等. 电力变压器的励磁涌流判据及其发展[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 1-6. Ge Baoming, Wang Xiangheng, Su Pengsheng, et al. Criterion and development trend to identify inrush current of power transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 1-6(in Chinese).
- [2] 何奔腾, 徐习东. 波形比较法变压器差动保护[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(6): 395-398. He Benteng, Xu Xidong. Transformer protection based on wave comparison[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 395-398(in Chinese).
- [3] 胡玉峰, 陈德树. 基于采样值差动的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 55-58, 63. Hu Yufeng, Chen Deshu. A new method to identify inrush current based on sampled values[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 55-58, 63(in Chinese).
- [4] 王祖光. 间断角原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1979, 3(1): 18-30. Wang Zuguang. Transformer differential protection based on the dead-angle[J]. Automation of Electric Power Systems, 1979, 3(1): 18-30(in Chinese).
- [5] 李永丽, 梅云, 刘长胜, 等. 一种基于序功率方向的变压器保护方案[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 28-31. Li Yongli, Mei Yun, Liu Changsheng, et al. A protective scheme for power transformers based on sequence power directions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 28-31(in Chinese).
- [6] 王增平, 徐岩, 王雪, 等. 基于变压器模型的新型变压器保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 54-58. Wang Zengping, Xu Yan, Wang Xue, et al. Study on the novel transformers protection principle based on the transformer model[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 54-58(in Chinese).
- [7] 郝治国, 张保会, 褚云龙. 基于等值回路平衡方程的变

- 压器保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 67-72.
- Hao Zhiguo, Zhang Baohui, Chu Yunlong. Study on transformer protection principle based on equivalent circuit equilibrium equation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 67-72(in Chinese).
- [8] 马静, 王增平, 吴劼. 基于广义瞬功率的新型变压器保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 78-83. Ma Jing, Wang Zengping, Wu Jie. A novel principle of transformer protection based on generalized instantaneous power[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 78-83(in Chinese).
- [9] 谭江平. 基于磁通轨迹特征的变压器励磁涌流识别新方法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(12): 77-80. Tan Jiangping. Identification of transformer magnetization inrush current based on magnetic flux track[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(13): 77-80(in Chinese).
- [10] 宗洪良, 金华锋, 朱振飞, 等. 基于励磁阻抗变化的变压器励磁涌流判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 91-94. Zong Hongliang, Jin Huafeng, Zhu Zhenfei, et al. Transformer inrush detected by the variation of magnetizing impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 91-94(in Chinese).
- [11] 康小宁, 何璐, 焦在滨, 等. 基于励磁电感参数识别的变压器励磁涌流判别方法[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(10): 1214-1218. Kang Xiaoning, He Lu, Jiao Zaibin, et al. Distinguishing magnetizing inrush based on characteristics of excitation inductance[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(10): 1214-1218(in Chinese).
- [12] 索南加乐, 焦在滨, 宋国兵, 等. 基于故障分量综合阻抗的变压器保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2008, 19(7): 1-5, 76. Suonan Jiale, Jiao Zaibin, Song Guobing, et al. A fault component comprehensive impedance based transformer protection principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 19(7): 1-5, 76(in Chinese).
- [13] Elleuch M. A contribution to the modeling of three phase transformers using reluctances[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(2): 335-344.
- [14] Mork A, Ishchenko D, Stuehm D. Hybrid transformer model for transient simulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 248-256.
- [15] Oliveira L, Cardoso A. A coupled electromagnetic transformer model for the analysis of winding inter-turn short-circuits[C]. IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines. Grado, Italy: IEEE, 2001: 367-372.
- [16] Yacimini R, Bronzeado H. Transformer inrush calculations using a coupled electromagnetic model [J]. IEE Proceedings-Science Measurement and Technology, 1994, 141(6): 491-498.
- [17] 郝志国, 张保会, 褚云龙, 等. 基于等值回路平衡方程的变压器保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 67-72. Hao Zhiguo, Zhang Baohui, Chu Yunlong, et al. Study on transformer protection principle based on equivalent circuit equilibrium equation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 67-72 (in Chinese).
- [18] 第一机械工业部. 变压器产品样本[M]. 北京: 机械工业出版社, 1979: 58-158. First Ministry of Mechanical Industry. Transformer product stylebook [M]. Beijing: China Machine Press, 1979: 58-158(in Chinese).
- [19] 赵旺初. 变压器的零序阻抗及测量[J]. 变压器, 1996(1): 22-25. Zhao Wangchu. Zero sequence impedance and its measurement of transformer [J]. Transformer, 1996(1): 22-25(in Chinese).
- [20] 吕建玉, 张长栓, 沈红. 变压器零序阻抗的特点[J]. 变压器, 2007, 44(8): 33-35. Lu Jianyu, Zhang Changshuan, Shen Hong. Characteristics of zero-sequence impedance of transformer [J]. Transformer, 2007, 44(8): 33-35(in Chinese).
- [21] 郑涛, 刘万顺, 谷君, 等. 三相变压器等效瞬时电感的计算分析及CT配置新方案[J]. 继电器, 2006, 34(16): 1-6. Zheng Tao, Liu Wanshun, Gu Jun, et al. Analysis of the calculation of equivalent instantaneous inductance in three-phase transformer and a new CT's configuration [J]. Relay, 2006, 34(16): 1-6(in Chinese).
- [22] Enright W, Arrillaga J, Watson N R, et al. Modelling multi-limb transformers with an electromagnetic transient program[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1998(46): 213-223.
- [23] Arrillaga J, Enright W, Watson N R, et al. Improved simulation of HVDC converter transformers in electromagnetic transient programs[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1997, 14(2): 100-106.
- [24] 曹林, 赵杰, 何金良, 等. 三相三柱变压器对偏磁电流的耐受特性研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 71-74, 95. Cao Lin, Zhao Jie, He Jinliang, et al. Research on the withstand performance of the three-phase three-limb power transformer under DC current biasing[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 71-74, 95(in Chinese).



索南加乐

收稿日期: 2011-01-16。

作者简介:

索南加乐(1960), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护, suonan@263.net;

许立强(1982), 男, 博士研究生, 主要研究方向为变压器仿真与保护, sduxuliqiang@163.com;

焦在滨(1972), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统继电保护;

杜斌(1983), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护。

(编辑 胡琳琳)