

引用格式:柴济民,郑玉平,潘书燕.考虑铁心结构的三相变压器励磁涌流和角型绕组环流分析[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):91-100.

Citation: CHAI Jimin, ZHENG Yuping, PANG Shuyan. Analysis of inrush current and delta winding circulating current in three-phase transformers with different core structures[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 91-100.

考虑铁心结构的三相变压器励磁涌流和 角型绕组环流分析

柴济民^{1,2}, 郑玉平^{2,3,4}, 潘书燕^{3,4}

(1.常州工学院电气与信息工程学院,江苏常州 213032;2.河海大学能源与电气工程学院,江苏南京 210098;3.南瑞集团公司(国网电力科学研究院),江苏南京 211106;4.智能电网保护和运行控制国家重点实验室,江苏南京 211106)

摘要:基于三相组式、五柱式和三柱式铁心结构变压器的磁路特征和运行方程,首先,提出运用星形侧零序电流和电压来拟合角型绕组环流的数值方法,并进一步研究不同铁心结构变压器的角型绕组环流和励磁涌流的特点;然后,进行软件仿真和现场录波以验证该数值方法的有效性,可判断三相组式和五柱式变压器的各相绕组差流即为对应相的励磁涌流,而三柱式变压器某相的绕组差流并不是对应相的励磁电流;最后,进一步的理论分析与仿真验证表明,在3类铁心结构的变压器从星形侧空载合闸时,星形侧任意两相的线电流之差可以认为是这两相等效磁路的励磁涌流之差。研究结论可以为不同铁心结构三相变压器的励磁涌流识别提供依据。

关键词:变压器;励磁涌流;环流;零序分量

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.011 **中图分类号:** TM771 **文章编号:** 1673-9140(2024)02-0091-09

Analysis of inrush current and delta winding circulating current in three-phase transformers with different core structures

CHAI Jimin^{1,2}, ZHENG Yuping^{1,3,4}, PANG Shuyan^{3,4}

(1.School of Electrical and information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China; 2.College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3.NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 4.State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

Abstract: The magnetic circuit characteristics and operating equations of transformers with three different core structures: three-phase banked, five-limb, and three-limb are utilized. A numerical method is proposed to fit the circulating current in the delta windings using the zero-sequence current and voltage on the wye side. Through this approach, a deeper understanding of the characteristics of current in the delta windings and magnetizing inrush current in transformers with different core structures is gained. To validate the effectiveness of the proposed numerical method, software simulations and field waveform recordings are conducted. The results show that for three-phase banked and five-limb transformers, the differential current in each phase winding corresponds directly to the magnetizing inrush current of that phase; however, for three-limb transformers, the differential current in a phase winding is not directly correspond to its excitation current. Further theoretical analysis and simulation verification indicate that during no-load closing from the wye side of transformers with these three types of core structures, the difference between the line currents of any two phases on the wye side can be regarded as the difference in magnetizing inrush current between the two equivalent magnetic circuits. This finding provides a new basis for identifying the magnetizing inrush current of three-phase transformers with different core structures.

Key words: transformer; inrush current; circulating current; zero-sequence component

收稿日期:2023-06-13;修回日期:2023-11-30

基金项目:国家自然科学基金委—国家电网公司智能电网联合基金(U1866603);国家电网公司总部科技项目(5100-202340030A-1-1-ZN)

通信作者:柴济民(1983—),男,博士研究生,讲师,主要从事电力系统保护与控制研究;E-mail:chaijm@czu.cn

励磁涌流的识别一直是变压器继电保护研究的重要内容^[1-14]。文献[2-6]表明三相变压器从星形侧空载合闸时在角型绕组中可能存在内部环流。一般情况下只有500 kV及以上电压等级的超特高压变压器可能配置有绕组电流互感器(current transformer, CT),可以直接测量环流,而大量220 kV及以下变压器常采用三柱式或五柱式的三相一体式铁心,一般无法配置CT来直接测量角型绕组内部电流。由于无法测量角型绕组电流,现有变压器保护只能基于各侧线电流运用转角方式构成纵差保护,因此,用于某相涌流识别的差动电流并不是对应相的真正励磁涌流。变压器空载合闸时各相差动电流的波形常常不具备单相变压器偏向一侧且具有间断角的特征,而会出现歪头或具有对称性。目前常用的励磁涌流识别方法,例如,二次谐波制动、间断角识别都是基于单相变压器励磁涌流的波形特征进行分析与整定。因此,分析与研究三相变压器的励磁涌流和角型绕组环流具有重要意义。

现有研究对环流的处理方法可分为两大类:①文献[2-7]运用变压器原副边的电气量关系建立两侧电流电压的运行方程,利用电气量之间的关联进行角型侧环流的等值计算;②文献[11-15]在两侧电气量关系方程的基础上,运用相关波形拟合的方法进行等值计算。总体来说,目前对环流的研究并没有考虑不同结构的变压器铁心磁路的具体影响,均是基于三相磁路相互独立的前提,并且相关研究结论缺乏一定的理论支撑,对三相变压器与单相变压器的励磁涌流波形区别的分析有待深入。

基于不同铁心结构变压器的磁路特征和电路等值方程,本文详细分析三相组式、五柱式和三柱式变压器励磁涌流和角型侧绕组环流的特点,提出运用星形侧零序电压和电流拟合角侧环流的数值方法,并利用仿真软件和现场录波进行验证,所得结论可为三相变压器的励磁涌流识别提供依据。

1 三相变压器角侧环流分析

1.1 三相变压器回路方程

以 Y_0d_{11} 型三相变压器为例,接线如图1所示,可列出变压器的原边电路方程和折合到原边的副边电路方程分别为

$$u_A = r_p i_A + L_p \frac{di_A}{dt} + N_1 \frac{d\phi_A}{dt} \quad (1)$$

$$u_B = r_p i_B + L_p \frac{di_B}{dt} + N_1 \frac{d\phi_B}{dt} \quad (2)$$

$$u_C = r_p i_C + L_p \frac{di_C}{dt} + N_1 \frac{d\phi_C}{dt} \quad (3)$$

$$u_{ac} = r_s i_{ac} + L_s \frac{di_{ac}}{dt} + N_1 \frac{d\phi_A}{dt} \quad (4)$$

$$u_{ba} = r_s i_{ba} + L_s \frac{di_{ba}}{dt} + N_1 \frac{d\phi_B}{dt} \quad (5)$$

$$u_{cb} = r_s i_{cb} + L_s \frac{di_{cb}}{dt} + N_1 \frac{d\phi_C}{dt} \quad (6)$$

式(1)~(6)中, r_p 、 L_p 分别为 Y_0 侧漏电阻、漏电抗; r_s 、 L_s 分别为角型侧漏电阻、漏电抗。

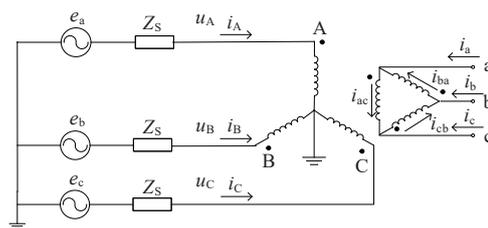


图1 Y_0d_{11} 变压器接线

Figure 1 Wiring connection of Y_0d_{11} transformer

由于各相合闸角和剩磁的不同,三相变压器各相磁路饱和程度也不同,原副边电气量可能出现不对称,星形侧绕组出现零序电压和零序电流。图1中当变压器从 Y_0 侧空充时,角型绕组内部环流为 i_D ,可得:

$$i_{ac} = i_{ba} = i_{cb} = i_D \quad (7)$$

由于角型侧绕组电压之和为零,将式(1)~(3)、(4)~(6)分别相加,再结合式(7),则可得:

$$-r_s i_D - L_s \frac{di_D}{dt} = u_0 - r_p i_0 - L_p \frac{di_0}{dt} \quad (8)$$

式中, u_0 、 i_0 分别为 Y_0 侧的零序电压、电流。

Y_0Yd_{11} 三绕组变压器接线如图2所示。当从 Y_0 侧空载合闸时,角型绕组中存在环流 i_D 。由于 Y 侧没有电流,所以不会产生影响 Y_0 侧和角侧的磁通,可认为在此空载合闸过程中的分析与图1相同,式(8)也可用于图2的分析。

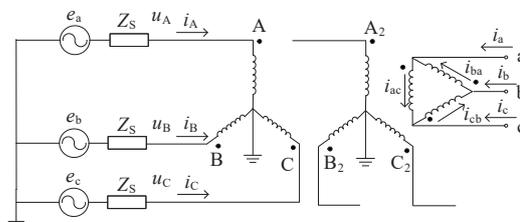


图2 Y_0Yd_{11} 变压器绕组接线

Figure 2 Wiring connection of Y_0Yd_{11} transformer

1.2 环流的递推方法

Y_0 侧各零序分量 u_0, i_0 可通过测量的电压、电流计算,相当于已知量,角型侧绕组环流 i_D 则为未知量。对式(8)的第 $k-1$ 和第 k 个采样点采用离散差分方程处理,即

$$-\Delta t \cdot r_s [i_D(k) + i_D(k-1)] / 2 - L_s \cdot [i_D(k) - i_D(k-1)] = \Delta t [u_0(k) + u_0(k-1)] / 2 - \Delta t \cdot r_p [i_0(k) + i_0(k-1)] / 2 - L_p \cdot [i_0(k) - i_0(k-1)]$$

其中, Δt 为采样间隔,进一步可得:

$$i_D(k) = -\frac{k_B}{k_A} i_D(k-1) - \Delta t \cdot$$

$$\frac{[u_0(k) + u_0(k-1)]}{2k_A} + \frac{k_C}{k_A} i_0(k) + \frac{k_D}{k_A} i_0(k-1) \quad (9)$$

式中, $k_A = 0.5r_s\Delta t + L_s$, $k_B = 0.5r_s\Delta t - L_s$, $k_C = 0.5r_p\Delta t + L_p$, $k_D = 0.5r_p\Delta t - L_p$ 。

由于变压器绕组漏电阻一般远小于漏电抗,式(9)可简化为

$$i_D(k) = i_D(k-1) - \Delta t \frac{[u_0(k) + u_0(k-1)]}{2L_s} + \frac{L_p}{L_s} i_0(k) - \frac{L_p}{L_s} i_0(k-1) \quad (10)$$

其中, L_p, L_s 为原副边绕组的漏电感。对于两绕组变

压器,近似认为 $L_p \approx L_s$;对于图 2 所示的三绕组变压器,由于短路实验可以得到 3 个短路电压百分比,因此,可以通过计算得到各绕组的漏电感。

1.3 仿真和录波验证及结果分析

仿真系统如图 3 所示,变压器采用基于磁路原理的统一磁路(unified magnetic equivalent circuit, UMEC)模型,该模型不仅能仿真两绕组变压器的暂态行为,而且能够仿真三相组式、五柱式和三柱式的铁心结构,并可输出主磁链和零序磁链。

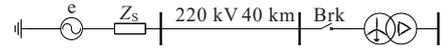


图 3 仿真系统

Figure 3 Diagram of simulation system

仿真系统相关元件参数为系统阻抗 $Z_s = 10 \angle 80^\circ \Omega$, 线路长度为 40 km;正序参数: $r_1 = 0.03629 \Omega/\text{km}$, $x_1 = 0.50310 \Omega/\text{km}$, $c_1 = 0.01054 \mu\text{F}/\text{km}$;零序参数: $r_0 = 0.37958 \Omega/\text{km}$, $x_0 = 1.32770 \Omega/\text{km}$, $c_0 = 0.00759 \mu\text{F}/\text{km}$;变压器参数:电压(kV)变比为 220/10.5,绕组为 Y_0d_{11} ,额定容量为 240 MV·A,空载损耗为 130 kW,负载损耗为 600 kW,短路电压百分比为 0.1。仿真的每周波采样点数为 48,合闸时间为 1.002 s,仿真结果如图 4~6 所示。

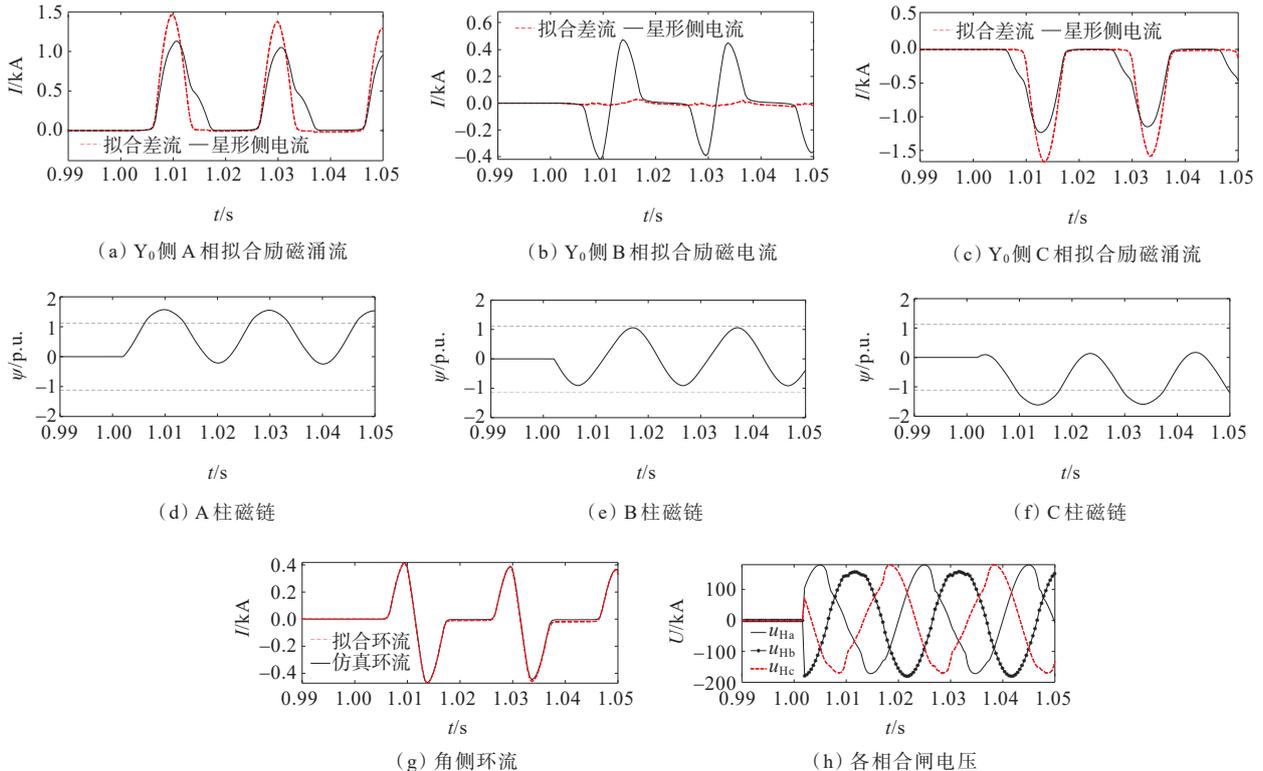


图 4 组式变压器环流、励磁涌流、柱磁链与合闸电压波形

Figure 4 Waveforms of circulating current, inrush current, column flux linkage and closing voltage for three-phase banked transformer

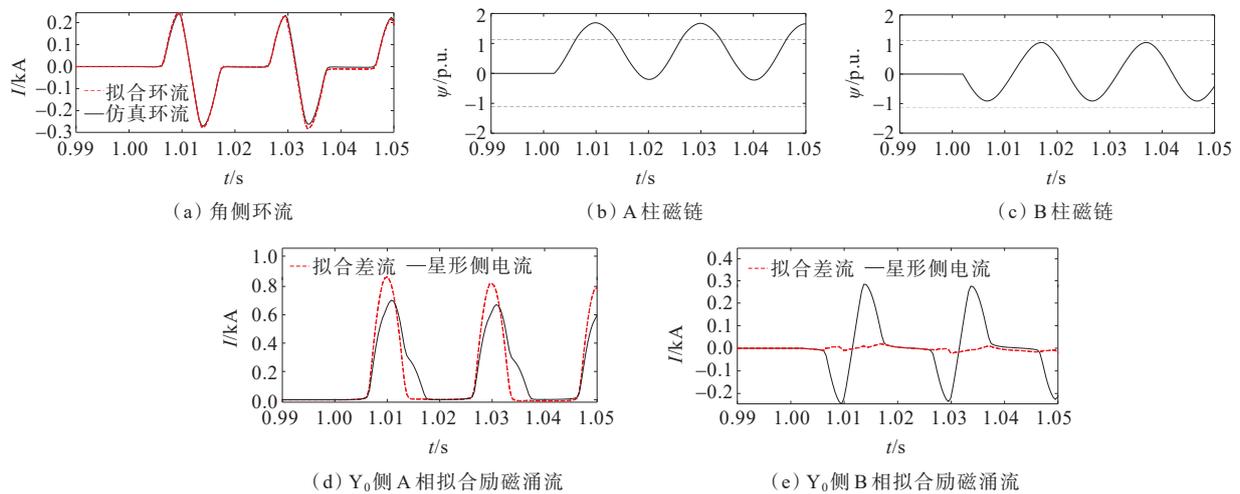


图5 五柱式变压器环流、励磁涌流与柱磁链波形

Figure 5 Waveforms of circulating current, inrush current and column flux linkage for three-phase five-limb transformer

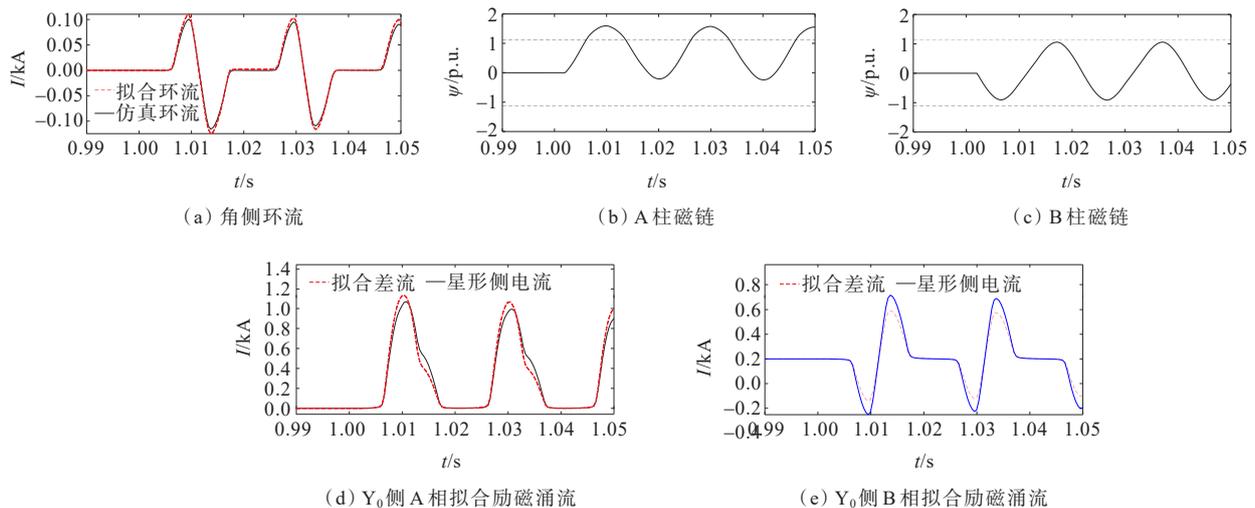


图6 三柱式变压器环流、励磁涌流与柱磁链波形

Figure 6 Waveforms of circulating current, inrush current and column flux linkage for three-phase three-limb transformer

由图4~6的验证结果可以看到:

1) 图4(a)中的拟合绕组差流为拟合环流与仿真的 Y_0 侧A相电流构成,与 Y_0 侧A相电流相比,拟合绕组差流的波形消除了歪头,属于典型的单相励磁涌流波形;图4(d)中虚直线为饱和磁链值(设为1.2 p.u.),A柱磁链高于饱和磁链值的部分为铁心运行的饱和区域;图4(d)的饱和区域与图4(a)拟合差流的非间断区域对应,证明了 Y_0 侧A相电流并非真正的励磁涌流;图4(c)、(f)中仿真和拟合结果与A相相同,只是C柱的饱和区域处于磁链波形的负半周,如图4(h)所示,这是由于空充时C、A相电压的合闸角不同所致;图4(g)中拟合与仿真环流重合度较好。

2) 对比图4(b)、(e)的B相拟合差流和仿真B

柱磁链,拟合后的B相差流非常小,如图4(e)中B柱磁链没有到达饱和区域;如图4(h)所示,B相在电压接近负半周峰值处合闸,暂态磁链没有非周期分量,铁心没有饱和。

3) 图5所示的三相五柱式变压器磁链仿真和差流拟合结果与图4所示的组式变压器相同,B相没有达到饱和条件,B相拟合差流很小。

4) 由图6(a)的波形可以看到,拟合环流与仿真环流波形整体上也保持一致。但对比图6(d)、(b),拟合后A相绕组差流波形仍存在较大歪头,并不与图6(b)的磁链波形相对应。对比图6(e)、(c)可以看到,虽然B相拟合差流比 Y_0 侧B相电流幅值有所降低,但仍为对称性涌流,与图6(c)的磁链图也不对应,图6(c)表明B柱没有饱和,理论上B相的励磁

电流接近于零。因此,从仿真结果看,三柱式变压器的绕组差流并不是对应的励磁电流,这是由三柱式变压器零序磁通的特殊性决定。

由于PSCAD没有基于磁路的三绕组变压器仿真模型,故三绕组变压器的验证采用南方电网某220 kV五柱式变压器,进行现场录波。该变压器的额定容量(MV·A)比为240/240/80,额定电压(kV)变比为220/115/10.5,绕组接线方式为 $Y_N Y_N d_{11}$,高中、高低和中低短路电压百分比分别为13.7%、36.4%和20.6%。仿真结果如图7所示。

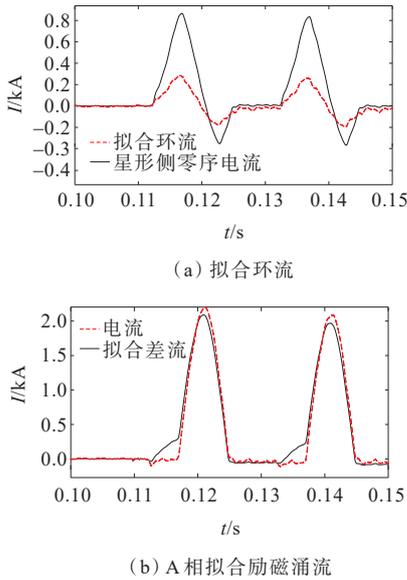


图7 五柱式三绕组变压器环流和励磁涌流

Figure 7 Waveforms of circulating current and inrush current for five-limb three-winding transformer

由图7可以看出,尽管现场变压器没有角型侧绕组CT,也无法测量铁心磁链,但可以从两方面进行分析。首先,图7(a)为 Y_0 侧零序电流和拟合环流,二者大致上呈现比例关系,这与文献[1, 14]分析结论符合;其次,从图7(b)的拟合差流和 Y_0 侧A相电流看,拟合差流波形能够有效消除波形歪头,这与图5(b)的仿真结果是相同的。

2 零序分量对励磁涌流影响分析

2.1 零序磁通分析

文献[15-17]表明,三相组式和五柱式变压器铁心均为零序磁通提供了通路。三相五柱式变压器的零序磁路如图8所示,其中 ϕ_{0a} 、 ϕ_{0b} 与 ϕ_{0c} 分别为A、B、C三柱的零序磁通, ϕ_{0e} 、 ϕ_{0f} 分别为左、右上下轭的零序磁通, ϕ_{0yL} 、 ϕ_{0yR} 分别为左、右边柱的零序磁通。零序磁通均在铁心中流通。

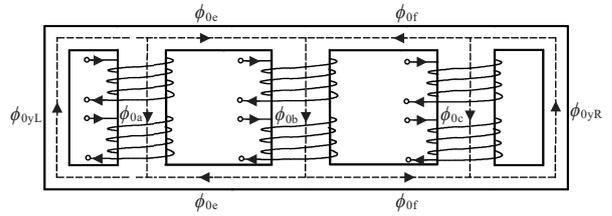


图8 三相五柱式变压器零序磁路

Figure 8 Zero-sequence magnetic circuit of three-phase five-limb transformer

三柱式变压器铁心无法为零序磁通提供通路,零序磁通只能以铁心的结构件、绝缘介质和油箱形成闭合回路,某相绕组对应心柱的正序磁通的磁动势用于励磁,而零序磁通属于绕组间的交链的漏磁通。三柱式变压器磁路如图9所示,以其A相为例, ϕ_a 为心柱内主磁通, ϕ_{0a} 为零序磁通,属于与A相原副边都交链的漏磁通。

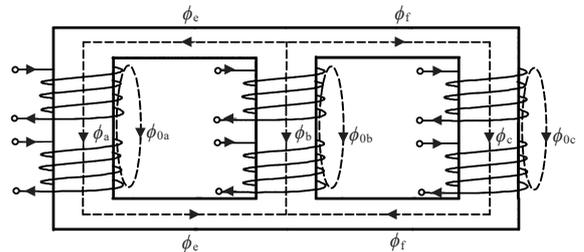


图9 三相三柱变压器磁路

Figure 9 Magnetic circuit of three-phase three-limb transformer

A柱零序磁路如图10所示,其中 ϕ_{leakpa} 、 ϕ_{leaksa} 分别为原副边绕组的漏磁通。对于三相组式和五柱式变压器的A相绕组对应心柱,可以认为零序和正序磁通都是流通于心柱之内,共同作用于该心柱的励磁。

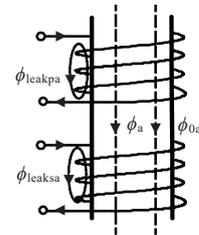


图10 组式和五柱式变压器A柱零序磁路

Figure 10 Zero-sequence magnetic circuit of limb A for banked or five-limb transformer

2.2 绕组差流分析

以图1所示两绕组变压器的A相为例,折合到某侧的高低电压绕组电流之差即差动电流,实际上对应的是两绕组电流的磁动势,通过对零序磁通的分析,三柱式变压器某相两绕组的磁动势并不全部作用于励磁,因此,三相组式和五柱式变压

器的绕组差电流即为对应的铁心柱励磁电流;而三柱式变压器绕组差电流并不是真正的铁心柱励磁电流。

2.3 三相三柱式变压器励磁涌流分析

理论上三柱式变压器的零序磁通应统一在心柱外流通,文献[15,18-21]表明,三柱式变压器的磁路分析可采用各相独立的并联零序磁阻进行等效。三柱式变压器的等效磁路如图11所示,以其A相为例, F_a 为绕组磁动势, \mathfrak{R}_a 为心柱磁阻, \mathfrak{R}_0 为零序磁阻。由于三柱式和五柱式铁心两边的上轭和对应的下轭磁通相同,因此,分别用一个 \mathfrak{R}_e 和 \mathfrak{R}_f 等效上下轭磁阻。由于零序磁通属于漏磁通,故用固定磁阻表示零序磁阻。

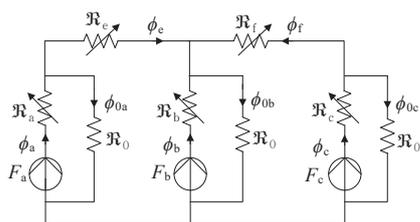


图11 三柱式变压器等效磁路

Figure 11 Equivalent magnetic circuit of three limb transformer

根据安培环路定律和磁路高斯定律可得:

$$\begin{cases} F_a = N_1 i_A + N_1 i_{ac} = \mathfrak{R}_a \phi_a + \mathfrak{R}_0 \phi_{0a} \\ F_b = N_1 i_B + N_1 i_{ba} = \mathfrak{R}_b \phi_b + \mathfrak{R}_0 \phi_{0b} \\ F_c = N_1 i_C + N_1 i_{cb} = \mathfrak{R}_c \phi_c + \mathfrak{R}_0 \phi_{0c} \end{cases} \quad (11)$$

其中,磁动势 $N_1 i_A + N_1 i_{ac}$ 相当于折算到星形侧的绕组差流, $\mathfrak{R}_a \phi_a$ 相当于A相心柱的励磁磁动势, $\mathfrak{R}_0 \phi_{0a}$ 相当于附加的零序磁动势,并不参与A相心柱励磁。文献[16]表明,零序磁通 ϕ_{0a} 相比心柱磁通很小,一般只有主磁通的5%以内,但由于零序磁通所对应的磁路磁阻相对于非饱和心柱磁阻却又大很多倍,因此,磁动势 $\mathfrak{R}_0 \phi_{0a}$ 在数量上相对 $\mathfrak{R}_a \phi_a$ 可能不可忽略。

由于磁动势从量纲上看相当于电流,以A相为例,则可引入等效励磁电流:

$$\mathfrak{R}_a \phi_a = N_1 i_{ma} \quad (12)$$

式中, i_{ma} 为A相心柱的真正等效励磁电流。

则式(11)中第1式变换为

$$i_A + i_{ac} = i_{ma} + i_{v0a} \quad (13)$$

式中, i_{v0a} 为等效附加零序电流。

基于相同的分析,B、C相也可得到等效励磁电流 i_{mb} 和 i_{mc} ,即

$$i_B + i_{ba} = i_{mb} + i_{v0b} \quad (14)$$

$$i_C + i_{cb} = i_{mc} + i_{v0c} \quad (15)$$

A相等效的附加零序电流为

$$i_{v0a} = \frac{\mathfrak{R}_0 \phi_{0a}}{N_1} = \frac{\mathfrak{R}_0 (N_1 \phi_{0a})}{N_1^2} = \frac{N_1 \phi_{0a}}{L_0} \quad (16)$$

其中, L_0 为零序磁路对应的等效电感,即零序励磁电感,由于三柱式铁心的零序磁通属于漏磁通,因此 L_0 为恒定漏感。文献[22-24]表明,三柱式的零序参数计算和测量都较为复杂,零序实验也不是变压器的常规实验,获取 L_0 较为困难。

由式(13)、(16)可以看到,由于 i_{ma} 与 L_0 以及 ϕ_{0a} 相关,因此直接求取 i_{ma} 较为困难。文献[25]表明,即使在铁心饱和时,零序磁通相比心柱内主磁通小得多,因此,仅从磁通的角度分析可忽略零序磁通。与图6对应的三柱式变压器A相仿真零序磁链波形如图12所示。对比图6(c)、12,A柱饱和时的零序磁链低于柱磁链的5%,因此可忽略。

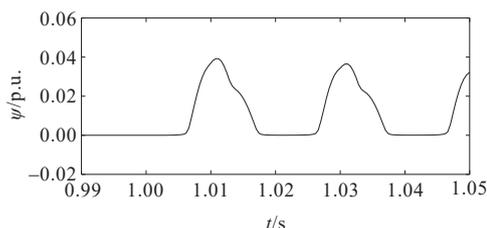


图12 三柱式变压器A相零序磁链波形

Figure 12 Zero-sequence flux linkage waveform of phase A for three-limb transformer

当忽略零序磁通时,可由图11得到三相三柱式变压器的简化模型,如图13所示,忽略零序磁通后 $\phi_a = \phi_e$,A柱与铁心左边轭的磁链相同,因此,铁心左边轭和A柱可看作等效A相磁路。由于 $\phi_c = \phi_f$,铁心右边轭和C柱可看作等效C相磁路,则应用磁路定律可得到:

$$\begin{cases} F_a - F_b = N_1 i_A - N_1 i_B = (\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_e) \phi_a - \mathfrak{R}_b \phi_b \\ F_c - F_b = N_1 i_C - N_1 i_B = (\mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_f) \phi_c - \mathfrak{R}_b \phi_b \end{cases} \quad (17)$$

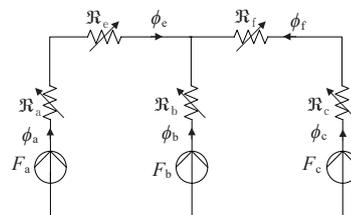


图13 三柱式变压器简化等效磁路

Figure 13 Simplified equivalent magnetic circuit of three limb transformer

忽略零序磁通后 A 柱磁链与铁心左边轭基本相同, \mathfrak{R}_e 和 \mathfrak{R}_a 饱和特性一致, $(\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_e)\phi_a$ 为等效的 A 相磁路对应的磁动势 $N_1 i_{maeq}$, 同样 $(\mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_f)\phi_c$ 为等效的 C 相磁路对应磁动势 $N_1 i_{mceq}$, 由式(14)、(17)可得到:

$$\begin{cases} F_a - F_b = N_1 i_A - N_1 i_B = N_1 i_{maeq} - N_1 i_{mb} \\ F_b - F_c = N_1 i_B - N_1 i_C = N_1 i_{mb} - N_1 i_{mceq} \\ F_c - F_a = N_1 i_C - N_1 i_A = N_1 i_{mceq} - N_1 i_{maeq} \end{cases} \quad (18)$$

从图 9、13 可以看到, 等效 A、C 相磁路比 B 柱磁路长, 因此在相同饱和程度时, 等效 A、C 相励磁电流大于 B 相励磁电流。

2.4 仿真分析

当 $t=1.002\ 00\ \text{s}$ 时, 对图 6 中三柱式变压器进行空载合闸的仿真, 其 C 相仿真磁链和各相间电流的仿真结果如图 14 所示。

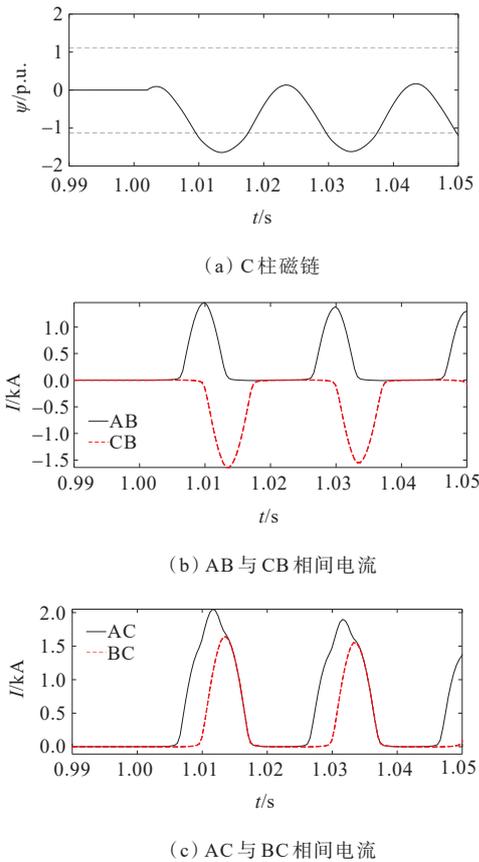


图 14 三柱式变压器 C 柱磁链与相间电流波形 ($t=1.002\ 00\ \text{s}$)

Figure 14 C-limb waveforms of flux linkage and phase current for three-limb transform ($t=1.002\ 00\ \text{s}$)

结合图 6、14 的三相磁链可以看到, B 柱没有饱和, 故 $i_{mb} = 0$, A 柱磁链正向饱和, C 柱磁链负向饱和。由式(14)可得 $i_A - i_B = i_{maeq} - i_{mb} = i_{maeq}$, 从图

14(b) 可见, $i_A - i_B$ 呈现出明显正向励磁涌流, 与图 6(b) 的 A 柱磁链对应; 同样可得 $i_C - i_B = i_{mceq} - i_{mb} = i_{mceq}$, 图 14(b) 中的 CB 相间电流为负向饱和励磁涌流, 与图 14(a) 的 C 柱磁链相对。而 AC 相间电流 $i_A - i_C = i_{maeq} - i_{mceq}$, 为 AC 两相等效磁路励磁涌流之差, 如图 14(c) 所示, AC 相间电流 $i_A - i_C$ 偏于坐标轴一侧, 为 $i_{maeq}(i_A - i_B)$ 与 $-i_{mceq}(i_B - i_C)$ 叠加, 间断角较小。

在 $t=1.008\ 67\ \text{s}$ 时, 从星形侧对三相三柱式变压器进行空载合闸, 仿真的各柱磁链波形和相间电流波形如图 15 所示。

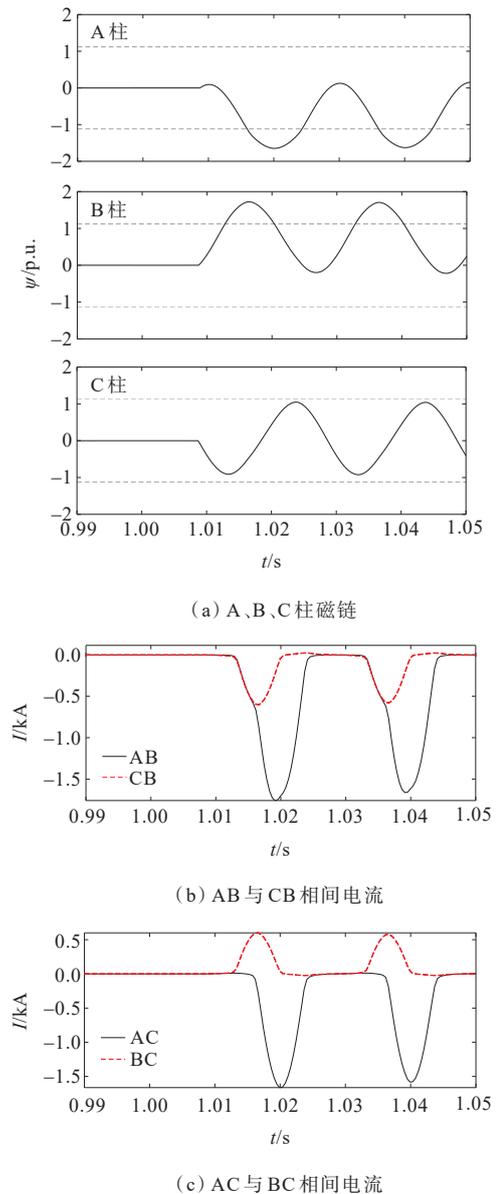


图 15 三柱式变压器各柱磁链与相间电流波形 ($t=1.008\ 67\ \text{s}$)

Figure 15 Limb waveforms of flux linkage and current between phases for three-limb transform ($t=1.008\ 67\ \text{s}$)

由图15(a)可以看到,此时C相没有饱和,A相负方向饱和。由图15(c)可知,AC相间电流 $i_A - i_C = i_{maeq} - i_{mceq} = i_{maeq}$,与图15(a)A柱磁链对应;B相正方向饱和,BC相间电流 $i_B - i_C = i_{mb} - i_{mceq} = i_{mb}$,与图15(a)B柱磁链对应。同时对比图14(b)、15(c),图14(b)中A、C相励磁电流基本相等,这是由于图13中A、B相等效磁路相同;而图15(c)中等效的A相明显大于B相励磁涌流,因为图13中B柱磁路短于A相等效磁路。

当 $t=1.000\ 00\ \text{s}$ 时,从星形侧空充三相三柱式变压器的各柱仿真磁链和相间电流波形如图16所示。

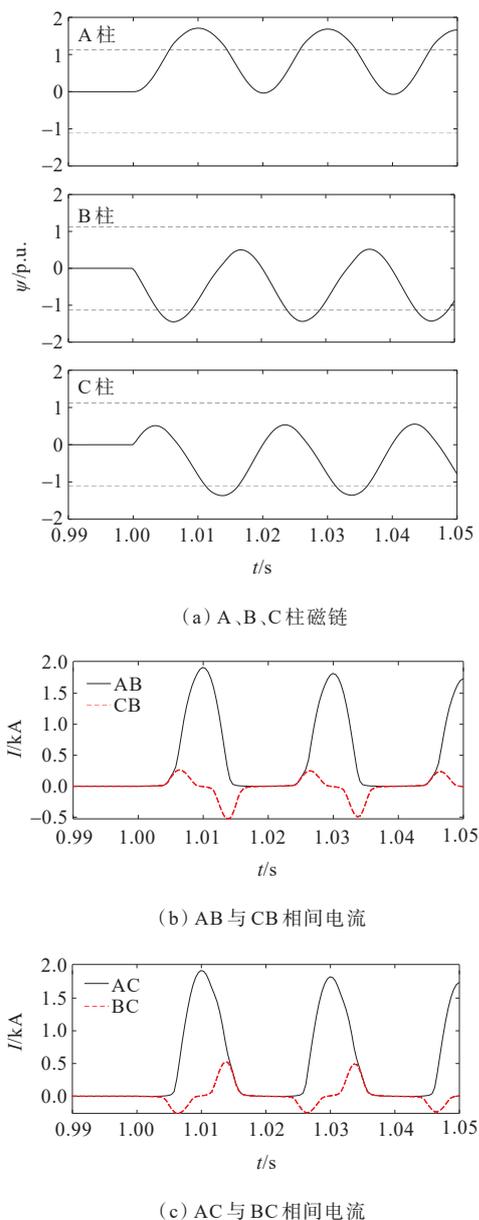


图16 三柱式变压器各柱磁链与相间电流波形($t=1.000\ 00\ \text{s}$)

Figure 16 Limb waveforms of flux linkage and current between phases for three-limb transform($t=1.000\ 00\ \text{s}$)

由图16(a)的仿真磁链可以看到,变压器空载合闸后三相心柱均出现饱和状态,其中B、C相铁心磁链出现负方向饱和。由图16(b)、(c)可知,BC相间电流为对称性涌流。由于A相饱和程度最为严重且为正方向饱和,因此,AB和AC相间电流为正方向饱和励磁电流。以AB相间电流为例,由于 $i_A - i_B = i_{maeq} - i_{mb}$,此时AB相间电流波形由 i_{maeq} 和 $-i_{mb}$ 波形叠加而成,相对于图14(b)中的 $i_A - i_B$ 波形叠加了较小的一 i_{mb} 波形。

通过前述分析,变压器从星形侧空载合闸时各相电流均不是本相对应心柱的实际励磁电流。三相组式和五柱式变压器星形侧各相电流为对应相实际励磁电流与三角侧环流之和。三相三柱式变压器的星形侧各相电流不仅包含对应相实际励磁电流与三角侧环流之和,而且包含对应相的零序等值电流部分。当变压器从星形侧进行空充时,由于差动保护常常采用转角后的差动电流进行谐波分析(图1)。以A相为例,转角后的差动电流实际为 $i_A - i_B + i_a$,其中 i_a 为按照变比折合到星形侧的三角侧线电流,而此时 $i_a = 0$,因此实际进行谐波分析的电流为 $i_A - i_B$ 。

通过文1.1中分析,对于三相组式和三相五柱式变压器, $i_A + i_D = i_{ma}$, $i_B + i_D = i_{mb}$,则进行谐波分析的电流 $i_A - i_B = i_{ma} - i_{mb}$,即 $i_A - i_B$ 是采用A、B柱的实际励磁电流之差进行谐波计算;通过文2.3中分析,对于三相三柱式变压器,当忽略零序磁通时, $i_A - i_B = i_{maeq} - i_{mb}$, $i_A - i_B$ 近似采用的是等效A相与B柱的实际励磁电流之差进行谐波计算。

变压器差动保护采用的二次谐波制动原理的整定门槛值一般为10%~20%,该门槛值理论上一般基于典型的单相变压器励磁涌流进行设置,而采用 $i_A - i_B$ 进行计算无法正确反映 i_{ma} 或者 i_{mb} 的二次谐波含量,实际中有可能出现较低的二次谐波含量,在变压器空载合闸操作时尤其在采用按相制动模式下,使得差动保护不正确动作,对此问题需要进行进一步分析。

3 结语

本文分析了不同铁心结构变压器的角侧环流的产生原因和特点,并基于星形侧零序电压电流的递推方法拟合了三角侧绕组环流和励磁涌流。研究结果表明:

1) 当三相组式和三相五柱式变压器从星形侧进行空充时,任何一相的星形侧电流和三角侧环流的差流就是对应相的实际励磁电流;

2) 三柱式变压器由于零序磁通的特殊性,因此,当变压器从星形侧绕组进行空充时,任何一相的星形侧电流和三角侧环流之差并不是对应相的实际励磁电流;

3) 无论何种铁心结构的变压器,在星形侧进行空充时,星形侧任意两相的电流之差可认为是对应两相的实际励磁电流之差。

本文的研究结论为实际工程中三相变压器励磁涌流的识别提供了依据。而变压器纵差保护直接利用差动电流进行分析计算对目前励磁涌流识别方法的具体影响和改进方法将进一步研究。

参考文献:

- [1] 李应文,刘涛,裴东良,等. 1 000 kV 特高压主变压器差动保护配置分析[J]. 电力科学与技术学报,2017,32(3): 106-113.
LI Yingwen, LIU Tao, PEI Dongliang, et al. Configuration analysis on current differential protection for 1 000 kV UHV transformer[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 106-113.
- [2] 袁宇波,陆于平,陈久林,等. 变压器三角形侧零序环流助增对差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 44-50.
YUAN Yubo, LU Yuping, CHEN Jiulin, et al. Influence of add-assist circulation current at Delta side on Y/Delta transformer differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 44-50.
- [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] 顾乔根,张晓宇,吕航,等. 基于故障负序分量的低频变压器快速差动保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 184-192.
GU Qiaogen, ZHANG Xiaoyu, LÜ Hang, et al. Fast differential protection of low-frequency transformer based on fault negative sequence component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 184-192.
- [5] 龚振,刘承锡,姚良忠,等. 基于增广动态相量法的变压器励磁涌流频率自适应仿真[J]. 电工技术学报, 2022, 37(15): 3805-3817.
GONG Zhen, LIU Chengxi, YAO Liangzhong, et al. Frequency adaptive simulation of transformer inrush current based on the augmented dynamic phasor method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15): 3805-3817.
- [6] 夏石伟,郑涛. Y,d 接线变压器三角型侧绕组中环流求取方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 60-64.
XIA Shiwei, ZHENG Tao. Calculation of circulating current in delta winding of transformers with Y, d connection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 60-64.
- [7] 袁婉玲,崔子轩,禹洪波,等. 基于粗糙集-G1 法组合赋权的变压器健康状态评估[J]. 电力建设, 2022, 43(3): 50-57.
YUAN Wanling, CUI Zixuan, YU Hongbo, et al. Transformer health status evaluation based on rough set G1 combined weighting[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(3): 50-57.
- [8] 毕大强,梁武星,柴建云,等. 变压器三角型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, CHAI 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.
- [9] 郑涛,刘强,夏石伟. 基于变压器回路方程的三角型侧绕组中环流求取新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 43-46.
ZHENG Tao, LIU Qiang, XIA Shiwei, New calculation method of the circulating current in delta side based on voltage loop equation of transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 43-46.
- [10] 王雪,王增平. 新型变压器三角形侧绕组环流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 59-62+67.
WANG Xue, WANG Zengping. A new method of calculating circulating current in delta winding of transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 59-62+67.
- [11] 凌光,姚文熙. Y/Δ 接线变压器三角型侧环流计算新方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 157-162.
LING Guang, YAO Wenxi. Circulating current calculation for delta windings of transformer with Y/Δ connection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 157-162.
- [12] 曹文斌,尹项根,张哲,等. 基于不平衡量的变压器三角绕组环流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 164-170.
CAO Wenbin, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Calculation method for circulating current in delta winding of transformer based on unbalanced amounts[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 164-170.

- 164-170.
- [13] 栗磊,赫嘉楠,熊军辉,等.基于波形分区重构的变压器励磁涌流与故障电流识别方法[J].电网与清洁能源,2023,39(2):16-23.
LI Lei, HE Jianan, XIONG Junhui, et al. An identification method of inrush current and fault current based on waveform partition and reconstruction[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 16-23.
- [14] 曹文斌,尹项根,张哲,等.变压器三角绕组环流助增作用分析及其工程求取方法[J].电工技术学报,2020,35(15):3161-3172.
CAO Wenbin, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Analysis of the helping effect and engineering calculation method for transformer circulating current in delta winding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(15): 3161-3172.
- [15] SONNEMANN W K, WAGNER C L, ROCKEFELLER G D. Magnetizing inrush phenomena in transformer banks[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 1958, 77(3): 884-892.
- [16] ELLEUCH M, POLOUJADOFF M. A contribution to the modeling of three phase transformers using reluctances [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(2): 335-343.
- [17] 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.
- [18] 索南加乐,许立强,焦在滨,等.基于磁路特征的三相三柱式变压器励磁参数识别[J].中国电机工程学报,2011,31(19):97-104.
SUONAN Jiale, XU Liqiang, JIAO Zaibin, et al. Identification method for excitation inductances of three-phase three-limb transformer based on characteristics of magnetic circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 97-104.
- [19] 肖湃,张海龙,杜志叶,等.特高压换流变压器励磁涌流选相合闸抑制方法研究[J].高压电器,2023,59(5): 146-153.
XIAO Pai, ZHANG Hailong, DU Zhiye, et al. Research on phase selection closing suppression method of exciting inrush current of UHV converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 146-153.
- [20] DICK E P, WATSON W. Transformer models for transient studies base on field measurements[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(1): 409-419.
- [21] 林志超,孙荣可,丘桢坤,等.配电变压器台区接地故障对低压系统暂态转移过电压分析[J].供用电,2022,39(6):33-39.
LIN Zhichao, SUN Rongke, QIU Zhenkun, et al. Analysis on transient transfer overvoltage of low voltage system caused by grounding fault in distribution transformer area[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(6): 33-39.
- [22] ENRIGHT W, NAYAK O B, IRWIN G D, et al. An electromagnetic transient model of multi-limb transformers using normalized core concept[C]// International Conference on Power System Transients (IPST), Seattle, Washington, 1997.
- [23] RAMOS A, BURGOS J C, MORENO A, et al. Determination of parameters of zero-sequence equivalent circuits for three-phase three-legged YNyd transformers based on onsite low-voltage tests[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1618-1625.
- [24] RAMOS A, BURGOS J C. Influence of tertiary stabilizing windings of three-phase three-legged YNyd transformers on short-circuit performance of power grids [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 144: 89-95.
- [25] 郭健,林鹤云,徐子宏,等.三相三柱变压器零序阻抗的场路耦合计算与分析[J].电工技术学报,2009,24(3): 80-85.
GUO Jian, LIN Heyun, XU Zihong, et al. Calculation and analysis of zero-sequence impedance of three phase and three limbs transformer based on field circuit coupled method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 80-85.