

Y/Δ 接线变压器三角形侧环流计算新方法

凌光¹, 姚文熙²

(1. 国网绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 等效瞬时电感算法是区分励磁涌流和故障电流的有效方法, 但 220 kV 及以下电压等级的 Y/Δ 接线三相变压器多采用三相一体式结构, Δ 侧环流难以获取, 因而限制了该算法在此类变压器中的应用。提出一种计算环流的新方法。首先利用变压器等效电路的微分方程, 推导出 Δ 侧环流和 Y 侧零序电流的比例关系。在磁通不饱和区域, Y 侧对应相电流和环流相等, 因而也和零序电流成比例。然后利用波形相关度理论, 分别求取 Y 侧三相电流与零序电流的相关系数以区分磁通不饱和区域, 证明至少可以获取一相长度足够的磁通不饱和区域。利用该段区域内的电流求出比例系数, 进而可由 Y 侧零序电流求得 Δ 侧环流。最后通过 MATLAB 仿真验证了该方法求取 Δ 侧环流的准确性。该方法无需已知变压器参数, 也无需控制合闸角, 在一个工频周期内就能准确求取环流。

关键词: 变压器; 等效瞬时电感; 励磁涌流; 环流; Y/Δ 接线

中图分类号: TM 92

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.10.024

0 引言

Y/Δ 接线变压器广泛应用于各电压等级的变电站中, 220 kV 及以下电压等级多采用三相一体式结构。Δ 侧不能配置绕组电流互感器(TA), 因而无法直接获取绕组电流。在计算差流时, 只能通过相位补偿来避免产生不平衡电流。目前常用的补偿方式有 Y→Δ 和 Δ→Y 2 种。但无论采用何种补偿方式, 由于 Δ 侧绕组环流的影响, 都不能准确计算等效瞬时电感值^[1-4], 使得基于此的励磁涌流判据失效, 不能准确区分空载合闸和主变故障 2 种状态, 增加了差动保护误动概率^[5-9]。

当前已有不少论文提出了计算 Δ 侧绕组环流的方法。文献[10-11]根据变压器回路方程, 给出 Y/Δ 接线变压器环流计算的方法, 但需要知道变压器参数。文献[12]提出了一种基于数值积分求得变压器参数, 再进一步求取环流的方法, 在处理过程中用到了 Δ 侧电压; 但电压互感器一般装设在母线上, 在变压器空投时是无法获取 Δ 侧电压数值的。文献[13-14]根据零序电流和环流的比例关系, 通过求取比例系数来得到环流, 但需要控制合闸角或者较长的计算时间, 现场应用困难。

本文根据 Y/Δ 接线变压器等效电路的微分方程计算环流, 得出 Δ 侧环流和 Y 侧零序电流的比例关系。通过分析三相合闸电流和零序电流的波形特征, 确定磁通未饱和部分, 得到零序电流和环流的比例系数, 从而求得 Δ 侧绕组环流。该方法对合闸角无

特殊要求, 也不需要知道变压器参数, 而且在一个工频周期内就能计算出环流, 因此能准确计算差流。该方法的应用, 有利于差动保护快速准确动作, 并有效拓宽了基于等效瞬时电感的励磁涌流判据的应用范围。

1 三角形侧环流计算

Y/Δ 接线变压器等效电路如图 1 所示。把 Δ 侧电压电流换算到 Y 侧, 得到如图 2 所示的单相等效电路。根据等效电路, 从 Y 侧和 Δ 侧分别计算励磁绕组两端电压, 设三相电源对称, 变压器两侧三相绕组各自对称, 得到电压方程。

$$\begin{cases} E_A - R_S i_A - (L_S + L_1) \frac{di_A}{dt} - R_1 i_A = u_{ab} + R_2 i_a + L_2 \frac{di_a}{dt} \\ E_B - R_S i_B - (L_S + L_1) \frac{di_B}{dt} - R_1 i_B = u_{bc} + R_2 i_b + L_2 \frac{di_b}{dt} \\ E_C - R_S i_C - (L_S + L_1) \frac{di_C}{dt} - R_1 i_C = u_{ca} + R_2 i_c + L_2 \frac{di_c}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

其中, R_S 和 L_S 分别为电源的等效电阻和电感; R_1 和 L_1 分别为变压器 Y 侧的各相绕组电阻和漏电感; R_2 和 L_2 分别为 Δ 侧的各相绕组电阻和漏电感。Δ 侧绕组电流可以分解成两部分: 一部分提供 Δ 侧线电流,

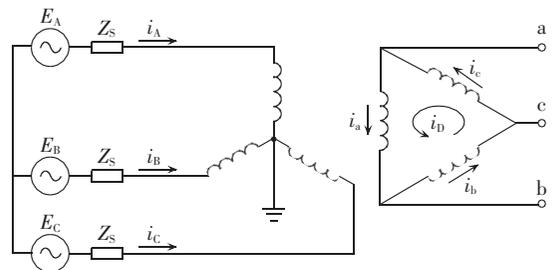


图 1 Y/Δ 接线变压器接线图

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

收稿日期: 2014-11-24; 修回日期: 2015-07-31
专利: 中华人民共和国发明专利(201410320438.8)
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177148)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177148)

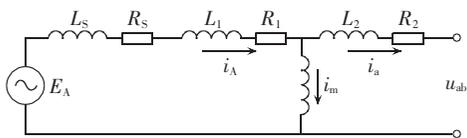


图 2 变压器单相等效电路

Fig.2 Single-phase equivalent circuit of transformer

三者相加等于 0；另一部分等于环流 i_D ，三者相加为 3 倍环流 $3i_D$ 。假设三相电源对称，则 $E_A + E_B + E_C = 0$ ，而 Δ 侧 3 个线电压之和亦为 0，即 $u_{ab} + u_{bc} + u_{ca} = 0$ ，把方程(1)中 3 个式子左右两侧相加，整理后得到方程：

$$\frac{di_D}{dt} + \frac{R_2}{L_2} i_D = -\frac{1}{L_2} \left(R_1^* i_0 + L_1^* \frac{di_0}{dt} \right) \quad (2)$$

其中， $R_1^* = R_1 + R_s$ ； $L_1^* = L_1 + L_s$ ； $i_0 = (i_A + i_B + i_C)/3$ 。

求解上述微分方程，考虑到空载合闸的初始条件 $i_D = i_0 = 0$ ，可以求得环流 i_D 的解析表达式为：

$$i_D = -\frac{e^{-R_2 t/L_2}}{L_2} \int_0^t \left(R_1^* - \frac{L_1^*}{L_2} R_2 \right) i_0 \cdot e^{R_2 t/L_2} dt - \frac{L_1^*}{L_2} i_0 \quad (3)$$

设信号采样周期为 ΔT ，将式(3)离散化，经过 n_s 个采样周期后，环流应为：

$$i_D(n_s) = -\frac{e^{-R_2 n_s \Delta T/L_2}}{L_2} \times \sum_{j=0}^{n_s} \left(R_1^* - \frac{L_1^*}{L_2} R_2 \right) i_0(j) \cdot e^{R_2 j \Delta T/L_2} \Delta T - \frac{L_1^*}{L_2} i_0(n_s) \quad (4)$$

在已知变压器及系统参数，或者根据在线监测获取参数^[15]时，可以根据上式准确计算环流，进而求取差流，来判别励磁涌流。若参数难以获取，忽略电阻，令 $R_1^* = R_2 = 0$ ，则式(4)可以进一步简化为：

$$i_D(n_s) = -\frac{L_1^*}{L_2} i_0(n_s) \quad (5)$$

Δ 侧绕组环流和 Y 侧零序电流成比例，后者根据高压侧电流可以计算得到。因此只要求得比例系数，就可以求取环流。

2 Y 侧零序电流和 Δ 侧环流比例系数计算

当空载合闸时，由于 Δ 侧线电流为 0，各相绕组电流就等于环流，即 $i_a = i_b = i_c = i_D$ 。由图 2 可知，两侧同一相绕组电流的关系是 $i_A = i_a + i_m$ 。当磁通不饱和时，励磁电流 i_m 可忽略，于是就有 $i_A = i_a$ ，即环流和 Y 侧电流相等。再通过自产得到该区域 Y 侧的零序电流，就可以求出两者的比例系数。由于比例系数只跟变压器和系统参数有关，在空载合闸至励磁涌流消失这段较短的时间里，可以认为是不变的，因而在磁通非饱和区求得的比例系数同样适用于磁通饱和区。

根据以上分析，只要确定磁通非饱和区域，就可以根据该区域内的 Y 侧电流求得比例系数，进而求出环流。在这一区域内，Y 侧对应相电流和零序电流成比例关系。文献[13]指出，波形相关度技术可以用来研究 2 组离散信号 x 和 y 的相关程度，用相关系

数 ρ 表示。设一段时间内采样点数为 N ，则 ρ 的表达式为：

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N x(i)y(i)}{\left[\sum_{i=1}^N x^2(i) \sum_{i=1}^N y^2(i) \right]^{1/2}} \quad (6)$$

当两信号相同或成比例时， ρ 的绝对值为 1，否则小于 1。两信号的相关程度越大，其绝对值越接近于 1。在磁通非饱和区域内，对应相电流和零序电流成负比例，其相关系数应该很接近于 -1。所以选择合适的窗口长度，计算相电流和零序电流的相关系数，就可以识别非饱和区。本文采用 1/4 工频周期作为窗口长度，与文献[13]所不同的是，本文不需要控制合闸角，取三相电流分别与零序电流进行相关度计算。只要有一相的非饱和区长度大于窗口长度，就可以求得比例系数。

实际上，在空载合闸于正常系统的情况下，若剩磁大小不超过额定磁通幅值，则三相电流中至少有一相存在 1/3 周期长度位于磁通非饱和区，这个结论可以得到严格证明。若电源电压为 $u_m \sin(\omega t + \alpha)$ ，不考虑电阻影响，则磁通可表示为：

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_m \cos \alpha + \Phi_s \quad (7)$$

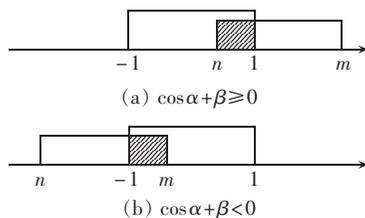
其中， Φ_m 为额定磁通幅值； Φ_s 为剩磁。当磁通大小不超过幅值 Φ_m 时，磁通位于非饱和区，满足：

$$-\Phi_m \leq \Phi \leq \Phi_m \quad (8)$$

把式(7)代入式(8)并记 $\beta = \Phi_s / \Phi_m$ ($-1 \leq \beta \leq 1$)，可以得到：

$$-1 + \cos \alpha + \beta \leq \cos(\omega t + \alpha) \leq 1 + \cos \alpha + \beta$$

记上式中 $\cos(\omega t + \alpha)$ 的上、下限分别为 m 和 n ，而余弦值本身的取值区间是 $[-1, 1]$ ，所以 $\cos(\omega t + \alpha)$ 的取值为 $[n, m]$ 和 $[-1, 1]$ 的交集，如图 3 中的阴影部分所示。

图 3 $\cos(\omega t + \alpha)$ 的取值区间
Fig.3 Range of $\cos(\omega t + \alpha)$

由于三相合闸角互差 120° ，设 A 相合闸角为 α ，则 B、C 相合闸角为 $\alpha \pm 120^\circ$ 。分析这 3 个余弦值的绝对值，不难证明最小值总是不超过 1/2，即：

$$\min\{|\cos \alpha|, |\cos(\alpha + 120^\circ)|, |\cos(\alpha - 120^\circ)|\} \leq 1/2$$

不妨设 $|\cos \alpha| \leq 1/2$ ，由于 $|\beta| \leq 1$ ，所以有：

$$|\cos \alpha + \beta| \leq |\cos \alpha| + |\beta| \leq 3/2$$

当 $\cos \alpha + \beta \geq 0$ 时，结合上式可得：

$$n = -1 + \cos \alpha + \beta \leq 1/2$$

因此 $\cos(\omega t + \alpha)$ 的取值区间应包含 $[1/2, 1]$, 即:

$$1/2 \leq \cos(\omega t + \alpha) \leq 1$$

上式 ωt 的解区间长度为 $2\pi/3$, 为 $1/3$ 工频周期。当 $\cos \alpha + \beta < 0$ 时, 应有 $\cos \alpha + \beta \geq -3/2$, 所以上限 $m = 1 + \cos \alpha + \beta \geq -1/2$, 因而下式成立:

$$-1 \leq \cos(\omega t + \alpha) \leq -1/2$$

ωt 的解区间长度同样为 $2\pi/3$, 所以磁通非饱和区间的长度至少为 $1/3$ 工频周期。在极个别情况下, 剩磁可能超过最大额定磁通, 导致非饱和区长度减少。因而取 $1/4$ 工频周期作为窗口长度, 可以保证至少有一相的磁通非饱和区长度大于该数据窗口。

设窗口长度为 N , 理论上磁通非饱和区对应相电流和零序电流的相关系数 ρ 应为 -1 , 考虑到零序电流和环流并不是精确的比例关系, 取 $\rho < -0.99$ 作为判据, 并把该段数据记为有效数据, 用于计算比例系数。为防止电流过零附近分母过小, 使得比例系数误差增大, Y 侧相电流和零序电流均取满足条件所有数据的绝对值和, 再求比例系数。若满足条件的数据三相都存在, 则取数据长度最长的一相, 计算得到的比例系数作为最终结果, 算法流程图如图 4 所示。

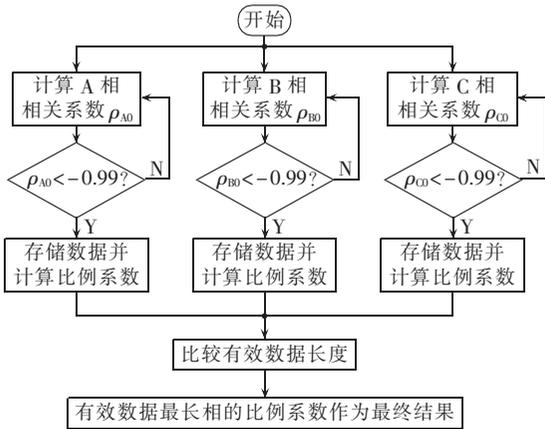


图 4 比例系数计算流程图

Fig.4 Flowchart of correlative coefficient calculation

设有效数据的起始序号为 p , 数据长度为 x , 并设计算相别为 A, 那么比例系数 k 的计算式可记作:

$$k = \frac{\sum_{i=p}^{p+x-1} |I_A(i)|}{\sum_{i=p}^{p+x-1} |I_0(i)|} \quad (9)$$

求得比例系数后, 就可以根据 Y 侧零序电流求得 Δ 侧环流, 最终准确求取差流, 从而判断差动保护是否应动作。当变压器空载合闸以及轻微匝间故障时, 差动保护反应不灵敏, 此时差流的准确计算显得尤为重要。而当 Y 侧发生接地故障时, 相当于电源出口处直接短路, 短路电流较大, 差动保护能灵敏反应。如图 5 所示, 假设 A 相接地, 图中也给出了 TA 的位置。

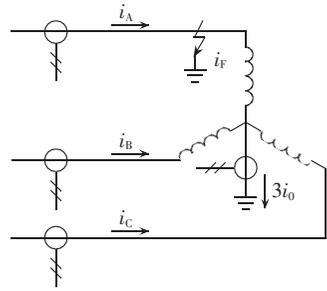


图 5 变压器 Y 侧接地

Fig.5 Grounding at Y side of transformer

此时若要计算 Δ 侧环流, 则要准确获知 Y 侧的零序电流; 但由于接地电流 i_f 的存在, 已经不能通过 3 个相电流 TA 计算得到, 但可通过中性点 TA 获取零序电流 $3i_0$ 。实际上, 此时已无进一步计算环流的必要, 因为系统的零序差流已经可以准确获取:

$$i_{d0} = i_A + i_B + i_C - 3i_0$$

该差流值与 Δ 侧绕组无关, 与励磁涌流无关, 变压器零序差动保护将灵敏动作, 切除故障。即使不采用中性点电流 $3i_0$, 由于故障电流较大, 利用 $Y \rightarrow \Delta$ 或 $\Delta \rightarrow Y$ 方式补偿计算差流, 也能对接地故障有非常灵敏的反应能力, 在第一时间出口跳闸。

3 仿真分析

利用 MATLAB 的 Simulink 模块建立如图 6 所示的仿真模型, 以验证本文所提出的环流计算方法。Y, d11 接线变压器采用三相一体式结构, 电压等级为 $110 \text{ kV}/35 \text{ kV}$, 容量为 $250 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。Y 侧绕组电阻和电感分别是 0.002 p.u. 和 0.08 p.u. , Δ 侧绕组电阻和电感分别是 0.002 p.u. 和 0.08 p.u. , 铁芯饱和特性为 $[0 \ 0; 0.0154 \ 1.2; 1 \ 1.2613]$, 仿真频率为 2.5 kHz 。

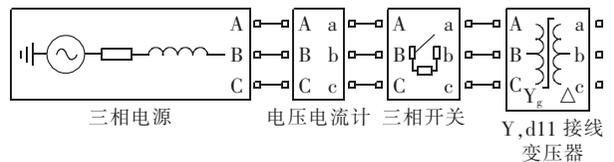


图 6 变压器仿真模型

Fig.6 Simulation model of transformer

合闸角随机选择, 利用式 (5) 计算空载合闸时 Δ 侧的环流, 和实际环流进行对比, 如图 7 所示, 发现按此式计算得到的环流与实际环流十分吻合, 由此证明了式 (5) 的合理性。

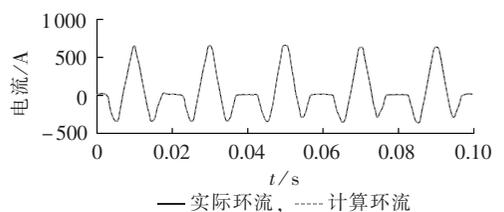


图 7 计算环流和实际环流

Fig.7 Calculated and real circulating currents

上述仿真结果证明了在空载合闸过程中,参数已知时 Δ 侧绕组环流可以准确求取;在更多不知道参数的场合,需要通过文中提出的方法来求取环流。再次进行空载合闸试验,合闸初相角和剩磁随机产生,得到三相电流和环流如图 8 所示。

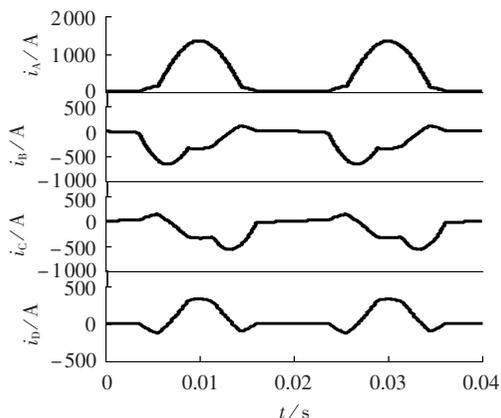


图 8 三相电流与环流

Fig.8 Three phase currents and circulating current

分别计算各相电流和零序电流的相关系数,结果如图 9 所示, ρ_{A0} 、 ρ_{B0} 、 ρ_{C0} 分别为 A、B、C 相和零序电流的相关系数。共计算了 2 个工频周期的数据,相关系数分布一致,所以取 1 个周期的数据即可完成计算。

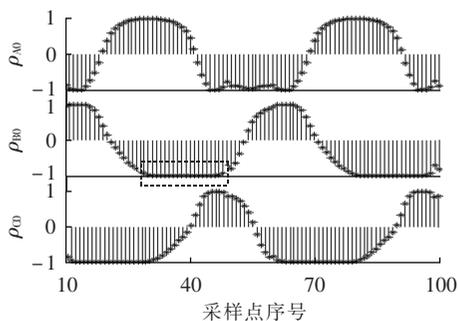


图 9 三相电流与零序电流相关系数

Fig.9 Correlation coefficient of phase current with zero-sequence current for three phases

由图 9 可知,B 相电流的第 31~45 号采样点所对应的相关系数计算值为 -1 ,如图中虚线框所示。包含计算窗口内的 10 个采样点,共存在 24 个采样点对应非磁通饱和区(第 22~45 号采样点)。根据这 24 个采样点的电流以及零序电流值,根据式(9)求得比例系数为 1.53,按式(5)计算环流,得到计算环流和实际环流,对比如图 10 所示。

由图 10 可知,计算环流和实际环流基本吻合,验证了文中提出算法的可靠性。考虑最不利情况,剩磁为 100% 额定最大磁通,A 相合闸角为 0° 。而且 B、C 相剩磁为负方向,A 相剩磁为正向,进行空载合闸仿真,得到高压侧三相电流和环流,再分别计算各相电流和零序电流的相关系数,结果如图 11 所示。

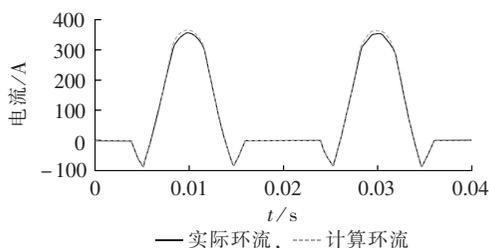


图 10 剩磁随机时的实际环流与计算环流

Fig.10 Calculated and real circulating currents when residual magnetism is random

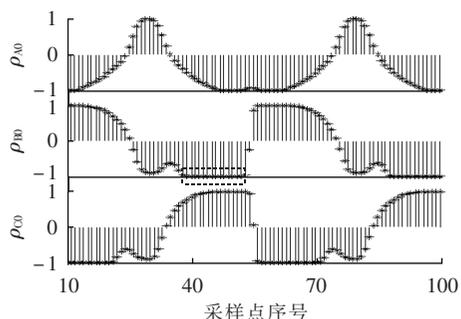


图 11 高剩磁时的相关系数

Fig.11 Correlation coefficient when residual magnetism is high

可以发现仍然存在大于数据窗口的区域,在此区域内零序电流和相电流成比例,B 相虚线框部分即为符合要求数据。根据文中提出算法计算环流,并与实际环流对比如图 12 所示,两者基本吻合。

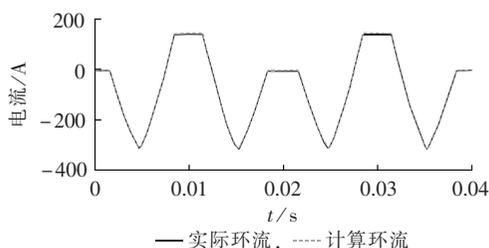


图 12 高剩磁时的实际环流与计算环流

Fig.12 Calculated and real circulating currents when residual magnetism is high

当变压器空载合闸于匝间故障时,故障相零序电流和环流的比例关系将不成立,但非故障相的比例关系依然成立,仍可以依此计算环流。当匝间故障时,非故障相因为二次负载阻抗变小,磁通更不容易饱和,所以存在更多的有效数据可以用于计算环流。而当三相都不存在有效数据时,说明变压器发生了两相甚至三相短路,这也可以作为保护动作跳闸的一个辅助判据。设 A 相发生 5% 匝间故障,把仿真得到的各相电流和零序电流分别计算相关系数,结果如图 13 所示。由图 13 可知,B 相和 C 相均存在较大区域数据,和零序电流成比例。针对本次故障,取 B 相电流第 10~40 号数据点以及对应的零序电流计算比例系数,并根据算得的系数求得环流,和实际环流相比较,如图 14 所示。

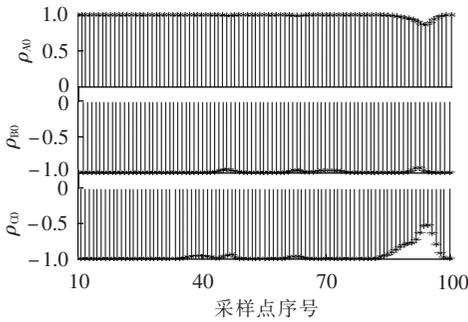


图 13 A 相匝间故障时的相关系数

Fig.13 Correlation coefficient when inter-turn fault occurs in phase A

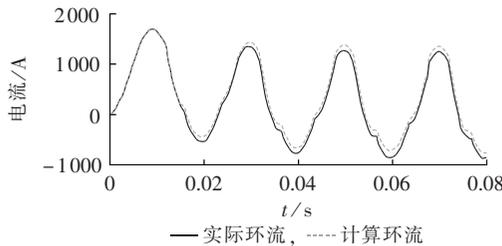


图 14 匝间故障时的实际环流和计算环流

Fig.14 Calculated and real circulating currents when inter-turn fault occurs

由图 14 可知,计算环流和实际环流基本吻合,所以本算法在变压器内部故障时仍然可以适用,准确求取差流,提高差动保护动作准确率,同时也弥补了差动保护在匝间故障时反应不灵敏的缺点。

4 结语

本文提出了计算 Y/△接线变压器△侧绕组环流的一种新方法。先根据变压器等效电路微分方程,推导出△侧绕组环流与 Y 侧零序电流成比例关系。再从理论上证明了对于任意合闸角,每个周期里至少有一相电流的磁通非饱和区不短于 1/3 周期。根据这一结论,结合波形相关度理论,识别出磁通非饱和区。然后利用这一区域内的电流数据求得比例系数,进而由零序电流求得空载合闸环流。最后通过 MATLAB 仿真验证了该方法的准确性。该方法无需已知变压器参数,无需控制合闸角,而且在一个工频周期内即可完成判断,符合现场实际情况和快速动作的要求,具有良好的应用前景。

参考文献:

[1] 郑涛,刘万顺,庄恒建,等. 用归一化等效瞬时电感分布特性识别励磁涌流的新算法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(23):47-53.
 ZHENG Tao,LIU Wanshun,ZHUANG Hengjian,et al. A new algorithm based on the distribution of the normalized equivalent instantaneous inductance for discrimination of inrush[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(23):47-53.
 [2] 毕大强,王祥珩,杨恢宏,等. 变压器差动保护中电流相位补偿方

式的分析[J]. 电力系统自动化,2006,30(18):33-37.
 BI Daqiang,WANG Xiangheng,YANG Huihong,et al. Analysis on current phase compensation methods in differential protection for transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(18):33-37.
 [3] 张志文,陈明飞,胡斯佳,等. 基于星形三角形接线多功能平衡变压器的负序和谐波综合治理系统[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):159-165.
 ZHANG Zhiwen,CHEN Mingfei,HU Sijia,et al. Comprehensive negative-sequence and harmonic suppression system based on Y-D multi-function balance transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):159-165.
 [4] 张友鹏,董海燕. 基于 Y/△平衡变压器的同相牵引供电系统[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):101-104.
 ZHANG Youpeng,DONG Haiyan. Co-phase traction power supply system based on Y/△ balanced transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):101-104.
 [5] 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 ad-dassist circuit current at delta side on Y/delta transformer differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(3):44-50.
 [6] 孙洋,黄家栋. 基于非饱和区等效瞬时电感波形特征的变压器励磁涌流鉴别方法[J]. 南方电网技术,2009,4(3):82-86.
 SUN Yang,HUANG Jiadong. Identification of transformer magnetizing inrush based on waveform characteristics of equivalent instantaneous inductance in non-saturation zone[J]. Southern Power System Technology,2009,4(3):82-86.
 [7] 陈俊,王响帆,严伟,等. 励磁变压器低压侧单相接地故障在线识别方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):149-152.
 CHEN Jun,WANG Yunfan,YAN Wei,et al. Online identification of single-phase grounding fault at low-voltage side of excitation transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):149-152.
 [8] 刘小波,刘万斌,包明磊,等. 转子一点接地保护双重化配置研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):162-167.
 LIU Xiaobo,LIU Wanbin,BAO Minglei,et al. Dual-configuration of rotor one-point grounding protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(10):162-167.
 [9] 滕予非,丁理杰,汤凡,等. 基于谐波互阻抗的励磁涌流引发谐波电压畸变风险识别[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):155-161.
 TENG Yufei,DING Lijie,TANG Fan,et al. Risk identification based on harmonic mutual impedance for harmonic voltage distortion caused by excitation inrush current[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):155-161.
 [10] 金恩淑,刘丽丽,杨明芳,等. 等效瞬时电感算法在 Y-△接线变压器中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(20):5-9.
 JIN Enshu,LIU Lili,YANG Mingfang,et al. Application of equivalent instantaneous inductance algorithm to the Y/△ three-phase transformer[J]. Power System Protection and Control,2008,36(20):5-9.
 [11] 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,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.
- [12] 郑涛,刘强,夏石伟. 基于变压器回路方程的三角形侧绕组中环流求取新方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(5):43-46.
ZHENG Tao,LIU Qiang,XIA Shiwei. New calculation method of the circulating current in delta side based on voltage loop equation of transformer[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(5):43-46.
- [13] 夏石伟,郑涛. Y,d 接线变压器三角形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.
- [14] 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.
WANG Xue,WANG Zengping. A new method of calculating circulating current in delta windings of transformer[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(24):59-62.
- [15] 李邦云,丁晓群,李娟. 变压器绕组变形在线监测方法的研究[J]. 变压器,2003,40(10):37-40.
LI Bangyun,DING Xiaoqun,LI Juan. Research on online monitoring method for transformer winding deformation [J]. Transformer,2003,40(10):37-40.

作者简介:



凌 光

凌 光(1986—),男,浙江绍兴人,硕士,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: lingguang86@gmail.com);

姚文熙(1977—),男,浙江海宁人,副教授,博士,主要研究方向为电力电子与电力传动(E-mail:ywxi@zju.edu.cn)。

Circulating current calculation for delta windings of transformer with Y/ Δ connection

LING Guang¹, YAO Wenxi²

(1. State Grid Shaoxing Power Company, Shaoxing 312000, China;

2. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The equivalent instantaneous inductance algorithm is an effective way to distinguish the excitation inrush from the fault current, which could not be easily applied to the 220 kV and below three-phase transformers with Y/ Δ connection due to the hardly acquired circulating current of delta winding. A method for calculating the circulating current is proposed. The proportional relationship between the circulating current of delta winding and the zero-sequence current of Y winding is derived based on the differential equations of transformer. In the unsaturated flux zone, because the circulating current is equal to the corresponding phase current at Y side, it is proportional to the zero-sequence current as well. In order to distinguish the unsaturated flux zones, the waveform correlation theory is applied to calculate the correlative coefficient of phase current with zero-sequence current for each phase at Y side, which proves that the unsaturated flux zone of at least one phase is long enough for calculating the ratio of phase current over zero-sequence current to obtain the circulating current. The accuracy of the proposed method is verified with MATLAB simulation. With the transformer parameters unknown and the closing angle uncontrolled, it calculates the circulating current accurately within one power cycle.

Key words: electric transformers; equivalent instantaneous inductance; excitation inrush; circulating current; Y/ Δ connection