

基于磁通特性的改进型变压器保护方案研究

徐岩,王增平,杨奇逊,赵冬鸣

(华北电力大学电力工程系,河北 保定 071003)

摘要: 首先简要地阐述了近年来利用变压器的磁通特性鉴别励磁涌流的两种具有代表性的方法,在此基础上,提出了基于磁通特性的改进型变压器保护方案,阐述了该保护方案的基本原理,推导出了基于该原理的两绕组和三绕组变压器的动作方程,并针对该保护方案中的几个问题进行了探讨,该方案不依赖二次谐波制动原理和间断角闭锁原理,避免了变压器难以得到的内部参数,具有数据采集方便、计算量小、动作迅速等特点。最后对此方案进行了试验,并给出了该保护方案的应用框图。

关键词: 变压器保护; 磁通特性; 励磁涌流

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2003)09-0009-06

1 引言

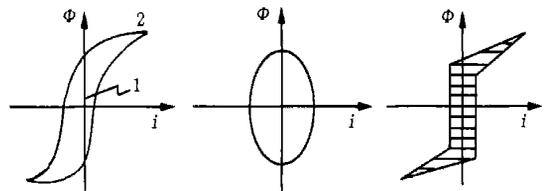
电力变压器是电力系统中十分重要的电气设备,变压器保护也是电力系统自动化的重要组成部分,对电力系统的安全运行具有十分重要的作用。长期以来,变压器差动保护一直是变压器的主保护,而且在该保护中最关键也是最困难的问题就是如何防止变压器励磁涌流所导致的差动保护误动作。目前,在系统中配置的变压器保护,主要是采用二次谐波制动原理和间断角闭锁原理来防止变压器差动保护误动作^[1,2]。由于间断角闭锁原理对硬件要求高,实现较困难,在微机变压器差动保护中,往往更多采用二次谐波制动原理。但是由于CT饱和,无功补偿用的并联电容或超高压长输电线分布电容的存在,使得变压器发生内部故障时也会产生很大的二次谐波,而且随着大型变压器铁心采用冷轧硅钢片,饱和磁通倍数由1.4降至了1.2~1.3,甚至低至1.1~1.15,使得励磁涌流的二次谐波含量有时低至10%以下。这些情况都使得基于二次谐波制动原理的保护常出现拒动或误动。因此,如何有效而准确地识别励磁涌流就变得十分重要。

近年来,利用变压器的磁通特性来鉴别励磁涌流取得了很大的进展,本文在简要地阐述了两种具有代表性的磁通制动方案的基础上,提出了基于磁通特性的改进型变压器保护方案。

2 利用励磁特性曲线判别故障类型

文献[3]提出的励磁特性方案的基本原理是基于变压器在不同工况下的励磁特性曲线建立故障判别区。变压器在正常运行和励磁涌流时的励磁特性

分别如图1(a)中曲线1和2所示,内部故障时的励磁特性如图1(b)所示。如果考虑模型误差留有一定的裕度,可以建立如图1(c)那样的判定区,落在区内为非故障状态,落在区外为故障状态。这里的磁通量可以基于变压器数学模型利用电流和电压计算得到。



(a)非故障时的磁特性 (b)内部故障时的磁特性 (c)内部故障判定区

图1 变压器的磁特性

Fig. 1 Magnetic characteristics of transformer

该方案由于判断和计算过程比较简捷,所以检测速度较快,同时由于在判别区中已考虑了变压器的磁饱和和特性,因此可以取消二次谐波制动,且具有较高的灵敏度^[2]。

3 利用磁通和差流相对变化曲线判别故障类型

文献[4]首先建立了如图2(a)所示的双绕组单相变压器模型,则存在关系式:

$$u - L di/dt = d \Phi / dt \quad (1)$$

式中忽略了绕组电阻R;绕组漏感为L,其值近似为常数;Φ为互感磁链。

在时刻 T_{k-1} 到 T_k 范围内对式(1)积分,并写成递推形式:

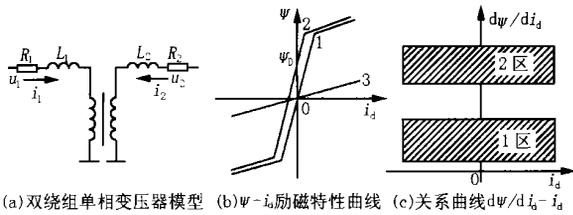


图2 双绕组单相变压器模型及其磁特性曲线

Fig. 2 The two-winding single-phase transformer model and its magnetic curves

$$(k) = (k - 1) + [u(k) - u(k - 1)] \cdot \frac{T}{2} - L[i(k) - i(k - 1)] \quad (2)$$

将差动电流 i_d 看作变压器的励磁电流 i , 算出磁链后, 通过比较与 i_d 的关系是否落在空载磁化曲线附近来判定涌流和故障, 是则判为涌流, 否则判为故障, 如图 2(b) 所示。

文献[4]认为空载特性曲线可用忽略磁滞作用的特性曲线 1 表示, 而发生故障时的励磁特性如曲线 3 所示, 剩磁的存在会改变原有的磁化曲线, 如曲线 2 所示。由图 2(b) 可见, 发生故障时的励磁特性曲线 3 斜率较小, 且是一个常数。正常状况下变压器的工作点在磁特性曲线 2 的拐点附近, 其斜率较大且基本为一常数。在涌流时, 变压器的工作点随涌流的周期性变化在磁特性曲线 2 的拐点上下两段折线上来回摆动, 其斜率在很小(饱和)和很大(非饱和)之间周期性变化。据此, 作者提出如下判据: 在 $d\psi/di_d - i_d$ 平面上, 可确定两个区域, 如图 2(c) 所示。区间 2 为饱和区, 区间 1 为非饱和区或内部故障区。当运行状态保持在区间 2 时为正常状况, 当运行状态跳变到区间 1 并保持不动时表示内部故障, 当运行状态在区间 1~2 交替跳变时, 则表示涌流状态。利用 $d\psi/di_d$ 的一个好处是可以消除剩磁的影响。

该方法的实时计算负担比较少, 并且不受剩磁影响, 可以取消二次谐波判据, 检测内部故障的速度也比较快。但也存在以下不足:

(1) 为得到磁化曲线上拐点上下两段折线斜率的整定值, 需用具体变压器的较精确的磁化特性曲线, 这些参数可能因测量不准对励磁涌流的鉴别产生不利的影响;

(2) 在 $d\psi/di_d - i_d$ 平面上确定区 1 和区 2 的位置可能遇到困难, 特别是内部轻微故障时, 由于差流较小, 端口电压维持较高, 故 $d\psi/di_d$ 较大, 这样必然要求区 1 相当大, 甚至可能与区 2 重合。

通过以上的研究可以看出, 基于磁特性的励磁涌流鉴别法, 不但可以克服二次谐波原理的不足, 而且适宜用微机实现, 这就为研制新型的变压器保护提供了新的发展前景, 同时也表明, 目前应用磁通特性原理的方法仍然存在很多不足。为此, 本文作者经过研究提出了基于磁通特性的改进型变压器保护方案。

4 基于磁通特性的改进型变压器保护方案

4.1 基本原理

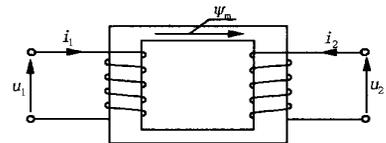


图3 双绕组单相变压器

Fig. 3 Two-winding single-phase transformer

如图 3 所示变压器, 有下面的关系成立:

$$\begin{cases} u_1 = i_1 r_1 + L_1 di_1/dt + d\psi_m/dt \\ u_2 = i_2 r_2 + L_2 di_2/dt + d\psi_m/dt \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中 u_1 、 u_2 为一、二次绕组的电压; i_1 、 i_2 为一、二次绕组的电流; L_1 、 L_2 为一、二次绕组的漏感; r_1 、 r_2 为一、二次绕组的电阻; ψ_m 为一、二次绕组的互感磁链; 将式(3)中的 $d\psi_m/dt$ 消去得:

$$u_1 - u_2 = i_1 r_1 - i_2 r_2 + L_1 \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (4)$$

由于式(4)是根据变压器正常运行的模型得到的, 所以它适合于外部故障、励磁涌流及过激磁情况, 只有内部故障时, 由于变压器模型本身的内部结构参数发生了变化, 它才不再成立。因此, 可以通过判别式(4)是否成立, 来决定保护的动作为。因而, 在励磁涌流、过激磁、外部故障情况下, 保护不会误动作。

4.2 两绕组变压器的动作方程

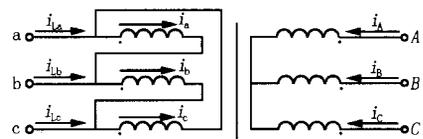


图4 Y/ 接线两绕组变压器

Fig. 4 Two-winding three-phase transformer with star-triple connection

由图 4 所示的 Y/ 接线的三相变压器, 根据电路原理可得到式(5)、(6)^[5], 如下:

$$\begin{cases} u_a = i_a r + L_a di_a/dt + d\psi_a/dt \\ u_b = i_b r + L_b di_b/dt + d\psi_b/dt \\ u_c = i_c r + L_c di_c/dt + d\psi_c/dt \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u_A = i_A R + L_A di_A/dt + d \psi_a/dt \\ u_B = i_B R + L_B di_B/dt + d \psi_b/dt \\ u_C = i_C R + L_C di_C/dt + d \psi_c/dt \end{cases} \quad (6)$$

式(5)、(6)中 u_a, u_b, u_c 为 侧绕组各相的电压; u_A, u_B, u_C 为 Y侧绕组各相的电压; i_a, i_b, i_c 为 侧绕组各相的电流; i_A, i_B, i_C 为 Y侧绕组各相的电流; L_a, L_b, L_c 为 侧绕组各相的漏感; L_A, L_B, L_C 为 Y侧绕组各相的漏感; r 为 侧绕组各相的电阻; R 为 Y侧绕组各相的电阻; ψ_a, ψ_b, ψ_c 为两侧绕组的互感磁链。由于 $L_a = L_b = L_c = L_1, L_A = L_B = L_C = L_2$, 又有 $i_{La} = i_a - i_c, i_{Lb} = i_b - i_a, i_{Lc} = i_c - i_b$ 所以将式(5)中的等式两两相减, 可得:

$$\begin{cases} u_a - u_c = i_{La} r + L_1 \frac{di_{La}}{dt} + \frac{d(\psi_a - \psi_c)}{dt} \\ u_b - u_a = i_{Lb} r + L_1 \frac{di_{Lb}}{dt} + \frac{d(\psi_b - \psi_a)}{dt} \\ u_c - u_b = i_{Lc} r + L_1 \frac{di_{Lc}}{dt} + \frac{d(\psi_c - \psi_b)}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

将式(6)中的等式两两相减, 可得:

$$\begin{cases} u_A - u_C = (i_A - i_C) R + L_2 \frac{d(i_A - i_C)}{dt} + \frac{d(\psi_a - \psi_c)}{dt} \\ u_B - u_A = (i_B - i_A) R + L_2 \frac{d(i_B - i_A)}{dt} + \frac{d(\psi_b - \psi_a)}{dt} \\ u_C - u_B = (i_C - i_B) R + L_2 \frac{d(i_C - i_B)}{dt} + \frac{d(\psi_c - \psi_b)}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

由(7) - (8)并归算到 Y侧, 可得:

$$\begin{cases} u_a - u_c - u_A + u_C = i_{La} r - (i_A - i_C) R + L_1 \frac{di_{La}}{dt} - L_2 \frac{d(i_A - i_C)}{dt} \\ u_b - u_a - u_B + u_A = i_{Lb} r - (i_B - i_A) R + L_1 \frac{di_{Lb}}{dt} - L_2 \frac{d(i_B - i_A)}{dt} \\ u_c - u_b - u_C + u_B = i_{Lc} r - (i_C - i_B) R + L_1 \frac{di_{Lc}}{dt} - L_2 \frac{d(i_C - i_B)}{dt} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中 $u_a, u_b, u_c, i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}, r, L_1$ 均为归算到 Y侧的值。若不满足式(9), 就表示变压器发生了内部故障。由于变压器制造厂家一般只提供变压器的短路电抗 x_k , 并不提供各侧绕组的漏感 L_1, L_2 , 可以利用关系式 $L_1 + L_2 = x_k/\sqrt{3}$, 将 $L_1 = x_k/\sqrt{3} - L_2$ 代入式(9), 可得:

$$\begin{cases} u_a - u_c - u_A + u_C = i_{La} r - (i_A - i_C) R + \frac{x_k di_{La}}{dt} - L_2 \frac{d(i_{La} + i_A - i_C)}{dt} \\ u_b - u_a - u_B + u_A = i_{Lb} r - (i_B - i_A) R + \frac{x_k di_{Lb}}{dt} - L_2 \frac{d(i_{Lb} + i_B - i_A)}{dt} \\ u_c - u_b - u_C + u_B = i_{Lc} r - (i_C - i_B) R + \frac{x_k di_{Lc}}{dt} - L_2 \frac{d(i_{Lc} + i_C - i_B)}{dt} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中 $i_{La} + i_A - i_C, i_{Lb} + i_B - i_A, i_{Lc} + i_C - i_B$ 分别为现有差动保护中的三个差动电流。在变压器正常运行时, 三个差动电流 $i_{La} + i_A - i_C, i_{Lb} + i_B - i_A, i_{Lc} + i_C - i_B$ 的值为不平衡电流, 所以值很小, 只有在变压器内部故障和励磁涌流时, 差动电流才增大。

4.3 三绕组变压器的动作方程

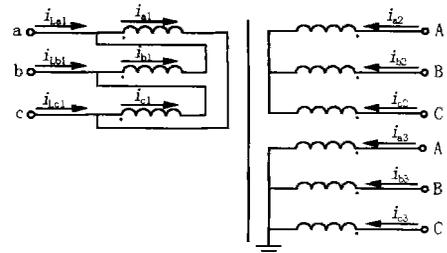


图5 Y/ 接线三绕组变压器

Fig. 5 Three-winding three-phase transformer with star-triple connection

如图5所示, 对单相绕组有:

$$\begin{cases} u_1 = i_1 r_1 + d \psi_1/dt \\ u_2 = i_2 r_2 + d \psi_2/dt \\ u_3 = i_3 r_3 + d \psi_3/dt \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \psi_1 = \psi_m + \psi_{1L} + \psi_{2L} + \psi_{3L} \\ \psi_2 = \psi_m + \psi_{2L} + \psi_{1L} + \psi_{3L} \\ \psi_3 = \psi_m + \psi_{3L} + \psi_{1L} + \psi_{2L} \end{cases} \quad (12)$$

式(11)、(12)中: r_1, r_2, r_3 为 1、2、3 侧绕组的电阻值; ψ_1, ψ_2, ψ_3 为穿过 1、2、3 侧绕组的总磁链; ψ_m 为穿过 1、2、3 侧绕组的公共磁链; $\psi_{1L}, \psi_{2L}, \psi_{3L}$ 分别为 1、2、3 侧绕组产生的除 ψ_m 以外的漏磁链; $\psi_{jL} (i = j)$ 为第 i 个绕组产生的除 ψ_m 以外的和第 j 个绕组交链的磁链。由式(11)、(12)可得 A、B、C 三三相的关系, 如式(13):

$$\begin{cases}
 u_{a1} = i_{a1} r_1 + L_{1a} \frac{di_{a1}}{dt} + m_{21a} \frac{di_{a2}}{dt} + m_{31a} \frac{di_{a3}}{dt} + \frac{d u_{ma}}{dt} \\
 u_{b1} = i_{b1} r_1 + L_{1b} \frac{di_{b1}}{dt} + m_{21b} \frac{di_{b2}}{dt} + m_{31b} \frac{di_{b3}}{dt} + \frac{d u_{mb}}{dt} \\
 u_{c1} = i_{c1} r_1 + L_{1c} \frac{di_{c1}}{dt} + m_{21c} \frac{di_{c2}}{dt} + m_{31c} \frac{di_{c3}}{dt} + \frac{d u_{mc}}{dt} \\
 u_{a2} = i_{a2} r_2 + L_{2a} \frac{di_{a2}}{dt} + m_{12a} \frac{di_{a1}}{dt} + m_{32a} \frac{di_{a3}}{dt} + \frac{d u_{ma}}{dt} \\
 u_{b2} = i_{b2} r_2 + L_{2b} \frac{di_{b2}}{dt} + m_{12b} \frac{di_{b1}}{dt} + m_{32b} \frac{di_{b3}}{dt} + \frac{d u_{mb}}{dt} \\
 u_{c2} = i_{c2} r_2 + L_{2c} \frac{di_{c2}}{dt} + m_{12c} \frac{di_{c1}}{dt} + m_{32c} \frac{di_{c3}}{dt} + \frac{d u_{mc}}{dt} \\
 u_{a3} = i_{a3} r_3 + L_{3a} \frac{di_{a3}}{dt} + m_{13a} \frac{di_{a1}}{dt} + m_{23a} \frac{di_{a2}}{dt} + \frac{d u_{ma}}{dt} \\
 u_{b3} = i_{b3} r_3 + L_{3b} \frac{di_{b3}}{dt} + m_{13b} \frac{di_{b1}}{dt} + m_{23b} \frac{di_{b2}}{dt} + \frac{d u_{mb}}{dt} \\
 u_{c3} = i_{c3} r_3 + L_{3c} \frac{di_{c3}}{dt} + m_{13c} \frac{di_{c1}}{dt} + m_{23c} \frac{di_{c2}}{dt} + \frac{d u_{mc}}{dt}
 \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中: L_{1a}, L_{1b}, L_{1c} 为对应 $1L$ 的电感; L_{2a}, L_{2b}, L_{2c} 为对应 $2L$ 的电感; L_{3a}, L_{3b}, L_{3c} 为对应 $3L$ 的电感; $m_{21a}, m_{21b}, m_{21c}$ 为对应 $21L$ 的电感; $m_{31a}, m_{31b}, m_{31c}$ 为对应 $31L$ 的电感; $m_{12a}, m_{12b}, m_{12c}$ 为对应 $12L$ 的电感; $m_{32a}, m_{32b}, m_{32c}$ 为对应 $32L$ 的电感; $m_{13a}, m_{13b}, m_{13c}$ 为对应 $13L$ 的电感; $m_{23a}, m_{23b}, m_{23c}$ 为对应 $23L$ 的电感。

设 $L_{1a} = L_{1b} = L_{1c} = L_1, L_{2a} = L_{2b} = L_{2c} = L_2, L_{3a} = L_{3b} = L_{3c} = L_3, m_{21a} = m_{21b} = m_{21c} = m_{21}, m_{31a} = m_{31b} = m_{31c} = m_{31}, m_{12a} = m_{12b} = m_{12c} = m_{12}, m_{32a} = m_{32b} = m_{32c} = m_{32}, m_{13a} = m_{13b} = m_{13c} = m_{13}, m_{23a} = m_{23b} = m_{23c} = m_{23}$, 又有 $m_{12} = m_{21}, m_{23} = m_{32}, m_{13} = m_{31}$ 。由图 5 可知 $i_{La1} = i_{a1} - i_{b1}, i_{Lb1} = i_{b1} - i_{c1}, i_{Lc1} = i_{c1} - i_{a1}$, 于是由式(13)变换, 并归算到变压器 1 侧可得式(14)。

$$\begin{cases}
 u_{b1} \cdot u_{a1} + u_{a2} \cdot u_{b2} = -i_{La1} r_1 \cdot (L_1 - m_{12}) \frac{di_{La1}}{dt} + (i_{a2} - i_{b2}) r_2 + (L_2 - m_{12}) \frac{d(i_{a2} - i_{b2})}{dt} + (m_{32} - m_{31}) \frac{d(i_{a3} - i_{b3})}{dt} \\
 u_{c1} \cdot u_{b1} + u_{b2} \cdot u_{c2} = -i_{Lb1} r_1 \cdot (L_1 - m_{12}) \frac{di_{Lb1}}{dt} + (i_{b2} - i_{c2}) r_2 + (L_2 - m_{12}) \frac{d(i_{b2} - i_{c2})}{dt} + (m_{32} - m_{31}) \frac{d(i_{b3} - i_{c3})}{dt} \\
 u_{a1} \cdot u_{c1} + u_{c2} \cdot u_{a2} = -i_{Lc1} r_1 \cdot (L_1 - m_{12}) \frac{di_{Lc1}}{dt} + (i_{c2} - i_{a2}) r_2 + (L_2 - m_{12}) \frac{d(i_{c2} - i_{a2})}{dt} + (m_{32} - m_{31}) \frac{d(i_{c3} - i_{a3})}{dt} \\
 u_{a2} \cdot u_{b2} + u_{b3} \cdot u_{a3} = (i_{a2} - i_{b2}) r_2 \cdot (L_2 - m_{23}) \frac{d(i_{a2} - i_{b2})}{dt} - (L_3 - m_{32}) \frac{d(i_{a3} - i_{b3})}{dt} - (i_{a3} - i_{b3}) r_3 + (m_{12} - m_{13}) \frac{di_{La1}}{dt} \\
 u_{b2} \cdot u_{c2} + u_{c3} \cdot u_{b3} = (i_{b2} - i_{c2}) r_2 \cdot (L_2 - m_{23}) \frac{d(i_{b2} - i_{c2})}{dt} - (L_3 - m_{32}) \frac{d(i_{b3} - i_{c3})}{dt} - (i_{b3} - i_{c3}) r_3 + (m_{12} - m_{13}) \frac{di_{Lb1}}{dt} \\
 u_{c2} \cdot u_{a2} + u_{a3} \cdot u_{c3} = (i_{c2} - i_{a2}) r_2 \cdot (L_2 - m_{23}) \frac{d(i_{c2} - i_{a2})}{dt} - (L_3 - m_{32}) \frac{d(i_{c3} - i_{a3})}{dt} - (i_{c3} - i_{a3}) r_3 + (m_{12} - m_{13}) \frac{di_{Lc1}}{dt}
 \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{又考虑到} \begin{cases}
 i_{La1} + i_{a2} - i_{b2} + i_{a3} - i_{b3} = i_{mab} \\
 i_{Lb1} + i_{b2} - i_{c2} + i_{b3} - i_{c3} = i_{mbc} \\
 i_{Lc1} + i_{c2} - i_{a2} + i_{c3} - i_{a3} = i_{mca}
 \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中 $i_{mab}, i_{mbc}, i_{mca}$ 为三相差动电流。将式(15)代入式(14), 整理得式(16):

$$\begin{cases}
 u_{b1} \cdot u_{a1} + u_{a2} \cdot u_{b2} = -i_{La1} r_1 \cdot (L_1 - m_{12} - m_{13} + m_{23}) \frac{di_{La1}}{dt} + (i_{a2} - i_{b2}) r_2 + (L_2 - m_{12} - m_{23} + m_{13}) \frac{d(i_{a2} - i_{b2})}{dt} + (m_{23} - m_{13}) \frac{di_{mab}}{dt} \\
 u_{c1} \cdot u_{b1} + u_{b2} \cdot u_{c2} = -i_{Lb1} r_1 \cdot (L_1 - m_{12} - m_{13} + m_{23}) \frac{di_{Lb1}}{dt} + (i_{b2} - i_{c2}) r_2 + (L_2 - m_{12} - m_{23} + m_{13}) \frac{d(i_{b2} - i_{c2})}{dt} + (m_{23} - m_{13}) \frac{di_{mbc}}{dt} \\
 u_{a1} \cdot u_{c1} + u_{c2} \cdot u_{a2} = -i_{Lc1} r_1 \cdot (L_1 - m_{12} - m_{13} + m_{23}) \frac{di_{Lc1}}{dt} + (i_{c2} - i_{a2}) r_2 + (L_2 - m_{12} - m_{23} + m_{13}) \frac{d(i_{c2} - i_{a2})}{dt} + (m_{23} - m_{13}) \frac{di_{mca}}{dt} \\
 u_{a2} \cdot u_{b2} + u_{b3} \cdot u_{a3} = (i_{a2} - i_{b2}) r_2 + (L_2 - m_{12} - m_{23} + m_{13}) \frac{d(i_{a2} - i_{b2})}{dt} - (L_3 + m_{12} - m_{13} - m_{23}) \frac{d(i_{a3} - i_{b3})}{dt} - (i_{a3} - i_{b3}) r_3 + (m_{12} - m_{13}) \frac{di_{mab}}{dt} \\
 u_{b2} \cdot u_{c2} + u_{c3} \cdot u_{b3} = (i_{b2} - i_{c2}) r_2 + (L_2 - m_{12} - m_{23} + m_{13}) \frac{d(i_{b2} - i_{c2})}{dt} - (L_3 + m_{12} - m_{13} - m_{23}) \frac{d(i_{b3} - i_{c3})}{dt} - (i_{b3} - i_{c3}) r_3 + (m_{12} - m_{13}) \frac{di_{mbc}}{dt} \\
 u_{c2} \cdot u_{a2} + u_{a3} \cdot u_{c3} = (i_{c2} - i_{a2}) r_2 + (L_2 - m_{12} - m_{23} + m_{13}) \frac{d(i_{c2} - i_{a2})}{dt} - (L_3 + m_{12} - m_{13} - m_{23}) \frac{d(i_{c3} - i_{a3})}{dt} - (i_{c3} - i_{a3}) r_3 + (m_{12} - m_{13}) \frac{di_{mca}}{dt}
 \end{cases} \quad (16)$$

因为变压器厂家提供的变压器各侧的电抗(归算到第1侧)为:

$$\begin{cases} x_1 = (L_1 - m_{12} - m_{13} + m_{23}) \\ x_2 = (L_2 - m_{12} - m_{23} + m_{13}) \\ x_3 = (L_3 - m_{13} - m_{23} + m_{12}) \end{cases} \quad (17)$$

所以,利用式(17)的关系可将式(16)化简为式(18)。

$$\begin{cases} u_{b1} - u_{a1} + u_{a2} - u_{b2} = -i_{La1} r_1 - \frac{x_1 di_{a1}}{dt} + (i_{a2} - i_{b2}) r_2 + \frac{x_2 d(i_{a2} - i_{b2})}{dt} + (m_{23} - m_{13}) \frac{di_{mab}}{dt} \\ u_{c1} - u_{b1} + u_{b2} - u_{c2} = -i_{Lb1} r_1 - \frac{x_1 di_{b1}}{dt} + (i_{b2} - i_{c2}) r_2 + \frac{x_2 d(i_{b2} - i_{c2})}{dt} + (m_{23} - m_{13}) \frac{di_{mbc}}{dt} \\ u_{a1} - u_{c1} + u_{c2} - u_{a2} = -i_{Lc1} r_1 - \frac{x_1 di_{c1}}{dt} + (i_{c2} - i_{a2}) r_2 + \frac{x_2 d(i_{c2} - i_{a2})}{dt} + (m_{23} - m_{13}) \frac{di_{mca}}{dt} \\ u_{a2} - u_{b2} + u_{b3} - u_{a3} = (i_{a2} - i_{b2}) r_2 + \frac{x_2 d(i_{a2} - i_{b2})}{dt} - \frac{x_3 d(i_{a3} - i_{b3})}{dt} - (i_{a3} - i_{b3}) r_3 + (m_{12} - m_{13}) \frac{di_{mab}}{dt} \\ u_{b2} - u_{c2} + u_{c3} - u_{b3} = (i_{b2} - i_{c2}) r_2 + \frac{x_2 d(i_{b2} - i_{c2})}{dt} - \frac{x_3 d(i_{b3} - i_{c3})}{dt} - (i_{b3} - i_{c3}) r_3 + (m_{12} - m_{13}) \frac{di_{mbc}}{dt} \\ u_{c2} - u_{a2} + u_{a3} - u_{c3} = (i_{c2} - i_{a2}) r_2 + \frac{x_2 d(i_{c2} - i_{a2})}{dt} - \frac{x_3 d(i_{c3} - i_{a3})}{dt} - (i_{c3} - i_{a3}) r_3 + (m_{12} - m_{13}) \frac{di_{mca}}{dt} \end{cases} \quad (18)$$

变压器在正常运行、外部故障、励磁涌流时式(18)成立。其中 $i_{mab}, i_{mbc}, i_{mca}$ 为三相差动电流, x_1, x_2, x_3 可由厂家提供,因此可以计算出 $(m_{23} - m_{13})$ 和 $(m_{12} - m_{13})$,且三相计算的结果基本相同。

4.4 保护判据

因为推导出的式(10)和式(18)只有在变压器发生内部故障时才不成立,所以可得到如下保护判据来判定变压器发生了内部故障:

(1) 两绕组变压器的保护判据:当差动电流大于门坎值时,用式(10)中的3个方程计算出的 L_2 之间有较大的差别;

(2) 三绕组变压器的保护判据:当差动电流大于门坎值时,用式(18)中的前三个方程计算出的三个 $(m_{23} - m_{13})$ 有较大的差别,或用后三个方程计算出的三个 $(m_{12} - m_{13})$ 有较大的差别。

5 保护方案的实现

应用此方案编制保护应用程序,对仿真数据进行试验,保护应用程序框图如图6所示。

说明以下几点:

(1) 保护启动元件采用三相差动电流的突变量元件。

(2) 为防止在变压器的外部导线上发生三相短路时,由于三相中计算出的 L_2 或 $(m_{23} - m_{13})$ 和 $(m_{12} - m_{13})$ 差别不大,而使保护拒动,加入了常规的差动电流速断保护。

(3) 该保护中只需知道变压器的短路电抗,并不

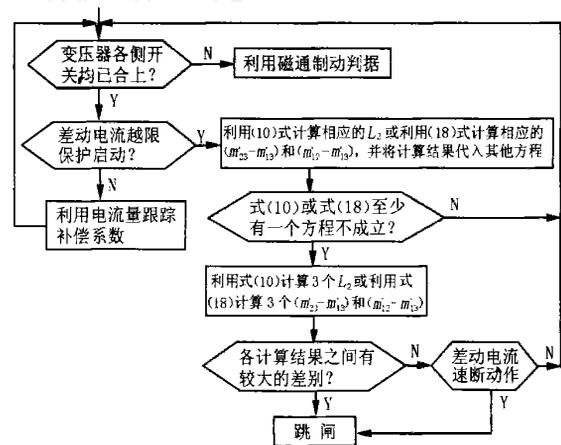


图6 改进型变压器保护框图

Fig. 6 Flow - chart of the improved transformer protection

要求知道各侧的漏抗。

根据上面的程序框图,利用动态模拟得到的变压器各种运行状态的数据进行仿真试验。试验结果表明,在取消了二次谐波制动原理和间断角闭锁原理的情况下,本保护方案能够可靠地区分内部故障和励磁涌流,并具有数据采集方便、计算量小、动作速度快(可在20ms内切除故障)等优点。

6 结论

该变压器保护方案是利用变压器本身正常运行时的模型来构成动作方程,由于只有在变压器内部发生故障时,本方程才被破坏,所以此方案可以取消二次谐波制动和间断角闭锁,适合用微机来实现,实现原理简单,避开了变压器难以得到的内部参数,具有数据采集

方便,计算量小,动作迅速等特点。基于此方案的变压器保护装置正在研制过程中,相信基于该原理的保护装置的使用将会大大提高变压器保护的运行性能,具体保护装置的实现过程将在后续的文章中继续讨论。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第2版)[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 唐跃中,刘勇,陈德树,等. 几种变压器励磁涌流判别方法的特点及其内在联系的分析[J]. 电力系统自动化,1995,19(9):53-59.
- [3] 王维俭译. 变压器保护新技术:考虑励磁特性的保护新技术[J]. (日)电气计算,49(5).
- [4] Phadke A G, Triop J S. A New Computer-based Flux Re-

strained Current Differential Relay for Power Transformer Protection[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1983, 102(11): 3624-3629.

- [5] 王增平. 大型发电机-变压器组保护的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,1997.

收稿日期: 2002-11-05; 修回日期: 2003-02-25

作者简介:

徐岩(1976-),男,博士研究生,主要研究领域为电力系统继电保护;

王增平(1964-),男,教授,主要从事电力系统继电保护和变电站综合自动化方面的教学和科研工作;

杨奇逊(1937-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统自动化、继电保护等方面的教学和科研工作。

Study on the improved transformer protection method based on magnetic flux characteristics

XU Yan, WANG Zengping, YANG Qixun, ZHAO Dongming
(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: This paper presents the basic principle of the improved transformer protection method based on the transformer model. Its operation equations of two-winding and three-winding transformers are derived from this principle. According to the equations, the improved transformer protection method is presented. The method does not need the second harmonic principle, dead angle restraint principle and the internal parameters got difficultly. The advantages of the method are convenient data acquisition, quick calculation and operation, etc. The results of testing confirmed that the method is able to clear the internal fault reliably and quickly.

Key words: transformer protection; magnetic flux characteristics; magnetizing inrush

继往开来 再攀高峰

——《继电器》将从2004年起
由月刊改为半月刊

《继电器》遵循“关注学科发展,理论联系实际,面向应用,为科研、生产一线服务”的宗旨,为广大业内人士提供了一个活跃的学术交流园地。

《继电器》从1973年创刊以来,已取得了一系列令人瞩目的成就:多次被列为全国中文核心期刊、中国科技论文统计源期刊,荣获“中国期刊方阵”双效期刊奖,并于2002年被国际著名检索机构 英国科学文摘(SA)和俄罗斯文摘杂志(AJ)收录,同时被国内知名的期刊网站中国期刊网、万方数据库等收录,在业界产生了很大的影响。

为了更及时、有效地反映学科发展,紧跟时代步伐,服务于科研、生产一线,进一步拓展国内外的交流与合作,《继电器》将从2004年起由月刊改为半月刊。

欢迎大家积极投稿、订阅、刊登广告,一如继往地支持《继电器》!