

# 变压器的计算机保护

华北电力学院 苏沛浦

## 一、概述

近十几年来,国外有关计算机保护的研究已发表了大量文献资料,提出了各种微机保护可行的算法和实施方案,特别是集中在线路保护方面,已有不少装置投入现场试运行。还有距离探测装置及频率、反时限过电流等单个微机继电器已开始投入批量生产。国内近几年来在线路保护方面也有不少大学和研究部门在进行研究,取得了不少成果,已有一套超高压线路的微型机距离保护装置投入试运。但就变压器的计算机保护来看,国内外研究得不太多,我们共收集到十几篇文献,其中大多数是探讨差动保护特别是鉴别涌流和内部故障的二次谐波制动原理的计算机算法。国内有一篇论文〔1〕—“大型变压器的计算机保护”对整个变压器的保护(包括差动、低压过流、过负荷及电流二次回路断线闭锁等)提出了一套较完整的方案。这些文献中大多提出了他们所研究的算法或方案在实验室、计算机上试验的结果,以此作为可行性的依据。我们还没有看到一套完整的现场实施保护方案。

## 二、差动保护的算法和评价

计算机差动保护和常规模拟式保护一样,一般包括两个主要部分:一是鉴别外部故障和非外部故障;二是鉴别变压器励磁涌流和内部故障。下面分别介绍这两部分的基本原理和算法。

### (一) 鉴别励磁涌流的算法

目前提出的鉴别涌流的各种方法大致可归为三大类:(1)基于二次谐波制动原理的各种算法。研究也集中于这一类。(2)波形识别方法,即利用监视差动电流相继峰值之间的时间来判别涌流的算法。(3)利用测量变压器的饱和程度来区别涌流和内部故障的算法。下面重点介绍第一类。

#### 1. 基于二次谐波制动原理的各种算法

这类算法的理论依据是:励磁涌流中含有大量的二次谐波分量,而内部故障差电流中则含量很少或没有。因而可用数字滤波的方法从差流中抽取出基波和二次谐波分量,根据这两个分量的大小或比值来区别涌流和内部故障。抽取这两种分量的滤波器算法很多,现就发表的主要几种分述如下:

##### (1) 递归式带通滤波器〔2〕

采用的是递归式二阶带通滤波器,其通用公式为:

$$Y_n = h_0 x_n + h_1 x_{n-1} + g_1 y_{n-1} + g_2 y_{n-2}$$

根据设计需要的调谐锐度和暂态特性,在某一定采样频率和基波、二次谐波回路的时间常数下,可以得出一特定的基波和二次谐波滤波公式。〔2〕文献中设计的具体参数如下:

$$\text{基波 } Y_{1n} = 0.096x_n - 0.096x_{n-1} + 1.81y_{n-1} - 0.905y_{n-2} \quad \dots\dots (1)$$

$$\text{二次谐波 } Y_{2n} = 0.045x_n - 0.045x_{n-1} + 1.58y_{n-1} - 0.953y_{n-2} \quad \dots\dots (2)$$

由上两式算出的是一系列离散值,然后经数字整流、低通滤波将其变为平均值,再将基波、二次谐波平均值进行比较后决定是否输出跳闸信号。文献中的滤波公式并未经过精心地选择设计,不是最佳方案。

### (2) 全零滤波器算法〔1〕

这种算法是利用Z平面设计滤波器的原理在—特定Z平面,|Z|=1的圆周上除 $\omega = \omega_m$ (需抽取的频率)处的其他频率位置上(直流和经模拟滤波后存留的所有整数倍频率)均设置零点,这样就可滤掉所有不需要的分量而保留需要的。这种滤波器的转移函数为各零点转移函数之积,可表示为:

$$H(Z) = A(1 - Z^{-2}) \cdot \prod_{\substack{K=1 \\ K \neq M}}^{N/2-1} (1 - 2 \cos \omega_K \Delta t Z^{-1} + Z^{-2}) \dots\dots (3)$$

式中 $\omega_K$ —K次谐波角频率

$\Delta t$ —信号的采样间隔时间( $\Delta t = T/N$ )

N—每周采样数

根据采样定理,如设 $N = 12$ ,则其前置模拟滤波器应能滤除六次及以上的谐波,五次谐波也应大大地被削弱,另外还考虑到涌流和故障电流中五次谐波相对也较小,因此为了简化计算可在基波滤波器中省去五次谐波处的零点,在二次谐波滤波器中省去六次谐波处的零点,这样经简化后两滤波器的转移函数可写为:

$$H_1(Z) = A_1(1 + Z^{-2} - Z^{-6} - Z^{-8}) \quad \dots\dots (4)$$

$$H_2(Z) = A_2(1 - Z^{-3} + Z^{-6} - Z^{-9}) \quad \dots\dots (5)$$

则相应的滤波计算式为:

$$Y_1 = A_1(X_n + X_{n-2} - X_{n-6} - X_{n-8}) \quad \dots\dots (6)$$

$$Y_2 = A_2(X_n - X_{n-3} + X_{n-6} - X_{n-9}) \quad \dots\dots (7)$$

式中的 $A_1, A_2$ 可并入幅值计算中处理以避免乘法。A的值可通过滤波器的幅频响应

$$|H(\omega)| = A \left| 2 \sin \omega \Delta t \cdot \prod_{\substack{K=1 \\ K \neq m}}^{N/2-1} (2 |\cos \omega \Delta t - \cos \omega_K \Delta t|) \right) \dots\dots (8)$$

分别令 $|H_1(1)| = 1, |H_2(2)| = 1$ 求出

$$A_1 = \frac{1}{2\sqrt{3}}, A_2 = \frac{1}{4}$$

然后利用矩形积分公式和递推算法对滤波后的信号分别算出其基波和二次谐波的幅值,即可进行涌流的判别。当 $\xi = I_{M2}/I_{M1} > 0.2$ 时定为涌流情况,反之判为内部故障,

保护跳闸。

另外还考虑了一附加涌流判据。根据涌流产生的两个条件（空投变压器；外部故障切除后变压器端电压恢复）利用励磁电流和电压的变化采用两个不等式来进一步鉴别涌流。即：

$$I_{M(n-N)} \leq I_{m_0} \quad \dots\dots (9)$$

$$U_{m(n)} \geq KU_{m(n-N)} \quad \dots\dots (10)$$

式中  $I_{m(n-N)}$ ， $U_{m(n-N)}$  分别为一周前的电流、电压幅值。 $I_{m_0}$  为空载励磁电流。

当以上两条件均不满足时肯定不是涌流，则不进行以上滤波计算而直接至故障跳闸，这样可大大提高保护的動作速度。

### (3) 有限脉冲响应滤波器[3]，[4]

这种滤波器实质上是采用奇、偶方波互相关的算法来抽取信号中的基波和二次谐波的，但它不用通常的幅值计算方法，避免了费时的两位组数的绝对值运算，此算法主要是求以下四个滤波系数：

$$S_1(K) = \sum_{m=K-N+1}^{K-N/2} [i_m - i_{m+N/2}] \quad \dots\dots (11)$$

$$C_1(K) = \sum_{m=K-N+1}^{K-3N/4} [i_m - (i_{m+N/4} + i_{m+N/2}) + i_{m+3N/4}] \quad \dots\dots (12)$$

$$S_2(K) = \sum_{m=K-N+1}^{K-3N/4} [i_m - i_{m+N/4} + i_{m+N/2} - i_{m+3N/4}] \quad \dots\dots (13)$$

$$C_2(K) = \sum_{m=K-N+1}^{K-7N/8} [i_m - (i_{m+N/8} + i_{m+N/4}) + i_{m+3N/8}] \quad \dots\dots (14)$$

以上各式计算的是第K次采样周期滤波器的输出。前两式使基波输出最大，直流及偶次谐波被滤除。后两式使二次谐波输出最大，而消除直流及奇次谐波。

然后找出较大的  $|S|$ ， $|C|$ ；并令  $F_1 = \text{Max}(|S_1|, |C_1|)$ ， $F_2 = \text{Max}(|S_2|, |C_2|)$ 。

采用的涌流判据为

$$\xi = F_2/F_1 > \xi_0 \quad \text{时给出涌流指示输出}$$

反之给出故障输出。

$\xi$  的值随系统 X/R 而变，文献 [3] 证明当 X/R = 5，内部故障时其值处于 0 ~ 0.146 之间，涌流时为 0.334 ~ 0.586。当 X/R 大于 10，则内部故障时  $\xi$  小于 0.093。考虑到多数超高压系统 X/R 大于 10，故可取  $\xi_0 = 0.125$ 。

### (4) 互相关算法 [5]

这种算法是利用正、余弦或奇、偶方波函数与有下列形式的差电流进行相关运算来抽取基波和二次谐波。差流形式为：

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^N I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad \dots\dots (15)$$

两个函数  $x(t)$ ， $y(t)$  作相关计算的一般公式为：

$$\phi_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad \dots\dots (16)$$

因此按(16)式将*i*(*t*)与正、余弦函数相关即可求出在τ = 0时的互相关函数为:

$$\phi_{iis}(0) = \frac{1}{2} I \cos \theta_n \quad \dots\dots (17)$$

$$\phi'_{iis}(0) = -\frac{1}{2} I_m \sin \theta_n \quad \dots\dots (18)$$

$$\text{因此有 } I_{m(n)} = \sqrt{(\phi_{iis}(0))^2 + (\phi'_{iis}(0))^2} \quad \dots\dots (19)$$

用于计算机上采用离散形式,利用矩形积分公式并令τ = 0则滤波公式为:

$$\phi_{iis(0)} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_{k-1} \sin \frac{2n\pi}{N} (k-1) \quad \dots\dots (20)$$

$$\phi'_{iis(0)} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_{k-1} \cos \frac{2n\pi}{N} (k-1) \quad \dots\dots (21)$$

式中n = 1, 2, 即可求出基波和二次谐波的值(滤波)

当采用奇、偶方波相关时只需将(20), (21)式中的sin, cos, 改为sal, cal即可,而再在(19)式右侧乘 $\frac{\pi}{2}$ 即可求出幅值。

奇、偶方波相关算法不用乘法故计算量小,但精度较差,响应较慢。

#### (5) 全波富氏分析算法〔6〕

算法和第(4)种相似。求取基波和二次谐波幅值A<sub>K</sub>, 首先求系数a<sub>K</sub>, b<sub>K</sub>, 也可通过将输入信号*f*(*x*)乘相应的正、余弦函数后求积分得出。用离散形式表示为:

$$a_K = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(nt) \cos(knt) \quad \dots\dots (22)$$

$$b_K = -\frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(nt) \sin(knt) \quad \dots\dots (23)$$

$$A_n = (a_n^2 + b_n^2)^{\frac{1}{2}} \quad (n = 1, 2) \quad \dots\dots (24)$$

涌流判据取决于  $P = \frac{A_2}{A_1}$

文中还对输入信号中按指数衰减的非周期分量和分次谐波给此算法带来的计算误差进行了研究,结果证明只要再加一个采样间隔(一周采样后)就可使这种误差减至允许的程度。因而这种影响只是使动作时间稍有加长而仍能正确动作。

#### (6) 正交变换算法〔7〕

这种算法是利用正交变换技术,将正、余弦函数的富氏系数通过正交变换系数表示出来。而后者可只用加、减法运算采样系数数据得到,因而加快了计算速度。

计算正交系数的公式如下:

$$S_K = S(\omega_K) = \sum_{j=0}^{n-1} X(t_j) \operatorname{sgn} \sin\left(\frac{2\pi jk}{N}\right) \quad \dots\dots (25)$$

$$C_K = C(\omega_K) = \sum_{j=0}^{n-1} X(t_j) \operatorname{sgn} \cos\left(\frac{2\pi jk}{N}\right) \quad \dots\dots (25')$$

式中  $\omega_K = 2\pi K/T$ ,  $K$  为谐波次数。(  $K = 1, 2, 5$  )

根据以上公式相应的正、余弦富氏系数可表示为:

$$\hat{S}_1 = S_1 - \frac{1}{3} S_3 - \frac{1}{5} S_5 \quad \dots\dots (26)$$

$$\hat{C}_1 = C_1 + \frac{1}{3} C_3 - \frac{1}{5} C_5 \quad \dots\dots (27)$$

$$\hat{S}_2 = S_2 \quad \dots\dots (28)$$

$$\hat{C}_2 = C_2 \quad \dots\dots (29)$$

$$\hat{S}_5 = S_5 \quad \dots\dots (30)$$

$$\hat{C}_5 = C_5 \quad \dots\dots (31)$$

(26~29) 式作为判别涌流用, (30~31) 式可作为变压器过励磁的判据用。根据以上六式则基波、二次、五次谐波分量的幅值可由下式得出:

$$I_n = \frac{2}{N} \left[ \hat{S}_n^2 + \hat{C}_n^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (n = 1, 2, 5) \quad \dots\dots (32)$$

以上幅值计算中的平方、平方根计算作者采用文献 [13] 中提出的简单技术以减小计算时间。

#### (7) 最小平方曲线拟合算法 [8]

这是将采样数据和一个予设的含有非周期分量、加某些谐波分量的曲线进行最小平方(最小二乘方)拟合的算法。预设曲线的表达式为:

$$i(t) = P_0 e^{-\lambda t} + \sum_{K=1}^{\pi} P_K \sin(k\omega_0 t + \theta_K) \quad \dots\dots (33)$$

式中  $P_0 \sim P_K$ ,  $\theta_1 \sim \theta_K$  和  $\lambda$  均为未知数, 因此非周期分量的时间常数亦为未知数, 但它们可通过足够多的含有这些未知数的某些联立方程来求得, 如按一定的时间间隔对输入差电流采样并代入 (33) 式就得出所要求的一系列方程式。假定差流中不包含高于五次谐波的分量并用两项台劳展开式代替 (33) 式右侧的第一项, 则 (33) 式可写为:

$$i(t) = P_0 - P_0 \lambda t + \sum_{K=1}^5 P_K \sin(k\omega_0 t) \cos\theta_K + \sum_{K=1}^5 P_K \sin\theta_K \cos(k\omega_0 t) \quad \dots\dots (34)$$

这样经不同时刻的采样值即可得到由未知数  $P_0$ ,  $P_0 \lambda$ ,  $P_K \cos\theta_K$ , 和  $P_K \sin\theta_K$  ( $k = 1 \sim 5$ ) 组成的线性方程组:

$$\begin{vmatrix}
 1 & t_1 & \sin \omega_0 t_1 & \cos \omega_0 t_1 & \cdots & \sin 5 \omega_0 t_1 & \cos 5 \omega_0 t_1 \\
 1 & t_2 & \sin \omega_0 t_2 & \cos \omega_0 t_2 & \cdots & \sin 5 \omega_0 t_2 & \cos 5 \omega_0 t_2 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 1 & t_N & \sin \omega_0 t_N & \cos \omega_0 t_N & \cdots & \sin 5 \omega_0 t_N & \cos \omega_0 t_N
 \end{vmatrix}
 \begin{vmatrix}
 P_0 \\
 -P_0 \lambda \\
 P_1 \cos \theta_1 \\
 P_1 \sin \theta_1 \\
 \vdots \\
 P_5 \sin \theta_5
 \end{vmatrix}
 =
 \begin{vmatrix}
 i(t_1) \\
 i(t_2) \\
 \vdots \\
 i(t_N)
 \end{vmatrix}
 \quad \cdots \cdots (35)$$

以上矩阵方程式中因未知数有 12 个参变量，故解此方程组至少要 12 个采样，一般取  $N > 12$ ，则矩阵方程可写为：

$$[A]_{N \times 12} \cdot X_{12 \times 1} = i_{N \times 1} \quad \cdots \cdots (36)$$

$$\text{则 } X_{12 \times 1} = [B]_{12 \times N} \cdot i_{N \times 1} \quad \cdots \cdots (37)$$

当  $N > 12$  时则  $[B] = [A^T \cdot A]^{-1} \cdot A^T = A^{LM}$  称为左伪逆矩阵。矩阵  $[B]$  的参数可预先离线计算出来。又因这里只抽取基波和二次谐波，故实时计算时不必将 12 个未知数全部解出，而只需求  $[A]^{LM}$  的第 3, 4, 5, 6 行乘  $[I]$ ，即求

$$P \cos_1 = P_1 \cos \theta_1(t_N) = \sum_{n=1}^N b^{(3,n)} i(t_N) \quad \cdots \cdots (38)$$

$$P \sin_1 = P_1 \sin \theta_1(t_N) = \sum_{n=1}^N b^{(4,n)} i(t_N) \quad \cdots \cdots (39)$$

$$P \cos_2 = P_2 \cos \theta_2(t_N) = \sum_{n=1}^N b^{(5,n)} i(t_N) \quad \cdots \cdots (40)$$

$$P \sin_2 = P_2 \sin \theta_2(t_N) = \sum_{n=1}^N b^{(6,n)} i(t_N) \quad \cdots \cdots (41)$$

因此基波和二次谐波的幅值  $P_1$  和  $P_2$  用下式即可算出：

$$P_i = (P_i^2 \cos^2 \theta_i + P_i^2 \sin^2 \theta_i)^{\frac{1}{2}}, \quad i = 1, 2$$

为了确定上面四个数字滤波器，要计算出  $[B]$  矩阵，而这又首先要形成  $[A]$  矩阵， $[A]$  的设计和选择可有各种不同的输入数据模型和各种窗口尺寸，但有几点是需要共同注意的：

- ① 复杂模型加长窗口可以提高精度，但计算量加大，时延加长，因此要权衡比较。
- ② 采样频率的选择对算法影响很大，原则应使噪声放大系数最小，一般在 600~800 Hz 为宜。

③时间参考点的选择很重要,一般选在窗口中间,以使 $[A]^{LM}$ 内的元素具有对称性,可节省乘法运算次数。

④数据窗的大小一般宜大于求解未知数的个数。

这里附带说明一下,采用以上伪逆来求解的方法和直接采用最小平方曲线拟合技术是等效的。

#### (8) 加权最小平方滤波器 [9]

这种算法基本同第 [7] 种算法,但为提高滤波实际效果它采用了一个权矩阵系数修正原给定的典型故障电流的数学模型(设计与实际的总有差别)。根据最小平方意义可将 $[X(t)] = [A] \cdot [Y]$ 改为:

$$[Q][A][Y] = [Q][X(t)] \quad \dots\dots(42)$$

设 $[A]$ 的秩为 $P$ , $[Q]^T$ , $Q$ 是对称和整定的,则上式的最小平方解可以从加权的归一化方程中来确定,即:

$$[A]^T [Q]^T [Q] [A] [Y] = [A]^T [Q]^T [Q] [X(t)] \quad \dots\dots(43)$$

或  $[Y] = [W] [X(t)] \quad \dots\dots(44)$

$$[W] \text{ 为归一化权矩阵} = \{ [A]^T [Q]^T [Q] [A] \}^{-1} [A]^T [Q]^T [Q]$$

这里关键是要预先求出 $[Q]$ ,而所选择的 $[Q]$ 原则上要使均方根误差(RMSE)为最小。RMSE的表达式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{[X_m(t) - X(t)]^T Q [X_m(t) - X(t)]}{N}} \quad \dots\dots(45)$$

式中的 $[X_m(t) - X(t)] = e$ 为误差向量,是根据实际测量的瞬时采样和给定模型瞬时电流之差来确定的。 $[X_m(t) - X(t)]^T Q [X_m(t) - X(t)]$ 为加权最小平方误差向量。 $N$ 为采样数。

要通过计算RMSE找出使其最小的 $[Q]$ 值,必须对各种不同的故障电流和涌流研究得出的数据计算比较才能确定,这往往是很复杂的。实际实用上一般可取 $[Q]$ 为对角线矩阵基本上能满足典型变压器的要求。

这种算法予先离线地用最符合实际的 $[Q]$ 对给定模型加以修正,显然能提高精度,但费事。

#### (9) 递归离散富氏变换(DFT)滤波 [10]

采用的滤波公式为:

$$F_n^{(r+1)} = F_n^{(r)} + \frac{1}{N} [f_{r+N} - f_r] e^{-j \frac{2\pi n r}{N}} \quad \dots\dots(46)$$

式中 $F$ —被采样函数 $f$ 的幅值, $N$ —采样数, $n$ —谐波次数, $r$ —采样时刻。

$F_n^{(r)}$ —第 $n$ 次谐波以第 $r$ 个采样开始的输出幅值响应。

将上式的指数用正、余弦函数代替,令 $N=12, n=1, 2, 5$ ,则各项的系数只含有 $0, \pm 1, \pm \frac{1}{2}, \pm \frac{\sqrt{3}}{2}$ 。再通过适当的变换(乘 $0, \pm \frac{1}{2}$ 或 $\pm 1$ )即可使各分量实部、虚部的各项系数只含有 $0, \pm 1, \pm \frac{1}{2}$ ,这样就避免了以后的乘法运算(幅值计算)。

再利用以下五个闭锁条件作为涌流或故障的判据。保护用于三卷变上,单线圈及极性标示见图1所示。闭锁条件的五个不等式如下:

$$\textcircled{1} \quad |\bar{I}_{TRP}| < 120 \quad \dots\dots (47)$$

$$\textcircled{2} \quad |\bar{I}_{TRP}| < 0.133 |I_{RST1}| \quad \dots\dots (48)$$

$$\textcircled{3} \quad |\bar{I}_{TRP}| < 0.133 |I_{RST2}| \quad \dots\dots (49)$$

$$\textcircled{4} \quad I_{R2} > 0.3 |\bar{I}_{TRP}| \quad \dots\dots (50)$$

$$\textcircled{5} \quad I_{R5} > 0.2 |\bar{I}_{TRP}| \quad \dots\dots (51)$$

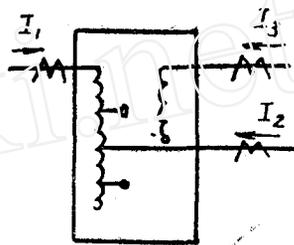


图1

式中 $I_{TRP} = I_1 + I_2 + I_3$ ;  $I_{RST1} = I_1 - I_2 - I_3$ ;  
 $I_{RST2} = -I_1 + I_2 - I_3$ ;  $I_{R2}$ —三相二次谐波分量之和(涌流闭锁用)。

$I_{R5}$ —三相五次谐波分量之和(作过励磁闭锁用)。

前三式比较的是基波分量,构成比率差动以判别内、外部故障。采用第二个制动量是为了保证变压器一次绕组断开时保护工作可靠。

上面五个不等式只要有一个成立,保护即被闭锁,都不成立时才判为内部故障。式中的门槛值为实验时采用的值。

下面就以上九种算法,根据一般判别保护性能的几项技术指标作一粗略的比较和评价:

① 响应速度。递归带通滤波器响应最慢,包括考虑波器暂态特性而外加延时20ms,整个响应最快也需73ms。最小平方曲线拟合算法也较慢需2周。有限脉冲响应算法需1.25~1.5周。其余的几种都在1个周波左右,如不考虑非周期分量的影响,互相关算法一类的滤波器可以小于3/4周,正交变换法可达 $\frac{1}{2} \sim \frac{3}{4}$ 周,全零滤波器在有附加涌流判据时速度可小于 $\frac{1}{6}$ 周,最快。

② 计算精度、第一种最差,最小平方曲线拟合算法类(第7,8种)较高,其他几种受非周期分量影响较大。

③ 计算时间。最小平方曲线拟合类算法最长,其他的差不多。

因此根据以上几项技术指标的比较可看出各种算法除第一种外各有短、长。但归结起来各种滤波器的优劣取决于共同的一些因素(采样率、数据窗的合理选择,运算的技巧等)外,很重要的一点是取决于选择假定的故障电流模型的准确性(不论是递归滤

波器系数的确定,相关法、最小平方曲线拟合算法中滤波系数和矩阵方程中未知数的确定等都和此有关),就这一意义上来看以上九种滤波器可分为两大类:一类是在故障模型中考虑了一定的非周期分量的影响(第1,7,8种),一类没有(其他各种)。因而前者在有非周期分量情况下精度也较高,而后者就较差。前者响应速度慢,而后者较快(不考虑非周期分量)。前者事先的离线计算较复杂费时,运算时间也较长。

总之以上各种算法都能正确地判别涌流,各有长短,都可以进一步研究以获得更好的性能。理论和实验也证明利用二次谐波制动原理的计算机差动保护是比较可靠的,但由于励磁涌流的情况很复杂,二次谐波的含量和很多因素有关,往往使保护很难合理整定,特别是变压器大型化后,涌流中二次谐波的含量下降,更影响到这种原理的可靠性。

## 2、识别波形的的方法 [11]

这是一种用监视差电流相继峰值之间的时间来识别励磁涌流的算法。它是根据三种不同的典型差电流波形来判断的。当故障下电流互感器饱和时波形如图2—a所示,相继电流峰值间隔约为3ms(60Hz系统的 $\frac{1}{2}$ 周)左右,而励磁电流两个峰值相隔近16ms(图2—b所示非周期性涌流)和4ms(图2—c所示周期性涌流)。因此认为两个峰值相隔若为7.5~10ms且满足一个峰值应是前一峰值的75%~125%、符号相反则判为真正的故障。

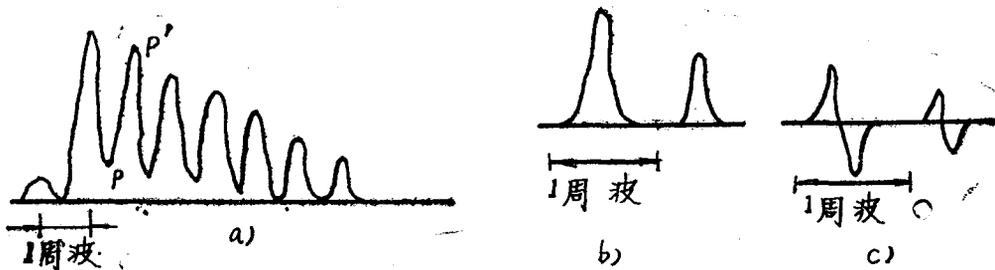


图2 差动电流波形

以上方法只是在一篇较早的文献中提到的,介绍很简单,以后没看到别的文章继续探讨,究其原因恐怕是由于大量的理论分析和实验证明涌流的波形很复杂,特别是C.T饱和后,波形畸变利害并可能出现反向电流,以上例举的三种波形恐怕很难概括全面。因此采用这种原理实现计算机变压器差动保护的可行性还需做大量工作才能证实。

## 3 利用监测变压器的饱和程度来鉴别涌流的方法 [12]。

这种方法的理论依据是认为励磁涌流(或过励磁)使变压器铁芯饱和,而故障时不会。因此可利用监测变压器相电压并将其与一预定的饱和变压器参数和实时测量的相电流瞬时值计算出的电压进行比较来区别涌流和故障。

保护的逻辑框图如图3所示。(单相变压器)。

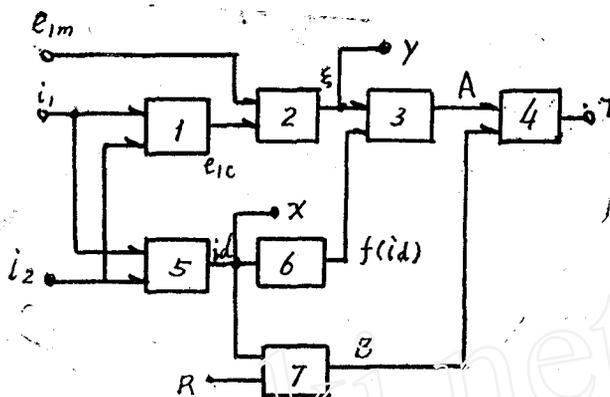


图3 保护逻辑框图

图中符号表示:

$e_{1m}$ —线圈1的测量电压

$e_{1c}$ —线圈1的计算电压

$i_1, i_2$ —线圈1, 2的电流

$i_d^T$ —差电流

$f(i_d)$ —电压差 $\varepsilon$ 的参考电平

(是 $i_d$ 的函数, 给定的)

R—差电流输入的参考值(给定)

A—电压比较器输出, B—差电流比较器输出, X, Y— $\varepsilon$ 和 $i_d$ 的测量点,

T—跳闸

方框1—电压计算:  $e_{1c} = R i_1 + L_{11} P i_1 + L_{12} P + L_{12} P i_2$

式中R, L为设计给定的饱和变压器参数, P为微分算子。

方框2—电压差计算:  $\varepsilon = e_{1m} - e_{1c}$

方框3—电压差比较:  $A = \begin{cases} 1, & |\varepsilon| \leq f(i_d) \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$  闭锁保护  
开放保护

方框4—跳闸输出:  $T = \overline{A} \cdot \overline{B} = \begin{cases} 1, & \overline{A} = \overline{B} = 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$  给跳闸信号

方框5—差流计算:  $i_d = i_1 + i_2$  (标么值)

方框6—函数 $f(i_d)$ 发生器。使 $\varepsilon$ 的基准值为差流的函数, 可提高保护灵敏度。

方框7—差流门槛检测:  $B = \begin{cases} 1, & |i_d| \leq R \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$  开放保护

根据逻辑框图看出保护动作情况:

① 励磁涌流时:  $\varepsilon < f(i_d)$ ;  $A = 1$ ;  $B = 0$  (因  $|i_d| > R$ );

$T = \overline{A} \cdot \overline{B} = 0$ , 因此保护被闭锁。

② 内部故障:  $\varepsilon > f(i_d)$ ;  $A = 0$ ;  $B = 0$ ; 故  $T = 1$  给跳闸。

③ 正常运行:  $\varepsilon > f(i_d)$ ;  $A = 0$ ;  $B = 1$ ;  $T = 1$  故保护闭锁。

以上方法经模拟试验证明动作可靠, 动作时间只需2~6ms, 但存在的问题是:

① 饱和变压器模型参数的计算或测定比较费事，也很难保证精确，也不可能归一化。

② 需测量绕组的相电流、相电压，前者对于△接线的变压器实现较困难，要求每相绕组两端均引出来，后者要求P.T接线应能测相电压。

③ 目前的方案灵敏度较差，但进一步精心设计饱和变压器参数会得到改善。

这种方法完全避开了利用涌流特征，因而也就摆脱了由于各种原因使涌流的特征不明显化带来的缺点和问题，因此是值得进一步探讨和研究的。

### (二) 差动过流的算法

这一部分是作为判别内、外部故障用，在大多数文献中都是沿用传统的比率制动式差动过流的原理，下面介绍一较典型的举例[4]

算法给出的差动过流部分的动作特性如图4所示。算法流程图如图5所示为双卷变情况。令 $I_P$ 、 $I_S$ 分别为变压器原、付边电流，设C.T的最大误差为 $e$ ，变压器最大调压范围为 $\pm a$ ，则最大不平衡电流为：

$$I_{Dmax} = (1+e) I_P - \frac{1-e}{1+a} I_S = \frac{2e+a+e_a}{1+a} I_P \quad \dots\dots(52)$$

最大制动电流为：

$$I_{\Sigma max} = (1+e) I_P + \frac{1-e}{1+a} I_S = \frac{2+a+e_a}{1+a} I_P \quad \dots\dots(53)$$

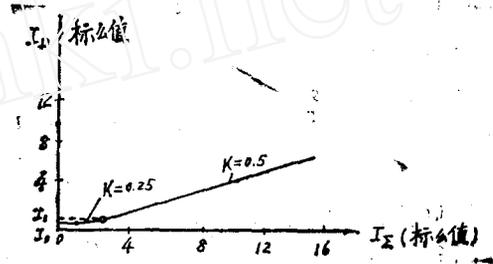


图4 差动过流保护动作特性

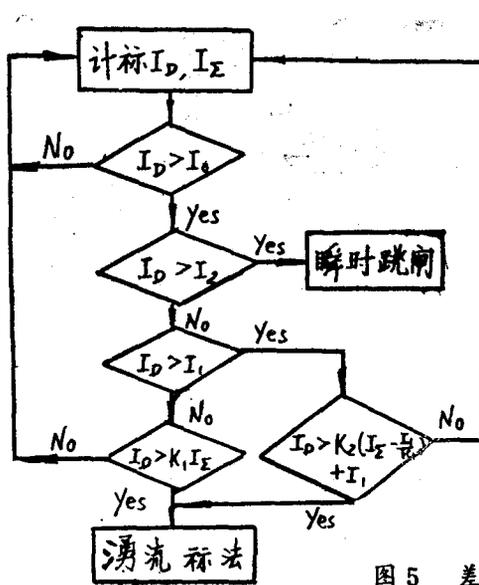


图5 差动过流算法流程图

$$\therefore I_{Dmax} = \frac{2e+a+e_a}{2+a+e_a} I_{\Sigma max} \quad \dots\dots(54)$$

令 $K_1$  (制动系数) =  $\frac{2e+a+e_a}{2+a+e_a}$

则动作特性图上第一段斜线的方程式为  $I_D = K_1 I_{\Sigma} \quad \dots\dots(55)$

这里  $I_D = |\dot{I}_P + \dot{I}_S|$ ,  $I_{\Sigma} = |\dot{I}_P - \dot{I}_S|$

当  $I_D = I_1$  时,  $I_{\Sigma} = I_1 / K_1$ , 因此第二段斜线的方程式为:

$$I_D = K_2 \left( I_{\Sigma} - \frac{I_1}{K_1} \right) + I_1 \quad \dots\dots(56)$$

$K_1$ 一般取为0.25,  $K_2$ 为0.5~0.7。

图5中的 $I_0$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ 均为整定值。 $I_0$ 按躲最大不平衡电流整定,一般取为0.25 $I_c$ 。 $I_1$ 按保证内部故障有足够灵敏度整定( $I_1$ 是两段斜线交接处的差流值, $I_1$ 越大灵敏度越高,可取为0.5~1 $I_c$ )。 $I_2$ 按躲涌流峰值整定。这种可变比率制动特性灵敏度和可靠性都较高,计算机实现很方便,只需改变一下程序即可得到满意的特性。

另一种算法是采用一种新型“ $\Delta$ -差动继电器”原理来实现[13]。其主要特点是利用计算机特有的记忆和运算功能,使继电器能消去故障前的穿越电流而只反映故障分量,它不仅保持了比率差动对外部故障的选择性,又在内部高阻故障时的灵敏度可较比率差动高一数量级。

下面简要介绍其工作原理:

差动保护的单相电路及故障前电流、 $\Delta$ 电流的迭加如图6(a, b, c)所示。将送、受端电流 $I_S$ ,  $I_R$ 分解为两个分量:故障前分量(即负荷),故障分量 $I_{\Delta}$ ,

$$\text{即 } I_S = I_P - I_X + I_P = I_{S\Delta} + I_P, \quad (I_{S\Delta} = I_S - I_P)$$

$$I_R = I_R - I_P + I_P = I_{R\Delta} + I_P, \quad (I_{R\Delta} = I_R - I_P)$$

我们可以很容易地在计算机中得到 $I_{S\Delta}$ 和 $I_{R\Delta}$ ,然后将 $|I_{S\Delta} - I_{R\Delta}|$ 和 $\left| \frac{I_{S\Delta} + I_{R\Delta}}{2} \right|$ 分别构成继电器的动作量和制动量,则继电器的动作方程为:

$$|I_{S\Delta} - I_{R\Delta}| > K_T \left| \frac{I_{S\Delta} + I_{R\Delta}}{2} \right| \quad \dots\dots (57)$$

令故障电流 $I_F = I_{S\Delta} - I_{R\Delta}$ ;  $I_{th} = \frac{I_S + I_R}{2}$ ;  $I_{th\Delta} = I_{th} - I_P$ 。

又从图6-b可得出:

$$U_{\Delta} = \frac{Z_R U_S + Z_S U_R}{Z_R + Z_S} \quad \dots\dots (58)$$

则从图6-c的故障网络得:

$$\begin{aligned} \left| \frac{I_F}{I_{th\Delta}} \right| &= 2 \left| \frac{I_{S\Delta} - I_{R\Delta}}{I_{S\Delta} + I_{R\Delta}} \right| \\ &= 2 \left| \frac{Z_R + Z_S}{Z_R - Z_S} \right| \quad \dots\dots (59) \end{aligned}$$

对于一般感性电力系统 $Z_R$ 和 $Z_S$ 各自的阻抗角不会超过 $\pm 90^\circ$ ,则 $\left| \frac{Z_R + Z_S}{Z_R - Z_S} \right|$ 的最小比值为1,  $\left| \frac{I_F}{I_{th\Delta}} \right|$ 的最小比值为2。

现令下标P和 $\Delta$ 分别表示故障前、后的量,再考虑C.T的误差,则此继电器的动作方程可改为:

$$|I_{S\Delta}(1 + f_{S\Delta}) - I_P(1 + f_{SP}) - I_{R\Delta}(1 + f_{R\Delta}) + I_P(1 +$$

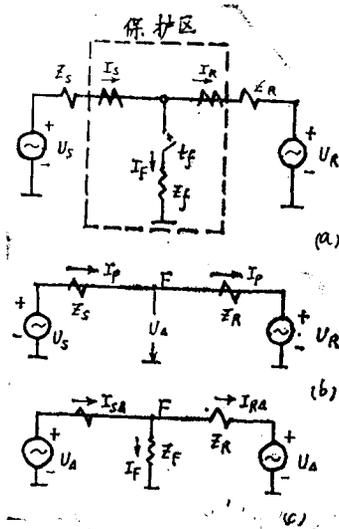


图6

$$+f_{RP}) \left| > \frac{K_T}{2} \left| I_{S\Delta}(1+f_{S\Delta}) - I_P(1+f_{SP}) + I_{R\Delta}(1+f_{R\Delta}) - I_P(1+f_{RP}) \right. \right. \quad \dots\dots (60)$$

或用  $I_F$  和  $I_{th}$  代替上式中相应的值, 则方程式可改为:

$$\left| I_F \left( 1 + \frac{f_{S\Delta} + f_{R\Delta}}{2} \right) + I_{th} (f_{S\Delta} - f_{R\Delta}) - I_P (f_{SP} - f_{RP}) \right| > K_T \left| I_{th} \left( 1 + \frac{f_{S\Delta} + f_{R\Delta}}{2} \right) + I_F \left( \frac{f_{S\Delta} - f_{R\Delta}}{4} \right) - I_P \left( 1 + \frac{f_{SP} + f_{RP}}{2} \right) \right. \quad \dots\dots (61)$$

根据上式我们可得出:

(1) 正常和外部故障时:

$$\text{恒有不等式 } \left| \frac{I_P}{I_{th\Delta}} \right| \leq 2 f_{max} \text{ 成立} \quad \dots\dots (62)$$

$f_{max}$  为 C、T 最大误差, 最严重情况是  $f_{S\Delta} = -f_{R\Delta} = f_{max}$ 。

(2) 内部故障(高阻或最严重情况)

$$\text{恒有不等式 } \frac{I_F}{I_{th\Delta}} \geq 2 \text{ 成立} \quad \dots\dots (63)$$

从以上两式可看出此继电器的特性在动作区和制动区之间有一很大的“缓冲区”, 允许较小的制动就可保证选择性, 允许低的门槛值, 因而可获得很高的灵敏度。试验证明在负荷与故障电流之比为85时都能在故障开始后一周内检出故障, 而小于此比值时动作可小于 5 ms。

此继电器动作方程中各电流均为基波的幅值, 算法采用正、余弦相关技术。用于变压器时方程式中还需加入调压引起的误差。

### 三、变压器的后备保护算法简介

变压器的计算机后备保护的配置和常规保护一样。其中零、负序电流可利用三相电流(差动保护已算出)计算得出。滤过器公式为:

$$\text{零序 } i_{0(n)} = \frac{1}{3} (i_{A(n)} + i_{B(n)} + i_{C(n)}) \quad \dots\dots (64)$$

$$\begin{aligned} \text{负序 } i_{2(n)} = \frac{1}{6} \left\{ 2i_{A(n)} - i_{B(n)} - i_{C(n)} - \sqrt{3} i_{B(n+2)} + \right. \\ \left. + \sqrt{3} i_{C(n+2)} \right. \quad \dots\dots (65) \end{aligned}$$

以上公式中  $i_{(n)}$  均为采样值。幅值的计算可根据计算机保护常用的各种原理进行(早有 很多文献介绍过)。

### 四、对今后开展这项研究工作的看法

由于计算机具有很好的信息处理、存储记忆和运算可编程等特有功能, 因此用它构成的继电保护装置可做到结构通用, 特性灵活可变, 能自检, 易于实现更完善的保护原

理, 另外还有易于维护, 便于系统发展等一系列优点。因此被认为是今后继电保护发展的方向。但就国内外的情况来看, 研究侧重于线路保护, 而变压器等元件保护相对地研究不多, 目前还没有较完善的实施方案。因此加快这方面的步伐, 尽快地研究出一些可行的实施方案很有必要。但在进行这项研究工作中不必拘泥于沿用传统的保护原理来实现计算机化, 重点恐怕还应该是根据我国国情、需要以及传统保护中存在的问题去寻找、挖掘计算机可实现的新原理、新途径, 以使其能适应新的要求并在各项技术指标上有较大的突破和改善。另外把理论紧密地与生产实际相结合也应是努力的方向。这将会遇到更多实际和复杂的问题, 如经济性的考虑, 抗干扰性能的研究等都需更进一步探索。还有许多工作需要脚踏实地地去做, 但我相信在全国高校、研究部门和现场的继电保护工作者共同努力下, 一定能在这方面迅速做出更大的成绩的。

### 参 考 文 献

- (1) 胡立华: “大型变压器的计算机保护” 1982年重大学报 No. 3.
- (2) J.A.Sykes, I.F.Morrison, “A Proposed Method Of Harmonic Restraint Differential Protection of Transformers by Digital Computer” IEEE Vol PAS-91, No. 3, PP1266-1272 1972
- (3) E.O.Schweitzer, R.R.Larson等, “An Efficient Inrush Current Detection Algorithm for Digital Computer Relay Protection of Transformer” IEEE PES Summer Meeting 1977 A77510-1
- (4) 作者同上, “The Design and Test of a Digital Relay for Transformer Protection” IEEE Vol PAS-98 No.3, PP795-803 1979
- (5) O.P.Malik, P.K.Dash, G.s.Hope, “Digital Protection of A power Transformer” IEEE PES Winter Meeting, New York Jan.1976 PP A76191-7
- (6) 李菊 “数字式变压器差动保护” 1982 浙江大学
- (7) M.A.Rahman, P.K.Dash “Fast Algorithm for Digital Protection of Power Transformers” IEEE PROC Vol 129 PP79-85
- (8) A.J.Degens “根据最小平方曲线拟合的数字差动保护” 继电器译丛1984, No.1 PP75-87
- (9) M.A.Raham, P.K.Dash, E.R.Downton, “Digital Protection of Power Transformer Based on Weighted Least Square Algorithm” IEEE.Vol PAS-101, No.11 1982 PP4204-4209
- (10) J.S.Thorp, A.G.Phadke, “A Microprocessor Based Threephase Transformer Differential Relay” IEEE Vol PAS-101 No.2 1982, PP426-432.
- (11) G.D.Rockefeller, “Fault Protection With a Digital Computer” IEEE PAS Vol PAS-88, No.4 1969 PP438-464
- (12) J.A.Sykes, “A New Technique for High-speed Transformer Fault Protection Suitable for Digital Computer Implementation”, IEEE PES Summer Meeting 1972 PP1-7
- (13) P.J.Mecleer, Mustahsan Mir, “A New Technique of Differential Relay: The  $\Delta$ -Differential Relay” IEEE PAS-101, No.10 1982
- (14) 黄焕焜等译 “计算机继电保护系统” 水电出版社 1983