

模糊理论在变压器保护中的应用

王增平 高中德 张 举 李海英 王铁强

柳 焯

(华北电力大学电力系 071003 河北保定)

(哈尔滨工业大学 150001 哈尔滨)

摘 要 对模糊理论在变压器保护中的应用进行了探讨,研究了利用模糊逻辑与模糊模式识别的理论识别变压器励磁涌流的方法。仿真结果表明,将模糊理论引入变压器保护领域,能够克服传统保护中的某些不足,改善变压器保护的性能,使保护的動作速度与选择性得到最好的配合。

关键词 变压器保护 模糊模式识别 励磁涌流

0 引言

在变压器差动保护中,如何辨别励磁涌流和内部故障一直是一个技术难题。许多学者曾对此进行了大量的研究^[1~4]。在实际的电流变压器保护中均使用单一的判据,采用定量的门槛区分励磁涌流和内部故障。但由于参数的模糊性,往往会造成误判。本文利用模糊逻辑和模糊模式识别的有关理论,对变压器保护中励磁涌流的识别方法进行了探讨。

1 变压器励磁涌流已有的判别方法

(1) 二次谐波电流含量励磁涌流判别法^[1]。

(2) 波形特征识别法。它又可分为两类:①利用间断角原理^[2];②根据波形的对称性来判别是否为励磁涌流^[3]。

(3) 磁通制动的涌流判别方法^[4,5]。

(4) 考虑励磁特性的变压器模型法。在变压器正常运行、外部故障以及励磁涌流时,均有如下关系:

$$u_1 = r_1 i_1 + l_1 \frac{di_1}{dt} + u_2 + r_2 i_2 + l_2 \frac{di_2}{dt} \quad (1)$$

式中 l_1, l_2 为漏感。

而在变压器内部故障时,(1)式不成立。因此可以通过判别(1)式成立与否来决定保护是否动作。

(5) 电压判据。通常有两种做法:一种是在相电压低于 70% 额定电压时,将二次谐波判据取消,并在符合一定条件下闭锁保护;另一种做法是谐波电压制动。

2 模糊逻辑与模糊模式识别的基本理论

2.1 模糊集合、隶属函数、模糊逻辑

在不同程度上具有某种特定性质的所有元素的总和叫作模糊集合,其外延和内涵都是模糊的。用来

描述一个模糊集合中元素隶属该集合的程度的特征函数称为隶属函数,用 $\mu_A(x)$ 表示, $\underline{A}$ 表示模糊集合,而 x 是 $\underline{A}$ 的元素。隶属函数满足 $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$ 。研究模糊命题的逻辑称为模糊逻辑。模糊逻辑是一种连续逻辑,它具有更普遍的意义。对于模糊变量 x, y , 通常的逻辑运算有:①析取: $x \vee y = \max(x, y)$;②合取: $x \wedge y = \min(x, y)$;③取非: $\bar{x} = 1 - x$ 。

2.2 模糊模式识别理论

对某个对象识别它属于何类的问题称为模式识别。因为许多客观事物的特征具有模糊性,而人对这类事物的识别能力是独一无二的,所以模拟人的思维方法识别模糊事物将比其它方法更优越。模糊模式识别中要用到模糊数学的一些方法。

2.2.1 模糊测度

模糊测度的定义如下:

设 $\mathcal{A}$ 为 U 的子集系,若映射 $g: \mathcal{A} \rightarrow [0, 1]$ 满足条件:

$$(1) g(\emptyset) = 0 \quad g(U) = 1$$

$$(2) A \subseteq B \Rightarrow g(A) \leq g(B)$$

$$(3) \{A_n\} \text{ 单调}, \lim_{n \rightarrow \infty} g(A_n) = g(A), n \geq 1$$

则称 g 为模糊测度,称 $(U, \mathcal{A})$ 为模糊可测空间, $(U, \mathcal{A}, g)$ 为模糊测度空间。

模糊测度的含义如下:

设有某个元素 $u \in U$, 我们猜测 u 可能属于 $\mathcal{A}$ 的某个元素 A , 即 $A \in \mathcal{A}$ 且 $u \in A$ 。这种猜测是不确定的、模糊的, g 就是这个模糊性的一个度量, $g(A)$ 表示了 u 属于 A 的程度, g 有各种定义的方法,也就有各种不同的测度,其中 g_λ 测度是常用的一种。

设 $H(u_i)$ 是对各因素的重视程度 $g(u_i)$ 的模糊分布函数,则对于 g_λ 分布有:

$$\begin{cases} g_1(u_1) = H(u_1) \\ g_1(u_i) = \frac{H(u_i) - H(u_{i-1})}{1 + \lambda H(u_{i-1})} \end{cases} \quad 2 \leq i \leq n \quad (2)$$

当取 $\lambda = 0$ 时,有:

$$\begin{cases} H(u_1) = g_1(u_1) \\ H(u_i) = g_1(u_i) + H(u_{i-1}) \quad 2 \leq i \leq n \end{cases} \quad (3)$$

2.2.2 模糊积分

设 $(U, \mathcal{A}, g)$ 是模糊测度空间, $h: U \rightarrow [0, 1]$ 是 U 上的可测函数, $A \in \mathcal{A}$. h 在 A 上关于 g 的模糊积分定义为:

$$\int h(u) \circ g(\cdot) = \sup_{\lambda \in [0, 1]} [\lambda \wedge g(A \cap h_\lambda)] \quad (4)$$

其中 $h_\lambda = \{u | h(u) \geq \lambda\}$; $0 \leq \lambda \leq 1$; $g(\cdot)$ 表示某集合的测度; $\int$ 为模糊积分符号。

取 g 为 λ - F 测度 g_λ , 则:

$$\int h(u) \circ g(\cdot) = \bigvee_{i=1}^n [h(u_i) \wedge H(u_i)] \quad (5)$$

模糊积分的实际意义可理解为: 客体满足各特征的程度和对特征的重视程度之间的相容性程度, 其值越大, 表明客体越满足各个特征。

3 利用模糊模式识别原理识别励磁涌流的方法

3.1 识别励磁涌流的方法

励磁涌流可用多个特征量来表达, 这里采用 4 个特征量: u_1 为二次谐波含量高; u_2 为铁心出现饱和; u_3 为变压器端电压较高; u_4 为差电流波形不对称。

取 $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ 为特征集。设在某种情况下, 各特征的满足程度为 h , 则:

$$h = (h(u_1), h(u_2), h(u_3), h(u_4))$$

要求 h 满足下列条件:

- (1) $h(u_1) \geq h(u_2) \geq h(u_3) \geq h(u_4)$;
- (2) $A_1 = h_{h(u_1)} = \{u_1\}$, $A_2 = h_{h(u_2)} = \{u_1, u_2\}$,
 $A_3 = h_{h(u_3)} = \{u_1, u_2, u_3\}$,
 $A_4 = h_{h(u_4)} = \{u_1, u_2, u_3, u_4\} = U$ 。

若不满足条件(1)则须掉换顺序。

取单调集列:

$$A_i = \{u_1, u_2, \dots, u_i\} \quad i = 1, 2, 3, 4$$

则最终判断励磁涌流的可能性为:

$$\mu = \int_U h(u) \circ g(\cdot) = \bigvee_{i=1}^4 [h(u_i) \wedge g(A_i)] = \bigvee_{i=1}^n [h(u_i) \wedge H(u_i)] \quad (6)$$

$H(u_i)$ 可由对各因素的重视程度 $g_1(u_i)$ 求得。 μ 表示这种情况是励磁涌流的程度, 当大于某个门槛时认为是励磁涌流。

3.2 隶属函数的选取

3.2.1 二次谐波隶属函数

我们将二次谐波的隶属函数定义如图 1。

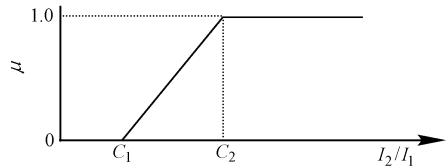


图 1 二次谐波含量的隶属函数图

Fig. 1 Membership function of second harmonic content

常规保护中一般取 I_2/I_1 的定值为 15% ~ 20%, 相当于图中的 C_2 点。这里取 $I_2/I_1 > 20\%$ 时隶属度为 1。同时利用数字仿真发现, 励磁涌流时的 I_2/I_1 一般大于 6%, 因此将 C_1 取为 7%。由于二次谐波的含量为一连续值, 考虑到实际应用中的运算速度, 隶属函数取成升半梯形分布。当 $C_1 = C_2$ 时, 二次谐波含量由模糊集合蜕变为普通集合, 保护的性能也与原来相同了。隶属函数的表达式为:

$$\mu = \begin{cases} 0 & I_2/I_1 < C_1 \\ \frac{1}{C_2 - C_1} \left(\frac{I_2}{I_1} - C_1 \right) & C_1 < \frac{I_2}{I_1} < C_2 \\ 1 & \frac{I_2}{I_1} > C_2 \end{cases} \quad (7)$$

3.2.2 磁通隶属函数的选取

对仿真 Δ -Y 变压器在不同合闸角、不同剩磁情况下的计算发现: 每周期取 20 个采样点, 发生励磁涌流时, 至少有 3 个采样间隔(最多达到 16 个采样间隔, 大多数情况有 13 个采样间隔)中计算出 $d\Psi/di_d$ 达到饱和。在 3~13 个采样间隔间, 基本符合正态分布。考虑到其它因素的影响, 取 4 个采样间隔定为铁心饱和可能性为 0.5 的点, 13 个采样间隔定为铁心饱和可能性为 1.0 的点, 4~13 个采样间隔间为正态分布曲线。隶属函数见图 2, 由于横坐标用来表示饱和的采样间隔数, 其值均为整数, 为了实际应用时提高运算速度, 将各横坐标对应的隶属度预先计算好, 以表格的形式存储, 使用时通过查表的方法来得到隶属度。隶属函数的表达式为:

$$\mu = \begin{cases} e^{\frac{(n-13)^2}{116.858}} & 4 \leq n \leq 13 \\ 1 & 13 < n \leq 16 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

3.2.3 波形对称度的隶属函数

波形对称法是通过判断差电流的对称性来鉴别励磁涌流。对称性由式(9)定义:

$$\left| \frac{I'_i + I_{i+N/2'}}{I'_i - I_{i+N/2'}} \right| \leq K \quad (9)$$

式中 I'_i 为第 i 个电流采样点的导数值; N 为一个周期的采样点数。

对于故障电流, 式(9)恒成立; 对于励磁涌流情

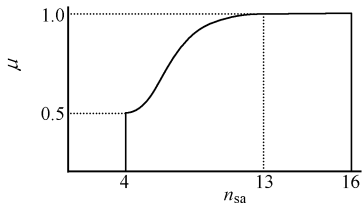


图 2 铁心饱和的隶属函数

Fig. 2 Membership function of core's saturation

况,有 1/4 周期以上点不满足(9)式。这样就可以区分出励磁涌流与内部故障电流。分析各种情况下的波形不对称的角度,包括单相变压器、 Δ -Y 接法的变压器以及各种合闸角、剩磁情况等,可以证实:内部故障电流的前半波与后半波基本对称。励磁涌流符合对称条件的角度范围最多 60° ,另外 120° 不对称;而内部故障电流最多 30° 不对称,另外 150° 范围内是对称的。

当每周期取 20 个采样点时,采样间隔为 18° ,这样在励磁涌流时约有 2~7 个采样间隔的波形不对称。仿真结果表明,考虑到 CT 饱和特性时,励磁电流不对称的角度偏大,对应的不对称采样间隔数为 4~10 个。

隶属函数如下选取:当有 4 个采样间隔的波形不对称时,认为励磁涌流的可能性是 0.5,低于 4 个时,可能性为 0,高于 7 个(包含 7 个)时,可能性为 1.0。根据模糊数学所述,一般情况下,较好的隶属函数形状为正态分布曲线,因此在 4~7 个采样间隔间采用正态分布曲线。同样,由于隶属函数的横坐标即波形不对称的采样间隔数均为整数,仍可将其以表格形式预先计算好存放,而不必考虑采用正态分布曲线对运算速度的影响。隶属函数见图 3,数学表达式见式(10)。

$$\mu = \begin{cases} e^{\frac{(n-10)^2}{51.937}} & 4 \leq n \leq 10 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

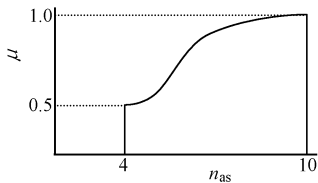


图 3 波形不对称的隶属函数

Fig. 3 Membership function of asymmetry of wave form

3.2.4 电压的隶属函数

由于电压是连续量,采用复杂的隶属函数将影响运算速度。故在基本满足要求的情况下采用升半梯形函数。考虑误差等原因,取 $C_1 = 10\% U_n$ 以下隶

属度为 0, $C_2 = 75\% U_n$ 以上隶属度为 1。隶属函数见图 4,数学表达式见式(11)。

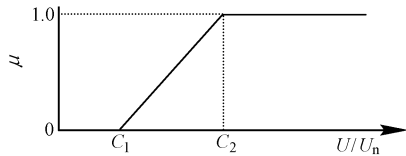


图 4 电压的隶属函数图

Fig. 4 Membership function of voltage

$$\mu = \begin{cases} 0 & \frac{U}{U_n} < C_1 \\ \frac{1}{C_2 - C_1} \left(\frac{U}{U_n} - C_1 \right) & C_1 \leq \frac{U}{U_n} \leq C_2 \\ 1 & \frac{U}{U_n} > C_2 \end{cases} \quad (11)$$

4 仿真验证及结果

利用高级语言实现算法,并用数字仿真的方法对算法从以下两方面进行了验证:

- (1) 在各种情况下的励磁涌流,均判别为励磁涌流;
- (2) 对内部故障情况,不闭锁保护。

4.1 单相变压器 CT 不饱和时对励磁涌流的识别

表 1 给出了一个较典型的仿真结果。

表 1 仿真结果 1
Table 1 Results of simulation 1

I_{2c}	n_{sa}	n_{as}	U_1	$\mu_{I_2}(0)$
0.133 970	10	7	1.0	0.492 06
$\mu_{sa}(1)$	$\mu_{as}(2)$	$\mu_{U_1}(3)$	μ_r	μ_{Ir}
0.925 87	0.840 9	1.000	0.800 0	0.800 0

I_{2c} 表示二次谐波含量; n_{sa} 表示磁通饱和采样间隔数; n_{as} 表示波形不对称的采样间隔数; U_1 表示励磁侧电压幅值; $\mu_{I_2}(0)$ 表示二次谐波含量隶属度; $\mu_{sa}(1)$ 表示磁通饱和和采样间隔数的隶属度; $\mu_{as}(2)$ 表示波形不对称的采样间隔数的隶属度; $\mu_{U_1}(3)$ 表示电压高的隶属度; μ_r 表示各相的判断是励磁涌流的隶属度; μ_{Ir} 表示最终判断是励磁涌流的隶属度。

可以看出,如果单独使用二次谐波判据,在某些情况下将引起识别不出励磁涌流的情况(如表 1 中,二次谐波含量为 13.4%,这对于定值为 15% 的二次谐波制动的保护将引起误动),而使用本算法,将最后的门槛定在 0.7,即可识别出励磁涌流。

4.2 Δ -Y 变压器 CT 饱和时对励磁涌流的识别

对于 Δ -Y 变压器,根据各相剩磁、合闸角等情况组成了 12 000 组数据来验证算法,在这些数据中,绝大多数的励磁涌流识别时隶属度大于 0.75

(表 2 及图 5 为这种情况),少数情况低于 0.65。分析发现,对于励磁涌流识别的隶属度低于 0.65 的情况,都是在给定合闸角和剩磁情况下,变压器直接进入稳态或非常接近稳态,因此没有励磁涌流或励磁涌流非常微弱。这说明本算法反映了实际情况。

表 2 仿真结果 2
Table 2 Results of simulation 2

相	I_{2c}	n_{sb}	n_{as}	U_1	$\mu_{i_2}(0)$
A	0.265 53	14	7	1.0	1.000 0
B	0.310 50	11	7	1.0	1.000 0
C	0.189 60	11	9	1.0	0.920 0
相	$\mu_{sb}(1)$	$\mu_{as}(2)$	$\mu_{i_1}(3)$	μ_r	μ_{lr}
A	1.000 0	0.840 9	1.000 0	0.840 9	
B	0.966 3	0.840 9	1.000 0	0.840 9	0.920 0
C	0.966 3	0.980 9	1.000 0	0.920 0	

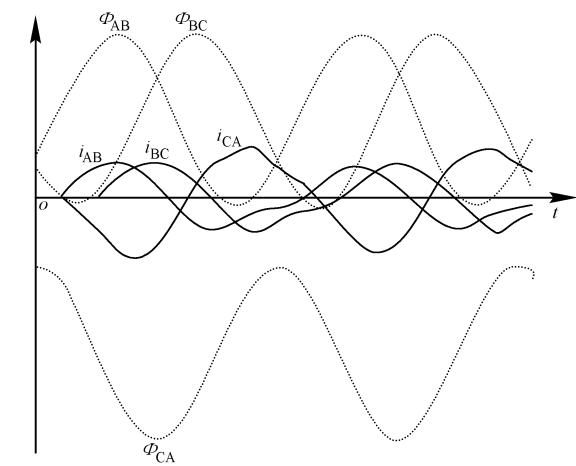


图 5 仿真结果曲线
—— 电流 磁通
Fig. 5 Figure of simulation result

验证结果表明,利用模糊模式识别的方法可以准确地将励磁涌流识别出来,比常规的方法更优越。

4.3 内部故障的验证

内部故障采用 EMTP 产生的数据来验证。由于 EMTP 不能计算变压器内部故障,因此用它计算变压器端部短路情况,结果证明本算法不会发生误识别。为了研究在端部接高压长距离输电时该算法的特性,将 EMTP 产生的结果进行谐波分析后,人为加大二次谐波含量,使之高达 50%,以模拟长线产生的大量二次谐波,结果本算法仍不会误识别,也不会发生延时的情况^[6]。

验证结果表明,利用模糊模式识别的方法在内部故障时不会发生误识别,也不会由于长线等引起的二次谐波过高而延时,较现有算法优越。图 6 给出了仿真用的系统图。

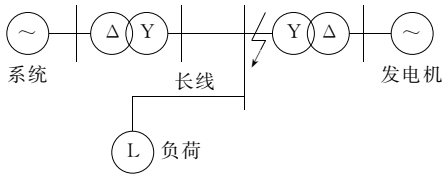


图 6 仿真用系统图
Fig. 6 Figure of simulation system

5 结论

在分析了大量的变压器保护方法的基础上,提出了采用二次谐波、磁通饱和程度、电压高低、电流波形的对称程度等判据,利用模糊模式识别方法辨别励磁涌流的算法。利用高级语言实现了算法,并对其进行了数字仿真,验证了励磁涌流和内部故障两种情况,结果证明该算法比常规算法有很大的优越性,表现为:

(1) 模糊理论由于采用了多种判据,使保护有更高的可靠性。从仿真结果看,在常规保护某一励磁涌流判据(例如二次谐波判据)完全会造成错误判断而导致保护误动或拒动的情况下,模糊方法却能得出正确的结果。保护避免了“一票否决制”,真正做到了“集思广益”。

(2) 多个判据的采用,更容易做到优势互补。

(3) 人的思维本身就具有模糊性,将模糊理论引入继电保护领域,是保护向智能化发展的一个方向。

本文所做的工作只是这方面的一个尝试,结果却令人鼓舞。它说明,智能化方法将给保护的性能带来一个飞跃。

参考文献

- 1 Liu Pei, Malik O P, Chen Deshu *et al.* Improved Operation of Differential Protection of Power Transformer for Internal Fault. IEEE on TPD, 1992,7 (4):1912~1919
- 2 王祖光. 间断角原理的变压器差动保护. 电力系统自动化,1979,3(1)
- 3 孙志杰,陈云仑. 波形对称原理的变压器差动保护. 电力系统自动化,1996,20(4):42~46
- 4 唐跃中. 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. 电力系统自动化,1995,19(9)
- 5 Phadke A G, Thorp J S. A New Computer-Based Flux-Restrained Current-Differential Relay for Power Transformer Protection. IEEE on PAS, 1983, PAS-102(11):3624~3628
- 6 Sachdev M S, Sidhu T S, Wood H C. A Digital Relay Algorithm for Detecting Transformer Winding Fault. IEEE on TPD, 1989,4(3):1638~1647

