

基于模糊多判据的变压器励磁涌流识别新算法

黄登峰,郁惟镛,赵亮,王慧芬

(上海交通大学电力学院,上海 200240)

摘要: 在分析现有各种变压器励磁涌流识别算法的基础上,采用模糊集合理论,综合各判据的优点,得到一种较为理想的新算法,通过 EMTP 仿真计算,并考虑 CT 传变特性后,该模糊多判据算法能快速识别各种变压器内部故障和励磁涌流情况,克服了谐波制动原理在某些工况下的误判和延时动作问题。

关键词: 变压器保护; 励磁涌流; 模糊集合理论

中图分类号: TM713

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2000)12-0004-04

1 引言

我国电力变压器广泛采用二次谐波制动原理的差动保护,随着电力系统电压等级和容量的扩大,变压器带长线及变压器低压侧装设电容或电抗器进行无功补偿的情况经常出现,变压器区内故障时将产生大量谐波,这将导致二次谐波制动原理的保护延时动作,甚至拒动。

近几年来,人们提出了许多新原理的变压器保护算法,有些保护算法本身在实用性方面有其先天不足之处,如间断角原理的算法对硬件要求较高,假使所要区分的间断角误差在 10° 以内,则采样率至少要求每周波 72 点以上,而且涌流在间断角处的幅值接近于 0,对 A/D 转换的精度要求较高,这将导致保护硬件成本太高;等值电路原理虽然在理论上十分完美,但它需要知道变压器两侧的漏抗,这在实际应用中是无法满足的,由漏感误差带来的灵敏度下降是这种方法的致命弱点;神经网络是近几年来兴起的一种新方法,在变压器保护中也有所应用,但它训练所用的大量样本在实际应用中很难得到,而仿真所得的训练样本往往与现实有一定差距,从而使得训练好的网络无法推广到实用中去。此外,现有算法大多是建立在利用仿真一次侧数据的基础上,而保护实际所用的数据都是 CT 二次侧数据,众所周知,励磁涌流经过电流互感器传变到二次侧后,电流波形有较大的畸变。对一些采用波形比较的算法,由于电流波形的畸变,使得励磁涌流和故障电流的波形特征有所改变,给实际应用带来一些困难;同样,功率差动原理也存在这一问题。

模糊集合理论借助于隶属度的概念,达到对人脑一定程度的模拟,具有处理模糊现象的能力,因此利用模糊集合理论,可以综合判据之间的优点,使判据之间相互取长补短。基于以上认识,本文在对现

有变压器保护算法深入研究的基础上,提出了模糊多判据励磁涌流识别算法。

2 CT 的数字仿真及其对励磁涌流的影响

为了使所研究的算法更接近实际情况,必须考虑 CT 饱和对二次电流的影响,根据电流互感器的工作原理,本文采用如图 1 所示的等值电路。 L_{μ} 为折算到二次侧的等值励磁阻抗, R_2 、 L_2 为二次侧漏抗, R_2 、 L_2 为等值负荷阻抗。

CT 铁芯磁化曲线采用如图 2 所示的曲线,并作如下的假设:(1)铁芯基本磁化曲线与坐标原点对称,磁滞回线的上升分支和下降分支也和原点对称;(2)对基本磁化曲线的主区间用三次样条函数分段拟合,对极限磁滞回线,主区间用修正的反正切函数拟合其上升分支;(3)当磁场强度超出主区间时,即认为磁化曲线进入线性饱和区(直线段);(4)动态磁化过程所产生的局部磁滞回环,根据磁化方向和转折点的坐标,由极限磁滞回线的上下分支压缩而得。

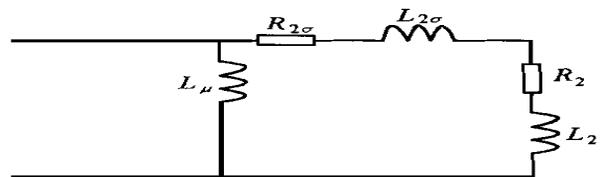


图1 CT 等值电路模型

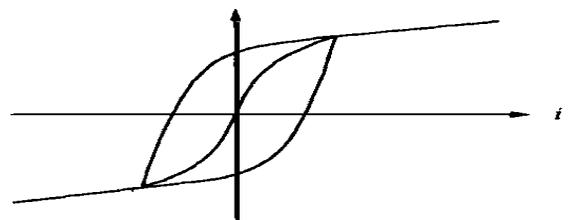


图2 CT 磁化曲线

至此,我们已经得到了 CT 的仿真模型,涌流和

故障电流的一、二次波形分别如图 3 所示。从图中可以看出,CT 饱和后,涌流的间断角消失,而短路电流的一、二次波形几乎没有区别。

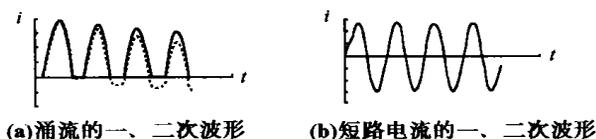


图 3

3 基础原理

本文通过研究认为,在现有的微机变压器保护算法中,二次谐波制动原理、波形比较原理、功率差动原理以及低电压判据具有较好的可实现性,可以通过模糊集合理论结合这些算法来实现一个高可靠性且快速动作的变压器保护新算法。

3.1 二次谐波制动原理及其判据的模糊化

二次谐波制动原理是目前广泛应用的算法,运行经验十分丰富,一般取 $I_2/I_1 > 15\% \sim 20\%$ 时确定为励磁涌流,但变压器内部故障时也有可能产生较大的谐波分量,一般认为二次谐波含量越低,出现故障的可能性越大,因此我们对二次谐波含量取一隶属函数,即 I_2/I_1 与变压器发生故障的可能性 μ_1 的关系可以用图 4 来表示。

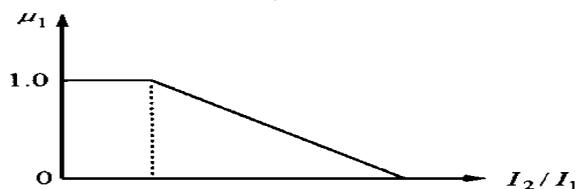


图 4 谐波含量的隶属函数

3.2 波形比较原理及其判据的模糊化

图 3 显示了励磁涌流和短路电流的波形,为了滤除直流分量的影响,先对励磁涌流和短路电流进行差分数字滤波,即:

$$i^{(n)} = i^{(n)} - i^{(n-1)} \quad (1)$$

上述的励磁涌流和短路电流经差分滤波后的波形如图 5 所示。

由图 5 可见,经差分滤波后,励磁涌流前半波和后半波的波形是不对称的,而短路电流的前半波和后半波基本上是对称的,利用励磁涌流和短路电流的对称程度不同,就可以识别励磁涌流和短路电流。

设一个周期内采样点数为 $2n$,对前半波采样点 $i(k)$ 和后半波采样点 $i(k+n)$ 定义一个如下的对称度函数:

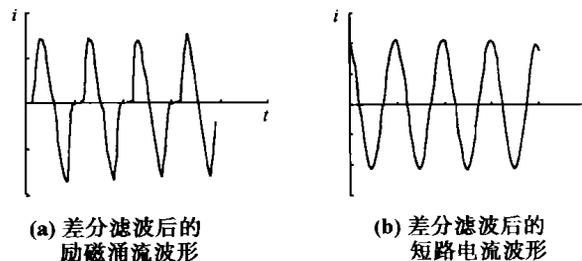


图 5

$$X(k) = |i(k) + i(k+n)| \quad (2)$$

很显然,短路电流波形的对称度函数的值接近于 0,而励磁涌流的对称度函数的值比较大。当然,当涌流的间断角较大时,前半波和后半波的采样点都位于间断角时,此时虽然 $X(k)$ 值较小,但不应认为是对称情况,所以还需设一个门槛值,只有当 $I = |i(k)| + |i(k+n)| >$ 时,才利用式(2)定义的对称度函数来判别涌流和短路情况,否则认为采样点位于间断角部分,是涌流情况。上述对称度函数值与变压器发生故障的可能性之间的隶属函数可以用如下的偏小型梯形分布来表示:

$$X(k) = \begin{cases} 1 & X(k) < a \text{ and } I > \\ \frac{b-X(k)}{b-a} & a < X(k) < b \text{ and } I > \\ 0 & X(k) > b \text{ or } I \end{cases} \quad (3)$$

隶属函数 $(X(k))$ 分布如图 6 所示,它表示了采样点与故障情况的对应程度, $(X(k))$ 越大,采样点是故障的可能性越大。

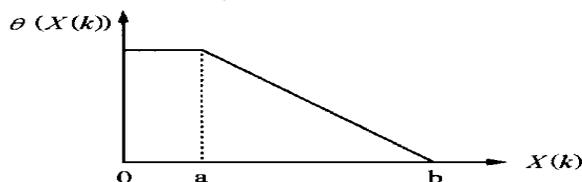


图 6 对称度隶属函数分布

经过分析,可以发现,当采样点位于故障电流的过零点时, $(X(k))$ 的值有可能为零,另外,当采样点受到干扰时,也有可能使得 $(X(k))$ 的值出现较大误差。为此,我们取连续 5 个点的 $(X(k))$ 的平均值作为识别励磁涌流的特征值,即

$$\bar{X}(k) = \frac{1}{5} \sum_{i=k-4}^{i=k} X(i) \quad (4)$$

这样,当 $\bar{X}(k)$ 大于某一门槛值时,即可认为该采样电流是故障情况,但正如引言中所说的那样,由于采样电流经过 CT 传变后,涌流的间断角消失,所以实践表明,要满足对所有的涌流情况不误动,

的值相应地取得较大,考虑一定的裕度,取为0.8,这样以后,并不能保证对所有的故障情况都能快速动作,甚至出现拒动的情况。

现在我们可用以下的隶属函数来解决这一问题,设

$$\mu_2 = \begin{cases} 0 & \bar{X}(k) < 0.2 \\ \frac{5}{3}(\bar{X}(k) - 0.2) & 0.2 \leq \bar{X}(k) \leq 0.8 \\ 1 & \bar{X}(k) > 0.8 \end{cases} \quad (5)$$

对应函数分布如图7所示:

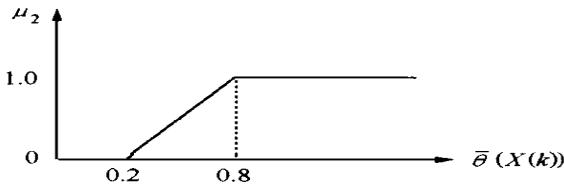


图7 隶属函数 μ_2 的分布

这样, μ_2 就成为采样电流是否是故障情况的隶属度。

3.3 功率差动原理及其判据的模糊化

在变压器正常运行情况下,变压器本身消耗的功率很小,因为几乎对所有变压器而言,它在正常情况下的铜损和铁损不超过额定容量的1%;在故障情况下,由于故障点的电弧放电发热,将消耗大量的有功;而在涌流情况下,由于涌流有一个充电过程,所以在初始阶段,它也消耗一定的功率,但随着充电过程的结束,它消耗的功率越来越小。通过计算,我们发现:在空载合闸到故障变压器时,由于涌流和故障电流的共同作用,初始阶段消耗的有功功率特别大,据此可以判别空载合闸到故障的情况,而空载合闸到故障正是二次谐波制动原理和波形比较原理难以判别的情况。

当变压器发生区外故障时,由于变压器流过较大的穿越电流,此时变压器也消耗较大的有功,因此本判据还需结合传统的差动保护来进行,当差动电流大于整定值时,再利用差动功率来判别故障。对一个双绕组变压器而言,它所消耗的有功功率可以表示如下:

$$W(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t (V_1 I_1 + V_2 I_2 - R_1 I_1^2 - R_2 I_2^2) dt \quad (6)$$

其中 V_1, I_1, V_2, I_2 是变压器一、二次绕组的瞬时电压电流值,对数字式保护而言,我们可以先计算变压器消耗的瞬时功率:

$$P(t) = V_1 I_1 + V_2 I_2 - R_1 I_1^2 - R_2 I_2^2 \quad (7)$$

变压器消耗的有功功率(平均功率)为:

$$W(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} P \left(t - \frac{n}{N} T \right) \quad (8)$$

我们定义一个隶属函数来表示 $W(t)$ 与故障之间的关系:

$$\mu_3 = \begin{cases} 0 & W(t) < m \\ \frac{W(t) - m}{n - m} & m \leq W(t) \leq n \\ 1 & W(t) > n \end{cases} \quad (9)$$

对应函数分布如图8所示:

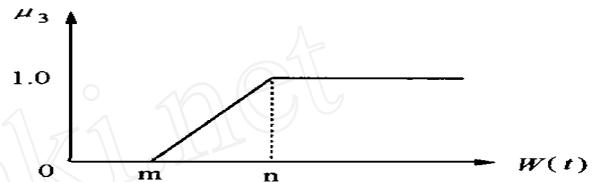


图8 隶属函数 μ_3 的分布

3.4 低电压判据及其模糊化

当变压器发生接地故障时,故障相电压会变得很小,传统的二次谐波制动原理一般认为当相电压低于额定值的70%时,认为不可能发生涌流情况,但为了防止区外故障切除后,电压回升产生的励磁涌流造成保护误动作,所以在 $I_{n-N} > I_{oe}$ 且 $U_{n-N} > kU_n$ 时将保护闭锁,其中 I_{n-N}, U_{n-N} 为当前时刻前一周的电流和电压, U_n 为当前时刻的电压, I_{oe} 为变压器空载时的励磁电流。为了防止保护误动,我们也可以把整定值定得低一点,比如是10%而不是70%,我们可以用隶属度函数来解决这一问题,定义:

$$\mu_4 = \begin{cases} 1 & U_n < 0.1 \\ \frac{5(0.7 - U_n)}{3} & 0.1 \leq U_n \leq 0.7 \\ 0 & U_n > 0.7 \end{cases} \quad (10)$$

对应函数分布如图9所示。

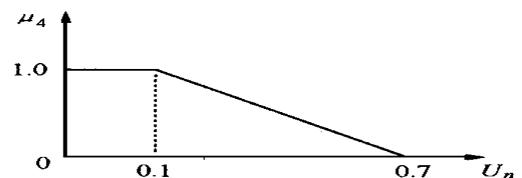


图9 隶属函数 μ_4 的分布

3.5 多判据的综合模糊化

考虑到综合利用几种励磁涌流判别方法,会使保护的可靠性有较大的提高,而且使保护动作的速度也有所改进,所以我们用一个总的隶属度来综合

上述多判据,即:

$$\mu = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4 \quad (11)$$

其中 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 、 μ_4 是该判据的权重,并且满足

$$\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4 = 1 \quad (12)$$

当 μ 大于某一整定值时,保护将出口动作,否则认为是涌流情况。从上面对各判据的分析可以看出,当 $\mu_i (i=1,2,3,4)$ 等于 1 时,该判据可以确定为故障,所以,我们引入每四个加速判据,即当 $\mu_i (i=1,2,3,4)$ 等于 1 时,直接出口跳闸,不受 μ 大小的限制。

表 1 各判据动作情况

故障类型	动作时间(ms)				
	低电压	二次谐波	波形比较	功率差动	模糊多判据
1SZ- abcg	20	20	16	#	16
1SQ- abc	20	20	16	#	16
1LQ- ag	21	20	15	20	15
1LQ- abg	20	20	#	#	20
1LN- ag	20	#	38	#	20
1SQ- ag	22	20	15	20	15
2SN- abg	20	#	#	20	20
2LZ- ag	20	20	16	#	16
2LZ- ab	#	29	32	23	21
2SQ- ab	#	#	25	20	20
2LQ- ab	#	48	32	21	20
2SN- abg	20	#	75	20	20
2SN- ab	20	#	#	20	20
2SZ- abg	20	20	#	20	20
2LZ- abg	20	29	58	20	20

备注:(1)1,2 表示故障地点分别在高压侧和低压侧;
 (2)S,L 表示变压器带短线和长线;
 (3)Z,Q,N 分别表示故障前为带负荷、空载和空载合闸到故障;
 (4)# 表示拒动。

4 仿真试验

为了考核本文提出的算法是否可行,我们利用 EMTP 仿真程序对变压器的故障和涌流情况进行了大量的仿真。选取一台三单相变压器,容量为 3 × 375MVA,额定电压为 525/110kV,接线方式为 $Y_0/\Delta-11$ 。系统接线如图 10 所示。

我们对变压器的各种涌流和内部故障(包括单相接地、两相故障、两相接地故障、三相故障、三相接

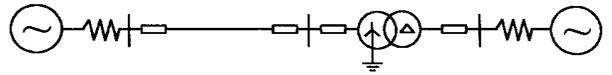


图 10 电力系统模型图

地故障)以及空载合闸到各种内部故障设计了 424 个样本,其中还考虑了变压器分别带长线和短线、故障前空载和带负荷等情况。部分仿真结果见表 1,从中可以得出以下几点结论:

- (1) 单一判据很难满足对所有的故障情况都可靠和快速动作,每个判据都存在一些缺点;
- (2) 各个判据之间具有互补性,对于一些判据不能动作的情况,另外一些判据却能正确动作;
- (3) 采用模糊多判据算法,不仅能使各判据之间取长补短,而且能够进一步缩短保护动作时间。

5 结论

- (1) 由于变压器励磁涌流与许多不完全可知因素有关,加上变压器运行工况的多变性,现有的众多单一判据很难全面兼顾,可能会误判或拒动。
- (2) 本文提出的模糊多判据算法借助模糊集合理论较好地综合了各种判据的优点,做到了取长补短,既能可靠动作,又提高了变压器保护的動作速度。
- (3) 仿真计算的结果表明,利用微机保护技术,可以实现上述多判据算法,本成果具有普遍推广意义。

参考文献:

- [1] 王国兴,张传利,等. 变压器励磁涌流判别方法的现状及发展. 中国电力,1998,(10).
- [2] 王维俭,侯炳蘊. 大型机组继电保护理论基础(第二版). 水利电力出版社,1989.
- [3] 梁国坚,梁冠安. 用模糊贴近度识别变压器故障电流和励磁涌流的研究. 中国电机工程学报. 1998,(5).
- [4] Kuniaki Yabe. Power Differential Method for Discrimination between Fault and Magnetizing Inrush Current in Transformers. IEEE Transactions on Power delivery,1997,12(3).
- [5] 王国兴,张传利,等. 变压器励磁涌流判别方法的现状及发展. 中国电力,1998,(10).
- [6] Goar B. Dolinar D. Integrated digital power transformer protection. IEE Proc - Gener Transm Distrib,1994,141(4).
- [7] Kasztenny B, Rosolowski E, saha M M, Hillstrom B. A Self-Organizing Fuzzy Logic Based Protective Relay - An Application to Power Transformer Protection. IEEE Transactions on Power delivery,1997,12(3).

(下转第 12 页)

Based on Artificial Intelligence Approach. IEEE Trans on Power Delivery. 1993, 8(4) : 1933 - 1941.

- [7] Gregory Levitin, Shmuel Mazal Tov, David Elmakis. Genetic Algorithm for Optimal Sectionalizing in Radial Distribution Systems with Alternative Supply. Electric Power Systems Research, 1995, 35(3) : 149 - 155.

收稿日期: 2000-05-21

作者简介: 蔡中勤(1973 -),女,博士研究生,研究方向为配电网网络分析; 郭志忠(1961 -),男,教授,博士生导师,研究方向为计算机在电力系统中的应用,光学电流互感器等; 陈学允(1934 -),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事,主要从事电力系统稳定分析及控制方面的研究。

Poised apparent accurate moment method for network reconfiguration in distribution systems

CAI Zhong-qin, GUO Zhi-zhong, CHEN Xue-yun
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: On the consideration of the radial characteristics of distribution network, the concept of apparent accurate moment (AAM) is proposed, which is analogous to that of moment of force in mechanics. The essence of network reconfiguration lies in the aim of load balance by switch operation. Based on this idea and the definition of the AAM, a new method for distribution reconfiguration—poised apparent accurate moment method (PAAM) is proposed, that is, the switch closing and opening depends on whether the AAM between the two ends of the switch poises or not. The PAAM method measures the balance degree of branches by means of the difference ET of the summation of the AAM between the two ends of the switch. The key point of network reconfiguration is to decide which switch to be opened and which one to be closed. Based on the idea of the load balance, we think that the switch which has the maximal ET value should be closed first and the branch which has the minimal ET value in the single loop formed just now should be opened so that we can benefit most from the reconfiguration. The AAM presented in this paper reflects the idea of load balance preferably and the detailed explanation for it is also given. This algorithm is tested on two experimental systems and a comparison is made between this method and others, which shows the effectivity and simplicity of this method.

Keywords: distribution network; apparent accurate moment; reconfiguration

(上接第3页)

Abstract: Wavelet analysis has excellent localization nature in time and frequency domain, and it can change the time and frequency windows according to the variation of signals frequency, so utilizing it can detect the singularity of signals efficiently. In this paper we analyze the singularity of fault transient signals in power system and get its particularity, then give the algorithm of detecting singularity of fault transient signals with wavelet transform which confirm the accurate detection of distinguished vertex.

Keywords: wavelet analysis; singularity; fault transient signals; extraction at fault time

(上接第7页)

收稿日期: 2000-06-13

基金项目: 中华电力教育基金会许继奖教金资助项目

作者简介: 黄登峰(1976 -),男,硕士,研究方向为人工智能在电力系统中的应用; 郁惟镛(1940 -),教授,博导,从事电力系统继电保护及综合自动化研究。

A new algorithm of distinguishing magnetizing inrush current based on fuzzy multi-criteria

HUANG Deng-feng, YU Wei-yong, ZHAO Liang, WANG Hui-fen
(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: After analyzing the schemes of transformer protection in existence, we present a new algorithm based on fuzzy set theory, which integrates the merits of all the other rules. All principles are verified by the EMTP, the result shows that the new algorithm is useful and can discriminate the inrush and fault current not only quickly, but also reliably.

Keywords: transformer protection; magnetizing inrush current; fuzzy set theory