

# 自适应算法在有载调压变压器差动保护中的应用

莫耀赐, 崔杨

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 首先分析了有载调压变压器由于变压器抽头的改变而引出的问题,在此基础上提出一种自适应算法,可在线消除由于 CT不匹配引起不平衡电流的影响。另外,对于励磁涌流的判别,提出一种基于电压开关量的自适应算法。仿真实例证明该文算法对 CT电流校正、励磁涌流鉴别是有效的,在保证动作时间的同时增加了动作的可靠性。

关键词: 自适应; 差动保护; 变压器抽头; 励磁涌流

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)09-0050-04

## 0 引言

现代电力系统能够可靠地输送电能,保护用继电器在这里扮演了很重要的角色,它连续监视系统的运行状态,并在其整定的保护区域内发现故障或不正常的情况,然后启动最少数量的断路器将故障切除,以免引起额外的损失,甚至将会引起系统的崩溃。

电力变压器是电力系统中使用相当普遍和十分重要的电气设备。它如果发生故障将给供电的可靠性和系统的正常运行带来严重后果。为了保证变压器的安全运行,防止故障的扩大,按照变压器可能发生的故障装设灵敏、快速、可靠和选择性好的保护是十分必要的。

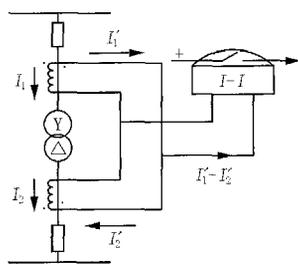


图1 双绕组变压器纵差动保护的单相原理接线图

Fig 1 Single-phase wiring diagram of differential protection for double-coil transformer

差动保护已成为大型变压器的标准主保护方式。众所周知,在变压器内部故障时流过差动元件的电流要远大于正常运行时流过的电流。即使在正常运行中,由于变压器正常的励磁电流和 CT及其它因素的影响,流过差动元件的电流也不等于零。

自适应保护是一种能根据系统运行情况和故障

状态的变化而适时改变保护性能、定值或自动闭锁的保护装置。计算机在电力系统保护和控制中的应用为自适应继电保护提供了良好可靠的基础<sup>[1]</sup>。

电流差动继电器被诸如励磁涌流、变压器抽头改变及 CT不匹配等因素影响,但在微机保护中可通过数字算法来消除这些因素的影响。本文主要讨论对 CT不匹配的补偿及励磁涌流自适应算法的研究。

## 1 CT不匹配的补偿(电流校正)

一般的电力变压器都有可以控制调整的分接抽头,有载调压变压器能在带负荷的状态下调节分接抽头的位置以控制变压器变比的变化,来适应系统电压的改变。

CT不匹配是随变压器抽头的改变而出现的问题,由于每个抽头的位置是可以预先知道的,那么就可以通过一个校正系数,计算 CT二次侧电流来获得真实的一次侧电流的情况。

CT不匹配可以从变压器两侧 CT二次侧电流的比率得出,此时是由于变压器抽头位置发生了变化。以双绕组变压器为例,分接头在高压侧。

定义 CT不匹配系数  $m$ ,

$$m_1 = \frac{(I_1 / CTR_1) - (I_2 / CTR_2)}{(I_1 / CTR_1)} = 1 - \frac{I_2 CTR_1}{I_1 CTR_2} \quad (1)$$

$$m_2 = \frac{(I_1 / CTR_1) - (I_2 / CTR_2)}{(I_2 / CTR_2)} = \frac{I_1 CTR_2}{I_2 CTR_1} - 1 \quad (2)$$

式中  $I_1, I_2$  为变压器高、低压两侧的实际电流;  $CTR_1, CTR_2$  为 CT一次侧和二次侧的变比;  $m_1$  是以高压侧 CT二次侧电流作参考时的不匹配系数;  $m_2$  是以低压侧 CT二次侧电流作参考时的不匹配系数。

由于分接头设在高压侧,当分接头改变时为了计算真实的高压侧电流(指反映到CT一次侧),设校正因数  $C_f$  (correction factor)为:

$$C_f = 1 - m_1 = \frac{1}{1 + m_2} = \frac{I_2 CTR_1}{I_1 CTR_2} \quad (3)$$

$CTR_1 / CTR_2$  是不变的;而  $I_2 / I_1$  是随抽头变化而变化的。在计算时将测量值乘以校正因数就可以得到实际电流值。不同抽头位置对应不同的校正因数,可以事先将各种情况的值计算出来存储到继电器的内存中。在实际运行中,抽头位置被一直监控着,当其位置改变时即调用相应的校正因数来进行校正。

举例说明:

设有载调压变压器有三个分接抽头,分别对应三个变比。变压器原、副边电流分别为  $I_1, I_2$ , CT一次侧、二次侧电流分别为  $i_1, i_2$ 。变压器经常工作在抽头 1 的位置上,即此时为了保证差动回路中无电流,CT的变比应为:  $(I_1 / I_2) = (CTR_1 / CTR_2) = (1 / 2)$  这里  $CTR_1 = (I_1 / i_1)$  是原边侧 CT 的变比;  $CTR_2 = (I_2 / i_2)$  是副边侧 CT 的变比。

表 1 中各抽头位置对应的比值为变压器原、副边的电流比。

表 1 CT 电流随变压器抽头改变而出现的变化

Tab 1 Variation of CT current with tap changing

	$I_1 / \text{kA}$	$I_2 / \text{kA}$	$i_1 / \text{A}$	$i_2 / \text{A}$
Tap1: (1/2)	5	10	0.5	0.5
Tap2: (1/4)	2.5	10	0.25	0.5
Tap3: (1/10)	1	10	0.1	0.5

从表中可看出当抽头位置改变时,若不调整 CT 的变比,在正常工作时差动回路中也会有电流流过。运用上述电流校正原理可以随抽头的改变而实时改变 CT 的变比,如下:

$$i_1^* = i_1 \times C_f = 0.5 \times \frac{2}{1} \times \frac{1}{2} = 0.5 \text{ A} \quad (4)$$

$$i_2^* = i_2 \times C_f = 0.25 \times \frac{4}{1} \times \frac{1}{2} = 0.5 \text{ A} \quad (5)$$

$$i_3^* = i_3 \times C_f = 0.1 \times \frac{10}{1} \times \frac{1}{2} = 0.5 \text{ A} \quad (6)$$

其中  $i_1^*, i_2^*, i_3^*$  是经电流校正后的电流值。可以得出经校正后,消除了由于抽头改变所带来的不平衡电流。

## 2 励磁涌流的判别

### 2.1 励磁涌流仿真实例

差动保护是瞬时保护,它是在一次系统的暂态

过程中发出跳闸脉冲的。因此暂态过程中的不平衡电流对它的影响必须给予考虑。正常情况下,变压器励磁电流  $i_0$  很小,通常只有额定电流的 2% ~ 5%,故它使差动回路中的不平衡电流增加很少。在外部短路时由于系统电压下降,  $i_0$  也将减小。因此,在稳态情况下,  $i_0$  对差动保护的影响常常略去不计。

但是,在电压突然增加的特殊情况下,例如在空载投入变压器或外部故障切除后恢复供电等情况下,就可能产生很大的励磁电流,这种暂态过程中出现的变压器的励磁电流通常称为励磁涌流。由于励磁涌流的存在常常导致差动保护误动作,给变压器差动保护的实现带来困难<sup>[2]</sup>。

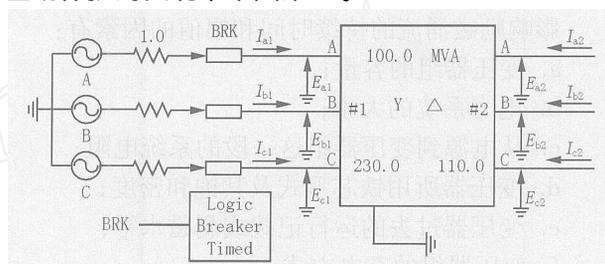


图 2 空载合闸仿真接线图

Fig 2 Simulative wiring diagram of switching-in on no-load

图 2 是空载合闸原理仿真接线图,所用仿真工具为 PSCAD4.0.1/EMTDC,采样频率为 1 000 Hz,图 3、4 分别为在  $t=0.1$  s 时合闸(空载)一次侧电流和电压的变化情况。

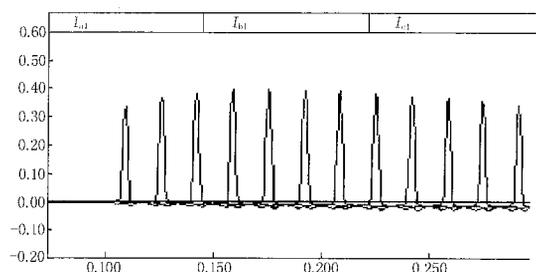


图 3 典型的三相励磁涌流波形

Fig 3 Typical three-phase wave of excitation inrush current

多次仿真试验的结果表明,励磁涌流对差动接线的继电器而言,表现为内部故障,其瞬时峰值可能达到满负载峰值的 8 ~ 30 倍<sup>[3]</sup>。且具有如下特点:

1) 励磁涌流波形中含有很大的非周期分量,它偏于时间轴的一方,并迅速衰减,但随变压器容量的增大衰减时间可能很长;

2) 涌流的波形经削去负波后出现间断;

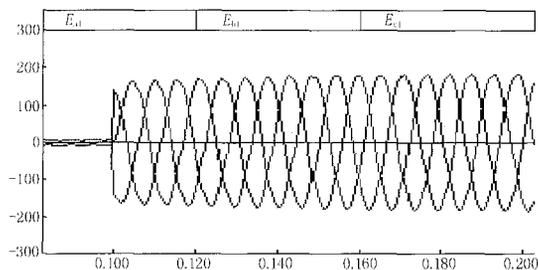


图 4 空载合闸一次侧电压波形(三相)

Fig 4 Three-phase voltage wave on source side of switching-in on no-load

3) 涌流波形中,含有大量的高次谐波分量,其中以二次谐波为主。

影响励磁涌流的持续时间和幅值的因素有:

- 变压器组的容量;
- 电力系统的大小;
- 从电源到变压器组这一段的系统电阻;
- 变压器所用铁芯型式及其饱和密度;
- 变压器过去的运行记载或剩磁水平;
- 变压器组的充电方式。

## 2.2 励磁涌流判别的自适应算法

空载合闸或从外部故障恢复时都将产生励磁涌流,而且这两种情况都伴随有端电压的突然增大<sup>[4]</sup>,如图 4。增大的电压可以由监视变压器电压输入量得到,之后比较一个周波前后的电压量,得到突变量的大小。这里提出一种开关量原理,即以电压的突变量作为开关量,决定是否启动 2 次谐波制动来判断是否励磁涌流,以此来提高可靠性。若突变量大于门限值,则启动谐波制动。以一个周波取 16 个点为例,若

$$V_{1k} > d \times V_{1(k-16)} \quad (7)$$

这里  $d$  是门限系数;  $V_{1k}$ ,  $V_{1(k-16)}$  分别是第  $k$  和第  $(k-16)$  个采样点的原边电压经全波整流取的平均值。

式 (7) 成立,则启动 2 次谐波制动来判断是否励磁涌流,若不成立,则可直接发跳闸信号,这样就提高了动作的可靠性。

2 次谐波制动判据:

$$D = \frac{I_{d2}}{I_{d1}} > 0.2 \quad (8)$$

其中,  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  是差电流中基波与二次谐波电流。

这里采用基于数字余弦变换(由 Vema 和 Kakoti 提出)简化后的算法<sup>[5]</sup>,每周波取 16 个点。

以 A 相为例,先进行电压突变量(即开关量)的

监测,再决定是否启动二次谐波制动,以此来提高动作的可靠性。

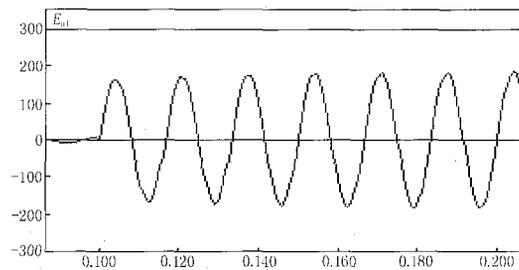


图 5 一次侧 A 相电压波形

Fig 5 A phase voltage wave on source side

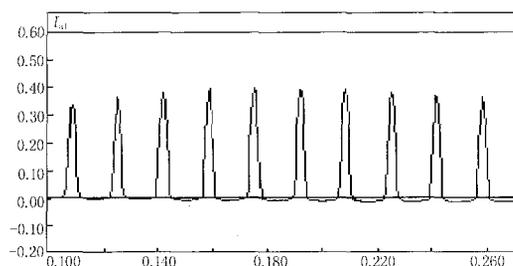


图 6 一次侧 A 相励磁涌流波形

Fig 6 A phase excitation inrush wave on source side

表 2 空载合闸一次侧励磁涌流谐波分析

Tab 2 Harmonic analysis of source side excitation inrush current on switching-in on no-load

相别	时间 /ms	谐波次数		
		0	1	2
A	100 ~ 120	815	100	20
	120 ~ 140	74	100	68
	140 ~ 160	60	100	74
	160 ~ 180	55	100	71
	180 ~ 200	52	100	75

运用公式 (8) 对表 2 的数据进行判断,符合励磁涌流的特征,继电器可出口跳闸。

## 2.3 程序框图

整个判别过程的算法流程见图 7。

## 3 结论

由于分接头的位置是可以预知的,所以当选定某个抽头时,程序可根据事先定好的校正系数,自适应地选择相应的补偿方式,来消除由抽头改变所带来的不平衡电流的影响。励磁涌流的判别则由于引入了电压开关量而增强了保护的防误动性及可靠性。

仿真试验所用变压器模型主要参数为:

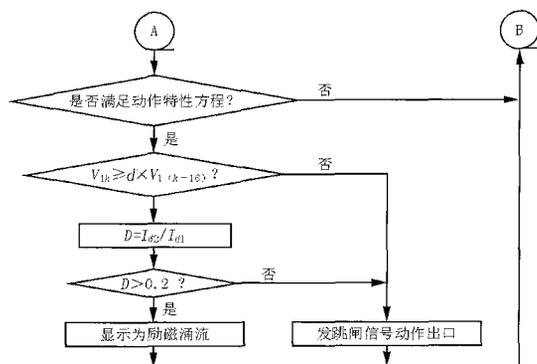


图 7 励磁涌流判别算法流程图

Fig 7 Arithmetic flow chart of excitation inrush current distinguishing

容量 100 MVA,电压等级 230  $\pm 2 \times 5\%$  / 110 kV,  $Y_0 / D-11$ 接线。

通过 PSCAD4.0.1/EMTDC 仿真得到原始数据,主算程序用 C 语言编制(考虑其高效性),经过电流校正、滤波及判别,所提出的自适应方案在合理的时间内能够正确识别励磁涌流状态。

#### 参考文献:

- [1] 葛耀中. 自适应继电保护及其前景展望 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21(9): 42-46  
GE Yao-zhong Adaptive Protection Relay and Its Prospect of Development [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(9): 42-46

- [2] 吕继绍. 电力系统继电保护原理与运行分析 [J]. 北京: 中国电力出版社, 1998  
LÜ Ji-shao. Theory and Function Analysis of Electric Power System Protection [J]. Beijing: China Electric Power Press, 1998
- [3] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998  
WANG Wei-jian. The Application of Generator Transformer Protection [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998
- [4] 唐跃中, 等. 变压器保护中几种励磁涌流判别方法的分析和评价 [J]. 电力自动化设备, 1995, 15(1): 1-7.  
TANG Yue-zhong, et al. Analysis and Evaluation of Several Magnetizing Inrush Distinguishing Methods in Transformer Protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 1995, 15(1): 1-7.
- [5] Maheshwari R P, Vema H K. Adaptive Digital Differential Relay of Parabolic Characteristic for Transformer Protection [J]. Electric Machines and Power System, 1997, 25: 459-473.

收稿日期: 2004-08-19; 修回日期: 2004-11-10

#### 作者简介:

莫耀赐 (1950 - ), 男, 副教授, 主要从事电力系统继电保护教学和自适应保护研究工作; E-mail: cc975@163.com  
崔杨 (1980 - ), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动控制技术。

### Application of adaptive algorithm in tap-changeable transformer differential protection

MO Yao-ci, CUI Yang

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** There are two aspects of applications of self-adaptive principle in differential protection of transformer with taps. Firstly, by analyzing problems caused by tap-changing, an adaptive algorithm is proposed. It can eliminate the influence of CT unbalanced current online. Then for excitation inrush current distinguishing, another adaptive algorithm based on voltage increment is put forward. Simulation instance has tested their availabilities of CT currents correction and inrush discrimination. It provides discrimination between faults and excitation inrush.

**Key words:** adaptive; differential protection; transformer tap; excitation inrush current

(上接第 26 页 continued from page 26)

**Abstract:** Switches and tapping nodes are regarded as nodes. Feeder lines are regarded as edges. The connection of nodes and edges is described by adjacent table. Distribution transformers are subordinate to the corresponding edges. A topology editing table with fourteen columns is put forward to record the editing steps. Each line of the table is a record of one editing step. The ways to add a node, eliminate a node, change the type of a node, add an edge and eliminate an edge are detailed. The method of adjusting the subordinate relationship between distribution transformers and edges is also discussed. The fast incremental modeling of distribution networks based on the topology editing table is described. A practical example is given to demonstrate the proposed method, which shows its feasibility.

**Key words:** distribution networks; network topology; modeling