

# 发一变组增量差动微机保护

清华大学 李海 王维俭

## 1 引言

从近十几年来国内外关于变压器微机保护的研究文献来看,大致有两种发展趋势,一种是模仿模拟型变压器保护采用差动原理,以二次谐波和间断角等波形特征来闭锁励磁涌流引起的误动作;一种是从变压器的非线性模型出发,利用两侧电流、电压量检测变压器的内部故障,从原理上避免了励磁涌流引起的误动。

模型法之所以能够精确地区分内部故障和外部故障、励磁涌流、过激磁等,也可以说是因为它顾及了变压器两侧的电压,输入了较多的信息,从而得到了较好的特性。但是,目前电力系统中,变压器高压侧出口与开关之间一般不装设PT,500kV母线的PT大多是CVT(电容式电压互感器),暂态特性较坏,致使模型法在普遍应用时受到限制。

差动原理应用于变压器保护有着悠久的历史,关键问题是区分励磁涌流和内部故障。一般利用两者在波形上的明显不同,例如二次谐波的含量或间断角的大小,以防止励磁涌流下的误动作。本文选用了二次谐波制动方式,为了区分内部短路和外部短路,通常采用传统的比率差动原理,利用微机保护的优点,使动作特性更趋于合理,我们选用了增量差动原理,能更灵敏地动作于内部小故障。

## 2 算法说明

增量差动保护原理是文献<sup>[3]</sup>最早提出的。简介如下:

.....

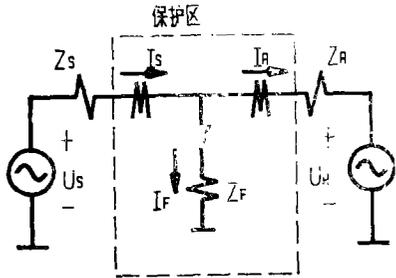
本文提出的故障分类技术,对噪声模型参数的准确性要求很高,因为只有正确的模型参数,才能得到正确的结果,而正确的模型参数又取决于起始状态估计和噪声的统计特性。本文用到的模型参数是通过大量的仿真运算确定的。

### 参考文献

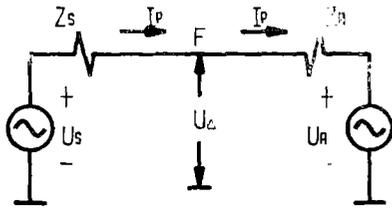
- [1] 浙江大学教学引航。概率论与数理统计。人民教育出版社。
- [2] A. Girgis, Implementation of Kalman and Adaptive Kalman Filtering Algorithms for Digital Distance protection on a vector signal Processor. IEEE Transaction on power, Deliverg. Vol 4. No 1. January 1989.
- [3] G. W. Swift, The spectra of Fault Induced Transients. IEEE. PES Summer Meeting July 1978, PP1~7.

差动保护的单相电路如图 1 中 (a) 所示, 故障前负荷电流  $I_P$  和故障后电流增量  $I_{\Delta}$  的迭加如图 1 中 (b)、(c) 所示。

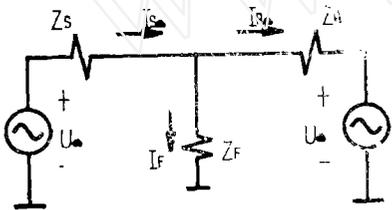
将送、受端电流  $I_S$  和  $I_R$  分解为: 故障前负荷电流分量  $I_P$  和故障引起的增量  $I_{\Delta}$ , 即:



(a)



(b)



(c)

图 1 故障前后网络迭加

$$I_S = I_S - I_P + I_P = I_{S\Delta} + I_P \quad (1)$$

$$I_R = I_R - I_P + I_P = I_{R\Delta} + I_P \quad (2)$$

式中  $I_P$  可以看成是由正常运行的电源  $U_S$  和  $U_R$  产生,  $I_{\Delta}$  可以看成是由故障点 (F) 电压  $U_f$  产生, 用增量电流  $I_{S\Delta}$  和  $I_{R\Delta}$  构成差动保护, 即有:

$$|I_{S\Delta} - I_{R\Delta}| > K_T \cdot |(I_{S\Delta} + I_{R\Delta}) / 2| \quad (3)$$

若令: 故障电流  $I_F = I_{S\Delta} - I_{R\Delta}$

制动电流  $I_{tk} = (I_{S\Delta} + I_{R\Delta}) / 2$

则由图 1 中 (c) 故障网络可得:

$$\begin{aligned} |I_F / I_{tk}| &= 2 \cdot |(I_{S\Delta} - I_{R\Delta}) / (I_{S\Delta} + I_{R\Delta})| \\ &= 2 \cdot |(Z_S + Z_R) / (Z_R - Z_S)| \end{aligned} \quad (4)$$

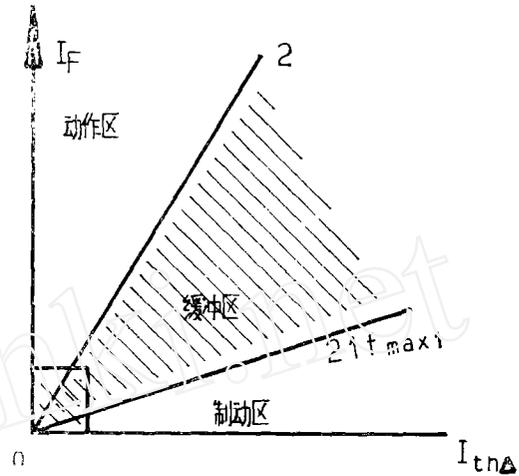


图 2 增量差动动作特性

对于一般的电力系统， $Z_S$ 和 $Z_R$ 各自的阻抗角不会超过 $90^\circ$ ，则有 $|I_F/I_{I,k}| \geq 2$ 。特别应该指出的是式(4)与过渡电阻( $Z_F$ )无关，使这种保护对高阻接地故障有较高的灵敏度。考虑各种工况可知：

$$\left. \begin{array}{l} \text{外部故障: } |I_F/I_{I,k}| \leq 2f_{max} \\ \text{内部故障: } |I_F/I_{I,k}| \geq 2 \\ \text{正常运行: } |I_F| \leq \xi, |I_{I,k}| \leq \xi \end{array} \right\} \quad (5)$$

式中： $f_{max}$ 是电流互感器的最大相对误差；

$\xi$ 是计算死区，与装置的精度有关。对应上式的动作特性如图2所示，在动作区与制动区之间有一很大的缓冲区，保证了选择性。

上述原理在应用于发一变组保护时，还必须考虑变压器分接头的调整、励磁涌流和过激磁的影响。 $f_{max}$ 也必须考虑变压器两侧CT不同型和CT在暂态过程中的最大误差，不能简单以电流互感器的10%误差曲线确定。

变压器分接头调整时产生的不平衡电流只在调整瞬间对增量差动保护有影响，调整以后，该不平衡电流在求电流的增量过程中会被自动消除。

对于励磁涌流引起的误动仍沿用传统的二次谐波制动方式，滤波算法选用能抑制直流分量的富氏全波算法，公式如下（采样频率为600Hz）：

$$\begin{aligned} \text{基波: } I_{C1} &= \frac{1}{6} \sum_{k=0}^{11} i_k \cos \frac{K\pi}{6} \\ &= \frac{1}{12} [(i_2 + i_{10} - i_4 - i_8) + \sqrt{3}(i_1 + i_{11} - i_5 - i_7) + Z(i_0 - i_6)] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} I_{S1} &= \frac{1}{6} \sum_{k=0}^{11} i_k \sin \frac{K\pi}{6} \\ &= \frac{1}{12} [(i_1 + i_5 - i_7 - i_{11}) + \sqrt{3}(i_2 + i_4 - i_8 - i_{10}) + 2(i_3 - i_9)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{二次谐波: } I_{C2} &= \frac{1}{6} \sum_{k=0}^{11} i_k \cos \frac{2K\pi}{3} \\ &= \frac{1}{12} [(i_1 - i_2 - i_4 + i_5 + i_7 - i_8 - i_{10} + i_{11}) + 2(i_0 - i_3 + i_6 - i_9)] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} I_{S2} &= \frac{1}{6} \sum_{k=0}^{11} i_k \sin \frac{2K\pi}{3} \\ &= \frac{1}{12} [\sqrt{3}(i_1 + i_2 - i_4 - i_5 + i_7 + i_8 - i_{10} - i_{11})] \end{aligned} \quad (9)$$

闭锁方式采用“或”门，即只要有一相电流具备涌流特征，就闭锁三相保护，制动比可以选择为12.5%、17.7%、25%三档。

对于过激磁引起的误动采用五次谐波闭锁，制动比取为35%，用富氏全波算法提取五次谐波，算法如下：

$$\begin{aligned}
 \text{五次谐波: } i_{c5} &= \frac{1}{6} \sum_{k=0}^{11} i_k \cos \frac{5\pi}{6} \cdot k \\
 &= \frac{1}{12} [(i_2 - i_4 - i_8 + i_{10}) + \sqrt{3}(-i_1 + i_5 + i_7 - i_{11}) + 2(i_6 - i_9)]
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 i_{s5} &= \frac{1}{6} \sum_{k=0}^{11} i_k \sin \frac{5\pi}{6} \cdot k \\
 &= \frac{1}{12} [(i_1 + i_5 - i_7 - i_{11}) + \sqrt{3}(-i_2 - i_4 + i_8 + i_{10}) + 2(i_3 - i_6)]
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

### 3 软件概述

本保护模块配置保护如下:

- 1°发一变组增量差动保护;
- 2°发一变组差动速断保护;
- 3°发电机定子绕组过负荷保护(定时限部分和反时限部分);
- 4°变压器高压侧中性点零序过流保护;
- 5°低频积算保护。

同时,还考虑了一部分软件自检功能。

程序框图见图3所示。由一个主程序、两个中断服务程序和几个功能子程序组成。中断程序之一是测频中断服务程序HSIINT,每工频周期中断一次,实时跟踪系统频率,修正采样间隔,保证每周波均匀采样12点;中断程序之二是软件定时器中断服务程序SOFTIM,每100ms中断一次,用于后备保护的動作延时,即使在“暂态监视”启动之后,保护程序没有运行后备保护,计时仍在正常运转,“暂态监视”消失以后,后备保护的定时不必修正。

图3中的“暂态监视启动?”用下式判定:

$$\begin{aligned}
 &|i_x(n) - i_x(n-12)| > 0.1I_n \\
 &\text{或 } |i_D(n) - i_D(n-12)| > 0.1I_n
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

式中:  $i_x$ 是和电流瞬时采样值;  $i_D$ 是差电流瞬时采样值;

$I_n$ 是额定电流;  $n$ 是现时刻采样点序号。

试验证明,能够在各种故障情况下灵敏启动,准确地记忆暂态发生前一周的负荷电流。

图3中的“有可能涌流?”用下式判定:

$$I_m > I_m f_{max} \quad \text{或} \quad I_m < I_m
 \tag{13}$$

式中:  $I_m$ 是“暂态监视”启动前一周波的相电流幅值;

$I_m f_{max}$ 是发一变组最大负荷电流;

$I_m$ 是变压器空载励磁电流。

这样,只在有可能涌流的情况(外部故障切除电压恢复和空载合闸时)下,才进行涌流判

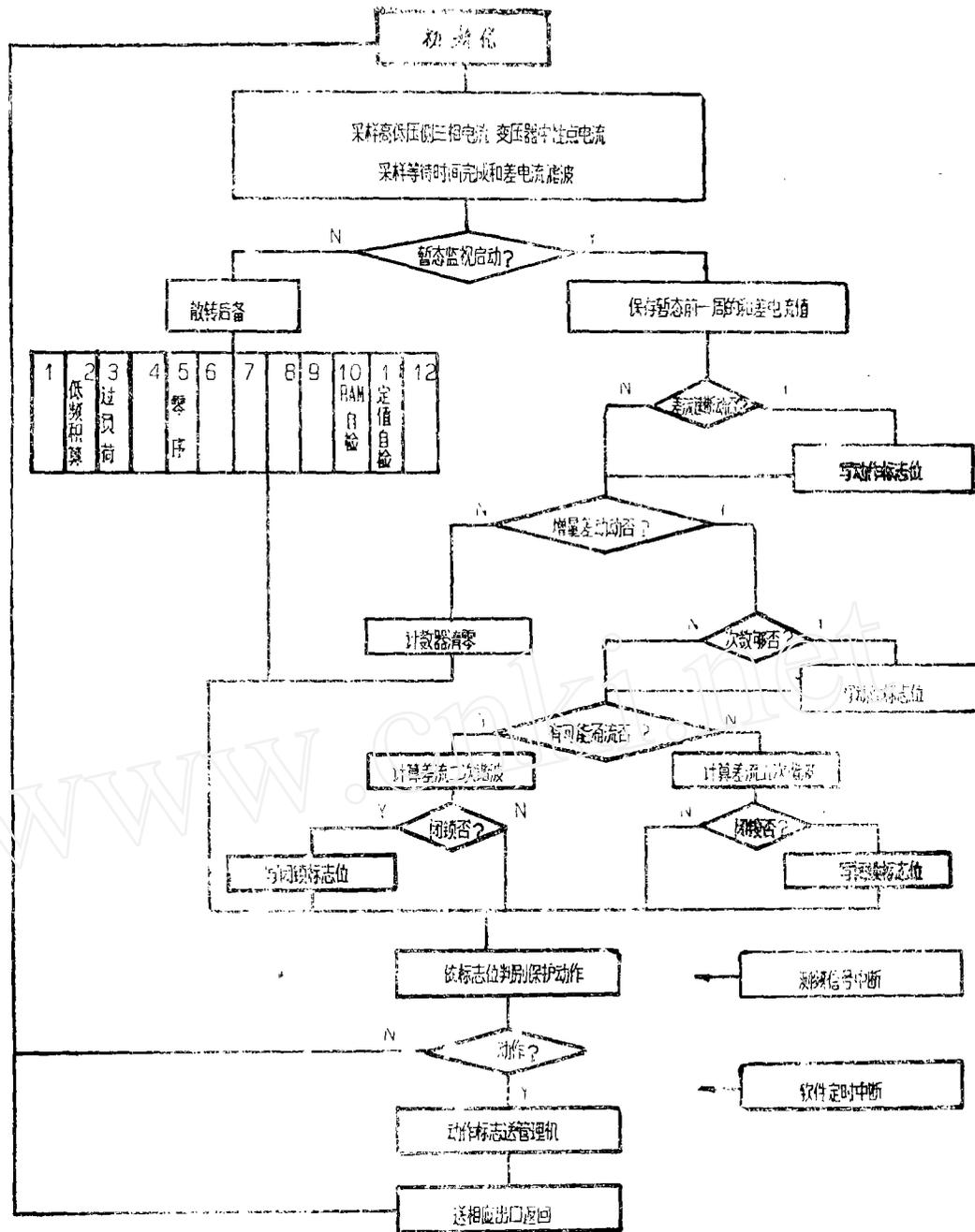


图 3 保护程序主框图

别，保证了在正常运行时发生内部故障后能够迅速给出跳闸信号。

保护算法在程序中具体实施时，为了减少计算工作量，增量差动保护比较的是和电流幅值增量的平方与差电流幅值增量的平方，动作方程为：

$$|\Delta I_{\text{差}}|^2 > |\Delta I_{\text{和}}|^2 - \epsilon \quad (14)$$

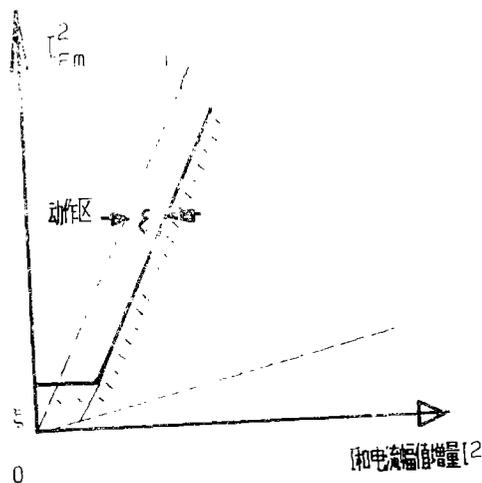


图4 修正后的动作特性

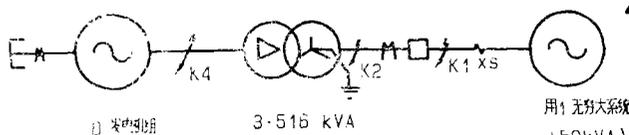


图5 模型系统示意图

表1 增量差动保护动作情况

		内 部		外 部		备 注		
高 压 侧	A相接地	6.7ms动作	短 路 点 K2	保护不动	短 路 点 K1	短路点见图5		
	B.C接地	6.7ms动作		保护不动				
	B.C相短	6.7ms动作		保护不动				
	ABC接地	6.7ms动作		保护不动				
	ABC相短	6.7ms动作		保护不动				
低 压 侧	C经R接地	6.7ms动作	短 路 点 K4		过 渡 电 阻 200Ω			
	B.C相短	6.7ms动作						
	ABC相短	6.7ms动作						
	BC经R短	8.3ms动作						
变 压 器 内 部 故 障	A22匝C短	6.7ms动作			过 渡 电 阻 650Ω 发 电 机 A 相 33% 处 与 C 相 首 端 短			
	高压 A 10匝	8.3ms动作					2.44%	
	高压 A 25匝	6.7ms动作					6.11%	
	低压 A 10匝	6.7ms动作					2.82%	
空 载 合 闸	低压 A 25匝	6.7ms动作				7.06%		
	高压侧 正常						保护不动	换用负荷变压器, 最大涌流3.5I <sub>e</sub> , 高压侧A相绕组5%匝间短路
	高压侧 5%短	60ms动作					保护不动	换用负荷变压器, 最大涌流3.2I <sub>e</sub> , 低压侧A相绕组10%匝间短路
空 载 合 闸	低压侧 正常							
	低压侧 10%短	30ms动作					保护不动	换用负荷变压器, 最大涌流3.2I <sub>e</sub> , 低压侧A相绕组10%匝间短路

式中:  $\varepsilon = (0.04I_e)^2$

$\varepsilon$ 是为了提高发一变组空载运行时内部故障的动作灵敏度, 因为空载时发生内部故障, 相当于单侧电源情况发生内部故障, 差和电流相等, 考虑 $\varepsilon$ 后, 可以进入动作区。动作特性如图4所示, 实线为修正以后的特性, 它是在图2的基础上把动作线水平向右移入了缓冲区, 与制动区相交的区域都属于计算死区, 不进行保护判别。计算死区主要与微机保护装置的识别精度有关, 本文取 $\xi = (0.025I_e)^2$ 。

以上保护功能在以一片 Intel 18098 为 CPU 的微机保护功能块上得以实现。

#### 4 动模试验

动模试验是在清华大学动模试验8号发一变组和1号无穷大系统上完成的。模型系统如图5所示, 试验结果见表1。

$P = 2.5 \text{ kW}$   $Q = 0.8 \text{ kvar}$

图6、图7、图8是三组典型试验曲线。图中(a)、(b)、(c)分别是A、B、C三相高压侧电流(虚线)和机尾电流(实线)，(d)为三相动作量和制动量随时间的变化情况。横轴T为采样序号；纵轴I为电流采样值，(d)中纵轴采用对数坐标表示。

图6是变压器高压侧外部B、C两相接地故障。正常时、动作量很小，制动量也很小，不进行判别；故障以后，制动量迅速上升，且领先并大于动作量，保证不误动。

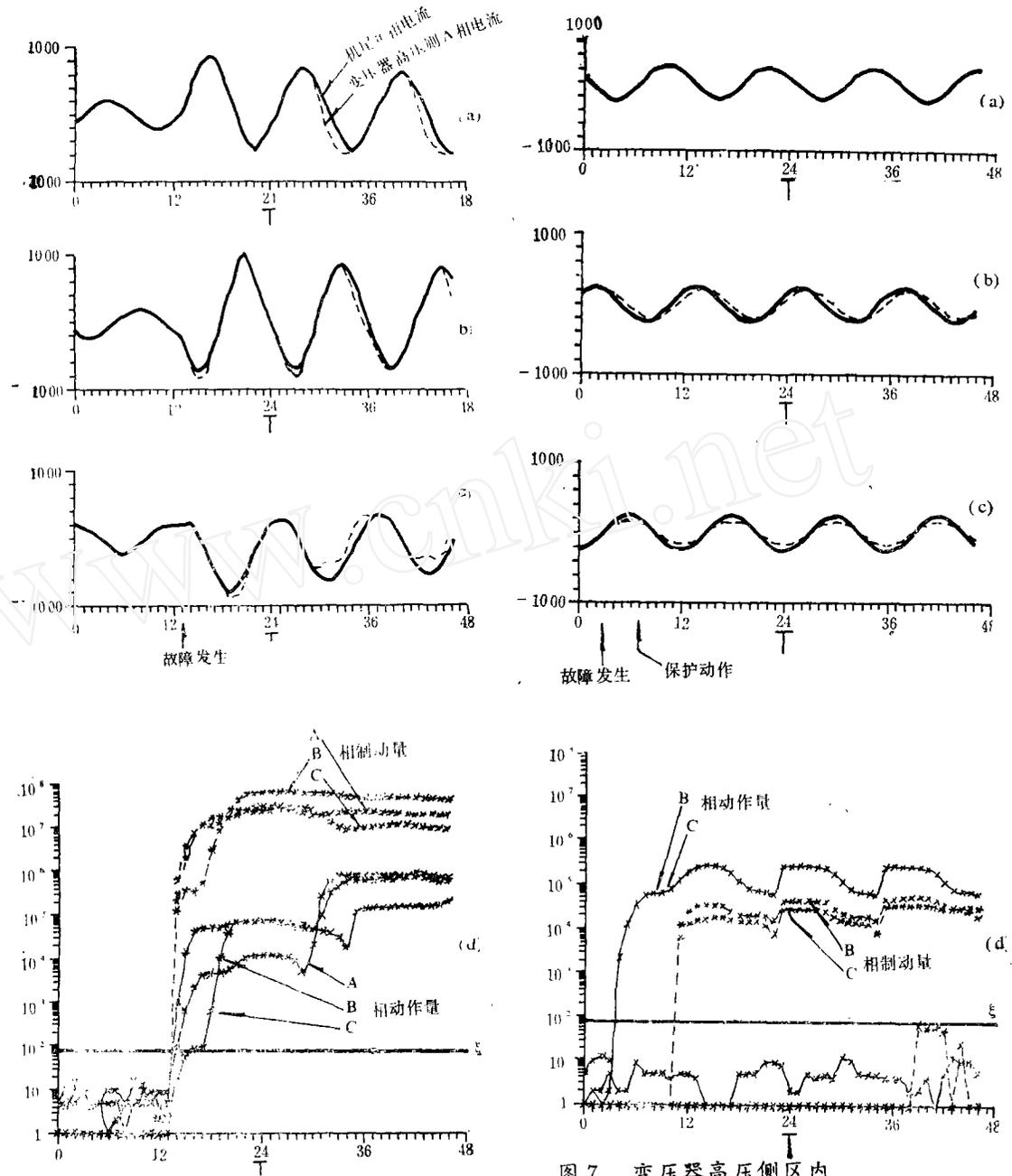


图6 变压器高压侧区外B、C两相接地

图7 变压器高压侧区内C相经 $220\Omega$ 过渡电阻接地

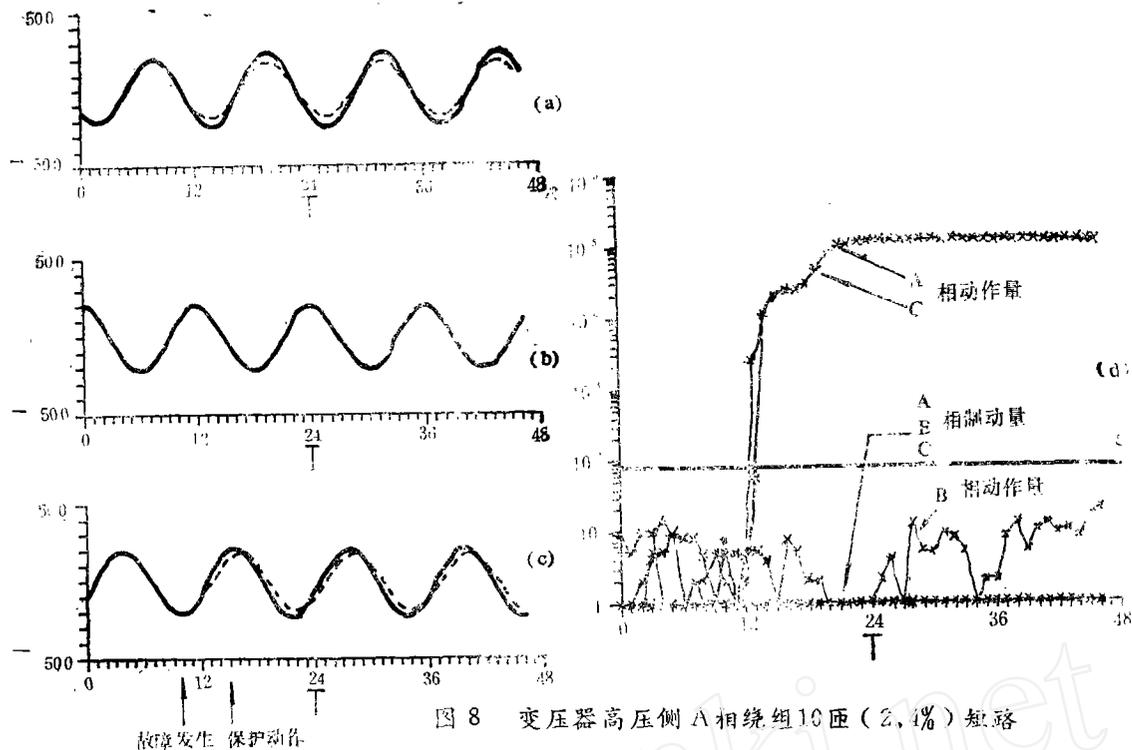


图8 变压器高压侧 A 相绕组 10 匝 (2.4%) 短路

图7是变压器高压侧内部 C 相经  $220\ \Omega$  过渡电阻接地故障。故障后 B、C 两相动作量大于制动量；A 相两侧电流没有变化 (a)，动作量小于  $\xi$ ，保护可靠动作。

图8是变压器高压侧 A 相绕组 10 匝 (2.4%) 匝间短路故障。故障发生后，A、C 两相动作量迅速上升，而制动量一直很小，保护可靠地给出动作信号。

## 5 总结

发一变组增量差动微机保护经动模试验证明，能够灵敏地动作于内部高阻抗接地故障和匝间短路，能可靠地区分内部故障和外部故障、励磁涌流，保护动作时间小于半个周波 (10ms)。

空载合闸于内部故障时，由于采用了二次谐波“或”门闭锁方式，使得保护动作时间较长，今后考虑采用三相综合闭锁方式，以期提高空载合闸于内部匝间短路的动作速度。

由于动模试验室现有条件的限制，过激磁五次谐波闭锁只在静态模拟试验中进行了验证。

### 参考文献

- [1] 王维俭、侯炳蘊编著. 大型机组继电保护理论基础 (第二版). 水利电力出版社, 1989年.
- [2] 陆继璜. 新型微机变压器全套保护装置. 电力系统及其自动化. 1990. 2.
- [3] Patrick J. McCleer. A New Technique of Differential Relaying: The DELTA—Differential Relay, IEEE Trans. PAS, Vol. PAS—101, No.10 Oct. 1982.