

一种鉴别变压器励磁涌流和内部故障的新原理

吕志娟,刘万顺,肖仕武,郑涛

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室,北京 102206)

摘要: 提出一种利用电流波形特征识别变压器励磁涌流和内部故障的方法,该方法综合利用变压器差电流波形在空投涌流时会呈现出尖顶波特性和间断特征,而故障时差电流波形基本为基频正弦波的差异,先计算差电流与其中所包含基频正弦波的相关度 J ,再进一步利用励磁涌流尖顶的凹弧特征构造一个系数 k ,根据 J 和 k 进一步构造一个函数 J_1 区分变压器的励磁涌流和内部故障。动模试验结果表明该方法能够正确区分励磁涌流和故障电流,在空投变压器时能够可靠地闭锁励磁涌流;在变压器各种内部故障时能够可靠地开放保护,动作时间一般在 20 ms 左右,具有较高的灵敏度和可靠性能够满足现代变压器对保护动作可靠性的要求。而且该方法实现方便,计算量小,具有良好的在实际工程中应用的价值。

关键词: 变压器; 差动保护; 励磁涌流; 内部故障

中图分类号: TM772 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)12-0001-05

0 引言

变压器是电力系统中最重要设备之一,在电力系统安全运行中起着重要作用。电流差动保护作为变压器的主保护有着悠久的历史,长期的运行经验表明电流差动保护能够灵敏地区分变压器区内和区外故障,但是在变压器空投和切除外部故障时,会产生励磁涌流,有可能导致保护误动,因此当前变压器差动保护的关键问题是如何可靠地鉴别励磁涌流和内部故障。

目前在变压器差动保护中应用的鉴别励磁涌流和内部故障的原理有二次谐波制动^[1]、间断角识别^[2]、波形比较^[3]等,都是直接或间接利用励磁涌流波形具有间断角这个特征进行励磁涌流和内部故障的鉴别。

我们在对变压器励磁涌流的生成机理进行深入研究后认识到,变压器铁芯在饱和的过程中磁特性具有严重的非线性,其原因一方面是由于变压器铁芯材料的导磁性能随着饱和程度的增加而下降;另一方面是矽钢片的饱和是非均匀的,表层较里层容易饱和,因此励磁涌流和内部故障电流之间在波形上的差异是多方面的。二次谐波制动原理和间断角原理只是利用了这些差异的一个方面的特征量。如果能将多种特征进行综合判别,显然能够提高保护的性能。基于以上认识,本文从变压器内部故障电流和励磁涌流的波形特征入手,利用励磁涌流波形

前半周波波始部呈现凹弧的尖顶波特征和整个周波内的间断特征,来区分变压器内部故障和励磁涌流。理论分析和动模实验结果表明:该方法能够更准确地地区分变压器内部故障和励磁涌流,并具有较强的抗干扰能力。

1 励磁涌流的特点

当变压器空载合闸时,由于其铁芯饱和的非线性磁特性,从而可能产生与短路电流可比拟的励磁涌流,图 1 中曲线 ABP 为变压器的基本励磁曲线, S 点由饱和磁通 ϕ_{sat} 确定,从 S 点作逼近饱和曲线的近似直线 SP 。设合闸时电源电压为: $u = U_m \sin(\omega t + \alpha)$,通过变压器的近似磁化特性折线 SP ,并忽略变压器漏抗,可以得到变压器空载合闸 ($t=0$) 时励磁涌流的近似表达式^[4]如式 (1) 所示。

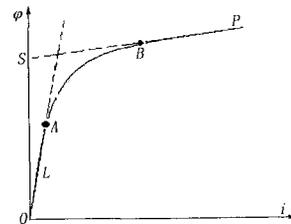


图 1 变压器励磁曲线

Fig 1 Excitation curve of transformer

$$i = \begin{cases} 0, & (\omega t < \alpha) \\ \frac{U_m}{L} [\cos(\omega t - \alpha) - \cos(\alpha) - \frac{r}{m} \sin(\omega t - \alpha)], & (\omega t \geq \alpha) \end{cases} \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50277012)

其中： Φ 为变压器铁芯磁通； Φ_m 为稳态磁通幅值，额定工况下为额定磁通幅值 Φ_e ； Φ_r 为变压器剩磁； L 为 $\Phi > \Phi_{sat}$ 时变压器的励磁电感，近似看作常数。

由公式(1)可知，当变压器磁化曲线采用简化的两折线模型时，励磁涌流为正弦波的一部分(不计直流)，而实际变压器铁芯在饱和的过程中磁特性具有严重的非线性，如图1中AB所示，我们称之为非线性段，而OA为变压器正常运行段，变压器铁芯不饱和，励磁特性呈线性变化，励磁电感非常大；BP为变压器深度饱和段，励磁特性基本上也是线性的，其电感也可近似看作一个常数。由励磁涌流产生的机理^[4]可知：在磁化曲线的非线性段AB，其励磁涌流波形是非正弦的，直到变压器进入深度饱和(BP段)后，励磁涌流波形才呈现正弦特征，因此，实际的励磁涌流波形应是一个具有间断角的尖顶波，其非间断部分的波形与正弦波形存在较大的差异。

图2为动模试验记录得到的励磁涌流波形，其中图2(a)为变压器Y侧三相非对称性涌流波形，从中可以清楚地看到非对称性涌流的尖顶波特征。另外，由于变压器采用Y/△接法，因此在形成差动电流时，需要对Y侧电流进行变换，此时的励磁涌流为两相磁化电流之差，如图2(b)所示，其中 i_{a-b} 、 i_{b-c} 仍为非对称性涌流，由于各相磁化电流进入深度饱和的时间不同，因此将两相电流求差后其尖顶波特征更加明显。 i_{c-a} 为对称性涌流，其间断角有所减小，但其波形与基频正弦波差异性仍然很大。而对于内部故障电流，其波形基本为基频正弦波。

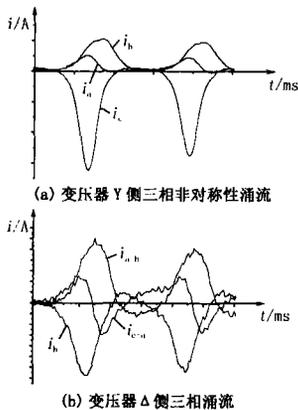


图2 变压器励磁涌流

Fig 2 Inrush current of transformer

2 鉴别励磁涌流的方法

励磁涌流波形具有间断的特征和始部呈凹弧的

尖顶波特征，而对于内部故障时的差电流，其波形基本为基频正弦波，基于这种不同的特征，首先利用傅里叶变换得到差电流中所包含基波的幅值和初相角，则得到一个标准的基频正弦波形，然后计算该正弦波与差电流波形的相关度 J ，由于励磁涌流波形存在间断的特征，因此差电流波形与其中所包含的基频正弦波的相关度较低；对于内部故障时的差电流波形基本为基频正弦波，因此此时的差电流波形与其中所包含的基频正弦波的相关度较高。具体实现方法为：

利用傅氏变换计算差电流 $i(t)$ 中基频正弦波的幅值和相角，其离散化处理公式为：

$$I_a = \frac{2}{T} \sum_{j=0}^N i(j) \sin\left(\frac{2\pi}{N} j\right) \quad (2)$$

$$I_b = \frac{2}{T} \sum_{j=0}^N i(j) \cos\left(\frac{2\pi}{N} j\right) \quad (3)$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_b^2} \quad (4)$$

$$\phi = \arctan \frac{I_a}{I_b} \quad (5)$$

式中： N 为每周期的采样点数(本文以每周期64点为研究对象)。得到基频正弦信号 $i_k = I \sin(\omega t + \phi)$ ，然后计算其与差电流的相关度 J ：

$$J = \frac{\sum_{k=0}^{64} i(k) i_k(k)}{\sum_{k=0}^{64} i(k)^2 \sum_{k=0}^{64} i_k(k)^2} \quad (6)$$

此时计算得到的相关度 J 主要突出了励磁涌流的间断特征。变压器差电流波形还存在始部呈凹弧的尖顶波特性，因此还可以再次充分地利用励磁涌流尖顶波的凹弧特征，进一步提高判据的可靠性和灵敏性。在发生空投励磁涌流时，励磁涌流波形前半部分的始部呈凹弧的尖顶波特征，励磁涌流的具有凹弧特性的尖顶波形如图3(a)所示。

可见，励磁涌流凹弧特性的存在，使最大值 i_b 两侧相邻的两个步长内存在 $S_1 + S_2 < S_3$ 。

其中 $S_1 + S_2$ 表示由时间轴上相邻三个采样点 t_k 、 t_{k+1} 、 t_{k+2} (即两个采样间隔)和这三个点对应的电流采样值组成的两个梯形(分别由 t_k 、 i_k 、 t_{k+1} 、 i_{k+1} 和 t_{k+1} 、 i_{k+1} 、 t_{k+2} 、 i_{k+2} 对应点连成的边构成)的面积，根据文献[5]中的Newton-Cotes公式， $S_1 + S_2$ 的面积，即：

$$S_1 + S_2 = \left(\frac{i_k + i_{k+1}}{2} + \frac{i_{k+1} + i_{k+2}}{2} \right) \times t = \frac{i_k + 2i_{k+1} + i_{k+2}}{2} \times t$$

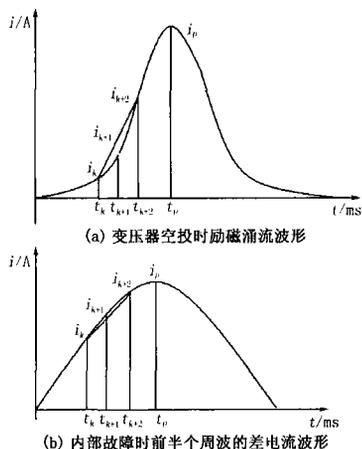


图 3 差电流波形

Fig 3 Waveform of differential current

S_3 表示由时间轴上相邻的三个采样点 t_k, t_{k+1}, t_{k+2} 即两个采样间隔和 t_k, t_{k+2} 时刻的电流采样值组成的梯形 (由 $t_k, i_k, t_{k+2}, i_{k+2}$ 对应点连成的边构成) 的面积, 即:

$$S_3 = \frac{(i_k + i_{k+2})}{2} \times (2 \times t)$$

对于励磁涌流的电流波形, 前半波为具有凹弧特征的尖顶波, 由图 3(a) 所示, $S_1 + S_2 < S_3$ 。

而内部故障电流, 其波形基本为基频正弦波。由图 3(b) 所示, $S_1 + S_2 > S_3$ 。

因此构造系数 k 如式 (7) 所示。式中 t_p 表示保护启动后半周波内采样值取得绝对值最大的采样时刻, N 表示每周期的采样点数 (本文以每周期 64 点采样为研究对象)。

$$k = \sum_{t=t_p-\frac{N}{4}}^{t_p} \frac{(S_1 + S_2) - S_3}{S_1 + S_2} + \sum_{t=t_p}^{t_p+\frac{N}{4}} \frac{(S_1 + S_2) - S_3}{S_1 + S_2} \quad (7)$$

由于励磁涌流时相邻两个步长内 $S_1 + S_2 < S_3$, 因此 k 小于零; 当内部故障时差电流为基频正弦波, 此时相邻两个步长内 $S_1 + S_2 > S_3$, k 大于零。

为使该算法识别励磁涌流和内部故障更灵敏, 根据动模数据发现无论是内部故障还是励磁涌流, k 的绝对值都很小, 为提高灵敏度在 k 前再乘以系数 k_{zd} (根据实际情况选择, 本文选为 40) 来扩大 k 的倍数。

$$J_1 = (1 + k_{zd} k) \times J \quad (8)$$

具体判据: 分别计算三相差电流的 J_1 , 然后与整定值 J_{zd} 比较:

$$J_1 \geq J_{zd} \quad (9)$$

$$J_1 < J_{zd} \quad (10)$$

如果有两相同时满足式 (9), 则判断为内部故障; 如果有两相同时满足式 (10), 则判断为励磁涌流。

整定值 J_{zd} 的选取原则, 因为该判据同时利用了励磁涌流波形的尖顶波特征和间断特征, 灵敏度得到了较大的提高, 因此使得定值的选取范围较宽, 一般故障时 $J_1 > 0$, 励磁涌流时 $J_1 < 0$, 根据动模试验为提高保护动作的可靠性, 本文中定值 J_{zd} 选为 0.8。

3 动态模拟实验

下面用清华大学动模实验室的三相变压器实验数据, 来验证识别方案以及所取定值的合理性。实验变压器是由三个单相变压器组成的三相变压器组, 接线组别为 Y/D-1, 各侧电流互感器二次接成星形。

单相变压器参数分别为: 额定容量 5 kVA, 空载损耗 0.68%, 短路损耗 1.68% ~ 5.35%, 空载电流 1.2%, 原边总匝数 271 匝, 副边总匝数 243, 原边额定电压 460 V, 副边额定电压 400 V。

求得变压器八次空投实验 (出现励磁涌流) 时, 不满足动作条件; 求得变压器八次匝间短路故障 (包括角侧 14.8% 匝间短路和星侧 1.8% 匝间短路) 及四次相间故障、四次空投匝间故障 (空投星侧 1.8% 匝间短路) 时, 均满足动作判据。实验项目的计算结果如表 1 所示。动模实验表明: 在各种情况下, 该判据均能正确识别故障电流和励磁涌流, 灵敏度和可靠性均得到大大提高。

表 1 实验项目计算结果 ($J_{zd} = 0.8$)Tab 1 Results of simulator ($J_{zd} = 0.8$)

	A相 (J_1)	B相 (J_1)	C相 (J_1)	判断结果
星侧空投 1	-4 787.8	-2 184.1	-1 302.2	励磁涌流
星侧空投 2	0 272.1	-2 836.8	-4 905.4	励磁涌流
星侧空投 3	1 075.0	-2 451.8	-2 846.7	励磁涌流
星侧空投 4	-2 288.8	-0 734.4	-1 191.9	励磁涌流
角侧空投 1	-1 066.7	-1 792.6	-3 694.1	励磁涌流
角侧空投 2	-4 696.0	0 808.8	-5 868.4	励磁涌流
角侧空投 3	-2 604.3	-1 739.8	-15 251.6	励磁涌流
角侧空投 4	-4 609.0	0 574.8	-0 183.6	励磁涌流
角侧匝间短路 (14.8%) 1	2 722.1	2 356.6	2 610.9	内部故障
角侧匝间短路 (14.8%) 2	2 944.5	1 359.7	2 908.3	内部故障
角侧匝间短路 (14.8%) 3	3 300.3	1 681.9	3 414.4	内部故障
角侧匝间短路 (14.8%) 4	3 719.5	1 807.1	3 582.3	内部故障
星侧匝间短路 (1.8%) 1	3 716.9	4 314.6	2 446.1	内部故障
星侧匝间短路 (1.8%) 2	0 226.7	1 459.8	5 499.9	内部故障
星侧匝间短路 (1.8%) 3	3 612.9	0 846.1	3 172.8	内部故障
星侧匝间短路 (1.8%) 4	3 673.1	-2 514.2	1 961.3	内部故障
星侧空投匝间短路 (1.8%) 1	3 544.2	4 709.3	3 551.6	内部故障
星侧空投匝间短路 (1.8%) 2	2 163.8	-0 091.5	2 808.2	内部故障
星侧空投匝间短路 (1.8%) 3	3 315.6	-1 775.9	2 901.4	内部故障
星侧空投匝间短路 (1.8%) 4	2 853.7	0 770.6	2 605.9	内部故障

4 与其他几种判据相比较

波形相关法^[3]:通过面积比较的方法,将测量到的一周波变压器差流分成两段等长度的波形,由这两段波形的相关系数和方差构成鉴别励磁涌流的判据。文献[6]中具体分析了这种方法的不足之处,并提出了改进型波形相关法:通过改进的最大面积法重组一周波数据窗内的采样信号,通过比较前后半周波的相关性来区分励磁涌流和内部故障,大大提高了波形相关法的灵敏度。但是由于改进波形相关法提出波形系数为:

$$J = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\sigma^2(X)}} \times \frac{\sigma^2(Y)}{\sigma^2(X)} \quad (11)$$

其中: $\text{Cov}(X, Y)$ 为故障后一周波数据重组后等分为2段; $x(t)$ 和 $y(t)$ 之间的协方差; $\sigma^2(X)$ 为 $x(t)$ 的方差; $\sigma^2(Y)$ 为 $y(t)$ 的方差。

文献[3, 6]提出的比较一周波数据窗内前后半波的波形对称原理受到了很大关注。由于该原理综合利用了波形中的形状、大小及变化率,出于变压器主保护原理双重化的考虑值得进一步深入的研究。

表 2 利用两个判据计算得到的几种故障波形系数比较

Tab 2 Comparison of waveform coefficients by two criterions

故障类型	本文判据 1(波形系数)整定值 0.8			改进型波形对称判据 2(波形系数)整定值 0.80		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相
空投涌流	- 4.787 8	- 2.184 1	- 1.302 2	0.000 2	0.002 2	0.002 3
空投涌流	1.075 0	- 2.451 8	- 2.846 7	0.030 8	0.000 2	0.0020
空投涌流	- 1.911 9	- 3.339 4	0.636 8	0.001 5	0.0033	0.028 2
空投涌流	- 1.100 5	- 2.853 7	0.799 6	0.000 6	0.001 5	0.037 3
角侧内部故障 (AB)	2.697 1	2.702 7	2.677 1	0.602 7	0.604 2	0.600 9
角侧内部故障 (ABN)	1.523 0	2.345 1	2.050 6	0.744 9	0.649 1	0.566 8
角侧内部故障 (AN)	1.471 3	1.472 1	4.009 9	0.588 1	0.587 0	0.462 7
角侧内部故障 (BC)	2.552 4	2.696 4	2.610 0	0.710 8	0.702 3	0.703 9
角侧匝间故障 (14.8%)	2.722 1	2.356 6	2.610 9	0.712 8	0.488 2	0.773 9
角侧匝间故障 (7.3%)	3.228 0	3.137 2	3.292 3	0.523 7	0.482 2	0.523 3
星侧匝间故障 (5.9%)	3.683 9	- 0.971 4	3.398 2	0.574 4	0.628 6	0.555 2
星侧匝间故障 (10.0%)	3.724 8	1.855 0	3.440 8	0.526 4	0.541 7	0.527 2
星侧匝间故障 (13.3%)	3.545 9	2.586 4	2.927 3	0.965 2	0.408 4	0.717 3

5 结论

本文综合利用差电流与其中所包含基频正弦波的相关度和差电流尖顶波的凹弧特征来区分励磁涌流和内部故障,保护动作的灵敏度和可靠性都有了较大的提高。动模试验结果表明该方法能够正确区分励磁涌流和故障电流,在空投变压器时能够可靠地闭锁保护;而在变压器发生各种内部故障时能够可靠地开放保护,动作时间一般在 20 ms 左右,符合现代变压器对保护动作可靠性的要求。

在改进型波形相关法中并没有从理论上证明在故障时 $(Y) > (X)$,只是在模拟实验中,通过角侧三相短路实验数据说明由于衰减非周期分量的影响,会使 $(Y) > (X)$,本文通过动模实验数据计算发现在部分故障时不会出现 $(Y) > (X)$,而是出现 $(Y) < (X)$ 的情况。因此,改进型相关法在内部故障时有可能使相关系数变小。在动模实验中,发现星侧 C 相 16 匝 (匝比 5.9%) 短路、星侧 C 相 27 匝 (匝比 10.0%) 短路、角侧 C 相 18 匝 (匝比 7.3%) 短路和部分相间故障时,改进型波形相关法会出现误动的情况,但是本文提出的新算法就不会发生此种现象。在表 2 中列出了改进型波形相关法与本文提出判据的对比数据,可以看出由于本方法利用了电流波形的多种特征量进行综合判别,本文所提出的判据较改进型波形对称法在灵敏度、可靠性上都有所提高;并且本文提出的判据无需如文献[3, 6]那样,对差电流波形按照最大面积法进行重组,因此克服了波形对称法中波形划分问题对相关度计算的影响。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与运行 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1996
WANG Wei-jian Principle and Application of Electric Power Equipment Protection [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996
- [2] 陈德树, 尹项根, 张哲, 等. 虚拟三次谐波制动式变压器差动保护 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 19-23
CHEN De-shu, YN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al Vir-

- tual Third Harmonic Restrained Transformer Differential Protection Principle and Practice [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (8): 19-23
- [3] 何奔腾,徐习东. 波形比较法变压器差动保护原理 [J]. 中国电机工程学报, 1998, 18 (6): 395-398
HE Ben-teng, XU Xi-dong Protection Based on Wave Comparison [J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18 (6): 395-398
- [4] 王维俭,侯炳蘊. 大型机组继电保护理论基础 [M]. 北京:中国电力出版社, 1996
WANG Wei-jian, HOU Bing-yun Principle of Generators and Transformer Relay Protection [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996
- [5] 翟瑞彩,谢伟松. 数值分析 [M]. 天津:天津大学出版社, 2000
ZHA I Rui-cai, XIE Wei-song Analysis of Numerical Value [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000
- [6] 林湘宁,刘沛,杨春明,等. 利用改进型波形相关法鉴别励磁涌流的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (5): 56-60, 70
L N Xiang-ning, L U Pei, YANG Chun-ming, et al Studies for Identification of the Inrush Based on Improved Correlation Algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (5): 56-60, 70
- [7] 赵光宙,舒侵. 信号分析与处理 [M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
ZHAO Guang-zhou, SHU Qin Analysis and Process of Signal [M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [8] 葛宝明,王祥珩,等. 电力变压器的励磁涌流判据及其发展方向 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (22): 1-5
GE Bao-ming, WANG Xiang-heng, et al Criteria and Development Trend to Identify Inrush Current of Power Transformers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (22): 1-5
- [9] 杨钟皓,董新洲. 基于小波变换的变压器励磁涌流识别方法 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2002, 42 (9): 49-52
YANG Zhong-hao, DONG Xin-zhou Method for Exciting Inrush Detection in Transformers Using Wavelet Transform [J]. Journal of Tsinghua University (Sci&Tech), 2002, 42 (9): 49-52
- [10] 郑涛,刘万顺,肖仕武,等. 一种基于数学形态学提取电流波形特征的变压器保护新原理 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (7): 18-24
ZHENG Tao, L U Wan-shun, XIAO Shi-wu, et al A New Algorithm Based on the Mathematical Morphology for Power Transformer Protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (7): 18-24

收稿日期: 2005-11-29; 修回日期: 2005-12-09

作者简介:

吕志娟 (1980-),女,硕士研究生,主研究方向为微机变压器保护与仿真; E-mail: lvzhijuan@tom.com

刘万顺 (1941-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统故障分析、电力系统微机保护;

肖仕武 (1974-),男,博士,讲师,主要研究方向为电力系统故障分析、电力系统微机保护。

Novel scheme to discriminate inrush current from internal fault of power transformer

L ÜZhi-juan, L U Wan-shun, XIAO Shi-wu, ZHENG Tao

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A new algorithm based on the waveform characteristics is presented. The method synthesizes the characteristic of peak curve and dead angle, while the fault current nearly keeps sinusoid when inrush current seriously distorts. First, this paper calculates the correlation coefficient J of fundamental component of difference current, then according to inrush current characteristic of the peak and concave curve, constructs coefficient k , finally in reference to coefficient of J and k , the discriminate between inrush current and fault current of power transformers can be made. Amount of simulations show this algorithm is effective when internal fault. Moreover, the method is easy to realize and calculating quantity is small. This new identification method has good application value in engineering.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50277012).

Key words: power transformer; current difference protection; inrush current; internal fault