

基于采样值相关原理的变压器保护方案

李肖博¹, 王宝英², 肖仕武¹, 李冰³

(1. 华北电力大学(北京)四方研究所, 北京 102206; 2. 天津电力公司西青供电分公司, 天津 300061; 3. 北京送变电公司调试所, 北京 102401)

摘要: 为提高变压器微机保护性能, 提出一种基于采样值相关度的变压器差动保护新方案, 利用变压器两侧电流的采样值波形的相关度来有效识别变压器内部故障和外部故障, 利用相关原理提取等效瞬时电感变化规律来区分励磁涌流和匝间短路故障。动模实验表明新判据能够快速、可靠地判别变压器内外部故障和励磁涌流。由于借鉴了常规比率差动的定值整定思想, 使得新判据定值的整定简单易行, 同时基于这种方法的判据对频率偏移和谐波的影响也有一定的抵御能力, 在工程中具有良好的实际应用价值。

关键词: 相关度; 采样值差动保护; 内部短路故障; 励磁涌流; 等效瞬时电感

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)07-0001-05

0 引言

电力变压器是电力系统的构成要件之一, 作为电能传送的枢纽, 其重要性不言而喻。近年来, 我国220 kV及以上变压器保护正确动作率一直徘徊在70%~85%之间, 远低于线路保护的正确动作率(99%以上)。因此, 研究动作速度快、可靠性和灵敏性高的变压器保护新方案具有十分重要的意义。

差动保护原理简单、易于实现, 一直为变压器保护所采用, 但在变压器发生励磁涌流的情况下, 差动保护容易误动。此外, 由于变压器各侧额定电压和额定电流不一致, 使得变压器各侧电流互感器在结构形式和传变特性等方面均存在较大的差异, 难免会带来一定的负面影响。一方面, 在正常运行情况下差动回路中的不平衡电流较大; 另一方面, 在变压器外部故障情况下由于某一侧电流互感器饱和而产生大量的不平衡电流时, 也有可能影响变压器差动保护的正常动作行为^[1]。同时, 随着超高压电力系统的发展, 对变压器保护的可靠性和快速性提出了更高的要求。

改善变压器差动保护的性能和探索基于新原理的变压器保护方案备受专家学者的关注。文献[2]提出一种采样值差动保护方案, 与常规相量差动保护相比较, 采样值差动保护无需等待故障后一个周波的数据即可开始进行有关的判断, 具有动作速度快、计算量少等特点, 但是采样值差动判据主要利用了每点采样值的信息进行判断, 抗干扰能力及可靠

性需要进一步研究^[3]。

基于以上认识, 本文提出一种基于采样值相关度的变压器差动保护方案, 利用变压器两侧电流幅值和相位信息, 综合多点采样值信息快速准确识别变压器区内区外故障。同时, 从励磁支路非线性特征出发, 利用相关原理提取等效瞬时电感变化规律准确可靠识别励磁涌流和匝间短路故障, 实现了励磁涌流和匝间短路故障本质上的区分。所提方案在保持采样值差动动作快速的基础上, 对各种瞬间干扰有一定的抑制作用, 提高了保护的可靠性, 即使在变压器空载合闸于内部轻微匝间短路故障时也能够做出快速准确的判别。动模实验验证了该方案的正确性和可行性。

1 利用相关差动判据识别变压器内外部故障

相关差动判据依据变压器两侧电流的采样值波形的相关度来识别变压器内部故障和外部故障, 相关度的原始定义参见文献[4]。文献[5]对相关度计算公式进行了改进, 使得计算出的相关度包含了幅值和相位两个方面的信息, 即只有当两个信号幅值和相位均相似时, 相关度才呈现较大的值。为了更有利于区分两个信号的差异, 本文采用文献[5]中的计算公式求取相关度。

1.1 制动量和动作量的选取

设变压器两侧电流分别为 $x(i)$ 和 $y(i)$, 则: 取变压器两侧电流的相关度做动作量 d_a :

$$d = \frac{\sum_{i=1}^N x(i)y(i)}{\max(\sum_{i=1}^N x^2(i), \sum_{i=1}^N y^2(i))} \quad (1)$$

取变压器穿越电流与被减侧电流相关度构成制动量 z

$$z = \frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (x(i) - y(i))x(i)}{\max(\sum_{i=1}^N x^2(i), \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^N (x(i) - y(i))^2)} \quad (2)$$

其中: N 为数据窗长。

1.2 建立判据

若取电流向变压器为正方向,当变压器内部没有故障时,根据基尔霍夫电流定律,变压器两侧电流大小相等,方向相反,相关度 xy 为 -1 。变压器发生内部故障时,两侧电流大小不相等,但方向相同,相关度 xy 接近 1 ,因此可以通过两侧电流的相关度清楚地区分变压器内部故障和外部故障。

基于采样值相关度的变压器差动原理可以采用以下判据:

$$\text{当 } 0 < z < 1 - \frac{K}{2} \text{ 时, 有:} \\ d > K_{res.1} z - 1 \quad (3)$$

$$\text{当 } 1 - \frac{K}{2} < z < 1 \text{ 时, 有:} \\ d > K_{res.2} (z - 1) + d_0 \quad (4)$$

其中: $K_{res.1}$ 、 $K_{res.2}$ 为相关差动制动系数, K 为比率制动系数, d_0 为常数。

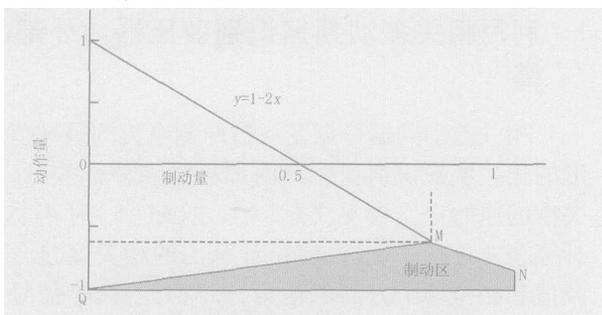


图 1 采样值相关差动保护动作特性

Fig 1 Operating characteristic of differential protection based on correlation coefficients of sampled current values

图 1 给出了新判据的制动特性。横坐标 z 为制动量,纵坐标 d 为动作量, M 点为拐点, QM 段斜率为相关差动制动系数 $K_{res.1}$, MN 段斜率为相关差动制动系数 $K_{res.2}$, 制动区为阴影区。 $K_{res.1}$ 和 $K_{res.2}$

可以通过式 (5)和式 (6)来整定,

$$K_{res.1} = \frac{K}{1 - \frac{K}{2}} \quad (5)$$

$$K_{res.2} = \left| \frac{d_0 + 1 - K}{\frac{K}{2}} \right| \quad (6)$$

其中: d_0 为给定常数, $d_0 \in (-1, K - 1)$ 。 K 可按外部故障出现最大不平衡电流时的电流互感器传变误差来设定^[6]。

1.3 特殊情况下的措施

由于新判据依据变压器两边电流波形来区分内外部故障,在单端供电系统中,当供电侧发生区外故障时变压器两边故障相电流采样值接近零,此时计算的相关度不能反映真实情况。为保证在这种情况下保护动作的可靠性,可设一门槛 i ,当变压器两侧电流均小于此门槛时直接判为供电侧区外故障。

2 利用相关原理和等效瞬时电感识别励磁涌流

当变压器空投发生励磁涌流时,相关差动判据判为内部故障,然后由励磁涌流识别判据来识别涌流和内部故障。文献 [7] 中提出等效瞬时电感的概念,即从原边绕组端口看进去的等效瞬时励磁电感。变压器励磁支路的非线性特性是导致产生励磁涌流的本质原因,等效瞬时电感及其变化规律反映了励磁支路非线性特性,揭示了励磁涌流和内部故障本质上的区别。因此,从变压器励磁支路非线性特征入手,利用相关原理提取等效瞬时电感变化规律来识别励磁涌流可以进一步提高变压器保护性能。

2.1 等效瞬时电感概念及其变化规律

计及变压器绕组电阻,磁滞及涡流损耗,变压器发生励磁涌流与内部匝间短路故障时将具有如下的统一方程式^[7]:

$$u_1 = r_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} \quad (7)$$

式中: u_1 为变压器原边绕组的端口电压, r_k 为等效电阻, L_k 为等效瞬时电感, i_k 为变压器原副边绕组电流之差,即差流。若忽略等效电阻,则得到等效瞬时电感表达式为^[7]:

$$L_{(k)} = 2T_s \frac{u_{(k)}}{i_{(k+1)} - i_{(k-1)}} \quad (8)$$

由于忽略等效电阻引起相位误差,使得利用式 (8)计算的等效瞬时电感在故障电流极值处出现奇

异点,而且有一小的负值区,变化规律形如一具有直流偏置的正切波,周期为 0.01 s 。图 2和图 3所示为空投励磁涌流和空投于匝间短路故障时利用式(8)计算出的等效瞬时电感。

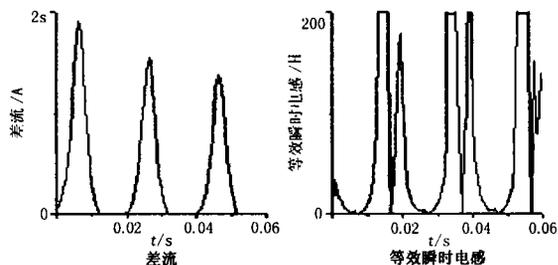


图 2 C相空投励磁涌流及其等效瞬时电感

Fig 2 Equivalent instantaneous inductance and magnetizing inrush current of phase C when switching in transformer with no load

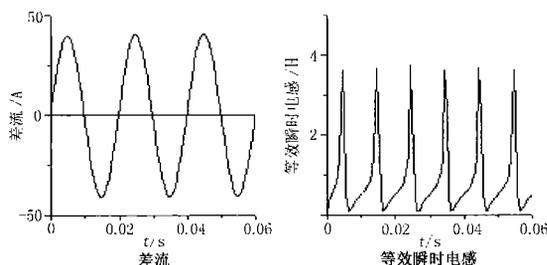


图 3 C相空投匝间短路故障电流及其等效瞬时电感

Fig 3 Equivalent instantaneous inductance and differential current of phase C when switching in transformer with tum-to-tum fault

由图 2和图 3可以看出,空投励磁涌流时涌流和间断角交替出现,等效瞬时电感波形的周期为 0.02 s 。空投于匝间短路故障时,由于忽略电阻引起的相位误差,使得等效瞬时电感出现奇异点,波形形如一具有直流偏置的正切波,周期为 0.01 s 。

2.2 建立判据

根据图 2和图 3所示等效瞬时电感变化规律,将故障后 0.02 s 的等效瞬时电感数据重新组合并等分为 0.01 s 长的两部分数据做相关计算。空投励磁涌流时,等效瞬时电感以 0.02 s 周期变化,两部分几乎是不相关的,故计算出的相关度很低。而匝间短路故障时,等效瞬时电感形如一具有直流偏置的正切波,周期为 0.01 s ,后一部分波形相当于前一部分的等周期延拓,两者做相关计算出的相关度很高。

若重组后一个周期的等效瞬时电感为 $[0, N - 1]$,将其等分为 m_1 和 m_2 两部分, m_1 为 $[0, N/2 - 1]$, m_2 为 $[N/2, N - 1]$, m_1 与 m_2 做相关计算,连续

计算 n 次相关度求平均,平均值记为 F_{inr} ,则励磁涌流识别判据可表示为:

$$\begin{cases} F_{\text{inr}} > \text{set} & \text{判为故障} \\ F_{\text{inr}} \leq \text{set} & \text{判为涌流} \end{cases} \quad (9)$$

其中: set 为整定值。

2.3 数据组合原则

以 C相空投于匝间短路故障后一个周期电压和差电流波形为例,如图 4所示,实线为电压,虚线为电流。0和 3之间表示故障后一个周期的电流电压波形。1和 2分别为一周期内电压的两个过零

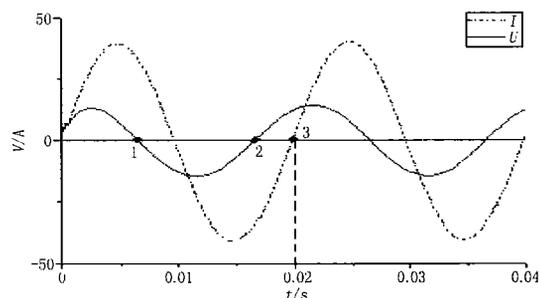


图 4 C相空投于匝间短路故障时的差流和电压

Fig 4 Voltage and differential current of phase C when switching in transformer with tum-to-tum fault

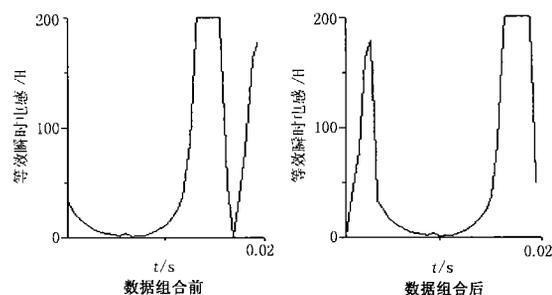


图 5 C相空投励磁涌流时的等效瞬时电感

Fig 5 Equivalent instantaneous inductance of phase C when switching in transformer with no load

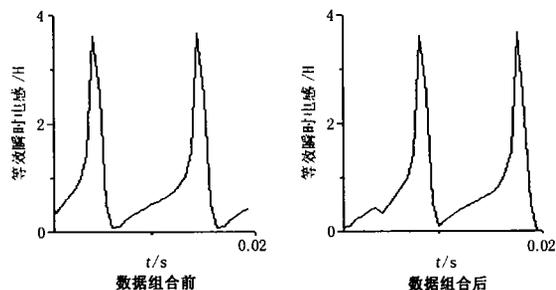


图 6 C相空投于匝间短路故障时的等效瞬时电感

Fig 6 Equivalent instantaneous inductance of phase C when switching in transformer with tum-to-tum fault

点。将 2-3 和 0-1 间的数据组成 m_1 部分, 1-2 之间的数据构成 m_2 部分数据。图 5 和图 6 是通过这一原则组合前后的电流电压数据计算出的等效瞬时电感。

3 仿真验证

为取得有效实验数据,在清华大学动态模拟实验室进行了变压器的相关实验,利用动模实验数据对所提方案进行了大量的仿真实验。限于篇幅,表 1~表 3 列出了相关差动实验结果及中间过程的数据,其中, K 取 0.5, d_0 取 -0.8,一周波 32 点采样,计算数据窗长 16,连续计算 4 次求平均。

表 1 区外故障

Tab 1 External fault

故障类别	d	z	zd
AB (星侧)	-0.942	0.971	-0.835
ABN (星侧)	-0.913	0.956	-0.853
AN (星侧)	-0.890	0.961	-0.847
CA (星侧)	-0.975	0.987	-0.816
CAN (星侧)	-0.949	0.975	-0.830
AB (角侧)	-0.942	0.971	-0.835
CA (角侧)	-0.928	0.964	-0.843
ABC (角侧)	-0.881	0.941	-0.871

表 2 区内故障

Tab 2 Internal fault

故障类别	d	z	zd
AB (星侧)	0.378	0.311	-0.793
ABC (星侧)	0.461	0.270	-0.820
ABCN (星侧)	0.491	0.254	-0.831
AN (星侧)	0.421	0.289	-0.807
CA (星侧)	0.459	0.270	-0.820
AB (角侧)	0.224	0.388	-0.741
ABC (角侧)	0.116	0.442	-0.705
CA (角侧)	-0.023	0.512	-0.658

表 3 匝间短路故障

Tab 3 Turn-to-turn fault

故障类别	d	z	zd	短路匝比
	-0.680	0.840	-0.440	1.8%
星侧	0.137	0.431	-0.713	6%
	0.678	0.161	-0.893	10%
匝间	0.254	0.373	-0.751	13% (头部)
	0.711	0.145	-0.903	13% (中部)
短路	0.638	0.181	-0.880	13% (尾部)
	角侧	-0.051	0.526	-0.649
匝间	0.233	0.384	-0.744	13% (中部)
短路	0.455	0.272	-0.819	13% (尾部)

注:括号内指变压器实验绕组的头部,中部和尾部。

大量的动模实验表明,当变压器在重负荷下发生内部轻微匝间短路时,基于采样值相关度的变压器差动保护的灵敏度是比较低的。为增加这种情况

下保护的灵敏度,需要采用故障分量的采样值进行相关度计算,这样就可以去除负荷电流的影响,增加基于采样值相关度变压器差动保护的灵敏度。

表 4 给出的是部分 C 相空投励磁涌流和 C 相空投于匝间短路故障的实验结果,其中一周波 32 点采样, m_1 和 m_2 两部分数据长都为 16,相关度计算窗长为 8,连续计算六次相关度求平均作为 $F_{inr, set}$ 整定为 0.6。

表 4 C 相空投实验

Tab 4 Experiment of phase C when switching in transformer with no bad

实验组别	相关度 F_{inr}	短路匝比
	0.766	1.8%
空投于星侧匝间短路故障	0.885	6%
	0.990	10%
空投于角侧匝间短路故障	0.971	13% (头部)
	0.926	13% (中部)
	0.996	13% (尾部)
空投涌流	0.991	6.7% (头部)
	0.914	13% (中部)
	0.969	13% (尾部)
	0.200	
	0.425	
	0.218	
	0.293	

注:括号内指变压器实验绕组的头部,中部和尾部。

由表 4 可以看出,所提判据能够有效区分涌流和匝间短路故障。

4 结论

本文在采样值差动保护的基础上,提出一种基于采样值相关度的变压器差动保护新方案,利用改进后的相关度计算公式综合多个采样值的信息来区分变压器内外部故障,利用相关原理提取等效瞬时电感变化规律来区分励磁涌流和匝间短路故障,实现了励磁涌流和匝间短路故障本质上的区分,有利于进一步提高变压器保护的性能。由于判据基于瞬时采样值不需要通过傅氏滤波来取得所需要的分量,所以对频率偏移和谐波的影响有一定的抵御能力,提高了保护的可靠性。计算数据窗长较短,有利于提高保护动作速度。同时,相关差动定值的确定借鉴常规比率差动定值整定,使得整定有据可依简单易行。大量动模实验表明所提方案动作速度快,可靠性比较高,可有效区分变压器内外部故障,准确识别励磁涌流,是一种较理想的变压器主保护方案。

参考文献:

- [1] 郑涛,刘万顺,庄恒键,等.基于改进型序阻抗原理的变压器保

- 护方案[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 67-71.
ZHENG Tao, LU Wan-shun, ZHUANG Heng-jian, et al Study of a Transformer Protective Scheme Based on the Improved Sequence Impedance Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 67-71.
- [2] 胡玉峰, 陈德树, 尹项根. 采样值差动及其应用[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 40-44.
HU Yu-feng, CHEN De-shu, YIN Xiang-gen New Differential Protection of Power Apparatus Based on Sampled Values and Its Application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10): 40-44.
- [3] 林湘宁, 何战虎, 刘世明, 等. 电流采样值差动保护若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(9): 27-33.
LIN Xiang-ning, HE Zhan-hu, LIU Shiming, et al Discussions on Some Aspects of Sampling Value Differential Current Protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(9): 27-33.
- [4] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
HU Guang-shu Digital Signal Process—Theory, Algorithm and Implement[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [5] 肖仕武, 刘万顺, 黄少锋. 基于相关度的发电机采样值差动保护[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 59-63.
XIAO Shi-wu, LU Wan-shun, HUANG Shao-feng Generator Differential Protection Based on Correlation Coefficients of Sampled Current Values[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 59-63.
- [6] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
WANG Wei-jian Relay Protection of Electric Main Equipment Their Theory and Application, Second Edition[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [7] 葛宝明, 苏鹏声, 王祥珩, 等. 基于瞬时励磁电感频率特性判别变压器励磁涌流[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 35-39.
GE Bao-ming, SU Peng-sheng, WANG Xiang-heng, et al Distinguish Inrush Currents for Transformer Using Frequency Characteristic of Instantaneous Excitation Inductance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 35-39.

收稿日期: 2005-09-13; 修回日期: 2005-10-14

作者简介:

李肖博(1980-),男,硕士研究生,研究方向为微机变压器保护;

E-mail: Xiaochong669@163.com

王宝英(1970-),女,工程师,主要从事电力系统继电保护技术管理及整定计算工作;

肖仕武(1974-),男,讲师,研究方向为电力系统仿真和微机保护等。

Study of a transformer protective scheme based on the correlation theory of sampled current values

LIXiao-bo¹, WANG Bao-ying², XIAO Shi-wu¹, LIBing³

(1. Sifang Institute of North China Electric Power University, Beijing 100085, China; 2. Tianjin Xiqing Electric Power Company, Tianjin 300061, China; 3. Adjustment and Test Dept of Beijing Transporting Transforming Electricity Company, Beijing 102401, China)

Abstract: To improve the performance of transformer's microcomputer-based protections, this paper presents a new transformer differential protection scheme. The new scheme uses correlation coefficients of sampled current values at transformer to distinguish internal faults and external faults, adopts the theory of correlation to extract the variation characteristic of instantaneous excitation inductance for distinguishing magnetizing inrush current and internal faults. Dynamic simulation results show that the new criterion can distinguish internal fault from external faults and magnetizing inrush current very fast and reliably. Based on setting scheme of transformer percentage differential protection, the setting scheme of the new criterion is simple and feasible. Besides, the new criterion can effectively restrain the interference of harmonics and frequency variation, it has good application value in engineering.

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

Key words: correlation coefficient; sampled values differential protection; internal short circuit fault; magnetizing inrush current; instantaneous excitation inductance

许继研制的 STA TCOM 装置在上海成功并网投运

2月28日,许继电源公司为上海电力公司研制的 STA TCOM 装置一次并网成功。截至目前,该装置已完成包括 12 h 恒无功运行实验等多项实验项目的检验。STA TCOM 成套装置的投运不仅填补了国内大功率电力电子 FACTS 设备的空白,同时标志着我国在 FACTS 领域的技术和制造水平达到了国际先进水平。

多年来,许继以振兴民族工业为己任,以改革创新、求真务实的工作作风致力于电力行业。今天,许继人有信心建立我国的大功率电力电子产业基地。