

# 基于模型的变压器保护判据分析与改进

韩正庆, 刘淑萍

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 对基于模型的变压器保护原理作了分析并提出了新判据。电流暂态波形波动较大时, 用差分代替微分会造成很大误差, 可能造成保护误动。利用积分法构成了新型的保护判据, 给出了新判据的计算公式并讨论了定值的选取。变压器在正常运行、外部故障、空载合闸、内部故障、带内部故障空载合闸等工况下的数字仿真结果表明, 新判据不易受电压、电流波形波动的影响, 计算简单, 可以可靠、快速识别变压器内部故障。

**关键词:** 变压器保护; 变压器模型; 判据

**中图分类号:** TM 772

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2007)02-0031-04

## 0 引言

变压器是变电所最重要的设备之一, 变压器保护意义重大。作为变压器主保护的差动保护面临着如何区分励磁涌流和内部故障电流这一问题, 许多专家和学者在这方面做了大量的研究<sup>[1-7]</sup>。这些原理或方法都是以励磁涌流波形存在间断角这一特征为理论基础, 实际上都是间断角原理的衍生、改进或推广。事实上, 变压器励磁涌流的波形特征受多种因素的影响, 所以任何以涌流波形特征为依据的防止空载投入误动的措施均不能保证变压器差动保护不误动, 差别仅是误动次数的多少而已<sup>[8]</sup>。

随着现代变压器的发展, 差动保护的局限性也越来越明显, 文献[9-15]避开了励磁涌流的波形特

征, 从变压器本质上寻找突破, 这样的方案主要有磁通特性识别法<sup>[9-12]</sup>、等值电路参数鉴别法<sup>[13]</sup>、基于变压器模型的算法<sup>[14-15]</sup>等。其中, 文献[14-15]等提出的基于变压器模型的保护原理从理论上完全摆脱了励磁涌流和过励磁电流的影响。但是, 当推向实际应用时, 现有的基于变压器模型的保护原理易受差分误差的影响。现在文献[14-15]的基础上, 分析了基于模型的变压器保护的误差因素及其动作特性, 并对保护判据作了改进。

## 1 理论基础

以单相双绕组变压器为例讨论基于变压器模型的新型保护判据, 单相双绕组变压器如图 1 所示。

由变压器的电磁关系有

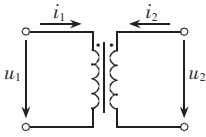


图 1 单相双绕组变压器  
Fig.1 Single-phase two-winding transformer

$$\begin{aligned} u_1 &= r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + W_1 \frac{d\phi_m}{dt} \\ u_2 &= r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + W_2 \frac{d\phi_m}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $i_1$ 、 $i_2$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $W_1$ 、 $W_2$  分别为一次侧电压、电流、电阻、漏感、绕组匝数； $\phi_m$  为变压器的工作磁通。

令变压器的变比为  $K = W_1 / W_2$ ，由式(1)可得：

$$u_1 - K u_2 = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - K \left( r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \right) \quad (2)$$

式(2)反映了基于模型的变压器保护原理：对于一台完好的变压器，无论是正常运行、励磁涌流，还是外部短路，变压器结构不变，漏阻抗参数也不变，式(2)两边必将相等；反之，当变压器内部故障时，伴随着变压器结构的改变和漏阻抗参数的改变，式(2)两边将出现差值。

## 2 误差分析

为适应微机工作的需要，以差分代替微分，式(2)两边相减得到误差：

$$\begin{aligned} \varepsilon &= u_1 - K u_2 - r_1 i_1 - L_1 \frac{i_1(t) - i_1(t - \Delta T)}{\Delta T} + \\ &\quad K r_2 i_2 + K L_2 \frac{i_2(t) - i_2(t - \Delta T)}{\Delta T} \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $t - \Delta T$ 、 $t$  分别为前后 2 个采样时刻， $\Delta T$  为采样间隔； $i_1(t - \Delta T)$ 、 $i_1(t)$ 、 $i_2(t - \Delta T)$ 、 $i_2(t)$  分别为两时刻时两侧电流的采样值。

只要变压器没有处于内部故障状态，理论上  $\varepsilon$  恒等于零。但事实上式(3)的计算结果受多种误差因素的影响：用差分代替微分将造成误差；各绕组的漏电感和电阻取近似值将造成误差；电压互感器、电流互感器的测量误差等。在各种误差因素中，用差分代替微分造成的误差具有较大的不确定性。若电流暂态波形有较大的波动，用差分代替微分可能造成很大误差。例如，对励磁涌流而言，当变压器铁芯通过磁化曲线饱和区的拐点时，变压器励磁阻抗急剧变化，变压器电流也急剧变化，此时用差分代替微分将造成很大的计算误差。在这种情况下，文献[15]的保护判据 1 可能导致误动。为保证保护不误动，必然要求增大动作定值，这又将降低保护的灵敏性，因而文献[15]需要用保护判据 2 识别轻微故障。文献[14]的保护判据为了保证动作的安全性，需要 1 周期左右的固有动作时间，因而对保护的速动性不能很好地保证。

## 3 新的保护判据

为避免差分造成的误差，考虑用积分法构成新型的保护判据。利用一段时间内变压器一、二次侧电压和电流的采样值对式(3)积分得：

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \sum_{k=1}^{N-1} [u_1(k) - K u_2(k) - r_1 i_1(k) + K r_2 i_2(k)] \Delta T - \\ &\quad L_1 [i_1(N) - i_1(1)] + K L_2 [i_2(N) - i_2(1)] \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $u_1(k)$ 、 $u_2(k)$ 、 $i_1(k)$ 、 $i_2(k)$  为一、二次侧电压和电流的采样值； $\Delta T$  为采样间隔； $N$  为保护数据窗内的采样点数。

为提高保护的動作速度，数据窗可取 1/4 周期或 1/2 周期。

用梯形法积分造成的误差较小，并且不易受电压、电流暂态波形波动的影响。随着采样频率的提高，用梯形法积分造成的误差将进一步减小，而用差分代替微分在电流波形波动较大时仍可能造成保护误动。

利用式(4)可以很容易地构造递推算法，从而进一步减少保护算法的计算量。

定义保护判据为

$$\varepsilon \geq \varepsilon_{dz} \quad (5)$$

式中  $\varepsilon$  为式(4)的计算结果； $\varepsilon_{dz}$  为保护动作门槛值。

$\varepsilon_{dz}$  的选取可以参考文献[14-15]中定值的选取。设  $\varepsilon'_{dz}$  为原有的保护判据的整定值，根据式(4)可知：

$$\varepsilon_{dz} = \varepsilon'_{dz} \Delta T (N - 1) \quad (6)$$

考虑到积分法造成的误差较小，为提高保护的灵敏度，可将  $\varepsilon_{dz}$  的取值适当减小。

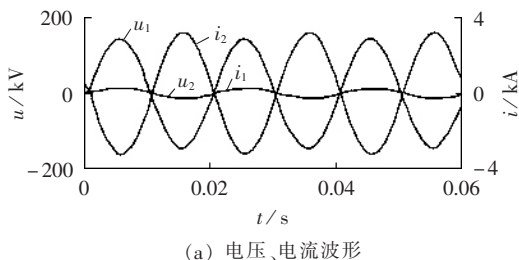
## 4 数字仿真

用于仿真的单相双绕组变压器的参数为：额定容量 25 MV·A， $U_{1N}/U_{2N} = 110/10$  kV， $r_1 = K^2 r_2 = 3.87 \Omega$ ， $L_1 = K^2 L_2 = 0.06$  H。每周期采样 100 点，数据窗长度为 1/4 周期；根据上节中关于  $\varepsilon_{dz}$  取值的讨论，取  $\varepsilon_{dz} = 12$ 。

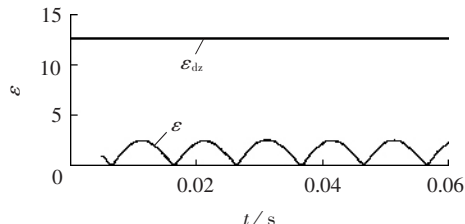
图 2~6 对变压器在多种运行情况下进行仿真分析。

### 4.1 正常运行

图 2 为变压器带额定负载正常运行时的仿真图形。从图 2 可以看出，所提出的保护判据在正常运行时变压器可靠不动作。



(a) 电压、电流波形



(b) 动作特性曲线

图 2 正常运行

Fig.2 Normal operation

### 4.2 空载合闸

图 3 为变压器空载合闸时的仿真图形。从图 3 可以看出，所提出的保护判据不受暂态波形波动的影

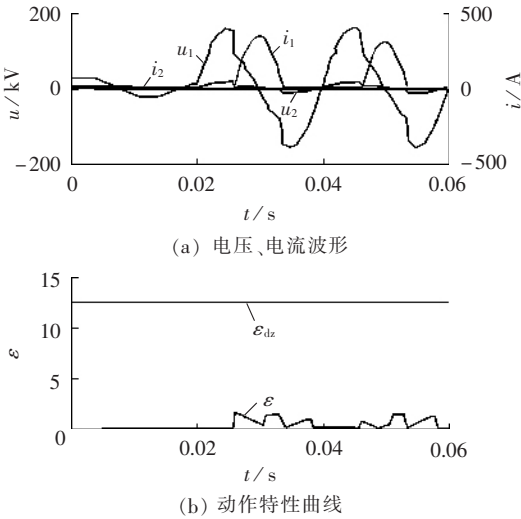


图 3 空载合闸

Fig.3 No-load closing

响,能在空载合闸时可靠不动作。图 3 空载合闸的条件为:初相角为 0,剩磁为 0。数字仿真还表明,基于模型的变压器保护原理不受励磁涌流的影响,改变空载合闸的条件保护仍不会误动,限于篇幅不再给出其他仿真结果。

4.3 外部故障

图 4 为变压器外部故障时的仿真图形。从图 4 可以看出,所提出的保护判据能在外部故障时可靠不动作。

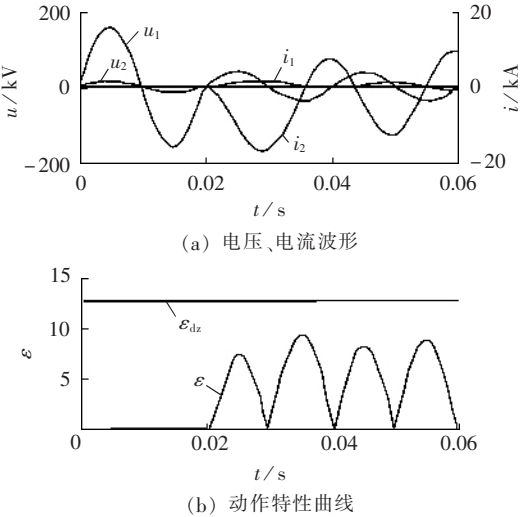


图 4 外部故障

Fig.4 External fault

4.4 内部故障

图 5 为变压器 10 % 匝间短路时的仿真图形。从图 5 可以看出,保护判据能够在内部故障发生 1/4 周期左右时迅速可靠地动作。

4.5 带内部故障空载合闸

图 6 为变压器带 10 % 匝间短路空载合闸时的仿真图形。从图 6 可以看出,保护判据能够在变压器带内部故障空载合闸时可靠动作。

从上述仿真看,提出的保护判据能够在变压器正

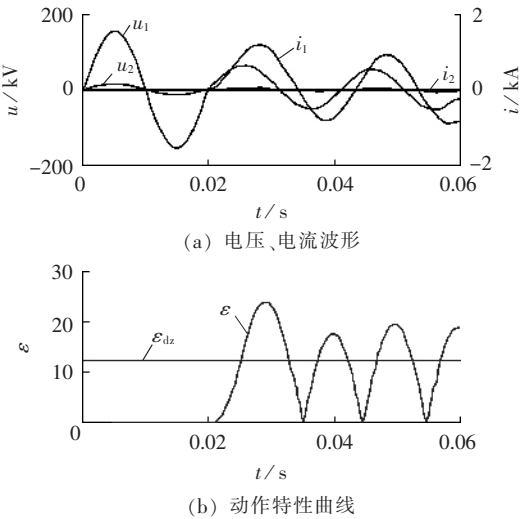


图 5 内部故障

Fig.5 Internal fault

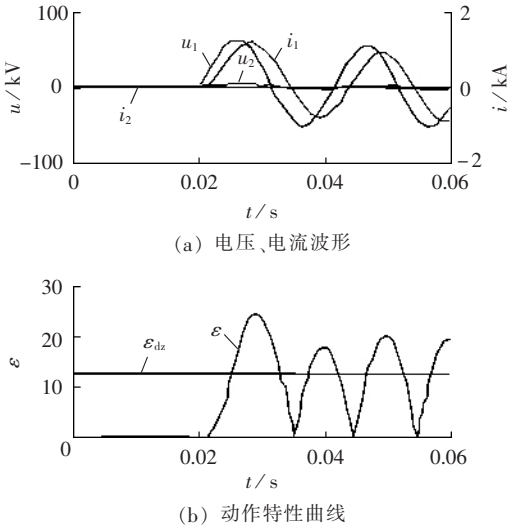


图 6 带内部故障空载合闸

Fig.6 No-load closing with internal fault

常运行、外部故障、空载合闸时可靠不动作,在内部故障、带内部故障空载合闸时可靠动作。

5 结论

通过理论分析和仿真试验可以得出以下结论:

a. 基于变压器模型的保护原理只与变压器的原始正常模型有关,不受励磁涌流和过励磁的影响,值得深入研究;

b. 利用梯形积分法构成保护判据,与原有的同类保护原理相比,所提出的保护判据不易受电压、电流暂态波形波动的影响;

c. 所提出的保护判据具有动作快速等优点,可以满足变压器保护速动性的要求,而且提出的保护判据可以很容易地构造递推算法,从而进一步减少保护算法的计算量;

d. 数字仿真表明所提出的保护判据和整定原则都是可行的,能可靠地识别变压器内部故障。

## 参考文献:

- [1] 胡玉峰,陈德树. 基于采样值差动的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报,2000,20(9):55-59.  
HU Yu-feng,CHEN De-shu. A new method to identify inrush current based on sampled values[J]. Proceedings of the CSEE, 2000,20(9):55-59.
- [2] 李贵存,刘万顺,滕林,等. 基于波形相关性分析的变压器励磁涌流识别新算法[J]. 电力系统自动化,2001,25(17):25-28.  
LI Gui-cun,LIU Wan-shun,TENG Lin,et al. A new algorithm of discrimination between inrush current and fault current of transformer based on self-correlation analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(17):25-28.
- [3] LIN Xiang-ning,LIU Pei,MALIK O P. Studies for identification of the inrush based on improved correlation algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2002,17(4):901-907.
- [4] YOUSSEF O A S. A wavelet-based technique for discrimination between faults and magnetizing inrush currents in transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2003,18(1):170-176.
- [5] FERNANDEZ A L O,CHONAIM N K I,VALENCIA J A. A FIRANN as a differential relay for three phase power transformer protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2001,16(2):215-218.
- [6] 陈晓东,柳亦钢,李天云. 利用二次小波变换区分变压器励磁涌流和短路电流的符号法[J]. 电力自动化设备,2006,26(6):52-56.  
CHEN Xiao-dong,LIU Yi-gang,LI Tian-yun. Sign identifying method to discriminate inrush current and fault current of transformer based on twice wavelet[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(6):52-56.
- [7] 褚云龙,张保会,郝治国. 新技术手段在变压器差动保护励磁涌流识别中应用研究的现状[J]. 电力自动化设备,2004,24(8):90-94.  
CHU Yun-long,ZHANG Bao-hui,HAO Zhi-guo. Application of new techniques in magnetizing inrush current identification for transformer differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(8):90-94.
- [8] 王维俭. 变压器保护运行不良的反思[J]. 电力自动化设备,2001,21(10):1-3.  
WANG Wei-jian. Consideration on the improper operation of transformer protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001,21(10):1-3.
- [9] PHADKE A G,THORP J S. A new computer-based flux-restrained current-differential relay for power transformer protection [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1983,102(11):3624-3629.
- [10] 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):35-40.  
GE Bao-ming,SU Peng-sheng,WANG Xiang-heng,et al. Distinguish inrush currents for transformers using frequency characteristic of instantaneous excitation inductance[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(17):35-40.
- [11] 宗洪良,金华烽,朱振飞,等. 基于励磁阻抗变化的变压器励磁涌流判别方法[J]. 中国电机工程学报,2001,21(7):91-94.  
ZONG Hong-liang,JIN Hua-feng,ZHU Zhen-fei,et al. Transformer inrush detected by the variation of magnetizing impedance[J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(7):91-94.
- [12] 毕大强,王祥珩,王剑,等. 基于非饱和区等效瞬时电感的变压器励磁涌流鉴别方法[J]. 电力自动化设备,2005,25(10):1-6.  
BI Da-qiang,WANG Xiang-heng,WANG Jian,et al. Identification of transformer magnetizing inrush based on equivalent instantaneous inductance in nonsaturation zone[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(10):1-6.
- [13] KEIZO I,MASARU H,YOSHIKI M,et al. Digital protection method for power transformers based on an equivalent circuit composed of inverse inductance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1988,3(4):1501-1510.
- [14] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [15] 王增平,徐岩,王雪,等. 基于变压器模型的新型变压器保护原理的研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(12):54-58.  
WANG Zeng-ping,XU Yan,WANG Xue,et al. Study on the novel transformer protection principle based on the transformer model[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(12):54-58.
- [16] YABE K. Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1997,12(3):1109-1118.
- [17] ZAMAN M R,RAHAN M A. Experimental testing of the artificial neural network based protection of power transformer [J]. IEEE Trans on Power Delivery,1998,13(2):510-517.
- [18] MAO P L,AGGARWAL R K. A wavelet transform based decision making logic method for discrimination between internal faults and inrush currents in power transformers [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2000,22(6):389-395.

(责任编辑:李玲)

## 作者简介:

韩正庆(1977-),男,山东安丘人,博士,研究方向为继电保护与变电站综合自动化(E-mail:hanzhengqing@sohu.com);  
刘淑萍(1979-),女,安徽阜阳人,博士研究生,研究方向为继电保护与变电站综合自动化。

## Analysis and improvement of transformer protection criterion based on model

HAN Zheng-qing, LIU Shu-ping

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The transformer protection principle based on transformer model is analyzed and the new criterion is provided. When current transient wave fluctuates obviously, the use of difference instead of differential may cause prodigious error and malfunction. The new-type protection criterion is composed of integral. Its calculation formula is presented and the selection of its settings is discussed. Digital simulation results under conditions of normal operation, external fault, no-load closing, internal fault, no-load closing with internal fault and so on show that, the new-type criterion is not sensitive to voltage and current fluctuation, easy to calculate and fast to identify transformer internal fault.

**Key words:** transformer protection; transformer model; criterion