

# 变压器保护新原理

汪国新,贺家李,张振宇

(天津大学电气自动化学院,天津 300072)

**摘要:** 变压器通常采用纵差动保护作为主保护,纵差动保护会受到励磁涌流的影响而误动作。目前已有许多识别励磁涌流的方法,但都有其局限性,不能绝对可靠地区分励磁涌流和空投于故障变压器的短路电流。该文提出了一种不受空投时励磁涌流影响的变压器差动保护原理,并用阻抗原理反应空投于内部故障。这种保护配置在内部故障时有很高的灵敏度,在外部故障时又有很强的制动作用,不反映空投时的励磁涌流,却能反映变压器空载合闸时有故障的情况,解决了变压器差动保护的难题。

**关键词:** 变压器保护; 纵差动保护; 励磁涌流; 阻抗继电器

**中图分类号:** TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)22-0001-05

## 0 引言

纵差动是大容量变压器必须采用的保护原理,它可以反映变压器的各种内部相间和接地故障。纵差动保护遇到的最大问题是如何区分励磁涌流和空投于内部有故障变压器的短路电流。因为在变压器空载合闸或外部短路故障切除电压恢复时,有很大的励磁涌流,该电流仅在变压器的一侧流过,如不采取措施必然引起保护误动作。现在有很多识别励磁涌流的方法,检测到励磁涌流后闭锁差动保护。但由于变压器结构和材料上的特点,以及受运行方式和接线的影响,这些检测方法都不能保证百分之百的可靠性。本文提出了一种不受空投时励磁涌流影响的变压器差动保护原理,并用阻抗继电器反应空投于内部故障。阻抗继电器在变压器空载合闸时投入,在变压器正常运行时退出。这种保护配置方式在内部故障时有很高的灵敏度,在外部故障时又有很强的制动作用,不反映空投时的励磁涌流,却能反映变压器空载合闸时有故障的情况,解决了变压器差动保护的难题。

## 1 新差动保护判据

在区外短路时差动回路的不平衡电流增大,要求差动保护有足够的制动作用,保证保护不误动。传统的差动保护所采用的制动方法一般都要使保护在内部故障时的灵敏度降低。不容易满足既保证区外故障不误动,区内故障又有足够灵敏度,本文采用的差动保护原理较好地解决了这个问题。

本差动保护采用的动作方程为:

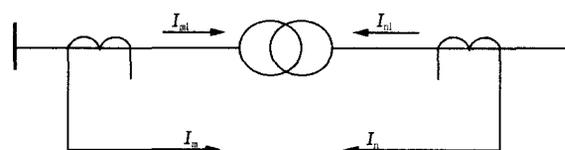


图 1 保护接线原理示意图

Fig 1 Connection scheme of transformer

$$I_{m1} (K I_{m2} + K I_{n2}) > S_m \quad (1)$$

$$I_{n1} (K I_{m2} + K I_{n2}) > S_n \quad (2)$$

式中:  $I_{m1}$ 、 $I_{n1}$ 为折合到同一侧的变压器一次电流;  $I_{m2}$ 为变压器 m 侧接入差回路的二次电流;  $I_{n2}$ 为变压器 n 侧接入差回路的二次电流;  $K$ 、 $K$ 为比例系数,可以整定的正整数 ( $K < K$ );  $S_m$ 、 $S_n$ 为定值,为一正数,可整定。

只有两个判据都满足,保护才可以动作出口。 $I_{m1}$ 、 $I_{n1}$ 的正方向如图 1 所示,均为从母线指向变压器为正。如果忽略励磁电流的影响,则发生区外短路时二次电流  $I_{m2}$  和  $I_{n2}$  大小相等,相位相差 180°: 不论区外故障发生在变压器左侧 ( $I_{m2}$  变负) 或右侧 ( $I_{n2}$  变负),判据都不满足,保护都不会动作。只有在内部故障时,  $I_{m2}$  和  $I_{n2}$  两电流方向相同,条件才满足。这种判据既符合差动原理又结合了方向比较实现制动,使得灵敏度和可靠性都得到增强<sup>[1]</sup>。

这种差动判据应用在单端电源系统内部故障时需要仿照输电线的弱馈端保护的方法使保护动作。因为对于图 1,假设 m 侧为电源端,发生区内故障时, m 侧判据满足, n 侧可能电流和电压都接近于 0,使得判据只有 m 侧满足动作条件,应增加如图 2 所示的逻辑功能。

这样只要有一端的判据满足动作条件保护就可

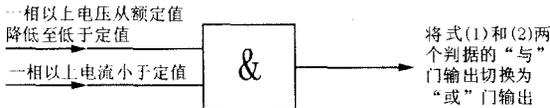


图 2 单端电源系统判据出口逻辑的切换

Fig 2 Protection criterion switch condition in single source power system

以动作了。

为了防止外部故障切除时产生的励磁涌流使保护误动,可以在外部故障切除后的一段时间内将差动保护闭锁,见下文。

## 2 阻抗继电器

上述差动保护判据是在两边都有电流且大于一最小电流定值的情况下才可能动作,在一边有电流一边无电流的或小于最小电流定值情况下不可能动作。当空载合闸时变压器一侧有电流,另一次侧无电流,差动保护区内有故障时不能动作。为了反应变压器空投于故障的情况,在两侧各设置一个指向变压器内部的阻抗继电器作为合闸到故障的变压器保护。使用阻抗继电器必须考虑励磁涌流的影响。电力变压器正常运行时的励磁电流很小,通常为额定电流的 3%~8%,对于大型变压器甚至不到 1%。而变压器在空载合闸或外部故障切除后电压恢复时,都要产生很大的励磁涌流。变压器的励磁涌流与合闸时电源电压初相角、铁芯剩磁、饱和磁密、系统阻抗等有关,而且受电流互感器的接线方式和铁芯结构的影响。因为合闸时刻的不确定,导致励磁涌流的不确定。对于中、小型变压器励磁涌流可达额定电流的 10 倍以上<sup>[2]</sup>,且衰减较快;对大型变压器,一般不超过 4、5 倍<sup>[3]</sup>,且衰减较慢。励磁涌流有如下特点:

- 1) 励磁涌流幅值大且衰减,含有非周期分量;
- 2) 波形呈间断特性,有明显的间断角;
- 3) 含有二次谐波,且二次谐波含量一般情况下不低于 15%。

而短路电流基本上不衰减,波形连续无间断角,二次谐波分量较小。励磁涌流虽很大,但其工频分量较小,在励磁涌流情况下电压仍较高,阻抗较大。而在空投于故障的变压器时,短路电流的工频分量较大,而故障相电压降低很大,阻抗较小。因而用阻抗原理反应空投于故障可行。

## 3 差动保护与阻抗保护的配合

阻抗继电器定值要躲开励磁涌流,还要整定到

变压器的另一侧并有一定裕度。在从一侧手合变压器和外部故障切除电压恢复时退出差动保护,投入阻抗继电器。前者考虑空投于故障的情况。后者是考虑在外部故障切除时紧接着发生内部故障的情况。因为在外部故障切除后,电压突然恢复,与变压器空投情况类似,变压器也会产生比较大的励磁涌流,而且励磁涌流的相位与负荷电流的相位关系是不确定的,这时候差动保护可能会误动作。所以利用外部故障期间变压器两侧电流相等,相位相反且两侧电压差约等于变压器压降等特征将差动保护闭锁,投入阻抗保护。投入阻抗保护的时间可定为 0.1 s 左右,是因为在 0.1 s 后励磁涌流已经衰减到很小,再投入差动保护时不会误动。退出差动保护投入阻抗保护的逻辑见图 3。

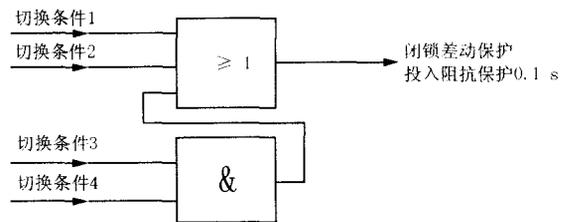


图 3 保护切换逻辑

Fig 3 Protection switching logic

其中:切换条件 1——一侧断路器未合;  
切换条件 2——有手合信号;  
切换条件 3——前一周波两侧电流大约相等,方向相反且大于最大负荷电流;  
切换条件 4——前一周波两侧电压差约等于变压器压降。

## 4 仿真分析

将从仿真得到的励磁涌流和短路电流数据用全波傅氏算法滤波,计算出不同时刻电流的基波幅值,并画出图形。对电压做同样的处理,这样就可以算出阻抗幅值,做出阻抗幅值随时间变化曲线。用 Matlab 仿真单端供电的电力系统模型,如图 4。

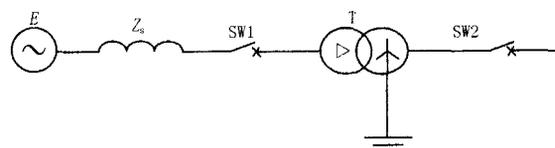


图 4 仿真系统模型

Fig 4 Single terminal power system model

图 4 中参数如下所示:

频率: 50 Hz。

电源:电压 110 kV,系统正序阻抗  $j8.07$ ,零序阻抗  $j16.3$ 。

变压器:接线方式 /Y0-11,电压比 110 kV / 500 kV,容量 40 MVA。

低压侧漏抗:  $X=2.413$   $R=0.194$

高压侧漏抗:  $X=18.32$   $R=1.47$

考虑磁饱和,用折线近似变压器铁心的励磁曲线,设变压器饱和磁通为 1.2 倍的额定磁通,饱和情况下的励磁曲线斜率近似为 1/4。

选取了几种有代表性的情况进行仿真。阻抗用标么值来表示。电压以 110 kV 侧额定相电压峰值即  $110\sqrt{2}/\sqrt{3}$  kV 为基准。电流以 110 kV 侧额定相电流峰值  $40\sqrt{2}/110\sqrt{3}$  kA 为基准。可以算出阻抗基准近似为 302.5。图中的曲线表示相间阻抗测量值。仿真历时为合闸后 0.5 s。计算当前时刻基波分量都是以本采样点前的二十个数据为样本,那么在仿真刚开始的一周波里采样点前的数据不足二十个,所以画图时候阻抗幅值的波形就从 0.02 s 开始。AB、BC、CA 相间阻抗在图上均有标注。

#### 4.1 无故障空载合闸

无故障空载合闸仿真就是要确定正常情况下合闸时的励磁阻抗能达到的最小幅值。剩磁对励磁阻抗的影响要大于对短路阻抗的影响,所以剩磁不能忽略。对于大型变压器来说,剩磁一般不超过 0.8 倍额定磁通。假设变压器 A、B、C 三相剩磁分别为 0.8, -0.7, 0.8 倍额定磁通。对于上面给定的参数,A 相合闸角度为 0 时产生的励磁阻抗最小。

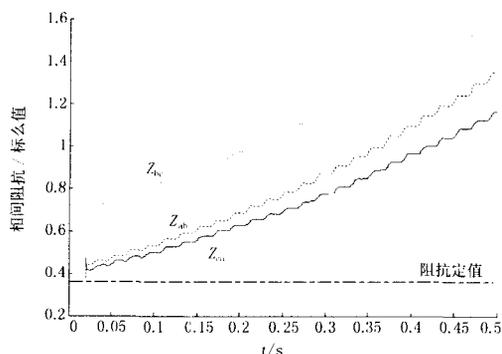


图 5 变压器空投时相间测量阻抗幅值

Fig 5 Amplitude of impedance between two phases when no load closing without fault

从图 5 可以看出,无故障空载合闸时测量阻抗呈上升趋势。测量阻抗的最小值大约为 0.4。定值可以设为最小测量阻抗除以可靠系数 1.25,为 0.32 倍基准阻抗,即 96。如果相间阻抗小于 96,则

一定有故障发生,如果各种故障情况下的相间阻抗都至少有一个小于定值,就意味着用阻抗继电器来区别变压器正常还是合闸于故障是可行的。下面对各种故障情况进行仿真。

#### 4.2 变压器 Y 侧单相接地情况下合闸

设变压器 Y 侧 B 相发生单相接地故障,过渡电阻为 100,合闸角度为 240°:

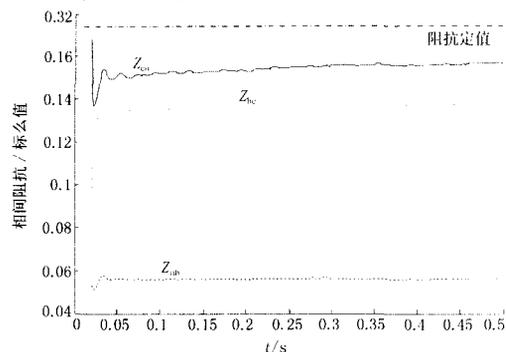


图 6 变压器 Y 侧单相接地时相间测量阻抗幅值

Fig 6 Amplitude of impedance between two phases when single-phase to earth fault

变压器接线方式为 /Y0-11 连接,由于变压器低压侧为三角连接,故障情况下零序电流不能流过,这样在该侧只有 A 相和 B 相流过故障电流,C 相只有励磁电流。合闸角度为 240°;C 相励磁电流最大。从仿真来看,相间电流在短暂振荡后趋于稳定,且幅值比较大。测量阻抗的最大值出现在 CA 相,约为 0.16 倍基准阻抗;最小值出现在 AB 相,大约 0.05 倍基准阻抗。测量阻抗最小值远小于定值,见图 6。

#### 4.3 变压器 Y 侧两相短路情况下合闸

设 Y 侧发生 BC 相短路,合闸角为 0°:

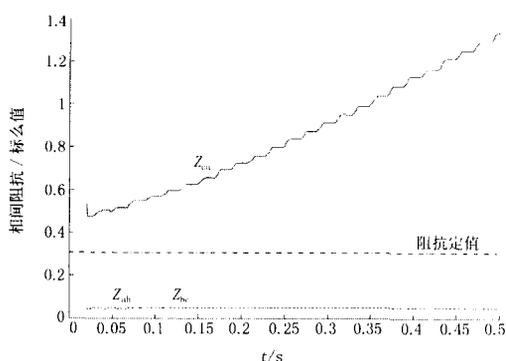


图 7 变压器 Y 侧两相短路时相间测量阻抗幅值

Fig 7 Amplitude of impedance between two phases when two-phase short circuit

Y侧发生两相短路故障时,侧 AB 与 BC 相间阻抗最小,约为 0.05 倍基准阻抗。见图 7。因为在 Y 侧发生两相短路时,侧的相间测量阻抗由于包含了系统阻抗在里面,并不反映实际变压器的阻抗值。此时如果用侧的单相阻抗继电器就能够正确反映。对于 Y 侧发生的两相故障,超前相对应的侧的同一相的测量阻抗就是变压器的阻抗值。对于本例(Y 侧 BC 相短路),侧的 B 相测量阻抗就是实际变压器的阻抗。假如忽略励磁电流,磁饱和等的影响,侧的相间阻抗继电器和单相阻抗继电器在 Y 侧发生 BC 相间短路情况下的理论值如表 1 所示。

表 1 变压器 Y 侧 BC 相短路情况下侧测量阻抗

Tab 1 Transformer measured impedance in side when phase B and phase C in Y side are short circuit

阻抗类型	阻抗大小
$Z_a$	$Z_T - j\sqrt{3}(Z_s + Z_T)$
$Z_b$	$Z_T$
$Z_c$	$Z_T + j\sqrt{3}(Z_s + Z_T)$
$Z_{ab}$	$Z_T - j\frac{\sqrt{3}}{2}(Z_s + Z_T)$
$Z_{bc}$	$Z_T + j\frac{\sqrt{3}}{3}(Z_s + Z_T)$
$Z_{ca}$	

其中:  $Z_T$  为变压器阻抗,  $Z_s$  为系统阻抗。

#### 4.4 变压器 Y 侧两相接地短路情况下合闸

设高压侧发生 BC 相接地短路,合闸角  $0^\circ$ ; 过渡电阻 100  $\Omega$ 。

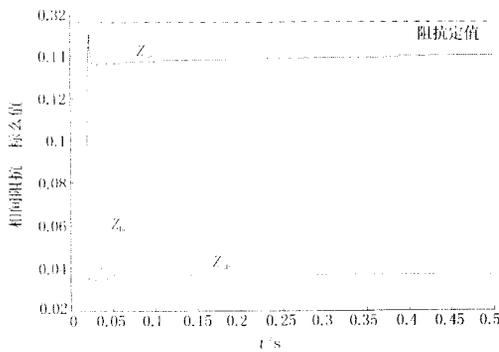


图 8 变压器 Y 侧两相接地短路时相间测量阻抗幅值

Fig 8 Amplitude of impedance between two phases when two-phase to ground fault

可以看出,当 Y 侧发生两相接地短路时,从侧来看故障电流幅值比较大,因此侧的测量阻抗都很小。其中 AB 相间阻抗最小,约为 0.04,远小于定值,见图 8。

#### 4.5 变压器 Y 侧三相短路情况下合闸

合闸角为  $0^\circ$ :

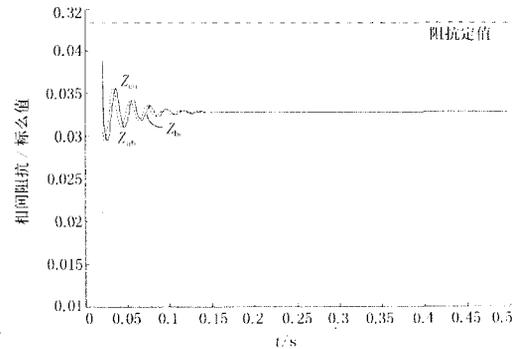


图 9 变压器 Y 侧三相短路时相间测量阻抗幅值

Fig 9 Amplitude of impedance between two phases when three-phase short circuit fault

仿真结果显示变压器 Y 侧发生三相短路时,侧最小测量阻抗不超过 0.05 倍基准阻抗。见图 9。

变压器在 Y 侧短路情况只有上面几种情况,从对各种故障类型的仿真来看,故障变压器的相间测量阻抗至少有一个小于整定值。通过仿真也验证了本原理在避免励磁涌流引起的误动作和在空载合闸时检测变压器内部故障方面都有良好的效果。

需要说明的是,如果不考虑电压的变化,只看电流在空载合闸和短路下的变化情况,幅值变化也很大,波形差异也很明显,也就是说这种保护用于背后系统为无限功率电源时也是可以的。在系统容量很大的时候,系统阻抗趋于零,采用阻抗保护与采用过电流保护相差不大,过电流保护更简单一些,当然此过流保护只能在空投时投入。在系统容量比较小,系统阻抗比较大的时候,采用阻抗保护的优点就体现出来:这时电压降比较大,变压器靠近电源侧电压很低,阻抗值很小,保护更容易动作。

当然对于有些轻微故障,如绕组的匝间短路故障,如果短路匝数非常少,引起的阻抗变化很小,采用阻抗继电器的方法和其他保护一样也不能判断出故障,这个问题需要依靠其它保护来切除故障,例如负序保护、故障分量的差动保护以及瓦斯保护、油温保护等非电量保护。

## 5 结论

本文提出一种结合了阻抗保护和改进的差动保护的新的变压器保护原理,详细分析了在不同情况下这种原理的动作特性,从理论推导和仿真结果来看,这种原理和保护配置方案具有灵敏度高,制动性能强,免除励磁涌流识别等优点。

## 参考文献:

- [1] Heathcote M J. 变压器实用技术大全 [M]. 北京:机械工业出版社, 2004.  
Heathcote M J. Transformer Practical Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [2] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理(增订版) [M]. 北京:中国电力出版社, 2004.  
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Power System Relay Protection, Enlarged Edition [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [3] 许正亚. 变压器及中低压网络数字式保护 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004.  
XU Zheng-ya. Digital Protection for Power Transformer and Medium-low Voltage Electric Power Net [M]. Beijing: China Water Power Press, 2004.
- [4] 贺家李,薛士敏,郭征. 输电线微机自适应分相纵差保护方法 [P]. 中国专利, ZL200410019004.0.  
HE Jia-li, XUE Shi-min, GUO Zheng. Method of Microprocessor Directional Protection for Transmission Lines [P]. China Patent, ZL200410019004.0.
- [5] 陈军. 基于波形不对称系数的新型变压器差动保护(硕士学位论文) [D]. 天津:天津大学, 2004.  
CHEN Jun. A Novel Differential Protection of Transformers Based on Waveform Asymmetric Coefficient, Thesis [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [6] 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.  
WANG Wei-jian. Electric Main Equipment Protection Their Theory and Application [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

收稿日期: 2005-07-25; 修回日期: 2005-08-14

## 作者简介:

汪国新(1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: wwgxx@eyou.com

贺家李(1925-),男,教授,中国电机工程学会名誉理事, IEEE高级会员,俄罗斯工程院外籍院士,主要研究方向为电力系统继电保护;

张振宇(1979-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护。

## New principle of transformer protection

WANG Guo-xin, HE Jia-li, ZHANG Zhen-yu

(School of Electrical Automation and Power Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Differential protection generally is used as main protection of transformers. Because of the influence of inrush exciting current, differential protection may maloperate. There are some ways to detect inrush exciting current, but they are limited by distinguishing inrush exciting current from short circuit current when closing on faulted transformer in different system operating conditions. This paper introduces a new approach to transformer protection which combines current differential protection and impedance protection. The proposed current differential protection is immune to inrush exciting current and the impedance protection is used to detect internal fault of transformer when closing. This principle has high sensitivity on internal fault and high restraining function during external fault as well. It doesn't reflect on inrush current but can operate when closing onto faulted transformer.

**Key words:** transformer protection; differential protection; inrush exciting current; impedance relay

## 2006年《继电器》征订启事

电力系统继电保护类唯一专业期刊,集三十年功力,精心打造“继电保护”专栏。

设置栏目:继电保护理论研究、继电保护运行技术、电力系统分析与控制、电力系统规划设计与可靠性、自动化及远动技术等。

1. 全国邮局均可订阅:邮发代号 36-135。定价:12元/期,全年共 288元。

2. 登陆中国刊物订阅网(www.bk114.com)、看看网(www.kankan.com.cn)网上订阅。

3. 杂志社订阅:

邮局汇款 地址:河南省许昌市许继大道 32号 461000 收款人:继电器杂志社

银行转帐 户名:许昌继电器研究所 帐号:1708023029021010058-051

开户行:许昌市工行五一路支行

凡 2005年 12月 31号之前订阅 2006年全年杂志者送 2007年上半年共 12期杂志。

订阅电话:0374-3212444 传真:0374-3360297 E-mail: faxing@xjgc.com

注:发邮件告知您的姓名、联系电话、地址和工作单位及部门,可获得免费赠刊。