

变压器零序差动保护的几个问题

张项安¹, 单强², 张弦²

(1. 许继集团, 河南 许昌 461000; 2 新疆电力设计院, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 通过分析变压器传统纵差保护在反映接地故障时灵敏度上的不足, 论述了装设零序差动保护的必要性。在分析了传统零序差动保护各种制动电流的选取方式后, 对两卷变压器和自耦变压器的零序差动保护提出了一种通用的制动电流选取方式。同时, 还针对传统差动保护的動作特性单一的缺点, 提出了变特性的差动保护设计新思路, 并在此基础上给出了零序差动保护的设计新方案。最后, 还根据现场实际情况给出了一种效验中性点零序 CT 极性的方法, 为零序差动保护在现场的正确应用提供了有力的支持。

关键词: 变压器; 励磁涌流; 零序差动保护

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)15-0013-05

0 引言

大型变压器在电力系统中占有不可替代的重要作用, 差动保护作为变压器内部故障的主保护, 是变压器保护的重中之重。变压器纵差保护历来受到大家的重视, 是变压器主保护的首选, 在现场也得到了广泛的应用, 而作为主保护之一的另一个差动保护——零序差动保护, 由于各种原因, 现场应用的普遍程度远不及纵差保护, 没有引起大家足够的重视。

1 装设零序差动保护的必要性

调研运行统计资料, 发现大型变压器绕组故障以匝间短路为最多, 单相接地短路次之, 相间短路为最少。因此有必要认真研究单相接地短路故障。

由于变压器一次绕组一般采用 $Y_n/ - 11$ 接线形式, 两侧电流的相位相差 30° 。为了平衡这个角度差, 微机型纵差保护通过软件来平衡这个误差。目前主要有下面两种做法。

a 星转角, 即将高压侧原始电流 I_{AY} 、 I_{BY} 、 I_{CY} 通过软件计算转换为和低压侧电流相位对应, 计算公式如下:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{AY} \\ I_{BY} \\ I_{CY} \end{bmatrix}$$

式中: I_A 、 I_B 、 I_C 为高压侧转换后的电流。

b 角转星, 即将低压侧原始电流 I_a 、 I_b 、 I_c 通过软件计算转换为和高压侧电流相位对应, 计算公式如下:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

式中: I_a 、 I_b 、 I_c 为低压侧转换后的电流。发生外部单相接地短路时, 由于三角侧的零序电流在绕组内部形成环流, 此时高压侧零序电流流入纵差继电器形成差流, 极易引起纵差保护误动。为此, 这种转角方式往往需要滤除高压侧零序电流, 计算公式如下:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{AY} \\ I_{BY} \\ I_{CY} \end{bmatrix}$$

式中: I_A 、 I_B 、 I_C 为高压侧滤除零序电流后的电流。

由上面这两种转角方式可以看出, 高压侧零序电流不再作为故障电流流入纵差继电器, 这导致内部接地故障时纵差保护灵敏度降低, 不能可靠保护内部单相接地故障。与此同时, Y_n 绕组发生绕组内部单相接地短路时, 传统的纵差保护两侧电流可能呈现外部短路的相位特征, 保护的灵敏度大大降低^[1]。

传统的纵差保护为了避免励磁涌流导致的误动, 常常利用二次谐波制动保护。随着大型变压器制造工艺的提高, 变压器的饱和磁密经常在 1.2 ~ 1.3 之间, 甚至低于 1.15, 励磁涌流中二次谐波含量降低, 为了保证空投变压器纵差保护不误动, 常常降低二次谐波制动系数^[2]。与此同时, 随着电力系统的发展, 超高压远距离输电线路对地电容的增大、静止无功补偿的大容量电容器的广泛使用, 使变压器纵差保护区内短路时短路电流中可能出现接近 100

Hz的二次谐波自由电流^[1]。这样就可能导致变压器内部故障时传统的二次谐波制动式纵差保护动作缓慢,故障电流对变压器造成巨大损坏。零序差动保护具有天然的抗励磁涌流能力,可以简化装置设计,提高保护动作速度。

基于以上种种原因,大型变压器有必要配置零序差动保护。

2 制动电流的几种选取方式

由于外部相间短路时,零序差动保护的差动电流为各侧零序不平衡电流的相量和,如果制动电流取各侧最大零序电流,很显然各侧零序不平衡电流的相量和完全可能大于各侧的最大零序不平衡电流,导致零序差动保护误动,为此,零序差动保护一般采用其他的电流作为制动电流。下面分别分析两卷变压器和自耦变压器的零序差动保护制动电流问题。

2.1 传统两卷变和自耦变的制动电流选取

传统的两卷变压器零序差动保护的制动电流取高压侧三相电流的最大值,即:

$$I_{res} = \max\{|I_{AH}|, |I_{BH}|, |I_{CH}|\} \quad (1)$$

式中: I_{AH} 、 I_{BH} 和 I_{CH} 分别为高压侧三相电流。下文用到此种符号时意义均相同。

传统上的自耦变压器零序差动保护的制动电流选取公式如下:

$$I_{res} = \max\{|I_{AH} + I_{CM}|, |I_{BH} + I_{AM}|, |I_{CH} + I_{BM}|\} \quad (2)$$

式中: I_{AM} 、 I_{BM} 和 I_{CM} 分别为中压侧三相电流。下文用到此种符号时意义均相同。

2.2 通用的制动电流选取

文献[3]对两卷变压器提出了一种全新的制动电流选取方式:

$$I_{res} = \max\{|I_{AH} - I_{BH}|, |I_{BH} - I_{CH}|, |I_{CH} - I_{AH}|\} \quad (3)$$

零序差动保护制动电流使用式(3)对比于使用式(1)有整定相对简单,区内单相接地故障灵敏度相对高的优点^[3]。

传统的自耦变制动电流公式(2),当自耦变压器高压侧或中压侧停运时,它就退化成两卷变压器下的制动电流公式。以中压侧停运为例,自耦变制动电流公式(2)退化成了式(1)。

针对式(2)的这个缺陷,本文对自耦变压器再提出一种新的制动电流选取方式,即:

$$I_{res} = \max\left\{ \begin{array}{l} |I_{AH} - I_{BH}|, |I_{BH} - I_{CH}|, |I_{CH} - I_{AH}|, \\ |I_{AM} - I_{BM}|, |I_{BM} - I_{CM}|, |I_{CM} - I_{AM}| \end{array} \right\} \quad (4)$$

式(4)对比于式(2),有不受变压器运行方式影响的优点。

可将这两种新型制动电流的选取方式综合起来,即对于两卷变压器和自耦变压器,制动电流均取各侧最大线电流。

下面分析自耦变压器几种区内外故障时式(4)的值。由于故障电流远大于负荷电流,故在分析时只计及故障电流,忽略负荷电流。

对于区外的相间故障,如图1所示的AB相间故障,此时制动电流 $I_{res} = \max\{|I_{AH} - I_{BH}|, |I_{AM} - I_{BM}|\}$ 很大,差动电流 I_{op} 为相间故障引起的零序不平衡电流,有 $I_{res} \gg I_{op}$,保护可靠制动。

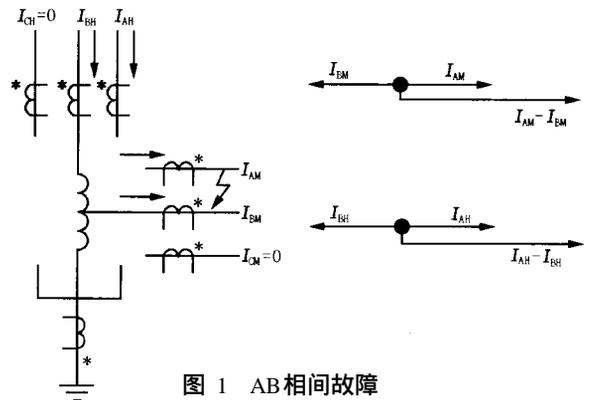


图1 AB相间故障
Fig 1 Intephase fault

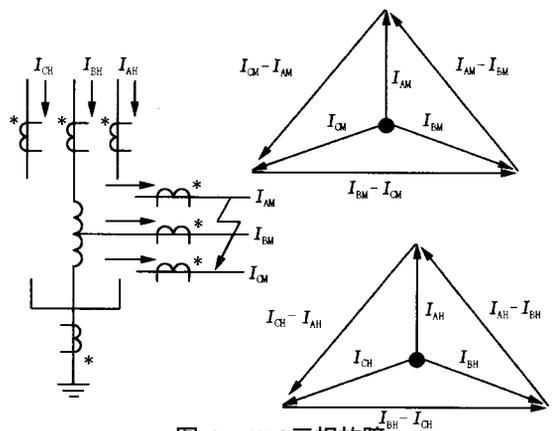


图2 ABC三相故障
Fig 2 Three-phase fault

对于如图2所示的ABC三相故障,有制动电流

$$I_{set} = \max \left\{ \begin{array}{l} |I_{AH} - I_{BH}|, |I_{BH} - I_{CH}|, |I_{CH} - I_{AH}| \\ |I_{AM} - I_{BM}|, |I_{BM} - I_{CM}|, |I_{CM} - I_{AM}| \end{array} \right\}$$
 很大,差动电流 I_{op} 为三相故障引起的零序不平衡电流,有 $I_{res} \gg I_{op}$,保护可靠制动。

对于区外的单相接地故障,如图 3 所示的 C 相接地故障,此时制动电流 $I_{res} = \max\{|I_{CH}|, |I_{CM}|\}$ 很大,差动电流 I_{op} 为 C 相接地故障引起的不平衡电流,有 $I_{res} \gg I_{op}$,保护可靠制动。

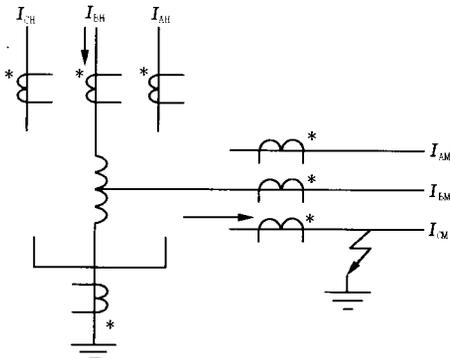


图 3 C相区外单相接地故障图

Fig 3 External fault with single-phase grounded of phase C

对于区内的单相接地故障,如图 4 所示的 C 相接地故障,此时制动电流为 $I_{res} = \max\{|I_{CH}|, |I_{CM}|\}$,差动电流为 $I_{op} = |I_{CH} + I_{CM} + 3I_{CM}|$,有 $I_{op} > I_{res}$,保护可靠动作。

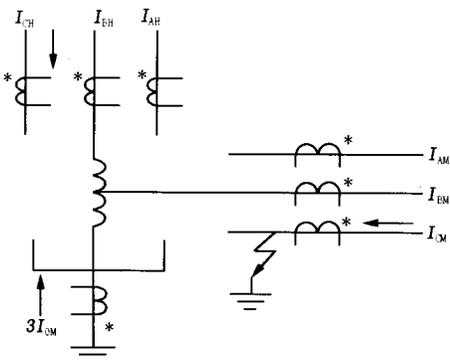


图 4 C相区内单相接地故障图

Fig 4 Internal fault with single-phase grounded of phase C

3 零序差动保护的设计方案

传统的变压器零序差动保护,不管是双折线,还是多折线,只能区分区内、区外故障,它的整定原则是躲过外部短路最大不平衡电流。对于区内故障,不分故障类型,无论是严重的金属性故障,还是经过渡电阻的轻微故障,只要动作点落在动作曲线的内部,其灵敏性和速动性是一致的。

图 5 为典型的传统零序差动保护动作曲线,其中单阴影的动作区 1 和双阴影的动作区 2 均为保护的动作用区, $I_{op,0}$ 为最小动作电流整定值, $I_{op,1}$ 稍大于 $I_{op,0}$, $I_{res,0}$ 为最小制动电流值。大部分变压器区内严重接地故障落在零序差动保护的动作用区 1 内,而大部分轻微接地故障落在动作区 2 内。对于落在零序差动保护动作区 2 内的接地故障,基于前文叙述的种种原因,传统纵差保护很可能拒动。从这个意义上说,动作区 2 也是传统纵差保护的拒动区。

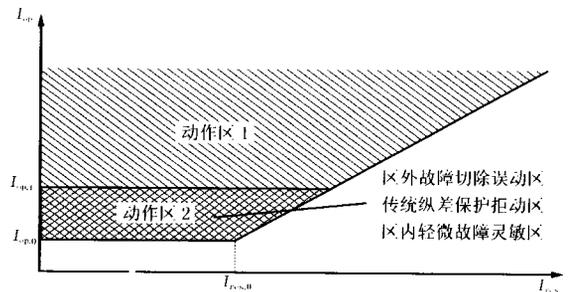


图 5 零序差动保护动作曲线

Fig 5 Operating curves of zero-sequence differential protection

多次事故表明,零序差动保护在变压器区外故障的开始时不会误动,在区外故障切除时反而常常误动。其原因是,区外故障时,短路电流较大,含有非周期分量和谐波分量,故障期间产生的零序不平衡分量较大(可能大于差动动作门槛),但制动电流较大,动作点落在非动作区,如图 6 所示 B 点。在故障切除的瞬间,差动两侧 CT 的暂态分量衰减程度不一样,此时差流仍然比较大,而制动电流减少,动作点移到 C 点,差动保护误动。

文献 [4] 分析了传统纵差保护在区外故障切除时类似的误动原因。

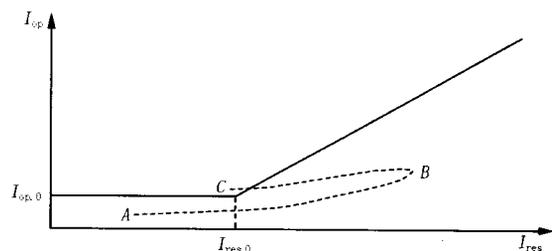


图 6 区外故障切除差动误动轨迹

Fig 6 Misoperation curves for external fault eliminating

综上所述,图 5 中的动作区 2 既是区内轻微故障零序差动保护灵敏区、传统纵差保护拒动区,也是区外故障切除误动区。正是这三者搅和在一起,导致了传统差动保护在灵敏性和可靠性的选择上左右为难。

现在我们采用细化故障类型的原则来细化单个保护的動作特性。

零序差动保护判据 1:

$$\begin{cases} I_{op} > I_{op.0}, (I_{res} < I_{res.0} \text{时}) \\ I_{op} = I_{op.0} + S(I_{res} - I_{res.0}), (I_{res} \geq I_{res.0} \text{时}) \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} I_{op} = |3I_{0H} + 3I_{0M} + 3I_{0N}| \\ I_{res} = \max \left\{ \begin{array}{l} |I_{AH} - I_{BH}|, |I_{BH} - I_{CH}|, |I_{CH} - I_{AH}| \\ |I_{AM} - I_{BM}|, |I_{BM} - I_{CM}|, |I_{CM} - I_{AM}| \end{array} \right\} \end{cases} \quad (6)$$

I_{0H} 、 I_{0M} 和 I_{0N} 分别为高压侧、中压侧和中性点零序电流。这是自耦变的零序差动保护动作方程,如果是两卷变压器的零序差动,则动作电流和制动电流公式为:

$$\begin{cases} I_{op} = |3I_{0H} + 3I_{0N}| \\ I_{res} = \max \left\{ |I_{AH} - I_{BH}|, |I_{BH} - I_{CH}|, |I_{CH} - I_{AH}| \right\} \end{cases} \quad (7)$$

判据 1对应的動作区如图 5,对于動作区 1,我们采用快速算法保证速动性,对于区内严重故障保护能快速动作切除故障变压器,对于動作区 2,我们采取稳定可靠的算法来保证可靠性,并在区外故障开始后增加适当的延时来避免区外故障切除可能导致的误动。

在理论上,如果制动电流取零序电流,零差保护是故障分量差动保护,但是,为了避免区外相间故障保护误动,零序差动保护采用了上述改变制动电流等种种防误动措施,这些措施提高了保护的可靠性,但是,与此同时,对于例如高阻接地等轻微故障,由于负荷电流的影响,零序差动保护可能工作在制动区,毫无疑问,这降低了零序差动保护的灵敏度,零序差动保护也就退化成传统的稳态电流型差动保护了。

为了提高区内轻微故障的動作灵敏度,我们采用下面的判据 2作为上述判据 1的补充,其制动电流取零序电流的最大值。为了防止区外严重相间故障导致零序差动保护误动,在最大线电流小于 nI_c 时才投入判据 2。

零序差动保护判据 2:

$$I_{op} > k \cdot I_{res} \quad I_{op} > I_{op.0} \quad I_{max} < nI_c \quad (8)$$

其中: I_{max} 为各侧线电流最大值; I_{res} 为各侧零序电流最大值; I_c 为变压器额定电流。对应動作区如图 7(注:图中未显示 $I_{max} < nI_c$ 的限制条件)。

判据 1和判据 2组成完整的零序差动保护,既

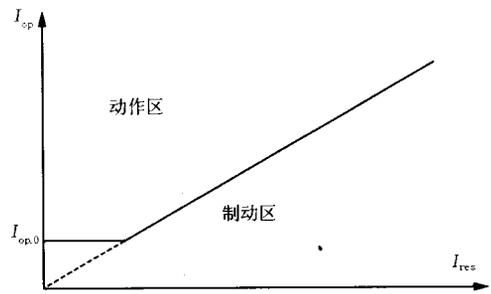


图 7 判据 2动作曲线

Fig 7 Operating curve of criterion two

能保证区内接地故障的速动性和灵敏度,又能保证区外各种故障的可靠性。

4 中性点 CT极性判别

影响零序差动保护動作正确性的一个非常关键的因素是要保证中性点零序 CT极性的正确性。现场的零序差动保护常常因为中性点零序 CT极性相反,导致零序差动保护误动。

变压器空载合闸时,如果内部无故障,理论上励磁涌流对于零序差动保护而言是穿越性电流,如果中性点零序 CT极性正确,合闸侧自产零序励磁涌流和中性点零序励磁涌流的大小应相等,相位应相反。因此我们在变压器空载合闸纵差保护不动作,即无故障时,利用合闸侧的自产零序励磁涌流和中性点零序励磁涌流的相位差来效验零序 CT的极性是否正确,如果两者相位相同,则发一个告警信息提示现场投运人员注意核实零序 CT极性。这个判据仅在变压器投运前的空载合闸试验时使用,变压器投运后应退出。它可以作为零序差动的补充,辅助零序差动保护的正確应用。

5 结论

本文分析了变压器传统纵差保护在反映接地故障上存在的灵敏度不足现象和励磁涌流给纵差保护应用带来的种种困难,论述了变压器装设零序差动保护的必要性。通过分析零序差动保护各种制动电流下的优缺点,提出了一种不受变压器运行方式影响的对两卷变压器和自耦变压器均适用的通用制动电流选取方式,即采用各侧线电流最大值作为制动电流。本文在分析了传统差动保护的单一動作特性的不足后,提出了根据区内故障类型划分動作特性的新思路,并根据这种新思路给出了零序差动保护的新设计方案。最后,根据现场零序 CT极性效验困难的现实情况,文中还给出了一种简便的效验零

序 CT极性方法辅助零序差动保护的正确应用。

参考文献:

- [1] 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, 1998
WANG Wei-jian Principle and Application of Electric Power Equipment Protection [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998
- [2] 史世文. 大机组继电保护 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
SHI Shi-wen Protection Relaying for Large Generators [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1987.
- [3] 张项安,等. 变压器零序保护制动电流新公式 [A]. 全国电力主设备保护学术讨论会论文集. 2004.

- ZHANG Xiang-an, et al New Formula for Constrained Current of Transformer Zero-sequence Protection [A]. Collection of Academic Forum on Electric Power Main Equipment Protection in China 2004.
- [4] 赵永彬,等. 区外故障变压器差动保护误动原因分析和防治 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (3): 95-98
ZHAO Yong-bin Analysis and Prevention of Transformer Differential Protection Misoperation at Out-area Fault [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (3): 95-98

收稿日期: 2004-12-23; 修回日期: 2005-06-24

作者简介:

张项安 (1968 -) 男, 专业从事继电保护产品开发工作。E-mail: xianganzh@xjgc.com

Several problems on zero-sequence differential protection for transformer

ZHANG Xiang-an¹, SHAN Qiang², ZHANG Xuan²

(1. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 2. Xinjiang Electric Power Bureau, Wulumuqi 830002, China)

Abstract: It is necessary to install zero-sequence differential protection because conventional differential protection is not sensitive enough to grounded fault. Based on the analysis of selection modes of constrained current for conventional zero-sequence differential protection, this paper presents a general constrained current selection mode for double-winding transformer and self-coupling transformer. Instead of single operating characteristic, this paper puts forward multi-characteristic differential protection and design scheme of zero-sequence differential protection. A method for neutral polarity testing of zero-sequence TA is proposed according to the real conditions on worksite, which is helpful for the correct application of zero-sequence differential protection on spot.

Key words: transformer; excitation current; zero-sequence differential protection

大家风范 昌盛之道

——热烈祝贺大昌电气系列产品荣获中国电器工业协会“质量可信产品”证书

日前,经过中国电器工业协会权威专家认真的评审与核查,浙江大昌电气有限公司生产的系列电力保护继电器全部荣获中国电器工业协会颁发的“质量可信产品”证书。大昌公司一直致力于追求不断提升产品质量,努力塑造企业品牌,以“质量兴企,品牌兴业”为企业方针,使大昌的产品赢在质量的起跑线上。短短几年里,浙江大昌电气有限公司紧紧依托行业资源优势,立足行业信息平台寻求发展。这几年大昌的发展历程,时时彰显着大昌电气的大家风范:

大昌电气获全国行业 CQC 认证第一证书
大昌的产品通过国家继电器质量监督检验中心的检测
大昌的产品通过浙江省电力研究所测试
大昌的产品获华东电力入网证书
大昌电气成为 ISO9001:2000 认证企业
大昌成为中国继电器及自动化设备协会理事单位

.....

此次又荣获中国电器工业协会颁发的“质量可信产品”证书等殊荣,为大昌的荣耀再添锦绣。今天的局面是大昌人一直努力的结果。继往开来,站在今天的成绩上,大昌人不会骄傲,还将在提高产品质量和打造公司品牌上不停奋进。

海纳百川,聚行业资源优势,打造百年宏伟大业,是大昌人的胸怀与抱负;关注客户、服务客户、满足客户需求,是大昌人永恒的追求;与时代同行,与世界同步,是大昌人发展的信念。这就是大昌公司的昌盛之道。

真诚地期待着与您的合作,让我们携手并进,共创辉煌!