

微机变压器的相间后备保护

朱声石¹, 吴运祥²

(1. 电力自动化研究院,江苏 南京,210003 2. 安徽省电力调度局,安徽 合肥,230000)

摘要:提出对变压器内部故障应以两套差动保护互为后备,距离继电器主要作为低压母线及馈线故障的后备保护,并建议采用负序距离继电器和椭圆形继电器为宜

关键词:变压器后备保护; 距离继电器

中图分类号: TM772

文献标识码: B

文章编号: 1003-4897(2000)01-0037-04

继电保护进入微机保护时代后许多观念应当更新^[1],遗憾的是有些机械型保护时代的观念仍未改变,后备保护不如主保护重要,受到较少的重视,可能是未改变观念的原因,本文将探讨这方面的问题。

1 双套变压器保护互为后备

对变压器内部故障以差动保护为主保护,以过流保护为后备保护,这种方式在机械型保护时代是正确的,因为两者是用不同硬件构成的,以简单的电流继电器作为复杂的差动继电器的后备是合乎情理的。

但是微机变压器保护情况不同了,首先微机型差动保护的灵敏度提高了,其最小启动电流可以降低到 $(0.2 \sim 0.3) I_n$ (I_n 为电流互感器的额定电流),可以对轻微匝间短路起保护作用^[2]。过流保护的启动电流都要大于 I_n 。如果差动保护未动作,灵敏度低的过流保护未必能起后备作用。过流保护的动作延时长。变压器内部故障若由过流保护切除一般变压器都要被严重烧损,难以修复。其次微机差动保护和微机过流保护常由一套装置完成。在变压器内部故障时差动电流是各侧流入的故障电流之和。在灵敏度最不利的情况下差动电流仅由一侧供给,此电流也同时供给过流保护。在同一套微机保护装置中此电流是由同一输入电路,同一数据采集系统,一般也用同一算法获得的同一电流,最后将此值与两种保护的启动值比较以决定它们是否动作。试问怎么可能出现灵敏的差动保护不动作,而不灵敏的过流保护反而动作的情况呢? 所以在此情况下过流保护的后备作用形同虚设。为了提高保护的信赖性,微

机差动保护应当双重化,两套主保护互为后备。于是过流保护对变压器内部故障的后备作用淡化了,但还有对中、低压母线及馈线故障的后备保护作用,过流保护还是需要的。

在我国一般希望采用不同原理的两套保护实现保护的双重化,现在习惯于按照避开变压器励磁涌流的原理来划分变压器差动保护。成熟的差动保护装置其避开涌流的方法也还不够尽善尽美^[3],更好的避开涌流的方法还在继续研制,当差动电流的波形不再畸变,趋向于正弦波时差动继电器都能正确动作,涌流鉴别元件在变压器合闸时未能避开涌流导致误跳闸是可能的,但在变压器故障时误闭锁保护的事却是从来没有的。两套差动保护采用不同的避开涌流的原理,其结果只能是增加在变压器空投时保护误动的几率,这岂不与采取双重化防止拒动的初衷相违背吗? 所以变压器保护的双重化不应以涌流鉴别元件要求不同原理。

在变压器合闸时绕组发生故障,涌流鉴别元件会不会长时间闭锁差动保护,延缓故障的切除? 双套差动保护是否要采用不同原理的涌流鉴别元件以争取缩短故障的切除时间? 如果任一相涌流鉴别元件动作后都闭锁三相差动继电器,在一相有故障而另一相出现涌流时后果当然是严重的,正确的方法应是按相闭锁。降压变压器高压绕组都按星形接线。差动继电器取高压侧两相电流之差与低压侧电流进行差动计算。如果高压侧 A 相出现涌流则取高压侧 $I_A - I_B$ 和 $I_C - I_A$ 的两相差动继电器将被闭锁,但另一相取 $I_B - I_C$ 的差动继电器不会被闭锁,可快速切除 B、C 相故障。采用按相闭锁方式后需要认真对待的是一相发生匝间短路并同时出现涌流,此时一相电流中既有故障分量又有涌流分量。差动继电器的动作取决于这两种分量的比例。当短路匝数较多时短路匝的漏抗归算到系统侧的数值较

收稿日期: 1999-09-06

作者简介: 朱声石(1928 -),男,高级工程师,长期从事电力系统继电保护与自动化的研究。

小,铁心中磁通不可能达到饱和值,因此电流中的故障分量小,涌流分量小,甚至不出现涌流,差动继电器定能迅速动作。当短路匝数很少时,短路匝的漏抗归算到系统侧的数值很大^[2],因而电流中的故障分量小,不超过变压器的额定电流,但铁心的饱和程度比无匝间短路时浅,可能出现的涌流不会很大,电流故障分量的存在也要淡化涌流的特征,所以涌流鉴别元件即使动作,其持续时间也不可能很长。再看匝间短路电流对变压器的危害。如果是低压绕组发生匝间短路,短路匝为 100 % 则短路电流可能达到 $10 I_n$, I_n 为变压器的额定电流。此时短路产生的铜耗为 $100 I_n^2 (r_1 + r_2)$ 其中 r_1 、 r_2 分别为高低压绕组电阻归算到高压侧的值,近似的有 $r_1 = r_2$ 。再看发生在高压侧的轻微匝间短路,短路匝数为高压绕组的 1 %,高压侧电流的故障分量较小,最大可能接近额定电流 I_n ^[2],则短路匝中电流将是 $99 I_n$ 。此时铜耗约为 $I_n^2 r_1 + (99 I_n)^2 \times 0.01 r_1 - 99 I_n^2 r_1$ 约为低压绕组 100 % 短路时铜耗的一半。现代变压器在满负荷下的铜损不超过 0.5 % P_n (P_n 为变压器的额定容量)。假设涌流鉴别元件动作,闭锁差动保护的时间为 200ms,则在此时间内耗散的能量将约为 0.000014 P_n kW·h。若 $P_n = 100$ MVA,则耗散能量仅为 14 kW·h,当然这并非毫无影响。而是考虑到变压器已有故障,即使保护瞬时动作,也要对变压器进行分解,更换绕组。延缓 200ms 跳闸,即使故障有所发展也不会显著增加经济损失。作者将在轻微故障下保护动作的延时定为 200ms 是相信现有各种原理的涌流鉴别元件都可在此时间内解除对差动保护的闭锁,因此没有必要对双套变压器差动保护采用不同原理的涌流鉴别元件。

如果在差动保护被闭锁期间 (< 200 ms) 故障发展了,则电流的故障分量将增加,涌流将减少,差动保护动作的延时将缩短,但故障分量差动继电器对逐步发展的故障可能不灵敏,所以故障分量差动继电器虽然具有较高的灵敏度^[2]但不宜单独使用,最好与稳态量差动继电器同时采用,相互补充。

顺便指出,利用波形鉴别励磁涌流虽尚未达到尽善尽美,但已不需要借助于提高差动继电器的启动电流(速饱和原理的差动继电器的启动电流要求大于额定电流)来避开涌流。差动继电器的灵敏度提高后已能保护变压器的轻微匝间短路^[2]。仅作者所知已有 3 次由电力自动化研究院生产的微机变压器

保护在瓦斯保护动作前将轻微匝间短路的变压器切除。差动保护不能保护匝间故障的观点应当予以否定。

2 当前后备保护存在的问题

2.1 过流保护存在的问题

过流保护动作的延时仅按与相邻线后备保护的级差整定是不够的。1997 年浙江系统曾发生一次 500kV 变压器高压侧的过流保护在由它供电的 220kV 变电所中的 110kV 线路故障时跳闸。其原因是故障切除后负载中的电动机自启动过程很长,过流保护的电流继电器不返回。故障时电压下降不多,电动机仍接在网上,但转速已逐渐下降,故障切除后电压迅速恢复,电动机带着负载转速逐渐恢复,此过程是相当长的。

过流保护的启动电流必需大于变压器的额定电流。500kV 三绕组变压器低压绕组容量仅为变压器总容量的 30 % ~ 50 %。高低压绕组间的漏抗约为 1.8 ~ 3.1 标么阻抗,高中压绕组间的漏抗小一些,约为 0.8 ~ 1.2 标么阻抗。因此在低压母线故障时短路电流小,高压母线残压高。高压侧过流保护即使采用复合电压启动对低压母线,甚至对中压母线故障也不能反应。尤其是低压母线可能没有专门的母线保护,低压母线故障的后果将不堪设想。

2.2 方向继电器存在的问题

方向继电器装设在高压侧,动作方向指向变压器,继电器按 90° 接线,其动作条件为 $M_A = k U_{BC} I_A \cos(\varphi + 45^\circ) > 0$, 式中 φ 为电流 I_A 落后于电压 U_{BC} 的角度。

(1) 高压线路发生接地故障

一般变压器高压侧的中性点直接接地。在高压侧外部发生单相接地故障时方向继电器不应动作。图(1)示出线路上发生 A 相单相接地故障时的系统

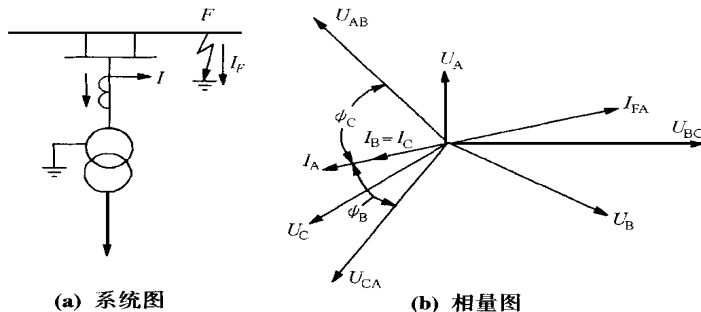


图 1 变压器高压侧外部 A 相接地故障

图及电压电流相量图。变压器低压侧系统不可能很大,流入保护的电流 I 中一般都有 $I_1 \approx I_2 < I_0$; 因而 I_A 、 I_B 和 I_C 相位接近同相,与 I_{FA} 相差约 180° 。B、C 两相方向继电器都要失去方向性 ($M_B > 0, M_C > 0$)。

(2) Y,d 接线变压器低压侧发生两相短路

假设变压器为 Y,d—1 组接线,在低压侧发生 ab 两相短路,图 (2) 示出变压器绕组的连接情况及故障时两侧电压电流的相量图,由图可见,只要 ϕ_B 大于 45° 则 $M_B < 0$, B 相方向继电器要拒动。此时 A 相方向继电器一定能动作。但是如果方向继电器的动作方向指向高压线路,那么 B 相继电器将失去方向性。由于 I_B 是短路电流,用接相启动的方式也不能避免误动。当然这是极端情况,过流保护是后备保护,动作带延时,只要低压侧保护不拒动,不会造成不良后果,但从理论上讲也是一个隐患。

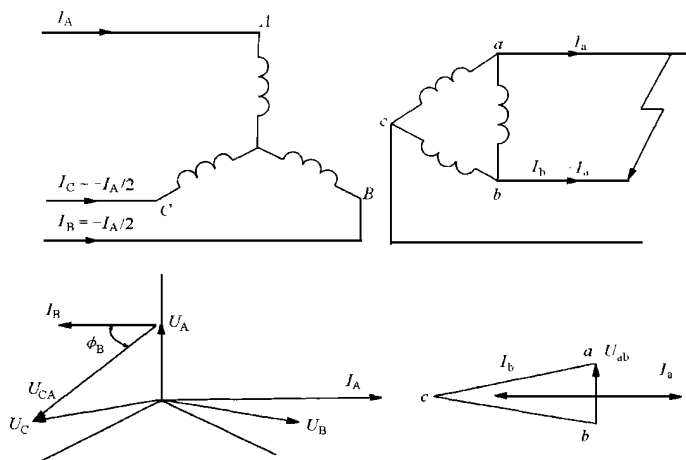


图 2 Y,d—1 组接线三角形侧发生 ab 两相短路时两侧电流、电压的相量图

2.3 距离继电器存在的问题

线路距离保护有长期运行的成功经验,但作为变压器的后备保护不能简单地照搬过来,首先电压断线闭锁应当简化。如果电流元件对低压母线故障有足够的灵敏度,将电流元件与距离元件组成与门即可有效地实现断线闭锁,但这样距离元件又起什么作用呢? 所以变压器的距离保护的断线闭锁问题并没有很好地解决。

其次,变压器的 Y,d 接线影响距离继电器的正确测量。从图 (2) 的相量图可见,高压侧 U_A 最低, I_A 最大。为了正确测量低压侧两相短路,在高压侧应采用相阻抗继电器,即 $Z_A = U_A / I_A$,而不是相间阻抗继电器。对图 (2) 的情况,它们的测量阻抗为^[4]

$$Z_A = Z_1$$

$$Z_{AB} = Z_1 + j \frac{1}{\sqrt{3}} Z_1 \Sigma$$

$$Z_{CA} = Z_1 - j \frac{1}{\sqrt{3}} Z_1 \Sigma$$

式中 Z_1 ——保护安装处到故障点的正序阻抗;

$Z_1 \Sigma$ ——系统正序阻抗之和, $Z_1 \Sigma = Z_{1S} + Z_1$, 其中 Z_{1S} 为等效电源的正序阻抗。

采用相间阻抗继电器作为变压器的后备保护存在这个误区。

3 变压器的距离后备保护

距离继电器作为变压器内部故障的后备保护没有什么优越性,但可以作为低压母线和馈线故障的后备保护。根据上面的讨论,应用于变压器后备保护的阻抗继电器应当满足以下 3 点要求。

(a) 能避开负荷,即距离继电器的整定阻抗不受负荷的限制;

(b) 在电压断线时距离继电器不会误动作,因而无需电压断线闭锁,仅需简单的电压断线报警;

(c) 不受 Y,d 接线的影响。

为了满足以上要求推荐采用负序距离继电器和椭圆特性距离继电器分别作为两相故障和三相故障的保护,兹分述于后。

(1) 负序距离继电器^[4,5]

假设保护范围自低压母线向馈线外延伸的距离为 Z_1 (归算到高压侧的阻抗值),则继电器的整定阻抗为 $jX_T + Z_1$, 其中 X_T 为变压器的漏抗归算到高压侧的值。负序距离继电器的动作为判据

$$|U_2 - (jX_T + Z_1) I_2| > |U_1 - (jX_T + Z_1) I_1|$$

式中 U_1, U_2 ——分别为高压母线的正、负序电压; I_1, I_2 ——分别为高压引线的正、负序电流。

由于是后备保护不要求精确测量距离,动作判据可以简化为

$$|U_2 - (jX_T + Z_1) I_2| > 0.5 U_N$$

式中 U_N ——为低压侧的额定电压,归算到高压侧的值

负序距离继电器以负序分量为动作量,所以在正常负荷状态下不会动作。负序分量不受 Y,d 转角的影响。为了防止电压断线时可能发生的不正确动作,可增设负序电流和电压元件,其逻辑图如图 3 所示。

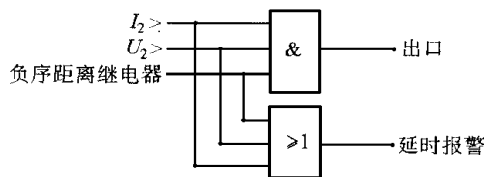


图3 负序继电器的逻辑图

负序距离继电器可以反应不同相别的两相短路,因而比较简单。

负序距离继电器有方向性。当用于三绕组变压器若中压侧有电源并希望对高压母线故障起后备保护作用时为此可设一个方向指向高压母线,整定阻抗很小的负序距离继电器。

负序距离继电器和相间多相补偿距离继电器完全等效,感应型相间多相补偿距离继电器在我国曾经有相当长的时间广泛应用,表现良好。由于没有选相能力和在线路两相运行时的性能分析复杂,在线路广泛采用单相自动重合闸后不再采用。分析表明在双侧电源线路系统振荡期间又发生故障时(这种情况是很罕见的),若是区外故障会误动,若是区内故障会拒动。但作为变压器的后备保护,这些问题是不存在问题。所以没有任何可担心必要。

(2) 椭圆特性距离继电器^[4]

椭圆特性距离继电器仅作为三相故障时的保护,因此不存在 Y,d 变压器转角的问题。它可接于任一相相电流电压,或相间电流电压。其在阻抗平面上的动作特性示于图 4。图中 C_1 和 C_2 为椭圆的

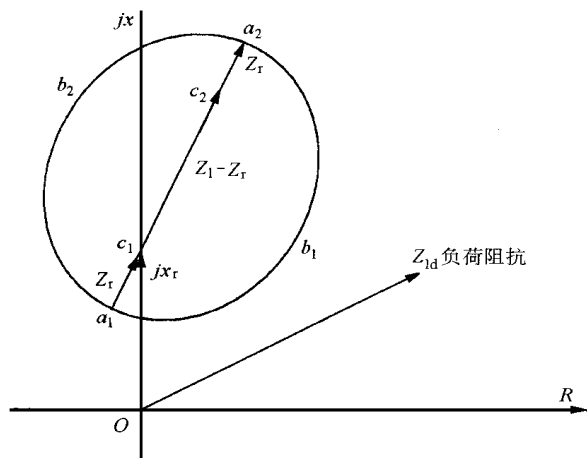


图4 作为变压器后备保护的椭圆特性距离继电器的特性

两个焦点, C_1 落在变压器漏抗矢量 jX_T 的末端。长轴较远的一端 a_2 是保护范围的末端, 矢量 $C_1a_2 =$

Z_1 是自低压母线向馈线外延伸的保护距离。椭圆的参数为:

$$\text{长轴 } a_1 a_2 = Z_1 + Z_r$$

$$\text{焦距 } c_1 c_2 = Z_1 - Z_r$$

$$\text{短轴 } b_1 b_2 = 4 \sqrt{Z_1 Z_r}$$

椭圆的方程为

$$|Z - jX_T| + |Z - jX_T - Z_1 + Z_r| = |Z_1 + Z_r|$$

式中变量 Z 即继电器的测量阻抗, 令 $Z = U/I$, 代入上式得继电器的动作判据为:

$$|(Z_1 + Z_r)I| \geq |U - jX_T I| + |U - (jX_T + Z_1 - Z_r)I|$$

式中 jX_T , Z_1 和 Z_r 都是待整定的参数。 jX_T 和 Z_1 的意义和负序距离继电器中的意义相同, Z_r 为伸入变压器内部的阻抗, 它不是为了把保护范围伸进变压器, 而是为了在低压母线上故障时能复盖电弧电阻, 保证必要的灵敏度。为此 Z_r 应按下式整定, $Z_r = 0.1(X_T + Z_s)$ 式中 Z_s 为高压系统的等效电源阻抗。

由于 $Z_r < X_T$, 所以椭圆远离负荷阻抗线, 继电器能可靠地避开负荷。椭圆不包围坐标原点, 在电压断线时不会误动。或者说当 $U = 0$ 时继电器的动作量肯定小于制动量, 可靠不动作。

对于三绕组变压器为了对中、低压母线故障都能起后备作用, X_T 应取高中压绕组间的漏抗 X_{HM} , 但椭圆特性应与负荷阻抗线保持足够的距离。或者 X_T 仍取高低压绕组间的漏抗 X_{HL} , 另设一个专对中压母线故障起后备作用的圆特性的距离继电器。其特性是以电抗 $j(X_{HL} + X_{HM})/2$ 的矢量末端为圆心, 以电抗 $jX_{HL}/2$ 为半径的圆, 继电器的动作判据为

$$|X_{HL} I/2| \geq |U - j(X_{HL} + X_{HM}) I/2|$$

如果中压侧有电源并希望作为高压母线故障的后备保护, 还希望作为高压侧电流互感器和变压器之间引线故障的后备保护, 为此可再设一整定阻抗很小的以坐标原点为圆心的全阻抗继电器, 并设一个过电流继电器作为启动元件, 在电压断线时闭锁全阻抗继电器。

参考文献:

- [1] 朱声石. 微机线路保护的特点, 技术进步和新概念. 继电器, 1997(2): 4-10.
- [2] 朱声石. 变压器经微匝间故障的保护. 电力自动化设备, 1999(1): 23-27.

(下转第 61 页)

$$m_{S2} = \frac{2}{\alpha + \beta} - \frac{1}{2\alpha + \beta} + \frac{7\alpha^2\beta + 6\alpha\beta^2 + \beta^3}{(\alpha + \beta)^2(2\alpha + \beta)^2} \quad (41)$$

系统 2 寿命与系统 1 寿命之差为：

$$m_{S2} - m_{S1} = \frac{5\alpha^2\beta + 3\alpha\beta^2}{(\alpha + \beta)^2(2\alpha + \beta)^2} > 0 \quad (43)$$

系统 2 的寿命大于系统 1 的寿命。

仅当 $\alpha = 0$ 或 $\beta = 0$ 时寿命才相等。

当 $\alpha \gg \beta$ 或 $\alpha \ll \beta$ 时,两个系统的可靠度将趋于一致,可选用系统 1,系统会在物理组成的独立性方面表现出优势,当 α 与 β 可比时,选择系统 2 可提高系统的可靠性。

6 结论

本文通过对冷备用冗余系统的可靠性分析比

较,给出了其可靠性分析方法,说明了其优越性。使用这种系统可简化控制装置功率输出部分的设计,提高该部的可靠性,应该在工业控制领域内加以推广。

参考文献：

- [1] Cui Jianhua, Fu Zhongwen. Reliability Analysis Of Excitation System (Configuration 1), HDC/ ES-970530-1. HDC ABB Generation AB, 1997, 5.
- [2] 傅仲文,崔建华.励磁系统电气结构的可靠性分析.水电厂自动化,1998,2.
- [3] 陆俭国,唐义良.电器可靠性理论及其应用.机械工业出版社,1996.

A method for reliability analysis on back-up redundancy

CUI Jian-hua, LU Jian-guo, JIN Shao-hua, GU Ying-meng

(Research Institute of Electrical Apparatus, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract : In this paper, the authors give a method for the reliability calculating and predicting of a system with back-up or even mixed back-up redundancy. Comparisons have made in the paper between back-up redundancy and other redundancy forms to show the advantages of the former after some typical systems with back-up redundancy are analyzed and references are worked out to the reliability design before system layout. It is proposed that the back-up redundancy should be put forward widely into practical use, especially in the expensive power stage of electrical control system, because of high system reliability and availability as well as low system cost reached.

Key words : back-up redundancy; reliability; power stage

(上接第 40 页)

- [3] 王维俭.主设备保护的几个理论和运行问题.电力系统自动化,1999(11):1-5.

- [4] 朱声石.高压电网继电保护原理与技术(第 2 版).北京:中国电力出版社,1995.
- [5] 王梅义.电网继电保护应用.北京:中国电力出版社,1999.8.

Microprocessor-based phase-to-phase backup protection of power transformer

ZHU Sheng-shi¹, WU Yun-xiang²

(1. Electric Power Automation Institute, Nanjing 210003; 2. Electric Power Bureau of Anhui Province, Hefei 230000, China)

Abstract : It is proposed that two differential protections backup each other against internal fault of power transformer and the distance relays are used mainly as backup protection of LV busbar and feeder faults. The negative sequence distance relay and elliptical characteristic relay are available.

Key words : backup protection of power transformer; distance relay