

变压器零序功率方向保护接线的正确性分析

王红霞

(宁夏天净电力勘察设计有限公司, 宁夏 银川 750002)

摘要: 多绕组主变压器的零序功率方向保护所用的 $3U_0$ 和 $3I_0$, 运行实践表明, 由于现场安装调试、运行维护人员在带负荷检查和安装接线的错误, 使方向保护在系统故障时误动和拒动。为此该文利用对称分量法, 分析电力系统发生不对称接地故障时的零序电流分布情况, 得出如何判断三绕组主变压器高、中压侧零序功率方向保护的正确接线, 并提出现场调试、运行维护中应该注意的事项, 对防止主变压器零序功率方向保护误接线和误判断、误动有参考的价值。

关键词: 变压器; 中性点接地; 零序电流; 零序功率; 误动

中图分类号: TM772 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-4897(2005)23-0073-06

0 引言

在大电流接地系统中发生单相接地或两相接地短路时, 系统中将出现零序电压 U_{d0} , 而零序电流可以看成是在故障点出现的一个零序电压 U_{d0} 而产生的, 它必须经过变压器接地中性点构成回路。如果规定和短路点直接相连的网络中零序电流的正方向是流向故障点, 零序电压的电位是线路高于大地的电位为正, 则由分析得知零序电压 $3U_0$ 滞后于零序电流 $3I_0$ 约为 110° 。中性点直接接地变压器设置的零序电流 $3I_0$ 和零序电压 $3U_0$ 及其零序功率方向保护是整个电网接地保护组成的一部分, 它的配置与整定值必须和相邻线路接地保护相配合, 主要作为母线和母线相邻线路主保护的后备, 同时也对变压器内部接地故障起后备作用。

对于一般或三绕组变压器中性点接地的高、中压侧的零序过电流保护的电流元件接到变压器中性点带有套管式专用电流互感器的二次侧, 这种接线简单、动作可靠、不存在因三相电流互感器误差引起的不平衡电流的问题, 保护的灵敏度容易满足要求。这样电流互感器一次侧电压不会很高, 可选用额定电流较低的电流互感器。在正常情况下, 电流互感器中基本上没有电流通过, 电流互感器的最小变比仅取决于通过接地短路电流 $3I_0$ 时热稳定和动稳定的条件。

为了提高动作的可靠性, 对 110 kV、220 kV 中性点直接接地的三绕组变压器, 零序电流保护可由两段组成, 每段可各带两个时限, 并均以较短的时限动作于缩小故障的影响范围或动作于本侧断路器, 以较长的时限动作于变压器各侧断路器。对自耦变

压器和高、中压侧中性点都直接接地的三绕组变压器, 当有选择性要求时, 应增设方向元件, 零序电流方向元件保护也可接入高、中压侧电流互感器的零序回路中。自耦变压器的零序电流保护应接入高、中压侧电流互感器的零序回路中, 这是因为自耦变压器高、中压侧具有共同直接接地的中性点时, 在有些情况下不能正确反应外部单相接地故障所致。

在中性点直接接地系统中, 为了使变电所的零序阻抗在各种运行方式下保持不变, 以及为了降低整个电力系统的接地短路电流水平, 必须限制变电所变压器中性点接地的数量和容量。例如当母线上有并列运行的变压器时, 只允许一台或两台主变压器中性点接地运行, 为了保护中性点不接地变压器的安全运行, 即将中性点接地运行变压器的零序过电流元件经过零序过电压元件后, 以较短的时限切除中性点不接地运行的变压器, 后切除中性点接地运行的变压器。

在 110 kV、220 kV 中性点直接接地的电网中, 对中性点不接地的变压器的低压侧有电源而在高、中压侧的电网单相接地短路且失去接地中性点, 引起工频电压升高, 相对应装设放电间隙和避雷器于变压器中性点和地线之间, 并另加装一套零序过电压和零序过电流保护快速灵敏动作后跳开变压器各侧断路器。

1 接地短路时三绕组变压器高、中压侧中性点直接接地时零序电流的流通过程

在大电流接地系统中发生不对称接地短路故障时, 由序网理论分析可知: 在零序网络中, 也不包含电源电势, 只在短路点存在有由故障条件所决定的

不对称电势电源中的零序分量,各元件的阻抗均应以零序参数来表示。

零序电流实际上是一个流经三相电路的单相电流,经过地或与地连接的其他导体(例如地线、电缆包皮),再返回三相电路中,为此我们可以作出系统的三线圈,在短路处将三相连在一起接上一个零序电势源,并从这一点开始逐一地查明零序电流可能通行的回路,如图 1、图 2 所示。

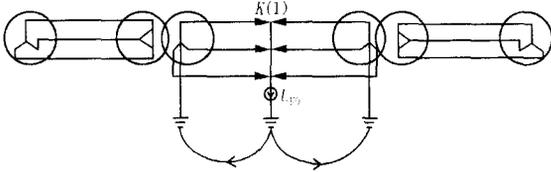


图 1 不对称短路时零序电流通路

Fig 1 Zero-sequence current path in unsymmetrical short circuit

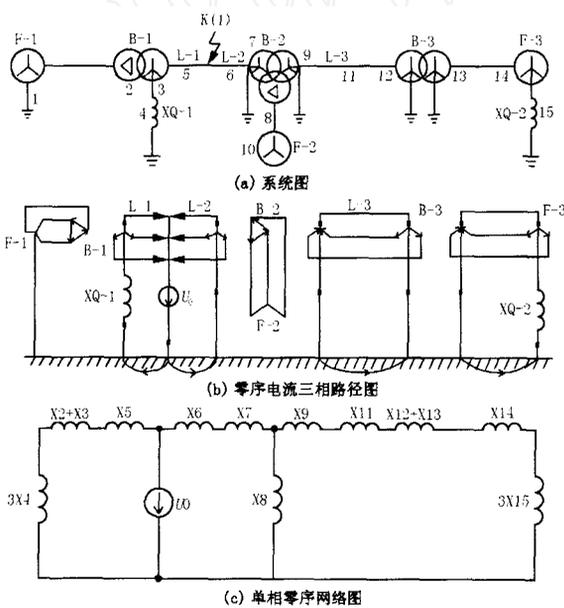


图 2 制订零序网络图例

Fig 2 Example of zero-sequence net

只有当和短路点直接相连的网络中至少具有一个接地的中性点(或有好几个接地的中性点)时,才可以形成一个零序回路(那么便有好几个零序电流的并联支路)。变压器绕组的接法对零序电流的通行路径有很大的影响,只有在某些特定的条件下,零序电流才能由变压器的一侧感应到另一侧去,如在 Y0/ 接法的绕组中,星形 Y0 侧绕组中的零序电流只能在三角形侧各相绕组中引起零序环流,并不能流到外线路上去,所以连接到三角形侧的任何网络,不论它具有接地的中性点与否,都不能画到零序

网络中去,如图 2 所示,又如在 Y0/Y0 连接的变压器中,当其中一侧的绕组中有零序电流通过时,另一侧的绕组中能不能通过零序电流,还要看另一侧绕组的外电路中还有没有其它接地的中性点等等。总之,有零序电流通过的元件,才有可能包含在零序网络中。如图 2 所示,在主变压器 B-2 中高、中压两侧的星形 Y0 中性点直接接地时,通过两侧中性点接地的零序电流 $3I_0$ 的流向是相反的,如在高压侧星形 Y0 发生单相接地短路为 K(1),则故障侧的星形 Y0 侧的零序电流 $3I_0$ 的流通方向的路径为:故障点 K(1) 地线(大地)等 Y0 中性点接地 变压器星形 Y0 侧三个线圈 母线 线路 故障点构成通路,显而易见,此时 $3I_0 - 3U_0 = -110^\circ$;即 $3I_0$ 超前 $3U_0$ 为 110° ;而变压器 B-2 的中压侧 Y0 侧的 $3I_0$ 流通方向则与高压侧 Y0 侧的 $3I_0$ 零序电流流通方向恰好相反,即可得知:在规定为高压侧是故障侧 Y0 的中性点零序电流 $3I_0$ 由地流向 Y0 中性点为正方向,则中压侧是非故障侧 Y0 的中性点零序电流 $3I_0$ 由地流向中性点侧,则中性点流向地为负方向,两者恰好相差 180° ;可得 $3I_0 - 3U_0 = 70^\circ$;即 $3I_0$ 滞后 $3U_0$ 为 70° 。

正确地理解与掌握应用当电力系统中发生不对称接地短路时变压器 Y0/Y0/ - 12 - 11 的高、中压侧 Y0/Y0 - 12 的两侧中性点接地的零序电流 $3I_0$ 流向,这是保证主变压器零序功率方向元件正确接线的理论根据。

对于那些有零序电流通过的,连在发电机或变压器等中性点的元件。例如消弧线圈,因为在其中通过的零序电流为三倍的零序电流之和(即每相零序电流的三倍),而零序网络所示的只是一相等值网络,故为了使零序网络中在这一元件上的电压降与实际相等,就必须将该元件的阻抗值乘以 3。

2 正确地判断变压器零序功率方向保护的接线

有时为了获得较好的保护配合关系,需要将变压器的零序电流保护的一段或二段经过零序功率方向元件控制,以构成变压器的零序功率方向保护,零序功率方向继电器靠比较零序电压与零序电流之间的相位关系来判别方向,它比变压器的零序电流继电器复杂的多,很大一部分零序电流方向保护的误动或拒动,追其根源,目前设计单位选型有误不能使用、现场安装调试和运行维护人员对审核图纸不严格、调试马虎、试验不把关等,是造成很大一部分零

序电流方向保护的误动或拒动的基本原因所在,为此提出以下的检验程序。

2.1 正方向接地故障与反方向接地故障的规定

中性点直接接地电网中发生接地短路故障时,如果规定零序电流 $3I_0$ 的正方向是流向故障点,零序电压 $3U_0$ 的电位是线路高于大地的电位为正,即电压以母线侧为正时,零序电流 $3I_0$ 与零序电压 $3U_0$ 的相位关系只与变压器和有关支路的零序阻抗有关,与故障点有无过渡电阻关系不大。由理论分析得知:

1) 零序功率方向保护的整定动作方向与零序电流 $3I_0$ 的正方向是流向故障点的流向相一致时,则零序电压 $3U_0$ 滞后于零序电流 $3I_0$ 为 110° ;则称为正方向接地故障。

2) 如果零序功率方向保护的整定动作方向与零序电流 $3I_0$ 的正方向是流向故障点的流向相反时,则零序电压 $3U_0$ 超前于零序电流 $3I_0$ 为 70° ;正确地分析判断 $3U_0$ 与 $3I_0$ 的相位关系,这是保证零序功率方向保护正确动作的理论依据。

2.2 再次验证零序功率方向继电器的动作特性、端子极性和其接线的正确性

正确的零序功率方向继电器的动作特性和接线,应在被保护元件(如线路、变压器)正方向接地故障时,零序电流 $3I_0$ 与零序电压 $3U_0$ 的相位关系进入继电器动作区的较灵敏部分。零序功率方向继电器按其动作原理可分为常规模拟型(后称 GJ0),包括:感应型、整流型、晶体管型、集成电路型,其最大灵敏角 $\alpha_m = 70^\circ$;即为通入 GJ0 的电流线圈极性端子的 $3I_0$ (即 I_j)滞后于所加入 GJ0 电压线圈的极性端子的 $3U_0$ (即 U_j)的相位角为 70° ;对微机型的零序功率方向继电器(后称为 CGJ0),其最大灵敏角 $\alpha_m = -110^\circ$;即为通入 CGJ0 的电流线圈极性端子的 $3I_0$ (即 I_j)超前于所加入 CGJ0 电压线圈的极性端子的 $3U_0$ (即 U_j)的相位角为 110° 。我们在做 CGJ0、GJ0 元件校验时,必须把 I_j 、 U_j 的输入端“*”侧查清楚找准确,并通过试验再次验证其所标的“*”端子、动作特性区及其接线是否准确无误,这是保证 GJ0、CGJ0 正确动作的先决条件。

2.3 零序功率方向继电器保护整定动作方向

需根据变压器在电网中的作用位置和重要程度,并且与变压器相关的电网结构和系统继电保护配置等情况有关,所以得出对主变压器中的零序功率方向继电器保护整定动作方向有两种:

1) 要求保护整定的动作方向为母线指向变压器,如降压变压器的高压侧多为这种情况,和通常的

线路保护由母线指向线路的情况是相一致的。

2) 要求保护整定的动作方向为变压器指向母线,如升压变压器的高压侧等,其零序功率方向元件的选定正方向按选择性要求为变压器指向母线,而并非母线指向变压器。

2.4 正确地判断电流互感器的极性

一般来说零序电流过滤器所用的 CT 极性是以满足 CGJ0、GJ0 的正方向故障(或保护整定动作的正方向)为原则而点极性的。如三绕组变压器高、中压侧零序功率方向过电流保护整定动作的正方向是由各侧母线指向变压器的,此时若所用零序电流过滤器为变压器高、中压侧的 CT(或变压器高、中压侧中性点带有套管式专用电流互感器)的极性是以一次侧电流从各侧母线流向变压器而以母线侧为正(或从变压器高、中压侧中性点流向地线而以中性点侧为正)以“*”表示,而二次侧必须同极性点以“*”作为正,才能保证一次侧与二次侧电流同相位,这样规定的方向给人以直观的感觉,明了易懂,即表示规定的 $3I_0$ 正方向分别为变压器高、中压侧母线流向变压器侧的故障点(或规定 $3I_0$ 的正方向分别为变压器高、中压侧的中性点流向地线),接线如图 3 所示。同理变压器高、中压侧零序功率方向保护整定动作的正方向由变压器指向高、中压各侧母线时,此时若所用的零序电流过滤器为高、中压侧的 CT(或变压器高、中压侧中性点带有套管式专用电流互感器)的极性是以一次侧电流从变压器流向高、中压各侧母线而以变压器侧为正(或一次电流从地线流向变压器高、中压侧中性点而以地线侧为正)以“*”标示,二次侧同极性为正用“*”标示。然后把零序功率方向保护的一组 CT“*”号端连在一起引出 $3I_0$ 为正极性,非“*”号端子连在一起,引出 I_k 为负极性,在此基础上才能确定出 GJ0、CGJ0 的电流线圈是正电流极性,还是反电流极性。接线如图 4 所示。

其次有关零序功率方向保护所用 PT 回路的极性、以及 U_L 、 U_N 、 U_S 的正确性在此不叙述。

2.5 根据 CGJ0、GJ0 继电器动作特性和 CT 与 PT 的极性,正确连接由互感器端子箱到继电器的整个电流与电压回路

目前常用的零序功率方向继电器分别为:CGJ0 有最灵敏角为 $3I_0$ 超前 $3U_0$ 为 110° 和 GJ0 有最灵敏角为 $3I_0$ 滞后 $3U_0$ 为 70° ;CGJ0 与正方向故障情况相一致,其电流和电压回路应按同极性与 CT 的 $3I_0$ 和 PT 开口三角形的 $3U_0$ 相连接,如图 3、图 4 中的

CGJ0继电器。GJ0与正方向故障情况相反,应将GJ0继电器的电流和电压回路两者之一按反极性与CT的 $3I_0$ 和PT开口三角形的 $3U_0$ 相连接,如图3和图4中的GJ0继电器。

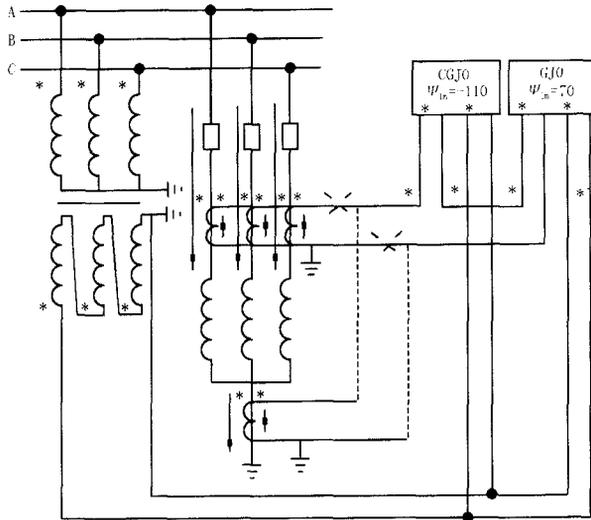


图3 零序功率方向继电器动作方向由母线指向变压器的接线方式

Fig 3 Connection mode when operational direction of the directional zero-sequence power relay from busbar to transformer

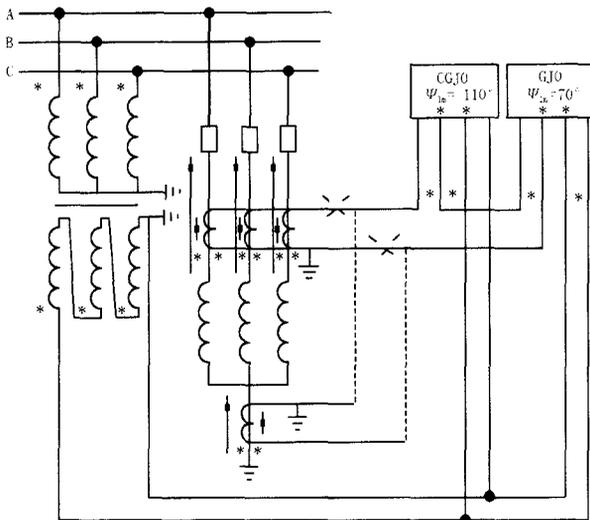


图4 零序功率方向继电器动作方向由变压器指向母线的接线方式

Fig 4 Connection mode when operational direction of the directional zero-sequence power relay from transformer to busbar

如对三绕组变压器高、中压侧零序功率方向保护所用的不论是高、中压零序电流滤过器的CT还是中性点的套管CT,其CT的极性一概以满足CGJ0、GJ0的正方向故障即保护整定动作的正方向为原则而点其极性。这样是相辅相成的,如图3和

图4所示的接线在变压器内部及各侧母线和其相对应的出线发生接地故障均能正确动作。

3 利用一次负荷电流和运行电压检查零序功率方向继电器

对于零序功率方向继电器,由于对其所加入的电流和电压相量有一定的相位关系要求,投运前必须利用负荷电流和运行电压进行实际模拟的方法来加以测试,以验证其接线的正确与否,在实测中应根据当时系统潮流方向、零序功率方向继电器接线方式、保护整定动作的正方向、CT、PT的极性和引接相连线等先作出理论分析,然后进行实测。当实测结果与分析相一致时,方能认定接线正确。

如220 kV侧的零序功率方向继电器,保护整定动作的正方向由220 kV侧母线指向变压器,当时的负荷情况即潮流方向为220 kV侧母线流向变压器,即220 kV侧母线送出 $P = 126 \text{ MW}$ 、 $Q = 70 \text{ Mvar}$,负荷角为 29.1° 。可以先将PT开口三角形绕组的a相电压取消或利用试验电压小母线取得相当于产生一个 $(-U_a)$ 电压,即 $3U_0 = -U_a$,分别通入 I_a 、 I_b 、 I_c 和 $-I_a$ 、 $-I_b$ 、 $-I_c$ 电流,以观察继电器动作情况如表1所列,可见实测结果与理论分析完全一致。

表1 继电器动作情况

Tab 1 Different conditions on relay operation

$3U_0$	短接电流	通入电流 $3I_0$	理论分析	实测结果
$-U_a$	$I_{b,c,n}$	I_a	Y	Y
$-U_a$	$I_{c,a,n}$	I_b	X	X
$-U_a$	$I_{a,b,n}$	I_c	N	N
$-U_a$	$I_{a,n}$	$-I_a$	N	N
$-U_a$	$I_{b,n}$	$-I_b$	X	X
$-U_a$	$I_{c,n}$	$-I_c$	Y	Y

表中“Y”表示动作状态,“N”表示制动状态,“X”表示动作边缘,即处于不定状态。

4 运行中注意事项及其建议

1) 为了保护母线上有并列运行中性点不接地变压器的安全运行,即将相邻中性点接地运行变压器的零序电流继电器控制的零序电压继电器配合使用的变压器接地保护方案,拟从保护回路设计上保证先跳中性点不接地变压器后跳中性点直接接地变压器。采用此保护方案时,必须在整定计算时要考虑可能出现的各种运行方式和有可能发生的各种接地短路时各台主变压器零序电流 $3I_0$ 和零序电压 $3U_0$ 的定值,保证可靠的动作;并要求零序电压继电器的动作电压整定值较低,要求比其它中性点接地变压器的零序电流更灵敏,这样才能保证在任何故

障情况下均能先跳中性点不接地变压器,否则导致全厂、全所停电和系统瓦解的重大事故,在宁夏电力系统已有这方面的事故教训。

2) 当电网发生单相接地,所有有关中性点直接接地变压器均相继与故障分开,而低压侧有电源的中性点不接地变压器仍保留在故障电网内时,相当于中性点不接地电网的单相接地,此时故障相对地电压为零,而非故障相电压幅值升高到额定相电压的 $\sqrt{3}$ 倍,相位角也分别转了 $\pm 30^\circ$;零序电压的幅值达到额定相电压值 $U_0 = -U_{A0}$,如果此时变比为 $U/100\sqrt{3}/100$ 的电压互感器不饱和,PT开口三角侧 $3U_0$ 升高到300V,但实际上,当中性点不接地电网单相接地时,非故障相电压升高 $\sqrt{3}$ 倍,该两相磁路很快达到饱和值,三次绕组每相达不到173V,而只能输出130~135V,因而 $3U_0 = U_A + U_B + U_C$ 的值为220~230V,当零序电压整定为180V时,尚有1.2倍以上的灵敏度。若定值大于180V,则保护可能有拒动的危险。动作时间0.3~0.5s动作后跳开各侧开关。但零序电压不宜低于180V,因为中性点不接地变压器在两相运行的情况下,如果变压器低压侧无电源时,根据理论分析可得三倍零序电压的 $3U_0$ 最高可达到150V,此时尚有1.2倍以上的灵敏度,可以保证保护不误动作。

放电间隙零序电流保护装于放电间隙回路内,当放电间隙放电,中性点通过零序电流时,允许零序电流保护有较小的动作值如100A或更小些,动作时间可以整定得短些,一旦动作,则应尽快切除该变压器。

3) LLG-3A型功率继电器当采用90接线方式时,可对各种相间故障和接入电流相接地故障的短路功率方向正确判别;当作零序功率方向继电器使用接入零序电压 $3U_0$ 和零序电流 $3I_0$ 时,则无论何种接线方式即 $+3U_0$ 、 $+3I_0$ 或 $+3I_0$ 、 $-3U_0$ 都存在正方向故障拒动或灵敏度大大下降的问题。因此这种型式的功率继电器不应作为零序功率方向元件使用。宁夏大坝电厂的#7、#8联变330kV、220kV侧零序功率方向继电器,设计选型不当为LLG-3A型,投运4年之久,未曾被发觉,以于是造成1995年的“9.9”重大事故的原因之一。

4) 对三绕组变压器的高、中压侧零序功率方向保护的整定动作正方向宜选择由变压器指向各侧高、中压母线,若经过各种方案的计算,权衡利弊,不得已的情况下才选择保护整定动作的正方向由高、

中压母线指向变压器,其原因为整定计算繁杂、保护配合困难等,而且还易出错。

5) 对三绕组变压器高、中压侧零序功率方向保护中所采用零序电流 $3I_0$ 的CT装在变压器中性点与地线之间时,应对CT极性、接线核实准确。采用录波、试投信号等有力的措施,验证其接线的正确性。

6) 对变压器中性点接地回路中的中性点侧架构小拐弯处的联线时有疏忽未接联线,其次接地线有一小段没有接通总地线,或运行时间长因地下腐蚀所致地线已断不通等等形成变压器中性点假接地的现象,直至电网发生接地短路故障时零序电流保护拒动且在中性点有烧伤的痕迹才被发觉,所以建议在运行维护中应严加监视和测试中性点接地线的完好性。

7) 当变压器零序方向保护由母线侧指向变压器时,其零序电流互感器CT应采用母线侧的三相CT,这样零序方向保护能保护该本侧变压器的线圈内部和引接线的接地短路故障;而不能采用中性点CT,因其不能保护主变压器该本侧的线圈内部和引接线的接地短路故障,如图3所示。

8) 当变压器零序方向保护由变压器指向母线侧时,其零序电流互感器CT应采用该本侧主变压器中性点CT,这样零序方向保护能保护该本侧变压器的线圈内部和引接线的接地短路故障;而不能采用主变压器母线侧的三相CT,因其不能保护主变压器该本侧的线圈内部和引接线的接地短路故障,如图4所示。

参考文献:

- [1] 王梅义. 电网继电保护应用 [M]. 北京:中国电力出版社,2001.
WANG Mei-yi Application of Protective Relaying in Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [2] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术 [M]. 北京:中国电力出版社,1995.
ZHU Sheng-shi Principle and Technology of Protective Relaying in High Voltage Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [3] 马长贵. 高压电网继电保护原理 [M]. 北京:水利电力出版社,1988.
MA Chang-gui Principle of Protective Relaying in High Voltage Power System [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1988.

作者简介:

收稿日期: 2005-05-12; 修回日期: 2005-06-09

王红霞(1963-),女,工程师,从事电力工程设计工作。

On connection correctness of directional zero-sequence power protection of power transformer

WANG Hong-xia

(Ningxia Tianjing Electric Power Survey and Design Co., Ltd, Yinchuan 750002, China)

Abstract: Operational experience shows that wrong connections of $3U_0$ and $3I_0$ used by the directional zero-sequence power protection of main transformer will cause the protection to be maloperation or miss trip on power system fault. By symmetrical component analysis method, this paper analyzes the distribution of zero-sequence current in unsymmetric earthing fault of power system. Consequently, it is clear that how to discriminate the correct connection of directional zero-sequence power protection on high and middle voltage sides of 3-windings main transformer. This paper puts forward some countermeasures in on-site test and maintenance as well.

Key words: power transformer; neutral earthing; zero-sequence current; zero-sequence power; maloperation

关于编写《现代继电器与继电保护装置实用技术手册》的通知

各有关企业:

随着继电器及继电保护装置的不断推陈出新,新产品层出不穷、老产品逐步淘汰,产品种类与型号纷繁复杂,给电力用户的选型造成很大不便。应华中网局、华东网局、南方电网以及各大电力设计院等电力客户的迫切需求,分会特组织编写本技术手册。

根据电力用户的需求,本手册将基于实用角度,将相关继电保护基础知识、产品、测试设备、常用标准、检测方法、明星企业荟萃一堂。她不仅是一本设计院产品选型、电力公司产品选购的实用技术手册,也是各电力公司、设计院、企业、院校开展技术培训的最佳教材。请各生产厂家将相关产品资料的电子文档以及产品样本(提供内容如下)Email或邮寄给分会秘书处编委会,详情请关注 www.dwg.net(网络实名:电力王国)。

一、继电器产品需提供内容:

a)生产厂家 b)用途 c)结构特点 d)主要技术参数 e)外形尺寸、安装开孔图 f)端子接线图

二、继电保护装置需提供内容:

a)生产厂家 b)用途 c)主要特点 d)功能配置 e)主要技术参数 f)外形尺寸、安装开孔图 g)其它

三、测试设备需提供内容:

a)生产厂家 b)用途 c)主要特点 d)功能配置 e)主要技术参数 f)其它

产品资料提供时间:2005年11月1日~2005年12月31日

编委会联系方式:中国电器工业协会继电保护及自动化设备分会

河南省许昌市许继大道32号 461000 传真:0374-3319473

联系人:张喜玲 电话:0374-3212479 E-mail: xilingz@powerkingdom.com

张艳超 电话:0374-3212554

中国电器工业协会继电保护及自动化设备分会

2005年10月21日