

基于超高压自耦变压器中性点零序电流的方向比较 纵联保护的研究

阿里木江·卡德尔¹, 索南加乐², 阿米那古丽·艾尼¹, 伊利亚尔·艾尔肯¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 随着电力系统向超高压方向发展, 自耦变压器容量越来越大, 而其零序阻抗越来越小, 导致保护上虽然零序电流达到定值。但零序电压很小, 不满足灵敏度要求, 零序方向元件误动和拒动, 从而零序方向纵联保护无法投入。但超高压自耦变压器中性点所产生的数值很大的零序电流的作用一直被忽略, 没有被有效利用。据此提出利用自耦变压器中性点零序电流来代替保护上两侧零序电压的基于自耦变压器中性点零序电流的方向比较纵联保护方案。该方案以自耦变压器中性点零序电流为参考量, 与两侧保护处的零序电流进行比相, 以两者相位差作为方向判据, 判断自耦变压器两侧故障方向, 进而根据纵联方向比较原理比较两侧故障方向来易区分内部故障和外部故障。该方案能够消除保护处零序电压对零序方向元件方向判据的不利影响, 有效地解决了目前保护处零序电压太小而引起的传统零序方向纵联保护拒动和误动的难题。经动模实验数据和数字仿真验证了该方案对接地故障具有灵敏度高, 选择性好, 能够正确地反应变压器各种轻微匝间故障, 判据不受故障侧电流互感器 (CT) 饱和影响等优点。

关键词: 自耦变压器; 接地故障; 零序电流; 新方向元件; 方向比较; 纵联保护; 匝间故障; CT 饱和

A novel scheme for UHV auto-transformer protection based on zero-sequence current longitudinal comparison principle

ALIMJAN Kader¹, SUONAN Jia-le², AMINGUL Aini¹, YILIJAR Erken¹

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the development of ultra-high voltage (UHV) power system, the capacity of auto-transformer gets larger and its zero-sequence impedance gets smaller accordingly. Therefore, the zero-sequence directional relay may have poor sensitivity due to the small zero-sequence voltage, although the zero-sequence current threshold is reached. The large value of zero-sequence current of the neutral point in auto-transformer is not utilized effectively. In view of this problem, the relationship of zero-sequence current phases between the neutral points on high voltage side and medium voltage side is analyzed, and a new auto-transformer pilot protection scheme based on the zero-sequence current comparison is proposed. With the zero-sequence current of neutral point as reference, the fault direction can be determined by comparing the phase shift between zero sequence current of high voltage side, medium voltage side and the reference current. So the internal fault and external fault can be discriminated. The proposed scheme eliminates the adverse effects yielded by zero-sequence voltage effectively. The results of dynamic simulation experiment and digital simulation show that the proposed directional relay can detect turn-to-ground and turn-to-turn fault reliably and sensitively even with the serious saturation of current transformer.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51267018).

Key words: auto-transformer; turn-to-ground; zero-sequence current; new direction components; directional comparison; pilot protection; turn-to-turn fault; saturation of current transformer

中图分类号: TM772, TM411+3

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)22-0024-08

0 引言

传统的零序功率方向保护是以零序功率方

向原理构成的, 即零序方向元件接入保护处的零序电压 ($3\dot{U}_0$) 和零序电流 ($3\dot{j}_0$), 反应于零序功率的方向而动作, 其具有优良的性能曾在超高压系统方向保护中得到了广泛应用。但超高压输电线路一般很长, 当系统发生接地故障时, 自耦变压器保护处零序方向元件测得的零序电压实

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51267018); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目 (2010211A13)

实际上为自耦变压器上的零序分压。随着电力系统的向超高压方向发展, 自耦变压器容量越来越大, 而其零序阻抗越来越小, 导致自耦变压器保护上虽然零序电流达到定值, 但零序电压很小, 不能满足灵敏度要求, 零序方向纵联保护无法投入。而且二次电压回路中性点多点接地或者交流电压回路断线等影响, 零序电压在低于门槛值后零序电压将无法反映真实的相位关系, 从而导致零序方向纵联保护的误动和拒动。如: 2003年7月24日500 kV 贵阳主变220 kV 出线干筑 I 线 C 相高阻接地时, 零序方向保护拒动是由于保护处零序电压很小而引起。2003年南方电网连续2次发生500 kV 线路经高阻单相接地故障, 由于保护上零序电压 ($3\dot{U}_0$) 太小而引起零序方向保护拒动和误动^[1-10]。国内外专家学者针对上述问题也进行了大量的研究。但是, 超高压系统发生接地故障时自耦变压器中性点所产生的数值很大的零序电流的作用一直被忽略, 没有被有效利用^[11-16]。据此, 本文以自耦变压器零序等效电路为基础, 分析自耦变压器在内部和外部故障下的中性点零序电流与两侧保护处零序电流的相位变化特征, 提出一种与保护处零序电压无关的, 利用自耦变压器中性点零序电流来代替保护上零序电压的基于超高压自耦变压器中性点零序电流的方向比较式纵联保护方案。该保护方案以自耦变压器中性点零序电流为参考量, 与两侧保护处的零序电流进行比相, 以两者相位差作为方向判据, 先判别自耦变压器两侧故障方向, 后根据方向比较纵联保护原理比较两侧故障方向(极性), 以方向(极性)相同或相反作为故障判据来易区分内部故障和外部故障。经理论分析, 动模实验数据和数字仿真验证了该保护方案对超高压自耦变压器区内外接地故障、轻微匝间故障以及外部接地故障抗 CT 饱和的反应能力。

1 自耦变压器外部接地故障分析

自耦变压器发生外部接地故障时, 零序电流的正方向规定为由母线指向自耦变压器, 下面将分别分析自耦变压器高、中压侧发生外部接地故障时的零序电流特点。图1为自耦变压器的接线图和零序电流分布图。

1.1 中压侧外部接地故障各零序电流的相位关系

自耦变压器中压侧区外发生单相接地故障参数归算到中压侧的零序等效电路如图2所示。

图中: \dot{U}_{M0} 为中压侧故障点零序电压; X_{H0} 、 X_{M0} 、 X_{L0} 分别为自耦变压器高、中和低压侧零序

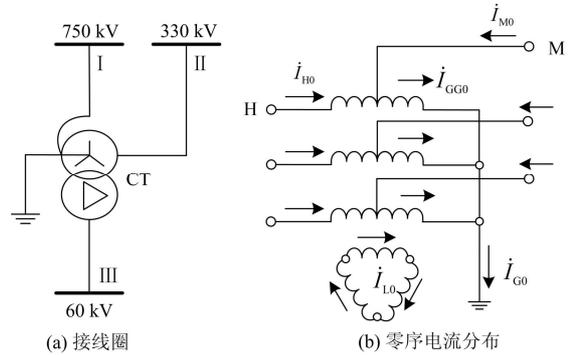


图1 自耦变压器的接线图和零序电流分布图

Fig. 1 Wiring diagram and zero-sequence current distribution of auto-transformer

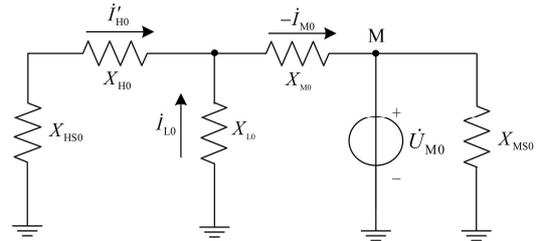


图2 自耦变中压侧单相接地故障零序等效电路图

Fig. 2 Zero-sequence current equivalent circuit of auto-transformer with single phase-to-ground fault occurred in medium-voltage side

等效电抗; X_{HS0} 、 X_{MS0} 为两侧系统的零序等效电抗; i_{H0} 为高压侧零序电流; i'_{H0} 归算到中压侧的高压侧零序电流, 其关系为 $i'_{H0} = ki_{H0}$, 其中 k 为高、中压侧之间的变比; i'_{L0} 归算到中压侧的低压侧零序电流; i_{M0} 为中压侧零序电流; i_{GG0} 为公共绕组零序电流; i_{G0} 为中性点零序电流。

分析 i_{G0} 与 i_{H0} 、 i_{M0} 之间的相位关系。

由图1(b)可得, 中性点零序电流和高、中压侧零序电流之间可满足:

$$i_{G0} = 3i_{GG0} = 3(i_{H0} + i_{M0}) \quad (1)$$

由图2可得, 高、中压侧零序电流之间可满足:

$$\frac{i_{H0}}{i_{M0}} = -\frac{X_{L0}}{(X_{HS0} + X_{H0} + X_{L0})k} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 可得出 i_{G0} 与 i_{H0} 、 i_{M0} 之间的相位关系可满足:

$$\frac{i_{G0}}{i_{M0}} = 3 \frac{X_{HS0} + X_{H0} + (1-1/k)X_{L0}}{X_{HS0} + X_{H0} + X_{L0}} \quad (3)$$

$$\frac{\dot{I}_{G0}}{\dot{I}_{H0}} = -3 \frac{X_{HS0} + X_{H0} + (1-1/k)X_{L0}}{k \times X_{L0}} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可知, 由于 $k > 1$, 当中压侧外部接地短路时, 自耦变压器每侧包括中性点均有零序电流存在以及 \dot{I}_{G0} 与 \dot{I}_{M0} 同向, \dot{I}_{G0} 与 \dot{I}_{H0} 反向, 即

$$\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{M0}) = 0^\circ \quad (5)$$

$$\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{H0}) = 180^\circ \quad (6)$$

从以上分析可知, 中压侧发生区外接地故障时, 中性点零序电流 (\dot{I}_{G0}) 的方向无论变化如何, 两侧新型零序电流方向元件 ($\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{M0})$ 和 $\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{H0})$) 判别的故障方向始终是相反的, 即

$$\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{H0}) - \arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{M0}) = 180^\circ \quad (7)$$

1.2 高压侧外部接地故障各侧零序电流的相位关系

自耦变压器高压侧区外发生单相接地故障参数归算到中压侧的零序等效电路如图 3 所示。

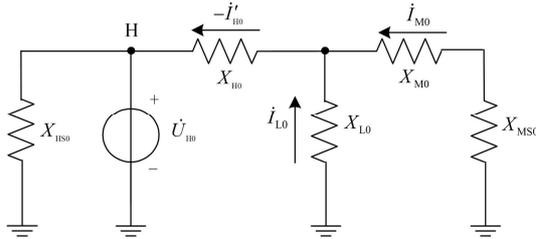


图 3 自耦变高压侧单相接地故障零序电流等效电路

Fig. 3 Zero-sequence current equivalent circuit of auto-transformer with single phase-to-ground fault occurred in high-voltage side

分析 \dot{I}_{G0} 与 \dot{I}_{H0} 、 \dot{I}_{M0} 之间的相位关系。由图 3 可得 \dot{I}_{H0} 与 \dot{I}_{M0} 的相位关系为

$$\frac{\dot{I}_{M0}}{\dot{I}_{H0}} = -\frac{k \times X_{L0}}{X_{HS0} + X_{H0} + X_{L0}} \quad (8)$$

将式(8)代入式(1), 可得出 \dot{I}_{G0} 与 \dot{I}_{H0} 、 \dot{I}_{M0} 之间的相位关系可满足:

$$\frac{\dot{I}_{G0}}{\dot{I}_{H0}} = 3 \frac{X_{MS0} + X_{M0} - (k-1)X_{L0}}{X_{MS0} + X_{M0} + X_{L0}} \quad (9)$$

$$\frac{\dot{I}_{G0}}{\dot{I}_{M0}} = -3 \frac{X_{MS0} + X_{M0} - (k-1)X_{L0}}{k \times X_{L0}} \quad (10)$$

运行经验及仿真分析结果表明, 超高压实际系统中自耦变压器变比 k 虽然大于 1, 但不会特别大, 而且由于 X_{L0} 为自耦变压器三角形侧漏抗, 其数值远远小于中压侧的系统阻抗 X_{MS0} 。因此

$X_{MS0} + X_{M0} > (k-1)X_{L0}$ 关系恒成立。这说明当高压侧外部接地短路时, 自耦变压器每侧包括中性点均有零序电流存在以及 \dot{I}_{G0} 与 \dot{I}_{H0} 的相位相同, \dot{I}_{G0} 与 \dot{I}_{M0} 相位相反, 即

$$\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{H0}) = 0^\circ \quad (11)$$

$$\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{M0}) = 180^\circ \quad (12)$$

从以上分析可知, 高压侧区外发生接地故障时, 中性点零序电流 (\dot{I}_{G0}) 的方向无论变化如何, 两侧新型零序电流方向元件 $\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{M0})$ 与 $\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{H0})$ 所判别的故障方向始终相反, 方向判断不受到中性点零序电流方向变化的影响, 即

$$\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{M0}) - \arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{H0}) = 180^\circ \quad (13)$$

2 自耦变压器内部短路故障分析

变压器内部故障指的是匝间、中性点接地侧绕组的接地短路以及绕组的相间短路等。当自耦变压器内部接地故障时, 零序电源在变压器内部, 参数归算到中压侧的零序等效电路如图 4 所示。

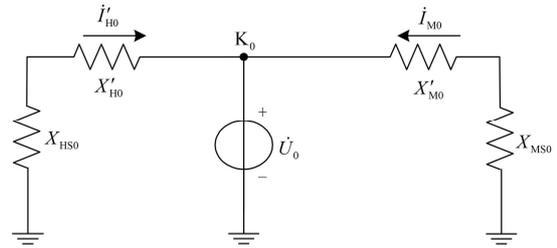


图 4 自耦变压器内部故障零序电流等效电路

Fig. 4 Zero-sequence current equivalent circuit of auto-transformer with internal faults

自耦变压器发生内部故障后的短路电抗不再等于铭牌上的外部故障时的短路电抗, 经考虑内部故障各绕组短路电抗变化的影响, 高、中和低压侧的零序等效电抗分别用 X'_{H0} 、 X'_{M0} 和 X'_{L0} 表示。由图 4 可得出:

$$k\dot{I}_{H0}(X'_{H0} + X_{HS0}) = \dot{I}_{M0}(X'_{M0} + X_{MS0}) \quad (14)$$

将式(14)代入式(1)可得出 \dot{I}_{G0} 与 \dot{I}_{M0} 、 \dot{I}_{H0} 之间可满足:

$$\frac{\dot{I}_{G0}}{\dot{I}_{H0}} = 3 \frac{X'_{H0} + X_{HS0} + (X'_{M0} + X_{MS0})/k}{X'_{H0} + X_{HS0}} \quad (15)$$

$$\frac{\dot{I}_{G0}}{\dot{I}_{M0}} = 3 \frac{X'_{M0} + X_{MS0} + k(X'_{H0} + X_{HS0})}{X'_{M0} + X_{MS0}} \quad (16)$$

由式(15)和式(16)可知, \dot{I}_{G0} 恒与 \dot{I}_{M0} 、 \dot{I}_{H0} 同向, 其相位可满足:

$$\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{M0}) = 0^\circ \quad (17)$$

$$\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{H0}) = 0^\circ \quad (18)$$

从式(18)、式(19)可知, 发生内部短路故障时, 两侧新型零序电流方向元($\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{M0})$, $\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{H0})$)所判别的故障方向始终相同, 即

$$\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{M0}) - \arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{H0}) = 0^\circ \quad (19)$$

3 保护方案故障判据

由以上分析可知, 利用自耦变压器中性点零序电流(\dot{I}_{G0})来代替其两侧保护处零序电压(\dot{U}_{H0} 、 \dot{U}_{M0})后根据新型零序电流方向元件($\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{M0})$ 、 $\arg(\dot{I}_{G0}/\dot{I}_{H0})$)先判断自耦变压器两侧的故障方向, 规定零序电流的相位差在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化时判为正向, 用“+”号表示; 而在 $90^\circ \sim 270^\circ$ 范围内变化时判为反向, 用“-”号表示。进而根据方向比较式纵联保护原理比较两侧故障方向(极性)来能够方便地区分内部故障和外部故障, 规定若两侧判别方向(极性)相同判为内部故障保护就动作, 而两侧判别方向(极性)相反判为外部故障, 保护就不动作。据此提出如表1所示的保护故障判据。其方向判据如下。

$$\text{正方向判据: } -90^\circ < \arg \frac{\dot{I}_{G0}}{\dot{I}_{HM0}} < 90^\circ \quad (20)$$

$$\text{反方向判据: } 90^\circ < \arg \frac{\dot{I}_{G0}}{\dot{I}_{HM0}} < 270^\circ \quad (21)$$

其中, $\dot{I}_{HM0} = \dot{I}_{H0}$ 、 \dot{I}_{M0} 。

表1 基于中性点零序电流的方向比较纵联保护故障判据

Table 1 Failure criterion of longitudinal protection based on zero-sequence current comparison

故障位置	$\arg(\frac{\dot{I}_{G0}}{\dot{I}_{M0}})$	$\arg(\frac{\dot{I}_{G0}}{\dot{I}_{H0}})$	两侧故障方向	故障判据	保护装置
区内故障	+	+	相同	内部故障	动作
区外故障	-	-	相同	外部故障	不动作
区内故障	+	-	相反	外部故障	不动作
区外故障	-	+	相反	外部故障	不动作

新型零序方向元件的动作特性如图5所示。

由以上分析可知, 该保护方案所提出的新型零序电流方向元件的动作特性与传统的零序功率方向元件相比, 虽然被比较对象不同, 但动作特性是一致的。因此, 以零序电流比较原理构成的新型方向元件来可以代替传统的零序功率方向元件。值得注意的是该方向元件的方向判据与保护处的零序电压无关, 因此有效地消除了保护处零序电压和二次回路电压对零序电流方向元

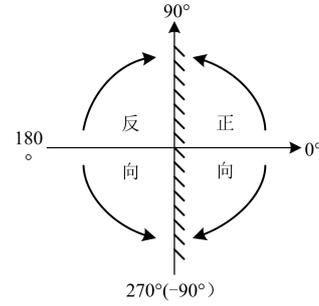


图5 零序电流方向元件的动作特性

Fig. 5 Operating characteristics of zero-sequence directional element

方向判据的不利影响。此外, 超高压输电线路的方向比较纵联保护原理成功地引入了变压器保护中, 由于变压器各侧的测量元件通常均安装在同一个控制室内, 甚至是同一个保护盘上, 信息的交换十分方便不存在各侧保护之间动作延时配合的问题^[17-18]。因此, 与超高压输电线路方向纵联保护相比大大缩短了故障切除时间, 与线路方向比较式纵联保护相比结构简单, 容易实现, 速动性好, 准确率高。

4 仿真验证

4.1 对区内外接地故障反应能力的仿真验证

为了验证该方案对自耦变压器区内外接地故障的反应能力, 采用电力系统仿真软件 ATP 建立了 750/330/60 kV 自耦变压器在双侧电源超高压输电系统中的仿真模型如图6所示。

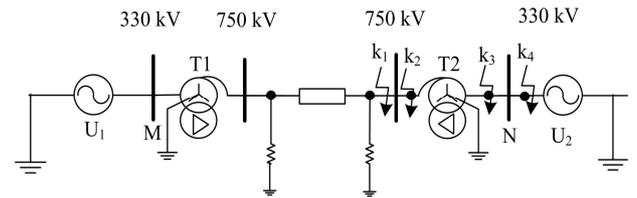


图6 自耦变压器在双侧电源超高压系统的仿真模型

Fig. 6 Autotransformer simulation model used in UHV system with double side power supply

其中变压器变比为 765/345/66, 接线方式 YN/a0/d11。系统阻抗: $Z_{NS0} = 1.8527 + j16.5808$; $Z_{NS1} = 0.8088 + j6.3077$; $Z_{NS2} = 0.4469 + j15.709$; $Z_{NS3} = 0.7792 + j6.744$ 。

为了验证所提保护原理在区内、外单相和两相接地故障时的性能, 分别对系统 k_1 点(高压侧外部)、 k_2 点(高压侧内部)、 k_3 点(中压侧内部)和 k_4 点(中压侧外部)发生单相和两相接

地故障情况进行仿真。

根据保护判据对所有的仿真波形进行分析,其结果如表 2 所示。

表 2 对接地故障反应能力的仿真验证结果
Table 2 Simulation results of the ground fault response capacity

故障点	接地故障类型	$\arg\left(\frac{I_{G0}}{I_{H0}}\right)$		$\arg\left(\frac{I_{G0}}{I_{M0}}\right)$		故障判据结果	保护装置
		相位差	方向	相位差	方向		
k ₁	单相	-178°	-	1.38°	+	外部	不动
	两相	-176°	-	1.35°	+	外部	不动
k ₂	单相	6.5°	+	1.36°	+	内部	动
	两相	6°	+	1.34°	+	内部	动
k ₃	单相	177°	-	175°	-	内部	动
	两相	177°	-	176°	-	内部	动
k ₄	单相	178°	-	-1.4°	+	外部	不动
	两相	177°	-	-1.37°	+	外部	不动

从以上分析表可知,理论分析与仿真结果一致。该保护方案都能够准确区分内部故障和外部故障,对区内外接地故障具有明确的方向性和选择性。零序电流的相差位变化范围较小,都在保护最灵敏的 0° 和 180° 附近,对接地故障灵敏度很高。

4.2 对匝间故障反应能力的仿真验证

由于目前各种仿真软件对变压器匝间故障的仿真不够成熟和完善,本文利用中国电力科学院 750 kV 超高压系统自耦变压器匝间故障动模试验数据对该方案的可行性进行了仿真验证。

自耦变压器动模实验模拟系统如图 7 所示。动模变压器为超高压三绕组自耦变压器,容量为 500/500/150 MVA,接线方式和电压变比同上。

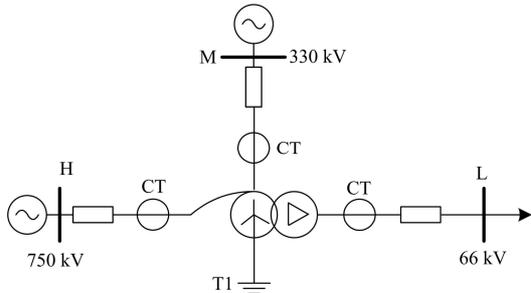


图 7 变压器动模实验模拟系统图

Fig. 7 Dynamic simulation structure of the transformer

4.2.1 匝间故障部分仿真波形

对自耦变压器匝间故障动模试验数据采用全周傅氏算法进行处理, Matlab 进行波形处理,各种匝间故障的持续时间均为 100 ms (5 个周

波),每个周波的采样点数为 40,自耦变压器中载 1.5% 发生匝间故障仿真波形如图 8 所示。

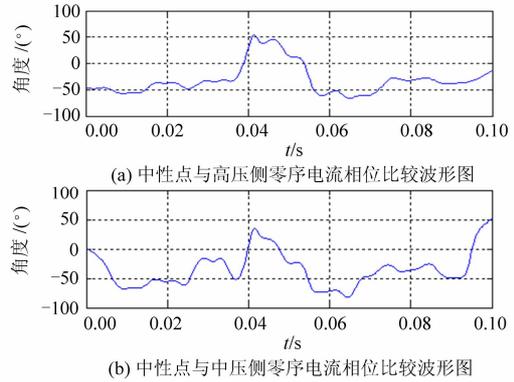


图 8 自耦变压器中载 1.5% 发生匝间故障仿真波形
Fig. 8 Simulation waveform of turn-to-turn fault of autotransformer with overloading 1.5%

4.2.2 匝间故障动模试验仿真波形结果分析

自耦变压器发生各种匝间故障情况下的动模试验数据仿真波形分析结果如表 3 所示。

表 3 对匝间故障反应能力的仿真验证结果
Table 3 Simulation results of turn-to-turn fault response capability

匝间故障类型	$\arg\left(\frac{I_{G0}}{I_{H0}}\right)$		$\arg\left(\frac{I_{G0}}{I_{M0}}\right)$		故障判据结果
	相位差	方向	相位差	方向	
轻载 3.0%	-30°~50°	+	-50°~20°	+	内部 动
轻载 1.5%	-25°~30°	+	-40°~30°	+	内部 动
中载 3.0%	-40°~5°	+	-45°~35°	+	内部 动
中载 1.5%	-55°~50°	+	-65°~50°	+	内部 动
重载 3.0%	-40°~20°	+	-15°~30°	+	内部 动
重载 1.5%	-48°~20°	+	-5°~39°	+	内部 动

从分析结果可知,虽然两侧零序电流的相位差变化范围较大,但仍在正方向判据相位变化范围都在 (-90°~90°) 之内,而且两侧故障方向(极性)相同能够满足故障判据要求。因此,该保护方案具有能够准确反应自耦变压器各种轻微匝间故障的能力。

4.3 对抗 CT 饱和反应能力的仿真验证

4.3.1 CT 饱和部分仿真波形

利用 PSCAD 仿真软件建立考虑铁磁元件特性

的 CT 仿真模型。分别观察自耦变压器外部高、中压侧发生接地故障, 对故障侧 CT 在轻、中、重度饱和情况进行仿真, 高压侧两相接地故障 CT 严重饱和 B 相原始电流畸变波形如图 9 所示。

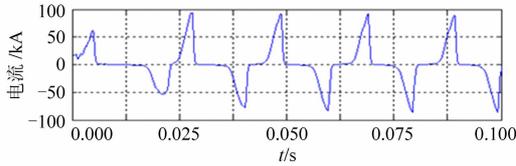


图 9 高压侧单相接地故障 CT 严重饱和 B 相电流波形

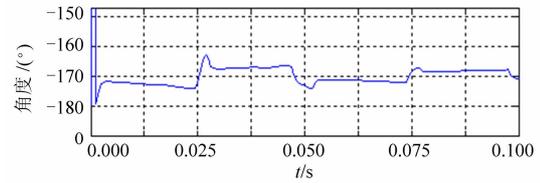
Fig. 9 Phase A original current wave when medium saturation happens when grounding fault occurs in HV side

高压侧两相接地故障中压侧 CT 严重饱和时中性点与高、中压侧零序电流相位比较仿真波形如图 10 所示。

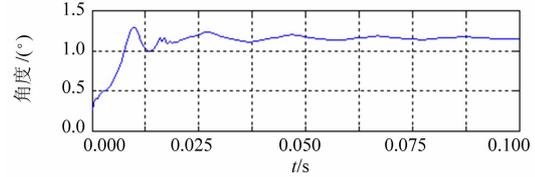
4.3.2 CT 饱和仿真波形分析结果

根据故障判据分析故障侧 CT 不同程度饱和时的仿真波形, 其结果如表 4 所示。

从以上分析可知, 自耦变压器中压侧 CT 饱和时中性点与中压侧零序电流的相位差变化范围比高压侧较大, 但都在正方向判据相位变化范围 ($-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$) 之内, 方向判据受 CT 饱和深度影响不太明显。更重要的是故障侧 CT 最严重饱和, 相电流波形如此严重畸变的情况下, 新型零序电流方向元件未导致误判。因此, 该方案受 CT 饱和和深度影



(a) 中性点与高压侧零序电流相位比较波形图



(b) 中性点与中压侧零序电流相位比较波形图

图 10 高压侧两相接地故障 CT 严重饱和时零序电流相位比较波形

Fig. 10 Severe CT saturation zero-sequence current phase comparison waveforms of two-phase turn-to-ground fault on HV side

响小, 对抗外部接地故障 CT 饱和能力很强。

4.4 中压侧系统阻抗变化对保护判据影响的仿真验证

为了验证超高压自耦变压器在高压侧发生接地故障时, 中压侧系统阻抗变化对零序电流方向纵联保护判据的影响, 不断地调整中压侧系统零序阻抗 Z_{NS0} 大小, 即 $(0.5 \sim 30) Z_{NS0}$, 观察分析自耦变压器高压侧发生接地故障时中性点零序电流的幅值大小及中性点零序电流与高、中压侧零序的相位比较仿真波形。并根据保护判据对其仿真波形进行分析, 其结果如表 5 所示。

表 4 对抗 CT 饱和反应能力的仿真结果

Table 4 Simulation results of against the CT saturation capacity

故障点	CT 饱和侧	接地故障(饱和)	$\arg \left(\frac{I_{GO}}{I_{HO}} \right)$		$\arg \left(\frac{I_{GO}}{I_{MO}} \right)$		判据结果	保护装置
			相位差	方向	相位差	方向		
高压侧外部	高压侧	A 相(轻度)	-163°	—	1.3°	+	外部故障	不动作
		A 相(中度)	-156°	—	1.2°	+	外部故障	不动作
		A 相(重度)	-163°	—	1.3°	+	外部故障	不动作
		AB 两相(严重)	$-163^{\circ} \sim -174^{\circ}$	—	$1^{\circ} \sim 1.3^{\circ}$	+	外部故障	不动作
		A 相(中度)	$175^{\circ} \sim 179^{\circ}$	—	$20^{\circ} \sim 81^{\circ}$	+	外部故障	不动作
		A 相(重度)	$177^{\circ} \sim 179^{\circ}$	—	$20^{\circ} \sim 85^{\circ}$	+	外部故障	不动作
		A 相(重度)	$177^{\circ} \sim 179^{\circ}$	—	$20^{\circ} \sim 85^{\circ}$	+	外部故障	不动作
		AB 两相(严重)	$174^{\circ} \sim 178^{\circ}$	—	$46^{\circ} \sim 52^{\circ}$	+	外部故障	不动作

从表 5 分析可知, 自耦变压器中压侧系统阻抗如此大的变化时, 虽然中性点电流的幅值有一定的变化, 但两侧方向元件所判别的故障方向没有受到

其大的影响, 始终没有导致保护判据错误。理论分析与仿真结果吻合, 该方案故障判据不受超高压自耦变压器中性点零序电流方向变化的影响。

表 5 中压侧系统阻抗变化对保护判据影响的仿真验证结果

Table 5 Simulation verification results of the protection criteria affected by variation of MV side power system impedance

中压侧系统阻抗参数			高压侧外部接地故障				故障判据结果	中性点零序电流幅值/kA	高压侧内部接地故障				故障判据结果
R/ Ω	L/H	C/ μ f	$\arg(i_{G0}/i_{H0})$		$\arg(i_{G0}/i_{M0})$				$\arg(i_{G0}/i_{H0})$		$\arg(i_{G0}/i_{M0})$		
			相位/ $^\circ$	方向	相位/ $^\circ$	方向			相位/ $^\circ$	方向	相位/ $^\circ$	方向	
0.5 \times 1.8527	0.5 \times 0.528	10 ⁶	-175	-	-4	+	外部	0.5290	5	+	-4	+	内部
1.8527	0.528	10 ⁶	-172	-	-5	+	外部	0.4190	6	+	-6	+	内部
3 \times 1.8527	3 \times 0.528	10 ⁶	-164	-	-6.4	+	外部	0.1600	5.4	+	-6	+	内部
5 \times 1.8527	5 \times 0.528	10 ⁶	-155	-	-6.3	+	外部	0.0987	6	+	-7	+	内部
10 \times 1.8527	10 \times 0.528	10 ⁶	-143	-	-5.6	+	外部	0.0498	7	+	-6	+	内部
15 \times 1.8527	15 \times 0.528	10 ⁶	-135	-	-4.7	+	外部	0.0354	7.5	+	-5	+	内部
20 \times 1.8527	20 \times 0.528	10 ⁶	-129	-	-3	+	外部	0.0245	9.3	+	-2.9	+	内部
25 \times 1.8527	25 \times 0.528	10 ⁶	-115	-	1.4	+	外部	0.0194	12	+	0.4	+	内部
30 \times 1.8527	30 \times 0.528	10 ⁶	-110	-	1	+	外部	0.0159	80	+	0	+	内部

5 结论

本文所提出的新型零序电流方向元件以零序电流相位比较原理构成的,其方向判据与保护上的零序电压和二次回路电压无关,能够有效地消除了保护处零序电压和二次回路电压对零序方向元件方向判据的不利影响,能够很好地解决了目前超高压系统保护处零序电压太小而引起的零序方向纵联保护拒动和误动的难题。与此同时超高压输电线路的方向比较纵联保护原理成功地引入了变压器保护中扩大了方向纵联保护的应用范围。理论分析、数字仿真和动模试验数据验证结果表明,该方案在超高压自耦变压器保护中具有以下优点。

(1) 对区内外接地故障具有明确的方向性和选择性;新型零序电流方向元件的相位变化范围较小,都在保护最灵敏的 0° 和 180° 附近,对接地故障灵敏度很高。

(2) 具有能够准确反应自耦变压器各种轻微匝间故障的能力,可靠性高。

(3) 即使在故障侧的 CT 严重饱和的情况下,也能够准确反映故障真实情况,方向判据和故障判据均抗 CT 饱和能力很强。

(4) 与线路方向比较式纵联保护相比结构简单,容易实现,速动性好。

(5) 方向及故障判据均不受自耦变压器中性点零序电流方向变化的影响。

综上所述,该保护方案在超高压大容量的自耦

变压器接地保护中具有一定的理论和工程实用价值,但在实际应用方面有待实践的检验。

参考文献

- [1] GAJIC Z, ROGER H. Review of unit protection schemes for auto-transformers[C] // Protective Relay Engineers, 64th Annual Conference for. IEEE, 2011: 257-277.
- [2] TANG Xiao-jiao, KOBAYASHI K, SONOBE Y, et al. Development of 765 kV transformer protection relay[C] // Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on, IEEE, 2011: 210-214.
- [3] GAJIC Z, HOIST S. Review of unit protection schemes for auto-transformers, developments in power system protection (DPSP 2010)[C] // Managing the Change, 10th IET International Conference, 2010: 1-5.
- [4] 古斌, 谭建成. 基于瞬时功率理论的新型功率方向元件[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 177-182.
GU Bin, TAN Jian-cheng. A study of the novel power direction relay based on the instantaneous power theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 177-182.
- [5] 梁纪峰, 刘文颖, 梁才, 等. 500 kV 自耦变压器中性点串接小电抗对接地短路电流限制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 96-100.
LIANG Ji-feng, LIU Wen-ying, LIANG Cai, et al. Analysis of limiting effect of 500 kV autotransformer neutral grounding by small reactance on ground short-circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 96-100.
- [6] 郭健, 林鹤云, 徐子宏, 等. 三相三柱变压器零序阻抗

- 的场路耦合计算与分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 242-249.
- GUO Jian, LIN He-yun, XU Zi-hong, et al. Calculation and analysis of zero-sequence impedance of three-phase and three limbs transformer based on field circuit coupled method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 242-249.
- [7] 冯秋芳, 刘千宽, 夏红光, 等. 交流电压回路对零序方向保护的影响[J]. 继电器, 2004, 32(19): 64-66.
- FENG Qiu-fang, LIU Qian-kuan, XIA Hong-guang, et al. Influence of AC voltage circuit on zero-sequence direction protection[J]. Relay, 2004, 32(19): 64-66.
- [8] 王焯, 闫奇, 戴志辉, 等. 零序电流保护运行风险评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 16-20.
- WANG Zhuo, YAN Qi, DAI Zhi-hui, et al. Operational risk evaluation model of zero sequence current protection[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 16-20.
- [9] 汪萍, 陈久林. 纵联零序方向保护误动原因分析及其对策[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(7): 122-125.
- WANG Ping, CHEN Jiu-lin. Analysis of longitudinal zero sequence direction protection operation and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(7): 122-125.
- [10] 蒋苏静, 毕天姝, 徐振宇, 等. 平行双回线路纵联零序方向误动原因分析及负序功率方向研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 21-26.
- JIANG Su-jing, BI Tian-shu, XU Zhen-yu, et al. Analysis of the reason of pilot zero sequence directional protection mal-function and study of negative sequence directional element on parallel double-circuit lines[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 21-26.
- [11] 李振兴, 尹项根, 张哲. 基于序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 242-249.
- LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe. Algorithm of wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 242-249.
- [12] 索南加乐, 杜斌, 许立强, 等. 基于变压器中性点零序电流的方向元件[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 72-77.
- SUONAN Jia-le, DU Bin, XU Li-qiang, et al. A novel direction element based on transformer neutral zero sequence current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 72-77.
- [13] 杨增力, 石东源, 段献忠. 基于方向比较原理的广域继电保护系统[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 77-81.
- YANG Zeng-li, SHI Dong-yuan, DUAN Xian-zhong. Wide-area protection system based on direction comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 77-81.
- [14] 徐振宇, 杜兆强, 孟岩, 等. 零、负序方向元件的特殊问题研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 21-25.
- XU Zhen-yu, DU Zhao-qiang, MENG Yan, et al. Special problems in zero/negative sequence directional element[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(5): 21-25.
- [15] 丁小兵, 赵曼勇, 徐振宇. 接地故障零序方向元件拒动保护改进方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 25-27.
- DING Xiao-bing, ZHAO Man-yong, XU Zhen-yu. Improvement on zero sequence current protection when directional element fails to operate during earth faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 25-27.
- [16] 李一泉, 张弛, 黄志元, 等. 基于正序电压替代的零序功率方向补充比相方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 63-66.
- LI Yi-quan, ZHANG Chi, HUANG Zhi-yuan, et al. A new supplement scheme of zero sequence directional pilot relay based on positive sequence voltage replacement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 63-66.
- [17] 王瑞, 潘贞存, 丛伟, 等. 基于纵联比较原理的变压器后备保护方案[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 63-67.
- WANG Rui, PAN Zhen-cun, CONG Wei, et al. A new scheme for transformer backup protection based on longitudinal comparison principle[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 63-67.
- [18] 潘贞存, 丛伟, 丁磊, 等. 基于纵联比较原理的降压变压器及其中低压母线保护方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 83-85.
- PAN Zhen-cun, CONG Wei, DING Lei, et al. New protection scheme for step-down transformer and corresponding middle and low voltage buses based on longitudinal comparison principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 83-85.

收稿日期: 2014-06-31; 修回日期: 2014-10-25

作者简介:

阿里木江·卡德尔(1968-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: alimu@xju.edu.cn

索南加乐(1960-2013), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统新型继电保护的研究;

阿米那古丽·艾尼(1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护。