

# 基于零序电流的超高压自耦变压器相位比较纵联保护的研究

阿里木江·卡德尔<sup>1</sup>, 索南加乐<sup>2</sup>, 伊力亚尔·艾尔肯<sup>1</sup>, 王海云<sup>1</sup>, 田易之<sup>1</sup>

(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:** 零序电流差动保护对接地故障灵敏度高, 动作电流与变压器调压分接头无关, 受励磁涌流影响小, 原理简单等优点, 在超高压自耦变压器保护上得到广泛应用。但零序电流差动保护由于反应自耦变压器三侧零序电流的相量和而动作, 受电流互感器饱和影响较大, 不易整定, 在区外故障切除时常导致保护的误动。据此提出“基于零序电流的超高压自耦变压器相位比较纵联保护方案”。该方案比较自耦变压器两侧保护处零序电流相位, 根据相位相同或相反作为故障判据来区分自耦变压器内部故障或外部故障。动模试验数据和数字仿真验证结果表明, 该方案具有对超高压自耦变压器接地故障灵敏度高, 选择性好, 能够正确反应自耦变压器各种轻微匝间故障, 保护判据均不受零序电流非周期分量和故障侧电流互感器 (CT) 饱和和深度的影响等优点。

**关键词:** 自耦变压器; 接地故障; 零序电流; 相位比较; 匝间故障; CT饱和; 非周期分量

## A novel phase comparison pilot protection scheme based on zero-sequence current of UHV auto-transformer

ALIMJAN Kader<sup>1</sup>, SUONAN Jia-le<sup>2</sup>, YILYAR Arken<sup>1</sup>, WANG Hai-yun<sup>1</sup>, TIAN Yi-zhi<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Zero-sequence current differential protection for grounding fault has the advantages of high sensitivity, action current's independence with transformer tap joint, small influence from inrush current, and principle simplicity. It is widely used in the area of UHV autotransformer protection. However, the zero-sequence current differential protection operates due to responding to the phase sum of zero sequence current in three sides of autotransformer, which is badly influenced by the saturation of current transformer and hard to set the threshold. In the external fault, it will lead to mal-operation. Based on this, a new auto-transformer pilot protection scheme based on the zero-sequence current phase comparison is proposed. 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 results of dynamic simulation experiment and digital simulation shows that the proposed method can detect turn-to-ground and turn-to-turn fault with high sensitivity and good selectivity. Besides, the protection criterion is not affected both by the non-periodic component of zero-sequence current and saturation level of fault-side current transformer (CT).

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

**Key words:** auto-transformer; turn-to-ground fault; zero-sequence current; phase comparison; turn-to-turn fault; saturation of current transformer; non-periodic component

中图分类号: TM411+3; TM772

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)16-0059-07

## 0 引言

超高压自耦变压器零序电流差动保护, 对接地故障灵敏度高, 动作电流与变压器调压分接头无关,

受励磁涌流影响小, 原理简单等优点, 在超高压自耦变压器保护上得到广泛应用。但其因反应自耦变压器三侧零序电流的相量和而动作, 保护受电流互感器饱和的影响较大, 不易整定, 在变压器区外故障开始时保护不会误动, 但在区外故障切除时反而常常误动。尤其当外部接地故障某侧电流互感器饱和时将产生较大的不平衡电流, 表现出内部故障特

**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)

征, 易导致零序电流差动保护误动。因此, 在不牺牲灵敏度的情况下, 提高外部故障的可靠性是变压器零序差动保护所面临的一大问题。为躲过此不平衡电流, 要求其动作值很大, 无疑这将大大降低零序差动保护对接地故障的灵敏度和可靠性, 尤其是对大型超高压自耦变压器将失去装设零序差动保护的意义<sup>[1-8]</sup>。而采用相位比较判别原理的保护比采用幅值比较判别原理的抗 CT 饱和性能要好, 运行经验及研究表明, 即使在故障侧 CT 严重饱和的情况下, 正确地恢复电量的相位还是比较容易的<sup>[9-14]</sup>。据此本文分析超高压自耦变压器在区内外接地故障以及匝间故障时的两侧零序电流的相位变化特征提出“基于零序电流的超高压自耦变压器相位比较式纵联保护方案”。该方案直接比较自耦变压器两侧保护处零序电流的相位, 根据相位相同或相反作为故障判据来区分自耦变压器内部故障或外部故障。经理论分析, 动模实验数据和数字仿真验证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、零序电流非周期分量以及外部接地故障抗 CT 饱和等各种工况的反应能力。

### 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。

#### 1.1 中压侧外部接地故障两侧零序电流的相位关系

当自耦变压器中压侧发生单相接地地区外故障时, 参数归算到中压侧的零序等效电路如图 1 所示。

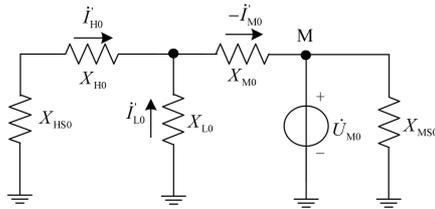


图 1 自耦变中压侧接地故障零序等效电路图

Fig. 1 Zero-sequence current equivalent circuit of auto-transformer with single phase-to-ground fault occurred in medium-voltage side

图 1 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、中和低压侧零序等效电抗;  $X_{HS0}$ 、 $X_{MS0}$  为两侧系统的零序等效电抗;  $\dot{i}_{H0}$  为高压侧零序电流,  $\dot{i}'_{H0}$  为归算到中压侧的高压侧零序电流, 其关系为  $\dot{i}'_{H0} = k\dot{i}_{H0}$ , 其中  $k$  为高、

中压侧之间的变比;  $\dot{i}'_{L0}$  为归算到中压侧的低压侧零序电流;  $\dot{i}_{M0}$  为中压侧零序电流。

由图 1 可得,  $\dot{i}_{H0}$  与  $\dot{i}_{M0}$  之间的相位关系可满足

$$\dot{i}'_{H0} = \frac{X_{L0}}{X_{HS0} + X_{H0} + X_{L0}} (-\dot{i}_{M0}) \quad (1)$$

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

由式(2)可知, 当中压侧发生外部接地故障时, 两侧零序电流的相位相反, 即

$$\arg(\dot{i}_{H0} / \dot{i}_{M0}) = 180^\circ \quad (3)$$

从式(3)可知, 其最大灵敏角为  $180^\circ$ , 相位差变化范围为  $90^\circ \sim 270^\circ$  时, 判为相位相反。

#### 1.2 高压侧外部接地故障两侧零序电流相位关系

当自耦变压器高压侧发生单相接地地区外故障时, 参数归算到中压侧的零序等效电路如图 2 所示。

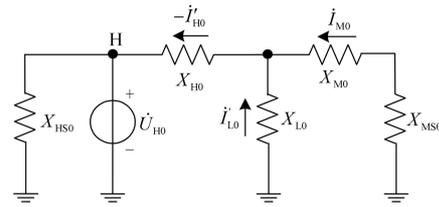


图 2 自耦变高压侧接地故障零序等效电路图

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

由图 2 可知,  $\dot{i}_{H0}$  与  $\dot{i}_{M0}$  之间的相位关系可满足

$$\dot{i}_{M0} = - \frac{X_{L0}}{X_{MS0} + X_{M0} + X_{L0}} k \cdot \dot{i}_{H0} \quad (4)$$

$$\frac{\dot{i}_{M0}}{\dot{i}_{H0}} = - \frac{k \cdot X_{L0}}{X_{HS0} + X_{H0} + X_{L0}} \quad (5)$$

由式(5)可知, 当高压侧发生外部接地故障时, 两侧零序电流的相位也相反, 即

$$\arg(\dot{i}_{H0} / \dot{i}_{M0}) = 180^\circ \quad (6)$$

从式(6)可知, 其最大灵敏角为  $180^\circ$ , 相位变化范围为  $90^\circ \sim 270^\circ$  时, 判为相位相反。

### 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。当自耦变压器内部匝地、匝间故障时, 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 3 所示。

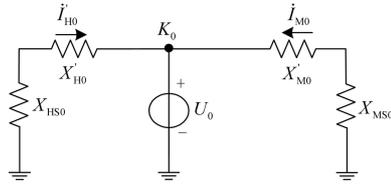


图3 自耦变压器内部故障零序电流等效电路

Fig. 3 Zero sequence current equivalent circuit of autotransformer 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(推导过程略), 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  $X'_{HO}$ 、 $X'_{M0}$  和  $X'_{L0}$  表示。由图3可得出

$$k\dot{I}_{HO}(X'_{HO} + X_{HS0}) = \dot{I}_{M0}(X'_{M0} + X_{MS0}) \quad (7)$$

从式(7)得出  $\dot{I}_{M0}$  与  $\dot{I}_{HO}$  之间可满足

$$\frac{\dot{I}_{HO}}{\dot{I}_{M0}} = \frac{X'_{M0} + X_{MS0}}{k(X'_{HO} + X_{HS0})} \quad (8)$$

由式(8)可知, 当发生内部接地故障时, 两侧零序电流的相位相同, 即

$$\arg(\dot{I}_{HO} / \dot{I}_{M0}) = 0^\circ \quad (9)$$

从式(9)可知, 其最大灵敏角为  $0^\circ$ , 相位变化范围为在  $-90^\circ \sim 90^\circ$  时, 判为相位相同。

### 3 保护判据

由以上分析可知, 根据输电线路的相位比较式纵联保护原理直接比较自耦变压器两侧零序电流的相位差能够方便地区分内部故障和外部故障。规定两侧零序电流的相位差在  $-90^\circ \sim 90^\circ$  范围之内变化时判为相位相同, 判据结果为内部故障保护就动作; 而在  $90^\circ \sim 270^\circ$  范围之内变化时判为相位相反, 判据结果为外部故障保护就不动作。据此提出如表1所示的保护判据。

表1 基于零序电流的相位比较纵联保护故障判据

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

故障位置	$\arg(\frac{\dot{I}_{HO}}{\dot{I}_{M0}})$	电流相位	判据结果	保护装置
区内	$-90^\circ \sim 90^\circ$	相同	内部故障	动作
区外	$90^\circ \sim 270^\circ$	相反	外部故障	不动作

由以上分析可知, 输电线路的相位比较式纵联保护原理成功地引入到变压器保护中。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, 不存在各侧之间延时配合的问题<sup>[15-16]</sup>。因此, 与线路相位比较纵联保护相比结构简单, 容易实现, 速动性好。

## 4 仿真实验

### 4.1 对接地故障反应能力的仿真实验

为了验证保护方案在 750 kV 超高压系统对区内外接地故障的反应能力, 利用电力系统仿真软件 ATP 所搭建的 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4所示。

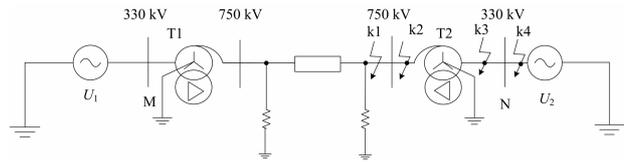


图4 自耦变压器在双侧电源超高压系统的仿真模型

Fig. 4 Auto-transformer simulation model used in UHV system with double side power supply

其中: 变压器变比为 765/345/66, 接线方式为 YN/a0/d11, 系统阻抗为

$$Z_{NS0} = 1.8527 + j16.5808; \quad Z_{NS1} = 0.8088 + j6.3077$$

$$Z_{MS0} = 0.4469 + j15.709; \quad Z_{MS1} = 0.7792 + j6.744$$

为了验证所提出保护方案在区内外单相和两相接地故障时的性能, 分别对系统 k1 点(高压侧外部)、k2 点(高压侧内部)、k3 点(中压侧内部)和 k4 点(中压侧外部)发生单相、两相接地故障情况进行仿真。

#### 4.1.1 接地故障部分仿真波形图

高压侧 A 相区外接地故障仿真波形如图5所示。

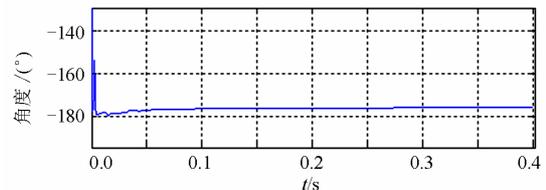


图5 高压侧区外 A 相接地故障仿真波形图

Fig. 5 Ground fault simulation result when external fault in the HV side occurs

自耦变压器高压侧区内 A 相接地故障仿真波形如图6所示。

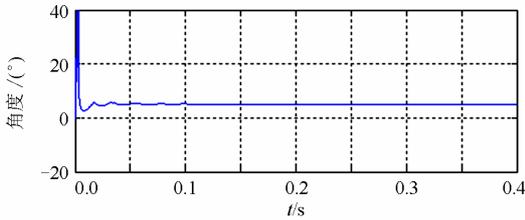


图 6 高压侧 A 相区内接地故障仿真波形图

Fig. 6 Grounding fault simulation result when internal fault in the HV side occurs

4.1.2 接地故障仿真波形分析结果

根据保护判据对各种接地故障仿真波形进行分析，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

故障点位置	故障类型	$\arg(\dot{I}^{H0} \setminus \dot{I}^{T0})$		判据结果	保护装置
		相位差	相位		
k1 点	A 相接地	-178°	相反	外部故障	不动作
	AB 两相接地	-177°	相反	外部故障	不动作
k2 点	A 相接地	5.2°	相同	内部故障	动作
	AB 两相接地	5°	相同	内部故障	动作
k3 点	A 相接地	1.7°	相同	内部故障	动作
	AB 两相接地	1.5°	相同	内部故障	动作
k4 点	A 相接地	176°	相反	外部故障	不动作
	AB 两相接地	176°	相反	外部故障	不动作

从仿真结果分析表可知，该方案能够准确区分内部故障和外部故障，对接地故障具有明确的选择性。两侧零序电流相位差变化范围较小，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及不太完善，本文利用中国电力科学院 750 kV 系统自耦变压器动模试验数据对本文保护判据的实用性进行验证，动模实验模拟系统图如图 7 所示。

动模变压器为三绕组自耦变压器，容量为 500/500/150 MVA，接线方式和电压变比同上。

4.2.1 匝间故障部分仿真波形图

对动模试验数据采用 Matlab 软件和全周傅氏算法进行处理，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 3%匝间故障仿真波形如图 8 所示。

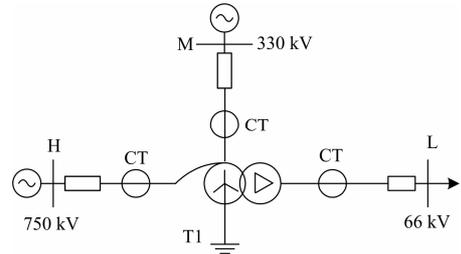


图 7 自耦变压器动模实验模拟系统图

Fig. 7 Dynamic simulation structure of the autotransformer

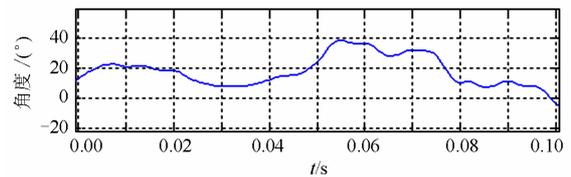


图 8 自耦变压器中载 3%发生匝间故障仿真波形

Fig. 8 Simulation waveform of turn-to-turn fault of autotransformer with overloading 3%

自耦变压器重载 1.5%匝间故障仿真波形如图 9 所示。

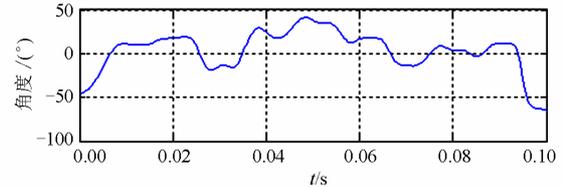


图 9 自耦变压器重载 1.5%发生匝间故障仿真波形

Fig. 9 Simulation waveform of turn-to-turn of autotransformer with overloading 1.5%

4.2.2 匝间故障仿真波形分析结果

自耦变压器发生各种轻微匝间故障情况下的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 capacity

匝间故障类型	$\arg(\dot{I}^{H0} \setminus \dot{I}^{T0})$		判据结果	保护装置
	相位差	相位		
轻载 3.0%	10°~78°	相同	内部故障	动作
轻载 1.5%	15°~60°	相同	内部故障	动作
中载 3.0%	-5°~42°	相同	内部故障	动作
中载 1.5%	-16°~38°	相同	内部故障	动作
重载 3.0%	-50°~40°	相同	内部故障	动作
重载 1.5%	-55°~45°	相同	内部故障	动作

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, 但仍然在内部故障保护判据相位变化范围 ( $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ) 之内。这说明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 饱和部分仿真波形图

利用 PSCAD 仿真软件建立考虑铁磁元件特性的 CT 仿真模型, 当自耦变压器发生外部接地故障时, 对故障侧 CT 在轻度、中度、重度以及最严重等不同程度饱和情况做了仿真。高压侧单相接地故障 CT 中度饱和时、A 相原始电流畸变波形如图 10 所示。

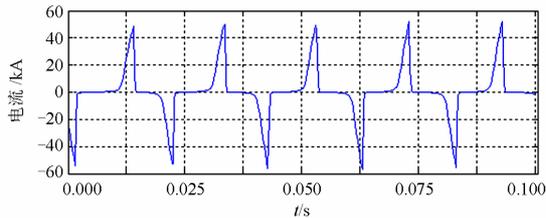


图 10 高压侧单相接地故障 CT 中度饱和 A 相原始电流波形  
Fig. 10 Phase A original current wave when medium saturation happens when grounding fault occurs in HV side

自耦变压器高压侧单相接地故障 CT 中度饱和和两侧零序电流相位比较仿真波形如图 11 所示。

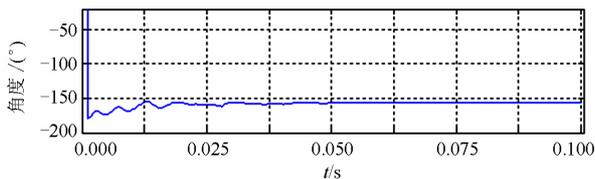


图 11 高压侧接地故障 CT 中度饱和和零序电流相位比较波形

Fig. 11 Zero sequence current phase comparison wave when medium saturation happens when grounding fault occurs in HV side

自耦变压器中压侧 A 相接地故障 CT 中度饱和和两侧零序电流相位比较波形如图 12 所示。

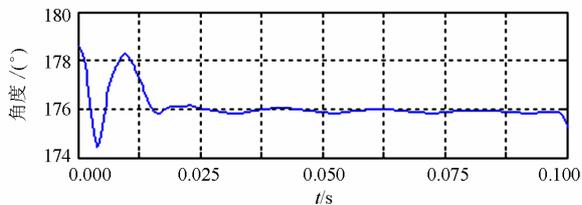


图 12 中压侧接地故障 CT 中度饱和和零序电流相位比较波形

Fig. 12 Zero sequence current phase comparison waveform when medium saturation happens when grounding fault occurs in MV side

#### 4.3.2 CT 饱和仿真波形分析结果

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

表 4 对抗 CT 饱和和反应能力的仿真结果

Table 4 Simulation results of against the CT saturation capacity

故障位置	CT 饱和侧	故障类型 (CT 饱和程度)	$\arg(\dot{I}_{H0} / \dot{I}_{M0})$		判据结果	保护装置
			相位差	相位		
高压侧外部	高电压侧 CT 饱和和	A 相接地 (轻度)	$-163.5^{\circ}$	相反	外部故障	不动作
		A 相接地 (中度)	$-156^{\circ}\sim -158^{\circ}$	相反	外部故障	不动作
		A 相接地 (重度)	$-163.2^{\circ}$	相反	外部故障	不动作
		B 两相接地 (严重)	$-165^{\circ}$	相反	外部故障	不动作
中压侧外部	中压侧 CT 饱和和	A 相接地 (轻度)	$102^{\circ}\sim 160^{\circ}$	相反	外部故障	不动作
		A 相接地 (中度)	$174^{\circ}\sim 178^{\circ}$	相反	外部故障	不动作
		A 相接地 (重度)	$93^{\circ}\sim 160^{\circ}$	相反	外部故障	不动作
		A 相接地 (严重)	$92^{\circ}\sim 160^{\circ}$	相反	外部故障	不动作
		B 两相接地 (严重)	$-175^{\circ}\sim -178^{\circ}$	相反	外部故障	不动作

从以上分析可知, 即使自耦变压器故障侧的 CT 严重饱和和相电流波形如此严重畸变的情况下, 该方案也能够准确反映外部故障真实情况, 不会出现保护误动问题。因此该保护方案抗 CT 饱和和能力很强。

#### 4.4 对抗非周期分量反应能力的仿真验证

为了验证超高压自耦变压器接地故障零序电流非周期分量对保护判据的影响, 图 5 所示的 750 kV 系统设 4 个故障点, 分别观察分析 150 ms 之内的 2 种接地故障非周期分量仿真波形。

##### 4.4.1 零序电流非周期分量部分仿真波形图

自耦变压器高压侧单相 (A 相) 外部接地故障时高、中压两侧零序电流非周期分量仿真波形如图 13 所示。

自耦变压器高压侧 A 相接地故障两侧零序电流非周期分量相位比较波形如图 14 所示。

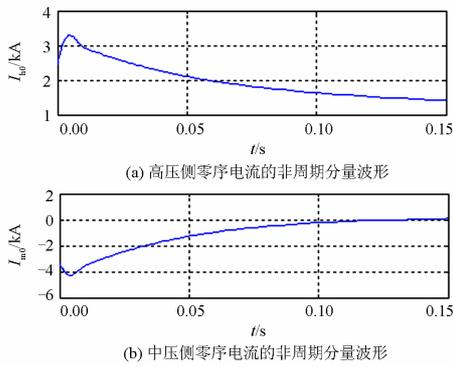


图 13 外部接地故障两侧零序电流非周期分量仿真波形  
Fig. 13 Simulation waveform of bilateral non-periodic components of zero-sequence current in terms of external ground fault

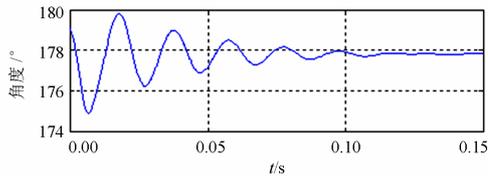


图 14 外部接地故障两侧零序电流非周期分量相位比较波形

Fig. 14 Phase comparison waveform of bilateral non-periodic components of zero-sequence current in terms of external ground fault

#### 4.4.2 零序电流非周期分量仿真波形分析结果

根据保护判据对接地故障零序电流非周期分量相位比较仿真波形进行分析, 其结果如表 5 所示。

表 5 对抗零序电流非周期分量反应能力仿真验证结果

Table 5 Simulation results of the performance against non-periodic component of zero-sequence current

故障位置	故障类型	$\arctan(\frac{I_{H0}}{I_{M0}})$		判据结果	保护装置
		相位差	相位		
高压侧外部	A 相接地	175°~179.3°	相反	外部故障	不动作
	AB 两相接地	175°~180°	相反	外部故障	不动作
高压侧内部	A 相接地	10°~23°	相同	内部故障	动作
	AB 两相接地	8.5°~22.8°	相同	内部故障	动作
中压侧内部	A 相接地	6°~16.3°	相同	内部故障	动作
	AB 两相接地	6.5°~18.2°	相同	内部故障	动作
中压侧外部	A 相接地	-155°~ -172°	相反	外部故障	不动作
	AB 两相接地	-156°~ -173°	相反	外部故障	不动作

从以上分析可知, 该保护方案即使在零序电流非周期分量的情况下也能够准确区分内部故障和外

部故障, 因此保护判据不受零序电流非周期分量的影响。

## 5 结语

本文将超高压输电线路的相位比较纵联保护原理成功地引入到超高压变压器保护中, 并解决了超高压自耦变压器幅值比较保护原理(如: 零序电流差动保护), 外部接地故障时因 CT 易饱和而导致保护误动的难题。同时该保护方案在超高压自耦变压器保护中具有如下优势:

- (1) 对超高压自耦变压器区内、区外接地故障选择性很好, 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;
- (3) 外部接地故障时, 对抗故障侧 CT 饱和和能力很强;
- (4) 保护判据不受接地故障零序电流非周期分量的影响;
- (5) 与线路相位比较纵联保护相比结构简单, 容易实现, 速动性好。

综上所述, 该保护方案在超高压自耦变压器保护中具有一定的理论和工程实用价值, 但实际应用方面有待实践的检验。

## 参考文献

- [1] 郑小敏, 刘会金, 刘霞忠, 等. CT 饱和引起变压器差动保护误动的分析和对策[J]. 继电器, 2005, 33(8): 61-63.  
ZHENG Xiao-min, LIU Hui-jin, LIU Xia-zhong, et al. Analysis and countermeasure of transformer differential protection malfunction due to CT saturation[J]. Relay, 2005, 33(8): 61-63.
- [2] FERNANDEZ C. An impedance-based CT saturation detection algorithm for bus-bar differential protection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(10): 468-472.
- [3] 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, et al. Algorithm of wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 242-249.
- [4] 杜姣, 陆于平, 朱国防. 幅值相位双判据变压器差动保护算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 79-85.  
DU Jiao, LU Yu-ping, ZHU Guo-fang. Differential-protection algorithm with double criterions of amplitude and phase angle for transformer[J]. Proceedings of the

- CSEE, 2010, 30(16): 79-85.
- [5] 张项安, 单强, 张弦. 变压器零序差动保护的几个问题[J]. 继电器, 2005, 33(15): 13-17.  
ZHANG Xiang-an, SHAN Qiang, ZHANG Xuan. Several problems on zero-sequence differential protection for transformer[J]. Relay, 2005, 33(15): 13-17.
- [6] 朱声石. 变压器零序差动保护的讨论[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(10): 5-7.  
ZHU Sheng-shi. Discussion on transformer zero-sequence current differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(10): 5-7.
- [7] 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.
- [8] 罗小莉, 赵安国, 郭晓冬. 新型变压器零序差动保护方案设计[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(7): 119-125.  
LUO Xiao-li, ZHAO An-guo, GUO Xiao-dong. Scheme design of transformer zero-sequence differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(7): 119-125.
- [9] 邓旭阳, 索南加乐, 李广, 等. 基于参数识别的电流互感器饱和识别原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 38-43, 87.  
DENG Xu-yang, SUONAN Jia-le, LI Guang, et al. A novel current transformer saturation detecting method based on parameter identification[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 38-43, 87.
- [10] 马静, 王增平, 吴劫. 利用基波幅值变化特征快速识别励磁涌流和故障电流[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 166-171.  
MA Jing, WANG Zeng-ping, WU Jie. A novel method to rapidly identify inrush current and internal fault current based on variation characteristic of fundamental current amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 166-171.
- [11] 公茂法, 夏文华, 张晓明, 等. 基于 HHT 的抗 CT 饱和和变压器故障识别新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 64-70.  
GONG Mao-fa, XIA Wen-hua, ZHANG Xiao-ming, et al. New method to identify transformer fault with anti-CT saturation based on HHT[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 64-70.
- [12] 徐松晓, 贺家李, 李永丽, 等. 特高压输电线分相电流相位差动保护的研究[J]. 继电器, 2007, 35(3): 1-6.  
XU Song-xiao, HE Jia-li, LI Yong-li, et al. Research on segregated current phase differential protection for UHV transmission lines[J]. Relay, 2007, 35(3): 1-6.
- [13] 杨红, 尹项根, 陈卫, 等. 基于分相电流突变量相位比较的广域继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 64-70.  
YANG Hong, YIN Xiang-gen, CHEN Wei, et al. Wide area protection based on phase comparison of segregated current fault component[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 64-70.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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: 2013-12-02; 修回日期: 2014-04-25

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;

伊力亚尔·艾尔肯(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护。