

DOI: 10.7667/PSPC160819

# 基于零序差动阻抗的输电线路保护新原理研究

吴继维<sup>1,2</sup>, 童晓阳<sup>1</sup>, 廖小君<sup>3</sup>, 郑永康<sup>4</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 湖州供电公司, 浙江 湖州 313000; 3. 国网四川省电力公司技能培训中心, 四川 成都 610072; 4. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 针对现有的输电线路光纤纵联差动保护原理易受分布电容电流影响较大, 且要求线路两端信息的严格同步的问题, 研究了一种基于双侧信息的零序差动阻抗保护原理。给出了零序差动阻抗的定义为线路两端零序电压与零序电流比值之和。由理论分析可知区内故障时零序差动阻抗为两侧系统零序阻抗和的负值, 阻抗位于第三象限, 区外故障时零序差动阻抗为线路的阻抗, 阻抗位于第一象限。根据零序差动阻抗的阻抗角构成保护判据。在 PSCAD 中搭建模型进行仿真实验, 实验结果表明, 零序差动阻抗保护原理不受对地电容电流和过渡电阻的影响, 适用于带并联电抗器补偿的线路和弱馈电系统, 并不要求两侧信号严格同步。

**关键词:** 输电线路保护; 零序差动阻抗; 阻抗角; 对地电容电流

## Transmission line protection principle based on zero sequence differential impedance

WU Jiwei<sup>1,2</sup>, TONG Xiaoyang<sup>1</sup>, LIAO Xiaojun<sup>3</sup>, ZHENG Yongkang<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Huzhou Electric Power Design Institute, Huzhou 313000, China; 3. State Grid Electric Power Company Skills Training Center, Chengdu 610072, China; 4. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** The optical longitudinal differential protection theory for transmission lines at present is affected easily by distributed capacitance current and requires rigid synchronization of double-terminal information of lines. The zero-sequence differential impedance protection principle based on bilateral information is proposed. The definition of zero-sequence differential impedance and the criterion of zero-sequence impedance differential protection principle are given. The zero-sequence differential impedance is equal to the opposite value of the sum of both sides system zero sequence impedance, which is in the third quadrant, when the fault happens within the protection zero. The zero-sequence differential impedance is equal to the transmission line zero sequence impedance, which is in the first quadrant, when the fault happens out of the protection zero. Some models are built in PSCAD to verify the correctness of the zero sequence differential impedance protection principle. Experimental results show that the criterion is not influenced by the fault resistance, and can be applied in the line with or without shunt reactor and weak feeding system, and the strict synchronization of the sampled data is not needed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377137).

**Key words:** transmission line protection; zero-sequence differential impedance protection; impedance angle; capacitive current

## 0 引言

光纤电流差动保护已广泛应用于电力系统, 对于电压等级高的长线路, 线路中流过较大的电容电流, 为了消除电容电流对光纤差动保护的不利影响, 已有学者做了大量的研究<sup>[1-5]</sup>。传统的光纤电流差动保护受两端数据的同步性影响较大<sup>[6-8]</sup>, 现有数据同

步技术是基于收发通道延时一致的假设条件, 一旦更换通信路由, 会由数据不同步影响保护的可靠性<sup>[9]</sup>。

文献[1]提出了一种电容电流的精确补偿方法, 但它属于传统的相量补偿方法, 不能补偿暂态电容电流, 难以满足超高压长线路电流差动保护的要求。文献[2-3]提出了暂态电容电流补偿方法, 但目前电容电流补偿方法带有一定的盲目性<sup>[10]</sup>。文献[11]提出了基于过渡电阻有功功率的单相高阻接地保护方案, 该判据随着过渡电阻值的增加, 效果越明显, 是一种性能优良的抗过渡电阻的后备保护原理。文

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377137); 四川省科技厅重点研发项目(2017GZ0054)

献[12-14]提出综合阻抗概念包括纵联综合阻抗、序分量综合阻抗等用于线路保护,用线路两端各种电压相量和与线路两端各种电流相量和求比值。区内故障和区外故障时定义的综合阻抗分别具有不同的特征,根据这些特征实现故障的判别。该综合阻抗保护原理不受电容电流的影响,但需要两端数据严格同步。文献[15]提出了基于故障分量的分相阻抗差动保护原理,无需进行采样数据同步处理,耐受电容电流和过渡电阻的影响。但故障分量仅在短路初期有效,不能完全依赖它<sup>[11]</sup>。

本文研究了一种基于两端信息的零序差动阻抗保护算法,适用于带并联电抗器补偿的线路和弱馈电系统,在理论上不受过渡电阻和分布电容的影响,同时不需要两端数据严格同步。与纵联零序方向保护相比,能够防止线路末端发生经高阻接地故障或母线侧零序综合阻抗很小时发生拒动的问题。由于本文提出的保护算法需要计算基波分量,因此动作速度要慢于光纤差动算法,但是本文算法的优势在于耐受过渡电阻能力较强,且受分布电容电流影响小,对两端数据的严格同步性要求不高,可作为光纤电流差动保护的补充。

### 1 零序差动阻抗保护算法的原理

假设双电源系统区内故障的系统模型如图 1(a)所示。M、N 为两侧母线,  $Z_{M0}$ 、 $Z_{N0}$  分别为 M 侧和 N 侧系统零序阻抗。 $Z_{C0}$  为线路对地零序容抗。 $Z_{L0}$  为线路的零序阻抗,  $i_{M0}$ 、 $i_{N0}$  为两侧保护安装处测得的零序电流,  $i_{f0}$  为故障点注入系统的零序电流。 $xZ_{L0}$  为故障点与母线 M 之间线路的零序阻抗。系统的零序网络如图 1(b)所示。

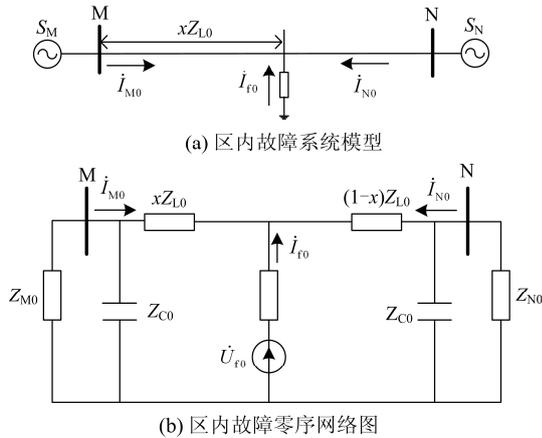


图 1 区内故障时的系统模型和零序网络图

Fig. 1 System model and zero sequence network of the fault within protection area

当发生 N 侧保护区外单相接地故障时的系统模型图和零序网络图如图 2 所示。

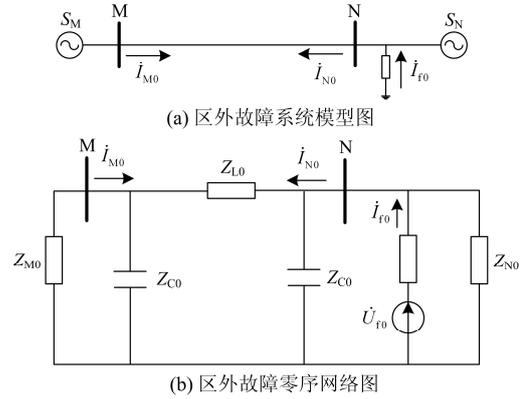


图 2 区外故障系统模型和零序网络图

Fig. 2 System model and zero sequence network of the fault without protection area

本文定义零序差动阻抗如式(1)。

$$Z_{cd0} = \frac{\dot{U}_{M0}}{\dot{I}_{M0}} + \frac{\dot{U}_{N0}}{\dot{I}_{N0}} \quad (1)$$

式中:  $Z_{cd0}$  为零序差动阻抗;  $\dot{U}_{M0}$  和  $\dot{U}_{N0}$  分别为两侧的零序电压;  $\dot{I}_{M0}$  和  $\dot{I}_{N0}$  分别为两侧的零序电流。

#### 1) 区内故障

由区内故障时系统的零序网络图可知:

$$\frac{\dot{U}_{M0}}{\dot{I}_{M0}} = -Z_{M0} \quad (2)$$

$$\frac{\dot{U}_{N0}}{\dot{I}_{N0}} = -Z_{N0} \quad (3)$$

零序差动阻抗为

$$Z_{cd0} = -(Z_{M0} + Z_{N0}) \quad (4)$$

在区内故障时,零序差动阻抗为两侧系统零序阻抗和的负值。

#### 2) 区外故障

以发生在 N 侧区外故障为例,由区外故障的零序网络图可知

$$\frac{\dot{U}_{M0}}{\dot{I}_{M0}} = -Z_{M0} \quad (5)$$

由于线路电纳很小<sup>[15]</sup>,忽略其影响,可得

$$\frac{\dot{U}_{N0}}{\dot{I}_{N0}} = Z_{M0} + Z_{L0} \quad (6)$$

区外故障的零序差动阻抗为

$$Z_{cd0} = Z_{L0} \quad (7)$$

由式(7)可得,区外故障时,零序差动阻抗为线路的零序阻抗。

由分析可得, 当发生区内故障时, 零序差动阻抗为负的两侧零序阻抗之和, 当发生区外故障时, 零序差动阻抗约为线路的零序阻抗。

系统和线路的零序阻抗均以电抗为主, 系统的零序阻抗和线路的零序阻抗角接近, 且均在  $80^\circ$  左右。构造单相接地故障的保护判据如式(8)。

$$\begin{cases} -160^\circ < \arg Z_{cd0} < 0^\circ \\ I_{M0}, I_{N0} > I_{0set} \\ \max(U_{M0}, U_{N0}) > U_{0set} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\arg Z_{cd0}$  表示求取  $Z_{cd0}$  的阻抗角;  $I_{0set}$  为零序电流定值。

当线路末端发生高阻接地故障, 或母线侧系统的零序阻抗很小时, 一侧的零序电压可能达不到零序方向动作的门槛, 造成纵联零序方向保护的拒动。本文将判据修改为  $\max(U_{M0}, U_{N0}) > U_{0set}$ , 区别于单侧的零序功率方向元件只能判断出故障方向, 本文的零序差动阻抗保护原理能够判断故障是位于区内还是区外, 该判据不会造成保护的误动。

## 2 零序差动阻抗保护算法的有效性分析

1) 针对带并联电抗器补偿的线路的算法性能分析

由于现代超高压及特高压线路系统通常都配备了并联电抗器, 当用于带并联电抗器补偿线路时, 当发生区内单相接地故障, 系统的零序网络图如图 3(a)所示。区外单相接地故障时, 仍以 N 侧区外故障为例, 系统的零序网络如图 3(b)所示。

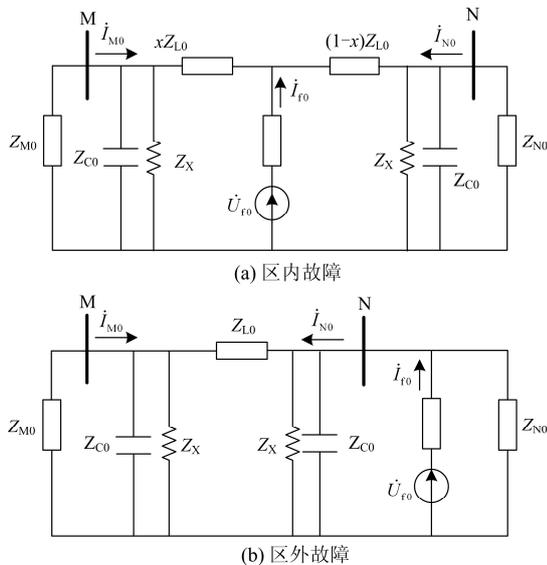


图 3 带并联电抗补偿的线路故障时的零序网络图

Fig. 3 Zero sequence network diagram of shunt reactance compensation circuit under faults

输电线路一般采用欠补偿, 即  $Z_{C0}$  与  $Z_X$  并联后仍呈容性, 可将二者等效为一个模值更大的容抗进行分析。与不带并联电抗器补偿的线路比较对地的分流作用更小, 忽略其分流作用。因此, 本文提出的零序差动阻抗保护适用于带并联电抗器补偿的线路, 受并联补偿电抗器的影响不大。

2) 耐受过渡电阻能力的分析

当发生区内故障时零序差动阻抗反映的是两侧系统的零序阻抗, 区外故障时零序差动阻抗反映的是线路的零序阻抗值, 无论是区内故障还是区内故障零序差动阻抗的值均与过渡电阻无关。本文提出的零序差动阻抗保护原理具有强过渡电阻耐受能力。

3) 应用于弱馈电系统的有效性

对于弱馈电系统, 弱馈电系统的系统阻抗比强电源侧要大得多。由于发生区内故障零序差动阻抗为两侧系统的零序阻抗的负值, 区外故障时为线路的零序阻抗。弱馈侧零序差动阻抗与强电源系统的零序阻抗均以电抗为主, 阻抗角差别不大。因此可知对于单电源、弱馈电系统, 本文提出的零序差动阻抗保护原理仍具有较好的适用性。

4) 两侧信号不同步时的有效性

本文的零序差动阻抗保护由两侧的零序电压、电流信号分别计算得到系统零序阻抗或线路零序阻抗后求和得到, 因为系统或线路的零序阻抗短时间内近似不变, 本保护在理论上不需要两侧数据的严格同步, 只需要每侧的电压与电流信息分别各自同步。

5) 系统振荡情况下的有效性

系统振荡对利用线路单侧信号进行判断的保护原理有较大的影响, 实际保护装置在检测到系统发生振荡而无故障时会将这些保护原理闭锁。由于系统振荡而无故障发生时系统无零序电流, 因此本文的零序差动阻抗保护原理不受系统振荡的影响。

## 3 算例分析与验证

在 PSCAD 中建立如图 4 所示的仿真模型。系统电压等级为 500 kV, 线路采用分布式参数模型。为检验本文保护原理在不同类型系统的适用性, 分别建立 3 种模型。在以下 3 种模型中, 线路参数相同, 只存在长度上的差异。线路参数为: 正序参数为  $r_1=0.0195 \Omega/\text{km}$ ,  $l_1=0.819 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $c_1=0.0135 \mu\text{F}/\text{km}$ ; 零序参数为  $r_0=0.182 \Omega/\text{km}$ ,  $l_0=2.74 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $c_1=0.0092 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

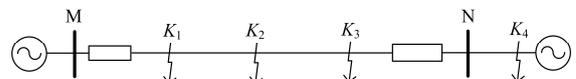


图 4 仿真模型图

Fig. 4 Simulation model

模型 1 是长线模型, 参数为: 线路长度为 400 km,  $Z_{M1}=4.357+j49.809 \Omega$ ,  $Z_{M0}=1.1+j16.61 \Omega$ ,  $Z_{N1}=2.1788+j24.904 \Omega$ ,  $Z_{N0}=0.436+j8.021 \Omega$ 。系统两侧零序阻抗和的负值为  $-1.536-j24.631 \Omega$ , 阻抗角为  $-93.56^\circ$ , 线路零序阻抗为  $72.8+j344.14$ , 阻抗角为  $78.05^\circ$ 。

模型 2 是短线模型, 参数为: 线路长度为 40 km,  $Z_{M1}=4.357+j49.809 \Omega$ ,  $Z_{M0}=1.1+j16.61 \Omega$ ,  $Z_{N1}=7.262+j83.01 \Omega$ ,  $Z_{N0}=1.21+j27.71 \Omega$ 。系统两侧零序阻抗和的负值为  $-2.31-j44.32 \Omega$ , 阻抗角为  $-92.98^\circ$ ; 线路零序阻抗为  $7.28+j34.41$ , 阻抗角为  $78.05^\circ$ 。

模型 3 是弱馈电模型, 参数为: 线路长度为 400 km,  $Z_{M1}=4.357+j49.809 \Omega$ ,  $Z_{M0}=1.1+j16.61 \Omega$ ,  $Z_{N1}=800+j900 \Omega$ ,  $Z_{N0}=50+j200 \Omega$ , N 侧为弱馈电侧。系统两侧零序阻抗和的负值为  $-51.1-j216.61 \Omega$ , 阻抗角为  $-103.27^\circ$ ; 线路零序阻抗为  $72.8+j344.14$ , 阻抗角为  $78.05^\circ$ 。

分别假设故障发生在区内的线路出口处  $K_1$ 、线路中间  $K_2$ 、线路末端  $K_3$  处和区外的线路的 N 侧母线外侧  $K_4$  处。分别假设在 3 个模型中的不同点发生了金属性 A 相接地故障, 计算出此时的零序差动阻抗  $Z_{cd0}$ 、零序差动阻抗的阻抗角  $\theta$ 。根据保护判据式 (8) 判断给出动作结果, 仿真结果如表 1 所示。

表 1 金属性故障仿真结果

Table 1 Simulation result under fault without resistance

模型	故障点	零序差动阻抗 $Z_{cd0}/\Omega$	零序差动阻 抗角 $\theta/(\circ)$	动作 结果
模型 1	$K_1$	$-1.63-j24.57$	$-93.55$	√
	$K_2$	$-1.62-j24.58$	$-93.65$	√
	$K_3$	$-1.57-j24.66$	$-93.70$	√
	$K_4$	$87.31+j386.92$	$77.23$	×
模型 2	$K_1$	$-2.43-j44.21$	$-93.31$	√
	$K_2$	$-2.31-j44.30$	$-92.98$	√
	$K_3$	$-2.31-j44.31$	$-92.98$	√
	$K_4$	$7.34+j43.16$	$80.35$	×
模型 3	$K_1$	$-50.04-j229.04$	$-102.32$	√
	$K_2$	$-50.00-j228.95$	$-102.32$	√
	$K_3$	$-50.01-j228.97$	$-102.32$	√
	$K_4$	$88.05+j391.01$	$77.30$	×

注: 表 1 中, “√” 表示零序差动阻抗保护动作, “×” 表示零序差动阻抗保护不动作(下同)。

从表 1 可看出, 区内故障时差动阻抗的计算值与故障点位置无关, 只与保护安装处两侧系统零序阻抗相关。区外故障时差动阻抗的计算值与线路的零序阻抗有关。零序差动阻抗的计算结果与理论分析值相近。模型 1 区内故障时  $\theta$  角值接近理论值

$-93.56^\circ$ ; 模型 2 区内故障时  $\theta$  角值接近理论值  $-92.98^\circ$ ; 模型 3 区内故障时  $\theta$  角值接近理论值  $-103.27^\circ$ 。

线路的分布电容电流对本文所提判据的影响主要在区外故障计算时。仿真模型中线路采用分布式参数模型, 考虑了分布电容电流的影响。其仿真结果为, 模型 1、2、3 区外故障计算值分别为  $77.23^\circ$ 、 $80.35^\circ$ 、 $77.30^\circ$ , 当不考虑分布电容电流影响时的值为  $78.05^\circ$ 、 $78.05^\circ$ 、 $78.05^\circ$ , 三组值非常接近。可知, 分布电容电流对本文算法的影响较小。

为了检验零序差动阻抗保护原理抗过渡电阻能力, 在模型 1 长线路模型中分别假设不同位置经不同过渡电阻发生单相接地故障, 仿真结果如表 2 所示。

表 2 模型 1 长线路时单相经不同过渡电阻的故障仿真结果  
Table 2 Simulation result under signal phase fault with different resistance of long line model

故障点	过渡电 阻/ $\Omega$	零序差动阻抗 $Z_{cd0}/\Omega$	零序差动阻 抗角 $\theta/(\circ)$	动作 结果
$K_1$	50	$-1.56-j24.82$	$-93.59$	√
	100	$-1.53-j25.01$	$-93.51$	√
	300	$-1.54-j25.03$	$-93.52$	√
$K_2$	50	$-1.61-j24.72$	$-93.73$	√
	100	$-1.60-j24.87$	$-93.67$	√
	300	$-1.56-j24.85$	$-93.59$	√
$K_3$	50	$-1.63-j24.95$	$-93.72$	√
	100	$-1.53-j24.98$	$-93.51$	√
	300	$-1.57-j25.01$	$-93.60$	√
$K_4$	100	$87.46+j386.92$	$77.26$	×

从表 2 可看出, 差动阻抗的计算值与故障点的位置和过渡电阻大小无关, 只与保护安装处两侧的系统阻抗和线路的阻抗有关。模型 1 区内故障时  $\theta$  角的理论值为  $-93.56^\circ$ , 区外故障时  $\theta$  角的理论值接近  $78.05^\circ$ 。零序差动阻抗的计算结果与理论分析值相近, 区内故障时的  $\theta$  角位于保护动作范围的中间, 可靠动作; 区外故障时  $\theta$  角距保护动作边界较远, 不会误动。结果表明本文构造的判据可靠性高。 $\theta$  角的计算结果受过渡电阻的影响非常小, 表明本文的零序差动阻抗保护原理具有较强的抗过渡电阻能力。

为了验证零序差动阻抗保护原理在弱馈电系统中的适用性, 假设在模型 2 中不同位置经不同过渡电阻发生单相接地故障, 仿真结果如表 3 所示。

从表 3 看出, 区内故障时零序差动阻抗  $Z_{cd0}$  的计算值等于两侧系统零序阻抗和的负值, 区外故障时零序差动阻抗  $Z_{cd0}$  的计算值近似为线路的零序阻抗。模型 3 区内故障时  $\theta$  角的理论值为  $-103.27^\circ$ , 区外

故障时 $\theta$ 角的理论值为 $78.05^\circ$ 。计算结果与理论分析值相近。区内故障时 $\theta$ 角位于保护动作范围的中间位置,零序差动阻抗保护能可靠动作;区外故障时 $\theta$ 角距保护动作边界较远,不会误动。实验结果表明,本文的保护原理对于弱馈电系统同样具有适用性。

表 3 模型 3 弱馈电系统单相经过渡电阻故障仿真结果

Table 3 Simulation result under signal phase fault with different resistance of weak feed model

故障点	过渡电阻/ $\Omega$	零序差动阻抗 $Z_{cd0}/\Omega$	零序差动阻抗角 $\theta/(^\circ)$	动作结果
$K_1$	50	-50.02-j229.19	-102.31	√
	100	-50.05-j229.17	-103.32	√
	300	-50.08-j229.17	-102.33	√
$K_2$	50	-50.14-j228.95	-102.35	√
	100	-50.05-j229.06	-102.32	√
	300	-50.04-j229.01	-102.33	√
$K_3$	50	-50.04-j229.06	-102.32	√
	100	-50.11-j228.94	-102.34	√
	300	-50.04-j228.99	-102.33	√
$K_4$	100	88.06+j391.03	77.30	×

为了验证不同运行工况下零序差动阻抗保护原理的适用性,假设在模型 1 中的  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$  处发生单相经  $300\Omega$  过渡电阻的接地故障, N 侧电压初始相角设为零, M 侧电压初始相角分别为  $-30^\circ$ 、 $-10^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $30^\circ$ 。仿真结果如表 4 所示。

从表 4 可看出,区内故障时零序差动阻抗  $Z_{cd0}$  的计算值等于两侧系统零序阻抗和的负值,区外故障时零序差动阻抗  $Z_{cd0}$  的计算值近似为线路的零序阻抗。模型 1 区内故障时  $\theta$  角的理论值为  $-93.56^\circ$ ,区外故障时  $\theta$  角的理论值为  $78.05^\circ$ 。计算结果与理论分析值相近。区内故障时  $\theta$  位于动作范围的中间位置,零序差动阻抗保护能可靠的动作;区外故障时  $\theta$  角距保护的边界远,零序差动阻抗保护不会发生误动。实验结果表明,本文的零序差动阻抗保护原理在两侧具有不同电压初始相角差的运行工况下均有效。

为了验证在两侧数据不同步情况下,零序差动阻抗保护原理的有效性,假设在模型 1 中的  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$  处发生经  $300\Omega$  过渡电阻单相接地故障, N 侧电压初始相角为  $0^\circ$ , M 侧电压初始相角为  $10^\circ$ 。以 M 侧时钟为参考时间,设 N 侧时钟与 M 侧时钟走时误差为  $T$ 。取  $T$  的取值为  $-10\sim 10\text{ms}$ ,即两侧不同步相角差  $\delta_d$  对应为  $-180^\circ\sim 180^\circ$ ,仿真结果如表 5 所示。

表 4 模型 1 长线路模型不同运行工况的单相故障仿真结果

Table 4 Simulation result under signal phase fault with different running condition of long line model

故障点	M 侧电压初始相角/ $^\circ$	零序差动阻抗 $Z_{cd0}/\Omega$	零序差动阻抗角 $\theta/(^\circ)$	动作结果
$K_1$	-30	-1.53-j24.63	-93.57	√
	-10	-1.54-j24.63	-93.57	√
	0	-1.54-j24.62	-93.58	√
	10	-1.53-j24.62	-93.55	√
	30	-1.53-j24.63	-93.57	√
$K_2$	-30	-1.49-j24.73	-93.45	√
	-10	-1.52-j24.70	-93.51	√
	0	-1.57-j24.68	-93.64	√
	10	-1.55-j24.64	-93.45	√
	30	-1.54-j24.62	-93.59	√
$K_3$	-30	-1.53-j24.90	-93.52	√
	-10	-1.54-j24.78	-93.56	√
	0	-1.54-j24.72	-93.57	√
	10	-1.54-j24.69	-93.58	√
	30	-1.52-j24.56	-93.55	√
$K_4$	-30	86.14+j377.68	77.15	×
	-10	85.10+j377.81	77.30	×
	0	84.57+j377.92	77.38	×
	10	84.04+j378.06	77.46	×
	30	83.04+j378.39	77.62	×

表 5 模型 1 长线路模型在不同时钟误差下单相经过渡电阻故障仿真结果

Table 5 Simulation result under signal phase fault via resistance with different clock error of long line model

故障点	$T/\text{ms}$	零序差动阻抗 $Z_{cd0}/\Omega$	零序差动阻抗角 $\theta/(^\circ)$	动作结果
$K_1$	-8	-1.53-j24.62	-93.56	√
	-3	-1.50-j24.66	-93.49	√
	0	-1.53-j24.62	-93.55	√
	4	-1.56-j24.62	-93.63	√
	7	-1.55-j24.60	-93.61	√
$K_2$	-8	-1.53-j24.63	-93.57	√
	-3	-1.54-j24.62	-93.58	√
	0	-1.55-j24.64	-93.45	√
	4	-1.54-j24.62	-93.58	√
	7	-1.54-j24.62	-93.58	√
$K_3$	-8	-1.56-j24.72	-93.61	√
	-3	-1.56-j24.71	-93.61	√
	0	-1.54-j24.72	-93.57	√
	4	-1.56-j24.71	-93.61	√
	7	-1.56-j24.71	-93.61	√
$K_4$	-8	85.82+j385.28	77.44	×
	-3	86.29+j388.25	77.46	×
	0	88.04+j388.48	77.23	×
	4	89.14+j387.08	77.03	×
	7	88.32+j385.82	77.10	×

从表 5 可看出,即使两侧数据不同步,本文的保护原理同样有效,且计算结果受两侧时钟走时误差的影响较小。模型 1 区内故障时 $\theta$ 角的理论值为 $-93.56^\circ$ ,区外故障时 $\theta$ 角的理论值为 $78.05^\circ$ 。区内故障时零序差动阻抗角均在 $-93^\circ$ 附近,区外故障时 $\theta$ 的计算值均在 $77^\circ$ 附近。实验结果表明本文的保护原理对两端数据的同步性要求不高。

为了进一步说明本算法的优越性,与文献[14]提出的零序综合阻抗保护原理进行对比。文献[14]定义零序综合阻抗为系统两侧零序电压和与系统两侧零序电流和的比值。零序综合阻抗保护原理以 $Z_{h0}$ 的模值构成判据,区外故障时 $|Z_{h0}|$ 值大于 $1000\ \Omega$ ,区内故障时 $|Z_{h0}|$ 的模值一般远小于此值,一般 $Z_{set0}$ 取值为 $500\sim 600\ \Omega$ ,当 $|Z_{h0}|$ 小于 $Z_{set0}$ 时,判定为区内故障。

在两侧时钟具有不同的走时误差下,利用 PSCAD 对模型 1 长线路建模和仿真实验。以 M 侧时钟为标准时钟, $T/ms$ 为 N 侧与 M 侧时钟走时误差,故障点选择线路中间的 $K_2$ 点和 N 侧母线外侧的 $K_4$ 点发生经 $300\ \Omega$ 过渡电阻单相接地故障。实验结果如表 6 所示。

表 6 模型 1 在两侧时钟具有不同走时误差下

单相经过渡电阻故障仿真结果

Table 6 Simulation result under signal phase fault via resistance with different clock error of long line model

故障点	$T/ms$	$Z_{h0}/\Omega$	文献 14 $ Z_{h0} /\Omega$	动作 结果
$K_2$	-8	$-0.71-j17.04$	17.05	√
	-3	$-0.74-j16.13$	16.14	√
	0	$-1.13-j16.01$	16.04	√
	4	$-1.80-j16.36$	16.46	√
	7	$-1.73-j16.95$	17.04	√
$K_4$	-8	$-33.67+j192.66$	195.58	√
	-3	$-402.27+j208.46$	453.07	√
	0	$13.26-j2902.03$	<u>2902.17</u>	×
	4	$298.56+j101.52$	315.34	√
	7	$139.10+j155.37$	208.53	√

从表 6 可看出,当区内故障时,文献[14]的零序综合阻抗原理计算结果受两侧时钟走时误差影响较小,区外故障时其受两侧时钟走时误差影响较大,两侧时钟走时误差为零时,零序综合阻抗为 $2902.17\ \Omega$ ,两侧时钟走时误差不为零时零序综合阻抗值小于 $500\ \Omega$ ,此时零序综合阻抗原理将发生误动。而本文的零序差动阻抗原理不会发生误动。因此,本文提出的保护原理性能更优。

为了验证零序差动阻抗保护原理对于装有并联电抗器补偿线路的有效性,搭建如图 5 所示的仿真模型,其中,线路参数为: $r_1=0.0195\ \Omega/km$ ;

$r_0=0.1675\ \Omega/km$ ;  $l_1=0.9134\ mH/km$ ;  $l_0=2.719\ mH/km$ ;  $c_1=0.014\ \mu F/km$ ;  $c_0=0.00834\ \mu F/km$ 。电源参数为: $\dot{E}_M=525\angle 10^\circ\ kV$ ;  $\dot{E}_N=500\angle 0^\circ\ kV$ 。 $X_{M1}=49.36\ \Omega$ ,  $X_{M0}=41.34\ \Omega$ ,  $X_{N1}=46.03\ \Omega$ ,  $X_{N0}=103.36\ \Omega$ 。并联电抗器参数为 $X_L=1680.56\ \Omega$ ,  $X_0=434\ \Omega$ 。两侧系统的零序阻抗和的负值为 $-j144.70\ \Omega$ ,阻抗角为 $-90^\circ$ ;线路零序阻抗为 $59.96+j305.65\ \Omega$ ,阻抗角为 $78.90^\circ$ 。

假设故障分别发生在区内距 M 端 100 km 的 $K_1$ 处、N 侧母线外侧的 $K_2$ 处。故障点处分别经不同的过渡电阻。仿真结果如表 7 所示。

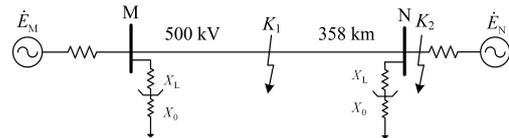


图 5 装有并联电抗补偿器线路模型

Fig. 5 Line model with shunt reactors

表 7 单相经过渡电阻故障仿真结果

Table 7 Simulation result under signal phase fault via resistance

故障点	过渡电阻/ $\Omega$	零序差动阻抗 $Z_{cd0}/\Omega$	零序差动阻 抗角 $\theta/^\circ$	动作 结果
$K_1$	50	$-0.05-j144.65$	$-90.02$	√
	100	$-0.02-j144.68$	$-90.01$	√
	300	$-0.02-j144.74$	$-90.01$	√
$K_2$	50	$73.01+j317.41$	$77.04$	×
	100	$74.64+j316.88$	$76.74$	×
	300	$75.79+j316.53$	$76.53$	×

区内故障时 $\theta$ 角的理论值为 $-90^\circ$ ,区外故障时 $\theta$ 角的理论值接近于线路零序阻抗角 $78.90^\circ$ 。由表 7 所示,区内故障时能可靠动作,当发生区外故障时能可靠不动作。实验结果表明,本文的零序差动阻抗保护原理适用于装有并联电抗补偿器的线路。

## 4 结论

研究了一种基于双端信息的零序差动阻抗保护原理。定义了零序差动阻抗,给出了零序差动阻抗保护原理的判据。在 PSCAD 中搭建的多个模型实验结果表明本文提出的零序差动阻抗保护原理适用于带并联电抗器补偿的线路和弱馈电系统,理论上不受过渡电阻和分布电容的影响,对两侧信号是否严格同步要求不高。与纵联零序方向保护相比,能够防止线路末端发生经高阻接地故障或母线侧零序综合阻抗很小时发生拒动的问题。相比于纵联零序方向元件易受分布电流影响,本文算法的性能更优。

## 参考文献

- [1] 毕天姝,于艳莉,黄少锋,等.超高压线路差动保护电

- 容电流的精确补偿方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 30-34.
- BI Tianshu, YU Yanli, HUANG Shaofeng, et al. Novel accurate compensation method of capacitance current of UHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 30-34.
- [2] 索南加乐, 张悛宁, 齐军, 等. II 模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 12-18.
- SUONAN Jiale, ZHANG Yining, QI Jun, et al. Study of current differential protection using time-domain capacitive current compensating algorithm on II-model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 12-18.
- [3] 吴通华, 郑玉平, 朱晓彤. 基于暂态电容电流补偿的线路差动保护[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 61-67.
- WU Tonghua, ZHENG Yuping, ZHU Xiaotong. Current differential protection based on transient capacitance current compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 61-67.
- [4] 邵能灵, 郭培育, 于仲安, 等. II 模型电容电流补偿的同塔四回线电流差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 34-42.
- TAI Nengling, GUO Peiyu, YU Zhongan, et al. Current differential protection using capacitive current compensating algorithm on Pi-model for four-parallel lines on same towers[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 34-42.
- [5] 刘革新, 杨琰, 吴殿峰, 等. 变压器式可控高抗对线路差动保护的影响及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 133-138.
- LIU Geming, YANG Yan, WU Dianfeng, et al. A study of effect of controllable shunt reactor of transformer type on line differential protection and countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 133-138.
- [6] 夏建矿. 关于输电线路光纤电流差动保护的若干问题讨论[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 141-144.
- XIA Jiankuang. Discussions on several problems about the optical fiber differential protection of the transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 141-144.
- [7] INGRAM D M E, SCHAUB P, TAYLOR R R, et al. System-level tests of transformer differential protection using an IEC 61850 process bus[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1382-1389.
- [8] 黄景光, 梅李鹏, 林湘宁, 等. 故障行波特性对光纤差动保护时延的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 76-82.
- HUANG Jingguang, MEI Lipeng, LIN Xiangning, et al. Influence on the optical fiber differential protection delay based on characteristic of fault traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 76-82.
- [9] 沈冰, 何奔腾, 张雪松. 基于时钟差的线路电流差动保护数据同步方法[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 78-83.
- SHEN Bing, HE Benteng, ZHANG Xuesong. A new device clock error based data synchronization method for current differential protection of transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 78-83.
- [10] 索南加乐, 刘凯, 粟小华, 等. 基于故障分量综合阻抗的输电线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 54-61.
- SUONAN Jiale, LIU Kai, SU Xiaohua, et al. A novel transmission line pilot protection based on fault component integrated impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 54-61.
- [11] 姜宪国, 王增平, 张执超, 等. 基于过渡电阻有功功率的单相高阻接地保护[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 187-193.
- JIANG Xianguo, WANG Zengping, ZHANG Zhichao, et al. Single-phase high-resistance fault protection based on active power of transition resistance[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 187-193.
- [12] 刘凯, 索南加乐, 邓旭阳, 等. 基于故障分量正序、负序和零序综合阻抗的线路纵联保护新原理[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(4): 21-25.
- LIU Kai, SUONAN Jiale, DENG Xuyang, et al. Principle of pilot line protection based on integrated impedance of fault component[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4): 21-25.
- [13] BOLANDI T G, SEYEDI H, HASHEMI S M, et al. Impedance-differential protection: a new approach to transmission-line pilot protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(6): 2510-2518.
- [14] 索南加乐, 刘凯, 粟小华, 等. 输电线路综合阻抗纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 36-41.
- SUONAN Jiale, LIU Kai, SU Xiaohua, et al. Novel transmission line pilot protection based on integrated impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 36-41.
- [15] 索南加乐, 张悛宁, 粟小华, 等. 基于故障分量的分相阻抗差动保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 41-45, 58.
- SUONAN Jiale, ZHANG Yining, SU Xiaohua, et al. Novel principle investigation of segregated phase impedance differential protection based on fault components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 41-45, 58.

收稿日期: 2016-06-06; 修回日期: 2016-08-28

作者简介:

吴继维(1990-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 896250021@qq.com

童晓阳(1970-), 男, 通信作者, 博士, 博导, 研究方向是电网故障诊断、广域后备保护、智能变电站; E-mail: xytong@swjtu.cn

廖小君(1973-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向是继电保护、智能变电站自动化。

(编辑 张爱琴)