

# 基于故障分量综合阻抗的输电线路纵联保护

索南加乐<sup>1</sup>, 刘凯<sup>1</sup>, 粟小华<sup>2</sup>, 张健康<sup>2</sup>, 李怀强<sup>2</sup>, 张怿宁<sup>1</sup>, 康小宁<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049;

2. 西北电力调度通信中心, 陕西省 西安市 710048)

## A Novel Transmission Line Pilot Protection Based on Fault Component Integrated Impedance

SUONAN Jia-le<sup>1</sup>, LIU Kai<sup>1</sup>, SU Xiao-hua<sup>2</sup>, ZHANG Jian-kang<sup>2</sup>, LI Huai-qiang<sup>2</sup>,  
ZHANG Yi-ning<sup>1</sup>, KANG Xiao-ning<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;

2. Northwest China Power Dispatch & Communication Center, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China)

**ABSTRACT:** Based on the ratio between the sum of two terminals fault component voltage phasor of the transmission line and the sum of two terminals current phasor of the same line, which is defined as fault component integrated impedance, a new transmission line pilot protection principle is proposed. When an outer fault occur, the fault component integrated impedance reflect the capacitance impedance of the line, its value is large, and when an internal fault occur, the fault component integrated impedance reflect the impedance of the system source and the line, its value is relative small. According to such a characteristic, whether there is fault in the line can be distinguished. The criterion is not influenced by the capacitive current and fault resistance, and can be applied in the line with or without shunt reactor. Also, it can be easily set. Simulation with EMTP and dynamic model data shows that the presented principle has high sensitivity and reliability.

**KEY WORDS:** transmission line; pilot protection; capacitive current; fault component; integrated impedance

**摘要:** 提出了一种基于故障分量综合阻抗的纵联线路保护新原理。利用故障时线路两端故障分量电压相量与故障分量电流相量之和的比值, 来判断线路上是否发生了故障。在外部故障时, 该比值反映输电线路上的容抗, 其模值较大; 内部故障时, 该比值反映系统电源阻抗和线路阻抗, 其模值相对较小, 据此可以区分线路上的内部和外部故障。新原理易整定, 本身具有选相能力, 不受电容电流的影响, 可以用于带或不带电抗器补偿的线路, 理论上与过渡电阻无关。EMTP仿真和动模数据验证了该原理的有效性。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50677051)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50677051).

**关键词:** 输电线路; 纵联保护; 电容电流; 故障分量; 综合阻抗

## 0 引言

线路光纤电流差动保护已广泛应用于电力系统中。为消除电容电流对差动保护的负面影响, 诸多文献对电流差动保护原理及电容电流的补偿方法做了研究<sup>[1-19]</sup>。

文献[1]利用电压相量计算出电容电流相量, 然后对电流相量进行补偿, 可在稳态过程中补偿区外故障时的电容电流, 但因未考虑故障时的暂态过程, 补偿效果未尽理想。文献[2]提出了基于贝瑞隆模型的差动保护判据, 该判据不受电容电流的影响, 但对采样率的要求很高, 还不适宜在目前硬件水平的保护中应用。文献[3]提出基于时域电容电流补偿的思想, 利用微分方程模型对瞬时值进行补偿, 能够有效消除暂态和工频稳态电容电流的影响。但是, 这些方法基本上都需要知道线路电容参数和补偿电抗器参数, 这增加了保护的复杂性。另外, 由于电抗器的投切由运行方式确定, 保护难以确切的得知电抗器的运行状态, 目前的电容电流补偿方法带有一定的盲目性; 而且文献[4]指出, 即使对电容电流进行补偿后, 对于单端供电等情况, 相量差动的各种方案也无法满足实际电力系统的要求, 不能期望由相量差动保护解决超高压输电线路继电保护的所有问题。综上所述, 直接把传统的分相电流差动保护应用于高压输电线路仍有困难, 需要研究新的保护原理。

线路上发生区外故障时, 故障分量电压在线路

上产生的故障分量差动电流全部是电容性电流，线路两侧故障分量电压相量和与故障分量电流相量和的比值反映线路的容抗，其模值较大。内部故障时，该比值反映系统电源阻抗和线路阻抗，其模值相对较小。因此，根据故障时线路上的故障分量电压相量和与故障分量电流相量和的比值，可以区分内部、外部故障，据此构成的纵联线路保护原理将不需要对电容电流进行补偿，可以用于带或不带电抗器补偿的线路，在原理上不受过渡电阻的影响，对于弱馈及单端供电线路，也有较高的灵敏度。

本文分析了区外故障、区内故障时，线路两侧故障分量电压相量和与故障分量电流相量和比值的特点，提出了基于故障分量综合阻抗的纵联线路保护新原理，并使用 EMTP 仿真和动模数据对新原理进行了验证。

### 1 基于故障分量综合阻抗的纵联保护原理

#### 1.1 故障分量综合阻抗的概念

图 1 为双侧电源供电的单相模型在  $F$  点发生故障时的故障附加状态图，线路采用  $\Pi$  型等值电路模型。图中， $Z_m$ 、 $Z_n$  为线路两侧电源阻抗； $Z_{lm}$ 、 $Z_{ln}$  分别为故障点两端的线路阻抗， $Z_c$  为容抗，其数值为全线等值容抗的 2 倍； $\Delta\dot{U}_F$  为  $F$  点的故障分量电势； $\Delta\dot{I}_F$  为流过故障支路的电流； $R_F$  为过渡电阻； $\Delta\dot{U}_m$ 、 $\Delta\dot{U}_n$ 、 $\Delta\dot{I}_m$  和  $\Delta\dot{I}_n$  分别为母线  $m$ 、 $n$  处的故障分量电压和电流。定义故障分量综合阻抗为

$$Z_{cd} = \frac{\Delta\dot{U}_{cd}}{\Delta\dot{I}_{cd}} \quad (1)$$

式中： $\Delta\dot{U}_{cd} = \Delta\dot{U}_m + \Delta\dot{U}_n$ ； $\Delta\dot{I}_{cd} = \Delta\dot{I}_m + \Delta\dot{I}_n$ 。

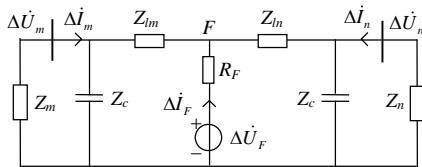


图 1 内部故障时短路附加状态  
Fig. 1 Figure of internal fault-added status

#### 1.2 区外故障时的故障分量综合阻抗

1) 单相模型。线路上发生区外故障时，差动电流全部由电容电流构成。图 2 为线路发生区外故障时的故障附加状态网络图，采用单相模型，图中  $\Delta\dot{I}_{mc}$ 、 $\Delta\dot{I}_{nc}$  分别为流过线路两端等效电容的故障分量电流。

故障分量差动电流为

$$\Delta\dot{I}_{cd} = \Delta\dot{I}_m + \Delta\dot{I}_n = \Delta\dot{I}_{mc} + \Delta\dot{I}_{nc} = \Delta\dot{U}_m / Z_c + \Delta\dot{U}_n / Z_c$$

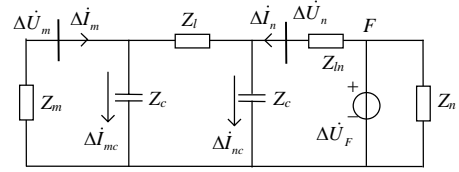


图 2 单相模型外部故障时的短路附加状态  
Fig. 2 Figure of external fault-added status for single phase model

故障分量综合阻抗为

$$Z_{cd} = (\Delta\dot{U}_m + \Delta\dot{U}_n) / \Delta\dot{I}_{cd} = Z_c$$

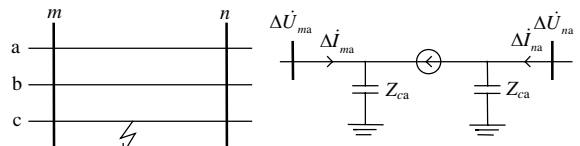
即线路上发生区外故障时， $Z_{cd}$ 和 $Z_c$ 相等，相对于系统阻抗和线路阻抗，它是一个较大的数值。

2) 三相模型。图 3(a)示出了发生内部故障时的三相系统，在 C 相线路上发生了故障，图 3(b)示出了健全相 A 相的故障分量等效电路图，用  $\Delta\dot{E}_M$  表示 B 相、C 相故障分量电流对 A 相的影响。图 3(b)中， $\Delta\dot{U}_{ma}$ 、 $\Delta\dot{U}_{na}$ 、 $\Delta\dot{I}_{ma}$  和  $\Delta\dot{I}_{na}$  分别为线路两端的故障分量电压和电流； $\Delta\dot{I}_{Cm}$  和  $\Delta\dot{I}_{Cn}$  为流过线路等效电容的电流； $Z_{ca}$  为 A 相等效容抗。由图 3 可得

$$\Delta\dot{I}_{cd} = \Delta\dot{I}_{ma} + \Delta\dot{I}_{na} = \Delta\dot{I}_{Cm} + \Delta\dot{I}_{Cn} = \Delta\dot{U}_{ma} / Z_{ca} + \Delta\dot{U}_{na} / Z_{ca}$$

$$Z_{cd} = (\Delta\dot{U}_{ma} + \Delta\dot{U}_{na}) / \Delta\dot{I}_{cd} = Z_{ca}$$

即对于内部故障时的健全相，其故障分量综合阻抗为线路该相等效容抗，与单相模型的分析结果类似。当发生外部故障时，对被保护线路的三相故障分量综合阻抗的分析与本节分析类同。



(a) 内部故障时的三相系统 (b) 健全相 A 相的故障分量等效电路

图 3 故障时健全相等效电路图  
Fig. 3 Figure of equivalent circuit of sound phase when fault occur

#### 1.3 区内故障时的故障分量综合阻抗

区内故障时，故障分量差动电流中的电容分量是很小的，因此下面分析中忽略了电容的影响。

线路上发生区内故障时，其故障附加状态网络如图 1 所示。定义故障点两侧的阻抗分别为  $Z_1 = Z_m + Z_{lm}$ ， $Z_2 = Z_n + Z_{ln}$ ，则

$$\Delta\dot{I}_F = \Delta\dot{U}_F / (R_F + Z_1 // Z_2)$$

$$\Delta\dot{U}_m = \Delta\dot{I}_F \times \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \times Z_m$$

$$\Delta\dot{U}_n = \Delta\dot{I}_F \times \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \times Z_n$$

$$\Delta \dot{I}_{cd} = \Delta \dot{I}_m + \Delta \dot{I}_n = -\Delta \dot{I}_F$$

将  $\Delta \dot{U}_m$ 、 $\Delta \dot{U}_n$ 、 $\Delta \dot{I}_{cd}$  代入式(1)，得

$$Z_{cd} = -\frac{Z_2 \times Z_m + Z_1 \times Z_n}{Z_1 + Z_2} \quad (2)$$

在高压系统中，电源阻抗和线路阻抗的阻抗角都接近  $90^\circ$ ，假设  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_m$ 、 $Z_n$  的阻抗角近似相等，且因  $Z_m < Z_1$ ， $Z_n < Z_2$ ，如将式(2)中的  $Z_m$  取值为  $Z_1$ ， $Z_n$  取值为  $Z_2$ ，可以得到  $Z_{cd}$  的上限： $Z_{cd} < 2 \times (Z_1 // Z_2)$ ，即  $Z_{cd} < \min\{2Z_1, 2Z_2\}$ 。

#### 1.4 基于故障分量综合阻抗的纵联保护判据

从上面的分析可知，当线路上发生区外故障时， $|Z_{cd}|$  在理论上等于  $|Z_c|$ 。发生区内故障时，故障相对应的  $|Z_{cd}|$  反映系统电源阻抗及线路阻抗，远小于  $|Z_c|$ 。因此，可以根据  $|Z_{cd}|$  的大小来区分线路内部、外部故障，本文据此提出了基于故障分量综合阻抗的纵联保护原理，判据为

$$\begin{cases} |Z_{cd}| < Z_{set} \\ |\Delta \dot{I}_{cd}| > I_{set} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $Z_{set}$  为阻抗定值，整定原则为

$$Z_{set} = K_{rel} \times Z_c \quad (4)$$

式中  $K_{rel}$  为可靠系数。从本文第3节大量的仿真可知， $K_{rel}$  一般可取 0.5~0.6，足以保证区外故障时不误动。

以电压等级为 500 kV、长度为 400 km 的线路为例， $|Z_c|$  约在 1000  $\Omega$  左右，可以将  $Z_{set}$  整定为 500~600  $\Omega$ 。线路长度短时， $|Z_c|$  变大，根据式(4)整定的  $Z_{set}$  也会较大，此时可以将  $Z_{set}$  取为 600  $\Omega$ 。

$\Delta \dot{I}_{cd}$  是故障分量，在系统正常运行时， $|\Delta \dot{I}_{cd}|$  理论上为零， $I_{set}$  为电流定值，一般  $I_{set}$  可取大于 0.2 A (二次值)，已有足够的安全性。

## 2 性能分析

### 2.1 电抗器投切对新原理的影响

对于装有电抗器的线路，电抗器的阻抗要比系统电源阻抗和线路阻抗大得多，区内故障时，流过并联电抗器的故障分量差动电流很小，因此可以忽略电抗器的影响，即当线路上安装电抗器后，仍如 1.3 节所分析，内部故障时故障相对应的  $|Z_{cd}|$  反映系统阻抗和线路阻抗，其值较小。

装有并联电抗器的线路上发生区外故障时，其短路附加状态如图 4 所示，图中， $Z_L$  为线路上并联电抗器的阻抗。

当线路上发生外部故障时，令  $Z_{cd0}$ 、 $Z_{cd1}$  分别为

电抗器退出运行及投入运行时的故障分量综合阻抗。当电抗器退出运行时，与前文分析类似，故障分量综合阻抗  $|Z_{cd0}| = |Z_c| = 1/\omega C$ 。当电抗器投入运行时，从图 4 可知：

$$\Delta \dot{I}_{cd} = \Delta \dot{I}_m + \Delta \dot{I}_n = \Delta \dot{U}_m / (Z_c // Z_L) + \Delta \dot{U}_n / (Z_c // Z_L)$$

$$Z_{cd1} = (\Delta \dot{U}_m + \Delta \dot{U}_n) / \Delta \dot{I}_{cd} = Z_c // Z_L$$

$$Z_{cd1} = 1 / [j(\omega C - 1/\omega L)]$$

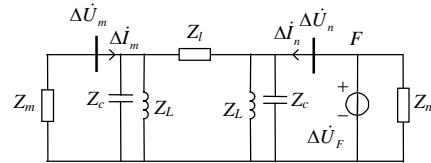


图 4 带电抗器补偿线路的外部故障短路附加状态  
Fig. 4 External fault-added status of the line with shunt reactor

输电线路一般采用欠补偿，即当并联电抗器投入运行后，线路上的差动电流依然是电容电流，由此易知  $\omega C > 1/\omega L$ 。所以， $|Z_{cd1}| = 1/(\omega C - 1/\omega L)$ ，而  $|Z_{cd0}| = 1/\omega C$ ，显然  $|Z_{cd1}| > |Z_{cd0}|$ 。即当电抗器投入运行后，相对于其未投入时的情况，发生外部故障时，故障分量综合阻抗的模值增大了。

对于装有并联电抗器的线路，如果定值  $Z_{set}$  按电抗器退出运行时的情况来整定，则当电抗器退出运行时，新原理可以正确工作。当电抗器投入运行时，区内故障的灵敏度不会受影响，而外部故障时的安全性更高。可见新原理可以顺利应用于带补偿电抗器的输电线路。

### 2.2 新判据抗过渡电阻能力

对于电流差动保护，差动电流门槛要躲开电容电流，整定值相对较高，这降低了它的抗过渡电阻能力，而基于故障分量综合阻抗的纵联保护新原理，从式(2)可知，其动作量  $Z_{cd}$  仅与系统阻抗和线路阻抗有关，与故障时的过渡电阻无关，新判据容许过渡电阻的能力仅与式(3)中的定值  $I_{set}$  有关。

$|\Delta \dot{I}_{cd}|$  是故障分量，只在故障时出现，所以式(3)中的  $I_{set}$  可以取的较低。因此，相较于传统电流差动保护，新原理的抗过渡电阻能力在理论上要强的多。

### 2.3 新判据对于弱馈、单端供电线路的灵敏度

文献[4]指出，对电容电流补偿进行补偿后，对于单端供电线路，相量差动的各种方案无法满足实际电力系统的要求。

弱馈线路的特点是弱馈侧系统阻抗较大，而单端供电线路的受电侧的阻抗较大，二者有类似之处。根据 1.3 节的分析， $|Z_{cd}|$  最大数值是  $\min\{2Z_1,$

$2Z_2\}$ ，它是一部分线路阻抗与线路两端电源阻抗中较小的阻抗的和，远小于线路容抗。可见，新原理用于弱馈线路和单端供电线路，仍会有较好的性能。

### 2.4 关于线路空载合闸

PT 可能装设于线路侧或母线侧，当将本判据用于空充线路场合时，根据 PT 装设的位置不同，情况有所不同。

如果 PT 装于线路侧，则在线路退出运行时，线路上的电压和电流都为零。空载合闸时的系统模型如图 5 所示，图 5(a)为合闸于无故障线路的模型，图 5(b)为合闸于故障的模型，图中， $\dot{U}_m$ 、 $\dot{U}_n$ 、 $\dot{I}_m$  和  $\dot{I}_n$  分别为线路两端的电压和电流相量； $F$  为故障点。当对输电线路进行充电时，合闸前电压和电流均为零，所以故障分量电压和电流与线路上当前电压和电流相等，结合式(1)可得

$$Z_{cd} = \frac{\Delta \dot{U}_{cd}}{\Delta \dot{I}_{cd}} = \frac{\dot{U}_m + \dot{U}_n}{\dot{I}_m + \dot{I}_n}$$

当线路上无故障时，如图 5(a)所示，故障分量综合阻抗的值为

$$Z_{cd} = \frac{\dot{U}_m + \dot{U}_n}{\dot{U}_m / Z_c + \dot{U}_n / Z_c} = Z_c$$

当线路上存在金属性故障时，如图 5(b)所示， $\dot{U}_n$  和  $\dot{I}_n$  为零，则

$$Z_{cd} = \frac{\dot{U}_m + \dot{U}_n}{\dot{I}_m + \dot{I}_n} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{U}_m / Z_{FL}} = Z_{FL}$$

式中  $Z_{FL}$  为从保护安装处到故障点的线路阻抗。

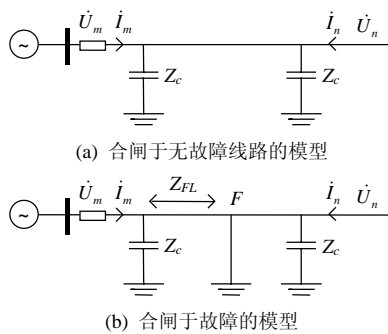


图 5 空载合闸系统模型图

Fig. 5 Model of system of switching onto fault

当线路上存在经过渡电阻接地故障时， $Z_{cd}$ 反映接地电阻和从保护安装处到故障点的线路阻抗。

可见，如果PT装设在线路侧，在空充线路时，如果线路上没有故障， $Z_{cd}$ 与 $Z_c$ 相等，如果线路上有故障， $Z_{cd}$ 反映过渡电阻和从保护安装处到故障点的距离，其模值与线路容抗的模值相差甚大，使用基于故障分量综合阻抗的纵联保护判据可以明确分

辨线路上是否有故障。

如果PT装在母线侧，空载合闸时，将不能得到线路远端的电压，不能计算 $Z_{cd}$ ，此时应该退出本判据。

### 2.5 新判据受暂态分量的影响

故障发生时，差动电流中包含有直流分量和高频分量，为避免线路电流差动保护误动，一般需要提高电流门槛或制动系数，在暂态分量基本消失后，才使用较低的定值，以保证灵敏度。

这种方法的不足之处在于，在故障后的暂态过程中，因提高动作门槛而降低了灵敏度，如果故障点存在过渡电阻，保护将会延缓动作。

本文所提判据，也要受到故障后暂态分量的影响，在暂态过程中需要采用较低的阻抗门槛。但由于区外、区内故障时，故障分量综合阻抗的模值差别较大，区外故障时，一般大于 1 000  $\Omega$ ，区内故障时，一般在数十 $\Omega$ 作用，即使降低了阻抗门槛，对于内部故障仍有较大的动作裕度，而且新判据和过渡电阻无关，当线路上发生带过渡电阻故障时，保护仍会较快动作。

## 3 仿真验证

### 3.1 EMTP 仿真

EMTP仿真中，系统电压等级为 500 kV，线路采用分布参数模型。共采用了 4 种模型进行验证，分别命名为模型 1、模型 2、模型 3 和模型 4，各模型线路的正序和零序阻抗参数相同，仅在线路长度和电源阻抗的大小方面有差别，图 6 为实验模型图。

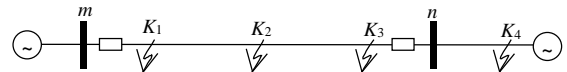


图 6 实验模型

Fig. 6 Model of system

模型 1 是长线模型：线路长度为 400 km， $Z_{m1}=4.3578+j49.8097\Omega$ ， $Z_{m0}=1.1+j16.6\Omega$ ， $Z_{n1}=2.1788+j24.9048\Omega$ ， $Z_{n0}=0.436+j8.02\Omega$ 。

模型 2 是中长线模型：线路长度为 200 km， $Z_{m1}=4.3578+j49.8097\Omega$ ， $Z_{m0}=1.1+j16.6\Omega$ ， $Z_{n1}=1.0894+j12.4524\Omega$ ， $Z_{n0}=0.27+j4.151\Omega$ 。

模型 3 是短线模型：线路长度为 40 km， $Z_{m1}=4.3578+j49.8097\Omega$ ， $Z_{m0}=1.1+j16.6\Omega$ ， $Z_{n1}=7.2627+j83.016\Omega$ ， $Z_{n0}=1.21+j27.7\Omega$ 。

模型 4 是弱馈模型：线路长度为 400 km， $Z_{m1}=4.3578+j49.8097\Omega$ ， $Z_{m0}=1.1+j16.6\Omega$ ， $Z_{n1}=800+j1000\Omega$ ， $Z_{n0}=50+j100\Omega$ ， $n$ 侧为弱馈端。

4个模型的线路参数：正序参数为 $r_1 = 0.019\ 58\ \Omega/\text{km}$ ,  $l_1 = 0.819\ 2\ \text{mH}/\text{km}$ ,  $c_1 = 0.013\ 5\ \mu\text{F}/\text{km}$ ；零序参数为 $r_0 = 0.182\ 8\ \Omega/\text{km}$ ,  $l_0 = 2.74\ \text{mH}/\text{km}$ ,  $c_1 = 0.009\ 2\ \mu\text{F}/\text{km}$ 。

仿真中，分别在 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ 4个点模拟各种金属性故障和带过渡电阻接地故障， $K_1$ 位于 $m$ 端线路出口， $K_2$ 位于线路中点， $K_3$ 位于 $n$ 端线路出口， $K_4$ 位于 $n$ 端母线反向侧出口，计算时采用傅里叶滤波算法。表1列出了4个模型在 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ 4个点发生不同类型金属性故障时的三相综合阻抗计算结果，其中 $|Z_{cda}|$ 、 $|Z_{cdb}|$ 、 $|Z_{cdc}|$ 分别代表A、B、C三三相的综合阻抗的模值。表2列出了模型1中的线路在B相发生经不同过渡电阻接地故障时的仿真结果，其中 $R_F$ 表示接地过渡电阻的数值，分别取100、300、400和500 $\Omega$ ； $I_{cdb}$ 为故障时B相的全量差动电流， $i_{cdb} = i_{mb} + i_{nb}$ ， $i_{mb}$ 和 $i_{nb}$ 分别

表1 EMTP仿真中金属性故障时的仿真结果

Tab. 1 EMTP simulation result under fault without resistance

模型	故障点	故障类型	$ Z_{cda} /\Omega$	$ Z_{cdb} /\Omega$	$ Z_{cdc} /\Omega$
模型1	$K_1$	AB	43.1	43.1	□
		ABC	43.5	42.8	43.3
	$K_2$	ABG	34.7	35.1	3 024
		BG	3021	28	3 021
	$K_3$	AB	29.0	29.0	□
		ABG	23.75	23.0	1 029
	$K_4$	ABC	1 161	1 161	1 161
		BG	1 025	1 210	1 025
模型2	$K_1$	CG	1 850	1 850	27.58
		AB	33.51	33.51	□
	$K_2$	CG	□	□	20.08
		AB	25.13	25.13	□
	$K_3$	CG	2 110	2 110	12.61
		AB	16.68	16.68	□
	$K_4$	CG	2 110	2 110	2 439
		AB	2 349	2 349	□
模型3	$K_1$	CAG	50.36	10 331	50.69
		ABC	62.52	61.62	62.28
	$K_2$	CAG	54.21	10 844	54.19
		ABC	63.75	62.82	63.47
	$K_3$	CAG	54.86	9 902	54.99
		ABC	64.98	64.02	64.65
	$K_4$	CAG	12 080	9 903	12 104
		ABC	11 787	11 787	11 787
模型4	$K_1$	AB	97.5	97.5	□
		ABC	95.8	99.4	1093
	$K_2$	ABG	121	134	1 453
		BG	1 453	106	1 453
	$K_3$	ABG	131	166	1 088
		BG	1 088	139	1 088

表2 EMTP仿真中单相带过渡电阻接地故障的仿真结果

Tab. 2 EMTP simulation result under single phase to ground fault with resistance

故障点	$R_F/\Omega$	$ Z_{cda} /\Omega$	$ Z_{cdb} /\Omega$	$ Z_{cdc} /\Omega$	$I_{cdb}/\text{A}$
$K_1$	100	982	34.1	982	2 800
	300	979	34.1	979	983.8
	400	□	34.1	□	741.2
	500	□	34.1	□	593.8
$K_2$	100	3 044	28.0	3 044	467.5
	300	□	28.0	□	983.8
	400	□	28.0	□	750.0
	500	□	28.0	□	605.0
$K_3$	100	1 025	22.07	1025	2 878
	300	□	22.0	□	981.2
	400	□	22.07	□	737.5
	500	□	22.07	□	590.0
$K_4$	100	1 025	1 210	1 025	51.2

为 $m$ 和 $n$ 侧的B相电流相量。当 $|\Delta \dot{I}_{cd}|$ 小于12.5 A， $|\Delta \dot{U}_{cd}|$ 小于500 V时，计算综合阻抗已经没有意义，设置为无效标“□”。

从表1可见，对于内部故障时的健全相和外部故障时的各相，模型1和模型4中 $|Z_{cd}|$ 的数值在1 000 $\Omega$ 左右，模型2中 $|Z_{cd}|$ 的数值在2 000 $\Omega$ 左右，模型3中的 $|Z_{cd}|$ 的数值在10 000 $\Omega$ 左右，线路越短， $|Z_{cd}|$ 的数值越大。对于线路上发生内部故障时的故障相，3个模型的故障相的 $|Z_{cd}|$ 在几十 $\Omega$ 到上百 $\Omega$ 之间，最大不超过200 $\Omega$ ，二者有明显的差别。

从表2可以看出，对于故障相B相，在同一点上发生经不同的过渡电阻故障时， $|Z_{cd}|$ 的数值基本没有变化，可见，过渡电阻的存在对 $|Z_{cd}|$ 的值基本上没有影响。

为了与传统电流差动保护的性能作比较，表2还列出了故障相B相的全量差动电流。模型1正常运行时的电容电流约为500 A，为了避免误动，传统电流差动保护的电流门槛一般要躲开2倍的电容电流，对于本模型，应整定为1 000 A。从表2可知，当接地电阻为300 $\Omega$ 时，故障相的全量差动电流已经小于1 000 A，传统电流差动保护已经不能可靠动作。而基于故障分量综合阻抗原理的纵联保护原理，动作量 $|Z_{cd}|$ 不受接地电阻的影响，且式(3)中 $I_{set}$ 可以取的比较小，取值为250 A时，已经足以保证可靠性。从表2可知，当接地电阻为500 $\Omega$ 时，全量差动电流为500 A，而内部故障时，故障分量差动电流和全量差动电流近似相等，基于故障分量综合阻抗原理的纵联保护仍可以可靠动作。对比可知，新原理的抗过渡电阻能力较强。

### 3.2 动模数据仿真

使用动模数据对基于故障分量综合阻抗的纵联线路保护原理进行了仿真验证。动模模型采用 500 kV 双回无互感输电线路系统模型，动模实验的系统模型及运行参数见文献[20]。本节使用了 3 种模型的动模数据对新原理进行了验证，3 种模型中，线路长度分别为 400、200 和 40 km，记为模型 4、模型 5 和模型 6。在  $m$  侧出口  $K_{10}$  点、线路中点  $K_{11}$  点、 $n$  侧出口  $K_{12}$  点和  $n$  侧反向出口  $K_5$  共 4 个点模拟各种金属性故障和带过渡电阻故障。仿真结果如表 3、4 所示，表中结果为二次值。表 3 为在 3 种动模模型各个点分别模拟各种金属性故障时三相  $|Z_{cd}|$  的数值，表 4 为模型 4 和模型 5 发生 300  $\Omega$  单相接地故障时  $|Z_{cd}|$  的数值。当某相  $|\Delta \dot{I}_{cd}|$  的数值小于 0.05 A 时，该相的综合阻抗设置为无效标“□”。

从表 3、4 可以看出，当在线路上发生内部故障时，故障相的故障分量综合阻抗的模值较小，最大为 43.53  $\Omega$ ，当区外发生故障时，其数值大于 1 000  $\Omega$ 。可见，使用故障分量综合阻抗可以容易的区分线路上的内部、外部故障，基于故障分量综合阻抗的纵联线路保护原理可以应用于高压线路。

表 3 金属性故障时的动模数据仿真结果  
Tab. 3 Dynamic model simulation result under fault without resistance

模型	故障点	故障类型	$ Z_{cda} /\Omega$	$ Z_{cdb} /\Omega$	$ Z_{cdc} /\Omega$
模型 4	$K_{10}$	ABG	6.84	6.16	□
	$K_{11}$	ABG	31.32	6.58	□
	$K_{12}$	ABC	3.24	2.96	3.17
	$K_{11}$	BC	□	4.64	5.06
	$K_{12}$	CG	□	□	2.73
模型 5	$K_5$	AG	1060	□	□
	$K_{10}$	BC	□	10.78	10.78
	$K_{10}$	CAN	10.16	□	9.0
	$K_{11}$	CAN	12.86	□	11.92
模型 6	$K_{11}$	AB	15.38	13.70	□
	$K_5$	AN	1334	□	□
	$K_{12}$	BC	□	11.43	11.75

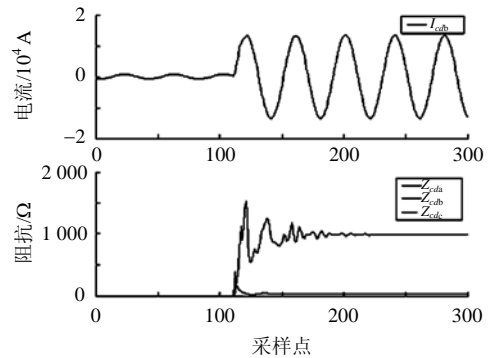
表 4 带过渡电阻单相接地故障的动模数据仿真结果  
Tab. 4 Dynamic model simulation result under single phase to ground fault with resistance

模型	故障点	故障类型	$Z_{cda}$	$Z_{cdb}$	$Z_{cdc}$
模型 4	$K_{10}$	BG	□	6.32	□
模型 4	$K_{11}$	BG	□	5.797	□
模型 4	$K_{12}$	AG	3.08	□	□
模型 5	$K_{11}$	CN	□	□	43.530
模型 5	$K_{12}$	AN	11.86	□	□

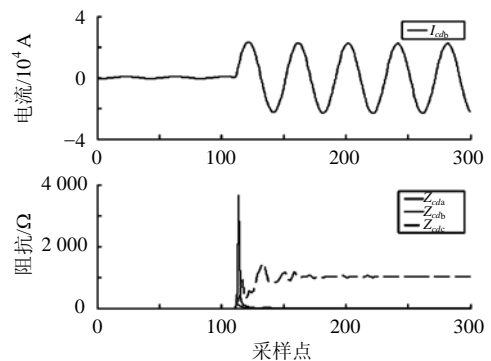
### 3.3 暂态情况下电容电流对计算的影响

在故障发生时，电容电流引起的谐波会对综合阻抗的计算产生影响。本文对 EMTP 仿真数据和动模数据的计算采用全周傅里叶算法。图 7 表示了内部和外部故障时的故障分量综合阻抗的模值，

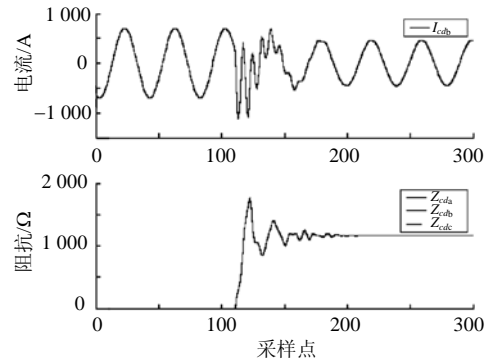
图 7(a)表示 EMTP 模型 1 在  $K_1$  点发生 B 相接地故障时情况，图 7(b)为在  $K_3$  点发生 AB 两相接地时的情况，图 7(c)为在  $K_4$  点发生区外 AB 短路故障时的情况，图中， $I_{cdb}$  表示 B 相差动电流， $Z_{cda}$ 、 $Z_{cdb}$ 、 $Z_{cdc}$  分别分别表示 A 相、B 相和 C 相故障分量综合阻抗的模值，横坐标为采样点，采样率为 2 000 Hz。图 7(a)中，A 相和 C 相上没有故障，曲线  $Z_{cda}$  和  $Z_{cdc}$  基本重合；图 7(b)中，曲线  $Z_{cda}$  和  $Z_{cdb}$  基本重合；



(a)  $K_1$  点发生 B 相接地故障



(b)  $K_3$  点发生 AB 两相接地



(c)  $K_4$  点发生区外 AB 两相接地

图 7 故障时  $Z_{cd}$  的计算值

Fig. 7 Calculated value of  $Z_{cd}$  when fault occur

图7(c)中,  $Z_{cda}$ 、 $Z_{cdb}$ 和 $Z_{cdc}$  3条曲线基本重合。

从图7可以看出,在故障发生时,计算结果有波动,故障发生20ms后,计算结果接近稳定值,仅有较小的波动,即故障数据填满滤波器数据窗后的结果基本准确,将 $K_{rel}$ 取为0.5~0.6不会导致误动或拒动。如果要进一步提高动作速度,则需要采用数据窗更短的滤波器或降低定值 $Z_{set}$ ,以保证可靠性。

## 4 结论

提出了基于故障分量综合阻抗的纵联线路保护新原理,并进行了仿真验证。理论分析和仿真结果表明,在发生区外故障时,新原理的动作量反映线路容抗,其数量级为 $k\Omega$ ;在内部故障时,动作量反映系统阻抗和线路阻抗,其数值不大于 $200\Omega$ ,二者有明显区别。新的纵联线路保护原理容易整定,本身具有选相能力,不受电容电流的影响,可以用于带或不带电抗器补偿的线路,在原理上不受过渡电阻的影响,对于弱馈及单端供电线路,也有较高的灵敏度。EMTP和动模数据仿真验证了新原理的有效性。

## 参考文献

- 伍叶凯, 邹东霞. 电容电流对差动保护的影响及补偿方案[J]. 继电器, 1997, 25(4): 4-8.  
Wu Yekai, Zou Dongxia. The influence of capacitance current to differential protection and its compensation scheme[J]. Relay, 1997, 25(4): 4-8(in Chinese).
- He Jiali, Guo Zheng. Novel principle of pilot differential relay protection of transmission lines[C]. The 4th International Conference on Power Transmission & Distribution Technology 2003, Changsha, China, 2003.
- 索南加乐, 张怿宁, 齐军, 等. 基于时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 12(39): 1370-1374.  
Suonan Jiale, Zhang Yining, Qi Jun, et al. Current differential protection based on time-domain algorithm of capacitive current compensating[J]. Journal of Xi'an JiaoTong University, 2005, 12(39): 1370-1374(in Chinese).
- 文明浩, 陈德树, 尹相根. 超高压长线相量差动保护的研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(20): 37-40.  
Wen Minghao, Chen Deshu, Yin Xianggen. Study of current phasor differential protection for long UHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(20): 37-40(in Chinese).
- 袁荣湘, 陈德树, 张哲. 高压输电线路新型差动保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 9-13.  
Yuan Rongxiang, Chen Deshu, Zhang Zhe. Study on a new differential protection for transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 9-13(in Chinese).
- 高厚磊, 江世芳, 贺家李. 输电线路新型电流差动保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 49-53.  
Gao Houlei, Jiang Shifang, He Jiali. Study on new type of current differential protection for transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 49-53(in Chinese).
- 李岩, 陈德树, 张哲, 等. 超高压长线电容电流对差动保护的影响及补偿对策仿真分析[J]. 继电器, 2001, 29(6): 6-9.  
Li Yan, Chen Deshu, Zhang Zhe, et al. The emulation analysis for the influence of capacitance current of uhv transmission line on differential current protection and compensation counter measure [J]. Relay, 2001, 29(6): 6-9(in Chinese).
- 袁荣湘, 陈德树, 马天皓, 等. 基于相关分析的暂态电流差动保护的原理与性能研究[J]. 电网技术, 2000, 24(4): 40-42.  
Yuan Rongxiang, Chen Deshu, Ma Tianhao, et al. Study on transient current differential protection based on correlation analysis[J]. Power System Technology, 2000, 24(4): 40-42(in Chinese).
- 杨经超, 尹项根, 陈德树, 等. 采样值差动保护动作特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 71-77.  
Yang Jingchao, Yin Xianggen, Chen Deshu, et al. Study on the operation characteristic of sampled value differential protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 71-77(in Chinese).
- 李瑞生, 王强, 文明浩, 等. WXH-803 光纤电流差动保护的研究[J]. 继电器, 2004, 32(2): 40-43.  
Li Ruisheng, Wang Qiang, Wen Minghao, et al. Study of WXH-803 current differential protection based on optical fiber[J]. Relay, 2004, 32(2): 40-43(in Chinese).
- 李清波, 刘沛. 光纤纵差保护的应用及灵敏度的提高[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(4): 21-24.  
Li Qingbo, Liu Pei. Applications of fiber differential protection and sensitivity improvement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(4): 21-24(in Chinese).
- 李瑞生, 索南加乐. 750 kV 输电线路的特殊问题及其对线路保护的影响[J]. 继电器, 2006, 34(3): 1-4.  
LI Ruisheng, Suonan Jiale. The special problems of 750 kV transmission line and its influences on relay protection[J]. Relay, 2006, 34(3): 1-4(in Chinese).
- 李斌, 李永丽, 贺家李. 特高压长线路电容电流对距离保护的影响[J]. 天津大学学报, 2006, 39(增刊): 83-89.  
Li Bin, Li Yongli, He Jiali. The distance protection of UHV long transmission line[J]. Transaction of Tianjin University, 2006, 39(Sup): 83-89(in Chinese).
- 索南加乐, 刘凯, 张怿宁, 等. 基于电阻性差流的差动保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 45-49.  
Suonan Jiale, Liu Kai, Zhang Yining, et al. New principle of differential protection based on the resistance component of differential current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,

- 31(16): 45-49(in Chinese).
- [15] 李岩松, 刘君, 杨以涵, 等. 自适应光学电流互感器与保护一体化运行研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 57-62.  
Li Yansong, Liu Jun, Yang Yihan, et al. Research on whole operating of adaptive optical current transducer and protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 57-62(in Chinese).
- [16] Zhang Min, Dong Xinzhou, Bo Z Q, et al. A new current differential protection scheme for two-terminal transmission lines[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, USA, 2007.
- [17] 索南加乐, 张恽宁, 齐军, 等.  $\Pi$ 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  $\Pi$ -model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 12-18(in Chinese).
- [18] Li Yan, Chen Deshu, Yuan RongXiang, et al. Study of the transient current differential protection based on correlation analysis [C]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, Caracas, 2002.
- [19] Li Xiaohua, Yin Xianggen, Chen Deshu, et al. Theoretical analysis of differential protection based on sampled values[C]. International Conference on Power System Technology, Chongqing, China, 2006.
- [20] 毛鹏, 杨立璠, 杜肖功, 等. 基于 RTDS 的超高压线路保护装置的试验研究[J]. 继电器, 2004, 32(3): 55-59.  
Mao Peng, Yang Lifan, Du Xiaogong, et al. Research on extra2high2voltage line protection based on RTDS[J]. Relay, 2004, 32(3): 55-59(in Chinese).



索南加乐

收稿日期: 2008-01-07。

作者简介:

索南加乐(1960—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统继电保护的教学与科研工作, suonan@263.net;

刘凯(1972—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护;

粟小华(1961—), 男, 硕士, 高级工程师, 西北网调继电保护处处长, 从事继电保护技术管理工作。

(责任编辑 王剑乔)