

# 基于双端电气量的串补线路故障测距新算法

康小宁<sup>1</sup>, 宁 荣<sup>1</sup>, 齐 军<sup>2</sup>, 汪冬辉<sup>1</sup>, 齐 倩<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 内蒙古电力调度通信中心, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:** 目前带串补装置的高压线路进行双端测距时需要进行真伪根判断, 对此提出了一种基于双端电气量的串补线路故障测距新算法。分别建立串补电容两侧的线路故障模型, 在发生故障后, 首先识别 2 个模型的参数, 然后计算 2 个模型的误差来判断故障点相对串补电容的位置, 再利用相应模型的参数进行故障测距。该算法不需判断真伪根, 有利于快速准确地定位故障。EMTP 仿真结果显示, 所提算法不受金属氧化物压敏电阻(MOV)、系统阻抗、故障类型和故障位置的影响, 测距误差都在 0.6% 以内。

**关键词:** 双端电气量; 串补线路; 故障测距; MOV; 模型; 参数识别; 误差; 继电保护

**中图分类号:** TM 73

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.08.009

## 0 引言

高压输电线路是电力系统的命脉, 担负着传送电能的重任。同时, 它是系统中发生故障最多的地方。因此, 在输电线路故障后迅速准确地找到故障点, 对电力系统的安全稳定和经济运行十分重要<sup>[1]</sup>。

串补电容可以提高电力系统的输送容量, 减少系统的线路损耗, 增加输电线路的稳定裕度, 改善联网负荷分配, 改善系统稳定性。由于串补电容具有诸多优点, 目前其在高压电网被广泛使用。考虑串补装置的过电压, 在串补电容设计和应用中普遍采用金属氧化物压敏电阻 MOV(Metal Oxide Varistor) 作为串联电容器的过电压保护设备。串联电容和 MOV 一起组成非线性电路, 该非线性电路在故障测距时需要给予考虑<sup>[3]</sup>。串补电容的存在改变了输电线路的均匀性, 使得常规输电线路的测距方法不能直接应用到串补线路上。

近年来, 国内外学者提出了不少关于串补线路的测距方法<sup>[2,9]</sup>。其中有基于单端电气量的故障分析方法<sup>[2]</sup>, 有基于双端电气量的故障分析方法<sup>[3,9]</sup>, 有行波测距方法<sup>[10-13]</sup>, 也有智能化方法<sup>[14]</sup>。单端测距方法不受通信技术条件的限制, 实现起来比较简单方便, 但其无法消除对侧系统运行方式变化和故障点过渡电阻的影响。双端测距方法在原理上可以实现精确的故障定位, 克服单端测距方法的缺陷。文献<sup>[3-4]</sup>没有考虑串补电容的保护 MOV; 文献<sup>[4-8]</sup>中的方法都存在真伪根的判别问题, 而排除伪根的计算较为复杂。如果故障发生后能知道故障点相对串补电容的位置, 那么在测距时就不需进行真伪根的判别。

在文献<sup>[15]</sup>的基础上, 本文提出了一种基于双端电气量串补线路故障测距的新算法。发生故障后, 假设故障分别发生在串补电容的两侧, 并建立串补电容前故障模型和串补电容后故障模型; 然后使用数据窗 1(故障后 5 ms 内, 且 MOV 未导通) 的数据识别 2 个模型式中的参数, 然后再采用数据窗 2(故障后 5~7.5 ms) 的数据计算 2 个模型的误差大小来判断故障点位置位于串联补偿电容前还是串补电容后; 最后利用数据窗 1 识别出的参数进行测距。该方法不需进行真伪根的判断, 计算方法简单, 有利于快速准确地故障定位。

## 1 串补模型

串补装置主要分为固定补偿(FSC)和晶闸管可控补偿(TCSC)2类, 本文主要研究安装固定串补的线路。固定串补装置主要包括串联电容器组、放电间隙、旁路断路器、负荷开关、隔离开关和辅助设备等。图 1 为一个典型的串补模型及其保护方案<sup>[16-17]</sup>。

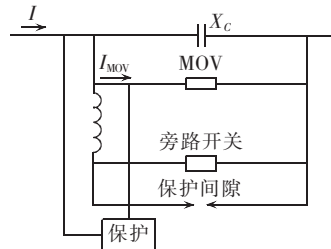


图 1 串补模型及保护方案

Fig.1 Series compensation model and protection scheme

当线路正常时, MOV 上的电压较低, 不会击穿, 呈高阻状态; 当串补电容两端的电压上升到一定值时 MOV 被击穿, 呈低阻状态。MOV 的非线性特性使得 MOV 导通后流过串补电容的电流不易确定, 串补电容上的电压也就难以获得, 给串补线路的研究带来了很大的困难<sup>[15]</sup>。由于高压线路发生故障时, 一般

收稿日期: 2013-08-06; 修回日期: 2014-06-02

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51037005); 国家自然科学基金资助项目(51177127)

Project supported by the Major Program of National Natural Science Foundation of China(51037005) and the National Natural Science Foundation of China(51177127)

存在过渡电阻,这在一定程度上限制了故障电流;并且根据电路理论可知,由于 MOV 和串补电容并联,电容电压不会突变。所以,当串补线路故障时,MOV 不会立即击穿,即在故障后到 MOV 导通需要一段时间。本文提出的方法就是利用故障后至 MOV 被击穿前的数据进行参数识别测距,而不需考虑 MOV 的非线性特性。

## 2 故障点位置判别及测距的基本思想

本文根据串补线路在串补电容两侧发生故障的不同,建立串补电容前故障模型与串补电容后故障模型。根据 2 个不同的模型建立 2 个不同的方程式,然后将故障后采集的相关数据代入方程进行故障点相对串补电容位置的判别和测距。为便于表述,以下以单相线路为例进行分析说明。

### 2.1 故障点位置判别模型的建立

#### 2.1.1 串补电容前故障模型

串补电容前故障模型如图 2 所示。当故障发生在串补电容前时,串补电容后线路部分,即串补安装处  $D$ (线路中点)到系统  $N$  端部分线路为无故障线路,这部分线路采用分布参数模型;而前半部分线路以故障点  $f_1$  为分界点可看成 2 段线路,因为这 2 段线路较短,所以采用  $R-L$  模型。

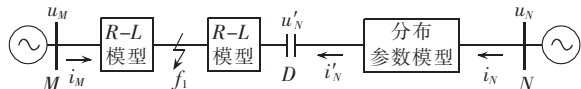


图 2 串补电容前故障模型

Fig.2 Model of fault location at left side of compensation capacitor

参考文献[15]方法,列写电压、电流关系如下:

$$u_M - u'_N = R_1 i_M + L_1 \frac{di_M}{dt} - R_2 i'_N - L_2 \frac{di'_N}{dt} - \frac{1}{C} \int i'_N dt - u_C(0) \quad (1)$$

其中,  $u'_N, i'_N$  分别为串补电容侧电压、电流,采用均匀传输线沿线电压和电流方程式计算;  $R_1, L_1, R_2, L_2$  为线路参数。由于电容的电压值  $u_C(0)$  难以得到,为了消除  $u_C(0)$ ,将式(1)等号两侧对  $t$  分别求导得串补电容前故障模型为:

$$\frac{du_M}{dt} - \frac{du'_N}{dt} = R_1 \frac{di_M}{dt} + L_1 \frac{d^2 i_M}{dt^2} - R_2 \frac{di'_N}{dt} - L_2 \frac{d^2 i'_N}{dt^2} - \frac{1}{C} i'_N \quad (2)$$

#### 2.1.2 串补电容后故障模型

串补电容后故障模型如图 3 所示,其推导过程类似串补电容前发生故障时,可得式(3):

$$\frac{du'_M}{dt} - \frac{du_N}{dt} = R_1 \frac{di'_M}{dt} + L_1 \frac{d^2 i'_M}{dt^2} - R_2 \frac{di_N}{dt} - L_2 \frac{d^2 i_N}{dt^2} + \frac{1}{C} i'_M \quad (3)$$

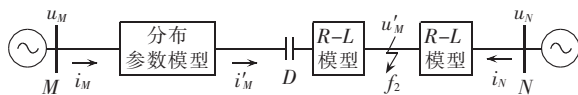


图 3 串补电容后故障模型

Fig.3 Model of fault location at right side of compensation capacitor

式(2)、(3)中的电压、电流为采样数据,利用中点差分代替微分计算可得:

$$\begin{cases} \frac{dy(n)}{dt} = \frac{y(n+1) - y(n-1)}{2t_s} \\ \frac{d^2 y(n)}{dt^2} = \frac{y(n+1) + y(n-1) - 2y(n)}{t_s^2} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $y$  代表  $u_M, u_N, i_M, i_N$ ;  $t_s$  为采样时间间隔。

### 2.2 模型误差判据式

#### 2.2.1 串补电容前故障模型误差判据式

将式(2)改写成:

$$\frac{du_M}{dt} - \frac{du'_N}{dt} + \frac{1}{C} i'_N = R_1 \frac{di_M}{dt} + L_1 \frac{d^2 i_M}{dt^2} - R_2 \frac{di'_N}{dt} - L_2 \frac{d^2 i'_N}{dt^2} \quad (5)$$

分别定义:

$$f(n) = \frac{du_M}{dt} - \frac{du'_N}{dt} + \frac{1}{C} i'_N \quad (6)$$

$$g(n) = R_1 \frac{di_M}{dt} + L_1 \frac{d^2 i_M}{dt^2} - R_2 \frac{di'_N}{dt} - L_2 \frac{d^2 i'_N}{dt^2} \quad (7)$$

$$h(n) = \left| R_1 \frac{di_M}{dt} \right| + \left| L_1 \frac{d^2 i_M}{dt^2} \right| + \left| R_2 \frac{di'_N}{dt} \right| + \left| L_2 \frac{d^2 i'_N}{dt^2} \right| \quad (8)$$

则串补电容前故障模型误差为:

$$E_1 = \frac{|f(n) - g(n)|}{|f(n)| + |h(n)|} \quad (9)$$

#### 2.2.2 串补电容后故障模型误差判据式

类似第 2.2.1 节中的方法,分别令:

$$f'(n) = \frac{du'_M}{dt} - \frac{du_N}{dt} - \frac{1}{C} i'_M \quad (10)$$

$$g'(n) = R_1 \frac{di'_M}{dt} + L_1 \frac{d^2 i'_M}{dt^2} - R_2 \frac{di_N}{dt} - L_2 \frac{d^2 i_N}{dt^2} \quad (11)$$

$$h'(n) = \left| R_1 \frac{di'_M}{dt} \right| + \left| L_1 \frac{d^2 i'_M}{dt^2} \right| + \left| R_2 \frac{di_N}{dt} \right| + \left| L_2 \frac{d^2 i_N}{dt^2} \right| \quad (12)$$

则串补电容后故障模型误差为:

$$E_2 = \frac{|f'(n) - g'(n)|}{|f'(n)| + |h'(n)|} \quad (13)$$

理想情况下,当故障发生在串补电容前时,应该有  $E_1=0$ ,而  $E_2>0$ ;当故障发生在串补电容后时,有  $E_1>0$ ,而  $E_2=0$ 。实际判断时,认为当  $KE_1 < E_2$  ( $K$  为可靠系数,考虑一定的裕量,选取  $K=1.5$ ) 时,则判断为串补电容前故障;当  $E_1 > KE_2$  时,则判断为串补电容后故障。

### 2.3 参数识别及测距思想

a. 最小二乘法参数估计。

分析式(2)和(3)可知,其中的待求量只是线路参数  $R_1、L_1、R_2、L_2$ 。为了获得比较精确的线路参数值,采用最小二乘法进行线路参数计算。

例如,对

$$y(n)=a_1g_1(n)+a_2g_2(n)+a_3g_3(n)+a_4g_4(n)$$

根据最小二乘原理,对  $m$  个采样点数据  $g_1(n)、g_2(n)、g_3(n)、g_4(n)、y(n)(n=1,2,\cdots,m)$ ,要求  $a_1、a_2、a_3、a_4$  使上式等号两边的差的平方  $E^2$  最小,即:

$$E^2=\min \sum_{n=1}^m\left[\sum_{k=1}^4a_kg_k(n)-y(n)\right]^2 \tag{14}$$

式(14)成立的必要条件为:

$$\frac{\partial E^2}{\partial a_k}=0 \quad k=1,2,3,4 \tag{15}$$

可得:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \tag{16}$$

$$\begin{cases} a_{ij}=\sum_{n=1}^mg_i(n)g_j(n) \\ b_i=\sum_{n=1}^mg_i(n)y(n) \end{cases} \quad i,j=1,2,3,4 \tag{17}$$

**b. 故障后**,首先使用数据窗 1(故障后 5 ms 内,且 MOV 未导通)的数据来识别模型式(2)和(3)中的参数,然后再利用数据窗 2(故障后 5~7.5 ms)的数据通过式(9)、(13)计算 2 个模型的误差,从而判断故障点位于串补电容前还是串补电容后。明确故障位置后,直接利用对应模型下,数据窗 1 识别出的参数进行故障测距。由于线路的电感远大于电阻,所以在本方法中选用识别电感数值来进行测距,测量的故障距离  $x$  如式(18)所示,其中  $l$  为单位长度电感。

$$x=\begin{cases} L_1/l & \text{串补电容前故障} \\ L_2/l & \text{串补电容后故障} \end{cases} \tag{18}$$

串补输电线路测距流程如图 4 所示。

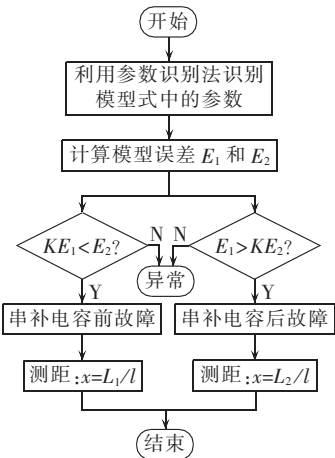


图 4 测距流程图

Fig.4 Flowchart of fault location

2.4 三相输电线路故障

对于三相系统,根据故障分析理论可知,在时域中,可以通过采用模变换阵将其分解为 0 模、1 模、2 模 3 个模网对其进行解耦。1 模量与 2 模量称为线模量,0 模量称为地模量。线模量适用于各种短路故障类型,而地模量只适用于接地短路情况,所以本文选用 1 模量。对于均匀输电线路,相模变换矩阵不唯一,本文采用卡伦堡变换阵作为三相解耦变换阵:

$$T=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix}, \quad T^{-1}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

3 仿真实验

本文采用文献[15]中的实例 2 进行仿真实验。

在长度为 300 km 的 500 kV 双端输电系统中,串补装置安装于线路中点处,补偿度为 40%,即串补电容为 98 μF。系统参数值如下:受端(M 端)的正序阻抗  $Z_{M1}=j28.3057 \Omega$ ,零序阻抗  $Z_{M0}=j26.2951 \Omega$ ;送端(N 端)的正序阻抗  $Z_{N1}=6.14+j31.42 \Omega$ ,零序阻抗  $Z_{N0}=1.6+j28.10 \Omega$ ;线路参数正序阻抗  $Z_1=0.0296+j0.27 \Omega/\text{km}$ ,零序阻抗  $Z_0=0.216+j0.667 \Omega/\text{km}$ ;MOV 模型的非线性函数为  $I_{\text{mov}}=5467(u_{\text{mov}}/122270)^{30}$ 。

仿真时,采样频率为 4 kHz,为保证计算时有一定的数据窗长,分别采用故障后 5 ms 的数据进行参数识别和故障后 5~7.5 ms 的数据计算模型误差。仿真结果如表 1—6 所示,其中  $x_a$  为实际故障距离,  $R_g$  为过渡电阻,“-”、“+”分别表示串补电容的左、右端点。

从表 1、表 2 可知:当串补装置安装在线路中点时,通过模型误差能准确判别故障点相对串补电容的位置;当故障发生在串补电容前时,  $E_2/E_1>1.5$ ;当故障发生在串补电容后时,  $E_1/E_2>1.5$ 。基于此将很

表 1 A 相接地故障发生在串补装置前时,模型误差与故障距离的关系

Tab.1 Relationship between model error and fault distance when phase A-to-earth fault locates at left side

| $x_a/\text{km}$ | $E_1$  | $E_2$  | $E_2/E_1$ |
|-----------------|--------|--------|-----------|
| 50              | 0.0902 | 0.3543 | 3.93      |
| 80              | 0.0526 | 0.3188 | 6.06      |
| 120             | 0.0165 | 0.2949 | 17.87     |
| 150-            | 0.0088 | 0.2492 | 28.28     |

表 2 A 相接地故障发生在串补装置后时,模型误差与故障距离的关系

Tab.2 Relationship between model error and fault distance when phase A-to-earth fault locates at right side

| $x_a/\text{km}$ | $E_1$  | $E_2$  | $E_1/E_2$ |
|-----------------|--------|--------|-----------|
| 150+            | 0.5106 | 0.0014 | 363.13    |
| 180             | 0.4959 | 0.0156 | 31.62     |
| 220             | 0.4587 | 0.0424 | 10.81     |
| 250             | 0.4161 | 0.0560 | 7.43      |

表 3 模型误差与数据窗长的关系 ( $x_a=80\text{ km}$ )  
Tab.3 Relationship between model error and data window length ( $x_a=80\text{ km}$ )

| 数据窗长/ms | $E_1$  | $E_2$  | $E_2/E_1$ |
|---------|--------|--------|-----------|
| 5~6.5   | 0.0176 | 0.2025 | 11.46     |
| 5~7.5   | 0.0524 | 0.3726 | 7.11      |
| 5~8     | 0.0746 | 0.4624 | 6.19      |
| 5~9     | 0.0947 | 0.5729 | 6.05      |
| 5~10    | 0.0850 | 0.6502 | 7.65      |

表 4 模型误差与数据窗长的关系 ( $x_a=250\text{ km}$ )  
Tab.4 Relationship between model error and data window length ( $x_a=250\text{ km}$ )

| 数据窗长/ms | $E_1$  | $E_2$  | $E_1/E_2$ |
|---------|--------|--------|-----------|
| 4~6     | 0.0532 | 0.0182 | 2.91      |
| 5~7     | 0.2667 | 0.0445 | 5.99      |
| 5~7.5   | 0.3534 | 0.0718 | 4.92      |
| 5~8     | 0.4281 | 0.1137 | 3.76      |
| 5~9     | 0.5423 | 0.1397 | 4.98      |

表 5 仿真测距结果

Tab.5 Simulative result of fault location

| 故障类型 | 测量距离/km            |                    |                     |                      |                      |                     |                     |
|------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
|      | $x_a=50\text{ km}$ | $x_a=80\text{ km}$ | $x_a=120\text{ km}$ | $x_a=150-\text{ km}$ | $x_a=150+\text{ km}$ | $x_a=180\text{ km}$ | $x_a=250\text{ km}$ |
| AG   | 49.9               | 80.4               | 120.9               | 150.7                | 150.2                | 180.9               | 251.1               |
| BC   | 50.3               | 80.8               | 121.1               | 150.6                | 149.9                | 180.9               | 250.5               |
| BCG  | 48.9               | 79.7               | 120.7               | 151.8                | 150.3                | 180.7               | 248.6               |
| ABC  | 50.0               | 80.7               | 121.1               | 150.3                | 150.4                | 181.1               | 251.2               |

表 6 过渡电阻对测距精度的影响

Tab.6 Influence of transition resistance on fault location

| 故障类型 | 测量距离/km                 |                        |                        |                        |                         |                         |  |
|------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--|
|      | $R_g=0.1\text{ }\Omega$ | $R_g=10\text{ }\Omega$ | $R_g=30\text{ }\Omega$ | $R_g=50\text{ }\Omega$ | $R_g=100\text{ }\Omega$ | $R_g=200\text{ }\Omega$ |  |
| AG   | 80.36                   | 80.38                  | 80.41                  | 80.44                  | 80.48                   | 80.50                   |  |
| BC   | 80.77                   | 80.78                  | 80.79                  | 80.81                  | 80.84                   | 80.88                   |  |
| BCG  | 79.44                   | 79.49                  | 79.58                  | 79.67                  | 79.84                   | 80.07                   |  |
| ABC  | 80.72                   | 80.38                  | 80.41                  | 80.44                  | 80.48                   | 80.50                   |  |

容易判断出故障点相对于串补电容的位置。

线路距  $M$  端  $80\text{ km}$  处发生 BC 相接地故障且 MOV 在故障后  $6.5\text{ ms}$  导通时的仿真数据如表 3 所示;线路距  $M$  端  $250\text{ km}$  处发生 BC 相接地故障且 MOV 在故障后  $6.0\text{ ms}$  导通时的仿真数据如表 4 所示。从表 3、表 4 可知:虽然 MOV 的导通对模型误差的计算有影响,但对正确模型的判断选取无影响。

从表 5 可知:所提算法不受故障位置和故障类型的影响,最大的测距误差也仅为  $1.8\text{ km}$ ,为线路全长的  $0.6\%$ ;其余测距误差均较小,不超过  $0.5\%$ 。

从表 6 可知:所提算法受过渡电阻的影响较小,过渡电阻在  $0.1\sim 200\text{ }\Omega$  变化时,引起的最大的测距误差也仅为  $0.63\text{ km}$ ,为线路全长的  $0.21\%$ 。

4 结语

本文提出了一种基于分布参数线路模型的双端电气量时域方法,其不受系统阻抗、故障类型、故障

位置等因素的影响,不需进行真伪根的判别,计算量小;仅采用  $7.5\text{ ms}$  的暂态数据,能快速地判断出故障点相对串补电容的位置并测距。仿真结果表明本文提出的方法具有很好的适应性,适用于各种线路故障类型,有足够高的测距精度。在本仿真示例中,MOV 导通的最早时刻在故障后  $5\text{ ms}$  左右。下一步的研究工作主要针对某些故障后到 MOV 导通时刻之间的时间间隔小于  $5\text{ ms}$  的实例,进而研究故障点位置的判别不受 MOV 导通影响的算法。

参考文献:

[1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,2007:256-257.

[2] SAHA M M,IZYKOWSKI J,ROSOLOWSKI E,et al. A new accurate fault algorithm for series compensated lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(3):789-795.

[3] JAVAD S,HADJISAI N,RANJBAR A M,et al. Accurate fault location algorithm for series compensated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2000,15(3):1027-1033.

[4] 陈允平,肖文峰,龚庆武,等. 一种基于微分方程法的串补线路精确故障测距算法[J]. 电力系统自动化,2004,28(17):45-48.

CHEN Yunping,XIAO Wenfeng,GONG Qingwu,et al. Accurate fault locating algorithm for series compensated transmission line based on the differential equation method[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(17):45-48.

[5] 束洪春,司大军,陈学允. 基于分布参数模型的串补线路故障测距方法研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(4):72-76.

SHU Hongchun,SI Dajun,CHEN Xueyun. Study on locating faults on series compensated lines based on distributed parameter line model[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(4):72-76.

[6] 陈铮,董新洲,罗承沐. 带串联电容补偿装置的高压输电线路两端故障测距新算法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(1):11-15.

CHEN Zheng,DONG Xinzhou,LUO Chengmu. A new accurate two-terminal locating algorithm for series compensated line[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(1):11-15.

[7] 韩彦华,施围. 串补输电线路的精确定位算法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(5):75-77.

HAN Yanhua,SHI Wei. Accurate fault location algorithm for series compensated transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2002,22(5):75-77.

[8] 卢斌先,郭丽军,王泽忠,等. 基于节点导纳方程的串联补偿线路两端故障测距算法[J]. 电网技术,2005,29(5):61-66.

LU Binxian,GUO Lijun,WANG Zezhong,et al. A two-terminal fault location algorithm for series compensated lines based on nodal-admittance equation[J]. Power System Technology,2005,29 (5):61-66.

[9] 欧峻彰. 基于分布参数模型的串补线路故障精确定位研究[D]. 南昌:南昌大学,2010.

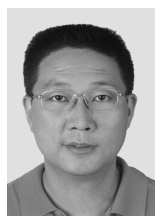
OU Junzhang. Study on series compensated transmission lines accurate fault location based on distributed parameter mode[D]. Nanchang:Nanchang University,2010.

[10] 夏远洋. 串补线路的行波故障测距研究[D]. 西安:西安科技大学,2013.

XIA Yuanyang. Study of traveling wave fault location for series

- compensated lines[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [11] 李小鹏,何正友,廖凯. 基于行波固有频率的串补线路故障测距方法[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 71-76.
- LI Xiaopeng, HE Zhengyou, LIAO Kai. Fault location of transmission line with series compensator based on natural frequencies of travelling wave[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 71-76.
- [12] 孙涛. 基于行波的串补线路故障测距研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2008.
- SUN Tao. Fault location of transmission line with series compensator based on travelling wave[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008.
- [13] 黄子俊,陈允平. 基于小波变换的行波故障定位法在串补输电线路中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 5-9.
- HUANG Zijun, CHEN Yunping. Application of wavelet transform based travelling wave fault location to series compensated lines[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 5-9.
- [14] 康忠建,徐丽,樊建川,等. 基于 Hilbert-Huang 变换和神经网络的带串补高压输电线路故障测距[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 142-146.
- KANG Zhongjian, XU Li, FAN Jianchuan, et al. Fault location for high voltage transmission lines with the series compensation capacitor based on Hilbert-Huang transform and neural network[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 142-146.
- [15] 索南加乐,陈福锋,齐军,等. 串补线路故障点位置的模型识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 66-72.
- SUONAN Jiale, CHEN Fufeng, QI Jun, et al. New method for identifying the fault location on series compensated lines based on different fault models[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 66-72.
- [16] 温荣,谭建成. 串联电容补偿线路的相差保护特性研究[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 86-90.
- WEN Rong, TAN Jiancheng. Study on phase comparison protection for series compensated lines[J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 86-90.
- [17] 刘淑磊,陈福锋,何奔腾. 基于补偿点阻抗的阻抗角特性的串补线路距离保护[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 70-74.
- LIU Shulei, CHEN Fufeng, HE Benteng. Distance protection principle for series compensated lines based on the impedance angle of the compensated point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 70-74.

#### 作者简介:



康小宁

康小宁(1968-),男,陕西佳县人,副教授,主要从事电力系统继电保护方面的科研和教学工作(E-mail: kangxn@mail.xjtu.edu.cn);

宁荣(1985-),男,江西新余人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: ningrong81@163.com);

齐军(1979-),男,陕西渭南人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统安全稳定运行、风电并网技术、输电线路故障定位(E-mail: qijun@impc.com.cn);

汪冬辉(1989-),男,浙江金华人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: wdhmzt@qq.com);

齐倩(1989-),女,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: qiqian2011@stu.xjtu.edu.com)。

## Fault location based on dual-terminal electrical variables for line with series compensation

KANG Xiaoning<sup>1</sup>, NING Rong<sup>1</sup>, QI Jun<sup>2</sup>, WANG Donghui<sup>1</sup>, QI Qian<sup>1</sup>

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

2. Inner Mongolia Power Dispatching and Communicating Center, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** Since the existing dual-terminal fault location algorithms of high-voltage line with series compensation have to expel the pseudo-root, a fault location algorithm based on dual-terminal electrical variables is proposed. Two fault models are built for faults location at different sides of compensation capacitor. When fault occurs, the parameters of both models are identified, both model parameter errors are calculated to determine at which side of the compensation capacitor the fault locates, and the fault location is accurately confirmed according to the parameters of the corresponding model. Without pseudo-root exclusion, the proposed algorithm locates the fault quickly and accurately. Simulative results with EMTF show that, with the location error less than 0.6%, the proposed algorithm is immune to MOV (Metal Oxide Varistor), system resistance, fault type and fault location.

**Key words:** dual-terminal electrical variables; line with series compensation; electric fault location; MOV; models; parameter identification; errors; relay protection