

基于分布参数模型的串联补偿双回线单线故障定位算法

张莹¹, 梁军¹, 负志皓¹, 张峰¹, 霍爽², 王鹏³

(1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东省济南市 250061;

2. 国网天津市电力公司, 天津市 300010; 3. 国网山东省电力公司德州供电公司, 山东省德州市 253000)

摘要: 对于装设串联补偿(串补)装置的输电线路, 由于与串联电容并联的保护元件金属氧化物可变电阻(MOV)的非线性特征, 使得串补线路无法直接使用常规的输电线路故障测距方法。为此, 提出了一种基于分布参数模型的串补双回线故障定位算法。按照故障点相对于串补的位置分为两个子算法, 利用从本端、对端推算得到的故障点处电压相等的特点, 消去串补装置近故障一侧的电压, 结合故障点处过渡电阻的纯电阻性和故障序网边界条件, 构造故障定位函数。该方法不依赖串补装置模型, 不受 MOV 非线性影响, 无需预知串补装置相对于故障的位置, 同时不存在伪根判别问题。EMTDC/PSCAD 和 MATLAB 仿真结果计算验证了该方法的正确性。

关键词: 故障定位; 同杆并架双回线; 串联电容补偿; 分布参数

0 引言

串联补偿(串补)装置装设在超高压及特高压输电线路路上, 可以提高线路传输能力和系统暂态稳定性, 降低线路损耗, 并实现线路潮流的优化^[1]。美国、瑞典等国的 220~735 kV 输电线路已广泛采用串补设备^[2], 中国自 1966 年在新杭上线建成国内第一套 220 kV 串补装置以来, 随着特高压电网建设的逐步展开, 出现了大量带串补的同杆并架双回线这一线路结构。

串补线路输电距离长, 且常与大型发电厂和负荷中心连接, 故障若不能及时修复可能导致严重损失; 串补电容器普遍采用具有非线性伏安特性的金属氧化物可变电阻(metal oxide varistor, MOV)进行过电压保护, 由于非线性 MOV 的存在, 常规的故障测距方法^[3-6]不再适用于串补系统。

国内外已有许多学者对串补线路的故障定位进行了研究, 主要分为行波法^[7-8]和故障分析法^[9-14]。文献[7]首先利用单端电流频率信息判断故障相对于串联电容的位置, 其中对于发生在串联电容后的故障, 考虑串补处行波的折反射对测距算法的影响, 然后根据故障距离与边界条件、固有频率间的数学关系进行故障定位。文献[8]从行波能量的角度出发, 故障行波波头的获取采用特定时窗下的能量比

函数法, 时窗宽度的选择需要反复测试。文献[9-11]提出了直接求解 MOV 模型的串补线路工频测距算法, 由于涉及串补处的电压计算, 为求该电压所做的假设和模型将会给定位算法带来误差。文献[12]采用分布参数时域模型, 基于贝瑞隆线路模型利用本端电压和对端电流得到本端电流, 实现双端测距, 不计及串补处电压, 但应用前提是已知故障点相对于串补的位置。上述研究主要集中在输电线路单回线, 在串补双回线领域, 研究成果较少, 且存在明显不足; 文献[13]通过解故障回路方程来获得故障位置与过渡电阻, 其中零序网络采用近似分布参数模型, 没有考虑线间零序互阻抗, 导致测距精度较低; 文献[14]假设故障类型已知, 利用不同故障类型的边界条件推导测距方程, 由于双回线故障种类繁多, 该方法应用性不强, 且为排除伪根需要进一步计算与对比。

为此, 本文提出了一种基于分布参数模型的串补双回线故障定位算法, 该算法按照故障点相对于串补位置的不同分为两个子算法, 根据从两侧分别推得的故障点处电压相等、串补装置两侧流经电流相等的特点, 消去传输方程中近故障一侧的串补电压和电流。利用故障处过渡电阻的纯电阻性构造故障定位函数, 通过单线故障时故障序网边界条件对定位方程进行简化, 最终解得单回线故障位置。该方法不依赖串补装置的模型, 不受 MOV 非线性的影响, 无需预知故障点相对于串补的位置, 只需对故障距离进行一维搜索, 不存在伪根判别问题。

1 串补双回线分布参数模型及其相序变换

同杆双回线存在相间耦合和线间耦合,双回线上安装串补设备时,仍可以采用六序分量法^[15]解耦。考虑到串补线路一般较长,本文采用分布参数模型。图1中,SC为串补装置,MOV作为其主保护; m 和 n 为系统两侧母线, Z_m 和 Z_n 分别为两侧系统阻抗; $\dot{U}_m, \dot{I}_{mI}, \dot{I}_{mII}$ 和 $\dot{U}_n, \dot{I}_{nI}, \dot{I}_{nII}$ 分别为 m 和 n 侧保护所测量到的电压、I回线电流和II回线电流。

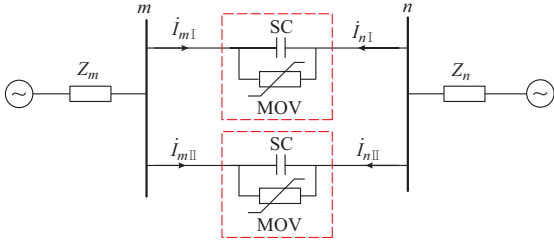


图1 串补双回线示意图

Fig.1 Schematic diagram of series-compensated double-circuit transmission lines

以 m 侧电量为例,将双回线的电流和电压分解为六序分量,有如下关系:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{mI,II} = [\dot{U}_{mIA}, \dot{U}_{mIB}, \dot{U}_{mIC}, \dot{U}_{mIIA}, \dot{U}_{mIIB}, \dot{U}_{mIIC}]^T \\ \mathbf{U}_S = [\dot{U}_{mT0}, \dot{U}_{mT1}, \dot{U}_{mT2}, \dot{U}_{mF0}, \dot{U}_{mF1}, \dot{U}_{mF2}]^T \\ \mathbf{I}_{mI,II} = [\dot{I}_{mIA}, \dot{I}_{mIB}, \dot{I}_{mIC}, \dot{I}_{mIIA}, \dot{I}_{mIIB}, \dot{I}_{mIIC}]^T \\ \mathbf{I}_S = [\dot{I}_{mT0}, \dot{I}_{mT1}, \dot{I}_{mT2}, \dot{I}_{mF0}, \dot{I}_{mF1}, \dot{I}_{mF2}]^T \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mathbf{U}_S = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{U}_{mI,II} \\ \mathbf{I}_S = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{I}_{mI,II} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{U}_S$ 和 $\mathbf{I}_S$ 分别为 m 侧序电压和序电流量; $\mathbf{U}_{mI,II}$ 和 $\mathbf{I}_{mI,II}$ 分别为 m 侧相电压和相电流量; $\mathbf{M}$ 为转换矩阵,如式(3)所示。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a & 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 & 1 & a & a^2 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & a^2 & a & -1 & -a^2 & -a \\ 1 & a & a^2 & -1 & -a & -a^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $a = e^{j120^\circ}$ 。

$$\mathbf{Z}_f = \begin{bmatrix} R_{1A} + R_G & R_G & R_G & R_G & R_G & R_G \\ R_G & R_{1B} + R_G & R_G & R_G & R_G & R_G \\ R_G & R_G & R_{1C} + R_G & R_G & R_G & R_G \\ R_G & R_G & R_G & R_{2A} + R_G & R_G & R_G \\ R_G & R_G & R_G & R_G & R_{2B} + R_G & R_G \\ R_G & R_G & R_G & R_G & R_G & R_{2C} + R_G \end{bmatrix} \quad (8)$$

线路的相阻抗、导纳矩阵经过矩阵变换为相应的六序阻抗、导纳矩阵,具体变换关系见附录A表A1。

利用完全解耦的序参数得到各序分布参数:

$$\begin{cases} Z_{cs} = \sqrt{\frac{Z_s}{Y_s}} \\ \gamma_s = \sqrt{Z_s Y_s} \end{cases} \quad (4)$$

式中: Z_{cs} 为各序线路波阻抗; γ_s 为各序线路传播系数; Z_s 为各序单位长度阻抗系数; Y_s 为各序单位长度导纳系数; $s = T0, T1, T2, F0, F1, F2$,代表六序分量。

2 串补双回线故障测距基本原理

2.1 双回线通用测距方程

图2为双回线短路故障的一般形式,其中: $R_{1A}, R_{1B}, R_{1C}, R_{2A}, R_{2B}, R_{2C}$ 分别为故障点处六相过渡电阻,对于非故障相,电阻值为无穷大; R_G 为故障点处接地电阻,对于非接地故障, R_G 值为无穷大。设故障点距线路左端距离为 x 。

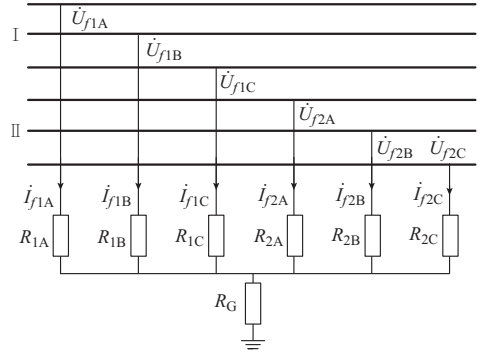


图2 同杆双回线故障处短路模型图
Fig.2 Diagram of short-circuit model for double-circuit at fault point

故障点处相电压和相电流的关系为:

$$\mathbf{U}_f = \mathbf{Z}_f \mathbf{I}_f \quad (5)$$

式中: $\mathbf{U}_f$ 和 $\mathbf{I}_f$ 分别为故障点处相电压和相电流列向量,均为 x 的函数; $\mathbf{Z}_f$ 为故障点处阻抗矩阵。

$\mathbf{U}_f, \mathbf{I}_f, \mathbf{Z}_f$ 的表达式如下:

$$\mathbf{U}_f = [\dot{U}_{f1A}, \dot{U}_{f1B}, \dot{U}_{f1C}, \dot{U}_{f2A}, \dot{U}_{f2B}, \dot{U}_{f2C}]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{I}_f = [\dot{I}_{f1A}, \dot{I}_{f1B}, \dot{I}_{f1C}, \dot{I}_{f2A}, \dot{I}_{f2B}, \dot{I}_{f2C}]^T \quad (7)$$

根据故障点处过渡电阻的纯电阻性质,由式(1)可以推出:

$$\begin{aligned} & \text{Im} \left[(\dot{U}_{f1A} - \sum IR_G)^* \dot{i}_{f1A} + \right. \\ & (\dot{U}_{f1B} - \sum IR_G)^* \dot{i}_{f1B} + (\dot{U}_{f1C} - \sum IR_G)^* \dot{i}_{f1C} + \\ & (\dot{U}_{f2A} - \sum IR_G)^* \dot{i}_{f2A} + (\dot{U}_{f2B} - \sum IR_G)^* \dot{i}_{f2B} + \\ & \left. (\dot{U}_{f2C} - \sum IR_G)^* \dot{i}_{f2C} \right] = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\sum I = \dot{i}_{f1A} + \dot{i}_{f1B} + \dot{i}_{f1C} + \dot{i}_{f2A} + \dot{i}_{f2B} + \dot{i}_{f2C}$; 上标“*”表示复数取共轭。

将故障点处相电压、电流分别表示为六序分量形式:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_f = \mathbf{M} \mathbf{I}_{fS} \\ \mathbf{U}_f = \mathbf{M} \mathbf{U}_{fS} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{I}_f$ 为故障点处序电流列向量, $\mathbf{I}_{fS} = [\dot{i}_{fT0}, \dot{i}_{fT1}, \dot{i}_{fT2}, \dot{i}_{fF0}, \dot{i}_{fF1}, \dot{i}_{fF2}]^T$; $\mathbf{U}_{fS}$ 为序电压列向量, $\mathbf{U}_{fS} = [\dot{U}_{fT0}, \dot{U}_{fT1}, \dot{U}_{fT2}, \dot{U}_{fF0}, \dot{U}_{fF1}, \dot{U}_{fF2}]^T$ 。

将式(10)代入式(9),消去接地电阻 R_G ,可得用故障点处六序电压、电流分量表示的故障测距方程 $f(x)$ 为:

$$\begin{aligned} f(x) = & \text{Im} [\dot{U}_{fT0}^* \dot{i}_{fT0} + \dot{U}_{fT1}^* \dot{i}_{fT1} + \dot{U}_{fT2}^* \dot{i}_{fT2} + \\ & \dot{U}_{fF0}^* \dot{i}_{fF0} + \dot{U}_{fF1}^* \dot{i}_{fF1} + \dot{U}_{fF2}^* \dot{i}_{fF2}] = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)适用于同杆并架双回线所有短路故障类型。

2.2 串补双回线故障测距算法

含串补的双回线计算故障处注入电流时需要双端量,故无法避免地要考虑串补装置的影响。本节在前2.1节基础上,利用从两侧分别推得的故障点处电压相等的特点,消去传输方程中难以直接计算的串补电压,从而避开了MOV的非线性特性,构造了适用于串补双回线的故障测距函数。

双回线解耦后可以得到同、反序故障分量网络,如图3所示。反序故障分量网络中电流仅在双回线内部环流,系统阻抗为零,两侧母线上反序电压也等于零^[15]。图3中,SC₁和SC₂为串补两侧, f 为短路故障点; l 为线路长度, l_c 为串补安装位置到 m 端的距离, x 为故障点到 m 端的距离。

事先定义本节各量如下: $\dot{U}_{mTs}$, $\dot{U}_{nTs}$ 和 $\dot{U}_{mFs}$, $\dot{U}_{nFs}$ 分别为 m 和 n 端同、反序电压; $\dot{U}_{fTs}$ 和 $\dot{U}_{fFs}$ 分别为故障点处同、反序电压; $\dot{U}_{SC_1Fs}$ 和 $\dot{U}_{SC_2Fs}$ 分别为串补两侧反序电压; $\dot{i}_{mTs}$, $\dot{i}_{nTs}$ 和 $\dot{i}_{mFs}$, $\dot{i}_{nFs}$ 分别为 m 和 n 端同、反序电流; $\dot{i}_{fTs}$ 和 $\dot{i}_{fFs}$ 分别为故障点处注入的同、反序电流; $\dot{i}_{mfTs}$, $\dot{i}_{nfTs}$ 和 $\dot{i}_{mfFs}$, $\dot{i}_{nfFs}$ 分别为

故障点两侧同、反序电流; $\dot{i}_{SC_1Ts}$, $\dot{i}_{SC_2Ts}$ 和 $\dot{i}_{SC_1Fs}$, $\dot{i}_{SC_2Fs}$ 分别为串补两侧同、反序电流。各参考方向如图3所示,下标 Ts 代表同序分量 $T0, T1, T2$, 下标 Fs 代表反序分量 $F0, F1, F2$ 。

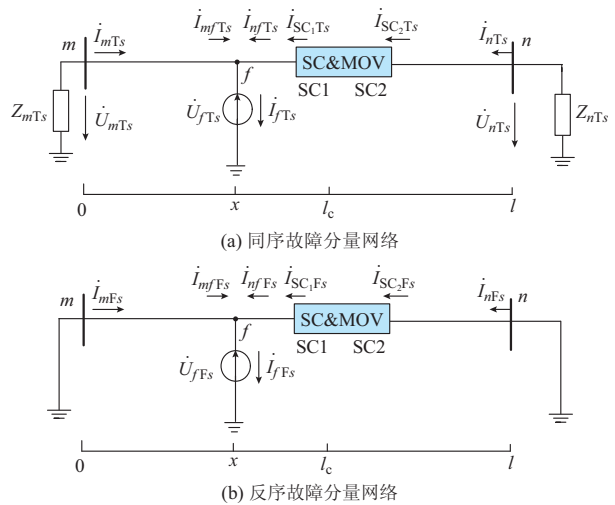


图3 串补双回线同、反序故障分量网络
Fig.3 Common and reverse sequence fault component networks for series-compensated double-circuit transmission lines

1)子算法1:假设故障发生在 m 端至串补 SC₁ 段

由 m 侧电压电流推得故障点 f 处的同、反序电压以及反序电流如下:

$$\dot{U}_{mfTs} = \dot{U}_{mTs} \text{ch}(\gamma_{Ts}x) - Z_{cTs} \dot{i}_{mTs} \text{sh}(\gamma_{Ts}x) \quad (12)$$

$$\dot{U}_{mfFs} = -Z_{cFs} \dot{i}_{mFs} \text{sh}(\gamma_{Fs}x) \quad (13)$$

$$\dot{i}_{mfFs} = \dot{i}_{mFs} \text{ch}(\gamma_{Fs}x) \quad (14)$$

式中: Z_{cTs} 和 Z_{cFs} 分别为同、反序线路波阻抗; γ_{Ts} 和 γ_{Fs} 分别为同、反序线路传播系数。

由 n 端电流可得 SC₂ 处反序电流为:

$$\dot{i}_{SC_2Fs} = \dot{i}_{nFs} \text{ch}(\gamma_{Fs}(l-l_c)) \quad (15)$$

根据基尔霍夫电流定律,串补左、右两侧电流满足:

$$\dot{i}_{SC_1s} = \dot{i}_{SC_2s} \quad (16)$$

由 SC₁ 推得故障点 f 处反序电压和电流为:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{nfFs} = & \dot{U}_{SC_1Fs} \text{ch}(\gamma_{Fs}(l_c-x)) - \\ & Z_{cFs} \dot{i}_{SC_1Fs} \text{sh}(\gamma_{Fs}(l_c-x)) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_{nfFs} = & -\frac{\dot{U}_{SC_1Fs}}{Z_{cFs}} \text{sh}(\gamma_{Fs}(l_c-x)) + \\ & \dot{i}_{SC_1Fs} \text{ch}(\gamma_{Fs}(l_c-x)) \end{aligned} \quad (18)$$

由于式(18)中的串补近故障侧电压 $\dot{U}_{SC_1Fs}$ 较难获得,利用从两端母线推算得到的 f 点处电压相等

这一关系,即 $\dot{U}_{mfF_s} = \dot{U}_{nfF_s} = \dot{U}_{fF_s}$,将式(13)和式(17)联立,得到 $\dot{U}_{SC_1F_s}$ (如式(19)所示),避免了对串补电压的直接求解。

$$\dot{U}_{SC_1F_s} = \frac{\dot{I}_{SC_1F_s} Z_{cF_s} \text{sh}(\gamma_{F_s}(l_c - x)) - \dot{I}_{mF_s} Z_{cF_s} \text{sh}(\gamma_{F_s}x)}{\text{ch}(\gamma_{F_s}(l_c - x))} \quad (19)$$

联立式(15)一式(19),消去中间量 $\dot{U}_{SC_1F_s}$ 和 $\dot{I}_{SC_1F_s}$,得到只含 m 和 n 双端量的 $\dot{I}_{nfF_s}$ 表达式:

$$\dot{I}_{nfF_s} = \frac{\dot{I}_{mF_s} \text{sh}(\gamma_{F_s}x) - \dot{I}_{nF_s} \text{ch}(\gamma_{F_s}(l - l_c)) \text{sh}(\gamma_{F_s}(l_c - x))}{\text{ch}(\gamma_{F_s}(l_c - x))} \cdot \frac{\text{sh}(\gamma_{F_s}(l_c - x)) + \dot{I}_{nF_s} \text{ch}(\gamma_{F_s}(l - l_c)) \text{ch}(\gamma_{F_s}(l_c - x))}{\text{ch}(\gamma_{F_s}(l_c - x))} \quad (20)$$

f 点反序电流可表示为:

$$\dot{I}_{fF_s} = \dot{I}_{mF_s} + \dot{I}_{nfF_s} \quad (21)$$

将式(20)和式(14)代入式(21)后,在两侧保护处电流和线路参数已知的情况下, f 点处反序电流仅为故障距离 x 的函数。

同杆并架双回线发生各种单线故障时有如下电气量特征^[16]: I 回线发生短路故障时,同序电流与反序电流对应相等,即

$$\begin{cases} \dot{I}_{fT1} = \dot{I}_{fF1} \\ \dot{I}_{fT2} = \dot{I}_{fF2} \\ \dot{I}_{fT0} = \dot{I}_{fF0} \end{cases} \quad (22)$$

II 回线发生短路故障时,同序电流与反序电流大小相等,方向相反,即

$$\begin{cases} \dot{I}_{fT1} = -\dot{I}_{fF1} \\ \dot{I}_{fT2} = -\dot{I}_{fF2} \\ \dot{I}_{fT0} = -\dot{I}_{fF0} \end{cases} \quad (23)$$

已知同杆并架双回线单线故障高达 80%^[16],发生单线故障时,利用式(22)或式(23),通用故障测距方程(式(11))可以简化为:

$$f(x) = \text{Im} \left[(\dot{U}_{fF0} \pm \dot{U}_{fT0})^* \dot{I}_{fF0} + (\dot{U}_{fF1} \pm \dot{U}_{fT1})^* \dot{I}_{fF1} + (\dot{U}_{fF2} \pm \dot{U}_{fT2})^* \dot{I}_{fF2} \right] = 0 \quad (24)$$

式(24)即为双回线发生单线故障时的测距方程,该方程的解即为故障点。其中正号对应 I 回线故障,负号对应 II 回线故障。故障点 f 处序电压按式(12)和式(13)选用 $\dot{U}_{mfT_s}$ 和 $\dot{U}_{mfF_s}$, f 处反序电流

表达式为式(21),将式(12)、式(13)和式(21)代入式(24)中,得到关于故障距离 x 的非线性方程,采用二分法在区间 $[0, l_c]$ 内搜索即可得到测距结果。

2)子算法 2:假设故障发生在串补 SC_2 至 n 端

此时串补元件靠近故障侧为 SC_2 。故障点处同、反序电压及 f 点右侧反序电流基于 n 端量由传输方程求得:

$$\dot{U}_{nfT_s} = \dot{U}_{nT_s} \text{ch}(\gamma_{T_s}(l - x)) - Z_{cT_s} \dot{I}_{nT_s} \text{sh}(\gamma_{T_s}(l - x)) \quad (25)$$

$$\dot{U}_{nfF_s} = -Z_{cF_s} \dot{I}_{nF_s} \text{sh}(\gamma_{F_s}(l - x)) \quad (26)$$

$$\dot{I}_{nfF_s} = \dot{I}_{nF_s} \text{ch}(\gamma_{F_s}(l - x)) \quad (27)$$

f 点左侧反序电流采用与子算法 1 相同的方法

消去中间量 $\dot{U}_{SC_2F_s}$ 和 $\dot{I}_{SC_2F_s}$,可表示如下:

$$\dot{I}_{mfF_s} = \frac{\dot{I}_{nF_s} \text{sh}(\gamma_{F_s}(l - x)) - \dot{I}_{mF_s} \text{ch}(\gamma_{F_s}l_c) \text{sh}(\gamma_{F_s}(x - l_c))}{\text{ch}(\gamma_{F_s}(x - l_c))} \cdot \frac{\text{sh}(\gamma_{F_s}(x - l_c)) + \dot{I}_{mF_s} \text{ch}(\gamma_{F_s}l_c) \text{ch}(\gamma_{F_s}(x - l_c))}{\text{ch}(\gamma_{F_s}(x - l_c))} \quad (28)$$

f 点反序电流仍可表示为式(21)。测距方程仍

为式(24),其中 f 点序电压选用 $\dot{U}_{nfT_s}$ 和 $\dot{U}_{nfF_s}$,将式(21)、式(25)和式(26)代入式(24)中解相应的 x ,搜索范围为 $[l_c, l]$ 。

3 仿真验证

本章第一部分验证了故障测距算法无需判别伪根结论,第二部分给出了不同故障位置、过渡电阻、负荷电流下的仿真结果。两部分均采用 PSCAD 搭建如图 1 所示的串补双回线分布参数模型。

图 1 双端电源系统电压等级为 500 kV,线路长度为 300 km;串补位于线路中点 150 km 处,补偿度为 40%^[11],串补电容为 $C = 98 \mu\text{F}$;两端电源相角差 $\delta = 10^\circ$, m 和 n 侧电源幅值分别为 1.05(标幺值)和 1.00(标幺值)。

m 和 n 侧系统参数为: $Z_{m1} = Z_{m2} = j63.0 \Omega$, $Z_{m0} = j70.0 \Omega$; $Z_{n1} = Z_{n2} = j40.0 \Omega$, $Z_{n0} = j60.0 \Omega$ 。

单回线正(负)序参数为: $R_1 = 0.0347 \Omega/\text{km}$; $L_1 = 1.2813 \text{ mH}/\text{km}$; $C_1 = 0.009121 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

单回线零序参数为: $R_0 = 0.2983 \Omega/\text{km}$; $L_0 = 3.7757 \text{ mH}/\text{km}$; $C_0 = 0.006610 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

双回线零序互阻抗参数为: $Z_{0m} = 0.2636 \Omega/\text{km}$; $L_{0m} = 2.4944 \text{ mH}/\text{km}$; $C_{0m} = 0.002512 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

以 I 回线发生短路故障为例,设置双回线各种单线故障。

3.1 算法验证

设置 I 回线距 m 端 100,150,200 km 处发生各种单线故障,分别对应串补左侧、串补处、串补右侧故障,图 4 描绘了子算法 1 和子算法 2 在不同情况下的故障定位函数特性曲线。

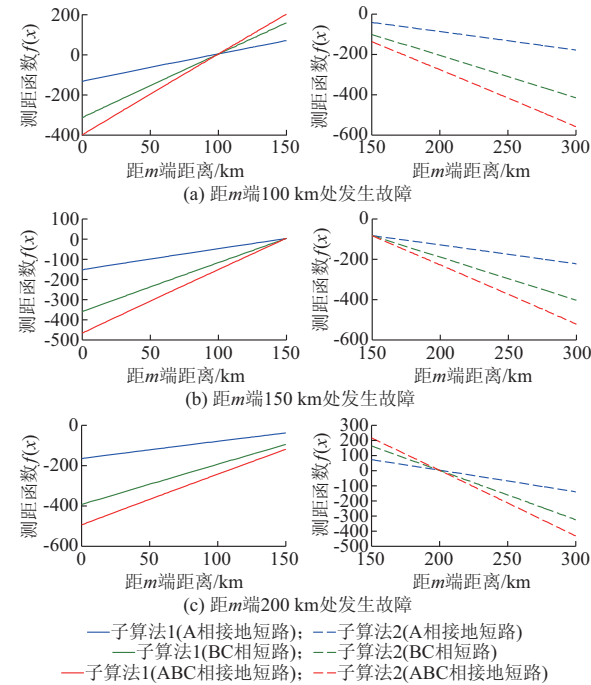


图 4 故障定位函数特性曲线
Fig.4 Characteristic curve of fault location function

以串补左侧故障为例,子算法 2 的故障定位函数在搜索范围内一直为负,而子算法 1 有唯一零点,如图 4(a)所示。

本文算法表明:串补左侧故障时,子算法 1 有唯一解,而子算法 2 无解;串补右侧故障时子算法 1 无解,子算法 2 有唯一解;在串补安装处故障时,采用任一子算法均可得正确解。

故将双端数据同时输入子算法 1 和子算法 2 中进行计算时,无需判别故障区间,可以直接实现故障精确定位,且所得故障距离并不存在判别伪根的问题。

3.2 仿真计算

附录 A 表 A2 所示为含串补双回线沿线发生不同故障时的测距结果,其中 I AG 故障指双回线中 I 回线 A 相经过渡电阻接地。其中,相对测距误差的计算式为:

$$\delta = \left| \frac{\text{测距距离} - \text{实际故障距离}}{\text{线路全长}} \right| \times 100\% \quad (29)$$

附录 A 表 A2 表明,本文算法适用于单回线不同故障类型,且精度较高。

附录 A 表 A3 给出了过渡电阻和故障位置对

I AG故障测距结果的影响情况,测距误差均不超过 0.4%。附录 A 表 A4 给出了过渡电阻为 50 Ω 时负荷电流和故障位置对 I ABC 故障测距结果的影响情况。分析附录 A 表 A2 至表 A4 的仿真结果可见,本文方法不受故障位置、负荷电流和故障电阻等因素的影响,且测距精度高,可靠性好。

4 结语

本文提出了一种基于分布参数模型的串补双回线故障定位算法。该算法采用六序分量法解耦,利用从两侧推得的故障点处故障电压相等,消除串补电压;在此基础上,根据同、反向序网边界条件,利用故障处过渡电阻的纯阻性特点,构造了适用于串补双回线的故障定位函数。

该算法存在如下优点:①不依赖串补模型,不受 MOV 非线性特性的影响,从而避开了 MOV 导通后串补电容上电压难以获得的问题;②无需识别故障类型和故障相对于串补的位置;③不存在伪根判别问题;④测距结果受故障位置、负荷电流和过渡电阻等因素的影响较小。

本文所提方法虽仅能精确定位线路全长范围内的单线故障,但为解决串补双回线故障定位问题提供了一种新的研究思路,接下来将致力于将本文方法改进、推广至双回线所有故障类型,并考虑双端非同步采样的影响。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] JANCKE G, FAHLEN N, NERF O. Series capacitors in power systems[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(3): 915-925.
[2] GRUNBAUM R, SAMUELSSON J. Series capacitors facilitate long distance AC power transmission[C]// IEEE Russia Power Tech, June 27-30, 2005, Saint Petersburg, Russia: 6p.
[3] 陈旭,朱永利,高艳丰,等.基于故障分支快速辨识的 T 型高压输电线路故障定位新算法[J].电力系统自动化,2016,40(4): 105-111.DOI:10.7500/AEPS20150412007.
CHEN Xu, ZHU Yongli, GAO Yanfeng, et al. A new fault location algorithm for high-voltage three-terminal transmission lines based on fault branch fast identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 105-111. DOI: 10.7500/AEPS20150412007.
[4] 李博通,李永丽,胡宇,等.基于故障区域识别的超高压混联线路故障测距算法[J].电力系统自动化,2013,37(5): 93-98.
LI Botong, LI Yongli, HU Yu, et al. A new fault location algorithm for extra-high voltage mixed lines based on fault zone identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 93-98.
[5] 霍爽,高压输电线路故障测距算法的研究[D].济南:山东大学,

- 2012.
- [6] 张峰,梁军,李建超,等.基于初始反极性行波检测的单端故障测距算法[J].电力系统自动化,2013,37(4):108-113.
ZHANG Feng, LIANG Jun, LI Jianchao, et al. Single ended fault location algorithm based on detection of initial reverse polarity traveling wave [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 108-113.
- [7] 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 frequencies technology with series compensator based on natural travelling wave[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 71-76.
- [8] 商立群,夏远洋.基于能量比函数的串补线路行波故障测距[J].中国电机工程学报,2015,35(20):5228-5234.
SHANG Liqun, XIA Yuanyang. Energy ratio function-based traveling wave fault location for series compensated line[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5228-5234.
- [9] 陈铮,董新洲,罗承沐.带串联电容补偿装置的高压输电线路双端故障测距新算法[J].中国电机工程学报,2003,23(1):12-16.
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): 12-16.
- [10] 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):73-77.
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): 73-77.
- [11] 韩彦华,施围.串补输电线路的精确故障定位算法[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.
- [12] 索南加乐,许文宣,何世恩,等.基于双端电气量的串补输电线路故障测距算法[J].中国电机工程学报,2013,33(19):157-164.
SUONAN Jiale, XU Wenxuan, HE Shien, et al. A fault location algorithm for series compensated transmission lines based on two-end information[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 157-164.
- [13] IZYKOWSKI J, ROSOŁOWSKI E, BALCEREK P, et al. Fault location on double-circuit series-compensated lines using two-end unsynchronized measurements[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(4): 2072-2080.
- [14] KANG Ning, CHEN Jiaxiong, LIAO Yuan. A fault-location algorithm for series-compensated double-circuit transmission lines using the distributed parameter line model[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2015, 30(1): 360-367.
- [15] 葛耀中.新型继电保护和故障测距的原理和技术[M].2版.西安:西安交通大学出版社,2007.
- [16] 龚震东,范春菊,郁惟镛,等.一种基于六序网图的同杆双回线故障测距算法[J].电力系统自动化,2007,31(17):58-60.
GONG Zhendong, FAN Chunju, YU Weiyong, et al. A new fault allocation algorithm for parallel transmission line based on six sequence network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(17): 58-60.

张莹(1992—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统继电保护与故障测距。E-mail: 634069272@qq.com

梁军(1956—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统运行与控制、电力系统自动化。E-mail: liangjun@sdu.edu.cn

贡志皓(1973—),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向:电力系统运行与控制。E-mail: zhihaoyun@sdu.edu.cn

(编辑 蔡静雯)

Distributed Parameter Model Based Single-line Fault Location Algorithm for Series-compensated Double-circuit Transmission Lines

ZHANG Ying¹, LIANG Jun¹, YUN Zhihao¹, ZHANG Feng¹, HUO Shuang², WANG Peng³

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, China;

2. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China;

3. Dezhou Electric Power Supply Bureau of State Grid Shandong Electric Power Company, Dezhou 253000, China)

Abstract: The conventional fault location algorithm cannot be directly applied to the series compensated transmission lines because of the nonlinear characteristic of the metal oxide varistor (MOV) installed with the series capacitor (SC) in parallel. For this reason, this paper presents a fault location algorithm for the series-compensated double-circuit transmission lines based on the distributed parameter model. The algorithm is divided into two subroutines according to the fault position relative to the left or right side of the series compensator. For each subroutine, the voltages of the series compensated devices are eliminated according to the features that the sequence voltages calculated from local and opposite buses are equal at the fault point. Since the transition resistance is pure resistant at the fault point, the fault location equation can be created according to the boundary condition of the fault sequence current. The proposed algorithm does not use the equivalent model of series compensated device and is not affected by the nonlinear characteristic of MOV. In addition, there is no need to predict the location of the series compensation device relative to the fault point, nor is there any pseudo root elimination problem. The simulation and calculation results of EMTDC/PSCAD and MATLAB have verified the proposed algorithm.

Key words: fault location; double-circuit transmission line; series capacitor compensation; distributed parameter