

基于RL模型的双回线单端时域法故障定位

宋国兵¹, 穆国强², 崔琪², 孙金凤², 高莉², 刘志良¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安供电局, 陕西 西安 710032)

摘要: 提出了一种基于双回线单端电气量的RL模型时域法故障定位方法。该方法是建立在集中参数模型基础上, 利用单端电压电流通过微分方程计算故障相的沿线电压, 根据故障边界条件, 用环流电流来计算故障电流, 再根据故障支路的电压电流关系进行故障定位。由于该定位方法在时域中进行, 所需数据窗短, 计算量小。利用分布参数模型的故障数据对该方法进行仿真验证, 结果表明具有实用价值, 并给出了提高定位精度的措施。

关键词: 故障定位; 双回线; RL模型; 时域法; 单端

Time domain fault location of parallel transmission lines based on RL model

SONG Guo-bing¹, MU Guo-qiang², CUI Qi², SUN Jin-feng², GAO Li², LIU Zhi-liang¹

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

2. Xi'an Power Supply Bureau, Xi'an 710049, China)

Abstract: A time domain fault location algorithm for parallel transmission lines is proposed in this paper. Based on RL model, the novel fault location method is implemented by calculating voltage distribution using one terminal voltage and current, and expressing fault current using differential component current, and then the fault can be located by the relationship of voltage and current in fault point. For the fault location is carried out in time domain, which has some merits of short data window and low computation capacity. Results simulated by using distributed parameter model show that the proposed algorithm is practicable for constructing distance protection. And a technique is given to improve the accuracy of the method.

Key words: fault location; parallel transmission lines; RL model; time domain; one terminal

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0034-05

0 引言

同杆双回线共用杆塔, 出线走廊窄, 同时具有节约土地、建设速度快、输送能力强、节省投资等优势, 能够很好地满足现代电力系统对供电可靠性和大容量输电等要求, 所以在工程上的应用日益广泛^[1,2]。在国外, 高压线路多采用同杆双回线结构。我国的输电线路中同杆双回线的比例也在逐渐增大, 在未来将会有更多的高电压等级交流输电线路采用同杆并架结构。随着电力系统的发展和对安全运行要求的进一步提高, 这种输电方式也给电力系统继电保护提出了新的挑战和要求。作为故障后快速查找故障位置的依据, 故障定位一直是继电保护的重要内容之一。因此, 输电线路故障定位方法的研究有着重要的理论意义和实用价值。

根据使用的电气量, 故障测距方法可分为: 双

端测距和单端测距。双端故障测距法是利用输电线路两端电气量确定输电线路故障位置的方法, 需要通道配合; 单端测距法是仅利用输电线路一端的电气量确定输电线路故障位置的方法, 无须通信设备和数据同步设备。因此, 单端法的优点不但使得该方法具有广泛的应用前景, 性能优良的单端故障定位算法也能用于构造距离继电器元件。

由于同杆双回线的复杂耦合关系, 使得单回线测距装置用于同杆双回线时将不适用。电力科技工作者进行了大量的研究, 现将利用单端电气量实现测距的方法归结如下: 文献[2~12]为集中参数模型下的单端故障定位法。文献[2]系统地阐述了双回线的单线故障、跨线故障定位方法, 文献[3]给出了跨线故障的定位方法。它们都是借助于环流网, 用环流电流表示故障电流, 进而根据故障点电压电流的关系构造测距算法。文献[4]在计算故障点电流的方法同文献[2,3], 它将存在双回线环流的故障分为4类,

基金项目: 教育部博士点基金新教师项目 (20070698057); 国家自然科学基金项目 (50677051)

每类算法有不同的测距表达式, 需要选相配合。文献[5~10]给出的故障定位方法, 虽然实现方式各不相同, 但基本思路都是通过与故障相的同名健全相构造 KVL(Kirchhoff's voltage law)方程, 进而计算出对端对故障点的注入电流, 实现故障定位。其中, 文献[2~8]为 RL 模型, 文献[9,10]为 RLC 模型。文献[11]给出了双回线单线故障定位方法, 它通过用零序电流的比例关系定位接地故障, 用故障电流和负序电流的比例关系定位相间故障。文献[12~14]为分布参数模型的单端故障定位算法, 定位精度比集中参数模型有明显提高。文献[12,13]利用双回线故障时的故障电流可以用本端反序电流表示的特点, 并结合故障点处电压电流的关系, 实现故障定位。文献[14]利用单端电流实现故障定位, 该算法无需电压量且定位精度高, 但对于理想的换位线路, 由于线间和相间互感(容)相同, 该算法不再成立, 故其适用性受到限制。

综上所述, 目前的双回线单端测距算法存在如下问题: ①都属于频域测距算法, 需由滤波算法求取相量, 所需数据窗较长; ②单端电流的故障分析法不能适用于完全换位的对称线路。

鉴于单端电流的故障分析法不能适用于完全换位的对称线路, 因此有必要研究适应性更强的定位方法。研究表明, 对于单端量的故障定位, 在故障定位时引入电压量就可以满足这一要求。现有的线路多采用传统的 PT 和 CT, 他们的传变能力在除基频外有一定差异, 故采样数据必须滤波。既然电压电流数据的滤波不能省略, 况且用低频数据进行故障定位时集中参数模型和分布参数模型差别不大。基于这样的考虑, 本文提出了一种可以适用于所有网架结构和故障初相角的单端故障定位方法, 该方法是基于双回线 RL 模型的微分方程算法, 具有以下优点: 1) 定间隔采样情况下, 不受系统频率变化的影响; 2) 只需要滤除高次谐波; 3) 所需数据窗短, 适用于快速跳闸的场合; 4) 计算量小, 可用于保护构造距离元件。由于微分方程法采用集中参数线路模型, 且假定故障电流与保护安装处电流同相位, 该假设将影响精度, 故本文提出的方法适用于短线路或者装备传统的 PT 和 CT 的线路。

1 R-L模型下的双回线沿线电压计算

单位长度 R-L 模型的双回线及其耦合关系如图 1 所示, 该模型下的双回线系统如图 2 所示。

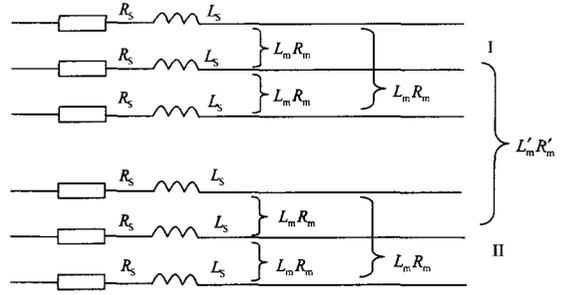


图 1 单位长度 R-L 模型的双回线

Fig.1 Coupling relationship in R-L model of parallel transmission lines

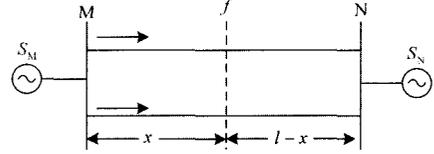


图 2 双回线系统图

Fig.2 Configuration of parallel transmission lines

在图 2 中, 沿线任意一点 f 处的各相电压可以通过如下微分方程计算得到:

$$u_f(x) = u_M - x \cdot R \cdot i - x \cdot L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

其中:

$$u_f = \begin{bmatrix} u_{IAf} \\ u_{IBf} \\ u_{ICf} \\ u_{IIA} \\ u_{IIB} \\ u_{IIC} \end{bmatrix}; \quad u_M = \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}; \quad i = \begin{bmatrix} i_{IA} \\ i_{IB} \\ i_{IC} \\ i_{IIA} \\ i_{IIB} \\ i_{IIC} \end{bmatrix};$$

$$R = \begin{bmatrix} R_s & R_m & R_m & R'_m & R'_m & R'_m \\ R_m & R_s & R_m & R'_m & R'_m & R'_m \\ R_m & R_m & R_s & R'_m & R'_m & R'_m \\ R'_m & R'_m & R'_m & R_s & R_m & R_m \\ R'_m & R'_m & R'_m & R_m & R_s & R_m \\ R'_m & R'_m & R'_m & R_m & R_m & R_s \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} L_s & L_m & L_m & L'_m & L'_m & L'_m \\ L_m & L_s & L_m & L'_m & L'_m & L'_m \\ L_m & L_m & L_s & L'_m & L'_m & L'_m \\ L'_m & L'_m & L'_m & L_s & L_m & L_m \\ L'_m & L'_m & L'_m & L_m & L_s & L_m \\ L'_m & L'_m & L'_m & L_m & L_m & L_s \end{bmatrix}$$

x 为故障距离。

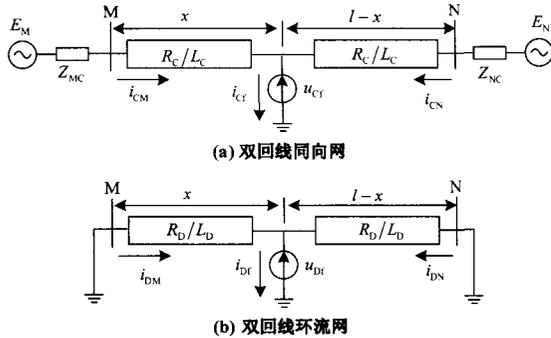
式(1)表明, 在传输线的参数矩阵 R 和 L 已知的情况下, 只需知道 M 端测点处的电压 u_M 和电流 i , 就可以算出本端到故障点间沿线上任意一点的电

压。

2 R-L模型下的双回线故障电流计算

双回线系统中，对端注入电流可以由本端电流来表示。如下给出 R-L 模型下，双回线的单回单相故障时，故障点电流的本端和对端助增关系的推导过程。

R-L 模型下的双回线可以解耦为如图 3 所示的同向网和环流网^[1]。



注：下标 C 表示同向量；下标 D 表示环流量。

图 3 双回线同向网和环流网

Fig.3 Common component network differential component network

在图 3(b)中，有如下关系成立：

$$i_{DM} \cdot x \cdot R_D + x \cdot L_D \frac{di_{DM}}{dt} = i_{DN} (l-x) R_D + (l-x) L_D \frac{di_{DN}}{dt} \quad (2)$$

进而可得：

$$i_{DM} \cdot x = (l-x) i_{DN} \quad (3)$$

$$i_{Df} = i_{DM} + i_{DN} = i_{DM} + \left(\frac{x}{l-x}\right) i_{DM} = \left(\frac{l}{l-x}\right) i_{DM} \quad (4)$$

由上面的推导结果可以看出，双回线故障点的环流电流可以用本端环流电流来表示。根据故障边界条件可以用环流电流表示故障电流，但是不同故障类型有不同的表达式，下面只推导双回线单线故障情况下的表达式，跨线故障类似。

1) 单回线单相故障

这里以 I 回线的 A-G 为例，讨论故障电流和环流电流的关系。如图 4 所示。

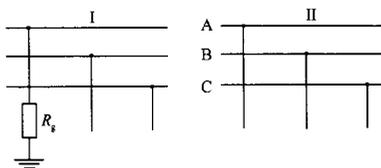


图 4 单相接地点示意图

Fig.4 Sketch map of single phase to earth fault

从图 4 中可以推导出，双回线 A-G 故障用环流量表示的边界条件为：

$$i_{DAf} = i_{Aaf} / 2; i_{DBf} = 0; i_{DCf} = 0 \quad (5)$$

如果令 M 端的 A 相环流电流为 i_{DMA} ，结合式(5)与式(4)可得：

$$i_{Aaf} = 2i_{DAf} = 2\left(\frac{l}{l-x}\right) i_{DMA} \quad (6)$$

2) 单回线相间故障

这里以 I 回线的 AB-G 为例，讨论故障电流和环流电流的关系。如图 5 所示：

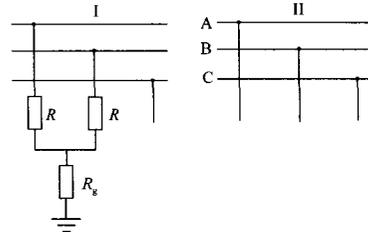


图 5 相间故障边界条件

Fig.5 Boundary conditions of phase to phase fault

从图 5 中可以推导出，双回线 AB-G 故障用环流量表示的边界条件为：

$$i_{DAf} = i_{Aaf} / 2; i_{DBf} = i_{Bbf} / 2; i_{DCf} = 0 \quad (7)$$

如果令 M 端的 A 相环流电流为 i_{DMA} ，B 相环流电流为 i_{DMB} ，结合式(7)与式(4)可得：

$$i_f = (i_{Aaf} - i_{Bbf}) = 2(i_{DAf} - i_{DBf}) = 2\left(\frac{l}{l-x}\right) (i_{DMA} - i_{DMB}) \quad (8)$$

3) 单回线三相故障

三相故障时，可求出任意一相的对地电流，每相电流的求法同前面的单回线单相故障。

3 故障定位原理

单端故障定位算法需要选相配合，根据故障环来确定故障定位的电路方程，进而实现故障定位。前述第1节给出了沿线电压分布的计算方法，第2节给出了故障点电流的计算方法，在已知沿线电压分布和故障点电流的情况下，就可以根据故障支路电压电流的关系实现故障定位。如下讨论单回线各种故障定位原理。

1) 单回线单相故障

以 I 回线的 A-G 为例讨论故障定位原理。根据图 4 和式(1)很容易写出如下故障定位方程：

$$i_{Aaf} R_g = u_A - x \cdot [i_{IA} R_s + R_m (i_{IB} + i_{IC}) + R'_m (i_{IIA} + i_{IIB} + i_{IIC})] - x \cdot \left[L_s \frac{di_{IA}}{dt} + L_m \left(\frac{d(i_{IB} + i_{IC})}{dt} \right) + L'_m \left(\frac{d(i_{IIA} + i_{IIB} + i_{IIC})}{dt} \right) \right] \quad (9)$$

如果令： $R_1 = R_s - R_m$ ， $L_1 = L_s - L_m$ ， $K'_R = R_m / R_1$ ， $K''_R = R_m / R_1$ ， $K'_L = L_m / L_1$ ， $K''_L = L'_m / L_1$ ， $i_{I0} = (i_{IA} + i_{IB} + i_{IC}) / 3$ ， $i_{II0} = (i_{IIA} +$

$i_{IB} + i_{IC})/3$ 。则式(9)可以简化为:

$$i_{IA}R_g = u_A - x \cdot R_1 \cdot (i_{IA} + K'_R \cdot i_{I0} + K''_R \cdot i_{I10}) - x \cdot L_1 \frac{d(i_{IA} + K'_L \cdot i_{I0} + K''_L \cdot i_{I10})}{dt} \quad (10)$$

由式(6)和式(10)可以得到如下的故障定位方程:

$$u_A = x \cdot R_1 \cdot (i_{IA} + K'_R \cdot i_{I0} + K''_R \cdot i_{I10}) + x \cdot L_1 \frac{d(i_{IA} + K'_L \cdot i_{I0} + K''_L \cdot i_{I10})}{dt} + i_{DMA}R'_g \quad (11)$$

其中: $R'_g = 2(\frac{l}{l-x})R_g$, 则式(11)的离散形式为:

$$u_A(k) = x \cdot u_{sum}(k) + i_{DMA}(k)R'_g \quad (12)$$

其中:

$$u_{sum}(k) = R_1 \cdot [i_{IA}(k) + K'_R \cdot i_{I0}(k) + K''_R \cdot i_{I10}(k)] + [(i_{IA}(k+1) + K'_L \cdot i_{I0}(k+1) + K''_L \cdot i_{I10}(k+1)) - (i_{IA}(k-1) + K'_L \cdot i_{I0}(k-1) + K''_L \cdot i_{I10}(k-1))] \frac{L_1}{2\Delta T}$$

为了估计 x 和 R'_g 的数值, 构造误差函数:

$$J = \sum_{k=1}^N (u_A(k) - x \cdot u_{sum}(k) - i_{DMA}(k)R'_g)^2 \quad (13)$$

其中: N 为设定的数据窗内采样点的个数。

使得式(13)取最小值所对应的估计值 \hat{x} 和 \hat{R}'_g 即为最小二乘解^[15,16]:

$$\hat{x} = \frac{\sum_{k=1}^N i_{DMA}^2(k) \sum_{k=1}^N u_A(k) u_{sum}(k) - \sum_{k=1}^N u_A(k) i_{DMA}(k) \sum_{k=1}^N u_{sum}(k) i_{DMA}(k)}{\sum_{k=1}^N u_{sum}^2(k) \sum_{k=1}^N i_{DMA}^2(k) - (\sum_{k=1}^N u_{sum}(k) i_{DMA}(k))^2}$$

$$\hat{R}'_g = \frac{\sum_{k=1}^N u_A(k) i_{DMA}(k) \sum_{k=1}^N u_{sum}^2(k) - \sum_{k=1}^N u_A(k) u_{sum}(k) \sum_{k=1}^N i_{DMA}(k) u_{sum}(k)}{\sum_{k=1}^N u_{sum}^2(k) \sum_{k=1}^N i_{DMA}^2(k) - (\sum_{k=1}^N u_{sum}(k) i_{DMA}(k))^2}$$

另外, 抗差最小二乘法将有助于定位精度的进一步提高, 参考文献[17,18]。在已知故障距离的情况下, 真实的过渡电阻可以通过下式计算得到:

$$R_g = \frac{l-x}{2l} R'_g \quad (14)$$

2) 单回线相间故障

这里以回线 I 的 AB-G 故障为例讨论定位原理。根据图5和式(1)、式(12)很容易写出如下方程组:

$$\begin{cases} u_{rA} = u_A - x \cdot R_1 \cdot (i_{IA} + K'_R \cdot i_{I0} + K''_R \cdot i_{I10}) - x \cdot L_1 \frac{d(i_{IA} + K'_L \cdot i_{I0} + K''_L \cdot i_{I10})}{dt} - i_{IA}R \\ u_{rB} = u_B - x \cdot R_1 \cdot (i_{IB} + K'_R \cdot i_{I0} + K''_R \cdot i_{I10}) - x \cdot L_1 \frac{d(i_{IB} + K'_L \cdot i_{I0} + K''_L \cdot i_{I10})}{dt} - i_{IB}R \end{cases} \quad (15)$$

方程组中两式之差为:

$$u_A - u_B = x \cdot R_1 \cdot (i_{IA} - i_{IB}) + x \cdot L_1 \frac{d(i_{IA} - i_{IB})}{dt} + (i_{IA} - i_{IB})R \quad (16)$$

将式(8)代入式(16)可得:

$$u_A - u_B = x \cdot R_1 \cdot (i_{IA} - i_{IB}) + x \cdot L_1 \frac{d(i_{IA} - i_{IB})}{dt} + (i_{DMA} - i_{DMB})R' \quad (17)$$

其中: $R' = 2(\frac{l}{l-x})R$

通过式(17)构造最小二乘算法, 求出最小二乘

意义下的故障距离 x 和电阻 R'_g 。进而求出过渡电阻的实际值。

3) 单回线三相故障

单回线三相故障时, 任意相的故障环都可以作为故障定位的故障环。因此, 三相故障时的故障定位完全同单相故障, 不再赘述。

4 仿真分析

本节采用如图6所示的仿真模型: 500 kV 双电源系统, 线路全长 300 km, 中间 240 km 为同杆双回线。用 ATP 得到仿真数据, 用 Matlab 进行测距计算。系统等效参数和线路参数如下:

系统等效参数:

M 端: 正序阻抗: $Z_{m1} = j60.00 \Omega$,

零序阻抗: $Z_{m0} = j46.80 \Omega$;

N 端: 正序阻抗: $Z_{n1} = j45.20 \Omega$,

零序阻抗: $Z_{n0} = j22.01 \Omega$;

单回线线参数:

正序参数: $r_1 = 0.027 \Omega/\text{km}$, $\omega_1 = 0.303 \Omega/\text{km}$,

$\omega x_1 = 4.27 \times 10^{-6} \text{ S/km}$

零序参数: $r_0 = 0.196 \Omega/\text{km}$, $\omega_0 = 0.695 \Omega/\text{km}$,

$\omega x_0 = 2.88 \times 10^{-6} \text{ S/km}$

两回线间互阻抗参数:

$r'_m = 0.064 \Omega/\text{km}$, $\omega'_m = 0.131 \Omega/\text{km}$

$\omega x'_m = 0.467 \times 10^{-6} \text{ S/km}$

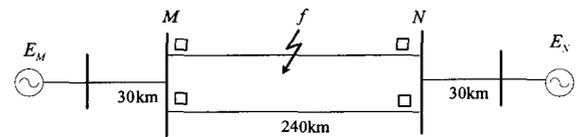


图6 双回线系统仿真模型

Fig.6 Simulation model

仿真中采样频率 10 kHz; 数据窗长度选为 10 ms; 所给的故障距离是以 M 侧为起点。考虑到算法是基于集中参数模型, 而仿真数据来源于分布参数模型, 因此, 在用暂态数据进行故障定位时, 对数据进行了低通滤波处理。

为了全面考核算法的性能, 表 1 给出了全线范围内, 不同过渡电阻下的单相故障, 用故障暂态和故障稳态数据的定位结果。故障时, 故障相的相角为 90° , M 端电源超前 N 端电源为 30° 。在故障定位前, 对暂态数据进行处理方式分别是: 无处理、经过截止频率为 50 Hz、150 Hz、250 Hz、350 Hz 的低通滤波器、经过基波相量滤波器。

表 1 单相接地故障定位结果

Tab.1 Location results of single phase to earth faults

故障距离/km	过渡电阻/ Ω	暂态故障定位结果/km						稳态故障定位结果/km
		无处理	50Hz	150Hz	250Hz	350Hz	相量	
10	0	8.729	10.124	10.002	9.949	9.944	10.176	10.022
	100	9.468	10.040	10.018	10.050	10.070	10.057	10.052
	200	6.008	10.068	10.032	10.062	10.110	10.083	10.086
50	0	38.217	49.749	49.874	49.974	50.937	49.820	50.121
	100	50.045	50.293	50.330	50.349	50.354	50.043	50.208
	200	49.100	51.427	51.201	51.282	51.274	50.556	50.291
100	0	53.591	100.036	100.805	101.069	109.809	100.138	100.468
	100	94.748	101.366	101.746	101.792	101.817	101.426	100.380
	200	88.413	101.298	101.841	100.674	101.668	101.469	100.082
150	0	79.065	150.681	151.381	153.599	171.021	151.408	151.357
	100	127.278	150.113	149.948	149.853	149.908	150.523	150.387
	200	89.648	147.878	147.465	145.442	145.441	148.051	147.780
200	0	51.160	202.513	202.545	183.235	106.732	203.280	203.008
	100	111.605	201.335	206.122	203.363	203.195	200.511	198.288
	200	-209.272	169.610	170.767	147.983	147.774	168.756	168.771
230	0	35.834	236.496	238.406	191.706	80.501	236.698	234.290
	100	-105.995	100.980	123.743	122.625	122.466	159.983	218.856
	200	-797.803	947.419	524.094	194.758	197.485	628.535	295.077

注：定位结果不在范围内或误差过大都属于定位失败

由表 1 可得出如下结论：故障暂态数据不经滤波处理将导致定位失败；故障暂态数据经过相量滤波器和故障稳态数据的定位效果相同，它们在全线的三分之二范围内基本能够准确定位，而线路末端的高阻接地一般将定位失败。用暂态数据进行故障定位时，除了具有前面所说的线路末端高阻接地的定位效果较差外，还具有截止频率高于 250 Hz 时，金属性接地也会出现定位失败的现象，其原因在于前述的微分方程算法的有用信号为衰减直流分量和基波分量，截止频率距离基波频率太远时，高次谐波将导致定位失败。故此建议采用该算法时，低通滤波器的截止频率应略大于基频。

由表 2 给出了不同故障类型情况下故障定位结果，仿真条件同表 1，故障发生时，M 侧 A 相电源为 90° 。

表 2 不同故障类型的稳态故障定位结果

Tab.2 Location results of different fault types

故障距离/km	过渡电阻/ Ω	故障定位结果/km			
		A-G	BC	BC-G	ABC
100	0	100.468	101.206	100.208	100.964
	100	100.380	101.188	101.009	100.954
	200	100.082	101.009	100.730	100.624

注：BC-G 的过渡电阻指的是 B 相和 C 相分别对地的电阻；

ABC 的过渡电阻指的是三相分别的对地电阻。

表 2 表明，该算法适用于单回故障的所有故障类型。

5 结论

通过本端电流电压用微分方程计算双回线故障相的沿线电压分布，并根据故障边界条件推导出用本端环流电流表示故障电流。进而根据故障支路的电流电压的相关性进行故障定位。通过利用分布参数模型得到的故障数据进行计算的结果验证了此方法适用于单回线故障的所有故障类型，由于微分方

程算法是基于 R-L 模型的，所以，在用微分方程算法进行故障定位时，对故障暂态数据需要进行滤波处理，为了提高定位精确度，最好截止频率略高于基波频率。此方法的所需数据窗短，计算量小，因此可用于构造快速跳闸的距离保护元件。

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.127-315.
GE Yao-zhong. New Types of Protective Relaying and Fault Location Their Theory and Techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.127-315.
- [2] 索南加乐. 同杆双回线的故障分析及继电保护[D]. 西安: 西安交通大学, 1991.
SUONAN Jia-le. Fault Analysis and Protective Relaying of Double Circuit Lines on the Same Tower, Doctoral Dissertation[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1991.
- [3] 索南加乐, 葛耀中. 同杆双回线跨线故障的准确定位方法[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(3):1-9.
SUONAN Jia-le, GE Yao-zhong. A New Accurate Fault Locating Method of the Fault Between Two Lines on the Double Line on the Same Tower[J]. Proceedings of the CSEE, 1992, 12(3):1-9.
- [4] 李红巍. 一种实用的双回线测距方法[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(9):30-33.
LI Hong-wei. A Useful Algorithm for Fault Location of Parallel Transmission Lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(9):30-33.
- [5] Liao Y, Elangovan S. Digital Distance Relaying Algorithm for First-zone Protection for Parallel Transmission Lines[J]. IEE Proceedings-Gener, Transm and Distrib, 1998, 145(5): 531-536.
- [6] Zhang Q C, Zhang Y, Song W N. Fault Location of Two-parallel Transmission Line for Non-earth Fault Using One-terminal Data[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3):863-866.
- [7] Zhang Q C, Zhang Y, Song W N. Transmission Line Fault Location for Phase-to-earth Using One-terminal Data[J]. IEE Proceedings Gener, Transm and Distrib, 1999, 146(2):121-125.
- [8] Ahn Y J, Choi M S, Kang S H. An Accurate Fault Location Algorithm for Double-circuit Transmission Systems[A]. in: IEEE Power Engineering Society Summer Meeting[C]. 2000. 1344-1349.
- [9] Sheng L B, Elangovan S. A Fault Location Method for Parallel Transmission Lines[J]. Electrical Power and Energy Systems, 1999, 21(4): 253-259.
- [10] Saha M M, Wikstrom K, Lzykowski J. New Accurate Fault Location Algorithm for Parallel Lines[A]. in: IEE Seventh International Conference on DPSP[C]. 2001. 407-410.
- [11] 粟小华. 基于平行双回线单端实时数据的准确故障测距实用新方法[J]. 继电器, 2001, 29(5): 5-7.

(下转第 42 页 continued on page 42)

参考文献

- [1] Math H, Bollen J. Understanding Power Quality Problems, Voltage Sags and Interruptions[M]. New York: IEEE Press, 2000.
- [2] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
XIAO Xiang-ning. Analysis and Control of Power Quality [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [3] 刘连光, 贾文双, 肖湘宁, 等. 用小波变换和有效值算法实现电压凹陷的准确测量[J]. 电力系统自动化, 2003,27(11):30-33.
LIU Lian-guang, JIA Wen-shuang, XIAO Xiang-ning, et al. Measurement Method of Voltage Sag by Wavelet Transform and RMS Method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(11):30-33.
- [4] 肖湘宁, 徐永海, 刘连光. 考虑相位跳变的电压凹陷动态补偿控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2002,22(1):64-69.
XIAO Xiang-ning, XU Yong-hai, LIU Lian-guang. Research on Mitigation Methods of Voltage Sag with Phase-angle Jump[J]. Proceedings of the CSEE, 2002,22(1):64-69.
- [5] 杨亚飞, 颜湘武, 娄尧林. 一种新的电压骤降特征值检测方法[J]. 电力系统自动化, 2004,28(1):41-44.
YANG Ya-fei, YAN Xiang-wu, LOU Yao-lin. A New Method to Detect Voltage Sag Characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(1):41-44.
- [6] 袁川, 杨洪耕. 改进的电压凹陷特征量实时检测方法[J]. 继电器, 2005,33(11):57-60.
YUAN Chuan, YANG Hong-geng. The Advanced Method of Real-time Detection of Voltage Sag Characteristics[J]. Relay, 2005,33(11):57-60.
- [7] 刘兵, 阮江军, 罗湘, 等. 基于曲线拟合法的定制电力设备快速检测算法[J]. 电力自动化设备, 2007,27(9):55-58.
LIU Bing, RUAN Jiang-jun, LUO Xiang, et al. Fast Detection Algorithm Based on Curve Fitting Algorithm for Custom Power Device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007,27(9):55-58.

收稿日期: 2008-11-05; 修回日期: 2008-12-11

作者简介:

邱志(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量; E-mail: qiuuzhi713@yahoo.com.cn

韩富春(1954-), 男, 教授, 主要从事电力系统自动控制的研究;

任婷婷(1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量。

(上接第 38 页 continued from page 38)

- SU Xiao-hua. A New and Practical Method for Fault Location Based on Single-end Real Time Data in Paralleled Double Circuit line[J]. Relay, 2001,29(5):5-7.
- [12] 束洪春, 高峰, 李卫东. 利用单端工频量的高压输电线路故障测距实用方法研究[J]. 电工技术学报, 1998, 13(5):9-15.
SHU Hong-chun, GAO Feng, LI Wei-dong. A Practical Fault Location Algorithm for HV Transmission Line Using One End Data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1998, 13(5):9-15.
- [13] 索南加乐, 吴亚萍, 宋国兵. 基于分布参数的同杆双回线单线故障准确测距原理[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5):39-43.
SUONAN Jia-le, WU Ya-ping, SONG Guo-bing. New Accurate Fault Location Algorithm for Parallel Lines on the Same Tower Based on Distribute Parameter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5):39-43.
- [14] 索南加乐, 王树刚, 张超. 利用单端电流的同杆双回线准确故障定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23):25-30.
SUONAN Jia-le, WANG Shu-gang, ZHANG Chao. An Accurate Fault Location Algorithm for Parallel Transmission Lines Using One-terminal Current[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23):25-30.
- [15] 陈允平, 吴夙. 输电线路故障定位的最小二乘法实现法[J]. 电力系统自动化, 2004, 25(7):54-56.
CHEN Yun-ping, WU Su. Least Square Realization in Fault Location of Transmission Line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 25(7):54-56.
- [16] 黄彦全, 肖建. 最小二乘法在距离保护中的应用初探[J]. 继电器, 2004, 32(7):17-20.
HUANG Yan-quan, XIAO Jian. Primary Research of Implementing Least Squares in Digital Distance Relaying[J]. Relay, 2004, 32(7):17-20.
- [17] 李响, 刘玲群, 郭志忠. 抗差最小二乘法状态估计[J]. 继电器, 2003, 31(7):50-53.
LI Xiang, LIU Ling-qun, GUO Zhi-zhong. State Estimation with the Least Robustness Square Method[J]. Relay, 2003, 31(7):50-53.
- [18] 龚庆武, 钱峰. 基于抗差估计理论的输电线路故障定位新型算法[J]. 继电器, 2004, 32(20):13-16, 24.
GONG Qing-wu, QIAN Feng. A New Fault Location Algorithm for Transmission Line Based on Robust Estimation Theory[J]. Relay, 2004, 32(20):13-16, 24.

收稿日期: 2008-09-18; 修回日期: 2009-02-02

作者简介:

宋国兵(1972-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事电力系统继电保护领域的研究。E-mail: song.gb@163.com