

DOI: 10.7652/xjtuxb201306015

利用最小二乘拟合算法的三相重合闸永久性故障判别

梁振锋^{1,2}, 索南加乐¹, 康小宁¹, 宋国兵¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 西安理工大学水利水电学院, 710048, 西安)

摘要: 为解决单相接地永久性故障判别灵敏度不足的问题, 提出采用并联电抗器零模电流不同频率分量比值特征的三相自适应重合闸故障性质判别方法。通过分析单相接地故障时的并联电抗器零模电流, 发现不同故障性质情况下其自由振荡频率不同, 据此建立了包含衰减非周期分量及不同自由振荡频率分量的并联电抗器零模电流识别模型。当输电线路发生故障且两侧断路器跳开后, 将并联电抗器零模电流作为已知量, 利用最小二乘拟合算法求取其不同频率分量的幅值, 根据各频率分量电流幅值对比关系实现永久性故障判别。EMTP 仿真表明, 该方法适用于单端及双端带并联电抗器线路, 且不受过渡电阻、故障位置的影响, 灵敏度高。

关键词: 输电线路; 并联电抗器电流; 三相自适应重合闸; 自由振荡频率; 最小二乘拟合算法

中图分类号: TM762 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)06-0085-05

Permanent Faults Identification Using Least Squares Fitting Algorithm for Three-Phase Reclosure in Transmission Lines with Shunt Reactors

LIANG Zhenfeng^{1,2}, SUONAN Jiale¹, KANG Xiaoning¹, SONG Guobing¹

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

2. Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To heighten sensitivity of permanent fault identification for single-phase-to-ground fault, a three-phase adaptive reclosure in transmission lines with shunt reactors is developed. It is found that the shunt reactor zero modal current gets with different free oscillation frequencies in transient fault or permanent fault in the case of single-phase-to-ground. An identification model of shunt reactor zero-modal current is established, which includes decaying DC component and two frequency components corresponding to transient fault and permanent fault. Once the single-phase-to-ground fault occurs and circuit breakers open, each frequency component is obtained by least square fitting, where shunt reactor zero-modal current is available. The amplitudes of various frequency components are adopted to distinguish the permanent faults from transient faults. EMTP simulation shows that the proposed scheme is of higher sensitivity and freedom from the influences of transient resistance and fault position in permanent faults identification for transmission lines with shunt reactors.

Keywords: transmission line; current of shunt reactors; three-phase adaptive reclosure; free oscillation frequency; least square fitting

输电线路采用自动重合闸能够提高供电可靠性和系统并列运行稳定性,经济效益显著。但是,重合失败,即重合于永久性故障会对系统稳定和设备安全造成不利影响。自适应重合闸能够避免重合于永久性故障,因此研究自适应重合闸具有重要意义^[1-3]。

北美地区电网发展成熟,系统间联系比较紧密,输电线路广泛采用三相重合闸方式^[4-5]。随着我国电网网架结构的逐渐增强,三相重合闸也将在我国超高压、特高压输电线路得以应用,因此应开展三相重合闸永久性故障判别方法的研究。文献[6]利用输电线路高频保护的高频信号传输特性实现三相重合闸故障性质判别,但当输电线路未采用高频通道时,该方法将失效。文献[7-8]基于自振电压幅值特性实现永久性故障判别,这些方法依赖线路侧的电压互感器,判别结果可靠性差。另外,文献[6-7]方法未考虑单相接地故障的情况。

在超高压、特高压输电线路中,一般装有并联电抗器。为并联电抗器保护装设的电流互感器在一次电流较小时测量误差小。据此,文献[9-11]利用并联电抗器电流实现三相重合闸故障性质判别。文献[9-10]以输电线路 π 模型或T模型为参考模型,通过识别并联电抗器电感参数或线路电容参数判别故障性质,但对发生概率最大的单相接地故障,这些方法的灵敏度均较低,甚至无法实现有效判别。文献[11]利用电流差动原理实现三相重合闸永久性故障判别,方法只适用于两端带并联电抗器的线路,且需要通信通道。

本文针对单相接地故障,分析了不同故障性质时并联电抗器零模电流的自由振荡频率。当发生瞬时性故障时,故障点电弧熄灭,零模网络和线模网络解耦,此时并联电抗器零模分量电流自由振荡频率为零模网络固有频率。当发生永久性故障时,零模网络和线模网络相互耦合,受线模网络的影响,并联电抗器零模分量电流自由振荡频率与零模网络固有频率不同。因此,本文利用最小二乘拟合算法计算并联电抗器零模分量电流的不同频率分量,实现三相重合闸故障性质判别。EMTP 仿真表明,该方法灵敏度高,发生单相接地故障时能有效识别故障性质。

1 不同故障性质时并联电抗器零模电流的频率特性

1.1 输电线路的固有频率

带并联电抗器线路采用三相重合闸,保护动作

跳开两侧断路器后,线路电容与并联电抗器形成自由振荡回路,振荡频率为固有频率^[12-13]。

本文首先利用 Karrenbauer 变换解耦三相线路,得到线模网络和零模网络,如图 1 所示。设零模网络固有频率主频为 $f_{0\text{nat}}$,线模网络固有频率主频为 $f_{1\text{nat}}$,由于二者参数不同,因此 $f_{0\text{nat}} \neq f_{1\text{nat}}$ 。

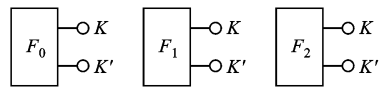


图 1 模分量网络图

1.2 瞬时性故障特性分析

对于瞬时性故障,故障点电弧熄灭,零模网络与线模网络停止能量交换,零模网络和线模网络各自独立自由振荡,则并联电抗器零模电流的自由振荡频率 $f_1 = f_{0\text{nat}}$ 。

1.3 永久性故障特性分析

若故障点电弧未熄灭,即永久性故障,零模网络与线模网络将通过故障端口进行能量交换,零模网络与线模网络之间的连接如图 2 所示。对于零模分量网络 F_0 ,线模分量网络 F_1 和 F_2 相当于“外部电源”。由于 $f_{0\text{nat}} \neq f_{1\text{nat}}$,并联电抗器零模电流的自由振荡频率 $f_2 \neq f_{0\text{nat}}$ 。

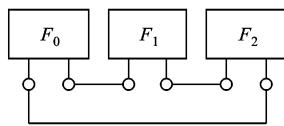


图 2 故障点电弧未熄灭时模分量网络连接图

2 数据处理方法及判据

2.1 f_1 和 f_2 的获取

理论上可通过建立输电线路的 Laplace 等效电路,建立电路方程来求解 f_1 和 f_2 ,但由于超高压、特高压输电线路的分布参数特性,用简化等效网络计算固有频率存在误差,尤其在发生永久性故障时,零模网络与线模网络相互耦合,方程非常复杂。因此,本文利用矩阵束算法分析不同情况下的并联电抗器零模电流以获取 f_1 和 f_2 。具体做法是,通过仿真或现场录波方式获取不同情况下并联电抗器零模电流,然后利用低通滤波器(截止频率为 100 Hz)滤除并联电抗器零模电流中的高频分量,进而利用矩阵束算法求得并联电抗器零模电流中各分量的频率、幅值,其中幅值最大的分量对应的频率即为待求频率量。通过分析正常运行时跳开线路两侧三相断路器后的并

联电抗器零模电流获得 f_1 ,通过分析不同故障点发生单相永久性故障时的并联电抗器零模电流,计算所得频率的算术平均值获得 f_2 。本文利用 EMTP 进行了各种情况的仿真,求得了 f_1 和 f_2 。经仿真可知, f_2 几乎不受故障位置的影响。对于附录 A 中图 A1 所示线路, $f_1 = 25.989 \text{ Hz}$, $f_2 = 27.256 \text{ Hz}$;对于附录 A 中图 A2 所示线路, $f_1 = 41.917 \text{ Hz}$, $f_2 = 42.548 \text{ Hz}$ 。

2.2 最小二乘拟合算法模型

为了判别故障性质,建立并联电抗器零模电流模型如下

$$i_0(t) = Ie^{-\frac{t}{T}} + I_1 e^{-\frac{t}{T_1}} \sin(\omega_1 t + \theta_1) + I_2 e^{-\frac{t}{T_2}} \sin(\omega_2 t + \theta_2) \quad (1)$$

式中: $t=0$ 为线路两侧断路器跳开时刻; $\omega_1 = 2\pi f_1$; $\omega_2 = 2\pi f_2$; I 为 $t=0$ 时的直流分量幅值; T 为直流分量衰减时间常数; I_1 为 $t=0$ 时频率为 f_1 的自由振荡分量幅值; T_1 、 θ_1 为 I_1 分量的衰减时间常数和初相位; I_2 为 $t=0$ 时的频率为 f_2 的自由振荡分量幅值; T_2 、 θ_2 为 I_2 分量的衰减时间常数和初相位。

对于超高压、特高压输电线路,两侧断路器跳开后,并联电抗器电流中的直流分量衰减较快,因此可用 $1 - \frac{t}{T}$ 代替 $e^{-\frac{t}{T}}$ 。另外,两侧断路器跳开后,超高压、特高压线路中的自由振荡分量衰减较慢,时间常数较大,则 $e^{-\frac{t}{T_1}}$ 、 $e^{-\frac{t}{T_2}}$ 可近似取 1。因此,式(1)可简化为

$$\begin{aligned} i_0(t) = & I - I \frac{t}{T} + I_1 \sin(\omega_1 t + \theta_1) + I_2 \sin(\omega_2 t + \theta_2) = \\ & I - I \frac{t}{T} + I_1 \sin\omega_1 t \cos\theta_1 + I_1 \cos\omega_1 t \sin\theta_1 + \\ & I_2 \sin\omega_2 t \cos\theta_2 + I_2 \cos\omega_2 t \sin\theta_2 \end{aligned} \quad (2)$$

将线路两端跳闸后的并联电抗器零模电流 i_0 的 N 个采样值代入式(2),可构成 N 个方程,表示成矩阵形式为

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B} \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \sin\omega_1 t_1 & \cos\omega_1 t_1 & \sin\omega_2 t_1 & \cos\omega_2 t_1 \\ 1 & t_2 & \sin\omega_1 t_2 & \cos\omega_1 t_2 & \sin\omega_2 t_2 & \cos\omega_2 t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_N & \sin\omega_1 t_N & \cos\omega_1 t_N & \sin\omega_2 t_N & \cos\omega_2 t_N \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = [I, -I \frac{t}{T}, I_1 \cos\theta_1, I_1 \sin\theta_1, I_2 \cos\theta_2, I_2 \sin\theta_2]^T$$

$$\mathbf{B} = [i_0(t_1), i_0(t_2), \dots, i_0(t_N)]^T$$

式中: $\mathbf{A}$ 为系数矩阵,可离线计算完成; $\mathbf{X}$ 为待求参数矩阵,包含 6 个待求参数; $\mathbf{B}$ 为常数矩阵,由对应的电流 i_0 的采样值构成。理论上, $\mathbf{X}$ 中的参数可由 6 个独立的线性方程完成,但为了提高计算精度,采用最小二乘拟合算法,即 $N > 6$ 。 $\mathbf{X}$ 可由下式求取

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^+ \mathbf{B} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{A}^+$ 为广义逆矩阵。

根据第 1 节的分析,当故障点电弧尚未熄灭,即发生永久性故障时,并联电抗器零模电流 i_0 的采样值满足

$$i_0(t) = I - I \frac{t}{T} + I_2 \sin(\omega_2 t + \theta_2) \quad (5)$$

即发生永久性故障时,理论上利用式(4)计算得到的 $I_1 = 0$, $I_2 \neq 0$,则 $I_2 > I_1$ 。

当故障点电弧熄灭,即发生瞬时性故障时,并联电抗器零模电流 i_0 的采样值满足

$$i_0(t) = I - I \frac{t}{T} + I_1 \sin(\omega_1 t + \theta_1) \quad (6)$$

即发生瞬时性故障时,理论上利用式(4)计算得到的 $I_2 = 0$, $I_1 \neq 0$,则 $I_2 < I_1$ 。

2.3 数据处理

由于超高压、特高压输电线路的分布参数特性,在两侧断路器跳开后的暂态过程中,并联电抗器零模电流包含有高频分量,会影响到计算精度。因此,本文首先利用低通滤波器滤除并联电抗器零模电流中的高频分量。本文方法的数据窗选择为 20 ms,即 $N=40$ 。线路两侧断路器跳开后,利用式(4)计算得到序列 $I_1(k)$ 、 $I_2(k)$ 。

需要指出的是,自适应重合闸故障性质判别的实时性要求远低于继电保护。因此,在实际应用中,若保护装置的计算速度不能满足本文方法的要求时,可选择若干个采样周期计算一次。

2.4 判据

得到 $I_1(k)$ 、 $I_2(k)$ 后,可用下式

$$I_2 > I_1 \quad (7)$$

实现瞬时性故障与永久性故障的判别。两侧断路器跳开后,若式(7)连续多次成立,即判为永久性故障,否则判为瞬时性故障。

3 仿真实验

利用 EMTP 建立附录 A 中图 A1 和图 A2 所示的仿真系统并进行仿真实验。其中,采样频率取 2 kHz,假定系统在 40 ms 时刻发生单相接地故障,故障后 100 ms 三相断路器跳开,瞬时性故障二次电

弧熄灭。

图 3、图 4 分别给出了单端及双端带并联电抗器线路距 M 端 200 km 处发生单相接地故障时不同频率分量的仿真结果。由图 3、图 4 可知:线路发生单相接地故障且两侧断路器跳开后,若为瞬时性故障,并联电抗器零模电流中频率为 f_1 的分量 I_1 远

大于频率为 f_2 的分量 I_2 ;反之,若为永久性故障, I_2 将远大于 I_1 。不同故障性质差别明显,能够实现故障性质判别。

为了验证判据的适用性,表 1~表 3 分别给出了单端及双端带并联电抗器线路的仿真结果。表中故障位置以故障点距 M 端距离占线路全长的百分比来表示,各频率分量的计算结果为式(4)300 ms 时刻的计算值。

由表 1~表 3 可知,对于单端及双端带并联电
表 1 单端带并联电抗器线路的仿真结果

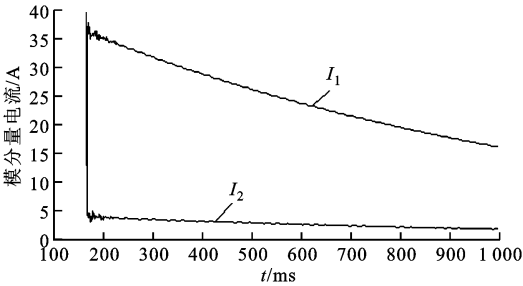
故障位置/%	过渡电阻/ Ω	瞬时性故障		永久性故障	
		I_1 /A	I_2 /A	I_1 /A	I_2 /A
0	0.1	32.49	4.45	4.35	39.82
	300	9.20	0.63	3.91	27.88
25	0.1	27.37	2.90	2.20	22.80
	300	40.83	4.48	5.12	41.52
50	0.1	34.70	4.56	3.43	38.08
	300	41.52	4.31	4.81	41.66
75	0.1	31.64	3.45	3.11	36.19
	300	40.15	4.40	4.78	41.83
100	0.1	51.86	6.09	5.16	54.55
	300	28.61	3.31	5.07	43.14

表 2 双端带并联电抗器线路 M 端仿真结果

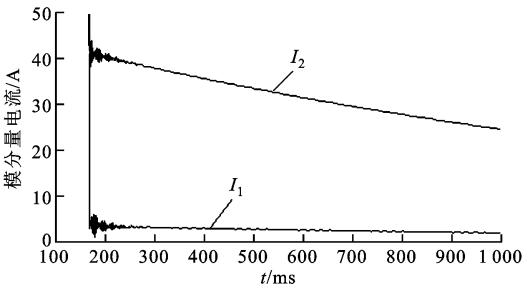
故障位置/%	过渡电阻/ Ω	瞬时性故障		永久性故障	
		I_1 /A	I_2 /A	I_1 /A	I_2 /A
0	0.1	44.564	6.690	10.725	74.335
	300	24.195	4.426	12.635	86.258
25	0.1	84.859	13.162	9.488	89.660
	300	15.418	2.386	10.414	89.199
50	0.1	89.541	13.247	8.977	94.934
	300	15.161	2.147	9.698	91.003

表 3 双端带并联电抗器线路 N 端仿真结果

故障位置/%	过渡电阻/ Ω	瞬时性故障		永久性故障	
		I_1 /A	I_2 /A	I_1 /A	I_2 /A
0	0.1	45.556	5.141	10.305	80.020
	300	24.213	4.426	12.648	86.484
25	0.1	84.849	13.073	9.486	89.941
	300	15.509	2.397	10.408	89.307
50	0.1	89.781	13.317	9.126	94.774
	300	15.232	2.171	9.725	90.947

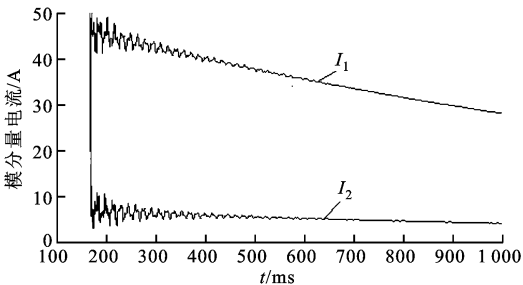


(a)瞬时性故障

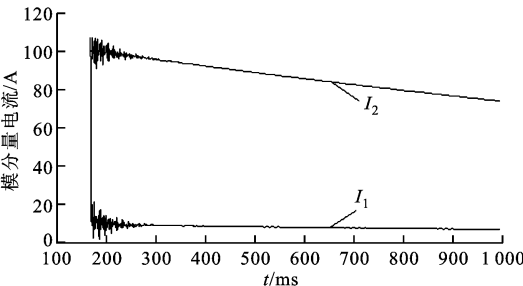


(b)永久性故障

图 3 单端带并联电抗器输电线路仿真结果



(a)瞬时性故障



(b)永久性故障

图 4 双端带并联电抗器输电线路 M 端的仿真结果

抗器线路,发生瞬时性故障时 I_1 均远大于 I_2 , 而发生永久性故障时刚好相反, I_2 均远大于 I_1 。因此,在不同故障位置及过渡电阻情况下,本文方法均能可靠判别故障性质。另外,对于双端带并联电抗器线路,利用单端并联电抗器电流信息即可判别故障性质,而不需要对侧信息。

4 结 论

针对单相接地故障,本文通过最小二乘拟合算法计算不同频率分量,实现三相重合闸故障性质判别。该方法具有以下特点。

(1)线路两侧三相断路器跳开后,不同故障性质下,并联电抗器零模电流的频率明显不同,据此可实现永久性故障判别。

(2)本文方法灵敏度高,不同故障位置及过渡电阻均有效,不存在死区或判别无效的情况。

(3)实例仿真表明,本文方法不仅适用于单端带并联电抗器线路,也适用于双端带并联电抗器线路。

附录 A

(1)单端带并联电抗器线路的双电源系统如图 A1 所示。线路参数: $R_1 = 0.027 \Omega/\text{km}$, $R_0 = 0.1957 \Omega/\text{km}$, $L_1 = 0.9651 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$, $L_0 = 2.2110 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$, $C_1 = 1.36 \times 10^{-8} \text{ F}/\text{km}$, $C_0 = 9.2 \times 10^{-9} \text{ F}/\text{km}$ 。并联电抗器电感 $L_{n1} = 6.4203 \text{ H}$, 中性点小电抗电感 $L_{n0} = 1.7507 \text{ H}$ 。

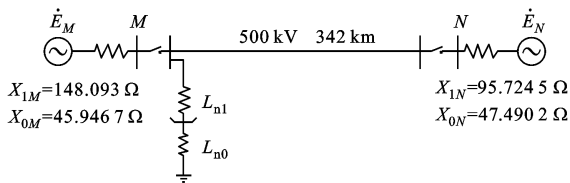


图 A1 单端带并联电抗器线路系统

(2)双端带并联电抗器线路的双电源系统如图 A2 所示。线路参数: $R_1 = 0.0195 \Omega/\text{km}$, $R_0 = 0.1675 \Omega/\text{km}$, $L_1 = 0.9134 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$, $L_0 = 2.719 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$, $C_1 = 1.4 \times 10^{-8} \text{ F}/\text{km}$, $C_0 = 8.34 \times 10^{-9} \text{ F}/\text{km}$ 。并联电抗器电感 $L_{n1} = 5.3494 \text{ H}$,

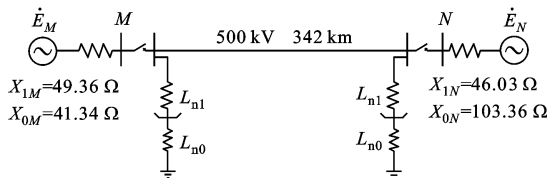


图 A2 双端带并联电抗器输电系统

中性点小电抗电感 $L_{n0} = 1.3815 \text{ H}$ 。

参考文献:

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 380-381.
- [2] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 146-152
- [3] 宋国兵, 索南加乐, 孙丹丹. 输电线路永久性故障判别方法综述 [J]. 电网技术, 2006, 30(18): 75-80. SONG Guobing, SUONAN Jiale, SUN Dandan. A survey on methods to distinguish permanent faults from instantaneous faults in transmission lines [J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 75-80.
- [4] IEEE Power Engineering Society. IEEE std C37. 104™-2002 IEEE guide for automatic reclosing of line circuit breakers for AC distribution and transmission lines [S]. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003.
- [5] 王梅义. 电网继电保护应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 105-108.
- [6] 李永丽, 李斌, 黄强, 等. 基于高频保护通道信号的三相自适应重合闸方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 74-79. LI Yongli, LI Bin, HUANG Qiang, et al. The study on three-phase adaptive reclosure based on carrier channel and signal transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 74-79.
- [7] 李永丽, 李博通. 带并联电抗器输电线路三相永久性和瞬时性故障的判别方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 82-90. LI Yongli, LI Botong. Identification of three-phase permanent or temporary fault at transmission lines with shunt reactors [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 82-90.
- [8] 葛耀中, 肖原. 超高压输电线路自适应三相自动重合闸 [J]. 电力自动化设备, 1995, 15(2): 10-18. GE Yaozhong, XIAO Yuan. Adaptive three phase autoreclosure of EHV transmission lines [J]. Electric Power Automation Equipment, 1995, 15(2): 10-18.
- [9] 索南加乐, 梁振锋, 宋国兵. 采用模量参数识别的三相重合闸永久性故障判别原理 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 81-86. SUONAN Jiale, LIANG Zhenfeng, SONG Guobing. Permanent faults identification based on mode component for three-phase autoreclosing on transmission lines with shunt reactors [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 81-86.

(下转第 96 页)