

带并联电抗器输电线路拍频电流幅值分析

钟高跃, 宋国兵, 王欢欢, 杨远航, 马志宾

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049)

摘要:目前在自适应单相重合闸中缺乏对拍频电流表达式、拍频电流是否一定存在及其幅值范围的研究。单相瞬时性故障消失后,拍频电流不存在或过小,都会影响重合闸判定的可靠性。拍频电流受健全相电压和故障消失后线路中元器件初始状态的影响,采用叠加原理得到完整的拍频电流表达式;通过分析表达式得出最小拍频电流及其出现的条件,分析出拍频电流为零属于小概率事件;拍频电流受故障时刻、故障持续时间、电弧电阻、电源相角差及故障位置等共同影响,使得不同工况下的拍频电流差异明显,若幅值过小,将会影响重合闸判定的可靠性。文中利用正交实验的方法给出某 500 kV 输电线路拍频电流幅值大小的范围,证明了在工程实践中可以用拍频电流实现自适应重合闸。

关键词:输电线路; 并联电抗器; 拍频电流; 幅值范围; 自适应重合闸

0 引言

为避免单相自动重合闸重合于永久性故障,葛耀中教授于 20 世纪 80 年代提出自适应重合闸概念^[1],其关键在于能有一种区分瞬时性和永久性故障的方法^[2-3],其中利用拍频特性判定故障性质的方法得到很多学者青睐^[4-5],但目前对其缺乏以下研究:一是拍频电流的表达式;二是故障消失后拍频电流是否一定存在;三是拍频电流的幅值范围。若拍频电流不存在或者过小,会严重影响永久性故障判别的可靠性。文献[6-7]通过仿真验证了可以用拍频特性作为重合闸判据;文献[8-12]给出了拍频电流频率的表达式,但未对幅值进行理论分析;文献[13]给出了拍频电压的表达式,但其将熄弧后元器件初值等效为恒定值,而实际中元器件初值是不确定的量,且忽略了对地电容和电感的初始储能;文献[14]给出了线路拍频电压的表达式,但只分析了相间静电耦合作用下的拍频电压,没有考虑元器件初值的作用;文献[15-16]给出了拍频电流的表达式,但没有考虑相间静电耦合作用下的拍频电流,且只考虑了电容的初始能量;文献[17]分析了拍频电压的表达式,但在处理元器件初始值上过于粗略,使得拍频分量表达式中没含有初始值;文献[18]给出求取拍频电压的方法,但该方法是针对判别三相永久性和瞬时性故障提出的。

本文分别从零状态和零输入响应入手,求取拍频电流的表达式,其中零状态响应是由健全相电压通过相间电容耦合作用激励,零输入响应由线路元器件初值激励;并探讨单相瞬时性故障消失后拍频电流是否一定存在;同时利用数理统计中正交实验的方法得出某 500 kV 输电线路拍频电流幅值的范围。由此填补拍频电流在该领域的空白,为拍频现象用于重合闸判据提供理论支撑。

1 并联电抗器拍频电流表达式

输电线路单相瞬时性故障消失后,并联电抗器中电流 i 包含 4 个分量:工频分量、低频分量(也称作拍频分量)、高频分量和直流分量,表达如下:

$$i = \sum_{k=1}^3 I_k \cos(\omega_k t + \varphi_k) + A e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (1)$$

式中: I_k, ω_k, φ_k 分别为工频($k=1$ 时)、低频($k=2$ 时)、高频($k=3$ 时)分量幅值、频率和相角; A, T_a 为直流分量的幅值和时间常数。

设拍频电流为 i_2 , 则 $i_2 = I_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$ 。带并联电抗器输电线路单相故障后电路如图 1 所示。图中: C_0 为对地电容; C_m 为相间电容; L 和 L_N 为并联电抗器和中性点小电抗; L_r 为线路电感; $u_{SMA}, u_{SMB}, u_{SMC}, u_{SNA}, u_{SNB}, u_{SNC}$ 分别为 M 和 N 端各相等效电压; $u_{SMA} = U_S \sin(\omega_1 t), u_{SNA} = U_S \sin(\omega_1 t - \delta), U_S$ 为等效电源有效值, $-\delta$ 为 N 端电源相角,也是两端电源相角差。

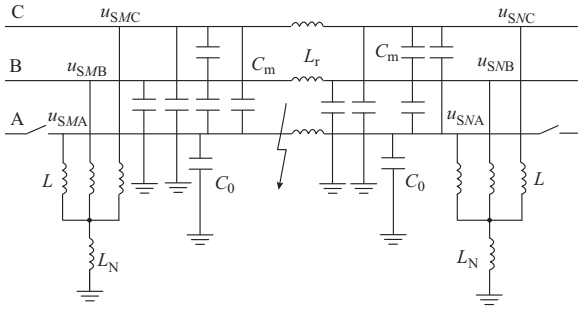


图1 输电线路单相故障等效图
Fig.1 Equivalent circuit diagram of transmission line with single-phase fault

拍频电流受相间电容耦合、相间互感耦合以及熄弧后元器件初值影响,由于相间互感耦合作用受负荷电流及故障位置的影响,一般比较小,故在以下分析中只考虑相间电容耦合及元件初值的影响。

单相(假设 A 相)瞬时性故障消失后, A 相拉普拉斯等值电路如图 2 所示。

$U_{SMB}(s), U_{SMC}(s)$ 与 $U_{SNB}(s), U_{SNC}(s)$ 分别为 M 端和 N 端的 B 相和 C 相等效电压的象函数; $I_{MA}(0_+), I_{MB}(0_+), I_{MC}(0_+), I_{MN}(0_+)$ 与 $I_{NA}(0_+), I_{NB}(0_+), I_{NC}(0_+), I_{NN}(0_+)$ 分别为 M 端和 N 端并联电抗器及中性点小电抗的初始电流值; $I_r(0_+)$ 为线路电感初始电流值; $U_{MB}(0_+), U_{MC}(0_+), U_M(0_+)$ 与 $U_{NB}(0_+), U_{NC}(0_+), U_N(0_+)$ 分别为 M 端和 N 端 BA 和 CA 相间电容以及对地电容的初始电压值。为便于求解拍频电流,根据叠加定理,将图 2 的全响应分解成零状态响应和零输入响应^[19]。下面分别从这两种响应入手求解对应的拍频电流的表达式。

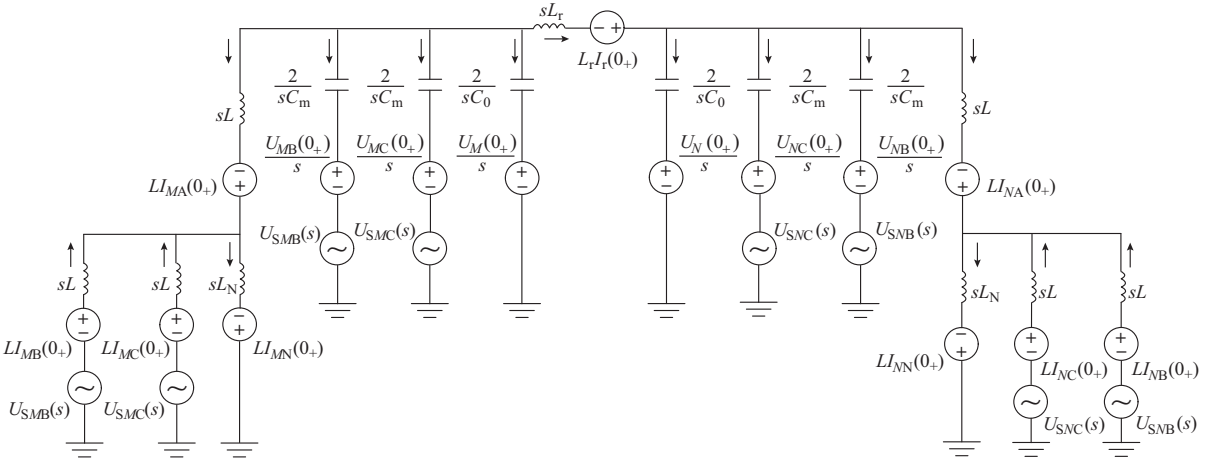


图2 全响应复频域电路模型
Fig.2 Complex frequency domain circuit model of complete response

1.1 零状态响应对应的拍频电流

由图 2 得零状态响应下的等效电路如图 3 所示。

根据戴维南及诺顿定理^[19]得化简后的电路如图 4 所示。

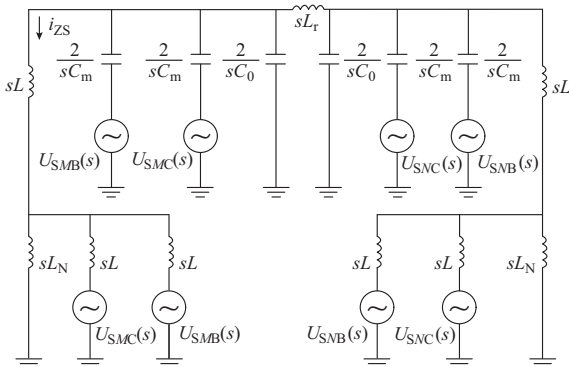


图3 零状态响应复频域电路模型
Fig.3 Complex frequency domain circuit model of zero-state response

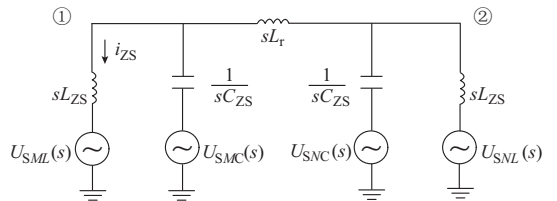


图4 化简后的零状态响应复频域电路模型
Fig.4 Complex frequency domain circuit model of complete response after simplification

图中: i_{zs} 为流过故障相并联电抗器的电流; $U_{SML}(s), U_{SNL}(s), U_{SMC}(s), U_{SNC}(s)$ 为等效电压源。等效电源及参数计算方法如下。

$$L_{zs} = \frac{L(L + 3L_N)}{L + 2L_N} \quad (2)$$

$$C_{ZS} = \frac{1}{2}(C_0 + 2C_m) \quad (3)$$

$$U_{SML}(s) = \frac{L_N}{L + 2L_N}(U_{SMB}(s) + U_{SMC}(s)) = \frac{L_N}{L + 2L_N} \left(-\frac{U_S}{s^2 + \omega_1^2} \omega_1 \right) \quad (4)$$

$$U_{SMC}(s) = \frac{C_m}{C_0 + 2C_m}(U_{SMB}(s) + U_{SMC}(s)) = \frac{C_m}{C_0 + 2C_m} \left(-\frac{U_S}{s^2 + \omega_1^2} \omega_1 \right) \quad (5)$$

$$U_{SNL}(s) = \frac{L_N}{L + 2L_N}(U_{SNB}(s) + U_{SNC}(s)) = \frac{L_N}{L + 2L_N} \frac{U_S}{s^2 + \omega_1^2} (s \sin \delta - \omega_1 \cos \delta) \quad (6)$$

$$U_{SNC}(s) = \frac{C_m}{C_0 + 2C_m}(U_{SNB}(s) + U_{SNC}(s)) = \frac{C_m}{C_0 + 2C_m} \frac{U_S}{s^2 + \omega_1^2} (s \sin \delta - \omega_1 \cos \delta) \quad (7)$$

对图 4 中节点 ①, ② 列节点电压方程 (见附录 A) 并联立式 (2) 至式 (7) 可求得并联电抗器上电流为:

$$I_{ZS}(s) = \frac{L_{ZS}[L_r U_{SNL}(s) + \frac{s^2 L_r L_{ZS} C_{ZS} U_{SNC}(s)}{(s^2 L_r L_{ZS} C_{ZS} + L_r)} + \frac{(s^2 L_r \cdot L_{ZS} C_{ZS} + 2L_{ZS} + L_r)[L_r U_{SML}(s) + \frac{s^2 L_r L_{ZS} C_{ZS} U_{SMC}(s)}{(s^2 L_r L_{ZS} C_{ZS} + L_r)}] - U_{SML}(s)}{s L_{ZS}}]}{s L_{ZS}(s^2 L_r L_{ZS} C_{ZS} + 2L_{ZS} + L_r)} \quad (8)$$

式 (8) 极点为 $s = 0, s = \pm \omega_1, s = \pm \frac{j}{\sqrt{L_{ZS} C_{ZS}}}$,

$s = \pm j \sqrt{\frac{2L_{ZS} + L_r}{L_r L_{ZS} C_{ZS}}}$, 分别对应直流分量、工频分量、拍频分量和高频分量。再结合式 (2) 至式 (7) 求得零状态响应下的拍频电流 i_{2_ZS} 的幅值、频率、相角分别为:

$$\begin{cases} I_{2_ZS} = \frac{1}{2} \frac{U_S}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \frac{L + 2L_N}{L(L + 3L_N)} \left(\frac{L_N}{L + 2L_N} - \frac{C_m}{C_0 + 2C_m} \right) \sqrt{[\omega_1(1 + \cos \delta)]^2 + (\omega_2 \sin \delta)^2} \\ \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_{ZS} C_{ZS}}} = \sqrt{\frac{L + 2L_N}{L(L + 3L_N)(0.5C_0 + C_m)}} \\ \theta_{ZS} = -\arctan \frac{\omega_2 \sin \delta}{\omega_1(1 + \cos \delta)} \end{cases} \quad (9)$$

则零状态响应对应的拍频电流表达式为:

$$i_{2_ZS} = I_{2_ZS} \cos(\omega_2 t + \theta_{ZS}) \quad (10)$$

1.2 零输入响应对应的拍频电流

由图 2 得零输入响应下的等效电路如图 5 所示。

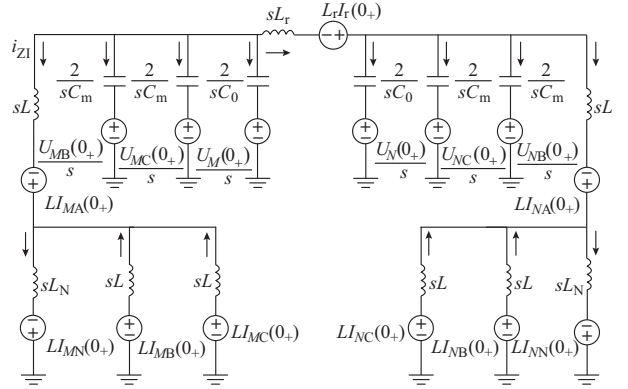


图 5 零输入响应复频域电路模型
Fig.5 Complex frequency domain circuit model of zero-input response

简化后的电路如图 6 所示。

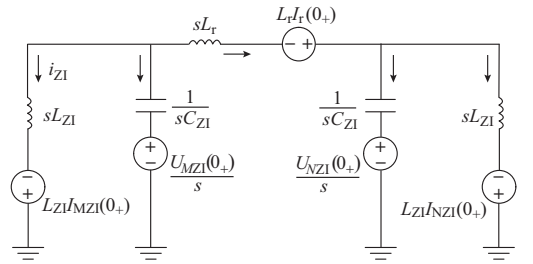


图 6 化简后的零输入响应复频域电路模型
Fig.6 Complex frequency domain circuit model of zero-input response after simplification

图中: i_{z1} 为流过故障相并联电抗器的电流; $I_{MZ1}(0_+), I_{NZ1}(0_+)$ 为等效电流源; $U_{MZ1}(0_+), U_{NZ1}(0_+)$ 为等效电压源; 等效电源及参数计算方法如下。

$$L_{Z1} = \frac{L(L + 3L_N)}{L + 2L_N} \quad (11)$$

$$C_{Z1} = \frac{1}{2}(C_0 + 2C_m) \quad (12)$$

$$I_{MZ1}(0_+) = \frac{1}{L_{Z1}} \left[L I_{MA}(0_+) + \frac{L L_N}{L + 2L_N} (I_{MN}(0_+) - I_{MB}(0_+) - I_{MC}(0_+)) \right] \quad (13)$$

又 $I_{MA}(0_+) = I_{MN}(0_+) - I_{MB}(0_+) - I_{MC}(0_+)$, 所以有:

$$I_{MZ1}(0_+) = I_{MA}(0_+) \quad (14)$$

同理有:

$$I_{NZ1}(0_+) = I_{NA}(0_+) \quad (15)$$

$$U_{MZI}(0_+) = \frac{C_m(U_{MB}(0_+) + U_{MC}(0_+)) + U_M(0_+)}{C_0 + 2C_m} \quad (16)$$

$$U_{NZI}(0_+) = \frac{C_m(U_{NB}(0_+) + U_{NC}(0_+)) + U_N(0_+)}{C_0 + 2C_m} \quad (17)$$

同求解零状态响应下拍频电流的方法,求得零输入响应对应的拍频电流 i_{2_ZI} 的幅值、频率和相角分别为:

$$\left\{ \begin{aligned} I_{2_ZI} &= \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{C_m(U_{MB} + U_{NB} + U_{MC} + U_{MC}) + \leftarrow}{C_0 + \leftarrow} \frac{C_0(U_M + U_N)}{2C_m} \right]^2 + (I_{MA}(0_+) + I_{NA}(0_+))^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \\ \omega_2 &= \frac{1}{\sqrt{L_{ZI}C_{ZI}}} = \sqrt{\frac{L + 2L_N}{L(L + 3L_N)(0.5C_0 + C_m)}} \\ \theta_{ZI} &= \arctan \left(\frac{\sqrt{\frac{C_{ZI}}{L_{ZI}}} \frac{C_m(U_{MB} + U_{NB} + U_{MC} + \leftarrow)}{(C_0 + 2C_m)(I_{MA}(0_+) + \leftarrow)} + \frac{U_{MC}}{I_{NA}(0_+)}}{\leftarrow} \right) \end{aligned} \right. \quad (18)$$

故零输入响应下的拍频电流表达式为:

$$i_{2_ZI} = I_{2_ZI} \cos(\omega_2 t + \theta_{ZI}) \quad (19)$$

从中看出,该幅值和相角由线路参数和单相瞬时性故障消失瞬间元器件初始储能共同决定,零输入响应下的拍频电流频率同零状态下的频率一样。

1.3 全响应下的拍频电流表达式

根据叠加定理,拍频电流 i_2 等于零状态响应和零输入响应对应下的电流之和,其完整表达式为:

$$\begin{aligned} i_2 &= i_{2_ZS} + i_{2_ZI} = I_{2_ZS} \cos(\omega_2 t + \theta_{ZS}) + \\ &I_{2_ZI} \cos(\omega_2 t + \theta_{ZI}) = (I_{2_ZS}^2 + I_{2_ZI}^2 + \\ &2I_{2_ZS}I_{2_ZI} \cos(\theta_{ZS} - \theta_{ZI}))^{\frac{1}{2}} \cos(\omega_2 t + \theta_2) \quad (20) \\ \theta_2 &= \arccos \frac{I_{2_ZS}}{\sqrt{I_{2_ZS}^2 + I_{2_ZI}^2 + 2I_{2_ZS}I_{2_ZI} \cos(\theta_{ZS} - \theta_{ZI})}} \quad (21) \end{aligned}$$

2 分析拍频电流幅值为零的可能性

2.1 拍频电流为零的理论分析

由第 1.3 节可知拍频电流的幅值表达式如下:

$$|i_2| = \sqrt{I_{2_ZS}^2 + I_{2_ZI}^2 + 2I_{2_ZS}I_{2_ZI} \cos(\theta_{ZS} - \theta_{ZI})} \quad (22)$$

进一步分析可得该幅值范围为:

$$|I_{2_ZS} - I_{2_ZI}| \leq |i_2| \leq |I_{2_ZS} + I_{2_ZI}| \quad (23)$$

当 $\theta_{ZS} - \theta_{ZI} = \pm(2n+1)180^\circ (n=0,1,\dots)$ 时:

$$|i_2| = |I_{2_ZS} - I_{2_ZI}|$$

当 $\theta_{ZS} - \theta_{ZI} = \pm(2n)180^\circ (n=0,1,\dots)$ 时:

$$|i_2| = |I_{2_ZS} + I_{2_ZI}|$$

经分析在以下 2 种情况拍频电流为零:①两端电源幅值相等,相位差 δ 为 180° ,两端系统等效阻抗相同,故障发生在线路中点。由于 $\delta = 180^\circ$,所以 $I_{2_ZS} = 0$;又在该条件下,线路两端并联电抗器电流相反,两端相间电容电压相反,两端对地电容电压相反,且由于流过两端断路器的电流相位差为 180° ,可实现同一时刻跳闸,使得两端元器件初值大小相等、正负相反,即实现 $I_{MA}(0_+) + I_{NA}(0_+) = 0$, $U_{MB}(0_+) + U_{NB}(0_+) = 0$, $U_{MC}(0_+) + U_{NC}(0_+) = 0$, $U_M(0_+) + U_N(0_+) = 0$,使得 I_{2_ZI} ,这样 i_2 就为零。②当 $\theta_{ZS} - \theta_{ZI} = \pm(2n+1)180^\circ (n=0,1,2,\dots)$,且 $I_{2_ZS} - I_{2_ZI} = 0$ 时, $i_2 = 0$ 。下面分析上述两种情况出现的概率。

第 1 种情况属于小概率事件,原因如下:首先,一般情况下相角差 δ 不会达到 180° ,除非系统发生振荡;其次,两端系统等效阻抗相同以及故障发生在线路中点均是小概率事件,而同时满足这几个条件的概率将更小。情况 2 既要求 $\theta_{ZS} - \theta_{ZI} = \pm(2n+1)180^\circ$,也要求 $I_{2_ZS} - I_{2_ZI} = 0$ 时,对一特定系统 θ_{ZS} 是一确定的值,而 θ_{ZI} 是由线路跳闸后元器件的初始值决定的,是一个随机的值,故实现 $\theta_{ZS} - \theta_{ZI} = \pm(2n+1)180^\circ$ 是一小概率事件,同理,实现 $I_{2_ZS} - I_{2_ZI} = 0$ 也是一小概率事件,而同时满足这两个条件的概率将更小。综合 2 种情况可知拍频电流幅值为零属于小概率事件。

2.2 仿真验证

以重庆市万县至龙泉 500 kV 电压等级的输电线路系统为例进行 PSCAD 仿真验证,验证第一种情况时拍频电流为零。线路参数如下:全长 358 km; $r_1 = 0.0195 \Omega/\text{km}$; $l_1 = 0.9134 \text{ mH}/\text{km}$, $l_0 = 2.719 \text{ mH}/\text{km}$; $C_1 = 0.014 \mu\text{F}/\text{km}$, $C_0 = 0.00834 \mu\text{F}/\text{km}$ 。M 侧电源参数: $\dot{E}_M = 1.00 \angle 0^\circ$, $L_{m1} = 0.1572 \text{ H}$ 。N 侧电源参数: $\dot{E}_N = 1.00 \angle -60^\circ$, $L_{n1} = 0.1466 \text{ H}$ 。

仿真参数设置:将 N 侧电源参数改为: $\dot{E}_N = 1.00 \angle -180^\circ$, $L_{n1} = 0.1572 \text{ H}$,从而使得相角差 $\delta = -180^\circ$,系统两边等效阻抗相同;设 A 相发生瞬时性故障,故障位置在线路中点,故障时间为 1.039 s,跳闸时间为 1.13 s,熄弧时刻为 1.198 s,故障持续时间 $\Delta t = 159 \text{ ms}$,过渡电阻 $R = 20 \Omega$ 。熄弧后电流及电压波形如图 7 所示。

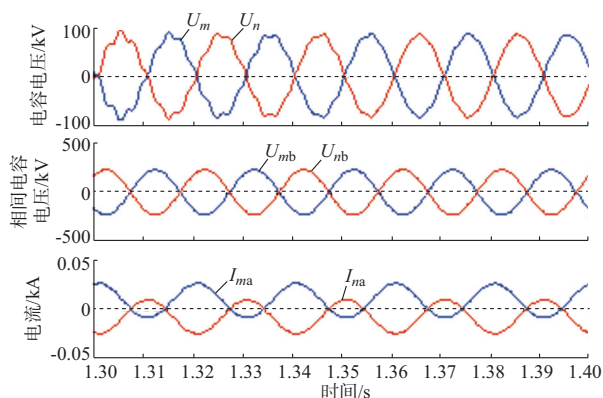


图7 线路两端电抗器电流及电容电压波形
Fig.7 Waveforms of the shunt reactor current and capacitor voltage on both ends of line

图中: U_m, U_n 分别为 A 相线路 M 端和 N 端对地电容电压; U_{mb}, U_{nb} 分别为 M 端和 N 端 BA 相相间电容电压; I_{ma}, I_{na} 分别为 M 端和 N 端故障相并联电抗器中电流。可以看出,在上述工况下故障线路两端对地电压相反,两端相间电压相反,两端并联电抗器中的电流相反,符合情况一对应的结果。对灭弧后流过电抗器的电流进行谐波检测得:工频分量幅值为 17.345 4 A;直流分量幅值 45.233 1 A;未检测到低频分量,故低频分量的幅值为零。由此证明了 2.1 节分析的正确性。

3 拍频电流的范围

由第 2 节可知,只有在特殊工况下拍频电流才为零,且上述工况为小概率事件,故不能以此认为拍频电流不能作为自适应重合闸判据。接下来探讨在一般的单相瞬时性故障后拍频电流的幅值范围,并分析拍频电流在该范围内能否有效用于自适应重合闸。

3.1 各个因素对拍频电流幅值的影响

由 1.3 节可知,对一特定系统,零状态响应对应的拍频电流是一确定的值;而零输入响应对应的拍频电流由熄弧后线路元件初值决定,是一个随机的值,受双端电源相角差 δ 、故障时刻 t 、故障持续时间 Δt (从发生故障到电弧熄灭的时间)、电弧电阻 R 以及故障位置系数 a (故障点到线路左端母线的距离占全长的比例) 等影响。电弧电阻考虑为常数,原因如下:一是本文研究的是电弧熄灭后线路并联电抗器中拍频电流情况,故电弧电阻采用常数还是非线性模型均不影响本文研究;二是拍频电流受熄弧后线路中元器件的初值影响,而元器件初值只与熄弧时刻有关。

下面用单一变量法分析各个因素对单相瞬时性故障消失后的拍频电流的影响。仍然以重庆市万县

至龙泉 500 kV 输电系统作为研究对象。当研究某一因素对拍频分量的影响时,其余变量按下述值保持不变。相角差 $\delta = -60^\circ$,故障位置系数 $a = 0.28$,电弧电阻 $R = 20 \Omega$;故障时间为 1.039 s,跳闸时间为 1.13 s,1.198 s 故障点消失(故障持续时间 $\Delta t = 0.159$ s)。采样从 1.93 s 到 2.03 s 的数据。试验结果如附录 B 图 B1 所示。图中纵坐标代表拍频电流幅值,可以看出,5 个因素中的任何一个变动都会影响拍频电流的大小。

3.2 拍频电流幅值的变化范围

前文指出拍频电流受线路元件初值影响,而在应用中很难确定这些初始电气量,原因如下:初值受 3.1 节所讲 5 个因素的影响,且每个因素对初值影响的规律很难把握;存在线路两端保护以不同时限切除故障的可能性;断路器跳开后,继续燃烧着的电弧继续改变线路电容和并联电抗器中的能量,进一步增加了线路初始储能的不确定性;这些因素造成了初始值的不确定性,因此无法做到定量计算分析。

因此,本文另辟蹊径,采用数理统计中正交试验的方法来解决这一问题。正交试验是利用正交表科学地安排试验,以较少的试验而取得较多较全面的信息。正交设计的基本特点是用部分试验来代替全面试验,通过对部分试验结果的分析,了解全面试验的情况。正交试验利用一套规格化的正交表安排试验,安排的试验具有均衡分布的特点,因此可以获得较全面的信息。例如,有 5 个因素,每个因素取 8 个水平,全面试验就需要 $8^5 = 327\ 68$ 个组合。而运用正交试验的方法只需要做 64 次试验。实践表明,正交试验是一种解决多因素试验问题的卓有成效的方法^[20]。仍以万县至龙泉 500 kV 线路单相瞬时性故障作为研究对象进行正交试验,各因素及其水平如表 1 所示。

表 1 试验因素及水平
Table 1 Test factors and levels

水平	因素				
	相角差 $\delta/(^\circ)$	故障位 置系数	过渡电 阻/ Ω	电弧持续 时/s	故障时 刻/s
1	30	0.1	0	0.042	1.002
2	35	0.2	30	0.084	1.004
3	40	0.3	60	0.126	1.006
4	45	0.4	90	0.168	1.008
5	50	0.5	120	0.210	1.010
6	55	0.6	150	0.252	1.012
7	60	0.7	180	0.294	1.014
8	65	0.8	210	0.336	1.016

注:本次正交试验为 5 因素 8 水平的试验,因此采用 9 因素 8 水平正交表,需要做试验 64 次;正交试验断路器均为故障发生 91 ms 后跳闸。

试验结果如图 8 所示。

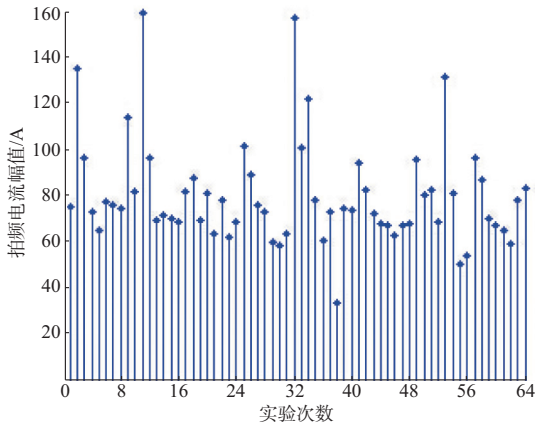


图 8 正交试验结果

Fig.8 Results of orthogonal experiments

由试验可知,在第 38 次试验时拍频电流幅值最小为 33.93 A,在第 11 次试验时拍频电流幅值最大为 159.42 A。根据正交试验“均匀分散,整齐可比”以及“用部分试验来代替全面试验”的特点,可以认为对于该 500 kV 的输电系统,瞬时性故障后的拍频电流主要集中在三十安到一百多安不等。而现在高压输电线路并联电抗器上安装有测量精度很高的电流互感器,对于该范围内的电流可以准确测量,因此可以利用拍频电流构造自适应重合闸判据。

4 结语

本文通过叠加原理求出高压输电线路单相瞬时性故障消失后并联电抗器中拍频电流的完整表达式;得出了拍频电流的最小值是零的结论,并给出拍频电流为零的条件,同时得出拍频电流为零属于小概率事件的结论;提出了用数理统计中正交试验的方法求解拍频电流幅值范围,并以此为依据证明了可以用拍频电流作为自适应重合闸判据。

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

参考文献

[1] GE Yaozhong, SUN Fenghai, XIAO Yuan. Prediction methods for preventing single-phase reclosing on permanent fault[J]. IEEE trans on power delivery, 1989, 4(1): 114-121.

[2] 郑涛,刘敏,董淑惠.基于故障相并联补偿电流变化特征的单相自适应重合闸[J].电力系统自动化,2011,35(10):74-78.

ZHENG Tao, LIU Min, DONG Shuhui. Single-phase adaptive reclosure based on variation trend of decaying components of fault phase shunt reactor currents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 74-78.

[3] LI Botong, LI Yongli. A new adaptive single-pole autoreclosure

technique based on calculation of fault voltage[J]. Automation of Electric Power Systems (in Chinese), 2013, 37(10): 86-91.

[4] 沈军,李超群,朱晓彤,等.高压电缆-架空线混合线路重合闸新判据[J].电力系统自动化,2012,36(13):97-100.

SHEN Jun, LI Chaoqun, ZHU Xiaotong, et al. New reclosing criterion for hybrid lines of high-voltage cables and pole lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 97-100.

[5] 贾晶晶,龚庆武,李勋,等.采用原子分解法的带并联补偿线路单相自适应重合闸[J].电力系统自动化,2013,37(5):117-123.

JIA Jingjing, GONG Qingwu, LI Xun, et al. Single-phase adaptive reclose of shunt compensated transmission lines using atomic decomposition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 117-123.

[6] 石光,邵文权,郭耀珠,等.带并联电抗器的超/特高压输电线路的单相重合闸新方案[J].电力自动化设备,2011,31(7):5-9.

SHI Guang, SHAO Wenquan, GUO Yaozhu, et al. Single-phase adaptive reclose scheme for EHV/UHV transmission lines with reactors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 5-9.

[7] 曹芬,何奔腾.带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸新算法[J].电力系统自动化,2009,33(23):55-59.

CAO Fen, HE Benteng. New algorithm for single-phase adaptive reclosure of EHV transmission lines with shunt reactor [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 55-59.

[8] 李斌,李永丽,盛鹏,等.带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(5):56-60.

LI Bin, LI Yongli, SHENG Kun, et al. The study on single pole adaptive reclosure of EHV transmission lines with the shunt reactor [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 56-60.

[9] 邵文权,南树功,章青微,等.带并联电抗器超/特高压输电线路单相瞬时故障拍频特性研究[J].电力自动化设备,2014,34(5):72-78.

SHAO Wenquan, NAN Shugong, ZHANG Xiaowei, et al. Beat-frequency characteristics for single-phase transient fault of EHV/UHV transmission line with shunt reactor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 72-78.

[10] 刘浩芳,王增平,刘俊岭.带并补的超高压输电线路单相自适应重合闸新判据[J].电力系统自动化,2007,31(24):62-66.

LIU Haofang, WANG Zengping, LIU Junling. A new criterion for single-phase adaptive reclosure of shunt reactor compensated EHV transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 62-66.

[11] 李博通,李永丽.带并联电抗器的超高压输电线路自适应重合闸新判据[J].电力系统自动化,2009,33(23):48-54.

LI Botong, LI Yongli. A new criterion for adaptive single pole auto-reclosure of EHV transmission lines with shunt reactor compensation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 48-54.

[12] 石光,邵文权,郭耀珠,等.带并联电抗器输电线路单相故障性质识别判据[J].电力系统保护与控制,2010,38(8):53-58.

SHI Guang, SHAO Wenquan, GUO Yaozhu, et al. Identification criterion of permanent single-phase fault for transmission lines with shunt reactors [J]. Power System

- Protection and Control, 2010, 38(8): 53-58.
- [13] 陆岩,郑玉平,沈军,等.超高压有并联电抗器线路无故障重合闸研究[J].电力系统自动化,2008,32(6):76-80.
LU Yan, ZHENG Yuping, SHEN Jun, et al. Research on adaptive reclosure of EHV transmission lines with shunt reactors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 76-80.
- [14] 李斌,李永丽,贺家李,等.750 kV 输电线路保护与单相重合闸动作的研究[J].电力系统自动化,2004,28(13):73-76.
LI Bin, LI Yongli, HE Jiali, et al. Research on protective relaying and single-phase reclosure of 750 kV transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(13): 73-76.
- [15] 张园园,龚庆武.基于并联电抗器电流判别的超高压输电线路单相自适应重合闸[J].电力自动化设备,2009,29(7):75-78.
ZHANG Yuanyuan, GONG Qingwu. Single-phase adaptive reclose of EHV transmission line based on shunt reactor current identification [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 75-78.
- [16] LIN Xin, XIE Yingzhi, SUI Dongpeng. Fault nature identification method for single-phase adaptive reclosure on UHVAC transmission lines with shunt reactors [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 769-775.
- [17] 邵文权,王建波,刘毅力,等.带并联电抗器的超/特高压输电线路单相故障特性研究[J].陕西电力,2010,38(9):14-17.
SHAO Wenquan, WANG Jianbo, LIU Yili, et al. Study on characteristics of single-phase faults in EHV and UHV transmission lines with shunt reactors[J]. Shaanxi Electric Power, 2010, 38(9): 14-17.
- [18] 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.
- [19] 陈希有.电路理论基础[M].北京:高等教育出版社,2013.
- [20] 施雨.应用数理统计[M].西安:西安交通大学出版社,2005.

钟高跃(1989—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: zhonggaoyue@126.com
宋国兵(1972—),男,博士,教授,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: song.gb@mail.xjtu.edu.cn
王欢欢(1988—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: joycewang089@gmail.com

(编辑 代长振)

Analysis of Beat Frequency Current Amplitude of Transmission Lines with Shunt Reactors

ZHONG Gaoyue, SONG Guobing, WANG Huanhuan, YANG Yuanhang, MA Zhibin
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: At present, researches on the adaptive reclosure lack an analytic expression for beat frequency current about whether the beat frequency current definitely exists and the range of amplitude of the current in adaptive reclosure. The amplitude may be nonexistent or too small when the single-phase transient fault disappears, which will affect the reliability of reclosing determination. The beat frequency current in the shunt reactor is not only affected by sound phase voltage but also by the initial state of components of transmission line when fault disappears. Based on the superposition principle, the complete expression of beat frequency current is obtained, by an analysis of which the minimum beat frequency current and conditions for its occurrence are obtained. It is concluded that the beat frequency current being zero belongs to small probability event. The current is affected by fault time, arc duration, arc resistance, phase angle difference and fault location that make the amplitude obvious. If the amplitude is too small, it will affect the reliability of the reclosing determination. The paper gives the range of amplitude of the beat frequency current on 500 kV transmission lines using the method of the orthogonal experiment in mathematical statistics, proving the beat frequency current can be applied to engineering.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50877062).

Key words: transmission line; shunt reactor; beat frequency current; range of amplitude; adaptive reclosure

立足行业 鼓励创新 面向应用
促进电力工业科技进步