

# 基于电压相位波动特征的单相永久性故障识别方法

李 斌<sup>1</sup>, 郭子焯<sup>1</sup>, 姚 斌<sup>1</sup>, 李博通<sup>1</sup>, 李宝伟<sup>2</sup>

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:**研究了带并联电抗器的超高压输电线路发生单相接地故障时跳开相电压的自由振荡分量频率的影响因素,分析了带并联电抗器的超高压输电线路发生单相接地故障时跳开相电压的相位特征,揭示了恢复电压相位周期性波动的原因,并考虑了傅氏算法处理含非基频量信号时的误差对跳开相电压相位计算的影响。引入健全相电压相量和作为极化电压,以极化电压为基准区分发生瞬时性故障与永久性故障时的跳开相电压相位,提出了识别永久性故障的跳开相电压相位波动判据。EMTP 仿真结果表明,该判据计算简单,判定准确,且不受过渡电阻影响,可有效适用于带并联电抗器的输电线路单相故障性质的识别。

**关键词:**超高压输电;特高压输电;瞬时性故障;永久性故障;恢复电压;自由振荡分量;并联电抗器

**中图分类号:**TM 77

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.002

## 0 引言

由于超/特高压输电线路发生的故障多为瞬时性单相接地故障,仅跳开故障相并延时进行重合的单相自动重合闸技术得到了广泛应用。然而,传统单相自动重合闸装置不具备识别瞬时性故障和永久性故障的能力,只能统一进行重合操作。当重合于永久性故障时,二次短路电流将对系统稳定性和设备绝缘造成危害。因此,能够在重合前预先判断故障性质的自适应重合闸技术被提出<sup>[1]</sup>。

为避免重合于永久性故障,目前单相自适应重合闸的研究重点主要是对故障断开相电气信号的分析,所提出的故障性质识别方法大致分为基于恢复电压特性、基于电弧特性和基于并联电抗器电流 3 类<sup>[2]</sup>。文献[1]最先提出了电压判据和补偿电压判据,但所提判据易受电网结构、运行方式等因素的影响;进一步地,文献[3-4]通过比较瞬时性故障发生时故障点电压理论值与故障点实际电压判断故障性质,但是判据易受故障测距结果的影响。文献[5]指出了不同故障性质下断开相与健全相电压的不同特征,并由此提出了基于改进型相关法的故障性质识别判据,但只适用于不带并联电抗器的超/特高压输电线路。

目前,超高压长距离输电线路中普遍安装带中性点小电抗的并联电抗器用于限制线路过电压、加速短路点电弧的熄灭<sup>[6]</sup>。由于并联电抗器与相间电容的耦合作用使断开相的恢复电压中有显著的衰减振荡自由分量,其频率与工频接近,因此恢复电压呈现“拍频”现象,导致不带并联电抗器线路采用的电压

判据难以适用。基于这种恢复电压特性,文献[7-8]分别利用恢复电压幅值在每个周期内的最大与最小值的差值和比值进行故障性质的识别;文献[9]利用正弦函数的正交性识别振荡自由分量,进而判断故障性质;文献[10]提出了一种利用积分提取低频分量的实用方法并据此给出了识别永久性故障的断开相端电压振荡自由分量幅值判据;文献[11]采用原子稀疏分解法分析非线性的故障信号,利用原子分解法较强的时域和频域分析能力准确确定故障熄弧时刻,以此作为线路重合时刻的整定依据。文献[12]利用故障相恢复电压的正、负、零序分量判断故障性质,但该方法受过渡电阻的影响较大。文献[13]利用健全相和故障相电压的始化内积与补偿内积进行故障性质的判别。文献[14]提出了以单相故障可靠选相为基础的严重永久性故障可靠不重合的单相重合闸方案。文献[15]提出了基于跳开相端电压中衰减周期分量幅值的自适应重合闸故障性质判断方法。文献[16]结合具体工程介绍了国内实用的自适应重合闸方案。

本文研究了带并联电抗器的超高压输电线路发生单相接地故障时跳开相电压的自由振荡分量频率的影响因素,证明了自由分量频率只与线路电容、并联电抗器补偿度有关,与线路长度无关;分析了超高压输电线路发生单相接地故障时跳开相电压的相位特征,揭示了恢复电压相位周期性波动的原因,并考虑了傅氏算法处理含非基频量信号时的误差对跳开相电压相位计算的影响。在此基础上,引入健全相电压相量和作为极化电压,并以极化电压为基准进行相位计算,提出了简单实用的跳开相电压相位波动判据。EMTP 仿真结果表明,本文所提出的永久性故障识别方法可有效识别带并联电抗器的超高压输电线路单相故障性质。

## 1 瞬时性故障恢复电压自由振荡分量频率

两端带并联电抗器的超/特高压输电线路发生

收稿日期:2018-05-08;修回日期:2018-12-21

基金项目:国家电网总部科技项目(基于全域信息的失灵保护和自适应重合闸技术研究)

Project supported by the Science and Technology Program of SGCC (Research on Breaker Failure Protection and Adaptive Reclosure based on the Whole Filed Information)

单相瞬时性故障和永久性故障时,跳开相电压具有不同的特点。发生永久性故障时,由于故障支路持续存在,跳开相电压仅包含健全相耦合作用产生的工频耦合电压;发生瞬时性故障时,由于线路两端有并联电抗器,潜供电流熄弧后,线路电容与并联电抗器间出现电磁能量振荡,使得跳开相恢复电压由自由振荡分量与工频分量 2 个不同频率的信号叠加而成<sup>[15]</sup>。

两端带相同并联电抗器的线路发生瞬时性单相接地故障,故障相断路器跳开后,线路的集中参数等效电路如附录 A 中的图 A1 所示。图中,并联电抗器和中性点小电抗器为星形接线; $C_m$  和  $C_0$  分别为线路的相间电容和对地电容; $L_k$  和  $L_n$  分别为并联电抗器和中性点小电抗的电感; $L_1$  和  $r$  分别为线路电感和电阻。采用星角变换,将  $L_k$  和  $L_n$  分别转换为并联电抗器的相间电感  $L_m$  和对地电感  $L_0$ ,则  $L_m$  和  $L_0$  满足:

$$L_m = \frac{L_k}{L_n}(L_k + 3L_n) \quad (1)$$

$$L_0 = L_k + 3L_n \quad (2)$$

对跳开后的线路进行 T 形等效,并进行拉普拉斯变换,可得计算跳开相电容耦合电压的复频域等效电路如附录 A 中的图 A2 所示<sup>[15]</sup>。根据图 A2 列写特征多项式并进行求解,即可得到两端带相同并联电抗器线路的自由分量频率。由于超/特高压线路的线路阻抗远小于分布电容容抗和并联电抗器的感抗,为便于分析,忽略线路阻抗,可得:

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = \sqrt{\frac{6L_k + 12L_n}{L_k(L_k + 3L_n)(2C_1 + C_0)l_{\text{line}}}} \quad (3)$$

其中, $\omega_1$  和  $f_1$  分别为恢复电压自由振荡分量的角频率和频率; $C_1$  为线路单位长度的正序电容; $C_0$  为线路单位长度的零序电容; $l_{\text{line}}$  为线路长度。

又因为并联电抗器补偿度  $K_{\text{SR}}$  是并联电抗器容量  $Q_k$  对空载长线电容无功功率  $Q_C$  的比值,则  $K_{\text{SR}}$  满足:

$$K_{\text{SR}} = X_{C_1}/X_{L_k} \quad (4)$$

其中, $X_{L_k}$  和  $X_{C_1}$  分别为并联电抗器电感和线路正序电容对应的电抗。则由式(4)可得:

$$L_k = \frac{1}{2\pi^2 f_0^2 C_1 l_{\text{line}} K_{\text{SR}}} \quad (5)$$

其中, $f_0$  为工频。

设  $L_k/L_n = 3$ ,并将式(5)代入式(3),可得:

$$f_1 = \sqrt{\frac{5C_1 K_{\text{SR}}}{2(2C_1 + C_0)}} f_0 \quad (6)$$

由式(6)可知,自由振荡分量频率与工频的比

值  $p = \sqrt{\frac{5C_1 K_{\text{SR}}}{2(2C_1 + C_0)}}$  只与线路单位长度电容和并联电抗器补偿度有关。换言之,即使线路长度不同,只要单位长度电容和并联电抗器补偿度相同,输电线路跳开相电压的自由振荡分量就具有相同的频率。

又因为  $C_1$  和  $C_0$  总满足  $C_1 < 2C_0$ ,则对于  $p$  有:

$$p = \sqrt{\frac{5C_1 K_{\text{SR}}}{2(2C_1 + C_0)}} < \sqrt{\frac{5C_1}{4C_1 + 2C_0}} < 1 \quad (7)$$

即自由振荡分量频率总小于工频。

超/特高压线路的分布电容会随电压等级的升高而增大,220 kV 线路的单位长度正序电容约为  $0.011 \mu\text{F}/\text{km}$ ,1 000 kV 输电线路的单位长度正序电容约为  $0.014 \mu\text{F}/\text{km}$ 。330~500 kV 超高压输电线路的并联电抗器补偿度一般选为 0.6~0.8,750~1 150 kV 输电线路的并联电抗器补偿度可超过 90%。

当线路单位长度正序电容和并联电抗器补偿度在上述范围内变化时,由式(6)可得不同的线路正序电容和补偿度下,跳开相电压自由振荡分量的频率如图 1 所示。

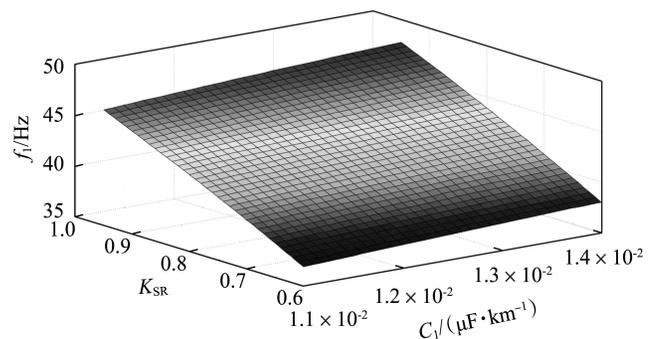


图 1 线路电容和补偿度不同时的自由分量频率

Fig.1 Free oscillation component frequency under different line capacitances and compensation degrees

由图 1 可知,当线路单位长度正序电容不变,并联电抗器补偿度由 0.60 增大至 0.95 时,自由振荡分量频率  $f_1$  增大,当线路单位长度正序电容为  $0.014 \mu\text{F}/\text{km}$  时, $f_1$  由 36.9 Hz 增大到 47.5 Hz,增幅较大;当并联电抗器补偿度不变,线路单位长度正序电容由  $0.011 \mu\text{F}/\text{km}$  增至  $0.014 \mu\text{F}/\text{km}$  时,自由振荡分量频率  $f_1$  增大,但增幅较小,在 3~5 Hz 范围内。自由振荡分量频率与工频的比值  $p$  也反映了这一特征,由于  $K_{\text{SR}}$  仅位于  $p$  的分子上,而  $C_1$  同时位于  $p$  的分子和分母上,所以  $p$  对  $K_{\text{SR}}$  的增加更为敏感。

实际线路中, $L_k/L_n$  一般为 3~4。当  $L_k/L_n \neq 3$  时,自由振荡分量频率表达式可通过与式(6)类似的推导过程求得,此时  $p$  将由于  $L_k/L_n$  的增大而乘以一个略大于 1 的常量,则  $L_k/L_n$  的增大将导致自由振荡分量频率  $f_1$  在图 1 的基础上小幅增加,但不会对自由振荡分量频率与线路单位长度正序电容和并联电抗器补偿度间的关系造成影响。

## 2 单相接地故障跳开相电压的相位特征

### 2.1 瞬时性故障跳开相电压相位的周期性波动

由于瞬时性故障跳开相恢复电压的自由振荡分量幅值一般接近或超过工频分量<sup>[4]</sup>,可利用相量图法对瞬时性故障跳开相的恢复电压相位进行分析。图2为线路发生瞬时性故障时,跳开相恢复电压工频分量和自由振荡分量示意图。由于恢复电压自由振荡分量的频率小于工频,而实际恢复电压为两者的相量和,为便于分析,可将恢复电压的工频分量 $s_0$ (其幅值、频率和角频率分别为 $A_0$ 、 $f_0$ 和 $\omega_0$ )固定在相量图横轴上,则按照相量求和的原则,恢复电压的自由振荡分量 $s_1$ (其幅值、频率和角频率分别为 $A_1$ 、 $f_1$ 和 $\omega_1$ )应与 $s_0$ 首尾相接,以 $\omega_1 - \omega_0$ 为角速度旋转。则实际恢复电压 $s_0 + s_1$ 是以原点为起点、终点落在 $s_1$ 圆周上的相量。

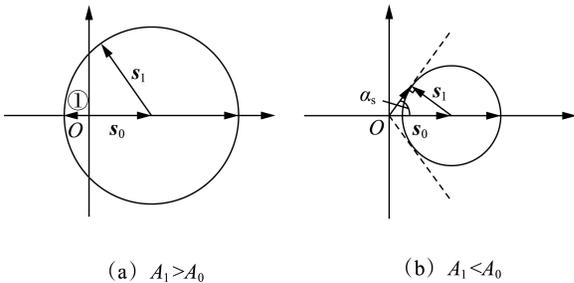


图2 瞬时性故障跳开相电压相量图

Fig.2 Phasor diagram of fault phase voltage when transient fault occurs

当 $A_1 > A_0$ ,即恢复电压的自由振荡分量幅值大于工频分量时, $s_1$ 旋转所成的圆周如图2(a)所示。由图2(a)可知,此时恢复电压与其工频分量间的相位差呈周期性变化。当恢复电压的自由振荡分量旋转至横轴处且方向与自由振荡分量相反时,两者的相量和如图2(a)中的箭头①所示,此时恢复电压与其工频分量间的相位差最大,为 $180^\circ$ 。所以,恢复电压与其工频分量的相位差在 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 范围内变化。

当 $A_1 < A_0$ ,即恢复电压的自由振荡分量幅值小于工频分量时, $s_1$ 旋转所形成的圆周如图2(b)所示。由图2(b)可见,此时恢复电压与其工频分量的相位差同样呈周期性变化,其最大值即为图中两切线(即图中虚线)与横轴所成的角度 $\alpha_s$ :

$$\alpha_s = \arcsin(A_1/A_0), 0^\circ < \alpha_s < 90^\circ \quad (8)$$

此时,恢复电压与其工频分量的相位差将在 $[-\alpha_s, \alpha_s]$ 范围内变化。

由于恢复电压的自由振荡分量 $s_1$ 以角速度 $\omega_1 - \omega_0$ 旋转,故跳开相恢复电压相位的波动周期 $T$ 满足:

$$T = \frac{1}{f_0 - f_1} \quad (9)$$

以上分析表明,当线路发生瞬时性故障时,跳开相恢复电压相位将出现明显的周期性波动,波动范围取决于工频分量和自由振荡分量的幅值比,波动频率为二者的频率差。

### 2.2 考虑傅氏算法计算误差的恢复电压相位波动

因为线路瞬时性故障下的跳开相恢复电压是自由振荡分量与工频分量2个不同频率信号的叠加,故2.1节分析建立在对恢复电压中的2个不同频率信号进行准确提取的基础上。但由第1节分析可知,由于恢复电压的自由振荡分量频率一般为 $30 \sim 45$  Hz,以工频为基频的傅氏算法在处理含有非工频分量的信号时,幅值和相位的计算均会存在一定的误差。本节对傅氏算法处理非工频周期信号时的幅值、相位误差进行了分析。

设任意频率周期信号为:

$$f(t) = \sin(\zeta\omega_0 t + \theta_1) \quad (10)$$

其中, $\omega_0$ 为傅氏算法采用的基频角频率; $\zeta$ 为信号频率与基频频率的比值; $\theta_1$ 为信号的初相角。

当 $\zeta = 1$ 时,输入信号的频率等于基频,傅氏算法能正确计算信号的幅值和相位;当 $\zeta \neq 1$ 时,由于傅氏算法仍采用原有的采样频率,则算法数据窗长与信号周期之间的关系被破坏,计算出现误差。

对于式(10),其基波傅氏系数 $a_1$ 和 $b_1$ 满足:

$$a_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \sin(\zeta\omega_0 t + \theta_1) \sin(\omega_0 t) d(\omega_0 t) \quad (11)$$

$$b_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \sin(\zeta\omega_0 t + \theta_1) \cos(\omega_0 t) d(\omega_0 t) \quad (12)$$

由式(11)、(12)可得傅氏算法计算出的基波幅值 $A_f$ <sup>[17]</sup>、相位 $\theta_f$ 分别为:

$$A_f = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = \frac{\sin \pi \zeta}{\pi} \sqrt{\frac{2+2\zeta^2}{(1-\zeta^2)^2} + \frac{2\cos(2\pi\zeta+2\theta_1)}{1-\zeta^2}} \quad (13)$$

$$\theta_f = \arctan \frac{b_1}{a_1} = \arctan[\zeta \tan(\theta_1 + \pi\zeta)] \quad (14)$$

当 $\zeta = 1$ ,即输入信号频率为基频时,由式(14)可知,随着傅氏算法时间窗的推移,输入信号的初相角将按照 $\theta_1 = \omega_0 t$ 的规律变化。由式(13)可得,当 $\zeta \in [0.6, 0.9]$ (对应自由分量频率在 $30 \sim 45$  Hz范围内)时,以 $\theta_1 = \omega_0 t$ 为横坐标,利用傅氏算法计算出的幅值如图3所示。由图3可知:当输入信号的频率小于基频时,利用傅氏算法计算出的幅值可能大于真实值,但仍在真实值附近摆动;输入信号频率离基频越远,傅氏算法的幅值计算误差越大;当 $\zeta = 0.6$ 时,计算出的幅值仍大于真实值的60%。

而由式(14)可知,当输入信号的频率不等于基频时,利用傅氏算法计算的相位将发生以下变化。

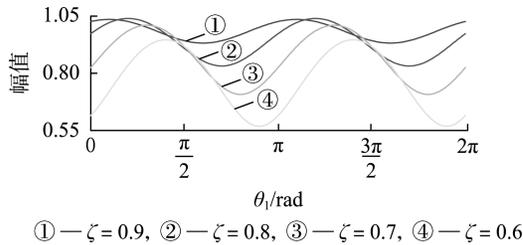


图 3 利用傅氏算法计算的幅值

Fig.3 Amplitudes calculated by Fourier algorithm

a.  $\theta_1 = \zeta\omega_0 t$ , 傅氏算法计算出的相位变化周期始终为输入信号的周期, 与基频无关。

b. 式(14)的  $\tan(\theta_1 + \pi\zeta)$  中含有  $\pi\zeta$ , 这将导致计算得到的相位在横轴方向平移。由于  $\cot(\theta_1 + \pi) = \cot \theta_1$  且  $\zeta \neq 1$ , 则有: 当  $\zeta > 1$ , 即输入信号频率高于基频时, 相位在横轴方向上左移; 当  $\zeta < 1$ , 即输入信号频率低于基频时, 相位在横轴方向上右移。

c. 式(14)中  $\tan(\theta_1 + \pi\zeta)$  前乘以了系数  $\zeta$ , 这将导致计算得到的相位大小发生变化。当  $\zeta > 1$ , 即输入信号频率高于基频时, 相较于  $\zeta = 1$  的情况, 此时前半周期相位增大, 后半周期相位减小; 当  $\zeta < 1$ , 即输入信号频率低于基频时, 相较于  $\zeta = 1$  的情况, 前半周期相位减小, 后半周期相位增大。

显然, 上述 3 种变化总是同时存在的。则由式(14)可得, 当  $\zeta \in [0.6, 0.9]$  (对应自由分量频率在 30~45 Hz 之间) 时, 以  $\theta_1$  为横坐标, 傅氏算法的相位计算误差如图 4 所示。由图 4 可见, 当输入信号的频率小于基频时, 傅氏算法所得相位始终小于真实值, 且在一定范围内波动。输入信号频率离基频越远, 傅氏算法的相位计算误差越大, 波动也越显著。但是, 只要波动幅度不太大, 傅氏算法的相位计算结果与实际值之间仍存在较为明显的对应关系。

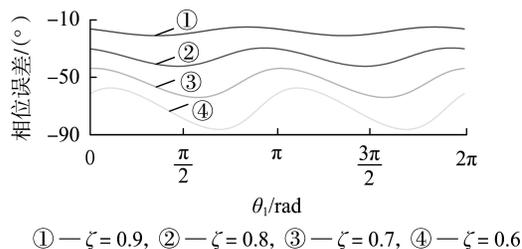


图 4 傅氏算法的相位计算误差

Fig.4 Phase calculation error of Fourier algorithm

由图 3、4 可知, 虽然傅氏算法在处理含有非基频分量的信号时, 幅值和相位计算都存在误差, 但在恢复电压自由振荡分量所处的频率范围内, 计算误差仍可接受。换言之, 傅氏算法的相位计算结果仍能较好地反映跳开相电压相位的周期性波动。

在图 2(b) 的基础上, 设  $A_1/A_0 = 0.8$ , 并考虑傅氏算法的幅值、相位误差, 不同  $\zeta$  值对应的跳开相电压相量图如图 5 所示。图中, 虚线为不考虑傅氏算法误差时恢复电压自由振荡分量  $s_1$  旋转所形成的圆, 与图 2(b) 中的实线圆相对应; 实线曲线为考虑傅氏

算法计算误差时  $s_1$  的运动轨迹。由图 5 可知, 当  $\zeta \in [0.6, 0.9]$  时, 考虑傅氏算法的幅值、相位误差, 跳开相电压相位仍有明显的周期性波动特征, 2.1 节的分析仍然适用。

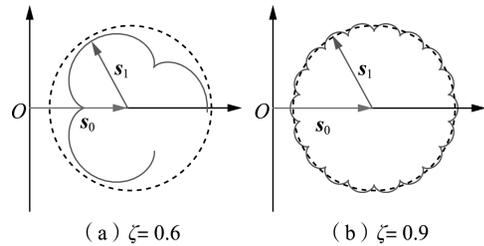


图 5 考虑计算误差的瞬时性故障跳开相电压相量图

Fig.5 Phasor diagram of fault phase voltage considering calculation error when transient fault occurs

以上分析基于针对连续函数的傅里叶级数, 其同样适用于离散信号。

### 2.3 以极化电压为基准的跳开相电压相位

由于健全相电压与跳开相电压工频分量间存在确定的相位关系, 在实际计算中, 可用两健全相电压相量和作为计算跳开相电压相位的基准, 并将其定义为极化电压  $U_p$ 。为便于分析, 本文假设线路 A 相发生单相接地故障并跳开, B、C 相为健全相, 则有:

$$U_p = U_b + U_c \quad (15)$$

其中,  $U_b$  和  $U_c$  为健全相电压。

附录 A 中图 A3 所示的带并联电抗器 500 kV 系统发生永久性故障和瞬时性故障时的跳开相电压如图 6 所示。图 6 中, 设断路器在故障发生后 60 ms 动作于跳闸, 瞬时性故障在断路器跳闸后 400 ms 熄弧。利用傅氏算法计算跳开相电压, 即可得到不同故障性质下以极化电压为基准的跳开相电压相位, 由图 6 中的共时间轴示出。

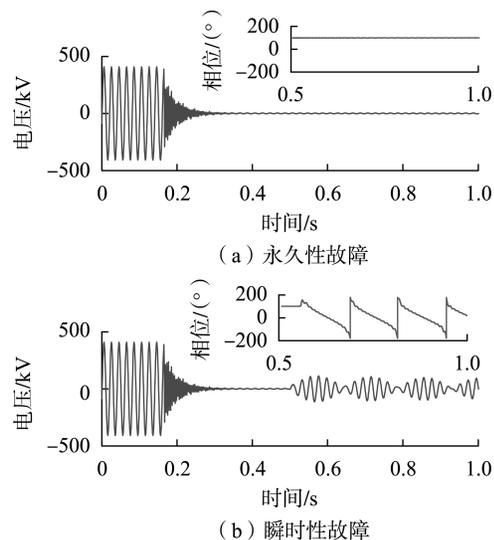


图 6 超高压输电线路跳开相电压及其相位

Fig.6 Fault voltage of EHV power transmission line

由图 6 可知, 瞬时性故障消失后的恢复电压相

位与永久性故障的跳开相电压相位存在明显差异。线路发生永久性故障后,跳开相电压相位逐渐稳定并保持不变,如图6(a)所示。而线路瞬时性故障消失后,跳开相的恢复电压相位发生周期性变化,波动中值为 $0^\circ$ ,周期约为139 ms,如图6(b)所示。由式(6)、(9)可分别计算出系统的恢复电压自由振荡分量频率为42.8 Hz,恢复电压相位的波动周期 $T=138.9$  ms,与图6(b)吻合。值得注意的是,图6(b)给出的跳开相恢复电压相位在周期性变化的同时存在抖动和扭曲,这正是由2.2节所分析的傅氏算法计算误差造成的。

#### 2.4 永久性故障跳开相电压幅值特征

超/特高压线路发生永久性单相接地故障时,跳开相电压幅值将满足一定的条件。设超高压线路正常运行时,系统角频率为 $\omega$ ,则A相(跳开相)电流可表示为:

$$i_a = \sqrt{2}I \cos(\omega t) \quad (16)$$

其中, $I$ 为系统正常运行时的电流有效值。

发生永久性故障时,故障相断路器跳开,故障点始终保持可靠接地。此时,线路中的储能元件将迅速完成能量的泄放,跳开相电压中仅包含电磁耦合电压<sup>[11]</sup>:

$$U_{xl} = (I_b + I_c) Z_m l \quad (17)$$

其中, $I_b$ 和 $I_c$ 为线路健全相的电流; $Z_m$ 为线路单位长度互感; $l$ 为故障点到线路首端的距离。跳开相电压中仅含有工频分量,所以其相位逐渐趋于稳定,如图6(a)所示。

由于超/特高压输电线路的中性点直接接地,发生单相接地故障时,健全相电压、电流基本保持不变,而 $Z_m$ 为纯感性,则此时跳开相电压滞后 $i_a$   $90^\circ$ 。由此可得跳开相电压满足:

$$u_a = \sqrt{2}IZ_m l \cos(\omega t - 90^\circ) \quad (18)$$

由此可知,跳开相电压的幅值在 $[-\sqrt{2}IZ_m l, \sqrt{2}IZ_m l]$ 范围内变化,与故障位置和负荷电流大小有关。

### 3 基于电压相位波动特征的永久性故障识别方法

由第2节分析可知,线路发生永久性故障时,跳开相电压相位在故障发生后稳定并保持不变;线路发生瞬时性故障时,跳开相恢复电压相位以 $0^\circ$ 为中值进行周期性波动,周期为 $T$ 。依据上述特征,本文提出了一种基于电压相位波动特征的永久性故障识别方法。

#### 3.1 识别永久性故障的相位波动判据

在断路器跳开后,计算跳开相电压相位,记为

$\{\phi_k\}$ ,其中, $\phi_k$ 为线路跳闸后某采样点的跳开相电压相位, $k$ 为正整数。在时间窗 $\Delta t$ 内,计算 $\{\phi_k\}$ 的平均值 $\bar{\phi}$ ,并计算相位偏差 $\{C_k\}$ :

$$C_k = \phi_k - \bar{\phi} \quad (19)$$

瞬时性故障和永久性故障跳开相电压相位的不同特征导致不同故障性质下的相位偏差也具有不同的性质。

由图2可知,当线路发生瞬时性故障时,跳开相恢复电压相位以 $0^\circ$ 为中值进行周期性波动,故在时间窗 $\Delta t$ 内,存在 $\{C_k\}$ 满足:

$$|C_k| > k_1 \quad (20)$$

当发生永久性故障时,跳开相电压相位保持不变,故在时间窗 $\Delta t$ 内, $\{C_k\}$ 始终满足:

$$|C_k| < k_1 \quad (21)$$

其中, $k_1$ 为整定值,可取为 $10^\circ$ 。由上述分析可知,若跳开相的相位偏差 $\{C_k\}$ 在时间窗 $\Delta t$ 内满足式(21),则可确认跳开相电压相位不具有波动性。为保证在判据不被满足时,自适应重合闸装置能够退回自动重合闸状态,为故障相线路提供最大限度的重合机会,本文采用式(21)作为识别永久性故障的判据。

由于 $k_1 = 10^\circ$ ,则时间窗 $\Delta t$ 应至少大于跳开相电压相位波动 $10^\circ$ 的时长,经验证,时间窗 $\Delta t$ 可取为100 ms。

为了最大限度地保证线路获得应有的重合机会并更慎重地识别永久性故障,在设置电压相位波动判据式(21)的同时,本文还设置了跳开相电压幅值判据:由2.4节可知,输电线路发生永久性故障时,跳开相电压幅值的变化范围为 $[-\sqrt{2}IZ_m l, \sqrt{2}IZ_m l]$ 。因此,永久性故障跳开相电压的幅值应始终满足:

$$|U_a| \leq \sqrt{2}IZ_m l_{line} \quad (22)$$

其中, $U_a$ 为跳开相电压幅值。

则两端带并联电抗器的永久性故障判据为相位波动判据式(21)和跳开相电压幅值判据式(22)的组合。

#### 3.2 相位波动判据的开放判据及判据判定逻辑

由于相位波动判据计算的跳开相电压相位是以极化电压为基准的,当跳开相电压幅值极小时,傅氏算法无法对其相位进行准确提取,相位波动判据将失效。因此,应同时设置跳开相电压开放判据式(23)和极化电压开放判据式(24),确保跳开相电压和极化电压幅值满足开放相位波动判据的要求。

$$\left| \frac{U_a}{U_p} \right| > k_2 \quad (23)$$

$$|U_p| > k_3 \quad (24)$$

其中, $U_p$ 为极化电压幅值; $k_2$ 为整定值,可取为0.02;

$k_3$  可取为  $0.8U_e$ , 其中  $U_e$  为线路的额定相电压。

各判据的判定流程如附录中的图 A4 所示。

当极化电压开放判据或跳开相电压开放判据不被满足时, 相位波动判据和跳开相电压幅值判据将闭锁。由于在本文所采用的长时间窗  $\Delta t$  内, 瞬时性故障线路的跳开相电压不可能持续不满足跳开相电压开放判据, 故在跳开相电压幅值不满足式 (23) 的情况持续 1 个时间窗  $\Delta t$  后, 虽然相位波动判据已经闭锁, 但重合闸装置仍应将故障性质识别为永久性故障, 不进行重合闸。而当跳开相电压开放判据不被满足但不满足时间又达不到 1 个时间窗长时, 由于无法判断跳开相电压相位是否可用, 相位波动判据和跳开相电压幅值判据也将闭锁。由于此时不能判定线路发生了永久性故障, 故障相线路仍应重合。

上述判据投入时, 将重合闸装置中的永久性故障标志位置为 0。若跳开相电压满足相位波动判据和跳开相电压幅值判据, 或跳开相电压幅值不满足式 (23) 的情况持续 1 个时间窗, 则将永久性故障标志位置为 1。重合前, 检测永久性故障标志位, 若标志位为 0, 则进行重合闸; 若标志位为 1, 则判为永久性故障, 不进行重合闸。

#### 4 仿真验证

本文采用 EMTDC/PSCAD 搭建超高压输电线路仿真模型, 如附录 A 中的图 A3 所示。线路参数来自重庆市万县至龙泉的 500 kV 输电系统, 线路全长 358 km, 线路两侧接有 2 组相同的并联电抗器, 2 组电抗器均带有中性点小电抗。线路参数为:  $R_1 = 0.0195 \Omega/\text{km}$ ,  $L_1 = 0.9134 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_1 = 0.014 \mu\text{F}/\text{km}$ ,  $R_0 = 0.1675 \Omega/\text{km}$ ,  $L_0 = 2.7191 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_0 = 0.00834 \mu\text{F}/\text{km}$ ;  $X_{m1} = 49.36 \Omega$ ,  $X_{m0} = 41.34 \Omega$ ,  $X_{n1} = 46.03 \Omega$ ,  $X_{n0} = 103.36 \Omega$ ; 并联电抗器补偿度为 75%, 并联电抗器电抗  $X_L = 1680.56 \Omega$ , 中性点小电抗  $X_N = 434 \Omega$ 。线路连接等效电网系统  $m$  和  $n$ , 线路与  $m$  系统相连的线路侧电压为  $U_m$ , 与  $n$  侧相连的电压为  $U_n$ 。

在仿真模型中模拟超高压输电线路的各种故障并对本文提出的永久性故障识别方法进行验证。假设断路器在故障发生后 60 ms 动作于跳闸, 瞬时性故障在断路器跳闸后 400 ms 熄弧。线路不同负载及故障点位置情况下, 本文提出的永久性故障识别方法的判别结果如附录 B 中的表 B1—B3 所示。

由表 B1—B2 可知: 当线路中发生永久性单相接地故障时, 跳开相电压相位波动很小, 相位偏差  $\{C_k\}$  满足式 (21), 永久性故障标志位置为 1, 相位波动判据能可靠识别永久性故障; 当线路中发生瞬时性单相接地故障时, 跳开相电压相位波动明显, 相位偏差  $\{C_k\}$  不满足式 (21), 永久性故障标志位未被置为 1, 线路将按照预定时间进行重合闸。

特别地, 当轻载线路中发生永久性单相接地故障时, 跳开相电压很小, 跳开相电压幅值在时间窗内不满足式 (23), 相位波动判据闭锁。此时, 如 3.2 节所述, 重合闸装置在跳开相电压幅值不满足式 (23) 的情况持续 1 个时间窗后将故障识别为永久性故障。当轻载线路发生瞬时性故障时, 跳开相电压幅值较大, 相位波动判据未闭锁, 相位偏差  $\{C_k\}$  不满足式 (21), 永久性故障标志位未被置为 1, 线路将按照预定时间进行重合闸。轻载线路不同位置发生故障的情况下, 相位波动判据的判别结果如附录中的表 B3 所示。

当线路发生近端永久性故障时, 故障点到线路首端的距离  $l$  极小, 由式 (18) 可知, 本侧跳开相电压幅值始终不满足式 (23), 本侧相位波动判据将闭锁。此时, 在跳开相电压幅值不满足式 (23) 的情况持续 1 个时间窗后, 重合闸装置仍会将故障性质识别为永久性故障, 并不进行重合闸。同时, 对侧跳开相电压幅值满足式 (23), 对侧相位波动判据仍可正确识别故障性质。

由于本文第 2、3 节所进行的理论分析均与过渡电阻大小无关, 故障点是否存在过渡电阻不会影响相位波动判据对故障性质的识别。表 B1—B3 也给出了故障点经  $300 \Omega$  过渡电阻接地时, 本文提出的永久性故障识别方法的判别结果。

由于本文所提出的判据与线路参数不存在明确的依赖关系, 线路参数误差对本文判据的影响很小。

此外, 本文还对系统频率在  $\pm 0.5 \text{ Hz}$  范围内偏移时判据的判定情况进行了验证, 结果表明, 系统频率出现偏移时, 本文提出的永久性故障识别方法仍能够对线路的故障性质进行准确识别。

在系统频率发生偏移的情况下仍能准确判别故障性质是本文所提出判据的优点。本文第 1、2 节的理论分析是基于当前电力系统的实际频率, 其值并不必须为工频。而且, 由第 1 节可知, 恢复电压的自由振荡分量频率一般在  $30 \sim 45 \text{ Hz}$  范围内, 而系统频率偏移一般只考虑在工频上下波动  $0.2 \sim 0.5 \text{ Hz}$  范围内, 可与恢复电压的自由振荡分量频率有明显的区分。因此, 在系统频率发生偏移时, 本文所提出的相位波动判据仍然有效, 可对故障性质进行准确识别。

图 7 给出了图 A3 所示的带并联电抗器 500 kV 系统频率偏移至  $49.5 \text{ Hz}$  时, 距线路  $m$  端线路全长的 20% 处发生永久性故障和瞬时性故障时的跳开相电压, 断路器跳闸时刻和瞬时性故障熄弧时间同图 6。利用傅氏算法对跳开相电压进行计算, 即可得到不同故障性质下以极化电压为基准的跳开相电压相位, 由图 7 中的共时间轴示出。同理可得线路其他位置发生故障时的跳开相电压。

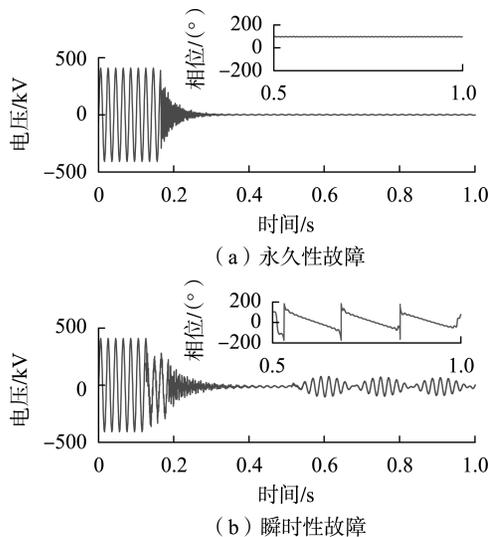


图7 系统频率偏移时的超高压输电线路跳开相电压及其相位

Fig.7 Fault voltage of EHV transmission line and its phase when power system frequency shifts

由图7可知,线路发生永久性故障后,由于频率偏移,跳开相电压相位存在一些小幅波动,但总体仍保持稳定,如图7(a)所示。线路瞬时性故障消失后,跳开相的恢复电压的相位仍发生周期性变化,波动中值为 $0^\circ$ ,如图7(b)所示。发生频率偏移时,本文所提出的相位波动判据仍然有效,能对故障性质进行准确识别。

综上所述,本文提出的永久性故障识别方法可以对两端带并联电抗器的超/特高压交流输电线路的故障性质进行准确识别。

## 5 结论

本文研究了带并联电抗器的超高压输电线路发生单相接地故障时跳开相电压的自由振荡分量频率的影响因素,证明了自由分量频率只与线路电容、并联电抗器补偿度有关,与线路长度无关;分析了超高压输电线路单相接地故障时跳开相电压的相位特征,揭示了恢复电压相位周期性波动的原因,并考虑了傅氏算法处理含非基频量信号时的误差对跳开相电压相位计算的影响。在此基础上,引入健全相电压相量和作为极化电压,并以极化电压为基准区分瞬时性故障与永久性故障时的跳开相电压相位,提出了识别永久性单相接地故障的跳开相电压相位波动判据。该判据计算简单,判定准确,且不受过渡电阻的影响。EMTP 仿真表明,相位波动判据能准确识别故障性质,可以适用于带并联电抗器的超/特高压输电线路,具有很好的理论价值和工程价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

[1] GE Yaozhong, SUI Fonghai, XIAO Yuan. Prediction methods for

preventing single-phase reclosing on permanent fault [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 114-121.

[2] 索南加乐, 孙丹丹, 付伟, 等. 带并联电抗器输电线路单相自动重合闸永久故障的识别原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 75-81.

SUONAN Jiale, SUN Dandan, FU Wei, et al. Identification of permanent faults for single-phase autoreclosure on transmission lines with shunt reactors [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 75-81.

[3] LI Botong, LI Yongli. A new adaptive single-pole autoreclosure technique based on calculation of fault point voltage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 86-91.

[4] 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.

[5] 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]. Proceedings of the CSEE, 2008, 32(6): 76-80.

[6] 郑涛, 刘敏, 郭飞. 并联电抗器中性点小电抗的选择及其对单相自适应重合闸的影响[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 62-67.

ZHENG Tao, LIU Min, GUO Fei. Influence of neutral reactor on single-phase adaptive reclose [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 62-67.

[7] 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, 89.

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, 89.

[8] 王增平, 刘浩芳, 徐岩, 等. 基于改进型相关法的单相自适应重合闸新判据[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 49-55.

WANG Zengping, LIU Haofang, XU Yan, et al. A new criterion for single-phase adaptive automatic reclosure based on improved correlation algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 49-55.

[9] 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): 52-56.

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): 52-56.

[10] 索南加乐, 刘辉, 吴亚萍, 等. 基于故障测距的单相自动重合闸永久故障电压自适应补偿判据[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 80-84.

SUONAN Jiale, LIU Hui, WU Yaping, et al. An adaptive voltage compensation criterion for permanent fault in the single phase automatic reclosing based on fault location [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 80-84.

[11] 李斌, 李永丽, 黄强, 等. 单相自适应重合闸相位判据的研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 41-44.

LI Bin, LI Yongli, HUANG Qiang, et al. Study on phase criterion for single-pole adaptive reclosure [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 41-44.

- [12] DANTAS K, NEVES W, FERNANDES D. An approach for controlled reclosing of shunt-compensated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 29(3):1203-1211.
- [13] 罗勋华, 黄纯, 江亚群, 等. 基于电压内积的带并联电抗器输电线路单相自适应重合闸[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 17-25.  
LUO Xunhua, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. A voltage inner product based approach for single-phase adaptive reclosure on transmission line with shunt reactors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(11): 17-25.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 沈军, 舒治淮, 陈军, 等. 自适应重合闸在电力系统中的应用实践[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 152-156.  
SHEN Jun, SHU Zhihui, CHEN Jun, et al. Application of adaptive auto-reclosure in power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 152-156.
- [17] 杨念慈, 姜惠兰, 龚大德, 等. 电力系统频率偏移对傅里叶算法的影响[J]. 天津大学学报, 1993(5): 9-16.  
YANG Nianci, JIANG Huilan, GONG Dade, et al. The influence of power system frequency deviation on Fourier algorithm [J]. Journal of Tianjin University, 1993(5): 9-16.

#### 作者简介:



李斌

李斌(1976—),男,天津人,教授,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: binli@tju.edu.cn);

郭子焯(1992—),男,山西太原人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: guozixuantju@126.com);

姚斌(1977—),男,黑龙江宁安人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: yaobin@tjuer.com)。

## Identification of single phase permanent fault based on voltage phase fluctuation characteristics

LI Bin<sup>1</sup>, GUO Zixuan<sup>1</sup>, YAO Bin<sup>1</sup>, LI Botong<sup>1</sup>, LI Baowei<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Xuji Group Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** The factors affecting the frequency of the free oscillation component of the tripping phase voltage when a single-phase grounding fault occurs in an EHV transmission line with shunt reactors are studied. The phase characteristics of the tripping phase voltage during transient single-phase grounding fault of EHV transmission line with shunt reactors are analyzed, and the reason for the phase periodic fluctuation of recovery voltage is revealed. With the consideration of the influence of the error of Fourier algorithm when processing the signals with non-based frequency components on tripping phase voltage calculation, the sum of healthy phase voltages is introduced as the polarization voltage, the phases of tripping phase voltage in transient faults and permanent faults are differentiated based on the polarization voltage, and a criterion of phase fluctuation of tripping phase to identify permanent faults is proposed. EMTP simulation shows that the proposed criterion is simple, accurate and immune to the transition resistance, and can be effectively applied to the fault nature identification of single-phase adaptive reclosing of EHV/UHV transmission lines with shunt reactors.

**Key words:** EHV power transmission; UHV power transmission; transient fault; permanent fault; recovery voltage; free oscillation component; shunt reactor

附录 A

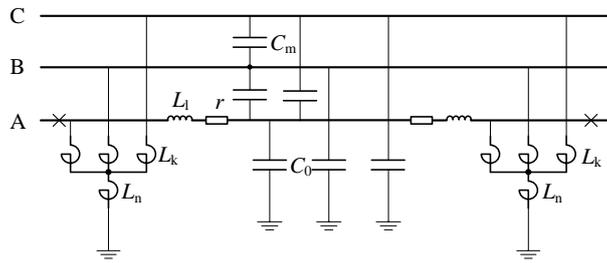


图 A1 两端带并联电抗器超高压线路集中参数等效电路  
Fig.A1 Equivalent circuit for lumped parameter of EHV line with shunt reactor at both ends

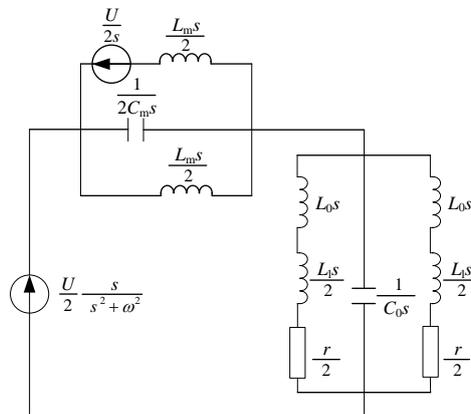


图 A2 复频域等效电路  
Fig.A2 Equivalent circuit in complex frequency domain

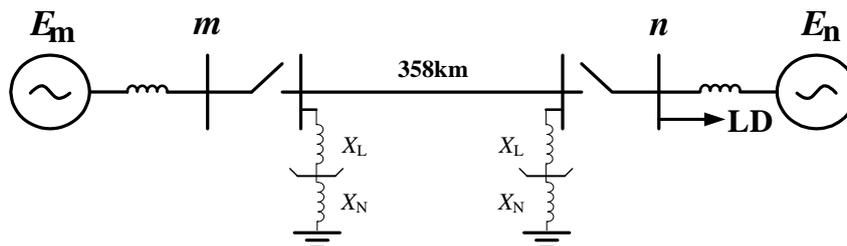


图 A3 带并联电抗器的超高压输电系统  
Fig.A3 EHV power transmission system with shunt reactor

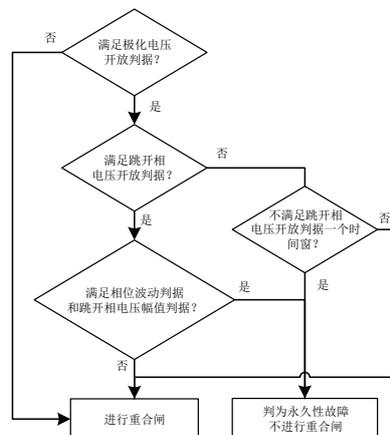


图 A4 判据判定流程图  
Fig.A4 Decision flowchart of criterias

附录 B

表 B1 不同故障性质下线路相位波动判据的判别结果 (正常运行)

Table B1 Calculation result of the fluctuation criterion when different faults occur(normal operation)

故障性质	过渡电阻/ $\Omega$	$\gamma$ /%	$ C_i _{\max} / (^\circ)$	$ C_i _{\min} / (^\circ)$	故障性质
永久性	0	0	-	-	永久性故障
		20	0.14	0.09	永久性故障
		50	0.19	0.10	永久性故障
		70	0.22	0.12	永久性故障
		90	0.30	0.15	永久性故障
	300	0	0.36	0.07	永久性故障
		20	0.29	0.12	永久性故障
		50	0.38	0.13	永久性故障
		70	0.34	0.16	永久性故障
		90	0.35	0.20	永久性故障
瞬时性	0	0	96.01	16.49	瞬时性故障
		20	99.22	17.34	瞬时性故障
		50	98.12	18.55	瞬时性故障
		70	100.47	12.47	瞬时性故障
		90	97.95	11.04	瞬时性故障
	300	0	73.75	8.99	瞬时性故障
		20	77.56	12.84	瞬时性故障
		50	84.35	13.06	瞬时性故障
		70	91.31	21.01	瞬时性故障
		90	66.12	16.41	瞬时性故障

注:  $|C_i|_{\max}$  为重合前相位偏差在时间窗内的最大值;  $|C_i|_{\min}$  为重合前相位偏差在时间窗内的最小值;  $\gamma$  为故障点与  $m$  端的距离占线路全长的百分比。

表 B2 不同故障性质下线路相位波动判据的判别结果 (重载)

TableB2 Calculation result of the fluctuation criterion when different faults occur(overload)

故障性质	过渡电阻/ $\Omega$	$\gamma$ /%	$ C_i _{\max} / ^\circ$	$ C_i _{\min} / ^\circ$	故障性质
永久性	0	0	-	-	永久性故障
		20	0.23	0.07	永久性故障
		50	0.84	0.19	永久性故障
		70	1.04	0.85	永久性故障
		90	1.59	0.37	永久性故障
	300	0	1.37	0.11	永久性故障
		20	1.03	0.42	永久性故障
		50	0.99	0.63	永久性故障
		70	1.56	0.66	永久性故障
		90	1.97	0.51	永久性故障
瞬时性	0	0	75.97	2.54	瞬时性故障
		20	94.07	2.96	瞬时性故障
		50	74.03	2.84	瞬时性故障
		70	59.31	1.29	瞬时性故障
		90	64.40	2.08	瞬时性故障
	300	0	69.86	3.12	瞬时性故障
		20	60.29	3.49	瞬时性故障
		50	90.83	2.75	瞬时性故障
		70	57.73	1.95	瞬时性故障
		90	50.34	2.83	瞬时性故障

表 B3 不同故障性质下线路相位波动判据的判别结果(轻载)

Table B3 Calculation result of the fluctuation criterion when different faults occur(underload)

故障性质	过渡电阻/ $\Omega$	故障点距线路首端	$ C_{i_{max}}  / (^\circ)$	$ C_{i_{min}}  / (^\circ)$	故障性质
永久性	0	0%	-	-	永久性故障
		20%	-	-	永久性故障
		50%	-	-	永久性故障
		70%	-	-	永久性故障
		90%	-	-	永久性故障
	300	0%	-	-	永久性故障
		20%	-	-	永久性故障
		50%	-	-	永久性故障
		70%	-	-	永久性故障
		90%	-	-	永久性故障
瞬时性	0	0%	106.22	6.85	瞬时性故障
		20%	89.72	9.53	瞬时性故障
		50%	105.03	8.54	瞬时性故障
		70%	99.58	12.36	瞬时性故障
		90%	101.64	11.85	瞬时性故障
	300	0%	85.41	13.44	瞬时性故障
		20%	94.77	12.00	瞬时性故障
		50%	98.05	7.01	瞬时性故障
		70%	102.54	11.96	瞬时性故障
		90%	91.13	10.59	瞬时性故障