

# 基于积分比分布的单相接地故障熄弧时刻识别策略

何柏娜, 宁家兴, 黄桂春, 孔杰, 王乐森, 颌雅迪, 姜仁卓, 毛亚哲, 周宇洋  
(山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049)

**摘要:**现有自适应重合闸在识别出瞬时性故障后普遍经过固有延时合闸, 忽视了故障点电弧熄灭与否, 为进一步提高重合闸的自适应能力, 有必要对故障熄弧时刻进行识别。通过计算分析超高压线路接地点熄弧前后故障相端电压特性, 对比发生瞬时性故障时故障相端电压绝对值函数在二次电弧阶段和恢复电压阶段的差异, 发现二次电弧阶段绝对值函数的积分在相邻时间窗内大小始终不变, 积分比约为1, 而恢复电压阶段初期相邻时间窗内的积分存在显著差异, 其积分比出现较为明显的突变。通过设定上下阈值, 将故障相端电压绝对值函数积分比作为熄弧时刻识别判据, 若积分比连续5次超过所设阈值, 则判断故障熄弧。大量EMTP-ATP仿真表明, 该判据能可靠识别熄弧时刻, 且不受并联补偿度、故障位置以及过渡电阻影响, 具有较强的自适应性。

**关键词:**超高压输电; 瞬时性故障; 故障相端电压; 并联电抗器; 积分比; 熄弧时刻

**中图分类号:** TM 77

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.epae.202002021

## 0 引言

据统计, 超高压架空线上发生单相接地故障的概率高达90%, 其中瞬时性故障约占80%<sup>[1-2]</sup>, 为保证电网安全可靠运行, 单相自动重合闸装置被广泛使用<sup>[3]</sup>。然而, 目前电力系统使用的自动重合闸普遍采用固定延时合闸, 存在重合于永久性故障的可能。为确保断路器可靠重合于瞬时性故障, 能够提前识别故障类型的自适应重合闸应运而生<sup>[4-5]</sup>。

目前针对自适应重合闸的研究普遍侧重于故障类型的识别<sup>[6-7]</sup>, 其认为只要识别出瞬时性故障, 断路器即可重合成功。然而, 对于二次电弧持续时间较长(大于重合闸固有延时)的瞬时性故障, 断路器达到固有合闸时间时故障点电弧还未熄灭, 此时若断路器盲目合闸, 由于故障点依然存在, 断路器会再次跳开, 并且二次合闸产生的短路冲击还会对高压电气设备造成一定的损害, 甚至可能引起整个电力系统的瓦解; 对于部分熄弧较快的瞬时性故障, 固有延时合闸无疑会增加系统非全相运行时间。因此目前自适应重合闸的保护性能不佳, 为进一步优化其性能, 熄弧时刻的确定就显得尤为重要。

当前国内外对于单相接地故障熄弧时刻识别的研究主要基于故障相端电压信号以及过渡电阻等电气量在故障点熄弧前后的差异<sup>[8-11]</sup>。文献[8]详细分析了全相位快速傅里叶变换(apFFT)谱的相位平坦特性, 利用熄弧前后高频分量平坦度的变化来捕捉熄弧时刻, 该方法抗干扰能力强, 但检测误差约为1个工频周期, 还有进一步缩短的空间。文献[9]利用

改进的自适应累加和(ACUSUM)算法对故障相端电压幅值变化时序进行检测, 考虑了噪声对熄弧时刻识别的干扰, 但没有对不同过渡电阻下算法的有效性进行验证。文献[10]利用过渡电阻非线性特征作为判据来识别电弧性故障并确认电弧熄灭时刻, 但没有讨论算法在不同补偿度下的适用性。文献[11]基于电流差动原理, 提出一种循环判断电弧是否熄灭的方法, 该方法可靠性较高, 但收敛时间较长, 没有考虑实时性。针对以上不足, 本文提出一种基于故障相端电压绝对值函数积分比差异的超高压线路单相接地故障熄弧时刻识别算法。

考虑到高压交流输电线路并联电抗器装设的普遍性, 尤其对于超/特高压输电线路, 几乎都会在线路上装设并联电抗器来有效抑制潜供电流, 加快潜供电弧熄灭<sup>[12-13]</sup>。因此对带有并联电抗器的输电线路熄弧时刻识别策略进行研究更有意义, 本文所提方法主要适用于带有并联电抗器的高压交流输电线路。本文通过分析发生瞬时性故障时故障相端电压在故障点熄弧前后的特性, 发现故障相端电压的绝对值函数积分比在熄弧前后存在显著差异, 基于此差异提出一种检测判据对熄弧时刻进行快速识别。利用EMTP-ATP分别对不同并联补偿度、故障位置以及过渡电阻等情况进行大量仿真, 结果表明所提判据具有较高的灵敏度与自适应性, 能够可靠识别熄弧时刻。

## 1 故障点熄弧前后故障相端电压特性分析

二次电弧极易受到各种外界环境因素的干扰, 使得其熄灭时间长短不一, 仅有熄灭速度极快的二次电弧电压方能在熄弧前保持大致稳定, 在无外力干扰自然熄弧的情况下, 二次电弧电压逐步增大到

收稿日期: 2019-03-05; 修回日期: 2019-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51777130)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777130)

一定幅值,甚至超过恢复电压幅值后方能熄灭。而故障相端电压在二次电弧阶段主要包含静电耦合分量(电磁耦合分量极小,可忽略不计),相比于二次电弧电压,故障相端电压的特性更为稳定,因此本文选用故障相端电压作为判据识别电气量,对其在故障点熄弧前后的特性进行分析。

超高压输电线路发生瞬时性故障后,故障相端电压根据不同时间节点可分为5个阶段,其中,故障点彻底熄弧前为二次电弧阶段,而故障点熄弧后,故障点两端电压开始恢复,故障相端电压进入恢复电压阶段。系统正常工作时A相电压可表示为:

$$u_A(t) = u_{Am} \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

其中,  $u_{Am}$  为A相正常工作时的电压峰值;  $\omega$  为系统角频率;  $\varphi$  为电流滞后电压的角度(假定电流初相角为  $0^\circ$ )。

### 1.1 二次电弧阶段故障相端电压特性分析

对于带有并联电抗器的超高压输电线路,当A相发生单相接地瞬时性故障,两端断路器跳闸后,故障相端电压进入二次电弧阶段。此时,故障相端电压的主要成分为电容耦合电压,图1为熄弧前故障相静电耦合回路。

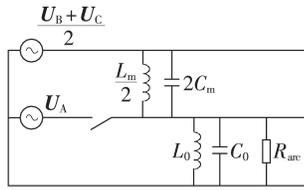


图1 熄弧前故障相静电耦合回路  
Fig.1 Electrostatic coupling circuit of fault phase before arc extinguishing

图1中,  $C_m$ 、 $C_0$  分别为相间电容和相对地电容;  $L_m$ 、 $L_0$  分别为相间补偿电感和相对地补偿电感等效值;  $\frac{U_B + U_C}{2}$  为B、C相合并后的等效电压源,  $U_B$  和  $U_C$  分别为健全相B、C相电压,由于B、C相之间存在相间等值电容和并联电抗器经过小电抗分配后的相间补偿电感,因此静电耦合回路中B、C相的等效电源并不能简单地认为是2个电压源的并联,合并后其幅值应为两者的平均值<sup>[14]</sup>,即合并后的等效电压源为  $\frac{U_B + U_C}{2}$ ;  $R_{arc}$  为电弧电阻,二次电弧阶段初期近似认为  $R_{arc}$  远小于相对地感抗  $j\omega L_0$  以及相对地容抗  $\frac{1}{j\omega C_0}$ 。因此故障相端电压可由式(2)求得。

$$\begin{cases} U_{MA} = \frac{R_{arc}}{X_m} \left( \frac{U_B + U_C}{2} \right) \\ X_m = \frac{j\omega L_m}{2(1 - \omega^2 L_m C_m)} \end{cases} \quad (2)$$

通过计算可知  $X_m$  呈容性,因此  $U_{MA}$  超前  $U_B + U_C$   $90^\circ$ ,又由于  $U_B + U_C$  的瞬时值可表示为:

$$u_h(t) = u_{Am} \cos(\omega t + \varphi - \pi) \quad (3)$$

因此,故障相端电压瞬时值表达式为:

$$u_{MA1}(t) = K_1 u_{Am} \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

其中,  $K_1 = \frac{R_{arc}}{2|X_m|}$ 。

由式(4)可知,二次电弧阶段故障相端电压波形大致呈现为幅值为  $K_1 u_{Am}$ 、角频率为  $\omega$  的余弦波,将其横轴下方波形关于横轴做对称后得到的曲线方程可表示为:

$$u'_{MA1}(t) = \left| K_1 u_{Am} \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{2}\right) \right| \quad (5)$$

### 1.2 恢复电压阶段故障相端电压特性分析

接地点熄弧后,故障相端电压进入恢复电压阶段,其工频分量主要成分为静电耦合电压,熄弧后故障相静电耦合回路如图2所示。

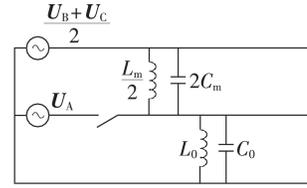


图2 熄弧后故障相静电耦合回路  
Fig.2 Electrostatic coupling circuit of fault phase after arc extinguishing

可求得静电耦合电压为:

$$U_y = \frac{U_B + U_C}{2} \frac{X_0}{X_m + X_0} = \frac{1}{2} \left| \frac{X_0}{X_m + X_0} \right| (U_B + U_C) \quad (6)$$

其中,  $X_0 = \frac{j\omega L_0}{1 - \omega^2 L_0 C_0}$ 。

由于  $X_m$ 、 $X_0$  都呈容性,因此,可近似认为  $U_y$  与  $U_B + U_C$  相位一致,则静电耦合电压瞬时值如式(7)所示。

$$u_y(t) = K_2 u_{Am} \cos(\omega t + \varphi + \pi) \quad (7)$$

其中,  $K_2 = \frac{1}{2} \left| \frac{X_0}{X_m + X_0} \right|$ 。

同时,故障相端电压中还会包含频率略小于工频、幅值接近工频分量的低频振荡分量<sup>[15-16]</sup>,其相位与工频分量相反,瞬时值为:

$$u_l(t) = K_2 u_{Am} \cos(\omega' t + \varphi) \quad (8)$$

其中,  $\omega'$  为低频自振频率。

由上述分析可知,发生瞬时性故障时故障相端

电压在恢复电压阶段的瞬时值可表示为:

$$u_{MA2}(t) = K_2 u_{Am} [\cos(\omega't + \varphi) - \cos(\omega t + \varphi)] \quad (9)$$

而式(9)所示的曲线取绝对值后得到的方程为:

$$u'_{MA2}(t) = |K_2 u_{Am} [\cos(\omega't + \varphi) - \cos(\omega t + \varphi)]| \quad (10)$$

## 2 熄弧时刻识别算法

由第1节分析可得发生瞬时性故障时故障相端电压函数及其绝对值函数波形分别如图3和图4所示。

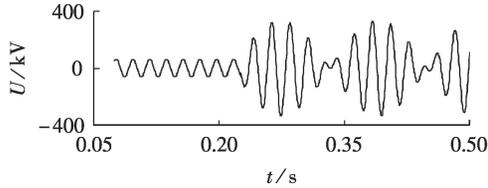


图3 故障相端电压波形

Fig.3 Waveform of terminal voltage in fault phase

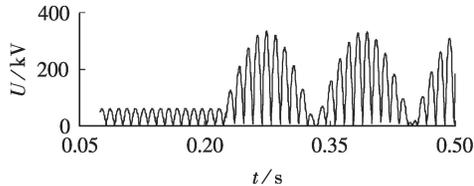


图4 故障相端电压绝对值函数波形

Fig.4 Waveform of absolute value function of terminal voltage in fault phase

由于绝对值函数周期约为半个工频周期,因此在保证检测准确性的前提下尽可能缩短检测时间,取时间窗为10ms、移动步长为1ms,依次对*i*个时间窗内的故障相端电压绝对值函数进行积分得到*J<sub>i</sub>*,求得前后2个时间窗内的积分比如式(11)所示。

$$R_i = \frac{J_{i+1}}{J_i} \quad (11)$$

利用MATLAB对图4所示的波形进行上述处理可得其积分比*R<sub>i</sub>*分布如图5所示。

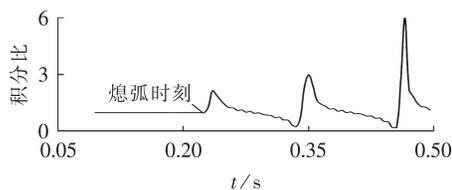


图5 故障相端电压绝对值函数积分比分布

Fig.5 Integral ratio distribution of absolute value function of terminal voltage in fault phase

由图5可见,熄弧前绝对值函数积分比始终约为1,而熄弧之后,积分比在短时间内急剧上升,并且上升幅度较大,故障点熄弧前后短时间内的积分比存在明显的差异,本文基于这种差异实现熄弧时刻的实时检测。检测流程见附录中的图A1。具体

检测方案如下:

(1)故障相断路器完全断开(分闸电弧彻底熄灭)后,为防止残余高频暂态信号干扰判据准确性,考虑留有一定的时间裕量,在分闸电弧彻底熄灭之后延时30ms再提取故障相端电压,得到有效故障相端电压信号*U<sub>M</sub>(t)*和绝对值信号*U'<sub>M</sub>(t)*;

(2)设定时间窗长度为10ms(半个周期),移动步长为1ms,依次计算绝对值信号*U'<sub>M</sub>(t)*在每个时间窗内的积分值*J<sub>i</sub>*;

(3)依次计算前后每2个时间窗内的积分,得到积分比*R<sub>i</sub> = J<sub>i+1</sub> / J<sub>i</sub>*;

(4)为保证检测结果的可靠性,设定裕度系数为0.5,即上阈值*R<sub>set1</sub> = 1.5*、下阈值*R<sub>set2</sub> = 0.5*,若连续5次(1/4个周期)检测到*R<sub>i</sub> ≥ R<sub>set1</sub>*或*R<sub>i</sub> ≤ R<sub>set2</sub>*,则判断故障已熄弧,结束检测,输出熄弧时刻。

检测方案中算法时间窗的选取原则应为:算法时间窗与故障相端电压绝对值函数周期之比为 $\frac{n}{2}$ (*n*为正整数),若不按此原则进行选取,则无法保证二次电弧阶段前后每2个时间段的积分比约为1,并且无法保证恢复电压阶段的积分特性,可能会造成判据失效。因此,本文综合考虑算法的实时性与可靠性,选取绝对值函数的1个周期(10ms)作为时间窗长度,在保证判断结果可靠性的前提下最大限度地减小检测误差。

裕度系数的选取主要考虑判据在二次电弧阶段不会产生误判,理论上二次电弧阶段积分比应始终约为1,但实际过程中难免存在电压波动的情况,本文设置算法裕度系数为0.5(远超过波动范围),可有效防止判据误判,提高判据可靠性。

## 3 仿真实验

利用EMTP-ATP搭建我国某条长度为478km的750kV超高压输电系统仿真模型,验证所提检测方案的准确性,750kV超高压输电系统如图6所示。

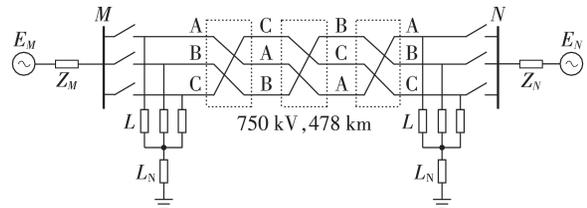


图6 750 kV超高压输电系统

Fig.6 750 kV EHV transmission system

### 3.1 参数设置

(1)线路单位长度正序电阻、电感、电容分别为0.0163Ω/km、0.9056mH/km、0.0133μF/km,单位长度零序电阻、电感、电容分别为0.1572Ω/km、

1.9455 mH/km、0.0101  $\mu$ F/km;  $M$  侧电源正序阻抗  $Z_{M1}=7.11+j37.24 \Omega$ , 零序阻抗  $Z_{M0}=5.5+j28.23 \Omega$ ;  $N$  侧电源正序阻抗  $Z_{N1}=8.71+j59.21 \Omega$ , 零序阻抗  $Z_{N0}=6.5+j31.34 \Omega$ 。

(2) 并联电抗器及其中性点小电抗的取值依赖于线路补偿度, 文献[17-18]已经证实, 750 kV 输电线路的补偿度通常为 80%~100%; 时间参数设定为 0.029 s 时发生单相接地故障, 0.075 s 时断路器断开, 0.225 s 时故障点电弧熄灭。

(3) 由于线路长度为 478 km, 属于长线路, 为平衡三相线路感抗, 需对三相导线进行换位处理; 本文采用 EMTP-ATP 中的 Transp2 ABC-CAB 模块实现这一操作, 整条导线被分为 4 段, 每段排列依次为 ABC-CAB-BCA-ABC。LCC 模块中选用 JMarti 模型, 考虑频率相关性。

(4) 根据文献[5]提供的现场录波可以看出, 实际工程中二次侧得到的故障相端电压在二次电弧阶段的波形近似为余弦波, 因此考虑实际工程意义, 本文利用线性电阻模型来代替电弧模型进行仿真分析, 得到的故障相端电压在二次电弧阶段呈现为余弦波, 在此基础上来验证识别策略的有效性, 使得仿真结果更加贴近实际工程应用。

### 3.2 仿真结果及分析

利用图 6 所示系统分别在不同故障位置、过渡电阻以及补偿度等情况下进行单相接地瞬时性故障仿真, 选取 2 种较为典型的故障情况进行分析。并联补偿度为 80% 时线路末端经 300  $\Omega$  过渡电阻接地以及并联补偿度为 90% 时线路中点经 100  $\Omega$  过渡电阻接地情况下的故障相端电压和积分比如图 7 所示。

从图 7(a) 可以看出, 并联补偿度为 80% 时线路末端经 300  $\Omega$  过渡电阻接地情况下, 故障相端电压积分比分布总体趋势与理论分析基本吻合, 仿真设定熄弧时刻为 0.225 s, 在  $t=0.231$  s 时, 积分比首次超过阈值, 后续 4 次检测积分比始终大于所设阈值, 且在 0.235 s 检测到积分比第 5 次大于阈值时结束检测, 检测输出熄弧时刻  $t=0.235$  s, 而实际设定熄弧时刻为 0.225 s, 检测误差仅为半个工频周期, 可以将检测输出的熄弧时刻认为是实际熄弧时刻。

从图 7(b) 可以看出, 相比于二次电弧阶段末期, 恢复电压阶段初期绝对值函数的电压幅值相对较小, 因此在故障点电弧刚熄灭时, 积分比出现小于 1 的趋势, 当  $t=0.234$  s 时, 积分比首次超过阈值, 检测输出熄弧时刻  $t=0.238$  s, 误差仅为 13 ms, 灵敏度较高。另外, 本文所提判据在熄弧之后半个工频周期左右即可识别出熄弧时刻, 有效避免了后期积分比波动对判据的干扰, 具有较高的可靠性。

图 8 为并联补偿度为 80% 时线路末端经 300  $\Omega$  过渡电阻接地和并联补偿度为 90% 时线路中点经

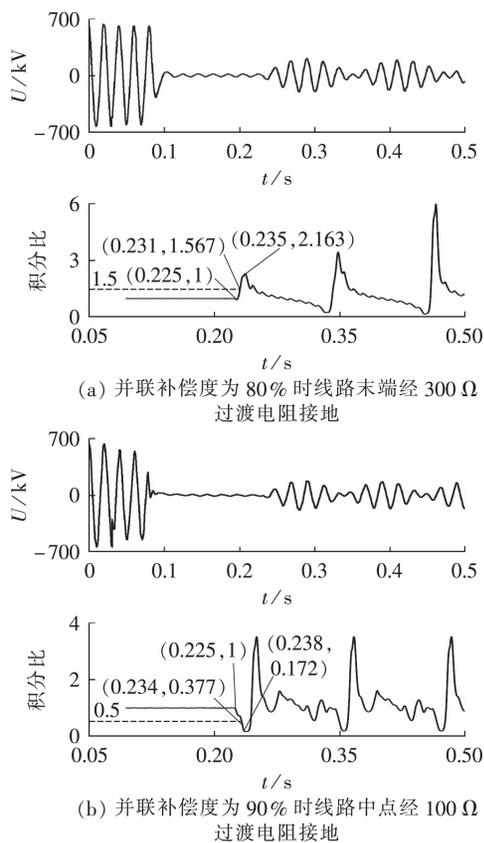


图7 故障相端电压和积分比仿真结果

Fig.7 Simulative results of terminal voltage in fault phase and integral ratio

100  $\Omega$  过渡电阻接地情况下的恢复电压阶段频谱图。由图 8 可见, 在上述 2 种故障情况下, 故障相端电压在接地电弧熄灭后主要包含工频分量以及频率接近于工频的低频分量, 再次验证了 1.2 节理论分析的合理性。各种情况下的检测结果及误差分析见表 1—3, 由于并联电抗器补偿方式通常为欠补偿, 因此表中只列出并联补偿度分别为 80% 和 90% 时的仿真结果。

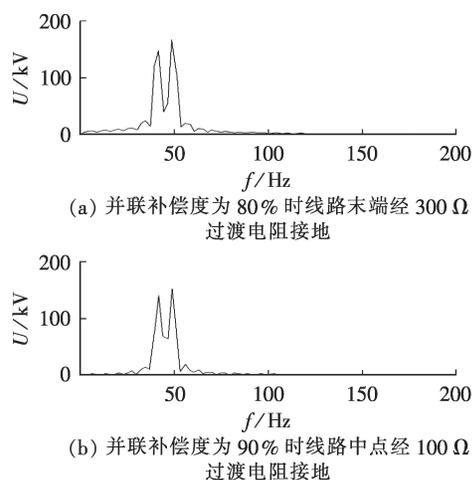


图8 恢复电压阶段故障相端电压频谱图

Fig.8 Frequency spectrum diagram of terminal voltage in fault phase at stage of recovery voltage

表1 不同并联补偿度下线路首端经不同过渡电阻接地时的仿真结果

Table 1 Simulative results of grounding fault with different transition resistances at head of line under different parallel compensation degrees

并联补偿度 / %	过渡电阻 / $\Omega$	实际熄弧时刻 / s	检测熄弧时刻 / s	误差 / ms
80	50	0.225	0.233	8
	100	0.225	0.236	11
	200	0.225	0.229	4
	300	0.225	0.230	5
90	50	0.225	0.232	7
	100	0.225	0.237	12
	200	0.225	0.231	6
	300	0.225	0.229	4

表2 不同并联补偿度下线路中点经不同过渡电阻接地时的仿真结果

Table 2 Simulative results of grounding fault with different transition resistances at midpoint of line under different parallel compensation degrees

并联补偿度 / %	过渡电阻 / $\Omega$	实际熄弧时刻 / s	检测熄弧时刻 / s	误差 / ms
80	50	0.225	0.230	5
	100	0.225	0.235	10
	200	0.225	0.235	10
	300	0.225	0.234	9
90	50	0.225	0.237	12
	100	0.225	0.238	13
	200	0.225	0.233	8
	300	0.225	0.234	9

表3 不同并联补偿度下线路末端经不同过渡电阻接地时的仿真结果

Table 3 Simulative results of grounding fault with different transition resistances at end of line under different parallel compensation degrees

并联补偿度 / %	过渡电阻 / $\Omega$	实际熄弧时刻 / s	检测熄弧时刻 / s	误差 / ms
80	50	0.225	0.232	7
	100	0.225	0.235	10
	200	0.225	0.233	8
	300	0.225	0.235	10
90	50	0.225	0.238	13
	100	0.225	0.229	4
	200	0.225	0.232	7
	300	0.225	0.231	6

由表1—3可知,不同故障情况下,检测输出熄弧时刻普遍大于实际熄弧时刻,不存在故障未熄弧时断路器重合的可能,有效提高了合闸成功率;并且实际检测误差仅为半个工频周期左右,可以认为检测熄弧时刻即为实际熄弧时刻。

文献[19]采用电弧模型进行仿真,得到的故障相端电压在二次电弧阶段呈现为尖峰波。为验证本判据在尖峰波下的适用性,需对故障点引入电弧模

型下的故障相端电压波形进行分析。接地点引入的电弧模型如附录中的图A2所示,图中左半部分虚线框内为一次电弧模型,右半部分虚线框内为二次电弧模型,二者通过 $S_0$ 、 $S_1$ 和 $S_2$ 这3个开关实现时间上的配合控制。此时故障相端电压在二次电弧阶段会呈现尖峰波的现象,接入电弧模型时故障相端电压波形如图9所示。

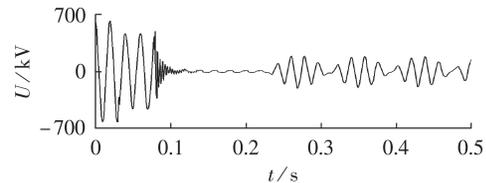


图9 故障电弧模型影响下的故障相端电压

Fig.9 Terminal voltage in fault phase under influence of fault arc model

从图9可以看出,故障相端电压在二次电弧阶段近似呈现为尖峰波,并且该阶段故障相端电压的周期约为20 ms(1个工频周期),其绝对值函数周期约为10 ms,而本文的时间窗长度为绝对值函数的1个周期(10 ms),因此本文所提判据同样适用于尖峰波的情况。考虑实际工程二次侧录波故障相端电压在二次电弧阶段为余弦波,因此,本文仿真主要对余弦波下判据的有效性进行验证,而尖峰波的验证对于实际工程意义不大,此处不再赘述。

## 4 结论

本文针对并联电抗器补偿的超高压输电线路,提出了一种单相接地故障熄弧时刻识别算法,仿真结果表明,该算法具有以下特点:

(1)利用故障点熄弧前后故障相端电压绝对值函数积分比的差异作为识别判据,当检测到积分比连续5次超过所设阈值时,判定故障点电弧熄灭,算法可操作性强,易于实现;

(2)判据不受并联补偿度、过渡电阻以及故障位置的影响,并且与潜供电弧实际熄弧时间的长短无关,具有较强的自适应性;

(3)算法采用时域求解,收敛时间短,且检测误差控制在10 ms左右,识别精度及可靠性高,可为当前自适应熄弧时刻的重合闸装置研究提供参考。

本文所提算法适用于带并联电抗器的高压交流输电系统,而对于不带并联电抗器的系统以及直流输电系统中算法的有效性还有待进一步验证,后续可针对上述2种系统单相/极接地故障熄弧时刻识别等问题展开研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

[1] PATRICIA M, MARIA C T, ANIRUDDHA M G. Implemen-

- tation and performance evaluation of a reclosing method for shunt reactor compensated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2):954-962.
- [2] NING Jiaying, HE Baina, WANG Zhenzhen, et al. Algorithm for adaptive single-phase reclosure on shunt-reactor compensated extra high voltage transmission lines considering beat frequency oscillation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(13):3193-3200.
- [3] 罗勋华, 黄纯, 戴永梁, 等. 输电线路瞬时性故障的恢复电压直流偏移特性研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1):107-111. LUO Xunhua, HUANG Chun, DAI Yongliang, et al. DC offset characteristics of recovery voltage for transient transmission line fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1):107-111.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 何柏娜, 赵云伟, 林鹤云. 带并联电抗器的交流特高压输电线路单相自适应重合闸故障识别方法[J]. 高压电器, 2013, 49(12):13-18, 25. HE Baina, ZHAO Yunwei, LIN Heyun. Fault identification method for single phase adaptive reclosure on UHV AC transmission lines with shunt reactors[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12):13-18, 25.
- [7] RADOJEVIC Z M, SHIN J R. New digital algorithm for adaptive reclosing based on the calculation of the faulted phase voltage total harmonic distortion factor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1):37-41.
- [8] 李娜, 江亚群, 黄纯, 等. 线路单相接地故障熄弧时刻捕捉算法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7):1660-1667. LI Na, JIANG Yaqun, HUANG Chun, et al. Approach to detect arc extinction time of single-phase transient fault in transmission lines[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7):1660-1667.
- [9] 罗薇, 黄纯, 罗勋华, 等. 改进 ACUSUM 算法的自适应重合闸判据[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(9):136-142. LUO Wei, HUANG Chun, LUO Xunhua, et al. Adaptive reclosure criterion based on improved ACUSUM algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(9):136-142.
- [10] KARACASU O, HOCAOGLU M H. An adaline based arcing fault detection algorithm for single-pole autoreclosers[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(2):367-376.
- [11] 索南加乐, 梁振锋, 宋国兵. 自适应熄弧时刻的单相重合闸的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5):37-41. SUONAN Jiale, LIANG Zhenfeng, SONG Guobing. Study of single-phase reclosure with adaptive secondary arc extinction[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5):37-41.
- [12] 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, 16. 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, 16.
- [13] 梁林, 江亚群, 黄纯. 带并联电抗器的超高压输电线路单相故障识别[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(8):32-37. LIANG Lin, JIANG Yaqun, HUANG Chun. Identification of single-phase fault for UHV transmission lines with shunt reactor[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(8):32-37.
- [14] ZADEH M R D, VOLOH I, KANABAR M, et al. An adaptive HV transmission lines reclosing based on voltage pattern in the complex plane[C]//2012 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers. College Station, TX, USA: IEEE, 2012:85-95.
- [15] 邵文权, 南树功, 章霄微, 等. 带并补电抗器超/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.
- [16] 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.
- [17] 胡玉生. 超高压串补线路熄灭潜供电弧的研究[D]. 西安:西安科技大学, 2013. HU Yusheng. Study of secondary arc extinction in UHV transmission line with series capacitors[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [18] 顾生杰, 田铭兴. 基于串联电容补偿的超/特高压输电线路可控并联电抗器补偿度分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(6):1858-1863. GU Shengjie, TIAN Mingxing. Analysis of compensation degree of controllable shunt reactor installed in series capacitor compensated EHV/UHV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6):1858-1863.
- [19] 江亚群, 冷崇富, 黄纯, 等. 基于LMD近似熵和SVM的自适应重合闸方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(8):74-80. JIANG Yaqun, LENG Chongfu, HUANG Chun, et al. Adaptive reclosure method based on LMD-approximate entropy and SVM[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2015, 42(8):74-80.

#### 作者简介:



何柏娜

何柏娜(1977—),女,辽宁沈阳人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统仿真及高电压绝缘技术(E-mail: hbn770425@163.com);

宁家兴(1993—),男,山东威海人,硕士研究生,通信作者,研究方向为电力系统自适应重合闸技术(E-mail: ningjiaxing93@163.com);

黄桂春(1979—),女,湖北武汉人,讲师,硕士,主要研究方向为电力系统仿真以及智能电网配电网控制(E-mail: guichunhuang@126.com)。

(编辑 任思思)

## Identification strategy of arc extinguishing time of single-phase grounding fault based on integral ratio distribution

HE Baina, NING Jiaying, HUANG Guichun, KONG Jie, WANG Lemiao, XIE Yadi,  
JIANG Renzhuo, MAO Yazhe, ZHOU Yuyang

(College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** The existing adaptive reclosure usually recloses by inherent delay after transient fault is identified, and ignores whether the arc has extinguished at the fault point. So it is necessary to identify the time of the fault arc extinguishing to further improve adaptive capability of reclosure. The characteristics of fault phase terminal voltage of EHV (Extra High Voltage) transmission lines before and after arc extinguishing are calculated and analyzed. The difference of absolute value function about fault phase terminal voltage at the stage of secondary arc and recovery voltage when transient fault occurs is compared. It is found that the integral of the absolute value function at the stage of secondary arc is always unchanged in adjacent time windows, and the integral ratio is about 1. However, the integral in adjacent time windows at the initial stage of recovery voltage is significantly different, and the integral ratio shows obvious mutation. The integral ratio of absolute value function about fault phase terminal voltage is used as a criterion for identification of extinguishing time by setting up and down threshold values. If the integral ratio exceeds the threshold value five times in a row, the arc distinguishing is judged. A large number of EMTP-ATP simulations show that the proposed criterion can identify the extinguishing time reliably, and is immune to parallel compensation degree, fault location and fault resistance, so it has strong adaptability.

**Key words:** EHV power transmission; transient fault; fault phase terminal voltage; shunt reactor; integral ratio; arc extinguishing time

(上接第137页 continued from page 137)

## Joint optimization of active / reactive power for hybrid island power grids with weak AC system and VSC-MTDC

WANG Xiaohui<sup>1</sup>, LI Shu<sup>1</sup>, ZHONG Yujun<sup>2</sup>, LI Cheng<sup>2</sup>, LU Dandan<sup>2</sup>, JIA Ke<sup>3</sup>, LIU Dong<sup>4</sup>, SHI Fang<sup>1</sup>

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

2. Zhoushan Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Zhoushan 316021, China;

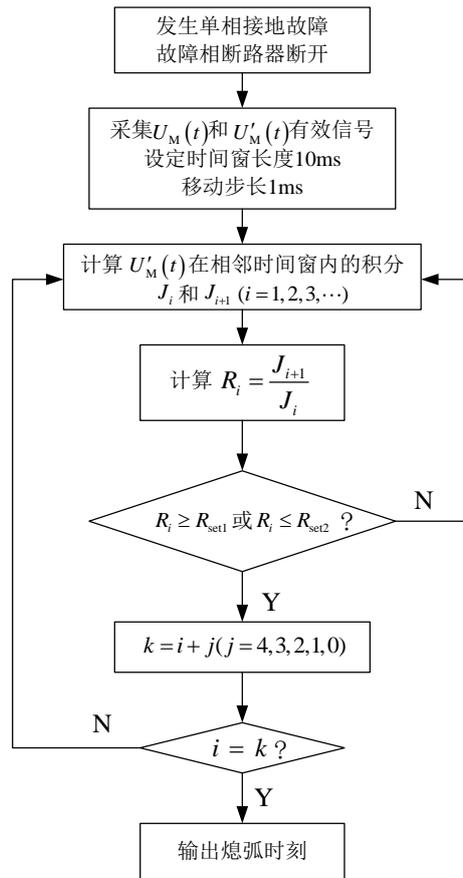
3. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,  
North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

4. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** The traditional island AC grids are usually weak and faced with some inherent challenges such as the large reactive power imposed by AC submarine cables, the small stability margin, the short device service-life due to frequent switching, and so on. As VSC-MTDC (Voltage Source Converter based Multi-Terminal Direct Current) system fulfills the supply demands of islands in a better way, the AC / VSC-MTDC hybrid power grid tends to be the popular choice in island. Since the transmission characteristics of active and reactive power in the weak AC island power grids correlating with each other, the voltage amplitude difference is not only relevant to reactive power, while the phase angle difference is not only related to real power. An active / reactive power joint optimization strategy is proposed. It controls the VSC outputs to coordinate the controlled outputs from VSC-MTDC with the measures of AC networks in parallel. A multi-objective optimization model solvable by GA (Genetic Algorithm) is established, which considers the system loss, the switching costs of devices and the stability margin. In line with the concerned issues in island power grids, the proposed optimization strategy is validated by the simulation case of  $\pm 200$  kV five-terminal flexible DC demonstration project in Zhoushan, Zhejiang. The results confirm the advantages of the joint optimization over the sole strategy based on either active or reactive power.

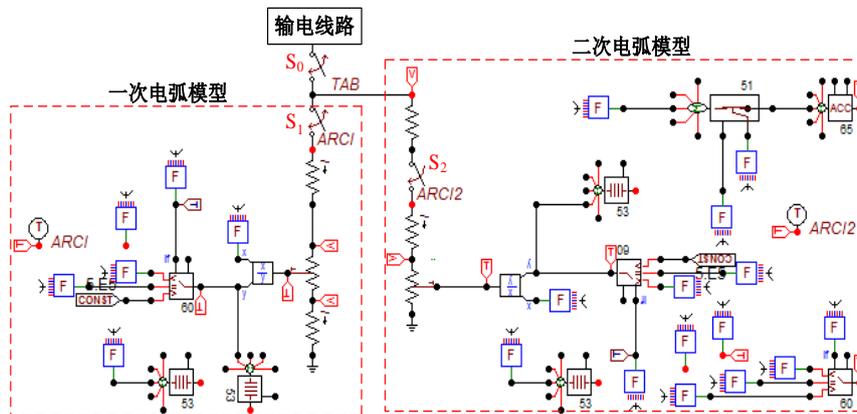
**Key words:** island power grid; AC / DC hybrid power grid; active / reactive power joint optimization; multi-objective optimization; genetic algorithm; VSC-MTDC

# 附录



图A1 熄弧时刻检测流程图

Fig.A1 Flowchart for detection of arc extinction time



图A2 接地电弧模型仿真图

Fig.A2 Simulation diagram of grounding arc model