

# 输电线路两相短路故障的自适应分相重合闸方法<sup>\*</sup>

江亚群<sup>1†</sup>,洪俊宇<sup>1</sup>,黄纯<sup>1</sup>,高云鹏<sup>1</sup>,江辉<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082; 2. 深圳大学 光电工程学院,广东 深圳 518060)

**摘要:**针对不带并联电抗器的超高压输电线路上的两相短路故障,提出一种自适应分相重合闸方法.搭建两相短路故障分析电路模型,推导出瞬时性故障下不同阶段选跳相端电压的时域表达式,分析选跳相端电压特性.研究发现,瞬时性故障二次电弧熄弧时,选跳相断路器两端电压的相角差由 $-120^\circ$ 突变到 $180^\circ$ ,且熄弧后恢复电压中出现明显的衰减直流分量.利用选跳相端电压的上述特征,提出了二次电弧熄灭时刻捕捉判据,实现了超高压输电线路上的自适应分相重合闸,并通过仿真验证了分析结果的正确性及所提方法的有效性.

**关键词:**输电线路;自适应重合闸;分相重合闸;瞬时性故障;故障分析

**中图分类号:**TM762.2

**文献标志码:**A

## An Approach to Adaptive Sequential Reclosure of Two Phase Short Circuit Fault in Transmission Lines

JIANG Yaqu<sup>1†</sup>, HONG Junyu<sup>1</sup>, HUANG Chun<sup>1</sup>, GAO Yunpeng<sup>1</sup>, JIANG Hui<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** For the phase-to-phase short circuit fault occurred in transmission lines without shunt reactor, a method of adaptive sequential reclosure is proposed in this paper. A circuit model is built for analyzing the phase-to-phase short circuit fault, and the time domain expression of terminal voltage is deduced for the open-phase at different stages of transient fault. The recovery voltage characters of terminal voltage at open-phase is analyzed in detail. The theoretical analysis shows that the phase angle difference of terminal voltage at open-phase changes suddenly from  $-120^\circ$  to  $180^\circ$  in the moment of arc extinction, and the decaying DC component appears obviously in the recovery voltage after the arc extinction. According to the above characteristics of terminal voltage at open-phase, a criterion was proposed to detect the arc extinction time and realize the adaptive sequential reclosure of transmission line. The simulations verified the correctness of the analysis result and the validity of the proposed method.

**Key words:** transmission line; adaptive reclosure; sequential reclosure; transient fault; fault analysis

<sup>\*</sup> 收稿日期:2017-03-13

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51677060), National Natural Science Foundation of China(51677060); 广东省自然科学基金资助项目(2016A030313041), National Natural Science Foundation of Guangdong Province (2016A030313041)

**作者简介:**江亚群(1971—),女,湖南桃源人,湖南大学副教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: yaqujiang@qq.com

超高压输电线路发生的故障大多数是瞬时性的,对于瞬时性故障,重合闸能恢复线路的正常运行,有效提高电力系统的安全稳定运行。于是,自动重合闸技术在输电系统得到了广泛应用。但目前电力系统中所使用的自动重合闸大多是按照设定的重合时间间隔进行合闸,容易盲目重合于永久性故障,导致重合闸失败,使电力系统受到更严重的冲击<sup>[1-2]</sup>;或者为避免重合于瞬时性故障的二次电弧阶段,重合时间间隔整定较长,延长了不必要的非全相运行时间。因此故障性质的有效识别和二次电弧熄弧时刻的准确捕捉成为了关键。

目前,国内外单相自适应重合闸方面的理论研究日益成熟并开始逐步推广。在国内,大多学者对于单相自适应重合闸的理论研究主要集中于如何判别故障性质上。对于不带并联电抗器的超高压输电线路,文献[3]根据线路侧断开处正负序无功功率分量在不同故障性质下变化率的不同来区分瞬时性还是永久性故障。对于带并联电抗器的超高压输电线路,文献[4]通过利用恢复电压阶段是否出现拍频特性来完成故障性质识别;文献[5]利用参数识别原理快速识别出了故障类型;文献[6]通过小波包能量熵的方法实现了故障性质的准确识别。

在国外,对于单相自适应重合闸的理论研究主要集中于二次电弧特性。文献[7]利用二次电弧熄弧前后零序电压三次谐波含量的不同对熄弧时刻进行判断;文献[8]通过检测零序瞬时功率的基波含量来对熄弧时刻进行捕捉;文献[9]利用二次电弧熄弧前后,故障相端电压的急剧变化来捕捉熄弧时刻。

总的来说,国内外的研究主要集中于单相接地故障的单相自适应重合闸,而对于相间短路故障(含两相接地/不接地故障及三相故障接地/不接地短路故障)的自适应分相重合闸方面的研究有待深入。

运行经验表明,两相和三相短路故障约占输电线路的20%~30%,虽然比例较小,但其对电力系统的影响不容忽视,因此,自适应分相重合闸有很大的应用价值。

对于不带并联电抗器的自适应分相重合闸,文献[10]利用自适应分相重合的原理及逻辑,结合分相重合后线路侧的电压特征,提出了区分瞬时性与永久性故障的分相重合闸有效判据。文献[11]将自适应分相重合闸应用于发电机系统,并配合最佳重合闸时间,有效地提高了发电机系统的稳定性。为了使分相重合闸的研究更加完善,文献[12]进而提出了首合相判据,通过检测合闸后线路侧的电压,决定

是否进行首合相合闸。

本文从不带并联电抗器的超高压输电线路两相短路故障的角度出发,通过搭建故障分析电路模型,基于这一模型以及必要的等效电路和运算电路推导了选跳相端电压在故障发生后不同阶段的理论表达式,并得出瞬时性故障情况下选跳相恢复电压中含有衰减直流分量的重要结论,弥补了现阶段两相短路故障以及自适应分相重合闸相关理论分析的不足,并且提出了一种捕捉故障电弧熄弧时刻的方法。

## 1 自适应选跳分相重合闸原理

自适应选跳分相重合闸的理论思想是自适应单相重合闸思想的合理扩展。自适应单相重合闸是发生单相接地故障时断开故障相来消除故障,然后判别瞬时性故障还是永久性故障,若是瞬时性故障就重合。自适应选跳重合闸是在发生多相故障(接地或不接地)时,根据故障类型选出应该跳开的相而不是所有相来消除线路上已存在的故障,然后再分相重合,而且分相重合要以能区分瞬时性故障或永久性故障为根据<sup>[13-14]</sup>。

选跳与分相重合逻辑如表1。以A、B相相间短路(表中故障类型AB)为例,若线路发生A、B两相短路故障,只跳开其中的一相A或者B,切断线路故障电流,然后判定故障性质以决定是否分相重合。本文只讨论两相相间短路故障的自适应重合闸。

表1 自适应选跳分相重合闸重合逻辑

Tab.1 Logic of adaptive sequence reclosure

故障类型	选跳相	重合相
AB	A 或 B	A 或 B
BC	B 或 C	B 或 C
CA	C 或 A	C 或 A
ABG	A 与 B	A 或 B
BCG	B 与 C	B 或 C
CAG	C 与 A	C 或 A
ABC	A 与 B 与 C	A 或 B 或 C
ABCG	A 与 B 与 C	A 或 B 或 C

## 2 选跳相端电压特性分析

输电线路瞬时性两相短路故障从故障发生到消失的过程包括3个阶段:一次电弧阶段、二次电弧阶段以及恢复电压阶段。选跳相端电压在不同阶段具有不同的特性。

### 2.1 瞬时性故障二次电弧阶段选跳相端电压分析

一次电弧和二次电弧分别发生在故障出现到断路器跳闸前的一次电弧阶段以及断路器跳闸后的二次电弧阶段,且一次电弧电流较二次电弧电流大,为了分析选跳相端电压的特性,本文忽略线路阻抗,用图1所示电路来简化求解线路模型,其中 $E_A$ 、 $E_B$ 、 $E_C$ 为三相电源电压, $R_b$ 为过渡电阻, $C_m$ 、 $C_0$ 分别为相间耦合电容和对地耦合电容,其简化的等效电路如图2所示.

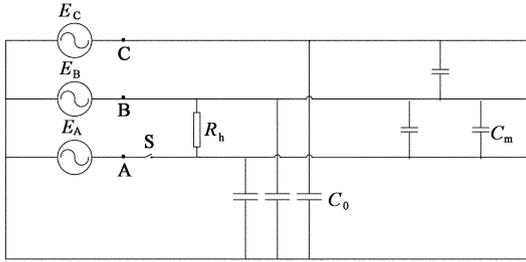


图1 输电线路两相短路故障等效电路  
Fig. 1 Equivalent circuit of two-phase short circuit fault of transmission line

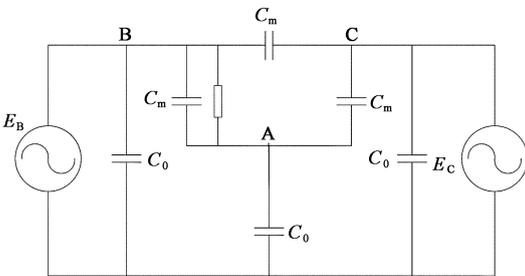


图2 二次电弧熄弧前的等效电路  
Fig. 2 Equivalent circuit before secondary arc extinction

A、B相发生相间短路故障时,选跳A相,剩余的相仍处于运行状态.由于此时故障点还存在,所以跳开相(A相)与另外的运行相(B相)通过相间过渡电阻连接(相间过渡电阻阻值很小,近似认为是短路线).因此,此时的A相电压较大,近似与B相电压相等,并且只含有工频分量.

### 2.2 瞬时性故障恢复电压阶段选跳相端电压分析

因为AB发生相间短路时,从跳闸到故障消失(二次电弧阶段)这段时间,相间耦合电容被短路,所以这段时间内它将通过过渡电阻很快放电(与单相接地故障不同,单相接地故障情况下是对地电容很快放电<sup>[15-16]</sup>).到了故障熄弧时,相间电容的充电电压基本为0,而对地电容充电电压不为0.

二次电弧熄弧后(相当于图1中过渡电阻 $R_b$ 变得无穷大),进入恢复电压阶段.考虑到线路中对地

电容的储能较大,熄弧后该能量会以直流分量的形式释放出来,并通过对地电导 $G_0$ 逐渐衰减,因此,选跳相端电压会出现衰减直流分量.为了书写方便,我们将电导 $G_0$ 转化为对地等效电阻 $R_0$ .于是,便得到图3的等效运算电路.

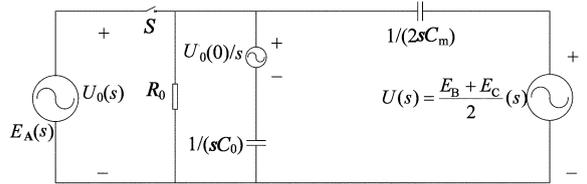


图3 二次电弧熄弧后的运算电路  
Fig. 3 Arithmetic circuit after secondary arc extinction

此时选跳相(A相)的端电压为对地耦合电压和电磁耦合电压的叠加.假设在二次电弧熄弧的瞬间,对地电容上的充电电压为 $U_0(0)$ ,忽略线路阻抗,利用节点电压法求解得到对地点耦合电压 $U_0(s)$ 为:

$$\left(\frac{1}{R_0} + sC_0 + 2sC_m\right)U_0(s) = sC_0 \frac{U_0(0)}{s} + 2sC_m U(s) \tag{1}$$

化简得:

$$U_0(s) = \frac{2R_0 C_m s U(s)}{R_0 (C_0 + 2C_m) s + 1} + \frac{R_0 C_0 U_0(0)}{R_0 (C_0 + 2C_m) s + 1} = U'_0(s) + U''_0(s) \tag{2}$$

其中, $U'_0(s) = \frac{2R_0 C_m s U(s)}{R_0 (C_0 + 2C_m) s + 1}$ ;

$$U''_0(s) = \frac{R_0 C_0 U_0(0)}{R_0 (C_0 + 2C_m) s + 1}$$

令 $\dot{U} = (\dot{E}_B + \dot{E}_C)/2$ ,且 $u(t) = U_m \sin(\omega t + \theta)$ ,则 $u(t)$ 的拉普拉斯变换式为:

$$U(s) = \frac{\omega \cos \theta + s \sin \theta}{s^2 + \omega^2} U_m \tag{3}$$

将式(3)代入 $U'_0(s)$ ,求得:

$$U'_0(s) = \frac{2R_0 C_m s}{R_0 (C_0 + 2C_m) s + 1} \frac{U_m (\omega \cos \theta + s \sin \theta)}{s^2 + \omega^2} \tag{4}$$

通过对 $U'_0(s)$ 的分母的多项式特征根进行分析,可将 $u'_0(t)$ 定性描述为:

$$u'_0(t) = U_1 e^{-\frac{t}{\tau}} + U_2 \cos(\omega t + \varphi) \tag{5}$$

式中: $U_1$ 为电压直流分量的初始值; $\tau = R_0(2C_m + C_0)$ 为衰减时间常数.

$$U_2 = 2 \left| (s - j\omega) U'_0(s) \right|_{s=j\omega} = 2U_m \left| \frac{\omega R_0 C_m (\cos \theta + j \sin \theta)}{1 + j\omega R_0 (2C_m + C_0)} \right| =$$

$$2U_m \frac{1}{\sqrt{1/(\omega R_0 C_m)^2 + (2 + C_0/C_m)^2}}$$

将  $U_0''(s)$  进行反拉普拉斯变换得到其时域表达式为:

$$u_0''(t) = \frac{C_0 U_0(0)}{(C_0 + 2C_m)} e^{-R_0(C_0 + 2C_m)t} \quad (6)$$

所以,

$$u_0(t) = (U_1 + \frac{C_0 U_0(0)}{C_0 + 2C_m}) e^{-R_0(C_0 + 2C_m)t} + U_2 \cos(\omega t + \varphi) \quad (7)$$

由式(7)可以看出,选跳相(A相)的对地耦合电压由(衰减)直流分量和工频正弦分量这两部分组成,与电磁耦合电压  $\dot{U}_X$  进行叠加后为选跳相端电压.在超高压输电线路中,线路相间耦合电容和对地耦合电容通常都在  $10^{-8} \sim 10^{-7}$  F 范围内,而对地电导数值很小,进而转化成的对地电阻  $R_0$  很大.因此,衰减时间常数  $\tau = R_0(C_0 + 2C_m)$  较大,直流衰减较慢.

### 2.3 永久性故障时的选跳相端电压

当发生永久性故障时,因为故障点一直存在,选跳相与另外仍在正常运行的相一直通过相间过渡电阻持续连接,由于正常运行的相都是工频分量,所以此时跳开相端电压中只含有稳定的工频分量,不会产生衰减直流分量.

## 3 熄弧时刻捕捉方法

### 3.1 熄弧时刻捕捉原理

二次电弧熄弧前,由于选跳相(A相)端电压与B相电压近似相等,忽略线路阻抗,设选跳相(A相)端电压为  $\dot{U}_\varphi$ ,此时可以认为  $\dot{U}_\varphi = \dot{E}_B$ ,它与  $\dot{E}_B + \dot{E}_C$  的相位关系如图4所示.此时,它与  $\dot{E}_B + \dot{E}_C$  所成角度为

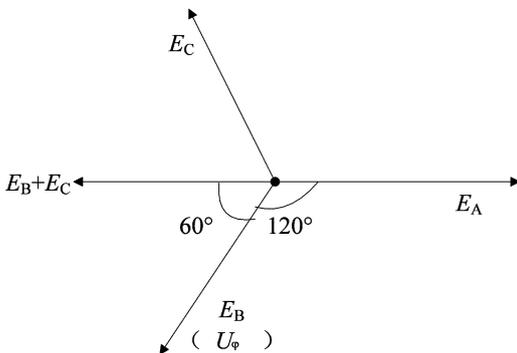


图 4 二次电弧熄弧前  $\dot{U}_\varphi$  与  $\dot{E}_B + \dot{E}_C$  的相位关系  
Fig. 4 Phase relationship between  $\dot{U}_\varphi$  and  $\dot{E}_B + \dot{E}_C$  before secondary arc extinction

$60^\circ$ ,即此时  $\dot{U}_\varphi$  与  $\dot{E}_A$  的相角差是  $-120^\circ$ .需要指出的是,这里我们以 A 相电源电压  $\dot{E}_A$  为参考相量.

那么,如果是永久性故障,选跳相(A相)端电压  $\dot{U}_\varphi$  与  $\dot{E}_B + \dot{E}_C$  的这种角度关系将一直维持不变(因为故障点一直存在,A相和B相持续连接),即  $\dot{U}_\varphi$  与  $\dot{E}_A$  将一直维持  $-120^\circ$  的相角差.如果是瞬时性故障,电弧熄灭时,故障点将消失,且这个角度也会发生较大的变化.由于选跳相跳开后其与健全相之间的电磁耦合电压频率为工频且幅值很小,因此可不考虑选跳相端电压中电磁耦合电压分量对其端电压的影响,即选跳相端电压中主要为电容耦合电压.这时,我们可以通过图5所示等效电路求出  $\dot{U}_\varphi = \frac{2C_m}{2C_m + C_0} (\frac{\dot{E}_B + \dot{E}_C}{2})$ .可以看出,熄弧后  $\dot{U}_\varphi$  近似与  $\dot{E}_B + \dot{E}_C$  同相位,即此时  $\dot{U}_\varphi$  与  $\dot{E}_A$  的相角差为  $180^\circ$ ,相位关系图见图6.

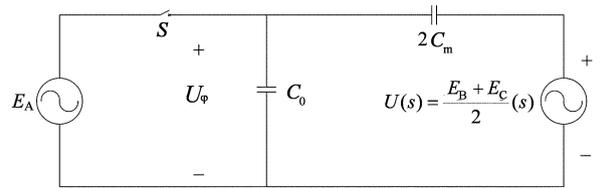


图 5 熄弧后的等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit after secondary arc extinction

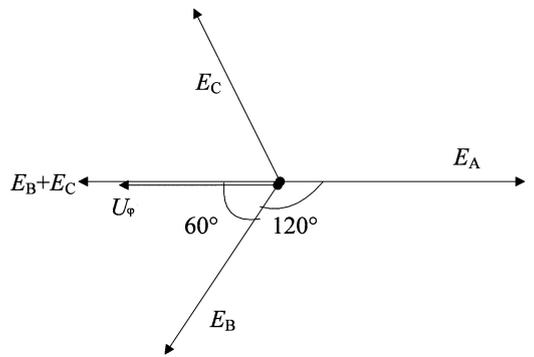


图 6 二次电弧熄弧后  $\dot{U}_\varphi$  与  $\dot{E}_B + \dot{E}_C$  的相位关系  
Fig. 6 Phase relationship between  $\dot{U}_\varphi$  and  $\dot{E}_B + \dot{E}_C$  after secondary arc extinction

因此,如果选跳相断路器的线路侧电压  $\dot{U}_\varphi$  与母线侧电压  $\dot{E}_A$  的相角差发生突变,由  $-120^\circ$  变化到  $180^\circ$ ,或电压  $\dot{U}_\varphi$  与线路侧另两相电压和的相位相同,即可认为故障电弧熄灭,据此可捕捉熄弧时刻.

### 3.2 熄弧时刻捕捉的实现步骤

1) 以 20 kHz 的采样频率对线路侧的三相电压

进行采样,取其数据进行分析.

2)通过选相元件确定故障类型,如果不是两相相间故障,另行处理;否则,任选一故障相跳闸;

3)采用 DFT 计算选跳相端电压相位角及其它两相电压和的相位角,并计算它们的相角差  $\Delta\varphi$ ;

4)当相角差突变后并满足  $|\Delta\varphi| \leq 10^\circ$  时,判断为瞬时性故障且电弧已熄灭,经适当延时绝缘恢复后重合闸.

### 4 仿真验证

#### 4.1 仿真模型及其参数

为验证上述理论分析的正确性,采用 ATP-EMTP 对图 7 所示 500 kV、320 km 不带并联电抗器的输电线路进行数字仿真实验.

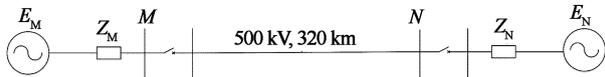


图 7 不带并联电抗器的输电系统

Fig. 7 Transmission system without shunt reactor

线路参数为:正序电阻  $r_1 = 0.01667 \Omega/\text{km}$ ,零序电阻  $r_0 = 0.16922 \Omega/\text{km}$ ;正序电感  $l_1 = 0.98528 \text{ mH}/\text{km}$ ,零序电感  $l_0 = 3.69415 \text{ mH}/\text{km}$ ;正序电容  $c_1 = 0.01227 \mu\text{F}/\text{km}$ ;零序电容  $c_0 = 0.00761 \mu\text{F}/\text{km}$ . 两侧电源系统的正序阻抗均为  $Z_1 = 0.23 + j49.39 \Omega$ ,零序阻抗均为  $Z_0 = 0.74 + j41.36 \Omega$ ;两侧的波阻抗均为  $150 \Omega$ . 电弧模型采用 EMTP 中的 TACS 模块 Type91<sup>[17]</sup>.

#### 4.2 选跳相端电压波形特征仿真

在  $t = 0.1 \text{ s}$  时,系统发生 AB 相间短路故障,选跳相(A相)两端断路器在  $t = 0.2 \text{ s}$  时断开. 图 8 为发生永久性相间短路故障时的选跳相(A相)端电压波形,由图可知在断路器动作后选跳相端电压一直与运行相(B相)电压近似相等,并且未出现直流衰减现象.

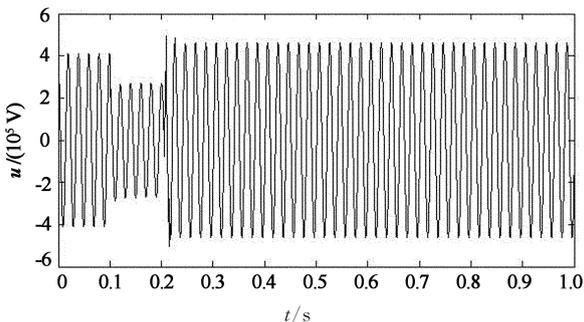


图 8 永久性两相短路故障时选跳相端电压波形

Fig. 8 Waveform of terminal voltage at open-phase in permanent two-phase short circuit fault

减现象. 图 9 中瞬时性故障二次电弧在  $t = 0.41 \text{ s}$  时熄弧,熄弧后明显出现之前理论分析所得的直流衰减现象.

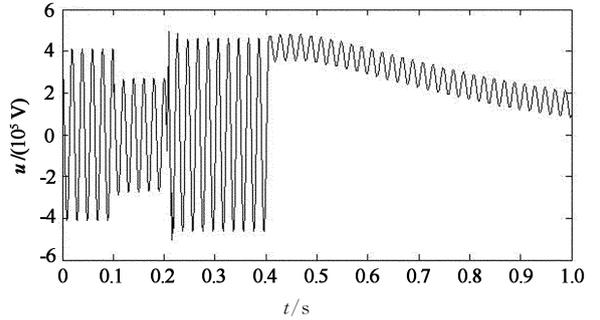


图 9 瞬时性两相短路故障时选跳相端电压波形

Fig. 9 Waveform of terminal voltage at open-phase in transient two-phase short circuit fault

#### 4.3 熄弧时刻捕捉的仿真验证

采用 MATLAB 对  $\dot{U}_\varphi$  和  $\dot{E}_A$  的采样数据进行 DFT 变换,得到  $\dot{U}_\varphi$  与  $\dot{E}_A$  的相角差,结果如图 10、图 11 所示.

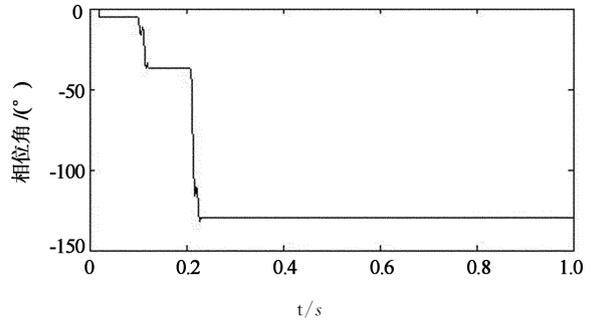


图 10 永久性两相短路故障时选跳相端电压相角差

Fig. 10 Phase angle difference of terminal voltage at open-phase in permanent two-phase short circuit fault

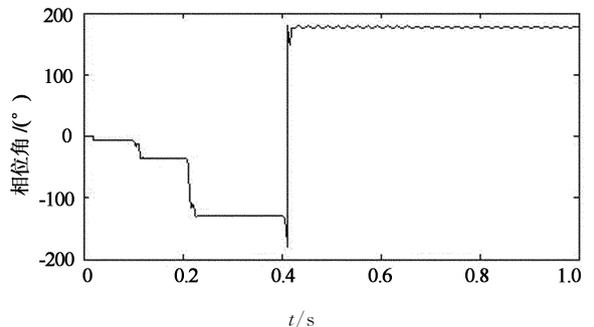


图 11 瞬时性两相短路故障时选跳相端电压相角差

Fig. 11 Phase angle difference of terminal voltage at open-phase in transient two-phase short circuit fault

由仿真可以明显看出,永久性故障情况下,0.2

s 断路器跳闸后,选跳相(A相)端电压  $\dot{U}_\varphi$  与  $\dot{E}_A$  的相角差一直维持约  $-120^\circ$  不变。

瞬时性故障下,0.2 s 选跳相(A相)跳闸后,其端电压与  $\dot{E}_A$  的相角差近似为  $-120^\circ$ ,而到了 0.4 s 故障消失后,它们的相角差突变到约  $180^\circ$  左右,然后维持一个相对稳定的数值,与理论分析完全相符。另外,需要指出的是,由于瞬时性故障下,恢复电压阶段电压相角的计算受到衰减直流分量的影响,会出现误差,这一误差导致相角差计算值出现图 11 所示的振荡现象。

本文还针对瞬时性故障下不同电源相角差、不同故障位置、不同过渡电阻值的情况做了大量的仿真实验电弧熄弧时刻仿真结果如表 2 所示。

表 2 电弧熄弧时刻仿真结果

Tab. 2 The results of simulation of arc extinction time

电源相角差/ $^\circ$	故障位置/%	相间过渡电阻/ $\Omega$	熄弧时间/s	
10	25	5	0.412 6	
		100	0.412 2	
	50	5	0.412 7	
		100	0.412 3	
		5	0.412 2	
		100	0.412 3	
	20	25	5	0.413 0
			100	0.412 6
50		5	0.413 1	
		100	0.412 6	
		5	0.413 1	
		100	0.412 6	
30		25	5	0.413 5
			100	0.413 0
	50	5	0.413 4	
		100	0.413 0	
		5	0.413 5	
		100	0.413 0	

从表 2 中的数据可以看出,当两端电源相角差、故障位置以及过渡电阻值发生改变时,仿真得到的电弧熄弧时刻均在 0.41 s 左右,误差很小,可以有效实现熄弧时刻的判断。

## 5 结 论

1) 通过输电线路两相相间短路故障电路分析模型,推导了故障选跳相端电压的表达式,理论分析出,瞬时性故障恢复电压阶段,选跳相端电压将会出现衰减直流分量,而永久性故障情况下则不会有类似情况,这一点与单相自适应重合闸有较大不同。

2) 通过对选跳相端电压相位变化特征进行分

析,发现瞬时性故障二次电弧熄弧时刻,选跳相断路器两端电压的相角差)将会出现突变,由此提出了基于相角差变化量来判断两相相间故障情况下是否熄弧的方法。

3) 通过大量的 ATP-EMTP 及 MATLAB 仿真测试验证了本文理论分析的正确性。

本文只讨论两相短路故障,对于其它类型的相间故障的自适应重合闸方法,将在后续工作中继续研究。

## 参考文献

- [1] 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. (In Chinese)
- [2] 葛耀中.在单相自动重合闸过程中判别瞬时故障和永久故障的方法[J].西安交通大学学报,1984,18(2):23-32.  
GE Yaozhong. Identification of temporary fault and permanent fault for single-phase reclosure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1984, 18(2): 23-32. (In Chinese)
- [3] 罗勋华,黄纯,潘志敏,等.基于序分量无功功率的单相自适应重合闸[J].电工技术学报,2016,31(11):149-156.  
LUO Xunhua, HUANG Chun, PAN Zhimin, *et al.* Single-phase adaptive reclosure based on reactive power of sequence components[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 149-156. (In Chinese)
- [4] 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. (In Chinese)
- [5] 索南加乐,邵文权,宋国兵.基于参数识别的单相自适应重合闸研究[J].中国电机工程学报,2009,29(1):48-54.  
SUONAN Jiale, SHAO Wenquan, SONG Guobing. Study on single-phase adaptive reclosure scheme based on parameter identification [J]. Proceeding of the CSEE, 2009, 29(1): 48-54. (In Chinese)
- [6] 黄娟,黄纯,江亚群,等.基于小波包近似熵的线路故障性质辨识方法[J].仪器仪表学报,2012,33(9):2009-2015.  
HUANG Juan, HUANG Chun, JIANG Yaquin, *et al.* Identification method of fault characteristics in transmission lines based on wavelet packet and approximate entropy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(9): 2009-2015. (In Chinese)

- [7] JAMALI S, PARHAM S. New approach to adaptive single-pole auto-reclosing of power transmission lines[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2010, 4(1): 115–122.
- [8] ELKALASHY N I, DARWISH H A, TAALAB A M I, *et al.* An adaptive single pole auto-reclosure based on zero sequence power[J]. *Electric Power Systems Research*, 2007, 77(5): 438–446.
- [9] 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.
- [10] 黄莹, 葛耀中. 自适应分相重合闸的判据及其仿真计算[J]. *继电器*, 1996, 24(4): 4–8.  
HUANG Ying, GE Yaozhong. Adaptive reclosing criteria and its simulation[J]. *Relay*, 1996, 24(4): 4–8. (In Chinese)
- [11] 郁惟镛, 房鑫炎, 王山虎, 等. 自适应重合闸的机理及仿真计算[J]. *上海交通大学学报*, 1996, 30(9): 63–68.  
YU Weiyong, FANG Xinyan, WANG Shanhu, *et al.* Function and simulation calculation of adaptive reclose [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1996, 30(9): 63–68. (In Chinese)
- [12] 房鑫炎, 郁惟镛, 王曼. 自适应重合闸中首合相判据的分析[J]. *电力自动化设备*, 1997, 17(3): 21–23.  
FANG Xinyan, YU Weiyong, WANG Man. Research on first-reclose phase judgment of adaptive reclosure [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 1997, 17(3): 21–23. (In Chinese)
- [13] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术(第二版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 411–413.  
GE Yaozhong. New types of protective relaying and fault location: their theory and techniques(2nd ed)[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007: 411–413. (In Chinese)
- [14] 曹芬. 高压输电线路自适应重合闸技术研究[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2010: 52–58.  
CAO Feng. Research on adaptive reclosing technique for HV transmission lines[D]. Hangzhou: College of Electrical Engineering, Zhejiang University, 2010: 52–58. (In Chinese)
- [15] 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 the shunt reactor [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(6): 76–80. (In Chinese)
- [16] 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. (In Chinese)
- [17] 陈奎, 陈博博. 基于改进暂态相关分析和支持向量机的电弧故障选线研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(24): 66–73.  
CHEN Kui, CHEN Bobo. Research on arc fault line selection based on improved transient correlation analysis and support vector machine [J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(24): 66–73. (In Chinese)