

输电线路瞬时性故障的恢复电压直流偏移特性研究

罗勋华¹, 黄 纯¹, 戴永梁¹, 潘志敏², 刘 琨², 梁勇超²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410012;

2. 湖南省电力公司检修公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 针对不带并联电抗器的超高压输电线路发生的瞬时单相接地故障, 建立故障分析电路模型, 推导故障相端电压在熄弧前、后的时域表达式, 分析表明熄弧后恢复电压将出现直流偏移, ATP-EMTP 仿真结果验证了理论分析的正确性。根据理论分析和仿真结果, 提出了自适应重合闸判据: 当故障相端电压直流分量与基波电压幅值之比大于 0.9, 且持续时间超过 20 ms 时, 发出重合闸命令。

关键词: 超高压输电; 线路; 单相自适应重合闸; 瞬时性故障; 恢复电压; 直流偏移; 接地; 继电保护; 故障分析

中图分类号: TM 727.2

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.01.016

0 引言

自动重合闸在保证电力系统的稳定性方面一直发挥着重要作用, 但现有的单相自动重合闸在断路器动作跳闸后, 一旦达到预先设定重合时间间隔便重合于故障相, 如果重合闸于永久性故障或者合闸于二次电弧未熄弧阶段, 重合闸就会失败, 对电力系统造成更严重的冲击。因此如何识别故障性质和判断熄弧时刻, 是自适应重合闸实现的关键。

近年来, 国内外在单相自适应重合闸方面的理论研究取得了较大的突破。

在国内, 自适应重合闸的研究主要集中于故障性质的识别方法上。对于不带并联电抗器的超高压输电线路主要有基于恢复电压的电压判据法, 该方法利用恢复电压中所含耦合电压的不同区分瞬时性与永久性故障, 目前已较为完善并投入实用^[1-2]。瞬时性故障可以认为是故障电阻趋近于无穷大的一种永久性故障, 因此发生永久性故障时, 故障点电压必然小于该点发生瞬时性故障时的电容耦合电压。基于该原理, 文献[3]提出基于故障测距的单相自动重合闸永久性故障电压自适应补偿判据, 但应用该方法时, 故障测距结果对故障点电压计算的影响很大。文献[4]根据二次电弧阶段奇次谐波的衰减速度及其能量百分比在不同故障性质下随时间的变化规律来区别瞬时性与永久性故障, 该方法速度快且不受过渡电阻的影响, 但对于金属性接地和小电阻接地故障, 判据的阈值存在交叉区域。对于带并联电抗器的输电线路, 典型的故障性质识别方法有基于恢复电压拍频特性的方法^[5-6]、模量参数识别法^[7-8], 以及基于小波包能量熵^[9-10]、利用流过并联电抗器故障

相电流与中性点小电抗电流幅值比的判别法^[11]等, 这些方法各有特点, 适用于不同的应用场合。

国外主要集中在对二次电弧特性的研究上。研究者根据现场实测数据, 采用时变电压^[12]和时变电阻^[13] 2 种方式来模拟电弧特性, 并在此基础上提出判断二次电弧熄弧时刻的方法。对于不带并联电抗器的超高压输电线路, 文献[14]采用自适应累加和算法检测故障相电压幅值的上升和下降时序来识别故障性质和确定熄弧时间; 文献[15]根据二次电弧熄弧后, 电弧电阻消失使得故障点电压谐波含量急剧减少的原理, 利用故障相端电压谐波含量判断二次电弧熄弧时刻; 文献[16]根据故障相电压相对健全相电压和传输阻抗在二次电弧阶段与熄弧之后呈现不同性质的差异, 通过检测故障相电压的相位变化是否达到 90°来判定电弧的熄弧时刻; 文献[17]认为电弧电压是由电弧电流决定的, 因此利用故障相电压、电流的基波和 3 次谐波求解单相接地故障时各序网的电路方程, 可以计算出故障点的电弧电压和故障距离。

本文针对不带并联电抗器的输电线路瞬时性单相接地故障, 建立故障分析电路模型, 基于故障等效电路和运算电路推导出故障相端电压在故障不同阶段的时域表达式, 获得故障相恢复电压的直流分量偏移特性, 弥补了目前恢复电压直流偏移特性相关理论分析的不足; 在此基础上, 提出了一种基于恢复电压直流偏移特性的故障性质识别和重合闸时刻捕捉方法。

1 瞬时性故障相端电压分析

输电线路瞬时性单相接地故障从故障发生到消除的过程, 分成 3 个阶段: 故障发生到断路器跳闸前的一次电弧阶段、断路器跳闸后到电弧熄灭前的二次电弧阶段以及电弧熄灭后的恢复电压阶段。不同阶段的故障相端电压具有不同的特性。

收稿日期: 2014-01-24; 修回日期: 2014-11-07

基金项目: 国家电网公司研究开发项目 (5216A313500N)

Project supported by the Research and Development Program of SGCC (5216A313500N)

1.1 二次电弧阶段故障相端电压分析

发生在一次电弧和二次电弧阶段的电弧,分别称为一次电弧和二次电弧。一次电弧发生在出现故障到断路器跳闸之前,电弧电流较大,持续时间与断路器的保护动作时间有关,大约为 0.05 s。二次电弧发生在断路器动作跳闸后,由于潜供电流的作用,二次电弧是一个重燃与熄灭的反复过程,且输电线路电压等级越高,耦合电压越大,电弧越不容易熄灭。

在二次电弧阶段,忽略线路阻抗上的电压降,实际输电线路采集的故障相端电压包含故障点电弧电压和电磁耦合电压两部分。为了分析故障相电弧电压的特性,本文采用时变电阻模拟二次电弧过程,忽略线路阻抗,在故障相暂态过程结束后,用图 1 所示的稳态等效电路来简化求解线路模型^[16],其运算电路如图 2 所示。

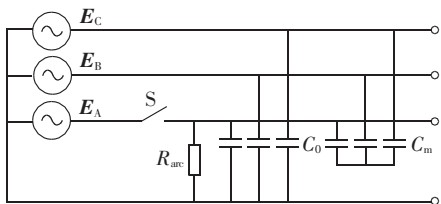


图 1 输电线路单相接地故障等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of single-phase grounding fault of transmission line

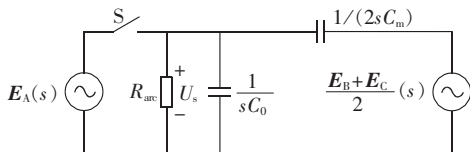


图 2 二次电弧熄弧前运算电路

Fig.2 Arithmetic circuit before secondary arc extinction

A 相发生接地故障时,用运算法求解电路即得故障点电弧电压 U_s 的拉普拉斯表达式为:

$$U_s(s) = \frac{[1/(sC_0)] // R_{arc}}{[1/(sC_0)] // R_{arc} + 1/(2sC_m)} \frac{E_B + E_C}{2}(s) \quad (1)$$

其中, E_B, E_C 为健全 B、C 相电压; C_0 为输电线路对地耦合电容; C_m 为输电线路相间耦合电容; R_{arc} 为故障点电弧电阻; “//” 表示阻抗并联运算。

令 $U = (E_B + E_C)/2$, 且 $U(t) = U_m \sin(\omega t + \theta)$, 则 U 的拉普拉斯的变换式为:

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

将式(2)代入式(1)求得故障点电压:

$$U_s(s) = \frac{[1/(sC_0)] // R_{arc}}{[1/(sC_0)] // R_{arc} + 1/(2sC_m)} U(s) = \frac{2R_{arc}C_ms}{R_{arc}(2C_m + C_0)s + 1} \frac{U_m(\omega \cos \theta + s \sin \theta)}{s^2 + \omega^2} \quad (3)$$

通过对 $U_s(s)$ 的分母的多项式特征根进行分析, 可将电弧点电压的时域表达式 $U_s(t)$ 定性描述为:

$$U_s(t) = U_1 e^{-t/\tau} + U_2 \cos(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

$$\tau = R_{arc}(2C_m + C_0)$$

$$U_2 = 2 \left| (s - j\omega) U_s(s) \right|_{s=j\omega} = 2U_m \left| \frac{\omega R_{arc} C_m (\cos \theta + j \sin \theta)}{1 + j\omega R_{arc} (2C_m + C_0)} \right| = 2U_m \frac{1}{\sqrt{1/(\omega R_{arc} C_m)^2 + (2 + C_0/C_m)^2}}$$

其中, U_1 为基波电压幅值。

由 $U_s(t)$ 表达式可以看出故障点电弧电压由两部分组成。第一部分 $U_1 e^{-t/\tau}$ 是衰减直流分量, 在超高压输电线路系统中, 线路对地耦合电容和相间耦合电容都在 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ F 范围内, 而电弧电阻不会大于 1000Ω , 因此衰减时间常数 τ 非常小, 一般小于 1 ms, 直流分量衰减非常快, 电弧电压迅速只剩下 $U_2 \cos(\omega t + \varphi)$ 部分。从 $U_2 \cos(\omega t + \varphi)$ 表达式看, 其是一个工频分量, 但由于电弧电阻 R_{arc} 的非线性, 使得电压波形在时域近似表现为一个周期性的方波信号^[4], 可用多个奇次谐波的累加和表示。

电磁耦合电压是健全相电流在断开相上通过电磁耦合感应的电压, 与单位长度互感阻抗、线路长度、健全相电流有关, 耦合电压 U_x 的表达式为:

$$U_x = (I_B + I_C) Z_m l \quad (5)$$

其中, I_B, I_C 为健全 B、C 相电流; Z_m 为单位线路长度互阻抗; l 为测量端到故障点的距离。

当故障相断开后, 健全相的电流基本无变化, 因此电磁耦合电压是一个工频分量。

由以上分析可知, 在二次电弧阶段, 故障相端电压是多个奇次谐波和 1 个工频分量的叠加, 其不会出现直流偏移现象。

1.2 二次电弧熄弧后故障相端电压分析

二次电弧熄弧后, 即恢复电压阶段, 电弧电阻消失, 此时故障相端电压为对地耦合电容电压与电磁耦合电压的叠加。发生单相接地故障时相对地电容回路很快放电, 故障消失时对地耦合电容电压基本为 0^[18]。假设在电弧熄弧瞬间, 相间耦合电容上的充电电压为 $U_m(0)$ 。忽略线路阻抗, 用如图 3 所示的等效运算电路图来求解对地耦合电容电压, 利用节点电压法求解电路方程可得对地点耦合电压 $U_0(s)$ 为:

$$U_0(s) = \left[U(s) - \frac{U_m(0)}{s} \right] \frac{1/(sC_0)}{1/(sC_0) + 1/(2sC_m)} = \left[U(s) - \frac{U_m(0)}{s} \right] \frac{2C_m}{2C_m + C_0} = \frac{2C_m}{2C_m + C_0} U(s) - \frac{2C_m}{2C_m + C_0} \frac{U_m(0)}{s} \quad (6)$$

利用拉普拉斯反变换求得其时域表达式为:

$$U_0(t) = \frac{2C_m}{2C_m + C_0} U(t) - \frac{2C_m}{2C_m + C_0} U_m(0) \quad (7)$$

可以看出对地耦合电压由工频正弦分量和直流

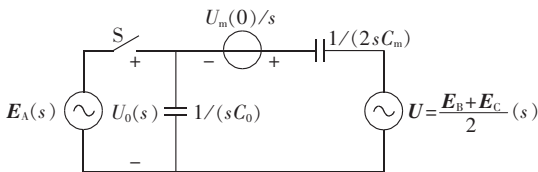


图 3 二次电弧熄弧后的运算电路

Fig.3 Arithmetic circuit after secondary arc extinction

分量两部分组成,与电磁耦合电压 U_x 叠加后为故障相端电压。分析可知,故障相端电压的直流分量的大小由二次电弧熄弧时电容耦合电压的储存电压决定,因此当 $U_m(0)$ 为负时,熄弧后端电压的直流分量为正,波形偏向正半轴;当 $U_m(0)$ 为正时,熄弧后端电压直流分量为负,即恢复电压波形偏向负半轴。在二次电弧阶段,电弧电流相对 $U(t)$ 的传输阻抗近似于容性阻抗,相位超前 $U(t)$ 近似 90° ,故电弧电流过零时, $U(t)$ 瞬时绝对值很大,因此熄弧时 $U_m(0)$ 的绝对值是不为零的较大值。

综上所述,若发生瞬时性单相接地故障,在断路器动作后,由于直流分量衰减时间常数很小,故障相电压迅速只剩下奇次谐波叠加的电弧电压和工频分量的电磁耦合电压;二次电弧熄弧后,在相间电容的储能作用下,故障相端电压中含有直流分量,恢复电压出现直流偏移现象。

2 永久性故障时的断开相端电压

当发生永久性故障时,由于故障点一直存在,电弧点电压如式(4)所示,但此时 R_{arc} 由故障点过渡电阻代替原来的电弧电阻,衰减时间常数小,电弧点电压立即只含稳定的工频分量。特别地,当发生金属性接地短路时, $R_{arc}=0$,则 $U_2=0$,此时电容耦合电压为 0,故障相端电压只含电磁耦合电压。综上,若发生永久性单相接地故障,经过短时暂态过程后,故障相端电压立即只剩下工频分量,不会出现直流偏移现象。

3 ATP-EMTP 仿真验证

3.1 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 对某条 750 kV、478 km 且不带并联电抗器的输电线路进行数字仿真实验,其等效模型图如图 4 所示。

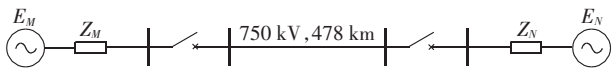


图 4 不带并联电抗器的输电系统

Fig.4 Transmission system without shunt reactor

线路参数为:正序电阻 $r_1=0.016\ 25\ \Omega/\text{km}$;零序电阻 $r_0=0.157\ 23\ \Omega/\text{km}$;正序电感 $l_1=0.905\ 64\ \text{mH}/\text{km}$;负序电感 $l_2=1.945\ 54\ \text{mH}/\text{km}$;正序电容 $c_1=0.013\ 26\ \mu\text{F}/\text{km}$;零序电容 $c_0=0.010\ 06\ \mu\text{F}/\text{km}$ 。两端电源相

角差设为 20° ; M 侧电源系统的正序阻抗 $Z_{M1}=7.11+j\ 37.23\ \Omega$,零序阻抗 $Z_{M0}=5.5+j\ 28.2\ \Omega$; N 侧电源系统的正序阻抗 $Z_{N1}=8.71+j\ 59.21\ \Omega$,零序阻抗 $Z_{N0}=6.5+j\ 31.34\ \Omega$ 。

3.2 仿真结果及分析

在 $t=0.05\ \text{s}$ 时,系统发生 A 相接地故障,故障相两端断路器于 $t=0.1\ \text{s}$ 时刻跳开。图 5 为发生永久性单相接地故障时的故障相端电压波形,由图可知在断路器动作后故障相端电压的直流含量一直处于 0 附近。在瞬时性故障时,按照文献[13]建立电弧模型,通过设定初始电弧长度可以得到不同熄弧时刻故障相端电压波形。图 6 中二次电弧熄弧发生在 $t=0.292\ \text{s}$,此时故障相端电压偏向正半轴。图 7 中二次电弧熄弧发生在 $t=0.302\ \text{s}$ 时,此时故障相端电压偏向负半轴。由图 6、7 可以看出,在断路器跳闸后到熄弧前的故障相端电压直流偏移量几乎为 0,而熄弧之后电压直流偏移量达 42 kV。图 8 给出了瞬时性故障(图 7 情形)与永久性故障(图 5 情形)的故障相端电压直流偏移量情况。

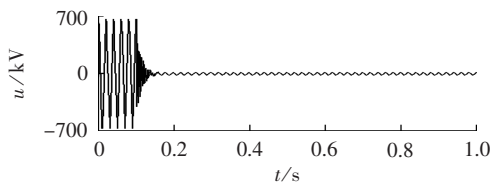


图 5 永久性单相故障时故障相端电压波形

Fig.5 Terminal voltage waveform of faulty phase for permanent single-phase fault

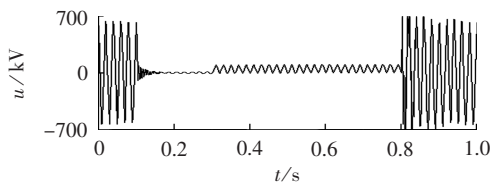


图 6 瞬时性单相故障时恢复电压直流正向偏移波形
Fig.6 Positive DC offset waveform of recovery voltage for transient single-phase grounding fault

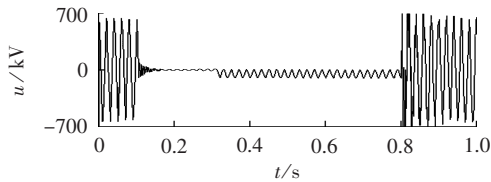


图 7 瞬时性单相故障时恢复电压直流负向偏移波形
Fig.7 Negative DC offset waveform of recovery voltage for transient single-phase grounding fault

4 单相自适应重合闸新判据

由以上分析可知,仅在发生瞬时性故障且熄弧后,故障相端电压信号中才会持续出现明显的直流分量,因此,以故障相端电压直流偏移量作为自适应

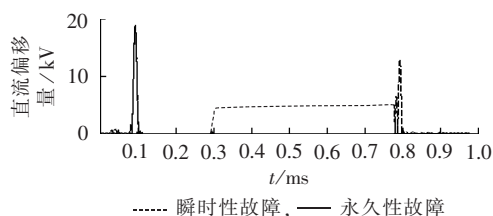


图 8 瞬时性与永久性故障电压直流偏移量对比

Fig.8 Comparison of DC offset between transient and permanent faults

重合闸的依据,实现原理简单,动作量差异明显,灵敏度较高。

在不同高压输电系统中,由于电压等级和线路参数的差异,使得恢复电压阶段直流偏移量不一致,实用于微机保护时,需针对不同线路设定动作门槛值,整定相对不便。笔者研究后发现,二次电弧熄灭后,从故障相端电压的时域表达式(7)中可以推出直流偏移量与基波电压的幅值比取决于熄弧瞬间储存在相间电容的电压 $U_m(0)$ 。通过前文分析可知,熄弧瞬间的对地电容电压为 0, $U_m(0)$ 的幅值取决于熄弧时 $U(t)$ 的瞬时值。而此时 $U(t)$ 瞬时绝对值很大,接近于幅值,即 $U_m(0)$ 接近于 U_m ,据此可以利用直流偏移量 U_0 与基波电压幅值 U_1 的比 k 来确定重合闸时刻。综合考虑电磁耦合电压以及暂态过程的影响,本文提出一种简单的新判据:

$$k = \frac{U_0}{U_1} > 0.9 \quad (9)$$

即当直流偏移量 U_0 与基波电压幅值 U_1 之比大于 0.9,且持续时间超过 20 ms 时,认为故障为瞬时性故障,且故障电弧已熄灭,发出重合闸命令,分析结果如图 9 所示。

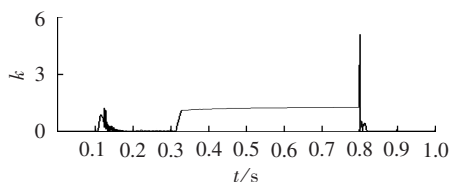


图 9 瞬时性故障相电压直流分量与基波分量幅值比

Fig.9 Ratio of DC component of faulty phase voltage to fundamental component amplitude for transient fault

5 结论

本文通过输电线路单相故障电路分析模型,推导了故障跳开相端电压的表达式,以此为依据分析了恢复电压的直流分量性质及其幅值特征,为基于恢复电压直流偏移特性的自适应重合闸方法提供了严谨的理论依据。ATP-EMTP 仿真测试结果验证了本文理论分析结论的正确性,但本文推导未涉及过渡电阻的影响,在较大过渡电阻的影响下,恢复电压直流分量减少,电压判据受一定影响。

采用故障相端电压直流分量与基波分量的幅值

比动态确定重合闸时间,提出相应的自适应重合闸新判据,避免了重合于永久性故障和瞬时性故障尚未熄弧阶段,具有很强的实用性,为不带并联电抗器的超高压输电线路提供了一种简单可靠的单相自适应重合闸方法。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 郭相国,张保会. 自适应自动重合闸现状与发展[J]. 继电器,2004,32(16):77-84.
GUO Xiangguo,ZHANG Baohui. Present achievements and prospects of adaptive auto-reclosure [J]. Relay,2004,32(16):77-84.
- [3] 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.
- [4] 李斌,李永丽,曾志安,等. 基于电压谐波信号分析的单相自适应重合闸[J]. 电网技术,2002,26(10):53-57.
LI Bin,LI Yongli,ZENG Zhian,et al. Study on single-pole adaptive reclosure based on analysis of voltage harmonic signal [J]. Power System Technology,2002,26(10):53-57.
- [5] 李斌,李永丽,盛鹏,等. 并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸研究[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.
- [6] 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.
- [7] 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]. Proceedings of the CSEE,2009,29(1):48-54.
- [8] 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.
- [9] 张园园,龚庆武,陈道君,等. 基于小波包能量熵判别的高压输电线路单相自适应重合闸[J]. 电力自动化设备,2009,29(9):11-16.
ZHANG Yuanyuan,GONG Qingwu,CHEN Daojun,et al. Single-phase adaptive reclose based on wavelet packet energy entropy

- for HV transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9): 11-16.
- [10] 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 Yaqun, 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.
- [11] 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.
- [12] GOLDBERG S, HORTON F, TZIOUVARAS D. A computer model of the secondary arc in the single phase operation of transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 286-295.
- [13] JOHNS A T, AGGARWAL R K, SONG Y H. Improved technique for modeling fault arcs on faulted EHV transmission systems[J]. IEEE Proceeding-Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(2): 148-154.
- [14] KHODADADI M, NOORI M R, SHAHRTASH S M. A noncommunication adaptive single-pole autoreclosure scheme based on the ACUSUM algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2526-2533.
- [15] 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.
- [16] 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 Protection Relay Engineers. College Station, TX, USA: IEEE, 2012: 85-95.
- [17] RADOJEVIC Z M, SHIN J R. New one terminal digital algorithm for adaptive reclosing and faulted distance calculation on transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1231-1237.
- [18] 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.

作者简介:



罗勋华

罗勋华(1989—),男,湖北仙桃人,博士研究生,从事电力系统继电保护、电气信号处理方面的研究(**Email**:luoxunhuas@163.com);

黄纯(1966—),男,湖南沅江人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统保护与控制、电能质量分析与控制、信号处理方面的研究。

DC offset characteristics of recovery voltage for transient transmission line fault

LUO Xunhua¹, HUANG Chun¹, DAI Yongliang¹, PAN Zhimin², LIU Kun², LIANG Yongchao²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410012, China;

2. Hunan Electric Power Overhauling Company, Changsha 410004, China)

Abstract: A circuit model of EHV transmission line without shunt reactor is built for analyzing its transient single-phase grounding fault. The time-domain expression of terminal voltage is deduced for the faulty phase before and after arc extinction and the theoretical analysis shows that DC offset appears in the recovery voltage after the arc extinction, which is verified by the simulation with ATP-EMTP. A criterion of adaptive reclosure is proposed according to the simulative and analytical results; the reclosure command is issued only when the ratio of the DC component of faulty terminal voltage to the fundamental voltage amplitude is larger than 0.9 for longer than 20 ms.

Key words: EHV power transmission; electric lines; single-pole adaptive reclosure; transient fault; recovery voltage; DC offset; electric grounding; relay protection; failure analysis