

Arc Current Transient Simulation of Live Breaking 220 V Non-Loaded Cables

Dingzuo Yin¹, Lihe Zhou¹, Lihui Zhao¹, Shengyou Zhao¹, Weinan Chen², Qi Qi², Jinpeng Chen²

¹Qujing Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Company, Qujing Yunnan

²School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: 2572921286@qq.com

Received: Feb. 15th, 2020; accepted: Feb. 29th, 2020; published: Mar. 6th, 2020

Abstract

In order to study the transient process and influencing factors of electric arc produced by live breaking 220 V non-loaded cables, an improved arc black-box model is established in this paper. On the basis of this model, the simulation circuit of live breaking 220 V non-loaded cables is built by using ATP-EMTP software. The influence of the change of the opening initial phase angle, cable length and conductor layer radius on the transient process of electric arc current is studied. The simulation results show that the longer the cable length and the larger the radius of the conductor layer, the greater the arc current generated by the opening operation, and the change of the opening initial phase angle basically has no effect on the arc current. Through the simulation research in this paper, it can provide some theoretical guidance for live breaking the non-loaded cables with the voltage level of 220 V.

Keywords

Live Breaking, 220 V Non-Loaded Cables, Arc Black-Box Model, Arc Current

带电分闸220 V空载电缆的电弧电流暂态仿真研究

尹定座¹, 周立鹤¹, 赵丽惠¹, 赵升有¹, 陈纬楠², 齐 祺², 陈锦鹏²

¹云南电网公司曲靖供电局, 云南 曲靖

²武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉

Email: 2572921286@qq.com

收稿日期: 2020年2月15日; 录用日期: 2020年2月29日; 发布日期: 2020年3月6日

文章引用: 尹定座, 周立鹤, 赵丽惠, 赵升有, 陈纬楠, 齐祺, 陈锦鹏. 带电分闸 220 V 空载电缆的电弧电流暂态仿真研究[J]. 输配电工程与技术, 2020, 9(1): 8-17. DOI: 10.12677/tDET.2020.91002

摘要

为了研究带电分闸220 V空载电缆时断口产生电弧的暂态过程及其影响因素,本文首先建立了改进的电弧黑盒模型,在该模型的基础上,采用ATP-EMTP软件搭建了带电分闸220 V空载电缆仿真电路,研究了分闸初相角、电缆长度、导体层半径改变对电弧电流暂态过程的影响,仿真结果表明:电缆长度越长、导体层半径越大,分闸操作产生的电弧电流越大,而分闸初相角变化对电弧电流基本没有影响。通过本文的仿真研究,能够为带电分闸220 V电压等级的空载电缆线路提供一定的理论指导。

关键词

带电分闸, 220 V空载电缆, 电弧黑盒模型, 电弧电流

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,我国对城市配电网进行了大规模的改造,使得城网的结构发生了很大的变化。配电网电缆化率越来越高,带电拆搭电缆操作越发频繁。由于电缆对地电容是架空线路的数十倍,配网中容性电流迅速增大,带电拆搭电缆极易产生电弧,危及带电操作人员的安全[1]。

当前有关220 V低压配电网带电作业技术研究成果较少,导致作业不规范和安全性不高的问题,阻碍了该领域带电作业技术的推广应用。因此,有必要系统开展220 V配电网带电作业技术应用研究,实现220 V配电网带电作业规范化并扩大应用范围,从而有效提高供电可靠性,给客户以优质的用电体验感受和较高的用电满意度。220 V配电网属于低压配电网,是整个电网的最末一级电网,与客户联系较为紧密,主要由220 V架空线路、电缆线路、低压电缆分支箱以及其它低压配电装置及附属设施等组成。虽然电压等级不高,但人工带电断接设备时也会产生电弧,给带电作业工作带来严重影响。

由于电弧产生时的现场数据难以测量,物理仿真条件复杂且花费大,而建立电弧数学模型仿真的方法不仅成本低,且更为灵活。目前对电弧模型的研究已取得大量成果[2]-[8],但各种电弧模型都建立在一定假设和简化条件下[9],因此,建立准确合适的电弧模型对研究带电分闸电缆产生电弧电流的暂态过程极为重要。

文献[10]解决了以电缆为主的低压配电网中合闸操作所产生的过电压问题;文献[11]对配网线路旁路作业法的带电操作过程进行了电磁暂态仿真计算;文献[12]仿真了电缆终端作业的电磁暂态过程;文献[13]运用Cassie电弧模型对带电拆搭电缆操作进行了仿真。但文献[10][11][12]没有建立具体的电弧模型,文献[13]没有涉及电弧燃烧的暂态过程,也未分析影响带电操作电缆产生电弧的具体因素。

本文从改进的电弧黑盒模型出发,建立了带电分闸220 V空载电缆的电弧电流仿真模型,分析了其暂态过程特征及影响因素,得出了相关影响因素与电弧电流的变化关系,为带电分闸220 V电压等级的空载电缆线路提供了一定的理论基础。

2. 电弧黑盒模型

电弧是气体放电的一种形式[14]。干燥气体通常是良好的绝缘体,当在气体间隙两端加上足够大的电

场时, 气体中游离的带电粒子会增多, 有电流通过时便形成电弧。由于触头本身及周围介质中含有大量可被游离的自由电子, 因此进行带电分闸操作时容易产生电弧[15] [16]。电弧动态模型认为电弧是一个可变电阻, 可以用非线性微分方程式来描述。而常用的传统电弧模型如 Cassie 模型、Mayer 模型、近似电弧模型和控制论模型等均成立在一定假设条件下, 不能描述电弧燃烧全过程内的弧安特性。文中所用的电弧模型在上述模型基础上改进得到, 可以描述在电弧燃烧全阶段的电气特性。基于电弧黑盒模型的基本原理, 可以用如下非线性方程表示电弧电压:

$$u_{a0}(t) = \left(U_a + U_b \frac{I_0}{i_b(t)} + R_s |i_b(t)| \right) \text{sgn}(i_a) \quad (1)$$

其中, $u_{a0}(t)$ 和 i_a 是电弧长度为常数 L_0 时, 电弧电压和电弧电流的值。

$$i_b(t) = \begin{cases} I_0 & |i_a(t)| < I_0 \\ |i_a(t)| & |i_a(t)| \geq I_0 \end{cases} \quad (2)$$

U_a, U_b, I_0 和 R_s 都是定义电弧电压波形的参数。在式(1)中 sgn 为符号函数(当 $x \geq 0$ 时, $\text{sgn}(x) = 1$; 当 $x < 0$ 时, $\text{sgn}(x) = -1$)。 U_a 是电弧电压梯度 E_a 和电弧长度 L_a 的乘积。 $U_b \frac{I_0}{i_b(t)}$ 分量表示电弧电压的初始值, 分量 $R_s |i_b(t)|$ 是由 i_a 决定的拟线性部分。 R_s 是电弧电阻的一部分, 其值主要由 U_a 的值决定。

在式(1)的电弧模型中并没有考虑电弧的伸长, 可以通过乘以一个合适的函数 $L(t)$ 来实现。 $L(t)$ 的表达式为:

$$L(t) = L_0 (1 + \Delta L(t - T_i) h(t - T_i)) \quad (3)$$

式中: $\Delta L(t - T_i)$ 表示弧长改变量, T_i 是电弧的开始时间, $h(t)$ 是赫维赛德函数(符号函数), 而 $\Delta L(t - T_i)$ 又可以表示为:

$$\Delta L(t) = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} (t - T_i) h(t - T_i) \quad (4)$$

联立式(3)和式(4)有:

$$L(t) = L_0 \left[1 + \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} (t - T_i) h(t - T_i) \right] \quad (5)$$

本文采用指数函数来描述电弧长度改变的动态过程, 即

$$L(t) = L_0 \left[1 + A e^{B(t - T_i)} h(t - T_i) \right] \quad (6)$$

式中: A 和 B 为决定弧长改变量的参数, 且

$$\Delta L(t - T_i) = A e^{B(t - T_i)} h(t - T_i) \quad (7)$$

综上所述, 电弧模型的表达式为

$$u_a(t) = \frac{u_{a0}(t)}{L_0} L(t - T_i) h(t - T_i) = u_{a0}(t) \left[1 + \Delta L(t - T_i) h(t - T_i) \right] \quad (8)$$

再联立式(7)和式(8), 可得

$$u_a(t) = u_{a0}(t) \left[1 + A e^{B(t - T_i)} h(t - T_i) \right] \quad (9)$$

式中： A 、 B 的值为常数，可在相关的实验数据基础上通过曲线拟合的方法计算得到，能够基本保证仿真模型的准确性。

根据以上推导，利用 ATP-EMTP 中的 MODELS 和 TACS 模块可以实现上述的电弧黑盒模型，如图 1 所示。

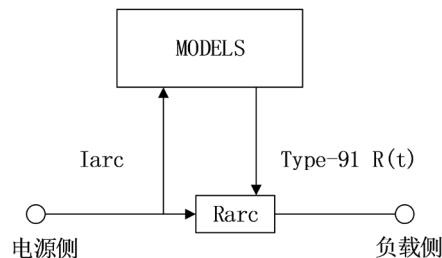


Figure 1. Arc model in ATP-EMTP
图 1. ATP-EMTP 中的电弧模型

3. 带电分闸 220 V 空载电缆的电弧电流仿真

带电分闸 220 V 空载电缆的仿真电路如图 2 所示，其中 U_s 为电源； R_1 、 R_2 、 L_1 分别为电源的等效内阻； $Rarc$ 为控制电阻器 Type-91R(t)；MODELS 为调节 Type-91R(t) 电阻大小的控制模块，它与 $Rarc$ 共同组成上节中所述电弧模型；LCC 为埋于地下 1 m 的某 YJV-70 电缆。

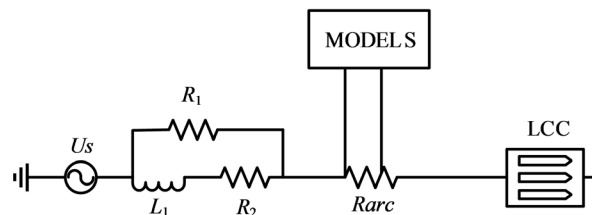


Figure 2. Arc current simulation diagram of live breaking 220 V non-loaded cables

图 2. 带电分闸 220 V 空载电缆的电弧电流仿真图

仿真电路的具体参数设置见表 1 所示。

Table 1. Parameter setting of simulation circuit
表 1. 仿真电路的参数设置

参数	取值
U_s (V)	220
R_1 (Ω)	200
R_2 (Ω)	1
L_1 (mH)	23.2

当电缆长度为 1 km，导体层半径为 10 mm，分闸角为 0° 时，得到电缆侧的电压波形如图 3 所示。

由于电缆的阻抗远大于电源侧等值阻抗，因此未产生电弧前，电缆上的电压近似为电源电压幅值 311 V。电弧产生瞬间，线路上电压存在短暂的高频振荡，最大过电压将达到 328 V。随后由于系统中存在阻尼而出现衰减过程，最后变为 0。

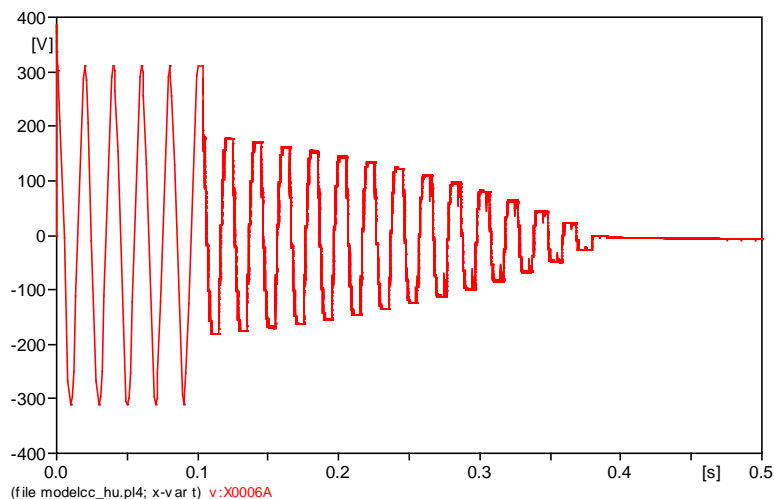


Figure 3. Voltage waveform on the cable side
图 3. 电缆侧的电压波形

在电弧产生的暂态过程中，电感和电容上存储的能量得到释放，大部分会输出给电弧。此放电过程频率是非常高的，因而系统会产生振荡而造成过电压。

电弧电压如图 4 所示。

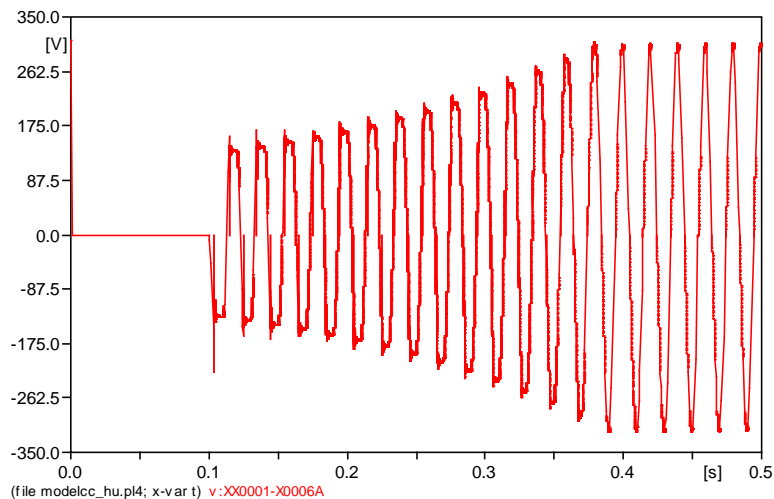


Figure 4. Arc voltage waveform
图 4. 电弧电压波形

从操作时刻产生电弧开始，电弧电压逐渐增大，电弧熄灭时断口电压上升至超过电源电压，达到 313 V。这是由于熄弧后，电感和电容存储的能量无法释放而导致的断口电压升高。

电弧电流如图 5 所示。

在电弧产生的瞬间，电弧电流迅速增大，最大可达 1 A 左右。此后，电弧熄弧—燃弧过程交替进行，在每次熄弧前后电弧电流短暂过零，存在明显的零休现象。这是由于电弧过零前后，弧道电阻变得很大，成为限制电弧电流上升的主要因素。

220 V 配电网缆线大部分采用架空或沿墙面敷设，基本上不占用地面空间，多条绝缘导线可以同时

容纳在通道内，且架空高度受自然气象因素和周围环境影响小，供电可靠性较高。但是无论是采用裸露的架空导线还是绝缘包裹的绝缘导线，当长度达到一定限值以后，缆线中的全部输送容量将仅仅用来对缆线自身充电，功率将没有办法输出。基于这一理论，缆线的长度是影响电容电流大小的重要因素。此外，对于绝缘包裹的绝缘导线，其导体层的横截面积以及分闸初相角等都可能对电弧的电流大小产生影响。针对以上提到的影响因素，分别进行电弧仿真分析，探究各种因素的变化对电弧电流大小的影响规律。

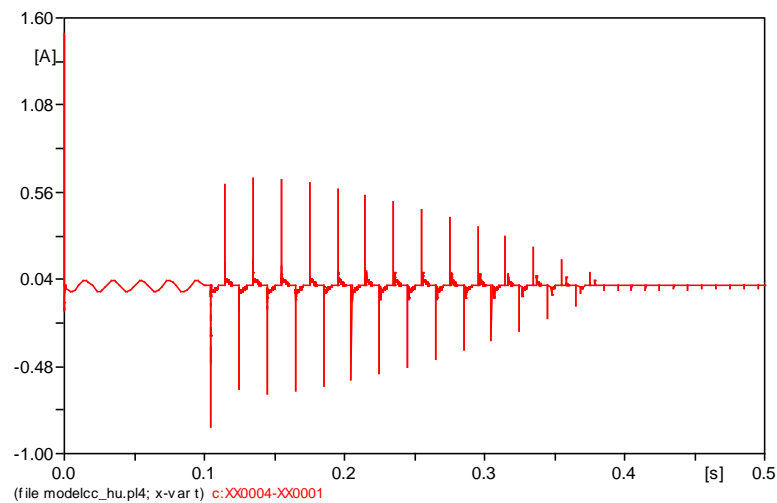


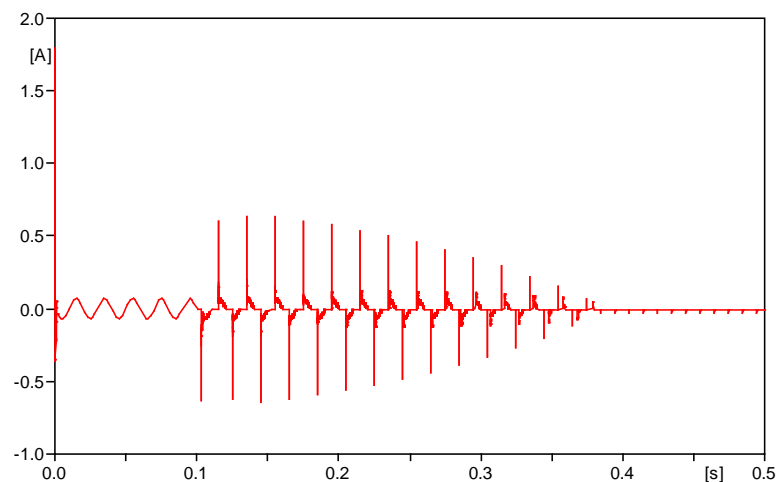
Figure 5. Arc current waveform

图 5. 电弧电流波形

3.1. 分闸初相角对电弧电流暂态过程的影响

通过改变电弧模型接入电路的时间可以改变分闸初相角 α 的大小，图 6 为 $\alpha = 0^\circ$ 和 $\alpha = 90^\circ$ 时的电弧电流波形。

更多仿真结果见表 2 所示，其中电弧电流的大小均为有效值，有效值的求解可以通过 ATP-EMTP 中的傅里叶变换得到。



(a) 分闸初相角为 0°

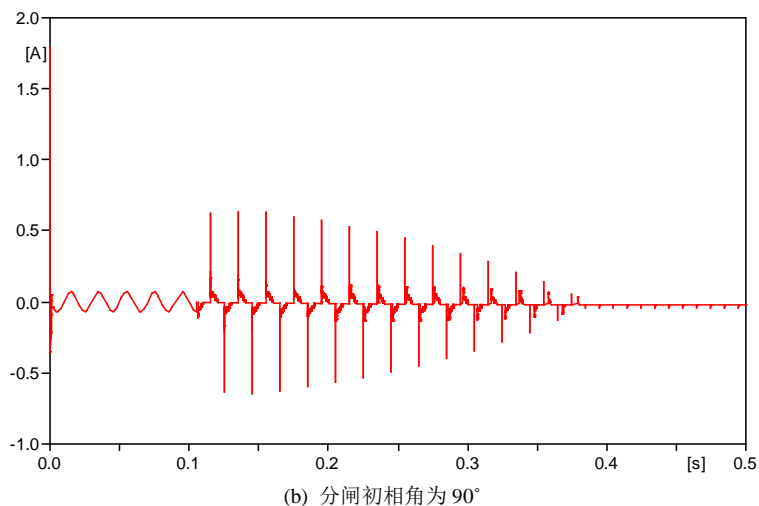


Figure 6. Arc current waveform in different opening phase angles

图 6. 不同分闸初相角情况下电弧电流波形

Table 2. Results of arc current in different opening phase angles

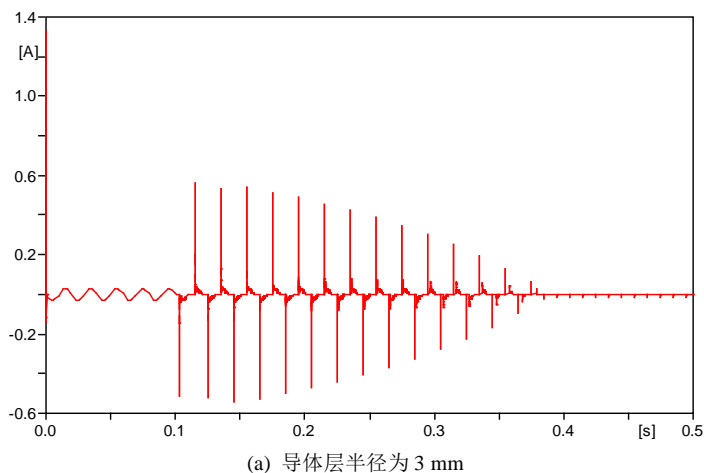
表 2. 不同分闸初相角情况下电弧电流结果

参数	数值						
分闸初相角(°)	0	30	60	90	120	150	180
电弧电流(A)	0.02839	0.02761	0.02634	0.02453	0.02226	0.02188	0.02408

从表中的结果可以看出，在不同分闸初相角的情况下，电弧电流的有效值变化不是特别明显。改变分闸初相角由 0° 到 180° 的过程中，电弧电流有效值在 0.02188 A 到 0.02839 A 之间变化。分闸初相角 0° 时电弧电流有效值即电弧强度最大，达 0.02839 A。分闸初相角 150° 时电弧电流有效值即电弧强度最低，为 0.02188 A。整体上看，分闸初相角对分闸暂态过程中产生的电弧的影响不是很大。

3.2. 电缆导体层半径对电弧电流暂态过程的影响

电缆导体层半径的改变主要影响电缆电容参数的改变，进而对电弧电流的大小造成影响。故改变电弧模型中导体层的半径，研究其对电弧电流暂态过程的影响，图 7 为导体层半径等于 3 mm 和 13 mm 时的电弧电流波形。



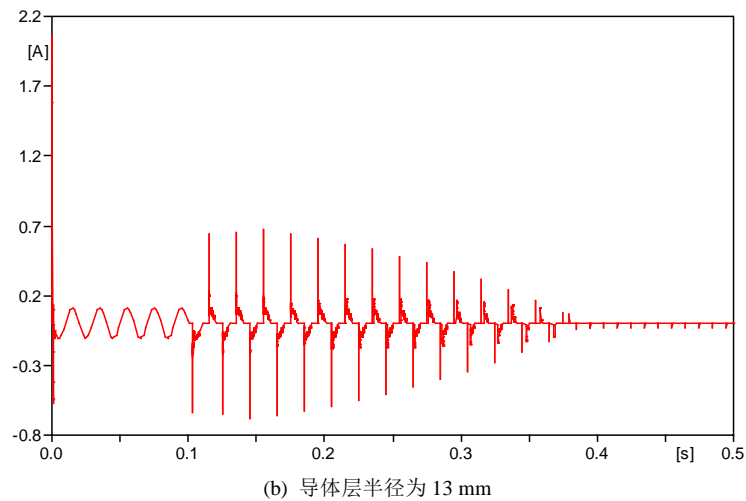


Figure 7. Arc current waveform in different conductor layer radius
图 7. 不同导体层半径情况下电弧电流波形

更多仿真结果见表 3 所示。

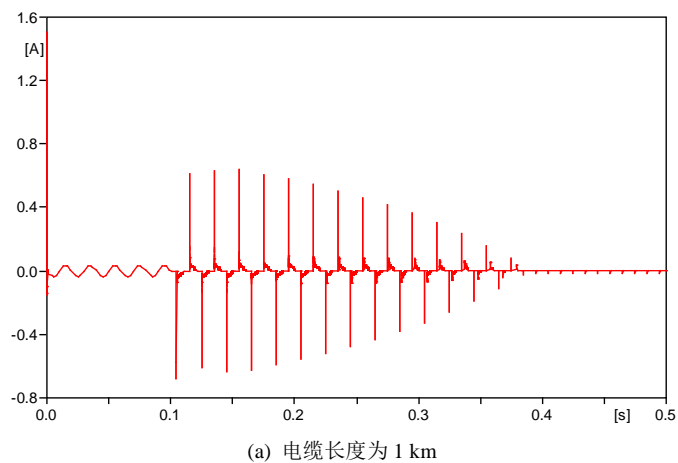
Table 3. Results of arc current in different conductor layer radius
表 3. 不同导体层半径情况下电弧电流结果

参数	数值										
导体层半径 (mm)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
电弧电流 (A)	0.01269	0.01389	0.01550	0.01742	0.01962	0.02216	0.02510	0.02850	0.03258	0.03746	0.04338

由上表可以看出, 电弧电流的有效值随着导体层半径的增大而明显增大。电缆导体层半径由 3 mm 增大至 13 mm 的过程中, 电弧电流由 0.01269 A 增大至 0.04338 A。可见电缆的导体层半径对电弧的影响较大。

3.3. 电缆长度对电弧电流暂态过程的影响

电缆长度的改变同样会引起电缆电容参数的改变, 故改变电弧模型中的电缆长度, 研究其对电弧电流暂态过程的影响, 图 8 为电缆长度等于 1 km 和 2 km 时的电弧电流波形。



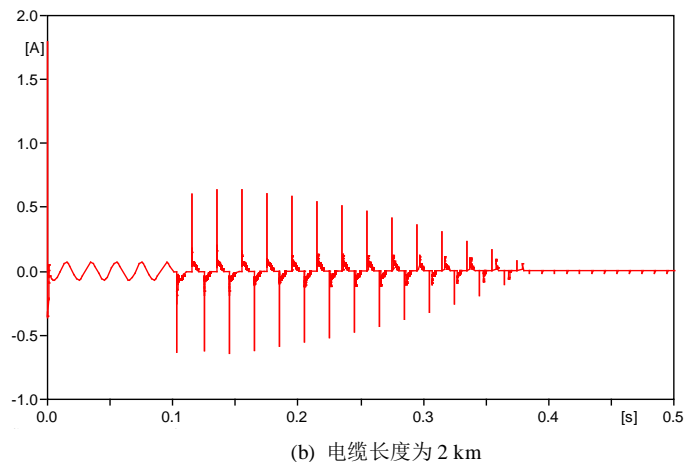


Figure 8. Arc current waveform in different length
图 8. 不同电缆长度情况下电弧电流波形

更多仿真结果见表 4。

Table 4. Results of arc current in different length
表 4. 不同电缆长度情况下电弧电流结果

参数	数值								
导体层半径 (mm)	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.2	1.5	2
电弧电流 (A)	0.00145	0.00287	0.00428	0.00711	0.00994	0.01424	0.01705	0.02128	0.02839

由上表可以看出随着电缆长度的增加，电弧电流有效值不断增加，电缆长度越长，电弧电流有效值也越大。在电缆从 100 m 增长到 2 km 的过程中，电弧电流从 0.00145 A 增加到 0.02839 A，可见电缆长度对电弧电流有效值影响较大。

4. 结论

本文基于改进的电弧黑盒模型，在 ATP-EMTP 中仿真分析了带电分闸 220 V 空载电缆暂态过程及其影响因素，仿真结果符合基本的电弧理论，并且与通过数值计算方法得出的结果基本一致。其主要结论如下：

(1) 在分闸空载电缆的暂态过程中，电缆上的电压由分闸瞬间的电源电压逐渐衰减至零；电弧电压由零值上升并稳定在电源电压附近；电弧电流每半周期过零值一次，燃弧熄弧过程交替进行，过零前后一小段时间内存在明显的“零休现象”。

(2) 在电弧的影响因素中，分闸初相角的变化对电弧电流的影响不明显；而电缆导体层半径越大、电缆长度越长，分闸空载电缆操作时越容易产生电弧，电弧电流会越大，电弧越易重燃难以熄灭。

参考文献

- [1] 闫格, 吴细秀, 田芸, 等. 开关电弧放电电磁暂态干扰研究综述[J]. 高压电器, 2014, 50(2): 119-130.
- [2] 舒胜文, 黄道春, 阮江军. 真空开关电弧开断过程的数值仿真方法研究进展[J]. 高压电器, 2014, 50(2): 131-138.
- [3] 林莘, 王亮, 徐建源, 等. 非平衡态双温度 SF₆ 离子体电弧数学模型研究[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 1-7.
- [4] 王晓远, 高淼, 赵玉双. 阻性负载下低压故障电弧特性分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 106-110.

-
- [5] 荣命哲, 杨飞, 吴翊, 等. 直流断路器电弧研究的新进展[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 1-9.
- [6] Lin, X., Wang, N. and Xu, J.Y. (2012) Calculation and Analysis of Very Fast Transient Over-Voltage Characteristic on the Condition of Dynamic Arcing Model. *Proceedings of the CSEE*, **32**, 157-164.
- [7] Ji, L., Chen, D.G., Liu, Y.Y., *et al.* (2009) Simulation of the Interruption Process of Low Voltage Circuit Breaker Using Dynamic Mathematic Arc Model. *Proceedings of the CSEE*, **29**, 107-113.
- [8] Wang, Z.X., Geng, Y.S. and Liu, Z.Y. (2012) Step Wise Behavior of Free Recovery Processes after Diffused Vacuum Arc Extinction. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **19**, 582-590.
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6180253>
- [9] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地建模仿真分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015(7): 57-64.
- [10] 曹珍崇, 杨学昌, 鄧嘯, 等. 电缆配电网操作过电压的计算与分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(4): 466-469.
- [11] 郑传广, 刘凯, 刘庭, 等. 10 kV 配电线路旁路作业电磁暂态过程仿真计算研究[J]. 电工电气, 2013(3): 7-12.
- [12] 王建军, 吴季浩, 苏梓铭. 10 kV 电缆终端带电作业仿真及试验研究[J]. 电力建设, 2014, 35(2): 41-46.
- [13] 王广利, 吴爱军, 陈宇. 拆, 搭电缆引线时电弧建模仿真研究及消弧策略优化[J]. 华东电力, 2012, 40(12): 2299-2302.
- [14] 赵玉林. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [15] Wu, X.X., Li, Z.B., Tian, Y., *et al.* (2011) Investigate on the Simulation of Black-Box Arc Model. 2011 1st International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology, Xi'an, 23-27 October 2011, 629-636.
- [16] Smeets, R.P.P. and Kertesz, V. (2000) Evaluation of High-Voltage Circuit Breaker Performance with a Validated Arc Model. *IEE Proceedings of the Generation, Transmission and Distribution*, **147**, 121-125.
<https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20000238>