

中压电缆网接地故障的电弧建模及仿真研究

李建南¹, 张慧媛¹, 王鲜花², 龚仁敏³

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 内蒙电力公司巴彦淖尔电业局, 内蒙古 巴彦淖尔 015000;
3. 北京市中恒博瑞数字电力科技有限公司, 北京 100085)

摘要: 在中压电缆网络中, 很容易发生单相接地故障, 其中电弧接地故障所占比例较高, 且其过程复杂, 难以模拟。为此提出了新型小电流方式电弧模型。研究了现有的经简化的电弧模型, 并用 Matlab 对现有模型进行仿真分析。在此基础上, 以小电流接地方式的中压电缆网络为背景条件, 对电弧模型的参数进行改进, 得出电弧模型的电压电流特性, 用 Matlab 对改进后的电弧模型进行验证。与实际情况的物理量进行比较, 证明所得改进电弧模型的可应用性。仿真结果证实所提出模型能更合理地贴近于真实故障情况, 为下一步电缆网络故障分析的研究奠定了重要技术基础。

关键词: 电弧模型; 中压电缆网; 电弧接地故障; Matlab; 小电流方式

Arc modeling and simulation of the ground faults of the middle voltage cable network

LI Jiannan¹, ZHANG Huiyuan¹, WANG Xianhua², GONG Renmin³

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Bayannaer Electric Power Bureau of Electric Company of Inner Mongolia, Bayan Nur 015000, China;
3. Beijing Joinbright Digital Power Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: In the MV cable network, it is easy to have phase-to-ground faults, of which the ratio of arc grounding faults is high. What's more, the process of it is complex and difficult to simulate. As a result, a new arc model for the small current neutral grounding mode is put forward. This paper studies the existing simplified arc models and simulates the arc models with Matlab. On this basis and in the background of MV cable network with the small current neutral grounding mode, the parameters of the models are improved. Then the voltage and current characteristics of the arc model are got. The model is verified with Matlab. Compared with realistic physical quantities, it can be proved that the improved arc model is applicable. The result affirms that this model is closer to the reality. It is an important technical basis for the study of the next step of cable network fault analysis.

Key words: arc models; MV network; phase-to-ground faults; Matlab; small current grounding system

0 引言

城市电网不断发展, 电缆线路在中压配电网中的应用越来越广泛。与原有配电网相比, 现在的中压电缆网络电缆化率增大为主要特点, 且大多采用中性点不直接接地的方式, 这样在发生故障时流过接地点的电流很小, 故称为小电流接地系统。随着现有网络电缆化率的提高, 固然有很多优势^[1], 但同时随之而来的电缆故障问题也不容忽视。对电缆化率较高的网络, 采用小电流接地方式时, 容易发生单相接地故障, 而在这些故障中, 有 80% 为电弧接地这一类型的故障。当发生这一类型的故障的

时候, 非故障相的相电压增大, 大于线电压的值, 严重情况下电弧击穿, 发展成相间短路, 事故范围扩大, 故障程度也更严重^[2-3]。在这一背景条件下, 为了探究故障发生时的电气量特征, 就需要对实际网络中电弧故障进行准确的、切合实际的仿真分析, 其首要任务便是建立正确的电弧模型。

目前来看, 现在用来模拟单相电弧接地故障的模型很多通过了假设和省略, 不能正确地模拟实际情况中的问题, 会有不合理的地方^[4]。例如, 文献[5]在分析电弧接地故障时, 采用的是开关元件来模拟电弧过程, 而电弧是非线性的, 故而故障的特征不能被准确模拟。文献[6]中所选的为现有的 Mayr

电弧模型来接入配电网作为电弧故障的模拟进行分析, 虽然 Mayr 模型适用于小电流情况, 但所得模型以“假设散出功率是常数”为前提, 不满足于实际情况。文献[7]是基于弧隙能量平衡理论建立电弧模型, 虽然波形与实际波形近似一致, 但此模型的简化过程限定了这一模型只能用于大电流情况中。

在研究了上述现有模型的基础上, 本文以小电流接地方式的中压电缆网络为背景条件, 用 Matlab 对电弧模型进行建模仿真分析, 找出现有电弧模型的不足和缺陷。在此基础上对电弧模型的参数和推导过程进行改进。对改进后的模型做仿真分析, 得到理想结果, 最终提出了适用于小电流接地方式的中压电缆网的电弧模型。将此模型用于电缆网间歇性电弧故障的仿真模拟更加真实准确, 为下一步电缆网络故障分析的研究奠定了重要技术基础。

1 电弧的数学模型分析^[8]

对中压电缆网来说, 存在的故障主要有永久性、瞬时性及电弧故障等。永久性接地故障模型可以通过经一阻抗连接来进行模拟, 瞬时性接地故障模型的建立方法与永久性接地故障模型基本相同^[9]。所以本文的重点在于如何构建一个模型来正确地模拟电弧故障, 使电缆网的故障分析更为准确全面。

电弧具有非线性的特性, 通过研究现有原理, 根据弧隙能量平衡理论, 可以得出电弧的基本数学模型如式(1)。

$$Q = \int (P_{in} - P_{out}) dt \quad (1)$$

以式(1)为基础, 通过整理推导, 可得

$$\frac{dQ}{dt} = P_{in} - P_{out} = u \cdot i - P_{out} \quad (2)$$

整理可得电弧模型的方程为

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u \cdot i}{P_{out}} - 1 \right) \quad (3)$$

式中: i 为电弧电流; u 为电弧电压; g 为动态电弧电导; τ 为电弧时间常数; P_{in} 为电弧的输入功率; P_{out} 为电弧的输出功率; Q 为电弧的能量。

式(3)是由能量平衡推导得出的电弧模型的一般形式, 式中的参数并没有经过修改和省略, 在这个基础上, 不同的故障条件下, 根据不同的限定对参数进行修改, 就能推导出相应条件下的电弧模型。

1.1 现有的电弧模型

在研究中压电缆网的电弧接地故障时, 不需要对其内部结构进行研究, 只需要把电弧看作一个整体(“黑箱”), 从外部宏观进行研究, 对其动

态特性进行仿真。常用模型有 Cassie 模型、Mayr 模型等。

(1) Cassie 电弧模型

Cassie 模型的观点是电弧能量与电弧横截面成正比, 且能量散出亦与横截面成正比^[8]。此模型所适用的情况为电流较大时, 将电流用电压和电导表示, 最终得到与电压相关的电弧模型表达式^[10], 如式(4)。

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{u_c^2} - 1 \right) \quad (4)$$

式中: g 为电弧电导; u 为电弧电压; τ 为电弧时间常数; u_c 为恒定电弧电压。

(2) Mayr 电弧模型

Mayr 模型的观点是, 当电弧的 P_{in} 大于 P_{out} , 即 $ui > P$ 时, 电弧电导对时间的导数为正, 趋于增加。电弧的热惯性又会使电弧电导增加的更慢^[10]。此模型可以认为电弧散出的能量(功率)是恒定的。Mayr 电弧模型的表达式为^[10]

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u \cdot i}{P} - 1 \right) \quad (5)$$

式中: g 为电弧电导; u 为电弧电压; τ 为电弧时间常数; P 为电弧散热功率。

1.2 基于小电流接地方式条件下提出的电弧模型

通过上述分析可知, Cassie 电弧模型模拟的是大电流接地方式的情况, 所以针对中压系统小电流接地这一条件, Cassie 模型是不能准确地进行模拟电弧故障情况的。而 Mayr 电弧虽然可以适用于小电流的情况, 但在模型推导过程中, 假设电弧的散出功率是常数, 很显然, 在电网实际运行过程中, 这是不可能的。所以, Mayr 模型用来模拟这一类型故障也不准确。因此, 在中压电缆网络的条件下, 通过对现有的电弧模型进行改进, 具体推导过程如下。

如前文中的式(3), 电弧模型的基本形式为

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u \cdot i}{P_{out}} - 1 \right) \quad (6)$$

和 P_{out} 。因为是小电流情况, 将电压用电流和电导表示, 使所得公式对电流的变化更为敏感, 可得到式(6)。

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{i \cdot i / g_1}{P_{out}} - 1 \right) \quad (6)$$

式中, g_1 是电弧电导。再将散出功率用电弧电流和等效电导的形式表示, 得式(7)。

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{i \cdot i / g_1}{i^2 / g_2} - 1 \right) \quad (7)$$

式中, g_2 即为散出功率的等效电导, 与电弧电流和电弧长度等参量均相关。消去电弧电流, 得

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{g_2}{g_1} - 1 \right) \quad (8)$$

通过对 g_2 物理意义的分析, 电导与长度成反比, 同时与电弧电流成正比, 对其进行如下表示, 如式(9)。

$$g_2 = \frac{1}{l} \frac{i}{u_c} \quad (9)$$

式中: l 为电弧长度; u_c 为所设电压常数。将式(9)代入到式(8)中, 得

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{i}{g_1 \cdot l \cdot u_c} - 1 \right) \quad (10)$$

此式即为最终得到的适用于中压电缆网络小电流接地方式的电弧模型。为了更准确地进行模拟, 考虑到电弧的燃弧过程, 通过对 u_c 不同取值可以分为主弧和二次燃弧分别表示, 即^[11]

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \begin{cases} \frac{1}{\tau} \left(\frac{i}{g_1 \cdot l \cdot 15} - 1 \right) & \text{主弧} \\ \frac{1}{\tau} \left(\frac{i}{g_1 \cdot l \cdot 26.1} - 1 \right) & \text{二次电弧} \end{cases} \quad (11)$$

由上, 式(11)就是最终得到的可用在小电流系统中的电弧模型。

1.3 几种电弧模型的对比

作为现有的几种电弧模型, Cassie 电弧模型和 Mayr 电弧模型有着各自的优势。例如, Cassie 电弧模型的电弧电压和电弧电流随时间变化特性与实际情况贴近, Mayr 模型的物理意义更为明确。但如上文所述, Cassie 电弧模型应用背景为大电流接地系统, 在小电流接地系统中则无法正确反映实际情况; Mayr 电弧模型应用背景为小电流接地情况, 但是由模型的推导过程可知, 假定散出功率为恒定值是该模型使用的前提, 但实际情况中, 散出功率会随着电弧电流等电气量发生变化, 故而 Mayr 模型的使用也存在很大误差。

由于本文的研究背景为小电流接地系统的中压电缆网络, 以上两种电弧模型无法进行正确仿真, 所以本文重新推导, 以小电流接地系统为前提条件, 将散出功率视为与电弧电流和电弧长度相关的变化量, 使推导后得到的电弧模型既能满足“使用在小电流接地方式的情况下”这一条件, 又可以满足“仿真后所得曲线准确可靠, 能正确模拟现实中电弧故障情况”的条件。

2 基于 Matlab 的电弧仿真分析^[12-16]

2.1 应用 Matlab 对电弧模型的仿真

选择 Matlab 软件进行分析, 利用电力系统模块中的元件建立电弧模型和简单电路, 并对物理量进行定性分析, 将电弧模块接入简单电路中以观察电压电流等特性。

首先, 对原有 Cassie 和 Mayr 模型进行仿真, 将电弧模型的方程式输入到 Matlab 中, 设置的仿真时间为 0.08 s, 可得以下结果, 其中图 1 为 Cassie 电弧模型的电弧电压、电弧电流随时间变化曲线, 图 2 为 Mayr 电弧模型的电弧电压、电弧电流随时间变化曲线。

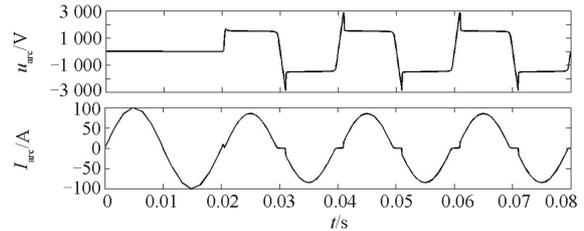


图 1 Cassie 主弧电弧的电压、电流随时间变化曲线

Fig. 1 Curves of arc voltage, arc current of the Cassie arc model changed with time

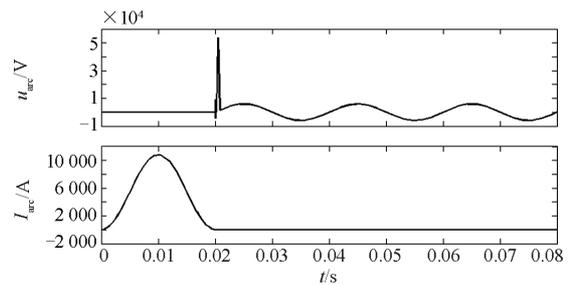


图 2 Mayr 主弧电弧的电压、电流随时间变化曲线

Fig. 2 Curves of arc voltage, arc current of the Mayr arc model changed with time

接下来对改进后的电弧模型进行仿真模拟, 得到的主弧和二次电弧的电弧电压、电弧电流随时间变化的仿真曲线分别如图 3 和图 4 所示。

2.2 对改进模型的有效性分析

分析图 3、图 4 可见, 电弧电流的波形整体是正弦波的形态, 但存在明显的变缓的区域。电弧电压的波形是方波的形态, 但当电弧电流过零点时, 电压突变幅值减小, 直到电流的变缓区域停止, 电压反向达到最大值, 且高于电源电压。

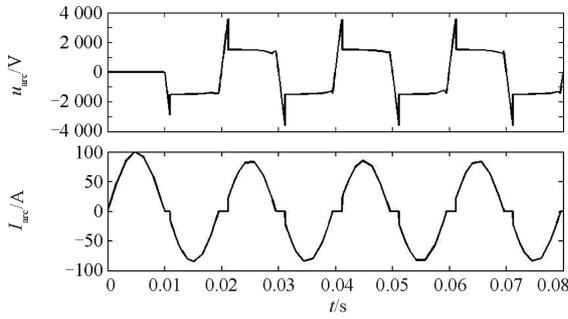


图3 主弧电弧电压、电弧电流随时间变化曲线
Fig. 3 Curves of arc voltage, arc current of the primary arc changed with time

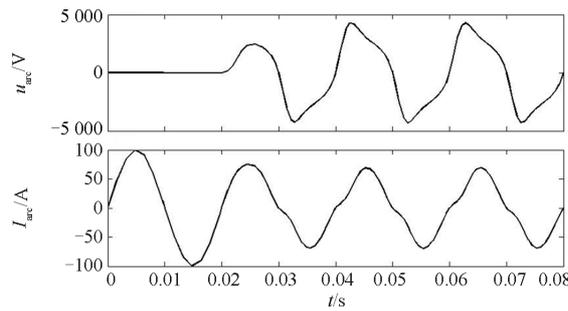


图4 二次电弧的电弧电压、电弧电流随时间变化曲线
Fig. 4 Curves of arc voltage, arc current of the second arc changed with time

为了证明改进模型在实际电网中的有效性，需要证实实际中压电缆网络中，当发生电弧接地故障时，电弧电流和电弧电压的特性及伏安特性与所得模型的特性均一致。通过对文献的研究分析可知，在实际的配电网中，当发生电弧接地故障时，电弧电压和电流的特点为：电弧的电压波形近似为方波状态，产生过电压后回落到一个近乎不变的值上并保持一段时间。电流波形近似正弦波，有一个与正弦波相比变化缓慢的区域^[7]。电弧的伏安特性曲线如图5所示，具有明显的非线性特性。

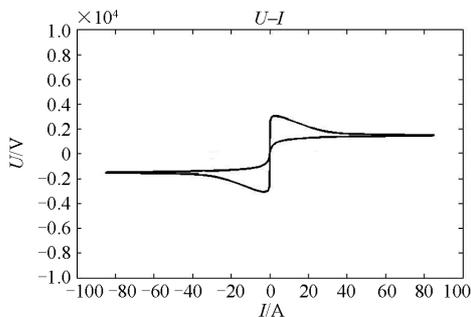


图5 电弧 $U-I$ 特性曲线
Fig. 5 $U-I$ characteristic curve of arc

从改进的电弧模型的仿真曲线可以看出，三个物理量的特点均符合实际电弧模型的物理量状态。且因为参数的修改，改进后的模型既可以模拟主弧的状态下的故障情况，又可以模拟二次燃弧的状态下的故障情况，更加全面。由此，使用这一模型应用在对中压电缆网的故障模拟中。

3 结论

在中压电缆网中，间歇性电弧故障是一种很难模拟的故障类型。本文在研究了现有的 Cassie 电弧模型和 Mayr 电弧模型的基础上，改变电弧散出功率和时间常数的表达方式，考虑实际情况对模型进行改进，改进的模型不再是近似的、无法正确反映实际故障的模型，而是能在中压电缆网的条件下正确模拟实际情况。选用 Matlab 软件对所得模型进行仿真，分析其电弧电压、电弧电流、电弧电阻的特性，电弧电流的波形整体是正弦波的形态，但存在很明显的零休区域。电弧电压的波形是方波的形态，但当电弧电流过零点时，电压突变幅值减小，直到电流的零休停止。所得的模型可以更为真实、准确地反映实际网络中的电弧故障特性，将此模型接入中压电缆网络中，便可以正确模拟最常见的电弧接地故障，为下一步中压电缆网故障分析的研究奠定了基础。

参考文献

[1] 刘渝根, 许晓艳, 马晋佩, 等. 风电场 35 kV 电缆网络中性点接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 92-99.
LIU Yugen, XU Xiaoyan, MA Jinpei, et al. Study on neutral grounding modes of 35 kV cable networks in wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 92-99.

[2] 贾晨曦, 杨龙月, 杜贵府. 全电流补偿消弧线圈关键技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 145-154.
JIA Chenxi, YANG Longyue, DU Guifu. Review of key technologies on full current compensation arc suppression coil[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 145-154.

[3] 范李平, 袁兆强, 张凯. 基于小波变换的单相接地故障电弧模型及其 PSCAD/EMTDC 仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 51-56.
FAN Liping, YUAN Zhaoqiang, ZHANG Kai. Simulation on arc model of single phase earth fault and PSCAD/EMTDC based on wavelet transformation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 51-56.

- [4] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 57-64.
XU Ye, GUO Moufa, CHEN Bin, et al. Modeling and simulation analysis of arc in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 57-64.
- [5] 束洪春, 肖白. 配电网单相电弧接地故障选线暂态分析法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21): 58-61.
SHU Hongchun, XIAO Bai. A transient-based study of fault line selection for single-phase to ground faults on distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 58-61.
- [6] 顾荣斌, 蔡旭, 陈海昆, 等. 非有效接地电网单相电弧接地故障的建模及仿真[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 63-67.
GU Rongbin, CAI Xu, CHEN Haikun, et al. Modeling and simulating of single-phase arc grounding fault in non-effective earthed networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 63-67.
- [7] 要焕年, 曹梅月. 电缆网络的中性点接地方式问题[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 84-89.
YAO Huannian, CAO Meiyue. On neutral grounding modes of cable network[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 84-89.
- [8] 占友雄, 张认成, 杨建红, 等. 基于 Camberra 距离的串联电弧故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 30-36.
ZHAN Youxiong, ZHANG Rencheng, YANG Jianhong, et al. Series arcing fault diagnosis based on Camberra distance[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 30-36.
- [9] 宋云东. 电缆网运行方式及故障控制的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010.
SONG Yundong. Research on operation mode and fault control of cable power network[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2010.
- [10] 黄绍平, 杨青, 李靖. 基于 MATLAB 的电弧模型仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 64-66, 70.
HUANG Shaoping, YANG Qing, LI Jing. Simulation of arc models based on MATLAB[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(5): 64-66, 70.
- [11] 魏子镗. 小电流接地系统单相弧光接地的选线研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
WEI Ziqiang. Study on the system of single-phase arc grounding line selection in small current grounding[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [12] 金海望, 杨炳元, 郑日红, 等. Matlab7.0 下电弧模型的建立与分析[J]. 电气技术, 2011(12): 90-92.
- [13] MARCINAK L. Model of the arc earth-fault for medium voltage networks[J]. Central European Journal of Engineering, 2011, 1(2): 168-173.
- [14] 于然, 付周兴, 王清亮, 等. 基于 MATLAB 的电弧建模仿真及故障分析[J]. 高压电器, 2011, 47(9): 95-99, 106.
YU Ran, FU Zhouxing, WANG Qingliang, et al. Modeling simulation and fault analysis arc based on MATLAB[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(9): 95-99, 106.
- [15] 李震球, 王时胜, 吴丽娜. 一种谐振接地系统电弧高阻接地故障选线新方法及仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 44-49.
LI Zhenqiu, WANG Shisheng, WU Lina. A new method and simulation for arcing high-impedance-grounding fault line selection in resonant grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 44-49.
- [16] 李谦, 王晓瑜, 招誉颐, 等. 配电网间歇性电弧接地过电压抑制措施的仿真研究[J]. 电网技术, 1994, 18(5): 42-48.
LI Qian, WANG Xiaoyu, ZHAO Yuyi, et al. Simulation research on the restraining measures of the intermittent arcing grounding overvoltage in the power distribution system[J]. Power System Technology, 1994, 18(5): 42-48.

收稿日期: 2015-12-21; 修回日期: 2016-03-01

作者简介:

李建南(1991-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 576973754@qq.com

张慧媛(1963-), 女, 副教授, 研究方向为电网络理论及其在电力系统中的应用; E-mail: zhyseunj@aliyun.com

王鲜花(1968-), 女, 高级工程师, 研究方向为继电保护整定计算。E-mail: bmdlwxh@126.com

(编辑 魏小丽)