

低压配电线路电弧性短路故障仿真分析

郑梦笛 (中南建筑设计院股份有限公司, 武汉市 430071)

Simulation Analysis on Arc Short-circuit Fault of LV Distribution Circuit

ZHENG Mengdi (Central-South Architectural Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: Background and significance of studying fault arc of low-voltage distribution circuit are illustrated; and production conditions, classification and features of fault arc in circuit are analyzed in this paper. A mathematical model for single-phase arc fault of low-voltage distribution circuit is established by choosing an arc mathematical model suitable for low-voltage distribution system. With the simulation experiment analysis on limitation of overcurrent protection of breaker in case of arc short-circuit fault of the circuit, the necessity of using arc fault breaker is illustrated, and the application prospect of arc fault breaker is proposed.

Key words: arc; fault arc; arc short-circuit fault; low-voltage distribution system; mathematical model; simulation analysis; action delay; arc fault circuit interrupter

摘要: 阐述进行低压配电线路故障电弧研究的背景及意义, 分析线路上故障电弧的产生条件、分类及特征, 选取适用于低压配电系统的电弧数学模型, 建立低压配电线路单相电弧性短路故障数学模型, 通过仿真实验分析线路上发生电弧性短路故障时断路器过电流保护的局限性, 说明电弧故障断路器应用的必要性, 并提出电弧故障断路器的应用前景。

关键词: 电弧; 故障电弧; 电弧性短路故障; 低压配电系统; 数学模型; 仿真分析; 动作延迟; 电弧故障断路器

中图分类号: TM56 文献标识码: A

0 引言

在低压配电系统中, 为保证正常运行, 系统中采用了过电流保护、过负荷保护、接地故障保护、中性线断线保护等保护措施^[1]。断路器、控制与保护开关、熔断器等保护装置的应用大大提高了系统的安全运行能力, 其中具有反时限断开特性的断路器作用突出, 且断路器整定电流以金属性短路的短路电流作为校验标准。

根据电弧的伏安特性曲线推导, 电弧可认为是一个非线性时变电阻元件^[2], 且由于电弧性短路故障的短路阻抗相当于空气介质的阻抗, 属于高阻抗短路, 因此故障电流可能小于断路器的整定电流, 过电流保护无法对电弧故障提供可靠的保护。故障电弧长期间歇性热效应作用于包覆导体的绝缘层, 逐渐形成可靠的碳化导电途径, 可能会对线路及设备造成严重损坏, 甚至引发火灾。

本文从故障电弧本身的性质和其构成的电气火灾隐患两方面入手, 说明进行低压配电线路电弧性短路故障分析具有重要意义。

1 低压故障电弧的产生与分类

气体放电形式随外界气体种类、压力、温度、电极材料、电极间距以及电极两端电压的变化而改变^[3]。其中, 电弧放电是气体放电的一种表现形式, 并认为是气体放电的最终形式。电弧通常产生于两电极之间, 当极间电场强度足够大, 极间气体的绝缘强度减弱, 直至发生绝缘击穿, 在电极间形成稳定的导

作者信息

郑梦笛, 女, 中南建筑设计院股份有限公司, 助理工程师。

电等离子体。

电弧产生的原因多种多样，针对低压配电线路上产生的故障电弧，总结为表1所示4个原因。

表1 电弧产生原因分类及解释

Tab. 1 Classification and explanation of the cause of arc

电弧产生原因	解释
电路开断	当线路被意外外力强制切割时，接触压力和面积的减小导致接触电阻增大，触头释放的热量增加。热量大量聚集于接触面导致接触面上的金属被高温加热而熔化，在触头间形成液态金属桥。当金属桥被拉开后，在触头之间就会形成过渡或稳定的电弧。
触头闭合	裸露导线暂时性接触前会发生电击穿。电弧建立的时间大约为 10^{-8} s，与发生击穿时的触头间距离无关。
间隙击穿	电极两端电压差引起间隙场电子电流作用，使金属蒸气游离形成空间电荷，抬升电极电压差，累积作用下电压差越来越大，最终导致间隙击穿。
绝缘碳化	包覆导线的绝缘层长期受热或短时高温，产生泄漏电流而引发火花放电，导致绝缘裂解，形成碳化导电通道。

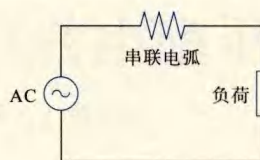
按发生方式的不同，一般将低压配电线路电弧故障分为串联电弧故障、并联电弧故障和接地电弧故障^[4]：

a. 串联故障电弧。如图1(a)所示，故障电弧与线路负荷呈串联关系，串联电弧多是由于导线长期弯折或被外力拉开导致电路开断形成的。

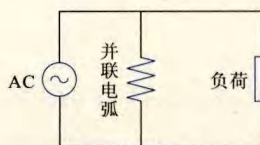
b. 并联故障电弧。如图1(b)所示，故障电弧与线路负荷呈并联关系，并联电弧多是由于不同极性导体意外碰触形成的。

c. 接地故障电弧。如图1(c)所示，接地电弧是相线与PE线、设备外壳或其他地电位物体间产生的电弧，一般将接地故障电弧归入并联故障电弧。接地故障电弧可能出现在裸露导线与设备外壳接触、图钉刺穿电线绝缘层等情况下。

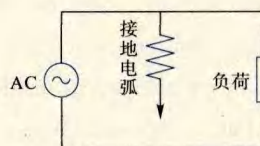
并联故障电弧由于将负荷短路，故障电流通常很大，过电流保护可对其实现保护。而串联故障电弧的电流受负荷影响较大，容易躲过过电流保护装置和剩余电流动作保护电器的监测。下面选取低压配电线路上发生单相接地电弧故障这一特殊情形进行理论分析



(a) 串联故障电弧
(a) Series fault arc



(b) 并联故障电弧
(b) Parallel fault arc



(c) 接地故障电弧
(c) Grounding fault arc

图1 故障电弧类型示意图
Fig. 1 Type diagram of fault arc

与仿真计算，以此说明过电流保护应用于电弧故障保护的局限性。

2 低压配电系统单相电弧性短路故障仿真分析

民用建筑典型低压供配电系统主接线如图2所示，假设单相电弧性短路故障发生在终端配电箱进线上，其等效电路示意如图3所示。此系统参数包括了系统相保阻抗、变压器相保阻抗、线路相保阻抗以及电弧阻抗。由此可见，故障电弧的电流受电弧电阻、系统中各种电气元件的综合影响。

系统电源侧可视为无穷大电网，系统相保阻抗相比于其他阻抗可忽略。以10/0.4kV低压配电系统

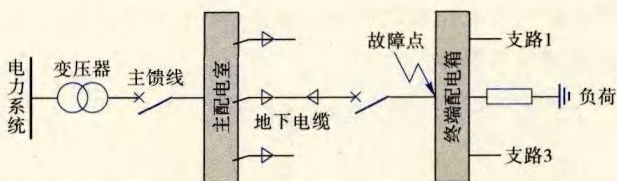


图2 民用建筑供配电系统主接线示意图
Fig. 2 Main wiring diagram of distribution system in civil buildings

为例,选取系统主变压器联结组别为 D, yn11, 容量为 630 kVA, 设定线路参数为 YJV-1 kV-3×50+1×25 mm², 线路总长度为 120 m, 在该线路末端发生单相电弧性短路故障, 查阅文献 [5] 得到系统总阻抗(系统阻抗、变压器阻抗和线路阻抗之和)为 (128.86+j30.11) mΩ。

采用 Tammy Gammon 和 John Matthews [4] 提出的描述电弧电压和电弧电流之间关系的电弧数学模型:

$$V_{\max} \sin \omega t = i_{\text{arc}} R + L \frac{di_{\text{arc}}}{dt} + (20 + 534 \times g) i_{\text{arc}}^{0.12}$$

在 MATLAB / Simulink 仿真平台上建立如图 4 所示供配电系统故障电弧仿真模型。

图 4 中, AC 为频率 50 Hz, 有效值 220 V 的单相交流电源, R、L 分别为系统阻抗、变压器阻抗、线路阻抗的总电阻及总电感, A 为电流表, 示波器 i 用于记录电流瞬时值, 电压表 V 记录系统电压瞬时值, 电压表 V1 记录故障电弧两端电压瞬时值, 示波器 u 用于记录电源及故障电弧端电压。

采用一受控电压源 CVS 对故障电弧两端电压 (20 + 534 × g) i_{arc}^{0.12} 进行等效。

另外, 在仿真分析中不考虑电弧间隙对电弧电压、电流参数的影响, 取电弧间隙为一定值, 即

$g = 2 \text{ cm}$ 。

进行仿真运算得到如图 5、图 6 所示回路电流、系统电压及故障电弧端电压的波形。

由图 5 可知, 故障电弧电流波形出现一定程度的畸变, 在电流过零点前后出现“零休”区域, 此时故障电弧电流几乎为 0, 而在远离过零点处电弧电流呈现正弦变化趋势。

由图 6 可知, 故障电弧端电压波形可近似看作方波, 在过零点附近电压变化非常快, 而在远离过零点处电弧电压基本维持恒定。

针对所设线路参数, 可选择施耐德电气型号为 NSX250 的断路器作为该线路的过电流保护装置, 表 2 列出了 NSX250 塑壳式低压断路器电流-时间特性数据 [7]。其中, 参数 I_r 表示断路器的长延时脱扣整定电流。

根据仿真模型计算得出单相电弧性短路故障回路电流有效值为 1 180 A, 因此发生单相电弧短路故障时断路器将会延时 3.2~5 s 才能脱扣, 常规过电流保护会出现动作延迟现象。而根据图 5、图 6 可估算在一个周期 (0.02 s) 内输入电弧的电功率达到 1 000 W, 因此在 3.2~5 s 内输入故障电弧的能量将非常大, 在断路器延迟动作之前故障电弧可能已将附近可燃物引燃。

另外, 针对故障电弧检测, 将仿真所得故障电弧电流进行如图 7 所示 FFT 分析, 发现奇次谐波, 特别是 3、5、7 次谐波含量较大, 在进行故障电弧检测时, 可将线路谐波含量作为检测依据之一。同时, 采用动态电阻计算方法获得故障电弧动态电阻如图 8 所

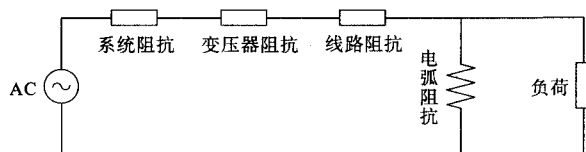
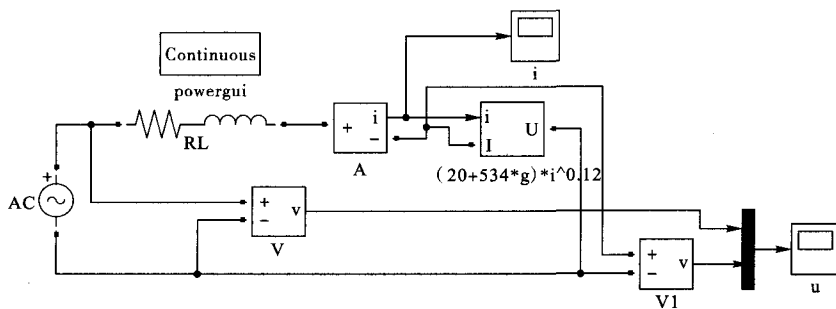
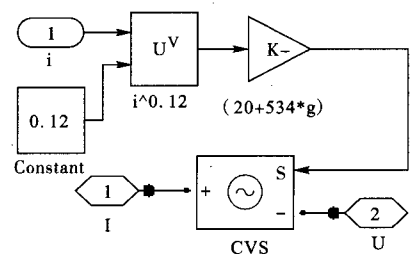


图 3 供配电系统单相电弧故障电路等效图
Fig. 3 Equivalent diagram of single-phase arc fault circuit in distribution system



(a) 系统仿真模型
(a) Simulation model of system



(b) 电弧仿真模型
(b) Simulation model of arc

图 4 供配电系统故障电弧仿真模型
Fig. 4 Simulation model for fault arc of distribution system

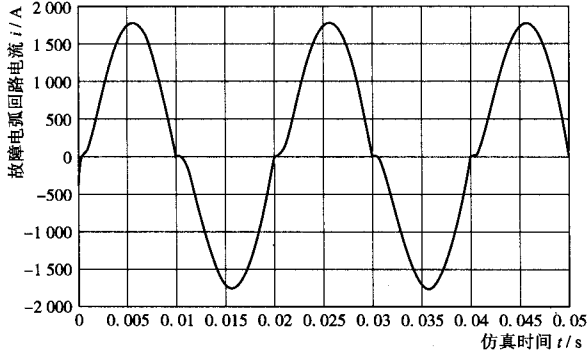


图5 故障电弧放电电流仿真波形
Fig. 5 Discharge current simulation wave of fault arc

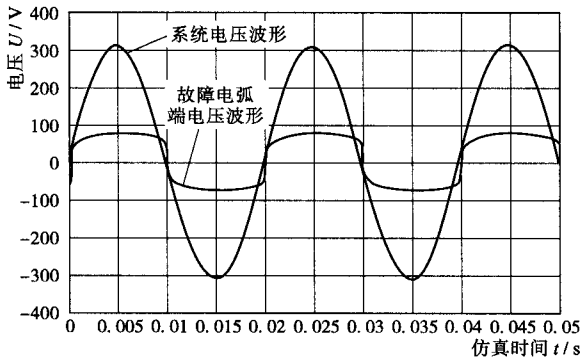


图6 系统电压与故障电弧端电压仿真波形
Fig. 6 Simulation wave of system voltage and fault arc voltage

表2 NSX250 塑壳式低压断路器电流—时间特性数据
Tab. 2 Data on current-time characteristic of NSX250 molded case circuit breaker

线路电流	$I = 1.5 I_r$	$I = 6 I_r$	$I = 7.2 I_r$	$I = 8 I_r$
脱扣时间 / s	120 ~ 180	5 ~ 7.5	3.2 ~ 5	瞬时脱扣

注：断路器长延时脱扣整定电流 $I_r = (0.8 \sim 1) \times$ 载流量（根据线路选型取其载流量为 160 A）。

示，发现在过零点附近电弧动态电阻明显升高，呈现阶跃状态，因此在进行故障电弧检测时，同样可将故障电弧动态电阻变化率作为检测依据。

3 电弧故障断路器的应用

针对仿真中出现的过电流保护装置无法及时检测并切除电弧性故障回路的问题，美国 Underwriter Laboratories Inc.（美国保险商试验所）于 1999 年首次发行了电弧故障断路器安全标准，即 UL1699 标准^[8]。

此标准用以规范电弧故障断路器（Arc - Fault

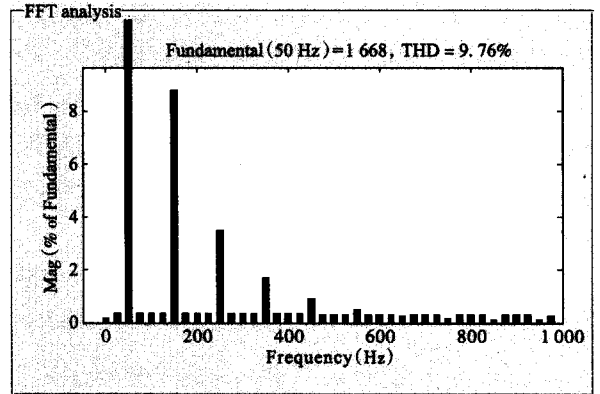


图7 故障电弧电流 FFT 分析结果
Fig. 7 FFT analysis result of fault arc current

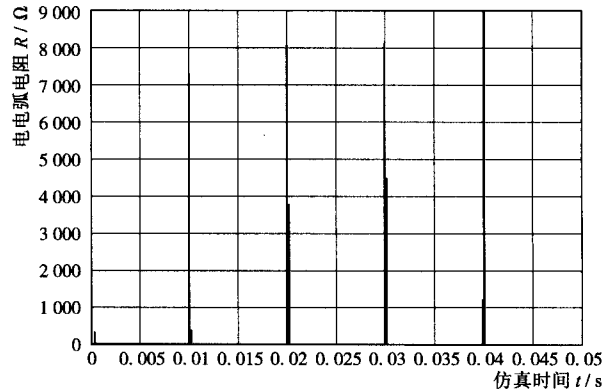


图8 故障电弧动态电阻仿真波形
Fig. 8 Dynamic resistance simulation wave of fault arc

Circuit - Interrupters, AFCI) 的生产与校验，以此识别由过电流产生的电弧而造成的建筑物火灾。根据 UL1699 的标准，在低压配电线路上，当 AFCI 在 0.5 s 内觉察到 8 个半周的故障电弧，断路器即执行脱扣，切断故障电路^[9]。

UL1699 将电弧故障断路器分为 5 大类，分别为支路式（Branch / Feeder）AFCI、插座式（Outlet Circuit）AFCI、组合式（Combination）AFCI、绳索式（Cord）AFCI、便携式（Portable）AFCI。

AFCI 技术作为一项较新的电力系统保护技术，能够在发生电弧故障时及时分断电路，提高系统可靠性。

由于电气火灾事故频频发生，为了减少家用电气设备故障电弧引发的不安全因素，电弧故障断路器已经在海外开始广泛应用。2002 年美国全国电气条例要求所有卧室内的支路，都必须安装符合工艺要求的电弧故障断路器，以保护整条支路^[10]。2004 年开始，

美国家用空调必须带具有 AFCI 功能的电源插头。

随着自动化普及程度越来越高,生产生活对供电可靠性提出了非常高的要求,而 AFCI 技术目前尚处于发展阶段,预计近年 AFCI 技术的相关研究会越来越深入,AFCI 市场前景将会非常广阔。

4 结语

针对常规过电流保护无法对电弧故障进行快速有效保护的问题,本文通过对线路上产生的故障电弧进行的简单分析,在 MATLAB/Simulink 仿真平台上建立了单相电弧性短路故障的仿真模型,验证了过电流保护对于电弧故障保护的局限性。从故障电弧的电压、电流、阻抗、功率、频率 5 方面对仿真结果进行深入分析。

仿真结果说明线路上发生的故障电弧为大电流、低电压电弧,在电弧过零时电弧阻抗远高于过零前的电弧阻抗,奇数次谐波含量较大,提出故障电弧阻抗和频率可作为诊断参考量。

参考文献

- [1] 桂小智. 低压配电系统串联电弧故障实验研究与电弧性短路故障仿真分析[D]. 重庆:重庆大学,2011.
- [2] 古金国,徐国政,钱家骊. 故障电弧特性[J]. 高压电器,1999(6):41-44.
- [3] 王其平. 电器电弧理论[M]. 北京:机械工业

出版社,1982.

- [4] 宋政湘,李东玮,陈会林. 低压电弧故障的研究与分析[J]. 低压电器,2009(17):1-4.
- [5] 中国航空工业规划设计研究院. 工业与民用配电设计手册[M]. 第3版. 北京:中国电力出版社,2005.
- [6] Tammy Gammon, John Matthews. The Historical Evolution of Arcing-Fault Models for Low-Voltage Systems[C]. IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1999.
- [7] Schneider Electric. Schneider Compact NSX 应用指南[C].
- [8] UL Standard for Safety for Arc-Fault Circuit-Interrupters (UL1699) [S], 2006.
- [9] 杨艺,董爱华,付永丽. 低压故障电弧检测概述[J]. 低压电器,2009(5):1-4,27.
- [10] 罗雷,刘晖. 新型家用电弧故障断路器(AFCI)的开发[J]. 建筑电气,2006,25(2):11-16.
- [11] 任长宁,杨栋. 低压配电线路中的电弧故障与防控[J]. 建筑电气,2012,31(1):40-45.

2014-01-22 来稿

2014-02-24 修回

(本专栏文章均由湖北省土木建筑学会建筑电气专业委员会、武汉市土木建筑学会建筑电气专业委员会、湖北省建筑电气设计技术协作及情报交流网联合推荐)

编后记

Afterword

本次和湖北省(武汉市)建筑电气“两会一网”合作的《湖北省建筑电气优秀论文专栏》,呈现给国内外读者的7篇优秀论文是湖北省建筑电气技术发展的代表和缩影,力图反映湖北在“中部崛起”、“产业转移”的国家发展大背景下,迈向“大光谷时代”的步伐,展现湖北建筑电气人为湖北“建成支点、走在前列”添砖加瓦的作为。

湖北省“两会一网”专业学术活动开展卓有成效,湖北建筑电气圈素来具有良好的学术氛围,这在湖北建筑界被高度评价。介绍和传播行业动态是《建筑电气》义不容辞的职责,希望本专栏带给读者朋友的优质资讯,可以助力您的工作,提供有益思考,共同为行业进步努力,贡献智慧和力量。

在此,特向为本专栏严格把关的湖北建筑电气专家、辛勤付出的各位作者、一丝不苟的湖北省“两会一网”组织者表示深深的敬意!