

配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究

许晔¹, 郭谋发¹, 陈彬², 杨耿杰¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116; 2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

摘要: 为选择有效的配电网接地消弧措施及选线方法, 有必要进行电弧建模及仿真研究。给出 Cassie、Mayr、Schwarz、控制论等四种电弧模型的数学方程, 其中 Mayr、Schwarz、控制论等三种电弧模型适合描述接地电流较小的电弧的故障特征。建立 Schwarz 和控制论电弧仿真模型, 并利用电弧特性测试电路对这两种模型做仿真对比分析。控制论模型因能直接设置弧长, 直观地反映配电网故障拉弧情况, 更适用于谐振接地系统单相弧光接地故障仿真研究。采用 ATP-EMTP 软件建立谐振接地系统模型和控制论电弧模型, 分析了不同电弧长度对电弧阻抗、接地电弧稳态和暂态特性的影响。仿真结果表明, 利用控制论电弧模型可较直观且准确地仿真谐振接地系统弧光接地故障。

关键词: 谐振接地系统; 单相接地; 弧光接地; 电弧模型; 电弧长度; ATP-EMTP

Modeling and simulation analysis of arc in distribution network

XU Ye¹, GUO Moufa¹, CHEN Bin², YANG Gengjie¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;
2. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Studies on modeling and simulation of arc help to choose arc-extinction methods and line-selection methods in distribution network. Four kinds of arc mathematical equations are given such as Cassie, Mayr, Schwarz and the cybernetic model. Mayr, Schwarz and the cybernetic model are suitable for describing the arc characteristics when the grounding current is small. The arc model of Schwarz and the cybernetics is established, and these two models are compared using a test circuit of arc characteristics. The cybernetic model can set arc length, reflect the arc fault conditions and apply to simulation of single-phase arc grounding fault in resonant earthed system. The resonance earthed system model and the cybernetic model are established by ATP-EMTP, and the effect of arc length on arc impedance, steady and transient arc characteristics is analyzed. The results show that the cybernetic model is more intuitive and accurate to simulate arc grounding fault in resonant earthed system.

Key words: resonant earthed system; single phase grounding; arc grounding; arc model; arc length; ATP-EMTP

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)07-0057-08

0 引言

10 kV 中压配电线路单相接地故障率较高, 且常伴随弧光现象, 引起的弧光过电压常常危害电力系统的安全运行^[1]。进行电弧建模及仿真研究, 有助于选择有效的消弧措施及选线方法。电弧故障现场数据不易测量, 物理仿真^[2-3]条件有限且花费巨大。建立电弧数学模型的仿真方式^[4]不仅成本低, 灵活性强, 且能较为准确的模拟电弧情况。

目前对电弧模型的研究^[5-8]已取得大量成果。但各种电弧模型都是通过一定的假设和简化得到的,

用于模拟物理过程复杂、影响因素众多的电弧, 均存在一定缺陷。文献[9]利用压控开关模拟配电网电弧故障, 无法准确模拟电弧非线性电阻的特性。文献[10]建立弧隙能量平衡的配电网电弧动态模型, 但公式复杂, 不利于数字仿真实现。文献[11]建立特高压输电线路精确数字仿真模型, 应用于配网电弧故障的准确性有待验证。文献[12]对高压电弧建立混沌模型, 电弧方程复杂, 其假设条件对中压电弧的适用性有待商榷。

本文将从数学方程、模型特性测试等方面分析对比几种常见电弧模型, 获得适用于仿真配电网单

相弧光接地故障的电弧模型，并将其接入配电网仿真系统，分析不同弧长下的电弧模型的特征。

1 电弧的数学模型

电弧数学模型的普遍形式如下：

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_{arc}} \left(\frac{e \cdot i}{P_{loss}} - 1 \right) \quad (1)$$

式中： g 为单位长度电弧电导； $e \cdot i$ 为单位长度电弧的输入功率； e 为单位长度电弧电压，即弧柱中场强； i 为电弧电流； τ_{arc} 为电弧的时间常数； P_{loss} 为单位长度电弧的耗散功率。

各种电弧模型根据不同的假定条件，推导出相应的时间常数 τ_{arc} 和耗散功率 P_{loss} 。目前常用的电弧模型有 Cassie 电弧模型、Mayr 电弧模型、Schwarz 电弧模型^[13]、控制论模型等。

1.1 Cassie 电弧模型

根据 Cassie 电弧模型的假定条件^[14]，可推出 Cassie 电弧方程：

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{e^2}{e_0^2} - 1 \right) \quad (2)$$

式中： τ_c 为 Cassie 电弧的时间常数； e_0 静态弧柱中的场强，为常数。

Cassie 电弧模型适合模拟小电阻大电流的燃弧情况^[15]。

1.2 Mayr 电弧模型

Mayr 电弧模型是一种基于热游离、热惯性和热平衡^[16]三种原理而建立的动态电弧模型，具有较为明确的物理意义，适用于小电流电弧的特性仿真，其电弧方程为

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_M} \left(\frac{e \cdot i}{P_{loss}} - 1 \right) \quad (3)$$

Mayr 模型中时间常数 τ_M 和耗散功率 P_{loss} 均为常数。

1.3 Schwarz 电弧模型

实际燃弧的时间常数 τ_M 和耗散功率 P_{loss} 都是不断变化的。因此，改进 Mayr 模型，认为时间常数 τ_M 和耗散功率 P_{loss} 是关于电导 g 的函数，其关系式^[17]如下：

$$\begin{cases} \tau_M = \tau_p g^p \\ P_{loss} = p_s g^s \end{cases} \quad (4)$$

式中， τ_p 、 p 、 p_s 、 s 这四个参数为常数，可通过实验获得。

1.4 控制论模型

将 Mayr 电弧方程转化为长度 L_C 的电弧方程，

令 G_C 为稳态电导， $P_{loss} = i^2 G_C$ ，则控制论模型表达式为

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_c} (G_C - g) \quad (5)$$

式中：稳态电导 $G_C = \frac{|i|}{V_C \cdot L_C}$ ，电弧时间常数

$\tau_c = \beta \cdot \frac{I_C}{L_C}$ 。 V_C 为弧柱中稳态场强，近似为常数，

可取经验值 $V_C = 15 \text{ V/cm}$ ； L_C 为电弧长度，单位 cm ；系数 β 取经验值 2.85×10^{-5} ； I_C 为电弧电流的峰值，近似为直接接地时的短路电流^[18]，单位 kA 。

2 接地电弧模型特性的仿真与对比

Cassie 电弧模型适用于大电流燃弧的情况，Mayr、Schwarz、控制论等三种电弧模型适用于小电流电弧的特性模拟^[18]。而我国中压配电网多采用小电流接地方式，接地电流较小，因此采用 Mayr、Schwarz、控制论等三种电弧模型更适合描述配电网单相弧光接地的故障特征。下面对广泛采用的 Schwarz 模型和控制论模型等两种 Mayr 电弧改进模型进行建模仿真，对比其电弧特性。

采用 ATP-EMTP 电力系统电磁暂态分析仿真软件，建立电弧模型和电弧模型特性测试电路，如图 1 所示。

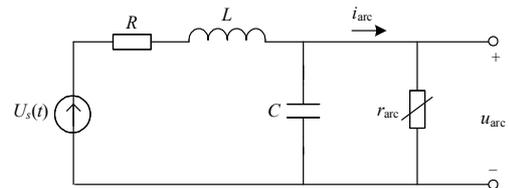


图 1 电弧模型特性测试电路

Fig. 1 Test circuit of arc models

测试电路为配电网等效电路，由电压源 $u_s(t)$ 、线路等效电阻 R 、线路等效电感 L 和线路等效电容 C 等部分组成。电压源电压峰值为 $u_{s-amp} = 10 \times 10^3 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} = 8164.9 \text{ V}$ ，频率 50 Hz ，初相角 90° ；线路等效电阻 $R = 0.45 \Omega$ ，线路等效电感 $L = 1.21 \text{ mH}$ ，线路等效电容 $C = 0.01 \mu\text{F}$ 。 r_{arc} 、 i_{arc} 和 u_{arc} 分别为电弧模型电阻、电流和电压，即电弧模型的外输出特性。

2.1 Schwarz 电弧模型

令 Schwarz 电弧模型参数^[19] $\tau_p = 1.5 \mu\text{s}$ ， $p = 0.17$ ， $p_s = 4 \text{ MW}$ ， $s = 0.68$ ，电弧电导初始值 $g(0) = 10000 \text{ S}$ 。仿真所得相关波形如图 2 所示，图 2(a)~(d)分别为

Schwarz 模型的电弧电流波形、电弧电压波形、电弧阻抗波形和电弧伏安特性曲线。

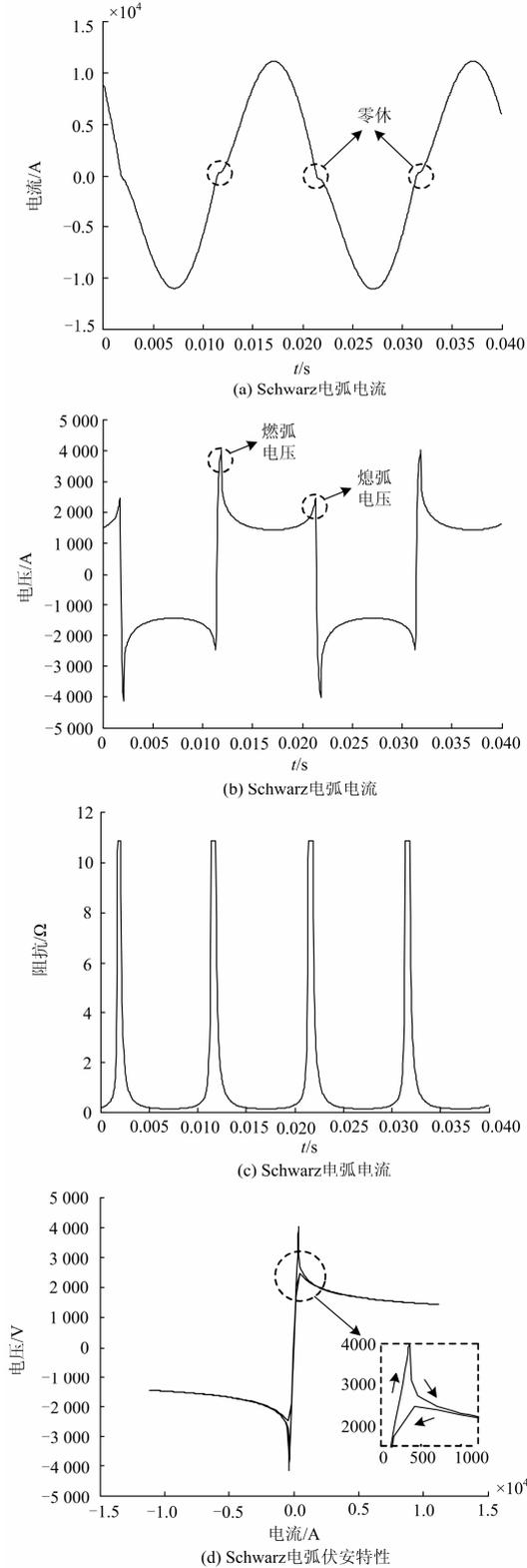


图 2 Schwarz 电弧波形

Fig. 2 Schwarz arc waveforms

由仿真波形可以看出, 电弧电流、电压波形发生严重畸变。图 2(a)中, 电流波形近似正弦波, 但在过零前一小段时间内, 电流约等于零, 这是“电弧电流零休现象”, 每个工频周波内有两个“零休”点。Schwarz 电弧模型的零休时间约为 0.5 ms。图 2(b)中的电弧电压在电流“零休”期间急剧变化, 在大电流阶段变化缓慢, 呈现马鞍形状, 具有明显的燃弧电压和熄弧电压, 且熄弧电压低于燃弧电压, 与文献[20]中某煤矿现场录波 10 kV 母线 I 段 b 相发生单相弧光接地故障电压波形相似。图 2(c)所示电弧阻抗波形类似于脉冲波, 在电弧电流“零休”期间阻抗较大, 其余时间内阻抗近似为零。该模型最大电弧阻抗约为 12 Ω, 这是受 τ_p 、 p 、 p_s 、 s 等四个参数的影响, 增大 τ_p 、 p_s 或减小 p 、 s 可增加电弧长度, 提高电弧阻抗。Schwarz 电弧伏安特性如图 2(d), 形如磁滞回线, 由电流增大和电流减小时的 2 条特性曲线组成。

FFT(快速傅里叶变换)能够快速分解平稳信号。采用 FFT 分析电弧电流和电弧电压的幅频特性, 如图 3。由于电弧的时变非线性阻抗特性, 电弧电压和电弧电流存在奇数次谐波, 且随着谐波次数的增加逐渐衰减。电流谐波成分比例较小, 3 次及 3 次以上谐波幅值接近零。电压谐波成分比例较大, 3 次及 3 次以上谐波逐次衰减速度较慢。

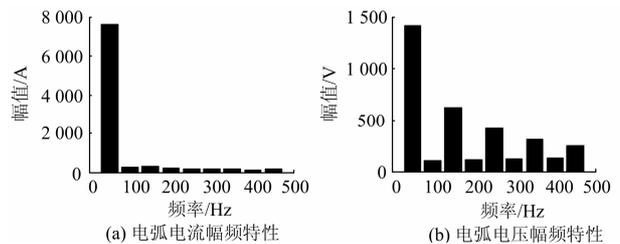


图 3 Schwarz 电弧幅频特性

Fig. 3 Amplitude-frequency characteristics of Schwarz arc

综合上述分析, Schwarz 电弧模型能够正确描述电弧燃烧过程中电压、电流随时间变化的情况, 与文献[20]提供现场录波波形对比, 验证了该模型的有效性。

2.2 控制论模型

控制论模型参数设置为: $V_C=15 \text{ V/cm}$, $L_C=200 \text{ cm}$, $\beta=2.85 \times 10^{-5}$, $I_C=14 \text{ kA}$, 电弧电导初始值 $g(0)=10000 \text{ S}$ 。仿真所得相关波形如图 4 所示, 图 4(a)~(d)分别为 Schwarz 模型的电弧电流波形、电弧电压波形、电弧阻抗波形和电弧伏安特性曲线。

控制论模型的电弧电流和电弧电压也存在畸变。电弧电流如图 4(a), 零休时间约为 0.1 ms, 零

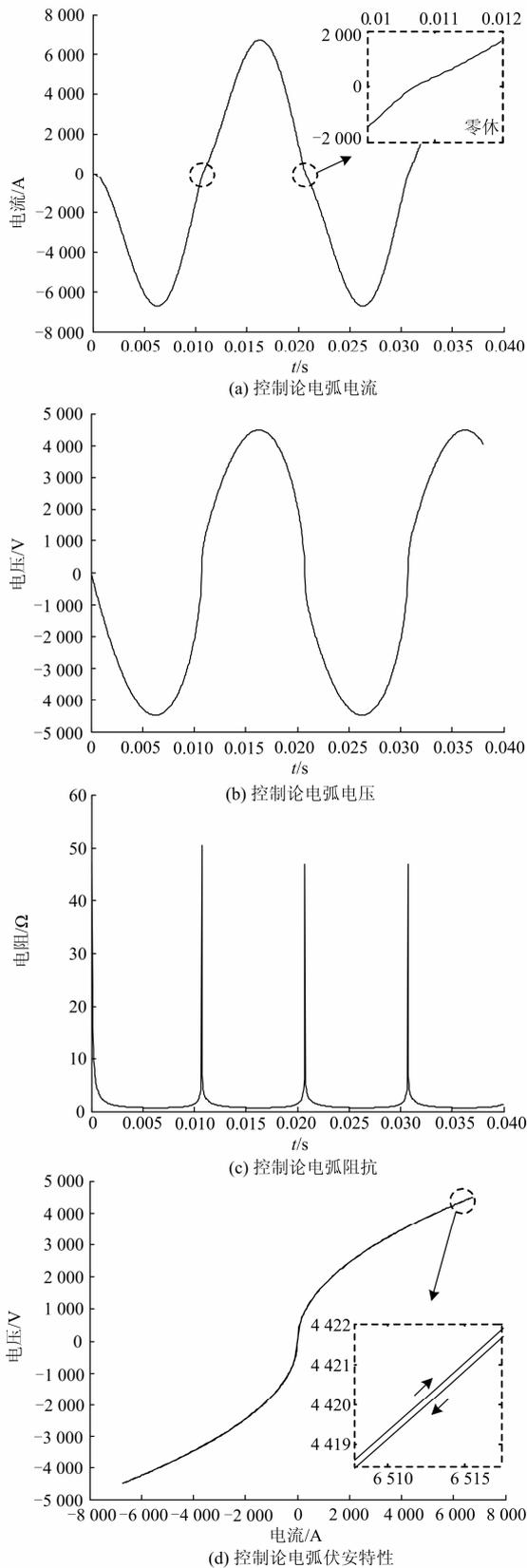


图 4 控制论电弧波形

Fig. 4 Cybernetic arc waveforms

休现象不如 Schwarz 电弧模型明显。图 4(b)中, 电弧电压形似“窝窝头”, 燃弧电压和熄弧电压不明显, 与文献[20]中某煤矿现场录波 10 kV 母线 I 段 c 相发生单相弧光接地故障电压波形相似, 说明控制论能够反映实际电弧特性。图 4(c)展示的“脉冲波”状电弧阻抗波形幅值达 50Ω , 调节电弧长度参数 L_C 可改变电弧阻抗值。控制论电弧模型伏安特性, 如图 4(d), 形似“积分号”, 但本质上仍为电流增大和电流减小时的两条特性曲线组成。这是由于控制论模型电弧电流零休现象不明显, 燃弧电压和熄弧电压不突出, 造成两条特性曲线十分接近。

图 5 为 FFT 变换所得电弧电流幅频特性与电弧电压幅频特性。电弧电压和电弧电流均存在奇数次谐波, 且随着谐波次数的增加逐渐衰减。由于电弧电流和电压畸变不如 Schwarz 电弧模型严重, 工频分量幅值较大, 谐波成分比例较小, 5 次以上谐波幅值都接近零。

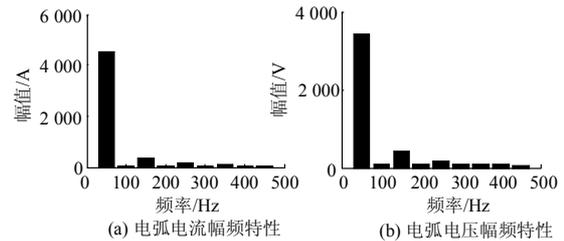


图 5 控制论电弧幅频特性

Fig. 5 Amplitude-frequency characteristics of the cybernetic arc

综上, 控制论模型基本体现了电弧非线性阻抗的特性, 能够有效描述实际电弧特性。

2.3 Schwarz 电弧模型和控制论模型的对比

现就 Schwarz 电弧模型和控制论模型对比如下:

- (1) 从测试波形来看, 两个模型均能反映电弧电流的“零休”特性, 只是零休持续时间不同。
- (2) Schwarz 模型电弧电压具有明显的燃弧电压和熄弧电压, 而控制论模型的燃弧电压和熄弧电压并不明显, 但根据文献[20]中现场录波情况, 二者均能反映真实电弧电压情况。
- (3) 两种模型的伏安特性曲线均有“磁滞回线”的外形, 但控制论模型的 2 条曲线十分接近, 更像“积分号”。

(4) Schwarz 模型和控制论模型的电弧电流和电弧电压幅频特性都随着谐波次数的增加逐渐衰减。电弧电流幅频特性相似, 谐波成分较少, 3 次以上谐波幅值接近于零。Schwarz 模型的电弧电压畸变比控制论模型严重, 因此电弧电压谐波成分比控制

论模型多, 3 次及 3 次以上谐波逐次衰减速度较慢。

(5) 电弧模型阻抗波形均呈现“脉冲波”状, 但最大值不同。可通过设置 Schwarz 模型的 τ_p 、 p 、 p_s 、 s 等四个参数和控制论模型的电弧长度参数 L_C 来调整电弧的长短, 调节电弧阻抗最大值。

总体来说, 用 Schwarz 模型或控制论模型来仿真实际电弧都是可行的。从参数设置上来说, 控制论模型可直接设置电弧长度, 直观反映配电线路燃弧情况; Schwarz 模型需通过 τ_p 、 p 、 p_s 、 s 等四个参数调节电弧长度, 无法直观量化电弧长度, 只能定性分析电弧长短。因此, 本文选择控制论模型接入配电系统, 进行进一步分析。

3 配电网电弧接地故障的仿真分析

中压配电网普遍采用小电流接地系统, 主要包括中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统(也称谐振接地系统)。相较于中性点不接地系统, 谐振接地系统能显著减小故障电流, 始终占据着相当的优势。因此, 本节以谐振接地系统为例, 分析控制论电弧模型接入配电系统中的特性。

采用 ATP-EMTP 软件建立包含 4 条馈线的谐振接地系统仿真模型, 如图 6 所示。模型中 4 条馈线分别为全架空线路、缆一线混合线路、全电缆线路和带分支全电缆线路, 体现配电系统网络结构复杂的特点。

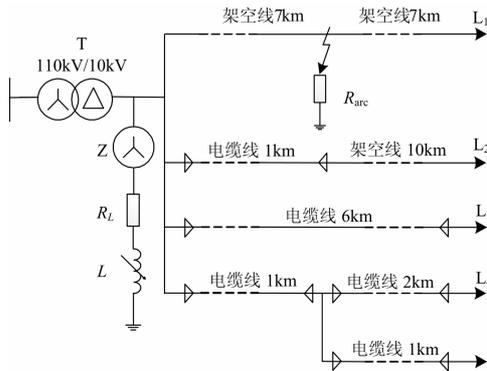


图 6 谐振接地系统仿真模型

Fig. 6 Simulation model of resonant earthed system

谐振接地系统模型各部分参数如下, 110 kV 变压器型号为 SZ-31500/110, 10 kV 配电变压器型号为 S11-MR-1000/10。Z 型变压器型号为 JSC-200/10.5。消弧线圈过补偿度为 8%。线路采用分布参数 Clarke 模型, 电缆线路和架空线路参数如表 1 所示。

将控制论电弧模块接入线路 1 的 C 相距离母线 7 km 处。电弧参数设置为 $V_C=15$ V/cm; $\beta=2.85 \times 10^{-5}$; I_C 取该处直接接地时故障相短路电流, 约为 11 kA; 电弧电导初始值 $g(0)=10000$ S。

表 1 电缆线路和架空线路参数

Table 1 Parameters of cable line and overhead line

类型	$R_1/$ Ω/km	$L_1/$ mH/km	$C_1/$ $\mu\text{F}/\text{km}$	$R_0/$ Ω/km	$L_0/$ mH/km	$C_0/$ $\mu\text{F}/\text{km}$
电缆	0.270	0.225	0.339	2.700	1.019	0.280
架空	0.170	1.210	0.010	0.230	5.478	0.008

发生弧光接地的原因多为电压过峰值时刻绝缘薄弱处击穿, 因此设置故障初相角为 90° , 故障时刻为 0.02 s。仿真时长 0.3 s, 采样频率为 20000 Hz。下面将从接地电弧稳态特性和暂态特性等两个方面进行分析。

3.1 配电网接地电弧稳态特性

对电弧长度 L_C 分别为 1 cm、10 cm、100 cm、500 cm 情况进行仿真。接地电弧稳态特性如表 2 所示。图 7、图 8 分别为接地电弧电流稳态幅频特性和电压稳态幅频特性。

表 2 接地电弧稳态特性

Table 2 Steady-state characteristic of the grounding arc

电弧长度/cm	最大阻抗/ Ω	电压幅值/V	电流幅值/A	零休时间/ms
1	60	5.5	2	≈ 0
10	400	17	2	0.4
100	5500	52	2	0.6
500	50000	116	2	0.8

观察表 2 记录的接地电弧稳态特性, 得出以下结论:

- (1) 随着电弧长度的增加, 接地电弧的阻抗也逐渐增大。
- (2) 电弧越长, 阻抗越大, 弧柱上的压降越大, 电压幅值就越大。
- (3) 电弧电流的幅值基本不随电弧长度变化。
- (4) 零休时间的长短随着弧长增加而变大, 这是由于阻抗增加使得零休现象趋于明显。

在图 7 中, 各弧长下电弧电流基波幅值基本不变, 都没有偶次谐波成分。当电弧长度为 1 cm 时, 奇次谐波幅值约为零; 弧长增加到 10 cm 时, 奇次谐波比例增加, 7 次谐波幅值最大, 3~7 次谐波幅值随着谐波次数的增加而变大, 7 次以上谐波随谐波次数增加而递减; 弧长为 100 cm 时, 3~7 次谐波幅值相当, 7 次谐波以上随谐波次数增大而减小; 当弧长达到 500 cm 时, 各奇次谐波随谐波次数的增加而逐渐衰减。这说明电弧长度不同, 电弧电流畸变的程度不同, 各奇数次谐波所占的比例也不同。但总体来说, 各次谐波幅值均远小于基波幅值, 侧面说明电弧电流波形近似于正弦波, 只在“零休”部分发生畸变。

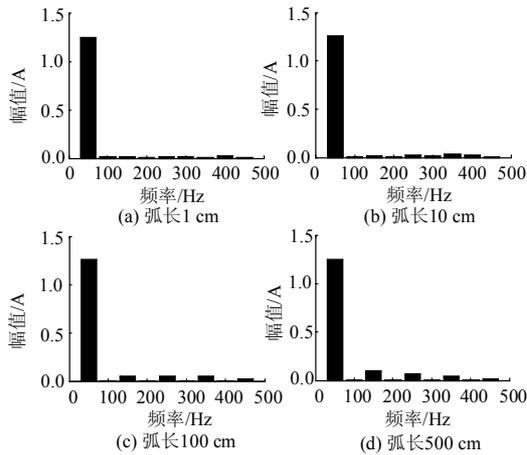


图 7 接地电弧电流稳态幅频特性
Fig. 7 Amplitude-frequency characteristics of steady arc current

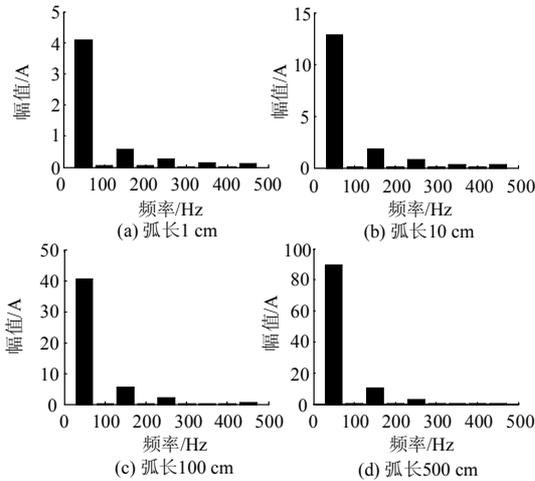


图 8 接地电弧电压稳态幅频特性
Fig. 8 Amplitude-frequency characteristics of steady arc voltage

观察图 8 中各弧长下电弧电压的幅频特性，基波分量幅值随弧长增加而变大，不存在偶数次谐波，各奇次谐波所占比例基本不变。这说明基频电压和奇次谐波在电弧阻抗上的压降随着电弧长度的增加而线性增长。

3.2 配电网接地电弧暂态特性

电弧长度 L_C 为 1 cm、10 cm、100 cm、500 cm 时的接地电弧暂态波形如图 9，观察到：

(1) 暂态电弧电流最大值基本相等。故障后存在的电容电路高频振荡分量使得电弧一直保持持弧状态。根据第 2 节分析可知，在非“燃弧熄弧交替”的阶段，电弧阻抗约等于零，因此，故障初始时刻电弧接地近似于直接接地，接地电流的幅值不受电弧长度的影响。

(2) 弧长越大，阻尼作用越强，电流暂态分量衰减速度越快。当电容电流振荡基本结束后的第一个电流过零点将出现熄弧现象，此后电弧在熄弧、燃弧交替进行的状态下稳定燃烧。电弧稳定燃烧时的特性即 3.1 节分析的接地电弧稳态特性。

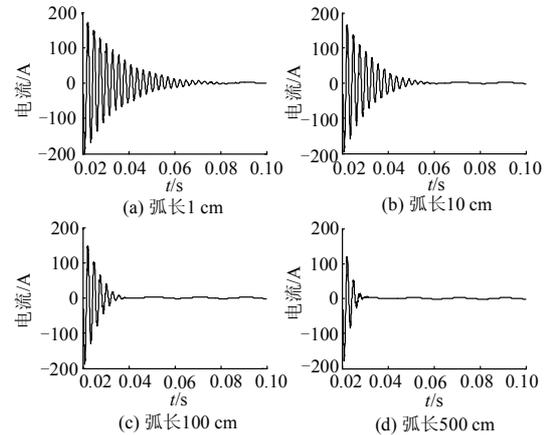


图 9 接地电弧暂态电流波形
Fig. 9 Transient waveforms of arc current

HHT(希尔伯特-黄变换)是一种时频局部化分析方法，能够准确分解非平稳信号。取故障后 1 个工频周期的接地电弧电流进行 HHT 分析，得到接地暂态电流幅频特性如图 10。分析各弧长下电弧电流的幅频特性曲线，得到如下结论：

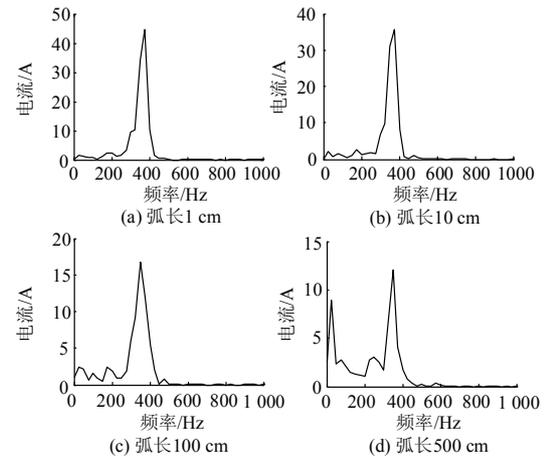


图 10 接地电弧电流暂态幅频特性
Fig. 10 Amplitude-frequency characteristics of transient arc current

(1) 因阻尼作用随电弧长度的增加而增强，暂态幅频曲线幅值逐渐降低。

(2) 各弧长电弧电流主要成分均为 7 次谐波。

(3) 随弧长增加，除 7 次外的奇次谐波与各偶次谐波所占比重逐渐上升。这是因为电弧越长，电弧电流衰减越快，在相同的时间窗内波形的后部越趋

近于稳态波形, 因此暂态幅频特性越趋近于稳态幅频特性。

4 结论

本文从数学方程、模型特性测试、配电网电弧接地故障等方面分析了常见的电弧模型, 得如下结论:

(1) 从数学方程来看, Mayr、Schwarz、控制论等三种电弧模型适合描述接地电流较小的电弧的故障特征。Schwarz 模型和控制论模型本质上是改进的 Mayr 模型。

(2) 利用电弧特性测试电路, 对比 Schwarz 模型和控制论模型, 后者因能直接设置弧长, 直观反映配电网故障拉弧情况, 更适用于谐振接地系统单相弧光接地故障仿真研究。

(3) 将不同弧长的控制论模型接入配电网谐振接地系统, 分析可知弧长的变化将引起电弧阻抗值、接地电弧暂态和稳态特性的变化。

参考文献

- [1] 陈奎, 程天华, 彭伟光, 等. 馈电开关用电弧性单相接地保护方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 107-111.
CHEN Kui, CHENG Tianhua, PENG Weiguang, et al. Research of arc single-phase earth protection for feed switch protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 107-111.
- [2] 刘晓明, 赵洋, 曹云东, 等. 基于小波变换的交流系统串联电弧故障诊断[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 10-17.
LIU Xiaoming, ZHAO Yang, CAO Yundong, et al. Series arc fault diagnosis based on wavelet transform in ac system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 10-17.
- [3] 雍静, 桂小智, 牛亮亮, 等. 基于自回归参数模型的低压系统串联电弧故障识别[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 213-219.
YONG Jing, GUI Xiaozhi, NIU Liangliang, et al. Series arc fault identification in low voltage system based on autoregressive parameter model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 213-219.
- [4] 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其仿真[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.
- [5] 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.
SHU Shengwen, HUANG Daochun, RUAN Jiangjun. Review of numerical simulation methods for arc interruption process of vacuum switch[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(2): 131-138.
- [6] 唐微, 赵辉, 岳有军. 基于 tcr_tsc 的电弧炉无功补偿仿真研究[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(2): 67-70.
TANG Wei, ZHAO Hui, YUE Youjun. Simulation of reactive power compensation for electronic arc furnace based on tcr_tsc[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(2): 67-70.
- [7] 王立军, 贾申利, 史宗谦, 等. 真空电弧磁流体动力学模型与仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 113-118.
WANG Lijun, JIA Shenli, SHI Zongqian, et al. MHD model and simulation research of vacuum arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 113-118.
- [8] 金海望, 骆立实, 胡尊张, 等. 中性点经高阻接地电网故障电弧建模与弧光接地分析[J]. 电气自动化, 2014, 36(4): 54-55.
JIN Haiwang, LUO Lishi, HU Zunzhang, et al. An analysis on arc modeling and arc light grounding for grid faults of high-resistance grounding of the neutral point[J]. Electrical Automation, 2014, 36(4): 54-55.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.

[12] 刘晓明, 韩颖, 王尔智, 等. 基于多物理场耦合的高压 SF₆ 断路器混沌电弧模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 165-172.
LIU Xiaomin, HAN Ying, WANG Erzhi, et al. Chaos of arc model for SF₆ circuit breaker based on coupled multiple — physical field simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 165-172.

[13] 孙秋芹, 李庆民, 王冠, 等. SF₆ 断路器开断并联电抗器的截流过电压及其特性分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 170-176.
SUN Qiuqin, LI Qingmin, WANG Guan, et al. Characteristic analysis of the shunt reactor switching over-voltages interrupted by SF₆ circuit breakers with chopping current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 170-176.

[14] CASSIE A M. Arc rupture and circuit severity: a new theory [M]. ERA, 1939.

[15] 王钢, 徐子利, 梁远升, 等. 基于故障电弧方波曲线相似度的输电线路单端故障测距时域算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 109-113.
WANG Gang, XU Zili, LIANG Yuansheng, et al. Single terminal time domain fault location method based on the similarity of square wave for arc grounding fault[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 109-113.

[16] MAYR O. Beitrage zur theorie des statischen und des dynamischen lichtbogens[J]. Electrical Engineering: Archiv für Elektrotechnik, 1943, 37(12): 588-608.

[17] SCHAVEMAKER P H, VAN DER SLUI L. An improved Mayr-type arc model based on current-zero measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 580-584.

[18] 李冀昆, 高仕斌, 王涛. 牵引供电新型异相短路保护原理的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 63-67.
LI Jikun, GAO Shibin, WANG Tao. Research on new protection principle against wrong-phase short circuit of the AC traction supply[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 63-67.

[19] SMEETS R P P, KERTÉSZ V. Evaluation of high-voltage circuit breaker performance with a new validated arc model[J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147(2): 121-125.

[20] 于然. 小电流接地系统单相电弧接地建模研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
YU Ran. Research of single phase arc grounding modeling in neutral un-effectual grounding power systems[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011.

收稿日期: 2014-07-01; 修回日期: 2014-10-28

作者简介:

许 晔(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网自动化; E-mail: 180881355@qq.com

郭谋发(1973-), 男, 通信作者, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: gmf@fzu.edu.cn

陈 彬(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电技术和智能电网。E-mail: cb_fz@163.com

(编辑 张爱琴)