

# 接地故障电弧的精确数字仿真及其计算

康健

(福州大学, 福建 福州 350002)

**摘要:** 精确的接地故障电弧的数字仿真有助于设计和发展新的继电保护装置,但是由于电弧现象的复杂性,使得在以往的数字仿真中,仅仅用理想短路或者一个线性电阻来模拟接地故障电弧,大大降低了仿真结果的可信度。为解决这个问题,本文依据普通的电弧数学模型,给出了接地故障电弧的精确数字仿真模型,EMTP仿真结果证明了该模型的可行性。

**关键词:** 故障电弧; 数字仿真; EMTP

**中图分类号:** TM74

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-4897(2002)05-0014-03

## 1 引言

接地故障电弧的研究对于设计和发展新的继电保护装置具有非常重要的意义。对接地故障电弧的研究可以从实验室、生产实践或者数字仿真中获得。创造一个实验环境来模拟故障电弧花费昂贵,在一个实际的电力系统中模拟故障电弧,不但代价昂贵,而且操作起来很困难。因此,寻求精确的故障电弧的数字仿真模型尤为重要。

## 2 接地故障电弧数学模型

### 2.1 电弧数学模型

从能量平衡原理<sup>[1]</sup>出发,可以得到:

$$\frac{dq}{dt} = e \times i - P_{\text{loss}} \quad (1)$$

其中  $\frac{dq}{dt}$ : 单位长度电弧弧柱中所储存能量的变化;

$e \times i$ : 单位弧长输入的功率,  $i$  为电弧电流,  $e$  为弧柱中的电场强度;

$P_{\text{loss}}$ : 单位弧长的功率损失。

将公式(1)进一步转化

$$\begin{aligned} \left( \frac{dq}{dt} \right) \left( \frac{dg}{dt} \right) &= P_{\text{loss}} \left( \frac{g \times e^2}{P_{\text{loss}}} - 1 \right) \\ \frac{1}{g} \left( \frac{dg}{dt} \right) &= \frac{P_{\text{loss}}}{g \times \frac{dq}{dt}} \left( \frac{g \times e^2}{P_{\text{loss}}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $g$ : 单位长度电弧的电导。

$$\text{令 } T = f \left( g, P_{\text{loss}}, \frac{dq}{dt} \right) = \frac{g \times \frac{dq}{dt}}{P_{\text{loss}}} \quad (3)$$

公式(2)可以写成:

$$\frac{1}{g} \left( \frac{dg}{dt} \right) = \frac{1}{T} \left( \frac{g \times e^2}{P_{\text{loss}}} - 1 \right) = \frac{1}{T} \left( \frac{e \times i}{P_{\text{loss}}} - 1 \right) \quad (4)$$

考虑电弧长度为  $L$ , 则由公式(4)进一步转化:

$$\begin{aligned} \frac{1}{g} \left( \frac{dg}{dt} \right) &= \frac{1}{T} \left( \frac{L \times e \times i}{L \times P_{\text{loss}}} - 1 \right) \\ \frac{1}{g} \left( \frac{dg}{dt} \right) &= \frac{1}{T} \left( \frac{u \times i}{P_0} - 1 \right) \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $u$ : 电弧电压,  $u = L \times e$ ;

$P_0$ : 电弧弧柱的功率损失,  $P_0 = L \times P_{\text{loss}}$

当电弧弧柱的电导由  $g$  转变为稳定电导  $G$  时, 电弧稳定燃烧, 且电弧输入的能量与散出的相等, 即

$$P_0 = i^2 / G \quad (6)$$

将公式(6)代入公式(5), 得到

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{T} (G - g) \quad (7)$$

其中  $G$  为电弧稳态电导,  $g$  为电弧电导,  $T$  为电弧时间常数。

### 2.2 接地故障电弧数学模型

电弧分为一次电弧(断路器开断前)和二次电弧(断路器跳闸后)<sup>[6]</sup>两种。设计和发展新的继电保护装置所关心的是接地故障电弧, 即一次电弧。用下标 p(primary) 表示一次电弧, 则公式(7)可以写为:

$$\frac{dg_p}{dt} = \frac{1}{T_p} (G_p - g_p) \quad (8)$$

显然, 这是个关于  $g_p$  的微分方程, 确定了  $G_p$  和  $T_p$  就可以求解。

#### 2.2.1 $G_p$ 的确定

$G_p$  反应了电弧的静态特性, 可以解释为在恒定的外部条件下, 当电弧电流在足够长的时间里维持某个值时的电弧电导值, 记为

$$G_p = \frac{i}{V_p L_p} \quad (9)$$

其中,  $|i|$  表示电弧电流的大小,  $V_p$  表示单位长度的静态电弧压降,  $L_p$  表示电弧长度。

大量实验研究表明, 对于大部分电弧, 当电弧电

流的峰值在1.4kA ~ 24kA 范围时,沿着主电弧柱的单位长度的电压降与电弧电流无关,  $V_p$  基本为常数,经验值为  $V_p = 15V/cm$ ;  $L_p$  也可近似为一常数<sup>[5]</sup>。

2.2.2  $T_p$  的确定

$T_p$  反应了电弧伏安特性曲线中电压的上升速度,记为:

$$T_p = \frac{a \times I_p}{L_p} \tag{10}$$

其中,  $I_p$  为电弧伏安特性曲线中的峰值电流,可近似采用直接接地时的短路电流。 $a$  为经验值,取  $a = 2.85 \times 10^{-5}$ <sup>[5]</sup>。

3 接地故障电弧的精确数字仿真模型

接地故障电弧的精确数字仿真模型即利用 EMTP 的 TASC 控制模型来构建故障电弧。对公式(8)进行拉普拉斯变换,进一步整理得到

$$\frac{L(g_p)}{L(|i|)} = \frac{1}{T_p \left( s + \frac{1}{T_p} \right)} \tag{11}$$

将公式(9)带入公式(11),整理得到:

$$\frac{L(g_p)}{L(|i|)} = \frac{1}{T_p \left( s + \frac{1}{T_p} \right) \times V_p L_p} \tag{12}$$

该式为利用 TASC 控制模型构建故障电弧模型的依据。其具体实现为:

- a) 利用 TASC 中的‘用户定义的非线性元件’实现电弧电流的绝对值计算,即得到  $|i|$ 。
- b) 利用 TASC 中的传递函数模块,得到电弧电导  $g_p$ 。
- c) 利用 TASC 变量控制的时变电阻实现对接地故障电弧的精确数字仿真。

4 EMTP 校验

4.1 一个实际电力系统模型

为了验证接地故障电弧的数字仿真模型的有效性,引入一个实际的电力系统,见图1(称为系统一)。该电力系统的具体参数请参见参考文献[3]。

4.2 EMTP 仿真结果及分析

利用上述接地故障电弧的数字仿真模型,模拟



图1 220kV 系统接线图

系统的一回线首端发生经故障电弧接地的单相接地短路,得到电弧电压、电弧电流、电弧电阻、电弧伏安特性共四条曲线。分别见图2、图3、图4、图5。

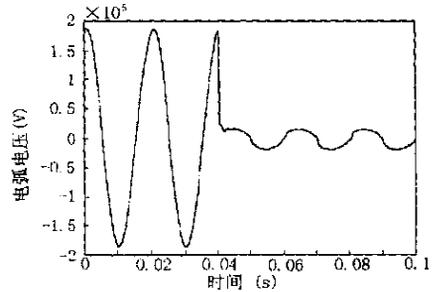


图2 电弧电压的波形

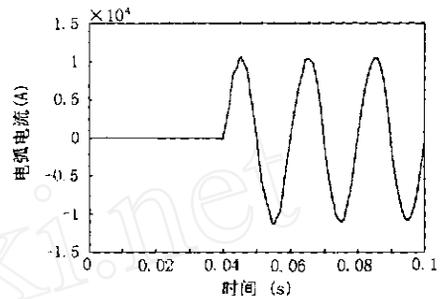


图3 电弧电流的波形

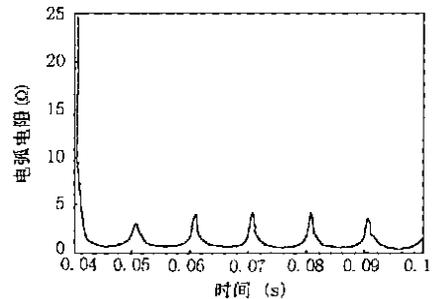


图4 电弧电阻波形图

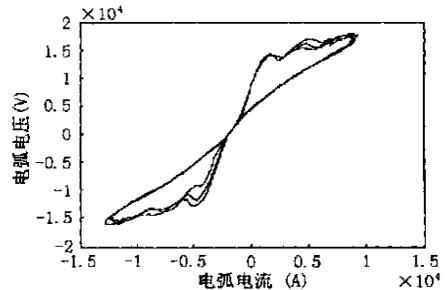


图5 电弧伏安特性曲线

对图形分析,得到以下结论:电弧电压近似方波;电弧电流近似正弦波;电弧电阻呈现脉冲样波形;电弧的伏安特性曲线近似磁滞回线。

图6 给出了电弧电压和电弧电流的实测曲线,

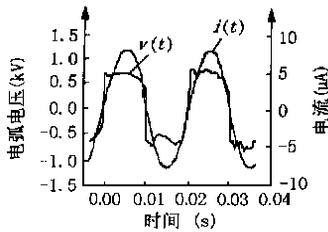


图6 电压和电流波形

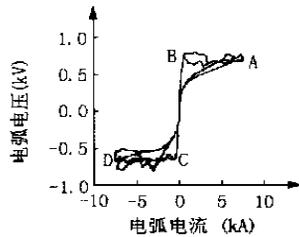


图7 伏安特性曲线

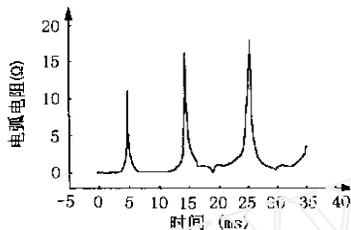


图8 电弧电阻波形

图7给出了电弧伏安特性曲线,图8给出了电弧电阻的波形曲线。将图2、3、4、5与图6、7、8相比较,发现仿真结果确实能够模拟接地故障电弧的各种特性,该仿真模型具有可行性。

## 5 结论

采用理想短路或者线性电阻的方式模拟接地故障电弧,不能够模拟接地故障电弧的各种特性;采用接地故障电弧的精确数字仿真模型能够模拟接地故障电弧的各种特性,增加了数字仿真结果的可信度,更好地为设计和发展新继电保护装置提供帮助。

## 参考文献:

- [1] 王仁甫. 电弧现象模型的发展[J]. 高压电器, 1991, 27(4): 39~46.
- [2] 束洪春, 可大军, 高峰, 葛耀中, 陈学允. 高压输电线路故障及操作电磁暂态数字计算新方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(20): 23~26.
- [3] 李保福, 李营, 王芝茗, 洪军, 王澎, 郑心广, 朱兴勇, Paul A Forsyth. RTDS应用于线路保护装置的动模试验[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(15): 69~70.
- [4] 古金国, 徐国政, 钱家骊. 应用电弧特性的单端线路故障定距算法[J]. 高压电器, 2000, 36(1): 3~7.
- [5] John S A T, Aggarwal R K, Song Y H. Improved Techniques for Modeling Fault Arcs on Faulted EHV Transmission Systems [J]. IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(2): 148~154.
- [6] Djuric M B, Terzija V V. A New Approach to the Arcing Faults Detection for Fast Autoreclosure in Transmission Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(4): 1793~1798.

收稿日期: 2002-01-17;

作者简介: 康健(1974-),女,硕士,助教,从事电力系统继电保护的研究。

## Exact digital simulation and calculation of fault arcs

KANGJian

(Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** Exact digital simulation of fault arcs helps to design and develop new protection. The fault arc is so complex that it is simplified to be perfect short or linear resistance in digital simulation formerly. In order to enhance the reliability of digital simulation, the paper puts forward a exact digital simulation model of fault arcs based on general math model of fault arcs. The result of EMTP simulation proves the feasibility of the model.

**Key words:** fault arcs; digital simulation; EMTP

许继集团的目标是:在中国电力装备行业做到最优、最强、最大!