

基于 M AT LAB 的电弧模型仿真^①

黄绍平, 杨 青, 李 靖

(湖南工程学院电气与信息工程系, 湘潭 411101)

摘要: 开关电器的电弧开断特性是开关电器设计和研制的关键。为了分析断路器开断现象利用 M A TLAB 软件对开关电器电弧开断进行仿真计算。给出了 M ayr 和 Cassie 电弧模型方程式, 阐述了在 M A TLAB 软件平台上构建电弧模型的原理与方法, 最后用 M ayr 电弧模型对高压断路器电弧开断进行了实例计算。结果表明, 这一方法对开关电器电弧开断的定性分析是实用的和有效的。

关键词: 电弧模型; 瞬态恢复电压; 仿真

中图分类号: TM 561.3 文献标识码: A 文章编号: 1003 28930 (2005) 05 20064 203

Simulation of Arc Models Based on M AT LAB

HU AN G Shao2ping, YAN G Q ing, L I Jing

(Department of Electrical and Information Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411101, China)

Abstract: The simulating computation of arc interruption in switchgear is studied using M A TLAB software. The equations of M ayr arc model and Cassie arc model are given, and the principle and method building arc models upon the M A TLAB platform is expatiated. A computational example of arc interruption in high voltage circuit breaker using M ayr arc model is presented. The result shows that this method is feasible and effective for qualitative analysis of arc interruption in switchgear.

Key words: arc model; transient recovery voltage; simulation

1 前言

掌握电弧开断特性是开关电器设计和研制的关键。长期以来, 科技人员希望能找到电弧的动态物理模型。最早得出的电弧模型是 1939 年的克西 (Cassie) 模型和 1943 年的麦也尔 (M ayr) 模型。后来, 科技人员从物理方程式出发来描述电弧过程并解决电弧过程与灭弧室或其周围介质状况的关系, 在实验的基础上又推导出不少方程式。20 世纪 70 年代以后, 在气吹灭弧室纵吹电弧数学物理模型方面有相当大的发展, 提出了由能量方程、动量方程、连续方程、气体方程、电导方程等多个非线性方程式组成的电弧模型。

荷兰代夫特技术大学电力系统实验室 (Power Systems Laboratory, Delft University of Technology) 的研究人员以 M A TLAB 软件为平台, 开发出了包含 7 种电弧模型的电弧模型库 (AM B)^[2]。这些模型可

以从 eps et tudelft. nl 网站免费下载, 并添加到 M A TLAB 软件中, 用来分析断路器电弧的开断现象。

2 电弧模型方程式

2.1 M ayr 电弧模型

M ayr 电弧模型是基于热平衡、热惯性、热游离三个基本原理推导而来的, 其方程式为^[1]

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\Sigma P} (u i - 1) \quad (1)$$

式中: g —— 电弧电导;

u —— 电弧电压;

i —— 电弧电流;

Σ —— 电弧时间常数;

P —— 电弧散热功率。

M ayr 电弧模型的物理意义很明确, 当电弧功率 $u i$ 大于散热功率 P 时, 电弧温度将升高, 热游离

① 收稿日期: 2004 212 208; 修回日期: 2005 203 221

加强，电弧电导 g 有增加的趋势。由于电弧有热惯性，也即有时间常数 Σ 使得电弧升温或电弧电导 g 的增加趋于缓慢。M ayr 方程比较适用于小电流，包括零区的电弧过程。

2 2 Cassie 电弧模型

Cassie 电弧模型的方程式^[1]为

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

式中 u_c 为恒定电弧电压，它是 IEC 电弧瞬态恢复电压 (TRV) 表示方法中的参考电压，取为 TRV 的峰值。其它量的含义与式 (1) 相同。

典型的电弧模型方程式还有 Habedank 模型^[3]、M odified M ayr 模型^[4]、Schavemaker 模型^[5]、Schwarz 模型^[2]和 KEM A 模型^[6]等。

3 电弧模型的实现

以 M A TLAB 软件为平台，利用 Sim ulink PSB (电力系统模块库) 中的元件建立的通用电弧模型如图 1 所示。电弧模型由电压控制的电流源 (Con trolled Cu rrent Source)、微分方程编辑器 (D EE)、定值检测 (H it Crossing)、阶跃信号 (Step)、电压测量 (V oltag e M easurement) 等模块组成。以下以 M ayr 电弧模型为例^[2]，对各模块的功能与参数设置进行阐述。

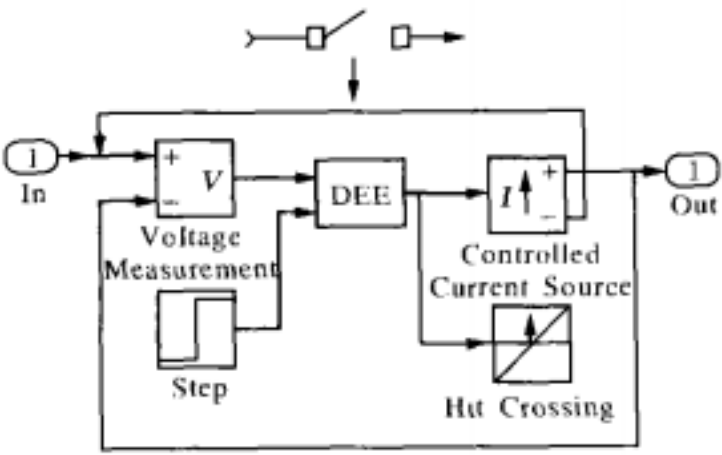


图 1 电弧模型的实现
Fig 1 Realiza tion of arc m odel

(1) 微分方程编辑器 (D EE)

电弧模型的微分方程可采用 Sim ulink 中的微分方程编辑器 (D EE) 模块来实现^[7]。M ayr 电弧模型的微分方程为

$$\frac{dx(1)}{dt} = \frac{u(2)}{\Sigma} \left(\frac{e^{x(1)} u(1)^2}{P} - 1 \right)$$

$$y = e^{x(1)} u(1)$$
 (3)

式中： $x(1)$ ——微分方程状态变量，即电弧电导的自然对数 $\ln(g)$ ；

$x(0)$ ——状态变量的初始值，它是电弧电导的初始值 $g(0)$ ；
 $u(1)$ ——D EE 第一个输入量，即电弧电压 u ；
 $u(2)$ ——D EE 的第二个输入量，它表示断路器触头的关合状态。当触头闭合时 $u(2) = 0$ ；当触头分开时， $u(2) = 1$ ；
 y ——D EE 的输出量，即电弧电流 i ；
 Σ ——电弧时间常数；
 P ——电弧散热功率。

Σ 和 p 是M ayr 电弧模型的自由参数，它们可在 M ayr 电弧模型的对话框中进行设置和更改。

(2) 定值检测 (H it Crossing)

Sim ulink 的“H it cro ssing”模块用于检测电弧电流的过零点。

(3) 阶跃信号 (Step)

Sim ulink 的“Step”模块用来控制断路器触头的分离。当触头处于闭合状态时，有

$$\frac{d \ln g}{dt} = 0$$
 (4)

此时，电弧表现为一个电导，其值为 $g(0)$ 。当触头分离后，M ayr 电弧模型方程即为式 (1)。电弧电导的初始值 $g(0)$ 和断路器触头开始分离的时间都可以在电弧模型对话框中指定。

4 仿真算例

一个简单的仿真计算电路模型如图 2 所示。它用高压断路器开断短路电流，高压断路器采用 M ayr 电弧模型，在断路器的电源侧由一个电路产生一个由 IEC 两参数法确定的瞬态恢复电压 (TRV)，而断路器线路侧的 RLC 电路代表一条被短路的短输电线路。采用电流测量和电压测量模块分别测量电弧电流和电弧电压，并用示波器模块 (Scope) 显示电弧电流和电弧电压的波形。

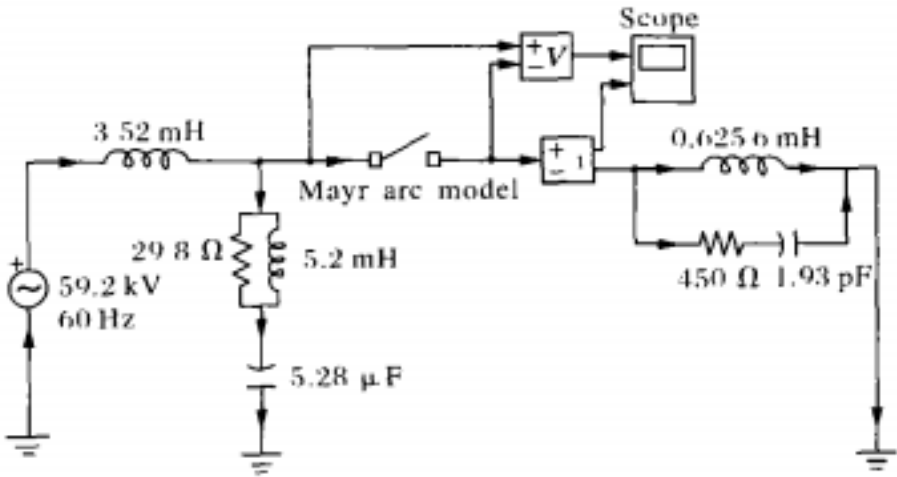


图 2 仿真计算电路模型
F ig 2 C ircuit m odel for simulation

打开 M ayr 电弧模型对话框，有关参设置为：电弧时间常数 $\Sigma = 0.3 \text{ } \mu\text{s}$ ，散热功率 $P = 30.9 \text{ kW}$ ，电弧电导初始值 $g(0) = 1.0 \times 10^4 \text{ S}$ 。当断路器触

头开始分离时间分别设为 $t = 0 \text{ ms}$ 和 $t = 9 \text{ ms}$ 时，仿真计算得到的电弧电流和电弧电压波形如图 3 所示。

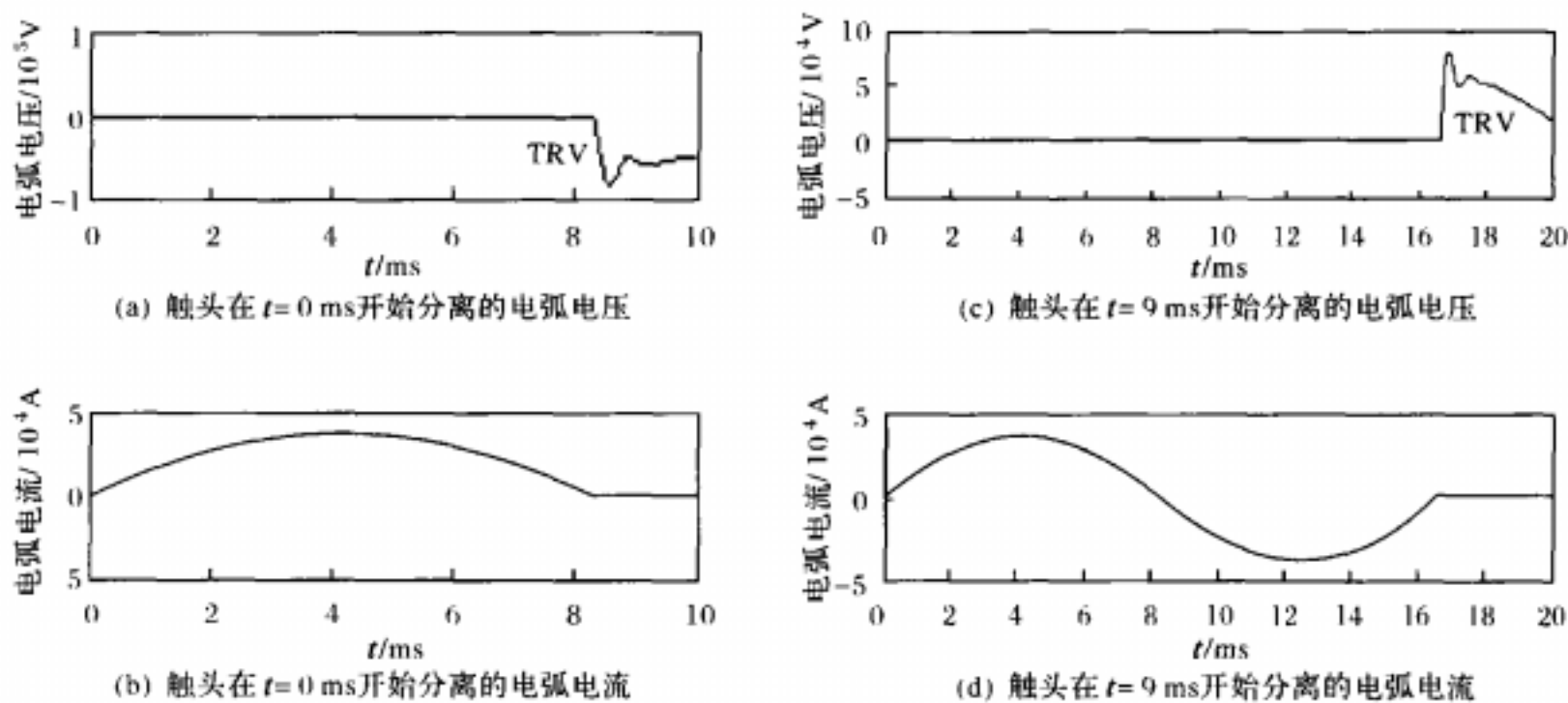


图 3 计算结果

Fig 3 Computation result

从以上计算结果可以看出电弧的开断过程与特性。当断路器触头闭合时，触头电阻为零，触头间电压为 0。在某一时刻（例如 $t = 0 \text{ ms}$ 或 $t = 9 \text{ ms}$ ）断路器触头分开，产生电弧。电弧表现为高度非线性伏安特性。因为电弧是一个非线性电阻（或电导），所以电弧电流和电弧电压在同一时刻过零。在电流过零前，电弧电压很小，电流仍按正弦变化。电流过零时，电路中断，触头（弧隙）两端出现电压恢复过程，即弧隙上的电压由电流过零前的电弧电压上升到电源电压的过渡过程。首先出现在弧隙两端的恢复电压是瞬态恢复电压（TRV）。从图 3 可以看出，TRV 是高频振荡电压，其振荡频率取决于电路 L 、 C 参数，但衰减很快，存在的时间很短，此例计算中不到 2 ms TRV 消失后，弧隙两端出现的是工频恢复电压，即电源电压。TRV 起始上升率很高，在极短时间内就上升到最大值，其值达到电源电压幅值的 $1.4 \sim 1.5$ 倍。瞬态恢复电压的大小与上升率对电弧的熄灭起关键作用，当电流过零后，如果恢复电压高于介质强度，电弧就会复燃；只有当介质恢复强度高于恢复电压，电弧才能顺利熄灭。在本例计算中，这种性能的断路器成功地熄灭了电弧。

理论分析^[1]和本例仿真结果都表明：电弧散热功率 P 及电弧时间常数 Σ 在电弧熄灭过程中起决定性作用。开断电流过零后，弧隙没有能量输入，电弧电导 g 随电弧能量的扩散和温度下降而迅速

减少，当 g 下降到电流过零瞬间电弧电导的 e 倍时，或电弧温度下降到电流过零时的 $1/e$ 倍时所需的时间称为电弧时间常数 Σ 。 Σ 越小，说明电弧电导率 P 在电流过零后下降越快，电流过零后剩余电导率越小，弧后电流就越小，不易发生热击穿，电弧容易熄灭。

可以用不同的电弧模型对这一电路的电弧开断进行计算。例如，用 Schwarz 电弧模型代替图 2 中的 M ayr 电弧模型，并设置相应的参数，所得到的结果与图 3 几乎相同。但是如用 Cassie 电弧模型代替图 2 中的 M ayr 电弧模型，并设置相应的参数，计算结果的差异就相当大，而且电弧不能熄灭。这说明，不同的电弧模型分别有各自的适应范围。一般来说，M ayr 电弧模型较适用于小电流的开断^[1]。

5 结语

开关电器的电弧是一个复杂的物理、化学过程，它涉及到物质组成和物性变化、可压缩流体的流动、电磁场的分布、热量的发散与吸收等，又是空间分布和快速时变过程，而其中很多参数是高度非线性的，所以现有的各种电弧模型只是一些简化的和定性的电弧模型，其计算结果尚不足以作为开关电器灭弧室设计的依据，但作为分析电弧开断现象还是有意义的。

（下转第 70 页）

表 3 意愿支付费用分配表
Tab. 3 Allocation of willingness-to-pay (万元)

机组编号	分得的意愿支付费用	机组编号	分得的意愿支付费用
1	37.769 7	6	30.215 7
2	75.539 3	7	309.755 4
3	33.992 7	8	41.546 6
4	330.317 6	9	0
5	67.985 4	10	52.877 5

5 结语

本文研究了如何把 ISO 收取的意愿支付费用在相关发电公司间合理分配的问题。基于按比例分配原则，提出了根据检修计划被调整所引起的发电公司收益损失的比例来分配发电公司所缴纳的意愿支付费用的方法。该方法以上一年度发电公司因检修计划安排所造成的损失（包括发电公司为了维持其所拥有的发电机组的检修计划不被 ISO 调整而缴纳的意愿支付费用和检修计划被调整所引起的发电收益损失）为依据，公平地分配总的意愿支付费用，对因检修计划安排和被调整而造成收益损失的发电公司给予补偿。

参考文献：

[1] Wang Y, Handschin E. Unit maintenance scheduling in open systems using genetic algorithm [A]. In: Proceedings of the 15th IEEE Transmission and Distribution Conference [C], New Orleans, USA: 1999. 334-339.

[2] 王鹏, 张粒子, 鲍海, 等 (Wang Peng, Zhang Lizi, Bao Hai, et al). 初级电力市场环境下机组检修计划的实用模型 (Unit maintenance scheduling model under primary electricity environment) [J]. 中国电力 (China Electric Power), 2000, 33(11): 79-81.

[3] 冯永青, 丁明 (Feng Yongqing, Ding Ming). 电力市场环境下的发电机组检修计划 (Generator maintenance scheduling in the environment of electricity market) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2001, 24(18): 20-23.

[4] 王健, 文福拴, 杨仁刚 (Wang Jian, Wen Fushuan, Yang Rengang). 电力市场环境下发电机组检修计划调整机制初探 (A preliminary investigation on the regulation mechanism for maintenance scheduling of generating units in the electricity market environment) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2004, 28(7): 30-34.

作者简介：

王健 (1965-), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力市场。Email: wangjian@eee.hku.hk

文福拴 (1965-), 男, 博士, 主要从事电力市场和电力系统故障诊断方面的研究工作。Email: fswen@eee.hku.hk

(上接第 66)

参考文献：

[1] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等 (Xu GuoZheng, Zhang Jierong, Qian Jiali, et al). 高压断路器原理和应用 (Principle and Application of High Voltage Circuit Breaker) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 2000.

[2] Schavemaker P H. Arc model block set [DB]. Power Systems Laboratory, Delft University of Technology, the Netherlands (eps.et.tudelft.nl), 2001.

[3] Habedank U. On the mathematical description of arc behaviour in the vicinity of current zero [J]. et2z Archiv, Vol. No. 11, 1988, 10(11): 339-343.

[4] Van der Sluis L, Rutgers W R, Koreman C G A. A physical arc model for the simulation of current zero behaviour of high voltage circuit breakers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(2): 1016-1022.

[5] Schavemaker P H, Van der Sluis L. An improved mayr type arc model based on current zero measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,

2000, 15(2): 580-584.

[6] Smeets R P P, Kertesz V. Evaluation of high voltage circuit breaker performance with a validated arc model [J]. IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147(2): 121-125.

[7] 吴天明, 谢小竹, 彭彬 (Wu Tianmin, Xie Xiaozhu, Peng Bin). MATLAB 电力系统设计与分析 (Design and Analyse of Electric Power System Based on MATLAB) [M]. 北京: 国防工业出版社 (Beijing: National Defence Industry Press), 2004.

作者简介：

黄绍平 (1964-), 男, 教授, 主要从事电力系统无功补偿、电力系统数字仿真的研究。Email: hsp@hnie.edu.cn

杨青 (1969-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事自动控制技术、MATLAB 与系统仿真研究。Email: yangqing@hnie.edu.cn

李靖 (1969-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事开关电器电弧的研究。Email: lijing@hnie.edu.cn

