

空气开关电弧的磁流体动力学建模及特性仿真

李兴文, 陈德桂

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西省 西安市 710049)

Magnetohydrodynamics Modeling and Characteristics Simulation of Air Switching Arc

LI Xing-wen, CHEN De-gui

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University,
Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Taken into account the properties of arc plasma and electromagnetic, heat and radiative phenomena, commercial computational fluid dynamics software FLUENT has been adapted and extended by self-written routines to develop the 2-D magnetohydrodynamic (MHD) model of air switching arc. Then the relationships between arc radius, strength of electric field and current, and the influence of external magnetic field on arc motion are analyzed in detail. The relative experiments have also been carried out. The results demonstrate that the variation of arc radius is restricted by the width of arc chamber wall with the increase of arc current; The arc current hardly affects the strength of electric field; The arc motion will be accelerated by the external magnetic field and simultaneously the effect of magnetic pressure makes the arc concentrated and local pressure raised in the area of high temperature.

KEY WORDS: arc; magnetohydrodynamics; simulation; magnetic field; strength of electric field

摘要: 考虑电弧的物理参数以及电磁、热和辐射等现象, 通过对商用计算流体力学软件 FLUENT 进行二次开发, 建立了空气开关电弧等离子体的二维磁流体动力学(MHD)数学模型。然后仿真分析了电弧半径、电场强度与电流之间的关系, 以及外部磁场对电弧运动过程的影响。同时完成了相关的实验研究。结果表明随着电流的增大, 电弧半径将受到器壁宽度的限制; 电流对电场强度的影响很小; 外部磁场在加速电弧运动的同时, 产生的“磁压”会导致电弧高温区不断被压缩以及局部压力的升高。

关键词: 电弧; 磁流体动力学; 仿真; 磁场; 电场强度

基金项目: 国家自然科学基金项目(50507016)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50507016).

0 引言

以空气为灭弧介质的低压限流断路器, 包括塑壳断路器(MCCB)和微型断路器(MCB), 已广泛应用于电力系统中。其主要功能是通过电弧电压快速上升来达到限流的目的, 从而使得电弧电流远小于预期电流值, 以保证用电设备以及人身的安全。当短路电流到来时, 动触头快速斥开并在其中产生电弧, 在操作机构的作用下, 动触头进一步打开, 在电磁力和/或气吹力的作用下, 电弧从初始燃烧区域向与弧柱垂直排放的铁磁栅片中运动, 并最终熄灭, 完成电路开断。

在这个过程中, 空气开关电弧的基本物理过程及其特性是最为关键和复杂的问题。涉及到电磁学、化学、流动与传热、光学等多个学科领域。掌握和理解电弧特性对研发高性能的电器产品具有重要的指导意义。因此, 国内外的学者对低压断路器中的空气开关电弧进行了大量的研究。特别是随着数值计算理论和方法的发展, 电弧仿真研究水平也在不断提高。Karetta首次建立了两个平行电弧跑道之间的电弧三维磁流体动力学(MHD)模型^[1]; Helence Rachard通过一个二维电弧模型, 分析了外部磁场对于电弧形状和运动的影响^[2], 但他们的模型均完全封闭。B Swierczynski分析了外部磁场和混合等离子体特性对电弧运动的影响^[3]; Lei Z. Schlitz研究了大电流电弧中的电磁场与气流场之间的相互作用过程^[4]; Lindmayer仿真了电弧在铁磁栅片中的分割过程^[5]; 吴翊通过建立三维电弧模型, 特别分析了绝缘栅片对电弧运动的影响^[6]。

此外, 近年来, 人们尝试在低压断路器的灭弧室中放置产气材料, 通过高温电弧的侵蚀作用, 产

生大量的具有高热导率的氢气,以冷却电弧,从而提高断路器的开断性能和限流能力。很多学者就电弧和器壁材料之间的相互作用机理,以及器壁侵蚀型电弧的物理特性进行了一些很有价值的研究^[7-10]。

可以看出,人们对空气开关电弧的研究给予了很多关注,也得到了一些对产品设计有指导意义的结论。但是,应该指出的是,对空气开关电弧的认识仍然不够全面和确切,尚需进一步的深入研究。本文在上述研究工作的基础上,基于计算流体力学软件 Fluent,采用 C 语言对其进行二次开发,建立了电弧的二维 MHD 数学模型,并从电流与电弧半径、电场强度之间的关系,外部磁场对电弧运动过程的控制等角度,分析和研究了空气开关电弧中的一些基本物理过程和规律。

1 空气开关电弧的 MHD 模型

1.1 弧柱区的物理过程

电弧运动是电流、电磁场、气流场及热辐射等相互作用的结果。图 1 给出了它们之间的相互作用过程^[1]。初始的温度和压力分布决定了等离子体中的电导率,通过施加合理的电位边界条件,求解电磁场方程,便可确定出电位分布;结合电导率分布,就决定了电弧中的电流密度分布;同时,电弧作为载流体,一方面,将产生一定的焦耳热,该值由电导率和电流密度分布决定,另一方面,在自身及外加磁场的共同作用下会受到电磁力的作用,从而使电弧运动;这样最终导致等离子体内部的能量传输。从而引起了新的温度和压力分布及与温度、压力有关的等离子体参数的变化。

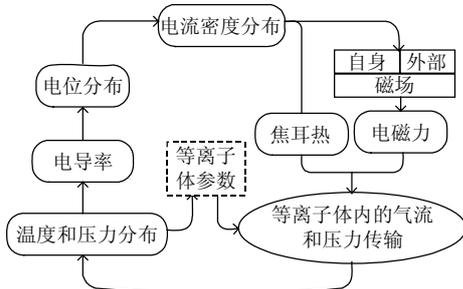


图1 弧柱区气流场与电磁场之间的相互作用过程
Fig. 1 Interactions between the gasdynamic and electromagnetic process in an arc column

1.2 基本假设和控制方程

为了简化开关电弧中的复杂物理化学过程,忽略电弧与电极之间的相互作用,而仅对与电弧特性及开断性能关系更为密切的弧柱部分进行仿真分析,因此做出了以下假设:

(1) 电弧等离子体满足局部热平衡条件并认为流动是层流。

(2) 电弧等离子体的介质为高温空气,其物理参数(热导率、粘度系数、密度、比热、电导率等)是温度和压力的函数,并可通过查表得到^[11]。

(3) 由于忽略了电弧与电极之间的作用,对于弧柱部分,电弧等离子体处于电中性。

(4) 忽略传导电流的影响,这是因为和注入的电流相比,传导电流非常小。

(5) 不考虑铁磁物质的影响,即认为场域中的磁导率为常数,以简化磁场的计算并提高计算速度。

基于以上的假设,可以用 Navier-Stokes 控制方程来描述电弧等离子体运动的质量、动量及能量守恒过程,用欧姆公式以及 Biot-Savart 方程来描述其中的电磁过程,如式(1)~(6)所示。此外,为了反映弧柱中的焦耳热和辐射冷却过程,以及在自身或外部磁场作用下的电磁力作用, $N-S$ 方程中需要加入一些对应的源项。这些就构成了空气开关电弧 MHD 模型的基本方程组。

(1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

(2) 动量守恒方程。

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho v v_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \sum_{k=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right) \right] + (\mathbf{J} \times \mathbf{B})_i \quad (2)$$

(3) 能量守恒方程。

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \text{div}(\rho v H) - \text{div}[\lambda \cdot \text{grad}(T)] = \frac{\partial p}{\partial t} - S_R + \frac{1}{\sigma} \mathbf{J}^2 \quad (3)$$

其中: t 为时间; x_i 和 x_k 为笛卡儿坐标; \mathbf{v} 为电弧运动速度; v_i 为 i 方向上的速度分量($i=x, y$); p 和 T 分别为灭弧室内压力和温度; H 为动态热焓; \mathbf{J} 为电流密度; \mathbf{B} 为磁感应强度; S_R 表示辐射冷却; ρ 、 η 、 λ 和 σ 分别为等离子体的密度、粘度系数、热导率和电导率。

(4) 电场方程。

可以认为,在与弧柱垂直的平面上,弧柱区的电场强度 \mathbf{E}_{arc} 均匀分布,其方向垂直于该平面。这样可以用式(4)所示的欧姆公式描述电流密度和电场强度之间的关系,而电场强度可用式(5)表示,其中 s_a 为弧柱截面, I 为流过该截面的电流。

$$\mathbf{J}(x, y, t) = \sigma(x, y, t) \mathbf{E}_{\text{arc}}(t) \quad (4)$$

$$\mathbf{E}_{\text{arc}}(t) = I(t) / \int_{s_a} \sigma ds \quad (5)$$

式中 \mathbf{E}_{arc} 为弧柱区的电场强度。

(5) 磁场方程。

因为场域中不存在铁磁物质，考虑外部磁场的影响，场域中任一点 \mathbf{r} 的磁感应强度可以用 Biot-Savart 方程来计算。

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mathbf{B}(\mathbf{r})_{\text{ext}} + \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_{V'} \mathbf{J}(\mathbf{r}') \times \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dV' \quad (6)$$

需要指出的是，动量守恒方程中的 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 表示电弧电流在磁场的作用下所产生的电磁力密度。能量守恒方程中的 $(1/\sigma)\mathbf{J}^2$ 表示电流流过等离子体所产生的焦耳热，这也是造成弧柱温度升高的主要原因。

由于电弧的温度非常高，热辐射对其性质起重要作用。但是，精确表述热辐射是非常复杂的，因为它取决于等离子体的光谱性质，温度和压力分布等。本文采用文献[1]中介绍的简化公式法来确定热辐射，如式(7)所示，其中 k 为吸收系数， T 和 T_0 分别为电弧温度和环境温度， α 为波尔兹曼常数。另外，静发射系数法(NEC)、P1 模型法和局部特性法(MPC)也在空气及 SF_6 等气体电弧等离子体的数值模拟中有所应用^[12-5]。

$$S_R = 4\alpha k(T^4 - T_0^4) \quad (7)$$

其中 $k = 13 \frac{1}{m} \cdot \frac{p}{p_0}$ ($p_0 = 1 \text{atm}$)。

此外，由于电磁场和气流场是完全耦合的，因此 N-S 方程组和欧姆公式以及 Biot-Savart 方程必须同步耦合求解。本文中，控制方程的数值计算均基于有限容积法。首先对计算模型进行剖分以生成网格，然后采用控制容积积分法将控制方程离散化，在此基础上，应用 SIMPLE 算法完成对上述控制方程的耦合求解。

1.3 计算模型及边界条件

低压断路器的灭弧室结构非常复杂，本文为了便于分析弧柱区电弧的物理特性，节约时间开销，对灭弧室进行了简化处理。计算模型的基本结构如图 2 所示，计算平面平行于电极，也就是垂直于弧柱，区域大小为 $80\text{mm} \times 14\text{mm}$ ，计算网格大小为 $0.2\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ ，时间步长根据计算收敛情况，在 $1\mu\text{s} \sim 5\mu\text{s}$ 范围内调整。边界条件为：对温度来说，除灭弧室右侧出气口外均为绝热边界条件，出气口温度设为 300K ；对压力来说，出气口的压力等于外部气压，即 1 个大气压；对速度来说，灭弧室器

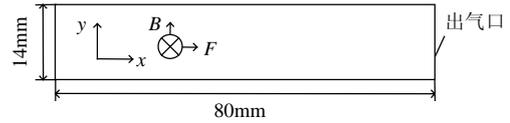


图 2 计算模型

Fig. 2 Analysis model

壁满足无滑移边界条件。此外，电弧的初始燃弧位置可以沿 x 轴变化。

假定电弧电流垂直纸面向里，磁场方向沿 y 正方向，这样电弧将受到一个沿 x 正方向的电磁力，在该力和气流场的共同作用下，电弧向出气口方向运动。

本文基于该计算模型，在一定的边界条件下，通过耦合求解上述控制方程，建立了空气开关电弧的 MHD 数学模型。下面针对该模型，仿真分析了电弧电流与电弧半径、电场强度之间的关系，以及外部磁场对电弧运动过程的影响。

2 空气开关电弧的特性仿真结果及讨论

2.1 电弧电流与电弧半径、电场强度之间的关系

在与空气开关电弧相关的研究中，经常需要电流和电弧半径之间的定量关系，如计算灭弧室中的吹弧磁场、作用在动导电杆上的电动力等^[16]。而已有的数据多针对于自由燃烧电弧，因此，需要就低压断路器中这类器壁控制型电弧(Wall-controlled Arc)，得到一些可借鉴的电弧电流与电弧半径之间的关系数据。同时，电弧电压特性也是空气开关电弧的一项重要研究内容。对电弧中电场强度的分析有助于对其电压特性的了解。这样，基于建立的电弧 MHD 模型，本文对电弧电流与电弧半径、电场强度之间的关系进行了静态的仿真分析。

图 3 中 \blacktriangle 所示为 Lowke 对自由燃烧电弧计算的结果^[17]， \blacksquare 为本文的计算结果。电弧半径 r 的定义为：以电弧中心为圆心，流过 90% 总电流的区域半径。从图中可以看出，电弧半径随着电流的增大而增加，而且相同电流时，由于受到器壁的限制，自由燃烧电弧的半径较器壁控制型电弧大。值得指出的是，在本节的计算中，当电流较小时，电弧的电流密度分布是以电弧中心为原点，逐渐向外减小；但随着电流的增大，电弧的电流密度将不再是圆形分布，电弧直径会超过器壁的宽度，此时，电弧半径定义为以电弧中心为原点，沿灭弧室长度方向上流过 90% 总电流的区域长度，图 4 给出的 500A、2kA 和 5kA 时的电流密度分布说明了这个问题。

因此，可以说，当电流增加到一定的数值时，

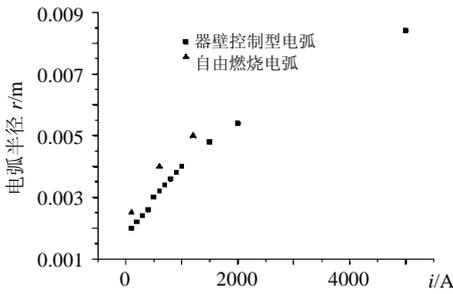


图3 电弧半径 r 随电流的变化

Fig. 3 The variation of arc radius with current

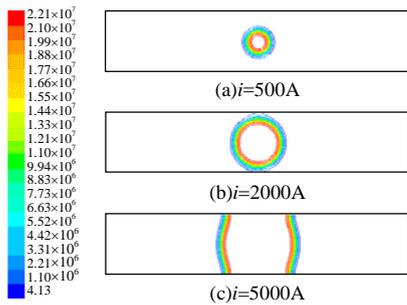


图4 不同电流下的电弧电流密度分布

Fig. 4 The distribution of arc current density with different current values

在宽度方向上, 电弧将充满整个灭弧室, 这给考虑电弧作用时的触头灭弧系统计算造成了困难。然而, 从磁场的角度定性比较灭弧室的优劣时, 可以在小电流时进行, 此时可考虑电流对电弧半径的影响。此外, 在计算触头打开过程的电动斥力时, 由于电流的变化范围较大, 一般为数千安到数十千安, 要考虑电弧半径随电流的变化非常困难。为了便于分析, 通常可以近似认为电弧的截面积与触头或灭弧室截面积相等。

表1为通过MHD模型计算得到的不同电弧电流时对应的电场强度值。可以看出, 电流对场强的影响并不大, 场强的数值范围一般在4.10~4.20kV/m范围内。而且, 对于低压断路器来说, 动导电杆通常在数千安时斥开而产生电弧, 这样就可以认为其场强在4.10kV/m左右。此外, 文献[2]通过对低压断路器中的电弧运动进行动态仿真计算, 得出电场强度的一般特征值为3.0kV/m; 文献[18]也对输电线短路时在空气中产生的长弧进行实验研究, 指出可用 $E=(0.95+0.005/I)$ kV/m 来表示其中的场强分布, 这也表明电流对场强的数值影响很小。

表1 电弧电流和电场强度之间的关系

Tab. 1 The relationship between arc current and the strength of electric field

电流/kA	0.2	0.6	1.0	1.5	2.0	5.0
场强/kV m ⁻¹	4.22	4.15	4.13	4.12	4.10	4.10

2.2 外部磁场对电弧运动的控制

在设计低压断路器产品时, 人们总是试图利用灭弧室、触头导电回路结构上的特点以增加灭弧室区域的磁场, 加强磁吹效果和增大电动斥力的数值, 从而加速电弧的运动以及触头的运动速度, 显著提高电弧电压的上升速度和数值, 这样可改善断路器的开断能力和限流性能。

本文以所建立的电弧数学模型为基础, 分析了外加磁场对电弧运动的影响。与已有文献中认为电弧电流是恒定直流^[1-6]不同, 本文模型中的电流是正弦交流电流。电弧的初始燃弧位置距离灭弧室左端25mm, 初始电流为100A。首先进行气流场的静态分析, 将得到的场分布结果作为初始条件, 然后电流按照 $i=200\sin(100\pi t+\pi/6)$ A 的规律变化, 在此情况下分别计算了外加磁场为1、5、10和15mT时的电弧动态运动过程。

图5为不同强度的磁场作用下电弧位置随时间 t 的变化过程, 其中电弧位置定义为电弧的最高温度所在处。可以看出, 增加外加磁场可以有效地提高电弧的运动速度, 其本质上是由于吹弧磁场的增加, 引起动量守恒方程中 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 项的增加, 从而驱使电弧向前运动。

图6所示为在5mT的磁场作用下、时间为0.1ms时电弧中的速度场分布, 其中速度的单位为m/s。可以看出, 此时, 电弧的最大运动速度为44m/s, 而且, 由于磁场的作用, 在电弧的高温区域会产生一个双

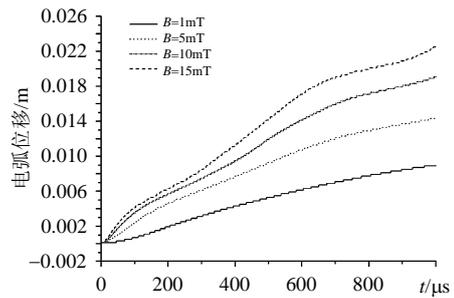


图5 电弧位移随时间的变化

Fig. 5 The variation of arc distance with time

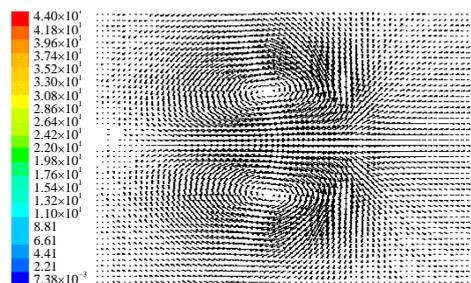


图6 电弧中的速度场分布 ($B=5\text{mT}, t=0.1\text{ms}$)

Fig. 6 The velocity distribution of arc ($B=5\text{mT}, t=0.1\text{ms}$)

涡旋，使电弧中心的高温气体向外扩散，从而冷却电弧。

图 7 为吹弧磁场为 5mT 时电弧的温度分布随时间的变化过程以及 $t=0.5\text{ms}$ 时灭弧室内的压力分布。其中横、竖两个色条分别表示电弧温度和灭弧室内压力的变化范围及颜色对应的数值。可以看出，在外部磁场的作用下，电弧中的高温区域不断被压缩、集中，从而导致图 7(d) 所示的电弧高温区域压力升高，此即所谓的“磁压”作用。

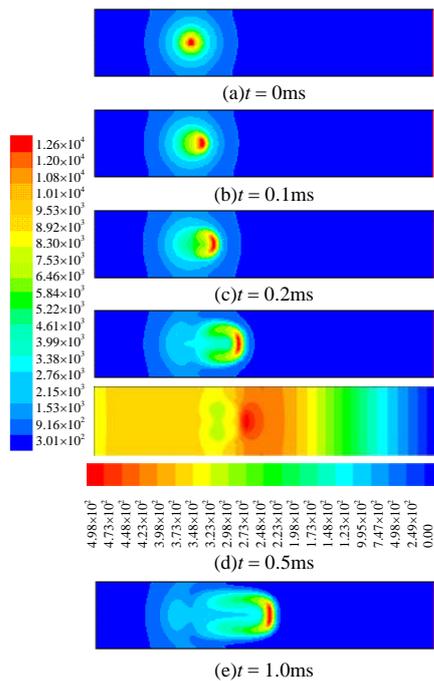


图 7 电弧温度分布随时间的变化以及 $t=0.5\text{ms}$ 时灭弧室内的压力分布

Fig. 7 The variation of arc temperature distribution with time and the pressure distribution when $t=0.5\text{ms}$

3 电弧运动过程的实验测试

3.1 实验电路

为了便于和仿真计算的结果相比较，验证计算方法的正确性，本文设计了一个与计算模型灭弧室结构、燃弧位置相一致的实验模型。并在小容量振荡回路条件下，利用二维光纤测试系统，通过同步测量燃弧期间的电弧电流、电弧电压和电弧的运动图景，研究了电弧的运动过程。

实验在小容量振荡回路条件下进行。图 8 为其原理图，其中 T 为变压器，B 为整流器， S_1 和 S_2 为开关，C 为电容器组，L 为电抗器，SP 为实验样品，A 为分流器。闭合 S_1 ，断开 S_2 ，就可以给电容器组 C 充电；一旦电容器组上的充电电压达到要求值时，立即断开 S_1 ；然后闭合 S_2 ，C、L、SP 和 A

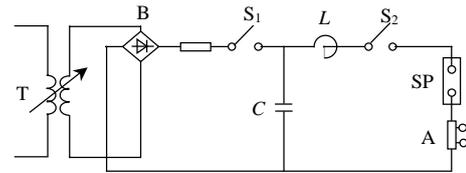


图 8 振荡回路原理图

Fig. 8 Capacitor bank circuit

组成一个典型的单频振荡回路。其中电容和电感分别为 $1509\mu\text{F}$ 和 6.88mH ，电路的振荡频率为 50Hz ，充电电压有效值和放电电流第一波有效值之比为 $3:1(\text{V/A})$ 。在本实验中，预期电流第一半波有效值均为 200A ，那么电容器组所需的充电电压就应为 600V 。分流器 A 是一个经过严格标定的无感采样电阻，其阻值为 $1\text{m}\Omega$ ，用于测量电流。

3.2 实验模型及测试方法

图 9 为实验模型示意图，其几何尺寸为 $80\text{mm} \times 35\text{mm} \times 14\text{mm}$ ，灭弧室材料为不饱和聚酯模塑料(DMC)材料，触头为铜。在灭弧室的侧面布有光纤观测孔，孔径为 2mm ，孔心距为 6mm 。实验中，灭弧室下方完全封闭，上方完全打开。

图 10 为二维光纤测试系统结构图，由 4 个主要部分组成^[19-20]：

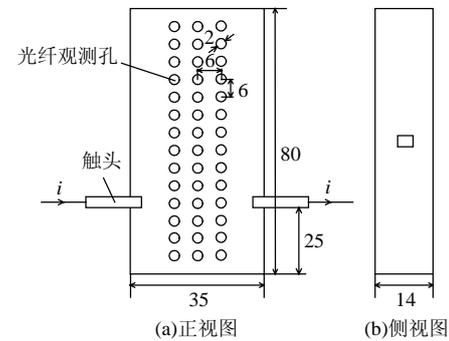


图 9 实验模型图

Fig. 9 Schematic drawing of experimental model

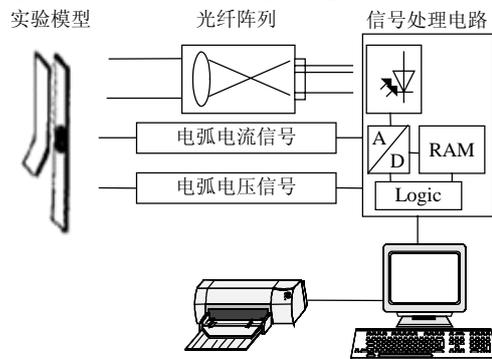


图 10 二维光纤阵列测试系统

Fig. 10 2-D optical fiber measurement system

(1) 光纤阵列采集电弧光信号，其最大采样频率为 10^6 幅/秒。另外在每个光纤的顶端加入非均

匀介质纤维透镜，以提高空间分辨率。此外，光强分8个等级。

(2) 通过分流器和高压探头(Tektronix 6015A)可测得电弧电流和电压信号。这些模拟信号可以通过系统提供的4个数据通道以15.625 kHz的采样频率送入信号处理电路中。

(3) 信号处理电路用于完成光电转换、A/D转换和读/写等功能。

(4) 上位机用于管理和分析实验数据。软件系统可完成以下主要功能：电弧运动和电流、电压、气压等信号同步模拟；分析不同位置的光强信号；测量信号特征参数，如峰值、燃弧时间、相位差等。

3.3 实验结果及分析

图11所示为电弧运动的实验结果。图中的色条分8个等级，从左到右表示光强依次增大。竖线为同步模拟电弧运动和电弧电流、电弧电压变化时的时间标志，图中所示为 $t=3.90\text{ms}$ 时的电流和电压。

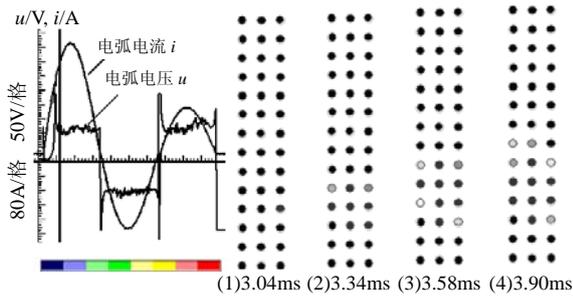


图11 电弧运动的实验结果
Fig. 11 Experimental result of arc motion

由图可知，电弧在 $t=3.04\text{ms}$ 时开始起弧，其光强最大、也就是温度最高的区域，分别在 $t=3.34$ 、 3.58 和 3.90ms 时向前运动了1格、2格和3格，也即分别0.3、0.54和0.86ms的时间内运动了6、12、18mm的位移。其平均运动速度分别为： $6/0.3=20.0$ 、 $12/0.54=22.22$ 和 $18/0.86=20.93\text{m/s}$ 。

上述仿真结果表明： $t=0.618\text{ms}$ 时，电弧温度最高的区域运动过12mm的位移，这样，其平均运动速度为 $12/0.618=19.42\text{m/s}$ 。可以看出，实验和仿真的结果比较吻合，从而验证了所建立的电弧MHD模型的正确性。

4 关于电弧电压特性的讨论

低压塑壳断路器电弧电压的特性比较复杂，与灭弧室结构、电弧运动情况等密切相关。图12所示为一额定电流为63A的低压塑壳断路器在预期短路电流有效值为8kA时的典型电弧电流和电弧电压

波形，电弧电压峰值为390V。可以看出，电弧电压由一个近似线性的上升阶段和平台期组成。这可用本文上述的分析结果来解释，首先，从电弧电流对弧柱区电场强度的影响分析可知：由于低压断路器中开关电弧的电流通常在数千安以上，其电场强度 E_{arc} 一般可取 4.10kV/m 。这样，电弧电压可近似用 $U_{\text{arc}}=E_{\text{arc}}\cdot l_{\text{arc}}+U_e\cdot n$ 来表达，其中 l_{arc} 为电弧的长度， n 为进入的栅片数目， U_e 表示近极压降，一般可取 $20\text{V}^{[21]}$ 。即电弧在拉长阶段，电弧电压主要取决于电弧的长度 l_{arc} 或电弧的拉长速度 v_1 ，而 l_{arc} 和 v_1 将受到吹弧磁场、气流场、动导电杆运动速度等的影响，因此要得到这两个量的准确数值非常困难。然而，图5所示的外部磁场对电弧运动的影响表明，在恒定磁场的作用下，电弧的位移随时间几乎是线性变化，即电弧的运动速度近似保持恒值，并且与吹弧磁场的强度有一个比例关系。因此，从电弧拉长的角度来看，这个结果对此时的电弧电压特性有一定的帮助，这也在一定的程度上说明了这阶段电弧电压的数值随时间近似线性上升。而当电弧进入栅片后，栅片的近极压降将起决定性作用，从而使得电弧电压能够保持在一个相对稳定的数值上。

这样，就可以采用参数化的方法描述低压塑壳断路器中的电弧电压，如图13所示，其中 t_0 对应触头打开时间，取决于作用在动导电杆上的力和触

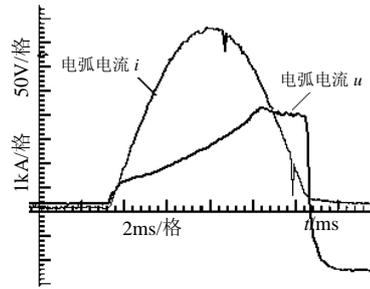


图12 低压塑壳断路器开断过程中的典型电弧电压和电弧电流实验波形

Fig. 12 A typical experimental result of arc voltage and current during the interruption process of low voltage molded case circuit breaker

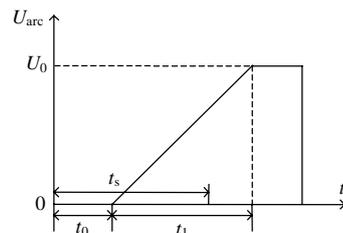


图13 电弧电压的特征描述曲线

Fig. 13 Characteristic description curve of arc voltage head pressure between the relationship, t_1 corresponds to the arc voltage rising to the

数值 U_0 所需的时间。 t_s 为脱扣器和传动部件动作所需的时间,也即机构开始动作的时间。应用该电弧电压描述方法,可简化考虑电弧在低压塑壳断路器开断过程仿真分析中的作用,从而建立低压塑壳断路器开断过程的动力学模型^[22]。

5 结论

基于简单模型灭弧室,建立了空气开关电弧的MHD数学模型,并通过仿真分析及相关实验研究,得到以下结论:

(1) 随着电弧电流的增大,电弧半径将受到器壁宽度的限制;而电弧电流对弧柱区的电场强度影响很小。

(2) 外部磁场在加速电弧运动的同时,产生的“磁压”会导致电弧高温区域不断被压缩以及局部压力的升高。

(3) 以上两条结论可合理地解释低压限流式断路器中的电弧电压特性,即近似由线性上升区和平台期两个阶段组成,并给出了其描述参数。

参考文献

- [1] Karetta F, Lindmayer M. Simulation of the gasdynamic and electromagnetic processes in low voltage switching arcs[J]. IEEE Trans Compon Packag Maunf Technol, 1998, 21(1): 96-103.
- [2] Helene Rachard, Pierre Chevrier, Daniel Henry, et al. Numerical study of coupled electromagnetic and aerothermodynamic phenomena in a circuit breaker electric arc[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(10): 1723-1734
- [3] Swierczynski B, Gonzalea J J, Teulet P, et al. Advance in low voltage circuit breaker modeling[J]. J. Phys. D: Appl. Phys. 2004, 37(4): 595-609
- [4] Schlitz L Z, Garimella S V, Chan S H. Gas dynamics and electromagnetic processed in high-current arc plasmas[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85(5): 2540-2555.
- [5] Lindmayer M, Marzahn E, Mutzke A, et al. The process of arc-splitting between metal plates in low voltage arc chutes[C]. Proc. of the 50th IEEE Holm Conf. on Electrical Contacts, Seattle, 2004: 28-34.
- [6] 吴翊, 荣命哲, 杨茜, 等. 低压空气电弧动态特性仿真及分析[J]. 中国电机工程学报. 2005, 25(21): 143-148.
Wu Yi, Rong Mingzhe, Yang Qian, et al. Simulation on dynamic characteristics of arc in low voltage circuit breaker modeling [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 143-148(in Chinese).
- [7] Xin Zhou. Evaluation of gassing materials in switching devices using monochromatic high speed imaging technique[J]. IEEE Trans. on Comp. and Pack. Tech, 2002, 25(3): 384-389.
- [8] Shea J J. Gassing arc chamber wall material effect on post current-zero recovery voltage breakdown[J]. IEEE Trans Comp Packag Technol, 2004, 27(1): 42-50.
- [9] Li Xingwen, Chen Degui, Wang Qian, et al. Simulation of the effects of several factors on arc plasma behavior in low voltage circuit breaker[J]. Plasma Science & Technology, 2005, 7(5): 3069-3072.
- [10] 刘洪武, 陈德桂, 李志鹏. 不同因素对气吹式塑壳断路器开断电弧运动影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 154-159.
Liu Hongwu, Chen Degui, Li Zhipeng. Experimental investigation of the influence of several factors on the motion of interruption arc in MCCB with gas-driven arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 154-159(in Chinese).
- [11] Yos J. Revised transport properties for high temperature air and its components[R]. Avco Space System Division, Technical Release, 1967.
- [12] Deron C, Riviere P, Perrin M Y, et al. Modeling radiative properties of LTE air atmospheric plasmas[C]. Proc. 15th Int Conf on Gas Discharges and their Applications. Toulouse, France, 5-10.Sept. 2004.
- [13] Eby S D, Trepanier J Y, Zhang X D. Modelling radiative transfer in SF₆ circuit-breaker arcs with the P-1 approximation[J]. J Phys D: Appl Phys, 1998, 31(13): 1578-1588.
- [14] Aubrecht V, Lowke J J. Calculations of radiation transfer in SF₆ plasmas using the method of partial characteristics[J]. J Phys D: Appl Phys, 1994, 27(10): 2066-2073.
- [15] Dixon C M, Yan J D, Fang M T C. A comparison of three radiation models for the calculation of nozzle arcs[J]. J Phys D: Appl Phys, 2004, 37(23): 3309-3318.
- [16] 李兴文, 陈德桂, 向洪岗, 等. 低压塑壳断路器中电动斥力的三维有限元分析与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 150-155.
Li Xingwen, Chen Degui, Xiang Honggang, et al. 3-D Finite element nonlinear analysis and experimental investigation of electro-dynamic repulsion force in molded case circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE. 2004, 24(2): 150-155(in Chinese).
- [17] Lowke J J. Simple theory of free-burning arcs[J]. J Phys D: Appl Phys, 1979, 12(11): 1873-1886.
- [18] Goda Y, Iwata M, Ikeda K, et al. Arc voltage characteristics of high current fault arcs in long gaps[J]. IEEE Trans Power Delivery, 2000, 15(2): 791-795.
- [19] Li Zhipeng, Chen Degui, Liu Hongwu, et al. A novel optical fiber measurement system of arc motion in molded case circuit breakers [J]. IEICE Trans. on Electronics, 2004, E87-C(8): 1329-1336.
- [20] Li Xingwen, Chen Degui, Liu Hongwu, et al. Imaging and spectrum diagnostics of air arc plasma characteristics[J]. IEEE Trans. on Plasma Sci., 2004, 32(6): 2243-2249.
- [21] Slade P. Electrical contacts principles and applications[M]. New York: Marcel Dekker, 1999.
- [22] Li Xingwen, Chen Degui, Wang Qian, et al. Investigation on the interruption process of molded case circuit breakers including the influence of blow open force[J]. IEICE Trans. on Electronics, 2006, E89-C(8): 1187-1193.

收稿日期: 2007-03-27.

作者简介:

李兴文(1978—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电弧电接触理论及其应用, 新型与智能开关电器, jds20@mail.xjtu.edu.cn;

陈德桂(1933—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为开关电弧现象, 低压电器及其智能化。

(责任编辑 韩 蕾)