

基于 SIMULINK 的介质阻挡放电的仿真

章程¹, 方志¹, 赵龙章¹, 邱毓昌²

(1. 南京工业大学自动化学院, 江苏 南京 210009; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

Simulation of Dielectric Barrier Discharge Using SIMULINK

ZHANG Cheng¹, FANG Zhi¹, ZHAO Long-zhang¹, QIU Yu-chang²

(1. School of Automation, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. State key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment, Xi 'an Jiaotong University, Xi 'an 710049, China)

摘要: 为了深入地理解 DBD 的放电机理和优化 DBD 等离子体反应器的设计, 在分析 DBD 微放电过程和等效电路的基础上, 建立了基于 SIMULINK 的 DBD 动态仿真模型。为了更真实地反映 DBD 的放电情况, 模型中采用一个电压控制电流源(CCS)来模拟 DBD 的微放电, 同时考虑到了微放电的起止及幅值衰减的影响。用所建立的模型对空气中 DBD 放电进行仿真, 计算得到放电电流、气隙电压和李萨育图形等放电参量。仿真结果及分析表明, 放电模型可以用来对 DBD 进行仿真研究, 所得的结果能真实地反映 DBD 的放电情况。

关键词: 介质阻挡放电; 微放电; 电压控制电流源; 仿真; SIMULINK

中图分类号: TM213

文献标志码: A

Abstract: For better understanding the discharge mechanisms of dielectric barrier discharge and optimizing the design of discharge reactors, based on the analysis of micro-discharges process and equivalent circuit of DBD, a dynamic simulating model for DBD was established using SIMULINK. To reflect the discharge instance of DBD more truly, a voltage-controlled current source was adopt to simulate micro-discharge in DBD, and the influences of the ignition and extinction time and the attenuation of the amplitude of the micro-discharge were also taken into consideration in the model. The established model was used to simulate the DBD in air, and the electrical parameters, such as discharge current, gap voltage and Lissajous diagram etc. were calculated. The simulating results and analysis show that the established model can be used to simulate the DBD, and the results can reflect discharge situation of DBD more truly.

Key words: dielectric barrier discharge(DBD);

micro-discharges; voltage-controlled current source(CCS); simulation; SIMULINK

0 引言

介质阻挡放电(DBD)能够在大气压下产生大体积、高能量密度的低温等离子体, 在工业生产上具有广阔的应用前景, 因而对 DBD 的放电机理和特性研究成为近年来国内外研究中的热点问题之一^[1-4]。传统研究 DBD 放电机理和特性大多采用实验的方法, 由于测量和诊断手段的限制, 所得到的结果往往不准确, 制约了 DBD 应用技术的发展。计算机和数值模拟技术的发展使得可以用仿真手段研究 DBD 的放电机理和特性。研究人员分别采用了可变电阻、齐纳二极管和可控硅开关控制的电阻器等多种方法来模拟 DBD 的微放电过程, 并用 PSPICE 等软件来实现对 DBD 仿真^[5-9]。但 DBD 中微放电过程是一个瞬态过程, 该过程主要受气隙电压的影响, 因此采用上述方法来模拟微放电通道尚存在一定误差, 得到的仿真结果往往不能真实地反映气隙放电的情况。

笔者在分析 DBD 的微放电过程和等效电路模型的基础上, 采用一个电压控制电流源(CCS)来模拟微放电通道, 并利用功能强大的 MATLAB/SIMULINK 软件来构建 DBD 的动态仿真模型, 从而实现了对 DBD 放电的仿真。

1 DBD 的微放电过程

DBD 是一种有绝缘介质插入放电空间的气体放电形式。插入的绝缘介质可以限制电流密度的自由增长, 从而阻止放电发展到电弧阶段。放电空间的气体击穿会造成大量的电流细丝通道, 称为微放电^[1,2]。通常 DBD 的微放电可分为电子崩、流注和熄灭 3 个阶段, 见图 1。研究表明, DBD 放电的电

收稿日期: 2007-02-31; 修回日期: 2007-05-16

作者简介: 章程(1982-), 男, 江苏省无锡市人, 硕士研究生, 主要从事介质阻挡放电的机理及应用方面的研究。

子崩、流注过程通常在几 ns 内完成,而放电熄灭阶段则需几十到上百 ns^[5,9]。DBD 通常采用交流电源供电,故放电中断后在外加电压的下半个周期还会再次出现。因此 DBD 表现为在电源每个周期内多次击穿和熄灭的动态过程,放电由许多时间和空间上随机分布的微放电构成,反映在电压电流波形上即为在外加电压的每半个周期内,电流波形出现大量的脉冲,实验时测得的电压电流波形见图 2。对 DBD 放电的仿真,主要是建立在对 DBD 的微放电模拟和等效的基础上。

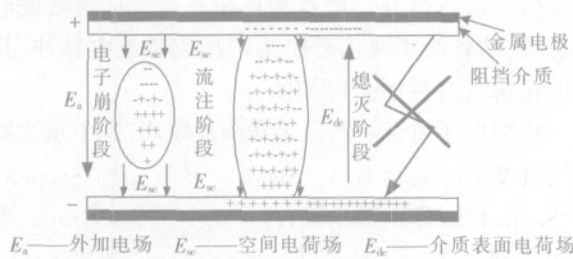


图1 DBD 的微放电过程示意图

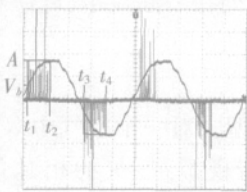


图2 DBD 的电压电流波形图

2 DBD 的仿真模型

2.1 DBD 仿真模型的建立

微放电过程的 3 个阶段是气隙电压动态变化的反映,这就导致放电前后 DBD 等效电路不同。放电前 DBD 的等效电路由介质等效电容 C_d 和气隙等效电容 C_g 串联构成,见图 3(a),其中 C_d 和 C_g 的值分别为

$$C_d = \frac{S_d \epsilon_0 \epsilon_d}{2l_d} \quad (1)$$

$$C_g = \frac{S_g \epsilon_0 \epsilon_g}{l_g} \quad (2)$$

式中 ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_d 为介质相对介电常数; ϵ_g 为气体相对介电常数; S_d 为介质层面积; S_g 为电极面积; l_d 为介质层厚度; l_g 为气隙距离。

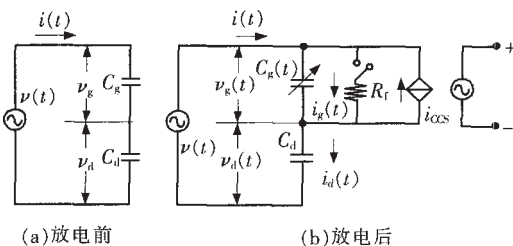


图3 DBD 的等效电路模型

放电后,气隙发生击穿,在微放电的不同阶段,气隙内的电离水平不同,导致气体的介电常数也随电离水平的增加而减少。由式(2)可知, C_g 是非线性

变化的,故用齐纳二极管或可变电阻等元件来模拟微放电过程均存在一定误差^[6-8]。与以往研究者不同,采用一个 CCS 模拟微放电过程,该电流源由遵循 C_g 非线性动态变化规律的电压信号激励,放电后等效电路模型见图 3(b)。其中 $v(t)$ 为外加电压; $i(t)$ 为回路总电流(放电电流); i_{CCS} 是表征微放电的电压控制电流源; $i_d(t)$ 和 $i_g(t)$ 分别为介质材料上和气隙中的位移电流; $v_d(t)$ 和 $v_g(t)$ 分别为介质和气隙上的电压。由图 3 可得

$$i(t) = i_d(t) = C_d \frac{d v_d(t)}{dt} \quad (3)$$

$$i_g(t) = C_g \frac{d v_g(t)}{dt} = [i(t) - i_{CCS}(t)] \quad (4)$$

$$v(t) = v_d(t) + v_g(t) \quad (5)$$

式(5)对时间求导,并将式(3)、(4)代入得

$$\frac{d v(t)}{dt} = \frac{d v_d(t)}{dt} + \frac{d v_g(t)}{dt} = \frac{1}{C_g} [i(t) - i_{CCS}(t)] + \frac{i(t)}{C_d} \quad (6)$$

于是可得 i_{CCS} 的表达式

$$i_{CCS}(t) = (1 + \frac{C_g}{C_d}) i(t) - C_g \frac{d v(t)}{dt} \quad (7)$$

对于固定的电极布置, C_g 和 C_d 为定值,由式(7)可以看出, i_{CCS} 受 $v(t)$ 控制,对于任一 i_{CCS} 都有一个 $i(t)$ 与之对应。对式(3)积分可以得到 $v_d(t)$ 的表达式为

$$v_d(t) = \frac{1}{C_d} \int_0^t i(\tau) d\tau + v_d(0) \quad (8)$$

式中 $v_d(0) = v_d(t=0)$, 表示介质等效电容上的初始电压,为前半个周期放电电荷累积所致,其值随外加电压的不同变化^[6-8]。将式(8)代入式(5),得到 $v_g(t)$ 为

$$v_g(t) = v(t) - \frac{1}{C_d} \int_0^t i(\tau) d\tau - v_d(0) \quad (9)$$

由以上分析可知,采用 CCS 来模拟微放电,气隙电流随着外加电压的斜率变化而变化,能够较为真实地反映微放电非线性衰减的变化情况。

2.2 DBD 放电时刻和击穿电压

设外加正弦电压表达式为

$$v(t) = A \sin \omega t \quad (10)$$

式中 A 为外加电压幅值; ω 为角频率。从图 2 可以看出,在 t_1 时刻,外加电压幅值达到击穿电压 V_b 时放电开始,并一直持续到 t_2 时刻外加电压达到最大值时放电脉冲消失,放电结束;负半周期在 t_3 和 t_4 时刻之间分别重复上述过程,因此可以得到单个周期内放电开始和熄灭时刻分别为

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \sin^{-1}(\frac{V_b}{A}); \quad t_2 = \frac{\pi}{\omega} \quad (11)$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega} \sin^{-1}(-\frac{V_b}{A}); \quad t_4 = \frac{3\pi}{\omega} \quad (12)$$

其中 V_b 的大小只与气隙距离 l_g 、介质厚度 l_d 、介质的相对介电常数 ϵ_d 和电源频率 f 有关,而与外加电压

的幅值无关^[3, 4, 9]。对于空气中的双层介质平板电极结构 DBD, 因其电极布置对称, 为均匀电场情况, 分析和实验表明, 在频率为 50~100 kHz 和气隙距离为 1~10 mm 时, 其击穿强度约为 3 000 V/mm, 因此空气中双层介质平板电极结构 DBD 的 V_b 可由如下近似公式计算。

$$V_b = 3\ 000l_g + 2l_d \times \frac{3\ 000}{d} \quad (13)$$

2.3 基于 SIMULINK 的 DBD 仿真模型

微放电过程是一个动态变化过程, 采用 PSPICE 实现微放电过程的仿真存在一定困难, 因此利用 MATLAB 平台的 SIMULINK 动态系统建模工具来模拟 DBD^[10], 基于图 3(b) 放电后等效电路, 利用 SIMULINK 中的公共模块库和电力系统专业模块库构造了 DBD 的动态仿真模型, 见图 4。

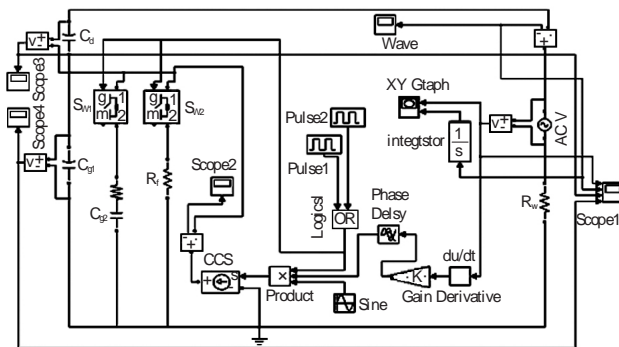


图4 DBD 的动态仿真模型

模型中, 微放电的发生和熄灭是通过使能开关 S_{M1} 和 S_{M2} 的开闭控制电容 C_{g1} 和 C_{g2} 的断开和连接实现, 其中 $C_g = C_{g1} + C_{g2}$ 。气体击穿后, 气隙等效电容 C_g 的值并不为 0, 因此为了真实反映微放电过程中的变化情况, 将击穿后的电容等效为一个固定值的电容 C_{g1} 。通过多次运行上述模型, 并与实验数据相比较, 模型中取 C_{g1} 的值为 $0.7C_{g0}$ 。 S_{M1} 和 S_{M2} 的开闭时刻是由放电起始 (t_1 和 t_3) 和熄灭 (t_2 和 t_4) 的时刻来确定。模型中采用两个脉冲信号 Pulse1 和 Pulse2 通过或 ('OR') 运算后的信号控制 S_{M1} 和 S_{M2} 来实现。在外加电压正半周期放电时 (图 2 中 $t_1 \sim t_2$ 时刻), Pulse1 保持高电平, 否则为低电平; 在外加电压负半周期放电时 (图 2 中 $t_3 \sim t_4$ 时刻), Pulse2 保持高电平, 否则为低电平。不放电时, 'OR' 输出信号为低电平, 因此 S_{M1} 常闭, S_{M2} 常开, 电路等效为 C_{g1} 和 C_{g2} 并联后与 C_d 串联, 与放电前等效电路相同; 放电时, 'OR' 输出信号为高电平, S_{M1} 打开, S_{M2} 闭合, C_{g2} 支路断开, 含有表征微放电丝状通道电阻 R_f 的支路和 CCS 支路连接上, 直至放电熄灭。整个开闭过程在一个周期内发生 2 次, 正负半周各出现一次。研究表明, 微放电通道的场强通常为 $10^3 \sim 10^6$ V/mm, 而微放电电流一般

为 mA 量级, 因而模拟时 R_f 取几百 k^[1, 2, 9]。

在构建模型时, 微放电的起止条件以及微放电的衰减过程都得到了体现, 采用 CCS 来集中反映微放电的瞬态过程。模型中正弦交流电源的电压由电压表测得后送入微分模块 ('Derivative') 微分后, 再送入增益模块 ('Gain'), 从而得到归一化电压信号, 此信号再经过移相之后, 与 'OR' 模块的输出信号以及纳秒级的正弦信号一起送入 'Product1' 模块, 3 路信号相乘后的输出电压信号用以激励 CCS。其中对电压信号进行微分, 增益和移相是为了反映微放电的衰减, 纳秒级正弦信号是为了形成微放电脉冲, 其幅度在仿真过程中是可调的。

模型中还包含一些显示和测量模块, 其中示波器模块 'Wave' 显示 $i(t)$, 'Scope2' 显示 i_{CCS} , 'Scope3' 和 'Scope4' 则分别显示 $d(t)$ 与 $g(t)$, 'XY Graph' 模块用来显示 Lissajous 图形, 而 'Scope1' 则将 $t(t)$ 、 $i(t)$ 、 $d(t)$ 与 $g(t)$ 列在一起显示, 以便观察和比较。

3 仿真实例

利用上述模型, 对一个空气中双层介质平板电极结构 DBD 进行模拟, 空气的相对介电常数 ϵ_g 取为 1.0; 阻挡介质为玻璃, 其介电常数 ϵ_d 取为 5; 真空介电常数 ϵ_0 取为 8.854×10^{-12} pF/m; 圆形介质层的半径 R_d 取为 20 mm, 圆形电极板的半径 R_g 取为 10 mm; 气隙距离 l_g 取为 1 mm, 介质层的厚度 l_d 取为 0.5 mm。由式 (1)、(2) 计算得 $C_d = 55.6$ pF、 $C_g = 2.78$ pF, 进而可算出 $C_{g1} = 1.95$ pF、 $C_{g2} = 0.83$ pF。外加电压取为 5 000 V, 其频率取为 20 kHz, 由式 (13) 可算得 V_b 值为 3 600 V, 进而由式 (11)、(12) 可算出 t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 时刻分别为 6.40、12.5、31.40、37.5 μ s。Pulse1 和 Pulse2 的占空比可由下式计算。

$$\frac{t_2 - t_1}{T} = \frac{t_4 - t_3}{T} \quad (14)$$

式中 T 为脉冲周期, 即为外加电压周期。由式 (14) 可求得脉冲占空比为 20.92%。

按上述值对模型中各元件参数进行设置后, 并选取系统仿真算法为变步长连续 ode23 算法。运行仿真模型, 所得放电电流、气隙电压、介质电压和 Lissajous 图形等分别见图 5、6。

从图 5 可看出, 当外加电压达到 3 600 V 时, 出现大量脉冲细丝构成的放电电流, 其幅值约为 20 mA, 直至外加电压达到最大值时, 电流脉冲消失, 这种现象在一个电源周期内出现两次, 每次持续约 6 μ s, 介质电压与气隙电压之和在同一时刻等于外加电压的值。从图 6 可以看出, 放电的 Lissajous 图形为一椭

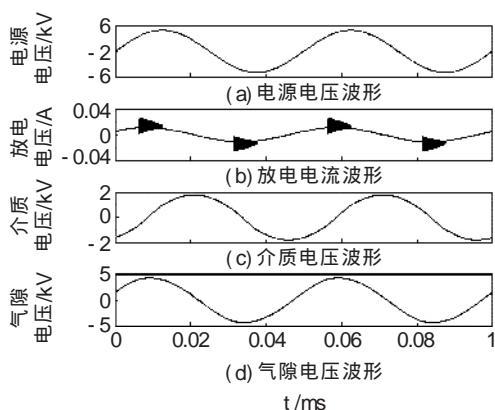


图5 仿真波形

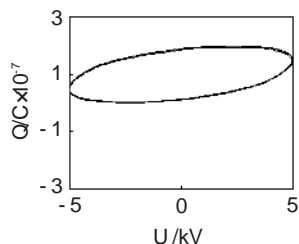


图6 Lissajous 图形

圆。通过与相关文献资料进行比较可知,以上结果与实验结果一致^[1,2,11-13]。

4 结语

DBD的微放电过程受气隙电压影响,笔者经理论分析,用一个电压控制电流源模拟DBD中微放电的瞬态变化过程,其更能够反映出微放电的真实情况。利用MATLAB平台下的SIMULINK工具箱构造了一个包含CCS的DBD动态仿真模型,在模型中采用脉冲信号和使能开关来控制微放电的起始和熄灭,并考虑到了微放电的幅值和沿电压斜率进行衰减。用所建立的模型对空气中双层平板电极结构DBD进行仿真,获得的放电电流、气隙电压及Lissajous图形等结果与实验结果一致。利用所建立的模型还可对外加电压、气隙距离、阻挡介质等因素对DBD的放电特性影响进行研究,从而为优化DBD等离子体反应器设计、提高放电效率提供参考。

参考文献:

- [1] KOGELE SCHATS U. Dielectric-barrier Discharge: their History, Discharge Physics, and Industrial Application [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(1): 1-46.
- [2] WAGNER H E, BRANDENBURG R, SONNENFELD A, et al. The Barrier Discharge: Basic Properties and Applications to Surface Treatment[J]. Vacuum, 2003, 71(3): 417-436.
- [3] 方志, 邱毓昌, 王辉. 介质阻挡放电的电荷传输特性研究[J]. 高压电器, 2004, 40(6): 401-403.
- [4] 罗毅, 方志, 邱毓昌. 介质阻挡放电影响因素分析[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 81-83.
- [5] ELIASSONI B, KOGELESCHATS U. Modeling and Applications of Silent Discharge Plasma [J]. IEEE Trans. Plasma Sci, 1991, 19(2): 309-323.
- [6] LIU S, NEIGER M. Electrical Modeling of Homogeneous Dielectric Barrier Discharges under an Arbitrary Excitation Voltage [J]. J. Phys. D: Appl. Phys, 2003, 36 (24): 3144-3150.
- [7] LIU S, NEIGER M. Excitation Of Dielectric Barrier Discharges By Unipolar Submicrosecond Square Pulses [J]. J. Phys. D: Appl. Phys, 2001, 34(11): 1632-1638.
- [8] BARRIENTOS R V, SOTELO J P, PACHECO M P, et al. Analysis and Electrical Modeling of a Cylindrical DBD Configuration at Different Operating Frequencies [J]. Plasma Sources Sci. Technol., 2006, 15(2): 237-245.
- [9] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.
- [10] 李颖, 朱伯立, 张威. Simulink 动态系统建模与仿真基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [11] ABDEL Salam M, HASHEM A, YEHA A, et al. Characteristics of Corona and Silent Discharge as Influenced by Geometry of the Discharge Reactor [J]. J. Phys. D: Appl. Phys, 2003, 36(3): 252-260.
- [12] GUAITELLA O, THEVENET F, GUILLARD C, et al. Dynamic of The Plasma Current Amplitude in a Barrier Discharge: Influence of Photocatalytic Material [J]. J. Phys. D: Appl. Phys, 2006, 39(14): 2964-2972.
- [13] DONG L F, YIN Z Q, LI X C, et al. Spatio-temporal Dynamics of Discharge Domains in a Dielectric Barrier Discharge Device[J]. Plasma Sources Sci. Technol., 2003, 12 (3): 380-388.

《国内外高压断路器技术发展动态》

简讯

该文集通过对 SF₆ 断路器开断能力、热气流的模拟、触头材料烧蚀状况、电弧能量、模型等的分析研究,介绍了 SF₆ 断路器的最新发展动态;通过对真空灭弧室大电流开断的物理过程、纵向磁场作用下大电流真空电弧的磁场控制、绝缘恢复特性、触头材料以及真空断路器其它性能的基础研究,介绍了真空断路器的最新发展动向;还介绍了几种新型高压断路器的技术发展,以期对近期国内外在高压断路器方面的研究动向做一系统、全面的综述,供有关业内人士参考借鉴。

该文集由西安高压电器研究所信息室编译,联系电话:029-84225623。