

基于 SIMULINK 的气隙局部放电仿真技术研究

任成燕, 成永红, 陈小林, 谢小军, 杨 越

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了解决目前国内外局部放电仿真方法难以计算气隙局部放电暂态过程的问题, 利用 MATLAB (SIMULINK) 的公共模块库和电力系统专业模块库, 根据单气隙局部放电仿真物理模型, 构造了气隙局部放电仿真计算的电路. 研究了气隙放电过程的电压控制方法、分段时间控制方法、线性时间控制方法以及非线性时间控制方法, 从而实现了多种控制方式下单气隙局部放电暂态过程的计算机仿真. 得到的工频周期内的仿真波形和纳秒级单次放电仿真波形均与实际测量波形比较接近, 证明利用 SIMULINK 可以进行气隙局部放电过程的仿真. 该方法具有建模方便、运算速度快等优点, 是一种十分有效的方法.

关键词: 局部放电; 计算机仿真; SIMULINK

中图分类号: TM85 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)08 - 0824 - 04

Study on Simulation Technology of Partial Discharge in Single Void Based on SIMULINK

Ren Chengyan, Cheng Yonghong, Chen Xiaolin, Xie Xiaojun, Yang Yue

(State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: The existing simulation methods of partial discharge (PD) are difficult to simulate the transient process of PD in voids. In order to solve this problem, a new simulation method by using the simulation block of public module library and power system library in MATLAB (SIMULINK) was developed. According to the physical model of PD in a single void, the equivalent circuit of PD simulation was constructed. The simulation methods of different discharge processes, including discharge voltage control method, sectional time control method, linear time control method, and nonlinear time control method, were studied. Thus the computer simulation of PD transient process in a single void was realized by multifunction control methods. Main characteristics of the simulation waveform in one main frequency cycle and a single waveform of PD at nanosecond order are similar to those of the experimental waveforms. It is shown that this simulation method based on SIMULINK can be used to simulate the different discharge processes, and is effective for easy modeling and fast calculation.

Key words: partial discharge; computer simulation; SIMULINK

气隙局部放电机理的研究, 是电气绝缘领域的重要课题之一^[1], 通过气隙局部放电的数值仿真, 了解固体介质内部气体放电的特性以及物理参数的变化对放电特性的影响, 是深入地认识局部放电机理的重要途径. 然而, 由于介质内部气隙发生放电过程的复杂性以及一些参数的不确定性, 气隙局部放电

仿真研究一直是电气绝缘领域的难点之一. 国外研究人员对于气隙局部放电的数值仿真主要采用 PSPICE 软件^[2-6], 但是 PSPICE 在实现气隙局部放电的瞬态过程时较为困难.

本文在对计算模型及仿真计算参数研究的基础上, 利用 SIMULINK 齐全 的模块库和 MATLAB

收稿日期: 2004 - 01 - 18. 作者简介: 任成燕 (1979 ~), 女, 硕士生; 成永红 (联系人), 男, 教授. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50077014).

强大的科学计算功能,实现固体绝缘试样内部气隙局部放电的计算机仿真。

1 SIMULINK 仿真语言和模块库

基于 MATLAB 平台的 SIMULINK 仿真语言是动态系统仿真领域中最著名的仿真集成环境之一,在许多领域得到了广泛的应用^[7]。SIMULINK 是基于 MATLAB 的图形化仿真环境,能够直接使用 MATLAB 强大的科学计算功能,并可以和 MATLAB 进行灵活的交互操作。它使用高级图形技术,具有优秀的用户界面,并且提供了大量的系统内置模块。SIMULINK 的图形建模方式可以完成绝大多数的动态系统仿真分析。

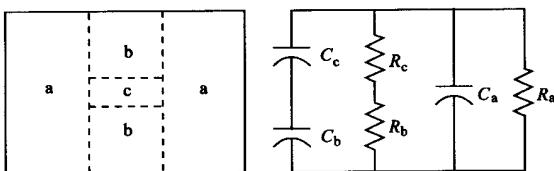
本文基于 SIMULINK 公共模块库和电力系统专业模块库进行气隙局部放电仿真, SIMULINK 公共模块库主要包括连续系统模块库、离散系统模块库、函数与表库、数学运算库、非线性系统模块库、信号与系统模块库、系统输出模块库、系统输入模块库和子系统模块库等,可以用来构建一般的动态系统模型。电力系统专业模块库主要包括连接器、电源、元器件、电机、测量元件和电力电子元件等。本文利用这些模块构建了气隙局部放电的仿真计算模型。

2 基于 SIMULINK 的气隙局部放电仿真

2.1 仿真基本电路构造

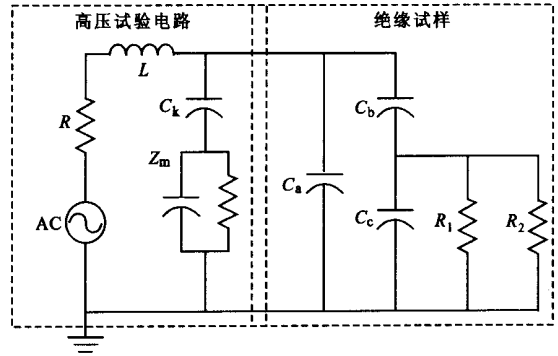
对于经典的单气隙绝缘试样局部放电阻容模型(如图 1 所示),根据放电的实际过程进行修正,引入气隙电阻的半导电化过程。

R_c 由气隙绝缘电阻 R_1 和气隙沿面绝缘电阻 R_2 组成,当发生局部放电时气隙电阻半导电化,即 R_1 或是 R_2 在发生局部放电时,变化到它们对应的半导电化电阻 R_1 或是 R_2 。仿真等效电路变化如图 2 所示。



(a) 含有一个气隙的试样 (b) 等效电路
 C_c 为气隙电容; R_c 为气隙等效电阻; C_b 为与气隙串联介质的电容; R_b 为与气隙串联介质的电阻; C_a 为试样其他部分介质的电容; R_a 为试样其他部分介质的电阻

图 1 单气隙局部放电模型



AC 为交流电压源; R 为保护电阻; L 为滤波器; C_k 为耦合电容器; Z_m 为检测阻抗; C_c 为气隙电容; R_1 为气隙电阻; R_2 为气隙沿面绝缘电阻; C_b 为与气隙串联介质的电容; C_a 为试样其他部分介质的电容

图 2 单气隙局部放电仿真的等效电路

对于图 2 中的电阻、电容元件及交流电压源可以利用 SIMULINK 模块库中的标准模块进行仿真,因此仿真的关键在于气隙发生局部放电时,模拟气隙内部的变化过程。本文针对仿真计算中实际可能遇到的 3 种可能放电过程(气隙瞬时击穿、气隙线性化击穿、气隙非线性化击穿),通过电压测量器、信号延迟器和使能开关器等实现仿真过程中的气隙放电过程的控制。

2.2 放电过程的瞬时控制方法

假设气隙放电是在瞬间完成的,电路中等效为气隙电阻瞬间减小为其半导电化电阻,仿真中采用使能开关控制,此时的仿真电路如图 3 所示。

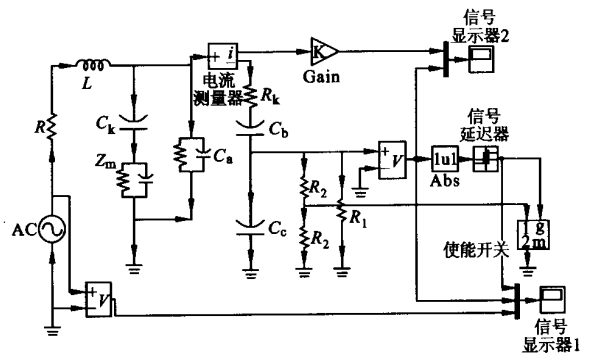


图 3 电阻瞬时变化的单气隙放电仿真计算电路

图 3 中电压测量器用来测量气隙两端的电压; Abs 模块用来求电压的绝对值;信号延迟器的作用是当气隙两端电压的绝对值大于气隙放电起始电压时产生一个高电平,小于气隙放电熄灭电压时产生一个低电平;信号延迟器输出高电平时,使能开关闭合,输出为低电平时,使能开关打开。当使能开关连

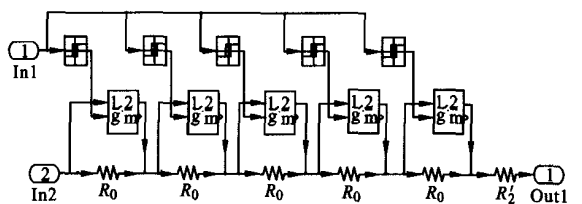
接在 R_2 两端时,放电开始则开关闭合, R_2 减小到其半导电化电阻 R_2 , 放电结束则开关断开. 电流测量器用来测量气隙回路的电流值; 信号显示器的显示界面和示波器很相似, 可以方便地对动态系统的仿真结果或系统模块中指定的信号进行定性的分析. 图3中信号显示器1定义为同时显示交流电压源波形、气隙两端电压波形和放电脉冲触发波形, 信号显示器2显示气隙两端电压波形和气隙电流波形.

2.3 放电过程的线性分段控制方法

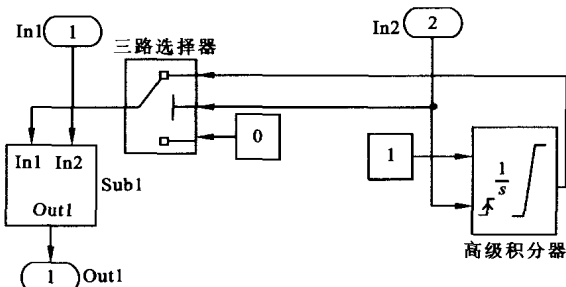
上述由使能开关器控制的放电过程是在瞬间完成的, 但通常气隙发生局部放电的过程并不是瞬时完成的, 即气隙电阻是逐步变化的, 仿真过程采用一系列信号延迟器、使能开关和分段电阻来实现这种线性化的过程.

在气隙发生放电的过程中, R_2 在某一特定时间内阶梯状减小为 R_2 . 这个过程可以采用两级子系统来实现.

图4a是一个有两路输入、一路输出的5级分段的一级子系统, 它的封装模块 Sub1 连在二级子系统中. 图4b中, 输入1(In1)连接 C_c 的非接地端, 输入2(In2)连接控制气隙放电的信号延迟器的输出, 输出端(Out1)接地. 高级积分器由信号延迟器的输出重置积分器的初始状态, 同时还可以限制积分器的输出范围. 根据输入信号 In2 控制选择器的输出, 当输入信号大于开关的阈值时, 三路选择器开关连接上面端点, 小于阈值时, 连接下面端点. 图4b是在



(a) 一级子系统



(b) 二级子系统

图4 气隙电阻线性化变化的仿真计算子系统

信号延迟器输出高电平(气隙开始放电)时, 对常数1积分, 产生时间信号, 通过多路选择开关连接到图4a中的输入1端口, 然后由一级子系统实现电阻的阶梯状变化. 当信号延迟器输出为低电平时, 多路选择开关将常数0连接到图4a中的输入1端口, 气隙电阻不发生变化. 在图4a的一级子系统中, 信号延迟器依次通过等间隔时间使相应的开关闭合, 当产生放电后 R_2 减小为 R_2 . 输入1(In1)为0时, 5个使能开关始终是断开的, 气隙电阻不发生变化, 即没有放电发生.

2.4 放电过程的连续控制方法

当气隙发生局部放电时, 一个真实的放电过程是一个非线性的连续时间过程, 即气隙沿面绝缘电阻 R_2 应该是非线性连续减小到 R_2 . 本文在SIMULINK仿真中同样用两级子系统完成电阻连续变化的过程. 一级子系统有两个输入、一个输出, 连接方法和电阻阶梯状变化时相同, 它的内部结构如图5所示. 其中, 模块 F_{cn} 用来求取输入信号的数学函数值, 当 R_2 在特定时间内连续变化到 R_2 时, F_{cn} 的输出可表示为

$$f(u) = u(1) / (R_2 - u(2) C) \quad (1)$$

式中: C 为 R_2 的变化率; $u(1)$ 、 $u(2)$ 分别表示模块的两个输入, $u(1)$ 是气隙两端的电压, $u(2)$ 表示气隙电阻变化的时间. CCS 是可控电流源模块, 功能是将输入转换成等效的电流信号. 二级子系统和图4b相同, 用来产生时间信号. 两级子系统实现的功能为气隙电阻是气隙两端电压和时间的函数, 即发生局部放电时气隙电阻在放电时间内连续变化, 不发生放电时电阻不变.

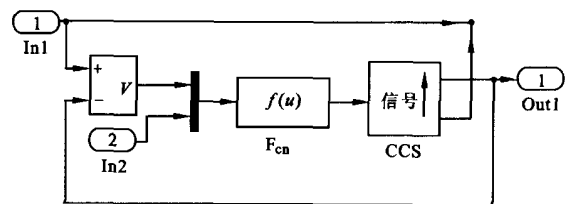


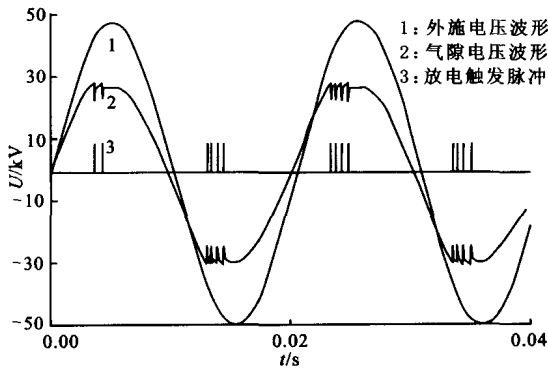
图5 气隙电阻连续减小的一级子系统

3 仿真实例

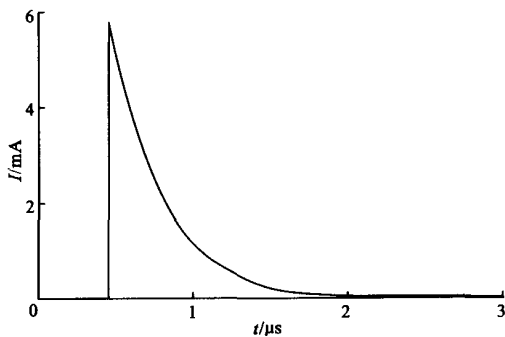
本文给出了一个环氧绝缘试样的仿真实例, 试样形状为立方体(40 mm × 40 mm × 40 mm), 试样包含了一个底面半径 $a = 4$ mm、高 $h = 9$ mm 的圆柱形气隙, 试样仿真计算的参数如下: 外施高压电源 $U_{AC} = 50$ kV, $f_{AC} = 50$ Hz; 保护电阻 $R = 5$ k ; $L = 5$ mH,

用来检测回路的滤波器;耦合电容 $C_k = 0.5 \times 10^{-9}$ F; Z_m 表示检测阻抗,其中 $R_m = 50$, $C_m = 2 \times 10^{-12}$ F; $C_a = 7.36 \times 10^{-13}$ F,为试样中 a 区域的等效电容;电容器极板延伸的等效电阻 $R_k = 10^6$;气隙的等效电容 $C_c = 5.7 \times 10^{-14}$ pF;试样中 b 区域的等效电容 $C_b = 3.7 \times 10^{-14}$ F;气隙电阻 $R_1 = 2 \times 10^{10}$;气隙沿面绝缘电阻 $R_2 = 6 \times 10^{10}$;气隙沿面半导电化等效电阻 $R_2 = 8 \times 10^5$;放电起始电压 $U_i = 28.4$ kV;放电熄灭电压 $U_1 = 21.78$ kV.

当气隙两端电压达到气隙的放电起始电压时,气隙沿面绝缘电阻在 50 ns 内按指数规律连续变化的仿真结果如图 6 所示.



(a) 气隙电压和电流的仿真波形



(b) 单次放电波形

图 6 单气隙局部放电仿真结果

该仿真通过放电起始电压和放电熄灭电压控制气隙击穿过程,得到的放电电压波形为正弦波上的一系列放电脉冲,不同于国外仿真得到的锯齿波,更

接近于真实的放电统计波形.同时,第二周波的放电次数明显多于第一周波,证明放电与放电电荷积累的过程有密切关系.图 6b 是仿真得到的单次放电波形,幅值约为 5.8 mA,上升前沿约为十几纳秒,放电脉冲宽度(峰值的一半)约为 280 ns,与实测的微秒级放电波形较为相似.

4 结 论

利用 SIMULINK 仿真语言,建立了气隙局部放电仿真计算模型,给出了气隙不同击穿过程(气隙瞬时击穿、气隙分段线性击穿、气隙连续击穿)数值仿真的具体方法,实现了绝缘试样中气隙局部放电的数值仿真,计算结果更接近实际放电波形.

参考文献:

- [1] 葛景滂,邱昌容,谢恒堃. 局部放电测量[M]. 北京:机械工业出版社,1984.
- [2] Chia P Y, Liew A C. Novel approach to partial discharge signals modeling in dielectric insulation void extension of lumped capacitance model [A]. International Conference on Power System Technology, Perth, Australia, 2000.
- [3] Kolev N P, Danikas M G, Gadjeva E D, et al. Development of partial discharge model, simulation and measurement [A]. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Austin, USA, 1999.
- [4] Kolev N P, Danikas M G, Gadjeva E D, et al. An approach to develop a partial discharge investigation [A]. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, Cincinnati, USA, 1999.
- [5] Kolev N P, Darjanov P I, Gadjeva E D, et al. Partial discharge phenomena simulation using general purpose analysis programs [A]. The 6th IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, Vasteras, Sweden, 1998.
- [6] Kolev N P, Darjanov P I, Gadjeva E D, et al. A new computer model for partial discharge phenomena investigations [A]. The IEEE Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Windings Conference, Rosemont, USA, 1997.
- [7] 姚俊,马松辉. SIMULINK 建模与仿真[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.

(编辑 杜秀杰)