

高压限流熔断器的过电压动态仿真与数值计算

周 挺, 毛柳明

(湖南省电力试验研究院, 湖南 长沙 410007)

Numerical Calculation and Dynamic Simulation of the Overvoltage during the Breaking Progress for the High Voltage Current Limiting Fuse

ZHOU Ting, MAO Liu-ming

(Huazhong Electric Power Test and Research Institute, Changsha 410007, China)

摘要: 以高压限流熔断器短路试验系统为研究主体, 用 MATLAB 建立了动态仿真模型对熔断器熔断过程进行仿真。建立了用于电磁暂态过程计算的数值计算模型, 运用半隐半显格式的 Callahan 算法分析计算了熔断器的开断过电压, 得到了过电压波形。仿真波形与计算波形均与实际试验波形基本吻合, 充分说明两种方法的正确性, 它们可以较好地模拟出熔断器短路试验时的开断过电压情况, 还可用于其它非线性电路过电压的求解以及电磁暂态过程的计算。

关键词: 高压限流熔断器; MATLAB; 动态仿真;

Callahan 算法

中图分类号: TM563.1

文献标志码: A

Abstract: Aiming to the short circuit test system, this paper discussed the generation mechanism of the overvoltage during the breaking progress for the high voltage current limiting fuse and set up a dynamic simulation model to simulate the breaking progress of the fuse based on MATLAB. A numerical calculation model was established for electromagnetic transient progress. A great deal of calculations of the overvoltage were carried out by using Callahan algorithm. The results were almost the same as the fact. It illuminates that the two methods are both correct. The breaking voltage of the high voltage current limiting fuse in short circuit test can be simulated using the two methods. They can also be used to calculate the overvoltage of the other nonlinear circuit and electromagnetism transient process.

Key words: high voltage current limiting fuse; MATLAB; dynamic simulation; callahan algorithm

0 引言

高压限流熔断器是电网中最简单的一种保护电器, 当熔断器中流过短路电流或长期流过过负荷电流时会自行熔断, 进而保护该电路中的电器设备。将

高压限流熔断器与高压负荷开关配合组成组合电器, 还可以在短路容量较小的网络中代替昂贵的高压断路器来使用。高压限流熔断器能够在故障电流达到最大值之前将电弧熄灭, 从而起到限制短路电流的作用, 它迅速切断故障电流的实质是其电阻值迅速增大以减小故障电流的幅值和持续时间。由于电路中电感的存在, 在熔断器电阻迅速增大的过程中熔断器两端会产生一个比系统电压高得多的电弧电压反作用于被保护的设备上, 可能会损坏电路中其它一些重要设备^[1,2]。因此有必要对高压限流熔断器的开断过电压进行研究, 以此为依据对电路其它设备进行保护。

1 开断过电压的产生机理

高压限流熔断器开断过程中产生过电压的机理可以用图 1 所示熔断器短路试验线路图来分析说明: 当开关合上后熔断器还未动作之前, 电路方程为 $U=U_s-L\frac{di}{dt}$, 在短路初期短路电流不断上升, 电流变化率为正 ($di/dt>0$), $U<U_s$, 电流的作用使得熔断器熔体的温度不断增加, 当熔体的温度增加到其熔点时, 熔体便会迅速熔化^[3], 熔体的电阻将会迅速增加, 导致电路中的短路电流从原来的上升变为迅速下降, 电流变化率变为负数 ($di/dt<0$), $U>U_s$, 电路中出现过电压^[3]。高压限流熔断器熔断过程电压电流波形见图 2, t_{ret} 为熔断时间^[4]。从图 2 中可以清晰地看到, 在短路电流达到最大值之前, 熔断器已将电路切断, 有效地限制了电路中短路电流大小, 但同时产生的过电压可能对电路中其它设备造成威胁。

2 动态仿真

以 12 kV、50 kA 高压限流熔断器短路试验为例,

收稿日期: 2006-11-28; 修回日期: 2007-02-09

作者简介: 周 挺(1981-), 男, 硕士, 从事高电压技术方面的试验研究工作。

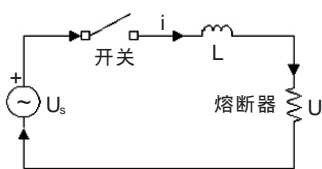


图 1 熔断器短路试验线路图

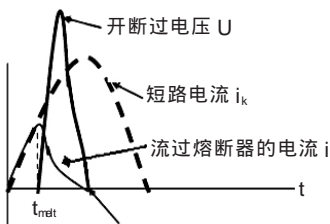


图 2 高压限流熔断器熔断过程电压电流波形图

运用 MATLAB 的 Simulink 动态仿真模块建模。实际试验电路见图 3: L_w 为尾端电抗器, 电抗值为 $0.02 / \text{相}$; R_D 为接地电阻, 为发电机中性点提供地电位, 阻值 612Ω ; MOA_1 和 MOA_2 是用来限制过电压的无间隙氧化锌避雷器; K 为合闸开关; L_t 为可调电抗器, 用以调节线路电流的大小, 使得试验线路电流等于熔断器的预期最大开断电流; C_S-R_S 为调频装置, 是电容与电阻的串联, 其作用是使得线路的预期瞬态恢复电压满足相关标准要求; Fuse 为熔断器。根据实际试验电路建立的仿真电路模型见图 4。

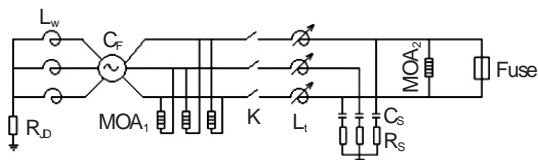


图 3 12 kV、50 kA 高压限流熔断器短路试验电路图

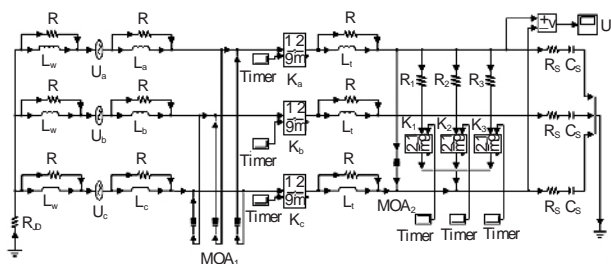


图 4 12 kV、50 kA 高压限流熔断器短路试验等值仿真电路图

图 4 仿真电路中用三相对称电源 U_a 、 U_b 、 U_c 分别串联超瞬变电抗 L_a 、 L_b 、 L_c 来代替试验用冲击发电机。合闸开关用理想开关 (K_a 、 K_b 、 K_c) 加上计时器来代替, 通过计时器来控制合闸时间。所有电抗 (L_a 、 L_b 、 L_c 、 L_w 、 L_t) 均用电感来表示。 MOA_1 和 MOA_2 则用 MATLAB 仿真元件库里的避雷器模块来代替。所有电感上并联的电阻 R 是为了仿真的需要而加入的阻值极大的电阻 ($10^3 \text{ k}\Omega$), 作用是保证含有非线性元件 (MOA 、开关等) 的仿真电路能够正常运行。

熔断器在熔断过程中表现为一个非线性电阻, 其电阻 R_f 在熔断过程中是随时间不断变化的。笔者

对熔断器熔断过程中时间电阻特性的拟合采用分段线性化的方法, 用 3 个线性电阻 (R_1 、 R_2 、 R_3) 来模拟熔断器熔断过程中电阻的变化情况。通过开关状态 (K_1 、 K_2 、 K_3) 的转换来决定投入电路中的电阻的大小, 开关的开合同样由计时器控制^[5-8]。

将仿真电路中所有元件的参数按照试验要求设定好之后, 即可进行仿真。实际试验测得的过电压波形如图 5 虚线所示, 其过电压峰值为 21.08 kV 。仿真得到的过电压波形如图 5 实线所示, 过电压峰值为 22.075 kV 。两者误差为 4.7% 。

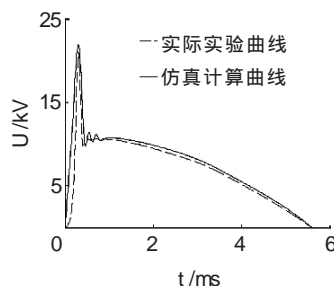


图 5 MATLAB 动态仿真过电压波形

3 数值计算模型的建立与计算

直接对高压限流熔断器短路试验的三相电路进行数值建模会使得后面的计算相当的繁琐。通过对该三相电路进行仿真分析发现, C_S-R_S 支路对熔断器支路的影响相当小, 故我们在建模的时候可以忽略掉 C_S-R_S 支路。将原来的三相电路简化为图 6 所示的电路来进行分析。电源 U_s 的电压为原三相电路中 A、C 两相的线电压。 MOA (无间隙氧化锌避雷器) 和熔断器均为非线性元件。对 MOA 的非线性 $U-I$ 曲线和熔断器的非线性 $R-t$ 曲线的处理既可以采用分段线性化的方法也可以采用分段曲线拟合的方法, 但是后者的精度要高于前者, 能更真实的反映出非线性特性, 使得过电压的计算更准确。笔者采用后者, 将 MOA 的 $U-I$ 曲线分为 3 段每段用指数函数 $I=KU$ 来拟合, 熔断器的非线性 $R-t$ 曲线也分为 3 段每段用指数函数 $R=At$ 来拟合^[9]。

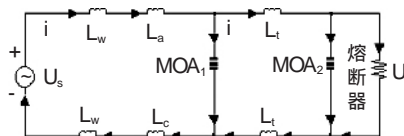


图 6 高压限流熔断器短路试验等值数值计算电路

图 6 所示等值电路的方程为非线性微分方程组。对于非线性微分方程组的求解采用半隐半显格式的 Callahan 算法其基本公式如下。令待求方程为

$$\begin{cases} dy/dt=f(y, t) \\ y(t_0)=y_0 \end{cases} \quad (1)$$

计算公式为

$$Y_{n+1}=Y_n+0.75K_n+0.25L_n \quad (2)$$

$$K_n = [I - t \times a \times (\partial f / \partial Y)_n]^{-1} \times [f(Y_n, t_n) + a \times t \times (\partial f / \partial t)_n] \quad (3)$$

$$L_n = [I - t \times a \times (\partial f / \partial Y)_n]^{-1} \times [f(Y_n + b \times K_n, t_n + b \times t) + a \times t \times (\partial f / \partial t)_n] \quad (4)$$

其中 I 为单位阵, a=0.788 675 134 595, b=- 1.154 700 538 38; n 为 t_n 时刻的变量值; t 为时间步长; ∂f/∂Y 为右函数 f 的偏导数, 称之为 Jacobi 矩阵。

该半隐半显的 Callahan 方法既具有显式法求解时不用迭代、可直接递推的优点, 又具备隐式法易收敛、稳定性不受步长影响的特性。且 Callahan 方法为三阶精度, 能较好地满足工程计算的要求, 若将它和 Richardson 外推法相结合, 还可以提高一阶精度^[10]。

同样以 12 kV、50 kA 高压限流熔断器短路试验为例, 根据试验等值数值计算电路列写电路方程式(5), 将 MOA 和熔断器的非线性模型带入到方程中, 用 Callahan 算法编程计算得到的熔断器熔断过电压波形如图 7 实线所示, 最大过电压 21.845 kV。实际试验的过电压波形如图 7 虚线所示。两者最大误差为 3.6%。

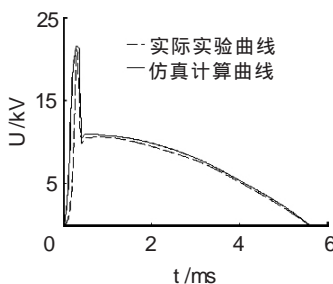


图7 Callahan 算法数值计算过电压波形

$$\begin{cases} (L_w + L_a) \frac{di}{dt} + L_i \frac{di}{dt} + i \left(\frac{R_{MOA2} + R_f}{R_{MOA2} \cdot R_f} \right) = U_s \\ (L_w + L_a) \frac{di}{dt} (i - i) R_{MOA1} = U_s \\ U = i \left(\frac{R_{MOA2} + R_f}{R_{MOA2} \cdot R_f} \right) \\ i|_{t=0} = 0, i|_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中 $U_s = U_m \sin(\omega t + \phi)$ 为电源电压。

4 结果与误差分析

MATLAB 动态仿真与 Callahan 数值计算两者得到的过电压波形与实际试验所得波形都比较吻合, 最大误差不超过 5%。两种方法各有特点: MATLAB 动态仿真建模简单直观, 不用手动编程可自动求解电路的各个状态变量, 但是受到软件自身条件的限制对于非线性的模拟与实际存在一定偏

差; Callahan 算法对电路参数的模拟更准确, 更接近实际, 但是参数计算建模、列写电路方程、编写修改程序工作量较大。

两种方法各有自己的误差来源: MATLAB 动态仿真的误差主要来源于熔断器非线性电阻的线性化处理以及为了使仿真顺利进行而并联的大电阻。Callahan 算法的误差主要来源于计算步长的选取, 步长太大或太小都有可能使误差增大。

5 结语

笔者分别采用 MATLAB 动态仿真和 Callahan 数值计算方法对高压限流熔断器的开断过电压进行了计算, 得到的过电压波形与实际熔断器短路试验开断过电压波形相当接近, 证明了这两种方法的正确性, 可用于其它非线性电路过电压的求解以及电磁暂态过程的计算。采用以上两种方法来预测高压限流熔断器的开断过电压情况, 可以替代熔断器短路试验, 减少人力物力的浪费, 避免实际短路试验时可能出现的各种危险事故的发生。

参考文献:

- [1] SCHAFFER J S. Current Limiting Fuse Theory and Operation [C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. IEEE PES, 2003(3): 1 232-1 234.
- [2] WILKINS R, SAENGJUAN T, SHIELDS L O. Short-circuit Test on Current-limiting Fuse Modeling of the Test Circuit[J]. IEE Proceedings, 1993, 140(1): 30-36.
- [3] 王季梅. 高压交流熔断器 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [4] CHEN Zhe, WEN Yuan-fang, LV Guang-qian. Improved Digital Modeling and Transient Calculation on Experimental Current Limiting Fuse Operation[C]// Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering. Beijing, Tsinghua University, 2005: 212-214.
- [5] 张志涌. 精通 MATLAB 6.5 版 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [6] 钟麟, 王峰. MATLAB 仿真技术与应用教程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [7] NAKAMURA S. Numerical Analysis and Graphic Visualization with MATLAB [M]. 梁恒, 刘晓艳译. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [8] DOMMEL H W. 电力系统电磁暂态计算理论 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [9] 文远芳, 梁毓锦, 招誉颐. 用 MOV 作变压器绕组内保护的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(2): 97-101.
- [10] 陈喆, 文远芳, 陆国俊, 等. 变压器励磁涌流的 Callahan 数值计算及动态仿真[J]. 高电压技术, 2004, 30(10): 12-14.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!