

Simulation of Arc Based on Mayr-Cassie Model under Restrike Overvoltage

Jun Chen¹, Lintao Xie¹, Jie Zhong², Fang Yang²

¹Chongqing Electric Power Company Maintenance Branch, Chongqing

²School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing

Email: zhongjiequ@gmail.com

Received: Jun. 10th, 2013; revised: Jul. 8th, 2013; accepted: Jul. 16th, 2013

Copyright © 2013 Jun Chen et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Arc simulation under overvoltage in switchgear has great significance to its design and retrofit. This article simulated the thyristor switched capacitor in transformer substation by EMTDC/PSCAD, in which, different way of restrike was considered and overvoltage waveform was obtained. The arc model based on Mayr-Cassie model is established in MATLAB/Simlink. Through the simulation of different way of overvoltage, the voltage curve, current curve of arc is obtained. The simultaneous result shows: the model could reflect the external character of arc restrike under overvoltage.

Keywords: Restrike Overvoltage; Arc Model; Simulation of Arc; External Characteristic Arc

重燃过电压下基于 Mayr-Cassie 模型的电弧仿真分析

陈俊¹, 谢林涛¹, 钟杰², 杨帆²

¹重庆市电力公司检修分公司, 重庆

²重庆大学电气工程学院, 重庆

Email: zhongjiequ@gmail.com

收稿日期: 2013年6月10日; 修回日期: 2013年7月8日; 录用日期: 2013年7月16日

摘要: 过电压下开关柜内电弧仿真对于开关电器设计与改造有重要意义。本文通过 EMTDC/PSCAD 对变电站投切并联电容器的仿真计算, 考虑了不同重燃方式的影响, 得到了开关柜内过电压波形。并在 MATLAB/Simlink 建立基于 Mayr-Cassie 模型的电弧模型, 通过对不同过电压下的电弧模拟仿真。得到了在过电压下电弧的电压、电流曲线。计算结果表明: 模型能良好的反应过电压下电弧重燃的外部特性。

关键词: 重燃过电压; 电弧模型; 电弧仿真; 电弧外部特性

1. 引言

电弧燃弧外部特性反应是反应电弧危害的重要指标。在重燃过电压下, 电弧的燃弧特性涉及电磁场、气流场、温度场等的耦合计算, 其燃弧过程极其复杂^[1]。在断路器开断并联电容器过程中, 电弧重燃引起的过电压常常高达正常工作电压的数倍, 其对电力系统的绝缘危害重大。

在电弧对电力设备危害仿真模拟的研究中, 从其外部特性入手, 研究其在过电压状态下的燃弧特性。研究开始从解析方程出发研究其电弧燃弧过程。20世纪70年代以后, 在气吹与纵吹电弧数学物理模型方面有所发展, 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。在80年代, 高压电弧数学模型有了进一

步的发展。K. Ragaller 等研究了轴向气吹 SF₆ 电弧在电流过零后的介质恢复特性。R. R. Mitch 等计算了强制对流所稳定的非正常二维电弧特性。在国内，电弧动态模型的研究起步较晚。到 80 年代初，国内才开始系统的电弧动态模型^[2-5]。

针对重燃过电压引起的电弧重燃外部特性，通过建立 Mayr-Cassie 的电弧模型，研究了投切并联电容器时开关内电弧重燃过电压倍数与波形。将过电压电压电流曲线作为电弧燃弧电路中的源，分析电弧的燃弧特性。本文得出的电力系统开关设备中的燃弧特性对设备制造与改进提供了参考。

2. 投切并联电容器操作过电压模型与计算

投切补偿电容器的过程中，低压侧为恒定负荷模型，串联电抗器的电抗率为 6%，电容器组等效为电容器，采用 Y 型不接地接线，且忽略放电线圈的作用，但是考虑了中性点与大地之间的杂散电容。其系统等接线图效图如图 1 所示。

简化系统中，采用如图 2 所示的等效的模型，其为三相不接地系统。其中中性点对地杂散电容为 C₀。

等效模型中，各电气设备参数采用变电站等效数值作为仿真基础，具体值如表 1 所示。

因为在 PSCAD 运行开始时，系统并没有进入稳态，所以设置延时模块为 0.3 s，等待系统进入稳态之后开始仿真，单相重燃时电压波形如图 3 所示。A 相熄弧时间为 0.3051 s，而重燃的时刻为 0.3148 s。

由图 3 可知，过电压的峰值电压达到了 32.7 kV，而经过变压器之后的低压侧电压在 10 kV，经过一段线路的线损以后电压降低到 9.86 kV 左右。可知，在单相重燃的情况下，过电压达到了额定电压的 3.31 倍。

与单相重燃的时刻不同，由于两相重燃在 0.2 s 时已经达到了稳态。所以，在初始化的延时模块中我们就不再延时 0.3 s，而是延时 0.2 s 即开始断路器的熄弧重燃仿真。两相重燃电压波形如图 4 所示。两相重燃时，A 相熄弧时刻在 0.20675 s，而重燃则发生在 0.21645 s，B 相熄弧发生在 0.20175 s，重燃则发生在 0.2095 s。

从图中可知，A 相过电压的峰值电压达到了 42.12 kV，其中 A 相为首开相，并在高幅值时产生单相重燃，

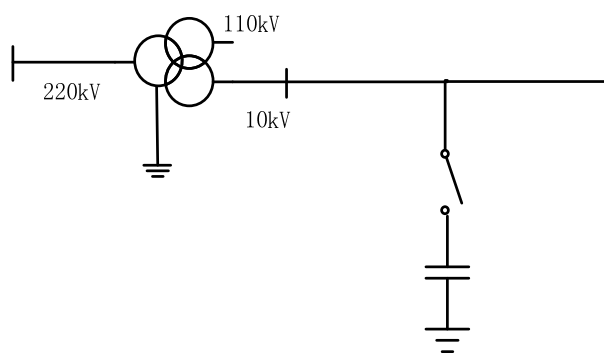


Figure 1. Simplified compensation capacitor system wiring diagram
图 1. 简化补偿电容器系统接线图

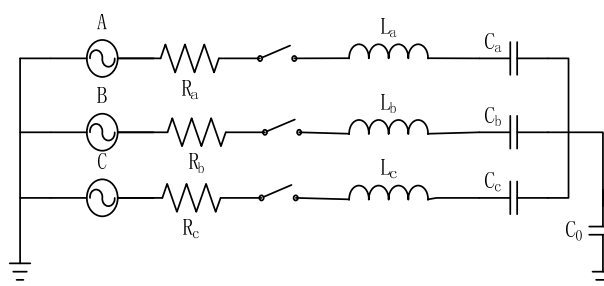


Figure 2. Equivalent compensation capacitor system diagram
图 2. 等效补偿电容器系统图

Table 1. Equipment electrical parameters
表 1. 主要设备电气参数

设备	参数
主变	U 12% = 12.35, U 13% = 21.0, U 23% = 22.0
电路电阻	R _a = R _b = R _c = 0.0029 Ω
电路电感	L _a = L _b = L _c = 2.24 mH
放电线圈	Z = 1600 Ω
并联电容器	C _a = C _b = C _c = 26.36 μ, C ₀ = 0.01 μF

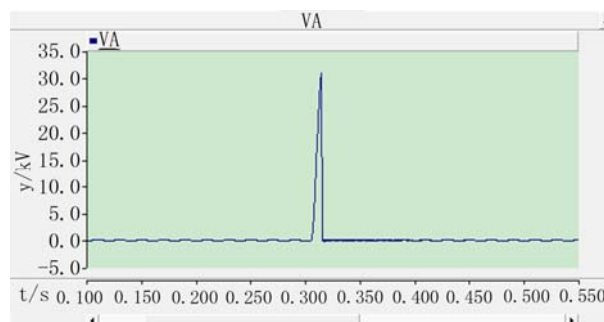


Figure 3. Circuit breaker single-phase restriking voltage waveform
图 3. 断路器单相重燃的重燃相恢复电压波形

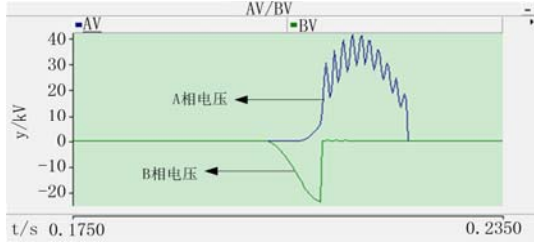


Figure 4. Circuit breaker two-phase restrike phase recovery voltage waveform

图 4. 断路器两相重燃的重燃相恢复电压波形

由于单相重燃回路震荡频率很高，中性点对地电压快速抬升，立刻导致 B 相重燃，由于 A 相与 B 相相位关系，在 A 相达最高幅值时，B 相还未达到最高幅值就发生了重燃。与单相重燃相同的是经过变压器之后的低压侧电压在 10 kV，经过一段线路的线损以后电压降低到 9.86 kV 左右。可知，在两相重燃的情况下，A 相过电压达到了额定电压的 4.27 倍。而 B 相的峰值达到了 -24.53 kV，同样地也能达到额定电压值的 2.49 倍。

3. Mayr-Cassie 电弧模型

3.1. 电弧数学模型

根据 Cassie 电弧模型的原理，从能量平衡方程出发^[6]

$$\frac{dq}{dt} = e \cdot i - P_{loss} \quad (1)$$

式子中， $\frac{dq}{dt}$ 是点位长度电弧弧柱中储能的变化， $e \cdot i$ 是单位弧长的输入功率， i 为电弧电流， e 为弧柱中的电场强度， P_{loss} 是单位弧长的功率损失。

上式改写为

$$\left(\frac{dq}{dg}\right)\left(\frac{dg}{dt}\right) = \frac{1}{P_{loss}^{-1}}\left(\frac{ge^2}{P_{loss}} - 1\right) \quad (2)$$

G 表示单位长度电导，进一步转化为

$$\frac{1}{g}\left(\frac{dg}{dt}\right) = \frac{1}{g \cdot P_{loss}^{-1}}\left(\frac{ge^2}{P_{loss}} - 1\right) \quad (3)$$

令 $\tau = \frac{g \cdot \left(\frac{dq}{dt}\right)}{P_{loss}}$ 上式变为

$$\frac{1}{g}\left(\frac{dg}{dt}\right) = \frac{1}{\tau}\left(\frac{e \cdot i}{P_{loss}} - 1\right) \quad (4)$$

根据 Cassie 假定，

$$\frac{dq}{dg} = \frac{Q_0 d(\pi r^2)}{\sigma_0 d(\pi r^2)} = \frac{Q_0}{\sigma_0} \quad (5)$$

r 为电弧半径， Q_0 为单位体积内电弧储能， σ_0 为电弧电导。

$$P_{loss} = (\pi r^2) P_0 \quad (6)$$

P_0 为单位体积电弧散发的功率。所以有，

$$\tau = (\pi r^2) \cdot \sigma_0 \cdot \left(\frac{Q_0}{\sigma_0}\right) / (\pi r^2) P_0 \quad (7)$$

$$\text{令 } U_0^2 = \left(\frac{g}{P_{loss}}\right)^{-1} = \left(\frac{\pi r^2 P_0}{\pi r^2 \sigma_0}\right) = \frac{P_0}{\sigma_0}$$

即得到 Cassie 电弧模型

$$\frac{1}{g}\left(\frac{dg}{dt}\right) = \frac{1}{\tau}\left(\frac{e^2}{U_c} - 1\right) \quad (8)$$

Mayr 模型考虑小电流情况电导变化，得出如下模型^[7]

$$\frac{1}{g}\left(\frac{dg}{dt}\right) = \frac{1}{\tau}\left(\frac{e \cdot i}{P_{loss}} - 1\right) \quad (9)$$

Cassie 模型主要适合于电流过零前的大电流燃弧期间，而 Mayr 模型适合于电流过零时的小电流期间，在不同时刻利用不同的电弧方程。电流过零前用 Cassie 形式，电流过零后用 Mayr 形式。从二者结合的方法，对本模型中采用 Mayr-Cassie 结合的电弧模型^[8]。

3.2. Simlink 电弧模型仿真重燃过电压

以 Simlink 中的相应模块建立如图 5 所示的电弧模块，其由压控电流源、微分方程编辑器、定值检测、电压测量、阶跃信号等模块构成。

建立断路器燃弧模块如图 6 所示，断路器前侧为 IEC 两参数法确定瞬态恢复电压。断路器后侧电路代表一条被短路输电线路。测量电弧电流和电弧电压并用示波器显示。

图中电源采用 PSCAD 中过电压波形倒入 Simlink 中作为外电源(Out_source)，其中电弧时间常数 $\tau = 0.3 \mu\text{s}$ ，散热功率 $P = 30.9 \text{ kW}$ ，电弧电导初始值 $g(0) = 1.0 \times 10^4 \text{ S}$ 。

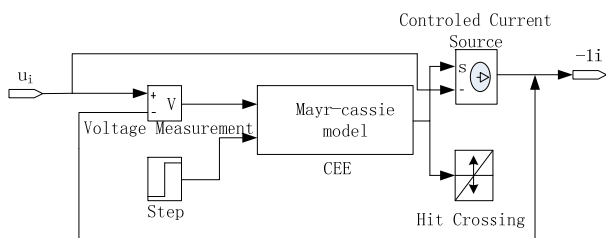


Figure 5. Implementation of Arc module
图 5. 电弧模块实现

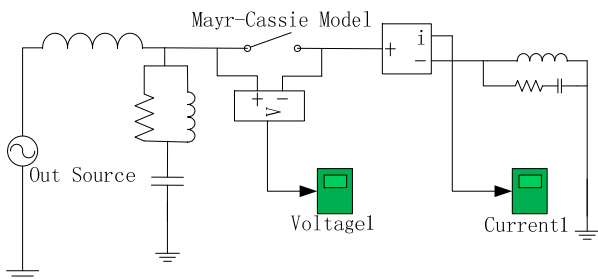


Figure 6. Implementation of external power source arc waveform
图 6. 外接电源电弧燃弧波形实现

模型中时间常数 τ 与起弧电压的 U_c 确定是仿真中比较重要的方面, 根据时间常数的定义: 时间常数 τ 是指当电弧温度下降到电流过零时的 $1/e$ 倍时所需的时间。记其为

$$\tau = \frac{\chi \cdot I_{arc \max}}{H_{arc}} \quad (10)$$

其中, $I_{arc \max}$ 为电弧电压幅值, 用短路电流代替, H_{arc} 为电弧长度, χ 为常数 2.85×10^{-5} 。

4. 结果与讨论

通过以上的模型, 我们以过电压波形作为外部源倒入电弧燃弧波形中。电路模型中的电压降由电路电阻和电弧分别承担。其中电弧电压降如图 7 所示。

在断路器开断过程中, 由于断路器的分离, 引起断路器两端电压逐渐升高, 在 0.3158 s 时, 断路器两端最高达到 28.1205 kV, 此时, 电弧 Mayr-Cassie 模型中发生了重燃击穿, 此时, 弧隙两端出现衰减很快的高频振荡恢复电压。其振荡频率由电路 L、C 参数决定, 图 7 中存在的时间在 3.0158 ms 至 0.32 ms 之间。电弧燃弧的条件是恢复电压高于介电介电强度。本例中发生了重燃。使断路器两端电压再次趋近于断路前。

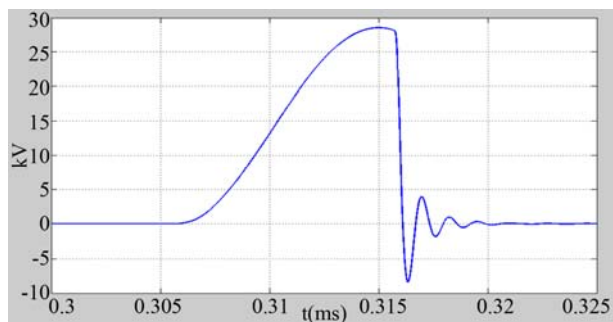


Figure 7. Single phase arc to restrike recovery voltage waveform
图 7. 单相重燃电弧恢复电压波形

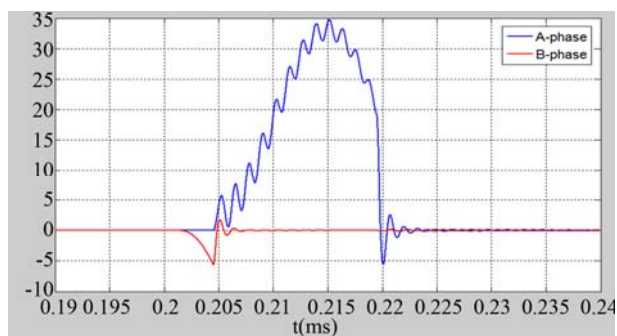


Figure 8. Two phase arc to restrike recovery voltage waveform
图 8. 两相重燃电弧恢复电压波形

如图 8 所示的 A/B 两相电弧重燃波形中, 对重燃熄灭起决定性作用的是重燃电弧散热功率 P 及电弧时间常数 τ 。A 相开断电流过零后, 由于电弧能量的扩散和温度下降, 电弧电阻 R 随之迅速增大, 时间常数 τ 是指当电弧温度下降到电流过零时的 $1/e$ 倍时所需的时间。 τ 越小, 电弧电导率 σ 下降越快, 燃弧后残余电流就越小, 就表示越难发生热击穿, 电弧容易熄灭。

5. 结语

过电压下开关设备燃弧特性对电力设备设计及安全有重要意义。电弧燃弧过程涉及热场、电磁场、粒子流场的复杂耦合。对开关设备而言, 其外部特性则具有更大意义。本文从仿真分析了过电压下开关设备的燃弧电压外部特性。对工程实际应用具有借鉴意义。

参考文献 (References)

- [1] 王锐. 降低配网防雷间隙建弧率及电弧重燃率的方法研究 [D]. 广西大学, 2008.
- [2] E. Hanninen, M. Lehtonen. Characteristics of earth faults in electrical distribution networks with high impedance earthing. *Electric Power Systems Research*, 1988, 44(3): 155-161.
- [3] U. Habedank. On the mathematical description of arc behaviour

- in the vicinity of current zero. *etzArchiv Vot*, 1988, 10(11): 339-343.
- [4] 王巨丰, 朱立波, 陆俊杰等. 基于改进MAYER电弧模型的间隙防雷仿真分析[J]. *广西电力*, 2008, 5: 50-64.
- [5] J. W. McBride, K. Pechrach and P. M. Weaver. Arc motion and gas flow in current limiting circuit breakers operating with a low contact swishing velocity. *IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies*, 2002, 25(3): 427-433.
- [6] H. Mokhtari, M. Hejri. A new three phase time-domain model for electric arc furnaces using MATLAB. *IEEE Conference on Transmission and Distribution*, 6-10 October 2002, 3: 2078-2083.
- [7] K. J. Tseng, Y. Wang. Development of a dynamic model of electric arc for Power electronics simulations. *IEEE Conference on Industry Applications*. 6-10 October 1996, 2173-2180.