

[开关设备]

VFTO计算中隔离开关电弧多次重燃模型的研究

文/贵州大学电气工程学院 胡 智 刘晓波 郭太平
贵州电力科学研究院 马晓红
国网四川省电力公司内江供电公司 朱红梅

隔离开关的操作是快速暂态过电压（VFTO）的主要产生原因，如何对隔离开关更精确的建模是提升VFTO仿真精度的关键。在基于指数时变电弧模型的基础上，搭建了动态电弧多次重燃模型，结合某500 kV GIS站的实际运行方式，开展了VFTO计算中隔离开关电弧多次重燃模型的研究。结果表明隔离开关多次重燃模型比指数时变电弧模型产生的VFTO幅值更高，VFTO的频率分量也更为丰富，更能反映VFTO的高幅值、高频率的特点。因此，建议VFTO计算中隔离开关的建模应考虑电弧的重燃影响。

气体绝缘变电站（GasInsulated Substation, GIS）具有占地面积小，运行可靠性高，易于维护等优点，在220 kV及以上电压等级的电网中得到广泛应用。但是在GIS运行过程中，断路器、隔离开关和接地开关的分合闸都会形成快速暂态过电压（Very Fast Transient Overvoltage, VFTO），其中，隔离开关操作是其产生的主要原因。因此，隔离开关仿真模型的研究已成为VFTO计算不可或缺的一部分。

在传统VFTO计算中使用最多的隔离开关主要有2种，分别是定值电阻模型、指数时变电弧模型。近年来，某文献提出了一种虚拟电感电弧模型，相比于时变电弧模型和定值电阻模型，考虑了弧道电感特性；某文献针对时变电弧未考虑熄弧阶段电弧电阻的变化趋势的问题，提出用动态混合电弧模型来模拟隔离开关电弧的开断过程。在基于指数时变电弧模型的基础上，提出了一种适用于VFTO计算的隔离开关多重击穿动态电弧模型。

隔离开关电弧模型

1. 传统隔离开关模型

如上述，VFTO计算中，常采用定值电阻模型和指数时变电弧模型。其中，定值电阻模型是指在开关极间插入0.5 μ H的电感和2 Ω 的电阻的串联电路，如图1所示。



图1 定值电阻模型

而指数时变电弧模型是将电弧等效为时变电弧，用指数函数可近似表示为

$$R(t) = R_0 e^{-(t/T)} + R_1 \quad (1)$$

式中， $R_0 = 1\,012\ \Omega$ ； $T = 1\ \text{ns}$ ； $R_1 = 0.5\ \Omega$ 。

分段电弧模型中不考虑电流衰减为零后极间的恢复电压，在熄弧过程中，电弧电阻以指数形式上升，即

$$R(t) = R_{10} e^{t/T} + R_1 \quad (2)$$

式中， $T = 1\ \text{ns}$ ； R_{10} 为电弧熄弧临界点弧道电阻； $R_1 = 0.5\ \Omega$ 。

指数时变电阻模型在仿真中的搭建模型如图2所示。



图2 指数时变电阻模型

图2中，电弧电阻模型为自定义电弧电阻。

2. 隔离开关多次重燃模型

采用的隔离开关多次重燃模型是在指数时变电阻模型的基础上，考虑了开关负荷侧的恢复电压，以弧隙上的恢复电压大于介质绝缘恢复强度作为击穿判据；电流幅值趋近于零作为熄弧判据。其中，弧隙上的恢复电压为隔离开关两端的电压差，即电源工频电压与上一次熄弧时刻的电压差：

$$\Delta U = U_1 \cos(\omega t + \varphi) - U_2(t) \quad (3)$$

式中， U_1 表示工频电压的峰值； $U_2(t)$ 为上一次熄弧时刻开关负荷侧的残压。

由某文献可知开关触头间的击穿电压和时间

呈线性关系变化，因此，临界击穿电压可由式(4)来表示。

$$\begin{cases} \text{合闸时: } U_3(t) = vtE \\ \text{分闸时: } U_3(t) = (d - vt)E \end{cases} \quad (4)$$

式中， d 为隔离开关两端电容距离； v 为隔离开关触头的运动速度； t 为隔离开关触头的运动时间； E 为开关间隙单位长度的耐受电压。

由此搭建的隔离开关多重击穿动态电弧模型如图3所示。

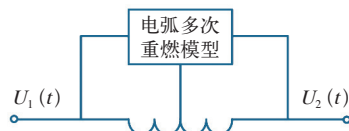


图3 隔离开关多重击穿动态电弧模型

VFTO的仿真建模与分析

1. 仿真建模

某500 kV高压变电站，高压配电装置采用GIS，出线侧布置避雷器和线路终端设备。

500 kV高压侧采用二分之三接线模式，每段母线各安装有避雷器。电气主接线图如图4所示。

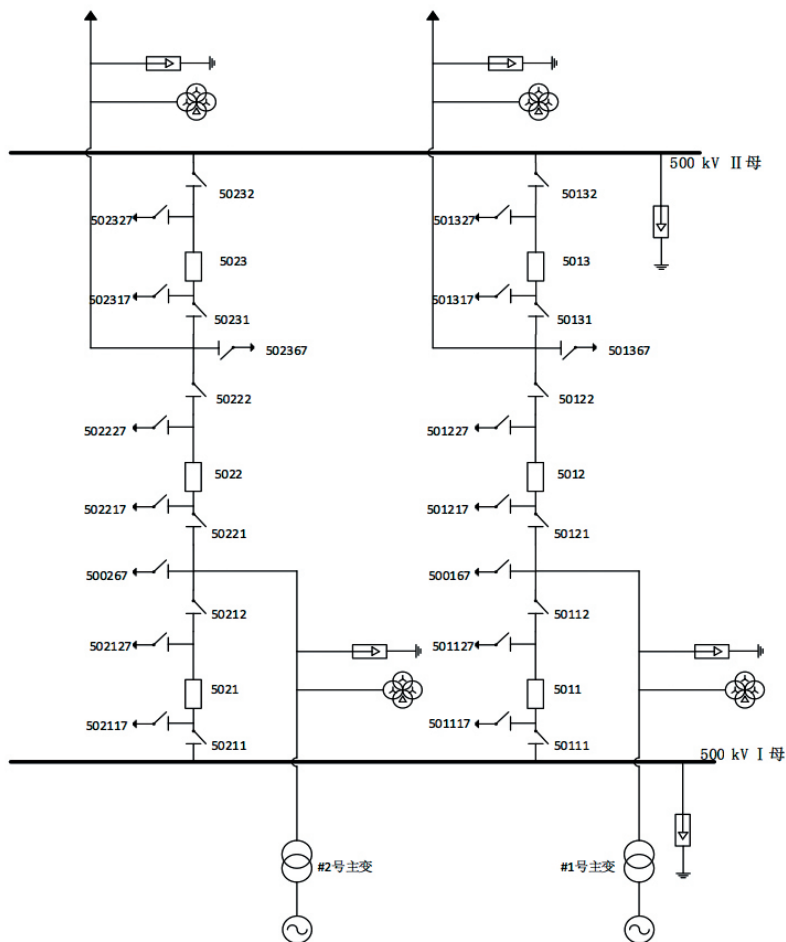


图4 某500 kV GIS变电站电气主接线图

依据上图,在EMTP-ATP仿真软件中,仿真步长选择1 ns, GIS站各关键设备的仿真模型的选取及参数的选择原则如下表所示。

表1 500 kV GIS中内部设备仿真模型与参数选择

元件	说明	设备参数
变压器	入口电容/pF	5 000
断路器	分闸 断口的等效串联电容/pF	350
	合闸 等效为母线的一部分	-
隔离开关	分闸 对地电容/pF	240
	燃弧 动态电弧电阻	$R(t) = R_{10}e^{v_T} + R$
接地开关	合闸 对地电容/pF	125
	对地电容/pF	240
GIS管线	波阻抗/ Ω	63
套管	等效为一段母线与对地电容/pF	320
避雷器	对地电容/pF	19
波速	/ (m/ μ s)	296

2. 仿真分析

依据实际运行经验,本次仿真选择5013断路器合闸操作中,5013断路器、50131、50132隔离开关断开,合闸50131的案例,VFTO监测点选为#1号主变压器负荷侧。计算过程中,电压采用标么值,基准电压采用系统运行最高相电压最大值,即。隔离开关操作时,考虑最严重的情况,负荷侧残压以-1.0 p.u表示。为简单起见,只考虑一次VFTO的波形,测量的指数时变电弧模型和本文采用的电弧多次重燃模型产生的VFTO波形图如图5和图6所示。

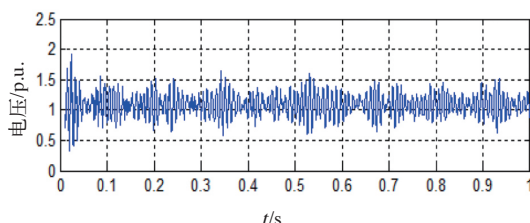


图5 时变模型单次击穿VFTO波形图

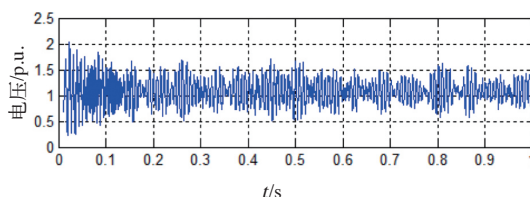


图6 隔离开关多次重燃的一次VFTO波形图

由以上可知,指数时变电弧模型与多次重燃模型产生的VFTO波形基本吻合,但是时变模型

的VFTO幅值为1.91 p.u,略低于多次重燃模型的2.09 p.u。分析主要原因,多次重燃模型考虑了隔离开关两侧恢复电压的影响,使得电阻上升速率更快,因而VFTO的幅值更高。将其进行FFT分析可得图7和图8。

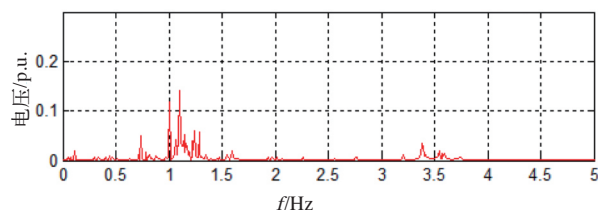


图7 FFT分析时变模型VFTO波形图

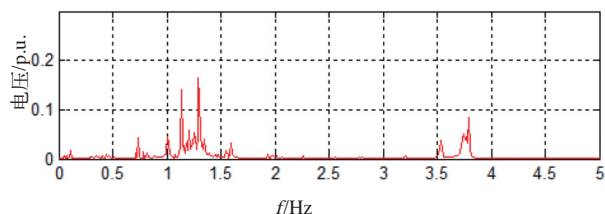


图8 FFT分析多次重燃的一次VFTO波形图

由上可知,多次重燃模型比时变模型的VFTO频率分量更加丰富,在35~40 MHz频率间较为明显。分析原因,多次重燃模型考虑了开关触头运动速度的影响,使得VFTO的脉冲波在GIS管道内得折反射更为剧烈。因此,多次重燃模型比时变电弧模型更能反映VFTO的高幅值、高频率的特点,建议VFTO计算中隔离开关的建模应考虑电弧的重燃影响,在实际中GIS站的设计人员也能为VFTO的危害做好预防准备。

结束语

在指数时变电弧模型的基础上,搭建了动态电弧多次重燃模型,结合某500 kV GIS站的实际运行方式,开展了VFTO计算中隔离开关电弧多次重燃模型的研究。结果表明:

1) 隔离开关多次重燃模型与指数时变模型产生的VFTO波形基本吻合,可用于VFTO的建模仿真。

2) 隔离开关多次重燃模型比指数时变模型产生的VFTO幅值更高,VFTO的频率分量也更为丰富,更能反映VFTO的高幅值、高频率的特点。因此,建议VFTO计算中隔离开关的建模应考虑电弧的重燃影响。**EA**

(收稿日期:2016.10.14)

(编辑:刘群点)