

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2021.0002.013

GIS 变电站中电弧重燃对 VFTO 的影响研究*

胡 瑞¹, 欧美英¹, 朱金枝²

(1. 滁州学院 机械与电气工程学院, 安徽 滁州 239000; 2. 滁州现代模具股份有限公司, 安徽 滁州 239000)

摘 要:针对目前普遍使用的电弧模型无法完整地模拟电弧单次放电的全程,进而影响到特快速的暂态过电压(Very Fast Transient Overvoltage, VFTO)的计算与仿真的情况,提出了一种单次电弧击穿模型;同时联合重燃理论设计了一种电弧重燃模型;电弧单次放电全过程分为即将击穿、稳定燃烧与熄弧 3 个过程,该单次电弧击穿模型综合考虑了这 3 个过程,在每一过程分别构建相应模型模拟相对应的电弧状态,各个状态的过渡通过追踪电弧电流来完成;同时电弧重燃模型可以准确地模拟电弧的实际状态;通过仿真,验证了该模型的实用性,且可以发现在重燃模型下的 VFTO 的波形显著差异于单次电弧击穿模型下的情况。

关键词:特快速暂态过电压;电弧模型;重燃

中图分类号: TM743

文献标志码: A

文章编号: 1672-058X(2021)02-0082-08

0 引 言

目前, SF6 气体绝缘变电站(Gas Insulation Substation, GIS)已被广泛使用。隔离开关为 GIS 里广泛使用的一种电气设备,因隔离开关无专门的灭弧设备,灭弧能力不强,且动触头运动速率慢,故在分合闸时,动静触头间隙之间会发生重燃现象。此时,电弧放电会引起振荡,这种振荡频率极高,在极短的时间内,形成阶跃性质的行波电压。此行波在 GIS 和与 GIS 相连的设备间传播,在阻抗骤变处就会发生折射和反射,产生畸变的波形,造成抖波前的过电压,这就是特快速暂态过电压(Very-Fast-Transient over Voltage, VFTO)^[1]。

GIS 的本体和与 GIS 联结的设备的绝缘性能可能会因为 VFTO 的传播而造成损害,且由于 VFTO

的特性,易产生电磁干扰,进而可能会影响相关二次设备^[2],GIS 的故障率会随电压等级的提高而增加。

国内外对 VFTO 的探究热点主要聚焦在 GIS 中 VFTO 的计算、产生机理、限制措施等方面。研究方法主要是实验室模拟,在 GIS 变电站进行实际测量,使用现代计算机仿真计算。通过仿真软件在计算机上进行仿真计算是国内外研究者大多采用的一种方法。通过仿真软件来探究 VFTO 的前提条件是建立准确的电弧模型。阅读相关文献如文献[3-11]可知,部分学者使用电磁暂态仿真软件来研究 VFTO 时,没有考虑完整的电弧单次放电全过程,电弧的熄弧阶段很少被考虑到。由图 1 可以发现,单次电弧放电全过程包含 3 个状态,只考虑即将击穿状态与稳定燃烧状态,是无法建立准确的电弧模型的,熄弧状态也需要被考虑到。故本文将综合考虑电弧发展的 3 种状态,设计了一种单次电弧击穿模型,在该单

收稿日期:2020-04-19;修回日期:2020-06-05.

* 基金项目:国家自然科学基金(11105002);重大创新平台及高校创新人才团队(2017A053).

作者简介:胡瑞(1991—),男,安徽淮南人,助教,硕士研究生,从事高电压与电磁暂态研究.

次击穿模型的基础上联合重燃理论,设计了一种重燃模型;并借助 ATP-EMTP 软件对设计的电弧模型进行了仿真分析。

1 电弧模型构建方法研究

1.1 定值电阻模型

早期因对电弧的机理了解不深,常用一电阻 R ($2 \sim 5$) Ω 串联一理想开关来模拟电弧的单个放电过程,这就是定值电阻模型。随着对电弧机理认识的加深,该模型有了一定的改进,使用电感 L 和电阻 R 串联来模拟电弧的单个放电过程($R=2\Omega, L=0.5\mu\text{H}$)。可以知道,电弧过程是相当复杂的非线性过程,定值电阻模型并不能准确模拟电弧的状态,具有一定误差,只是在估算时使用。

1.2 时变电阻模型

有学者根据电弧的电阻会随时间迅速变化的特性,提出了时变电阻模型。目前,时变电阻模型有指数模型和双曲线模型。

1.2.1 指数电阻模型

顾名思义,指数电阻模型模拟电弧的发展过程是通过指数函数来实现的。具体可用式(1)表示:

$$R(t) = R_0 e^{-\left(\frac{t}{T}\right)} + R_a \quad (1)$$

式(1)中: $R_0=10^{12}\Omega, T=\ln s, R_a=0.5\Omega$ 。图1所示即为电弧单个放电全过程。

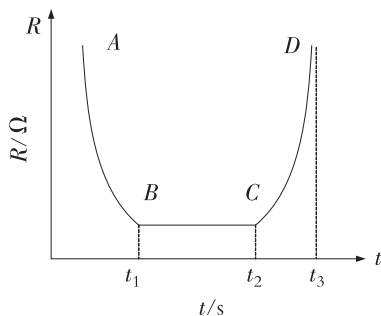


图1 电弧单个放电全过程

Fig. 1 The whole process of a single arc discharge

由图1可以看出一个完整的电弧放电过程主要由3个状态组成。以电弧放电时间为顺序,依次为AB段(即将击穿阶段)、BC段(稳定燃烧阶段)、CD段(熄弧阶段)。式(1)主要考虑了AB段(即将击

穿阶段),BC段(稳定燃烧阶段)与CD段(熄弧阶段)考虑的并不是很充分。故该模型并没有考虑完整的电弧单个放电全过程,且可以发现该模型只与时间有关。所以,其仍然无法准确模拟电弧放电全过程。

1.2.2 双曲线电阻模型

该模型具体可用式(2)表示:

$$R = 2Z \left(\frac{t_\delta}{t} - 1 \right), 0 < t < t_\delta$$

$$R = 0, t > t_\delta \quad (2)$$

式(2)中, Z 为GIS的母线波阻抗,间隙击穿一次所用时间用 t_δ 表示。根据文献[8]可以得出 t_δ 的具体表达式,如式(3)所示:

$$t_\delta = (1 \sim 1.5) / P \quad (3)$$

式(3)中,GIS中的气体压强用 P 表示(对 SF_6 气体来说, $P=1 \sim 1.5$ Mpa)。根据式(2)和式(3)可以发现,该模型引入了系数 Z 和 t_δ ,不再是只考虑时间因素对电弧的影响,也考虑了器件本身特点对电弧的影响,故该模型有了一定的进步。根据式(2)可以发现,该模型主要考虑了电弧的即将击穿阶段与稳定燃烧阶段,当 $t < t_\delta$ 时,表示即将击穿,此时 R 为 ∞ ;当 $t > t_\delta$ 时,表示稳态燃烧,此时 R 为0。由此,可以发现该模型虽有改进,但仍未考虑完整的电弧放电过程。

1.3 Mayr 电弧模型

当电流过零时,Mayr模型可以更好地模拟电弧放电过程。具体可用式(4)表示:

$$R_{\text{arc}} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_{\text{arc}}} \right) = \frac{P - N_0}{Q_0} = \frac{1}{\theta_2} \left(\frac{P}{N_0} - 1 \right) \quad (4)$$

其中, $N_0=30.9$ kW, $\theta_2=0.3 \times 10^{-6}$ s。

1.4 Cassie 电弧模型

在电流较大环境下,Cassie模型可以更好地模拟电弧放电过程。具体可用式(5)表示:

$$R_{\text{arc}} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_{\text{arc}}} \right) = \frac{E^2 - N_c}{q_c} = \frac{N_c}{q_c} \left(\frac{E^2}{\mu_c N_c} - 1 \right) = \frac{1}{\theta_1} \left(\frac{E^2}{E_0^2} - 1 \right) \quad (5)$$

其中, $\theta_1=1.2 \times 10^{-6}$ s。

上述两种电弧模型更多地考虑了电弧内部因素对电弧放电过程的影响,可以更好地模拟电弧放电全过程。

1.5 电弧单次击穿模型构建

通过以上分析,考虑完整的电弧放电全过程,设计了一种单次电弧击穿模型。该模型综合考虑了电弧放电的各个状态,考虑每段的放电特性,使用不同的电弧模型。在即将击穿阶段,使用时变电阻模型;在稳态燃烧阶段,使用 Cassie 电弧模型;在熄弧阶段,使用 Mayr 电弧模型。

由图 1 可以发现,在 AB 段(即将击穿阶段),电弧的电阻正在快速下滑,电弧的电流在快速增长。在 BC 段(稳定燃烧阶段),电阻维持不变。在 CD 段(熄弧阶段),电阻又快速增长,导致此阶段的电流又快速减少。可以发现,电弧在上述各状态之间过渡时,必然伴随着电流的变化,故电弧各个阶段的过渡可以通过追踪电弧电流来实现。首先,可设变量 I_0 (令初值 $I_0=0$) 和 I ,每进行一步仿真,记录该仿真步长下的电弧电流值,将此次步长得到的值赋给 I ,上一次的值赋给 I_0 。若 $I>1.1I_0$,说明电弧的电流在逐渐增长,可知,此时处在 AB 段(即将击穿阶段);若 $0.9I_0<I<1.1I_0$,表示的是电弧的电流维持不变,可知处于 BC 段(稳定燃烧阶段),虽电阻维持稳定,但联结的电网也会影响电流,所以取阈值 $1.1I_0$ 和 $0.9I_0$;若 $I<0.9I_0$,表示电弧的电流在逐渐减小,可知,此时处于 CD 段(熄弧阶段)。图 2 为该模型的程序流程图。

1.6 电弧重燃模型构建

重燃是研究电弧必然要考虑的一个问题(图 3),也是造成 VFTO 的主要原因。目前,弧隙介质强度恢复学说作为一种重燃理论使用较为广泛。该理论认为,造成重燃的原因可能是间隙恢复电压大于介质的绝缘恢复强度。由文献[12]可以得到,短间隙条件下 SF6 气体击穿电压(kV)为

$$U_0 = 88.5\delta d + 0.38 \quad (6)$$

式(6)中, d 表示开关两级间距(cm), δ 表示空气相对密度。

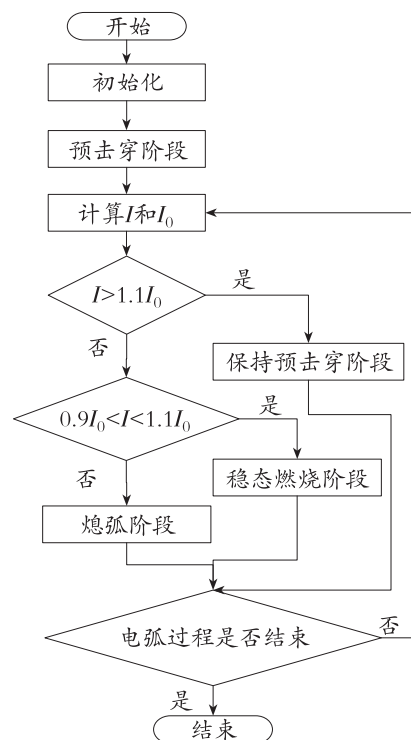


图 2 单次电弧击穿流程图

Fig. 2 Flow chart of single arc breakdown

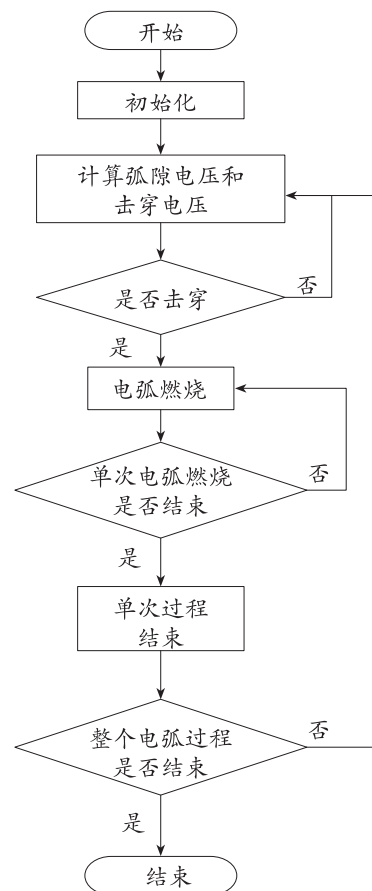


图 3 电弧重燃流程图

Fig. 3 Flow chart in arc re-ignition

2 1 000 kV GIS 变电站仿真模型的构建

在仿真软件 ATP-EMTP 中构建某 1 000 kV GIS 变电站模型来验证设计的电弧模型。该变电站的出线端使用线路终端设备且并联电抗器,高压侧采取双母线分段接线方法,另外在分段母线处安装了避雷器。对该 GIS 变电站,规定其运行方式为使用 1# 主变时,线路 2L 的电由母线直接送达,断路器已经断开,隔离开关可以进行操作。图 4 即为该运行方式下的等效计算电路。

在该模型中可取相电压的峰值作为电压的基准值,此时有

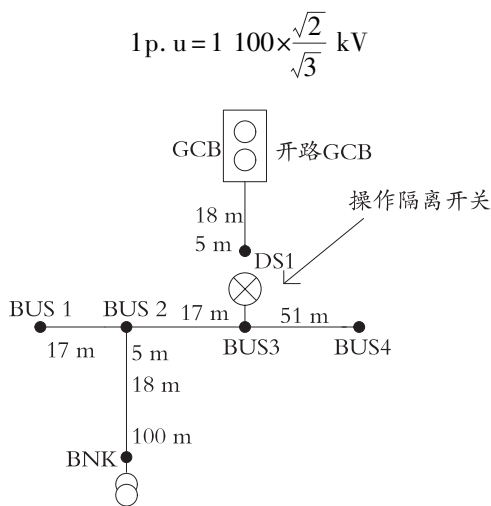


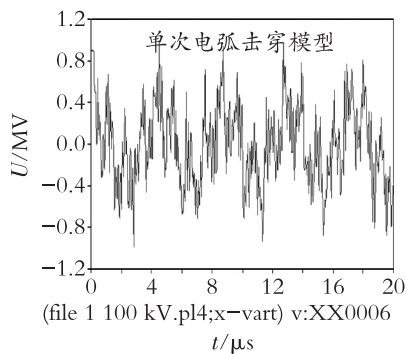
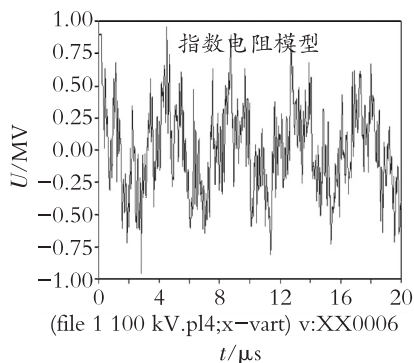
图 4 等效计算电路

Fig. 4 Equivalent computing circuit

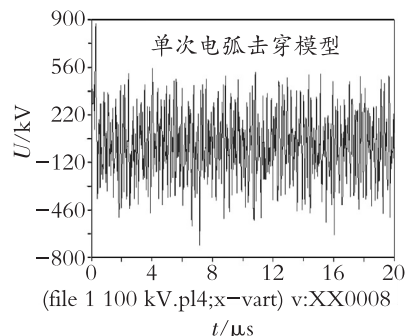
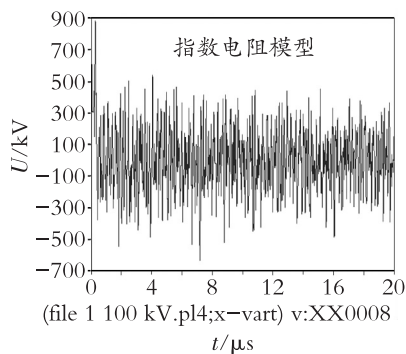
3 两种电弧模型下的 VFTO 的仿真分析

图 5 为两种电弧模型下各观测点的 VFTO 模型。由图 5 可以发现,两种电弧模型在各观测点的 VFTO 波形的变化趋向基本上是一致的,在幅值处两种电弧模型略有区别。单次电弧击穿模型在各观测点的 VFTO 波形的幅值相较于指数模型较大,波形更陡。可能是因为单次电弧击穿模型引入电弧电流这个参数来监测电弧各阶段的变化,故电流变化时,电弧电阻也将实时变化。但是,指数电阻模型中

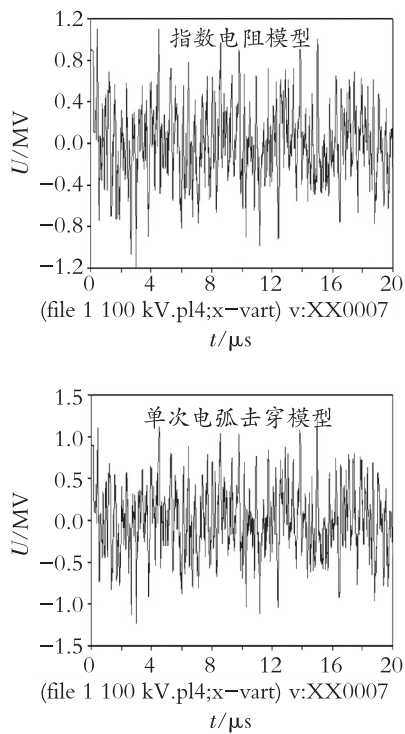
电弧电阻只与时间有关。且单次电弧击穿模型考虑了电弧的熄弧阶段,相较于时变电阻模型更加完整地考虑了电弧的放电过程,可以更好地模拟电弧现象。



(a) 变压器侧隔离开关上波形



(b) 操作隔离开关上波形



(c) 母线端部 BUS1 上波形

图 5 两种电弧模型下各观测点的 VFTO 波形

Fig. 5 VFTO waveform at each observation point under two arc models

表 1 为两种电弧模型在各观测点 VFTO 波形的极值。可以发现在操作隔离开关处两种模型的极值几乎一致,且 VFTO 波形变化趋势也几乎一致,这说明在操作隔离开关处两种模型模拟效果相同。在变压器侧隔离开关与母线端部 BUS1, 单次电弧击穿模型下的 VFTO 波形的极值大于指数电阻模型下的该处极值。此时,因为本文设计的电弧模型综合考虑了电弧的 3 个阶段,且电弧电阻严格随着电弧电流变化,造成了两种模型下关键设备处的极值差别。

表 1 两种电弧模型在各观测点 VFTO 波形的极值

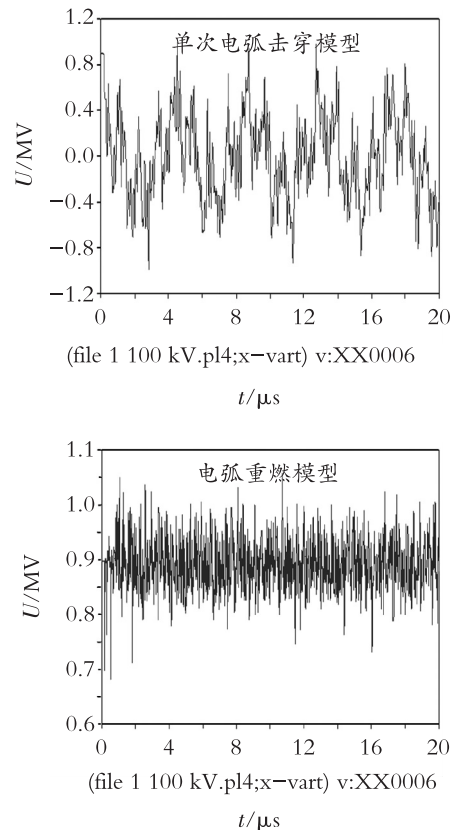
Table 1 The extreme values of the VFTO waveform of the two arc models at each observation point

各关键设备处极值/p.u	指数电阻模型	电弧单次击穿模型
变压器侧隔离开关	1.072	1.225
操作隔离开关	1.001	1.002
母线端部 BUS1	1.325	1.526

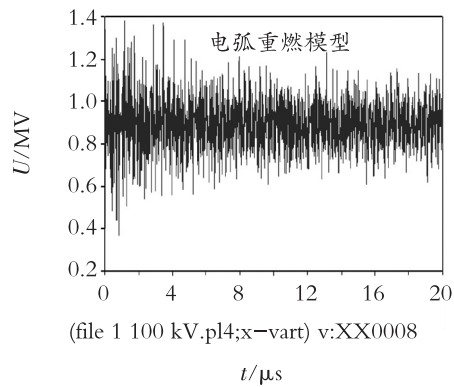
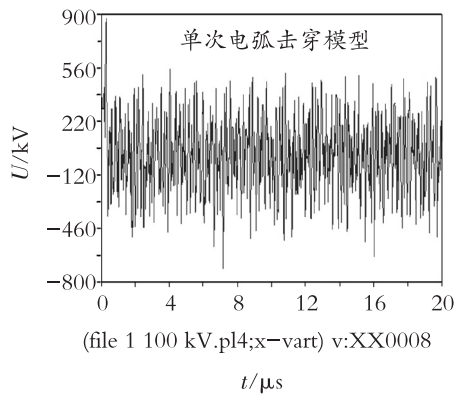
4 电弧重燃模型下的仿真分析

研究电弧,必然要考虑重燃。在上述单次电弧击穿模型基础上联合重燃理论,设计了电弧重燃模型。

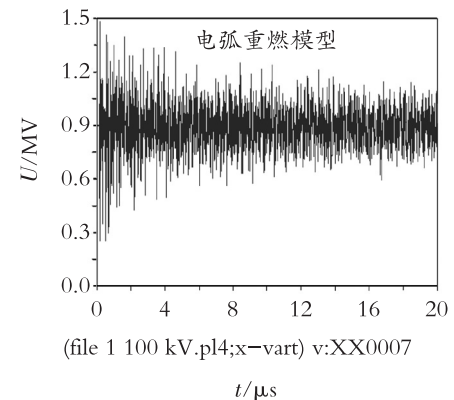
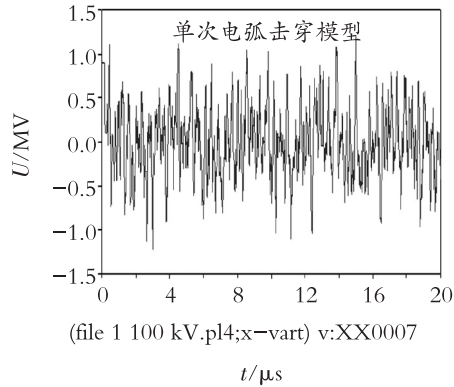
通过图 6 可以发现,考虑重燃影响后,两种电弧模型在各观测点 VFTO 的变化趋向是存在着显著差异的。表 2 是两种电弧模型在各观测点的 VFTO 的极值。通过表 2 可以发现,在重燃模型下,母线端部 BUS1 和操作隔离开关的 VFTO 的极值是远远高于单次电弧击穿模型下的。此种原因可能是单次电弧击穿模型只考虑了一次击穿,而后不会根据隔离开关触头两侧的电势判断是否还会发生击穿,而重燃模型会根据判据实时分析目前是否会发生重击穿,因此存在多次击穿可能。多次击穿导致电弧电压的急剧变化,进而导致电流、电阻的剧烈变化。由此造成了两种电弧模型在各观测点的 VFTO 的波形变化趋势存在着显著差异。



(a) 变压器侧隔离开关上波形



(b) 操作隔离开关上波形



(c) 母线端部 BUS1 上波形

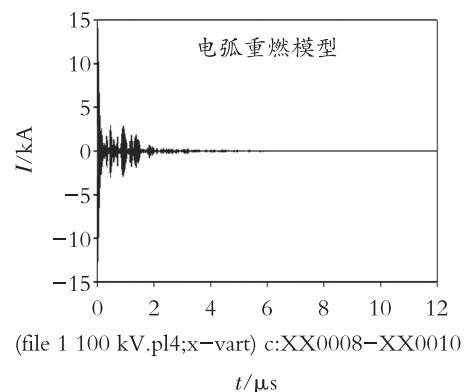
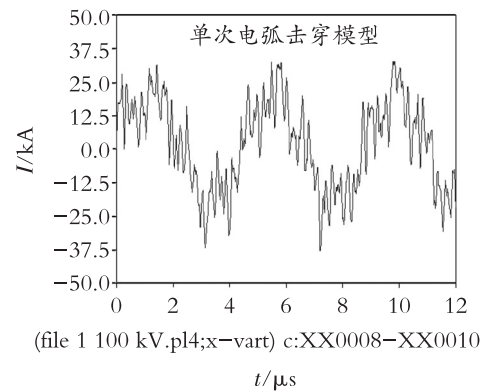
图 6 两种电弧模型下各观测点的 VFTO 波形
Fig. 6 VFTO waveform at each observation point under two arc models

表 2 两种电弧模型在各观测点 VFTO 的极值

Table 2 The extreme values of VFTO of two arc models at each observation point

各关键设备处极值/p.u	电弧重燃模型	单次击穿电弧模型
变压器侧隔离开关	1.181	1.225
操作隔离开关	1.536	1.002
母线端部 BUS1	1.648	1.526

图 7 为在两种电弧模型下观测点的电弧电压、电流波形。由此可以发现,在重燃模型下观测点的电流波形变化较为剧烈,在单次电弧击穿模型下观测点电流衰减较慢。如图 7 所示,在重燃模型下观测点的电流存在多次过零,而在单次电弧击穿模型下观测点的电流没有过零。两种电弧模型下,观测点的电弧电压差异也较大。在单次电弧击穿模型下,观测点的电弧电压随着间隙的击穿电压很快为零。而在重燃模型下,观测点的电弧电压因为重击穿的影响,会发生剧烈波动。



(a) 电弧电流

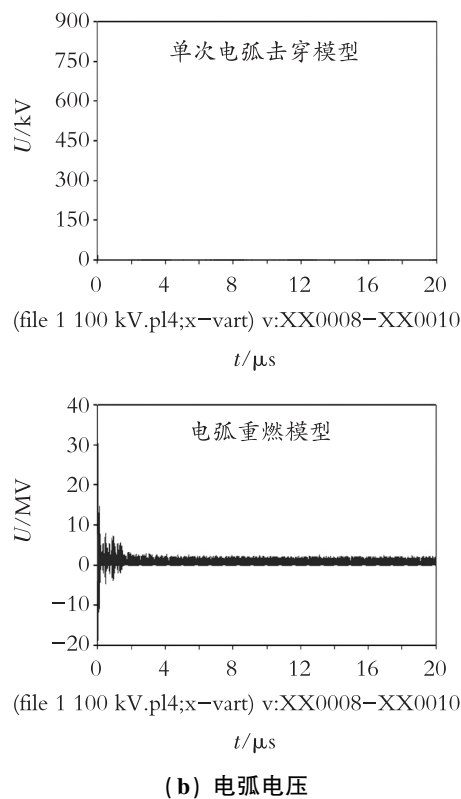


图 7 两种电弧模型下观测点电弧电流与电压的波形

Fig. 7 Waveform of arc current and voltage observed under two arc models

5 结束语

设计了一种单次电弧击穿模型,且在该模型的基础上联合重燃理论,设计了电弧重燃模型。通过仿真分析,可以得出:本文设计的单次电弧击穿模型是适用的;电弧重燃模型在各观测点的 VFTO 波形与单次击穿模型存在显著差异,只考虑单次击穿无法准确模拟电弧全过程。通过阅读相关文献可以发现,其他学者在研究 VFTO 时采用分段电弧模型,与本文设计的电弧模型相比,往往很少考虑电弧的熄弧阶段,故无法准确模拟电弧的放电全过程,而本文设计的电弧模型,则综合考虑了电弧放电的全过程。

随着对电弧机理认识的加深,建立的模型就能更加符合电弧的实际状态。电弧是一个很复杂的过程,电弧内部因素对电弧有着重要的影响。日后更多考虑电弧内部因素的相关模型将会建立,可以更加准确地模拟电弧。

参考文献 (References):

[1] 李云阁. ATP-EMTP 及其在电力系统中的应用[M].

北京:中国电力出版社,2016

LI Y G. ATP-EMTP and Its Application in Power System[M]. Beijing: China Power Press, 2016(in Chinese)

[2] 徐敏. 特高压交流输电的建设及发展意义探寻[J]. 中国市场,2016(2):61—62

XU M. Exploration of the Construction and Development Significance of UHV AC Transmission[J]. China Market, 2016(2):61—62(in Chinese)

[3] 龙贤忠,刘晓波,曾鹏,等. VFTO 中隔离开关的多重击穿模型研究[J]. 贵州电力技术,2016,19(4):17—20

LONG X Z, LIU X B, CENG P, et al. Study on Multiple Breakdown Model of Isolating Switch in VFTO [J]. Guizhou Power Technology, 2016, 19 (4): 17—20 (in Chinese)

[4] 林莘,王娜,徐建源. Arcing Model of a Disconnecter and Its Effect on VFTO[J]. Plasma Science and Technology, 2013,15(7):644—647

LIN X, WANG N, XU J Y. Arcing Model of a Disconnecter and Its Effect on VFTO[J]. Plasma Science and Technology, 2013,15(7):644—647(in Chinese)

[5] 万亦如,杜鹃,刘庄. 隔离开关多次重燃的 VFTO 计算模型[J]. 浙江电力,2014,33(2):22—25

WAN Y R, DU J, LIU Z. VFTO Calculation Model for Multiple Rekindling of Disconnectors[J]. Zhejiang Electric Power, 2014,33(2):22—25(in Chinese)

[6] 林莘,王娜,徐建源. 动态电弧模型下特快速瞬态过电压特性的计算与分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):157—164

LIN X, WANG N, XU J Y. Calculation and Analysis of Ultra-fast Transient Overvoltage Characteristics under Dynamic Arc Model [J]. Proceedings of the Chinese Journal of Electrical Engineering, 2012,32(16):157—164(in Chinese)

[7] 王娜,林莘,徐建源,等. GIS 中隔离开关电弧模型对快速暂态过电压的影响[J]. 电工电能新技术,2013,32(1):85—88

WANG N, LIN X, XU J Y, et al. Influence of Arc Model of Isolating Switch on Fast Transient Overvoltage in GIS[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013,32(1):85—88(in Chinese)

[8] LIN X, WANG N. Dynamic Arcing Model of Switching and Its Effect on VFTO[C]//1st International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology. Xi'an:IEEE,2011:608—612

- [9] 邵冲,杨钰,王赞基. GIS开关电弧建模及其对VFTO波形的影响[J]. 电网技术,2010,34(7):200—205
SHAO C, YANG Y, WANG Z J. GIS Switch Arc Modeling and Its Influence on VFTO Waveform [J]. Power Grid Technology, 2010, 34(7):200—205 (in Chinese)
- [10] 刘教民,杜巍,李永刚,等. 隔离开关电弧模型及参数对特快速暂态过电压仿真结果的影响分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2013,40(3):17—24+52.
LIU J M, DU W, LI Y G, et al. Analysis of the Influence of Isolated Switch Arc Model and Parameters on Simulation Results of Ultra-fast Transient Overvoltage [J]. Journal of North China University of Electric Power (Natural Science Edition), 2013, 40(3):17—24, 52 (in Chinese)
- [11] 王娜,林莘,徐建源,等. 特高压GIS变电站中快速暂态过电压仿真及其特性分析[J]. 高电压技术,2012,38(12):3310—3315
WANG N, LIN X, XU J Y, et al. Simulation and Characteristic Analysis of Fast Transient Overvoltage in UHV GIS Substation [J]. High Voltage Technology, 2012, 38(12):3310—3315 (in Chinese)
- [12] 林福昌. 高电压工程[M]. 北京:中国电力出版社,2006
LIN F C. High Voltage Engineering [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006 (in Chinese)

Research on the Influence of Arc Reburning on VFTO in GIS Substation

HU Rui¹, OU Mei-ying¹, ZHU Jin-zhi²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Chuzhou University, Anhui Chuzhou 239000, China;

2. Chuzhou Modern Mould Co., Ltd, Anhui Chuzhou 239000, China)

Abstract: In view of the fact that the commonly used arc model cannot simulate the entire process of a single arc discharge, which affects the calculation and simulation of very fast transient overvoltage (VFTO), a single arc breakdown model is proposed. Arc reignition is a practical case that must be considered in the study of arc, so a new arc reignition model is designed based on the joint arc reignition criterion based on the single arc breakdown model. The whole process of a single arc discharge consists of three stages: pre-breakdown, steady state combustion and arc extinguishing. The single arc breakdown model comprehensively considers the three stages, and the corresponding models to simulate the corresponding arc states are built in each stage. The transition of the three stages is completed by tracking the arc current. At present, the arc model only considers a single breakdown, but ignores the influence of reignition, so the arc process cannot be accurately simulated. The arc reignition model can accurately simulate the actual state of the arc. The applicability of single arc breakdown model is verified by simulation, and it can be found that the waveform of VFTO in the arc reburning model is significantly different from that in the single arc breakdown model.

Key words: VFTO; arc model; reignition

责任编辑:李翠薇

引用本文/Cite this paper:

胡瑞,欧美英,朱金枝. GIS变电站中电弧重燃对VFTO的影响研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2021,38(2):82—89

HU R, OU M Y, ZHU J Z. Research on the Influence of Arc Reburning on VFTO in GIS Substation [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2021, 38(2):82—89