

# 断路器电弧模型对瞬态恢复电压影响的研究

电弧发展过程直接影响瞬态恢复电压的特性，因此选择合适的断路器电弧模型十分必要。针对某750 kV超高压输电线路，分别采用理想开关模型、Mayr电弧模型、Cassie电弧模型以及Cassie-Mayr电弧模型来模拟断路器开断过程，并利用EMTP-ATP进行建模仿真，分析不同故障类型、不同故障位置时，断路器电弧模型对瞬态恢复电压的影响。研究表明，断路器采用Cassie-Mayr电弧模型能够更贴切地模拟开断暂态过程，仿真结果更准确，推荐采用Cassie-Mayr电弧模型。

王珍珍 何柏娜 宁家兴 孔 杰/山东理工大学电气与电子工程学院

## 0 引言

断路器开断短路电流时会产生电弧，而电弧的发展由断路器电流和电压决定，同时，电弧电流和电压又会改变断路器电流和电压，它们之间的相互作用会损害断路器绝缘特性以及开断能力，进而使瞬态恢复电压的暂态特性受到影响。因此，在研究断路器瞬态恢复电压时必须考虑电弧对其影响。

瞬态恢复电压(Transient Recovery Voltage, TRV)是断路器熄弧后，首先出现在断路器触头间的电压，其幅值一般大于工频电压幅值，上升率大，影响着断路器开断能力和绝缘水平，是设计断路器时必须考虑的主要因素之一。目前国内外对于TRV影响因素的研究主要包括：并联电抗器、感应电压和抑制措施等<sup>[1-12]</sup>，而对于断路器电弧模型的研究并不完善，没有充分考虑断路器电弧模型对瞬态恢复电压的影响。

电弧的发展是一个极其复杂的物理、化学过程，电弧模型必须能够体现电弧电阻的非线性，以及在开断过程中与系统之间的相互作用。基于电弧的暂态特性，国内外学者提出了各种电弧模型。影响最大、应用最广泛的是Mayr电弧模型和Cassie电弧模型<sup>[13-15]</sup>。文献[16-23]研究了隔离开关的电弧暂态特性，提出了各种电弧模型，如时变电阻模型、分段电弧模型等，并对其进行了详细的理论分析和仿真模拟，发现Mayr电弧模型、Cassie电弧模型以及Cassie-Mayr电弧模型在模拟隔离开关间隙电弧时能更贴切地模拟暂态过程。

目前，众多文献资料<sup>[1-8]</sup>及国家标准<sup>[23-26]</sup>对于TRV特性的研究，常采用简单开关模型模拟断路器，忽略了电弧模型对TRV的影响；而电弧的发展是开断过程的主要组成部分，是影响TRV特性的因素之一，忽略断路器电弧模型仿真计算所得TRV是不准确的。因此，在仿真计算中加入电弧模型，准确模拟电弧发展的物理过程，对于准确计算与分析TRV特性十分必要。但是，不同电弧模型适用条件不同，模拟的电弧特性不同，导致TRV的准确度不同。因此，选择合适的断路器电弧模型尤为重要。经过对现有电弧模型的分析总结，选择了合适开关间隙电弧的Mayr电弧模型、Cassie电弧模型以及Cassie-Mayr电弧模型，本文将对以上三种电弧模型进行对比，分析高压SF<sub>6</sub>断路器开断短路电流时，断路器电弧模型对TRV的影响。



王珍珍/硕士研究生

### 关键词/Keywords

SF<sub>6</sub>断路器 ·  
瞬态恢复电压 ·  
电弧模型 ·

山东省高等学校科技计划项目(J14LN27)。

## 1 断路器的电弧模型

使用仿真软件模拟电力系统过电压时,断路器通常使用理想开关模型,仅模拟了断路器闭合和断开两种状态,忽略了开关过程,而开断过程中电弧的发展直接影响TRV特性。因此,为了提高仿真结果的准确度,必须采用能体现开断暂态过程的电弧模型。

### 1.1 Mayr电弧模型

Mayr电弧模型广泛用于模拟小电流的电弧现象,常用于模拟低压接地电弧和潜供电弧。Mayr电弧模型的电弧时间常数和电弧散热功率是可调节的,由断路器绝缘介质决定,在应用中常采用经验值,也可以根据电弧电压和电弧电流的测量曲线进行修改,从而使仿真模拟更符合实际。

Mayr电弧模型的数学模型为

$$\frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left( \frac{i_a^2}{P_0} - g_m \right) \quad (1)$$

式中,  $g_m$  为电弧电导, S;  $\tau_m$  为时间常数, s;  $P_0$  为电弧散热功率, W。

### 1.2 Cassie电弧模型

Cassie电弧模型广泛用于模拟大电流的电弧现象,常用于模拟高压隔离开关电弧和接地电弧。Cassie电弧模型电弧电导的大小由电弧时间常数、稳态电弧电压和流过断路器的电流决定。其中,电弧时间常数和稳态电弧电压完全取决于断路器的绝缘介质,且断路器的许多参数均会影响参数的取值,如触头的系统设计、淬火介质及触头运动速度等。Cassie电弧模型的数学模型为

$$\frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left( \frac{i_a^2}{u_s^2 g_c} - g_c \right) \quad (2)$$

式中,  $g_c$  为电弧电导, S;  $\tau_c$  为时间常数, s;  $u_s$  为稳态电弧电压, V;  $i_a$  为电弧电流, A。

根据经验,在极小的时间间隔内,时间常数  $\tau$ 、电弧散热功率  $P_0$  以及稳态电弧电压  $u_s$  均可看作定值,其大小只与断路器绝缘介质相关。SF<sub>6</sub> 断路器采用两种电弧模型时的参数值<sup>[13-15]</sup>如表1所示。

表1 Cassie电弧模型参数和Mayr电弧模型参数

| 模型  | Cassie电弧模型           |                 | Mayr电弧模型             |                 |
|-----|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
|     | $\tau_c/\mu\text{s}$ | $u_s/\text{kV}$ | $\tau_m/\mu\text{s}$ | $P_0/\text{kW}$ |
| 参数值 | 0.8                  | 2.35            | 0.22                 | 8.8             |

### 1.3 Cassie – Mayr电弧模型

电弧的发展过程可以划分为:预击穿阶段、燃弧阶段和熄弧阶段<sup>[16-17]</sup>。在高压电弧的发展过程中,预击穿阶段和燃弧阶段电流较大,高达几千安培;相对而言,熄弧阶段电流较小,最大只有几十安培。Cassie – Mayr电弧模型根据电弧的发展规律,将Mayr电弧模型与Cassie电弧模型结合,共同模拟电弧的发展过程。

大电流阶段即预击穿阶段和燃弧阶段,Cassie电弧模型起主导作用,能够较好地模拟电弧的发展。熄弧阶段和产生TRV初期,电流较小,最后“截流”为零,此时Cassie电弧模型电弧电压衰减为零,而Mayr电弧模型能够更好地模拟电弧的发展过程。因此,根据电弧的发展特点,整个过程可以由两个电弧模型共同模拟。Cassie – Mayr电弧模型的数学模型为

$$r_{\text{arc}} = \frac{1}{g_{\text{arc}}} = \left( \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m} \right) \quad (3)$$

式中,  $g_m$  和  $g_c$  分别为Mayr电弧模型和Cassie电弧模型的电弧电导,计算方法见式(1)、式(2)。

## 2 建模及仿真

本次研究是基于某条750 kV超高压输电线路,采用EMTP – ATP软件对其进行建模,分析不同位置发生接地故障时,断路器开断故障的暂态过程。

### 2.1 系统模型

图1为简化系统模型,系统采用双端电源(E1、E2),线路全长396.7 km,首尾两端均采

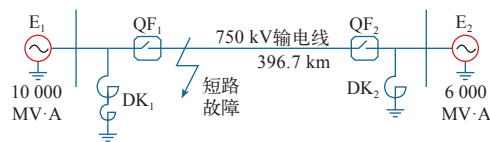


图1 750 kV输电线路单相接地故障图

用并联电抗器 ( $DK_1$ 、 $DK_2$ ) 进行无功补偿, 断路器 ( $QF_1$ 、 $QF_2$ ) 开断A相接地短路故障时的仿真模型如图2所示。

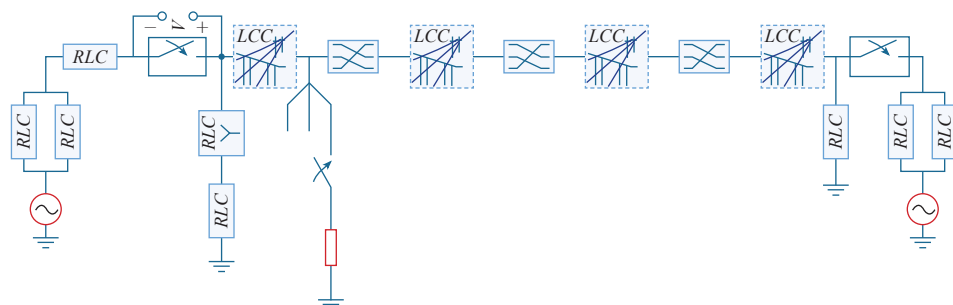


图2 750 kV输电线路仿真模型

200 mH; 首端电抗器采用星形联结, 电阻 $R_{DK1} = 10 \Omega$ , 电感 $L_{DK1} = 3\ 000$  mH; 中性点小电抗电感 $L_{ND} = 300$  mH; 末端电源容量 $S_2 = 6\ 000$  MV·A, 电阻 $R_{E2} = 150 \Omega$ , 电感 $L_{E2} = 300$  mH; 并联电抗器电阻 $R_{DK2} = 20 \Omega$ , 电感 $L_{DK2} = 6\ 000$  mH。

## 2.2 线路模型

输电线路采用六分裂导线, 具体线路参数如表2所示。考虑频率变化对线路参数的影响, 采用LCC模块的JMart模型模拟输电线路, 同时, LCC模块还考虑了趋肤效应、换位等, 使模型更符合实际情况。输电杆塔参数及导线的布置如图3所示。

表2 输电线路参数

| 参数                   | 导线      | 地线    |
|----------------------|---------|-------|
| 内半径/cm               | 0.55    | 0.3   |
| 外半径/cm               | 1.55    | 0.8   |
| 直流电阻/( $\Omega$ /km) | 0.058 5 | 0.304 |
| 分裂间距/cm              | 60      | —     |

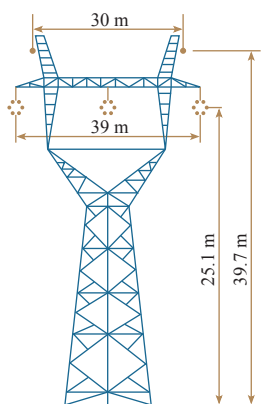


图3 750 kV超高压杆塔和导线布置方式

图2中, 系统电源相电压峰值 $U = 612.37$  kV, 首端电源容量 $S_1 = 10\ 000$  MV·A, 内阻 $R_{E1} = 150 \Omega$ , 电感 $L_{E1} = 180$  mH; 变压器电阻 $R_{T1} = 2 \Omega$ , 电感 $L_{T1} =$

输电线路采用逆序1个全换位 (ABC-CAB-BCA-ABC), 换位距离分别为84.6 km、80.5 km和155.9 km。

## 2.3 断路器电弧模型

基于电弧的数学模型, 利用ATP及其TACS模块搭建Mayr、Cassie以及Cassie-Mayr三种电弧模型。采用非线性电阻 $R$  (TACS) Type91模拟电弧特性, 由数学模型控制非线性电阻的变化过程, 以便实时跟踪电弧的动态发展过程, 仿真模型如图4所示。

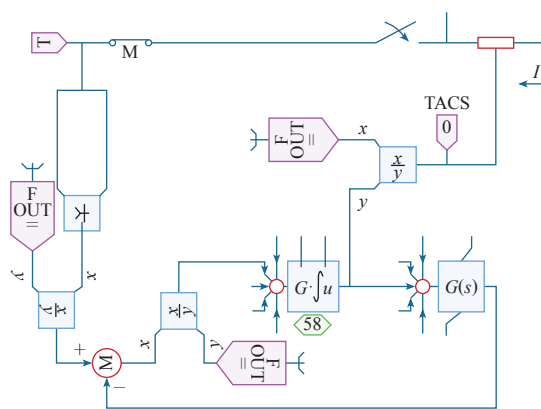


图4 Mayr模型的仿真模型

在每个仿真步长 ( $0.1 \mu s$ ) 内, 电弧模型根据经过断路器的电流计算电弧电阻, 将阻值输出到 $R$  (TACS) Type91, 同时反馈到系统。基于系统电流的发展实时模拟燃弧过程, 直到电弧完全熄灭, 以此来有效地模拟电弧的发展过程。

### 3 仿真结果

以某条750 kV超高压输电线路为背景,设置线路在0.03 s时发生A相接地故障,接地电阻为 $2\ \Omega$ ,考虑到断路器的固有分闸时间及恢复特性,设置断路器跳闸时间为0.088 s,分别模拟断路器的三种电弧模型和理想开关模型,开断长线路不同故障点的TRV仿真结果如表3所示。

表3 开断长线路故障TRV峰值

| 参数     | 峰值/kV   |          |        |          |
|--------|---------|----------|--------|----------|
|        | 84.6 km | 165.1 km | 321 km | 396.7 km |
| Idel   | 811.54  | 766.13   | 679.67 | 665.54   |
| Mayr   | 594.92  | 682.54   | 679.49 | 665.31   |
| Cassie | 594.59  | 682.16   | 679.32 | 665.30   |
| C-M    | 594.69  | 682.57   | 679.65 | 665.54   |

由表3可知,开断长线路故障时,三种电弧模型TRV峰值相差较小,与理想开关模型TRV峰值相差较大。随着故障距离的增大,理想开关模型与电弧模型的仿真结果趋于相同。这表明断路器开断长线路故障时,采用理想开关模型TRV峰值偏大;但是,随着故障距离的增大,电弧模型对TRV峰值影响变小。

仿真结果表明四种模型的TRV峰值相差不大,但其波形却有很大不同。例如线路末端(396.7 km处)发生A相接地故障时,四种断路器模型的TRV峰值差别最小,最大差值仅为0.24 kV,但是放大的TRV振荡波形却大有不同,具体图形分别如图5~图8所示。

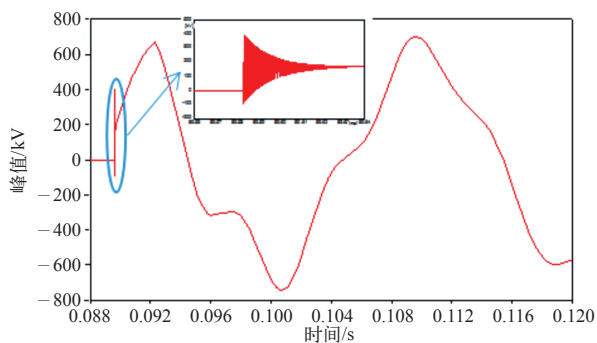


图5 理想开关模型TRV波形

对比分析图5~图8,可知四种模型TRV波形振荡明显不同。理想开关模型TRV波形振荡最严重,Mayr电弧模型次之,Cassie-Mayr电弧模型TRV

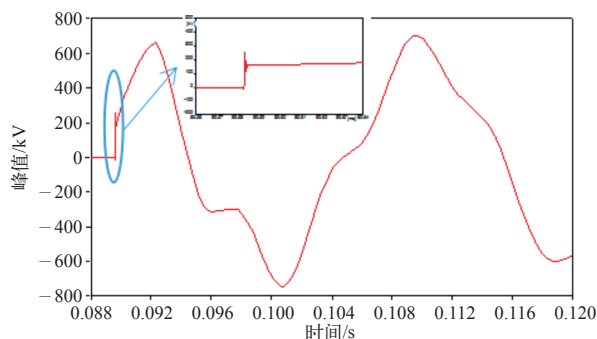


图6 Mayr电弧模型TRV波形

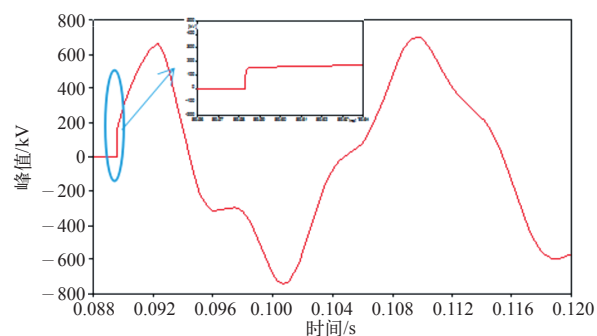


图7 Cassie电弧模型TRV波形

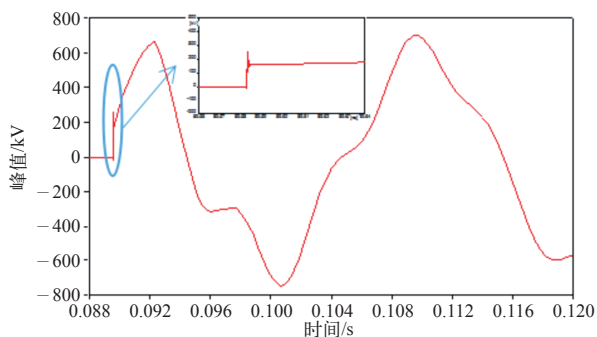


图8 Cassie-Mayr电弧模型TRV波形

波形振荡较小,Cassie电弧模型TRV波形几乎无振荡(与实际不符)。但是,恢复电压的总体走势相似,这表明电弧模型对瞬态恢复电压的影响较大,对工频恢复电压的影响较小。

研究表明:理想开关模型的TRV近似于系统电容两端的电压,频率变化对其影响较大,故振荡最严重;而电弧模型相当于与系统电容并联的时变电阻,在一定程度上起到分流降压的作用,因此,电弧模型的TRV峰值较小;熄弧后,电弧电阻无限大相当于开路,不再影响恢复电压的发展。在预击穿和燃弧阶段,Mayr电弧模型模拟的大电流电弧现象与实际情况不符,而Cassie电弧模型可

以很好地模拟该阶段电弧的发展；在熄弧阶段，Cassie电弧模型模拟的小电流电弧现象严重失真，导致TRV幅值偏小，Mayr电弧模型则能更好地模拟小电流电弧；Cassie—Mayr电弧模型结合了两模型的特点，能较好地模拟电弧发展全过程。

开断近区故障的TRV比较严重，GB和IEC标准将其作为断路器试验的标准之一，TRV的标准规定值<sup>[23-25]</sup>如表4所示，模拟开断不同位置近区故障的仿真结果如表5所示。

表4 TRV的标准规定值

| 额定电压/kV | 试验方式  | TRV峰值/kV |
|---------|-------|----------|
| 800     | 出线端故障 | 1 189    |
|         | 近区故障  | 914      |
|         | 失步故障  | 1 633    |

表5 开断近区故障TRV峰值

| 参数     | 峰值/kV   |         |         |         |
|--------|---------|---------|---------|---------|
|        | 0.5 km  | 1 km    | 5 km    | 10 km   |
| Idel   | 1 046.4 | 1 012.2 | 1 120.4 | 1 201.7 |
| Mayr   | 637.73  | 937.27  | 823.20  | 684.12  |
| Cassie | 631.19  | 901.46  | 521.67  | 522.96  |
| C—M    | 637.73  | 937.27  | 823.23  | 684.13  |

通过大量仿真计算发现，断路器电弧模型开断输电线路1 km处故障时TRV峰值最大，与标准分析一致。相对于近区故障的标准规定值（914 kV），理想开关模型的仿真结果偏大，不同故障位置的TRV峰值均超过了标准值。另外，开断故障距离大于1 km的近区故障时，采用Cassie电弧模型仿真计算的TRV峰值偏小，不能反映真实情况。

为了进一步分析电弧模型对TRV的影响，分别模拟断路器端部故障（Break Terminal Fault，BTF）及并联电抗器故障，所得TRV的仿真结果如表6所示。

表6 开断BTF和并联电抗器故障TRV峰值

| 参数     | 峰值/kV  |         |
|--------|--------|---------|
|        | BTF    | 并联电抗器故障 |
| Idel   | 940.79 | 1 352.0 |
| Mayr   | 714.83 | 1 515.8 |
| Cassie | 630.87 | 1 514.8 |
| C—M    | 714.83 | 1 587.4 |

由表6可知，断路器开断BTF（0 km处）时，

采用理想开关模型比采用电弧模型仿真计算的TRV峰值大，最大差值为309.92 kV。这表明输电线路不同位置发生单相接地故障时，断路器采用理想开关模型所得TRV峰值均比采用电弧模型所得结果偏大。

开断并联电抗器故障时的电流为感性电流，所得TRV波形严重畸变，TRV峰值高达1587.4 kV，超过了国标中并联电抗器故障的预期TRV标准值（1 240 kV）<sup>[26]</sup>，对断路器的绝缘危害较大，可能会引起电弧重燃，导致断路器开断失败。因此，应采取必要的抑制措施。

## 4 结束语

本文以某750 kV超高压输电线路为例，分别采用断路器理想开关模型和断路器电弧模型，研究开断不同故障类型、不同故障位置时的TRV特性。研究结果为进一步研究TRV特性及制定TRV标准提供理论依据。具体结论如下。

1) 输电线路发生单相接地故障时，断路器采用理想开关模型不能准确反映暂态过程，所得仿真结果偏大，不建议采用。

2) 仿真结果要求较高时，或者开断除长线路故障以外的故障类型时，必须采用考虑电弧过程的断路器模型。

3) Cassie—Mayr电弧模型能够更好地模拟断路器开断故障的暂态过程，仿真计算所得TRV更准确。因此，推荐断路器采用Cassie—Mayr电弧模型。

4) 开断并联电抗器故障时TRV较严重，可能导致断路器开断失败，必须采用抑制措施。

## 参考文献

- [1] 刘浩军，赵福强，苏超，等．并联电容对发电机断路器暂态恢复电压TRV的影响[J]．高压电器，2017，53(2)：186-190．
- [2] 何柏娜，赵云伟，刘连鑫，等．感应电压对断路器瞬态恢复电压特性影响的研究[J]．高压电器，2016，52(10)：8-12．
- [3] 隋玉秋，李学斌，赵义松，等．特高压电容器组

- 专用断路器开断特性及试验研究 [J]. 高压电器, 2016, 52 (11): 34-41.
- [4] 章勇高, 常凯旋, 苏永春. 特高压接入电网的并联电抗器补偿研究 [J]. 高压电器, 2016, 52 (1): 1-6.
- [5] 袁帅, 唐宗华, 丁建明, 等. 复合型故障限流器对断路器瞬态恢复电压特性的影响与分析 [J]. 电气工程学报, 2016, 11 (9): 15-24.
- [6] 方冰, 关永刚, 申笑林. 特高压换流站交流滤波器断路器恢复电压特性研究 [J]. 高压电器, 2015, 51 (8): 1-7.
- [7] 张长虹, 阳少军, 杨旭, 等. 500 kV交流滤波器断路器绝缘故障分析及其绝缘特性研究 [J]. 高压电器, 2016, 52 (9): 1-7.
- [8] 郑彬, 项祖涛, 班连庚, 等. 特高压交流输电线路加装串联补偿装置后断路器开断暂态恢复电压特性分析 [J]. 高电压技术, 2013, 39 (3): 605-611.
- [9] 刘洋. 特高压断路器重合闸过程电磁暂态特性的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [10] Voronin V A. Decreasing the influence of arc feed currents and transient recovery voltages in single-phase conditions in EHV lines [J]. Russian Electrical Engineering, 2014, 85 (5): 267-273.
- [11] Volkov M S, Gusev Yu P, Monakov Yu V, et al. The effect of current-limiting reactors on the tripping of short circuits in high-voltage electrical equipment [J]. Power Technology and Engineering, 2016, 49 (5): 375-377.
- [12] Palazzo Mirko, Popov Marjan, Marmolejo Alejandro, et al. Revision of TRV requirements for the application of generator circuit-breakers [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 138: 66-71.
- [13] Ziani A, Moulai H. Hybrid model of electric arcs in high voltage circuit breakers [J]. Electric Power Systems Research, 2012, 92: 37-42.
- [14] Oramus P, Chmielewski T, Kuczek T, et al. Transient recovery voltage analysis for various current breaking mathematical models; shunt reactor and capacitor bank de-energization study [J]. Archives of Electrical Engineering, 2015, 64 (3): 441-458.
- [15] Chmielewski T, Oramus P, Szweczyk M, et al. Circuit breaker models for simulations of short-circuit current breaking and slow-front overvoltages in HV systems [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 143: 174-181.
- [16] 刘教民, 杜巍, 王震洲, 等. VFTO仿真中GIS隔离开关电弧模型的研究进展 [J]. 高压电器, 2013, 49 (5): 21-25.
- [17] 林莘, 王亮, 徐建源, 等. 非平衡态双温度SF<sub>6</sub>等离子体电弧数学模型研究 [J]. 高压电器, 2015, 51 (3): 1-7.
- [18] 张建功, 王红超, 赵军, 等. 基于分段电弧模型的多次重燃弧VFTO计算与分析 [J]. 高压电器, 2016, 52 (5): 14-19.
- [19] 刘德东, 吴文辉, 何人望, 等. 考虑弧道电感特性的电弧电阻模型下VFTO的研究 [J]. 高压电器, 2015, 51 (1): 105-109.
- [20] 田芸, 吴细秀, 张欢. VFTO计算中隔离开关燃弧模型探究 [J]. 高压电器, 2013, 49 (5): 106-113.
- [21] 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, 2016, 32 (16): 157-163.
- [22] 杜巍. 特快速暂态过电压仿真中关键问题研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [23] IEC 62271-100; 2008 High-voltage switchgear and controlgear-part 100; Alternating-current circuit-breakers [S].
- [24] DL/T 402—2016 高压交流断路器 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [25] GB 1984—2014 交流高压断路器 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [26] GB/T 29489—2013 高压交流开关设备和控制设备的感性负载开合 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

(收稿日期: 2017-07-26) EA