

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.06.002

# ±500 kV 直流滤波器雷电过电压特性仿真研究

张耀月

(澳大利亚国立大学商业与经济学院, 澳大利亚 堪培拉 2600)

**摘要:**直流输电线路在雷击工况下,会引起换流站中性区域产生过电压,极大的影响和威胁中性区域设备特别是直流滤波器安全稳定运行。文章针对某±500 kV 换流站直流双极大地回线全压运行方式极Ⅱ HP12/36 直流滤波器典型故障过电压及其特性,搭建电磁暂态仿真模型开展过电压特性研究,得出该过电压是介于工频过电压和操作过电压之间的非标准类工频过电压的结论,并结合这一论断,分析了爬距计算电压、雷电耐受电压和操作耐受电压等因素对过电压的影响,提出了直流滤波器及其支柱绝缘子设备选型要求,对滤波器、避雷器暂态额定值选择、关键参数优化具有参考和借鉴意义。

**关键词:**直流滤波器;雷电过电压;操作过电压;工频过电压;暂态参数

## Simulation Study on Lightning Overvoltage Characteristics of ±500 kV DC Filter

ZHANG Yaoyue

(ANU College of Business and Economics, Canberra 2600, Australia)

**Abstract:** Under lightning strike conditions, direct current transmission lines can cause overvoltage in the neutral area of converter station, greatly affecting and threatening the safe and stable operation of equipment (with DC filters in particular) of neutral area. In this paper an electromagnetic transient simulation model is set up to investigate overvoltage characteristics, focusing on a typical fault overvoltage event and its properties in the pole II HP12/36DC filter in the full-voltage operation mode of the DC bipolar ground return system at a ±500 kV converter station. It is concluded that the overvoltage is a non-standard type of power frequency overvoltage between power frequency overvoltage and operating overvoltage. Based on this conclusion, the influence of such factors as creepage distance calculated voltage, lightning withstand voltage and operating withstand voltage on overvoltage is analyzed, The type selection requirements for DC filters and their supporting insulator are proposed. This has reference and inspiration value for the selection of transient rated values and key parameter optimization of filters and lightning arresters.

**Keywords:** DC filter; lightning overvoltage; operating overvoltage; power frequency overvoltage; transient parameters

## 0 引言

雷电过电压是雷云放电时在直流线路或设备上引起的过电压<sup>[1]</sup>,具有脉冲特性,虽然持续时间短,一般为几十微秒,但幅值大、频率高,对电力系统设备危害极大<sup>[2]</sup>。直流滤波器并联在直流系统极母线与中性母线间,其主要作用是阻碍和短路直流侧的交流信号,将直流侧谐波电压和谐波电流限制在耐受水平<sup>[3]</sup>。同时,当交流侧发生单相或相间故障时,直流滤波器还可以抑制换流器渗透引起的低

频二次谐振<sup>[4]</sup>。当直流输电线路处于雷击工况时,中性区域产生的过电压会对直流滤波器及电抗器、支柱绝缘子的绝缘造成极大威胁<sup>[5]</sup>,虽然避雷器可以有效保护滤波器元件避免雷电冲击,但高湿阴雨等特殊运行环境会造成避雷器绝缘子对非标准类工频过电压的防护能力降低,直流滤波器闪络放电的概率陡增。

增加绝缘裕度可以减小外部过电压对直流滤波器的冲击危害<sup>[6]</sup>,但如何选择合理的绝缘裕度,高端电抗器对地过电压水平怎样校核,对地直流电

压、中性线绝缘水平、爬电比距等参数怎样确定,既能确保滤波器安全,又能保证合理的绝缘配合,这些难题长期困扰工程建设和科研人员,亟待研究解决。文章针对某  $\pm 500$  kV 换流站直流双极大地回线全压运行方式极 II HP12/36 直流滤波器典型雷电过电压及其暂态特性,搭建电磁暂态仿真(power systems computer aided design, PSCAD/EMTDC)模型开展暂态过电压特性研究<sup>[7-8]</sup>,分析滤波器中的避雷器对暂态过电压的影响,从而确定直流滤波器暂态定值和绝缘配合水平,保证直流线路接地故障和线路重启等各种典型故障工况对直流滤波器造成的影响最小。文章对直流滤波器雷电过电压的特性和波形进行精准描述,综合考虑了爬距计算电压、雷电耐受电压和操作耐受电压等因素对过电压的影响<sup>[9]</sup>,提出了直流滤波器及其支柱绝缘子设备选型要求,对对地直流电压、中性线绝缘水平、爬电比距等参数选取提出有效建议,对滤波器、避雷器额定值选择、关键参数优化、设备绝缘配合等具有参考和借鉴意义。

1 系统条件

某  $\pm 500$  kV 直流输电工程西起华中某地,东止华东某地,全长 1 018.393 km,设计输送容量 3 000 MW,于 2010 年 4 月投运。该直流输电工程是世界上最大水电站的外送工程,是我国跨区电网的重要枢纽,是华中、华东、华北、南方 4 大电网的交集,也是国家西电东送工程的重要通道,南北水火电互济的枢纽。

送端换流站(整流站)位于华中某地,交流部分只设 500 kV,采用半开关接线方式,共 8 串,500 kV 交流出线 8 回,至 500 kV 南部某换流站 2 回,至 1 000 kV 北部某特高压变电站、水电站地下电厂各 3 回;500 kV 交流滤波器分布在 3 大滤波器场,总容量为 1 900 Mvar;500 kV 并联电抗器 3 组,总容量 480 Mvar;全站共 14 台(2 台备用)换流变,单台容量 297.6 MVA。

受端换流站(逆变站)也是本文研究的故障换流站,位于华东某地,交流 500 kV 出线 2 回,至 1 000 kV 某特高压变电站;容性无功补偿总容量 1 818 Mvar,按 3 大组配置,每小组容量按不大于 202 Mvar 配置;全站共 14 台(2 台备用)换流变,单台容量 283 MVA。受端换流站交流母线的正常运行电压为 510 kV,正常运行电压范围为

490~525 kV,事故后变化范围为 475~550 kV,母线正常频率波动为  $50\pm 0.1$  Hz,事故后频率范围为 49~50.5 Hz。

2 直流滤波器配置与参数

2.1 配置与参数

换流站直流滤波器配置如图 1 所示。每极与中性线间分别配置一组 HP12/24 直流滤波器和一组 HP12/36 直流滤波器<sup>[10]</sup>,共配置两组 HP12/24、HP12/36 直流滤波器,参数见表 1~4。

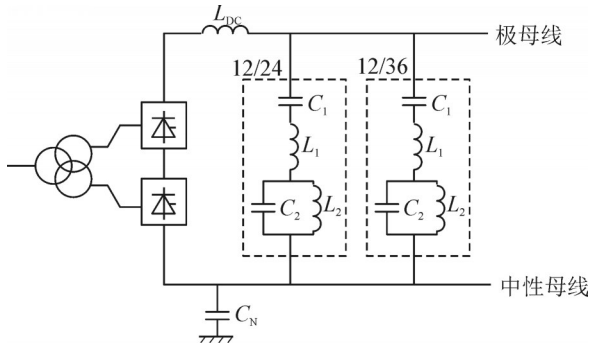


图1 直流滤波器配置示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of DC filter configuration

表1 直流滤波器参数  
Table 1 Parameters of DC filter

| 参数                | 数值        |           |
|-------------------|-----------|-----------|
|                   | HP 12/24  | HP 12/36  |
| 总滤波器组数            | 2         | 2         |
| 调谐频率/Hz           | 600/1 200 | 600/1 800 |
| $C_1/\mu\text{F}$ | 1         | 1         |
| $L_1/\text{mH}$   | 23.419    | 12.923    |
| $C_2/\mu\text{F}$ | 4.524     | 1.876     |
| $L_2/\text{mH}$   | 11.683    | 22.69     |

表2 HP12/24  $L_1$ 电抗器及支柱绝缘子暂态参数  
Table 2 Transient parameters of HP12/24  $L_1$  reactor and support insulator

| 参数      | 数值                 |
|---------|--------------------|
| 爬距计算电压  | 高压端对地(有效值)/kV 11.1 |
|         | 两端间(有效值)/kV 1.8    |
|         | 低压端对地(有效值)/kV 10.4 |
| 雷电波耐受水平 | 高压端对地(峰值)/kV 550   |
|         | 两端间(峰值)/kV 550     |
|         | 低压端对地(峰值)/kV 250   |
| 操作波耐受水平 | 高压端对地(峰值)/kV 355   |
|         | 两端间(峰值)/kV 430     |
|         | 低压端对地(峰值)/kV 190   |
| 支柱绝缘子   | 工频湿闪电压(峰值)/kV 125  |

表3 HP12/36  $L_1$  电抗器及支柱绝缘子暂态参数  
Table 3 Transient parameters of HP12/36  $L_1$  reactor and support insulator

| 参数      | 数值                 |
|---------|--------------------|
| 爬距计算电压  | 高压端对地(有效值)/kV 11.1 |
|         | 两端间(有效值)/kV 1.0    |
|         | 低压端对地(有效值)/kV 10.7 |
| 雷电波耐受水平 | 高压端对地(峰值)/kV 550   |
|         | 两端间(峰值)/kV 550     |
|         | 低压端对地(峰值)/kV 250   |
| 操作波耐受水平 | 高压端对地(峰值)/kV 350   |
|         | 两端间(峰值)/kV 415     |
|         | 低压端对地(峰值)/kV 190   |
| 支柱绝缘子   | 工频湿闪电压(峰值)/kV 125  |

表4 中性母线元器件参数  
Table 4 Parameters of neutral busbar elements

| 参数                     | 数值  |
|------------------------|-----|
| 中性母线电容器/ $\mu\text{F}$ | 16  |
| 中性母线 PLC 滤波器           |     |
| 电容器/nF                 | 7   |
| 中性母线 PLC 滤波器           |     |
| 电抗器/mH                 | 2   |
| 中性母线接地电阻/ $\Omega$     | 300 |

2.2 设计原则

直流滤波器暂态额定值的计算包括选择合适的避雷器、滤波器元件的暂态电流和绝缘水平<sup>[11]</sup>。设计直流滤波器的暂态定值,应充分考虑以下原则:

- 1)进行关键参数优化,基于多种系统工况计算出直流滤波器稳态定值做为输入。
- 2)充分考虑杂散参数,搭建 PSCAD 仿真模型开展暂态定值。
- 3)仿真时,为考虑线路接地故障和重启等各种典型故障工况对直流滤波器的影响,通过不同故障点位置进行遍历扫描,将得到的元件暂态参数的最大值做为元件的设计值,由此确定绝缘水平和元件暂态电流。

对于暂态电压,综合考虑爬距计算电压、雷电耐受电压和操作耐受电压 3 种影响暂态电压的指标,提出技术参数要求并进行参数约束。按照有关规程规定<sup>[12-13]</sup>,结合工程实践经验<sup>[14-16]</sup>,设计绝缘裕度按照不小于 20% 考虑,计算其绝缘裕度设计值见表 5。

表5 绝缘裕度设计值  
Table 5 Design value of insulation margin

| 介质     | 陡波前 | 雷电冲击 | 操作冲击 |
|--------|-----|------|------|
| 换流阀/%  | 20  | 15   | 15   |
| 空气绝缘/% | 25  | 25   | 20   |
| 油绝缘/%  | 25  | 20   | 15   |

直流滤波器 HP12/36 中  $L_1$  避雷器主要参数见表 6。其中  $L_1$  对地参数,其绝缘水平由低压避雷器  $A_2$  和中性母线避雷器来确定。其内部 3 个避雷器绝缘配合原则是<sup>[17]</sup>,当产生过电压时,高压避雷器  $A_1$  和低压避雷器  $A_2$  优先动作,高压  $L_1$  避雷器  $A_3$  最后动作。

表6 直流滤波器HP12/36中 $L_1$ 避雷器暂态参数  
Table 6 Transient parameters of HP12/36  $L_1$  arrester

| 参数                                | 数值       |        |          |
|-----------------------------------|----------|--------|----------|
|                                   | $A_1$    | $A_2$  | $A_3$    |
| 最大持续运行电压/kV                       | 4.2      | 10     | 41.2     |
| 标称放电电流/kA                         | 20       | 20     | 20       |
| 直流 1 mA 参考电压/kV                   | 243.5    | 48     | 194.5    |
| 雷电波(8/20 $\mu\text{s}$ )/(kV/kA)  | 367/3.0  | N.A.   | 383/77.1 |
| 操作波(30/60 $\mu\text{s}$ )/(kV/kA) | 344/1.2  | 70/8.6 | 290/6.7  |
| 工频耐受电压(峰值)/kV                     | 364.6    | 75.3   | 307.4    |
| 操作波耐受水平                           | 高压端对地/kV | 350    | 190      |
|                                   | 两端间/kV   | 415    | 90       |
|                                   | 低压端对地/kV | 190    | 92       |

3 雷电过电压情况

2023 年 7 月 8 日,直流线路双极大地回线全压运行,双极输送功率 2 999 MW。当时正值梅雨季节,连续阴雨天气使空气相对湿度达 93%,当天气温 31℃。当日 15:00 时,站内阵雨,直流线路发生雷击,雷电过电压造成 HP12/36 直流滤波器闪络接地,导致极 II 闭锁。产生过电压的直流滤波器为极 II 端的 HP12/36,其具体结构如图 2 所示。

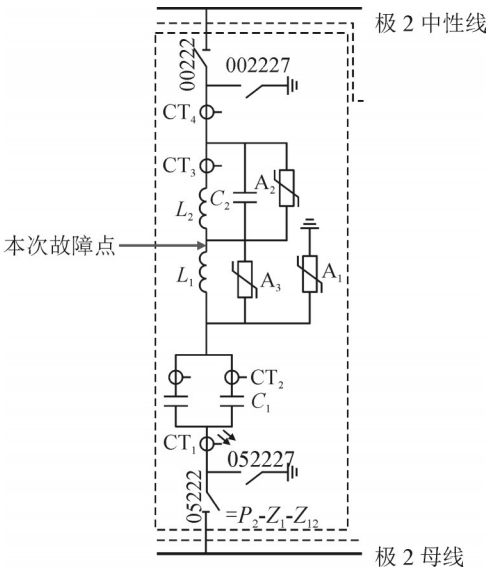


图2 过电压直流滤波器 HP12/36 示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of overvoltage DC filter HP12/36

从故障定位来看,当日 15:00 时,直流线路发生雷击引发的雷电过电压造成极 II 端的 HP12/36 直流滤波器  $L_1$  低压端支柱绝缘子对地闪络<sup>[18]</sup>。过电压录波如图 3 所示。

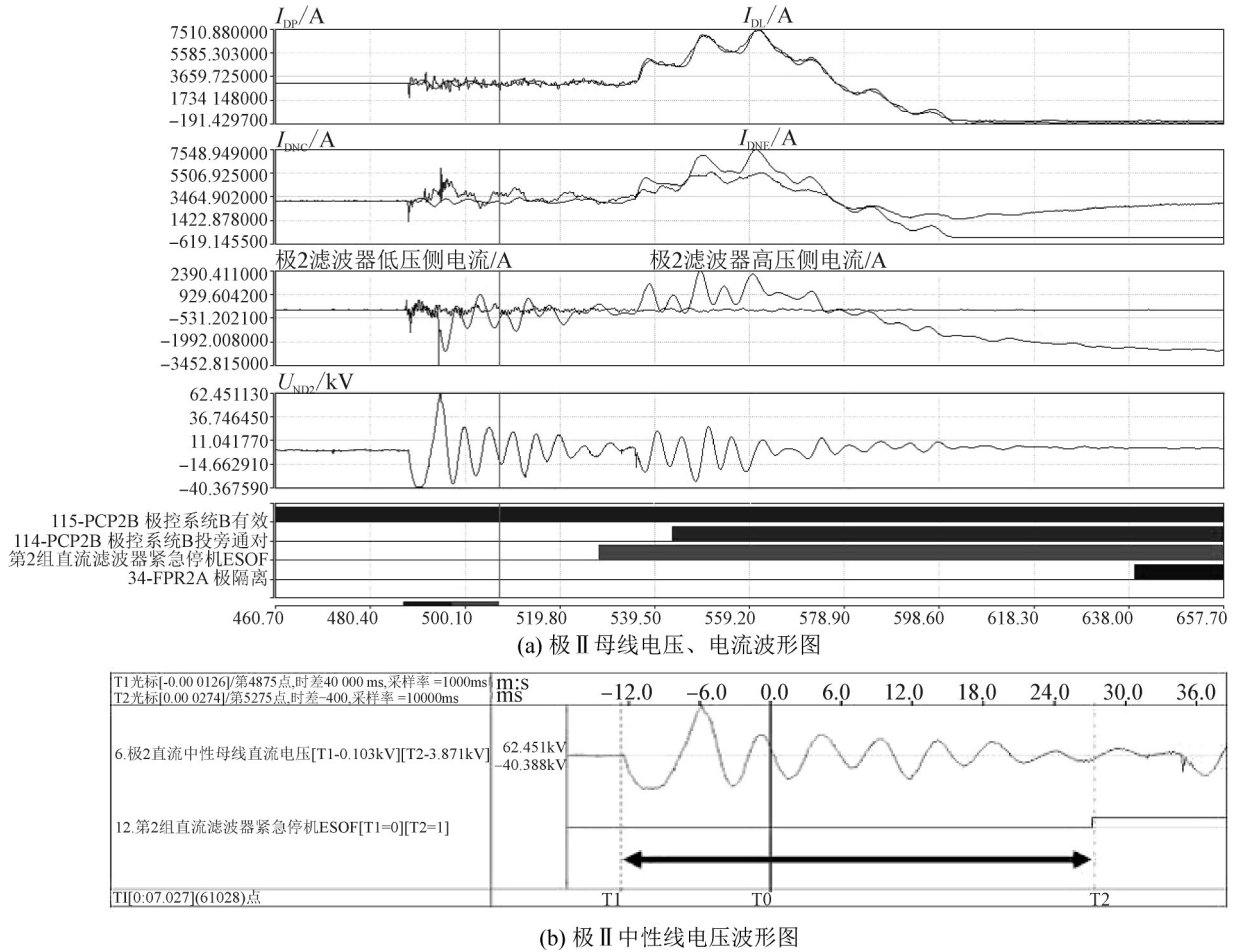


图3 过电压故障录波波形图  
Fig. 3 Overvoltage fault recording waveform diagram

从图3可以看出,雷击后整个直流回路LC振荡,极II直流线路电压存在波动,电压最高幅值为-628 kV;中性母线电压波动最高 $U_{DN}=62.5$  kV,且电压幅值存在周期振荡特点,主要包括2次和4次电压波动分量。在直流滤波器 $L_1$ 电抗器高低端形成过电压,高压避雷器 $A_1$ 和低压避雷器 $A_2$ 皆动作1次,高压 $L_1$ 避雷器 $A_3$ 避雷器未动。

#### 4 暂态仿真与过电压计算

##### 4.1 绝缘子过电压计算

根据绝缘配合原则,结合中性母线电压峰值电压与 $A_2$ 避雷器动作残压,计算出故障位置过电压峰值为

$$U_{F1} = U_{DN} + U_{cc} \quad (1)$$

式中: $U_{F1}$ 表示故障位置(HP12/36电抗器 $L_1$ 低压端)过电压峰值; $U_{DN}$ 表示中性母线电压最大值, $U_{DN}=62.5$  kV; $U_{cc}$ 表示操作冲击电流残压,计算 $U_{cc}$ 时,最大电流按8.6 kA计,则

$$U_{cc} = U_{pl}/K_{cp} = 92/1.35 = 68.15 \quad (2)$$

式中: $U_{pl}$ 表示 $A_2$ 避雷器低压端对地, $U_{pl}=92$  kV; $K_{cp}$ 表示操作冲击绝缘配合系数,当最大电流为8.6 kA时, $K_{cp}=1.35$ 。则

$$U_{F1} = U_{DN} + U_{cc} = 62.5 + 68.15 \approx 131 \text{ kV} \quad (3)$$

即,绝缘子过电压峰值为 $U_{F1}=131$  kV。

结合现场录波,可推知该处承受了介于工频过电压和操作过电压之间的非标准类工频过电压<sup>[9]</sup>。

##### 4.2 等值仿真模型

为模拟故障时直流滤波器电抗器 $L_1$ 低压端对地过电压水平,搭建直流滤波器PSCAD等值仿真模型。

1)直流滤波器建模选取的元件除了包含基本的电容器、电抗器和电阻器外,还包含杂散电感、杂散电容等杂散参数<sup>[20-21]</sup>。

2)直流滤波器的电抗器需由电感元件和经电抗器品质因数计算得到的串联电阻表示。

3)PSCAD建模时,直流滤波器的元件参数选择直流滤波器的设计值<sup>[22]</sup>。

考虑上述等值约束,得到换流站内直流滤波器的等值模型如图4所示。

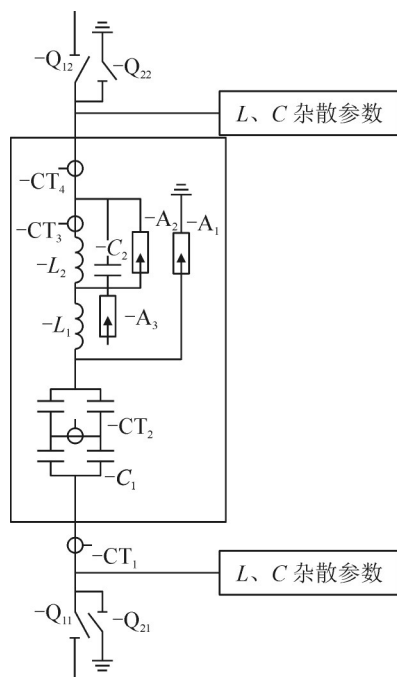
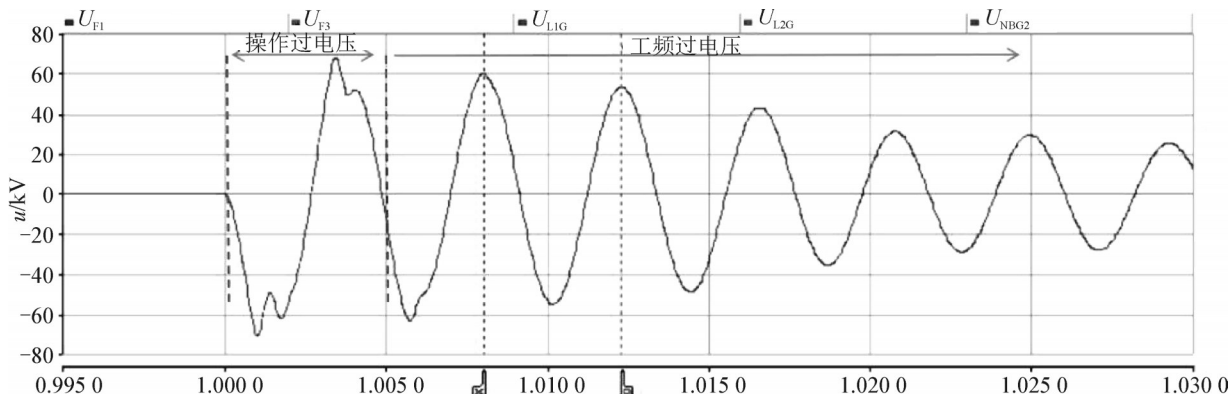


图4 直流滤波器等值模型

Fig. 4 Equivalent model of DC filter

图5  $L_1$  低压端对地电压仿真结果波形Fig. 5 Simulation result waveform of  $L_1$  line-to-ground voltage on the low voltage side

仿真分析时,结合具体过程分析不同时间段内波形的过电压类型。

1) 参照规程规定的过电压类型和波形、标准耐受电压试验施加的标准电压波形<sup>[23]</sup>,可以看出过电压故障发生瞬间,由于断路器瞬时投切造成的电压

### 4.3 仿真内容

换流站直流滤波器 HP12/36  $L_1$  低压端对地故障是由于负极线雷击导致,可在 HP12/36 的电容器  $C_1$  的高端模拟雷击故障;同时,直流滤波器 HP12/24 的电抗器和支柱绝缘子选型与 HP12/36 一致,需要在 HP12/24 的电容器  $C_1$  的高端模拟雷击故障,以此形成对照。基于建立的等值仿真模型,扫描不同杂散电感得到  $L_1$  低压端对地操作过电压和工频过电压的最大值,并与其操作耐受电压和工频耐受电压进行对比,验证其绝缘设计是否正确。

1) 模拟直流滤波器 HP12/36、HP12/24 故障时滤波器电抗器  $L_1$  低压端对地的操作过电压和工频过电压的最大值。

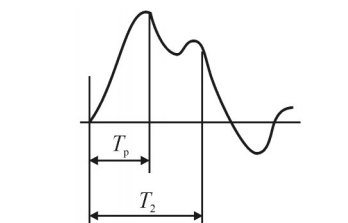
2) 对比直流滤波器 HP12/36、HP12/24 的仿真结果,并与其操作耐受电压和工频耐受电压进行比较,分析结果并得出结论。

### 4.4 故障仿真波形等效

经仿真计算,得到直流滤波器电抗器  $L_1$  低压端对地电压仿真的结果波形如图5所示。

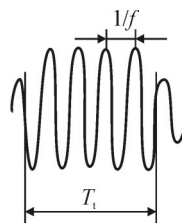
波动,其波形类似于瞬态电压的缓波前电压波形<sup>[24]</sup>(如图6(a)),属于操作过电压。

2) 在一个周期后,其电压波形逐渐平稳,波形类似于低频电压的暂时电压波形(如图6(b)),属于工频过电压。



注:  $20 \mu\text{s} < T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ ,  $T_2 \leq 20 \text{ms}$

(a) 瞬态电压的缓波前电压波形



注:  $10 \text{Hz} < f < 500 \text{Hz}$ ,  $0.02 \text{s} \leq T_i \leq 3600 \text{s}$

(b) 低频电压的暂时电压波形

图6 过电压的类型和波形

Fig. 6 Type and waveform of overvoltage

4.5 故障仿真结果

经仿真计算,得到该工况下直流滤波器  $L_1$  HP12/24、HP12/36 低压端对地操作过电压和工频过

电压最大值的波形,如图 7 所示(图中  $U_{L2G}$  为  $L_1$  低压端对地电压):避雷器  $A_1$ 、 $A_2$  的电压和电流波形分别如图 8 所示。

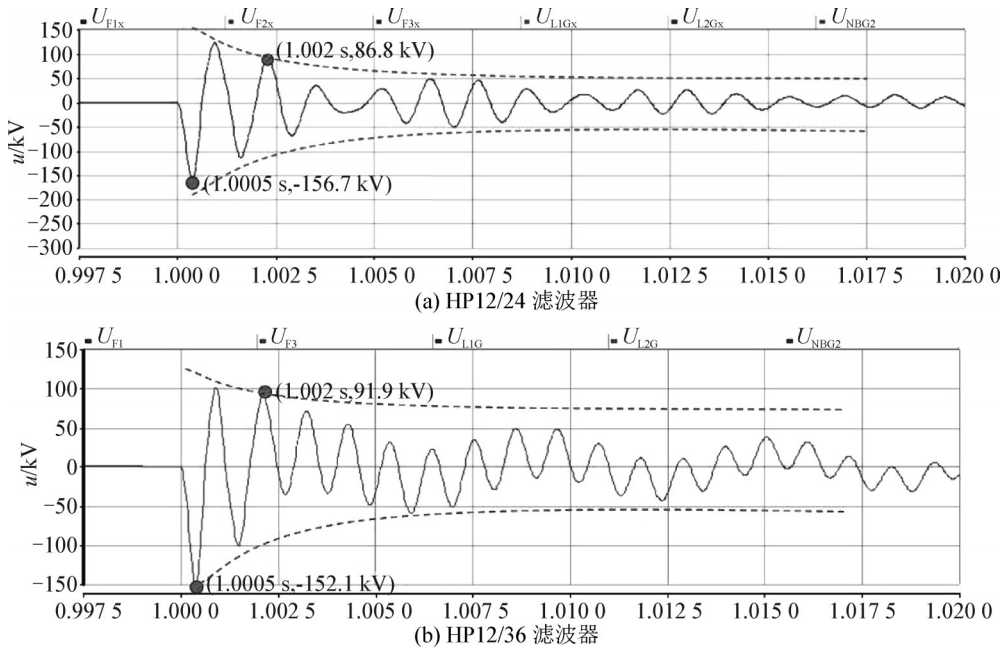


图 7  $L_1$  低压端对地电压最大值时的电压波形

Fig. 7 Voltage waveform at maximum  $L_1$  line-to-ground voltage on the low voltage side

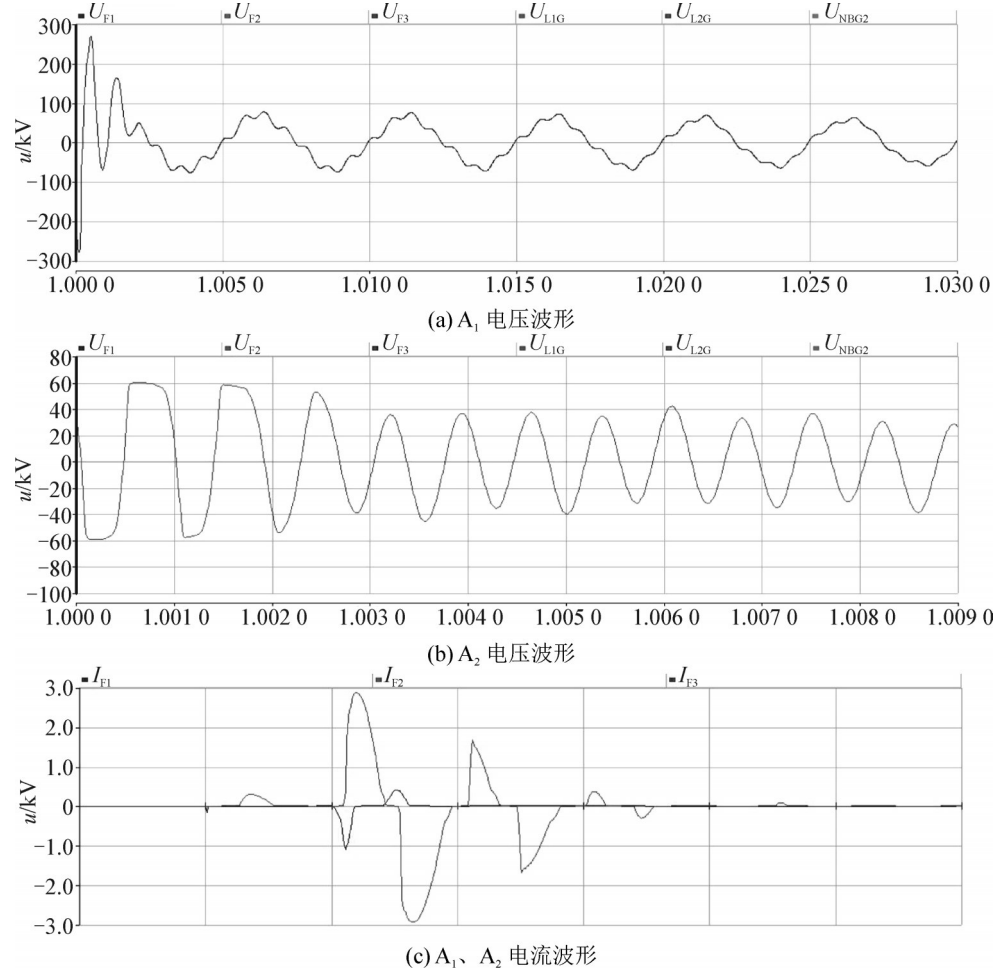


图 8 避雷器放电波形

Fig. 8 Discharge waveform of arrester

图 7 和图 8 可以看出,直流滤波器 HP12/24、HP12/36 的  $L_1$  低压端对地操作过电压最大值分别为 156.7 kV、152.1 kV,皆小于其操作耐受水平 190 kV,根据标准和规程要求操作耐受绝缘裕度按不小于 20% 设计,表明  $L_1$  电抗器操作过电压的设计满足要求。

直流滤波器 HP12/24、HP12/36 的  $L_1$  低压端对地工频过电压最大值分别为 86.8 kV 和 91.9 kV,皆小于其电抗器支柱绝缘子的工频湿闪电压,其绝缘裕度皆大于 20%,表明支柱绝缘子工频耐受电压的设计满足要求。

综合仿真结果来看,雷击过电压放电闪络是连续阴雨天气且线路在雷击工况下的小概率事件。

现场录波显示,极 II 直流滤波器低压侧电流 ( $CT_4$ ) 突变,且  $I_{CT4}=3.4$  kA,仿真计算结果  $A_2$  避雷器电流  $I_{F2}=3$  kA,与故障录波数值基本一致。

### 5 避雷器试验

直流滤波器中的避雷器可以保护滤波器元件避免放电和投切造成的雷电冲击和操作冲击<sup>[25]</sup>,针对出现过电压的 HP12/36 调谐滤波器 022LB 避雷器,进行常规试验和耐压试验。

#### 5.1 常规试验

在仿真工况下,开展各避雷器常规试验,绝缘电阻、参考电压、泄露电流与末次交接试验无明显差别,判断避雷器在故障工况下不会发生损坏。试验结果见表 7。

表 7 022LB 避雷器试验结果  
Table 7 Test result of 022LB arrester

| 试验项目               | 数值             |                |                |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|
|                    | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | A <sub>3</sub> |
| 绝缘电阻/MΩ            | 10 000         | 10 000         | 11 000         |
| 直流 1 mA 参考电压/kV    | 243.5          | 48             | 194.2          |
| 75% 直流参考电压下泄漏电流/μA | 20             | 30             | 16             |

#### 5.2 耐压试验

##### 1) 高校实验室试验

在某大学高压实验室对避雷器进行耐压试验,现场试验条件为温度 29.5℃、相对湿度 66%、气压 100 kPa,按绝缘子表面干和湿两种状态、分别进行工频、操作冲击和雷电冲击 3 种试验。具体如下<sup>[26-27]</sup>:

①雷电冲击闪络试验采用正极性冲击电压,用视在波前时间和视在半峰值时间分别为 1.2 μs 和 50 μs 的标准雷电冲击电压波形试验。

②操作冲击闪络试验采用正极性进行,冲击电压波形的波前时间和半峰值时间分别为 250 μs 和 2 500 μs。

③湿闪络试验采用人造雨方式,雨水的体积电导率选  $8.33\pm1.25\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ,计及最严苛条件,确定雨水电导率  $\delta=10\ \mu\text{S}/\text{cm}$  (20℃ 时)<sup>[28]</sup>。试验时,喷淋的雨水应均匀、呈滴状,降雨率的垂直与水平分量均为 1.0~2.0 mm/min。

试验结果见表 8。若现场高温高湿阴雨天气时,实际工频闪络电压将会更低。同时,考虑试验环境相对湿度不高,在高湿度环境条件下,实际雷电冲击和操作冲击放电电压及工频闪络电压将会进一步降低。

表 8 绝缘子耐压试验结果  
Table 8 Withstanding voltage test result of insulator kV

| 试验项目 | 雷电冲击<br>(50% 放电电压) | 操作冲击<br>(50% 放电电压) | 工频闪络<br>(闪络电压) |
|------|--------------------|--------------------|----------------|
| 设计值  | 250                | 190                | 125            |
| 干燥状态 | 267.35             | 244.91             | 183            |
| 潮湿状态 | 243.40             | 212.66             | 120            |

按照 3 个标偏核实湿态对应的操作冲击耐压电压,见表 9,已低于设计要求 190 kV<sup>[29]</sup>。

表 9 绝缘子耐压试验结果  
Table 9 Withstanding voltage test result of insulator

| 试验项目 | 操作冲击<br>(50% 放电<br>电压)/kV | 由湿态操作电压 $U_{50}$ 折算到<br>操作耐受水平/kV |     |
|------|---------------------------|-----------------------------------|-----|
| 设计值  | 190                       | 3 标偏,99.7%                        | 174 |
|      |                           | 1.3 标偏,90%                        | 196 |
| 潮湿状态 | 212.66                    | 2 标偏,95.5%                        | 187 |

绝缘子的 50% 闪络电压  $U_{50}$  可由其标准环境下的耐受电压  $U_w$  通过下式计算<sup>[30]</sup>

$$U_{50} = \frac{U_w}{1 - 3\sigma} \tag{4}$$

式中,  $\sigma$  表示安全绝缘裕度,单位为 %。

##### 2) 国家级重点实验室试验

为保证试验的准确性和可比性,在某国家级重点实验室进行同样工况的耐压试验,试验结果见表 10~11。从试验结论来看,与高校试验室试验基本一致,相对湿度等气候条件比实际运行工况略低。

表 10 绝缘子潮湿状态操作冲击电压试验结果  
Table 10 Switching voltage test result of insulator in humid condition

| 设备编号       | 50% 放电电压/kV |
|------------|-------------|
| 1 号绝缘子(完好) | 279         |
| 2 号绝缘子(故障) | 281         |

表 11 工频闪络试验结果  
Table 11 Power frequency flashover test result  
kV

| 试验项目  | 设备编号 | 干工频闪络试验 | 湿工频闪络试验 |
|-------|------|---------|---------|
| 第1次放电 | 1号   | 181.0   | 150.0   |
|       | 2号   | 172.0   | 144.0   |
| 第2次放电 | 1号   | 178.0   | 149.0   |
|       | 2号   | 172.0   | 133.0   |
| 第3次放电 | 1号   | 174.0   | 145.0   |
|       | 2号   | 170.0   | 135.0   |
| 第4次放电 | 1号   | 177.0   | 143.0   |
|       | 2号   | 172.0   | 137.0   |
| 第5次放电 | 1号   | 178.0   | 142.0   |
|       | 2号   | 171.0   | 121.0   |
| 平均值   | 1号   | 177.6   | 145.8   |
|       | 2号   | 171.4   | 134.0   |

5.3 绝缘子闪络分析

结合现场录波和仿真分析,  $L_1$  对地支撑绝缘子承受 2 倍和 4 倍工频波动量的非标准过电压, 峰值在 121.5~131.0 kV 之间, 试验结果中绝缘子湿态工频闪络有效值 120 kV(峰值 167 kV)、操作电压  $U_{50}$  峰值 212.66 kV, 经绝缘校准后其耐受能力应介于工频和操作之间。在高湿阴雨的现场工况下, 绝缘子对这种非标准类工频耐压较试验时能力下降<sup>[11]</sup>, 故障时刻存在闪络的可能。

5.4 仿真结果应用

基于仿真结果, 对比同类型其他换流站, 对 HP12/36 直流滤波器操作耐受水平和工频耐受水平进行校核<sup>[31]</sup>。从校核结果来看, 不同厂家针对同类型电抗器支柱绝缘子参数选型绝缘裕度存在一定差异, 具体见表 12-13。

表 12 同类型电抗器操作过电压仿真结果对比  
Table 12 Simulation results comparison of switching overvoltage for the same type of reactors

| 换流站   | 操作电压/kV | 操作耐受电压/kV | 裕度 $\sigma$ /% |
|-------|---------|-----------|----------------|
| 故障站   | 152.1   | 190       | 25             |
| B 逆变站 | 186.6   | 356       | 91             |
| C 逆变站 | 159.3   | 950       | 496            |
| D 逆变站 | 153.1   | 190       | 24             |
| E 整流站 | 171.5   | 410       | 139            |

表 13 同类型电抗器工频过电压仿真结果对比  
Table 13 Simulation results comparison of power frequency overvoltage for the same type of reactors

| 换流站   | 操作电压/kV | 操作耐受电压/kV | 裕度 $\sigma$ /% |
|-------|---------|-----------|----------------|
| 故障站   | 91.9    | 125       | 36             |
| B 逆变站 | 66.7    | 135       | 102            |
| C 逆变站 | 43.6    | 570       | 1 207          |
| D 逆变站 | 75.2    | 95        | 26             |
| E 整流站 | 63.5    | 100       | 58             |

由表 12-13 可以看出, 各换流站同类型电抗器工频耐受电压均可以满足正常运行工况要求。但是, 故障换流站和 D 逆变站较其他站工频耐受和操作耐受电压裕度偏低, 干弧距离较其他站偏低, 在特殊故障工况和极端天气环境条件下, 绝缘子发生间隙闪络的可能性较大, 为减小雷电过电压影响, 降低闪络概率, 建议对支柱绝缘子更换为绝缘水平更高一级的绝缘子, 确保其绝缘裕度不低于 50%。

6 结语

1) 开展故障工况仿真计算, 直流滤波器 HP12/36 高压端避雷器  $A_1$  和低压端避雷器  $A_2$  动作, 故障时刻电压峰值仿真计算结果为 279 kV、59 kV, 均高于避雷器 1 mA 参考电压 194.5 kV、48 kV, 与现场避雷器动作情况一致。电抗器  $L_1$  低压端过电压峰值仿真计算为 121.5 kV, 现场录波分析过电压峰值最大约 132.5 kV, 仿真计算情况与录波结果基本一致。

2) 故障时, 绝缘子过电压特征介于工频过电压与操作过电压标准波形之间, 即按照承受工频过电压估计, 相当于最大可能承受有效值为  $131.0 \text{ kV} / \sqrt{2} = 92.63 \text{ kV}$  的工频过电压, 绝缘子工频湿态闪络电压有效值设计值为 125 kV(峰值 177 kV), 湿态工频耐受水平大于 25% 的裕度。

3) 避雷器试验表明, 故障支柱绝缘子工频湿态闪络放电电压有效值分别为 120 kV(峰值 167 kV) 和 121 kV(峰值 171 kV), 低于该设备工频湿态闪络电压设计值 125 kV(峰值 177 kV), 考虑试验环境相对湿度偏低, 在现场连续阴雨高温环境条件下, 实际工频湿态闪络电压可能进一步降低, 即该设备长期运行后耐压水平有所下降。因此, 在特殊运行环境且承受振荡频率大于工频的非标准过电压时, 该绝缘子发生闪络故障的概率仍然较高。

4) 通过雷击工况下系统仿真模拟, 极 II 直流滤波器 HP12/36 的  $L_1$  电抗器低压端操作过电压最大值为 152.1 kV, 该处对地操作过电压耐受水平为 190 kV, 根据标准和规程要求操作耐受绝缘裕度按不小于 20% 设计, 表明操作耐受水平满足规程要求。厂家提供的 HP12/36 的  $L_1$  低压端支柱绝缘子工频耐受电压 125 kV, 低压端对地工频过电压为 91.9 kV, 裕度为 36%, 满足正常运行工况要求。但是, 由于工频耐受电压裕度和干弧距离偏低, 在特殊故障工况和极端天气环境条件下, 绝缘子发生间隙闪络的概率较大, 为降低闪络概率、避免同类故障再次发生, 提高直流运可靠性、提升绝缘裕度, 建议将直流滤波器  $L_1$  支柱绝缘子替换为干弧距离大

于 600 mm 的支柱绝缘子。

5) 直流滤波器支柱绝缘子的选型过程, 是按照安装运行位置确定雷电冲击水平、操作冲击水平和爬电距离电压等参数要求, 兼顾其自身重量, 最终对抗弯能力进行校核后确定其技术参数。因此, 支柱绝缘子的工频过电压数值由其雷电冲击水平、操作冲击水平和爬电距离电压等参数共同决定。

直流滤波器  $L_1$  电抗器的支柱绝缘子工频湿闪电压等级及其裕度均能满足选型要求, 但从运行实际来看, 考虑极端天气、环境污秽等级等因素, 应将直流滤波器  $L_1$  支柱绝缘子补强为耐压更高一级的支柱绝缘子, 保证其工频耐受电压裕度不低于 50%。

### 参考文献

- [1] 戈尔德, 周诗, 孙景群. 雷电[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
- [2] 张耀月.  $\pm 800$  kV 直流分压器低能量放电故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 98-105.  
ZHANG Yaoyue. Analysis on low energy discharge fault analysis of  $\pm 800$  kV DC voltage divider[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 98-105.
- [3] 张宏伟. 振荡过电压对双极中性线滤波器电抗器绝缘性能影响分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(5): 74-84.  
ZHANG Hongwei. Analysis of the Influence of oscillatory overvoltage on the insulation performance of bipolar neutral line filter reactors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(5): 74-84.
- [4] LI Xin, WANG Yang, XU W. A new filtering scheme for HVDC terminals based on damped high-pass filter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(5): 2050-2057.
- [5] 张宏伟, 杨晓静, 姬凯. 暂态过电压对双极中性线冲击电容器绝缘性能影响分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(3): 61-68.  
ZHANG Hongwei, YANG Xiaojing, JI Kai. Analysis on influence of transient overvoltage on insulation performance of bipolar neutral line surge capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(3): 61-68.
- [6] 吴钰颖, 郭洁.  $\pm 1$  100 kV 直流滤波器典型故障过电压特性研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 130-137.  
WU Yuying, GUO Jie. Typical fault overvoltage characteristics of  $\pm 1$  100 kV DC filter[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2020, 39(1): 130-137.
- [7] 江金成, 彭寅章, 王尚德, 等. 特高压换流站交流滤波电容器组不平衡保护定值整定研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(2): 98-105.  
JIANG Jincheng, PENG Yinzhong, WANG Shangde, et al. Study on unbalance protection setting of AC filter capacitor bank in UHV converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 98-105.
- [8] 张宏伟. 内部异物对超高压 HGIS 隔离开关触头放电影响分析[J]. 农村电气化, 2025(6): 48-55.  
ZHANG Hongwei. Analysis of the influence of internal foreign objects on the discharge of ultra-high voltage HGIS disconnector contacts[J]. Rural Electrification, 2025(6): 48-55.
- [9] 熊俊, 甘文风, 陈愚, 等. 受端电网故障下真双极柔性直流输电系统电压协同控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(5): 32-41.  
XIONG Jun, GAN Wenfeng, CHEN Yu, et al. A voltage collaborative control method for symmetrical bipolar MMC-HVDC under the receiving-end grid fault[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(5): 32-41.
- [10] 王运超, 余占清, 牟亚, 等. 特高压直流中性母线过电压特性及抑制措施[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6765-6773.  
WANG Yunchao, YU Zhanqing, MU Ya, et al. Neutral bus overvoltage characteristics and suppression measures for UHVDC converter stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6765-6773.
- [11] ZHU Xiaoguang, LIU Yichen, DENG Junbo, et al. Study on overvoltage characteristics and arrester configuration strategy for  $\pm 1$  100 kV HVDC transmission lines[J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 1232-1237.
- [12]  $\pm 800$  kV 高压直流输电系统成套设计规程: DL/T 5426—2021[S]. 2021.  
System design standard for  $\pm 800$  kV HVDC system: DL/T 5426—2021[S]. 2021.
- [13] 高压直流换流站设计规范: GB/T 51200—2016[S]. 2016.  
Code for design of HVDC converter station: GB/T 51200—2016[S]. 2016.
- [14] 王剑, 谷山强, 彭波, 等. 国网辖区特高压直流线路防雷运行现状分析[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(4): 511-520.  
WANG Jian, GU Shanqiang, PENG Bo, et al. Research on lightning protection operation status of UHVDC transmission lines in SGCC[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 511-520.
- [15] 龚大卫, 俞敦耀. 三峡至常州  $\pm 500$  kV 高压直流输电工程简介[J]. 中国电力, 2000, 33(2): 42-44, 53.  
GONG Dawei, YU Dunyao. A brief introduction to  $\pm 500$  kV HVDC transmission project from the Three Gorges to Changzhou[J]. Electric Power, 2000, 33(2): 42-44, 53.
- [16] 刘泽洪.  $\pm 1$  100 kV 特高压直流输电工程创新实践[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7782-7791.  
LIU Zehong. Findings in development of  $\pm 1$  100 kV UHVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7782-7791.
- [17] 邓京, 韩永霞, 邓俊文, 等.  $\pm 800$  kV 换流站交流滤波器绝

- 缘配合影响因素[J]. 广东电力, 2021, 34(5): 107-113.
- DENG Jing, HAN Yongxia, DENG Junwen, et al. Influencing factors of insulation coordination of AC filter in  $\pm 800$  kV converter station[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(5): 107-113.
- [18] DAI Zhihui, LIU Ningning, ZHANG Cheng, et al. A pilot protection for HVDC transmission lines based on transient energy ratio of DC filter link[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1695-1706.
- [19] ASIF M, LEE H Y, KHAN U A, et al. Analysis of transient behavior of mixed high voltage DC transmission line under lightning strikes[J]. IEEE Access, 2019(7): 7194-7205.
- [20] VAN JAARSVELD B J, NICOLAE D V. Simplified modeling of an air-core reactor for lightning impulse transient studies[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 92(1): 83-92.
- [21] 高压直流输电系统用直流滤波电容器及中性母线冲击电容器: GB/T 20993—2012[S]. 2012.
- DC filter capacitors and neutral bus surge capacitors for HVDC transmission system: GB/T 20993—2012[S]. 2012.
- [22] XUE Ancheng, YUE Lei, ZHANG Jiahuan, et al. A new quantitative analysis method for overvoltage in sending end electric power system with UHVDC[J]. IEEE Access, 2020(8): 145898-145908.
- [23] 绝缘配合: GB 311.1—2012[S]. 2012.
- Insulation co-ordination: GB 311.1—2012[S]. 2012.
- [24] 曹虹, 周泽昕, 吕鹏飞, 等. 高压直流输电线路故障初始阶段解析方法研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(7): 137-147.
- CAO Hong, ZHOU Zexin, LYU Pengfei, et al. Study on analysis method for HVDC transmission line faults at initial stage[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(7): 137-147.
- [25] 雷梦飞, 王少华, 刘黎, 等. 特高压直流输电线路雷击故障特性分析[J]. 电瓷避雷器, 2019(3): 57-62.
- LEI Mengfei, WANG Shaohua, LIU Li, et al. Analysis on lightning fault characteristics of UHVDC transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3): 57-62.
- [26] 输变电设备状态检修试验规程: Q/GDW 1168—2013[S]. 2020.
- [27]  $\pm 800$  kV 特高压直流设备预防性试验规程: Q/GDW 10299—2025[S]. 2025.
- [28] 张耀月. 伞裙结构对超(特)高压电流互感器闪络特性影响的研究[J]. 电力安全技术, 2024, 26(12): 73-78.
- ZHANG Yaoyue. Study on influence of umbrella-skirt structure upon the flashover characteristics of UHV current transformer[J]. Electric Safety Technology, 2024, 26(12): 73-78.
- [29] 聂男峰, 王磊, 王东举, 等.  $\pm 800$  kV 特高压多端直流系统换流阀过电压机理及影响因素研究[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 307-315.
- NIE Nanfeng, WANG Lei, WANG Dongju, et al. Study on overvoltage mechanism and influencing factors of converter valves in  $\pm 800$  kV multi-terminal UHVDC system[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 307-315.
- [30] 高压直流输电系统直流滤波器: GB/T 25308—2022[S]. 2022.
- DC filters for high voltage direct current (HVDC) transmission system: GB/T 25308—2022[S]. 2022.
- [31] LIU Zehong, ZHANG Fuxuan, YU Jun, et al. Research on key technologies in  $\pm 1100$  kV ultra-high voltage DC transmission[J]. High Voltage, 2018, 3(4): 279-288.

#### 作者简介:

张耀月(2001—), 女, 工学学士、管理学学士, 研究方向为电力系统安全生产及应用经济学。E-mail: 467711318@qq.com。