

# 基于真空断路器与 SF<sub>6</sub> 断路器串联的新型混合式高压直流断路器理论分析

程 显<sup>1,2</sup>, 葛国伟<sup>1,2</sup>, 杨培远<sup>1</sup>, 吴启亮<sup>1</sup>, 廖敏夫<sup>3</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 河南省输配电装备与电气绝缘工程技术研究中心, 河南 郑州 450001;

3. 大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:**提出基于真空断路器与 SF<sub>6</sub> 断路器串联的混合式高压直流断路器新型拓扑结构, 在传统强迫过零直流开断的基础上, 提出以高压串联晶闸管续流支路创造主开关电压零休的思路, 进而提高主开关的动态介质恢复强度。分析了新型混合式高压直流断路器的拓扑结构、工作原理、工作过程, 得到其电压零休时间的数学描述和动态电压分布协同调控措施。然后基于连续过渡模型和改进 Mayr 模型搭建了新型混合式高压直流断路器的仿真电路, 分析得到续流支路限流电阻、电感、振荡回路参数等对电压零休时间、反向暂态恢复电压的影响规律。

**关键词:**高压直流输电; 高压直流断路器; 续流串联晶闸管; 电压零休

**中图分类号:** TM 561

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.06.010

## 0 引言

多端直流输电系统、直流输电网等是未来电网发展趋势与方向, 高压直流电网在大容量远距离输电、新能源的并网及消纳和互联大电网等方面具有优势, 同时, 高压直流电网的工程应用面临一系列关键技术问题, 其中之一是高压直流断路器相关理论与关键技术<sup>[1-2]</sup>。

高压直流断路器的研制难点在于直流电流无过零点、故障电流上升速度快、直流系统中储能元件储存能量大。目前, 高压直流开断方法包括自激振荡、强迫过零、机械开关与电力电子开关混合式直流开断等, 其中, 强迫过零和混合式直流断路器是主流方向<sup>[3-8]</sup>。在混合式直流断路器领域, ABB 研制了基于高速隔离开关与绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 并联的高压直流断路器, 其额定电压为 80 kV, 额定电流为 2 kA, 开断电流为 9 kA, 开断时间为 5 ms, ABB 基于模块串联, 提出了 320 kV 混合式高压直流断路器方案<sup>[3]</sup>; Alstom 公司研制了 120 kV/5 ms/7.5 kA 混合式高压直流断路器样机<sup>[4]</sup>; 国家电网智能电网研究院研制了 200 kV/3 ms/12 kA 混合式高压直流断路器样机<sup>[5]</sup>。在强迫过零开断领域, 日本三菱公司研制了 80 kV/16 kA (开断时间为 10 ms) 的机械

式强迫过零直流断路器<sup>[6]</sup>; ABB 研制了 80 kV/10.5 kA/5 ms 直流断路器; 西电公司、西安交通大学等研制了 55 kV/16 kA/5 ms 的直流断路器单元, 并串联构成了 110 kV/12 kA/4.6 ms 的直流断路器样机<sup>[7]</sup>; 大连理工大学邹积岩团队提出了机械联动的 15 kV/10 kA 直流断路器模块<sup>[8]</sup>。

真空断路器动态介质恢复速度快, 适用于直流中频开断场合, 由于真空间隙饱和效应, 高压直流领域需要采用多断口串联技术; SF<sub>6</sub> 断路器动态介质强度高, 但 (di/dt) × (du/dt) 承受能力低。将耐压等级高的 SF<sub>6</sub> 断路器和中频开断性能强的真空断路器串联, 可充分发挥真空介质恢复速度快和 SF<sub>6</sub> 介质恢复强度高的优势, 可以实现更高电压等级的直流开断, 近年来在国内外引起了广泛关注。R. Dethlefsen 等将 15 kV 及以上电压等级的真空灭弧室与 72 kV 及以上电压等级的 SF<sub>6</sub> 灭弧室串联组成的模块式混合断路器应用于 145 ~ 230 kV 电压等级<sup>[9]</sup>; M. Perret 等提出将真空灭弧室与 SF<sub>6</sub> 灭弧室同轴连接应用于高电压等级以减小整个 SF<sub>6</sub> 气腔体积<sup>[10]</sup>; 荷兰 KEMA 实验站 R. Smeets 等建立了真空间隙与 SF<sub>6</sub> 气体间隙串联的电弧仿真模型, 并成功研制出额定电压为 145 kV、开断电流为 63 kA 的混合断路器样机, 试验测试证明 SF<sub>6</sub> 气体间隙串联真空间隙对电流开断有明显增益效果<sup>[11]</sup>; S. Yanabu 等将 1 个真空灭弧室和 1 个 SF<sub>6</sub> 灭弧室布置在封闭的接地箱体中, 搭建了额定电压为 250 kV、额定电流为 1 200 A 的混合断路器样机, 并且进行了直流开断试验, 研制了 250 kV/1.2 kA 和 200 kV/3.5 kA 高压直流断路器<sup>[12]</sup>; 葛国伟等建立了真空灭弧室与 SF<sub>6</sub> 间隙串联的高压直流开断仿真模型, 在拓扑结

**收稿日期:** 2018-03-05; **修回日期:** 2019-04-02

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51407163, 51777025); 中国博士后科学基金面上资助项目 (2017M622370); 河南省高校重点科研项目 (16A470014, 19A470008)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51407163, 51777025), China Postdoctoral Science Foundation (2017M622370) and the Key Scientific Research Projects of Colleges and Universities in Henan (16A470014, 9A470008)

构、动态电压分压措施等方面开展了研究<sup>[13]</sup>。笔者所在团队前期对真空电弧与SF<sub>6</sub>气体电弧相互作用、串联间隙零区与弧后相互影响及协同过程开展了大量的研究工作,得到两串联间隙的协同控制策略和电弧发展调控措施<sup>[14-15]</sup>。然而目前的相关研究主要针对串联真空与SF<sub>6</sub>间隙动态电压分布与动态介质恢复协同增益,对高压直流开断过程中零区协同作用机理及调控措施尚无深入、细致的研究。

本文提出了基于真空断路器与SF<sub>6</sub>断路器串联的强迫过零式高压直流断路器(下文简称新型混合式高压直流断路器)方案,并通过高压续流支路为机械开关创造“电压零休”,以获得更长的动态介质恢复时间,并通过分压措施实现了真空断路器与SF<sub>6</sub>断路器的动态电压与动态介质恢复的协同效应;对新型混合式高压直流断路器的工作原理进行了理论分析与建模,分别采用连续过渡模型和改进Mayr模型建立了真空电弧和SF<sub>6</sub>电弧模型,搭建了新型混合式高压直流断路器仿真模型,分析了LC反向振荡电路、高压续流支路及串联限流电阻、电感等参数对“电压零休”时间的影响,最后得到新型混合式高压直流断路器的参数设计依据,为高压直流断路器的研制提供了新的思路和方法。

## 1 新型混合式高压直流断路器结构与原理

### 1.1 新型混合式高压直流断路器结构

新型混合式高压直流断路器采用真空断路器与SF<sub>6</sub>断路器串联构成主开关,以LC振荡电路提供反向电流与主电流叠加创造人工过零点,在过零后的反向电压由高压续流串联晶闸管组件导通,以便为过零后的主开关创造更长的介质恢复时间(称为“电压零休”),然后在反向电流后,正向暂态恢复电压(TRV)施加在混合式直流断路器两端。新型混合式高压直流断路器结构如图1所示。图中,VIU和GIU分别为真空断路器与SF<sub>6</sub>断路器; $R_N$ 和 $R_D$ 用于实现真空断路器与SF<sub>6</sub>断路器串联的动态电压协同效应; $C_2$ 和 $L_2$ 分别为LC振荡电路的电容和电感,用于产生反向振荡电流;高压续流支路由高压大容量串联晶闸管SCR<sub>1</sub>与SCR<sub>2</sub>、限流电阻 $R$ 和限流电感 $L$ 组成,串联晶闸管组件利用均压电阻 $R_G$ 实现其静动态均压,限流电阻 $R$ 和电流电感 $L$ 用于限制高压续流支路的电流,进而减小串联晶闸管组件的电流,降低晶闸管组件成本;TVS<sub>1</sub>、TVS<sub>2</sub>分别为正向、负向振荡电路的触发开关,由 $L_1$ 、 $C_1$ 、TVS<sub>1</sub>构成的负向振荡电路与负向串联晶闸管组件SCR<sub>1</sub>用于负向故障电流(从右到左)的开断, $L_2$ 、 $C_2$ 、TVS<sub>2</sub>构成的正向振荡电路与正向串联晶闸管组件SCR<sub>2</sub>用于正向故障电流的开断;MOV为避雷器,主要用于吸收直流系统平波电抗器等储存的能量; $R_2$ 和CB<sub>2</sub>分

别为正向振荡电路储能电容的充电电阻和充电控制开关;DS为隔离开关,用于切除直流开断后的泄漏电流,实现电气隔离。为了简化分析新型混合式高压直流断路器的工作原理,本文以正向故障电流的开断过程为研究对象,不考虑图1中点内负向振荡电路与负向串联晶闸管组件。

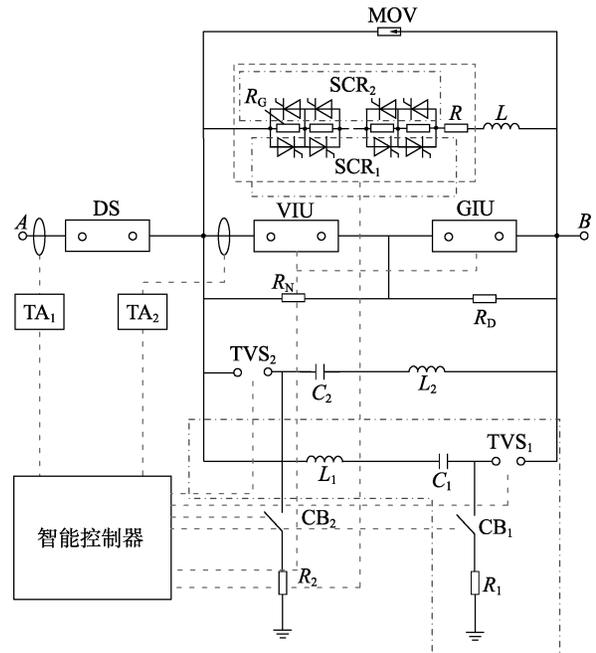


图1 新型混合式高压直流断路器结构

Fig.1 Structure of novel hybrid HVDC circuit breaker

为实现更高电压等级的高压直流断路器模块,主开关由真空断路器、SF<sub>6</sub>断路器串联构成。分别采用10 kV、35 kV真空断路器与35 kV、110 kV、220 kV的SF<sub>6</sub>断路器串联作为主开关构成50 kV、150 kV、200 kV等电压等级的混合式高压直流断路器模块,本文中理论仿真是基于10 kV真空断路器与35 kV的SF<sub>6</sub>断路器串联作为主开关的50 kV新型混合式高压直流断路器模块。由于可以得到较高的SF<sub>6</sub>断路器介质恢复强度,采用真空断路器与SF<sub>6</sub>断路器串联相比于多断口真空断路器技术可以实现更高电压等级的直流断路器模块。

### 1.2 新型混合式高压直流断路器工作原理

新型混合式高压直流断路器的工作原理如图2所示。图中, $I_{HCB}$ 为系统电流; $I_C$ 为反向振荡电流; $I_{MOV}$ 为避雷器电流; $I_S$ 为主开关电流; $V_{HCB}$ 为系统TRV; $V_{GI}$ 为SF<sub>6</sub>断路器两端电压; $V_{VI}$ 为真空断路器两端电压。正常运行时电流主要由串联的真空与SF<sub>6</sub>断路器承担,额定电流为2 kA;在20 ms( $t_F$ )时发生短路故障,由于平波电抗器的限流作用,电流开始由2 kA快速增加,真空断路器与SF<sub>6</sub>断路器在发生故障后快速分闸,充电控制开关CB<sub>1</sub>分闸;在25 ms( $t_C$ )时,TVS<sub>2</sub>触发导通,引入反向振荡电流,主开关电流开始下降,主电流开始由主开关向振荡电路

转移;在  $t_{D0}-t_{D1}$  时段内,主开关电流为 0 后,反向振荡电流由高压续流串联晶闸管组件导通,此时主开关两端几乎无电压,如图 2(b) 所示;待续流支路电流在  $t_{D1}$  时刻过零后,正向 TRV 施加到主开关两端,因此  $t_{D0}-t_{D1}$  为主开关介质恢复时间,称为“电压零休”时间,在 TRV 阶段,通过非线性电阻和分压电阻的作用,初始 TRV 先由真空断路器承担直至真空断路器承担的电压达到其介质恢复强度,此阶段为 SF<sub>6</sub> 断路器的动态介质恢复争取了更多的时间,后期主要由 SF<sub>6</sub> 断路器承担 TRV;当 TRV 达到避雷器的设置电压后,在  $t_{MOV}$  时刻,避雷器开始工作,电流开始由振荡电路向避雷器支路转移;在  $t_{DS}$  时刻,如图 2(a) 所示,避雷器电流和故障电流降低为 0,并由隔离开关 DS 断开,实现直流故障电流的断开。

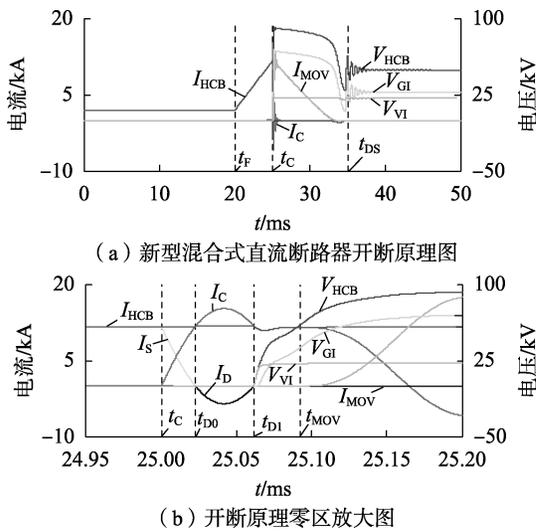


图 2 新型混合式直流断路器开断原理

Fig.2 Principle of novel hybrid HVDC circuit breaker in interruption process

传统的强迫过零直流开断过程零区如图 3 所示,其与图 2(b) 的区别在于存在反向 TRV,反向 TRV 施加在主开关两端,而存在高压续流串联晶闸管组件时,反向 TRV 由续流串联晶闸管组件导通,此时反向 TRV 几乎为 0;另外,通过高压续流串联晶闸管组件支路的限流电阻和限流电感的作用,高压续流串联晶闸管组件支路的电流可被限制在较低水平,大幅降低了高压续流串联晶闸管组件的成本。

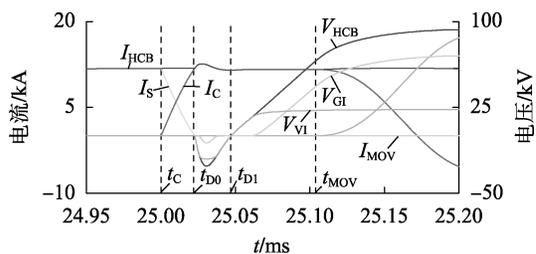


图 3 无高压串联晶闸管组件续流支路时零区开断过程

Fig.3 Interruption process of novel hybrid HVDC circuit breaker without follow-current branch in zero-crossing zone

通过高压续流串联晶闸管组件支路为主开关创造了“电压零休”时间,“电压零休”时间可以通过振荡电路参数、高压续流电路参数进行调整,进而使得主开关具有更高的介质恢复强度。

## 2 新型混合式高压直流断路器理论分析

新型混合式高压直流断路器的工作过程如附录中图 A1 所示。图中,模拟系统直流电压为 50 kV;系统电感  $L_s$  设置为 25 mH,用于模拟直流系统平波电抗器及线路电感参数等<sup>[3,16]</sup>;额定电流为 2 kA;额定负载电阻  $R_L$  设置为 25  $\Omega$ ;短路故障电阻  $R_F$  设置为 0.001  $\Omega$ 。根据图 2 中开断过程工作原理,将新型混合式高压直流断路器的工作过程分为 6 个阶段进行理论分析。

(1) 正常工作阶段(0— $t_F$ )。

正常工作阶段工作过程如附录中的图 A1(a) 所示,主电流为 2 kA 的额定电流,由隔离开关 DS、真空断路器 VIU 和 SF<sub>6</sub> 断路器 GIU 串联构成的主开关承担。同时,振荡电路中的储能电容  $C_2$  由点 B 的额定电压通过  $L_2$ 、 $C_2$ 、 $CB_1$ 、 $R_1$  构成的支路为其充电达到额定电压。

(2) 故障电流上升阶段( $t_F-t_C$ )。

在发生短路故障后,由于系统电感的影响,故障电流快速增加,此时振荡回路储能电容充电控制开关  $CB_1$  断开,主电流流向如图 A1(b) 中的蓝色虚线所示,此时短路故障电流满足式(1)。

$$i = i_N + \frac{U_N}{t}(t - t_F) \quad (1)$$

其中,  $i_N$  为额定电流;  $U_N$  为系统电压。

(3) 主开关电流降低为 0 的阶段( $t_C-t_{D0}$ )。

在系统检测到短路故障后,主开关快速分闸,并在  $t_C$  时刻导通 TVS<sub>2</sub> 引入反向振荡电流,叠加到主开关支路,反向振荡电流回路如图 A1(b) 所示,主开关电流迅速降低,在  $t_{D0}$  时刻得到电流零点。反向振荡电路的振荡电流和频率计算如下:

$$i_{CM} = U_N \sqrt{\frac{C_2}{L_2}} \quad (2)$$

$$f_C = \frac{1}{T_C} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (3)$$

其中,  $i_{CM}$  为反向电流的最大值;  $f_C$  和  $T_C$  分别为反向振荡电流频率和周期。

(4) 高压串联晶闸管组件续流阶段( $t_{D0}-t_{D1}$ )。

当主开关电流过零后,在无高压续流串联晶闸管组件支路的情况下,将产生反向 TRV,加入高压续流串联晶闸管组件支路后,高于故障电流的反向电流由高压续流串联晶闸管组件支路续流,振荡回路一方面承担主电流,另一方面一部分电流通过高压

续流串联晶闸管组件支路续流,此时的工作过程如图 A1(c)所示。高压续流串联晶闸管组件支路续流过程的时间即为主开关的“电压零休”时间,在不考虑限流电阻和限流电感的作用时,“电压零休”时间可以由式(4)计算得到。在振荡回路电容和电感分别为 10 μF 和 80 μH 时,由式(2)和式(3)计算得到的反向振荡电流幅值和频率分别为 17.7 kA 和 5.65 kHz,计算得到的“电压零休”时间为 42 μs,这与图 2 中的结果基本一致。

$$\Delta t_0 = \frac{T_c}{2} - \frac{2}{\omega_2} \arcsin \frac{i_{ID0}}{i_{CM}} \quad (4)$$

其中,ω<sub>2</sub> 为振荡回路的角频率; i<sub>ID0</sub> 为系统故障电流在主开关过零后的瞬时值,可以由式(1)计算得到。

(5) 正向 TRV 分压阶段(t<sub>D1</sub>—t<sub>MOV</sub>)。

在“电压零休”后,主电流由图 A1(c)中的蓝色虚线表示,此时续流回路消失,正向的 TRV 施加到主开关两端,同时高压续流串联晶闸管组件支路承受反向电压,所以高压续流串联晶闸管组件采用多个晶闸管组件串联,能够耐受较高的反向电压。随着 TRV 的增加,串联的真空断路器和 SF<sub>6</sub> 断路器的电压分布关系由非线性电阻 R<sub>N</sub> 和分压电压 R<sub>D</sub> 决定。R<sub>N</sub> 并联在真空开关两端,在初始 TRV 阶段, R<sub>N</sub> ≫ R<sub>D</sub>, 电压主要由真空断路器承担,当 TRV 达到 R<sub>N</sub> 的保护电压后,电压由主要 SF<sub>6</sub> 断路器承担。

(6) 避雷器吸收能量阶段(t<sub>MOV</sub>—t<sub>DS</sub>)。

当正向 TRV 达到避雷器的动作电压后,避雷器开始工作,避雷器电流开始增加,电流开始由振荡回路向避雷器支路转移,最后直流系统储存的电能完全由避雷器吸收,如图 A1(d)所示。当避雷器电流降低为 0 后,隔离开关 DS 断开,完成直流故障的断开,实现电气隔离。

### 3 新型混合式高压直流断路器建模分析

#### 3.1 新型混合式高压直流断路器模型

(1) 真空电弧模型。

真空电弧连续过渡模型最早由 Andrews 和 Varey 提出,用于描述介质恢复阶段开断过程的电弧模型<sup>[17]</sup>,该模型描述了低气压等离子体在电流过零后鞘层的发展过程,提供了弧后等离子体的数学描述,具体如下。

$$l^2 = \frac{4\varepsilon_0 U_0}{9eZN_i} \left[ \left( 1 + \frac{u(t)}{U_0} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{3u(t)}{U_0} - 1 \right] \quad (5)$$

$$U_0 = \frac{M_i}{2e} \left( v_i - \frac{dl}{dt} \right)^2 \quad (6)$$

$$i(t) = \frac{\pi D^2 Z N_i e}{4} \left( v_i - \frac{dl}{dt} \right) \quad (7)$$

$$N_i = N_{i0} \exp \left( -\frac{t-t_0}{\tau} \right) \left( C_{AMP} \frac{l^2}{l_{gap}^2} + 1 \right) \quad (8)$$

其中, l 为正离子鞘层厚度; ε<sub>0</sub> 为自由介电常数; U<sub>0</sub> 为鞘层边缘电位; e 为电子电荷量; Z 为离子平均电荷数; N<sub>i</sub> 为鞘层边缘的离子密度,对于扩散电弧而言 N<sub>i</sub> 为 10<sup>18</sup> ~ 10<sup>23</sup> 数量级; u(t) 为电弧电压; M<sub>i</sub> 为离子质量,对于铜而言 M<sub>i</sub> = 1.062 × 10<sup>-25</sup> kg; v<sub>i</sub> 为中性等离子体中和鞘层边缘离子的速度,对于铜基扩散电弧而言, v<sub>i</sub> 的数量级一般为 10<sup>3</sup> ~ 10<sup>4</sup> m/s; i(t) 为弧后电流; D 为电弧弧柱直径; τ 为电弧时间常数; N<sub>i0</sub> 为鞘层边缘离子初始浓度; C<sub>AMP</sub> 为间隙电荷分布常数; l<sub>gap</sub> 为间隙长度。式(5)为鞘层发展厚度数学描述,鞘层厚度与离子体密度、鞘层电势和 TRV 等有关;式(6)为鞘层电势的数学描述;式(7)为弧后电流与离子体密度和电子迁移速度的关系;式(8)为离子密度的数学描述。

(2) SF<sub>6</sub> 电弧模型。

SF<sub>6</sub> 电弧模型采用如式(9)所示的改进 Mayr 电弧模型。

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left( \frac{u(t)i(t)}{P} - 1 \right) = \frac{1}{\theta_0 g^\alpha} \left( \frac{u(t)i(t)}{P_0 g^\beta} - 1 \right) \quad (9)$$

其中, g 为电弧电导; i(t) 为电弧电流; P 为电弧的功率耗散; P<sub>0</sub>、θ<sub>0</sub>、α、β 均为根据断路器和外部电路条件确定的 SF<sub>6</sub> 断路器电弧模型参数常量<sup>[18]</sup>。

真空电弧和 SF<sub>6</sub> 电弧模型在 ATP 仿真过程中相当于黑盒模型, TACS (Transient Analysis of Control Systems) 从外电路获取电压 u(t)、电流 i(t), 代入 TACS 实现数学模型的计算, 然后将计算结果得到的 R<sub>VCB</sub> 和 R<sub>GCB</sub> 代入外电路实现计算, 反复计算直到仿真结束, 仿真过程示意图见附录中的图 A2。

(3) 避雷器模型。

避雷器的模型参数设置的依据是其伏安特性, V<sub>ref</sub> 为参考电压, I<sub>ref</sub> 为参考电流, 通过对其 V-I 特性的分段线性处理, 用 3 个指数函数表达, 其对数关系见式(10), 其中, 参数 k<sub>i</sub> 和 α<sub>i</sub> 根据实际的避雷器产品的 V-I 特性得到。在 ATP 仿真模型中, 采用 FORTRAN 模块实现式(10)的计算。

$$\lg(V/V_{ref}) = \lg k_i - \alpha_i \lg [I/(nI_{ref})] \quad (10)$$

其中, n 为避雷器并联数量。

(4) 新型混合式高压直流断路器模型。

在 ATPdraw 搭建模拟直流开断系统, 其中, 真空电弧与 SF<sub>6</sub> 电弧模型采用 TACS 模块实现计算, 避雷器参数根据实际产品的伏安特性进行设置。搭建的新型混合式高压直流断路器仿真模型如图 4 所示, 虚线框内的部分为混合式直流断路器模型, 其余是外电路及其控制; R<sub>L</sub> 用于模拟额定负载, R<sub>F</sub> 用于模

拟短路故障;  $U_{DC}$ 、 $L_S$ 、 $R_S$  构成高压直流开断外电路;  $R_0$  和  $C_0$  用于模拟系统分布参数。

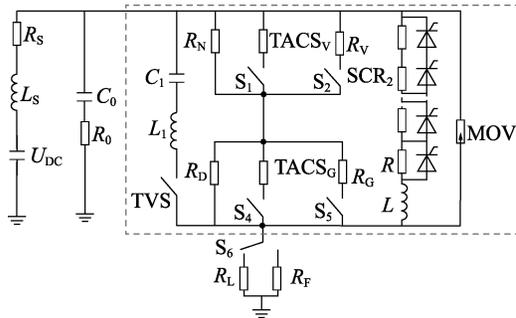


图 4 新型混合式高压直流断路器仿真模型

Fig.4 Simulation model of novel hybrid HVDC circuit breaker

### 3.2 新型混合式高压直流断路器仿真分析

#### (1) 无限流电阻和电感情况下的仿真。

在无限流电阻和限流电感时,得到的仿真结果如图 2 所示,“电压零休”时间为  $37.4 \mu\text{s}$ ,反向 TRV 几乎为 0,正向 TRV 的峰值为  $93.11 \text{ kV}$ ,直流开断过程的波形与国际大电网 A3/B4 工作组中提出的直流开断过程结果以及文献[3]中机械式直流开断过程结果一致。根据式(2),在不改变反向振荡电流峰值的情况下,改变反向振荡电流频率,即按照相同的倍数增加振荡回路的电容和电感参数,当振荡回路电容、电感同步增加为原来的 2 倍时,得到的直流开断过程波形见图 5,由于振荡频率的降低,主开关电流过零点由原来的  $25.023 \text{ ms}$  增加为  $25.046 \text{ ms}$ ,“电压零休”时间增加为  $75.9 \mu\text{s}$ ,而正向 TRV 峰值基本不变,同时高压续流串联晶闸管组件续流电流峰值基本不变。

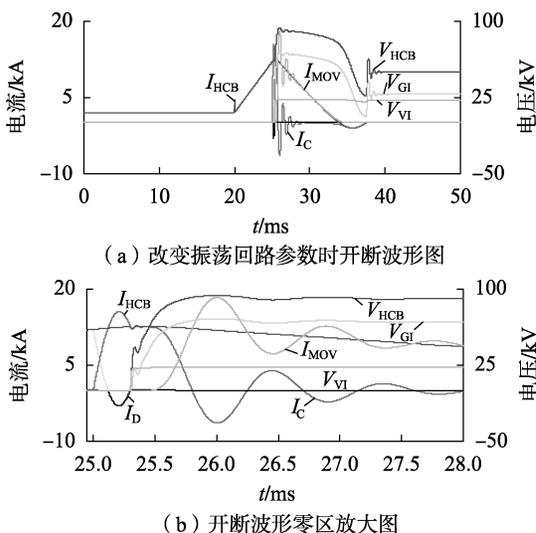


图 5 改变振荡回路参数时的开断波形

Fig.5 Interruption process of novel hybrid HVDC circuit breaker

在上述基础上,分别将振荡回路电容、电感增加到原来的 2、5、10 倍,得到“电压零休”时间的影响规律如图 6 所示。由图可知,“电压零休”时间

随着振荡回路电容、电感增加倍数的增加而线性增加,在倍数为 10 时,“电压零休”时间可以达到  $338.62 \mu\text{s}$ 。通过增加振荡回路电容、电感增加“电压零休”时间,可为后期主开关动态介质恢复创造有利条件。

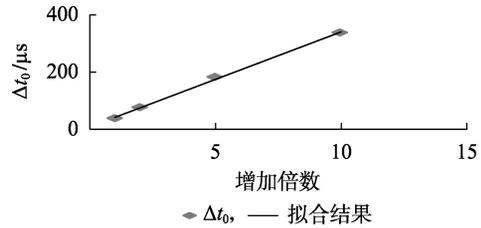


图 6 振荡回路参数对“电压零休”时间的影响

Fig.6 Influence of oscillation circuit parameters on zero-voltage time

#### (2) 限流电阻的影响。

在振荡回路参数不变的情况下,增加限流电阻可以限制高压串联晶闸管组件续流支路的续流电流,但随着限流电阻的增加,反向 TRV 开始增加,当限流电阻无限大时,反向 TRV 与采用传统强迫过零开断时相同(如图 3 所示)。续流支路限流电阻对“电压零休”时间  $\Delta t_0$ 、续流串联晶闸管组件最大电流  $I_{Dm}$ 、反向 TRV 和正向 TRV 的影响如表 1 所示,由表可知,通过限流电阻可以在一定程度上限制续流支路电流,但零休时间和反向 TRV 增加较多,对主开关动态介质恢复将造成不利影响。

表 1 续流支路限流电阻的影响

Table 1 Influence of current-limiting resistors in follow-current branch

$R/\Omega$	$\Delta t_0/\mu\text{s}$	$I_{Dm}/\text{kA}$	反向 TRV 峰值/kV	正向 TRV 峰值/kV
0	37.40	3.377	0	93.110
2	34.97	2.606	5.155	93.130
5	32.40	1.959	9.795	93.130
20	27.79	0.896	17.905	93.135
100	24.74	0.235	23.530	93.140
$\infty$	23.70	0	25.675	93.140

#### (3) 限流电感的影响。

在振荡回路参数不变的情况下,限流电感的影响规律如表 2 所示,由表可知,随着限流电感的增加,续流支路电流减小,“电压零休”时间增加,同时反向电压增加,与限流电阻的影响不同的时,限流电感改变了反向 TRV 的波形,其波形如图 7 所示。

综上所述,通过调整续流支路参数,在一定程度上降低了续流支路电流,但当限流到一定程度时反向 TRV 增加明显,不利于主开关动态介质恢复,因此不宜采用限流电阻或电感对续流支路限流;而在设计反向振荡回路时,通过调整振荡电路频率可以有效扩展“电压零休”区间,且同步改变振荡回路电感与电容参数时反向振荡电流峰值保持不变,续流

表2 续流支路限流电感的影响

Table 2 Influence of current-limiting reactors in follow-current branch

$L/\mu\text{H}$	$\Delta t_0/\mu\text{s}$	$I_{\text{Dm}}/\text{kA}$	反向 TRV 峰值/kV	正向 TRV 峰值/kV
0	37.40	3.377	0	93.110
5	38.62	3.246	1.610	93.105
50	41.56	2.328	10.350	93.130
500	46.78	0.598	22.335	93.135
5 000	48.13	0.070	25.295	93.140
$\infty$	23.70	0	25.675	93.140

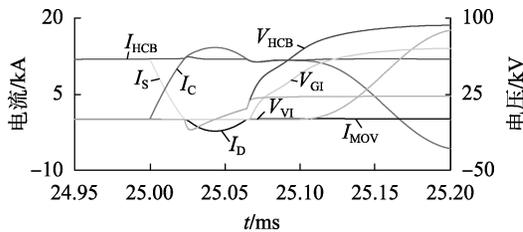


图7 有限流电感时新型高压混合式直流断路器开断波形

Fig.7 Interruption process of novel hybrid HVDC circuit breaker with current-limiting reactors

支路电流峰值基本不变,故同步改变振荡回路参数是增加“电压零休”时间、提高主开关的动态介质恢复强度有效的方法。

#### 4 结论

本文提出了基于真空断路器与SF<sub>6</sub>断路器串联的新型高压直流断路器技术方案,引入高压串联晶闸管组件续流支路创造主开关“电压零休”时间,提高主开关动态介质恢复强度。针对新型混合式高压直流断路器的拓扑结构、工作原理和过程进行了理论分析,得到“电压零休”时间的数学描述及不同拓扑结构对其的影响规律。

基于连续过渡模型和改进 Mayr 模型,搭建了新型混合式高压直流断路器的仿真模型,仿真发现高压串联晶闸管组件续流支路限流电阻、电感对续流支路可以起到较好的限流作用,但同时增加了反向 TRV,所以不宜采用;而同步改变振荡回路电容、电感参数可有效扩展“电压零休”区间,“电压零休”时间可以达到 338.62  $\mu\text{s}$ ,且此时主开关两端几乎无反向 TRV。

本文提出的新型混合式高压直流断路器可以实现更高电压等级的直流断路器模块构建,但其在回路参数优化设计、动态介质恢复增益等方面需要进一步的理论与实验研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

#### 参考文献:

[1] 汤广福,庞辉,贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1760-1771.  
TANG Guangfu,PANG Hui,HE Zhiyuan. R&D and application of

advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(7):1760-1771.

- [2] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):64-73.  
SUN Pengfei,HE Chunguang,SHAO Hua,et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):64-73.
- [3] CALLAVIK M,BLOMBERG A,HAFNER J,et al. The hybrid HVDC breaker an innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids[R]. [S.l.]:ABB,2012.
- [4] GRIESHABER W,DUPRAZ J P,PENACHE D L,et al. Development and test of a 120 kV direct current circuit breaker[C]//CI-GRE 2014. Paris,France;CIGRE,2014:24-29.
- [5] 魏晓光,高冲,罗湘,等. 柔性直流输电网用新型高压直流断路器设计方案[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):95-102.  
WEI Xiaoguang,GAO Chong,LUO Xiang,et al. A novel design of high-voltage DC circuit breaker in HVDC flexible transmission grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(15):95-102.
- [6] TAHATA K,OUKAILI S E,KAMEI K,et al. HVDC circuit breakers for HVDC grid applications[C]//IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham,UK:IET,2015:1-9.
- [7] ZHANG Y,SHI Z,WANG Q,et al. Experimental investigation on HVDC vacuum circuit breaker based on artificial current zero[C]//International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Suzhou,China:IEEE,2016:1-4.
- [8] 邹积岩,刘晓明,于德恩. 基于智能模块的高压直流真空断路器研究[J]. 电工技术学报,2015,30(13):47-55.  
ZOU Jiyan,LIU Xiaoming,YU De'en. Investigations on the HVDC vacuum circuit breaker based on intelligent models[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(13):47-55.
- [9] DETHLEFSEN R. Hybrid circuit breaker with varistor in parallel with vacuum interrupter:4204101[P]. 1980-05-20.
- [10] PERRET M,DUFOURNET D. High-voltage interrupter device having combined vacuum and gas interruption:US,6593538[P]. 2003-07-15.
- [11] SMEETS R,KERTESZ V,DUFOURNET D,et al. Interaction of a vacuum arc with an SF<sub>6</sub> arc in a hybrid circuit breaker during high-current interruption[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2007,35(4):933-938.
- [12] SENDA T,TAMAGAWA T,HIGUCHI K,et al. Development of HVDC circuit breaker based on hybrid interruption scheme[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems,1984,PAS-103(3):545-52.
- [13] GE Guowei,LIAO Minfu,DUAN Xiongying,et al. HVDC hybrid circuit breaker based on SF<sub>6</sub> interrupter and vacuum interrupter in series[C]//IEEE Electric Power Equipment-Switching Technology. Matsue,Japan;IEEE,2013:1-4.
- [14] 程显,廖敏夫,段雄鹰,等. 基于真空灭弧室 SF<sub>6</sub> 灭弧室串联的混合断路器动态介质恢复特性研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):68-73.  
CHENG Xian,LIAO Minfu,DUAN Xiongying,et al. Dynamic dielectric recovery characteristics of hybrid circuit breaker based on vacuum interrupter and SF<sub>6</sub> interrupter in series[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):68-73.
- [15] 程显,陈占清,何周,等. 真空开关低分散性永磁操动机构控制系统设计[J]. 郑州大学学报(工学版),2017,38(3):58-62.  
CHENG Xian,CHEN Zhanqing,HE Zhou,et al. Design of the low-dispersion control system for the permanent magnetic actuator of vacuum switch[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science),2017,38(3):58-62.
- [16] CIGRE JWG A3/B4-34. Technical requirements and specifications

of state of the art HVDC switching equipment[R]. [S.1.]:CIGRE JWG A3/B4-34, 2017.

- [17] 葛国伟, 廖敏夫, 黄金强, 等. 双断口真空断路器配合特性仿真与试验[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 57-65.  
 GE Guowei, LIAO Minfu, HUANG Jinqiang, et al. Simulation and experimental of matching characteristics of vacuum circuit breakers with double-break[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 57-65.
- [18] 程显. 混合断路器相关理论与实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.  
 CHENG Xian. Relevant theory and experimental investigation on hybrid circuit breaker[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

#### 作者简介:



程 显

程 显(1982—), 男, 河南平顶山人, 副教授, 博士, 主要从事高压电器及高电压新技术方面的研究工作, 着重研究混合断路器技术、多断口真空开关技术(**E-mail**: chengxian@zzu.edu.cn);

葛国伟(1987—), 男, 河南新乡人, 讲师, 博士, 通信作者, 主要从事智能化高压电器及高电压新技术方面的研究工作, 着重研究多断口真空开关技术、真空电弧动态恢复(**E-mail**: ggw@zzu.edu.cn)。

### Theoretical analysis of novel hybrid HVDC circuit breaker based on a series of vacuum interrupter and SF<sub>6</sub> interrupters

CHENG Xian<sup>1,2</sup>, GE Guowei<sup>1,2</sup>, YANG Peiyuan<sup>1</sup>, WU Qiliang<sup>1</sup>, LIAO Minfu<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Engineering Research Center of Power Transmission & Distribution Equipment and Electrical Insulation, Zhengzhou 450001, China; 3. College of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** A novel hybrid HVDC CB(Circuit Breaker) based on VI(Vacuum Interrupter) and GI(SF<sub>6</sub> Interrupter) connected in series is proposed. Based on the DC interruption through traditional artificial current zero method, the idea of creating the zero-voltage for the main mechanical switch by using the continuous branch of high voltage thyristor module and current limiting element is put forward to improve the DDRS(Dynamic Dielectric Recovery Strength). The topological structure, working principle and working process of the hybrid HVDC CB are analyzed, based on which, the mathematic description of the zero-voltage time and the coordinated control measures of the dynamic voltage distribution are obtained. The simulation circuit of the novel HVDC CB is built according to the continuous transition model and the improved Mayr arc model. The influences of the current-limiting resistance and inductance of the follow-current loop and parameters of the oscillation circuit on zero-voltage time and the inverted transient recovery voltage is gained.

**Key words:** HVDC power transmission; HVDC circuit breaker; follow-current loop with thyristor; zero-voltage

附录

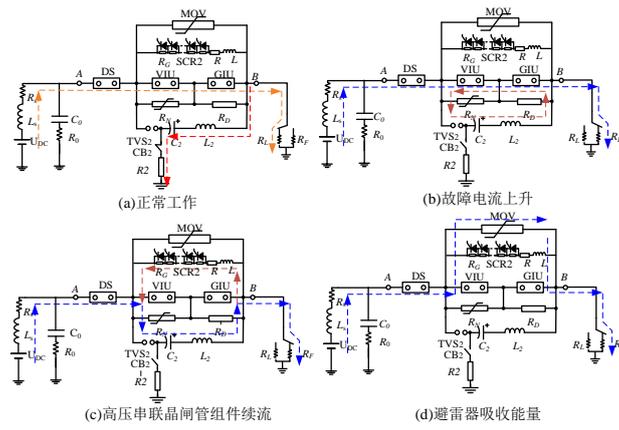


图 A1 新型混合式高压直流断路器工作过程

Fig.A1 Interruption process of novel hybrid HVDC CB

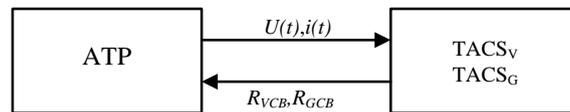


图 A2 电弧模型仿真过程

Fig.A2 Simulation process of arc model in ATP