

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230650

计及柔性限流装置与直流断路器协同动作的 电弧抑制暂态特性研究

郑峰¹, 王威东¹, 刘宝谨¹, 刘莞玲², 梁宁³

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 福州大学计算机与大数据学院, 福建 福州 350108;
3. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 直流系统的故障隔离是保证直流系统稳定运行的重要技术。针对传统故障隔离策略对直流断路器(direct current circuit breaker, DCCB)的性能要求较高的问题, 提出了一种利用柔性限流装置(flexible current limiting device, FCLD)与DCCB协同动作的故障隔离策略。首先, 研究了直流系统永久性故障和瞬时性故障情况下FCLD与DCCB的协同作用机理。其次, 分析考虑FCLD电流抑制作用下DCCB开断过程的电弧暂态特性。最后, 在Matlab/Simulink平台中进行仿真, 验证所提协同策略的可行性。结果表明: FCLD可有效抑制DCCB的开断电弧; 基于所提故障隔离策略, 直流系统可在瞬时故障情况下实现平稳穿越, 永久故障情况下实现DCCB的无弧开断。该策略降低了直流系统故障隔离过程中对DCCB的开断要求, 提升了直流系统的故障穿越能力。

关键词: 直流系统; 柔性限流装置; 直流断路器; 故障隔离策略; 协同配合

Research on transient characteristic of arc suppression considering the joint operation of a flexible current limiting device and a DC circuit breaker

ZHENG Feng¹, WANG Weidong¹, LIU Baojin¹, LIU Wanling², LIANG Ning³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. College of Computer and Data Science, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 3. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Fault isolation is an important technology to help guarantee that a DC system can be operated stably. A new fault isolation strategy is proposed to improve the traditional strategy which relies too much on a high-performance DC circuit breaker (DCCB). The new strategy makes use of the coordination between a flexible current limiting device (FCLD) and a DCCB. First, the cooperative mechanism between the FCLD and DCCB under permanent fault and transient fault is researched. Second, the arc transient characteristic of the interruption of the DCCB considering suppressed current from the FCLD is analyzed. Finally, a simulation is carried out on the Matlab/Simulink platform to verify the feasibility of the new cooperative strategy. The results show that FCLD can inhibit the breaking arc effectively; with this new fault isolation strategy, the DC system can finish ride through smoothly in the transient fault, while the DCCB can complete the no arc break in the permanent fault. The new strategy has reduced the breaking requirements for DCCB in terms of the DC system's fault isolation, and improved the fault ride-through capability of the DC system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52167010).

Key words: DC system; flexible current limiting device; direct current circuit breaker; fault isolation approach; cooperative collaboration

0 引言

随着直流配电技术的发展, 直流系统被广泛应用于船舶供电、航空航天技术、光伏发电、电动汽

车等领域, 是电力系统电力电子化重要体现。随着直流配电系统发展日趋完善, 各种针对直流配电技术的研究也随之展开^[1-3]。直流保护是直流配电技术中尤为关键的一个环节, 是直流配电系统发展的瓶颈技术, 关系到直流系统能否长久、可靠、高效运行^[4-6]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52167010)

日前,国内外在直流保护技术领域的研究内容主要分为三大部分:故障检测、故障隔离与保护配合策略^[7]。直流系统保护配合策略主要依赖于换流站、隔离开关、限流装置(current limiting device, CLD)等电力设备的相互配合,面对不同的保护思路,通常存在一套互相适应的保护配合策略。文献[8]提出改变故障发生后直流断路器(direct current circuit breaker, DCCB)与换流阀的动作次序,通过降低DCCB的过电流动作指令阈值来实现换流阀在故障发生后继续保持运行状态,但是该保护协调策略提高了系统对DCCB的开断要求。文献[9]提出一种新型混合式DCCB,并进行了重合闸验证,但缺少了重合闸时序过程的分析。文献[10]提出了一种基于故障限流器与DCCB相互配合的直流故障穿越方法,但是并未对系统的故障隔离暂态过程进行阐述。

在实际情况下,当DCCB开断直流系统故障线路电流时,其自身所须承受的电压与线路的电压等级一致,在造成能量损耗的同时也考验着DCCB的寿命与开断能力^[11]。不仅如此,当直流系统内部在非DCCB位置发生电弧故障时,直流线路亦存在着能量损耗和电压应力等相关问题。为了减小各类电气设备在开断过程中发生的电弧现象对系统造成的危害,需要采用一定的灭弧手段。目前国内外针对灭弧技术的研究主要围绕着气体灭弧、真空灭弧、金属灭弧等^[12-14]技术展开。然而无论是何种形式的灭弧技术均对DCCB自身结构提出了较高的要求,如气体灭弧技术对灭弧室的熄弧要求较为严苛,强迫换流型DCCB要求灭弧室具备优越的介质恢复特性。因此如何降低DCCB开断故障线路时的限制要求,成为直流系统发展过程中亟待解决的关键性问题。

鉴于上述内容,本文针对直流系统中的柔性限流装置(flexible current limiting device, FCLD)与DCCB的协同配合展开分析研究,并完善二者之间的协同配合流程;分析了直流系统在FCLD作用下的直流电弧开断暂态过程;采用FCLD创造电弧电流过零点的方式,大幅降低了DCCB的开断要求;通过在Matlab/Simulink中搭建直流系统,对FCLD与DCCB在直流系统中协同配合过程的暂态特性进行仿真分析。

1 限流器与断路器的协同作用

1.1 柔性限流器应用层设计

依据FCLD运行要求,附录A图A1给出了应用层控制系统框图。由于正常与故障期间限流器均与线路串联,则限流器的电感电压在直流系统正常

工作期间和故障期间分别控制在0V和系统设定值。通过对比已有文献,从检测速度与精度角度,考虑采用适用于直流系统的电压微分及欠压相结合的检测方式^[15]。

依据图A1,直流系统正常运行时FCLD对外输出电压为0V,因此应用层输出参考电压设置为 $u_{c_ref} = 0V$ 。故障发生时直流侧电压瞬时变化,则其电压微分量 $(\Delta u / \Delta t)$ 瞬间呈现极大值。在此根据直流系统参数以及不同故障类型、故障位置、过渡电阻,确定电压微分量影响因素的规律,并取规律区间内极小值 T 作为整定判据^[16-17]。但极值判据无法准确识别直流系统线路故障类型,故需要对控制输入量采取二次欠压判断。由于一般直流线路电压衰减系数较大,欠压保护中电容放电至判断阈值只存在几个毫秒延时,故该阶段判断可与极值判定同时进行。当电压低于其自身0.9倍电压额定值 u_{cn} ,且 $(\Delta u / \Delta t) > T$ 成立时,则可判定直流侧发生极间故障,正极、负极FCLD应用层输出参考电压设置为 $u_{c_ref} = u_{cn}$,直流侧输出正、负极电压抬升至额定值,故障区域被完全隔离,整个动态过程故障电流得到明显抑制^[18]。

然而,由于FCLD维持直流系统额定电压值输出,无法准确区分瞬时与永久性故障,定义故障后 t_a 为瞬时、永久性故障区分时刻,在故障后 t_a 时刻前将故障线路FCLD控制目标设置为 $u_{c_ref} = 0.95u_{cn}$,再根据判别限流器线路侧有无输出电流的暂降,实现对瞬时性与永久性故障识别(在故障后 t_a 时刻前,无FCLD输出电流暂降现象发生时,将该故障类型定义为永久性故障)。在此需要注意:当故障发生时,由于直流线路纵联差动保护存在延时,将使故障线路FCLD在故障发生后0.2~0.6ms动作,而非故障线路FCLD应用层信号依旧保持 $u_{c_ref} = 0V$ 。

1.2 FCLD与DCCB的协同动作过程

文献[19-21]通过对含限流器直流电网双极故障电流暂态特性进行分析,将其动作全过程分为6个阶段,如图1所示。

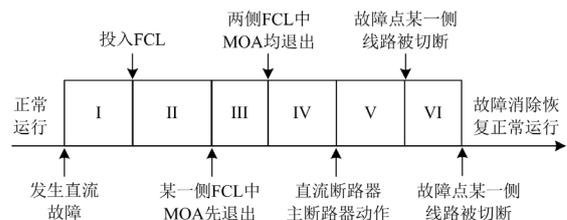


图1 限流器与DCCB协同动作过程

Fig. 1 Cooperative action process of current limiter and DCCB

若在该动作过程充分考虑传统电感限流器与 ABB 公司混合式高压断路器协同作用, 则含 N 个换流站的直流电网系统某一线路双极故障时, 其暂态电流方程可表示^[20-24]为

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{A} \cdot \mathbf{u} = \underbrace{\mathbf{R} \cdot \mathbf{i}_F + \mathbf{L} \cdot \dot{\mathbf{i}}_F + [u_{MF_1}, u_{MF_2}, 0, \dots]^T}_{\text{I 阶段}} + \underbrace{[u_{MB_1}, u_{MB_2}, 0, \dots]^T}_{\text{II, III 阶段}} \\ \mathbf{u} = \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{i}}_F \\ u_{MF_1} = L_{F_1} \frac{d(i_{F_1} - i_{MOA_1})}{dt} \\ u_{MF_2} = L_{F_2} \frac{d(i_{F_2} - i_{MOA_2})}{dt} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: \mathbf{A} 为支路与节点的关联矩阵; \mathbf{u} 为节点电容电压矩阵; \mathbf{R} 为电阻矩阵; \mathbf{L} 为电感矩阵; \mathbf{i}_F 为支路电流矩阵; u_{MF_1} 、 u_{MF_2} 分别为两侧限流器的端电压; u_{MB_1} 、 u_{MB_2} 分别为两侧 DCCB 中金属氧化物避雷器(metal oxide arrester, MOA)的电压; \mathbf{C} 为电容矩阵; L_{F_1} 、 L_{F_2} 分别为两侧限流器电感值; i_{F_1} 、 i_{F_2} 分别为故障线路两侧电流; i_{MOA_1} 、 i_{MOA_2} 分别为两侧限流器 MOA 电流。

含传统限流器的直流系统应对直流线路两极故障时, 其动态全过程耗时大约 6~6.5 ms, 期间存在能量损耗、故障区域对非故障区域负面影响无法消除等问题, 若以限流器全动作过程时间为基准, 当应对故障持续时间大于 4.5 ms 的“瞬时性故障”时, 线路保护势必动作, 增加开关动作次数, 缩短 DCCB 工作寿命。

根据图 1 可知, 传统限流器与断路器协同保护全过程中, 存在明显功率损耗, 且应对瞬时性故障无法通过传统限流器辅助作用来实现无断路器动作行为的系统自行恢复。而本文所提柔性限流器利用微分欠压^[17]与其自身二次欠压监测, 使柔性限流器瞬时启动, 通过调节其控制系统 u_{c_ref} 快速提高换流站直流输出侧电压、抑制故障电流、识别故障类型, 实现永久性故障快速隔离、瞬时性故障无断路器动作行为的自行恢复。因此, 可解决图 1 所示传统限流器与 DCCB 协同动作 6 个阶段中存在的相关问题, 所提柔性限流器与 DCCB 协同作用全过程如图 2 所示。

第 1 阶段: 发生直流故障到限流器完全投入。此阶段中通过欠压检测识别故障类型, 调节应用层参考电压, 两侧 FCLD 分别完全投入。永久性故障

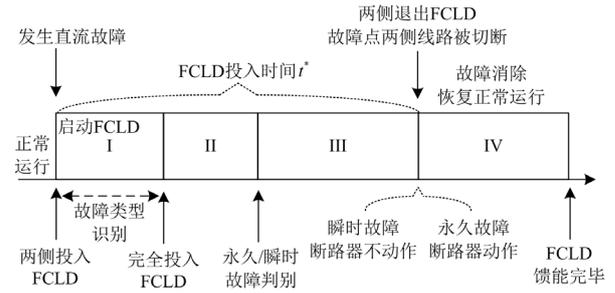


图 2 柔性限流器与 DCCB 协同作用全过程

Fig. 2 Cooperative action whole process of FCLD and DCCB

时, 其完全投入时间受换流站出口电容电压衰减系数制约。在此阶段中柔性限流器无能量损耗, 仅在故障发生后 2 ms 内完全消除故障区域对非故障区域产生的负面影响, 且与传统方法相比, 限流器投入时间缩短。

第 2 阶段: 通过调节 FCLD 应用层控制目标, 依据 DCCB 输出电流变化特性, 区分系统永久性与瞬时性故障。在此阶段中, 无能量损耗, 基本无故障区域负面影响。

第 3 阶段: 两侧 FCLD 持续投入 t^* 后控制目标恢复至其正常运行状态, 此阶段分为两种情况。

1) 在永久性故障情况下, 通过限流器的钳位电压作用以维持直流系统的输出电压, 当限流器应用层输出参考电压 u_{c_ref} 与直流系统换流站输出端口电压 u_c 相等时, 流经 DCCB 的电流过零, 在电流过零瞬间 DCCB 可实现无弧开断, 即可实现故障隔离。此时含 N 个换流站直流电网系统某一线路双极故障时其暂态电流方程为

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{A} \cdot \mathbf{u} = \underbrace{\mathbf{R} \cdot \mathbf{i}_F + \mathbf{L} \cdot \dot{\mathbf{i}}_F + [u_{CLD_1}, u_{CLD_2}, 0, \dots]^T}_{\text{I 阶段}} \\ \mathbf{u} = \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{i}}_F \\ u_{CLD_1} = L_{F_1} \frac{di_{F_1}}{dt} \\ u_{CLD_2} = L_{F_2} \frac{di_{F_2}}{dt} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中, u_{CLD_1} 、 u_{CLD_2} 分别为两侧 FCLD 的端电压。

2) 瞬时性故障情况下, DCCB 无动作行为, 此阶段可提高原有传统限流装置与断路器瞬时故障线路开断时间的灵活性, 能量损耗、故障区域负面影响与阶段 2、3 相同。

第 4 阶段: 两侧 FCLD 通过换流器将存储能量馈入电网, 馈能时间受整流器输入电流制约。在此

阶段故障清除, 能量损耗明显降低。

由上述 4 个阶段可知, 利用 FCLD 不仅可以使故障电流得到明显的抑制, 亦可保证换流站输出电压在故障期间保持在额定电压值, 无电压暂降问题, 即故障区域对非故障区域负面影响得到完全消除。与传统限流隔离阶段相比, 所提方法可判别瞬时故障, 减少断路器重合闸动作次数。

2 DCCB 开断电弧抑制过程分析

2.1 直流系统电弧模型

目前直流系统的串联电弧模型构建主要分为两类: 基于物理特性的模型和基于伏安特性的模型^[25-26]。其中, 基于电弧自身动态物理特性的电弧模型以 Mayr 模型和 Cassie 模型为主, 其公式分别为

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left(\frac{e \cdot i}{P_0} - 1 \right) \quad (3)$$

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left(\frac{e^2}{E_0^2} - 1 \right) \quad (4)$$

式中: g 为电弧电导; τ 为电弧时间常数; e 为电弧电压; i 为电弧电流; P_0 为电弧耗散功率; E_0 为常数, 取电弧瞬态恢复电压(transient recovery voltage, TRV)峰值^[26]。

文献[13]提出即便电弧燃烧过程存在不确定性和非线性变化过程, 也不会轻易改变故障电弧电压的变化趋势, 因此采取不同的电弧模拟模型并不会对本文的验证结果产生影响。

2.2 非故障状态下 DCCB 开断暂态过程分析

以二端直流系统为例, 在直流系统的输电线路某处因 DCCB 开断而导致串联电弧出现之后, 通过 FCLD 对串联电弧的限制过程如下。

第 1 阶段: 直流系统的故障检测装置检测到故障发生, 在 DCCB 开断故障线路之前, 故障所在线路的 FCLD 快速启动。

第 2 阶段: 柔性限流器启动后, 钳位电压从 0 V 迅速上升至钳位电压设定值, 此后限流装置钳位电压在一定范围内保持稳定。

图 3 为 FCLD 作用下的二端直流系统。根据图 3 所示拓扑, 忽略线路阻抗, 针对 VSC1、DCCB、柔性限流器和电弧故障发生位置组成的回路列写电压方程, 如式(5)所示。

$$U_{D1} = U_{VSC1} - U_{D2} - U_{F1} + U_{F2} - U_{VSC2} \quad (5)$$

式中: U_{D1} 、 U_{D2} 分别为 D_1 、 D_2 的端电压; U_{VSC1} 、 U_{VSC2} 分别为 VSC₁、VSC₂ 的端电压; U_{F1} 、 U_{F2} 分别为限流器 F_1 、 F_2 的端电压。

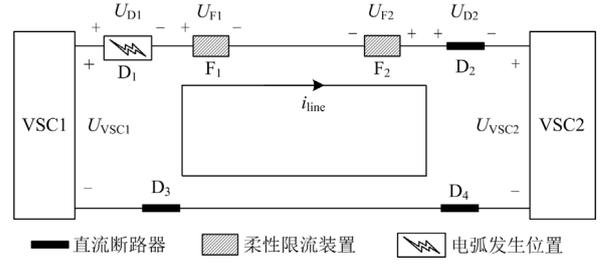


图 3 二端直流系统

Fig. 3 Double-terminal DC system

在直流系统 DCCB 开断前一刻, DCCB 处于闭合状态, 忽略 DCCB 阻抗, 可认定电弧两端电压 U_{arc} 为零, 则此时的回路电压方程为

$$U_{VSC1} = U_{VSC2} + U_{arc} = U_{VSC2} \quad (6)$$

当 VSC1 为电源送端、VSC2 为负荷受端时, 在故障发生时仅限流器 F_1 启动, 限流器 F_2 的钳位电压始终保持为 0 V; 当 VSC2 为电源送端、VSC1 为负荷受端时, 在故障发生时仅限流器 F_2 启动。此处若考虑 VSC1 为电源送端以及先开断 D_1 的情况, 即 D_2 、 D_3 、 D_4 在开断 D_1 时刻之前始终保持闭合状态, 此时图 3 可简化成图 4, 并且可将式(6)简化为

$$U_{D1} = U_{arc} = U_{VSC1} - U_{F1} - U_{VSC2} \quad (7)$$

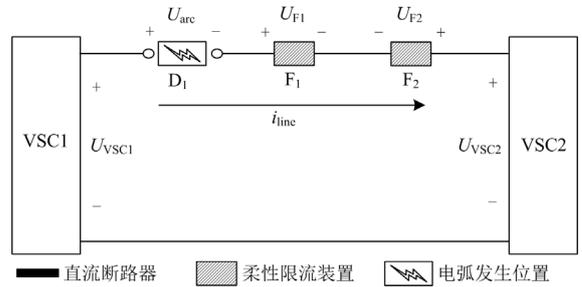


图 4 简化的二端直流系统

Fig. 4 Simplified double-terminal DC system

根据式(4)可以得出电弧电导的数学表达式为

$$g = c \cdot e^{\frac{t}{\tau} \left(\frac{e^2}{E_0^2} - 1 \right)} \quad (8)$$

式中, c 为任意正常数。

将式(7)代入式(8)可得电弧电导表达式, 如式(9)所示。

$$g = c \cdot e^{\frac{t}{\tau} \left(\frac{(U_{VSC1} - U_{F1} - U_{VSC2})^2}{E_0^2} - 1 \right)} \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 当 FCLD 的钳位电压与换流站、线路元件端电压互相抵消, 即 U_{arc} 为 0 V 时, 电弧电导最小, 此时故障电弧消耗的能量最小, 因此 FCLD 的控制目标为 $U_{arc} = 0$ V, 即 DCCB 两端电压为零。

假设 FCLD 钳位电压设定值与电源送端直流侧电压相等, 当 FCLD 两端的钳位电压抬升至设定值并令 $U_{F2} = 0 \text{ V}$ 时, 可得

$$U_{\text{arc}} + U_{\text{VSC2}} = U_{\text{VSC1}} - U_{F1} = 0 \text{ V} \quad (10)$$

$$U_{\text{arc}} = U_{\text{VSC1}} - U_{\text{VSC2}} - U_{F1} \quad (11)$$

若断线故障发生在二端网络中, 由于二端网络仅存在一条输电线路, 因此整个系统在故障排除之前处于停运状态, 此时负荷输出侧无功功率供给。

若线路断线故障发生在三端网络中, 在一条输电线路停止电能传输的情况下, 负荷所需电能依旧能够通过另一条输电线路进行电能传输, 此时的 FCLD 动作情况与在二端网络中的不同之处在于: 靠近负荷侧与靠近电源侧的 FCLD 同时进行动作。在三端网络中装设 FCLD 的回路电流如图 5 所示, 假定在此过程中不考虑 DCCB 的开断以及输电线路阻抗, 仅考虑换流站、FCLD 以及直流串联电弧压降。当三端网络中的 VSC1 与 VSC2 正极输电线路发生串联电弧故障时, F_1 、 F_2 的钳位电压预设值分别与送端、受端直流侧电压保持一致, 受端 VSC2 负荷所需功率通过如图 5 所示回路进行传输。

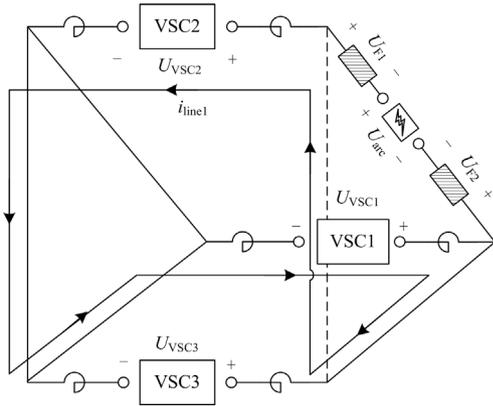


图 5 三端直流系统回路示意图

Fig. 5 Schematic diagram of three-terminal DC system circuit

第 3 阶段: 实时采集故障线路电流, 通过该电流值对钳位电压设定值进行实时修正, 最终使故障线路电流值维持在零附近。对二端网络在第二阶段的两类不同情况分别进行处理, 钳位电压基准值处理流程图如附录 A 图 A2 所示, 图中: K_{ad} 为反馈系数; U_{set} 为 FCLD 应用层输出参考电压预设值。

第 4 阶段: 在故障线路电流值维持在零附近的情况下, 当检测到故障线路电流过零瞬间开断 DCCB, 至此实现故障线路的隔离全过程。

2.3 DCCB 开断极间故障线路过程分析

为了简化计算过程, 图 6 所示二端直流系统拓扑简化了 FCLD 和 DCCB 的安装数量, 实际上的

FCLD 和 DCCB 应在正负极线路上分别安装, 简化后拓扑不影响计算结果, 将图 6 所示电流流向视为电流正方向。

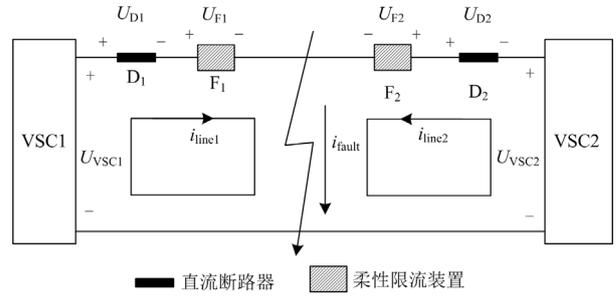


图 6 极间故障情况下的二端直流系统

Fig. 6 Double-terminal DC system under inter-pole fault condition

当系统发生如图 6 所示的极间短路故障时, 故障发生点两侧的电位差, 因此故障电流流向会由负方向向正方向发生转变, 该变化过程存在一个自然过零点。此时的直流系统故障点源侧电流 i_{line1} 不存在过零点, 荷侧电流 i_{line2} 存在自然过零点, 但其过零速度过快, 即使在电流过零瞬间开断 DCCB 依旧会发生电弧问题, 而通过装设 FCLD 可以解决上述问题。DCCB 与 FCLD 的配合过程如下。

第 1 阶段: 直流系统的故障检测装置检测到故障发生, 在 DCCB 开断故障线路之前, 故障所在线路的 FCLD 快速启动。

第 2 阶段: 本阶段与 2.2 节第 2 阶段相同, 根据图 6 所示拓扑, 回路电压方程为

$$\begin{cases} U_{D1} = U_{\text{VSC1}} - U_{F1} \\ U_{D2} = U_{\text{VSC2}} - U_{F2} \end{cases} \quad (12)$$

第 3 阶段: 本阶段与 2.2 节第 3 阶段相同, 此过程的 FCLD 控制目标是分别令源/荷侧的电流 i_{line1} 、 i_{line2} 稳定于零, 为 DCCB 的开断留出时间裕量。此时源/荷侧 DCCB 开断时的电弧电导表达式为

$$g = \begin{cases} c_1 \cdot e^{\frac{t}{\tau} \left(\frac{(U_{\text{VSC1}} - U_{F1})^2}{E_0^2} - 1 \right)} \\ c_2 \cdot e^{\frac{t}{\tau} \left(\frac{(U_{F2} - U_{\text{VSC2}})^2}{E_0^2} - 1 \right)} \end{cases} \quad (13)$$

式中, c_1 、 c_2 为任意正常数。

从式(13)可以看出, 当端电压 U_{D1} 、 U_{D2} 为零时电弧电导最小, 此时 DCCB 开断过程中电弧消耗的能量最小。

第4阶段：本阶段与2.2节第4阶段相同。

3 仿真分析

为验证本文所提 FCLD、DCCB 协同配合过程的正确性和 FCLD 对 DCCB 开断电弧抑制的有效性，本文在 Matlab 中搭建三端直流系统仿真模型，如图 7 所示，系统参数如附录 A 表 A1 所示。

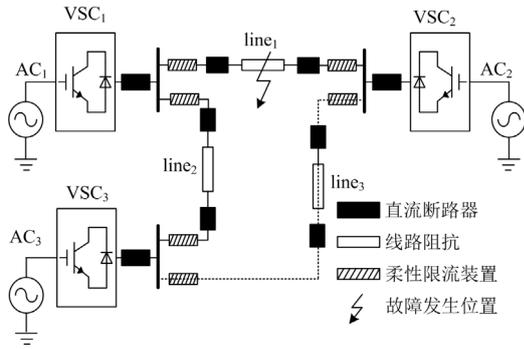


图 7 三端直流系统仿真模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of a three-terminal DC system simulation model

图中：VSC₁ 为送端换流站；VSC₂、VSC₃ 为受端换流站；AC₁、AC₂、AC₃ 均为与换流站互相连接的交流系统，AC₁ 为送端换流站的能量来源，AC₂、AC₃ 为受端换流站的能量去向；line₁、line₂、line₃ 分别为连接 VSC₁ 与 VSC₂、VSC₁ 与 VSC₃、VSC₂ 与 VSC₃ 的配电线路。附录 A 图 A3 体现了三端直流系统在发生极间故障情况下的电压电流变化情况。本节采用放射状和环状三端直流系统，对直流系统的电弧开断进行分析，并分别对系统发生极间永久性故障和极间瞬时性故障的情况进行 FCLD 和 DCCB 的协同过程分析。

3.1 FCLD 与 DCCB 的协同过程仿真分析

3.1.1 直流系统永久性故障

图 8 为三端直流系统 line₁ 发生永久性极间故障情况下(line₃ 始终处于断开状态)，FCLD 配合 DCCB 动作的电压电流波形图。从图 8 可以看出，当 $t = t_1$ ，FCLD 启动时，直流系统发生极间故障后迅速激增的线路故障电流被迅速抑制，此过程对应 FCLD 与 DCCB 协同动作的第 2 阶段；在第 3 阶段开始后，故障线路电流持续被降低至零，在电流过零瞬间 $t = t_0$ 时配合 DCCB 开断故障线路，即可实现故障线路的隔离，协同过程第 3 阶段结束；从图 8(b) 可以看出，FCLD 的限流电感在作用时间段 $t_1 - t_2$ 间，其电流持续增大，在 FCLD 钳位电压恢复值零时，

此时的限流电感能量存在一个释放阶段 $t_2 - t_3$ ，对应的 VSC₂ 直流侧电压缓慢下降，在限流电感能量释放结束时降至零，此过程对应协同过程第 4 阶段。

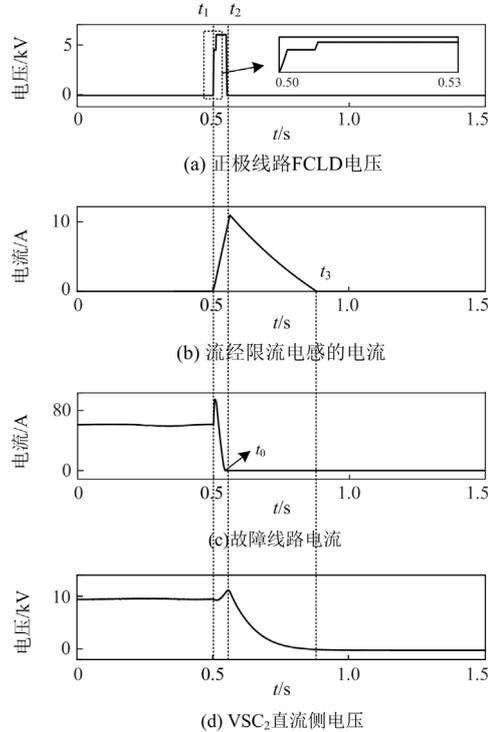


图 8 永久性极间故障-协同过程波形图

Fig. 8 Waveform of permanent inter-pole fault-collaborative process

图 9 为三端直流系统 line₁ 发生永久性极间故障情况下，仅存在 FCLD 作用，DCCB 并无动作的 VSC₂ 直流侧电压与故障线路电流变化情况。从图中可以看出，在 FCLD 的持续作用下，直流侧电压被抬高、故障线路电流被降低，避免出现直流侧电压跌落、故障线路电流激增的情况。

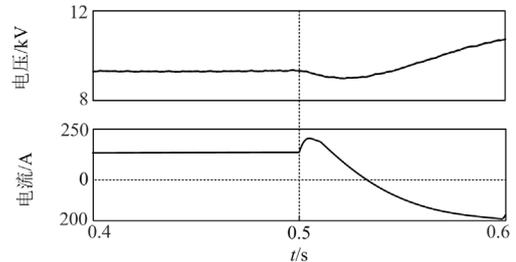


图 9 永久性极间故障-无协同过程波形图

Fig. 9 Waveform of permanent inter-pole fault without collaboration process

图 10 为三端直流系统 line₁ 永久故障情况下，各换流站直流电压变化情况。从图 10 中可以看出，

在 FCLD 和 DCCB 的协同作用下, VSC_1 的电压几乎无波动, 故障区域 VSC_2 对非故障区域 VSC_3 的影响被快速隔离, 此时 VSC_3 电压存在小段波动, 随之快速恢复至稳定状态。

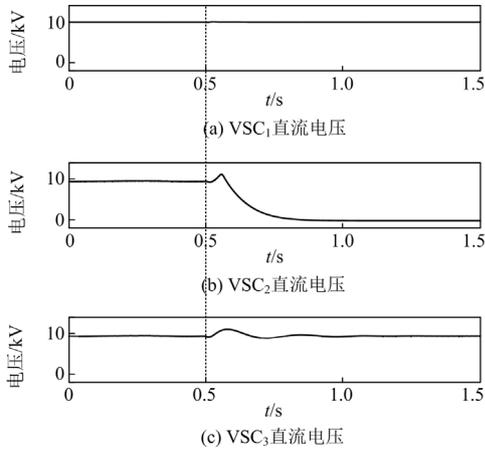


图 10 永久性极间故障-电压变化情况

Fig. 10 Permanent inter-pole fault-voltage change

图 11 为三端直流系统 $line_1$ 永久故障情况下, 各部分的电流变化情况。从图 11 中可以看出, 在 FCLD 和 DCCB 的协同作用之后, VSC_1 仅为 VSC_3 输送功率, 此时故障线路已被完全隔离, 非故障区域保持正常运行状态, 整个协同过程的电流波动相对平稳。

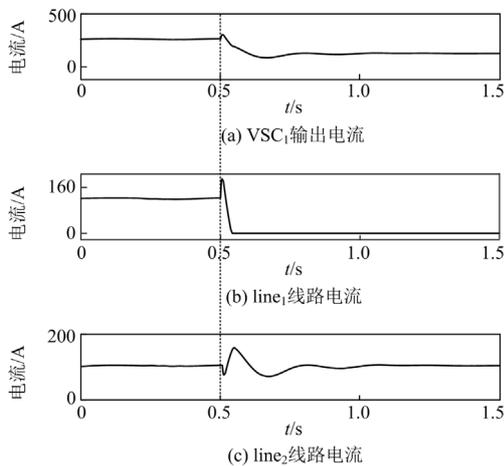


图 11 永久性极间故障-电流变化情况

Fig. 11 Permanent inter-pole fault-current change

3.1.2 直流系统瞬时性故障

图 12 为三端直流系统 $line_1$ 发生瞬时性极间故障情况下的部分电压电流波形图, 故障持续时间设置为 10 ms。

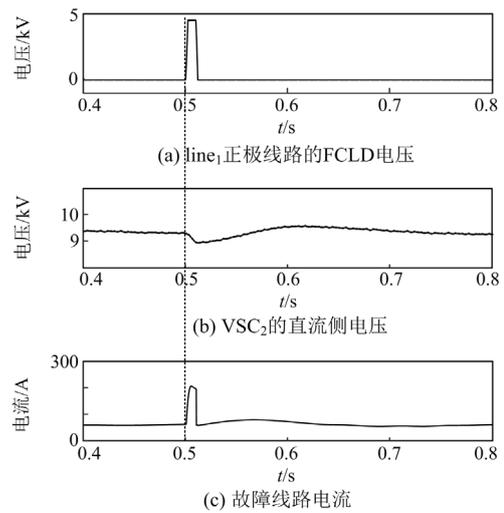
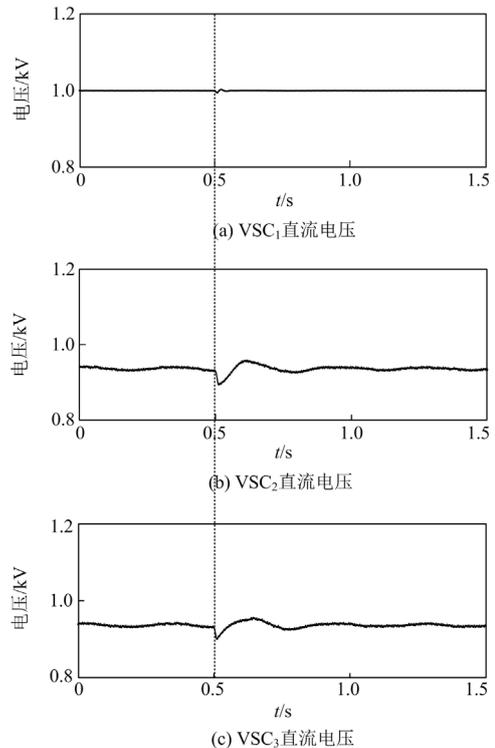


图 12 瞬时性极间故障波形图

Fig. 12 Waveform of a transient inter-pole fault

从图 12 中可以看出, 瞬时故障情况下的故障端电压、线路电流均通过 FCLD 的作用, 保持在相对平稳的状态, 在这个过程中无需 DCCB 的配合即可平稳度过故障持续时间。

图 13 为三端直流系统 $line_1$ 发生瞬时性极间故障情况下的电流电压波形图。从图 13 可以看出, 在直流系统发生瞬时故障的整个过程中, 无论是电流或者是电压波形, 均通过 FCLD 的作用在很短时间内便恢复平稳状态。



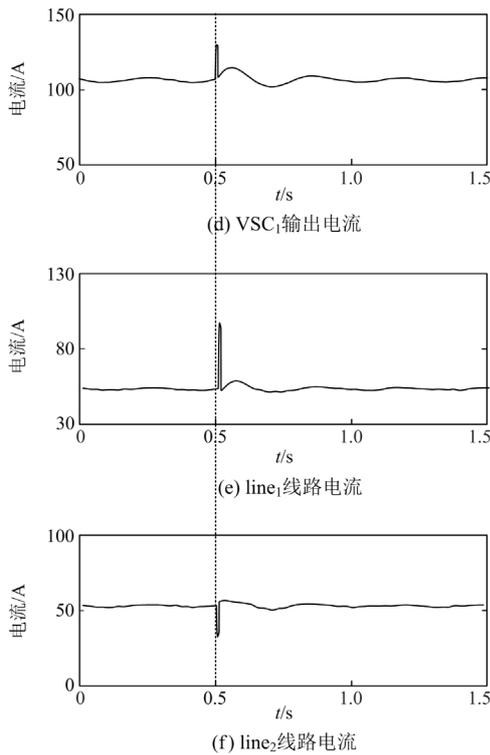


图 13 瞬时性极间故障-电流电压波形图

Fig. 13 Transient inter-pole fault-voltage and current waveform

3.2 直流系统电弧抑制暂态过程分析

本节分别根据图 7 的环状(带虚线线路)和放射状三端直流系统拓扑结构进行仿真建模, 探究 FCLD 和 DCCB 配合动作的暂态过程。为了体现 FCLD 对电弧发生过程的有效抑制作用, 本节仿真背景将 FCLD 的启动时刻设置在 DCCB 开断发生之后, 即电弧发生之后。设定 DCCB 开断时刻为 0.5 s, FCLD 启动时刻为 0.52 s。电弧仿真参数如附录 A 表 A2 所示。

图 14、图 15 分别为环状、放射状三端直流系统电弧发生点电压 V_{arc} 、电流 I_{arc} 及功率 P_{arc} 波形图。

从图 14 中可以看出, 在限流器启动时刻之后, 电弧的发生被迅速抑制, 图 14(a)电弧电压在限流器作用下被快速减小至 0 V, 图 14(b)电弧电流在限流器作用下也被迅速减小至 0 A, 图 14(c)电弧燃烧消耗的功率在限流器作用下可以忽略不计, 此时使电弧燃烧的两个条件均不满足, 理论上电弧发生过程被终止。

理论上, 电弧的发生过程应该被阻断, 但由于本文的电弧建模是基于 Cassie 模型, 该模型中存在一个微分环节, 其在仿真中体现在: 其电弧发展过程将不会被停止, 电弧电压值将不断变大直至稳定值, 并不会因为外界仿真环境的改变而停止电弧的

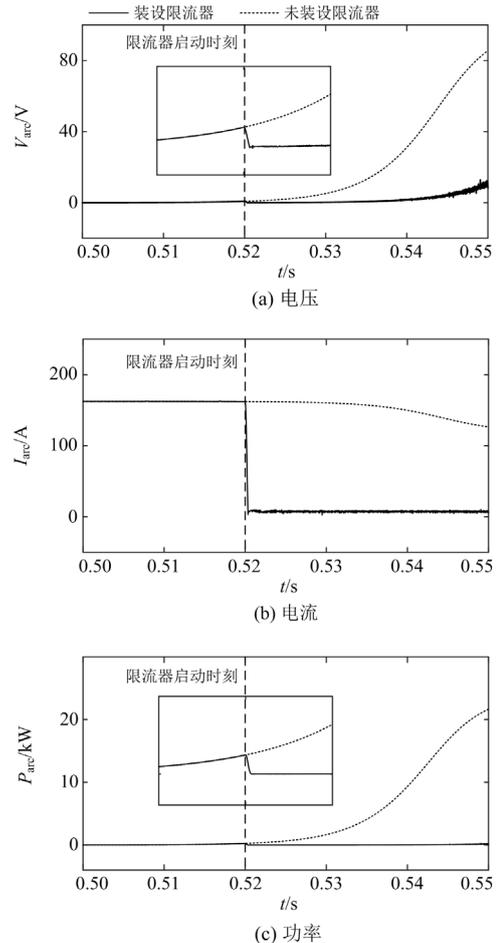


图 14 环状三端系统电弧变化情况

Fig. 14 Arc change of ring three-terminal system

发生, 因此电弧电压值在一定时间的减小之后将会再次出现较为明显的增大过程。

对图 14 和图 15 中未装设限流装置情况下的电弧发生情况进行对比分析: 与放射状三端系统相比, 在环状三端系统中, 电弧在仿真中的暂态过程表现得较为平稳, 其原因在于环状三端系统中存在两条无故障线路, 此时即使其中一条线路存在断路起弧问题, 线路的能量依旧可以通过无故障线路进行传输。

从图 15 中可以看出, 在限流器启动后, 放射状三端直流系统电弧的发生被迅速抑制。从图 15(a)可以看出, 电弧电压被迅速抑制至 0 V; 从图 15(b)可以看出, 发生电弧故障线路的电流被迅速减小到 0 A, 随之逐渐增大直至保持稳定, 该电流数值小于正常运行下的线路电流值; 图 15(c)电弧燃烧消耗的功率在限流器作用下可以忽略不计。与环状三端系统不同的是, 在 FCLD 启动一段时间后, 放射状三端直流系统中发生电弧燃烧的电流条件无法完全被消除。

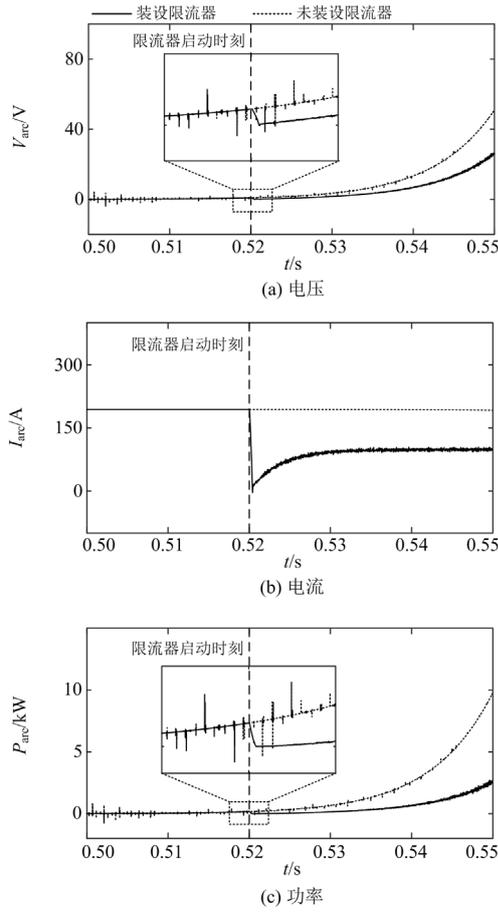


图 15 放射状三端系统电弧变化情况

Fig. 15 Arc change of radial three-terminal system

4 结论与展望

本文对 FCLD 在直流系统中与 DCCB 的协同作用过程的暂态特性进行了分析研究, 并通过仿真验证该协同作用过程的正确性, 得到以下结论:

1) 对系统装设 FCLD 的情况进行仿真, 并分析了基于 FCLD 的 DCCB 开断电弧暂态特性, 仿真结果表明了 FCLD 对直流系统内的电弧有较为明显的抑制效果, 避免故障检测后 DCCB 直接开断情况下对自身的损毁、破坏, 大大降低了直流系统开断 DCCB 的要求;

2) 在直流系统发生永久性故障情况下, FCLD 能够通过与 DCCB 的协同作用, 快速隔离故障区域, 大大减弱了故障区域对非故障区域的负面影响, 保证了非故障区域的正常运行;

3) 在直流系统发生瞬时性故障情况下, 可以通过 FCLD 提供钳位电压, 使直流系统平稳度过故障持续时间, 避免直流系统应对瞬时性故障时出现频繁开断 DCCB 的行为。

目前对 FCLD 的研究探讨, 主要是为了实现直流系统极间故障或单极故障的消除或抑制, 本文致力于探索 FCLD 更多的应用场景与可能性。通过增设额外电力装置可以有效实现电弧熄灭, 即使增加了熄弧成本, 但是可以不用通过改变断路器结构达到消弧目的, 消除断路器的体积限制, 为直流灭弧手段提供了一定的思路。如何降低 FCLD 的成本, 找到 FCLD、DCCB 功率等级与直流系统故障穿越能力的平衡点, 提高 FCLD 装设的经济性问题, 有待进行更深层的研究。

附录 A

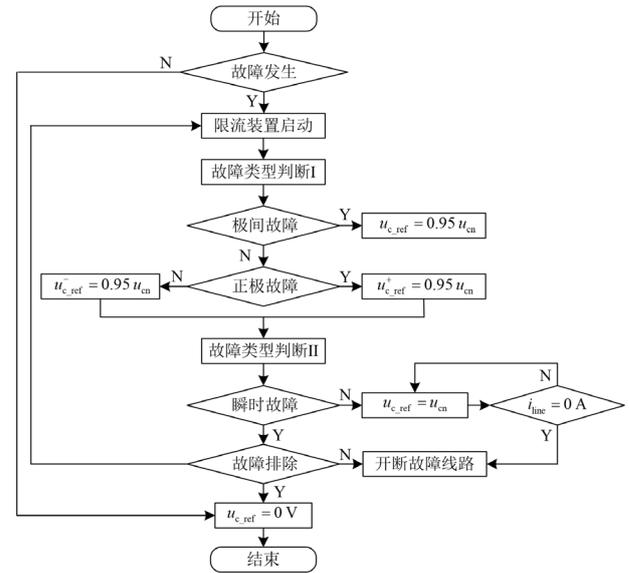


图 A1 应用层控制系统框图

Fig. A1 Control system block diagram of application layer

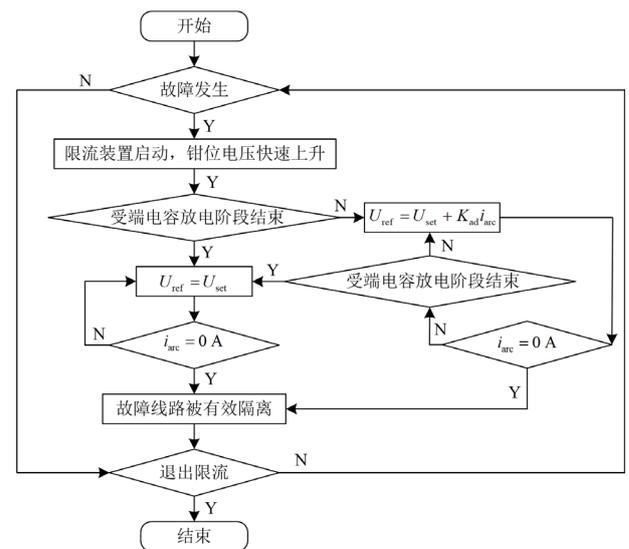


图 A2 钳位电压基准值处理流程图

Fig. A2 Clamping voltage reference value processing flowchart

表 A1 直流系统参数

Table A1 Parameters of DC system

	VSC ₁	VSC ₂	VSC ₃
额定容量/MW	10	5	5
实际负荷/MW	—	2	2
直流侧电压/kV	±5	—	—
线路阻抗/Ω	—	0.1+j0.0016	0.1+j0.0016
控制方式	V/f	P/Q	P/Q

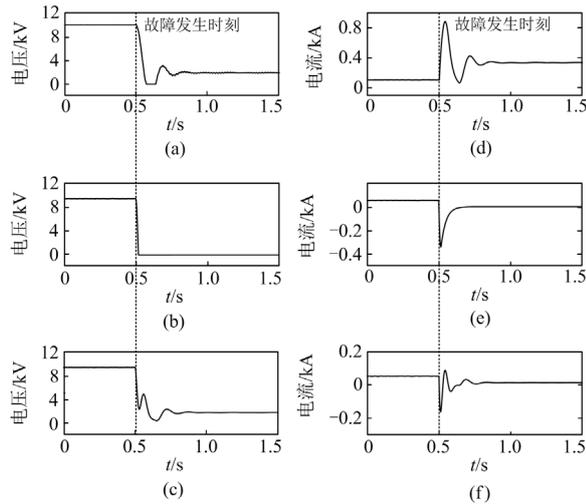


图 A3 三端直流系统故障波形图

Fig. A3 Fault waveform of three-terminal DC system

表 A2 电弧仿真参数

Table A2 Arc simulation parameter

参数	数值
电弧时间常数 τ/s	0.0052
电弧电压/kV	10
初始电导/S	1000

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] 曾嵘, 赵宇明, 赵彪, 等. 直流配用电关键技术研究与应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6791-6801, 7114.
ZENG Rong, ZHAO Yuming, ZHAO Biao, et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6791-6801, 7114.

[3] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES

G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.

[4] 张兆云, 林璞, 王星华. 交直流混合配电网继电保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 179-187.
ZHANG Zhaoyun, LIN Pu, WANG Xinghua. Review on relay protection of AC/DC hybrid distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 179-187.

[5] 胡加伟, 王彤, 王增平. 直流闭锁后系统暂态稳定紧急协同控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 43-52.
HU Jiawei, WANG Tong, WANG Zengping. Collaborative emergency control strategy of system transient stability after DC blocking[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 43-52.

[6] 陈铁, 蔡东阁, 何思敏, 等. 基于数据驱动的直流输电后续换相失败预判的研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(8): 68-74.
CHEN Tie, CAI Dongge, HE Simin, et al. Prediction of subsequent commutation failure of HVDC transmission based on data-driven[J]. Smart Power, 2022, 50(8): 68-74.

[7] 吴亚楠, 吕铮, 贺之渊, 等. 基于架空线的直流电网保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3726-3734.
WU Yanan, LÜ Zheng, HE Zhiyuan, et al. Study on the protection strategies of HVDC grid for overhead line application[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3726-3734.

[8] GUPTA R, BARKER C D, ADAMCZYK A, et al. Protection coordination in multi-terminal HVDC networks for DC fault clearance[C] // 13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP), March 7-10, 2016, Edinburgh, UK: 1-6.

[9] 张烁, 邹贵彬, 魏秀燕, 等. 适用于柔性直流电网的新型多端口混合式直流断路器[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(11): 99-105.
ZHANG Shuo, ZOU Guibin, WEI Xiuyan, et al. Novel multiport hybrid DC circuit breaker suitable for flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 99-105.

[10] ZHENG Feng, ZHANG Jinsong, LIN Jiahao, et al. A novel flexible fault current limiter for DC distribution applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2): 1049-1060.

[11] 刘路辉, 叶志浩, 付立军, 等. 快速直流断路器研究现状与展望[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 966-978.
LIU Luhui, YE Zhihao, FU Lijun, et al. Research & development status and prospects of fast DC circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 966-978.

[12] 姜仁卓, 何柏娜, 颜雅迪, 等. 双能式 SF6 高压断路器灭弧室结构设计及熄弧特性仿真研究[J]. 高电压技术,

- 2020, 46(6): 2040-2048.
- JIANG Renzhuo, HE Baina, XIE Yadi, et al. Structural design of arc extinguisher for dual-energy SF6 high voltage circuit breaker and simulation research of its arc-extinguishing characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2040-2048.
- [13] 赵峰, 杨和, 李玲. 关合电容器组高频涌流对真空灭弧室绝缘特性的影响研究[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 169-176.
- ZHAO Feng, YANG He, LI Ling. Research on impact of high frequency inrush current when making capacitor bank on insulation characteristic of vacuum interrupter[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 169-176.
- [14] 孙华, 王宾. 基于分合闸电气量的真空断路器灭弧能力在线检测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 102-109.
- SUN Hua, WANG Bin. Arc-queenching ability detection of a high voltage vacuum circuit breaker based on switching and closing current[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 102-109.
- [15] 高本锋, 董沛毅, 刘辛晔, 等. 高压直流输电线路微分欠压保护特性与定值整定[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2303-2311.
- GAO Benfeng, DONG Peiyi, LIU Xinye, et al. Research of HVDC transmission line differential under-voltage protection characteristics and value setting[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2303-2311.
- [16] 秦瑜, 文明浩, 白宇, 等. 在线估计判据极值的高压直流线路新型距离保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3888-3896.
- QIN Yu, WEN Minghao, BAI Yu, et al. A novel distance protection scheme for HVDC transmission lines based on criterion extremum online estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3888-3896.
- [17] 朱思丞, 赵成勇, 李承昱, 等. 含直流故障限流装置动作的直流电网故障电流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 469-478.
- ZHU Sicheng, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. The DC fault current calculation of DC fault current limiter action included in bipolar MMC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 469-478.
- [18] 李海锋, 许灿雄, 梁远升, 等. 计及换流站控制响应的多端混合直流线路后备保护设计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 155-163.
- LI Haifeng, XU Canxiong, LIANG Yuansheng, et al. Backup protection design for multi-terminal hybrid HVDC lines considering control response[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 155-163.
- [19] LI Rui, XU Lie, HOLLIDAY D, et al. Continuous operation of radial multiterminal HVDC systems under DC fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 351-361.
- [20] 田培涛, 陈勇, 吴庆范, 等. 基于柔直电网的暂态量保护方案及配合策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 71-78.
- TIAN Peitao, CHEN Yong, WU Qingfan, et al. Study on transient-based protection scheme and cooperation strategy based on flexible DC grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 71-78.
- [21] LI Chengyu, ZHAO Chengyong, WU Jianzhong, et al. A pole-to-pole short-circuit fault current calculation method for DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4943-4953.
- [22] 贺之渊, 王威儒, 谷怀广, 等. 兼备故障限流及开断功能的直流电网集成化关键设备发展现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 14-30.
- HE Zhiyuan, WANG Weiru, GU Huaiguang, et al. Development status and prospect of integrated key equipment of DC power grid with fault current limiting and breaking functions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 14-30.
- [23] LIU Gaoren, XU Feng, XU Zheng, et al. Assembly HVDC breaker for HVDC grids with modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 931-941.
- [24] 张冠生. 电器理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [25] 黄绍平, 杨青, 李靖. 基于 MATLAB 的电弧模型仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 64-66, 70.
- HUANG Shaoping, YANG Qing, LI Jing. Simulation of arc models based on MATLAB[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(5): 64-66, 70.
- [26] 董彦辰, 何柏娜, 贺兴民, 等. 分闸电阻对单相重合闸瞬态恢复电压影响研究[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 170-177.
- DONG Yanchen, HE Baina, HE Xingmin, et al. Study on influence of opening resistance on transient recovery voltage of single-phase reclosing operation[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 170-177.

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-09-08

作者简介:

郑峰(1983—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为直流配电网系统保护与运行; E-mail: zf_w hu@163.com

王威东(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配网保护与运行; E-mail: wwd_882022@163.com

刘宝谨(1992—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为微电网多变流并联系统协调控制技术。E-mail: lbj@fzu.edu.cn

(编辑 周金梅)