

适用于柔性直流电网的新型多端口混合式直流断路器

张 烁, 邹贵彬, 魏秀燕, 张成泉

(山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要:混合式直流断路器(HCB)是柔性直流电网直流侧故障隔离的优选方案,但是HCB高成本限制了其大规模应用的可行性,此外架空线路较高的故障概率要求HCB具备自适应重合闸功能。为此,提出了一种适用于柔性直流电网的新型多端口HCB,分别给出了其在故障隔离和自适应重合闸阶段的控制策略,详细分析了其工作原理和内部动态过程并推导了关键参数的设计方法。不同工况下的电磁暂态仿真和物理实验结果表明,该直流断路器能够通过多条直流线路共用昂贵的主断开关大幅降低制造成本,通过旁路故障线路及其上的限流电抗器降低避雷器的耗能时间和容量需求,并且具备控制简单、易于实现的自适应重合闸功能。

关键词:柔性直流电网;多端口混合式直流断路器;架空线路;避雷器;自适应重合闸

中图分类号:TM 721.1;TM 561

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204008

0 引言

与交流系统和基于电网换相换流器的传统直流输电系统相比,基于模块化多电平换流器MMC(Modular Multilevel Converter)的柔性直流电网具有有功和无功率解耦控制、不存在换相失败问题、能够为无源网络供电等优势,是大规模可再生能源接入电网的理想方式^[1-2]。然而,由于柔性直流电网具有低阻抗特性,当直流侧发生故障后,故障电流在数毫秒内即可达到额定电流的数倍甚至数十倍,这对柔性直流电网的故障检测与隔离技术提出了极高的要求^[3-4]。

在柔性直流电网多端、大容量的应用场景下,采用直流断路器隔离直流侧故障是目前最简单、高效的故障应对方式。混合式直流断路器HCB(Hybrid DC Circuit Breaker)结合了机械式直流断路器和全固态直流断路器的优势,具有通态损耗小、动作速度快等特点,具有广阔的应用前景^[5-6]。但是,由于HCB中主断开关MB(Main Breaker)需要大量电力电子器件承受极高的暂态分断电压以及大容量避雷器耗散故障电流能量,HCB的制造成本高昂,并且主要成本来源于MB。此外,上述HCB只有一进一出2个端口,只能分断单条线路的故障电流,本文称其为两端口HCB。

为了降低直流断路器的配置成本,国内外专家充分利用支路强迫换流特性,提出了多种多端口混合式直流断路器MHCB(Multiport HCB)设计方案。MHCB通过连接于同一直流母线的多条直流线路共

用昂贵的MB,避免了每条直流线路均需配置MB所造成的器件冗余。文献[7]提出一种三端口HCB,由2个完整的耦合负压型HCB以及一个额外的快速机械开关组成。该直流断路器已投运于唐家湾三端柔性直流配电网工程,具备2.7 ms内开断10 kA故障电流的能力。文献[8]提出一种组合式MHCB,在线路故障后主动将直流母线对地短路,实现故障线路上的快速机械开关UFD(Ultra Fast Disconnecter)迅速分闸以隔离故障的目标。文献[9]所提MHCB除具备经济性优势外,还具备故障限流功能。文献[10]所提MHCB通过额外配置的二极管支路将任一端口故障电流换流至共用的MB,从而避免了每条直流线路均配置MB所带来的高成本。

此外,为了限制故障电流的上升速度,柔性直流电网通常在直流线路两端配置限流电抗器。由于HCB中避雷器耗散的能量主要是柔性直流电网中电感(包括线路电感、限流电抗器等)电流的能量,限流电抗器的配置将大幅增加避雷器的耗能时间和耗能压力,从而延长了直流电网健全部分恢复正常运行的时间,增加了直流电网设备的散热压力。

另外,架空线路OHL(OverHead Line)作为未来大规模柔性直流电网电能传输的主流方式,其故障概率较高且大多数故障为瞬时性故障的特点必须加以考虑。借鉴交流系统的运行经验,为直流电网中架空线路配置自动重合闸可大幅降低瞬时性故障的影响^[11]。但为了避免HCB和直流电网内其他脆弱设备在短时间内连续遭受2次故障冲击,在HCB重合前需首先识别发生的故障为瞬时性的还是永久性的,并且HCB仅在识别瞬时性故障后才进行重合,从而实现自适应重合闸的功能^[12-14]。文献[12]提出将MB子模块分为数组,每隔数ms导通一组,从而避免了MB所有子模块同时导通可能产生的故障冲击。文献[13-16]通过控制MB部分子模块导通向故

收稿日期:2021-08-15;修回日期:2022-02-16

在线出版日期:2022-04-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077124,51677109)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077124,51677109)

障线路注入行波信号,通过行波信号在故障点或线路对端反射波的性质(如到达时刻、极性)区分瞬时性和永久性故障。文献[17]通过闭合剩余电流开关后判断线路侧的残压是否越限以识别故障性质。以上方法除文献[16]外均在配置两端口HCB的柔性直流电网的应用场景下提出,目前针对MHCB的自适应重合闸方法研究报道较少。

为了解决上述问题,本文提出一种新型MHCB,通过各相邻直流线路共用昂贵的MB以降低直流断路器的配置成本。该新型MHCB还具备如下优势:①在避雷器耗能过程中,通过旁路故障线路及其上的限流电抗器以降低避雷器耗能时间和耗能压力,进而使非故障线路故障电流更快衰减,并缩短非故障侧器件的过流时间;②通过简单的控制和识别判据实现自适应重合闸,重合过程对直流电网健全部分的正常运行影响较小。最后,通过电磁暂态仿真和物理实验对所提MHCB的可行性和有效性进行验证。

1 MHCB拓扑

本文设计的MHCB拓扑如图1所示,其共有 n 个端口(P_1 — P_n),其可替代 n 个两端口HCB。与两端口HCB的配置方案相比,所提MHCB保留了每个端口上的负荷转移开关LCS(Load Commutation Switch)、UFD与剩余电流开关RCB(Residual Current Breaker),并且其可以通过二极管支路 D_1 — D_n 将任意端口的故障电流转移到共用的MB。此外,额外配置的二极管 D_g 与耗能电阻 R_g 串联支路可以在避雷器耗能阶段将故障线路及其上的限流电抗器旁路,从而减少避雷器的耗能时间和耗能压力,缩短直流电网健全部分恢复正常运行的时间。在MHCB动作隔离故障期间,限流电阻 R_c 被旁路开关BS(Bypass Switch)旁路。

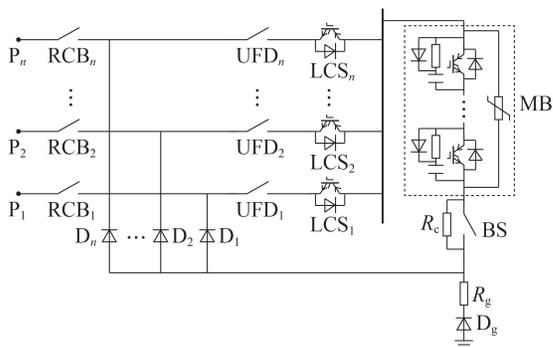


图1 新型MHCB拓扑

Fig.1 Topology of novel MHCB

2 MHCB工作原理

2.1 分析模型

多端柔性直流电网的简化分析模型如附录A图A1所示。如图所示,MMC_k($k=1, 2, \dots, n$)等效为理

想电压源与桥臂等效电感 $L_{eq,k}$ 的串联支路,架空线路等效为RL模型^[18], L_k 、 $L_{s,k}$ 分别为各架空线路上的电感、限流电抗器,端口 P_k 在故障发生前的负荷电流为 $I_{pre,k}$ 。为简化分析,假设当故障电流换流至避雷器所在支路时,忽略过渡过程,避雷器两端电压立刻跃升至残余电压 U_{res} 。

2.2 故障隔离

在正常运行情况下,MHCB各端口LCS、UFD与RCB以及BS均处于导通状态,MB处于关断状态。若 t_0 时刻架空线路OHL₁发生短路故障,各端口开始向故障端口 P_1 注入故障电流,如附录A图A2(a)所示。此时,各端口电流满足:

$$\begin{cases} U_{dc} \mathbf{e}^T = L_1 \frac{d\mathbf{i}_p}{dt} + \mathbf{R}_1 \mathbf{i}_p + (L_{s,1} + L_{r,1}) \frac{d\mathbf{i}_{p,1}}{dt} \mathbf{e}^T + \mathbf{R}_{r,1} \mathbf{i}_{p,1} \mathbf{e}^T \\ \mathbf{i}_{p,1} = \mathbf{e} \mathbf{i}_p \\ \mathbf{i}_{p,k}(t) = I_{pre,k} + \int_{t_0}^t \frac{d\mathbf{i}_{p,k}}{dt} dt \quad k=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mathbf{e} = [1 \ 1 \ \dots \ 1]_{1 \times (n-1)} \\ \mathbf{i}_p = [i_{p,2} \ \dots \ i_{p,n}]^T \\ L_1 = \text{diag}(L_{eq,2} + L_2 + L_{s,2} \ \dots \ L_{eq,n} + L_n + L_{s,n}) \\ \mathbf{R}_1 = \text{diag}(R_2 \ \dots \ R_n) \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_{dc} 为系统额定电压; $L_{r,1}$ 、 $R_{r,1}$ 分别为故障点 F 右侧OHL₁等效电感、电阻。

假设MHCB于 t_1 时刻接收到跳闸命令,开始动作将故障端口 P_1 隔离。首先,导通MB并控制故障端口LCS₁闭锁,此时故障电流开始由UFD₁转移到MB。此电流转移过程大约持续数十微秒,于 t_2 时刻结束。之后控制UFD₁启动分闸,通常认为UFD₁在零电流状态下的分闸时间为2ms^[19],在 $[t_2, t_3]$ 时间段内MHCB的故障电流通路径如附录A图A2(b)所示。待UFD₁于 t_3 时刻分闸完成后,闭锁MB,故障电流被换流至避雷器进行耗散,同时故障线路及其上的限流电抗器被 D_g - R_g 支路旁路,如附录A图A2(c)所示。在 $[t_1, t_3]$ 时间段内各端口电流仍然满足式(1),而 t_3 时刻后MHCB各电流量将满足式(3)。

$$\begin{cases} U_{dc} \mathbf{e}^T = L_1 \frac{d\mathbf{i}_p}{dt} + \mathbf{R}_1 \mathbf{i}_p + (U_{res} + v_g) \mathbf{e}^T \\ v_g = (L_{s,1} + L_{r,1}) \frac{d\mathbf{i}_{p,1}}{dt} + \mathbf{R}_{r,1} \mathbf{i}_{p,1} = -R_g \mathbf{i}_g \\ \mathbf{i}_{p,1} = \mathbf{i}_{MB} + \mathbf{i}_g = \mathbf{e} \mathbf{i}_p + \mathbf{i}_g \\ \mathbf{i}_{p,k}(t) = \mathbf{i}_{p,k}(t_3) + \int_{t_3}^t \frac{d\mathbf{i}_{p,k}}{dt} dt \quad k=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{i}_{p,k}(t_3)$ 可由式(1)求得; v_g 、 \mathbf{i}_g 分别为耗能电阻 R_g 两端电压、支路电流; \mathbf{i}_{MB} 为MB中的故障电流。

假设MB中的故障电流 \mathbf{i}_{MB} 于 t_4 时刻衰减为0,这标志着避雷器耗能过程结束以及非故障端口的故障电流清除完毕。在 $(t_3, t_4]$ 时间段内避雷器耗散能量 E_{abs} 可由式(4)近似计算。

$$E_{\text{abs}} = \int_{t_3}^{t_4} U_{\text{res}} i_{\text{MB}}(t) dt \quad (4)$$

为了直观分析耗能电阻 R_g 对避雷器耗能过程的影响,忽略式(3)中较小的线路电阻 R_l 和 $R_{r,1}$,可得到 MB 电流 $i_{\text{MB}}(t)$ 的表达式为:

$$\begin{cases} i_{\text{MB}}(t) = i_{p,1}(t_3) - \frac{K_1}{K_2} t - A(t) \\ A(t) = \frac{K_3 K_1 (K_2 - 1)}{K_2^2} \left(1 - e^{-\frac{K_2}{K_3} t} \right) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} K_1 = (U_{\text{res}} - U_{\text{dc}}) \sum_{k=2}^n \frac{1}{L_{\text{eq},k} + L_k + L_{s,k}} \\ K_2 = (L_{s,1} + L_{r,1}) \sum_{k=2}^n \frac{1}{L_{\text{eq},k} + L_k + L_{s,k}} + 1 \\ K_3 = \frac{L_{s,1} + L_{r,1}}{R_g} \end{cases} \quad (6)$$

对于两端口 HCB, MB 电流 $i_{\text{MB}}(t)$ 的表达式为:

$$i_{\text{MB}}(t) = i_{p,1}(t_3) - \frac{K_1}{K_2} t \quad (7)$$

对比式(5)和式(7)可知, MHCB 与两端口 HCB 的 MB 电流表达式区别体现在 $A(t)$ 。由于 $A(t)$ 恒为正, MHCB 中配置的耗能电阻 R_g 可以加快 MB 故障电流衰减速度,并且衰减速度与耗能电阻 R_g 的取值有关。由式(6)可知,常数 $K_1 - K_3$ 中仅 K_3 的大小与耗能电阻 R_g 的取值有关,并且随 R_g 取值增大 K_3 逐渐减小,相应地式(5)中 $A(t)$ 也逐渐减小,导致 MB 故障电流衰减速度减慢。同时,由式(4)可知,避雷器耗散能量 E_{abs} 与 MB 电流 $i_{\text{MB}}(t)$ 积分值有关,因此故障电流衰减速度越快,避雷器耗散能量越少。综上所述,选取较小的耗能电阻 R_g 不仅可以缩短避雷器耗能时间,还能够降低避雷器耗散能量。

在 t_4 时刻之后,故障线路电感电流将通过回路 $L_{s,1} - L_{r,1} - R_{r,1} - F - D_g - R_g - D_l - L_{s,1}$ 进行续流,如附录 A 图 A2 (d) 所示。续流阶段故障端口电流 $i_{p,1}(t)$ 满足:

$$i_{p,1}(t) = i_g(t) = i_{p,1}(t_4) e^{-\frac{R_{r,1} + R_g}{L_{r,1} + L_{s,1}} (t - t_4)} \quad (8)$$

式中: $i_{p,1}(t_4)$ 可由式(3)求得。

假设续流过程于 t_5 时刻结束,此时如果不再需要重合故障线路,则控制 RCB₁ 断开将故障线路完全隔离。否则 RCB₁ 仍然保持闭合,等待故障去游离时间后进行自适应重合闸。

2.3 自适应重合闸

当续流过程于 t_5 时刻结束并等待线路去游离时间(约 300 ms^[15])后, MHCB 开始重合故障端口(此处定义为 t_6 时刻)。在等待线路去游离时间内应打开 BS 将限流电阻 R_c 与 MB 串联。自适应重合闸的核心是识别故障性质。本文提出的故障性质识别方法原理如下。

在 t_6 时刻时,首先导通 MB。此时根据故障性质

的不同存在 2 种可能情况。

1) 永久性故障。假设发生的故障为永久性故障,则导通 MB 时故障点仍然存在于故障线路,因此会产生流过如附录 A 图 A3 所示的故障电流路径:非故障端口 $P_2 - P_n$ 的 LCS 和 UFD-MB- R_c -D₁-RCB₁-P₁-OHL₁-F。故障端口电流和电压稳态值为:

$$\begin{cases} i_{p,1} = \frac{v_b}{R_c + R_{r,1} + R_f} \\ v_{p,1} = (R_{r,1} + R_f) i_{p,1} \end{cases} \quad (9)$$

式中: v_b 为直流母线电压,其值接近于系统额定电压; R_f 为过渡电阻,在 500 kV 应用场景下考虑最大过渡电阻为 500 Ω 。由于限流电阻 R_c 的阻值为千欧姆级,由式(9)可知,不论发生的故障为金属性故障还是高阻故障,故障端口电压和电流均会被限制在较小值。

2) 瞬时性故障。假设发生的故障为瞬时性故障,则导通 MB 时故障点已经消失。因此,在失去故障点的电压箝位作用后,故障线路电压将由于线路分布电容充电而逐渐升高,充电路径如附录 A 图 A3 中箭头所示。经过一定时间后,故障线路电压将由近似零电位上升到接近额定值的水平。

综合以上分析可构建故障性质识别判据如下:

$$|v_{p,1}(t_6 + \Delta t)| > |K_{\text{rel}} U_{\text{dc}}| \quad (10)$$

式中: Δt 为保证故障线路充电时间而设置的延时; K_{rel} 为可靠系数,其取值范围为(0, 1)。若故障端口电压 $v_{p,1}$ 满足式(10),则判定发生的故障为瞬时性故障, MHCB 继续后续重合闸操作,依次闭合 UFD 和 LCS 以恢复故障线路的供电;否则,判定为永久性故障, MHCB 不再进行后续重合闸操作,打开故障端口的 RCB 以分断小故障电流并隔离故障端口。

2.4 动作时序图

MHCB 在故障隔离和自适应重合闸阶段的动作时序如附录 A 图 A4 所示。

3 MHCB 参数设计

3.1 耗能电阻

为了分析 MHCB 中避雷器耗能时间和耗散能量与耗能电阻 R_g 之间的关系,将测试系统参数和不同耗能电阻 R_g 代入式(1)~(4)求解 MB 中电流,以获得避雷器耗能时间和耗散能量。测试系统采用如附录 A 图 A1 所示拓扑,其关键参数列于附录 A 表 A1。MHCB 中避雷器耗能时间和耗散能量随耗能电阻 R_g 阻值的变化曲线如图 2 所示。

由图 2 可知,随着耗能电阻 R_g 的增加,避雷器耗能时间和耗散能量迅速增加。当耗能电阻 R_g 增大到一定程度(数百欧姆)后,其变化将不会再对避雷器耗能时间和耗散能量产生显著影响。因此,应尽量选择较小的耗能电阻。但是,由式(8)可知,较小的

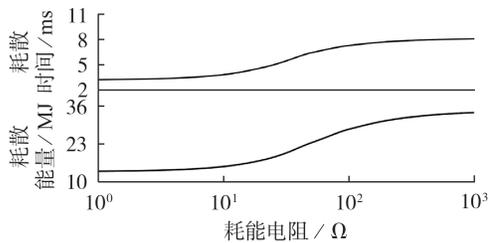


图2 MHCB中避雷器耗能时间及耗散能量随耗能电阻变化的关系曲线

Fig.2 Relationship curves between energy dissipation time and dissipated energy of arrester with change of energy dissipation resistance in MHCB

耗能电阻会延长故障线路电感续流时间。此外,当耗能电阻 R_g 在 $[1, 10] \Omega$ 范围内变化时,避雷器耗能和耗散能量相应变化较小。因此,综合考虑以上因素,本文中耗能电阻 R_g 确定为 10Ω 。

3.2 限流电阻

由2.2节和2.3节分析可知,限流电阻 R_c 在故障隔离过程中被BS旁路,仅在自适应重合闸前投入。限流电阻 R_c 的作用主要为限制发生永久性故障时重合MB所产生的故障电流。因此,考虑500 kV的应用场景,本文选择限流电阻 R_c 为 $100 \text{ k}\Omega$ 。由式(9)可知,选择 $100 \text{ k}\Omega$ 的限流电阻能够将故障电流稳态值限制在5 A以内。由于该电流幅值较小,断开故障端口RCB即可将其分断。

3.3 二极管支路

由附录A图A2可知,在故障隔离过程中非故障端口二极管支路 D_2-D_n 可看作与避雷器并联。因此,二极管支路 D_1-D_n 承受的最大电压为避雷器的残余电压,而二极管支路 D_g 承受的最大电压不会超过系统额定电压。此外,由附录A图A3可知,在自适应重合闸过程中,所有二极管支路 D_1-D_n 、 D_g 承受的最大电压均不会超过系统额定电压。

由于二极管具备较高的短时过流能力,只需要考虑二极管支路耐受过电压能力即可。假设新型MHCB采用二极管额定电压为 U_{dN} ,不考虑器件冗余,则二极管支路 D_1-D_n 和 D_g 所需器件个数分别为 U_{res}/U_{dN} 和 U_{dc}/U_{dN} ,进而可以得到新型MHCB所需器件总数为 $(nU_{res}+U_{dc})/U_{dN}$ 。

4 仿真分析

4.1 仿真模型

为了验证本文所提MHCB的可行性和有效性,在PSCAD/EMTDC仿真软件中搭建了三端不对称单极仿真模型,其拓扑与附录A图A1所示分析模型相同。该仿真模型采用基于半桥子模块的MMC,子模块数目为250个,桥臂电感为 30 mH 。直流线路采用分布式依频架空线路模型。该仿真模型的其他关

键参数与附录A表A1中的测试系统关键参数相同。根据3.1节和3.2节的分析,耗能电阻 R_g 与限流电阻 R_c 分别选取为 10Ω 和 $100 \text{ k}\Omega$ 。假设线路保护动作为 3 ms ,UFD动作为 2 ms ,RCB与BS动作为 30 ms 。自适应重合闸判据中延时 Δt 和可靠系数 K_{rel} 分别设置为 10 ms 和 0.05 。

4.2 故障隔离仿真

在架空线路 OHL_1 中点处设置金属性短路故障,故障时刻为 5.0 s 。MHCB于 5.003 s 接收到线路保护发出的跳闸信号并开始动作,其动作时序如附录A图A4所示。此外,为了比较MHCB与两端口HCB配置方案的故障隔离表现,将MHCB替换为两端口HCB并在相同故障条件下进行仿真。2种直流断路器配置方案在故障隔离过程中各关键电气量波形如图3所示。

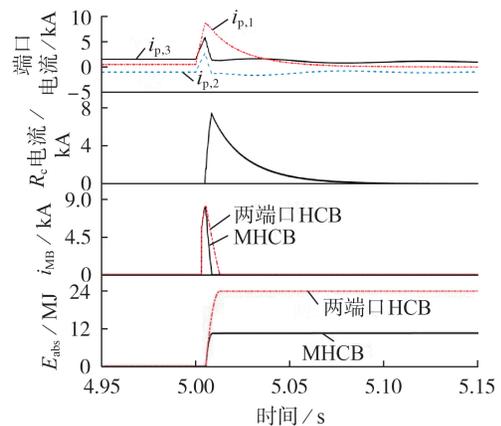


图3 故障隔离过程仿真波形

Fig.3 Simulative waveforms of fault isolation process

由图3可知,MHCB中MB闭锁之前各端口电流 $i_{p,1}-i_{p,3}$ 分别达到峰值 $8.73, 2.82, 5.91 \text{ kA}$ 。当MB闭锁后,避雷器耗能时间为 3.5 ms ,耗散能量为 10.96 MJ 。在相同的故障条件下,两端口HCB避雷器耗能时间与耗散能量分别为 7.96 ms 和 24.96 MJ 。因此,相较于两端口HCB,在直流电网中配置本文所提MHCB可以降低避雷器 56.0% 的耗能时间以及 56.1% 的耗散能量。

4.3 自适应重合闸仿真

故障端口 P_1 电流在 5.1 s 衰减为0并等待 300 ms 线路去游离时间后,MHCB于 5.4 s 开始自适应重合闸。MHCB的自适应重合闸动作时序如附录A图A4所示,在瞬时性故障和永久性故障场景下的仿真结果如图4所示。

由图4可知,当发生的故障为瞬时性故障时,故障端口电压远大于故障性质识别门槛值。对于永久性故障,当暂态过程结束后故障端口电压维持在0附近。因此,在以上2种故障场景下,由式(10)可

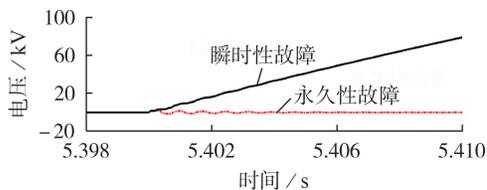


图 4 自适应重合闸过程中故障端口电压仿真波形

Fig.4 Simulative waveforms of fault port voltage during adaptive reclosing process

以可靠区分瞬时性故障和永久性故障。此外,在上述 2 种故障场景下,非故障端口的电压波动范围均在 $\pm 5\%$ 以内,说明本文所提自适应重合闸方法对直流电网健全部分的正常运行影响较小。

4.4 与已有技术方案的对比分析

为了体现本文所提 MHCB 的经济性及性能优势,本节对本文所提方案与张北工程所采用的模块化级联 HCB 方案进行对比分析。模块化级联 HCB 的拓扑如附录 A 图 A5 所示^[20-21]。

由于 HCB 中 MB 成本远高于其他部件,在经济性方面仅比较 2 种方案 MB 的制造成本。假设所采用绝缘栅双极型晶体管 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 模块 (4.5 kV)、二极管 (4.5 kV) 和避雷器成本分别为 3 万元、0.26 万元和 10 万元 / MJ。2 种技术方案所需避雷器容量根据最恶劣故障情形确定。对于 4.1 节测试系统,2 种技术方案关键参数 (制造成本、避雷器耗能时间和避雷器容量需求等) 如附录 A 表 A2 所示。由表可知,相较于模块化级联 HCB 方案,采用本文所提 MHCB 方案可以分别降低约 50% 的避雷器耗能时间和 75% 的避雷器容量需求。此外,本文所提 MHCB 方案的制造成本仅约为模块化级联 HCB 方案的 1/3。以上分析结果验证了本文所提 MHCB 方案在经济性和动作性能方面的优势。

5 实验验证

为了验证本文所提新型 MHCB 的可行性,在实验室中搭建了如附录 A 图 A6(a) 所示的实验平台,其拓扑如附录 A 图 A6(b) 所示,相应的关键参数列于附录 A 表 A3。由于 MHCB 在故障隔离以及自适应重合闸过程中非故障端口的 LCS、UFD 与 RCB 一直处于闭合状态,为了降低实验平台的复杂程度,本文已在实验平台中将上述开关省略,省略的开关在附录 A 图 A6(b) 中用实线框标注。此外,为了精确控制动作时间,实验电路中的 UFD、BS 与 RCB 均采用 IGBT 模块等效。其中,为了降低故障电流峰值,等效 UFD 的动作时间设置为 1 ms。实验过程中式 (10) 所示故障性质识别判据中时间延迟 Δt 和可靠系数 K_{rel} 分别设置为 10 ms 和 0.3。

在正常运行期间, MHCB 中 LCS_1 、 UFD_1 、 RCB_1 和 BS 均处于闭合状态,而 MB 和故障模拟模块均处于

断开状态。故障模拟模块在 78.0 ms 时闭合以便模拟发生短路故障。MHCB 在 79.0 ms 开始动作将故障隔离,其动作时序如附录 A 图 A4 所示。此外,为了对比 MHCB 与两端口 HCB 的动作特性,本文将附录 A 图 A6(b) 中的 MHCB 替换为两端口 HCB,并在相同故障条件下进行实验。2 种断路器配置方案下的实验结果如图 5 所示。

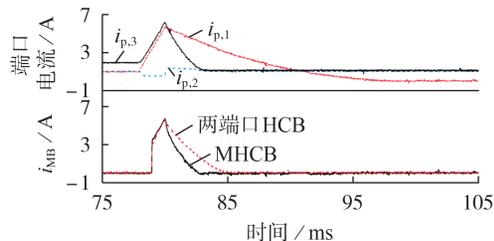


图 5 故障隔离过程实验波形

Fig.5 Experimental waveforms of fault isolation process

由图可知,2 种直流断路器配置方案下故障电流均在 80.0 ms 时上升到峰值,并在 MB 关闭后开始减小。在故障隔离过程中, MHCB 的耗能时间和耗散能量分别为 2.80 ms 和 0.72 J,而两端口 HCB 的耗能时间和耗散能量为 4.90 ms 和 1.60 J。因此,与两端口 HCB 的配置方案相比,采用 MHCB 的配置方案可以降低避雷器 42.9% 的耗能时间和 55.0% 的耗散能量。

当故障隔离过程结束后,本文分别设置瞬时性和永久性故障以测试所提出的 MHCB 自适应重合闸的性能。MHCB 于 0.398 s 进行自适应重合闸,其动作时序如附录 A 图 A4 所示。2 种故障情况下的实验结果如图 6 所示。由图可知,在发生瞬时性故障后,故障端口电压迅速上升至额定值的水平。对于永久性故障,在暂态过程结束后故障端口电压被限制在一个较小的值。这意味着由式 (10) 所示的识别判据能够准确判别故障性质,并且具备较高的灵敏度。

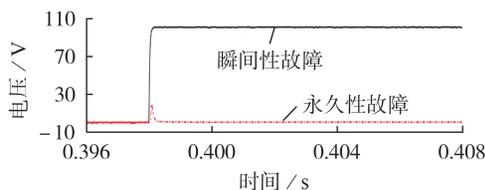


图 6 自适应重合闸过程中故障端口电压实验波形

Fig.6 Experimental waveforms of fault port voltage during adaptive reclosing process

6 结论

为了解决两端口 HCB 制造成本高、耗能时间长以及无选择性重合闸的问题,本文提出一种适用于柔性直流电网的新型 MHCB。与两端口 HCB 相比,该 MHCB 能够以较低的成本保护多条直流线路,同

时在故障隔离过程中降低避雷器40%以上的耗能和50%以上的耗散能量。此外该MVCB的自适应重合闸功能控制简单、便于实现,故障性质识别灵敏度高,重合闸过程对直流电网健全部分的正常运行影响较小。本文所提新型MVCB的可行性和有效性在电磁暂态仿真和物理实验中均得到了验证。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 林湘宁,刘琦,范理想,等. 基于突变能量比值的多端柔性直流电网闭锁式纵联保护方案[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):2-8,16.
LIN Xiangning,LIU Qi,FAN Lixiang,et al. Blocking pilot protection based on ratio of superimposed energy for VSC-MTDC grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):2-8,16.
- [2] 宋国兵,侯俊杰,郭冰,等. 计及主动故障限流策略的柔性直流电网纵联保护[J]. 电力自动化设备,2021,41(4):123-131,138.
SONG Guobing,HOU Junjie,GUO Bing,et al. Pilot protection of flexible DC grid considering active fault current limiting strategy[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(4):123-131,138.
- [3] 刘剑,何雨微,徐祥海,等. 柔性直流电网故障限流技术分析与探讨[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):9-16.
LIU Jian,HE Yuwei,XU Xianghai,et al. Analysis and discussion of fault current limiting technology in flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):9-16.
- [4] 赵冠琨,贾科,王聪博,等. 基于直流断路器转移支路动态电阻特性的柔性直流输电系统保护动作分析与改进[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):46-53.
ZHAO Guankun,JIA Ke,WANG Congbo,et al. Analysis and improvement of protection action of flexible DC transmission system based on dynamic resistance characteristics of DC circuit breaker's transfer branch[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(9):46-53.
- [5] 程显,葛国伟,杨培远,等. 基于真空断路器与SF₆断路器串联的新型混合式高压直流断路器理论分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(6):68-74.
CHENG Xian,GE Guowei,YANG Peiyuan,et al. Theoretical analysis of novel hybrid HVDC circuit breaker based on a series of vacuum interrupter and SF₆ interrupters[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(6):68-74.
- [6] 王灿,杜船,徐杰雄. 中高压直流断路器拓扑综述[J]. 电力系统自动化,2020,44(9):187-199.
WANG Can,DU Chuan,XU Jiexiong. Review of topologies for medium- and high-voltage DC circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(9):187-199.
- [7] 屈鲁,余占清,陈政宇,等. 三端口混合式直流断路器的工程应用[J]. 电力系统自动化,2019,43(23):141-146,154.
QU Lu,YU Zhanqing,CHEN Zhengyu,et al. Engineering application of three-terminal hybrid DC circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(23):141-146,154.
- [8] LIU G,XU F,XU Z,et al. Assembly HVDC breaker for HVDC grids with modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2017,32(2):931-941.
- [9] 王金健,王志新. 一种具有限流能力的新型混合式高压直流断路器拓扑[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):143-149.
WANG Jinjian,WANG Zhixin. A novel hybrid high-voltage DC circuit breaker topology with current limiting capability[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(10):143-149.
- [10] ZHANG S,ZOU G,WEI X,et al. Diode-bridge multi-port hybrid DC circuit breaker for multi-terminal DC grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2021,68(1):270-281.
- [11] 丁骁,汤广福,韩民晓,等. 柔性直流电网用混合式高压直流断路器特征参数提取及应用[J]. 中国电机工程学报,2018,38(1):309-319,369.
DING Xiao,TANG Guangfu,HAN Minxiao,et al. Characteristic parameters extraction and application of the hybrid DC circuit breaker in MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(1):309-319,369.
- [12] 张盛梅,安婷,裴翔羽,等. 混合式直流断路器重合闸策略[J]. 电力系统自动化,2019,43(6):129-136.
ZHANG Shengmei,AN Ting,PEI Xiangyu,et al. Reclosing strategy for hybrid DC circuit breakers[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(6):129-136.
- [13] ZHANG S,ZOU G,LI B,et al. Fault property identification method and application for MTDC grids with hybrid DC circuit breaker[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2019,110:136-143.
- [14] SONG G,WANG T,HUSSAIN K S T. DC line fault identification based on pulse injection from hybrid HVDC breaker[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2019,34(1):271-280.
- [15] ZHANG S,ZOU G,WEI X,et al. A reclosing scheme of hybrid DC circuit breaker for MMC-HVDC systems[J/OL]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. [2021-04-20]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9201539>.
- [16] 张烁,邹贵彬,魏秀燕,等. 基于多端口混合式直流断路器的柔性直流电网故障性质识别方法[J/OL]. 高电压技术. [2021-04-13]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201318>.
- [17] LI B,HE J,LI Y,et al. A novel DCCB reclosing strategy for the flexible HVDC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2020,35(1):244-257.
- [18] LI C,ZHAO C,XU J,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.
- [19] 肖晃天,徐政,刘高任,等. 新型高压直流断路器的自供能控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):1-9.
XIAO Huangqing,XU Zheng,LIU Gaoren,et al. Self-powered control strategy of new HVDC circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(1):1-9.
- [20] 汤广福,王高勇,贺之渊,等. 张北500 kV直流电网关键技术与设备研究[J]. 高电压技术,2018,44(7):2097-2106.
TANG Guangfu,WANG Gaoyong,HE Zhiyuan,et al. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500 kV DC grid[J]. High Voltage Engineering,2018,44(7):2097-2106.
- [21] CHEN W,ZENG R,HE J,et al. Development and prospect of direct-current circuit breaker in China[J]. High Voltage,2021,6(1):1-15.

作者简介:



张烁

张烁(1995—),男,博士研究生,主要研究方向为柔性直流电网保护与控制(E-mail: zhangshuo95@foxmail.com);

邹贵彬(1971—),男,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: guibinzou@sdu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Novel multiport hybrid DC circuit breaker suitable for flexible DC grid

ZHANG Shuo,ZOU Guibin,WEI Xiuyan,ZHANG Chengquan

(School of Electrical Engineering,Shandong University,Jinan 250061,China)

Abstract: The HCB(Hybrid DC Circuit Breaker) has been considered as an ideal way to isolate the fault on DC-side of flexible DC grid. However,its high cost has seriously limited the feasibility of its large-scale application. In addition,the high fault probability of the overhead lines requires HCBs to have adaptive reclosing capability. Therefore,a novel MHCBS(Multiport Hybrid DC Circuit Breaker) suitable for flexible DC grid is proposed,its control strategies in the stages of fault isolation and adaptive reclosing are put forward,its working principle and internal dynamic process are analyzed in detail,and the design method of key parameters is deduced. The electromagnetic transient simulations and physical experiments under different working conditions show that the proposed MHCBS greatly reduces the manufacturing cost by sharing the expensive main breaker by multiple DC lines,reduces the energy dissipation time and capacity requirement of the arresters by bypassing the fault line and the current-limiting reactor on it,and has the adaptive reclosing function that is simple to control and easy to implement.

Key words: flexible DC grid;multiport hybrid DC circuit breaker;overhead line;arrester;adaptive reclosing

(上接第98页 continued from page 98)

Grey-box impedance identification and impedance aggregation analysis method for multiple grid-connected inverter system

LIU Qiyu¹,LI Yonggang¹,WANG Yue²,WU Binyuan¹,HUANG Qilin¹,WANG Ou³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University,Baoding 071003,China;

2. Nantong Power Supply Subsidiary Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd.,Nantong 226006,China;

3. Information and Communication Branch,State Grid Liaoning Electric Power Supply Co.,Ltd.,Shenyang 110002,China)

Abstract: The problem of harmonic oscillation in new energy power generation network is prominent. The key to analyze this problem by impedance analysis method is the correct choice of aggregation path. For this,an impedance aggregation method of multiple grid-connected inverter system considering zero-pole cancellation is proposed. The establishment process of new energy power generation network and its corresponding impedance network is explained,and the aggregation process of new energy power generation impedance network is shown. Based on the gray-box background,the impedance models of grid-connected inverter,reactor and capacitor are obtained by vector fitting algorithm. The possible zero-pole cancellation phenomenon in the impedance aggregation path is analyzed theoretically. A multiple grid-connected inverter system is built in MATLAB/Simulink for simulation,different impedance aggregation paths are selected,and the system stability is analyzed by impedance analysis method to further verify the effectiveness and practicability of the proposed aggregation method.

Key words: grid-connected inverter; impedance-based analysis; grey-box; vector fitting algorithm; impedance aggregation path;zero-pole cancellation

附录 A

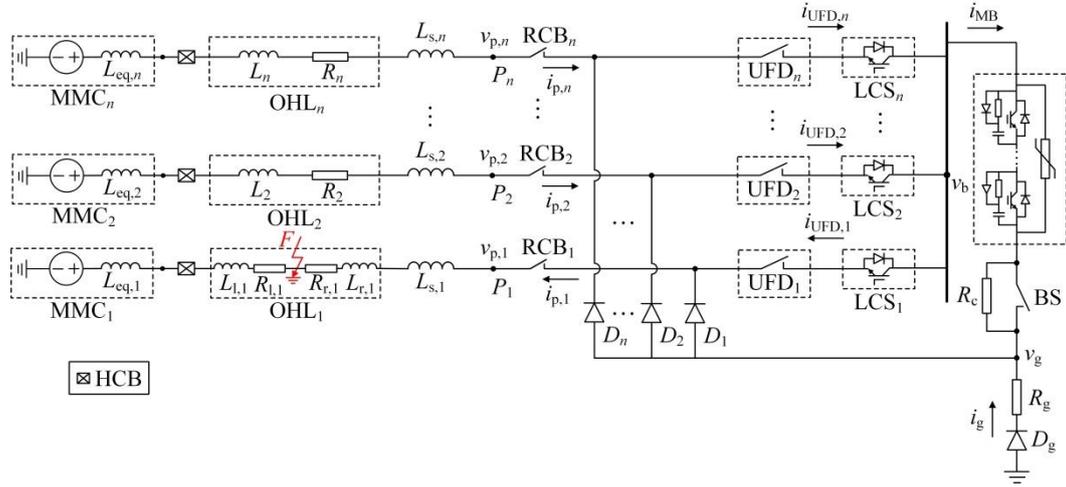


图 A1 简化分析模型

Fig.A1 Simplified analysis model

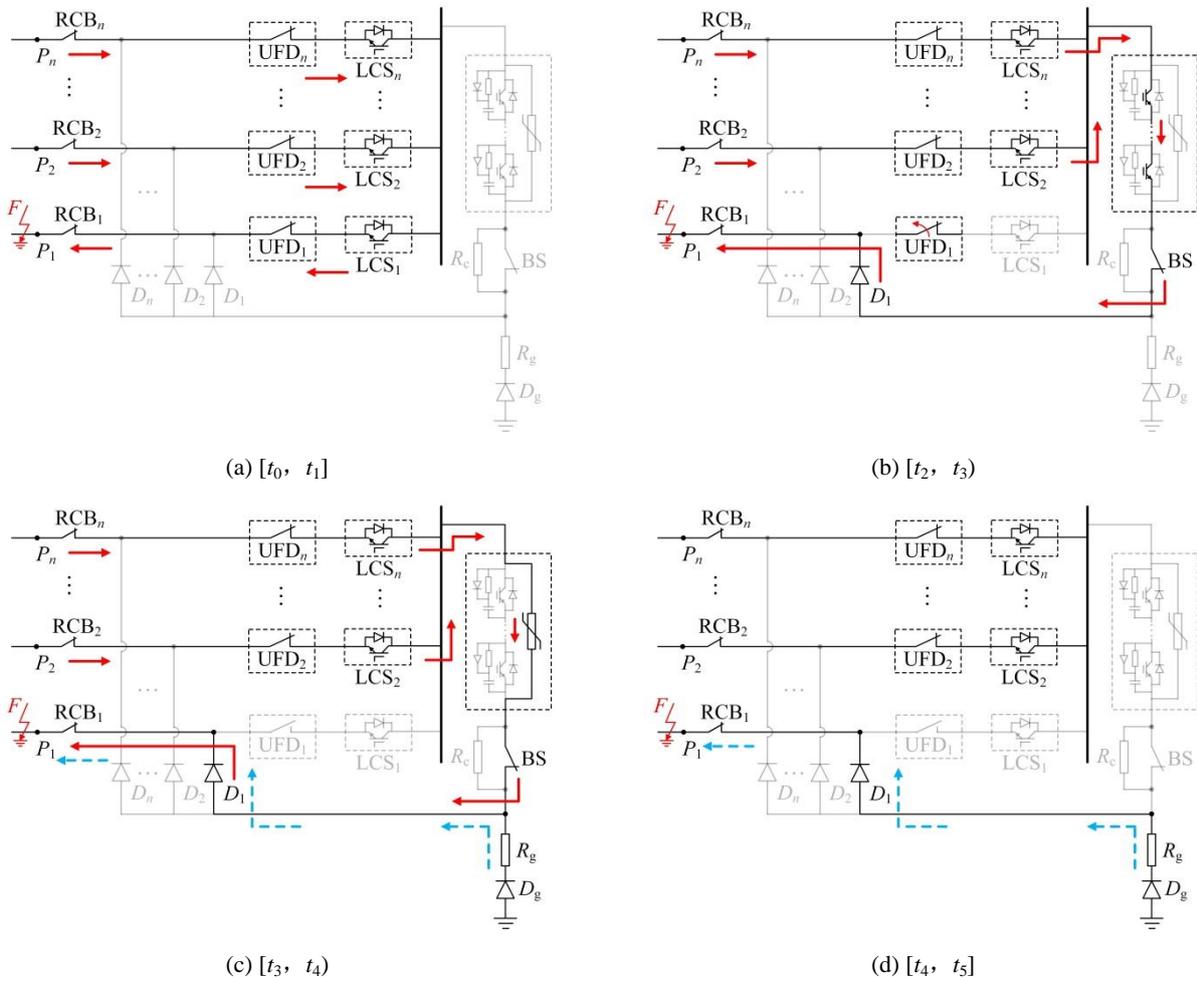


图 A2 MHCBS 在不同阶段的故障电流通路径

Fig.A2 Fault current paths of MHCBS in different stages

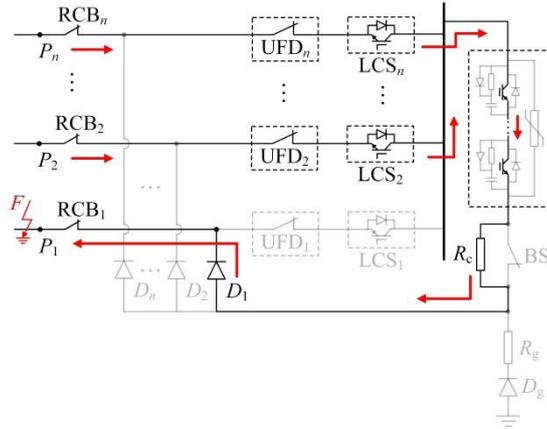


图 A3 MHCB 电流路径

Fig.A3 Current paths of MHCB

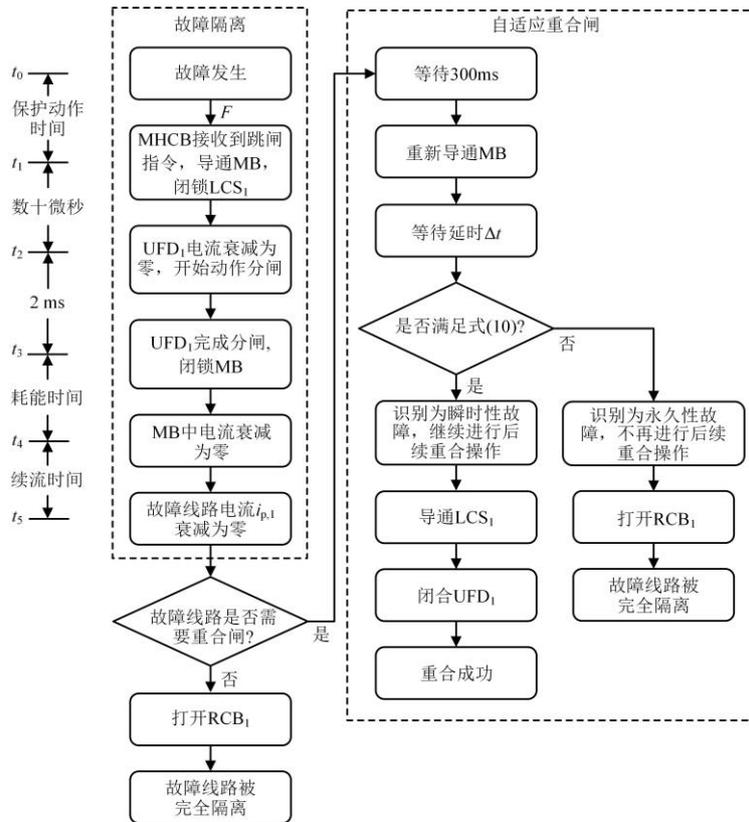


图 A4 MHCB 动作时序

Fig.A4 Operation sequences of MHCB

表 A1 测试系统关键参数

Table A1 Key parameters of test system

参数	取值
端口数 n	3
额定电压 U_{dc}	500 kV
避雷器残余电压 U_{res}	800 kV
桥臂等效电感值 $L_{eq,1}—L_{eq,3}$	20 mH
限流电抗器电感值 $L_{s,1}—L_{s,3}$	100 mH
OHL ₁ —OHL ₃ 线路长度	100 km, 80 km, 60 km
单位长度线路电阻值	9.03 mΩ/km
单位长度线路电感值	2.06 mH/km

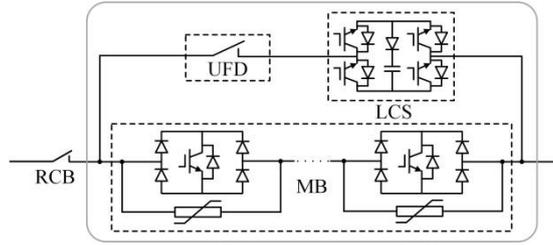


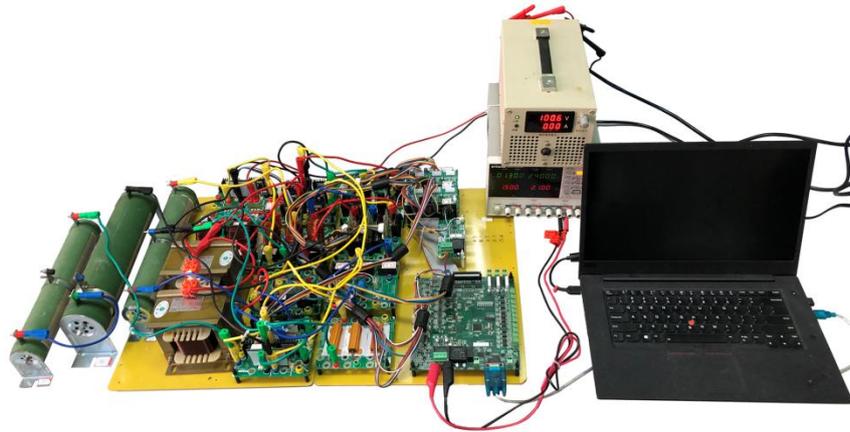
图 A5 模块化级联 HCB 拓扑

Fig.A5 Topology of modular cascaded HCB

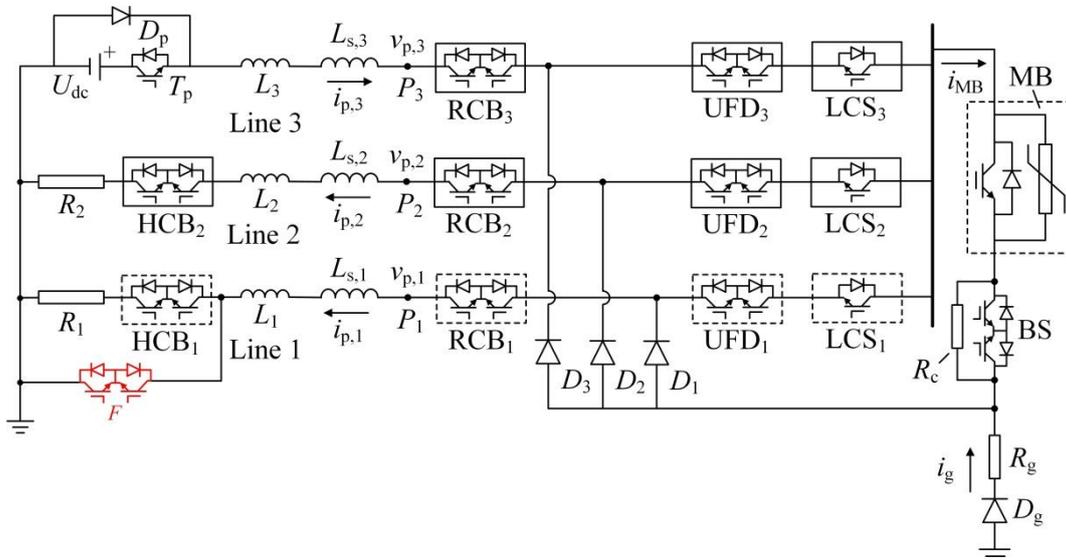
表 A2 MHCBS 与模块化级联 HCB 关键参数对比

Table A2 Comparison of key parameters between MHCBS and modular cascaded HCB

技术方案	典型避雷器耗能时间			半导体器件数目		总避雷器容量需求	总成本
	OHL ₁	OHL ₂	OHL ₃	IGBT 模块	二极管		
模块化级联 HCB	7.96 ms	8.04 ms	5.74 ms	178×3	712×3	88.2 MJ	3 039 万元
MHCBS	3.50 ms	3.91 ms	3.09 ms	178	646	21.9 MJ	921 万元



(a) 物理测试接线图



(b) 测试电路拓扑

图 A6 实验平台及测试电路拓扑

Fig.A6 Experimental platform and topology of test circuit

表 A3 实验平台关键参数

Table A3 Key parameters of experimental platform

参数	取值或型号
额定电压	100 V
线路电感 $L_{s,1}$, $L_{s,2}$, $L_{s,3}$	10 mH, 2 mH, 10 mH
等效线路电感 L_1 , L_2 , L_3	3 mH, 3 mH, 3 mH
负荷电阻 R_1 , R_2	100 Ω , 100 Ω
耗能电阻 R_g	1 Ω
限流电阻 R_c	200 Ω
压敏电阻	14D101K
数字信号处理器	TMS320F28069