

基于直流阻尼器的新能源直流汇集系统故障隔离方案

李 晔¹, 陈炳如¹, 何佳伟², 李 斌², 张胜博¹

(1. 河北工业大学 电气工程学院 智能配用电装备与系统全国重点实验室, 天津 300401;

2. 天津大学 电气自动化与信息工程学院 智能配用电装备与系统全国重点实验室, 天津 300072)

摘要:针对新能源基地的多级升压全直流汇集送出系统,研究了高压直流汇集侧的故障隔离方案。介绍了新能源多级升压直流汇集系统的结构以及高压直流送出线路的故障特性。从故障隔离的可行性出发,设计了适用于高压直流汇集系统的故障隔离配置方案。分析发现,基于直流阻尼器的故障隔离方案具有经济性好、故障隔离较快的优势,在此基础上提出了直流阻尼器的拓扑及关键参数设计方法。基于PSCAD/EMTDC仿真验证了基于直流阻尼器的故障隔离方案的可行性与有效性,并与设计的其他隔离方案在器件使用量和器件吸收能量方面进行详细对比分析,体现了基于直流阻尼器的隔离方案具备较优的综合性能优势。

关键词:全直流汇集与送出;高压直流变压器;直流阻尼器;新能源基地;故障隔离;模块化多电平换流器

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202511012

0 引言

随着“双碳”目标的提出,我国能源结构正处于由化石能源主导转变为以清洁能源为主体的现代能源体系的关键窗口期。根据《“十四五”可再生能源发展规划》,“十四五”期间我国将大力推进风电和光伏发电基地化开发^[1]。近年来,我国加速推进地处偏远内陆的沙漠、戈壁、荒漠地区的大型风光基地开发建设^[2-3]。相较于交流升压汇集送出方案,“直流汇集-直流送出”的方案不存在交流同步与电压/无功问题,电能损耗小,且无传输距离限制,特别适用于“沙戈荒”地区大规模风电和光伏新能源基地汇集并网^[4-5]。

直流汇集系统分支多、线路短,且多采用架空线路汇集送出,故障概率大幅增加。任意一条线路发生故障,汇集侧的非故障线路也会快速向故障点馈入电流,故障电流幅值极大、上升更快^[6]。然而,电力电子器件过流能力弱,导致新能源汇集系统设备安全面临威胁。因此,可靠的直流故障穿越策略对新能源直流汇集系统的安全运行至关重要。

目前,针对适用于新能源直流汇集系统故障隔离方案的研究较少,其故障隔离方案主要参考借鉴多端柔直系统,主要包括2种技术方案,即自清除型模块化多电平换流器(modular multilevel converter,

MMC)+直流快速开关(high speed switch, HSS)方案和半桥 MMC+直流断路器(DC circuit breaker, DCCB)方案^[7-8]。

自清除型 MMC+HSS 方案通过闭锁子模块,将子模块电容电压反极性接入故障回路中以实现直流故障电流的快速清除,并配合 HSS 隔离故障区域。例如,文献[9]提出的全桥子模块,文献[10]提出的单极型全桥子模块,文献[11]提出的串联双子模块,文献[12]提出的二极管箝位式混合子模块,文献[13]提出的逆阻自均压型子模块等。当该方案应用于新能源直流汇集系统时,高压汇集侧的高压 DC/DC 变换器均采用具有自清除能力的子模块完成故障隔离,导致其投资成本大幅增加,且运行损耗较大^[14-15],控制系统复杂度也会显著升高^[16]。此外,在故障隔离过程中,系统内所有 DC/DC 变换器都需要闭锁,导致整个系统传输功率中断,对供电可靠性、运行稳定性造成不利影响。

半桥 MMC+DCCB 方案通过 DCCB 切除直流故障回路,实现直流故障快速清除,保证健全系统功率送出不中断,该方案在中国张北柔直电网中实现了工程应用。对于新能源直流汇集系统,其高压汇集线路较多,若采用该故障隔离方案,则需要在每条汇集线路两端均安装 DCCB,占地面积大且造价十分高昂。此外,若采用目前工程上常用的混合式直流断路器(hybrid DC circuit breaker, HDCCB),则在单次故障隔离中,HDCCB 的金属氧化物避雷器(metal oxide varistor, MOV)耗能水平极高,从而导致 MOV 并联支数较多,动态均流困难^[17]。未来,随着一些新型低成本的断路器的研发与制造,该方案的经济性和适用性还需进一步评估。

基于上述分析,从故障隔离的可行性出发,本

收稿日期:2025-04-21;修回日期:2025-09-04

在线出版日期:2025-11-18

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52207088);河北省自然科学基金资助项目(E2024202184)

Project supported by the Youth Fund of the National Natural Science Foundation of China(52207088) and the Natural Science Foundation of Hebei Province Funding Project(E2024202184)

文设计了适用于高压直流汇集系统的故障隔离配置方案。考虑到闭锁“面对面”半桥 MMC 构成的高压 DC / DC 变换器会导致故障隔离时间较长,本文提出了基于直流阻尼器的故障隔离方案,利用高压 DC / DC 变换器的闭锁配合直流阻尼器以加速高压 DC / DC 变换器侧故障电流的衰减,从而实现高压 DC / DC 变换器侧的快速故障隔离。在此基础上,提出直流阻尼器的拓扑及关键参数设计方法。最后,基于 PSCAD / EMTDC 仿真验证了基于直流阻尼器的故障隔离方案的可行性与有效性。

1 新能源直流汇集与送出系统的典型结构

新能源基地多级升压直流汇集送出系统的典型结构如附录 A 图 A1(a)所示。光伏阵列输出的直流电经 Boost 升压电路接入中压 DC / DC 变换器,风电机组输出的交流电经整流后接入中压 DC / DC 变换器升压为中压直流接入中压汇集母线,在风电场站和光伏场站出口处由高压 DC / DC 变换器将电压升至高压直流经高压线路送出,接入高压直流汇集母线,如附录 A 图 A1(b)、(c)所示,最后统一经过特高压 DC / DC 变换器升压为特高压直流,由特高压直流线路实现整体功率的远距离送出。

在新能源直流汇集系统中,高压侧的直流汇集通过“面对面”半桥 MMC 构成的高压 DC / DC 变换器来完成^[18],其结构见附录 A 图 A2。图中: U_c 为单个子模块电容电压; L_0 为 MMC 桥臂电感。虽然传统的半桥 MMC 无法实现故障电流自阻断,但是“面对面”半桥 MMC 构成的高压 DC / DC 变换器可通过相继闭锁初、次级侧实现故障电流的自阻断,然而故障线路两端的故障电流需要利用线路等效电阻和电力电子器件的通态电阻实现故障能量的耗散,故障电流清除过程很长。

2 新能源直流汇集系统故障隔离方案设计

2.1 高压直流汇集侧的故障电流回路

新能源直流汇集系统高压直流汇集侧采用伪双极结构^[19],系统接地方式采用变压器星形侧中性点经大电阻接地方案。当系统发生单极接地故障时,认为桥臂子模块电容不存在放电通路,只有故障极直流线路对地电容通过接地点构成放电回路。由于只有故障线路分布电容向故障点放电,因此故障电流峰值较小,没有过电流风险^[20]。

因此,本文主要分析危害较大的两极短路故障,为了简化分析,将新能源场站的中压直流送出端口等效为 1 个直流源。

在两极短路故障 f_1 初期,高压 DC / DC 变换器和特高压 DC / DC 变换器中的 MMC 子模块电容向

故障点放电,故障电流上升极快、幅值极大,故障发生后的放电回路见附录 A 图 A3。图中:Line₁—Line_N为高压直流汇集线路; L_1 、 L_2 、 L_3 分别为高压 DC / DC 变换器侧、高压直流汇集母线侧以及特高压 DC / DC 变换器侧的限流电抗器。另外,高压汇集侧故障电流的定量分析计算与多端柔直系统短路故障电流计算相比并无特殊之处,可参考多端柔直系统短路故障电流计算方法(如文献[21]所述),本文不再赘述。

2.2 高压直流汇集侧的故障隔离配置方案

本节讨论新能源直流汇集系统高压直流汇集侧的故障隔离配置方案。参考借鉴多端柔直故障隔离的技术方案,从故障隔离的可行性出发,设计了适用于高压直流汇集系统的故障隔离配置方案,见附录 B 图 B1。图中:Line 表示特高压直流送出线路; L_4 为特高压送出线路两端的限流电抗器;INV 表示逆变器。

方案 1:在每条汇集线路的两端均装设 DCCB,当任意一条直流汇集线路发生故障时,该方案利用故障线路两端的 DCCB 隔离故障,如图 B1(a)所示。

方案 2:在每条汇集线路的两端装设 HSS,当任意一条直流汇集线路发生故障时,该方案通过闭锁系统内所有 DC / DC 变换器来清除故障电流,并配合 HSS 隔离故障区域,如图 B1(b)所示。该方案故障电流清除过程很长,且故障隔离无选择性。

方案 3:为增加故障隔离的选择性,在每条汇集线路的高压 DC / DC 变换器侧装设 HSS,高压汇集母线侧装设 DCCB。当任意一条直流汇集线路发生故障时,可利用 DCCB 清除汇集母线侧的故障电流,高压 DC / DC 变换器侧的故障电流通过闭锁故障侧的高压 DC / DC 变换器清除,并配合 HSS 隔离故障区域,见图 B1(c)。

基于上述分析,方案 3 的经济性较好,故障隔离有选择性,但高压 DC / DC 变换器侧的故障电流难以快速清除,难以实现故障区域的快速恢复。因此,本文在方案 3 的基础上提出新型的故障隔离方案,即故障侧高压 DC / DC 闭锁+直流阻尼器+DCCB 方案,该方案能快速清除高压 DC / DC 变换器侧的故障电流,进而实现故障区域的快速恢复。本文所提故障隔离方案配置如图 1 所示,在每条汇集线路高压 DC / DC 变换器侧安装直流阻尼器(具体拓扑和工作原理将在第 3 章中讨论),在汇集母线侧安装 DCCB,如图 1 所示。当任意一条直流汇集线路发生故障时,该方案可利用 DCCB 实现故障点与剩余汇集网络的隔离,高压 DC / DC 变换器侧通过高压 DC / DC 变换器的闭锁配合直流阻尼器来加速衰减故障电流,实现故障隔离。为便于表述,将本文所提方案记作方案 4。

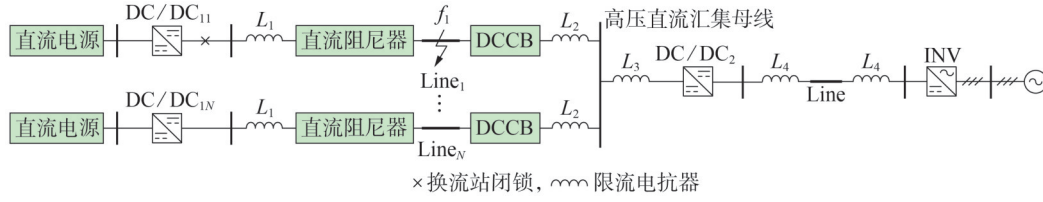


图 1 本文所提故障隔离方案配置

Fig.1 Configuration of proposed fault isolation scheme

3 直流阻尼器的拓扑及参数设计

3.1 直流阻尼器的拓扑结构

本文所提直流阻尼器的结构如图 2 所示,其由载流支路、转移支路和阻尼支路 3 个部分组成。

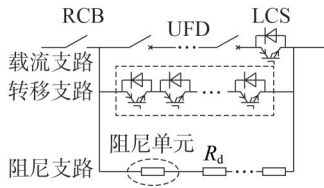


图 2 直流阻尼器结构图

Fig.2 Structure diagram of DC damper

1) 载流支路和转移支路沿用 ABB 公司生产的 HDCB 结构。载流支路由超快速机械开关 (ultra fast disconnect, UFD) 和负载转换开关 (load commutation switch, LCS) 组成。转移支路由绝缘栅双极晶体管 (insulate-gate bipolar transistor, IGBT) 模块串并联组成,该支路为故障电流转移提供通道。需要注意的是,由于直流阻尼器配置在 DC / DC 汇集侧,因此载流支路和转移支路采用单向流通结构,无须应用双向器件串联结构^[22]。

2) 阻尼支路由阻尼电阻 R_d 串联组成,该支路可以配合高压 DC / DC 变换器的闭锁加速故障电流的衰减,实现故障电流的快速清除。另外,残余电流开关 (residual current breaker, RCB) 装设于高压 DC / DC 变换器的出口位置,只能开断幅值较小的残余电流。

3.2 直流阻尼器的工作原理

以双极短路故障为例,对所提直流阻尼器的工作原理进行详细说明,整个工作过程主要分为故障检测阶段、电流转移阶段和电流阻尼阶段,如图 3 所示,图中的参数将在下文进行说明。图 3(a) — (c) 中,RCB 均为闭合状态。图 3(a) 中的 UFD 为闭合状态,图 3(b)、(c) 中的 UFD 均为断开状态。值得注意的是,负极配置的直流阻尼器动作特性和正极的保持一致,所以在图中并未具体画出。

1) 故障检测阶段 ($t_0 \sim t_1$)。

假设 t_0 时刻直流线路发生两极短路故障,由于存在故障检测延时,此时故障电流仍流经载流支路且迅速上升,故障检测阶段电流通路如图 3(a) 所示。

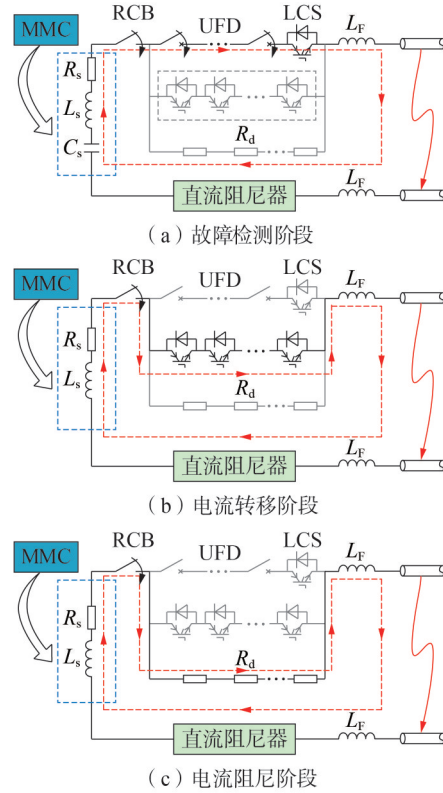


图 3 直流阻尼器工作原理图

Fig.3 Working principle diagram of DC damper

在故障检测阶段,高压 DC / DC 变换器中的 MMC 子模块投入数量可视为不变,此阶段 MMC 可等效为串联 RLC 线性定常电路^[23]。设 MMC 中子模块数量为 n , MMC 中桥臂等效电阻、桥臂等效电抗、子模块电容分别为 R_0 、 L_0 、 C_{sm} ,可进一步将 MMC 简化为由 R_s 、 L_s 、 C_s 构成的等效电路,其中 $R_s = 2R_0/3$ 、 $L_s = 2L_0/3$ 、 $C_s = 6C_{sm}/n$ 。直流侧线路的等效电感与电阻分别为 L_L 和 R_L ,限流电抗器用 L_F 表示。

记故障发生前的时刻换流站出口处的直流电流和电压分别为 I_0 和 U_0 。采用 Laplace 变换可得载流支路故障电流的频域表达式 (记为 $I_{dc1}(s)$),如式 (1) 所示。

$$I_{dc1}(s) = \frac{\frac{U_0}{s} + (L_s + L_L + 2L_F)I_0}{R_s + R_L + (L_L + 2L_F)s + \frac{1}{sC_s}} \quad (1)$$

对式 (1) 进行 Laplace 反变换,可得载流支路上

故障电流时域表达式(记为 $i_{\text{dc1}}(t)$),如式(2)所示。

$$i_{\text{dc1}}(t) = A_1 \sqrt{\frac{C_s}{L_s + 2L_F + L_L}} e^{-\sigma_1 t} \sin(\omega_1 t + \beta_1) \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sigma_1 = (R_s + R_L) / [2(L_s + 2L_F + L_L)] \\ \omega_1 = \sqrt{1 / [(L_s + 2L_F + L_L) C_s] - \sigma_1^2} \\ A_1 = \sqrt{U_0^2 + \left(\frac{U_0 \sigma_1}{\omega_1} - \frac{I_0}{\omega_1 C_s} \right)^2} \\ \beta_1 = \arcsin \frac{I_0}{A_1 \sqrt{C_s / (L_s + 2L_F + L_L)}} \end{cases} \quad (3)$$

2) 电流转移阶段($t_1 \sim t_2$)。

随着故障被检测并定位, t_1 时刻, 关断LCS, 导通转移支路的IGBT, 故障电流换流至转移支路, UFD在零电流条件下分闸。同时立刻闭锁故障处的高压DC/DC变换器的初、次级侧MMC; t_2 时刻, UFD达到最大开距, 分闸完毕。

电流转移阶段电流通路如图3(b)所示。记 t_1 时刻故障电流为 $i_{\text{dc1}}(t_1)$, 根据基尔霍夫电压定律(Kirchhoff voltage laws, KVL)以及电流初值可得到转移支路上故障电流 $i_{\text{dc2}}(t)$, 如式(4)所示。

$$\begin{cases} i_{\text{dc2}}(t) = i_{\text{dc1}}(t_1) e^{-\sigma_2(t-t_1)} \\ \sigma_2 = (R_s + R_L) / (L_s + 2L_F + L_L) \end{cases} \quad (4)$$

3) 电流阻尼阶段($t_2 \sim t_3$)。

t_2 时刻, 关断转移支路的IGBT阀组, 故障电流转移至阻尼支路, 并在阻尼电阻的作用下快速衰减; t_3 时刻, 当故障电流衰减到一定数值时, 可以通过RCB切除故障点, 实现故障线路与高压DC/DC变换器的物理隔离。可定义: t_2 为故障电流转移至阻尼支路的初始时刻; t_3 为故障电流在阻尼支路衰减至RCB分断值的时刻, 即故障电流切断时刻。电流阻尼阶段电流通路如图3(c)所示。记 t_2 时刻故障电流为 $i_{\text{dc2}}(t_2)$, 根据KVL以及电流初值可得阻尼支路上的故障电流 $i_R(t)$ 为:

$$\begin{cases} i_R(t) = i_{\text{dc2}}(t_2) e^{-\frac{R_\Sigma}{L_\Sigma}(t-t_2)} \\ R_\Sigma = R_s + R_L + R_d \\ L_\Sigma = 2L_F + L_s + L_L \end{cases} \quad (5)$$

阻尼电阻在泄能过程中吸收的能量 E_R 为:

$$E_R = \int_{t_2}^{t_3} i_R^2(t) R_d dt \quad (6)$$

3.3 直流阻尼器的元件参数和数量设计

本节主要确定最大故障电流, 并对阻尼电阻参数、转移支路元件数量进行设计, 设计时主要考虑以下2个方面: 转移支路IGBT两端所承受的电压峰值; 故障隔离时间。

1) 最大故障电流的确定。

对阻尼电阻值进行设计时, 首先需要确定最大故障电流。考虑故障最严重的情况, 即故障发生在输电线路首端, 作为确定最大故障电流的前提条件, 对应为 $L_L=0$ 、 $R_L=0$ 。将 $L_L=0$ 、 $R_L=0$ 、故障检测延迟时间(一般为3 ms)以及换流站和限流电抗器的参数代入式(2)和式(3)中, 得到 t_1 时刻的故障电流, 即故障电流换流至转移支路的初始电流, 记为 I_1 , 易得 $i_{\text{dc1}}(t_1)=I_1$ 。然后, 故障电流流过转移支路, 等待UFD分闸完成后才换流至阻尼支路, 所以将初始值 $i_{\text{dc1}}(t_1)=I_1$ 和UFD分闸时间(一般为2~3 ms)代入式(4)中得到 t_2 时刻的故障电流, 即故障电流转移至阻尼支路的最大值 I_{Rm} , 以此作为接下来阻尼电阻参数设计的基础。

2) 阻尼电阻值设计。

以新能源直流汇集系统的 ± 250 kV高压汇集为例进行阻尼电阻参数设计, 目前工程中配置的限流电抗器一般为 $L_F=50$ mH, 故障电流转移至阻尼支路的初始电流 $i_{\text{dc2}}(t_2)$ 采用最大故障电流 I_{Rm} , 故障电流在设定时间 t_{set} (一般为几十毫秒)以内衰减到RCB分断值 I_{RCB} (一般为几百安培)^[24], 则由式(5)可以计算得到 R_d , 如式(7)所示。

$$R_d = \left(\ln \frac{I_{\text{Rm}}}{I_{\text{RCB}}} \right) \frac{L_\Sigma}{t_{\text{set}}} - R_s \quad (7)$$

设置RCB分断值 I_{RCB} 为200 A, 将 t_{set} 控制在20~30 ms以内, 根据式(7)求出阻尼电阻的取值需大于20 Ω 且小于29 Ω 。

图4给出了阻尼电阻为20、24、28 Ω 时故障电流 I_R 和阻尼电阻两端电压 U_R 的波形。由图4可知: 阻尼电阻越小, 故障电流衰减得越慢, 故障隔离时间越长, 进而会影响系统的后续恢复过程, 所以阻尼电阻不可过小; 而阻尼电阻越大, 其峰值电压就越大, 则对转移支路IGBT阀组的耐压要求就越高, 串联的IGBT数量增多, 直流阻尼器成本也随之提升, 所以阻尼电阻也不宜过大。因此, 需要在满足系统恢复时间、故障隔离时间、直流阻尼器成本等目标的前提

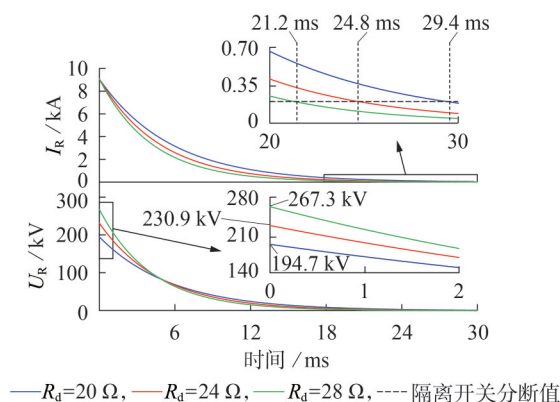


图4 阻尼电阻的取值分析

Fig.4 Analysis of value of damping resistance

下,选择合适的阻尼电阻值,将故障电流在一定的时间内衰减到RCB可分断的范围内,以实现故障的隔离,进而实现系统的快速恢复。综上,本文建议阻尼电阻 R_d 取值为 $24\ \Omega$,则配置在直流线路上的单个直流阻尼器的阻尼电阻为 $12\ \Omega$ 。

3) 转移支路元件数量设计。

在不考虑双向分断电流的能力并且忽略器件裕度的情况下,假设IGBT额定电压、额定电流分别为 U_N 、 I_N ,转移支路承受的最大电压为 U_m ,流过的故障电流峰值为 I_m ,则转移支路中所需IGBT数量 n_{IGBT} 为:

$$n_{IGBT} = \frac{U_m}{U_N} \frac{I_m}{I_N} \quad (8)$$

式中: U_m 实际为阻尼电阻的峰值电压,可以根据 $I_{Rm}R_d$ 进行计算。

本文所提故障隔离方案适用的电压等级分析见附录C。现有柔性直流工程,例如舟山柔直工程,主要在半桥MMC的每个桥臂上安装阻尼模块以加快故障电流的清除。然而,由于阻尼模块安装在桥臂上,容易造成换流阀充电过程中子模块存在不均压现象^[25];与现有的在半桥MMC桥臂上安装阻尼模块方案不同的是,本文提出的直流阻尼器安装在高压DC/DC变换器直流侧,衰减故障电流的效果显著,且不会出现子模块均压问题;另外,与阻尼模块分散在各个桥臂上不同,本文的阻尼电阻集成在直流阻尼器的内部,形成单独的阻尼支路,安装更为方便快捷,非常利于工程实施。

4 仿真分析

在PSCAD/EMTDC仿真软件中搭建新能源直流汇集与送出系统模型,如附录D图D1所示。新能源场站的中压直流送出端口等效成一个 $\pm 20\text{ kV}$ 的直流源。3座场站的功率均为500 MW,经高压DC/DC变换器(DC/DC₁₁—DC/DC₁₃)变换为 $\pm 250\text{ kV}$ 后通过直流架空线路Line₁—Line₃汇集到 $\pm 250\text{ kV}$ 直流母线,然后经特高压直流变压器(DC/DC₂)变换为 $\pm 800\text{ kV}$ 的电压等级,由特高压直流架空线Line₄实现整体功率的送出。特高压DC/DC变换器低压侧为2台MMC并联,高压侧为2台MMC级联,由正、负极分别送出750 MW功率。逆变站由2台MMC级联构成真双极结构。所建模型的具体参数见附录D表D1。表中: S_2 表示高压DC/DC变换器高压侧MMC; S_3 、 S_4 表示特高压DC/DC变换器高压侧和特高压侧MMC; S_5 表示逆变侧MMC。

4.1 直流阻尼器的动作特性仿真验证

本算例假设在 $t=1\text{ s}$ 时,Line₁首端发生永久性双极短路故障,如图D1中的 f_a 所示。设定故障检测延时为3 ms,相应的仿真结果如图5所示。图中: I_{dc} 为高压DC/DC变换器侧的电流; I_{dc2} 为直流阻尼器转

移支路上的电流; I_{Rd} 为直流阻尼器阻尼支路上的电流。

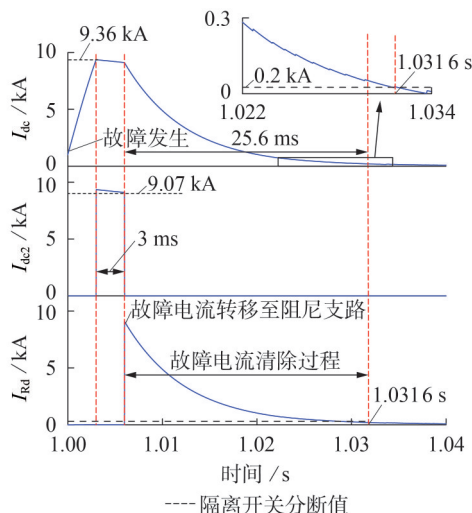


图5 直流阻尼器仿真结果

Fig.5 Simulative results of DC damper

由图5中 I_{dc} 可知, $t=1.0\text{ s}$ 时,Line₁首端发生两极短路故障,直流线路电流快速上升,此时电流仍然流经直流阻尼器的载流支路;线路保护装置动作后, $t=1.003\text{ s}$ 时,闭锁载流支路上的IGBT阀组,并开始分闸UFD,故障电流换流至转移支路,同时DC/DC变换器闭锁,此时故障电流达到峰值9.36 kA; $t=1.006\text{ s}$ 时,UFD动静触头达到额定开距,UFD完全分闸,至此转移支路两端电压全部由UFD承担。此时,关断转移支路上的IGBT阀组,故障电流转移至阻尼支路,由于故障电流在转移支路上缓慢下降一段时间,所以此时故障电流降低至9.07 kA,如图5中 I_{dc2} 所示。故障电流在阻尼电阻的作用下故障电流开始快速衰减,故障电流于 $t=1.0316\text{ s}$ 衰减到RCB的分断值200 A时断开RCB,实现故障线路与DC/DC变换器的物理隔离,整个故障隔离过程结束,如图5中 I_{Rd} 所示。

4.2 不同故障隔离方案的隔离过程对比分析

为深入研究本文所提故障隔离方案的性能,现将2.2节所设计的方案1—3与方案4(即本文所提故障隔离方案)进行性能对比分析。其中,DCCB的载流支路和转移支路的动作时间与直流阻尼器保持一致。下面对4种方案中涉及的设备参数进行分析设计。

方案1:在每条直流线路两端均配备DCCB。DCCB采用ABB公司生产的传统HDCCB^[26],具体结构如附录D图D2所示。需要注意的是,其装设于高压DC/DC变换器侧时,载流支路和转移支路采用单向流通结构。该方案涉及的设备为DCCB,针对DCCB的参数设计为MOV动作电压的设计。文献[27]将DCCB中MOV动作电压的设计为直流额定

电压 U_{dc} 的 1.4~2 倍,本文以此为参考,取 1.6 倍,即 MOV 动作电压为 400 kV。

方案2:需要在每条直流线路上配备 HSS。该方案涉及的设备为 HSS,为实现快速分断或合闸功能,本文采用超快速隔离开关,能执行 ms 级的分合闸操作。

方案3:高压 DC/DC 变换器侧配备 HSS,高压直流母线侧配备 DCCB。该方案所涉及的设备为 DCCB 和 HSS,其中:DCCB 的 MOV 动作电压与方案1中相同,设计为 400 kV;HSS 仍然选择超快速隔离开关。

方案4:高压 DC/DC 变换器侧配备直流阻尼器,高压直流母线侧配备 DCCB。当任意一条直流汇集线路发生故障时,该方案利用 DCCB 实现故障点与剩余汇集网络之间的隔离。高压 DC/DC 变换器侧的故障隔离利用高压 DC/DC 变换器的闭锁配合直流阻尼器来加速衰减故障电流。该方案涉及的设备为直流阻尼器和 DCCB,其中:直流阻尼器依据 3.3 节的分析设计,选择的阻尼电阻阻值为 12 Ω ;DCCB 的 MOV 动作电压与方案1中相同,设计为 400 kV。

在新能源直流汇聚与送出系统的高压直流侧中分别配置上述 4 种隔离方案,系统发生两极短路故障时,高压 DC/DC 变换器侧的故障电流仿真结果如图 6(a)所示。在方案1配置下,故障发生后故障电流以较高速率上升,直至 MOV 开始耗能时故障电流达到峰值 12.87 kA。方案2—4 由于及时闭锁 DC/DC 变换器的 MMC,极大地降低了线路故障电流的上升时间和峰值大小,故障电流峰值仅有 9.36 kA,相较于方案3减小了 27.27%。由于闭锁 DC/DC 变

换器的 MMC 后故障电流会在转移支路下降一段时间,方案4需要分断的最大故障电流为 9.07 kA,相较于方案1减小了 29.53%。在故障分断速度方面,如图 6(b)所示,方案2、3 用时 428.3 ms,方案1 仅用时 9.4 ms,相较于方案2和方案3缩短了 418.9 ms;方案4 用时 31.6 ms,相较于方案2、3 缩短了 396.7 ms,大幅缩短了故障电流的分断时间。

高压直流汇集母线侧故障电流仿真结果如附录 D 图 D3 所示。方案1、3、4 采用 DCCB 来清除汇集侧的故障电流,其故障电流峰值达到 8.95 kA。而方案2 通过及时闭锁系统内所有 DC/DC 变换器的 MMC 来清除汇集侧的故障电流,其故障电流峰值仅有 5.16 kA,相较于方案1、3、4 减小了 42.35%。在故障分断速度方面,方案2 用时 465 ms,而方案1、3、4 用时 14.4 ms,相较于方案2 用时缩短了 450.6 ms,大幅降低了故障电流的分断时间。

在吸收能量方面,阻尼电阻与 MOV 泄放能量对比如附录 D 图 D4 所示。由于方案2 不涉及 MOV 耗能,所以不再作具体分析。方案1、3、4 高压直流汇集母线侧 MOV 吸收的能量均为 28.78 MJ。而对于高压 DC/DC 变换器侧的耗能而言,方案3 中高压 DC/DC 变换器侧没有涉及 MOV 耗能,不再作具体讨论。方案1 中高压 DC/DC 变换器侧 MOV 吸收的能量为 14.94 MJ。方案4 中利用阻尼电阻吸收电感中的能量,吸收的能量仅为 6.42 MJ,相较于方案1 减少了 57.03%。由此可见,本文所提方案大幅降低了对 MOV 的泄能需求。

由于阻尼电阻吸收能量发热,其需要配置水冷系统,相应的水冷系统参数设计可参考文献[28]。同样地,MOV 需要配置相应的冷却系统。然而值得注意的是,本文所提方案中阻尼电阻吸收的能量相比于 MOV 吸收的能量大幅降低,更使得相应冷却系统的设计容量及成本较传统 MOV 的冷却系统大幅缩减,因此现有针对 MOV 的冷却系统也能够很好地适用于阻尼电阻的冷却散热要求,甚至在冷却成本方面能有所节省。但国内外文献对该冷却成本的定量分析研究较少,现有技术经济性对比多聚焦于电力电子器件的量化比较,例如 IGBT 模块、续流二极管等核心元件的数量与参数规格^[29]。

4.3 不同故障隔离方案经济性对比分析

下面对 4 种方案的器件用量进行对比,其对比结果如附录 D 表 D2 所示。本文选择的 IGBT 型号为 ABB 的 5SNA3000K452300,其额定电压和额定电流分别为 4.5 kV 和 3 kA。选择的二极管型号为 ABB 的 5SDD40H4000,其额定电压、电流分别为 4.5 kV、3.8 kA。需要注意的是,方案1、3、4 均需要在高压直流母线侧装设 DCCB,且 DCCB 中器件使用量均相同,设 IGBT 和二极管的数量为 m 个。本文主要计算

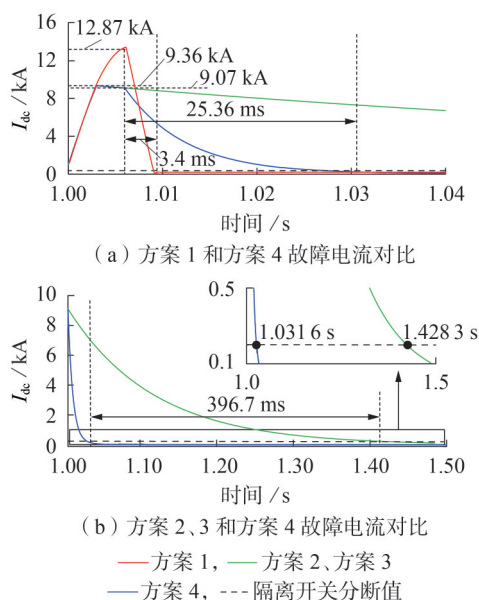


图6 高压DC/DC变换器侧故障电流对比

Fig.6 Comparison of fault current on high voltage DC/DC converter side

高压DC/DC变换器侧的器件使用量。

方案1:每条直流线路两端均配备DCCB。由图6可知,其转移支路流过的最大电流为12.87 kA,转移支路承受的最大电压为MOV的动作电压400 kV,则正、负极2台DCCB共需承受800 kV的电压,因此转移支路需要763个IGBT和763个续流二极管。此外,载流支路中总共需配置2个UFD和2个LCS,每个LCS中需配置5个IGBT和5个二极管。因此方案1总共需要 $773+m$ 个IGBT、 $773+m$ 个二极管和4个UFD。

方案2:在每条直流线路上配备4个HSS。

方案3:高压DC/DC变换器侧只需配备HSS,高压直流母线侧配备DCCB。因此方案3总共需要 m 个IGBT、 m 个二极管、2个UFD和2个HSS。

方案4:高压DC/DC变换器侧配备直流阻尼器,高压直流母线侧配备DCCB。由图6可知,直流阻尼器的转移支路流过的最大电流为9.36 kA,转移支路承受的最大电压为阻尼电阻两端的峰值电压 $9.07 \times 12 \times 2 = 217$ (kV)(正、负极2个直流阻尼器),因此转移支路中需要150个IGBT和150个续流二极管。此外,载流支路中需配置2个UFD和2个LCS,LCS中需配置4个IGBT和4个二极管。因此,方案4总共需要 $158+m$ 个IGBT、 $158+m$ 个二极管和4个UFD。

由表D2可知,本文所提故障隔离方案(方案4)相较于传统的DCCB方案(方案1)IGBT使用数量减少了615个。虽然相较于方案2和方案3,IGBT使用数量有所增加,但故障隔离速度大幅提升。由此可见,本文所提故障隔离方案在保证良好性能的同时,极大地降低了成本。

需要注意的是,上述经济性对比是针对整体方案的对比,接下来是单独对直流阻尼器和DCCB进行经济成本分析,采用的IGBT的额定电压为4.5 kV,单价为3.5万元;采用的二极管的额定电压与采用的IGBT相同,单价为采用的IGBT的10%^[30]。直流阻尼器和DCCB成本对比结果如表1所示。

表1 直流阻尼器和DCCB成本对比

Table 1 Cost comparison between DC damper and DCCB

元件	单价/万元	所需数量	总价/万元
DCCB	IGBT	3.50	387
	二极管	0.35	387
直流阻尼器	IGBT	3.50	80
	二极管	0.35	80

由图6可知,DCCB的转移支路流过的最大电流为12.87 kA,转移支路承受的最大电压为MOV的动作电压400 kV,根据式(8)可计算得到转移支路中需要382个IGBT和382个续流二极管。此外,载流支

路中总共需配置1个UFD和1个LCS,每个LCS中需配置5个IGBT和5个二极管。因此,DCCB总共需要387个IGBT、387个二极管和1个UFD。

由图6可知,直流阻尼器的转移支路流过的最大电流为9.36 kA,转移支路承受的最大电压为阻尼电阻两端的峰值电压 $9.07 \times 12 = 109$ (kV),根据式(8)可计算得到转移支路中需要76个IGBT和76个续流二极管。此外,载流支路中需配置1个UFD和1个LCS,LCS中需配置4个IGBT和4个二极管。因此,直流阻尼器总共需要80个IGBT、80个二极管和1个UFD。

由表1中的对比可知,与传统的DCCB相比,直流阻尼器所需的IGBT数量减少了79.33%,大幅降低了投资成本。

5 结论

针对新能源直流汇集线路故障,本文提出了一种经济型的直流阻尼器故障隔离方案,实现新能源侧直流故障电流的快速清除,所得结论如下。

1)与传统的DCCB方案相比,本文所提故障隔离方案的DC/DC侧故障电流峰值降低了27.27%,阻尼支路需要分断的电流峰值降低了29.53%,耗能需求减少了57.03%,在分断性能上具备一定的优势。

2)与混合式DCCB相比,本文所提直流阻尼器的IGBT使用数量降低了79.33%,大幅降低了投资成本。

3)利用闭锁DC/DC变换器配合阻尼电阻加速故障电流的衰减,与采用MOV相比,阻尼电阻技术成熟度高、制造难度低、经济性好,因此具有很高的工程应用价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 周步祥,宁冲,陈实,等. 计及生态阻力成本的新能源基地风光电站容量规划与布局优化方法[J]. 电力自动化设备,2024,44(7):141-148.
Zhou Buxiang, Ning Chong, Chen Shi, et al. Capacity planning and layout optimization method of wind and photovoltaic power plants in new energy base considering ecological resistance cost[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7):141-148.
- [2] 王宇,姜崇学,宋胜利,等. 基于源网直储一体化的沙戈荒大规模新能源基地外送方案[J]. 电力系统自动化,2025,49(7):126-134.
Wang Yu, Jiang Chongxue, Song Shengli, et al. Transmission scheme for large-scale renewable energy bases in Gobi Desert and other arid areas based on integration of source, grid, DC and storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(7):126-134.
- [3] 刘君怡,樊艳芳,白雪岩,等. 基于FTA-NSMC法的风电场直流汇集系统可靠性评估[J]. 智慧电力,2025,53(1):82-89.
Liu Junyi, Fan Yanfang, Bai Xueyan, et al. Reliability evalua-

- tion of DC collection system in wind farms based on FTA-NSMC method[J]. Smart Power, 2025, 53(1): 82-89.
- [4] 姚雅涵, 姚伟, 熊永新, 等. 经多端直流并网的海上风电场协调控制 and 风机转速恢复策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3537-3547.
- Yao Yahan, Yao Wei, Xiong Yongxin, et al. Coordinated frequency support and wind turbine preset restoration scheme of VSC-MTDC integrated offshore wind farms[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3537-3547.
- [5] 韩华春, 李群, 荣泉森, 等. 海上风电全直流汇集送出系统自适应振荡抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(11): 72-78.
- Han Huachun, Li Qun, Rong Quansen, et al. Adaptive oscillation suppression strategy for offshore wind power system with all-DC collection and transmission[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(11): 72-78.
- [6] 李攀龙, 侯俊杰, 樊艳芳, 等. 基于卷积功率能量比的全直流风电系统汇集线路故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(9): 154-165.
- Li Panlong, Hou Junjie, Fan Yanfang, et al. Fault line selection scheme for collection lines in the all-DC wind power systems based on convolutional power energy ratio[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(9): 154-165.
- [7] 马秀达, 卢宇, 詹长江, 等. 海上风电多端柔性直流输电系统及直流故障处理方案[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(17): 81-89.
- Ma Xiuda, Lu Yu, Zhan Changjiang, et al. Multi-terminal flexible DC transmission system for offshore wind power and its DC fault clearance scheme[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(17): 81-89.
- [8] 迟永宁, 席迅, 薛安成, 等. 海上风电全直流并网关键技术研究综述[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(12): 3-14.
- Chi Yongning, Xi Xun, Xue Ancheng, et al. Review of key technologies research of all-DC grid integration for offshore wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(12): 3-14.
- [9] Adam G P, Williams B W. Half- and full-bridge modular multilevel converter models for simulations of full-scale HVDC links and multiterminal DC grids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 1089-1108.
- [10] Yu X, Wei Y, Jiang Q, et al. A novel hybrid-arm bipolar MMC topology with DC fault ride-through capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1404-1413.
- [11] 张建坡, 赵成勇, 孙海峰, 等. 模块化多电平换流器改进拓扑结构及其应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 173-179.
- Zhang Jianpo, Zhao Chengyong, Sun Haifeng, et al. Improved topology of modular multilevel converter and application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 173-179.
- [12] 刘其辉, 许倩倩, 冯驰, 等. 一种用于海上风电全直流并网系统故障阻断的新型MMC子模块[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(12): 201-208.
- Liu Qihui, Xu Qianqian, Feng Chi, et al. Novel MMC sub-module for fault-blocking in all-DC grid-connected offshore wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(12): 201-208.
- [13] 玄东旭, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 适用于直流汇集型风电场送出系统的双极DC/DC变换器及其短路限流[J]. 高电压技术, 2025, 51(2): 605-618.
- Xuan Dongxu, Fan Yanfang, Hou Junjie, et al. Bipolar DC/DC converter and short-circuit current limitation for DC-integrated wind farm transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2): 605-618.
- [14] 杨立敏, 朱艺颖, 孙栩, 等. 基于损耗分析的全桥型MMC参数优化设计[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 128-133.
- Yang Limin, Zhu Yiyang, Sun Xu, et al. Optimization design of full bridge MMC parameters based on loss analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 128-133.
- [15] Modeer T, Nee H P, Norrga S. Loss comparison of different sub-module implementations for modular multilevel converters in HVDC applications[C]//Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications, August 30-September 1, 2011, Birmingham. New York: IEEE, 2011: 1-7.
- [16] 郝治国, 谢凡, 张雨宁, 等. 远海风电直流汇集送出系统直流线路继电保护技术现状与展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 1-18.
- Hao Zhiguo, Xie Fan, Zhang Yuning, et al. Status and prospects of relay protection technology for DC lines in distant offshore wind DC collection and transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 1-18.
- [17] 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.
- [18] 甄新梅, 贺宇阳, 于大川, 等. 基于光储协调电压自均衡的光伏直流汇集方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(10): 153-164.
- Zhen Xinmei, He Yuyang, Yu Dachuan, et al. A photovoltaic DC collection scheme based on PV-storage coordinated voltage self-balancing[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(10): 153-164.
- [19] 徐政, 徐文哲, 张哲任, 等. 大型陆上水风光综合基地交直流组网送出方案研究[J]. 浙江电力, 2023, 42(6): 3-13.
- Xu Zheng, Xu Wenzhe, Zhang Zheren, et al. Research on an AC/DC networking and transmission scheme for large-scale onshore hydro-wind-solar integrated bases[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(6): 3-13.
- [20] 张建坡, 赵成勇, 黄晓明, 等. 基于模块化多电平高压直流输电系统接地故障特性仿真分析[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2658-2664.
- Zhang Jianpo, Zhao Chengyong, Huang Xiaoming, et al. Simulation research on earth fault characteristics of modular multilevel converter based high voltage direct current transmission system[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2658-2664.
- [21] Li C Y, Zhao C Y, Xu J Z, 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] 章浅诺, 张哲任, 金砚秋, 等. 适用于超大规模海上风电并网的直流送出系统[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(1): 106-114.
- Zhang Qiannuo, Zhang Zheren, Jin Yanqiu, et al. DC transmission system suitable for ultra-large-scale offshore wind power grid-connected system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(1): 106-114.
- [23] 蒋纯冰, 赵成勇. 具备重合闸判断能力的电容换流型直流断路器[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3254-3263.
- Jiang Chunbing, Zhao Chengyong. Capacitor-commutated DC circuit breaker with reclosing judgment capability[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3254-3263.
- [24] 谢峰源, 曹冬明, 李继红, 等. 一种实现柔直系统快速恢复的自取能故障阻尼器[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 142-147, 154.
- Xie Yeyuan, Cao Dongming, Li Jihong, et al. Self-powered fault damper for realizing fast recovery of VSC-HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 142-

- 147,154.
- [25] 韩坤,司志磊,胡四全,等. 柔性直流阻尼换流阀充电过程电子模块均压特性[J]. 南方电网技术,2019,13(6):8-15,29.
Han Kun,Si Zhilei,Hu Siqian,et al. Voltage-balance characteristics for submodule of VSC-HVDC damping converter valve during system charging process [J]. Southern Power System Technology,2019,13(6):8-15,29.
- [26] Bucher M K,Wiget R,Andersson G,et al. Multiterminal HVDC networks; what is the preferred topology? [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(1):406-413.
- [27] 陈晓龙,周宁,韩小文,等. 一种具备自适应重合闸能力的混合式直流断路器[J]. 电网技术,2022,46(12):4718-4728.
Chen Xiaolong,Zhou Ning,Han Xiaowen,et al. A hybrid DC circuit breaker with adaptive reclosing ability [J]. Power System Technology,2022,46(12):4718-4728.
- [28] 周建辉,侯俊义,王航,等. 脉冲高功率耗能电阻热阻抗模型与系统动态仿真分析[J]. 高电压技术,2021,47(2):574-583.
Zhou Jianhui,Hou Junyi,Wang Hang,et al. Thermal impedance model and system dynamic simulation analysis of pulsed high power dissipation resistor [J]. High Voltage Engineering,2021,47(2):574-583.
- [29] 薛士敏,陈萧,刘白冰,等. 一种基于晶闸管的新型混合式直流断路器[J]. 高电压技术,2022,48(11):4568-4577.
Xue Shimin,Chen Xiao,Liu Baibing,et al. A new hybrid DC circuit breaker based on thyristors [J]. High Voltage Engineering,2022,48(11):4568-4577.
- [30] 张烁,邹贵彬,魏秀燕,等. 多端口直流断路器研究综述[J]. 中国电机工程学报,2021,41(13):4502-4515.
Zhang Shuo,Zou Guibin,Wei Xiuyan,et al. A review of research on multi-port DC circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(13):4502-4515.

作者简介:

李 晔(1993—),女,副教授,博士,主要研究方向为新型电力系统保护与控制(E-mail:liye@hebut.edu.cn);
陈炳如(2001—),男,硕士研究生,主要研究方向为新型电力系统保护与控制(E-mail:13140603860@163.com);
何佳伟(1991—),男,副研究员,博士,通信作者,主要研究方向为新型电力系统保护与控制(E-mail:hejiawei_tju@126.cn)。

(编辑 任思思)

Fault isolation scheme for new energy DC collection system based on DC damper

Li Ye¹,Chen Bingru¹,He Jiawei²,Li Bin²,Zhang Shengbo¹

(1. State Key Laboratory of Intelligent Power Distribution Equipment and System,School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology,Tianjin 300401,China;

2. State Key Laboratory of Intelligent Power Distribution Equipment and System,School of Electrical and Information Engineering,Tianjin University,Tianjin 300072,China)

Abstract: The fault isolation scheme for the high-voltage direct current(DC) collection side of the multi-level Boost full DC collection and transmission system for the new energy base is studied. The structure of the new energy multi-level Boost DC collection system and the fault characteristics of the high-voltage DC transmission lines are analyzed. Starting from the feasibility of fault isolation,a fault isolation configuration scheme suitable for high-voltage DC collection system is designed. It is found that the fault isolation scheme based on DC damper has the advantages of good economy and fast fault isolation. Based on this, the design method of DC damper topology and its key parameters is proposed. The feasibility and effectiveness of the fault isolation scheme based on DC damper are verified through PSCAD/EMTDC simulation. Detailed comparative analysis is conducted with other designed isolation schemes in terms of device usage and energy absorption,which demonstrates that the isolation scheme based on DC damper has superior comprehensive performance advantages.

Key words: full DC collection and transmission;high-voltage DC transformer;DC damper;new energy base; fault isolation;modular multilevel converter