

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210436

柔性直流电网潮流转移特性及安全运行影响分析

王子文, 张英敏, 李保宏, 刘天琪, 李峰

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 直流电网潮流大范围转移可能导致换流站运行于安全边界之外, 进而引发直流系统连锁故障。为厘清不同情况下直流系统潮流分布转移特性及其对安全运行的影响, 首先在主从控制、下垂控制方式下分别对故障线路切除和换流站注入功率改变后潮流转移特性进行了理论分析, 并得出了不同运行方式下潮流转移定量计算方法。然后基于 PQ 功率域分析了复杂直流电网中各站的安全运行边界, 明确了不同运行方式及不同控制模式受潮流转移及安全边界双重影响的规律。最后, 通过 CIGRE 柔直电网测试模型对所提计算方法及安全边界分析结论进行了仿真。基于 PSCAD 软件的仿真结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 潮流转移; 直流电网; 安全边界; 故障线路; 换流站注入功率

Analysis of power flow transfer characteristics and influence on the safety operation of a flexible DC grid

WANG Ziwen, ZHANG Yingmin, LI Baohong, LIU Tianqi, LI Feng

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The large-scale transfer of DC power flow may cause a converter station to operate outside safety limits. This may cause cascading failures in the DC system. In order to clarify the power flow distribution and transfer characteristics of a DC system under different conditions and its impact on safe operation, first, this paper analyzes the characteristics of power flow transfer after removing the faulty line or changing the injected power of a converter station under master-slave control and droop control. It obtains a quantitative calculation method for power flow transfer in different operational modes. Then, based on PQ power domain, the safe operation boundary of each station in a complex DC grid is analyzed. The rules of different operational and control modes affected by power flow transfer and safety boundary are clarified. Finally, this paper simulates the proposed calculation method and the conclusion of security boundary analysis through the CIGRE DC grid test model. The simulation results based on PSCAD software confirm the correctness of the theoretical analysis.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904600).

Key words: power flow transfer; DC-grid; safety boundary; faulty line; injected power of converter station

0 引言

近年来随着电网规模的不断扩大, 大停电事故频发已对人们的正常生产生活造成了严重影响^[1-4]。导致大停电事故的主要原因是^[5-10]当系统联接负荷过重或输电线路因过载而退出运行时系统中出现的冗余功率将通过其他线路而转移至全网, 导致电力系统中某些输电元件出现过载现象, 进而引发一系列连锁反应, 造成大面积停电事故。因此, 对

日益趋于稳定极限边缘的互联系统来说^[11-12], 潮流转移是影响电网安全稳定运行的关键因素。

目前针对潮流转移后电力系统的安全性分析, 已有大量学者展开了研究。文献[13]基于对潮流转移分布熵和负荷冲击灵敏度熵的定义, 提出了一种识别关键线路的综合评价指标, 但只在主从控制下进行了研究, 并未涉及下垂控制方式下的潮流转移。文献[14]基于对有功转移系数的定义, 针对多支路开断情况, 提出了一种基于网络图论搜索潮流转移输电断面的方法, 但该方法仅适用于忽略线路电阻和对地导纳影响的高压交流输电系统。而随着技术

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0904600)

的不断发展, 基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的直流电网输电技术是未来电网规划设计的重要趋势^[15-19]。文献[20]提出了一种在交直流电网中基于网络图论和分布系数法搜索潮流转移的量化分析方法。文献[21]通过定量计算线路开断后直流电网的静态安全裕度, 提出了一种交直流混联电网关键线路识别方法, 为后续研究提供了参考。上述文献主要针对潮流转移的路径搜索展开研究。对柔性直流电网潮流转移特性的分析: 文献[22]基于直流潮流的分布系数法估算故障线路切除后的潮流转移量; 文献[23]定量分析了下垂控制方式下有功指令的变化对各下垂站输出有功的影响, 但未涉及在主从控制下潮流转移的计算; 文献[24]通过在两节点间引入有功功率增量方程来模拟故障线路开断, 提出了一种基于直流灵敏度和补偿的潮流转移计算方法。在柔性直流电网连锁故障抑制方面; 文献[25]针对 OPA 连锁故障仿真模型, 提出了一种基于安全最优潮流的预防控制方法, 使连锁故障引发负荷停电的风险降到最低; 文献[26]通过对节点注入功率变化引起线路功率变化问题的研究, 提出了一种考虑平衡机的紧急控制策略, 以消除线路过载。以上文献对潮流转移后系统安全性的研究主要集中在潮流转移路径搜索、潮流转移特性分析以及连锁故障抑制上, 并未考虑直流电网潮流转移对各换流站安全运行的影响, 然而开展换流站安全运行边界的研究工作对处于极限边缘的直流系统保持稳定运行具有重要的价值。

目前关于柔性直流输电系统中换流站安全运行边界的研究, 已取得了一定成果。文献[27]分析了换流器输出最大有功功率与交流系统阻抗幅值、相角之间的关系, 并给出了交流系统在不同相角下换流器的理论临界短路比, 但并未考虑换流器安全稳定运行的约束条件对其输出最大有功的影响。文献[28]提出了一种寻点-校验的方法来确定电压稳定性约束、电压调制比约束以及电流约束条件下换流器的安全运行范围, 但没有考虑换流器内部特性对其安全边界的影响。对于 MMC 内部动态特性的研究, 文献[29-31]从 MMC 调制信号、桥臂电抗、子模块投切比例以及其电容电压波动的角度出发, 研究了这些因素对换流器安全运行边界的影响。文献[32]在新能源经柔直孤岛送出场景下, 需额外满足三种附加运行约束条件以保证系统的安全稳定运行。以上文献比较详尽地研究了多种工况下影响换流器安全稳定运行的关键因素, 但没有考虑直流电网潮流转移对换流站安全稳定运行的影响。

为此, 本文考虑将潮流转移与安全边界相结合, 研究直流电网潮流转移特性及其对 MMC 安全运行的影响。首先, 本文在主从控制、下垂控制方式下分别对故障线路切除和换流站注入功率改变后潮流转移的计算方法进行了定量分析, 然后基于 PQ 功率域分析了复杂直流电网中各站的安全运行边界, 明确了不同运行方式及不同控制模式受潮流转移及安全边界双重影响的规律。最后, 本文在 PSCAD 软件中搭建 CIGRE 柔直电网测试模型, 基于对仿真结果的分析, 验证了所提计算方法及安全边界分析结论的正确性。

1 直流电网潮流转移计算方法

本文在主从控制、下垂控制方式下分别对故障线路切除和换流站注入功率改变后潮流转移特性进行理论分析, 并推导不同运行方式下潮流转移的定量计算方法。

1.1 主从控制下潮流转移的计算方法

1) 切除故障线路

故障线路切除前后, 网络的节点电压方程分别为

$$\begin{cases} \mathbf{I}_0 = \mathbf{Y}_0 \cdot \mathbf{U}_0 \\ \mathbf{I}_1 = \mathbf{Y}_0 \cdot \mathbf{U}_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{I}_0 、 \mathbf{U}_0 分别为故障前的节点注入电流、节点电压; \mathbf{I}_1 、 \mathbf{U}_1 分别为故障后的节点注入电流、节点电压; \mathbf{Y}_0 为节点导纳矩阵。

对于线性网络, 满足叠加定理:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_0 + \Delta \mathbf{I} \\ \mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_0 + \Delta \mathbf{U} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\Delta \mathbf{I} = \mathbf{Y}_0 \cdot \Delta \mathbf{U}$ 。

在切除故障线路 ij 后, 可通过定量改变节点注入电流增量来等效地认为线路并未开断, 从而使网络的节点导纳矩阵保持不变, 节点注入电流增量为

$$\Delta \mathbf{I} = \mathbf{B}_{ij} \cdot \mathbf{I}_{ij} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{B}_{ij} = [0 \ \cdots \ 1 \ 0 \ \cdots \ -1 \ 0 \ \cdots \ 0]^T$ 。

将故障后的网络进行戴维宁等效, 并将线路电阻 R_{ij} 置为负数, 代替 \mathbf{B}_{ij} 的作用, 进而求得 \mathbf{I}_{ij} , 等效电路如图 1 所示。

可求得:

$$\mathbf{I}_{ij} = -\mathbf{C}_{ij} \mathbf{B}_{ij}^T \mathbf{U}_0 \quad (4)$$

式中, $\mathbf{C}_{ij} = \frac{1}{\mathbf{B}_{ij}^T \mathbf{Y}_0^{-1} \mathbf{B}_{ij} - R_{ij}}$ 。

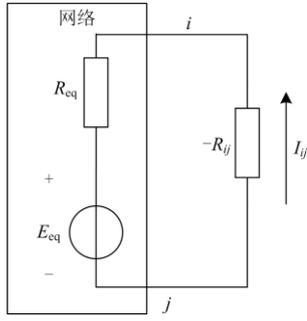


图1 故障后网络等效电路

Fig. 1 Network equivalent circuit after fault

在切断故障线路 ij 后, 线路 mn 上的电流增量为

$$\Delta I_{mn} = \frac{\mathbf{B}_{ij}^T \Delta U}{R_{mn}} = -D_{mn} \cdot I_{ij}^0 \quad (5)$$

式中: $D_{mn} = \frac{\mathbf{C}_{mn} \mathbf{B}_{mn}^T \mathbf{Y}_0^{-1} \mathbf{B}_{ij} R_{ij}}{R_{mn}}$; I_{ij}^0 为故障前线路 ij 上的电流。

从而得到, 线路 mn 上传输的有功功率增量为

$$\Delta P_{mn} = \Delta I_{mn} (u_m + \Delta u_m) \approx -D_{mn} I_{ij}^0 u_m \quad (6)$$

2) 改变换流站注入功率

直流电网中支路电流与节点电压之间的关系可表示为

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{Y}_B \mathbf{A}^T \mathbf{U} \quad (7)$$

式中: \mathbf{I}_B 为支路电流; \mathbf{Y}_B 为支路电导矩阵; \mathbf{A}^T 为节点-支路关联矩阵。

联立式(1), 可得线路上传输的有功功率增量为

$$\Delta \mathbf{P}_B = \mathbf{Y}_B \mathbf{A}^T \mathbf{Y}_0^{-1} \Delta \mathbf{P} \quad (8)$$

式中, $\Delta \mathbf{P} = \Delta \mathbf{P}_{\text{ref}}$ 。

1.2 下垂控制下潮流转移的计算方法

1) 切除故障线路

下垂控制方式下, 换流站输出有功功率 P 与换流站直流侧电压 U 满足一次函数关系。

$$P = -kU + b \quad (9)$$

式中, $b = P_{\text{ref}} + kU_{\text{ref}}$, 其中 P_{ref} 为换流站输出有功功率参考值, k 为下垂系数, U_{ref} 为换流站直流侧电压参考值。

由式(9)可得, 下垂控制站和定功率站的 $I-U$ 关系分别为

$$\begin{cases} I = -k + \frac{b}{U} \\ I = \frac{P}{U} \end{cases} \quad (10)$$

令前 $n-1$ 个换流站均采用下垂控制, 第 n 个换流站采用定功率控制, 联立式(1)、式(2)、式(10), 得:

$$\mathbf{Y}_0 \Delta \mathbf{U} = \Delta \mathbf{I} + \mathbf{B}_{ij} \cdot I_{ij} \quad (11)$$

将 $\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_0 + \mathbf{Y}'$ 和 $\Delta \mathbf{I} = -\mathbf{Y}' \Delta \mathbf{U}$ 代入式(11), 可得:

$$\mathbf{Y} \Delta \mathbf{U} = \mathbf{B}_{ij} \cdot I_{ij} \quad (12)$$

式中, $\mathbf{Y}' = \text{diag} \left[\frac{b_1}{u_1^2} \quad \frac{b_2}{u_2^2} \quad \dots \quad \frac{P_n}{u_n^2} \right]$ 。

在切断故障线路 ij 后, 可由式(6)计算得到线路 mn 上传输的有功功率增量, 其中 $D_{mn} = \frac{\mathbf{C}_{ij} \mathbf{B}_{mn}^T \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{B}_{ij} R_{ij}}{R_{mn}}$ 。

2) 改变换流站注入功率

将式(9)改写为

$$P = P_{\text{ref}} + k(U_{\text{ref}} - U) \quad (13)$$

将式(13)进行线性化处理, 可得:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ref}} - \text{diag}(k) \Delta U \quad (14)$$

引入直流电网雅可比矩阵 \mathbf{J}_{DC} , 化简为

$$\Delta \mathbf{P} = \left[\mathbf{E} + \text{diag}(k) \mathbf{J}_{\text{DC}}^{-1} \right]^{-1} \Delta \mathbf{P}_{\text{ref}} \quad (15)$$

式中, \mathbf{E} 为单位矩阵。

在改变节点注入功率后, 可由式(8)计算得到线路上传输的有功功率增量。

2 换流站安全运行约束条件

MMC-HVDC 换流站交流侧等效电路如图 2 所示, $U_s \angle 0$ 为交流系统电压, R_s 、 X_s 分别为交流系统短路电阻和电抗, $U_p \angle \alpha$ 为公共连接点 PCC 处母线线电压, X_T 为换流变压器电抗, $U_v \angle \beta$ 为变压器阀侧线电压, X_L 为桥臂电抗, $U_c \angle \delta$ 为换流器交流出口等效虚拟点 c 处线电压, P_c 、 Q_c 分别为换流站流向交流侧的三相有功功率和三相无功功率, U_{dc} 为直流侧电压。

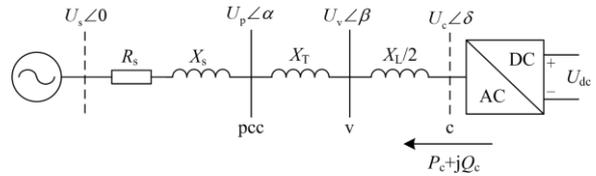


图2 换流站交流侧等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit at AC side of converter station

此时有功功率、无功功率满足式(16)。

$$\left(P_c - \frac{U_c^2 R}{Z^2} \right)^2 + \left(Q_c - \frac{U_c^2 X}{Z^2} \right)^2 = \left(\frac{U_c U_s}{Z} \right)^2 \quad (16)$$

式中，交流系统阻抗 $Z = R + jX$ ，其中 $R = R_s$ 、 $X = X_s + X_T + X_L/2$ 。

主要考虑五种约束对换流器安全稳定运行的影响，即换流器额定容量约束、电压稳定性约束、电压调制比约束、额定交流电流约束、直流电压约束。

1) 换流器额定容量约束

$$P_v^2 + Q_v^2 \leq S_{vN}^2 \quad (17)$$

式中， S_{vN} 为换流器额定视在功率。

2) 电压稳定性约束

$$U_c \angle \delta_c - \frac{P_c - jQ_c}{U_c \angle -\delta_c} \cdot Z = U_s \angle 0 \quad (18)$$

将换流器交流出口等效虚拟点 c 处线电压进行 dq 分解，即 $U_c \angle \delta = U_{cd} + jU_{cq}$ ，为保证潮流方程有解，需满足式(19)的约束条件。

$$\Delta = U_s^2 - 4 \left[\left(\frac{P_c X - Q_c R}{U_s} \right)^2 - P_c R - Q_c X \right] \geq 0 \quad (19)$$

3) 电压调制比约束

由电压调制比的定义，可推出

$$m = \frac{U_{diffm}}{U_{dc}/2} = \frac{2\sqrt{2}U_c}{\sqrt{3}U_{dc}} \quad (20)$$

考虑实际工况时换流器的约束条件，半桥型 MMC 电压调制比 m 需满足：

$$0.85 \leq m \leq 1 \quad (21)$$

4) 额定交流电流约束

$$\text{abs} \left(\frac{P_v + jQ_v}{U_{vd} + jU_{vq}} \right) \leq I_{vN} \quad (22)$$

式中， I_{vN} 为交流侧额定电流。

5) 直流电压约束

$$0.95 \text{ p.u.} \leq U_{dc} \leq 1.05 \text{ p.u.} \quad (23)$$

3 换流站安全运行边界

CIGRE 柔直电网测试模型由 3 个系统组成，分别为点对点直流系统(DCS1)，4 端辐射直流系统(DCS2)和 5 端直流网络(DCS3)，共包括 11 端 VSC，2 个 DC/DC 变换器，2 个直流电压等级 ($\pm 400 \text{ kV}$ 和 $\pm 200 \text{ kV}$)，连接了 2 个 380 kV 交流电网和 4 个 145 kV 交流孤岛，如图 3 所示。

以 5 端直流网络 DCS3 为例，各换流站主要参数如表 1 所示。将系统参数折算为标幺值进行分析，选取功率基值为 1 000 MVA，交流电压基值为变压器阀侧额定电压 220 kV，直流电压基值为 400 kV。

根据影响换流站安全稳定运行的各种约束条

件，在 Matlab 上绘制出各换流站的安全运行边界，如图 4 所示。

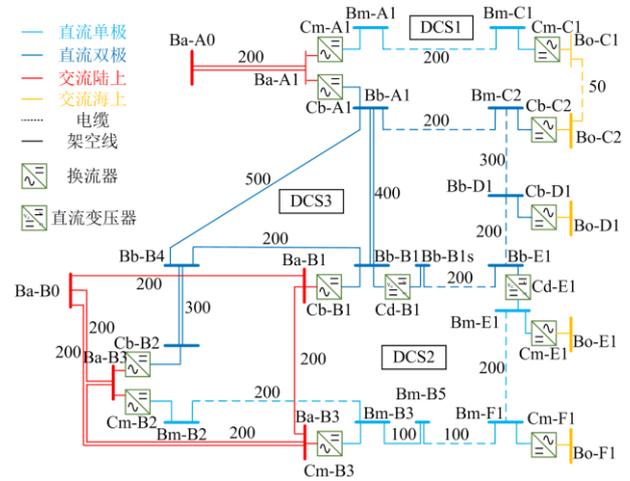


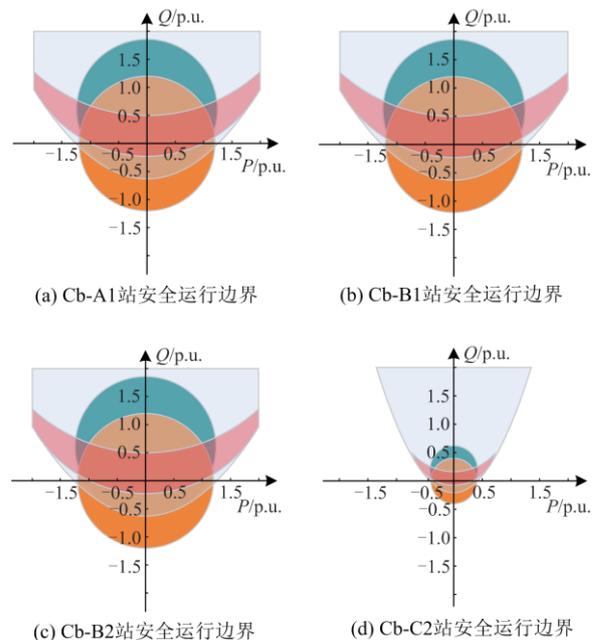
图 3 CIGRE 柔直电网测试模型

Fig. 3 CIGRE flexible DC grid test model

表 1 DCS3 中各换流站主要参数

Table 1 Main parameters of converter station in DCS3

参数	Cb-A1	Cb-B1	Cb-B2	Cb-C2	Cb-D1
额定容量/MVA	1200×2	1200×2	1200×2	400×2	800×2
网侧额定电压/kV	380	380	380	145	145
阀侧额定电压/kV	220	220	220	220	220
直流侧电压/kV	±400	±400	±400	±400	±400
桥臂子模块数	200	200	200	200	200
子模块电容值/mF	15	15	15	5	10
桥臂电感值/mH	76	76	76	232	116

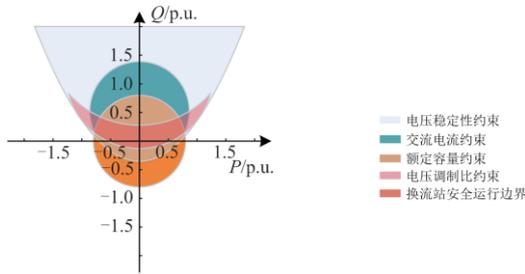


(a) Cb-A1站安全运行边界

(b) Cb-B1站安全运行边界

(c) Cb-B2站安全运行边界

(d) Cb-C2站安全运行边界



(e) Cb-D1站安全运行边界

图4 DCS3中各换流站安全运行边界

Fig. 4 Safe operation boundary of converter station in DCS3

4 仿真验证

本文对CIGRE柔直电网测试模型中5端直流网络DCS3进行分析,将点对点直流系统DCS1中Cm-A1站设置为定直流电压控制,4端辐射直流系统DCS2中Cm-B2和Cm-B3站设置为定功率控制,直流变压器Cd-B1、Cd-E1设置为定功率控制,排除子系统间不平衡功率的相互影响。直流变压器控制指令值如表2所示。

表2 直流变压器控制策略

直流变压器	控制模式	参考值(每极)
Cd-B1	定功率控制	$P=300\text{ MW}$
Cd-E1	定功率控制	$P=150\text{ MW}$

本文在主从控制、下垂控制方式下分别对切除故障线路和改变换流站注入功率后的潮流转移量进行计算,进而判断换流站输出功率是否超出其安全运行边界,分析直流电网潮流转移对MMC安全运行的影响,并在PSCAD软件中搭建相应的仿真模型加以验证。

4.1 主从控制下潮流转移后安全性分析

主从控制方式下直流电网中定功率站的有功参考值为定值,定直流电压站负责平衡网络中出现的功率不平衡,因此其潮流分布相对稳定。本算例在主从控制方式下分别针对故障线路切除和换流站注入功率改变的情况,分析直流电网潮流转移对MMC安全运行的影响。主从控制方式下各换流站控制策略如表3所示。

当系统达到稳态时,其正极、负极运行层上对应线路上的潮流分布相同。以正极为例,直流电网中各条线路初始潮流如表4所示,功率单位为MW。

1) 切除故障线路

根据直流电网潮流分布特性,电源与负荷节点间的线路作为系统功率传输的高负载线路,更容易发生过载而被切除,本案例分别对此类关键线路作

开断处理,计算网络中各条线路上的潮流转移量,结果如表5所示,功率单位为MW。

表3 换流站控制策略

换流站	控制模式	参考值(每极)
Cb-A1	定直流电压控制	$U_{dc}=400\text{ kV}$ $Q=0\text{ Mvar}$
Cb-C2	定功率控制	$P=300\text{ MW}$ $Q=0\text{ Mvar}$
Cb-D1	定功率控制	$P=500\text{ MW}$ $Q=0\text{ Mvar}$
Cb-B1	定功率控制	$P=-750\text{ MW}$ $Q=0\text{ Mvar}$
Cb-B2	定功率控制	$P=-850\text{ MW}$ $Q=0\text{ Mvar}$

表4 线路初始潮流

线路	A1-C2	C2-D1	D1-E1	E1-B1
初始潮流	-350.10	-52.89	424.85	404.93
线路	B1-B4	A1-B1	A1-B4	B4-B2
初始潮流	405.58	386.86×2	473.73	437.91×2

通过对故障线路切除后非故障线路上潮流转移量的计算,可求得各换流站输出功率,将计算结果与仿真值进行比较,具体数据如表6所示,功率单位为MW。

表7对故障线路切除后换流站是否超出其安全运行边界进行了分析,“0”、“1”分别表示换流站输出功率未超出、超出安全运行边界。

由表6、表7可知,只有在切除故障线路B4-B2后,换流站输出功率才存在较大变化;断开其他线路对换流站输出功率影响不大。切除线路B4-B2后,定功率站Cb-B2被切离系统,定直流电压站Cb-A1负责平衡网络中出现的功率不平衡,维持直流电网

表5 故障线路切除后各条线路潮流转移

线路	切除 D1-E1	切除 A1-B1	切除 A1-B4	切除 B4-B2
A1-C2	-402.82	211.88	49.07	-46.16
C2-D1	-413.78	214.98	45.20	-50.32
D1-E1	-422.06	213.33	45.92	-47.46
E1-B1	-418.79	217.67	48.44	-39.14
B1-B4	-92.08	-561.74	472.11	-495.44
A1-B1	164.93×2	-384.71×2	216.48×2	-223.06×2
A1-B4	95.08	572.92	-478.47	-379.67
B4-B2	-1.11×2	0.29×2	-2.69×2	-437.88×2

表 6 故障线路切除后换流站输出功率

Table 6 Output power of the converter station after removing the faulty line

换流站		切除	切除	切除	切除
		D1-E1	A1-B1	A1-B4	B4-B2
Cb-A1	计算值	918.84	912.73	900.91	25.40
	仿真值	939.30	950.76	933.80	27.60
	误差	2.18%	4.00%	3.52%	7.97%
Cb-C2	计算值	286.25	300.31	293.34	293.05
	仿真值	300.06	299.99	300.00	300.07
	误差	4.77%	0.11%	2.22%	2.34%
Cb-D1	计算值	469.46	476.09	478.46	480.60
	仿真值	500.13	499.88	500.05	500.01
	误差	6.10%	4.76%	4.32%	3.88%
Cb-B1	计算值	-776.22	-783.06	-782.36	-783.25
	仿真值	-750.07	-750.26	-750.11	-750.50
	误差	3.49%	4.37%	4.30%	4.36%
Cb-B2	计算值	-873.60	-876.4	-870.44	-0.06
	仿真值	-849.99	-850.04	-850.13	-0.06
	误差	2.78%	3.10%	2.39%	0

表 7 故障线路切除后换流站是否超出安全运行边界

Table 7 Whether the converter station exceeds safe operation boundary after removing the faulty line

换流站	切除 D1-E1	切除 A1-B1	切除 A1-B4	切除 B4-B2
Cb-A1	0	0	0	0
Cb-C2	0	0	0	0
Cb-D1	0	0	0	0
Cb-B1	0	0	0	0
Cb-B2	0	0	0	0

稳定，定功率站 Cb-C2、Cb-D1、Cb-B1 输出功率保持不变。

本文以 3.5 s 时切除线路 B4-B2 为例，验证主从控制方式下切除故障线路对 MMC 安全运行的影响，各换流站输出功率如图 5 所示。由图 5 可知，各换流站输出功率均未超出其安全运行边界，系统能保持稳定运行。

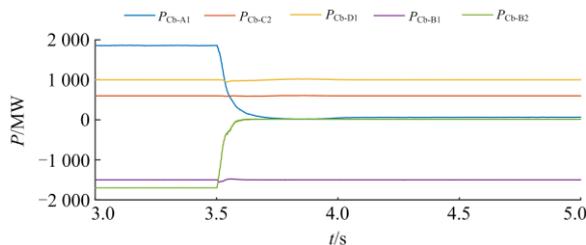


图 5 各换流站输出功率

Fig. 5 Output power of the converter station

2) 改变换流站注入功率

通过改变各定功率站注入功率，计算网络中各条直流线路上的潮流转移量，如表 8 所示，功率单位为 MW。

表 8 改变换流站注入功率后各条线路潮流转移

Table 8 Power flow transfer of each line after changing the injected power of converter station

线路	$\Delta P=50$	$\Delta P=250$	$\Delta P=-350$	$\Delta P=-250$
	(Cb-C2)	(Cb-D1)	(Cb-B1)	(Cb-B2)
A1-C2	-38.23	-110.15	33.92	18.92
C2-D1	12.16	-110.93	25.67	17.71
D1-E1	7.30	121.14	24.56	11.61
E1-B1	9.50	125.84	31.92	17.96
B1-B4	4.65	27.32	-74.07	146.79
A1-B1	-3.41×2	-45.89×2	130.75×2	68.58×2
A1-B4	-3.91	-29.14	72.53	111.90
B4-B2	-0.14×2	-1.05×2	-1.44×2	128.29×2

通过对换流站注入功率改变后各条直流线路上潮流转移量的计算，可求得各换流站输出功率，将计算结果与仿真值进行比较，具体数据如表 9 所示，功率单位为 MW，“—”表示换流站失稳，此值无法获得。

表 10 对换流站注入功率改变后输出功率是否超出其安全运行边界进行了分析，功率单位为 MW，“0”、“1”分别表示换流站输出功率未超出、超出安全运行边界。

表 9 改变换流站注入功率后换流站输出功率

Table 9 Output power of the converter station after changing the injected power of converter station

换流站	$\Delta P=50$	$\Delta P=250$	$\Delta P=-350$	$\Delta P=-250$
	(Cb-C2)	(Cb-D1)	(Cb-B1)	(Cb-B2)
Cb-A1	计算值	848.39	666.28	1 220.30
	仿真值	875.55	686.98	—
	误差	3.10%	3.01%	—
Cb-C2	计算值	347.60	296.43	288.96
	仿真值	349.92	299.93	—
	误差	0.66%	1.17%	—
Cb-D1	计算值	472.88	709.81	476.63
	仿真值	499.96	—	—
	误差	5.42%	—	—
Cb-B1	计算值	-771.10	-779.81	-1 140.56
	仿真值	-749.99	-750.21	—
	误差	2.81%	3.95%	—
Cb-B2	计算值	-875.54	-873.72	-872.94
	仿真值	-850.09	-850.13	—
	误差	2.90%	2.77%	—

表 10 改变换流站注入功率后换流站是否超出安全运行边界

Table 10 Whether the converter station exceeds safe operation boundary after changing the injected power of converter station

换流站	$\Delta P=50$ (Cb-C2)	$\Delta P=250$ (Cb-D1)	$\Delta P=-350$ (Cb-B1)	$\Delta P=-250$ (Cb-B2)
Cb-A1	0	0	1	1
Cb-C2	0	0	0	0
Cb-D1	0	1	0	0
Cb-B1	0	0	1	0
Cb-B2	0	0	0	1

由表 9、表 10 可知, 改变定功率站注入功率使其参考值不在安全运行边界内, 定直流电压站可能会因平衡网络中出现的冗余功率而超出其安全运行边界。若平衡站未出现功率越限, 则系统中只有改变注入功率的换流站会因功率越限而失稳。若平衡站出现功率越限, 系统将会因唯一的平衡站失稳而崩溃, 其他换流站即使通过计算未出现越限, 也会因系统瓦解而失稳。

本文以 3.5 s 时改变 Cb-B1 站注入功率为例, 验证主从控制方式下改变换流站注入功率对 MMC 安全运行的影响, 各换流站输出功率如图 6 所示。由图 6 可知, 定直流电压站 Cb-A1 因平衡网络中冗余功率而出现功率越限, 导致系统失稳。

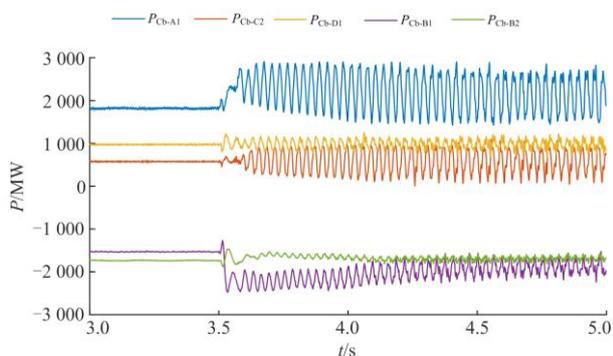


图 6 各换流站输出功率

Fig. 6 Output power of the converter station

4.2 下垂控制下潮流转移后安全性分析

在下垂控制方式下, 当网络中直流电压发生变化时, 下垂控制站将负责平衡因直流电压突变而引起的功率不平衡, 调节量由每个换流站设置的下垂系数决定。本算例在下垂控制方式下分别针对故障线路切除和换流站注入功率改变的情况, 分析直流电网潮流转移对 MMC 安全运行的影响。下垂控制方式下各换流站控制策略如表 11 所示。

表 11 换流站控制策略

Table 11 Control strategies of converter stations

换流站	控制模式	参考值(每极)
Cb-A1	定功率控制	$P=600$ MW
		$Q=0$ Mvar
Cb-C2	定功率控制	$P=300$ MW
		$Q=0$ Mvar
Cb-D1	定功率控制	$P=500$ MW
		$Q=0$ Mvar
Cb-B1	功率-电压下垂控制	$P=-750$ MW
		$U_{dc}=400$ kV
		$K_{droop}=15$
Cb-B2	功率-电压下垂控制	$Q=0$ Mvar
		$P=-850$ MW
		$U_{dc}=400$ kV
		$K_{droop}=15$
		$Q=0$ Mvar

同样以正极为例, 直流网络中各条线路初始潮流如表 12 所示, 功率单位为 MW。

表 12 线路初始潮流

Table 12 Initial power flow of line

线路	A1-C2	C2-D1	D1-E1	E1-B1
初始潮流	-367.36	-75.04	-401.10	384.04
线路	B1-B4	A1-B1	A1-B4	B4-B2
初始潮流	333.50	291.94 × 2	366.64	347.68 × 2

1) 切除故障线路

本案例同样以电源与负荷节点间的线路作为关键线路分别进行开断处理, 计算网络中各条线路上的潮流转移量, 结果如表 13 所示, 功率单位为 MW。

表 13 故障线路切除后各条线路潮流转移

Table 13 Power flow transfer of each line after removing the faulty line

线路	切除 D1-E1	切除 A1-B1	切除 A1-B4	切除 B4-B2
A1-C2	-388.08	157.63	33.24	62.28
C2-D1	-393.42	158.16	35.06	9.69
D1-E1	405.42	963.04	839.45	17.96
E1-B1	-396.33	163.61	37.18	-104.06
B1-B4	-89.84	-414.91	357.07	-528.56
A1-B1	151.41 × 2	-291.94 × 2	165.50 × 2	51.31 × 2
A1-B4	86.74	424.79	-365.54	-172.00
B4-B2	-3.02 × 2	2.05 × 2	-3.34 × 2	-347.64 × 2

通过对故障线路切除后非故障线路上潮流转移量的计算, 可求得各换流站输出功率, 将计算结果与仿真值进行比较, 具体数据如表 14 所示, 功率单位为 MW, “—”表示换流站失稳, 此值无法获得。

表 14 故障线路切除后换流站输出功率

Table 14 Output power of the converter station after removing the faulty line

换流站		切除 D1-E1	切除 A1-B1	切除 A1-B4	切除 B4-B2
Cb-A1	计算值	584.64	581.70	581.86	576.08
	仿真值	599.97	599.99	599.75	—
	误差	2.56%	3.05%	2.98%	—
Cb-C2	计算值	286.98	292.73	294.14	239.73
	仿真值	300.06	300.01	300.10	—
	误差	4.36%	2.57%	1.99%	—
Cb-D1	计算值	472.78	478.82	478.33	448.49
	仿真值	500.06	500.00	499.85	—
	误差	5.46%	4.24%	4.31%	—
Cb-B1	计算值	-630.75	-629.06	-645.53	-1 161.55
	仿真值	-610.53	-634.53	-622.37	—
	误差	3.31%	0.86%	3.72%	—
Cb-B2	计算值	-689.32	-699.46	-688.68	-0.08
	仿真值	-672.84	-655.89	-666.11	—
	误差	2.45%	6.64%	3.39%	—

表 15 对故障线路切除后换流站是否超出其安全运行边界进行了分析，“0”、“1”分别表示换流站输出功率未超出、超出安全运行边界。

表 15 故障线路切除后换流站是否超出安全运行边界

Table 15 Whether the converter station exceeds safe operation boundary after removing the faulty line

换流站	切除 D1-E1	切除 A1-B1	切除 A1-B4	切除 B4-B2
Cb-A1	0	0	0	0
Cb-C2	0	0	0	0
Cb-D1	0	0	0	0
Cb-B1	0	0	0	1
Cb-B2	0	0	0	0

由表 14、表 15 可看出，只有在切除故障线路 B4-B2 后，换流站输出功率才存在较大变化；断开其他线路对换流站输出功率影响不大。切除线路 B4-B2 后，下垂站 Cb-B2 被切离系统，系统中唯一的下垂站 Cb-B1 将负责整个直流网络的功率平衡，因平衡站无法满足定功率站的有功需求而出现越限，导致系统失稳，其他换流站即使通过计算未出现越限，也会因系统瓦解而失去稳定。

本文以 3.5 s 时切除线路 B4-B2 为例，验证下垂控制方式下切除故障线路对 MMC 安全运行的影响，各换流站输出功率如图 7 所示。由图 7 可看出，下垂站 Cb-B2 被切离系统，下垂站 Cb-B1 因无法满足定功率站的有功需求而出现越限，导致系统失稳。

2) 改变换流站注入功率

通过改变各定功率站注入功率，计算网络中各条直流线路上的潮流转移量，如表 16 所示，功率单位为 MW。

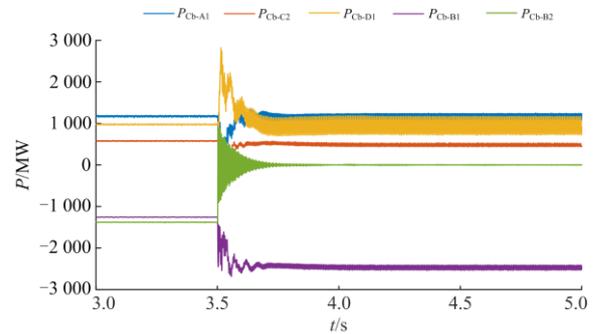


图 7 各换流站输出功率

Fig. 7 Output power of the converter station

表 16 改变换流站注入功率后的潮流转移

Table 16 Power flow transfer of each line after changing the injected power of converter station

线路	$\Delta P=500$ (Cb-A1)	$\Delta P=50$ (Cb-C2)	$\Delta P=250$ (Cb-D1)
A1-C2	29.83	-32.92	-102.56
C2-D1	33.41	12.80	-95.63
D1-E1	836.94	814.81	938.67
E1-B1	38.00	14.32	139.00
B1-B4	85.15	9.81	65.65
A1-B1	150.98×2	11.07×2	25.32×2
A1-B4	151.76	10.07	47.13
B4-B2	119.81×2	11.35×2	55.77×2

通过对换流站注入功率改变后各条直流线路上潮流转移量的计算，可求得各换流站输出功率，将计算结果与仿真值进行比较，具体数据如表 17 所示，功率单位为 MW，“—”表示换流站失稳，此值无法获得。

表 17 改变换流站注入功率后换流站输出功率

Table 17 Output power of the converter station after changing the injected power of converter station

换流站	$\Delta P=500$ (Cb-A1)	$\Delta P=50$ (Cb-C2)	$\Delta P=250$ (Cb-D1)
Cb-A1	计算值	1 066.35	578.37
	仿真值	—	599.74
	误差	—	3.56%
Cb-C2	计算值	295.90	299.25
	仿真值	300.09	300.04
	误差	1.40%	0.38%
Cb-D1	计算值	477.47	708.24
	仿真值	500.04	—
	误差	4.51%	—
Cb-B1	计算值	-889.23	-758.41
	仿真值	-857.53	-732.82
	误差	3.70%	3.49%
Cb-B2	计算值	-934.98	-806.90
	仿真值	-906.60	-786.47
	误差	3.13%	2.60%

表 18 对换流站注入功率改变后输出功率是否超出其安全运行边界进行了分析, 功率单位为 MW, “0”、“1” 分别表示换流站输出功率未超出、超出安全运行边界。

表 18 改变换流站注入功率后换流站是否超过安全运行边界

Table 18 Whether the converter station exceeds safe operation boundary after changing the injected power of converter station			
换流站	converter station		
	$\Delta P = 500$ (Cb-A1)	$\Delta P = 50$ (Cb-C2)	$\Delta P = 250$ (Cb-D1)
Cb-A1	1	0	0
Cb-C2	0	0	0
Cb-D1	0	0	1
Cb-B1	0	0	0
Cb-B2	0	0	0

由表 17、表 18 可看出, 改变定功率站注入功率使其参考值不在安全运行边界内, 下垂站因平衡网络中出现的冗余功率, 其输出功率将在安全运行边界内波动而未出现功率越限, 其他定功率站将继续保持稳定运行。

本文以 3.5 s 时改变 Cb-D1 站注入功率为例, 验证主从控制方式下改变换流站注入功率对 MMC 安全运行的影响, 各换流站输出功率如图 8 所示。由图 8 可看出, 下垂站输出功率在其安全运行边界内波动而未出现功率越限, 其他定功率站继续保持稳定运行。

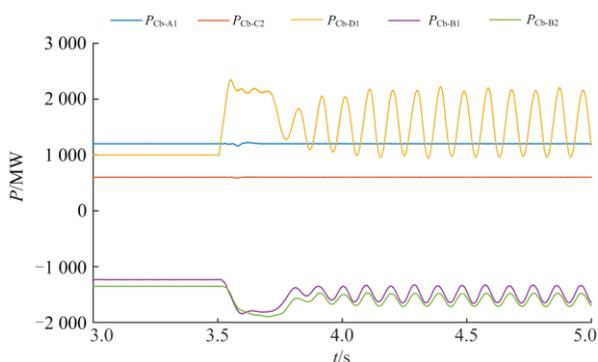


图 8 各换流站输出功率

Fig. 8 Output power of the converter station

5 结论

本文在主从控制、下垂控制方式下分别对故障线路切除和换流站注入功率改变后潮流转移特性进行了理论分析, 并得出了不同运行方式下潮流转移定量计算方法, 然后基于 PQ 功率域分析了复杂直流电网中各站的安全运行边界, 明确了不同运行方式及不同控制模式受潮流转移及安全边界双重影响

的规律。主要结论如下:

1) 主从控制方式下, 切除故障线路或改变换流站注入功率时, 定直流电压站按需平衡网络中出现的不平衡功率, 其换流站输出功率变化较大, 有超出安全运行边界的风险, 此时若没有后备定直流电压站, 直流系统将失去稳定。

2) 下垂控制方式下, 切除故障线路或改变换流站注入功率时, 下垂站可能无法满足系统中定功率站的功率需求而超出其安全运行边界, 进而导致系统失稳, 但相比于主从控制, 其多个下垂站可共同分担功率波动, 因此在下垂控制下功率越限的风险较主从控制低。

3) 由于调度等因素, 实际柔性直流工程均采用主从控制模式, 因此为减少运行风险, 建议增强定直流电压站系统强度, 扩增其安全运行边界。

参考文献

- [1] 王克球, 张保会, 王立永, 等. 安全稳定控制系统的经济效益评价[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 31-37.
WANG Keqiu, ZHANG Baohui, WANG Liyong, et al. Assessment on economic benefit of security and stability control system[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 31-37.
- [2] 严道波, 文劲宇, 杜治, 等. 2021 年得州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 121-128.
YAN Daobo, WEN Jinyu, DU Zhi, et al. Analysis of Texas blackout in 2021 and its enlightenment to power system planning management[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 121-128.
- [3] 张晶晶, 陈博进, 尉静慧, 等. 一种交直流系统连锁故障预测方法及风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 125-132.
ZHANG Jingjing, CHEN Bojin, WEI Jinghui, et al. AC-DC system cascading failure simulation method and risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 125-132.
- [4] 任冲, 柯贤波, 樊国伟, 等. 大规模风电直流送出系统过电压抑制措施及控制方案优化研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 163-174.
REN Chong, KE Xianbo, FAN Guowei, et al. Transient voltage stabilization and control optimization for large-scale wind power UHVDC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 163-174.
- [5] 周孝信, 郑健超, 沈国荣, 等. 从美加东北部电网大面积停电事故中吸取教训[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 1-2.
ZHOU Xiaoxin, ZHENG Jianchao, SHEN Guorong, et al. Learn from the large-scale blackouts in the northeastern

United States and Canada[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 1-2.

[6] 李再华, 白晓民, 丁剑, 等. 西欧大停电事故分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 1-3, 32.
LI Zaihua, BAI Xiaomin, DING Jian, et al. Analysis of the western Europe blackout[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 1-3, 32.

[7] 唐斯庆, 张弥, 李建设, 等. 海南电网“9·26”大面积停电事故的分析与总结[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 1-7, 16.
TANG Siqing, ZHANG Mi, LI Jianshe, et al. Review of blackout in Hainan on September 26th—causes and recommendations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-7, 16.

[8] 汤涌, 卜广全, 易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 167-174, 23.
TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian power grid on July 30 and 31, 2012[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 167-174, 23.

[9] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 1-6.
ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of “9·28” blackout in South Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-6.

[10] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6192.
SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6192.

[11] NOVOSEL D, BEGOVIC M M, MADANI V. Shedding light on blackouts[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2004, 2(1): 32-43.

[12] 程临燕, 张保会, 郝治国, 等. 基于最小基本回路集合的潮流转移快速搜索[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 21-26.
CHENG Linyan, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Fast search of power flow transfers based on minimal basic circuit set[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 21-26.

[13] 栗然, 靳保源. 基于潮流转移分布熵和负荷冲击灵敏度熵的电力系统关键线路识别[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 148-154.
LI Ran, JIN Baoyuan. Critical line identification of power grid based on power flow transferring distribution entropy and load impact sensitivity entropy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 148-154.

[14] 刘献超, 任建文, 渠卫东. 基于广度优先法的多支路连锁切除潮流转移快速搜索算法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 69-74.
LIU Xianchao, REN Jianwen, QU Weidong. A fast search algorithm of power flow transfer for multi-branches removal event based on breadth first search[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 69-74.

[15] HE Jinghan, CHEN Ke'ao, LI Meng, et al. Review of protection and fault handling for a flexible DC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 28-42.

[16] 杜晓磊, 郭庆雷, 吴延坤, 等. 张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 164-173.
DU Xiaolei, GUO Qinglei, WU Yankun, et al. Research on control system structure and coordination control strategy for Zhangbei Demonstration Project of MMC-HVDC Grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 164-173.

[17] 汪涛, 虞晓阳, 文继锋, 等. 模块化多电平柔性直流输电换流器子模块过电压保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 107-115.
WANG Tao, YU Xiaoyang, WEN Jifeng, et al. Sub-module overvoltage protection of modular multilevel converter for flexible DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 107-115.

[18] 沈宝兴, 林琳, 董倩, 等. MMC-HVDC 孤岛供电系统交流故障穿越协调控制策略[J]. 电力建设, 2020, 41(6): 93-99.
SHEN Baoxing, LIN Lin, DONG Qian, et al. Coordinated control strategy for ac fault ride-through of MMC-HVDC island power supply system[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(6): 93-99.

[19] 蔡巍, 赵媛, 胡应宏, 等. 张北柔性直流电网变电站能耗装置系统仿真研究[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 212-220.
CAI Wei, ZHAO Yuan, HU Yinghong, et al. Simulation study on energy consumption device in power substation of Zhangbei Flexible HVDC Power Grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 212-220.

[20] 张英敏, 蒋容, 刘凯, 等. 含柔性直流电网的交直流系统潮流转移搜索与量化分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2553-2561.
ZHANG Yingmin, JIANG Rong, LIU Kai, et al. Path search and analysis on power flow transferring of power

- system with VSC-HVDC Grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(8): 2553-2561.
- [21] 辛建波, 杨程祥, 舒展, 等. 基于静态安全域的交流直流混联大电网关键线路辨识[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(6): 165-172.
- XIN Jianbo, YANG Chengxiang, SHU Zhan, et al. Identification of critical lines in AC/DC hybrid large power grid based on steady-state security region[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(6): 165-172.
- [22] LIM S, YUAN H, RIM S, et al. Adaptive blinder for distance relay based on sensitivity factors[C] // *International Conference on Power System Technology*, October 22-26, 2006, Chongqing, China: 1-5.
- [23] HAILESELASSIE T M, UHLEN K. Impact of DC line voltage drops on power flow of MTDC using droop control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(3): 1441-1449.
- [24] MU Y, ZHANG B, BO Z Q. Fast prediction of cascading overload on transmission section based on DC sensitivity and compensation method[C] // *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, July 17-21, 2016, Boston, MA: 1-5.
- [25] YAO R, ZHANG X, HUANG S W, et al. Cascading outage preventive control for large-scale AC-DC interconnected power grid[C] // *IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition*, July 27-31, 2014, National Harbor, MD, USA: 1-5.
- [26] ZHI J, XU Y. Power flow transferring path search and emergency control strategy[C] // *IEEE 5th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication*, May 14-16, 2015, Beijing, China: 380-383.
- [27] ZHOU J Z, GOLE A M. VSC transmission limitations imposed by AC system strength and AC impedance characteristics[C] // *IET International Conference on AC & DC Power Transmission*, December 4-5, 2012, Birmingham, UK: 1-6.
- [28] ZHANG Z, JIANG W, BIE X, et al. Operating area for modular multilevel converter based high-voltage direct current system[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2016, 10(6): 776-787.
- [29] 鲁晓军, 向往, 林卫星, 等. 混合型模块化多电平换流器解析建模与功率运行区间分析[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(7): 76-84.
- LU Xiaojun, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Analysis on analytical modeling and power operating zone of hybrid modular multilevel converter[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(7): 76-84.
- [30] 廖敏, 许韦华, 杨杰, 等. 考虑子模块均压约束的混合型模块化多电平换流器功率极限分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(5): 17-25.
- LIAO Min, XU Weihua, YANG Jie, et al. Analysis of maximum power operating region for hybrid MMC considering sub-module balancing constraint[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(5): 17-25.
- [31] 周保荣, 李选平, 杨健, 等. 向无源电网供电的MMC-HVDC 稳态运行区域分析[J]. *智慧电力*, 2020, 48(6): 98-104.
- ZHOU Baorong, LI Xuanping, YANG Jian, et al. Analysis of steady operation region of MMC-HVDC connected to passive network[J]. *Smart Power*, 2020, 48(6): 98-104.
- [32] 秦善萌, 王姗姗, 赵兵, 等. 新能源经柔直孤岛送出场景下换流站安全稳定运行区域研究[J]. *电网技术*, 2021, 45(2): 785-793.
- QIN Shanmeng, WANG Shanshan, ZHAO Bing, et al. Study on the safe and stable operation area for the converter station under the scenarios of renewable energy generation sending through islanded MMC-HVDC[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(2): 785-793.

收稿日期: 2021-04-19; 修回日期: 2021-05-12

作者简介:

王子文(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电; E-mail: wangzw_scu@163.com

张英敏(1974—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、直流输电; E-mail: zhangyingmin@scu.edu.cn

李保宏(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制。E-mail: scu_lbh@163.com

(编辑 姜新丽)