

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.01.012

# 多直流协调的新能源送端地区暂态过电压抑制策略

张起瑞<sup>1,2</sup>, 辛超山<sup>3</sup>, 李凤婷<sup>1</sup>, 尹纯亚<sup>1</sup>, 刘江山<sup>1</sup>, 李源<sup>1</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130; 3. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**针对直流闭锁故障导致的高比例新能源多直流送端系统暂态过电压问题,文中首先分析多直流间的交互影响机理,引入多馈出电压交互作用因子,揭示了直流闭锁导致其他健全直流近区域交流系统暂态过电压的根本原因。其次基于直流闭锁故障下调相机不同时间尺度的无功特性与整流侧换流母线电压的定量关系,在改进直流系统整流侧控制的前提下,于整流侧母线处投入调相机并以调相机暂态无功特性对其容量进行配置,降低了调相机所需投入容量。然后整合了调相机与整流器的无功调节能力,据此提出多直流、多无功设备协调配合的暂态过电压抑制策略。最后在PSCAD仿真平台中搭建两直流送端系统模型,验证了所提协调策略对暂态过电压的抑制效果以及调相机容量的配置效果。

**关键词:**高比例新能源;调相机;多直流送端系统;暂态过电压;直流控制策略;直流闭锁

**中图分类号:**TM762

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2023)01-0098-09

## 0 引言

随着风光等新能源机组装机容量在我国电力系统中占比的逐步提高以及高压直流输电系统的广泛应用,弱送端系统的暂态稳定性能进一步降低<sup>[1-3]</sup>,随之带来的是故障严重程度的增加与冲击范围的扩大。同时,新能源机组缺乏对系统无功的支撑能力,送端系统故障下的暂态特性呈现出以暂态电压为主导的新特征<sup>[4-6]</sup>。因此,研究过电压抑制技术对保持新能源集中送出地区的电力系统稳定运行尤为重要。

新型大容量调相机的区域无功支撑能力以及故障时的瞬间响应速度均有一定的提升,能够应对直流故障造成的无功波动<sup>[7-10]</sup>,近年来在直流系统的暂态性能改进技术中得到广泛应用<sup>[11-12]</sup>。现有调相机关于直流系统无功调节的研究多集中于利用电网自动电压控制整合区域内无功资源<sup>[12-15]</sup>,文献[13]基于无功电压灵敏度,利用自动电压控制的分级控制实现区域内调相机与同步发电机的协调控制;文献[14-15]通过自动电压控制提高交流滤波器与电容器组的投切响应速度,与调相机配合抑制直流近区无功波动;文献[16]则通过自动电压控制统合了直流送端电容器组与调相机进行协调。针对新能源集中地区分布式调相机的选址定容,文献[17]以故障发生概率和故障线路数量为约束建立

数学模型配置调相机位置,以轨迹灵敏度配置调相机容量;文献[18]分析了分布式调相机与集中式调相机相比在暂态过电压抑制效果以及容量优化上的优势;文献[19]分析了故障下区域无功缺额的形成原因,使用多目标差分进化算法优化调相机选址与容量。对于利用调相机抑制暂态过电压的研究,文献[20-21]协调了多直流换流站处调相机,减小直流故障发生概率的同时降低了故障发生后的暂态过电压抬升程度;文献[22]基于调相机稳态无功特性,提出调相机的定无功控制策略,提高了调相机抑制暂态电压的能力;文献[23]提出协调风机侧静态无功补偿装置与直流侧调相机的并网点暂态电压抑制策略。上述研究虽提高了调相机稳态无功的持续输出,注重系统整体无功支撑能力,但对区域性暂态电压抑制能力较差,未深入探寻多直流间交互作用带来的影响,无法满足高比例新能源地区的稳定运行需求。

因此文中着重分析调相机在多直流送端系统中的无功特性,配合对直流整流侧控制系统的改进,以健全直流近区域新能源机组不脱网为约束,对调相机投入容量进行配置优化,协调故障直流与健全直流处2种无功调节设备,在暂态过电压出现的关键节点对其进行有效抑制。

## 1 故障直流过电压对健全直流的影响

### 1.1 多馈出交互作用因子

不同于单直流系统,实际应用中多直流送端系统的部分直流可能会存在落点相近的情况,直流间

收稿日期:2022-07-23;修回日期:2022-10-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877185);新疆维吾尔自治区青年科学基金资助项目(2022D01C85)

存在一定的耦合作用。

可将多直流送端系统视为多端口网络,其等值模型如图 1 所示。

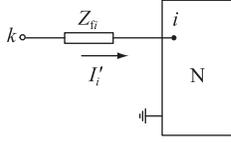


图 1 投入对称三相电容器后等效端口网络

Fig.1 Equivalent port network with symmetrical three-phase capacitor

在等效的多端网络中,可以将不同直流的换流母线看作不同节点,因此在整流侧换流母线  $i$  处投入对称三相电容器  $Z_{fi} = 1/(j\omega C)$ ,其中  $\omega$  为角频率,  $C$  为电容大小,相当于在  $n$  维端口网络的节点  $i$  前增加一处节点  $k$ ,且在  $i$  与  $k$  间等效相应的支路阻抗  $Z_{fi}$ ,由于经过  $i$  处的电流  $I'_i$  受阻抗变化的影响,其节点电压亦随之改变,导致网络内其余节点电压均有不同程度的变化。

等效网络中的节点即为直流换流母线,根据上述分析,在多直流系统中,当一条直流发生故障时,其余直流母线亦会因此受到故障直流电压变化的影响,出现不同程度的暂态过电压。

为了更加准确地描述各直流间的交互影响,引入多馈出电压交互作用因子 (multi-outfeed voltage infection factor, MOVIF),文中以  $M_{ji}$  表示,其意义为:在整流侧换流母线  $i$  处投入对称三相电容器,引起另一直流整流侧换流母线  $j$  处电压变化,换流母线  $j$  与换流母线  $i$  电压压差  $\Delta U_j$  和  $\Delta U_i$  的比值<sup>[24]</sup>。

$$M_{ji} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} = \left| \frac{Z_{ij}}{Z_{ii}} \right| \quad (1)$$

式中:  $Z_{ij}$  为线路间互阻抗;  $Z_{ii}$  为健全线路自阻抗。

可以看出,  $0 \leq M_{ji} \leq 1$ , 且其大小与所投入电容器的大小无关,只与节点间的等效阻抗大小相关。2 个节点间阻抗越小,则相互间作用关系越强;2 个节点间阻抗越大,则相互作用关系越弱,甚至可忽略不计。

## 1.2 健全直流暂态过电压机理

在电力系统稳定运行时,交、直流系统间的有功、无功功率交换基本保持平衡,交流滤波器提供的无功支撑了直流系统换流阀的运行。直流闭锁故障下,功率的动态平衡被打破,故障直流换流阀停止工作,导致直流系统无功消耗能力降低,但短时间内送端交流系统传输无功功率不变,送端换流母线处交流滤波器及电容器组受其投切策略和本身速动性不足的影响,切除时间延时超过 100 ms,

持续输出整流器换流阀运行所需的大部分无功,无法快速响应故障引起的区域性无功变化,造成母线处大量无功盈余。

### 1.2.1 故障直流暂态过电压

为了简化多直流送端系统分析过程,建立两直流送端系统模型,如图 2 所示。

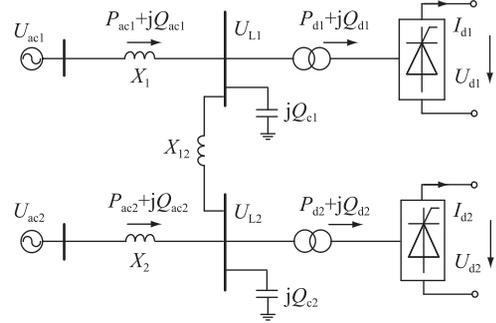


图 2 两直流送端系统等值模型

Fig.2 Equivalent circuit of double-circuit DC system on rectifier station

图 2 中,  $U_{ac1}$ 、 $U_{ac2}$  分别为两直流送端系统中交流系统等值电势;  $X_1$ 、 $X_2$  分别为两交流系统等值电抗;  $X_{12}$  为 2 条直流间耦合电抗;  $P_{ac1}$ 、 $Q_{ac1}$  与  $P_{ac2}$ 、 $Q_{ac2}$  分别为 2 条直流线路所对应交流系统汇入换流母线的有功功率与无功功率;  $Q_{c1}$ 、 $Q_{c2}$  分别为 2 条直流无功补偿装置提供的无功功率;  $U_{L1}$ 、 $U_{L2}$  分别为 2 条直流换流母线处线电压;  $P_{d1}$ 、 $Q_{d1}$  与  $P_{d2}$ 、 $Q_{d2}$  分别为 2 条直流传输的有功功率和整流站消耗的无功功率;  $I_{d1}$ 、 $I_{d2}$ 、 $U_{d1}$ 、 $U_{d2}$  分别为 2 条直流的整流侧直流电流与直流电压。

稳态下两直流系统各电气量等式:

$$\begin{cases} U_{d1} = N \left( \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{L1} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_{d1} I_{d1} \right) \\ I_{d1} = \frac{U_{d1}}{R_1} \\ P_{ac1} + P_{ac2} = P_{d1} + P_{d2} \\ Q_{ac1} + Q_{ac2} = Q_{c1} + Q_{c2} + Q_{d1} + Q_{d2} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $N$  为六脉动换流阀组数;  $\alpha$  为整流器换流阀触发角;  $X_{d1}$  为整流器每相的换相电抗;  $R_1$  为直流 1 回路阻抗,包括线路阻抗、平波电抗器阻抗以及接地阻抗等。

设置直流 1 发生直流闭锁,则其母线处电压标幺值<sup>[25]</sup>可表示为:

$$U_{L1}^* = \Delta U_{L1}^* + 1 \approx \frac{\Delta Q_{d1} + S_{c1}}{S_{c1}} \quad (3)$$

式中:  $\Delta U_{L1}^*$  为故障直流母线处暂态压升标幺值;  $\Delta Q_{d1}$  为直流 1 换流母线盈余无功;  $S_{c1}$  为直流 1 系统短路容量。

根据式(3)可得  $\Delta U_{L1}^*$  表达式为:

$$\Delta U_{L1}^* = \frac{\Delta U_{L1}}{U_{LN1}} \approx \frac{\Delta Q_{d1}}{S_{c1}} \quad (4)$$

式中:  $\Delta U_{L1}$  为故障直流母线处暂态压升;  $U_{LN1}$  为故障直流换流母线的额定电压。

将2条直流所连接的交流部分别独立分析,  $\Delta U_{L1}^*$  只与  $\Delta Q_{d1}$  及与其连接的交流系统  $S_{c1}$  相关。

闭锁故障下换流母线处交流滤波器仍提供大量无功,且交流滤波器发出无功与换流母线电压的平方成正比<sup>[26]</sup>。由此直流闭锁下直流1滤波器无功功率  $Q_{c1}$  可表示为:

$$Q_{c1} = (1 + \Delta U_{L1}^*)^2 Q_{cN1} \quad (5)$$

式中:  $Q_{cN1}$  为稳态下滤波器无功出力。

联立式(3)与式(5),故障直流1换流母线处盈余无功  $\Delta Q_1$  可表示为:

$$\Delta Q_1 = (1 + \Delta U_{L1}^*)^2 Q_{cN1} + Q_{ac1} \quad (6)$$

### 1.2.2 健全直流暂态过电压

结合式(6)和图2可推得,当闭锁直流1换流母线暂态过电压抬升程度的标幺值为  $U_{L1}^*$  时,健全直流换流母线暂态电压的标幺值  $U_{L2}^*$  可由多馈出交互作用因子表示:

$$U_{L2}^* = M_{21} \frac{U_{LN1}}{U_{LN2}} \Delta U_{L1}^* + 1 \quad (7)$$

式中:  $U_{LN2}$  为健全直流换流母线的额定电压。

为验证式(7)的正确性,在两直流系统模型中进行直流闭锁故障仿真,模型参数如表1所示,仿真波形对比如图3所示。

表1 两直流系统模型参数

Table 1 Parameters of double-circuit DC system model

直流	位置	$U_L/kV$	$U_d/kV$	$S_c/(MV \cdot A)$	$P_d/MW$	$Q_d/Mvar$
1	整流侧	345	505	3 000	1 050	540
	逆变侧	340	495	4 700	1 020	520
2	整流侧	345	505	3 000	1 050	540
	逆变侧	340	495	4 700	1 020	520

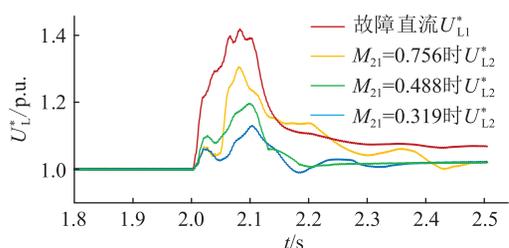


图3 不同多馈交互作用因子下健全直流暂态压升对比

Fig.3 Comparison of sound DC transient voltage rise under different MOVIF

当多直流外送系统其中一条直流发生直流闭

锁故障时,其余健全直流换流母线电压均会有不同程度的抬升,在  $U_{L1}^* = 1.44$  p.u. 时分别达到了 1.30 p.u.、1.23 p.u.、1.09 p.u., 总体趋势与前述分析一致。一方面验证了  $M_{21}$  越小,直流间相互作用越弱,则健全直流的过电压程度越低的结论;另一方面也验证了暂态过电压向一定电气距离内的健全直流传递,使得直流闭锁影响范围进一步扩大的结论。

两直流外送系统直流闭锁下多馈出交互作用因子计算误差对比如表2所示。由于多馈出交互作用因子是通过等效各节点间交互阻抗所得,直流闭锁故障下健全直流母线暂态电压计算结果与仿真中多直流系统交互影响情况有一定误差,但仍能表征直流间耦合导致电压变化的总体趋势,说明其依旧适用于在文中分析各直流整流侧换流母线电压变化的情况,验证了式(7)的正确性。

表2 两直流外送系统直流闭锁下多馈出交互作用因子计算误差对比

Table 2 Comparison of calculation error of MOVIF under DC blocking of double-circuit DC external transmission systems

$M_{21}$	$U_{L2}^*$ 仿真值/p.u.	$U_{L2}^*$ 计算值/p.u.	误差/%
0.756	1.30	1.31	0.80
0.488	1.23	1.20	2.50
0.319	1.09	1.13	3.54

健全直流换流母线无功  $\Delta Q_2$  的变化情况:

$$\Delta Q_2 = (U_{L2}^*)^2 Q_{cN2} + Q_{acN2} + Q_{d2} \quad (8)$$

式中:  $Q_{cN2}$  健全直流稳态下滤波器无功出力;  $Q_{acN2}$  为健全直流对应的交流系统稳态下注入母线无功量。

综合分析式(7)与式(8),可得  $\Delta Q_2$  关于  $U_{L1}^*$  的表达式为:

$$\Delta Q_2 = \left( M_{21} \frac{U_{LN1}}{U_{LN2}} \Delta U_{L1}^* + 1 \right)^2 Q_{cN2} + Q_{acN2} + Q_{d2} \quad (9)$$

根据上述对2条直流间相互影响的分析可知,由于落点相近,受故障直流闭锁导致暂态过电压的影响,健全直流换流母线电压亦会出现抬升现象,其大小可由  $U_{L1}$  和  $U_{L2}$  的比值与  $M_{21}$  的乘积表示。由于交流滤波器无功出力与母线电压的平方成正比,  $U_{L2}$  升高使  $Q_{c2}$  变大,造成健全直流换流母线处盈余无功  $\Delta Q_2$  进一步增加,由此导致健全直流也出现一定程度的暂态过电压。

根据图3可知,上述在两直流系统中的推导在多直流系统中也同样适用。将式(7)与式(9)进一步推广至多直流系统中:

$$U_{Lj}^* = M_{ji} \frac{U_{LNi}}{U_{LNj}} \Delta U_{Li}^* + 1 \quad (10)$$

$$\Delta Q_j = \left( M_{ji} \frac{U_{LNi}}{U_{LNj}} \Delta U_{Li}^* + 1 \right)^2 Q_{eNj} + Q_{acNj} + Q_{dj} \quad (11)$$

由式(10)可以得到在多直流系统中故障直流与其余健全直流换流母线间电压变化的定量关系,而由式(11)可以得知多直流系统中故障直流暂态过电压引起其他健全直流换流母线处无功盈余的原因。

## 2 调相机在暂态过电压抑制中的应用

### 2.1 调相机无功特性

新型大容量调相机凭借其出色的动态无功补偿能力<sup>[11]</sup>在电力系统中得到广泛应用。

在直流送端系统闭锁故障下,整流侧换流母线电压急剧上升,据调相机本身运行方式,其无功出力特性可分为3个部分<sup>[7]</sup>。

(1) 次暂态无功出力特性。直流闭锁故障发生瞬间,为维持机端电压的稳定,调相机进相运行,瞬间从系统吸收大量无功。稳态下调相机无功出力  $Q_{sc}$  可由  $d$  轴、 $q$  轴电压、电流表示:

$$Q_{sc} = \sqrt{S_{sc}^2 - P_{sc}^2} = \sqrt{(u_d^2 - u_q^2)(i_d^2 + i_q^2) - (u_d i_d + u_q i_q)^2} = u_q i_d - u_d i_q \quad (12)$$

式中:  $S_{sc}$  为调相机视在功率;  $P_{sc}$  为调相机有功功率;  $u_d$ 、 $i_d$ 、 $u_q$ 、 $i_q$  分别为  $d$  轴、 $q$  轴的电压、电流。

故障瞬间,调相机发出的无功增量  $\Delta Q_{sc}''$  为:

$$\Delta Q_{sc}'' = Q_{sc} - Q_{sc0} \approx U_{sc0} \Delta i_d - \Delta U_{sc} i_{d0} \quad (13)$$

式中:  $Q_{sc0}$  为稳态下调相机无功出力;  $U_{sc0}$  为稳态机端电压;  $\Delta i_d$ 、 $i_{d0}$  分别为  $d$  轴分量电流变化量和电流初始量;  $\Delta U_{sc}$  为电压变化量。

联立式(12)和式(13)可得调相机次暂态无功增量  $\Delta Q_{sc}''$ :

$$\Delta Q_{sc}'' = \Delta U_{sc} i_{d0} - \frac{U_{sc0} \Delta U_{sc}}{x_d''} \quad (14)$$

式中:  $x_d''$  为  $d$  轴次暂态电抗。由式(14)可知,调相机次暂态无功出力受调相机本身次暂态参数和机端电压变化程度的影响,当换流母线出现暂态过电压导致调相机机端电压升高时,调相机吸收送端系统中盈余无功。

(2) 暂态无功出力特性。故障发生 20 ms 后,调相机自发响应逐渐减弱,在励磁控制作用下,调相机保持进相运行,吸收系统无功,此过程下调相机无功吸收量  $\Delta Q_{sc}'$  可表示为:

$$\Delta Q_{sc}' = \begin{cases} \Delta U_{sc} i_{d0} - \frac{[K_B(K_A + 1) - 1] U_L \Delta U_{sc}}{(x_d' + x_s)(K_B T_{d0}' + 1)} - \frac{U_L \Delta U_{sc}}{x_d' + x_s} \\ K_B = \frac{x_d' + x_s}{x_d + x_s + K_A x_s} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $K_A$  为调相机励磁倍数;  $x_d$  为  $d$  轴稳态电抗;  $x_d'$  为  $d$  轴暂态电抗;  $x_s$  为调相机到换流母线间的线路阻抗;  $T_{d0}'$  为  $d$  轴开路暂态时间常数。

由式(15)可知,调相机暂态过程下吸收无功量取决于调相机暂态参数、机端电压变化量和换流母线暂态过电压大小,  $\Delta Q_{sc}'$  随着  $\Delta U_{sc}$  和  $U_L$  的增大而增加。

(3) 稳态无功出力特性。当故障长时间未清除时,调相机深度进相运行,持续调节系统无功,达到新稳态运行状态。此时  $Q_{sc}$  表达式为:

$$Q_{sc} = \frac{U_{sc}(E_0 - U_{sc})}{x_d} \quad (16)$$

式中:  $U_{sc}$  为机端电压;  $E_0$  为调相机内电势。

故障后的新稳态下,调相机无功出力  $Q_{sc}$  仅与调相机稳态参数和机端电压的变化量相关,其吸收量随着  $U_{sc}$  的增大而增加。

根据上述分析,调相机可在直流闭锁故障瞬间吸收大量盈余无功,并随着励磁控制的完全启动持续稳定输出无功功率,发挥抑制暂态过电压的作用。

### 2.2 直流闭锁故障下调相机容量配置方法

调相机次暂态无功出力仅依靠其自发无功响应能力进行调节,调节能力与  $\Delta i_d$  (受调相机次暂态参数影响) 和  $U_{sc}$  的变化量有关,与调相机容量大小无关且持续时间极短。同时,直流闭锁故障下,调相机无法在安控系统切除滤波器前达到新的稳定运行状态,因此调相机稳态无功调节不参与暂态过电压抑制过程;而暂态过程下,调相机的自发无功响应与励磁调节控制先后启动,其中励磁环节的无功出力受换流母线暂态过电压抬升程度和调相机额定容量的共同影响,因此,调相机合理容量的配置仅须考虑其暂态无功特性。

两直流送端系统下,故障直流、健全直流均投入一定容量的调相机。为满足无功调节需求,考虑  $M_{21} = 1$  的极端情况,结合式(5),以健全直流换流母线电压标么值  $U_{12}^*$  指导调相机的容量选择:

$$U_{12}^* = \frac{S_{c2}}{2Q_{c2}} - \sqrt{\left(\frac{S_{c2}}{2Q_{c2}}\right)^2 - \frac{S_{c2} + Q_{acN2}}{Q_{c2}}} \quad (17)$$

式中:  $S_{c2}$  为健全直流所连接交流系统短路容量。

将所得  $U_{L2}^*$  代入式(15),得到两直流送端系统下调相机应吸收无功功率  $Q_1$  为:

$$Q_1 = \Delta U_{sc} i_{d0} - \frac{[K_B(K_A + 1) - 1] U_{L2}^* U_{L2N} \Delta U_{sc}}{(x'_d + x_s)(K_B T'_{d0} + 1)} - \frac{U_{L2}^* U_{L2N} \Delta U_{sc}}{x'_d + x_s} \quad (18)$$

由此得到的  $Q_1$  即为多直流外送系统下各条直流抑制暂态过电压的调相机最小配置容量。但仅依靠调相机对直流闭锁导致的暂态过电压进行抑制,存在调相机设备成本投入过高的问题,无法在实际工程中应用,因此需要其他手段协调完成暂态过电压的抑制,降低投入成本。

### 2.3 改进的直流控制策略对调相机容量的优化

当多直流外送系统发生直流闭锁故障时,故障直流换流器控制失去其调控能力,虽然健全直流换流器控制仍保持运行,对换流母线处盈余无功有着潜在的调节作用,但限于整流侧各控制环节的运行特性,依靠原整流侧控制系统无法有效解决暂态过电压问题,须要对整流侧定电流控制进行改进,挖掘其无功调节的潜力。

结合式(2)与式(17),推导得到健全直流电流关于换流母线处各部分无功量的表达式,并用此直流电流表达式替代原整流侧定电流控制的电流指令值  $I_{d2}$  [27]:

$$I_{d2} = \frac{Q_{acN2} - \Delta U_{L2}^* S_{c2} + (U_{L2}^*)^2 Q_{cN2}}{\sqrt{(NKU_{L2} 3\sqrt{2}/\pi)^2 - U_{d2}^2}} \quad (19)$$

式中:  $K$  为变压器变比。改进的直流控制策略通过上述附加的定无功功率电流指令值在故障时对整流侧直流电流进行整定,旨在提高健全直流整流器无功功率的消耗量,从而抑制暂态过电压。改进的控制环节见图4。

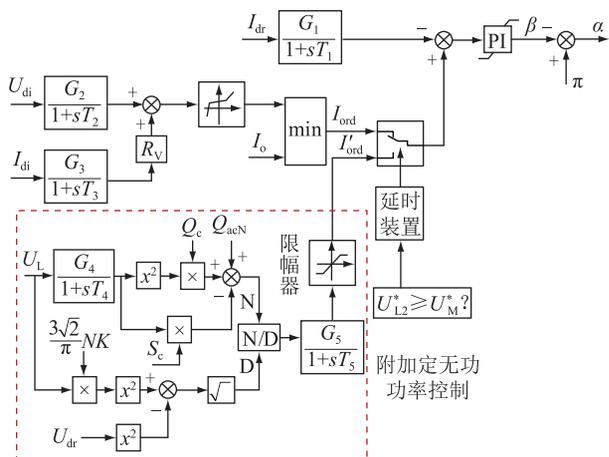


图4 改进的整流侧定电流控制

Fig.4 Improved constant current control of rectifier side

图4中,  $I_{dr}$ 、 $U_{dr}$  分别为整流侧直流电流和电压测量值;  $I_{di}$ 、 $U_{di}$  分别为逆变侧直流电流和电压的测量值;  $\gamma$  为逆变侧关断角测量值;  $\beta$  为超前触发角;  $T_1$ — $T_5$  为不同电气量的测量时间常数;  $G_1$ — $G_5$  为不同电气量增益参数,可将对应的的电气量转换为标么值;  $R_V$  为补偿电阻;  $I_o$ 、 $I_{ord}$  分别为主控制级下达的电流指令值和整流、逆变侧的直流电流指令值;  $I'_{ord}$  为改进后的整流侧电流指令值; PI 为比例积分环节。

为防止直流近区域新能源机组因暂态过电压导致高压脱网,以整流侧母线电压不高于 1.1 p.u. 作为本策略的抑制目标。由于改进的直流控制启动存在一定延迟,须保留一定裕度,提前触发,见图4,设置  $U_M^* = 1.08$  p.u. 作为健全直流改进控制策略的启动判据,当  $U_{L2}^* \geq U_M^*$  时改进的控制策略投入,与各直流调相机协调;同时为了防止故障清除前本策略反复启停造成电压波动,加入 100 ms 的延时装置。

直流闭锁故障时,在此直流控制策略的启动前提下,再投入调相机,能够降低调相机的无功调节压力,由式(17)可知直流策略抑制后的健全直流换流母线暂态电压标么值  $U_{L2}^*$  可表示为:

$$U_{L2}^* = \frac{S_{c2}}{2Q_{c2}} - \sqrt{\left(\frac{S_{c2}}{2Q_{c2}}\right)^2 - \frac{S_{c2}}{Q_{c2}} + \frac{Q'_{d2} - Q_{acN2}}{Q_{c2}}} \quad (20)$$

式中:  $Q'_{d2}$  为直流抑制策略下健全直流整流器消耗无功量。

将此时所得  $U_{L2}^*$  代入式(18)中,据此重新对调相机容量进行配置:

$$Q_1 = \Delta U_{sc} i_{d0} - \frac{[K_B(K_A + 1) - 1] U_{L2}^* U_{L2N} \Delta U_{sc}}{(x'_d + x_s)(K_B T'_{d0} + 1)} - \frac{U_{L2}^* U_{L2N} \Delta U_{sc}}{x'_d + x_s} \quad (21)$$

### 3 多直流间协调的过电压抑制策略

根据式(21)完成调相机容量配置后,须健全直流调相机、改进的直流控制策略与故障直流换流母线处调相机协调作用,对暂态过电压进行抑制。具体多直流间协调的暂态过抑制策略示意图5。

由图5可知,直流闭锁故障发生后,由于  $U_{sc}$  变化,故障直流调相机自发无功响应,对  $U_{L1}^*$  进行抑制;由于直流间相互影响,  $U_{L2}^*$  同样出现抬升,健全直流整流侧调相机自发无功响应;若此时电压仍然抬升,当检测到  $U_{L2}^* \geq U_M^*$  时,健全直流定无功直流控制策略启动,共同对多直流系统中出现的暂态过电压进行抑制。

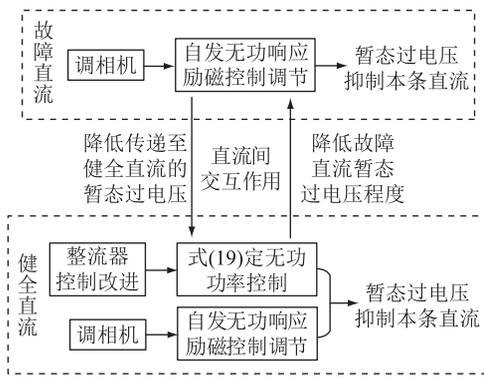


图5 暂态过电压协调抑制策略示意

Fig.5 Schematic diagram of transient overvoltage coordination suppression strategy

此协调策略在多直流送端系统下考虑了多直流间不同无功设备的协调,能够进一步提高对暂态过电压的抑制效果,同时也可以对调相机的投运容量进行配置,极大削减了设备安装的投入成本。

#### 4 仿真验证

在算例无功盈余程度较高的情况下,在 PSCAD 平台中对协调策略在两直流送端系统中的应用进行验证,系统具体参数如表 1 所示。

设置 3 组故障直流换流母线盈余无功分别为  $\Delta Q_1 = 875 \text{ Mvar}$ 、 $\Delta Q_2 = 1\ 000 \text{ Mvar}$ 、 $\Delta Q_3 = 1\ 125 \text{ Mvar}$

的算例,验证协调策略对调相机容量的优化。配置优化结果如表 3 所示。

表 3 调相机容量配置对比

Table 3 Comparison of synchronous condenser capacity configuration Mvar

盈余无功	调相机容量	协调策略下调相机容量	优化容量
$\Delta Q_1$	362	233	129
$\Delta Q_2$	422	271	151
$\Delta Q_3$	507	336	171

由表 3 可知,在协调策略下,调相机容量得到一定程度的优化,相比于原直流系统,能够减少投入容量 33% 以上,且无功盈余程度越高,其优化效果越好。

在算例  $\Delta Q_3 = 1\ 125 \text{ Mvar}$  的条件下设置直流 1 于 2 s 时刻发生直流闭锁故障,系统于 100 ms 后切除部分交流滤波器,优化后的调相机最小容量为 336 Mvar,据此投入容量为 350 Mvar 的调相机,对协调策略的暂态过电压抑制效果进行验证,主要电气量如图 6 所示。

多直流协调策略投入前后  $U_{Li}^*$  的变化趋势如图 6(a) 所示,由 1.44 p.u. 降低至 1.27 p.u.;对比单独投入调相机与投入协调策略,  $U_{Li}^*$  由 1.34 p.u. 降低至 1.27 p.u.,结合对多直流间交互作用关系的分析可

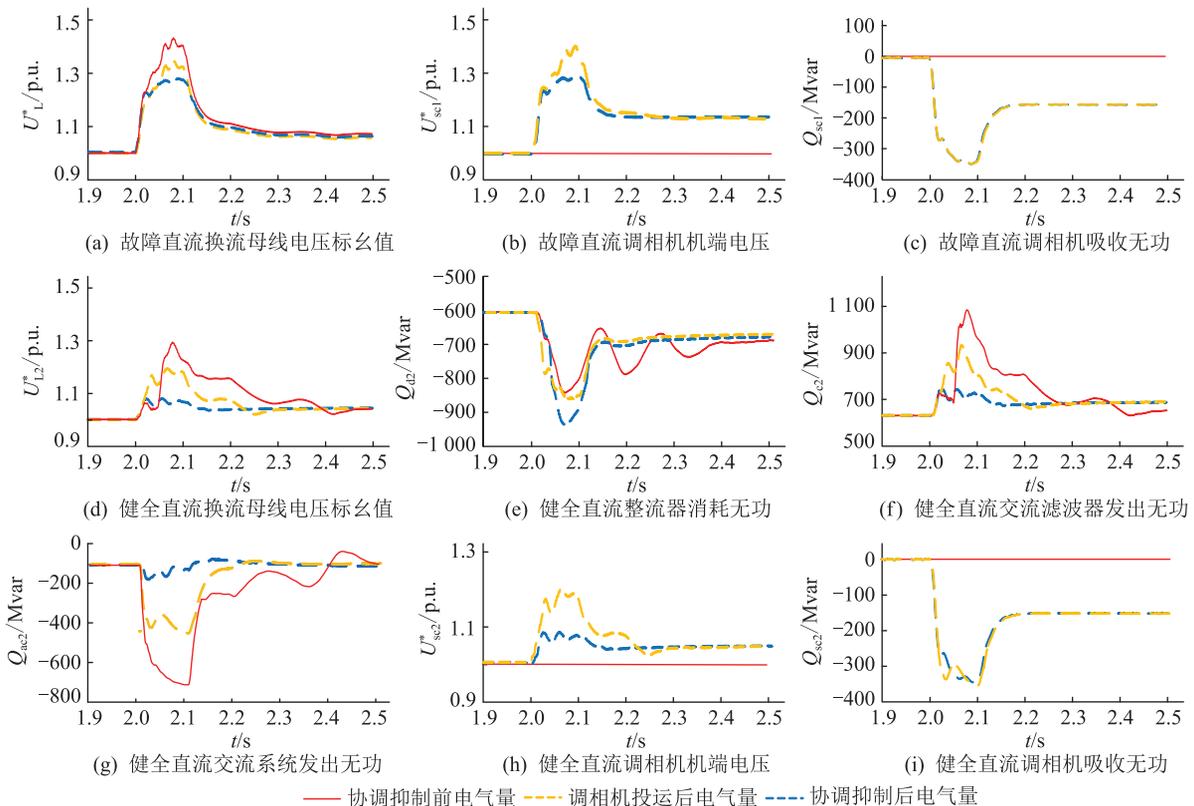


图 6 多直流协调控制下各电气量波形

Fig.6 Waveforms of each electrical quantity under multi DC coordinated control

知,健全直流的电压变化同样会影响故障直流母线电压,进一步验证了文中对于直流间耦合作用的理论分析的正确性;由图 6(d)可知,在协调策略抑制作用下, $U_{L2}^*$ 由 1.3 p.u.降低到 1.07 p.u.;由图 6(e)、(f)、(g)可知, $Q_{d2}$ 消耗水平由 852 Mvar 提高至 966 Mvar, $Q_{e2}$ 由于  $U_{L2}^*$ 被抑制,随之降低到 774 Mvar, $Q_{ac2}$ 相比于单一调相机控制策略下的 459 Mvar,进一步降低至接近稳态的 194 Mvar;由图 6(c)、(i)可知,改进的直流控制策略的投入对调相机无功调节能力的影响不大。综上所述,多直流外送系统直流闭锁故障下,故障直流换流母线处调相机吸收无功 352 Mvar,健全直流控制策略和调相机分别承担了 0.1 p.u.和 0.13 p.u.的暂态电压抑制任务,共降低盈余无功 541 Mvar。

健全直流关断角波形变化如图 7 所示。

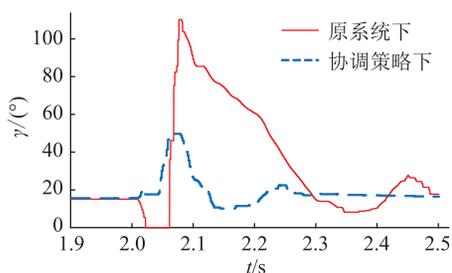


图 7 健全直流关断角波形

Fig.7 Waveforms of sound DC extinction angle

由图 6(d)协调策略投入前波形可知,受直流闭锁导致的暂态过电压影响,健全直流整流侧换流母线电压迅速抬升,结合图 7,健全直流关断角波形在 2.02 s 时降为 0°,可以说明整流侧母线暂态过电压导致健全直流发生了换相失败故障<sup>[28]</sup>;协调策略投入后,关断角最小值增大至 11°,提高了逆变器换相裕度,避免了换相失败故障的发生。可以说明该协调策略在抑制暂态电压的同时减小了健全直流发生换相失败的概率。

将仅投入调相机的过电压抑制效果与多直流协调策略的过电压抑制效果进行对比,如表 4 所示。

表 4 策略效果对比

Table 4 Comparison of strategy effect

参数	无策略	调相机策略	协调策略
$\Delta Q_2$ /Mvar	635	359	94
$\Delta Q_2$ 降低程度/%	—	43.46	85.20
$U_{L1}^*$ /p.u.	1.44	1.34	1.27
$U_{L1}^*$ 降低程度/%	—	10.00	17.00
$U_{L2}^*$ /p.u.	1.30	1.22	1.07
$U_{L2}^*$ 降低程度/%	—	8.00	23.00

由表 4 可知,文中协调抑制策略有效抑制了暂

态过电压在直流间的交互传递,降低了故障直流母线处暂态过电压在附近交流系统的传递范围与冲击程度,保证了健全直流近区域新能源并网点电压稳定在 1.1 p.u.以下,避免了多区域新能源机组大规模连锁脱网的发生,也减少了各条直流调相机的设备投入成本。

## 5 结论

新能源装机容量的增加进一步凸显了弱送端地区的暂态电压问题。为应对较高抬升程度的暂态过电压,保证高比例新能源送端地区稳定运行,文中探索了多直流线路交互作用对故障传播的影响机理,得出如下结论:

(1) 整合了不同直流线路换流母线处调相机与直流控制器的无功调节能力,提出适用于多直流送端系统的协调控制策略,其暂态过电压抑制能力达到 0.25 p.u.以上。

(2) 在提高系统暂态过电压抑制能力、避免新能源机组大规模脱网的前提下,对调相机容量进行了配置优化,使其投入容量减少 33%。

(3) 文中使用 MOVIF 建立两直流送端系统数学模型,与实际系统存在一定误差,对调相机容量配置的精确度有一定影响,后续可针对多直流系统建模方法展开研究。

### 参考文献:

[1] 张振宇,王文倬,王智伟,等. 跨区直流外送模式对新能源消纳的影响分析及应用[J]. 电力系统自动化,2019,43(11): 174-180.  
ZHANG Zhenyu, WANG Wenzhuo, WANG Zhiwei, et al. Impact analysis and application of cross-region HVDC delivery mode in renewable energy accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 174-180.

[2] 周二彪,孙阳,谭捷,等. 面向新能源消纳的电网互联互通规划[J]. 高电压技术,2020,46(8): 2933-2940.  
ZHOU Erbiao, SUN Yang, TAN Jie, et al. Network interconnection channel planning for new energy consumption [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2933-2940.

[3] BARNES M, VAN HERTEM D, TEEUWSEN S P, et al. HVDC systems in smart grids [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(11): 2082-2098.

[4] 沈政委,孙华东,汤涌,等. 传统交流电网与高比例新能源电网连锁故障差异性分析[J]. 电网技术,2021,45(12): 4641-4649.  
SHEN Zhengwei, SUN Huadong, TANG Yong, et al. Analysis of cascading failure differences between traditional AC power grid and high-proportion new energy power grid [J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4641-4649.

[5] 崔晓丹,吴家龙,雷鸣,等. 新能源高占比电力系统的连锁故

- 障诱因及事故链搜索技术探讨[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7):135-143.
- CUI Xiaodan, WU Jialong, LEI Ming, et al. Discussion on inducement and fault chain search technology of cascading failure in power system with high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7):135-143.
- [6] 毛安家, 马静, 蒯圣宇, 等. 高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9):2745-2756.
- MAO Anjia, MA Jing, KUAI Shengyu, et al. Evolution mechanism of transient and voltage stability for power system with high renewable penetration level[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9):2745-2756.
- [7] 李志强, 种芝艺, 黄金军. 快速动态响应同步调相机动态无功特性试验验证[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23):6877-6885, 7101.
- LI Zhiqiang, CHONG Zhiyi, HUANG Jinjun. Test verification of dynamic reactive power characteristics of fast dynamic response synchronous condenser[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23):6877-6885, 7101.
- [8] PU Y, ZHONG Q D, LI X, et al. Influence of synchronous condenser on voltage stability of HVDC[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. Portland, OR, USA. IEEE, 2018: 1-5.
- [9] 王强, 顾乔根, 孙仲民, 等. 计及出力波动的光伏电站无功支撑能力评估[J]. 电力工程技术, 2020, 39(2):29-34.
- WANG Qiang, GU Qiaogen, SUN Zhongmin, et al. The evaluation of reactive power support capacity of photovoltaic power station considering output fluctuation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2):29-34.
- [10] ANDREASSON M, LI N. Dynamical decentralized voltage control of multi-terminal HVDC grids[C]//European Control Conference (ECC). Aalborg, Denmark. IEEE, 2016: 1519-1524.
- [11] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术, 2017, 41(1):22-28.
- WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1):22-28.
- [12] 金一丁, 于钊, 李明节, 等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术, 2018, 42(7):2095-2102.
- JIN Yiding, YU Zhao, LI Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive power compensation devices in application in UHV DC/AC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(7):2095-2102.
- [13] 王少雄, 潘学萍, 颜君凯, 等. 大容量调相机参与下特高压交直流电力系统稳态电压协同控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24):120-127.
- WANG Shaoxiong, PAN Xueping, YAN Junkai, et al. Coordinated control of steady-state voltage for UHVDC/AC power systems with large-scale synchronous condenser integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24):120-127.
- [14] 陈波, 熊华强, 舒展, 等. 含同步调相机的直流换流站稳态无功协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11):156-164.
- CHEN Bo, XIONG Huaqiang, SHU Zhan, et al. Steady-state reactive power coordinated control strategy for DC converter station with synchronous condenser[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11):156-164.
- [15] 巩伟峥, 肖洋, 夏潮, 等. 华东电网调相机 AVC 控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(8):3106-3113.
- GONG Weizheng, XIAO Yang, XIA Chao, et al. Study on AVC control strategy of synchronous condenser in East China grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(8):3106-3113.
- [16] 李锴, 邵德军, 徐友平, 等. 基于新一代调相机的多目标无功电压协调控制系统研究[J]. 电网技术, 2019, 43(8):2961-2967.
- LI Kai, SHAO Dejun, XU Youping, et al. Research on coordinated multi-objective reactive voltage control system based on new type synchronous condenser[J]. Power System Technology, 2019, 43(8):2961-2967.
- [17] 周仕豪, 唐飞, 刘涤尘, 等. 考虑降低多馈入直流换相失败风险的动态无功补偿配置方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(10):3258-3265.
- ZHOU Shihao, TANG Fei, LIU Dichen, et al. Dynamic reactive power compensation configuration method for reducing the risk of commutation failure in multi-infeed DC system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10):3258-3265.
- [18] 索之闻, 刘建琴, 蒋维勇, 等. 大规模新能源直流外送系统调相机配置研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9):124-129.
- SUO Zhiwen, LIU Jianqin, JIANG Weiyong, et al. Research on synchronous condenser configuration of large-scale renewable energy DC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9):124-129.
- [19] 简文, 周自强, 唐飞, 等. 抑制多馈入直流换相失败的同步调相机优化配置方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(1):169-177.
- JIAN Wen, ZHOU Ziqiang, TANG Fei, et al. Optimal configuration of synchronous condensers for suppressing multi-infeed DC commutation failure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1):169-177.
- [20] 李兆伟, 吴雪莲, 曹路, 等. 抑制直流连续换相失败的调相机紧急控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22):91-97.
- LI Zhaowei, WU Xuelian, CAO Lu, et al. Emergency control of synchronous condenser to suppress DC continuous commutation failure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22):91-97.
- [21] 常海军, 霍超, 刘福锁, 等. 提高弱送端电网暂态电压稳定水平的调相机优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6):90-95.
- CHANG Haijun, HUO Chao, LIU Fusuo, et al. Research on op-

- timal allocation method of synchronous condensers for improving transient voltage stability level of weak sending-end power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 90-95.
- [22] 刘增训, 李晓飞, 刘建琴. 含调相机的高压直流送端换流站无功协调控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3857-3865.  
LIU Zengxun, LI Xiaofei, LIU Jianqin. HVDC converter station reactive power coordinated control strategy with synchronous condenser[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3857-3865.
- [23] 朱丽萍, 刘文颖, 邵冲, 等. 基于调相机与 SVC 协调的抑制高压直流送端风机脱网的控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 107-115.  
ZHU Liping, LIU Wenyong, SHAO Chong, et al. Control strategy of suppressing wind turbine tripping based on coordination between synchronous condenser and SVC in sending-end network of HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 107-115.
- [24] 尹纯亚, 李凤婷, 宋新甫, 等. 多馈出直流系统换相失败快速判别方法[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3459-3465.  
YIN Chunya, LI Fengting, SONG Xinfu, et al. A fast detection method of commutation failure in multi-outfeed DC system[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3459-3465.
- [25] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
ZHAO Wanjun. HVDC transmission engineering technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [26] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析: 机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.  
XU Zheng. Dynamic behavior analysis of AC/DC power system [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [27] 张起瑞, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 抑制直流单极闭锁引起大规模风电机组脱网的直流控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3528-3537.  
ZHANG Qirui, LI Fengting, YIN Chunya, et al. DC control strategy for suppressing large-scale WTC tripping caused by mono-polar block fault[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3528-3537.
- [28] 尹纯亚, 李凤婷, 陈伟伟, 等. 单极闭锁引起直流健全极换相失败分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 114-119, 132.  
YIN Chunya, LI Fengting, CHEN Weiwei, et al. Commutation failure risk analysis of sound pole caused by DC monopole blocking[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 114-119, 132.

作者简介:



张起瑞

张起瑞(1993),男,硕士,研究方向为交流系统稳定与控制(E-mail:2206867601@qq.com);

辛超山(1980),男,硕士,工程师,从事电力系统规划与可再生能源并网技术相关工作;

李凤婷(1965),女,博士,教授,研究方向为可再生能源并网技术。

## Multi DC coordinated transient overvoltage suppression strategy for high proportion new energy sending terminal area

ZHANG Qirui<sup>1,2</sup>, XIN Chaoshan<sup>3</sup>, LI Fengting<sup>1</sup>, YIN Chunya<sup>1</sup>, LIU Jiangshan<sup>1</sup>, LI Yuan<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

2. Chengdu Engineering Co., Ltd., Chengdu 611130, China; 3. Economic and Technical

Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

**Abstract:** Aiming at the transient overvoltage problem of high proportion new energy multi direct current (DC) transmission system caused by DC blocking fault, the interaction mechanism between multiple DC lines is analyzed firstly and the multi-outfeed voltage infection factor is introduced, which reveals the fundamental reason of transient overvoltage of other sound DC near area alternating current (AC) systems caused by DC blocking. Secondly, based on the quantitative relationship between reactive power output of the synchronous condenser in different time scales and rectifier side commutation bus voltage and improved rectifier side control of DC system, the capacity of the synchronous condenser installed on the rectifier side bus is configured and the required investment capacity is reduced. Thirdly, based on the above strategy, integrating the reactive power regulation capability of the synchronous condenser and rectifier, a transient overvoltage suppression strategy with coordinated cooperation of multi DC and multi reactive power equipment is proposed. Finally, a double-circuit DC transmission system model is built in PSCAD simulation platform to verify the suppression effect of the proposed coordination strategy on transient overvoltage and the configuration effect of condenser capacity.

**Keywords:** high proportion new energy; synchronous condenser; multi DC transmission system; transient overvoltage; DC control strategy; DC blocking

(编辑 钱悦)