

DOI: 10.7667/PSPC161291

考虑高压直流输电系统无功特性的低压限流参数设置

李瑶佳¹, 汪娟娟¹, 李子林¹, 梁泽勇², 黄梦华¹, 王子民¹

(1. 华南理工大学, 广东 广州 510640; 2. 广东省电力设计研究院, 广东 广州 510663)

摘要: 高压直流控制系统中的低压限流(VDCOL)环节能够限制低电压下的直流电流, 减少故障和恢复期间的无功需求, 有助于系统恢复稳定。VDCOL 控制参数的合理设置, 对系统恢复性能的改善至关重要。从高压直流输电系统无功特性的角度对 VDCOL 参数的设置方法进行了深入研究。首先, 基于 VDCOL 电压-电流特性, 对包含 VDCOL 的直流输电系统运行特性进行了详细分析。在此基础上, 再以 VDCOL 参数和交流母线电压为自变量, 以直流换流站无功交换量为因变量, 对 VDCOL 各参数范围的设置进行了解析。最后, 在 PSCAD/EMTDC 软件中的 GIGRE 直流模型上进行了仿真验证, 仿真结果与解析结果相吻合, 证明了上述解析方法的正确性和有效性。研究成果对提高高压直流输电系统稳态和动态性能均有参考意义。

关键词: 低压限流; 参数范围; 无功交换; 恢复特性

VDCOL parameters setting influenced by reactive power characteristics of HVDC system

LI Yaojia¹, WANG Juanjuan¹, LI Zilin¹, LIANG Zeyong², HUANG Menghua¹, WANG Zimin¹

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Voltage dependent current order limiter (VDCOL) can limit the HVDC current in low voltage and reduce the reactive power requirement, which helps power system quickly restore stability. Thus, the reasonable setting of VDCOL control parameters is vital to improve the recovery characteristics of system. This paper makes a deep research about VDCOL parameters setting method with reactive power characteristics of HVDC system considered. Firstly, based on the voltage-current characteristics of VDCOL, this paper makes a detail analysis about operating characteristics of HVDC system with VDCOL involved. On this basis, it makes an analysis about the range of VDCOL parameters, which considers VDCOL parameters and AC voltage as independent variables, and reactive power exchange as dependent variable. Finally, the simulation, which tests the optimal setting range of VDCOL parameters, is carried out in the CIGRE HVDC model of PSCAD/EMTDC, whose results are in agreement with the analytical results, thus proves the correctness and effectiveness of the analytical method. The research results have reference significance for improving the stability and dynamic capability of HVDC system.

This work is supported by Youth National Natural Science Foundation of China (No. 51207057).

Key words: VDCOL; range of parameters; reactive power exchange; recovery characteristic

0 引言

已有研究表明, 换流站临近区域交流故障引起的直流换相失败及其后的功率恢复过程中, 直流输电系统的动态无功特性中存在高于正常无功需求的动态无功峰值部分, 这部分动态无功需求会显著增加扰动后交流电网的无功负荷, 使得换流站本已不

足的无功供给雪上加霜。直流控制系统^[1]中配置的低压限流功能(Voltage Dependent Current Order Limiter, VDCOL)可以为上述难题的解决提供帮助。当直流或交流电压低于某一设定值时, VDCOL 会减小直流电流指令值来降低直流系统的无功需求, 可以避免直流系统发生连续换相失败, 并达到改善系统恢复性能的目的^[2-6]。

电力系统学术界与工程界针对 VDCOL 进行了大量研究。文献[7-8]分析了直流系统控制方式和

VDCOL 参数对大扰动后交直流混合系统恢复的影响; 文献[9-10]研究了换流站动态无功轨迹, 并分析了 VDCOL 启动值、测量时间常数在不同控制方式下对无功变化轨迹的影响; 文献[11]指出优化多馈入直流恢复过程需要研究 VDCOL 特性和延迟时间常数; 文献[12-13]为改善系统的恢复特性对 VDCOL 的控制特性进行了改进; 文献[14]探讨了故障及恢复期间换流站母线电压及换流站有功与无功消耗之间的关系, 提出一种使得多馈入直流输电系统故障恢复时无功需求最小的 VDCOL 优化策略; 文献[15]提出了一种提高多馈入直流输电系统性能的模糊自适应型 VDCOL。以上文献研究方法是在电磁暂态或机电暂态软件中对 VDCOL 各个参数进行修改, 根据仿真结果给出 VDCOL 参数设置值, 均未将 VDCOL 参数设置与解析分析结合起来进行分析。

本文从高压直流输电系统无功特性的角度对 VDCOL 参数的设置方法进行了深入研究。首先对包含 VDCOL 的直流输电系统运行特性进行了分析; 再以 VDCOL 参数和交流母线电压为自变量, 以尽量减少换流站从交流电网吸收的无功量为解析目标, 对 VDCOL 各参数的最佳设置范围进行了解析分析; CIGRE 高压直流输电标准测试系统上的仿真验证了该 VDCOL 参数范围对于改善换流站恢复特性的有效性和实用性。

1 高压直流输电中的 VDCOL 控制特性

VDCOL 根据电压对直流电流指令进行限制。该电压可为直流电压或交流母线电压, 实际高压直流输电工程主要采用直流电压。低压限流电压-电流特性图如图 1 所示。

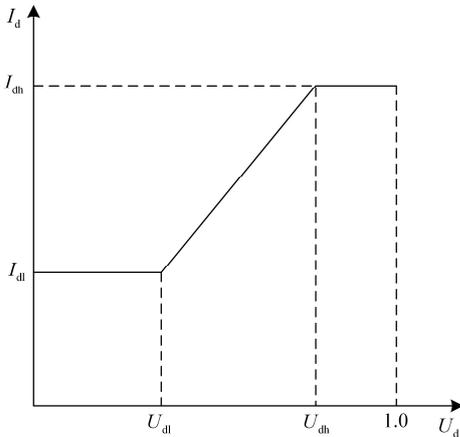


图 1 低压限流电压-电流特性图

Fig. 1 $U_d - I_d$ characteristics of VDCOL

由此推导出 $U_d - I_d$ 间的关系式为

$$I_d = \begin{cases} I_{d1} & U_d \leq U_{d1} \\ \frac{I_{d2} - I_{d1}}{U_{d2} - U_{d1}} U_d + \frac{U_{d2} I_{d1} - U_{d1} I_{d2}}{U_{d2} - U_{d1}} & U_{d1} < U_d < U_{d2} \\ I_{d2} & U_{d2} \leq U_d \leq 1.0 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知, VDCOL 单元输出的电流指令不仅取决于直流电压 U_d , I_{d1} 、 I_{d2} 、 U_{d1} 、 U_{d2} 4 个参数也对于直流系统恢复特性产生重要影响。因此对包含 VDCOL 单元的高压直流输电系统运行特性进行分析时, 有必要研究这 4 个参数对直流系统电气量的影响。

实际高压直流输电工程 VDCOL 控制框图如图 2, 图中 T_{ud} 为时间常数。输入为直流电压 U_d , 经过测量环节与式(1)分段函数后输出 I_{VDCOL} , 与直流电流给定值 I_{des} 比较后取小值作为实际电流指令值 I_{ord} 。

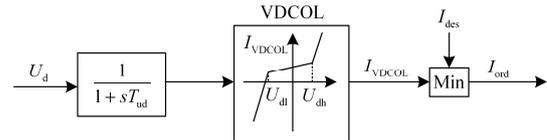


图 2 VDCOL 控制框图

Fig. 2 VDCOL control block diagram

2 考虑 VDCOL 功能的高压直流输电运行特性分析

当 $U_{d1} < U_d < U_{d2}$ 时, 系统一般选择 VDCOL 的电流输出值作为整定值。因此, 对此电压区间内的直流输电运行特性进行分析, 有助于深入理解 VDCOL 对高压直流输电的作用。

直流换流站近区电网等值电路如图 3 表示。

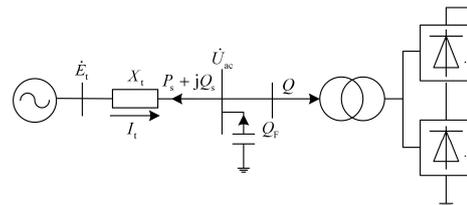


图 3 直流换流站近区电网等值电路图

Fig. 3 Near area power grid equivalent circuit diagram of DC converter station

图中: \dot{E}_t 和 X_t 分别为交流系统等值电势和电抗; I_t 为等值电抗上流过的电流; \dot{U}_{ac} 为换流母线电压; P_s 为交流线路传输的有功功率; Q_s 为换流站与交流系统交换的无功功率; Q 为换流器消耗的无功功率; Q_f 为换流站交流滤波器等提供的无功功率。

本文涉及到的其他符号规定如下: 下标 R 表示整流侧, 下标 I 表示逆变侧, 下标 d 表示直流量; P 、

Q 、 U 、 I 、 R 和 X_c 分别表示有功功率、无功功率、电压、电流、电阻和等效换相电抗； φ 、 α 、 β 、 γ 和 μ 分别表示功率因数角、触发滞后角、触发超前角、熄弧角和换相角； k 为换流变压器的变比； N_p 为极数(双极为 2, 单极为 1)。

直流输电系统整流侧与逆变侧流系统一般不会同时发生故障。当整流侧交流系统故障导致母线电压降低时, 整流侧进入 α_{\min} 控制, 逆变侧为定电流控制; 当逆变侧交流系统故障导致母线电压降低时, 逆变侧进入定 γ_{\min} 控制, 整流侧为定电流控制。本文以整流侧为例进行分析, 分析方法和结论对逆变侧也同样适用。

2.1 故障后含 VDCOL 直流输电系统运行特性

当 $U_{dl} < U_d < U_{dh}$ 时, 整流侧进入 α_{\min} 控制, 逆变侧为定电流控制, 12 脉动整流器的运行特性方程可表示为

$$I_d = \frac{I_{dh} - I_{dl}}{U_{dh} - U_{dl}} U_{dR} + \frac{U_{dh} I_{dl} - U_{dl} I_{dh}}{U_{dh} - U_{dl}} \quad (2)$$

$$U_{dR} = 2 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} k_R U_{acR} \cos \alpha_{\min} - \frac{3}{\pi} X_c I_d \right) \quad (3)$$

将 U_{dR} 代入式(2)并化简得

$$I_d = \frac{AU_{acR} + B}{C} \quad (4)$$

式中: $A = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} (I_{dh} - I_{dl}) k_R \cos \alpha_{\min}$; $B = U_{dh} I_{dl} -$

$U_{dl} I_{dh}$; $C = (U_{dh} - U_{dl}) + (I_{dh} - I_{dl}) \times \frac{6}{\pi} X_c$ 。

整流侧直流电压为

$$U_{dR} = 2 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} k_R U_{acR} \cos \alpha_{\min} - \frac{3}{\pi} X_c \frac{AU_{acR} + B}{C} \right) \quad (5)$$

整流器消耗的无功功率为

$$Q_R = P_{dR} \tan \varphi_R \quad (6)$$

式中: $P_{dR} = N_p U_{dR} I_d$; $\tan \varphi_R = \sqrt{\frac{1}{(\cos \varphi_R)^2} - 1}$ 。

当换流站交流母线上装有性能完好的滤波器时, 可认为谐波电流均被滤波器所吸收, 而流入交流系统的为基波电流。在忽略整流器损耗的情况下, 整流器交流侧的基波有功功率即等于其直流功率^[1]。令整流器交流侧的基波有功功率为 P_1 , 基波电流为 I_1 , 则

$$P_1 = P_{dR} = N_p U_{dR} I_d = \sqrt{3} k_R U_{acR} I_1 \cos \varphi_R \quad (7)$$

由此可得

$$\cos \varphi_R = \frac{N_p U_{dR} I_d}{\sqrt{3} k_R U_{acR} I_1} \quad (8)$$

已知 $I_d = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_1$, 代入式(8)得: $\cos \varphi_R = \frac{N_p U_{dR}}{U_{dOR}}$ 。

对于本文的 12 脉动整流器而言:

$$U_{dOR} = N_p \times 2 \times \frac{3\sqrt{2}}{\pi} k_R U_{acR} \quad (9)$$

故

$$\cos \varphi_R = \frac{N_p U_{dR}}{U_{dOR}} = \cos \alpha_{\min} - \frac{X_c I_d}{\sqrt{2} k_R U_{acR}} \quad (10)$$

Q_R 的具体表达式为

$$Q_R = 2N_p \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} k_R U_{acR} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_c \frac{AU_{acR} + B}{C} \right) \left(\frac{AU_{acR} + B}{C} \right) \sqrt{\frac{1}{\left[\cos \alpha - \frac{X_c (AU_{acR} + B)}{\sqrt{2} k_R U_{acR} C} \right]^2} - 1}} \quad (11)$$

整流器和交流系统交换的无功功率为

$$Q_{SR} = Q_{FR} - Q_R \quad (12)$$

式中, $Q_{FR} = \omega C_R U_{acR}^2$, ω 是角频率, C_R 是无功补偿等效电容。

研究表明, 仅仅根据直流输电系统准稳态方程(12)无法确定换流站无功交换量(Q_{SR})的变化趋势。在实际的高压直流工程中, 额定工况时可认为换流站无功交换量为零, 即 $Q_{FR} - Q_R = 0$, 由此可以求出换流站无功补偿等效电容值 C_R 。因此, Q_{FR} 可根据交流电压实际值进行计算, 交流电压下降后 Q_R 可由换流器准稳态公式(11)估算。

对于任何一个高压直流输电系统, 稳态时都将受不等式 $Q_{SR} = Q_{FR} - Q_R \geq 0$ 的约束^[16-19]。不失一般性, 本文利用 CIGRE 高压直流输电标准测试系统参数对交流母线电压和直流电流变化时整流站的无功特性进行计算和分析。

2.2 故障后含 VDCOL 直流输电系统运行特性

CIGRE 直流输电标准测试系统参数如表 1 所示。

表 1 CIGRE 直流输电标准测试系统参数

Table 1 Parameters of CIGRE HVDC standard test system

N_p	k_R	α_{\min}	X_c	ωC_R
1	0.62	5°	13.58 Ω	0.0053

将表 1 中的参数代入式(12)后得 Q_{SR} 的表达式为

$$Q_{SR} = 0.0053 U_{acR}^2 - \left(1.6682 U_{acR} I_d - 25.9359 I_d^2 \right) \times \sqrt{\frac{1}{\left(0.9962 - \frac{15.4879 I_d}{U_{acR}} \right)^2} - 1}} \quad (13)$$

式中

$$I_d = \frac{1.6682(I_{dh} - I_{dl})U_{acR} + (U_{dh}I_{dl} - U_{dl}I_{dh})}{(U_{dh} - U_{dl}) + 25.9359(I_{dh} - I_{dl})} \quad (14)$$

故 Q_{SR} 的大小同时受 I_{dl} 、 I_{dh} 、 U_{dl} 、 U_{dh} 和 U_{acR} 的影响。其中 I_{dl} 、 U_{dl} 和 I_{dh} 、 U_{dh} 分别是图 1 中 VDCOL 曲线两个拐点的参数。后文分别以 I_{dl} 、 U_{dl} 和 U_{acR} 和 I_{dh} 、 U_{dh} 、 U_{acR} 为自变量探讨两个拐点的参数和交流母线电压对 Q_{SR} 的影响。

2.2.1 以 I_{dl} 、 U_{dl} 和 U_{acR} 为自变量, Q_{SR} 为因变量

若以 I_{dl} 、 U_{dl} 和 U_{acR} 为自变量, 将 I_{dh} 、 U_{dh} 近似等于稳态运行值 1.0 p.u., 代入式(13), 作出 Q_{SR} 以 I_{dl} 、 U_{dl} 和 U_{acR} 为自变量的四维图, 如图 4。其中 I_{dl} 、 U_{dl} 和 U_{acR} 分别为四维图的 3 个维度, Q_{SR} 为第 4 个维度, 其值在四维图中以颜色来显示。

为更好地观察 Q_{SR} 随 I_{dl} 、 U_{dl} 变化的趋势, 此处固定 U_{acR} 为某个值, 对四维图进行平切, 得到一个剖面, 该剖面就是四维图形的切片图, 取出该切片图, 观察不同 U_{acR} 时 Q_{SR} 随着 I_{dl} 、 U_{dl} 变化的趋势, 如图 5 所示。

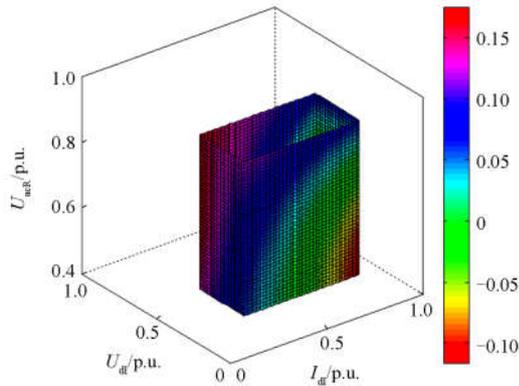
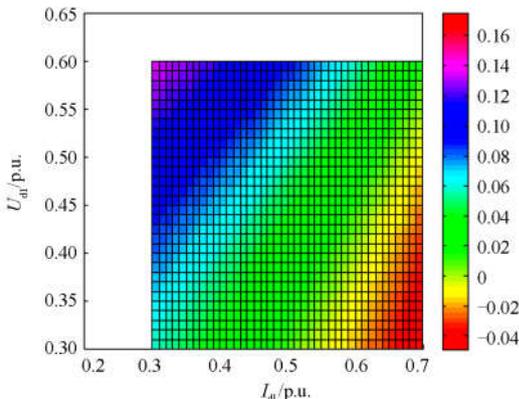
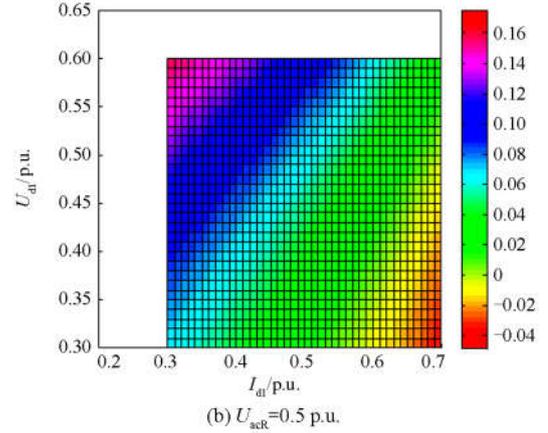


图 4 Q_{SR} 四维图

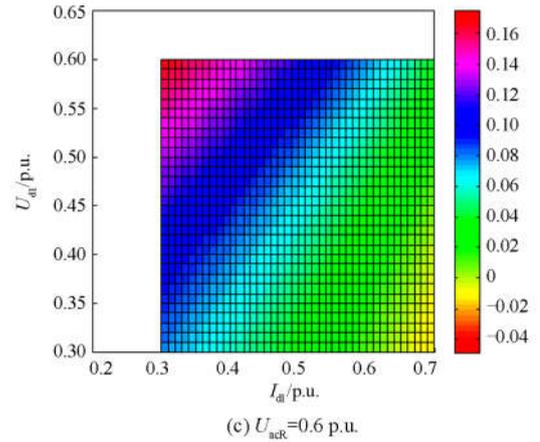
Fig. 4 4-D graph of Q_{SR}



(a) $U_{acR}=0.4$ p.u.



(b) $U_{acR}=0.5$ p.u.



(c) $U_{acR}=0.6$ p.u.

图 5 Q_{SR} 切片图

Fig. 5 Slice graph of Q_{SR}

图 5 中图形右下角为 $Q_{SR} < 0$ 的区域, 即换流站从交流系统吸收无功来满足自身的消耗, 这种运行情况对于系统运行是不利的。 $Q_{SR} \geq 0$ 最有利于故障后系统的恢复, 此时 I_{dl} 、 U_{dl} 对应的取值范围, 称之为“可取域”, 反之称为“不可取域”。在图 5 中找到 $Q_{SR} = 0$ 所对应的界限, 界限左侧 $Q_{SR} \geq 0$, 为可取域, 界限右侧 $Q_{SR} < 0$, 为不可取域。为方便得到可取域, 将其结果呈现如图 6。

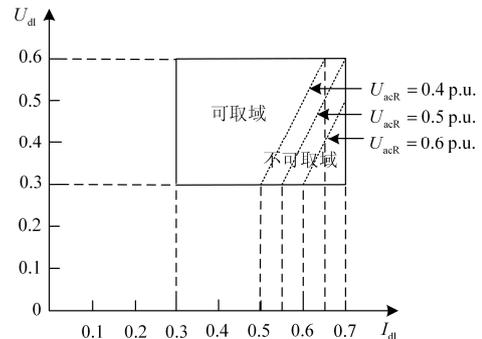


图 6 I_{dl} 、 U_{dl} 可取域

Fig. 6 Range of values for I_{dl} 、 U_{dl}

图 6 中, 方框内虚线为可取域与不可取域的分界线, 当 U_{acR} 减小时, 对应的可取域减小, 不可取域增大。故障后交流母线电压下降的程度不可知, 为保守起见, 可取 $U_{acR}=0.4$ p.u. 时对应的分界线左侧为 I_{dl}, U_{dl} 的可取域, 此可取域一定满足 $U_{acR} > 0.4$ p.u. 时 $Q_{SR} \geq 0$ 。

2.2.2 以 I_{dh}, U_{dh} 和 U_{acR} 为自变量, Q_{SR} 为因变量

直流工程中, VDCOL 的 I_{dl} 和 U_{dl} 参数通常都取 0.3 p.u. [2], 代入式(13), 作出 Q_{SR} 以 I_{dh}, U_{dh} 和 U_{acR} 为自变量的四维图, 如图 7。

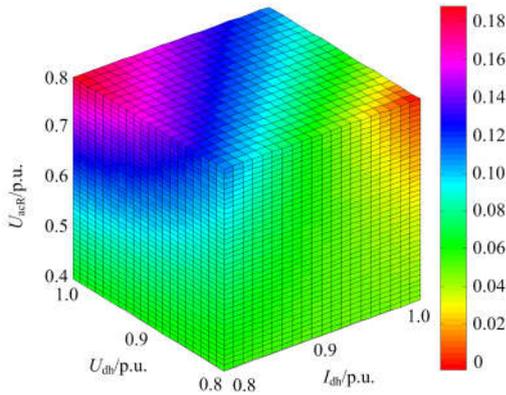


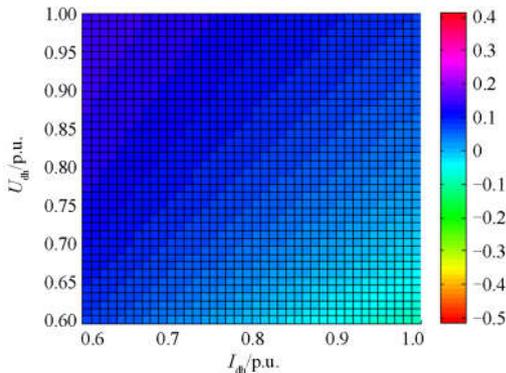
图 7 Q_{SR} 四维图

Fig. 7 4-D graph of Q_{SR}

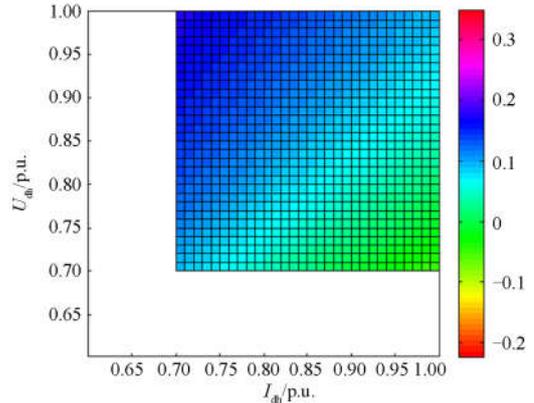
类似于图 4 的处理, 由图 7 得出四维图形的切片图, 如图 8 所示, 对应不同 U_{acR} 时 Q_{SR} 随着 I_{dh}, U_{dh} 变化的趋势。

图 8 中图形右下角为 $Q_{SR} < 0$ 的区域, 为方便得到可取域, 在图 8 中找到 $Q_{SR} < 0$ 所对应的部分, 呈现如图 9。

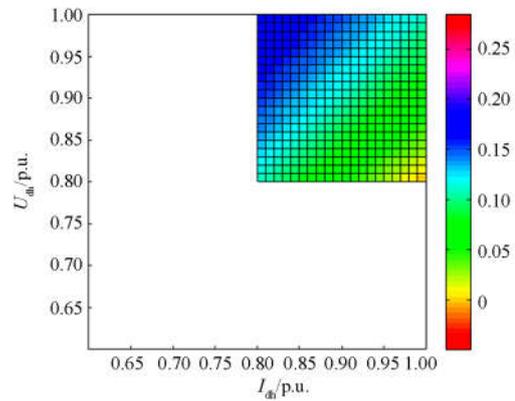
图 9 中, 方框内黑色区域为不同 U_{acR} 所对应的不可取域。观察图形发现, 在 $U_{acR}=0.6$ p.u. 的可取域内包含 $U_{acR}=0.7$ p.u. 的不可取域, 在 $U_{acR}=0.7$ p.u. 的可取域内几乎不包含 $U_{acR}=0.8$ p.u. 的不可取域。



(a) $U_{acR}=0.6$ p.u.



(b) $U_{acR}=0.7$ p.u.



(c) $U_{acR}=0.8$ p.u.

图 8 Q_{SR} 切片图

Fig. 8 Slice graph of Q_{SR}

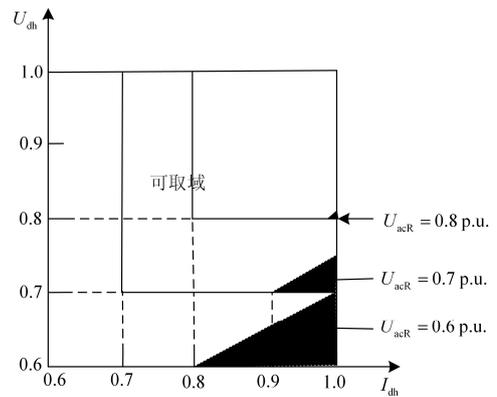


图 9 I_{dh}, U_{dh} 可取域

Fig. 9 Range of values for I_{dh}, U_{dh}

故选取 $U_{acR}=0.7$ p.u. 时对应的分界线左侧为 I_{dh}, U_{dh} 的可取域, 此可取域一定满足不同 U_{acR} 下 $Q_{SR} \geq 0$ 。

2.3 VDCOL 参数最佳设置范围

通过以上分析, 确定了 $I_{dl}, I_{dh}, U_{dl}, U_{dh}$ 的最佳设置范围, 如图 10 中框图区域所示。VDCOL 参数在该区域内取值可以尽量避免交流系统向换流站倒送无功, 从而优化直流输电系统的恢复特性。

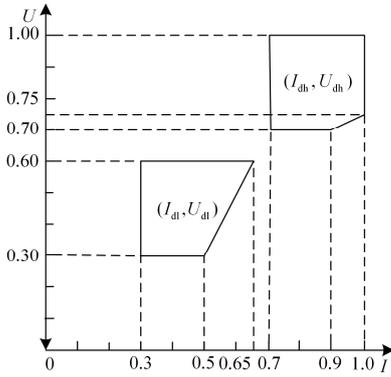


图 10 VDCOL 参数最佳设置范围

Fig. 10 Optimal setting range of VDCOL parameters

3 仿真验证

3.1 CIGRE 高压直流输电标准测试系统

本文仿真所用模型为 CIGRE 高压直流输电标准测试系统^[20-21], 该模型直流线路额定直流电压为 500 kV, 额定电流为 2 kA, 额定送电功率为 1000 MW, 整流侧交流系统电压为 345 kV, 逆变侧交流系统电压为 230 kV。单极运行, 联于频率为 50 Hz、短路比为 2.5 的交流系统。

3.2 I_{d1} 、 U_{d1} 可取域的验证

在 CIGRE 高压直流输电标准测试系统中设置故障使得整流侧交流母线电压下降至额定值的 40%, 令 I_{d1} 从 0.3 p.u. 开始, 以 0.05 p.u. 为间隔, 增大至 0.6 p.u., U_{d1} 从 0.3 p.u. 开始, 以 0.05 p.u. 为间隔, 增大至 0.4 p.u. (此区间内 VDCOL 发挥作用)。测量换流器与交流系统的无功交换量 Q_{SR} , 换流站流向交流系统的无功量为正, 反之为负。

测量 Q_{SR} 的大小, 将仿真结果呈现如图 11 所示。

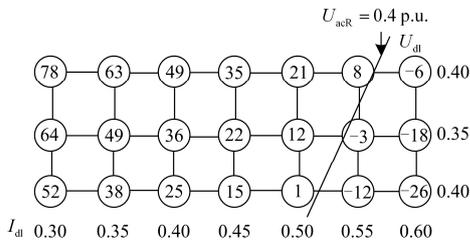
图 11 不同 I_{d1} 、 U_{d1} 下的 Q_{SR} Fig. 11 Q_{SR} under different I_{d1} , U_{d1}

图 11 中, 圆圈内的数值为 Q_{SR} 的大小, 单位为 MVar, 所对应的横、纵轴分别为 U_{d1} 和 I_{d1} , 单位为 p.u.。观察 Q_{SR} 数值大小可知, 其所呈现出的变化规律恰好与图 5 的 Q_{SR} 切片图吻合。在 $Q_{SR} > 0$ 与 $Q_{SR} < 0$ 间画分割线, 该分割线与图 6 中 $U_{acR} = 0.4$ p.u. 时对应

的分界线重合。因此该仿真结果验证了 I_{d1} 、 U_{d1} 可取域的正确性。

3.3 I_{dh} 、 U_{dh} 可取域的验证

在测试系统中设置故障使得整流侧交流母线电压下降至额定值的 70%, 令 I_{dh} 从 0.7 p.u. 开始, 以 0.05 p.u. 为间隔, 增大至 1.0 p.u., U_{dh} 从 0.7 p.u. 开始, 以 0.05 p.u. 为间隔, 增大至 0.8 p.u. (此区间内 VDCOL 发挥作用)。测量换流器与交流系统的无功交换量 Q_{SR} , 流向交流系统的无功量为正, 反之为负。

测量 Q_{SR} 的大小, 将仿真结果呈现如图 12 所示。

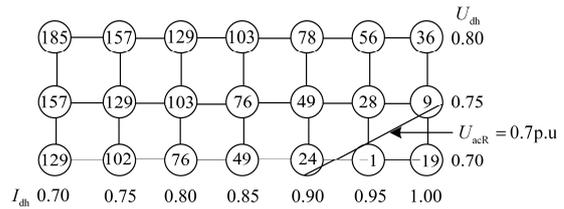
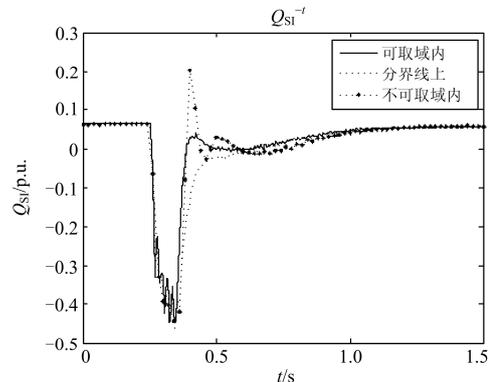
图 12 不同 I_{dh} 、 U_{dh} 下的 Q_{SR} Fig. 12 Q_{SR} under different I_{dh} , U_{dh}

图 12 中, 圆圈内 Q_{SR} 的单位为 MVar, 所对应的横、纵轴 U_{dh} 、 I_{dh} 的单位为 p.u.。类似于图 11 的作法, 对图 12 进行处理。 Q_{SR} 数值大小所呈现出的变化规律恰好与图 8 的 Q_{SR} 切片图吻合。在 $Q_{SR} > 0$ 与 $Q_{SR} < 0$ 间画分割线, 该分割线与图 9 中 $U_{acR} = 0.7$ p.u. 时对应的分界线重合。因此该仿真结果验证了 I_{dh} 、 U_{dh} 可取域的正确性。

3.4 可取域对故障后系统恢复的实用性验证

在 CIGRE 高压直流输电标准测试系统中设置故障使得系统在稳定运行后 0.25 s 发生三相短路故障, 故障持续时间为 0.1 s, 故障导致系统换相失败。分别设置 VDCOL 参数在可取域内、分界线上、不可取域内, 观察逆变侧直流功率的变化情况, 如图 13 所示。



(a) 逆变站与交流系统净无功交换

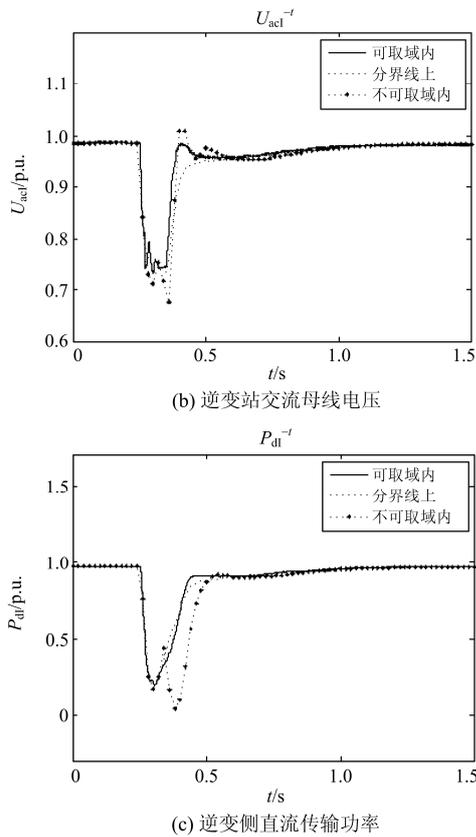


图 13 VDCOL 参数对系统恢复特性的影响
Fig. 13 Influence of VDCOL parameters on the recovery characteristic

由图 13 可知, VDCOL 参数在可取域内取值时系统恢复性能最佳(如:故障期间与交流系统发生的无功交换量最少,交流母线电压及直流功率均最快恢复且过程平稳),在分界线上取值时恢复性能次之,在不可取域内取值时恢复性能最差,这进一步验证了本文所提 VDCOL 参数可取域的正确性和鲁棒性。

4 结论

本文运用解析方法,以尽量减少交流故障时换流站向交流电网倒送无功功率为目标,得出 VDCOL 参数的最佳设置区域。通过调整 VDCOL 参数在指定区域,使换流站作为动态无功源向交流系统注入容性无功,有利于维持电压稳定和故障后电压的快速恢复,缓解故障冲击威胁,具备在线实时应用前景。

虽然通过设置 VDCOL 参数可以控制直流电流,但该直流电流的控制是以减少直流传输有功为代价,待电压恢复至较高水平后,应及时恢复传输有功,且盈余的无功功率可能带来弱交流电网过电

压的危险,应注意防范。

参考文献

- [1] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp. DOI 10.1186/s 41601-016-0012-2
- [2] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版, 2010.
- [3] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 浙江大学直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
- [5] 夏成军, 杨仲超, 周保荣, 等. 考虑负荷模型的多回直流同时换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 76-81. XIA Chengjun, YANG Zhongchao, ZHOU Baorong, et al. Analysis of commutation failure in multi-infeed HVDC system under different load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 76-81.
- [6] 彭忠, 李少华, 李泰, 等. 高压直流输电系统抑制换相失败的最小关断面积控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 75-80. PENG Zhong, LI Shaohua, LI Tai, et al. A minimum extinction area control strategy to suppress commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 75-80.
- [7] 张建设, 张尧, 张志朝, 等. 直流系统控制方式对大扰动后交直流混合系统电压和功率恢复的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 20-24. ZHANG Jianshe, ZHANG Yao, ZHANG Zhichao, et al. Influence of DC system control modes on voltage and power recovery after large disturbance in hybrid AC/DC systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 20-24.
- [8] 付颖, 罗隆福, 童泽, 等. 直流输电控制器低压限流环节的研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1110-1114. FU Ying, LUO Longfu, TONG Ze, et al. Study on voltage dependent current order limiter of HVDC transmission system's controller[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6): 1110-1114.
- [9] 郑超, 汤涌, 马世英, 等. 直流整流站动态无功特性解析及优化措施[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4886-4896. ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shiyong, et al. Study on the dynamic reactive power characteristic of HVDC rectifier stations and optimization measures[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4886-4896.

- [10] 王贺楠, 郑超, 任杰, 等. 直流逆变站动态无功轨迹及优化措施[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1254-1260.
WANG Henan, ZHENG Chao, REN Jie, et al. Dynamic reactive power trajectory of HVDC inverter station and its optimization measures[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1254-1260.
- [11] 张彪, 王渝红, 李兴源. 改善直流系统恢复特性的VDCOL控制策略研究综述[J]. 华东电力, 2014, 42(5): 826-832.
ZHANG Biao, WANG Yuhong, LI Xingyuan. Overview on VDCOL control strategy for improving DC system recovery characteristics[J]. East China Electric Power, 2014, 42(5): 826-832.
- [12] 何萍. 基于低压限流的直流电流控制的直流输电研究[J]. 煤炭技术, 2013, 32(3): 72-73.
HE Ping. Research on direct current transmission based on low-voltage current-limiting direct control[J]. Coal Technology, 2013, 32(3): 72-73.
- [13] 汪娟娟, 张尧, 林凌雪. 交流故障后MIDC系统的协调恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 79-83.
WANG Juanjuan, ZHANG Yao, LIN Lingxue. Coordinated recovery strategy of MIDC system after AC faults[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 79-83.
- [14] ZHOU Baorong, DU Zhaobin, LUO Donghao, et al. VDCOL parameters design of multi-infeed HVDC based on a simplified model of DC P-Q coupling recovery[C] // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Hong Kong, December 7-10, 2014: 1-5.
- [15] YANG Dachun, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Study of an adaptive fuzzy VDCOL control strategy for coordinated recovery of multi-feed-in HVDC system[C] // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), March 28-31, 2010: 1-4.
- [16] 程改红, 康义, 钟胜, 等. 国内已投运直流换流站的无功配置及运行现状[J]. 南方电网技术, 2015, 9(8): 64-70.
CHENG Gaihong, KANG Yi, ZHONG Sheng, et al. Reactive power configuration at existing DC converter stations and operating status in China[J]. Southern Power Grid Technology, 2015, 9(8): 64-70.
- [17] 高压直流换流站设计技术规定: DL/T 5223—2005[S].
Technical rule for designing HVDC converter station: DL/T 5223—2005[S].
- [18] 高压直流换流站无功补偿与配置技术导则: Q/GDW 146-2006[S].
Technical guide for reactive power compensation and allocation of HVDC converter stations: Q/GDW 146—2006[S].
- [19] 林捷, 王云柳, 黄辉, 等. 自动电压控制下的地区电网电压无功运行状态评估指标体系[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 123-129.
LIN Jie, WANG Yunliu, HUANG Hui, et al. An index system for voltage and reactive power operation status evaluation in regional power grid under automatic voltage control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 123-129.
- [20] SZECHTMAN M, WESS T, THIO C V. First benchmark model for HVDC control studies[J]. Electra, 1991, 135: 54-73.
- [21] SZECHTMAN M, WESS T, THIO C V. A benchmark model for HVDC system studies[C] // International Conference on AC and DC Power Transmission. London, 1991: 374-378.

收稿日期: 2016-08-12; 修回日期: 2016-10-19

作者简介:

李瑶佳(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制等; E-mail: 908902181@qq.com

汪娟娟(1974—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与控制、交直流混合输电系统等; E-mail: 541091380@qq.com

李子林(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电、电力电子装置、电力系统稳定与控制等。E-mail: lizilin20071229@126.com

(编辑 周金梅)