

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200214

直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法

李欣悦¹, 李凤婷¹, 尹纯亚¹, 白海滨²

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网新疆电力有限公司昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 针对特高压直流输电系统闭锁引起的暂态过电压严重威胁系统安全运行的问题, 推导建立了直流双极闭锁后换流母线暂态电压的解析表达式。在此基础上, 建立了送端交流系统电力网络等值模型, 推导出了直流双极闭锁后送端交流系统内任一关键节点暂态过电压的计算方法。为判断送端新能源节点面临高压穿越问题的严重程度、提前发现系统薄弱环节, 提出用阻抗比来表征节点的暂态过电压程度。在直流双极闭锁后节点暂态电压压升值随着阻抗比增大而呈现线性升高的趋势。基于 DIgSILENT 仿真平台, 搭建了 CIGRE 直流输电标准测试系统和吉泉 ±1100 kV 高压直流送端系统, 验证了送端系统暂态过电压计算方法及结论的正确性。

关键词: 特高压直流; 直流闭锁; 送端交流系统; 暂态过电压

Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking

LI Xinyue¹, LI Fengting¹, YIN Chunya¹, BAI Haibin²

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Changji Power Supply Company, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Changji 831100, China)

Abstract: A U-HVDC system's transient overvoltage caused by DC blocking will threaten the safe operation of a system. Thus an analytic formula calculating transient voltage of the commutation bus after DC bipolar blocking is derived. Based on this, the equivalent model of the power network of the sending-end system is established, and the transient overvoltage calculation method of any key node of the AC system is derived. In order to judge the severity of the high voltage crossing problem faced by the new energy node and find the weak link of the system in advance, the impedance ratio is proposed to represent the transient overvoltage degree of the node. The voltage rise value of the node transient voltage increases linearly with the increase of the impedance ratio after DC bipolar blocking. Finally, the CIGRE HVDC standard test system and the Jiquan ±1100 kV DC transmission sending system are set up in the DIgSILENT simulation platform to verify the correctness of the transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877185) and Xinjiang Uygur Autonomous Region Natural Science Foundation of China (No. 2016D01C036).

Key words: U-HVDC; DC blocking; sending-end AC system; transient overvoltage

0 引言

特高压直流输电系统与传统的交流输电系统相比具有输送距离远、输送容量大且经济性较好等优势^[1-7]。实际投运的特高压直流输电系统换流站在运行过程中需要消耗大量的无功功率, 直流系统一旦突然发生闭锁故障, 由于极控系统延时 200 ms 动作切除换流站无功补偿装置, 换流站内盈余的无功功

率将倒送至交流系统而引起大幅的暂态过电压, 由此造成的大规模风机连锁脱网将对系统的安全运行造成严重威胁^[8-13]。

目前, 已有较多文献针对直流闭锁引起的暂态过电压问题展开了研究。文献[14-16]分析了直流系统故障引发送端近区交流系统暂态过电压问题的原理以及对风电机组的影响, 并提出了应对策略; 文献[17]基于短路比, 推导出了一一种直流闭锁故障后换流母线暂态过电压的定量计算方法, 但该计算方法在应用于短路比较低的系统时可能出现没有实解的情况, 不完全适用于所有系统; 文献[18]针对文

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877185); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助(2016D01C036)

献[17]在低短路比情况下无实解的问题, 基于直流闭锁后的谐振电路, 推导出了适用范围更广的换流母线暂态过电压计算方法。上述研究一方面针对直流闭锁故障引起的送端交流系统暂态过电压的原理进行了分析, 另一方面提出了直流闭锁后换流母线处暂态过电压的计算方法, 均未涉及对于送端交流系统内各关键节点的暂态过电压的定量计算研究。

文献[19]提出了一种基于卷积神经网络的直流送端系统暂态过电压估算方法, 但该方法需要大量的输入数据且估算精度受到学习速率、卷积核尺寸、批处理数量等参数的影响, 需通过多次估算来确定每个参数的最优值, 估算过程较为复杂, 在实际系统应用中具有一定的局限性。

直流双极闭锁是对特高压直流输电系统影响最为严重的故障之一^[20-22], 为实现精确计算直流双极闭锁后送端系统暂态过电压、发现系统薄弱环节以维护系统安全稳定运行, 本文通过建立电力网络等值模型, 推导出了送端交流系统中任一关键节点的暂态过电压定量计算式, 并定义了一个用来衡量送端交流系统内各节点暂态过电压程度的指标。最后基于 DIgSILENT 仿真软件搭建 CIGRE 直流输电标准测试系统和吉泉±1 100 kV 直流送端系统进行仿真验证。

1 直流闭锁引起的暂态过电压分析

送端直流输电系统可等值为图 1 所示的等值电路^[23-24]。

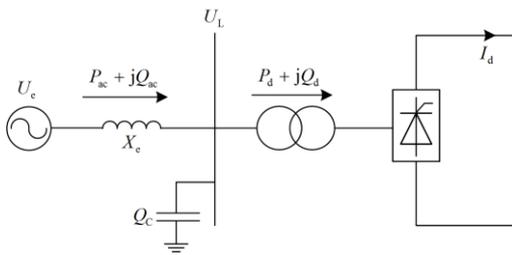


图 1 交直流系统等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of AC/DC hybrid system

图 1 中, P_{ac} 和 Q_{ac} 分别为送端交流系统与直流系统交换的有功功率和无功功率, P_d 和 Q_d 分别为直流系统输送的有功功率和换流站内消耗的无功功率, Q_C 为无功补偿装置为系统提供的无功功率, U_c 和 X_c 分别为交流系统的等值电势和等值电抗, U_L 为换流母线电压。图 1 中有:

$$P_{ac} = P_d \quad (1)$$

$$Q_{ac} + Q_C = Q_d \quad (2)$$

稳态运行时换流站消耗大量的无功功率, 换流站消耗的无功功率与直流输送的有功功率关系如下:

$$Q_d = P_d \tan \varphi_R \quad (3)$$

式中, φ_R 为换流站功率因数角。

当直流发生闭锁故障后, 换流站消耗的无功功率随着直流输送有功功率的降低而迅速减小, 由于无功补偿装置延时 200 ms 动作, 大量无功涌入交流系统, 导致换流母线暂态过电压。

换流母线的压升标么值可以近似为式(4)。

$$\Delta U_L^* = \frac{\Delta Q}{S_C} \quad (4)$$

式中: ΔQ 为无功功率变化量; S_C 为交流系统的短路容量^[25]。

当前的研究大多仅是基于式(4)来对直流闭锁后换流母线电压来进行推导计算的, 缺乏针对送端交流系统中各关键节点暂态过电压的计算方法。

现有关于换流母线暂态过电压的计算方法一方面认为 ΔQ 为换流站无功补偿容量, 而忽略了交直流系统间交换的无功功率; 另一方面则直接设定 ΔQ 为 0.5 倍的直流额定输送功率。

图 2 为直流双极闭锁后, S_C 同为 4 000 MVA 的系统在换流站处无功补偿装置容量分别为 40%、50%、60% 直流输送有功功率的换流母线电压仿真结果。分析图 2 可知, 在相同短路容量、不同换流站无功配置的系统, 直流发生闭锁故障后盈余的无功功率不同, 必然会导致不同程度的暂态过电压。因此现有方法不能精确计算直流闭锁后换流母线暂态过电压程度。

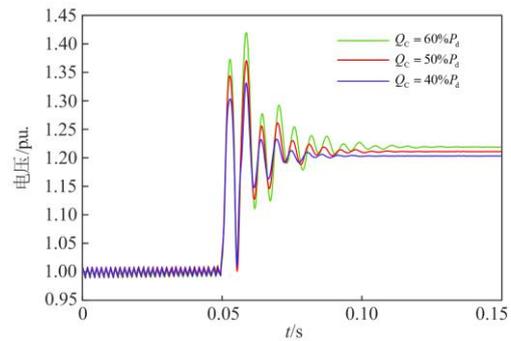


图 2 不同无功配置的换流母线电压

Fig. 2 Commutation bus voltage with different reactive power configurations

寻求一种更为精确的计算直流双极闭锁后送端交流系统中各关键节点暂态过电压的方法, 提出一个用来表征系统各关键节点暂态过电压程度的指标对交直流系统的稳定运行具有重要意义。

2 直流双极闭锁暂态过电压计算方法

2.1 换流母线暂态过电压计算方法

当直流发生闭锁故障后, 直流输送的有功功率将瞬间降为 0, 由式(3)可知换流站内消耗的无功功率也随之降为 0, 换流站内无功补偿装置即交流滤波器和电容器组发出的无功功率与母线电压的平方成正比。因此直流双极闭锁后, 考虑交直流系统间无功交换功率 Q_{ac} , 无功盈余 ΔQ 为

$$\Delta Q = (\Delta U_L^* + 1)^2 Q_C + Q_{ac} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)可得

$$\Delta U_L^* = \frac{(1 + \Delta U_L^*)^2 Q_C + Q_{ac}}{S_C} \quad (6)$$

根据式(6)解得直流闭锁后换流母线的压升标幺值为

$$\Delta U_L^* = -\sqrt{\left(\frac{S_C}{2Q_C}\right)^2 - \frac{S_C}{Q_C} - \frac{Q_{ac}}{Q_C}} + \frac{S_C}{2Q_C} - 1 \quad (7)$$

则换流母线电压表达式为

$$U_L = \left[-\sqrt{\left(\frac{S_C}{2Q_C}\right)^2 - \frac{S_C}{Q_C} - \frac{Q_{ac}}{Q_C}} + \frac{S_C}{2Q_C}\right] U_{LN} \quad (8)$$

根据式(8)可以看出交流系统短路容量、交流系统与直流系统间的无功交换和换流站内无功补偿装置容量是影响直流双极闭锁后换流母线暂态过电压的主要因素。

2.2 送端交流系统任一节点暂态过电压计算方法

直流双极闭锁后等效为在换流母线 L 处投入对称三相电容器 $Z_C = 1/j\omega C$, 如图 3 所示。

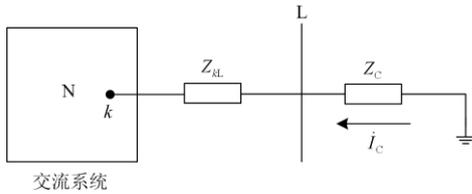


图 3 直流双极闭锁后交流系统等值模型

Fig. 3 AC system equivalent model after DC blocking

图 3 中, k 为送端交流系统中任一节点, Z_{kL} 为任一节点到换流母线处的等值阻抗。

将图 1 中交流系统等值为图 3 中的网络 N, 设该网络节点数为 n , \mathbf{I} 为节点注入电流的列向量, \mathbf{Z} 为该网络的节点阻抗矩阵, 则 n 阶节点电压矩阵 \mathbf{U} 为^[26]

$$\mathbf{U} = \mathbf{Z}\mathbf{I} \quad (9)$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1i} & \cdots & Z_{1j} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{i1} & \cdots & Z_{ii} & \cdots & Z_{ij} & \cdots & Z_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{j1} & \cdots & Z_{ji} & \cdots & Z_{jj} & \cdots & Z_{jn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{ni} & \cdots & Z_{nj} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix}, \mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_i \\ \vdots \\ i_j \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据式(9)和式(10)可推导出网络 \mathbf{Z} 中任一节点 k 在正常运行情况下的节点电压为

$$\dot{U}_k = \sum_{m=1}^n Z_{km} i_m \quad (11)$$

式中: i_m 为节点 m 的注入电流; Z_{km} 为节点 k 与节点 m 之间的互阻抗。

当投入对称三相电容器后相当于在 L 处增加了一个注入电流 i_C , 将网络的原有部分同故障线路分开, 根据叠加定理, 节点 k 的电压可表示为

$$\dot{U}_k = \sum_{m=1}^n Z_{km} i_m + Z_{kL} i_C \quad (12)$$

根据分析可知式(12)中第一项为电容器投入前正常运行状态下节点 k 的电压; 第二项为仅由电流 i_C 在节点 k 上产生的电压。

当投入对称三相电容器后, 换流母线 L 处有

$$\dot{U}_L = \sum_{m=1}^n Z_{Lm} i_m + Z_{LL} i_C \quad (13)$$

同样, 式(13)中第一项为正常运行状态下换流母线处电压; 第二项为仅由 i_C 在换流母线处产生的电压。

根据图 3 可知换流母线处电压亦可表示为

$$\dot{U}_L = Z_C i_C \quad (14)$$

由式(13)和式(14)解得:

$$i_C = \sum_{m=1}^n \frac{Z_{Lm}}{Z_C - Z_{LL}} i_m \quad (15)$$

则网络中任一节点 k 的电压可表示为

$$\dot{U}_k = \sum_{m=1}^n \left(Z_{km} + \frac{Z_{kL} Z_{Lm}}{Z_C - Z_{LL}} \right) i_m \quad (16)$$

则网络中任一节点 k 的压升值可表示为

$$\Delta \dot{U}_k = \sum_{m=1}^n \frac{Z_{kL} Z_{Lm}}{Z_C - Z_{LL}} i_m = \frac{Z_{kL}}{Z_C - Z_{LL}} \dot{U}_{L0} \quad (17)$$

\dot{U}_{L0} 为未投入对称三相电容器时换流母线处电压, 则有

$$\dot{U}_{L0} = \dot{U}_L - \Delta \dot{U}_L \quad (18)$$

根据式(13)可知换流母线处电压变化量为

$$\Delta \dot{U}_L = Z_{LL} \dot{I}_C \quad (19)$$

将式(14)和式(19)代入式(18)有

$$\dot{U}_{L0} = (Z_C - Z_{LL}) \dot{I}_C \quad (20)$$

将式(20)代入式(17)可得节点 k 电压压升值为

$$\Delta \dot{U}_k = Z_{kL} \dot{I}_C \quad (21)$$

综合式(19)和式(21)可推得网络 Z 中任一节点 k 的压升值与换流母线处压升值关系为

$$\frac{\Delta U_k}{\Delta U_L} = \left| \frac{Z_{kL}}{Z_{LL}} \right| \quad (22)$$

根据式(8)可得出送端交流系统中任一节点压升标么值为

$$\Delta U_k^* = \left| \frac{Z_{kL}}{Z_{LL}} \right| \left(\frac{S_C}{2Q_C} - \sqrt{\left(\frac{S_C}{2Q_C} \right)^2 - \frac{S_C}{Q_C} - \frac{Q_{ac}}{Q_C}} - 1 \right) \quad (23)$$

定义 $\left| \frac{Z_{kL}}{Z_{LL}} \right|$ 为阻抗比 Z_k , 则有

$$\Delta U_k^* = Z_k \Delta U_L^* \quad (24)$$

直流双极闭锁后送端交流系统内任一节点压升标么值与阻抗比和换流母线压升标么值(ΔU_L^*)的关系如图4所示。

由图4可知, 当 ΔU_L^* 一定时, 节点压升标么值与阻抗比呈正相关关系, 随着阻抗比的升高, 节点压升值随之线性升高。因此可以用本文所定义的阻抗比 Z_k 来表征直流闭锁后送端系统中节点的暂态过电压程度。通过上述分析可知, 直流发生双极闭锁故障后, 根据换流母线的自阻抗和节点的互阻抗可计算出各节点的 Z_k 值, 同时根据阻抗比和换流母线处压

升值可快速计算出网络中任一关键节点的压升值。

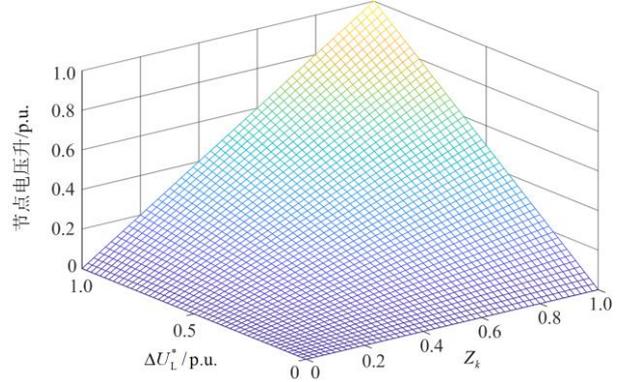


图4 阻抗比与换流母线压升对送端交流系统任一节点电压的影响

Fig. 4 Influence of impedance ratio and AC bus voltage rise on the voltage of any node in the sending communication system

直流双极闭锁后, 新能源并网点的阻抗比越高, 其暂态过电压越高, 则新能源机组面临的高压穿越问题风险越大, 根据本文计算方法可精确计算出该点暂态过电压进而判断是否会导致新能源机组高压脱网, 对于制定合理的稳控方案预防新能源机组高压脱网以及维护系统安全稳定运行具有指导意义。

3 算例验证

3.1 节点暂态过电压计算方法验证

在国际大电网会议(CIGRE)直流输电标准测试系统模型的送端增加一节点 k , 通过改变 k 点所对应的线路阻抗 Z_{kL} 来对暂态过电压计算方法进行仿真验证。系统结构和参数如图5和表1所示。

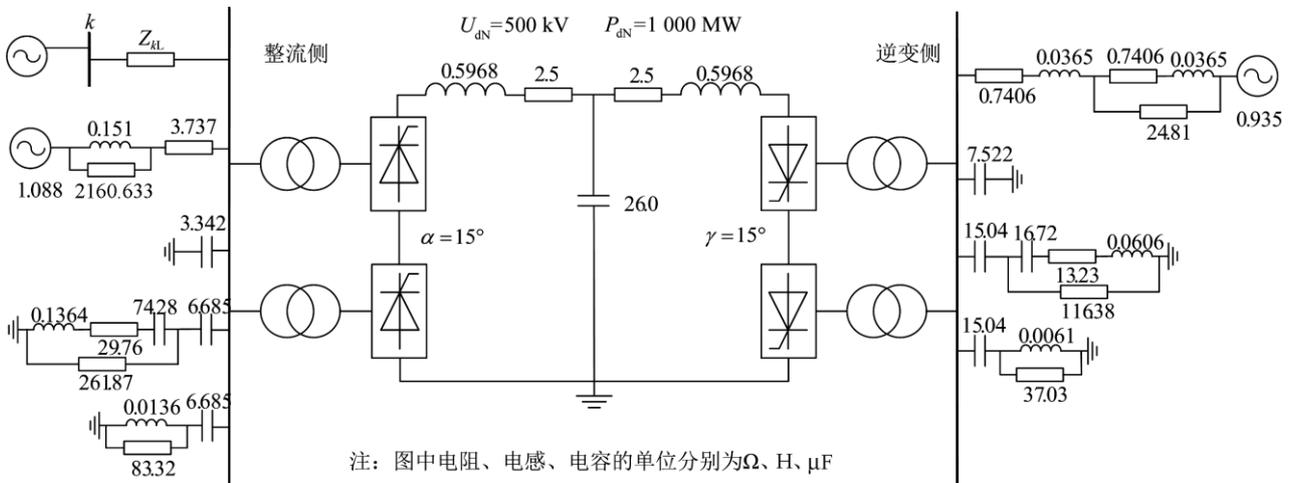


图5 直流输电标准测试系统

Fig. 5 DC transmission standard test system

表 1 直流输电标准测试系统参数

参数	U_{ac}/kV	U_d/kV	P_d/MW	$Q_d/Mvar$	α/γ
整流侧	345	505	1 010	540	15
逆变侧	230	495	990	527	15

表 2 为直流标准测试系统短路容量为 5 000 MVA 时, 直流完全闭锁后换流母线处($Z_{kL}=0$)以及 Z_{kL} 分别为 100 Ω 、200 Ω 、300 Ω 、400 Ω 时节点 k 的压升结果。

表 2 不同阻抗比下的母线暂态压升结果

Z_{kL}/Ω	阻抗比 Z_k	计算值/p.u.	仿真值/p.u.	误差/%
0	1	0.190 1	0.188 6	0.795
100	0.738 3	0.146 7	0.150 1	2.27
200	0.585 1	0.117 1	0.123 7	5.34
300	0.482 1	0.098 6	0.103 5	4.73
400	0.413 6	0.082 8	0.087 2	5.05

通过以上仿真结果与计算值分析对比可知, 节点暂态电压压升的仿真值随着阻抗比的减小而呈现线性减小的趋势, 与式(24)和图 4 分析所得结果一致; 将仿真值与计算值进行对比可以看出, 计算值与仿真值非常接近, 误差保持在 6% 以内。

综合以上分析和仿真验证结果可以验证本文所提出的直流双极闭锁后任一节点暂态过电压计算方法的正确性。同时验证了本文所定义的阻抗比表征直流闭锁后节点暂态过电压程度的有效性。

3.2 节点暂态过电压计算方法仿真验证

本文根据新疆 2025 年 220 kV 以上目标网架示意图, 以 DIgSILENT 为平台搭建了吉泉 ± 100 kV 直流及送端交流系统仿真模型, 其直流近区网架结构示意图如图 6 所示。

仿真模型稳态运行时, 直流双极输送功率为 12 000 MW, 换流站消耗无功功率为 5 188.8 Mvar; 直流配套火电 20 台, 共出力 10 000 MW, 其余 2 000 MW 由风电及光伏机组共同出力。换流母线处短路容量为 50 501.44 MVA, 换流站内无功补偿装置发出 4 378.9 Mvar 无功功率。

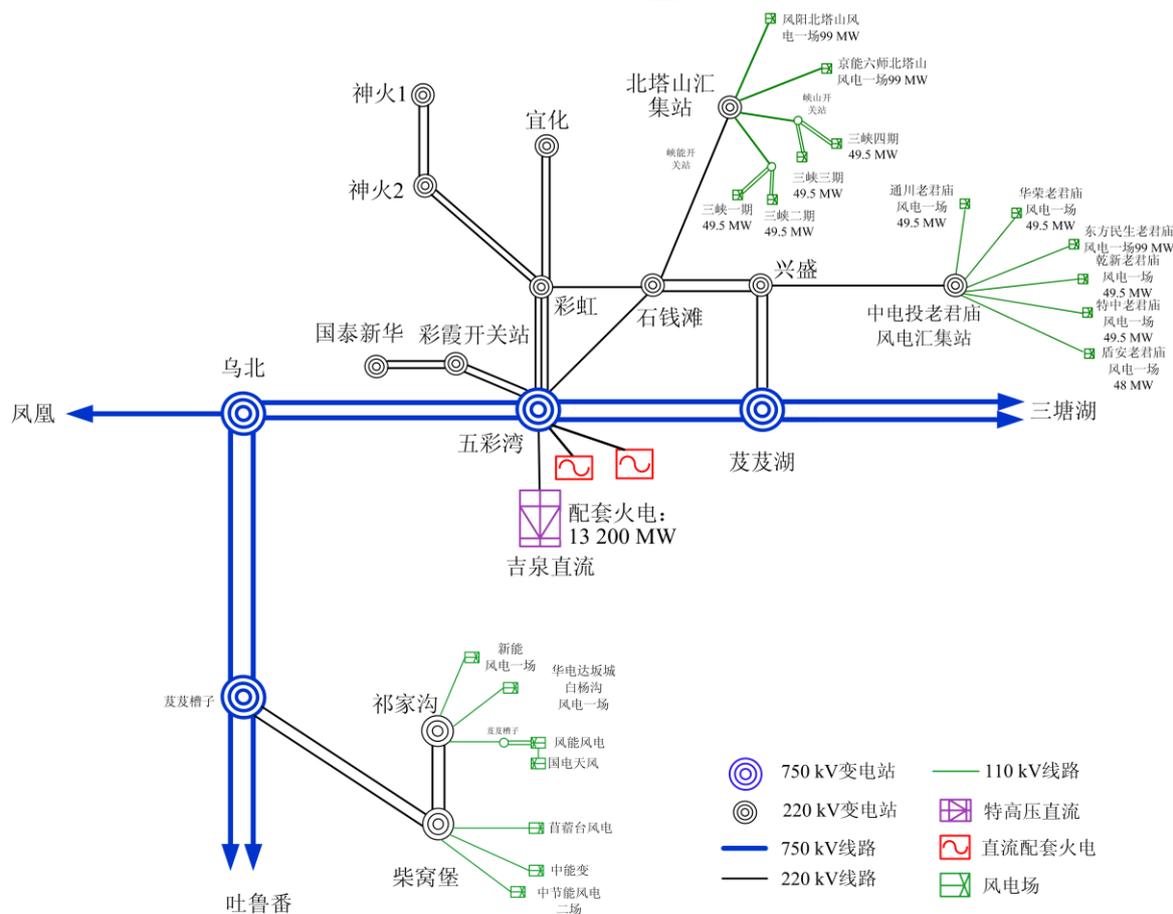


图 6 直流近区网架结构示意图

Fig. 6 DC near-area network structure diagram

设置直流系统在 0.05 s 时发生双极闭锁故障，直流闭锁后换流母线以及送端交流系统中部分母线暂态过电压响应如图 7—图 9 及表 3、表 4 所示。

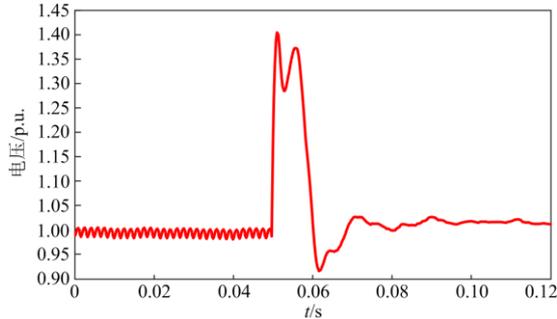


图 7 换流母线电压曲线

Fig. 7 Converter bus voltage curve

由图 7 可知仿真模型中吉泉直流双极闭锁后换流母线压升标幺值为 0.404 8 p.u.，根据式(10)计算 ΔU_L^* 值为 0.410 5 p.u.，误差为 1.41%。

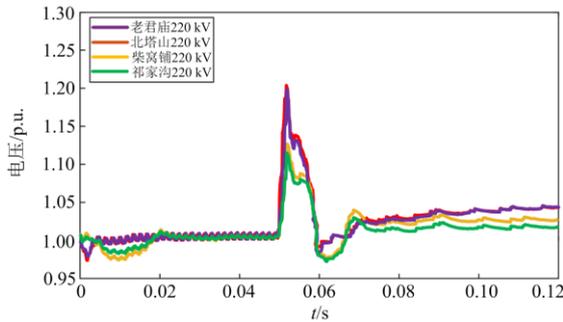


图 8 交流系统中部分 220 kV 母线电压曲线

Fig. 8 Partial 220 kV bus voltage curve in sending system

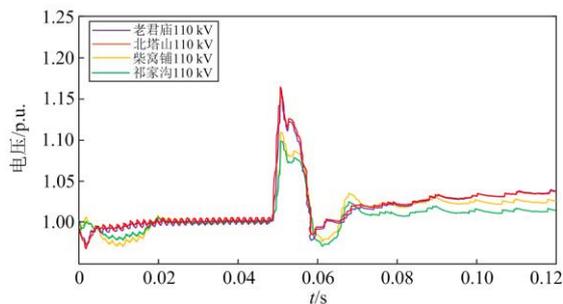


图 9 交流系统中部分 110 kV 母线电压曲线

Fig. 9 Partial 110 kV bus voltage curve in AC system

表 3 220 kV 母线暂态电压压升结果

Table 3 220 kV bus transient voltage rising result

母线	阻抗比 Z_k	计算值/p.u.	仿真值/p.u.	误差/%
老君庙 220 kV	0.478 7	0.196 5	0.191 5	2.61
北塔山 220 kV	0.494 5	0.203 0	0.198 8	2.11
柴窝铺 220 kV	0.301 6	0.123 8	0.120 0	3.17
祁家沟 220 kV	0.270 9	0.111 2	0.108 7	2.30

表 4 110 kV 母线暂态电压压升结果

Table 4 110 kV bus transient voltage rising result

母线	阻抗比 Z_k	计算值/p.u.	仿真值/p.u.	误差/%
老君庙 110 kV	0.391 2	0.160 6	0.158 8	1.13
北塔山 110 kV	0.393 6	0.161 5	0.165 9	2.65
柴窝铺 110 kV	0.276 4	0.113 5	0.107 3	5.78
祁家沟 110 kV	0.245 5	0.100 8	0.098 6	2.23

直流双极闭锁后，换流母线与送端交流系统中各节点电压都有较大幅度的升高。由图 9 和表 4 可知，老君庙、北塔山、柴窝铺、祁家沟四个位置的风电汇集 110 kV 母线暂态电压值均超过 1.1 p.u.，面临风电机组高压脱网问题。

通过图 8、图 9 和表 3、表 4 可知，直流闭锁后与换流母线电气距离相近的节点间暂态电压值相差较小，如北塔山汇集站、老君庙汇集站与换流母线电气距离非常接近，各自相同电压等级母线节点阻抗比相差很小，因此暂态电压压升值相差较小，母线电压曲线趋势也非常相似；相反，北塔山汇集站与祁家沟电气距离较远，各自相同电压等级母线节点阻抗比相差很大，因此暂态电压压升值相差很大，母线电压曲线趋势不完全相似。

由仿真结果可知直流双极闭锁后，送端交流系统内各节点暂态电压压升与阻抗比 Z_k 呈正相关关系。仿真结果与理论计算值非常接近，误差保持在 6% 以内，再次验证了本文计算方法的正确性。

4 结论

1) 综合分析得出直流闭锁后暂态过电压(ΔU)主要受交流系统短路容量(S_C)、交流系统与直流系统间的无功交换(Q_{ac})和换流站内无功补偿装置容量(Q_C)影响，推导出了换流母线压升标幺值 ΔU_L^* 的计算表达式。

2) 通过对直流双极闭锁后送端交流系统等效模型的分析，进而推导出送端交流系统内任一节点压升标幺值 ΔU_k^* 的解析表达式；基于解析表达式定义了阻抗比 Z_k ，用以表征直流闭锁后送端交流系统任一节点暂态过电压程度。

3) 分析了阻抗比 Z_k 与节点电压的关系，交流系统内节点压升标幺值 ΔU_k^* 与 Z_k 呈正相关关系。在换流母线压升一定的情况下， ΔU_k^* 随着阻抗比上升而线性升高。

4) 基于 DIGSILENT 仿真平台，分别搭建了 CIGRE 直流输电标准测试系统和吉泉 ±1 100 kV 直流送端系统，通过仿真验证了本文计算方法的有效性与正确性。本文结论对于特高压直流输电安全运

行以及采取有效的稳控方案预防直流闭锁故障后新能源机组脱网具有理论指导意义。

参考文献

- [1] 肖繁, 王涛, 高扬, 等. 基于特高压交直流混联电网的调相机无功补偿及快速响应机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 93-100.
XIAO Fan, WANG Tao, GAO Yang, et al. Research on reactive power compensation and fast response mechanism of synchronous condenser based on UHVAC/DC hybrid grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 93-100.
- [2] 尹纯亚, 李凤婷, 王丹东, 等. 风电高渗透率交直流外送系统直流闭锁稳控方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 95-102.
YIN Chunya, LI Fengting, WANG Dandong, et al. Research on stability control scheme for AC/DC hybrid transmission system with wind power high permeability under DC blocking[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 95-102.
- [3] 王永平, 赵文强, 杨建明, 等. 混合直流输电技术及发展分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 156-167.
WANG Yongping, ZHAO Wenqiang, YANG Jianming, et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 156-167.
- [4] 罗澍忻, 董新洲. 基于 LCC 的高压直流输电线路保护分析及展望[J]. 广东电力, 2019, 32(12): 121-129.
LUO Shuxi, DONG Xinzhou. Analysis and prospects of HVDC transmission line protection based on LCC[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(12): 121-129.
- [5] 马燕君, 李海锋, 王钢. 同塔双回高压直流输电线路单极接地故障引发换相失败研究[J]. 广东电力, 2019, 32(11): 86-95.
MA Yanjun, LI Haifeng, WANG Gang. Study on commutation failure caused by single-pole-to-ground fault on double-circuit HVDC transmission lines of the same tower[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(11): 86-95.
- [6] 胡忠山, 吴秋媚, 龚英明, 等. 谐波对高压直流输电系统换流站锁相环性能影响[J]. 广东电力, 2020, 33(11): 91-101.
HU Zhongshan, WU Qiumei, GONG Mingying, et al. Influence of harmonics on performance of phase locked loop in HVDC converter station[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(11): 91-101.
- [7] 黄方能, 张红丽, 马骞, 等. 受端电网特高压直流系统与海上风电交互影响及评价指标[J]. 广东电力, 2019, 32(3): 96-103.
HUANG Fangneng, ZHANG Hongli, MA Qian, et al. Interactive effects between hvdc of receiving-end power grid and offshore wind power and evaluation index[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(3): 96-103.
- [8] 贺静波, 庄伟, 许涛, 等. 暂态过电压引起风电机组连锁脱网风险分析及对策[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1839-1844.
HE Jingbo, ZHUANG Wei, XU Tao, et al. Study on cascading tripping risk of wind turbines caused by transient overvoltage and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1839-1844.
- [9] 屠竞哲, 张健, 刘明松, 等. 风火打捆直流外送系统直流故障引发风机脱网的问题研究[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3333-3338.
TU Jingzhe, ZHANG Jian, LIU Mingsong, et al. Study on wind turbine generators tripping caused by HVDC contingencies of wind thermal-bundled HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3333-3338.
- [10] ZHANG Tian, YAO Jun, PEI Jinxin, et al. Coordinated control of HVDC sending system with large-scale DFIG-based wind farm under mono-polar blocking fault[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 119.
- [11] LI F, CHEN Q, LIN X, et al. Simulation on power characteristic of UHVDC during commutation failure and DC block[C] // IEEE Electrical Power and Energy Conference, October 22-25, 2017, Saskatoon, SK, Canada: 1-6.
- [12] 舒展, 张伟晨, 王光, 等. 特高压直流接入江西电网后的故障影响分析及其应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 163-170.
SHU Zhan, ZHANG Weichen, WANG Guang, et al. Fault analysis and its countermeasures of Jiangxi Provincial Grid after UHVDC line connection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 163-170.
- [13] 辛建波, 王玉麟, 舒展, 等. 特高压交直流接入对江西电网暂态稳定的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 71-79.
XIN Jianbo, WANG Yulin, SHU Zhan, et al. Transient stability impact analysis of UHV AC/DC access to Jiangxi power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 71-79.
- [14] 吴萍, 陈昊, 赵兵, 等. 风光火打捆交直流混联外送系统交互影响及稳定性研究[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 1934-1942.
WU Ping, CHEN Hao, ZHAO Bing, et al. Study on

- interaction and stability characteristics of bundled wind-PV-thermal power transmitted with AC/DC system[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 1934-1942.
- [15] 罗煦之, 张健, 贺静波, 等. 计及暂态过电压约束的直流闭锁安控与极控协调控制研究[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2526-2531.
- LUO Xuzhi, ZHANG Jian, HE Jingbo, et al. Coordinated control research of stability control system and pole control system under DC system block considering transient overvoltage[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2526-2531.
- [16] 韩平平, 陈凌琦, 胡迪, 等. 直流闭锁暂态过电压对风电外送影响及其抑制措施[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 99-105.
- HAN Pingping, CHEN Lingqi, HU Di, et al. Impact of transient overvoltage caused by DC block on wind power transmission and its suppression measure[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 99-105.
- [17] 王峰, 刘天琪, 丁媛媛, 等. 直流闭锁引起的暂态过电压计算方法及其影响因素分析[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3059-3065.
- WANG Feng, LIU Tianqi, DING Yuanyuan, et al. Calculation method and influencing factors of transient overvoltage caused by HVDC block[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3059-3065.
- [18] 尹纯亚, 李凤婷, 周识远, 等. 基于无功功率短路比的直流闭锁暂态过电压计算方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 150-157, 161.
- YIN Chunya, LI Fengting, ZHOU Shiyuan, et al. Calculation method of transient overvoltage due to DC blocking based on short circuit ratio of reactive power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 150-157, 161.
- [19] 陈厚合, 张赫, 王长江, 等. 基于卷积神经网络的直流送端系统暂态过电压估算方法[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2987-2997.
- CHEN Houhe, ZHANG He, WANG Changjiang, et al. Method for estimating transient overvoltage of HVDC sending-end system based on convolutional neural network[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2987-2997.
- [20] HE Huiwen, LI Xiaolan, LOU Ying, et al. Transient overvoltage on overhead metal return lines of ± 500 kV MMC-HVDC grid[J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 1934-1936.
- [21] 索之闻, 陈启超, 李晖, 等. 混合直流输电系统送端交流暂态电压特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 125-132.
- SUO Zhiwen, CHEN Qichao, LI Hui, et al. Research on sending end AC transient voltage characteristics of hybrid HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 125-132.
- [22] YANG W. Study on system commissioning test and project application of Lingzhou to Shaoxing UHVDC transmission project[J]. Journal of Engineering, 2017(13): 2188-2192.
- [23] 邵瑶, 汤涌. 采用多馈入交互作用因子判断高压直流系统换相失败的方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 108-114.
- SHAO Yao, TANG Yong. A commutation failure detection method for HVDC systems based on multi-infeed interaction factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 108-114.
- [24] 夏成军, 王真, 杜兆斌. 考虑直流系统控制方式的多馈入交互作用因子实用计算方法[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3532-3540.
- XIA Chengjun, WANG Zhen, DU Zhaobin. Practical calculation method for multi-infeed interaction factor considering HVDC system control modes[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3532-3540.
- [25] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [26] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

收稿日期: 2020-03-05; 修回日期: 2020-06-04

作者简介:

李欣悦(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为交直流系统稳定与控制; E-mail: 541520566@qq.com

李凤婷(1965—), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为可再生能源与并网技术等。E-mail: xjlt2009@sina.com

(编辑 魏小丽)