

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.06.014

苏州同里±10 kV 柔性直流配电系统直流故障特性研究

杨景刚^{1,3}, 刘洋², 苏伟¹, 肖小龙^{1,3}, 司鑫尧¹, 张晓荣⁴

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210019;

3. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

4. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:基于苏州同里±10 kV 直流配电系统参数, 针对直流单极接地和极间短路故障暂态特性进行了研究。采用示范工程系统结构及控制策略, 利用 PSCAD 建立了电磁暂态模型, 针对系统交流侧、换流器侧、直流侧和负荷侧进行了故障过电压、过电流研究, 分析了接地电阻对直流侧电压和电流的影响。结果表明: 系统直流侧发生单极接地故障时, 交流侧出现持续直流分量, 换流器不闭锁, DC-DC 变换器高压侧电容放电; 故障接地电阻对直流侧电压、电流影响大; 极间短路故障产生严重过电流, 将触发换流器过电流保护, 导致换流器闭锁; 故障电流是产生过电压的重要原因; 电感元件两端过电压较大, 极间故障对系统交流侧影响较小。

关键词:柔性直流; 直流配电系统; 模块化多电平换流器(MMC); 电磁暂态; 过电压; 直流故障特性

中图分类号: TM86

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)06-0113-08

0 引言

随着新能源分布式发电及电力电子技术的发展和应用, 负荷日趋多样化。直流配电系统可适用于分布式电源的广泛接入, 且具有传输容量大、电能质量高、系统稳定强等优点, 应用前景广泛^[1-5]。模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)相较于两电平及三电平换流器, 具有损耗成倍下降、阶跃电压降低、波形质量高等优点^[6]。

国内外陆续开展了对于柔性直流输配电系统的研究。在柔性直流输电方面, 文献[7]分析高压柔性直流输电系统直流侧3种故障类型的故障特性; 文献[8-9]将张北±500 kV 四端柔直工程直流线路短路过程分为3个阶段研究; 文献[10]对直流双极短路故障时子模块的过电压应力进行详细研究, 对闭锁前后2个阶段的故障机理进行理论分析; 文献[11]针对典型交流接地方式下系统的直流单极接地故障及换流站的故障恢复进行研究, 定性分析了避雷器动作对故障特性的影响。柔性直流配电系统相对于输电系统, 电压等级低, 输送距离短, 且多数接有分布式电源, 过电压机理及故障特性有所不同。文献[12]分析伪双极、真双极和混合接线方式下换流站内部的过电压; 文献[13]针对深圳±10 kV 直流配电网示范工程进行过电压及绝缘配合分析, 该工程采用两端状拓扑结构, 伪双极主接

线方式; 文献[14]采用两端状主接线方式为深圳宝龙工业城直流配电系统提供技术方案支撑; 文献[15-19]针对±10 kV 中压柔性直流配电网, 研究换流站和直流线路区域各类接地或短路的操作过电压并分析过电压的产生机理; 文献[20-26]分析了柔性直流配电系统的故障及保护特性。

目前, 对于柔性直流配电系统故障特性的研究多数未考虑 DC-DC 变换器、光伏及储能元件对故障的影响。文中针对苏州同里±10 kV 直流配电系统, 采用 PSCAD 电磁暂态仿真软件进行直流侧单极接地和极间短路故障暂态特性分析。系统采用伪双极接线, 交流系统联接变压器阀侧经电阻接地, 换流站均为 MMC, 其过电压、过电流特性可为器件参数设计及系统控制策略和保护方案提供重要依据。

1 基于 MMC 的柔性直流配电系统结构

1.1 系统拓扑

苏州同里±10 kV 柔性直流配电网示范工程系统采用伪双极接线, 交流系统联接变压器阀侧经电阻接地, 如图1所示。九里和庞东2座交流变电站的电压等级均为110 kV, 分别经过110 kV/10 kV 的降压变压器以及10 kV/10 kV 的联接变压器, 接入容量为10 MW 的 MMC, 换流器直流侧输出电压等级为10 kV, 经过开闭所 K₁、K₂ 及10 kV/0.375 kV DC-DC 变换器并接入负荷。其中 K₁、K₂ 开闭采用单母分段接线方式, 每一段母线分别与一座换流站相连。系统主接线方式为伪双极结构, 直流主干网采

收稿日期: 2021-06-05; 修回日期: 2021-08-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904700)

用双端环网结构。正常工况下,九里变与庞东变分别出线构成双端环网,通过直流电缆线路与直流变压器连接,各类工商民用负荷在负荷点处就近新建直流配电房,实现负荷接入。

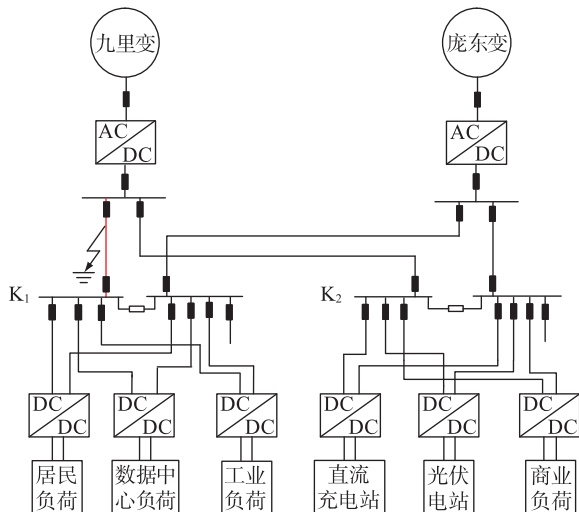


图1 示范工程示意

Fig.1 Schematic diagram of the demonstration project

苏州柔性直流配电网示范工程包含中、低压2个电压等级,满足直流负荷、光伏、储能多点分层接入,主要有居民负荷、数据中心负荷、工业负荷、直流充电站、光伏电站和商业负荷。

1.2 系统参数

基于苏州柔性直流配电网系统结构和控制策略,采用PSCAD搭建仿真模型。该系统主要由交流电源、联接变压器、MMC、直流变压器、直流负荷及直流电缆组成,系统参数如下。

(1) 换流站均采用MMC,参数如表1所示。

表1 换流站参数

Table 1 Converter station parameters

参数	数值
接入交流系统电压/kV	10
额定直流功率/MW	10
输出额定直流电压/kV	±10
输出最大直流电流/kA	0.5
额定频率/Hz	50
子模块数量	24
桥臂电感值/mH	2
直流电抗器/mH	8

(2) 光伏电站由2个串联的光伏阵列元件构成,光伏阵列1由36个光伏电池串联而成,光伏阵列2由10个光伏模块构成,均由36个光伏电池串联。光伏电池等效电路见图2。其中, I_g 为光电流; I_d, V_d 分别为流过反并联二极管的电流及其两端电

压; R_{sh} 为并联电阻; I_{sh} 为流过 R_{sh} 的电流; R_{sv} 为串联电阻; I, V 分别为光伏电池的输出电流和输出电压。

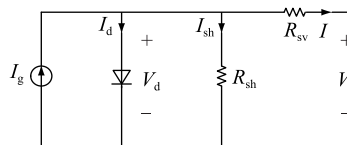


图2 光伏电池等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of photovoltaic cell

光伏电池等效电路中各部分电流的关系如下:

$$I = I_g - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} I_g = I_{SCR} G/G_R [1 + \alpha_T (T_c - T_{cR})] \\ I_{sh} = (V + IR_{sv})/R_{sh} \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_{SCR} 为参考照度 G_R 和参考电池温度 T_{cR} 时的短路电流; α_T 为光电流的温度系数; G, T_c 分别为实际照度和实际电池温度。

(3) DC-DC变换器拓扑结构如图3所示,左边为逆变电路,右边为整流电路,两边结构对称。高压侧由开关管 S_1-S_4 及二极管组成,经过高频变压器连接至低压侧;低压侧由开关管 S_5-S_8 及二极管组成,实现电气隔离并改变直流电压等级。

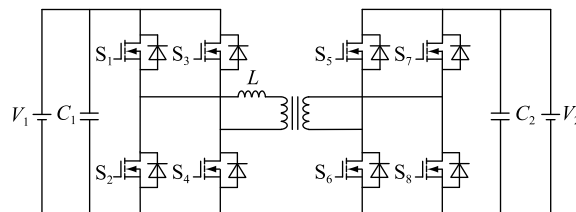


图3 DC-DC变换器拓扑结构

Fig.3 DC-DC converter topology

采用单移相控制策略进行仿真,开关管 S_1, S_4 驱动信号相同,其驱动信号的取反信号为 S_2, S_3 驱动信号,同样适用于低压侧。通过控制开关管的驱动信号,使高频变压器两侧的电路产生频率相同的方波,2个方波之间相位关系决定DC-DC变换器传输功率大小和方向。

(4) 直流负荷包括居民负荷、数据中心负荷、工业负荷、直流充电站、光伏电站和商业负荷等,采用受控直流电流源建模。

(5) 直流电缆选用DC-YJV62-±10 kV型单芯交联聚乙烯绝缘电缆,采用频率相关模型建模,由内至外分别是导体层、绝缘层、铠装层和表皮层,其中铠装层单侧接地。

(6) 直流断路器拓扑见图4。采用混合式结构,主支路为快速机械开关S和少量电力电子模块串联,降低负荷电流的导通损耗,转移支路为电力

电子模块串联,耗能支路为金属氧化物可变电阻,开断时间短,通态损耗小,无需专用冷却设备。

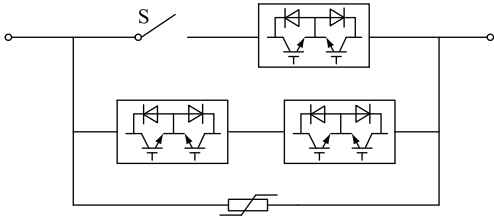


图4 直流断路器拓扑结构

Fig.4 Topology of DC circuit breaker

1.3 MMC 基本结构及控制方式

图5为MMC的基本结构示意图,每相分为上、下2个桥臂,每个桥臂均由多个子模块SM、桥臂电抗器 L_0 及等效电阻 R_0 串联而成。其中, $u_{sj}(j=a,b,c)$ 为交流侧等效电源电压; L_s, R_s 分别为交流侧等效电感及电阻; i_{ij}, i_{nj} 分别为上、下桥臂的通流电流; i_j 为换流器输出电流; u_{ij}, u_{nj} 分别为上、下桥臂子模块电压; u_{vj} 为换流器输出电压; U_{dc} 为直流母线正负极间电压; O 为零电位点。

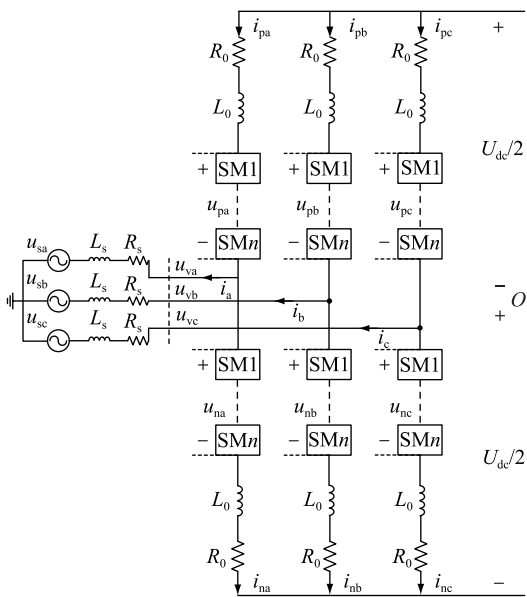


图5 MMC基本结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of MMC basic structure

换流器的数学模型分析是研究控制方式的前提,以a相为例,依据基尔霍夫电压定律,交流侧微分方程及上、下桥臂微分方程如下:

$$\begin{cases} u_{sa} = -L_s \frac{di_a}{dt} - R_s i_a + u_{va} \\ u_{va} = \frac{U_{dc}}{2} - L_0 \frac{di_{pa}}{dt} - R_0 i_{pa} - u_{pa} \\ u_{va} = -\frac{U_{dc}}{2} + L_0 \frac{di_{na}}{dt} + R_0 i_{na} + u_{na} \end{cases} \quad (3)$$

同理可得出b,c两相基于基尔霍夫电压定律的微分方程,结合基尔霍夫电流定律,经过dq同步旋转坐标变换和拉氏变换,可得:

$$\begin{cases} \left(s \frac{L_0}{2} + \frac{R_0}{2} \right) i_d(s) = u_d(s) - v_d(s) + \omega \frac{L_0}{2} i_q(s) \\ \left(s \frac{L_0}{2} + \frac{R_0}{2} \right) i_q(s) = u_q(s) - v_q(s) - \omega \frac{L_0}{2} i_d(s) \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4)设计换流站控制,换流站级控制采用直接电流控制,九里换流站外环控制采用定直流电压和定无功功率控制,庞东换流站外环控制采用定有功功率和定无功功率控制。忽略换流器内部有功损耗,有功及无功的直流分量 P_0, Q_0 可简化为^[27-29]:

$$\begin{cases} P_0 = 1.5u_d i_d \\ Q_0 = -1.5u_q i_q \end{cases} \quad (5)$$

对比有功功率或直流电压的参考值 P_{ref}/U_{dcref} 和测量值 P/U_{dc} ,经过PI调节可得有功电流参考值 i_{sdr} ,同理对比无功功率的参考值 Q_{ref} 和测量值 Q ,经过PI调节可得无功电流参考值 i_{sqr} 。内环根据 i_{sdr} 和 i_{sqr} 值进行消耦,直接电流控制框图如图6所示。

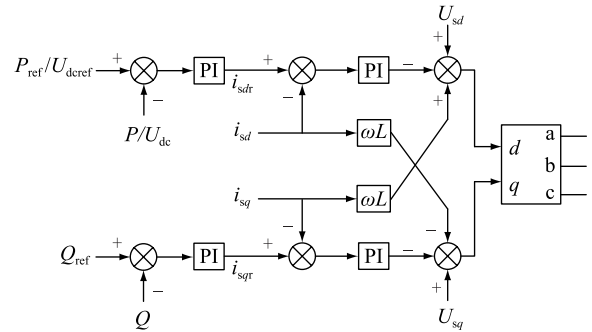


图6 直接电流控制框图

Fig.6 Block diagram of direct current control

2 系统稳态运行特性

设 $t=1.1$ s时负荷全部投入,稳态运行时各节点电压如表2所示,直流侧电压电流如图7所示。

稳态直流母线电流为0.34 kA,极间最大电压为20.36 kV,电压偏移小于±3%,满足系统要求。

3 直流侧故障特性

3.1 单极接地故障电压特性

设 $t=2.0$ s时直流侧正极发生接地故障,故障持续时间0.3 s,故障位置如图1所示。单极接地故障时关键节点电压如表3所示。

系统单极接地故障时关键电压如图8所示。

表 2 稳态运行时关键位置电压

Table 2 Voltage of key point during steady-state operation

系统关键位置	电压/kV
10 kV 交流母线出口处	8.220
联接变压器网侧	8.210
联接变压器阀侧	10.820
换流器桥臂电抗器两端	1.320
换流器阀顶	10.470
换流器阀底	10.770
直流电抗器两端	0.320
电缆线路正极	10.110
电缆线路极间	20.360
直流变压器入口侧	9.980
直流变压器低压侧	0.381

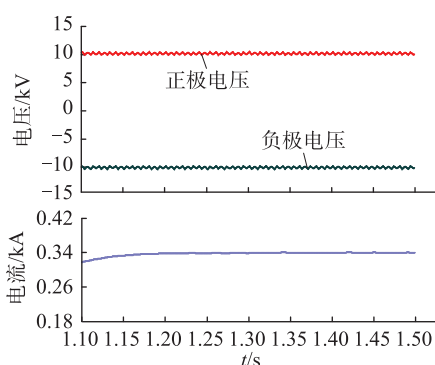


图 7 系统稳态运行时直流侧电压和电流

Fig.7 System voltage and current of DC side during steady-state operation

表 3 直流侧单极接地故障时关键位置电压峰值

Table 3 Peak voltage at key position during single-pole grounding fault on the DC side

系统关键位置	电压/kV
10 kV 交流母线出口处	8.230
联接变压器网侧	8.230
联接变压器阀侧	20.660
换流器桥臂电抗器两端	3.920
换流器阀顶	19.320
换流器阀底	22.030
直流电抗器两端	6.910
电缆线路健全极	20.370
电缆线路极间	20.400
直流变压器入口侧	10.020
直流变压器低压侧	0.386

直流侧发生单极接地故障时,联结变压器网侧电压几乎不变,而阀侧产生 20.66 kV 的过电压。系统交流侧出现直流偏置,产生 10 kV 左右的持续直流分量;桥臂电抗器端电压近似正弦波形,电压峰值为 3.92 kV。直流侧单极接地故障时,换流器直流

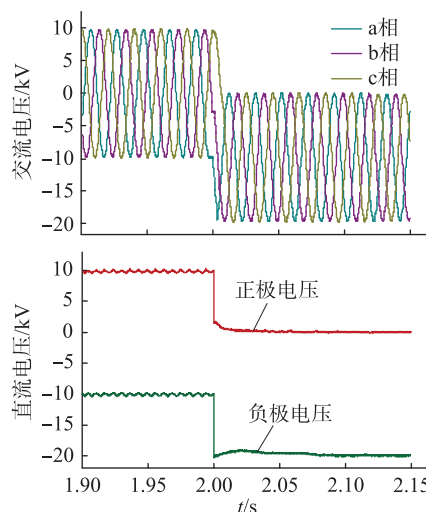


图 8 单极接地故障时关键节点过电压

Fig.8 Overvoltage at key locations in the system under single-pole ground fault

电抗器和桥臂电抗器在故障瞬间分别产生 6.91 kV 和 3.93 kV 的过电压,桥臂电抗器和直流电抗器可以抑制环流及直流侧故障时流过桥臂的故障电流上升率。

系统采用伪双极的接线方式,故障极电压几乎为 0,健全极线路产生 20.37 kV 的过电压,换流器阀底和阀顶电压均升至原来的 2 倍,而极间电压几乎不变,DC-DC 直流变压器仍能依据控制策略输出理想电压,短时间内系统仍能持续运行。

3.2 单极接地故障电流特性

直流侧单极接地故障时,设故障点电流为 I_{fault} ,接地故障点的电阻为 R_f ,联接变压器的接地电阻为 R_c 。由于 R_c 的取值与较多因素有关,阻值不能任意变化,因而文中不考虑 R_c 对单极接地故障电流的影响,取 R_c 为 150 Ω 。接地故障点的电阻 R_f 与故障点位置有关,故障点经直流电抗器、MMC 桥臂、联接变压器及接地电阻形成故障电容放电回路,如图 9 所示,其中 MMC 单个子模块由 VD_1 、 VD_2 、 VT_1 、 VT_2 和 C_0 组成。

直流侧正极接地故障时,故障极与健全极对地电压 U_p , U_N 如式(6)所示。

$$\begin{cases} U_p = -(I_{0.1} + I_{0.2})R_f \\ U_N = -U_{dc} - (I_{0.1} + I_{0.2})R_f \end{cases} \quad (6)$$

直流侧单极接地故障时,接地故障点电阻较小,由式(6)可知,故障极电压几乎为 0,非故障极电压升至原来的 2 倍,极间电压几乎不变。单极接地故障时系统直流母线电流如图 10 所示。

由于 DC-DC 变换器的高压侧接有大电容,单极接地故障后电容放电,直流母线电流略有增大,短

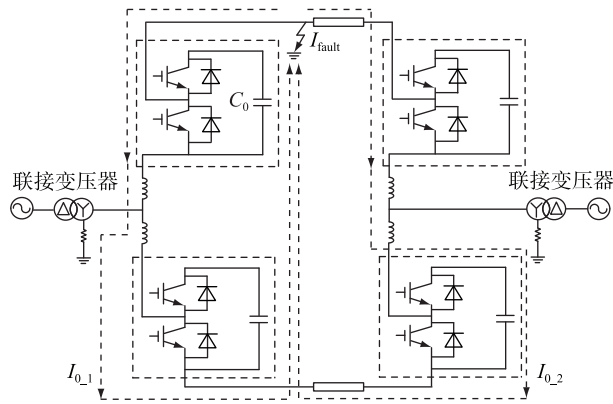


图9 系统直流侧单极接地故障电容放电回路

Fig.9 Discharge path of capacitor during single pole ground fault on the DC side of system

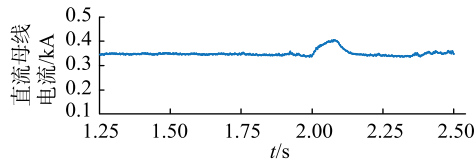


图10 系统直流侧单极接地故障电流

Fig.10 Single-pole ground fault current on DC side

时间内系统仍能正常运行。

3.3 极间短路故障电压特性

设 $t=2.0\text{ s}$ 时系统直流侧发生极间短路故障,故障持续时间 0.15 s ,系统极间短路故障时关键位置电压峰值如表 4 所示。其中,联接变压器阀侧交流电压及系统直流电缆线路电压如图 11 所示。

表 4 直流侧极间短路故障时关键位置电压峰值

Table 4 Peak voltage at key position during pole-to-pole fault on DC side

系统关键位置	电压/kV
10 kV 交流母线出口处	7.73
联接变压器网侧	7.70
联接变压器阀侧	7.05
换流器桥臂电抗器两端	4.32
换流器阀顶	0.68
换流器阀底	3.15
直流电抗器两端	7.09
电缆线路正极	1.22
电缆线路极间	2.15
直流变压器入口侧	2.02
直流变压器低压侧	0.03

直流极间短路故障时,联结变压器网侧电压下降 6.2% , 阀侧电压下降 34.8% ,对系统交流侧有一定影响;换流器桥臂电抗器和直流电抗器在故障瞬间产生较大过电压。此时 MMC 闭锁,故障瞬间直流侧产生 2.15 kV 过电压,随后极间电压几乎为 0 ,

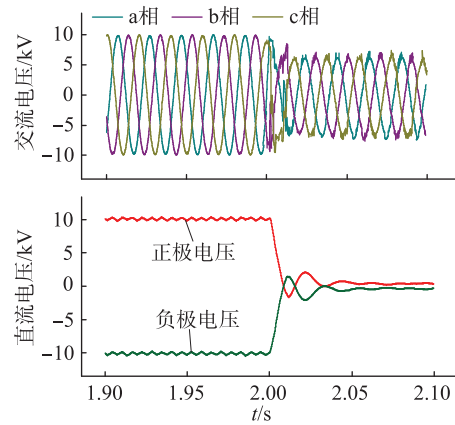


图11 极间短路故障时关键节点过电压

Fig.11 Overvoltage at key locations in the system during pole-to-pole fault

直流负荷无法正常运行。极间短路故障严重影响系统运行,实际工程中应尽量避免,并配以相应保护措施。

3.4 极间短路故障电流特性

故障发生瞬间,MMC 仍处于正常工作状态,将此时相单元电路进行等效,等效电容值为 $2C_0/n$, 等效电感为桥臂电抗器的 2 倍即 $2L_0$,将线路的等效电阻、桥臂电抗器、电容的等效电阻及开关器件的电阻损耗等效为 R_{eq} ,单个相单元的等效电路如图 12 所示。

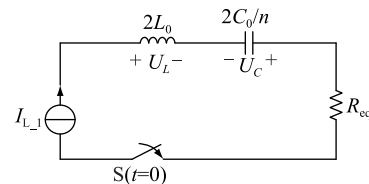


图12 MMC 单相等效电路

Fig.12 Equivalent circuit of MMC single-phase

系统故障发生的瞬间,MMC 子模块仍处于正常的导通关断状态,系统直流侧极间电压 U_{dc} 和 MMC 上桥臂电流 $I_{L,1}$ 均不为 0 ,电路的初始状态为:

$$\begin{cases} U_c(0+) = U_c(0-) = U_{dc} \\ I(0+) = I(0-) = I_{L,1} \end{cases} \quad (7)$$

换流器闭锁前,子模块电容放电,流过换流器桥臂电流增大,超过绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 额定值的 1.5 倍后,换流器闭锁,闭锁后故障电流通过二极管 VD_2 流通,随后断路器动作,电流逐渐下降为 0 ,系统故障电流及直流线路电流如图 13 所示。

故障发生的瞬间,交流侧和直流侧同时向故障点馈入电流,直流母线电流迅速上升至 2.75 kA , IGBT 闭锁,交流侧不再向故障点提供故障电流,故障电流主要由换流器桥臂电流和直流侧电流组成,

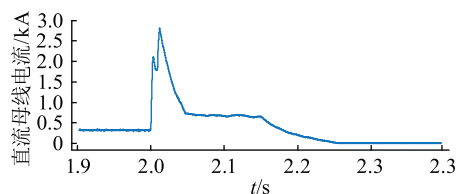


图 13 系统直流侧极间短路故障电流

Fig.13 Pole-to-pole fault current on DC side

2.138 s断路器动作,随后直流母线电流下降为0。

3.5 接地电阻对直流侧故障影响

单极接地的故障位置可能存在整个电缆区域,接地电阻阻值有所差别,单极接地故障下不同接地电阻的直流侧电压、电流如表5所示。

表 5 不同接地电阻的直流侧电压电流

Table 5 Voltage and current of DC side under different grounding resistance

接地电阻阻值/ Ω	健全极过电压/kV	故障电流/kA
0.01	27.157	1.71
0.1	27.100	1.57
1	25.740	1.32
5	20.500	0.73
10	19.715	0.59
20	17.690	0.33
50	14.350	0.15
100	13.050	0.07
500	11.340	0.02

由表5可知,接地电阻值越小,系统单极接地故障健全极过电压和故障电流越大;随着接地电阻增大,直流侧健全极过电压和故障电流均减小。接地电阻阻值较小时,健全极过电压的变化相对速率较小,故障电流的变化速率相对较大;接地电阻阻值大于10 Ω 时,对系统健全极过电压的影响几乎可以忽略;接地电阻阻值大于500 Ω 时,系统故障电流值几乎可以忽略。

4 结论

文中针对苏州同里 ± 10 kV 直流配电系统,采用PSCAD,对直流单极接地和极间短路故障暂态特性进行了研究,得到以下结论:

(1) 直流侧单极接地故障时,阀侧电压出现持续直流分量,桥臂电抗器和直流电抗器出现较大过电压。由于极间电压几乎不变,换流器将不闭锁,系统可短时运行。应考虑DC-DC变换器高压侧电容对系统的影响。

(2) 直流侧极间短路故障时,直流母线产生较大过电流,触发换流器过电流保护,MMC闭锁,故障

电流是形成过电压的重要原因,直流电抗器两端过电压较大。极间短路对交流侧影响较小。

(3) 故障接地电阻对系统暂态过程产生影响。接地电阻值越小,系统单极接地故障健全极过电压和故障电流越大,当接地电阻阻值足够大时,对系统的影响可忽略。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“直流配电系统过电压产生机理及防护方法研究”(J2019043)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 宋强,赵彪,刘文华,等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):9-19,5. SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19, 5.
- [2] WU T F, CHANG C H, LIN L C, et al. DC-bus voltage control with a three-phase bidirectional inverter for DC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1890-1899.
- [3] PELTONIEMI P, NUUTINEN P, PYRHONEN J. Observer-based output voltage control for DC power distribution purposes[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1914-1926.
- [4] 杜翼,江道灼,尹瑞,等. 直流配电网拓扑结构及控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):139-145. DU Yi, JIANG Daozhuo, YIN Rui, et al. Topological structure and control strategy of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 139-145.
- [5] 唐晓骏,张正卫,韩民晓,等. 适应多直流馈入受端电网的柔性直流配置方法[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(10):57-64. TANG Xiaojun, ZHANG Zhengwei, HAN Minxiao, et al. VSC-HVDC configuration method suitable for multi-DC feeding receiving power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 57-64.
- [6] 王朝亮,吕文韬,许烽,等. 柔性直流配电网 MMC 子模块级联数量优化设计[J]. 浙江电力,2019,38(4):8-12. WANG Chaoliang, LYU Wentao, XU Feng, et al. Optimum design of cascading number of MMC sub-modules in intelligent flexible DC distribution network[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(4): 8-12.
- [7] 杨海倩,王玮,荆龙,等. MMC-HVDC 系统直流侧故障暂态特性分析[J]. 电网技术,2016,40(1):40-46. YANG Haiqian, WANG Wei, JING Long, et al. Analysis on transient characteristic of DC transmission line fault in MMC based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 40-46.
- [8] 李英彪,卜广全,王姗姗,等. 张北柔直电网工程直流线路短路过程中直流过电压分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(12):3391-3399,3666.

- LI Yingbiao, BU Guangquan, WANG Shanshan, et al. Analysis of DC overvoltage caused by DC short-circuit fault in Zhangbei VSC-based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12):3391-3399,3666.
- [9] 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.
- [10] 王姗姗,周孝信,汤广福,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1):1-7.
- WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1):1-7.
- [11] 赵成勇,李探,俞露杰,等. MMC-HVDC 直流单极接地故障分析与换流站故障恢复策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21):3518-3526.
- ZHAO Chengyong, LI Tan, YU Lujie, et al. DC pole-to-ground fault characteristic analysis and converter fault recovery strategy of MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21):3518-3526.
- [12] 杨英,董舒怡,陈红坤,等. 三种主接线方式下柔性直流输电系统换流站内部过电压仿真[J]. 南方电网技术, 2015, 9(7):2-10.
- YANG Ying, DONG Shuyi, CHEN Hongkun, et al. Inner overvoltage simulation of converter station of MMC-HVDC system in three kinds of main wiring modes[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(7):2-10.
- [13] 何秋萍,韩永霞,赵宇明,等. ±10 kV 直流配电系统过电压与绝缘配合[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4):16-22.
- HE Qiuping, HAN Yongxia, ZHAO Yuming, et al. Overvoltage and insulation coordination of ±10 kV DC distribution system[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4):16-22.
- [14] 刘国伟,赵宇明,袁志昌,等. 深圳柔性直流配电示范工程技术方案研究[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4):1-7.
- LIU Guowei, ZHAO Yuming, YUAN Zhichang, et al. Study on demonstration project technical scheme of VSC-DC distribution system in Shenzhen[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4):1-7.
- [15] 苏宜靖,胡列翔,许烽,等. 柔性直流配电网系统操作过电压的研究[J]. 电网技术, 2018, 42(10):3196-3203.
- SU Yijing, HU Liexiang, XU Feng, et al. Research on switching overvoltage in flexible DC distribution network[J]. Power System Technology, 2018, 42(10):3196-3203.
- [16] 苏宜靖,董立,唐律,等. 柔性直流配电网过电压及避雷器配置研究[J]. 浙江电力, 2019, 38(3):20-24.
- SU Yijing, DONG Li, TANG Lyu, et al. Research on overvoltage and arrester allocation in flexible DC distribution network[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(3):20-24.
- [17] 李勇,梁爽,陈曦,等. 直流配电网中的线路保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9):136-144.
- LI Yong, LIANG Shuang, CHEN Xi, et al. Line protection scheme for DC distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9):136-144.
- [18] 李志,余绍峰,劳增江,等. 基于本质安全的配电网设备质检中心建设[J]. 浙江电力, 2018, 37(2):22-26.
- LI Zhi, YU Shaofeng, LAO Zenjiang, et al. Construction of distribution network equipment quality inspection center based on intrinsic safety[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(2):22-26.
- [19] 梁汉东,高毓群,侯婷,等. 柔性直流配电系统负荷波动对系统过电压及过电流影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13):56-62.
- LIANG H, ong, GAO Yuqun, et al. Study on the influence of load fluctuation on overvoltage and overcurrent of a VSC-DC distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13):56-62.
- [20] 戴志辉,葛红波,严思齐,等. 柔性直流配电网故障分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8):1863-1874.
- DAI Zhihui, GE Hongbo, YAN Siqi, et al. Fault analysis of flexible DC distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8):1863-1874.
- [21] 吴通华,戴魏,李新东,等. 柔性直流配电网保护方案及设备研制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23):123-130.
- WU Tonghua, DAI Wei, LI Xindong, et al. Protection scheme and device development of flexible DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23):123-130.
- [22] 肖芳磊,张竞涵,高毓群,等. 多端柔性直流配电系统子模块拓扑对过电压影响的仿真分析[J]. 电气自动化, 2019, 41(4):16-19, 85.
- XIAO Fanglei, ZHANG Jinghan, GAO Yuqun, et al. Simulation analysis of influence upon overvoltage produced by sub-module topology of multi-terminal flexible DC distribution systems[J]. Electrical Automation, 2019, 41(4):16-19, 85.
- [23] 曾嵘,赵宇明,赵彪,等. 直流配用电关键技术研究与应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23):6791-6801, 7114.
- ZENG Rong, ZHAO Yuming, ZHAO Biao, et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23):6791-6801, 7114.
- [24] 贾科,赵其娟,王聪博,等. 柔性直流配电网线路保护与定值整定[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19):171-178.
- JIA Ke, ZHAO Qijuan, WANG Congbo, et al. Line protection and setting calculation for flexible DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19):171-178.
- [25] STUMPE M, TUNNERHOFF P, SCHNETTLER A, et al. Grid topology and technology influences on selective protection con-

cepts for multi-terminal medium voltage DC grids [J]. The Journal of Engineering, 2018, 2018(15):796-801.

[26] 贾科,李论,宣振文,等. 基于扰动注入的柔性直流配电网主动故障定位及其仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4):99-106. JIA Ke, LI Lun, XUAN Zhenwen, et al. Study on fault location method and simulation for VSC-DC distribution network based on disturbance injection [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4):99-106.

[27] 管敏渊,徐政,屠卿瑞,等. 模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2):48-52. GUAN Minyuan, XU Zheng, TU Qingrui, et al. Nearest level modulation for modular multilevel converters in HVDC transmission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2):48-52.

[28] 刘喜梅,王宁,张硕博. 基于CPS-SPWM的模块化多电平整流器的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22):180-179. LIU Ximei, WANG Ning, ZHANG Shuobo. Research and application of a modular multilevel rectifier based on CPS-SPWM

[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22):180-179.

[29] 张婕,曾国辉,赵晋斌,等. 基于改进冒泡排序的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6):92-99. ZHANG Jie, ZENG Guohui, ZHAO Jinbin, et al. Modular multilevel converter capacitor voltage balancing strategy based on improved bubble sorting [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6):92-99.

作者简介:



杨景刚

杨景刚(1984),男,硕士,高级工程师,从事智能配电网相关工作(E-mail: huzi_yang@163.com);

刘洋(1982),男,博士,高级工程师,从事直流配电网相关工作;

苏伟(1993),男,硕士,工程师,从事直流配电网相关工作。

Grounding fault on DC side of Suzhou Tongli ±10 kV flexible DC distribution system

YANG Jinggang^{1,3}, LIU Yang², SU Wei¹, XIAO Xiaolong^{1,3}, SI Xinyao¹, ZHANG Xiaorong⁴

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Nanjing Power Supply Branch, Nanjing 210019, China;

3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

4. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on the parameters of the ±10 kV DC distribution system in Tongli, Suzhou, the transient characteristics of DC unipolar grounding and inter-electrode short-circuit faults are studied. Using the system structure and control strategy of the demonstration project, the electromagnetic transient model is established in the environment of PSCAD. Many fault cases are considered in our work, including the AC side, the converter side, the DC side, as well as the load side. The overvoltage and overcurrent of the system are discussed. Furthermore, the impact of grounding fault resistance on the transients on the DC side of system is quantitatively studied. The simulation results indicate that there is a continuous DC component on the AC side in the case of single pole to ground fault on DC distribution system. The converter is not blocked, and the DC-DC converter high-voltage side capacitor is discharged. The grounding resistance of fault has a significant effect on the voltage and current transients of DC side. The pole-to-pole ground fault produces a severe overcurrent, which triggers the converter overcurrent protection, which triggers the converter overcurrent protection. The fault current is an important cause of the overvoltage. The overvoltage at both ends of the inductive element is large, which has little impact on the AC side of the system.

Keywords: flexible DC; DC distribution system; modular multilevel converter (MMC); electromagnetic transients; overvoltage; DC side fault characteristics

(编辑 钱悦)