

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.03.003

计及系统过电压的直流配电网接地方式选择与绝缘配置

刘鉴雯¹, 吴在军¹, 曹骁勇¹, 杨景刚², 陈庆³, 张勋友⁴

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024; 4. 池州学院机电工程学院, 安徽 池州 247122)

摘要:过电压特性与系统接地方式密切相关,对关键设备选取、设计具有重要意义,但目前直流配电网中结合过电压分析进行接地方式选择的研究仍不完善。文中首先基于模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)型±10 kV双端直流配电网分析过电压产生机理,并通过PSCAD/EMTDC平台的故障仿真,对比3种典型接地方式下系统关键位置的过电压峰值。然后,提出综合故障恢复能力、经济性、电压稳定性、过电压峰值作为指标进行接地方式的选择,评估得出交流侧变压器中性点经电阻接地、直流侧不接地为所研究系统的优选接地方式。最后,基于荷电率计算设计方法确定相应的避雷器参数与配置方案,并通过仿真进行了有效性验证。研究结论为直流配电网接地方式选择与绝缘配置提供了参考。

关键词:模块化多电平换流器(MMC);直流配电网;接地方式;过电压分析;绝缘配置;故障仿真

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)03-0019-08

0 引言

随着新能源发电、电动汽车充电技术的快速发展,在电能质量、消纳可再生能源等方面具有优势的直流配电网逐渐成为国内外的研究热点^[1-4]。配电网的接地系统为网络提供电压参考点,对系统稳定性、恢复速度等方面具有重要影响^[5]。对于中压直流配电网,其拓扑中往往不存在固有接地点,因此存在多种可能的接地方式^[6]。

目前,柔性直流输电系统中对于接地方式的研究已经取得了具有借鉴性的成果,包括分析不同接地方式下网络电气量的传播机理,设计适用于实际工程的接地方式等^[7-8]。直流配电网接地方式选择中常考察的指标包括故障电流水平、故障电压恢复能力、直流母线电压波形、供电连续性与电能质量等^[9-10]。此外,系统过电压与直流配电网接地方式也密切相关^[11],不同接地方式所形成的不同等效拓扑导致了系统故障过电压水平的差异,从而影响设备选型及系统安全可靠运行。目前,直流系统中对过电压的研究多集中于机理分析^[12-15]、相关绝缘配合方案设计^[16-19],对于接地方式与过电压的关联性方面探讨较少。文献[20]针对海上风电并网柔性直流系统的接地方式进行了研究,分析对比了不同接地方式下的过电压特性,为相关风电工程的接地

方案选择提供了参考依据,但在直流配电网中类似的研究仍不全面。

综上,现有对于直流配电网接地方式的研究多关注其系统运行与故障特性,对过电压因素的考虑较少,对接地方式的综合性比较仍待完善。因此,须对不同接地方式下的故障过电压进行对比,以优化适用于直流配电网的接地方式。

文中基于模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)型±10 kV双端直流配电网,在考虑系统故障恢复能力、经济性、电压稳定性等指标的基础上,通过仿真比较不同接地方式下系统关键位置的故障过电压峰值,综合评估所研究系统的优选接地方案,并提出基于避雷器的有效绝缘配置方案。研究计及接地方式对系统故障过电压的影响,完善了直流配电网接地方式的选择依据,相关方案可为直流配电网工程建设提供有益参考。

1 直流配电网典型拓扑与接地方式

1.1 典型拓扑

直流配电网中不存在交流配电系统的电磁环网问题,具有灵活的组网方式,典型拓扑包括单端放射型、双端“手拉手”型以及环型拓扑^[21]。

目前,国内已建成苏州工业园、深圳宝龙工业园、杭州江东新城等直流配电网示范工程项目^[22-24]。综合考虑供电可靠性、控制与保护的复杂程度以及示范工程建设情况,文中选取具有代表性的双端直流配电网拓扑作为研究对象,换流器选用基于半桥

收稿日期:2022-11-23;修回日期:2023-02-09

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904700);
国家电网有限公司科技项目(SGJS0000YJJS1801250)

型拓扑的 MMC, 直流侧电压等级为 ± 10 kV。双端型直流配电网拓扑如图 1 所示。

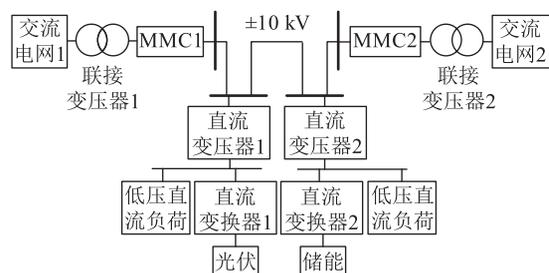


图 1 双端型直流配电网拓扑

Fig.1 Topology of two-terminal DC distribution network

1.2 典型接地方式

接地方式对直流配电网的故障特性具有直接影响, 双端型直流配电网的接地方式可以分为交流侧接地与直流侧接地。其中, 交流侧接地通常包括变压器中性点经电阻接地和经星型电抗-电阻接地; 直流侧接地则一般采用经并联电容中点接地和经钳位电阻接地^[25-26]。对于直流侧经并联电容中点接地方式, 考虑到 MMC 直流侧无集中电容, 且该方式故障运行特性较差^[6], 首先予以排除。文中将对其他 3 种可行性较高的典型接地方式进行比较与分析。

1.2.1 交流侧变压器中性点经电阻接地

该方式对变压器网侧采用 Δ 接线, 阀侧采用 Y_n 接线, 阀侧中性点经电阻接地。此时, 系统主要依赖变压器中的星形绕组承受故障下的暂态电压与电流。当处于不对称运行状态或发生不对称故障时, 中性点直流电流的增大使得铁芯饱和, 正弦励磁电路发生畸变, 提高了变压器绕组设计对抑制直流偏磁的要求, 同时, 须考虑限制换流器故障极桥臂电容放电电流、继电保护灵敏度等问题。

1.2.2 交流侧经星型电抗-电阻接地

该方式通过在换流阀交流侧构建并联电抗电阻接地, 对电抗器采用单相结构避免直流偏磁。星型电抗器在故障发生时可限制电流增速以降低过流水平, 但也使系统产生无功功率损耗, 增加了建设成本^[20], 接地电阻则用于限制变压器的故障稳态电流。为避免电流零序分量在交流侧与换流站之间流通, 一般对变压器网侧采用 Y_n 接线, 阀侧采用 Δ 接线。在正常工作状态下, 星型电抗与接地电阻构成的等效阻抗可为直流侧提供电位参考点, 避免换流站电位漂移。

1.2.3 直流侧经钳位电阻接地

该方式在直流侧通过 2 个等值大电阻构成直流中性点接地, 换流变压器网侧为 Y_n 接线, 阀侧为 Δ

接线。其建设成本相对较低, 对变压器阀侧绕组的接线方式也无特殊要求。但是, 钳位电阻在为直流侧电压提供电位参考点的同时, 也存在长期运行导致过热损坏的风险, 致使线路出现两极电压不对称的情况。钳位电阻的并联也使系统正常运行时产生有功功率损耗, 因此该接地方式适用于直流侧电压等级低、线路较短的配电系统。

2 过电压分析与仿真

2.1 过电压分析

直流配电网过电压的来源包括系统外部的异常操作、雷击等因素以及系统内部的接地、短路、断线等故障工况, 通过对系统的过电压分析, 可以为接地方式选择与绝缘配置提供参考, 对系统关键设备的选型与设计具有重要意义。由于直流配电线路通常采用埋地电缆, 因此在研究中更关注内部过电压的影响。内部过电压主要可以分为交流系统过电压与直流系统过电压。

2.1.1 交流系统过电压

交流系统过电压一般源于交流侧的雷击与误操作等情况, 包括联接变压器网侧、变压器内部及联接变压器阀侧至两端换流器网侧接线区域各类故障。文中主要针对联接变压器阀侧的交流系统进行研究, 常见的故障类型包括线路不同位置的单相、两相、三相接地与两相、三相短路故障等。

以单相接地故障为例, 当换流阀交流侧的线路发生故障时, 故障相电压迅速下降为 0, 非故障相电压增加至正常运行状态的 1.732 倍^[27]。非故障相由于线路的不对称产生电磁振荡过电压, 直流侧极间电压基本保持不变, 正负极电压则受故障零序分量影响发生基频共模波动, 在部分接地方式下将会对系统故障恢复能力产生影响^[28]。

2.1.2 直流系统过电压

配电系统直流侧运行控制相对复杂, 不同设备的控制信号异常或直流侧线路故障等情况均可能导致直流系统过电压。直流系统与下游用户侧直接相连, 其故障往往会引发系统异常与停电等事故。其主要故障类型包括限流电抗器阀侧与线路侧、直流线路不同位置的短路、接地、断线等故障。

以直流线路的单极接地故障为例, 该故障与换流阀阀顶接地故障具有类似的特性。当故障发生时, 故障极电压迅速下降为 0, 故障接地点与系统交流或直流侧接地点之间形成放电回路, 线路电容与桥臂子模块电容经故障电流通路放电, 在线路电抗、限流电抗、桥臂电抗两端产生过电压^[12]。MMC

通过对开关管的控制使得系统投入的子模块数恒定,因此极间电压基本保持不变,故障过电压传递到非故障极,其稳定后的电压为正常运行状态的2倍。

2.2 关键位置与决定性故障

直流配电网中的部分关键位置在系统运行监视中具有重要意义,同时也是避雷器配置的备选节点,在过电压分析中应予以关注。系统的关键位置包括:联接变压器网侧(L1)、变压器中性点(L2)、联接变压器阀侧(L3)、桥臂电抗器两端(L4)、阀侧直流极间(L5)、直流电抗器两端(L6)、直流电抗器线路侧对地(L7)、直流电抗器线路极间(L8)、直流线路单极对地(L9)、直流线路极间(L10)。此外,通过故障扫描发现,对系统关键位置过电压具有决定作用的故障工况包括换流阀交流侧单相接地(F1)、换流阀阀顶接地(F2)、换流阀直流侧短路(F3)、直流线路单极接地(F4)、直流线路极间短路(F5)。关键位置及决定性故障具体如图2所示,图中SM表示MMC子模块。

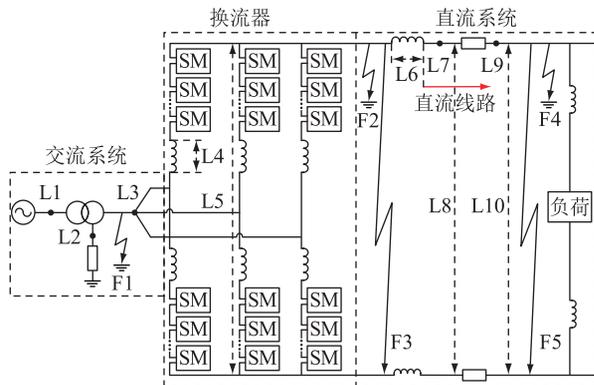


图2 关键位置与决定性故障

Fig.2 Key locations and typical faults

2.3 过电压仿真

文中采用的研究系统为 ± 10 kV MMC型双端直流配电网,在PSCAD/EMTDC环境中搭建如图1所示的直流配电网模型,系统参数如表1所示。两端换流器分别采用定直流电压控制方式、定有功和定无功功率控制方式。故障发生在仿真开始后的1.3 s,故障持续时间为0.2 s。

仿真针对上述决定性故障F1—F5,并根据结果统计得到不同接地方式下各关键位置的过电压峰值。其中,接地方式1为交流侧变压器中性点经电阻接地、直流侧不接地,接地电阻取1 000 Ω ;接地方式2为交流侧经星型电抗-电阻接地、直流侧不接地,单相电抗为1 H,接地电阻取1 000 Ω ;接地方式3为直流侧经钳位电阻接地、交流侧不接地,钳位电

表1 系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of system

系统类型	参数	数值
交流系统	最大有功功率/MW	50
	交流电网电压/kV	110
	变压器变比	110 kV/10 kV
	无功功率整定值/Mvar	0
直流系统	直流母线电压/kV	± 10
	线路总长度/km	3
	单位长度电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.121
	单位长度电感/(mH $\cdot \text{km}^{-1}$)	0.97
换流器	单相桥臂模块数	21

阻取1 M Ω 。

决定性故障下的过电压峰值测量数据及其对应故障类型如表2所示。结果表明,对于不同接地方式,系统大部分关键位置故障过电压现象明显,直流线路(L7—L10)侧产生了最高约3倍直流母线电压额定值的峰值。其中,各电抗器(L4、L6)处的过电压峰值取决于直流系统的短路故障F3、F5,其余关键位置的过电压峰值则由极对地型故障F2、F4决定,而故障F1的整体峰值较低,未能决定各关键位置最大过电压。对比不同接地方式可知,接地方式2在直流线路侧产生的故障过电压峰值明显高于接地方式1、3,提高了对设备绝缘耐压的要求。对于不同接地方式的分析与比较将在文中进一步讨论。

表2 系统关键位置过电压峰值

Table 2 Overtoltage peak value at key locations of system

关键位置	接地方式1		接地方式2		接地方式3	
	过电压峰值/kV	故障类型	过电压峰值/kV	故障类型	过电压峰值/kV	故障类型
L1	8.17		8.17		8.17	
L2	16.52	F4	0		0	
L3	23.10	F4	24.91	F2	22.90	F4
L4	15.80	F3	17.52	F5	15.82	F3
L5	22.25	F2	22.31	F2	21.93	F2
L6	8.29	F5	8.47	F5	8.42	F5
L7	28.57	F4	29.29	F4	28.11	F4
L8	27.31	F4	29.30	F4	26.41	F4
L9	28.83	F4	30.02	F4	28.30	F4
L10	28.25	F4	32.89	F4	27.70	F4

3 接地方式评估与绝缘配置

3.1 接地方式评估与选择

中低压直流配电网电压等级较低、处于城市密集区域、线路数目较多、直接面对用户群,因此须重

点关注对应接地方式下系统的故障恢复能力、经济性以及电压稳定性。文中在上述各方面的基础上,进一步考察其关键位置故障过电压水平,综合进行接地方式的优化选择。典型故障 F1—F5 的直流母线电压仿真波形分别如图 3—图 7 所示。其中, U_u 为直流正极母线电压; U_d 为直流负极母线电压; U_{ap} 为直流母线极间电压。

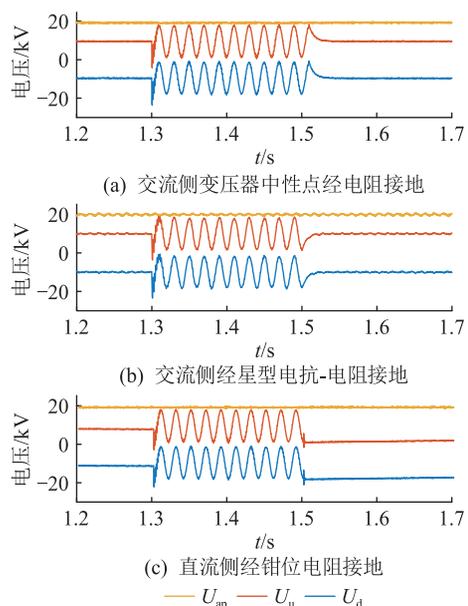


图3 换流阀交流侧单相接地故障电压波形
Fig.3 Voltage waveforms of single phase to ground fault in AC side of converter

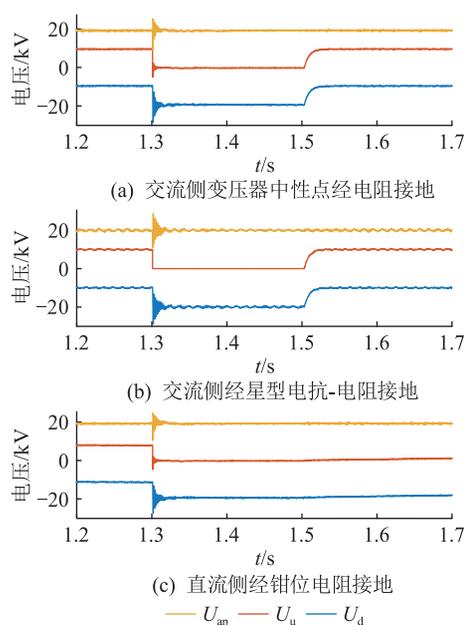


图4 直流线路单极接地故障电压波形
Fig.4 Voltage waveforms of single pole to ground fault in DC line

由图 3—图 7 可知,当 1.3 s 故障发生时,不同接地方式下的直流母线电压出现了明显的突变尖峰

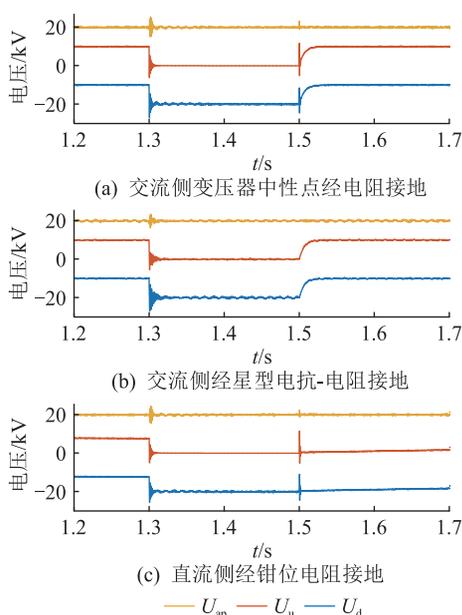


图5 换流阀阀顶接地故障电压波形
Fig.5 Voltage waveforms of the converter top to ground fault

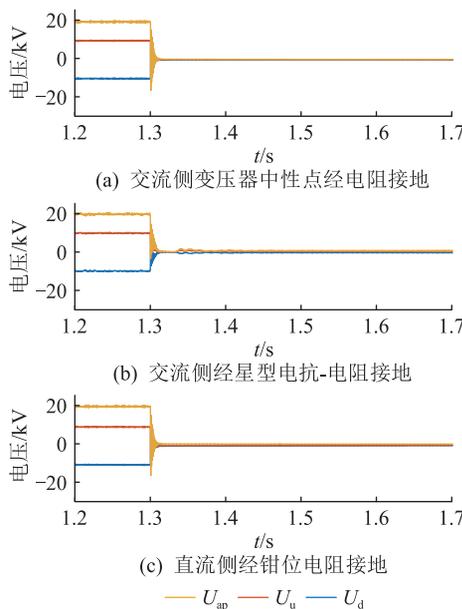


图6 换流阀直流侧短路故障电压波形
Fig.6 Voltage waveforms of short circuit fault in DC side of converter

并迅速衰减。故障持续期间, F1 的 U_u 、 U_d 产生基频共模波动; F2、F4 的 U_u 、 U_d 出现电位偏移, 分别维持运行在 0 kV 与 -20 kV 左右; F3、F5 的 U_u 、 U_d 、 U_{ap} 则迅速下降为 0, 系统失去供电能力。当 1.5 s 故障切除后, F1、F2、F4 的 U_u 、 U_d 逐渐恢复; F3、F5 由于故障后换流器闭锁, 系统无法直接恢复正常运行, U_u 、 U_d 、 U_{ap} 仍保持为 0。

在系统恢复能力方面, 文中针对仿真中可自恢复的 3 种故障 F1、F2、F4 进行比较, 3 种接地方式下

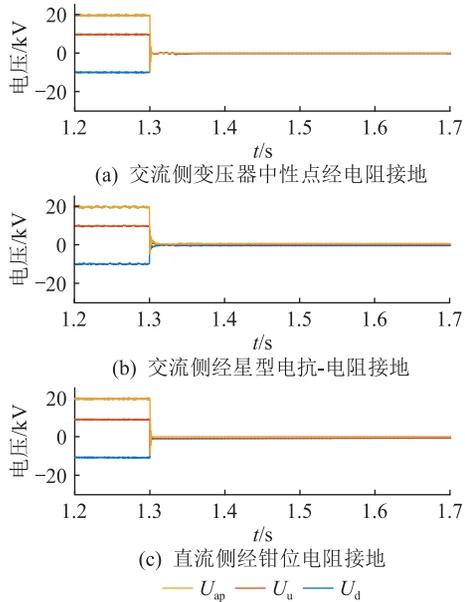


图7 直流线路极间短路故障电压波形

Fig.7 Voltage waveforms of inter-pole short circuit fault in DC line

母线的正负极电压恢复速度受到接地支路中对应的电阻与电抗器大小的影响。由对应仿真波形可见,在不同故障下,采用接地方式1与接地方式2的系统均能够在约0.03 s内恢复到故障前的母线电压水平,而接地方式3由于采用了大阻值钳位电阻,恢复时间相对前2种接地方式明显延长。

在经济性以及电压稳定性方面,由1.2节的分析可知,接地方式1采用中性点接地电阻,设备造价相对较低,不存在运行中的长期风险,电压稳定性也较高。接地方式2须采用电抗器,其造价高于其他方式,不利于建设成本的控制。接地电抗的无功消耗也导致换流站交流调压能力减弱,易使直流配电网在无法满足无功需求的情况下电压降低,电压稳定性较差。接地方式3经济性相对较好,但钳位电阻在长期运行中可能产生过热而损坏,导致系统也存在线路电压不稳定的问题。

在过电压峰值方面,由不同故障对应仿真波形图3—图7可见,接地方式产生的差异主要体现在过电压尖峰的大小与发生时刻。由表2可知,在联接变压器网侧、阀侧与各电抗器两端等关键位置,3种接地方式下的故障过电压峰值相近,但在直流线路侧,接地方式2对应的故障过电压峰值接近33 kV,而接地方式1、3对应的最大过电压则均未超过29 kV。因此,在过电压峰值指标方面,接地方式1、3具有一定优势,均可作为优选方案。

综上所述,无论是在系统恢复能力、经济性、电压稳定性以及过电压峰值方面,接地方式1的表现均相似或优于其他2种接地方式,可满足直流配

网的大部分要求,仅须重点考虑变压器配置以及接地电阻取值2项指标。在实际应用中,也可采用高阻接地限流或接地电阻切换的方式调节接地电流。

3.2 绝缘配置方案

针对所选择的交流侧变压器中性点经电阻接地、直流侧不接地方式和过电压峰值情况,文中基于高压直流输电系统绝缘配置的荷电率计算方法^[29],根据配置点最大持续运行电压(maximum continuous operating voltage, MCOV)与荷电率确定避雷器的参考电压。

直流配电网中常用的避雷器类型包括交流母线避雷器(A)、中性点避雷器(AR)、换流变阀侧避雷器(AF)、桥臂电抗避雷器(R)、换流阀底避雷器(AL)、阀避雷器(V)、桥避雷器(C)、直流电抗避雷器(SR)、直流线路避雷器(D)。其中A、AR、AF、AL为交流系统避雷器,此类避雷器除了限制变压器一次侧、二次侧对应关键位置过电压之外,还可通过相互配合或与阀避雷器V配合实现对桥臂电抗、接地支路或级联模块的保护;R与SR是电抗专用避雷器,用于电抗器操作过电压的直接保护;C与D为直流系统避雷器,一般用于保护换流站免受直流侧入侵波的危害,也可通过相互配合实现对直流电抗器的保护^[30-31]。

通过仿真发现,V与A型避雷器配置点无明显故障过电压尖峰,因此不考虑装设避雷器,具体的配置方案如图8所示。

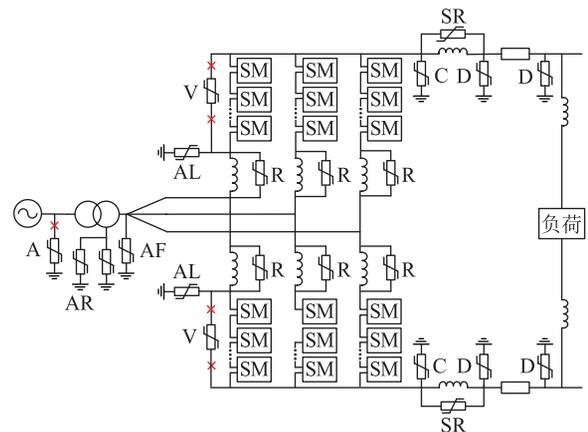


图8 避雷器配置方案

Fig.8 Configuration scheme of arrester

交流侧避雷器荷电率一般可取0.7~0.8,直流侧由于采用故障率相对较低的直流电缆,荷电率一般可选取0.8以上^[19]。其中,R与SR型避雷器参考电压的选取与荷电率无关,文中以直流线路电压稳态运行波形不产生畸变为原则,通过多次仿真调整确定避雷器的参数如表3所示。

表3 直流配电网避雷器参数选取

Table 3 Parameter selection of arrester in DC distribution network

避雷器类型	MCOV/kV	荷电率	避雷器参考电压/kV
AR	18.20	0.80	22.75
AF	10.42	0.80	13.03
R	1.46		1.50
AL	18.86	0.80	23.57
C	20.23	0.95	21.29
SR	0.38		1.00
D	20.11	0.95	21.17

根据上述方案,仿真统计了装设避雷器后系统关键位置的过电压峰值,与未装设避雷器的过电压峰值对比如表4所示。由对比结果可知,通过避雷器对能量的吸收,各电抗器处的故障过电压峰值降低了60%~70%,直流线路侧关键位置的峰值降低了10%~15%,系统整体过电压水平得到了合理限制,由此降低对设备绝缘水平的要求。

表4 系统过电压峰值对比

Table 4 Peak value comparison of system overvoltage

关键位置	过电压峰值/kV	
	未装设避雷器	装设避雷器
L1	8.17	8.17
L2	16.52	12.91
L3	23.10	19.36
L4	15.80	4.64
L5	22.25	22.28
L6	8.29	3.36
L7	28.57	24.79
L8	27.31	24.78
L9	28.83	24.75
L10	28.25	24.46

4 结论

文中基于PSCAD/EMTDC搭建了±10 kV MMC型双端直流配电网仿真模型,在比较3种典型接地方式下系统故障恢复能力、经济性、电压稳定性的基础上,引入关键位置故障过电压峰值作为指标之一,就不同接地方式进行了综合评估和选择,并研究了采用避雷器的绝缘配置,对相关直流配电工程建设具有一定参考意义。结论如下:

(1) 交流侧变压器中性点经电阻接地、直流侧不接地方式在不同评估指标方面均相似或优于其他2种接地方式,可以作为优选接地方案。

(2) 基于荷电率计算设计方法确定的避雷器参数,提出的绝缘配置方案可有效抑制系统关键位置

故障过电压,提高系统稳定性。

致谢

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“柔性直流配用电系统优化运行控制和保护关键技术研究”(J2019111)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 段建东,魏朝阳,周一,等. 未来直流配电网电压等级序列研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(12):3538-3545,13. DUAN Jiandong, WEI Zhaoyang, ZHOU Yi, et al. Research on voltage level sequence of future DC distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3538-3545, 13.
- [2] 张章,胡源,罗涛,等. 中压直流配电网系统保护技术研究综述[J]. 电测与仪表,2020,57(23):109-118. ZHANG Zhang, HU Yuan, LUO Tao, et al. Review on research of protection technology for medium voltage DC distribution system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(23): 109-118.
- [3] 吴在军,谢兴峰,杨景刚,等. 直流配电网电压控制技术综述[J]. 电力工程技术,2021,40(2):59-67. WU Zaijun, XIE Xingfeng, YANG Jinggang, et al. A review on voltage control strategies in DC distribution network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 59-67.
- [4] 王强刚,周亦尧,廖建权,等. 直流配电网电能质量研究综述[J]. 电力系统自动化,2023,47(7):193-207. WANG Qianggang, ZHOU Yiyao, LIAO Jianquan, et al. Review on power quality in DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 193-207.
- [5] 熊雄,季宇,李蕊,等. 直流配用电系统关键技术及应用示范综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6802-6813,7115. XIONG Xiong, JI Yu, LI Rui, et al. An overview of key technology and demonstration application of DC distribution and consumption system [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6802-6813, 7115.
- [6] 韩民晓,谢文强,曹文远,等. 中压直流配电网应用场景与系统设计[J]. 电力系统自动化,2019,43(23):2-11,89. HAN Minxiao, XIE Wenqiang, CAO Wenyuan, et al. Application scenarios and system design of medium-voltage DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 2-11, 89.
- [7] 梅念,陈东,吴方劼,等. 基于MMC的柔性直流系统接地方式研究[J]. 高电压技术,2018,44(4):1247-1253. MEI Nian, CHEN Dong, WU Fangjie, et al. Study on grounding methods for MMC-based VSC-HVDC systems [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1247-1253.
- [8] 毛航银,刘黎,邹国平,等. 舟山多端柔性直流输电系统接地方式研究[J]. 浙江电力,2014,33(4):10-13. MAO Hangyin, LIU Li, ZOU Guoping, et al. Research on grounding mode of Zhoushan multi-terminal flexible DC transmission system [J]. Zhejiang Electric Power, 2014, 33(4): 10-13.
- [9] 戴志辉,葛红波,严思齐,等. 柔性直流配电网接地方式对故

- 障特性的影响分析[J]. 电网技术,2017,41(7):2353-2364.
DAI Zhihui, GE Hongbo, YAN Siqi, et al. Effects of grounding mode on fault characteristics in flexible DC distribution system [J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2353-2364.
- [10] 吴峻, 武迪, 朱金大, 等. 多端柔性直流配电网接地方式设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2551-2561.
WU Jun, WU Di, ZHU Jinda, et al. Grounding method design of multi-terminal flexible DC distribution [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2551-2561.
- [11] 李蕊, 罗飞, 焦在滨. 中压直流配电系统接地方式研究[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2594-2603.
LI Rui, LUO Fei, JIAO Zaibin. Grounding mode research of MV DC distribution system [J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2594-2603.
- [12] 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.
- [13] 李岩, 黄豫, 龚雁峰, 等. 柔性直流电网直流线路故障的过电压机理分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 146-153.
LI Yan, HUANG Yu, GONG Yanfeng, et al. Analysis on overvoltage mechanism of DC line fault in flexible DC grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 146-153.
- [14] 杨景刚, 刘洋, 苏伟, 等. 苏州同里±10 kV 柔性直流配电系统直流故障特性研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6): 113-120.
YANG Jinggang, LIU Yang, SU Wei, et al. Grounding fault on DC side of Suzhou Tongli ±10 kV flexible DC distribution system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 113-120.
- [15] 张起瑞, 辛超山, 李凤婷, 等. 多直流协调的新能源送端地区暂态过电压抑制策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 98-106.
ZHANG Qirui, XIN Chaoshan, LI Fengting, et al. Multi DC coordinated transient overvoltage suppression strategy for high proportion new energy sending terminal area [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 98-106.
- [16] XIA C, CHEN X J, SHI W D, et al. Study on overvoltage and insulation coordination of grounding pole line for ±800 kV UHVDC system [C]//2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). Guangzhou, China. IEEE, 2019: 2433-2439.
- [17] ZHU X G, LIU Y C, DENG J B, et al. Study on overvoltage characteristics and arrester configuration strategy for ±1 100 kV HVDC transmission lines [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 1232-1237.
- [18] 张刘春, 张翠霞, 张搏宇, 等. ±800 kV 级联多端特高压直流输电工程的绝缘配合[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 60-65.
ZHANG Liuchun, ZHANG Cuixia, ZHANG Boyu, et al. Insulation coordination of ±800 kV cascaded multi-terminal DC transmission project [J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 60-65.
- [19] 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.
- [20] 傅春翔, 汪天呈, 酆洪柯, 等. 用于海上风电并网的柔性直流系统接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 119-126.
FU Chunxiang, WANG Tiancheng, LI Hongke, et al. Study on grounding methods of VSC-HVDC for off-shore wind farm integration [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 119-126.
- [21] 盛万兴, 李蕊, 李跃, 等. 直流配电电压等级序列与典型网络架构初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3391-3403, 3358.
SHENG Wanxing, LI Rui, LI Yue, et al. A preliminary study on voltage level sequence and typical network architecture of direct current distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3391-3403, 3358.
- [22] 苏麟, 朱鹏飞, 闫安心, 等. 苏州中压直流配电工程设计方案及仿真验证[J]. 中国电力, 2021, 54(1): 78-88.
SU Lin, ZHU Pengfei, YAN Anxin, et al. Design scheme and simulation verification of Suzhou medium voltage DC distribution project [J]. Electric Power, 2021, 54(1): 78-88.
- [23] 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.
- [24] 姜瀚瀚, 彭克, 徐丙垠, 等. 直流配电系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 219-231.
JIANG Songhan, PENG Ke, XU Bingyin, et al. Current situation and prospect of demonstration projects of DC distribution system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 219-231.
- [25] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于 MMC 的环状直流配网在不同接地方式下的故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 1-10.
DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo. Analysis on fault characteristics of MMC-based ring DC distribution networks under different grounding modes [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 1-10.
- [26] 张伟, 韦涛, 陈庆, 等. 中低压直流配用电系统接地方式选择研究[J]. 电力电子技术, 2019, 53(12): 84-89.
ZHANG Wei, WEI Tao, CHEN Qing, et al. Study on grounding mode selection of DC distribution and consumption system [J]. Power Electronics, 2019, 53(12): 84-89.
- [27] 李国庆, 刘宇超, 王鹤. MMC-HVDC 站内交流母线故障特性和保护策略[J]. 电测与仪表, 2017, 54(16): 25-31, 38.
LI Guoqing, LIU Yuchao, WANG He. Characteristic investi-

gation and protection strategy of MMC-HVDC system under internal AC bus fault conditions[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(16):25-31, 38.

[28] 高一波,徐习东,金阳忻,等. 交流侧接地故障对直流配电网电压平衡影响[J]. 电网技术, 2014, 38(10):2665-2670. GAO Yibo, XU Xidong, JIN Yangxin, et al. Impact on the voltage balancing of DC distribution network under AC side grounding fault[J]. Power System Technology, 2014, 38(10):2665-2670.

[29] 张哲任,徐政,薛英林. MMC-HVDC 系统过电压保护和绝缘配合的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21):58-64. ZHANG Zheren, XU Zheng, XUE Yinglin. Study of overvoltage protection and insulation coordination for MMC based HVDC [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21):58-64.

[30] 刘波,隗震,刘志远,等. 熔断型直流避雷器熔断退出特性试验研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(6):25-29. LIU Bo, WEI Zhen, LIU Zhiyuan, et al. Experimental research

on the fusing characteristics of fused DC arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(6):25-29.

[31] 赵智龙,钱敏,杨欢红,等. 基于氧化锌避雷器的二次直流系统交流窜入过电压保护研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(4):87-91. ZHAO Zhilong, QIAN Min, YANG Huanhong, et al. AC intrusion overvoltage protection in secondary DC system based on zinc oxide arrester [J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(4):87-91.

作者简介:



刘鉴雯

刘鉴雯(1996),男,硕士在读,研究方向为配电网保护与故障定位(E-mail:220192737@seu.edu.cn);

吴在军(1975),男,博士,教授,研究方向为分布式发电与微电网、主动配电网、变电站自动化;

曹骁勇(1990),男,博士在读,研究方向为直流配电网保护。

Grounding mode selection and insulation configuration of DC distribution network considering system overvoltage

LIU Jianwen¹, WU Zaijun¹, CAO Xiaoyong¹, YANG Jinggang², CHEN Qing³, ZHANG Xunyou⁴

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

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

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

4. Mechanical and Electronic Engineering College, Chizhou University, Chizhou 247122, China)

Abstract: The characteristics of overvoltage are closely related to the system grounding mode, which is of great significance to the selection and design of key equipment. However, the research on grounding mode selection combined with overvoltage analysis in DC distribution network is still imperfect. Firstly, the mechanism of overvoltage generation is analyzed for ± 10 kV dual-terminal DC distribution network based on modular multi-level converter (MMC), and the overvoltage peak values at key positions of the system under three typical grounding modes are compared by fault simulation in PSCAD/EMTDC. Then, the fault recovery ability, economy, voltage stability and overvoltage peak value are proposed as the indexes for the comprehensive selection of grounding mode. Grounding by resistance through neutral point of the transformer in AC side and ungrounding in DC side is evaluated as the preferred grounding mode of the studied system. Finally, the arrester parameters and configuration scheme are determined based on the chargeability calculation design method, and the validity is verified by simulation. References for the selection of grounding mode and insulation configuration of DC distribution network are supplied by the research.

Keywords: modular multi-level converter (MMC); DC distribution network; grounding mode; overvoltage analysis; insulation configuration; fault simulation

(编辑 吴昊)