

DOI: 10.7667/PSPC180582

直流配电网中的线路保护方案研究

李勇¹, 梁爽¹, 陈曦¹, 柴小亮¹, 孙辰军², 朱惠君³

(1. 国网河北省电力公司保定供电分公司, 河北 保定 071003; 2. 国网河北省电力公司, 河北 石家庄 050011;
3. 华北电力大学(保定), 河北 保定 071003)

摘要: 故障区段的可靠识别是直流配电网线路保护的难点之一, 由此产生相邻线路保护的配合问题, 并需防止交流故障后直流保护误动。基于平波电抗器和滤波电抗构成的物理边界的故障区域识别方法, 不适用于采用模块化多电平换流器(Modular multilevel converter, MMC)的直流电网。为此, 在分析直流线路短路的电气特征后, 综合考虑保护配合问题, 划分了直流线路保护区域, 设计了包含主保护、后备保护在内的直流线路保护方案。为满足选择性要求, 直流线路保护采用两端电流方向判断故障位置。最后, 搭建光伏直流汇集接入系统及多端直流配电网的仿真模型, 验证了该直流线路保护方案的可靠性、选择性和速动性。

关键词: 直流配电网; 直流线路保护; 保护区域; 后备保护; 电流方向保护

Line protection scheme for DC distribution grids

LI Yong¹, LIANG Shuang¹, CHEN Xi¹, CHAI Xiaoliang¹, SUN Chenjun², ZHU Huijun³

(1. Baoding Power Supply Company of SGCC, Baoding 071003, China; 2. State Grid Hebei Electrical Power Co., LTD, Shijiazhuang 050011, China; 3. North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China)

Abstract: The reliable identification of the fault zone is one of the bottlenecks in the DC line protection of a distribution network, which results in the issue of the cooperation between adjacent line protections, as well as preventing DC protections from malfunction after AC faults. The existing faulted-zone identification methods, which rely on the physical boundary formed by smoothing and filtering reactors, are not applicable for DC grids based on the Modular Multilevel Converter (MMC). Therefore, after analyzing fault characteristics of the DC line and considering the cooperation between protections, the DC line protected zones are divided, and the DC line protection scheme, consisting of the main protection and backup protection, is designed. To implement the selectivity, both-terminal current direction information of the protected line is employed to determine the fault location. Finally, the reliability, selectivity and rapidity of the proposed DC line protection are verified by means of the simulation model of a PV integration system and a multi-terminal DC distribution network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877084), Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2018502063), and Science and Technology Project of Hebei Electric Power Company (No. kj2017-008).

Key words: DC distribution network; DC line protection; protected zone; backup protection; directional current protection

0 引言

直流系统中, 为保护电力电子器件, 换流站可采用具有过流闭锁功能的模块化多电平换流器(Modular multilevel converter, MMC), 或加装限流装置, 故对直流线路保护的速动性要求较高^[1-2]。对于

高压直流输电系统, 因故障电流行波和故障电压行波的延时时间一般不超过 1 ms, 行波保护满足速动性要求, 故一般采用行波保护和电压突变量保护配合, 作为直流线路的主保护^[1]。但作为单端电气量保护的行波保护, 存在整定值不易确定, 难以区分区内、外故障的问题, 且灵敏度受过渡电阻及采样频率影响较大, 具有一定随机性^[3-5]。而直流配电网的线路保护, 不仅需有更高的速动性, 还需与相邻线路保护及交流保护配合, 准确区分区内、外故障^[6-8]。为削弱过渡电阻对保护的影响, 文献^[9]通过分

基金项目: 国家自然科学基金项目(51877084); 河北省自然科学基金项目(E2018502063); 河北省电力公司科技项目(kj2017-008)

析不易受过渡电阻影响的故障电流峰值时间,识别故障类型。并采用两段保护相配合的方式,实现保护线路全长。但与行波保护类似,该方案也存在整定值难以确定的问题。文献[10]指出,故障后直流电压的变化特征受过渡电阻影响较小,故可利用电压特征判断故障类型。但该方法无法确定故障位置。可见,对于配电网的直流线路保护,区分区内、外故障是保护的难点。

在两端为电压源换流器(Voltage source converter, VSC)的直流输电线路中,利用由线路两端平波电抗器和滤波电抗器构成的物理边界,可以得到区分区内、外故障的保护方案。如文献[11]将测量阻抗与平波电抗器和直流滤波器并联电抗比较,确定故障位置。文献[12]利用区内、外故障后,线路两端特定频率电流波形匹配度不同,判断故障位置。文献[13]将小波变换与模糊遗传算法结合,利用单端电流特征确定故障区域。

但在采用 MMC 的直流系统中,一般不设有平波电抗器和滤波电抗^[14]。且直流配电网结构多样,限流电抗器大小及安装位置并不统一,直流线路两端并不一定都有物理边界^[15]。故利用物理边界设置的保护方案并不适用于采用 MMC 的直流系统及直流配电网。为此,文献[16]通过比较故障后测量点残余电压的计算值与测量值,确定故障点到测量点的距离,但该方法利用的是故障后的稳态量,耗时较长。文献[17]通过二阶微分法提取电压电流故障分量,并根据电流故障分量极性识别区内、外故障,根据电压故障分量极性确定故障类型。但没有考虑交流故障的影响以及与相邻直流线路保护配合的问题。文献[18]利用暂态功率能量方向判断区内、外故障。文献[19]通过比较相邻线路的电流状态值和不平衡电流状态值,判定故障区间。但目前直流配电网的线路保护方案大多只考虑本段线路的保护,与相邻线路配合策略的研究较少,且没有明确的保护区域划分^[20]。

本文主要的主要工作如下:(1)研究对象从一条直流线路扩展到直流配电网中的多条直流线路,分析了直流线路的故障特征,明确了直流配电线路主、后备保护区域,并给出了相应的保护方案;(2)为了增强保护的选择性和可靠性,通过分析故障电流特征,设计了用于确定故障区段的电流方向保护,防止相邻线路故障导致的保护误动;(3)传统的过流保护难以判断故障类型^[7],本文在分析故障电流特征的基础上,设计了电流不平衡保护,并与过流保护配合实现直流故障类型的识别;(4)结合交流故障后直流侧的电压特征,改进了传统直流电压保护,防

止交流故障后直流保护误动。

1 直流线路故障模型

为分析直流线路的故障特征,先给出无损传输线的时域等效模型,如图 1 所示。

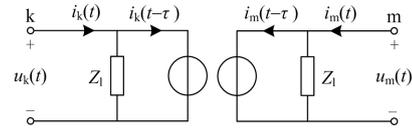


图 1 无损传输线时域等效模型

Fig. 1 Time-domain equivalent model of lossless line

图中, $u_k(t)$ 、 $i_k(t)$ 为 k 点电压、电流, $u_m(t)$ 、 $i_m(t)$ 为 m 点电压、电流, Z_1 为传输线波阻抗。t 时刻, 距离 k 点 x 米处的电压、电流瞬时值 $u(x,t)$ 、 $i(x,t)$ 与 k 点电压 $u_k(t)$ 、电流 $i_k(t)$ 的关系如式(1)所示^[21]。

$$\begin{aligned} i(x,t) &= [u_k(t+x/v) - Z_1 i_k(t+x/v)]/2Z_1 - \\ & [u_k(t-x/v) + Z_1 i_k(t-x/v)]/2Z_1 \\ u(x,t) &= [u_k(t+x/v) - Z_1 i_k(t+x/v)]/2 - \\ & [u_k(t-x/v) + Z_1 i_k(t-x/v)]/2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, v 为线路行波波速。设 t_f 时刻, 图 2 所示直流配电网线路 AB 上 k2 点发生短路故障。

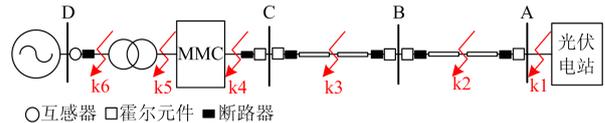


图 2 光伏直流汇集接入系统拓扑结构示意图

Fig. 2 Topology diagram of PV grid-connected system

对于单极短路, 令 u_{k0} 为故障极故障点故障前的电压, 则非故障极电压为 $-u_{k0}$ 。故障后, 故障点处, 故障极与非故障极的附加电源均为 $-u_{k0}$, 电流均从线路流向故障点。设故障点一侧流入故障点的电流为 i_{k01} , 另一侧流入故障点电流为 i_{k02} , 下标 fp 表示故障极, 下标 np 表示非故障极。线路故障极与非故障极的故障点电压满足 $u_{fpk} = u_{npk} = -u_{k0}$, 电流满足 $i_{fpkA} = i_{npkA} = -i_{k01}$, $i_{fpkB} = i_{npkB} = -i_{k02}$ 。

同理可得附加回路中, A 端的非故障极电压 u_{npA} 、电流 i_{npA} , B 端的故障极电压 u_{fpB} 、电流 i_{fpB} , 及非故障极电压 u_{npB} 、电流 i_{npB} 。由于故障附加回路中, 故障极与非故障极的故障点电压相等, 且均为 $-u_{k0}$, 故 A 端和 B 端故障极与非故障极电流均从母线流向线路, 与正方向同向。

对于极间短路, 令 u_{k0} 为故障前 k2 点正极电压, 则负极电压为 $-u_{k0}$ 。故障后, k2 点正极的附加电源为 $-u_{k0}$, 负极的附加电源为 u_{k0} , 电流从线路正极流入 k2 再流向线路负极。以下标 p 表示正极, 下标 n

表示负极。在故障附加电路中,故障点的正极电压 $u_{pk}=-u_{k0}$, 电流 $i_{pkA}=-i_{k01}$, $i_{pkB}=-i_{k02}$, 负极电压 $u_{nk}=u_{k0}$, 电流 $i_{nkA}=i_{k01}$, $i_{nkB}=i_{k02}$ 。

由于故障附加回路中,故障极与非故障极的故障点电压相反,故 A 端和 B 端正极电流从母线流向线路,与正方向同向,负极电流从线路流向母线,与正方向反向。

若在直流线路 AB 以外发生故障,以图 2 中光伏电站出线 k1 点发生单极接地故障为例,同理可得附加回路中, A 端故障极电压 u_{fpA} 、电流 i_{fpA} , 非故障极电压 u_{npA} 、电流 i_{npA} , B 端的故障极电压 u_{fpB} 、电流 i_{fpB} , 及非故障极电压 u_{npB} 、电流 i_{npB} 。且 B 端电压、电流与线路 AB 始端故障时, B 端电压、电流相等。由于故障附加回路中,故障极与非故障极的故障点电压相等,且均为 $-u_{k0}$ 。故 A 端故障极与非故障极电流均从线路流向母线,与正方向相反。B 端故障极与非故障极电流均从母线流向线路,与正方向相同。

2 直流配电网的线路主保护

2.1 保护原理

直流配电网线路短路的主保护由电流差动保护、电流过流保护和正、负极电流不平衡保护组成。其中,电流差动保护用于判断故障位置,过流保护和电流不平衡保护用于识别故障类型。保护范围为整段直流线路。电流正方向为从母线到线路。

以 k2 点短路为例,说明主保护的原理。采用电流差动保护判断保护区域,设正、负极差流 i_{pDif} 、 i_{nDif} 如式(2)所示。

$$i_{pDif} = i_{pA} + i_{pB}, \quad i_{nDif} = i_{nA} + i_{nB} \quad (2)$$

式中: i_{pA} 为 A 端正极电流; i_{pB} 为 B 端正极电流; i_{nA} 为 A 端负极电流; i_{nB} 为 B 端负极电流。

为便于判断正、负极差流,设总差流 i_{dcDif} 如式(3)所示。

$$i_{dcDif} = |i_{pDif}| + |i_{nDif}| \quad (3)$$

区内故障后,差流主要受线路参数影响。区内故障后,差流远大于线路参数导致的差流,故可通过差流保护判断故障是否发生在区内。

确定为区内故障后,通过电流不平衡保护判断是否为单极接地短路,并确定故障极。通过过流保护确定是否为极间短路。设电流不平衡系数为 K_{Idiff} , 如式(4)所示。

$$K_{Idiff} = |i_n / i_p| \quad (4)$$

结合第 1 节的分析可知,正极接地短路后,线路两端电流不平衡系数 K_{Idiff} 均小于 1。若为负极接

地短路,则有 $K_{Idiff} > 1$ 。极间短路后, $K_{Idiff} = 1$ 。系统正常运行时,正、负极电流 i_{pA} 、 i_{nA} 满足 $i_{pA} = -i_{nA}$, 则 $K_{IdiffA} = 1$ 。

设 A 端电流为 i_{dcA} , 如式(5)所示。其中, i_{pA} 为 A 端正极电流, i_{nA} 为 A 端负极电流。

$$i_{dcA} = |i_{pA}| + |i_{nA}| \quad (5)$$

由于单极短路后极间电压不变,而极间短路后,故障点处极间电压为 0,导致直流系统输出极间电压突降,故极间短路后,故障电流 i_{fA} 远大于单极接地短路的 i_{fA} 。

综上,可采用始末端差流判断区内是否发生故障,通过始端电流不平衡系数 K_{Idiff} 以及电流 i_{dcA} 判断直流故障类型。

根据区内短路后,线路始、末端电流特征,可得式(6)所示的主保护判据。

$$\begin{cases} i_{dcDif} > I_{set1.1} \\ i_{dcA} = |i_{pA}| + |i_{nA}| > I_{set1.2} \\ |K_{IdiffA} - 1| = \left| |i_{nA} / i_{pA}| - 1 \right| > K_{setld} \end{cases} \quad (6)$$

为便于识别单极短路并判断故障极,式(6)中的不平衡电流判据设置为 $K_{IdiffA} - 1$ 。其中, $I_{set1.1}$ 、 $I_{set1.2}$ 、 K_{setld} 取值如式(7)所示。

$$\begin{cases} I_{set1.1} = K_{set1.1} \max \{ |I_{dcD.sup}|, |I_{dcD.sub}|, |I_{dcD.nor}| \} \\ I_{set1.2} = K_{set1.2} \max \{ I_{dcA.SpF}, I_{dcA.nor} \} \\ K_{setld} = K_{set1.3} \max \{ |K_{Id.nor} - 1|, |K_{Id.PNF} - 1| \} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $K_{set1.1}$ 、 $K_{set1.2}$ 、 $K_{set1.3}$ 分别为差流保护、过流保护及电流不平衡保护的可靠系数,为协调速动性和可靠性,考虑电流传感器误差等,可靠系数取 1.1~1.3。区内故障判据整定值 $I_{set1.1}$ 按躲过上级线路、下级线路短路及正常运行时的差流 $I_{dcD.sup}$ 、 $I_{dcD.sub}$ 和 $I_{dcD.nor}$ 整定。由前面的分析可知,极间短路后的线路始端电流 i_{dcA} 远大于单极接地短路的 i_{dcA} , 同时为避免正常运行时保护误判,极间短路判据整定值 $I_{set1.2}$ 按躲过区内单极接地短路和正常运行的始端电流最大值 $I_{dcA.SpF}$ 和 $I_{dcA.nor}$ 整定。由于单极接地短路后,电流不平衡系数 $K_{IdiffA} \neq 1$, 考虑到元件参数差异等因素可能导致的正常运行和极间短路后 $K_{IdiffA} \neq 1$, 不平衡电流判据整定值 K_{setld} 按躲过正常运行和区内极间短路时,线路始端正负极电流不平衡系数 $K_{Id.nor}$ 、 $K_{Id.PNF}$ 整定。

2.2 保护方案及验证

主保护流程如图 3 所示。其中, $\text{sign}(y)$ 为符号判断函数,当实数 y 为正时,函数值为 1, y 为 0

时函数值为 0, y 为负时函数值为-1。为提高判断速度, 同时判断图 3 中前三个判据, 并记录成立次数。连续成立 3 次即认为该判据成立, 再按照图 3 流程判断故障类型。

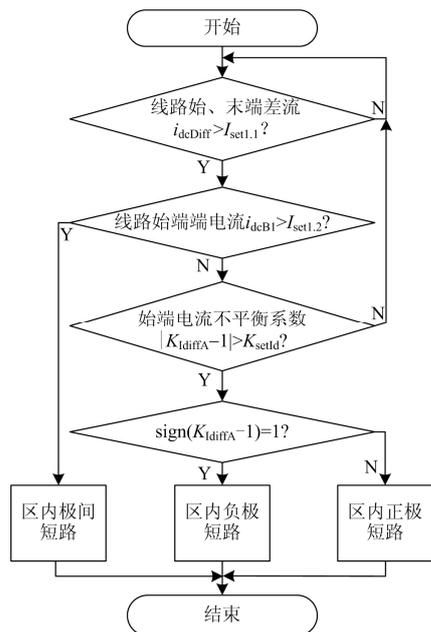


图 3 主保护流程图

Fig. 3 Flow chart of the main protection

在 PSCAD 中搭建图 2 所示光伏直流汇集接入系统, 验证提出的保护方案。直流系统为 5 MW 光伏电站, 交流系统电压为 35 kV。两段线路均为 10 km 的 30 kV 直流电缆, 线路阻抗 $Z_f=0.45 \Omega/\text{km}$ 。并网变流站由 MMC 和连接变压器组成。MMC 采用具有闭锁功能的 129 电平混合型 MMC, 半桥子模块 (Half bridge submodule, HBSM) 与全桥子模块 (Full bridge submodule, FBSM) 个数比为 1:1。连接变压器 Dyn11 变压器, 且经 1 000 Ω 电阻接地, 变比 1:1.1。光伏电站采用最大功率跟踪控制, MMC 采用无功与定直流电压作为外环的电流解耦控制。

以线路 AB 上除始端以外, 其他位置金属性短路为例, 分析故障后线路 AB 始、末端电压、电流。单极短路后, 极间电压不变, 光伏输出电流基本不变, 故障极对应的 MMC 半桥子模块电容与线路电容形成放电回路。始、末端故障附加电流 i_{fA} 、 i_{fB} 主要由线路分布电容决定, 且正、负极故障电流方向相同, 则故障后, 正、负极电流不平衡。极间短路后, 受故障点极间电压降为 0 的影响, 始、末端电压下降且接近于 0。由光伏输出特性可知, 光伏输出电流增大, 且约为短路电流, MMC 子模块电容放电。与单极短路相比, 始端故障电流 i_{fA} 还包含

光伏输出短路电流, 末端故障电流 i_{fB} 还包含 MMC 电容放电电流。

若线路 AB 始端短路, 由于光伏电站直接与始端相连, 故 i_{fA} 仅由光伏输出短路电流决定。因光伏输出最大短路电流为 1 kA, 且电流具有单向性, 只能从光伏电站流出, 导致正、负极电流不平衡度较低。故线路 AB 始端短路后, 主保护可能不动作。

仿真 1 s 时, 分别在 k1 至 k4 设置正极接地短路和极间短路, 在 k5、k6 设置交流短路。采样频率 20 kHz, 在 Matlab 中处理仿真输出数据, 验证保护方案。对于线路 AB, $I_{set1.1}$ 需躲过线路 BC 始端单极短路后的最大差流 1.774 8 kA, 令 $K_{set1.1}=1.05$, 则 $I_{set1.1}=1.86$ kA; $I_{set1.2}$ 需躲过本段线路单极短路后的最大电流 3.2 kA, 令 $K_{set1.2}=1.1$, 则 $I_{set1.2}=3.52$ kA; $I_{set1.3}$ 需躲过本段线路极间短路后的最大不平衡电流系数 0.001 6, 令 $K_{set1.3}=1.1$, 则 $I_{set1.3}=0.001 76$ 。对于线路 BC, $I_{set1.1}$ 需躲过 MMC 直流出口处单极短路后的最大差流 1.966 kA, 令 $K_{set1.1}=1.1$, 则 $I_{set1.1}=2.16$ kA; $I_{set1.2}$ 需躲过本段线路单极短路后的最大电流 2.88 kA, 令 $K_{set1.2}=1.1$, 则 $I_{set1.2}=3.17$ kA; $I_{set1.3}$ 需躲过本段线路极间短路后的最大不平衡电流系数 0.003, 令 $K_{set1.3}=1.1$, 则 $I_{set1.3}=0.003 3$ 。

主保护方案结果验证如表 1 所示。其中, X_{fA} 、 X_{fB} 分别为线路 AB 和线路 BC 故障到本段线路始端的距离(单位: km), PF 代表正极短路, PNF 代表极间短路, acF 代表交流短路, R_f 为过渡电阻。

由表 1 可知, 对于金属性短路, 线路 BC 的保护可以准确识别本段线路的故障。由于直接与光伏电站相连, 线路 AB 可以识别除始端外, 其他位置的短路。但对于高阻故障, 主保护难以识别。为减小过渡电阻及光伏电站短路特性对故障识别的影响, 提高保护的可靠性, 需设置可保护本段线路全长的后备保护。

3 直流配电网的线路后备保护

3.1 保护原理

虽然在发生金属性短路时, 主保护可以保护线路全长, 但当线路末端发生非金属性短路时, 主保护可能不动作。故需要设置后备保护, 保护范围为线路全长。采用方向电流保护确定故障区域, 利用低电压保护判断故障类型。

以直流线路 AB 为例, 区内故障时, 本段线路与下级线路 BC 始端故障电流方向相反, 且线路 AB 始端故障电流方向与正方向相同, 线路 BC 始端故障电流方向与正方向相反。区外故障时, 线路 AB、BC 始端故障电流方向相同, 且均与正方向相反。

表 1 主保护的测试结果

Table 1 Test results of the proposed main protection

故障位置	故障类型	R_f/Ω	线路 AB 保护		线路 BC 保护		
			故障识别	判据成立时间/ms	故障识别	判据成立时间/ms	
k1	PF	0	—	—	—	—	
		50	—	—	—	—	
	PNF	0	—	—	—	—	
		50	—	—	—	—	
	k2 线路首端	PF	0	—	—	—	—
			50	—	—	—	—
PNF		0	—	—	—	—	
		50	—	—	—	—	
k2 线路末端		PF	0	PF	0.4	—	—
			50	—	—	—	—
	PNF	0	PNF	0.2	—	—	
		50	—	—	—	—	
	k3 线路首端	PF	0	—	—	PF	1.1
			50	—	—	—	—
PNF		0	—	—	PNF	0.1	
		50	—	—	PNF	15.7	
k3 线路末端		PF	0	—	—	PF	1.4
			50	—	—	—	—
	PNF	0	—	—	PNF	0.2	
		50	—	—	—	—	
	k4	PF	0	—	—	—	—
			50	—	—	—	—
PNF		0	—	—	—	—	
		50	—	—	—	—	
acF		0	—	—	—	—	
		50	—	—	—	—	
k6	acF	0	—	—	—	—	

故可以通过判断并比较本段及下级线路始端故障电流方向, 确定故障位置。

$$S_{iA} = \begin{cases} 1, & i_{iA} - i_{iA0} > I_{set2.1} \\ 0, & |i_{iA} - i_{iA0}| \leq I_{set2.1} \\ -1, & i_{iA} - i_{iA0} < -I_{set2.1} \end{cases} \quad (8)$$

设 A 端 i 极故障电流方向为 $S_{iA}(i=p,n)$, 且 p 代表正极, n 代表负极, 其取值如式(8)所示。其中, i_{iA0} 为正常运行时, A 端 i 极电流; $I_{set2.1}$ 为过流整定值, 如式(9)所示。

$$I_{set2.1} = K_{set2.1} \left| \frac{I_{iA0,max} - I_{iA0,min}}{2} \right| \quad (9)$$

式中: $K_{set2.1}$ 为可靠系数; $I_{iA0,max}$ 、 $I_{iA0,min}$ 分别为正常运行时, A 端 i 极电流的最大值与最小值。

若本段线路始端的 S_{iA} , 与下级线路始端电流方向 S_{isub} 满足式(10), 则发生区内故障。

$$S_{iA} S_{isub} = -1 \quad (10)$$

区内故障后, 故障点处故障极电压为 0, 导致线路两端故障极电压下降^[22], 设低电压保护判据如式(11)所示。

$$|u_{pA}| < U_{set2.2}, |u_{nA}| < U_{set2.2} \quad (11)$$

式中: u_{pA} 、 u_{nA} 为线路始端正、负极电压; 当下级为换流器时, $U_{set2.2}$ 取值如式(12)所示; 当下级为换流器时, 为防止交流故障后保护误动, 并考虑过渡电阻的影响, 同时兼顾保护的速动性, 采用两套低电压判据, 其中辅助判据的 $U_{set2.2}$ 如式(13)所示。

$$U_{set2.2} = K_{set2.2} U_{0A,min} \quad (12)$$

$$U_{set2.2} = K_{set2.2} (1 - \sqrt{2}/2) U_{0A} \quad (13)$$

式中: $K_{set2.2}$ 为低电压保护的可靠系数; $U_{0A,min}$ 为正常运行时线路始端最低电压; U_{0A} 为线路始端额定电压。

当交流短路时, 直流侧电压可能包含工频正弦分量, 且幅值最大为正常运行时的直流线路电压。为防止交流故障导致低电压保护误动, 当过渡电阻较大时, 低电压判据的整定值为式(12), 延时至少 1/2 工频周期, 即 $t_{set2} \geq 10$ ms。当过渡电阻较小时, 为减小保护动作时间, 低电压判据整定值为式(13), 延时至少 1/4 工频周期, 即 $t_{set2} \geq 5$ ms。在 1/4 周期内, 正弦分量均值最大时, 初相角为 45°, 结合式(13)可知, 交流短路后, 在 1/4 周期内, 式(11)不恒成立。通过整定值与延时的配合, 可躲过交流故障。

3.2 保护方案及验证

图 4 所示为直流线路后备保护流程。通过延时 t_{set2} , 实现后备保护与本段线路主保护的配合, 防止主保护动作前后备保护先动作。为提高判断速度, 同时判断式(10)所示方向电流判据和式(11)所示低电压判据是否成立。其中, 若连续 3 个采样周期内本级线路及下级线路方向均满足式(10), 则认为方向电流判据成立, 故障发生在本段线路。再根据式(11)判断是否为区内故障, 并确定故障类型。若在 t_{set2} 内, 仅正极电压始终满足式(11), 则为正极接地短路; 若在 t_{set2} 内仅负极电压始终满足式(11), 则为负极接地短路; 若在 t_{set2} 内正、负极电压均一直满足式(11), 则为极间短路。

在光伏直流接入系统模型中, 以线路 AB 的保护为例, 分析故障后线路 AB、BC 始端电流方向。线路 AB 上任一点 k2 故障后, 线路 AB 始端的故障电流主要由光伏电站及线路电容放电提供, 线路 BC 始端的故障电流主要为 MMC 电容放电电流, 且与 AB 始端故障电流方向相反, i 极电流方向 $S_{iA}=1$, $S_{iB}=-1$, 或 $S_{iA}=-1$, $S_{iB}=1$, 式(10)成立, 为区内故障, 继续判断 AB 始端电压, 确定故障极。当线路

AB 上级 k1 点故障时, 线路 AB、BC 始端电流均由 MMC 电容放电提供, S_{iA} 、 S_{iB} 均为 1 或 -1, 式(10)不成立, 为区外故障, 保护不动作。当线路 BC 上 k3 点故障时, 线路 AB、BC 始端电流均由光伏电站提供, S_{iA} 、 S_{iB} 均为 1 或 -1, 式(10)不成立, 为区外故障, 保护不动作。

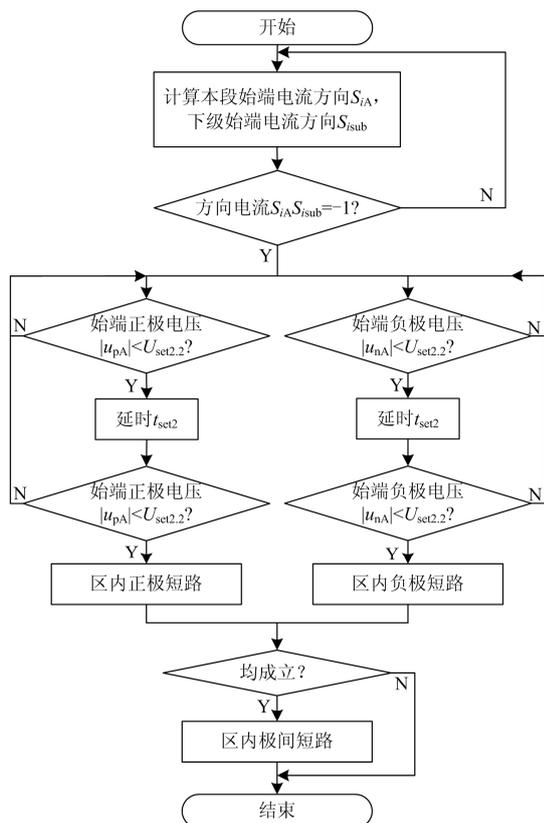


图 4 直流线路后备保护流程图

Fig. 4 Flowchart of the proposed local backup protection

对于线路 AB, 因线路始端短路后, 主保护不动作, 且由表 1 可知, 主保护成立时间最长为 0.4 ms, 故令 $t_{set2}=0.5$ ms, $K_{set2.1}=1.1$, 根据式(9), 取 AB 始端过流定值 $I_{set2.1.A}=0.0128$ kA, BC 始端过流定值 $I_{set2.1.B}=0.0177$ kA。令 $K_{set2.2}=0.9$, 取允许运行的最低电压 $U_{0A.min}=28.5$ kV, 则 $U_{set2.2}=26.65$ kV。

对于线路 BC, 根据式(9), 取 BC 始端过流定值 $I_{set2.1.B}=0.0128$ kA, 线路 CD 始端过流定值 $I_{set2.1.C}=0.0177$ kA。当低电压判据定值为式(13)时, 由表 1 知, 除高阻短路外, 主保护成立时间最长为 1.4 ms, 故令 $t_{set2}=5$ ms, $K_{set2.1}=0.9$, 线路额定电压 $U_{0A}=30$ kV, 则 $U_{set2.2}=7.9$ kV。当低电压判据整定值为式(12)时, 由表 1 可知, 主保护成立时间最长为 15.7 ms, 故令 $t_{set2}=20$ ms, $U_{set2.2}$ 取值与 AB 段的相同。

后备保护测试结果如表 2。由表 2 可知, 由电流方向保护与低电压保护组成的后备保护, 可以准确地识别整段线路内的短路, 且区外故障不误动。因保护定值仅与正常运行状态有关, 故过渡电阻只影响保护的速动性, 并不影响保护的可靠性。此外, 电流方向保护中, 需采集下一级线路始端电流方向信号, 导致保护速动性还受通讯延时的影响。相比于主保护, 后备保护对速动性的要求较低, 且该保护可靠性较高, 故可用于直流线路的后备保护。

表 2 后备保护方案的测试结果

Table 2 Test result of the proposed local backup protection

故障位置	故障类型	R_f/Ω	线路 AB 保护		线路 BC 保护	
			故障识别	判据成立时间/ms	故障识别	判据成立时间/ms
k1	PF	0	—	—	—	—
		50	—	—	—	—
	PNF	0	—	—	—	—
		50	—	—	—	—
线路首端	PF	0	PF	0.5	—	—
		50	PF	0.5	—	—
	PNF	0	PNF	1.4	—	—
		50	PNF	1	—	—
k2	PF	0	PF	0.5	—	—
		50	PF	0.6	—	—
	PNF	0	PNF	0.7	—	—
		50	PNF	1.1	—	—
线路末端	PF	0	—	—	PF	5
		50	—	—	PF	6.1
	PNF	0	—	—	PNF	5
		50	—	—	PNF	20.6
k3	PF	0	—	—	PF	5.1
		50	—	—	PF	6.1
	PNF	0	—	—	PNF	5.6
		50	—	—	PNF	20.1
k4	PF	0	—	—	—	—
	50	—	—	—	—	—
k5	acF	0	—	—	—	—
	acF	0	—	—	—	—
k6	acF	0	—	—	—	—
	acF	0	—	—	—	—

4 直流配电网线路保护的仿真实验

为验证直流配电网线路保护方案在复杂系统中的适用性, 在图 5 所示的 ± 10 kV 多端柔性直流配电系统中进一步验证该方案。其中, MMC 为由 HBSM 和 FBSM 构成的混合型 MMC; $L_1 \sim L_3$ 为直流线路, $B_1 \sim B_6$ 为直流母线。正常运行时线路 $L_1 \sim L_3$ 的电流数值分别为 140 A、18 A 和 72 A; 正极电流方向分

别为从 B₃ 流向 B₄, 从 B₄ 流向 B₅, 从 B₆ 流向 B₅。采样频率 10 kHz。

以线路始端 f₂、f₄、f₆ 点, 和末端 f₃、f₅、f₇ 点发生直流单极接地故障和极间故障, 以及 VSC 交流出口 f₁ 点, MMC 交流出口 f₈ 点发生交流短路为例, 验证直流配电网线路保护方案。综合考虑直流断路器动作时间、主保护识别时间以及传输延时, 设各段线路后备保护延时 $t_{set2}=5$ ms。故障识别结果

及保护判据成立时间如表 3 所示。

由于交流故障后直流线路保护均正确不动作, 故 f₁ 点及 f₈ 点故障识别结果不在表 3 中列出。f₂~f₇ 点过渡电阻为 10 Ω 的极间故障, 以及 f₃ 和 f₆ 点过渡电阻为 10 Ω 的单极接地故障均由后备保护识别。由表 3 可知, 该保护可正确识别直流配电网线路故障, 且满足可靠性要求。主保护可迅速识别区内金属性短路, 后备保护可保护线路全长。

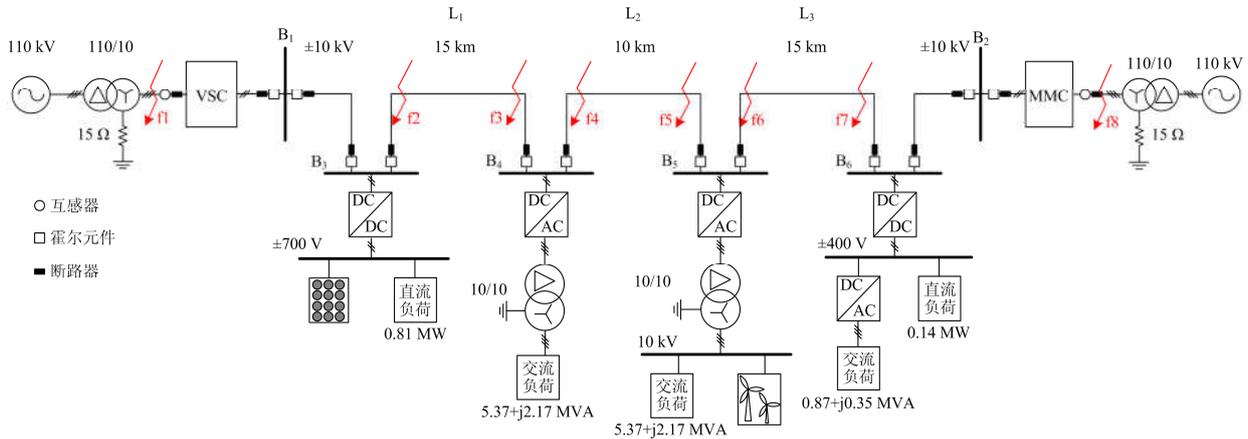


图 5 多端柔性直流配电系统拓扑示意图

Fig. 5 Topology of a multi-terminal flexible DC distribution network

表 3 直流配电网线路保护方案的测试结果

Table 3 Test result of the proposed protection for DC lines in the DC distribution network

故障位置	故障类型	R_f/Ω	L ₁ 保护			L ₂ 保护			L ₃ 保护			
			判据		判据		判据		判据		判据	
			故障识别	成立时间/ms	故障识别	成立时间/ms	故障识别	成立时间/ms	故障识别	成立时间/ms	故障识别	成立时间/ms
f ₂	PF	0	PF	0.2	—	—	—	—	—	—	—	
		10	PF	10.2	—	—	—	—	—	—	—	
	PNF	0	PNF	0.2	—	—	—	—	—	—	—	
		10	PNF	7.6	—	—	—	—	—	—	—	
f ₄	PF	0	—	—	PF	0.2	—	—	—	—	—	
		10	—	—	PF	0.2	—	—	—	—	—	
	PNF	0	—	—	PNF	0.2	—	—	—	—	—	
		10	—	—	PNF	5.6	—	—	—	—	—	
f ₆	PF	0	—	—	—	—	PF	0.2	—	—	—	
		10	—	—	—	—	PF	6.2	—	—	—	
	PNF	0	—	—	—	—	PNF	0.2	—	—	—	
		10	—	—	—	—	PNF	5.6	—	—	—	
f ₃	PF	0	PF	0.9	—	—	—	—	—	—	—	
		10	PF	6.6	—	—	—	—	—	—	—	
	PNF	0	PNF	1	—	—	—	—	—	—	—	
		10	PNF	12.9	—	—	—	—	—	—	—	
f ₅	PF	0	—	—	PF	0.3	—	—	—	—		
		10	—	—	PF	0.3	—	—	—	—		
	PNF	0	—	—	PNF	0.3	—	—	—	—		
		10	—	—	PNF	7.8	—	—	—	—		
f ₇	PF	0	—	—	—	—	PF	0.3	—	—		
		10	—	—	—	—	PF	0.5	—	—		
	PNF	0	—	—	—	—	PNF	0.8	—	—		
		10	—	—	—	—	PNF	8.3	—	—		

5 结语

1) 直流配电网线路主保护由电流差动保护、过流保护和不平衡电流保护组成, 保护范围为线路全长。相邻线路及交流故障后, 本段直流线路主保护不误动。主保护主要考虑速动性, 故当过渡电阻较

大时, 线路末端故障保护不动作, 需配置后备保护。

2) 直流配电网线路的后备保护由电流方向保护和低电压保护组成, 保护范围为线路全长。因故障电流方向和电压受过渡电阻影响较小, 故后备保护不受过渡电阻影响, 可以保护线路全长, 且相邻

直流线路及交流故障后不误动。

参考文献

- [1] 李豹, 熊双成, 李金安, 等. 特高压直流保护逻辑元件对保护特性的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 133-137.
LI Bao, XIONG Shuangcheng, LI Jinan, et al. Study on the influence of logical module on UHVDC protective characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 133-137.
- [2] 李斌, 何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 87-95.
LI Bin, HE Jiawei. Research on the DC fault isolating technique in multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 87-95.
- [3] 李俊霞, 严兵, 张爱玲, 等. 特高压直流双极区直流保护系统可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 130-136.
LI Junxia, YAN Bing, ZHANG Ailing, et al. Reliability research for UHVDC bipolar area DC protection system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 130-136.
- [4] 郭敬梅, 曾德辉. 高压直流线路短路故障行波保护动作概率计算与分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 99-107.
GUO Jingmei, ZENG Dehui. Action probability calculation and analysis method for travelling-wave protection caused by short-circuit faults on HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 99-107.
- [5] 郑伟, 武霁阳, 李海锋, 等. 特高压直流线路自适应行波保护[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1997-2003.
ZHENG Wei, WU Jiyang, LI Haifeng, et al. Research on adaptive travelling wave based protection for UHVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1997-2003.
- [6] 李敬如, 韩丰, 姜世公, 等. 能源互联网环境下交直流混合配电系统关键技术[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 56-63.
LI Jingru, HAN Feng, JIANG Shigong, et al. Research on the key technologies of AC/DC hybrid distribution networks based on energy internet[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 56-63.
- [7] 许火炬, 缪希仁. 交直流混合配电方式及其故障保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 139-146.
XU Huoju, MIAO Xiren. A review of AC/DC hybrid distribution and fault protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 139-146.
- [8] RAHMAN M H, XU L, YAO L. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [9] 徐敏, 蔡泽祥, 李晓华, 等. 一种检测电流首峰值时间的直流线路保护新原理[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2396-2402.
XU Min, CAI Zexiang, LI Xiaohua, et al. A new principle of protective relaying based on detecting the first peak time of fault current for HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2396-2402.
- [10] 何佳伟, 李斌, 李晔, 等. 多端柔性直流电网快速方向纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6878-6888.
HE Jiawei, LI Bin, LI Ye, et al. A fast directional pilot protection scheme for the MMC-based MTDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6878-6888.
- [11] 李小鹏, 滕予非, 刘耀, 等. 基于测量波阻抗的高压直流输电线路纵联保护[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 617-623.
LI Xiaopeng, TENG Yufei, LIU Yao, et al. Pilot protection based on measured surge impedance for HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 617-623.
- [12] 刘剑, 邵能灵, 范春菊. 基于电流波形匹配的高压直流输电线路纵联保护[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1736-1743.
LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju. A novel pilot protection scheme for HVDC transmission line based on current waveform matching[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1736-1743.
- [13] JUNIOR R B, LACERDA V A, MONARO R M, et al. Selective non-unit protection technique for multiterminal VSC-HVDC grids[J/OL]. [2018-01-18]. http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html.
- [14] 宁连营, 邵能灵, 郑晓冬, 等. 基于单端暂态电流的MMC-HVDC输电线路保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5010-5018.
NING Lianying, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Research on MMC-HVDC transmission line protection scheme based on one terminal transient current[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5010-5018.
- [15] DANTAS R, LIANG J, UGALDE-LOO C E, et al. Progressive fault isolation and grid restoration strategy for MTDC networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 909-918.
- [16] 徐铭铭, 王鹏, 高明春. 基于潮流计算的直流配电网

- 单极接地故障定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 103-109.
- XU Mingming, WANG Peng, GAO Mingchun. A fault location algorithm for the single-pole-to-ground fault of DC distribution network based on power flow calculation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 103-109.
- [17] 高淑萍, 胡振宇, 张保会, 等. 一种适用于 MMC-HVDC 直流输电线路的保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 13-20.
- GAO Shuping, HU Zhenyu, ZHANG Baohui, et al. A new relay protection principle of MMC-HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 13-20.
- [18] ZOU G, HUANG Q, SONG S, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [19] 戴志辉, 葛红波, 陈冰研, 等. 柔性中压直流配电网线路保护方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 78-86.
- DAI Zhihui, GE Hongbo, CHEN Bingyan, et al. Line protection schemes for flexible medium voltage DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 78-86.
- [20] 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): 2353-2362.
- 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): 2353-2362.
- [21] 宋国兵, 索南加乐, 许庆强, 等. 基于双回线环流的时域法故障定位[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 24-29.
- SONG Guobing, SUONAN Jiale, XU Qingqiang, et al. A novel time-domain algorithm for locating faults on parallel transmission lines by circulating circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 24-29.
- [22] 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.

收稿日期: 2018-05-16; 修回日期: 2018-08-22

作者简介:

李勇(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力规划、直流电网等; E-mail: 3637010@qq.com

梁爽(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: aulric318@163.com

陈曦(1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划、电力经济等。E-mail: 2064923239@qq.com

(编辑 姜新丽)