基于暂态电压比原理的直流配电网故障保护方案

王圣辉,范春菊,姜 山

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240)

摘要:由于直流配电网故障时短路电流呈现上升快、峰值大、过程短的基本特点,给故障的可靠识别和快速切除造成了困难。利用线路出口限流电抗器两侧电压的时域特性实现区内、外故障的可靠判别,提出了一种适用于直流配电网线路的继电保护方案,并通过单侧电气量保护与双侧电气量保护的配合实现了直流配电线路保护的速动性和选择性。该方案仅通过限流电抗器的暂态电压比即可实现对故障的快速检测、识别,不仅能满足直流电网对保护的要求,而且保护方案简单、易实现。大量仿真实例验证了保护方案的可行性,且具备较强的抗过渡电阻能力。

0 引言

近年来,随着光伏、风电等分布式能源的快速发展,新能源在配电网中的渗透率逐步增大。为了接入传统的交流配电网,光伏、风电往往需要通过多级 变流器结构实现交直流变换,由电力电子器件构成 的变流器带来的运行损耗将影响分布式能源并网的 实际运行效率。与此同时,直流空调、电动汽车等直 流负载在居民负荷中的占比快速增长,通过交流配 电网给这些直流负载供电需要经过整流环节,从而 导致用电环节的效率低下^[12]。

随着功率半导体技术的进步,直流配电技术得 到了长足的发展。由于在直流配电网能够实现分布 式能源的直接接入,减少了供电环节的功率损耗;直 流负载接入直流配电网也能减少变流器的使用,提 高用电环节的运行效率。通过直流配电网中源与荷 的直接匹配,实现了分布式能源的就地消纳,从而提 高了配电网系统的整体效率^[3]。另外相比于传统交 流配电网,直流配电网还具备线路成本低、输电损耗 小、供电可靠性高等突出优点,因此直流配电网得到 了各国学者的广泛研究,并具备良好的应用前景^[4]。

尽管直流配电网在经济性上具备一定的优势, 但在发生故障后对故障的识别、隔离等问题上面临 着巨大的挑战^[5]。目前直流环节中主要通过电容给 各端口提供电压支撑,从而导致直流配电网中发生 故障后电容快速放电,且呈现峰值电流大而暂态过 程短的基本特征。如果无法在短时间内排除故障区 域,将导致故障范围迅速扩大,因此要求直流保护能 够在1~2 ms内正确检测出故障^[6]。在高压直流输电 系统中,通常将行波保护作为主保护,而将电流差动 保护作为后备保护^[7]。行波保护原理基于线路中的 高频暂态信号,由于直流配电网中的直流线路较短,

收稿日期:2019-10-12;修回日期:2020-05-08

采样频率需达数 MHz, 配电网中安装的保护装置难 以满足上述要求^[8]。而电流差动保护依赖线路两侧 测量数据的严格同步,并且为避免区外故障可能导 致的误动作,需要较长的延时,无法满足直流配电网 中快速识别故障的要求^[9]。文献[10]提出通过比较 直流配电网中各保护处测得的暂态高频阻抗实现故 障区域的识别,但其保护原理依赖于保护间的相互 通信,且未考虑单极接地故障。文献[11]利用电流 突变量实现故障方向的识别,但是当过渡电阻较大 时突变电流的减小将影响保护动作。

为了限制短路电流对直流配电网的危害,仅通 过在直流线路两端加装电抗器就能够限制短路电流 水平,同时延长故障后的暂态过程[12]。国内外学者 针对直流电抗器构成的线路边界进行了保护方案的 研究。文献[13]利用限流电抗器上的电压变化率和 正负来定位故障区段。文献[14]利用限流电抗器线 路侧的电压变化率实现故障的快速检测和保护的选 择性。文献[15]利用限流电抗器上的电压幅值和方 向判别区内外故障。文献[16]采用限流电抗器上直 流电压变化率的大小来识别故障线路,通过检测到 的零模故障分量进行故障选极。上述保护的动作依 据均基于判定限流电抗器电压变化率的基本思路, 而基于限流电抗器两侧电压比值的保护方案同样具 有理论可行性。文献[17]根据限流电抗器两侧电压 的比值进行故障分区,具有方向性,但不能区分极间 和单极故障。文献[18]利用频域下经过滤波算法得 到的限流电抗器两侧高频电压比构成保护原理,但 高频信号容易受到电磁、雷击的干扰,且保护方案中 未给出保护定值的理论依据。文献[19]提出了限流 电抗器两端暂态电压比的时域概念,可以作为实现 **直流配电网保护的新思路**。

本文基于中压直流配电网的基本结构及其故障 特性,提出了适用于配电网直流线路故障的保护方 案:利用线路出口限流电抗器两侧测得电压的时域 特征,构造暂态电压比的概念作为识别故障方向的 可靠判据;根据暂态电压比的故障特性,为直流线路 配置了相应的单侧电气量保护及双侧电气量保护, 并给出了保护明确的理论依据及整定方法。最后, 在PSCAD / EMTDC软件平台上进行了大量的仿真, 仿真结果表明本文保护方案在各种故障条件下均能 够正确动作,验证了保护方案的可行性。

1 中压直流配电网的基本结构

中压直流配电系统作为配电网中功率联络的关 键环节,适合构成多端系统,主要由两侧换流站、直 流断路器及直流线路共同构成。换流站主要包含开 关器件、滤波器及直流电容等设备,特定的换流站结 构能够用于连接不同电压等级的交直流配电网。直 流线路的长度一般较短,在线路两侧加装限流电抗 器CLR(Current Limiting Reactor)用于滤除高频纹 波、限制故障电流,线路两侧的直流断路器用于开断 直流线路故障。图1为中压直流配电网的基本结 构。图中,QF₁-QF₄为两侧换流站出口正、负极安 装的断路器;本文中保护装置安装在直流线路出口, 装置测量值为各限流电抗器的两侧电压;保护1和 保护2为线路两侧的保护,保护范围为两端限流电 抗器内侧的直流线路;f, 一f, 表示中压直流配电网 中可能出现的不同故障类型,其中f1-f1表示直流 线路区内故障(f,表示极间故障,f,与f,表示单极接 地故障), f, f, 表示两侧换流站出口故障。当限流 电抗器外侧发生故障时,由母线保护、换流站出口保 护动作,保护1和保护2不动作。





2 中压直流配电线路发生故障时的电气量 特点

2.1 暂态电压比定义

中压直流配电网的等效故障网络如图2所示。 图中, $C_i 和 L_{CLRi}$ 分别为换流站i(i=1,2)侧安装的出口 电容和限流电抗器参数; $v_{Ci}(t)$ 为电容出口极间电 压; $v_{dci}(t)$ 为限流电抗器线路侧极间电压; $i_{dci}(t)$ 为流 经保护安装处的出口电流;直流线路用 π 型等效线 路表示, $R_0 \pi L_0$ 分别为线路的单位等效电阻及电感 参数,由于直流配电网电压等级较低,且线路长度较 短,因此可以忽略输电线路对地电容,并将其汇入 换流站出口电容;直流线路的首末端母线分别标记 为*M*、*N*,*d*_{MN}为线路总长度;*d*₁、*d*₂分别为故障点与保 护1、2的距离。





根据叠加定理,系统的故障状态可以等效为故 障网络及非故障网络的叠加,在故障网络中两侧线 路各自通过故障点构成故障回路。考虑到直流线路 边界加装限流电抗器,本文利用故障发生后线路边 界电抗器两端测得的暂态电压比ROTV(Ratio of Transient Voltage)实现故障方向的区分。暂态电压 比的定义为限流电抗器线路侧极间电压与电容出口 极间电压的比值,如式(1)所示。

$$r_{\text{ROTV}i}(t) = \frac{v_{\text{de}i}(t)}{v_{Ci}(t)} \quad i = 1, 2$$
(1)

在实际系统中,只需在出口限流电抗器两侧设 置相应的直流电压测点即可实现对上述参数的测 量,实现方式较为简单。在正常运行工况下,直流线 路电压基本保持恒定,此时出口电感两端测得的直 流电压均为额定电压,因此极间ROTV与单极ROTV 的测量值均近似为1。而当系统运行方式发生变化 时,由于线路两侧换流站直流出口均安装直流电容, 出口电压波动较小,此时ROTV测量值同样接近1。

2.2 正方向发生区内短路故障时的 ROTV 特性

以极间短路故障为例,当区内直流线路发生极间短路故障时,等效故障网络如图3所示,此时故障 点位于保护1的正方向。假设故障位置与换流站1 出口的距离为d₁。为简化分析,忽略对侧换流站2 出口电容提供的短路电流,根据故障电路可以得到 发生极间短路故障后换流站1出口电容电压表达 式为:

$$v_{c1}(t) = R_{\Sigma 1} i_{dc1}(t) + L_{\Sigma 1} \frac{\mathrm{d}i_{dc1}(t)}{\mathrm{d}t}$$
(2)

其中, $R_{\Sigma_1} = R_k + d_1 R_0$, $L_{\Sigma_1} = L_{CLR_1} + d_1 L_0$, R_k 为故障点 处的过渡电阻。

限流电抗器 CLR₁在线路侧测得的电压 $v_{del}(t)$ 可以表示为:

$$v_{\rm de1}(t) = v_{C1}(t) - L_{\rm CLR1} \frac{{\rm d}i_{\rm de1}(t)}{{\rm d}t}$$
 (3)



198

图 3 换流站1出口区内极间短路故障的等效故障网络 Fig.3 Equivalent fault network of Converter Station 1 export during pole-to-pole short circuit fault

联立式(2)和式(3)可以将*v*_{de1}(*t*)进一步表示为式(4)所示形式。

$$v_{\rm de1}(t) = v_{\rm C1}(t) - \frac{L_{\rm CLR1}}{L_{\Sigma 1}} \left(v_{\rm C1}(t) - R_{\Sigma 1} \dot{i}_{\rm de1}(t) \right)$$
(4)

由于推导过程中忽略了对侧短路电流,因此式 (4)得到的结果将略小于实际值。将式(4)代入式 (1)中可以最终得到QF₁及QF₂的正方向发生极间短 路故障时,*r*_{ROTV1}的表达式为:

$$r_{\text{ROTV1}}(t) = \frac{v_{\text{de1}}(t)}{v_{c1}(t)} = \frac{d_1 L_0}{L_{\Sigma 1}} + \frac{R_{\Sigma 1} L_{\text{CLR1}}}{L_{\Sigma 1}} \frac{i_{\text{de1}}(t)}{v_{c1}(t)}$$
(5)

根据式(5)可知,此时*r*_{ROTV1}的数值主要取决于 换流站1出口电容电压及短路电流。设故障前换流 站1出口电容电压为*V*_{C1}、负荷电流为*I*_{de1},极间短路 故障情况下的电容电压、短路电流的表达式可以分 别表示为式(6)、(7)^[6]。

$$v_{c1}(t) = V_{c1} \frac{\omega_0}{\omega_d} e^{-\alpha t} \cos(\omega_d t - \theta) - \frac{I_{dc1}}{\omega_d C_1} e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t) (6)$$

$$i_{dc1}(t) = \frac{V_{c1}}{\omega_d L_{\Sigma 1}} e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t) + \frac{I_{dc1}\omega_0}{\omega_d} e^{-\alpha t} \cos(\omega_d t + \theta) (7)$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{R_{\Sigma 1}}{2L_{\Sigma 1}} \\ \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{\Sigma 1} C_1}} \\ \omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \\ \theta = \arctan(\alpha/\omega_d) \end{cases}$$
(8)

由于故障后流经线路的短路电流远大于负荷电流,因此为了简化推导过程可以忽略电容电压及短路电流表达式中负荷电流的相关项。将上述表达式代入式(5)中可以得到*r*_{ROTV}的具体表达式为:

$$r_{\rm ROTV1}(t) = \frac{d_1 L_0}{L_{\Sigma 1}} + \frac{R_{\Sigma 1} L_{\rm CLR1}}{L_{\Sigma 1}^2} \frac{1}{\omega_{\rm d} \cot(\omega_{\rm d} t) + \alpha}$$
(9)

由式(9)可以看出,*r*_{ROTV1}的表达式由常数项及时 变项共同构成,等号右侧第1项为与故障距离相关 且始终小于1的常数项,且故障点距出口越近,常数 项的数值越小,而第2项为与时间相关的函数表达 式,在故障发生后的较短时间内,由于 cot(*ω*_d*t*)趋于 无穷大,该项数值趋于0,然后随着故障的进程逐步 增大。值得注意的是,时变项的变化过程受到过渡 电阻的影响,过渡电阻的增大将加快该项的上升 速率。

图4比较了由式(9)得到的r_{ROTV1}计算值以及通 过仿真模型测得的r_{ROTV1},可以看出由式(9)得到的计 算值能够正确反映故障发生后r_{ROTV1}的变化趋势。 根据式(5),由于忽略了对侧电容提供的短路电流流 经过渡电阻时造成的电压降落,导致ROTV的理论 计算值略低于仿真值,符合理论分析。从理论表达 式和仿真结果可以看出:①当保护1正方向的直流 线路发生极间短路故障时,保护1处测得的r_{ROTV1}将 从1附近瞬间跌落,并随着故障过程的发展逐渐上 升;②r_{ROTV1}跌落的具体数值仅与故障距离有关而与 过渡电阻无关,而r_{ROTV1}瞬间跌落后的上升速率随过 渡电阻的增大而加快;③当过渡电阻较小时,r_{ROTV1} 维持在瞬间跌落值附近,而当过渡电阻较大时,r_{ROTV1} 将以较快的速率回升。发生直流线路区内故障,保 护2处测得的r_{ROTV2}的变化过程与r_{ROTV1}类似。



图4 故障距离与过渡电阻对r_{ROTVI}的影响

Fig.4 Influences of fault distance and transition resistance on r_{ROTVI}

2.3 正方向发生区外短路故障时 ROTV 特性

当保护1的正方向区外发生极间短路故障时, 即故障点位于限流电抗器CLR₂的换流站侧时,等效 的故障网络如图5所示。



图 5 保护 1 正方向区外发生极间短路故障时的 等效故障网络



此时,
$$r_{\text{ROTV1}}$$
的表达式为:
 $r_{\text{ROTV1}}(t) = \frac{d_{MN}L_0 + L_{\text{CLR2}}}{L_{\Sigma 1}} + \frac{R_{\Sigma 1}L_{\text{CLR1}}}{L_{\Sigma 1}^2} \frac{1}{\omega_d \cot(\omega_d t) + \alpha} (10)$
 $\begin{cases} R_{\Sigma 1} = R_k + d_{MN}R_0 \\ L_{\Sigma 1} = L_{\text{CLR1}} + d_{MN}L_0 + L_{\text{CLR2}} \\ \alpha = \frac{R_{\Sigma 1}}{2L_{\Sigma 1}} \\ \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{\Sigma 1}C_1}} \\ \omega_0' = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \end{cases}$
(11)

可以看出,由于线路对侧末端存在限流电抗器 CLR₂,当发生故障时,限流电抗器的存在使r_{ROTV1}的 常数项明显增大。根据上述特性可知,为了保证单 侧保护的选择性,可以通过设置门槛值使该情况下 保护1不动作。

2.4 反方向发生区外短路故障时的ROTV特性

当被保护直流线路反方向发生短路故障时,即 换流站1出口发生短路故障时的等效故障网络如图 6所示。根据故障网络可知,此时流经保护1的短路 电流由换流站2一侧的出口电容C₂提供。由于保护1 安装处参考电流方向由母线指向线路,故障发生后 短路电流应满足条件:

$$\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{dc1}}(t)}{\mathrm{d}t} < 0 \tag{12}$$



图6 反方向发生极间短路故障的等效故障网络

Fig.6 Equivalent fault network in reverse-side pole-to-pole short circuit fault

同时根据电路关系,反方向发生极间短路故障 情况下r_{ROTV1}的表达式为:

$$r_{\text{ROTV1}}(t) = \frac{v_{c1}(t) - L_{\text{CLR1}}}{v_{c1}(t)} = 1 - \frac{L_{\text{CLR1}}}{v_{c1}(t)} \frac{di_{dc1}(t)}{dt}$$
(13)

综合式(12)、(13)可知,当保护1的反方向发生极间短路故障时,保护1处测得的r_{ROTV1}>1。

2.5 换流站外侧发生故障时ROTV特性

当换流站外侧发生其他类型的区外故障时,换 流站外侧直流故障示意图见附录中的图A1。换流 站安装的出口电容能减小直流侧电压纹波,缓冲发 生区外故障时引起的直流侧电压波动;限流电抗器 能削减直流线路谐波电流,限制直流线路短路电流 上升率。因此,换流站外侧发生其他类型的区外故 障时 $v_{G}(t) = v_{dei}(t)$ 的波动很小,两侧保护安装处测 得的 r_{ROTVi} 在1附近发生幅度较小的振荡。

2.6 各种故障情况下的ROTV特性总结

根据上述分析,当区内直流线路内部发生极间 短路故障时满足式(14)。

$$r_{\text{ROTV}i}(t) < 1 \tag{14}$$

当直流线路反方向发生极间短路故障时,保护 安装处测得的极间ROTV满足式(15)。

$$r_{\text{ROTV}i}(t) > 1 \tag{15}$$

因此,可利用r_{ROTVi}与1的大小关系判断故障方向。另外,在正方向发生短路故障时,ROTV故障瞬间的跌落值与保护安装处到故障点的距离成正比,故障点与保护安装处的距离越远,r_{ROTVi}越大,可以作为故障保护的依据。

3 基于ROTV的直流配电线路的保护方案

3.1 单侧电气量保护方案

直流系统发生故障后,由直流线路两侧保护安 装处测得的限流电抗器的极间ROTV能够区分故障 发生在本侧保护的正方向还是反方向:当r_{ROTVi}<1时 判断为正方向故障,当r_{ROTVi}>1时判断为反方向故 障。由式(9)可知,当故障位于本侧保护正方向时, 保护处测得r_{ROTVi}在故障后发生跌落,瞬间跌落值仅 与故障距离有关,且故障点距离保护安装处越近,瞬 间跌落值越小。

根据上述特性,可以通过设定门槛值实现基于 单侧电气量的单侧ST(Single Terminal)保护。以极 间短路故障为例,当保护1的本侧保护线路末端发 生故障时,设本线路的全长为d,则理论上本侧保护 处测得的r_{ROTV1}的瞬间跌落值为:

$$r_{\rm ROTV1} = \frac{dL_0}{L_{\rm CLR1} + dL_0} \tag{16}$$

由于*r*_{ROTV1}的实际值会略大于理论计算值,有一定的裕度,单侧保护整定值的可靠系数*K*sT取为0.95。因此,保护1的单侧保护整定值设为:

$$K_{\text{set.1}}^{\text{ST}} = K_{\text{rel}}^{\text{ST}} \frac{dL_0}{L_{\text{CLR1}} + dL_0}$$
(17)

同理可得,保护2的单侧保护整定值设为:

$$K_{\text{set},2}^{\text{ST}} = K_{\text{rel}}^{\text{ST}} \frac{dL_0}{L_{\text{CLR2}} + dL_0} \tag{18}$$

当本侧保护测得的r_{ROTVi}小于整定值时,则判断 为区内故障,触发出口断路器快速动作。当本侧保 护反方向发生故障时,r_{ROTVi}的测量值大于1,保护可 靠不动作;同时由于直流线路对侧的线路边界同样 加装了限流电抗器,对侧发生反方向故障时本侧保 护处测得*r*_{ROTVi}总是大于单侧保护的整定值,因此本侧保护不会动作。保护的动作判据为:

$$r_{\text{ROTV}i} < K_{\text{set},i}^{\text{ST}} \quad i = 1, 2 \tag{19}$$

单侧电气量保护将保护处测得的r_{ROTVi}作为保护 特征量。区内发生极间故障的情况下,r_{ROTVi}满足判 据条件,保护能正确动作。由于上述判据基于单侧 的时域测量值,因此能保证保护的快速性。但考虑 可能出现的信号干扰,可以设置连续多点平均值满 足判据作为保护动作条件,以保证保护的可靠性。

3.2 双侧允许式保护方案

200

根据上文分析可知,故障后r_{ROTVi}的实测值将略 大于理论值。由于单侧保护将线路末端发生金属性 故障时故障瞬间对应的r_{ROTVi}理论值作为整定值的 依据,因此当线路末端发生故障且过渡电阻较大时, 本侧保护将因为无法达到整定值而无法正确动作。 为了确保保护的范围能够覆盖整条线路,可以设置 基于双侧DT(Double Terminal)电气量的双侧允许 式保护作为后备保护。双侧保护的整定值设为:

$$\begin{cases} K_{\text{set.1}}^{\text{DT}} = K_{\text{rel}}^{\text{DT}} \frac{dL_0 + L_{\text{CLR2}}}{L_{\text{CLR1}} + dL_0 + L_{\text{CLR2}}} \\ K_{\text{set.2}}^{\text{DT}} = K_{\text{rel}}^{\text{DT}} \frac{dL_0 + L_{\text{CLR1}}}{L_{\text{CLR2}} + dL_0 + L_{\text{CLR1}}} \end{cases}$$
(20)

其中,K^{DT}_{seti}由KST_{seti}在分子、分母同时加上对侧直流电 抗器的电感值得到。显然,这个双侧电气量的整定 值一定大于单侧电气量的整定值,可以扩大保护范 围,保护线路的全长,但是为了保证选择性,这个整 定值必须小于1,即要保证KST_{seti}<1,则双侧保护 整定值的可靠系数K^{DT}_{efi}取为1.2。此时,双侧保护的 保护范围包含直流线路全长,并延伸到对侧直流电 抗器末端。由于基于双侧信息量的后备保护需要考 虑通信时延对保护动作的影响,所以对两侧故障信 号的持续时间提出了较高的要求。本文中要求故障 信号持续时间不短于3 ms,从而确保选取的时间窗 口能够基本满足跳闸及故障切除的要求。

当发生区内故障时,若本侧的保护特征量r_{ROTVi} 不满足单侧保护整定值而达到双侧保护整定值,双 侧保护都能可靠动作。当本侧保护反方向发生故障 时,r_{ROTVi}的测量值大于1,双侧保护可靠不动作。

当本侧保护监测到保护特征量达到双侧保护整 定值时,本侧保护启动,同时向对侧保护发出1个故 障允许信号。若故障为区内故障,则对侧保护也会 启动,同时也向本侧保护发出1个故障允许信号;若 故障为对侧反方向故障,则对侧保护不会启动,无法 发出故障允许信号。当本侧保护收到对侧保护发出 的故障允许信号后,两侧的故障允许信号经过与门 后发出双侧保护的允许动作信号,双侧保护才能出 口跳闸,切除故障。

3.3 保护逻辑及流程

本文所提直流线路保护的逻辑框图如图7所示,保护由单侧电气量保护及双侧允许式保护共同构成。由本侧保护安装处测得的电压信号可以计算得到保护特征量r_{ROTVi}。当本侧的保护特征量达到单侧保护整定值K^{sri}时,单侧保护直接出口跳闸,切除故障。而当本侧的保护特征量不满足单侧电气量保护整定值而达到双侧允许式保护整定值K^{sri}时,本侧保护启动,同时向对侧保护发出故障信号S_M。考虑到传输时延以及通信模块的动作时间,以及直流故障持续时间比较短等因素,故障信号延展3 ms。当本侧保护同时收到对侧保护发出的故障信号S_N时,两侧的故障信号经过与门后发出双侧保护的允许动作信号,出口跳闸,否则双侧保护可靠不动作。



图 7 所提保护方案逻辑框图 Fig.7 Logical block diagram of proposed protection scheme

4 仿真验证

4.1 仿真模型及参数

为了得到 ROTV 的定量表达式并给出保护原理 的理论依据,上文基于点对点的结构对保护方案进 行了理论分析。为了验证基于ROTV原理的直流线 路保护方案的普遍性和适用性,本文基于PSCAD/ EMTDC软件平台搭建了中压直流配电网三端系统 的仿真模型,采用网状型网架结构进行保护原理的 验证,系统的示意图见附录中的图 A2。其中换流 站1采用两电平的电压源型变流器(VSC)结构,实现 中压直流配电网与中压交流配电网的功率联络。换 流站2、3采用基于双向全桥变换器的直流变换模 块,将直流电压从中压等级变换至低压等级,实现对 直流负荷的供电^[3,6]。在实际工程中,当换流站1发 生故障切除运行后,由于其他换流站连接光伏、风电 等分布式能源,剩余网络仍然可以维持功率输送,从 而提高了系统的供电可靠性。仿真案例中,数据采 样频率设为50kHz。根据附录中的表A1所示的系 统参数可以计算出线路MN的 K_{seti}^{ST} 、 K_{seti}^{DT} 。

4.2 极间故障

图 8 为直流线路 MN 中点发生极间故障的仿真 波形。由图可见,t=1 s时发生故障,故障发生后,限 流电抗器两侧的极间电压发生不同步的跌落。由于 电抗器靠近换流站一侧与出口电容相连,因此 $v_{c1}(t)$ 与 $v_{c2}(t)$ 在故障瞬间无法突变,而电抗器靠近线路一侧测得的 $v_{de1}(t)$ 与 $v_{de2}(t)$ 在故障发生后瞬间跌落。故障瞬间保护1处测得的 r_{ROTV1} =0.2318,保护1的单侧保护整定值为0.3563,保护1处单侧保护可靠动作;保护2处测得的 r_{ROTV2} =0.2723,保护2的单侧保护整定值为0.4072,保护2处单侧保护同样可靠动作。图8中的时间窗口为3 ms,可以看出ROTV信号在保持3 ms的情况下可以满足保护要求,保护可靠动作。





4.3 单极接地故障

图9为直流线路MN中点发生正极接地故障的 仿真波形。可以看到,故障瞬间保护1处测得的 r_{ROTV1}=0.2417,保护2处测得的r_{ROTV2}=0.2842,保护1 和保护2处的单侧保护均能可靠动作。因此,对于 单极接地故障,保护方案能够正确识别并动作。





Fig.9 Simulative waveform of positive pole-to-ground fault at midpoint of Line MN

4.4 故障点不同时的保护动作情况

图10反映了直流线路MN发生不同故障条件的 极间故障后测得的r_{ROTVi},保护的动作情况见附录中 的表A2。由图10可知,故障点越接近保护安装处, 测得的保护特征值越小;同时,当存在过渡电阻时, 保护特征值相应增大。在大多数情况下,两侧的单 侧保护均能够正确动作;在远离保护安装处发生故 障且过渡电阻较大的情况下,保护特征值无法达到 本侧的单侧保护整定值,单侧保护不动作,但由于两 侧保护特征值均能达到双侧允许式保护的整定值, 双侧保护能够正常动作。根据仿真案例可知,在过 渡电阻为50Ω的情况下双侧保护仍然能够正常动 作,能满足中压直流配电网的抗过渡电阻要求。



图10 不同故障位置及过渡电阻条件下测得的r_{ROTV}

Fig.10 Measured values of $r_{\text{ROTV}i}$ under different fault locations and transition resistances

4.5 反方向故障

图11为换流站1出口发生反方向极间故障的仿 真波形。由于此时故障位置位于保护1的反方向, 保护1处测得的保护特征值始终大于1,因此故障发 生后单侧保护及双侧允许式保护均无法动作。尽管 故障位置位于保护2正方向,但故障后保护2处测得 的保护特征值远大于单侧保护的整定值,因此单侧 保护无法动作。



图 11 换流站 1 出口发生反方向极间故障的仿真波形



4.6 采样频率对保护动作特性的影响

图 12 为采样频率降低时,直流线路 MN 中点发 生极间故障的仿真波形。由图可见,当采样频率为 10 kHz时,故障瞬间保护1处测得的 r_{ROTV1}=0.2332, 保护2处测得的 r_{ROTV2}=0.2738;当采样频率为20 kHz 时,故障瞬间保护1处测得的 r_{ROTV1}=0.2324,保护2 处测得的 r_{ROTV2}=0.2729。在这2种情况下,保护1和 保护2处的单侧保护均能可靠动作。因此,采样频 率降低不会影响保护的可靠动作。



图 12 采样频率降低时线路 MN 中点发生极间故障的 仿真波形

Fig.12 Simulative waveform of pole-to-pole fault at mid-point of Line *MN* when sampling frequency reduces

4.7 雷击干扰对保护动作特性的影响

在*t*=1s时加入雷击干扰信号,则直流线路*MN*的仿真波形如图13所示。其中,上图为*r*_{ROTVi}的全局 波形,下图为略去雷击干扰时刻后*r*_{ROTVi}的局部波形。 雷击干扰发生后,保护1、2处测得的*r*_{ROTVi}在跳变后 迅速稳定于1附近,保护1和保护2处的单侧保护均 不会误动。因此,雷击干扰不会使保护发生误动。





Fig.13 Simulative waveform of Line *MN* under lightning disturbance

5 结论

202

本文基于中压直流配电网的基本结构,提出了 针对直流配电线路故障的保护方案。时域下直流线 路出口限流电抗器两侧电压在故障发生后呈现不同 的故障特性,利用电抗器两侧暂态电压之比能够正 确识别故障并判断故障方向。故障发生后较短时间 内测得的ROTV 仅取决于保护安装处与故障位置的 距离,而与过渡电阻无关,因此本保护方案具备较强 的抗过渡电阻能力。根据上述原理的单侧保护基于 直流线路的单侧电气量,能够满足快速识别故障的 要求。而当区内线路末端经过渡电阻故障导致单侧 保护拒动时,基于直流线路双侧电气量的双侧允许 式保护确保保护范围覆盖线路全长。最后通过仿真 实例验证了保护方案的可行性,当区内发生故障时 正确动作,而在不同条件的区外故障情况下可靠不 误动。在目前阶段,在限流电抗器两侧均安装电压 互感器的代价相对较高,但随着直流设备的发展和 成熟,基于ROTV的保护原理将具有更广泛的适用 范围。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

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.
 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.
- [2] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等.直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):64-73.
 SUN Pengfei,HE Chunguang,SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):64-73.
- [3] 赵彪,赵宇明,王一振,等. 基于柔性中压直流配电的能源互联网系统[J]. 中国电机工程学报,2015,35(19):4843-4851.
 ZHAO Biao,ZHAO Yuming,WANG Yizhen, et al. Energy internet based on flexible medium-voltage DC distribution[J].
 Proceedings of the CSEE,2015,35(19):4843-4851.
- [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] 刘剑,邰能灵,范春菊,等. 柔性直流输电线路故障处理与保护 技术评述[J]. 电力系统自动化,2015,39(20):158-167.
 LIU Jian,TAI Nengling,FAN Chunju, et al. Comments on fault handling and protection technology for VSC-HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(20): 158-167.
- [6]姜山,范春菊,黄宁,等.电力电子变压器直流端口极间短路故障特性分析[J].中国电机工程学报,2018,38(5):1301-1309.
 JIANG Shan,FAN Chunju,HUANG Ning, et al. Fault characteristic analysis of DC pole-to-pole fault in power electronic transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5):1301-1309.
- [7] KWON Y J, KANG S H, LEE D G, et al. Fault location algorithm based on cross correlation method for HVDC cable lines [C] //IET 9th International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2008). Glasgow, UK: IET, 2008:360-364.
- [8] 姜崇学,卢字,汪楠楠,等. 柔性直流电网中行波保护分析及配 合策略研究[J]. 供用电,2017,34(3):51-56.
 JIANG Chongxue, LU Yu, WANG Nannan, et al. Analysis of traveling wave protection and study on coordination strategy in flexible DC grid [J]. Distribution & Utilization, 2017, 34 (3):51-56.
- [9] 毕天姝,王帅,贾科,等.基于短时能量的多端柔性直流单极接 地故障线路识别方法[J]. 电网技术,2016,40(3):689-695.
 BI Tianshu, WANG Shuai, JIA Ke, et al. Short-term energy based approach for monopolar grounding line identification in

MMC-MTDC system [J]. Power System Technology, 2016, 40 (3):689-695.

[10] 贾科,宣振文,李晨曦,等.柔性直流配网中基于暂态高频阻抗 比较的方向纵联保护[J].中国电机工程学报,2018,38(18): 5343-5351.

JIA Ke,YI Zhenwen,LI Chenxi,et al. A directional pilot protection based on phase angle of transient high-frequency impedance for flexible DC distribution grid[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(18):5343-5351.

- [11] MONADI M, KOCH-CIOBOTARU C, LUNA A, et al. Multiterminal medium voltage DC grids fault location and isolation
 [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(14): 3517-3528.
- [12] LIU J, TAI N, FAN C, et al. A hybrid current-limiting circuit for DC line fault in multiterminal VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7):5595-5607.
- [13] LI R, XU L, YAO L. DC fault detection and location in meshed multiterminal HVDC systems based on DC reactor voltage change rate[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017,32(3):1516-1526.
- [14] SNEATH J, RAJAPAKSE A D. Fault detection and interruption in an earthed HVDC grid using ROCOV and hybrid DC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3):973-981.
- [15] 周家培,赵成勇,李承昱,等.基于直流电抗器电压的多端柔性 直流电网边界保护方案[J].电力系统自动化,2017,41(19): 89-94,146.
 ZHOU Jiapei, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Boundary protection scheme for multi-terminal flexible DC grid based on voltage of DC reactor[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(19):89-94,146.
- [16] 余修勇,肖立业,林良真,等. 基于单端量的柔性直流电网故障

识别方案[J]. 高电压技术,2018,44(2):440-447.

YU Xiuyong, XIAO Liye, LIN Liangzhen, et al. Single-ended fast fault detection scheme for MMC-based HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2):440-447.

- [17] 嵇康,邰能灵,刘剑,等. 基于暂态电压的多端柔性直流线路保 护方案[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(1):3-10.
 JI Kang,TAI Nengling,LIU Jian, et al. Protection scheme for multi-terminal VSC-HVDC lines based on transient voltage
 [J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2018, 33(1):3-10.
- [18] LIU J, TAI N, FAN C. Transient-voltage-based protection scheme for DC line faults in the multiterminal VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1483-1494.
- [19] JIANG S, FAN C, HUANG N, et al. A fault location method for DC lines connected with DAB terminal in power electronic transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019,34(1):301-311.

作者简介:



王圣辉(1996—),男,湖北襄阳人,硕 士研究生,主要研究方向为电力系统直流 配电网继电保护(E-mail:shenghuiwang@sjtu. edu.cn);

范春菊(1967—), 女, 上海人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统继电保护 及其综合自动化(E-mail; fanchunju@sjtu.edu. cn);

姜山(1995—),男,江苏宜兴人,硕 士研究生,主要研究方向为交直流配电网保护(E-mail: jiangshan1995@sjtu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Fault protection scheme for DC distribution network based on ratio of transient voltage principle

WANG Shenghui, FAN Chunju, JIANG Shan

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Because the short circuit current of DC distribution network has the basic characteristics of rapid rising, high peak value and short process, it is difficult to identify and remove faults reliably and quickly. The reliable identification of internal and external faults is realized based on the time domain characteristics of the voltage on both sides of the current limiting reactor at the line outlet, a relay protection scheme suitable for DC distribution lines is proposed, and the fast-moving and selectivity of DC distribution line protection is realized through the combination of single-terminal electrical quantity protection and doubleterminal electrical quantity protection. The proposed scheme can detect and identify faults quickly only through the ratio of transient voltage of current limiting reactor. It can not only meet the protection requirements of DC power grid, but also make the protection scheme simple and easy to implement. A large number of simulation examples verify the feasibility of the protection scheme, and it has strong ability against transition resistance.

Key words: DC distribution network; current limiting reactor; ratio of transient voltage; relay protection; DC protection; transition resistance



图 A1 换流站外侧发生其他类型故障的示意图

Fig.A1 Diagram of other types of faults occurring outside the converter station



图 A2 中压直流配网三端系统

Fig.A2 Three-terminal system of MVDC distribution network

表 A1 系统参数

参数	参数值	参数	参数值
额定电压	10kV	线路长度 d	10km
额定功率	2MW	线路单位电阻 R ₀	$0.025\Omega/km$
限流电抗器 LCLRI	5mH	线路单位电感 L ₀	0.3mH/km
限流电抗器 L _{CLR2}	4mH	$K_{\rm set.1}^{ m ST}$	0.3563
限流电抗器 LCLR3	4mH	$K_{\rm set.1}^{\rm DT}$	0.7000
直流电容 C_1	1000µ F	$K_{\rm set.2}^{ m ST}$	0.4072
直流电容 C_2	1000µ F	$K_{\rm set.2}^{\rm DT}$	0.8000
直流电容 C3	1000µ F		

Table A1 System parameters

附录

			1	1			
<i>d</i> _{<i>i</i>} /	$R_{\rm k}$		r _{ROTV2}	保护1		保护 2	
km	$/\Omega$	r _{ROTV1}		单侧	双侧	单侧	双侧
0	1	0.0060	0.0065	动作	动作	动作	动作
	50	0.2546	0.2742	动作	动作	动作	动作
2	1	0.1131	0.1355	动作	动作	动作	动作
	50	0.3324	0.3565	动作	动作	动作	动作
4	1	0.1994	0.2349	动作	动作	动作	动作
	50	0.3958	0.4246	不动作	动作	不动作	动作
6	1	0.2704	0.3135	动作	动作	动作	动作
	50	0.4513	0.4824	不动作	动作	不动作	动作
8	1	0.3302	0.3775	动作	动作	动作	动作
	50	0.5016	0.5299	不动作	动作	不动作	动作
10	1	0.3810	0.4308	不动作	动作	不动作	动作
	50	0.5477	0.5724	不动作	动作	不动作	动作

表 A2 保护的动作情况 Table A2 Operation of protection