

文章编号: 1671-251X(2023)10-0026-09

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2022120024

基于暂态电流导数的煤矿直流配电线路无通道保护

魏朝阳¹, 段建东²

(1. 陕西能源职业技术学院, 陕西 咸阳 712000;

2. 西安理工大学 电气工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 煤矿直流供配电线路故障电流具有幅值大、上升率高的特征, 是威胁供电系统安全稳定的重要因素。利用直流配电系统电气特征实现故障识别的方法较少考虑保护设备的实际情况, 难以处理设备误差及扰动, 不满足继电保护的可靠性要求; 而基于电力电子变换器的主动保护方法则较少利用故障电气量信息, 仅依靠设备动作特性实现故障切除, 往往不能满足继电保护的速动性要求。针对上述问题, 提出一种基于暂态电流导数的煤矿直流配电线路无通道保护方案。将直流侧并联电容放电电流的二阶导数作为保护加速判据, 若满足加速判据则启动加速动作, 若不满足加速判据则按照断路器既定延时动作。故障发生时, 电流均指向故障点, 则可利用功率流向的变化初步判断故障方向, 构成无通道保护, 使故障线路两端断路器加速跳开, 从而缩短故障切除时间。仿真结果表明, 在不同故障发生位置、过渡电阻及故障类型条件下, 若加速动作能够有效启动, 则基于暂态电流导数的煤矿直流配电线路无通道保护方案可快速切除故障, 减少故障时间; 若加速动作不能启动, 保护方案也能按照既定延时配合实现故障类型和区段的确定并切除故障。

关键词: 煤矿供电; 直流配电线路; 故障识别; 无通道保护; 暂态电流导数; 加速保护; 单极接地故障; 极间故障

中图分类号: TD61

文献标志码: A

Non-communication protection of coal mine DC distribution lines based on transient current derivation

WEI Zhaoyang¹, DUAN Jiandong²

(1. Shaanxi Energy Institute, Xianyang 712000, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The fault current of coal mine DC power supply and distribution lines has the features of large amplitude and high rise rate, which is an important factor threatening the safety and stability of the power supply system. The method of using electrical features of DC distribution systems to achieve fault recognition rarely considers the actual situation of protective equipment. It makes it difficult to handle equipment errors and disturbances, and it does not meet the reliability requirements of relay protection. The active protection methods based on power electronic converters rarely utilize fault electrical information and rely solely on equipment action features to achieve fault removal. It often fails to meet the quick action requirements of relay protection. In order to solve the above problems, a non-communication protection scheme for coal mine DC distribution lines based on transient current derivation is proposed. The second derivative of the discharge current of the parallel capacitor on the DC side is used as the protection acceleration criterion. If the acceleration criterion is met, it will start the acceleration action. If the acceleration criterion is not met, it will act according to the established delay of the

收稿日期: 2022-12-07; 修回日期: 2023-10-09; 责任编辑: 胡娴。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900600); 国家自然科学基金项目(51507135); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JM7255)。

作者简介: 魏朝阳(1993—), 男, 陕西咸阳人, 讲师, 硕士, 研究方向为煤矿直流配电系统继电保护, E-mail: 354026289@qq.com。

引用格式: 魏朝阳, 段建东. 基于暂态电流导数的煤矿直流配电线路无通道保护[J]. 工矿自动化, 2023, 49(10): 26-34.

WEI Zhaoyang, DUAN Jiandong. Non-communication protection of coal mine DC distribution lines based on transient current derivation[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(10): 26-34.



扫码移动阅读

circuit breaker. When a fault occurs, the current is directed towards the fault point. The change in power flow direction can be used to preliminarily determine the direction of the fault, forming a non-communication protection. It will accelerate the tripping of the circuit breakers at both ends of the fault line, thereby shortening the fault removal time. The simulation results show that under different fault positions, transition resistors, and fault types, if the acceleration action can effectively start, the non-communication protection scheme of coal mine DC distribution lines based on transient current derivation can quickly remove faults and reduce fault time. If the acceleration action cannot be started, the protection scheme can also cooperate with the established delay to determine the fault type and section and remove the fault.

Key words: coal mine power supply; DC distribution line; fault recognition; non-communication protection; transient current derivative; acceleration protection; monopole to earth fault; pole to pole fault

0 引言

煤矿供电系统稳定运行是保证煤矿安全生产的前提。煤矿短路事故会引发火灾及瓦斯爆炸、煤尘爆炸等。因此,快速、准确识别并切除供电系统故障是减少安全事故的重要一环^[1-2]。目前煤矿供电主要以交流电居多,采取的保护措施主要为过电流保护、定时限保护等。直流电可以解决交流电存在的功率限制、频率限制等问题^[3-4],因此本文以煤矿直流配电系统为背景开展研究。

煤矿直流供配电线路故障电流具有幅值大、上升率高的特征,对系统威胁较大,需快速切除。文献[5]利用故障时刻直流系统边界电气特征实现故障识别并进行隔离,文献[6-8]利用故障时刻的电流信息实现故障快速定位,文献[9-10]利用故障时刻的能量信息实现故障定位,文献[11-14]采用直流断路器实现故障定位与继电保护。随着控制水平的提升,学者们提出了基于电力电子变换器的主动保护方法,可最大限度地快速切除故障,保证系统的正常运行^[15-17]。利用直流配电系统电气特征实现故障识别的方法较少考虑保护设备的实际情况,难以处理设备误差及扰动,甚至会造成拒动或误动现象,不满足继电保护的可靠性要求。而基于电力电子变换器的主动保护方法则较少利用故障电气量信息,仅依靠设备动作特性实现故障切除,往往不能满足继电保护的速动性要求。针对上述问题,本文提出一种基于暂态电流导数的煤矿直流配电线路无通道保护方案。

1 直流配电线路故障暂态分析

直流配电系统中线路故障类型主要包括单极接地故障、极间故障及断线故障,其中单极接地和极间故障会造成严重过流,威胁设备安全,因此本文针对这2种故障类型进行分析。

故障刚发生时,若故障电流超过绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)的承受能力,会导致IGBT闭锁。直流线路上的故障电流仅由直流侧电容提供。严格来说,在器件关断后,直流侧并联电容和线路的分布电容同时放电,但考虑到配电线路较短,线路分布电容较直流侧并联电容小,因此可以忽略线路分布电容的放电影响,主要分析直流侧并联电容放电阶段的特征。

当直流配电系统发生单极接地故障且IGBT闭锁后,系统等效电路如图1所示。图1中, R_p 、 L_p 为接地故障时直流线路的电阻、电感; i_p 为故障极线路电流; R_f 为单极接地故障时的过渡电阻; C_p 为正极并联电容; u_p 为正极直流电压。直流侧电容放电时段从换流阀内IGBT闭锁开始,到直流线路故障电流降为0为止。故障发生后,故障极的直流侧电容 C_p 通过故障线路向故障点释放电能。

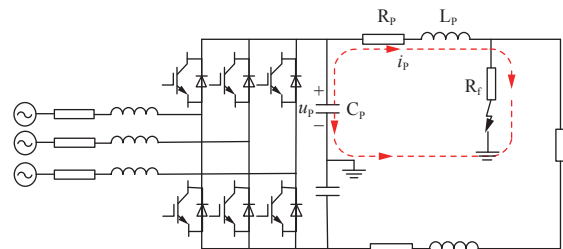


图1 直流配电系统单极接地故障时的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of DC distribution system with monopole to earth fault

由图1可得单极接地故障时各电气量之间的关系,进而可求得故障时刻的线路电流 i_p 及其导数 di_p/dt , d^2i_p/dt^2 , t 为时间。

$$\begin{cases} (R_p + R_f)i_p + L_p \frac{di_p}{dt} = u_p \\ C_p \frac{du_p}{dt} = -i_p \end{cases} \quad (1)$$

同理可分析极间故障时IGBT闭锁后的简化电路,如图2所示。图2中, R_2 、 L_2 为直流线路的等效电阻、电感; C 为直流侧并联等效电容; $u_c(t)$ 为直流

侧故障瞬间电容两端电压,即系统实际的极间直流电压; i_c 为直流侧电容电流; i_l 为直流线路故障电流; R_{fd} 为极间故障的过渡电阻。

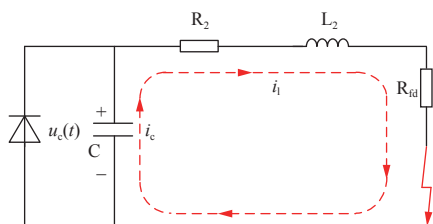


图2 直流配电系统极间故障时的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of DC distribution system with pole to pole fault

由图2可得极间故障时各电气量之间的关系,进而可推导出本阶段内线路故障电流 $i(t)$ 及其导数 $di(t)/dt$, $d^2i(t)/dt^2$ 。

$$\begin{cases} L_2 C \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + (R_2 + R_{fd}) C \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = 0 \\ i_l = i_c = -C \frac{du_c(t)}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

无论是极间故障还是单极接地故障,在故障电容放电阶段,可从2个方面对系统进行简化。一方面,在故障初期,电源向故障点提供故障电流,直流线路的电流上升率最大。为保证后续保护在任何情况下都能可靠动作,应考虑最不利于保护动作的情况。因此,在整定保护动作阈值时,可以忽略电源支路。另一方面,当直流线路发生不对称故障时,故障极直流电容总是先于非故障极直流电容向故障点放电。在故障初期,直流馈线的电流变化率主要取决于故障极电容的放电情况^[18]。基于此,在整定保护动作阈值时可忽略非故障支路。

系统简化后,可将直流网络视为二阶电路,如图3所示,其中 R 为直流侧等效短路电阻, L 为线路等效电感, $i(t)$ 为线路电流。

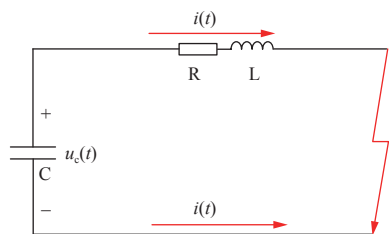


图3 直流配电系统简化电路

Fig. 3 Simplified circuit of DC distribution system

各电气量之间的关系为

$$\begin{cases} LC \frac{d^2 u_{dc}}{dt^2} + RC \frac{du_{dc}}{dt} + u_{dc} = 0 \\ i_{ldc} = i_c = -C \frac{du_c(t)}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_{dc} 为直流侧端电压; i_{ldc} 为直流侧负荷电流。

设单级直流电容为 C_0 , 直流线路单位长度电阻、电感分别为 r_0 , l_0 , 故障点与换流器距离为 x , 则不同故障类型下简化电路参数计算见表1。

表1 简化电路参数计算

Table 1 Calculation of simplified circuit parameters

故障类型	R	L	C
极间故障(L-L)	$2xr_0 + R_f$	$2xl_0$	$C_0/2$
接地故障(L-G)	$xr_0 + R_f$	xl_0	C_0

当两极线路发生金属性短路时,电容放电为欠阻尼振荡过程。由式(2)和式(3)可知线路的故障距离 D 与放电电流二阶导数的变化存在函数关系,其大致变化趋势如图4所示,故障位置越远离换流阀,放电电流二阶导数越大。

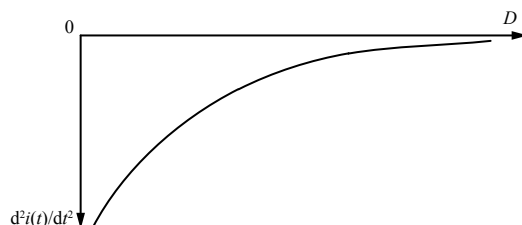


图4 故障位置与电容放电电流二阶导数的关系

Fig. 4 Relationship between fault location and the second derivation of capacitance discharge current

2 基于暂态电流二阶导数的直流配电线路加速保护原理

直流侧并联电容放电电流的一阶、二阶导数均可构成保护加速判据。本着计算量少、快速的原则,在不同故障位置、不同过渡电阻情况下,对放电电流的一阶、二阶导数性能进行测试。每级线路总长 3 km, 为简化表示,作如下设置:线路 2.97 km 处为线路末端,线路 0.03 km 处为线路首端;线路 80% (2.4 km)处和线路末端放电电流对时间的一阶导数之比为 b_1 , 二阶导数之比为 b_2 ; 本级线路 80% (2.4 km)处与下一级线路首端放电电流对时间的一阶导数之比为 b'_1 , 二阶导数之比为 b'_2 。测试结果见表2。

表2 放电电流的一阶导数与二阶导数差异

Table 2 Difference between the first and the second derivative of discharge current

过渡电阻/ Ω	b_1	b_2	b'_1	b'_2
0.5	1.255	1.412	1.219	1.858
1	1.255	1.464	1.199	1.699
3	1.256	1.524	1.114	1.47
5	1.257	1.541	1.021	1.451

从测试结果可看出,放电电流的一阶、二阶导数

均可作为判据。但是参考传统交流系统保护的可靠性、选择性要求,为使得保护可靠动作,在设置整定值时,需要用每一级线路末端放电电流导数乘以一定可靠系数(一般为1.2~1.3)^[19]。

测试数据表明,当选择一阶导数为保护加速判据时,线路80%处和线路末端放电电流对时间的导数之比为1.255~1.257。继电保护的可靠性要求中提到:每一级线路保护整定值与末端故障参数的比值必须大于1.4,才能应对继电保护中其他因素扰动的影响。因此,选择一阶导数为保护加速判据不能保证保护动作的可靠性。当采用放电电流的二阶导数为保护加速判据时,线路80%处和线路末端放电电流对时间的导数之比为1.412~1.541,有足够裕度应对不利因素。此时,本级线路80%处与下一级线路首端放电电流对时间的导数之比都大于1.451,能保证保护的选择性,而选择一阶导数为保护加速判

据时,比值为1.021~1.219,不能满足保护的可靠性要求,即不能区分故障是在本级末端还是下一级首端。二阶导数在可靠性、选择性方面显著优于一阶导数,故本文采用放电电流的二阶导数作为保护加速判据。

两端供电型直流配电线路保护如图5所示。 t_1 、 t_2 分别为左侧DC系统1和右侧DC系统2正方向发生故障时的动作时间; Δt 为考虑系统数据采集处理、断路器动作及灭弧的延时; $(d^2i/dt^2)_{acc1}$ 为DC系统1中断路器加速动作的判据; $(d^2i/dt^2)_{acc2}$ 为DC系统2中断路器加速动作的判据。将线路命名为 W_1 — W_4 ,保护装置 P_1 — P_4 位于各级线路的首端。BF1—BF4, BR1—BR4分别为各级线路首末两端所配置的断路器。所有断路器均带有方向性,箭头所指方向为断路器的正方向。OC为过电流检测模块,UDV为低电压检测模块,ACC为加速跳闸信号。

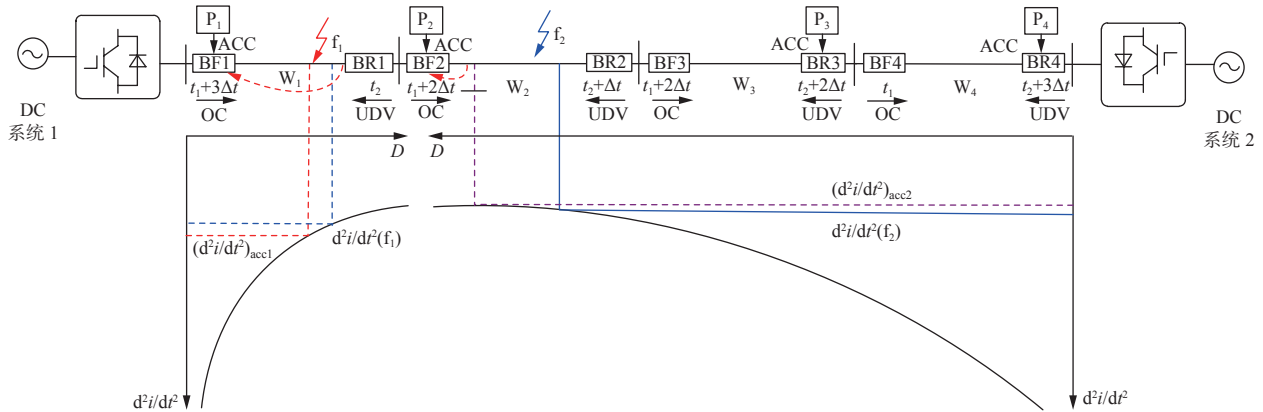


图5 双端供电型直流配电线路保护

Fig. 5 Double end power supply type DC distribution line protection

假设线路 W_1 在 f_1 处故障,所有断路器开始计时,同时保护装置开始计算放电电流二阶导数。BR1—BR4和BF1检测到故障位于其正方向,因此开放接收加速动作指令的端口。BR1延时 t_1 后率先动作,在BR1动作期间,保护装置 P_1 通过计算判定 $|d^2i/dt^2| > |(d^2i/dt^2)_{acc1}|$,可以确定故障发生在本级线路(W_1),因此向断路器BF1发送加速跳闸命令(ACC)。至此,故障得到准确识别并隔离。为保证动作的选择性,需在设定加速判据整定值时乘以一定可靠系数,但随之而来的问题是不能保护本级线路全长,对于剩余未保护部分,按照BF1的既定延时动作实现故障切除。图5中红色带箭头虚线代表当故障位于加速判据不能启动的区域(一般为线路末端处)时,由BF1断路器的既定延时动作切除。

同理,当线路 W_2 在 f_2 处故障时,所有断路器开始计时,保护装置计算放电电流二阶导数。BR2—BR4均检测到故障位于其正方向,因此开放接收动

作指令端口。保护装置 P_2 判定 $|d^2i/dt^2| > |(d^2i/dt^2)_{acc2}|$,即故障发生在本级线路(W_2),因此向断路器BF2发送加速跳闸命令。 P_2 也不能保护本级线路全长,剩余未保护部分由BF2的既定延时动作实现故障切除。

3 直流配电线路无通道保护方案

3.1 无通道保护原理

故障发生时,电流均通过故障点流入大地,因此,利用功率流向的变化即可初步判断故障方向,构成无通道保护^[20-21]。在对动作速度要求不太严格时,可将无通道保护应用于直流配电网中,如图6所示。通过过电流检测模块、低电压检测模块,结合系统功率流向,可检测故障是否位于断路器的正方向。

假设线路 W_2 在 f_2 处发生故障,BR1、BF3和BF4检测出该故障位于反方向,因此会闭锁端口而不接收动作信号。BF1、BF2、BR2检测出该故障位于正方向,因此会开放接收端口,等待动作信号并开

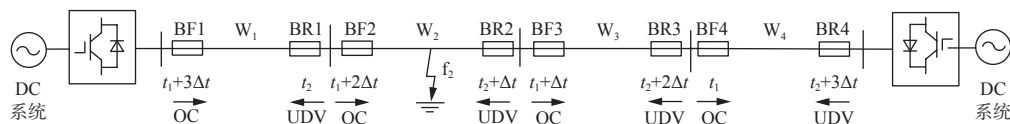


图 6 双端直流配电线路无通道保护原理

Fig. 6 The principle of non-communication protection in double end DC distribution network

始计时。BR2 延时最短，首先动作跳开。接着 BF2 动作，这样故障线路在 $2\Delta t$ 内被完全切除。同理，线路 W_1 在 f_1 处发生故障时，可在 $3\Delta t$ 内完全切除故障线路。但在实际应用中，由于直流配电网故障电流的高幅值和高上升率特性，应以最快速度隔离故障。根据电容放电电流特征可确定故障区段，利用该特征可使故障线路两端断路器加速跳开，从而缩短故障切除时间。

令图 6 中 $t_1 = t_2 = 0$ ，即保护装置立即开始计时，系统发生故障之后，设置延时时间 $\Delta t = 7 \text{ ms}$ ，断路器的动作时间为 5 ms [22]。另外，考虑直流断路器动作时电弧重燃的可能性，并要留有一定时间裕度，同方向上下 2 级的 2 个断路器（如 BF1 和 BF2，BR1 和 BR2）延时相差取 7 ms 。

若取 $d^2 i_f / dt^2$ 为本级线路末端发生故障时直流电容放电电流 i_f 的二阶导数初始值，则 $|(d^2 i_f / dt^2)_{\text{acc1}}|$ 为本级线路 (W_1) 断路器 BF1 加速动作的判据； $|(d^2 i_f / dt^2)_{\text{acc2}}|$ 为下一级线路 (W_2) 断路器 BF2 加速动作的判据。设定 K'_{rel} 为可靠系数，各级线路的加速判据阈值整定方程为

$$|(d^2 i_f / dt^2)_{\text{acc1}}| = |K'_{\text{rel}} (d^2 i_f / dt^2)| \quad (4)$$

对应断路器加速动作的条件为

$$|d^2 i_f / dt^2| > |(d^2 i_f / dt^2)_{\text{acc1}}| \quad (5)$$

3.2 保护启动判据

保护装置能否快速准确启动，启动元件至关重要。故障发生时，最明显的特征是直流线路故障电流急剧攀升。故障电流会远大于正常情况下的负荷电流，因此，可用最大负荷电流乘以可靠系数作为保护启动判据，即

$$|i_{p,n(i)}| > 1.2 |i_{\text{load,max}(i)}| \quad (6)$$

式中： $|i_{p,n(i)}|$ 为每级线路电流的瞬时值，一般由系统测得； $|i_{\text{load,max}(i)}|$ 为每级线路保护启动整定值，可根据系统参数计算。

3.3 故障类型判别

保护动作之前，需要识别出故障类型，再根据保护方案动作。若正极直流线路发生接地短路故障，则正极电流大于负极电流；负极直流线路接地短路故障的情况与正极相反；若出现极间故障，则正负两极短路电流同值反向。故在故障发生时刻，通过采

集电流信息即可实现故障类型判别。不同故障类型下的直流线路电流差异见表 3，其中 i_p 为正极线路电流； i_n 为负极线路电流。

表 3 不同故障类型下的直流线路电流差异

Table 3 Current differences in DC line under different fault types

故障类型	$i_p + i_n$	$ i_p - i_n $
正极接地故障	非 0	大于 0
负极接地故障	非 0	小于 0
极间故障	0	0

3.4 无通道保护流程

直流配电线路无通道保护流程如图 7 所示。

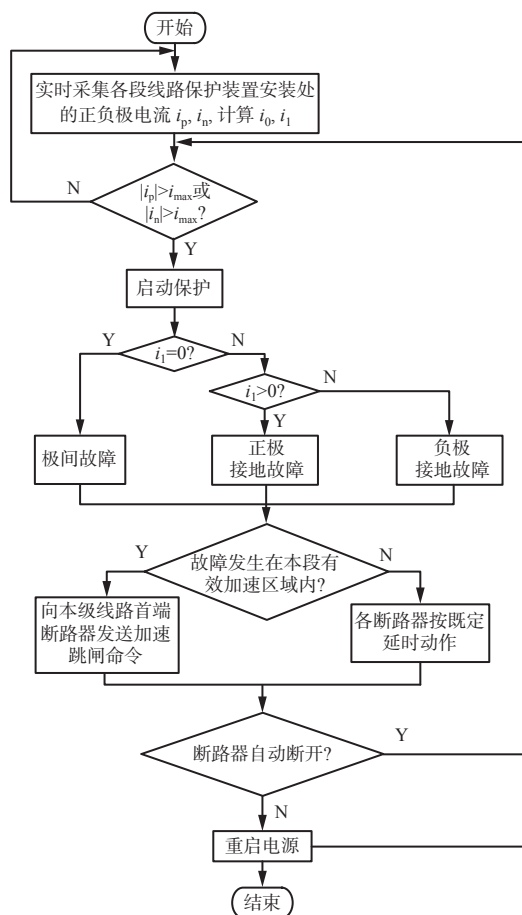


图 7 直流配电线路无通道保护流程

Fig. 7 Flow of non-communication protection of DC distribution line

图 7 中 i_0 为零模电流，其值等于 $i_p + i_n$ ； i_1 为 1 模电流，其值等于 $|i_p| - |i_n|$ ； i_{max} 为最大负荷电流。在系统运行的同时，保护设备不断监测线路正负极电流

i_p 及 i_n 。当电流大于线路最大负荷电流 i_{\max} 时启动保护装置。线路保护装置根据 $|i_p|-|i_n|$ 的值判断故障类型。确定故障类型后,保护装置计算电容放电电流的二阶导数初始值,同时所有断路器计时开始,根据二阶导数与整定值的关系判定故障是否位于本级线路,是否需要向首端断路器发送加速动作命令。不满足加速判据的按照断路器既定延时动作。最后,若某级线路的保护装置发出加速跳闸命令或断路器延时断开,则该保护装置需向电压源换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 重新发送启动命令,再次恢复直流线路供电。

4 仿真分析

在电力系统实时仿真平台 RT-LAB 上搭建双

端±10 kV 直流配电系统仿真模型,如图 8 所示,每段线路的具体保护配置与图 5 中一致。其额定电压为±10 kV,通过 2 个 VSC 与交流系统互联,其中 VSC1 采用定有功功率控制,VSC2 采用定电压控制。VSC1 和 VSC2 采用二电平拓扑,直流侧电容中性点采用直接接地方式。各级线路两端均配有直流断路器,以便于直接切除故障。故障闭锁策略:若电流幅值大于 1.6 倍额定电流,则闭锁换流器。换流器额定容量为 10 MVA,额定电流为 400 A,直流并联电容为 100 μ F;4 级直流线路长度均为 3 km,线路 W_1 和 W_2 的电阻参数为 0.065 09 Ω /km,线路 W_3 的电阻参数为 0.050 94 Ω /km,线路 W_4 的电阻参数为 0.053 77 Ω /km;总负荷为 16 MW,负荷 1—负载 4 分别为 8,2,3.5,2.5 MW。

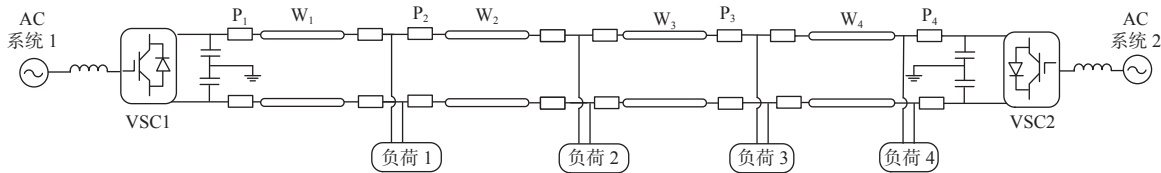


图 8 双端±10 kV 直流配电系统仿真模型

Fig. 8 Simulation model of dual terminal ±10 kV DC distribution system

4.1 典型极间故障时线路保护仿真

根据故障类型的不同,将所建模型的原始参数代入表 1 及式(4),可得到直流配电线路末端发生极间故障时直流侧电容放电电流的二阶导数随时间变化曲线,如图 9 所示。

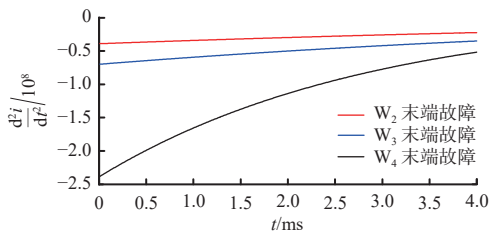


图 9 线路末端极间故障时电容放电电流二阶导数变化曲线

Fig. 9 Second derivative variation curves of capacitor discharge current during pole to pole fault at the line end

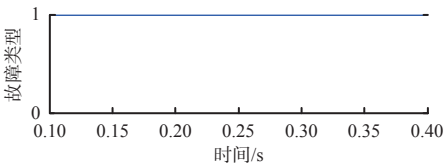
为保证保护的可靠性,取参数 $K'_{rel}=1.2$,由式(5)、式(6)可求得极间故障情况下各级线路首端断路器的加速判据整定值,见表 4。

表 4 极间故障时各级线路保护加速判据

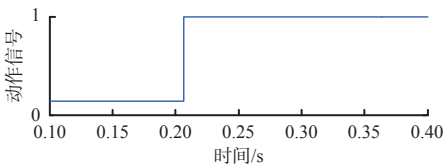
Table 4 Acceleration criteria for line protection at all levels during pole to pole fault

保护装置	保护加速判据/ 10^8	
	原始值的绝对值	整定值
P_4	2.380	2.860
P_3	0.699	0.838

假设直流线路 W_2 的 0.03 km 处在 $t=0.2$ s 时刻发生金属性极间短路故障,通过保护启动判据识别为故障发生之后,根据保护装置采集到的故障电流计算结果判断出故障类型,判定结果如图 10(a)所示,故障类型为 0 表示单机接地故障,为 1 表示极间故障。BF1、BF2 和 BR2 检测出故障位于正方向。BR2 延时 7 ms 后最先动作,在其延时开始的同时,保护装置 P_2 计算得出放电电流二阶导数满足加速动作条件,在 $t=0.203$ s 时向断路器 BF2 发出加速动作信号,如图 10(b)所示,动作信号为 0 表示闭合断路器,为 1 表示加速断路器分断。故障切除后,保护装置 P_2 向换流阀发送重新启动命令,恢复整个系统供电。



(a) 故障类型判断结果



(b) 保护装置 P_2 发出的加速动作信号

图 10 极间故障仿真结果

Fig. 10 Simulation results of pole to pole fault

4.2 典型单极接地故障时线路保护仿真

直流线路 W_4 、 W_3 末端单极接地故障时直流侧电容放电电流的二阶导数变化曲线如图 11 所示。类似于极间故障的加速判据整定方式,取可靠系数 $K'_{rel}=1.2$,通过计算得到放电电流的二阶导数初始值,由此可得各级线路的加速动作整定值,见表 5。

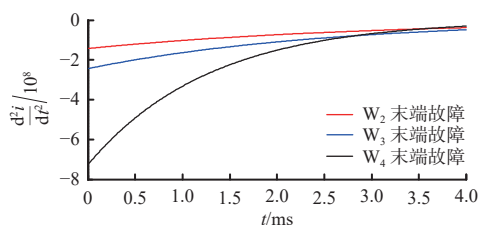


图 11 线路末端单极接地故障时电容电流二阶导数变化曲线

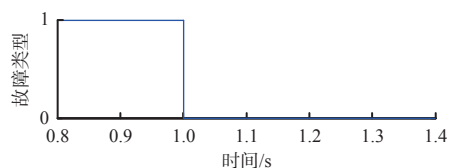
Fig. 11 The second derivative variation curves of capacitor discharge current during monopole to earth fault at the line end

表 5 单极接地故障时各级线路保护加速判据

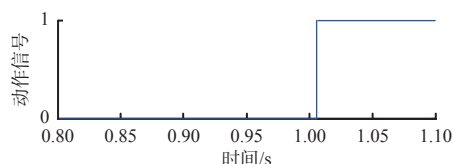
Table 5 Acceleration criteria for line protection at all levels during monopole to earth fault

保护装置	保护加速判据/ 10^8	
	原始值的绝对值	整定值
P_4	7.21	8.65
P_3	2.43	2.91

设定直流线路 W_3 的 0.9 km 处在 $t=1$ s 时刻发生单极接地故障,故障类型判定结果如图 12(a)所示。BF3 和 BR3 检测出故障位于正方向,且 BF3 延时 7 ms 后最先动作,在其延时的同时,保护装置 P_3 计算得出放电电流二阶导数满足加速动作条件,于 $t=1.003$ s 时向断路器 BR3 发出加速动作信号,动作信号如图 12(b)所示。故障切除后,保护装置 P_3 向换流阀发送重新启动命令,恢复整个系统供电。



(a) 直流线路故障类型的判断结果



(b) 保护装置 P_3 发出的加速动作信号

图 12 单极接地故障仿真结果

Fig. 12 Simulation results of monopole to earth fault

4.3 不同条件下直流线路保护测试

在不同故障类型、位置及过渡电阻情况下对保护方案进行测试,结果见表 6 和表 7,表中“—”表示

该级线路的保护装置未发出加速动作命令。设定接地故障在 $t=1$ s 发生,且测试的双端供电型直流配电网运行方式不变。

表 6 单极接地故障时的保护动作情况

Table 6 Protection action during monopole to earth fault

过渡电阻/ Ω	故障距离/km	加速动作时刻/s		故障切除 总时间/ms	故障类型 判断结果
		P_1	P_2		
0.2	0.03	1.003	—	3	L-G
	1.50	1.003	—	3	
	2.97	—	—	21	
	3.03	—	1.003	7	
	4.50	—	1.003	7	
	5.97	—	—	14	
1	0.03	1.003	—	3	L-G
	1.50	1.003	—	3	
	2.97	—	—	21	
	3.03	—	1.003	7	
	4.50	—	1.003	7	
	5.97	—	—	14	
3	0.03	1.003	—	3	L-G
	1.50	1.003	—	3	
	2.97	—	—	21	
	3.03	—	1.003	7	
	4.50	—	1.003	7	
	5.97	—	—	14	
5	0.03	1.003	—	3	L-G
	1.50	1.003	—	3	
	2.97	—	—	21	
	3.03	—	1.003	7	
	4.50	—	1.003	7	
	5.97	—	—	14	

测试结果表明,在不同故障发生位置、过渡电阻及故障类型条件下,若加速动作能够有效启动,则本文保护方案能识别故障类型、确定故障区段并加速对应断路器的跳闸动作,快速切除故障,减少故障时间。在各级线路末端故障时,加速动作不能启动,保护方案仍能识别故障类型,按照既定延时配合实现故障类型和区段的确定并切除故障,只是故障隔离速度较加速方式慢。

5 结论

1) 提出一种基于暂态电流导数的煤矿直流配电网线路无通道保护方案,以直流配电线路故障后电容

表 7 极间故障时的保护动作情况
Table 7 Protection action during pole to pole fault

过渡电阻/ Ω	故障距离/km	加速动作时刻/s		故障切除 总时间/ms	故障类型 判断结果
		P_1	P_2		
0.2	0.03	1.003	—	3	L-L
	1.50	1.003	—	3	
	2.97	—	—	21	
	3.03	—	1.003	7	
	4.50	—	1.003	7	
	5.97	—	—	14	
1	0.03	1.003	—	3	L-L
	1.50	1.003	—	3	
	2.97	—	—	21	
	3.03	—	1.003	7	
	4.50	—	1.003	7	
	5.97	—	—	14	
3	0.03	1.003	—	3	L-L
	1.50	1.003	—	3	
	2.97	—	—	21	
	3.03	—	1.003	7	
	4.50	—	1.003	7	
	5.97	—	—	14	
5	0.03	1.003	—	3	L-L
	1.50	1.003	—	3	
	2.97	—	—	21	
	3.03	—	1.003	7	
	4.50	—	1.003	7	
	5.97	—	—	14	

放电电流二阶导数作为保护动作加速的判据。

2) 结合无通道保护与合理延时,实现故障的识别和切除:对于加速有效区段,利用无通道保护实现断路器提前动作;对于不能加速区域,按照断路器的既定延时动作,实现故障切除。

3) 在单极接地故障、极间故障及加速判据失效 3 种情况下对保护方案进行测试分析,结果显示该保护方案在不同故障位置、过渡电阻及加速判据失效情况下均能实现故障区段的快速识别与隔离。

参考文献(References):

[1] 刘波. 煤矿智能化供电系统的防越级跳闸与远程漏试应用[J]. 工矿自动化, 2021, 47(增刊 1): 85-87.
LIU Bo. Application of anti override trip and remote leakage test in coal mine intelligent power supply system[J]. Industry and Mine Automation, 2021,

47(S1): 85-87.
[2] 贾新立. 煤矿供电系统穿越性故障识别与隔离方案研究[J]. 中国煤炭, 2017, 43(3): 89-92, 108.
JIA Xinli. Research on through fault recognition and isolation scheme for coal mine power supply system[J]. China Coal, 2017, 43(3): 89-92, 108.
[3] 宋国兵, 陶然, 李斌, 等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12.
SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12.
[4] 曾嘉思, 徐习东, 赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2582-2589.
ZENG Jiasi, XU Xidong, ZHAO Yuming. Reliability comparison of AC and DC distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2582-2589.
[5] 乔立华, 陶然, 宋国兵, 等. 直流线路边界特性保护综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 179-186.
QIAO Lihua, TAO Ran, SONG Guobing, et al. A summary of the boundary characteristics used in DC system relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 179-186.
[6] 王国钰, 范春菊, 李潇. 伪双极接线不同接地方式下直流配电线路故障选极方案[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3570-3579.
WANG Guoyu, FAN Chunju, LI Xiao. Fault pole selection of DC distribution lines under pseudo-bipolar wiring with different grounding modes[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3570-3579.
[7] 高仁栋, 吴在军, 范文超, 等. 基于电流微分初始值的 VSC 直流配电系统线路故障定位方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 27-33.
GAO Rendong, WU Zaijun, FAN Wenchao, et al. Line fault location method of VSC-based DC distribution system based on initial current differential value[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 27-33.
[8] 和敬涵, 周琳, 罗国敏, 等. 基于单端电气量的多端柔性直流配电系统暂态保护[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 158-165.
HE Jinghan, ZHOU Lin, LUO Guomin, et al. Transient protection based on single-end electrical signals for multi-terminal flexible DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 158-165.
[9] 高淑萍, 吕宇星, 宋国兵, 等. 利用改进 VMD 突变能量的直流配电网保护方法[J/OL]. 西安交通大学学报: 1-11[2023-09-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.t.20221213.1740.003.html>.
GAO Shuping, LYU Yuxing, SONG Guobing, et al. DC

- distribution network protection method using improved VMD sudden change energy[J/OL]. Journal of Xi'an Jiaotong University: 1-11[2023-09-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.t.20221213.1740.003.html>.
- [10] 贾科, 李猛, 毕天姝, 等. 柔性直流配电线路能量分布差动保护[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3058-3065.
JIA Ke, LI Meng, BI Tianshu, et al. Energy distribution-based differential protection for VSC-DC distribution lines[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 3058-3065.
- [11] 肖磊石, 盛超, 骆潘钊, 等. 基于电阻型超导限流器的直流线路纵联保护方法[J]. 广东电力, 2020, 33(8): 11-17.
XIAO Leishi, SHENG Chao, LUO Pandian, et al. Pilot protection method of DC line based on resistance superconducting fault current limiter[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(8): 11-17.
- [12] 李威, 吴学光, 常彬, 等. 基于电压变化率故障检测的高压直流断路器保护策略[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 554-565.
LI Wei, WU Xueguang, CHANG Bin, et al. Research on protection strategy of HVDC circuit breaker based on voltage change rate fault detection[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 554-565.
- [13] 彭发喜, 汪震, 邓银秋, 等. 混合式直流断路器在柔性直流电网中应用初探[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2092-2098.
PENG Faxi, WANG Zhen, DENG Yinqiu, et al. Potentials of hybrid HVDC circuit breakers' application to MMC-HVDC grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2092-2098.
- [14] 董恩源, 杜广波, 邹积岩, 等. 新型直流断路器在短路故障保护中的应用[J]. 电工技术杂志, 2003(11): 29-31.
DONG Enyuan, DU Guangbo, ZOU Jiyan, et al. Application of intelligent operating system in DC breakers[J]. Electrotechnical Journal, 2003(11): 29-31.
- [15] 郑涛, 吴琼, 吕文轩, 等. 基于主动限流控制的直流配电网保护及故障隔离方案[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 114-121.
ZHENG Tao, WU Qiong, LYU Wenxuan, et al. Protection and fault isolation scheme based on active current-limiting control for DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 114-121.
- [16] 吴鸣, 刘海涛, 陈文波, 等. 中低压直流配电系统的主动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 891-899.
WU Ming, LIU Haitao, CHEN Wenbo, et al. Research on active protection for MV/LV DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 891-899.
- [17] 姜舒婷, 齐磊, 崔翔, 等. 含潮流控制器的直流电网潮流计算方法[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1793-1799.
JIANG Shuting, QI Lei, CUI Xiang, et al. Power flow algorithm method for DC grid with power controller[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1793-1799.
- [18] 束洪春, 安娜, 代月, 等. 基于电流上升速率的柔性直流环网输电线路反时限保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 206-215.
SHU Hongchun, AN Na, DAI Yue, et al. Inverse-time protection for flexible DC transmission lines in ring network based on current rising rate[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 206-215.
- [19] 贺家李, 宋从矩, 李永丽, 等. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
HE Jiali, SONG Congju, LI Yongli, et al. Principles of relay protection in power systems[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [20] BO Z Q, DONG X Z, CAUNCE B R J. Accelerated protection of distribution systems with tapped off loads[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(4): 461-468.
- [21] BO Z Q, DONG X Z, CAUNCE B R J, et al. Adaptive noncommunication protection of double-circuit line systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 43-49.
- [22] 范兴明, 李涛, 张鑫. 中高压直流断路器的研究与应用[J/OL]. 高电压技术: 1-16 [2023-09-13]. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230696.
FAN Xingming, LI Tao, ZHANG Xin. Research and application of medium and high voltage DC circuit breaker[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-16[2023-09-13]. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230696.