

基于直流断路器转移支路动态电阻特性的 柔性直流输电系统保护动作分析与改进

赵冠琨, 贾科, 王聪博, 宣振文, 毕天姝

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要:当直流断路器通过其各支路间的换流清除故障电流时,会导致系统的故障暂态电气量发生变化。现有直流保护在进行原理设计时大多未考虑直流断路器动作特性的影响,因而有可能不正确动作。因此对于柔性直流输电系统,分析了直流短路故障过程中直流断路器的动作特性,给出了考虑直流断路器各换流支路故障电流熄灭特性的短路电流解析表达式,验证了现有的电流微分保护、低压过流保护以及差动保护的适应性,进而提出一种基于电流积分值的保护算法,解决了电流微分保护会出现误动的问题并且具有较强的抗过渡电阻和噪声的能力。最后利用PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件搭建±320 kV双端柔性直流输电系统模型,仿真结果验证了理论分析的正确性和保护算法的适用性。

关键词:直流断路器;直流输电;直流线路保护;适应性分析;短路电流;继电保护

中图分类号:TM 77;TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201909013

0 引言

直流断路器(DCCB)可以有效地实现故障的快速隔离和切除,因此已经成为柔性直流电网技术发展过程中的重要装备^[1-3]。目前关于直流断路器的研究主要集中于其拓扑结构的优化^[4-6]以及设备参数的选型^[7-9],很少关注其动作特性对于线路保护的影响。然而当直流断路器通过其各支路间的换流清除故障电流时,会导致系统的故障暂态电气量发生变化,因此基于电压、电流微分值的直流线路保护的动作用性能面临挑战。

目前直流线路的保护根据其保护原理的不同可分为单端量保护^[10-12]和双端量保护^[13-14]。但这些保护在进行原理设计时大多未考虑直流断路器动作特性的影响。仅有的考虑直流断路器动作特性的文献则重点通过仿真的手段来进行保护的适应性分析。文献[15]仿真分析了单极接地故障情况下断路器的动作特性对于线路过电压保护动作性能的影响并提出了一种能够抑制过电压发生的保护策略。文献[16]则仿真分析了双极短路故障和直流母线故障情况下断路器的动作特性对于保护动作时序的影响并基于此提出了一种新的定向保护策略。然而现有的文献都未给出直流断路器动作特性的解析推导,难以指导保护原理的改进。

收稿日期:2019-01-09;修回日期:2019-07-18

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904100);
国家电网公司科技项目(SGHB0000KXJS1800685)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFB0904100)and the Science and Technology Project of SGCC(SGHB0000KXJS-1800685)

因此本文分析了直流短路故障过程中直流断路器的动作特性,给出了考虑直流断路器各换流支路故障电流熄灭特性后的短路电流解析表达式,并基于该表达式验证了现有的电流微分保护、低压过流保护以及差动保护的适应性,进而提出了一种基于电流积分值的保护算法,解决了电流微分保护会出现误动的问题并且具有较强的抗过渡电阻和噪声的能力。最后,利用PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件搭建±320 kV双端柔性直流输电系统模型,仿真结果验证了本文理论分析的正确性和保护算法的适用性。

1 故障电流特性分析

本文以图1所示的双端柔性直流输电系统为例进行故障电流特性分析,直流断路器配置在输电线路的两端以快速隔离故障。

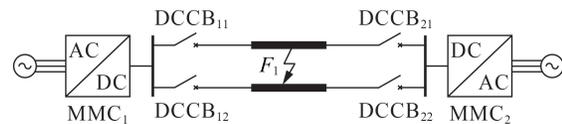


图1 柔性直流输电系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of flexible DC transmission system

柔性直流输电系统的直流线路故障可分为单极接地故障、断线故障和双极短路故障。由于单极接地故障和断线故障不会引起严重过流,因此直流断路器并不会动作,所以本文以双极短路故障为例进行故障电流特性分析。

双极短路故障发生后,直流断路器需要一定的时间才能动作,因此在进行故障电流特性分析时需要将其分为直流断路器动作前和动作后2个阶段,

下面进行具体分析。

1.1 直流断路器动作前故障电流特性

双极短路故障发生后,由于直流断路器的开断能够迅速隔离并清除故障电流,因此换流器无需闭锁,所以在直流断路器开断前需要考虑模块化多电平换流器(MMC)的控制策略可能对故障电流特性产生的影响。

本文系统中采用半桥型MMC,其内部拓扑结构如附录A中的图A1所示。假设每一相MMC的上、下桥臂各含有 N 个子模块,为了保持直流侧电压的稳定,每一瞬间每个相单元总是投入 N 个子模块。同时,为了使相单元输出的交流电压能够跟随调制波同步变化,要求上、下桥臂处于投入状态的子模块数动态变化,每个时刻上桥臂需要投入的子模块数 n_{down} 和下桥臂需要投入的子模块数 n_{up} 的实时表达式为:

$$\begin{cases} n_{\text{up}} = N - n_{\text{down}} = \frac{N}{2} \mp \text{round}\left(\frac{U_s}{U_c}\right) \\ n_{\text{down}} = \frac{N}{2} \pm \text{round}\left(\frac{U_s}{U_c}\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中, U_c 为子模块上的直流电压平均值; U_s 为调制波的幅值; $\text{round}(x)$ 表示取与 x 最接近的整数。

发生故障后子模块电容快速放电,直流电压会迅速跌落,此时在定直流电压控制策略的作用下,上、下桥臂会进行子模块的快速投切以保证直流电压的稳定,但直流电压并不能立刻恢复稳定,在这个暂态过程中MMC会增加处于投入状态的子模块数目,因此直流侧输出多电平电压,即:

$$U_{\text{dc}} = (N \pm k) U_c \quad k=0, 1, \dots, N \quad (2)$$

因此,当直流侧输出多电平电压时,直流线路电流也是多电平的,如式(3)所示。

$$i_{\text{dc}} = \frac{U_{\text{dc}}}{Z} = \frac{(N \pm k) U_c}{Z} \quad k=0, 1, \dots, N \quad (3)$$

其中, Z 为直流线路阻抗。

1.2 直流断路器动作后故障电流特性

直流断路器动作后,其自身的动作特性成为影响故障电流特性的主要因素,因此本文以ABB公司生产的混合式高压直流断路器为例进行动作特性分析,其拓扑结构如图2所示。

图2所示的混合式高压直流断路器的动作特性为:直流系统发生故障后,故障电流快速上升,当电流值超过预设值之后,转移支路内的电力电子模块导通,同时关断主支路的电力电子模块,故障电流将由主支路换流至转移支路;当流经主支路的电流下降为0时,打开快速机械开关;然后关断转移支路的电力电子模块,故障电流换流至耗能支路(金属氧化物避雷器(MOV)),直流系统故障后的剩余能量将

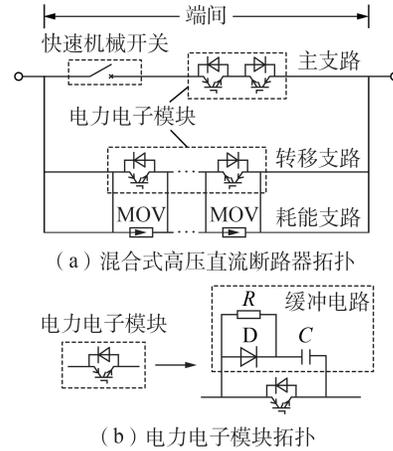


图2 混合式高压直流断路器结构图

Fig.2 Topology diagram of hybrid HVDC circuit breaker

通过避雷器吸收,最终完成直流故障的快速隔离。

换流器不闭锁时,直流线路保护安装处的故障电流包括电容放电电流分量和交流馈入电流分量2个部分,由于子模块电容快速放电,因此故障电流以电容放电电流分量为主^[17],等效电路图见附录A中的图A2。

故障发生后,该动态过程所对应的微分方程以及边界条件分别如式(4)和式(5)所示。

$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (4)$$

$$\begin{cases} u_c(0_+) = u_c(0_-) = U_{\text{dc}0} = U_{\text{dc}N} \\ i_{\text{dc}}(0_+) = i_{\text{dc}}(0_-) = I_0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, u_c 为等值电容两端电压; $U_{\text{dc}0}$ 和 I_0 分别为故障时刻保护安装处直流电压和直流电流瞬时值; $U_{\text{dc}N}$ 为直流线路额定极间电压; 0_- 、 0_+ 分别表示故障前的最终时刻和故障后的最初时刻,假设故障瞬间电气量不发生跃变。

由于直流线路的等值电阻一般较小,所以等效二阶电路以衰减振荡的形式放电,直流线路保护安装处的电流为:

$$i_{\text{dc}} = \frac{U_{\text{dc}N}}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t) - \frac{I_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \beta) \quad (6)$$

其中, δ 、 ω_0 、 β 可由等效电路中电气参数计算得到,计算表达式详见附录A中的式(A1)、(A2)。

直流断路器清除故障电流是通过支路间的可控换流来实现的,第1次换流发生在主支路的IGBT开关关断、转移支路的IGBT开关导通时,故障电流首先换流至主支路缓冲电容,然后再由缓冲电容换流至转移支路IGBT^[18],然而IGBT支路换流到缓冲电容这一过程只需 $2 \mu\text{s}$ 便能完成^[19],换流过程相当短暂,不会对故障电流的变化造成影响,因此在分析中忽略这一短暂的换流过程。而当其由缓冲电容换流至转移支路IGBT时,式(A1)中的电阻 $r(t)$ 即为转移支路中电力电子模块的动态电阻变化值,在此换流

过程中转移支路的等效电阻的变化分为IGBT导通阶段和IGBT稳态阶段这2个阶段考虑。

首先是导通阶段,IGBT在导通的过程中其电阻的变化规律如式(7)、(8)所示。

$$R_{\text{onend}} = R_{\text{on0}} e^{-\frac{t_{\text{on}}}{\tau}} \quad (7)$$

$$\tau = -t_{\text{on}} / \lg(R_{\text{onend}} / R_{\text{on0}}) \quad (8)$$

其中, R_{on0} 为电阻初值; R_{onend} 为电阻终值; t_{on} 为导通时间,可由IGBT手册查阅,不同的导通电压对应不同的导通时间。

由式(6)可知,虽然故障电流整体表现出衰减振荡的变化趋势,然而在第1次换流过程中,转移支路电力电子器件的电阻在导通时是以指数形式减小的,因此会导致故障电流在衰减振荡的过程中由于换流支路电阻的减小再次出现幅值增大的情况,从而使故障电流产生波动。

然后是稳态阶段,当IGBT完成导通并达到开通稳态后,它的等效电阻是动态变化的,影响因素为IGBT的集电极电流,可以通过试验曲线开通关断过程的电气量变化进行拟合,拟合表达式如式(9)所示。

$$r(t) = a^{bI_c(t)} + c^{dI_c(t)} \quad (9)$$

其中, I_c 为集电极电流; a 、 b 、 c 、 d 为拟合的系数。

第1次换流完成后,故障电流换流至转移支路,所以IGBT的集电极电流即为通过转移支路的故障电流。同样由式(6)可知,故障电流整体表现出衰减振荡的变化趋势,因此支路电阻值会随着故障电流的衰减而减小。然而当换流支路电阻值减小后反过来会导致衰减的故障电流再次出现幅值增大的情况,从而使故障电流产生波动。

第2次换流发生在转移支路的IGBT关断时,故障电流首先换流至转移支路缓冲电容,然后再由转移支路缓冲电容换流至MOV,同样换流到缓冲电容这一过程相当短暂,不会对故障电流的变化造成影响,因此分析中忽略这一换流过程。此过程与第1次换流的区别在于需要考虑IGBT信号的同步问题,第1次换流过程中不考虑IGBT信号的同步问题是因为转移支路采用的是IGBT级联方式,只有当其全部导通时转移支路才会解锁进行换流,因此IGBT信号的同步问题不会影响该过程故障电流的暂态特性。

由于IGBT信号的不同步导致IGBT的关断时间也就不同,而耗能支路中与IGBT并联的避雷器是在其关断的情况下才投入电路中的,因此IGBT未同步关断即相当于与其并联的避雷器是分步投入电路中吸收能量的,此时故障电流值可用式(10)表示。

$$i_{\text{dc}} = \frac{U_{\text{dcN}} - n(t)U_{\text{var}}}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t) - \frac{I_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \beta) \quad (10)$$

其中, $n(t)$ 为不同时刻已经完成关断的IGBT阀组数即已经投入电路中的避雷器组数,其值为0~ N 之间的整数; U_{var} 为1组避雷器投入所形成的反电动势值,该值在分断过程中近似为定值。

由式(8)可知,转移支路的IGBT由于关断时间的不同导致其并联的避雷器投入到电路中的时间也不同,而避雷器在不同时刻投入到电路中相当于改变了式(5)所示的二阶微分方程的初始边界条件,因此避雷器的分步投入加速了故障电流幅值的衰减。

以上分别分析了故障发生后直流断路器动作前和动作后的故障电流特性,并推导得到了不同阶段的故障电流表达式,将上述2个阶段的表达式综合可得:

$$i_{\text{dc}} = \begin{cases} \pm \left(\frac{N}{2} - k \right) \frac{U_c}{Z} & t_0 \leq t \leq t_1 \\ \frac{U_{\text{dcN}}}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t) - \frac{I_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \beta) & t_1 < t \leq t_2 \\ \frac{U_{\text{dcN}} - n(t)U_{\text{var}}}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t) - \frac{I_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \beta) & t_2 < t \leq t_3 \end{cases} \quad (11)$$

其中, t_0 为故障发生时刻; t_1 为直流断路器动作时刻,即第1次换流时刻; t_2 为第2次换流时刻; t_3 为直流断路器完成开断隔离故障时刻。

因此用式(11)便可描述出直流线路从故障发生后直流断路器开始动作一直到直流断路器完成开断隔离故障这段时间内的故障电流特性。

2 考虑直流断路器的保护动作性能分析

对于直流断路器而言,其能开断的故障电流值为一定值,如果保护未及时发出命令,故障电流值超过开断值后直流断路器便不会动作,而是改为与之并联单独配置的旁路开关动作以保护其自身安全。然而这种情况并不允许出现,因此即便保护未发出跳闸命令,当故障电流一旦达到其开断值时直流断路器自身便会直接动作,所以其开断过程中所导致的故障暂态电气量的变化会对保护的动作性能造成影响。

对于柔性直流输电系统,发生双极短路故障后,电流迅速增大同的时电压降低,因此配置反应电压降低和电流增大的低压过流保护以及反应电流上升速度快慢的电流微分保护共同作为主保护。此外,直流线路正、负极分别安装电流差动保护,用于有选择性地识别直流线路区内外故障。因此本文主要分析上述3种保护的動作性能。

2.1 电流微分保护

对于电流微分保护,其动作判据如式(12)所示。

$$\begin{cases} di/dt > F \\ \Delta t \geq \Delta t_{\text{set}} \end{cases} \quad (12)$$

其中, i 为瞬时电流; F 为电流上升率起始门限; Δt_{set} 为电流上升率保护持续判断时间。

对上述推导的故障电流表达式(6)求导得:

$$\frac{di_{\text{dc}}}{dt} = -\frac{\omega_0 U_{\text{dcN}}}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \beta) + \frac{I_0}{\omega LC} e^{-\delta t} \sin(\omega t - 2\beta) \quad (13)$$

从式(13)可以看出,电流微分值表现出衰减振荡的变化趋势,而其振荡幅值的大小和直流断路器的支路电阻值 $r(t)$ 有关,直流断路器动作后,由于转移支路电力电子器件的动态电阻性,会导致电流微分值随着转移支路电阻的减小而再次增大,所以有可能会再次出现电流微分值再次大于其设定值的情况,从而造成保护的误动。

2.2 低压过流保护

对于低压过流保护,其动作判据如下:

$$U_{\text{pn}} < U_{\text{set}} \quad (14)$$

$$I_1 > I_{\text{set}} \quad (15)$$

$$I_2 > I_{\text{set}} \quad (16)$$

其中, U_{pn} 为直流输电线路正、负极极间电压; U_{set} 为电压动作门槛值; I_1 为直流线路正极电流; I_2 为直流线路负极电流; I_{set} 为电流动作门槛值。

对于故障电流,由式(6)可知其表现出衰减振荡的变化趋势,直流断路器动作后由于转移支路电力电子器件的动态电阻性会导致故障电流产生波动。故障电流流经转移支路发生在第1次换流和第2次换流之间。因此故障电流值的波动主要集中于其峰值和之后的一小段时间内,而这段时间内的故障电流值大于保护的电流设定值,所以波动并不会导致电流再次满足判据从而造成保护的误动。

对于极间电压,发生故障后其值大小可等值为保护测量点到故障发生处直流线路等效模型中线路等值元件上的电压之和,故障线路等值电路如图3所示。图中, R_u 、 L_u 、 C_u 分别为线路单位电阻、电感、电容。

此时线路极间电压表达式如式(17)所示。

$$U_{\text{pg}} = \frac{R_{\text{eq}} U_{\text{dcN}}}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t) + \frac{L_{\text{eq}} I_0}{\omega LC} e^{-\delta t} \sin(\omega t - 2\beta) -$$

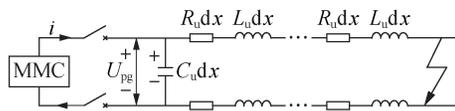


图3 故障线路等值电路

Fig.3 Equivalent circuit of fault line

$$\left(\frac{L_{\text{eq}} \omega_0 U_0}{\omega L} + \frac{R_{\text{eq}} I_0 \omega_0}{\omega} \right) e^{-\delta t} \sin(\omega t - \beta) \quad (17)$$

其中, R_{eq} 为测量点到故障点的等效电阻; L_{eq} 为测量点到故障点的等效电感。

由式(17)可知,线路极间电压表现出衰减振荡的变化趋势。直流断路器动作后由于转移支路电力电子器件的动态电阻性会导致极间电压产生波动,造成极间电压值可能会再次低于设定值。然而低压过流保护的原理是要同时满足所有判据保护才会动作,由上述分析可知过流保护在这里并不会再次满足判据,因此低压过流保护不会发生误动。

2.3 差动保护

对于常见的比率制动型电流差动保护,其动作判据如式(18)所示。

$$\begin{cases} |i_M + i_S| > K |i_M - i_S| \\ |i_M + i_S| > I_{\text{op}} \\ \Delta t \geq \Delta t_{\text{set_DIFF}} \end{cases} \quad (18)$$

其中, i_M 、 i_S 为每一极线路两侧的一次侧电流瞬时值; K 为制动系数,借鉴高压直流的经验,一般取值范围为0.5~0.8; I_{op} 为最小的动作门槛,其整定原则是躲过一次侧需要切除的最小短路电流; $\Delta t_{\text{set_DIFF}}$ 为电流差动保护持续判断时间。

当输电线路发生区外短路故障时,差动电流为0,制动电流为故障电流的2倍,不满足判据,因此差动保护能够可靠不动作;当输电线路发生区内短路故障时,线路两侧电流方向都为正方向,电流值都为正值。差动电流必然大于制动电流,满足判据,因此差动保护能够可靠动作。

由于差动保护采用瞬时电流值作为判据,所以每个时刻保护在进行判定时电流都为固定值。直流断路器动作后换流至转移支路,虽然由于其动态电阻性会导致电流发生波动,但是在这一过程中制动量和动作量的波动变化是同步的,因此本质上并没有改变动作量和制动量的大小关系,所以差动保护不会出现误动。

2.4 基于电流积分值的保护算法

由上述分析可知,考虑直流断路器动作特性后电流微分保护存在误动的风险,如果直接将保护闭锁、对于故障区域而言保护相互之间无法形成配合,对于相邻区域而言则失去了其后备保护,保护的可靠性大幅降低,因此本文在不闭锁保护的基础上提出了一种基于电流积分值的保护算法,通过增加保护判据的方式能够有效解决电流微分保护出现误动的问题。

故障电流出现波动发生在直流断路器第1次换流和第2次换流之间,此时故障电流值在峰值附近,其值明显大于故障刚发生时刻的故障电流值,因此

取电流对时间的积分值能够构造出清晰的保护边界。

保护判据可以依据故障刚发生时和直流断路器动作时故障电流值的显著差异而构造,这样便能够躲过由于直流断路器动作特性而产生的故障电流波动的影响,因此保护动作判据如式(19)所示。

$$\begin{cases} di/dt > E \\ \Delta t = \Delta t_{\text{set}} \\ \int_t^{t+\Delta t} i dt < F_{\text{set}} \end{cases} \quad (19)$$

其中, E 为电流上升率起始门限; F_{set} 为积分整定值; Δt_{set} 为延时时间整定值。

考虑外界影响因素时,由于本文算法是通过计算电流对时间的积分值来作为辅助判据,因此不管是过渡电阻还是噪声,其都无法改变直流断路器动作时故障电流远大于故障刚发生时刻电流值这一根本特性,理论上该算法具备较强的抗过渡电阻和噪声的能力。

3 仿真验证与分析

本文在 PSCAD / EMTDC 电磁暂态仿真软件中搭建图 1 所示的 ± 320 kV 柔性直流输电系统进行仿真,验证本文理论分析的正确性以及保护对实际故障波形的适应性,同时也对本文保护算法的正确性进行验证。图 1 中的 F_1 表示双极短路故障,采样频率设为 10 kHz,窗长为 0.2 ms,模型中各具体参数详见附录 B。

3.1 理论分析验证

在线路中点 F_1 处设置双极短路故障,故障发生时刻为 2 s,以直流断路器 DDCB₁₁ 所测得的各电气量波形为例进行分析。理论计算时采用的算例参数为: $U_{\text{dcN}}=640$ kV, $R_1=42.4$ Ω , $R_f=0.005$ Ω , $L_0=50$ mH, $L_1=0.212$ H, $L=2L_0/3+L_1=0.245$ H, $C_0=2800$ μF , $N=77$, $C=6C_0/N=218$ μF 。

故障电流值的理论和仿真波形对比如图 4 所示,由图可知,理论推导所得的故障电流表达式能够表现出故障后实际线路中电流值的波动变化情况,两者的区别在于故障电流变化的幅度有所不同,仿真波形相对于理论波形波动较小,其原因为:仿真中由于线路配备有限流电抗器,因此不但在直流断路

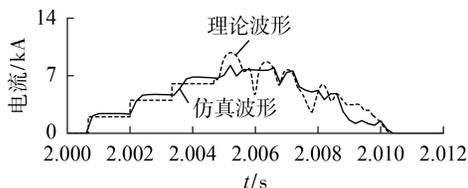


图4 故障电流值的理论和仿真波形对比

Fig.4 Comparison between theoretical and simulative waveforms of fault current

器动作前降低了故障电流的阶梯波上升斜率,并且在直流断路器动作后也减小了由于其动作特性所导致的电流波动。

极间电压值的理论和仿真波形对比如图 5 所示,由图可知本文理论推导所得极间电压表达式能够表现出故障后实际线路中极间电压值的波动变化情况,两者的区别有 2 处:一是理论值与仿真值相比波谷差异较大,其原因为仿真中由于线路限流电抗器的存在导致电流阶梯波上升的斜率小于理论值,而极间电压值中波谷所对应的时刻正好是电流阶梯波上升的时刻,因此电压波谷的仿真值小于理论值;二是故障清除后,仿真波形相较于理论波形出现了一段电压再次下降的情况,其原因为直流线路可等效成由 RLC 电气元件所构成的电路,故障发生后线路的储能元件会吸收能量,而当故障清除后直流线路各等效元件之间会形成一个闭合回路,电感和电容元件通过回路再次产生电流,因此极间电压会在故障清除后出现一段短暂下降的波形。

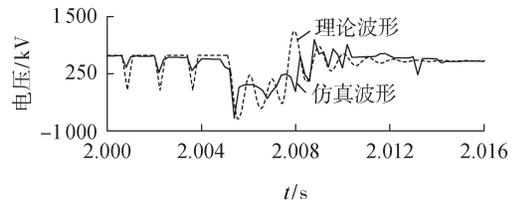


图5 极间电压值的理论和仿真波形对比

Fig.5 Comparison between theoretical and simulative waveforms of voltage between poles

3.2 保护动作性能验证

3.2.1 电流微分保护

电流微分保护的仿真结果如图 6 所示。可以看出,直流断路器动作后换流至转移支路时由于电力电子器件的动态电阻特性,会导致电流微分值在所设定的采样率进行采样时会出现连续 3 个点再次满足判据的情况,从而造成保护的误动,与理论分析一致。

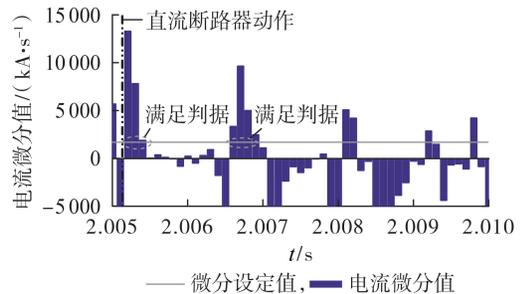


图6 电流微分保护仿真结果

Fig.6 Simulative results of current differential protection

3.2.2 低压过流保护

低压过流保护的仿真结果如图 7 所示。可以看出,直流断路器动作后由于转移支路电力电子器件

的动态电阻性,导致故障电流值会随着电阻的动态变化出现波动;但是由于换流到转移支路时电阻才是动态变化的,因此故障电流值的波动主要集中于其峰值和之后的一小段时间内,而这段时间内的故障电流值大于保护的电流设定值,因此不会出现再次满足过流保护判据的情况。

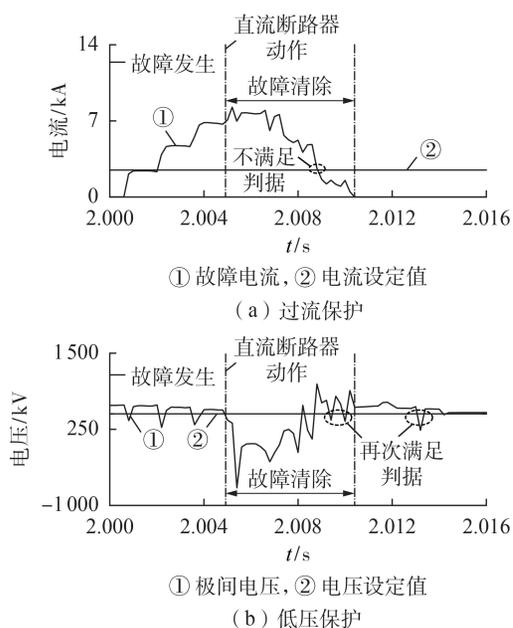


图7 低压过流保护仿真结果

Fig.7 Simulative results of low voltage and overcurrent protection

由于故障电流值的波动,导致极间电压值在换流过程中同样发生了波动,因此出现了再次低于电压设定值的情况。综上所述,直流断路器的动作会导致低压保护满足判据而过流保护不会满足判据,因此不会引起低压过流保护的误动,与理论分析一致。

3.2.3 差动保护

差动保护的仿真结果如图8所示。可以看出,直流断路器动作后换流至转移支路,虽然由于其动态电阻性会导致电流上下波动,但是在这一过程中动作量和制动量的波动变化是同步的,因此本质上并没有改变动作量和制动量的大小关系,所以不会引起差动保护的误动,与理论分析一致。

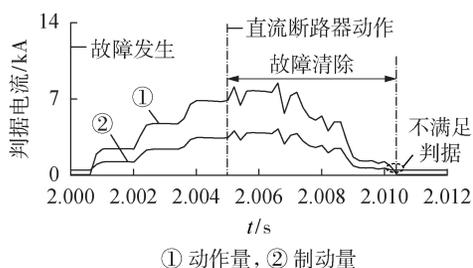


图8 差动保护仿真结果

Fig.8 Simulative results of differential protection

3.3 算法性能验证

对于本文所提基于电流积分值的保护算法,不但要求其在直流断路器动作情况下能够准确闭锁电流微分保护确保其不误动,也要求其在故障发生后到直流断路器动作前这段时间能够准确不闭锁,确保能够正确识别出故障,仿真结果如附录C中的图C1所示。

由图C1可以看出,故障刚发生时刻电流积分值并不大,因此保护既满足电流微分保护判据又满足电流积分值判据,所以能够准确不闭锁识别出区内故障;而这之后无论是子模块的动态投切调节过程还是直流断路器的动作特性所导致的连续满足判据的情况,其所对应的电流积分值都明显大于故障刚发生时刻的电流积分值,所以能够构成清晰的保护边界,因此可以准确闭锁保护确保其不误动,验证了本文算法的正确性和适用性。

3.3.1 过渡电阻的影响

为分析过渡电阻对于保护算法的影响,设置故障时的过渡电阻分别为 $10\ \Omega$ 、 $20\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$ 和 $100\ \Omega$,仿真结果如附录C中的图C2所示。由仿真结果可知,4种过渡电阻情况下并未改变故障发生后不同时刻积分值的大小关系,故障刚发生时刻保护能够同时满足2种判据准确不闭锁,而无论是在子模块动态投切的调节过程还是在直流断路器动作后支路换流的过程中,故障电流的积分值仍然都大于故障刚发生时刻电流的积分值,因此不会满足积分判据,所以能够准确闭锁保护确保其不误动,验证了所提算法具有很强的耐受过渡电阻能力。

3.3.2 噪声的影响

噪声会影响故障电流波形,使其幅值存在波动。因此在故障电流中分别加入信噪比为20 dB、30 dB和40 dB的白噪声,测试所提保护算法的抗噪声能力。同样以故障点 F_1 双极短路故障为例,仿真结果如附录C中的图C3所示。由仿真结果可知,故障发生时刻保护能够同时满足2种判据准确不闭锁,而无论是在子模块动态投切的调节过程还是在直流断路器动作后支路换流的过程中,故障电流的积分值仍然都大于故障刚发生时刻电流的积分值,所以不会满足积分判据,因此能够准确闭锁保护确保其不误动,验证了本文所提算法具有较强的抗噪声能力。

4 结论

本文分析了直流线路极间短路故障过程中直流断路器的动作特性,给出了考虑直流断路器各换流支路故障电流熄灭特性后的短路电流表达式,并基于该表达式验证了现有的电流微分保护、低压过流保护以及差动保护的适应动作适应性。针对电流微分保护会出现误动的问题,提出了一种基于电流积分值

的保护算法并且其具有较强的抗过渡电阻和噪声的能力。最后,在PSCAD仿真软件中搭建 ± 320 kV双端柔性直流输电系统模型,仿真结果验证了理论分析的正确性及保护算法的适用性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李斌,何佳伟,李晔,等. 多端柔性直流系统直流故障保护方案[J]. 中国电机工程学报,2016,36(17):4627-4636.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. DC fault protection strategy for the flexible multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4627-4636.
- [2] 刘剑,邵能灵,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.
- [3] 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.
- [4] 刘程卓,王渝红,龚鸿,等. 一种适用于混合式高压直流断路器负载换流开关的新型缓冲电路[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):205-209,217.
LIU Chengzhuo, WANG Yuhong, GONG Hong, et al. Novel snubber circuit for load commutation switch of hybrid HVDC breaker[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 205-209, 217.
- [5] 刘顺炮,郑建勇,查申森,等. 基于新型混合式断路器的IGBT缓冲电路研究[J]. 电力自动化设备,2006,26(3):31-34.
LIU Shunpao, ZHENG Jianyong, ZHA Shensen, et al. Research on IGBT snubber based on hybrid circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(3): 31-34.
- [6] 魏晓光,高冲,罗湘,等. 柔性直流输电网用新型高压直流断路器设计方案[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):95-102.
WEI Xiaoguang, GAO Chong, LUO Xiang, et al. A novel design of high-voltage DC circuit breaker in HVDC flexible transmission grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 95-102.
- [7] 朱童,余占清,曾嵘,等. 混合式直流断路器模型及其操作暂态特性研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):18-30.
ZHU Tong, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Transient model and operation characteristics researches of hybrid DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 18-30.
- [8] 赵坚鹏,赵成勇,许建中,等. 直流电网中超导限流器与高压直流断路器的协调配合方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):121-128.
ZHAO Jianpeng, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong, et al. Coordination between superconducting current limiter and high voltage DC circuit breaker in DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 121-128.
- [9] 丁骁,汤广福,韩民晓,等. 柔性直流电网用混合式高压直流断路器特征参数提取及应用[J]. 中国电机工程学报,2018,38(1):309-319,369.
DING Xiao, TANG Guangfu, HAN Minxiao, et al. Characteristic parameters extraction and application of the hybrid DC circuit breaker in MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 309-319, 369.
- [10] 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.
- [11] LI W, MONTI A, PONCI F. Fault detection and classification in medium voltage DC shipboard power systems with wavelets and artificial neural networks[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2014, 63(11):2651-2665.
- [12] 李斌,何佳伟,李晔,等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报,2016,36(21):5741-5749.
LI Bin, HE Jiawei, LI Hua, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749.
- [13] 邢鲁华,陈青,高湛军. 基于电压和电流突变量方向的高压直流输电线路保护原理[J]. 电力系统自动化,2013,37(6):107-113.
XING Luhua, CHEN Qing, GAO Zhanjun. A new protection principle for HVDC transmission lines based on directions of fault components of voltage and current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 107-113.
- [14] 张颖,邵能灵,徐斌. 高压直流线路纵联行波方向保护[J]. 电力系统自动化,2012,36(21):77-80.
ZHANG Ying, TAI Nengling, XU Bin. Travelling wave based pilot directional protection for HVDC line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 77-80.
- [15] 许烽,李继红,朱承治,等. 直流断路器对直流电网过电压特性的影响分析[J]. 浙江电力,2017,36(9):13-18.
XU Feng, LI Jihong, ZHU Chengzhi, et al. Analysis on the influence of DC circuit breaker on the over-voltage characteristics of DC grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(9): 13-18.
- [16] MOKHBERDORAN A, SILVA N, LEITE H, et al. A directional protection strategy for multi-terminal VSC-HVDC grids[C]//2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Florence, Italy: IEEE, 2016: 1-6.
- [17] 孙吉波,王宇,刘崇茹,等. 基于MMC的多端直流电网双极短路故障电流计算[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):72-78.
SUN Jibo, WANG Yu, LIU Chongru, et al. Pole-to-pole short circuit current calculation of multi-terminal DC grid based on MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 72-78.
- [18] 丁骁,汤广福,韩民晓,等. IGBT串联阀混合式高压直流断路器分断应力分析[J]. 中国电机工程学报,2018,38(6):1846-1856,1922.
DING Xiao, TANG Guangfu, HAN Minxiao, et al. Analysis of the turn-off stress on hybrid DC circuit breaker with IGBT series valve[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1846-1856, 1922.
- [19] HÄFNER J, JACOBSON B. Proactive hybrid HVDC breakers—a key innovation for reliable HVDC grids[C]//Proceedings of

the International Council on Large Electric System. Bologna, Italy:CIGRE,2011:264-272.

作者简介:

赵冠琨(1996—),男,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向为柔性直流电网保护与控制(**E-mail**:zhaoguankun_ncepu@163.com)

贾科(1986—),男,内蒙古呼和浩特人,教授,博士研



赵冠琨

究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统保护与控制、新型配电网故障定位与系统自我恢复(**E-mail**:ke.jia@ncepu.edu.cn);

王聪博(1990—),男,吉林长春人,博士研究生,主要研究方向为柔性直流配电网保护与控制(**E-mail**:wangcongbo107@163.com)。

Analysis and improvement of protection action of flexible DC transmission system based on dynamic resistance characteristics of DC circuit breaker's transfer branch

ZHAO Guankun, JIA Ke, WANG Congbo, XUAN Zhenwen, BI Tianshu

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: When the DC circuit breaker clears the fault current through the commutation between its branches, the fault transient electrical quantity of the system will change. The influence of DC circuit breaker's action characteristics is not considered in the principle design of existing DC protection, which may cause the misoperation of the existing DC protection. Therefore for flexible HVDC (High Voltage Direct Current) system, the action characteristic of DC circuit breaker during DC short circuit fault is analyzed, the short circuit current analytical expression considering quench characteristics of fault current in each flow branch of DC circuit breaker is given, the applicability of existing current differential protection, low voltage over-current protection and differential protection is verified, and then a protection algorithm based on the current integral value is proposed, which solves the misoperation problems of the current differential protection with strong ability to resist the transition resistance and noise. Finally, a ± 320 kV double-terminal flexible DC transmission system model is established by PSCAD / EMTDC electromagnetic transient simulation software. The simulative results verify the correctness of theoretical analysis and the applicability of the proposed protection algorithm.

Key words: DC circuit breaker; DC power transmission; DC line protection; adaptive analysis; short circuit currents; relay protection

(上接第32页 continued from page 32)

KONG Fei, ZHANG Baohui, WANG Yanting. A novel pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on waveform correlation analysis of traveling wave [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 108-114.

作者简介:

李斌(1976—),男,甘肃兰州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制(**E-mail**:



李斌

libin_tju@126.com);

张纪航(1993—),男,福建南平人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制(**E-mail**:zhangjh_tju@163.com);

刘海金(1990—),男,山西临汾人,博士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制(**E-mail**:liuhaijin@tju.edu.cn)。

Fault location of HVDC transmission lines based on waveform similarity analysis

LI Bin, ZHANG Jihang, LIU Haijin, LI Ye

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of the traveling wave fault location principle that performs worse in high-resistance fault and requires extremely high sampling frequency, a fault location method based on waveform similarity for HVDC (High Voltage Direct Current) power transmission lines is proposed. Based on the functional relationship between positive and negative differential currents and fault point current, the waveform similarity between positive and negative differential currents is analyzed by using Pearson correlation coefficient and the corresponding information of fault location is extracted. The proposed method takes use of time-domain information of voltages and currents at both ends, is less affected by the transition resistance and noise, and shows high reliability. PSCAD / EMTDC simulation verifies that the proposed method can achieve accurate fault location of the full length of power transmission line.

Key words: HVDC power transmission; transmission line; electric fault location; differential current; waveform similarity; time shift

附录 A

本文系统中采用半桥型模块化多电平换流器（HBSM-MMC）进行整流和逆变，其结构如图 A1 所示，其由 2 个 IGBT、2 个反并联二极管以及 1 个直流电容器组成。正常工作时， T_1 、 T_2 交替导通；发生故障时，闭锁 T_1 、 T_2 将子模块电容器旁路。

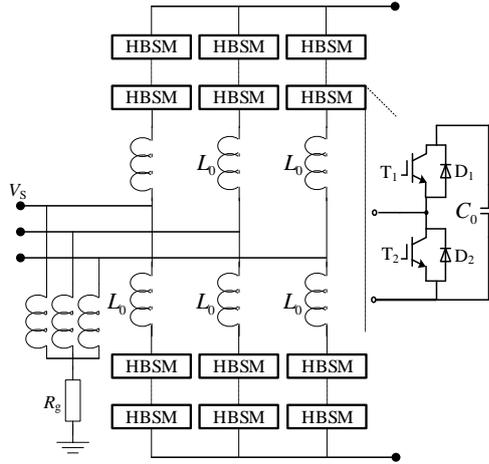


图 A1 HBSM-MMC 拓扑结构

Fig.A1 Topology of HBSM-MMC

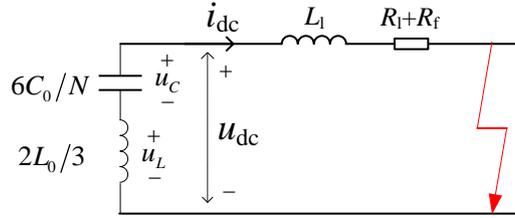


图 A2 双极短路故障初始阶段简化等效电路

Fig.A2 Simplified equivalent circuit of initial stage of DC line-to-line fault

$$\begin{cases} R = R_1 + R_f + r(t) \\ L = \frac{2}{3}L_0 + L_1 \\ C = 6C_0/N \end{cases} \quad (A1)$$

$$\begin{cases} \delta = \frac{R}{2L} \\ \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \\ \omega_0 = \sqrt{\delta^2 + \omega^2} \\ \beta = \arctan\left(\frac{\omega}{\delta}\right) \end{cases} \quad (A2)$$

其中， C_0 为子模块电容； L_0 为桥臂电感； L_1 为直流线路电感； R_1 为直流线路电阻； R_f 为故障点过渡电阻； $r(t)$ 为直流断路器动态电阻值。

附录 B

表 B1 系统仿真模型中 MMC 详细参数

TableB1 Detailed parameters of MMC in simulation model

	参数	参数值
HB-MMC	额定容量 S_N / (MV · A)	1000MV · A
	额定直流电压 U_{DCN} /kV	640 kV
	电平数 N	77
	桥臂电感 L_{arm} / mH	50
	子模块电容 C_{SM} /μF	2800
	子模块通态电阻 R_{SM} /Ω	0.005
交流电网	电压等级	220kV

表 B2 系统仿真模型中直流传输线详细参数

TableB2 Detailed parameters of AC/DC transmission lines

	参数	数值
	总长度 L /	400
	线路单位电阻 R_0 / km	0.212
	线路单位电感 L_0 / km	1.058
	线路单位电容 C_0 / km	0.0028

附录 C

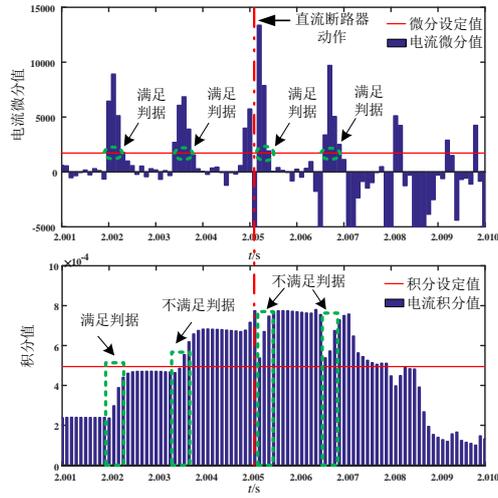


图 C1 保护算法仿真结果

Fig.C1 Simulative results of algorithm for protection

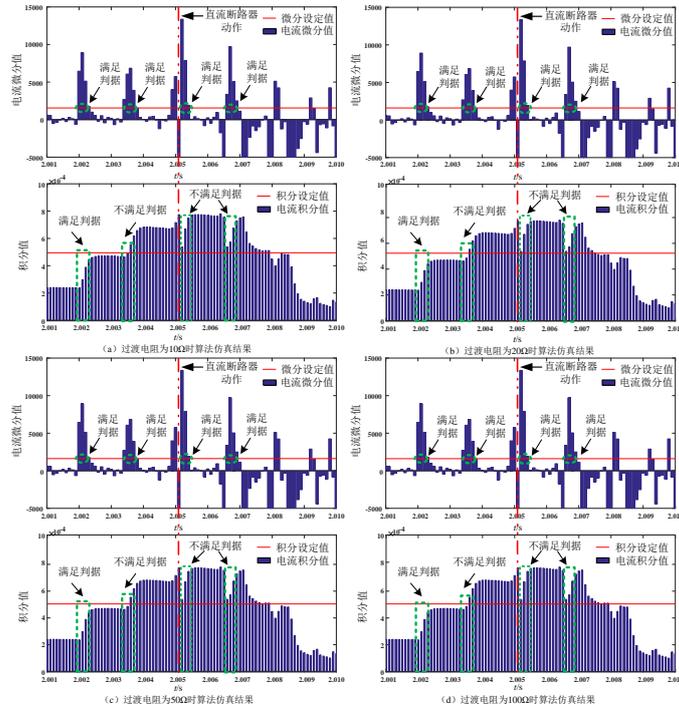


图 C2 不同过渡电阻情况下保护算法性能验证

Fig.C2 Performance verification of protection algorithm under different transition resistors

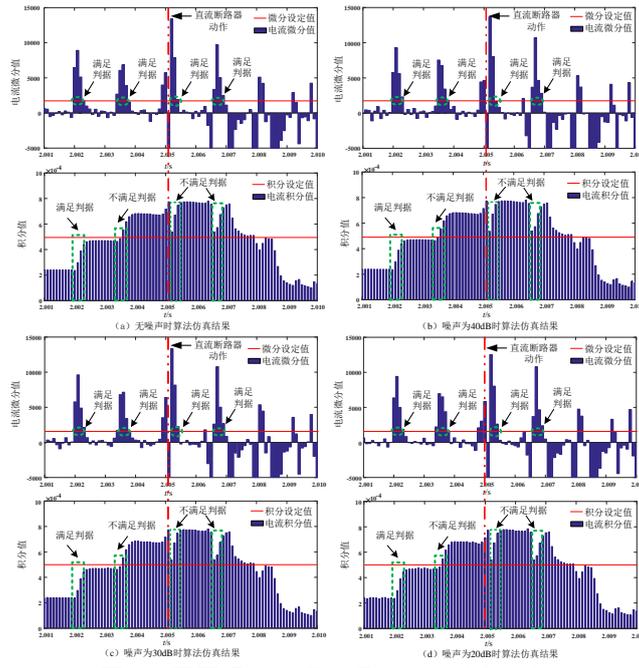


图 C3 不同噪声情况下保护算法性能验证

Fig.C3 Performance verification of protection algorithm under different noise conditions