

文章编号: 1006-4710(2015)02-0214-06

基于电流变化率的多级直流配电馈线保护研究

孙原冰, 段建东, 周一

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 线路保护技术不完善是目前制约直流配电网发展的重要因素之一。本文提出了一种可用于具有多级馈线的直流配电系统线路保护方案及其整定方法。利用不同故障位置下, 直流电容放电电流变化率不同构成了保护判据, 并且在时序上将直流故障的发展过程分为了三个阶段, 根据每一阶段的等效电路及故障电流的计算结果对保护进行整定。在 RT-LAB 实验平台上对该线路保护方案做了一系列性能测试。仿真结果表明, 所提出的保护方案能够与换流器保护形成配合, 分辨故障是否发生在本级线路, 保证直流断路器的动作具有选择性, 有效地保护直流配电线路。

关键词: 直流配电系统; 线路保护; 整定方法; 直流断路器

中图分类号: TM773

文献标志码: A

Line protection scheme for multistage DC power distribution system based on current changing rate

SUN Yuanbing, DUAN Jiandong, ZHOU Yi

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The imperfection of line protection technology is one of factors restricting the development of DC distribution network. This paper proposes a line protection scheme and its setting method which can be used in DC distribution network with multiple lines. Under the different fault locations leading to different DC capacitor current rate increase the operating conditions of line protection are formed. The process of DC fault occurs in DC lines is divided into three stages and analyzed in detail. For each stage, the equivalent circuit of the system and the calculation method of DC fault current are set and the action threshold is determined according to the result of fault analysis. Finally, a series of performance tests of the proposed line protection scheme is carried out by RT-LAB experimental platform. The simulation results show that the proposed protection method can cooperate with a converter protection. It can distinguish whether the fault occurred in protected zone, and ensure the selectivity of DC circuit breaker to protect the DC distribution line effectively.

Key words: DC distribution system; line protection; setting method; DC circuit breaker

现存的直流输配电系统更多的是作为不同地域间有源交流电网互相连接的桥梁, 其自身并没有形成网络系统。造成这种现状的主要原因之一是直流系统的线路保护技术不够完善。近几年有学者提出在配电网等级上也进行直流供电^[1-3], 因此制定一套较为可行的线路保护方案对直流电网的发展就变得尤为重要。

针对该问题, 各国学者展开了多方面研究。文献[4][5]对基于电压源型换流器的高压直流输电系统直流侧故障进行了详细的理论研究, 为直流短路

故障分析提供了参考。目前多端柔性直流输电系统一般采用常规交流断路器代替直流断路器, 通过与换流站控制系统或直流侧隔离开关相配合隔离来故障线路^[6-7], 但是可能造成故障后整个系统停运, 此类保护方案仅适用于连接有源交流网络的多端直流系统。文献[8][9]讨论了基于 VSC 的舰船直流配电系统的保护与重构方案, 可保证系统非故障部分正常运行, 但是舰船直流配电多配置冗余的供电线路, 其保护模式不可直接应用于配电网馈线。文献

收稿日期: 2014-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50707026); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2014JM7255)。

作者简介: 孙原冰, 男, 硕士生, 研究方向为直流配电。E-mail: seeleno7@126.com。

通讯作者: 段建东, 男, 教授, 博士, 研究方向为新型继电保护、分布式供能电网、智能电网监控技术。

E-mail: duanjd@xaut.edu.cn。

[10][11]讨论了直流微网的保护技术,基于此,文献[12]设计了辐射状直流配电馈线的保护,但其较少涉及供电线路故障的定量分析与保护动作阈值的整定计算。文献[13][14]总结了国内外直流电网线路保护技术,并对其未来发展方向进行了展望。

本文通过对直流故障的分析,结合传统三段式保护的思想,提出了一种适用于具有多级线路的直流配电系统的线路保护方案。最后本文给出某一测试系统的整定算例,并在实时仿真平台 RT-LAB 上对该保护方案进行了仿真验证。

1 多级直流配电馈线的保护思想

对于多级配电馈线保护,最基本的要求是:1)对于本级馈线故障要可靠动作;2)对于其他馈线故障要可靠不动作。

1.1 多级直流馈线保护原理

直流配电系统中电源侧使用的电压源型换流器或电力电子变压器中含有电力电子开关器件。为了防止这些开关器件被故障电流击穿,电源端换流器本身具有闭锁功能,在故障后会及时切断供电电源。

根据直流配电系统的结构,直流馈线可能发生的故障类型有极间短路、极线接地、极线与中性线短路。但是在这三种类型的故障中,仅凭换流器本身的闭锁均不能阻止电源端换流器及负荷换流器的直流电容向故障点放电。为防止负荷换流器直流电容放电,需在其进线端装设二极管,而电源端换流器为保证潮流双向流通能力,一般不设二极管。因此,可以通过检测电源端换流器直流电容的放电电流来判断直流馈线的故障情况。当故障位于馈线不同区段时,该放电电流的变化率存在很大差异,因此利用这个信息可以判断故障位置,切断配电馈线的故障部分,从而构成馈线主保护。

1.2 多级直流馈线保护配置

图 1 是一个由三级直流馈线组成的放射状配电系统,分别称为 Cable A、Cable B、Cable C,线路保护及直流断路器分别配置在各级馈线首端,按顺序命名为 A、B、C。各级保护由两段组成,其中保护 I 段为无延时动作,考虑到保护整定的可靠系数,I 段的实际保护范围有限。于是设置延时动作的保护 II 段,其保护范围延伸至下一级线路。下面举例说明:

假设图 1 所示系统中 f 点发生故障,则故障点之前的各级保护测得直流电容放电电流变化率为 di_f/dt ,设保护 B 的 I 段动作阈值为 $(di/dt)_B^I$,保护 A 的 II 段动作阈值为 $(di/dt)_A^{II}$,则该故障线路将由保护 B 将率先动作切除。

此外,除了电流变化率保护作为馈线主保护,还应设置定时限过电流保护作为近后备,防止主保护拒动。而换流器或电力电子变压器保护则可作为整个馈线保护的远后备。

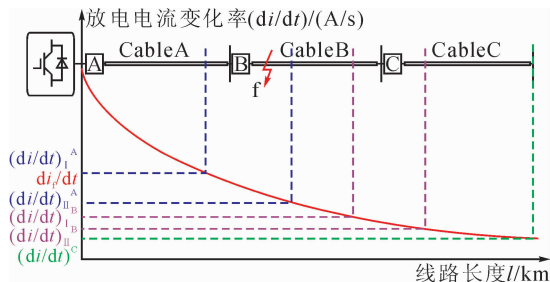


图 1 多级直流配电馈线保护示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DC distribution line protection

2 直流配电馈线故障分析与计算

一般情况下,交流电源到换流器之间装有变压器、换流电抗、滤波器等元件,故障分析时应考虑。本文以极间短路为例(下文所述“故障”均指极间短路),对直流馈线故障电流进行计算。在双极直流配电系统中出现的极线接地和极线与中性线短路,也可以采用类似的方法进行分析。

从时间顺序上,可以将整个故障发展过程可分为 3 个阶段:1)换流器保护动作阶段;2)电容放电阶段;3)线路电感续流阶段。下面对各个故障阶段进行分析,以便于保护动作阈值整定。

2.1 换流器保护动作阶段

此阶段以故障发生时刻 t_0 为始,以换流器保护动作时刻 t_1 为止。忽略线路对地电容,则该阶段内直流系统等效电路如图 2 所示。

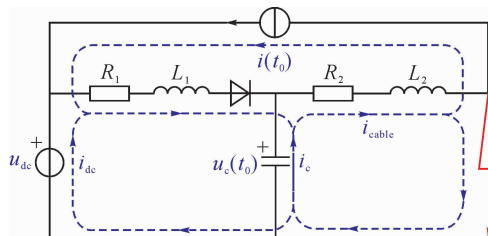


图 2 换流器保护动作阶段内系统的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the system in converter protection action stage

图 2 中 $R_1、L_1$ 为电源等效阻抗,包括换流电抗、开关管电阻等。 $R_2、L_2$ 为直流线路等效电阻、电感。 $i(t_0)$ 为故障前的负荷电流, u_{dc} 为无穷大电压源,其值等于换流器直流电压参考值, $u_c(t)$ 为直流电容电压,即直流系统的实际电压, i_c 为电容电流, i_{dc} 为电源提供的故障电流, i_{cable} 为线路上的故障电流。故障发生时,相当于电路右侧的故障支路导通,因此该

阶段内故障电流的变化情况即为 i_{cable} 的全响应。

设故障电阻为 R_f , 由图 2 所示电路可列出式(1)。求解该式, 即可得出本阶段内线路故障电流的解析表达式 $i_{\text{cable}}(t)$, 进而得到其变化率。

$$\begin{cases} u_c + R_1 i_{\text{dc}} + L_1 \frac{di_{\text{dc}}}{dt} = u_{\text{dc}} \\ (R_2 + R_f) i_{\text{cable}} + L_2 \frac{di_{\text{cable}}}{dt} = u_c \\ i_c = -C \frac{du_c}{dt} \\ i_{\text{dc}} + i_c = i_{\text{cable}} \\ i_{\text{dc}}(t_0) = i_{\text{cable}}(t_0) = i(t_0) \end{cases} \quad (1)$$

2.2 直流电容放电阶段

此阶段内由于电源被切断, 因此故障电流仅由直流电容提供, 此时直流系统等效电路如图 3 所示。

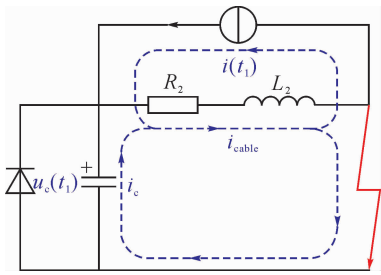


图 3 直流电容放电阶段内系统的等效电路
Fig. 3 Equivalent circuit of the system in DC capacitor discharge stage

此时线路故障电流的变化情况即为 i_{cable} 的零输入响应, i_{cable} 的初值 $i(t_1)$ 等于上一阶段 i_{cable} 的终值, $u_c(t)$ 的初值等于上一阶段 $u_c(t)$ 的终值。设故障电阻为 R_f , 由图 3 可得式(2)。通过求解式(2), 即可得出本阶段内线路故障电流的解析表达式 $i_{\text{cable}}(t)$, 进而得到其变化率。

$$\begin{cases} L_2 C \frac{d^2 u_c}{dt^2} + (R_2 + R_f) C \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \\ i_{\text{cable}} = i_c = -C \frac{du_c}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

2.3 线路电感续流阶段

当直流电容放电完毕, 即电容电压降为零时, 进入线路电感续流阶段。该阶段一直持续到线路电流降为零为止。设直流电容电压降为零的时刻为 t_2 , 则此阶段内直流系统等效电路如图 4。

图 4 中 i_{vd} 为流过反并联二极管的续流电流, 此时线路故障电流的变化情况即为 i_{cable} 的零输入响应。 i_{cable} 的初值 $i(t_2)$ 等于上一阶段 i_{cable} 的终值。设故障电阻为 R_f , 由图 4 可得下式:

$$\begin{cases} (R_2 + R_f) i_{\text{cable}} + L_2 \frac{di_{\text{cable}}}{dt} = 0 \\ i_{\text{vd}} = \frac{i_{\text{cable}}}{3} \end{cases} \quad (3)$$

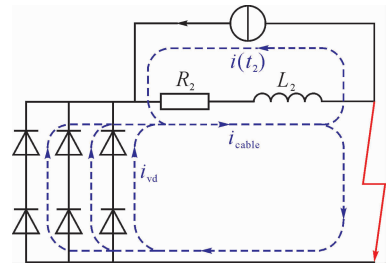


图 4 线路电感续流阶段内系统的等效电路
Fig. 4 Equivalent circuit of the system in line inductor freewheeling stage

通过求解式(3), 即可得出本阶段内线路故障电流的解析表达式 $i_{\text{cable}}(t)$, 进而得到其变化率。

3 多级直流配电馈线保护整定及总体方案

根据上一节得出的直流线路故障电流计算方法, 本节说明基于电流变化率的多级直流配电线路保护的整定及总体方案的设计。

3.1 保护动作阈值的整定方法

由图 1 知, 故障点距离换流器越近, 则放电电流变化率越大。如 1.2 节所述, 作为直流馈线的主保护, 电流变化率保护需分为 I 段与 II 段。在动作阈值上, 本级馈线保护 I 段按本级线路末端发生故障时电流的变化率整定, 与相邻馈线的故障无关; 而本级 II 段的整定值则需与下一级 I 段的整定值相配合。在动作时间上, 本级馈线保护 I 段为无延时动作, 与相邻馈线的保护动作时间无关; 而本级 II 段的动作时间需与下一级 I 段的动作时间相配合。设 di_f/dt 为本线末端故障时, 直流电容放电电流的初始变化率; $(\Delta i)_I^A$ 为本线保护 I 段的整定值; $(\Delta i)_I^B$ 为本线保护 II 段的整定值; $(\Delta i)_I^C$ 为下一级保护 I 段的整定值; K'_{rel} 、 K''_{rel} 为可靠系数; Δt 为保护采样时间, 则动作阈值整定方程如下式:

$$\begin{cases} (\Delta i)_I^A = K'_{\text{rel}} \times \Delta t \times (di_f/dt) \\ (\Delta i)_I^B = K''_{\text{rel}} \times (\Delta i)_I^C \end{cases} \quad (4)$$

其中 Δi 为保护测得的采样间隔内的电流增量, 则保护 I 段动作条件为:

$$\begin{cases} \Delta i \geq (\Delta i)_I^A \\ t \geq T_1 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中 T_1 是直流断路器固有动作时间。相应地, 保护 II 段动作条件为:

$$\begin{cases} \Delta i \geq (\Delta i)_I^B \\ t \geq T_1 + T_2 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中 T_2 为本级保护 II 段相对于下一级保护 I 段的动作延迟时间。

3.2 直流配电馈线保护的总体方案

结合前文所阐述的对保护思想以及对直流配电

馈线故障电流变化过程的定量分析,可以设计出保护总体方案及动作流程如图 5 所示。

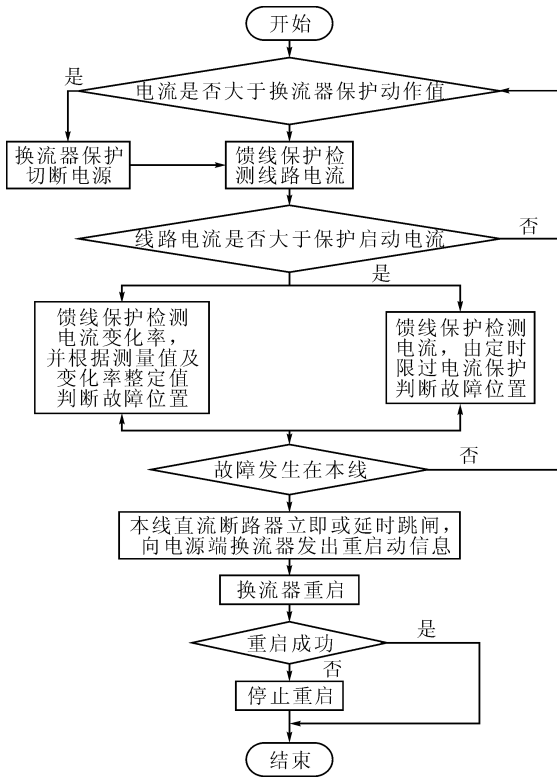


图 5 多级直流配电馈线保护动作流程

Fig. 5 Process of multi-stage DC line protection

由于电源端的换流器或电力电子变压器具有通信功能,所以在直流断路器断开后,保护装置应发重启信息给电源端换流器。电源端换流器收到重启信息或等待一段固定延时后重新启动。

4 测试系统及其定值计算

以图 1 作为测试系统,其中电源端换流器控制直流网络的电压,而负荷端换流器控制负载电压。设直流电压 u_{dc} 为 750 V;三级线路参数相同,线路电阻和线路电感分别为 $R=0.12 \Omega/\text{km}$, $L=1.3 \text{ mH}/\text{km}$,每级线路长度 $l=0.3 \text{ km}$,每级线路各带负荷 100 kW;直流电容 $C=0.007\text{F}$,换流器保护动作阈值为 600 A,故障过渡电阻 $R_f=1 \Omega$ 。若第一级馈线 Cable A 末端 0.3 km 处发生金属性故障,则根据 2.1 节描述的故障电流计算方法得到电容放电阶段电流波形与 Simulink 仿真软件的仿真结果对比如图 6 所示。

由图 6 可知,直流电容放电电流计算结果与仿真结果相差不大。于是进一步得到各级馈线末端故障时,电容放电阶段电流波形及其变化率波形,分别如图 7(a)和图 7(b)。

设保护装置电流采样率为 2 000 Hz,取 $K'_{rel} =$

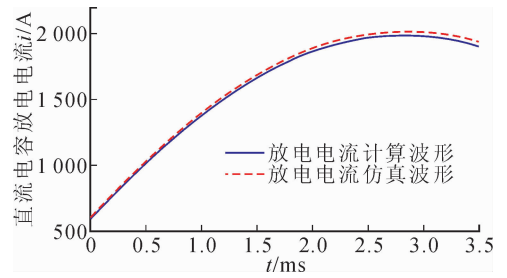
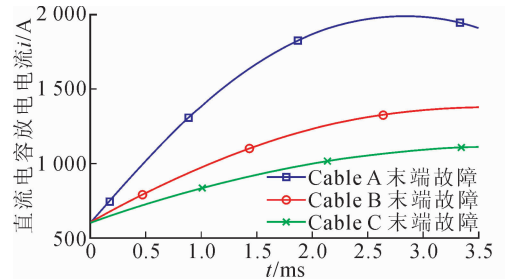
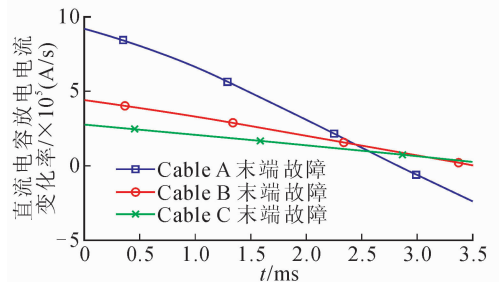


图 6 电容放电电流的计算波形与仿真波形

Fig. 6 Calculation waveform and simulation waveform of capacitor discharge current



(a) 各级馈线末端故障时电容放电阶段电流



(b) 各级馈线末端故障时电容放电阶段电流变化率

图 7 不同故障位置下直流电容放电电流的变化情况
Fig. 7 The discharge currents of DC capacitor under various fault location

1.3、 $K''_{rel} = 1.2$,则根据式 4 及图 7(b)得到各级馈线保护的启动整定值如表 1,保护的启动电流设为最大负荷电流的 1.1 倍。

表 1 各级馈线保护的启动整定值
Tab. 1 Action setting value of each line protection

电流增量	保护 A	保护 B	保护 C
$(\Delta i)_I/\text{A}$	520	228	98
$(\Delta i)_{II}/\text{A}$	273	117	98

5 仿真测试

本节利用 RT-LAB 实时仿真平台,在上一节所述系统中对电流变化率保护进行几种故障情况下的仿真测试,以考察其性能。

另外,由于混合式断路器是直流断路器未来的发展方向,它很可能成为直流配电网的主要开关元

件。这类断路器是以全控型半导体器件作为关断支路^[15]。因此本文用可关断开关管模拟直流断路器关断过程,且在仿真中为保护动作时间加入一段固有延时,以表征断路器动作时间。

5.1 典型故障仿真

假设第三级馈线(Cable C)0.15 km处在 $t=1$ s时发生金属性故障,按照本文描述的保护方案,设电源端VSC换流器在 $t=1.05$ s时重启,则各级馈线电流波形如图8(a)所示;各级馈线保护发出的断路器控制信号如图8(b)所示(0代表分断,1代表闭合);切断过程中各级电路电流如图8(c)所示。

运行。

5.2 其他故障仿真

对本文所描述的主保护进行大量仿真测试。设故障发生在 $t=1$ s,在不同过渡电阻、不同故障位置情况下,各级馈线保护的動作情况如表2所示,其中故障距离是指电源端换流器到故障点的距离,“—”表示该保护未动作。

表2 不同故障情况下电流变化率保护的動作时间
Tab.2 Action time of line protection in different fault situation

过渡电阻/ Ω	故障距离/km	保护動作时间/s		
		保护A	保护B	保护C
0.1	0.03	1.0050	—	—
	0.15	1.0050	—	—
	0.27	1.0165	—	—
	0.33	—	1.0050	—
	0.45	—	1.0050	—
	0.54	—	1.0165	—
	0.63	—	—	1.0050
1	0.90	—	—	1.0050
	0.03	1.0055	—	—
	0.15	1.0055	—	—
	0.27	1.0170	—	—
	0.33	—	1.0055	—
	0.45	—	1.0055	—
	0.54	—	1.0170	—
3	0.63	—	—	1.0055
	0.90	—	—	1.0055
	0.03	1.0170	—	—
	0.15	—	—	—
	0.27	—	—	—
	0.33	—	1.0170	—
	0.45	—	1.0170	—
0.54	—	—	—	
0.63	—	—	1.0055	
0.90	—	—	—	

由表2中 $R_f=0.1 \Omega$ 的数据可知,当故障发生在各级馈线末端时,由本级保护II段延时动作切除故障,而当故障发生在各级馈线首端时,本级保护I段经过判断会先于上一级保护的II段发出动作信号,防止上一级保护误动。

另外,当 $R_f=1 \Omega$ 时,各保护的動作时间晚于 $R_f=0.1 \Omega$,这是因为当过渡电阻增大后,故障电流的变化率变小,使故障电流到达保护启动电流的时间变长。当 $R_f=3 \Omega$ 时,某些馈线的电流变化率保护未能正确动作,这是因为表1中整定值是按 $R_f=1 \Omega$ 的条件计算得出,当过渡电阻超过整定条

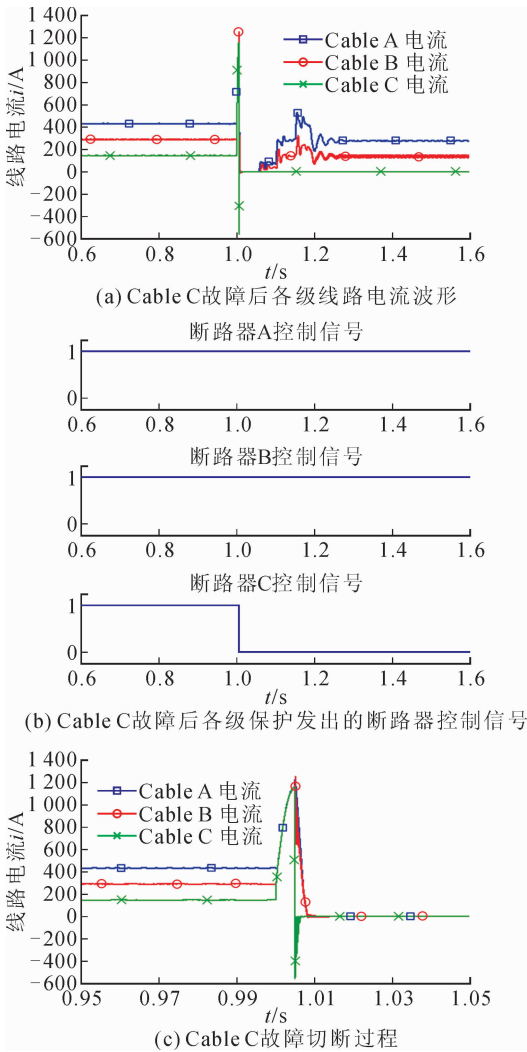


图8 Cable C故障后各级馈线电流及保护動作情况
Fig.8 The feeder currents and protection states of each cable after the fault in cable c

由图8可知,当 $t=1$ s Cable C发生故障后,保护C经过判断后,于 $t=1.005$ s对断路器发出分断信号,切断了故障电流。其他馈线的保护装置并未发出分断信号,说明该保护方案可以快速判断并有选择性地切除故障线路,保证系统无故障部分继续

件时,电流变化率保护的将缩小。这时在直流馈线保护的整体方案中,就需要依靠后备保护或绝缘监察装置加以弥补。

6 结 语

本文以直流馈线短路故障后,直流电容放电电流变化率为判据,描述了直流配电系统馈线保护的整体方案及其动作阈值整定方法。并利用 RT-LAB 实时仿真平台上对所提出的保护方案进行了仿真验证。仿真结果表明该保护方案可在不依赖长距离通信的前提下,能够快速、可靠、有选择性的切除故障线路,且保护原理简单,易于实现。

参考文献:

- [1] 王丹,毛承雄,陆继明,等. 直流配电系统技术分析及设计构想[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 82-88.
Wang Dan, Mao Chengxiong, Lu Jiming, et al. Technical analysis and design concept of DC distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37 (8): 82-88.
- [2] 江道灼,郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104
Jiang Daozhuo, Zheng Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98 -104.
- [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 CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [4] Rafferty J, Morrow D J, Xu L. Analysis of VSC-based HVDC system under DC faults[C]//39th Annual Conference of the IEEE, Vienna, 2013:459-464.
- [5] Yang J, Fletcher J E, O'Reilly J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3827-3837.
- [6] 许烽,徐政,傅闯. 多端直流输电系统直流侧故障的控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 74-78.
Xu Feng, Xu Zheng, Fu Chuang. A control and protection scheme of multi-terminal DC power system for DC line fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 74-78.

- [7] Tang L, Ooi B T. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1877-1884.
- [8] Cuzner R M, Sielicki T, Archibald A E, et al. Management of ground faults in an ungrounded multi-terminal zonal DC distribution system with auctioneered loads [C]//IEEE Electric Ship Technologies Symposium, Virginia, 2011:300-305.
- [9] 贺天元. 直流区域配电系统的保护方法[J]. 船电技术, 2011, 31(6): 25-28.
He Tianyuan. Protection method of DC zonal power distribution systems[J]. Marine Electric and Electronic Engineering, 2011, 31(6): 25-28.
- [10] Corzine K. DC micro grid protection with the z-source breaker[C]//39th Annual Conference of the IEEE, Vienna, 2013:2197-2204.
- [11] Salomonsson D, Soder L, Sannino A. Protection of low-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1045-1053.
- [12] Salonen P, Nuutinen P, Peltoniemi P, et al. Protection scheme for an LVDC distribution system[C]//20th International conference on electricity distribution, Prague, 2009:1-4.
- [13] 薛士敏,陈超超,金毅,等. 直流配电系统保护技术研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3114-3122
Xue Shimin, Chen Chaochao, Jin Yi, et al. A Researchreview of protection technology for DC distribution system[J]. Proceedings of CSEE, 2014, 34(19): 3114-3122.
- [14] 胡竟竞,徐习东,裘鹏,等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 电网技术, 2014, 38(4):844-851.
Hu Jingjing, Xu Xidong, Qiu Peng, et al. A Review ofthe protection methods in DC distribution system[J]. Power System Technology, 2014, 38(4):844-851.
- [15] 江道灼,张弛,郑欢,等. 一种限流式混合直流断路器方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4):65-71.
Jiang Daozhuo, Zhang Chi, Zheng Huan, et al. A scheme for current-limiting hybrid DC circuit breaker [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38 (4): 65-71.

(责任编辑 杨小丽)