

基于故障分量差动电流极性特征的直流线路故障全过程保护原理

侯俊杰¹, 宋国兵¹, 常仲学¹, 张晨浩¹, 尹利帅¹, 韩伟²

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 国网河南省电力公司科学研究院, 河南 郑州 450000)

摘要: 为了提高直流线路保护的可靠性, 需要研究能够在故障暂态和稳态过程中均可识别故障的后备保护原理。提出了基于故障分量差动电流极性特征的故障全过程差动保护原理。通过对故障暂态阶段(换流器未响应阶段、换流器动态调节阶段)及故障稳态阶段的电流故障分量特征进行分析, 得出故障全过程中整流和逆变侧故障分量差值在区内故障时满足正极性特征而区外故障时不满足的结论, 建立面向故障全过程的差动保护判据。仿真结果表明了该判据在各种工况条件下的正确性, 受交流系统故障特征谐波影响小, 具有较强的抗过渡电阻性能和抗干扰能力。

关键词: 直流输电; 直流线路; 故障全过程; 继电保护; 差动保护; 故障分量

中图分类号: TM 77

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.201909046

0 引言

高压直流输电(HVDC)系统凭借远距离大功率传输的特点, 在电力系统中获得了广泛的应用。直流输电线路距离长, 输电走廊环境复杂, 使得直流线路故障成为直流系统中发生概率最大的故障^[1-2]。目前直流线路保护主要分为行波保护、微分欠压保护、差动保护。其中行波保护和微分欠压保护极易受到波头信息提取不准确、整定值选取、高阻接地故障等因素影响, 保护可靠性差, 存在适应性问题。

考虑传统差动保护基于Kirchhoff定律, 在短线路中, 由于分布参数效应不明显, 在发生区外故障时, 可以保证保护准确不动作。但考虑到高压直流线路往往传输距离较长, 分布电容效应显著, 所以需要延迟闭锁来保证其正确动作。传统差动保护一般需要经过600 ms的闭锁延时和500 ms的保护判据延时才能动作。因此传统差动保护原理因延长时间过长, 而无法发挥其有效的作用。

针对传统差动保护原理在直流线路的适应性问题, 国内外学者开展了研究。首先考虑到差动保护受长线路分布电容电流的影响。因此文献[3-5]针对分布电容电流问题, 直接采用补偿法, 通过采用分布参数模型对线路分布电容电流进行补偿, 提高了线路保护可靠性。但其计算量较大, 并且需依赖于

线路参数, 无法对分布电容电流进行精确补偿, 保护适应性仍然存在一定的问题。因此学者们开始对行波过程和暂态量保护原理进行探索。

考虑基于初始行波过程的纵联保护原理^[6-9]基于分布参数线路模型, 本身已考虑分布电容的影响, 但可能存在波头难以识别、采样率较高的问题, 并且考虑初始行波过程时间较短, 需要保护装置在极短时间内进行动作, 保护的可靠性有待进一步探究。暂态量保护原理主要包括突变量方向^[10-14]和考虑边界及线路衰减特性^[15-18]的纵联保护原理。突变量方向保护原理主要利用换流器未调节过程中的等效故障分量网络, 利用暂态电压、电流、功率、阻抗在区内、外故障下的极性差异性构成保护原理。而考虑边界及线路衰减特性的保护原理利用边界和直流线路对频段信息的衰减作用在区内外故障下的差异性构成保护原理。

综上所述, 现有多数暂态量保护原理均基于暂态故障特征提出, 其在故障稳态过程中的适应性有待进一步研究; 而传统差动保护原理因延时过长, 仅能在故障稳态阶段进行判别。当暂态过程中主保护拒动时, 差动保护又需要长延时才能动作, 不利于系统的安全稳定运行。因此, 为了提高直流线路保护的可靠性, 需要研究在故障暂态、稳态情况下均能反应故障的后备保护原理。

针对上述问题, 本文提出基于故障分量差动电流极性特征的故障全过程纵差保护原理。通过对故障暂态、故障稳态过程中的电流故障分量进行特征分析, 利用故障分量差值极性在故障全过程发生区内故障时满足正极性而发生区外故障时不满足正极性的特征, 建立面向故障全过程特征的差动保护原

收稿日期: 2019-05-16; 修回日期: 2019-08-14

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U1766-209); 国家电网公司总部科技项目(52170218000M)

Project supported by the Key Project of Joint Research Fund of National Natural Science Foundation of China (U1766209) and the Science and Technology Project of SGCC(52170218000M)

理判据,结合启动、选极元件构成面向故障全过程的差动保护,并通过仿真验证了原理的有效性。

1 电流故障分量的故障全过程特征分析

本节分别在故障暂态阶段、故障稳态阶段,对保护安装处两端的故障分量电流进行故障电流特征分析,为下文提出适应于故障全过程的故障分量电流纵差保护原理提供理论依据。

1.1 故障暂态过程

1.1.1 换流器未响应阶段

系统正常运行时,故障前的网络中直流电流基本恒定。与交流系统不同,直流系统发生故障时短路电流受控。此阶段中两侧的控制系統由于时滞而均没有发生变化。系统两侧换流站未对故障进行响应,其系统等效阻抗近似不变。因此根据叠加原理^[19],故障后的直流系统可以等效为故障前的网络和故障附加网络 2 个部分,应用故障分量网络进行故障拓扑结构的等效^[10-14]。

以正极直流线路发生区内故障为例,其故障分量网络相当于在故障点叠加 1 个负的电压源 u_f ,其故障分量等效网络如图 1 所示。图中, m 和 n 分别为整流侧、逆变侧的保护安装处; Δi_m 和 Δi_n 分别为整流侧、逆变侧测得的电流暂态分量,其方向是由故障分量网络附加电源作用下的方向; u_f 为等效故障附加电源; Z_s 为系统两侧等效阻抗。为分析方便,这里规定故障分量电流参考方向为整流侧指向逆变侧。

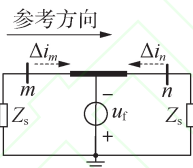


图 1 区内故障等效网络

Fig.1 Equivalent network of internal fault

故障电流方向由故障分量网络的叠加电源与选取的参考方向共同决定^[10-14]。由图 1 可知,当发生区内故障时,由故障分量叠加电源在两侧产生的故障分量电流方向如图 1 中的虚线箭头所示,而两侧保护安装处的电流参考方向如图 1 中的实线箭头所示,因此 m 侧故障分量电流 Δi_m 与参考方向一致,为正值;而 n 侧故障分量电流 Δi_n 与参考方向相反,为负值。两侧保护安装处的故障分量电流关系可表示为:

$$\Delta i_m > 0, \Delta i_n < 0 \quad (1)$$

由式(1)可知,在换流器未调节阶段,保护安装处两侧的故障分量电流方向异号。

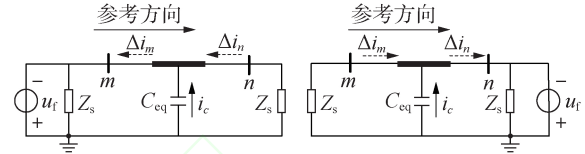
式(1)中 Δi_m 和 Δi_n 关系进一步可表示为:

$$\Delta i_m - \Delta i_n > 0 \quad (2)$$

由式(2)可以看出,当发生区内故障时,两侧故障分量电流的差值满足正极性特征。

当直流线路发生区外故障时,需考虑电容电流

的影响。为简化分析,被保护的直流线路可以用考虑电容电流影响的集中参数模型替代^[20],以正极线路为例,利用故障分量网络进行等效,在整流侧、逆变侧区外发生故障时,其故障分量等效网络可表示为图 2。图中, C_{eq} 为等效对地分布电容; i_c 为分布电容电流。当发生区外故障时,存在电压降低过程,线路分布电容将对外放电,形成放电电流。



(a) 整流侧区外故障

(b) 逆变侧区外故障

图 2 区外故障等效网络

Fig.2 Equivalent network of external fault

对于整流侧区外故障,综合考虑故障分量叠加电源、分布电容电流方向以及文中设定的故障分量电流参考方向。由图 2(a)可知,其 Δi_m 和 Δi_n 满足:

$$\begin{cases} \Delta i_m < 0 \\ \Delta i_n < 0 \end{cases}, \begin{cases} \Delta i_m = \Delta i_n - i_c \\ |\Delta i_m| > |\Delta i_n| \end{cases} \quad (3)$$

对于逆变侧区外故障,由图 2(b)可知 Δi_m 和 Δi_n 满足:

$$\begin{cases} \Delta i_m > 0 \\ \Delta i_n > 0 \end{cases}, \begin{cases} \Delta i_n = \Delta i_m + i_c \\ |\Delta i_m| < |\Delta i_n| \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)、(4)可知,当发生区外故障时, Δi_m 和 Δi_n 同号,但由于对地分布电容的影响, Δi_m 和 Δi_n 具有差异性。综合考虑式(3)、(4)中的 Δi_m 和 Δi_n 与电容电流 i_c 的关系,以及 Δi_m 和 Δi_n 的极性,式(3)、(4)中 Δi_m 和 Δi_n 的关系可进一步表示为:

$$\Delta i_m - \Delta i_n < 0 \quad (5)$$

由式(5)可知,发生区外故障瞬间,整流侧的电流分量的测量值小于逆变侧,整流侧与逆变侧的电流分量差值体现为负极性特征。

另外,利用行波传输理论也可以对换流器未响应状态下的区外故障进行说明。研究表明,控制系统从接受到调节指令至晶闸管的调节完成至少需要 5 ms,换流器未响应阶段在时序上同样满足初始行波理论,不受控制系统响应的影响^[12,20]。

特高压直流输电工程的输电线路距离较长,以 1 500 km 的输电线路为例,波速近似用光速来表示,当发生区外故障时,在故障点附加了 1 个由故障分量等效电源产生的故障行波信号。故障行波电流由一侧保护安装处传递至另一侧保护安装处的线路传输时间需要 5 ms。当发生区外故障时,由一侧保护安装处传至另一侧保护安装处仅需考虑首行波过程。区外故障的行波传递简化图如图 3 所示。

故障行波电流首先由区外经过直流边界发生透

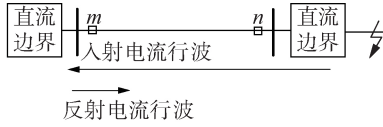


图3 故障电流行波传递

Fig.3 Fault current traveling wave transfer

射传播至对侧(n 侧)保护安装处,然后经过整条直流线路传播至本侧直流边界,经过入射、反射的叠加后,由本侧(m 侧)保护安装处测得。

故障电流行波首先穿过对端直流边界到达 n 侧保护安装处,电流的直流边界透射传输函数的复频域^[21]可表示为:

$$G_{ii}(s) = \frac{2Z_c(s)Z_w(s)}{Z_1(s)Z_c(s) + Z_1(s)Z_w(s) + Z_w(s)Z_c(s)} \quad (6)$$

其中, $Z_c(s)$ 、 $Z_1(s)$ 、 $Z_w(s)$ 分别为直流线路的波阻抗、平波电抗器阻抗、直流滤波器阻抗。

经过直流线路传输,需考虑直流线路衰减,考虑频率相关参数的线路传递函数如式(7)所示。

$$A_1(s) = \exp(-\zeta(s)x) \quad (7)$$

$$\zeta(s) = \sqrt{(R(s) + L(s))(G(s) + C(s))} \quad (8)$$

其中, x 为线路长度; $\zeta(s)$ 为传输系数; $R(s)$ 、 $L(s)$ 、 $G(s)$ 、 $C(s)$ 分别为单位长度的电阻、电感、电导、电容。

经过故障电流的入射、反射叠加后,直流边界的反射和入射的叠加传输函数 $G_{if}(s)$ ^[21]可表示为:

$$G_{if}(s) = \frac{-2Z_c(s)}{\frac{Z_1(s)Z_w(s)}{Z_1(s) + Z_w(s)} + Z_c(s)} \quad (9)$$

结合式(7)、(9)可知,首行波过程中, n 侧保护安装处传递至 m 侧保护安装处的传输函数 $G_{inf}(s)$ 为:

$$G_{inf}(s) = A_1(s) \frac{-2Z_c(s)}{\frac{Z_1(s)Z_w(s)}{Z_1(s) + Z_w(s)} + Z_c(s)} \quad (10)$$

因此,结合某直流工程详细参数,则直流边界的透射函数(式(6))、线路的衰减函数(式(7))、直流边界的反射叠加函数(式(9))、考虑首行波过程的两侧保护安装处的故障行波电流的传输函数(式(10))的幅频特性如图4所示。图中,纵轴均为标么值。

由图4(a)可知,当故障行波电流穿过直流边界元件时,各频率段幅值均发生衰减;由图4(b)可以看出,随着传输距离的增长,各频率段幅值衰减程度愈加显著,且频率愈高,衰减现象愈加明显。由图4(d)可知,当发生区外故障时,远离故障端保护安装处的故障行波电流幅值在线路传输衰减等因素的影响下小于靠近故障点的保护安装处。因此可以得到式(3)和式(4)所示的两端故障分量电流幅值大小的结论。结合两端保护安装处电流极性,仍满足式(5)所示的一般性结论。

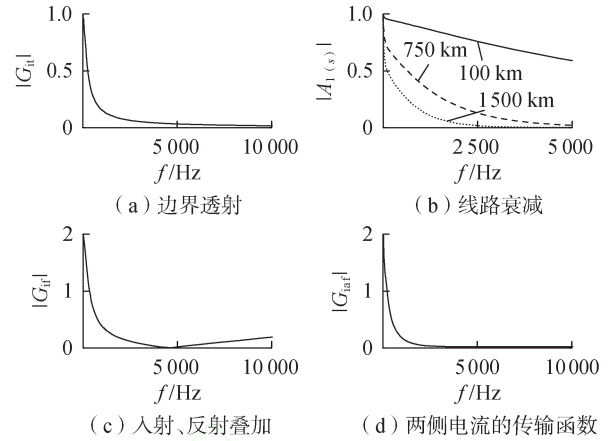


图4 行波传输幅频曲线

Fig.4 Amplitude-frequency curve of traveling wave transmission

综上可知,换流器未响应状态下,在发生区内故障时,两端的故障分量电流极性相反,整流侧与逆变侧的电流分量差值体现为正极性特征;而发生区外故障时,两端的故障分量电流极性相同,整流侧与逆变侧的电流分量差值体现为负极性特征。

1.1.2 换流器调节阶段

考虑在高压直流极控系统中,整流侧通常配备定电流控制和定触发角 α_{min} 控制,而逆变侧通常配置定电流控制、电流偏差控制以及定关断角 γ 控制。此外,两端同时配置低压限流控制。为了避免两侧电流控制环节同时工作时引起的调节不稳定,逆变侧电流控制环节的定值一般比整流侧小10%的额定电流值,该措施为电流裕度法,该方法无论在稳态运行还是在暂态运行下都必须保持,一旦失去电流裕度控制原则,直流系统就会崩溃。因此该方法为直流输电的基本控制原则^[22]。

高压直流系统换流站的基本控制系统如图5所示,图中,电压、电流均为标么值; $AEFG$ 表示整流侧控制方式,包括定 α_{min} 控制、定电流控制、低压限流控制; $ABCD$ 表示逆变侧控制方式,包括定 γ 控制、电流偏差控制、低压限流控制。

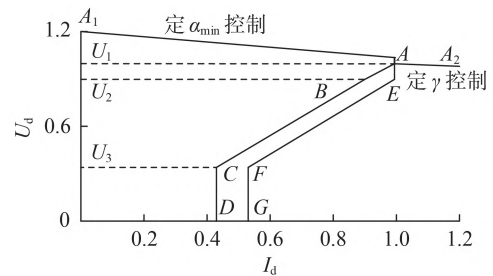


图5 直流系统换流站的基本控制方式

Fig.5 Basic control mode of DC converter station

当发生区外故障时,以整流侧故障为例,在发生故障时, Δi_m 和 Δi_n 在换流器未调节时,电流均下降,

而整流侧进入定 α_{\min} 控制,失去对电流的调节能力,对应图 5 中的 A_1A 段,因此直流输电系统的电流最终由逆变侧控制系统决定,其控制特性分析如下:

(1)当整流侧区外故障导致交流母线电压下降较小时(图 5 中 U_1 至 U_2),此时逆变侧进行电流偏差控制,对应图 5 中的 AB 段;

(2)当交流母线电压下降较大时(图 5 中 U_2 至 U_3),逆变侧的低压限流控制投入,使得电流随着电压下降,对应于图 5 中的 BC 段;

(3)当交流母线电压下降明显时(图 5 中 U_3 以下),逆变侧的定最小电流控制投入,使得电流保持不变,对应于图 5 的 CD 段。

同理,当逆变侧区外故障后, Δi_m 和 Δi_n 在换流器未调节时均上升,而逆变侧进入定 γ 控制,失去对电流的调节能力,对应图 5 中的 A_2A 段,因此直流输电系统的电流最终由整流侧控制系统决定,其控制特性与整流侧控制系统类似,特性曲线如图 5 中曲线 $AEFG$ 所示,本文不再赘述。

无论是整流侧区外故障还是逆变侧区外故障,当整流/逆变侧中的一侧发生区外故障时,其直流输电系统故障电流最终由对侧控制系统决定,在控制系统的作用下,两端电流逐渐逼近。

当发生区内故障时,由 1.1.1 节可知,在换流器未作用时,两侧的故障分量电流 Δi_m 和 Δi_n 极性相反,且整流侧故障电流逐渐增大,而逆变侧故障电流逐渐减少。由于故障电流的持续存在,使得两侧控制系统均失去对对侧系统的控制能力,因此两侧电流均由自身控制系统进行控制,整流侧电流在整流侧控制系统的作用下逐渐减少,最终逼近整流侧控制系统的预设值;而逆变侧电流也受逆变侧控制系统的作用而逐渐增大。最终由于整流侧和逆变侧存在 10% 的电流裕度,使得发生区内故障时,整流侧与逆变侧的故障分量电流存在差异性。

考虑故障时的故障电流记为 I_f ,由故障引起的故障分量电流记为 ΔI ,正常运行时的额定电流近似为常数表示为 I_{zc} ,根据故障分量理论,有 $I_f = I_{zc} + \Delta I$,则对于两侧故障电流有:

$$I_{fm} = I_{zcm} + \Delta I_m, \quad I_{fn} = I_{zcn} + \Delta I_n \quad (11)$$

由式(11)可知,当直流系统正常运行时,两侧的额定电流值相差很小,其差异性几乎可以忽略,因此有 $I_{zcm} \approx I_{zcn}$ 。

但考虑到由故障初始行波过程过渡到换流器动态调节的过程中,换流器开始响应,并进行动态调节,两侧故障电流差值由于换流器动态调节中的电流裕度原则维持在额定电流的 10%,则有:

$$I_{fm} - I_{fn} = 0.1I_{zc} \quad (12)$$

将式(11)代入式(12)可得:

$$\Delta I_m - \Delta I_n = 0.1I_{zc} \quad (13)$$

由式(13)可知,由故障引起的故障分量电流差值将在直流系统控制中电流裕度法作用下,最终维持在额定电流的 10%。

1.2 故障稳态过程

结合 1.1 节可知,当发生区外故障时,在换流器未响应时,两侧故障分量电流极性相同。在响应阶段及故障稳态阶段时,整流侧与逆变侧的故障电流差值由换流器未控制阶段的负极性在故障激励与控制系统的双重作用下最终稳定至 0,在故障稳态时,两侧的故障电流相等,则有:

$$\Delta i_m - \Delta i_n = 0 \quad (14)$$

由式(13)可知,当发生区内故障时,由故障引起的故障分量电流差值将受直流系统控制中电流裕度原则作用,最终维持在额定电流的 10%。

综上可知,当故障阶段由换流器调节阶段过渡到故障稳态阶段时有:发生区内故障时,整流侧与逆变侧对应的故障分量电流差值始终满足正极性特征,结合换流器未响应阶段可知,在包含故障暂态和稳态阶段的故障全过程中,保护安装处两侧的故障分量差值始终满足正极性特征;而发生区外故障时,两侧的故障分量差值极性在理论上由换流器未响应状态的负极性特征,在故障激励与控制系统的双重作用下最终稳定至 0。

1.3 全过程故障特征分析

在故障全过程中,对于区内故障,整流侧与逆变侧的故障分量电流差值满足正极性特征;发生区外故障时,整流侧与逆变侧的故障分量电流差值极性由换流器未响应阶段的负极性特征,在故障激励与控制系统的双重作用下最终稳定至 0。

2 基于故障分量差动电流极性特征的故障全过程的保护原理

2.1 基本思想

本文的保护原理面向故障全过程提出,利用两侧保护安装处的故障分量电流差值的极性特征进行区内外故障区域判别。根据区内故障全过程状态下的故障分量电流差值极性恒满足正极性特征而区外故障不满足该特征,构造基于故障分量电流差值正极性的故障分量纵差保护原理。

2.2 启动元件

当发生线路故障时,保护安装处将感受到较大的故障分量电流 Δi ,因此可以利用故障分量电流的幅值作为启动判据,考虑正常运行时,直流电流多采用定电流控制,故所允许的电流波动一般控制为额定值的 10%。考虑故障极与非故障极的耦合作用,应留有一定的裕度,设定可靠系数 $K_{rel}=1.2$,整定值 $\Delta I_{set}=0.12 \text{ p.u.}$,则启动判据为:

$$\Delta i_{\text{star}} = K_{\text{rel}} |\Delta i| > \Delta i_{\text{set}} \quad (15)$$

为保证一定的抗干扰性能,可设定保护装置的启动条件为连续检测到3个数据点的 Δi_{star} 均大于整定值。

2.3 差动元件

由第1节可知,当发生区内故障时,两侧的故障分量电流差值由换流器未调节状态下的正极性特征,经过换流器控制阶段及故障稳态阶段逐渐减少,最终稳定在额定电流的10%状态,但全过程仍然满足正极性特征,因此发生区内故障时,两侧故障分量电流差值始终大于门槛值。而发生区外故障时,故障分量电流差值极性理论上应由换流器未响应阶段的负极性特征,在故障激励与控制系统的双重作用下最终稳定至0。

结合上述分析,考虑保护中数据提取处理过程中可能存在数据突变点的影响,因此选取在一段数据窗内,构造基于故障分量电流差值正极性特征的故障全过程差动保护原理。定义整流侧与逆变侧故障分量电流差值的积分值为保护动作值,记为 Δi_{mn} ,则保护判据离散化表达式如式(16)所示。

$$\Delta i_{mn} = \sum_{j=j_0}^{j_1} (\Delta i_m(j) - \Delta i_n(j)) > \Delta i_{\text{set1}} \quad (16)$$

其中, j_0 为初始数据采样点; j_1 为数据长度末端对应的采样点; Δi_{set1} 为整定值。

由式(16)可知,只要满足 $\Delta i_{mn} > \Delta i_{\text{set1}}$ 即可判别为区内故障,反之判别为区外故障。

对于整定值 Δi_{set1} ,考虑 Δi_{mn} 在发生区内故障时,由换流器未作用时的正极性故障分量差值经过换流器调节及稳态阶段逐渐减小,最终稳定在额定电流的10%。因此考虑采样率为 f_s ,选取的数据窗长度为 l ,则离散化的故障分量电流采样点数为 lf_s ,因此整定值可选取为 $0.1lf_s$,考虑可靠性系数 K 选取为0.8,则 Δi_{set1} 可表示为:

$$\Delta i_{\text{set1}} = 0.1Klf_s \quad (17)$$

式(17)中,考虑实际直流工程中采样率不大于10 kHz,且考虑故障过程中存在互感器畸变、雷击干扰、噪声干扰等外部因素,以及故障电流的波动影响,为保证的可靠性和速动性,本文选取数据窗长度为20 ms,则 $\Delta i_{\text{set1}} = 16 \text{ p.u.}$

3 相关问题讨论

3.1 故障电流波动影响

考虑发生区外故障时,交流系统故障可能导致电压发生畸变,会在直流系统中产生非特征谐波^[22-23],该谐波会使两侧的故障分量电流出现轻微波动。其主导非特征谐波次数为:

$$y = \pm(h-1) \quad (18)$$

其中, y 为直流谐波次数; h 为交流谐波电压次数。因此当系统发生不对称短路、变压器饱和、换流失败、换流阀故障等时,均会给直流系统带来50 Hz、100 Hz等频率分量。由此可知,发生区外故障时可能会使系统产生特征谐波,将造成故障电流出现波动。另外考虑直流滤波器放电等因素的影响同样将引起暂态电流波形振荡。综上所述,以上因素将会给故障分量电流造成波动现象。

本文的保护算法在综合考虑以上影响因素的基础上,采用工频的整数次窗长进行积分运算,较传统滤波算法更加灵活。本文算法有2个优点:

(1)考虑特征谐波分量的频率均为基频50 Hz的整数倍,因此本文选取20 ms的数据窗为50 Hz对应的数据窗长的最小整数倍,可消除发生区外故障时由交流系统带来的50 Hz整数倍的特征频率信号;

(2)积分削弱了暂态电流波动对判据的影响,通过增加积分环节,波形受到高频电流的影响大幅减少且较为平滑,起到了滤波器的作用。

另外,由于积分算法的运用使得本文的差动保护的動作值与整定值在发生区内外故障时,差异性显著,因此能够明显地区分区内外故障,具有较高的灵敏度和可靠性。

3.2 过渡电阻的影响

考虑过渡电阻仅对幅值造成影响,对于换流器未调节过程,整流、逆变侧的故障分量电流极性均不受过渡电阻影响,而对于换流器调节阶段至稳态阶段,整流侧和逆变侧的故障分量电流差值仅与控制系统相关,最终的故障分量电流差值仅相差电流额定值的10%。因此在故障全过程中,本文提出的保护原理具有较强的抗过渡电阻性能。

3.3 极间耦合影响

直流输电线路的正负极间存在电容耦合和电磁耦合,当一极发生故障时,会在另一极引起电气量的突变。对于电磁耦合,故障极的磁场变换将通过互感在健全极产生纵向感应电势,受互感系数的限值,这种感应电势的幅值一般比较小。因此由分析可知,故障极的故障分量电流远远大于健全极。

另外,考虑本文已采用启动值进行保护启动判据,在很大程度上减少了非故障极误动的风险,但为保证保护性能的可靠性,可构造故障极判别辅助判据。

考虑故障极的故障分量电流明显大于非故障极,因此本文利用故障极与非故障极的故障分量电流比值在一段数据窗内构成故障极识别判据,如式(19)所示。

$$K_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\Delta I_z(i)}{\Delta I_f(i)} \right| \quad (19)$$

其中, K_i 为正负极故障分量电流比值; ΔI_x 、 ΔI_f 分别为正、负极的故障分量电流瞬时值; N 为数据长度对应的采样点个数。为保证保护的快速性, 选取 1 ms 数据进行离散化运算。

通过与整定值进行比较, 实现保护动作。具体判别结果如下:

$$\begin{cases} \text{正极故障} & K_i > K_{\text{set1}} \\ \text{负极故障} & K_i < K_{\text{set2}} \\ \text{极间故障} & K_{\text{set2}} \leq K_i \leq K_{\text{set1}} \end{cases} \quad (20)$$

通过大量的仿真实验可知, 同时考虑双极不对称运行状态, 设定整定值 K_{set1} 和 K_{set2} 分别为 1.2 和 0.5。考虑不同实际工程, K_{set1} 和 K_{set2} 的数值可进行相应调整。

3.4 故障分量电流的定义说明

故障分量是故障信息在电气量上的具体体现, 因此故障分量可以定义为在系统发生故障时所出现的电气量^[19]。作为由故障引起的变化量, 称之为故障分量, 或者称之为区别于正常运行时的变化量, 所以本文利用故障分量的概念。由于正常运行时电流近似为常量, 因此本文针对由故障引起的信息进行研究。

考虑换流器未响应过程, 等效电路可等效为线性简化电路, 因此满足传统故障分量网络的概念; 而在换流器响应阶段, 由于控制系统的复杂性、非线性、时变特性, 所利用的是区别于正常运行时的变化量, 而变化量是相对概念, 指相对于正常运行时的变化量。而故障分量的理念就是将故障全量分为正常运行的电气量和由故障引起的故障分量, 并且在实际运用时, 也是利用故障电流全量信息与稳态电流的差值表征故障分量电流, 因此为了突出重点本文也沿用了这一概念。

3.5 保护动作时间及相关说明

考虑换流器未响应过程极其短暂, 一般过程在 5 ms 以内, 随后过渡至换流器动态调节过程, 而换流器动态调节过程时间较长, 一般持续时间为 30 ms 左右^[14,24]。而换流器未响应阶段与换流器动态调节阶段并称为故障暂态阶段。因此本文旨在建立包含故障暂态和稳态阶段的故障全过程保护原理用于高压直流线路的主保护的后备保护, 保证保护能够在故障暂态、稳态下识别故障并与主保护配合完成后备保护的职责, 克服传统差动保护原理需要延时上百毫秒的不利影响。

本文保护算法在保护判据上区别于传统差动保护, 其利用两侧故障分量差值极性特征 (而非传统差动保护的两侧电气量求和方式), 充分利用故障全过程中两侧故障分量电流差值的极性特征构成保护原理, 无需滤波算法及复杂数据处理方法, 无需利用仿

真获取整定值。

4 保护算法流程

本文提出的包含故障暂态、稳态过程的故障全过程差动保护方案具体步骤如下:

(1) 利用保护安装处的故障分量电流进行启动判别, 满足条件时启动保护;

(2) 提取两侧故障分量电流, 利用积分求解两侧故障分量电流差值极性;

(3) 对差值极性动作值与整定值进行比较, 实现区内外故障判别;

(4) 分别对正负极故障分量电流进行故障选极判别, 通过与预设整定值的比较, 实现故障极判别。

保护原理流程图如附录 A 中的图 A1 所示。

5 仿真算例

参照某地区特高压直流输电系统及实际参数, 搭建如图 6 所示的 ± 800 kV 双极直流输电模型, 直流额定功率为 5 000 MW, 直流额定电流为 3.125 kA, 直流输电线路的全长为 1 500 km, 导线的型号为 6×LGL-630/45, 弧垂为 2 m, 采用频变参数线路模型。输电线路导线自电阻为 $0.046\ 33\ \Omega/\text{km}$, 导线互电阻为 $4.51 \times 10^{-7}\ \Omega/\text{km}$, 每极自电感为 $0.001\ 81\ \text{H}/\text{km}$, 极间互电感为 $0.000\ 99\ \text{H}/\text{km}$, 每极导体单位长度对地电容为 $9.99 \times 10^{-9}\ \text{F}/\text{km}$, 每单位长度两极导体间的电容为 $2.11 \times 10^{-9}\ \text{F}/\text{km}$, 相关线路参数见附录 B 中的图 B1。

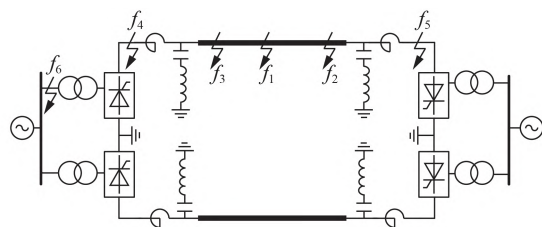


图6 直流输电简化模型

Fig.6 Simplified model of HVDC transmission

仿真采样频率为 10 kHz, 仿真时长为 4 s, 在 3 s 时发生金属性接地故障, 故障位置分别为直流输电线路区内首端 100 km 的 f_3 、中点 f_1 、末端 f_2 、整流侧区外 f_4 和逆变侧区外 f_5 、交流侧系统故障点 f_6 , 故障持续为 0.3 s。利用 PSCAD 得到仿真数据, 导入 MATLAB 进行保护算法验证。

5.1 换流器未响应阶段故障分量电流差值极性验证

考虑换流器未响应阶段持续 5 ms 左右, 仿真选择初始行波过程, 选择 5 ms 数据窗并考虑行波传输延时情况, 以区内 f_3 、 f_1 、 f_2 处及整流侧区外 f_4 、逆变侧 f_5 处发生金属性接地故障为例, 对换流器未响应阶段

的故障分量差值极性特征进行验证,如附录C中的图C1(a)—C1(e)所示。图中,电压、电流均为标么值,后同。

由仿真结果可以看出:若在换流器未响应时(故障初始行波阶段)发生区外故障,则两侧故障分量的差值体现为负极性特征;而发生区内故障时,两侧的故障分量的差值体现为正极性特征。

5.2 保护原理验证

以正极整流侧正极 f_4 、 f_5 、 f_6 、 f_1 处发生单相金属性接地故障为例验证保护原理在故障全过程中的有效性,数据窗长度为20 ms。其中为验证差动元件在故障全过程中的有效性,保护动作值 Δi_{mn} 以故障全过程为例,以20 ms数据窗在故障后以滑窗的形式进行积分运算,考虑故障持续时间为0.3 s,而当故障发生0.1 s后已完全过渡到故障稳态,展示大于0.1 s的保护动作结果即可,因此文中选择0.2 s的数据长度。正极整流/逆变侧的故障分量电流、差值、保护的差值与整定值及负极的保护动作值与整定值如附录D中的图D1—D4所示。

由图D1—D3可知,当发生区外故障时,两侧的故障分量极性相同,考虑交流系统故障可能导致电压发生畸变,会在直流系统中产生非特征谐波,因此差值出现轻微振荡。另外,直流滤波器放电也将引起暂态电流波形振荡的影响、互感器测量误差等过程使线路电气量信息出现畸变,故障分量差值出现轻微波动。

本文保护判据在充分考虑上述因素的影响下,采用工频的整数倍窗长进行积分求和,保护动作值在很大程度上能够克服故障分量电流波动的影响。由于整定值留有较大裕度,可保证保护动作值远小于整定值,发生区外故障时,正负极保护安装处均不会发生误动的情况。由图D4可知,当发生区内故障时,两侧的故障分量极性相反,整流和逆变侧的故障分量电流差值在故障全过程中均满足正极性特征。保护动作值大于整定值,可以保证发生区内故障时,故障极保护正确动作,非故障极准确不动作。

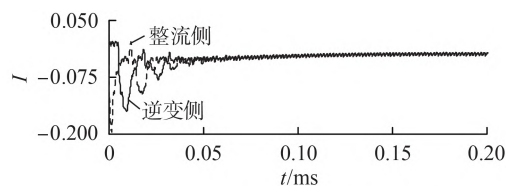
5.3 保护原理性能验证

本节分别随机选取正/负不同故障位置(f_4 、 f_3 、 f_1 、 f_2 、 f_5)和不同过渡电阻(0.01 Ω 、500 Ω)对保护原理进行验证。其中对正极整流侧区外 f_4 、逆变侧区外 f_5 、区内中点 f_1 发生500 Ω 高阻接地故障的验证结果分别如图7—9所示,将其他故障情况下保护动作结果共同汇总至附录E中表E1。

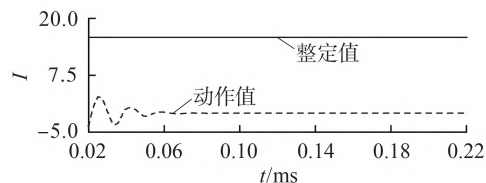
由仿真结果可看出,本文提出的基于故障分量差动电流极性的故障全过程纵差保护原理能够在各类型故障下具有良好的保护性能和较高的可靠性。

5.4 抗干扰性能验证

考虑实际工程中外界噪声和互感器传变误差对



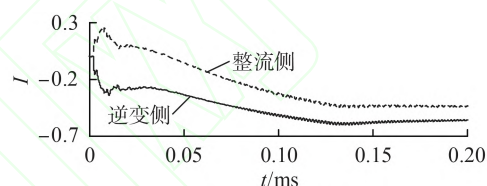
(a) 整流/逆变侧故障分量电流



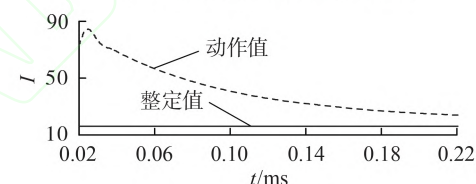
(b) 保护动作值与整定值

图7 故障点为 f_4 时的验证结果

Fig.7 Verification results when fault point is f_4



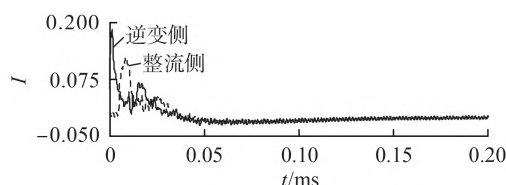
(a) 整流/逆变侧故障分量电流



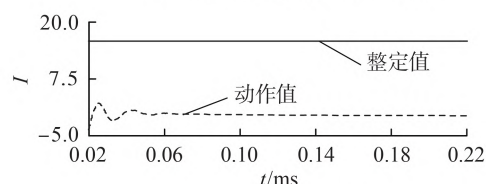
(b) 保护动作值与整定值

图8 故障点为 f_5 时的验证结果

Fig.8 Verification results when fault point is f_5



(a) 整流/逆变侧故障分量电流



(b) 保护动作值与整定值

图9 故障点为 f_1 时的验证结果

Fig.9 Verification results when fault point is f_1

保护原理的造成的干扰,本文利用随机高斯白噪声对原理的抗干扰性能进行验证,白噪声选取信号信噪比为40 dB,对整流侧正极的不同的故障位置(f_4 、 f_3 、 f_1 、 f_2 、 f_5)和不同过渡电阻(0.01 Ω 、500 Ω)下的保护原理进行抗干扰能力验证。另外为验证数据窗长

度对保护原理的影响,将差动元件数据窗长度缩短至10 ms,对保护原理的适应性进行仿真分析,结果见附录F中的表F1。

由仿真结果可以看出,本文提出的基于故障分量电流差值极性的故障全过程纵差保护原理具有一定的抗干扰能力。另外,保护算法在10 ms数据窗长下仍能正确动作,虽然该数据窗下无法滤除50 Hz谐波分量,但本文采用的积分算法在一定程度上抑制了波动的情况,发生区外故障时,动作值仍小于整定值。本文采用20 ms数据窗具有一定的保守性。

6 结论

本文提出了一种基于故障分量差动电流极性特征的故障全过程保护原理,所得结论如下。

(1)当直流线路发生区内故障时,在包含故障暂态和稳态的故障全过程中,整流侧与逆变侧的故障分量差表现为正极性特征。

(2)当发生区外故障时,在包含故障暂态和稳态的故障全过程中,两侧的故障分量电流差值极性由换流器未响应过程的负极性特征在换流器调节阶段及稳态阶段最终稳定为0。受交流侧故障特征谐波及直流滤波器放电的影响,故障过程中的故障分量电流将出现轻微波动。

(3)本文提出的基于故障分量差动电流极性特征的全过程保护原理在各种故障条件下均能正确动作,采用工频的整数次窗长进行积分滤波算法在很大程度上消除故障分量电流波动影响,整定值无需仿真整定,具有较强的抗过渡电阻性能,抗干扰能力较强,保护算法简便易于实现,结合故障启动元件和故障选极元件,构成新型差动保护原理。有望作为高压直流线路主保护的后备保护原理应用于故障暂态和稳态过程中,具有一定的工程实用性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 宋国兵,高淑萍,蔡新雷,等. 高压直流输电线路继电保护技术综述[J]. 电力系统自动化,2012,36(22):123-129.
SONG Guobing,GAO Shuping,CAI Xinlei,et al. Survey of relay protection technology for HVDC transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(22):123-129.
- [2] 刘琪,宋国兵. 基于电流偏差均值控制特性的高压直流输电线路纵联保护新原理[J]. 中国电机工程学报,2016,36(8):2159-2167.
LIU Qi,SONG Guobing. A novel pilot protection for hvdc transmission lines using mean current error control [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(8):2159-2167.
- [3] 高淑萍,索南加乐,宋国兵,等. 高压直流输电线路电流差动保护新原理[J]. 电力系统自动化,2010,34(17):45-49.
GAO Shuping,SUONAN Jiale,SONG Guobing,et al. A new current differential protection principle for HVDC transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(17):45-49.
- [4] 宋国兵,蔡新雷,高淑萍,等. VSC-HVDC 频变参数电缆线路电流差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报,2011,31(22):105-111.
SONG Guobing,CAI Xinlei,GAO Shuping,et al. A new current differential protection principle of VSC-HVDC considering frequency-dependent characteristic of cable [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(22):105-111.
- [5] 宋璇坤,申洪明,黄少锋,等. 特高压分布电容对电流差动保护的影响分析及对策[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):169-172,192.
SONG Xuankun,SHEN Hongming,HUANG Shaofeng,et al. Effect of distributed capacitance on differential current protection and relevant countermeasures [J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(1):169-172,192.
- [6] 孔飞,张保会,王艳婷. 基于行波波形相关性分析的直流输电线路纵联保护方案[J]. 电力系统自动化,2014,38(20):108-114.
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.
- [7] 蒋灵通,陈青,王磊,等. 基于故障电流前反行波初始波头时差的VSC-HVDC纵联方向保护[J]. 电网技术,2018,42(12):3998-4005.
JIANG Lingtong,CHEN Qing,WANG Lei,et al. A novel VSC-HVDC directional pilot protection using the propagation time of fault initial forward and backward travelling wave [J]. Power System Technology,2018,42(12):3998-4005.
- [8] 李小鹏,汤涌,滕予非,等. 基于反行波幅值比较的高压直流输电线路纵联保护方法[J]. 电网技术,2016,40(10):3095-3101.
LI Xiaopeng,TANG Yong,TENG Yufei,et al. Pilot protection method based on amplitude comparison of backward traveling wave for HVDC transmission lines [J]. Power System Technology,2016,40(10):3095-3101.
- [9] 赵航,林湘宁,喻锐,等. 基于模量Hausdorff距离波形比较的直流输电线路选择性快速保护方案[J]. 中国电机工程学报,2017,37(23):6888-6900.
ZHAO Hang,LIN Xiangning,YU Kun,et al. A high-speed protection scheme for HVDC transmission line based on Hausdorff distance comparison [J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(23):6888-6900.
- [10] 周家培,赵成勇,李承昱,等. 采用电流突变量夹角余弦的直流电网线路纵联保护方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(14):165-171.
ZHOU Jiawei,ZHAO Chengyong,LI Chengyu,et al. Pilot protection method for DC lines based on included angle cosine of fault current component [J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(14):165-171.
- [11] 张艳霞,马桦岩,李婷,等. 基于Kaiser窗滤波的高压直流输电线路突变量功率保护[J]. 高电压技术,2016,42(1):19-25.
ZHANG Yanxia,MA Huayan,LI Ting,et al. HVDC line protection based on the mutant power through Kaiser window [J]. High Voltage Engineering,2016,42(1):19-25.
- [12] 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.
- [13] 高淑萍,索南加乐,宋国兵,等. 利用电流突变特性的高压直流输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化,2011,35(5):52-56.
GAO Shuping,SUONAN Jiale,SONG Guobing,et al. A new

- pilot protection principle for HVDC transmission lines based on current fault component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 52-56.
- [14] 陈仕龙,曹蕊蕊,毕贵红,等. 基于形态学的特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 67-72.
- CHEN Shilong, CAO Ruirui, BI Guihong, et al. Single-end current direction transient protection based on morphology for UHVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 67-72.
- [15] 李斌,邱宏,洪潮,等. 基于电压源型换流器的柔性直流系统快速方向保护[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 1-8.
- LI Bin, QIU Hong, HONG Chao, et al. High-speed direction protection of flexible DC system based on voltage source converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 1-8.
- [16] 陈仕龙,束洪春,谢佳伟,等. 利用保护元件区分对侧区内外故障的特高压直流输电线路双端电压暂态保护原理[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 14-20.
- CHEN Shilong, SHU Hongchun, XIE Jiawei, et al. Principle of double-ended transient based voltage protection for UHVDC transmission line which uses protector to identify the opposite internal and external fault[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 14-20.
- [17] 杨亚宇,邵能灵,刘剑,等. 利用边界能量的高压直流线路纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5757-5767.
- YANG Yayu, TAI Nengling, LIU Jian, et al. A pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on boundary energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5757-5767.
- [18] 杨亚宇,邵能灵,范春菊,等. 利用峰值频率的高压直流输电线路纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4304-4314, 4570.
- YANG Yayu, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on specific-frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4304-4314, 4570.
- [19] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 1-14.
- [20] 郑晓冬. 特高压直流输电线路保护新原理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- ZHENG Xiaodong. Research on novel protection scheme for UHVDC transmission line[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [21] XIAO Hao, LI Yinhong, LIU Ruoping, et al. Single-end time-domain transient electrical signals based protection principle and its efficient setting calculation method for LCC-HVDC lines[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 5(11): 1233-1242.
- [22] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 76-81.
- [23] 傅闯, 饶宏, 黎小林. 交直流混合电网中直流 50 Hz 和 100 Hz 保护研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 57-60.
- FU Chuang, RAO Hong, LI Xiaolin. HVDC 50 Hz and 100 Hz protection of AC/DC hybrid transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 57-60.
- [24] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 利用单端电流的高压直流输电线路全线速动保护[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 107-113.
- GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A novel whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 107-113.

作者简介:



侯俊杰

侯俊杰(1993—),男,新疆乌鲁木齐人,博士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: 826686025@qq.com);

宋国兵(1972—),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: songgb@163.com)。

DC line fault protection principle based on polarity characteristics of differential current of fault components for whole process of failure

HOU Junjie¹, SONG Guobing¹, CHANG Zhongxue¹, ZHANG Chenhao¹, YIN Lishuai¹, HAN Wei²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Henan Electric Power Company Scientific Research Institute, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to improve the reliability of DC line protection, it is necessary to study the principle of back-up protection that can distinguish faults in both steady and transient state processes. A differential protection principle based on polarity characteristics of differential current of fault components is proposed for the whole process of failure. By analyzing the characteristics of the current fault components in transient stage, i.e. the non-response stage and the dynamic regulation stage of converter, and the steady-state stage of faults, it is found that in the whole process of failure, the difference of the fault components between rectifier and inverter side satisfies the positive polarity characteristics in internal fault while not satisfies the positive polarity characteristics in external fault. The differential protection criteria for the whole process of failure are established. Simulative results show that the criteria can operate correctly under various working conditions, and is less affected by the harmonics of fault characteristics of AC system with strong anti-transition-resistance ability and anti-interference ability.

Key words: DC power transmission; DC line; whole process of failure; relay protection; differential protection; fault component