

DOI: 10.7667/PSPC171613

基于电流特征量相关系数的 UHVDC 线路纵联保护新原理

戴志辉, 严思齐, 张程, 王增平

(分布式储能与微网河北省重点实验室(华北电力大学), 河北保定 071003)

摘要: 特高压直流输电线路长、发生故障概率大, 其常规纵联电流差动保护的快速性较差且耐受过渡电阻能力有限。相关系数可定量描述两个变量的变化趋势, 且不受变化幅度影响。为此, 首先立足直流线路故障暂态特性, 利用两端电流和、差计算相关系数, 构造了判据特征量。其次, 基于判据特征量在区内、外故障的不同特性, 计及直流输电系统控制特性, 提出了纵联保护新原理。该原理无需电容电流补偿, 耐受过渡电阻能力和快速性优于常规纵联电流差动保护; 且对信道要求低, 利于工程应用。最后, 利用 PSCAD/EMTDC 仿真验证了新原理的有效性。

关键词: 电流构造量; 相关系数; 特高压直流; 线路保护; 高阻故障

A new pilot protection for UHVDC lines based on correlation coefficient of designed current variables

DAI Zhihui, YAN Siqi, ZHANG Cheng, WANG Zengping

(Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid of Hebei Province (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: Ultra High Voltage Direct Current (UHVDC) transmission lines usually go across long distance, and hence are exposed to high fault probabilities. Its conventional current differential protection lacks rapidity, as well as adaptability to high fault resistances. The correlation coefficient can be used to quantitatively describe the trend of two variables without being influenced by the magnitude of variations. Accordingly, based on the fault transient characteristic of DC lines, characteristic quantities for relay criteria are generated first by calculating correlation coefficients of the sum and difference of both-terminal currents. Subsequently, considering different characteristics in terms of internal and external faults reflected by relay criteria and the effect of control systems, a new pilot protection principle is proposed. The principle, without compensation requirement of distributed capacitance current, has better capability to discriminate UHVDC line faults with high fault resistance, and faster reaction than current differential protection. It also has lower requirements on communication channels, which means easier to be applied. Finally, the effectiveness of the proposed protection is verified by PSCAD/EMTDC simulation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877084), Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2018502063), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2017MS096).

Key words: designed current variables; correlation coefficient; UHVDC; line protection; high-resistance faults

0 引言

我国超高压直流(UHVDC)发展迅速, 在输电容量和距离上不断取得突破, 截止 2017 年 6 月 15 日, 已投运 UHVDC 工程 8 项、在建 7 项。UHVDC 线路往往在 1 000 km 以上, 沿线气候/地形复杂,

线路故障概率大, 完善的直流线路保护越显重要。UHVDC 线路保护的经典方案是行波保护作为主保护, 微分欠压保护、纵联差动保护作为后备保护, 横差保护作为金属回线运行方式下的后备保护^[1-2]。但行波保护和微分欠压保护难以检测到高阻接地故障^[3], 纵联差动保护需躲过区外故障和直流控制系统调控引起的电流波动, 动作延时可达 1.1 s^[4]; 且仅基于线路两端电气量“差值”特征进行判断, 易受过渡电阻、补偿参数计算误差等因素影响^[5]。目前 UHVDC 线路纵联类保护的研究热点是结合时频

基金项目: 国家自然科学基金项目(51877084); 河北省自然科学基金项目(E2018502063); 中央高校基本科研业务费(2017MS096)

分析(如行波)或特定频率分量分析。如文献[6]提出基于 S 变换的高压直流线路纵联保护方法,利用 S 变换构造电压电流相角差,纵联两端判别方向结果判断故障位置,无需设置延时、耐受过渡电阻能力较强,但计算量大。文献[7-9]纵联传输行波数据,通过比较线路两端电流故障分量的前向行波与反向行波的极性和相位,区分区内、外故障。文献[10]利用故障发生后一段时间内线路两端反行波幅值积分的比值来识别区内故障。文献[11]基于小波分析在两端计算能量相对熵判别故障位置。这些研究同样无需设置延时,但信道要求高,计算复杂。文献[4]利用直流滤波器在 600 Hz 左右时阻抗接近 0 的特性,基于两端 600 Hz 电流的方向构成保护,计算量和信道要求较前述方法低但需提取特定频率。

本质上,直流线路纵联类保护在快速性方面不占优势,可考虑结合相关性分析建立判据。例如文献[5]通过计算线路两端行波波形的相关系数,判断故障是否发生在区内。文献[12-13]通过差动电流和差动电压导数的相关系数甄别区外故障。文献[14]计算实测电压与计算电压的相关系数,判断区内、外故障。文献[15]利用正、负极暂态电压与+800 和 -800 kV 的相关系数构造雷击干扰识别判据。但未见基于两端电流量相关性分析的研究。此外,前述相关性分析多利用故障后短时内的特征,而后备保护出口时间长于控制系统响应于故障的时间,故不能忽视故障后控制系统的作用^[16-17]。

但是,UHVDC 的控制系统较难线性化,无法通过计算准确描述有控制系统作用的线路故障特征。本文尝试从直流线路两侧电流特征量的相关性分析角度,探索反映区内高阻故障的纵联保护判据,使其可靠保护单极高阻接地故障且出口快于纵联差动保护。首先说明了判据特征量构造,随后阐述判据及其整定方法,最后通过仿真验证了方法的有效性。方法的其他优势是:1)相关性分析是两个量变化趋势的定量描述,可用以设置暂态过程中的判据;2)变量变化幅度不影响相关系数计算结果。

1 判据特征量

1.1 线路两端电流相关性分析

分析两端电流相关性,是寻找基于电流相关性判据特征量的基础。UHVDC 线路发生高阻故障,若不考虑线路保护、仅靠控制系统,则故障线路最终以接近正常电压、低于正常电流运行。本文将线路高阻故障划分为三个阶段:1)从故障发生到线路末端电压恢复正常的时段称为阶段一,此阶段电流波动较剧烈;2)从阶段一结束到电流被限制在预设

值的时段称为阶段二,此阶段电流波动较上一阶段平缓;3)阶段二之后的时段为阶段三,此阶段故障线路电压接近正常值、电流低于正常值。为防止误动于区外故障,遇电流波动纵联差动保护即闭锁一段时间,往往在阶段二、阶段三才启动并延时出口,导致快速性差。且高阻故障后电流变化幅度受过渡电阻影响较大,差动电流保护往往不能有效反映。

但是,变量变化的幅度不影响相关系数的计算结果,因此可基于相关系数构造判据特征量。以变化是否同步为准,把两端电流划分为三种成分:变化趋势相同的成分称为同步变化成分;变化趋势相反的称为反同步变化成分;非上述两种成分的称为不相关成分。因长线的分布效应,即使两端电压完全稳定,两端电流也不相等、不同步,故所定义的同步变化成分不具有穿越电流的意义。

由于解析计算难以求得 UHVDC 电流的波形,需借助仿真。为保证波形准确,线路模型采用相域频率相关模型。线路总长度 1 891 km,代表档距 500 m,弧垂 26 m,杆塔参数如图 1 所示。导线 6 分裂,等效半径 0.457 2 m,类型为绞线,总股数 52 股,最外层 21 股,每股半径 2.265 mm,电阻 0.039 8 Ω/km。地线 1、2 的电阻分别为 0.469 6 Ω/km 和 0.465 Ω/km,各参数来自实际 UHVDC 工程。整流侧采用定电流控制,额定触发角 13°;逆变侧采用定熄弧角控制,额定熄弧角 17°。本文研究对象为正极线路,线路两端测量电流以整流站流向逆变站为正方向,测点位于直流滤波器线路侧,采样频率 100 kHz。本文模型配置了完善的滤波器,其参数来源于实际工程,因此暂不考虑谐波影响。

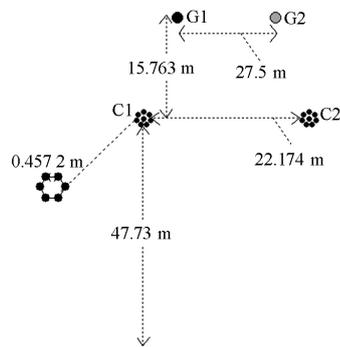


图 1 线路模型杆塔结构

Fig. 1 Structure model of line tower

1.1.1 正常运行

本节首先分析正常运行及故障情况下,两端电流的相关性及同步、反同步成分的产生原因。为后文叙述方便,将输电线路的整流侧称为首端,逆变侧称为末端。

正常运行时, 两端电流均有微小波动, 如图 2 所示。因首末端控制系统的固有延时相近, 故两端电流波动周期相近, 属同步变化成分。但首末端主回路与控制参数不同, 导致两端电流变化趋势不同、极值出现时刻不同, 属于反同步变化成分。即正常运行时控制系统既产生同步变化成分, 也产生反同步变化成分。不论 UHVDC 具体控制模式如何, 在稳定运行点附近控制效果相近。正常运行时两端电流具有类似特征。

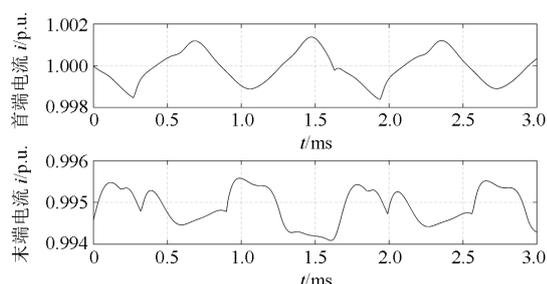


图 2 正常运行的两端电流

Fig. 2 Two-terminal currents in normal operation

1.1.2 区内高阻故障

故障导致输电线路对地出现新增支路, 区内高阻故障可分为三个阶段。

(1) 阶段一: 此对地支路的并联效应导致从首端看入的等效阻抗变小, 首端电流上升、末端电流下降; 此支路也导致线路电压下降。控制系统需维持 UHVDC 线路电压、电流在预设值。故障后, 控制系统使首端电流下降, 末端电压上升; 末端电压上升也导致末端电流下降。故此阶段末端电流必然下降, 首端电流有波动。控制系统产生两端电流同步变化成分; 故障产生反同步变化成分。

(2) 阶段二: 末端电压恢复到正常值后, 进入衰减振荡状态并趋于稳定。因 UHVDC 线路电流直接由两端电压决定, 且 UHVDC 的定熄弧角控制响应快于定电流控制, 故首端电流晚于末端电压进入衰减振荡。此阶段首端电流仍有波动, 末端电流受衰减振荡状态的末端电压和波动状态的首端电流共同影响, 两端电流相关性复杂。

(3) 阶段三: 首末端电流都进入周期波动状态, 每周期内波形相近、极值近似相等。此状态类似于正常运行时两端电流的状态, 但两端电流更加无序, 不相关成分较正常运行多。控制系统和故障共同作用, 既产生两端电流同步变化成分, 也产生反同步变化成分。

1.1.3 区外故障

线路首末端区外低、高阻故障, 两端电流的相

关性各有不同。

首端出口低阻故障, 故障新增对地支路的并联效应使线路两端电流、电压均下降。控制系统的目标是提升线路首端电流与末端电压, 而末端电压上升也导致末端电流下降。低阻故障后, 控制系统不能维持线路电压、电流。末端电流在故障和控制系统共同作用下跌至 0; 首端电流必然下降到接近 0 但有波动。因此在跌落过程中, 故障产生两端电流同步变化成分, 控制系统产生反同步变化成分。跌落到 0 后, 线路两端电流均小幅波动, 相关性差。

首端高阻故障, 两端电流先跌落, 后衰减振荡, 最后周期波动。跌落阶段与低阻故障类似, 故障产生两端电流同步变化成分, 控制系统产生反同步变化成分。衰减振荡阶段类似于区内高阻故障的阶段二。

末端区外故障, 故障新增对地支路的并联效应, 使线路两端电流上升、线路电压下降。控制系统目标是降低线路首端电流、提高末端电压, 而末端电压上升导致末端电流下降。末端区外故障, 流经输电线路的故障电流完全来自于整流侧, 即使发生金属性故障, 控制系统也可抑制两端电流上升。两端电流必然先上升, 后下降, 随后衰减振荡, 最后被限制在控制系统预设的电流值并周期性波动。电流上升段, 故障产生两端电流同步变化成分, 控制系统产生反同步变化成分。电流下降段, 控制系统产生两端电流同步变化成分, 故障产生反同步变化成分。衰减振荡阶段类似于区内高阻故障的阶段二, 两端电流的相关性复杂。周期性波动阶段, 两端电流状态类似于正常运行, 但更加无序包含更多不相关成分; 控制系统和故障共同作用, 既产生两端电流同步变化成分, 也产生反同步变化成分。

由上述分析知, 正常运行及区内外故障情况下, 两端电流都含有同步和反同步变化成分, 成因复杂。直接用两端电流计算的相关系数, 淹没故障特征, 不易区分区内外故障。因此需构造两个中间量进行相关性分析。不论逆变侧处于定电压控制还是定熄弧角控制模式, 效果皆如 1.1.2、1.1.3 所述。仅在严重故障电流过大时, 逆变侧才处于定电流控制模式, 具体条件与 UHVDC 控制系统静态特性具体参数有关。本文基于高阻故障特点, 假设高阻故障过程中逆变侧控制系统不处于定电流模式。

1.2 判据特征量的构造

1.2.1 通用形式

为突出故障特征, 进行相关性分析的两个中间量, 应分别反映两端电流的同步、反同步变化。为

便于工程应用, 仅利用两端电流构造中间量。两端电流求和, 部分抵消反同步变化成分, 放大同步变化成分。两端电流作差, 部分抵消同步变化成分, 放大反同步变化成分。两端电流取标么值, 构造中间量 s_0 、 s_1 如式(1)所示。

$$\begin{cases} s_0(t) = 0.5i_1(t) - 0.5i_2(t) \\ s_1(t) = 0.5i_1(t) + 0.5i_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$ 分别为 t 时刻线路首末端测量电流的标么值; $s_0(t)$ 是 t 时刻两端电流差的一半; $s_1(t)$ 是 t 时刻两端电流和的一半。

s_0 主要反映两端电流反同步变化成分。因正常运行时线路存在对地电容, 造成首端电流略大于末端电流, s_0 接近 0 但大于 0。 s_1 主要反映两端电流同步变化成分, 正常运行时接近 1。因变化幅度的大小不影响相关系数计算结果, s_0 、 s_1 数值范围不必相近。 s_0 、 s_1 与纵联差动保护中的差动电流制动电流具有相近的形式。但 UHVDC 输电线路分布效应不能忽略。因此 s_0 、 s_1 不具有纵联差动保护中差动电流、制动电流的意义。

每产生 a 个 s_0 、 s_1 计算一次协方差相关系数, 考虑到本方法主要作为识别高阻故障的后备保护, 故不重复使用 s_0 、 s_1 数据点, 与滑动数据窗方法相比, 会慢几个毫秒, 但有利于减小后续定值的确定时间。

$$\begin{cases} S_0(t) = \{s_0(t - (a-1)T_s), s_0(t - (a-2)T_s), \dots, s_0(t)\} \\ S_1(t) = \{s_1(t - (a-1)T_s), s_1(t - (a-2)T_s), \dots, s_1(t)\} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $s_1(t)$ 、 $s_0(t)$ 分别是 t 时刻两端电流和、差的一半; $S_0(t)$ 、 $S_1(t)$ 分别是 a 个 s_0 、 s_1 采样值构成的数组。 a 的取值需保证正常运行时 s_0 、 s_1 的相关系数较稳定。 a 个 s_0 、 s_1 构成的数组记为式(2)所示的 S_0 、 S_1 。式中: T_s 为两端电流的采样周期; $S_0(t)$ 、 $S_1(t)$ 为 t 时刻最新产生的 a 个 s_0 、 s_1 组成的数组。

本文判据特征量 r , 是新产生的 b 个相关系数的不重复累加。 b 的取值需避免少数异常数据造成判据特征量异常; 保证正常运行判据特征量的取值稳定; 同时保证判据特征量有合适值域。

$$r(T) = \sum_{t=T-abT_s}^T \left(\frac{E[(S_0(t) - E(S_0(t)))(S_1(t) - E(S_1(t)))]}{\sqrt{D(S_0(t))}\sqrt{D(S_1(t))}} \right) \quad (3)$$

式中: T_s 为两端电流的采样周期; $r(T)$ 为 T 时刻保护动作量; $S_0(t)$ 、 $S_1(t)$ 分别是 s_0 、 s_1 采样值数组; $D(X)$ 、 $E(X)$ 表示数组 X 的方差和期望。

判据特征量的计算流程如图 3 所示。

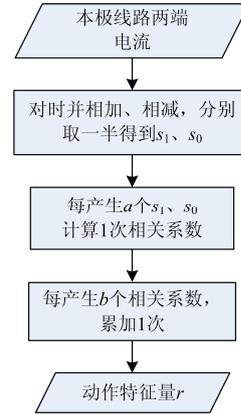


图 3 判据特征量的计算流程

Fig. 3 Calculation process of characteristic value

1.2.2 参数 a 、 b 的整定

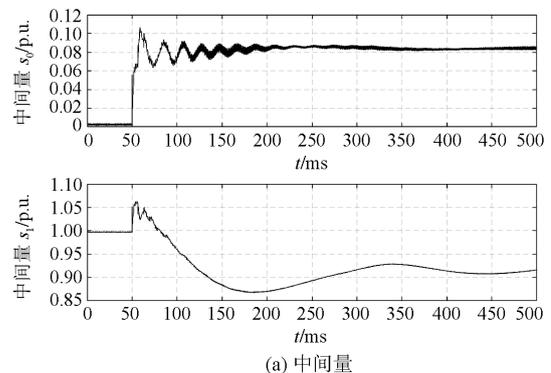
产生判据特征量 r , 需确定 a 、 b , 两者的取值应保证 r 有合适的值域, 正常运行时 r 的取值稳定; b 不宜过小, 避免单个异常相关系数造成判据特征量异常。

控制系统作用难以解析计算。UHVDC 正常运行时线路电流波动周期波形等特征与控制系统和主回路参数密切相关, 不同 UHVDC 正常运行时电流的波动特征不一致, 故无法通过解析计算求取 a 、 b 。本文利用穷举法, 针对 UHVDC 系统模型的穷举范围是: a 为 5~1 000, 且对每个 a , 穷举 5 个 b ; b 的数值满足 $abT_s = 10, 20, 30, 40, 50$ ms。本文采样周期 $T_s = 10^{-5}$ s, 穷举得到较优结果: $a = 10$, $b = 100$, 此时判据特征量 r 在 UHVDC 正常运行时有较平稳的取值范围[45.64, 46.30]。

2 判据特征量分析与判据

2.1 区内高阻故障

结合典型区内高阻故障(距线路首端 0.5%、99.5%处发生经 1 000 Ω 过渡电阻的极接地故障), 分析 s_0 、 s_1 和 r 的特征。图 4、图 5 分别对应线路 0.5%、99.5%处故障的情况。



(a) 中间量

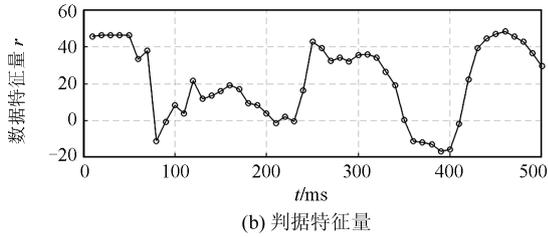


图 4 线路首端 0.5% 发生经 1 000 Ω 过渡电阻单极接地的构造量和判据特征量

Fig. 4 Designed current variables and criterion values under unipolar grounded fault with 1 000 Ω fault resistance at 0.5% of the head of the line

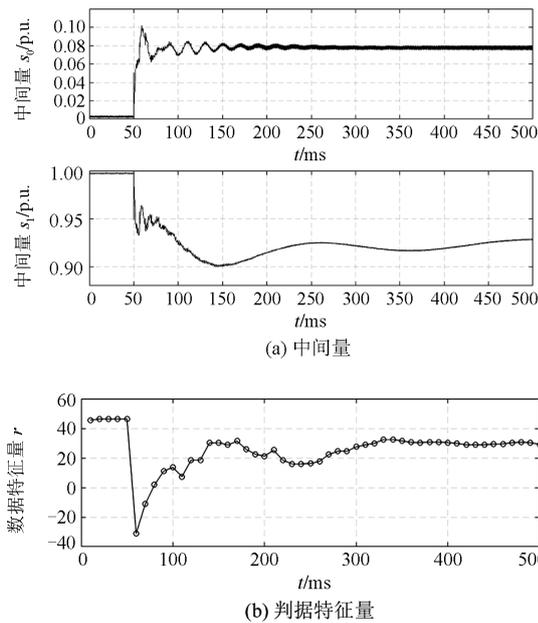


图 5 线路 99.5% 发生 1 000 Ω 单极接地故障的构造量和判据特征量

Fig. 5 Designed current variables and criterion values under unipolar grounded fault with 1000 Ω fault resistance at 99.5% of the end of the line

1) 阶段一

s_0 先突然上升, 随后进入波动阶段, s_0 交替上升、下降且时长相近。 s_1 先突变, 若故障靠近首端则变大, 若靠近末端则变小; 随后下降同时略有波动。由 1.1 节分析, 故障导致首端电流上升、末端电流下降, 在控制系统响应故障前, 必然造成 s_0 上升; 控制系统在阶段一内使两端电流降低, 因此 s_1 下降。但控制系统对两端电流的调控存在较为固定的速度差, 造成 s_0 波动与 s_1 下降过程中的波动。 s_0 的波动与 s_1 的下降都是控制系统调控造成的, 因此区内故障时 s_0 的波动段和 s_1 下降段基本同时出现且时长相近。

此阶段 r 最初有突变, 若故障靠近整流侧, s_1 正突变, 则 r 负突变程度较小, 若靠近逆变侧, 则 r 负突变幅度较大; 随后 r 在低于正常值附近波动。原因是: 故障后的两端电流必然比故障前含更多不相关成分, 造成 r 下降。 s_0 波动段在时间上对应 s_1 的下降段, 波动段的 s_0 有升有降, 若上升则 r 必然负相关, 若下降则必然正相关, 导致 r 波动。

2) 阶段二

此阶段 s_0 进入衰减振荡过程趋近于故障电流的稳态分量, 波动幅度明显减小。 s_1 缓慢上升下降。由 1.1 节分析, 此阶段控制系统弥补电压过调, 末端电压在预设值附近并处于衰减振荡过程, 首端电流尚未限制到预设值变化趋缓。因此 s_0 、 s_1 的变化较上一阶段平缓, 两者的变化率大小, 较上一阶段更加接近。因 s_1 上升、下降交替, 判据特征量 r 也正、负交替。又因 s_0 、 s_1 的变化率较接近, r 正、负相关程度比上一阶段高。图 4(b) 体现了这一特征。

3) 阶段三

故障位置越靠近线路末端, 故障后越早进入阶段三。因 UHVDC 线路能量单向流动, 故障电流主要来自整流侧。故障越靠近末端, 故障回路阻抗越大, 故障电流暂态分量越早消耗。此阶段 s_0 主要是故障电流稳态分量, s_1 缓慢变化。

由 1.1 节分析, 故障阶段三的两端电流变化趋势类似于正常运行, 而判据特征量 r 的产生过程是以正常运行时取值稳定为目标设计, 故阶段三的判据特征量 r 也较为稳定。因此时 s_0 主要成分是故障稳态分量, 比正常运行时的 s_0 更加无序, 判据特征量 r 的数值较正常运行低。图 5(b) 体现这一特征。

综上, 区内高阻故障后判据特征量 r 的特征可总结为: r 先突变并波动, 后渐渐稳定, 故障越靠近末端越早稳定; 故障后 r 的值总体小于正常运行时。

2.2 区外故障

区外与区内故障的主要区别有三点:

(1) 区外故障时, 区内没有新增电流通路, 中间量 s_0 波动的均值为 0。区内高阻故障 s_0 暂态分量在数值上小于稳态分量, 波动过程中较少出现负数。

(2) 首末端区外故障, s_1 的变化趋势不同且受过渡电阻影响。首末端区外故障, s_1 必然先下降, 之后能否上升由过渡电阻决定。若过渡电阻较小, s_1 不能上升并最终在 0 附近; 若过渡电阻较大首端电压跌落较低, s_1 在控制系统作用下稳定在某一低于正常值的数值; 若过渡电阻极大, 则 s_1 先下降、后上升并最终在正常运行值附近。末端区外故障的故障回路包括整条线路与末端平波电抗器的阻抗, 控制系

统通常可抑制电流上升,此时 s_1 最终稳定在低于正常的值。末端区外故障 s_1 先上升、后下降。

(3) 区内高阻故障与区外故障的本质区别是:区内高阻故障, s_0 波动段与 s_1 下降段时长相近、出现时间大致相同;区外故障, s_0 波动段与 s_1 下降段时长无关,部分情况下 s_0 波动段与 s_1 下降段出现时刻不同。因区外故障 s_0 波动段与 s_1 下降段并非由控制系统决定。

值得注意的是,逆变侧平波电抗器阀侧故障与区内末端故障从判据特征量上不容易区分,需引入闭锁判据。区内高阻故障时,中间量 s_0 的波动不会出现小于 0 的值。此时, s_0 包含的故障稳态分量是正数、故障暂态分量幅值小,所以 s_0 无负值。区外故障(包括对极线路故障) s_0 有连续负值区间。可由此设置闭锁判据,具体闭锁判据后文给出。

综上, r 在区内外故障下的不同特征可总结为:区内高阻故障, r 有明显的波动,平均值明显小于正常运行数值。区外故障, r 无类似波动过程,整体偏向不相关或负相关。

2.3 判据设置与整定

2.3.1 判据原理及整定

对应 r 在区内外故障下的不同特征,设计 r 波动次数判据:定值包括判断波动定值 dz_1 和波动次数定值 dz_2 。相继产生的两个判据特征量若 1 个小于 dz_1 、另 1 个大于 dz_1 ,则记为波动 1 次。在 0.4 s 内波动次数达到或超过 dz_2 ,判为区内故障。

UHVDC 强非线性特征导致保护定值无法解析计算。本文应用穷举法,分两步:

1) 由故障前后特征,设置初始范围。

dz_1 应小于 r 正常运行的值(记为 R_N)并留有裕度,本文选取 R_N 的 85% 作为 dz_1 的上限;为保证穷举范围足够宽,选取 R_N 相反数或更小的值作为 dz_1 的下限。 dz_2 下限 3 次,不满足 3 次难以称之为波动;上限应稍大于典型过渡电阻下首端故障 r 的明显增减次数。如图 4(b) 的情况, r 在故障后有 6 次明显的增减,可设上限为 7~8 次。

2) 选择步长并利用典型故障进行穷举。

为保证寻找到较优解,步长可取 R_N 的 2% 左右的整数。典型故障包括线路的各等分点处的故障和两端平波电抗器阀侧的故障,每处故障考虑典型过渡电阻,如 0 Ω 、100 Ω 、300 Ω 、1 000 Ω 。记录每个 dz_1 、 dz_2 组合下的结果并择优选择定值。

2.3.2 闭锁判据

本判据可能误动于区外低阻故障。利用线路两端差流的特点:区内高阻故障 s_0 不出现负值。区外故障 s_0 必然出现负值。

闭锁判据用 s_0 的数值构成判断,每过 c ms 执行一次判断。若 s_0 在此时段内的最小值大于 d p.u. 则闭锁判据不起动,否则闭锁保护出口 c ms 并将波动次数计数置为 0。 c 可取 r 的产生周期或其整数倍, d 取较接近 0 的负数。判据逻辑如图 6 所示。

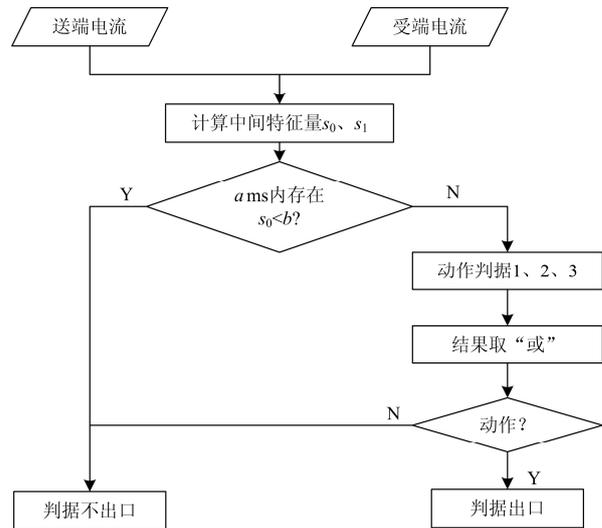


图 6 判据逻辑流程

Fig. 6 Logic chart of the criterion

3 仿真验证

本文采用 PSCAD/EMTDC 中 ± 800 kV/5 kA 双极 UHVDC 系统仿真模型,一次参数源于实际工程。考虑的故障位置有 15 处:区内故障含线路全长的 0.5%、10%、20%、30%、...、90%、99.5% 共 11 处,区外故障含整流站平波电抗器阀侧、逆变站平波电抗器阀侧、整流站交流母线、逆变站交流母线。直流故障类型为正极接地故障,过渡电阻分别考虑 0.01 Ω 、50 Ω 、300 Ω 、1 000 Ω 、2 000 Ω ;交流故障为三相故障,过渡电阻分别考虑 0 Ω 、10 Ω 、30 Ω 、50 Ω 。

3.1 判据具体参数

设置前述 15 种交、直流侧故障位置每个位置 4 种过渡电阻,共 60 种故障情况。分别对录波生成的 r 进行穷举。定值穷举范围的确定和选择标准如 2.3.2 节所述,本文所用具体穷举范围 dz_1 为 [-50,38], dz_2 为 [3,8],穷举步长取 $0.02R_N \approx 1$ 。最终定值为 $dz_1=18$, $dz_2=4$ 。

闭锁判据利用 s_0 构成,每 10 ms 判断一次。若 s_0 在这 10 ms 内的最小值大于 -0.01 p.u.,闭锁判据不起动;否则,闭锁保护出口 10 ms 并将波动次数清 0。

3.2 区内故障

本判据可靠保护全线 300 Ω 、1 000 Ω 和 2 000 Ω

的故障。

表 1 区内故障的判据动作情况一览

Table 1 List of criteria actions to inner faults

故障位置	出口时间/ms				
	0 Ω	50 Ω	300 Ω	1 000 Ω	2 000 Ω
0.50%	—	—	80	110	170
10%	—	—	70	260	250
20%	220	70	150	100	170
30%	50	70	50	170	200
40%	50	80	70	180	170
50%	60	-	70	260	240
60%	150	80	90	250	150
70%	80	80	90	140	170
80%	70	—	70	160	180
90%	130	80	70	70	70
99.50%	—	—	200	210	70

由表 1 可以看出, 全线 300 Ω 接地的故障, 最慢出口时间为 200 ms; 全线 1 000 Ω 接地的故障, 最慢出口时间为 260 ms; 全线 2 000 Ω 单极接地故障, 最慢出口时间为 250 ms。本判据的快速性明显优于传统纵联差动保护, 即使考虑 UHVDC 使用电力线路载波通信 PLC 传输两端电流的 65 ms 平均采样延迟时间^[18], 动作时间较直流线路纵联差动保护 500 ms 的延时^[18-19]也具有相当优势。

3.3 区外故障

设置闭锁判据前, 保护可能误动作于区外低阻故障。利用 s_0 在区外故障稳态分量均值为 0 的特点, 设置闭锁判据, 详见 2.3 节。

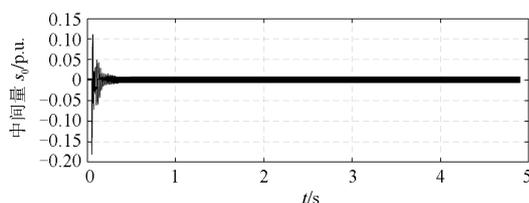


图 7 逆变站平波电抗器阀侧 50 Ω 故障的 s_0

Fig. 7 s_0 under unipolar grounded fault with 50 Ω fault resistance at the valve side of smoothing reactor in inverter station

以逆变站平波电抗器阀侧经 50 Ω 过渡电阻的三相故障为例, 说明闭锁判据的作用。故障发生于 0.05 s, 录波时长 4.9 s。由图 7 可见故障发生后 s_0 一直有负值, 保护一直闭锁。

4 结论

本文利用两端电流构造中间量并计算相关系数, 累加相关系数形成判据特征量, 由此提出保护

原理并整定定值形成保护判据。经仿真验证, 本文提出的 UHVDC 单极线路高阻保护能有效保护本极线路 300~2 000 Ω 的故障。

(1) 提出的判据特征量能定量反映线路两端电流的变化趋势, 其数值特征可区分正常运行、区内故障和区外故障。基于相关系数构成的电流变化定量描述是针对高阻故障的保护新思路。

(2) 本文保护原理考虑控制系统作用, 基于控制系统在故障后的作用效果设置判据, 适应保护动作于高阻故障时间较长, 控制系统开始反映于故障的实际。

(3) 判据定值整定方法有一定的通用性。

参考文献

- [1] 王鹤, 刘宇超, 李国庆, 等. 接入 MMC-HVDC 的交流系统线路自适应距离保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 7-13.
WANG He, LIU Yuchao, LI Guoqing, et al. Adaptive distance protection of AC system in the presence of modular multilevel converter based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 7-13.
- [2] 郑伟, 张楠, 杨光源. 西门子及 ABB 直流线路行波保护对比和改进研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 149-154.
ZHENG Wei, ZHANG Nan, YANG Guangyuan. Comparative and improvement investigation on the DC transmission line traveling wave protections of Siemens and ABB[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 149-154.
- [3] 张悛宁, 束洪春, 田鑫萃, 等. 特高压直流输电线路接地极线路高阻故障测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 1-7.
ZHANG Yining, SHU Hongchun, TIAN Xincui, et al. Research on fault location algorithm for HVDC electrode line high impedance fault[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 1-7.
- [4] 刘剑, 邵能灵, 范春菊, 等. 基于电流波形匹配的高压直流输电线路纵联保护[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1736-1743.
LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A novel pilot protection scheme for HVDC transmission line based on current waveform matching[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1736-1743.
- [5] 齐国强, 王增平. 基于 Hilbert-Huang 变换的 HVDC 突变量方向纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 92-99.
QI Guoqiang, WANG Zengping. Directional pilot protection method of fault component for HVDC transmission lines

- based on Hilbert-Huang transform[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 92-99.
- [6] 李钊, 邹贵彬, 许春华, 等. 基于S变换的HVDC输电线路纵联保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1228-1235.
LI Zhao, ZOU Guibin, XU Chunhua, et al. S-transform based pilot protection method for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1228-1235.
- [7] WANG Yanting, ZHANG Baohui, KONG Fei, et al. A directional comparison pilot protection scheme for hybrid HVDC transmission lines[C] // Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation Restructuring and Power Technologies, November 26-29, 2015, Changsha, China: 978-983.
- [8] LI Zhao, ZOU Guibin, TONG Bingbing, et al. Novel traveling wave protection method for high voltage DC transmission line[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, USA: 1-5.
- [9] LIU Kai, LI Youyi, WANG Jianping, et al. Pilot polarity comparison protection for serial multi-terminals DC grid[C] // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, October 25-28, 2016, Xi'an, China: 809-814.
- [10] 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.
- [11] LIN Sheng, GAO Shan, HE Zhengyou. A pilot directional protection for HVDC transmission line based on relative entropy of wavelet energy[J]. Entropy, 2015, 17(8): 5257-5273.
- [12] 宋国兵, 王晨清, 唐吉斯, 等. 适用于风电接入系统的时域模型识别纵联保护新原理[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3580-3585.
SONG Guobing, WANG Chenqing, TANG Jisi, et al. Novel pilot protection based on time-domain model identification for wind power integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3580-3585.
- [13] 靳幸福, 宋国兵, 徐海洋, 等. 利用模量模型识别的VSC-HVDC输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(10): 100-106.
JIN Xingfu, SONG Guobing, XU Haiyang, et al. A novel pilot protection for VSC-HVDC transmission line using modulus model identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10): 100-106.
- [14] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. 利用电压相关性的±800 kV直流输电线路区内外故障判断方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 151-160.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. Identification between internal and external faults of ±800 kV HVDC transmission lines based on voltage correlation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 151-160.
- [15] 束洪春, 刘可真, 朱盛强, 等. ±800 kV特高压直流输电线路单端电气量暂态保护[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 108-117.
SHU Hongchun, LIU Kezhen, ZHU Shengqiang, et al. ±800 kV UHVDC transmission line protection based on single end electrical transient signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 108-117.
- [16] 李俊霞, 严兵, 张爱玲, 等. 特高压直流双极区直流保护系统可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 130-136.
LI Junxia, YAN Bing, ZHANG Ailing, et al. Reliability research for UHVDC bipolar area DC protection system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 130-136.
- [17] 李豹, 熊双成, 李金安, 等. 特高压直流保护逻辑元件对保护特性的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 133-137.
LI Bao, XIONG Shuangcheng, LI Jinan, et al. Study on the influence of logical module on UHVDC protective characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 133-137.
- [18] 周红阳, 余江, 黄佳胤, 等. 直流线路纵联差动保护的相关问题[J]. 南方电网技术, 2008, 2(3): 17-21.
ZHOU Hongyang, YU Jiang, HUANG Jiayin, et al. Issues over DC line differential protection[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(3): 17-21.
- [19] 张培东, 何杰. 高压直流输电线路纵联差动保护研究[J]. 电工技术, 2008, 29(11): 32-34.
ZHANG Peidong, HE Jie. Study on differential protection of HVDC transmission line[J]. Electric Engineering, 2008, 29(11): 32-34.

收稿日期: 2017-11-01; 修回日期: 2018-01-12

作者简介:

戴志辉(1980—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: daihuadian@163.com

(编辑 张爱琴)