

DOI:10.12158/j.2096-3203.2023.02.011

基于杰卡德相似度一体化判据的柔直线路纵联保护

李振兴^{1,2}, 余双喜², 徐浩³, 崔晓琳², 李振华^{1,2}, 张萌萌²

(1. 湖北省输电线路工程技术研究中心(三峡大学),湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学电气与新能源学院,湖北 宜昌 443002;

3. 国网湖北省电力有限公司超高压公司,湖北 武汉 430050)

摘要:基于双端法的柔直线路纵联保护通信量大、动作时间长,并且受噪声等因素影响较大,因此其整定困难。基于此,文中提出一种基于杰卡德相似度一体化判据的柔直线路纵联保护方法。首先分析了柔直线路区内外故障电压和电流变化率的故障特征,分别构建了模拟量至逻辑量的转换关系;然后提出基于0.5 ms数据窗下逻辑量比较的杰卡德相似度模型,基于区内故障的高相似度构建一体化判据实现故障类型的判别,无需故障启动及故障选极判据,基于双端逻辑量比较的纵联保护方案可以实现柔直线路的快速保护,该方案原理简单、动作速度快、易于实现;最后利用PSCAD/EMTDC搭建四端柔直输电系统模型,分别验证了该保护方案在区内外不同故障类型、高阻接地、噪声干扰等多种场景下的有效性。

关键词:四端柔直输电系统;柔直线路;杰卡德相似度;一体化判据;纵联保护;故障类型判别

中图分类号:TM773

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)02-0094-09

0 引言

随着风、光等清洁能源建设规模的增长,使用基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔直输电系统已被认为是实现大规模分布式电源并网和可再生能源远距离电力输送的可行方案,多端柔直输电(multi-terminal direct current based on voltage source converter, VSC-MTDC)系统已成为直流输电领域的研究热点^[1-3]。但针对直流输电线路保护策略的研究并不多,故障发生时,故障电流上升速度快、幅值大,换流站不具备自关断故障电流的能力,在必须短时间内切除故障的场景下,对保护方案的要求更加严格。保护方案的滞后限制了柔直输电技术的发展^[4-6],因此须研究快速且有效的直流侧故障隔离和清除方法^[7-9]。

目前针对柔直输电系统保护方法的研究可分为两大类。一类是基于单端电气量的保护方法,文献[10]使用直流侧故障暂态电流固有模态能量构造单端保护判据,能够快速检测直流侧故障,但单极接地故障识别时间较长,需要11 ms才能可靠识别;文献[11]利用皮尔逊相关系数计算正负极暂态电压的相关性进行故障识别,但该方法仅能进行单极故障判别,不适用于极间故障;文献[12]利用电流电抗器和滤波器的边界特性,通过高频暂态电流能量识别区内外故障,但无法进行故障选极;文

献[13]提出一种基于电流变化特征的柔直输电线路保护,保护可靠、动作灵敏,但抗过渡电阻能力不强,不能及时对故障进行检测和隔离。另一类是基于双端电气量的保护方法,文献[14]由线路不同极电压、电流构造自定义差分电流,提出一种纵联保护新原理,但主要面向双端系统,在多端直流系统中的应用有待验证;文献[15]将线路分布参数考虑在内,对纵联电流差动保护进行改进,但动作时限无法满足柔直输电系统的要求,仅用作后备保护;文献[16]采用余弦相似度计算线路两端电流故障分量的相似性完成故障区域和故障极的判定,但要增加启动判据,在一定程度上会影响动作速度。

综上所述,纵联保护拥有绝对的选择性,更容易实现,但两站间通信传输以及设备对接收信号的处理时间都影响其速动性,纵联保护方法多数借鉴传统高压直流输电系统(high voltage direct current system, HVDC)或交流系统^[17-18],目前在柔直输电系统中的应用尚不成熟,仍须结合柔直输电系统的特点进一步研究^[19-20]。因此,文中以对称双极接线方式下的四端柔直输电系统为研究对象,提出一种基于杰卡德相似度一体化判据的柔直线路纵联保护方案。利用杰卡德相似度理论将检测点的电流变化率与电压这2种故障暂态量相结合,构造逻辑量比较的杰卡德相似度模型,将电流变化率对故障的高灵敏性和故障后电压受噪声影响较小的优点相统一,实现区内外故障识别,并利用所搭建的四端柔直模型仿真验证了该保护方案的有效性。

收稿日期:2022-09-27;修回日期:2022-12-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077120)

1 四端 MMC 输电系统及其故障特性

1.1 四端 MMC 输电系统结构

四端 MMC 输电系统如图 1 所示,其中 MMC₁—MMC₄均采用半桥型子模块结构,换流站之间的输电线路编号为 L_{12} 、 L_{23} 、 L_{34} 、 L_{14} ,线路 L_{12} 两端母线分别称为 K 端和 M 端。 F_1 — F_9 为线路故障点,其中 F_1 — F_3 为 K、M 区内故障点, F_4 — F_9 为区外故障点; X_1 — X_8 为限流电抗; R_1 — R_8 为保护电阻。参数及结构参考张北四端 VSC-MTDC 系统,具体参数见表 1。

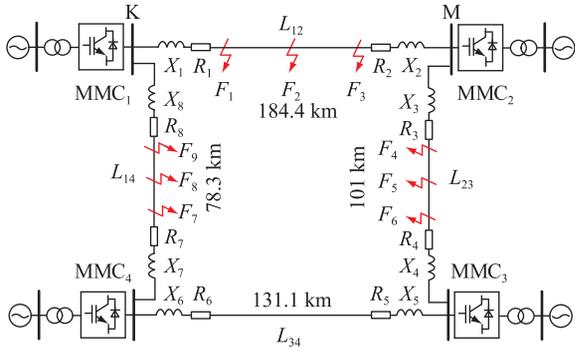


图 1 四端 MMC 输电系统

Fig.1 Four-terminal MMC transmission system

表 1 四端柔直电网模型主要参数

Table 1 Main parameters of four-terminal flexible DC power grid model

参数	MMC ₁	MMC ₂	MMC ₃	MMC ₄
换流变额定容量/(MV·A)	2×850	2×850	2×1 700	2×1 700
网侧额定电压/kV	±500	±500	±500	±500
阀侧额定电压/kV	260	260	260	260
直流额定电压/kV	400	400	400	400
桥臂子模块数 N	200	200	200	200
桥臂电感 L /mH	75	75	40	40
子模块电容值 C /mF	10	10	15	15

1.2 四端柔直输电系统故障特性分析

1.2.1 电压特性

采用真双极接线方式的 MMC 柔直系统中,以正极接地故障为例,正极接地故障时,故障极电压迅速下降,而非故障极电压由于耦合作用短时间内也会发生变化,其变化相对于故障极较小^[21]。将正、负极的直流线电压分别记为 u_p 和 u_n ,采用相模变换解耦极点电气量。极电压能分解为线模分量 u_1 和零模分量 u_0 ,如式(1)所示。

$$\begin{cases} u_1 = (u_n - u_p) / \sqrt{2} \\ u_0 = (u_n + u_p) / \sqrt{2} \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知正常工况下的线模电压 u_{a1} 和零模电压 u_{a0} 为:

$$\begin{cases} u_{a1} = -V_{\text{dcn}} / \sqrt{2} \\ u_{a0} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_{dcn} 为正负极极间电压。正极接地故障时边界条件如图 2(a) 所示,其中 R_g 为故障电阻。

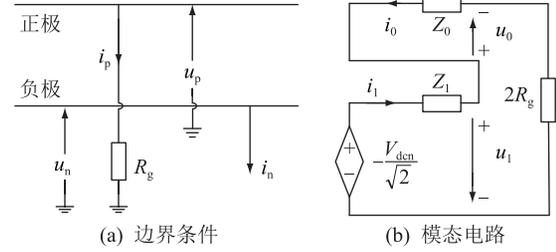


图 2 正极接地故障示意

Fig.2 Schematic diagram of positive ground fault

$$\begin{cases} u_p = R_g i_p \\ i_n = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_p 、 i_n 分别为接地故障时的正、负极电流。将电流转换为线模和零模输出,如式(4)所示。

$$\begin{cases} i_1 = (i_n - i_p) / \sqrt{2} \\ i_0 = (i_n + i_p) / \sqrt{2} \end{cases} \quad (4)$$

由式(1)一式(4),正极接地故障瞬时边界能够改写为:

$$\begin{cases} u_1 - u_0 = R_g (i_1 - i_0) \\ i_0 + i_1 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

因此,可以得到图 2(b) 所示模态电路,其中 Z_1 、 Z_0 分别为直流线路的正序阻抗和零序阻抗,且 $Z_0 > Z_1$ ^[22]。由图 2(b) 可知,线模和零模分量为:

$$\begin{cases} u_1 = -\frac{V_{\text{dcn}}}{\sqrt{2}} \times \frac{Z_0 + 2R_g}{Z_0 + Z_1 + 2R_g} \\ u_0 = -\frac{V_{\text{dcn}}}{\sqrt{2}} \times \frac{Z_0}{Z_0 + Z_1 + 2R_g} \end{cases} \quad (6)$$

结合式(1)、式(2)、式(6),可得 u_p 和 u_n 的变化量为:

$$\begin{cases} \Delta u_p = -\frac{V_{\text{dcn}}(Z_0 + Z_1)}{2(Z_0 + Z_1 + 2R_g)} \\ \Delta u_n = -\frac{V_{\text{dcn}}(Z_0 - Z_1)}{2(Z_0 + Z_1 + 2R_g)} \end{cases} \quad (7)$$

极间故障的推导与单极接地故障类似,同理可得极间故障时正、负极电压变化量为:

$$\begin{cases} \Delta u_p = -\frac{V_{\text{dcn}}}{\sqrt{2}} \times \frac{2Z_1}{R_g + 2Z_1} \\ \Delta u_n = \frac{V_{\text{dcn}}}{\sqrt{2}} \times \frac{2Z_1}{R_g + 2Z_1} \end{cases} \quad (8)$$

由式(7)、式(8)可知,正极接地故障时,正负极线路电压均会有所变化,而正极线路电压改变幅度

远大于负极线路;极间故障时,正负极线路的电压变化方向相反,幅值均会快速下降,而且下降的幅度相等。

在 PSCAD/EMTDC 平台搭建图 1 所示四端 MMC 输电系统仿真模型,各参数设置参照表 1。图 3(a)为线路 L_{12} 中点 F_2 在 3 s 时发生金属性正极接地故障的线路电压仿真图,图 3(b)为线路 L_{12} 近端即点 F_1 在 3 s 时发生极间故障的电压仿真图,可见仿真结果与式(7)、式(8)所得结论相同。

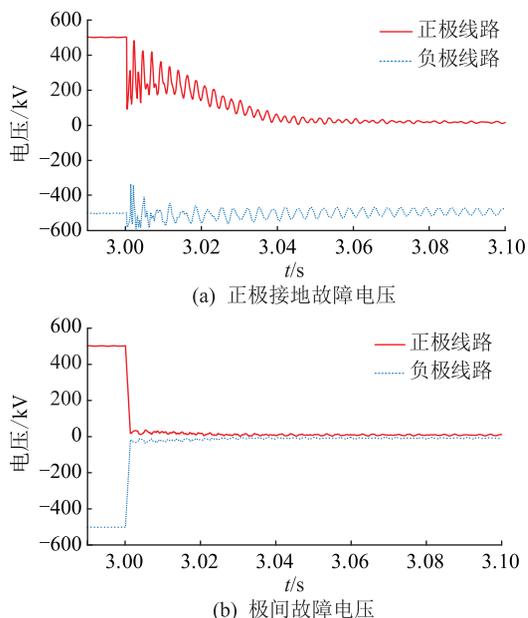


图 3 故障电压仿真结果

Fig.3 Simulation results of fault voltage

1.2.2 电流特性

直流侧极间短路故障特性与单极接地故障特性基本相同,因此以正极接地故障为例分析故障后电流特性。四端柔直输电系统由直流线路连接多个换流站构成环状结构,若某条直流线路发生故障,各换流站将会通过直流线路向故障点馈入故障电流。换流站放电电流使故障电流快速上升,故障线路过流现象因各换流站馈入的电流互相叠加而变得极其严重。图 4 为直流侧线路 L_{12} 在中点 F_2 故障时,各换流站馈入故障点电流示意。

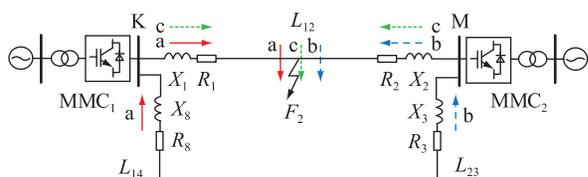


图 4 直流侧故障点电流示意

Fig.4 Schematic diagram of fault current at DC side

图 4 中箭头 a、b 分别代表 MMC_4 、 MMC_3 向故障点馈入电流路径,箭头 c 代表故障线路两端换流站

向故障点馈入电流路径,由图可见三者将在故障点处汇集,使故障电流迅速增加。图 5 为线路 L_{12} 中点 F_2 发生正极接地故障时故障电流示意。

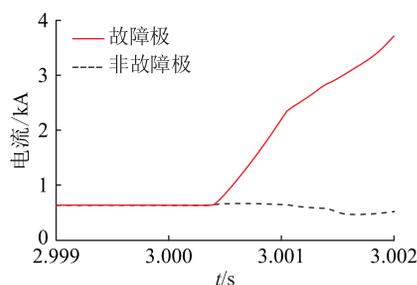


图 5 正极接地故障电流示意

Fig.5 Schematic diagram of positive ground fault current

由图 5 可知,发生正极接地故障时,故障极电流会突变,非故障极电流由于耦合作用也会发生波动,但幅值远小于正极线路。考虑到故障极电流会在几个毫秒内迅速增加,电流变化率相较于电流的变化趋势更加明显,陡度更大,用作保护动作判据会更加灵敏,因此采用电流变化率来描述电流的突变。文中所提离散电流变化率计算如式(9)所示。

$$\Delta i / \Delta t = \frac{i(n) - i(n - k)}{t(n) - t(n - k)} \quad (9)$$

式中: n 为采样窗内各采样点标记值, $i(n)$ 为采样点 n 处的实测电流; k 为选取的采样窗前的采样点标记值, $i(n-k)$ 为 $i(n)$ 前第 k 个采样点处实测电流。文中数据窗采样点取 10, 采样频率取 20 kHz, 考虑到文中数据窗为 0.5 ms, 为保证保护动作可靠性与灵敏性, 文中 k 值选为 20。图 6 为由式(9)计算得到的正极接地故障电流变化率。

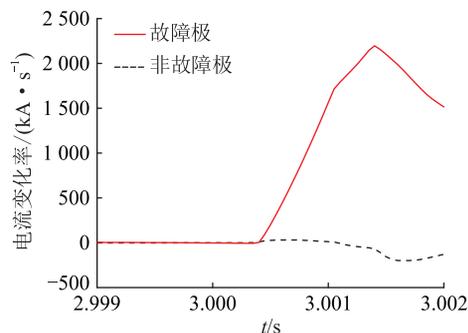


图 6 正极接地故障电流变化率

Fig.6 Change rate of positive ground fault current

2 基于就地电压电流杰卡德相似度比较的保护

2.1 杰卡德相似度系数基础理论

杰卡德相似度能够比较有限样本集之间的相似性与差异性,关注样本间的共同特征,其值越大,

样本相似度越高^[23-24]。杰卡德相似度广泛应用于大规模数据处理、自然语言处理、计算机工程与技术等领域^[25],其计算如式(10)所示。

$$J(A, B) = \frac{\sum_{j=1}^m (A_j = 1 \cap B_j = 1)}{\sum_{j=1}^m (A_j \cup B_j)} \quad (10)$$

式中: $J(A, B)$ 为杰卡德相似度系数,样本 A 和 B 是所有元素取值为0或1的2个由 m 个元素组成的集合,取1表示集合包含该元素,取0表示集合不包含该元素。设定样本 A 与 B 中取值都是1的元素的个数为 M_{11} ,样本 A 中是1而样本 B 中是0的元素的个数为 M_{10} ,样本 A 中是0而样本 B 中是1的元素的个数为 M_{01} ,样本 A 与 B 中都是0的元素的个数为 M_{00} ,则样本 A 与 B 的杰卡德相似度系数也可表示为式(11)。

$$J = \frac{M_{11}}{M_{11} + M_{10} + M_{01}} \quad (11)$$

可以看出,计算过程中没有考虑 M_{00} ,其原因是:杰卡德相似度求的是非对称二元属性的相似度,例如电流突增赋值1,电流不变赋值0,比较是否发生故障,只关注发生电流突增的情况,故分子分母中都没有 M_{00} ,因此杰卡德相似度对于直流线路故障具有很快的速动性。

2.2 感性杰卡德相似度模型

以故障电压与电流变化率构建感性杰卡德相似度模型 L_j ,如式(12)所示。利用电流变化率保证选择性,又通过电压保证可靠性,而直接将电压引入故障判据的构建,通过整定,相当于变相设立了类似电压下降的保护启动判据,因此文中提出的保护方案不用单独设立保护启动判据。

$$L_j = J(u, \Delta i/\Delta t) \quad (12)$$

文中采用一个数据窗内的10个采样点进行相似度计算。因此集合 u 中包含10个离散的电压信号,集合 $\Delta i/\Delta t$ 中包含10个离散的电流变化率信号。然后对电流变化率和电压离散信号序列进行0、1变换,其变换规则如式(13)、式(14)所示。最终形成所有元素取值都是0或1的2个集合 $\Delta i/\Delta t$ 和 u 。

$$I_{\text{set1}} = K_{\text{rel},1}(\Delta i/\Delta t)_{h,M} \quad (13)$$

$$U_{\text{set2}} = K_{\text{rel},2}U_{\text{DC}} \quad (14)$$

式中: I_{set1} 为故障后电流变化率进行0、1变换的阈值, U_{set2} 为故障后电压进行0、1变换的阈值, I_{set1} 、 U_{set2} 整定原则为能灵敏反应区内高阻故障; U_{DC} 为正常运行电压值; $(\Delta i/\Delta t)_{h,M}$ 为电流变化率阈值;

$K_{\text{rel},1}$ 、 $K_{\text{rel},2}$ 为可靠系数。0、1变换过程如式(15)所示。

$$\begin{cases} 1 & (\Delta i/\Delta t)_\beta \geq I_{\text{set1}} \\ 0 & (\Delta i/\Delta t)_\beta < I_{\text{set1}} \\ 1 & u_{p\beta} \leq U_{\text{set2}} \\ 0 & u_{p\beta} > U_{\text{set2}} \\ 1 & u_{N\beta} \geq -U_{\text{set2}} \\ 0 & u_{N\beta} < -U_{\text{set2}} \end{cases} \quad \beta = 1, 2, \dots, 10 \quad (15)$$

式中: β 为数据窗内采样信号。电压和电流变化率达到阈值要求时置1,反之则置0。

3 柔直线路保护方案

3.1 就地化保护判据构建

区内故障时故障极电流变化率迅速升高,大于 I_{set1} ,电压降低且幅值低于 U_{set2} ,即 $\Delta i/\Delta t = u = \{1, 1, \dots, 1\}$,求得 $J(u, \Delta i/\Delta t) = 1$ 。区外故障时,与故障极对应的极电压仍会降低。对于电流变化率而言,K、M端区外故障,对应的K、M端电流变化率与区内故障时相反,同时幅值因限流电抗的存在也小于区内故障,因此通过整定,在电压降低时电流变化率仍能准确区分区内外故障,即 $u = \{1, 1, \dots, 1\}$ 、 $\Delta i/\Delta t = \{0, 0, \dots, 0\}$,从而 $J(u, \Delta i/\Delta t) = 0$ 。表2为不同故障情况下杰卡德相似度模型计算结果。

表2 不同故障情况下杰卡德相似度模型计算结果
Table 2 Calculation results of Jeckard similarity model under different fault conditions

故障情况	K端 正极	K端 负极	M端 正极	M端 负极
区内正极接地	1	0	1	0
区内极间故障	1	1	1	1
K端区外正极接地	0	0	1	0
K端区外极间故障	0	0	1	1
M端区外正极接地	1	0	0	0
M端区外极间故障	1	1	0	0

由表2可知,区内单极接地故障时,故障极两端 L_j 为1,非故障极为0;区内极间故障时,正负极线路两端计算结果均为1;区外故障时,仅远离故障点保护计算结果为1,而靠近故障点保护计算结果为0,因此在判断故障的同时,完成了故障极的判断。考虑到保护方案的灵活性,借鉴传统欠量保护可靠系数一般取0.8~0.85,文中取定值为0.8,其故障识别判据如式(16)所示,当相似度计算结果达到0.8时,则就地端判据判定为故障发生在区内,从而输出1,反之则输出0。

$$\begin{cases} L_j \geq 0.8 & \text{区内故障} \\ L_j < 0.8 & \text{无故障} \end{cases} \quad (16)$$

3.2 一体化判据构建

由于采用就地电压电流计算相似度,因此在每极线路均得到一个相似度结果,文中保护判据采用双通道通信方式,正负极独立发送逻辑信号用于故障识别。为便于研究,引入故障判别函数 Q_η ($\eta=P, N$, 其中 P 为正极, N 为负极)。其计算方式及具体判据如式(17)、式(18)所示。

$$Q_\eta = L_{JK\eta} \& L_{JM\eta} \quad (17)$$

$$Q_\eta = \begin{cases} 1 & \eta \text{ 极故障} \\ 0 & \text{无故障} \end{cases} \quad (18)$$

式中: L_{JK} 、 L_{JM} 分别为输电线路 L_{12} 的 K 、 M 端感性杰卡德相似度计算结果。由式(17)、式(18)可知,该保护能够直接通过对就地化保护判据结果进行计算得到故障判别函数的值,根据 Q_η 的值,直接判别出故障区域和故障类型,无需额外的选极判据。具体流程如图7所示。

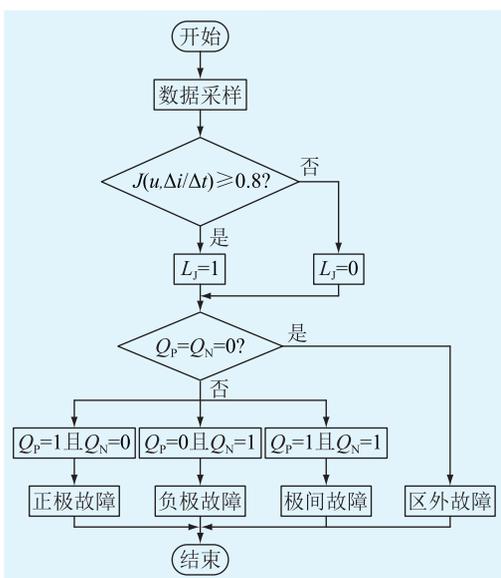


图7 保护方案流程

Fig.7 Flow chart of protection scheme

4 仿真实验

在 PSCAD/EMTDC 中搭建四端柔直输电系统进行不同类型故障仿真。以线路 L_{12} 两端保护的动作情况为例验证文中所提保护的有效性。参数取值如下: $(\Delta i/\Delta t)_{h,M} = 200 \text{ kA/ms}$, $U_{DC} = 500 \text{ kV}$, $K_{rel,1} = 1.5$, $K_{rel,2} = 0.8$ 。

4.1 区内故障仿真验证

4.1.1 单极接地故障

设置线路 L_{12} 在 F_1 、 F_2 、 F_3 处 3 s 时发生正极接地故障,验证文中所提保护方案。 F_2 点仿真结果如图8所示, F_1 、 F_2 、 F_3 的不同类型故障仿真结果如表3所示。图中 K_P 、 M_P 、 K_N 、 M_N 分别表示 K 端正极、 M

端正极、 K 端负极、 M 端负极; L_{JKP} 、 L_{JMP} 、 L_{JKN} 、 L_{JMN} 分别为 K 端正极、 M 端正极、 K 端负极、 M 端负极的杰卡德相似度计算结果。

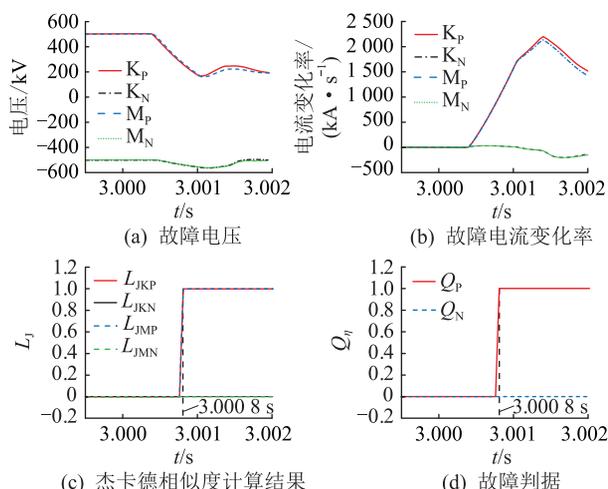


图8 线路中点正极接地故障

Fig.8 Positive ground fault at line midpoint

表3 区内不同类型故障仿真结果

Table 3 Simulation results of different types of faults in the area

故障位置	故障类型	Q_P	Q_N	判断结果
F_1	正极接地	1	0	区内正极接地
	极间故障	1	1	区内极间故障
F_2	正极接地	1	0	区内正极接地
	极间故障	1	1	区内极间故障
F_3	正极接地	1	0	区内正极接地
	极间故障	1	1	区内极间故障

由图8可知,当线路 L_{12} 中点发生正极接地故障时,故障后 0.8 ms 正极线路两端的杰卡德相似度计算结果均为 1,而负极线路两端的计算结果为 0,因此故障判据 Q_P 为 1, Q_N 为 0,由此可判定为正极接地故障。考虑光纤通信网络数据传输延时为 204 km/ms,因此数据在线路 L_{12} 信道中传输时间约为 1 ms,所以保护可在故障后 1.8 ms 内确认故障。

4.1.2 区内极间故障

设置线路 L_{12} 在 F_1 、 F_2 、 F_3 处 3 s 时发生极间故障, F_2 点仿真结果如图9所示。 F_1 、 F_2 、 F_3 的不同类型故障仿真结果如表3所示。

由图9可知,在故障后 0.8 ms 时,正负极线路两端杰卡德相似度计算结果均为 1,所以 $Q_P = Q_N = 1$ 。同样计及 1 ms 的通信延迟,文中所提保护方案能够在故障后 1.8 ms 内准确识别极间故障。

4.2 区外故障仿真验证

以线路 L_{14} 近端 F_9 处发生正极接地故障为例,验证保护方案对于区外故障的动作情况。故障时

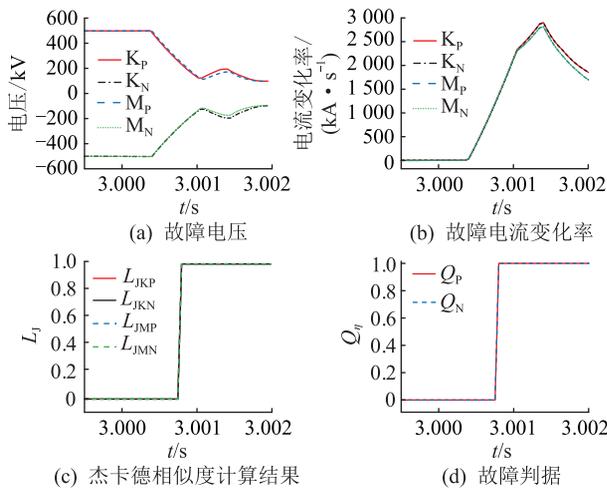


图9 线路中点极间故障

Fig.9 Inter-pole fault at line midpoint

刻为 3 s, F_9 点仿真结果如图 10 所示。区外不同故障位置仿真结果如表 4 所示。

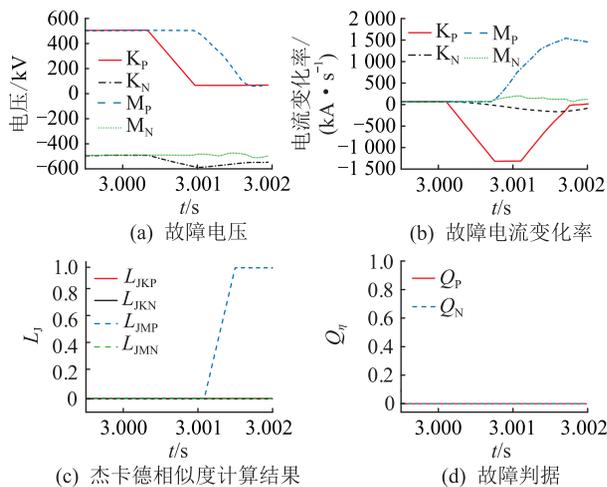


图 10 区外正极接地故障

Fig.10 Out-of-zone positive ground fault

表 4 区外多种故障情况仿真结果

Table 4 Simulation results of various fault conditions outside the area

故障位置	故障类型	Q_P	Q_N	判断结果
F_4, F_5, F_6	正极接地	0	0	区外故障
	极间故障	0	0	区外故障
F_7, F_8, F_9	正极接地	0	0	区外故障
	极间故障	0	0	区外故障

线路 L_{14} 发生区外正极接地故障时,只有 M 端正极相似度计算结果为 1,其余相似度计算结果均为 0,因此最终判据计算结果 Q_n 仍为 0,不会引起误判。由表 4 可知,在区外不同位置发生故障时,文中保护方案仍能可靠不动作。

4.3 高阻故障仿真验证

过渡电阻的存在并不改变电流及电压的变化

趋势,因此不影响保护动作的可靠性。设置线路 L_{12} 在 F_1, F_2, F_3 处 3 s 时发生正极高阻接地故障,过渡电阻为 200Ω , F_2 点仿真结果如图 11 所示, F_1, F_2, F_3 的不同类型高阻故障仿真结果如表 5 所示。

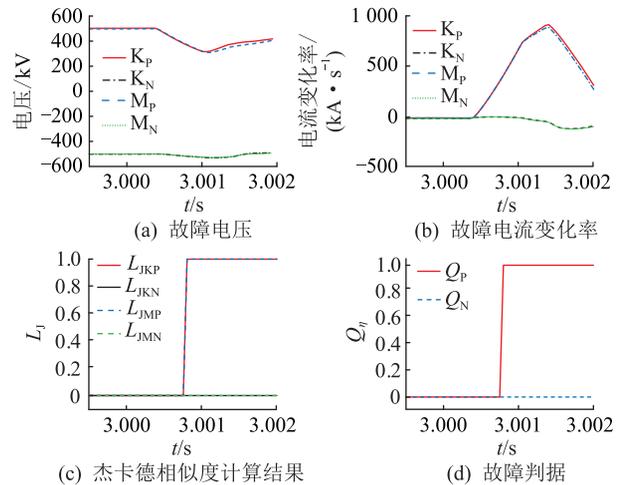


图 11 线路中点正极高阻接地故障

Fig.11 Positive high resistance ground fault at line midpoint

表 5 不同类型高阻故障仿真结果

Table 5 Simulation results of different types of high resistance faults

故障类型	故障位置	Q_P	Q_N	判断结果
正极接地	F_1	1	0	区内正极接地
	F_2	1	0	区内正极接地
	F_3	1	0	区内正极接地
极间故障	F_1	1	1	区内极间故障
	F_2	1	1	区内极间故障
	F_3	1	1	区内极间故障

由图 11 可知保护动作情况不受过渡电阻的影响,考虑到通信时间,仍能够在 1.8 ms 之内完成故障识别。由表 5 可知,在发生高阻接地故障时,文中保护方案仍能可靠动作。

4.4 抗噪声仿真验证

噪声对电压信号影响较小,会使电流发生较大幅度的波动,但总影响仍较小,设置线路 L_{12} 在 F_2 点 3 s 时发生正极接地故障,在电压、电流信号中加入信噪比为 20 dB 的随机高斯白噪声, F_2 点仿真结果如图 12 所示。可见,由于同时使用线路电流变化率和电压构成保护判据,所以文中保护方案有较好的抗噪能力,在噪声影响下仍能可靠动作。

4.5 系统运行方式变化的影响

当系统运行方式发生变化时,以四端输电系统中线路 L_{34} 退出为例。系统的开环运行只会对线路的潮流分布产生影响,不影响保护动作的可靠性。设置线路 L_{34} 在 2.9 s 时退出,此时系统开环运行。

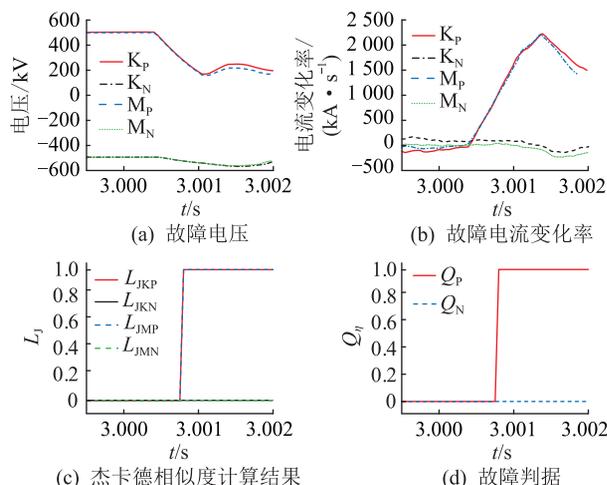


图 12 噪声干扰仿真

Fig.12 Noise interference simulation

设置线路 L_{12} 在 F_2 点 3 s 时发生正极接地故障, 仿真结果如图 13 所示。

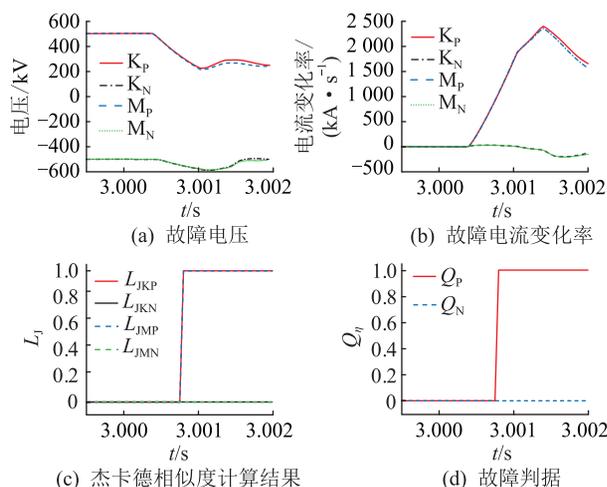


图 13 开环运行仿真

Fig.13 Open-loop operation simulation

由图 13 可知, 当系统的运行方式改变后, 故障后正极线路两端的杰卡德相似度计算结果仍为 1, 负极线路两端的计算结果仍为 0, 故障判据 Q_p 为 1, Q_n 为 0, 依然可判定为正极接地故障, 文中保护方案仍能可靠动作。

4.6 与其他保护方案的对比分析

文献[16]采用的余弦相似度是目前典型的电流极性保护方法, 现将文中所提保护与文献[16]所提保护进行比较。仿真中设置线路 L_{12} 在 F_2 点 3 s 时发生正极接地故障, 验证 2 种保护方案的动作情况。以正极系统为例, 文中所提保护仿真结果如图 8 所示, 文献[16]仿真结果如图 14 所示。图 14 中 ΔI_{KP} 、 ΔI_{MP} 分别为 K 端和 M 端的正极电流故障分量, C_{KMP} 为正极余弦相似度计算结果。

分析图 8、图 14 可知, 文中所提保护不需要保

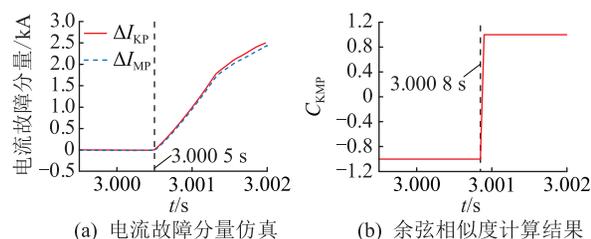


图 14 余弦相似度仿真

Fig.14 Cosine similarity simulation

护启动判据, 在故障后保护快速动作, 故障判据可在 0.8 ms 内可靠完成故障判断。而文献[16]中的保护, 在故障后 0.5 ms 保护算法才开始启动, 故障判据要在 0.8 ms 之后才能完成故障判断, 时间上明显滞后于文中保护方案。可以看出, 文中方案与文献[16]相比, 具有以下优点:

(1) 方法简单。在相似度计算过程中仅利用 0、1 变量, 降低了运算难度。基于杰卡德相似度一体化判据的柔直线路纵联保护仅需一个判据便能完成故障识别和故障选极, 不需要额外的保护启动判据。

(2) 可靠性高。文中保护方案通过对阈值 I_{set1} 、 U_{set2} 的整定, 仅关注故障暂态量与整定值的大小关系, 而非其具体数值, 不受测量误差和噪声的影响。

(3) 易于实现。杰卡德相似度通过对故障暂态量进行 0、1 处理, 两端仅须传递逻辑值。而基于电流余弦相似度的纵联保护须传递大量非逻辑信号, 在以毫秒级时间尺度为考核标准的换流器故障耐受时间内, 不易满足实际工程通信容量可达性^[26]。

5 结语

文中在柔直输电系统直流侧故障特性分析的基础上, 提出一种基于杰卡德相似度一体化判据的柔直线路纵联保护方法。该方法利用杰卡德相似度理论结合电流变化率与电压 2 种故障暂态量来构建一体化判据实现故障类型判别, 无需保护启动元件并且能够同时完成故障极判定, 在通信时只传递 0、1 逻辑量, 通信量少。仿真结果表明, 文中所提保护能够可靠识别故障区段和故障极, 原理简单, 动作速度快, 易于实现。

参考文献:

- [1] 陈少宇, 黄文焘, 邵能灵, 等. 多端柔性直流配电网高频功率相关性纵联保护方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 150-159.
- CHEN Shaoyu, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Pilot protection method for multi-terminal flexible DC distribution network based on correlation of high-frequency power[J]. Autom-

- tion of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 150-159.
- [2] 蔡巍, 赵媛, 胡应宏, 等. 张北柔性直流电网变电站能耗装置系统仿真研究[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 212-220.
CAI Wei, ZHAO Yuan, HU Yinghong, et al. Simulation study on energy consumption device in power substation of Zhangbei flexible HVDC power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 212-220.
- [3] 姚宏洋, 文卫兵, 谢晔源, 等. ± 800 kV 柔性直流换流阀塔均压优化设计[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 178-184.
YAO Hongyang, WEN Weibing, XIE Yeyuan, et al. Optimization design of electric field distribution for ± 800 kV VSC valve[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 178-184.
- [4] 林湘宁, 胡仙清, 童宁, 等. 具备高灵敏性与速动性的柔性直流输电系统纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 130-139.
LIN Xiangning, HU Xianqing, TONG Ning, et al. A pilot protection scheme for an VSC-MTDC system with high sensitivity and rapidity[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 130-139.
- [5] 朱金涛, 辛业春. 柔性高压直流输电仿真技术研究方法综述[J]. 智慧电力, 2021, 49(3): 1-11, 94.
ZHU Jintao, XIN Yechun. Review of research on simulation methods of VSC-HVDC transmission system[J]. Smart Power, 2021, 49(3): 1-11, 94.
- [6] 唐溢, 李保宏, 曾蕊, 等. 柔性直流对交流系统短路电流影响因素分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 40-47.
TANG Yi, LI Baohong, ZENG Rui, et al. Influence of VSC-HVDC on short-circuit current of AC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 40-47.
- [7] 张群, 赵倩, 郝俊芳, 等. 基于直流断路器的柔性直流电网架空线路故障隔离策略研究[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 17-22.
ZHANG Qun, ZHAO Qian, HAO Junfang, et al. Study on fault isolation strategy of overhead transmission line based on DC circuit breaker in flexible DC grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 17-22.
- [8] 年珩, 孔亮. 直流微电网故障保护技术研究综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2241-2254.
NIAN Heng, KONG Liang. Review on fault protection technologies of DC microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2241-2254.
- [9] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于半桥型 MMC 的柔性直流电网故障限流方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 175-186.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Review of the fault current limiting approaches for a flexible DC grid based on a half-bridge MMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 175-186.
- [10] 宁连营, 邵能灵, 郑晓冬, 等. 基于单端暂态电流的 MMC-HVDC 输电线路保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5010-5017, 5220.
NING Lianying, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Research on MMC-HVDC transmission line protection scheme based on one terminal transient current[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5010-5017, 5220.
- [11] 上官鑫, 秦文萍, 夏福良, 等. 基于暂态电压 Pearson 相关性的 MMC 多端柔性直流配电网单极接地故障保护方案[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1740-1749.
SHANGGUAN Xin, QIN Wenping, XIA Fuliang, et al. Pole-to-ground fault protection scheme for MMC multi-terminal flexible DC distribution network based on Pearson correlation of transient voltage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1740-1749.
- [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, 6016.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, 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, 6016.
- [13] HALEEM N M, RAJAPAKSE A D. Fault-type discrimination in HVDC transmission lines using rate of change of local currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 117-129.
- [14] 宁连营, 邵能灵, 郑晓冬, 等. 基于自定义差分电流的 MMC-HVDC 输电线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 87-93, 133.
NING Lianying, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Pilot protection for MMC-HVDC transmission line based on custom difference current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 87-93, 133.
- [15] 郑俊超, 文明浩, 秦瑜, 等. 具备故障选极能力的高压直流输电线路差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4350-4358, 4635.
ZHENG Junchao, WEN Minghao, QIN Yu, et al. A novel differential protection scheme with fault line selection capability for HVDC transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4350-4358, 4635.
- [16] 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.
- [17] 高飘, 郑晓冬, 晁晨翔, 等. 基于边界暂态能量的多端柔性直流输电线路保护[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17): 171-179.
GAO Piao, ZHENG Xiaodong, CHAO Chenxu, et al. Protection for multi-terminal flexible DC transmission lines based on boundary transient energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 171-179.
- [18] 刘海金, 李斌, 温伟杰, 等. 柔性直流系统的线路保护关键技术及展望[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3463-3480.

- LIU Haijin, LI Bin, WEN Weijie, et al. Review and prospect on transmission line protection in flexible DC system[J]. Power System Technology, 2021, 45(9):3463-3480.
- [19] 宋国兵, 侯俊杰, 郭冰. 基于主动探测式的柔性直流电网纵联保护[J]. 电网技术, 2020, 44(10):4001-4010.
- SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing. Pilot protection of flexible DC grid based on active detection[J]. Power System Technology, 2020, 44(10):4001-4010.
- [20] 张大海, 武传健, 和敬涵, 等. 利用测量波阻抗欧几里得距离的柔性直流输电线路后备保护方案[J]. 电网技术, 2021, 45(10):3895-3906.
- ZHANG Dahai, WU Chuanjian, HE Jinghan, et al. Backup protection scheme for flexible DC transmission lines by measuring wave impedance euclidean distance[J]. Power System Technology, 2021, 45(10):3895-3906.
- [21] XIANG W, YANG S Z, XU L, et al. A transient voltage-based DC fault line protection scheme for MMC-based DC grid embedding DC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1):334-345.
- [22] ZHANG Y, TAI N L, XU B. Fault analysis and traveling-wave protection scheme for bipolar HVDC lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3):1583-1591.
- [23] 钱斌, 蔡梓文, 肖勇, 等. 基于模糊推理的计量自动化系统网络安全态势感知[J]. 南方电网技术, 2019, 13(2):51-58.
- QIAN Bin, CAI Ziwen, XIAO Yong, et al. Fuzzy inference based cyber security situation awareness of advanced metering system[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(2):51-58.
- [24] 冯艳红, 于红, 孙庚, 等. 基于非对称多值特征杰卡德系数的高维语义向量差异性度量方法[J]. 计算机科学, 2018, 45(6):57-66.
- FENG Yanhong, YU Hong, SUN Geng, et al. Diversity measures method in high-dimensional semantic vector based on asymmetric multi-valued feature jaccard coefficient[J]. Computer Science, 2018, 45(6):57-66.
- [25] 范九伦, 张雷, 刘颖, 等. 融合巴氏系数和杰卡德系数的图像相似度算法[J]. 西安邮电大学学报, 2020, 25(5):39-44.
- FAN Jiulun, ZHANG Lei, LIU Ying, et al. Integrating Bhattacharyya coefficient and Jaccard coefficient for image similarity measure[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2020, 25(5):39-44.
- [26] 魏霖, 童宁, 林湘宁, 等. 面向多端直流电网的高可靠性允许式纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(S1):95-108.
- WEI Lin, TONG Ning, LIN Xiangning, et al. VSC-MTDC oriented high reliable permissive pilot protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1):95-108.

作者简介:



李振兴

李振兴(1977),男,博士,教授,研究方向为电力系统与安全稳定控制(E-mail:lxz2007-001@163.com);

余双喜(1995),男,硕士在读,研究方向为电力系统与安全稳定控制;

徐浩(1995),男,硕士,从事电力系统与安全稳定控制工作。

Pilot protection of flexible DC line based on Jaccard similarity integration criterion

LI Zhenxing^{1,2}, SHE Shuangxi², XU Hao³, CUI Xiaolin², LI Zhenhua^{1,2}, ZHANG Mengmeng²

(1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. EHV Company of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430050, China)

Abstract: The flexible DC line protection based on the double-ended method with large communication and long action time is greatly affected by factors such as noise, which makes it difficult to set. Based on this, a pilot protection method of flexible DC line based on Jaccard similarity integration criterion is proposed. Firstly, the fault characteristics of voltage and current change rate in the case of internal and external faults of flexible DC lines are analyzed, and the conversion relationship between analog quantities and logical quantities is constructed respectively. Then a Jaccard similarity model based on the comparison of logical quantities under the 0.5 ms data window is proposed. The integrated criterion is constructed with high similarity to realize fault type identification, and fault starting and fault pole selection criteria are not required. Finally, the double-ended longitudinal protection scheme based on the comparison of logical quantities realizes the rapid protection of the flexible DC line. The scheme is easy to be implemented, because the protection principle of that is simple with fast action speed. Using the four-terminal flexible straight model built by PSCAD/EMTDC, the protection effectiveness in various scenarios such as different fault types, high-resistance grounding, and noise interference inside and outside the zone were verified.

Keywords: four-terminal flexible DC transmission system; flexible DC line; Jaccard similarity; integration criterion; pilot protection; fault type identification

(编辑 方晶)