

基于 PCA 聚类方法的 ± 800 kV 直流输电线路 全线速动保护

束洪春, 田鑫萃

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051)

摘要: 提出一种基于主成分分析(PCA)聚类的直流线路全线速动保护,其结合保护安装处测点所获取的极线电流,基于 PCA 聚类来判断短路故障发生的方向,如果是正向故障,则继续采用 PCA 聚类来甄别是正向区内还是正向区外故障。仿真结果和实测数据表明,所提保护适应于不同的高压直流输电系统,具有抗雷击干扰和抗谐波干扰的能力。

关键词: 电力系统保护; 高压直流输电; 故障方向; 方向元件; 全线速动; 主成分分析; 聚类

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.01.008

0 引言

现行 SIMENS 直流输电线路行波主保护和低电压保护基于线路单端信息,往往难以检测并反应高阻接地故障^[1-3]。而作为检测并反应高阻故障的后备保护,纵联差动保护受控制系统的影响较大,往往起不到后备保护的作用。这是因为 SIMENS 的纵联保护为避免直流系统谐波、采样值抖动等因素影响,为交流系统故障清除设置出口延时 500 ms,为避开功率调整期间误判误响应,设置了闭锁逻辑,纵差被闭锁 600 ms,这样,最长纵差响应时间可能达 1.1 s,故 SIMENS 的纵联保护往往起不到后备保护作用^[3-7]。直流线路的实际运行经验亦表明,以电压变化率 du/dt 为核心判据的行波保护由于采样的离散性,对于线路的非高阻故障,可能达不到整定值而拒动。

现行的直流线路保护是在大量 RDTs 仿真的基础上结合同类工程经验整定保护定值的,当直流输电系统结构参数、系统运行工况、保护装置硬件条件、数采通道偏置等发生改变时,需重新整定保护定值。可见,通过解析方法求取保护特征量变化规律及整定值的保护,往往很难对所有可能的故障均可靠动作。

直流输电线路保护必须计及控制系统动态响应时间约束。直流线路短路故障方向的识别和正向区内与正向区外故障的识别命题,可作为模式识别问题,是需要识别极线量测端的故障电流波形曲线簇所隐藏的模式,而主成分分析(PCA)聚类正是一种发现数据模式和结构很实用的聚类方法,一般事先不做标记,即在没有训练目标的情况下,根据数据内在特点,将数据划分为若干簇,每一簇就是一个模式。因此,PCA 更适用于解决复杂的不同属性的分类

问题,不存在人工神经网络(ANN)中传递函数、隐含层节点数以及支持向量机(SVM)中核函数的选取等问题。此外,PCA 聚类可看作是提取一批时域瞬态波形曲线总体特征的方法,显著区别于诸如小波变换、S 变换等算法,其只是对单条故障数据进行处理。

本文提出一种基于 PCA 聚类的直流线路全线速动保护,其本质是根据保护安装处测点所获取的极线电流瞬态曲线,基于 PCA 聚类来判断短路故障发生的方向,如果是正向故障,则继续基于 PCA 聚类来甄别是正向区内还是正向区外故障。实际故障数据验证表明,本文方法抗干扰能力强,对山火故障有效,且适用于不同电压等级的高压直流输电线路。此外,若将历史故障数据作为新样本数据复用添加至元件 PCA₁ 和元件 PCA₂ 的聚类点簇,则可进一步完善该直流输电线路全线速动保护性能。

1 直流系统故障下极线电流电压变化方向

现以云广 ± 800 kV 特高压直流输电系统作为分析和仿真模型,如图 1 所示。

图 1 中, M_{inN} 为换流站中性母线电压量测端; M_{m1} 为接地极线路 l_1 电流量测端, M_{m2} 为接地极线路 l_2 电流量测端。 ± 800 kV 直流输电整流侧和逆变侧的交流侧无功补偿容量分别为 3000 和 3040 Mvar,每极换流单元由 2 个 12 脉冲换流器串联组成,直流输电线路全长 1500 km。线路两侧装有 400 mH 的平波电抗器,直流滤波器为 12/24/36 三调谐滤波器,整流侧接地极线路全长为 109 km,逆变侧接地极线路全长 80 km。直流输电线路为 6 分裂线路,分裂间距 0.45 m。当两侧交流系统中的电压波动不大时,整流侧采用定电流控制,逆变侧采用定熄弧角控制。为了快速、精确地调节工程,一般整流侧采用定电流控制(或定功率控制),逆变侧采用定直流电压控制。

现假设正极线路发生接地故障,其故障分量网络

收稿日期:2015-08-19;修回日期:2015-12-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1202233,51267009)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(U1202233,51267009)

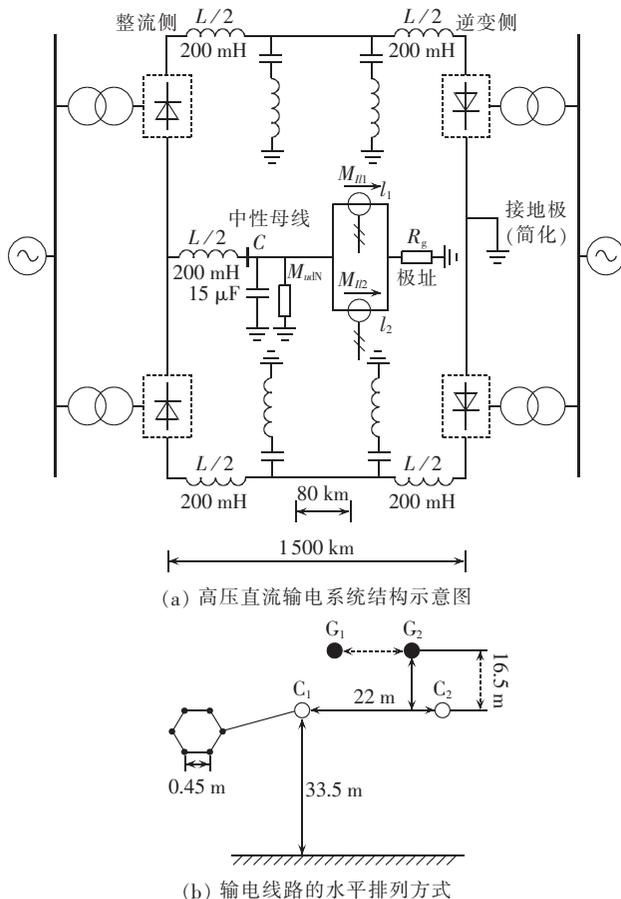


图 1 特高压直流输电系统

Fig.1 UHVDC transmission system

如图 2 所示。图中, M 、 N 分别为整流侧、逆变侧端子, M 、 N 之间是直流线路保护的的范围。将整流侧 M 和逆变侧 N 的电压、电流的故障分量分别记为 Δu_{M+} 、 Δi_{M+} 和 Δu_{N+} 、 Δi_{N+} 。

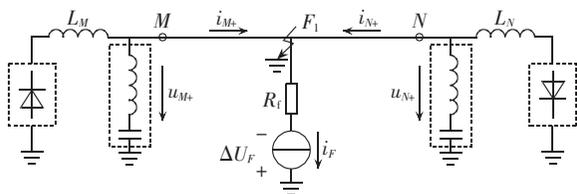


图 2 特高压直流线路故障分量网络

Fig.2 Fault component network of UHVDC transmission line

当输电线路发生接地故障时(如图 2 中 F_1 处), 原两侧电压降低^[8-10]。对于整流侧, 换流器的桥阀将继续导通, 阻抗减少, 电流增大; 对于逆变侧, 换流器的桥阀不能突然改变导通方向, 这相当于失去了电源, 而阻抗并未变化, 因此其电流也相应减小。则由图 2 可知, 线路故障瞬间, 线路两侧量测端电压、电流故障分量满足:

$$\Delta u_{M+} < 0, \Delta u_{N+} < 0, \Delta i_{M+} > 0, \Delta i_{N+} > 0 \quad (1)$$

同理, 当直流线路发生反向故障时, 故障分量网络如图 3 所示。

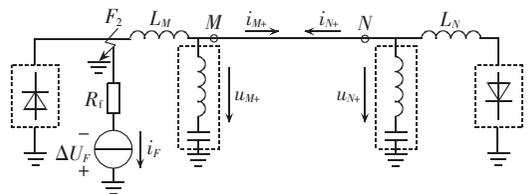


图 3 反向故障分量网络

Fig.3 Reverse fault component network of UHVDC transmission line

对于线路保护安装处反向故障 F_2 , 由于换流器导通方向不能突变, 两端的电流幅值均减小, 则故障瞬间线路两侧量测端电压、电流故障分量满足:

$$\Delta u_{M+} < 0, \Delta u_{N+} < 0, \Delta i_{M+} < 0, \Delta i_{N+} > 0 \quad (2)$$

同理, 当直流线路发生正向区外故障时, 故障分量网络如图 4 所示。

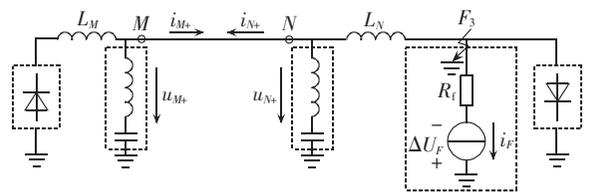


图 4 正向区外故障分量网络

Fig.4 Component network of forward out-zone fault

同理, 可得对于正向区外 F_3 故障, 故障瞬间线路两侧量测端电压、电流故障分量满足:

$$\Delta u_{M+} < 0, \Delta u_{N+} < 0, \Delta i_{M+} > 0, \Delta i_{N+} < 0 \quad (3)$$

可知, 功率正送方式下, 高压直流输电线路有功潮流方向始终由整流侧指向逆变侧, 且无故障角和母线上还有其他出线等问题, 故障电流波形起始变化方向自然地具有方向性, 能唯一反映故障方向。

2 正向故障和反向故障识别元件

以图 1 所示的仿真系统为例, 采样率采用 6.4 kHz, 对于保护安装处极线端部 M 而言, 假设正向区内发生金属性接地故障, 沿线路 MN 全长由近至远, 共设置 300 个故障位置, 步长取 5 km; 正向区外故障计及逆变侧出口故障和逆变侧交流系统故障, 正向区外设置 6 个故障; 反向故障计及整流侧出口故障和整流侧交流系统故障, 反向区外设置 6 个故障, 应用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真程序, 获取 300 条正向区内故障电流样本数据曲线, 获取 6 条正向区外、6 条反向区外和 6 条反向故障电流样本数据曲线, 如图 5 所示。采用式(4)将这些故障电流样本曲线簇做均值为 0、方差为 1 的归一化处理。

$$y(k) = \frac{x(k) - \mu}{\sigma} \quad (4)$$

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(k)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[x(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(k) \right]^2}$$

其中, μ 为信号 $x(k)$ 的均值; σ 为信号 $x(k)$ 的标准差; N 为采样点数。

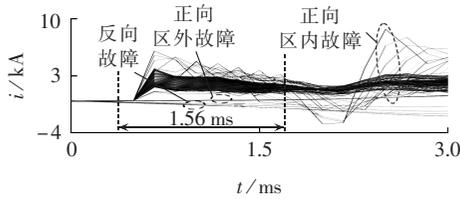


图 5 正向、反向故障下正极线量测端故障电流曲线簇

Fig.5 Curve cluster of fault current measured at positive polar line under forward and reverse conditions

由图 5 可知,当发生正向故障和反向故障时,于量测端观测到故障电流的变化方向不同。以下采用 PCA 聚类提取这些故障电流的变化方向的特征。在经归一化处理后的样本数据曲线簇中,现在时窗长 1.56 ms 内,选取其故障前 2 个采样点、故障后 8 个采样点的 312 条样本数据进行 PCA 聚类,可得正极线在正向、反向故障下正极线量测端电流曲线簇聚类空间 PCA_1 ,如图 6 所示。

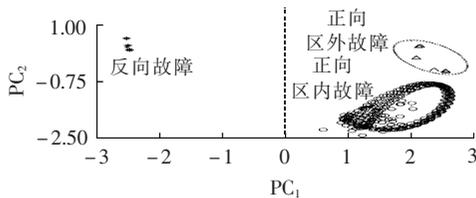


图 6 聚类空间 PCA_1

Fig.6 Clustering space PCA_1

由图 6 可知,相对于正极线起端保护安装处测点而言,当发生正向故障时,其故障电流曲线在 PCA_1 的 PC_1 轴上投影值 $q_1 > 0$;当发生反向故障时其故障电流曲线在 PCA_1 的 PC_1 轴上的投影值 $q_1 < 0$ 。

由此,基于正极线起端测点故障电流的故障方向识别元件 PCA_1 的判别式为:

$$\text{若 } q_1 \geq 0, \text{ 则为正向故障} \quad (5)$$

$$\text{若 } q_1 < 0, \text{ 则为反向故障} \quad (6)$$

同样,由图 1 所示的直流输电系统经仿真可获得负极线量测端正向故障和反向故障下的故障电流曲线簇,如图 7 所示。将此瞬态电流曲线簇做均值为 0、方差为 1 的归一化处理,并选其故障之前 2 个采样点、故障之后 8 个采样点的 312 条样本数据进行 PCA 聚类,可获得负极线的正、反向故障下负极线量测端电流曲线簇聚类空间 PCA_{1n} 如图 8 所示。

由图 8 可知,相对于负极线路量测端而言,当发生正向故障时,其故障电流曲线在 PC_1 轴上的投影 $q_1 < 0$;当发生反向故障时,其故障电流曲线在 PC_1 轴上的投影 $q_1 > 0$ 。

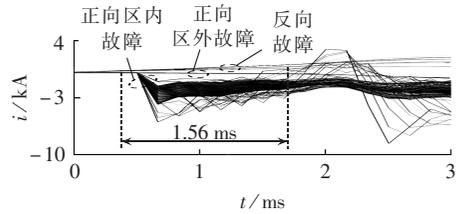


图 7 正、反向故障下负极线量测端故障电流曲线簇

Fig.7 Curve cluster of fault current measured at negative polar line under forward and reverse conditions

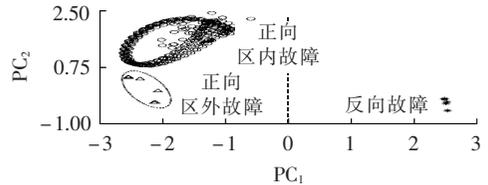


图 8 聚类空间 PCA_{1n}

Fig.8 Clustering space PCA_{1n}

同理,基于负极线起端测点故障电流的故障方向识别元件 PCA_{1n} 的判别式为:

$$\text{若 } q_1 \leq 0, \text{ 则为正向故障} \quad (7)$$

$$\text{若 } q_1 > 0, \text{ 则为反向故障} \quad (8)$$

若将图 7 所示的负极线测点故障电流曲线簇乘以 -1 ,它即与图 5 所示的正极线测点的故障电流曲线簇相同。因此负极线基于 PCA 聚类的方向元件配置可以采用正极线的方向元件 (PCA_1),只是需要将负极线的故障电流乘以 -1 后作为 PCA_1 程序的输入,投影至 PCA_1 空间获取 PC_1 上的 q_1 值,再应用式 (5) 和式 (6) 进行短路故障方向判断。

3 正向区内和正向区外故障识别元件

±800 kV 和 ±500 kV 直流输电线路两端由平波电抗器和直流滤波器构成的电气边界,阻抗-频率特性基本一致,具有高频阻塞作用。一般地,由于高压直流输电线路两端实体电气边界的存在,使得直流线路区外故障下电流的高频成分衰减严重,其极线起端测点故障电流波形起始阶段变化平缓、幅值小,靠近 0 轴;而当直流线路区内故障时,其故障电流没有经过平波电抗器和直流滤波器的滤波作用,高频分量衰减不大,其极线起端测点故障电流波形较线路外部故障下的起始阶段曲线变化陡峭、幅值大,远离 0 轴。可见,正向区内故障和正向区外故障下故障极线电流波形特征存在较大差别,且与直流系统电压等级、送电距离等的关系甚小。故可利用一组正向区内和正向区外故障下的极线故障电流样本数据进行 PCA 聚类,建立对正向区内和正向区外故障电流波形样本进行刻画、分类和辨识的故障识别元件 PCA_2 。

同样,取用上述 300 条正极正向区内故障和 6 条正向区外故障的正极线起端测点故障电流样本数

据曲线,如图 9 所示,将其正极线故障电流曲线簇进行均值为 0、方差为 1 的归一化处理,并选其故障之前 2 个采样点、故障之后 8 个采样点的数据作为样本数据进行 PCA 聚类,可得正向区内和区外故障下正极线量测端电流曲线簇的聚类空间 PCA_2 见图 10。

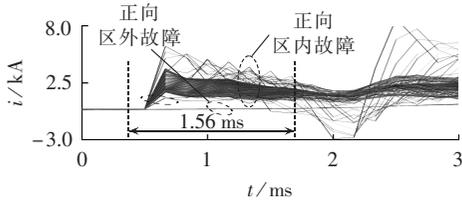


图 9 正向区内、区外故障下正极线路量测端电流曲线簇

Fig.9 Curve cluster of fault current measured at positive polar line under in-zone and out-zone fault

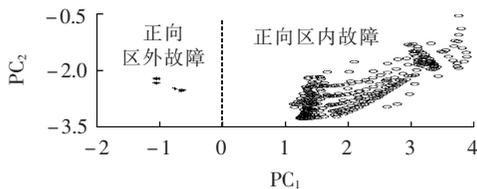


图 10 聚类空间 PCA_2

Fig.10 Clustering space PCA_2

由图 10 可知,对于正向区内故障,其极线起端测点故障电流在 PCA_2 空间 PC_1 坐标轴上的投影值 q_1 为正;而对于正向区外故障,其故障电流在 PC_1 坐标轴上的投影值 q_1 为负。由此,得到正极线路正向区内、外故障方向识别元件 PCA_2 的判据为:

$$\text{若 } q_1 > 0, \text{ 则为正向区内故障} \quad (9)$$

$$\text{若 } q_1 \leq 0, \text{ 则为正向区外故障} \quad (10)$$

同样,取用 300 条上述负极正向区内故障和 6 条正向区外故障的负极线起端测点故障电流样本数据曲线,见图 11。将其负极线故障电流曲线簇进行均值为 0、方差为 1 的归一化处理,并选其故障之前 2 个采样点、故障之后 8 个采样点的数据作为样本数据进行 PCA 聚类,可得正向区内和区外故障下负极线量测端电流曲线簇的 PCA 聚类空间,见图 12。

同理,可得到负极线量测端正向区内与区外故

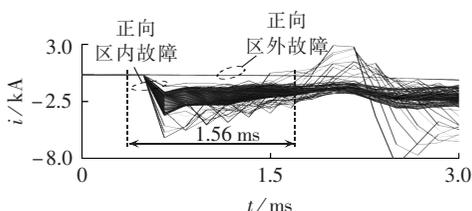


图 11 正向区内、区外故障下负极线路量测端电流曲线簇

Fig.11 Curve cluster of fault current measured at negative polar line under in-zone and out-zone fault

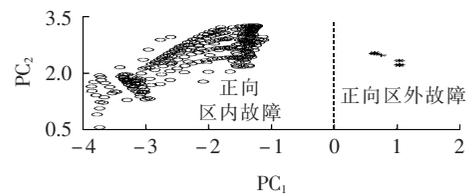


图 12 聚类空间 PCA_2

Fig.12 Clustering space PCA_2

障的判据为:

$$\text{若 } q_1 < 0, \text{ 则为正向区内故障} \quad (11)$$

$$\text{若 } q_1 \geq 0, \text{ 则为正向区外故障} \quad (12)$$

由图 9 和图 11 可知,当负极发生故障时,将负极线起端测点瞬态电流故障分量曲线簇乘以 -1 ,并进行 PCA 聚类,同样可根据式(9)和(10)来判断故障是否位于正向区内。即将正极线路故障全线速动元件 ($PCA_4 = PCA_1 + PCA_2$) 配置到负极线路,同样可实现负极线路全线速动保护,只是其输入为负极线量测端故障电流分量乘以 -1 的波形数据。

由此可见,可由故障方向识别元件 PCA_1 和正向区内、外故障识别元件 PCA_2 构建直流线路全线速动保护,且适用于不同电压等级的直流线路。至此,基于极线电流 PCA 聚类的直流线路全线速动保护算法主要步骤如下。

a. 采用 PSCAD/EMTDC 建立一组覆盖线路全长、整流侧和逆变侧系统的故障样本数据,并作均值为 0、方差为 1 的归一化处理,建立短路故障方向识别元件 PCA_1 聚类空间和正向区内、外故障识别元件 PCA_2 聚类空间。

b. 故障启动元件 du/dt 启动后,选取极线起端测点故障前 2 个采样点、故障后 8 个采样点的故障电流数据作为一条样本数据投影至 PCA_1 ,聚类获取其在 PCA_1 空间 PC_1 轴上的投影 $q_{1,1}$,以及在 PCA_2 空间 PC_1 轴上的投影 $q_{1,2}$ 。

c. 正向故障和反向故障识别:若 $q_{1,1} \geq 0$,则为正向故障,转到步骤 **d**;若 $q_{1,1} < 0$,则为反向故障,直流线路全线速动保护复位。

d. 正向区内和正向区外故障识别:若 $q_{1,2} \geq 0$,则为正向区内故障,全线速动保护出口;若 $q_{1,2} < 0$,则为正向区外故障,且全线速动保护复位。

4 保护算法的验证

4.1 仿真数据验证

4.1.1 线路雷击闪络与非雷击短路故障

仿真系统如图 1 所示,现避开仿真数据样本集进行测试,每次用 1 条某种原因的故障数据记录对 PCA_1 和 PCA_2 进行测试,基于投影值 $q_{1,1}$ 进行正极线路故障方向判别,以及基于投影值 $q_{1,2}$ 进行正极线路

正向区内、外故障识别,结果如表 1 和图 13 所示;负极线路故障判断结果如表 2 和图 13 所示。文中对直流线路雷电反击故障(雷电流取 120 kA)、雷电绕击故障(雷电流取 40 kA),以及雷击未发生闪络故障(即雷击干扰)分别进行仿真试验。

由图 13、表 1 和表 2 可知,PCA₁ 能可靠识别短路故障发生的方向元件,PCA₂ 能可靠辨识正向区内和正向区外故障,从而 PCA₁+PCA₂ 可实现直流线路全线速动保护功能。

4.1.2 高阻故障

现行的直流行波保护往往很难响应高阻故障,为了验证该方法对高阻故障的响应情况,采用如图 1 所示的仿真系统,线模波阻抗 $Z_c=238 \Omega$,过渡电阻设为 300Ω ,在不同故障位置下,用 1 条某种故障数据记录对 PCA₁ 和 PCA₂ 进行测试,测试结果如表 3 和图 14 所示。为了进行比较,高阻故障条件下,现行直流行波保护的動作结果亦列于表 4。

由表 3、表 4 和图 14 可知,当线路发生高阻故

障时,现行的行波保护往往会拒动,而采用 PCA₁ 和

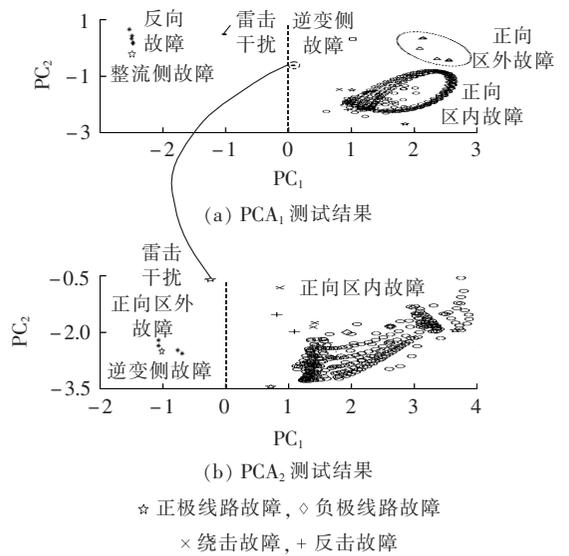


图 13 基于仿真数据的 PCA₁ 和 PCA₂ 进行测试的结果
Fig.13 Test results of PCA₁ and PCA₂ based on simulation data

表 1 正极线路 PCA₁ 和 PCA₂ 测试结果

Table 1 Test results of PCA₁ and PCA₂ for positive polar line

故障位置	过渡电阻/ Ω	$q_{1,1}$	$q_{1,2}$	判断结果	
				PCA ₁	PCA ₂
正极线路故障,距 M 端 120 km 处	50	1.8490	3.6451	正向故障	正向区内故障
正极线路故障,距 M 端 950 km 处	50	1.0060	0.7209	正向故障	正向区内故障
两极线路故障,距 M 端 654 km 处	50	0.9471	2.6137	正向故障	正向区内故障
正极线路整流侧出口故障	10	-2.4830	—	反向故障	—
逆变侧交流系统侧 A 相接地故障	10	1.0179	-1.0050	正向故障	正向区外故障
距离 M 端 120 km 雷电反击故障	—	0.9580	1.0989	正向故障	正向区内故障
距离 M 端 680 km 雷电反击故障	—	1.1222	1.6103	正向故障	正向区内故障
距离 M 端 1200 km 雷电反击故障	—	0.8046	0.8202	正向故障	正向区内故障
距离 M 端 120 km 雷电绕击故障	—	0.9326	1.4192	正向故障	正向区内故障
距离 M 端 680 km 雷电绕击故障	—	0.9515	1.3944	正向故障	正向区内故障
距离 M 端 1200 km 雷电绕击故障	—	0.8616	0.8599	正向故障	正向区内故障
距离 M 端 120 km 雷击避雷线未故障	—	0.0733	-0.2437	正向故障	正向区外故障
距离 M 端 120 km 雷击导线未故障	—	-1.0232	—	反向故障	—

表 2 负极线路 PCA₁ 和 PCA₂ 测试结果

Table 2 Test results of PCA₁ and PCA₂ for negative polar line

故障位置	过渡电阻/ Ω	$q_{1,1}$	$q_{1,2}$	判断结果	
				PCA ₁	PCA ₂
负极线路故障,距 M 端 750 km 处	50	1.4352	1.9257	正向故障	正向区内故障
负极线路故障,距 M 端 1399 km 处	50	1.2235	2.4552	正向故障	正向区内故障
两极线路故障,距 M 端 654 km 处	50	0.9471	2.6516	正向故障	正向区内故障
逆变侧交流系统 A 相接地故障	10	1.0179	-1.0005	正向故障	正向区外故障

表 3 线路高阻故障条件下 PCA₁ 和 PCA₂ 测试结果

Table 3 Test results of PCA₁ and PCA₂ under HIF fault condition

故障位置	过渡电阻/ Ω	$q_{1,1}$	$q_{1,2}$	判断结果	
				PCA ₁	PCA ₂
正极线路故障,距 M 端 120 km 处	300	1.6347	1.7092	正向故障	正向区内故障
正极线路故障,距 M 端 910 km 处	300	0.8546	0.3256	正向故障	正向区外故障
正极线路故障,距 M 端 1450 km 处	300	0.9693	0.2280	正向故障	正向区内故障
负极线路故障,距 M 端 654 km 处	300	1.0447	0.1497	正向故障	正向区内故障
负极线路故障,距 M 端 750 km 处	300	0.6488	0.3329	正向故障	正向区内故障
负极线路故障,距 M 端 1399 km 处	300	0.1133	0.4803	正向故障	正向区内故障

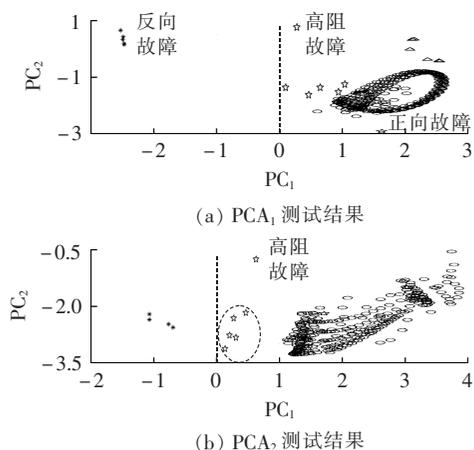


图 14 利用高阻故障条件下的仿真数据对 PCA₁ 和 PCA₂ 进行测试的结果

Fig.14 Test results of PCA₁ and PCA₂ based on simulation data under HIF fault condition

表 4 线路高阻故障条件下现行行波保护动作结果
Table 4 Operational results of traveling-wave protection under HIF fault condition

故障位置	过渡电阻/ Ω	现行行波保护判断结果	
		du/dt 最大值	保护动作结果
正极线路故障, 距 M 端 120 km 处	300	0.1844	动作
正极线路故障, 距 M 端 910 km 处	300	0.0856	拒动
正极线路故障, 距 M 端 1450 km 处	300	0.1028	拒动
负极线路故障, 距 M 端 654 km 处	300	0.0824	拒动
负极线路故障, 距 M 端 750 km 处	300	0.0874	拒动
负极线路故障, 距 M 端 1399 km 处	300	0.0904	拒动

PCA₂ 元件可以提高保护的可靠性。

4.2 实测故障数据的验证

a. 实例 1。

2014 年 3 月 30 日,某 ± 800 kV 直流线路发生极 I 闭锁。在故障发生前,直流线路双极大地方式运行,且双极功率为 2750 MW。当直流线路发生故障时,其保护动作过程为:在 14:31:33:883 时,极 I 中行波保护(WFPDL)动作启动直流线路故障恢复顺序,在 14:31:33:935 时,极 I 控制系统收到对站闭锁请求,极 I 闭锁。设定采样率为 6.4 kHz,该直流线路行波保护判据及定值如表 5 所示。

在表 5 中,保护定值均是以正常时候的电压为

表 5 高压直流线路行波保护判据及定值

Table 5 Criterion and setting value of traveling wave protection for HVDC line

保护名称	保护判据	动作延时/ms	动作结果
行波保护	$du/dt > 0.14$ p.u., $\Delta u > 0.3$ p.u., $\Delta i > 0.5$ p.u.	0	启动直流线路故障恢复顺序

基准求取的标么值。该直流线路保护采用 2 套完全冗余配置,2 套保护同时工作,并列运行,任一套保护动作均出口。

直流线路故障电压和电流波形如图 15 所示,现行的 2 套行波保护的動作结果(标么值)见图 16。

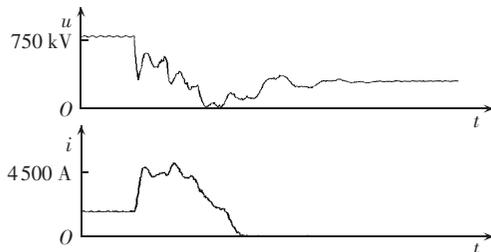
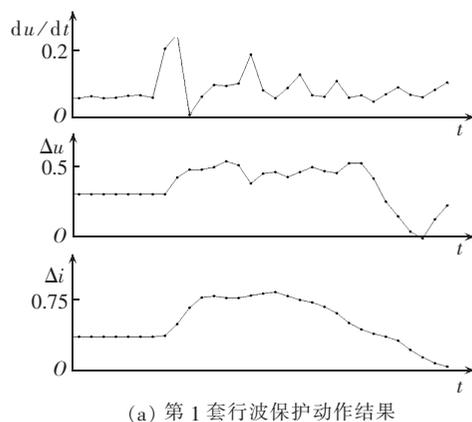
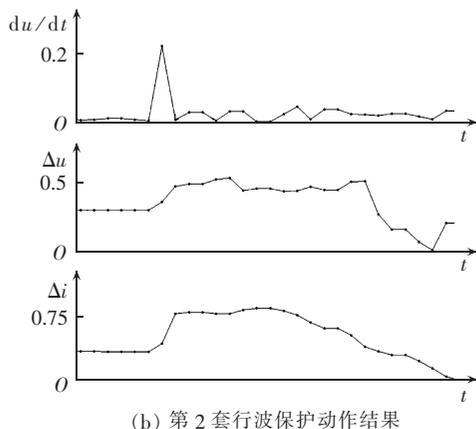


图 15 2014-03-30 高压直流线路故障时的电压和电流波形

Fig.15 Voltage and current waveforms of HVDC line fault on 30th, March, 2014



(a) 第 1 套行波保护动作结果



(b) 第 2 套行波保护动作结果

图 16 2014-03-30 高压直流线路故障时行波保护动作结果

Fig.16 Operational results of traveling-wave protection for HVDC line fault on 30th, March, 2014

由图 16(a)可知,极 I 中第 1 套保护装置的行波保护的結果为 $du/dt=0.13$ p.u., $\Delta u=0.432$ p.u., $\Delta i=0.809$ p.u.;由图 15(b)可知,极 I 中第 2 套保护装置的行波保护的結果为 $du/dt=0.249$ p.u., $\Delta u=0.465$ p.u., $\Delta i=0.834$ p.u.。由这些結果可知,极 I 中第 1 套保护的 du/dt 并未到达定值,而第 2 套保护的 du/dt

到达定值,行波保护正确动作。

b. 实例 2。

直流线路纵联差动保护判据^[11]为 $|I_{dl} - I_{dl,cs}| > 150 \text{ A}$ (I_{dl} 为整流侧电流, $I_{dl,cs}$ 为逆变侧电流), 动作延时为 500 ms, 动作结果为启动直流线路故障恢复顺序。2015 年 4 月 3 日, 某 ±500 kV 直流线路发生极 I 闭锁, 在故障发生前, 直流线路双极大地方式运行, 且双极功率为 3000 MW。当直流线路发生故障时, 保护动作过程为: 2015 年 4 月 3 日 15:13 极 I 直流线路纵差保护动作, 极 I 转为闭锁状态, 极 I 电压被设定为降压 350 kV。2015 年 4 月 3 日 15:17 极 II 直流线路纵差保护动作, 极 II 降压 -350 kV 重启成功。

直流线路故障电压和电流波形如图 17 所示, 行波保护中 du/dt (标么值) 计算结果如图 18 所示。

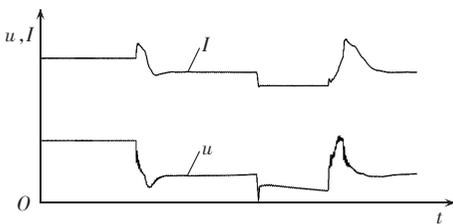


图 17 2015-04-03 直流线路故障下电压和电流波形
Fig.17 Voltage and current waveforms of HVDC line fault on 3rd, April, 2015

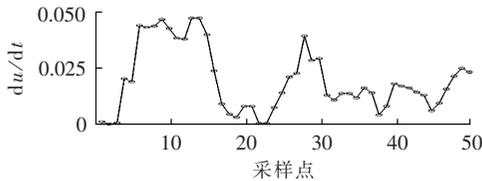


图 18 行波保护的 du/dt 波形

Fig.18 Waveform of du/dt in traveling wave protection

图 18 是通过计算每 2 个采样点的差值而得到的。由图 18 可知, 在连续的 5 个时间间隔差值中, $(du/dt)_{\max} = 0.025 \text{ p.u.}$, 没有到达行波保护的定值, 因此行波保护没有动作。

据人工巡线结果, 该故障是由山火引起的, 山火故障边界模型比较复杂, 通常呈非线性发展性, 此处的电压波形很平缓, 其 du/dt 远达不到整定值。

对于实例 1 和实例 2, 选其故障前 2 个采样点、故障后 8 个采样点的实测故障数据, 采用式(4)进行归一化处理, 投影至 PCA_1 元件和 PCA_2 元件。实例 1 和实例 2 故障数据在 PCA_1 聚类空间投影和在 PCA_2 聚类空间投影结果分别如图 19(a) 和 (b) 所示。

由图 19(a) 可知, 实例 1 故障电流数据在 PCA_1 空间 PC_1 轴上的投影值 $q_{1,1} = 2.38$, 根据式(7), 可判知为正向故障; 由图 19(b) 可知, 实例 1 故障电流数据在 PCA_2 空间 PC_1 轴上的投影值 $q_{1,2} = 2.02$, 由式(9)

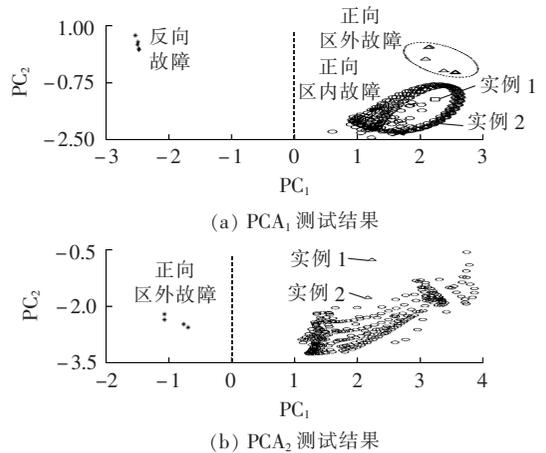


图 19 实测数据在 PCA_1 和 PCA_2 的投影

Fig.19 Projection of measured data on PCA_1 and PCA_2

可判知, 为正向区内故障。

同样, 实例 2 故障电流数据在 PCA_1 空间 PC_1 轴上的投影值 $q_{1,1} = 2.419$, 根据式(7), 可判知为正向故障; 其在 PCA_2 空间 PC_1 轴上的投影值 $q_{1,2} = 2.162$, 由式(9)可判知, 为正向区内故障。

c. 不同故障距离下的实测数据测试与分析。

某 ±800 kV 直流线路全长 1500 km, 正极线路发生接地故障, 故障位置分别为 8.8 km 处、634 km 处半线长之内靠近中点处、半线长之外 1084 km 处 (雷击故障)。为了与实测波形进行比较分析, 假设在相同位置发生金属性短路故障, 采用电磁暂态仿真程序获取对应的故障电流波形曲线 (其中仿真时半线长之外 1084 km 处发生反击闪络故障)。

现对实测故障电流数据和仿真对应位置的故障数据, 选取其故障前 2 个采样点、故障后 8 个采样点的故障电流样本数据, 进行归一化处理, 求取在 PCA_1 的投影见图 20(a), 在 PCA_2 的投影见图 20(b)。

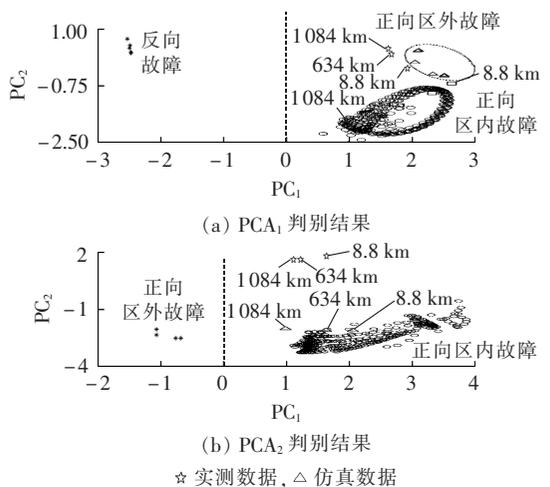


图 20 不同故障位置下故障数据在 PCA_1 和 PCA_2 的聚类结果

Fig.20 Clustering results of faulty data in PCA_1 and PCA_2 for different fault locations

由图 20 可知,相同的故障位置下,仿真故障电流波形与实测故障电流波形在 PC_1 上的投影值相差较小,而在 PC_2 上的投影值相差较大。这是由于实测故障电流受线路参数、控制系统和故障条件以及采样回路的影响,使得实测故障电流波形较为复杂,与仿真波形存在一定差异性。

d. 不同故障原因下的实测电流数据测试。

在 6.4 kHz 采样率下,实测高压直流输电线路的山火故障、雷击故障和普通短路下极线电流波形差别也较大,如图 21 所示。

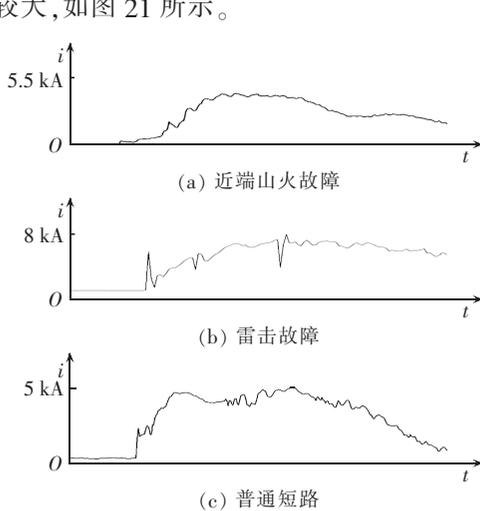


图 21 不同故障下的故障电流波形

Fig.21 Faulty currents of different faults

实测的山火故障、雷击故障和普通短路下极线故障电流波形在 PCA_1 和 PCA_2 投影如图 22 所示。由这些实际故障实测数据测试实例可知,对于山火故障,该保护也能正确动作。实际线路故障很复杂,如山火故障、电弧型故障等,较难计及实际环境作用建立诸如山火故障、电弧型故障非线性时变故障边界的理论仿真模型,由仿真获取此种故障数据。现采用多条实际直流线路实际故障实测数据对全线速动保护进行验证,测试的结果如表 6 所示。

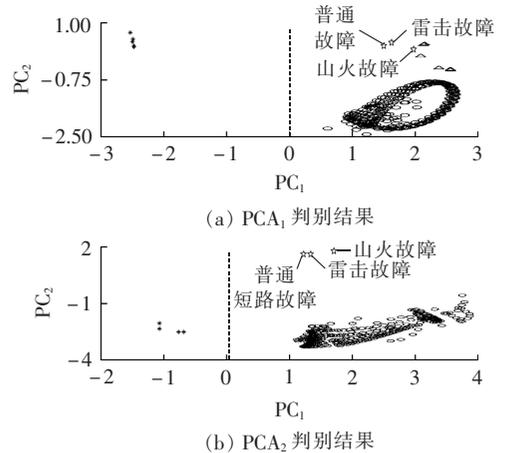


图 22 不同故障下的实测故障数据在 PCA_1 和 PCA_2 的聚类结果

Fig.22 Clustering results of fault data in PCA_1 and PCA_2 for different faults

表 6 实际故障下 PCA_1 和 PCA_2 的测试结果

Table 6 Test results of PCA_1 and PCA_2 for actual faults

故障日期	电压等级/kV	故障原因	$q_{1.1}$	$q_{1.2}$	判断结果	
					PCA_1	PCA_2
2014-03-30	±800	正极普通短路	2.3800	2.2300	正向故障	正向区外故障
2015-04-03	±500	正极山火故障	2.4190	2.1620	正向故障	正向区外故障
2014-03-19	±800	负极巨型山火故障	2.5811	1.9353	正向故障	正向区外故障
2015-04-07	±800	雷击故障	1.6939	1.7321	正向故障	正向区外故障
2014-01-24	±500	普通故障	2.3527	1.8051	正向故障	正向区外故障
2014-01-23	±500	普通故障	0.9705	2.5672	正向故障	正向区外故障
2015-04-28	±500	普通故障	1.9632	2.1987	正向故障	正向区外故障
2013-04-02	±500	山火故障	1.6614	0.1949	正向故障	正向区外故障
2015-04-13	±500	普通故障	2.0500	2.8457	正向故障	正向区外故障
2013-08-26	±500	普通故障	2.5777	2.8129	正向故障	正向区外故障

由表 6 可知,本文提出的全线速动保护对于山火故障、雷击故障和普通短路故障均有效。

5 讨论与结论

现行的直流线路行波保护属于解析法,其本质是充分利用高压直流输电线路两端电气实体边界高频阻塞特性,根据线路在内、外部故障下极线端部测点故障电压波形和电流波形起始阶段变化率 du/dt 、 di/dt 和变化量 Δu 和 Δi 不同的特征解析构造行波保护动作方程。本文方法取故障发生之后、控制系统响应之前的 1.56 ms 时窗内故障电流数据进行

PCA 聚类分析,从这组故障样本数据中提取其总体特征。借助 PCA_1 和 PCA_2 元件,可实现直流线路 PCA 全线速动保护,其方法的电路原理实质是利用故障波形起始阶段整体的变化率和变化量。原理分析和实测故障数据测试表明,PCA 全线速动保护具有适应于不同高压直流输电系统和线路的特点;具有抗雷击干扰和抗谐波干扰的能力,具有一定的鲁棒性;与解析法保护原理不同,如果将大量实际故障数据进行复用,作为历史样本增加 PCA 聚类点,则尚可进一步完善直流输电线路 PCA 全线速动保护的性。

参考文献:

- [1] 束洪春,田鑫萃,张广斌,等. 800 kV 直流输电线路的极波暂态能量保护[J]. 中国电机工程学报,2011,31(22):96-104.
SHU Hongchun,TIAN Xincui,ZHANG Guangbin,et al. Protection for 800 kV HVDC transmission lines using pole wave transients[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(22):96-104.
- [2] 张保会,张嵩,尤敏,等. 高压直流线路单端暂态能量保护研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(15):18-23.
ZHANG Baohui,ZHANG Song,YOU Min,et al. Research on transient-based protection for HVDC lines[J]. Power System Protection and Control,2010,38(15):18-23.
- [3] 束洪春,安娜,董俊,等. 高压直流输电线路故障识别的分形算法[J]. 电力系统自动化,2012,36(12):49-54.
SHU Hongchun,AN Na,DONG Jun,et al. Fractal algorithm of faults identification for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(12):49-54.
- [4] 束洪春,田鑫萃,董俊,等. ± 800 kV 云广直流输电线路保护的仿真及分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(31):179-188.
SHU Hongchun,TIAN Xincui,DONG Jun,et al. Simulation and analyses for Yun-Guang ± 800 kV HVDC transmission line protection system[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(31):179-188.
- [5] 艾琳,陈为化. 高压直流输电线路行波保护判据的研究[J]. 继电器,2003,31(10):41-44.
AI Lin,CHEN Weihua. Research on traveling wave protection criterion on HVDC transmission lines[J]. Relay,2003,31(10):41-44.
- [6] 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.
- [7] 艾琳. 高压直流输电线路行波保护的研究[D]. 北京:华北电力大学,2002.
AI Lin. Research on theory of traveling wave protection of HVDC line[D]. Beijing:North China Electric Power University,2002.
- [8] 王钢,罗健斌,李海锋,等. 特高压直流输电线路暂态能量保护[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):28-31.
WANG Gang,LUO Jianbin,LI Haifeng,et al. Transient energy protection for UHVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power System,2010,34(1):28-31.
- [9] 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):1-5.
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):1-5.
- [10] 孔飞,张保会,王艳婷,等. 超高速直流输电线路保护方向元件[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):83-88.
KONG Fei,ZHANG Baohui,WANG Yanting,et al. Ultra-high-speed directional element of relay protection for HVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):83-88.
- [11] 张楠,陈潜,王海军,等. 直流线路纵差保护算法的改进及仿真验证[J]. 南方电网技术,2009,3(4):56-59.
ZHANG Nan,CHEN Qian,WANG Haijun,et al. Improvement and simulation validation of DC line longitudinal[J]. Southern Power System Technology,2009,3(4):56-59.
- [12] JAFARIAN P,SANAYE-PASAND M. A traveling-wave-based protection technique using wavelet/PCA analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(10):588-599.
- [13] VÁZQUEZ E,CASTRUITA J,CHACÓN O L. A new approach traveling-wave distance protection-part I:algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(2):795-800.
- [14] AGUILAR R,PÉREZ F,ORDUÑA E,et al. The directional feature of current transients application in high-speed transmission-line protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(2):1175-1182.
- [15] 王星. 大数据分析:方法和应用[M]. 北京:清华大学出版社.
- [16] 刘雪莉. 数据挖掘及其在小电流接地选线中的应用[D]. 北京:华北电力大学,2005.
LIU Xueli. Data mining and its application in fault line selection for non-effective grounded system[D]. Beijing:North China Electric Power University,2005.

作者简介:



束洪春

束洪春(1961—),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波、数字信号处理及 DSP 应用等方面的教研工作(E-mail: kmshe@sina.com.cn);

田鑫萃(1986—),女,云南保山人,博士研究生,研究方向为新型继电保护与故障测距。

Entire-line instant protection based on PCA clustering for ± 800 kV HVDC transmission line

SHU Hongchun,TIAN Xincui

(Department of Electrical Power Engineering,Kunming University of Science and Technology,Kunming 650051,China)

Abstract: An entire-line instant protection based on PCA (Principal Component Analysis) clustering is proposed for DC line, which identifies the short circuit fault direction based on PCA clustering according to the polar line current acquired by the measuring point at the installation location of protection. If the fault direction is forward, the PCA clustering is still used to detect if it is a forward in-zone or out-zone fault. Simulative results and measured data show that, the proposed protection can adapt to different HVDC systems and resist the lightning and harmonic disturbances.

Key words: electric power system protection; HVDC power transmission; fault direction; directional element; entire-line instant protection; principal component analysis; clustering