

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240650

基于暂态功率脉冲因子的柔性直流输电线路故障检测

曾志辉^{1,2}, 郑莹莹¹, 韦延方^{1,2}, 王晓卫³, 李佳音¹

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室, 河南 焦作 454003; 3. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710000)

摘要: 为解决直流电网故障电气量急剧变化对电网造成的不利影响, 利用限流电抗器的边界特性, 提出了一种基于暂态功率脉冲因子的柔性直流输电线路故障检测。首先, 利用故障后各电气量发生急剧变化的特点, 提出将 Savitzky-Golay 滤波与正负极保护测量点的功率变化率结合作为启动判据。其次, 建立发生不同故障时柔性直流电网的等效电路图, 推导出故障后直流线路上限流电抗器两端暂态功率大小特点, 利用脉冲因子提取功率变化量构成区内、外故障判据。最后, 计算正负极保护测量点 b 处功率的脉冲因子之比, 构建故障选极判据。仿真结果表明, 所提故障检测方法能准确识别故障类型, 且在不同工况下未出现误判情况, 对柔性直流电网故障检测具有一定的适应性。

关键词: 柔性直流电网; 暂态功率; Savitzky-Golay 滤波; 脉冲因子; 故障检测

Fault detection of flexible DC transmission lines based on transient power pulse factor

ZENG Zhihui^{1,2}, ZHENG Yingying¹, WEI Yanfang^{1,2}, WANG Xiaowei³, LI Jiayin¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Henan Provincial Key Laboratory of Intelligent Detection and Control of Coal Mine Equipment, Jiaozuo 454003, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: To address the adverse impacts on the grid caused by sharp changes in electrical quantities during DC grid faults, a transient power pulse factor-based fault detection for flexible DC transmission lines is proposed, using the boundary characteristics of a current limiting reactor. First, based on the characteristic of sharp changes in electrical quantities after a fault, a fault detection criterion is proposed that combines Savitzky-Golay filtering with the power change rate at the positive and negative protection measurement points. Second, an equivalent circuit diagram of the flexible DC grid is established for different fault types, and the transient power magnitude characteristics of the two ends of the upper current limiting reactor on the DC line after a fault are derived. The power change amount is extracted using the impulse factor to constitute fault detection criteria for internal and external faults. Finally, the ratio of the pulse factors of the power at the positive and negative protection measurement points is calculated to construct the fault selection criterion. Simulation results show that the proposed fault detection method can accurately identify the fault types, with no misjudgment in different operating conditions, demonstrating a certain adaptability for fault detection in flexible DC grids.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177114 and No. 61703144).

Key words: flexible DC grid; transient power; Savitzky-Golay filtering; pulse factor; fault detection

0 引言

随着分布式电力能源在电网中的广泛应用, 用户对电能质量的要求不断提高, 传统交流电网面临巨大的挑战^[1-4]。基于模块化多电平变换器(modular multilevel converter, MMC)因其具有开关损耗低、谐

波含量少以及易于实现高压大容量等显著技术优势, 在直流电网系统中展现出重要的应用潜力, 尤其在资源优化配置领域具有广阔的发展前景^[5-8]。但柔性直流电网也存在一些问题, 直流电网阻尼小, 故障电流上升速度快, 对系统造成危害极大^[9]。因此快速可靠识别故障对直流电网至关重要^[10]。

文献[11]基于边界元件特性, 验证了发生不同故障时电压行波在时域和频域上存在差异, 通过 S

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177114, 61703144)

变换加大故障特征的区分度以实现故障辨识。但该方法在特征信息提取时存在自适应能力不足的缺点。文献[12]利用故障电流的暂态特性提出了一种不依赖边界元件的反时限过流保护方案,该方案拓扑结构简单,在复杂直流电网中的应用有待研究。文献[13]提出一种基于变分模态分解与 Gath Geva 聚类结合的故障检测方法,该方法实验数据较少,且耐过渡电阻能力不高。文献[14]提出一种基于电压行波的保护方案,利用小波变换提取高频信号构造故障识别判据,但其易受噪声干扰且在识别高阻故障时需构造辅助判据。文献[15]利用 Teager 能量算子提取区内、外故障电压瞬时能量进行故障区域选择,该方案在速动性上有所改进,但未考虑不同限流电抗大小对保护方案的影响。文献[16]提出一种基于电压行波传播项指数系数差异的故障保护方法,该方法通过提取电压行波的传播项指数系数来区分区内、外故障,具有较强的抗过渡电阻能力,但未对高采样频率工况进行验证。文献[17]利用零模故障电流波前的拟合系数进行故障定位。而零模分量只存在于单极接地故障中,故该保护方案无法识别极间故障。文献[18]采用形态滤波对线模电压数据进行预处理,并计算其相似性进行故障识别,但该方案存在速动性不足的问题。文献[19]利用瞬态电流余弦相似度识别故障。该保护无法消除分布式电容电流,导致其在长线路应用中可能延长保护动作时间。文献[20]提出了一种基于单端限流电抗电压变化率的故障检测方法,但该方法求解时要处理较多高阶方程组,计算复杂。文献[21]利用限流电抗器电压幅值差异性进行故障检测,但在电感值较小时可能出现误判。

限流电抗器可有效限制系统故障电流上升,延迟故障电流上升至峰值的时间,以提高电网故障穿越及生存能力,同时限流电抗器作为一种天然的边界,为直流线路提供边界条件,使故障区域被更精准地识别,故通常在直流线路两侧安装限流电抗器^[22-23]。脉冲因子表示波峰的极端程度,其值越大表明信号变化越大,可以用来反映故障时电气量的变化特征^[24]。因此提出将限流电抗边界条件与脉冲因子结合对直流电网故障识别具有重要意义。

本文针对以上问题提出一种基于限流电抗功率脉冲因子的柔性直流输电线路故障检测方法,主要工作如下。

1) 首先建立发生不同故障时直流电网的等效模型,推导出区内、外故障时限流电抗两侧暂态功率具有明显差异。

2) 再对故障电气量进行 Savitzky-Golay 滤波,降低噪声干扰。计算保护测量点滤波后功率的脉冲因子,根据脉冲因子大小进行区内、外故障和故障极判别。

3) 保护方案在高阻 1500 Ω 下仍能识别故障类型,且在不同工况下,均可快速准确地识别故障,验证了所提方案的有效性与适用性。

1 直流输电线路故障特征分析

1.1 拓扑结构

以图 1 所示的±500 kV 柔性直流电网为例。MMC1—MMC4 为四端口换流站,AC1—AC4 为交流系统。为限制系统故障电流上升,在输电线路两端安装限流电抗器,即 L_{pa} 、 L_{pb} 、 L_{na} 、 L_{nb} 。a、b、c、d 分别为直流线路的保护测量点, f_1 — f_5 为设定的故障位置,其中 f_1 为区内正极接地故障、 f_2 为区内负极接地故障、 f_3 为区内极间故障、 f_4 为正向区外故障、 f_5 为反向区外故障。

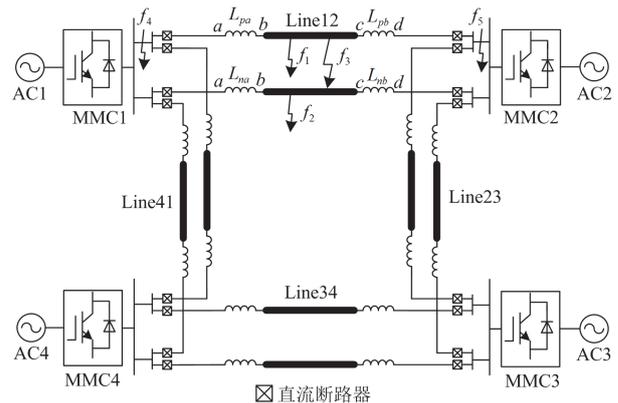


图 1 四端口柔性直流电网结构

Fig. 1 Structure of four-terminal flexible DC grid

1.2 区内、外故障特性分析

限流电抗器作为一种天然的边界,抑制故障电流的变化,因此故障时不同位置的电气量特征不同,由此构造区内、外故障判据。首先建立发生不同故障时直流电网的等效模型,如图 2—图 4 所示。图中: Z_1 、 Z_2 分别为换流站 MMC1、MMC2 的等效阻抗; Z_L 为限流电抗器的等效阻抗; Z_{l1} 、 Z_{l2} 分

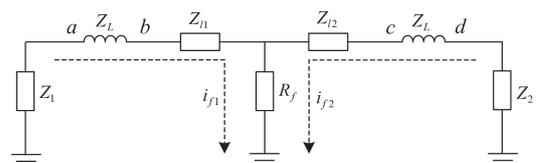


图 2 区内故障等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of an internal fault

别为故障点两侧直流线路的等效阻抗; R_f 为接地电阻; i_{f1} 、 i_{f2} 分别为流过 L_{pa} 、 L_{pb} 的故障电流。

由图 2 可知, 4 个保护测量点的功率分别为

$$\begin{cases} p_a = i_{f1}^2(Z_L + Z_{l1}) + R_f(i_{f1} + i_{f2})^2 \\ p_b = i_{f1}^2 Z_{l1} + R_f(i_{f1} + i_{f2})^2 \\ p_c = i_{f2}^2 Z_{l2} + R_f(i_{f1} + i_{f2})^2 \\ p_d = i_{f2}^2(Z_L + Z_{l2}) + R_f(i_{f1} + i_{f2})^2 \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可得, 在区内故障时, 保护测量点暂态功率满足 $p_a > p_b$, $p_d > p_c$, 此时 p_b 、 p_c 变化最明显。

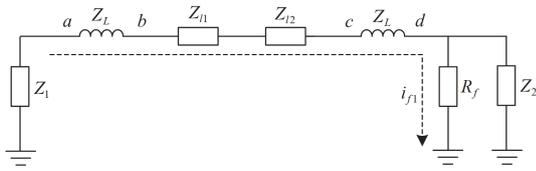


图 3 正向区外故障等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of a positive external fault

由图 3 可知, 4 个保护测量点的功率分别为

$$\begin{cases} p_a = i_{f1}^2(Z_L + Z_{l1} + Z_{l2} + Z_L + R_f) \\ p_b = i_{f1}^2(Z_{l1} + Z_{l2} + Z_L + R_f) \\ p_c = i_{f1}^2(Z_L + R_f) \\ p_d = i_{f1}^2 R_f \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可得, 在正向区外故障时, 保护测量点暂态功率满足 $p_a > p_b > p_c > p_d$, 此时 p_d 变化最明显。

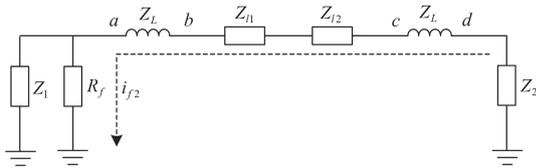


图 4 反向区外故障等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of a reverse external fault

由图 4 可知, 4 个保护测量点的功率分别为

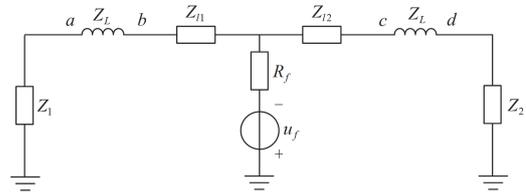
$$\begin{cases} p_a = i_{f2}^2 R_f \\ p_b = i_{f2}^2(Z_L + R_f) \\ p_c = i_{f2}^2(Z_{l1} + Z_{l2} + Z_L + R_f) \\ p_d = i_{f2}^2(Z_L + Z_{l1} + Z_{l2} + Z_L + R_f) \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可得, 在反向区外故障时, 保护测量点暂态功率满足 $p_a < p_b < p_c < p_d$, 此时 p_a 变化最明显。

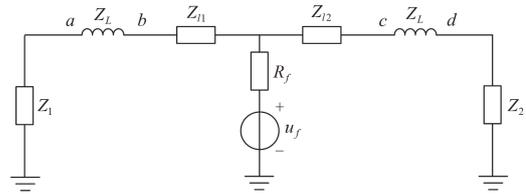
综上所述, 发生不同故障时, 保护测量点暂态功率变化特征有明显的差异, 为区内、外故障检测提供依据。

1.3 区内故障特征分析

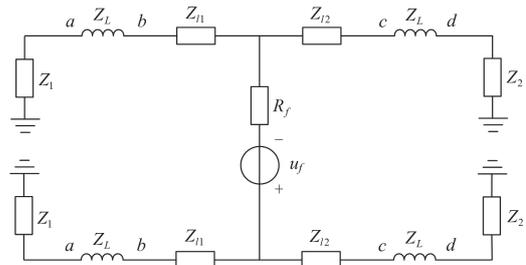
输电线路发生故障时, 将其等效为正常状态与故障状态的叠加, 区内故障网络附加图如图 5 所示。图中 u_f 为附加电源。



(a) 正极故障



(b) 负极故障



(c) 极间故障

图 5 区内故障的网络附加图

Fig. 5 Network additional map for an internal fault

图 5(a)中, 发生区内正极故障时, 相当于一个负电源叠加在故障点, 正极 b 点功率会急剧变化, 由于线路的耦合作用, 负极 b 点功率变化较小。

图 5(b)中, 发生区内负极故障时, 相当于一个正电源叠加在故障点, 负极 b 点功率会急剧变化, 正极 b 点功率变化较小。

图 5(c)中, 发生区内极间故障时, 相当于一个负电源叠加在正负极线路之间, 正负极 b 点功率都会急剧变化。

因此, 可以根据 b 点暂态功率变化特征构造故障选极判据。

2 故障保护算法

2.1 启动判据

功率对噪声、负荷变化等干扰不敏感, 且发生故障时功率下降明显^[25]。因此可利用功率变化率设计启动判据, 为减轻外界的干扰, 首先对功率进行滤波处理。

滤波方法有很多种,其中小波滤波、滑动平均滤波、均值滤波、Savitzky-Golay 滤波等较为常见。本文采用的 Savitzky-Golay 滤波,是一种基于局部多项式最小二乘卷积拟合,通过移动故障功率窗口实现滤波的方法。其原理简单,计算效率高,具有平滑数据和滤波的作用,在处理故障信号时,不改变信号形状和宽度。将原始信号 x_i 定为原点,在 x_i 左右两边各取 M 个样本点,样本点总数为 $2M + 1$,再构造一个 p 阶多项式 $q(n) = \sum_{k=0}^p a_k n^k$, 对其进行拟合。定义函数为

$$C = \sum_{n=-M}^M (q(n) - x(n))^2 = \sum_{n=-M}^M \left(\sum_{k=0}^p a_k n^k - x(n) \right)^2 \quad (4)$$

式中: $-M \leq n \leq M$, $p \leq 2M + 1$; a_k 表示多项式中第 k 项的系数; $x(n)$ 为原始信号。

当 C 值最小时,滤波效果最好。

由 1.2 节可知,区内故障时 b 、 c 两点功率变化率最明显,而 b 点在线路首端,选择 b 点作为启动判据的测量点较为方便。图 6 为发生区内故障时滤波前后 b 点的功率波形。

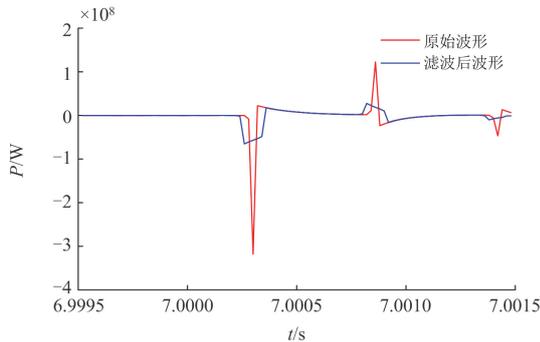


图 6 滤波前后 b 点的功率

Fig. 6 Power at point b before and after filtering

以功率变化率构造启动判据 K_1 , 具体如式(15)所示。

$$K_1 = \max \left(\left| \frac{dp_{pb}}{dt} \right|, \left| \frac{dp_{nb}}{dt} \right| \right) > K_{set1} \quad (5)$$

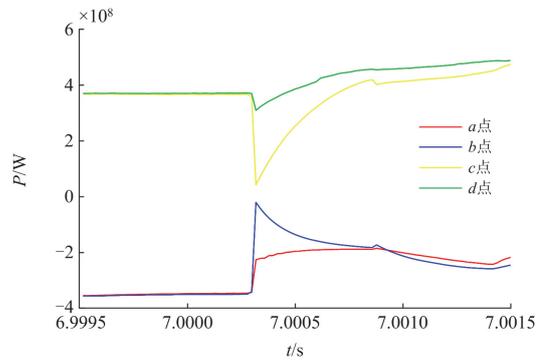
式中: dp_{pb}/dt 、 dp_{nb}/dt 分别为正、负极线路 b 点的功率变化率; K_{set1} 为躲过正常运行时测量点处功率变化率的最大值,取 K_{set1} 为 0.05 MW/ms。

若测量点功率符合式(5),保护启动。为防止保护误动作,将连续检测到 6 个数据点均满足式(5)作为保护启动的条件。

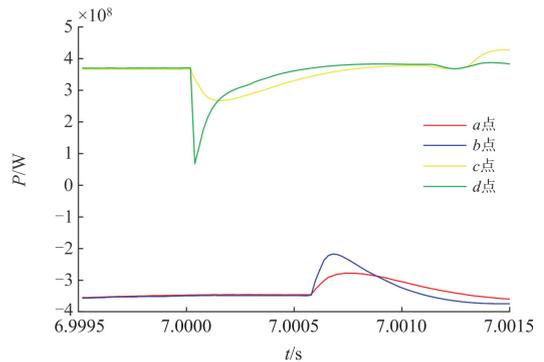
2.2 区内、外故障判据

当直流线路发生故障时,为防止保护误动作,

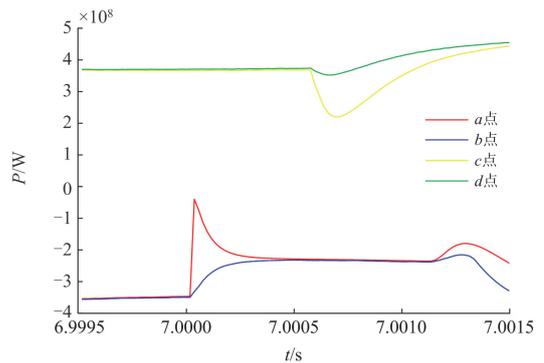
首先要确定故障发生在区内还是区外。根据 1.2 节的理论推导进行仿真,图 7 为发生区内、外故障时经 Savitzky-Golay 滤波后保护测量点的功率波形。由图 7 可知,在区内故障时, b 、 c 两点的功率变化最明显,在正向区外故障时, d 点的功率变化最明显,在反向区外故障时, a 点的功率变化最明显,仿真结果和理论推导一致。



(a) 区内故障



(b) 正向区外故障



(c) 反向区外故障

图 7 保护测量点的功率波形

Fig. 7 Power waveform of measurement point of protection

2.1 节利用功率变化率构造启动判据,在构造区内、外故障判据时引入脉冲因子,脉冲因子是信号峰值与平均值之比,对冲击信号比较敏感,可以更

好地反映功率波形冲击程度和奇异程度, 故障电气量变化越大, 脉冲因子越大, 反之亦然。与功率变化率相比, 脉冲因子无量纲, 能将故障电气量量化成 10 以内的数值, 计算简单, 抗干扰能力强, 能更好地提取信号特性。综上, 可利用保护测量点暂态功率的脉冲因子变化情况构造区内、外故障判据。脉冲因子的表达式为

$$M_j = \frac{\max(p_j(i)) - \min(p_j(i))}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |p_j(i)|} \quad (6)$$

式中: M_j 为保护测量点功率的脉冲因子; N 表示采样点数; $p_j(i)$ 为 j 点功率。

计算保护测量点的脉冲因子, 结果如表 1 所示。表 1 数据符合不同故障时功率的变化情况, 由此定义 K_2 如式(7)所示。

$$K_2 = \max \begin{pmatrix} M_{pa}, M_{pb} \\ M_{pc}, M_{pd} \\ M_{na}, M_{nb} \\ M_{nc}, M_{nd} \end{pmatrix} = \begin{cases} M_b \text{ 或 } M_c & \text{区内故障} \\ M_d & \text{正向区外故障} \\ M_a & \text{反向区外故障} \end{cases} \quad (7)$$

表 1 区内、外故障时的脉冲因子的值

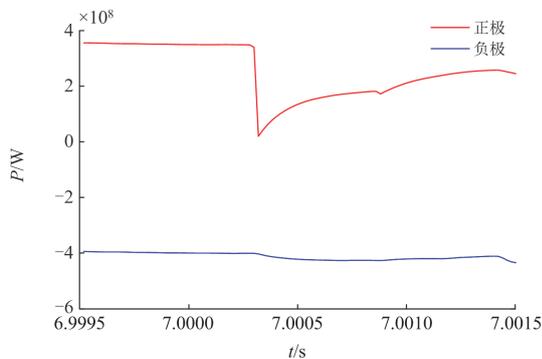
Table 1 Value of the pulse factor in case of internal and external faults

故障类型	M_{pa}	M_{pb}	M_{pc}	M_{pd}	M_{na}	M_{nb}	M_{nc}	M_{nd}
区内故障	正极故障	1.119	2.721	2.296	0.370	0.265	0.243	0.152
	负极故障	0.377	0.348	0.191	0.069	1.159	2.652	2.354
	极间故障	0.554	3.800	3.404	0.543	0.586	3.382	3.145
正向区外	正极故障	0.366	0.907	0.665	1.097	0.120	0.087	0.119
	负极故障	0.215	0.190	0.193	0.126	0.351	0.728	1.159
	极间故障	0.381	1.218	1.014	1.337	0.275	0.922	1.378
反向区外	正极故障	2.702	1.920	0.923	0.144	0.312	0.319	0.214
	负极故障	0.398	0.407	0.254	0.070	2.716	2.007	1.031
	极间故障	1.877	1.352	1.088	0.147	1.512	1.099	1.074

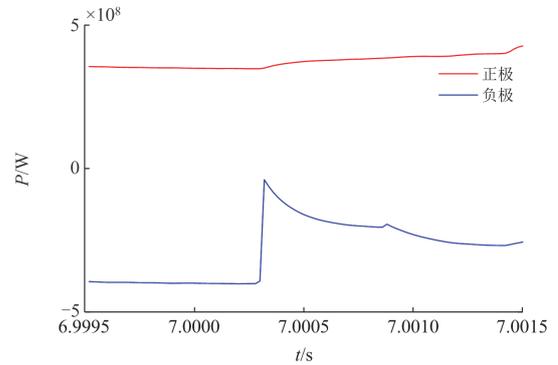
2.3 故障选极判据

若输电线路区内发生故障, 还需进行故障选极。根据 1.3 节的分析进行仿真, 图 8 为发生区内故障时经 Savitzky-Golay 滤波后正负极 b 点的功率波形。由图 8 可知, 发生区内正极故障时, 正极 b 点功率急剧变化, 负极 b 点功率基本不变。区内负极故障时, 负极 b 点功率会急剧变化, 正极 b 点功率基本不变。区内极间故障时, 正负极 b 点功率都会急剧变化, 仿真结果和 1.3 节分析一致。

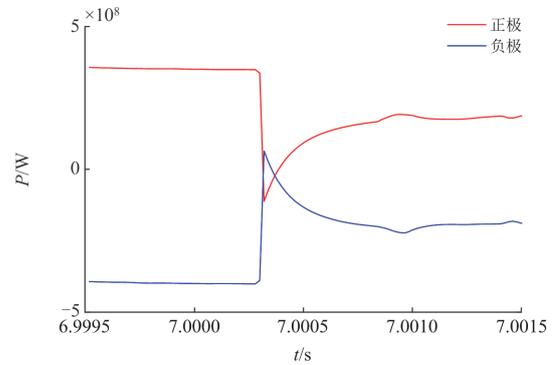
因此, 利用区内故障时正负极 b 点的功率变化不同进行故障选极。定义 K_3 为正极 b 点功率的脉冲因子 M_{b+} 与负极 b 点功率的脉冲因子 M_{b-} 的比值, 即



(a) 正极故障



(b) 负极故障



(c) 极间故障

图 8 区内故障时正负极 b 点的功率

Fig. 8 Power at positive and negative b -point during internal faults

$$K_3 = \frac{M_{b+}}{M_{b-}} \quad (8)$$

发生区内故障时 K_3 的值如表 2 所示。

表 2 区内故障时 K_3 的值

Table 2 Value of K_3 during internal faults

故障类型	过渡电阻/ Ω	M_{b+}	M_{b-}	K_3
区内正极故障	0.01	4.530	0.315	14.384
	100	2.402	0.182	13.188
	300	1.329	0.123	10.917
区内负极故障	0.01	0.252	4.257	0.059
	100	0.193	2.174	0.089
	300	0.127	1.147	0.111
区内极间故障	0.01	4.456	4.209	1.059
	100	3.110	2.911	1.069
	300	1.745	1.604	1.089

由表 2 可知, 区内正极故障时, $K_3 \gg 1$; 区内负极故障时, $K_3 \ll 1$; 区内极间故障时, $K_3 \approx 1$ 。考虑一定裕度, 定义可靠系数 $K_{rel} = 1.5$, 构造故障选极判据如式(9)所示。

$$\begin{cases} K_3 > 1.5(K_{rel} = 1.5) & \text{正极短路故障} \\ 0.67 \leq K_3 \leq 1.5 \left(\frac{1}{K_{rel}} = 0.67 \right) & \text{极间故障} \\ K_3 < 0.67 & \text{负极短路故障} \end{cases} \quad (9)$$

3 直流电网保护流程

基于上述分析与验证, 得出保护方案流程图如图 9 所示。首先判断保护是否启动, 然后对比保护测量点限流电抗功率的脉冲因子大小进行区、内外故障及故障极识别。

4 仿真验证

利用 Matlab/Simulink 搭建四端 MMC 直流电网模型验证保护方案可行性。系统采样频率为 50 kHz, 限流电抗器为 0.1 H, 故障时刻 $t = 0.7$ s, 故障持续时间为 0.05 s, 采样时间窗为 1.5 ms。系统参数如表 3 所示。

4.1 故障判据验证

4.1.1 金属性接地故障

故障电阻应按照最严重的金属性接地故障考虑, 若区内高阻接地故障躲过最严重的区外金属性接地故障, 就能保证躲过其他区外故障^[26]。将过渡电阻设置为 0.01 Ω 模拟金属性故障。 $f_1 - f_5$ 在不同故障位置的金属性接地故障判别结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 本文方法对于金属性接地故障不存在误判情况。

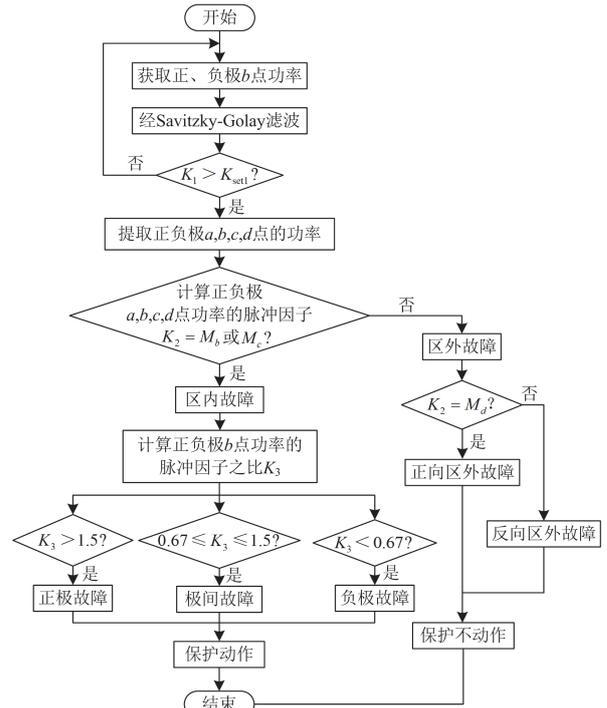


图 9 保护方案流程图

Fig. 9 Flow chart of the protection scheme

表 3 柔性直流系统仿真参数

Table 3 Simulation parameters of flexible DC system

参数	数值
MMC1 额定容量	定电压
MMC2—MMC4 额定容量/MVA	500
额定直流电压/kV	500
线路长度/km	100
半桥子模块数量	264
桥臂电感/mH	100
子模块电容/mF	15

表 4 金属性接地故障判别结果

Table 4 Identification results of metallic ground faults

故障类型	故障位置	K_2	判别结果
f_1	距保护设备 10 km	$M_b = 3.487$	区内故障
	距保护设备 50 km	$M_b = 4.530$	区内故障
	距保护设备 90 km	$M_b = 3.148$	区内故障
f_2	距保护设备 10 km	$M_b = 3.463$	区内故障
	距保护设备 50 km	$M_c = 4.506$	区内故障
	距保护设备 90 km	$M_c = 3.312$	区内故障
f_3	距保护设备 10 km	$M_b = 3.399$	区内故障
	距保护设备 50 km	$M_b = 4.799$	区内故障
	距保护设备 90 km	$M_c = 3.355$	区内故障
f_4	整流站出口处	$M_a = 3.946$	反向区外故障
f_5	逆变站出口处	$M_d = 2.814$	正向区外故障

4.1.2 高阻接地故障

将故障电阻设置为 100 Ω、300 Ω 模拟短路故障,

$f_1 - f_3$ 在不同故障位置及不同过渡电阻下的故障识别结果如表 5 所示。

表 5 高阻接地故障判别结果

Table 5 Identification results of high resistance ground faults

故障类型	故障点位置	过渡电阻/Ω	$K_1/(MW/ms)$	K_2	K_3	判别结果
f_1	距保护设备 10 km	100	14	$M_b = 2.632$	12.969	区内正极故障
		300	9	$M_b = 1.362$	10.984	区内正极故障
	距保护设备 50 km	100	15	$M_b = 2.402$	13.188	区内正极故障
		300	10	$M_b = 1.329$	10.917	区内正极故障
	距保护设备 90 km	100	15	$M_b = 2.049$	11.886	区内正极故障
		300	10	$M_b = 1.259$	10.272	区内正极故障
f_2	距保护设备 10 km	100	16	$M_b = 2.631$	0.089	区内负极故障
		300	10	$M_b = 1.342$	0.101	区内负极故障
	距保护设备 50 km	100	17	$M_c = 2.346$	0.089	区内负极故障
		300	11	$M_b = 1.288$	0.111	区内负极故障
	距保护设备 90 km	100	16	$M_c = 2.061$	0.101	区内负极故障
		300	11	$M_b = 1.197$	0.127	区内负极故障
f_3	距保护设备 10 km	100	17	$M_b = 3.123$	1.058	区内极间故障
		300	13	$M_b = 2.036$	1.070	区内极间故障
	距保护设备 50 km	100	18	$M_b = 3.295$	1.069	区内极间故障
		300	14	$M_b = 1.899$	1.089	区内极间故障
	距保护设备 90 km	100	18	$M_b = 2.696$	1.048	区内极间故障
		300	14	$M_b = 1.727$	1.055	区内极间故障
f_4	整流站出口处	100	2	$M_d = 2.197$	—	反向区外故障
		300	2	$M_d = 1.414$	—	反向区外故障
f_5	整流站出口处	100	3	$M_d = 1.948$	—	正向区外故障
		300	3	$M_d = 0.847$	—	正向区外故障

由表 5 可知, K_1 均大于 0.05 MW/ms。计算保护测量点功率经 Savitzky-Golay 滤波后的脉冲因子如图 10 所示。由图 10 可知, 区内故障时, 保护测量点 b 、 c 的功率变化大, 计算出的脉冲因子较大, $K_2 = M_b$ 或 $K_2 = M_c$; 正向区外故障时, 保护测量

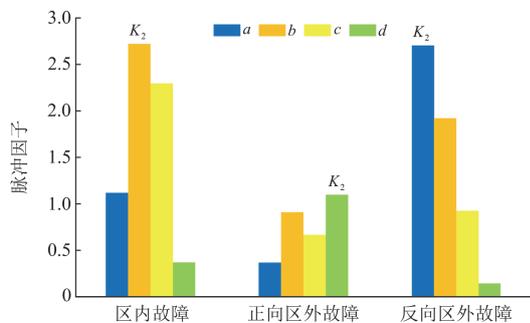


图 10 不同故障类型下的脉冲因子计算结果

Fig. 10 Calculation results of pulse factor for different fault types

点 d 的功率变化大, $K_2 = M_d$; 反向区外故障时, 保护测量点 a 的功率变化大, $K_2 = M_a$ 。

若判定为区内故障, 通过式(9)确定故障极, 正负极脉冲因子之比如图 11 所示。由表 5 与图 11 可知: 正极故障时, 在不同位置 and 不同过渡电阻下, K_3 均大于 1.5; 负极故障时, K_3 均小于 0.67; 极间故障时, K_3 在 0.67~1.5 之间, 均满足式(9)所示的故障选极判据, 保护不发生误动作。区内、外故障判据和故障选极均利用脉冲因子, 没有引入新算法, 保护方案流程简单, 极大地缩短了故障检测时间, 具有较大的优越性。

4.2 保护性能分析

4.2.1 采样频率影响

对采样频率为 20 kHz、40 kHz 进行测试, 结果如表 6 所示。由表 6 可知, 本文保护方法在不同频率下仍能对故障做出准确判断。

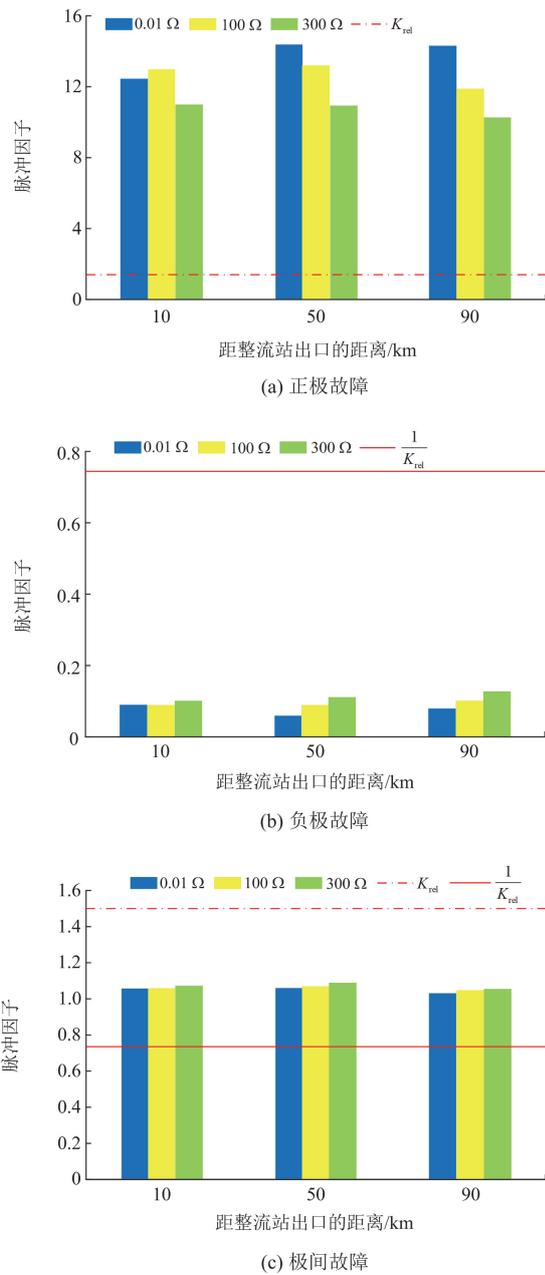


图 11 正负极脉冲因子之比

Fig. 11 Ratio of positive and negative pulse factors

4.2.2 不同接地电阻影响

为验证接地电阻对功率造成的影响，分别修改接地电阻为 500 Ω、1000 Ω、1500 Ω，故障判别结果如表 7 所示。由表 7 可知，接地电阻变化对本文保护方法影响较小。

4.2.3 噪声影响

不同信噪比下的高斯白噪声可以模拟噪声干扰，信噪比越小噪声干扰越强。故障时在采样数据中加入 10 dB 的高斯白噪声进行仿真验证，结果如表 8 所示。由表 8 可知，保护方案没有出现误判情

况，表明有较强的耐噪声干扰能力。

表 6 不同采样频率下判别结果

Table 6 Identification results with different sampling frequencies

故障类型	采样频率/kHz	K_2	K_3	判别结果
f_1	20	$M_b = 2.158$	12.372	区内正极故障
	40	$M_b = 1.853$	12.698	区内正极故障
f_2	20	$M_b = 2.465$	0.076	区内负极故障
	40	$M_b = 1.942$	0.069	区内负极故障
f_3	20	$M_b = 3.518$	1.112	区内极间故障
	40	$M_c = 3.644$	1.053	区内极间故障
f_4	20	$M_a = 2.356$	—	反向区外故障
	40	$M_a = 2.185$	—	反向区外故障
f_5	20	$M_d = 1.987$	—	正向区外故障
	40	$M_d = 2.116$	—	正向区外故障

表 7 不同过渡电阻下判别结果

Table 7 Identification results with different transition resistances

故障类型	过渡电阻/Ω	K_2	K_3	判别结果
f_1	500	$M_b = 0.972$	10.387	区内正极故障
	1000	$M_b = 0.765$	9.514	区内正极故障
	1500	$M_b = 0.624$	9.865	区内正极故障
f_2	500	$M_b = 1.059$	0.102	区内负极故障
	1000	$M_c = 0.876$	0.094	区内负极故障
	1500	$M_c = 0.843$	0.096	区内负极故障
f_3	500	$M_b = 1.754$	1.058	区内极间故障
	1000	$M_b = 1.468$	1.114	区内极间故障
	1500	$M_b = 1.325$	0.978	区内极间故障
f_4	500	$M_a = 1.365$	—	反向区外故障
	1000	$M_a = 1.204$	—	反向区外故障
	1500	$M_a = 0.864$	—	反向区外故障
f_5	500	$M_d = 0.801$	—	正向区外故障
	1000	$M_d = 0.766$	—	正向区外故障
	1500	$M_d = 0.659$	—	正向区外故障

表 8 噪声干扰下判别结果

Table 8 Identification results under noise interference

故障类型	故障点位置	K_2	K_3	判别结果
f_1	距保护设备 10 km	$M_b = 2.549$	11.864	区内正极故障
	距保护设备 90 km	$M_b = 2.011$	11.528	区内正极故障
f_2	距保护设备 10 km	$M_c = 2.301$	0.083	区内负极故障
	距保护设备 90 km	$M_c = 1.984$	0.978	区内负极故障
f_3	距保护设备 10 km	$M_b = 3.068$	0.942	区内极间故障
	距保护设备 90 km	$M_b = 2.581$	1.003	区内极间故障
f_4	整流站出口处	$M_a = 1.951$	—	反向区外故障
f_5	逆变站出口处	$M_d = 1.764$	—	正向区外故障

4.2.4 限流电抗器影响

一般在直流电网的线路上串联限流电抗器, 其值可有效限制短路电流及电压大小。本文采用限流电抗器两端功率构造故障判据, 需要讨论不同限流电抗下对本文方法的影响。将限流电抗分别设置为 0.15 H、0.2 H 进行验证, 结果如表 9 所示。由表 9 可知, 保护能正确动作。

表 9 不同限流电抗下判别结果

Table 9 Identification results with different current limiting reactance

故障类型	限流电抗/H	K_2	K_3	判别结果
f_1	0.15	$M_b = 2.218$	15.498	区内正极故障
	0.2	$M_b = 2.065$	13.011	区内正极故障
f_2	0.15	$M_c = 2.034$	0.064	区内负极故障
	0.2	$M_b = 1.682$	0.083	区内负极故障
f_3	0.15	$M_c = 3.169$	1.031	区内极间故障
	0.2	$M_b = 2.874$	1.072	区内极间故障
f_4	0.15	$M_a = 2.068$	—	反向区外故障
	0.2	$M_a = 1.798$	—	反向区外故障
f_5	0.15	$M_d = 1.671$	—	正向区外故障
	0.2	$M_d = 1.843$	—	正向区外故障

4.2.5 通信延时影响

为确保将故障可靠切除, 需考虑以下因素:

1) 启动判据和故障采样时间为 2 ms; 2) 故障保护动作的附加延时为 0.5 ms; 3) 断路器动作时间为 2 ms; 4) 电气量传输的时间。数据在光纤中传送速度为 204 km/ms^[27], 本文直流线路为 100 km, 经计算通信延时约为 0.5 ms。考虑最大通信延时误差, 将通信延时分别设置为 0.5 ms、0.6 ms、0.7 ms 进行验证, 结果如表 10 所示。由表 10 可知, 本文所提方法可有效识别区、内外故障, 而故障选极采用单端电气量, 无需考虑通信延时。故本文保护方法对通信延时要求较低, 在 5.2 ms 内即可隔离故障。

表 10 不同通信延时下判别结果

Table 10 Identification results with different communication delays

通信延时/ms	K_2		
	区内故障	正向区外故障	反向区外故障
0.5	$M_b = 2.206$	$M_d = 1.867$	$M_a = 2.136$
0.6	$M_b = 2.354$	$M_d = 1.935$	$M_a = 2.085$
0.7	$M_b = 2.158$	$M_d = 1.851$	$M_a = 1.945$

4.3 与其他保护方案对比

将本文保护方法与其他文献进行对比, 主要从采样频率、抗过渡电阻能力、抗噪声能力、故障判

别时间等 4 个方面进行, 对比结果如表 11 所示。由表 11 可知, 本文抗过渡电阻可达 1500 Ω , 抗噪声干扰能力强, 故障判别时间短, 具有较强的优越性。

表 11 本文与其他文献对比

Table 11 Comparison of this paper with other literature

保护方案	采样频率/kHz	抗过渡电阻/ Ω	抗噪声能力/dB	故障判别时间/ms
本文	50	1500	10	2
文献[11]	50	350	30	2
文献[12]	10	300	10	3
文献[13]	50	100	25	30
文献[14]	100	500	—	0.5
文献[15]	10	1000	—	2
文献[16]	10	20	30	1
文献[17]	200	300	50	2.5
文献[18]	10	300	10	3
文献[19]	10	200	20	0.5
文献[20]	20	80	—	8
文献[21]	—	200	10	1.04
文献[28]	10	600	30	6
文献[29]	50	300	20	2.5

5 结论

本文提出了一种基于暂态功率脉冲因子的柔性直流输电线路故障检测, 在 Matlab 平台进行了测试验证, 得到以下结论。

1) 采用 Savitzky-Golay 滤波可降低噪声干扰, 基于限流电抗器边界条件, 推导出故障测量点的功率大小特征, 且故障测量点 b 提取的暂态功率变化量明显大于非故障点, 为故障检测提供依据。

2) 利用脉冲因子计算简单, 无量纲, 能反映信号的冲击程度等特点, 进行区内、外故障和故障选极识别, 极大地缩短了故障检测时间。

3) 仿真结果表明, 本文方法在不同工况下, 均可快速识别故障类型, 且对通信延时的要求不高, 具有较强的优越性。

参考文献

- [1] 薛士敏, 陈超超, 金毅, 等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3114-3122. XUE Shimin, CHEN Chaochao, JIN Yi, et al. A research review of protection technology for DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3114-3122.
- [2] 沈毅, 黄琛, 赵振廷, 等. 兼顾短路与断线故障识别的柔性直流电网行波保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(22): 143-155. SHEN Yi, HUANG Chen, ZHAO Zhenting, et al. A traveling wave protection scheme for flexible DC power

- grids considering both short-circuit and breakage fault identification[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(22): 143-155.
- [3] 晁武杰, 李智诚, 唐志军, 等. 基于 MMC 的柔性直流输电线路双极性故障检测方法研究[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(9): 165-170.
CHAO Wujie, LI Zhicheng, TANG Zhijun, et al. Research of bipolar fault detection method based on the MMC flexible DC transmission lines[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(9): 165-170.
- [4] 刘麒麟, 张英敏, 张明奇, 等. 直流电网输电线路短路故障的单端化近似解析计算方法[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(3): 47-52.
LIU Qilin, ZHANG Yingmin, ZHANG Mingqi, et al. A single terminal approximate analytical method for short-circuit fault of transmission lines in DC power grid[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(3): 47-52.
- [5] XIANG W, YANG S, ADAM G P, et al. DC fault protection algorithms of MMC-HVDC grids: fault analysis, methodologies, experimental validations, and future trends[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(10): 11245-11264.
- [6] 张晓林, 张帆, 李甲飞, 等. 考虑桥臂参数不对称和子模块故障的 MMC 协同控制策略[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(5): 76-84.
ZHANG Xiaolin, ZHANG Fan, LI Jiafei, et al. MMC cooperative control strategy considering asymmetry of arm parameters and sub-module faults[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(5): 76-84.
- [7] 唐欣, 黄晟, 潘一彬, 等. 直流故障下基于交流侧馈能的 MMC 换流站主动限流策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(9): 56-64.
TANG Xin, HUANG Sheng, PAN Yibin, et al. Active current limiting strategy of an MMC converter station based on AC side energy feedback under a DC fault[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(9): 56-64.
- [8] YU X, XIAO L. A DC fault protection scheme for MMC-HVDC grids using new directional criterion[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 36(1): 441-451.
- [9] 孙银山, 杨晓平, 任军辉. 一种具备故障自清除能力的 MMC 新型双子模块拓扑研究[J]. *高压电器*, 2021, 57(8): 115-119.
SUN Yinshan, YANG Xiaoping, REN Junhui. Research on MMC novel dual sub-module topology with fault self-clearance capability[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(8): 115-119.
- [10] 吴通华, 戴魏, 李新东, 等. 基于数值拉普拉斯逆变换的 MMC-HVDC 故障电流计算[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(5): 40-49.
- WU Tonghua, DAI Wei, LI Xindong, et al. Calculation of fault current in MMC-HVDC based on numerical inverse Laplace transform[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(5): 40-49.
- [11] 权文杰, 童晓阳, 张广骁. 基于 S 变换行波能谱矩阵相似度的柔性直流单端保护方案[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(7): 178-186.
QUAN Wenjie, TONG Xiaoyang, ZHANG Guangxiao. Single-end flexible DC protection scheme based on similarity of S-transform energy spectrum matrix of traveling wave[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(7): 178-186.
- [12] 陈田田, 赵振廷, 李银红. 不依赖边界元件的柔性直流电网反时限过流保护配置方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(16): 48-58.
CHEN Tiantian, ZHAO Zhenting, LI Yinhong. Inverse time overcurrent protection configuration scheme for a flexible DC power grid independent of boundary components[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(16): 48-58.
- [13] 韦延方, 王志杰, 王鹏, 等. 基于 VMD 模糊熵与 GG 聚类的直流配电网故障检测方法[J]. *电机与控制学报*, 2024, 28(2): 129-141.
WEI Yanfang, WANG Zhijie, WANG Peng, et al. Fault detection method for DC distribution network based on VMD fuzzy entropy and GG clustering[J]. *Electric Machines and Control*, 2024, 28(2): 129-141.
- [14] 谢仲润, 邹贵彬, 杜肖功, 等. 基于真双极的 MTDC 电网直流线路快速保护[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(6): 1906-1915.
XIE Zhongrun, ZOU Guibin, DU Xiaogong, et al. Fast DC lines protection for symmetrical bipolar based MTDC grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(6): 1906-1915.
- [15] 高淑萍, 高悦, 宋国兵, 等. 利用 Teager 能量算子瞬时能量的模块化多电平换流器多端柔性直流电网保护方法[J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(9): 40-48.
GAO Shuping, GAO Yue, SONG Guobing, et al. A protection method based on instantaneous energy of Teager energy operator for modular multilevel converter multiterminal flexible direct current grid[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(9): 40-48.
- [16] 张晨浩, 宋国兵, 李洋, 等. 基于故障电压行波传播项指数系数的柔性直流输电线路单端行波保护原理[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(24): 8424-8437.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, LI Yang, et al. Principle of non-unit traveling wave protection for VSCHVDC grids based on index of fault voltage traveling wave propagation term[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(24): 8424-8437.

- [17] ZHANG C, SONG G, WANG T, et al. Single-ended traveling wave fault location method in DC transmission line based on wave front information[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(5): 2028-2038.
- [18] XIANG W, ZHANG H, YANG S, et al. A differential pilot protection scheme for MMC-based DC grid resilient to communication failure[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 5631-5645.
- [19] JIA K, WANG C, BI T, et al. Transient current waveform similarity based protection for flexible DC distribution system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(12): 9301-9311.
- [20] 祁晓敏, 裴玮, 李鲁阳, 等. 基于限流电感电压的多端交直流混合配电网直流故障检测方案[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 537-545.
QI Xiaomin, PEI Wei, LI Luyang, et al. DC fault detection scheme for multi-terminal hybrid AC/DC distribution network based on current-limiting inductor voltage[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 537-545.
- [21] 杨赛昭, 向往, 文劲宇. 基于限流电抗器电压差异性的架空柔直电网故障检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1196-1211, 1411.
YANG Saizhao, XIANG Wang, WEN Jinyu. A fault protection scheme based on the difference of current-limiting reactor voltage for overhead MMC based DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1196-1211, 1411.
- [22] 高飘, 郑晓冬, 晁晨栩, 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.
- [23] 季路, 汤亚芳, 袁旭峰, 等. 基于限流电抗暂态电压的直流配电网单端量保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(10): 15-23, 41.
JI Lu, TANG Yafang, YUAN Xufeng, et al. Single-ended protection of DC distribution network based on current-limiting reactance transient voltage[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(10): 15-23, 41.
- [24] 汪大海, 王国强, 王昕, 等. 下击暴流风冲击作用下输电塔非平稳动力响应的频域方法[J]. 工程力学, 2024, 41(8): 152-163.
WANG Dahai, WANG Guoqiang, WANG Xin, et al. Frequency domain method for dynamic responses of transmission tower under downburst[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(8): 152-163.
- [25] 李波, 廖凯, 朱禹澜, 等. 基于限流电抗器电压的直流配电网单端量保护[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2693-2705.
LI Bo, LIAO Kai, ZHU Yulan, et al. Single-terminal protection for DC distribution network based on current limiting reactor voltage[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2693-2705.
- [26] 高淑萍, 宋晓辰, 宋国兵. 基于VMD能量熵的混合双端直流输电线路纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 123-132.
GAO Shuping, SONG Xiaochen, SONG Guobing. Longitudinal protection scheme of hybrid double-terminal DC transmission lines based on VMD energy entropy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 123-132.
- [27] 戴志辉, 刘雪燕, 刘自强, 等. 基于电流故障分量的柔直配电网纵联保护原理[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1684-1695.
DAI Zhihui, LIU Xueyan, LIU Ziqiang, et al. Pilot protection scheme for flexible DC distribution grids based on superimposed current[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1684-1695.
- [28] 褚倍钰, 李海锋, 彭光强, 等. 基于差动电流与分布电容电流比值的直流线路纵联保护方案[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(9): 162-170.
CHU Beiyu, LI Haifeng, PENG Guangqiang, et al. Pilot protection scheme for DC lines based on ratio of differential current to distributed capacitive current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(9): 162-170.
- [29] 郑涛, 陈云飞, 马英, 等. 基于复合暂态能量的多端柔性直流电网自适应差动保护[J/OL]. 电工技术学报: 1-15[2024-08-28]. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240195.
ZHENG Tao, CHEN Yunfei, MA Ying, et al. Differential protection for multi terminal flexible DC power grid based on composite transient energy[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-15[2024-08-28]. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240195.

收稿日期: 2024-05-27; 修回日期: 2025-02-14

作者简介:

曾志辉(1978—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子装置与电气传动; E-mail: 524316170@qq.com

郑莹莹(1999—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 2869105481@qq.com

韦延方(1982—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统及其新型输配电的分析与控制。E-mail: meilaier@163.com

(编辑 许威)