

利用改进变分模态分解突变能量的 直流配电网保护方法

高淑萍¹, 吕宇星¹, 宋国兵², 沈渠旺¹, 李元泽¹

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 710054, 西安; 2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了有效识别环状直流配电网中的故障,提高直流配电网保护的可靠性、选择性、速动性和灵敏性,保证系统的稳定运行,提出一种利用改进变分模态分解(VMD)突变能量的线路纵联保护方法。因为VMD算法需要先设置模态数,且模态数与分解效果息息相关,所以首先利用麻雀搜索算法(SSA)找到VMD算法合适的模态数,使得在此参数下的分解效果最优。然后根据线路首末两端突变能量的差异,构造保护方案。将故障时采集的电压、电流故障分量进行SSA-VMD分解,得到若干模态分量并计算其突变能量。根据区内、区外的突变能量大小差异构造区内、外故障判据,由故障时正负极的突变能量比值差异构造故障极判据。在PSCAD/EMTDC中搭建环状直流配电网模型,利用MATLAB进行保护方法验证,结果表明:在不同故障类型下,所提方法均可在3 ms内快速可靠动作;可以识别区内外故障并实现故障选极,保护线路全长;可耐受过渡电阻20 Ω ,耐受过渡电阻能力强;在40 dB噪声情况下,依旧可以识别故障,有一定的抗干扰能力。

关键词: 直流配电网;变分模态分解;麻雀搜索算法;突变能量;继电保护

中图分类号: TM773;TM75 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202305016 **文章编号:** 0253-987X(2023)05-0159-12

A DC Distribution Network Protection Method Based on Improved VMD and Abrupt Energy

GAO Shuping¹, LÜ Yuxing¹, SONG Guobing², SHEN Quwang¹, LI Yuanze¹

(1. School of Electrical and Control, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this paper, a line longitudinal protection method based on improved variational mode decomposition (VMD) and abrupt energy is proposed to effectively identify faults in ring-shaped DC distribution network, improve the protection reliability, selectivity, speed and sensitivity, and ensure the stable operation of the system. To use the VMD algorithm, the number of modes that matters to the decomposition effect needs to be set first. Hence the Sparrow search algorithm (SSA) is used to find a better number of modes for the VMD algorithm so as to ensure optimal decomposition effect under this parameter. Then a protection scheme is devised according to the difference of abrupt energy at the head and tail of the line. The voltage and current fault components collected are decomposed by SSA-VMD to obtain several modal components and calculate their abrupt energy. The internal and external fault criteria are developed according to the differ-

ence of abrupt energy in the areas separated by the direct current reactor. The fault pole criteria are developed according to the difference of the abrupt energy ratio between positive and negative poles at the time of failure. A circular DC distribution network model is built in PSCAD/EMT-DC, and the protection method is validated by MATLAB. The results show that the proposed method works quickly (within 3 ms) and reliably for different types of faults. It can identify both internal and external faults, realize fault pole selection and protect the full length of the line. It can also well withstand transition resistance (up to 20 Ω). Under a noise level of 40 dB, it can still identify faults and resist jamming to a certain extent.

Keywords: DC distribution network; variational mode decomposition; sparrow search algorithm; abrupt energy; relay protection

柔性直流配电网相较于传统的直流配电网,线路成本低、供电能力强、电能质量优,有利于降低投资成本并促进分布式电源的接入^[1-3],成为国内外研究、应用热点^[4]。但是,环状直流配电系统的发展仍面临着诸多亟待解决的问题。因其系统阻尼小,一旦故障发生,所有线路均会快速过流,故障发展迅速,需要短时间内识别故障所在位置^[5-8],而传统直流配电网及高压直流输电系统保护因无法可靠识别直流故障已不再适用于环状柔性直流配电系统中。

近年来,不少学者对柔性直流配电网的保护进行了研究^[9-10]。文献[11]提出了一种相关性与全周期限流控制相结合的柔性直流配电保护方案,并且可在限流时识别故障。直流配电网单极接地故障发生率较高并且故障识别难度随着过渡电阻的增大而增大。文献[12]认为线路高阻时,传统的微分欠压保护电压变化率会因达不到门槛值而拒动,所以以系统复频域为基础,利用线路上的限流电抗电压值来识别故障,但对保护装置有一定要求。文献[13]提取零模电压和电流计算其零模功率,通过其幅值的大小以及正负值作为区内外故障识别和选线的判据。文献[14]根据故障线与非故障线的差异,利用暂态功率的方向识别出区内外故障,但未能进一步进行选极分析。文献[15]利用 Pearson 相关系数计算电压来区分区内外故障,但是不能区分单极还是双极故障。因电磁耦合的影响,基于零模量的特点,文献[16]利用零模故障分量的多少来区分故障极,但是高阻接地故障后可能对故障特征影响较大,可能会识别失败。文献[17]提出利用快速重合闸恢复极间故障的保护方法,该方法虽减少了换流阀损坏风险,但会扩大故障范围。

变分模态分解(VMD)算法具有良好的鲁棒性和检测精度,近年来广泛应用于高压直流输电线路测距与保护中^[18-20],但在直流配网的保护中应用较少,这

是因为其需要提前预设好分解参数值,且数值大小影响分解效果^[21-22]。本文在上述研究基础之上,提出一种基于麻雀搜索算法(SSA)优化 VMD,即 SSA-VMD 突变能量的纵联保护。对模块化多电平换流器(MMC)构成的环状直流配电网,研究其直流线路故障特性,利用麻雀算法优化 VMD 参数^[23-25],自动寻找最优参数,对电压、电流故障分量分解并提取其突变能量。通过区内外故障突变能量差值的差异,区分区内外故障;根据故障发生后正负极突变能量的比值差别,区分故障极。最后,通过建立 PSCAD 仿真模型,验证所提保护方法的有效性和速动性。

1 环状直流配电网结构

直流配电网有三种常见拓扑结构,分别是单端辐射状、双端型以及环状。本文以 MMC 环状直流配电网为研究对象,搭建其系统拓扑结构,如图 1 所示。该系统由 10 kV 交流系统 A 和交流系统 B 经由变压器进行供电,MMC 为模块化多电平换流器, $L_1 \sim L_5$ 为直流线路,线路使用电缆,其单位长度的电阻和电感分别 0.12 Ω/km 、0.17 mH/km,其中线路 L_1 、 L_4 和 L_5 为 10 km,线路 L_2 和 L_3 为 5 km; f 为故障点,输出电压为 ± 10 kV;系统负荷有直流负载和交流负载,其中系统图中的集中式新能源负荷由蓄电池、风电和太阳能光伏构成,其中蓄电池通过双向 DC/DC 接入配电网;风电通过前级整流,后级 BOOST 升压电路接入配电网;光伏通过 BOOST 升压电路接入配电网;直流负载 1 为高压负载,电压从母线取得,双有源桥式变换器(DAB)对电压进行变换,DAB1、DAB3 将电压降低到 800 V 供给直流负载 2 和直流负载 4,DAB2 将电压降到 1 500 V 供给直流负载 3;通过 DC/AC 变换器将直流电转换成交流电供给交流负载;光伏(PV)通过 DAB4 并入直流配电网中。

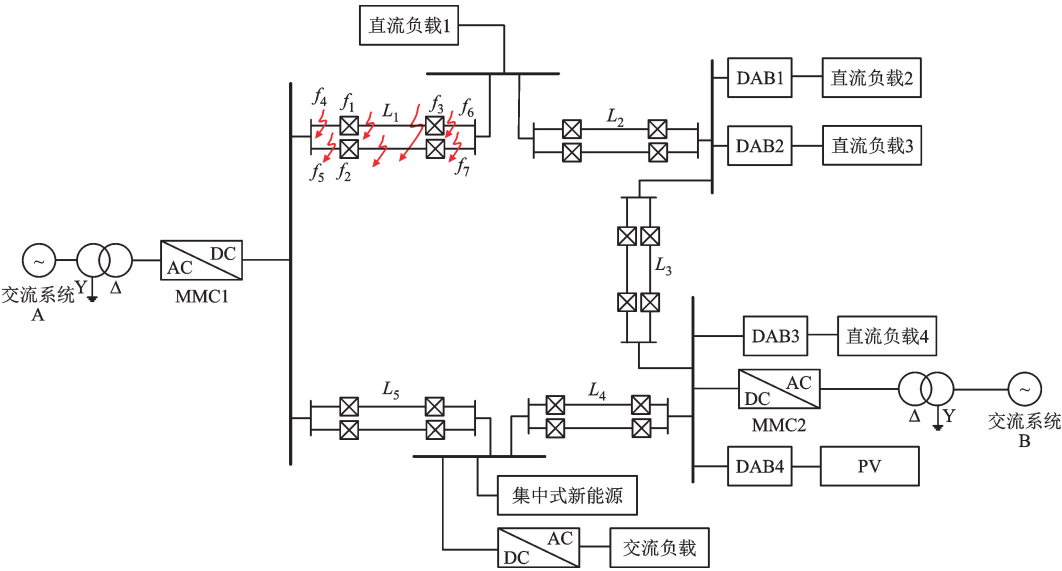


图 1 环状直流配电网的系统拓扑图

Fig. 1 A ring-shaped DC distribution network system topology

本文将直流线路两侧安装的直流电抗器视为边界,有了电抗器作为天然物理边界,可以划分出区内以及区外两部分,有效区分相邻线路的故障。为了既平滑波形又具有衰减作用,需要取恰当的电感,结合已有研究^[26-27],本文选择电抗器电感为 4 mH。

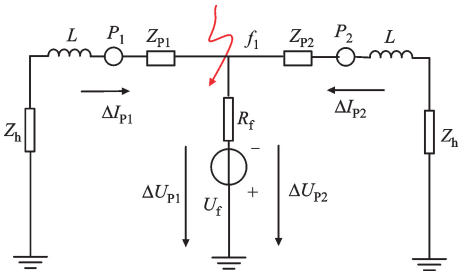
2 故障特征分析

2.1 区内外故障特性分析

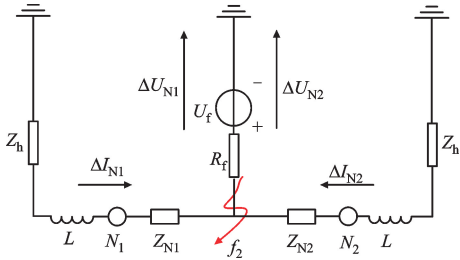
故障发生后需要判断故障发生在电抗器的内部还是外部,在故障发生瞬间,系统可以运用叠加定理。下面以 L_1 线路为例分析,其余线路与之类似,文中不再分析。

2.1.1 区内故障特性分析

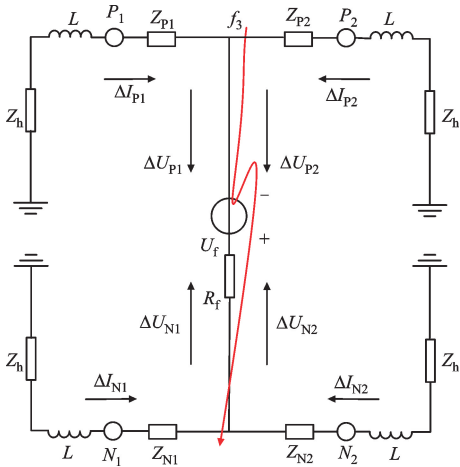
故障状态是故障前后状态的叠加,区内故障 f_1 、 f_2 、 f_3 分别表示正极、负极和双极故障,故障等效网络图如图 2 所示。对于任意一条线路,将母线指向线路方向规定为正参考方向。



(a)故障 f_1 发生时的故障网络



(b)故障 f_2 发生时的故障网络



(c)故障 f_3 发生时的故障网络

图 2 区内故障等效网络

Fig. 2 Fault equivalent network in the area

图 2 中, P 、 N 分别为正、负极保护测量点, U_f 为故障附加电源, R_f 为故障点的过渡电阻, Z_{P1} 、 Z_{P2} 、 Z_{N1} 、 Z_{N2} 为直流线路故障点距离保护安装处的等效

3 相关理论和算法

3.1 VMD 分解

VMD 分解是非递归信号分解算法,对信号自适应分解得到不同频带下的本征模态函数(IMF),在求解模态函数过程中,通过镜像延拓避免了出现在经验模态分解(EMD)等分解法中出现的端点效应。VMD 对非线性故障信号的处理有助于对后续故障信号特征的提取。其分解出来的 IMF 具有独立的中心频率,具备稀疏性,且在参数取值恰当的情况下能有效避免模态混叠。

(1)为获得单向频谱,用希尔伯特变换得到 $v_k(t)$ 的分析信号,经与 $e^{j\omega_k t}$ 相乘,得到 $v_k(t)$ 移频后的表达式为

$$\left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * v_k(t) \right] e^{j\omega_k t} \quad (9)$$

式中: $\delta(t)$ 为狄拉克函数; v_k, ω_k 分别为分解出第 k 个 IMF 分量及其中心频率; $*$ 为卷积计算符号。

(2)通过梯度的平方范数来估计带宽,构造的约束性表达式为

$$\begin{cases} \min_{\{v_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * v_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s. t.} \quad \sum_{k=1}^K v_k(t) = f(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: ∂_t 为梯度计算。

(3)为了更有利地取得最优解,利用拉格朗日算子 $\tau(t)$ 和惩罚因子 α 将约束性问题变为无约束问题,扩展的拉格朗日函数表达式为

$$\begin{aligned} L(\{v_k\}, \{\omega_k\}, \tau) = & \alpha \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * v_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \\ & + \left\| f(t) - \sum_{k=1}^K v_k(t) \right\|_2^2 + \left[\tau(t), f(t) - \sum_{k=1}^K v_k(t) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

(4)用交替方向乘子法不断迭代更新各模态分量与中心频率,得到无约束函数的鞍点,即为最佳解。 v_k, ω_k, τ 的迭代更新表达式如下

$$\hat{v}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{v}_i(\omega) + \frac{\tau(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (12)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{v}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{v}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (13)$$

$$\hat{\tau}^{n+1}(\omega) = \hat{\tau}^n(\omega) + \gamma \left[\hat{f}(\omega) - \sum_{k=1}^K \hat{v}_k^{n+1}(\omega) \right] \quad (14)$$

式中: n 是迭代次数; γ 为噪声容限参数。

(5)迭代终止条件判定。若式(7)成立,则停止迭代并输出模态分量

$$\frac{\sum_{k=1}^K \left\| \hat{v}_k^{n+1} - \hat{v}_k^n \right\|_2^2}{\sum_{k=1}^K \left\| \hat{v}_k^n \right\|_2^2} < \epsilon \quad (15)$$

式中 ϵ 为判定精度,当 $\epsilon > 0$ 时停止迭代,循环结束。

用 VMD 处理信号有一定的局限性。VMD 需要先设置模态数 K 值, K 值是 IMF 的分量个数,当 K 选择合适时,可以将原信号中的频率成分很好地分解出来,但不合适的取值会造成欠分解或者过分解的现象。 α 值影响 IMF 的带宽,过小的带宽会让被分解出的某些信号丢失,反之会带有其他分量的信号,因此 α 和 K 的选择会影响 VMD 方法的分解效果。为了得到更优的参数,以取得更好的分解效果,本文通过麻雀搜索算法,优化确定变分模态分解的参数。

3.2 改进 VMD 分解

麻雀搜寻算法相比于粒子群算法及引力搜索算法等在收敛速率、精度及寻优能力有很好的表现,且易于实现,因此选用 SSA 算法优化 VMD 参数。麻雀群体种有发现者、跟随者两种角色,基于雀群觅食和反捕食设计算法,两种角色根据自身位置的更新如下

$$X_{i,j}^{N+1} = \begin{cases} X_{i,j}^N \exp\left(-\frac{i}{\beta N_{\max}}\right), & R_2 < \text{安全值} \\ X_{i,j}^N + QL, & R_2 \geq \text{安全值} \end{cases} \quad (16)$$

$$X_{i,j}^{N+1} = \begin{cases} Q \exp\left(\frac{X_{\text{worst}} - X_{i,j}^N}{i^2}\right), & i > \frac{P}{2} \\ X_g^{N+1} + |X_{i,j}^N - X_g^{N+1}| A^+ L, & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式中: Q 为正态分布的随机数组; R_2 是报警值; N 是迭代数; $N_{\max}$ 是最大迭代数; $i = 1, 2, 3, \dots, N_{\max}$, $j = 1, 2, 3, \dots, d$, $X_{i,j}$ 是第 i 个麻雀在 j 维度的位置^[25]; $A = A^T (AA^T)^{-1}$, L 与 A 均为 $1 \times d$ 的矩阵,其中 A 中元素均为 1, L 中元素为 1 与 -1,表明雀种中除发现者外,其他个体作为跟随者,依照发现者进行觅食; X_{worst} 为历史最差位置; X_g 为现在发现者的最佳位置; P 为雀种总数。

引入报警者,以防止算法落入局部最优,全局搜索能力增强,可设置报警者的数目占种群总数的 10%~20%,其位置如下

$$X_{i,j}^{N+1} = \begin{cases} X_{i,j}^{N+1} + \mu \left(\frac{|X_{i,j}^N - X_{\text{worst}}^N|}{(f_i - f_w) + \theta} \right), & f_i > f_g \\ X_{\text{best}}^N + G |X_{i,j}^N - X_{\text{best}}^{N+1}|, & f_i = f_g \end{cases} \quad (18)$$

式中: f_i 为当前自适应度值; f_w 为当前最差适应度值; f_g 为当前最好适应度值; 当 $f_i = f_g$ 时,此时报警者在最优位置,否则不是最优位置,将前往最优位置; X_{best} 为全域最佳位置; μ 与 G 表示随机数; θ 表示最小常数,其目的在于防止分母为 0。

优化问题需要确定适应度函数,以此来寻找最优解。在利用 SSA 算法进行寻优时,将样本熵作为适应度函数寻找最优解。样本熵值越小,表明序列中频率分量越少,信号噪声越少,其模态混叠问题小,分解效果越好,所提取的故障信息越丰富。因而将样本熵的最小值作为适应度函数,利用 SSA 算法寻优获得适应度的极小值。SSA-VMD 的具体步骤如下。

步骤 1: 设置算法种群数等基本参数,并产生 $[k, \alpha]$ 作为雀种的初始位置;

步骤 2: 对故障信号进行 VMD 分解,并将样本熵为适应度函数进行全局搜索;

步骤 3: 根据式(16)~(18)更新个体位置;

步骤 4: 重复步骤 2 到 3 直到达到样本熵最小,输出此刻的参数 $[K, \alpha]$;

步骤 5: 利用最佳参数对故障信号进行 VMD 分解。

3.3 算法参数设置

设置麻雀种群数为 10,最大迭代次数为 20,如图 4 所示。通过仿真发现,当群体进化代数到 5 代时得到了局部极小熵,此时得到的 $[K, \alpha]$ 为 $[6, 1.035]$ 。因

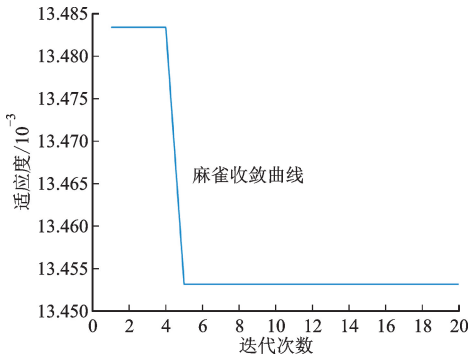


图 4 算法优化值与迭代次数的变化曲线

Fig. 4 Change curve of algorithm optimization value and iteration number

此,本文取 $K=6, \alpha=1.035$ 时, VMD 分解效果最优。

3.4 VMD 突变能量

当直流线路发生故障时,经过 VMD 分解所得的 IMF 分量会产生变化,其能量值会有所突变,因此将突变能量作为直流线路的故障特征。根据突变能量的定义公式

$$\Delta e = \Delta u \Delta i \quad (19)$$

为了保证数据的稳定性,将其改为积分的平均值,如式(20)所示

$$\Delta E = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n \Delta e(x) \quad (20)$$

假设故障突变量信号经过 VMD 分解得到 K 个 IMF 分量,根据式(20)计算其各个 IMF 分量,各模态分量可表示为 $\Delta E_1, \Delta E_2, \dots, \Delta E_K$ 。VMD 突变能量可表示为

$$\Delta H = \sum_{i=1}^K \Delta E_i \quad (21)$$

4 SSA-VMD 突变能量保护方法

4.1 保护启动

直流线路正常时,电压的变化率为 0,发生异常时,暂态电压会发生较大的突变,变化率大于 0。通过提取各保护测量安装处的电压幅值变化率,可以区分线路的正常与故障状态。以暂态电压变化率作为保护启动判据,即

$$\left| \frac{dU}{dt} \right| > K_{\text{set1}} \quad (22)$$

式中: U 是直流配电网运行时各线路的电压值; K_{set1} 为保护整定值,针对本文的模型,当线路电压的突变量大于自身的 1/10 时,可以认为线路发生了故障,本文的 K_{set1} 取 $0.1U$ 。当满足式(22)的时候启动,否则不启动。

4.2 故障分量提取

由 2.1 节可知,当故障发生时,电气量会产生突变,提取故障分量

$$\Delta a(g) = a(g) - a(g-h) \quad (23)$$

式中: g 为所选窗口内的采样点; h 为未发生故障时的采样点; $a(g)$ 为 g 时刻保护安装处测得的电气量; $\Delta a(g)$ 为 g 时刻保护安装处所测电气量的故障分量。

4.3 区内外故障识别判据

通过 2.1 节分析可知,当发生区内故障时,线路两侧测量得到的突变能量方向相同,两者数值之差

小;当发生区外故障时,两侧突变能量方向则相反,其数值之差大;无论是区内还是区外故障,非故障极的两侧突变能量均相反,但是其数值小,数据差值小于区外故障极上的突变能量差值。提取正、负极线路上突变能量差值的最大值,即

$$K_1 = \max(|K_p|, |K_n|) \tag{24}$$

式中 K_p 和 K_n 分别是正极、负极线路上突变能量差值。所构造的区内外故障识别判据为

$$K_1 > K_{\text{set}2} \tag{25}$$

式中 $K_{\text{set}2}$ 为判断区内外故障的整定值。考虑最难以区分情况下选取整定值,保证区内外判定的准确性,使其门槛值 $K_{\text{set}2}$ 可以躲开所有区外故障,整定值由式(26)确定

$$K_{\text{set}2} = \frac{K_d}{K_{\text{rel}}} \tag{26}$$

式中: K_{rel} 为可靠系数,取 1.2; K_d 为区外高阻接地线路突变能量值,即最终确定门槛值 $K_{\text{set}2}$ 为 2.6 可以识别区内外故障。综上,若满足式(25)可认为区外故障,否则为区内故障。

4.4 故障选极判据

根据 2.2 节可知,双极的突变能量比值可以区分出故障极。提取线路首端双极突变能量的比值,构造故障级识别判据,即

$$K_2 = \frac{|H_p|}{|H_n|} \tag{27}$$

式中: H_p 和 H_n 分别为线路首端正极和负极的突变能量。线路电磁耦合作用会使健全极上有突变量,但其值与故障极相差较大。当正极故障时, K_2 必然会大于 1,同理负极故障时, K_2 小于 1;当双极故障时,因为两极都出现故障,故障突变能量接近, K_2 约为 1。因此,构造的最终保护判据为

$$\begin{cases} K_2 > 1.5, & \text{正极故障} \\ 0.8 < K_2 \leq 1.5, & \text{双极故障} \\ K_2 \leq 0.8, & \text{负极故障} \end{cases} \tag{28}$$

4.5 保护流程图

根据所设计的环状直流配电网线路保护启动和故障识别判据,可以得到环状直流配电网保护算法流程图,如图 5 所示。

5 仿真验证

根据图 1,利用 PSCAD/EMTDC 搭建环状直流配电网模型,在线路不同位置设置不同的故障,验

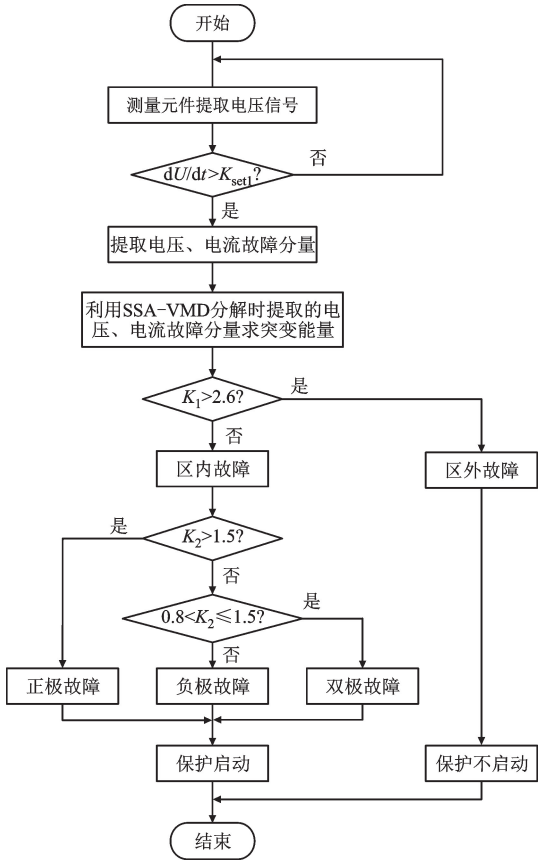


图 5 环状直流配电网线路保护算法流程图

Fig. 5 Line protection algorithm flowchart of ring-shaped DC distribution network

证线路保护原理。

模型数据采样频率设置为 10 kHz,在 0.32 s 时设置故障发生,并持续 0.05 s,本文数据窗选择为 3 ms。以 L_1 线路为例,进行仿真验证。

5.1 线路区内、外故障仿真

区内金属性接地故障属于最严重的故障类型,区外高阻接地时,因其能量突变量数值减小,所得差值最为接近区内数值,此时较难区分,倘若在区外高阻时可以有效识别出故障,那么可以保证区外其他故障均能被识别出。取 20 Ω 过渡电阻来模拟高阻故障,针对故障 $f_1 \sim f_7$ 不同位置进行仿真实验,结果见表 1。

区内金属性故障时,线路首末端突变能量大小如图 6 所示。由图 6 可知,区内故障在 f_1 、 f_2 、 f_3 得到的突变能量值均小于整定值。由图 7 可知,区外高阻故障时,线路首末端突变能量均大于整定值。由此验证了保护方法的正确性。

表 1 区内外故障识别结果

Table 1 Identification result of fault inside and outside zone

故障类型	故障位置	$ K_p $	$ K_n $	K_1	区内外判定结果
f_1	距首端保护安装处 20%	1.956	1.850	1.956	区内故障
	距首端保护安装处 50%	1.782	1.552	1.782	区内故障
	距首端保护安装处 80%	2.192	1.186	2.192	区内故障
f_2	距首端保护安装处 20%	1.962	1.374	1.962	区内故障
	距首端保护安装处 50%	1.667	1.843	1.843	区内故障
	距首端保护安装处 80%	1.924	1.522	1.924	区内故障
f_3	距首端保护安装处 20%	2.248	2.125	2.248	区内故障
	距首端保护安装处 50%	2.169	2.195	2.195	区内故障
	距首端保护安装处 80%	1.933	1.713	1.933	区内故障
f_4	区外正极首端	3.273	0.265	3.273	区外故障
f_5	区外负极首端	0.223	3.214	3.214	区外故障
f_6	区外正极末端	3.625	0.305	3.625	区外故障
f_7	区外负极末端	0.448	3.553	3.553	区外故障

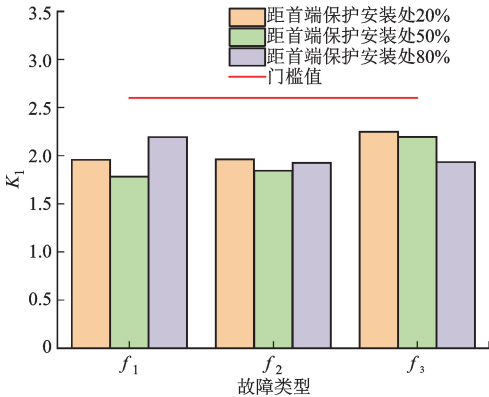


图 6 区内金属性故障时的 K_1 值

Fig. 6 K_1 value in case of metal fault in the zone

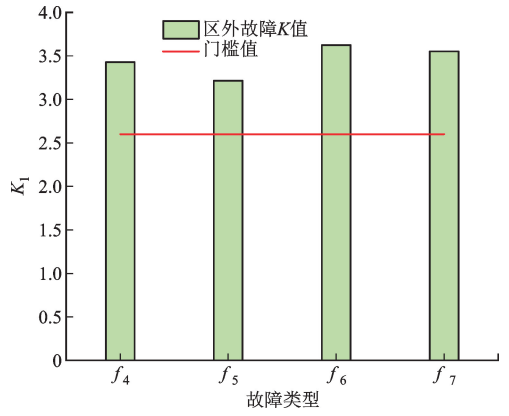


图 7 区外高阻故障时的 K_1 值

Fig. 7 K_1 value in case of high resistance fault outside the area

5.2 区内高阻接地仿真

随着过渡电阻的增大,故障分量幅值减小,得到的突变能量越小。为了验证系统的耐过渡电阻能力,在不同故障位置对故障 f_1 、 f_2 、 f_3 分别在 $10\ \Omega$ 和 $20\ \Omega$ 的过渡电阻下,进行仿真实验,如表 2 所示。

表 2 区内高阻故障识别结果

Table 2 High resistance fault identification results in the area

故障类型	故障位置	过渡电阻/ Ω	$ K_p $	$ K_n $	K_1
f_1	距首端保护安装处 20%	10	0.416	0.511	0.511
	距首端保护安装处 20%	20	0.652	0.279	0.652
	距首端保护安装处 50%	10	0.224	0.366	0.366
	距首端保护安装处 50%	20	0.366	0.159	0.366
	距首端保护安装处 80%	10	1.240	0.542	1.240
	距首端保护安装处 80%	20	0.599	0.278	0.599
f_2	距首端保护安装处 20%	10	0.457	0.827	0.827
	距首端保护安装处 20%	20	0.243	0.886	0.886
	距首端保护安装处 50%	10	0.364	0.890	0.890
	距首端保护安装处 50%	20	0.178	0.640	0.640
	距首端保护安装处 80%	10	0.414	1.236	1.236
	距首端保护安装处 80%	20	0.224	0.690	0.690
f_3	距首端保护安装处 20%	10	1.499	1.577	1.577
	距首端保护安装处 20%	20	1.201	1.196	1.201
	距首端保护安装处 50%	10	1.745	1.811	1.811
	距首端保护安装处 50%	20	1.179	1.215	1.215
	距首端保护安装处 80%	10	1.536	1.474	1.536
	距首端保护安装处 80%	20	1.052	0.971	1.052

由表 2 可知,不同故障类型在区内不同位置 and 不同过渡电阻时所得 K_1 值均小于阈值 2.6,表明该保护方法耐受过渡电阻能力较好。

5.3 故障选极仿真

故障判定为区内之后,需要进一步识别故障极,求取首端线路保护安装处的突变能量比值 K_2 。 f_1 、

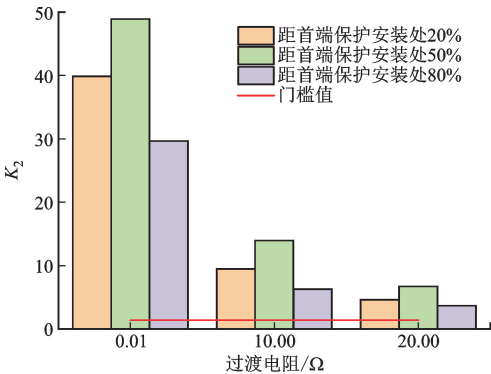
f_2 、 f_3 不同情况下正负极突变能量之比如表 3 所示。

表 3 单双极故障时突变能量之比

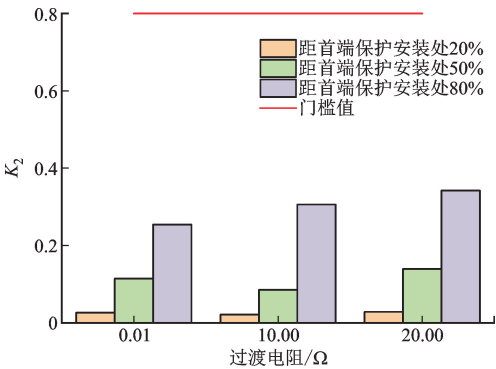
Table 3 Ratio of sudden change energy during single and bipolar faults

故障类型	故障位置	过渡电阻/ Ω	K_2	故障判定结果
f_1	距首端保护安装处 20%	0.01	39.86	正极
		10	9.49	
		20	4.61	
	距首端保护安装处 50%	0.01	45.39	正极
		10	13.99	
		20	6.74	
	距首端保护安装处 80%	0.01	30.34	正极
		10	6.30	
		20	3.67	
f_2	距首端保护安装处 20%	0.01	0.026	负极
		10	0.114	
		20	0.254	
	距首端保护安装处 50%	0.01	0.021	负极
		10	0.085	
		20	0.306	
	距首端保护安装处 80%	0.01	0.028	负极
		10	0.139	
		20	0.342	
f_3	距首端保护安装处 20%	0.01	1.047	双极
		10	1.075	
		20	1.129	
	距首端保护安装处 50%	0.01	1.024	双极
		10	1.074	
		20	1.139	
	距首端保护安装处 80%	0.01	1.021	双极
		10	1.063	
		20	1.169	

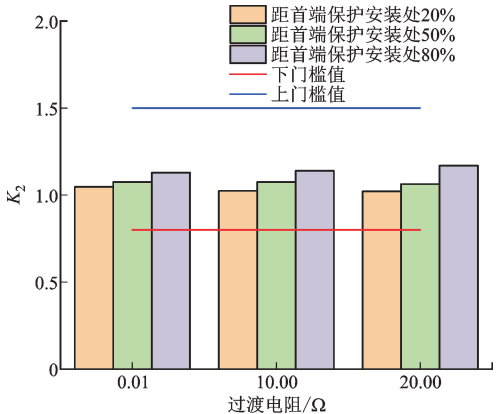
如图 8 所示:当正极故障时, K_2 均大于 1.5;当负极故障时, K_2 均小于 0.8;双极故障时的 K_2 值在 0.8到 1.5 之间。



(a)不同过渡电阻下的区内正极故障



(b)不同过渡电阻下的区内负极故障



(c)不同过渡电阻下的区内双极故障

图 8 不同过渡电阻下区内故障选极

Fig. 8 Pole selection for intra zone faults under different transition resistances

5.4 抗噪声干扰能力分析

仿真分析一般是最理想的状态下进行的分析,而实际工程中会有程度不同的噪声干扰,所以本文考虑到噪声的干扰,为检验所提保护方案抗干扰能力,在故障电流、电压中加入噪声,用信噪比衡量其抗噪声干扰的能力,结果如表 4 所示。

表 4 不同噪声下的故障检测结果

Table 4 Fault detection results under different noises					
故障类型	信噪比/dB	$ K_p $	$ K_n $	K_1	区内外判定结果
f_1	20	2.454	0.975	2.454	区内故障
	40	2.446	0.631	2.446	区内故障
f_2	20	0.372	2.206	2.206	区内故障
	40	0.843	2.407	2.407	区内故障
f_3	20	1.682	1.874	1.874	区内故障
	40	1.415	2.419	2.419	区内故障
f_4	40	3.246	0.366	3.246	区外故障
f_5	40	0.412	3.193	3.193	区外故障
f_6	40	2.995	0.297	2.995	区外故障
f_7	40	0.107	3.546	3.546	区外故障

可以看出,所有判别参数均满足保护判据要求,保护能够正常动作,可见本文所提保护方法在 40 dB 噪声情况下,依旧可以识别故障,有较好的抗噪声能力。

5.5 故障仿真验证结果

当区内单极故障时,仅故障极保护元件动作,非故障极不动作;区内双极故障时,两级保护元件均动作;区外故障时保护元件不动作。保护动作情况如表 5 所示。

表 5 故障仿真保护动作结果

Table 5 Fault simulation protection action status		
故障类型	识别结果	保护动作情况
f_1	区内正极接地故障	$P_1、P_2$ 动作
f_2	区内负极接地故障	$N_1、N_2$ 动作
f_3	区内双极接地故障	$P_1、P_2、N_1、N_2$ 动作
f_4	区外正极接地故障	不动作
f_5	区外负极接地故障	不动作
f_6	区外正极接地故障	不动作
f_7	区外负极接地故障	不动作

6 结 论

针对目前直流配电网保护方案存在耐过渡电阻能力不强、速动性不足等问题,本文分析了环状 MMC 直流配电网线路故障时的特征,根据线路发生故障时首末端电压、电流故障分量的特征,基于 SSA-VMD 算法,设计了一种改进的 VMD 突变能量保护方法。所提保护方法具有如下优点。

(1)利用麻雀搜索算法改进 VMD 算法,提升其分解效果,区内、外故障时线路首末端所得突变能量差异较明显,保护方案简单可靠。

(2)本保护方法可以保护线路全长,并且可以快速识别故障并在 3 ms 内可靠动作,将故障危害降到最低。

(3)本方法在过渡电阻为 20 Ω 以及白噪声下,依旧可以准确识别,有较高耐过渡电阻和抗干扰能力能力。

综上所述,本文所提保护方法易于实现,可靠性高。后续可以根据实际工程需要,结合直流断路器、换流器选择电抗器参数,并用实际数据对保护方法开展进一步探究。

参考文献:

[1] 刘海金,李斌,温伟杰,等. 柔性直流系统的线路保护关键技术与发展 [J]. 电网技术, 2021, 45(9):

3463-3477.
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): 3463-3477.
[2] HE Jinghan, CHEN Keao, LI Meng, et al. Review of protection and fault handling for a flexible DC grid [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 15.
[3] 郑涛,吕文轩. 基于级联全桥型直流断路器的直流配电网自适应重合闸方案 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 78-86.
ZHENG Tao, LV Wenxuan. Adaptive reclosing scheme for DC distribution network based on cascaded full-bridge DC circuit breaker [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 78-86.
[4] 杨赛昭,向往,文劲宇. 架空柔性直流电网线路故障保护综述 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6600-6616.
YANG Saizhao, XIANG Wang, WEN Jinyu. Review of DC fault protection methods for the MMC based DC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6600-6616.
[5] LEE J Y, KIM H S, JUNG J H. Enhanced dual-active-bridge DC-DC converter for balancing bipolar voltage level of DC distribution system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(12): 10399-10409.
[6] 李妮,焦在滨,齐杉. 基于直流断路器动作响应的环状柔性直流配电网后备保护方案 [J/OL]. 中国电机工程学报: 1-14[2022-10-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20220803.1329.010.html>.
LI Ni, JIAO Zaibin, QI Shan. A backup protection scheme based on the response of the DC circuit breaker tripping for the meshed DC distribution networks [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-14[2022-10-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20220803.1329.010.html>.
[7] 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.
[8] 徐瑞东,宋国兵,侯俊杰,等. 采用换流器控制信号变化量极性特征的高压直流线路纵联保护 [J]. 西安

- 交通大学学报, 2021, 55(5): 143-153.
- XU Ruidong, SONG Guobing, HOU Junjie, et al. Pilot protection for high voltage direct current transmission line based on polarity characteristics of converter control signal deviation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(5): 143-153.
- [9] YANG Yachao, HUANG Chun, XU Qianming. A fault location method suitable for low-voltage DC line [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 194-204.
- [10] 贾科, 陈聪, 刘子奕, 等. 基于单端电流暂态量的柔性直流配电网保护及其整定 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 144-152.
- JIA Ke, CHEN Cong, LIU Ziyi, et al. Protection of flexible DC distribution network based on single-end current transient and its setting [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 144-152.
- [11] 杨乐, 秦文萍, 陈晓乾, 等. 基于限流控制与保护协同的柔性直流配电线路整体保护方案 [J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4634-4646.
- YANG Le, QIN Wenping, CHEN Xiaoqian, et al. Overall protection scheme for flexible DC distribution lines based on synergy of current limiting control and protection [J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4634-4646.
- [12] 戴志辉, 刘雪燕, 刘自强, 等. 基于限流电抗电压积分值的环状柔性直流配电网保护方案 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 104-112.
- DAI Zhihui, LIU Xueyan, LIU Ziqiang, et al. Protection scheme for ring flexible DC distribution grids based on integration of current-limiting reactance voltage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 104-112.
- [13] 高淑萍, 邵明星, 宋国兵, 等. 一种适用于中压直流配电网单极故障的保护方法 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(8): 78-89.
- GAO Shuping, SHAO Mingxing, SONG Guobing, et al. A new type of protection method suitable for single-pole fault in medium voltage DC distribution network [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2021, 48(8): 78-89.
- [14] 李卫丰, 王超, 薛永端, 等. 基于暂态功率方向的柔性直流配电网线路单极接地保护方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 1-10.
- LI Weifeng, WANG Chao, XUE Yongduan, et al. A flexible DC distribution network line unipolar grounding protection method based on transient power direction [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 1-10.
- [15] 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.
- [16] 余修勇, 肖立业, 林良真, 等. 基于单端量的柔性直流电网故障识别方案 [J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 440-447.
- YU Xiuyong, XIAO Liye, LIN Liangzhen, et al. Single-ended fast fault detection scheme for MMC-based HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 440-447.
- [17] 时伯年, 李岩, 孙刚, 等. 基于快速重合闸的多端直流配电网极间故障隔离恢复策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 88-95.
- SHI Bonian, LI Yan, SUN Gang, et al. Fault isolation recovery strategy for multi-terminal DC distribution network based on DC breaker reclosing [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 88-95.
- [18] 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.
- [19] 杨冬锋, 王鹤, 刘晓军, 等. 基于 VMD-SVD 的多端柔直电网故障测距方案 [J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3084-3093.
- YANG Dongfeng, WANG He, LIU Xiaojun, et al. Fault location scheme for multi-terminal MMC-HVDC system based on VMD-SVD [J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3084-3093.
- [20] 刘维, 刘辉. 改进变分模态分解-多尺度排列熵结合广义回归神经网络的高压直流输电线路故障辨识 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(1): 211-219.
- LIU Wei, LIU Hui. High voltage direct current transmission lines fault identification method based on improved VMD-MPE and general regression neural network [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(1): 211-219.
- [21] 陈祥祥, 史治宇, 赵宗爽. 基于参数优化变分模态分解的瞬时模态参数识别 [J/OL]. 航空动力学报: 1-8

- [2022-09-01]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20220301>.
- CHEN Xiangxiang, SHI Zhiyu, ZHAO Zongshuang. Instantaneous modal parameter identification based on parameter optimized variational mode decomposition [J/OL]. *Journal of Aerospace Power*; 1-8[2022-09-01]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20220301>.
- [22] 申勇, 章翔峰, 姜宏, 等. 计入传动轴柔性的齿轮故障系统建模及 VMD-Lempel-Ziv 损伤评估 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(3): 126-135.
- SHEN Yong, ZHANG Xiangfeng, JIANG Hong, et al. Gear fault system modeling and VMD-Lempel-Ziv damage assessment considering transmission shaft flexibility [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(3): 126-135.
- [23] 李浩, 张禄亮. 基于改进 VMD 和特征分布系数的配电网高阻接地故障检测方法 [J]. *南方电网技术*, 2022, 16(12): 109-117.
- LI Hao, ZHANG Luliang. High impedance grounding fault detection method for distribution network based on improved VMD and characteristic distribution coefficient [J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(12): 109-117.
- [24] 张治, 王新宇, 王林. 基于麻雀搜索算法的光伏阵列参数辨识 [J]. *电气传动*, 2022, 52(13): 75-80.
- ZHANG Zhi, WANG Xinyu, WANG Lin. Photovoltaic array parameter identification based on sparrow search algorithm [J]. *Electric Drive*, 2022, 52(13): 75-80.
- [25] 王红君, 李万丰, 赵辉, 等. 基于改进 VMD-SSA 的直流微电网故障检测技术研究 [J]. *电工电能新技术*, 2022, 41(2): 53-62.
- WANG Hongjun, LI Wanfeng, ZHAO Hui, et al. Research on fault detection technology of DC microgrid based on improved VMD-SSA [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2022, 41(2): 53-62.
- [26] 陈少宇, 黄文焘, 邰能灵, 等. 基于单端暂态电压的含限流电抗器直流配电网保护方法 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(8): 185-193.
- CHEN Shaoyu, HUANG Wendao, TAI Nengling, et al. Protection method based on single-terminal transient voltage for DC distribution network with current limiting reactor [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(8): 185-193.
- [27] 王圣辉, 范春菊, 姜山. 基于暂态电压比原理的直流配电网故障保护方案 [J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(7): 196-203.
- WANG Shenghui, FAN Chunju, JIANG Shan. Fault protection scheme for DC distribution network based on ratio of transient voltage principle [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(7): 196-203.

(编辑 亢列梅)