

# 基于离散整定值的配电系统快速电流保护算法

张军, 宫旻, 周宜, 谢俊娥, 曹磊, 刘盈盈

(国网湖北电力有限公司神农架供电公司, 湖北 神农架 442400)

**摘要:**传统的电流保护使用电流的有效值与整定值进行比较以识别故障,这是配电系统输电线路的典型保护方案。通过快速傅里叶变换(FFT)算法计算电流。由于电流有效值的计算需要很长时间,电流速断保护的速度降低。针对这一问题,提出了一种基于离散整定值的快速电流保护算法。重点介绍了整定值离散序列和保护判据的构造。通过对电流故障分量整定值和采样值离散序列的比较,建立了保护启动判据和动作判据。分析了快速电流保护的工作特性和可靠性。通过基于PSCAD/EMTDC的仿真,将新型快速电流保护算法的性能与传统电流保护算法进行了比较。结果表明,该快速电流保护算法在不同故障条件下具有良好的运行特性。

**关键词:**配电系统;快速电流保护;离散整定值;电流故障分量

**中图分类号:**TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed24915

## A Fast Current Protection Algorithm for Power Distribution Systems Based on Discrete Setting-value

ZHANG Jun, GONG Min, ZHOU Yi, XIE June, CAO Lei, LIU Yingying

(State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. Shennongjia Power Supply Company, Shennongjia 442400, Hubei, China)

**Abstract:** In traditional current protection, the effective value of current is compared with the setting value to identify the fault which is the typical protection scheme for the transmission lines of the power distribution systems. The current is calculated by the fast Fourier transform algorithm. As the calculation of the effective value of current requires a long time, the speed of the current quick break protection is reduced. In this regard, a fast current protection algorithm based on the discrete setting-value was presented to solve this problem. The main emphasis was placed on the construction of the discrete sequence of setting-value and the protection criterion. The protection startup criterion and action criterion were constructed based on comparisons between discrete sequence of setting-value and sampling-value of the current fault component. The operation characteristics and reliability of the fast current protection were analyzed. The performance of the novel fast current protection algorithm was compared with that of the conventional current protection through simulations based on PSCAD/EMTDC. The results verify that the novel fast current protection algorithm has good operation characteristics under different fault conditions.

**Key words:** power distribution systems; fast current protection; discrete setting-value; current fault component

随着城市配电网的快速发展,为了提高用户的供电可靠性,配电网中的输电线路数量逐渐增加。此外,两级之间的配电线路较短,多级线路保护的短路电流差较小,因此很难设计保护配置方案来实现上下游与电流整定的协调<sup>[1]</sup>。例如,传统过流区段 I 和过流区段 II 的组合甚至会导致 10 kV 故障过渡到 35 kV 跳闸。为了降低过步跳闸的风险,基于时间差协调的电流保护在实践中被广泛使用。差分时间通常设置为 0.2~0.5 s,

但传统电流保护算法的数据窗口长度为一个周期。考虑到保护判断和保护输出延迟时间,很难将保护动作时间减少到 20 ms 以下。受限于变压器输出保护动作时间的要求(通常小于 0.5 s),多级配电网中基于时间差的电流保护的适应性严重降低<sup>[2-3]</sup>。因此,在配电网多层次趋势日益明显的情况下,缩短差分时间成为亟待解决的问题,也是扩大多层次保护配置的根本。目前,相关研究人员一直致力于研究差分协调问题。缩短差

**基金项目:**国家自然科学基金(52167010)

**作者简介:**张军(1978—),男,本科,工程师,主要研究方向为电气工程及其自动化,Email:Zj610505016@outlook.com

异时间主要从两个角度出发。一方面,缩短主要设备的动作时间。例如,真空断路器和磁性断路器等一次设备的发展缩短了断路器的动作时间;另一方面对保护算法进行了改进,以达到缩短保护装置差动的目的。为了提高保护的可靠性和速度,已经提出了多种先导保护方案<sup>[4-9]</sup>。文献[10]对高速飞行员保护进行了研究,保护算法依赖于暂态能量的方向比较,能够快速检测故障。文献[11]提出了一种自适应电流差动保护方案,以提高电力系统保护的可靠性和速度。在文献[12]中,作者提出了一种基于虚拟阻抗的新型导频保护方案。该方案不受不同故障条件的影响,并保持较高的可靠性。然而,上述保护算法需要用于数据传输的可靠通信信道<sup>[13]</sup>。通信信道的安装需要高的投资成本。行波保护利用故障电压和故障电流的行波特性实现最快的运行速度<sup>[14-17]</sup>。文献[18]为电网引入了一种新的行波保护算法。保护算法利用行波的传播特性实现超高速保护。在初始故障电流行波的基础上,提出了一种高速保护方案<sup>[19-20]</sup>。利用初始电流行波可以快速识别内部故障。尽管这些方案能够提高操作速度,但它们需要几百kHz的高采样率,这使得目前难以在配电系统中应用。

本文提出了一种基于采样值比较的配电线路快速保护新理论。所提出的快速电流保护需要更短的数据窗口,有助于更快的操作速度。

本文的其余部分安排如下:在第1节中,提出了快速电流保护的保护时间分析和一般思路。第2节给出了整定值模板曲线的构造。第3节描述了快速电流保护和可靠性分析的标准。第4节中,在PSCAD/EMTDC中开发了三相10kV配电网仿真模型,以测试快速电流保护的性能。第5节给出了结论。

## 1 保护时间分析及总体思路

### 1.1 传统保护动作的时间分析

在传统保护算法中,保护装置通过A/D转换模块将电流信号转换为数字量。通过数字滤波器、快速傅里叶变换计算电流均方根值(root mean square, RMS)并和整定值比较,进一步识别故障。当通过快速傅里叶变换计算的电流的RMS值大于保护整定值时,保护立即发出动作信号。动作时间分析如图1所示。

如图1所示, $I_{set}$ 为常规电流保护的整定值,

$i_{RMS}$ 为RMS电流, $i_k$ 为故障电流。

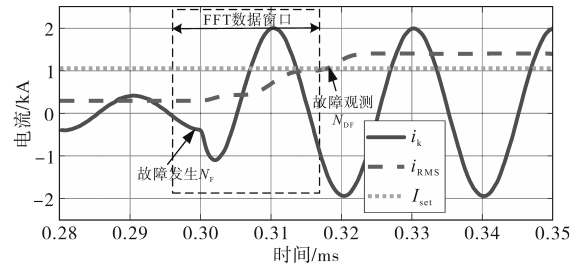


图1 传统保护措施的时间分析

Fig.1 Time analysis of traditional protection measures

系统故障发生的时间为 $t_0$ ,其对应的采样点为 $N_F$ 。此时,故障电流 $i_k$ 开始快速增加。然而,当保护装置计算全波快速傅里叶变换算法时,其数据窗口是当前时间前推的一个周期的采样数据。由于故障初始阶段的数据窗口包含大量非故障数据,计算的电流 $i_{RMS}$ 有效值不能立即反映实际故障电流。

从图1中可以看出,当前 $i_{RMS}$ 的RMS并没有快速增加,而是随着数据窗口的移动在一定程度上呈现出爬升效应,这延迟了保护的实际行动时间。假设短路电流 $i_{RMS}$ 的有效值在时间 $t_1$ 大于保护整定值 $I_{set}$ ,则此时对应的采样点为 $N_{DF}$ 。如果保护装置的采样频率为 $f_s$ ,则识别故障的延迟时间为 $\Delta t_1 = t_1 - t_0 = (N_{DF} - N_F) \times \frac{1}{f_s}$ 。延迟时间与保护整定值、故障电流、故障初始相角、故障类型等因素有关,一般超过0.5个周期,即大于10ms。

### 1.2 快速保护的基本思想

通过对传统电流保护动作时间的分析可知,传统电流保护故障识别的延时主要与数据窗口长度、保护整定值等因素有关。如果可以缩短保护判断窗口的长度,并且可以将故障电流与反映多个点的整定值的序列进行动态比较,无疑将有效地解决保护算法固有延迟长的问题。因此,首次提出了一种新的快速电流保护思想:

1)在故障发生初期,直接选取含有大量故障信息的前半波采样数据进行比较,形成保护判据,可以大大加快保护动作的判断。

2)在故障发生的初始阶段,立即构建与保护装置具有相同采样频率的整定值模板曲线序列。整定值模板曲线序列主要显示保护整定值的特性。

3)采样值与低阈值的比较,构建了保护启动判据。通过将电流故障分量的采样值与整定值模板曲线序列进行比较,构建保护动作准则。

## 2 整定值模板曲线的构建

### 2.1 整定值模板的振幅分析

由于短路电流的故障分量幅值远大于负载突然增加时的故障分量幅值,因此可以通过设置电流故障分量的保护整定值来进行有效的区分。只有当电流的故障分量大于故障分量的整定值时,才能判断为内部故障,因此电流故障分量的采样值应同时大于故障分量的整定值模板曲线。传统电流故障分量保护的整定值为  $\Delta I_{set}$ ,以  $(0.85 \sim 0.95)\sqrt{2} \Delta I_{set}$  为幅值构造的模板曲线,既能避免负荷突然增大时的误判,又能始终保证在短路情况下,整定值模板曲线绝对值小于电流故障分量绝对值。分析过程如图2所示。

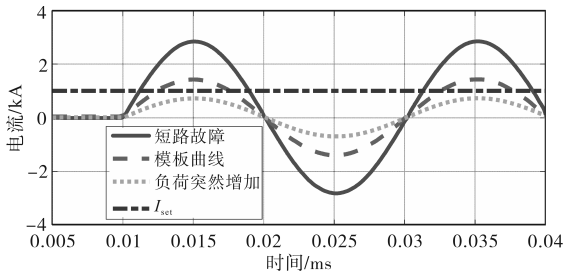


图2 整定值模板曲线的振幅分析

Fig.2 Amplitude analysis of setting-value template curves

### 2.2 整定值模板曲线的相位

当前故障部件的初始相位将受到故障时间的影响。如果构建的整定值模板曲线不能与当前故障分量曲线相位对齐,则可能会影响保护比较的结果,从而降低保护辨别的速度和性能。理想情况下,整定值模板曲线和电流故障分量曲线应严格对齐,即过零点和极值点一一对应。

当前样本值是一系列离散数据。使用极值理论,以相等的间隔实时计算两个采样点之间的增量符号。增加表示为“+”,减少表示为“-”,所以“+”和“-”形成序列。初始预定峰值时间落在符号改变间隔内,并且与该间隔中的最大值相对应的时间是预定峰值时间  $t_p$ 。基于峰值时间  $t_p$  将标准模板曲线的起点向前推  $T/4$  周期,然后以  $I_{set2}$  为振幅构建工频周期的整定值模板曲线:

$$i_s(t) = I_{set2} \sin(2\pi ft) \quad t \in [t_p - \frac{T}{4}, t_p + \frac{7T}{4}] \quad (1)$$

其中  $I_{set2} = (0.85 \sim 0.95)\sqrt{2} (I_{set} - I_e)$

式中:  $I_{set2}$  为整定值模板曲线的振幅;  $I_{set}$  为常规电流速断保护算法的整定值;  $I_e$  为被保护线路的额

定电流;  $T$  为标准正弦模板曲线周期。

在保护装置中,电流故障分量被转换为离散化的样本值,因此必须对整定值模板曲线进行离散化。为了确保可靠性,这里要求整定值模板曲线的离散化必须与当前故障分量采样相对应。通过离散化处理获得的离散值被设置为  $i_s(k)$ , 计算过程如下式所示:

$$i_s(k+1) = I_{set2} \sin(\frac{2\pi k}{N} - \alpha) \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

式中:  $i_s(k+1)$  为对应于  $k+1$  点的采样值;  $k$  为整数;  $\alpha$  为故障的初始相角。

### 2.3 故障分量样本值峰值时间的确定

考虑到电流故障分量的采样值易受高次谐波影响,可能存在1~2个分散的干扰点。如果由传统峰值算法搜索的预测峰值是干扰点,则根据干扰点时间构建的整定值模板曲线的相位将与当前故障分量的故障初始相位非常不同。比较多点样本值的结果将受到严重影响。

为了消除干扰点的影响,通过比较整定值模板曲线和故障分量样本值之间的相似度,使用欧几里德距离算法来确定峰值时间。欧几里德距离是两个或多个点之间最常见的距离表示算法。它在欧几里得空间中定义,其中两个  $n$  维向量  $\mathbf{a} = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n})$  和  $\mathbf{b} = (x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n})$  之间的欧几里德距离  $d_{12}$  表示为

$$d_{12} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{1k} - x_{2k})^2} \quad (3)$$

欧氏距离相似性的具体步骤如下:

1) 数据归一化。首先,通过“+”和“-”,初步预测峰值落在符号变化区间内。以预定极值  $i_{peak}$  作为归一化的准则,对故障分量采样值序列  $i(n)$  的每个点的幅度进行压缩,以获得归一化的故障分量采样序列  $i(n)_{pu}$ 。同时,基于其预定极值的对应时间为峰值时间的工频正弦波形,建立具有相同采样频率、振幅为1的标准正弦序列  $y(n)$ 。

2) 计算预测极值的欧氏距离相似度。标准正弦序列的起点是基于预测的极限时间  $t_p$  向前推  $T/4$  周期。从起始点到预定极值之后的第3点的间隔构成比较间隔。

通过应用欧几里德距离算法,计算比较区间中故障分量和标准正弦序列的样本值之间的相似度  $B$ , 如下式:

$$B = 1/(1 + d) \quad (4)$$

$$\text{其中 } d = \sqrt{\sum_{n=1}^k [i(n)_{\text{pu}} - y(n)]^2} \quad (5)$$

式中: $d$ 为欧几里得距离; $k$ 为比较区间中采样点的数量。

3)取最大相似度值与阈值 $B_{\text{set}}$ 进行比较。当在比较区间中存在 $r$ 个预定极值时,选择 $r$ 个相似度中的最大相似度与阈值 $B_{\text{set}}$ 进行比较。当满足下式时,预测极值被判断为正确的峰值。

$$\max(B_1, B_2, \dots, B_r) > B_{\text{set}} \quad (6)$$

考虑到裕度和精度,建议 $B_{\text{set}}$ 值为0.8~0.9。

模板曲线离散化和欧氏相似性比较如图3所示。当故障分量采样过程中没有干扰点时,如图3a所示,通过“+”和“-”序列,初步预测极值落在符号变化区间内。由于只有一个符号变化间隔(峰值 $i_{\text{peak}}$ ),因此根据预定的极端时间构造振幅为1的标准正弦序列 $y(n)$ 。 $i(n)_{\text{pu}}$ 是通过在峰值 $i_{\text{peak}}$ 的基础上归一化样本值序列 $i(n)$ 而获得的。使用欧氏距离相似度算法计算此时欧氏距离相似度 $B=1$ 。因为它大于相似度阈值 $B_{\text{set}}$ ,所以极值时间被称为峰值时间。

当采样过程中存在干扰点时,如图3b所示,通过“+”和“-”找到了对应于干扰点 $i_{\text{obs}}$ 和峰值 $i_{\text{peak}}$ 的两个符号变化区间。使用 $i_{\text{obs}}$ 和 $i_{\text{peak}}$ 作为预定极值,通过欧几里德相似度算法分别计算的欧几里德距离相似度为 $B_{\text{obs}}=0.215$ 和 $B_{\text{peak}}=1$ 。最后,根据

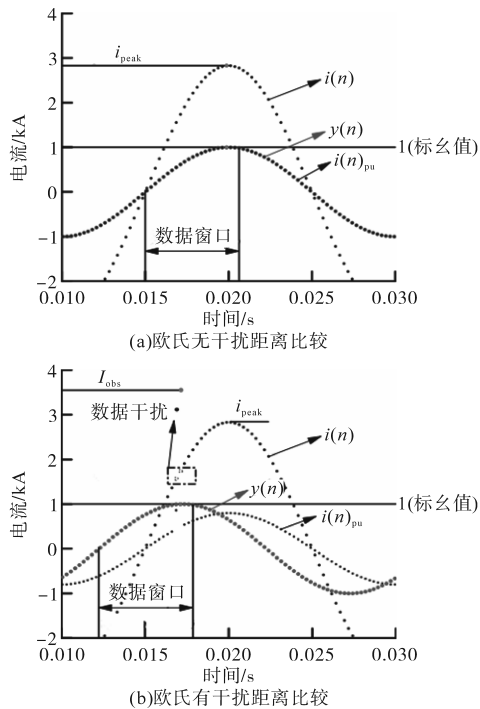


图3 欧几里德距离相似性比较

Fig.3 Euclidean distance similarity comparison

式(6)确定正确的极值时间。

### 3 快速保护标准和可靠性分析

#### 3.1 保护启动标准

对于给定的电流采样信号 $I$ ,电流故障分量可以由下式给出<sup>[21]</sup>:

$$I_m(k) = I(k) - I(k - 2N) \quad (7)$$

式中: $k$ 为样本数; $N$ 为一个周期中的样本数; $I(k)$ 为当前样本; $I(k-2N)$ 为在当前样本前两个周期中的对应样本。

假设电流故障分量的初始 $M_1$ 采样值为 $I_m(1), I_m(2), \dots, I_m(M)$ ,保护启动标准如下:

$$\frac{1}{M_1} \sum_{i=1}^{M_1} |I_m(i)| > I_{\text{set1}} \quad (8)$$

式中: $I_{\text{set1}}$ 为低阈值, $I_{\text{set1}}=0.05I_c$ ; $I_c$ 为受保护线路的额定电流; $M_1$ 为 $T/8$ 中采样点的数量。

快速保护启动标准如图4所示。

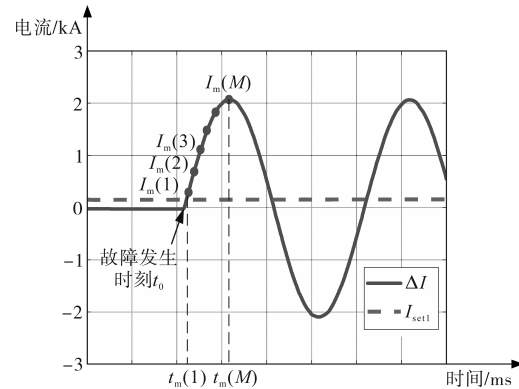


图4 快速保护启动标准

Fig.4 Startup criterion of fast protection

#### 3.2 保护动作标准

在满足保护启动标准后,根据第2.3节所述的方法,根据欧氏距离相似性找到正确的极限时间 $t_p$ ,然后根据第2.2节构建整定值模板曲线 $I_s(k)$ 的离散序列。

基于传统的电流保护,当故障发生在正保护范围内时,故障电流大于保护整定值。此时,对应的电流故障分量采样值 $I_m(k)$ 必须大于整定值模板曲线 $I_s(k)$ 的离散序列。保护动作标准如图5所示。

采样点 $k$ 的比较结果为

$$r_{\text{oc}}(k) = \begin{cases} 1 & |I_m(k)| \geq |I_s(k)| \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

为了提高保护操作的可靠性,基于多点比较结果构建了保护操作准则,如下式所示:

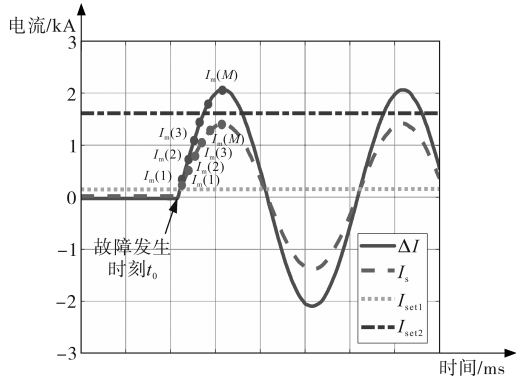


图5 快速保护动作标准

Fig.5 Action criterion of fast protection

$$R_{oc} = \sum_{k=1}^{M_2} r_{oc}(k) \geq M_2 - m \quad (10)$$

式中: $R_{oc}$ 为多点比较结果的总和; $M_2$ 为 $T/4$ 中采样点的数量。

考虑到采样值中存在干扰数据, $m=M_2/3$ 。如图6所示,多点采样值用于比较,可以在故障后的几个采样间隔内识别故障。根据保护标准和设置原则,保护装置可以在电源频率周期的 $1/4$ 内识别故障。故障检测所需的时间为 $\Delta t_2=t_2-t_0$ 。

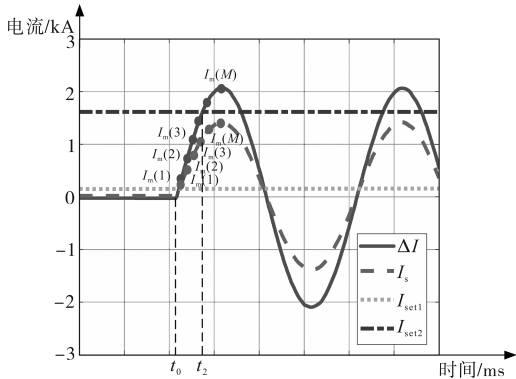


图6 故障检测所需的时间

Fig.6 The required time for fault detection

图6中, $t_2$ 为故障检测时刻,并且 $\Delta t_2$ 与 $M_2$ 的大小有关。动作时间不超过0.5个工频周期。所提出算法的逻辑图如图7所示。

采样值差动保护还使用采样值构建故障识别的保护标准。它具有快速动作的特点,但也容易受到一些因素的影响。保护操作的主要负面因素包括样本值的干扰、衰减的DC分量、负载变化、电流互感器(current transformer, CT)饱和等<sup>[22]</sup>。因此,有必要讨论这些因素对本文提出的快速保护算法的影响。

### 3.3 快速保护可靠性分析

对于采样值的干扰,在之前的分析中已经考虑了这个问题。采样值干扰对该方法的影响主

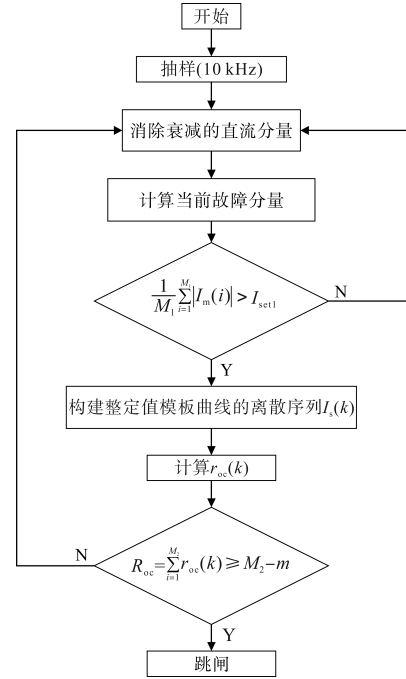


图7 新型算法的流程图

Fig.7 The logic diagram of the proposed algorithm

要体现在模板曲线的构建和保护判断上。然而,结合欧氏距离相似性判断极值点是否被正确找到的新方法可以有效避免干扰点对模板曲线构建的影响。此外,保护判据中的 $m$ 值可以有效避免对保护的误判。同时,当采样频率较高时,可以更好地解决这个问题<sup>[23]</sup>。

衰减直流分量的存在将导致采样值偏移。如果采样值直接应用于保护标准,则会发生保护误操作。因此,当计算 $I_m(k)$ 时,必须首先采用微分算法来消除DC分量。根据传统的微机保护装置,采用一点差分算法消除衰减的直流分量。

理论上,当断层的初始角度为 $0^\circ$ ,电流故障分量的第一波显著增加。当故障的初始角度为 $90^\circ$ ,电流故障分量的第一波增加不够明显。因此,考虑到故障初始角的影响,为确保所提保护算法的可靠性。将电流故障分量 $I_{set2}$ 的保护整定值设置为 $(0.85 \sim 0.95) \sqrt{2} (I_{set} - I_e)$ 。

当负载电流增加时,将出现电流故障部件。考虑到重载电流较大, $I_m(k)$ 可能大于 $I_{set1}$ ,并且满足保护启动标准。然而,传统电流保护的整定值考虑了负载变化的影响。因此,电流故障分量不会超过电流故障分量保护的整定值。 $I_m(k) < I_s(k)$ ,如图8所示。

CT饱和现象在常规电流保护中是不可避免的。配电网中CT元件的阈值低于高压主网络

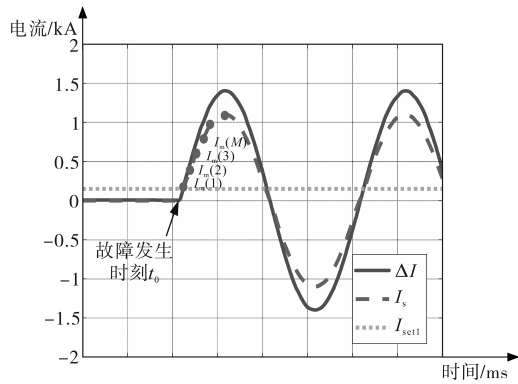


图8 负载变化的影响

Fig.8 Effect of load change

中CT的阈值。当电流大于5~8 kA时,会出现CT饱和现象。这种现象导致保护动作时间增加。在这种情况下,CT将在电流通过零点时释放饱和磁通量,并输出正常的电流采样数据<sup>[24-25]</sup>。使用该正常电流采样数据可以识别故障,如图9所示。因此,本文提出的算法可以有效避免CT饱和的影响。

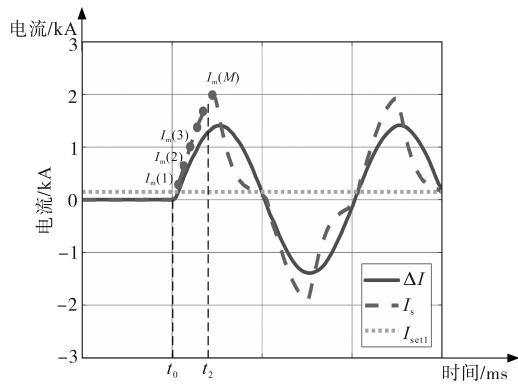


图9 CT饱和时的故障电流波形

Fig.9 Fault current waveform with a CT saturation

## 4 模拟和验证

为了验证新型电流保护算法的有效性,在PSCAD/EMTDC平台上进行了大量仿真。10 kV配电网仿真模型如图10所示。系统频率为50 Hz,采样频率为10 kHz。根据仿真模型的系统参数, $I_{set1}$ 设置为0.025 kA, $I_{set}$ 设置为1.36 kA, $I_{set2}$ 设置为0.98 kA。在Matlab程序中使用继电器CB<sub>2</sub>位置的测量电流来实现新的保护方案。 $F_1$ 是内部故障点, $F_2$ 是外部故障点。在模拟中,将各种故障条件设置为在 $F_1$ 和 $F_2$ 处发生。

### 4.1 内部故障

在 $F_1$ 发生三相短路故障的情况下,传统电流保护和所提出算法的操作响应如图11所示。三相短路故障发生在60 ms,RMS故障电流 $I_{RMS}$ 从

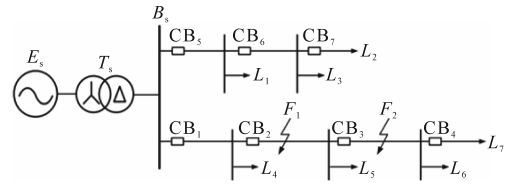


图10 10 kV配电网仿真模型

Fig.10 Simulation model of 10 kV distribution network

0.55 kA增加到1.94 kA,满足新型电流保护的動作标准,在63 ms时产生跳闸信号,而传统保护在75 ms时运行跳闸信号。在 $F_1$ 发生相间短路故障的情况下,传统电流保护和新型电流保护运行响应如图12所示。 $I_{RMS}$ 从0.55 kA增加到1.60 kA。满足新型电流保护的操作系统,在63 ms时产生跳闸信号,而传统保护在75.5 ms时产生跳闸信号。

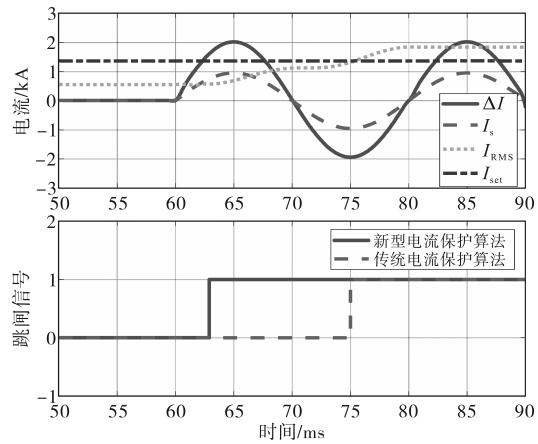


图11 内部三相短路故障时的保护操作

Fig.11 Protection operation in the case of an internal three-phase short circuit fault

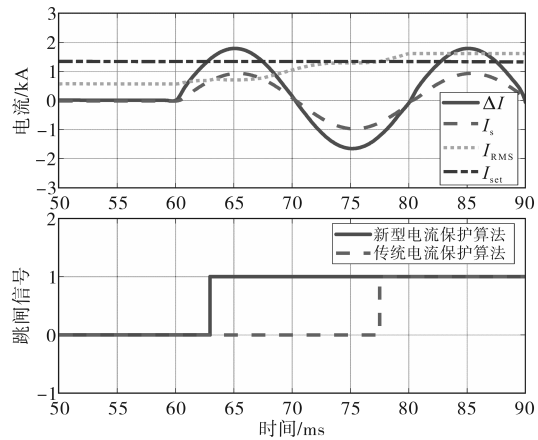


图12 内部相间短路故障时的保护操作

Fig.12 Protection operation in the case of an internal phase-phase short circuit fault

#### 4.1.1 不同故障类型的影响

分析了传统电流保护和新型电流保护在不同内部故障类型下的性能。不同故障类型对应的延迟时间如表1所示。表1表明,新型电流保

护可以在故障开始后 3 ms 产生跳闸信号,而传统电流保护需要在故障开始后 10~20 ms 产生跳闸信号。因此,在不同内部故障类型的情况下,与传统算法相比,新型保护的时间延迟要短得多。

表 1 故障类型的影响  
Tab.1 Effect of fault type

| 故障类型 | 故障位置  | 故障时刻  | 延迟时间/ms |     |
|------|-------|-------|---------|-----|
|      |       |       | 传统      | 新型  |
| Ag   | $F_1$ | 0.100 | 20.9    | 3.0 |
|      | $F_1$ | 0.102 | 19.1    | 3.0 |
|      | $F_1$ | 0.104 | 18.4    | 3.0 |
| ABg  | $F_1$ | 0.100 | 12.5    | 3.0 |
|      | $F_1$ | 0.102 | 11.0    | 3.0 |
|      | $F_1$ | 0.104 | 10.4    | 3.0 |
| AB   | $F_1$ | 0.100 | 12.5    | 3.0 |
|      | $F_1$ | 0.102 | 11.2    | 3.0 |
|      | $F_1$ | 0.104 | 11.3    | 3.0 |
| ABC  | $F_1$ | 0.100 | 13.2    | 3.0 |
|      | $F_1$ | 0.102 | 11.3    | 3.0 |
|      | $F_1$ | 0.104 | 10.3    | 3.0 |

#### 4.1.2 故障起始瞬间的影响

在不同的故障起始时刻,分析了传统电流保护和新型电流保护的性能。对应于不同故障起始时刻的操作响应如表 2 所示。从结果来看,在不同模拟条件下,新型电流保护可以在故障起始后 5 ms 识别故障。然而,常规电流保护需要 10~15 ms 才能产生跳闸信号。因此,在不同内部故障起始时刻的条件下,与传统电流保护相比,新型电流保护的延迟时间要短得多。

表 2 故障发生瞬间的影响  
Tab.2 Effect of fault inception instant

| 故障类型 | 故障位置  | 故障时刻  | 延迟时间/ms |     |
|------|-------|-------|---------|-----|
|      |       |       | 传统      | 新型  |
| ABC  | $F_1$ | 0.100 | 13.2    | 5.1 |
| ABC  | $F_1$ | 0.102 | 11.3    | 5.0 |
| ABC  | $F_1$ | 0.104 | 10.3    | 5.2 |
| ABC  | $F_1$ | 0.106 | 12.2    | 5.0 |
| ABC  | $F_1$ | 0.108 | 15.4    | 5.1 |
| ABC  | $F_1$ | 0.110 | 13.7    | 5.0 |
| ABC  | $F_1$ | 0.112 | 11.9    | 5.0 |

#### 4.2 外部故障

在  $F_2$  发生三相短路故障的情况下,传统电流速断保护和新型电流保护的操作响应如图 13 所示。从结果来看,三相短路故障发生在 60 ms 时,  $I_{RMS}$  从 0.55 kA 增加到 0.99 kA。在这种情况下,由于  $|\Delta I|$  和  $I_{RMS}$  分别小于  $I_s$  和  $I_{set}$ ,所提出的算法和传统算法不会生成跳闸信号。在  $F_2$  发生相间短路

故障的情况下,保护操作结果如图 14 所示。从结果来看,在 60 ms 时发生相间短路,  $I_{RMS}$  从 0.55 kA 增加到 0.96 kA。类似地,所提出的算法和传统算法不会产生跳闸信号。

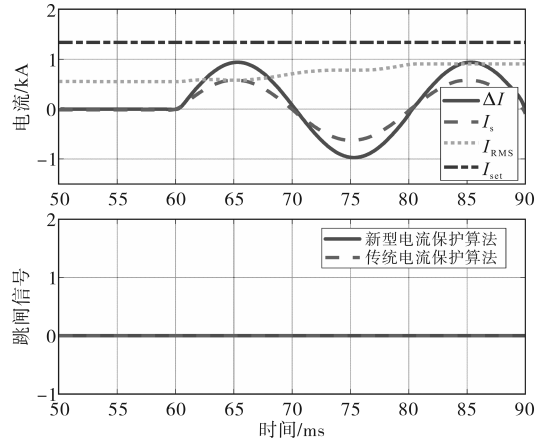


图 13 外部三相短路故障时的保护操作

Fig.13 Protection operation in case of an external three-phase short circuit fault

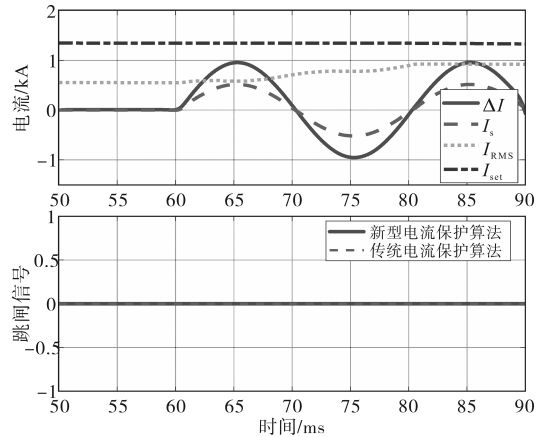


图 14 外部相间短路故障保护操作

Fig.14 Protection operation in case of an external phase-phase short circuit fault

#### 4.3 CT饱和和内部故障

如图 15 所示,在 70 ms 时,  $F_1$  发生三相短路故障,通过改变电流互感器的参数实现 CT 饱和。参考图 16,所提出的算法利用不饱和区中的采样点数据来识别故障,并在 73 ms 时产生跳闸信号。由于 CT 饱和的影响,传统电流保护在 100 ms 时产生一个跳闸信号,由于波形失真,  $I_{RMS}$  降低,这导致了传统保护的延迟时间延长。因此,所提出的算法具有更好的抗 CT 饱和性能。

#### 4.4 负载变化的影响

在负载变化的情况下,分析了两种保护算法的保护操作。如图 17 所示,负载电流在 70 ms 时变化,同时,  $I_{RMS}$  从 0.56 kA 增加到 0.87 kA,这比  $I_{set}$

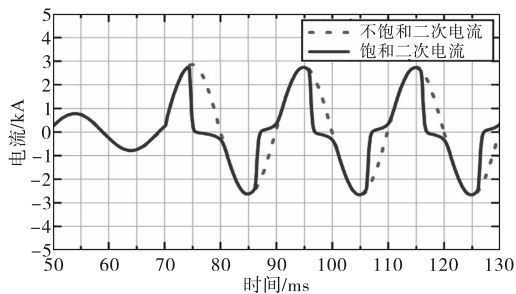


图15 饱和电流信号

Fig.15 Saturated current signal

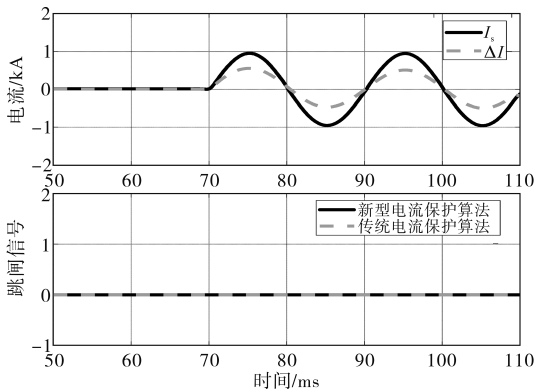


图16 内部故障的CT饱和结果

Fig.16 CT saturation results for internal fault

小。如图18所示,两条曲线重合,所提出的算法和传统算法均不会产生跳闸信号。结果表明,所提出的算法和传统算法不受负载变化的影响。

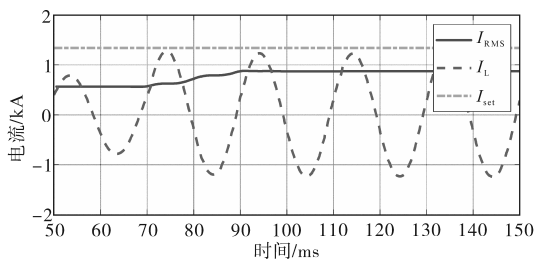


图17 负载电流波形

Fig.17 Load current waveform

#### 4.5 噪声的影响

如图19所示,内部三相短路故障在60 ms时发生,并且高斯白噪声被添加到故障电流信号中。新型电流保护在故障开始后3 ms产生跳闸信号。然而,传统的电流保护在故障开始后需要12 ms才能产生跳闸信号。结果表明,该算法在噪声干扰条件下具有较好的工作特性。

#### 4.6 与其他保护算法的比较与分析

为了缩短保护识别时间,一些专家和学者提出使用半波傅里叶算法和窄带滤波算法来计算RMS电流,以缩短故障识别时间。本文采用半波傅里叶算法和窄带滤波算法与改进的保护算法进行了比较。在 $F_1$ 处发生三相短路故障的情况

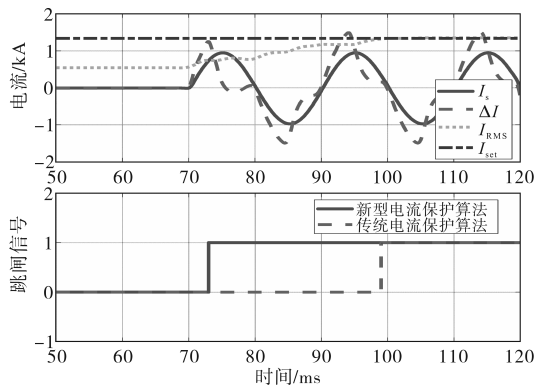


图18 负载变化的操作响应

Fig.18 Operating response for load change

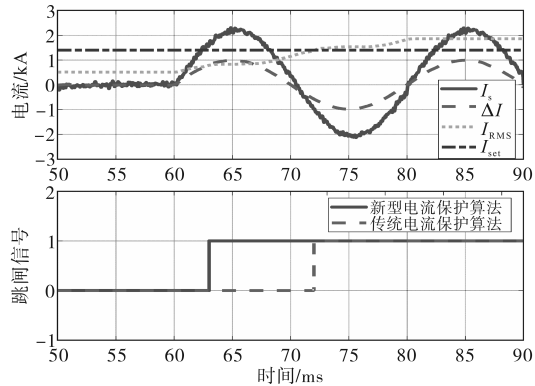


图19 噪声的运行响应

Fig.19 Operating response for noise

下,半波傅里叶算法、窄带滤波算法和所提出算法的操作响应如图20所示。

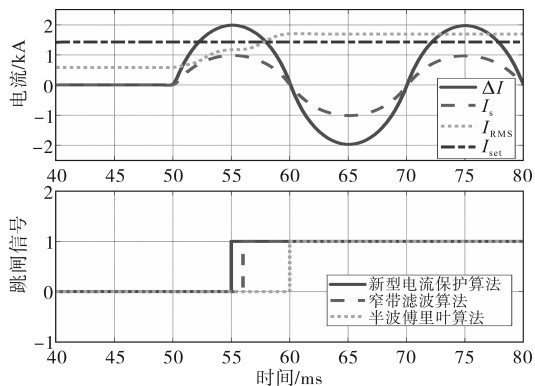


图20 三种保护算法的比较分析

Fig.20 Comparison and analysis of three protection algorithms

三相短路故障发生在50 ms,RMS故障电流 $I_{RMS}$ 从0.55 kA增加到1.74 kA。所提出的算法在故障开始后5 ms产生跳闸信号,然而,半波傅里叶算法在故障开始后需要9.8 ms才能产生跳闸窄带滤波算法信号,窄带滤波算法需要6 ms才能产生跳闸信号。结果表明,与半波傅里叶算法和窄带滤波算法相比,所提出的保护算法的延迟时间更短。

## 5 结论

提出了一种基于离散整定值的快速电流保护算法。所提出的算法利用整定值的离散序列与当前故障分量的采样值之间的比较来识别故障。通过多点比较结果的和,建立了保护启动判据和动作判据,提高了保护动作的可靠性。与传统的电流保护方案相比,新的保护算法具有更快的速度,并且具有良好的抗CT饱和、抗噪声干扰能力。仿真实验表明,该算法在不同故障条件下具有良好的运行特性。

### 参考文献

- [1] MA Hengrui, LIU Zhe, LI Min, et al. A two-stage optimal scheduling method for active distribution networks considering uncertainty risk[J]. Energy Reports, 2021(7):4633-4641.
- [2] ALVES H N, FONSECE R N B. An algorithm based on discrete wavelet transform for fault detection and evaluation of the performance of overcurrent protection in radial distribution systems[J]. IEEE Latin America Transaction, 2014, 12(4):602-608.
- [3] NAIK S G, RAVI V, ARSHIYA R. Programmable protective device for LV distribution system protection[J]. Protection and Control Modern Power Systems, 2018, 3(3):285-290.
- [4] 任康杰, 刘阳, 李勇, 等. 一种适用于继电保护在线整定的极小断点集求取算法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14):43-52.  
REN Kangjie, LIU Yang, LI Yong, et al. An algorithm for finding the minimum breakpoint set for online setting of relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14):43-52.
- [5] 戴志辉, 陈思琦, 李毅然, 等. 基于聚类中心距离度量的柔性直流配电线路保护原理[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(9):126-132.  
DAI Zhihui, CHEN Siqi, LI Yiran, et al. Flexible DC distribution line protection principle based on cluster center distance measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(9):126-132.
- [6] 李新雷, 鄢杰, 张川, 等. 配电网保护快速算法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(12):4877-4888.  
LI Xinlei, YAN Jie, ZHANG Chuan, et al. Research on fast algorithm of distribution network protection[J]. Power System Technology, 2021, 45(12):4877-4888.
- [7] 刘永欣, 师峰, 姜帅, 等. 智能变电站继电保护状态监测的一种模糊评估算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3):37-41.  
LIU Yongxin, SHI Feng, JIANG Shuai, et al. A fuzzy evaluation algorithm for relay protection status monitoring in intelligent substations[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3):37-41.
- [8] 王艳, 郝良霞, 刘美岑, 等. 基于正交滤波函数的快速窄带滤波算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3):35-42.  
WANG Yan, HAO Liangxia, LIU Meicen, et al. Fast narrow-band filtering algorithm based on orthogonal filter functions[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3):35-42.
- [9] 熊玉倩, 都洪基. 机器学习算法运用到电力系统继电保护[J]. 电气应用, 2018, 37(18):32-37.  
XIONG Yuqian, DU Hongji. Machine learning algorithm applied to power system relay protection [J]. Electrical Application, 2018, 37(18):32-37.
- [10] KONG Yuan, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo. Study of ultra-high-speed protection of trans-mission lines using a directional comparison scheme of transient energy[J]. IEEE Transactions Power Delivery, 2014, 30(3):1317-1322.
- [11] DAMBHARE S, SOMAN S A, CHANDORKLAR M C. Adaptive current differential protection schemes for transmission-line protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4):1832-1841.
- [12] MA Jing, PEI Xun, MA Wei, et al. A new transmission line pilot differential protection principle using virtual impedance of fault component[J]. Canadian Journal of Electrical & Computer Engineering, 2015, 38(1):37-44.
- [13] APPASANI B, MOHANTA D K. A review on synchrophasor communication system: communication technologies, standards and applications[J]. Protection and Control Modern Power Systems, 2018, 3(3):383-399.
- [14] 李海锋, 蒋慧敏, 梁远升, 等. 基于故障电压反行波拟合残差的柔性直流线路单端行波保护[J]. 电网技术, 2023, 47(12):5120-5128.  
LI Haifeng, JIANG Huimin, LIANG Yuansheng, et al. Single-end traveling wave protection of flexible DC lines based on the residual of fault voltage reverse traveling wave fitting[J]. Power System Technology, 2023, 47(12):5120-5128.
- [15] 牟大林, 林圣, 李小鹏, 等. 白鹤滩-江苏特高压混合直流输电线路行波保护适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21):88-98.  
MOU Dalin, LIN Sheng, LI Xiaopeng, et al. Adaptability analysis of traveling wave protection for Baihetan-Jiangsu UHV hybrid DC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21):88-98.
- [16] 郑涛, 宋祥艳. 适用于多端直流电网的电压极性比较式行波保护方案[J]. 电网技术, 2022, 46(12):4690-4699.  
ZHENG Tao, SONG Xiangyan. Voltage polarity comparison traveling wave protection scheme applicable to multi-terminal DC power grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(12):4690-4699.
- [17] 彭贺翔, 廖凯, 李波, 等. 计及直流分压器传变特性的行波保护定值整定方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(5):179-191.  
PENG Hexiang, LIAO Kai, LI Bo, et al. Setting method of traveling-wave protection taking into account the transmission characteristics of DC voltage divider[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(5):179-191.

(下转第76页)

2021,49(19):18-26.

SHUAI Wanlan, ZHU Ziwei, LI Xuemeng, et al. "Source-network-load-storage" coordinated optimization operation for an integrated energy system considering wind power consumption [J]. Power System Protection and Control, 2021,49(19):18-26.

[16] 黄景光,汪潭,林湘宁,等. 面向风电消纳的区域综合能源系统鲁棒优化调度[J]. 电测与仪表, 2021,58(12):110-117.

HUANG Jingguang, WANG Tan, LIN Xiangning, et al. Robust optimal dispatch of regional integrated energy system for wind power consumption[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021,58(12):110-117.

[17] 张彼德,陈颖倩,李孟洁,等. 含热泵和相变储能的多能互补微能源网运行优化方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(1):106-114.

ZHANG Bide, CHEN Yingqian, LI Mengjie, et al. Research on an operational optimization method of multi-energy complementary micro energy grid with heat pump and phase change energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1):106-114.

[18] 龙虹毓,何国军,徐瑞林,等. 计及分布式电源热泵的热电联产协调优化调度与能效分析[J]. 电力系统自动化, 2013,37(14):38-42.

LONG Hongyu, HE Guojun, XU Ruilin, et al. Cogeneration coordination optimal dispatch and energy efficiency analysis containing distributed electric heat pumps[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(14):38-42.

[19] 王丹,范孟华,贾宏杰. 考虑用户舒适约束的家居温控负荷需求响应和能效电厂建模[J]. 中国电机工程学报, 2014,34(13):2071-2077.

WANG Dan, FAN Menghua, JIA Hongjie. User comfort constraint demand response for residential thermostatically-controlled loads and efficient power plant modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(13):2071-2077.

[20] 孙莹,李晓鹏,蔡文斌,等. 面向新能源消纳的调峰辅助服务市场研究综述[J]. 现代电力, 2022,39(6):668-676.

SUN Ying, LI Xiaopeng, CAI Wenbin, et al. A research overview on ancillary services market of peak regulation oriented to accommodation of new energy[J]. Modern Electric Power, 2022, 39(6):668-676.

[21] BARAA M, MOHAMED M, NIKOS H, et al. A review of power system flexibility with high penetration of renewables[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019,34(4):3140-3155.

[22] 单文亮,刘静,徐宪东,等. 基于可调鲁棒优化的工业园区供能系统自发电灵活性评估[J]. 高电压技术, 2023,49(4):1402-1411.

SHAN Wenliang, LIU Jing, XU Xiandong, et al. Evaluation of the electricity flexibility of energy supply system in industrial park using adjustable robust optimization framework[J]. High Voltage Engineering, 2023,49(4):1402-1411.

[23] 刘泽洪,阎志鹏,侯宇. 俄乌冲突对世界能源发展的影响与启示[J]. 全球能源互联网, 2022,5(4):309-317.

LIU Zehong, YAN Zhipeng, HOU Yu. The impact and implication of Russia-Ukraine conflict on world energy development[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022,5(4):309-317.

收稿日期:2023-05-09  
修改稿日期:2023-06-08

(上接第56页)

[18] 薛士敏,崔森. 基于形态学梯度算法的微电网行波保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019,47(2):31-39.

XUE Shimin, CUI Miao. Microgrid traveling wave protection scheme based on morphological gradient algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019,47(2):31-39.

[19] 吴浩,李群湛,刘炜. 基于功率信息的广域行波保护新算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018,30(2):90-100.

WU Hao, LI Qunzhan, LIU Wei. New algorithm of wide-area traveling wave protection based on power information[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018,30(2):90-100.

[20] 董新洲,王珺,施慎行. 配电线路单相接地行波保护的原理与算法[J]. 中国电机工程学报, 2013,33(10):154-160.

DONG Xinzhou, WANG Jun, SHI Shenxing. Principle and algorithm of single-phase grounding traveling wave protection for distribution lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(10):154-160.

[21] GAO H, CROSSLEY P A. Design and evaluation of a directional algorithm for transmission-line protection based on positive-sequence fault components[J]. IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2006,153(6):711-718.

[22] ABDELHAMID Mohammed, KAMEL Salah, SELIM Ali, et al. Development of bonobo algorithm and its application for optimal coordination of directional overcurrent relays in power systems[J]. DYNAIng, 2021,96(5):492-497.

[23] ABDELHAMID Mohammed, KAMEL Salah, MOHAMED Mohamed A, et al. An effective approach for optimal coordination of directional overcurrent relays based on artificial ecosystem optimizer[C]//2021 IEEE International Conference on Automation/XXIV Congress of the Chilean Association of Automatic Control(ICA-ACCA), IEEE, 2021.

[24] ABDELHAMID Mohammed, KAMEL Salah, MOHAMED Mohamed A, et al. Political optimization algorithm for optimal coordination of directional overcurrent relays[C]//2020 IEEE Electric Power and Energy Conference, EPEC, IEEE, 2020.

[25] MOHAMED Mohamed A, JIN Tao, SU Wencong. An effective stochastic framework for smart coordinated operation of wind park and energy storage unit[J]. Applied Energy, 2020, 272:115228.

收稿日期:2023-01-15  
修改稿日期:2023-05-11