

基于差分天牛须算法的继电保护装置异常警告方法

王立军[†], 程鹏, 梅千宇, 谭普成, 吴光杰, 蔡鸿儒

(贵州乌江水电开发有限责任公司构皮滩发电厂, 贵州 遵义 564400)

摘要: 受到多因素影响, 对不同程度的异常故障信息节点, 采用定量参数作为触发条件, 出现部分异常故障信息感知偏差较大, 造成警告保护失效的问题。为此, 设计了一种基于差分天牛须算法的继电保护装置异常警告方法。计算异常警告触发的频度-无效触发概率的最大似然估计值, 确定继电保护装置异常警告节点的先验概率, 通过贝叶斯网络与异常警告信息节点故障树之间的相似性, 对故障树进行优化, 同时, 引入差分天牛须算法进行二次优化, 完成对应感知异常警告信息节点的位置更新, 完成继电保护装置异常警告方法。实验结果表明, 提出方法具备提升异常警告精准度, 降低全局偏差的能力, 且方法操作全过程稳定性好, 扰动控制收敛适中, 具有较高的研究与推广价值。

关键词: 差分天牛须算法; 继电保护装置; 异常; 警告

中图分类号: TM773

文献标识码: A

An Abnormal Alarm Method of Relay Protection Device Based on Differential Beetle Antenna Algorithm

WANG Lijun[†], CHENG Peng, MEI Qianyu, TAN Pucheng, WU Guangjie, CAI Hongru
(Goupitan Power Plant, Guizhou Wujiang Hydropower Development Co., Ltd., Zunyi, Guizhou 564400, China)

Abstract: Affected by multiple factors, quantitative parameters are used as triggering conditions for nodes with different degrees of abnormal fault information. As a result, there is a significant deviation in the perception of some abnormal fault information, leading to the failure of warning protection. To address this issue, a relay protection device abnormal alarm method based on the differential beetle antenna algorithm is designed. Calculate the frequency of abnormal alarm triggering-maximum likelihood estimate of invalid triggering probability, determine the prior probability of abnormal warning nodes in relay protection devices, optimize the fault tree through the similarity between Bayesian network and abnormal warning information node fault tree, and introduce the differential beetle algorithm for secondary optimization to complete the position update of corresponding perceptual abnormal warning information nodes, complete the abnormal alarm method for relay protection devices. The experimental results show that the proposed method has the ability to improve the accuracy of anomaly warnings, reduce global deviations, and has good stability throughout the operation process. The disturbance control convergence is moderate, and it has high research and promotion value.

Key words: differential beetle antenna algorithm; relay protection device; abnormal; warning

故障分析是继电保护装置在对电路系统保护过程中的核心环节,其核心算法的异常感知能力及其准确度直接影响电路系统的应用安全。通过对近五年的继电器算法应用效果的统计发现,93.4%的继电器保护故障问题的出现都归结于传统算法的异常警告数据感知偏差较大^[1-2]。其偏差来源受到电网系统控制参量,继电器生产规格差异,使用环境因素等多种因素影响。因此,如何通过故障信息的有效利用,快速定位故障元件、动作结果及保护装置内部信息异常,成为解决问题的关键,同时也是当下研究的热门课题。

差分天牛须算法是一种新型的全局优化算法,能够对复杂系统进行全局优化,具有良好的鲁棒性和鲁棒性^[3-4],在很多领域得到了广泛应用。该方法以故障信息为基础,结合数据差分处理技术,综合利用继电保护装置内部信息和故障元件信息,能够有效提高异常警告的准确性和及时性。

1 继电保护装置异常警告方法

1.1 继电保护装置异常警告节点先验概率确定

考虑到不同继电器型号之间存在的差异,以及各个厂家、设计参数之间的不同,这些因素都会对保护效果产生影响。因此在提出方法中,首先需要确定继电保护装置异常警告节点的先验概率。通过准确地确定先验概率,可以显著提高警告节点的感知准确性。

为了实现这一目标,需要构建一个根节点网络。根据异常警告节点分布的特征,采用贝叶斯网络^[5-6]来完成根节点网络的构建。贝叶斯网络具有分布类精准性强的特点,这使得它能够与后期的差分天牛须算法完美融合。这种融合降低了算法转化过程中可能带来的参数损失,从而提高了整体计算的准确性。

具体计算过程如下:

根据异常节点样本的周期性可知,在周期内的异常信息节点所构成的样本具有随机截尾特性。因此假设样本规模为 n ,其中包含 r 组样本可以触发异常警告,异常警告触发时间为 t_i ,即异常警告被触发时的时间点与继电保护装置感知异常节点信息所用时间之差, $i = 1, 2, \dots, r$;共包含 k 个样本正常信息节点, c_j 代表正常信息节点样本的截尾时间,即样本反馈所需时间与发送所需时间之差, $j = 1, 2, \dots, k$ 。根据历史经验可知,常规警告触发过程中指数分布对于异常警告触发节点信息

系数的拟合程度较高^[7-8],由此可以得到异常警告触发的频度—无效触发概率 λ 的最大似然估计值的计算公式为:

$$\hat{\lambda} = \frac{r}{\sum_{i=1}^r t_i + \sum_{j=1}^k c_j} \quad (1)$$

通过计算可以发现,在提出方法设定的样本条件下,相同继电保护装置的稳定性更好,参数偏差造成的警告影响系数为0,由此可知该过程中根节点处于稳定状态,其对应触发概率系数值为1,将其从贝叶斯网络剔除,可得到失效概率所对应的系数值,即继电保护装置异常警告节点先验概率为:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda(t-t_1)} \quad (2)$$

式中, t 代表当下样本触发所用的时间; t_1 代表继电保护装置发送感知节点所用时间与上一时间点下全局检测中感知异常警告时间之间的最大差值。

1.2 异常警告节点故障树贝叶斯网络量化

基于上述计算结果,可以在构建的贝叶斯网络中将继电保护异常信息节点所对应的集合转化为异常警告故障树。通过贝叶斯网络与异常警告信息节点故障树之间的相似性,可以对故障树进行优化。

故障树中上、中、下三部分信息流分布可对应贝叶斯网络中的叶节点、根节点和其他节点。原有故障数感知规则对应的门限参数可以转化为有界参数^[9-10],其中门限参数的逻辑规则,可根据定义条件的概率情况具体确定。由此可以得到故障树中任意事件均有且仅有两种状态,即触发状态与未触发状态。考虑到警告状态触发程度的不同,根据实际应用需要,在提出方法中采用动态多模态模型对其进行优化。

在多态模型中,将感知信息节点状态分为“故障”、“异常”、“稳定”三种状态。将上述根节点的触发状态与未触发状态转换为三状态建模时,针对“故障”或“异常”两种状态中,与根节点所对应异常警告信息匹配程度作为异常警告的先验概率;与根节点异常警告信息不匹配程度程度时,其警告先验概率系数为0;“稳定”状态所对应的警告概率系数为根节点异常警告不匹配的概率。

贝叶斯网络中感知异常节点信息的条件按照概率分布逻辑进行表达,需满足:

$$P(X = \text{故障}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \exists p_a(X) \text{ 满足 } p_a(X) = \text{故障} \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (3)$$

$$P(X = \text{异常}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \exists p_a(X) \text{ 满足 } p_a(X) = \\ & \text{异常, 且 } P(X = \text{故障}) = 0 \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (4)$$

$$1 - P(X = \text{故障}) - P(X = \text{异常}) \quad (5)$$

其中, $p_a(X)$ 代表 X 的主节点。

根据贝叶斯条件概率计算方法,可以对线路保护 TS 空接、线路保护通道警告和线路继电保护装置状态之间的概率关系进行建模。假设 A 线路保护 TS 空接和 B、C 线路保护通道警告的先验概率分别为 0.2 和 0.3,那么可以使用贝叶斯条件概率计算方法来计算出不同节点状态的概率,具体结果如图 1 所示。

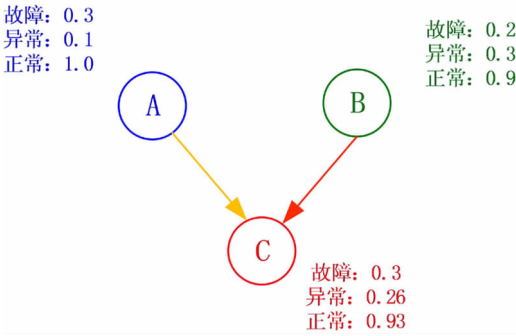


图 1 贝叶斯条件概率计算举例

1.3 引入差分天牛须算法的异常警告节点位置更新

为了提高异常警告数据节点的识别精度,引入了差分天牛须算法(Differential Beetle Antenna Algorithm)进行优化。这种算法通过模拟生物启发式识别行为,建立 BAS(Beetle Antennae-based Search)算法模型,通过对异常节点实施差分搜索扫描与探测的两种行为,从而获得更准确的异常警告信息识别特征。

通过引入差分天牛须算法进行优化^[11-12],能够实现对异常警告数据节点的高精度识别。该算法不仅具有快速、准确的优点,还具有很好的鲁棒性和适应性,可以广泛应用于各种异常检测和识别问题中。

首先,假设异常信息搜索与探测过程中每一个差分单元中的天牛个体 x_i 分别对应一组 D 维解空间,其位置为可以描述为 $x_i = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^j, \dots, x_i^D\}, x_i \in X, i = \{1, 2, \dots, NP\}$ 。其中, X 代表参与优化的天牛种群, D 代表异常警告信息优化空间维度, NP 代表种群规模。定义天牛差分搜索状态下随机搜索方向 b 的函数关系表达式为:

$$b = \frac{\text{rnd}(D, 1)}{\|\text{rnd}(D, 1)\|} \quad (6)$$

其中, $\text{rnd}(D, 1)$ 代表随机样本维度 D 中所包含的异常触发行为 $[0, 1]$ 信息。

然后,根据优化天牛个体 x_i 对应搜索结果,通过关系式(7)、式(8)可得到自身左右须位置:

$$\begin{cases} x_i^l = x_i^t + d^l b \\ x_i^r = x_i^t - d^l b \end{cases} \quad (7)$$

$$d^l = d_0 + \gamma_a d^{l-1} \quad (8)$$

其中, x_i^l 与 x_i^r 代表 x_i 任意一只天牛须所指向的搜索位置; x_i^t 代表 x_i 第 t 次迭代状态下自身所在的位置; d^l 代表第 t 次迭代优化后其中任意一只天牛触须所在位置的质心距离。

最后,通过第 t 次迭代后天牛个体所探测结果,结合式(9)与式(10)完成对应感知异常警告信息节点的位置更新:

$$x_i^t = x_i^{t-1} - \delta^t b \text{sign}(f(x_i^r) - f(x_i^l)) \quad (9)$$

$$\delta^t = \gamma_\delta \delta^{t-1} \quad (10)$$

其中, δ^t 代表第 t 次异常警告信息节点位置更新的迭代步长, γ_δ 代表天牛移动搜索步长, $f(x_i^l)$ 与 $f(x_i^r)$ 分别为 x_i^l 与 x_i^r 所对应异常警告信息节点的适应度函数值, $\text{sign}(\cdot)$ 代表天牛算法中个体天牛须指向的符号函数。

为了避免天牛种群在搜索过程中出现高维空间依赖问题,采取了一种创新的策略。将天牛须算法与不同维度空间的异常警告信息节点特征相结合,进行同目标的多次搜索。该策略能够有效地利用不同维度空间的信息,提高搜索的精度和效率。同时采用差分优化方法,成功地实现了对种群多样性的保护。这种方法可以增强算法在搜索过程中的稳定性,避免出现单一解的情况。同时,还提升了不同维度空间下异常警告信息节点的均匀分布与精准识别。

通过这些优化措施,成功地优化了算法的收敛效果。现在,算法能够更快地找到最优解,提高了搜索效率。而且,由于算法的稳定性增强,能够更准确地预测搜索结果,从而更好地应对高维空间依赖问题。其操作过程可通过伪代码进行如下描述:

```

p = 2D + 1;
for i = 1 : NP do
    for j = 1 : D do
        r(j) = 2cos((2πj)/p);
        x_i^j = l_i + mod(r(j) * i, 1)(u_i^j - l_i)
    end for
end for
    
```

其中, x_i^j 代表优化过程中随机个体天牛在第 j 维空间下的位置, NP 代表种群规模, D 代表搜索

位置关系所更新的实际维度, $j \in \{1, 2, \dots, D\}$, u_j^l 与 U_j^l 代表搜索边界上的最大值与最小值。

算法具体执行及其差分动态更新过程具体描述如下:

(1)通过对目标信息样本执行动态差分进化策略,根据式(11)的差分变异操作与式(12)的差分交叉操作确定天牛种群优化移动方向。

$$DE/best/1: v_i = x_{\text{best}} + F(x_{i_1} - x_{i_2}) \quad (11)$$

其中, x_{best} 代表当前时间点及其变量条件下天牛个体中的最优量;其中包含变异式 i , $i_1, i_2 \in \{1, 2, \dots, NP\}$ 且二者之间存在差异性, NP 代表天牛种群规模; F 代表感知尺度控制因子。

$$\text{Tem}V_i(j) = \begin{cases} v_i(j) & U_i(j) \leq CR \text{ or } j = k \\ x_i(j) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\text{Tem}V_i$ 代表动态差分进化策略执行条件下每个天牛个体搜索的实际移动位置, v_i 代表天牛个体差分变异优化后所对应的位置, x_i 代表天牛须所指的原始位置, $U_i(0, 1)$ 为 $[0, 1]$ 范围内的任意一组系数值, $k \in \{1, 2, \dots, D\}$ 代表天牛个体搜索更新过程中的一个随机参数索引, j 代表即时更新维度, $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ 。

搜索尺度控制因子 F 与交叉率 CR 的取值系数可分别通过式(13)与式(14)计算得到:

$$F = F_{\text{max}} - (F_{\text{max}} - F_{\text{min}}) \cdot (G/G_{\text{max}}) \quad (13)$$

$$CR = CR_{\text{max}} - (CR_{\text{max}} - CR_{\text{min}}) \cdot (G/G_{\text{max}}) \quad (14)$$

其中, G 代表此刻天牛种群所对应的迭代次数, G_{max} 代表此刻天牛种群所对应的最大迭代次数。

(2)将天牛种群中任意个体所对应的 $\text{Tem}V_i$ 位置设定为扫描搜索目标点,完成该目标点信息扫描后可得到对应天牛个体左右触须的位置,将其标记为 x_i^l 、 x_i^r ;计算左右触须位置当前状态下的适应度值 $f(x_i^l)$ 与 $f(x_i^r)$ 。然后根据 $f(x_i^l)$ 和 $f(x_i^r)$ 的对比结果,按照计算式(16)所示完成差分天牛须算法的异常警告信息节点探测操作。若 $f(x_i^l) < f(x_i^r)$,说明当前个体天牛左须感知信息浓度高于右须感知信息浓度,那么,此时该个体天牛的搜索方向将向左侧移动,同时完成所在位置信息更新,反之亦然。

$$\begin{cases} x_i^r = \text{Tem}V_i + d'b \\ x_i^l = \text{Tem}V_i - d'b \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{Tem}V_i = \text{Tem}V_i - \delta'b \text{sign}(f(x_i^r) - f(x_i^l)) \quad (16)$$

其中, x_i^l 、 x_i^r 分别代表第 i 只天牛左右触须当前所指向的搜索位置。

(3)最后根据天牛个体搜索的贪婪选择特性^[13],比较对应信息节点的原始解 $f(x_i)$ 与优化信息节点更新后 $f(\text{Tem}V_i)$ 所对应位置的最佳状态,并将最佳状态的天牛个体所在位置作为当前最优天牛 x_{best} ,并将其对应的最佳适应值进行替换,直至达到最大迭代次数,获得全局最优解。

2 应用测试

对提出方法进行全局性能对比测试,以评估其在稳定性和准确性方面的表现。在测试中,设定了稳定性指标和准确性两项判定指标,以全面评估各方法的性能。为了确保测试结果的可靠性,采用对比法对多项性能指标进行验证,并以此作为判定依据。

在对比测试中,引入了文献[14]、[15]中的两种方法,将它们组成对比组,与提出方法组成的验证组一同完成性能指标测试项目。对比组中的两种方法分别标记为对比组方法 1 和对比组方法 2。在相同的测试样本设定下,对测试结果进行设定项目测试。

2.1 设置测试条件

测试样本采用多平台采样,随机封包的动态方式进行 110 kV 异常警告数据参量配置,样本数据总量配置为 30000 组,实际测试样本根据测试需要通过测试工具 MATLAB 自行定义。其中测试平台选取一组继电保护电路来完成,如图 2 所示。通过模拟测试系统控制完成相关指标的测试与分析。

2.2 异常警告感知响应测试

随机抽取 4 组不同级别的故障样本组成测试样本数据包,按照故障程度从低到高依次分为 1、2、3、4 个级别,每个级别下包含 1000 组样本信息。分别对验证组与对比组方法进行感知响应测试,每组样本信息之间的时间间隔为 3.5 s,测试结果经过测试工具 MATLAB 整理后,生成可视化统计信息,如图 3~图 6 所示。

经过对验证组与对比组的 4 级不同等级样本的测试后可以发现,三种不同方法所得性能指标差异较大,现根据所得图谱及其样本分类对其进行分析,具体如下:

如图 3 所示对比样本级别为 1 时,对比组方法 1 与对比组方法 2 的异常警告样本感知响应曲线整体表征相似,均表现出快速增长的趋势特征,且

增长幅度均根据样本数量的变化而变化。其中,对比组方法 1 变化频率较高,对比组方法 2 的变化幅度最大;反观验证组方法,其指标线整体平滑,无频繁变化生成的波动,说明验证组方法具有较好的异

常警告感知控制效果,且对响应时间最小。基于上述分析,可以判定验证组方法为 1 级样本条件下的最佳响应方法。

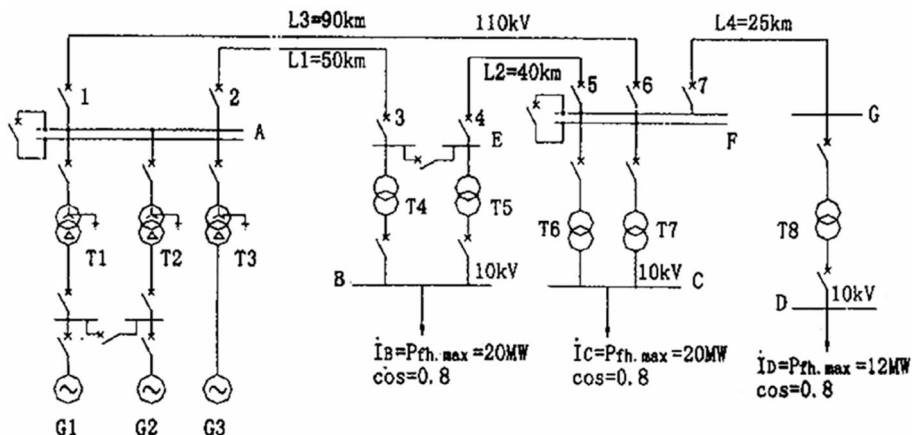


图 2 继电保护测试电路示意图

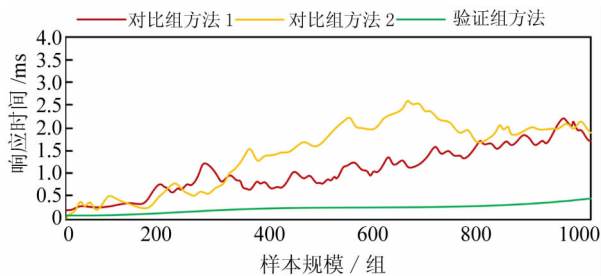


图 3 不同方法 1 级异常警告测试样本下所得测试结果

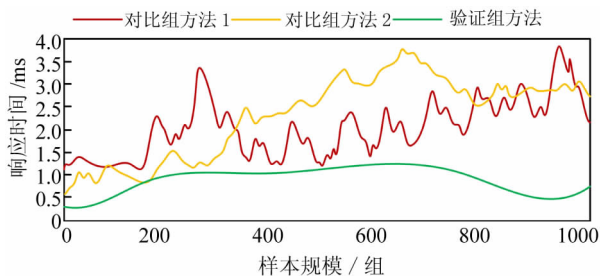


图 6 不同方法 4 级异常警告测试样本下所得测试结果

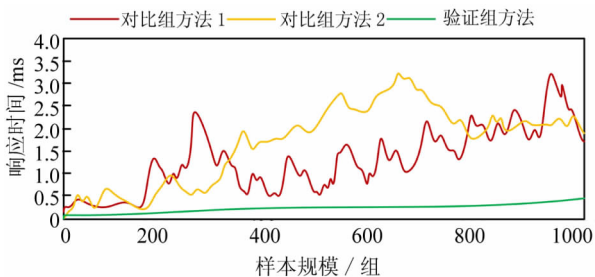


图 4 不同方法 2 级异常警告测试样本下所得测试结果

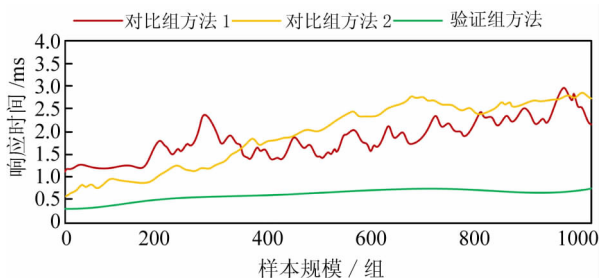


图 5 不同方法 3 级异常警告测试样本下所得测试结果

按照上述对比方法分析对比图 4 后发现,该样本级别下的三种方法的指标特征与上述指标特征保持一致。因此可以判定图 4 所示的 2 级样本下验证组方法仍是最佳感知响应方法。从图 5 所示 3 级异常警告样本开始,三组参测方法均出现不同程度较大的指标变化,其中最为明显的是验证组方法曲线出现了较大幅度的起伏波动,但从曲线整体平滑程度来看,其波动在收敛控制作用下并没有对响应指标造成较大影响。相比之下,对比组方法 1 与对比组方法 2 的曲线波动依旧频繁,且指标值初始系数均有所提升,综合来看仍是验证组方法的响应指标最好。基于上述多组数据的分析来看图 6 所示 4 级样本,可以进一步印证上述分析结果,验证组方法响应曲线虽波动幅度有所增大,但整体波动频率系数较小,说明了在响应过程中扰动收敛产生作用,因此在整体响应指标过程中并无指标断裂现象的出现。

综上所述,可以判定验证组方法的异常警告感知响应能力最能满足测试要求,整体响应性能优于

对比组方法 1 与对比组方法 2。

2.3 稳定性测试

基于上述测试过程及其参数配置方案,重复上述测试过程 10 次,数据时间间隔调整为 1.5 s,每完成一次测试记录各方法的整体警告识别偏差,共计获得 10 组偏差指标,如表 1 所示。根据历史经验,偏差判定指标取值 0.5,大于 0.5 说明该方法的异常警告识别保护效果稳定性较差;小于 0.5 说明该方法的异常警告识别保护效果稳定性优秀;等于 0.5 说明该方法的异常警告识别保护效果稳定性合格。

表 1 稳定性测试指标采集统计

测试次序	验证组方法 偏差指标值	对比组方法 1 偏差指标值	对比组方法 2 偏差指标值
1	0.3	0.6	0.7
2	0.3	0.6	0.7
3	0.3	0.8	0.8
4	0.3	0.8	0.9
5	0.3	0.6	1.6
6	0.2	0.8	1.6
7	0.2	1.0	1.4
8	0.3	1.4	1.2
9	0.3	0.8	1.0
10	0.3	0.9	1.4

对比测试结果可以发现,三种方法的偏差指标值与上述响应指标测试结果可以相互印证。从指标一致性的维度分析,验证组方法的表现最好,另外两组方法并未满足控制一致性的要求。从指标波动差大小的维度分析,仍是验证组方法最好,其最大差值为 0.1;而对比组方法 1 的最大差值为 0.8,对比组方法 2 的最大差值为 0.9,因此从此维度分析三种方法的稳定性排序为验证组 > 对比组方法 1 > 对比组方法 2;从判定要求的维度分析,仅有验证组方法满足要求。故此,可以证明验证组方法的稳定性最好。

3 结论

提出了一种通过优化继电保护装置下异常警告信息节点的感知网络结构,利用差分天牛须算法对异常警告数据进行高精度感知识别优化。这种

方法不仅提高了保护精准度,还降低了异常识别偏差,有效地解决了现阶段大部分继电保护装置的异常警告偏差问题。然而,由于电力系统构成的复杂性,提出方法的效果无法保证完全一致。在某些场景的应用中,需要通过调整大量的控制参数及其自适应平衡策略来满足特定的需求。为了解决这个问题,在日后的研究中需要根据用户与使用环境的不同,进一步完善方法的自我学习能力,以确保该方法具有更广泛的适用性。

参考文献

- [1] 任金霞,王兴康,甘夏冰. 基于改进天牛群算法的多目标云任务调度 [J]. 智能城市, 2023, 9 (8): 45-47.
- [2] 黄景光,赵珩,李浙栋,等. 基于动作时限曲线拟合思想的含 DG 型配电网后备保护新方法 [J]. 电网技术, 2024, 48(5): 2199-2206.
- [3] 霍亚俊,冯霆,张扬. 基于改进 BAS 算法的配电网多目标优化重构 [J]. 现代电子技术, 2023, 46 (11): 144-148.
- [4] 叶坤涛,舒蕾蕾,李文,等. 基于差分进化策略的天牛须搜索算法及其应用 [J]. 计算机工程与科学, 2023, 45 (5): 920-930.
- [5] 谢楠,马振国,唐兵,等. 继电保护设备剩余寿命预测的智能算法研究 [J]. 兰州理工大学学报, 2023, 49 (2): 83-87.
- [6] 翟博龙,唐志军,宋福海,等. 基于 OPNET 的保护性能评估及采样值估计算法 [J]. 电测与仪表, 2023, 60 (4): 160-166.
- [7] 卞凯鸣. 智能变电站继电保护二次回路在线监测与故障诊断技术研究 [J]. 电子测试, 2021, (20): 98-99+70.
- [8] 刘玮,屠卿瑞,郭明宇,等. 基于差值有效值的智能录波器暂态同源比对算法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (16): 97-103.
- [9] 林燎东. 变电站继电保护二次回路在线监测及线路故障诊断研究 [J]. 中国设备工程, 2021, (6): 175-176.
- [10] 李捷,周红阳,丁晓兵,等. 云计算模式下的继电保护定值优化算法 [J]. 电子器件, 2021, 44 (1): 157-161.
- [11] 王文焕,郭鹏,詹荣荣,等. 基于最短路径算法的继电保护数据模型结构及搜索优化 [J]. 电机与控制学报, 2021, 25 (1): 68-78.
- [12] 邵庆祝,谢民,王同文,等. 考虑配网重构的过电流保护配合优化 [J]. 电子器件, 2020, 43 (5): 1010-1015.
- [13] 陈海涛,张学敏,戴伟康,等. 基于 GA 优化 SVM 参数与云模型的继电保护装置状态评估方法 [J]. 智慧电力, 2020, 48 (7): 88-92+117.
- [14] 杨檬,夏经德,高淑萍. 应用特定电压差的直流输电线路保护算法 [J]. 现代电子技术, 2020, 43 (7): 163-168.
- [15] 徐拓,葛以康. 智能变电站继电保护二次回路在线监测与故障诊断技术 [J]. 通信电源技术, 2019, 36 (11): 279-280.