

引用格式:樊群才,胡笏,廖艳萍,等.基于改进鲸鱼优化算法的分布式电源接入配电网继电保护的整定优化研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):74-79.

Citation:FAN Qunca, HU Jia, LIAO Yanping, et al. Research on relay protection setting optimization of distribution network connected with distributed power supply based on improved whale optimization algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 74-79.

基于改进鲸鱼优化算法的分布式电源接入 配电网继电保护的整定优化研究

樊群才, 胡 笏, 廖艳萍, 杨爱红

(国网山西省电力公司运城供电公司, 山西 运城 044000)

摘要:分布式电源因为具有灵活性高、成本低、绿色低碳等优点而被越来越多地接入配电网,但是由于其改变了原有配电网的潮流拓扑结构,也给传统的电流差动保护提出了新的要求。首先分析大量分布式电源的接入对配电网继电保护的影响;随后考虑到继保的速动性、灵敏性要求,引入收敛速度较快的鲸鱼优化算法,并引入列文伯格马奎特(Levenberg-Marquadt, LM)算法对其进行改进;最后对分布式电源接入配电网时的电流保护整定值进行优化,用收敛速度较快的鲸鱼优化算法进行全局寻优,为避免陷入局部最优而转入 LM 算法进一步求解。实验分析结果表明,LM 算法改进的鲸鱼优化算法的引入可以加快收敛速度,提高继保装置的速动性,适用于分布式电源接入配电网时的继保整定优化。

关键词:分布式电源;配电网;继电保护;鲸鱼优化算法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.009 中图分类号: TM732 文章编号: 1673-9140(2024)02-0074-06

Research on relay protection setting optimization of distribution network connected with distributed power supply based on improved whale optimization algorithm

FAN Qunca, HU Jia, LIAO Yanping, YANG Aihong

(Yuncheng Power Supply Company, State Grid Shanxi Electric Power Company, Yuncheng 044000, China)

Abstract: Distributed generation is increasingly being connected to the distribution network due to its advantages of high flexibility, low cost, green and low carbon. However, because it changes the topology of the original distribution network, it also poses new requirements for traditional current differential protection. Firstly, the impact of the access of a large number of distributed generations on relay protection in the distribution network is analyzed. Then, considering the requirements of relay protection for quickness and sensitivity, the Whale optimization algorithm with fast convergence speed is introduced, and the LM algorithm is introduced to improve it. Finally, the setting value for current protection is optimized when the distributed generation is connected to the distribution network. The Whale optimization algorithm with fast convergence speed is used for global optimization, and to avoid falling into a local optimum, it switches to the LM algorithm for further solution. Experimental analysis results show that the introduction of the Whale optimization algorithm improved by the LM algorithm can accelerate the convergence speed and improve the quickness of the relay protection device, which is suitable for relay protection setting optimization when distributed generation is connected to the distribution network.

Keywords: distributed power supply; distribution network; relay protection; Whale optimization algorithm

收稿日期: 2021-11-18; 修回日期: 2023-05-29

基金项目: 国网山西省电力公司科技项目(5205M02000xb)

通信作者: 樊群才(1970—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事继电保护专业管理、继电保护整定计算方面的研究; E-mail: lw120120724@126.com

随着中国朝着碳中和、碳达峰的目标建设电力系统,分布式发电(distributed generation, DG)电源因其成本低、绿色低碳、无污染等优点而被越来越多接入配电网。但是,大量DG电源的接入改变了电网的拓扑结构,改变了潮流拓扑和故障电流的流向,改变了整个电力系统的继电保护配合关系和整定值,因此必须将其对配网继保的影响计算在内。

目前,对于配网继保整定的反时限保护的全局优化研究比较广泛。文献[1]提出将优化理论引入电力系统的继电保护整定中。而针对于分布式电源的接入,为了避免接入后继保装置的失准;文献[2]提出基于故障稳态分量的自适应方向电流保护方案,根据不同特性的DG电源的暂态特性,分析了系统短路电流的成分,在此基础上构建了不同的短路方向电流判据。对于DG电源、分布式储能共同接入配网的情况;文献[3]以成本最低、配网电压最优为目标研究了计及储能策略优化的配网模型优化;文献[4]分析了DG在不同位置对方向过流继电器的影响以及过流继电器和方向元件的协调问题,并用ETAP软件进行了仿真验证分析;文献[5]提出了一种面向闭环运行配电网的广域保护控制方案,具有对网络拓扑变化的自适应、自愈控制以及可观可控的优势。这类方法能够获取性能较强的整定方案,但是缺乏针对于含有分布式电源配电网的快速、有效的优化方案。

为此,研究者们也提出了多种针对分布式配网的保护优化方法。文献[6]将DG电源接入后的配网继保整定考虑在内,提出一种利用IIDG实时运行参数调整保护定值的保护灵敏度提升方案;文献[7]针对于DG电源接入配网的情况提出了一种双整定继电器的方法,通过非线性规划,将继电器一次和备用运行的时间缩短至最小;文献[8]基于灰狼优化算法分析了DG电源接入后对于配网反时限过电流保护的影响;文献[9]将DG电源和随机负荷整合分析,归纳总结了分布设备渗透对配电网保护的影响;文献[10]分析了分布式储能机构对各类保护装置的影响,并提出了基于改进粒子群算法的一种优化措施;文献[11]针对即插即用式分布式配网的不同运行状态下的继保参数实施了优化。上述方法考虑了分布式配网的运行特性,但在优化方案的运行效率上仍有提升的空间。

本文首先对于大量DG电源的接入对配网继保的影响进行分析,随后以继保的速动性、灵敏性为导向,建立函数关系,引入改进的鲸鱼优化算法进

行优化分析。针对于鲸鱼优化算法收敛速度快,但是可能陷入局部最优的情况,引入LM算法对鲸鱼优化算法进行改进,在鲸鱼优化算法全局寻优后转入LM算法继续求解。最后,仿真模拟实验证明该方法可以改进分布式电源接入配网的继保参数整定,具有更快的收敛速度。

1 分布式电源接入配网对继保的影响

配电网继电保护的基本要求是“四性”,速动性、选择性、可靠性、灵敏性。而分布式电源相较于大电网中的发电单元,其区别和特征主要在于:

- 1) 单个供电单元功率不大,一般采用中小型规模的发电机组;
- 2) 更加靠近用户侧、负荷侧,可以直接向就近的配网供电;
- 3) 各个DG电源相互独立,停用和启用发电机组都较为方便,因此灵活性和可靠性都较高;
- 4) 因为风、光、水等形式的能源都不能提供恒定数值的电能,因此分布式电源的电量具有一定的不可预测性、波动性,必须和主网电源以及储能装置配合使用。

同时,当有DG电源接入配电网时,输配电线路的节点变多,可能出现故障的点数变多,故障电流的流向变得更加复杂,此时整个配网的继保必须做出相应的调整。

以图1所示的典型含有DG电源的配电网为模型,分析DG电源的接入对继保配置的影响。选取 a 、 b 、 c 、 d 这4个典型位置,以配电网最常见的三相短路故障为例,分析如下。

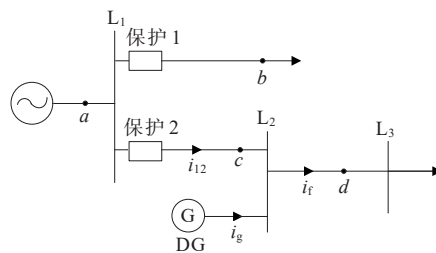


图1 配电网模型

Figure 1 Distribution network model

若 a 点处出现三相短路故障,应直接切除该总电源或变压器;而此时由于分布式电源DG的存在,在母线 L_1 和 L_2 之间产生逆向电流流过保护2,可能导致保护2误动作。

若 b 点处出现三相短路故障,本应由保护1动作、切除故障,而此时DG产生的逆向电流同样流经保护1,因此实际电流大于整定值,保护1变得更加灵敏。

若 c 点处出现三相短路故障,此时流经保护 2 的短路电流 I_{sc2} 大小为

$$I_{sc2} = \frac{U_{1b}}{Z_{1b}} = \frac{U_1}{Z_{1b}} \quad (1)$$

式中, U_{1b} 为母线 L_1 和故障点 b 之间的电压; U_1 为母线 L_1 的对地电压; Z_{1b} 为母线 L_1 和故障点 b 之间的线路阻抗。可以看出,此时 DG 虽然也产生逆向电流,但是该电流直接从 b 点流入地面,保护 2 流经的故障电流大小与 DG 完全无关。因此,此时保护 2 不受 DG 的存在的影响。

若 d 点处出现三相短路故障,保护 2 测到的短路电压 U_{dsc} 为

$$U_{dsc} = I_{12} \cdot Z_{12} + (I_{12} + I_g) \cdot Z_{2d} \quad (2)$$

式中, I_{12} 为母线 L_1 和 L_2 之间的电流; Z_{12} 为母线 L_1 和 L_2 之间的线路阻抗; I_g 为 DG 输入到配网的电流; Z_{2d} 为母线 L_2 和故障点 d 之间的线路阻抗。因此保护 2 测到的短路阻抗 Z_r 为

$$Z_r = \frac{U_{dsc}}{I_{12}} = Z_{12} + Z_{2d} + \frac{I_g}{I_{12}} \cdot Z_{2d} \quad (3)$$

$$Z_r = Z_{1d} + \frac{I_g}{I_{12}} \cdot Z_{2d} > Z_{1d} \quad (4)$$

式(3)、(4)中, Z_{1d} 为母线 L_2 和故障点 d 之间的线路阻抗,这也是 d 点短路时保护 2 本应测到的短路阻抗值。由式(4)可知:由于 DG 的存在,实际测到的短路阻抗值大于理论值。这将导致保护 2 的保护范围缩小,如图 2 所示。

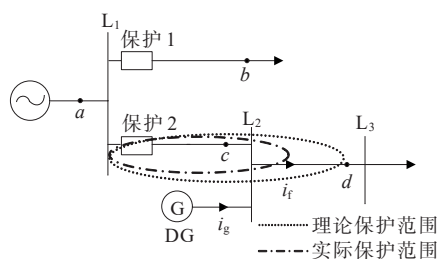


图 2 实际保护范围对比

Figure 2 Comparison of actual protection scopes

总之,从上述分析可以得到,分布式电源的接入对配电网原有继保的影响可能是复杂的,可能导致误动、拒动。为了保证所有继保装置的速动性、选择性、可靠性、灵敏性,必须将分布式电源对短路电流的大小和方向的改变充分计算在内,调整继保装置的整定值。这是一个复杂的非线性规划问题,因此本文考虑使用鲸鱼优化算法来完成计算。

2 改进鲸鱼优化算法

鲸鱼优化算法是近年提出的一种群智能优化

算法,最大的优点是算法结构简单、便于实施、收敛速度快。

鲸鱼优化算法的基本原理是通过模拟座头鲸的捕猎而进行优化搜索^[12]。座头鲸的捕猎过程包括包围猎物、螺旋气泡网攻击和搜寻猎物 3 种行为方式,每一只鲸鱼的位置都代表一个可行解。鲸鱼群捕猎时,每一只鲸鱼都有可能包围猎物,或者用气泡网驱赶猎物,这 2 种行为是随机发生的。而每一只鲸鱼包围猎物的动作也包括了游向位置最优的鲸鱼,或者游向任意一只鲸鱼 2 种可能。

包围猎物的行为用数学模型表达为

$$X(t+1) = X^*(t) - A \cdot |C \cdot X^*(t) - X(t)| \quad (5)$$

$$A = 2a \cdot r_1 - a \quad (6)$$

$$C = 2 \cdot r_2 \quad (7)$$

式(5)~(7)中, t 为迭代次数; X 为个体位置; X^* 为当前最优位置; A 、 C 为系数矩阵; a 为在整个迭代中从 2 到 0 线性变化的系数; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 区间上的随机数。

对猎物的螺旋起泡网攻击的数学模型为

$$X(t+1) =$$

$$|X^*(t) - X(t)| \cdot e^{\theta l} \cdot \cos(2\pi l) + X^*(t) \quad (8)$$

式中, l 为 $[-1, 1]$ 之间的随机数; θ 为常数。

而当鲸鱼对猎物进行搜寻时,对应的表达式为

$$X(t+1) = X_{rand} - A \cdot |C \cdot X_{rand} - X(t)| \quad (9)$$

式中, X_{rand} 为随机个体的位置。系数矩阵 A 的值决定了鲸鱼是搜寻猎物还是攻击猎物,当 A 的值大于 -1 且小于 1 时,进行攻击猎物且采用哪种随机,否则搜寻猎物。

从上述鲸鱼优化算法的具体求解过程可以看出,鲸鱼优化算法求解过程简单,收敛速度快;但是,迭代过程中是否向当前最优解收敛取决于式(6)中的系数 a ,而 a 随着迭代的过程逐渐减小。因此,后期算法容易陷入局部最优解,算法本身缺乏跳出局部最优的求解逻辑。

此时,考虑引入一个新的算法,用于在鲸鱼优化算法全局寻优后的补充和修正,充分利用鲸鱼优化算法迭代速度快的优点,同时避开局部最优的情形。

常用的最优化算法有梯度下降法、高斯牛顿法(Gauss-Newton, GN)和列文伯格马奎特法(Levenberg-Marquadt, LM)等。其中,GN算法最简单,计算量少,但是鲁棒性较差;而LM算法作为GN算法的优化,在一定程度上修正了这一缺点,因此鲁棒性好,但是收敛速度慢^[13-14]。

LM算法的基本运算逻辑概述如下。设权值和

阈值组成的向量为 $x(k)$, 设误差指标函数为

$$E(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N e_i^2(x) \quad (10)$$

式中, $e_i(x)$ 为误差。

则 $x(k)$ 的迭代规则为

$$x(k+1) = x(k) + \Delta x \quad (11)$$

$$\Delta x = -[\nabla^2 E(x)]^{-1} \nabla E(x) \quad (12)$$

式(11)、(12)中, $\nabla^2 E(x)$ 为 $E(x)$ 的 Hessian 矩阵; $\nabla E(x)$ 为梯度。

GN 算法的运算迭代式可以表示为

$$\Delta x = -[J^T(x)J(x)]^{-1} J^T(x)e(x) \quad (13)$$

式中, $J(x)$ 为 $E(x)$ 的 Jacobian 矩阵。

GN 算法收敛速度较快, 它在迭代的过程中要首先假定 $J^T(x)J(x)$ 是可逆的、正定的矩阵, 但是实际运算中 $J^T(x)J(x)$ 可能会是奇异的、病态的。如果 $J^T(x)J(x)$ 是奇异的、病态的, 将会导致整个运算稳定性较差, 可能出现不收敛的情况。

LM 算法则是在 GN 算法的基础上, 加入了一个阻尼因子, 修正了稳定性的问题, 表达为

$$\Delta x = -[J^T(x)J(x) + \mu I]^{-1} J^T(x)e(x) \quad (14)$$

式中, μ 为正的常数; I 为单位矩阵。

从式(14)中可以看出, 当 μ 取到 0 的时候, LM 算法的表达式即为 GN 算法的表达式。当 μ 足够大的时候, LM 算法的表达式则更接近于梯度下降法。

算法的每次迭代都对 μ 进行自适应的调整, 当与所求的解接近的时候, μ 减小, 类似于 GN 算法, 可以快速收敛到解。当偏差值较大的时候, μ 增加, 此时可以扩大搜索范围进行寻优, 类似于梯度下降法。

阻尼因子的引入和 μ 的灵活取值使得 LM 算法结合了梯度下降法和 GN 算法的优点, 但是运算量更大, 在本次的算法改进中更适合和鲸鱼优化算法配合求解。

因此, 可以用 LM 算法来改进鲸鱼优化算法, 用前者作为后者的二次补充——当迭代达到一定次数, 或连续 2 次迭代的个体适应度差值较小时, 可以由鲸鱼优化算法转入 LM 算法, 最大限度利用起鲸鱼优化算法收敛快和 LM 算法局部寻优能力强的优点。

对于过流继电器来说, 通过算法主要整定的参数是时间整定系数 T_{DS} 和启动电流 I_p 2 个参数。常规反时限过流继电器的动作特性方程为

$$t = \frac{0.14 T_{DS}}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^{0.02} - 1} \quad (15)$$

式中, t 为保护动作的时间; I 为流过过流继电器的实际电流。

根据反时限过流继电器的动作特性和整个配网中的协调配合关系, 得到目标函数为

$$f = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \frac{0.14 T_{DSik}}{\left(\frac{I_i}{I_{pik}}\right)^{0.02} - 1} \quad (16)$$

式中, i 为继电器序列号; k 为故障点序列号; I_i 为故障电流。因此整个优化算法的目标就是在满足继电器基本逻辑关系的条件下, 求解 f 的最小值对应的时间整定系数 T_{DS} 和启动电流 I_p 2 个参数的整定值。

继电器的特性及其之间的配合是算法求解过程中的约束条件, 具体包括了继电器本身特性带来的约束和配网系统继电器配合对应的约束, 可以用公式描述如下:

$$T_{DSmin} \leq T_{DSi} \leq T_{DSimax} \quad (17)$$

$$I_{pimin} \leq I_{pi} \leq I_{pimax} \quad (18)$$

$$T_{ik} - T_{ij} \geq \Delta T \quad (19)$$

$$k_1 \cdot I_{Lmax} \leq I_{pi} \leq k_2 \cdot I_{kmin} \quad (20)$$

式(17)为时间整定系数必须在继电器元件本身的范围之内; 式(18)为启动电流应该在继电器允许的范围之内; 式(19)为继电器之间要有一个时间差来相互配合; 式(20)中 I_{Lmax} 为最大负荷电流; I_{kmin} 为最小短路电流, 分别乘以一个系数表示要满足各个继电器动作的可靠性、灵敏性。

整个改进鲸鱼优化算法的流程如图 3 所示。

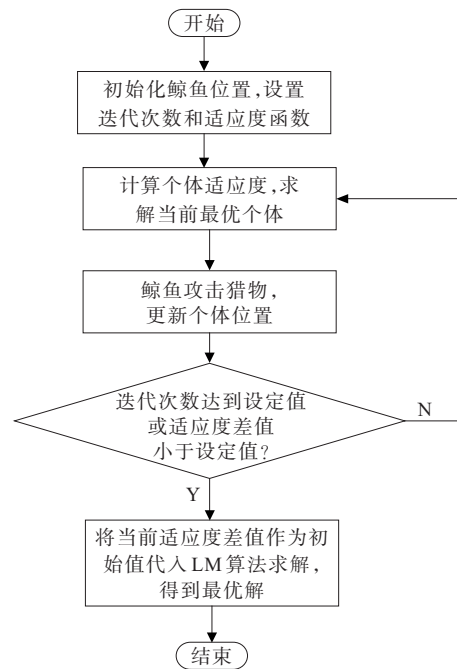


图 3 算法流程

Figure 3 Algorithm flowchart

3 实验分析

为了验证所提出的改进鲸鱼优化算法在配网继保参数整定中的实际效果,在某含有分布式电源的典型配电网模型上进行了实验分析,如图4所示。

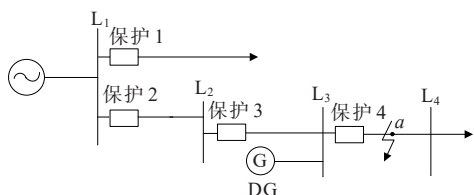


图4 典型含DG的配电网

Figure 4 Typical distribution network with DG

该配电网有4条母线,其中的母线 L_3 上接入了一个分布式电源DG,有4处装有继保装置。继保装置的互相配合可以保护整个配电网的安全性。

对于这样一个典型的配电网,在DG未接入的时候的保护整定值如表1所示。

表1 DG未接入时的继保整定值

Table 1 Relay setting value without DG

保护装置	I_p/A	T_{Ds}
1	1 460	0.15
2	1 155	0.10
3	595	0.10
4	1 275	0.10

而在DG接入母线 L_3 后,根据上文的分析论证,发生在不同位置的故障可能导致继电器的灵敏度不同程度的降低。以 a 点为例,若此处出现三相短路故障,DG的存在将会导致保护4保护范围增大,保护2、3保护范围缩小,可能出现误动、拒动的情况。此时,引入改进鲸鱼优化算法对DG接入后的整定值进行优化处理,得到优化后的整定值如表2所示。

表2 含DG的优化后的继保整定值

Table 2 Optimized relay setting value with DG

保护装置	I_p/A	T_{Ds}
1	990	0.15
2	895	0.10
3	615	0.15
4	1 275	0.10

作为对比,DG接入前以及DG接入后、整定优化前和优化后这3种情形下的各继电器的动作时间如表3所示。

表3中的0代表拒动。由表3可知,该套继电保护装置在DG接入前可以正常保护,在DG接入后、优化整定参数之前,会有一些的可能性出现误动和

拒动,如 a 点短路故障时保护1失灵,出现拒动。其对应的更为直观的雷达如图5所示。

表3 3种情形下的动作时间

Table 3 Action schedule in three situations s

情形	保护1	保护2	保护3
DG接入前	6.015 5	1.752 0	0.501 3
优化前	0	3.023 5	0.408 8
优化后	3.185 5	1.617 6	0.602 5

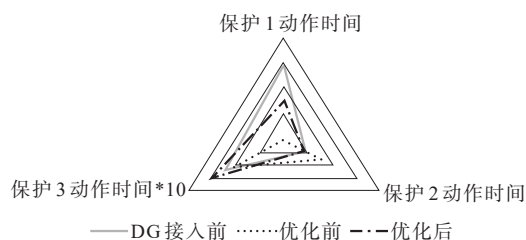


图5 动作时间对比

Figure 5 Comparison of action time

而在经过改进鲸鱼优化算法的优化后,各保护的動作时间重新起到互相配合的关系,各继电器可以正常动作。并且,保护1、2的動作时间相比之下有所减小,从而提高了装置的速动性、灵敏性。

为了验证该套优化算法的优越性,采用经典的遗传算法(genetic algorithm, GA)和粒子群算法(particiale swarm optimization, PSO)分别对同一模型进行求解。运算次数均设定为1 000次,用所求解的标准差和收敛次数作为精度和速度的评判标准,得到的对比结果如表4所示。

表4 各种算法对比情况

Table 4 Comparison of various algorithms

算法	标准差	收敛次数
遗传	6.77×10^{-16}	320
粒子群	2.35×10^{-17}	256
改进鲸鱼优化	3.88×10^{-23}	105

由表4可知,改进的鲸鱼优化算法相较于传统的优化算法求解精度更高、收敛速度更快,整体性能优异,更适用于配网继保中的应用。因此,可以认为该套优化算法对DG接入后的配电网继电保护的参数整定起到了有效的优化作用。

4 结语

本文首先以故障电流为切入点,分析了分布式电源接入配电网对于故障电流的变化,总结了分布式电源对配网继保的几种可能的影响。随后,将继保整定的优化过程建模,并提出采用LM算法改进的鲸鱼优化算法来求解这一非线性求解问题。最后,

通过对某典型配电网的实验分析,论证了该套优化算法对于优化DG接入后的继保参数的有效性。

参考文献:

- [1] 郑玉平,吕鹏飞,李斌,等.新型电力系统继电保护面临的问题与解决思路[J].电力系统自动化,2023,47(22):3-15.
ZHENG Yuping, LÜ Pengfei, LI Bin, et al. Problems faced by relay protection in new power system and their solution ideas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023,47(22):3-15.
- [2] 马静,刘静.基于故障稳态分量的含DG配电网自适应方向电流保护方案[J].电力自动化设备,2018,38(1):1-9.
MA Jing, LIU Jing. Adaptive directional current protection scheme based on steady state component in distribution network with DG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(1):1-9.
- [2] 马静,刘静.基于故障稳态分量的含DG配电网自适应方向电流保护方案[J].电力自动化设备,2018,38(1):1-9.
MA Jing, LIU Jing. Adaptive directional current protection scheme based on steady state component in distribution network with DG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(1):1-9.
- [3] 陈倩,王维庆,王海云.基于含分布式电源的配电网优化运行研究[J].电测与仪表,2023,60(11):19-28.
CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Research on optimal operation of distribution network with distributed generation integration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023,60(11):19-28.
- [4] 周超群,陈先凯,孙荣可,等.基于幅值差动原理的低压配电网剩余电流保护方法[J].供用电,2022,39(2):58-64.
ZHOU Chaoqun, CHEN Xiankai, SUN Rongke, et al. Residual current protection method of low voltage distribution network based on amplitude differential principle[J]. Distribution & Utilization, 2022,39(2):58-64.
- [5] 黄昱翰,蔡泽祥,潘天亮,等.面向闭环运行配电网的广域保护控制方案[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):47-52.
HUANG Yuhan, CAI Zexiang, PAN Tianliang, et al. Research on wide area protection and control scheme for closed-loop distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019,34(2):47-52.
- [6] 乔一达,吴红斌,吴通华,等.含逆变型分布式电源的配电网分区域电流保护[J].电工技术学报,2022,37(S1):134-144.
QIAO Yida, WU Hongbin, WU Tonghua, et al. Regional current protection of distribution network with inverter distributed power supply[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022,37(S1):134-144.
- [7] ZEINELDIN H H, SHARAF H M, IBRAHIM D K, et al. Optimal protection coordination for meshed distribution systems with dg using dual setting directional over-current relays[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 6(1):115-123.
- [8] 何思名,袁智勇,雷金勇,等.基于改进灰狼算法的DG接入配电网反时限过电流保护定值优化[J].电力系统保护与控制,2021,49(18):173-181.
HE Siming, YUAN Zhiyong, LEI Jinyong, et al. Optimal setting method of inverse time over-current protection for a distribution network based on the improved grey wolf optimization[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(18):173-181.
- [8] 何思名,袁智勇,雷金勇,等.基于改进灰狼算法的DG接入配电网反时限过电流保护定值优化[J].电力系统保护与控制,2021,49(18):173-181.
HE Siming, YUAN Zhiyong, LEI Jinyong, et al. Optimal setting method of inverse time over-current protection for a distribution network based on the improved grey wolf optimization[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(18):173-181.
- [9] 曾翔,文明浩,钱堃,等.逆变型分布式电源接入对接地距离保护的影响与对策[J].智慧电力,2023,51(1):46-53.
ZENG Xiang, WEN Minghao, QIAN Kun, et al. Influence of inverter-interfaced distributed generation integration on grounding distance protection and its strategies[J]. Smart Power, 2023,51(1):46-53.
- [10] 杨昆,向真,黄珊,等.基于多代理的有源配电网分布式保护协调优化方法[J].供用电,2023,40(4):23-30.
YANG Kun, XIANG Zhen, HUANG Shan, et al. Multi agent based distributed protection coordination optimization method for active distribution networks[J]. Distribution & Utilization, 2023,40(4):23-30.
- [11] TSIMTSIOS A M, NIKOLAIDIS V C. Towards plug-and-play protection for meshed distribution systems with DG [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3):1980-1995.
- [12] 张国治,陈康,方荣行,等.基于DGA与鲸鱼算法优化Logit Boost-决策树的变压器故障诊断方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(7):63-72.
ZHANG Guozhi, CHEN Kang, FANG Rongxing, et al. Transformer fault diagnosis based on DGA and a whale algorithm optimizing a LogitBoost-decision tree[J]. Power System Protection and Control, 2023,51(7):63-72.
- [13] 武小琳,栾凌,潘连武,等.基于LM-CNN的输变电工程造价自动计算模型[J].中国电力,2023,56(2):157-163.
WU Xiaolin, LUAN Ling, PAN Lianwu, et al. LM-CNN-based automatic cost calculation model for power transmission and transformation projects[J]. Electric Power, 2023,56(2):157-163.
- [14] 郭创新,刘祝平,刘永刚,等.基于图神经网络和强化学习的电网风险态势感知[J].电网与清洁能源,2023,39(12):41-49.
GUO Chuangxin, LIU Zhuping, LIU Yonggang, et al. GNN and RL based power system risk situation perception[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12):41-49.