

基于改进粒子群算法的配电网 检修计划优化方法

李亚国¹, 白鹭², 李冠良², 杨冬冬², 王瑞珏¹

(1. 国网山西省电力公司, 山西 太原 030000; 2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030000)

摘要:为提高配电网检修计划的合理性与经济性,提出一种基于改进粒子群算法配电网检修计划优化方法。首先,以检修成本、供电损失和故障损失最小为目标,以实际检修过程中存在的检修资源限制、检修先后顺序、安全稳定运行等问题为约束条件,建立符合实际配网检修过程的检修计划优化模型;其次,为减小求解问题的复杂度,提出对不同约束类型的约束采取相应的预处理方法;最后,通过将自然选择思想融入到种群粒子的迭代更新中,提高种群粒子的整体质量,克服标准粒子群算法存在的早熟收敛、易于陷入局部最优解的问题。将改进的粒子群算法应用于具体算例的求解,结果表明提出的模型和算法具有很好的可行性与合理性。

关键词:配电网检修计划;优化问题;自然选择;粒子群优化算法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.012 中图分类号:TM732 文章编号:1673-9140(2021)05-0097-07

Maintenance scheduling optimization method of distribution network based on the improved particle swarm optimization

LI Yaguo¹, BAI Lu², LI Guanliang², YANG Dongdong², WANG Ruijue¹

(1. State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China; 2. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China)

Abstract: In order to improve the rationality and economy of distribution network maintenance plan, an optimization method of distribution network maintenance plan based on improved particle swarm optimization is proposed. Firstly, with the goal of minimizing maintenance cost, power supply loss, and failure loss, and the constraints of maintenance resource limitations, maintenance sequence, and safe and stable operation in the actual maintenance process, a maintenance plan optimization model that conforms to the actual distribution network maintenance process is established. Secondly, corresponding preprocessing methods are proposed for different types of constraints to reduce the complexity of solving the problem. Finally, by incorporating the idea of natural selection into the iterative updating of population particles, the overall quality of population particles is improved to overcome the problems of premature convergence and easy to fall into local optimal solution of standard particle swarm optimization algorithm. The improved particle swarm optimization (PSO) algorithm is applied to solve a specific example. Results show that the proposed model and algorithm have good feasibility and rationality.

Key words: distribution maintenance scheduling; optimization problem; natural selection; PSO

配电网是连接电力系统与用户的媒介,在电力系统中起着电能传输与再分配的作用。随着中国电网建设规模的不断扩大和电力设备不断增多,配电网的结构也变得越来越复杂^[1]。当遇到自然灾害或极端天气导致配网设备出现故障时,往往需要对其线路和电力设备进行停电检修^[2-5]。检修计划安排的是否合理,不仅关系到配网停电的面积与时长,更对电力系统的安全稳定性有着重大的影响。因此,制定合理的检修计划不仅能最大限度地保证电网安全稳定运行,同时也对缩短停电面积与时长,对提高检修的经济性有着重大意义^[6-8]。对配电网设备进行检修的目的是为了保证电网的安全稳定运行,但停电检修必然会带来电力负荷的损失与电网安全稳定性的降低。因此,建立一个能有效地反映实际配电网检修过程,同时又能兼顾电网安全性与经济性的配电网检修计划数学模型,并提出相应的求解算法,具有重大的理论价值与实际意义^[9-13]。

配电网检修计划的优化属于非线性整数规划问题的一种,不仅存在多个优化目标且包含大量约束条件。配电网检修计划问题本质是一个多目标、多约束的非线性整数规划问题。其目标函数包括检修经济性最好、运行风险最小、调度管理最合理等,约束条件包含检修资源约束、检修关系约束、系统安全约束等。国内外学者从不同角度出发建立了许多检修计划优化模型,也提出了相应的求解算法^[14-20],文献[17]将检修成本与停电损失转化为经济性目标函数,同时考虑多种约束条件,建立了配电网检修计划优化模型,并提出一种免疫禁忌混合智能算法对模型进行求解;文献[18]从电网运行风险的角度出发,以电网检修风险和电网故障风险之和最小为目标函数,建立了配电网检修计划优化模型,并对粒子群算法进行了改进;文献[19]将配电网检修计划优化问题转化为多目标优化问题,提出了一种小生境多目标粒子群算法对问题进行求解;文献[20]通过对检修约束进行灵活性定义,同时构建了负荷转移矩阵,以经济性最好为目标函数,建立了优化模型,并采用双层优化算法进行了求解。

粒子群优化算法实现了简单、计算速度快且没有遗传算法、蚁群算法那么复杂的操作流程。针对算法容易陷入局部最优解的问题,国内外学者也进

行了相应改进^[21-22]。该文首先提出了种群早熟收敛程度的评判方法,然后在此基础上对惯性权重进行动态调整,最后在粒子的更新迭代中融入自然选择的思想,提高了种群整体质量和算法的收敛精度。

该文综合考虑检修成本、供电损失和故障损失,将三者转换为待优化目标函数,并对多个约束条件进行分类预处理。利用改进后的粒子群算法对问题进行优化求解,最后通过具体实例计算验证了该文模型和算法的合理性与有效性。

1 配电网检修计划优化模型

1.1 目标函数

检修部门在制定配电检修计划时,会综合考虑设备的健康状态、检修带来的停电损失及故障损失等因素。对检修计划优化的实质是在满足检修各类约束的前提下,确定配电网中各个设备开始检修的时刻,并保证在该计划下的检修经济性、安全性达到相对最优。因此,检修计划的待优化参数可表示为由各设备检修开始时刻组成的集合,即

$$t = (t_1, t_2, \dots, t_N) \quad (1)$$

文献[17]以电价为基础将检修成本和停电损失转化为经济目标函数,但未将设备故障带来的风险考虑到模型中,该文在此基础上将设备故障带来的损失考虑作为待优化目标函数的一部分,即

$$\min(F_1 + F_2 + F_3) = \min\left(\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T cq_i^t u_i^t + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T m_i^t u_i^t + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T p_i^t u_i^t\right) \quad (2)$$

式中 F_1 、 F_2 、 F_3 分别为检修停电损失、检修成本、设备故障损失; N 为配电网中待检修设备的总数; T 为检修时段总数; c 为电价; q_i^t 为 t 时段第 i 个设备检修所造成的失负荷量; u_i^t 为 t 时段设备 i 的检修状态,当取 1 时表示设备正在检修,当取 0 时表示设备未在检修; m_i^t 为 t 时段设备 i 的检修费用; p_i^t 为 t 时段设备 i 的故障修复费用。

1.2 约束条件

检修计划优化模型的约束条件如下。

1)同时约束。配网设备进行检修时存在 2 个设备检修都会导致负荷停电的情况,如线路末端变压

器或末端线路检修都会造成该地区负荷停电,为了减少不必要的多次停电应将两者安排在同一时段进行检修,即

$$t_i = t_j \quad (3)$$

2)互斥约束。检修时若多个设备同时检修可能会导致电力系统潮流出现越限,进而影响系统的安全性。同时,在某些情况下多个设备同时检修会造成原本可避免的停电,如对同一变电站的 2 台主变压器进行检修就会造成全站停电,这种情况下应将二者的检修时间错开,即

$$t_i \neq t_j \quad (4)$$

3)检修顺序约束。配电网中不同设备检修会造成系统运行方式发生变化,为了减少改变系统运行方式的重复操作量应将同一运行方式下的设备形成顺序检修的关系,如设备 i 与设备 j 的检修均在同一系统运行方式下,则顺序约束为

$$t_i = t_j + T_j \quad (5)$$

式中 T_j 为设备 j 的检修工期。

4)检修时间约束。为了保证电网的安全稳定运行,设备应在一定时间段内完成检修任务,检修时间约束为

$$t_i \in [t_i^s, t_i^e] \quad (6)$$

式中 t_i^s 为设备 i 可开始检修的最早时刻; t_i^e 为设备 i 可结束检修的最晚时刻。

5)检修资源约束。配网检修时,由于人力物力资源的限制,检修部门同时可检修设备的数量是有限的,则检修资源约束为

$$\sum_{i=1}^N u_i \leq M \quad (7)$$

式中 M 为一天内可同时检修的设备数。

2 基于自然选择的自适应粒子群算法

2.1 PSO 算法早熟收敛分析

粒子群算法是一种基于随机初始解的优化算法,种群中的每个粒子都有具体的速度和位置,粒子的速度根据粒子自身经验、种群经验及惯性动态调整;粒子的位置由速度进行更新且每个位置对应待优化问题的解。粒子通过不断迭代更新来寻找搜索空间中的最优解,每次迭代粒子的速度和位置需进行更新,即

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (8)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^k \quad (9)$$

式中 c_1 、 c_2 均为粒子的学习因子; r_1 、 r_2 为 2 个随机数; v_{id}^k 、 x_{id}^k 分别为粒子的速度和位置; p_{id}^k 、 p_{gd}^k 分别为粒子的个体极值和种群全局极值; ω 为惯性权重。

PSO 算法的优化结果很大程度上取决于上述参数的选取,为了使算法能适应粒子适应度不断变化的情况,需要对种群收敛程度进行分析,并判断种群是否趋于早熟收敛。定义收敛度来对种群早熟收敛程度进行评判,即

$$L = |f_m - f_n| \quad (10)$$

式中 f_m 为当前最优粒子的适应度; f_n 为种群中适应值优于 f_{avg} 的粒子的平均适应值。

收敛度 L 的大小反映了种群早熟收敛的程度,其值越小说明种群早熟收敛程度越高。由式(8)可知,随着种群不断迭代更新,当种群中的粒子陷入局部最优解或到达全局最优解时,其速度主要由惯性部分 ωv_{id}^k 来决定。由于标准 PSO 中惯性权重小于 1,因此随着迭代次数的增加粒子的速度会越来越小,最终将停留在局部最优解上造成整个种群陷入局部最优解。该文依据收敛度的大小对粒子的惯性权重进行动态调节,避免了算法陷入局部最优的问题。

2.2 PSO 算法的改进

种群易于趋向早熟收敛,从而导致算法陷入局部最优解是标准 PSO 算法存在的主要问题。由粒子的更新策略可知,粒子的惯性权重被固定,不能随着迭代次数的增加而进行动态调整,导致算法趋于早熟收敛。为了克服标准 PSO 算法的固有弊病,该文提出一种根据收敛度确定惯性权重的方法,其基本流程如下。

1)计算第 k 次迭代后最优粒子的适应值 f_m 、总群平均适应值 f_{avg} 及优于 f_{avg} 的粒子的平均适应值 f_n 。根据以上参数计算收敛度 L ,设定最大惯性权重 ω_{max} 和最小惯性权重 ω_{min} 。

2)计算第 i 个粒子的适应度值 f_i ,若 f_i 劣于 f_{avg} ,则说明此时粒子 i 距离最优解位置较远,应设置较大的惯性权重 ω_{max} ;若 f_i 优于 f_n ,说明粒子 i 已经比较接近全局或局部最优解位置,此时其惯性

权重取值为

$$\omega = \omega_{\min} + (f_i - f_{\min}) \cdot \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{L} \quad (11)$$

根据收敛度 L 对惯性权重进行动态调整,提高了算法的全局寻优能力,避免了粒子陷入局部最优解的问题。但标准粒子群算法由于粒子的随机性,仍存在收敛精度低的问题。为此,该文将自然选择思想融入粒子的更新迭代中,其具体操作流程为种群每更新一次,就根据粒子的适应值大小对粒子进行排序分为两部分,并用适应值好的那部分粒子位置代替适应值差的粒子的位置,从而提高了种群粒子的整体质量。

2.3 改进 PSO 算法的流程

该文从标准 PSO 存在的固有弊病出发,通过对种群的收敛度进行评判,提出了一种能够随种群更新迭代来动态调整惯性权重的粒子位置更新策略。针对粒子收敛精度低、不能获得最优解的问题,提出将自然选择思想融入粒子更新替换中的优化方法,其具体算法流程如下。

1) 初始化种群,确定种群的规模、最大迭代次数、搜索空间的维数等参数,随机生成一组具有初始速度的粒子。

2) 按照式(8)和(9)的更新策略对每个粒子的速度和位置进行更新,其中式(9)中的惯性权重 ω 的取值由式(11)来确定。根据粒子的位置计算出各个粒子的适应度值 f_i ,选出适应度最好的粒子 f_m ,若 f_i 优于个体极值 p_i ,则令 $p_i = f_m$;同理,若 f_i 优于群体极值 p_g ,则令 $p_g = f_m$ 。

3) 判断算法是否满足收敛条件,若满足则转向步骤 6,反之转向步骤 4。

4) 对种群中的粒子按照适应值大小进行排序并将其分为两部分,用适应度好的粒子的位置和速度去替换适应度差的粒子的位置和速度。

5) 转向步骤 2。

6) 输出群体极值 p_g ,算法结束。

3 改进粒子群算法在配电网检修计划中的应用

3.1 约束条件的处理

粒子群算法最初是用于求解无约束的优化问

题,对于带约束的优化问题,通常的处理方式是将约束条件转化为罚函数或对于超出约束的情况将适应度值设为较大的值^[17,19]。配网检修计划优化问题是一个多约束的问题,且约束条件的数学形式各异,若直接采用转化为罚函数或设较大值的方法进行处理,将会导致算法收敛性降低,影响最终的优化结果。该文根据约束条件的不同数学形式采取不同的处理方法。

1) 约束条件式(3)、(5)均为等式约束,即当确定某个设备的开始时刻后即可由这 2 式推出另一个设备的开始时刻。由于粒子群算法中位置变量的各维元素代表各个设备的检修开始时刻,因此,对于存在同时约束或顺序约束的 2 个元素,只需要对其中一个进行优化,即可根据约束确定另一个元素的取值。该操作相当于变相降低了粒子群搜索空间的维数,提高了算法的搜索精度。

2) 对于约束条件式(4)、(6)、(7),该文采用转化为罚函数加入到待优化函数中的方式进行处理,即

$$G_1(t) = \sum_{i,j \text{ 满足互斥约束}} \max\{0, \min\{t_i + T_i - t_j, t_j + T_j - t_i\}\} \quad (12)$$

$$G_2(t) = \sum_{i=1}^T \max\{0, \sum_{i=1}^N u_i^t - M\} \quad (13)$$

$$G_3(t) = \sum_{i=1}^N \max\{0, \max\{t_i^s - t_i, t_i - t_i^e + T_i - 1\}\} \quad (14)$$

将上述罚函数加入目标函数,得到粒子群算法的适应度函数为

$$F = \sum_{i=1}^3 \alpha_i F_i + \sum_{i=1}^3 \beta_i G_i \quad (15)$$

式中 F_i 为目标值; α_i 为各目标值的权重; G_i 为惩罚项; β_i 为惩罚项系数。检修部门可根据实际目标来选取适当的 α_i 的值;同理对于各惩罚项系数,由于互斥约束保证了电网的安全运行,因此其系数应设置为较大的值。

3.2 基于改进 PSO 算法的配电网检修计划优化流程

对配电网检修计划进行优化就是在满足检修部门给定的要求及各检修约束条件下,确定各设备的检修开始时刻,使得在该检修方案下配网检修的经济安全性最好。检修时刻的确定在数学上可以等效为在给定区间内多目标值的整数规划问题。PSO 算法是一种基于随机初始解的优化算法,算法中各

粒子的适应度评判及位置更新策略都十分契合该问题的求解。同时改进后 PSO 算法不仅继承了标准 PSO 算法易于实现、收敛速度快的优点且克服了其容易陷入局部最优解的问题,能够大大提高配网检修计划优化问题的求解精度。

该文基于改进 PSO 算法对配电网检修计划进行优化的具体流程如图 1 所示。

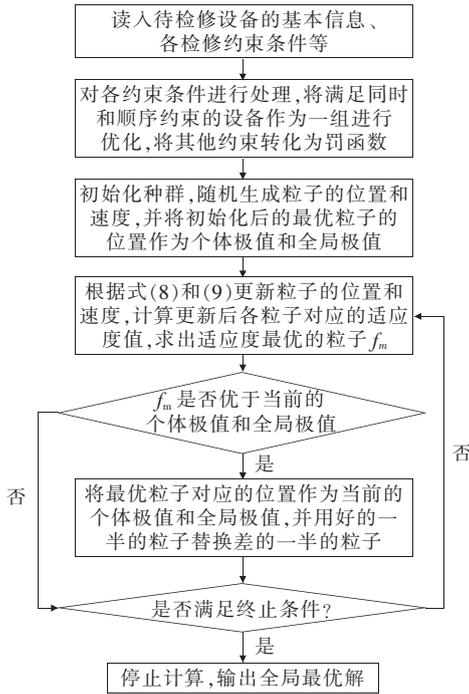


图 1 基于改进 PSO 的配网检修计划优化流程

Figure 1 Optimization process of distribution network maintenance plan based on Improved PSO

4 算例分析

该文以某供电局上报的检修计划申请为例进行仿真计算以验证模型和算法的可行性。待检修设备的具体信息参考文献[13],检修周期为一个月,检修时段以 d 为单位。各设备检修费用及故障修复费用参考文献[18],电价参考电力市场的实时价格。同时约束、互斥约束和顺序约束见表 1,其中(m,n)表示设备 m 和设备 n 之间满足对应的检修约束。

检修时间约束为设备 8 的检修结束时间不能晚于第 7 日;设备 31 的检修结束时间不能晚于第 2 日;设备 52 的检修开始时间不得早于第 13 日;所有设备的检修结束时间不得晚于第 30 日。检修资源约束为每日检修班组不得超过 3 组。

表 1 3 种检修约束条件

Table 1 Three maintenance constraints

同时约束	互斥约束	顺序约束
(2,3)	(4,7)	(4,5)
(11,12)	(5,7)	(5,6)
(18,19)	(6,7)	(9,10)
(23,24)	(36,37)	(12,13)
(24,25)	(36,38)	(14,15)
(39,40)	(36,39)	(16,17)
(43,44)	(37,39)	(19,20)
(44,45)	(38,39)	(24,26)
(48,49)	(53,54)	(26,27)
(49,50)	(53,55)	(28,29)
(52,56)	(54,55)	(32,33)
—	—	(37,38)
—	—	(41,42)

4.1 算法性能比较

为了体现改进 PSO 算法的性能,将该文改进算法与标准 PSO 算法的优化结果进行对比。优化算法的参数设置如下,种群大小为 1 000;最大迭代次数为 200;粒子速度区间为[-5,5];学习因子 c₁、c₂ 均为 2;标准 PSO 中惯性权重固定为 0.729;改进粒子群算法最大惯性权重 ω_{max} 设为 0.95;最小惯性权重 ω_{min} 设为 0.3;各目标值权重均为 1;惩罚项系数 β₁ 为 1 000,β₂、β₃ 均为 1。同时,在使用标准粒子群算法进行求解时,检修约束与顺序检修约束不采用分组处理。2 种算法的结果如表 2 所示,收敛过程如图 2 所示。

由表 2 可知,改进后的 PSO 算法虽然计算时间有所增加,但其他方面的性能均有所提升。平均值的对比结果表明,改进后的 PSO 算法粒子质量明显高于标准 PSO,保证了结果的精确性。标准差的对比结果表明,改进后的 PSO 算法稳定性更好,能够更有效地收敛于全局最优解。由图 2 可知,改进后

表 2 算法比较结果

Table 2 Algorithm comparison results

PSO 算法	最优值/ 元	平均值/ 元	标准差	计算时间/ min
标准	43 318	43 479	43.31	4.6
改进	42 576	42 834	31.45	5.2

的粒子群算法提高了算法的全局搜索能力,避免了算法陷入局部最优解,同时其收敛结果也较标准 PSO 算法更好。

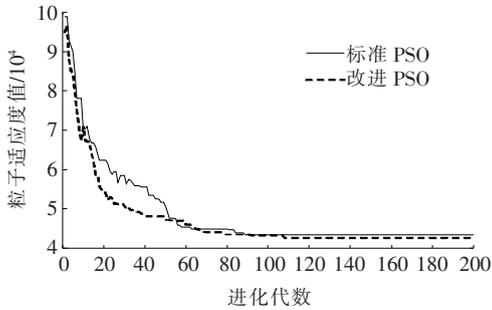


图2 标准 PSO 与改进 PSO 适应度变化曲线对比

Figure 2 Comparison of the change curve of standard PSO and improved PSO adaptability

5 结语

1) 该文以检修成本、停电损失、故障损失之和最小为目标,同时考虑各种检修条件约束,建立了配电网检修计划优化模型。针对检修模型约束条件各异的特点,提出了分组处理和加入罚函数的方法。

2) 针对标准 PSO 算法存在的容易陷入局部最优解且收敛精度低的问题,提出了种群早熟收敛程度的评判方法,并基于收敛度对惯性权重进行了自适应调整。在种群迭代过程中通过对粒子进行“优胜劣汰”处理,提高了种群的整体质量。算例求解结果表明,改进后的粒子群算法不仅有着更高的收敛精度,同时还克服了标准粒子群算法易陷入局部最优解的缺点。

参考文献:

[1] 张健磊,高湛军,陈明,等.考虑复故障的有源配电网故障定位方法[J].电工技术学报,2021,36(11):2265-2276.
ZHANG Jianlei, GAO Shenjun, CHEN Ming, et al. Fault location method for active distribution networks considering combination faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(11): 2265-2276.

[2] George-Williams H, Patelli E. Maintenance strategy optimization for complex power systems susceptible to maintenance delays and operational dynamic[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2017, 66(4): 1309-1330.

[3] 李腾飞. 红外精确测温技术在电力设备状态检修中的应用[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 246-251.

LI Tengfei. Application of accurate infrared temperature measurement in condition maintenance of power equipment [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 246-251.

[4] 贾京苇,侯慧娟,杜修明,等.基于 Markov 决策过程的输变电设备最佳检修决策[J].高电压技术,2017,43(7):2323-2330.
JIA Jingwei, HOU Huijuan, DU Xiuming, et al. Optimum maintenance policy for power delivery equipment based on Markov decision process[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2323-2330.

[5] 袁野,王慧芳,应高亮,等.基于最小累积风险度的电网等风险检修决策[J].电力自动化设备,2017,37(11):151-155.
YUAN Ye, WANG Huifang, YING Gaoliang, et al. Equal risk maintenance decision for power grid based cumulative risk[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 151-155.

[6] Lou X S, Feng X S, Chen W, et al. Risk-based coordination of maintenance scheduling and unit commitment in power systems[J]. Journal of Technology & Science, 2020(8): 58788-58799.

[7] Alayo H, Paucar E. A MILP model for maintenance scheduling in transmission systems and an example application to the peruvian system[J]. IEEE Latin America Transactions, 2018, 16(4): 1099-1104.

[8] Feng D, Lin S, He Z Y, et al. Optimization method with prediction-based maintenance strategy for traction power supply equipment based on risk quantification[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(4): 961-970.

[9] 俞晨玺,孔维禄,俞柏红,等.考虑需求响应的多目标机组检修调度优化[J].电力系统保护与控制,2020,48(11):110-118.
YU Chenxi, KONG Weilu, YU Bohong, et al. Multi-objective optimization of generation maintenance scheduling considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 110-118.

[10] 许丹,罗治强,李旻,等.考虑安全约束及电量执行的年度发电与检修联合优化模型[J].电力系统保护与控制,2019,47(17):133-139.
XU Dan, LUO Zhiqiang, LI Min, et al. A combined optimization model for annual generation and maintenance scheduling considering safety constraints and power execution[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 133-139.

[11] 刘辉,江千军,桂前进,等.考虑供需综合因素的电网检

- 修计划最优决策模型[J]. 中国电力, 2021, 54(6): 159-167.
- LIU Hui, JIANG Qianjun, GUI Qianjin, et al. Optimal decision-making model for power grid maintenance scheduling considering comprehensive supply-demand factors[J]. Electric Power, 2021, 54(6): 159-167.
- [12] 陈丽光, 何绍洋, 俞晓峰, 等. 考虑设备故障率时变特性的电网检修计划优化编制[J]. 智慧电力, 2020, 48(12): 109-115.
- CHEN Liguang, HE Shaoyang, YU Xiaofeng. Optimal formulation for power grid maintenance scheduling considering time-varying characteristics of equipment failure rate[J]. Smart Power, 2020, 48(12): 109-115.
- [13] 余佳莹, 刘梓权. 基于改进粒子群算法的输电网检修计划优化[J]. 广东电力, 2020, 33(9): 100-107.
- YU Jiaying, LIU Zhiqian. Optimization of transmission network maintenance schedule based on improved particle swarm algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(9): 100-107.
- [14] Janjic A D, Popovic D S. Selective maintenance schedule of distribution networks based on risk management approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 597-604.
- [15] Moham ma dnezhad-Shourkaei H, Abiri-Jahromi A, Fotuhi-Firuzabad M. Incorporating service quality regulation in distribution system maintenance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2495-2504.
- [16] Li F X, Brown R E. A cost-effective approach of prioritizing distribution maintenance based on system reliability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 439-441.
- [17] 黄弦超, 舒隽, 张粒子, 等. 免疫禁忌混合智能优化算法在配电网检修优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 98-102.
- HUANG Xianchao, SHU Jun, ZHANG Lizi, et al. Distribution maintenance scheduling using an intelligent optimal approach mixed with immune algorithm and tabu search[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 98-102.
- [18] 栗然, 王飞飞, 李增辉. 基于风险评估的配电网检修决策优化[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 1-8.
- LI Ran, WANG Feifei, LI Zenghui. Maintenance decision making optimization based on risk assessment for distribution system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 1-8.
- [19] 刘文颖, 谢昶, 文晶, 等. 基于小生境多目标粒子群算法的输电网检修计划优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 141-148+19.
- LIU Wenyin, XIE Chang, WEN Jing, et al. Optimization of transmission network maintenance scheduling based on niche multi-objective particle swarm algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 141-148+19.
- [20] 刘志文, 董旭柱, 吴争荣, 等. 考虑灵活定义约束的配电网检修计划双层优化方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2208-2216.
- LI Zhiwen, DONG Xuzhu, WU Zhengrong, et al. A bi-level optimization method for distribution network maintenance schedule considering flexible definition constraint condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2208-2216.
- [21] 马立新, 徐嘉辉, 杨天笑. 基于 MPSO 算法含电动汽车的微网优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(8): 116-122.
- MA Lixin, XU Jiahui, YANG Tianxiao. Optimal scheduling of microgrid with electric vehicles based on MP-SO algorithm [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8): 116-122.
- [22] 倪泽宇, 季亮, 施佳斌, 等. 基于 PQMS 电压信息的有源配电网故障定位方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14): 51-56.
- NI Zeyu, JI Liang, SHI Jiabin, et al. Fault location method of active distribution network based on voltage information of PQMS [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 51-56.