

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230050

# 基于蝴蝶优化的配电线路双层迭代降损方法研究

潘雅琦<sup>1</sup>, 王江波<sup>1</sup>, 孟宇静<sup>2</sup>, 白广<sup>2</sup>, 齐宁<sup>2</sup>, 张宇航<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国网北京密云供电公司, 北京 101500)

**摘要:** 为解决 10 kV 长配电线路损耗大、电压质量差及降损设备年投资回报率低等问题, 提出一种结合蝴蝶优化的配电线路双层迭代降损增效方法。首先, 考虑线路负荷三相不平衡, 应用电力系统仿真软件 OpenDSS 建立目标配电线路分相潮流仿真模型。其次, 增加 10 kV 线路无功补偿装置容量与位置以及调压器分接头挡位与位置为控制变量, 建立以考虑全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)的年投资回报率最大为目标的外层规划模型, 以年有功损耗及年平均电压偏移量最小的多目标为内层运行模型。然后, 利用蝴蝶算法通过 Python 调用 OpenDSS 潮流计算模型仿真, 得到潮流结果和理论线损并求解降损模型。最后, 以某供电公司线路为算例进行验证, 结果表明该方法能为线路降损提供实用的实施方案。

**关键词:** 10 kV 长配电线路; OpenDSS; 蝴蝶算法; 双层迭代降损方法; 年投资回报率; 年平均电压偏移量

## A double layer iterative loss reduction method for distribution lines based on butterfly optimization

PAN Yaqi<sup>1</sup>, WANG Jiangbo<sup>1</sup>, MENG Yujing<sup>2</sup>, BAI Guang<sup>2</sup>, QI Ning<sup>2</sup>, ZHANG Yuhang<sup>2</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Miyun Power Supply Company, State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 101500, China)

**Abstract:** There are problems of large loss, poor voltage quality and low annual return on investment of loss reduction equipment in 10 kV long distribution lines. Thus a double-layer iterative loss reduction and efficiency enhancement method for distribution lines combined with butterfly optimization is proposed. First, considering the three-phase imbalance of line load, the power system simulation software OpenDSS is used to establish a simulation model of the target distribution line. Second, the capacity and position of the reactive power compensation device of the 10 kV line and the position of the voltage regulator tap are added as the control variables, and the outer planning model with the maximum annual return on investment considering the life cycle cost (LCC) is established. The multi-objective model with the minimum annual active loss and annual average voltage offset is the inner operation model. Then using the butterfly algorithm to call the OpenDSS power flow calculation model simulation through Python, the power flow results and theoretical line losses are obtained and the loss reduction model is solved. Finally, the line of a power supply company is taken as an example for verification. The results show that this method can provide a practical implementation scheme for line loss reduction.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977210).

**Key words:** 10 kV distribution line; OpenDSS; butterfly algorithm; double layer iterative loss reduction method; annual return on investment; annual average voltage offset

## 0 引言

根据“十四五”规划提出的节能降耗总目标, 国家对能源规划、电网高质量发展提出了更高要求<sup>[1-4]</sup>, 各地也针对 10 kV 长线路损耗问题制定了关

于线损率、电压质量、节能指标等新目标。近年来, 随着配电线路的构成日渐复杂, 降损增效面临了新的挑战<sup>[5-7]</sup>, 配电线路中损耗的存在不仅造成了电力资源的浪费, 也不利于电力企业经济效益的提升。从经济层面出发, 关注电网投入产出, 降低电网损耗, 提高电压质量, 考虑设备调控成本, 对提升综合投资效益具有重要意义<sup>[8-11]</sup>。

多年来, 大多数学者利用算法与仿真模型相结

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51977210); 国网北京市电力公司科技项目资助(52021521N001)

合进行优化求解,传统的元启发式智能算法主要有粒子群算法、遗传算法及蚁群算法等,但其应用在降损分析问题上普遍存在寻优精度低、收敛速度慢的缺点<sup>[12-16]</sup>。针对这些问题,文献[17-24]利用算法改进、利用新算法以及优化降损模型进行降损。文献[17]以网损、年平均电压偏移量及无功补偿装置投资最小为目标,利用基于 Pareto 熵的粒子群算法解决多目标求解问题;文献[18]以损耗和峰值功率损失成本最小为目标,利用花斑鬣狗算法进行单相潮流降损计算,成本降低显著;文献[19]在考虑电气设备寿命周期的基础上以净投资收益为目标利用改进的遗传算法进行研究;文献[20]以无功补偿设备安装位置与容量为上层控制变量,以优化方案为下层变量,以经济性最优为目标函数,利用风驱动优化算法进行求解。文献[18-20]虽然考虑了经济效益,但都未考虑负荷三相不平衡性,且控制变量不够丰富。文献[21]建立了配电网设备规划与运行双层优化模型,以降低配电网投资运行成本与提高电压稳定性为目标函数,但未考虑综合投资回报率。综上,当前研究仍存在以下不足:仿真模型多以单层运行模型或单层规划模型为主,且模型控制变量较为单一,以日 96 点数据为基础、以日损耗及年平均电压偏移量为目标函数进行研究的较多,对一整年的综合投资经济效益的规划研究较少。

针对上述求解工具、仿真模型及研究时长等一系列问题,本文采用搜索能力强、计算精度高的蝴蝶算法进行降损研究。蝴蝶算法主要包含迁移算子和调整算子,并行处理能力强,并且能够很好地平衡局部搜索和全局搜索<sup>[25-27]</sup>的矛盾;同时,建立双层降损模型,内层运行模型以变压器分接头档位、各无功补偿装置投切组数为控制变量,以年有功损耗以及年平均电压偏移量最小为多目标函数;外层规划模型以线路无功补偿位置与总容量、台区无功补偿装置总容量以及调压器位置为控制变量,以考虑全寿命周期成本的投资回报率最大为单目标函数;并结合蝴蝶算法的双层迭代降损方法对模型进行求解,其中,通过求解内层运行模型获得 Pareto 最优解集,结合主观赋权法得到最优折衷解<sup>[28-29]</sup>;最后,本文通过对某供电公司实际线路仿真求解,验证所提方案的可行性与优越性。

## 1 配电网双层降损数学模型

对 10 kV 长线路进行降损增效时,首先需要确定各无功补偿装置安装位置及容量以及调压器的安装位置,线路年有功损耗需在确定变压器分接头变

比、投切无功补偿装置组数后由 OpenDSS 计算得出,而后者又需要以安装位置和容量为前提,故在计算过程中二者相互联系且相互制约,因此本文采用内外双层规划模型。

### 1.1 内层运行模型

内层运行模型为一个多目标运行问题,目标函数为线路年有功损耗及系统年平均电压偏移量最小,二者求解时会受到外层模型的制约。

#### 1) 控制变量

传统的降损增效控制变量主要为变压器分接头档位及投切的无功补偿装置组数<sup>[30]</sup>,内层模型在此基础上以增加线路无功补偿装置的投切组数及线路双向调压器分接头档位为控制变量,对于包含  $n$  节点的配电线路,其中有  $m$  个节点为负荷节点、有  $M_1$  条支路,则控制变量的表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_1^t = [ & T_{1,t}^{\text{tran}}, T_{2,t}^{\text{tran}}, \dots, T_{i,t}^{\text{tran}}, \dots, T_{m,t}^{\text{tran}}, \\ & N_{1,t}^{\text{cap}}, N_{2,t}^{\text{cap}}, \dots, N_{j,t}^{\text{cap}}, \dots, N_{m,t}^{\text{cap}}, \\ & T_{1,t}^{\text{ltran}}, T_{2,t}^{\text{ltran}}, \dots, T_{k,t}^{\text{ltran}}, \dots, T_{h,t}^{\text{ltran}}, \\ & N_{1,t}^{\text{lcap}}, N_{2,t}^{\text{lcap}}, \dots, N_{q,t}^{\text{lcap}}, \dots, N_{s,t}^{\text{lcap}} ] \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{X}_1^t$  为  $t$  时刻的内层控制变量;  $T_{i,t}^{\text{tran}}$  ( $0 \leq i \leq m$ ) 为  $t$  时刻第  $i$  个台区变压器的分接头档位;  $N_{j,t}^{\text{cap}}$  ( $0 \leq j \leq m$ ) 为  $t$  时刻第  $j$  个台区变压器低压侧无功补偿装置投切组数;  $T_{k,t}^{\text{ltran}}$  ( $0 \leq k \leq h$ ) 为  $t$  时刻第  $k$  个线路调压器的分接头档位,  $h$  为线路调压器总个数;  $N_{q,t}^{\text{lcap}}$  ( $0 \leq q \leq s$ ) 为  $t$  时刻第  $q$  个线路无功补偿装置投切组数,  $s$  为线路无功补偿装置总个数。对于长线路,一般可在其中间部分安装一个调压器以及 2~3 个线路无功补偿装置,以降低线路损耗和提高末端电压。

#### 2) 目标函数

##### (1) 线路年有功损耗最小

$$\min P_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{i=1}^{M_1} P_{i,t}^L \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{loss}}$  为线路年有功损耗;  $\tau$  为配电线路运行总小时数;  $P_{i,t}^L$  为第  $i$  条支路  $t$  时刻的有功损耗功率。

##### (2) 系统年平均电压偏移量最小

电压偏移量是监测电压是否合格、衡量电压质量的重要标准,本文以年平均电压偏移量作为监测电压质量的标准,具体如式(3)所示。

$$\min \Delta U = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \left| \frac{U_{i,t} - U_N}{(U_{i,\max} - U_{i,\min})} \right| \quad (3)$$

式中:  $\Delta U$  为年平均电压偏移量;  $U_{i,t}$  为节点  $i$  在  $t$  时段的电压标幺值;  $U_N$  为标准电压;  $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$  分别为节点  $i$  允许的最大最小电压标幺值。

3) 各时刻约束条件

(1) 潮流方程约束

就节点  $i$  而言可表示为

$$P_i^G - P_i^N - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (4)$$

$$Q_i^G + Q_i^C - Q_i^L - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (5)$$

$$Q_i^C = N_i^{\text{group}} \times Q^C \quad (6)$$

就整个系统而言可表示为

$$\sum_{i=1}^n P_i^G - \sum_{i=1}^n P_i^N - \Delta P_{\Sigma} = 0 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_i^G - \sum_{i=1}^n Q_i^C - \sum_{i=1}^n Q_i^N - \Delta Q_{\Sigma} = 0 \quad (8)$$

式中:  $P_i^G$  为电源向节点  $i$  注入的有功功率;  $Q_i^G$  为电源向节点  $i$  注入的无功功率;  $P_i^N$  为节点  $i$  处负荷消耗的有功功率;  $Q_i^N$  为节点  $i$  处负荷消耗的无功功率;  $Q_i^C$  为节点  $i$  的无功补偿功率;  $Q_i^L$  为节点  $i$  负荷的无功功率;  $Q^C$  为变压器低压侧总无功补偿装置单组投切容量, 在单组容量确定的前提下,  $Q_i^C$  的大小主要取决于实际投切组数  $N_i^{\text{group}}$ ;  $U_i$  与  $U_j$  分别为节点  $i$  和节点  $j$  处的电压;  $\theta_{ij}$  为节点  $i$  和  $j$  间的电压相位差;  $G_{ij}$  为节点  $i$  和  $j$  间的电导;  $B_{ij}$  为节点  $i$  和  $j$  间的电纳;  $\Delta P_{\Sigma}$  为网络总有功损耗;  $\Delta Q_{\Sigma}$  为网络总无功损耗。

(2) 电压约束

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad i \in m \quad (9)$$

(3) 控制变量约束

控制变量的约束条件表示为

$$\begin{cases} T_{i,\min}^{\text{tran}} \leq T_i^{\text{tran}} \leq T_{i,\max}^{\text{tran}} & i \in m \\ N_j^{\text{cap}} = Q_j^{\text{zcap}} / Q_1^C & j \in m \\ N_q^{\text{lcap}} = Q_q^{\text{zcap}} / Q_2^C & q \in s \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $T_i^{\text{tran}}$  为第  $i$  个变压器的分接头档位,  $T_{i,\min}^{\text{tran}}$ 、 $T_{i,\max}^{\text{tran}}$  为其上下限;  $N_j^{\text{cap}}$ 、 $Q_j^{\text{zcap}}$  分别为第  $j$  个台区变压器低压侧无功补偿装置投切组数和投入总容量;  $N_q^{\text{lcap}}$ 、 $Q_q^{\text{zcap}}$  分别为第  $q$  个线路无功补偿装置投切组数和投入总容量;  $Q_j^{\text{zcap}}$  与  $Q_q^{\text{zcap}}$  也是外层模型的控制变量;  $Q_1^C$  为台区无功补偿装置的单组投切容量;  $Q_2^C$

为线路无功补偿装置的单组投切容量。

## 1.2 外层规划模型

外层规划结果为内层目标函数的计算提供了基础, 而内层的计算结果也会反馈到外层模型中, 成为外层目标函数中的重要组成部分。

1) 控制变量

外层规划模型主要为电力系统规划模型, 控制变量为各无功补偿装置位置与总容量以及调压器的安装位置, 由于台区无功补偿需求较大, 则设定每个台区都需要投切, 故不存在台区无功补偿装置的选址问题, 则控制变量表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_2 = [ & Q_1^{\text{zcap}}, Q_2^{\text{zcap}}, \dots, Q_j^{\text{zcap}}, \dots, Q_m^{\text{zcap}}, \\ & Q_1^{\text{zcap}}, Q_2^{\text{zcap}}, \dots, Q_q^{\text{zcap}}, \dots, Q_s^{\text{zcap}}, \\ & M_1^{\text{loc}}, M_2^{\text{loc}}, \dots, M_k^{\text{loc}}, \dots, M_h^{\text{loc}}, \\ & M_1^{\text{lloc}}, M_2^{\text{lloc}}, \dots, M_q^{\text{lloc}}, \dots, M_s^{\text{lloc}} ] \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{X}_2$  为外层控制变量;  $M_k^{\text{loc}}$  ( $0 \leq k \leq h$ ) 为第  $k$  个线路调压器的安装位置;  $M_q^{\text{lloc}}$  ( $0 \leq q \leq s$ ) 为第  $q$  个线路无功补偿装置的安装位置。

2) 目标函数

外层规划模型的目标函数主要为考虑了设备全寿命周期成本的年投资回报率, 全寿命周期成本费用主要包含设备投资成本、运行成本以及维护成本<sup>[31-32]</sup>, 具体如式(12)~式(14)所示。

$$\max E = \frac{\Delta F}{C} = \frac{F_0 - F}{C} \quad (12)$$

$$F = C_{\text{loss}} \quad (13)$$

$$C = C_c + C_m + C_d \quad (14)$$

式中:  $E$  为配电线路的年投资回报率;  $\Delta F$  为投入无功补偿装置后节约的年网损电能费用;  $F$  为投入无功补偿装置后年网损电能费用;  $F_0$  为投入无功补偿装置前配电线路原始网损电能费用, 主要取决于内层运行模型中年有功损耗  $P_{\text{loss}}$ ;  $C_{\text{loss}}$  为年总损耗电量对应的年网损电能费用;  $C$  为降损设备的投资总费用;  $C_c$  为无功补偿装置的综合投资成本;  $C_m$  为设备的运行维护费用;  $C_d$  为设备的报废成本。

$C_c$  包含无功补偿装置的购买成本及安装费用, 具体表示为

$$C_c = K_c \left( \sum_{j=1}^m Q_j^{\text{zcap}} + \sum_{q=1}^s Q_q^{\text{zcap}} \right) + C_0 \quad (15)$$

式中:  $K_c$  为无功补偿装置单位成本;  $C_0$  表示调压器及无功补偿装置的人工安装费用。

设备的运行维护费用  $C_m$  具体表示为

$$C_m = K_a K_c \left( \sum_{j=1}^m Q_j^{\text{zcap}} + \sum_{q=1}^s Q_q^{\text{zcap}} \right) \quad (16)$$

式中,  $K_a$  为投资设备的年维修费用率。

设备的报废成本  $C_d$  具体表示为

$$C_d = K_d K_c \left( \sum_{j=1}^m Q_j^{\text{zcap}} + \sum_{q=1}^s Q_q^{\text{zcap}} \right) \quad (17)$$

式中,  $K_d$  为设备的报废费用率。

年总损耗电量对应的年网损电能费用  $C_{\text{loss}}$  具体表示为

$$C_{\text{loss}} = \beta \times P_{\text{loss}} = \beta \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{i=1}^{M_1} P_{i,t}^L \quad (18)$$

式中:  $\beta$  为单位电量的有功电价;  $P_{\text{loss}}$  由内层模型直接得出。

### 3) 约束条件

外层规划模型中控制变量的约束条件为

$$\begin{cases} 0 \leq Q_j^{\text{zcap}} \leq Q_{j,\text{max}}^{\text{zcap}} & j \in m \\ 0 \leq Q_q^{\text{zcap}} \leq Q_{q,\text{max}}^{\text{zcap}} & q \in s \\ M_k^{\text{loc}} \in A \\ M_q^{\text{loc}} \in A \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $Q_{j,\text{max}}^{\text{zcap}}$  为第  $j$  个台区无功补偿装置的最大规划量;  $Q_{q,\text{max}}^{\text{zcap}}$  为第  $q$  个线路无功补偿装置的最大规划量;  $A$  为配电线路中间部分节点的集合。

## 2 考虑年投资回报率的蝴蝶算法

为了说明基本的蝴蝶算法与本文目标相结合的过程, 首先通过下述数学公式对适应本文的蝴蝶算法基本运行步骤进行阐述。

蝴蝶算法主要包含香味浓度的计算、搜索方式的选择、位置的更新及感觉模态的更新 4 部分, 下面将详细介绍各部分的原理及功能。

在感觉模态中, 蝴蝶可以辨识出不同的香味, 并感知它们的强度, 蝴蝶算法主要通过初始化之后的目标函数值决定每个蝴蝶个体的感知强度, 并由此计算出每只蝴蝶的香味浓度, 香味浓度是更新位置时的主要影响参数, 其计算公式为

$$f = cI^a \quad (20)$$

式中:  $f$  为香味浓度;  $c$  为感觉模态;  $I$  为由目标函数值决定的蝴蝶个体感知强度;  $a$  为感觉模态中的气味, 通常  $a$  与  $c$  的范围在  $[0,1]$  之间。本文为了更全面地找寻最优解, 将  $a$ 、 $c$  的值初始化为  $[0,1]$  范围内的随机数, 并在每次更新位置前都重新随机生成

$a$  的值。

初始化蝴蝶参数后, 通过移动对蝴蝶位置进行更新迭代, 蝴蝶的移动方式可分为局部搜索与全局搜索<sup>[33]</sup>两种。为了确保蝴蝶搜索范围广, 寻优精度高, 蝴蝶算法中搜索方式会根据概率  $p$  决定,  $p$  的值会在算法初始化时给定, 范围在  $[0,1]$  之间, 而随机数  $r$  的值则会由算法随机产生, 范围也为  $[0,1]$ 。

当  $r \geq p$  时, 蝴蝶个体会进行局部搜索, 并更新位置, 对应位置公式为

$$X_i^{w+1} = \lfloor X_i^w + (r^2 \times X_j^w - X_k^w) \times f \rfloor \quad (21)$$

式中:  $r$  为  $[0,1]$  之间的随机数;  $X_i^w$ 、 $X_j^w$ 、 $X_k^w$  分别为第  $i$ 、 $j$ 、 $k$  只蝴蝶在  $w$  次迭代时的控制变量, 并在计算后对其进行向下取整。

当  $r < p$  时, 蝴蝶个体朝着全局最优解的方向移动, 移动公式为

$$X_i^{w+1} = \lfloor X_i^w + (r^2 \times g^* - X_i^w) \times f \rfloor \quad (22)$$

式中,  $g^*$  为在当前迭代的所有解中目前的全局最优位置, 并在计算后对其进行向下取整。

需要注意的是, 进行位置更新后, 若所得控制变量中各变量值超过原定范围, 则自动进行可调操作, 将其置为各变量的最大值, 确保各变量都在实际范围内。

在达到最大迭代次数之前, 每次迭代后, 更新蝴蝶的感觉模态  $c$ , 更新公式为

$$c^{w+1} = c^w + (b/c^w \times M) \quad (23)$$

式中:  $c^w$  表示第  $w$  次迭代后感觉模态的值;  $b$  为可设定的常数;  $M$  为最大迭代次数。

## 3 结合蝴蝶算法的双层迭代降损方法

本文主要以 OpenDSS 为仿真工具, 以 Python 为算法实现工具, 完成双层模型与蝴蝶算法的交互, 下面将对此法进行详细介绍。

### 3.1 蝴蝶算法流程

本文中蝴蝶算法主要运用在双层模型的更新迭代上, 故首先介绍算法迭代的核心部分, 其迭代部分流程图如图 1 所示。

具体步骤如下。

1) 根据历史数据计算出的每只蝴蝶的适应度, 确定初始状态下对应的最优值  $G_{\text{bestScore}}$  及对应的最优位置  $G_{\text{bestPosition}}$ ;

2) 根据步骤 1) 所得适应度即蝴蝶个体感知强度  $I$  值, 再随机生成  $a$  的值, 并由式(20)更新蝴蝶散发的香味浓度  $f$ ;

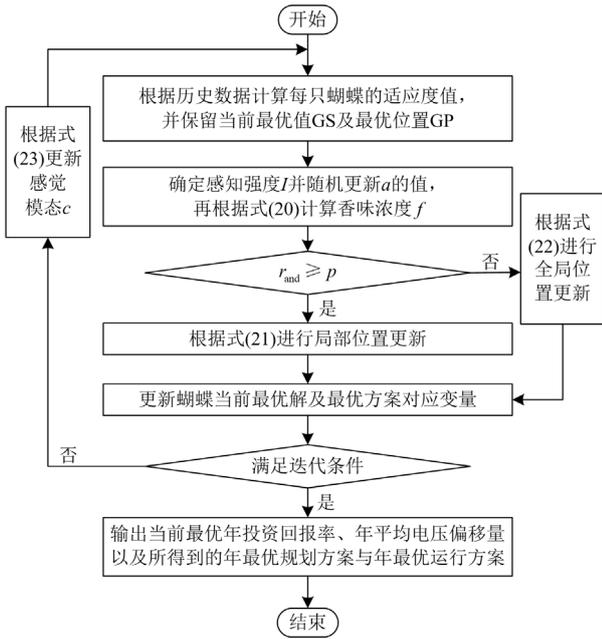


图 1 蝴蝶算法迭代部分流程图

Fig. 1 Flow chart of butterfly algorithm iteration

3) 判断均匀分布的随机数  $r_{\text{and}}$  值与概率  $p$  的关系, 若  $r_{\text{and}} \geq p$ , 则根据式(21)进行局部位置更新, 反之根据式(22)进行全局位置更新;

4) 更新解集 GS-New 及对应的最优位置 GP-New, 判断是否优于上一次的最优值, 若更优, 则替换原最优解, 得到新的最优解及最优位置, 若优化结果不如上一次, 则保留原值及原位置;

5) 判断是否达到迭代次数, 若达到, 则输出当前最优解及对应最优位置, 若未达到, 则根据式(23)更新感觉模式  $c$  的值, 并返回双层模型中进行迭代计算, 直至迭代完成。

### 3.2 结合蝴蝶算法的双层迭代降损方法流程

双层迭代降损方法主要由外层规划模型与内层运行模型两部分组成, 并结合了蝴蝶算法更新迭代的核心部分。双层迭代结束后会产生年最优规划方案、年最优运行方案、最优年投资回报率及其对应年平均电压偏移量。年最优规划方案主要包含各无功补偿装置安装总容量及调压器安装位置; 年最优运行方案则包含 8760 组变压器分接头挡位、各无功补偿装置投切组数。具体流程图如图 2 所示。详细步骤如下。

1) 首先在 OpenDSS 中完成对目标线路的三相模型搭建。

2) 初始化各参数并生成  $N_2$  个外层控制变量  $X_2$ , 并置内外层初始迭代次数  $M_1 = M_2 = 0$ 。

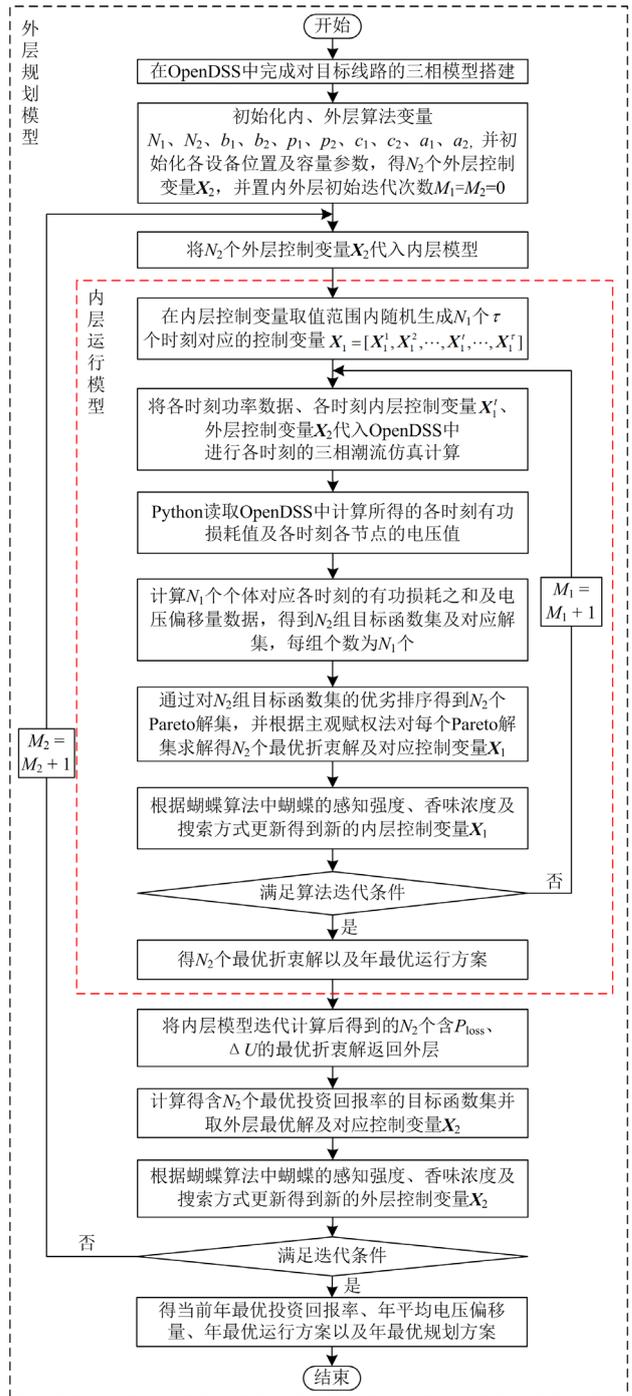


图 2 结合蝴蝶算法的双层迭代降损方法流程图

Fig. 2 Flow chart of double-layer iterative loss reduction method combined with butterfly algorithm

3) 将  $N_2$  个控制变量  $X_2$  代入内层模型, 并在控制变量的取值范围内随机生成  $N_1$  个  $\tau$  个时刻对应的内层控制变量  $X_1 = [X_1^1, X_1^2, \dots, X_1^t, \dots, X_1^{\tau}]$ 。

4) 将各时刻功率数据、各时刻内层控制变量  $X_1^t$ 、外层控制变量  $X_2$  代入 OpenDSS 中, 进行各时

刻的三相潮流仿真计算并利用 Python 读取 OpenDSS 中计算所得的各时刻的损耗值及电压值。

5) 计算  $N_1$  个个体对应各时刻的有功损耗之和及电压偏移量数据, 得到  $N_2$  组目标函数集及对应解集, 每组个数为  $N_1$  个。

6) 通过对  $N_2$  组目标函数集的优劣排序得到  $N_2$  个 Pareto 解集, 并对 Pareto 解集中年有功损耗取权重为  $e$ , 对年平均电压偏移量取权重为  $1-e$ , 求解得  $N_2$  个最优折衷解。再利用蝴蝶算法更新内层控制变量  $X_1$ , 判断是否满足迭代条件, 若满足, 则得到  $N_2$  个最优的目标函数值以及年最优运行方案; 若不满足迭代条件, 则继续返回步骤 4) 进行求解。

7) 将内层模型经过蝴蝶算法迭代计算后得到含  $N_2$  个年有功损耗  $P_{loss}$  及年平均电压偏移量  $\Delta U$  的最优解集返回外层, 求得含  $N_2$  个最优投资回报率的目标函数集并取外层最优解及控制变量  $X_2$ 。

8) 利用蝴蝶算法对外层模型进行迭代求解, 判断是否满足迭代条件, 若满足, 则输出当前年最优投资回报率、年平均电压偏移量、年最优运行方案以及年最优规划方案; 若未满足, 则返回步骤 3), 将更新后的外层控制变量重新代入内层进行迭代求解。

### 4 算例分析

本文以某 10 kV 配电线路作为测试算例, 对所提出的算法进行验证, 下面将对某线路基本情况及优化结果进行详细说明。

#### 4.1 算例介绍

某 10 kV 配电线路含 57 个 400 V 三相负荷, 对应变压器 57 台, 其中专变型号为 S13, 公变包含 S11-M、ZGS11-Z、S13-M、S9、SBH15-MRL 共 5 种型号, 含升压调压器 1 台, 型号为 SVR-8000/10, 初始位置位于节点 2 处; 全线共 82 个节点, 其中负荷节点为 57 个; 线路全长为 26 km, 含 45 条支路, 最长支路为 8.95 km, 且节点 1 与节点 2 之间长度为 6.95 km, 占线路全长的 1/4, 配电线路型号包含 JKLYJ/QN-10、ZS-JKL/LHYJ 等共 10 种型号, 导线截面含 35 mm<sup>2</sup> 到 240 mm<sup>2</sup> 共 8 种; 原始系统中电压最低节点所对应电压标幺值为 0.87 p.u.; 各台区原已配有台区无功补偿装置, 本文主要针对当前线路仍存在损耗大、无功补偿不足等问题进行深入研究。首先在 OpenDSS 中完成对该配电系统的搭建, 得到对应算例仿真图如图 3 所示, 简化后的节点及用户示意图如图 4 所示。

图 4 为图 3 仿真图的节点及用户拓扑图, 图 3 中, 蓝色线表示线路的走势与长度, 蓝绿色圆点表

示线路所接 400 V 负荷, 图 4 中, 绿色、黄色、红色分别表示用户变压器容量小于 100 kVA、[100, 315] kVA、大于等于 315 kVA 3 个部分。

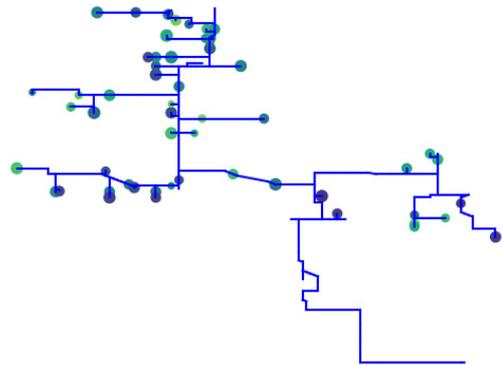


图 3 算例仿真图

Fig. 3 Example simulation diagram

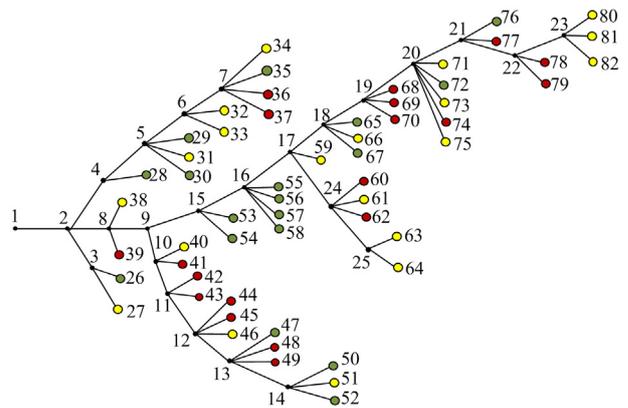


图 4 网络节点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of network nodes

针对上述对控制变量的定义, 将本算例中各控制变量范围的限值设定如下。

首先根据在 OpenDSS 中搭建的配电线路的模型, 根据变压器参数设定变比范围为 [0.95, 1.10], 步长为 0.05, 故可调节的变压器挡位为 [1, 3], 对应高压侧电压分别为 10 kV、10.5 kV、11 kV; 其次每台台区并联电容器无功补偿容量的范围设定为 [0, 90], 设定可选择的投切组数为 6 组, 每组 15 kvar, 主要针对线路上所有台区进行, 可投组数最小为 0 组, 投入总容量为 0 kvar, 即相当于不投, 最大为 6 组, 投入总容量为 90 kvar, 即相当全投; 另设定线路无功补偿范围为 [0, 600], 可选择投切组数为 6 组, 每组 100 kvar。另外, 设定线路无功补偿装置及调压器位置的范围为所有节点, 即节点名称为 [1, 82]; 最后, 需要保证全线路电压标幺值在 [0.95, 1.10]

p.u.区间内,这样可以对整条线路进行更精确的降损增效分析。综上,为了直观看出各变量的取值范围,将上述变量对应取值范围汇总如表 1 和表 2 所示。

表 1 负荷节点电压及变压器与调压器取值范围

Table 1 Load node voltage and transformer value range

变量	最小值/ p.u.	最大值/ p.u.	步长/ p.u.	调整 方式	针对群体
$U_{load}$	0.95	1.10	—	算法调整	所有负荷节点
$T_k$	0.9	1.1	0.05	挡位[1,3]	所有变压器
$M$	1	82	—	算法调整	所有负荷节点

表 2 无功补偿装置取值范围

Table 2 Value range of reactive power capacitor

变量	最小容 量/kvar	最大容 量/kvar	步长/ kvar	调整方式	针对群体
$Q_m^{cap}$	0	90	15	组数[0,6]	所有台区
$Q_s^{cap}$	0	600	100	组数[0,6]	所有节点

最后,设定蝴蝶算法基本参数。在初始状态下,设定内层种群大小为 40,迭代次数为 80,概率参数为 0.8,外层种群大小为 50,迭代次数为 100,概率参数为 0.7, Pareto 解集中年有功损耗的权重为 0.7,年平均电压偏移量的权重即为 0.3,以此进行迭代运算。

迭代后输出的最优方案中,得到了两个线路无功补偿装置方案,其安装位置分别位于 16 节点、19 节点处,且两节点的最大投切容量均为 200 kvar,共配置容量 400 kvar。调压器安装一个较为合适,其位置位于节点 9 处,对应分接头挡位为 2 挡;最后将各变压器调节后的挡位、需要进行负荷无功补偿的节点以及对应年最优投切组数与投切容量汇总如表 3 和表 4 所示。

由表 3 可得算法计算后的各台变压器最佳挡位,由表 4 可得,在结合 OpenDSS 的蝴蝶算法所得年最优方案中,57 个台区中,有 26 个台区对应无功补偿装置的投切组数不为 0,即判定为需要进行无功补偿,且共需要补偿总无功容量为 1200 kvar。

为体现本文所提方法的优越性,本文采用粒子群算法<sup>[34]</sup>对原算例进行对比求解,求解所得投切线路无功补偿装置容量为 400 kvar,台区补偿总容量为 1440 kvar。

#### 4.2 结果分析

将蝴蝶算法与粒子群算法进行性能对比测试,两种算法计算所得一年的线路总损耗、变压器总损耗、总有功损耗、总用电量、总损耗百分数及年平均电压偏移量的结果汇总如表 5 所示,降损前后线路年总有功损耗的折线对比图如图 5 所示。

表 3 台区变压器挡位最佳方案

Table 3 The best scheme of transformer gear in station area

节点 名称	变压器 挡位	节点 名称	变压器 挡位	节点 名称	变压器 挡位
26	2	45	3	64	3
27	1	46	2	65	2
28	1	47	1	66	2
29	2	48	2	67	2
30	2	49	2	68	3
31	2	50	2	69	2
32	2	51	3	70	3
33	3	52	2	71	2
34	3	53	1	72	2
35	2	54	1	73	2
36	2	55	1	74	3
37	3	56	2	75	3
38	2	57	2	76	3
39	2	58	1	77	2
40	1	59	2	78	3
41	3	60	3	79	2
42	3	61	3	80	2
43	2	62	3	81	2
44	1	63	2	82	2

表 4 台区无功补偿装置年最佳规划方案

Table 4 Annual optimal planning scheme for reactive power compensation devices in station area

节点名称	投切容量/kvar	节点名称	投切容量/kvar
32	45	54	60
36	60	61	45
37	45	62	60
39	60	63	90
40	30	67	30
41	45	68	45
43	60	69	45
44	45	70	30
45	75	73	45
46	60	74	60
48	45	77	30
49	90	79	30

表 5 3 种情况下各项损耗结果

Table 5 Loss results under three conditions

类型	年总线 损/MWh	年变压 器损耗/ MWh	年总有 功损耗/ MWh	年总用 电量/ MWh	损耗百 分数/ %	年平均 电压偏 移量/p.u.
原始 数据	1361.08	860.96	2222.04	35 103.32	6.33	40.82
蝴蝶 算法	1221.11	851.29	2072.40	35 060.79	5.91	26.21
粒子 群算法	1301.65	854.53	2156.18	35 088.08	6.15	33.93

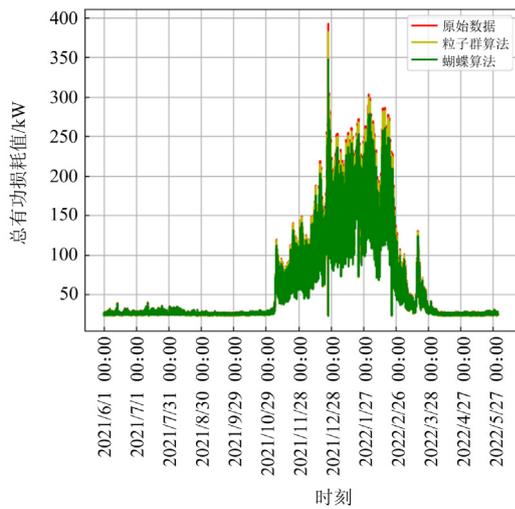


图 5 降损增效前后年各时刻网损对比图

Fig. 5 Comparison diagram of network loss at each time before and after loss reduction and efficiency increase

由图 5 可得，绿色为本文所提算法降损后损耗结果，黄色为粒子群算法结果，红色为原始数据，对比可知，红色点高于黄色点和绿色点，可知在两种算法下，各时刻损耗值较原始数据均有不同程度的下降，但本文所提算法明显更胜一筹。将结果量化后汇总在表 5 中，可得本文所提算法降损后的年总有功损耗、年总电量及年总损耗百分数分别比原始数据降低 149.64 MWh、49.53 MWh、0.42%，比粒子群算法降低 83.78 MWh、27.29 MWh、0.24%，降损效果较为明显。所得年平均电压偏移量较降损前降低 35.79%，比粒子群算法降低 22.75%，电压质量改善效果明显。

得到各部分年损耗及电量后，取电价  $\beta$  为 0.3515 元/kWh，周期性年维修费用  $K_a$  为 3%，设备报废费用率  $K_d$  为 1.5%，装设单位无功补偿装置的综合投资  $K_c$  为 30 元/kvar，设备安装费用  $C_e$  为 2000 元，将目标函数中对应的各部分费用及年经济效益汇总如表 6 所示。

表 6 降损前后年经济效益对比

Table 6 Comparison of annual economic benefits before and after loss reduction

类型	原始数据	蝴蝶算法	粒子群算法
$C_j$ /万元	0	5	5.52
$C_m$ /元	0	1500	1656
$C_d$ /元	0	750	828
$C_{loss}$ /万元	78.10	72.84	75.79
$\Delta F$ /万元	0	5.26	2.31
$C$ /万元	0	5.225	5.7684
$E$ %	—	100.67	40.05

由表 6 可知，经本文所提方法与粒子群算法降损后节约损耗电费分别为 5.26 万元、2.31 万元，第一年投资回报率分别为 100.67%、40.05%，即若使用本文所提算法，则一年内可收回投资成本，若使用粒子群算法，则需要两年多才可收回投资成本，本文所提算法年投资回报率明显高于粒子群算法，经济效益更高。

以此类推，若每年损耗率同上稳定下降，每年只需额外投入设备维修费，长此以往，经济效益会逐年提升，达到收益持续增长的效果。

## 5 结论

10 kV 配电线路的降损增效研究对低压配电线路的规划与发展具有重要意义。本文充分考虑了线路三相不平衡性，建立了双层降损数学模型，在 OpenDSS 中搭建了三相潮流仿真模型，利用蝴蝶算法寻优策略多样性、避免陷入局部最优解的特点，对模型进行了求解。研究结果表明，结合蝴蝶算法的双层迭代降损方法较粒子群算法降损效果更好，能够提高寻优广度，有效平衡好各控制变量之间的关系，可针对三相不平衡线路制定合适的规划与运行方案，能够长期稳定地提升目标配电线路的年投资回报率和年电压质量，具有良好的应用前景。

## 参考文献

- [1] 王富, 杨威, 张安安, 等. 油田配电网节能降损投资决策方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6): 125-133. WANG Fu, YANG Wei, ZHANG An'an, et al. Investment decision-making method for energy saving and loss reduction in oilfield distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 125-133.
- [2] 文劭宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10. WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.
- [3] 李宁, 安卓尔, 张世乾, 等. 弹性电网关键技术研究的进展与展望[J/OL]. 电测与仪表: 1-9[2023-01-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220412.1014.002.html>. LI Ning, AN Zhuoer, ZHANG Shiqian, et al. Research and prospect on key technologies of resilient power grid[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-9[2023-01-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220412.1014.002.html>.
- [4] 蔡黎, 葛棚丹, 代妮娜, 等. 电动汽车入网负荷预测及

- 其与电网互动研究进展综述[J]. 智慧电力, 2022, 50(7): 96-103.
- CAI Li, GE Pengdan, DAI Nina, et al. Review of research progress on load prediction and grid interaction of electric vehicles[J]. Smart Power, 2022, 50(7): 96-103.
- [5] 彭生江, 陆军, 张中丹, 等. 光伏接入对电网的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 157-164.
- PENG Shengjiang, LU Jun, ZHANG Zhongdan, et al. Research on the influence of photovoltaic access on a power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 157-164.
- [6] XU Biao, ZHANG Guiyuan, LI Ke, et al. Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 801-813.
- [7] 邓鹏, 刘敏. 基于改进聚类和 RBF 神经网络的台区电网线损计算研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 107-113.
- DENG Peng, LIU Min. Power line loss calculation in low voltage region based on improved clustering algorithm and RBF neural network[J]. Smart Power, 2021, 49(2): 107-113.
- [8] 项中明, 石博隆, 吴昌, 等. 考虑无功辅助服务分段报价的多目标无功优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 40-47.
- XIANG Zhongming, SHI Bolong, WU Chang, et al. Research on AVC considering quotation rules of reactive power ancillary services in the electricity market[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 40-47.
- [9] 曾鸣, 张硕. “十四五”电力规划的综合能源发展探析[J]. 中国电力企业管理, 2020(13): 26-28.
- [10] 易斌, 赵伟, 邓凯, 等. 基于负荷功率特征分区的用户侧储能经济运行优化[J]. 中国电力, 2021, 54(6): 128-135.
- YI Bin, ZHAO Wei, DENG Kai, et al. Economic operation optimization of user-side energy storage system based on complex power characteristic zone of load[J]. Electric Power, 2021, 54(6): 128-135.
- [11] 夏革非, 丁智涵, 于长任, 等. 基于数据驱动的有源配电网实时调度降损策略[J]. 电测与仪表, 2022, 59(12): 103-109.
- XIA Gefei, DING Zhihan, YU Changren, et al. Real-time scheduling strategy for loss reduction of active distribution network based on data-driven method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12): 103-109.
- [12] 李智欢, 段献忠. 多目标进化算法求解无功优化问题的对比分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 57-65.
- LI Zhihuan, DUAN Xianzhong. Comparison and analysis of multiobjective evolutionary algorithm for reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 57-65.
- [13] 王怡. 电网无功优化算法的研究与实现[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- WANG Yi. Research and realization of reactive power optimization algorithm for power grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [14] 蔡博, 黄少锋. 基于多目标粒子群算法的高维多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 77-84.
- CAI Bo, HUANG Shaofeng. Multi-objective reactive power optimization based on the multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 77-84.
- [15] JAWAD R, KADHUM A A, MONEER M. Performance comparison of meta-heuristic algorithms PSO ASND ACO for optimum power flow in power systems[C] // 2021 International Conference on Communication and Information Technology (ICICT), June 5-6, 2021, Basrah, Iraq: 19-24.
- [16] ABDELHADY S, OSAMA A, SHABAN A, et al. A real-time optimization of reactive power for an intelligent system using genetic algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 11991-12000.
- [17] 李晓利, 高金峰. 用于配电网多目标无功优化的改进粒子群优化算法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 106-111.
- LI Xiaoli, GAO Jinfeng. Improved particle swarm optimization algorithm for multi-objective reactive power optimization of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 106-111.
- [18] NADERIPOUR A, ABDUL-MALEK Z, HAJIVAND M, et al. Spotted hyena optimizer algorithm for capacitor allocation in radial distribution system with distributed generation and microgrid operation considering different load types[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 27-28.
- [19] 徐玉琴, 刘杨, 谢庆. 基于全寿命周期成本的配电网无功规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 30-36.
- XU Yuqin, LIU Yang, XIE Qing. Research on reactive power planning of distribution network based on life cycle cost[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 30-36.
- [20] 朱瞳彤, 顾洁, 金之俭, 等. 规划与运行融合的配电网无功补偿智能协调配置[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 36-43.
- ZHU Tongtong, GU Jie, JIN Zhijian, et al. Intelligent harmonious collocation for reactive power compensation of distribution network combining planning and operation[J].

- Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 36-43.
- [21] 陈倩, 王维庆, 王海云. 基于需求侧响应的主动配电网双层优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 1-13.  
CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Bi-level optimization model of an active distribution network based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 1-13.
- [22] 张晓英, 侯秉臣, 王琨, 等. 基于改进天牛须算法的含固态变压器的配电网无功优化[J]. 高压电器, 2022, 58(11): 221-229.  
ZHANG Xiaoying, HOU Bingchen, WANG Kun, et al. Reactive power optimization of distribution network with solid state transformer based on improved beetle antennae search algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11): 221-229.
- [23] YU Linlin, ZHANG Lihua, MENG Gaojun, et al. Research on multi-objective reactive power optimization of power grid with high proportion of new energy[J]. IEEE Access, 2022, 10: 116443-116452.
- [24] 张晓英, 张艺, 王琨, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的含分布式电源配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 55-64.  
ZHANG Xiaoying, ZHANG Yi, WANG Kun, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generations based on improved NSGA-II algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 55-64.
- [25] YADAV V, GHOSH S P. Optimal power flow for IEEE 30 and 118-bus systems using Monarch butterfly optimization[C]// 2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP), March 28-30, 2018, Bhubaneswar, India: 1-6.
- [26] 宁杰琼, 何庆. 混合策略改进的蝴蝶优化算法[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(6): 1718-1723, 1738.  
NING Jieqiong, HE Qing. Mixed strategy to improve butterfly optimization algorithm[J]. Application Research of Computers, 2021, 38(6): 1718-1723, 1738.
- [27] FENG Yanhong, WANG Gaige, DEB S, et al. Solving 0-1 knapsack problem by a novel binary monarch butterfly optimization[J]. Neural Computing & Applications, 2017, 28(7): 1619-1634.
- [28] 林卓琼, 彭显刚. 基于帕累托最优法的中低压配电网多属性规划方案比选方法[J]. 广东电力, 2020, 33(8): 46-53.  
LIN Zhuoqiong, PENG Xiangang. Comparison method of multi-attribute planning for medium and low voltage distribution network based on pareto optimality[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(8): 46-53.
- [29] 马昭, 赵会茹, 霍慧娟, 等. 基于改进三角模糊 VIKOR 法的用户储能系统配置方案综合评估[J]. 中国电力, 2022, 55(4): 185-191.  
MA Zhao, ZHAO Huiru, HUO Huijuan, et al. Comprehensive evaluation of user energy storage system configuration schemes based on the improved triangular fuzzy VIKOR method[J]. Electric Power, 2022, 55(4): 185-191.
- [30] 石琛. 基于数据驱动和深度学习的配电线路无功优化技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.  
SHI Chen. Reactive power optimization of distribution system based on data driven and deep learning[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [31] 郭世嘉. 基于经济寿命的电力设备综合效能评估及应用研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.  
GUO Shijia. Application and research on comprehensive efficiency evaluation based on economic life of electric equipment[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.
- [32] 宋冬然, 梁梓昂, 夏鄂, 等. 风电全生命周期成本建模与经济分析综述[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 1-12.  
SONG Dongran, LIANG Ziang, XIA E, et al. Overview of wind power life-cycle cost modeling and economic analysis[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 1-12.
- [33] QI Xiang, ZHU Yunlong, ZHANG Hao. A new meta-heuristic butterfly-inspired algorithm[J]. Journal of Computational Science, 2017, 23: 226-239.
- [34] 于飞, 张迪. 考虑光伏接入的低压配电网损耗优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(11): 132-136.  
YU Fei, ZHANG Di. Loss optimization considering photovoltaic access to low-voltage distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(11): 132-136.

收稿日期: 2023-01-12; 修回日期: 2023-06-01

作者简介:

潘雅琦(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网智能运维技术; E-mail: pyq1227@163.com

王江波(1978—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统测量与控制, 配电自动化技术。E-mail: jiangbowang@cau.edu.cn

(编辑 周金梅)