

# 面向能源互联的主动配电网选址定容研究

吕毅, 梁文波, 王庆, 刘恩涛

(四川明星电力股份有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要:**传统主动配电网选址定容忽略了能源系统多能互补协调特性,导致成本较高。为此,提出一种基于能源互联的主动配电网选址定容方法。基于能源互联建立目标函数,采用全寿命周期成本理论计及设备购置成本、安装成本、运行维护成本、系统运行成本以及残值回收,以概率形式的配电网选址定容综合成本作为目标函数,构建必要约束模型,包括设备配置容量约束、系统供能可靠性约束、功率平衡约束、设备运行约束。在此基础上,采用改进人工鱼群算法对选址定容算法进行求解。仿真实验结果表明:接入分布式电源相比不接入分布式电源的主动配电网选址定容所需成本更小,改进后的人工鱼群算法计算得出的网损和无功补偿总成本更低,所提方法相对于其他方法的选址定容网损成本和无功补偿成本更低,说明所提方法可以减少主动配电网选址定容的成本,实用性效果较优。

**关键词:**能源互联;主动配电网;选址定容;人工鱼群算法;分布式电源;功率

**中图分类号:**TM73 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24818

## Research on Location and Capacity Determination of Active Distribution Network for Energy Interconnection

LÜ Yi, LIANG Wenbo, WANG Qing, LIU Entao

(Sichuan Mingxing Electric Power Co., Ltd., Chengdu 610000, Sichuan, China)

**Abstract:** The traditional active distribution network location and capacity determination ignores the multi-energy complementary coordination characteristics of the energy system, which led to high cost. Therefore, an active distribution network location and capacity determination method based on energy interconnection was proposed. On the basis of energy interconnection, the objective function was established, and the whole life cycle cost theory was used to comprehensively consider the equipment purchase cost, installation cost, operation and maintenance cost, system operation cost and salvage value recovery. Taking the distribution network location and capacity determination comprehensive cost in the form of probability as the objective function, the necessary constraint models were constructed, including equipment configuration capacity constraint, system power supply reliability constraint, power balance constraint and equipment operation constraint. On this basis, the improved artificial fish swarm algorithm was used to solve the location and capacity determination algorithm. The simulation results show that the cost of the location and capacity determination of the active distribution network with distributed power is lower than that without distributed power. The total cost of network loss and reactive power compensation calculated by the improved artificial fish swarm algorithm is lower. Compared with other methods, the method proposed has lower loss cost and reactive power compensation cost. It shows that the proposed method can reduce the cost of active distribution network location and capacity determination, and the practical effect is better.

**Key words:** energy interconnection; active distribution network; location and capacity determination; artificial fish swarm algorithm; distributed generation; power

由于大气环境的污染以及化石能源的日渐枯竭,现代社会提倡节能减排,导致各类电网系统在节能的基本理论下,由被动节能逐渐向主动节能转变<sup>[1-2]</sup>。在主动配电网中,网架结构更为复

杂,为减少主动配电网的建设和运营成本,选择最合理的节点位置与容量,对主动配电网进行选址定容研究具有重要的意义。

国内大量学者也对此展开了研究,如王涛

**基金项目:**国家电网公司科技项目(52199919001J)

**作者简介:**吕毅(1977—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电网经营、电网规划、电力信息化,Email:llee9977@163.com

等<sup>[3]</sup>人提出基于潮流线性模型的电网选址定容算法,通过建立风光投资双层规划模型,使用约束凸松弛潮流形式得到了近似的下层模型,并将其转换为上层的分布式约束条件,在最终的数学模型中,该方法降低了选址定容的复杂度,减少了运算时间,提高了运算效率。陈德炜等<sup>[4]</sup>人提出一种基于改进花朵授粉算法(flower pollination algorithm, FPA)的含分布式光伏配电网选址定容多目标优化方法,通过以网损最小、投资成本最低、电压质量最优为优化目标建立选址定容模型,采用FPA算法对模型进行求解,从而降低配电网的损耗。陈浩等<sup>[5]</sup>人提出了基于改进多目标粒子群算法的分布式电源(distributed generation, DG)的选址定容优化方法,通过建立以综合成本、网损和电压稳定裕度为目标函数的模型,采用改进多目标粒子群优化算法对模型进行求解,得出DG的多目标最优选址定容方案,并验证了该方案的可行性。以上方法对于提高主动配电网选址定容的效果均有一定的作用,但忽视了能源系统多能互补协调特性,导致存在成本较高的问题。

为解决以上方法存在的问题,提出一种面向能源互联的主动配电网选址定容方法,通过能源互联建立目标函数,设置约束条件,采用改进人工鱼群算法优化主动配电网选址定容方法,并对其进行仿真测试,验证了该方法在选址定容成本控制方面的优越性。

## 1 主动配电网选址定容方法设计

### 1.1 基于能源互联建立目标函数

在基于能源互联的主动配电网选址定容方法中,考虑能源系统多能互补协调特性,建立目标函数,以数学模型的方式计算主动配电网的选址定容方法,包括购置成本、安装成本、维护成本、系统运行成本以及残值回收成本<sup>[6]</sup>。在采用全寿命周期成本理论计算设备的成本时,通过概率形式可以得到配电网选址定容购置成本的目标函数:

$$\min F(x) = \sum_{i=1}^N \frac{h_i(1+\delta)}{N} \cdot (1+\beta_j)^j \quad (1)$$

式中: $\min F(x)$ 为配电网选址定容时设备购置成本的最小函数值; $h_i$ 为第*i*个选址定容设备购买的损耗费用; $\delta$ 为设备提前报废概率; $N$ 为选址定容设备的数量; $\beta_j$ 为第*i*个选址定容设备安装费用的年平均利率; $j$ 为配电网运行的全寿命周期。

通过以上目标函数,可以计算主动配电网选址定容最初的成本,该成本可以为主动配电网提供一个全寿命周期的初始变量。而安装成本是全寿命周期中影响最大的成本,安装成本的目标函数为

$$\min G(x) = \sum_{i=1}^N \frac{k_i(t_1 - t_0)}{(1 + YX_j)} \quad (2)$$

式中: $\min G(x)$ 为配电网选址定容设备安装成本的最小函数值; $Y$ 为安装设备的单位成本; $t_1$ 为安装结束后的时间; $t_0$ 为安装的初始时间; $k_i$ 为第*i*个选址定容设备的安装的时间成本; $X_j$ 为配电网运行的全寿命周期; $j$ 时间内安装主动配电网选址定容设备的次数。

在得到该目标函数后,计算设备安装的成本,安装所需的时间也是成本的一种,因此需要考虑到设备在安装时的数量以及单位时间内安装设备的速度<sup>[7]</sup>。

在主动配电网维护的过程中,需要计算维护成本,需要保证全寿命周期的各项收益,以及单位容量内维护投资的价值。维护的时间成本、人力成本以及维护本身所需成本都是目标函数的重要环节,此时的函数可以表示为<sup>[8-9]</sup>

$$\min H(x) = \sum_{i=1}^N \frac{S_1(S_2 + S_3)}{1 - S_0} \left( \frac{1 + F_g}{N} \right)^j \quad (3)$$

式中: $\min H(x)$ 为主动配电网选址定容过程中维护成本的最小函数值; $S_0$ 为一年内设备维护的平均成本; $S_1$ 为设备维护的时间成本; $S_2$ 为设备维护的人工成本; $S_3$ 为设备维护的零件成本; $F_g$ 为设备在全生命周期内的折算年金。

在维护成本计算中,可以将某个下游电功率作为主动配电网的过载假设,如果某处节点位置的无功补偿功率总成本大于其他节点,则首先计算该节点。

在主动配电网运行的过程中,成本计算较为复杂,需要考虑到功率的补偿,主动配电网选址定容过程中运行成本的目标函数为

$$\min K(x) = \sum_{i=1}^N [T_i p_i (G_i + k_i)] \quad (4)$$

式中: $\min K(x)$ 为主动配电网选址定容过程中运行成本的最小函数值; $T_i$ 为第*i*个选址定容设备的运行时间; $p_i$ 为在全寿命周期内第*i*个选址定容设备的置换折算成本; $G_i$ 为第*i*个选址定容设备的投资成本; $k_i$ 为第*i*个选址定容设备在不同类型中运行的损耗成本。

在计算运行成本时,需要注意单个节点在补偿设备中的约束,并结合所有配电网的充分裕度,在引入惩罚函数之前,将并网和离网的情况全部作为无功负荷<sup>[10]</sup>。

对于残值回收的目标函数,需要注意污染物的种类。如果在主动配电网中接入分布式电源,则残值回收的成本就会大大降低,反之若系统中没有分布式电源,则残值回收的成本会是一个较大的数值,此时的目标函数为<sup>[11-12]</sup>

$$\min U(x) = \sum_{i=1}^N \frac{(R_h + H_g) \cdot l_i}{(1 + H_g)^j} B_i \quad (5)$$

式中: $\min U(x)$ 为回收主动配电网选址定容造成的污染物时所需成本; $R_h$ 为燃料电池在第 $h$ 种污染物中的供电单价; $H_g$ 为系统的总负荷功率造成的损失成本; $l_i$ 为第 $i$ 个选址定容设备的残值成本; $B_i$ 为第 $i$ 个选址定容设备所处理的污染物种类数量。

以上内容为主动配电网成本控制的目标函数的建立,目标函数中的参数需要协调控制,如果在主动配电网中连接分布式电源,以上目标函数中就会出现一些随机变量,导致函数值误差变大,因此需要设置约束条件,作为选址定容置信水平的优化解。

### 1.2 设置约束条件

在设置约束条件时,主要对配置容量、系统供能可靠性、功率平衡、设备运行等必要条件进行约束分析。其中配置容量约束为

$$\sum_{p=1}^n G_p \leq G_{\text{总}} \quad (6)$$

式中: $G_p$ 为主动配电网在节点 $p$ 处的电源容量; $G_{\text{总}}$ 为主动配电网在各个节点中的总容量; $n$ 为节点数量。

根据式(6)可以建立电源容量的总值模型,规定节点容量的下限,若没有满足式(6)的约束条件,则需要导入惩罚系数。系统供能可靠性约束为

$$0 \leq P_c \leq P_v \quad (7)$$

式中: $P_c$ 为系统供能的功率; $P_v$ 为系统供能的最大功率。

此时的约束条件中,系统供能功率需要至少大于等于0。

分布式发电对环境污染小,能量利用率高,通过与配电网互联,增加了配电网的裕度,提高了系统供电的可靠性。在分布式电源中,若配电网

呈现辐射状,则系统功率的总电源不能大于 $P_v$ ,否则功率就很难处于控制范围内。功率平衡约束为<sup>[13]</sup>

$$W_h + W_{\text{dg}} = W_{\text{ou}} + W_{\text{gb}} \quad (8)$$

式中: $W_h$ 为主动配电网在不接入分布式电源的情况下任意节点的无功功率; $W_{\text{dg}}$ 为配电网在接入分布式电源的情况下任意节点的无功功率; $W_{\text{ou}}$ 为配电网无分布式电源的无功负荷; $W_{\text{gb}}$ 为配电网在接入分布式电源时的有功负荷。

此时的功率负荷需要考虑配电室的总容量,且如果接入分布式电源,其功率负荷不能超过配电室总容量的35%。设备运行约束为

$$V_{\min} \leq V_p \leq V_{\max} \quad (9)$$

式中: $V_{\min}$ 为设备运行的最低电压; $V_p$ 为设备运行到节点 $p$ 时的电压; $V_{\max}$ 为设备运行的最高电压。

该约束条件主要表示电力设备运行的电压上限与电压下限,此时 $p \in \lambda_z$ , $\lambda_z$ 为节点的集合,集合中有 $z$ 个节点。以上约束条件一旦违背,就可以引入惩罚因子 $\xi$ <sup>[14]</sup>:

$$\xi = 1/\ln [1 + N(z)] \quad (10)$$

式中: $N(z)$ 为节点 $z$ 出现的次数。

在网络损失的计算过程中,可以使用主动配电网作为系统的供电可靠性保证,此时的系统需要以充放电的功率损失作为平衡功率偏差的主要方法,并且在能源的存储设备中也可以用上述约束条件进行表示。

### 1.3 基于改进人工鱼群算法优化选址定容方法

人工鱼群算法是一种基于生物智能与经典人工智能的交互式算法,通过对鱼类行为特点的观察,得到人工鱼在水下活动的路径。传统人工鱼群算法无法更新空间单位中的状态参数,易陷入局部极点问题,本文对传统算法进行改进。当搜索空间的维度为 $S$ 时,该空间内有 $r$ 条人工鱼,此时 $r$ 条人工鱼的空间向量可以用集合 $\{a_1, a_2, \dots, a_r\}$ 来表示,且两条人工鱼的相对距离为 $\|a_n - a_{n-1}\|$ ,其中 $a_n$ 为前一条鱼的空间位置, $a_{n-1}$ 为后一条鱼的空间位置。则任意空间内人工鱼在进行觅食时的状态参数可以表示为

$$D'_{x+1} = \begin{cases} d_h / (1 + T_{\text{df}}) & D_r < 0 \\ d_h & D_r = 0 \\ (d_h + 1) / T_u & D_r > 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $D'_{x+1}$ 为第 $r$ 条人工鱼在 $x+1$ 个空间单位中的状态参数; $d_h$ 为人工鱼在尝试新的状态时的觅食次数; $T_{\text{df}}$ 为人工鱼的单次觅食时间; $T_u$ 为人工鱼

的总觅食时间; $D_r$ 为第 $r$ 条人工鱼的活动方向。当 $D_r > 0$ 时,方向向左;当 $D_r = 0$ 时,方向不变;当 $D_r < 0$ 时,方向向右。

通过以上方法完成人工鱼种群在寻优过程中的觅食,并对人工鱼群算法引入反馈策略、全局最优信息记录和自适应视野与步长进行改进。

### 1.3.1 改进人工鱼群算法反馈策略

首先采用公告牌对每个人工鱼历史最优点进行记录并更新,在每一次迭代中将公告牌信息反馈给人工鱼个体,增加位置和速度变换中向着公告牌信息趋紧的权重,从而引导寻优<sup>[15]</sup>。基于反馈策略的具体反馈行为进行如下设定:若人工鱼群个体进行反馈的概率为 $P_r$ ,则不进行反馈的概率为 $1 - P_r$ 。通过这样的设定,在迭代前期,人工鱼个体行为的随机因素较多,在迭代后期,反馈概率不断降低,寻优过程中的随机因素逐渐减少,从而提高收敛精度和寻优效率。

### 1.3.2 考虑全局最优记录

在基本人工鱼群算法中,在位置更新中并没有考虑全局最优记录,改进的人工鱼群算法在人工鱼群个体位置的更新公式中考虑全局最优个体的位置信息 $X_{be}$ ,将其应用于种群寻优中,从而降低算法的寻优复杂度,提高寻优效率。考虑全局最优记录下的人工鱼群个体位置更新公式为

$$X_r^{t+1} = X_r^t + \frac{(X_{bo} - X_r^t) + (X_{be} - X_r^t)}{\|(X_{bo} - X_r^t) + (X_{be} - X_r^t)\|} \times R_{\text{and}} \quad (12)$$

式中: $X_r^t$ 为当前状态; $X_{bo}$ 为人工鱼个体在寻觅过程中搜索到的优于当前状态 $X_r^t$ 的位置; $R_{\text{and}}$ 为0~1之间的随机数。

### 1.3.3 自适应视野和步长

在基本人工鱼群算法中,寻优视野和迭代步长为固定的常数,寻优视野决定了人工鱼个体的搜索范围,迭代步长对于寻优精度有着较大的影响。由于算法迭代过程中寻优行为存在随机因素,寻优视野和迭代步长将影响算法的收敛精度。为此,在改进的人工鱼群算法中,对寻优视野和迭代步长进行自适应调整,自适应视野随着公告牌中的最优人工鱼信息进行调整,对应的基础迭代步长也对应进行调整,从而进一步提高寻优效率。

## 1.4 选址定容算法求解

基于以上改进人工鱼群算法,对主动配电网选址定容进行分析,可以得到如图1所示的选址

定容算法求解步骤。

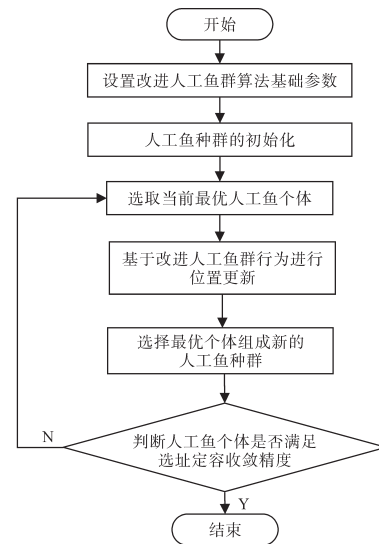


图1 选址定容算法求解步骤

Fig.1 Solution steps of location and capacity determination algorithm

如图1所示,选址定容算法求解步骤如下:

1) 设置改进人工鱼群算法基本参数。包括鱼群规模、迭代步长、鱼群成熟条件、最优解收敛规则、反馈概率等。

2) 人工鱼种群的初始化。采用随机搜索进行初始种群范围的确定,针对位置信息进行迭代计算,取较优的前 $M$ 个值,生成初始人工鱼种群。

3) 选取当前最优人工鱼个体。以选址定容综合成本为目标,对所有人工鱼个体进行适应度值计算,将最优的个体记入公告牌。

4) 基于改进人工鱼群行为进行位置更新。根据适应度值和公告牌信息,得出自适应视野和步长。

5) 选择最优个体组成新的人工鱼种群,更新公告牌中的最优人工鱼个体,对反馈概率进行更新。

6) 判断人工鱼个体是否满足选址定容收敛精度,满足则结束计算,并输出结果;若不满足,则返回步骤3)。

## 2 仿真测试

### 2.1 设定主动配电网系统参数

主动配电网的选址定容是一个十分复杂的问题,涉及到配电网运行的各个方面,且配电网本身节点众多,任意节点的接入位置都会影响到主动配电网的性能,因此需要在考虑网损和经济效益的基础上,仔细考虑主动配电网的优化方

案。选取 IEEE10 作为本次仿真测试的主动配电网节点示意图,如图 2 所示。

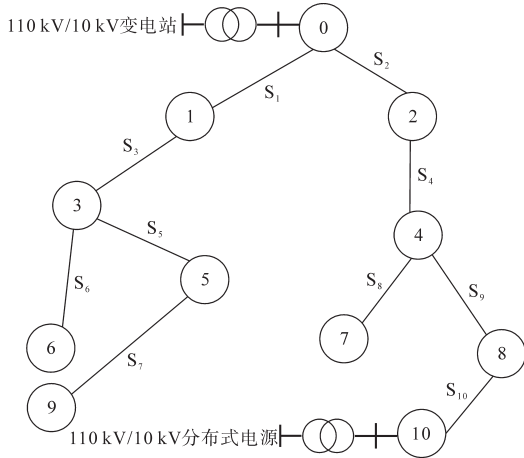


图 2 主动配电网节点

Fig.2 Active distribution network nodes

在图 2 中,除节点 0 为平衡节点外,其余 10 个节点均为需要供给电能的负荷节点。在这 11 个节点中,共有两条支路,每条支路又有一个分支支路。这两条支路分别为  $\{S_1-S_3-S_5-S_7\}$  和  $\{S_2-S_4-S_9-S_{10}\}$ , 节点 6 为支路 1 的分支支路,节点 7 为支路 2 的分支支路。据测试,可得各个节点及支路的参数如表 1 所示。

表 1 配网节点参数

Tab.1 Distribution network node parameters

路段	起始节点	阻抗/ $\Omega$	容量/(kV·A)
$S_1$	0—1	0.142+j0.12	20
$S_2$	0—2	0.325+j0.11	20
$S_3$	1—3	0.625+j0.13	20
$S_4$	2—4	0.415+j0.10	10
$S_5$	3—5	0.355+j0.14	12
$S_6$	3—6	0.652+j0.12	10
$S_7$	5—9	0.748+j0.11	20
$S_8$	4—7	0.963+j0.13	16
$S_9$	4—8	0.254+j0.15	14
$S_{10}$	8—10	0.125+j0.14	12

根据相关文献资料<sup>[16]</sup>,20 kV 主动配电网的输送功率是 10 kV 的 1 倍,而且供电半径更大,电压损失和线损率更低。因此,在表 1 中,将主动配电网的额定电压设置为 20 kV,有功负荷总量设置为 31.5 MW,无功负荷设置为 3.14 MW。在计算配电网节点在电压偏移下的网损成本时,使用以下公式:

$$f_{\lambda} = \sum_{p=1}^n \frac{(R_p^2 + O_p^2)P_{re}}{Q_{re}^2} \quad (13)$$

式中: $f_{\lambda}$  为配电网中所有节点在电压偏移下的网

损成本; $R_p$  为节点  $p$  的阻抗; $O_p$  为节点  $p$  的容量; $P_{re}$  为配电网有功负荷; $Q_{re}$  为配电网无功负荷。

基于配电网节点网损,计算无功补偿成本:

$$f_x = E_r \sum_{p=1}^n O_{k,p} \times 10^{-4} \quad (14)$$

式中: $f_x$  为配电网无功补偿的成本; $E_r$  为单位容量需要补偿的成本; $O_{k,p}$  为节点  $p$  中电容器的容量。

通过式(13)和式(14)所得数据,计算配电网选址定容的总成本  $f_z$ ,其计算公式为

$$f_z = f_{\lambda} + f_x \quad (15)$$

通过配电网选址定容的总成本,判断主动配电网选址定容方法的经济性能。

## 2.2 配电网选址定容成本测试

在测试配电网选址定容方法的成本时,设定两个场景,分别对其使用以上方法进行仿真研究。

场景 1:不接入分布式电源。

场景 2:接入分布式电源。

在主动配电网的电能统计中,需要提前设置春、夏、秋、冬 4 个季节的风速参数以及日照参数,如表 2 所示。

表 2 四季风力及日照参数

Tab.2 Four seasons wind and sunshine parameters

参数	春	夏	秋	冬
日出时间	06:00	04:30	06:00	07:30
光照时间/h	12	15	12	9
最大光照强度/Lux	0.65	1.13	0.71	0.54
风速尺度参数	6.57	7.16	6.87	9.13
风速形状参数	2.34	2.55	3.11	2.14

表 2 中四个季节的典型光照和风力参数,均是春分、夏至、秋分、冬至日的数据,因此 5 个参数的数据均具备典型性。基于以上两个场景,使用基本人工鱼群算法与改进人工鱼群算法分别测试该方法的有效性。通过上述公式计算主动配电网选址定容的网损成本和无功补偿成本,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,迭代次数在 100 次后,在场景 1 中,使用基本人工鱼群算法计算网损成本和无功补偿成本分别为 3.314 万元和 1.023 万元,总值为 4.337 万元。使用改进人工鱼群算法计算网损成本和无功补偿成本分别为 2.745 万元和 0.712 万元,总成本为 3.457 万元。

在场景 2 中,迭代次数在 100 次后,使用基本人工鱼群算法计算网损成本和无功补偿成本分别为 1.923 万元和 0.502 万元,总成本为 2.425 万元;使用改进人工鱼群算法计算网损成本和无

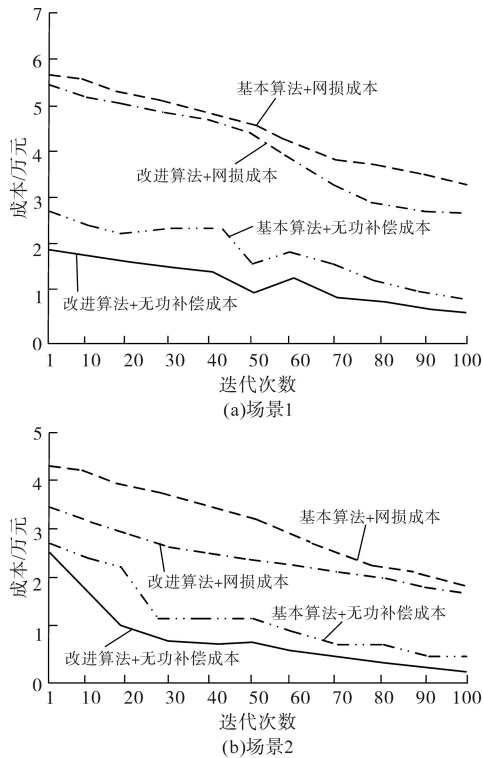


图3 配电网选址定容成本

Fig.3 Cost of location and capacity determination of distribution network

无功补偿成本分别为1.821万元和0.236万元,总成本为2.057万元。

基于以上数据,可知本文方法可以减少主动配电网选址定容的成本,且场景2中接入分布式电源的主动配电网,在选址定容过程中所需成本小于场景1中的不接入分布式电源的所需成本。

由于场景2中选址定容所需成本少于场景1中所需成本,因此,选择场景2作为下一步的研究背景,基于场景2情况下对本文方法、文献[3]中的基于潮流线性方法、文献[4]中的基于改进花朵授粉算法方法和文献[5]中的基于改进多目标粒子群算法方法进行主动配电网选址定容计算,计算得出不同方法下的主动配电网选址定容网损成本如图4所示,无功补偿成本如图5所示。

由图4和图5可知,在场景2中,本文方法的主动配电网选址定容网损成本和无功补偿成本均低于文献[3]方法、文献[4]方法和文献[5]方法,主要是由于本文方法采用了改进人工鱼群算法,对人工鱼群算法引入反馈策略、全局最优信息记录和自适应视野与步长进行改进,使得寻优精度更高,成本更低。

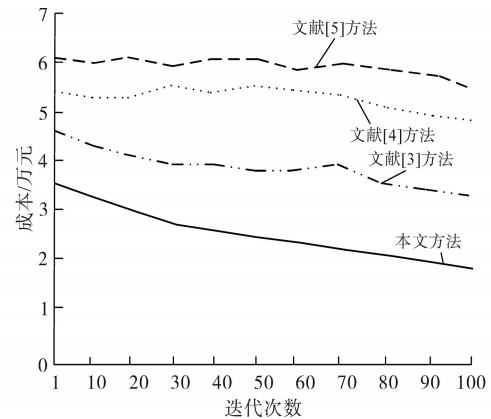
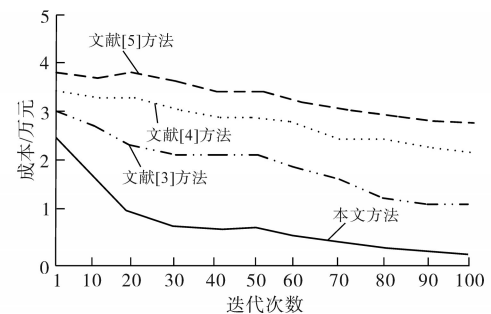


图4 不同方法的主动配电网选址定容网损成本

Fig.4 Cost of active distribution network location and capacity determination network loss by different methods

图5 不同方法的主动配电网选址定容无功补偿成本  
Fig.5 Cost of reactive power compensation with different methods for active distribution network location and capacity determination

### 3 结论

本文设计了一种面向能源互联的主动配电网选址定容方法,考虑能源系统多能互补协调特性,建立目标函数,并设置约束条件,通过改进人工鱼群算法对基于能源互联的主动配电网选址定容方法进行优化。得出以下结论:

1)在迭代次数达到100次后,接入分布式电源的场景2比不接入分布式电源的场景1网损成本和无功补偿成本更低。

2)改进后的人工鱼群算法相比未改进的基本鱼群算法计算得出的网损和无功补偿总成本更低。

3)在场景2中,本文方法相比于文献[3]方法、文献[4]方法和文献[5]方法的主动配电网选址定容网损成本和无功补偿成本都更低,表明本文方法的有效性。

#### 参考文献

[1] 林克灵,王振宇,罗磊,等.面向低碳化的输电网能效评价标

- 准与技术[J].水电能源科学,2020,38(10):190-193.  
LIN Keling, WANG Zhenyu, LUO Lei, et al. Evaluation standard and technology of energy efficiency of transmission network for low carbonization[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(10):190-193.
- [2] 朱训君,王宾,李海雨,等.基于改进粒子群算法的农村配电网分布式光伏选址定容研究[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(4):206-214.  
ZHU Xunjun, WANG Bin, LI Haiyu, et al. Study on distributed photovoltaic location and capacity selection of rural distribution network based on improved particle swarm optimization[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4):206-214.
- [3] 王涛,刘雪飞,郑重,等.基于潮流线性化的分布式发电选址定容新算法[J].电力自动化设备,2020,40(8):117-128.  
WANG Tao, LIU Xuefei, ZHENG Zhong, et al. Novel locating and sizing algorithm for distributed generation based on power flow linearization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8):117-128.
- [4] 陈德炜,施永明,徐威,等.基于改进FPA算法的含分布式光伏配电网选址定容多目标优化方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(7):120-125.  
CHEN Dewei, SHI Yongming, XU Wei, et al. Multi-objective optimization method for location and capacity of a distribution network with distributed photovoltaic energy based on an improved FPA algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7):120-125.
- [5] 陈浩,马平.基于改进多目标粒子群算法的DG选址定容优化研究[J].计算机与数字工程,2020,48(1):1-6,38.  
CHEN Hao, MA Ping. Research of distributed generation locating and sizing based on improved multi-objective particle swarm algorithm[J]. Computer & Digital Engineering, 2020, 48(1):1-6, 38.
- [6] 郭威,修晓青,李文启,等.计及多属性综合指标与经济性的电网侧储能系统选址配置方法[J].电力建设,2020,41(4):53-62.  
GUO Wei, XIU Xiaoqing, LI Wenqi, et al. Siting and configuration methods for grid-side energy storage system considering multi-attribute comprehensive indices and economy[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(4):53-62.
- [7] 李建林,牛萌,周喜超,等.能源互联网中微能源系统储能容量规划及投资效益分析[J].电工技术学报,2020,35(4):874-884.  
LI Jianlin, NIU Meng, ZHOU Xichao, et al. Energy storage capacity planning and investment benefit analysis of micro-energy system in energy interconnection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4):874-884.
- [8] 尹爱辉,林祺蓉,王俏俏,等.考虑不确定性的三相不平衡配电网DG选址定容研究[J].电测与仪表,2020,57(6):38-45.  
YIN Aihui, LIN Qirong, WANG Qiaoqiao, et al. Distributed generations optimal locating and sizing in unbalanced three phase distribution systems considering the uncertainties[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(6):38-45.
- [9] 任智君,郭敏铧,郭红霞,等.电源-用户互动模式下的主动配电网分布式电源规划[J].可再生能源,2019,37(11):1643-1649.  
REN Zhijun, GUO Minhua, GUO Hongxia, et al. Active distribution network planning method under power-user interaction mode[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(11):1643-1649.
- [10] 卢光辉,滕欢,廖寒逊,等.基于改进天牛须搜索算法的分布式电源选址定容[J].电测与仪表,2019,56(17):6-12.  
LU Guanghui, TENG Huan, LIAO Hanxun, et al. Location and sizing of distributed generation planning based on the improved beetle antennae search algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(17):6-12.
- [11] 王华昕,倪静,赵永熹,等.配网居民用户侧应急抢修资源多目标选址研究[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):73-80,131.  
WANG Huaxin, NI Jing, ZHAO Yongxi, et al. Research on multi objective location of rush repair resources in residents' side for distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4):73-80, 131.
- [12] 李锐,周子煦.基于多维度自适应机制改进的混合人工鱼群优化算法[J].计算技术与自动化,2022,41(2):77-83.  
LI Rui, ZHOU Zixu. Hybrid artificial fish swarm optimization algorithm based on multi-dimensional adaptive mechanism[J]. Computing Technology and Automation, 2022, 41(2):77-83.
- [13] 潘霄,沈方,张明理,等.基于需求相关性分组预测的主动配电网分布式电源规划方法[J].可再生能源,2019,37(4):582-587.  
PAN Xiao, SHEN Fang, ZHANG Mingli, et al. Research on distributed power supply planning method for active distribution network based on demand correlation group load prediction[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(4):582-587.
- [14] 孙顺祥,李晓明,刘振盛,等.计及电压稳定性评估的配电网DG选址定容的研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(3):88-94.  
SUN Shunxiang, LI Xiaoming, LIU Zhensheng, et al. Research on locating and sizing of DG in the distribution network considering voltage stability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3):88-94.
- [15] 马立红,肖禹,宁光涛,等.考虑虚拟电厂的分布式电源优化配置研究[J].电气传动,2022,52(2):74-80.  
MA Lihong, XIAO Yu, NING Guangtao, et al. Research on distributed generation optimization configuration considering virtual power plant in distribution network[J]. Electric Drive, 2022, 52(2):74-80.
- [16] 孟祥东.20 kV与10 kV配电电压等级规划的比较[J].现代工业经济和信息化,2018,8(1):63-64,72.  
MENG Xiangdong. Comparison of 20 kV and 10 kV distribution voltage levels planning[J]. Modern Industrial Economy and Informatization, 2018, 8(1):63-64, 72.

收稿日期:2022-11-29

修改稿日期:2022-12-08