DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191118

基于随机机会约束规划的面向能源互联的主动配电网选址定容方法

赵丽萍，张书伟，张雪岩，李永刚

(国网冀北电力有限公司张家口供电公司，河北 张家口 075001)

摘要：面向能源互联的主动配电网作为能源互联网的重要实现形式，是目前智能配电网领域的前沿方向。针对面向能源互联的主动配电网选址定容问题，计及系统不确定性采用随机机会约束规划建立模型。考虑到系统多能互补协调特性，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为目标函数，计及设备配置容量约束、系统供能可靠性约束、功率平衡约束、设备运行约束等必要约束条件建立模型。对基本人工鱼群算法引入反馈策略、全局最优记录以及自适应视野和步长进行改进，并采用改进人工鱼群算法对所建立的模型进行求解。最后通过两种选址定容场景的仿真，验证了所提方法以及算法改进的有效性。

关键词：能源互联；主动配电网；选址定容；随机机会约束规划；人工鱼群算法

Locating and sizing method for energy interconnection oriented active distribution networks based on stochastic chance constrained programming

ZHAO Liping, ZHANG Shuwei, ZHANG Xueyan, LI Yonggang

(Zhangjiakou Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Zhangjiakou 075001, China)

Abstract: As an important part of the energy internet, an energy interconnection-oriented active distribution network has been a research frontier in the field of intelligent distribution networks. In order to solve the problem of locating and sizing of an energy interconnection-oriented active distribution network, a stochastic chance constrained programming model is established considering system uncertainty. Considering the multi-energy complementary coordination characteristics of the system, life cycle cost theory is adopted to take into account the purchase cost of equipment, installation, operation, maintenance and system operation costs and residual value recovery. The comprehensive cost of location and capacity of a distribution network in probability form is taken as the objective function, and necessary constraints such as the capacity of equipment configuration, system power supply reliability, power balance, and equipment operation, etc. are taken into account. It introduces a feedback strategy, a global optimum record, and an adaptive visual field and step size to improve the basic artificial fish swarm algorithm, and then uses the improved algorithm to solve the built model. Finally, the effectiveness of the proposed strategy and the improved algorithm is verified by simulating two kinds of locating and sizing scenarios.

This work is supported by Beijing-Tianjin-Hebei Cooperation Special Project of National Natural Science Foundation of Hebei Province (No. F2016203507).

Key words: energy interconnection; active distribution network; locating and sizing; stochastic chance constrained programming; artificial fish swarm algorithm

0 引言

能源互联配电网是指以电力系统为中心，借助信息化设备，横向实现电、气、热、可再生能源等“多源互补”，纵向实现“源网荷储”各环节高度协调的区域性能量平衡系统[1-4]。能源互联配电网将能量流、信息流和业务流进行深度耦合，形成了一个全新的能源体系，形成能源应用的创新形式。能源互联配电网故障恢复方法作为其重要的关键技术

基金项目：河北省自然科学基金京津冀合作专项项目资助(F2016203507)

之一，是一门必要的研究课题[5-6]。

目前针对传统单一供能形式的主动配电网选址定容模型的研究较多。比如文献[6]针对传统分布式电源规划方法难以满足高渗透率分布式发电的配电网在运行阶段的分区控制需求问题，提出分布式电源集群规划的概念和方法。文献[7]考虑不确定性因素之间的相关性，建立以年综合规划成本以及系统运行风险最小的目标函数，对分布式发电的并网容量和并网位置进行优化。文献[8]考虑分布式发电资源与负荷间的相关性，以年综合规划运行成本费用最小为目标建立选址定容优化模型。文献[9]充分考虑到了分布式能源发电出力波动对配电网的影响，该方法能够优化网络结构，降低费用，并且在出现故障时能够保证关键负荷的正常供电。在模型求解方面，配电网选址定容模型可以采用微分进化算法[10-12]，粒子群算法[13-14]以及遗传算法[15-16]等算法进行求解。然而以上文献建立的配电网选址定容模型针对的都是传统单一供能形式的主动配电网，目前还很少有文献针对面向能源互联的主动配电网计及其多能互补特性建立选址定容模型。此外，配电网中设备的选址定容规划方案受到分布式发电不确定性的影响，目前还较少有文献考虑模型的不确定性。

能源互联配电网运营商在规划阶段的控制变量分为两类：一方面是需要决定各个设备在配电网中的并网节点和容量，包括冷热电联供机组、燃料电池、风力发电、光伏发电、储能装置、甲烷式电转气机组、蓄能装置容量和储气罐装置的容量；另一方面，运营商还需要制定系统期望的运行计划，对运行可靠性和成本情况进行评估。能源互联配电网中电能网络即配电网部分作为已经投运的系统，需要在此基础上通过选址定容将热能网络以及气能网络整合进来形成多能互补协调系统，同时计及系统不确定性对选址定容规划结果的影响。

本文针对能源互联配电网的能源耦合设备和分布式电源进行选址定容，制定设备的并网节点以及并网容量方案。基于全寿命周期成本思想，以全寿命周期内的系统选址定容综合规划成本最小为目标函数，考虑到必要约束条件建立模型，采用随机机会约束规划形式进行建模。采用改进人工鱼群算法设计模型求解流程，最后设置两种场景的选址定容情形分别进行优化，验证了所提方法的有效性。

1 选址定容优化模型

1.1 选址定容模型目标函数

选址定容模型的控制变量用数学形式表示如式(1)所示。

$$u_1=[Q_{\mathrm{SB}},Q_{\mathrm{PV}},Q_{\mathrm{WT}},Q_{\mathrm{CCHP}},Q_{\mathrm{FC}},Q_{\mathrm{CH}},Q_{\mathrm{X}},Q_{\mathrm{G}}] \tag{1}$$

式中：u_1 为优化模型的控制变量；Q_{SB}、Q_{PV}、Q_{WT}、Q_{CCHP}、Q_{FC}、Q_{CH}、Q_{X}、Q_{G} 分别表示储能装置容量、光伏发电容量、风力发电容量、冷热电联供型微燃机容量、燃料电池容量、甲烷式机组容量、蓄能装置容量和储气罐容量。

选址定容模型的目标函数为最小化能源互联配电网在全寿命周期内的运行规划成本。该成本包括设备购置成本、设备安装成本、设备维护成本、系统综合运行成本以及设备残值回收。该目标函数如式(2)所示。

$$\min f=C_{\mathrm{ins}}+C_{\mathrm{rep}}+C_{\mathrm{om}}+C_{\mathrm{op}}-C_{\mathrm{val}} \tag{2}$$

式中：f 为选址定容模型的目标函数；C_{ins} 表示设备购置成本，如式(3)所示；C_{rep} 表示设备安装成本，如式(4)所示；C_{om} 为全寿命周期内设备运行维护成本，如式(5)所示；C_{op} 表示全寿命周期内的系统运行成本，如式(6)所示；C_{val} 表示设备残值收益，如式(7)所示。以上各项成本或者收益均通过考虑资金时间价值的方式折算为全寿命周期内的年金。本文的全寿命周期选为 30 年。

$$C_{\mathrm{ins}}=\sum_{i\in E}\frac{r(1+r)^D}{(1+r)^D-1}[Q_i c_i(n_i+1)] \tag{3}$$

式中：D 为能源互联配电网运行的全寿命周期；r 为基准利率，用于折算资金的时间价值；E 为设备类型集合；Q_i 为第 i 种设备配置的容量；c_i 为第 i 种设备的单位容量投资成本；n_i 为第 i 种设备在全寿命周期内的置换次数，并且有 $n_i=\mathrm{floor}(D/d_i)$，其中 floor() 为地板函数；$d_i$ 为第 i 种设备的运行寿命。

$$C_{\mathrm{rep}}=\sum_{i\in E}\sum_{j=0}^{n_i}\frac{r(1+r)^D}{(1+r)^D-1}(1+r)^{-d_i j}(1-\alpha_i)^{d_i j}C_{\mathrm{rep}}^{i,j}N_i \tag{4}$$

式中：有 $j=0,1,\mathrm{L}\ ,n_i$；$C_{\mathrm{rep}}^{i,j}$ 为第 i 种设备发生的第 j 次安装费用；α_i 为第 i 种设备安装费用的年均下降比例；N_i 为第 i 种设备的配置台数。

$$C_{\mathrm{om}}=\sum_{i\in E}\sum_{j=1}^{D}\frac{r(1+r)^D}{(1+r)^D-1}(1+r)^{-j}(1+\beta_i)^j C_{\mathrm{om},i}N_i \tag{5}$$

式中：β_i 为第 i 种设备运维成本的年变化率；$C_{\mathrm{om},i}$ 为第 i 种设备的每台全年产生的运维成本。

$$C_{\text{op}}=\sum_{t=1}^{T}\left[\begin{array}{l}P_{\text{grid}}(t)q_{\text{grid}}(t)+f_{\text{CCHP}}[P_{\text{CCHP}}(t)]+f_{\text{FC}}[P_{\text{FC}}(t)]+P_{\text{H}}(t)p_{\text{h}}+\\ G_{\text{in}}(t)C_{\text{NG}}+\sum_{\theta=1}^{N}\lambda_{\text{CCHP}}^{\theta}c^{\theta}P_{\text{CCHP}}(t)+\sum_{\theta=1}^{N}\lambda_{\text{FC}}^{\theta}c^{\theta}P_{\text{FC}}(t)\end{array}\right] \tag{6}$$

式中：$q_{\text{grid}}(t)$ 为 t 时段外网分时电价水平；$P_{\text{grid}}(t)$ 为 t 时段配电网向外网购售电功率，$P_{\text{grid}}(t)$ 大于零为购电；$f_{\text{CCHP}}()$ 和 $f_{\text{FC}}()$ 分别为 CCHP 机组和燃料电池的燃料成本函数；$P_{\text{CCHP}}(t)$ 和 $P_{\text{FC}}(t)$ 分别为 CCHP 机组和燃料电池 t 时段功率出力；$P_{\text{H}}(t)$ 为 t 时段外网供热功率；p_{h} 为外网供热单价；C_{NG} 表示天然气的单价；$G_{\text{in}}(t)$ 为气能网络向外网的购气量；θ 为污染物类别，共 N 种污染物；$\lambda_{\text{CCHP}}^{\theta}$ 为 CCHP 机组第 θ 种污染物的排放系数；c^{θ} 为第 θ 种污染物的单位排放量治理成本。

$$C_{\text{val}}=\sum_{i\in E}\sum_{j=0}^{n_i}\frac{r(1+r)^{D}}{(1+r)^{D}-1}(1+r)^{-d_i j}C_{\text{val},i}N_i \tag{7}$$

式中，$C_{\text{val},i}$ 为第 i 种设备的残值。

由于目标函数受到分布式光伏和风电出力的影响，而两者是随机变量，因此目标函数实际上也是随机变量，基于 Minimin 形式的随机机会约束规划模型建立目标函数分别如式(8)和式(9)所示[17-18]。

$$\min_{u}\ \min \bar{f} \tag{8}$$

$$\Pr\left\{f=C_{\text{ins}}+C_{\text{rep}}+C_{\text{om}}+C_{\text{op}}-C_{\text{val}}\le\bar{f}\right\}\ge\alpha \tag{9}$$

式中：u 为随机机会约束规划的控制变量，本文中为能源互联配电网选址定容方案；$\bar{f}$ 为目标函数在置信水平为 α 时的乐观值。

1.2 选址定容模型约束条件

(1) 设备配置容量约束。在项目既有的规划和建设条件下，能源互联配电网运营商制定选址定容计划时需要满足以下设备配置容量约束。

$$0\le Q_i\le Q_{i,\max},\ i\in E \tag{10}$$

式中：Q_i 为第 i 种设备的配置容量；$Q_{i,\max}$ 为第 i 种设备可配置的容量上限。同时由于设备配置容量并不是连续而是离散的，因此有 Q_i/q_i 为正整数，其中 q_i 为第 i 种设备的单台容量。

(2) 供能可靠性约束。能源互联配电网选址定容之后的系统需要确保足够的供电可靠性。采用系统供能中断率来衡量系统的供电可靠性，因此有系统供能可靠性约束如式(11)所示，其中 δ 的计算方式如式(12)所示。

$$\Pr\left\{\delta\ge\delta_{\min}\right\}\ge\beta \tag{11}$$

$$\delta=1-\frac{\sum_{t=1}^{T_0}P_{\text{e,cut}}(t)+\sum_{t=1}^{T_0}P_{\text{h,cut}}(t)+\sum_{t=1}^{T_0}P_{\text{g,cut}}(t)}{\sum_{t=1}^{T_0}P_{\text{e,L}}(t)+\sum_{t=1}^{T_0}P_{\text{h,L}}(t)+\sum_{t=1}^{T_0}P_{\text{g,L}}(t)} \tag{12}$$

式中：δ 为系统的负荷综合供能率，包括电能网络、热能网络以及气能网络的供能情况；T_0 为能源互联配电网在全寿命周期内的调度周期数；$P_{\text{e,cut}}(t)$、$P_{\text{h,cut}}(t)$ 和 $P_{\text{g,cut}}(t)$ 分别为电能网络、热能网络和气能网络在第 t 个调度周期的能量中断功率；$P_{\text{e,L}}(t)$，$P_{\text{h,L}}(t)$ 和 $P_{\text{g,L}}(t)$ 分别为第 t 个调度周期电能网络、热能网络和气能网络的负荷功率；$\delta_{\min}$ 为系统运行满足的供电可靠性指标。

(3) 功率平衡约束。该约束包括电能网络功率平衡约束，热能网络功率平衡约束以及气能网络功率平衡约束分别如式(13)—式(15)所示。

$$\Pr\left\{\begin{array}{l}-\Delta P\le P_{\text{grid}}(t)+P_{\text{WT}}(t)+P_{\text{PV}}(t)+\\ P_{\text{SB}}(t)+P_{\text{CCHP}}(t)+P_{\text{FC}}(t)+\\ P_{\text{e,cut}}(t)-P_{\text{loss}}(t)-P_{\text{e,L}}(t)\le\Delta P\end{array}\right\}\ge\beta \tag{13}$$

$$\Pr\left\{\begin{array}{l}-\Delta P\le P_{\text{CCHP}}(t)c_{\text{h}}+Q_{\text{x}}(t)+\\ P_{\text{H}}(t)+P_{\text{h,cut}}(t)-P_{\text{h,L}}(t)\le\Delta P\end{array}\right\}\ge\beta \tag{14}$$

$$\Pr\left\{\begin{array}{l}-\Delta P\le G_{\text{in}}(t)+G_{\text{s}}(t)+G_{\text{CH}}(t)+P_{\text{g,cut}}(t)-\\ P_{\text{g,L}}(t)-\dfrac{P_{\text{FC}}(t)}{\eta_{\text{FC}}(t)Q_{\text{LHV}}}-\dfrac{P_{\text{CCHP}}(t)}{\eta_{\text{CCHP}}(t)Q_{\text{LHV}}}\le\Delta P\end{array}\right\}\ge\beta \tag{15}$$

式中：$P_{\text{loss}}(t)$ 为 t 时段电能网络的网损功率，计算方式参考文献[19]；$P_{\text{WT}}(t)$ 和 $P_{\text{PV}}(t)$ 分别为 t 时段风电和光伏出力；$P_{\text{SB}}(t)$ 为 t 时段电储能出力；c_{h} 为双效吸收式机组的制热系数；$Q_{\text{x}}(t)$ 为蓄能装置 t 时段充放热功率，$Q_{\text{x}}(t)$ 大于零时为放热；$G_{\text{s}}(t)$ 为储气罐 t 时段充放气量，$G_{\text{s}}(t)$ 大于零时为释放状态；$G_{\text{CH}}(t)$ 为 t 时段甲烷式电转气机组制气量；ΔP 为最大允许不平衡功率偏差；β 为约束条件成立的置信度。

(4) 设备运行约束。该约束包括设备运行限值约束如式(16)所示，以及能源存储设备的运行约束如式(17)所示。

$$\begin{cases} 0 \le P_{\mathrm{CCHP}}(t) \le Q_{\mathrm{CCHP}} \\ 0 \le P_{\mathrm{FC}}(t) \le Q_{\mathrm{FC}} \\ 0 \le G_{\mathrm{CH}}(t) \le Q_{\mathrm{CH}} \\ 0 \le P_{\mathrm{SB}}(t) \le \lambda_{\mathrm{SB}} Q_{\mathrm{SB}} \\ -Q_{\mathrm{X}} \le Q_{\mathrm{x}}(t) \le \lambda_{\mathrm{X}} Q_{\mathrm{X}} \\ -Q_{\mathrm{G}} \le G_{\mathrm{s}}(t) \le \lambda_{\mathrm{G}} Q_{\mathrm{G}} \end{cases} \tag{16}$$

$$\begin{cases} S_{\mathrm{SB}}(t+1) = S_{\mathrm{SB}}(t) - \\ \qquad P_{\mathrm{SB}}(t)\Delta t \eta_{\mathrm{SB}} - \Delta t D_{\mathrm{SB}} Q_{\mathrm{SB}} \\ d_{\mathrm{SB,min}} Q_{\mathrm{SB}} \le S_{\mathrm{SB}}(t) \le d_{\mathrm{SB,max}} Q_{\mathrm{SB}} \\ X(t) = X(t-1) + Q_{\mathrm{x}}(t) - \lambda_{\mathrm{x}} \Delta t \\ X^{\min} \le X(t) \le X^{\max} \\ Q_s(t) = Q_s(t-1) + G_{\mathrm{s}}(t) \\ Q_s^{\min} \le Q_s(t) \le Q_s^{\max} \end{cases} \tag{17}$$

式中：λ_{SB} 为可选电储能设备的充放电功率限值-容量比；λ_{X} 为蓄能装置的充放热功率限值-容量比；λ_{G} 为储气罐的充放气限值-容量比；$S_{\mathrm{SB}}(t+1)$ 和 $S_{\mathrm{SB}}(t)$ 分别为 t 时段的电储能剩余容量；Δt 为运行时段长；η_{SB} 为电储能充放电效率；D_{SB} 为电储能自放电系数；$d_{\mathrm{SB,min}}$ 和 $d_{\mathrm{SB,max}}$ 分别为电储能运行允许的最小放电深度和最大充电深度系数；$X(t)$ 和 $X(t-1)$ 分别为 t 时段的热储能剩余容量；λ_{x} 为蓄能装置剩余热量的自损失系数。

(5) 电能网络节点电压约束。该约束如式(18)所示。

$$\Pr\left\{U_{i,\min} \le U_i(t) \le U_{i,\max}\right\} \ge \beta \tag{18}$$

式中：U_i 为第 i 个节点 t 时段的电压幅值；$U_{i,\min}$ 和 $U_{i,\max}$ 分别为第 i 个节点电压的最小值和最大值。其中电能网络节点电压由通过式(19)和式(20)所示的潮流方程得到

$$P_i - U_i \sum_{j=1}^{n} U_j (G_{ij}\cos\delta_{ij} + B_{ij}\sin\delta_{ij}) = 0 \tag{19}$$

$$Q_i - U_i \sum_{j=1}^{n} U_j (G_{ij}\sin\delta_{ij} - B_{ij}\cos\delta_{ij}) = 0 \tag{20}$$

式中：n 为节点数；P_i 和 Q_i 分别为第 i 个节点流入的有功和无功功率，受到设备选址定容方案的影响；G_{ij}、B_{ij} 和 δ_{ij} 为第 i 个节点和第 j 个节点之间的电导、电纳以及电压相角差；U_i 和 U_j 为第 i 个节点和第 j 个节点的电压幅值。

(6) 支路容量约束。该约束主要是指电能配电网络的支路潮流不能越限，如式(21)所示。

$$\Pr\left\{-P_{l,\max} \le P_l(t) \le P_{l,\max}\right\} \ge \beta \tag{21}$$

式中：P_l 表示第 l 条支路 t 时段的有功功率；$P_{l,\max}$ 表示第 l 条支路的传输上限。

2 改进人工鱼群算法与模型求解

人工鱼群算法(Artificial Fish Swarm Algorithm, AFSA)在寻优过程中具备快速性，全局性以及跟踪性等优点，该算法作为一种高效的寻优策略，其提出受到了自然界鱼群的行为特性的启发[20-21]。人工鱼种群在寻优过程中依托四种基本的行为，包括觅食、聚群、随机以及追尾行为，各种行为的具体位置和速度变换公式目前已经有较为成熟的研究，可参考文献[22]。本文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。通过改进能够避免陷入局部极值，基于改进人工鱼群算法设计模型的求解流程。

2.1 人工鱼群算法的改进措施

2.1.1 反馈策略

本文对基本人工鱼群算法采取反馈策略，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。

基于反馈策略的具体反馈行为通过以下形式进行设定：设定人工鱼个体不进行反馈的概率为 P_{fb}，则进行反馈的概率为 $1-P_{\mathrm{fb}}$。随着迭代的进行 P_{fb} 呈线性递减的规律进行更新，具体如式(22)所示。

$$P_{\mathrm{fb}} = \alpha P_{\mathrm{fb}} \tag{22}$$

式中：α 为反馈概率的衰减因数，一般情况下取 $\alpha < 1$。通过这样的设定可以使得迭代前期，人工鱼个体行为中随机因素较多；而在迭代后期，随着寻优过程的进行，反馈概率不断降低，非反馈概率 $1-P_{\mathrm{fb}}$ 增大，从而使得寻优行为的随机因素减少，而反馈的比重增加，在保证人工鱼群算法的全局收敛性满足的同时，也可具备较好的收敛精度和寻优效率。

2.1.2 考虑全局最优记录

在基本人工鱼群算法中，人工鱼个体的四类行为中的位置更新都没有计及当前全局最优信息的更新。因此本文在人工鱼个体的位置更新公式中，考虑到全局最优个体的位置信息 $X_{\text{best-af}}$，将其引入到种群寻优的指导中，能够显著增强算法的寻优能力，同时提升算法收敛精度和寻优速度，降低了算法的

复杂度。考虑全局最优记录下的个体位置更新公式如式(23)所示。

$$X_i^{t+1}=X_i^t+\frac{(X_{\text{better}}-X_i^t)+(X_{\text{best-af}}-X_i^t)}{\left\|(X_{\text{better}}-X_i^t)+(X_{\text{best-af}}-X_i^t)\right\|}\times\text{Rand} \tag{23}$$

式中：X_{better} 为个体在四类基本行为中搜索到的优于当前状态 X_i^t 的位置；$X_{\text{best-af}}$ 为当前全局最优人工鱼个体的位置；Rand 为 0 到 1 之间的随机数，乘以 Rand 表示在位置更新中以前一项作为最大可能步长，并且乘以一个随机因数控制步长。

2.1.3 自适应视野和步长

在基本人工鱼群算法中，迭代步长设置的合理与否对于算法的寻优精度和效率起着至关重要的作用，而寻优视野表征了人工鱼个体的搜索范围，也需要进行合理设定。在改进前，基础寻优视野和迭代步长为固定不变的常数，在迭代过程中由于寻优行为中存在的随机因素，因此基本人工鱼群算法实际上的迭代补偿成为固定范围内的随机步长，这导致了算法收敛精度较低，以及迭代后期寻优性能不足的问题。

针对以上存在的问题，本文对寻优视野和迭代步长进行自适应调整，使得两者随着寻优的过程进行灵活的调整。自适应寻优视野随着公告牌中最优人工鱼的信息进行调整，即针对每个人工鱼个体计算其与当前最优人工鱼个体的距离 $d_{i-\text{best}}$，将该距离作为该人工鱼个体的寻优视野。同时将基础迭代步长设置也为 $d_{i-\text{best}}$。通过这样的调整，可以显著提升寻优效率。

2.2 算法求解步骤

基于以上几点对人工鱼群算法做出的改进，本文采用改进人工鱼群算法对所建立的能源互联配电网选址定容模型进行求解，具体求解步骤如下：

(1) 设置改进人工鱼群算法的参数，包括种群的规模 N，人工鱼个体位置信息的维数 D，最大尝试数 Try−number，算法最大迭代步数，反馈概率 P_{fb}，反馈概率衰减因子 α，算法收敛精度，控制变量的限值等。

(2) 人工鱼种群的初始化。采用混沌搜索进行初始化可以增加初始种群的代表性，采取 Logistic 混沌映射方法针对每一维位置信息进行迭代 $M(M>N)$ 次，取较优的前 N 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，计算所有人工鱼个体的适应度函数，将其中适应度函数最优的人工鱼个体作为最优记入公告牌。

(4) 基于改进人工鱼群行为对位置进行更新。依据公告牌信息以及设定的适应度值，得到自适应视野和步长。针对人工鱼个体进行聚群、追尾、觅食行为，若进行以上行为后的人工鱼适应度更高，则进行更新，并转到步骤(6)。

(5) 如果人工鱼个体不满足基本行为条件时，生成随机数 $rand$，若 $rand<P_{\text{fb}}$，进行随机行为，否则进行反馈行为。

(6) 计算所有人工鱼个体的适应度函数，通过精英策略筛选出 N 个较优的个体组成新的人工鱼种群，对公告牌的最优人工鱼个体进行更新，更新反馈概率。

(7) 判断最优人工鱼个体是否满足收敛精度，如果满足则停止计算并输出结果，否则返回步骤(3)。

3 仿真算例

本文以如图 1 所示的 IEEE33 节点系统作为系统电能网络结构，将其改造为面向能源互联的主动配电网，基于所建立的模型对系统中各个设备进行选址定容方案设计。模型中，资金贴现率 r 取为 7%，主动配电网工程寿命周期取为30年进行全寿命周期成本计算。系统中并网的微燃机和燃料电池的燃料成本函数如图 2 所示，外网分时电价水平参考文献[23-24]。

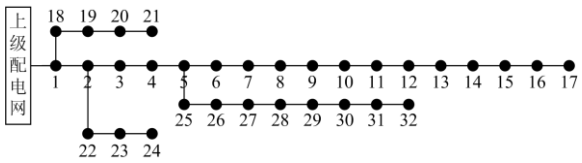


图 1 作为面向能源互联的主动配电网电能网络的 IEEE33 节点系统

Fig. 1 IEEE33 node system for energy interconnection oriented active distribution network

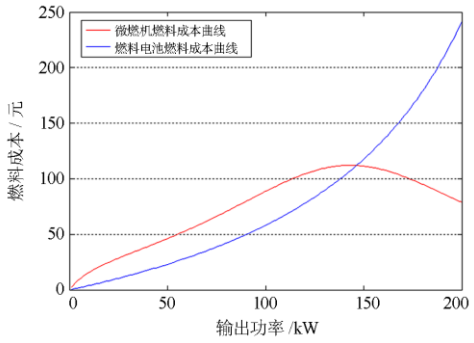


图 2 冷热电联供型微燃机和燃料电池的燃料成本曲线

Fig. 2 Fuel cost curves for micro gas turbine with combined cooling, heating and power and fuel cells

蓄电池储能自放电系数 D_{SB} 为 0.1，充放电效率 η_{ch} 和 η_{dis} 均为 0.9，储能电量上下限取为 $0.1Q_{SB}$ 和 $0.9Q_{SB}$。此外各个设备的参数如表 1 所示，其中光伏电池的购置和安装依据工程实际需要以 20 块光伏组件串联组成一个光伏组串进行，便于集中安装和管理。根据运行经验，对随机机会约束规划中目标函数和约束条件的置信度水平选取为 0.9。

为了验证面向能源互联的主动配电网相比于传统主动配电网在选址定容指标上的优势，本文设计两种选址定容方式。其中方式一为传统主动配电网的设备选址定容方式，不考虑多能互补协调；方式二考虑多能互补协调，基于本文面向能源互联的主动配电网形式进行选址定容。运行所建立的模型，可以得到如表 2 所示的设备选址定容方案。其中，CCHP 型微燃机与主动配电网存在直接的电气联系，而甲烷式反应机组，蓄能装置以及储气罐并没有直接并网接入主动配电网运行，而是分别配置在热能网络和气能网络中。

表 1 面向能源互联的主动配电网中设备的性能参数

Table 1 Performance parameters of equipment in energy interconnection oriented active distribution network

设备类型	公共耦合点	冷热电联供型微燃机	燃料电池	光伏发电	风力发电	电储能设备	甲烷式机组	蓄能装置	储气罐装置
寿命/年	30	25	15	10	20	10	12	10	15
运维成本/(万元/台 年)	0.11	0.13	0.11	0.042	0.12	0.03	0.16	0.04	0.02
额定容量/kW	750	150	240	0.18	30	250	160	200	400
购置费用/(万元/台)	28.6	6.5	17.2	0.2	60	85	24.2	4.2	13.5
安装费用/万元	3.5	0.55	1.2	0.06	3.5	2	2.3	1.4	0.5
设备残值/万元	2.4	0.26	0.68	0.08	2.4	3.5	0.36	0.45	1.56

表 2 方式一和方式二下面向能源互联的主动配电网选址定容方案对比

Table 2 Comparison of locating and sizing schemes for active distribution networks with energy interconnection under mode 1 and mode 2

选址定容方式	方式一	方式二
公共耦合点数量/台	1	1
公共耦合点并网节点	1	1
CCHP 型微燃机/台	3	2
CCHP 型微燃机并网节点	15，24，30	16，31
燃料电池数量/台	2	1
燃料电池并网节点	7，26	10
光伏发电数量/组	4	3
光伏发电并网节点	4，14，22，27	3，13，28
风力发电数量/台	2	2
风力发电并网节点	11，25	11，25
蓄电池储能数量/台	2	1
蓄电池储能并网节点	5，16	5
甲烷式反应机组数量/台	—	2
甲烷式反应机组并网节点	—	—
蓄能装置数量/台	—	1
蓄能装置并网节点	—	—
储气罐装置数量/台	—	1
储气罐装置并网节点	—	—

从表 2 中可以看出，在方式一和方式二下系统的选址定容方案有着较大区别。方式二相比于方式一设备配置数量更少，这意味着系统能够节省更多的设备购置成本、安装成本以及运行维护成本。在两种选址定容情景下，分别计算其选址定容相关指标并进行对比得到表 3。

表 3 方式一和方式二下主动配电网选址定容指标对比

Table 3 Comparison of locating and sizing index for active distribution networks with energy interconnection under mode 1 and mode 2

选址定容方式	方式一	方式二
设备购置成本/万元	968.07	815.53
设备安装成本/万元	58.72	48.93
设备运行维护成本/万元	168.41	139.06
系统运行成本/万元	318.41	178.39
设备残值回收/万元	78.62	65.71
选址定容综合成本/万元	1 592.23	1 247.62

从表 3 中可以看出，面向能源互联的主动配电网选址定容综合成本为 1 247.62 万元，相比于传统形式的主动配电网选址定容综合成本 1 592.23 万元降低了 21.64%，经济效益较为显著。其中系统运行成本的降低最为显著，这主要是因为将不同形式能源网络通过面向能源互联的主动配电网进行整合之后，能够通过多能互补协调将能源在不同形式之间进行再优化分配，从而显著降低运行成本。

为了验证本文进行改进之后的人工鱼群算法针对主动配电网选址定容模型求解上的效果，针对方式一和方式二下的选址定容情景，分别采用传统人工鱼群算法以及本文改进人工鱼群算法进行求解，得到四种情形下的算法收敛情况对比如图 3 所示。

从图 3 中可以看出，无论是在方式一还是方式二中，本文对基本人工鱼群算法进行改进之后取得的求解效果均要更佳。在方式一中，改进人工鱼群算法经过 154 代收敛到了 1 592.23 万元，而基本人工鱼群算法经过 184 代只寻优到了 1 641.04 万元；在方式二中，改进人工鱼群算法经过 147 代收敛到了 1 247.62 万元，而基本人工鱼群算法经过 181 代只寻优到了 1 283.74 万元。

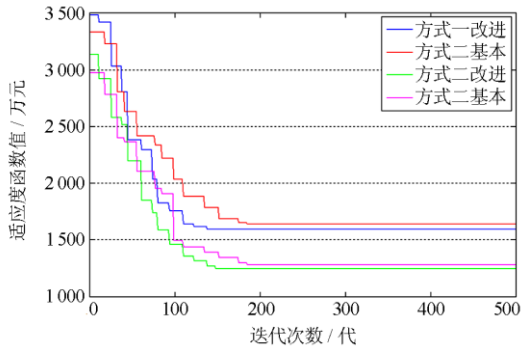


图 3 基本人工鱼群算法和改进人工鱼群算法的收敛过程对比

Fig. 3 Comparison of convergence processes between basic artificial fish swarm algorithms and improved artificial fish swarm algorithms

事实上，以上选址定容结果以及分析均针对置信度水平为 0.9 时的情形。分别针对目标函数和约束条件选取不同置信度，运行本文所建立的模型，选取最为关键的指标即选址定容综合成本作为考察对象，得到如图 4 和图 5 所示方式一下和方式二下的选址定容综合成本与置信度关系图。

从图 4 和图 5 中可以看出，随着置信度水平的上升，为了提升目标函数和约束条件的成立概率，主动配电网需要配置更大容量的设备以确保系统运行可靠性，从而提升了选址定容综合成本。

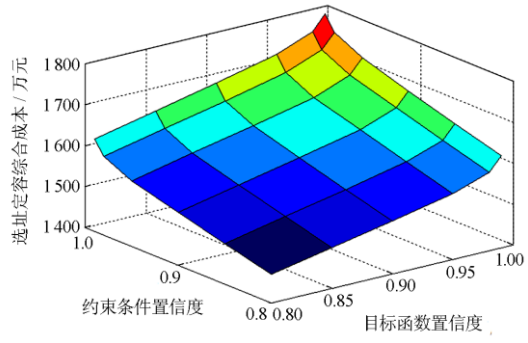


图 4 方式一下选址定容综合成本与置信度的关系图

Fig. 4 Relationship between locating and sizing comprehensive cost and confidence in location and capacity in mode 1

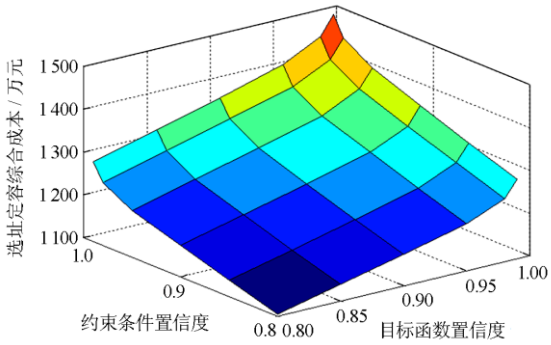


图 5 方式二下选址定容综合成本与置信度的关系图

Fig. 5 Relationship between locating and sizing comprehensive cost and confidence in location and capacity in mode 2

4 结论

本文采用随机机会约束规划，针对面向能源互联的主动配电网建立设备选址定容模型，主要完成了以下几个方面的工作：

(1) 计及模型不确定性，采用随机机会约束规划进行建模。所建立模型能够给出综合选址定容成本与置信度的关系，从而能够为决策者在选址定容经济性和可靠性方面提供参考。

(2) 面向能源互联的主动配电网相比于传统形式的主动配电网，能够通过多能互补协调降低系统运行成本和供能可靠性，从而降低选址定容成本。

(3) 改进人工鱼群算法适用于面向能源互联的主动配电网选址定容模型求解，同时相比于基本人工鱼群算法，无论是在寻优效果上还是迭代速度上均要更优。

参考文献

[1] 余晓丹，徐宪东，陈硕翼，等. 综合能源系统与能源互联网简述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1-13.
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13.

[2] KRAUSE T, ANDERSSON G, FROHLICH K, et al. Multiple-energy carriers: modeling of production, delivery, and consumption[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 15-27.

[3] 田世明，栾文鹏，张东霞，等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy inter-net[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14):

3482-3494.

[4] 吴峰, 杨柳燕. 孤立运行模式下海岛综合能源系统的能量控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(6): 53-60.
WU Feng, YANG Liuyan. Research on energy control strategy of isolated island integrated energy system[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(6): 53-60.

[5] 张爱祥, 宋士瞻, 高扬, 等. 含能源互联微网的主动配电网分层分布式协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 131-138.
ZHANG Aixiang, SONG Shizhan, GAO Yang, et al. Hierarchical distributed coordinated control of active distribution network including energy interconnection micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 131-138.

[6] MAGDY G, MOHAMED E A, SHABIB G, et al. Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 236-246. DOI: 10.1186/s41601-018-0093-1.

[7] 李珂, 邰能灵, 张沈习, 等. 考虑相关性的分布式电源多目标规划方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 51-57.
LI Ke, TAI Nengling, ZHANG Shenxi, et al. Multi-objective planning method of distributed generators considering correlations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 51-57.

[8] ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, LI Ke, et al. Optimal siting and sizing of intermittent distributed generators in distribution system[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2015, 10(6): 628-635.

[9] 李亮, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 58-63.
LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time-sequence characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 58-63.

[10] 郑乐, 胡伟, 陆秋瑜, 等. 储能系统用于提高风电接入的规划和运行综合优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2533-2543.
ZHENG Le, HU Wei, LU Qiuyu, et al. Research on planning and operation model for energy storage system to optimize wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2533-2543.

[11] 李端超, 黄少雄, 汪伟, 等. 基于改进型GAGA算法的智能电网有功优化调度研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(10): 54-59.
LI Duanchao, HUANG Shaoxiong, WANG Wei, et al. Research on intelligent optimization of smart grid based on improved GAGA algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(10): 54-59.

[12] 夏澍, 周明, 李庚银. 分布式电源选址定容的多目标优化算法[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 115-121.
XIA Shu, ZHOU Ming, LI Gengyin. Multi-objective optimization algorithm for distributed generation locating and sizing[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 115-121.

[13] 贺禹强, 刘故帅, 肖异瑶, 等. 基于改进GA-PSO混合算法的变电站选址优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 143-150.
HE Yuqiang, LIU Gushuai, XIAO Yiyao, et al. Optimization of substation location based on improved GA-PSO hybrid algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 143-150.

[14] 苏海锋, 张建华, 梁志瑞, 等. 基于改进均值聚类随机粒子群算法的变电站 LCC 规划[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 209-215.
SU Haifeng, ZHANG Jianhua, LIANG Zhirui, et al. Substation LCC planning based on refined mean clustering random particle swarm algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 209-215.

[15] 张沈习, 程浩忠, 李珂. 考虑相关性的风力发电机组多阶段选址定容规划[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 53-59.
ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, LI Ke. Multistage planning for wind turbine generator considering correlations[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 53-59.

[16] GONG D W, SUN X Y. Multi-population genetic algorithms with variational search areas[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(2): 256-260.

[17] WU Jiasi, ZHANG Buhan, JIANG Yazhou, et al. Chance-constrained stochastic congestion management of power systems considering uncertainty of wind power and demand side response[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 107: 61-75.

[18] 陈哲, 张伊宁, 黄刚, 等. 计及线路随机故障的机会约束最优风电消纳模型[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 363-370.
CHEN Zhe, ZHANG Yining, HUANG Gang, et al. Chance-constrained optimal wind power accommodation point considering transmission line contingencies[J].

Power System Technology, 2019, 43(2): 363-370.

[19] YUAN H Y, LI F X, WEI Y L, et al. Novel linearized power flow and linearized OPF models for active distribution networks with application in distribution LMP[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 438-448.

[20] 李如琪, 王宗耀, 谢林峰, 等. 种群优化人工鱼群算法在输电网扩展规划的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 11-15.
LI Ruqi, WANG Zongyao, XIE Linfeng, et al. Population optimization artificial fish school algorithm applied in transmission network expansion planning[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 11-15.

[21] 陈浩, 李莉, 董新, 等. 考虑风险重叠度最小化的多电压等级检修计划协同优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 93-101.
CHEN Hao, LI Li, DONG Xin, et al. Optimization of maintenance scheduling of multiple voltage level integrated with the risk overlap degree minimization[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 93-101.

[22] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002(11): 32-38.
LI Xiaolei, SHAO Zhijiang, QIAN Jixin. An optimizing method based on autonomous animats: fish-swarm algorithm[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2002(11): 32-38.

[23] 陈程, 陈星莺, 张健钊, 等. 考虑分时电价的地源热泵系统随机运行优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 57-64.
CHEN Cheng, CHEN Xingying, ZHANG Jianzhao, et al. Stochastic operational optimal strategy for ground source heat pump system under TOU price[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 57-64.

[24] 李沐珂, 张靠社. 计及分布式光伏发电的分时电价模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(4): 74-78.
LI Muke, ZHANG Kaoshe. Research on TOU pricing model taking account of distributed photovoltaic generation[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(4): 74-78.

收稿日期：2019-09-15；　修回日期：2019-11-13

作者简介：

赵丽萍(1973—)，女，硕士，高级工程师，研究方向为智能分布配电自动化和综合能源系统；E-mail: zhaoliping2015@126.com

张书伟(1986—)，男，硕士，工程师，主要研究方向为配网自动化和管理技术；

张雪岩(1991—)，男，硕士，助理工程师，研究方向为配电自动化。

(编辑　张爱琴)