

DOI: 10.7667/PSPC171519

# 基于改进万有引力搜索算法的住宅区微网优化

吴国庆<sup>1,2</sup>, 霍伟<sup>1</sup>, 茅靖峰<sup>2</sup>, 张旭东<sup>2</sup>, 宋晨光<sup>2</sup>

(1. 南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019; 2. 江苏省风能应用技术工程中心, 江苏 南通 226019)

**摘要:** 微网容量优化是微网建设中的重要环节。针对目前住宅区微网经济性、稳定性、气象匹配性较差的问题, 提出了一种多目标的优化方法。首先, 给出了优化对象的目标函数和约束条件, 提出了一种负载分类方法, 设计了一种用于气象跟踪的风光互补组合系数, 并分三个层次建立优化的数学模型。其次, 利用杂交粒子群算法和风光互补组合系数改进万有引力搜索算法, 分析网内负载的使用情况, 求得微网内风/光/柴/储的最优配置组合。最后, 从经济性、气象跟随性、网内能源结构和负载波动承受能力方面对比分析四种算例。算例验证了模型的可靠性。

**关键词:** 微网; 万有引力搜索算法; 杂交粒子群算法; 优化配置; 风光互补

## Optimization allocation of residential districts' micro-grid via improved gravitational search algorithm

WU Guoqing<sup>1,2</sup>, HUO Wei<sup>1</sup>, MAO Jingfeng<sup>2</sup>, ZHANG Xudong<sup>2</sup>, SONG Chenguang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;

2. Jiangsu Engineering Research Center for Wind Energy Application, Nantong 226019, China)

**Abstract:** Optimization allocation plays an important role in micro-grid's construction. An optimization method for multiple targets is proposed with the consideration of economy, stability and weather following of residential districts. Firstly, a set of wind-solar complementary coefficients for weather tracking and the mathematical model through three ranks are designed after giving the objective functions and constraint conditions. Besides that, a method for loads classification is put forward. Secondly, the crossbreeding particle swarm optimizer and the wind-solar complementary coefficient are used to improve the gravitational search algorithm, and an optimization allocation of wind driven generator, solar panel, diesel and storage battery is obtained after analyzing distribution of loads in the micro-grid. Finally, four cases are compared and analyzed in terms of economy, weather following, domestic energy structure and load fluctuation endurance. The result verifies the reliability of the proposed model.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61273151, No. 61004053, and No. 51376096).

**Key words:** micro-grid; gravitational search algorithm; crossbreeding particle swarm algorithm; optimization allocation; wind-solar complementary

## 0 引言

随着电网规模的增长和国民经济对电力的依赖, 电力的清洁生产和系统安全运行受到了日益广泛的关注。微网是一种基于分布式电源(Distributed

Generation, DG)的小型电网技术, 可为网内用户提供清洁电能。

微网容量优化是微网应用中的重要环节<sup>[1]</sup>。目前, 针对智能住宅微网的案例较少, 技术也还不够成熟。在研究微网配置问题时, 常使用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)或粒子群算法(Particle Swarm Optimizer, PSO)求解, 但存在收敛速度慢、易陷入局部最优等缺陷<sup>[2-4]</sup>。文献[5]采用退火遗传算法, 获得了更经济的全局最优解, 但没有考虑到DG变化对微网系统的影响; 文献[6]通过实时跟踪的方法, 提高了优化的准确性, 但需要大量的经验数据;

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(61273151, 61004053, 51376096); 江苏省科技厅政策引导类计划项目(产学研合作)-前瞻性联合研究项目资助(BY2015047-04); 南通市科技计划项目资助(GY12016042); 南通市人才引进项目资助(17R11)

文献[7-8]采用多目标粒子群算法, 改变寻优方式, 但缺少与常规方案的比较; 文献[9-10]改进 GA 或 PSO, 采用实时电价的方法, 提高微网的运行能力, 但影响了微网的稳定性; 文献[11-12]考虑负荷响应特性, 分析负载对微网的影响, 但工程的造价较高; 文献[13]考虑风光互补, 并使用超级电容, 提高了微网的响应能力, 但当气象条件发生变化时应对能力不足; 文献[14-15]细分 DG 功能, 从储能的角度改进优化模型, 但微网的后期维护成本较高。

万有引力搜索算法 (Gravitational Search Algorithm, GSA) 是近年提出的一种基于牛顿万有引力定律的新型算法<sup>[16-17]</sup>, 日前, 针对该算法的研究较少。文献[18]通过 GSA 在微网中不同应用场景的比较分析, 证明了该算法处理微网优化配置问题的优越性; 文献[19]通过反向学习机制和精英策略改进 GSA, 证明了改进方法的合理性。为此, 本文进一步改进该算法, 并将其应用到住宅区微网案例中, 探讨该算法针对微网容量优化问题的可行性。

传统方法有效提高了微网的 DG 的配置能力, 但在优化的过程中也存在模型不匹配、气象跟随性差等不足。本文以典型的住宅区为分析对象, 以微网的经济性、稳定性为优化目标, 对网内负载进行分类, 并考虑风光互补特性, 设计了一种用于气象匹配的风光互补组合系数。在此基础上引入杂交粒子群算法 (Crossbreeding Particle Swarm Optimizer, CPSO) 改进 GSA, 并求解微网的容量优化问题。

## 1 数学模型

微网简化模型如图 1 所示。其中, 风力发电机 (Wind Turbine, WT)、太阳能电池板 (Photovoltaic Cell, PV)、柴油机 (Diesel Generator, DEG) 和蓄电池组 (Battery, BAT) 分别通过各自的整流器或逆变器接入微网母线。同时, 公共电网母线也与负载相连。

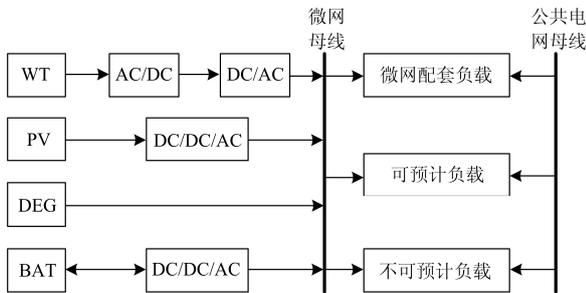


图 1 微网简化模型

Fig. 1 Micro-grid's simplified model

对优化配置的数学模型分三个层次分别设计。第一层为电网层, 以经济和环境的最优解为目标;

第二层为负载层, 以实现系统的稳定性为目标; 第三层为气象匹配层, 以提高与气象的匹配度为目标。

### 1.1 电网层的数学模型

#### 1.1.1 目标函数

考虑设备成本  $C_{eq}$ 、运营成本  $C_{op}$  和环保成本  $C_{ev}$ <sup>[9-11]</sup>。  $(N, N_i, t)$  表示一个  $N \times N_i \times t$  的向量, 其中  $N$  表示 DG 序号向量, 其取值限于 1、2、3、4, 分别表示风力发电机、太阳能电池板、柴油机和蓄电池组;  $N_i$  表示第  $N$  种类型 DG 中第  $i$  台,  $t$  表示从启用开始计算的时间。优化函数  $C_1(t)$  可表示为

$$C_1(t) = C_{eq} + C_{op}(t) + C_{ev}(t) \quad (1)$$

$$C_{eq} = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{N_k} \left( \frac{C_{in}(k, i) \times r \times (1+r)^{n(k, i)}}{r \times (1+r)^{n(k, i)} - 1} + q \times U(k, i) \right) \quad (2)$$

$$C_{op}(t) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{N_k} [k_{om}(k, i) \times P(k, i, t)] + k_o P_{load}(t) \quad (3)$$

$$C_{ev}(t) = \sum_{i=1}^{N_d} \sum_{p=1}^m k_m \times Q_i(m, t) \quad (4)$$

式中:  $N_k$  为第  $k$  种 DG 的数量;  $r$  为贴现率;  $q$  为运行年数;  $n(k, i)$ 、 $k_{om}(k, i)$ 、 $U(k, i)$  分别为第  $k$  种、第  $i$  个 DG 的使用寿命、运行维护系数和年检修成本;  $P(k, i, t)$  为  $t$  时刻第  $k$  种、第  $i$  个 DG 的功率;  $k_o$  为微网停电惩罚系数;  $P_{load}(t)$  为  $t$  时刻的负载功率;  $N_d$  为柴油发电机的数量;  $m$  为污染物的种类;  $k_m$  为第  $m$  种污染物的惩罚系数;  $Q_i(m, t)$  为  $t$  时刻第  $m$  类污染物的排放量;  $C_{in}(k, i)$  为第  $k$  种 DG 的单位安装成本系数<sup>[11]</sup>, 并有

$$C_{in}(k, i) = \sum_{y=1}^q \frac{A(k, i)}{(1+r)^y} - \frac{A(k, i) \times \{n(k, i) \times [r_c(k, i) + 1] - q\}}{n(k, i) \times (1+r)^q} \quad (5)$$

式中,  $A(k, i)$ 、 $r_c(k, i)$  分别为第  $k$  种第  $i$  个 DG 的初装成本和使用寿命。

#### 1.1.2 约束条件

##### (1) 功率平衡约束

$$\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{N_k} P(k, i, t) = P_{load}(t) + P_{loss}(t) + P_B(t) + P_E(t) \quad (6)$$

式中,  $P_{loss}(t)$ 、 $P_B(t)$ 、 $P_E(t)$  分别为在  $t$  时刻的网损、蓄电池输出功率 (其充电时为负值、放电时为正值)、电网主网补充功率。

##### (2) DG 输出功率

$$P_{min}(k, i) \leq P(k, i) \leq P_{max}(k, i) \quad (7)$$

式中,  $P_{min}(k, i)$ 、 $P(k, i)$ 、 $P_{max}(k, i)$  分别为第  $k$  种第  $i$  个 DG 的最小输出功率、输出功率和最大输出功率。

##### (3) 蓄电池约束

$$P_{B\min} \leq P_B(t) \leq P_{B\max} \quad (8)$$

$$\text{SOC}_{\min}(t) \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}_{\max}(t) \quad (9)$$

式中:  $P_B(t)$ 、 $P_{B\min}$ 、 $P_{B\max}$  分别为  $t$  时刻蓄电池组的输出功率及其下限和上限;  $\text{SOC}(t)$ 、 $\text{SOC}_{\min}(t)$ 、 $\text{SOC}_{\max}(t)$  分别为  $t$  时刻蓄电池组剩余容量及其下限和上限, 进一步描述参见文献[19]。

(4) 使用寿命约束

$$q(k, i) \leq n(k, i) \quad (10)$$

式中,  $q(k, i)$  为第  $k$  种第  $i$  个 DG 的使用时间。

## 1.2 负载层的数学模型

### 1.2.1 负载类型分类

传统的优化方法对特定负载分析的不足, 导致微网系统稳定性降低。本文将负载分为微网配套负载、可预计负载和不可预计负载, 从而达到合理分配网内电能的目的。 $(a, b, c, T)$  表示一个  $a \times b \times c \times T$  的向量, 其中  $a$  表示用户数;  $b$  表示电器种类数;  $c$  表示运行状态系数; 将一天分为 24 个时段,  $T$  表示运行时段, 且有  $0 \leq c \leq 1$ 。

微网配套负载是指在微网建设时特别定制的负载。根据负载接受调配的程度, 再将该类负载分为可切断负载、可降功率负载和不可切断负载。可切断负载为当蓄电池组电量不足时, 可切断供电的负载。可降功率负载为在电量不足时, 可改变功率继续运行的负载, 此时的  $c_{1,2}$  表示切换后功率与最大额定功率之间的比值。不可切断负载为系统中的关键负载, 在蓄电池组电量不足时仍需通过电网主网提供电量。

可预计负载为微网内功率、使用频率可被线性表示出来的负载, 这里分为季节性负载和非季节性负载。季节性负载指的是功率和使用频率会随着季节变化而变化的负载,  $c_{2,1}$  表示功率或使用频率变化后与额定功率或最大使用率之间的比值; 非季节性负载是指功率、使用频率不会随季节发生显著变化的负载。

不可预计负载为微网内使用功率、使用频率不能被线性表示出来的负载; 此时  $c_3$  表示用户使用的概率值。

### 1.2.2 目标函数

考虑微网配套负载平均功率  $C_{ma}(T)$ 、可预计负载平均功率  $C_p(T)$  和不可预计负载平均功率  $C_{up}(T)$ 。设电量总缺额为  $E_E(T)$ , 以需另付电费最小为优化目标  $C_2$ 。有

$$C_2(T) = \min E_E(T) \times H \times P_r = [C_{ma}(T) + C_p(T) + C_{up}(T) - P_{Bout}(T)] \times H \times P_r \times 3600 \quad (11)$$

$$C_{ma}(T) = \sum_{a=1}^h \sum_{b=1}^g \sum_{c=1}^f [P_{1,1}(a, b, T) + c_{1,2} \cdot P_{1,2}(a, b, c, T) + P_{1,3}(a, b, T)] \quad (12)$$

$$C_p(T) = \sum_{a=1}^h \sum_{b=1}^g [c_{2,1} \times P_{2,1}(a, b, c, T) + P_{2,2}(a, b, T)] \quad (13)$$

$$C_{up}(T) = \sum_{a=1}^h \sum_{b=1}^g [c_3 \times P_3(a, b, c, T)] \quad (14)$$

式中:  $H$  为系统运行的小时数;  $P_r$  为实时电价;  $P_{Bout}(T)$  为蓄电池功率;  $g$ 、 $h$  分别为  $T$  时段参与运行的电器种类数和用户数;  $f$  为负载切换运行模式的次数;  $P_{1,2}(a, b, c, T)$ 、 $P_{2,1}(a, b, c, T)$ 、 $P_3(a, b, c, T)$  分别表示在  $T$  时段满足条件  $c$ ,  $a$  用户  $b$  电器的可降功率负载、季节性负载和不可预计负载的额定功率;  $P_{1,1}(a, b, T)$ 、 $P_{1,3}(a, b, T)$ 、 $P_{2,2}(a, b, T)$  分别表示在  $T$  时段,  $a$  用户  $b$  电器可切断负载、不可切断负载运行段的平均功率和非季节性负载的额定功率。

### 1.2.3 约束条件

$$\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{N_k} P(k, i, t) + P_E(t) > \sum_{a=1}^h \sum_{b=1}^g P(a, b) \quad (15)$$

式中:  $P_E(t)$  为  $t$  时刻的公网主网功率;  $P(a, b)$  为  $a$  用户  $b$  电器的额定功率。

## 1.3 气象匹配层的数学模型

针对微网系统与气象条件不匹配的问题, 设计了一种风光互补组合系数, 使微网内的风电、光电占比满足气象条件。

计算第  $n$  个月的风速均值  $v_{Mn}$ 、年风速均值  $v_Y$ , 第  $n$  个月的辐射量均值  $G_{Mn}$ 、年辐射量均值  $G_Y$ 。气象条件参数  $\alpha_n$  可表示为

$$\alpha_n = \frac{v_{Mn} / v_Y}{G_{Mn} / G_Y} \quad (16)$$

计算 12 个月的  $\alpha_n$  值; 记单台风力发电机均摊到每月的购置成本为  $M_{WTn}$ , 年均购置成本为  $M_{WTY}$ ; 单台太阳能电池板均摊到每月的购置成本为  $M_{PVn}$ , 年均购置成本为  $M_{PVY}$ ; 单台风力发电机的月均功率为  $P_{WTn}$ , 年均功率为  $P_{WTY}$ ; 单台太阳能电池板的月均功率为  $P_{PVn}$ , 年均功率为  $P_{PVY}$ ; 经济效率参数  $\beta_n$  可表示为

$$\beta_n = \frac{\frac{M_{WTn}}{P_{WTn}} / \frac{P_{WTn}}{P_{WTY}}}{\frac{M_{PVn}}{P_{PVn}} / \frac{P_{PVn}}{P_{PVY}}} \quad (17)$$

计算 12 个月的  $\beta_n$  值; 再令

$$\delta_n = m_1 \alpha_n + m_2 \beta_n \quad (18)$$

$$m_1 + m_2 = 1 \quad (19)$$

$$0 < m_1 < 1 \quad (20)$$

在此定义参考值  $\delta_n$  为风光互补组合系数, 它表示一个综合了气象因素和经济因素的风力发电机与太阳能电池板的投入比值。  $m_1$  和  $m_2$  为制约  $\delta_n$  取值的两个影响因子:  $m_1$  的值越大, 表示气象条件的影响因子越高;  $m_2$  的值越大, 表示经济效率的影响因子越高。

## 2 算法模型及其改进

### 2.1 万有引力搜索算法

万有引力搜索算法是近年来提出的算法, 具有很强的全局搜索能力。该算法引入牛顿万有引力定律, 将算子比作天体, 模拟其在宇宙中的运动规律, 在求解过程中不断增加较优算子的质量, 使算子持续飞向更优解。

以  $m_i(t)$  表示  $t$  时刻粒子的质量。在  $t$  时刻粒子的惯性质量  $M_i(t)$  可表示为

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{i=1}^n m_i(t)} \quad (21)$$

再以  $f_i(t)$  表示第  $i$  个粒子的适应度值,  $\min[f_i(t)]$  为第  $n$  个粒子适应度中的最小值,  $\max[f_i(t)]$  为第  $n$  个粒子适应度中的最大值, 有

$$m_i(t) = \frac{f_i(t) - \min[f(t)]}{\max[f(t)] - \min[f(t)]} \quad (22)$$

在  $t$  时刻第  $k$  维, 粒子  $a$  受到粒子  $b$  的引力  $F_{ab}^k(t)$  可表示为

$$F_{ab}^k(t) = G(t) \frac{M_a(t) \times M_b(t)}{\|N_a(t), N_b(t)\|_2 + \varepsilon} [x_b^k(t) - x_a^k(t)] \quad (23)$$

式中:  $G(t)$  表示在  $t$  时刻的万有引力常数;  $|N_a(t), N_b(t)|$  表示粒子  $N_a(t)$  和  $N_b(t)$  之间的欧氏距离;  $\varepsilon$  为一个非常小的常量;  $x_a^k(t)$  和  $x_b^k(t)$  分别表示在  $t$  时刻  $k$  维两个粒子的位置。在  $t+1$  时刻, 第  $k$  维粒子位置  $x_i^k(t+1)$  可表示为

$$x_i^k(t+1) = x_i^k(t) + v_i^k(t+1) \quad (24)$$

式中:  $x_i^k(t)$  表示在  $t$  时刻第  $k$  维粒子的位置;  $v_i^k(t+1)$  表示在  $t+1$  时刻第  $k$  维粒子的更新速度, 其更新公式可表示为

$$v_i^k(t+1) = \text{rand}_i \times v_i^k(t) + a_i^k(t) \quad (25)$$

式中:  $\text{rand}_i$  表示一个  $[0, 1]$  中的随机数;  $v_i^k(t)$  表示在  $t$  时刻第  $k$  维粒子的更新速度;  $a_i^k(t)$  表示在  $t$  时刻  $i$  粒子的更新加速度, 可表示为

$$a_i^k(t) = \frac{F_i^k(t)}{M_i(t)} \quad (26)$$

式中,  $F_i^k(t)$  为在  $t$  时刻  $i$  粒子  $k$  维所受到的作用力的合力。

相对于传统的优化算法, GSA 不容易陷入局部最优, 但容易出现局部搜索能力不足的情况。本文通过改进速度、位置更新方式的方法, 并通过风光互补组合系数改进 GSA, 使其搜索到更优解。

### 2.2 算法优化改进

#### 2.2.1 基于杂交的粒子群算法的引入

GA 和 PSO 是求解微网容量优化配置问题时的常用算法, CPSO 借鉴 GA 中的杂交概念, 并选择 PSO 作为算法主体, 改进 GSA。

引入杂交概念, 更新粒子位置。将式(24)中产生的粒子作为父代粒子放入杂交池, 使粒子两两杂交, 产生子代粒子并使其代替父代粒子。子代粒子的位置为

$$gx = \text{rand} \times hx(1) + (1 - \text{rand}) \times hx(2) \quad (27)$$

式中:  $gx$  表示子代粒子的位置;  $hx(1)$  和  $hx(2)$  表示两个参与杂交的父代粒子的位置,  $\text{rand}$  表示一个  $[0, 1]$  中的随机数。子代粒子  $gv$  的速度为

$$gv = \frac{hv(1) + hv(2)}{|hv(1) + hv(2)|} |hv(1)| \quad (28)$$

式中,  $hv(1)$  和  $hv(2)$  为两个参与杂交的父代粒子的速度。

此外, 引入 PSO 中的速度更新方法:

$$v_i^k(t+1) = w \cdot v_i^k(t) + c_1 \cdot \text{rand}_{i1} [p_i^d - x_i^k(t)] + c_2 \cdot \text{rand}_{i2} [g_i^d - x_i^k(t)] \quad (29)$$

式中:  $w$  为 PSO 中的惯性权重;  $\text{rand}_{i1}$  和  $\text{rand}_{i2}$  为两个  $[0, 1]$  中的随机数;  $c_1$  和  $c_2$  为 PSO 中的学习因子;  $p_i^d$  和  $g_i^d$  分别为粒子的个体最优和群体最优。利用式(29)改写 GSA 中的速度公式(25), 有

$$v_i^k(t+1) = w \cdot \text{rand}_i \cdot v_i^k(t) + c_1 \cdot \text{rand}_{i1} [p_i^d - x_i^k(t)] + c_2 \cdot \text{rand}_{i2} [g_i^d - x_i^k(t)] + a_i^k(t) \quad (30)$$

#### 2.2.2 风光互补组合系数的限制

选择风力发电机和太阳能电池板, 依据式(16)一式(20)计算风光互补组合系数的初始值。  $m_1$  每次更新 0.02 以获得不同的气象、经济占比所对应的  $\delta_n$  值。当更新群体最优值不发生变化时即可视为达到精度要求, 此时更新  $m_1$  和  $m_2$  值。

$$\begin{cases} m_1(n+1) = m_1(n) - 0.02 \\ m_2(n+1) = m_2(n) + 0.02 \end{cases} \quad (31)$$

式中:  $m_1(n)$ 、 $m_2(n)$  为第  $n$  次更新后的  $m_1$ 、 $m_2$  值;  $m_1(n+1)$ 、 $m_2(n+1)$  为第  $(n+1)$  次更新后的  $m_1$ 、 $m_2$  值。

改进的万有引力搜索算法流程图如图 2 所示。

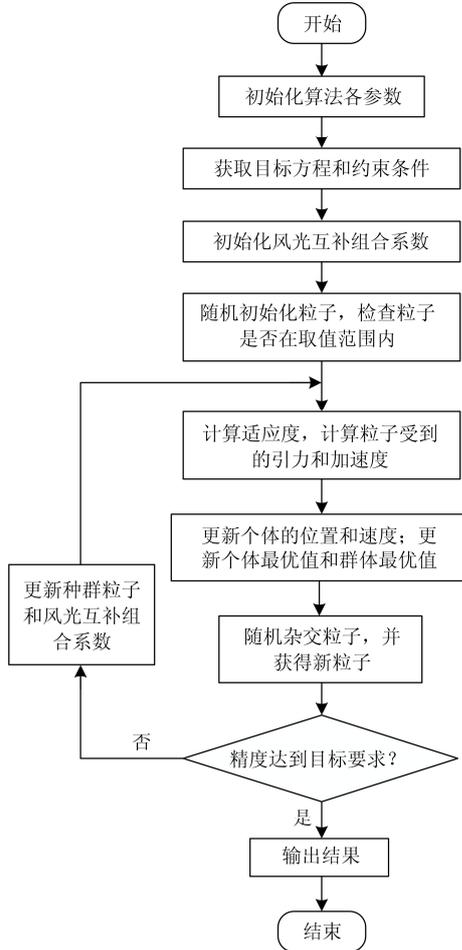


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

### 3 案例分析

#### 3.1 算例参数设置

以南通市崇川区某住宅区为研究对象, 分析该配置方案的优化能力。选择 DG 的相关参数如表 1 所示。

表 1 DG 相关参数

Table 1 DGs' parameters

DG 种类	功率/kW	运行维护系数/(¥·kWh <sup>-1</sup> )	使用寿命/年
PT	10	0.029 0	20
PV	1	0.009 6	20
DEG	5	0.010 0	15
BAT	2.4	0.009 0	5

其中, 风力发电机的启动风速为 2.5 m/s, 额定风速为 12.0 m/s; 柴油机产生的污染物及其惩罚系数如表 2 所示。

表 2 柴油机污染惩罚

Table 2 Penalty coefficients of diesel engine pollution

污染物种类	$k_m/(\text{¥}\cdot\text{kg}^{-1})$	柴油机排放量/(kg·kW <sup>-1</sup> )
NO <sub>x</sub>	26.04	$2.2 \times 10^{-2}$
SO <sub>2</sub>	6.138	$4.6 \times 10^{-4}$
CO <sub>2</sub>	0.086 8	$1.4 \times 10^{-3}$

选择常用电器, 其相关参数如表 3 所示。

表 3 微网使用电器明细

Table 3 Electric appliances in the micro-grid

电器类型	电器名称	功率/kW	数量
微网配套负载 (可切断负载)	照明类装饰景观	0.08	20
微网配套负载 (可降功率负载)	装饰喷泉	5	2
	显示气象情况的景观灯	0.02	15
微网配套负载(不可切断负载)	公告板	0.12	2
	应急灯	0.02	30
	不可切断照明光源 微网系统关键负载、预留功率	10.00	1
可预计负载(季节性负载)	空调	1.20	60
	日光灯	0.04	350
	风扇	0.07	30
	取暖器	1.50	30
可预计负载(非季节性负载)	电冰箱	0.13	30
	洗衣机	0.36	30
	电饭煲	0.60	30
	电吹风	0.50	40
	微波炉	1.00	30
	电磁炉	1.50	50
	油烟机	0.24	30
	电热水器	1.20	30
	饮水机	0.60	30
	吸尘器	1.10	30
不可预计负载	彩电	0.24	50
	计算机	0.30	50
	家庭影院	0.25	20

对于装饰喷泉和显示气象情况的景观灯, 设定其  $c$  的取值为

$$c = \begin{cases} 1 & 0.8 \leq \frac{SOC(t)}{SOC_{\max}(t)} \leq 1 \\ 0.5 & 0.6 \leq \frac{SOC(t)}{SOC_{\max}(t)} < 0.8 \\ 0 & \frac{SOC(t)}{SOC_{\max}(t)} < 0.6 \end{cases} \quad (32)$$

对于空调,其12月至2月、6月至8月的 $c$ 值取0.5,其余时间的 $c$ 值取0.1;对于日光灯,其 $c$ 值为

$$c = \frac{24 - t_{ss} + t_{sr}}{24} \quad (33)$$

式中: $t_{ss}$ 表示当地日落时间; $t_{sr}$ 表示当地日出时间。

对于风扇,其5月至9月的 $c$ 值为0.3,其余时间的 $c$ 值为0;对于取暖器,其11月至3月的 $c$ 值为0.3,其余时间的 $c$ 值为0;对于不可预计负载,为了确保留有足够电量,取 $c=1$ 。

使用 HOMER 软件,选取5月作为典型月,仿真得到负载功率波动情况如图3所示。

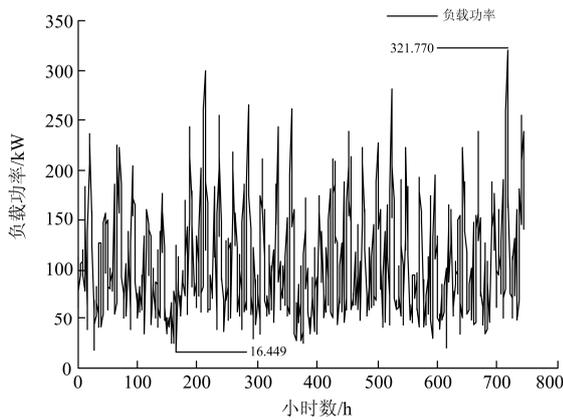


图3 仿真功率波动曲线

Fig. 3 Simulation power fluctuation curve

### 3.2 算例验证分析

设计4种算例,验证模型的有效性,并计算10年内微网所需的总费用和总费用中的后期运营维护费用。由于在建设过程中存在货币价值的变化,因此需考虑贴现率对投资价值产生的影响。为消除贴现率带来的误差,取 $r$ 为0.1<sup>[20]</sup>。算例1使用有CPSO参与改进的GSA,考虑风光互补组合系数并全局搜索该系数的所求得的所有解,即 $m_{1max}=1$ 、 $m_{1min}=0$ ,选取费用最高和最低解作为特殊解,分别记作算例1(1)和算例1(2)。算例2使用未经改进的GSA,并将在算例1中的特殊解所对应的 $m_1$ 值代入到算例2中求解,所得结果分别记作算例2(1)和算例2(2)。算例3使用有CPSO参与改进的GSA,但不使用风光互补组合系数。算例4使用未经改进的GSA,且不考虑风光互补组合系数。四种算例所得结果如表4所示。

仿真结果显示,算例1(2)的总费用最低,算例4的总费用最高,这两种算例的总费用相差1.89%,因此可以认为所有算例所需要的总费用是相近的。

表4 算例仿真结果

Table 4 Simulation results of numerical examples

算例编号	$m_1$	WT/台	PV/块	DEG/台	BAT/套	总费用/万元	运营维护费用/万元
1(1)	0.64	12	183	34	261	545.28	75.23
1(2)	0.20	10	199	35	264	544.22	74.34
2(1)	0.64	11	173	42	293	552.86	86.39
2(2)	0.20	14	162	39	272	550.98	84.98
3	—	6	110	76	229	547.03	123.26
4	—	8	148	59	288	554.48	105.52

但从后期的运营维护成本看,算例1所需费用明显低于其他算例。以运营维护成本最低的算例1(2)为例,它与算例1(1)、2(1)、2(2)、3、4的运营维护成本分别相差1.20%、16.21%、14.31%、65.81%、41.94%。可以认为,各算例的后期运营维护成本差距较大,其中使用风光互补组合系数的算例1、2可明显降低后期成本,而算例1所给出的优化结果又明显优于算例2。

从经济性的角度看,虽然10年的总成本近似相同,但经过改进的算例可明显降低后期运营维护成本,对于需要长期依靠微网运行的住宅区案例,其后期运营成本越低,可以预见微网寿命内的总成本也会进一步降低。因此,算例1中所得出的结论是经济最优解。

对各算例的微网性能进行分析。首先,分析风能、光能的在总能源中的占比,研究它们与气象条件的匹配程度。以风速偏移表示月均风速和年均风速的比值,辐射偏移表示月均辐射与年均辐射的比值。其仿真结果如图4、图5所示。

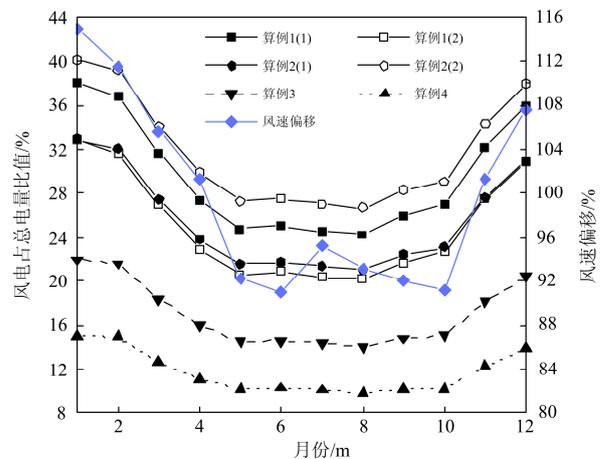


图4 风电占比与风速偏移曲线

Fig. 4 Wind power proportion and wind velocity offset curve

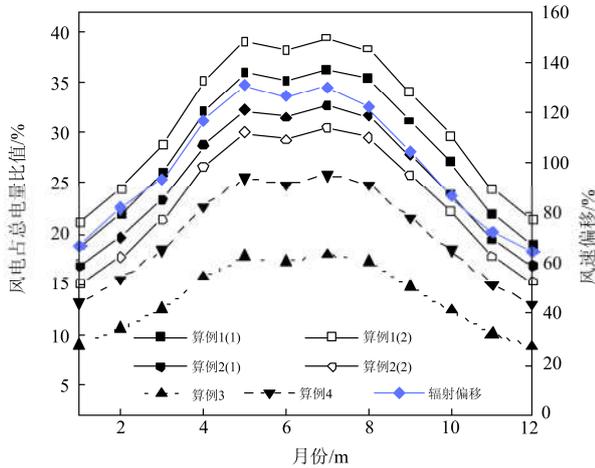


图 5 光电占比与辐射偏移曲线

Fig. 5 Photoelectric proportion and radiation offset curve

如图 4, 4 种算例中算例 1 和算例 2 的曲线斜率更接近于风速偏移曲线斜率, 表明加入了风光互补组合系数能够更好地跟踪建设地的风场条件。图 5 中, 四种算例中算例 1 和算例 2 的曲线斜率更接近于辐射偏移曲线斜率, 表明风光互补组合系数也在一定程度上改善了微网的光电性能。

然后, 依据表 3 中的负载信息, 分析微网在正常运行时 DG 的功率变化情况, 探究在气象条件发生变化时各算例的应对能力, 仿真结果如图 6—图 9 所示。

对比算例 1 的两种解, 柴油机发电量和蓄电池储量相似, 但算例 1(1)的风电占比更高, 微网内各 DG 的能源占比也更平均; 当气象条件发生波动时, 算例 1(1)所受的波动更小。同时, 算例 1(1)、(2)的柴油机的发电占比分别为 26.19%、26.74%, 在风/光/柴/储能源结构中较为合理, 且在不发生气象、负载波动时, 柴油机剩余柴油为油箱满油状态的 50.28%和 50.07%, 因此当发生主电网故障、地质、气象灾害等突发情况时, 该算例具备应对能力。

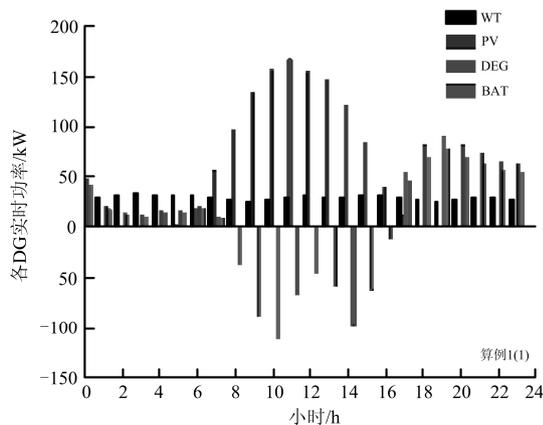


图 6 算例 1 的 DG 功率变化

Fig. 6 DG's power change in example 1

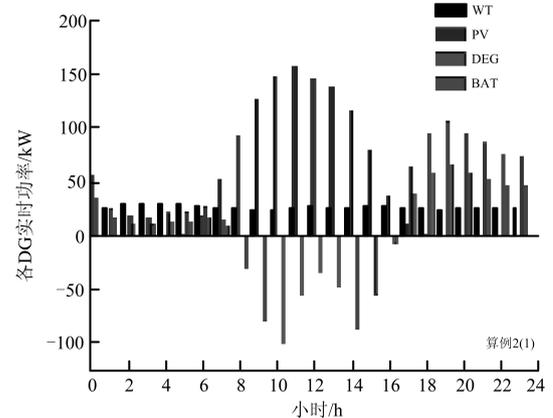
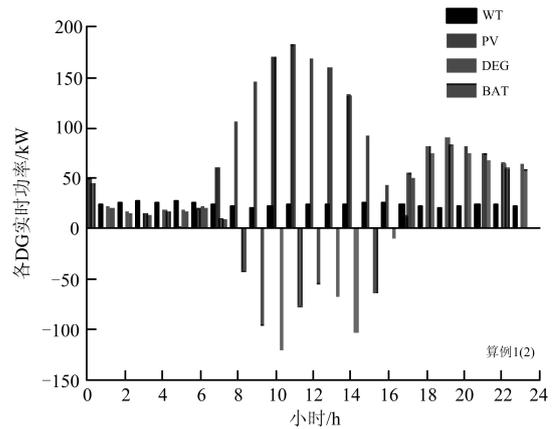


图 7 算例 2 的 DG 功率变化

Fig. 7 DG's power change in example 2

在算例 2 中, 两种方案也拥有相似的柴油机发电能力, 但算例 2(2)中的风力、光电占比更平均, 可以认为, 当气象条件发生变化时, 算例 2(2)所对应的微网具备更好应对能力。对比算例 1, 算例 2 中的蓄电池储量整体比算例 1 小, 所以算例 1 应对气象发生突变的能力比算例 2 强。算例 2(1)、(2)的柴油机发电占比分别为 31.02%、34.60%, 相对算例

1 中的两种方案有所增加, 因此算例 1 较算例 2 更环保。在不发生气象、负载波动时, 柴油机剩余柴油为油箱满油状态的 52.34%和 55.48%, 因此这两种案例也具备应对气象突变的能力。

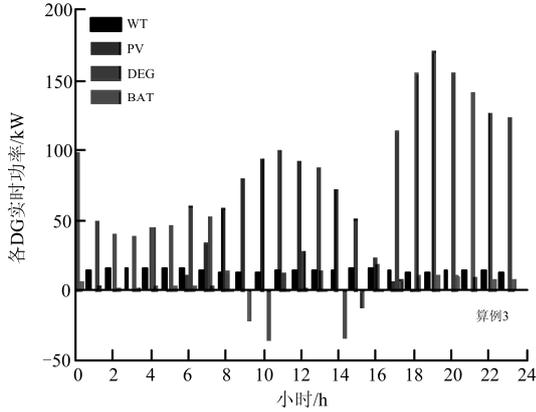


图 8 算例 3 的 DG 功率变化

Fig. 8 DG's power change in example 3

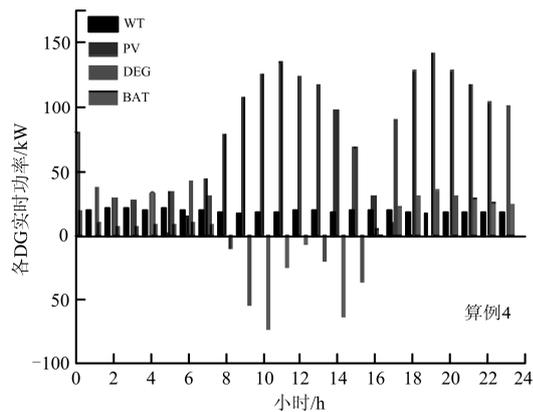


图 9 算例 4 的 DG 功率变化

Fig. 9 DG's power change in example 4

在算例 3 中, 蓄电池的电力储能较少, 且更依赖柴油机的发电。在该算例中, 柴油机的发电占比为 58.42%, 因此当电网发生突发状况时, 由于系统过分依赖柴油机发电, 需提前在蓄电池组内储备电量, 这就增大了后者的运行压力, 进而危及微网的安全性; 同时, 在正常运行的情况下, 这种方案也最不环保。在算例 4 中, 柴油机的利用率为 44.22%, 同样存在由于过分依赖柴油机而带来的风险, 增大了系统和环境压力。因此, 这两种算例相对算例 1、2 的稳定性、环保性均较差。

据此分析, 考虑稳定运行时微网内各 DG 的占比, 算例 1 是最为稳定、环保的方案。

最后, 依据图 3 中的负载波动数据, 计算在微网稳定运行时, 各算例发生负载波动时需要调用电网主网电力的概率。以小时为单位, 利用 HOMER

和 PVsyst 调取典型月中风速和太阳能辐射历史数据中的均值和极值, 并使用 Matlab, 以均值为初始值, 以极值为取值的上下限, 随机产生典型月中每小时的风速和太阳能辐射值, 设置仿真次数为 5000。假设柴油机能够稳定运行, 计算典型月内不同气象条件下微网每小时能够提供的电力。将该值与图 3 中每小时负载所需电力进行比较, 统计在各仿真中, 某负载功率值出现电力不足情况的总次数  $n_{\text{lack}}$ 。记系统需要电网主网供电的概率为  $P_{\text{lack}}$ , 该功率值出现的总次数为  $n_p$ , 有

$$P_{\text{lack}} = \frac{n_{\text{lack}}}{n_p} \quad (34)$$

计算结果如图 10 所示。

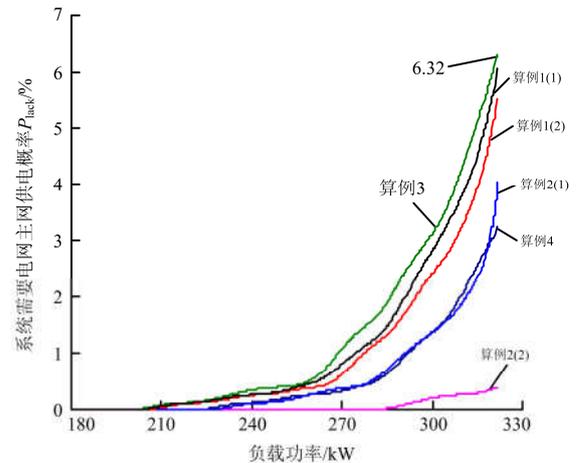


图 10 负载变化时需要电网主网供电的概率

Fig. 10 Probability of grid power supply when load changes

仿真结果显示, 除算例 2(2)外, 其余算例需调用电网主网的概率相近。在负载功率达到负载仿真波动最大值时, 各算例所需调用电网主网电力概率均不超过 6.32%。可以认为, 当负载发生变化时, 4 种算例的需要电网接入的概率均较小, 且算例 2(2)运行更稳定。

综上所述, 在 4 种算例中: 加入了风光互补组合系数并经过 CPSO 优化的算例 1 可获得经济最优解, 其气象跟随性更强, 网内 DG 功率分配更合理, 具有较强的应对气象条件发生变化的能力; 加入风光互补组合系数, 未经 CPSO 优化的算例 2 虽然需要更多费用, 但气象跟随性也较强, 当网内负载发生变化时具备良好的应对能力; 仅使用 CPSO 改进的算例 3 可获得较经济的解, 但气象跟随性较差, 网内的供能也过分依赖柴油机, 造成了环境和蓄电池组的压力; 算例 4 仅使用 GSA, 所需费用是最高的, 且气象跟随性较差, 系统稳定性也有待提高。

由算例分析可知, 对于未经优化的 GSA 很难获得较优解, 而 CPSO 可以为算法找到更优的解, 从而提升 GSA 的搜索能力。同时, 风光互补组合系数对优化解的搜索具有一定的限制作用, 可将优化结果向更符合气象条件的方向偏移。通过两种算法的共同改进, 可以为微网优化寻找到更优的解, 从而提高微网配置结果的可靠性。

## 4 结论

1) 本文结合遗传算法和粒子群算法, 利用杂交粒子群算法改进的万有引力搜索算法, 实现了微网容量优化配置的最优求解。

2) 本文提出了一种风光互补组合系数, 并利用该系数求得更稳定、更符合气象条件的解。

3) 本文设立多目标求解方案, 提出了一种负载分类方法, 获得了经济性、稳定性、气象适配性更优且更环保的优化配置模型, 为住宅微网建设提供了一种可行的方案。

## 参考文献

- [1] 任洪波, 吴琼, 邱留良, 等. 分布式能源系统可靠性评价[J]. 热力发电, 2016, 45(4): 65-69.  
REN Hongbo, WU Qiong, QIU Liuliang, et al. Reliability assessment of distributed energy system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(4): 65-69.
- [2] 江岳春, 邢方方, 庞振国, 等. 基于机会约束规划的微网运行备用优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 100-106.  
JIANG Yuechun, XING Fangfang, PANG Zhenguo, et al. Optimization configuration of operating reserve in microgrid based on chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 100-106.
- [3] YAZDI IB, ARANI A AK, GHAREHPETIANG B. Determining optimal capacity of FESS using PSO to enhance stability of microgrid after islanding mode, considering investment costs[C]// Smart Grids Conference(SGC), December 20-21, 2016, Kerman, Iran: 19-24.
- [4] 祖其武, 牛玉刚, 陈蓓. 基于改进粒子群算法的微网多目标经济运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 57-63.  
ZU Qiwu, NIU Yugang, CHEN Bei. Study on multi-objective economic operating strategy of microgrid based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 57-63.
- [5] MORADI M H, ABEDINI M, HOSSEINIAN S M. Optimal operation of autonomous microgrid using HS-GA[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 77: 210-220.
- [6] REZVANI A, IZADBAKHS H M, GANDOMKA R M. Microgrid dynamic responses enhancement using artificial neural network-genetic algorithm for photovoltaic system and fuzzy controller for high wind speeds[J]. International Journal of Numerical Modelling Electronic Networks Devices & Fields, 2016, 29(2): 309-332.
- [7] PROMME E W, ONGSAKU L W. Multi-objective optimal placement of protective devices on microgrid using improved binary multi-objective PSO[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2015, 25(11): 2621-2638.
- [8] 孙可, 段光, 李晓春, 等. 综合能源服务系统结构描述及设计优化[J]. 热力发电, 2017, 46(12): 33-39.  
SUN Ke, DUAN Guang, LI Xiaochun, et al. Structural description and design optimization for integrated energy service system[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(12): 33-39.
- [9] 王先齐, 吕智林, 汤泽琦. 基于分时电价机制的并网型微网多目标动态优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 9-17.  
WANG Xianqi, LÜ Zhilin, TANG Zeqi. Multiobjective dynamic optimal dispatching of grid-connected microgrid based on TOU power price mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 9-17.
- [10] 陈安伟, 华浩瑞, 李鹏, 等. 实时电价机制下交直流混合微网优化运行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 13-20.  
CHEN Anwei, HUA Haorui, LI Peng, et al. Optimal operation of AC/DC hybrid micro-grid based on real-time price mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 13-20.
- [11] 荆朝霞, 胡荣兴, 袁灼新, 等. 含风/光/抽水蓄能并计及负荷响应的海岛微网优化配置[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 65-72.  
JING Zhaoxia, HU Rongxing, YUAN Zhuoxin, et al. Optimization allocation of microgrid including wind turbine, solar panel and impounding reservoir[J]. Automation of Electric Power systems, 2017, 41(1): 65-72.
- [12] 杨艳红, 裴玮, 邓卫, 等. 计及蓄电池储能寿命影响的微电网日前调度优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22):

- 172-180.  
 YANG Yanhong, PEI Wei, DENG Wei, et al. Day-ahead scheduling optimization for microgrid with battery life model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 172-180.
- [13] 张蕴昕, 孙运全. 混合储能在风光互补微网中的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 93-98.  
 ZHANG Yunxin, SUN Yunquan. Control strategy of a hybrid energy storage in wind-solar hybrid generation micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 93-98.
- [14] FENG Lin, ZHANG Jingning, LI Guojie, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 86-94. DOI: 10.1186/s41601-016-0021-1.
- [15] 韩璐, 李凤婷, 周二雄, 等. 基于成本-收益的微网分布式能源优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 388-396.  
 HAN Lu, LI Fengting, ZHOU Erxiong, et al. The distributed energy optimization configuration of micro-grid based on cost-benefit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 388-396.
- [16] MARZBAN D M, GHADIM I M, SUMPE R A, et al. Experimental validation of a real-time energy management system using multi-period gravitational search algorithm for microgrids in islanded mode[J]. Applied Energy, 2014, 128(3): 164-174.
- [17] KADIRA F A, MOHAME D A, SHAREE F H, et al. An improved gravitational search algorithm for optimal placement and sizing of renewable distributed generation units in a distribution system for power quality enhancement[J]. Journal of Renewable & Sustainable Energy, 2014, 6(3): 1645-1656.
- [18] HASANIENH M. Gravitational search algorithm-based optimal control of Archimedes wave swing-based wave energy conversion system supplying a DC microgrid under uncertain dynamics[J]. Let Renewable Power Generation, 2017, 11(6): 763-770.
- [19] 李鹏, 徐伟娜, 周泽远, 等. 基于改进万有引力搜索算法的微网优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 24(19): 3073-3079.  
 LI Peng, XU Weina, ZHOU Zeyuan, et al. Optimal operation of microgrid based on improved gravitational search algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 24(19): 3073-3079.
- [20] 刘故帅, 肖异瑶, 贺禹强, 等. 考虑新能源类型的电力系统多目标并网优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 31-37.  
 LIU Gushuai, XIAO Yiyao, HE Yuqiang, et al. Multi-objective optimal method considering types of grid connected new energy of electric power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 31-37.

收稿日期: 2017-10-12; 修回日期: 2018-01-15

作者简介:

吴国庆(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能微网控制技术、风力发电技术方面研究; E-mail: wgq@ntu.edu.cn

霍伟(1993—), 男, 在读硕士, 主要从事智能微网功率预测及优化配置相关研究. E-mail: huowei1993@outlook.com

(编辑 张爱琴)