

DOI: 10.7667/PSPC170847

# 基于贝叶斯-粒子群算法的微电网优化运行

康健, 靳斌, 段秀娟, 尚小华, 栗玮

(四川大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039)

**摘要:** 针对目前微网调度难于全局最优收敛的问题, 从概率网络的角度出发, 将贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)理论与粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)相结合, 提出了基于贝叶斯-粒子群算法(BN-PSO)的微电网优化运行新策略。首先建立了微网数学模型和系统约束条件, 考虑风能和光伏系统的概率分布情况, 引入可再生因子和单位电力生产成本, 以实现微网系统满足节能减排条件下的总费用最低的优化目标。最后以一个典型的微网系统进行算例仿真分析。结果表明: BN-PSO 算法能有效解决包含随机概率事件的新能源微网优化运行问题, 是解决此类问题的一个新思路; 与目前的主流算法相比, BN-PSO 算法能克服局部最优的缺陷, 实现快速收敛。

**关键词:** 微电网; 贝叶斯网络; 粒子群算法; 优化运行; 概率分布

## Optimal operation of microgrid based on Bayesian-PSO algorithm

KANG Jian, JIN Bin, DUAN Xiujuan, SHANG Xiaohua, LI Wei

(School of Electric Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the global optimal of the day-ahead schedule for micro-grid is hard to convergence, a new optimal operation of micro-grid based on Bayesian and PSO algorithm is proposed, which combines the Bayesian Network (BN) theory with the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm from the perspective of probability network. Initially, the mathematical models of microgrid and the system constraints are established by considering the probability distribution of wind power and PV system, then the renewable factor and unit power production costs are introduced to achieve the optimization goal which contains the lowest total cost under the condition of energy conservation and emissions reduction. Finally, the simulation analysis comes from a typical microgrid system. The result shows that the BN-PSO algorithm can effectively solve the optimal operation problems of microgrid which includes random probability event, it's a new way to solve such problems; when compared with the current mainstream algorithms, the BN-PSO algorithm can overcome the defect of local optimum and achieve convergence rapidly.

This work is supported by the "Chunhui Plan" of Ministry of Education (No. Z2014076).

**Key words:** microgrid; Bayesian network; particle swarm optimization; optimal operation; probability distribution

## 0 引言

为应对气候变化、能源危机、环境恶化等全球性问题, 能源变革、能源消费转变成为了当今各国发展的重要战略<sup>[1-2]</sup>。以风能、光伏发电为主的分布式能源的大力发展, 能有效地改善环境污染指数, 减少化石燃料的使用, 实现可持续发展。微电网囊括了分布式电源、储能系统和负荷, 能较好地解决风能系统、光伏发电的随机波动性给电力系统带来的安全和稳定性影响<sup>[3-6]</sup>。因此, 微电网的优化运行

仍是近几年的研究热点。

微电网的优化运行是一个多维度、非线性的寻优问题, 目前多用智能优化算法如粒子群算法(PSO)和遗传算法(GA)等, 少有文献从概率网络的角度出发来解决这个问题。文献[7]通过对微网进行数学建模, 采用改进的自适应萤火虫算法, 以解决微网运行的寻优问题; 文献[8]采用精英策略和全局记忆, 结合反向学习机制提出改进的万有引力搜索算法, 以实现包括环境效益、网损和经济效益等多个微网优化运行目标; 文献[9-10]分别采用量子粒子群算法和改进的多目标粒子群算法, 考虑蓄电池费用对系统成本的影响, 并分别解决了分时电价机制下的

微网调度优化问题和发电成本、蓄电池损耗以及环境效益的多目标优化问题; 文献[11]以蓄电池热装置的投、切来改善风能机组反调峰的弊端, 引入隶属度函数, 采用遗传算法来达到微网各单元最佳运行方式; 文献[12]通过改进蓄电池的放电深度模型, 采用粒子群算法与遗传算法相结合的粒子群遗传混合算法, 能较好地收敛于微网运行收益最大化的目标函数; 文献[13]结合风机、光伏的随机性提出机会约束规划条件下的微网经济运行模型, 通过卷和、卷差的序列运算将随机变量转化为概率性序列, 从而计算出满足约束条件的概率, 引导微网系统确定最优的运行方式。

贝叶斯网络(BN)是一种不确定性推理方法, 广泛运用在可能性和不确定性领域<sup>[14]</sup>, 其网络结构数据学习困难的问题一直制约着贝叶斯网络理论的运用<sup>[15]</sup>。粒子群算法(PSO)操作简单、容易理解, 广泛运用于动态经济调度中, 但其收敛速度慢, 易陷入局部最优<sup>[16]</sup>。

本文从概率网络的角度出发, 建立微网各部分间的约束模型, 并以满足一定节能减排条件下的微网经济效益最优为目标函数。基于粒子群算法, 通过引入粒子更新公式来解决贝叶斯网络的结构学习问题, 而贝叶斯评分函数(Bayesian Information Criteria, BIC)反过来又优化粒子群算法, 克服粒子群算法收敛速度慢和易陷入局部最优的问题。

## 1 微电网数学模型

一个典型的微网系统框图如图 1 所示。

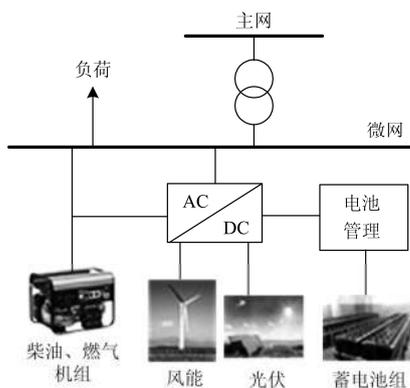


图 1 微网简化结构图

Fig. 1 Simplified structure of micro-grid

目前, 微网的主要形式是并网型微网。由于受气候条件的限制, 太阳能和风能的发电资源是随机的, 需配置一定比例的化石能源机组如柴油机、燃气机以及合理地运用储能设备来保证系统的功率平衡<sup>[17-18]</sup>。

### 1.1 光伏系统

光伏发电系统的能量来源于光照, 与光照强度和环境温度息息相关, 光伏发电系统的输出功率可以由式(1)得到<sup>[19]</sup>。

$$P_{pv} = P_{pvr} \cdot [1 + K_t (0.0256G + T - T_{ref})] \cdot \frac{G}{G_{ref}} \quad (1)$$

式中:  $P_{pv}$  为光伏发电系统的输出功率;  $P_{pvr}$  为基准条件下的额定功率;  $G$  表示实际光照强度, 基准条件下的光照强度  $G_{ref}=1\ 000\ \text{W/m}^2$ ;  $K_t=-3.7 \times 10^{-3}$  ( $1/^\circ\text{C}$ ) 为光伏面板的温度系数;  $T$  为环境温度;  $T_{ref}=25\ ^\circ\text{C}$  为参考温度。  $P_{pv}$  和  $G_{ref}$  服从  $\beta$  分布,  $P_{pv}$  的概率密度函数为

$$f(P_{pv}) = \frac{\Gamma(\delta + \varphi)}{\Gamma(\delta)\Gamma(\varphi)} \left(\frac{P_{pv}}{P_{pvmax}}\right)^{\delta-1} \left(1 - \frac{P_{pv}}{P_{pvmax}}\right)^{\varphi-1} \quad (2)$$

式中:  $\delta$  和  $\varphi$  为  $\beta$  分布的形状参数;  $P_{pvmax}$  表示光伏系统的最大输出功率。

### 1.2 风能系统

风能系统是由风的动能转换为电能的系统, 其能量的输出与风速的分布和变化情况息息相关, 而风速大约服从 Weibull 分布, 其分布函数和概率密度函数分别为式(3)和式(4)。

$$F(v) = 1 - \exp\left[-(v/c)^k\right] \quad (3)$$

$$f(v) = k/c(v/c)^{k-1} \exp\left[-(v/c)^k\right] \quad (4)$$

式中:  $v$  表示风速;  $k$  为形状参数;  $c$  为尺度参数。

风能系统的输出功率采用式(5)描述<sup>[20]</sup>。

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{in}, v > v_{out} \\ v^3 \left( \frac{P_{wr}}{v_r^3 - v_{in}^3} \right) - P_{wr} \left( \frac{v_{in}^3}{v_r^3 - v_{in}^3} \right) & v_{in} \leq v < v_r \\ P_{wr} & v_r \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_w$  为风力发电机组的输出功率;  $P_{wr}$  为风机的额定输出功率;  $v$  为每个时间段的实时风速;  $v_r$ 、 $v_{in}$  和  $v_{out}$  分别为额定、切入和切出风速。

### 1.3 柴油发电机组

对于可再生能源, 其电能的生产取决于资源, 而不能随需求的变化而快速响应, 因此, 柴油发电机组和储能系统的设置才能使系统更加可靠和有效地运行。柴油发电机组能有效缓解电能高峰需求时储能系统电池快速充放电带来的损耗, 但应保证其避免空载和轻载的情况以保证高效运行。其耗量特性由式(6)表示。

$$F(t) = \alpha \cdot P_{dieselr} + \beta \cdot P_{diesel}(t) \quad (6)$$

式中:  $F(t)$  为油耗量;  $P_{dieselr}$  表示柴油发电机的额定

功率;  $P_{\text{diesel}}(t)$  表示  $t$  时刻柴油发电机的实际发电功率; 油耗量系数  $\alpha$  和  $\beta$  分别为 0.24 和 0.084。

#### 1.4 逆变器

逆变器不仅是可再生能源与交流电网之间的接口, 而且还承担着保证并网侧电能质量的任务; 但是在逆变的过程中, 仍然存在效率和损耗的问题, 逆变效率可以由方程(7)描述。

$$\eta_{\text{inv}} = \frac{P}{P(\gamma P + 1) + P_x} \quad (7)$$

式中:

$$P = \frac{P_{\text{inv}}}{P_{\text{invr}}} \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{1}{\eta_{100}} - P_x - 1 \quad (9)$$

$$P_x = 1 - 99 \left( \frac{10}{\eta_{10}} - \frac{1}{\eta_{100}} - 9 \right)^2 \quad (10)$$

$\eta_{\text{inv}}$  为逆变效率;  $\eta_{10}$  和  $\eta_{100}$  是由厂家提供的 10% 和 100% 额定功率时的逆变器效率;  $P_{\text{inv}}$  为逆变器输出功率;  $P_{\text{invr}}$  为逆变器额定功率。

#### 1.5 燃气轮机

燃气轮机与柴油发电机类似, 可以作为满足需求侧响应的持续电源。其电能生产方式为热力发电, 过程中消耗燃气, 其燃料成本  $C_{\text{gas}}$  由式(11)表示。

$$C_{\text{gas}} = \frac{C_a}{LHV_{\text{ng}}} \sum \frac{P_{\text{gas}}(t) \Delta t}{\eta_{\text{gas}}(t)} \quad (11)$$

式中:  $C_a$  为燃气单价(元/ $\text{m}^3$ );  $LHV_{\text{ng}}$  为燃气低热热值;  $P_{\text{gas}}(t)$  为燃气轮机  $t$  时刻的输出功率;  $\Delta t$  为燃气轮机运行时间;  $\eta_{\text{gas}}(t)$  为燃气轮机  $t$  时刻的发电效率。

燃气轮机的效率和输出功率成非线性变化, 本文采用文献[21]所述的 C65 型微型燃气轮机, 其  $\eta_{\text{gas}}(t)$  与  $P_{\text{gas}}(t)$  的函数关系见文献[21]。

#### 1.6 储能系统

储能系统作为微网稳定运行中的重要环节, 扮演着源、荷的双重角色。当可再生能源或化石机组产生的电力富余时, 对储能系统进行充电; 当电网电力供应紧张时, 储能系统又可以作为电源对负载进行电力供应。起着削峰填谷, 补充调节电能的作用。而目前储能系统主要采用的是容量大、储能时间长的蓄电池组, 蓄电池容量  $C_b$  由式(12)给出。

$$C_b = \frac{W_d \cdot E_L}{DOD \cdot \eta_{\text{inv}} \cdot \eta_b} \quad (12)$$

式中:  $E_L$  表示负荷需求;  $W_d$  表示权重天数;  $DOD$  为放电深度(80%);  $\eta_{\text{inv}}$  和  $\eta_b$  分别为逆变效率和蓄电池效率。

## 2 概率角度下的微网优化策略

可再生能源的发展, 一是为了缓解能源危机, 二是考虑到绿色发展与保护环境的问题。对于微网而言, 运营成本越低, 环境污染越小, 可靠性越高, 则其综合效益越优。通过对微网数学模型的分析, 不难看出该模型是一个多维度、非线性规划的问题。

### 2.1 系统约束条件

#### 2.1.1 分布式电源的出力约束

$$P_{\text{imin}}(t) \leq P_i(t) \leq P_{\text{imax}}(t) \quad (13)$$

式中:  $P_{\text{imin}}(t)$  和  $P_{\text{imax}}(t)$  分别为第  $i$  个分布式电源  $t$  时刻有功功率的最小值和最大值;  $P_i(t)$  为第  $i$  个分布式电源  $t$  时刻的输出功率。

#### 2.1.2 柴油、燃气轮机组的运行约束

爬坡限制和下坡限制分别为

$$P_c(t) - P_c(t-1) \leq v_U \cdot \Delta t \quad (14)$$

$$P_c(t) - P_c(t-1) \geq v_D \cdot \Delta t \quad (15)$$

式中:  $v_U$  和  $v_D$  分别代表可控电源的上坡和下坡速率;  $P_c(t)$  为可控电源的发电功率;  $\Delta t$  为时间增量。

#### 2.1.3 功率平衡约束

$$P_{\text{load}}(t) = P_{\text{pv}}(t) + P_w(t) + \sum_1^n P_{\text{cr}}(t) + P_b(t) + P_{\text{net}}(t) \quad (16)$$

式中:  $P_{\text{load}}(t)$  代表  $t$  时段内系统的总负荷;  $P_{\text{net}}(t)$  为  $t$  时段内主网与微网的交换功率;  $P_{\text{pv}}(t)$  和  $P_w(t)$  分别代表  $t$  时段内光伏机组和风能机组的发电功率;  $P_{\text{cr}}(t)$  代表  $t$  时段内第  $i$  个可控机组的出力;  $P_b(t)$  代表  $t$  时段内蓄电池组的充放电功率。

#### 2.1.4 储能系统运行约束

蓄电池的使用寿命受其运行条件和充放电状态的影响, 为保证蓄电池组的寿命和正常工作, 要使其充放电功率和荷电状态保持在合理的区域范围内, 放电深度不宜超过 80%<sup>[22-23]</sup>。

$$\begin{cases} SOC_{\text{min}} \leq SOC(t) \leq SOC_{\text{max}} \\ P_{\text{chmax}}(t) = V_b(t) \cdot \min \left\{ \frac{(SOC_{\text{max}} - SOC(t)) C_b}{\Delta t}, I_{\text{chmax}} \right\} \\ P_{\text{dhmax}}(t) = V_b(t) \cdot \min \left\{ \frac{(SOC(t) - SOC_{\text{max}}) C_b}{\Delta t}, I_{\text{dhmax}} \right\} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $SOC(t)$  表示第  $t$  时刻内的荷电状态值;  $SOC_{\text{min}}$  和  $SOC_{\text{max}}$  分别表示荷电状态值的最小值和最大值;  $P_{\text{chmax}}(t)$ 、 $P_{\text{dhmax}}(t)$  分别表示蓄电池充、放电功率最

大值;  $\Delta t$  表示蓄电池检测时间间隔;  $I_{chmax}$ 、 $I_{dhmax}$  分别为蓄电池的最大充电、放电电流;  $V_b(t)$  表示第  $t$  小时的蓄电池端电压值。

### 2.1.5 系统交换功率限制

$$P_{netmin} \leq P_{net}(t) \leq P_{netmax} \quad (18)$$

式中,  $P_{netmax}$  和  $P_{netmin}$  分别为主网与微网交换功率的上下限。

## 2.2 优化目标

### 2.2.1 可再生能源比例

新能源发展的初衷就是为了可持续发展, 提升新能源在微网中所占的比例, 能很好地降低由于使用传统化石能源而带来的环境成本和操作成本; 定义  $RF$  为可再生因子,  $RF$  越高, 则微网的环境污染越小, 其表达式为

$$RF = \begin{cases} \left(1 - \frac{\sum P_{diesel} + \sum P_{gas}}{\sum P_{pv} + \sum P_w}\right) \times 100\% & RF_1 \\ \frac{\sum P_{pv} + \sum P_w}{\sum P_{diesel} + \sum P_{gas}} \times 100\% & RF_2 \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $RF_1$ 、 $RF_2$  分别表示柴油机与燃气轮机的出力总和小于等于、大于太阳能与风能的出力总和。可见, 条件为  $RF_1$  时, 可再生能源出力较大, 是比较良好的系统; 条件为  $RF_2$  时, 可再生能源出力太低, 环境成本较高。两个条件下的  $RF$  分别计算, 分别比较。

### 2.2.2 成本分析

可再生能源的能量来自于自然资源, 发电成本忽略不计, 只考虑投资、运维费用。由于自然能量的随机性, 为保证供电可靠性和自然资源充裕时的内部消纳过剩, 微网系统与主网并网, 合理地向主网购电和售电。微网系统的总成本  $C_{cost}$  包含设备投资成本  $C_{inve}$ 、运行维护费用  $C_{om}$ 、燃料成本  $C_{fuel}$ 、蓄电池重置费用  $C_{rep}$  和净购电费用  $C_{net}$ , 如式(20)。

$$C_{cost} = C_{inve} + C_{om} + C_{fuel} + C_{rep} + C_{net} \quad (20)$$

$$C_{om} = \int_0^T \sum_{i=1}^N C_{aomi} P_i(t) dt \quad (21)$$

$$C_{fuel} = \int_0^T \sum_{i=1}^N C_{afueli} P_i(t) dt \quad (22)$$

$$C_{rep} = C_{arep} \sum_{i=1}^N n_{bi} \quad (23)$$

$$C_{net} = C_{netin} - C_{netout} \quad (24)$$

式中:  $C_{aomi}$ 、 $C_{afueli}$  分别为第  $i$  个分布式电源的单位运行维护费用和单位燃料成本;  $C_{arep}$  表示蓄电池的年平均重置费用;  $n_{bi}$  表示第  $i$  个分布式电源的蓄电池数目;  $C_{netin}$  和  $C_{netout}$  分别为购电费用和售电收入。

采用式(25)描述的每单位电力生产成本  $C_{per}$  (元/kWh) 来表示可再生能源经济效益<sup>[24]</sup>。

$$C_{per} = \frac{i_{ra} (1 + i_{ra})^{T_n} C_{cost}}{\left((1 + i_{ra})^{T_n} - 1\right) \sum_{h=1}^{h=8760} P_{load}(h)} \quad (25)$$

式中:  $i_{ra}$  表示实际利率;  $T_n$  为系统的生命周期(通常取光伏机组的生命周期);  $P_{load}(h)$  表示负载每小时的耗电量。

### 2.2.3 目标函数

微电网的协同优化目标是保证环境污染小的条件下的运营成本最低, 这里引入事件  $A$ 、 $C$ , 分别代表  $RF$  和  $C_{per}$ , 则目标函数可以表示为

$$\min F(C|A) \quad (26)$$

## 3 BN-PSO 算法

### 3.1 贝叶斯方法

贝叶斯理论的核心是条件概率, 利用先验知识来确定随机变量的关联约束, 结合样本信息最终得到目标事件的分布信息。贝叶斯网络(BN)是一种基于概率推理的概率网络, 是目前不确定性分析和推理领域内研究的热点。BN 是一个有向无环图, 节点代表随机变量, 父节点与子节点之间的有向弧表示变量间的依赖关系, 其关系强度用条件概率表示。BN 结构学习就是通过找到能反映各数据变量之间的依赖关系来确定数据与网络模型的最优拟合。

BN 描述了一组随机变量  $(X_1, \dots, X_n)$  的联合概率分布, 从  $X_i$  指向  $X_j$  的有向弧代表了两者之间的依赖关系, 规定  $X_i$  是  $X_j$  的父节点, 并用  $P_i(X_j)$  表示  $X_j$  的直接前驱节点联合。则可以得到 BN 描述的联合概率分布的表达式为

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | P_i(X_i)) \quad (27)$$

给定一个训练数据集, 通过结构学习和参数学习来确定一个能构建有效 BN 的最优数据集。结构学习确定网络的拓扑, 参数学习定义数值参数。并以贝叶斯评分(BIC)函数式(28)来评估 BN 的拓扑质量, 通过一个搜索函数式(29)搜索所有可能的网络来优化 BN。采用 Akaike 信息判据准则来决定惩罚项<sup>[25]</sup>, 保证数据与结构的拟合准确度。

$$\text{BIC}(BN|D) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r_i} \sum_{j=1}^{q_i} N_{ijk} \ln \frac{N_{ijk}}{N_{ij}} - N \left| \sum_{i=1}^n q_i (r_i - 1) \right| \quad (28)$$

$$f(n) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} \binom{n}{i} 2^{i(n-i)} f(n-1), f(0) = f(1) = 1 \quad (29)$$

式中： $D$  表示训练数据样本集； $N$  表示样本数量； $n$  表示变量个数； $N_{ij}$  表示第  $i$  个变量的父节点取  $j$  值时的样本数量； $N_{ijk}$  表示第  $i$  个变量取  $k$  值且其父节点取  $j$  值时的样本数量； $r_i$  表示第  $i$  个变量的取值数目； $q_i$  表示第  $i$  个变量父节点的取值组合数目。

可以看出，在实际应用中对于  $n$  个变量的网络状态数是十分巨大的，在如此巨大的空间寻找最优结构也比较困难。

### 3.2 粒子群算法(PSO)

粒子群算法是一种通过不断迭代、竞争与合作来寻找个体和全局最优粒子以实现  $D$  维空间全局最优解的优化算法。粒子的位置函数和粒子速度函数如式(30)和式(31)所示。

$$X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t) \quad (30)$$

$$V_i(t) = w \cdot V_i(t-1) + c_1 r_1 (P_{gi}(t-1) - X_i(t-1)) + c_2 r_2 (P_g(t-1) - X_i(t-1)) \quad (31)$$

式中： $X_i$ 、 $V_i$ 、 $P_{gi}$  分别为第  $i$  个粒子在  $D$  维空间的位置、移动速度和最优位置； $P_g$  为全局最优位置； $w$  是惯性权重； $c_1$ 、 $c_2$  为加速系数； $r_1$ 、 $r_2$  为  $[0, 1]$  区间内的随机数； $t$  为迭代时刻。

粒子群算法的优点是易于实现，并且能迅速收敛到一个比较好的解决方案，并成功地运用在许多研究领域。

### 3.3 BN-PSO 算法

BN 存在网络结构学习困难的问题，PSO 算法容易陷入局部最优。本文通过对两种算法的分析，采用 PSO 算法来解决 BN 结构学习问题，并以贝叶斯网络的推理能力快速建立粒子节点与全局最优间的概率联系。基于三个算法  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  来快速更新粒子的离散速度和位置。粒子的更新公式为

$$f_1(X_i(t-1), w) = \begin{cases} M(X_i(t-1)), & w > r_1 \\ X_i(t-1), & w \leq r_1 \end{cases} \quad (32)$$

$$f_2(f_{1out}, c_1) = \begin{cases} C(f_{1out}), & c_1 > r_2 \\ f_{1out}, & c_1 \leq r_2 \end{cases} \quad (33)$$

$$f_3(f_{2out}, c_2) = \begin{cases} C(f_{2out}), & c_2 > r_3 \\ f_{2out}, & c_2 \leq r_3 \end{cases} \quad (34)$$

式中： $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  分别对应式(31)的记忆、自身认知和群体认知三个部分； $r_3$  为  $[0, 1]$  区间内的随机数； $f_{1out}$ 、 $f_{2out}$  分别对应式(32)和式(33)的输出结果； $M$ 、 $C$  分别为变异运算和交叉运算， $f_2$ 、 $f_3$  中的交叉运算逻辑相同，不重复介绍，其逻辑图如图 2 和图 3 所示。

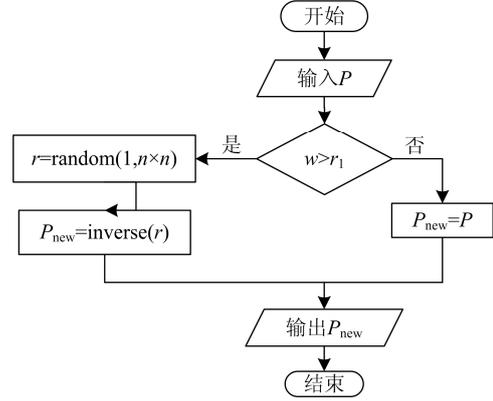


图 2 M 运算逻辑图

Fig. 2 Logic diagram of M algorithm

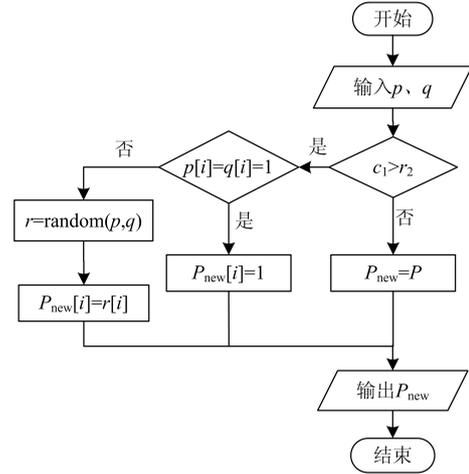


图 3 C 运算逻辑图

Fig. 3 Logic diagram of C algorithm

粒子的更新过程中，考虑了网络边缘粒子的插入和删除，去除关联性弱的粒子构成的回边，从而得以加速 BN 网络的学习过程。惯性权重  $w$  决定多少以前的粒子速度被保留下来，较大的  $w$  能加强搜索未覆盖区域的能力，有利于提高算法的全局搜索能力和跳出局部最优；较小的  $w$  有利于增强局部搜索能力，加快收敛。 $w$  的计算式为

$$w = \frac{w_1 (ev_{\max} - ev) + w_n \cdot ev}{ev_{\max}} \quad (35)$$

式中： $w_1$ 、 $w_n$  分别表示初始权重和最终权重； $ev$ 、 $ev_{\max}$  分别表示当前迭代次数和最大迭代次数。同样地，加速系数  $c_1$ 、 $c_2$  如式(36)和式(37)，也应该是一个线性变量，以保证跳出局部循环和早熟，且在后期能加速收敛于全局最优。

$$c_1 = \frac{c_{1l} (ev_{\max} - ev) + c_{1n} \cdot ev}{ev_{\max}} \quad (36)$$

$$c_2 = \frac{c_{21}(ev_{\max} - ev) + c_{2n} \cdot ev}{ev_{\max}} \quad (37)$$

式中:  $c_{11}$ 、 $c_{1n}$  分别表示  $c_1$  的初始加速系数和最终加速系数;  $c_{21}$ 、 $c_{2n}$  分别表示  $c_2$  的初始加速系数和最终加速系数。

基于上面的分析, 图 4 给出了 BN-PSO 算法的具体流程图。

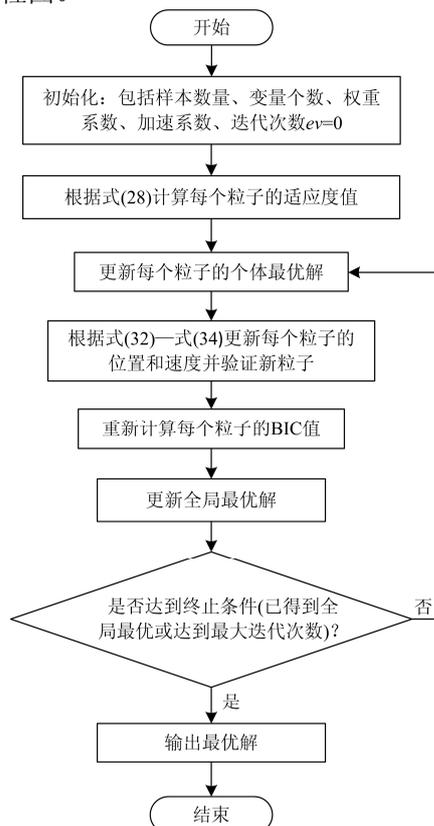


图 4 BN-PSO 算法流程图

Fig. 4 BN-PSO algorithm flowchart

## 4 算例分析

### 4.1 算例基础数据

采用文献[26]提出的 14 节点微网系统进行分析, 根据本文建立的各微网数学模型列出相关数据如表 1。

BN-PSO 算法中,  $w_1$  和  $w_n$  分别为 0.95 和 0.4;  $c_{11}$  和  $c_{1n}$  分别为 0.82 和 0.5;  $c_{21}$  和  $c_{2n}$  分别为 0.4 和 0.83;  $ev_{\max}$  取 10 000; BN 网络如图 5。

从图 5 中不难看出, 风速、光照的分布直接影响  $P_w$ 、 $P_{pv}$  的分布, 而  $P_w$ 、 $P_{pv}$  的分布又直接影响  $P_{ci}$ 、 $P_b$ 、 $P_{net}$  的分布, 整个网络的分布决定微网能否满足  $P_{load}$  的需求。整个网络间存在着随机变量的概率联系与约束。图 6 为算例区的负荷曲线和光伏、风能系统的预测出力情况。

表 1 微网系统设备技术参数  
Table 1 Technical parameters of equipment or device in micro-grid system

名称	参数	数值
光伏机组	功率上限/kW	50
	功率下限/kW	0
	设备成本/(元/kW)	20 000
	运维成本/(元/kWh)	0.011
	生命周期/年	25
风能机组	功率上限/kW	100
	功率下限/kW	0
	设备成本/(元/kW)	14 000
	运维成本/(元/kWh)	0.051
柴油发电机组	功率上限/kW	50
	功率下限/kW	2
	设备成本/(元/kW)	7 000
	运维成本/(元/kWh)	0.055
燃气轮机机组	功率上限/kW	50
	功率下限/kW	2
	设备成本/(元/kW)	7 500
	运维成本/(元/kWh)	0.053
	生命周期/年	24
	爬坡速率/(kW/min)	15
蓄电池组	下坡速率/(kW/min)	5
	最大充电率/kW	20
	最大放电率/kW	40
	最大储能/kWh	80
	最小储能/kWh	5
	设备成本/(元/kW)	800
	运维成本/(元/kWh)	0.051
逆变器	生命周期/年	10
	自放电率 $k$	0.14
	设备成本/元	16 000
	逆变效率/%	92
	生命周期/年	20

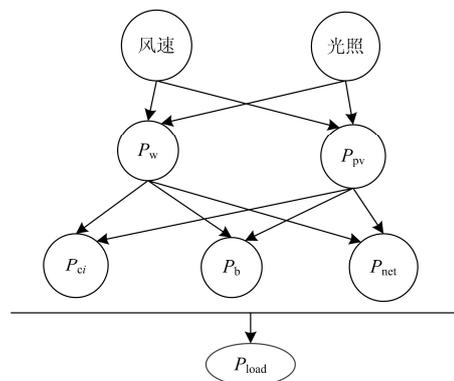


图 5 BN 网络图

Fig. 5 BN network diagram

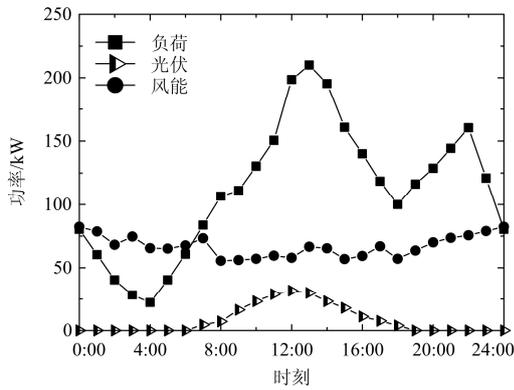


图 6 负荷和  $P_{pv}$ 、 $P_w$  变化曲线

Fig. 6 Change curve of load,  $P_{pv}$  and  $P_w$

参照我国大多数可再生能源上网电价，并根据用电量情况采用分时电价，各时段的购电和售电电价如表 2 所示。

表 2 购电和售电电价

Table 2 Power price for purchase and sale

时段	时间	购电电价/(元/kWh)	售电电价/(元/kWh)
高峰	10:00—16:00	0.80	0.60
	20:00—23:00		
平时	06:00—10:00	0.55	0.42
	16:00—20:00		
	23:00—01:00		
低谷	01:00—06:00	0.30	0.20

#### 4.2 优化结果

将上述参数在 MatlabR2016 中进行仿真，优化得到的  $P_{diesel}$ 、 $P_{gas}$ 、 $P_b$ 、 $P_{net}$  变化曲线如图 7 所示。

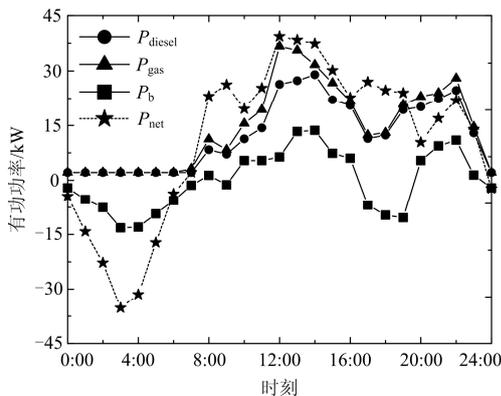


图 7 BN-PSO 算法优化出力结果

Fig. 7 Optimization results by BN-PSO algorithm

从图 7 中可以看出，在 00:00—06:00 风能高发时段，柴油、燃气机组保持最低功率运行，此时风能机组完全能够满足负载需求，蓄电池稳步储能，多余的电量交换给主网以获取售电收益；06:00—

10:00 时段负荷逐渐加重，而此时电价处于平时价位，主要采用购电的方式来补充电能缺口，并且蓄电池做好放电准备开始逐渐放电；10:00—16:00 时段处于负荷高峰期，购电电价较高，尽量增大柴油、燃气机组的出力以减少电网购电量，此时蓄电池不断放电，缓解电能需求压力；16:00—20:00 时段负荷有所降低，柴油、燃气机组的成本电价与电网平时电价相差不多，主要以电网购电方式补充电能缺口，同时蓄电池进行充电，为缓解下一个用电高峰做准备；20:00—23:00 时段负荷达到夜间峰段，由于电能缺额较 10:00—16:00 时段内有所降低，主要以柴油和燃气机组供能，同时蓄电池进行放电，剩余电量缺额向主网购买；23:00 到次日 01:00 时段内，风能系统势头再次强劲，且负荷降低，柴油、燃气机组进入低发阶段，蓄电池进入充放电调整阶段。

蓄电池主要经过了两次充放电，且放电深度均不超过 80%，这保证了蓄电池的使用寿命；用电高峰时段虽购电电价较高，但无限制地使用柴油、燃气机组带来的环境成本升高。最终得到的  $RF$  与  $C_{per}$  分别为 64.37% 和 1.986 8/(元/kW)，若将  $RF$  与  $C_{per}$  分别对应于每时刻做计算比较，结果如图 8 所示。

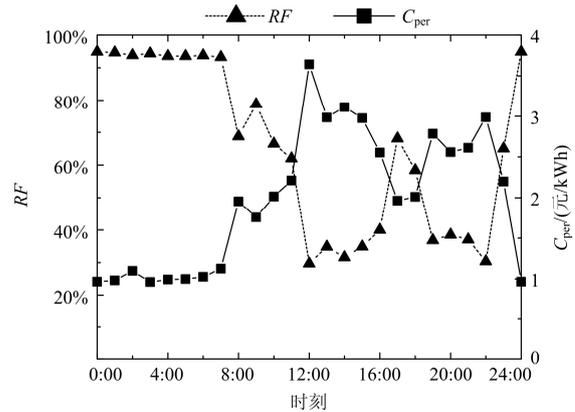


图 8  $RF$  和  $C_{per}$  关系图

Fig. 8 The  $RF$  and  $C_{per}$  diagram

从图 8 中可以看出，可再生因子  $RF$  与单位电力生产成本  $C_{per}$  成反比关系，这很容易从图 7 中得出，当风能势头强劲时，不需要柴油、燃气机组做多余动作，且还有多余清洁能源卖入电网获得收益，这得益于该地区的风能资源丰富；随着负荷的增大，柴油、燃气机组以及蓄电池的运用虽然降低了  $RF$ ，但保证了系统可靠供电，同时也是可再生能源随机性的体现。

#### 4.3 算法性能对比

为了验证算法的运算效果，将 BN-PSO 算法与 PSO 算法、遗传算法(GA)进行对比，考虑  $RF$  因素

和目标值  $C_{per}$ 。其中 PSO 算法、GA 算法求解的各机组出力情况分别如图 9 和图 10 所示。

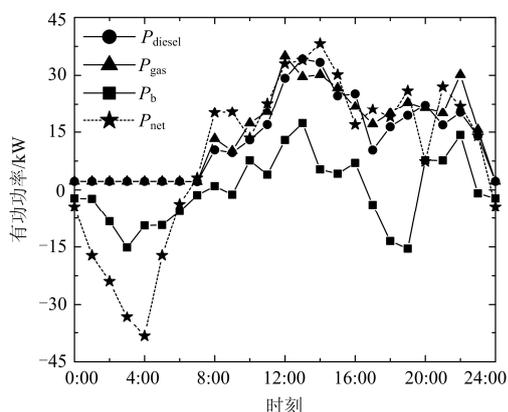


图 9 PSO 算法优化出力结果

Fig. 9 Optimization results by PSO algorithm

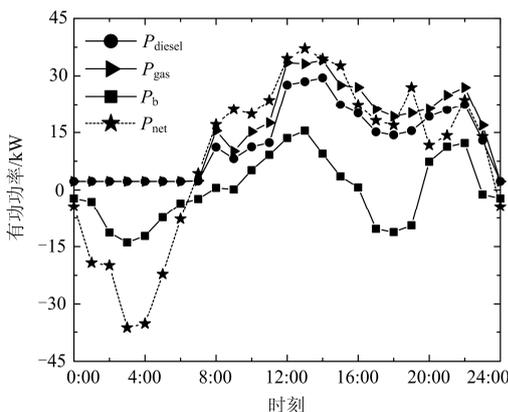


图 10 GA 算法优化出力结果

Fig. 10 Optimization results by GA algorithm

PSO 和 GA 算法优化结果的主要变化体现在电网间交换功率的降低和柴油、燃气机组的出力提升, 而蓄电池的出力曲线波动过大, 这不利于保证蓄电池的使用寿命。各算法的收敛情况如图 11, 可以更好地体现三种算法的优劣。

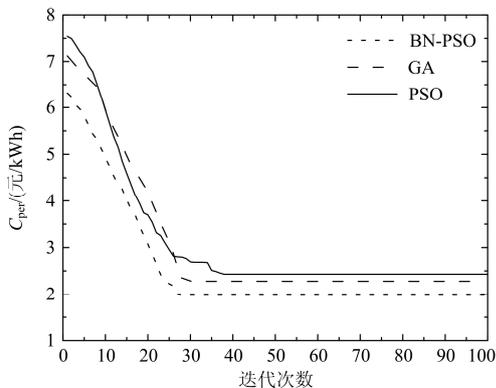


图 11 各算法收敛情况

Fig. 11 Convergence condition of each algorithm

可以得到各算法对应的目标函数  $RF$ 、 $C_{per}$  如表 3 所示。三种算法的计算时间如表 4。

表 3 各算法的优化目标值

Table 3 Objective optimization value of each algorithm		
算法	RF/%	$C_{per}$ /(元/kWh)
BN-PSO	64.37	1.976 8
GA	63.04	2.279 2
PSO	62.50	2.431 0

表 4 各算法的计算时间

Table 4 Computation time of each algorithm			
类型	BN-PSO	GA	PSO
计算时间/s	88.3	91.1	95.6

BN-PSO 算法的迭代次数为 28 次, 相比 PSO 算法的 38 次和 GA 算法的 31 次都快; PSO 算法前期表现良好, 但在迭代到 30 次时陷入了局部最优, 相比之下 BN-PSO 算法不仅继承了 PSO 算法的优点, 而且还结合了贝叶斯网络的优点, 解决了局部最优问题而且收敛速度更快, 计算时间更短。BN-PSO 算法对应的可再生因子达到了 64.37%, 更加清洁环保, 而费用比采用 PSO 算法时节省了 22.98%, 比采用 GA 算法时节省了 15.30%。BN-PSO 算法能在微网优化运行中表现出强大的优越性能。

## 5 结论

1) 本文提出的 BN-PSO 算法对解决微网运行的多维度、非线性寻优问题有着优越的运算性能, 证明了将贝叶斯网络引入微网寻优问题的可行性。

2) 通过粒子更新公式改善贝叶斯网络的结构学习问题, 并用贝叶斯评分函数(BIC)改进 PSO 算法, 算例验证了其有效性, 提高了收敛速度并优化了运算效果。

3) 可再生因子越高, 系统的环境效益越优, 相应的成本亦有所降低, 表明合理地风能系统、光伏系统进行布址以及提高可再生能源的利用率对实现微网的环境成本最优和经济运行有着十分重要的作用。

本文只针对一个典型的并网型微网阐述了引入贝叶斯网络的寻优办法, 提出的 BN-PSO 算法在解决层次、角度、状态均复杂的微网互联系统寻优问题, 以及考虑供需双侧动态平衡的寻优问题上均有极大的应用前景。

## 参考文献

[1] 白学祥, 曾鸣, 李源非, 等. 区域能源供给网络热电协同规划模型与算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 65-72.

- BAI Xuexiang, ZENG Ming, LI Yuanfei, et al. The model and algorithm of thermoelectric collaborative planning of regional energy supply network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 65-72.
- [2] 孙可, 吴臻, 尚楠, 等. 以省为实体的区域能源互联网内涵框架及发展方向分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 1-9.
- SUN Ke, WU Zhen, SHANG Nan, et al. Provincial regional energy internet framework and development tendency analysis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 1-9.
- [3] 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.
- [4] LIDULA N W A, RAJAPAKSE A D. Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1): 186-202.
- [5] WANG Z, CHEN B, WANG J, et al. Robust optimization based optimal DG placement in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2173-2182.
- [6] 谭颖, 吕智林, 李捷. 基于改进 ELM 的风/光/柴/储独立微网分布式电源多目标容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 63-70.
- TAN Ying, LÜ Zhilin, LI Jie. Multi-objective optimal sizing method for distributed power of wind-solar-diesel-battery independent microgrid based on improved electromagnetism-like mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 63-70.
- [7] MOHAMMADI S, MOZAFARI B, SOLIMANI S, et al. An adaptive modified firefly optimization algorithm based on Hong's point estimate method to optimal operation management in a microgrid with consideration of uncertainties[J]. Energy, 2013, 51: 339-348.
- [8] 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, 34(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, 34(19): 3073-3079.
- [9] 毛晓明, 陈深, 吴杰康, 等. 分时电价机制下含蓄电池微网的优化调度[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1192-1197.
- MAO Xiaoming, CHEN Shen, WU Jiekang, et al. Optimal dispatching of microgrid containing battery under time-of-use price mechanism[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1192-1197.
- [10] 胡晓通, 刘天琪, 何川, 等. 计及蓄电池损耗特性的微网多目标优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2674-2681.
- HU Xiaotong, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Multi-objective optimal operation of microgrid considering the battery loss characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2674-2681.
- [11] 刘方, 杨秀. 含电蓄热解决高渗透率风电消纳问题的微网热电能量综合优化[J]. 现代电力, 2015, 32(4): 19-26.
- LIU Fang, YANG Xiu. Comprehensive optimization of heat and electric energy for micro-grid with electric heat storage to solve the high penetration problem of wind power consumption[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(4): 19-26.
- [12] 朱晓荣, 刘冠强. 基于改进 GA-PSO 算法的孤立微网日前经济调度[J]. 现代电力, 2017, 34(1): 15-22.
- ZHU Xiaorong, LIU Guanqiang. GA-PSO algorithm based day-ahead economic schedule for isolated microgrid[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(1): 15-22.
- [13] 刘方, 杨秀, 时珊珊, 等. 基于序列运算的微网经济优化调度[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 227-237.
- LIU Fang, YANG Xiu, SHI Shanshan, et al. Economic operation of micro-grid based on sequence operation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 227-237.
- [14] LARRAÑAGA P, POZA M, YURRAMENDI Y, et al. Structure learning of Bayesian networks by genetic algorithms: a performance analysis of control parameters[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(9): 912-926.
- [15] MALONE B. Empirical behavior of Bayesian network structure learning algorithms[C] // Workshop on Advanced Methodologies for Bayesian Networks, November 16-18, 2015, Yokohama, Japan: 105-121.
- [16] 王耀雷, 周步祥. 基于自适应粒子群算法的直流微网能量优化管理[J]. 现代电力, 2017, 34(1): 37-43.
- WANG Yaolei, ZHOU Buxiang. Energy management of DC microgrid based on adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(1): 37-43.
- [17] 李东东, 徐连连, 刘翔, 等. 考虑可削减负荷参与的含风光储微网经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 35-41.

- LI Dongdong, XU Lianlian, LIU Xiang, et al. Optimal dispatching of microgrid considering the participation of reducible loads, distributed generators(DG) and energy storage units[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 35-41.
- [18] 徐立中, 易永辉, 朱承治, 等. 考虑风电随机性的微网多时间尺度能量优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 1-8.
- XU Lizhong, YI Yonghui, ZHU Chengzhi, et al. Multi-time scale optimal energy dispatch of microgrid considering stochastic wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 1-8.
- [19] DAUD A K, ISMAIL M S. Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions[J]. Renewable Energy, 2012, 44: 215-224.
- [20] WANG L, SINGH C. PSO-based multi-criteria optimum design of a grid-connected hybrid power system with multiple renewable sources of energy[C] // Swarm Intelligence Symposium, April 1-5, 2007, Honolulu, USA: 250-257.
- [21] 李乐. 微网的经济运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- LI Le. Study of economic operation in microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [22] 丁明, 王波, 赵波, 等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 575-581.
- DING Ming, WANG Bo, ZHAO Bo, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 575-581.
- [23] 王晶, 王雪峰, 王肖杰, 等. 基于改进型 MMAS 算法的微电源容量优化布址[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 73-80.
- WANG Jing, WANG Xuefeng, WANG Xiaojie, et al. Optimal siting and sizing of DGs for microgrid based on improved MMAS algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 73-80.
- [24] LUNA-RUBIO R, TREJO-PEREA M, VARGAS-VÁZQUEZ D, et al. Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: a review of methodologies[J]. Solar Energy, 2012, 86(4): 1077-1088.
- [25] AKAIKE H. A new look at the statistical model identification[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6): 716-723.
- [26] 李博文, 靳斌, 李竹, 等. 基于 C-FS 混合算法的微电网经济调度[J]. 现代电力, 2016, 33(4): 8-14.
- LI Bowen, JIN Bin, LI Zhu, et al. Economic dispatch of microgrid based on C-FS hybrid algorithm[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(4): 8-14.

---

收稿日期: 2017-06-07; 修回日期: 2017-07-20

作者简介:

康健(1990—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网与逆变器控制技术; E-mail: 505617561@qq.com

靳斌(1969—), 男, 教授, 研究方向为新能源并网、微电网系统控制、图像处理等。E-mail: jb123456@163.com

(编辑 周金梅)