

DOI: 10.7667/PSPC151042

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

谭颖, 吕智林, 李捷

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 针对风/光/柴/储独立混合微电网中分布式电源容量配置问题, 以系统供电可靠性作为约束条件, 构建考虑微电网经济性、环保性和能源利用效率的多目标优化模型。引入熵理论确定多目标函数各项指标的权重系数, 有效地摆脱权重取值的主观性。采用自适应迭代步长、自适应变异策略和搜索空间缩减等措施来改善仿电磁学算法 (Electromagnetism-like mechanism, ELM) 的收敛性。基于改进的循环充放 (ICC) 控制策略, 用改进的仿电磁学算法求解配置模型。以广西涠洲岛为背景进行算例分析, 验证模型和算法的有效性。结果表明改进的 ELM 算法能有效地解决微电网规划这类多约束、计算量大的组合优化问题, 并且在全局最优搜索能力和寻优速度方面具有明显优势。

关键词: 独立微电网; 容量优化配置; 多目标优化; 熵权法; 改进仿电磁学算法

Multi-objective optimal sizing method for distributed power of wind-solar-diesel-battery independent microgrid based on improved electromagnetism-like mechanism

TAN Ying, LÜ Zhilin, LI Jie

(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Aiming at the optimal size of distributed generation in isolated hybrid microgrid that consists of wind/photovoltaic/diesel/battery, using the reliability of power supply as the constraint condition, this paper constructs a microgrid multi-objective optimal model which takes economy, environmental protection and energy efficiency into consideration. The entropy theory is introduced to determine the weight coefficient of multi-objective function to get rid of the subjectivity of weight value effectively. Moreover, self-adaptive steps, adaptive variation, reduction of search space and other measures are adopted to improve the convergence of the electromagnetism-like mechanism (ELM). Based on improved cycle charge (ICC) control strategy, the improved ELM is used to solve the optimal model. Taking Guangxi Weizhou Island as the background for a case study, the effectiveness of the model and algorithm is verified. The results of simulation show that such optimization problems with a lot of constraints and huge computation, such as microgrid planning, can be solved by this algorithm. In addition, the proposed algorithm has obvious advantages in global optimal capability and the speed of optimization.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61364027) and Natural Science Foundation of Guangxi (No. 2014GXNSFAA118384).

Key words: independent microgrid; optimal sizing allocation; multi-objective optimization; entropy theory; improved ELM

0 引言

独立微电网具有供电灵活、可近距离输送等优

点, 能够弥补传统电网远距离输电建设成本高、能量损耗巨大等不足, 成为解决边远地区供电问题的重要手段。然而, 分布式电源输出受环境气候的影响极大, 具有明显的随机性、间歇性和不确定性, DG 容量配置与电力系统的正常运行和供电网络的可靠性密切相关。因此, DG 定容非常重要。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61364027); 广西自然科学基金项目 (2014GXNSFAA118384)

DG 优化问题较为复杂且数据量大,目前,已有学者针对 DG 优化配置的具体问题进行了相关研究,并已取得许多理论与实践方面的成果。文献[1]采用自适应罚函数对风光储互补独立微电网电源优化配置的目标函数进行修正,求解过程中结合自适应旋转角调整策略、量子位交叉变异操作和全体灾变思想,提出了一种新的混合量子遗传算法;文献[2]针对分布式电源特性,提出了适用于并网型和独立型微电网系统的双层优化设计模型,其上层系统最优配置采用基于 NSGA-II 的多目标遗传算法计算,下层则采用混合整数线性规划算法计算系统最优运行方案;文献[3]将改进的细菌觅食算法(Bacterial foraging algorithm, BFA)应用到解决风光储混合的孤岛微电网电源优化配置问题中,并用该方法全面评估分布式电源的经济性;文献[4]提出一种新的优化设计方法,将 ε -约束运用到优化模型中以同时减少系统总成本、未满足负载以及燃料消耗,并用粒子群算法对该多目标优化问题进行求解;文献[5]充分考虑风光互补特性,针对风光蓄互补发电系统,考虑独立和并网两种模式,提出一种改进的优化策略对各微电源容量进行优化配置;文献[6]针对混合可再生能源系统提出一种新的动态多目标粒子群优化算法,设计的目标同时考虑系统的净成本、未满足负荷以及燃料排放;文献[7]首次应用优先启发式协同进化算法(PICEA)进行混合可再生能源系统多目标优化设计,提出一种增强的自适应分配方法,通过最小化优化过程中的目标向量以改善该算法;文献[8]建立了含分布式电源的多目标优化模型,目标函数计及有功网损费用、综合投资成本和购电成本,并提出了一种基于细菌菌落生长和死亡寻优机制的细菌菌落优化算法对优化模型进行求解;文献[9]为提高微电网的电能质量,采用蓄电池和超级电容组合的混合储能装置,提出一种基于超前控制策略和考虑超级电容剩余容量的方法修正储能装置的输出功率,并对以年投资成本最小为目标的混合储能容量优化模型进行求解。

本文针对风光柴储独立微电网的系统成本、污染排放以及未利用能源多个目标,使用熵权法对多目标函数进行归一化处理,提出一种在既定控制策略下的微电源容量优化配置方案。针对该模型非线性、含有大量约束以及计算量大的特点,选用仿电磁学算法(Electromagnetism-like mechanism, ELM)^[10-14]对该优化问题进行求解,并对该算法进行改进。最后以广西北海市涠洲岛为例,对微电网系统进行仿真和计算,验证模型的准确性。与 PSO 算法和基本 ELM 算法进行比较,改进后的算法在快速性、准确

性和全局收敛性方面具有明显优势。

1 微电网 DG 出力模型

1.1 光伏模型

光伏阵列的实际输出功率 $P_{pv}(t)$ 与光照强度、环境温度、其标准条件下的额定输出功率有关,数学模型可描述为

$$P_{pv}(t) = P_{STC} \cdot G_c(t) \{1 + k[T_c(t) - T_{STC}]\} \quad (1)$$

$$T_c(t) = T_a(t) + (a_1 + a_2 e^{a_3 v(t)}) G_c(t) \quad (2)$$

式中: $P_{pv}(t)$ 为 t 时刻工作点的输出功率; STC 为生产厂家给出的标准条件^[13](电池表面温度 T_{STC} 为 25 °C); P_{STC} 为额定条件下的额定输出功率, $G_c(t)$ 为工作点辐照强度; k 为温度系数; $T_c(t)$ 为工作点的电池表面温度,与环境温度 $T_a(t)$ 和风速有关, a_1, a_2, a_3 为常数。

1.2 风机模型

根据风机功率的变化规律,风力发电机组的功率输出与风速之间的关系可以描述为

$$P_{wt}(v) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v(t) \leq v_{ci} \\ P_r \frac{v(t) - v_{ci}}{v_r - v_{ci}}, & v_{ci} \leq v(t) \leq v_r \\ P_r, & v_r \leq v(t) \leq v_{co} \\ 0, & v(t) \geq v_{co} \end{cases} \quad (3)$$

式中: v_{ci} 为风力机组切入风速; v_{co} 为切出风速; v_r 为额定风速; P_r 为风力发电机组额定输出功率。

1.3 柴油机模型

柴油机的效率与其操作模式密切相关,燃料消耗计算公式为

$$\text{fuel} = \alpha_{DG} P_{n-DG} + \beta_{DG} P_{a-DG} \quad (4)$$

式中: fuel 为燃料消耗量(kg/h); α_{DG} 和 β_{DG} 为燃料消耗曲线系数; P_{n-DG} 和 P_{a-DG} 分别为柴油机的额定功率和实际输出功率(kW)。本文中 $\alpha_{DG} = 0.081451$ L/kWh, β_{DG} 为 0.2461 L/kWh。

1.4 蓄电池模型

本文选择铅酸蓄电池(lead-acid battery, Pb)作为储能元件。蓄电池实际可用容量 $E_{bat}(t)$ 与电池温度的函数关系可表示为

$$E_{bat}(t) = E_{STC} [1 + \delta_B (T_{bat}(t) - T_{batSTC})] \quad (5)$$

式中: $T_{bat}(t)$ 为工作点蓄电池温度,近似认为等于环境温度 $T_a(t)$; E_{STC} 为标准条件下蓄电池的额定容量,由生产厂家提供; T_{batSTC} 为 25 °C; δ_B 为容量温度系数。

蓄电池运行过程满足:

$$E_{\text{STC}}(t+1) = E_{\text{STC}}(t) \times (1 - \sigma) + P_{\text{ch}}(t) - P_{\text{dch}}(t) \quad (6)$$

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t-1) \pm \frac{E_{\text{bat}}(t) \times \eta_{\text{bat}}}{P_{\text{bat}}} \times 100 \quad (7)$$

式中: σ 为每小时蓄电池的自放电率; $P_{\text{ch}}(t)$ 为单位小时内的充电功率; $P_{\text{dch}}(t)$ 为单位小时内的放电效率; SOC 为电池充放电状态(state of charge)是防止蓄电池过度充电或过度放电的一个重要变量。

2 微电网 DG 容量优化配置模型

2.1 优化配置评价指标

本文建立的混合微电网优化配置模型包含风机、光伏阵列、储能装置以及柴油发电机, 目标是在满足相关约束条件下, 达到等年值设备投资成本、废气污染排放以及能源利用率的综合最优。其目标函数为

$$\min F(\mathbf{X}) = \min \sum_{i=1}^3 w_i f_i(\mathbf{X}) + C \quad (8)$$

$$C = \begin{cases} 0, & f_{\text{LPSP}} \leq f_{\text{max}} \\ 10^{20}, & f_{\text{LPSP}} > f_{\text{max}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: w_i 为目标函数中各项的权重系数, 反映各指标的重要程度, $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$; C 为系统可靠性约束指标的惩罚项系数。

(1) 等年值设备投资成本

等年值设备投资成本包括设备初始投、运行和维护、替换、燃料费用。数学表达式为

$$f_1(\mathbf{X}) = C_{\text{DG}} + C_{\text{OM}} + C_{\text{R}} + C_{\text{F}} \quad (10)$$

式中: C_{DG} 为分布式电源(Distributed generator, DG)的设备投资成本; C_{OM} 为运行和维护成本; C_{R} 为替换成本; C_{F} 为燃料成本。式中各项的具体表达式分别为

$$\begin{cases} C_{\text{DG}} = c(r, l) \sum_{i \in N_{\text{DG}}} (C_{\text{wt}} + C_{\text{pv}} + C_{\text{de}} + C_{\text{bat}}) x_i P_i \\ C_{\text{OM}} = c(r, l) \sum_{i \in N_{\text{DG}}} (C_{\text{wt}}^{\text{OM}} + C_{\text{pv}}^{\text{OM}} + C_{\text{de}}^{\text{OM}} + C_{\text{bat}}^{\text{OM}}) x_i P_i \\ C_{\text{R}} = c(r, l) \sum_{i \in N_{\text{DG}}} (C_{\text{wt}}^{\text{R}} + C_{\text{pv}}^{\text{R}} + C_{\text{de}}^{\text{R}} + C_{\text{bat}}^{\text{R}}) x_i P_i \\ C_{\text{F}} = \sum_{i \in N_{\text{DG}}} m_i U_f x_i P_i \end{cases} \quad (11)$$

$$c(r, l) = r(1+r)^l / [(1+r)^l - 1] \quad (12)$$

式中: C_{wt} 、 C_{pv} 、 C_{de} 、 C_{bat} 分别为风机、光伏阵列、柴油发电机、储能装置的设备投资成本; $C_{\text{wt}}^{\text{OM}}$ 、

$C_{\text{pv}}^{\text{OM}}$ 、 $C_{\text{de}}^{\text{OM}}$ 、 $C_{\text{bat}}^{\text{OM}}$ 分别表示风机、光伏阵列、柴油发电机、储能装置的运行和维护成本; C_{wt}^{R} 、 C_{pv}^{R} 、 C_{de}^{R} 、 $C_{\text{bat}}^{\text{R}}$ 分别表示风机、光伏阵列、柴油发电机、储能装置的替换成本; $c(r, l)$ 为现值系数, 与折现率 r 和微电网使用寿命 l 有关; U_f 为柴油单价; N_{DG} 为电源种类数; 决策变量 x_i 为第 i 种电源的数量; 决策变量 P_i 为第 i 种电源的装机容量。

(2) 废气污染排放

废气污染排放量与柴油消耗量直接相关, 目前考虑的气体排放主要有 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 和 PM。将其排放量转化为经济费用, 引入排放惩罚项来计算环境成本, 即

$$f_2(\mathbf{X}) = \sum_{i \in N_{\text{DG}}} \sum_{j \in K} (u_j v_j) x_i P_i \quad (13)$$

式中: K 为废气污染排放的种类; u 表示单位废气排放处罚费用; v 表示污染排放量。

(3) 能源利用率

为提高能源的利用率, 需减少未利用的能量 E_{excess} , 其越小则能源利用率越高。

$$E_{\text{excess}} = P_{\text{DG}} - P_{\text{load}} \quad (14)$$

$$f_3(\mathbf{X}) = g_{\text{R}} \cdot E_{\text{excess}} \quad (15)$$

式中: P_{DG} 为 DG 产生的总能量; g_{R} 为未利用的能源处罚标准。

2.2 熵权法

各目标函数的权重系数是对其重要程度的直接反映, 常用的方法有均差排序法、 α -法、老手法等。本文应用熵^[15]来确定各个目标函数的权重。主观赋权法主要根据专家经验来确定权重, 因此受人为因素和主观因素的影响较大。本文采用的熵权法通过设备投资成本、废气污染排放和能源利用率 3 个指标的实际数据计算确定权重信息, 当某项指标的值相差较大时, 熵值较小, 说明该指标提供的有效信息量较大, 则其对应的权重也较大; 反之, 若某项指标的值相差较小, 熵值较大, 则该指标提供的有效信息量较小, 因此其权重也较小。

设有 m 个分布式电源容量配置候选组合, 每个组合有 n 个指标, 候选组合对应的目标函数构成初始信息矩阵 $\mathbf{Y} = (y_{ij})_{m \times n}$, 其中 y_{ij} 为第 i 个候选组合的第 j 个指标的数值。由于不同指标的量纲不同, 必须对其进行无量纲处理, 由此可得到标准化矩阵 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n}$ 。

根据熵的定义, 第 j 个目标的熵值为

$$H_j = 1 + (\ln n)^{-1} \sum_{i=1}^n x_{ij} \ln x_{ij} \quad (16)$$

式中, $x_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^n y_{ij}$ 。

由式(17)计算出第 j 个目标的权重:

$$w_j = H_j / \sum_{j=1}^m H_j \quad (17)$$

式中, $0 \leq w_j \leq 1, \sum_{j=1}^m w_j = 1$ 。

2.3 约束条件

微电网系统运行过程中满足如下约束条件:

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_L(t) + P_{\text{exc}}(t) = P_{\text{wt}}(t) + P_{\text{pv}}(t) + \\ P_{\text{de}}(t) + P_{\text{bat}}(t) + P_{\text{unmet}}(t) \\ \text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}_{\max} \\ P_{\text{ch}}(t) \leq 0.2E_{\text{bat}} / \Delta t \\ P_{\text{dch}}(t) \leq 0.2E_{\text{bat}} / \Delta t \\ f_{\text{LPSP}} \leq f_{\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_L(t)$ 为负荷实际功率; $P_{\text{exc}}(t)$ 为超出的能量; $P_{\text{wt}}(t)$ 、 $P_{\text{pv}}(t)$ 、 $P_{\text{de}}(t)$ 、 $P_{\text{bat}}(t)$ 分别为风机、光伏、柴油机和蓄电池的实际输出; $P_{\text{unmet}}(t)$ 为无法满足的功率; f_{\max} 为系统允许的最大年缺电率; f_{LPSP} 为年缺电率, 见式(19)。

$$f_{\text{LPSP}} = \frac{\sum_{i=1}^{8760} [P_L(t_i) - P_R(t_i)]}{\sum_{i=1}^{8760} P_L(t_i)} \quad (19)$$

$$P_R(t_i) = P_{\text{wt}}(t_i)N_{\text{wt}} + P_{\text{pv}}(t_i)N_{\text{pv}} + P_{\text{dch}}(t_i)N_{\text{bat}} + P_{\text{de}}(t_i)N_{\text{de}}$$

3 模型求解

3.1 控制策略

独立微电网优化配置结果不仅与电源类型和容量参数有关, 而且受控制调度策略及其参数的影响。净负荷 P_{net} , 指实际负荷减去可再生能源输出后的值。典型控制策略可以归纳为两类: (1) 负荷跟随策略(Load Following, LF), 主要靠柴油机补偿 P_{net} 波动, 柴油机几乎一直处于运行状态, 而蓄电池基本处于浮充状态, 用于补偿超出柴油机额定功率的负荷需求, 此类策略柴油消耗量较大; (2) 循环充放策略(Cycle Charge, CC), 蓄电池主要发挥 P_{net} 跟随作用。本文使用的 ICC(Improved Cycle Charge)控制策略^[16], 进一步考虑了电池的充放电对其寿命以及微电网经济性的影响, 在 CC 控制策略的基础上综合了 LF 控制策略的优点, 由柴油机与蓄电池轮流做

主电源以满足净负荷需求, 为了尽可能减少蓄电池的充放电次数, 若上一时段蓄电池处于放电状态, 则一直保持其放电直至达到设定的 SOC 下限, 若 $P_{\text{net}} < 0$, 则舍弃多余能量; 若上一时刻蓄电池处于充电状态, 则一直保持对其充电直至达到设定的 SOC 上限。

3.2 ELM 的基本原理

2003 年 Birbil 博士提出一种随机全局优化算法——仿电磁学算法。该算法通过模拟电荷间作用力的吸引和排斥机制, 采用记忆和回馈机制, 对解决微电网规划这类计算量大、约束条件多、目标函数具有非凸非线性特点的优化问题比较有效, 且比较容易处理。求解过程中, ELM 算法将每个个体 X_i^k 看作一个带电粒子, 其粒子的寻优公式为

$$X_i^{k+1} = X_i^k + \lambda \frac{F_i^k}{\|F_i^k\|} R, \quad \lambda \in N(0,1) \quad (20)$$

其中

$$F_i^k = \sum_{j=1, j \neq i}^m \begin{cases} q_i^k q_j^k (X_j^k - X_i^k) / \|X_j^k - X_i^k\|, f(X_j^k) < f(X_i^k) \\ -q_i^k q_j^k (X_j^k - X_i^k) / \|X_j^k - X_i^k\|, f(X_j^k) \geq f(X_i^k) \end{cases} \quad (21)$$

$$q_i^k = \exp \left[-n \frac{f(X_i^k) - f(X_{\text{best}}^k)}{\sum_{i=1}^m (f(X_i^k) - f(X_{\text{best}}^k))} \right] \quad (22)$$

$$R = \begin{cases} X_i^k - L_i^k, F_i^k < 0 \\ U_i^k - X_i^k, F_i^k > 0 \end{cases} \quad (23)$$

式中: X_i^k 为第 k 次迭代中的第 i 个粒子; R 表示为限制越限搜索而设置的约束条件; q_i^k 为第 k 次迭代中粒子 i 具有的电荷值; m 为种群中粒子总数; n 为粒子维数; $f(\cdot)$ 为粒子的适应度函数; X_{best}^k 为第 k 次迭代中适应度函数最优的粒子; F_i^k 为第 k 次迭代中第 i 个粒子的向量力; λ 为权重系数; U_i^k , L_i^k 为变量的上下界。

3.3 算法改进

(1) 改进的种群移动策略

在 ELM 算法中的吸引和排斥机制是一种邻域搜索行为, 当粒子 X_i^k 的受力 F_i^k 表现为引力时, 促使其向优化区域聚集, 为排斥力时会使其到达未搜索区域。这样只考虑种群对个体的影响, 无法大范围拓展新的解域。因此, 需考虑种群中单个粒子间的相互影响, 本文借鉴文献[12]的方法, 将式(21)改为

$$X_i^{k+1} = X_i^k + \left[\frac{\lambda F_i^k}{\|F_i^k\| + \delta} + \frac{c F_{ir}^k N(0,1)}{\|F_{ir}^k\| + \delta} \right] R \quad (24)$$

式中: F_{ir}^k 为第 k 次迭代中粒子 i 对随机粒子 r 的矢量力; 当 $f(X_r^k) < f(X_i^k)$, 被动聚集因子 c 为负, 否则为正; 考虑到微电网规划的整数性, 为避免算法分母为 0, 设置 δ 为抗干扰因子^[17]。该改进不仅改善了粒子的种群移动机制, 还提高了算法的全局寻优能力。

(2) 采用自适应迭代步长策略

对于高维优化问题而言, 若每次都调用局部搜索程序, 将会大大降低算法的效率, 利用动态迭代步长代替局部搜索, 在式(20)中, 随机迭代步长 λ 的大小决定着算法的全局搜索和局部搜索能力, 若取值不当可能会导致算法在迭代后期出现不收敛的情况。因此, 采用如下的自适应迭代步长来协调算法的全局搜索和局部搜索性能。

$$\lambda = \lambda_{\max} - \frac{(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})k}{10K} \quad (25)$$

式中: λ_{\max} 、 λ_{\min} 分别为算法迭代初期和末期的迭代步长; k 、 K 分别为算法的当前迭代次数和总迭代次数。

(3) 搜索空间缩减策略

算法的寻优速度与搜索空间密切相关, 空间越小, 越容易找到最优解。若寻优过程中出现算法停滞并达到设定次数时, 则将原搜索空间 $[V_{\min}^k, V_{\max}^k]$ 按比例系数 λ 缩减为 $[V_{\min}^{k+1}, V_{\max}^{k+1}]$ 。

$$\begin{cases} V_{\max}^{k+1} = V_{\max}^k - \lambda(V_{\max}^k - V_{\min}^k) \\ V_{\min}^{k+1} = V_{\min}^k + \lambda(V_{\max}^k - V_{\min}^k) \end{cases} \quad (26)$$

$$\text{其中: } \begin{cases} V_{\max}^{k+1} = V_{\text{best}}, V_{\max}^{k+1} < V_{\text{best}} \\ V_{\min}^{k+1} = V_{\text{best}}, V_{\text{best}} < V_{\min}^{k+1} \end{cases} \quad (27)$$

(4) 自适应变异策略

为避免算法陷入局部最优, 本文借鉴遗传算法的变异思想, 对种群个体进行变异操作。在变异过程中: 当算法停滞达到所设定次数时产生新的正态分布种群, 并以一定概率用新种群中的优秀个体淘汰掉旧种群中差的个体。

3.4 求解步骤

采用改进的仿电磁学算法求解独立微电网电源优化配置问题时, 其基本步骤如下。

(1) 参数初始化。导入全年风速、光照、温度以及负荷数据, 设置种群规模 m , 粒子维数 n , 停滞迭代次数 K , 决策变量的上下限、最大迭代次数等参数。

(2) 种群初始化。以分布式电源的容量作为决策变量, 利用下式产生满足上下限约束的初始种群:

$$X_i^k = \text{Round}[L_i^k + \text{rand}(0,1) \cdot (U_i^k - L_i^k)]$$

该方法不仅使初始种群覆盖整个解空间, 而且保证了初始种群的多样性。

(3) 根据控制策略计算种群中每个粒子的年缺电率, 适应度函数值, 粒子电荷值以及个体矢量力大小。

(4) 根据式(21)产生新的种群, 并将新种群和前代种群的适应度函数值进行比较, 进行种群更新, 保存当前代最优解。

(5) 判断种群进化是否达到停滞代数, 若达到则进行迭代步长、变异策略和寻优空间改变。

(6) 判断是否达到算法的终止条件, 若未满足, 则转入步骤(3)继续重复迭代步骤; 若已满足终止条件, 则输出最优解以及最终目标函数值。

4 算例分析

4.1 算例描述

选取广西北海市南部涠洲岛(东经 $109^{\circ}05' - 109^{\circ}13'$, 北纬 $20^{\circ}54' - 21^{\circ}05'$)作为研究背景, 根据该岛全年的风力、光照、温度以及电力负荷需求, 采用本文提出的优化配置模型, 并应用改进的 ELM 算法对其进行计算, 以验证本文提出的模型和算法的有效性。假设用户负荷平均耗能 85 kWh/d 、平均功率 3.54 kW 、峰值功率 11.5 kW , 负荷曲线如图 1 所示。参考广西气象局所提供的月平均风速数据, 根据威布尔(weibull)分布, 借助于 HOMER 软件拟合得到全年风速曲线, 如图 2 所示。全年 8760 小时的光照强度数据以及温度数据由广西气象局提供, 光照强度数据和温度数据分别见图 3 和图 4。

柴油价格为 6.11 元/L , CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、PM 的排放系数分别为 2.5 kg/L 、 0.0004 kg/L 、 0.0085 kg/L 和 0.0018 kg/L ; 未利用能源处罚收费 g_R 按照 2.0 元/kWh 收取。设定工程寿命周期为 20 yr , 仿真运行时间为 1 年, 时间步长为 1 h , 采用 Matlab 2013a 进行编程仿真, 初始种群 N 为 40, 改变步长和缩减优化空间的停滞代数为 10, 终止条件为总迭代次数

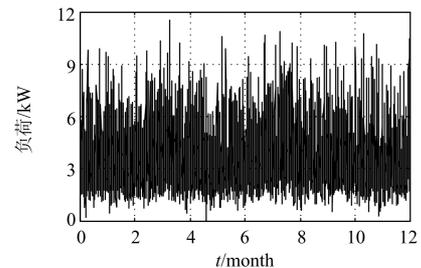


图 1 全年用户负荷数据曲线

Fig. 1 Annual load data curve

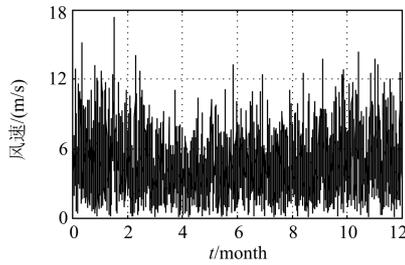


图2 全年风速数据曲线

Fig. 2 Annual wind speed data curve

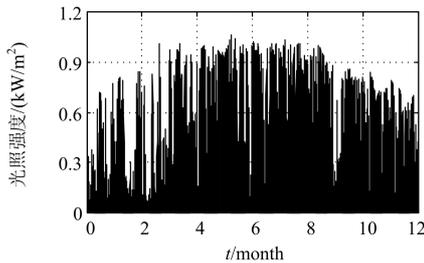


图3 全年光照数据曲线

Fig. 3 Annual solar radiation data curve

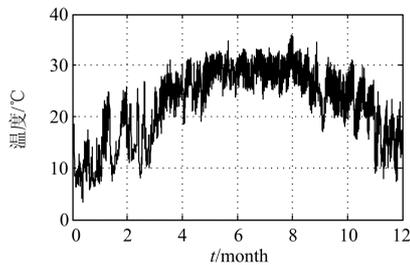


图4 全年温度数据曲线

Fig. 4 Annual temperature data curve

达到 100。本文设定系统允许的最大年缺电概率 f_{max} 为 0.1%。所选组件的相关参数(数据部分取自文献[4, 18])如表 1 所示。

根据岛上的风力、光照和温度数据计算出微电网各微电源出力情况,同时计算出约束条件(即微电网系统年缺电率 f_{LPSP}),用表 1 中的分布式电源经济参数计算出微电网系统等年投资成本,应用仿电磁学算法求解多元非线性整数规划问题。

表 1 分布式电源经济参数

DG	设备投资成本/(元/kW)	替换成本/(元/kW)	O&M 成本/(元/kW·yr)	寿命/yr
风机	4 535	0	35.4	20
光伏阵列	5 000	0	88.7	25
铅酸电池	567	453.6	5.67	2.5
柴油机	1 283	1 000.0	25.7	9

4.2 仿真结果与比较

表 2 给出了各目标函数分别采用等权重法和熵权法两种方案计算权重时所得的电源优化配置结果。采用等权重法时,考虑经济性、环保性和能源利用率的重要性一样,人为赋予它们权重 $w_1 = w_2 = w_3 = 1/3$ 。而通过熵权法得到目标函数中各个权重 w_j ,其大小分别为:0.414 0、0.443 2、0.142 7,其反映出各个目标函数对于总目标函数影响的重要程度。因而从配置结果可以看到,采用熵权法定权重时,未利用能源百分比有所下降,柴油发电机运行时间减少,因而柴油消耗量和污染排放随之降低,等年投资成本减少,该方案经济性更好。

表 2 不同权重的优化结果比较

Table 2 Comparison of optimization results of different weights

优化方案	风机/ kW	光伏/ kW	柴油机/ kW	铅酸电池/ kWh	f_{LPSP} /%	未利用 能源/%	柴油机运行 时间/h	柴油 消耗量/L	CO ₂ /SO ₂ /NO _x / PM 排放量/kg	等年值综合 总成本/元
等权重法	17	6	13	74	0.08	38.4	4 565	19 438.5	48 596.1/7.8/ 166.6/35.0	247 878.1
熵权法	30	5	10	60	0.09	36.5	2 115	11 271.0	28177.5/4.5/ 96.6/20.3	219 063.2

仿真计算时,分别采用粒子群(PSO)算法、基本仿电磁学算法和改进后的仿电磁学算法对优化模型进行求解,对优化配置结果和运算效率进行比较。结果如表 3 所示。

可见,当迭代次数、种群个数均相同时,相比于 PSO 算法和基本 ELM 算法,改进后的 ELM 算法在分布式电源优化配置的收敛性和运行效率方面,具有明显优势。3 种方案的收敛曲线如图 5 所

示。结果表明,改进后的 ELM 算法计算效率更高,易跳出局部极小值。

表 3 不同仿真方法性能比较

Table 3 Performance comparison of different simulation methods

求解方法	种群个数	迭代次数	平均收敛代数	平均运行时间/s
PSO	40	100	32	480
基本 ELM	40	100	58	22 243
改进 ELM	40	100	20	430

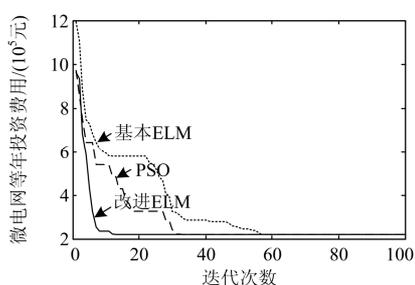


图5 算法收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve of the algorithm

5 结论

(1) 围绕微电网经济成本、环境污染以及能源利用率的综合最优对分布式电源进行优化配置,采用熵权法确定各个目标函数权重,可以有效克服人为定权重的主观性,有效地反映经济成本、环境污染和能源利用率对目标函数影响的重要程度并实现三者协调,有利于提高微电网的综合经济性。

(2) 考虑了控制策略对独立微电网优化配置结果的影响,在采用改进的循环充放(ICC)控制策略基础上对模型进行求解。增加了对蓄电池的充放电管理,减少其充放电次数,增加蓄电池使用寿命。

(3) 采用自适应迭代步长、自适应变异策略和搜索空间缩减等措施来改善仿电磁学算法的收敛性,将改进的 ELM 算法运用到配置模型的求解中。与 PSO 算法及基本 ELM 算法比较,改进后的算法在求解效率和全局收敛性方面具有优越性。

参考文献

- [1] 符杨, 蒋一鏊, 李振坤. 基于混合量子遗传算法的微电网电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 50-57.
FU Yang, JIANG Yiliu, LI Zhenkun. Optimal allocation of distributed generation for microgrid based on hybrid quantum genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 50-57.
- [2] 刘振国, 胡亚平, 陈炯聪, 等. 基于双层优化的微电网系统规划设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 123-133.
LIU Zhenguo, HU Yaping, CHEN Jiongcong, et al. A planning and design method for microgrid based on two-stage optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 123-133.
- [3] 马溪原, 吴耀文, 方华亮, 等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 17-25.
MA Xiyuan, WU Yaowen, FANG Hualiang, et al. Optimal sizing of hybrid solar-wind distributed generation in an islanded microgrid using improved bacterial foraging algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 31(25): 17-25.
- [4] SHARAFI M, ELMEKKAWY T Y. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach[J]. Renewable Energy, 2014, 68: 67-79.
- [5] 徐林, 阮新波, 张步涵, 等. 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 88-98.
XU Lin, RUAN Xinbo, ZHANG Buhan, et al. An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 32(25): 88-98.
- [6] SHARAFI M, ELMEKKAWY T Y. A dynamic MOPSO algorithm for multiobjective optimal design of hybrid renewable energy systems[J]. International Journal of Energy Research, 2014, 38(15): 1949-1963.
- [7] SHI Z, WANG R, ZHANG T. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using preference-inspired coevolutionary approach[J]. Solar Energy, 2015, 118: 96-106.
- [8] 陈海东. 基于细菌菌落优化算法分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21):106-111.
CHEN Haidong. Optimal power flow of distribution network with distributed generation based on bacterial colony optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 106-111.
- [9] 王博堃, 滕欢, 胡晓通, 等. 基于平滑控制策略的混合储能优化配置方法[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 47-53.
WANG Bokun, TENG Huan, HU Xiaotong, et al. Hybrid energy storage system optimal configuration based on smooth control strategy[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 47-53.
- [10] BIRBIL S I, FANG S C. An electromagnetism-like mechanism for global optimization[J]. Journal of Global Optimization, 2003, 25(3): 263-282.
- [11] 吴杰康, 郭壮志. 基于仿电磁学算法的梯级水电站多目标短期优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 14-21.
WU Jiekang, GUO Zhuangzhi. Electromagnetism-like mechanism based multi-objective short-term optimization scheduling for cascade hydro plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 14-21.

- [12] 付锦, 周步祥, 王学友, 等. 改进仿电磁学算法在多目标电网规划中的应用[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 141-146.
FU Jin, ZHOU Buxiang, WANG Xueyou, et al. Application of improved electromagnetism-like mechanism in multi-objective power network planning[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 141-146.
- [13] DE SOTO W, KLEIN S A, BECKMAN W A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance[J]. Solar Energy, 2006, 80(1): 78-88.
- [14] 郭壮志, 吴杰康, 孔繁镍. 基于仿电磁学算法和数据包络分析的水火电力系统多目标优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 53-61.
GUO Zhuangzhi, WU Jiekang, KONG Fannie. Multi-objective optimization scheduling for hydrothermal power systems based on electromagnetism-like mechanism and data envelopment analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 14-21.
- [15] 李如琦, 苏浩益, 曲振旭. 核向量空间模型在电能质量综合评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 72-76.
LI Ruqi, SU Haoyi, QU Zhenxu. Application of kernel vector space model in power quality comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 72-76.
- [16] 刘梦璇, 王成山, 郭力, 等. 基于多目标的独立微电网优化设计方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 34-39.
LIU Mengxuan, WANG Chengshan, GUO Li, et al. An optimal design method of multi-objective based island microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 34-39.
- [17] 王学友, 周步祥, 付锦, 等. 分布式电源优化配置的仿电磁学算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(4): 134-138.
WANG Xueyou, ZHOU Buxiang, FU Jin, et al. Electromagnetism-like mechanism based on optimal placement of distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2012, 24(4): 134-138.
- [18] ISMAIL M, MOGHAVVEMI M, MAHLIA T. Techno-economic analysis of an optimized photovoltaic and diesel generator hybrid power system for remote houses in a tropical climate[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 69: 163-173.

收稿日期: 2015-06-21; 修回日期: 2015-11-08

作者简介:

谭颖(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为复杂系统优化与控制; E-mail: 924701132@qq.com

吕智林(1971-), 女, 通信作者, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为智能电网、系统优化及复杂系统集成控制等; E-mail: luzhilin2001@163.com

李捷(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能电网与新能源技术。E-mail: 415130190@qq.com

(编辑 姜新丽)