

DOI: 10.7667/PSPC170648

基于满意度原理的光柴储微网系统优化运行研究

张倩^{1,2}, 丁津津^{1,3}, 刘童^{1,4}, 芮涛^{2,4}, 王群京^{1,4}

(1. 安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601; 2. 教育部电能质量工程研究中心(安徽大学), 安徽 合肥 230601; 3. 安徽省电力科学研究院, 安徽 合肥 230022; 4. 安徽大学工业节电与电能质量控制协同创新中心, 安徽 合肥 230601)

摘要: 围绕微网系统环保经济运行优化问题, 在并网和孤岛运行状态下, 建立了以分布式发电单元的发电费用、折旧费用和环境治理费用为目标, 考虑微网运行约束条件的经济优化运行模型, 形成多目标有约束优化问题。基于满意度原理的模糊综合判断将多目标转化为单目标问题。再应用全面学习粒子群算法, 对微网内分布式电源的输出功率和储能装置充/放电优化求解。以包含光伏、柴油发电机、锂电池、电动汽车充电桩和负载的交直流混合微电网为具体研究对象, 优化结果验证了所提模型、算法和方法的有效性。

关键词: 微网; 经济运行; 模糊综合评价; 全面学习粒子群算法

Optimal operation of PV-diesel-battery microgrid based on satisfying degree

ZHANG Qian^{1,2}, DING Jinjin^{1,3}, LIU Tong^{1,4}, RUI Tao^{2,4}, WANG Qunjing^{1,4}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China; 2. Engineering Research Center of Power Quality, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230601, China; 3. Anhui Electric Power Science Research Institute, Hefei 230022, China; 4. Collaborative Innovation Center of Industrial Energy-Saving and Power Quality Control, Hefei 230601, China)

Abstract: This paper focuses on the environmental and economic optimal operation of microgrid in grid-connected and island modes. Considering the operation constraints of microgrid, a Constrained Multi-Objective Optimization Problem (CMOP) is built with the fuel cost, depreciation expense and emission cost of distributed generators as optimization objectives. The satisfying degree based fuzzy comprehensive evaluation is introduced for the conversion from multi-objective problem to single-objective one. Then the Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization (CLPSO) is applied for the solutions of outputs from distributed generators and charge/discharge optimization of storage device in microgrid. An AC/DC hybrid microgrid including photovoltaic, diesel generator, lithium battery, electric vehicle charging points and load is researched. Optimization results demonstrate the effectiveness of the proposed models, methods, and algorithm.

This work is supported by Youth National Natural Science Foundation of China (No. 51507001), National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900400), and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 521205160021).

Key words: microgrid; economic optimal operation; fuzzy comprehensive evaluation; comprehensive learning particle swarm optimization

0 引言

分布式发电逐渐成为重要的电能生产方式, 是

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助(51507001); 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900400); 国家电网公司科技项目资助(521205160021); 光伏电网建模与仿真技术研究项目资助(ZXZB-2015-002); 安徽大学 2015 博士科研启动项目资助(J01001929)

解决能源危机、环境污染等问题的重要途径^[1]。将分布式电源(Distributed Generator, DG)和能量储存系统(Energy Storage System, ESS)以微网(Microgrid, MG)形式接入电网, 与电网互为支撑, 可以提高分布式电源的利用率, 有助于电网灾变时向重要负荷继续供电, 避免间歇式电源对电能质量的影响, 是发挥分布式电源效能的最有效方式^[2-3]。在满足潮流约束的各分布式电源正常运行的约束条件下, 对分布式电源的出力、能量储存设施的充放电进行合理

安排^[4-7], 可以优化其经济作用、环境性能并使系统获得更好的可靠性。

在孤岛^[8-12]和并网^[13-17]运行模式下, 含光伏、风电、蓄电接入的微网经济优化运行是国内外的研究热点。该类问题是典型的多变量、有约束、多目标优化问题。文献[3-4,12]分别对单个目标进行不同场景下的优化分析, 文献[7]提出两层随机规划的方法, 文献[8]研究了基于 Pareto 的双目标优化运行, 此外线性加权法^[14-16]是最常用的处理微电网多目标优化问题的方法。

本文以安徽大学包含光伏发电系统、柴油机发电单元、锂电池组储能系统、充电桩的光柴储交直流混合微网为研究对象。考虑并网与孤岛运行状态, 建立以折旧成本、运行成本、环境效益为目标, 包含能量供求平衡、DG 单元功率限制的优化问题。电动汽车(Electric Vehicle, EV)作为可控负载, 可以消纳不同形式的可再生能源^[6], 改善系统运行的经济性, 将电动汽车作为随机负荷。锂电池^[7]具有工作电压等级高、比能量和比体积大、自放电率低、无记忆效应、环保性佳和无污染性等优点, 但需要避免频繁充放电对电池寿命的影响, 选用锂电池组作为储能元件。

针对将微网优化运行的多目标问题, 引入基于满意度原理的模糊综合评价(Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE), 合理转化为单目标优化问题, 应用全面学习粒子群算法(Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization, CLPSO)求解。对各分布式电源的出力、电池充放电情况进行优化, 讨论在并网及孤岛运行模式下, 多种因素对经济建模优化结果的影响, 验证所建模型的合理性和算法的有效性。

1 光柴储微源模型

1.1 太阳能光伏阵列模型

简化的光伏组件稳态功率输出模型如下。

$$P_{pv}(t) = f_{pv} P_{STC} \frac{G(t)}{G_{STC}} (1 + k(T(t) - T_{STC})) \quad (1)$$

$$T(t) = T_{air}(t) + 0.0138[1 + 0.031T_{air}(t)](1 - 0.042V_w)G(t) \quad (2)$$

$$T_{air}(t) = 0.5[(T_{max} + T_{min}) + (T_{max} - T_{min})\sin(\frac{2\pi(t - t_p)}{24})] \quad (3)$$

式中: f_{pv} 为光伏阵列降额因数; P_{STC} 为标准测试条件(Standard Test Conditions, STC), 即太阳光入射强

度 1000 W/m^2 、环境温度 25°C 下的最大输出功率; $G(t)$ 为实际光照强度, 单位为 W/m^2 ; G_{STC} 为 STC 光照强度, 取 1000 W/m^2 ; k 为功率温度系数, 取 $-0.45\%/^\circ\text{C}$; $T(t)$ 、 $T_{air}(t)$ 为 t 时刻光伏阵列的表面温度和环境温度, 单位为 $^\circ\text{C}$; T_{STC} 为 STC 光伏阵列温度, 取 25°C ; T_{max} 、 T_{min} 分别为该日温度的最大值和最小值; t_p 为平均温度的时刻; V_w 为当前风速。

1.2 柴油发电机模型

柴油发电机燃料消耗费用主要与其输出功率有关^[18], 可用二次多项式表示。

$$C_{DE} = aP_{DE}^2 + bP_{DE} + c \quad (4)$$

式中: C_{DE} 为柴油发电机的燃料费用; P_{DE} 为柴油发电机的输出功率; a 、 b 、 c 为柴油发电机燃料费用函数的系数, 与具体的柴油发电机类型有关。

1.3 锂电池组模型

锂电池的荷电状态(state of charge, SOC)如下。

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t-1) + \frac{\eta_{ch} I_c(t)}{C_N} \quad \text{充电} \quad (5)$$

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t-1) - \frac{I_c(t)}{C_N \eta_{dis}} \quad \text{放电} \quad (6)$$

$$I_c(t) = \frac{P_{bat}(t)}{U} \quad (7)$$

式中: C_N 为锂电池标称容量; $I_c(t)$ 为 t 时刻锂电池实际充放电电流; $P_{bat}(t)$ 为 t 时刻锂电池出力; U 为锂电池组终端电压; $\text{SOC}(t)$ 为锂电池在 t 时刻的荷电状态; η_{ch} 为锂电池充电效率; η_{dis} 为锂电池放电效率。

2 含 EV 充电桩接入的负载模型

本文中的微电网负荷主要包括安徽大学理工 B 楼一层的用电、模拟负载、15 kW 电力电子负载、10 个电动汽车充电桩^[11]并配置两个备用接口。冬季典型日负荷曲线及晴天/阴天的光伏输出曲线如图 1 和图 2。

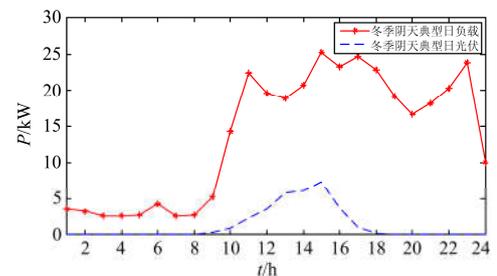


图 1 微网冬季典型日负荷及阴天光伏数据

Fig. 1 Typical daily load and cloudy PV data in microgrid

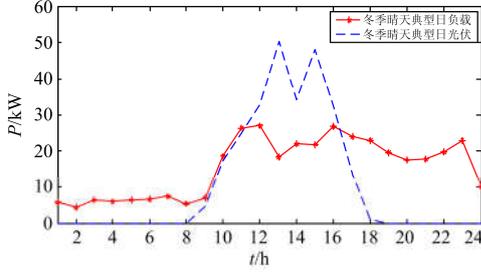


图2 微网冬季典型日负荷及晴天光伏数据

Fig. 2 Typical daily load and sunny PV data in microgrid

电动汽车日行驶里程 S 近似满足对数正态分布, $S \sim \log N(\mu_s, \sigma_s^2)$, 其概率密度函数和充电持续时长为

$$f_s(x) = \frac{1}{x} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (8)$$

$$T_c = \frac{SW_{100}}{100P_c \eta_{C_EV}} \quad (9)$$

式中: W_{100} 为百千米耗电量; η_{C_EV} 为电站的汽车充电效率。通过蒙特卡洛方法, 累计得到一定数量电动汽车充电的日负荷为

$$P_{EVload}(t) = \sum_{i=1}^N P_i(t) \quad (10)$$

式中: $P_{EVload}(t)$ 为 t 时段的总充电功率, $t=1, 2, \dots, 24$; N 为可调度电动汽车的总数量; $P_i(t)$ 为第 i 辆电动汽车在 t 时段的充电功率。

3 含 EV 接入的光柴储微网系统经济模型

因微网的需求和储能单元在系统中所发挥的作用不同, 储能单元类型及其运行功能也有所不同。本文针对集中控制式光柴储微网系统, 对微网级中央控制器进行经济优化调度, 以锂电池组在系统中实现削峰填谷功能为例, 建立了包含锂电池储能和 EV 充电桩接入的微网系统经济运行优化模型。优化目标及约束条件如下。

3.1 优化目标函数

对于柴光蓄微电网系统, 主要的运行成本包括购电成本、系统运行维护成本、污染物排放成本, 如果允许系统向电网售电, 还包括电网回购电收益。对独立系统而言, 还需考虑停电惩罚费用。选取三个目标函数如下。

3.1.1 目标函数一: 系统运行成本最低

该优化目标包含光柴储微网系统的能耗成本、运行管理成本和微网与主网之间的能量交互成本。

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^{24} \left\{ \sum_{i=1}^{NG} [C_f(P_i(t)) + C_{om}(P_i(t))] + C_{grid}(P_{grid}(t)) \right\} \quad (11)$$

式中: F_1 为微网系统的运行成本; $P_i(t)$ 为系统中第 i 个 DG 的有功输出功率; C_{grid} 为微电网与大电网交互成本; $P_{grid}(t)$ 为微网与主网的交互功率; C_f 为 DG 的消耗成本, 主要指微电网中的柴油发电机运行时所需要的燃料消耗成本, 遵从式(4); C_{om} 为系统运行管理成本, 计算方法为

$$C_{om}(P_i(t)) = K_{omit} P_i(t) \quad (12)$$

式中: K_{omit} 为第 i 个发电单元在 t 时刻运行成本系数, 单位为元/kWh; 微网从主网中吸收功率时遵从购电电价 $c_p(t)$, 向主网输出功率时遵从售电电价 $c_s(t)$, 具体表达式为

$$C_{grid}(P_{grid}(t)) = \begin{cases} c_p(t) P_{grid}(t) & P_{grid}(t) \geq 0 \\ c_s(t) P_{grid}(t) & P_{grid}(t) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

3.1.2 目标函数二: 系统折旧成本最低

该优化目标主要描述系统运行成本和各分布式电源及储能装置的安装成本折旧因素。考虑到频繁充放电会降低锂电池组的使用寿命, 进而间接增加系统的运行成本, 将锂电池的更换成本折算到运行费用中, 可以更真实地反映蓄电池寿命对运行成本和实际收益的影响。为此, 本文设计了计及锂电池的折旧成本目标函数。

$$\min F_2 = \sum_{t=1}^{24} \left\{ \sum_{i=1}^{NG} [C_f P_i(t) + C_{OM} P_i(t) + C_{DEP_DER} P_i(t)] + \gamma \left| \sum_{i, P_{bat,j} > 0}^H \frac{P_{bat,i}}{\eta_{bat,d}} + \sum_{i, P_{bat,j} < 0}^H P_{bat,i} \eta_{bat,c} \right| + C_{bw} \sum_{i, P_{bat,j} > 0}^H P_{bat,i} \right\} \quad (14)$$

$$C_{bw} = \frac{C_{bat,rep}}{Q_{lifetime}} \quad (15)$$

式中: γ 为新的蓄电池 SOC 约束惩罚因子, 可描述为蓄电池增加或减少单位电量的费用; H 为调度周期的总时段数, 取值 24; $P_{bat,i}$ 为 i 时段蓄电池平均充放电功率; $\eta_{bat,c}$ 、 $\eta_{bat,d}$ 为电池充、放电效率; C_{bw} 为锂电池充放电折旧成本; $C_{bat,rep}$ 为锂电池更换成本; $Q_{lifetime}$ 为电池单体全寿命输出总电量。本文采用的是计及锂电池折旧成本的数学模型。

3.1.3 目标函数三: 系统环境成本最低

暂时仅考虑分布式电源及配网的 CO_2 排放成本为

$$\min F_3 = \sum_{t=1}^{24} \left(\sum_{i=1}^{NG} K_i P_i(t) + k_{grid} P_{grid}(t) \right) \quad (16)$$

式中: k_i 为第 i 个 DG 的 CO_2 排放系数; k_{grid} 为配电网的 CO_2 排放系数; $P_{\text{grid}}(t)$ 为 t 时刻微电网向大电网的购电量。

3.2 约束条件

3.2.1 DG 单元输出功率约束

$$P_{i,\min} \leq P_i(t) \leq P_{i,\max} \quad (17)$$

式中: $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 为第 i 个可调度型 DG 单元的最小和最大输出功率; $P_i(t)$ 为 t 时刻第 i 个可调度型 DG 单元的功率输出。

3.2.2 锂电池存储容量约束

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}_{\max} \quad (18)$$

式中: $\text{SOC}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的荷电状态; SOC_{\min} 为蓄电池荷电状态允许的最小值; SOC_{\max} 为蓄电池荷电状态允许的最大值。

3.2.3 微电网与大电网传输功率约束

$$P_{\text{grid},\min} \leq P_{\text{grid}}(t) \leq P_{\text{grid},\max} \quad (19)$$

式中, $P_{\text{grid},\min}$ 、 $P_{\text{grid},\max}$ 分别为微电网与大电网最小和最大传输功率。

3.2.4 EV 接入约束

EV 从微网吸收的功率受充电桩输出功率及充电桩个数约束。

$$N \cdot P_{\text{EV},\min} \leq P_{\text{EV}}(t) \leq N \cdot P_{\text{EV},\max} \quad (20)$$

式中: N 为微网系统中充电桩个数; $P_{\text{EV},\min}$ 、 $P_{\text{EV},\max}$ 分别为充电桩空载损耗和最大输出功率。

3.2.5 微电网功率平衡约束

$$P_{\text{Load}} = P_{\text{grid}} + \sum_{i=1}^{NG} P_{\text{DG},i} \quad (21)$$

式中: P_{Load} 为整个微电网系统的所有电负荷, 单位为 kW; N 为微源类型; $P_{\text{DG},i}$ 为微源类型 i 的输出功率, 单位为 kW。

3.3 基于满意度原理多目标优化运行问题分析

3.3.1 光柴储微网优化运行的 CMOP 问题

经过上述的处理和分析, 可以将含 EV 接入的光柴储微网系统经济优化运行归纳为有约束多目标优化 CMOP 问题, 其数学表达为

$$\min F = \min(F_1, F_2, F_3) \quad (22)$$

$$P_{\text{Load}} = P_{\text{grid}} + \sum_{i=1}^{NG} P_{\text{DG},i}$$

$$P_{i,\min} \leq P_i(t) \leq P_{i,\max}$$

$$\text{s.t.} \quad \text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}_{\max} \quad (23)$$

$$P_{\text{grid},\min} \leq P_{\text{grid}}(t) \leq P_{\text{grid},\max}$$

$$N \cdot P_{\text{EV},\min} \leq P_{\text{EV}}(t) \leq N \cdot P_{\text{EV},\max}$$

为解决微网优化运行的多目标 CMOP 问题, 引入基于满意度原理^[18-21]的优化模型, 运用模糊函数中的模糊综合评价, 通过模糊评判过程转化成单目标问题。

3.3.2 基于满意度原理的多目标问题分析

所谓满意度是指解的性能令人满意的程度。将微网能量管理与优化运行的满意度定义为一组光伏/柴发出力、电池充放电、与大电网功率交互等状态变量下, 对系统运行成本、折旧成本、环境成本的满意程度。

首先分别求解不同优化目标在约束下的单目标最优解。其次将求得的最优解代入各自的隶属度函数, 将各子目标函数模糊化, 与权重集结合构造隶属度函数交集作为新的适应度函数。最后依据模糊综合评判原则, 应用全面学习粒子群算法^[19] (Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization, CLPSO), 求取使得模糊评判结果最优的解, 则该解即为多目标优化问题下的最优解。

3.3.3 满意度函数建立

建立满意度函数的方法有利用神经网络建立^[20]、基于目标函数直接建立^[21]、利用模糊逻辑建立^[18]、按照解的搜索代价建立^[22]四种。在此应用基于模糊理论的模糊综合评判过程处理微网优化运行 CMOP 问题。

将子目标函数模糊化, 原则上遵从在满足系统要求的前提下, 尽可能降低运行成本、维护成本, 减少环境保护折算成本, 则期望值有上限值而无下限值, 因此选择降半形的隶属度函数。采用降半 Γ 分布的隶属度函数, 如式(24)。

$$\mu_i = \begin{cases} 1 & f_i \leq f_{i,\min} \\ \exp\left(-\frac{f_i - f_{i,\min}}{f_{i,\min}}\right) & f_i > f_{i,\min} \end{cases}, \quad i=1, 2, 3 \quad (24)$$

式中, $f_{i,\min}$ 为第 i 个目标在约束条件下的最小值。

3.3.4 模糊综合评判

评判因素集为包含表征系统运行成本、折旧成本、环境成本的指标集 $U = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3\}$ 。评价体系

中的权重集 $A = \{a_1, a_2, a_3\}$, $\sum_{i=1}^3 a_i = 1$, 其中 a_i 表征

目标 F_i 在整个指标体系中重要程度。将熵权值法^[21]与主观权重相结合, 确定权重集取 $a_1 = 0.4$, $a_2 = 0.4$, $a_3 = 0.3$ 。模糊划分采用五级划分, 评价等级 $V = \{\text{优}, \text{良}, \text{中}, \text{差}, \text{劣}\}$ 。对第 i 个目标评价 R_i 是 V 上的模糊子集 $R_i = \{r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}, r_{i5}\}$, 三个单指标评价向量构成 3×5 阶评判矩阵 R 。

设实际数据集为 $F = [f_1, f_2, f_3]^T$ ，利用模糊矩阵的合成运算，得到综合评价模型 B 及最终评价结果 Z 。

$$B = A \circ R \quad (25)$$

$$Z = B \cdot F \quad (26)$$

式中，Fuzzy 运算采用 $M(\cdot, \oplus)$ 算子。

3.4 基于 CLPSO 的微网优化运行求解

应用全面学习粒子群算法对微网优化运行的单目标问题进行求解。基本思想是：对粒子速度的更新不仅考虑到当前的自身最好位置 p_{best} 和全局最好位置 g_{best} ，还向别的粒子的过去最好位置学习。假设粒子的速度和位置是 n 维向量，取其中 m 维粒子向 g_{best} 学习：

$$v_{id} = w_1 v_{id} + rand()(g_{bestid} - x_{id}) \quad (27)$$

另外的 $n-m$ 维向自身最优位置 p_{best} 学习或者在其他粒子中随机选择个体最优位置进行学习。

$$v_{id} = w_1 v_{id} + rand()(p_{bestid} - x_{id}) \quad (28)$$

式中： x_{id} 为粒子位置，由待优化的各分布式电源及电网功率构成； v_{id} 为粒子速度。该算法可保证粒子的多样性，避免 PSO 的过早收敛。适应度函数为 $1-Z$ ， Z 为模糊评判的最终评价结果。

4 算例分析

4.1 实例介绍

研究对象位于北纬 $31^\circ 52''$ 、东经 $117^\circ 17''$ 的安徽省合肥市安徽大学磬苑校区内。包含 400 V/100 kW 示范性微电网和 400 V/20 kW 实验型微电网两部分，电气结构示意图如图 3。采用交直流混合母线，包括光伏发电系统、柴油发电单元、锂电池组储能系统、充电桩(10 个)、双向 DC/DC、AC/DC 双向逆变器、双向电网模拟器、电子负载、常用负荷。分布式电源相关信息如表 1 和表 2。

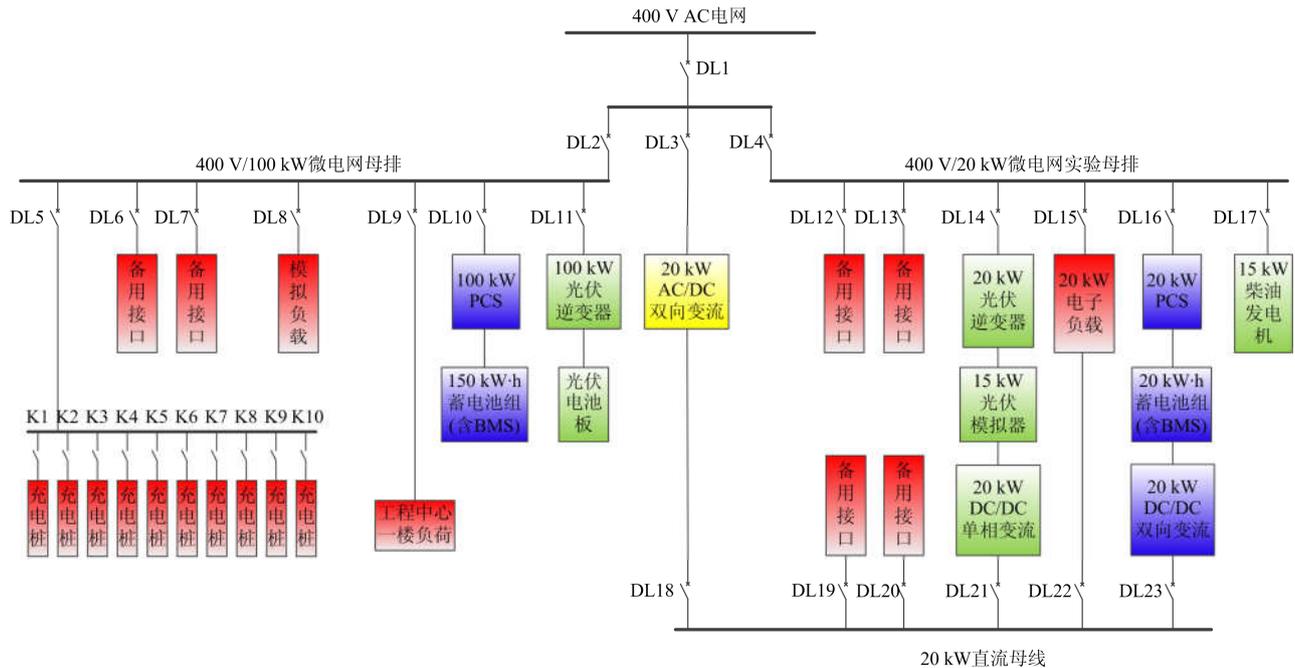


图 3 光柴储微网系统电气结构示意图

Fig. 3 Electrical structure diagram of PV-diesel-battery microgrid

表 1 分布式电源及可调度负荷成本和相关费用系数

Table 1 Cost and correlative charges coefficients of the distributed generators and adjustable load

DG 类型	(最大输出/ 吸收功率)/kW	功率成本/ (元/kW)	折旧成本系数/(元/kWh)	运行管理系数/(元/kWh)
光伏阵列	115	36 500	0.13	0.009 6
柴油发电机	15	16 000	0.410 9	0.088
锂电池组	170	2 819	0.689 5	0.009
EV 充电桩	3×10	3 333	0.611 5	0.009

表 2 柴油发电机排放系数

Table 2 Emission coefficients of diesel generator

污染物类型	污染物排放系数/(g/kWh)	治理费用系数/(元/kg)
CO ₂	649	0.210
SO ₂	0.206	14.842
NO _x	9.890	62.964

4.2 场景与优化结果

针对上述含 EV 接入的光柴储微网的数学模型和经济运行模型，研究微网处于并网/孤岛两种运行

模式且考虑典型日负荷下, 不同光照度场景中 CMOP 优化问题。应用 CLPSO 优化算法对不同运行模式和场景下微网系统经济运行优化。取最大迭代次数 500, 种群数 30, 分布式能源种类三种(柴油发电机 DG、锂电池 BT、太阳能光伏板 PV), 加速度参数 $c_1 = c_2 = 2$, 权重因子 $W_{\min} = 0.4$, $W_{\max} = 0.9$ 。按照不同的运行模式和气象条件, 划分为四种不同场景, 如表 3。

表 3 光柴储微网系统优化运行场景

Table 3 Optimal operation scenarios of PV-diesel-battery microgrid

场景划分	并网运行	孤岛运行
光照情况良好	场景 1	场景 3
光照情况不佳	场景 2	场景 4

控制策略遵从: 并网时优先考虑分布式电源输出功率; 购电及售电费用以平均电费计算。折旧成本中计及锂电池折旧成本。孤岛运行状态下, 在系统运行成本的目标函数中加入停电惩罚项^[23]。本光柴储微网的负荷为安徽大学理工楼 B 楼一层照明及动力用电, 因有电机实验平台等试验用电, 负荷高峰一般出现在 11 时、15 时和 23 时, 如图 1 和图 2。并网运行模式下, 如光照质量良好, 光伏输出功率在 9 时至 17 时可满足系统负荷, 在此期间除供给负荷, 还往锂电池内充电储能, 如图 4; 如光照度不佳, 则需要从大电网吸收功率, 如图 5 中 Grid 曲线所示。因考虑环境成本优化目标, 柴油发电机 DG 并未切入系统; 因考虑锂电池 BT 使用寿命涉及的折旧成本, 避免频繁充放电, 一天内分别一次充电及放电。孤岛运行模式下, 与大电网没有能量交互。主要依靠微网内柴油发电机及锂电池提供负荷能量。光照度良好的场景下, PV 提供负载能量并给储能锂电池充电; 19 时至 24 时, 锂电池组出力, 但受输出功率上限约束, DG 补充剩余负荷能量, 如图 6。光照度不佳的情况下, 由柴油发电机 DG 给负荷供电, 如图 7。由运行结果可见, 基于满意度的模糊

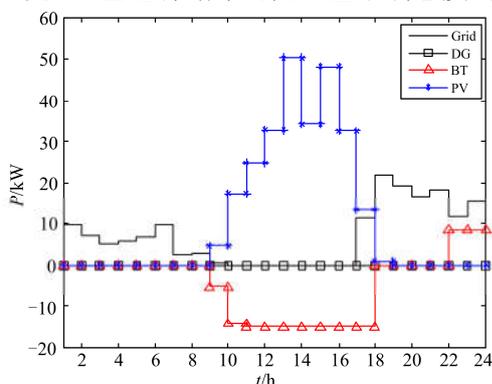


图 4 场景 1 下光柴储微网系统经济优化运行结果

Fig. 4 Result of economic optimal operation for PV-diesel-battery microgrid in the first scenarios

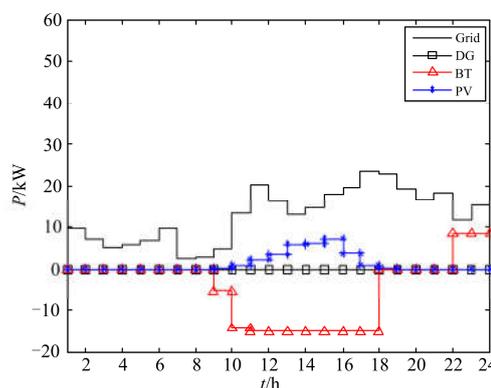


图 5 场景 2 下柴光储微网系统经济优化运行结果

Fig. 5 Result of economic optimal operation for PV-diesel-battery microgrid in the second scenarios

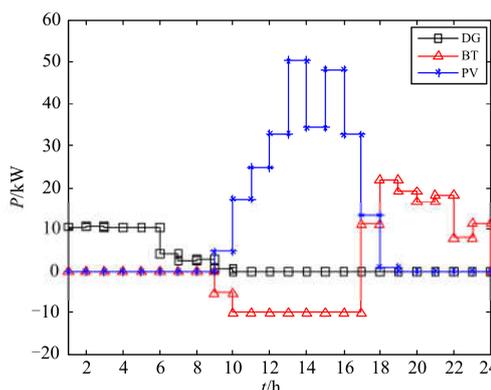


图 6 场景 3 下光柴储微网系统经济优化运行结果

Fig. 6 Result of economic optimal operation for PV-diesel-battery microgrid in the third scenarios

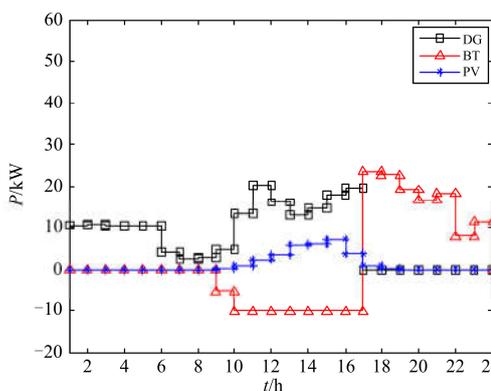


图 7 场景 4 下光柴储微网系统经济优化运行结果

Fig. 7 Result of economic optimal operation for PV-diesel-battery microgrid in the fourth scenarios

综合判断可以有效、合理地处理微电网优化运行中的多目标问题。在 Win10 系统, Inter i7-5600U 处理器, 8 G 内存的环境下, 以 Matlab2012a 运行该程序

的平均时间为 1.04 s。

4.3 结果对比与分析

不失一般性，以场景 3 为例，分别研究在单目标优化、加权多目标优化以及基于满意度的多目标优化下 24 h 内运行结果，如表 4。当以微电网系统运行成本最低为目标时，可得到经济性最优方案 1；以折旧成本最低为目标时，可得到经济性最优方案 2；以环境成本最低为目标时，可获得环保性最优的求解方案。线性加权法处理多目标优化的结果也作为比较列在其中。

表 4 场景 3 下不同目标下的优化结果

Table 4 Results of optimization with different objectives in the third scenarios

目标	运行成本/元	折旧成本/元	环境成本/元
经济性最优 1	207.97	212.30	28.79
经济性最优 2	214.76	205.15	28.37
环保性最优	210.10	210.23	26.52
线性加权多目标优化	212.65	206.10	27.70
基于满意度多目标优化	210.13	206.12	26.64

由上述比较结果可见，单目标优化可以获得某个指标的极值，无法综合考虑多个约束与指标。采用线性加权的多目标优化问题，决策者可能只对优化目标的重要性有部分了解，一般无法提供出具体的信息以求得准确的权系数值。采用文献[17]中的权重选择，仿真优化结果在折旧成本方面与本方案相近，但在运行成本和经济指标方面均劣于本方案优化结果。可见，基于模糊综合评价的满意度原理，给每个子目标函数设定一个期望值，并给出多目标相对于子目标期望值隶属度的处理方法，可针对光柴储交直流混合微网的实际情况，综合考虑各目标下的利益，获得更优的经济运行方案。

5 结论

本文以具体的柴储微网为研究对象，考虑 EV 接入后，在并网及孤岛状态下的经济优化运行。以分布式发电单元的发电费用、折旧费用和环境治理费用为多个优化目标，考虑微网运行约束条件的经济优化运行模型，形成 CMOP 问题。引入基于满意度原理的模糊综合评价，综合考虑各个优化目标，将其转化为综合的单目标问题。以安徽大学包含光伏、柴油发电机、锂电池、电动汽车充电桩和负载的交直流混合微电网为具体研究对象，考虑并网/孤岛，光照度不同的多种场景，应用 CLPSO 算法，获得微网内分布式电源的输出功率和储能装置充/放电方案。仿真结果验证了模型和算法的有效性，验证了所提出模糊综合评价法和全面学习粒子群优

化算法相结合的可行性。

参考文献

[1] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-15.
WANG Chengshan, LI Peng. The development and challenge of distributed generation, microgrid and smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-15.

[2] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.

[3] 张德举, 郭力, 王成山. 高风电渗透率下的独立型微网优化调度方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(9): 1-7.
ZHANG Deju, GUO Li, WANG Chengshan. Optimal dispatching method of isolated microgrids with high wind power penetration rate[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2016, 28(9): 1-7.

[4] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.

[5] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.
WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.

[6] ERIC S, JAMES M P. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 198-205.

[7] BAHMAN B F, RASOUL A A. Optimal sizing of battery energy storage for micro-grid operation management using a new improved bat algorithm[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2014, 56: 42-54.

[8] 郭力, 刘文建, 焦冰琦, 等. 独立微网系统的多目标优化规划设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 524-536.
GUO Li, LIU Wenjian, JIAO Bingqi, et al. Multi-objective optimal planning design method for stand-alone microgrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 524-536.

[9] 茆美琴, 孙树娟, 苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储微

- 电网经济性分析[J]. 电力系统自动, 2011, 14(3): 30-35.
MAO Meiqin, SUN Shujuan, SU Jianhui. Economic analysis of wind-PV-battery microgrid with electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 14(3): 30-35.
- [10] YANG Qingyu, TAN Zhengan, AN Dou, et al. On optimal electric vehicles penetration in a novel Archipelago microgrids[C] // IEEE/ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing, June 26-29, 2016, Shanghai, China: 331-336.
- [11] MORAD MAA, MOSTAFA F S, HANY E F, et al. A multistage centralized control scheme for islanded microgrids with PEVs[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 927-937.
- [12] 姚莉娜, 杨东海, 段运鑫. 微电网离网运行有功缺额计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 137-144.
YAO Lina, YANG Donghai, DUAN Yunxin. A calculation method of active power shortage in off-grid microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 137-144.
- [13] 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 method of AC/DC hybrid microgrid under real time tariff mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 13-20.
- [14] 邢龙, 张沛超, 方陈, 等. 基于广义需求侧资源的微网运行优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 7-12, 133.
XING Long, ZHANG Peichao, FANG Chen, et al. Optimal operation for microgrid using generalized demand side resource[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 7-12, 133.
- [15] 李保恩, 李献伟, 毋炳鑫. 基于储能 SOC 状态的微电网能量优化调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 108-114.
LI Baoen, LI Xianwei, WU Bingxin. Research on energy optimal dispatching strategy for microgrid based on battery SOC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 108-114.
- [16] YIN C J, HU H B, FABRIC L, et al. Energy management of DC microgrid based on photovoltaic combined with diesel generator and supercapacitor[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 132: 14-27.
- [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] 邱海伟. 基于多目标的微电网优化调度研究[D]. 上海: 上海电力学院, 2013.
QIU Haiwei. Research of microgrid optimal operation based on multi-objective[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2013.
- [19] ZHANG Q, WANG Q J, LI G L. Switched system modeling for the radar antenna servo turntable[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2016, 14(5): 1153-1159.
- [20] 张国凤, 胡群威. 基于满意度原理的旋转式分插机构多目标优化设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 22-28.
ZHANG Guofeng, HU Qunwei. Multi-objective optimization design of rotary transplanting mechanism based on satisfactory degree theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(9): 22-28.
- [21] 姚新胜, 黄洪钟, 周仲荣, 等. 基于广义满意度原理的多目标优化理论研究[J]. 应用科学学报, 2002, 20(3): 275-281.
YAO Xinseng, HUANG Hongzhong, ZHOU Zhongrong, et al. A study of the multi-objective optimization theory based on the generalized satisfactory degree principle[J]. Journal of Applied Science, 2002, 20(3): 275-281.
- [22] MICHAEL A G, WYNN C S, RICHARD L F. A theory of satisficing decisions and control[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: System and Humans, 1998, 28(6): 763-779.
- [23] 李志奇, 吕林, 张燃. 计及停电损失期望的微网经济运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 77-82.
LI Zhiqi, LÜ Lin, ZHANG Ran. Economic operation of microgrid considering customer interruption cost[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2013, 25(5): 77-82.

收稿日期: 2017-05-03; 修回日期: 2017-10-09

作者简介:

张倩(1984—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为微电网经济优化运行、多目标优化算法、预测控制; E-mail: qianzh@ahu.edu.cn

丁津津(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能电网, 主动配电网; E-mail: djjin123@126.com

刘童(1993—), 男, 在读硕士, 研究方向为微电网经济优化运行。E-mail: 1024316402@qq.com

(编辑 周金梅)