

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1801954

基于 MOFA 算法的微网系统优化调度

吴倩雯 张会林 高宁

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

摘要: 针对大规模电动汽车入网给微电网带来的影响,在并网运行方式下,以微电网运行成本、环境治理成本和电动汽车用户充放电成本的综合效益为目标,考虑电动汽车的时空分布特性,提出了分时电价下电动汽车有序充放电的调度方案。建立了包含风、光、储、燃料电池、微型燃气轮机、电动汽车及负荷的微网系统多目标经济调度模型,采用多目标萤火虫(MOFA)算法对调度模型进行求解,并与多目标粒子群优化(MOPSO)算法进行对比。基于 MATLAB 平台,以某典型微电网系统为例进行仿真,调度周期为一天,算例结果验证了所提方案、模型和算法的有效性。

关键词: 微电网;优化调度;电动汽车;分布式电源;多目标萤火虫算法(MOFA)

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4054

Optimal dispatch of micro-grid system based on multi-objective firefly algorithm

Wu Qianwen Zhang Huilin Gao Ning

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: For the impact of large scale electric vehicles connected to the micro grid, in parallel operation mode, the comprehensive optimization of operation cost of micro grid, environmental management cost and charging and discharging cost of electric vehicle user is selected as the objective function, considering the time-space distribution characteristics of electric vehicles, a scheduling scheme for orderly charging and discharging of electric vehicles under time-sharing electricity price is proposed. A multi-objective economic scheduling model for micro grid system including wind, light, storage, fuel cell, micro gas turbine, electric vehicle and load was established, multi-objective firefly algorithm was used to solve the scheduling model and compared with multi-objective particle swarm optimization algorithm. Based on the MATLAB platform, a typical micro grid system is taken as an example for simulation, the scheduling period is one day, the results of an example verify the validity of the proposed scheme, model and algorithm.

Keywords: micro-grid; optimal dispatch; electric vehicles; distributed generation; multi-objective firefly algorithm

0 引言

在能源危机和环境恶化的双重压力下,分布式发电得到迅速发展,但其具有间歇性和不可控性,如大量接入会带来频率和电压的冲击,造成电网的不稳定。微电网是一个由多种微电源、储能装置、控制装置以及负荷共同组成的相对独立的低压电网,通过公共连接点与主网相连,有效地解决分布式电源并网问题^[1],为可再生资源的综合利用提供了一种有效的技术手段,最大程度的降低传统能源的消耗,实现节能减排。

电动汽车(electric vehicle, EV)作为绿色出行工具,近年来其保有量不断增长。而 EV 大规模的无序充电不仅会增加电网负荷高峰时的负担,也会影响电能质量,给电网稳

定运行带来巨大挑战。电动汽车作为一种灵活的负荷和移动的储能装置,可实现与电网间的信息和能量互换(vehicle to grid, V2G)^[2],将电动汽车接入微电网,鼓励电动汽车有序充放电,与分布式能源形成互补,能有效平抑可再生能源对电网造成的波动,缓解电网供电压力,达到“削峰填谷”的作用,同时也缓解了电动汽车直接接入对主网的影响^[3]。

经济调度作为微电网研究的核心,近年来已有大量学者对其进行研究。文献[4]提出了一种风光互补混合的供电系统,没有考虑环境成本;文献[5]综合考虑了微电网经济性和环保性,评估了不同运行方案下经济与环保的协同优化程度;文献[6]考虑风电、光伏以及钠硫电池等不确定性因素对调度的影响,建立了微电网动态经济调度模型,但以上均未计及电动汽车接入对微网的影响;文献[7]针对含

有电动汽车负荷的微电网,提出分时电价下含电动汽车充电负荷的微电网调度方法,但未考虑 V2G 模式;文献[8]提出的考虑电动汽车充放电的微电网调度模型有效地降低了系统的运行成本,但未考虑环境治理成本和 EV 用户的充放电成本。

本文对电动汽车接入后的微电网系统进行研究,综合考虑运行成本、环境治理成本和 EV 用户充放电成本,在微电网并网运行方式下建立了包含风机(wind turbine, WT)、光伏电池(photovoltaic cell, PV)、微型燃气轮机(micro turbine, MT)、燃料电池(fuel cell, FC)、蓄电池(battery, BT)、电动汽车及负荷的多目标优化调度模型。对比多目标粒子群优化(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)算法,选取寻优能力和全局收敛性较强的多目标萤火虫算法(multi-objective firefly algorithm, MOFA)对模型进行求解,并通过算例验证了电动汽车有序充放电模式入网的可行性和有效性。

1 含电动汽车的微电网系统

1.1 风力发电

风力发电机的输出功率与风速有关,通过威布尔分布对风速进行拟合^[9],其概率密度函数如式(1)所示。

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

式中: v 为风速; k 为形状系数; c 为尺度系数。风力发电机的输出功率如式(2)所示。

$$P_w = \begin{cases} 0, & v < v_{ci} \text{ 或 } v \geq v_{co} \\ P_N \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_N^3 - v_{ci}^3}, & v_{ci} \leq v \leq v_N \\ P_N, & v_N \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_{ci} 、 v_{co} 、 v_N 分别为切入风速、切出风速、额定风速; P_N 为风力发电机的额定输出功率。

1.2 光伏发电

光伏发电即太阳能转换为电能的过程,其输出功率受光照强度和环境影响。一般可通过在标准测试条件下(太阳光入射强度 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,环境温度为 $25\ ^\circ\text{C}$)的光伏出力来近似推出当前环境下的输出功率^[10]。

$$\begin{cases} P_{PV} = P_{STC} \frac{G_C}{G_{STC}} [1 + K(T_C - T_{STC})] \\ T_C = T_1 + 30 \times \frac{G_C}{1\ 000} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{STC} 、 G_{STC} 和 T_{STC} 分别为标准测试条件下光伏额定发电功率、光照强度和环境温度; G_C 和 T_C 分别为当前工况下的光照强度和工作点的电池温度; K 为功率温度系数; T_1 为当前周围环境温度。

1.3 微型燃气轮机组

微型燃气轮机作为微网中的可控发电单元之一,其燃料成本不仅取决于发电量,还与其发电效率有关。燃料成

本的表达式如式(4)所示。

$$C_{MT} = \frac{C_{nl} P_{MT}}{L \eta_{MT}} \quad (4)$$

式中: P_{MT} 、 η_{MT} 分别为燃气轮机的输出功率和发电效率; L 为天然气热值,取 $9.7\ \text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$; C_{nl} 为天然气价格,取 $2.05\ \text{元}/\text{m}^3$ 。

1.4 燃料电池

燃料电池阴阳极上的含氢化学燃料和氧气等氧化剂发生反应后,离子在电解质中定向移动,在外部电路逐渐形成电位差进而产生电流。

燃料电池的发电成本与输出功率的关系为:

$$C_{LFC} = C_{ng} \frac{1}{LHV_{ng}} \frac{P_{FC}}{\eta_{FC}} \quad (5)$$

式中: C_{ng} 为化学燃料的价格; LHV_{ng} 为对应燃料的低热值; P_{FC} 为燃料电池的输出功率; η_{FC} 为燃料电池的工作效率。

1.5 蓄电池

蓄电池能够根据可再生能源出力情况进行充放电,有效地平抑了风力、光伏发电等不可控发电单元对配电网的冲击,保障了电网运行的稳定性^[11]。蓄电池在 t 时刻的储能状态可表示为:

$$\begin{cases} E_k(t) = E_k(t-1) + P_k(t)\Delta t\eta_c, & P_k(t) > 0 \\ E_k(t) = E_k(t-1) + \frac{P_k(t)\Delta t}{\eta_d}, & P_k(t) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $E_k(t)$ 、 $E_k(t-1)$ 分别为蓄电池在 t 时刻和 $t-1$ 时刻的荷电量; $P_k(t)$ 表示 t 时刻的充放电功率(大于 0 表示充电,小于 0 表示放电); η_c 、 η_d 分别表示充放电效率; t 为步长。

1.6 电动汽车时空特性

电动汽车充电需求的时空特性主要受用户行驶习惯的影响,具有随机性和动态性。电动汽车充电功率和充电时间主要取决于日行驶结束时刻和日行驶里程,根据 2009 年美国交通部对全美家用车辆的出行统计的调查结果,对得到的数据进行拟合^[12],将电动汽车日行驶结束时刻和日行驶里程分别近似为正态分布和对数正态分布。

电动汽车日行驶里程的概率密度函数为:

$$f_s(x) = \frac{1}{x} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (7)$$

日行驶结束时刻 t_0 可认为是电动汽车最早可入网充放电的时刻,其概率密度函数为:

$$f_t(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right), & \mu_t - 12 < x < 24 \\ \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - (\mu_t - 24))^2}{2\sigma_t^2}\right), & 0 < x < \mu_t - 12 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mu_s = 8.25$; $\sigma_s = 3.16$; $\mu_t = 16.36$; $\sigma_t = 3.25$ 。

本文以常规慢充的电动汽车为研究对象,忽略充电开始和结束两个较短的过渡时段,则电动汽车充电过程可近似为是恒功率的。考虑到动力电池的使用寿命,电池 SOC

设定区间为 0.3~0.9。

2 微电网多目标优化调度模型

2.1 目标函数

随着微网技术的发展以及电动汽车的普及,调度不再是以单一的运行成本最低为目标,而是一个多目标优化问题。本文以微网系统的运行成本最低、环境治理成本最低以及电动汽车用户充放电成本最低为目标,建立微电网多目标优化调度模型。

目标函数可表示为:

$$\min F(x) = [F_1(x), F_2(x), F_3(x)] \quad (9)$$

1) 目标函数 1: F_1 为微网系统的运行成本,主要包括各发电单元各机组的燃料成本、运行维护成本、折旧成本以及与大电网之间的能量交互成本。

$$F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (C_{\text{fuel}}(i, t) + C_{\text{OM}}(i, t) + C_{\text{DP}}(i, t) + C_{\text{grid}}(t)) \quad (10)$$

式中: T 为调度周期所含时间间隔 t 的个数; N 为可控发电单元的数目; $C_{\text{grid}}(t)$ 表示 t 时刻微网与外部主网间的能量交互成本; $C_{\text{fuel}}(i, t)$ 、 $C_{\text{OM}}(i, t)$ 和 $C_{\text{DP}}(i, t)$ 分别表示 t 时刻第 i 个发电单元的燃料成本、运行维护成本和折旧成本。

2) 目标函数 2: F_2 为环境治理成本,微电网中的一些传统供电设备运行时会产生 NO_x 、 SO_2 、 CO 等有害气体,需要经过处理后才能排放。

$$F_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \left[\sum_{i=1}^N (C_k \gamma_{ik}) P_i(t) + (C_k \gamma_{\text{grid}k}) P_{\text{grid}}(t) \right] \quad (11)$$

式中: C_k 代表系统要处理每千克的 k 类污染物所需费用; γ_{ik} 为第 i 个可控发电单元对第 k 类污染物的排放系数; $\gamma_{\text{grid}k}$ 为大电网向微网输电时第 k 类污染物的排放系数; $P_i(t)$ 为第 i 个可控发电单元在 t 时刻的发电量; $P_{\text{grid}}(t)$ 为 t 时刻微电网向大电网的购电量。

3) 目标函数 3: F_3 为电动汽车用户充放电成本。车主参考分时电价^[13],考虑在负荷低谷时充电,参与 V2G 调度的电动汽车,在满足自身负荷需求的情况下,在负荷高峰时向微电网售电,既达到“削峰填谷”的目的,也实现了电动汽车用户利益的最大化。

$$F_3 = \sum_{i=1}^{24} \sum_{t=1}^n (P_{\text{EVc},i}(t)c(t)\Delta t_{c,i} - P_{\text{EVd},i}(t)p(t)\Delta t_{d,i}) \quad (12)$$

式中: n 为电动汽车保有量; $P_{\text{EVc},i}(t)$ 为第 i 辆电动汽车在 t 时段的充电功率; $P_{\text{EVd},i}(t)$ 为电动汽车在 t 时段的放电功率; $c(t)$ 和 $p(t)$ 分别表示电动汽车在 t 时段内每千瓦时的充电费用和放电上网售价。

2.2 约束条件

1) 微网系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_i + P_{\text{Grid}} = P_{\text{Load}} + P_{\text{EVload}} + P_b \quad (13)$$

式中: P_i 表示微电网内各分布式电源的输出功率; P_{Grid} 表示系统向主网的购电量,若值为负则系统向主网售电; P_{Load} 表示系统常规负荷需求量; P_{EVload} 表示电动汽车的充电负荷,值为负时表示电动汽车的放电量; P_b 表示蓄电池充电功率,值为负时处于放电状态。

2) 发电单元输出功率约束

$$P_{i\min} \leq P_i \leq P_{i\max} \quad (14)$$

式中: $P_{i\min}$ 和 $P_{i\max}$ 分别表示第 i 个发电机组的最小和最大输出功率。

3) 蓄电池容量约束

$$\begin{aligned} \text{SOC}_{\text{BTmin}} &\leq \text{SOC}_{\text{BT}}(t) \leq \text{SOC}_{\text{BTmax}} \\ \text{SOC}_{\text{EVmin}} &\leq \text{SOC}_{\text{EV}}(t) \leq \text{SOC}_{\text{EVmax}} \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $\text{SOC}_{\text{BT}}(t)$ 和 $\text{SOC}_{\text{EV}}(t)$ 分别表示 t 时刻微网系统蓄电池、车载电池的 SOC 值; $\text{SOC}_{\text{BTmax}}$ 和 $\text{SOC}_{\text{BTmin}}$ 分别为蓄电池荷电状态 SOC 的上下限; $\text{SOC}_{\text{EVmax}}$ 和 $\text{SOC}_{\text{EVmin}}$ 分别表示电动汽车车载电池充放电 SOC 上下限。

4) 微网与主网能量传输约束

$$P_{\text{gridmin}} \leq P_{\text{grid}}(t) \leq P_{\text{gridmax}} \quad (16)$$

式中: $P_{\text{grid}}(t)$ 表示 t 时刻微网与主网的能量传输值; P_{gridmax} 和 P_{gridmin} 分别表示微网与主网之间电功率传输的最大、最小值。

2.3 模型求解算法

2.3.1 基本萤火虫算法

萤火虫算法(firefly algorithm, FA)是文献[14]提出的一种启发式进化算法。自然界中的萤火虫通过发光特性来吸引周围的同伴或猎物,该算法正是通过模拟萤火虫的这种自然行为来达寻优的目的。在萤火虫算法中,将目标函数转化为荧光亮度,通过亮度比较选择萤火虫的移动方向,所有萤火虫移动到新位置后,更新其亮度,直至达到最大的迭代次数,最后获得最优解。

定义 1 萤火虫的相对荧光亮度为:

$$I_{ij} = I_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (17)$$

式中: I_0 为萤火虫本身的最大荧光亮度; γ 为光强损耗系数,荧光亮度会随着距离的增加而逐渐减弱; r_{ij} 为任意两个萤火虫 i 和 j 之间的空间距离。

定义 2 萤火虫的吸引度为:

$$\beta = \beta_0 e^{-r_{ij}^2} \quad (18)$$

式中: β_0 为 $r=0$ 处的吸引度,即光源处对其他萤火虫的最大吸引度。

定义 3 萤火虫 i 向萤火虫 j 移动的位置更新公式为:

$$X_i = X_i + \beta_{ij} \cdot (X_j - X_i) + \alpha(\text{rand} - 0.5) \quad (19)$$

式中:第 2 项表明萤火虫的移动步长与萤火虫 i 和 j 之间的吸引力大小有关; $\alpha(\text{rand} - 0.5)$ 是一个随机扰动项,可避免算法过早陷入局部最优。

2.3.2 多目标萤火虫算法

在基本的萤火虫算法中,进化过程主要包含亮度比较、位置更新、亮度更新等环节。对于多目标优化问题,可对单

目标萤火虫算法进行改造^[15],使其产生一组完整的 Pareto 最优解集,并且需要保证解的收敛性和多样性。

1) 萤火虫亮度比较改进策略

定义 4(Pareto 支配)对于任意给定的两个决策向量 u_1, u_2 属于 U, U 为多目标问题的解集,当且仅当:

$$\begin{cases} f_m(u_1) \leq f_m(u_2) & \forall m \in \{1, \dots, M\} \\ f_m(u_1) < f_m(u_2) & \exists m \in \{1, \dots, M\} \end{cases} \quad (20)$$

则称 u_1 支配 u_2 , 即 u_1 非支配等级低于 u_2, M 为目标函数的个数^[16]。

2) 精英保留策略

精英保留策略是为了保留在优化过程中出现的优质个体,在最后一次迭代完成后,参与 Pareto 最优解的筛选操作。在 MOFA 的求解过程中,萤火虫 i 在其决策域范围内进行亮度比较时,如果不存在亮度大于萤火虫 i 的个体,则将萤火虫 i 存储在集合 P 中,并对其进行位置更新,更新公式为:

$$x_i = x_i + \alpha \cdot (rand - 0.5) \quad (21)$$

2.3.3 算法描述

综上所述,MOFA 的运算步骤如下:

步骤 1 初始化算法的各项参数,随机生成个数为 n 的萤火虫群。

步骤 2 对每个萤火虫个体进行非支配排序和拥挤度距离计算,确定 Pareto 支配关系。

步骤 3 由式(18)计算个体间的吸引度 β ,若萤火虫 i 亮度大于萤火虫 j ,则根据式(19)移动萤火虫 j ;如种群内不存在亮度大于萤火虫 i 的个体,则将其存入 P ,并由式(21)对其进行更新位置。

步骤 4 第 t 代种群 F_t 在完成步骤 3 后得到得到临时种群 F' ,合并种群 F_t 和 F' ,计算合并后的萤火虫个体的非支配等级和拥挤度距离,筛选出 n 个萤火虫个体组成 $t+1$ 代种群 F_{t+1} 。

步骤 5 判断是否到达最大迭代次数,若不是,则重复步骤 2;若是,则对最终得到的种群 F 和 P 进行 Pareto 占优排序和拥挤度距离排序,输出 Pareto 最优解集。

3 算例分析

本文以某地区微电网系统为例,包含多种分布式电源、储能蓄电池和电动汽车,系统并网运行,调度周期为 1 天,共 24 个时段。该地区某日的日负荷预测曲线及 WT、PV 日输出功率曲线如图 1 所示。燃气轮机组和燃料电池组的输出功率上限均为 100 kW;设该区域电动汽车保有量为 70 辆,车载电池额定容量为 30 kW·h,电池荷电状态上下限分别为 92% 和 25%,充放电功率均为 5 kW,忽略充放电损耗。

为鼓励 EV 用户有序充放电,设置峰谷分时电价,与该时段微网向外部电网的购电价格一致,如表 1 所示;并给予电量上网补贴,为 0.43 元/kW·h。

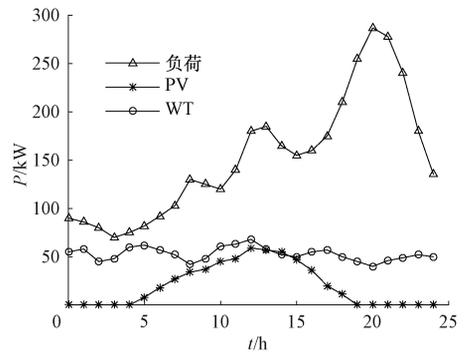


图 1 分布式电源与日负荷的预测功率

表 1 微电网购电、售电价格

时段	购电价格/ (kW·h)	售电价格/ (kW·h)
高峰(8~12,17~21)	0.85	0.65
平(12~17,21~24)	0.56	0.41
低谷(0~8)	0.28	0.21

本算例假设在有序充放电模式下用户响应度 $\lambda = 0.5$,其余车辆处于有序充电模式。MOFA 的参数设置:种群规模为 60,迭代次数为 200, $\gamma = 1, \beta_0 = 0.1, \alpha = 0.05$ 。

风力发电和光伏发电为清洁可再生能源发电,认为是零污染且无需运行成本。确定总负荷需求后,优先消纳风力和光伏出力,其余发电单元和主网依据优化调度结果安排出力。分别采用 MOFA 算法和 MOPSO 算法来求解调度模型,图 2 和 3 所示分别给出了采用 MOFA 算法时电动汽车无序充电和有序充放电的优化结果。

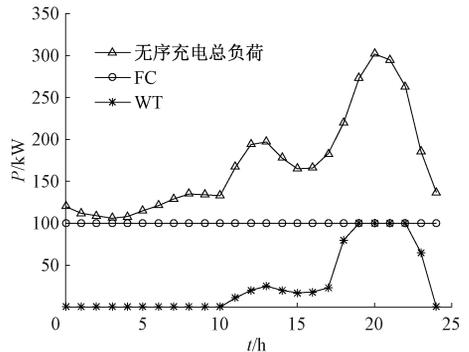


图 2 电动汽车无序充电时的优化结果

对比分析图 2 和 3 可知,电动汽车的无序充电增加了负荷峰值,19:00、20:00 的负荷高峰分别达到 273.52 kW 和 302.68 kW,而微电网各发电单元总的发电量分别为 265.67 kW 和 293.79 kW,超出的部分以 0.85 元/kW·h 的价格向大电网高价购电,增加了微网系统的运行成本,且大电网发电会产生更多的污染物,环境治理成本也随之达到高峰。

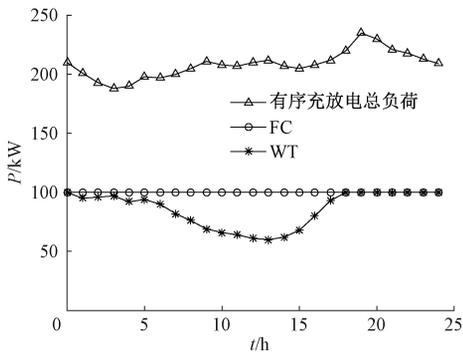


图 3 电动汽车有序充放电时的优化结果

车主在不影响自身出行的前提下,参考峰谷分时电价政策,选择在负荷低谷时充电,在负荷高峰时向电网反向送电,在一定程度上达到了“削峰填谷”的目的,负荷峰值由无序充电时的 302.68 kW 下降到 235.45 kW,避免了在高峰时段向大电网购电,减少了购电成本和环境治理成本;EV 用户在电价低时充电,显然充电成本有所降低,并且部分电动汽车参与 V2G 放电,还可获得额外的电量上网补贴。

基于 MOFA 算法,统计得到一天内电动汽车无序/有序充放电的调度结果,如表 2 所示。

表 2 电动汽车无序/有序充放电的调度结果(元)

成本	无序充电	有序充放电
运行成本	7 862.325	7 082.336
环境治理成本	395.253	312.686
EV 用户充放电成本	183.645	156.605
总成本	8 441.223	7 551.627

由表 2 数据可知,无论是发电成本、环境治理成本还是电动汽车用户的充放电成本,在有序充放电模式下都有所降低,分别减少了 9.92%, 20.88% 和 14.72%。采用 MOPSO 算法时,无序充电和有序充放电模式下的总成本分别为 8 492.335 元、7 588.658 元,而采用 MOFA 算法时总成本分别节省了 51.112 元、37.031 元。

4 结 论

本文研究了微电网在并网运行时的优化调度问题,以运行成本最小、环境治理成本最小和电动汽车用户充放电成本最小为目标函数,建立了含电动汽车的微电网多目标优化调度模型。算例针对某典型微电网系统,分别采用 MOFA 算法和 MOPSO 算法来求解调度模型,由调度结果可知,MOFA 算法保证了最优解的多样性且更具经济性,相比无序充电,电动汽车有序充放电在一定程度上实现了“削峰填谷”,缓解了电力紧张,给微电网系统和电动汽车用户都带来了一定的经济效益。

参考文献

- [1] 沈鑫,曹敏,周年荣,等.多微网配电系统协调优化调度和经济运行研究[J].电子测量与仪器学报,2016,30(4):568-576.
- [2] 刘晓飞,张千帆,崔淑梅.电动汽车 V2G 技术综述[J].电工技术学报,2012,27(2):121-127.
- [3] 苗秩群,江全元,曹一家.考虑电动汽车随机接入的微网优化调度[J].电力自动化设备,2013,33(12):1-7.
- [4] 杨琦,张建华,刘自发,等.风光互补混合供电系统多目标优化设计[J].电力系统自动化,2009(17):86-90.
- [5] 邱晓燕,赵劲帅,史光耀,等.基于 HSMOPSO 算法的微电网经济与环保协同优化方法[J].高电压技术,2017,43(4):1223-1230.
- [6] 黄伟,黄婷,周欢,等.基于改进微分进化算法的微电网动态经济优化调度[J].电力系统自动化,2014,38(9):211-217.
- [7] 徐从启,高瑞林,贾桂芝,等.考虑分时电价电动汽车负荷的微电网优化调度[J].电气工程学报,2017,12(11):12-20.
- [8] 柯奇江,刘肖,刘波.含多种分布式电源的微电网经济调度[J].宁夏电力,2017(3):7-12.
- [9] 张昭遂,孙元章,李国杰,等.计及风电功率不确定性的经济调度问题求解方法[J].电力系统自动化,2011,35(22):125-130.
- [10] 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].电力系统自动化,2011,35(14):30-35.
- [11] 余岳,栗梅,孙尧,等.计及电动汽车的微电网储能单元容量优化[J].仪器仪表学报,2014,35(6):1261-1268.
- [12] 张良,严正,冯冬涵,等.采用两阶段优化模型的电动汽车充电站内有序充电策略[J].电网技术,2014,38(4):967-973.
- [13] 毛晓明,陈深,吴杰康,等.分时电价机制下含蓄电池微电网的优化调度[J].电网技术,2015,39(5):1192-1197.
- [14] YANG X S. Multiobjective firefly algorithm for continuous optimization [J]. Engineering with Computers, 2013,29(2):175-184.
- [15] 朱书伟,周治平,张道文.基于改进多目标萤火虫算法的模糊聚类[J].计算机应用,2015,35(3):685-690.
- [16] AHMED F, DEB K. Multi-objective optimal path planning using elitist non-dominated sorting genetic algorithms [J]. Soft Computing, 2013, 17(7):1283-1299.

作者简介

吴倩雯,1994 年出生,硕士研究生,主要研究方向为智能电网、电力系统规划与优化运行等。

E-mail:741666934@qq.com