

考虑与电动汽车换电站互动的微电网经济调度

陈 思¹, 张 焰¹, 薛贵挺², 孙伟卿³

(1. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200240; 2. 国网北京门头沟供电公司, 北京 102300;

3. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为实现电动汽车换电站(BSS)与微电网所有权不同时微电网运行优化,建立了微电网经济调度双层优化模型。在上层模型中,微电网调度中心是决策机构,其目标函数是微电网供电成本最小;在下层模型中,BSS运营商是决策机构,在考虑换电需求量不确定性的基础上,建立以 BSS 利润最大为目标函数的盒式集合鲁棒优化模型。上、下层优化模型通过微电网向 BSS 提供的个性化电价实现互动。采用入侵杂草算法和 CPLEX 软件分别对上、下层优化问题进行求解,得到微电网内部可控微电源的出力 and 个性化电价,实现微电网和 BSS 的共同利益。对某中压微电网进行算例分析,结果验证了所提模型及算法的合理性和有效性。

关键词: 微电网; 电动汽车; 换电站; 优化; 经济调度; 入侵杂草优化算法; 盒式集合鲁棒优化; 模型
中图分类号: TM 72 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.009

0 引言

作为解决能源紧缺、全球气候变暖 and 环境污染的有效途径,微电网 and 电动汽车入网技术 V2G(Vehicle to Grid)得到各国学者 and 电力行业的广泛关注。微电网运行方式灵活,满足用户个性化、多样化的用电需求,将电动汽车 EVs(Electric Vehicles)或电动汽车换电站 BSS(Battery Swap Station)接入微电网是智能电网发展的一个趋势,有利于充分发挥二者的优势^[1-2]。

近年来,国内外学者在电动汽车充放电控制^[3-5]、电动汽车充放电对电网影响^[6-9]以及电动汽车与风电等新能源协调控制^[10-11]等方面做了大量的研究,取得了丰硕成果。其中,文献[5]通过充电分时电价和有序充电措施管理电动汽车充电,建立了面向局域配电网的充电控制系统;文献[8]构建了含有插电式混合动力电动汽车(PHEVs)充放电的动态经济调度数学模型;文献[9]建立了电动汽车在智能接入模式下的微电网优化调度模型,其调度效果优于随机充电及错峰充电模式。但这些研究都还没有考虑电动汽车发展的另外一种重要形式,即电动汽车采用更换电池模式,以换电站的形式接入电网,目前这方面的研究还较少。文献[12]考虑了电动汽车换电需求和市场电价的不确定性,以运行成本的期望和方差为目标,建立了 BSS 的能量管理模型。文献[13]在分析电动公交车换电需求的基础上,研究了电池组的更换策略和充电策略。文献[14]基于分时电价机制,建立了 BSS 线性优化模型,并采用 LINGO 软件得到

了 BSS 运营收益最大化的充放电控制策略。文献[15]研究了基于动态电价的充电控制策略,建立了购买电池的原始投资和后期运营成本的经济数学模型,为充电站的运营提供了指导。文献[16]以燃料成本最小、氮氧化物排放最少、购电成本最小 and 电网波动最小为目标,建立了含可再生能源发电 and BSS 的电力系统经济调度模型。文献[17-20]以微电网运行成本最小为目标,建立了含 BSS 的微电网运行优化模型。其中,文献[20]建立的优化模型考虑了可再生能源功率、负荷功率,以及随机接入的电动汽车充放电功率等不确定因素的随机性。

上述文献主要以对 BSS 的直接调度为基本假设,认为 BSS 充放电装置的充放电状态及功率由微电网调度中心控制,而没有充分考虑 BSS 的利益和意愿。实际上,BSS 有多种运营模式^[21],微电网运行人员没有直接调度 BSS 的权利,而是需要通过激励措施来引导 BSS 充放电行为,从而实现间接调度 BSS 负荷的目的。文献[22-23]从需求响应视角出发,研究了微电网运行优化问题,但模型中未涉及 BSS 的运行优化。文献[24]提出了一种充分考虑 BSS 自主性的优化模型,并利用鲁棒优化方法处理电池需求量及电价的不确定性,但没有考虑与上层电网的互动,仅仅是 BSS 自身的优化。

在此背景下,本文提出考虑与 BSS 互动的微电网经济调度模型。该模型由上、下 2 层组成:上层模型的决策者为微电网调度中心,其通过优化微电网内部可控微电源的出力及向 BSS 提供个性化电价来引导 BSS 参与微电网运行优化,从而使微电网供电成本最小;下层模型的决策者为 BSS 运营商,其根据微电网提供的个性化电价,通过求解计及 BSS 中电动汽车用户换电需求量不确定性的盒式集合鲁棒优化模型实现 BSS 充放电管理,使得 BSS 利润最大。采

收稿日期:2014-10-27;修回日期:2015-02-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51407117);上海市青年科技英才“扬帆计划”资助项目(14YF1410100)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51407117) and Yangfan Program of Shanghai(14YF-1410100)

用入侵杂草优化 IWO(Invasive Weed Optimization) 算法和 IBM ILOG CPLEX 软件分别对上层非线性规划问题和下层多维整数线性规划问题进行求解。最后,以一个包括风电机组 WT(Wind Turbine)、燃料电池 FC(Fuel Cell)、微型燃气轮机 MT(MicroTurbine)、柴油发电机 DE(Diesel Engine)和 BSS 的中压微电网为例,说明所提模型和方法的有效性。

1 含 BSS 的微电网结构及调度框架

本文研究的含 BSS 的微电网结构^[18]如图 1 所示,由 WT、FC、MT、DE、传统负荷和 BSS 组成。

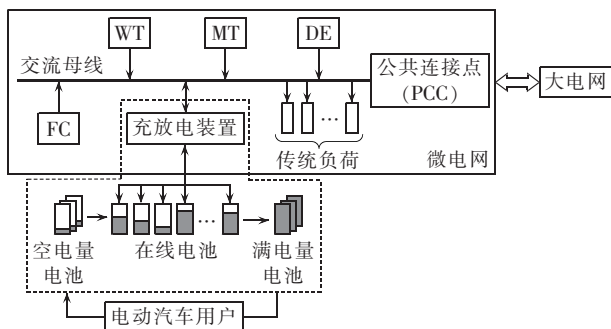


图 1 含电动汽车换电站的微电网结构
Fig.1 Structure of microgrid with BSS

WT 属于间歇性电源,其输出功率不可控,不接受微电网调度中心控制;FC、MT 和 DE 属于可控分布式电源 CDG(Controllable Distributed Generations),其出力受微电网调度中心控制;BSS 所有权及经营权不属微电网,微电网没有权限调度 BSS,只能通过电价引导 BSS 参与微电网运行优化。BSS 具有集中充放电功能,主要由充放电装置和电池组组成。充放电装置的充放电状态、充放电功率等指令由 BSS 运营商下达。BSS 内部电池分为在线电池、满电量电池和空电量电池。在线电池与充放电装置相连进行充电或放电,当电量充满后将电池从充电格中取出供电动汽车用户使用,电动汽车换下的空电池再由充放电装置统一安排充电。

微电网和 BSS 是不同的经济实体,它们有各自的经济利益。对微电网而言,在保证安全约束和供电质量的前提下降低电网供电成本是其追求的目标。对 BSS 运营商而言,在满足电动汽车用户换电需求的条件下期望获得更多的利润。将两者有机结合,一方面可以降低微电网在储能方面的投资,另一方面可以通过向 BSS 提供个性化电价提高其利润。

考虑两者互动的微电网调度架构如图 2 所示。在所采用的 2 层结构中,上层着重解决微电网运行优化问题;下层根据上层给出的个性化电价,在满足 BSS 运行约束的条件下优化 BSS 充放电计划,同时将优化后的充放电计划反馈给微电网。微电网根据该充放

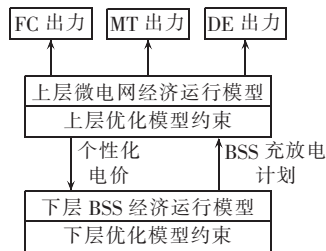


图 2 考虑与换电站互动的微电网调度架构
Fig.2 Architecture of microgrid dispatch considering interaction with BSS

电功率,重新优化微电网内部 CDG 出力,并重新调整个性化电价,如此循环迭代至预先设定的最大迭代次数,得出优化结果,实现微电网和 BSS 的双赢。

2 基于双层优化的微电网经济调度模型

2.1 上层微电网经济运行模型

上层模型的目标是通过优化微电网内部不同 CDG 在各时段的出力以及为 BSS 制定个性化电价使微电网 1d 的供电成本最小。

由于 WT 利用风能发电,其发电成本很小,可忽略不计,因此本文认为微电网供电成本主要由 CDG 燃料成本、治污成本和能量交换成本三部分组成,其中能量交换成本包括与大电网的交换成本和与 BSS 的交换成本。

上层模型的目标函数可表示为:

$$\begin{aligned} \min C_{MG} &= \min(C_{Fuel} + C_{Emiss} + C_{Exch}) \\ C_{Fuel} &= \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{CDG}} (C_{CDGi} P_{CDGi}^t) \\ C_{Emiss} &= \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_{Gas}} \sum_{i=1}^{N_{CDG}} (\beta_j \alpha_{ij} P_{CDGi}^t) \\ C_{Exch} &= \sum_{t=1}^T (\lambda_{grid}^t P_{grid}^t - \lambda_{MG}^t P_{BSS}^t) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, C_{MG} 为微电网供电成本; C_{Fuel} 、 C_{Emiss} 和 C_{Exch} 分别为 CDG 燃料成本、排放成本和能量交换成本; T 为优化周期的时间段数,本文取 24,即 1 h 为一个研究时段; N_{CDG} 为微电网内部 CDG 数量; C_{CDGi} 为第 i 个 CDG 的运行能耗成本函数; P_{CDGi}^t 为第 i 个 CDG 在时间段 t 的有功出力; N_{Gas} 为污染气体类型数; β_j 为治理单位质量污染物 j 所需的费用; α_{ij} 为第 i 个 CDG 第 j 类污染物的排放系数; λ_{grid}^t 和 λ_{MG}^t 分别为大电网在时间段 t 的电价和微电网在时间段 t 为 BSS 提供的个性化电价; P_{grid}^t 和 P_{BSS}^t 分别为微电网与大电网和 BSS 在时间段 t 的交换功率。假定微电网向大电网购电时 P_{grid}^t 为正,向大电网售电时 P_{grid}^t 为负; BSS 向微电网购电时 P_{BSS}^t 为正,向微电网售电时 P_{BSS}^t 为负。

上层模型的约束条件如下。

a. 潮流方程约束。

$$\begin{cases} P_{iGen}^t - P_{iBSS}^t - P_{iL}^t = U_i^t \sum_{j \in i} U_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \\ Q_{iGen}^t - Q_{iL}^t = U_i^t \sum_{j \in i} U_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \end{cases} \quad (2)$$

其中, P_{iGen}^t 和 Q_{iGen}^t 分别为节点 i 处的电源(大电网或 DG)在时段 t 注入的有功功率和无功功率,若电源为大电网,说明节点 i 是平衡节点(与大电网相连),则 P_{iGen}^t 和 Q_{iGen}^t 等于微电网从大电网购入的功率,若电源为 DG,则 P_{iGen}^t 和 Q_{iGen}^t 等于 DG 的发电功率,若节点 i 既不与大电网相连,也未安装 DG,则 P_{iGen}^t 和 Q_{iGen}^t 等于 0; P_{iBSS}^t 为节点 i 处 BSS 在时段 t 的充电功率,该值由 BSS 运行商根据自身优化模型计算得到,不受微电网控制; P_{iL}^t 和 Q_{iL}^t 分别为节点 i 处传统负荷在时段 t 消耗的有功功率和无功功率; $j \in i$ 表示所有与节点 i 直接相连的节点,包括 $j=i$; U_i^t 和 U_j^t 分别为节点 i 和节点 j 在时段 t 的电压幅值; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵中相应元素的实部和虚部; θ_{ij}^t 为节点 i 和 j 在时段 t 的电压相角差。

b. CDG 出力上、下限约束。

$$P_{CDGi}^{\min} \leq P_{CDGi}^t \leq P_{CDGi}^{\max} \quad i=1,2,\dots,N_{CDG} \quad (3)$$

其中, $P_{CDGi}^{\max}$ 和 $P_{CDGi}^{\min}$ 分别为第 i 个可控微电源的有功出力上限和有功出力下限。

c. CDG 爬坡速率约束。

$$-P_{CDGi}^D \leq P_{CDGi}^t - P_{CDGi}^{t-1} \leq P_{CDGi}^U \quad (4)$$

其中, P_{CDGi}^D 和 P_{CDGi}^U 分别为第 i 个可控微电源在单位时间内的最大下调有功量和最大上调有功量。

d. 节点电压约束。

$$U_i^{\min} \leq U_i^t \leq U_i^{\max} \quad i=1,2,\dots,N_{Bus} \quad (5)$$

其中, $U_i^{\max}$ 和 $U_i^{\min}$ 分别为节点 i 的电压上限和下限; N_{Bus} 为微电网节点数量。

e. 线路传输功率约束。

$$P_l^{\min} \leq P_l^t \leq P_l^{\max} \quad l=1,2,\dots,N_{Bran} \quad (6)$$

其中, $P_l^{\max}$ 和 $P_l^{\min}$ 分别为支路 l 的传输功率上限和下限; P_l^t 为支路 l 在时段 t 的传输功率; N_{Bran} 为微电网支路数量。当支路为微电网与大电网间的联络线时,式(6)表示交换功率约束。

2.2 下层换电站经济运行的盒式集合鲁棒优化模型

为简化计算过程,同时使仿真结果不至于偏离实际情况,本文进行了如下假设。

a. BSS 内部电池容量一致,标准容量为 C 的电池需要经过 T_c 个时段才能充满,同时假定电池以恒定功率 P_c 充电,即 $P_c=C/T_c$ 。考虑到电池的充电效率 η_c ,实际的充电功率为 $P_c'=P_c/\eta_c$ 。

b. 当 BSS 向微电网出售电能时,容量为 C 的电池需要经过 T_d 个时段才能放完,并认为电池以恒定功率 P_d 放电,即 $P_d=C/T_d$ 。考虑到电池的放电效率 η_d ,实际的放电功率为 $P_d'=P_d/\eta_d$ 。

c. BSS 内部电池一旦处于充电或放电状态,只有当它充满电量或放完电量后才能考虑对其进行后续操作,即正在充电或放电的电池不提供换电等其

他任何服务。

d. BSS 在任意时间段初始时刻的满电量电池数量需满足该时段内电动汽车用户的换电需求量,即不考虑电动汽车到达时间分布对 BSS 充放电计划的影响,电动汽车换下的空电池需要等到下一个时间段才能对其进行充电。

基于以上 4 点假设, BSS 运营商根据微电网提供的个性化电价优化站内电池的充放电计划,以获取最大利润。BSS 的利润为 BSS 收入与支出之差,因此下层模型的目标函数可表示为:

$$\max C_{BSS} = \max(C_R - C_C) \quad (7)$$

其中, C_{BSS} 、 C_R 和 C_C 分别为 BSS 的利润、总收入和总支出。

BSS 总收入 C_R 包括向电动汽车用户收取的电池租赁收入、换电收入和向微电网卖电收入,即:

$$C_R = \alpha \sum_{t=1}^T N_{EVt} + \lambda C \sum_{t=1}^T N_{EVt} + \sum_{t=1}^T \lambda_{MG}^t P_d^t W_t \quad (8)$$

其中, α 为每次换电时 BSS 向电动汽车用户收取的电池租金; N_{EVt} 为时段 t 的 BSS 服务区内电动汽车用户更换电池的需求量; λ 为 BSS 向电动汽车用户提供的换电零售价; C 为电池的标准容量; W_t 为时段 t 处于放电状态的电池数量。

BSS 总支出 C_C 由电池充电成本和折旧成本组成:

$$C_C = \sum_{t=1}^T \lambda_{MG}^t P_c^t M_t + \alpha_0 \sum_{t=1}^T \left(N_{EVt} + \frac{P_d W_t}{C} \right) \quad (9)$$

其中, M_t 为时段 t 处于充电状态的电池数量; α_0 为电池进行一次充放电的折旧费用。

下层模型的约束条件如下。

a. 总电池数量平衡约束。

$$N_{EVt} + J_t + K_t + M_t + W_t = Z \quad (10)$$

其中, J_t 和 K_t 分别为时段 t 满电量和空电量的电池数量; M_t 和 W_t 分别为时段 t 处于充电状态和放电状态的电池数量; Z 为 BSS 内部电池总数量。

b. 处于充电状态的电池数量平衡约束。

$$\begin{cases} M_t^{(1)} + M_t^{(2)} + \dots + M_t^{(T_c)} = M_t \\ M_t^{(1)} = M_{t+1}^{(2)}, M_t^{(2)} = M_{t+1}^{(3)}, \dots, M_t^{(T_c-1)} = M_{t+1}^{(T_c)} \end{cases} \quad (11)$$

其中, T_c 为电池充满电所需的时间段数,即每组电池有 T_c 个充电过程,需要经历 T_c 个充程才能充满电; $M_t^{(1)}$ 、 $M_t^{(2)}$ 、 $\dots$ 、 $M_t^{(T_c)}$ 分别为时段 t 处于第 1、2、 $\dots$ 、 T_c 个充程的电池数量; $M_{t+1}^{(2)}$ 、 $M_{t+1}^{(3)}$ 、 $\dots$ 、 $M_{t+1}^{(T_c)}$ 分别为时段 $t+1$ 处于第 2、3、 $\dots$ 、 T_c 个充程的电池数量。

c. 处于放电状态的电池数量平衡约束。

$$\begin{cases} W_t^{(1)} + W_t^{(2)} + \dots + W_t^{(T_d)} = W_t \\ W_t^{(1)} = W_{t+1}^{(2)}, W_t^{(2)} = W_{t+1}^{(3)}, \dots, W_t^{(T_d-1)} = W_{t+1}^{(T_d)} \end{cases} \quad (12)$$

其中, T_d 为电池放完电所需的时间段数,即每组电池有 T_d 个放电过程,需经历 T_d 个放程才能放完电; $W_t^{(1)}$ 、 $W_t^{(2)}$ 、 $\dots$ 、 $W_t^{(T_d)}$ 分别为时段 t 处于第 1、2、 $\dots$ 、 T_d 个放程的电池数量; $W_{t+1}^{(2)}$ 、 $W_{t+1}^{(3)}$ 、 $\dots$ 、 $W_{t+1}^{(T_d)}$ 分别为时段 $t+1$ 处

于第2、3、...、 T_d 个放程的电池数量。

d. 满电量电池数量平衡约束。

$$M_t^{(T_d)} + J_t \geq N_{EV(t+1)} + W_{t+1}^{(1)} + J_{t+1} \quad (13)$$

其中, $N_{EV(t+1)}$ 为时段 $t+1$ 电动汽车用户换电需求量; J_{t+1} 为时段 $t+1$ 满电量的电池数量; $W_{t+1}^{(1)}$ 为时段 $t+1$ 处于第1个放程的电池数量。

e. 空电池数量平衡约束。

$$N_{EVt} + W_t^{(T_d)} + K_t = M_{t+1}^{(1)} + K_{t+1} \quad (14)$$

其中, K_{t+1} 和 $M_{t+1}^{(1)}$ 分别为时段 $t+1$ 保持空电量的电池数量和处于第1个充程的电池数量。

f. 充放电电池数量约束。

$$M_t \leq M_{\max} \quad (15)$$

$$W_t \leq M_{\max} \quad (16)$$

其中, $M_{\max}$ 为 BSS 内部充放电格位数量。

在实际中, 换电需求量 N_{EVt} 具有不确定性。本文采用盒式集合鲁棒优化方法来考虑 N_{EVt} 的不确定性。鲁棒优化是一种解决不确定性问题的方法, 其特点是不需要假设变量的概率分布, 而是利用“不确定集合”的形式来描述变量的不确定性, 使得约束条件在不确定变量取值于已知集合中所有可能值时都能够满足。当选取该不确定集合为盒式不确定集时, 该鲁棒优化称为盒式集合鲁棒优化^[25-27]。

把前述模型中的 N_{EVt} 表示为一个估计值加上一个扰动的形式, 即 $\bar{N}_{EVt} + \zeta_t$, 其中, $\bar{N}_{EVt}$ 为时段 t 的 BSS 服务区内电动汽车用户更换电池的预期需求量, 而扰动量 ζ_t 属于盒式集合 u 。

$$u = \{\zeta_t | \zeta_t \leq \bar{\zeta}_t, \bar{\zeta}_t = -\bar{\zeta}_t\} \quad (17)$$

至此, 式(7)—(17)构成了下层换电站经济运行的盒式集合鲁棒优化模型。

为了求解该优化模型, 运用优化对偶理论, 将约束条件中的不确定量转化为确定性形式, 模型转化为线性规划模型, 详细变换过程如下。

a. 消去等式约束。式(10)和式(14)同时含有 N_{EVt} , 可以联立消去, 以减少不确定参数的影响, 得:

$$M_{t+1}^{(1)} + K_{t+1} + J_t + M_t + W_t - W_t^{(T_d)} = Z \quad (18)$$

b. 不确定参数的变换。应用拉格朗日优化对偶方法, 将式(13)变换为易于求解的线性规划模型。

把 $N_{EVt} = \bar{N}_{EVt} + \zeta_t$ 代入式(13)得:

$$\zeta_t \leq M_{t+1}^{(T_d)} + J_{t+1} - J_t - W_t^{(1)} - \bar{N}_{EVt} \quad (19)$$

最大的扰动 ζ_t 也应满足式(19), 故式(19)可写为:

$$\max \zeta_t \leq A \quad (20)$$

$$A = M_{t+1}^{(T_d)} + J_{t+1} - J_t - W_t^{(1)} - \bar{N}_{EVt}$$

根据优化对偶原理, 只需考虑如下形式:

$$\min(-\zeta_t) \geq -A \quad (21)$$

首先构造 $\min(-\zeta_t)$ 对应的拉格朗日函数如下:

$$L(\zeta_t, \delta_t, \gamma_t) = -\zeta_t - \delta_t(\zeta_t - \bar{\zeta}_t) - \gamma_t(\bar{\zeta}_t - \zeta_t) \quad (22)$$

其中, δ_t, γ_t 为拉格朗日系数。

对式(22)关于 ζ_t 求偏导, 得到:

$$\nabla_{\zeta_t} L(\zeta_t, \delta_t, \gamma_t) = -1 - \delta_t + \gamma_t = 0 \quad (23)$$

根据优化对偶理论, $\min(-\zeta_t)$ 转化为:

$$\begin{aligned} \min(-\zeta_t) &= \min \max L(\zeta_t, \delta_t, \gamma_t) = \min(\delta_t \bar{\zeta}_t - \gamma_t \bar{\zeta}_t) \\ \text{s.t.} \quad &-1 - \delta_t + \gamma_t = 0 \\ &\delta_t \geq 0 \\ &\gamma_t \geq 0 \end{aligned} \quad (24)$$

于是式(19)变换为:

$$\begin{cases} \gamma_t \bar{\zeta}_t - \delta_t \bar{\zeta}_t - M_{t+1}^{(T_d)} - J_{t+1} + J_t + W_t^{(1)} \leq -\bar{N}_{EVt} \\ -1 - \delta_t + \gamma_t = 0 \\ \delta_t \geq 0, \gamma_t \geq 0 \end{cases} \quad (25)$$

经过变换, 下层优化模型的最终形式为:

$$\begin{aligned} \max C_{BSS} &= \max \left[\sum_{t=1}^T \left(\lambda_{MG}^t P_d^t - \alpha_0 \frac{P_d}{C} \right) W_t - \sum_{t=1}^T \lambda_{MG}^t P_c^t M_t \right] + h_t \\ \text{s.t.} \quad &M_{t+1}^{(1)} + K_{t+1} + J_t + M_t + W_t - W_t^{(T_d)} = Z \\ &M_t^{(1)} + M_t^{(2)} + \dots + M_t^{(T_d)} = M_t \\ &M_t^{(1)} = M_{t+1}^{(2)}, M_t^{(2)} = M_{t+1}^{(3)}, \dots, M_t^{(T_d-1)} = M_{t+1}^{(T_d)} \\ &W_t^{(1)} + W_t^{(2)} + \dots + W_t^{(T_d)} = W_t \\ &W_t^{(1)} = W_{t+1}^{(2)}, W_t^{(2)} = W_{t+1}^{(3)}, \dots, W_t^{(T_d-1)} = W_{t+1}^{(T_d)} \\ &M_t \leq M_{\max} \\ &W_t \leq M_{\max} \\ &\gamma_t \bar{\zeta}_t - \delta_t \bar{\zeta}_t - M_{t+1}^{(T_d)} - J_{t+1} + J_t + W_t^{(1)} \leq -\bar{N}_{EVt} \\ &-1 - \delta_t + \gamma_t = 0 \\ &\delta_t \geq 0, \gamma_t \geq 0 \end{aligned} \quad (26)$$

其中, δ_t 和 γ_t 为拉格朗日系数; h_t 为常数, 与 $\alpha, \lambda C, \alpha_0$ 及时段 t 的换电量有关。

2.3 上、下层模型之间的关系

上、下层模型之间的联系纽带是微电网提供的个性化电价及 BSS 反馈的充放电功率, 其中个性化电价是自变量, BSS 充放电功率是因变量。

如上所述, 微电网和 BSS 互不隶属, 它们均从自身角度出发, 在满足各自运行约束的条件下, 追求自身利益最大化。要想实现双方互动, 须保证两者均有利可图。对微电网而言, 只要考虑互动后的供电成本小于其单独优化时的供电成本即可; 对 BSS 运营商而言, 同等条件下采用个性化电价获得的利润大于采用大电网电价获得的利润, 或微电网给予的补偿大于 BSS 因参与微电网运行优化造成的利润损失即可, 只有这样 BSS 才有参与微电网运行的意愿和积极性。

3 基于 IWO 算法的双层优化模型求解

本文采用 IWO 算法和 CPLEX 软件相结合的方法来求解提出的双层优化模型。在 MATLAB 平台下, 用 IWO 算法求解上层优化问题, 并通过调用 CPLEX 软件求解下层多维整数线性规划问题。

IWO 算法受自然界杂草繁殖特性的启发, 模拟了杂草入侵中杂草的生长、繁殖、空间扩散和竞争性生

存的基本过程,由 Mehrabian 和 Lueas 在 2006 年提出^[28]。该算法在性能上优于遗传算法和粒子群算法等,尤其在求解高维问题时其收敛速度和全局最优搜索能力强于目前的一些优化算法^[28-29]。

在 IWO 算法中,“杂草”表示随机产生的可行解,“种子”表示杂草的后代,“种群”表示所有杂草的集合,“适应值”为杂草个体对应的目标函数值。应用 IWO 算法和 CPLEX 软件求解微电网双层优化调度模型的流程如图 3 所示。

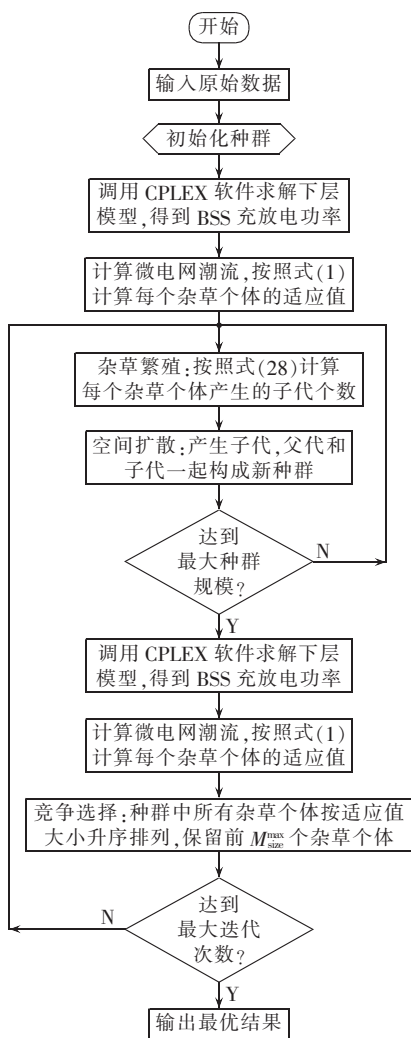


图 3 IWO 算法求解模型流程

Fig.3 Flowchart of IWO algorithm

具体步骤说明如下。

a. 输入原始数据:包括微电网线路参数、微电源参数、BSS 运行参数和 IWO 算法控制参数。

b. 初始化种群:随机产生一组初始解 $X = [X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_M]$, 其中 M 为初始解个数, $X_k = [x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kd}, \dots, x_{kD}]$ 为第 k 个杂草个体, x_{kd} 为 X_k 中第 d 个决策变量的取值, D 为决策变量的个数。

结合本文研究,杂草个体 X_k 可表示为:

$$X_k = [P_{FC}^1, \dots, P_{FC}^{24}, P_{MT}^1, \dots, P_{MT}^{24}, P_{DE}^1, \dots, P_{DE}^{24}, \lambda_{MG}^1, \dots, \lambda_{MG}^{24}] \quad (27)$$

其中, P_{FC}^t 、 P_{MT}^t 和 P_{DE}^t 分别为 FC、MT 和 DE 在时段 t 的有功出力; λ_{MG}^t 为时段 t 的个性化电价。

c. 调用 CPLEX 软件,根据初始的各时段个性化电价求解当前电价下的 BSS 充放电功率。

d. 根据求得的 BSS 充放电功率和初始的各时段 CDG 有功出力计算微电网潮流,然后按照式(1)计算各杂草个体的适应值。

e. 繁殖子代:按照式(28)计算每个杂草个体产生的种子数。

$$S_k = f \left[\frac{S_{\max} - S_{\min}}{F_b - F_w} (f(X_k) - F_w) + S_{\min} \right] \quad (28)$$

其中, $f(\cdot)$ 表示向下取整函数; S_k 为第 k 个杂草个体产生的种子个数; $S_{\max}$ 和 $S_{\min}$ 分别为杂草个体允许产生种子个数的最大值和最小值; $f(X_k)$ 为第 k 个杂草个体的适应值; F_b 和 F_w 分别为该代种群中最优适应值和最差适应值。

本文研究的是最小化问题,最优适应值即目标函数最小值,最差适应值即目标函数最大值。杂草个体的适应值越小,说明当前个体的适应能力越强,产生的子代数也就越多。

f. 空间扩散:产生的种子以正态分布 $N(0, \sigma_{\text{iter}}^2)$ 的方式随机地散布在其父代周围,并成长为新杂草。每一代的进化, σ_{iter} 将从初始值 σ_{ini} 减小到最终值 σ_{fin} , 如式(29)所示。

$$\sigma_{\text{iter}} = (\sigma_{\text{ini}} - \sigma_{\text{fin}}) \left[(t_{\text{ermax}} - t_{\text{er}}) / t_{\text{ermax}} \right]^w + \sigma_{\text{fin}} \quad (29)$$

其中, t_{er} 和 t_{ermax} 分别为当前迭代次数和最大迭代次数; σ_{ini} 和 σ_{fin} 分别为标准差的初始值和最终值; w 为非线性调和因子。

根据 $N(0, \sigma_{\text{iter}}^2)$ 随机产生的扩散值与父代个体叠加得到子代杂草个体,然后父代和子代个体共同构成新种群。

g. 判断种群规模是否达到最大种群规模 $M_{\text{size}}^{\max}$ 。若未达到,跳转到步骤 e, 否则执行下一步操作。

h. 调用 CPLEX 软件,根据新产生的各时段个性化电价求解 BSS 充放电功率。

i. 计算微电网潮流,然后按照式(1)计算种群中各子代的适应值。

j. 竞争选择:将种群中所有杂草个体按其适应值大小升序排列,选取前 $M_{\text{size}}^{\max}$ 个杂草个体进入下一次迭代,淘汰其他剩余杂草个体,同时更新进化代数(即迭代次数)。

k. 判断是否达到最大迭代次数 t_{ermax} 。若未达到,则跳转到步骤 e; 否则,将种群中适应值最小的个体作为最优解输出。

4 算例分析

4.1 算例系统与原始数据

本文采用文献[30]推荐的中压微电网作为算例,

如图 4 所示。系统基准容量为 $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 基准电压为 10 kV ; 节点电压的上限和下限分别为 1.07 p.u. 和 0.93 p.u. ; 联络线传输功率的上、下限分别为 300 kW 和 -300 kW , 其余微电网支路传输功率的上限和下限分别为 3 MW 和 -3 MW 。

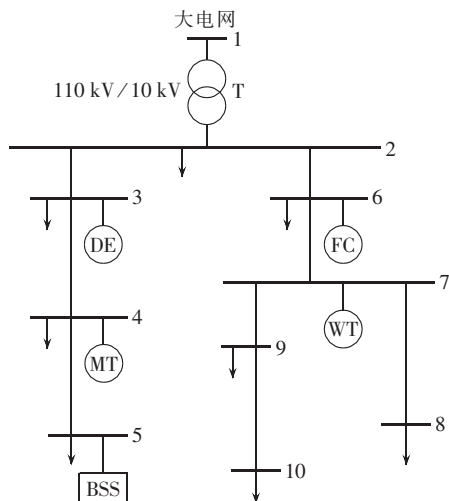


图 4 中压微电网算例系统

Fig.4 MV microgrid for case study

微电网内部的分布式电源参数如表 1 所示。各 CDG 单机发电费用曲线如图 5 所示。考虑到负荷变化和风电出力的随机性,本文在典型日负荷曲线和风电出力曲线的基础上,通过引入随机数作为波动变量生成负荷和风电出力随时间变化的曲线,如图 6 所示。

表 1 分布式电源参数

Table 1 Parameters of distributed generations

微电源	单机功率/kW	功率因数	出力/kW		下降速率/ (kW·min ⁻¹)	上升速率/ (kW·min ⁻¹)	安装台数	接入位置
			最小	最大				
WT	100	0.9	0	100	—	—	10	7
FC	200	1.0	20	200	3.5	3.5	10	6
MT	200	1.0	20	200	4.0	4.0	10	4
DE	200	0.8	20	200	5.0	5.0	12	3

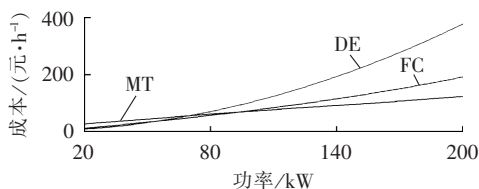


图 5 可控微电源成本-功率曲线

Fig.5 Cost-power curve of controllable microsources

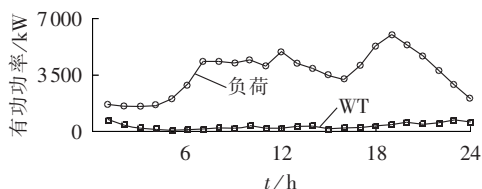


图 6 负荷和风电功率曲线

Fig.6 Power curve of load and wind power

BSS 参数如下: BSS 连接在节点 5, 换电站内有 50 个充放电格位和 180 个可租赁的电池, 充放电装置的充电效率和放电效率均取 0.95; 站内所有电池的容量都相同, 大小为 $30 \text{ kW}\cdot\text{h}$, 每个电池的额定充电功率和放电功率分别为 15 kW 和 30 kW , 充满电和放完电分别需要 2 h 和 1 h; 考虑到充放电装置的充放电效率, 换电站实际充电功率和放电功率的最大值分别为 789 kW 和 1.425 MW ; 电池完成一次充放电过程的折旧成本为 6 元/次, 换电零售价取统一价格为 $1.3 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 不再另计电池租赁费, 即式 (8) 中的 $\alpha=0$ 元。各时段大电网电价、预计的电动汽车用户换电需求见表 2。

表 2 各时段大电网电价和预计的
电动汽车用户换电需求量

Table 2 Hourly electricity price and expected battery swap demand

t	$\lambda_{\text{grid}}^t / [\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	$\bar{N}_{\text{EVI}}$	t	$\lambda_{\text{grid}}^t / [\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	$\bar{N}_{\text{EVI}}$
1	0.765	5	13	1.087	8
2	0.765	3	14	1.087	6
3	0.765	3	15	1.087	5
4	0.765	5	16	1.087	14
5	0.765	6	17	1.087	20
6	0.765	10	18	1.269	15
7	0.765	15	19	1.269	10
8	0.765	13	20	1.269	6
9	1.269	10	21	1.269	8
10	1.269	6	22	1.087	10
11	1.269	5	23	1.087	7
12	1.269	5	24	1.087	5

IWO 算法参数为:初始种群大小为 20,最大种群数量为 50,最大种子数为 10,最小种子数为 2,初始标准差为 0.5,最终标准差为 0.001,非线性调和因子为 3,杂草个体维数为 96,最大迭代次数为 1000。

4.2 结果分析

为了说明微电网和 BSS 联合优化带来的经济效益,本文设计了 2 个仿真案例:案例 1 是微电网和 BSS 之间按大电网电价进行能量交换;案例 2 是微电网和 BSS 之间采用个性化电价进行交易。同时,为了排除负荷和风电出力在 2 个案例中因不同的随机波动对研究结果带来的干扰,本文对 2 个案例选取相同的随机产生的负荷和风电出力曲线(即为图 6 中的曲线)。

图 7 和图 8 分别为案例 1、2 中的 BSS 充放电功率曲线。由图 7 可见:BSS 在谷时段(全天电价最低的时间段)大规模充电,以保证换电站内部的满电量电池数量充足,满足后面峰时段和平时段电动汽车用户的换电需求;BSS 没有出现负的功率,表明换电站全天只充电而没放电,说明 BSS 未通过向微电网售电而获利。而由图 8 可见,采用个性化电价后 BSS 在负荷高峰时段($t=12, 21$)向微电网售电,通过负荷低时段

和负荷高时段之间的个性化电价差而获利。

案例 1 和案例 2 中微电网内部可控微电源的输出功率分别见图 9 和图 10。从图 9 和图 10 可以看出:负荷高峰时段微电网优先采用 FC 和 MT 供电,当 FC 和 MT 的发电量不能满足负荷需求和微电网运行约束条件后再考虑 DE 供电;采用个性化电价后,MT 在低时段的输出功率增加,这有助于减小 MT 单位电量发电成本;当 t 为 12、21 时,案例 2 中的 BSS 向微电网售电,从而减小了该时段 DE 的输出功率,有助于降低微电网供电成本。以上现象可以根据微电源特性来解释,因为 MT 的单位电量成本(单位:元/(kW·h))随其输出功率的增大而降低,FC 和 DE 的单位电量成本则随其输出功率的增大而增大,并且 DE 的单位电量成本增长速度大于 FC 的单位电量成本增长速度,所以为降低微电网系统的总供电成本应避免出现 MT 以较低功率运行的情况,同时应尽量减小 DE 在负荷高峰时段的发电量(DE 的

治污成本也较大)。

2 个案例中 BSS 各时段的运行数据(即下层模型优化结果)见表 3。由表 3 可见,案例 1 中的 BSS 在电网电价最低时大规模充电,在随后的峰时段、平时段基本处于只售(只提供换电服务)不充的状态,未通过向微电网售电获利。这是因为电池折旧成本为 6 元/次,即使不考虑充放电装置的充放电效率,电池充放电差价只有满足大于 0.2 元/(kW·h)的条件才具有获利空间。采用个性化电价后,充放电差价不再固定不变而是可灵活调整,案例 2 中,BSS 就是利用电价差通过低充高放向微电网售电实现了获利。

表 4 为相应的微电网各项成本和 BSS 各项收入与支出。图 11 为 2 个案例中微电网的供电成本。从图 11 和表 4 可以看出:案例 1 中的微电网总成本为 79 562.66 元,BSS 利润为 1 768.4 元,案例 2 中的微电网总成本为 75 667.67 元,BSS 利润为 2 449.7 元,相比案例 1 微电网的日供电成本减少了 4.90%,BSS

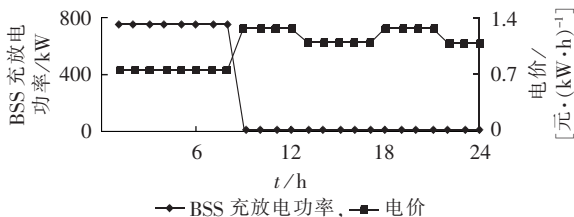


图 7 案例 1 中的 BSS 充放电功率曲线

Fig.7 Charging/discharging power curve of BSS in case no.1

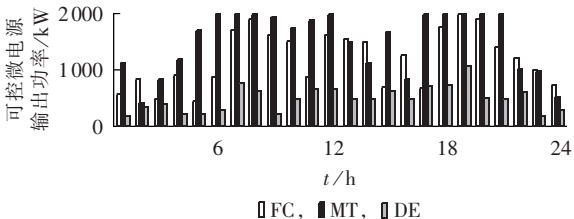


图 9 案例 1 中可控微电源输出功率

Fig.9 Output power of controllable microsources in case no.1

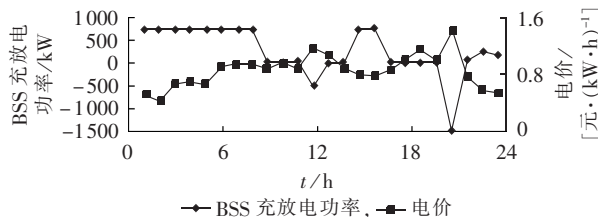


图 8 案例 2 中的 BSS 充放电功率曲线

Fig.8 Charging/discharging power curve of BSS in case no.2

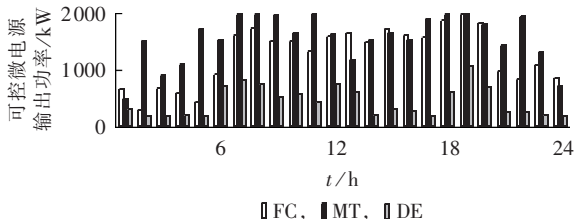


图 10 案例 2 中可控微电源输出功率

Fig.10 Output power of controllable microsources in case no.2

表 3 2 个案例中换电站运行数据

Table 3 Operating data of BSS for two cases

t/h	$M_t^{(1)}$		$M_t^{(2)}$		$W_t^{(1)}$		J_t		K_t		t/h	$M_t^{(1)}$		$M_t^{(2)}$		$W_t^{(1)}$		J_t		K_t	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	50	50	0	0	0	0	3	7	122	118	13	0	0	0	0	0	0	114	101	58	71
2	0	0	50	50	0	0	0	4	127	123	14	0	0	0	0	0	0	108	95	66	79
3	50	50	0	0	0	0	47	51	80	76	15	0	50	0	0	0	0	103	90	72	35
4	0	0	50	50	0	0	42	46	83	79	16	0	0	0	50	0	0	89	76	77	40
5	50	50	0	0	0	0	86	90	38	34	17	0	0	0	0	0	0	69	106	91	54
6	0	0	50	50	0	0	76	80	44	40	18	0	0	0	0	0	0	54	91	111	74
7	50	50	0	0	0	0	111	115	4	0	19	0	0	0	0	0	0	44	81	126	89
8	0	0	50	50	0	0	98	102	19	15	20	0	0	0	0	0	0	38	75	136	99
9	0	0	0	0	0	0	138	142	32	28	21	0	0	0	0	50	30	17	142	105	
10	0	0	0	0	0	0	132	136	42	38	22	0	5	0	0	0	0	20	7	150	158
11	0	0	0	0	0	0	127	131	48	44	23	0	12	0	5	0	0	13	0	160	156
12	0	0	0	0	0	17	122	109	53	49	24	0	0	0	12	0	0	8	0	167	163

注:第 2 行数字 1、2 分别代表案例 1、案例 2。

表 4 2 个案例中微电网成本和 BSS 利润
Table 4 Microgrid cost and BSS profit
for two cases

元				
收支项目		案例 1	案例 2	
微电网	燃料成本	59104	56376	
	治污成本	20150	19436	
	交换成本	308.66	-144.33	
	总成本	79562.66	75667.67	
BSS	换电收入	7800	8759.9	
	卖电收入	0	2423.2	
	充电成本	4831.6	7131.4	
	折旧成本	1200	1602	
总利润		1768.4	2449.7	

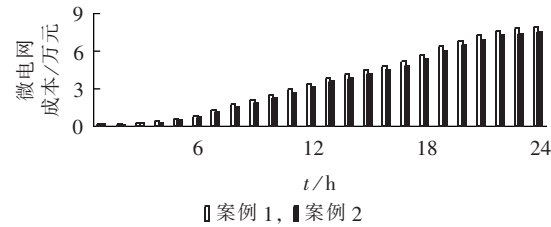
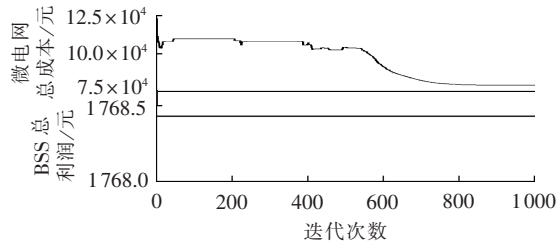


图 11 2 个案例下的微电网成本
Fig.11 Microgrid cost of two cases

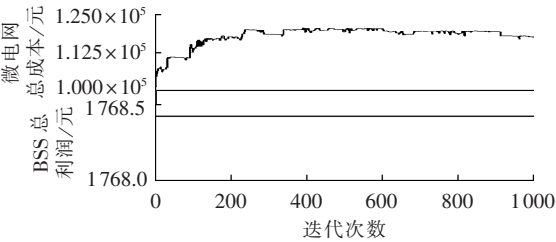
的日最大利润增加了 38.53%。以上分析表明,当微电网为 BSS 提供个性化电价后,BSS 参与了微电网运行优化,在增加自身利润的同时降低了微电网的供电成本,实现了双方共赢。

为了说明所采用的 IWO 算法的优势,给出了 IWO 算法、遗传算法(GA)和粒子群优化(PSO)算法的上层目标函数(微电网总成本)和下层目标函数(BSS 总利润)随迭代次数变化的情况如图 12 所示,3 种算法的运算时间列于表 5。3 种算法计算出的微电网总成本和 BSS 总利润如表 6 所示。

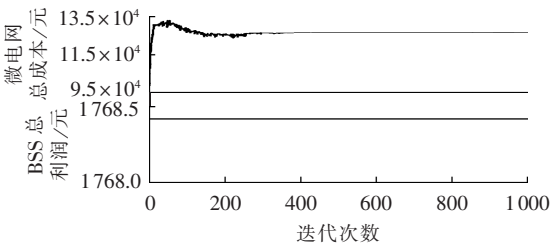
综合图 12、表 5 和表 6 可以发现,同样迭代 1 000 次,IWO 算法的收敛性明显好于 GA,IWO 算法在迭代 700 次左右就已经收敛,而 GA 在 1000 次



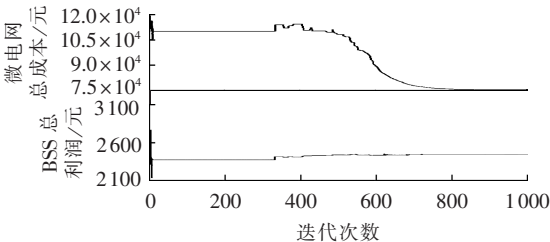
(a) IWO 算法的收敛性(案例 1)



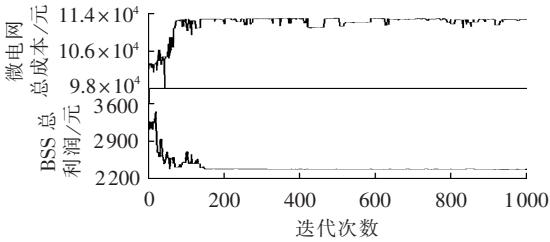
(b) GA 的收敛性(案例 1)



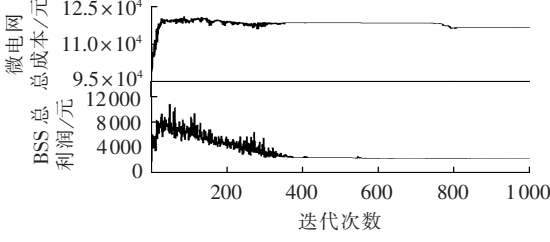
(c) PSO 算法的收敛性(案例 1)



(d) IWO 算法的收敛性(案例 2)



(e) GA 的收敛性(案例 2)



(f) PSO 算法的收敛性(案例 2)

图 12 IWO 算法、GA 和 PSO 算法的收敛性比较
Fig.12 Comparison of convergence among IWO algorithm, GA and PSO algorithm

表 5 IWO 算法、GA 和 PSO 算法的运算时间比较
Table 5 Comparison of calculating time among IWO algorithm,GA and PSO algorithm

案例	运算时间/s		
	IWO 算法	GA	PSO 算法
1	8265.35	2138.09	2057.85
2	8361.94	2172.77	2297.01

表 6 IWO 算法与 GA 和 PSO 算法的计算结果比较
Table 6 Comparison of calculating results among IWO algorithm,GA and PSO algorithm

算法	微电网总成本		BSS 总利润	
	案例 1	案例 2	案例 1	案例 2
IWO	79562.66	75667.67	1768.4	2449.7
GA	119460	112670	1768.4	2380.4
PSO	126439	116512	1768.4	2280.3

时仍未收敛;IWO 算法的寻优结果也优于 GA 和 PSO 算法,其搜索全局最优解的能力更强;IWO 算法的计算时间大约是 GA 和 PSO 算法的 4 倍;虽然

PSO 算法的收敛性优于 IWO 算法,但是寻优结果远不如 IWO 算法好。综上,IWO 算法虽然牺牲了计算时间,但其寻找全局最优解的能力明显优于 GA 和 PSO 算法。

5 结论

资源和环境压力为电动汽车产业提供了发展机遇。作为电动汽车充放电设施的一种形式,BSS 越来越多地接入微电网。微电网具有运行方式灵活的优点,可以向 BSS 提供个性化的服务,以实现双方共赢。针对含 BSS 的微电网运行优化问题,本文建立了基于双层优化的微电网经济调度模型,考虑了微电网的安全约束和 BSS 的运行约束,并兼顾了双方经济利益,同时利用盒式集合鲁棒优化方法考虑了用户换电需求量的不确定性。采用 IWO 算法和 CPLEX 软件分别对上、下层优化问题进行迭代求解。最后,以一个中压微电网算例为例对所提出的模型和求解方法进行验证。仿真结果表明,采用文中提出的基于双层优化的微电网经济调度模型及算法不仅可以降低微电网供电成本,而且可以提高 BSS 运行商利润,实现双方共赢。

参考文献:

- [1] 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.
MAO Meiqin,SUN Shujuan,SU Jianhui. Economic analysis of a microgrid with wind/photovoltaic/storages and electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):30-35.
- [2] 肖湘宁,陈征,刘念. 可再生能源与电动汽车充放电设施在微电网中的集成模式与关键问题[J]. 电工技术学报,2013,28(2):1-14.
XIAO Xiangning,CHEN Zheng,LIU Nian. Integrated mode and key issues of renewable energy sources and electric vehicles' charging and discharging facilities in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(2):1-14.
- [3] 姚伟锋,赵俊华,文福拴,等. 基于双层优化的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):30-37.
YAO Weifeng,ZHAO Junhua,WEN Fushuan,et al. A charging and discharging strategy for electric vehicles based on bi-level optimization[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(11):30-37.
- [4] HE Y,VENKATESH B,GUAN L. Optimal scheduling for charging and discharging of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(3):1095-1105.
- [5] 苏粟,孙晓明,罗敏,等. 面向局域配电网的电动汽车充电控制系统[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):19-23.
SU Su,SUN Xiaoming,LUO Min,et al. Charging control system of electric vehicles orientating to local distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):19-23.
- [6] CLEMENT-NYNS K,HAESSEN E,DRIESEN J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(1):371-380.
- [7] 胡泽春,宋永华,徐智威,等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):1-10,25.
HU Zechun,SONG Yonghua,XU Zhiwei,et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(4):1-10,25.
- [8] 何明杰,彭春华,曹文辉,等. 考虑电动汽车规模化入网的动态经济调度[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):82-88.
HE Mingjie,PENG Chunhua,CAO Wenhui,et al. Dynamic economic dispatch considering large-scale integration of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(9):82-88.
- [9] 苗铁群,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.
MIAO Yiqun,JIANG Quanyuan,CAO Yijia. Optimal microgrid dispatch considering stochastic integration of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(12):1-7.
- [10] 王贵斌,赵俊华,文福拴,等. 配电系统中电动汽车与可再生能源的随机协同调度[J]. 电力系统自动化,2012,36(19):22-29.
WANG Guibin,ZHAO Junhua,WEN Fushuan,et al. Stochastic optimization dispatching of plug-in hybrid electric vehicles in coordination with renewable generation in distribution systems [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(19):22-29.
- [11] 刘文霞,赵天阳,邱威,等. 规模化 EV 充电与风力/火电发电系统协调运行[J]. 电工技术学报,2013,28(5):49-57.
LIU Wenxia,ZHAO Tianyang,QIU Wei,et al. Coordinated operation of large scale electric vehicles charging with wind-thermal power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(5):49-57.
- [12] 刘玉娇,蒋传文,王旭,等. 采用随机约束和多目标算法的电动汽车换电站能量管理[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):59-63,69.
LIU Yujiao,JIANG Chuanwen,WANG Xu,et al. Energy management with stochastic constraint and multi-objective optimization algorithm for electric vehicle battery swap station[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):59-63,69.
- [13] 阳岳希,胡泽春,宋永华. 电动公交充换电站的优化运行研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):35-42,216.
YANG Yuexi,HU Zechun,SONG Yonghua. Research on optimal operation of battery swapping and charging station for electric buses[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(31):35-42,216.
- [14] 孙伟卿,王承民,曾平良,等. 基于线性优化的电动汽车换电站最优充放电策略[J]. 电力系统自动化,2014,38(1):21-27.
SUN Weiqing,WANG Chengmin,ZENG Pingliang,et al. An optimal charging/discharging strategy for electric vehicle battery swapping stations based on linear optimization[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(1):21-27.
- [15] WORLEY O,KLABJAN D. Optimization of battery charging and purchasing at electric vehicle battery swap stations[C]//IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference(VPPC). Chicago,USA: IEEE,2011:1-4.
- [16] GAO Y,ZHAO K,WANG C. Economic dispatch containing wind power and electric vehicle battery swap station[C]//IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition(T&D). Orlando,USA:IEEE,2012:1-7.
- [17] MIAO Y,JIANG Q,CAO Y. Battery switch station modeling

- and its economic evaluation in microgrid[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, USA; IEEE, 2012:1-7.
- [18] 苗铁群,江全元,曹一家. 基于微电网的电动汽车换电站运营策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 33-38, 100.
- MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Operation strategy for battery swap station of electric vehicles based on microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 33-38, 100.
- [19] 曹一家,苗铁群,江全元. 含电动汽车换电站的微电网孤岛运行优化[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 1-6.
- CAO Yijia, MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan. Optimal operation of islanded microgrid with battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 1-6.
- [20] 苗铁群,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.
- MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Optimal microgrid dispatch considering stochastic integration of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 1-7.
- [21] 范永根,钱维忠. 电动汽车充电设施规划和建设的探讨[J]. 华东电力, 2010, 38(11): 1671-1674.
- FAN Yonggen, QIAN Weizhong. Discussion on the planning and construction of charging facilities for electric vehicles[J]. East China Electric Power, 2010, 38(11): 1671-1674.
- [22] 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 resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 7-12, 133.
- [23] 吴雄,王秀丽,崔强. 考虑需求侧管理的微网经济优化运行[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(6): 90-96.
- WU Xiong, WANG Xiuli, CUI Qiang. Optimal operation of microgrid considering demand side management[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(6): 90-96.
- [24] SARKER M R, PANDZIC H, ORTEGA-VAZQUEZ M A. Optimal operation and services scheduling for an electric vehicle battery swapping station[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 30(2): 901-910.
- [25] BEN-TAL A, NEMIROVSKI A. Robust optimization—methodology and applications[J]. Math Program, 2002(92): 453-480.
- [26] 李斯,周任军,童小娇,等. 基于盒式集合鲁棒优化的风电并网最大装机容量[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 208-213.
- LI Si, ZHOU Renjun, TONG Xiaojiao, et al. Robust optimization with box set for maximum installed capacity of wind farm connected to grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 208-213.
- [27] 谢鹏,彭春华,于蓉. 大规模间歇式电源接入电网多目标鲁棒优化调度[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1479-1484.
- XIE Peng, PENG Chunhua, YU Rong. Multi-objective robust optimized scheduling of power grid connected with large-scale intermittent power sources[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1479-1484.
- [28] MEHRABIAN A R, LUCAS C. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization[J]. Ecological Informatics, 2006, 1(4): 355-366.
- [29] KRISHNANAND K R, NAYAK S K, PANIGRAHI K B, et al. Comparative study of five bio-inspired evolutionary optimization techniques[C]//World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing. Bhubaneswar, India: [s.n.], 2009: 1231-1236.
- [30] 彭克,王成山,李琰,等. 典型中低压微电网算例系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 31-35.
- PENG Ke, WANG Chengshan, LI Yan, et al. Design of a typical medium-low voltage microgrid network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 31-35.

作者简介:



陈思

陈思(1991—),男,江苏常州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化控制;

张焰(1958—),女,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统规划、电力系统可靠性、电力系统安全性;

薛贵挺(1982—),男,湖北襄阳人,博士,主要研究方向为微电网优化及控制技术

(E-mail: xueguiting@163.com);

孙伟卿(1985—),男,上海人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统优化控制与运行、智能电网。

Microgrid economic dispatch considering interaction with EV BSS

CHEN Si¹, ZHANG Yan¹, XUE Guiting², SUN Weiqing³

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Grid Beijing Mentougou Power Supply Company, Beijing 102300, China; 3. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to realize the operation optimization of microgrid when its ownership is distinct from that of electric vehicle BSS(Battery Swap Station), a bi-layer optimization model is built for its economic dispatch. In the upper-layer model, the microgrid dispatch centre is the decision-making body, taking the minimum power supply cost as its objective; while in the lower-layer model, the owner of BSS is the decision-making body, taking the maximum profit as its objective, which is a robust optimization model with the box set based on the consideration of battery swap demand uncertainty. The interaction between the upper-layer and lower-layer models is implemented via the particular electricity price offered by microgrid to BSS. The upper-layer and lower-layer models are solved by the invasive weed optimization algorithm and the CPLEX software respectively to obtain the output power of the controllable microsources and the particular electricity price for mutual benefit. The analytical results for an middle-voltage microgrid show the rationality and validity of the proposed model and algorithm.

Key words: microgrid; electric vehicles; battery swap station; optimization; economic dispatch; invasive weed optimization algorithm; robust optimization with box set; models