

# 含电动汽车的电力系统动态环境经济调度

朱永胜<sup>1,2</sup>, 王杰<sup>1</sup>, 瞿博阳<sup>2</sup>, 李健<sup>2</sup>, SUGANTHAN P N<sup>3</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中原工学院 电子信息学院, 河南 郑州 450007;

3. 南洋理工大学 电机与电子工程学院, 新加坡 639798)

**摘要:** 为应对电动汽车规模化应用给电力调度带来的挑战, 构建含电动汽车的动态环境经济调度模型。该模型将各调度时段电动汽车的“车-网”互动(V2G)功率以及常规机组的出力作为决策变量, 以总燃料费用和污染排放量作为优化目标, 在满足系统能量及用户出行需求的前提下, 动态管理电动汽车的充放电行为。设计一种采用改进 MOEA/D 的优化调度求解方法, 并提出基于罚函数的决策变量两步制动态约束处理策略。测试系统的仿真结果验证了所提调度模型及方法的合理性及有效性。

**关键词:** 电力系统; 电动汽车; 动态环境经济调度; MOEA/D; 多目标优化

**中图分类号:** TM 73; U 469.72

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.10.003

## 0 引言

由于能源、环境的双重压力, 电动汽车 EV(Electric Vehicle)受到了各国政府、能源企业以及汽车厂商的广泛关注。研究表明, 在中等的发展速度下, 至 2020 年、2030 年和 2050 年, 美国汽车总量中电动汽车的比例将分别达到 35%、51% 和 62%<sup>[1]</sup>。我国纯电动汽车以及插电式混合动力汽车的累计产销量也将在 2020 年突破 500 万辆<sup>[2]</sup>。

经济调度是电力系统优化运行的关键问题。未来如此大规模的电动汽车充电负荷, 受用户出行需求、入网车辆数量、电池设备特性等多种因素的影响, 在加重电网负担的同时, 又具有典型的随机不确定性<sup>[3]</sup>; 特别是车载储能装置以“车-网”互动 V2G (Vehicle to Grid) 模式<sup>[4]</sup>接入电网后, 其复杂的充放电行为使调度问题成为一个不同时段间联系紧密的动态耦合系统, 这将给传统的经济调度特别是动态经济调度 DED(Dynamic Economic Dispatch)带来新的挑战<sup>[5]</sup>, 近年来已经成为学者们的研究热点<sup>[6-10]</sup>。

同时, 随着国家对电力工业强制性减排要求的日益严苛以及全社会对环保问题的持续关注, 环境因素在调度问题中的地位愈发重要, 且这也更符合电动汽车“节能”、“环保”的自身定位。但如果再综合环境调度目标, 则上述动态经济调度成为动态环境经济调度 DEED(Dynamic Economic Emission Dispatch)。相比于传统的在单一调度时段内以经济性

最优为唯一目标的经济调度, DEED 是典型的多目标、多时段、高维度、强约束的非线性最优化问题, 尤其是在时间和能量上综合考虑电动汽车的行驶及充放电需求后, 调度问题的建模和求解将更为复杂。因此, 目前对含电动汽车 DEED 问题的研究较少。

文献[11]构建了计及电动汽车规模化接入的多目标动态经济调度模型, 并提出自适应多目标差分进化算法求解, 但环境因素在模型中仅作为约束存在, 且其只讨论了电动汽车充电的场景; 文献[12-13]将燃料费用、排放成本等多目标问题转化为社会总成本单目标问题, 并采用双种群带精英学习策略的微分进化算法等方法求解, 但仅靠充放电时间很难全面描述电动汽车的 V2G 情况; 文献[14-15]建立了综合考虑经济及环境因素的单目标调度模型, 并采用 PSO 等算法获得最优的调度方案, 然而其对电动汽车的建模也仅涉及注册 V2G 电动汽车数量与基本的电池容量约束, 并未详细考虑车主的出行需求及电池的充放电特征; 文献[16]建立了计及车辆行驶特征、电池充放电情况的多目标动态经济调度模型, 并利用 NSGA-II 算法求解, 但环境因素仅作为模型众多调度目标之一, 并未做深入讨论, 且所建模型忽略了涉及电量非线性平衡问题的电网有功损耗, 在增大误差的同时也降低了调度问题本身的难度。

基于以上分析, 本文构建了计及电动汽车可调度 V2G 接入模式的电力多目标 DEED 模型, 该模型能够同时兼顾系统的经济和环境效益, 且在常规电力约束外, 充分考虑了参与调度电动汽车的出行需求以及车载电池的充放电特性等因素; 并在前期多目标进化算法的研究基础上, 设计一种采用改进 MOEA/D, 即 IMOEA/D(Improved Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition)的优化调度求解方法。仿真验证了所提调度模型的合理性以及求解算

收稿日期: 2015-12-25; 修回日期: 2016-08-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61305080); 河南省科技攻关计划项目(132102210521); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(17A470006)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61305080), Scientific and Technological Projects of Henan Province(132102210521) and Key Scientific and Technological Research Projects of Education Department of Henan Province(17A470006)

法的有效性。

## 1 含电动汽车电力系统的 DEED 建模

### 1.1 模型的目标函数

#### (1) 燃料费用。

系统的燃料费用目标函数采用下式表示<sup>[14]</sup>:

$$F_C = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (a_i + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2) \quad (1)$$

其中,  $T$  为调度时段数;  $N$  为常规机组的台数;  $P_{i,t}$  为常规机组  $i$  在时段  $t$  的有功出力;  $a_i, b_i, c_i$  为机组  $i$  的费用系数。

#### (2) 污染排放。

系统的污染气体排放目标函数可表示为<sup>[15]</sup>:

$$E_M = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [\alpha_i + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i P_{i,t}^2 + \zeta_i \exp(\varphi_i P_{i,t})] \quad (2)$$

其中,  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \zeta_i, \varphi_i$  为常规机组  $i$  的排放系数。

### 1.2 模型的约束条件

#### (1) 功率平衡约束。

系统的功率平衡以等式约束形式给出:

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + P_{Dch,t} = P_{D,t} + P_{L,t} + P_{Ch,t} \quad t=1, 2, \dots, T \quad (3)$$

其中,  $P_{Ch,t}$  为电动汽车在时段  $t$  的充电负荷;  $P_{Dch,t}$  为电动汽车在时段  $t$  的放电负荷;  $P_{D,t}$  为时段  $t$  的系统负荷;  $P_{L,t}$  为时段  $t$  的网损, 本文采用  $B$  系数法求得, 其计算式如式(4)所示<sup>[15]</sup>。

$$P_{L,t} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{i,t} B_{ij} P_{j,t} + \sum_{i=1}^N P_{i,t} B_{i0} + B_{00} \quad (4)$$

其中,  $B_{ij}, B_{i0}$  和  $B_{00}$  为网损参数。

#### (2) 电池剩余电量约束。

电动汽车储能电池在时段  $t$  的剩余电量  $S_t$  为:

$$S_t = S_{t-1} + \eta_C P_{Ch,t} \Delta t - \frac{1}{\eta_D} P_{Dch,t} \Delta t - S_{Trip,t} \quad (5)$$

其中,  $\eta_C, \eta_D$  分别为充、放电效率;  $\Delta t$  为调度时间间隔;  $S_{Trip,t}$  为电动汽车在时段  $t$  行驶过程中消耗的电量。

$$S_{Trip,t} = \Delta S L \quad (6)$$

其中,  $\Delta S$  为单位距离的平均耗电量;  $L$  为行驶里程。

为保证电池的寿命和运行安全, 其剩余容量  $S_t$  要满足:

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (7)$$

其中,  $S_{\max}, S_{\min}$  分别为电池电量的上、下限。

#### (3) 电动汽车充、放电功率约束。

一般情况下, 电动汽车充放电功率不能超过其额定充放电功率:

$$\begin{cases} P_{Ch,t} \leq P_{NCh} \\ P_{Dch,t} \leq P_{NDch} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $P_{NCh}, P_{NDch}$  分别为电动汽车的额定充、放电功率, 具体受电池特点及线路容量影响。

#### (4) 车主出行需求约束。

电动汽车的基本功能是要满足车主的出行需求。假设电动汽车在一个调度周期内完成一次充放电循环, 则应有:

$$\sum_{t=1}^T S_{Trip,t} = \sum_{t=1}^T \eta_C P_{Ch,t} \Delta t - \sum_{t=1}^T \frac{1}{\eta_D} P_{Dch,t} \Delta t \quad (9)$$

#### (5) 常规机组出力约束。

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (10)$$

其中,  $P_{i,\max}, P_{i,\min}$  分别为机组  $i$  出力的上、下限。

#### (6) 常规机组爬坡约束。

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} - U_{Ri} \Delta t \leq 0 \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} - D_{Ri} \Delta t \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $U_{Ri}, D_{Ri}$  分别为常规机组  $i$  的升、降爬坡速率。

#### (7) 旋转备用约束。

$$\sum_{i=1}^N P_{i,\max} + P_{Dch,t} \geq P_{D,t} + P_{L,t} + P_{Ch,t} + S_{R,t} \quad (12)$$

其中,  $S_{R,t}$  为时段  $t$  系统的旋转备用容量需求。

## 2 模型求解

### 2.1 求解算法

针对 DEED 问题, 文献[17]提出了一种基于 MOEA/D 的调度求解新方法。该方法利用分解算法将多目标环境经济调度问题转化为一定数量的单目标优化子问题, 并利用进化算法在指定的邻域内同时对各子问题进行优化计算, 并且方法中加入了相关约束处理及进化控制策略, 最终通过多次迭代实现对最优前沿的有效逼近。该方法计算速度快、收敛特性好, 且能得到在目标空间分布均匀的 Pareto 最优解集。

#### (1) 分解算法。

利用 Tchebycheff 分解算法获得一定数量单目标优化子问题的计算方法如下<sup>[17-18]</sup>:

$$\begin{cases} \min g^{te}(\mathbf{x} | \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{z}^*) = \max_{m=1, 2, \dots, M} \{ \lambda_m | f_m(\mathbf{x}) - z_m^* | \} \\ \text{s.t. } \mathbf{x} \in \mathbf{S} \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $g^{te}$  代表分解后的优化子问题;  $M$  为目标函数个数, 对于 EED 问题,  $M=2$ ;  $f_m(\mathbf{x})$  为第  $m$  个调度目标函数;  $\mathbf{x}$  为决策变量;  $\mathbf{S}$  为可行解的区域;  $\mathbf{z}^* = [z_1^*, \dots, z_M^*]^T$  为算法的参考点;  $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \dots, \lambda_M]^T$  为算法的权重向量。对于  $m=1, 2, \dots, M$ , 存在  $z_m^* = \min \{ f_m(\mathbf{x}) | \mathbf{x} \in \mathbf{S} \}$  且  $\sum_{m=1}^M \lambda_m = 1$ 。

#### (2) 进化算法。

针对种群中的第  $i$  个个体  $\mathbf{x}^i (i=1, 2, \dots, N_p, N_p$  为种群规模), 根据单纯形格子点设计法, 计算相应的权重向量<sup>[17-18]</sup>, 并定义与其权重向量欧氏距离相近的  $H$  个个体为其进化邻域, 记为  $B(i) = \{i_1, \dots, i_H\}$ 。随机从其邻域  $B(i)$  内选择父代  $r_1, r_2$  和  $r_3$ , 且  $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$ , 然后进行差分进化计算产生其子代  $\mathbf{y}$ 。

$$y = \begin{cases} \mathbf{x}^n + F_S(\mathbf{x}^n - \mathbf{x}^{n-1}) & \text{概率为 } C_R \\ \mathbf{x}^n & \text{概率为 } 1 - C_R \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $F_S$  和  $C_R$  为进化控制参数。

## 2.2 算法改进与实现

含电动汽车的 DEED 问题是在传统多目标动态负荷调度的基础上, 综合考虑电动汽车的行驶及充放电等因素限制, 其模型更复杂且变量及约束间的耦合度更高。为此, 本文在上述方法的基础上进行适应性改进, 以获得所建模型最优的调度方案。

### (1) 种群设置。

在本文的调度模型中, 决策变量设置为各个调度时段常规机组的出力以及电动汽车的充放电功率, 算法的种群  $\mathbf{x}$  表示为:

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}^1 \quad \mathbf{x}^2 \quad \cdots \quad \mathbf{x}^{N_p}]^T \quad (15)$$

个体  $\mathbf{x}^i$  为其中的一个调度方案:

$$\mathbf{x}^i = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \cdots & P_{1,T} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \cdots & P_{2,T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N,1} & P_{N,2} & \cdots & P_{N,T} \\ P_{ev,1} & P_{ev,2} & \cdots & P_{ev,T} \end{bmatrix} \quad (16)$$

每个个体共有  $(N+1) \times T$  维。其中,  $P_{ev,t}$  ( $t=1, 2, \dots, T$ ) 为时段  $t$  的充放电功率; 当电动汽车在该时段处于充电状态时,  $P_{ev,t} = P_{Ch,t}$ ; 而当电动汽车在该时段处于放电状态时,  $P_{ev,t} = P_{Dch,t}$ 。

### (2) 约束处理。

MOEA/D 设计之初是用来解决无约束优化问题的, 而所建模型具有各种等式及不等式约束。因此, 本文复杂约束的有效处理是解决该调度问题的关键。本文采用惩罚函数法, 利用所求解问题的目标函数和约束条件, 构造无约束的增广目标函数, 把非线性的约束规划问题转化成无约束规划问题求解。

模型的等式约束包括系统功率平衡约束及车主出行需求约束, 将其直接计入增广目标函数存在一定困难。为此, 本文在算法中设计一种决策变量的两步制处理策略, 首先对等式约束进行调整:

**a.** 针对模型的出行需求等式约束, 根据式(9)调整不同时间段的 V2G 功率以满足电量平衡;

**b.** 在获得电动汽车充放电功率的基础上, 根据式(3)依次调整各个时段的常规机组出力, 以保证系统的功率平衡。

以上分步处理过程是通过调用决策变量动态调整模块来实现的, 其主要步骤如下。

**a.** 针对不同的等式约束, 计算其约束违反量  $\theta$ , 如果  $\theta$  小于或等于事先设定的阈值  $\varepsilon$ , 或调整次数达到最大调整次数  $K$ , 则转步骤 **c**; 否则执行步骤 **b**。

**b.** 根据所调整决策变量的情况, 将  $\theta/n$  ( $n$  为时段数或者机组数) 叠加到每个决策变量, 并根据变量

的出力上下限, 进行越界处理。

**c.** 如果是针对车主出行需求约束中的充放电功率, 则结束调整; 如果是系统功率平衡约束中的机组出力, 则待所有时段都调整完成后, 结束处理过程。

以上等式约束的具体处理流程见图 1。

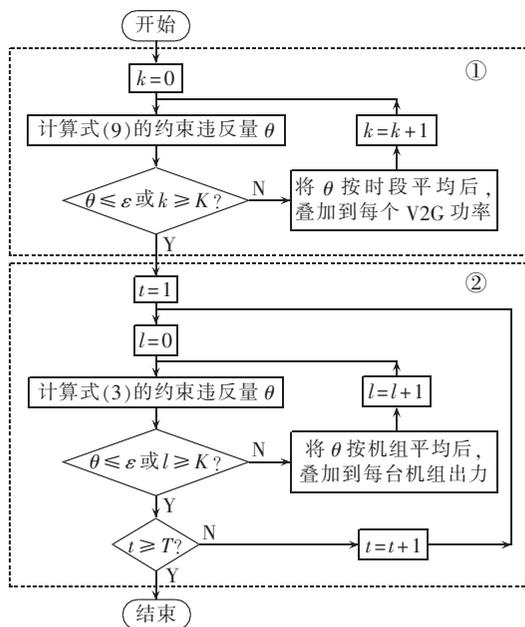


图 1 两步制等式约束处理流程图

Fig.1 Flowchart of two-step equality constraint processing

对于调度模型中的不等式约束, 本文采用如下分类处理的方法。

**a.** 将其中的电动汽车充放电功率约束、机组出力约束、爬坡约束, 纳入到以上动态调整模块的越界处理中<sup>[17]</sup>。

**b.** 在等式约束的动态调整过程中达到最大调整次数后, 仍然可能得到不可行解, 算法将这些解的等式约束违反量, 以及电池剩余容量约束和旋转备用约束违反量, 记为系统的总约束违反量  $V(\mathbf{x})$ , 其计算式如下:

$$V(\mathbf{x}) = \sum_{t=1}^T \left| \sum_{i=1}^N P_{i,t} + P_{Dch,t} - P_{D,t} - P_{L,t} - P_{Ch,t} \right| + \left| \sum_{i=1}^T S_{Trip,t} - \sum_{i=1}^T \eta_C P_{Ch,t} \Delta t + \sum_{i=1}^T \frac{1}{\eta_D} P_{Dch,t} \Delta t \right| + \sum_{i=1}^T [\max(S_{min} - S_t, 0)] + \sum_{i=1}^T [\max(S_t - S_{max}, 0)] + \sum_{i=1}^T \left[ \max \left( P_{D,t} + P_{L,t} + P_{Ch,t} + S_{R,t} - \sum_{i=1}^N P_{i,max} - P_{Dch,t}, 0 \right) \right] \quad (17)$$

模型的增广目标函数  $F(\mathbf{x})$  以基本的调度目标函数  $f(\mathbf{x})$  与总约束违反量罚函数之和的形式给出:

$$F(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + sV(\mathbf{x}) \quad (18)$$

其中,  $s$  为罚系数。

最终, 在对多目标函数分解、进化的基础上, 利用基于罚函数的约束处理方法, 实现迭代计算过程

中对不可行解的有效处理。

### 2.3 求解步骤

针对含电动汽车的 DEED 问题,采用 IMOEA/D 的求解步骤如下。

#### (1) 参数设置。

设置电动汽车、电力系统及 IMOEA/D 的具体参数。

#### (2) 初始化。

a. 初始化算法的种群  $N_p$ 、权重向量  $\lambda$ , 并计算每个个体对应的进化邻域;

b. 针对每个个体  $x^i$ , 利用两步制算法对等式约束中的决策变量进行动态调整, 并对不等式约束进行分类处理, 计算包含总约束违反量  $V(x^i)$  在内的目标函数值  $F(x^i)$ , 确定 IMOEA/D 的参考点  $z = [z_1, z_2]^T$ , 其中  $z_m = \min_{i=1,2,\dots,N_p} [F_m(x^i)] (m=1,2)$ ;

#### c. 迭代次数 $g_{en}$ 置零。

#### (3) 算法更新。

a. 对每个个体  $x^i$ , 利用差分进化生成新的个体  $y$ , 并对  $y$  进行前述的等式及不等式约束处理, 计算新的目标函数  $F(y)$ 。如果  $z_m > F_m(y)$ , 则更新参考点值  $z_m = F_m(y)$ 。

b. 对邻域  $B(i)$  内的个体  $x^r$ , 利用 Tchebycheff 法进行分解计算。如果  $g^{lc}(y|\lambda^r, z) \leq g^{lc}(x^r|\lambda^r, z)$ , 则更新最优解  $x^* = y$ , 且  $F(x^*) = F(y)$ 。

#### (4) 终止迭代。

如果  $g_{en}$  等于最大迭代次数, 则终止迭代计算; 否则,  $g_{en} = g_{en} + 1$ , 返回步骤 (3)。

#### (5) 输出结果。

输出目标值、最优解及 Pareto 最优前沿, 并应用模糊集理论<sup>[11]</sup>确定最优折中解。

## 3 算例分析

### 3.1 测试系统描述

本文采用 10 机系统进行调度研究, 调度周期 24 h, 机组参数及负荷数据见文献[19]。电网内共有 50000 辆电动汽车, 其电池容量为 24 kW·h (以 Nissan Leaf 为例), 每 100 km 耗电 15 kW·h。

假定电动汽车在每天早上离家时的荷电状态 SOC(State Of Charge)为 100%, 并且在 07:00 以及 17:00 开始的 1 h 内行驶在上下班路上 (共 50 km), 其余时间均可参与电网调度。调度周期内的最低 SOC 限制及额定充放电功率限制均设定为其额定值的 20%, 车载电池的充、放电效率为 0.85, 系统的旋转备用需求设为各时段负荷值的 10%。

### 3.2 方法验证

首先, 为保证 IMOEA/D 求解结果的真实可信, 同时利用 NSGA-II 算法求解该调度模型, 以进行

对比。IMOEA/D 的种群规模设为 100, 邻域  $H$  为 20, 迭代次数为 5000 次,  $\varepsilon, K$  分别取  $10^{-6}, 10$ , 罚系数  $s$  设为 100, 其余参数与文献[17]相同。NSGA-II 算法的交叉、变异概率分别取 0.9、0.2, 交叉、变异算子的分布指数取 20, 且采用本文的个体及约束处理机制, 种群规模与迭代次数也与本文算法保持一致。2 种算法得到的 Pareto 最优前沿和最优解分别见图 2 和表 1。

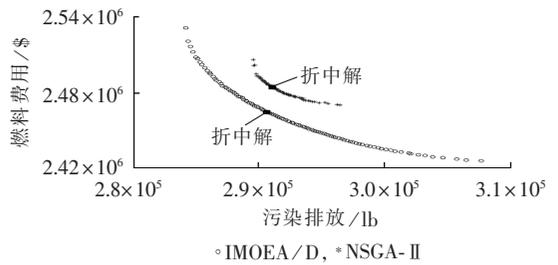


图 2 Pareto 最优前沿比较

Fig.2 Comparison of Pareto optimal fronts

表 1 极端解和最优折中解比较

Table 1 Comparison of extreme solutions and best compromise solutions

方法	目标	燃料费用/\$	污染排放/lb
IMOEA/D	经济最优	$2.4252 \times 10^6$	$3.0772 \times 10^5$
	环境最优	$2.5308 \times 10^6$	$2.8425 \times 10^5$
	最优折中解	$2.4635 \times 10^6$	$2.9080 \times 10^5$
NSGA-II	经济最优	$2.4697 \times 10^6$	$2.9652 \times 10^5$
	环境最优	$2.5055 \times 10^6$	$2.8962 \times 10^5$
	最优折中解	$2.4832 \times 10^6$	$2.9115 \times 10^5$

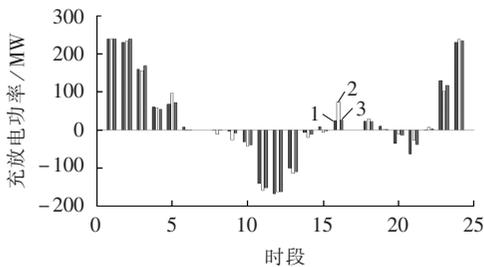
由优化结果可见, 针对此类多目标问题, 并不存在使 2 个调度目标同时最优的绝对最优解, 取而代之的是 Pareto 最优解。若运行人员仅考虑经济效益而选择经济最优方案时, 对环保不利; 反之若仅考虑污染气体排放量最小而选择环境最优方案时, 则以增加燃料费用为代价。因此, 在多目标问题特别是 DEED 的决策方面, 要充分挖掘 Pareto 最优解集所蕴含的信息, 并综合考虑各方面的因素, 进行科学合理决策。

同时, 由图 2 可见, 由于该调度问题的复杂性, 传统的 NSGA-II 算法并不能获得完整的最优前沿, 相比之下, 本文 IMOEA/D 得到的最优前沿范围更广, 分布更为均匀。且通过表 1 可看出, NSGA-II 算法找到的只是局部最优解, 明显劣于 IMOEA/D 的极端解和最优折中解。所以, 本文算法能为经济效益和环境保护目标间的相互妥协提供更为丰富的调度信息, 充分显示了该算法的优越性。

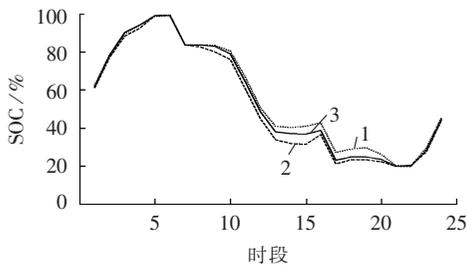
为验证调度方案的正确性, 表 2 给出 IMOEA/D 最优折中解的具体情况, 图 3 则给出了不同方案下电动汽车的充放电功率和 SOC (图中时段 1 表示 01:00—02:00, 其他依此类推)。

表 2 IMOEA/D 的最优折中解  
Table 2 Best compromise solutions of IMOEA/D

时段	常规机组出力/MW										充放电 功率/MW	网损/ MW	负荷/ MW
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6	机组 7	机组 8	机组 9	机组 10			
1	151.79	136.46	140.76	135.23	195.93	159.72	130.00	120.00	79.32	54.86	238.76	29.30	1036
2	152.19	142.05	154.17	168.92	221.33	159.64	130.00	119.61	79.29	54.64	239.07	32.77	1110
3	162.16	163.46	173.56	178.23	241.87	159.99	129.86	119.99	79.99	54.99	169.19	36.92	1258
4	160.56	173.52	187.46	192.88	242.68	159.53	129.34	119.44	79.47	54.25	54.43	38.69	1406
5	179.50	193.00	213.18	222.14	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	71.84	44.01	1480
6	203.38	219.10	237.97	231.49	242.73	159.39	129.98	119.95	79.88	54.32	1.13	49.03	1628
7	211.42	240.68	258.39	257.33	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	—	53.84	1702
8	246.83	259.28	267.31	277.74	242.42	159.64	129.61	119.51	79.16	54.48	0.63	59.35	1776
9	299.27	290.22	309.12	299.59	242.95	159.91	129.92	119.96	79.97	54.90	-8.40	70.22	1924
10	313.69	327.48	329.57	299.93	242.98	159.98	129.96	119.98	79.98	54.97	-39.48	75.98	2022
11	307.63	311.52	322.70	298.57	243.00	160.00	130.00	119.98	80.00	54.99	-151.16	73.56	2106
12	316.47	328.23	333.11	299.87	242.85	159.59	129.95	119.94	79.96	54.99	-161.54	76.50	2150
13	318.28	312.44	319.73	299.67	242.89	159.99	129.81	120.00	79.88	54.94	-108.74	74.37	2072
14	287.01	297.75	311.48	298.69	242.98	159.98	130.00	119.97	79.95	54.84	-11.28	69.92	1924
15	231.69	259.93	281.10	271.99	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	-2.26	58.98	1776
16	190.41	196.39	222.72	229.98	242.97	159.96	129.96	119.99	79.97	54.85	27.35	45.85	1554
17	167.15	170.45	197.58	197.17	242.79	159.82	129.93	119.97	79.96	54.95	—	39.77	1480
18	208.38	215.95	248.34	239.97	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	54.98	22.28	50.34	1628
19	241.50	261.40	276.94	270.75	242.73	159.86	129.71	119.75	79.64	54.76	1.67	59.38	1776
20	295.34	323.22	326.63	299.84	242.81	159.93	129.94	119.95	79.92	54.87	-13.38	73.82	1972
21	269.58	288.73	310.60	296.46	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	-38.23	67.60	1924
22	198.70	214.14	232.10	247.49	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	3.39	49.06	1628
23	158.15	163.13	178.73	201.79	240.39	160.00	130.00	120.00	80.00	54.87	117.07	37.99	1332
24	158.49	163.18	170.22	178.72	240.11	159.73	129.93	119.89	79.74	54.50	234.10	36.42	1184



(a) 充放电功率



(b) 荷电状态

1—经济最优, 2—环境最优, 3—最优折中解

图 3 不同解的电动汽车充放电情况对比

Fig.3 Comparison of EV charge/discharge power among different solutions

由图 3 可以看出, 极端解和最优折中解对应的电动汽车充放电规律比较相似, 两者只是在具体功率上有所不同, 这也就改变了常规机组之间的负荷分配, 导致最终的燃料费用及污染气体排放量的差异较大。

综合图 3(a)、(b), 电动汽车在 22:00 至次日 06:00, 基本处于充电状态, 以保证日间的出行及调度需求, 至 07:00 出发时 SOC 达到 100%; 07:00—08:00 车辆行驶在路上, 车载电池放电, SOC 有所下降; 08:00—15:00 为负荷的高峰期, 最高达到 2150 MW, 最低也有 1776 MW, 在此期间, 电动汽车基本处于放电状态, 以缓解常规火电机组压力, SOC 持续下降; 由于 17:00—18:00 车主的行驶需求, 车辆在 16:00 进行充电, SOC 有所上升; 而 20:00 及 21:00 是夜间的负荷高峰, 电动汽车继续放电直至 SOC 达到下限, 然后在夜间负荷低谷时补充电量直至次日出行。

### 3.3 模型验证

(1) 不同场景的调度研究。

在以上工作的基础上, 为深入验证所提调度模型及调度方法, 分别对以下场景进行动态环境经济调度研究。

场景 1: 无电动汽车接入系统。

场景 2: 50 000 辆电动汽车接入系统, 采用直接控制充电方式<sup>[3]</sup>, 对充电时间加以限定, 即电动汽车在 18:00 到家后开始充电, 至第 2 天 07:00 离家时结束。假定在此期间其所充电量满足均匀分布, 50 000 辆电动汽车共需电能 375 MW·h。

场景 3: 50 000 辆电动汽车接入系统, 采用可调度的 V2G 模式。

在上述 3 个场景中, 场景 1 只进行基本的 DEED

计算,其余的 2 个场景均有电动汽车参与。所有场景都采用本文的 IMOE/A/D 进行求解,且算法种群、迭代次数以及其他参数与 3.2 节保持一致。限于篇幅,在此只给出了不同场景下的极端解和折中解对应的负荷曲线,分别见表 3 和图 4。

表 3 不同场景的极端解

Table 3 Extreme solutions of different scenarios

场景	目标	燃料费用/\$	污染排放/lb
1	经济最优	$2.4365 \times 10^6$	$3.1373 \times 10^5$
	环境最优	$2.5317 \times 10^6$	$2.9256 \times 10^5$
2	经济最优	$2.4653 \times 10^6$	$3.1990 \times 10^5$
	环境最优	$2.5609 \times 10^6$	$2.9863 \times 10^5$
3	经济最优	$2.4252 \times 10^6$	$3.0772 \times 10^5$
	环境最优	$2.5308 \times 10^6$	$2.8425 \times 10^5$

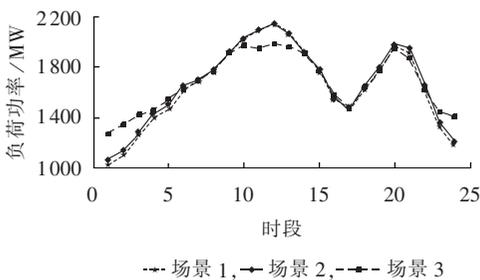


图 4 不同场景的负荷曲线

Fig.4 Load curves of different scenarios

对比以上解的情况和负荷曲线,若电动汽车采用场景 2 的常规充电方式接入电网,相比于无电动汽车接入的场景 1,系统的最优燃料费用和最优污染排放分别增加了 \$28 800 和 6 070 lb。可见,电动汽车虽然能减少车辆在行驶过程中的污染排放,但单一的充电模式,特别是对传统化石能源的过度依赖,反而使充电过程中的经济与环境问题更加突出。同时,此场景下负荷增长集中在 18:00 至次日 07:00,虽然有一定的填谷作用,但与原有的夜间负荷高峰期叠加,增加了系统的容量需求且影响系统安全。

而如果电动汽车采用场景 3 的可调度 V2G 接入模式,其最优燃料费用和最优污染排放反而比场景 1 分别减少了 \$11 300 和 8 310 lb。所以,相比于场景 2 的单一充电模式,采用可调度的智能充放电方式,通过其有效的双向能量交换,在高峰重负荷时缓解了常规机组的压力,能有效减少总的燃料费用和污染气体排放量;且场景 3 的充电行为集中在 22:00 至次日 06:00,放电行为集中在 08:00—15:00,这明显改善了系统的负荷特性,其峰谷差率降为 35.89%,负荷率升至 84.85%。3 个场景的具体负荷特性指标见表 4。

(2) 不同电动汽车规模的调度研究。

为研究不同电动汽车接入规模对系统调度结果影响,本文借鉴文献[20]对风电的处理思路,定义电

表 4 负荷特性指标对比

Table 4 Comparison of load characteristic indexes

场景	峰谷差率/%	负荷率/%
1	51.81	77.22
2	50.47	77.95
3	35.89	84.85

动汽车的渗透率为:

$$p = \frac{P_{NCh}}{P_{D,peak}} \times 100\% \quad (19)$$

其中,  $P_{D,peak}$  为系统的峰值负荷。不同渗透率下的极端解及其变化趋势见表 5 和图 5、图 6。

表 5 不同渗透率的极端解

Table 5 Extreme solutions of different penetrations

电动汽车数量/辆	渗透率/%	目标	燃料费用/\$	污染排放/lb
20000	4.47	经济最优	$2.4284 \times 10^6$	$3.0735 \times 10^5$
		环境最优	$2.5226 \times 10^6$	$2.8699 \times 10^5$
30000	6.70	经济最优	$2.4266 \times 10^6$	$3.0752 \times 10^5$
		环境最优	$2.5174 \times 10^6$	$2.8633 \times 10^5$
40000	8.93	经济最优	$2.4264 \times 10^6$	$3.0639 \times 10^5$
		环境最优	$2.5225 \times 10^6$	$2.8554 \times 10^5$
50000	11.16	经济最优	$2.4252 \times 10^6$	$3.0772 \times 10^5$
		环境最优	$2.5308 \times 10^6$	$2.8425 \times 10^5$
60000	13.40	经济最优	$2.4239 \times 10^6$	$3.0985 \times 10^5$
		环境最优	$2.5366 \times 10^6$	$2.8382 \times 10^5$
70000	15.63	经济最优	$2.4266 \times 10^6$	$3.0907 \times 10^5$
		环境最优	$2.5461 \times 10^6$	$2.8391 \times 10^5$
80000	17.86	经济最优	$2.4336 \times 10^6$	$3.0932 \times 10^5$
		环境最优	$2.5540 \times 10^6$	$2.8432 \times 10^5$

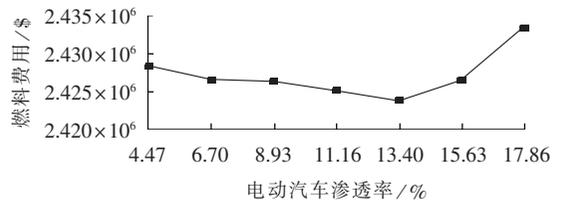


图 5 最优燃料费用随不同渗透率的变化趋势

Fig.5 Curve of best fuel cost vs. penetration

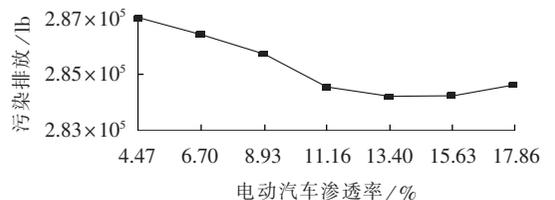


图 6 最优污染排放随不同渗透率的变化趋势

Fig.6 Curve of best pollution emission vs. penetration

由以上结果可以看出,随着电动汽车接入规模的不断扩大,其渗透率不断提高,相应的最优燃料费用及最优污染排放也随之不断减小。可见,电动汽车以 V2G 形式接入电网并参与电网调度,在初期确实能够缓解常规火机组的经济与环境压力。

然而,在本模型接入 60000 辆电动汽车(渗透率 13.40%)后,随着电动汽车规模的继续扩大,最优燃

料费用及最优污染排放反而由最低点向上攀升。这说明,随着电动汽车渗透率逐渐达到拐点,其对经济和环境效益的改善效果不断减弱,取而代之的是大规模电动汽车充电需求的不断增加,系统为应对此额外的充电负荷需牺牲一定的燃料费用及污染气体排放量。所以,在考虑电动汽车接入水平及制定相关规划时,并非接入规模越大越好,而是要根据系统实际情况进行综合评价。

#### 4 结论

基于电动汽车规模化接入电网这一应用背景,针对电力系统多目标 DEED 问题,本文主要做了以下工作。

a. 构建计及电动汽车可调度 V2G 接入模式的多目标 DEED 模型,并在模型中充分考虑了电动汽车能量属性与交通属性的耦合,以及系统的网络损耗等因素。该模型在兼顾经济和环境效益的同时,很好地体现了电动汽车接入对系统调度的影响。

b. 设计一种基于改进 MOEA/D 的优化调度求解方法,提出针对系统多等式约束的决策变量两步制处理策略,并通过违反量的适当惩罚,最终实现对模型复杂约束的有效处理。

c. 以 10 机电力系统进行 DEED 仿真计算,并对不同的调度方案进行分析研究,结果验证了所提调度模型及方法的合理性及有效性。

#### 参考文献:

- [1] DUVALL M, KNIPPING E, ALEXANDER M, et al. Environmental assessment of plug-in hybrid electric vehicles. volume 1: nationwide greenhouse gas emissions[R]. Palo Alto, USA: Electric Power Research Institute, 2007.
- [2] 中华人民共和国国务院. 《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)》[EB/OL]. (2012-06-28)[2015-05-08]. [http://www.gov.cn/jw/gk/2012-07/09/content\\_2179032.htm](http://www.gov.cn/jw/gk/2012-07/09/content_2179032.htm).
- [3] 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.
- [4] KEMPTON W, TOMIĆ J. Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 268-279.
- [5] 郭建龙, 文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 1-9.  
GUO Jianlong, WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 1-9.
- [6] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 22-29.  
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Power system stochastic economic dispatch considering uncertain
- outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 22-29.
- [7] 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.
- [8] DERAKHSHANDEH S Y, MASOUM A S, DEILAMI S, et al. Coordination of generation scheduling with PEVs charging in industrial microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3451-3461.
- [9] 张新松, 顾菊平, 袁越, 等. 电动汽车最优充电模型及其近似求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3148-3155.  
ZHANG Xinsong, GU Juping, YUAN Yue, et al. Optimum electric vehicle charging model and its approximate solving technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3148-3155.
- [10] 魏大钧, 张承慧, 孙波, 等. 基于分时电价的电动汽车充放电多目标优化调度[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 2972-2977.  
WEI Dajun, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. A time-of-use price based multi-objective optimal dispatching for charging and discharging of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 2972-2977.
- [11] 邱威, 张建华, 刘念, 等. 计及插电式混合动力汽车规模化接入的多目标发电优化调度[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 160-167.  
QIU Wei, ZHANG Jianhua, LIU Nian, et al. Multi-objective optimal generation dispatching with large-scale plug-in hybrid electric vehicles penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 160-167.
- [12] 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.
- [13] 蔡秋娜, 文福拴, 薛禹胜, 等. 基于 SCUC 的可入网混合动力汽车优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 38-46.  
CAI Qiuna, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. An SCUC-based optimization approach for power system dispatching with plug-in hybrid electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 38-46.
- [14] SABER A Y, VENAYAGAMOORTHY G K. Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1229-1238.
- [15] GHOLAMI A, ANSARI J, JAMEI M, et al. Environmental/economic dispatch incorporating renewable energy sources and plug-in vehicles[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(12): 2183-2198.
- [16] 李惠玲, 白晓民, 谭闻, 等. 基于智能电网的动态经济调度研究[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1547-1554.  
LI Huiling, BAI Xiaomin, TAN Wen, et al. Research on dynamic economic dispatch based on smart grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1547-1554.
- [17] 朱永胜, 王杰, 瞿博阳, 等. 含风电场的多目标动态环境经济调度[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1315-1322.

ZHU Yongsheng, WANG Jie, QU Boyang, et al. Multi-objective dynamic economic emission dispatching of power grid containing wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1315-1322.

- [18] LI H, ZHANG Q. Multiobjective optimization problems with complicated Pareto sets, MOEA/D and NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13(2): 284-302.
- [19] BASU M. Dynamic economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 30(2): 140-149.
- [20] 王彩霞, 乔颖, 鲁宗相, 等. 低碳经济下风火互济系统日前发电计划模式分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 111-117.
- WANG Caixia, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Day-ahead dispatch mode for wind thermal power system in low-carbon economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 111-117.

### 作者简介:



朱永胜

朱永胜(1980—),男,河南郑州人,讲师,博士研究生,研究方向为电力系统优化运行(**E-mail**: zhuydsy@163.com);

王杰(1959—),男,河南周口人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为智能计算与智能控制(**E-mail**: wj@zzu.edu.cn);

瞿博阳(1984—),男,河南焦作人,副教授,博士,研究方向为进化计算、模式识别、

运筹学理论(**E-mail**: qby1984@hotmail.com);

李健(1960—),男,河南开封人,高级实验师,研究方向为电力系统规划、运行(**E-mail**: lj@zzti.edu.cn);

SUGANTHAN P N(1967—),男,澳大利亚悉尼人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为进化计算、模式识别、群体智能(**E-mail**: epnsugan@ntu.edu.sg)。

## Dynamic environmental and economic dispatch of power system with EVs

ZHU Yongsheng<sup>1,2</sup>, WANG Jie<sup>1</sup>, QU Boyang<sup>2</sup>, LI Jian<sup>2</sup>, SUGANTHAN P N<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798)

**Abstract:** A dynamic environmental and economic dispatch model including EVs (Electric Vehicles) is constructed to cope with the challenge brought by the large-scale EV application to the power dispatch, which takes the V2G (Vehicle to Grid) power and the conventional generator outputs of each dispatch period as the decision variables, takes the total fuel cost and the pollution emission as the optimization objectives, and dynamically manages the charging/discharging behaviour of EVs to meet the demands of system energy and user travel. An improved MOEA/D is designed to solve the optimal dispatch model and a strategy based on the penalty function is proposed to dynamically process the constraints of decision variables in two steps. The rationality and effectiveness of the proposed model and method are verified by the simulative results of a test system.

**Key words:** electric power systems; electric vehicles; dynamic environmental and economic dispatch; MOEA/D; multi-objective optimization

(上接第 15 页 continued from page 15)

## Optimal EV charging station siting and sizing based on urban traffic network information

ZHAO Shuqiang, LI Zhiwei, DANG Lei

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** An analysis method based on two-step search is given for planning the site and size of EV (Electric Vehicle) charging station, for which, an optimal mathematical model is proposed. The optimal allocation of EV charging stations is obtained based on the information of urban roads, the Voronoi diagram is applied to divide the service areas for EV charging stations, and the size of each station is designed according to its charging load. Case analysis verifies the effectiveness and practicability of the proposed method.

**Key words:** electric vehicles; charging station; cluster analysis; set covering; charging station siting; charging station sizing; optimization