DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)06-0034-05

# 计及新能源汽车充放电的综合能源系统优化研究

程 旭[1]，彭 科[1]，李浩帆[1]，谢 鹏[2]

(1.南方电网电动汽车服务有限公司，广东 深圳 518000；
2.南方科技大学 电子与电气工程系，广东 深圳 518000)

**摘 要**：计及新能源汽车充放电，建立了含新能源汽车、新能源发电、市政电网、市政热网的综合能源系统架构模型。在满足能量平衡约束的和设备运行约束条件下，以最小二氧化碳排放量和最小用户成本为目标函数，基于分时电价利用粒子群优化算法对模型进行求解。结果表明，优化方案提升了供电可靠性，降低线路负载率，缓解了负荷高峰时期电力系统的供能压力，降低了系统运行成本，有效提高光伏发电消纳能力。在最佳购电、购气策略条件下，二氧化碳排放量为18.690 3 t，运行成本为32 830.03元。

**关键词**：充放电特性；新能源汽车；综合能源系统；运行成本；碳排放

中图分类号：TP183 文献标识码：A 文章编号：1003-7241(2025)06-0034-05

# Research on Comprehensive Energy System Optimization Considering Charging and Discharging of New Energy Vehicles

**CHENG Xu[1], PENG Ke[1], LI Hao-fan[1], XIE Peng[2]**

( 1. China Southern Power Grid Electric Vehicle Service Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;
2. Department of Electronic and Electrical Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518000, China )

**Abstract:** A comprehensive energy system architecture model including new energy vehicles, new energy power generation, municipal power grid and municipal heating network is established. Under the conditions of meeting the energy balance constraints and equipment operation constraints, the model is solved using particle swarm optimization algorithm based on time-sharing price with the minimum carbon dioxide emissions and minimum user cost as the objective function. The results show that the optimization scheme improves the power supply reliability, reduces the line load rate, relieves the power supply pressure of the power system during the peak load period, reduces the system operation cost, and effectively improves the photovoltaic power generation capacity. Under the optimal strategy of purchasing electricity and gas, the carbon dioxide emission is 18.690 3 t, and the operating cost is ¥32 830.03.

**Keywords:** new energy vehicles; integrated energy system; charging and discharging characteristics; operating costs; carbon emissions

## 0 引言

新能源汽车在电力系统中的高度渗透和不协调充电对电网产生的影响也不容忽视[1-2]。在负荷高峰期新能源汽车的V2G技术被视为电源，能够实现向电网输送电能，具有灵活、低碳、节能等优点[3-4]。此外，新能源汽车充放电具有电压调节、频率调节、负荷均衡、调峰、无功支持和可再生能源支持等优点[5]。如何将新能源汽车接入电网逐渐成为未来研究的方向，包括无线充电和利用能源互联网优化存储电能。颜勤等[6]提出了一种耦合插电式电动汽车的新型电力系统；Patwal等[7]提出了一种模糊替代权衡法，实现了含太阳能发电、风力发电、储能等模块的综合能源系统多目标发电调度；董燕等[8]提出了一种用于混合场景下并充分考虑用户综合需求的电动汽车充放电调度策略；王鹤等[9]建立了含风电、光伏、充电汽车的配电网运行风险评估方法。综上所述，现有研究对含电动汽车及新能源的新型电力系统调度优化进行了大量研究，然而对于含有新能源汽车的热电联产综合能源系统优化的文献还不多见。鉴于光伏、风电等清洁能源的出力间歇和负荷不稳定性，很有必要建立含新能源汽车充放电的综合能源系统。本文首先建立含新能源汽车充放电的综合能源系统架构模型，在满足能量平衡约束的和设备运行约束条件下，以最小二氧化碳排放量和最小用户成本为目标函数，基于分时电价利用粒子群优化算法对模型进行求解，实现系统的碳排放和经济最优。研究结果可为计及新能源汽车充放电的综合能源系统优化提供参考。

*基金项目：广东省基础与应用基础研究基金项目(2019A1515110901)

收稿日期：2023-11-07

## 1 综合能源系统架构模型

综合能源系统由负荷端、能源输入端和能源转换端组成，如图1所示。

热电联产机组运行模型为

$$H_{mt}=\frac{P_{mt}(1-\eta_{mt}-\eta_L)}{\eta_L} \tag{1}$$

式中，$\eta_L$为发电产热系数，$\eta_{mt}$为发电效率，$P_{mt}$为输出功率，$H_{mt}$为发电产生的余热量。

电锅炉的电热功率转换关系为

$$\Phi_{EB}=P_{EB}\eta_{EB} \tag{2}$$

式中，$P_{EB}$为电锅炉的耗电功率；$\eta_{EB}$为电锅炉的电热功率转换效率；$\Phi_{EB}$为电锅炉的电制热功率。

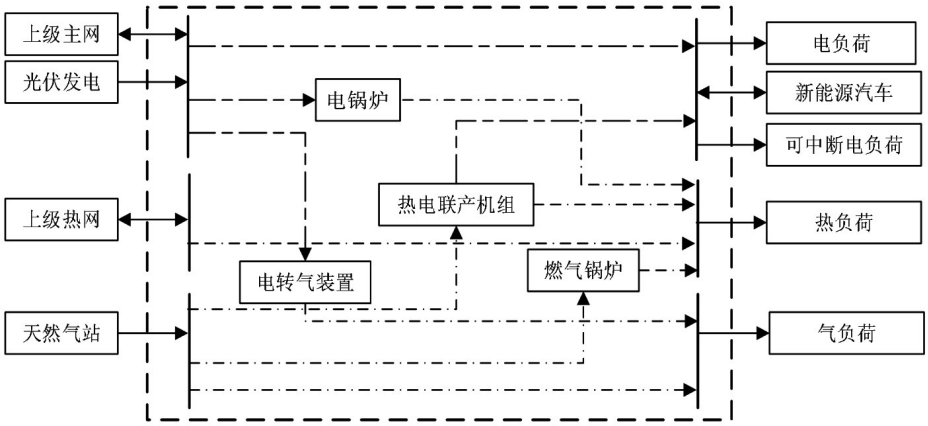



**图1 综合能源系统架构图**

燃气锅炉消耗的天然气量为

$$f_{GB}=\frac{\Phi_{GB}}{\eta_{GB}f_{LHV}} \tag{3}$$

式中，$f_{LHV}$为天然气的低热值，$\eta_{GB}$为燃气锅炉的发热效率，$\Phi_{GB}$为燃气锅炉的热出力。

电转气装置转化关系：

$$f_{P2G}=\frac{P_{P2G}\eta_{P2G}}{f_{LHV}} \tag{4}$$

式中，$P_{P2G}$为电转气装置的耗电功率，$\eta_{P2G}$为电转气装置的转化效率。

新能源汽车充放电模型为

$$E_{ev,i}(t)=E_{ev,i0}+P_{dis}\mu_{ev}+\frac{P_{cha}}{\mu_{ev}} \tag{5}$$

式中，$\mu_{ev}$为充放电效率，$P_{cha}$为充电功率，$P_{dis}$为放电功率，$E_{ev,i0}$为剩余电量，$E_{ev,i}(t)$为$t$时刻的储存电量。

假设结束1 d行程后新能源汽车就接入电网，则剩余电量为：

$$E_{ev,i0}=E_{\max}-E_{\min}-SW \tag{6}$$

式中，$W$为每公里的耗电量，$S$为日行驶里程，$E_{\min}$为最小电池容量，$E_{\max}$为最大电池容量。

为保障车主利益，设置放电和充电时刻分别为晚间电负荷高峰和晚间电负荷低谷时期。同时，将出行前电量设为电池容量的95%，且在8时−18时这一时间段内新能源汽车不参与调度。

放电时间为

$$T_{dis}=\begin{cases}T_0 & T_{in}\le T_0\\ T_{in} & T_0<T_{in}<T_1\end{cases} \tag{7}$$

式中，$T_{in}$为结束1 d行程的时刻，$T_0$、$T_1$分别为电负荷高峰初始、结束时刻。放电时长由放电功率与放电开始时间决定。

## 2 多目标优化建模

### 2.1 目标函数

以用户费用最小建模，目标函数为

$$C_{ost}=\sum_{i=1}^{T}(C_{ess}(t)+C_{grid}(t)+C_{mgo}(t)) \tag{8}$$

式中，$C_{ess}$为用户储能成本；$C_{mgo}$为用户热能成本；$C_{grid}$为用户电成本；$C_{ost}$为用户总费用。

构建以二氧化碳排放最小为目标的函数：

$$\min\ EM(t)=\min(EM_{ele}+EM_{gas})=\min(\sum_{j=1}^{N_j}X_{ele,j}E(t)+X_{gas}G(t)) \tag{9}$$

式中，$G(t)$和$E(t)$分别为$t$时段内购天然气量和购电量；$X_{gas}$为天然气的污染气体排放因子；$X_{elej}$和$EM_{gas}$分别使用电网和天然气产生污染气体的排放因子；$N_j$为污染气体排放类型；$EM_{ele}$为电网产生的污染气体排放量；$EM(t)$为$t$时段内的碳排放成本。

### 2.2 约束条件

电平衡公式如下：

$$x_{grid,n,t}+l_{pv,n,t}+x_{dis,n,t}=l_{e,n,t}+l_{eh,n,t}+x_{ch,n,t} \tag{10}$$

式中，$l_{pv,n,t}$为光伏输出电量；$l_{e,n,t}$为用户电负荷；$x_{ch,n,t}$和$x_{dis,n,t}$分别为充、放电量；$x_{eMGO,n,t}$为获取的电能；$x_{grid,n,t}$为向电网的购电量。

综合能源系统中电制热设备、燃气锅炉和燃气轮机等为用户提供热能。热平衡表示如下：

$$x_{mgo,n,t}+\left(l_{h,n,t}-x_{mgo,n,t}\right)^{+}=l_{h,n,t} \tag{11}$$

构建的优化模型基于新能源汽车充放电策略，基于分时电价利用粒子群优化算法对模型进行求解。

## 3 结果与分析

以贵州省某综合能源系统示范工程为研究对象，对冬季典型日的光伏出力、用户侧热电负荷以及新能源汽车充放电负荷进行数据收集，验证计及新能源汽车充放电特性与用户费用和二氧化碳排放量的优化策略的有效性和合理性。社区用户侧各负荷需求以及光伏出力如图2所示。

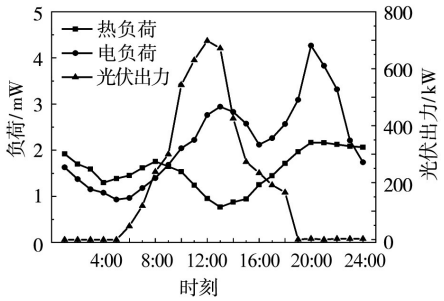



图2 热电负荷和光伏出力曲线

### 3.1 以用户费用最小化为目标

结合光伏出力及分时电价情况，最小用户费用为目标的供热优化结果如图3所示。可以看出热负荷输入以锅炉供热为辅，热电联供系统(cogeneration system；combined heat and power system，CHP)机组供热为主。根据负荷分布情况，制定能源系统内的分时电价，分时电价优化结果如图4所示。供电优化结果如图5所示。在电价平段(7时−10时)期间，光伏装置开始发电，充电量有所增加，而随着热负荷需求的减少和用电量的增加，导致购电量逐渐增加，CHP供电量和购气量不断减少。由于CHP供电量受购气量限制，在电价峰段(10时−15时)期间充电量等于光伏发电量，而此阶段用电量急剧增加，购电量峰值出现在12时，随后购电量逐渐降低。在电价平段(15时−18时)期间，社区用电由CHP供电和电网购电共同提供。在电价峰段(18时−21时)和电价平段(21时−23时)期间，供电以CHP供电为辅，储能系统放电为主。电价谷段(23时−24时)期间向电网购电。

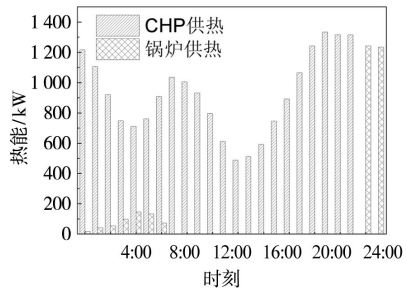



图3 供热优化结果

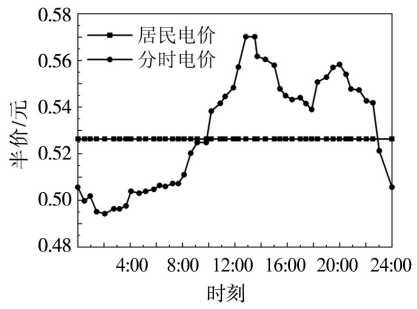



图4 分时电价优化结果

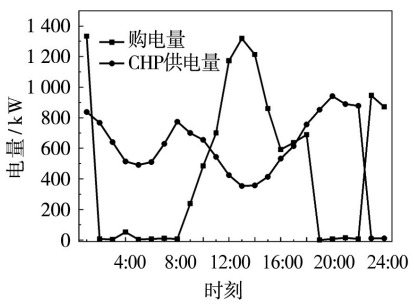



图5 以用户费用最小化为目标的供电优化结果

### 3.2 以$CO_2$排放成本最小化为目标

以$CO_2$排放成本最小化为目标对供热进行优化，燃气锅炉仅在(2时−6时)提供热能，供热主要由CHP机组提供。供电优化结果如图6所示。在电价谷段(1时−7时)，仅少量电量通过购电获取，主要以CHP供电为主。在电价平段(7时−10时)和电价峰段(10时−13时)期间，光伏装置开始发电，充电量随之增加。电价峰段(13时−15时)随电负荷需求降低购电量逐渐减少，CHP供电量不断增加。电价平段(15时−18时)期间，社区用电由CHP供电和电网购电共同提供。在(18时−24时)期间，供电以CHP供电为辅，储能系统放电为主。

优化前后碳排放量曲线，如图7所示。结合普通负荷发现，在执行优化方案前，1时到8时用电负荷处于低谷期，执行优化方案后，大部分新能源汽车充电负荷及可转移的用电负荷被分配到此时段，储能作用得到最大限度的发挥，$CO_2$排放量明显降低。$CO_2$排放曲线明显降低，进一步证明所提方案的有效性。

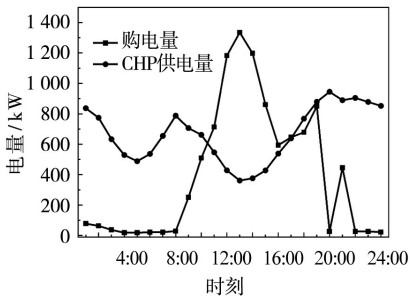



图6 以$CO_2$排放成本最小化为目标的供电优化结果

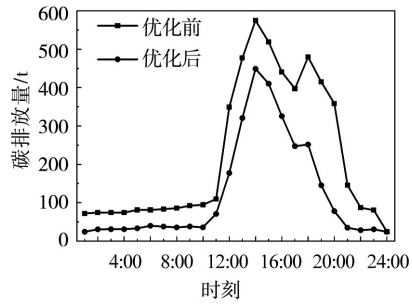



图7 优化前后碳排放量曲线图

### 3.3 多目标优化结果

综合考虑$CO_2$排放和用户费用最小化的多目标优化优化，得到的帕累托最优前沿，见表1。可以看出，$CO_2$排放与运行成本成反比，二氧化碳排放随运行成本的增加不断降低。利用粒子群优化算法对表1帕累托最优前沿数值结果进行分析，可得最佳解决方案L，此时$CO_2$排放量为18.690 3 t，运行成本为32 830.03元。购电和购气策略优化结果如表2所示。

表1 帕累托最优前沿数值

| 方案 | Epsilon | 用户费用/元 | $CO_2$排放量/t | $\mu_e$ | $\mu_{cost}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| A | 19.634 6 | 32 745.43 | 19.634 6 | 0 | 1 |
| B | 19.549 1 | 32 753.11 | 19.549 1 | 0.071 3 | 0.992 6 |
| C | 19.463 6 | 32 760.81 | 19.463 6 | 0.142 7 | 0.986 6 |
| D | 19.377 2 | 32 768.49 | 19.377 2 | 0.214 0 | 0.980 7 |
| E | 19.291 7 | 32 776.19 | 19.291 7 | 0.285 2 | 0.974 7 |
| F | 19.205 2 | 32 783.88 | 19.205 2 | 0.356 5 | 0.968 8 |
| G | 19.119 7 | 32 791.57 | 19.119 7 | 0.428 0 | 0.962 9 |
| H | 19.034 2 | 32 799.26 | 19.034 2 | 0.499 2 | 0.956 9 |
| I | 18.947 8 | 32 806.96 | 18.947 8 | 0.570 5 | 0.951 0 |
| J | 18.862 3 | 32 814.64 | 18.862 3 | 0.642 0 | 0.945 2 |
| K | 18.776 8 | 32 822.34 | 18.776 8 | 0.713 2 | 0.939 2 |
| L | 18.690 3 | 32 830.03 | 18.690 3 | 0.784 5 | 0.933 3 |
| M | 18.604 8 | 32 837.72 | 18.604 8 | 0.855 7 | 0.927 3 |
| N | 18.519 3 | 32 895.99 | 18.519 3 | 0.927 2 | 0.882 4 |
| O | 18.432 9 | 33 429.05 | 18.432 9 | 1 | 0.471 6 |

通过计算各个环节运行成本，验证该优化方案的经济性，并进行了经济性对比。综合能源系统优化后的总成本明显降低，负荷低谷时段的过剩可再生能源发电，电转气运行成本降低41.4%，火电机组的成本降低了49.6%。优化前的新能源汽车不需启用放电供能，而优化后供能增加了运行成本，新能源汽车运行成本增加了40.3%。

表2 购电和购气策略

| 时刻 | 购电量/kW | 购气量/kW | 时刻 | 购电量/kW | 购气量/kW |
|---|---|---|---|---|---|
| $t_1$ | 1 353.49 | 2 396.07 | $t_{13}$ | 1 401.28 | 1 017.06 |
| $t_2$ | 1.59 | 2 166.93 | $t_{14}$ | 1 266.14 | 1 105.50 |
| $t_3$ | | 1 864.54 | $t_{15}$ | 891.39 | 1 247.00 |
| $t_4$ | 56.58 | 1 509.21 | $t_{16}$ | 621.79 | 1 596.34 |
| $t_5$ | | 1 553.06 | $t_{17}$ | 674.20 | 1 877.88 |
| $t_6$ | | 1 653.18 | $t_{18}$ | 728.20 | 2 261.12 |
| $t_7$ | | 1 899.50 | $t_{19}$ | | 2 589.82 |
| $t_8$ | 12.70 | 2 224.92 | $t_{20}$ | | 2 828.61 |
| $t_9$ | 253.81 | 2 009.93 | $t_{21}$ | | 2 688.58 |
| $t_{10}$ | 497.22 | 1 868.48 | $t_{22}$ | | 2 647.30 |
| $t_{11}$ | 709.17 | 1 545.99 | $t_{23}$ | 87.16 | 2 545.60 |
| $t_{12}$ | 1 353.49 | 2 396.07 | $t_{24}$ | 1 401.28 | 1 017.06 |

表3 运行总成本

| 方案 | 总成本/元 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 新能源汽车 | 火电机组 | 光伏 | 总成本 |
| 优化前 | 57 237 | 25 329 | 94 429 | 272 997 |
| 优化后 | 34 165 | 37 912 | 55 327 | 224 365 |

## 4 结束语

为了提高城市能源利用率，以碳排放量和运行成本最小为目标，对计及新能源汽车充放电的综合能源系统进行了优化，建立了新能源汽车充放电负荷模型，提出了多目标优化方法，以综合能源系统示范工程为例对优化模型的有效性进行了验证，新能源汽车根据电价和目标函数有序充放电，在分时电价的基础上，平抑负荷波动，使得负荷曲线平缓，多目标优化结果同时兼顾环保性和经济性，系统稳定、环保、经济、运行。在最佳购电购气策略条件下，二氧化碳排放量为18.690 3 t，运行成本为32 830.03元，能够进一步提升光伏消纳能力，降低系统运行成本，实现综合能源系统的梯级利用与多能互补。

**参考文献：**

[1] 魏骁，申少辉，徐俊.浙江省中长期电力负荷需求预测分析[J].自动化技术与应用，2023，42(2)：26−29.

[2] Sun J，Li G，Wang Z.Optimizing China's energy consumption structure under energy and carbon constraints[J].Structural Change and Economic Dynamics，2018(47)：57−72.

[3] Keshavarzzadeh A H，Ahmadi P.Multi−objective techno economic optimization of a solar based integrated energy system using various optimization methods[J].Energy Conversion and Management，2019(196)：196−210.

(下转第184页)