

# 含电动汽车的区域综合能源系统日前调度优化

张雯雯, 魏震波, 黄宇涵

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 区域综合能源系统是实现能源转型和解决环境问题的基础。随着中国电动汽车的大力发展, 电动汽车作为园区内灵活可调度资源, 具备调峰和促进清洁能源消纳等作用。由此, 建立一种包含电动汽车和分布式电源的区域综合能源系统日前调度模型。首先, 分析了区域综合能源系统中多种能量流动关系; 其次, 对不同能源转换设备和电动汽车独立建模的基础上, 抽象出以园区日前综合经济效益最大化为目标函数的数学模型; 最后, 在算例系统中分析了含电动汽车参与区域综合能源系统日前调度的经济效益。

**关键词:** 区域综合能源系统; 电动汽车; 冷热电三联

中图分类号: TM73 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)06-0050-05

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.06.011

## Day-ahead Scheduling Optimization of Regional Integrated Energy System Including Electric Vehicles

Zhang Wenwen, Wei Zhengbo, Huang Yuhuan

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

**Abstract:** Regional integrated energy system is the base of energy transformation and solving environmental problem. With the rapid development of electric vehicles in China, electric vehicles, as flexible and dispatchable resources in parks, play a role in peak regulation and promoting clean energy consumption. Therefore, a day-ahead scheduling model of regional integrated energy system including electric vehicles and distributed power supply is established. Firstly, the relationship of energy flow in regional comprehensive energy system is analyzed. Secondly, on the basis of independent modeling of different energy conversion equipment and electric vehicles, the mathematical model is abstracted taking the day-ahead comprehensive economic benefits maximization as objective function. Finally, the economic benefits of electric vehicles participating in day-ahead dispatching of regional integrated energy system are analyzed in the example system.

**Key words:** regional integrated energy system; electric vehicles; combined supply of cooling, heating and power

## 0 引言

为解决化石能源日益枯竭以及人类对能源需求日益增长的问题, 各国大力发展具有清洁、易于获取、资源覆盖面广等特点的可再生能源<sup>[1]</sup>。在此基础上, 优化能源结构, 从化石能源结构向可再生能源结构转型成为必然趋势。为提高用能效率并综合协调管理, 能源互联网应运而生。与传统的单一微电网系统相较, 区域综合能源系统<sup>[2-7]</sup>将中低压配电网、配气网、冷/热网等不同形式的网络进行紧密耦合, 不同能源间高效的互补互济提高了系统整体调度灵活性。但多能协调管理和转化机制也会带来新的挑战。

目前, 在区域综合能源系统调度层面已有许多研究。文献[8]针对区域综合能源系统面临灾害的弹性恢复能力和系统运行经济性之间的矛盾问题, 提出多目标加权模糊规划的优化方法。文献[9]针对含电转气技术的综合能源系统, 面向供给侧储能/储气设备和需求侧暖通空调等, 提出了一种基于李雅普诺夫的事件触发型在线能量优化方法。文献[10]针对冷热负荷存在惯性, 提出多元储能技术, 构成多元储能系统对区域综合能源系统进行优化。上述文献从不同方面考虑了如何对区域综合能源系统进行优化并相应提出优化方法; 但针对的都是传统的电气元件进行建模优化仿真, 缺乏针对迅速普及的电动汽车<sup>[11-12]</sup>对区域综合能源系统优化运行影响的研究。

下面针对此问题,将电动汽车视为园区内可调度的调峰资源,建立了一种含电动汽车和多种分布式电源<sup>[13]</sup>的热电联供<sup>[14-16]</sup>的区域综合能源优化模型,并使用具有求解线性规划问题功能的 Python 进行仿真求解。

## 1 区域综合能源系统模型

### 1.1 模型设定

设定区域综合能源系统具有一个可以对电动汽车进行有效调度运行的 EV 聚合商、风光分布式电源、微型燃气发电设备、锅炉以及外部接入的电网等,如图 1 所示。通过先进的物联网、通信技术将上述系统组成联系在一起,配合各类储能设备以及电动汽车的辅助,使不同种类能源互补互济、优化运行,提高能源利用率以及清洁能源的使用量,同时使购买能源的费用达到最低。

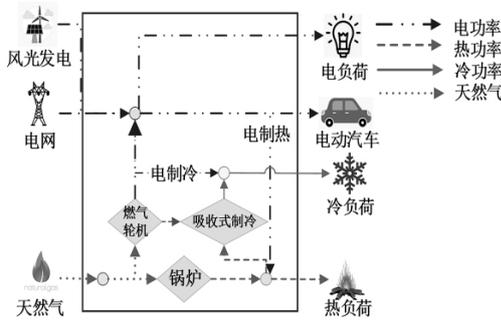


图 1 系统模型

### 1.2 目标函数

建立区域综合能源系统优化模型的目的是通过能源之间的协调运作,降低能源的使用成本(购电购气成本减去区域内发电并网收入),提高经济性。以此为目的建立如下目标函数。

$$C = \min(C_e + C_{gas} + C_{EV})$$

$$C_e = \sum_{t=1}^T c_{e,t} P_{e,t}$$

$$C_{gas} = c_{gas} \sum_{t=1}^T (aP_{gas,t}^2 + bP_{gas,t} + d + H_t^{GB})$$

$$C_{EV} = \sum_{t=1}^T c_{EV,t} P_{EV,t} \quad (1)$$

式中:  $T$  表示总调度时段数,为 24 h;  $C_e$ 、 $C_{gas}$  和  $C_{EV}$  分别为一天内电网电能购入总成本、天然气购买成本和电动汽车运行成本;  $c_{e,t}$  为第  $t$  个时间段的电费价格;  $P_{e,t}$  为第  $t$  个时间段从电网获取电能的功率;  $P_{gas,t}$  为第  $t$  个时间段燃气轮机发出的电能;  $H_t^{GB}$  为

第  $t$  个时间段锅炉产生的热能功率;  $c_{gas}$  为天然气价格;  $P_{EV,t}$  为第  $t$  个时间段充入的电能;  $c_{EV,t}$  为单位储能成本。

### 1.3 系统模型

#### 1) 微型燃气轮机机组模型

$$P_t^{GT} = F_t^{GT} \eta_e \cdot HG_V$$

$$H_t^{GT} = F_t^{GT} \eta_{h1} \cdot HG_V$$

$$P_{min}^{GT} \leq P_t^{GT} \leq P_{max}^{GT}$$

$$H_{min}^{GT} \leq H_t^{GT} \leq H_{max}^{GT} \quad (2)$$

式中:  $P_t^{GT}$  为第  $t$  个时刻微型燃气轮机发电功率;  $H_t^{GT}$  为第  $t$  个时刻微型燃气轮机产热功率;  $HGV$  为天然气热值;  $F_t^{GT}$  为第  $t$  个时间天然气燃料流量;  $\eta_e$ 、 $\eta_{h1}$  分别为微型燃气轮机发电、产热效率;  $H_{min}^{GT}$ 、 $H_{max}^{GT}$  分别为燃气轮机产热的最小和最大功率;  $P_{min}^{GT}$ 、 $P_{max}^{GT}$  分别为燃气轮机发电的最小、最大功率。

#### 2) 燃气锅炉模型

$$H_t^{GB} = F_t^{GB} \eta_{h2} \cdot HG_V$$

$$H_{min}^{GB} \leq H_t^{GB} \leq H_{max}^{GB} \quad (3)$$

式中:  $H_t^{GB}$  为第  $t$  个时刻燃气锅炉产热功率;  $F_t^{GB}$  为第  $t$  个时间天然气燃料流量;  $\eta_{h2}$  为燃气锅炉发热效率;  $H_{min}^{GB}$ 、 $H_{max}^{GB}$  分别为燃气锅炉产热的最小和最大功率。

#### 3) 吸收式制冷机组模型

$$Q_{chi,t} = H_{c,t} \cdot \eta_c \quad (4)$$

式中:  $H_{c,t}$  和  $Q_{c,t}$  分别为第  $t$  个时段吸收式制冷机的输入热功率和输出冷功率;  $\eta_c$  为吸收式制冷机组热转冷效率。

#### 4) 电锅炉

$$H_t^{EB} = P_t^{EB} \eta_{eb} \quad (5)$$

式中:  $H_t^{EB}$  和  $P_t^{EB}$  分别为第  $t$  个时段电锅炉的输出热功率和输入电功率;  $\eta_{eb}$  为电锅炉电转热效率。

#### 5) 电制冷机组模型

$$Q_{AC,t} = P_{AC,t} \eta_{AC} \quad (6)$$

式中:  $Q_{c,t}^{AC}$  和  $P_{t,t}^{AC}$  分别为第  $t$  个时段电制冷机组的输出冷功率和输入电功率;  $\eta_{AC}$  为电锅炉电转冷效率。

### 1.4 约束条件

#### 1) 电功率平衡约束

$$P_{e,t} + P_{gas,t} + P_{clean,t} = P_{LD,t} + P_{EV,t} + P_{h,t} + P_{c,t} \quad (7)$$

式中:  $P_{clean,t}$  为第  $t$  个时间段风光分布式电源产生的电能;  $P_{LD,t}$  为第  $t$  个时间段的区域用户用电负荷(电动汽车负荷除外);  $P_{h,t}$  为第  $t$  个时间段的电锅

炉输入电功率;  $P_{c,t}$  为第  $t$  个时间段的电制冷机输入电功率。

2) 热、冷功率平衡

$$Q_{h,t} = H_t^{GB} + H_t^{GT} - H_{c,t}$$

$$Q_{c,t}^L = Q_{AC,t} + Q_{chi,t} \quad (8)$$

3) 风光发电约束

$$0 \leq P_{clean,t} \leq P_{clean,max} \quad (9)$$

根据区域所在的地理位置与历史风光发电信息对风光分布式电源进行发电预测,预测出每个时间段的发电最大值  $P_{clean,max}$ ,各个时刻清洁能源的使用量不能高于  $P_{clean,max}$ 。

4) EV 约束

考虑到用户用车的习惯,同时电动汽车使用和充电不能同时进行,在用户不使用电动汽车时,将电动汽车当做储能资源使用,EV聚合商相应的给予用户价格补偿或者使用其他激励机制激励用户将电动汽车作为储能资源,EV聚合商在协商好的时间段可以任意对电动汽车进行充放电操作。

$$0 \leq \sum_{j=1}^i P_{EV,j} \leq W \quad i = 1, 2, \dots, T$$

$$-\beta \leq P_{EV,t} \leq \beta \quad (10)$$

式中:  $\beta$  为单位时间电动汽车储能电池充入或放出的最大电能;  $W$  为电动汽车的日最大充放电容量。在第  $t$  个时间段内存储的能量与前面储存的能量累加值不能超出电动汽车存储的最大限度或者为负值,同时每个时间段充放的电能也不能超过单位时间所能充入的能量最大值。

## 2 算例分析

### 2.1 算例描述

选某一区域综合能源系统为研究对象,图2为某区域夏季某一日的电负荷、热负荷、冷负荷以及风光功率预测曲线。

本算例中存在电转热、电转冷、气转电、气转热等能量转化过程,具体能量转化效率如表1所示。

本算例中,电网电价高峰时段为7:00—11:00、19:00—23:00,低谷时段为23:00至次日7:00,平段为11:00—19:00。该区域内平段电价为0.6元/kWh,按照峰谷分时浮动电价以高峰时段上调50%,低谷时

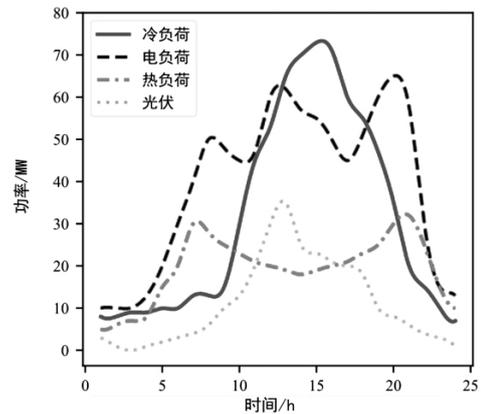


图2 夏季某日负荷曲线

表1 能量转化效率

类型	转化效率/%
电转热	3.1
电转冷	2.6
余热转冷	0.7
锅炉产热	0.8
燃气轮机产电	0.3
燃气轮机产热	0.3

段下降50%标准,高峰时段该区域电价0.9元/kWh,低谷时段该区域电价0.4元/kWh。

天然气按照2元/m<sup>3</sup>计算,1m<sup>3</sup>天然气与10kWh电的能量相等,同时按照各种能量的转化效率,定制以下发电、制冷、制热成本:

根据各种类型产生能量的成本大小,基于成本最低的目的,规定只考虑利用余热制冷,而不进行锅炉燃气只用于制冷的运行;其次,考虑到平段谷段电网电价较低,所以平段谷段不使用锅炉产热。除此之外,为电动汽车用户提供的价格补偿为每充放1kWh电补偿0.4元,清洁能源发电成本为0。在此基础上,鉴于本算例的电网电价机制,电动汽车在电网电价谷段充电,在平段不参与充放电,而在峰段放电,使清洁能源全部投入使用。

本算例中电动汽车储存能量在时刻1的初始值设为0,每个小时的最大充放电量为2MWh。

### 2.2 算例仿真

基于以上的算例说明使用Python对模型进行优化仿真并求解。仿真结果见图3至图5。

如图3所示,在电价低谷时间段内,系统从电网获取大量电能。随着时间的推移,电价升高,电能的

供应形式从电网供电慢慢过渡到由燃气轮机进行供电。除此之外,从图中电动汽车的充放电情况中可以看出,电动汽车在低谷时段充电、用电高峰期放电,不仅降低用电成本,而且参与调峰,同时为电动汽车用户带来经济效益。

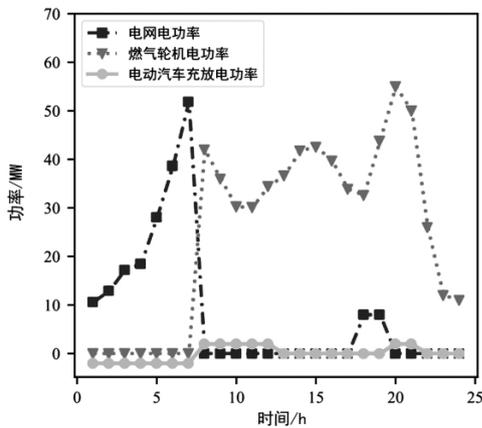


图3 优化后电功率负荷供给来源曲线

图4中分别为燃气余热供热功率随时间变化仿真曲线、电能转化的热能功率随时间变化仿真曲线、锅炉产生的热功率随时间变化仿真曲线。

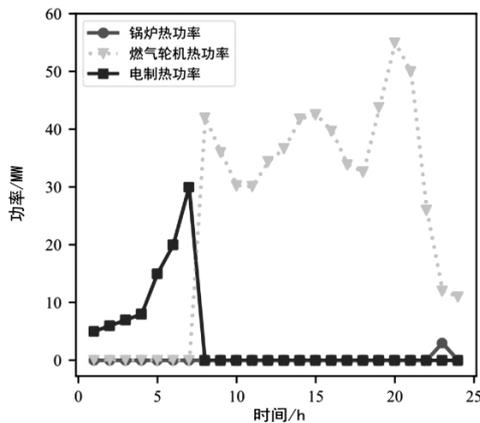


图4 优化后热功率负荷供给来源曲线

如图4所示,燃气轮机除了在平段和峰段产生电能,还同时利用余热产生大量热能满足热负荷需求。在仿真图中可以看到,当夏季热负荷需求较少时,余热可以供应大部分热负荷。其余部分的热负荷,在谷段由电能转化为热能,在用电高峰段由锅炉产热供应热负荷。

图5中给出了吸收式制冷机组利用燃气余热和锅炉产生的余热制冷功率随时间变化仿真曲线、电能转化为冷功率随时间变化仿真曲线。

如图5所示,吸收式制冷机组在谷段和平段吸收余热提供大量冷能,显著地实现了能量的梯级利

用。其余冷能几乎由平段和谷段的低电价电网电能提供。

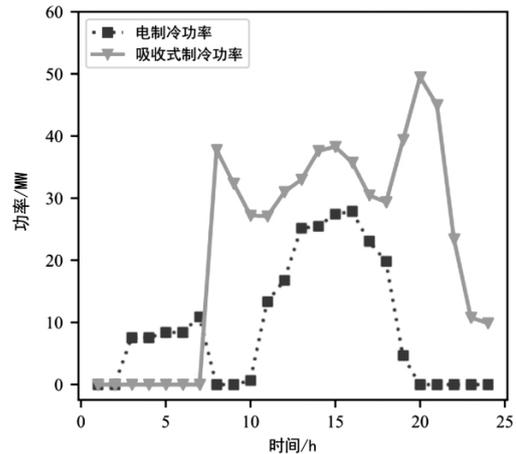


图5 优化后冷功率负荷供给来源曲线

### 2.3 对比分析

为进一步研究电动汽车在区域综合能源系统起到的优化作用,改变系统中的可用于充当储能资源的电动汽车数量和每个小时的充放电电量,并进行仿真对比分析。

将电动汽车每个小时的最大充放电电量从0分别提高到5 MWh、10 MWh、20 MWh、25 MWh,电动汽车充放电随时间变化仿真曲线如图6所示。燃气轮机发电量随时间变化仿真曲线如图7所示。

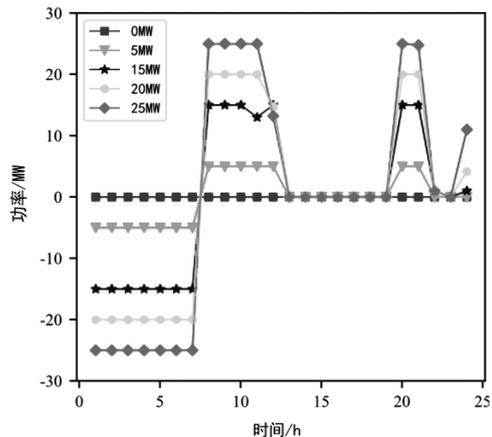


图6 电动汽车充放电功率

如图6和图7可以看出,随着电动汽车每个小时的最大充电量不断提高,电动汽车在谷价时段的实际充电量也相应提高,并在高峰时段放出,替代相对成本更高的燃气轮机。

对不同充放电电量约束条件(假设有足够的电动汽车)下的系统运行总成本进行仿真计算,结果如表2所示。

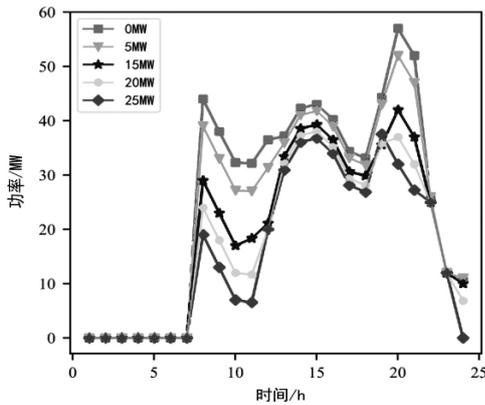


图7 燃气轮机发电功率

表2 仿真数据

最大充放功率/(MW·h <sup>-1</sup> )	总成本/万元
0	48.831
5	45.525
15	39.239
20	36.541
25	34.033

如表2所示,当每个小时电动汽车的最大充放量变大并且有足够的电动汽车可供调用时,系统使用能量的总成本不断下降,经济性不断提高。

### 3 结语

以系统能源成本为目标建立了含有电动汽车的区域综合能源系统模型。仿真结果表明:

1) 基于区域内的负荷特性对电网电能、天然气、清洁能源发电的使用进行优化,有效消纳了区域内风光能源;冷热电的梯级利用,大幅提高了能源利用率;通过对天然气与电网电能的交替配合使用既满足能源需求、有效错峰,又达到成本最小化的经济效果。

2) 随着可控的电动汽车数量变多、EV聚合商的规模变大,能将其作为调度资源参与错峰并降低成本。系统不需要额外的建设费用,同时电动汽车用户也可以得到相应的经济收入,相较于高成本的储能蓄电池,其潜力更大。

#### 参考文献

[1] 李欣民. 清洁能源发电技术及市场现状研究[J]. 电力需求侧管理 2017 6(7):29-32.  
[2] 吴桂联,林婷婷,郑洁云,等. 大型园区综合能源系统能源站优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报 2019-06-

19. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1251.TM.20190618.1435.002.html>.  
[3] 陈柏森,廖清芬,刘涤尘,等. 区域综合能源系统的综合评估指标与方法[J]. 电力系统自动化,2018,43(4):174-182.  
[4] 吴志力,杨卫红,原凯,等. 园区能源互联网多能源协同优化配置发展构想[J]. 中国电力 2018 51(8):99-105.  
[5] 单福州,李晓露,宋燕敏,等. 基于改进两阶段鲁棒优化的区域综合能源系统经济调度[J]. 电测与仪表,2018 55(23):103-108.  
[6] 应鸿,张扬. 综合能源服务知识体系研究[J]. 浙江电力 2018 37(7):1-4.  
[7] 叶琪超,楼可炜,张宝,等. 多能互补综合能源系统设计及优化[J]. 浙江电力 2018 37(7):5-12.  
[8] 齐世雄,王秀丽,邵成成,等. 计及弹性恢复的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. 中国电力 2019 52(6):19-26.  
[9] 张有兵,王嘉瑶,杨晓东,等. 计及电转气技术的区域综合能源系统在线优化方法[J]. 电网技术 2018 42(8):2467-2476.  
[10] 刘涤尘,马恒瑞,王波,等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化,2017 42(4):113-120.  
[11] 于娜,于飞,黄大为,等. 基于多代理系统的电动汽车充放电分布式协同调度策略[J]. 电力系统保护与控制 2019 47(5):1-7.  
[12] 杨国清,罗航,王德意,等. 分时电价与电动汽车优化调度的主从博弈模型[J]. 电力系统及其自动化学报 2018 30(10):55-60.  
[13] 葛浩天,张新慧. 基于分布式清洁能源系统的微电网聚合模型[J]. 电网与清洁能源 2017 33(8):125-131.  
[14] 韩高岩,吕洪坤,蔡洁聪,等. 燃气冷热电三联供发展现状及前景展望[J]. 浙江电力 2019 38(1):18-24.  
[15] 胡静,姚峻,艾春美,等. 分布式冷热电三联供智能集控平台研究及应用[J]. 中国电力 2019 52(5):1-7.  
[16] 孙健秧,郭建钊,金鹏. 基于冷热电三联供系统的微电网建模及仿真[J]. 电力建设 2014 35(6):22-25.

#### 作者简介:

张雯雯(1997),本科,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;

魏震波(1978),博士,副教授,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制、复杂性科学理论与大数据技术研究及应用、电力市场、能源互联网及泛在电力物联网等;

黄宇涵(1995),硕士研究生,主要从事综合能源系统经济调度研究工作。

(收稿日期:2019-07-05)