

# 电动汽车与热泵促进风电消纳的区域综合能源系统经济调度方法

崔杨<sup>1</sup>,姜涛<sup>1</sup>,仲悟之<sup>2</sup>,李鸿博<sup>3</sup>,赵钰婷<sup>1</sup>

(1. 东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室,吉林 吉林 132012;

2. 中国电力科学研究院,北京 100192;3. 国网吉林省电力有限公司培训中心,吉林 长春 130022)

**摘要:**针对冷热电联供“以热定电”导致的弃风问题,提出电动汽车与地源热泵协同作用促进风电消纳的区域综合能源系统经济调度方法。首先,在源侧引入地源热泵,通过协调电源、热源出力实现联供机组热电解耦,提高风电上网空间;然后,在荷侧考虑电动汽车可调度价值,采用激励型需求响应引导充电负荷有序转移,协助风电并网消纳;最后,以调度周期内运行成本最小为目标建立源荷协同区域综合能源系统优化调度模型,并采用优化软件CPLEX进行求解。仿真结果表明:采用地源热泵能够有效减少弃风,需求响应削峰填谷效果显著,源荷协同作用下系统风电消纳能力与运行效益更具优势,供电可靠性更高。

**关键词:**区域综合能源系统;风电消纳;地源热泵;电动汽车;需求响应;经济调度

**中图分类号:**TM 73;TK 01

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202011013

## 0 引言

区域综合能源系统(RIES)是位于用户端的综合能源系统,通过对电、气、热、冷等异质能源子系统进行统筹规划、协同调度,在满足用户多元化用能需求的同时就地消纳接入的可再生能源<sup>[1-2]</sup>。在以冷热电联供(CCHP)为核心的RIES中,由于微燃机发电容量占比较大,采用“以热定电”运行模式会导致供暖季系统弃风严重。电动汽车(EV)作为一种新型储能装置,通过充放电设施与可再生能源相集成,能够促进风电并网消纳并改善系统运行经济性<sup>[3-4]</sup>。

目前针对含电动汽车参与的风电消纳调度已有相关研究。文献[5-6]提出在微电网中通过对可再生能源与电动汽车进行有机集成,以促进风电就地消纳。文献[7]针对微电网运行中不确定因素的影响,提出了考虑各分布式电源运行特性的协调鲁棒优化方法。文献[8-10]分别用动态分时与实时充电电价引导电动汽车充电,结果表明该策略符合运营商和用户双方利益。文献[11-12]利用电动汽车具备储能功能来平抑微电网中可再生能源波动,通过与微电网的双向互动提高系统风电消纳能力与运行经济性。上述文献均考虑了在荷侧利用电动汽车消纳弃风,但大量电动汽车无序接入不仅增加了系统调度难度,同时受用户充电行为影响,风电往往不能得到理想的消纳。

地源热泵(GSHP)技术是利用地下浅层地热资源进行供热/制冷的新能源技术。目前,关于地源

热泵接入微网中参与电热优化运行已有一些研究。文献[13-14]对引入热泵和储能装置的微网调度周期内运行成本进行了分析,结果表明利用热泵和储能装置能够显著降低系统运行成本。文献[15-16]利用热泵群的功率调节能力来减少蓄电池充放电次数,以降低微网运行成本。文献[17]针对热泵储电系统具有能效高、低成本等优势,对其未来在微网中的发展趋势进行了展望。上述文献对热泵参与的微网电热协同调度进行了研究,但并未考虑电动汽车普及带来的影响,对需求侧与供应侧协同作用下的系统可再生能源消纳情况仍有待进一步研究。

针对以上问题,本文提出电动汽车与地源热泵协同作用促进风电消纳的优化调度方法。一方面,在源侧引入新的热源(即地源热泵)以提高系统调度灵活性,通过解耦用热高峰CCHP“以热定电”运行约束提高风电上网空间;另一方面,考虑电动汽车作为柔性负荷的可调度价值,采用激励型需求响应(IDR)引导充电负荷有序转移,协助风电并网消纳。以调度周期内系统运行成本最小为目标建立源荷协同优化调度模型,综合考虑能源间转换特性、机组运行约束、需求响应约束等,并采用成熟的商业优化软件CPLEX进行求解以验证本文所提调度方法的可行性与有效性。

## 1 源荷协同 RIES 风电消纳架构

我国华北地区可再生资源丰富,风能、地热资源开发潜力巨大,但由于冬季风电存在夜晚低谷高发的反调峰特性,与CCHP“以热定电”运行模式叠加,导致系统弃风现象严重。为此,本文建立源荷协同RIES调度模型以提升系统风电消纳能力,其结构和

收稿日期:2020-03-02;修回日期:2020-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777027)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777027)

能量传递过程如图1所示。系统内风机和光伏分别利用风能和太阳能进行发电,仅需考虑运行维护成本;地源热泵在电能驱动下利用陆地浅层地热资源进行供热;CCHP采用“并网不上网”的并网方式,微燃机以天然气为燃料进行发电,溴冷机对余热进行回收供热;储能装置包括电储能(蓄电池)与热储能(蓄热槽);用电负荷分为居民电负荷与电动汽车充电负荷两部分,其中电动汽车作为柔性负荷参与IDR,暂不考虑汽车入网(V2G)的作用。

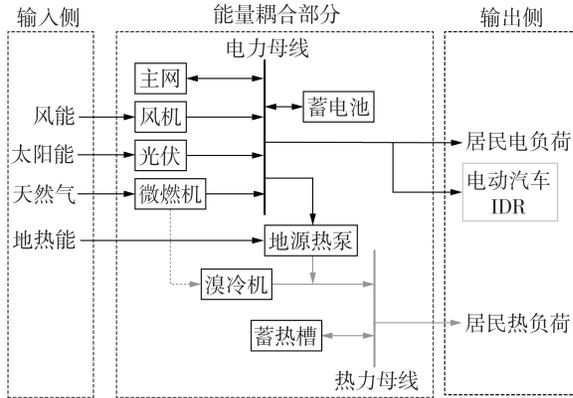


图1 RIES结构图

Fig.1 Structure diagram of RIES

### 1.1 地源热泵提高风电消纳的原理

由于供热季CCHP以热电耦合模式运行,微燃机出力需要时刻跟随热负荷变化,不能自主参与供电调节,导致在夜间风电大发时段为满足居民较高的用热需求,微燃机需维持一定的出力,从而限制了风电上网空间,造成系统弃风现象严重,调度成本较高。CCHP数学模型为:

$$Q_{MT}(t) = P_{MT}(t)(1 - \eta_{MT} - \eta_{loss})/\eta_{MT} \quad (1)$$

$$Q_{LB,h}(t) = Q_{MT}(t)\eta_{rec}C_{LB,h} \quad (2)$$

其中, $Q_{MT}(t)$ 、 $Q_{LB,h}(t)$ 分别为 $t$ 时段微燃机发电余热排出量、溴冷机制热功率; $P_{MT}(t)$ 为 $t$ 时段微燃机发电功率; $\eta_{MT}$ 、 $\eta_{loss}$ 、 $\eta_{rec}$ 分别为微燃机发电效率、散热损失系数和溴冷机余热回收率; $C_{LB,h}$ 为溴冷机制热效率。

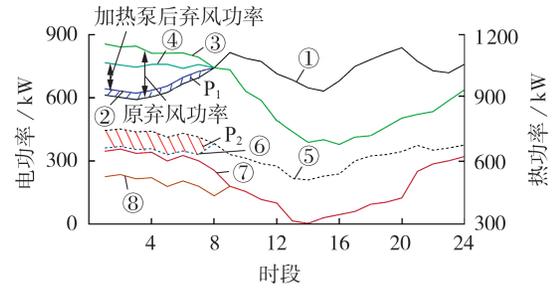
在浅层地热能丰富且因CCHP“以热定电”而导致弃风频繁发生的地区,通过在热源侧配置地源热泵,降低夜间CCHP承担的供热负荷,减少微燃机电耦合发电功率以提高风电上网空间。地源热泵提升系统风电消纳原理如图2所示,其数学模型为:

$$Q_{HP}(t) = C_{op,h}P_{HP}(t) \quad (3)$$

$$P_{HP}(t) = P_{comp}(t) + P_{pump}(t) + P_{fc}(t) \quad (4)$$

其中, $Q_{HP}(t)$ 、 $P_{HP}(t)$ 分别为 $t$ 时段地源热泵输出热功率、输入电功率; $P_{comp}(t)$ 、 $P_{pump}(t)$ 、 $P_{fc}(t)$ 分别为 $t$ 时段热泵压缩机、水泵和风机盘管耗电量; $C_{op,h}$ 为地源热泵制热系数。

在夜间电负荷低谷时段,地源热泵作为用电负



- ① 原电负荷+售电功率, ② 加热泵后电负荷+售电功率  
③ 风电+原CCHP电功率, ④ 加热泵后风电+CCHP电功率  
⑤ 原CCHP电功率, ⑥ 加热泵后CCHP电功率  
⑦ 原CCHP热功率, ⑧ 加热泵后CCHP热功率

图2 地源热泵提高风电消纳的原理

Fig.2 Principle of GSHP to improve wind power accommodation

荷提高了系统用电量,增加了系统风电消纳能力,即图2中 $P_1$ 部分,同时地源热泵作为新的热源参与供热使CCHP承担的供热负荷有所减少, $P_2$ 为微燃机“以热定电”发电功率减少量, $P_1+P_2$ 共同构成地源热泵提升风电消纳空间。

本文中地源热泵采用弃风启停控制策略,其原理为:在夜间用热高峰且系统存在弃风时,通过地源热泵将风电转化为调峰热源,以提高系统风电消纳能力与运行经济性。进行调度之前,系统可根据源荷预测数据以及机组信息对各调度时段是否出现弃风现象进行大致判断,弃风状态表达式为:

$$f_{wd}(t) = \begin{cases} 1 & P_{MT}(t) + P_{WF}(t) > P_{e,al}(t) + P_{line}^{max} \\ 0 & P_{MT}(t) + P_{WF}(t) \leq P_{e,al}(t) + P_{line}^{max} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $f_{wd}(t)$ 为 $t$ 时段系统弃风状态,其值为1时表示发生弃风,为0时表示无弃风; $P_{WF}(t)$ 、 $P_{e,al}(t)$ 分别为 $t$ 时段系统风电预测出力、总用电负荷; $P_{line}^{max}$ 为联络线传输功率上限。

### 1.2 IDR引导电动汽车消纳风电的原理

#### 1.2.1 电动汽车无序充电负荷建模

电动汽车是近年来兴起的新型科技产业,国内关于其充电的负荷数据很少,并且其充电过程在时间和空间上具有很强的随机性,传统的负荷预测方法对其并不适用,因此可以从统计学的角度对这些不确定因素进行挖掘分析以探索总结其规律。

本文采用蒙特卡洛模拟法对电动汽车充电负荷进行建模。其中,电动汽车电池容量、日行驶里程、充电方式、充电时间以及充电功率等是影响负荷建模的主要因素。根据美国交通部公布的全美家用车辆调查结果,电动汽车日行驶里程 $s$ 近似满足对数正态分布<sup>[18]</sup>,其概率密度函数为:

$$f_s(s) = \frac{1}{s} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln s - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (6)$$

用户最后返程时刻 $t$ 也近似满足正态分布,其

概率密度函数为:

$$f_i(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] & \mu_i - 12 < t \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{[t-(\mu_i-24)]^2}{2\sigma_i^2}\right] & 0 \leq t \leq \mu_i - 12 \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\sigma_s$ 、 $\sigma_i$  分别为 3.24、3.41;  $\mu_s$ 、 $\mu_i$  分别为 8.92、17.47。

电动汽车充电时间  $T_{ch}$  可由日行驶里程  $s$ 、充电效率  $\eta_c$ 、充电功率  $P_c$  以及百千米耗电量  $P_{100}$  获得, 其表达式如下:

$$T_{ch} = sP_{100}/(100P_c\eta_c) \quad (8)$$

本文设定每辆电动汽车最后返程时刻即为开始充电时刻, 通过入网充电时刻与持续充电时长即可得到充电结束时刻。将电动汽车各个时段充电功率累加即可得到统计时间内电动汽车充电负荷曲线。各时段电动汽车充电功率表达式为:

$$P_{ev}(t) = \sum_{m=1}^M P_m(t) \quad (9)$$

其中,  $P_{ev}(t)$ 、 $P_m(t)$  分别为  $t$  时段所有电动汽车总充电功率、第  $m$  辆电动汽车充电功率;  $M$  为电动汽车数。

对不同规模数量的电动汽车进行蒙特卡洛模拟, 得到的电动汽车充电负荷数据如附录中图 A1 所示。由图 A1 可知, 电动汽车充电主要从 18:00 开始, 此时也为下班高峰, 用户在回家后开始为电动汽车充电, 该仿真结果与用户行为相符合。

### 1.2.2 基于负荷聚合商的电动汽车 IDR 策略

由电动汽车无序充电负荷建模可知: 一方面电动汽车充电高峰通常也为居民用电高峰, 二者叠加增大了电力负荷峰谷差, 导致电价高峰时段系统对外购电需求增加, 在加剧主网调峰压力的同时也增加了系统购电成本; 另一方面, 受用户充电行为影响, 在弃风较为集中的夜间电价低谷时段, 电动汽车充电负荷较小, 导致电动汽车对于促进风电消纳的作用不能得到充分发挥。

对于用户而言, 电动汽车电量仅需满足第二日出行需求即可, 因此可将其作为一种柔性电力负荷参与供电调节。本文将负荷聚合商 LA (Load Aggregator) 作为协调电动汽车与系统调度中心的中间机构, 从而实现区域内需求资源的分散自治, 减少与调度中心大量通信交互, 增强系统运行可靠性。其分层调控原理如图 3 所示。

电动汽车用户根据 LA 提供的补偿电价  $\Delta D_p(t)$  将自身可调度信息进行上报, LA 对其进行整合, 连同报价信息上报至调度中心, 调度中心根据自身需求向 LA 购买需求资源并下发调度指令, LA 将调度指令分解为个体控制命令下发至各个电动汽车用户

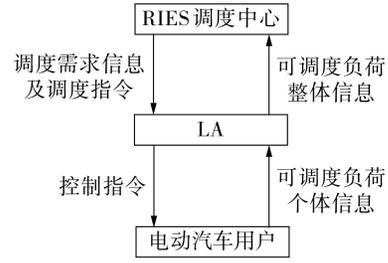


图3 基于LA的分层调控原理

Fig.3 Hierarchical regulation principle based on LA

并给予其一定经济补偿。其中, LA 与电动汽车用户通过签订负荷转移 LS (Load Shifting) 合同以实现有序调控, 合同参数包括负荷转移量、转移时段、被转移时段以及补偿电价, 其中  $\Delta D_p(t)$  与充电负荷转移量  $\Delta P_{ev}(t)$  的关系表达式为:

$$\Delta D_p(t) = |\Delta P_{ev}(t)| D_{sell}(t) / (P_{ev}(t) \varepsilon) \quad (10)$$

其中,  $\varepsilon$  为补偿电价弹性系数;  $D_{sell}(t)$  为  $t$  时段系统售电价。

IDR 引导电动汽车消纳风电的原理为: 电动汽车用户根据 LA 提供的  $\Delta D_p(t)$ , 将用电高峰时段部分充电负荷转移至用电低谷时段, 从而在消纳夜间富余风电的同时减少电价高峰时段系统购电需求, 缓解主网调峰压力, 实现 RIES 与用户双方共赢。

## 2 源荷协同 RIES 优化调度模型

### 2.1 目标函数

在以 CCHP 为核心的 RIES 中, 由于供热季电、热能量间相互耦合, 系统内弃风严重, 因此在满足能量平衡及机组运行约束、需求响应约束等条件下, 应尽可能协调电、热机组出力, 以促进风电并网消纳和提高系统运行经济性。本文以调度周期内 RIES 运行成本最小为目标对各机组进行优化调度, 目标函数表达式为:

$$\min F_G = \sum_{t=1}^T (W_{FC}(t) + W_{MC}(t) + W_{EX}(t) + W_{WC}(t) + W_{IDR}(t)) + W_{HP} \quad (11)$$

其中,  $F_G$  为调度周期  $T$  内系统的运行成本;  $W_{FC}(t)$ 、 $W_{MC}(t)$ 、 $W_{WC}(t)$  和  $W_{IDR}(t)$  分别为  $t$  时段系统的燃料成本、机组运维成本、弃风惩罚成本和 IDR 购买成本;  $W_{EX}(t)$  为  $t$  时段系统与主网电能交互成本, 包括购电成本与售电收益两部分;  $W_{HP}$  为地源热泵折算至每天的投资成本。

(1) 燃料成本:

$$W_{FC}(t) = \frac{P_{MT}(t) D_{CH4}}{\eta_{MT} L_{CH4}} \quad (12)$$

(2) 机组运维成本:

$$W_{MC}(t) = \sum_{i=1}^N P_i(t) K_i + \sum_{j=1}^L P_j(t) K_j + |P_{ES}(t) K_{ES}| \quad (13)$$

(3) 电能交互成本:

$$W_{EX}(t) = \begin{cases} P_{buy}(t)D_{buy}(t) & P_{EX}(t) > 0 \\ P_{sell}(t)D_{sell}(t) & P_{EX}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

(4) 弃风惩罚成本:

$$W_{WC}(t) = P_{wd}(t)D_w \quad (15)$$

(5) IDR 购买成本:

$$W_{IDR}(t) = \Delta P_{ev}(t)D_{IDR} \quad (16)$$

(6) 地源热泵折算至每天的投资成本:

$$W_{HP} = \frac{r(1+r)^\gamma}{(1+r)^\gamma - 1} \frac{C^{hp}\beta^{hp}}{365} \quad (17)$$

其中,  $D_{CH4}$  和  $L_{CH4}$  分别为天然气价格及其低热值;  $P_i(t)$ 、 $P_j(t)$  分别为  $t$  时段可控机组  $i$ 、可再生能源发电机组  $j$  发电功率;  $P_{ES}(t)$  为  $t$  时段储能装置出力;  $N$ 、 $L$  和  $K_i$ 、 $K_j$  分别为可控机组、可再生能源发电机组数量及其运维单价;  $K_{ES}$  为储能装置运维单价;  $P_{EX}(t)$  为  $t$  时段系统与主网交互功率, 包括购电功率  $P_{buy}(t)$  与售电功率  $P_{sell}(t)$ ;  $D_{buy}(t)$  为  $t$  时段系统购电电价;  $P_{wd}(t)$ 、 $D_w$  分别为  $t$  时段系统弃风功率和单位弃风功率惩罚费用;  $D_{IDR}$  为需求资源单位购买费用;  $C^{hp}$  和  $\beta^{hp}$  分别为地源热泵容量及其单位投资成本;  $r$  为折现率;  $\gamma$  为地源热泵使用寿命。

## 2.2 约束条件

(1) 能量平衡约束:

$$P_e(t) + P_{rev}(t) = \sum_{i=1}^N P_i(t) + \sum_{j=1}^L P_j(t) + P_{ES}^e(t) + P_{EX}(t) \quad (18)$$

$$Q_h(t) = Q_{LB,h}(t) + Q_{HP}(t) + P_{ES}^h(t) \quad (19)$$

(2) 联络线传输功率约束:

$$0 \leq |P_{EX}(t)| \leq P_{line}^{max} \quad (20)$$

(3) 可控机组运行约束:

$$P_i^{min} \leq P_i(t) \leq P_i^{max} \quad (21)$$

$$-\theta_i^{down} \Delta t \leq P_i(t) - P_i(t-1) \leq \theta_i^{up} \Delta t \quad (22)$$

(4) 储能约束:

$$\lambda_{min} C_{ES} \leq E_{ES}(t) \leq \lambda_{max} C_{ES} \quad (23)$$

$$-P_{cha}^{max} \leq P_{ES}(t) \leq P_{dis}^{max} \quad (24)$$

$$E_{ES}(0) = E_{ES}(T) \quad (25)$$

(5) 考虑 IDR 后电动汽车充电负荷总量应不变:

$$\sum_{t=1}^T P_{ev}(t) = \sum_{t=1}^T P_{rev}(t) \quad (26)$$

(6) 考虑 IDR 应不影响用户正常出行, 即电动汽车在离网时的荷电状态应满足用户设置的出行要求荷电状态:

$$S_{SOCm}(t_{end}) = S_{SOCev}^{set} \quad (27)$$

(7) 为防止用户过度响应对系统运行造成不利影响, 任一时段 LA 可调节电动汽车充电负荷应存在上限:

$$0 \leq \Delta P_{ev}(t) \leq \alpha P_{ev}(t) \quad (28)$$

(8) 考虑 IDR 后 LA 与电动汽车用户应有所获益:

$$\sum_{t=1}^T W_{IDR}(t) - \sum_{t=1}^T \Delta D_p(t) \Delta P_{ev}(t) \geq 0 \quad (29)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{rev}(t) D_{sell}(t) - \sum_{t=1}^T \Delta D_p(t) \Delta P_{ev}(t) \leq \sum_{t=1}^T P_{ev}(t) D_{sell}(t) \quad (30)$$

其中,  $P_e(t)$ 、 $Q_h(t)$  分别为  $t$  时段系统电负荷、热负荷;  $P_{rev}(t)$  为考虑 IDR 后  $t$  时段电动汽车充电负荷;  $P_{ES}^e(t)$ 、 $P_{ES}^h(t)$  分别为  $t$  时段蓄电池电功率、蓄热槽热功率;  $P_i^{max}$ 、 $P_i^{min}$  和  $\theta_i^{up}$ 、 $\theta_i^{down}$  分别为可控机组  $i$  出力及其爬坡功率上、下限;  $\Delta t$  为单位调度时间;  $C_{ES}$  为储能装置容量;  $E_{ES}(t)$  为  $t$  时段储能装置剩余容量;  $\lambda_{max}$ 、 $\lambda_{min}$  分别为储能荷电状态最大值、最小值;  $P_{cha}^{max}$ 、 $P_{dis}^{max}$  分别为储能装置最大输入、输出功率;  $S_{SOCm}(t_{end})$  和  $S_{SOCev}^{set}$  分别为第  $m$  辆电动汽车参与 IDR 后在离网时刻  $t_{end}$  时的荷电状态及其设置出行要求荷电状态;  $\alpha$  为系数。

## 2.3 削峰填谷指标

将相邻时段内电负荷变化率的平方和作为削峰填谷指标  $F_c$  [13], 其值越小, 系统运行效率与经济性越好, 供电可靠性越高。  $F_c$  表达式为:

$$F_c = \frac{1}{T} \sum_{t=2}^T (P_{e,al}(t) - P_{e,al}(t-1))^2 \quad (31)$$

## 2.4 求解方法

本文建立的优化调度模型为混合整数线性规划 MILP (Mixed Integer Linear Programming) 问题, 采用 CPLEX12.6 软件进行求解, 其标准形式为:

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \text{s.t. } g_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, p \\ h_j(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, q \\ \mathbf{x}_{min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{max}, \mathbf{y} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (32)$$

其中,  $p$ 、 $q$  分别为等式约束、不等式约束的数量;  $\mathbf{x}$  为待优化变量, 包括各机组和储能装置出力、联络线传输功率以及电动汽车充电负荷转移量;  $\mathbf{y}$  为储能装置充放电状态; 等式约束包括能量平衡约束、储能装置始末状态约束; 不等式约束包括各机组及储能运行约束、联络线传输功率约束和 IDR 约束。

## 3 算例分析

### 3.1 算例数据

算例系统参考文献 [13], 其结构如图 1 所示。设定 300 辆电动汽车参与调度, 风、光、负荷预测数据见附录中图 A2, 机组、储能、电动汽车参数分别见附录中表 A1—A3, 电价信息见附录中表 A4。其他参数如下:  $\eta_{loss} = 0.15$ ,  $\eta_{rec} = 0.85$ ,  $C_{LB,h} = 1.2$ ,  $D_{IDR} = 0.7$  元/kW,  $S_{SOCev}^{set} = 0.9$ ,  $\alpha = 0.4$ ,  $\varepsilon = 1.1$ ;  $D_{CH4} = 2.54$  元/m<sup>3</sup>,  $L_{CH4} = 9.7$  kW·h/m<sup>3</sup>;  $r = 5\%$ ,  $\beta^{hp} = 7000$  元/kW,  $\gamma = 10$  a;

$C_{op,h}=4$ ;LS 合同规定充电负荷转移时段为电价高峰时段 17—22,被转移时段为电价低谷时段 1—8;调度周期  $T=24$  h,单位调度时间  $\Delta t=1$  h。

### 3.2 优化结果分析

#### 3.2.1 地源热泵容量配置对优化结果影响分析

在优化过程中,由于系统引入了新的热源(即地源热泵),此时需要对其容量配置进行定量分析。地源热泵容量配置对 RIES 运行结果及微燃机出力的影响分别如表 1 和图 4 所示。

表 1 地源热泵容量对系统运行的影响

Table 1 Influence of GSHP capacity on system operation

容量/kW	$W_{HP}$ /元	总成本/元	弃风率/%	$F_c/(kW^2 \cdot h)$
0	0	7754.57	16.02	6250.58
10	25	7591.77	12.21	6218.73
20	50	7433.51	8.47	6195.21
30	74	7282.55	5.09	6119.68
40	99	7131.66	1.71	6058.39
50	124	7031.37	0	5916.24

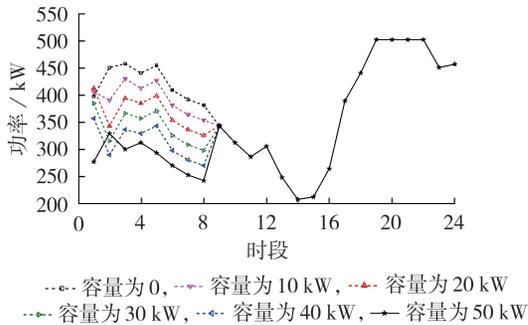


图 4 地源热泵容量对微燃机出力的影响

Fig.4 Influence of GSHP capacity on MT output

由表 1 可知,系统运行成本与弃风率随着地源热泵容量的增加均呈下降趋势,验证了地源热泵对于促进风电并网消纳、降低系统运行成本的可行性。由图 4 可知,在电价低谷时段 1—8,微燃机出力随着地源热泵容量的增加下降明显。其原因因为此时段内系统存在弃风,调度中心依照地源热泵弃风启停策略调用其优先供热,降低了 CCHP 承担的供热负荷,提高了风电上网空间。

图 5 为系统运行成本与地源热泵容量之间的关系。由图 5 可知,容量在 0~50 kW 区间内时,系统运行成本下降趋势明显,表明采用较小容量的地源热泵即可有效改善系统弃风现象与提高调度经济性;

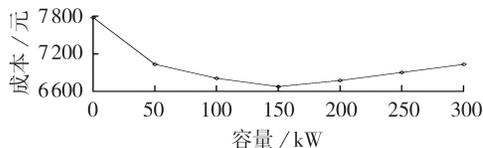


图 5 地源热泵容量对系统运行成本的影响

Fig.5 Influence of GSHP capacity on system operation cost

随着容量的增加,系统运行成本变化逐渐趋于平缓并会达到拐点,此时在电价低谷时段热负荷主要由地源热泵提供,系统应根据自身负荷需求合理地选择相应容量的地源热泵使运行效益最大化。

#### 3.2.2 IDR 补偿价格对优化结果影响分析

在 LS 合同中,核心参数为补偿电价  $\Delta D_p(t)$ ,其值越大,电动汽车用户响应程度越高,系统弃风改善效果越好。然而,在实际运行过程中, $\Delta D_p(t)$ 须在 LA 可调容量范围内进行制定,其值过大会导致用户过度响应而超出 LA 可调节能力。不同补偿电价取值下 RIES 优化结果如表 2 所示。

表 2 补偿电价对系统运行的影响

Table 2 Influence of compensation price on system operation

$\Delta D_p / [元 \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$	总成本/元	弃风率/%	$\Delta P_{ev} / (kW \cdot h)$	$F_c / (kW^2 \cdot h)$
0	7754.57	16.02	0	6250.58
0.1	7640.88	13.97	158.85	5906.37
0.2	7527.19	11.93	317.71	5775.32
0.3	7413.55	9.88	476.56	5541.27
0.4	7292.45	7.86	635.41	4984.37

由表 2 可知,增大电价高峰 LA 提供的补偿电价  $\Delta D_p$ 后,充电负荷响应量增大,系统运行成本、弃风率均有所下降;当  $\Delta D_p=0.4$  元 / (kW·h) 时,LA 能够提供的需求资源调节容量已趋于上限,若进一步提高  $\Delta D_p$ ,IDR 将无法得到有效实施。

对地源热泵与 IDR 各自优化结果分析可知,地源热泵制热效率远高于传统供热机组,采用较小的容量配置即可有效减少弃风和降低系统运行成本;IDR 的实施需要兼顾 LA 与用户双方的利益,提高补偿电价  $\Delta D_p$ ,系统弃风率、运行成本下降越明显,但受 LA 调节容量限制,其效果弱于增设地源热泵机组。需指出的是,实施 IDR 后调度周期内系统削峰填谷效果更明显,供电可靠性更高。

#### 3.2.3 源荷协同对优化结果影响分析

为了分析源荷协同作用对系统调度结果的影响,设置地源热泵容量为 30 kW,LS 合同中  $\Delta D_p=0.4$  元 / (kW·h),对此运行场景进行仿真分析,各机组调度出力如图 6 所示,成本及各指标如表 3 所示。

由图 6 可知,在电价低谷时段 1—8,系统存在弃风现象,优先调用地源热泵进行供热,剩余热负荷由 CCHP、蓄热槽提供;电动汽车充电负荷在 IDR 作用下部分由用电高峰时段转移至此时段,配合地源热泵使风电得到了全额消纳。在电价平时段 9—16、23、24,系统购电 / 售电电价均高于微燃机单位发电成本,此时微燃机应尽量满发以在电负荷较小时段进行售电,电负荷较大时段减少系统外购电能,热负荷由 CCHP 及蓄热槽提供,地源热泵停机。在电价

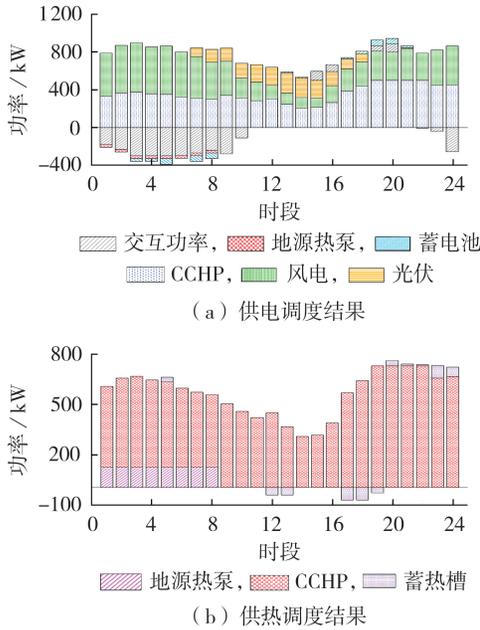


图6 源荷协同调度结果

Fig.6 Result of source-load cooperative dispatch

表3 源荷协同调度对系统运行的影响

Table 3 Influence of source-load cooperative dispatch on system operation

容量 / kW	$\Delta D_p / [元 \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$	总成本 / 元	弃风率 / %	$F_c / (kW^2 \cdot h)$
30	0.4	6922.44	0	4695.97

高峰时段17—22,系统购电/售电电价均较高,在IDR作用下部分电动汽车充电负荷转移至电价低谷时段,降低了此时段的用电需求,当各发电机组供电不足时,电负荷缺额由系统向主网购电补足,且地源热泵停机。由表3可知,与仅从单一优化层面相比,源荷协同作用下系统各指标均为最优。调度周期内系统风电得到了全额消纳,运行成本较仅配置地源热泵降低了4.99%,削峰填谷效果较仅考虑IDR提升了5.79%,从而验证了本文所提调度方法的优势。

当进一步增大地源热泵容量后,系统运行成本与削峰填谷指标进一步得到改善,结果见表4。综合考虑二者优势,系统运行状态能够达到最优。

表4 地源热泵容量对源荷协同调度的影响

Table 4 Influence of GSHP capacity on source-load cooperative dispatch

容量 / kW	$\Delta D_p / [元 \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$	总成本 / 元	弃风率 / %	$F_c / (kW^2 \cdot h)$
40	0.4	6878.39	0	4462.99
50	0.4	6834.92	0	4300.90

## 4 结论

为改善RIES中CCHP“以热定电”造成的弃风问题,本文提出地源热泵与电动汽车协同作用促进风

电消纳的优化调度方法,仿真结果表明:

(1)地源热泵具有高效的电热转换能力,采用较小的容量配置即可有效改善由CCHP热电耦合导致的弃风及运行成本较高问题;

(2)受LA可调容量限制,IDR优化效果弱于仅配置地源热泵机组,但其削峰填谷效果更具优势;

(3)地源热泵与IDR协同作用在减少弃风的同时,系统运行成本及削峰填谷效果能够达到最优。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等. 综合能源系统与能源互联网综述[J]. 电工技术学报,2016,31(1):1-13.  
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13.
- [2] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2015,39(7):198-207.  
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [3] 刘洪,陈星屹,李吉峰,等. 基于改进CPSO算法的区域电热综合能源系统经济调度[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):193-200.  
LIU Hong, CHEN Xingyi, LI Jifeng, et al. Economic dispatch based on improved CPSO algorithm for regional power-heat integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 193-200.
- [4] PENG M, LIU L, JIANG C. A review on the economic dispatch and risk management of the large-scale plug-in electric vehicles(PHEVs)-penetrated power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012(16):1508-1515.
- [5] 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.
- [6] 侯慧,薛梦雅,陈国炎,等. 计及电动汽车充放电的微电网多目标分级经济调度[J]. 电力系统自动化,2019,43(17):55-67.  
HOU Hui, XUE Mengya, CHEN Guoyan, et al. Multi-objective hierarchical economic dispatch for microgrid considering charging and discharging of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 55-67.
- [7] 梁子鹏,陈皓勇,王勇超,等. 含电动汽车的微网鲁棒经济调度[J]. 电网技术,2017,41(8):2647-2658.  
LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, WANG Yongchao, et al. Robust economic dispatch of microgrids containing electric vehicles[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2647-2658.
- [8] YANG Z, SUN L, CHEN J, et al. Profit maximization for plug-in electric taxi with uncertain future electricity prices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 3058-3068.
- [9] 徐智威,胡泽春,宋永华,等. 基于动态分时电价的电动汽车充电站有序充电策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3638-3646.  
XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging strategy for PEV charging stations based on dynamic

- mic time-of-use tariffs[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22):3638-3646.
- [10] 于娜,刘甲利,孙莉,等. 电动汽车作为主动负荷参与需求响应的研究[J]. 东北电力大学学报, 2017, 37(4):20-26.  
YU Na, LIU Jiali, SUN Li, et al. Research on electric vehicle access demand response as active load[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2017, 37(4):20-26.
- [11] 项顶,胡泽春,宋永华,等. 通过电动汽车与电网互动减少弃风的商业模式与日前优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24):6293-6303.  
XIANG Ding, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Business model and day-ahead dispatch strategy to reduce wind power curtailment through vehicle-to-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24):6293-6303.
- [12] 王明深,穆云飞,贾宏杰,等. 考虑电动汽车集群储能能力和风电接入的平抑控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5):211-219.  
WANG Mingshen, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Smoothing control strategy considering energy storage capability of electric vehicle aggregators and wind power integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5):211-219.
- [13] 杨志鹏,张峰,梁军,等. 含热泵和储能的冷热电联供型微网经济运行[J]. 电网技术, 2018, 42(6):1735-1743.  
YANG Zhipeng, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Economic generation scheduling of CCHP microgrid with heat pump and energy storage[J]. Power System Technology, 2018, 42(6):1735-1743.
- [14] 胡浩,王英瑞,曾博,等. 基于CVaR理论的综合能源系统经济优化调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6):209-219.  
HU Hao, WANG Yingrui, ZENG Bo, et al. CVaR-based economic optimal dispatch of integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):209-219.
- [15] 施金晓,黄文焘,邵能灵,等. 计及群控电热泵的微网联络线功率平滑策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6):201-208.  
SHI Jinxiao, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Microgrid tie-line power smoothing strategy considering group control of electric heat pumps[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):201-208.
- [16] BAETEN B, ROGIERS F, HELSEN L. Reduction of heat pump induced peak electricity use and required generation capacity through thermal energy storage and demand response[J]. Applied Energy, 2017, 195:184-195.
- [17] 张琼,王亮,徐玉杰,等. 热泵储电技术研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1):178-185, 354.  
ZHANG Qiong, WANG Liang, XU Yujie, et al. Research progress in pumped heat electricity storage system: a review[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1):178-185, 354.
- [18] 杜习超,刘永民,徐则诚,等. 电动汽车随机负荷建模及对配电网节点电压分布的影响[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6):124-130.  
DU Xichao, LIU Yongmin, XU Zecheng, et al. Modeling of random load of electric vehicle and its influence on node voltage distribution of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6):124-130.

#### 作者简介:



崔杨

崔杨(1980—),男,内蒙古包头人,教授,博士,主要研究方向为电力系统运行分析、新能源并网发电关键技术等(**E-mail**: cuiyang0432@163.com);

姜涛(1995—),男,四川广元人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为区域综合能源系统优化运行(**E-mail**: 857429745@qq.com)。

(编辑 李玮)

## Economic dispatch approach of RIES for electric vehicle and heat pump to promote wind power accommodation

CUI Yang<sup>1</sup>, JIANG Tao<sup>1</sup>, ZHONG Wuzhi<sup>2</sup>, LI Hongbo<sup>3</sup>, ZHAO Yuting<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

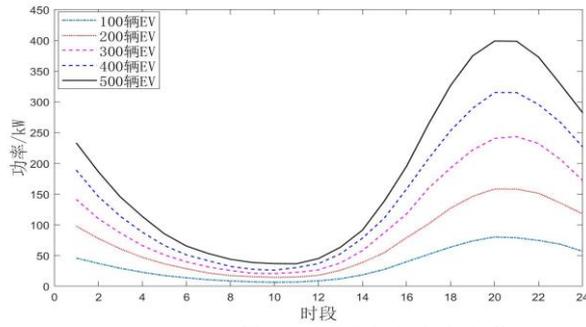
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. Training Centre of State Grid Jilin Province Electric Power Supply Company, Changchun 130022, China)

**Abstract:** To deal with the wind curtailment problem caused by “power determined by heat” in CCHP (Combined Cooling, Heating and Power), an economic dispatch approach for RIES (Regional Integrated Energy System) is proposed, which combines electric vehicle and ground source heat pump to promote wind power accommodation. Firstly, the operating constraints of CCHP are decoupled by adding the ground source heat pump into the source side to improve wind integration space. Secondly, the incentive demand response is adopted to guide the orderly transfer of charging load to assist wind power integration and accommodation by considering the schedulable value of electric vehicles at the load side. Finally, the source-load coordination optimal dispatch model for RIES with the goal of minimizing the operation cost is established, which is solved by the optimization software CPLEX. Simulative results show that adopting ground source heat pump effectively reduces the wind curtailment, and the peak-load shifting effect of demand response is obvious. Hence, the additional benefits are gained in terms of wind power accommodation and operation cost under the source and load coordination, and the higher power supply reliability is obtained.

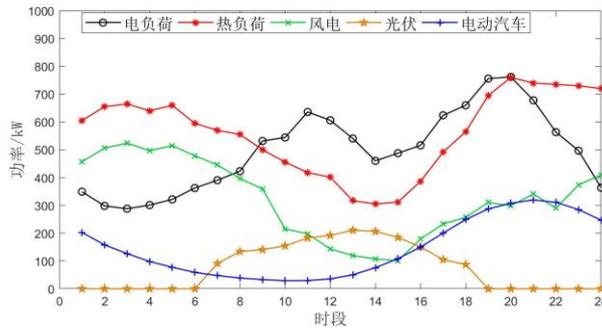
**Key words:** regional integrated energy system; wind power accommodation; ground source heat pump; electric vehicle; demand response; economic dispatch

## 附录



**图 A1 不同规模下的电动汽车充电负荷**

**Fig.A1 Charging load of electric vehicles under different scales**



**图 A2 RIES 风、光、负荷预测出力曲线**

**Fig.A2 Wind turbine, photovoltaic and load forecasting output curves of RIES**

**表 A1 RIES 机组参数**

**Table A1 Parameters of generators for RIES**

参数	数值			
	微燃机	风机	光伏	主网
功率上限/kW	500	600	300	300
功率下限/kW	50	0	0	0
爬坡功率上限/(kW · min <sup>-1</sup> )	6	0	0	0
爬坡功率下限/(kW · min <sup>-1</sup> )	5	0	0	0
效率	0.35	—	—	—
运维成本/[元 · (kW · h) <sup>-1</sup> ]	0.053	0.029	0.025	—

**表 A2 储能参数**

**Table A2 Parameters of energy storage**

参数	数值		参数	数值	
	蓄电池	蓄热槽		蓄电池	蓄热槽
容量/(kW · h)	300	300	最大输入功率/kW	60	75
初始储能状态	0.2	0.1	最大输出功率/kW	60	75
最大储能状态	0.9	0.8	自耗率	0.001	0.01
最小储能状态	0.2	0	充放率	0.9	0.9
运维单价/[元 · (kW · h) <sup>-1</sup> ]	0.051	0.016			

**表 A3 电动汽车参数**

**Table A3 Parameters of electric vehicle**

参数	数值
百千米耗电量 $P_{100}$ [(kW · h)/100 km]	13.9
电池容量 $C$ /(kW · h)	21.6
SOC 上、下限/%	1、0.2
充放电功率/kW	2~3
转换器效率 $\eta_c$ /%	0.75

**表 A4 RIES 电价信息**  
**Table A4 Price information of RIES**

参数	时段 1—8	时段 9—16、23—24	时段 17—22
售电价格/[元/(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.36	0.75	1.16
购电价格/[元/(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.42	0.88	1.35