

# 基于多能互补的综合能源微网优化调度方法研究

李剑锋<sup>1</sup>, 杨春来<sup>1</sup>, 郝晓光<sup>1</sup>, 张德隆<sup>2</sup>, 袁晓磊<sup>1</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

**摘要:**针对综合能源系统优化运行方法进行研究,首先,构建了包含多种能源和装置的综合能源微网系统;其次,以系统的运行成本为目标函数,以多种能源和装置的数学关系为约束条件,建立了系统的优化运行模型,并介绍了用于求解运行模型的遗传算法;最后,对提出的优化模型进行了仿真分析,验证了模型的可行性。

**关键词:**综合能源微网;优化运行;多能互补;遗传算法

**中图分类号:** TM73; TK01.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-9898(2021)03-0032-04

## Research on Optimal Scheduling Method of Integrated Energy Micro-grid Based on Multi-energy Complementation

LI Jianfeng<sup>1</sup>, YANG Chunlai<sup>1</sup>, HAO Xiaoguang<sup>1</sup>, ZHANG Delong<sup>2</sup>, YUAN Xiaolei<sup>1</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** This paper studies the optimized operation method of the integrated energy system. First, constructs an integrated energy micro-grid system containing multiple energy sources and devices; second, takes the the operating cost of the system as the objective function and the mathematical relationship between multiple energy sources and devices as constraints, establishes an optimal operating model of the system; then presents an introduction to the genetic algorithm for solving the operating model; finally, conducts the simulation analysis of the optimization model proposed, demonstrates the feasibility of the model.

**Key words:** integrated energy microgrid; optimized operation; multi-energy complementation; genetic algorithm

随着能源和环境问题的日益凸显,寻求可替代能源、提高能源的利用效率成为人们关注的焦点之一。综合能源系统作为一种实现多种能源子系统之间协调规划、运行和管理的新型一体化系统,对于构建新型的能源消费市场、提升可再生能源的利用率具有重要意义<sup>[1]</sup>。国家发改委和国家电网有限公司出台了《关于推进多能互补集成优化示范工程建设的实施意见》《推进综合能源服务业务发展2019—2020年行动计划》等相关政策,对于促进综合能源系统及其相关技术的发展与应用起到重要作用。然而,综合能源系统包含多种能源类型,各种能源之间存在耦合关系,系统的运行较为复杂<sup>[2-3]</sup>,这些问题对综合能源微网优化运行产生不利影响,限制综合能源系统的推广和应用。

以下对综合能源系统优化运行方法进行了研

究,构建了考虑多能源类型、多转换装置的综合能源微网优化运行模型,建立了综合能源微网中各单元的运行模型和平衡关系,最后利用遗传算法对综合能源微网优化调度问题进行了求解,验证了所建立模型的可行性。

### 1 优化调度模型

综合能源微网中含有冷、热、电、气4种能源形式,包含微燃气轮机、光伏发电、风力发电、蓄热槽、蓄电池、燃气锅炉、吸收式制冷机和电制冷机。综合能源微网示意图1。针对该综合能源微网系统,建立了系统优化运行模型,并考虑各个单元的运行模型和相互关系,建立约束条件的数学模型。

#### 1.1 运行成本的优化模型

综合能源微网优化运行的目标是使系统的运

收稿日期:2021-04-08

作者简介:李剑锋(1986—),男,高级工程师,主要从事综合能源优化调度、热工自动控制研究等工作。

基金项目:国网河北省电力有限公司科技项目(KJ2020-046)。

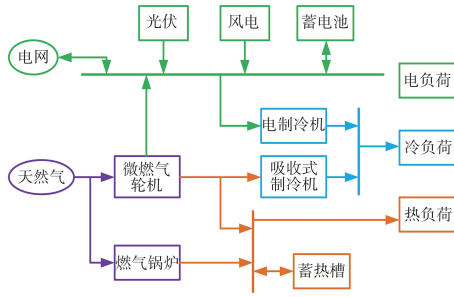


图1 综合能源微网示意

行成本最低或收益最大<sup>[4-8]</sup>,系统的运行成本包括从电网购电成本 $C_g$ 和购买天然气的成本 $C_f$ ,运行收益为向电网售电的收益 $C_s$ 。优化目标函数为系统的运行成本

$$\min C = C_g + C_f - C_s \quad (1)$$

$$C_g = \sum_{t=1}^{24} p_{g,t} P_{g,t} \Delta t \quad (2)$$

$$C_f = \sum_{t=1}^{24} [p_{ng,t} (G_{gt,t} + G_{gb,t}) / H_{ng}] \Delta t \quad (3)$$

$$C_s = \sum_{t=1}^{24} p_{s,t} P_{s,t} \Delta t \quad (4)$$

式中: $p_{g,t}$ 为电价; $P_{g,t}$ 为系统从上级电网的购电功率; $\Delta t$ 为时间; $p_{ng,t}$ 为天然气价格; $G_{gt,t}$ 为微燃气轮机的热值; $G_{gb,t}$ 为燃气锅炉的热值; $H_{ng}$ 为天然气热值; $p_{s,t}$ 为系统向上级电网售电的价格; $P_{s,t}$ 为售电功率。

## 1.2 约束条件

### 1.2.1 冷功率约束

在综合能源系统中,吸收式制冷机是提高能源综合利用效率的重要设备,其驱动能源为热能,工质为溴化锂或气水溶液,将输入的热量转为冷量输出,转换性能系数取决于输入热量值与输出冷量的比值。系统中与冷功率相关的设备为吸收式制冷机、电制冷机与冷负荷,其平衡关系为

$$CO_{ac} H_{ac,t} + CO_{ec} P_{ec,t} = C_L \quad (5)$$

式中: $CO_{ac}$ 为吸收式制冷机的制冷系数; $H_{ac,t}$ 为输入吸收式制冷机的热功率; $CO_{ec}$ 为电制冷机系数; $P_{ec,t}$ 为输入电制冷机的电功率; $C_L$ 为冷负荷。

### 1.2.2 热功率约束

系统中与热功率相关的设备包括燃气锅炉、微燃气轮机、蓄热槽和余热回收装置。热功率平衡关系为

$$H_{hr,t} + H_{gb,t} - H_{ac,t} + H_{tst,t} = H_{L,t} / \eta_{he} \quad (6)$$

式中: $H_{hr,t}$ 为余热回收装置吸收的热功率; $H_{gb,t}$

为燃气锅炉产生的热功率; $H_{ac,t}$ 为输入吸收式制冷机的热功率; $H_{tst,t}$ 为蓄热槽的充放热功率; $H_{L,t}$ 为热负荷; $\eta_{he}$ 为热交换器效率。

$$H_{hr,t} = P_{mt,t} (1 - \eta_{mt}) \eta_{hr} / \eta_{mt} \quad (7)$$

式中: $P_{mt,t}$ 为微燃气轮机输出电功率; $\eta_{mt}$ 为微燃气轮机发电效率; $\eta_{hr}$ 为余热回收装置效率。

蓄热槽是综合能源系统中的蓄热装置,采用蓄热槽能起到削峰填谷、缓解冷热电负荷比与燃气轮机供给不匹配的矛盾。蓄热槽的运行约束为

$$\begin{cases} E_{tst,t} = E_{tst,t-1} + \eta_{tst,ch} H_{tst,t} \Delta t, \text{充热} \\ E_{tst,t} = E_{tst,t-1} - H_{tst,t} \Delta t / \eta_{tst,dis}, \text{放热} \end{cases} \quad (8)$$

$$|H_{tst,t}| \leq H_{tst}^{\max} \quad (9)$$

$$E_{tst}^{\min} \leq E_{tst,t} \leq E_{tst}^{\max} \quad (10)$$

式中: $E_{tst,t}$ 为蓄热槽在 $t$ 时刻的热能; $\eta_{tst,ch}$ 、 $\eta_{tst,dis}$ 分别为充放热效率。

### 1.2.3 电功率约束

与电功率相关的设备或主体有微燃机、电制冷机、蓄电池、光伏、风电、用户、电网,电功率平衡约束为

$$P_{mt,t} + P_{g,t} - P_{ec,t} + P_{b,t} - P_{s,t} = P_{L,t} - P_{PV,t} - P_{W,t} \quad (11)$$

式中: $P_{mt,t}$ 为微燃气轮机输出电功率; $P_{g,t}$ 为系统从电网购电的功率; $P_{ec,t}$ 为输入电制冷机电功率; $P_{b,t}$ 为蓄电池充放电功率; $P_{s,t}$ 为向电网的售电功率; $P_{L,t}$ 为电负荷功率; $P_{PV,t}$ 为光伏功率; $P_{W,t}$ 为风电功率。

微燃气轮机功率与热值的关系为

$$P_{mt,t} = G_{gt,t} \eta_{mt} \quad (12)$$

$$P_{mt}^{\min} \leq P_{mt,t} \leq P_{mt}^{\max} \quad (13)$$

蓄电池约束为

$$\begin{cases} \text{SoC}_t = \text{SoC}_{t-1} + \eta_{ch} P_{b,t} \Delta t / E_{b,N}, \text{充电} \\ \text{SoC}_t = \text{SoC}_{t-1} - P_{b,t} \Delta t / \eta_{dis} E_{b,N}, \text{放电} \end{cases} \quad (14)$$

$$|P_{b,t}| \leq P_b^{\max} \quad (15)$$

$$\text{SoC}^{\min} \leq \text{SoC}_t \leq \text{SoC}^{\max} \quad (16)$$

式中: $\text{SoC}_t$ 为蓄电池的荷电状态; $\eta_{ch}$ 、 $\eta_{dis}$ 分别为充放电效率。

与上级电网的功率交互约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{g,t} \leq P_{grid}^{\max} \\ 0 \leq P_{s,t} \leq P_{grid}^{\max} \end{cases} \quad (17)$$

## 1.3 求解算法

遗传算法是一种随机全局搜索和优化的方法,具有简单、通用、鲁棒性强和良好的全局寻优

能力等优点,对于综合能源系统优化运行模型具有良好的适用性。遗传算法模仿了自然界的生物进化机制,其本质是一种高效的全局搜索方法,能在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的知识,进而求得问题的最优解。

利用遗传算法求解综合能源微网优化运行模型,其计算流程如图2所示,主要的求解步骤如下。

步骤1,随机生成初始种群,设置种群规模、交叉率、变异率和最大迭代次数等参数。

步骤2,计算种群中所有个体的适应度,即每个个体的目标函数值。

步骤3,对上一代群体进行选择、交叉、变异操作,产生新一代群体,替换并保存新一代群体中适应度函数值较高的个体。

步骤4,判断是否满足停止条件。如满足,则结束并输出最优解;如不满足,则转到步骤2重新进行迭代计算。

步骤5,输出问题的最优解,结束。

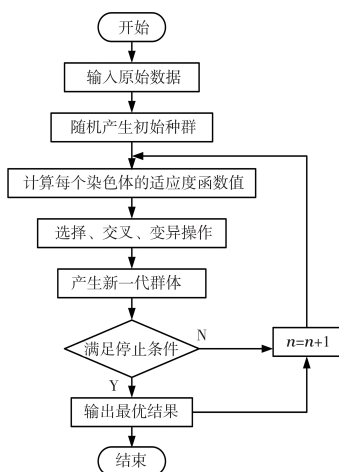


图2 遗传算法的基本流程

## 2 仿真计算

本节对综合能源微网的优化运行模型进行仿真分析,采用如图3所示的数据作为输入数据,包括电负荷、热负荷、冷负荷、光伏发电和风力发电。算例中采用的分时电价数据如表1所示。

根据综合能源微网的优化运行模型、输入数据和参数,可以得到以下仿真结果。图4和图5是夏季某一天的仿真结果,此时假设热负荷为0,用户只有用电需求和用冷需求。在01:00—08:00,电制冷机可以满足用户的大部分用冷需求,由于燃气轮机成本较高,此时燃气轮机用来满足一

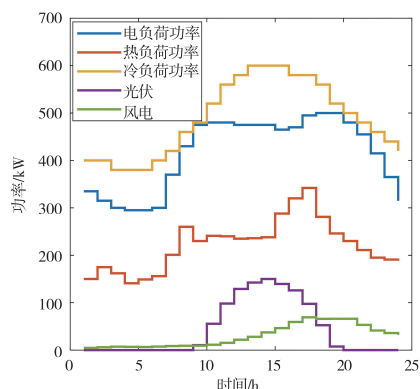


图3 输入数据曲线

表1 算例中采用的分时电价数据

| 时段   | 01:00—08:00 | 09:00—12:00 | 13:00—17:00 | 18:00—21:00 | 22:00—24:00 |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 电价/元 | 0.320 0     | 1.100 2     | 0.660 1     | 1.100 2     | 0.660 1     |

部分用冷需求,同时发出一部分电能供电负荷使用。在09:00—22:00,虽然用户用电需求下降,但由于此时气温高,用户用冷需求较大,在电制冷机达到了其额定功率的情况下,仍然难以满足冷负荷需求,因此,需要吸收式制冷机工作,燃气轮机需要供给吸收式制冷机75~140℃的热水用于制冷,此时,燃气轮机发电较多,用户从电网购电相应减少。在22:00以后,用冷需求下降,燃气轮机运行功率降低。

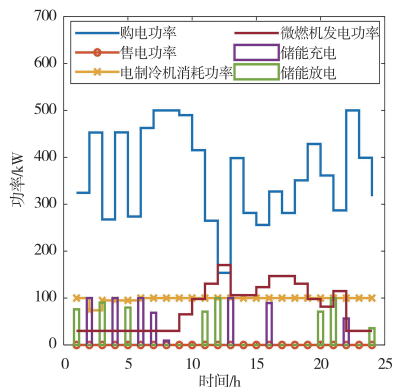


图4 夏季电功率曲线

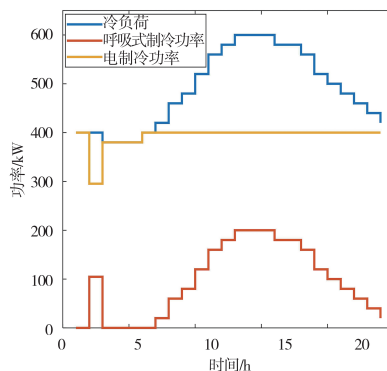


图5 夏季冷功率曲线

图6和图7是冬季某一天的仿真结果,此时假设冷负荷为0,用户只有用电需求和用热需求。由于同时有电和热需求,因此,燃气轮机一直处于运行状态,燃气轮机首先满足的是用户的热需求,在以热定电的条件下,用户再从电网中购电,此外,蓄电池配合充放电以满足用户对电能的需求。整个过程中,由于用户的负荷较大,风光发电和燃气轮机发电难以满足,用户一直处于购电状态,未向外部电网售电。

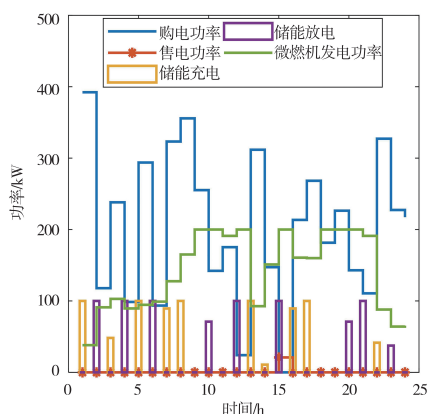


图6 冬季电功率曲线

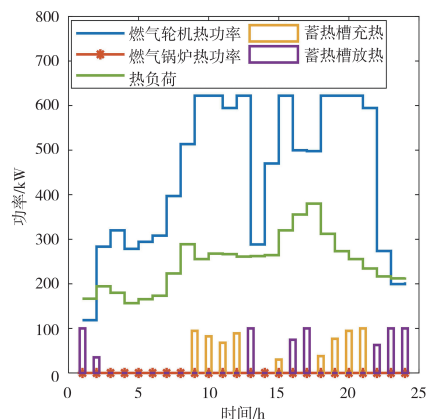


图7 冬季热功率曲线

微燃气轮机与蓄热槽配合可以满足用户的热需求,燃气轮机多发的热量存储在蓄热槽中,并在供热能力不足时,蓄热槽放热进行补充。燃气锅炉在此情况下没有参与运行,是由于锅炉只能供热,而燃气轮机可以在供电的同时将多余的热量供给热负荷,从而降低了系统运行成本。

在不考虑分时电价的情况下,一天的平均电价为0.69元/kWh,在夏季,系统的运行成本为

26 000元;在冬季,系统的运行成本为39 760元。在考虑分时电价的情况下,在夏季,系统的运行成本为25 850元;在冬季,系统的运行成本为39 520元。由此可以看出,考虑分时电价有利于降低系统的运行成本。

### 3 结论

本文构建了考虑多能源类型、多转换装置的综合能源微网优化运行模型,并利用遗传算法对综合能源微网优化调度问题进行了求解,算例分析表明:

- 综合能源微网中冷、热、电3种能源均可以达到各自的平衡;
- 蓄电池和蓄热槽在调节电功率和热功率方面发挥了重要的作用;
- 在选取的算例中,微燃气轮机和蓄热槽配合供热,燃气锅炉没有参与运行,节省了燃气成本,而且分时电价有利于降低系统的运行成本。

此外,在未来的研究中,将考虑不同能源之间的交易机制,将能源的价格考虑到优化运行模型中,并在多时间尺度上研究综合能源微网的优化运行问题。

### 参考文献:

- [1] 黎静华,朱梦姝,陆悦江,等.综合能源系统优化调度综述[J].电网技术,2021,https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0020.
- [2] 潘华,梁作放,肖雨涵,等.多场景下区域综合能源系统的优化运行[J].太阳能学报,2021,42(1):484-492.
- [3] 尹硕,张鹏,杨萌,等.计及需求侧响应的综合能源系统多时间尺度优化调度[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(11):35-42.
- [4] 林威,靳小龙,穆云飞,等.区域综合能源系统多目标最优混合潮流算法[J].中国电机工程学报,2017,37(20):5829-5839.
- [5] 艾芊,郝然.多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J].电力系统自动化,2018,42(4):2-10,46.
- [6] 熊文,刘育权,苏万,等.考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J].电力自动化设备,2019,39(1):118-126.
- [7] 于波,吴亮,卢欣,等.区域综合能源系统优化调度方法[J].电力建设,2016,37(1):70-76.
- [8] 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.

本文责任编辑:齐胜涛