



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109784569 A

(43)申请公布日 2019.05.21

(21)申请号 201910061601.6

(22)申请日 2019.01.23

(71)申请人 华北电力大学

地址 102206 北京市昌平区回龙观北农路2
号华北电力大学

(72)发明人 王永利 王玉东 李芳 李瑞文
李佳璞 张圆圆 曾鸣 张福伟
郭红珍 韩金山

(74)专利代理机构 北京科亿知识产权代理事务
所(普通合伙) 11350

代理人 汤东风

(51)Int.Cl.

G06Q 10/04(2012.01)

G06Q 50/06(2012.01)

H02J 3/00(2006.01)

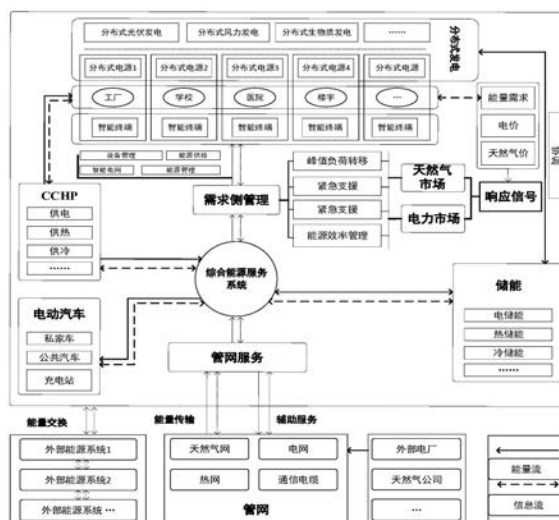
权利要求书4页 说明书16页 附图8页

(54)发明名称

一种区域综合能源系统优化控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种区域综合能源系统优化控制方法,包括如下步骤:S1、区域综合能源系统优化控制目标函数;实现区域综合能源系统总运行费用最低、可靠性和系统减排率最高的目的,将目标函数分为运行成本模型、环境成本模型和系统可靠性模型三个模块;其中包括S11、构建基于运行成本模型的目标函数;S12、构建基于环境成本模型的目标函数;S13、构建基于系统可靠性模型的目标函数;S2、对区域综合能源系统优化控制约束条件进行分析;其中包括S21、能量平衡约束分析;S22、能量平衡约束分析;S23、系统运行约束。本控制方法旨在实现系统总运行费用最低、可靠性和系统减排率最高。



1. 一种区域综合能源系统优化控制方法,其特征在于:包括如下步骤:

S1、构建区域综合能源系统优化控制目标函数

以实现区域综合能源系统总运行费用最低、可靠性和系统减排率最高的目的,将目标函数分为运行成本模型、环境成本模型和系统可靠性模型三个模块;

S11、构建基于运行成本模型的目标函数

区域综合能源系统经济调度的目标是使能源成本最小化;经济运行成本主要由天然气、电能和热能的交易成本组成;除此之外,还包括系统本身的运行成本;确定基于运行成本模型的目标函数如下

$$F_1 = \min C_{op} = C_{op-E} + C_{op-H} + C_{op-NG} \quad (1)$$

$$C_{op-E} = \sum_{i=1}^n C_i P_i(t) + C_{bat,dep} + (M \gamma_{ele-dr} + (1-M) \gamma_{ele}) P_{EB_grid}(t) \quad (2)$$

$$C_{op-H} = C_{HB_grid} + a_{h_st} P_{h_st}(t) \quad (3)$$

$$C_{op-NG} = (N \partial_{fuel-dr} + (1-N) \partial_{fuel}) \frac{\sum P_{CCHP}(t) \Delta t}{\delta_{CCHP} \times LHV_{NG}} + a_{NG_st} P_{NG_st}(t) \quad (4)$$

式中 C_{op} ——运营成本(元); C_{op-E} ——电能供应模块的运行成本(元);

C_i ——分布式发电的运营成本(元/kW); P_i ——分布式发电的输出功率(kW);
 γ_{ele-dr} ——需求响应电价(元/kWh); γ_{ele} ——固定电价(元/kWh); $P_{EB_grid}(t)$ ——系统和电网之间的交换功率(kW); $C_{bat,dep}$ ——单位时间储能的充/放电折旧费用(元/kWh); C_{op-H} ——热能供应模块的运营成本(元); C_{HB_grid} ——系统和热力公司的热量交换成本(元); $P_{h_st}(t)$ ——储热系统的功率(kW); a_{h_st} ——蓄热系统的电力成本(元/kWh); C_{op-NG} ——天然气供电模块的运营成本(元); $\partial_{fuel-dr}$ ——热能供应模块的运营成本(元); C_{HB_grid} ——需求响应天然气价格(元/m³); ∂_{fuel} ——固定天然气价格(元/m³); LHV_{NG} ——天然气的低热值(kWh/m³); $P_{NG_st}(t)$ ——天然气存储系统的功率(kW); a_{h_st} ——天然气存储系统的功率成本(元/kW);
 M, N ——需求响应系数, $M, N=1$ 表示系统参与需求响应; $M, N=0$ 表示系统不参与需求响应;

S12、构建基于环境成本模型的目标函数

以天然气为燃料的CCHP系统和燃气锅炉是区域综合能源系统的重要动力和供热单元,也是区域综合能源系统污染物排放的重要来源;区域综合能源系统运行的环境成本主要包括以下两个方面:能源生产污染物造成的环境损失和由此造成的非环境损失;相关部门收取的排污费;环境成本最小化模型如下所示:

$$F_2 = \min C_E = \sum_{k=1}^w \sum_{j=1}^m P_k(t) \varpi_{k,j} \delta_{E,j} + \zeta_{EC-p} \quad (4)$$

式中 C_E ——环境成本(元); $P_k(t)$ ——t时刻的发射源k的功率(kW); $\varpi_{k,j}$ ——来自排放源k的污染物j的排放系数(元/kg); Q_j ——污染物排放水平(kg); ζ_{EC-p} ——污染物排放惩罚费用(元);

S13、构建基于系统可靠性模型的目标函数

区域综合能源系统缺电率是电力系统常用的一个供电可靠性指标;根据区域综合能源系统与电力系统的相关性,构建了区域综合能源系统供给可靠性指标:能源供给损失率

(Loss of Energy Supply Probability, LESP), LESP表示某一时期系统能源供给缺口与总能量需求的比值;

$$F_3 = \min LESP(t) = (\sum_{t=1}^T E_{demand,t} - \sum_{t=1}^T E_{supply,t}) / \sum_{t=1}^T E_{demand,t} \quad (5)$$

式中LESP(t)——环境成本(元); $P_k(t)$ ——t时刻系统内能量缺额与t时刻总能量需求之比(%); $E_{demand,t}$ ——t时刻系统内能量需求总量(kW); $E_{supply,t}$ ——t时刻系统内能量需求供给(kW);

S2、对区域综合能源系统优化控制约束条件进行分析

S21、能量平衡约束分析

区域综合能源系统能量平衡的主要对象是电、热、冷、天然气;电功率平衡是指系统内外的电力供应必须满足系统内的电力负荷需求,热平衡主要指系统本身产生的热量可以满足自身的需要,如果不能满足,系统需要从热力公司购买一定量的热量,冷功率平衡主要指系统对冷的需求不能超过CCHP等系统产生的冷气量;

区域综合能源系统内的能量平衡约束如下

(1) 电负荷平衡约束

$$P_{e_grid}(t) + P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{CCHP}(t) + P_{dis}(t) = P_{load}(t) + P_{char}(t) + P_{EV}(t) \quad (6)$$

式中 $P_{e_grid}(t)$ ——电网与综合能源系统之间的电量交换功率(kW); $P_{WT}(t)$ ——风力发电输出功率(kW); $P_{pv}(t)$ ——分布式光伏发电输出功率(kW); $P_{CCHP}(t)$ ——CCHP电输出功率(kW); $P_{dis}(t)$ ——电池的放电功率(kW); $P_{load}(t)$ ——系统内的总负荷(kW); $P_{pv}(t)$ ——分布式光伏发电输出功率(kW); $P_{EV}(t)$ ——电动汽车负荷;

(2) 热负荷平衡约束

$$H_{h_grid}(t) + H_{HP}(t) + H_{AC}(t) + H_{CCHP}(t) + H_{h_re}(t) = H_{load}(t) + H_{h_st}(t) \quad (7)$$

式中 $H_{h_grid}(t)$ ——供热公司和综合能源系统之间的热交换功率(kW); $H_{HP}(t)$ ——热泵输出功率(kW); $H_{AC}(t)$ ——空调输出功率(kW); $H_{CCHP}(t)$ ——CCHP热输出功率(kW); $H_{h_re}(t)$ ——蓄热系统释放热量的功率(kW); $H_{load}(t)$ ——系统内的热负荷(kW); $H_{h_st}(t)$ ——蓄热系统储存热量的功率(kW);

(3) 冷负荷平衡约束

$$L_{HP}(t) + L_{AC}(t) + L_{CCHP}(t) + L_{l_re}(t) = L_{load}(t) + L_{l_st}(t) \quad (8)$$

式中 $L_{CCHP}(t)$ ——热泵输出冷负荷的功率(kW); $L_{AC}(t)$ ——空调输出冷负荷的功率(kW); $L_{h_re}(t)$ ——蓄冷系统释放冷负荷的功率(kW); $L_{load}(t)$ ——系统内的冷负荷(kW); $L_{h_st}(t)$ ——蓄冷系统储存冷负荷的功率(kW);

(4) 天然气负荷平衡约束

$$P_{ng_grid}(t) + P_{ng_st}(t) = \frac{P_{CCHP}(t)}{\varpi_{CCHP_e}} + P_{ng_life}(t) \quad (9)$$

式中 $P_{ng_grid}(t)$ ——天然气网向系统供应天然气的功率(kW); $P_{ng_st}(t)$ ——系统中储气系统释放的功率(kW); ϖ_{CCHP_e} ——燃气发电的发电效率(%); $P_{ng_life}(t)$ ——区域综合能源系统中的居民用气负荷(kW);

S22、能量平衡约束分析

在区域综合能源系统中,考虑到系统和外部的交互关系以及系统与能源网的安全,系统与外部网络之间的能量交换功率必须保持在一定范围内:

$$P_{e_min} \leq |P_{e_grid}| \leq P_{e_max} \quad (10)$$

$$P_{g_min} \leq |P_{g_network}| \leq P_{g_max} \quad (11)$$

式中 $P_{e_min}(t)$ ——电网与综合能源系统之间的最小电量交换功率(kW); $P_{e_max}(t)$ ——电网与综合能源系统之间的最大电量交换功率(kW); $P_{g_max}(t)$ ——天然气网向系统供应天然气的最大功率(kW); $P_{g_min}(t)$ ——天然气网向系统供应天然气的最小功率(kW);

S23、系统运行约束

综合能源系统包含很多硬件设备,这些设备必须在运行过程中满足自己的运行约束条件;机组实时出力应在上、下限之间,同时机组功率的变化率受到爬坡率的限制;

(1) 能源供应设备的运行约束

$$\begin{cases} P_{ese_min}(t)\theta(t) \leq P_{ese}(t) \leq P_{ese_max}(t)\theta(t) \\ \theta(t)=1 \text{ on}; \quad \theta(t)=0 \text{ off} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_{\Delta ese_min}(t)\theta(t) \leq \Delta P_{ese}(t) \leq P_{\Delta ese_max}(t)\theta(t) \quad (13)$$

式中 $P_{ese_min}(t)$ ——设备的最小输出功率(kW); $P_{ese_max}(t)$ ——设备的最大输出功率(kW); $\theta(t)$ ——设备的运行状态; $\Delta P_{ese}(t)$ ——t时间内功率的变化量(kW); $P_{\Delta ese_min}(t)$ ——设备爬坡能力的下限(kW); $P_{\Delta ese_max}(t)$ ——设备爬坡能力的上限(kW);

(2) 能量储存系统运行约束

1) 电能储能

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (14)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{char}(t) \leq P_{char_max} \varpi_{BA_s} \\ 0 \leq P_{dis}(t) \leq P_{dis_max} \varpi_{BA_r} \\ \varpi_{BA_s} + \varpi_{BA_r} \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} P_{char_max} = \min \left\{ I_{char}^{max} V_{bat}, \frac{[SOC_{max} - SOC(t)] Q_{max}}{\gamma_{char} \Delta t}, P_{inv} \right\} \\ P_{dis_max} = \min \left\{ I_{dis}^{max} V_{bat}, \frac{[SOC_{max} - SOC(t)] Q_{max} \gamma_{dis}}{\Delta t}, P_{inv} \right\} \end{cases} \quad (16)$$

$$SOC_{start}(t) = SOC_{end}(t) \quad (17)$$

式中 SOC_{min} ——电储能荷电状态的最小值; SOC_{max} ——电储能荷电状态的最大值; ϖ_{BA_s} ——电池充电的效率; ϖ_{BA_r} ——电池放电的效率; I_{char}^{max} ——电池允许的最大充电电流(A); I_{dis}^{max} ——电池允许的最大放电电流(A); $SOC_{start}(t)$ ——储能系统调度周期开始时间的电池剩余容量; $SOC_{end}(t)$ ——储能系统调度周期结束时间的电池剩余容量;

2) 热能储能

$$H_{h_st_min} \leq H_{hst}(t) \leq H_{h_st_max} \quad (18)$$

$$\begin{cases} 0 \leq H_{h_st}(t) \leq H_{h_st_max} \varpi_{h_st} \\ 0 \leq H_{h_st}(t) \leq H_{h_re_max} \varpi_{h_re} \\ \varpi_{h_st} + \varpi_{h_re} \leq 1 \end{cases} \quad (19)$$

$$H_{h_st_start}(t) = H_{h_st_end}(t) \quad (20)$$

式中 $H_{h_st_min}$ ——热储能荷电状态的最小值； $H_{h_st_max}$ ——热储能荷电状态的最大值； ϖ_{h_st} ——热能储存的效率； ϖ_{h_re} ——热能释放的效率； $H_{h_st_start}(t)$ ——储热系统调度周期开始时间的电池剩余容量； $H_{h_st_end}(t)$ ——储热系统调度周期结束时间的电池剩余容量。

2. 如权利要求1所述的区域综合能源系统优化控制方法,其特征在于:根据RIES的运行策略,采用NSGA-II算法求解模型;在计算过程中通过NSGA-II算法获得优化的Pareto解集,并使用模糊隶属函数从最优解集中选择最优解;决策者对这一目标优化的满意度体现在隶属度的大小上,并且通过合成每个目标函数的模糊隶属度来获得最优解;

首先,通过等式(24)计算帕累托解集中目标函数的隶属度;

$$u_i^k = \begin{cases} 1, & F_i = F_i^{\min} \\ \frac{F_i^{\max} - F_i}{F_i^{\max} - F_i^{\min}}, & F_i^{\min} \leq F_i \leq F_i^{\max} \\ 0, & F_i = F_i^{\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中 F_i ——目标函数 i 的函数值； $F_i^{\min}$ ——目标函数的最小值； $F_i^{\max}$ ——目标函数的最大值；

然后根据决策者的偏好设置权重值,并计算多目标函数的最优解的隶属权重值,最大值对应的Pareto解是最优解。

3. 如权利要求1所述的区域综合能源系统优化控制方法,其特征在于:如果权重设置为相等权重,则计算公式如下:

$$u^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obj}} D_i u_i^k}{\sum_{k=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_{obj}} D_i u_i^k} \quad (22)$$

式中 N_p ——种群数； D_i ——目标函数的权重； N_{obj} ——目标函数的数量； u^k ——隶属函数值。

一种区域综合能源系统优化控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及能源综合利用技术领域,具体涉及一种区域综合能源系统优化控制方法。

背景技术

[0002] 能源是人类生存的物质基础,也是社会发展和文明进步的先决条件。然而,社会生产力的跨越式发展导致了能源需求的急剧上升。传统化石能源面临着严重的过度开发和几近枯竭的问题。传统的能源利用系统需要改造和升级。因此,全面优化和利用能源、热能、天然气和其他能源,建立RIES将是提高能源效率和实现可持续能源发展的重要途径。RIES优化调度和运行的主要目标是提高整体能效、提高运行可靠性、降低能源成本和减少系统污染物排放。

[0003] 在能源系统耦合互补的研究中,文献《区域级综合能源系统多能耦合优化研究》从三个层次的功能模块、子系统和区域综合能源系统建立模型,深入研究各种能源利用技术以及冷、热、电多种能源形式的耦合优化过程。文献《多能互补区域能源典型方案设计与研究》基于国内外能源互联网和多能源互补提出一种新的区域能源互联网运行机制。鉴于综合能源系统中多能源流动的特点,文献《面向电网削峰的综合能源系统分层分布式协调控制方法》提出一种分层分布式协调控制方法来协调校园中的直接调谐资源和用户需求响应资源,以执行全面的削峰。文献《区域综合能源系统多主体非完全信息下的双层博弈策略》提出一个由能源供应商、分销网络 and 用户组成的多主题双层游戏互动策略。

[0004] 在能量网络方程的建立和求解中,文献《Research on the Construction of Energy Network Based on Modular Energy Service Industry》提出一种天然气和电力联合输送的方法,这样天然气输送和电力输送可以“以同样的方式”进行。基于智能电网技术,文献《综合热电负荷控制下的省级电网风电并网研究》提出一种热电与风能的联合控制方法,仿真结果表明,该方法可以帮助风力涡轮机增加其并网容量。文献《Optimization of the combined supercritical CO₂ cycle and organic Rankine cycle using zeotropic mixtures for gas turbine waste heat recovery》提出系统的多种能量管理运行模式。

[0005] 在综合能源系统能效评估模型的研究中,主要集中在产能设备能效评估和系统能效影响因素分析。文献《Research on characteristics and operation optimization of water intake system of absorption refrigeration unit》分析溴化锂吸收式制冷机组的能效标准、能效评估参数、能效水平和节能评估值的适用范围。文献《风电机组能效评价与诊断研究》提出基于能量流的风力涡轮机能效性能分析框架,以实现能效性能的全面评估。

[0006] 文献《槽式太阳能集热器与燃气锅炉联合供暖系统模拟研究》提出了一种新型加热系统,其中槽式太阳能收集器与燃气锅炉相连。文献《New district heating system based on natural gas-fired boilers with absorption heat exchangers》提出了一种

燃气锅炉,该锅炉与吸收传热相结合,用于区域供热,并证明,该系统可以充分利用低品位热源。文献《High efficiency cogeneration:CHP and non-CHP energy》比较热电联产电站和非热电联产电站的参数,并评估热电联产系统的能效。文献《Measurement and classification of energy efficiency in HVAC systems》综合考虑区域、运行状态和技术水平等因素,并提出几个共同参数。多能量RIES的最优控制策略是研究的重要问题之一。

[0007] 合理的优化方案可以降低运营成本,充分发挥RIES的优势。文献《考虑污染气体排放的热电联供型微电网多目标运行优化》、《Optimization of support vector machine power load forecasting model based on data mining and Lyapunov exponents》、《Power load forecasting using support vector machine and ant colony optimization》研究CHP系统的优化问题。文献《Design Optimization and Dynamic Performance Analysis of a Stand-Alone Hybrid Wind-Diesel Electrical Power Generation System》研究柴油发电机、风扇和蓄能器的运行特性对系统发电成本的影响,并提出风-柴油联合动力系统的最优控制方法。文献《Isolated microgrid economic operation model based on sequence operation theory》、《计及风险备用约束的孤网系统环保经济调度》、《考虑风电随机性的微电网热电联合调度》分析风能和光能输出的随机性,提出的方法可以减少新能源波动的负面影响,优化RIES的运营成本。基于DR,文献《Comprehensive real-time microgrid power management and control with distributed agents》提出负荷转换解决方案策略,以改善新能源输出和负荷的匹配。文献《Energy management system as a mean for the integration of distributed energy sources with low voltage network》提出可控DG的能量管理优化算法,以改善微电网的经济和环境友好性。

[0008] 在专家、学者和政策支持的推动下,中国开发了RIES的多源协调和优化系统。像北京和上海这样的城市已经有了许多显示出强大生命力的项目,这些项目具有技术优势和经济效益《A smart home energy management system using IoT and big data analytics approach》、《Effect of control strategy on performance and emissions of natural gas engine for cogeneration system》。由政府领导的多源协调和优化系统也在进行试点工作,以动态监测能源的在线技术参数和实时数据《Information Management for Decentralized Energy Storages under Market Uncertainties》、《An energy efficiency solution for WBAN in healthcare monitoring system》、《Design and Implementation of an Energy Monitoring System for Buildings Based on Internet of Things Architecture》。目前,关于多能源RIES的研究很少,但是关于电力系统和其他行业的能源管理的研究已经在多个国家完成《System and method for integrated management of terminal information in IPv6 environment》、《An Integrated Management System for Occupational Health and Safety and Environment in an Operating Nuclear Power Plant in East China and Its Management Information System》。这些关于能源系统综合管理的研究主要基于能源信息、需求响应、企业管理和网络《综合热电负荷控制下的省级电网风电并网研究 Analysis of energy performance and buildings characteristics obtained from Croatian energy management information system》。

[0009] 在上述研究中,RIES的研究主要集中在能源网络方程、仿真优化、能效评估和实施模式的推广上。与此同时,一些RIES项目已经实施,并取得了一些成就。然而,随着电力市场改革的深入,市场因素对RIES的影响逐渐加大,显然,如何在不造成大量污染物排放的情况下实现RIES的经济运行,已经成为研究RIES的关键。然而,由于RIES设计和优化运行的方法体系仍需要改进,现有的研究成果还没有达到预期的目标。

[0010] 区域综合能源系统是一种新型的区域综合能源系统。在综合能源系统中,天然气、电能、热能等能源通过先进的物理信息技术和创新的管理模式结合在一起,实现了不同能源子系统之间的协调规划、优化运行、协同管理和互补。此外,在满足系统多样化能源需求的同时,综合能源技术可以有效提高能源效率,促进能源的可持续发展。

[0011] 综合能源系统包括电力、天然气、太阳能、风能、废热和其他类型的能源,它结合了这些不同的资源和先进技术,以更高的整体系统能效为用户提供冷、热和电。在实际应用中,综合能源系统被视为一个统一的能源系统,系统中的各个过程相互作用,以构建系统的独特功能。而且,在这个综合能耗系统中,各种资源都经过了相同的过程,“开发-转换-传输-存储-消耗”。

[0012] 图1是区域综合能源系统的典型结构。如图1所示,在综合能源系统中,主要参与者是用户、能源服务提供商和能源供应公司。用户是综合能源系统中的关键要素之一,他们具有多样化的特征,包括工厂、学校、医院、建筑等。式发电机,他们可以向能源网络或其他用户出售多余的电力。能源服务提供商他们不仅是能源需求者,也是能源供应商。因为其中一些用户已经安装了分布也是RIES的重要参与者之一。他们的主要业务包括通信服务、系统操作、设备维护和能源管理服务。能源服务是综合能源业务的关键环节。综合能源服务提供商可以实现用户和外部市场之间的互动和融合。他们提供的能源服务主要包括能源管理、信息咨询和需求方管理。

[0013] 综合能源系统中电/气/热等各能源子系统在实际运行调度中的时间尺度、调度原则相差悬殊,在同一个时度、统一的调度原则下进行仿真分析和协调控制的难度较大;同时,用户侧的各类用能负荷及可再生能源出力的随机性对于综合能源系统调度运行优化也是一个不小的挑战,是实现综合能源系统各子模块统一、协调调度必须考虑的关键问题。

发明内容

[0014] 本发明目的是针对上述问题,提供一种区域综合能源系统优化控制方法。建立了一个包括发电、供热和制冷系统的RIES模型。在建立的系统模型中,建立了优化运行模型,可用于研究RIES的经济运行策略,旨在实现系统总运行费用最低、可靠性和系统减排率最高。

[0015] 与现有研究不同的是在对结果的讨论和分析中,我们还分析了影响RIES运营和环境成本的因素的敏感性。

[0016] 为了实现上述目的,本发明的技术方案是:

[0017] 一种区域综合能源系统优化控制方法,包括如下步骤:

[0018] S1、构建区域综合能源系统优化控制目标函数

[0019] 以实现区域综合能源系统总运行费用最低、可靠性和系统减排率最高的目的,将目标函数分为运行成本模型、环境成本模型和系统可靠性模型三个模块;

[0020] S11、构建基于运行成本模型的目标函数

[0021] 区域综合能源系统经济调度的目标是使能源成本最小化；经济运行成本主要由天然气、电能和热能的交易成本组成；除此之外，还包括系统本身的运行成本；确定基于运行成本模型的目标函数如下

$$[0022] \quad F_1 = \min C_{op} = C_{op-E} + C_{op-H} + C_{op-NG} \quad (23)$$

$$[0023] \quad C_{op-E} = \sum_{i=1}^n C_i P_i(t) + C_{bat,dep} + (M\gamma_{ele-dr} + (1-M)\gamma_{ele})P_{EB_grid}(t) \quad (24)$$

$$[0024] \quad C_{op-H} = C_{HB_grid} + a_{h_st} P_{h_st}(t) \quad (25)$$

$$[0025] \quad C_{op-NG} = (N\partial_{fuel-dr} + (1-N)\partial_{fuel}) \frac{\sum P_{CCHP}(t)\Delta t}{\delta_{CCHP} \times LHV_{NG}} + a_{NG_st} P_{NG_st}(t) \quad (4)$$

[0026] 式中 C_{op} ——运营成本(元)； C_{op-E} ——电能供应模块的运行成本(元)； C_i ——分布式发电的运营成本(元/kW)； P_i ——分布式发电的输出功率(kW)； γ_{ele-dr} ——需求响应电价(元/kWh)； γ_{ele} ——固定电价(元/kWh)； $P_{EB_grid}(t)$ ——系统和电网之间的交换功率(kW)； $C_{bat,dep}$ ——单位时间储能的充/放电折旧费用(元/kWh)； C_{op-H} ——热能供应模块的运营成本(元)； C_{HB_grid} ——系统和热力公司的热量交换成本(元)； $P_{h_st}(t)$ ——储热系统的功率(kW)； a_{h_st} ——蓄热系统的电力成本(元/kWh)； C_{op-NG} ——天然气供电模块的运营成本(元)； $\partial_{fuel-dr}$ ——热能供应模块的运营成本(元)； C_{HB_grid} ——需求响应天然气价格(元/m³)； ∂_{fuel} ——固定天然气价格(元/m³)； LHV_{NG} ——天然气的低热值(kWh/m³)； $P_{NG_st}(t)$ ——天然气存储系统的功率(kW)； a_{h_st} ——天然气存储系统的功率成本(元/kW)； M, N ——需求响应系数， $M, N=1$ 表示系统参与需求响应； $M, N=0$ 表示系统不参与需求响应；

[0027] S12、构建基于环境成本模型的目标函数

[0028] 以天然气为燃料的CCHP系统和燃气锅炉是区域综合能源系统的重要动力和供热单元，也是区域综合能源系统污染物排放的重要来源；区域综合能源系统运行的环境成本主要包括以下两个方面：能源生产污染物造成的环境损失和由此造成的非环境损失；相关部门收取的排污费；环境成本最小化模型如下所示：

$$[0029] \quad F_2 = \min C_E = \sum_{k=1}^w \sum_{j=1}^m P_k(t) \varpi_{k,j} \delta_{E,j} + \zeta_{EC-p} \quad (26)$$

[0030] 式中 C_E ——环境成本(元)； $P_k(t)$ ——t时刻的发射源k的功率(kW)； $\varpi_{k,j}$ ——来自排放源k的污染物j的排放系数(元/kg)； Q_j ——污染物排放水平(kg)； ζ_{EC-p} ——污染物排放惩罚费用(元)；

[0031] S13、构建基于系统可靠性模型的目标函数

[0032] 区域综合能源系统缺电率是电力系统常用的一个供电可靠性指标；根据区域综合能源系统与电力系统的相关性，构建了区域综合能源系统供给可靠性指标：能源供给损失率(Loss of Energy Supply Probability, LESP)，LESP表示某一时期系统能源供给缺口与总能量需求的比值；

$$[0033] \quad F_3 = \min LESP(t) = (\sum_{t=1}^T E_{demand,t} - \sum_{t=1}^T E_{supply,t}) / \sum_{t=1}^T E_{demand,t} \quad (27)$$

[0034] 式中 $LESP(t)$ ——环境成本(元); $P_k(t)$ —— t 时刻系统内能量缺额与 t 时刻总能量需求之比(%); $E_{demand,t}$ —— t 时刻系统内能量需求总量(kW); $E_{supply,t}$ —— t 时刻系统内能量需求供给(kW);

[0035] S2、对区域综合能源系统优化控制约束条件进行分析

[0036] S21、能量平衡约束

[0037] 区域综合能源系统能量平衡的主要对象是电、热、冷、天然气;电功率平衡是指系统内外的电力供应必须满足系统内的电力负荷需求,热平衡主要指系统本身产生的热量可以满足自身的需要,如果不能满足,系统需要从热力公司购买一定量的热量,冷功率平衡主要指系统对冷的需求不能超过CCHP等系统产生的冷气量;

[0038] 区域综合能源系统内的能量平衡约束如下

[0039] (1)电负荷平衡约束

$$[0040] \quad P_{e_grid}(t) + P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{CCHP}(t) + P_{dis}(t) = P_{load}(t) + P_{char}(t) + P_{EV}(t) \quad (28)$$

[0041] 式中 $P_{e_grid}(t)$ ——电网与综合能源系统之间的电量交换功率(kW); $P_{WT}(t)$ ——风力发电输出功率(kW); $P_{pv}(t)$ ——分布式光伏发电输出功率(kW); $P_{CCHP}(t)$ ——CCHP电输出功率(kW); $P_{dis}(t)$ ——电池的放电功率(kW); $P_{load}(t)$ ——系统内的总负荷(kW); $P_{pv}(t)$ ——分布式光伏发电输出功率(kW); $P_{EV}(t)$ ——电动汽车负荷;

[0042] (2)热负荷平衡约束

$$[0043] \quad H_{h_grid}(t) + H_{HP}(t) + H_{AC}(t) + H_{CCHP}(t) + H_{h_re}(t) = H_{load}(t) + H_{h_st}(t) \quad (29)$$

[0044] 式中 $H_{h_grid}(t)$ ——供热公司和综合能源系统之间的热交换功率(kW); $H_{HP}(t)$ ——热泵输出功率(kW); $H_{AC}(t)$ ——空调输出功率(kW); $H_{CCHP}(t)$ ——CCHP热输出功率(kW); $H_{h_re}(t)$ ——蓄热系统释放热量的功率(kW); $H_{load}(t)$ ——系统内的热负荷(kW); $H_{h_st}(t)$ ——蓄热系统储存热量的功率(kW);

[0045] (3)冷负荷平衡约束

$$[0046] \quad L_{HP}(t) + L_{AC}(t) + L_{CCHP}(t) + L_{l_re}(t) = L_{load}(t) + L_{l_st}(t) \quad (30)$$

[0047] 式中 $L_{CCHP}(t)$ ——热泵输出冷负荷的功率(kW); $L_{AC}(t)$ ——空调输出冷负荷的功率(kW); $L_{h_re}(t)$ ——蓄冷系统释放冷负荷的功率(kW); $L_{load}(t)$ ——系统内的冷负荷(kW); $L_{h_st}(t)$ ——蓄冷系统储存冷负荷的功率(kW);

[0048] (4)天然气负荷平衡约束

$$[0049] \quad P_{ng_grid}(t) + P_{ng_st}(t) = \frac{P_{CCHP}(t)}{\varpi_{CCHP_e}} + P_{ng_life}(t) \quad (31)$$

[0050] 式中 $P_{ng_grid}(t)$ ——天然气网向系统供应天然气的功率(kW); $P_{ng_st}(t)$ ——系统中储气系统释放的功率(kW); ϖ_{CCHP_e} ——燃气发电的发电效率(%);

[0051] $P_{ng_life}(t)$ ——区域综合能源系统中的居民用气负荷(kW);

[0052] S22、能量平衡约束

[0053] 在区域综合能源系统中,考虑到系统和外部的交互关系以及系统与能源网的安全,系统与外部网络之间的能量交换功率必须保持在一定范围内:

[0054] $P_{e_min} \leq |P_{e_grid}| \leq P_{e_max}$ (32)

[0055] $P_{g_min} \leq |P_{g_network}| \leq P_{g_max}$ (33)

[0056] 式中 $P_{e_min}(t)$ ——电网与综合能源系统之间的最小电量交换功率 (kW) ; $P_{e_max}(t)$ ——电网与综合能源系统之间的最大电量交换功率 (kW) ; $P_{g_max}(t)$ ——天然气网向系统供应天然气的最大功率 (kW) ; $P_{g_min}(t)$ ——天然气网向系统供应天然气的最小功率 (kW) ;

[0057] S23、系统运行约束

[0058] 综合能源系统包含很多硬件设备,这些设备必须在运行过程中满足自己的运行约束条件;机组实时出力应在上、下限之间,同时机组功率的变化率受到爬坡率的限制;

[0059] (1) 能源供应设备的运行约束

[0060]
$$\begin{cases} P_{ese_min}(t)\theta(t) \leq P_{ese}(t) \leq P_{ese_max}(t)\theta(t) \\ \theta(t) = 1 \text{ on}; \quad \theta(t) = 0 \text{ off} \end{cases} \quad (34)$$

[0061] $P_{\Delta ese_min}(t)\theta(t) \leq \Delta P_{ese}(t) \leq P_{\Delta ese_max}(t)\theta(t)$ (35)

[0062] 式中 $P_{ese_min}(t)$ ——设备的最小输出功率 (kW) ; $P_{ese_max}(t)$ ——设备的最大输出功率 (kW) ; $\theta(t)$ ——设备的运行状态; $\Delta P_{ese}(t)$ ——t 时间内功率的变化量 (kW) ; $P_{\Delta ese_min}(t)$ ——设备爬坡能力的下限 (kW) ; $P_{\Delta ese_max}(t)$ ——设备爬坡能力的上限 (kW) ;

[0063] (2) 能量储存系统运行约束

[0064] 1) 电能储能

[0065] $SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$ (36)

[0066]
$$\begin{cases} 0 \leq P_{char}(t) \leq P_{char_max} \varpi_{BA_s} \\ 0 \leq P_{dis}(t) \leq P_{dis_max} \varpi_{BA_r} \\ \varpi_{BA_s} + \varpi_{BA_r} \leq 1 \end{cases} \quad (37)$$

[0067]
$$\begin{cases} P_{char_max} = \min \left\{ I_{char}^{max} V_{bat}, \frac{[SOC_{max} - SOC(t)] Q_{max}}{\gamma_{char} \Delta t}, P_{inv} \right\} \\ P_{dis_max} = \min \left\{ I_{dis}^{max} V_{bat}, \frac{[SOC_{max} - SOC(t)] Q_{max} \gamma_{dis}}{\Delta t}, P_{inv} \right\} \end{cases} \quad (38)$$

[0068] $SOC_{start}(t) = SOC_{end}(t)$ (39)

[0069] 式中 SOC_{min} ——电储能荷电状态的最小值; SOC_{max} ——电储能荷电状态的最大值; ϖ_{BA_s} ——电池充电的效率; ϖ_{BA_r} ——电池放电的效率; I_{char}^{max} ——电池允许的最大充电电流 (A) ; I_{dis}^{max} ——电池允许的最大放电电流 (A) ; $SOC_{start}(t)$ ——储能系统调度周期开始时间的电池剩余容量; $SOC_{end}(t)$ ——储能系统调度周期结束时间的电池剩余容量;

[0070] 2) 热能储能

[0071] $H_{h_st_min} \leq H_{hst}(t) \leq H_{h_st_max}$ (40)

[0072]
$$\begin{cases} 0 \leq H_{h_st}(t) \leq H_{h_st_max} \varpi_{h_st} \\ 0 \leq H_{h_st}(t) \leq H_{h_re_max} \varpi_{h_re} \\ \varpi_{h_st} + \varpi_{h_re} \leq 1 \end{cases} \quad (41)$$

[0073] $H_{h_st_start}(t) = H_{h_st_end}(t)$ (42)

[0074] 式中 $H_{h_st_min}$ ——热储能荷电状态的最小值; $H_{h_st_max}$ ——热储能荷电状态的最大值; ϖ_{h_st} ——热能储存的效率; ϖ_{h_re} ——热能释放的效率; $H_{h_st_start}(t)$ ——储热系统调度周期开始时间的电池剩余容量; $H_{h_st_end}(t)$ ——储热系统调度周期结束时间的电池剩余容量;

[0075] S3、对优化控制模型求解

[0076] 根据RIES的运行策略, 本文采用NSGA-II算法求解模型; 在计算过程中, 可以通过NSGA-II算法获得优化的Pareto解集, 并使用模糊隶属函数从最优解集中选择最优解; 决策者对这一目标优化的满意度体现在隶属度的大小上, 并且通过合成每个目标函数的模糊隶属度来获得最优解;

[0077] 首先, 通过等式 (24) 计算帕累托解集中目标函数的隶属度;

$$[0078] \quad u_i^k = \begin{cases} 1, & F_i = F_i^{\min} \\ \frac{F_i^{\max} - F_i}{F_i^{\max} - F_i^{\min}}, & F_i^{\min} \leq F_i \leq F_i^{\max} \\ 0, & F_i = F_i^{\max} \end{cases} \quad (43)$$

[0079] 式中 F_i ——目标函数 i 的函数值; $F_i^{\min}$ ——目标函数的最小值; $F_i^{\max}$ ——目标函数的最大值;

[0080] 然后根据决策者的偏好设置权重值, 并计算多目标函数的最优解的隶属权重值, 最大值对应的Pareto解是最优解;

[0081] 进一步的, 权重设置为相等权重, 则计算公式如下:

$$[0082] \quad u^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obj}} D_i u_i^k}{\sum_{k=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_{obj}} D_i u_i^k} \quad (44)$$

[0083] 式中 N_p ——种群数; D_i ——目标函数的权重; N_{obj} ——目标函数的数量; u^k ——隶属函数值。

[0084] 与现有技术相比, 本发明具有的优点和积极效果是:

[0085] 本发明的区域综合能源系统优化控制方法, 综合考虑系统能量平衡、能源供应、系统设备运行等约束条件, 以经济行最优、污染物物排放最大以及能量损失率最小为目标函数, 建立RIES运行优化模型, 旨在实现系统总运行费用最低、可靠性和系统减排率最高。并基于本文建立的运行优化模型和求解问题的特点, 选择改进的非劣性遗传算法 (NSGA-II) 对目标函数进行求解。

附图说明

[0086] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案, 下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍, 显而易见地, 下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例, 对于本领域普通技术人员来讲, 在不付出创造性劳动性的前提下, 还可

以根据这些附图获得其他的附图。

- [0087] 图1为典型区域综合能源系统结构图；
- [0088] 图2为NSGA-II算法的流程图；
- [0089] 图3为该系统冬日典型日的电力负荷、热负荷和NG负荷预测曲线图；
- [0090] 图4为园区内冬季典型日的可再生能源出力曲线图；
- [0091] 图5为典型日NG价格和电价的预测值图；
- [0092] 图6为典型RIES冷-热-电负荷供应模式图；
- [0093] 图7为典型RIES能量管理及优化控制策略仿真流程图；
- [0094] 图8为基于NSGA-II的帕累托最优解集图；
- [0095] 图9为模式1DG出力及电储能荷电状态图；
- [0096] 图10为模式1热负荷平衡状况和储热系统状态图；
- [0097] 图11为模式2DG出力及电储能荷电状态图；
- [0098] 图12为模式2热负荷平衡状况和储热系统状态图；
- [0099] 图13为电价敏感性分析图；
- [0100] 图14为天然气价格敏感性分析图。

具体实施方式

[0101] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,以便于进一步理解本发明。显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

[0102] 以下实施例中所有使用的实验方法如无特殊说明,均为常规方法。以下实施例中所用的材料、试剂等,如无特殊说明,均可通过商业途径获得。

[0103] 如图1和2所示,本发明提供了一种区域综合能源系统优化控制方法,包括如下步骤:

[0104] S1、构建区域综合能源系统优化控制目标函数

[0105] 以实现区域综合能源系统总运行费用最低、可靠性和系统减排率最高的目的,将目标函数分为运行成本模型、环境成本模型和系统可靠性模型三个模块;

[0106] S11、构建基于运行成本模型的目标函数

[0107] 区域综合能源系统经济调度的目标是使能源成本最小化;经济运行成本主要由天然气、电能和热能的交易成本组成;除此之外,还包括系统本身的运行成本;确定基于运行成本模型的目标函数如下

$$[0108] \quad F_1 = \min C_{op} = C_{op-E} + C_{op-H} + C_{op-NG} \quad (45)$$

$$[0109] \quad C_{op-E} = \sum_{i=1}^n C_i P_i(t) + C_{bat,dep} + (M\gamma_{ele-dr} + (1-M)\gamma_{ele}) P_{EB_grid}(t) \quad (46)$$

$$[0110] \quad C_{op-H} = C_{HB_grid} + a_{h_st} P_{h_st}(t) \quad (47)$$

$$[0111] \quad C_{op-NG} = (N\partial_{fuel-dr} + (1-N)\partial_{fuel}) \frac{\sum P_{CCHP}(t)\Delta t}{\delta_{CCHP} \times LHV_{NG}} + a_{NG_st} P_{NG_st}(t) \quad (4)$$

[0112] 式中 C_{op} ——运营成本(元); C_{op-E} ——电能供应模块的运行成本(元); C_i ——分布式发电的运营成本(元/kW); P_i ——分布式发电的输出功率(kW); γ_{ele-dr} ——需求响应电价(元/kWh); γ_{ele} ——固定电价(元/kWh); $P_{EB_grid}(t)$ ——系统和电网之间的交换功率(kW); $C_{bat,dep}$ ——单位时间储能的充/放电折旧费用(元/kWh); C_{op-H} ——热能供应模块的运营成本(元); C_{HB_grid} ——系统和热力公司的热量交换成本(元); $P_{h_st}(t)$ ——储热系统的功率(kW); a_{h_st} ——蓄热系统的电力成本(元/kWh); C_{op-NG} ——天然气供电模块的运营成本(元); $\partial_{fuel-dr}$ ——热能供应模块的运营成本(元); C_{HB_grid} ——需求响应天然气价格(元/m³); ∂_{fuel} ——固定天然气价格(元/m³); LHV_{NG} ——天然气的低热值(kWh/m³); $P_{NG_st}(t)$ ——天然气存储系统的功率(kW); a_{h_st} ——天然气存储系统的功率成本(元/kW); M, N ——需求响应系数, $M, N=1$ 表示系统参与需求响应; $M, N=0$ 表示系统不参与需求响应;

[0113] S12、构建基于环境成本模型的目标函数

[0114] 以天然气为燃料的CCHP系统和燃气锅炉是区域综合能源系统的重要动力和供热单元,也是区域综合能源系统污染物排放的重要来源;区域综合能源系统运行的环境成本主要包括以下两个方面:能源生产污染物造成的环境损失和由此造成的非环境损失;相关部门收取的排污费;环境成本最小化模型如下所示:

$$[0115] \quad F_2 = \min C_E = \sum_{k=1}^w \sum_{j=1}^m P_k(t) \varpi_{k,j} \delta_{E,j} + \zeta_{EC-p} \quad (48)$$

[0116] 式中 C_E ——环境成本(元); $P_k(t)$ —— t 时刻的发射源 k 的功率(kW); $\varpi_{k,j}$ ——来自排放源 k 的污染物 j 的排放系数(元/kg); Q_j ——污染物排放水平(kg); ζ_{EC-p} ——污染物排放惩罚费用(元);

[0117] S13、构建基于系统可靠性模型的目标函数

[0118] 区域综合能源系统缺电率是电力系统常用的一个供电可靠性指标;根据区域综合能源系统与电力系统的相关性,构建了区域综合能源系统供给可靠性指标:能源供给损失率(Loss of Energy Supply Probability, LESP), LESP表示某一时期系统能源供给缺口与总能量需求的比值;

$$[0119] \quad F_3 = \min LESP(t) = (\sum_{t=1}^T E_{demand,t} - \sum_{t=1}^T E_{supply,t}) / \sum_{t=1}^T E_{demand,t} \quad (49)$$

[0120] 式中 $LESP(t)$ ——环境成本(元); $P_k(t)$ —— t 时刻系统内能量缺额与 t 时刻总能量需求之比(%); $E_{demand,t}$ —— t 时刻系统内能量需求总量(kW); $E_{supply,t}$ —— t 时刻系统内能量需求供给(kW);

[0121] S2、对区域综合能源系统优化控制约束条件进行分析

[0122] S21、能量平衡约束

[0123] 区域综合能源系统能量平衡的主要对象是电、热、冷、天然气;电功率平衡是指系统内外的电力供应必须满足系统内的电力负荷需求,热平衡主要指系统本身产生的热量可

以满足自身的需要,如果不能满足,系统需要从热力公司购买一定量的热量,冷功率平衡主要指系统对冷的需求不能超过CCHP等系统产生的冷气量;

[0124] 区域综合能源系统内的能量平衡约束如下

[0125] (1) 电负荷平衡约束

$$P_{e_grid}(t) + P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{CCHP}(t) + P_{dis}(t) = P_{load}(t) + P_{char}(t) + P_{EV}(t) \quad (50)$$

[0127] 式中 $P_{e_grid}(t)$ ——电网与综合能源系统之间的电量交换功率(kW); $P_{WT}(t)$ ——风力发电输出功率(kW); $P_{pv}(t)$ ——分布式光伏发电输出功率(kW); $P_{CCHP}(t)$ ——CCHP电输出功率(kW); $P_{dis}(t)$ ——电池的放电功率(kW); $P_{load}(t)$ ——系统内的总负荷(kW); $P_{pv}(t)$ ——分布式光伏发电输出功率(kW); $P_{EV}(t)$ ——电动汽车负荷;

[0128] (2) 热负荷平衡约束

$$H_{h_grid}(t) + H_{HP}(t) + H_{AC}(t) + H_{CCHP}(t) + H_{h_re}(t) = H_{load}(t) + H_{h_st}(t) \quad (51)$$

[0130] 式中 $H_{h_grid}(t)$ ——供热公司和综合能源系统之间的热交换功率(kW); $H_{HP}(t)$ ——热泵输出功率(kW); $H_{AC}(t)$ ——空调输出功率(kW); $H_{CCHP}(t)$ ——CCHP热输出功率(kW); $H_{h_re}(t)$ ——蓄热系统释放热量的功率(kW); $H_{load}(t)$ ——系统内的热负荷(kW); $H_{h_st}(t)$ ——蓄热系统储存热量的功率(kW);

[0131] (3) 冷负荷平衡约束

$$L_{HP}(t) + L_{AC}(t) + L_{CCHP}(t) + L_{l_re}(t) = L_{load}(t) + L_{l_st}(t) \quad (52)$$

[0133] 式中 $L_{CCHP}(t)$ ——热泵输出冷负荷的功率(kW); $L_{AC}(t)$ ——空调输出冷负荷的功率(kW); $L_{h_re}(t)$ ——蓄冷系统释放冷负荷的功率(kW); $L_{load}(t)$ ——系统内的冷负荷(kW); $L_{h_st}(t)$ ——蓄冷系统储存冷负荷的功率(kW);

[0134] (4) 天然气负荷平衡约束

$$P_{ng_grid}(t) + P_{ng_st}(t) = \frac{P_{CCHP}(t)}{\varpi_{CCHP_e}} + P_{ng_life}(t) \quad (53)$$

[0136] 式中 $P_{ng_grid}(t)$ ——天然气网向系统供应天然气的功率(kW); $P_{ng_st}(t)$ ——系统中储气系统释放的功率(kW); ϖ_{CCHP_e} ——燃气发电的发电效率(%); $P_{ng_life}(t)$ ——区域综合能源系统中的居民用气负荷(kW);

[0137] S22、能量平衡约束

[0138] 在区域综合能源系统中,考虑到系统和外部的交互关系以及系统与能源网的安全,系统与外部网络之间的能量交换功率必须保持在一定范围内:

$$P_{e_min} \leq |P_{e_grid}| \leq P_{e_max} \quad (54)$$

$$P_{g_min} \leq |P_{g_network}| \leq P_{g_max} \quad (55)$$

[0141] 式中 $P_{e_min}(t)$ ——电网与综合能源系统之间的最小电量交换功率(kW); $P_{e_max}(t)$ ——电网与综合能源系统之间的最大电量交换功率(kW); $P_{g_max}(t)$ ——天然气网向系统供应天然气的最大功率(kW); $P_{g_min}(t)$ ——天然气网向系统供应天然气的最小功率(kW);

[0142] S23、系统运行约束

[0143] 综合能源系统包含很多硬件设备,这些设备必须在运行过程中满足自己的运行约束条件;机组实时出力应在上、下限之间,同时机组功率的变化率受到爬坡率的限制;

[0144] (1) 能源供应设备的运行约束

$$[0145] \quad \begin{cases} P_{ese_min}(t)\theta(t) \leq P_{ese}(t) \leq P_{ese_max}(t)\theta(t) \\ \theta(t)=1 \text{ on}; \quad \theta(t)=0 \text{ off} \end{cases} \quad (56)$$

$$[0146] \quad P_{\Delta ese_min}(t)\theta(t) \leq \Delta P_{ese}(t) \leq P_{\Delta ese_max}(t)\theta(t) \quad (57)$$

[0147] 式中 $P_{ese_min}(t)$ ——设备的最小输出功率(kW); $P_{ese_max}(t)$ ——设备的最大输出功率(kW); $\theta(t)$ ——设备的运行状态; $\Delta P_{ese}(t)$ ——t时间内功率的变化量(kW); $P_{\Delta ese_min}(t)$ ——设备爬坡能力的下限(kW); $P_{\Delta ese_max}(t)$ ——设备爬坡能力的上限(kW);

[0148] (2) 能量储存系统运行约束

[0149] 1) 电能储能

$$[0150] \quad SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (58)$$

$$[0151] \quad \begin{cases} 0 \leq P_{char}(t) \leq P_{char_max} \varpi_{BA_s} \\ 0 \leq P_{dis}(t) \leq P_{dis_max} \varpi_{BA_r} \\ \varpi_{BA_s} + \varpi_{BA_r} \leq 1 \end{cases} \quad (59)$$

$$[0152] \quad \begin{cases} P_{char_max} = \min \left\{ I_{char}^{max} V_{bat}, \frac{[SOC_{max} - SOC(t)] Q_{max}}{\gamma_{char} \Delta t}, P_{inv} \right\} \\ P_{dis_max} = \min \left\{ I_{dis}^{max} V_{bat}, \frac{[SOC_{max} - SOC(t)] Q_{max} \gamma_{dis}}{\Delta t}, P_{inv} \right\} \end{cases} \quad (60)$$

$$[0153] \quad SOC_{start}(t) = SOC_{end}(t) \quad (61)$$

[0154] 式中 SOC_{min} ——电储能荷电状态的最小值; SOC_{max} ——电储能荷电状态的最大值; ϖ_{BA_s} ——电池充电的效率; ϖ_{BA_r} ——电池放电的效率; I_{char}^{max} ——电池允许的最大充电电流(A); I_{dis}^{max} ——电池允许的最大放电电流(A); $SOC_{start}(t)$ ——储能系统调度周期开始时间的电池剩余容量; $SOC_{end}(t)$ ——储能系统调度周期结束时间的电池剩余容量;

[0155] 2) 热能储能

$$[0156] \quad H_{h_st_min} \leq H_{hst}(t) \leq H_{h_st_max} \quad (62)$$

$$[0157] \quad \begin{cases} 0 \leq H_{h_st}(t) \leq H_{h_st_max} \varpi_{h_st} \\ 0 \leq H_{h_re}(t) \leq H_{h_re_max} \varpi_{h_re} \\ \varpi_{h_st} + \varpi_{h_re} \leq 1 \end{cases} \quad (63)$$

$$[0158] \quad H_{h_st_start}(t) = H_{h_st_end}(t) \quad (64)$$

[0159] 式中 $H_{h_st_min}$ ——热储能荷电状态的最小值; $H_{h_st_max}$ ——热储能荷电状态的最大值; ϖ_{h_st} ——热能储存的效率; ϖ_{h_re} ——热能释放的效率; $H_{h_st_start}(t)$ ——储热系统调度周期开始时间的电池剩余容量; $H_{h_st_end}(t)$ ——储热系统调度周期结束时间的电池剩余容量;

[0160] S3、对优化控制模型进行求解

[0161] 根据RIES的运行策略,采用NSGA-II算法求解模型;在计算过程中通过NSGA-II算法获得优化的Pareto解集,并使用模糊隶属函数从最优解集中选择最优解;决策者对这一

目标优化的满意度体现在隶属度的大小上,并且通过合成每个目标函数的模糊隶属度来获得最优解;

[0162] 首先,通过等式 (24) 计算帕累托解集中目标函数的隶属度;

$$[0163] \quad u_i^k = \begin{cases} 1, & F_i = F_i^{\min} \\ \frac{F_i^{\max} - F_i}{F_i^{\max} - F_i^{\min}}, & F_i^{\min} \leq F_i \leq F_i^{\max} \\ 0 & F_i = F_i^{\max} \end{cases} \quad (65)$$

[0164] 式中 F_i ——目标函数 i 的函数值; $F_i^{\min}$ ——目标函数的最小值; $F_i^{\max}$ ——目标函数的最大值;

[0165] 然后根据决策者的偏好设置权重值,并计算多目标函数的最优解的隶属权重值,最大值对应的Pareto解是最优解。

[0166] 进一步的,权重设置为相等权重,则计算公式如下:

$$[0167] \quad u^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obj}} D_i u_i^k}{\sum_{k=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_{obj}} D_i u_i^k} \quad (66)$$

[0168] 式中 N_p ——种群数; D_i ——目标函数的权重; N_{obj} ——目标函数的数量; u^k ——隶属函数值。

[0169] 实证分析

[0170] 区域综合能源系统作为一种高效的能源供应方式,其运行的经济性、环保性和安全性备受关注。本发明建立了兼顾市场以及经济性、环保性和安全性这三大技术要素的区域综合能源系统运行优化模型,旨实现区域综合能源系统的高效运行。根据建立的运行优化模型对系统进行运行优化,实现系统的最优运行状态。下面本发明人根据建立的模型,选取典型的区域综合能源园区进行仿真,以验证所建立模型的科学性和有效性。

[0171] 1、基础数据及模型参数

[0172] 本发明以某区域综合能源园区为研究对象,对其典型日的系统运行进行优化,调度周期为1h。该园区的配电网电压为10kV,现有的能源供应系统主要包括风电机组、光伏机组、CCHP系统和储能系统。表1为系统内各模块的容量配置情况。表2为能源供给单元的关键参数。图3为该系统冬日典型日的电力负荷、热负荷和NG负荷预测曲线。图4为园区内冬季典型日的可再生能源出力曲线。典型日NG价格和电价的预测值如图5所示。

[0173] 表1能源供应设备容量配置

	系统模块	数量	容量
[0174]	PV	2	2 MW
	WT	3	3 MW
	CCHP	2	5 MW
	EES	2	2.5 MW
	TES	2	3 MW

[0175] 表2能源供给单元关键参数

	参数	单位	数值
[0176]	CCHP 电效率	—	0.325
	CCHP 热效率	—	0.398
	EES 最大电功率	SOC	0.42
	EES 最大放电功率	SOC	0.24
	EES 充电/放电效率	—	0.96
	TES 最大输入功率	MW	1500
	TES 最大放热功率	MW	1500
	TES 充/放效率	—	0.85
	空调系统效率	—	0.90

[0177] 环境成本是综合能源系统运行中必须考虑的因素之一。表3为不同能源污染物排放量和环境成本参数。

[0178] 表3不同能源污染物排放量及环境成本参数

	污染物	SO ₂	NO _x	CO ₂	CO
[0179]	<u>排放物</u> 煤(kg/t)	18	8	1731	0.26
	NG(kg/10 ⁶ m ³)	11.6	0.0062	2.01	0
	环境价值(元/kg)	6.1308	26.00	0.0867	1.00
	惩罚成本(元/kg)	1.00	2.00	0.01	0.16

[0180] 2、RIES能量管理及优化控制策略

[0181] 根据典型日的可再生能源出力、电热气负荷需求曲线,将本发明提出的优化模型用于该区域综合能源系统的能量管理和优化控制。能量管理和优化控制仿真过程以典型日负荷(24h)和DG输出为基本数据,以1h的仿真时间步长,并根据系统的能源供给模式设定优

化控制策略,对该系统进行能量管理和优化控制仿真。图6为该RIES冷-热-电负荷供应模式示意图。

[0182] 下面基于建立的RIES运行优化模型进行仿真分析。仿真过程以基于负荷和能源价格的响应模型为基础,以运行成本最小化、污染物排放最小化和能源供应损失率最小化为优化目标。通过对两种不同的能源供应模式的仿真,制定了不同模式的调度策略。图7为设定的能量管理及优化控制策略仿真流程图。

[0183] 策略1:独立供热模式

[0184] 综合能源系统中的供热模块由CCHP、空调系统和热储能系统组成,系统不接受系统外部的热力供应,天然气价格固定为 $3.25\text{元}/\text{m}^3$;系统中的供电模块由CCHP、分布式发电、电能存储系统和电网组成。系统不向电网出售多余的电量,电价为使用时段对应的电价。

[0185] 策略2:联合供热模式

[0186] 综合能源系统中的供热模块由CCHP、城市供热网和热能储能系统组成,系统接受系统外部的供热,天然气价格为需求响应价格;系统中的供电模块由CCHP、分布式发电、电能存储系统和电网组成。系统可以将多余的电能出售给电网,电价是使用时段对应的电价。

[0187] 区域综合能源系统的能量管理和优化控制仿真过程如下:

[0188] 第一步:基础数据输入。电热气负荷数据、分布式光伏出力数据、分布式风电出力数据和能源价格(电价、热价、天然气价格)数据,环境排放系数,各设备的容量及其运行参数。

[0189] 第二步:基于NSGA-II的RIES优化控制仿真。根据前述部分建立的系统优化控制模型,以第二步得到的响应负荷曲线作为输入数据,通过NSGA-II算法进行不同供热模式下的运行优化仿真。仿真输出不同调度策略下的目标函数值以及系统中各单元的出力情况,实现系统的优化控制。

[0190] 第三步:能量管理及控制结果分析。对不同调度策略下的能量管理结果和运行优化结果进行对比分析,并对能源价格进行敏感性分析。

[0191] 3、不同优化策略仿真结果及分析

[0192] 针对上述2种能源供应模式,文采用NSGA-II算法求解优化问题。

[0193] 将该算法应用于综合能源系统多目标优化,初始种群大小设置为1000,迭代次数设置为100。为了研究NSGA-II的特性,下面采用NSGA-II对所建立的模型进行了计算。

[0194] 如图8所示,没有一个同时满足高减排率、低LESP和低系统成本要求的优化结果。在本发明提出的三个目标函数之间存在着矛盾的关系,使得同时获得最优解变得困难。一方面,如果需要降低系统的经济成本,则需要尽可能多的用光伏发电机组和风力发电机组取代化石能源机组。虽然这种策略可以提高减排率,但降低了系统的可靠性,因此在低成本、高减排率的情况下,系统可靠性较低。另一方面,为了提高系统的能源供应可靠性,应尽可能从外部能源网络中输入能量,这样可以显著增加系统成本和系统排放,因此不能同时实现高可靠性、低成本和高减排率。表4为系统三个目标函数的优化结果。

[0195] 表4不同能量供给模式下的目标函数值

[0196]

目标函数	运营成本/元	环境成本/元	LESP/%
模式 1	153005.6	82639.6	1.25
模式 2	137406	85502.8	1.36

[0197] 从上表可以看到,在不同的能源供应模式下,系统的成本构成有显著性差异。在模式1中,系统与外部之间没有热交换,系统电源供应只能满足自身电源的需求,没有电量销售收入。此外,该系统的热量来源于CCHP和空调,空调系统可以利用过量的绿色能源来产生热量,从而减少CCHP的污染排放。在模式2中,系统与外部之间存在能量交换,该系统在从系统外部购买热量的同时,将绿色电力出售给电网。在这种能量交换过程中,由于额外的收益,系统的运行成本相比模式1降低了。同时,由于系统外部能量网络的参与,系统的能量供应(LESP)的稳定性和可靠性得到了显著的提高。

[0198] 3.1、独立供热策略仿真结果及分析

[0199] 根据模式1设定的优化策略,得到系统的最优调度策略。图9为模式1下的系统电源模块的每个单元的输出功率。主要包括CCHP的电功率(CCHP-E)、电网的输入功率(Grid)、电储能的充放电功率(EES)和电储能荷电状态(EES-SOC)。

[0200] 图10为模式1下的系统热力供应模块的每个单元的输出。主要包括CCHP的热功率(CCHP-T)、空调输出功率(AC)、热储能的充放电功率(TES)和热能储存的充电状态(TES-SOC)。

[0201] 3.2、联合供热策略仿真结果及分析

[0202] 根据模式2设定的优化策略,得到系统的最优调度策略。图11为模式2下系统电源模块每个单元的输出。

[0203] 图12为模式2下的系统热供应模块的每个单元的输出。主要包括CCHP(CCHP-T)的热功率、热网(H-Grid)的输入功率、热储能(TES)的充放热功率和热能储存的状态(TES-SOC)。

[0204] 3.4敏感因素分析

[0205] 为了进一步分析参数变化对本文提出的模型的影响,本发明对能源价格进行了敏感性分析。本发明对不同能源价格变动对模型以及综合能源系统运行结果的影响进行研究,并选择了模式1和模式2的不同情景进行计算和分析。结果如图13和图14所示,能源价格变化率是每种能源价格变动值与基准价格之比,基准价格是本文所涉及的电价和天然气价格。

[0206] (一)电价敏感性分析

[0207] 需求响应之后,电价呈现出明显的时间特征。该系统可以根据负荷和电价,通过调节机组的出力和调节购电、售电来实现系统的经济运行。

[0208] 当电价变化时,系统运行成本变化较小,但环境成本变化更为明显。在模式1中,电价变动对环境成本的影响大于对运行成本的影响。电价的变化导致系统与电网之间的电能交换发生变化。该系统在减少购电量的同时,通过在高电价时期尽可能提高CCHP的运行效率,增加了受电利润,导致运行成本的变化较小,同时增加了系统的环境成本。与模式1相

比,模式2的运行成本对电价更敏感。系统中CCHP无法提供的热量由热力公司提供,系统可以出售多余的电力。当电价持续上涨时,系统在电价高峰时期向电网出售电力,获得一定的经济效益,但也增加了CCHP系统的污染物排放量。

[0209] (二)NG价格敏感性分析

[0210] 仿真结果表明,CCHP的运行成本占系统总运行成本的50%以上,同时CCHP也是系统中主要的污染源。天然气价格的上涨导致了CCHP运行成本的增加,同时也造成了严重的环境污染。

[0211] 从图14中可以看出,天然气价格变动对系统成本的影响大于电价变动对系统成本的影响。在我国,天然气价格一直保持在较高的水平,天然气市场条件对天然气价格的影响很大,导致天然气价格的小幅波动将对RIES的运行产生巨大的影响。在模式1中,当天然气价格从3.25元/m³下降10%时,系统环境成本急剧上升,运行成本也缓慢增长。天然气价格下跌后,CCHP响应天然气价格的变化,为系统提供更多的热量,最终导致环境成本急剧上升。这样就降低了供热系统的用电需求,降低了从电网购电的成本。与模式1相比,模式2呈现出不同的变化趋势。当天然气价格上涨时,系统主动地降低了CCHP的运行效率,在天然气价格高峰期节省了燃料成本,从而减少了污染物的排放,同时也增加了从热力公司购买的热量。这使得当天然气价格上涨5%~10%时,系统运行成本增加超过25%。

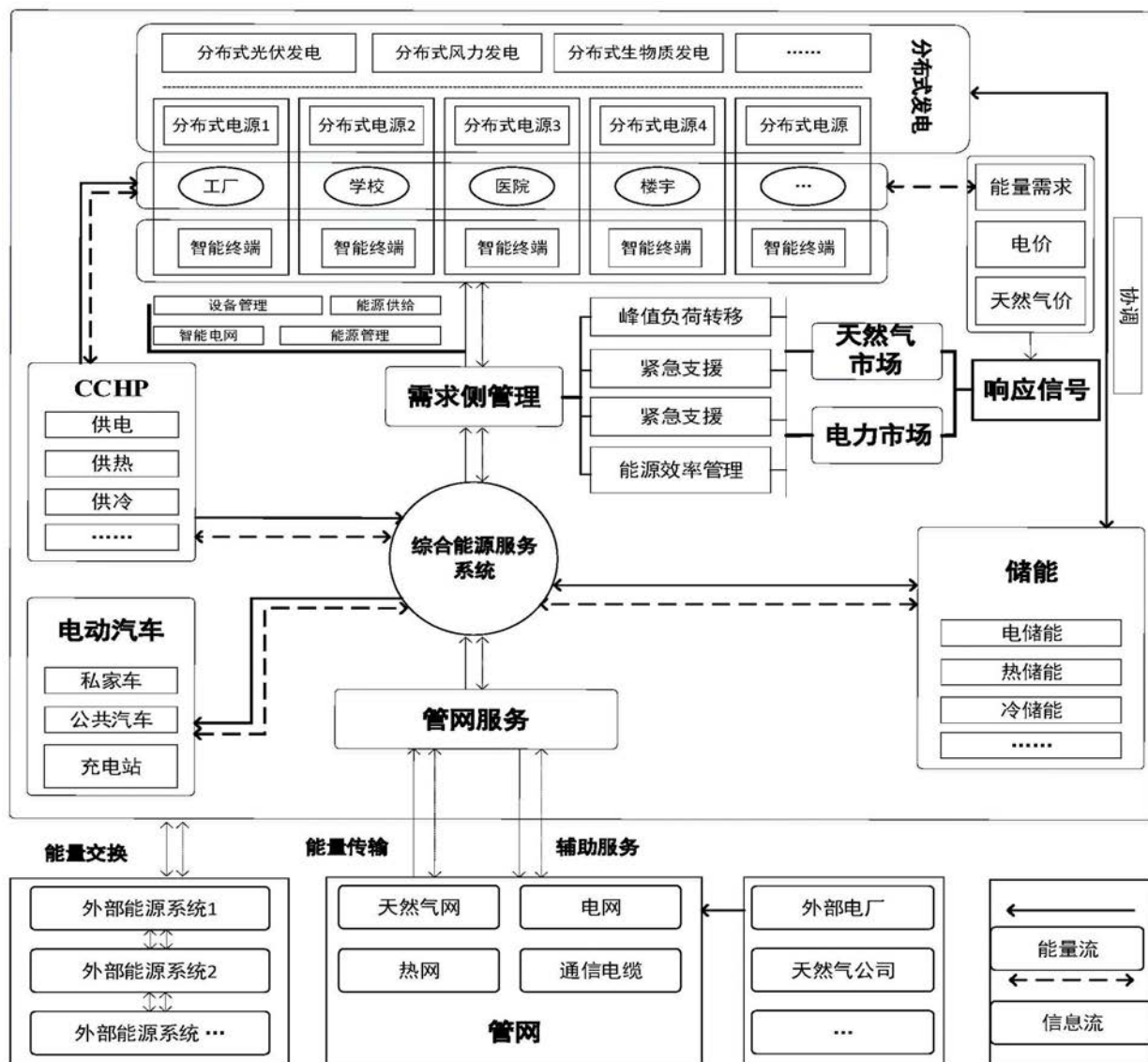


图1

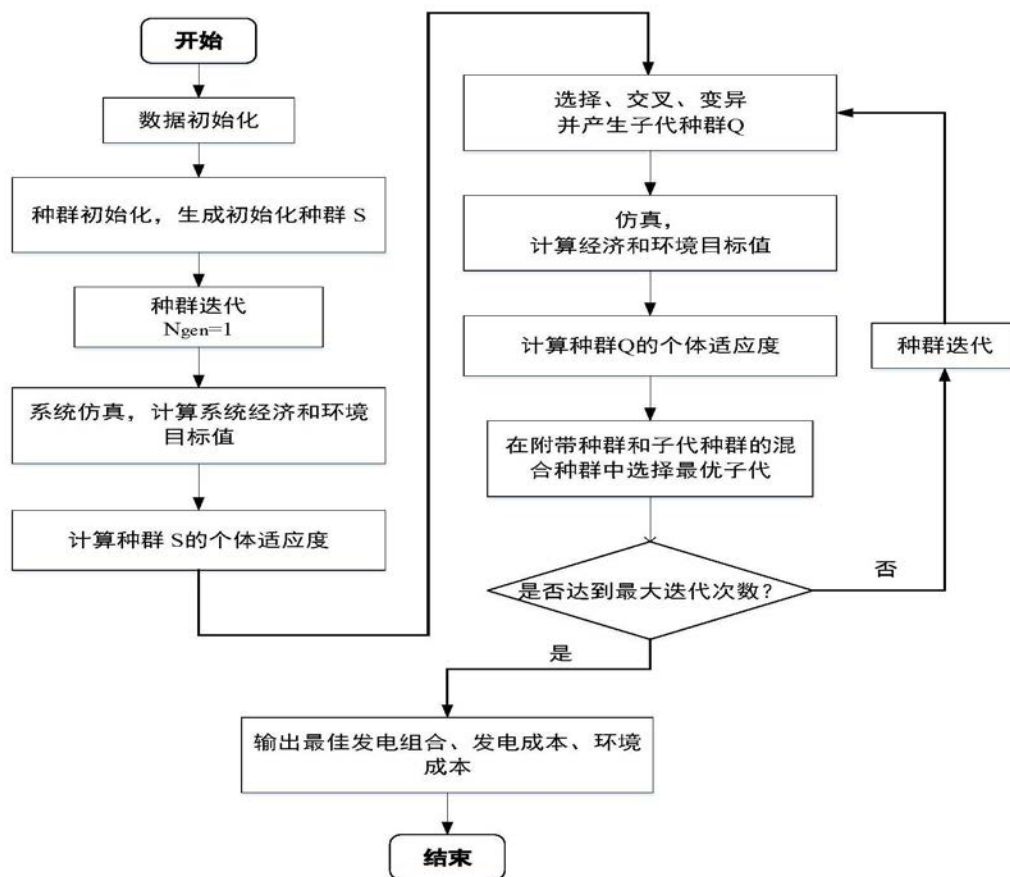


图2

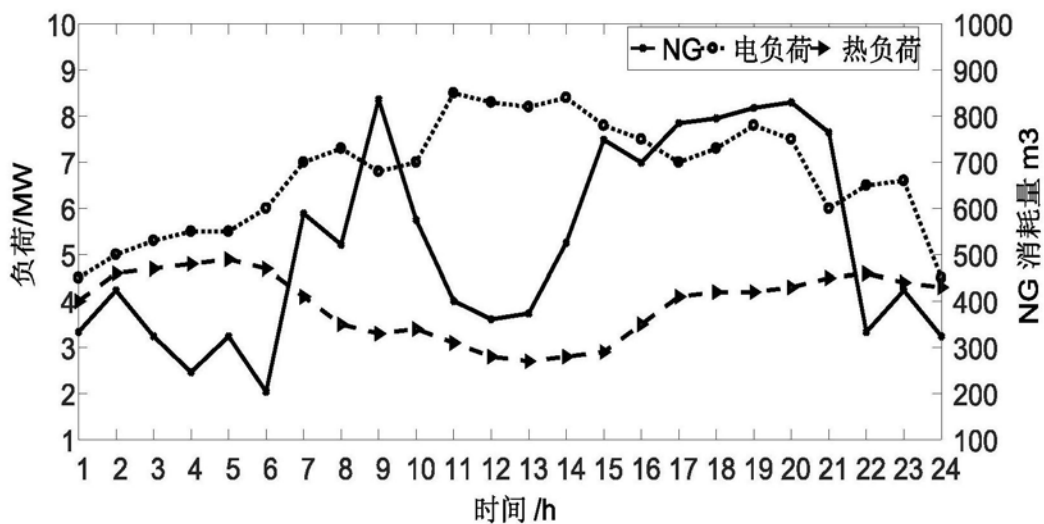


图3

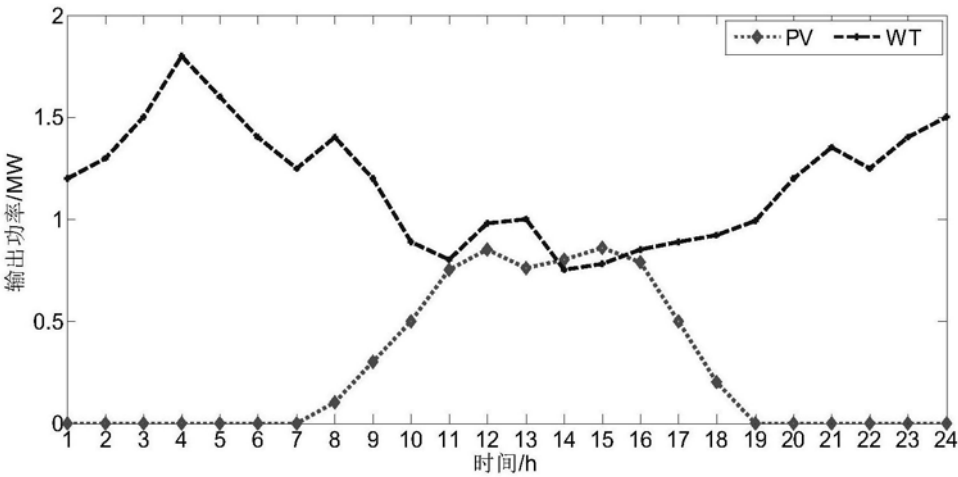


图4

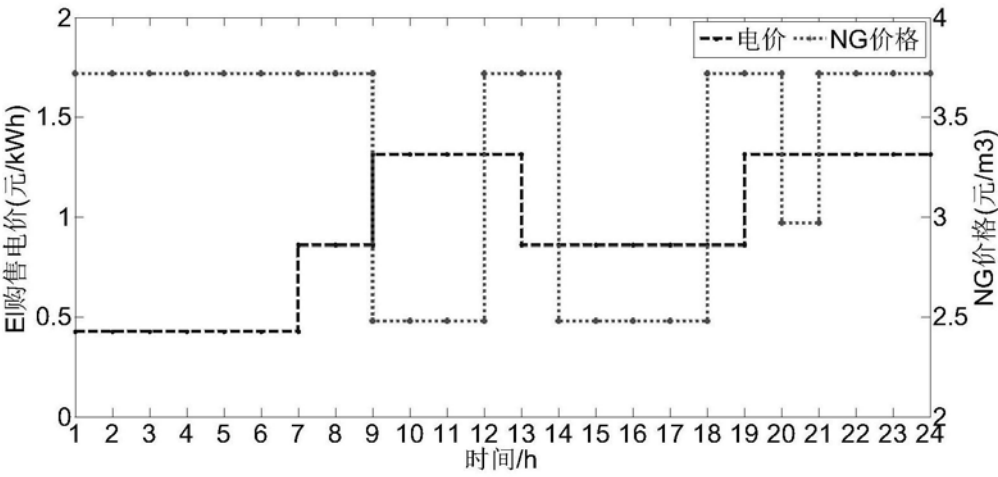


图5

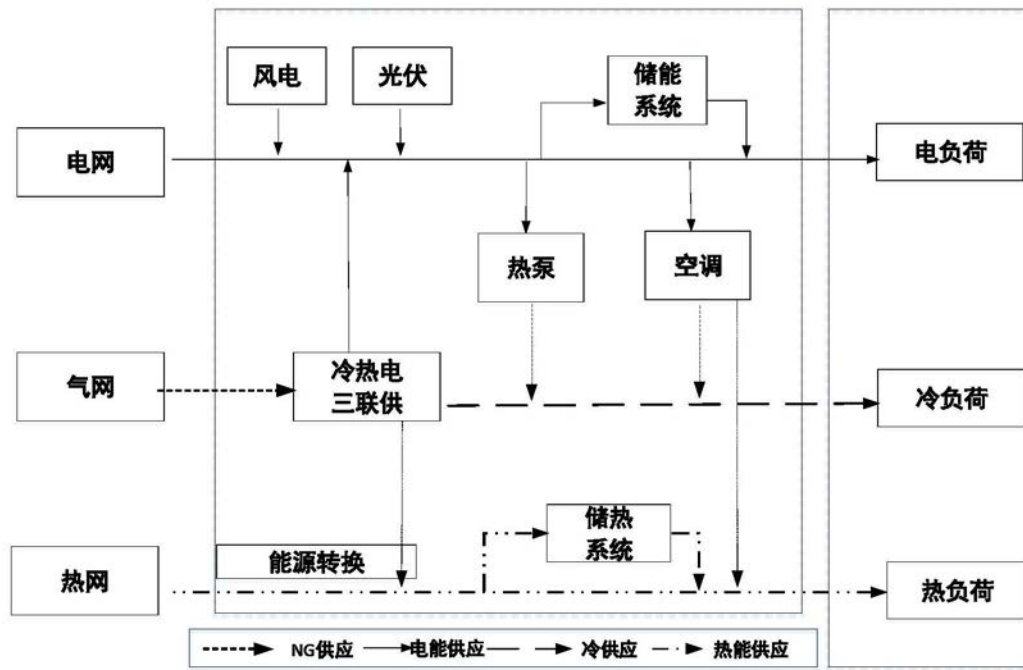


图6

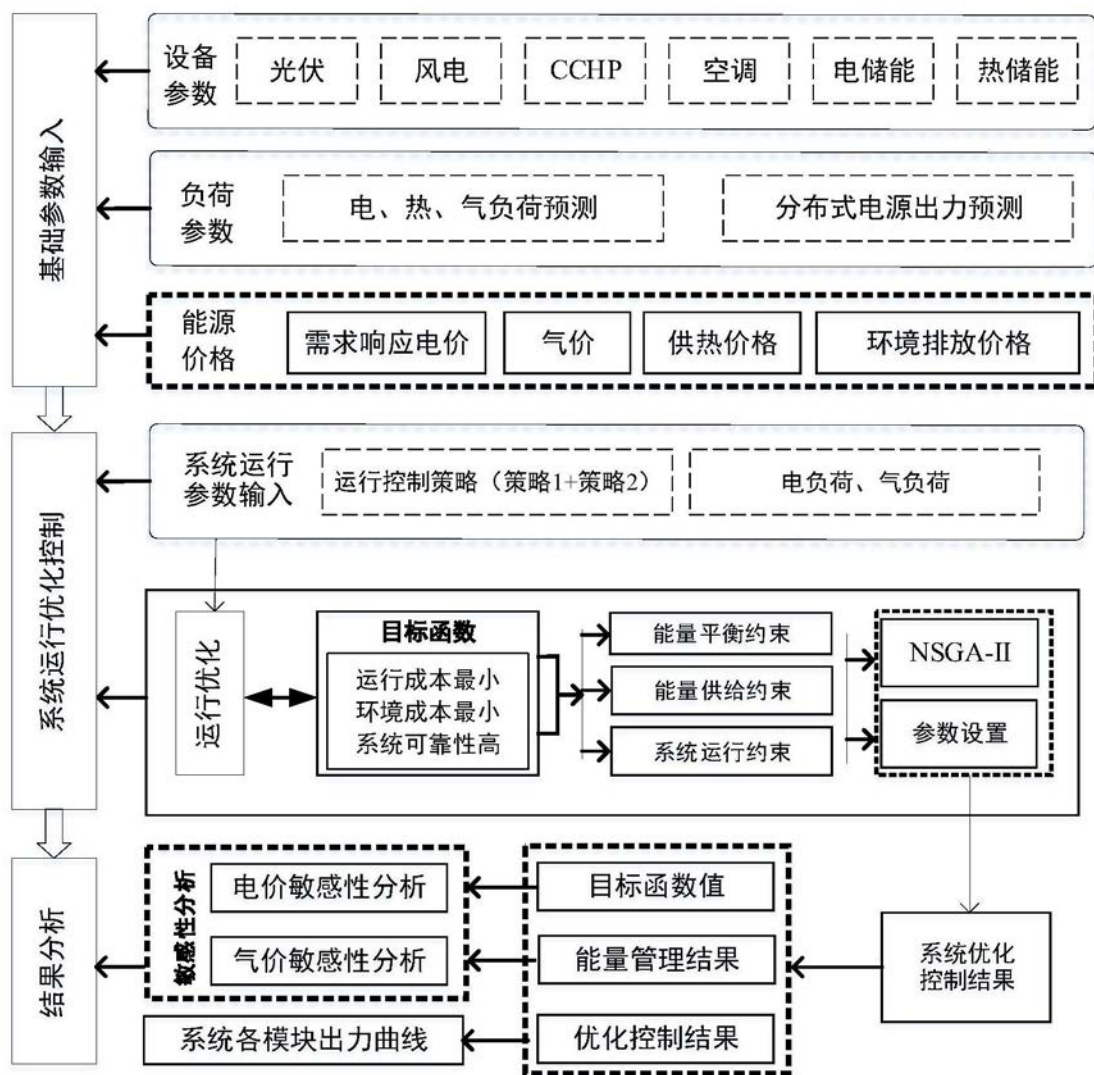


图7

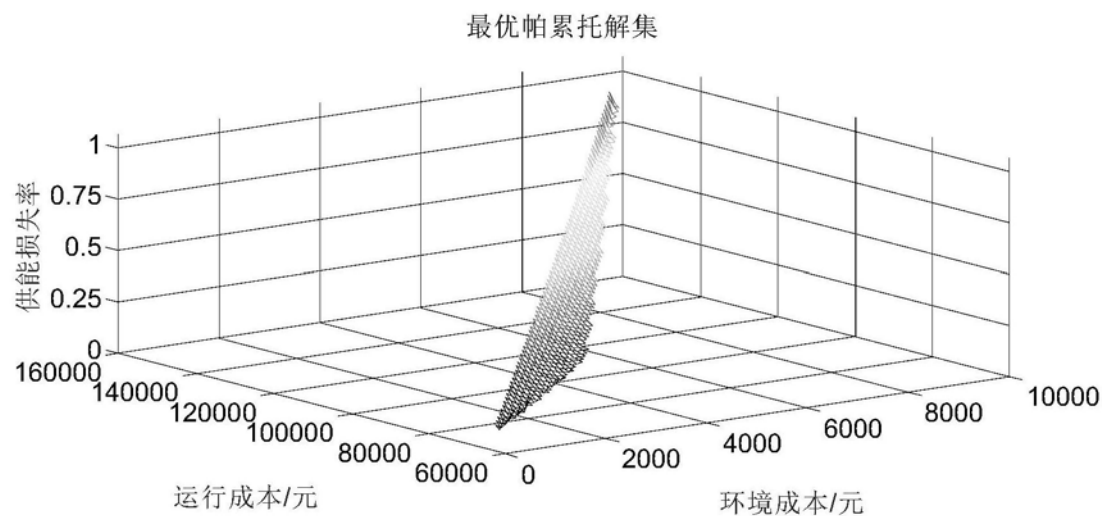


图8

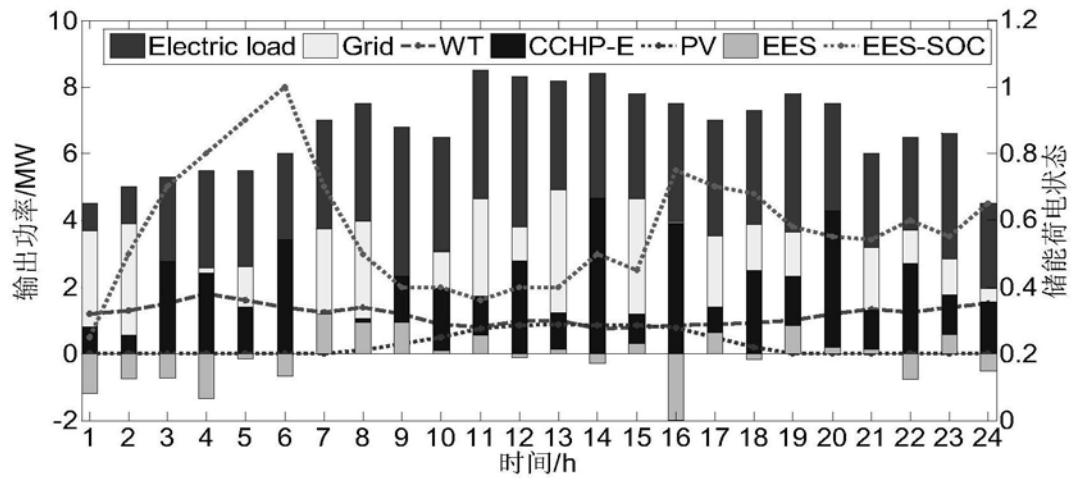


图9

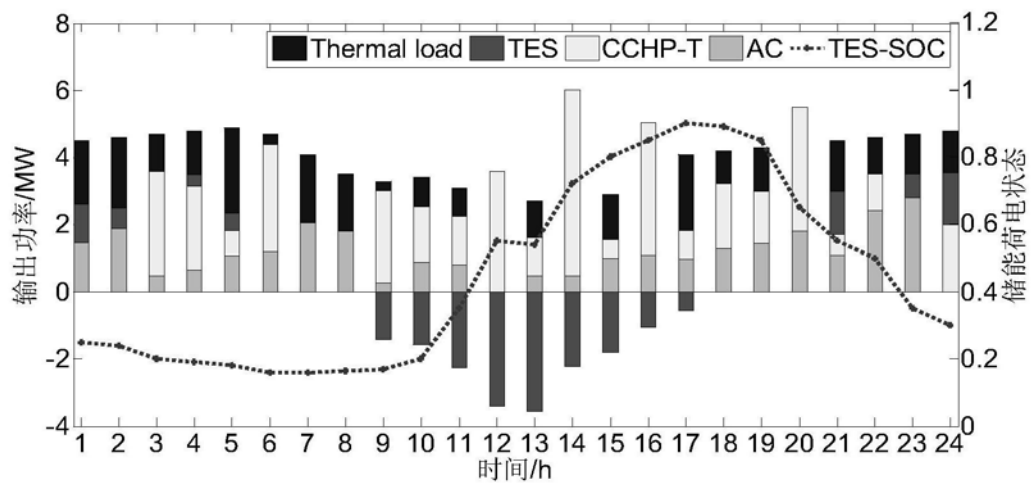


图10

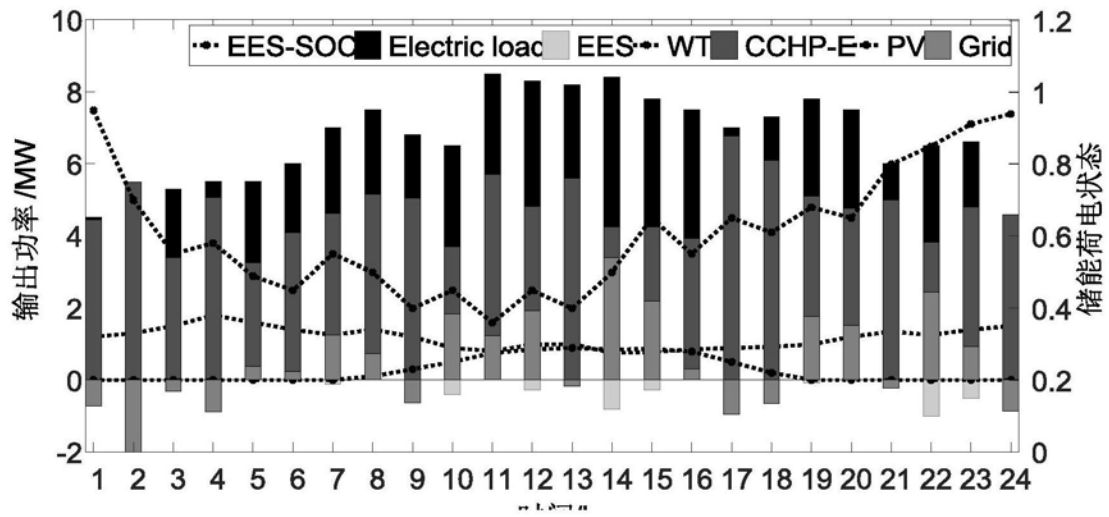


图11

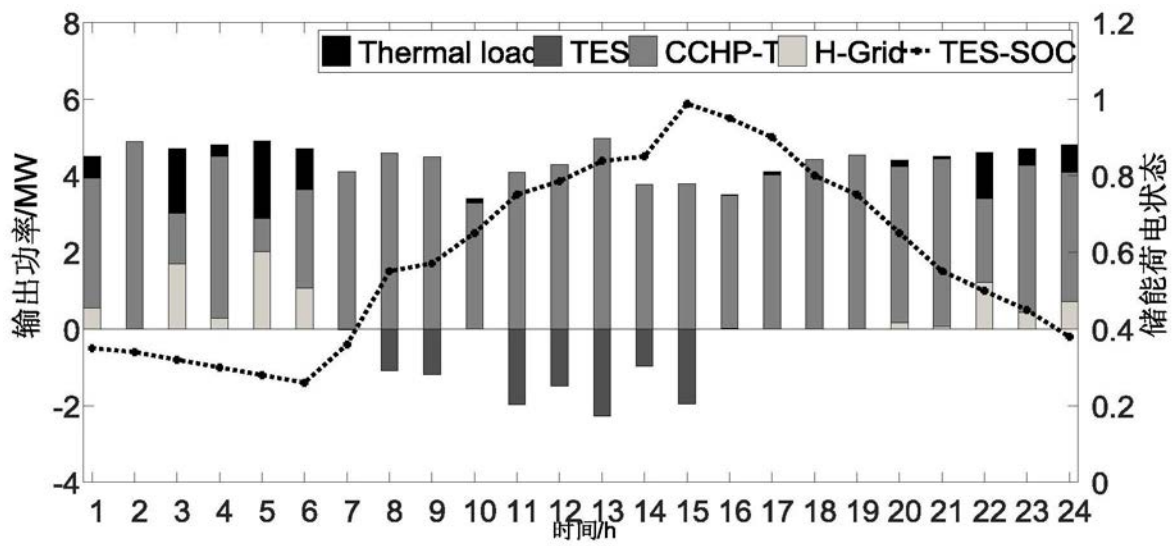


图12

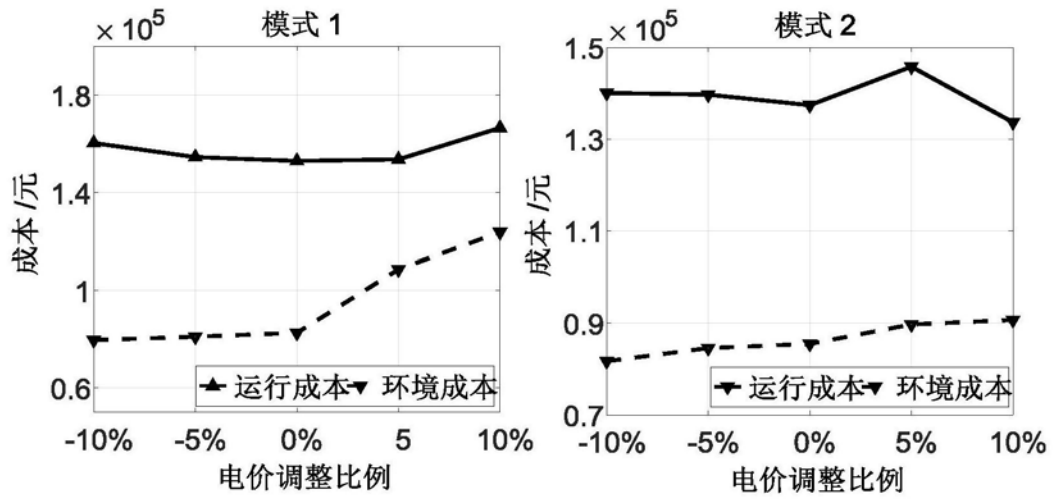


图13

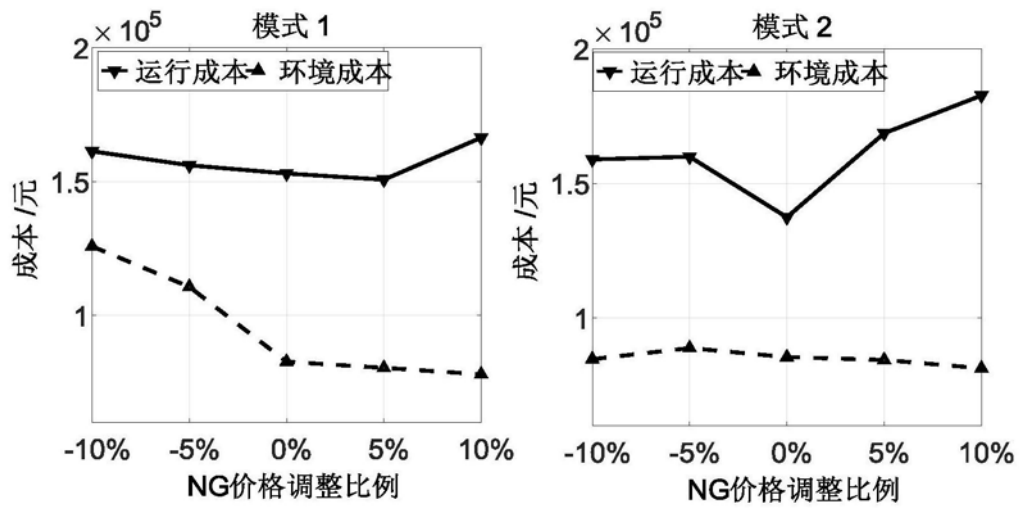


图14