

工业园区综合能源系统的运营模式综合评估方法

盛超群¹, 刘念¹, 周长城²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663)

Comprehensive evaluation method for the operation mode of integrated energy system in industrial park

SHENG Chaoqun¹, LIU Nian¹, ZHOU Changcheng²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

摘要:随着电力市场的改革及能源互联网技术的发展,具有清洁高效、能源利用率高等优点的综合能源系统受到高度重视。以多种能源形式的工业园区综合能源系统为研究对象,提出了包含经济、政策等因素的评价指标体系并建立了运营模式评估的层次结构模型。根据综合权重选择出最优的运营模式。最后,以综合能源系统实际工程为例,分析了运营模式的综合评估过程,为工业园区综合能源系统的发展提供了运营模式参考。

关键词:运营模式;综合能源系统;工业园区;综合评估

Abstract: With the reform of the electricity market and the development of energy Internet technology, integrated energy system (IES) has been attracted important attention, and has the advantages of cleanness, high efficiency and high utilization rate of energy. Taking IES with multiple energy forms of industrial park as a study object, three alternative operation modes are proposed. Moreover, the influencing factors are analyzed, and the evaluation index system including economic, policy factors of user is proposed. The hierarchical structure model evaluation is established, and the optimal operation mode is selected according to the comprehensive weight through the analysis of the influence factors. Finally, taking the practical project of integrated energy system as an example, the comprehensive evaluation process of the operation mode is analyzed, which provides a reference for the development of IES in the industrial park.

Key words: operation mode; integrated energy system; industrial park; comprehensive evaluation

中图分类号:TK018;TM715 文献标志码:A

0 引言

随着环境及能源问题日益严峻,我国构建清洁低碳现代能源体系的过程中迫切需提高能源综合利用效率^[1-2]。综合能源系统(integrated energy system, IES)可同时提供电、热等多种能源,提高可再生能源消纳率和系统的能源利用率,因而受到广泛关注。近年来,我国出台的多个文件均有利于综合能源配用电系统的发展^[3]。

目前国内外学者对综合能源系统的研究已取得了一定成果,尤其是在综合能源系统建模与多能流计算^[4-5]、优化调度^[6]等方面。例如,文献^[7]提出

了一种适用于含电、热、气的IES扩展Newton-Raphson多能流计算方法。文献^[8]考虑多能源在价格、用能、需求特性上的差异性和冷热电联产(combined cooling, heating and power, CCHP)机组的出力特性等,建立了基于多能互补的广义需求响应互动优化模型。但上述文献未研究IES的运营模式。

工业园区是以工业负荷为主的复杂能源系统,其能源需求包含电、热等多种形式能源。本文以国内普遍建设的工业园区为对象,研究其运营模式,以便实现工业园区内可再生能源的就地消纳利用。本文的贡献如下:①综合考虑电力、热能相关设施的投资、运营,提出了针对工业园区IES的3种运营模式备选方案;②提出了包含经济性等4个一级指标及全生命周期投资成本等11个二级指标的综合评价指标体系;③建立了运营模式评估的层次结构模型,并对各影响因素进行分析,最后根据综

收稿日期:2019-05-06;修回日期:2019-05-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51877076);南方电网公司科技项目(ZBKJXM20180209)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877076); Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. ZBKJXM20180209)

合权重选择出最优的运营模式。

1 工业园区综合能源系统成本和收益计算

1.1 售电收益

工业园区内电量来源有分布式光伏发电、CCHP发电、储能放电以及向外部电网购电4部分,这些电力由运营商统一购入,再按照分时电价出售给园区用户,满足用户需求。园区内电功率平衡关系为

$$P_{el}(t) = P_{pv}(t) - P_i(t) + P_e(t) + P_d(t) + P_{Ce}(t) \quad (1)$$

式中: $P_{el}(t)$ 、 $P_{pv}(t)$ 、 $P_i(t)$ 、 $P_e(t)$ 、 $P_d(t)$ 、 $P_{Ce}(t)$ 分别为用户负荷功率、光伏出力、工业园区上网功率、工业园区向电网购入电能功率、储能放电功率及CCHP的发电功率;储能放电时 $P_d(t)$ 为正,充电时为负,各功率为当前调度周期的平均功率。

工业园区运营商购入电能后,将其出售给园区用户,获得年售电收益 $S_{sell,e}$ 为

$$S_{sell,e} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (P_{el}(t) e_d \Delta t) R_i \quad (2)$$

式中: e_d 为从大电网的购电电价; T 为典型日时长;将每年分为 N 种典型场景,每种场景对应的相似日天数为 $R_i (i=1, 2, \dots, N)$; Δt 为一个调度周期,即1h。

1.2 CCHP发电收益

工业园区中CCHP机组发电出售给园区运营商的年发电收益 $S_{sell,ce}$ 为

$$S_{sell,ce} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (P_{Ce}(t) e_f \Delta t) R_i \quad (3)$$

式中: e_f 为CCHP发电上网电价。

1.3 供热/冷收益

工业园区年供热/冷收益 $S_{sell,hc}$ 为

$$S_{sell,hc} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (h_d P_h(t) + c_d P_c(t)) \Delta t R_i \quad (4)$$

式中: h_d 、 c_d 分别为供热价格、供冷价格; $P_h(t)$ 、 $P_c(t)$ 分别为用户供热、供冷功率。

1.4 光伏发电收益

(1) 当 $P_{pv}(t) \leq P_{el}(t)$ 时,光伏发电收益包含直供电能收益和补贴收益,如公式(5)所示,其中直供电能收益是运营商向用户提供光伏电力获得的电能收益。运营商与用户签订合同中的售电价格是在用户所在地区工业电价的基础上,考虑租赁用户屋顶而对电价进行一定程度的折扣^[9]。

$$S_{sol}^{(1)} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{T_{2,i}} (P_{pv}(t) e_d \alpha + P_{pv}(t) e_s) \Delta t R_i \quad (5)$$

式中: α 为直供电价折扣; e_s 为光伏补贴电价; $T_{2,i}$ 为第 i 个典型日中光伏发电功率小于用户负荷功率的小时数。

(2) 当 $P_{pv}(t) > P_{el}(t)$ 时,光伏发电收益包含直供电能收益、上网电能收益和补贴收益等。

$$S_{sol}^{(2)} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{T_{2,i}} ((P_{pv}(t) - P_i(t)) e_d \alpha + P_i(t) e_e + P_{pv}(t) e_s) \Delta t R_i \quad (6)$$

式中: e_e 为光伏上网电价; $T_{2,i}$ 为第 i 个典型日中分布式光伏发电功率大于用户负荷功率的小时数。

综上,光伏发电年收益为

$$S_{sol} = S_{sol}^{(1)} + S_{sol}^{(2)} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{T_{2,i}} (P_{pv}(t) e_d \alpha + P_{pv}(t) e_s) \Delta t R_i + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{T_{2,i}} ((P_{pv}(t) - P_i(t)) e_d \alpha + P_i(t) e_e + P_{pv}(t) e_s) \Delta t R_i \quad (7)$$

1.5 储能削峰填谷收益

当 $P_d(t) \geq 0$ 时,储能运营商分时段收益 S_c 为

$$S_c = \sum_{t=1}^{T_1} P_d(t) P_{r1} \beta \Delta t \quad (8)$$

式中: T_1 为典型日放电时长; P_{r1} 为 T_1 时间段内从大电网购电的电价,为高峰或平段电价; β 为储能运营商向用户供电的每度电折扣^[10]。

当 $P_d(t) < 0$ 时,储能运营商分时段向电网公司购电费用 S_s 为

$$S_s = \sum_{t=1}^{T_2} P_d(t) P_{r2} \Delta t \quad (9)$$

式中: T_2 为典型日充电时长; P_{r2} 为 T_2 时间段内从大电网购电的电价,为谷时电价。

储能运营商的年收益 S_b 为

$$S_b = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{t=1}^{T_1} P_d(t) P_{r1} \beta - \sum_{t=1}^{T_2} P_d(t) P_{r2} \right) \Delta t R_i \quad (10)$$

1.6 互动响应收益

从园区运营商的角度,其响应电网的削峰要求,可获取直接的经济补偿。定义互动响应收益为

$$S_{IR} = P_{pc} e_{pc} - P_{dc} C_{dc} - P_{IR} C_{IR} \quad (11)$$

式中: S_{IR} 为互动响应收益; P_{pc} 为电网削峰容量; e_{pc} 为互动响应补偿单价; P_{dc} 为直控资源; C_{dc} 为直控资源单位成本; P_{IR} 为园区互动资源; C_{IR} 为互动资源单位成本。

1.7 分布式光伏发电投资成本

光伏发电系统投资费用 C_g 为

$$C_g = Q_w C_w \quad (12)$$

式中: C_w 为光伏发电系统的装机容量; Q_w 为光伏发电系统单位容量成本。

1.8 CCHP投资及运行成本

(1) CCHP机组的投资费用 C_{GT} 为

$$C_{GT} = C_{GT,n} P_{GT,n} \quad (13)$$

式中: $P_{GT,n}$ 为CCHP机组的额定发电功率; $C_{GT,n}$ 为CCHP的单位发电容量成本。

(2) CCHP运行成本

CCHP燃料费用 C_T 与机组的出力关系为

$$C_T = C_{CH4} \cdot \frac{3.6W + Q_1 + Q_2}{v \cdot Q_L} \quad (14)$$

式中: C_{CH4} 为天然气单价; W 为CCHP年净输出电量, kWh; Q_1 为年有效余热供热总量, MJ; Q_2 为年有效余热供冷总量, MJ; v 为CCHP年平均能源综合利用效率; Q_L 为燃气低位发热量, MJ/m³。

1.9 分布式储能投资成本

储能投资成本 C_{bess} 为

$$C_{bess} = Q_s \delta_s C_s R_E \quad (15)$$

式中: Q_s 为电池容量; C_s 为电池单位容量成本; δ_s 为电池单位电量成本系数; R_E 为储能电池更换次数。

1.10 从外部电网购电成本

当工业园区中电能不足时,需从外部电网购电,购电成本 C_{grid} 为

$$C_{grid} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (P_e(t) e_e \Delta t) R_i \quad (16)$$

式中: $P_e(t)$ 为工业园区运营商向电网购入电功率。

1.11 从运行维护及折旧费用等成本

工业园区运行维护成本及折旧费用成本 C_{mc} 为

$$C_{mc} = C_1 R_2 \quad (17)$$

式中: C_{mc} 为运营维护成本; C_1 为系统投资的总成本; R_2 为维护费用所占比例。

2 工业园区综合能源系统运营模式

结合当前电力体制内容及改革趋势,本文提出了3种典型运营模式的备选方案。

2.1 运营模式1:电网公司投资+电网公司运营模式

该运营模式中,只存在单一的投资方和单一的运营商,投资方和运营商均为电网公司。

投资主体:电网公司承担全部投资。

运营主体:整个园区由电网公司统一调度和管理;电网公司同CCHP运营商签订调度协议,同园区内工业大用户签订互动响应协议;园区内冷、热、电等能源由电网公司统一购入、结算等。

2.2 运营模式2:多方投资+多方运营模式

该运营模式中,按照“谁投资、谁运营”的基本原则,存在多个投资方和多个运营商。

投资主体:电网公司承担光伏发电、储能等一次投资和二次投资;CCHP运营商承担冷热管网改造的投资费用。

运营主体:电网公司同CCHP运营商签订调度协议,同园区内工业大用户签订互动响应协议;园区内电能统一由电网公司购入、结算等;冷、热等能源由CCHP运营商直接与用户售出、结算等。

2.3 运营模式3:合资公司投资+合资公司运营模式

该运营模式中,电网公司、CCHP运营商、园区管委会等共同出资组建合资公司,该合资公司作为第三方的综合能源服务商运营整个园区;合资方式可采用资产入股、现金入股的方式确定公司股权结构,收益分配则按照各方股权比例进行分红。

投资主体:合资公司承担光伏发电、储能等一次投资和园区综合能量管理系统等二次投资。

运营主体:第三方运营商具有调度和管理园区内CCHP和配电网的权利,可以同园区内工业大用户签订互动响应协议;园区内冷、热、电等能源统一由第三方运营商购入、结算等;同时第三方运营商负责与电网公司在园区电网与上级电网之间的关口处进行电量购入、结算等。

3 运营模式综合评价分析

层次分析法^[11]是采用一定的标度把人的主观判断进行客观量化的方法,可将定性问题转化为定量分析。

3.1 模式建立层次结构模型

3.1.1 模型目标层

运营模式的目标为综合运营效用最大化。

3.1.2 模型指标层

根据追求目标、评价指标选择原则和决策方案,采用一级指标及其相应的二级子指标来选择最优的运营模式。

3.1.3 层次结构分析模型

根据层次分析法基本原则,建立综合效用评估运营方案的层次分析结构模型,如图1。

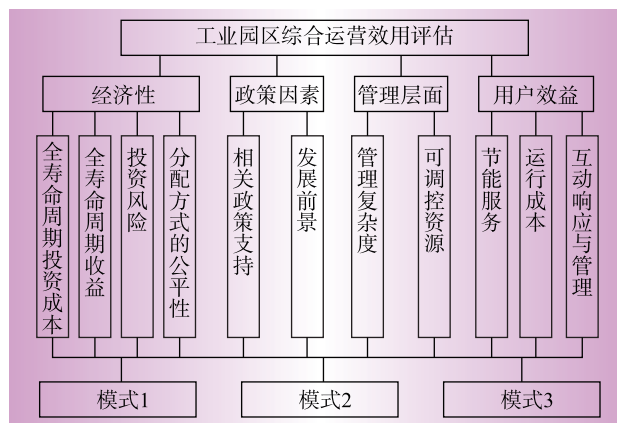


图1 综合效用评估的层次分析模型

Fig. 1 The hierarchical analysis model of comprehensive utility evaluation

3.2 各影响因素

3.2.1 经济性

经济性是工业园区综合效用评估的重要方面,需综合考虑全生命周期投资成本等指标。

3.2.2 政策因素

电改“9号文”明确提出,要“稳步推进售电侧改革,有序向社会资本放开配售电业务”,培育多元化售电主体,完善电力价格的传导机制,使市场在资源配置中发挥决定性作用。

3.2.3 管理层面

管理层面主要从管理复杂度与可调控资源方面考虑。管理复杂度指运营主体在运营工业园区中投入的人力等情况;可调控资源是指可以调控管理的资源情况,如发电公司资源等。

3.2.4 用户效益

用户效益指不同运营模式下用户可获得的好处,需要考虑用户参与节能活动带来的效益、用户的用能成本、管理用户需求的成本。

3.3 运营模式决策层次分析结构模型的综合评价

本节采用层次分析法对运营模式决策进行综合评价^[12],步骤如下:

(1) 首先将运营模式决策时需要考虑的11个评价二级子指标归纳为一个因素集 C ,令 $C=(D_1, D_2, \dots, D_{11})$ 。按照运营模式决策评价一级指标,可将11个决策评价二级子指标划分为4类,即包含4个子因素集 $C_1=(D_1, D_2, D_3, D_4)$, $C_2=(D_5, D_6)$, $C_3=(D_7, D_8)$, $C_4=(D_9, D_{10}, D_{11})$ 。

(2) 计算各评价二级子指标对评价一级指标的权重。

对于 C_1 ,根据1—9标度原理,先建立第一个子因素集评价二级子指标元素 D_1, D_2, D_3, D_4 对于 C_1 的判断矩阵 A_1 。求得该矩阵的最大特征根 $\lambda_{1\max}$ 及其对应的标准特征向量 η_1 。接着,对该判断矩阵的最大特征根进行一致性检验

$$CI = \frac{\lambda_{1\max} - n}{n - 1} \quad (18)$$

根据矩阵阶数,查表得到其平均一致性指标 RI ,进而求解随机一致性比率 CR

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (19)$$

CR 值不同,对矩阵判断结果不同。

同理,求出各子因素集标准权重 η_2, η_3, η_4 。

(3) 建立各一级指标相对于模型目标的判断矩阵,求得该判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$,相应的标准特征向量 $s=(s_1, s_2, s_3, s_4)$,并对该判断矩阵的最大特征根进行一致性检验。

(4) 计算各二级子指标相对总目标的综合权值

$$w_0 = (\eta_1 s_1, \eta_2 s_2, \eta_3 s_3, \eta_4 s_4) \quad (20)$$

(5) 根据综合效用评估指标对运营模式决策最终方案的影响,基于1—9标度法,建立各级二级指标相对于决策方案的判断矩阵,得到各二级指标相对于运营模式方案的权重 $w_{31}, w_{32}, \dots, w_{311}$ 。

(6) 结合各二级指标相对于运营模式的权重及各二级子指标相对总目标的综合权值,进行合成权重计算,得到综合运营效用评估下的最佳运营模式。综合权重计算方法为

$$w = (w_{31}^T, w_{32}^T, \dots, w_{311}^T) w_0^T \quad (21)$$

权重越大的运营模式,其综合评估效果越好。

4 算例分析

4.1 基础数据

本文以广州明珠工业园区实际情况为例,园区以万力轮胎厂及鳌头能源供应站为核心,包括万力轮胎等多家相关的企业与学校。

4.2 综合评价分析结果

4.2.1 各影响因素分析

(1) 经济性

通过成本收益计算,模式3的年净收益值为8 421.21万元,模式1和模式2的年净收益为8 241.05万元。模式3的年净收益最大。

模式3中工业园区是由多方投资,降低了投资风险,增强了投资回报能力、持续运营能力。因此,模式3更有利于降低投资风险,模式2次之,模式1电网公司投资风险最大。

模式1中发电公司按协议冷/热/电价格获取收益分配,模式2中发电公司按上网电价获取电能收益,模式3采用资产入股、现金入股的方式确定公司股权结构,收益分配则按照各方股权比例进行分红。模式1中发电公司的冷、热、电等能源统一由电网公司购入,而电网公司作为中间运营商可能收取部分费用,因此模式1的协议冷/热/电价相对发电公司而言不够有利;模式2中发电公司多余的电能只能按上网电价上网;而模式3中各主体根据股权结构按比例进行分红。所以模式3的分配方式最为公平。

(2) 政策因素

模式3中成立了合资公司,在售电侧市场改革的过程中采用该方式具有显著的探索性和前瞻性,而模式1和模式2的运营方式较为传统。

(3) 管理层面

模式1中用户数量众多、管理复杂,需投入较多的人力物力,且短期来说运营效益有限。模式2中电网公司和发电公司共同运营,管理复杂度相对降低。模式3中电网公司、发电公司运营商及园区管委会共同投资工业园区,管理复杂度更低。

(4) 用户效益

模式3中合资公司有权限从供能侧对网内冷/热/电进行统一管理,可利用大数据分析用户用能习惯,利用智能化手段控制用户主要用能设备,从而为用户提供统一的用能管理和节能服务。而模式1

和模式2在整个示范园区进行一体化能量管理优化的过程中,难以权衡发电公司运营商和电网公司之间的利益,可能会造成产能过剩,不利于为用户提供节能服务。

4.2.2 综合评价分析

(1) 根据1—9标度原理,建立第一个子因素集评价二级子指标元素对于 C_1 的判断矩阵

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 7/3 & 7/5 \\ 1 & 1 & 7/3 & 7/5 \\ 3/7 & 3/7 & 1 & 3/5 \\ 5/7 & 5/7 & 5/3 & 1 \end{bmatrix}$$

该矩阵的最大特征根 $\lambda_{1\max}=4$,相应的标准特征向量 $\eta_1=(0.32, 0.32, 0.14, 0.23)$ 。计算得 $CR=0<0.10$,因此该矩阵具体满意的一致性。

同理求出各个子因素集的标准权重, $\eta_2=(0.58, 0.42)$, $\eta_3=(0.3, 0.7)$, $\eta_4=(0.3, 0.28, 0.42)$ 。

(2) 根据对各影响因素的比较分析,建立各一级指标相对于模型目标的判断矩阵

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 7/5 & 7/5 & 7/3 \\ 5/7 & 1 & 1 & 5/3 \\ 5/7 & 1 & 1 & 5/3 \\ 3/7 & 3/5 & 3/5 & 1 \end{bmatrix}$$

该判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}=4$,相应的标准特征向量 $s=(s_1, s_2, s_3, s_4)=(0.35, 0.25, 0.25, 0.15)$ 。计算得到 $CR=0<0.10$,因此该判断矩阵具有满意的一致性。

(3) 计算各二级子指标相对总目标的综合权值 $w_0=(\eta_1 s_1, \eta_2 s_2, \eta_3 s_3, \eta_4 s_4)=(0.112\ 0, 0.112\ 0, 0.049\ 0, 0.080\ 5, 0.145\ 0, 0.105\ 0, 0.075\ 0, 0.175\ 0, 0.030\ 0, 0.070\ 5, 0.049\ 5)$ 。

(4) 基于1—9标度法及对各影响因素比较分析,得到各二级指标相对于运营模式方案的权重,如表1所示。

表1 各二级指标相对于运营模式方案的权重
Tab. 1 The weight of each two-level index relative to the operation mode scheme

w	权重	w	权重
w_{31}	(0.33, 0.33, 0.33)	w_{37}	(0.23, 0.33, 0.43)
w_{32}	(0.33, 0.33, 0.33)	w_{38}	(0.33, 0.20, 0.47)
w_{33}	(0.20, 0.33, 0.47)	w_{39}	(0.30, 0.30, 0.39)
w_{34}	(0.29, 0.29, 0.41)	w_{310}	(0.29, 0.29, 0.41)
w_{35}	(0.27, 0.27, 0.45)	w_{311}	(0.33, 0.20, 0.47)
w_{36}	(0.29, 0.29, 0.41)		

(5) 结合各二级指标相对于运营模式的权重与各二级子指标相对总目标的综合权值,进行合成权重计算,得到3种运营模式的综合权重分别为:0.295, 0.280, 0.425。可见方案3的综合权重最大,综合评估效果最好,有利于协调各方利益,充分发挥多能互补在提高能源综合利用效率的作用,达到多主

体间共赢的效果,因此本文将方案3作为推荐方案。

5 结束语

本文针对工业园区综合能源系统,提出了运营模式的综合评估方法以及3种典型运营模式方案。本文建立的综合评估层次结构模型,通过比较分析各影响因素,得到综合权重并优选出最佳运营模式。算例分析表明,合资公司投资+合资公司运营模式的综合权重最大,综合评估效果最好,有利于协调各方利益,可为工业园区综合能源系统的发展提供运营模式参考。

参考文献:

- [1] 宋晓健,喻洁,张俊芳,等.面向能源互联网的电力-通信联合仿真平台设计[J].电力工程技术,2017,36(3):44-49.
SONG Xiaojian, YU Jie, ZHANG Junfang, et al. Design of power communication simulation platform for energy Internet[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3):44-49.
- [2] 文劲宇,方家琨.能源互联网中的关键设备与支撑技术[J].南方电网技术,2016,10(3):1-10.
WEN Jinyu, FANG Jiakun. Key facilities and supportive technologies in energy Internet[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3):1-10.
- [3] 宋健京,陈永华,杨冬梅,等.售电侧放开后新型售电市场运营机制研究[J].电力需求侧管理,2018,20(5):20-24.
SONG Jianjing, CHEN Yonghua, YANG Dongmei, et al. Research of new retail electricity market operation mechanism after the opening of retail electricity side[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(5):20-24.
- [4] 彭钰茗,曾方迪,李更丰.综合能源服务商参与多能源市场的决策建模研究[J].供用电,2018,35(11):27-33,42.
PENG Yuming, ZENG Fangdi, LI Gengfeng. Research on decision modeling of multi-energy players participating in multi-energy markets[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(11):27-33,42.
- [5] MASSRUR H R, NIKNAM T, FOTUHI-FIRUZABAD M. Investigation of carrier demand response uncertainty on energy flow of renewable-based integrated electricity-gas-heat systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018,14(11): 5 133 - 5 142.
- [6] 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.

(下转第22页)