第41卷 第2期 太 阳 能 学 报 Vol. 41, No. 2
2020年2月 ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA Feb., 2020

文章编号:0254-0096(2020)02-0339-08

基于区间数理论的园区分布式综合能源系统效益及影响因素分析

李 薇[1], 包 哲[1], 杨涵晟[1], 许 野[1], 郑 鑫[2]

(1. 华北电力大学环境科学与工程学院, 北京 102206; 2. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 南京 211000)

摘 要: 利用区间数理论从经济和环境2个方面,对某园区式分布式综合能源系统中包含的天然气冷热电三联供(CCHP)系统和光伏系统2个子系统及整个综合能源系统分别进行具体的效益分析和影响因素的敏感性分析。有效反映了分布式综合能源系统的经济优势和减排能力,以及在运行过程中由于市场和系统本身带来的不确定性因素对系统的影响程度。该研究在一定程度上减少了不确定性对系统运行的影响,为分布式能源系统和综合能源系统的建设与运行提供了经济和环境两方面的参考。

关键词: 分布式发电; 综合能源系统; 成本效益分析; 光伏发电系统; CCHP

中图分类号: TK01+9 **文献标志码**: A

0 引 言

中国能源发展战略中提到,中国的可再生能源发电比重到2050年将增长至85%以上,其中风力发电和光伏发电的占比达到63%。目前中国能源需求增长,环境污染日益加剧,使得经济发展与节能减排之间矛盾日益恶化,改善能源消费结构已是当务之急。以园区为代表的区域分布式能源系统,因其能够实现可再生能源就地消纳,且能源利用率高,排放和能耗低,运行过程安全可靠,产用能形式多样化等特点,已在诸多国家和地区作为一种成熟的技术得到广泛应用,并一直是各国政府和科研机构的重点研究对象。中国的分布式综合能源供应系统仍处在起步阶段,2016年中国分布式天然气发电系统的总装机容量约为1200万kW,低于全国总装机容量的2%;分布式光伏发电系统的总装机容量约为1032万kW。一批分布式能源项目工程投建在全国各大城市,如上海浦东国际机场能源中心燃气轮机热电联供项目、北京中关村软件园热电冷联产项目、上海黄埔区中心医院燃气轮机热电联供项目、广州大学城等[1-2]。国内外学者研究了分布式能源系统在电力系统中的作用以及在建设与运行过程中面临的问题与机遇[3-4];从分布式能源的能效、环境、经济、综合效益等多个角度开展量化评估[5-11];并对不同各类型园区式能源系统的成本效益进行经济分析[12-16]。

以往研究主要对分布式能源的建设和布局进行研究,或是对分布式能源运行过程中的经济、能效、环境效益等进行不同方案的对比研究,忽略了当前市场日益增长的不确定因素的表征和对系统的影响,然而区域能源系统往往十分复杂,存在着各种社会因素、环境因素、人为因素等等带来的与能源的生产、供应、转换、消费相关的诸多不确定性。例如能源价格的波动、能源需求量和负荷的变化、污染物排放水平等,造成这些不确定性的原因有人为的主观原因,也有系统自身存在的客观原因。因此对各种不确定性进行准确表征,降低不确定性对系统的影响,有利于决策者做出对系统最优的方案[17-19]。本文选取京津冀地区某商业园区分布式综合能源系统对园区分布式能源系统的负荷需求和效益进行系统分析。考虑到该能源系统中存在的不确定性参数和决策变量(如天然气价格、销售电价等)多为在一定区间范围内变化的,因此使用区间数理论对运行过程中市场和系统的不确定性进行直观准确表征,从一定程度上解决了不确定性对系统的影响。从而以更加全面的角度来研究分布式能源投建的效益,为今后分布式能源的投资建设和运行方案提供参考。

收稿日期: 2018-08-10

基金项目: 需求侧多能互补优化与供需互动技术北京市重点实验室开放基金(YDB51201901510); 中央高校基本科研业务费(2017MS050; 2017XS040)

通信作者: 许 野(1980—), 男, 博士、副教授、硕士生导师, 主要从事不确定性优化技术方面的研究。xuye@ncepu.edu.cn

1 区间数理论

当 $\tilde{x}=[x^-,x^+]$ 且 $x^-\leqslant x\leqslant x^+$ 时，称 $\tilde{x}$ 为区间数，式中 x^- 和 x^+ 为区间数的上下确界。当 $x^-=x^+$ 时，区间数 $\tilde{x}$ 为一个确定实数[20]。设任意2个正的闭区间数 $\alpha^{\pm}=[\alpha^-,\alpha^+]$ 和 $\beta^{\pm}=[\beta^-,\beta^+]$，则其运算法则如下：

$$\alpha^{\pm}+\beta^{\pm}=[\alpha^-+\beta^-,\alpha^++\beta^+] \tag{1}$$

$$\alpha^{\pm}-\beta^{\pm}=[\alpha^--\beta^+,\alpha^+-\beta^-] \tag{2}$$

$$\alpha^{\pm}\times\beta^{\pm}=[\alpha^-\times\beta^-,\alpha^+\times\beta^+] \tag{3}$$

$$\alpha^{\pm}/\beta^{\pm}=[\alpha^-/\beta^+,\alpha^+/\beta^-] \tag{4}$$

$$k\alpha^{\pm}=[k\alpha^-,k\alpha^+] \tag{5}$$

$$\frac{1}{\alpha^{\pm}}=\left[\frac{1}{\alpha^+},\frac{1}{\alpha^-}\right] \tag{6}$$

$$(\alpha^{\pm})^n=\begin{cases}[(\alpha^-)^n,(\alpha^+)^n], & n>0\\ [(\alpha^+)^n,(\alpha^-)^n], & n<0\end{cases} \tag{7}$$

2 分布式综合能源效益分析评价指标模型

通过经济效益和环境效益2个方面对园区分布式综合能源系统进行能效评估分析，其具体指标如下。

2.1 经济评价指标

对系统运行成本、收益进行计算，选取净现值、动态回收期和内部收益率3个指标对系统进行经济性分析，其计算公式如下：

1)净现值

$$N_{\mathrm{PV}}=\sum_{t=1}^{n}\frac{R_{\mathrm{I},t}-C_{\mathrm{O},t}}{(1+i_0)^{t+t_0}}-C_{\mathrm{v}} \tag{8}$$

式中，N_{PV}——净现值，万¥；i_0——行业的基准折现率；$C_{\mathrm{O},t}$——分布式能源系统年运行总成本，万¥；C_{v}——第一年初试投资成本，万¥。

2)动态投资回收期

$$T_{\mathrm{D}}=t_0+\frac{\lg A-\lg(A-P_{\mathrm{C}}I_0)}{\lg(1+i_0)} \tag{9}$$

$$A=\sum_{t=1}^{n}\frac{R_{\mathrm{I},t}-C_{\mathrm{O},t}}{(1+i_0)^t}\cdot\frac{i_0(1+i_0)^n}{(1+i_0)^n-1} \tag{10}$$

$$P_{\mathrm{C}}=C_{\mathrm{v}}(1+i_0)^{t_0} \tag{11}$$

式中，T_{D}——动态投资回收期，a；A——年收益，万¥；P_{C}——系统初始投资，万¥。

3)内部收益率

当系统的方案净现值为0时，其收益率表示为内部收益率，即：

$$\sum_{t=1}^{n}\frac{R_{\mathrm{I},t}-C_{\mathrm{O},t}}{(1+I_{\mathrm{RR}})^{t+t_0}}-C_{\mathrm{v}}=0 \tag{12}$$

式中，I_{RR}——内部收益率。

2.2 环境效益分析评价指标

对于分布式能源的环境效益分析选取能源利用效率、污染物排放强度和污染物及温室气体年减排率3个指标，对环境效益进行分析。

1)能源利用效率

能源利用效率是指能源系统的输出功 W 与一次能源消耗量 H 按一定系数得出的比值。不同的发电形式能源利用效率有较大差异。传统供能形式如燃煤燃气供电的能源转换效率在50%以下，冷热电三联供的能源转换效率为60%~90%。

2)污染物排放强度指标

t 污染物排放强度 U_t 是指单位发电量消耗的能源所产生对应 t 污染物排放量，单位g/kWh，计算公式为：

$$U_t=\frac{E_t}{W_{\mathrm{E}}} \tag{13}$$

式中，E_t——t 污染物的排放量，g；W_{E}——分布式能源系统的装机容量，kWh。

3)污染物及温室气体年减排量

通过对分布式能源系统的污染物排放强度与传统能源形式的对比，与发电量建立联系得到该系统的污染物以及温室气体的年减排量，该指标可直观量化反映分布式能源减排方面存在的优势[21]。

3 案例分析

3.1 案例背景介绍

以京津冀地区某商业园区的分布式综合能源为例，项目所处地域拥有丰富的太阳能和天然气资源，为光伏发电和冷热电三联产技术提供了良好的功能基础。该项目主要承担某商业园区及周边居民生活的冷、热负荷及电力负荷，所发电力热力等可全部在本地区消化，其能源形式采取天然气冷热电三联供(CCHP)与光伏发电相结合的区域综合能源系统。其中电力部分由三联供系统和光伏发电系统按比例提供。其系统的结构图如图1所示。

然而该分布式能源系统由于受到外界及自身的各种因素影响，存在诸多的不确定性，例如项目所处地的市场能源价格一直存在波动；园区对于冷、热、

电力的需求量会随季节、时段等因素而变化；污染物排放系数受系统污染物治理技术和设备影响，在区间范围内波动等等。这些因素的不确定性将导致对系统经济效益和环境效益的计算分析结果可靠性降低。因此在对系统的不确定参数和决策变量进行表征以及效益计算时，使用区间数理论以降低不确定性的影响。

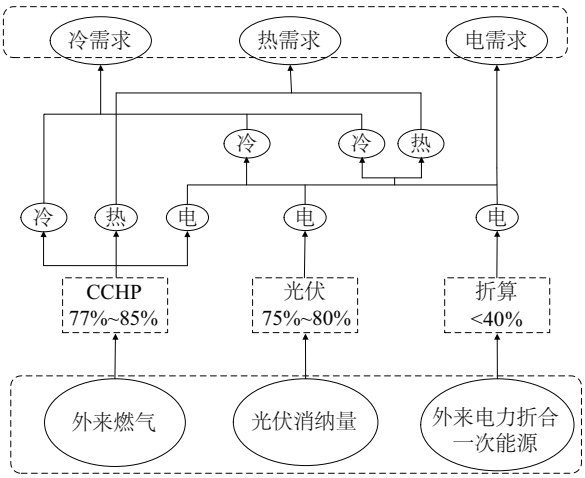


图1　综合能源系统结构图

Fig. 1　Structure diagram of integrated energy system

3.2　区间数理论框架在模型中的应用

该模型通过建立不同的经济和环境指标，对案例中园区分布式综合能源系统的效益进行评价分析，上文模型中的参数在本例中多以区间的形式存在，因此基于一般的区间数理论框架，可将上文指标模型中的式(8)~式(13)进行转换。

净现值式(8)可转换为：

$$N_{\mathrm{PV}}^{+}=\sum_{t=1}^{n}\frac{R_{\mathrm{I},t}^{+}-C_{\mathrm{O},t}^{-}}{(1+i_0)^{t+t_0}}-C_{\mathrm{v}} \tag{14}$$

$$N_{\mathrm{PV}}^{-}=\sum_{t=1}^{n}\frac{R_{\mathrm{I},t}^{-}-C_{\mathrm{O},t}^{+}}{(1+i_0)^{t+t_0}}-C_{\mathrm{v}} \tag{15}$$

$$N_{\mathrm{PV}}^{\pm}=\left[N_{\mathrm{PV}}^{-},N_{\mathrm{PV}}^{+}\right] \tag{16}$$

式中，$N_{\mathrm{PV}}^{\pm}$——净现值的区间计算结果。

动态回收期式(9)~式(11)可转换为：

$$T_{\mathrm{D}}^{+}=t_0+\frac{\lg A^{+}-\lg\left(A^{-}-P_{\mathrm{C}}^{+}I_0^{+}\right)}{\lg(1+i_0)} \tag{17}$$

$$T_{\mathrm{D}}^{-}=t_0+\frac{\lg A^{-}-\lg\left(A^{+}-P_{\mathrm{C}}^{-}I_0^{-}\right)}{\lg(1+i_0)} \tag{18}$$

$$T_{\mathrm{D}}^{\pm}=\left[T_{\mathrm{D}}^{-},T_{\mathrm{D}}^{+}\right] \tag{19}$$

$$A^{+}=\sum_{t=1}^{n}\frac{R_{\mathrm{I},t}^{+}-C_{\mathrm{O},t}^{-}}{(1+i_0)^{t}}\cdot\frac{i_0(1+i_0)^{n}}{(1+i_0)^{n}-1} \tag{20}$$

$$A^{-}=\sum_{t=1}^{n}\frac{R_{\mathrm{I},t}^{-}-C_{\mathrm{O},t}^{+}}{(1+i_0)^{t}}\cdot\frac{i_0(1+i_0)^{n}}{(1+i_0)^{n}-1} \tag{21}$$

$$P_{\mathrm{C}}^{+}=C_{\mathrm{v}}^{+}(1+i_0)^{t_0} \tag{22}$$

$$P_{\mathrm{C}}^{-}=C_{\mathrm{v}}^{-}(1+i_0)^{t_0} \tag{23}$$

式中，$T_{\mathrm{D}}^{\pm}$——动态回收期的区间计算结果，a。

内部收益率式(12)可转换为：

$$\sum_{t=1}^{n}\frac{R_{\mathrm{I},t}^{+}-C_{\mathrm{O},t}^{-}}{\left(1+I_{\mathrm{RR}}^{-}\right)^{t+t_0}}-C_{\mathrm{v}}=0 \tag{24}$$

$$\sum_{t=1}^{n}\frac{R_{\mathrm{I},t}^{-}-C_{\mathrm{O},t}^{+}}{\left(1+I_{\mathrm{RR}}^{+}\right)^{t+t_0}}-C_{\mathrm{v}}=0 \tag{25}$$

$$I_{\mathrm{RR}}^{\pm}=\left[I_{\mathrm{RR}}^{-},I_{\mathrm{RR}}^{+}\right] \tag{26}$$

式中，$I_{\mathrm{RR}}^{\pm}$——内部收益率的区间计算结果。

污染物强度式(13)可转换为：

$$U_t^{+}=\frac{E_t^{+}}{W_{\mathrm{E}}^{-}} \tag{27}$$

$$U_t^{-}=\frac{E_t^{-}}{W_{\mathrm{E}}^{+}} \tag{28}$$

$$U_t^{\pm}=\left[U_t^{-},U_t^{+}\right] \tag{29}$$

式中，$U_t^{\pm}$——t 污染物的污染物强度排放强度区间计算结果，g/kWh。

3.3　系统参数确定

3.3.1　综合能源系统参数确定

项目园区所处地域位于京津冀的核心区域，日照充足，位于太阳能辐射资源Ⅱ类地区，年日照小时数为2560 h，年总辐射量达到1350~1700 kWh/m^2。

CCHP系统采用7.32 MW燃气轮机-余热/直燃溴化锂吸收式空调机联合循环机组，项目初始投资1646万¥，建设期为12个月，设计设备使用寿命为20 a，折现率i=10%，年利用小时数为6500 h。该系统采取以热定电的运行方式，热电比为2.5。其余基本参数(如天然气价格和冷、热、电力的销售价格等)在运行过程中受到当地市场或系统自身影响，数据在一定范围内波动，其不确定形式符合区间数特征，本文使用区间数进行表征，如表1所示。

其中售电价格由于供应对象不同价格差异较大，根据园区所在地分阶段电价估算得到，与同地区已建成的天然气冷热电联供系统销售电价相当。因冷热电的价格均采取阶梯式收费且以商业使用为主，以下价格使用平均售价进行计算。

光伏发电项目装机为8.5 MW，总投资5259万¥，建设期1 a，计划使用年限为20 a，组件支架倾斜角度为35°，单位投资价格为6.19 ¥/W。

表1 系统经济参数

Table 1 Economic parameters of system

系统	主要指标	参数区间
CCHP系统	售电价格/¥·kWh^{-1}	[0.6435,0.6801]
	供热价格/¥·GJ^{-1}	[54.45,56.27]
	供冷价格/¥·GJ^{-1}	[230.3,231.6]
	年发电量/kWh	[732.7,735.1]
	年供热量/GJ	[61282,61703]
	年供冷量/GJ	[36893,36915]
	年燃气消耗量/万m^3	[382.8,383.2]
	购进天然气价格/¥·m^{-3}	[2.260,2.410]
	年运行维护费用/万¥	[20.01,21.88]
光伏系统	销售电价/¥·kWh^{-1}	[1.130,1.1450]
	年发电量/万kWh	[1040.2,1083.2]
	年运行维护费用/万¥	[130.7,132.2]

3.3.2 园区负荷需求分析

通过对园区及周边居民以往的负荷需求数据进行拟合，得出该项目区域在不同时期和情景下的负荷需求量，其典型日负荷如图3所示。由负荷与能源需求量分析可知，冬季和中间日的冷热电需求可全部通过分布式能源提供。而夏季7、8月份为用电和用冷高峰，该分布式综合能源无法为该商业园提供全部所需的全部电负荷和冷负荷，不足的部分通过外购当地电网火电进行补充。其系统年外购火电量为[358.3，361.2]万kWh，购入价格为[0.603，0.635]¥/kWh。

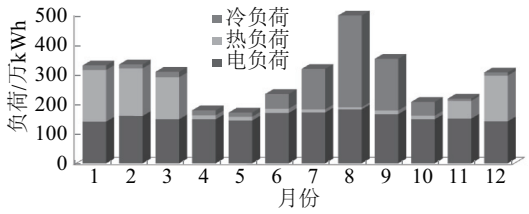
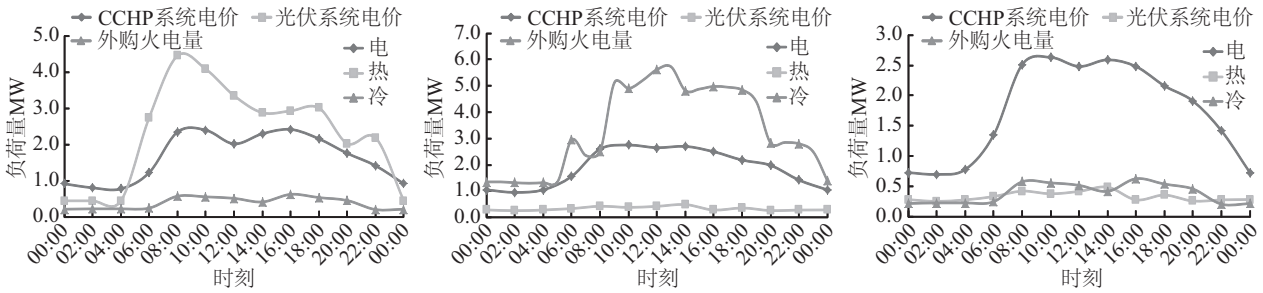


图2 园区各项能源需求量示意图

Fig. 2 Different kinds of energy demand of park



a. 典型供暖日负荷曲线 b. 典型供冷日负荷曲线 c. 典型中间日负荷曲线

图3 园区典型日负荷曲线图

Fig. 3 Load curves of park under different typical day

3.4 项目成本与经济效益分析

天然气冷热电三联供系统日常支出费用为运行维护费用和燃料费用，而收益为年发电、供热、供冷三项收益的总和。光伏发电系统的经济成本主要来源于投建时期，系统建成后年运维费用为1.8%，无需燃料费用。综合能源系统总初始投资为6905万¥，由表1的参数根据上文中的经济评价指标模型，其经济效益的计算结果如表2所示。可看出电力收益主要来自光伏系统，而三联供系统的收益主要来自供冷和供热，虽然成本较传统能源系统高，但整个系统的经济效益良好。随着将来技术的上升，成本将进一步下降。

3.5 项目环境效益分析

根据上文环境效益评估指标体系，CCHP子系统的能源利用效率为[77%，85%]，光伏系统为[75%，80%]。

表2 分布式能源系统经济效益计算结果

Table 2 Calculation results of economic benefits of distributed energy system

	主要指标	结果区间
CCHP系统	年发电收益/万¥	[471.5,499.9]
	年供热收益/万¥	[333.7,347.2]
	年供冷收益/万¥	[849.6,855.0]
	年总收益/万¥	[1654.8,1702.1]
	年总运行成本/万¥	[885.1,945.4]
光伏系统	年发电收益/万¥	[1175.4,1240.2]
	年总运行成本/万¥	[130.1,132.2]
	年外购电力成本/万¥	[216.1,229.4]
	年总收益/万¥	[2830.2，2942.3]
	年总运行成本/万¥	[1307.0,1231.3]
	净现值/万¥	[4884.0,6337.5]
	动态回收期/a	[7.16，8.24]
	内部收益率	[18.0%,20.1%]

CCHP 系统中不同污染物排放强度受系统的技术和设备影响，数据呈现不确定性，因此同样使用区间数进行表征，如表 3 所示。由表 3 可计算得到其环境改善程度为[0.2091，0.2325]。CCHP 系统由于使用天然气这一较为清洁的燃料，与当地同等规模燃煤发电厂污染物排放对比，SO_2 和 NO_x 的等大部分污染气体排放量都较传统发电形式的排放量有显著下降。而光伏发电系统在运行过程中几乎无污染物排放，由此计算得到该综合能源系统主要污染物及温室气体的减排量，如表 4 所示。

表3　CCHP子系统与燃煤发电的污染气体排放强度对比[3,20]

Table 3　Comparison of pollution intensity of CCHP subsystem and coal-fired power generation[3,20]

污染物	污染气体排放强度/g·kWh^{-1}	
	天然气冷热电联供	燃煤电厂
N_2O	[0.0003,0.0004]	[0.008,0.01]
SO_2	[0.0010,0.0013]	[3.14,3.85]
NO_x	[0.6188,0.7954]	[3.87,3.91]
颗粒	—	[0.059,0.061]
VOC	[0.015,0.018]	[0.023,0.025]

表4　综合能源系统污染物及温室气体区间年减排量

Table 4　Annual energy reductions for comprehensive energy system pollutants and greenhouse gases

主要指标	年减排量区间		外购火电增加	综合系统年总
	CCHP子系统	光伏发电子系统	排放量区间	减排量区间
CO_2排放量/t	[3791，3993]	[7006,7435]	[2413,2479]	[8317,9015]
CH_4排放量/kg	[−95.25，−80.86]	[20.80,32.50]	[7.17,10.84]	[−85.29,−55.53]
N_2O排放量/kg	[55.68，71.30]	[83.21,108.3]	[28.66,36.12]	[102.8,150.9]
SO_2排放量/t	[23.00，28.29]	[32.66,41.70]	[11.25,13.90]	[41.75,58.75]
NO_x排放量/t	[22.53，24.19]	[40.25，42.35]	[13.86，14.13]	[48.66,52.68]
颗粒排放量/kg	[432.3，448.4]	[613.7,660.7]	[397.4,418.7]	[1046,1109]
VOC排放量/kg	[51.29，51.45]	[260.0,270.8]	[157.9，171.6]	[311.3,322.3]

由以上环境效益分析可知，该分布式能源系统的一次能源利用效率较传统能源有较大提升。由于天然气中 CH_4 的含量较高，因此 CH_4 的排放量较高，其余大部分污染物及温室气体均有较好的减排效果。

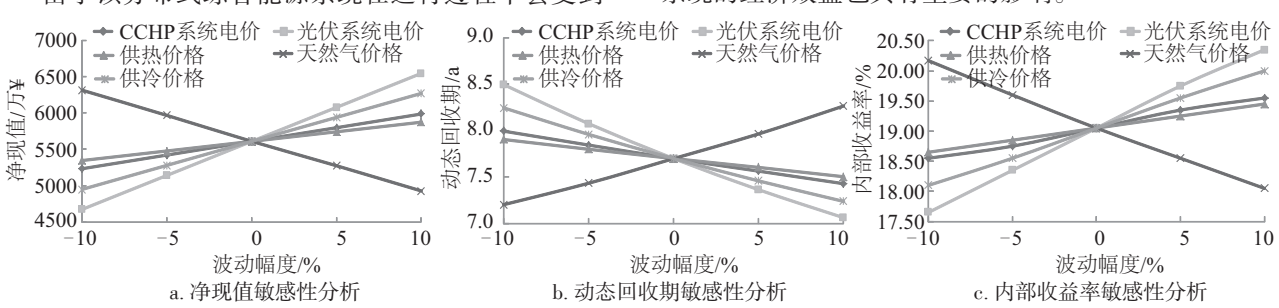
将传统能源形式的污染物治理费用和环保税考虑进系统的成本效益，按照京津冀地区环保税规定，所有大气污染物按照当量系数转换每当量征收环保税 12 ¥。则该系统每年可节省环保税[93.6，107.5]万¥，节约污染物治理费用[170.6，176.3]万¥，其收益相当可观。

3.6　敏感性分析

3.6.1　经济敏感性分析

由于该分布式综合能源系统在运行过程中会受到系统年利用小时数、电价、气价等不确定因素的影响，为了研究不同因素对系统效益的影响程度，选取不同子系统电价、热价和天然气价格和供冷价格 5 个因素对系统经济效益进行敏感性分析。波动范围选取 ±5% 和 ±10% 。为了较为清晰地对比各不确定因素对系统经济效益的影响效果，取表 3 中各个结果的中间值生成图 5，其图中各因素变化斜率的大小表示该因素对综合系统的影响程度。

从图 4 可看出，光伏系统的发电量在系统发电中占比较高，其销售电价是影响系统经济效益的首要因素。而天然气价格直接影响系统的年运行成本，因此对整个系统的经济效益也具有重要的影响。



a. 净现值敏感性分析　b. 动态回收期敏感性分析　c. 内部收益率敏感性分析

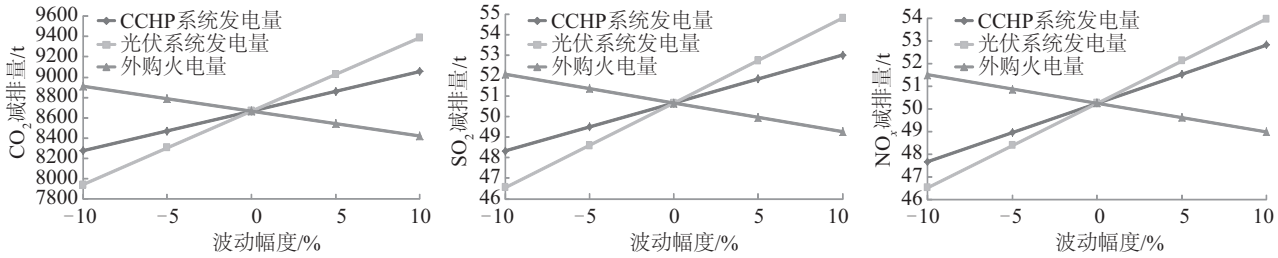
图4　经济敏感性分析结果

Fig. 4　Results of economic sensitivity analysis

3.6.2 环境敏感性分析

选取CCHP系统年发电量，光伏发电量和外购火电量3个不确定因素，对系统的CO_2、SO_2、NO_x年减排量3个指标进行敏感性分析，为了直观对比各不确定因素对系统减排量的影响程度，选取计算结果区间的中间值，将CCHP系统、光伏系统发电量以及外购火电量对系统CO_2、SO_2、NO_x年减排量3个指标进行敏感性分析如图5所示。

从图5中各研究指标的斜率可看出，光伏系统发电量和CCHP系统发电量与整个系统的减排量成正比，而外购电力来自火电，因此与系统减排量成反比。光伏系统由于在整个分布式能源系统中发电占比较高，因此其对整个系统的减排量有这非常大的影响。外购电力虽然占比较低，但火电的污染物和温室气体排放量较多，因此对系统的环境影响也不可忽略。



a. CO_2减排敏感性分析　b. SO_2减排敏感性分析　c. NO_x减排敏感性分析

图5 减排量敏感性分析结果

Fig. 5 Results of emission reduction sensitivity analysis

4 结 论

考虑到分布式能源运行过程中的不确定因素影响，将区间数理论应用于华北地区某园区及周边的规划实例，对天然气冷热电三联供和光伏发电结合的分布式综合能源系统的经济和环境效益进行分析。结果表明使用区间数对系统中的不确定性参数和变量进行表征，是当系统参数及变量信息不足，仅知道其波动的上下限情况时的一种有效适宜的处理方式，在一定程度上减少了不确定性因素对系统运行的影响。同时分别就系统的经济和环境效益两方面选取不确定因素进行敏感性分析，研究结果表明光伏系统的电价和天然气价格是影响综合系统经济效益的主要因素，而光伏系统发电量和外购火电量则对系统的环境效益有主要影响。整个分布式综合能源系统具有良好的经济效益、可观的环境效益，是实现节能减排与可持续发展目标的有效途径。

相比传统能源系统分产分供的形式，该系统的建设依据区域冷热电需求及资源储备，合理选择光伏发电技术与天然气冷热电三联供系统结合，不仅可为其提供电力上补充，同时在促进可再生能源大规模就地消纳、提高能源综合利用效率、削峰填谷及经济性方面均显示出优势，为区域低碳、绿色的能源发展提供了可持续发展的技术支撑。

[参考文献]

[1] 杜月华. 我国分布式能源投资模式及成本效益分析研究[D]. 北京：华北电力大学，2016.
DU Y H. Research on investment pattern and cost-benefit analysis of distributed energy in China[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.

[2] 阳厚斌. 我国分布式能源可持续发展研究[D]. 北京：华北电力大学，2013.
YANG H B. Research on the sustainable development of China's distributed energy[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.

[3] LOPES J A P, HATZIARGYRIOU N, MUTALE J, et al. Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities[J]. Electric power systems research, 2007, 77(9): 1189-1203.

[4] 汪少勇. 基于分布式电源的微网的设计与运行[J]. 电力自动化设备，2011，31(4)：120-123.
WANG S Y. Design and operation of micro-grid based on distributed generation[J]. Electric power automation equipment, 2011, 31(4): 120-123.

[5] 吴波. 分布式能源冷热电多联产系统能效分析与可比性方法研究[D]. 北京：北京科技大学，2014.
WU B. Energy effect analysis and comparable methodology study on CCHP based on distributed energy system[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2014.

[6] 王旭东. 冷热电三联供分布式能源综合效益分析[D]. 北京：华北电力大学，2014.
WANG X D. comprehensive Analysis of the Benefit of the CCHP[D]. Beijing: North China Electric Power

University, 2014.

[7] 李文升. 分布式资源与电网相互作用的机理及其协同调度技术的研究[D]. 济南:山东大学, 2012.
LI W S. Distributed resources and power grid interaction mechanism and synergistic dispatch technology research [D]. Ji'nan: Shandong University, 2012.

[8] 张洪伟. 分布式能源冷热电联产系统的热经济性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
ZHANG H W. Heating- economical analysis of distributed energy system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.

[9] 吴红斌, 蔡亮. 可再生能源分布式发电系统的经济调度[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 287-292.
WU H B, CAI L. Economic dispatching of renewable energy distribution generation systems [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(12): 287-292.

[10] 曾鸣, 田廓, 李娜, 等. 分布式发电经济效益分析及其评估模型[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 129-133.
ZENG M, TIAN K, LI N, et al. Economic benefits analysis of distributed generation and its assessment model[J]. Power system technology, 2010, 34(8): 129-133.

[11] GONZALEZ- CHAPA M A, VEGA- GALAZ J R. Fuel optimization for power, heat and CHP systems including emissions regulations and ambient conditions [C]// ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, 2005: 465-470.

[12] 程林, 张靖, 黄仁乐, 等. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 282-287.
CHENG L, ZHANG J, HUANG R L, et al. Case analysis of multi- scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system [J]. Electric power automation equipment, 2017, 37(6): 282-287.

[13] 皮薇. 全寿命周期的分布式光伏发电的成本-效益研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
PI W. Study on cost- effectiveness of distributed PV based on the whole life cycle[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

[14] 苏剑, 周莉梅, 李蕊. 分布式光伏发电并网的成本/效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 11, 84-90.
SU J, ZHOU L M, LI R. Cost- benefit analysis of distributed grid-connected photovoltaic power generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 11,84-90.

[15] 吕忠, 兰飞飞, 曲娟, 等. 太阳能发电示范基地的光伏发电试验及效益分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2011, 28(4): 106-108.
LYU Z, LAN F F, QU J, et al. Photovoltaic generation experiment in solar power demonstration base and its benefit analysis[J]. Meteorological, hydrological and marine instruments, 2011, 28(4): 106-108.

[16] 李华, 李惠强, 帅小根, 等. 冷热电三联供绿色能源项目的经济分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2006, 23(2): 49-52.
LI H, LI H Q, SHUAI X G, et al. Economic analysis on green energy project of cooling-heating-power supply [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (urban science edition), 2006, 23(2): 49-52.

[17] ZANGIABADI M, FEUILLET R, LESANI H, et al. Assessing the performance and benefits of customer distributed generation developers under uncertainties [J]. Energy, 2011, 36(3): 1703-1712.

[18] 胡骅, 徐冲, 吴汕, 等. 影响用户侧分布式发电经济性因素分析[J]. 电力自动化设备, 2008(5): 29-33.
HU H, XU C, WU S, et al. Analysis of factors influencing economy of customer- side distributed generation [J]. Electric power systems research, 2008(5): 29-33.

[19] SIDDIQUI A S, MARNAY C. Distributed generation investment by a microgrid under uncertainty[J]. Energy, 2008, 33(12): 1729-1737.

[20] 江修波, 吴文宣, 陈祥伟. 区间分析法在电力变压器全寿命周期成本模型中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 50-53.
JIANG X B, WU W X, CHEN X W. Transformer life cycle cost model based on interval analysis[J]. Electric power automation equipment, 2011, 31(9): 50-53.

[21] KATSUTA M, KANEKO A, YAMAMOTO T. Actual Condition evaluation of cogeneration system in an urbanized hotel, and study of the optimal operation to minimize the CO_2 emission[J]. Transactions of the Japan Society of Refrigerating & Air Conditioning Engineers, 2005, 22(1): 318-321.

COST-BENEFIT AND INFLUENCING FACTORS ANALYSIS OF DISTRIBUTED COMPREHENSIVE ENERGY SYSTEM BASED ON INTERVAL NUMBER THEORY

Li Wei[1], Bao Zhe[1], Yang Hansheng[1], Xu Ye[1], Zheng Xin[2]

(1. *Environmental Science and Engineering College of North China Electric Power University*, *Beijing* 102206, *China*;
2. *NARI Group Corporation* (*State Grid Electric Power Research Institute*), *Nanjing* 211000, *China*)

Abstract: Cost-benefit and sensitivity analysis of the park-type distributed system case, which include two subsystems(the CCHP system and the photovoltaic system), are conducted from both economic and environment system. The interval number theory is applied to this research. And it effectively suggests the economic advantages and emission reduction capabilities of the system, as well as the degree of impact on the system due to uncertainties brought by the market and the system itself during operation. In this research, the impact of uncertainty on system operation is reduced to a certain extent while economic and environmental reference is provided for the construction and operation of distributed energy and integrated energy systems.

Keywords: distributed power generation; integrated energy system; cost benefit analysis; photovoltaic power system; CCHP