

不确定条件下能源优化配置与敏感性分析模型

刘政平, 李 薇, 王 深, 黄国和, 齐 心

(华北电力大学 区域能源系统优化教育部重点实验室, 北京 102206)

摘 要: 随着人口的快速增长与经济的快速发展, 能源需求量与消费量也持续快速增加。实现能源优化配置是促进节能减排, 缓解能源供需矛盾的根本措施。文章基于不确定性优化方法, 构建了能源优化配置模型; 应用所构建的模型, 结合相关数据进行了包含多种资源类型、多重规划期和多重终端需求的案例验证研究; 权衡经济目标与环境目标, 得到了最低系统成本下的资源供应方案、电力与热力供给方案、扩容方案与污染物控制方案; 结合析因分析方法对优化模型结果进行敏感性分析, 确定了对研究目标影响最为显著的因子。该模型可为制定优化能源配置的相关政策提供有效的决策支持。

关键词: 能源优化配置; 不确定性; 敏感性分析; 化石能源; 可再生能源

中图分类号: TK01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2017)10-1544-07

0 引言

能源是人类生活与经济发展的基础。过去几十年, 随着世界人口的增长与经济的发展, 能源需求量与使用量持续快速增加。目前, 世界各国所用的绝大多数燃料是煤、石油和天然气等化石燃料。化石燃料的过度消耗, 产生了空气污染、地下水污染与气候变化等一系列的负面效应。严峻的能源形势与相关的环境问题, 促使能源决策者开展有效的规划工作。但是, 能源系统是复杂的综合性系统, 包含能源供应、能源消耗、环境约束等众多动态组成部分^[1]。在制定相应的能源政策时, 应充分考虑系统中所存在的不确定性, 在此基础上, 达到经济发展与环境保护的动态平衡。

目前, 利用可再生能源已成为全球能源发展的趋势, 但化石燃料仍处于主导地位^[2]。当规划区域中存在多种能源形式时, 有必要分析各要素对系统的影响, 揭示对系统目标影响最为显著的因子, 从而有针对性地改进相关规划, 提高资源分配效率。为处理能源系统优化配置中的不确定性, 进一步分析系统中的影响因子, 本研究引入不确定性优化方法和析因分析方法, 构建能源优化配置模型, 并开展案例研究, 以确定适应地区

发展的能源政策, 制定最优能源配置方案, 得到各系统因子的影响效应。本文的研究结果将有助于调整经济目标与环境效益, 从而制定更加科学有效的能源政策。

1 研究方法

1.1 不确定性优化方法

优化方法是处理复杂规划问题的有效手段, 并在能源系统管理中得到了广泛的应用^[3]。通常, 典型的确定性线性优化模型可表述为

$$\min f = dx \quad (1)$$

约束条件:

$$ax \leq b \quad (2)$$

$$x \geq 0 \quad (3)$$

式中: f 为目标函数; x 为决策变量; a, b, d 分别为相应系数。

在实际规划问题中, 模型的输入参数通常为一系列同类变量的集合, 且系统各变量并不是确定的, 而是在一定经验范围内浮动。因此, 为获得更为全面、可信的结果, 有必要引入不确定性优化方法, 处理系统中参数的不确定性。该模型可改进为不确定性模型:

$$\min f^{\pm} = \sum_{l=1}^L (D_l^{\pm} X_l^{\pm}) \quad (4)$$

收稿日期: 2017-06-22。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JB2016187)。

作者简介: 刘政平(1989-), 男, 博士研究生, 研究方向为能源环境系统优化技术。E-mail: zhengpingliu@foxmail.com

通讯作者: 黄国和(1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为能源模型与能源系统规划技术。E-mail: huang@iseis.org

约束:

$$A_l^+ X_l^+ \leq B_l^+, \forall_l \quad (5)$$

$$X_l^+ \geq 0, \forall_l \quad (6)$$

式中: f 为目标函数; X 为一系列决策变量; A, B, D 分别为对应系数; l 为变量的个数。

在规划中, 预设的规划情景可能存在误差, 可引入追索函数, 修正与决策相关的预设情景。模型可改进为

$$\min f^+ = \sum_{l=1}^L (X_l^+ D_{Xl}^+) + \sum_{l=1}^L (Y_l^+ D_{Yl}^+) \quad (7)$$

$$X_l^+ - Y_l^+ \leq B_l^+, \forall_l \quad (8)$$

$$Y_l^+ \leq X_l^+ \leq X_{\max}^+, \forall_l \quad (9)$$

$$X_l^+ \geq 0, \forall_l \quad (10)$$

$$Y_l^+ \geq 0, \forall_l \quad (11)$$

式中: Y 为引入的追索变量, D_X, D_Y 分别为对应的参数。

1.2 模型求解

根据 Huang 提出的交互式算法, 可将不确定性模型拆分为两个线性的确定性模型进行求解^{[4],[5]}。首先求解模型的下界子模型:

$$\min f^- = \sum_{l=1}^L (X_l^- D_{Xl}^-) + \sum_{l=1}^L (Y_l^- D_{Yl}^-) \quad (12)$$

$$X_l^- - Y_l^- \leq B_l^-, \forall_l \quad (13)$$

$$Y_l^- \leq X_l^- \leq X_{\max}^-, \forall_l \quad (14)$$

$$X_l^- \geq 0, \forall_l \quad (15)$$

$$Y_l^- \geq 0, \forall_l \quad (16)$$

可得到模型最优解 $X_{\text{lopt}}^-, Y_{\text{lopt}}^-$ 和 f_{opt}^- 。

将该结果带入对应的上界子模型, 可得到最优解 $X_{\text{lopt}}^+, Y_{\text{lopt}}^+$ 和 f_{opt}^+ 。因此, 该不确定性模型的最优解集为 $f = [f_{\text{opt}}^-, f_{\text{opt}}^+]$, $X_l = [X_{\text{lopt}}^-, X_{\text{lopt}}^+]$ 与 $Y_l = [Y_{\text{lopt}}^-, Y_{\text{lopt}}^+]$ 。

1.3 敏感性分析方法

敏感性分析方法可检验模型不确定性参数对研究目标的影响程度, 为决策分析提供更广泛的信息支持。本研究采用析因分析方法, 对模型的优化结果进一步开展敏感性分析。与传统方法相比, 析因分析方法可有效处理两个及两个以上参数对研究目标的影响效应。此外, 该方法可处理两水平甚至多水平的研究因子。

典型的析因分析方法基于 2^k 因子设计 (2^k factorial design)^{[6],[7]}。 2^k 因子设计包含 k 个影响指

标的因子, 每个因子都包含两个水平, 所以对应的全水平析因设计共存在 2^k 个不同组合结果。通过对各因子之间交互作用的效果进行方差分析, 可判断各因子对研究目标的影响程度。若因子水平的改变而引起的研究目标反应越明显, 则认为该因子对研究目标的影响更为显著, 该因子即为系统主要影响因子。针对系统的研究目标, 析因分析方法可得到所选取因子对研究目标影响效应的排序, 确定对研究目标影响最为显著的若干因子, 以及对研究目标影响较小的因子, 从而有针对性地改进现有政策, 提高管理效率, 降低综合成本。因此, 在优化结果的基础上进一步开展敏感性分析, 对能源优化配置的研究是十分必要的。

2 能源优化配置案例研究

2.1 研究系统概述

典型的能源配置模型包含 4 个组成部分: ①为系统提供基本保障的各种形式资源供应; ②能源转换, 即采用各种转换技术将资源转换为终端用户可以直接利用的能源形式; ③能源需求, 包括工业需求、农业需求和市政需求; ④保证能源系统可持续发展的、适当的环境约束。

决策者须制定能源配置方案, 在尽可能降低系统成本的基础上, 储备适量的能源, 并通过合理的供能方案, 保障终端用户的能源需求, 同时不违反相应的环境政策^[8]。

2.2 情景设置与模型构建

选取北方某城市为研究对象。共考虑 3 个规划期, 每个规划期设定为 5 a。表 1 展示了各能源供应的部分经济指标。

表 1 能源供应的部分经济指标
Table 1 Partial economic data for energy supply

资源及机组类型		规划期		
		$t=1$	$t=2$	$t=3$
热电联产机组 (美元/ $10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$)	燃煤机组	[52, 61]	[145, 53]	[39, 47]
	燃油机组	[90, 112]	[75, 97]	[62, 82]
	燃气机组	[153, 167]	[136, 148]	[118, 130]
可再生能源机组 (美元/ $10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$)	风能	[27, 36]	[22, 31]	[17, 26]
	太阳能	[40, 48]	[35, 43]	[28, 38]
备用供热机组 (万美元/GJ)	燃油机组	[30, 36]	[31, 37]	[32, 38]
	燃气机组	[44, 49]	[45, 50]	[46, 51]

能源类型共 5 种: 3 种化石燃料(煤炭、柴油、天然气)为热电联产机组提供能源, 相应机组可同时提供电力与热能; 两种可再生资源(风能、太阳能)可为系统提供一部分电力。煤炭为主要能源类

型。在供热期,当热电联产机组不能满足需求时,可利用备用机组供能,也可考虑机组整体扩容。此外,选取 SO_2 为代表性污染物,当排放量高于环境标准时,须根据超标排放量进行处罚,从而造成系统收益损失。要求尽可能降低系统成本。

综上所述,系统成本可分为 5 部分,研究系统的目标函数可表述为下列 5 项之和。

$$\min f^{\pm} = f_1^{\pm} + f_2^{\pm} + f_3^{\pm} + f_4^{\pm} + f_5^{\pm} \quad (17)$$

①资源采购成本

$$f_1^{\pm} = \sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^3 (S_{i,t}^{\pm} C_{i,t}^{\pm}) \quad (18)$$

②热电联产机组运行成本

$$f_2^{\pm} = \sum_{i=1}^5 \sum_{t=1}^3 (S_{Ei,t}^{\pm} C_{Ei,t}^{\pm}) \quad (19)$$

③备用供热机组运行成本

$$f_3^{\pm} = \sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^3 (S_{Hi,t}^{\pm} C_{Hi,t}^{\pm}) \quad (20)$$

④扩容成本

$$f_4^{\pm} = \sum_{i=2}^5 \sum_{n=1}^3 (C_{EKi,n}^{\pm} S_{EKi,n}^{\pm} Z_{EKi,n}^{\pm}) + \sum_{i=2}^3 \sum_{n=1}^3 (C_{HKi,n}^{\pm} S_{HKi,n}^{\pm} Z_{HKi,n}^{\pm}) \quad (21)$$

⑤污染物控制成本

$$f_5^{\pm} = \sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^3 (\eta_i^{\pm} S_{Wi,t}^{\pm} C_{Wi,t}^{\pm}) + \sum_{i=1}^3 \sum_{m=1}^3 \sum_{t=1}^3 (q_m S_{pi,m,t}^{\pm} C_{pi,t}^{\pm}) \quad (22)$$

系统约束可表述如下:

①资源利用量不高于储备量

$$S_{i,t}^{\pm} \geq V_{Ei,t}^{\pm} S_{Ei,t}^{\pm} + V_{Hi,t}^{\pm} S_{Hi,t}^{\pm}, \forall i=1,2,3, t \quad (23)$$

$$S_{Ei,t}^{\pm} M_{i,t}^{\pm} \leq O_{i,t}^{\pm}, \forall i=4,5, t \quad (24)$$

②产生的能源不高于资源本身的热值

$$S_{Ei,t}^{\pm} M_{i,t}^{\pm} \leq S_{i,t}^{\pm} R_i, \forall i=1,2,3, t \quad (25)$$

③发电量不低于需求量

$$\sum_{i=1}^5 S_{Ei,t}^{\pm} \geq \sum_{j=1}^3 N_{Ej,t}^{\pm}, \forall t \quad (26)$$

④供热量不低于需求量

$$\sum_{i=1}^3 S_{Hi,t}^{\pm} + 3.6 \sum_{i=1}^3 (\lambda_i^{\pm} S_{Ei,t}^{\pm}) \geq \sum_{j=1}^2 N_{Hj,t}^{\pm}, \forall t \quad (27)$$

⑤供电、供热量不高于机组装机容量

$$\left[R_{Ei}^{\pm} + \sum_{n=1}^3 (S_{EKi,n}^{\pm} Z_{EKi,n}^{\pm}) \right] U_{Ei}^{\pm} \geq \sum_{t=1}^3 S_{Ei,t}^{\pm}, \forall i \quad (28)$$

$$\left[R_{Hi}^{\pm} + \sum_{n=1}^3 (S_{HKi,n}^{\pm} Z_{HKi,n}^{\pm}) \right] U_{Hi}^{\pm} \geq \sum_{t=1}^3 S_{Hi,t}^{\pm}, \forall i=1,2,3 \quad (29)$$

⑥污染物排放量不高于环境标准

$$(V_{Ei,t}^{\pm} S_{Ei,t}^{\pm} + V_{Hi,t}^{\pm} S_{Hi,t}^{\pm}) \theta_i^{\pm} = S_{Wi,t}^{\pm}, \forall i, t \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^3 [S_{Wi,t}^{\pm} (1 - \eta_i^{\pm}) + S_{pi,m,t}^{\pm}] \leq G_{m,t}^{\pm}, \forall m, t \quad (31)$$

⑦备用供热机组提供的热能不得超过热电联产机组供热的一半

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^3 S_{Hi,t}^{\pm} \leq \frac{1}{2} \lambda_i^{\pm} 3.6 \sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^3 S_{Ei,t}^{\pm}, \forall i=1,2,3, t \quad (32)$$

⑧技术性约束

$$S_{i,t}^{\pm} \geq 0, \forall i, t \quad (33)$$

$$S_{Ei,t}^{\pm} \geq 0, \forall i, t \quad (34)$$

$$S_{Hi,t}^{\pm} \geq 0, \forall i, t \quad (35)$$

$$Z_{EKi,n}^{\pm} = \begin{cases} 1, \text{扩容} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (36)$$

$$Z_{HKi,n}^{\pm} = \begin{cases} 1, \text{扩容} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (37)$$

$$0 \leq \sum_{n=1}^3 Z_{EKi,n}^{\pm} \leq 1, \forall n \quad (38)$$

$$0 \leq \sum_{n=1}^3 Z_{HKi,n}^{\pm} \leq 1, \forall n \quad (39)$$

模型参数与变量如下。

变量: i 为资源种类,分别为煤炭、柴油、天然气、风能、太阳能; t 为规划期; n 为扩容选项; m 为超额排放水平; j 为终端用户,分别代表工业、农业和市政。

参数: $C_{i,t}$ 为规划期 t 内资源 i 的采购成本,美元/ t ; $S_{i,t}$ 为规划期 t 内资源 i 的采购量; $C_{Ei,t}$ 为规划期 t 内机组 i 的运行成本,美元/($\text{kW} \cdot \text{h}$); $S_{Ei,t}$ 为规划期 t 内机组 i 的发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $C_{Hi,t}$ 为规划期 t 内备用机组 i 的运行成本, 万美元/GJ; $S_{Hi,t}$ 为规划期 t 内机组 i 的供热量, GJ; $C_{EKi,n}$ 为机组 i 采用方案 n 的单位成本, 10^3 美元/MW; $S_{EKi,n}$ 为机组 i 采用方案 n 的扩容量, MW; $C_{HKi,n}$ 为备用机组 i 采用方案 n 的单位成本, 10^3 美元/MW; $S_{HKi,n}$ 为备用机组 i 采用方案 n 的扩容量, MW; $C_{Wi,t}$ 为规划期 t

内机组 i 的 SO_2 去除成本, 美元/ t ; $S_{\text{Wi},t}$ 为规划期 t 内机组 i 的 SO_2 产生量, t ; η_i 为机组 i 的 SO_2 去除效率; q_m 为在 m 水平下超额排放的概率; $C_{\text{Pi},t}$ 为规划期 t 内机组 i 超额排放的惩罚, 美元/ t ; $S_{\text{Pi},m,t}$ 为规划期 t 内机组 i 在 m 水平下的超额排放量, t ; $V_{\text{Ei},t}$ 为规划期 t 内机组 i 的资源利用效率, $t/(\text{kW} \cdot \text{h})$; $V_{\text{Hi},t}$ 为规划期 t 内备用机组 i 的资源利用效率, t/GJ ; $M_{i,t}$ 为规划期 t 内能源 i 的转换系数, $\text{TJ}/(\text{GW} \cdot \text{h})$; $O_{i,t}$ 为规划期 t 内能源 i 的可利用量, TJ ; R_i 为资源 i 的单位热值, TJ/t ; $N_{\text{Ei},t}$ 为规划期 t 内用户 i 的电力需求量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $N_{\text{Hi},t}$ 为规划期 t 内用户 i 的热力需求量, GJ ; R_{Ei} 为机组 i 的初始装机容量, MW ; U_{Ei} 为装机容量-电力转换系数; R_{Hi} 为备用热力机组 i 的初始装机容量, MW ; U_{Hi} 为装机容量-热力转换系数; θ_i 为机组 i 的 SO_2 产污系数; λ_i 为热电比; G 为 SO_2 排放标准, t_0 。

该模型可通过交互式算法, 拆解为两个线性子模型分别求解, 从而得到模型的最优解集。

3 结果分析

通过求解模型可得到最优资源供应方案、发电与供热方案、最小成本下可能的扩容方案和不同风险水平下的污染物控制方案, 其结果反映了研究系统能源活动的基本趋势, 可为制定相应的能源政策提供决策支持。

3.1 资源供应方案

煤炭资源量丰富, 价格相对较低, 是我国的主要能源类型, 也是支撑中国经济发展的重要动力。但是, 相关的污染防治政策也提出了对煤炭实施区域总量控制以及鼓励发展利用清洁能源。因此, 煤炭在我国未来能源结构中所占的比重可能会有所下降, 但在一段时间内仍为最主要的能源类型。在本研究中, 煤炭为主要能源, 占系统总能源供应量的 57%~66%。同时, 柴油的消耗量占系统能源供应量的 23%~32%, 天然气占比为 11%~12%。模型得到的最优资源采购量汇总于表 2。该结果符合现阶段我国能源发展的现状。

表 2 资源采购量 Table 2 Energy resource purchasing amount 10^3 t			
资源类型	规划期		
	$t=1$	$t=2$	$t=3$
煤炭	[542, 715]	[525, 698]	[505, 902]
柴油	[340, 383]	[298, 337]	[256, 290]
天然气	[54, 76]	[96, 123]	[139, 166]

3.2 供电与供热方案

本研究通过相应的供能方式, 为终端用户提供电能与热能。其中, 热电联产机组同时向终端用户提供电力和供暖季所需的热能。若热力供应量不足, 可启用备用的小型机组, 或者考虑扩容。

图 1 展示了具体的电力需求量以及模型所得的最优电力供应方案。

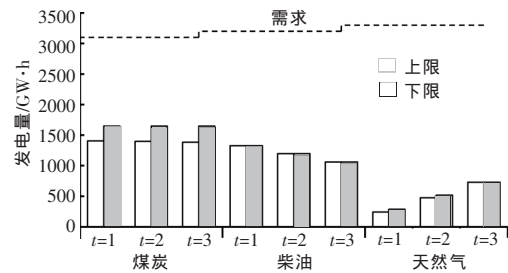


图 1 规划期内用电需求与热电联产机组发电量
Fig.1 Energy demand & electricity generation by CHP plants during planning period

在 3 个规划期中, 燃煤机组分别提供 [1 406, 1 650], [1 398, 1 650], [1 385, 1 650] $\text{GW} \cdot \text{h}$ 的电力; 燃油机组供电量分别为 1 328, 1 197, 1 059 $\text{GW} \cdot \text{h}$, 达到了各时期的最大可发电量; 燃气机组供电量分别为 [241, 288], [471, 571], [729, 730] $\text{GW} \cdot \text{h}$ 。从结果可见, 在满足环境标准的前提下, 模型会优先考虑发电成本较低的发电方式。同时, 随着环境标准的提升, 煤炭、柴油的消耗量逐渐减少, 相关机组的发电量也随之减少, 而天然气用量大幅增加, 发电量提升较快, 但发电总量仍低于燃煤、燃油机组。

模型同时考虑了风能与太阳能两种可再生能源发电作为系统电力的补充, 但是考虑到现阶段的使用限制, 装机容量相对较小, 其装机量随规划期进展略有增加, 但不超过 20 MW 。在规划期内, 风能发电量分别为 [15, 19], 20, [16, 44] $\text{GW} \cdot \text{h}$, 太阳能发电量分别为 [8, 14], [9, 15], [9, 16] $\text{GW} \cdot \text{h}$ 。这两种能源类型几乎不排放 SO_2 , 因此, 其总发电量呈上升趋势, 可作为系统电力供应的有效补充, 同时也是降低污染排放的有效方式。

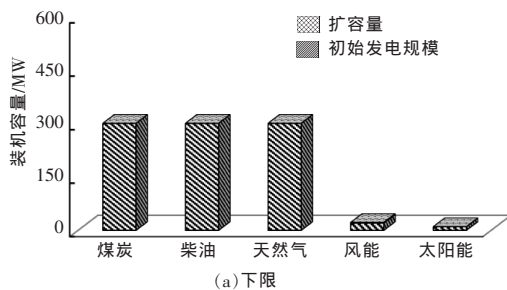
对采暖季出现的供热缺口, 本模型采用备用机组辅助供热, 各规划期提供的热量分别为 [231, 366], [201, 328], [141, 381] TJ 。在规划期内, 热电联产机组的能源供应逐渐增加, 因此, 备用机组的供热量呈现下降趋势。

结果显示, 煤炭为系统的主要能源类型; 当环

境标准趋于严格时,其用量呈现逐渐下降的趋势;天然气与可再生能源所占比例逐渐增多,其中,天然气用量增速最快。分析结果表明,煤改气、油改气可显著降低污染排放,是应对环境污染的可行措施。

3.3 扩容方案

随着能源需求的逐渐增加,系统内热电联产机组不能满足终端用户的能源需求,可采取以下3种方案:①对热电联产机组进行扩容,可同时增加发电量与供热量;②若仅为供热不足,可采用备用的小型机组;③若备用机组不能满足需求,可对备用机组扩容。由模型选择最优方案,要求满足能源需求,且成本最低。此外,规定扩容量不得超过初始装机容量,且燃煤机组不再扩容。根据历史数据,制定了3种对热电联产机组和小型备用机组的扩容方案(表3)。



资源类型		扩容方案		
		n=1	n=2	n=3
热电联产机组	燃油机组	[150, 200]	[250, 300]	[500, 600]
	燃气机组	[150, 200]	[250, 300]	[500, 600]
可再生能源机组	风能	[2, 5]	[5, 10]	[15, 20]
	太阳能	[2, 5]	[5, 10]	[10, 15]
备用供热机组	燃油机组	[25, 50]	[50, 100]	[100, 150]
	燃气机组	[25, 50]	[50, 100]	[100, 150]

图2展示了系统的初始装机容量与选定最优方案扩容后的总装机容量。由此可知,当系统趋于下限时,系统能源缺口较小,仅对风能发电扩容,且最优结果为扩容方案1。当系统趋于上限时,则存在相对较大的能源缺口,最终选择对燃气机组扩容300 MW(方案2),对风能发电机组扩容20 MW(方案3)。

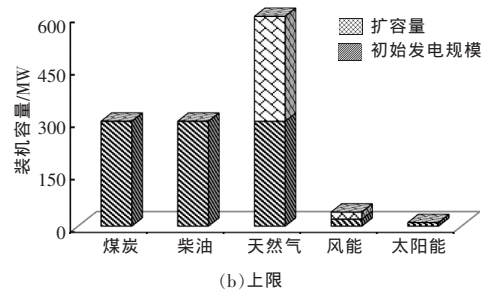


图2 初始装机容量与扩容后总装机量
Fig.2 Initial capacity and installed capacity after expansion

3.4 污染物控制方案

本文首先根据历史经验预估各机组在规划期中的SO₂排放量。当实际排放量超出环境标准,则对超额排放的部分罚款,从而降低系统收益。图3展示了具体的SO₂控制策略。根据各机组的发电量以及对应的产污系数,可得出机组实际产生的SO₂总量。假定机组SO₂去除效率介于85%~90%,可得出对应的排放量。因燃气机组排放相对很小,

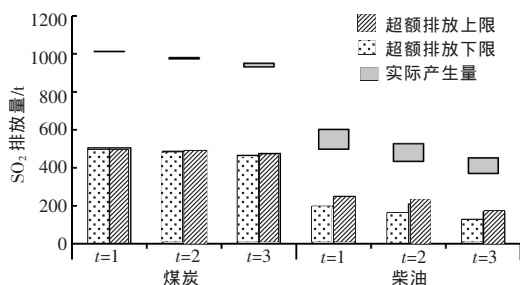


图3 二氧化硫排放量
Fig.3 SO₂ mitigation amount

本研究未考虑其污染排放。在3个规划期内,燃煤机组的排放量维持在1000 t左右,燃油机组的实际排放量为[498,602], [434,527]和[371,452] t。由于燃煤发电和燃油发电逐渐被相对清洁的发电方式所取代,其发电量逐年减少,因此总排放量都呈降低趋势。为验证模型的有效性,设置了相对严格的排放标准,因此都出现了超额排放。在不同规划期内,燃煤机组的超额排放量分别为505,[487,490],[465,475] t,燃油机组的超额排放量分别为[197,249],[162,208],[127,168] t。超额排放势必增加运行成本,从而降低系统的总收益。

3.5 系统敏感性分析

在能源系统规划中,系统通常存在较大变量。敏感性分析可从众多不确定性变量中找出对系统目标影响最为显著的变量,同时分析、测算其对应指标的影响程度和敏感性程度,从而在未来规划中,有针对性地采取对应措施,以提高方案的抗

风险能力与规划效率。因此,本研究引入两水平析因分析方法,分别选取系统成本与系统总排放量为目标,进行敏感性分析。表4展示了选定的不确定性变量,同时影响系统成本与污染排放。为便于研究,分别将参数命名为A,B,C,D,E,F。不确定变量的上限与下限分别对应因子的两个水平。因此,可进行 2^6 析因检验。

表4 敏感性分析目标参数

Table 4 Investigated factors for sensitive analysis

参数	参数含义	参数水平/美元·t ⁻¹	
		低水平	高水平
A	C_{W1} 燃煤机组 SO ₂ 去除成本	59	79
B	C_{W2} 燃油机组 SO ₂ 去除成本	51	66
C	C_{W3} 燃气机组 SO ₂ 去除成本	35	45
D	C_{P1} 燃煤机组超额排放的惩罚	200	240
E	C_{P2} 燃油机组超额排放的惩罚	270	320
F	C_{P3} 燃气机组超额排放的惩罚	240	300

图4展示了选择不确定变量对系统成本的影响。若 x 服从标准正态分布,则 $y=|x|$ 为半正态分布,即与正态分布相比较,半正态分布因子的影响效应均为其绝对值。因子越远离基线,对目标的影响越为显著。

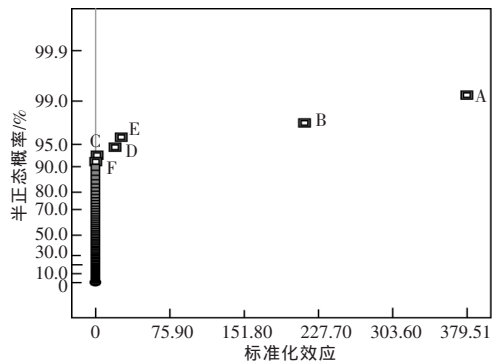


图4 各因子对系统成本影响效应的半正态分布
Fig.4 Half-normal plot of effects for total system cost

从图4可以看出,因子A影响效应最为显著,因子B次之;因子E,D对系统成本存在影响,但相对较小;因子C与F对目标的影响很小。结合供能方案,煤炭与柴油提供了系统70%以上的能源,因此,相应机组产生SO₂的常规运营成本,对系统总成本的影响最为显著是合理的。此外,超额排放的惩罚约为常规运营成本的3倍,但结果亦表明制定的超额排放惩罚对系统成本影响较小,因此,在制定趋于严格的环境标准的同时,也应增加对超额排放的惩罚力度。

图5为各因子对SO₂排放总量影响的半正态分布图。其中,因子B,E的影响效应最为显著,其它因子的影响效应相对较小。结果显示,与燃油机组相关的因子对SO₂排放总量的影响较大,未来的进一步减排,应着重限制燃油机组的尾气排放。从图4,5还可以看出,因系统供能以煤炭为主,单因子对系统的影响最为显著,各因子间没有明显的交互作用,因此图中省略了交互因子。

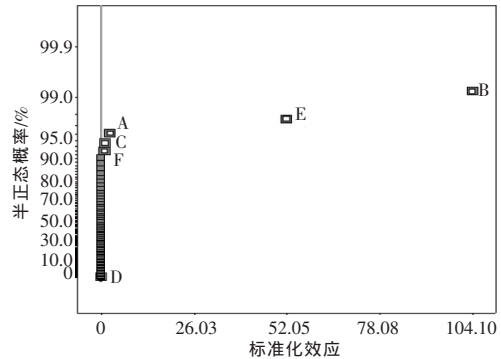


图5 各因子对污染排放影响效应的半正态分布
Fig.5 Half-normal plot of effects for pollution discharge

4 结论

本研究构建了基于不确定性方法的能源优化配置模型,并应用于案例研究。在权衡经济目标与环境约束的基础上,得到了最优资源供应、供能、扩容以及污染物控制方案。

在优化结果中,系统以煤炭为主要能源类型,以可再生能源为有效补充。当供能不足时,优先考虑采用可再生能源机组的扩容。当能源缺口较大时,在对可再生能源机组扩容的基础上,进一步扩容燃气机组,以满足终端用户的能源需求。模型设置了较为严格的污染物控制标准,对超额排放SO₂进行处罚。优化模型结果符合现阶段我国能源发展的现状。

本文对优化结果进行了敏感性分析,揭示了系统主要影响因子。其中,燃煤机组对系统成本影响最为显著,燃油机组对SO₂的总排放量影响最为显著。分析结果进一步表明,针对超额排放,应设置更加严厉的惩罚措施,系统减排应优先限制燃油机组的尾气排放。

参考文献:

- [1] 张伟,刘苑红,赵明欣,等.以区域能效优化为目标计及不确定因素的分布式能源综合优化配置[J].现代电力,2016,33(5):1-6.

- [1] Zhang Wei, Liu Yuanhong, Zhao Mingxin, et al. Comprehensive optimal allocation of distributed energy resources by considering uncertainties factors with the objectives of regional energy efficiency optimization [J]. Modern Electric Power, 2016, 33(5): 1–6.
- [2] 姜洪殿,董康银,孙仁金,等. 中国新能源消费预测及对策研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(8): 1196–1202.
- [2] Jiang Hongdian, Dong Kangyin, Sun Renjin, et al. China's new energy: Current status, consumption forecasting and countermeasures [J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(8): 1196–1202.
- [3] 韩为超,刘俊勇,向月,等.基于目标机会约束规划的储能容量优化配置模型 [J]. 电力建设, 2017, 38(4): 71–78.
- [3] Han Weichao, Liu Junyong, Xiang Yue, et al. An optimal allocation model of energy storage capacity based on goal-chance constrained programming [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(4): 71–78.
- [4] Huang G, Baetz B W, Patry G G. A grey linear programming approach for municipal solid waste management planning under uncertainty [J]. Civil Engineering Systems, 1992, 9(4): 319–335.
- [5] Yeomans J S, Huang G H. An evolutionary grey, hop, skip, and jump approach: generating alternative policies for the expansion of waste management facilities [J]. Journal of Environmental Informatics, 2003, 1 (1): 37–51.
- [6] Zhou Y, Huang G H, Yang B. Water resources management under multi-parameter interactions: A factorial multi-stage stochastic programming approach [J]. Omega, 2013, 41(3): 559–573.
- [7] 郝振达. 析因设计与贝叶斯概率预报方法在香港流域水文模型中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [7] Hao Zhenda. Application of factorial design and bayesian probability forecast method on hydrological model on Xiangxi River watershed [M]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [8] 辛晓刚,王彪,李昕,等. 考虑风电消纳能力的含风电场电力系统多目标优化调度研究 [J]. 可再生能源, 2016, 34(1): 49–55.
- [8] Xin Xiaogang, Wang Biao, Li Xin, et al. Study on electrical system multi-objective load dispatch optimization with wind farms considering wind power consumption [J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(1): 49–55.

Energy allocation optimization combined with sensitive analysis model under uncertainty

Liu Zhengping, Li Wei, Wang Shen, Huang Guohe, Qi Xin

(Key Laboratory of Regional Energy System Optimization, Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the rapid growth of the world's population and economic development, the energy demand and consumption is also increasing rapidly. Optimizing the allocation of energy resources is the fundamental measures to promote energy saving and emission reduction, as well as relieve the contradiction between energy supply and demand. Based on uncertain optimization methods, an optimal energy allocation model has been developed. With relevant data, the developed model has been applied to a case study within a multi-facility, multi-period and multi-demand-level context to demonstrate the feasibility. Weighing the economic targets and environmental goals, optimal resources supply, electricity and heat generation, capacity expansion and pollution control plans have been generated at the lowest system cost. Moreover, factorial method has been used for sensitivity analysis to the model results, it could address the key impact factors to the selected objective. The proposed model could be helpful for providing decision support of optimal energy allocation policies.

Key words: energy allocation optimization; uncertainty; sensitive analysis; fossil energy; renewable energy