

不确定性环境下可再生能源系统新优化模型^{*}

阳彩霞^{1**}, 万中²

(1. 华南理工大学广州学院, 计算机工程学院, 广东广州 510800; 2. 中南大学数学与统计学院, 湖南长沙 410083)

摘要:为发挥可再生能源在能源—经济—环境可持续发展中的积极效应, 本文研究了多态不确定性环境下跨地区、跨品种、跨部门的可再生能源动态规划问题。利用满意度方法处理太阳能和风能可利用量等随机变量, 利用可能度方法处理能源供应成本、需求量等区间数, 再结合0—1整数规划, 得到使系统成本最小的新优化模型。最后的算例说明使用的综合方法是有效合理的。

关键词:能源系统 满意度方法 可能度方法 0—1整数规划 不确定性

中图分类号: O211.5 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2020)02-0211-05

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20200421.003

0 引言

近年来, 随着能源的减少和人类环保意识的增强, 可再生能源得到了愈来愈多的关注。合理开发利用可再生能源对解决全世界的能源与环境危机有着举足轻重的作用。国内外很多学者为缓解能源消费与环境保护之间的矛盾, 研究了可再生能源管理的各种规划模型^[1-9]。Cai等^[7]结合两阶段区间规划和机会约束规划研究了不确定环境下多地区、多时期、多品种、多部门之间的可再生能源综合规划问题, 建立了以系统成本最小为目标的优化模型。万中等^[8]研究了不确定环境下长株潭城市群的可再生能源管理系统并建立规划模型, 但没有进行算例验证。在Cai等^[7]和万中等^[8]的基础上, 阳彩霞^[9]结合区间线性规划、混合整数规划和新提出的满意度方法, 建立了不确定环境下可再生能源管理系统的两阶段规

划子模型, 并以最好最优解和最差最优解组成最优解区间, 但不能保证最好最优解一定比最差最优解好(即区间的左端点比右端点小)。为解决这个难题, 本文针对阳彩霞^[9]所研究的模型背景, 结合满意度方法、0—1整数规划和徐泽水等^[10]提出的可能度方法, 建立多态不确定环境下可再生能源系统的新优化模型, 通过模型给出能源配置方案的确定性最优解, 从而避免了可再生能源系统模型可能无解的状况。

1 处理随机不等式的满意度方法

定义: 设随机变量 x, y 相互独立, $E(\cdot)$ 表示期望, $D(\cdot)$ 表示方差, 称 $\frac{E(y-x)}{\sqrt{D(y-x)}}$ 为随机不等式 $x \leq y$ 的满意度, 记为 $\lambda(x \leq y)$ 。

这里, x 和 y 不能同时取常数。易得满意度 $\lambda(x \leq y) \in (-\infty, +\infty)$ 。

* 国家自然科学基金项目(71071162)资助。

【作者简介】

阳彩霞(1983—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事不确定优化理论及其应用研究, E-mail: 19343478@qq.com。

【**通信作者】

【引用本文】

阳彩霞, 万中. 不确定性环境下可再生能源系统新优化模型[J]. 广西科学, 2020, 27(2): 211-215.

YANG C X, WAN Z. A New Optimization Model of Renewable Energy Systems under Uncertainty [J]. Guangxi Sciences, 2020, 27(2): 211-215.

设有随机向量 $A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, 随机变量 b 和决策向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, 决策者对随机不等式

$$AX \leq b, \quad (1)$$

的满意度水平为 λ_0 , 根据定义有

$$\frac{E(b - AX)}{\sqrt{D(b - AX)}} \geq \lambda_0,$$

$$\therefore E(A)X \leq E(b) - \lambda_0 \sqrt{X^T D(A)X + D(b)}, \quad (2)$$

即在满意度 λ_0 下, 随机不等式(1)可转化为其确定性等价类(2)式, 该转化方法称为满意度方法。它只涉及随机参数的期望和方差, 不需要考虑其具体分布类型。

2 可再生能源系统的新优化模型

假设需要制定 3 个地区的长期(分为 3 个规划期)能源规划方案。为方便研究, 将终端消费分为 4 个部门: ①农业(包括农、林、牧、渔业); ②商业(包括批发、零售业, 住宿、餐饮业, 生活消费和其他); ③工业(包括工业和建筑业); ④交通系统(包括交通运输、仓储和邮政业)。3 个地区都有柴油、汽油、天然气、煤炭 4 种常规能源和水能、太阳能、风能 3 种可再生能源。柴油、汽油用于交通系统和储备发电。天然气用于工业、商业供热。煤炭用于火力发电和工业、商业需求。3 种可再生能源用于发电, 且每个地区都有相应的发电设备(有容量限制)和技术。若电力需求量在容量限制范围内, 则可再生能源发电只存在发电成本; 若电力需求量超出容量限制, 则可再生能源发电设备在 3 个规划期内可以增容一次, 但会产生额外的增容成本。

由于可再生能源的可利用量不稳定, 因此不适用确定数表示, 但它具有明显的概率分布特征。例如, 太阳能可利用量一般近似服从正态分布, 风能可利用量一般服从威尔布分布^[7]。而能源价格、需求量、发电转化率等参数往往也是不确定的, 虽然较难获取其概率分布信息, 但容易得到其可能取值范围, 因此适合用区间数 $[a^-, a^+]$ 来表示。

分别用满意度方法和可能度方法处理约束条件中的随机不等式^[9]和区间不等式^[10], 可得到多态不确定环境下可再生能源系统的新优化模型, 其目标函数为最小化能源系统总成本, 分为下述 3 个部分。

①柴油、汽油、天然气和煤炭的供应成本

$$\sum_{t=1}^3 (PD_t^+ X_{1,t} + PG_t^+ X_{2,t} + PN_t^+ X_{3,t} + PC_t^+ X_{4,t});$$

②水力、太阳能、风力、柴油、汽油和煤炭的发电成本

$$\sum_{m=1}^3 \sum_{t=1}^3 (VH_{m,t}^+ Y_{1,m,t} + VS_{m,t}^+ Y_{2,m,t} + VW_{m,t}^+ Y_{3,m,t} + VD_{m,t}^+ Y_{4,m,t} + VG_{m,t}^+ Y_{5,m,t} + VC_{m,t}^+ Y_{6,m,t});$$

③水力、太阳能、风力发电的增容成本

$$\sum_{n=1}^3 (IH_n^+ EH_n Z_{1,n} + IS_n^+ ES_n Z_{2,n} + IW_n^+ EW_n Z_{3,n});$$

记不同区间不等式的可能度水平为 $\beta_i (i=1, \dots, 13)$, 不同区间不等式的满意度水平为 $\lambda_i (i=1, 2)$, 约束条件可分为

①柴油、汽油、天然气和煤炭的供需平衡

$$X_{1,t} - (1 - \beta_1) \sum_{m=1}^3 FED_{m,t}^- Y_{4,m,t} - \beta_1 \sum_{m=1}^3 FED_{m,t}^+ Y_{4,m,t} \geq \beta_1 \sum_{m=1}^3 DTD_{m,t}^+ + (1 - \beta_1) \sum_{m=1}^3 DTD_{m,t}^-, \forall t, \quad (3)$$

$$X_{2,t} - (1 - \beta_2) \sum_{m=1}^3 FEG_{m,t}^- Y_{5,m,t} - \beta_2 \sum_{m=1}^3 FEG_{m,t}^+ Y_{5,m,t} \geq \beta_2 \sum_{m=1}^3 DTG_{m,t}^+ + (1 - \beta_2) \sum_{m=1}^3 DTG_{m,t}^-, \forall t, \quad (4)$$

$$X_{3,t} \geq \beta_3 \sum_{m=1}^3 (DIN_{m,t}^+ + DMN_{m,t}^+) + (1 - \beta_3) \sum_{m=1}^3 (DIN_{m,t}^- + DMN_{m,t}^-), \forall t, \quad (5)$$

$$X_{4,t} - (1 - \beta_4) \sum_{m=1}^3 FEC_{m,t}^- Y_{6,m,t} - \beta_4 \sum_{m=1}^3 FEC_{m,t}^+ Y_{6,m,t} \geq \beta_4 \sum_{m=1}^3 (DIC_{m,t}^+ + DMC_{m,t}^+) + (1 - \beta_4) \sum_{m=1}^3 (DIC_{m,t}^- + DMC_{m,t}^-), \forall t; \quad (6)$$

②水能、太阳能、风能的可利用量限制

$$(1 - \beta_5) \sum_{m=1}^3 \frac{Y_{1,m,t}}{FEH_{m,t}^+} + \beta_5 \sum_{m=1}^3 \frac{Y_{1,m,t}}{FEH_{m,t}^-} \leq$$

$$\beta_5 AVH_t^- + (1 - \beta_5) AVH_t^+, \forall t, \quad (7)$$

$$(1 - \beta_6) \sum_{m=1}^3 \frac{Y_{2,m,t}}{FES_{m,t}^+} + \beta_6 \sum_{m=1}^3 \frac{Y_{2,m,t}}{FES_{m,t}^-} \leq$$

$$E(AVS_t) - \lambda_1 \sqrt{D(AVS_t)}, \forall t, \quad (8)$$

$$(1 - \beta_7) \sum_{m=1}^3 \frac{Y_{3,m,t}}{FEW_{m,t}^+} + \beta_7 \sum_{m=1}^3 \frac{Y_{3,m,t}}{FEW_{m,t}^-} \leq$$

$$E(AVW_t) - \lambda_2 \sqrt{D(AVW_t)}, \forall t; \quad (9)$$

③ 电力供需平衡

$$\sum_{m=1}^3 (Y_{1,m,t} + Y_{2,m,t} + Y_{3,m,t} + Y_{4,m,t} + Y_{5,m,t} +$$

$$Y_{6,m,t}) \geq \beta_8 \sum_{m=1}^3 (DIE_{m,t}^+ + DME_{m,t}^+ + DAE_{m,t}^+) +$$

$$(1 - \beta_8) \sum_{m=1}^3 (DIE_{m,t}^- + DME_{m,t}^- + DAE_{m,t}^-), \forall t;$$

(10)

④ 水力、太阳能、风力发电设备的装机容量限制

$$\sum_{t=1}^3 \sum_{m=1}^3 Y_{1,m,t} \leq [\beta_9 RCH^- + (1 - \beta_9) RCH^+ +$$

$$\sum_{n=1}^3 Z_{1,n} EH_n] UCAP, \quad (11)$$

$$\sum_{t=1}^3 \sum_{m=1}^3 Y_{2,m,t} \leq [\beta_{10} RCS^- + (1 - \beta_{10}) RCS^+ +$$

$$\sum_{n=1}^3 Z_{2,n} ES_n] UCAP, \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^3 \sum_{m=1}^3 Y_{3,m,t} \leq [\beta_{11} RCW^- + (1 - \beta_{11}) RCW^+ +$$

$$\sum_{n=1}^3 Z_{3,n} EW_n] UCAP; \quad (13)$$

⑤ 柴油和汽油储备发电设备装机容量限制

$$Y_{4,m,t} \leq \beta_{12} UP_{4,m,t}^- + (1 - \beta_{12}) UP_{4,m,t}^+, \forall t, m, \quad (14)$$

$$Y_{5,m,t} \leq \beta_{13} UP_{5,m,t}^- + (1 - \beta_{13}) UP_{5,m,t}^+, \forall t, m; \quad (15)$$

⑥ 3类决策变量限制

$$X_{i,t} \geq 0, \forall i, t,$$

$$Y_{j,m,t} \geq 0, \forall j, t, m,$$

$$Z_{k,n} \in \{0, 1\}, \forall k, n,$$

$$\sum_{n=1}^3 Z_{k,n} \leq 1, \forall k.$$

上述各式中, 决策变量 $X_{1,t}, X_{2,t}, X_{3,t}, X_{4,t}$ 分别表示 t 时期的柴油、汽油、天然气和煤炭供应量(单位: TJ); $Y_{1,m,t}, Y_{2,m,t}, Y_{3,m,t}, Y_{4,m,t}, Y_{5,m,t}, Y_{6,m,t}$ 分别表示 t 时期 m 地区水力、太阳能、风力、柴油、汽油和煤炭的发电量(单位: MW); $Z_{1,n}, Z_{2,n}, Z_{3,n}$ 分别表示第 n 选项下水力、太阳能、风力发电的增容选择, 取 0 表示不增容, 取 1 表示增容; 参数 $VH_{m,t}, VS_{m,t}, VW_{m,t}, VD_{m,t}, VG_{m,t}, VC_{m,t}$ 分别表示 t 时期 m 地区水力、太阳能、风力、储备柴油、汽油和煤炭的平均发电成本(单位: $\$ 10^3/\text{MW}$); IH_n, IS_n, IW_n 分别表示水力、太阳能、风力发电的平均增容成本(单位: $\$ 10^3/\text{MW}$); EH_n, ES_n, EW_n 分别表示第 n 选项下水力、太阳能、风力发电的增容量(单位: MW); $DTD_{m,t}, DTG_{m,t}, DIN_{m,t}, DMN_{m,t}, DIC_{m,t}, DMC_{m,t}, DIE_{m,t}, DME_{m,t}, DAE_{m,t}$ 分别表示 t 时期 m 地区交通柴油、交通汽油、工业天然气、商业天然气、工业煤炭、商业煤炭、工业电力、商业电力和农业电力的需求量(单位: TJ); $FED_{m,t}, FEG_{m,t}, FEC_{m,t}, FEH_{m,t}, FES_{m,t}, FEW_{m,t}$ 分别表示 t 时期 m 地区的柴油、汽油、煤炭、水力、太阳能和风力的发电转换率; RCH, RCS, RCW 分别表示水力、太阳能和风力发电厂的现有装机容量(单位: MW); AVH_t, AVS_t, AVW_t 分别表示 t 时期水力、太阳能和风力的可利用量(单位: MW); $UP_{4,m,t}, UP_{5,m,t}$ 分别表示 t 时期 m 地区用于储备发电的柴油量和汽油量上限(单位: MW); UCAP 表示发电厂的能量转换系数。

3 算例分析

3.1 最优值和最优解

为了更好地进行比较分析, 本文模型中的所有参数全部沿用文献[9]的数据。若目标函数中取折中系数 0.5, 使用 Lingo 软件编程可求得新模型在不同可能度和满意度水平下的最优值和最优解。具体结果见表 1, 未列出决策变量的取值全为 0。

3.2 结果与分析

(1) 与文献[9]的数值结果相比, 本文模型的最优值(系统总成本)和 4 种常规能源的供应量 $X_{i,t}$ ($i = 1, 2, 3, 4$) 完全在文献[9]所得结果对应区间内, 但 $Y_{j,m,t}$ ($j = 1, 2, 3$) 的取值反映了 3 种可再生能源的配置方案有很大不同, 可见带有不确定性的可再生能源在系统中的敏感度很高。

表 1 数值结果

Table 1 Numerical results

决策变量 Decision variables	$\lambda_i = 0.1$			$\lambda_i = 4$		
	文献结果 ^[9] Results of references ^[9]	本文结果 Results of this paper		文献结果 ^[9] Results of references ^[9]	本文结果 Results of this paper	
		$\beta_i = 0.1$	$\beta_i = 0.9$		$\beta_i = 0.1$	$\beta_i = 0.9$
$f (10^7 \$)$	[5.110 0, 7.816 1]	5.619 4	7.193 9	[5.112 4, 7.819 5]	5.620 9	7.195 2
X_{11}	[48.32, 50.32]	48.52	50.12	[48.32, 50.32]	48.52	50.12
X_{12}	[52.30, 54.28]	52.50	54.08	[52.30, 54.28]	52.50	54.08
X_{13}	[56.51, 58.51]	56.71	58.31	[56.51, 58.51]	56.71	58.31
X_{21}	[55.27, 58.27]	55.57	57.97	[55.27, 58.27]	55.57	57.97
X_{22}	[63.01, 66.01]	63.31	65.71	[63.01, 66.01]	63.31	65.71
X_{23}	[64.99, 67.99]	65.29	67.69	[64.99, 67.99]	65.29	67.69
X_{31}	[119.06, 139.07]	121.06	137.07	[119.06, 139.07]	121.06	137.07
X_{32}	[123.11, 143.11]	125.11	141.11	[123.11, 143.11]	125.11	141.11
X_{33}	[128.30, 148.30]	130.30	146.30	[128.30, 148.30]	130.30	146.30
X_{41}	[230 0, 315 0]	238 5	306 5	[230 0, 315 0]	238 5	306 5
X_{42}	[246 0, 332 0]	254 6	323 4	[246 0, 332 0]	254 6	323 4
X_{43}	[252 0, 350 0]	261 8	340 2	[252 0, 350 0]	261 8	340 2
Y_{111}	[27.18, 29.07]	35.45	38.64	[40.97, 41.29]	43.36	45.81
Y_{112}	0.00	44.65	47.85	[0.00, 2.35]	52.96	55.42
Y_{113}	0.00	44.91	48.73	0.00	59.98	62.65
Y_{121}	[0.00, 1.12]	0.00	0.00	[0.00, 2.68]	0.00	0.00
Y_{122}	[23.15, 24.04]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Y_{123}	13.66	0.00	0.00	50.59	0.00	0.00
Y_{131}	16.27	0.00	0.00	2.49	0.00	0.00
Y_{132}	[29.92, 31.80]	0.00	0.00	[53.07, 53.74]	0.00	0.00
Y_{133}	0.00	0.00	0.00	[4.42, 6.41]	0.00	0.00
Y_{213}	4.49	5.08	4.55	[1.94, 2.22]	2.19	1.96
Y_{223}	4.49	0.00	0.00	[1.94, 2.22]	0.00	0.00
Y_{233}	4.49	0.00	0.00	[1.94, 2.22]	0.00	0.00
Y_{311}	0.00	8.30	7.52	0.00	0.39	0.35
Y_{312}	0.00	8.72	7.94	0.00	0.41	0.37
Y_{313}	[11.77, 12.90]	12.77	11.88	[0.55, 0.60]	0.60	0.55
Y_{322}	[0.00, 0.25]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Y_{323}	[11.77, 12.54]	0.00	0.00	[0.55, 0.60]	0.00	0.00
Y_{333}	[11.77, 12.90]	0.00	0.00	[0.55, 0.60]	0.00	0.00

(2)单从本文的数值结果来看:当满意度水平 λ_i 不变、可能度水平 β_i 增大时,3个规划期内的4种常规能源供应量 $X_{i,t}$ ($i=1,2,3,4$)均有增加,而3种可再生能源发电量 $Y_{j,m,t}$ ($j=1,2,3$)有增有减,但系统总成本 f 会增加,且增幅明显;当可能度水平 β_i 不变、满意度水平 λ_i 增大时,4种常规能源供应量 $X_{i,t}$ ($i=1,2,3,4$)不变,而3种可再生能源发电量 $Y_{j,m,t}$ ($j=1,2,3$)依然有增有减,系统总成本 f 也会增加,但增幅较小。可见可能度水平 β_i 比满意度水平 λ_i 对系统成本影响更大,毕竟 λ_i 只存在于含随机变量的约束条件(8)和(9)中,而 β_i 存在于含区间数的约束条件(3)–(15)中。另外,不管是可能度水平 β_i 还是满意度水平 λ_i 增加(即约束条件的违反度越低),都会导致系统总成本增加。这表明能源的安全性和系统的可靠性需付出更高的成本代价。

(3)由于柴油、汽油的发电成本较高,在电力需求得到满足的情况下,不同地区不同时期的柴油、汽油的发电量 $Y_{j,m,t}$ ($j=4,5$)均为0。而3种可再生能源的发电设备也无需增容,毕竟增容会产生额外的巨大增容成本。

4 讨论

从计算和分析结果来看,本文结合满意度方法和可能度方法建立的能源规划新模型是合理有效的,其优势有:①能反映系统中不同能源品种、不同发电技术、不同消费部门间关系的复杂性;②能处理系统中以区间数和随机变量反映出的不确定性;③考虑了3个规划期内发电厂的增容问题,能反映系统的动态性;④能反映系统成本、能源安全与系统可靠性之间的相互制约关系;⑤能提供不同约束违反水平下的能

源配置方式。

可能度方法的使用解决了文献[9]中的两阶段子模型可能无解的问题。而作者提出的处理随机不等式的满意度方法,与常用的机会约束法^[3,6-7]相比,不受随机变量具体分布类型的限制,只需知道其两个关键数字特征即可,使用起来更有优势。

本文模型虽然考虑了3个地区在3个规划期的动态规划,但由于模型中变量、参数甚多,以及考虑到便于与文献[9]比较分析,在算例中没有细分3个地区能源结构和需求差异。这是本研究的不足之处。在下一步的研究中,可加以改进这个问题,也可以考虑能源消耗的环境成本、系统的可靠性等建立多目标优化模型,还可以继续探索其他能解决不确定问题的启发式算法。本研究结果可为相关决策部门在制订能源系统规划方案时提供理论和方法支持,也可供其他学者作研究参考。

参考文献

- [1] AMER M, NAMAANE A, M'SIRDI N K. Optimization of hybrid renewable energy systems (HRES) using PSO for cost reduction [J]. Energy Procedia, 2013, 42: 318-327. DOI:10.1016/j.egypro.2013.11.032.
- [2] SHARAFIA M, ELMEKKAWY T Y. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach [J]. Renewable Energy, 2014, 68: 67-79. DOI:10.1016/j.renene.2014.01.011.
- [3] 宋杰鲲, 栾龙, 陆悠悠, 等. 山东省能源-经济-环境系统模糊机会约束目标规划模型[J]. 山东科学, 2013, 26(6): 92-100. DOI:10.3976/j.issn.1002-4026.2013.06.019.
- [4] CHANG K H, LIN G. Optimal design of hybrid renewable energy systems using simulation optimization [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2015, 52: 40-51. DOI:10.1016/j.simpat.2014.12.002.
- [5] BHANDARI B, LEE K T, LEE G Y, et al. Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2015, 2(1): 99-112. DOI:10.1007/s40684-015-0013-z.
- [6] 周辛南, 柯德平, 孙元章. 基于配电网静态电压质量机会性约束的可再生能源分布式发电容量规划[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 143-149. DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2015.09.023.
- [7] CAI Y P, HUANG G H, YANG Z F, et al. Community-scale renewable energy systems planning under uncertainty-an interval chance-constrained programming approach [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 13(4): 721-735. DOI:10.1016/j.rser.2008.01.008.
- [8] 万中, 阳彩霞, 郝爱云. 地市级再生资源能源利用优化[J]. 经济数学, 2009, 26(2): 45-51. DOI:10.3969/j.issn.1007-1660.2009.02.008.
- [9] 阳彩霞. 可再生能源系统的不确定性优化模型及求解[J]. 经济数学, 2018, 35(4): 85-90. DOI:10.3969/j.issn.1007-1660.2018.04.016.
- [10] 徐泽水, 达庆利. 区间数排序的可能度法及其应用[J]. 系统工程, 2003, 18(1): 67-70. DOI:10.3969/j.issn.1000-5781.2003.01.011.

A New Optimization Model of Renewable Energy Systems under Uncertainty

YANG Caixia¹, WAN Zhong²

(1. School of Computer Engineering, Guangzhou College of South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong, 510800, China; 2. School of Mathematics and Statistics, Central South University, Changsha, Hunan, 410083, China)

Abstract: In order to exert the positive effects of renewable energy in the sustainable development of energy, economy and environment, the dynamic programming problem of renewable energy across regions, varieties and sectors under polymorphic uncertain environment is studied in this paper. The proposed satisfaction method is used to deal with the random variables such as the availability of solar energy and wind energy, and the probability method is used to deal with the interval numbers such as energy supply cost and demand, and then combined with 0-1 integer programming, an optimization model that minimizes the system cost is obtained. The final example shows that the comprehensive method used in this paper is effective and reasonable.

Key words: energy systems, satisfaction degree method, possibility degree method, 0-1 integer programming, uncertainty

责任编辑:符支宏