

多重不确定条件下的乌鲁木齐分布式 绿色电力规划研究

王 深, 黄国和, 刘政平

(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: 考虑季节和系统风险,设计3个情景,将两阶段随机规划、模糊随机规划以及随机鲁棒优化方法,分季节和系统风险多情景设置发电目标,以系统成本为模型目标,以电力供需平衡、电网交易、区域限制、污染物排放为约束条件,建立绿色电力规划模型进行研究,得到乌鲁木齐区域的分布式发电的优化配置,可为在乌鲁木齐推进绿色能源及能源发展提供决策支持。

关键词: 不确定性分析;最优化;分布式发电;可再生能源;绿色电力

中图分类号: TK01

文献标识码: A

0 引 言

在中国,绿色电力的推广势在必行。绿色电力将大力推进可再生能源的消纳和利用,以此促进高能耗能源结构绿色转型,是解决传统能源危机的重要手段,同时能为中国2020年非化石能源消耗比例提高为15%的目标提供帮助。分布式发电因其特点可为绿色电力应用提供有力的技术支持。分布式发电作为智能电网的重要组成部分,具有污染少、消耗低、可改善电能质量等优点,因此受到国际广泛关注。然而分布式发电引入绿色电力后会带来很多影响^[1],如风、光等能源具有的特性会使分布式发电输出具有随机性和间歇性等,会对电网稳定性甚至安全性造成影响^[2]。风、光等能源具有一定的季节性和周期性,因此考虑季节因素的分布式电力规划对于绿色电力联网具有一定意义。

另一方面,分布式电力会给区域供电以及联网后电力交易的需求侧带来复杂的不确定性。关于分布式发电的研究已较多,如王守相等^[3]探讨了组成微网的分布式发电的优化配置问题。朱璇等^[4]研究了平均成本下垂控制策略在分布式发电中的

应用。田军等^[5]介绍了分布式发电中储能技术的应用。

新疆维吾尔自治区是中国最富有绿色能源的省区之一。近年来,在新疆维吾尔自治区,风力和太阳能光伏发电装机容量的装机容量不断增加。但却出现了严重的“弃风弃光”现象,这种独特的现象导致成百上千的可再生能源设备闲置。这些绿色电力推广中遇到的问题在新疆尤为凸显。截至2017年,新疆地区弃风率达29.8%,弃电量也达到132.5亿kWh;弃光率21.6%,弃光电量达到28.2亿kWh。乌鲁木齐作为新疆维吾尔自治区重要的能源基地,已建立许多风场,并于2015年乌鲁木齐的达坂城被认定为国家风力发电的试点地区。因此,乌鲁木齐面临着严重的“弃风弃光”以及更多的电力系统管理挑战。但另一方面,2015年7月在达坂城成功实现7个风电场的电网互联,也为分布式发电系统构建提供了基础。因此,基于绿色电力的分布式发电系统在乌鲁木齐具有潜力巨大。

因此本文以作为新疆重要能源基地的乌鲁木齐为例,充分考虑分布式系统中的不确定性,基于两阶段随机规划、模糊随机规划以及随机鲁棒优化

收稿日期: 2018-03-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2015XS101)

通信作者: 黄国和(1961—),男,博士、教授、博士生导师,主要从事能源模型与能源系统规划、水资源与环境系统工程、水文与水文环境系统模拟、气候模型与尺度下延方面的研究。huang@iseis.org

方法的耦合方法,结合乌鲁木齐的绿色电力现状构建基于多重不确定条件下的乌鲁木齐两阶段绿色电力规划模型,得到符合乌鲁木齐区域特征的分布式能源规划方案以及绿色电力使用方案,以期乌鲁木齐电力系统发展以及绿色电力推进提供决策支持。

1 研究方法

两阶段随机规划方法在处理拥有随机不确定性参数的规划问题中具有独特优势,可通过追索函数分析各种情景^[6-9]。本文为处理分布式电力系统中的复杂不确定性,将随机不确定性参数变为模糊随机不确定性参数,通过多重不确定性增加模型对现实电力系统的抽象能力。因此引入模糊随机参数规划方法,处理拥有多重不确定性参数的两阶段随机模型。最后将随机鲁棒优化方法融入模型框架。模型整体可表示为:

$$\text{Min } f^* = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{n_1} \tilde{c}_{jt}^* x_{jt}^* + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{k=1}^{K_t} p_{tk} \tilde{d}_{jt}^* y_{jkt}^* z + \omega \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{k=1}^{K_t} p_{tk} \left(\tilde{d}_{jt}^* y_{jkt}^* - \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{k=1}^{K_t} p_{tk} \tilde{d}_{jt}^* y_{jkt}^* + 2\theta_{jkt}^* \right) \quad (1)$$

约束:

$$\sum_{j=1}^{j_1} \tilde{d}_{jt}^* y_{jkt}^* - \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{k=1}^{K_t} p_{tk} \tilde{d}_{jt}^* y_{jkt}^* + 2\theta_{jkt}^* \geq 0, \quad (2)$$

$$j=1,2,\dots,n_1; k=1,2,\dots,K_t$$

$$\sum_{j=1}^{n_1} \tilde{a}_{jt}^* x_{jt}^* \leq \tilde{b}_t^*, \quad (3)$$

$$r=1,2,\dots,m_1; t=1,2,\dots,T$$

$$\sum_{j=1}^{n_1} \tilde{a}_{jt}^* x_{jt}^* + \sum_{j=1}^{n_1} \tilde{e}_{jt}^* y_{jkt}^* \leq \tilde{w}_t^*, \quad (4)$$

$$r=1,2,\dots,m_2; t=1,2,\dots,T; k=1,2,\dots,K_t$$

$$x_{jt}^* \geq 0, j=1,2,\dots,n_1; t=1,2,\dots,T \quad (5)$$

$$y_{jkt}^* \geq 0, j=1,2,\dots,n_1; \quad (6)$$

$$k=1,2,\dots,K_t; t=1,2,\dots,T;$$

式中, \tilde{c}_{jt}^* 、 \tilde{d}_{jt}^* ——决策变量系数; x_{jt}^* 、 y_{jkt}^* ——决策变量; p_{tk} —— y_{jkt}^* 的不同概率水平; ω ——为鲁棒级别,用于表示系统安全等级; θ_{jkt}^* ——松弛变量;

$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{k=1}^{K_t} p_{tk} \left(\tilde{d}_{jt}^* y_{jkt}^* - \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{k=1}^{K_t} p_{tk} \tilde{d}_{jt}^* y_{jkt}^* + 2\theta_{jkt}^* \right)$ ——目标期望值。

2 模型构建与情景设置

2.1 模型构建

本研究以乌鲁木齐为研究区域,考虑4种绿色能源技术、2个位规划期、3种大气污染物、1种温室气体、3个季节情景,以系统成本最小为模型目标,以电力供需平衡、电网交易、区域限制、污染物排放为约束条件建立基于两阶段随机规划、模糊随机规划以及随机鲁棒优化方法的耦合方法,建立乌鲁木齐分布式绿色电力规划模型。

目标函数:

$$\text{Min } f^* = (a) + (b) + (c) - (d) + (e) + (f) + (g) \quad (7)$$

式中, f ——系统总成本; (a) ——能源供应成本; (b) ——能源成本; (c) ——运行成本; (d) ——与电网交易成本; (e) ——排污费; (f) ——电力线损成本; (g) ——鲁棒函数。

1) 能源供应成本

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{u=1}^U S_{ij}^* \tilde{C}P_{ij}^* (Q_{nij}^* + P_{tu} QE_{niju}^*) \eta_{ii}^* \quad (8)$$

式中, i ——绿色能源技术(1表示风能发电,2表示光能发电,3表示燃料电池发电,4表示微型汽轮机); t ——规划期 $t=1,2$; r ——季节(1表示夏季,2表示冬季,3表示过渡季节); j ——分布式区域 $j=1,2,3$; P ——污染物以及 CO_2 (1表示 SO_2 ,2表示 NO_x ,3表示 CO_2 ,4表示总悬浮颗粒物 TSP); u ——电力需求等级(L表示低需求,M表示中需求,H表示高需求); S_{ij}^* ——决策区域; CP_{ij}^* ——在分区 j 建设 i 设施的成本,¥; Q_{nij}^* ——为预期发电量, kWh; P_{tu}^* ——需求水平 u 发生的概率; QE_{niju}^* ——规划发电量, kWh。

2) 能源成本

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{u=1}^U S_{ij}^* \tilde{P}E_{ii}^* (E_{nij}^* + P_{tu} EC_{niju}^*) \quad (9)$$

式中, PE_{ii}^* ——能源价格, ¥/PJ; E_{nij}^* ——预期能源消耗量, PJ; EC_{niju}^* ——能源消耗量, PJ。

3) 运行成本

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{u=1}^U S_{ij}^* \tilde{E}P_{ii}^* (Q_{nij}^* + P_{tu} QE_{niju}^*) \quad (10)$$

式中, $\tilde{E}P_{ii}^*$ ——发电运行成本, ¥/kWh。

4) 电网交易成本

$$\sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J \sum_{u=1}^U \tilde{M}E_{rt}^+ EI_{jru}^+ P_{tu} \quad (11)$$

式中, $\tilde{M}E_{rt}^+$ ——购电价格, ¥/kWh; EI_{jru}^+ ——电力购
进量, kWh。

5) 排污费

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{u=1}^U \sum_{p=1}^P \tilde{W}P_p^+ S_{ij}^+ (Q_{rij}^+ + P_{tu} QE_{riju}^+) WE_{ijp}^+ \quad (12)$$

式中, $\tilde{W}P_p^+$ ——排放成本, ¥/t; WE_{ijp}^+ ——发电排
污率。

6) 电力线损成本

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{u=1}^U \sum_{p=1}^P \tilde{W}P_p^+ S_{ij}^+ SL_{rij}^+ EI_{jru}^+ WL_{jp}^+ P_{tu} \quad (13)$$

式中, SL_{rij}^+ ——线长, m; WL_{jp}^+ ——线损率。

7) 鲁棒函数

$$\begin{aligned} & \lambda \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{u=1}^U P_{tu} (\xi_{riju}^+ - \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{u=1}^U P_{tu} \xi_{riju}^+ + 2\theta_{riju}^+) \\ & \xi_{riju}^+ = S_{ij}^+ \tilde{C}P_{ij}^+ QE_{riju}^+ \eta_{it}^+ + S_{ij}^+ \tilde{P}E_{it}^+ EC_{riju}^+ + \\ & S_{ij}^+ \tilde{E}P_{it}^+ QE_{riju}^+ + \tilde{M}PE_{it}^+ EI_{jru}^+ - \tilde{X}P_{it}^+ EX_{jru}^+ + \\ & \sum_{p=1}^P \tilde{W}P_p^+ S_{ij}^+ QE_{riju}^+ WE_{ijp}^+ + \sum_{p=1}^P \tilde{W}P_p^+ S_{ij}^+ SL_{rij}^+ EI_{jru}^+ WL_{jp}^+ \end{aligned} \quad (14)$$

式中, λ ——权重系数; θ_{riju}^+ ——松弛变量。

约束条件:

1) 电力需求约束

$$\sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (Q_{rij}^+ + QE_{riju}^+) S_{ij}^+ - \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J EI_{jru}^+ \geq (1 + \Delta) \tilde{E}D_{tu} \quad (15)$$

式中, $\tilde{E}D_{tu}$ ——整体电力需求, kWh; Δ ——负荷
系数。

2) 电力平衡约束

$$\sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^I (Q_{rij}^+ + QE_{riju}^+) S_{ij}^+ - \sum_{r=1}^R EI_{jru}^+ \geq (1 + \Delta) \tilde{E}DI_{iju} \quad (16)$$

式中, $\tilde{E}DI_{iju}$ ——分布式区域电力需求, kWh。

3) 能源平衡约束

$$E_{rij}^+ \alpha_{ij}^+ = Q_{rij}^+ \quad (17)$$

$$EC_{riju}^+ \alpha_{ij}^+ = QE_{riju}^+ \quad (18)$$

$$\sum_{r=1}^R EI_{jru}^+ \leq \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R (Q_{rij}^+ S_{ij}^+ + QE_{riju}^+ S_{ij}^+) \quad (19)$$

式中, α_{ij}^+ ——电力转化率; QE_{riju}^+ ——分布式区域
发电量, kWh。

4) 电力容量限制

$$Q_{rij}^+ S_{ij}^+ \leq Q_{rij}^+ \leq Q_{rij}^+ S_{ij}^+ \quad (20)$$

$$QE_{riju}^+ S_{ij}^+ \leq QE_{riju}^+ \leq QE_{riju}^+ S_{ij}^+ \quad (21)$$

5) 分布区域与电网交易约束 $EX_{jru}^+ = 0$ 时,

$$\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R Q_{rij}^+ + QE_{riju}^+ \leq \tilde{E}DI_{iju} \quad (22)$$

式中, $\tilde{E}DI_{iju}$ ——分布式区域电力需求, kWh。

6) 分布区域电力设施限制

$$S_{ij}^+ \leq AR_{rij}^+ \quad (23)$$

式中, AR_{rij}^+ ——区域电力技术限制。

7) 乌鲁木齐污染物以及 CO₂ 排放限值

$$\begin{aligned} & \Pr\{(\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J S_{ij}^+ (Q_{rij}^+ + QE_{riju}^+) WE_{ijp}^+ + \\ & \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J \tilde{W}P_p^+ S_{ij}^+ SL_{rij}^+ EI_{jru}^+ WL_{jp}^+) \leq \tilde{C}WI_{ip}^+\} \geq 1 - qs_p \end{aligned} \quad (24)$$

式中, WL_{jp}^+ ——线损污染率; $\tilde{C}WI_{ip}^+$ ——污染物及
CO₂ 总限制量, t; qs_p ——总体污染物控制概率。

8) 分布区域污染物以及二氧化碳排放限值

$$\begin{aligned} & \Pr\{(\sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R S_{ij}^+ (Q_{rij}^+ + QE_{riju}^+) T_{rij}^+ WE_{ijp}^+ + \\ & \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \tilde{W}P_p^+ S_{ij}^+ SL_{rij}^+ EI_{jru}^+ WL_{jp}^+) \leq \tilde{C}WD_{ip}^+\} \geq 1 - qr_{jp} \end{aligned} \quad (25)$$

式中, T_{rij}^+ ——设备运行时间, h; $\tilde{C}WD_{ip}^+$ ——分布式
各区域污染物以及 CO₂ 限制量, t; qr_{jp} ——分区污
染物控制概率。

2.2 数据来源和情景

本文以 5 a 为一个规划期, 对乌鲁木齐进行为
期 10 a(2006~2016 年) 的分布式电力规划。数据取
自乌鲁木齐统计年鉴、政府部门发展规划、地区电
力集团公司报告、电力年鉴、相关文献以及案例研
究等。通过数据整理得出各区域电力需求如表 1
所示。本文以根据季节以及经济因素为指标设定绿
色电力技术相关的 3 种情景^[10~14]。情景 1(S1) 为放
宽季节对能源的限制, 此情景下, 拥有较强季节限
制的发电技术(如风能光能等)也不被季节影响。
情景 2(S2) 为在冬季光能发电受到较强限制, 因为
光能发电能力受到太阳辐射强度和冬季温度的限
制。情景 3(S3) 为在冬季风力发电受到较强限, 主
要原因是冬季不稳定的风速和被冻结的风险, 这将
给电力供应带来高度的不稳定。

表1 各区域不同水平需求电量				
Table 1 Power demand of each district				
10 ⁶ kWh				
时期	水平	分布式区域		
		区域1	区域2	区域3
t=1	L	74642.04	75911.29	85863.23
	M	81480.04	83022.81	95179.89
	H	85531.00	87038.95	102861.70
	L-L	72642.04	72642.04	76863.23
	L-M	76642.04	75324.14	80863.23
	L-H	76942.04	75592.35	84863.23
t=2	M-L	79480.04	84201.75	89179.89
	M-M	83480.04	87461.84	90579.89
	M-H	85980.04	87787.84	94179.89
	H-L	87531.00	108729.90	102261.70
	H-M	90931.00	113216.40	105861.70
	H-H	92931.00	113665.10	110861.70

3 结果分析

图1为不同鲁棒等级以及情景下分布式系统的成本的变化。可看出系统成本随鲁棒等级提高而有所提升,最后稳定。如在情景1时在鲁棒等级为5、10、30、50、70时,系统成本分别为 $[2.046, 2.052] \times 10^{12}$ 、 $[2.046, 2.052] \times 10^{12}$ 、 $[2.047, 2.052] \times 10^{12}$ 、 $[2.060, 2.062] \times 10^{12}$ 、 $[2.060, 2.062] \times 10^{12}$ ¥。鲁棒等级增加是为了减少系统风险,这表明系统风险降低后成本也会相应增加。另一方面,由于绿色电力技术比例的调整,系统成本也会显著改变。如鲁棒等级为70时,系统成本在情景1~3情景时分别为 $[2.060, 2.062] \times 10^{12}$ 、 $[2.444, 2.444] \times 10^{12}$ 、 $[2.989, 3.008] \times 10^{12}$ ¥。此外,绿色电力的推进将受到区域地理因素的限制,为了保证电力系统平衡,分布式电力系统与电网的联网意义重大。将会出现2种情况:为满足区域电力需求,将从电网购进电力;为避免弃风弃光现象,将超出需求的电量出口至电网。

本研究将乌鲁木齐分为3个区域:区域1包括天山区、水磨沟区、达坂城区;区域2包括沙依巴克区、新市区、头屯河区、乌鲁木齐县;区域3包括米

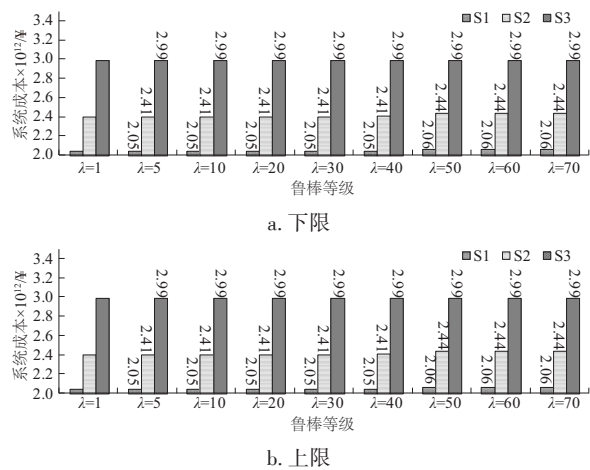


图1 不同鲁棒等级和情景下的系统成本
Fig. 1 System cost under different robust and scenarios

东区。3个分布式区域会根据区域限制以及情景选择最优绿色电力技术,其中区域1和区域2选择为风电和光能发电,而区域3为微型汽轮机。由于区域1和2的选择,规划期内不会有能源消耗,但会有运行费用。图2为区域3在不同情景下天然气消耗量,可看出天然气的消耗在冬季十分敏感,其主要原因是区域电力需求增加以及天然气价格和电力进口价格增长所造成。

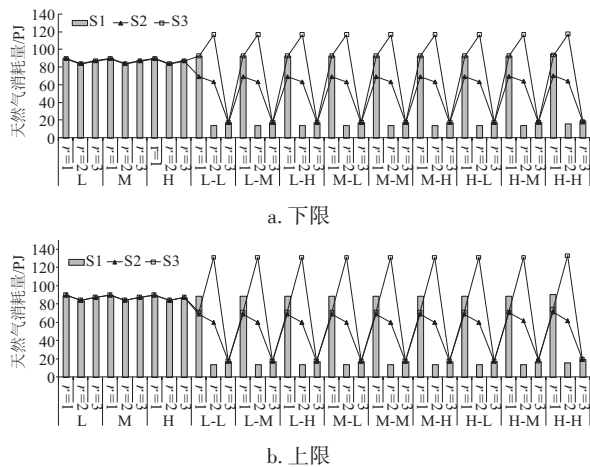


图2 不同情景下区域3天然气消耗量
Fig. 2 Optimized natural gas consumption in district 3 under different scenarios

图3~图5为3个区域在鲁棒等级为70时各需求水平以及各情景下的发电量规划结果。图中,L表示电力需求水平在第1时期为低,而L-M表示电力需求水平在第1时期为低需求量,第2时期为中需求量。

图 3 为区域 1 在不同需求水平不同季节不同情景下的发电量。如在第 1 时期冬季高(H)需求水平下的规划发电量为 12.12×10^3 GWh、 $[14.41, 15.63] \times 10^3$ GWh、 $[12.87, 15.91] \times 10^3$ GWh; 进一步第 2 时期为中(H-M)水平时的规划发电量为 17.71×10^3 GWh、 $[21.86, 22.08] \times 10^3$ GWh、 11.30×10^3 GWh。可看出区域 1 丰富的风能资源可为分布式能源同提供稳定的基础。另一方面, 结果也可显示出风能有明显的季节特性, 如在第 2 时期情景 1 时 H-H 需求水平下在夏季、冬季、过渡季节下的规划发电量为 $[18.01, 18.12] \times 10^3$ GWh、 $[14.19, 14.29] \times 10^3$ GWh、 $[5.43, 5.52] \times 10^3$ GWh。处于不能满足电力需求的季节时, 将从电网购买相应电力满足电力需求。同时, 在不同地区区域发展情景下的发电方式将呈现出明显的差异, 例如第 2 时期 H-H 需求水平夏季 3 个情景下的规划发电量分别是 $[18.02, 18.12] \times 10^3$ GWh、 $[21.98, 22.09] \times 10^3$ GWh、 $[11.61, 11.71] \times 10^3$ GWh。总体来说, 情景 3 的发电将在冬季出现变化, 主要原因是冬季和过渡季节的风稳定性。而情景 1 和情景 2 的发电将会随季节减少。因此, 不同方案的目标将会极大地影响 DG 系统的发电能力。

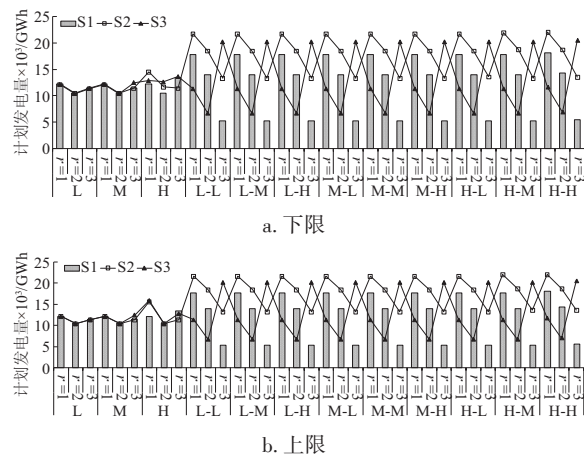


图 3 不同情景下区域 1 风电规划发电量

Fig. 3 Optimized wind power generation in district 1 under different scenarios

同样, 图 4 为区域 2 在不同需求水平不同季节不同情景下的发电量。光能为区域 2 选择的绿色电力技术, 从而获得最大程度的分布式系统稳定性。同风能发电, 光能发电也具有明显季节性, 其主要原因为太阳能光伏发电能力受到太阳辐射强度和温度的限制。

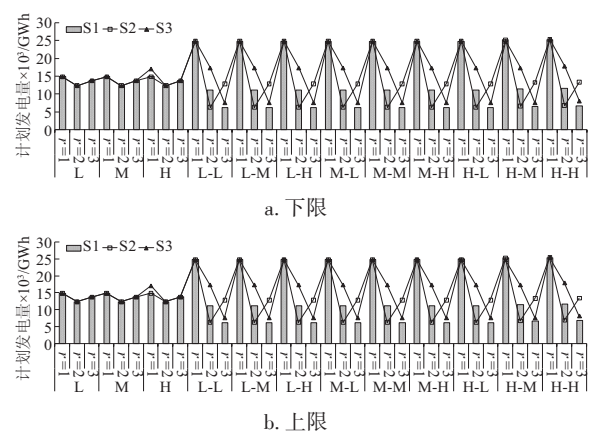


图 4 不同情景下区域 2 光能规划发电量

Fig. 4 Optimized solar photovoltaic power generation in district 2 under different scenarios

图 5 为区域 3 的规划发电量。由于区域因素导致风能和太阳能光伏发电的稳定性, 从而不能满足系统的安全与稳定性要求。由于成本原因导致燃料电池比起微型汽轮机更不具备优势, 因此区域 3 选择微型汽轮机为发电技术。由于有固定不受区域季节影响的能源来源, 区域 3 的发电具有很大的灵活性, 因此可出于经济考虑选择购买或出售电力。

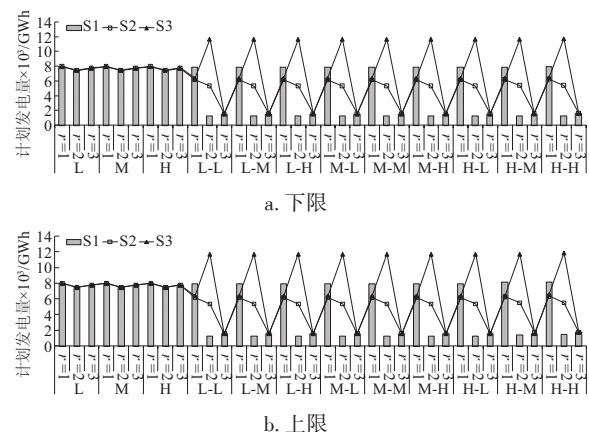


图 5 不同情景下区域 3 微型汽轮机规划发电量

Fig. 5 Optimized natural gas turbine power generation in district 3 under different scenarios

绿色电力技术的推广会减少电力系统的污染物以及温室气体排放。因此, 基于绿色电力的分布式规划方案将大大满足区域电力系统的减排目标。为了提高发电的使用能力和发电能力, 区域决策者和规划人员将发挥推动作用, 建立绿色电力的示范项目以及分布式系统与电网的联网, 从而促进

区域电力系统的发展。

4 结 论

本研究建立基于多重不确定性条件的两阶段电力系统规划模型,并应用于乌鲁木齐。在经济、环境以及设施等约束基础上,得出绿色电力的最佳规划方案。从各种情景出发,发现传统的发电技术可被绿色电力取代,以改善地区电力结构和环境保护要求,同时分布式电力系统与电网联网也能有效处理绿色电力的不稳定性问题。另一方面,与电网联网后也可使绿色电力进入电网,改善电力系统的能源与环境压力。乌鲁木齐方面,有效增加了绿色电力设施的利用率。

[参考文献]

- [1] 刘 舒,李正力,王 翼,等.含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J].电力系统保护与控制,2016,44(3): 78—84.
- [1] Liu Shu, Li Zhengli, Wang Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78—84.
- [2] 王 森,仇志华,薛永端,等.风电场多状态出力的概率性评估[J].太阳能学报,2016,37(6): 1611—1616.
- [2] Wang Sen, Zhang Zhihua, Xue Yongduan, et al. Probabilistic assessment for multi-state output of wind farm[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2016, 37(6): 1611—1616.
- [3] 王守相,王 慧,蔡声霞.分布式发电优化配置研究综述[J].电力系统自动化,2009,33(18): 110—115.
- [3] Wang Shouxiang, Wang Hui, Cai Shengxia. A review of optimization allocation of distributed generations embedded in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 110—115.
- [4] 朱 璇,陈得宝,方振国,等.平均成本下垂控制策略在分布式发电中的应用[J].电力系统保护与控制,2015,43(10): 14—20.
- [4] Zhu Xuan, Chen Debao, Fang Zhenguo, et al. Mean cost-based droop scheme in the application of distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 14—20.
- [5] 田 军,朱永强,陈彩虹.储能技术在分布式发电中的应用[J].电气技术,2010,(8): 28—32.
- [5] Tian Jun, Zhu Yongqiang, Chen Caihong. Application of energy storage technologies in distributed generation[J]. Electrical Engineering, 2010, (8): 28—32.
- [6] 甄纪亮,武传宝,尹建光,等.可再生能源发电目标约束下的山东省电力规划模型[J].水电能源科学,2016,34(11): 204—208.
- [6] Zhen Jiliang, Wu Chuanbao, Yin Jianguang, et al. Shandong's electric power planning model constrained by renewable power generation targets[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(11): 204—208.
- [7] 钟海旺,夏 清,丁茂生,等.以直流联络线运行方式优化提升新能源消纳能力的新模式[J].电力系统自动化,2015,(3): 36—42.
- [7] Zhong Haiwang, Xia Qing, Ding Maosheng, et al. A new mode of HVDC tie-line operation optimization for maximizing renewable energy accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, (3): 36—42.
- [8] 徐玉杰,陈海生,刘 佳,等.风光互补的压缩空气储能与发电一体化系统特性分析[J].中国电机工程学报,2012,32(20): 88—95.
- [8] Xu Yujie, Chen haisheng, Liu Jia, et al. Performance analysis on an integrated system of compressed air energy storage and electricity production with wind-solar complementary method[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(20): 88—95.
- [9] 王 惠,赵 军,安青松,等.不同建筑负荷下分布式能源系统优化与政策激励研究[J].中国电机工程学报,2015,35(14): 3734—3740.
- [9] Wang Hui, Zhao Jun, An Qingsong, et al. Study on optimization and policy incentives of distributed energy system under different building loads[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2015, 35(14): 3734—3740.
- [10] 柳 成,王天宇,曲永印,等.风电场的风力资源分析以及场址选择[J].太阳能学报,2016,37(11): 2835—2842.
- [10] Liu Cheng, Wang Tianyu, Qu Yongyin, et al. Wind resource analysis and site selection of wind power plant[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2016, 37(11): 2835—2842.
- [11] 李英姿,贺 琳,牛进苍.基于马尔可夫链的光伏并网发电量预测[J].太阳能学报,2014,35(4): 611—616.

- [11] Li Yingzi, He Lin, Niu Jincang. Forecasting power generation of grid-connected solar PV system based on markov chain[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2014, 35(4): 611—616.
- [12] 罗 毅, 张若含. 风-光-水联合发电系统优化调度研究[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(10): 2492—2498.
- [12] Luo Yi, Zhang Ruohan. Reseach of optimal scheduling of hybrid PV and wind power system[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2015, 36(10): 2492—2498.
- [13] 薛 松, 王跃锦. 基于异地输送的可再生能源消纳成本仿真分析[J]. *电网技术*, 2015, 39(3): 647—654.
- [13] Xue Song, Wang Yuejin. Simulation and analysis on accommodating cost for power generated by trans-regional renewable energy sources[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(3): 647—654.
- [14] 吴克河, 周 欢, 刘吉臻. 大规模并网型风光储发电单元容量优化配置方法[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(12): 2946—2953.
- [14] Wu Kehe, Zhou Huan, Liu Jizhen. Capacity allocation optimizationmethod of large scale grid connected wind-PV- battery generation unit [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2015, 36(12): 2946—2953.

URUMQI'S DISTRIBUTED POWER GENERATION PLANNING OF CLEAN POWER CONSTRAINED BY MULT-UNCERTAINTY

Wang Shen, Huang Guohe, Liu Zhengping

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

Abstract: In this study, seasons and system risk were considered and 3 scenarios were designed. Based on the incorporation of two stage stochastic programming, fuzzy-random programming, and stochastic robust method, the planning model for Urumqi's electric power planning by power demand targets was formulated with taking the minimum total system cost as objective function, and power supply, power grid trading, district limitation, atmospheric pollutants emission and CO₂ emission as constraints. Optimization schemes accorded with the characteristics of Urumqi's power system, such as clean power technologies choice, power generation, and trading scheme with power grid, were obtained, which provides decision support for clean power advancing and power system development of Urumqi.

Keywords: uncertainty analysis; optimization; distributed power generation; renewable energy resources; clean power generation