

# 计及需求响应不确定性的电-气耦合配网系统动态分布鲁棒优化

曾捷<sup>1</sup>, 童晓阳<sup>1</sup>, 范嘉乐<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川省 成都市 610031;

2. 郑州轻工业大学 电气信息工程学院, 河南省 郑州市 450000)

## Dynamic Distributionally Robust Optimization of Integrated Electric-gas Distribution System Considering Demand Response Uncertainty

ZENG Jie<sup>1</sup>, TONG Xiaoyang<sup>1</sup>, FAN Jiale<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, Henan Province, China)

**ABSTRACT:** The load fluctuation and the dynamic pipeline storage of natural gas have brought great challenges to the integrated electric-gas distribution system. In order to solve the problems, this paper proposes a dynamic distributionally robust optimization model based on the combination of chance constraint and the Wasserstein distance. Considering three different demand response loads, i.e. the reducible, transferable and replaceable loads, and the pipeline storage characteristics during gas transmission, a dynamic optimization model of the integrated electric-gas distribution system with demand response is established. As for the uncertainty problems of the electrical and gas loads in demand response, the paper proposes a distributionally robust ambiguity set based on the Wasserstein metric of uncertain variables. Combined with the chance constraints, this model restricts the inequality to a certain probability confidence interval to further improve the stability of the model. The dual theory and the conditional value at risk approximation method are used to transform the proposed model into a linear programming problem. Based on the modified 33 node electric distribution network and the Belgium 20 node gas distribution network, the simulation results illustrate the proposed model can effectively reduce the comprehensive costs and improve the consumption capacity of the wind power.

**KEY WORDS:** dynamic pipeline storage of natural gas; demand response; chance constraints; distributionally robust; Wasserstein distance

**摘要:** 需求侧负荷波动和天然气管存动态特性给电-气耦合配网系统的调度运行带来了较大挑战。针对需求响应不确定性和天然气动态特性,提出了一种机会约束与 Wasserstein 距离相结合的电-气耦合配网系统分布鲁棒动态优化模型。

首先,考虑可削减、可转移、可替代3种需求响应负荷及天然气传输的管存特性,构建了确定性的电-气耦合配网动态优化模型。其次,针对需求侧电负荷、气负荷的不确定性,基于衡量不同概率分布之间 Wasserstein 距离的分布鲁棒方法,构建不确定变量的概率分布模糊集。由于传统的分布鲁棒优化未考虑不等式约束的不确定性,结合机会约束将含不确定变量的不等式约束成立的期望概率,限定在最低允许的置信水平之上,以提高模型的可靠性。最后,通过对偶理论和条件风险价值近似将所提模型转化成线性规划问题进行求解,在修正的33节点配电网和比利时20节点配气网组成的电-气耦合配网系统进行仿真实验,结果表明所提模型可有效降低运行成本,提高风电的消纳能力。

**关键词:** 气管存动态特性; 需求响应; 机会约束; 分布鲁棒; Wasserstein 距离

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1183

## 0 引言

电-气综合能源系统在多种能源互补、高效、可靠等方面发挥重要作用<sup>[1-2]</sup>,目前研究大多针对输电网和输气网,对电-气耦合配网的研究较少。配网系统作为连接上级主网与用户的枢纽,其功率波动大、电能损耗多且存在需求侧负荷波动,有必要研究电-气耦合配网系统(integrated electrical and gas distribution system, IEGDS)的优化运行问题。

天然气的响应速度慢,传输过程中有部分天然气储存在运输管道中,需要在天然气模型中计及管存动态特性<sup>[3-4]</sup>,以精确分析系统运行与时间的关联特性。文献[5]使用不同的离散系数将天然气管道离散化建立天然气暂态模型,但其求解效率低。文

献[6]采用特征线法得到更加精准的气动态模型,但实际的物理特征并不明确。

需求侧用户根据配网系统分时价格等因素,调节其负荷用量和用时实现综合能源需求响应(integrated demand response, IDR)。需求响应对促进 IEGDS 供给侧与需求侧的互动平衡起重要作用。文献[7]表明 IDR 可有效降低综合能源系统协同运行费用,平滑负荷波动,降低系统碳排放量。文献[8-9]分别构建了电、气、热 3 种需求侧响应负荷的低碳经济模型和多时间尺度优化调度模型。由于电价、环境及用户主观意愿等不确定性因素,实际与预期的需求负荷响应量存在较大偏差,引起系统较大的负荷波动,导致失负荷量增大。目前处理需求响应不确定问题的常见方法有随机优化(stochastic optimization, SO)<sup>[10]</sup>、鲁棒优化(robust optimization, RO)<sup>[11]</sup>、模糊区间优化<sup>[12]</sup>、证据理论<sup>[13]</sup>等。但随机优化和证据理论需获取大量样本数据并指定误差服从固定的分布,实际上该分布也存在不确定性;鲁棒优化和模糊区间优化直接将不确定变量限制在一定区间内,缺乏对历史数据的不确定性分析,过于保守。

近年兴起的分布鲁棒优化方法(distributionally robust optimization, DRO)确保较高可靠性又平衡系统经济性<sup>[14]</sup>。根据模糊集构建方法的不同,分布鲁棒可分为基于距信息、基于多离散场景、基于 KL 散度、基于 Wasserstein 距离 4 种类型。文献[15-16]利用矩不确定性 DRO 解决风电不确定性及能源优化问题。文献[17]利用多离散场景 DRO 处理配电网中源荷不确定问题。文献[18-19]分别基于 KL 散度和 Wasserstein 距离 DRO 处理综合能源优化中风电不确定性问题。但上述 DRO 方法仍存在一定不足: 1) 基于距信息 DRO 对样本数据利用不充分,保守程度较高; 基于多离散场景 DRO 不适合求解大规模优化问题; 基于 KL 散度 DRO 仅适用于离散型分布情况。2) 基于 Wasserstein 距离 DRO 适用范围广且模型性能好,但未考虑约束条件的不确定性问题。国内目前分布鲁棒在电-气耦合配网系统中需求响应不确定性的研究尚不多见。

本文计及需求响应不确定性及天然气管存特性,提出与机会约束结合的动态分布鲁棒优化模型(distributional robust chance constraint, DRCC)。该模型以系统综合运行成本最小为优化目标,用管存和平均气流描述天然气动态特性,计及电网和气网的可削减、可转移、可替代 3 种需求响应负荷,构建确定性的 IEGDS 优化模型。针对需求响应负荷

不确定性问题,采用基于 Wasserstein 距离的分布鲁棒方法,利用历史样本数据,构建不确定变量的概率分布模糊集,并将其限制在置信区间内。针对模糊集中不等式约束不严格成立问题,将 DRO 和机会约束结合,把含不确定变量的不等式约束在模糊集内成立的期望概率限定在最低允许置信水平之上。通过对偶理论和条件风险价值近似方法将复杂模型转换成线性规划问题,调用线性求解器求解。

## 1 计及需求侧响应的 IEGDS 动态优化模型

IEGDS 从能源供应系统获得能量,通过线路及相关配电、配气设备,将能源分配给需求侧,结构如图 1 所示,其主要设备包括燃气轮机、电转气(power to gas, P2G)设备、分布式风力发电电源等。配网系统末端与需求侧相连,系统通过调节价格等因素引导用户进行需求响应来实现源荷互动。

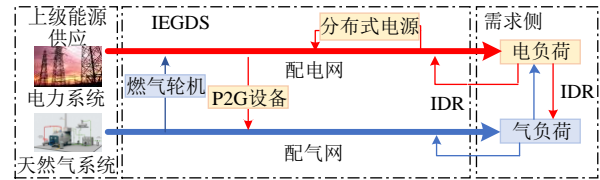


图 1 电-气耦合配网系统结构

Fig. 1 Composition and structure of integrated electric-gas distribution system

### 1.1 目标函数

本文以 IEGDS 的综合运行费用最小为优化目标,综合运行费用包括: IEGDS 从上级能源供应系统中购入电能和天然气能的费用  $f_t^{E,in}$ 、 $f_t^{G,in}$ ; 配电网和配气网的需求响应补偿费用  $f_t^{E,DR}$ 、 $f_t^{G,DR}$ ; 失电负荷、失气负荷的惩罚费用  $f_t^{E,Dloss}$ 、 $f_t^{G,Dloss}$ ; 弃风惩罚费用  $f_t^W$  及线路损耗费用  $f_t^{loss}$ 。为简化表达,将配电网和配气网结构相同的公式,上标统一为 E/G, 分别代表配电网和配气网的 2 套公式。

$$\min F = \min \sum_{t=1}^T (f_t^{E,in} + f_t^{G,in} + f_t^{E,DR} + f_t^{G,DR} + f_t^{E,Dloss} + f_t^{G,Dloss} + f_t^W + f_t^{loss}) \quad (1)$$

$$f_t^{E/G,in} = \sum_{i=1}^T (\sigma_i^{E/G,in} \cdot P_i^{E/G,in}) \quad (2)$$

$$f_t^{E/G,DR} = \sum_{i=1}^T \sum_{d=1}^{N_{DR}} (\sigma_{i,t}^{E/G,DR} \cdot P_{i,t}^{E/G,DR}) \quad (3)$$

$$f_t^{E/G,Dloss} = \sum_{d=1}^T \sum_{d=1}^{N_{Dloss}} (\sigma_{d,t}^{E/G,Dloss} \cdot P_{d,t}^{E/G,Dloss}) \quad (4)$$

$$f_t^W = \sum_{i=1}^T \sum_{w=1}^{N_W} (\sigma_{w,t}^W \cdot P_{w,t}^{W,loss}) \quad (5)$$

$$f_t^{loss} = \sum_{l=1}^T \sum_{l=1}^{N_l} (\sigma_l^{E,in} \cdot I_{l,t}^2 \cdot R_l) \quad (6)$$

式中:  $T$  为总时间段数;  $N_{DR}$ 、 $N_{Dloss}$ 、 $N_W$  分别表示需求响应、失负荷及风力发电的节点数目;  $M$  表示配电网的支路数目;  $\sigma_t^{E/G,in}$  表示单位购电和购气的费用系数;  $\sigma_{i,t}^{E/G,DR}$  表示配电网和配气网需求响应的单位补偿成本;  $\sigma_{d,t}^{E/G,Dloss}$  表示失电负荷、失气负荷的单位惩罚成本;  $\sigma_{w,t}^W$  表示单位弃风成本;  $P_t^{E/G,in}$  表示向上级系统购入的电量和气量;  $P_{i,t}^{E/G,DR}$  表示需求响应的电负荷量、气负荷量;  $P_{d,t}^{E/G,Dloss}$  表示负荷节点  $d$  的失电和失气负荷量;  $P_{w,t}^{W,loss}$  表示风力发电节点  $w$  的弃风量;  $R_l$  表示线路  $l$  的电阻。

## 1.2 运行约束

### 1.2.1 配电网约束

配电网采用 Distflow 支路潮流形式建模, 主要约束条件包括: 流入与流出节点的功率平衡约束、节点电压降落约束、支路电流约束、风力发电约束及其他安全上下限约束, 详细表达式见附录 A。

### 1.2.2 配气网约束

根据天然气的质量和传输速度守恒式, 由隐式差分法, 可求得天然气的静态韦茅斯方程<sup>[5]</sup>, 即

$$(P_{ij}^G)^2 = C_{ij} \cdot [(p_i)^2 - (p_j)^2] \quad (7)$$

式中:  $P_{ij}^G$  为管道  $ij$  的静态气流量;  $p_i$ 、 $p_j$  为节点  $i$ 、 $j$  的气压;  $C_{ij}$  为与温度及管道参数相关的常数。

上述静态模型认为天然气流速是恒定的, 但是实际上由于管存的影响, 同一时刻管道内流入流出的气流并不相等。本文计及天然气的管存特性, 构建 24h 气动态模型。

设  $t$  时刻管道  $ij$  的流入和流出气流分别为  $f_{ij,t}^{in}$ 、 $f_{ij,t}^{out}$ , 取二者的平均值代表管道的动态气流量  $\bar{P}_{ij,t}^G$ 。

$$\bar{P}_{ij,t}^G = (f_{ij,t}^{in} + f_{ij,t}^{out}) / 2 \quad (8)$$

静态韦茅斯方程由式(7)变为式(9)。

$$\bar{P}_{ij,t}^G \cdot \bar{P}_{ij,t}^G = C_{ij} \cdot [(p_i^t)^2 - (p_j^t)^2] \quad (9)$$

在气动态潮流中, 天然气流会有一部分储存在管道中。 $t$  时刻管道  $ij$  的管存  $m_{ij,t}$  与气流量  $\bar{P}_{ij,t}^G$  的关系表示为

$$m_{ij,t} = \frac{\pi \Delta l_{ij} D_{ij}^2}{4RT_0 Z \rho_0} \cdot p_{ij,t} \quad (10)$$

式中:  $\pi$  为圆周率;  $\Delta l_{ij}$  为管道长度;  $D_{ij}$  为管道直径;  $R$  为天然气常数;  $T_0$  为温度;  $Z$  为天然气压缩因子;  $\rho_0$  为标准气密度。

在时间尺度上,  $m_{ij,t}$  为前一个时刻管存  $m_{ij,t-1}$  加上流入流出管道气流量的差值。

$$m_{ij,t} = m_{ij,t-1} + f_{ij,t}^{in} - f_{ij,t}^{out} \quad (11)$$

配气网任意节点处总流入流出气流量需相等, 即

$$P_t^{G,in} + \sum_{k=1}^{N_k} f_{k,t}^{in} + \sum_{\alpha=1}^{N_{p2g}} f_{\alpha,t}^{p2g} = \sum_{k=1}^{N_k} f_{k,t}^{out} + \sum_{g=1}^{N_R} f_{g,t}^R + \sum_{i=1}^{N_{DR}} P_{i,t}^{G,DR} + \sum_{k=1}^{N_k} P_{k,t}^{G,d} + \sum_{d=1}^{N_{Dloss}} P_{d,t}^{G,Dloss} \quad (12)$$

式中:  $N_k$  表示配气网的节点数;  $N_{p2g}$ 、 $N_R$  分别表示电转气设备和燃气轮机的台数;  $f_{k,t}^{in}$ 、 $f_{k,t}^{out}$  分别表示节点  $k$  流入和流出的气流量;  $f_{\alpha,t}^{p2g}$ 、 $f_{g,t}^R$  分别表示第  $\alpha$  台电转气设备和第  $g$  台燃气轮机产生和消耗的气流量;  $P_{i,t}^{G,DR}$  表示配气网需求响应负荷量;  $P_{k,t}^{G,d}$ 、 $P_{d,t}^{G,Dloss}$  分别表示配气网的气负荷量和失气负荷量。

配气网的其他安全约束条件包括: 节点气流、气压、管存以及失气负荷的上下限约束见附录 A。

### 1.2.3 耦合设备约束

IEGDS 中燃气轮机消耗的天然气量  $f_{g,t}^R$  和产生电量  $P_{g,t}^R$  的转换关系见式(13); 由于燃气轮机的能量转换速度慢, 相邻 2 个时间段内燃气轮机还存在上下爬坡约束见式(15); 电转气设备消耗的电量  $P_{\alpha,t}^{p2g}$  和产生的天然气量  $f_{\alpha,t}^{p2g}$  转换关系见式(16); 燃气轮机所消耗的最大天然气量限制见式(14); 电转气设备所消耗的最大电量限制见式(17)。

#### 1) 燃气轮机约束。

$$P_{g,t}^R = f_{g,t}^R / (H_g \cdot \eta_R) \quad (13)$$

$$0 \leq f_{g,t}^R \leq f_{g,t}^{R,max} \quad (14)$$

$$\Delta f_{min}^R \leq f_{g,t}^R - f_{g,t-1}^R \leq \Delta f_{max}^R \quad (15)$$

#### 2) 电转气设备约束。

$$f_{\alpha,t}^{p2g} = (P_{\alpha,t}^{p2g} \cdot \eta_{p2g}) / H_g \quad (16)$$

$$0 \leq P_{\alpha,t}^{p2g} \leq P_{\alpha,t}^{p2g,max} \quad (17)$$

式中:  $H_g$  表示天然气热值;  $f_{g,t}^{R,max}$  表示燃气轮机最大可消耗的天然气量;  $\Delta f_{min}^R$ 、 $\Delta f_{max}^R$  表示燃气轮机相邻 2 个时间段内的最小和最大爬坡量;  $P_{\alpha,t}^{p2g}$  表示电转气设备最大可消耗的有功功率;  $\eta_R$ 、 $\eta_{p2g}$  分别表示燃气轮机和电转气设备的转换效率。

### 1.2.4 需求响应约束

IEGDS 终端的电负荷和气负荷并不是固定不变的, 需求侧用户根据价格等因素的引导调节自身负荷用量和用时, 这一方式称为需求响应。根据能否进行需求响应, 可将负荷分为刚性负荷和柔性负荷。刚性负荷是不受外界因素影响而改变的固定负荷; 柔性负荷是易受外界或自身因素影响而改变的可变负荷。

柔性负荷根据响应方式分为 3 种类型: 可削减



负荷  $P_{i,t}^{E/G,DR,C}$ 、可转移负荷  $P_{i,t}^{E/G,DR,S}$ 、可替代负荷  $P_{i,t}^{E/G,DR,T}$ ，需求响应负荷总量  $P_{i,t}^{E/G,DR}$  表示为

$$P_{i,t}^{E/G,DR} = -P_{i,t}^{E/G,DR,C} + P_{i,t}^{E/G,DR,S} + P_{i,t}^{E/G,DR,T} \quad (18)$$

1) 可削减负荷。

可削减负荷是指受到外界因素影响，可直接中断的重要程度不高的负荷，如空调、烘干机等。它受到最大可削减量、最多可削减次数及最长可削减时间的限制，分别如式(19)–(21)所示。

$$0 \leq P_{i,t}^{E/G,DR,C} \leq P_{\max}^{E/G,DR,C} \cdot L_{i,t}^{E/G,DR,C} \quad (19)$$

$$\sum_{t=1}^T L_{i,t}^{E/G,DR,C} \leq N_{\max}^{E/G,DR,C} \quad (20)$$

$$\sum_{n=t}^{t+T^{DR,C}} L_{i,t}^{E/G,DR,C} \leq T_{\max}^{E/G,DR,C} \quad (21)$$

式中： $P_{\max}^{E/G,DR,C}$  表示最大可削减负荷量； $L_{i,t}^{E/G,DR,C}$  表示可削减负荷的状态变量； $N_{\max}^{E/G,DR,C}$ 、 $T_{\max}^{E/G,DR,C}$  表示最多可削减次数和最长可削减时间。

2) 可转移负荷。

可转移负荷指在用户受分时价格影响后，从价格高峰时刻转移至价格低谷时刻的负荷，如电动汽车的充电负荷等。可转移负荷等于转入负荷和转出负荷的差值见式(22)；同一节点处各时刻的总转入负荷与总转出负荷相等见式(23)；可转移负荷受到最大转入量和转出量的限制见式(24)(25)。

$$P_{i,t}^{E/G,DR,S} = P_{i,t}^{E/G,DR,in} - P_{i,t}^{E/G,DR,out} \quad (22)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{i,t}^{E/G,DR,in} = \sum_{t=1}^T P_{i,t}^{E/G,DR,out} \quad (23)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{E/G,DR,in} \leq P_{\max}^{E/G,DR,in} \quad (24)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{E/G,DR,out} \leq P_{\max}^{E/G,DR,out} \quad (25)$$

式中： $P_{i,t}^{E/G,DR,in}$ 、 $P_{i,t}^{E/G,DR,out}$  分别表示需求侧的转入负荷量和转出负荷量； $P_{\max}^{E/G,DR,in}$ 、 $P_{\max}^{E/G,DR,out}$  分别表示最大可转入负荷量和最大可转出负荷量。

3) 可替代负荷。

可替代负荷指用户根据自身条件在电与气需求之间进行相互转换的负荷，如电磁炉与燃气灶等。可替代电负荷量  $P_{i,t}^{E,DR,T}$ 、可替代气负荷量  $P_{i,t}^{G,DR,T}$  之间的替换关系见式(26)(27)，二者均受到上下限约束见式(28)。

$$P_{i,t}^{E,DR,T} = -\lambda \cdot P_{i,t}^{G,DR,T} \quad (26)$$

$$\lambda = \frac{W_E \cdot \eta_E}{W_G \cdot \eta_G} \quad (27)$$

$$P_{\min}^{DR,E/G,T} \leq P_{i,t}^{DR,E/G,T} \leq P_{\max}^{DR,E/G,T} \quad (28)$$

式中： $\lambda$  表示电与气负荷之间的替代系数； $W_E$ 、 $W_G$  分别表示单位电负荷热值与单位气负荷热值； $\eta_E$ 、 $\eta_G$  分别表示电负荷与气负荷的利用率。

## 2 结合机会约束的分布鲁棒优化模型

基于 Wasserstein 距离的分布鲁棒 W-DRO，利用不确定变量的不同概率分布之间的欧氏范数构建模糊集，相比其他 DRO，W-DRO 更全面利用历史经验数据、适用范围更广，但是该方法未考虑约束条件的不确定性，导致含不确定变量的不等式约束不严格成立。机会约束可限制不等式的越限风险，使不确定的不等式约束在一定置信范围内成立，模型求解范围有界<sup>[20]</sup>。因此，本文将分布鲁棒与机会约束结合，构建基于 Wasserstein 距离的 DRCC 模型，以提高模型的可靠性。

### 2.1 基于 Wasserstein 距离的 DRCC 模糊集

Wasserstein 距离是用来衡量 2 个不同概率分布之间距离的参数。用蒙特卡洛方法抽样得到  $K$  组样本集合  $\{\tilde{\xi}_1, \tilde{\xi}_2, \dots, \tilde{\xi}_K\}$ ，它们分别服从于概率分布  $\{P_1, P_2, \dots, P_K\}$ ，则任意 2 个概率分布  $P_1$ 、 $P_2$  之间的 Wasserstein 距离定义为

$$W(P_1, P_2) = \inf \{ \int d(\xi_1, \xi_2) \Pi(d\xi_1, d\xi_2) \} \quad (29)$$

式中： $d(\xi_1, \xi_2) = \|\xi_1 - \xi_2\|$  为样本数组  $\xi_1$ 、 $\xi_2$  之间的欧氏范数； $\Pi(d\xi_1, d\xi_2)$  为边缘分布为  $P_1$  和  $P_2$  的联合样本分布； $\inf$  表示下确界函数。

基于 Wasserstein 距离的 DRO 模糊集  $D_0$  是以不确定变量经验分布  $P_s$  为中心， $\varepsilon$  为半径的 Wasserstein 球<sup>[19]</sup>，它包含真实分布在内所有可能的概率分布，即

$$D_0 = \{P_i \in M(\Xi) | W(P_i, P_s) \leq \varepsilon\} \quad (30)$$

式中： $M(\Xi)$  表示随机变量空间  $\Xi$  上的全部概率分布；半径  $\varepsilon$  反映未知概率分布的置信度，它与样本数、置信度相关，具体为

$$\varepsilon = C \sqrt{\frac{2}{K} \ln\left(\frac{1}{1-\beta}\right)} \quad (31)$$

$$C \approx 2 \inf \left[ \frac{1}{2\eta} \left( 1 + \ln\left( \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K e^{\eta \|\xi_i - \hat{u}\|^2} \right) \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

式中： $K$  表示样本组数； $\beta$  表示半径的置信度； $C$ 、 $\eta$  为辅助变量； $\hat{u}$  为所有样本的均值； $\xi_i$  为第  $i$  组样本； $\|\xi_i - \hat{u}\|$  表示样本  $\xi_i$  与均值  $\hat{u}$  之间的 1 范数。

通过二分搜索法求解式(32)得到辅助变量  $\eta$ ，进而得到  $C$ ，再代入式(31)得到半径  $\varepsilon$ 。

分布鲁棒优化是在模糊集下求得最小综合模型成本。DRCC 模型中，Wasserstein 球半径越大，模糊集  $D_0$  的范围越大，包含不确定分布的种类增多，系统可靠性越高，但优化结果会偏于保守，使得成本增加。因此，调节 DRCC 模型中模糊集球的

半径应尽可能平衡系统的经济性和可靠性。

## 2.2 需求响应的不确定性建模

### 2.2.1 含不确定变量模糊集的目标函数重构

配电网、配气网的需求响应负荷不确定变量分别定义为  $\xi^E$ 、 $\xi^G$ ，则含不确定变量的需求响应电、气负荷总量为

$$\tilde{P}_{i,t}^{E,DR} = P_{i,t}^{E,DR} + \xi^E \quad (33)$$

$$\tilde{P}_{i,t}^{G,DR} = P_{i,t}^{G,DR} + \xi^G \quad (34)$$

需求响应成本函数由式(3)变为

$$\tilde{f}_t^{E/G,DR} = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^{\varphi} (\sigma_i^{E/G,DR} \cdot \tilde{P}_{i,t}^{E/G,DR}) \quad (35)$$

将式(35)代入目标函数式(1)中，得到含需求响应不确定变量的总目标函数：

$$\min F = \min \sum_{t=1}^T (f_t^{E,in} + f_t^{G,in} + f_t^{E,Dloss} + f_t^{G,Dloss} + \tilde{f}_t^{E,DR} + \tilde{f}_t^{G,DR} + f_t^W + f_t^{loss}) \quad (36)$$

上述目标函数可简化表示为  $\min F = \min f(x, \xi)$ ； $x$  代表各决策变量， $\xi$  代表需求响应负荷不确定量，含分布鲁棒不确定性模糊集  $D_0$  的目标函数为

$$\min_x \sup_{P \in D_0} E_P \left\{ \sum_{i=1}^K f(x, \xi) \right\} \quad (37)$$

式中： $E_P(\cdot)$ 为期望概率； $\sup$  为上确界函数； $P$  表示不确定变量的概率分布。

### 2.2.2 机会约束条件构建

除目标函数中含不确定变量之外，在需求响应的约束条件中也含有可削减、可转移及可替代负荷多重不确定性变量。本文将按照决策者的偏重程度划分权重，这里假设该3种需求响应负荷的不确定变量占比相同，即

$$u^C + u^S + u^T = 1 \quad (38)$$

$$u^C : u^S : u^T = 1 : 1 : 1 \quad (39)$$

式中  $u^C$ 、 $u^S$ 、 $u^T$  分别表示可削减负荷、可转移负荷、可替代负荷的权重系数。

总需求响应不确定变量  $\xi^{E/G}$  为配电网和配气网的需求侧可削减负荷、可转移负荷、可替代负荷的不确定变量  $\xi^{E/G,C}$ 、 $\xi^{E/G,S}$ 、 $\xi^{E/G,T}$  三者之和，即

$$\xi^{E/G} = \xi^{E/G,C} + \xi^{E/G,S} + \xi^{E/G,T} \quad (40)$$

这3类需求响应不确定变量分别为相应的权重系数与总需求不确定变量的乘积：

$$\xi^{E/G,C} = u^C \xi^{E/G} \quad (41)$$

$$\xi^{E/G,S} = u^S \xi^{E/G} \quad (42)$$

$$\xi^{E/G,T} = u^T \xi^{E/G} \quad (43)$$

本文采用机会约束方法对含需求响应负荷不确定变量的不等式约束进行建模，使含不确定变量

概率分布  $P$  的不等式约束，在模糊集  $D_0$  内成立的期望概率  $E_P$  大于最低允许的置信水平(即  $1-\gamma$ ， $\gamma$  为不等式约束越限的风险系数)，即

$$\inf_{P \in D_0} E_P (P_{l,\min} \leq P_{l,t} - \xi^E \leq P_{l,\max}) \geq 1-\gamma \quad (44)$$

$$\inf_{P \in D_0} E_P (f_{\min}^G \leq f_{ij,t}^{\text{in}} - \xi^G \leq f_{\max}^G) \geq 1-\gamma \quad (45)$$

$$\inf_{P \in D_0} E_P (f_{\min}^G \leq f_{ij,t}^{\text{out}} + \xi^G \leq f_{\max}^G) \geq 1-\gamma \quad (46)$$

$$\inf_{P \in D_0} E_P (0 \leq P_{i,t}^{E/G,DR,C} +$$

$$u^C \xi^{E/G} \leq P_{\max}^{E/G,DR,C} L_{i,t}^{E/G,DR,C}) \geq 1-\gamma \quad (47)$$

$$\inf_{P \in D_0} E_P (-P_{\max}^{E/G,DR,out} \leq P_{i,t}^{E/G,DR,S} +$$

$$u^S \xi^{E/G} \leq P_{\max}^{E/G,DR,in}) \geq 1-\gamma \quad (48)$$

$$\inf_{P \in D_0} E_P (0 \leq P_{i,t}^{E/G,DR,T} + u^T \xi^{E/G} \leq P_{\max}^{E/G,DR,T}) \geq 1-\gamma \quad (49)$$

式(44)表示线路有功功率的机会约束，由附录式(A5)转化得到；式(45)(46)表示管道流入流出气流的机会约束，由附录公式(A13)(A14)转化得到；式(47)——(49)表示可削减、可转移、可替代负荷机会约束，由式(19)(24)(25)(28)转化得到。

## 2.3 DRCC 总模型

目标函数：

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_x \sup_{P \in D_0} E_P \left\{ \sum_{i=1}^K f(x, \xi) \right\} \\ \text{具体包括：式(2) \& (4)—(6) \& (33)—(36)} \end{array} \right.$$

约束条件：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{配电网约束：附录公式(A1)—(A10)} \\ \text{配气网约束：式(8)—(12) \& 附录公式(A11)—(A15)} \\ \text{耦合设备约束：式(13)—(17)} \\ \text{需求侧响应约束：式(18) \& (20)—(23) \& (26)—(27)} \\ \text{机会约束：式(38)—(49)} \end{array} \right.$$

## 3 模型求解

### 3.1 对偶转换

DRCC 总模型的目标函数含有 minmax 双层结构，实质是在内层不确定变量模糊集最恶劣条件下，寻找最优决策变量使得外层的综合成本最小。本文采用对偶理论，将内层的最大化问题转化最小化问题，从而得到单层最小目标寻优。

$$\sup_{P \in D_0} E_P \{h(x, \xi)\} =$$

$$\inf_{\lambda \geq 0} \left\{ \lambda \cdot \varepsilon + \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \sup_{\xi \leq \xi \leq \bar{\xi}} (f(x, \xi) - \lambda \|\xi - \hat{\xi}_i\|_1) \right\} \quad (50)$$

式中： $\lambda$  为对偶因子； $\varepsilon$  为 Wasserstein 球半径； $\underline{\xi}$ 、 $\bar{\xi}$  分别表示不确定变量样本集  $\{\hat{\xi}_1, \hat{\xi}_2, \hat{\xi}_3, \dots, \hat{\xi}_K\}$  的下确界和上确界。引入辅助变量  $\omega_k$  可简化得到：

$$\omega_k = f(x, \xi) - \lambda \|\xi - \hat{\xi}_i\|_1 \quad (51)$$

$$\begin{cases} \sup_{P \in D_0} E_P \left\{ \sum_{i=1}^K f(x, \xi) \right\} = \\ \inf \left( \lambda \cdot \varepsilon + \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \omega_i \right) \\ \text{s.t. } \sup_{\xi \leq \bar{\xi}} (f(x, \xi) - \lambda \|\xi - \hat{\xi}_i\|_1) \leq \omega_i \end{cases} \quad (52)$$

由于式(52)中约束条件的上确界只能在不确定变量的边界上获得，因此目标函数最终转化为单层的线性规划模型，如下：

$$\begin{cases} \sup_{P \in D_0} E_P \left\{ \sum_{i=1}^K f(x, \xi) \right\} = \\ \inf \left( \lambda \cdot \varepsilon + \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \omega_i \right) \\ f(x, \underline{\xi}) + \lambda (\underline{\xi} - \hat{\xi}_i) \leq \omega_i, \forall i \leq K \\ f(x, \bar{\xi}) - \lambda (\bar{\xi} - \hat{\xi}_i) \leq \omega_i, \forall i \leq K \\ f(x, \hat{\xi}_i) \leq \omega_i, \forall i \leq K \end{cases} \quad (53)$$

### 3.2 条件风险价值近似

总模型中的机会约束式(47)—(49)是非线性且难以求解，引入相关系数向量  $\alpha_i(x)$ 、 $\beta_i(x)$ ，将机会约束式简化如下，推导过程见附录 A。

$$\inf_{P \in D_0} E_P \{ \alpha_i(x) \cdot \hat{\xi}_i \leq \beta_i(x) \} \geq 1 - \gamma \quad (54)$$

本文通过引入辅助变量  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $s_j$  对上述概率约束式进行条件风险价值(conditional value at risk, CVAR)近似<sup>[21]</sup>，转换得到可求解的线性约束。

$$\begin{cases} \inf_{P \in D_0} E_P \{ \alpha_i(x)^T \cdot \hat{\xi}_i \leq \beta_i(x) \} \geq 1 - \gamma = \\ \varepsilon \cdot t_1 - \gamma \cdot t_2 \leq \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K s_j \\ s_j + t_2 \leq \max \{ \beta_i(x) - \alpha_i(x) \cdot \hat{\xi}_i^j \} \\ \|\alpha_i(x)\|_* \leq t_1 \\ t_1 > 0, t_2 \geq 0, s_j \leq 0, j \in N \end{cases} \quad (55)$$

式中： $\alpha_i(x)^T$ 表示系数向量  $\alpha_i(x)$  的转置； $\|\alpha_i(x)\|_*$ 表示向量  $\alpha_i(x)$  的对偶范数。

当历史样本集的规模较大时，式(55)的辅助变量数目也会随之增多，导致计算负担增大，因此将式(55)进一步松弛得到：

$$\begin{cases} \inf_{P \in D_0} E_P \{ \alpha_i(x)^T \cdot \hat{\xi}_i \leq \beta_i(x) \} \geq 1 - \gamma = \\ \varepsilon \cdot t_1 - \gamma \cdot t_2 \leq \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \{ \beta_i(x) - \alpha_i(x) \cdot \hat{\xi}_i^j - t_2 \} \\ \|\alpha_i(x)\|_* \leq t_1 \\ t_1 > 0, t_2 \geq 0, j \in N \end{cases} \quad (56)$$

### 3.3 整体求解流程

DRCC 模型的目标函数具有双层结构，且约束条件中含有概率机会约束不等式，难以求解。本文通过对偶转换和 CVAR 近似，将该模型转化成混合整数的线性规划问题，并在 Matlab 的 Yalmip 工具箱中调用 Gurobi 求解器求解，求解流程如图 2 所示。

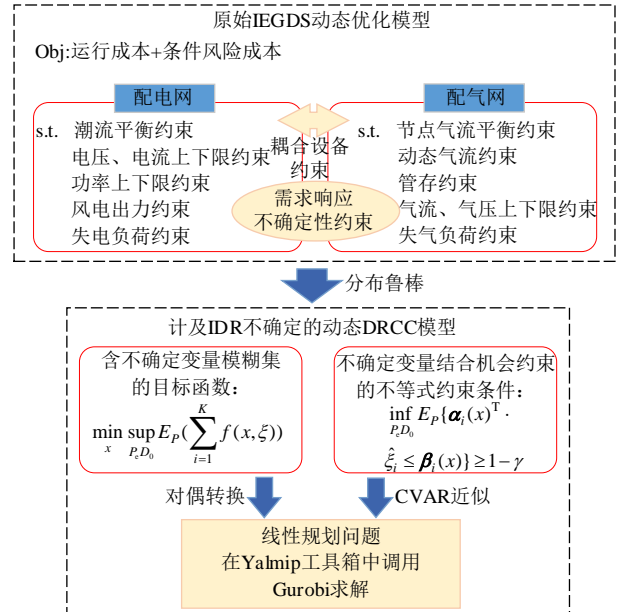


图 2 模型求解流程图

Fig. 2 Flow chart of model solving

### 4 算例分析

本文搭建由修正的 33 节点配电网和比利时 20 节点配气网组成的电-气耦合配网仿真模型，具体结构见附录图 B1。配电网从 1 节点从上级电网购电，风力发电电源位于 3、6 节点，其中需求响应位于 9、27 节点，配气网在 1、8 节点从上级气网购气，需求响应位于节点 6、10。燃气轮机连接配气网 4 节点和配电网 6 节点，电转气设备连接配电网 3 节点和配气网 11 节点，燃气轮机和电转气设备相关参数见附录表 B1。分时电价及分时气价参数见文献[11]，负荷、风电预测参数见附录图 B2，需求响应负荷参数见附录表 B2—B4。

#### 4.1 需求响应和气动态对 IEGDS 优化的影响

本文将分以下 4 种场景进行对比分析：1) 场景 1，不计及需求响应的静态 IEGDS 优化。2) 场景 2，不计及需求响应的动态 IEGDS 优化。3) 场景 3，计及需求响应的静态 IEGDS 优化。4) 场景 4，计及需求响应的动态 IEGDS 优化。

以上场景适用于日前调度，调度时长均为 24h，时间间隔为 1h。对场景的日运行成本，样本外损耗以及负荷优化结果进行了分析。

4.1.1 成本分析

以各场景的综合运行成本最小为优化目标，得到优化结果如下，系统损耗量见附录表 B5。不同场景下的优化运行结果见表 1。

场景类型	购电成本	购气成本	IDR 成本	弃风成本	系统网损	失负荷成本	总成本
1	2669.9	3772.1	0	814.9	127.0	1585.1	8969.0
2	2364.9	3504.4	0	614.8	123.9	1533.3	8141.2
3	2060.4	3306.8	205.5	289.8	120.5	1547.0	7529.9
4	1914.7	2960.5	202.3	229.5	118.0	1387.2	6812.3

从表 1 可看出，场景 1、2 不考虑 IDR，总成本明显高于场景 3、4。因为场景 1 和 2 需求侧负荷固定且多集中在高峰段，受到分时价格的影响，总购电成本和购气成本增加；在用电低谷时段，风电不能得到及时的消纳，弃风成本增加。而场景 3、4 计及 IDR 后，在负荷高峰时段，用户根据自身需求削减或转移负荷，使得系统购电成本、弃风成本明显降低，实验表明计及需求响应能够有效降低系统综合运行成本，提高风电消纳能力。

相比于静态场景 1、3，计及天然气动态特性后场景 2、4 的购气成本及弃风成本明显降低。因为天然气传输过程中管存对系统负荷变化起到一定的缓冲作用，负荷供应不完全依赖于气源，购电、购气量减少，弃风量降低。但这 4 个场景均未考虑需求侧负荷的不确定性，失负荷量较高。

4.1.2 计及 IDR 的负荷优化结果分析

图 3、4 分别为场景 4 中电网和气网 3 种不同类型的需求响应负荷图，其中天然气计量单位统一为 kcf，含义为千立方英尺。

从图 3、4 看到，电网和气网需求响应的转入负荷、可削减负荷、转出负荷的变化趋势大致相同。IDR 以可转移负荷为主，在 08:00—14:00 及 19:00—22:00 负荷高峰段，需求侧负荷大量转出至凌晨低峰段 12:00—06:00。而可削减负荷响应仅集中在 09:00—12:00 和 21:00。

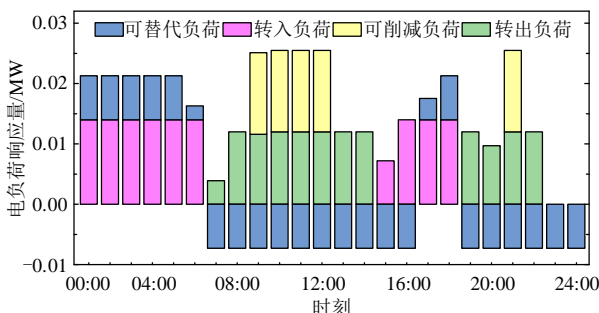


图 3 不同类型的需求响应电负荷

Fig. 3 Different kinds of demand response electrical load

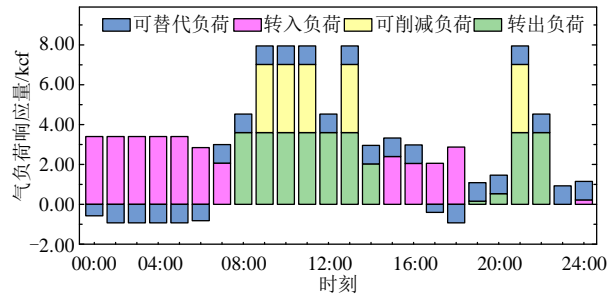


图 4 不同类型的需求响应气负荷

Fig. 4 Different kinds of demand response gas load

在 01:00—06:00 及 17:00—18:00 时段，用户消耗电能替代天然气能，电负荷增加，图 3 中可替代电负荷为正值，图 4 中气负荷由于被替换成电能而减少，可替代气负荷为负值；而在 07:00—16:00 及 19:00—24:00 时段，用户消耗天然气能替代电能，气负荷增加，电负荷减少。但电网和气网的可替代负荷量在需求侧响应负荷总量中占比并不大。

计及 IDR 后的电、气负荷变化如图 5、6 所示。

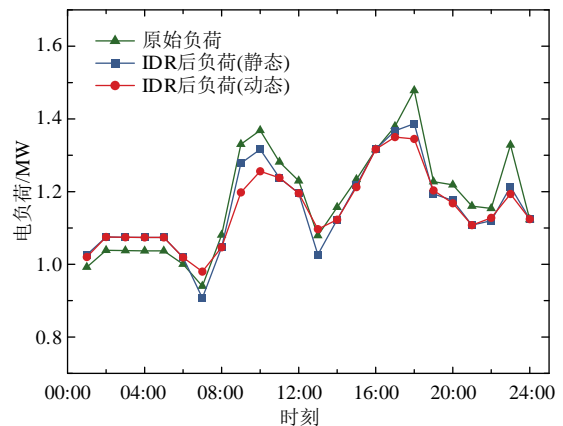


图 5 需求响应前后电负荷量变化

Fig. 5 Electric load change of demand response

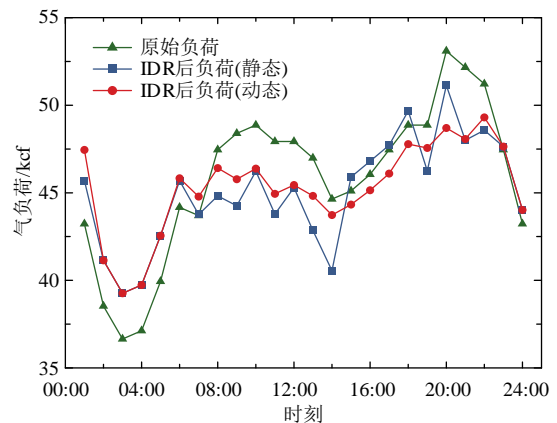


图 6 需求响应前后气负荷量变化

Fig. 6 Gas load change of demand response

由图 5、6 可知，负荷的峰谷特性明显，计及需求响应后，峰时段负荷量降低、谷时段负荷量上升，负荷曲线更平滑。这是因为在高峰时期需求侧进行负荷的削减和替代，且可转移负荷从负荷高峰



段转移至低谷段。计及天然气管存特性后，负荷高峰段的天然气流速增加、管存减小，管道内存储的天然更多供给需求侧；而负荷低谷段气流平缓，天然气大多储存在管道中，使得管存对负荷起到缓冲作用，负荷曲线更加平滑。

### 4.2 计及需求响应的多种不确定性优化方法分析

为了验证本文提出与机会约束结合的分布鲁棒优化模型 DRCC 的有效性，选取 IDR 确定模型 (certain model, CM)、随机优化(SO)、鲁棒优化(RO)、基于 Wasserstein 距离的分布鲁棒(W-DRO)作为对比模型。CM 模型不考虑需求响应不确定；RO 模型<sup>[1]</sup>采用盒式不确定性集将需求侧电、气负荷不确定变量分别限制在(-0.01, 0.01)及(-0.5, 0.5)区间内，采用拉格朗日函数和对偶理论消去不确定变量进行求解；SO 模型假设需求侧响应负荷的不确定误差服从均值为 0，标准差为 0.2 的高斯分布<sup>[10]</sup>。采用蒙特卡洛方法抽样 1100 组数据场景进行实验，取所有样本最优成本期望值为计算结果。

#### 4.2.1 成本与可靠性分析

表 2 为上述 5 种模型在 500 组样本数据下的最优运行结果，W-DRO、DRCC 模型中置信度  $\beta$  取 0.9，DRCC 模型中机会约束的风险系数  $\gamma$  取 0.1。

**表 2 多种不确定性优化模型的结果**  
**Table 2 Results of multiple uncertain optimization models**

参数及单位	不同优化模型下优化结果				
	CM	RO	SO	W-DRO	DRCC
调度 购电成本	1914.7	2451.8	2457.7	2481.5	2454.1
成本/ 购气成本	2960.5	3501.7	3157.8	3469.3	3433.2
万元 IDR 成本	202.3	194.7	243.2	240.0	244.7
损耗 弃风成本	229.5	209.2	116.6	68.2	52.4
成本/ 系统网损	118.1	126.9	130.1	131.7	133.1
万元 失负荷成本	1387.2	146.3	29.3	21.5	17.1
总成本/万元	6812.3	6630.6	6134.7	6412.2	6334.5
可靠性/%	—	100	91.83	96.13	98.96

从表 2 看到，CM 模型综合成本最高；计及需求响应不确定性的后 4 种模型，尽管购电、购气等调度成本有所增加，但损耗成本尤其是失负荷成本有明显的降低。由于配电网总购电量增大，弃风成本降低，消纳的风电增加，使系统传输功率增大，网络损耗成本有所增加，但是仅占系统总成本的 0.22%，可忽略不计。RO 模型总成本最高，过于保守；SO 模型总成本最低，但其不确定性变量分布固定，模型并不可靠；W-DRO 和 DRCC 介于前两者之间，DRCC 模型限制了不等式约束在模糊集下的越限风险，失负荷量更少，可靠性更高，且 DRCC 模型中约束条件是在一定的区间范围内成立，避免了极端情况造成的较大负荷波动，使得综合成本更

低，具有更优的运行性能。

#### 4.2.2 样本数目对不确定性优化结果的影响

图 7 展示了不同样本数下 RO、SO、DRCC 3 种模型的总成本及可靠性。

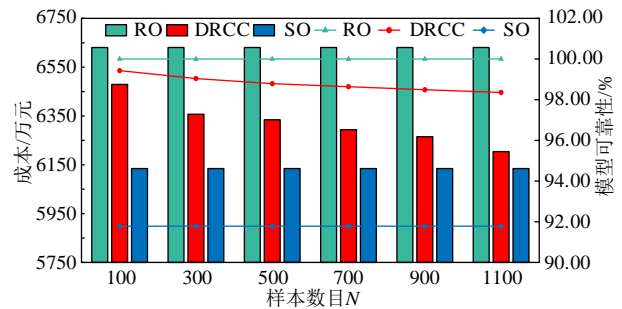


图 7 样本数目对模型成本及可靠性的影响

Fig. 7 Influence of sample size on cost and reliability

从图 7 可看出，RO 模型可靠性恒为 100%，但模型成本接近 6650 万元，过于保守；SO 模型成本最低，但可靠性低于 92%，风险程度大，DRCC 模型的成本和可靠度正好介于前两者之间。当历史样本数目减少时，未知的不确定性分布更多，DRCC 模型的模糊集范围变大，成本和可靠性增加接近于 RO 模型；反之，样本数目的增大排除了发生概率较低的边缘分布，DRCC 模型的模糊集范围缩小，成本明显降低并接近于 SO 模型，虽然 DRCC 模型的可靠性有所降低，但依旧维持在 98% 以上，系统的总体运行风险较小。

### 4.3 DRCC 模型参数影响分析

上述实验表明，DRCC 模型的综合运行成本和可靠性随模糊集增大而增大，该模型的模糊集大小是由 Wasserstein 球半径决定，球半径与样本数目和置信度有关，如图 8 所示。

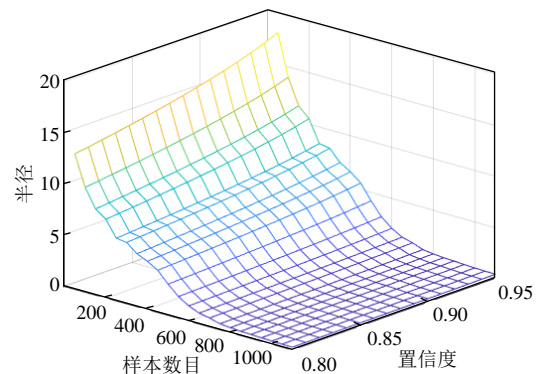


图 8 样本数目与置信度对 DRCC 半径的影响

Fig. 8 Influence of sample size and reliability on radius

从图 8 可看出，Wasserstein 球半径与置信度大小呈正比，当置信度增大时，系统要求更加可靠，需要增大模糊集球半径，包含更多未知分布在内；当样本数目增大时，未知的概率分布减少，不确定模糊集范围缩小，Wasserstein 球半径减小。



DRCC模型中置信度 $\beta$ 表示Wasserstein模糊集球中含真实分布的可信程度,风险系数 $\gamma$ 表示机会约束可承受的风险水平。表3给出不同置信度及风险系数对系统综合成本及系统可靠性的影响。

表3 置信度和风险系数对系统成本和可靠性的影响  
Table 3 Impact of confidence and risk factors on system cost and reliability

DRCC 参数	成本/万元	可靠性/%
置信度	0.80	6204.1
	0.85	6293.7
	0.90	6334.5
	0.95	6479.4
风险系数	0.05	6436.1
	0.10	6334.5
	0.15	6265.1
	0.20	6174.1

从表3可看出,系统成本和可靠性均随置信度的升高而增加,随着风险系数的增加而减小。因此,在可获取的样本数目恒定条件下,决策者可在系统可承受风险范围内,通过调节置信度和风险系数,来平衡系统综合运行成本与可靠性。

## 5 结论

本文针对电-气耦合配网系统,提出了计及气动态特性和需求响应的分布鲁棒优化模型。主要结论如下:

1) 计及电-气耦合配网的需求响应优化,能有效地实现负荷的削峰填谷,提高系统对新能源的消纳能力,减小系统运行成本。同时,天然气管存动态特性会对气流量变化起到一定的缓冲作用,使得系统的负荷曲线及气流出力曲线变得更平滑,进一步降低系统的运行成本。

2) 不考虑需求侧响应不确定性,系统存在较大运行风险。仿真实验证明,本文提出DRCC模型可解决多重需求侧响应不确定性问题。相比于SO、RO、W-DRO模型,DRCC模型计及真实分布,降低系统运行成本的同时又能保证较高的可靠性。系统成本和可靠性与DRCC的模糊集大小成正比,决策者可调节样本数目和置信度等参数来调节模糊集大小,平衡系统的经济性和可靠性。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

## 参考文献

[1] 程浩忠, 胡泉, 王莉, 等. 区域综合能源系统规划研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 2-13.  
CHENG Haozhong, HU Xiao, WANG Li, et al. Review on research of regional integrated energy system planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 2-13(in Chinese).

[2] FAN Jiale, TONG Xiaoyang, ZHAO Junbo. Unified optimal power flow model for AC/DC grids integrated with natural gas systems considering gas-supply uncertainties[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(6): 1193-1203.

[3] LIU Weijia, LI Peiyan, YANG Wentao, et al. Optimal energy flow for integrated energy systems considering gas transients[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 5076-5079.

[4] FAN Jiale, TONG Xiaoyang, ZHAO Junbo. Multi-period optimal energy flow for electricity-gas integrated systems considering gas inertia and wind power uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020(123): 106263.

[5] 卫志农, 梅建春, 孙国强, 等. 电-气互联综合能源系统多时段暂态能量流仿真[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 41-47.  
WEI Zhinong, MEI Jianchun, SUN Guoqiang, et al. Multi-period transient energy-flow simulation of integrated power and gas energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 41-47(in Chinese).

[6] 张惠智, 程志韬, 贾嵘, 等. 考虑天然气动态特性的电-气综合能源系统经济优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1304-1311.  
ZHANG Huizhi, CHENG Zhitao, JIA Rong, et al. Economic optimization of electric-gas integrated energy system considering dynamic characteristics of natural gas [J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1304-1311(in Chinese).

[7] 朱伟业, 罗毅, 胡博, 等. 热负荷弹性与分时电价需求侧响应协同促进碳减排的电热优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3803-3813.  
ZHU Weiye, LUO Yi, HU Bo, et al. Optimized combined heat and power dispatch considering decreasing carbon emission by coordination of heat load elasticity and time-of-use demand response [J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3803-3813 (in Chinese).

[8] YANG Haizhu, LI Menglong, JIANG Zhaoyang, et al. Multi-time scale optimal scheduling of regional integrated energy systems considering integrated demand response[J]. IEEE Access, 2020(8): 5080-5090.

[9] 崔杨, 曾鹏, 王铮, 等. 计及电价型需求侧响应含碳捕集设备的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 447-461.  
CUI Yang, ZENG Peng, WANG Zheng, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system with carbon capture equipment considering price-based demand response [J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 447-461(in Chinese).

[10] 曾丹, 姚建国, 杨胜春, 等. 计及价格型负荷响应不确定性的概率潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 66-71, 97.  
ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Probabilistic load flow calculation considering price-elasticity load uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 66-71, 97(in Chinese).

[11] 曾鸣, 杨雍琦, 向红伟, 等. 计及需求侧响应的电力系统鲁棒优化规划模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 137-145.  
ZENG Ming, YANG Yongqi, XIANG Hongwei, et al. Robust optimization planning model of power system considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 137-145(in Chinese).

[12] 赵冬梅, 宋原, 王云龙, 等. 考虑柔性负荷响应不确定性的多时间尺度协调调度模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(22): 21-30.  
ZHAO Dongmei, SONG Yuan, WANG Yunlong, et al. Coordinated scheduling model with multiple time scales considering response uncertainty of flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 21-30(in Chinese).

- [13] 刘文霞, 李征洲, 杨粤, 等. 计及需求响应不确定性的综合能源系统协同优化配置[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 41-49.  
LIU Wenxia, LI Zhengzhou, YANG Yue, et al. Collaborative optimal configuration for integrated energy system considering uncertainties of demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 41-49(in Chinese).
- [14] 贺帅佳, 阮贺彬, 高红均, 等. 分布鲁棒优化方法在电力系统中的理论分析与应用综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 179-191.  
HE Shuaijia, RUAN Hebin, GAO Hongjun, et al. Overview on theory analysis and application of distributionally robust optimization method in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 179-191(in Chinese).
- [15] 杨策, 孙伟卿, 韩冬, 等. 考虑风电出力不确定的分布鲁棒经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3649-3655.  
YANG Ce, SUN Weiqing, HAN Dong, et al. Distributionally-robust economic dispatch considering uncertain wind power output [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3649-3655(in Chinese).
- [16] HE Chuan, ZHANG Xiaping, LIU Tianqi, et al. Distributionally robust scheduling of integrated gas-electricity systems with demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3791-3803.
- [17] 高海淑, 张玉敏, 吉兴全, 等. 基于场景聚类的主动配电网分布鲁棒综合优化[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 32-41.  
GAO Haishu, ZHANG Yumin, JI Xingquan, et al. Scenario clustering based distributionally robust comprehensive optimization of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 32-41(in Chinese).
- [18] 高晓松, 李更丰, 肖遥, 等. 基于分布鲁棒优化的电-气-热综合能源系统日前经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2245-2253.  
GAO Xiaosong, LI Gengfeng, XIAO Yao, et al. Day-ahead economical dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on distributionally robust optimization[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2245-2253(in Chinese).
- [19] 朱兰, 李孝均, 唐陇军, 等. 考虑相变储能与建筑蓄能特性的微网分布鲁棒优化调度[J]. 电网技术, 2021, 44(6): 2308-2319.  
ZHU Lan, LI Xiaojun, TANG Longjun, et al. Distributionally robust optimal operation for microgrid considering phase change storage and building storage [J]. Power System Technology, 2021, 44(6): 2308-2319(in Chinese).
- [20] ZHOU Anping, YANG Ming, WANG Mingqiang et al. A linear programming approximation of distributionally robust chance-constrained dispatch with wasserstein distance [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3366-3377.
- [21] 帅轩越, 王秀丽, 吴雄, 等. 计及条件风险价值下基于合作博弈的多微网协同优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 130-138.  
SHUAI Xuanyue, WANG Xiuli, WU Xiong, et al. Cooperative optimal scheduling of multi-microgrids based on cooperative game considering conditional value at risk [J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 130-138(in Chinese).



曾捷

在线出版日期: 2021-09-15。

收稿日期: 2021-06-21。

作者简介:

曾捷(1999), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源优化, E-mail: zjie.bzxm@my.swjtu.edu.cn;

童晓阳(1970), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为电网故障诊断、广域后备保护、智能变电站、能源互联网, E-mail: xyotong@swjtu.cn;

范嘉乐(1994), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为综合能源系统能量流建模与优化, E-mail: fanjiale@zzuli.edu.cn。

(责任编辑 徐梅)

## 附录 A

### 1) 配电网约束

配电网流入与流出节点的功率平衡如式(A1)—(A2)。式(A3)表示节点电压降落方程，式(A4)表示支路电流方程，式(A5)—(A6)分别表示支路功率的上下限约束。式(A7)—(A10)分别表示节点电压、电流、风力发电和失电负荷的上下限约束。

$$\sum_{l=1}^{lj} (P_{l,t} - I_{l,t}^2 R_l) + P_t^{\text{in}} + \sum_{w=1}^{N_w} P_{w,t}^{\text{W}} + \sum_{g=1}^{N_g} P_{g,t}^{\text{R}} = \sum_{l=1}^{jl} P_{l,t} + \sum_{\alpha=1}^{N_{p2g}} P_{\alpha,t}^{\text{P2g}} + \sum_{i=1}^{N_{DR}} P_{i,t}^{\text{E,DR}} + \sum_{j=1}^{N_d} P_{j,t}^{\text{E,d}} + \sum_{d=1}^{N_{\text{Dloss}}} P_{d,t}^{\text{E,Dloss}} \quad (\text{A1})$$

$$\sum_{l=1}^{lj} (Q_{l,t} - X_l I_{l,t}^2) + Q_t^{\text{in}} = \sum_{l=1}^{N_l} Q_{l,t} + \sum_{j=1}^{N_d} Q_{j,t}^{\text{E,d}} \quad (\text{A2})$$

$$U_{i,t}^2 - U_{j,t}^2 = -2(R_l P_{l,t} + X_l Q_{l,t}) + (R_l^2 + X_l^2) \cdot I_{l,t}^2 \quad (\text{A3})$$

$$I_{l,t}^2 = (P_{l,t}^2 + Q_{l,t}^2) / U_{j,t}^2 \quad (\text{A4})$$

$$P_{l,\min} \leq P_{l,t} \leq P_{l,\max} \quad (\text{A5})$$

$$Q_{l,\min} \leq Q_{l,t} \leq Q_{l,\max} \quad (\text{A6})$$

$$U_{j,\min} \leq U_{j,t} \leq U_{j,\max} \quad (\text{A7})$$

$$I_{l,\min} \leq I_{l,t} \leq I_{l,\max} \quad (\text{A8})$$

$$0 \leq P_{w,t}^{\text{W}} \leq P_{w,\max}^{\text{W}} \quad (\text{A9})$$

$$0 \leq P_{d,t}^{\text{E,Dloss}} \leq P_{d,\max}^{\text{E,Dloss}} \quad (\text{A10})$$

式中： $lj$ 表示以 $j$ 为支路末端节点的首端点数目； $jl$ 表示以 $j$ 为支路首端节点的末端点数目； $N_l$ 表示配电网节点数目； $N_g$ 、 $N_\alpha$ 表示燃气轮机以及电转气设备数目； $I_{l,t}$ 、 $P_{l,t}$ 、 $Q_{l,t}$ 分别表示支路 $l$ 流过的电流、有功和无功功率； $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$ 表示节点 $i$ 、 $j$ 的电压； $P_{j,t}^{\text{E,d}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{E,d}}$ 表示节点 $j$ 上负荷所消耗的有功和无功功率； $P_{g,t}^{\text{R}}$ 、 $P_{\alpha,t}^{\text{P2g}}$ 燃气轮机、电转气设备产生与消耗的电功率； $P_{l,\min}$ 、 $P_{l,\max}$ 表示线路 $l$ 的最小、最大有功功率； $Q_{l,\min}$ 、 $Q_{l,\max}$ 表示线路 $l$ 的最小、最大有功功率； $U_{j,\min}$ 、 $U_{j,\max}$ 分别表示节点 $j$ 的最小、最大电压； $I_{l,\min}$ 、 $I_{l,\max}$ 表示线路 $l$ 中能流过的最小、最大电流； $Q_{l,\min}$ 、 $Q_{l,\max}$ 为线路 $l$ 的最小和最大无功功率限制； $P_{w,\max}^{\text{W}}$ 、 $P_{d,\max}^{\text{E,Dloss}}$ 表示最大风电出力 and 最大失负荷量限制。

### 2) 配气网约束

配气网中需要满足节点气压约束；管存上下限约束；管道流入和流入气流上下限约束以及失负荷约束，如下所示：

$$P_{\min} \leq P_{i,t} \leq P_{\max} \quad (\text{A11})$$

$$m_{ij}^{\min} \leq m_{ij,t} \leq m_{ij}^{\max} \quad (\text{A12})$$

$$f_{\min}^{\text{G}} \leq f_{ij,t}^{\text{in}} \leq f_{\max}^{\text{G}} \quad (\text{A13})$$

$$f_{\min}^{\text{G}} \leq f_{ij,t}^{\text{out}} \leq f_{\max}^{\text{G}} \quad (\text{A14})$$

$$0 \leq P_{d,t}^{\text{G,Dloss}} \leq P_{\max}^{\text{G,Dloss}} \quad (\text{A15})$$

式中： $P_{\min}$ 、 $P_{\max}$ 表示节点的最小和最大气压限制； $m_{ij}^{\min}$ 、 $m_{ij}^{\max}$ 表示最小和最大管存气流； $f_{\min}^{\text{G}}$ 、 $f_{\max}^{\text{G}}$ 表示管道最小和最大的气流量； $P_{\max}^{\text{G,Dloss}}$ 表示最大失气负荷量。

### 3) 机会约束式推导：

配电网有功功率机会约束式：

$$\inf_{P \in D_0} E_p (P_{l,\min} \leq P_{l,t} - \xi^{\text{E}} \leq P_{l,\max}) \geq 1 - \gamma =$$

$$\inf_{P \in D_0} E_p \left( \begin{array}{l} \vec{e} \cdot \xi^{\text{E}} \leq P_{l,t} - P_{l,\min} \\ \vec{e} \cdot (-\xi^{\text{E}}) \leq P_{l,\max} - P_{l,t} \end{array} \right) \geq 1 - \gamma \quad (\text{A16})$$

其中： $\alpha(x) = \vec{e}$ ， $\beta_1(x) = P_{l,t} - P_{l,\min}$

$$\beta_2(x) = P_{l,\max} - P_{l,t}$$

配气网流入气流机会约束式：

$$\inf_{P \in D_0} E_p (f_{\min}^{\text{G}} \leq f_{ij,t}^{\text{in}} - \xi^{\text{G}} \leq f_{\max}^{\text{G}}) \geq 1 - \gamma =$$

$$\inf_{P \in D_0} E_p \left( \begin{array}{l} \vec{e} \cdot \xi^{\text{G}} \leq f_{ij,t}^{\text{in}} - f_{\min}^{\text{G}} \\ \vec{e} \cdot (-\xi^{\text{G}}) \leq f_{\max}^{\text{G}} - f_{ij,t}^{\text{in}} \end{array} \right) \geq 1 - \gamma \quad (\text{A17})$$

其中： $\alpha(x) = \vec{e}$ ， $\beta_1(x) = f_{ij,t}^{\text{in}} - f_{\min}^{\text{G}}$

$$\beta_2(x) = f_{\max}^{\text{G}} - f_{ij,t}^{\text{in}}$$

配气网流出气流机会约束式：

$$\inf_{P \in D_0} E_p (f_{\min}^{\text{G}} \leq f_{ij,t}^{\text{out}} + \xi^{\text{G}} \leq f_{\max}^{\text{G}}) \geq 1 - \gamma =$$

$$\inf_{P \in D_0} E_p \left( \begin{array}{l} \vec{e} \cdot (-\xi^{\text{G}}) \leq f_{ij,t}^{\text{out}} - f_{\min}^{\text{G}} \\ \vec{e} \cdot \xi^{\text{G}} \leq f_{\max}^{\text{G}} - f_{ij,t}^{\text{out}} \end{array} \right) \geq 1 - \gamma \quad (\text{A18})$$

其中： $\alpha(x) = \vec{e}$ ， $\beta_1(x) = f_{ij,t}^{\text{out}} - f_{\min}^{\text{G}}$

$$\beta_2(x) = f_{\max}^{\text{G}} - f_{ij,t}^{\text{out}}$$

需求侧响应可转移负荷机会约束式：

$$\inf_{P \in D_0} E_p (-P_{\max}^{\text{E/G,DR,out}} \leq P_{i,t}^{\text{E/G,DR,S}} + u^{\text{S}} \xi^{\text{E/G}} \leq$$

$$P_{\max}^{\text{E/G,DR,in}}) \geq 1 - \gamma =$$

$$\inf_{P \in D_0} E_p \left( \begin{array}{l} u^{\text{S}} \cdot (-\xi^{\text{E/G}}) \leq P_{i,t}^{\text{E/G,DR,S}} + P_{\max}^{\text{E/G,DR,out}} \\ u^{\text{S}} \cdot \xi^{\text{E/G}} \leq P_{\max}^{\text{E/G,DR,in}} - P_{i,t}^{\text{E/G,DR,S}} \end{array} \right) \geq 1 - \gamma \quad (\text{A19})$$

其中： $\alpha(x) = u^{\text{S}}$ ， $\beta_1(x) = P_{i,t}^{\text{E/G,DR,S}} + P_{\max}^{\text{E/G,DR,out}}$

$$\beta_2(x) = P_{\max}^{\text{E/G,DR,in}} - P_{i,t}^{\text{E/G,DR,S}}$$

需求侧响应可替代负荷机会约束式：

$$\inf_{P \in D_0} E_p (0 \leq P_{i,t}^{\text{E/G,DR,T}} + u^{\text{T}} \xi^{\text{E/G}} \leq$$

$$P_{\max}^{\text{E/G,DR,T}}) \geq 1 - \gamma =$$

$$\inf_{P \in D_0} E_p \left( \begin{array}{l} u^{\text{T}} \cdot (-\xi^{\text{E/G}}) \leq P_{i,t}^{\text{E/G,DR,T}} \\ u^{\text{T}} \cdot \xi^{\text{E/G}} \leq P_{\max}^{\text{E/G,DR,T}} - P_{i,t}^{\text{E/G,DR,T}} \end{array} \right) \geq 1 - \gamma \quad (\text{A20})$$

其中： $\alpha(x) = u^{\text{T}}$ ， $\beta_1(x) = P_{i,t}^{\text{E/G,DR,T}}$

$$\beta_2(x) = P_{\max}^{\text{E/G,DR,T}} - P_{i,t}^{\text{E/G,DR,T}}$$



需求侧响应可削减负荷机会约束式:

$$\inf_{P \in D_0} E_p (0 \leq P_{i,t}^{E/G,DR,C} + u^C \xi^{E/G} \leq P_{\max}^{E/G,DR,C} \cdot L_{i,t}^{E/G,DR,C}) \geq 1 - \gamma =$$

$$\inf_{P \in D_0} E_p \left( \begin{array}{l} u^C \cdot (-\xi^{E/G}) \leq P_{i,t}^{E/G,DR,C} \\ u^C \cdot \xi^{E/G} \leq P_{\max}^{E/G,DR,C} \cdot L_{i,t}^{E/G,DR,C} \\ -P_{i,t}^{E/G,DR,C} \end{array} \right) \geq 1 - \gamma \quad (A21)$$

其中:  $\alpha(x) = u^C$ ,  $\beta_1(x) = P_{i,t}^{E/G,DR,C}$

$$\beta_2(x) = P_{\max}^{E/G,DR,C} \cdot L_{i,t}^{E/G,DR,C} - P_{i,t}^{E/G,DR,C}$$

附录 B

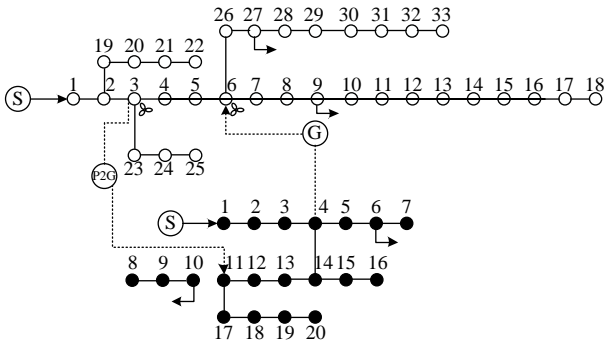


图 B1 电-气耦合配网系统模型图

Fig. B1 Integrated electric-gas distribution system

表 B1 燃气轮机和电转气设备参数

Table B1 Parameters of gas turbine and P2G equipment

耦合设备	最小有功值/kVar	最大有功值/kVar	爬坡速率	转换效率/%
燃气轮机	0	1000	200	85
电转气设备	0	500	-	60

表 B2 可削减负荷参数

Table B2 Parameters of reducible loads

节点	最大可削减量	最大削减持续时间	可削减次数	补偿费用/元	
电负荷	9	135/kW	4/h	5	0.547
	27	125/kW	3/h	5	0.530
气负荷	6	3.42/Kcf	4/h	5	1.760
	10	3.74/Kcf	3/h	5	1.895

表 B3 可转移负荷参数

Table B3 Parameters of shiftable loads

节点	最大可转入量	最大可转出量	转移费用/元	
电负	9	140/kW	120/kW	0.510
荷	27	130/kW	112/kW	0.479
气负	6	3.40/Kcf	3.60/Kcf	1.380
荷	10	3.60/Kcf	3.80/Kcf	1.595

表 B4 可替代负荷参数

Table B4 Parameters of substitutable loads

节点	最大可替代量	替代费用/元	
电负荷	9	130/kW	0.447
	27	125/kW	0.430
气负荷	6	3.20/Kcf	1.260
	10	3.80/Kcf	1.295

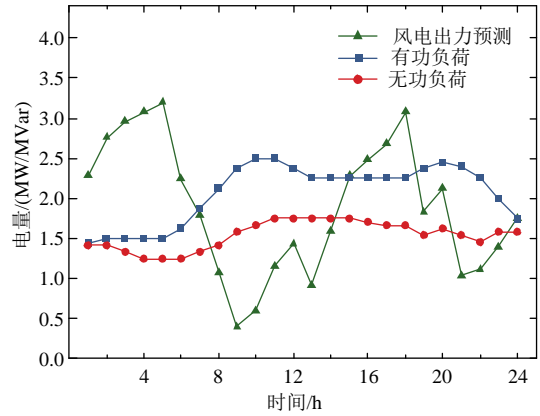


图 B2 负荷与风电预测参数

Fig. B2 Parameters of loads and wind power forecasting

表 B5 不同场景下的系统损耗

Table B5 System loss in different cases

	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
弃风量/kW	852.3	645.9	323.0	253.7
网络损耗/kW	109.5	107.0	106.0	103.9
失电负荷/kW	794.9	753.5	615.4	596.1
失气负荷/Kcf	111.5	111.6	142.6	120.0