Vol.37 No.2 Apr. 2020

文章编号: 1007-2322(2020)02-0197-08

文献标志码:A

中图分类号: TM73

# 基于机会约束的多能源枢纽电气互联 综合能源系统日前经济调度

周晟锐<sup>1</sup>,刘继春<sup>1</sup>,张浩禹<sup>1</sup>,文杰<sup>1</sup>,张林<sup>1</sup>,冯麒铭<sup>2</sup> (1.四川大学电气工程学院,四川省成都市 610065; 2.国网南充供电公司,四川省南充市 637000)

## Day-ahead Economic Dispatch for Electricity-Gas Integrated Energy System with Multiple Energy Hubs based on Chance Constraints

ZHOU Shengrui<sup>1</sup>, LIU Jichun<sup>1</sup>, ZHANG Haoyu<sup>1</sup>, WEN Jie<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>1</sup>, FENG Qiming<sup>2</sup>
(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China;
2. State Grid Nanchong Electric Power Supply Company, Nanchong 637000, Sichuan Province, China)

**摘要:**集生产、转化、储存和消费于一身的能源枢纽使电网和天然气系统的协同规划与运行成为可能,同时多种不确定性是电气互联系统调度面临的最大问题。为此构建了一种含多个能源枢纽的电气互联综合能源系统机会约束规划。首先,充分挖掘气管网的储能特性,在分别对能源枢纽、电力系统和天然气系统精细建模的基础上,考虑风电和负荷不确定性,建立了含机会约束的日前调度模型。然后,将气网潮流线性化,采用 Bernstein 近似将此模型转化为确定性整数混合线性凸优化问题,可利用商业软件有效求解。最后,在一个含3个能源枢纽的 IEEE RST24 电力系统和比利时 20 节点天然气系统的耦合系统中进行仿真,结果表明,气网动态特性能为综合能源系统调度提供缓冲,同时此种确定性转化方法能有效体现机会约束规划的 鲁棒性。

关键词:多能源枢纽;气网储能特性;电气耦合;机会约 束规划

Abstract: The energy hubs, which integrate the energy production, transformation, storage and consumption, make the coordinated planning and operation of power grid with natural gas system possible, however the multiple uncertainties are the uppermost problems that the scheduling departments of electricity-gas integrated energy systems have to be faced with. To solve this problem, a chanceconstraints basedplanning for electricity-gas integrated energy system containing multi energy hubs was constructed. Firstly, the energy storage characteristics of gas pipe network was fully utilized, and based on the fine modelings for energy hubs, power grid and natural gas system and considering the uncertainties of wind power generation and loads, a day-ahead dispatching model containing chance constraints was established. Secondly, the power flow in the gas network was linearized and by use of Bernstein approximation the established model was transformed into a deterministic integer mixed linear convex optimization problem that could be effectively solved by commercial software. Finally, the proposed model was simulated in IEEE RST 24 power system with 3 energy hubs and Belgium's 20-node natural gas system. Simulation results show that the dynamic characteristics of gas network can provide buffer for the dispatching of integrated energy system, and the proposed deterministic transformation method can effectively reflect the robustness of chance-constrained programming.

Keywords: multi-energy hubs; gas network energy storage characteristics; electrical coupling; chance-constrained programming

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0966

## 0 引言

相较于传统电力系统,综合能源系统 (integrated energy system, IES)将电力系统、天然 气系统和热力系统紧密耦合进行协调运行与控 制,耦合环节涉及到源-网-荷各个层面。多个系 统之间的相互支援也提高了单个系统的安全性和 灵活性,但其最大的优势还是体现在分布式电源 就地消纳和系统整体能效比[1-4]。

目前国内外对 IES 的研究重点关注电-气-热 互联综合能源系统的协调运行、扩展规划和可靠 性评估等问题<sup>[5-8]</sup>。IES 模型由电力系统和天然气 系统通过电转气 (power to gas, P2G) 和燃气轮机 等设备耦合而成,多种能源的相互转化主要集中 在系统"源""荷"层面,此种建模方式存在管 理方式被动、能量损失严重和缺乏可拓展性等缺陷<sup>[9]</sup>,难以适应风电机组和用户需求不断增加的发展趋势。能源枢纽 (energy hub, EH)是集成有大量分布式电源、能源转化元件和传输功能的建模单元,通过不同能源载体输入输出改善系统整体能源利用效率。文献 [10] 提出能源枢纽的数学建模方法,将多个能源枢纽以微网群的方式接入配电、配气网,实现不同能源传输网络的深度耦合。因此,研究多个能源枢纽和电网、气网的协调经济调度具有较好的应用前景。此外,上述文献在气网建模时均忽略了气网动态特性,实际上,气网管道的储存能力能为天然气负荷波动提供缓冲,未考虑此特性的传统暂态建模方式会与实际调度情况存在较大误差。

为分析风电不确定性对 IES 协调优化带来的 影响,已有文献多采用鲁棒优化和随机优化的方 法来描述不确定性参数,两种方法各有优劣。文 献 [11] 采用场景法描述 IES 中存在的风电不确定 参数,需要具体概率密度函数来表征不确定性, 产生的大量离散样本加重了运算负担,往往需要 场景削减。文献 [12-13] 采用仿射可调鲁棒的方法 克服传统鲁棒过于保守的问题,但其保守度控制 因子缺乏实际物理意义,也缺乏对气网、电网的 精细建模。文献 [14] 在随机变量满足期望为零的 对称分布前提下,可以将机会约束松弛转化为确 定性约束条件,通过改变置信水平控制系统的鲁 棒性和经济性。

因此,本文探讨了考虑风电、负荷不确定性 的电气互联综合能源系统机会约束规划问题。首 先,在对能源枢纽、电网和气网建模的基础上, 考虑气网的储能特性并采用分段线性化处理气网 潮流以方便求解。然后,根据多个能源枢纽与外 网能量交互限制建立机会约束,进一步将此机会 约束松弛近似为更为保守的确定性凸优化问题。 在一个电气互联综合能源系统中验证了该模型的 有效性。

## 含多能源枢纽的电-气互联综合能 源系统优化调度结构

能源枢纽将分布式电源、能源转化元件、储 能系统和多能源负荷集中一体化,此时综合能源 系统划分为能源枢纽与连接能源枢纽的传输网 络。在满足负荷需求前提下,通过不同能源相互转化的能源枢纽可以针对提升系统经济性和风电 消纳水平做出迅速地适应性调整,但在高比例风 电场景下,区域能源枢纽有限的冗余度为大量风 电消纳带来困难。本文中,能源枢纽不仅是用户 侧综合能源系统,同时也是电、气网络能量相互 传输的小型闭环,对电-气互联综合系统而言,能 源枢纽既可以是"源"也可以是"荷"。能源枢 纽既可以充当电源向电网输送电能,也可以通过 P2G将风电转化为天然气直接利用或注入天然气 管道;热电联产机组 (combined heat and power, CHP)可以利用天然气发电补充电能空缺。

所有能源枢纽和电网、气网将由上级调度中 心集中式调度,能源枢纽只作为能源转化和提供 能源的关键环节,不作为独立利益主体向所连网 络购售能源。具体日前调度结构如图1所示。首 先,由上级调度中心预测所有节点负荷和风电场 出力并根据历史统计数据考虑预测误差分布;然 后,调度决策者设定某个目标函数,并在已有的 确定性模型基础上,引入机会约束刻画约束越限 概率;最后制定系统每个机组和能源转化元件的 调度决策方案。





## 基于机会约束规划的综合能源系 统调度模型

#### 2.1 目标函数

本文构建的综合能源系统主要包括能源枢纽

4

和电、气传输网络,在分别建模的基础上,考虑 以综合运行成本最小为目标函数,决策变量包含 传统火电机组和气源的出力情况。

$$C(P_{G,i,t},\varphi_{S,j,t}) = \sum_{t \in T} \left[ \sum_{i \in N_G} (a_i P_{G,i,t}^2 + b_i P_{G,i,t} + c_i I_{i,t} + v_{i,t} S_{Ti} + \omega_{i,t} S_{Di}) + \sum_{j \in N_S} \rho_j^{gas} \varphi_{S,j,t} \right]$$
(1)

式中: T为调度总时段数,本文为 24 h;  $N_{\rm G}$ 和  $N_{\rm S}$ 分别为火电机组和气源个数;  $a_i$ 、 $b_i$ 和  $c_i$ 分别 为第 i台火电机组成本系数;  $P_{{\rm G},i,t}$ 为第 i台火电机 组在 t时段的输出电功率;  $I_{i,t}$ 为第 i台火电机组 在 t时段的开停机状态变量,为1时表示开机,为0时表示停机;  $v_{i,t}$ 为第 i台火电机组在 t时段的开机动作变量,为1时表示开机,否则为0;  $\omega_{i,t}$ 为第 i台火电机组在 t时段的关机动作变量,为1时表示关机,否则为0;  $S_{Ti}$ 和 $S_{Di}$ 分别为第 i台火电机组的开、停机成本;  $\rho_j^{\rm gas}$ 为第 j个气源的气价;  $\varphi_{{\rm S},j,t}$ 为第j个气源在 t时段发出的天然气流量。

#### 2.2 能源枢纽

本文设计的能源枢纽具体结构如图 2 所示, 能源枢纽可自由与电网、气网交互功率,其内部 主要包含分布式电源 (本文为风电场)、能源转化 元件 (P2G, CHP 和燃气锅炉)和储能系统 (储蓄 电池)。能源枢纽用户侧能源需求为电、气、热, 由于热能传输网络相较电能、天然气规模较小, 假定热能仅由能源枢纽内部产生并供给附近用户 需求,忽略其传输过程和损耗。



能源枢纽的矩阵数学描述文中不再赘述,内

部应满足的约束主要是功率平衡约束,如下:  $P_{\text{hub},i,t} + P_{\text{W},i,t} + P_{\text{CHP},i,t}^{e} + P_{\text{ES},i,t}^{\text{out}} = P_{\text{L},i,t} + P_{\text{P2G},i,t} + P_{\text{ES},i,t}^{\text{in}}$ (2)

$$\varphi_{\text{hub},i,t} + \varphi_{\text{P2G},i,t} = \varphi_{\text{CHP},i,t} + \varphi_{\text{GB},i,t} + \varphi_{\text{L},i,t}$$
(3)

$$P_{\text{CHP},i,t}^{\text{h}} + P_{\text{GB},i,t} = P_{\text{L},i,t}^{\text{h}}$$

$$\tag{4}$$

式中:  $P_{\text{hub},i,t}$ 和 $\varphi_{\text{hub},i,t}$ 分别为第 *i* 个能源枢纽在 *t* 时 段与外网交互的电能和天然气;  $P_{\text{W},i,t}$ 、 $P_{\text{CHP},i,t}^{e}$ 、  $P_{\text{L},i,t}$ 和 $P_{\text{P2G},i,t}$ 分别为第 *i* 个能源枢纽在 *t* 时段的风 电有功功率、CHP 发电功率、有功负荷和 P2G 电 功率;  $P_{\text{ES},i,t}^{\text{out}}$ 和 $P_{\text{ES},i,t}^{\text{in}}$ 分别为第 *i* 个能源枢纽在 *t* 时 段的储蓄电池放电功率和充电功率;  $\varphi_{\text{P2G},i,t}$ 、  $\varphi_{\text{CHP},i,t}$ 、 $\varphi_{\text{GB},i,t}$ 和 $\varphi_{\text{L},i,t}$ 分别为第 *i* 个能源枢纽在 *t* 时 段的 P2G 产气流量、CHP 耗气流量、燃气锅炉耗 气流量和气负荷;  $P_{\text{CHP},i,t}^{h}$ 、 $P_{\text{GB},i,t}$ 和 $P_{\text{L},i,t}^{h}$ 分别为第 *i* 个能源枢纽在 *t* 时段的 CHP 产热功率、燃气锅 炉产热功率和热负荷。

能源转化约束和联络线约束如下:

$$P^{\rm e}_{\rm CHP, i, t} = \eta^{\rm e}_{\rm CHP} \varphi_{\rm CHP, i, t} \cdot H_{GV} \tag{5}$$

$$P_{\text{CHP},i,t}^{\text{h}} = \eta_{\text{CHP}}^{\text{h}} \varphi_{\text{CHP},i,t} \cdot H_{GV}$$
(6)

 $\eta_{\text{P2G}} P_{\text{P2G},i,t} = \varphi_{\text{P2G},i,t} \cdot H_{GV} \tag{7}$ 

$$P_{\mathrm{GB},i,t} = \eta_{\mathrm{GB}}\varphi_{\mathrm{GB},i,t} \cdot H_{GV} \tag{8}$$

$$P_{\text{hub},i,\min} \leqslant P_{\text{hub},i,t} \leqslant P_{\text{hub},i,\max} \tag{9}$$

$$\varphi_{\text{hub},i,\min} \leq \varphi_{\text{hub},i,t} \leq \varphi_{\text{hub},i,\max}$$
 (10)

式中: $H_{GV}$ 为天然气热值; $\eta_{CHP}^{e}$ 、 $\eta_{CHP}^{h}$ 、 $\eta_{P2G}$ 和  $\eta_{GB}$ 分别为 CHP 发电、CHP 产热、电转气设备和 燃气锅炉的效率; $P_{hub,i,max}$ 和 $P_{hub,i,min}$ 分别为第 i 个 能源枢纽与电网交互电功率的上、下限;  $\varphi_{hub,i,max}$ 和 $\varphi_{hub,i,min}$ 分别为第 i 个能源枢纽与气网交 互天然气流量的上、下限。储蓄电池模型中考虑 充、放电和容量上下限约束,具体详见文献[3]。

#### 2.3 电力网络

1) 电功率平衡:

$$\sum_{i \in N_{\rm G}} P_{{\rm G},i,t} = \sum_{i \in N_{\rm hub}} P_{{\rm hub},i,t} + \sum_{i \in V} P_{{\rm L},i,t}^{\rm net}$$
(11)

式中: *N*<sub>hub</sub> 和 *V*分别为系统中能源枢纽和所有电 网节点集合; *P*<sup>net</sup><sub>L,i,t</sub>为第 *i* 个节点在 *t* 时段的电负荷。 2) 机组出力约束:

$$I_{i,t}P_{\mathrm{G},i,\min} \leqslant P_{\mathrm{G},i,t} \leqslant I_{i,t}P_{\mathrm{G},i,\max}$$
(12)

式中PG,i,max和PG,i,min分别为第i台火电机组的出力

上、下限。

3) 机组爬坡约束:

$$P_{G,i,t} - P_{G,i,t-1} \le I_{i,t-1} A_i^{up} + v_{i,t} A_i^{start}$$
(13)

$$P_{\mathrm{G},i,t-1} - P_{\mathrm{G},i,t} \leq I_{i,t} A_i^{\mathrm{down}} + \omega_{i,t} A_i^{\mathrm{shut}}$$
(14)

式中 $A_i^{up}$ 、 $A_i^{down}$ 、 $A_i^{start}$ 和 $A_i^{shut}$ 分别为第i台火电机 组的爬坡、滑坡速度限制和启动、关闭速度限制。

4)逻辑约束:

$$v_{i,t} - \omega_{i,t} = I_{i,t} - I_{i,t-1}$$
(15)

$$v_{i,t} + \omega_{i,t} \le 1 \tag{16}$$

6) 潮流约束:

$$\boldsymbol{P}_{\text{line}} = \boldsymbol{B}_{diag} \boldsymbol{L} \boldsymbol{B}^{-1} [\boldsymbol{P}_{\text{G}} + \boldsymbol{P}_{\text{hub}} - \boldsymbol{P}_{\text{L}}]$$
(17)

$$|\boldsymbol{P}_{\text{line}}| \leq \boldsymbol{P}_{\text{line,max}}, \boldsymbol{B}_{diag} = diag\left(\frac{1}{x_1}, \frac{1}{x_2}, \cdots, \frac{1}{x_L}\right)$$
 (18)

式中: B 为节点导纳矩阵; x 为线路电抗; L 为电 力系统线路集合;  $P_G$ 、 $P_{hub}$ 和 $P_L$ 分别为火电机 组、能源枢纽和电负荷在所连节点和时间维度下 的向量表达形式;  $P_{line,max}$ 为支路功率上限矩阵。

#### 2.4 动态天然气网络

 1)管存。常见的暂态天然气潮流将不再适用于电气互联综合能源系统的精确调度,利用管 道空间的储存特性,任意管道的注入流量和输出 流量在同一时段可以不同,其差值表现为在管道 内存储天然气或利用已有管存,间接地平滑天然 气的负荷峰谷差,提高系统的安全性和经济性。 具体数学模型<sup>[16]</sup>如下:

$$M_{ij,t} = M_{ij,t-1} + \varphi_{ij,t}^{\text{in}} - \varphi_{ij,t}^{\text{out}}$$
(19)

$$M_{ij,t} = \frac{\pi \Delta x_{ij} D_{ij}^2}{4R T_g Z \rho_0} \bar{\pi}_{ij,t}$$
(20)

$$\bar{\pi}_{ij,t} = (\pi_{i,t} + \pi_{j,t})/2 \tag{21}$$

$$\sum_{ij\in G} M_{ij,0} = \sum_{ij\in G} M_{ij,T}$$
(22)

式中: $M_{ij,t}$ 为管道 ij 在 t 时段的管存; $\varphi_{ij,t}^{in} \pi \varphi_{ij,t}^{out}$ 分别为管道 ij 在 t 时段的注入和流出的流量; $\pi_{i,t}$ 为 节点 i 在 t 时段的气压; $\bar{\pi}_{ij,t}$ 为管道 ij 在 t 时段的 平均气压; $\Delta x_{ij} \pi D_{ij}$ 分别为管道 ij 的长度和直 径;R 为气体常数; $T_g$ 、Z 和 $\rho_0$ 分别为天然气温 度、压缩因子和密度;G 为所有天然气管道的集合。

2) 节点流量平衡为

$$F_{S,i,t} + F_{P2G,i,t} - F_{L,i,t} = \sum_{j \in U, j \neq i} (F_{ij,t}^{in} - F_{ij,t}^{out}) + F_{CHP,i,t}$$
(23)

式中: $\varphi_{S,i,t}$ 、 $\varphi_{hub,i,t}$ 和 $\varphi_{L,i,t}^{net}$ 分别表示在 t 时段与第 i个气网节点相连的气源输出流量、能源枢纽交 互流量和天然气负荷; $\varphi_{ij,t}$ 为从气网节点 i 到 j 在 t 时段流过的管道流量, $\varphi_{ji,t}$ 为从气网节点 j 到 i 在 t 时段流过的管道流量;U为所有天然气节点 集合。

3) 气网约束<sup>[17]</sup>。为气网系统安全调度,管 网潮流和节点气压需满足一定的约束条件,详见 式 (24)。

$$\bar{\varphi}_{ij,t} \left| \bar{\varphi}_{ij,t} \right| = K_{ij} (\pi_{i,t}^2 - \pi_{j,t}^2) \tag{24}$$

$$\bar{\varphi}_{ij,t} = \frac{\varphi_{ij,t}^{\text{in}} + \varphi_{ij,t}^{\text{out}}}{2}$$
(25)

式中: $\varphi_{ij,t}$ 为在 t时段流经管道 ij的平均流量;  $K_{ij}$ 为管道 ij 的 Weymouth 常数;此约束条件为非 凸非线性,可以采用常见的分段线性化处理其非 线性项。具体处理过程详见附录 A。

4)加压站。天然气管网中的加压站消耗天 然气以弥补气压损失,具体建模时忽略非凸非线 性的加压站天然气损耗计算方式,约束条件包括 加压限制和经过加压站的天然气管道流量约束, 详见文献 [10]。

#### 2.5 机会约束构建

本文不确定性变量主要包括风电出力和用户 侧能源需求,假定次日风电出力和负荷真实值由 预测值加预测误差表达,具体如下:

$$P_{\mathrm{W},i,t} = \bar{P}_{\mathrm{W},i,t} + e_{\mathrm{W}}\varepsilon_{\mathrm{W},i,t}P_{\mathrm{L},i,t} = \bar{P}_{\mathrm{L},i,t} + e_{\mathrm{L},\mathrm{e}}\varepsilon_{\mathrm{L},i,t}^{\mathrm{e}} \qquad (26)$$

$$\varphi_{\mathrm{L},i,t} = \bar{\varphi}_{\mathrm{L},i,t} + e_{\mathrm{L},\mathrm{g}} \varepsilon_{\mathrm{L},i,t}^{\mathrm{g}} P_{\mathrm{L},i,t}^{\mathrm{h}} = \bar{P}_{\mathrm{L},i,t}^{\mathrm{h}} + e_{\mathrm{L},\mathrm{h}} \varepsilon_{\mathrm{L},i,t}^{\mathrm{h}} \qquad (27)$$

式中: $\bar{P}_{W,i,t}$ 、 $\bar{P}_{L,i,t}$ 、 $\bar{\varphi}_{L,i,t}$ 和 $\bar{P}_{L,i,t}^{h}$ 分别为风电出力和 多能源负荷预测值; $\epsilon$ 为各个随机变量误差的标 幺值系数,为维持整定误差为零设定 $\epsilon$ 满足限制 在 [-1,1] 内均值为零的正太分布;e为各个随机 变量误差的标幺值误差参数,其值可设定为预测 机构给出的历史预测误差最大值。

考虑这些不确定变量后,由式(9)、(10)建立 如下机会约束:

$$B\{P_{\text{hub},i,\min} \leqslant P_{\text{hub},i,t}\} \ge 1 - \xi \tag{28}$$

$$B\{P_{\text{hub},i,t} \le P_{\text{hub},i,\text{max}}\} \ge 1 - \xi \tag{29}$$

$$B\{\varphi_{\text{hub},i,\min} \leqslant \varphi_{\text{hub},i,t}\} \ge 1 - \xi \tag{30}$$

 $B\{\varphi_{\text{hub},i,t} \leq \varphi_{\text{hub},i,\max}\} \ge 1-\xi$  (31) 式中:  $B\{\cdot\}$ 为事件发生的概率;  $\xi$ 为不等式不被破 坏的概率。

### 3 模型确定性转化

Bernstein 保守近似方法详见附录 A,根据具体的机会约束确定性转化方法,由约束式 (2)可得式 (28)—(31)的具体转化过程 (为简化,转化过程均用矩阵来进行表示)如下:

$$\boldsymbol{P}_{\text{hub}} = \boldsymbol{P}_{\text{P2G}} + \boldsymbol{P}_{\text{L}} + \boldsymbol{P}_{\text{ES}}^{\text{in}} - \boldsymbol{P}_{\text{W}} - \boldsymbol{P}_{\text{CHP}}^{\text{e}} - \boldsymbol{P}_{\text{ES}}^{\text{out}} \qquad (32)$$
故约束 (29) 变为

$$B_{\varepsilon_{L}\sim Q_{L},\varepsilon_{W}\sim Q_{W}}\{P_{P2G}+\bar{P}_{L}+e_{L,e}\varepsilon_{L}+P_{ES}^{in}-\bar{P}_{W} \\ -e_{W}\varepsilon_{W}-P_{CHP}^{e}-P_{ES}^{out}-P_{hub,max}>0\} \leq \xi$$
(33)

$$\Pr_{\varepsilon_{\mathrm{L}}\sim Q_{\mathrm{L}},\varepsilon_{\mathrm{W}}\sim Q_{\mathrm{W}}} \{ \boldsymbol{P}_{\mathrm{hub}}^{0} + e_{\mathrm{L},\mathrm{e}}\varepsilon_{\mathrm{L}} - e_{\mathrm{W}}\varepsilon_{\mathrm{W}} - \boldsymbol{P}_{\mathrm{hub},\mathrm{max}} > 0 \} \leqslant \xi$$
(34)

根据式 (A-14), 可得可得可得

$$\boldsymbol{P}_{\text{hub}}^{0} \leq \boldsymbol{P}_{\text{hub,max}} - \sqrt{e_{\text{L,e}}^{2} + e_{\text{W}}^{2}} \cdot \sqrt{2\ln(\frac{1}{\xi})} \qquad (35)$$

同理,约束式(28)—(31)最终被转化为

$$\boldsymbol{P}_{\text{hub,min}} + \sqrt{\boldsymbol{e}_{\text{L,e}}^2 + \boldsymbol{e}_{\text{W}}^2} \cdot \sqrt{2\ln(\frac{1}{\xi})} \leq \boldsymbol{P}_{\text{hub}}^0$$
$$\leq \boldsymbol{P}_{\text{hub,max}} - \sqrt{\boldsymbol{e}_{\text{L,e}}^2 + \boldsymbol{e}_{\text{W}}^2} \cdot \sqrt{2\ln(\frac{1}{\xi})}$$
(36)

$$\varphi_{\text{hub,min}} + \sqrt{e_{\text{L,g}}^2 + (\lambda e_{\text{L,h}})^2} \cdot \sqrt{2\ln(\frac{1}{\xi})} \leq \varphi_{\text{hub}}^0$$
$$\leq \varphi_{\text{hub,max}} - \sqrt{e_{\text{L,g}}^2 + (\lambda e_{\text{L,h}})^2} \cdot \sqrt{2\ln(\frac{1}{\xi})}$$
(37)

式中**P**<sup>0</sup><sub>hub</sub>和**φ**<sup>0</sup><sub>hub</sub>分别为不计及预测误差时的电能和 天然气交互的向量表示形式。本文热负荷均由天 然气转化得到,故能源枢纽内热负荷预测误差会 间接对天然气流量交互带来影响,其线性影响因 子λ由 CHP 和燃气锅炉的平均效率近似得到。由 于其他节点电负荷和气负荷预测误差较小,且对 交互功率影响的线性表出系数难以准确表达,故 忽略了其对机会约束的影响。

此时,原本的综合能源系统机会约束模型转 化为确定性的混合整数线性规划模型如下:

目标函数: min 式(1);

能源枢纽约束:式(2)—(8); 电网约束:式(11)—(18); 气网约束:式(19)—(25); 能源枢纽与外网交互约束:式(36)、(37)。

首先,随机产生风电和负荷的预测误差数据,以 Matlab R2016a 为编程平台构建上述模型的目标函数和约束条件,然后调用 Yalmip和 CPLEX 12.6 进行求解 IES 最优能量管理策略。具体流程详见附录图 A2 所示。

### 4 算例分析

#### 4.1 测试系统

对文献 [17] 所给出的 IEEE-RST24 节点电力 系统和比利时 20 节点天然气系统的耦合系统部 分数据做出部分修改:电力线路容量扩大 1.5倍, 传统火电机组参数详见附录表 A1; 天然 气系统包含19条管道,管道初始管存总和为 3.72 Mm<sup>3</sup>, Weymouth 常数详见附录表 A2, 气源 数据详见附录表 A3, 各能源枢纽设备参数见附 录表 A4, 能源枢纽与外网交互参数见附录表 A5, 其余网络数据均与文献 [17] 保持一致。电气互联 综合能源系统通过3个能源枢纽相耦合,分别与 电网节点 11、16、21 和气网节点 3、11、15 相 连,它们与外部网络能量交换的功率和流量上下 限详见附录表 A4。调度时间间隔为1h, 越限概 率均取 0.1, 随机变量误差标幺值系数由范围在 [-1,1]上的正态分布 N(0,0.16)产生,多个随机 变量的产生相互独立。

为探讨气网动态特性对调度结果的影响,设 立两个场景:场景一考虑气管网的储存特性;场 景二采用暂态气网建模。

#### 4.2 调度结果分析

分别对场景一和场景二做 100 次蒙特卡洛仿 真实验,图 3、4 给出了在场景一下某次具体调 度结果;场景一下的天然气网管存量如图 5 所 示,2 个场景下的气源出力比较如图 6 所示。

由图 3、4 可知, EH 中风电比例较高,大量 风电在满足 EH 内部负荷需求之后通过并网或转 化为气负荷实现风电消纳,故 EH 与电网的电能 交互始终为负值;而 P2G 为消纳大量风电出力时 间集中在 1~7 h,而这个时段恰为热负荷峰值时 间,由 P2G 转化的天然气不能支撑 EH 内天然气



Fig. 3 Results of energy hub with power system



图 4 场景一调度结果

Fig. 4 Dispatch results of scenario one



Fig. 5 Pipe capacity of scenario one



需求,故 EH 与气网的能量交互始终为正值。 CHP 出力主要集中在电负荷峰值时段 (9~20 h) 以 弥补大量电能需求。EH 内部能源转化元件和与 外网自由能量交互为间歇性分布式电源消纳提供 可行域度,增强系统整体灵活性。

而在 2 个场景的比较中,场景一平均运行成本为 1097.46 万元,场景二为 1101.19 万元,考虑 气网储存特性后综合成本下降了约 0.34%。气管 网的储能特性会有利于系统经济运行,由图 5 可 知,最优经济运行下管网储气在 6 h 和 17 h 左右 达到峰值,而在 12 h 和 20 h 左右处于低谷,管存 的峰谷时段与气负荷的峰谷时段恰好相反。这证 明管存可以为气网调度做预备缓冲,间接削减了 天然气净负荷峰谷差,降低了峰荷时段气源和管 道传输压力,提高气网安全性。

图 6 分析了场景一的高经济性来源,假设 4 个分别位于1、5、8、13 节点的气源气价各不 相同。8 节点气源气价最低而1 节点最高,故在 2 个场景的调度结果中1 节点气源不出力而 8 节 点始终处于出力上限(为简化图 6 中并未给出), 节点13 气源价格比节点5 气源价格略高,但是在 优先选择节点5 气源多发的同时也会受到管道流 量、节点气压等限制。因此,采用气网暂态建模 的场景二节点13 气源在一个调度周期内共发出 5.97 Mm<sup>3</sup>天然气,而场景一的13 节点气源则只 发出 0.08 Mm<sup>3</sup>天然气,其中的差值则由5 节点气 源在 1~7 h 来弥补并暂时存于管道中。

#### 4.3 确定性转化方法的鲁棒性分析

为验证此确定性转化方法的合理性,对比了确定性优化方法、*ξ*=0.1、0.15、0.2、0.25的目标 函数值和能源集线器能源交互的越限概率。对不 同概率的机会约束规划分别做 1000 次蒙特卡洛 仿真,误差产生方式不变,取 1000 次的平均值 作为最终结果,如表1所示。

由表1可知,机会约束规划的结果均高于确 定性优化结果,能够体现其鲁棒性。而调度决策 者设置的越限概率越低,得到的结果就越保守, 证明通过调整越限概率可以根据调度决策者的要 求调整系统整体鲁棒性。此外,由于此种确定性 转化方法不断放缩,难以还原原本机会约束规划 的鲁棒性,所以得到的结果会较之机会约束规划 更加保守。

Table 1         Results of Monte Carlo simulation						
调度方法	调度成本/万元	能源枢纽与 电网能源交互 越限概率/%	能源枢纽与 气网能源交互 越限概率/%			
确定性优化	1090.35	33.7	20.4			
$\xi = 0.05$	1100.56	1.7	0.9			
$\xi = 0.1$	1097.46	4.9	1.8			
$\xi = 0.15$	1095.82	7.2	5.1			
$\xi = 0.2$	1093.59	11.3	7.1			

表1 蒙特卡洛模拟仿真结果

## 5 结论

针对含多个能源枢纽的电气综合能源系统, 提出考虑风电和负荷不确定性的机会约束规划, 并转化为凸优化问题求解,得到以下结论:

 1)充分挖掘气网的储能特性,可以为整个 综合能源系统的调度提供缓冲。考虑气网动态特 性模型比传统暂态建模方法成本降低 0.34%,同 时调度结果也更为精确。

2)本文所提机会约束确定性转化方法能体 现模型的鲁棒性,机会约束的越限概率会低于调 度决策者所设定的置信水平,得到的结果会比原 机会约束更为保守。

3)调度决策者可以调整约束越限概率,在 系统整体经济性和鲁棒性中做出权衡。

(本刊附录请见网络版,印刷版略)

## 参考文献

[1] 张利军, 徐晨博, 范娟娟, 等. 区域能源互联网多能系统规划决策关键技术及应用[J]. 现代电力, 2018, 35(4): 27-34.

ZHANG Lijun, XU Chenbo, FAN Juanjuan, et al. Critical technology and its application of muti-energy system planning and desion-making for regional energy internet [J]. Modern Electric Power, 2018, 35(4): 27 - 34 (in Chinese).

[2] 孙宏斌, 潘昭光, 郭庆来. 多能流能量管理研究: 挑战与展望 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 1-8.

SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8 (in Chinese).

- [3] 魏震波,黄宇涵,高红均,等.含电转气和热电解耦热 电联产机组的区域能源互联网联合经济调度[J].电 网技术,2018,42(11):3512-3519.
  WEI Zhenbo, HUANG Yuhan, GAO Hongjun, et al. Joint economic scheduling of power-to-gas and thermoelectric decoupling CHP in regional energy internet [J]. Power System Technology, 2018, 42(11):3512-3519 (in Chinese).
- [4] 李文博,李华东,张鹏飞,等.考虑不确定性的区域能源互联网源-荷-储协调优化[J].现代电力,2019,36(3):11-18.
  LI Wenbo, LI Huadong, ZHANG Pengfei, et al. Generation-load-storage coordinated optimization for regional energy internet considering uncertainties [J]. Modern Electric Power, 2019, 36(3): 11 18 (in Chinese).
- [5] LI Y, SHAHIDEHPOUR M, LIU W, et al. Optimal operation strategy for integrated power-to-gas and natural gas generating unit facilities [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1870 – 1879.
- [6] ZENG Q, ZHANG B, FANG J, et al. A bi-level programming for multistage co-expansion planning of the integrated gas and electricity system [J]. Applied Energy, 2017(200): 192 – 203.
- [7] 陈胜,卫志农,孙国强,等. 电-气混联综合能源系统概率能量流分析 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6331-6340.
  CHENG Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Probabilistic energy flow analysis in integrated electricity and natural-gas energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6331 6340 (in Chinese).
  [8] 余娟,马梦楠,郭林,等. 含电转气的电-气互联系统可
- [8] 余娟, 马梦楠, 鄂林, 等. 含电转气的电-气互联系统可 靠性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 708-715.

YU Juan, MA Mengnan, GUO Lin, et al. A reliability evaluation of integrated electrical and natural-gas system with power-to-gas [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 708 – 715 (in Chinese).

 [9] 徐青山,李淋,盛业宏,等. 冷热电联供型多微网主动 配电系统日前优化经济调度[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1726-1735.

XUQingshan, LI Lin, SHENGYehong, et al. Day-ahead optimized economic dispatch of active distribution power system with combined cooling, heating and power-based microgrids [J]. Power System Techno-

logy, 2018, 42(6): 1726-1735 (in Chinese).

[10] 李杨,刘伟佳,赵俊华,等.含电转气的电-气-热系统 协同调度与消纳风电效益分析 [J].电网技术, 2016,40(12):67-76.

LI Yang, LIU Weijia, ZHAO Junhua, et al. Optimal dispatch of combined electricity-gas-heat energy systems with power-to-gas devices and benefit analysis of wind power accommodation [J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 67 – 76 (in Chinese).

[11] 吕泉, 王海霞, 陈天佑, 等. 考虑风电不确定性的热电
 厂蓄热罐运行策略 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 23-29.

Lyu Quan, Wang Haixia, Chen Tianyou, et al. Operation Strategies of Heat Accumulator in Combined Heat and Power Plant with Uncertain Wind Power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 23 – 29 (in Chinese).

- [12] ZUGNO M, MORALES J M, MADSEN H. Commitment and dispatch of heat and power units via affinely adjustable robust optimization [J]. Computers & Operation Research, 2016, 75(8): 191 – 201.
- [13] 吴巍, 汪可友, 李国杰. 考虑风电时空相关性的仿射可 调鲁棒机组组合 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4089-4097.

WU Wei, WANG Keyou, LI Guojie. Affinely adjustable robust unit commitment considering the spatiotemporal correlation of wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4089 – 4097 ( in Chinese).

- [14] 栗子豪, 吴文传, 朱洁, 等. 基于机会约束的主动配电网热泵日前调度模型及可解性转换[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 24-31.
  LI Zihao, WU Wenchuan, ZHU Jie, et al. Chance-constrained model for day-ahead heat pump scheduling in active distribution network and its tractability transformation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 24-31 (in Chinese).
- [15] 税月,刘俊勇,高红均,等.考虑风电不确定性的电热综合系统分布鲁棒协调优化调度模型[J].中国电机工程学报,2018,38(24):125-137,340.
   SHUI Yue, LIU Junyong, GAO Hongjun, et al. A distri-

butionally robust coordinated dispatch model for integrated electricity and heating systems considering uncertainty of wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 125 - 137, 340 (in Chinese).

- [16] 董帅, 王成福, 徐士杰, 等. 计及网络动态特性的电-气-热综合能源系统日前优化调度 [J]. 电力系统自 动化, 2018, 42(13): 12-19.
  DONG Shuai, WANG Chengfu, XU Shijie, et al. Dayahead optimal scheduling of electricity-gas-heat integrated energy system considering dynamic characteristic of networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 12-19 (in Chinese).
- [17] YAO Z, YUAN H, JIN M, et al. A mixed-integer linear programming approach to security-constrained co-optimization expansion planning of natural gas and electricity transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6368 – 6378.
- [18] Nemirovski A. On safe tractable approximations of chance constraints [J]. European Journal of Operational Research, 2012, 219(3): 707-718.
- [19] 吴素农,于金镒,杨为群,等. 配电网分布式电源最大 并网容量的机会约束评估模型及其转化方法 [J]. 电 网技术, 2018, 42(11): 3691 - 3697.
  WU Sunong, YU Jinyi, YANG Weiqun. Chance constrained DG capacity assessment model and transforming method for distribution networks [J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3691 - 3697 (in Chinese).

#### 收稿日期:

#### 作者简介:

周晟锐 (1995),男,硕士研究生,研究方向为综合能源优 化调度与电力市场,E-mail: 452030553@qq.com; 刘继春 (1975),男,教授,硕士生导师,通信作者, IEEE 高级会员,研究方向为电力系统经济分析、电力市场 等,Email: jichunliu@scu.edu.cn;

张浩禹 (1995),男,硕士研究生,研究方向为综合能源优 化调度与概率潮流;

文杰 (1993), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场等; 张林 (1995), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源预测; 冯麒铭 (1993), 男, 硕士, 研究方向为综合能源经济调度 与电力市场。

### 附录 A

分段线性化处理过程:

为方便描述, 令 $f(\bar{\varphi}_{ij,t}) = \bar{\varphi}_{ij,t} |\bar{\varphi}_{ij,t}|$ ,  $g(\pi_{i,t}) = \pi_{i,t}^2$ 。 则这两个非线性函数可以等效成为

$$f(\bar{\varphi}_{ij,t}) = \sum_{k \in \zeta} (x_{ij,k,t}\bar{\varphi}_{ij,k,t} + y_{ij,k,t}\tau_{ij,k,t})$$
(A-1)

$$g(\pi_{i,t}) = \sum_{k \in \zeta} \left( m_{i,k,t} \pi_{i,k,t} + n_{i,k,t} \theta_{i,k,t} \right)$$
(A-2)

式中:  $x_{ij,k,t}$ 和 $y_{ij,k,t}$ 分别为管道 ij的天然气流量函数被分段线性化在第k段对应的斜率和截距;  $m_{i,k,t}$ 和 $n_{i,k,t}$ 分别为气网节点i的气压函数被分段 线性化在第k段对应的斜率和截距; $\zeta$ 为分段总 数,为协调线性化精度和计算速度,本文均取 4段; $\tau_{ij,k,t}$ 和 $\theta_{i,k,t}$ 为辅助布尔变量。具体线性化图 例如附录图 A1 所示。



附图 A1 线性化图例 Fig. A1 Figure of linearization

因此,线性化气网潮流的数学表达形式如下:

$$f(\bar{\varphi}_{ij,t}) = K_{ij}[g(\pi_{i,t}) - g(\pi_{j,t})]$$
(A-3)

$$\tau_{ij,k,t}\varphi_{ij,k,\min} \leqslant \bar{\varphi}_{ij,k,t} \leqslant \tau_{ij,k,t}\varphi_{ij,k,\max}$$
(A-4)

$$\theta_{i,k,t}\pi_{i,k,\min} \leq \pi_{i,k,t} \leq \theta_{i,k,t}\pi_{i,k,\max}$$
(A-5)

$$\sum_{k\in\zeta}\bar{\varphi}_{ij,k,t}=\bar{\varphi}_{ij,t},\sum_{k\in\zeta}\pi_{i,k,t}=\pi_{i,t}$$
(A-6)

$$\sum_{k\in\zeta}\tau_{ij,k,t} = 1, \sum_{k\in\zeta}\theta_{i,k,t} = 1$$
(A-7)

式中: *φ<sub>ij,k,max</sub>*和*φ<sub>ij,k,min</sub>*分别为管道 *ij* 在第 *k* 段对 应的天然气流量上、下限; *π<sub>i,k,max</sub>*和*π<sub>i,k,min</sub>*分别为 气网节点 *i* 在第 *k* 段对应的气压上、下限。式 (A-4)、(A-5) 限定了管道流量和节点气压在每一分段 的上下限;式 (A-6)、(A-7) 表明在同一时段只能 选择唯一的分段区间。

受不确定性变量影响的不等式约束条件可以 概括为如下的一般向量表达形式:性变量影响的 不等式约束条件可以概括为如下的一般向量表达 形式:性变量影响的不等式约束条件可以概括为 如下的一般向量表达形式:

$$\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{b} \leqslant \boldsymbol{0} \tag{A-8}$$

式中:  $\varepsilon$ 为随机变量误差标幺值系数的向量表达 形式;  $a^{T} = [a_{1}, a_{2}, \dots, a_{L}]$ 和 b的值具体与随机变量 有关。将其改写为机会约束:

$$B_{\varepsilon \sim Q}\{\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{b} > \boldsymbol{0}\} \leqslant \boldsymbol{\xi} \tag{A-9}$$

式中:随机变量误差 ε满足均值为零、范围在 [-1,1]的正太分布; ξ表示该不等式约束被破坏的 概率,调度决策者可以通过调节此系数均衡综合 能源系统的经济性和鲁棒性。接下来采用 Bernstein 近似处理此机会约束,首先可以将其改写为

$$B_{\varepsilon \sim Q}\{\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{b} > \boldsymbol{0}\} = \int \chi(\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{b})\mathrm{d}\boldsymbol{P} \leqslant \boldsymbol{\xi} \qquad (A-10)$$

其中:

$$\chi(s) = \begin{cases} 0 & s \le 0\\ 1 & s > 0 \end{cases}$$
(A-11)

有连续可微函数 $\gamma(s) = e^s > \chi(s)$ ,则式(41)可以被松弛为

$$\int \chi(\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varepsilon} + b)\mathrm{d}\boldsymbol{P} \leq \int \gamma(\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varepsilon} + b)\mathrm{d}\boldsymbol{P} = \mathrm{e}^{b}E_{\varepsilon\sim Q}(\mathrm{e}^{\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varepsilon}}) \quad (A-12)$$

又根据变量误差 $\varepsilon$ 满足的分布特性,有

$$e^{b}E_{\varepsilon\sim Q}(e^{a^{T}\varepsilon}) \leq e^{b}\prod_{l=1}^{L}\cosh(a_{l}) \leq e^{b+\sum_{l\in L}\frac{a_{l}^{2}}{2}} \qquad (A-13)$$

至此,原机会约束被近似松弛为一不含随机 变量误差的确定性不等式约束 $e^{b+\sum_{\ell=1}^{\frac{n}{2}}} \leqslant \xi$ ,由文 献 [18-19]可以将其近似为

$$b + \sqrt{2\ln(\frac{1}{\xi})} \cdot \sqrt{\sum_{l \in L} a_l^2} \le 0$$
 (A-14)

调度决策者在考虑合理的约束越限概率时, 要注意 Bernstein 近似得到的确定性约束会比原机 会约束更保守,进一步增强了系统鲁棒性,调度 决策者可以通过经验适当减小*a*<sub>l</sub>或提高ξ来达到理 想的调度结果。

#### 现代电力

2020年4月

Table A1     Parameters of thermal units								
机组节点位置	最大功率/MW	最小功率/MW	$a_i$	$b_i$	$c_i$	爬坡率/(MW/h)	启动成本/元	关机成本/元
1	800	300	0.00173	23.26	244.2	200	100	40
7	800	300	0.00168	26.41	166.4	200	90	40
13	600	200	0.00221	27.68	176.8	150	90	30
15	600	200	0.00245	27.79	169.3	150	90	30
16	400	100	0.00338	28.88	144.5	100	60	30
18	400	100	0.00429	28.78	134.7	100	60	30
22	200	50	0.00739	30.74	154	50	50	20
23	200	50	0.00712	30.27	261.1	50	50	20

附表 A1 机组参数

#### 附表 A2 气管道参数 Table A2Parameters of pipelines

管道	流量上限/Mm <sup>3</sup>	Weymouth常数	初始管存/Mm <sup>3</sup>
1-2	3	0.1116889	0
2-3	3	0.24590344	0.2
3-4	3	0.1812832	0.1
4-7	3	0.176335	1.2
5-6	3	0.25166323	0
6-7	3	0.185558	0.55
8-9	3	0.2116889	0
9-10	3	0.33468667	0.1
10-11	3	0.05046742	0.1
11-12	3	0.08294278	0.31
11-17	3	0.1268138	0.25
12-13	3	0.1523797	0.1
13-14	3	0.26937372	0.1
14-15	3	0.39047598	0.1
15-16	3	0.12046742	0.16
14-4	3	0.2121921	0.1
17-18	3	0.1590344	0.1
18-19	3	0.212698	0.13
19-20	3	0.167903	0.12

## 附表 A4 能源枢纽设备参数

 Table A4
 Device parameters s of energy hubs

能源枢纽编号	参数	1	2	3
<b>おれ 左日 かう</b>	最大出力/MW	80	150	200
XX IN X	热效率	0.8	0.8	0.8
	最大电功率/MW	500	600	700
热电联产机组	电效率	0.5	0.5	0.5
	热效率	0.35	0.35	0.35
Dac	最大输入电功率/MW	350	270	350
P2G	转换效率	0.8	0.8	0.8
	最大放电功率MW	40	50	50
	最大充电功率/MW	20	30	40
由体准平	最大容量/MW	60	110	150
电阻衣且	充电系数	0.9	0.9	0.9
	放电系数	1	1	1
	初始容量值/MW	0	30	60

#### 附表 A5 能源枢纽与外网交互参数

 
 Table A5
 Interaction parameters of energy hubs with
 networks

能源枢	交互功率上	交互功率下	交互天然气流量	交互天然气流量
纽编号	限/MW	限/MW	上限/Mm <sup>3</sup>	下限/Mm <sup>3</sup>
1	300	-445	0.191	-0.21
2	300	-335	0.231	-0.31
3	300	-440	0.32	-0.3

#### 附表 A3 气源参数 Table A3Parameters of gas source

气源节点位置	流量上限/Mm <sup>3</sup>	流量下限/M <sup>3</sup>	气价/万元
1	4.76	0.75	8.7
5	5	0	8
8	10.12	1.25	7.3
13	5	0	8.6

第37卷第2期 周晟锐等:基于机会约束的多能源枢纽电气互联综合能源系统日前经济调度 207



Fig. A2 Flowchart of solving