

考虑条件风险价值的电-气综合能源系统 风险厌恶机组组合研究

王春晓^{1,2,3}, 严超^{1,2,3}, 张耀^{1,2,3}, 别朝红^{1,2,3}, 谢海鹏^{1,2,3}

(1. 西安交通大学电气设备电力绝缘国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学陕西省
智能电网重点实验室, 710049, 西安; 3. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为应对新能源不确定性带来的综合能源系统运行风险, 选择合理的机组组合策略平衡综合能源系统的运行风险与运行费用, 建立风险厌恶电-气综合能源系统机组组合模型。在电-气综合能源系统的机组组合中引入条件风险价值, 分别描述电力系统和天然气系统的负荷损失风险, 分析电力系统与天然气系统的运行风险和两系统间的相互影响。利用分段线性化技术对天然气流量方程进行线性化, 通过 Benders 分解算法将模型分解为机组组合主问题、分场景子问题和天然气负荷损失风险校验问题, 对所提模型进行高效求解。算例仿真结果表明, 所提模型与传统模型相比可以有效减少小概率极端场景的电力负荷损失, 算例中最严重场景负荷损失从 34.62 MW 减少到 9.59 MW。所提模型可以协调电力负荷损失风险和天然气负荷损失风险, 为电-气综合能源系统的协调调度提供参考。

关键词: 风险厌恶; 电-气综合能源系统; 随机机组组合; 条件风险价值; Benders 分解

中图分类号: TM76 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202006003 **文章编号:** 0253-987X(2020)06-0017-11



OSID 码

CVaR Based Risk-Averse Unit Commitment of Integrated Electricity and Natural Gas System

WANG Chunxiao^{1,2,3}, YAN Chao^{1,2,3}, ZHANG Yao^{1,2,3}, BIE Zhaohong^{1,2,3}, XIE Haipeng^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To deal with the operational risks of integrated electricity and natural gas system brought about by uncertainty of new energy sources, this approach selects a reasonable unit commitment strategy to balance the operational risks and operating costs of the integrated energy system, and constructs a risk-averse integrated energy system unit commitment model. Conditional value-at-risk (CVaR) is introduced into the unit commitment of the integrated energy system to describe the load loss risk of the power system and the natural gas system. The operational risk of the power system and the natural gas system, and mutual influence between them are analyzed. The piecewise linearization technique is used to linearize the natural gas flow equation, and the model is decomposed into the main unit commitment problem, sub-problems for sub-scenario and natural gas load loss risk verification problems by the Benders decomposition algorithm. Compared with the traditional model, the proposed one can effectively reduce the

power load loss in extreme scenarios with small probability and the load loss in the most severe scenario is lowered from 34.62 MW to 9.59 MW. The proposed model enables to coordinate the risk of power load loss and the risk of natural gas load loss, especially for the coordinated dispatch of the integrated systems.

Keywords: risk-averse; integrated electricity and natural gas system; stochastic unit commitment; conditional value-at-risk (CVaR); Benders decomposition

符号表

集合	Y_{gt}	机组 g 在 t 时刻的启动标志
$b \in B$	Z_{gt}	机组 g 在 t 时刻的关停标志
$c \in C$	$\phi_{v,t}$	分段线性化辅助变量
$g \in U$		
$w \in W$	参数/系数	
$l \in L$	a_g, b_g, c_g	机组 g 的费用系数
$n \in N$	a_g^G, b_g^G, c_g^G	燃气机组 g 的天然气的耗量系数
$s \in S$	A_{bg}^G	节点-机组关联矩阵的系数
$t \in T$	A_{nw}^W	节点-风电关联矩阵的系数
U^G	C_g^{SU}	机组 g 的启动费用
$\xi \in \Omega$	C_g^{SD}	机组 g 的关停费用
	d_{gr}, e_{gr}	机组 g 费用函数线性化斜率和截距
连续型决策变量	d_{gr}^G, e_{gr}^G	燃气机组 g 的天然气的耗量函数线性化斜率和截距
$f_{c\xi}^C$	f_{nt}^L	节点 n 的其他用户在 t 时刻天然气负荷
$f_{c\xi}^{LC}$	f_s^{Smax}	气源 s 的最大产气量
$f_{nt\xi}^{LS}$	H_{bb}	电力功率传输分布系数
$f_{gt\xi}^G$	K_l^C	天然气管道 l 的常数
$f_{lt\xi}^{GL}$	L_{bt}	电力系统节点 b 处 t 时刻的负荷
$f_{gt\xi}^{GLS}$	$M_{n,x}$	天然气设备-节点关联矩阵的系数
$f_{st\xi}^S$	M^{L1}	电负荷损失风险费用系数
$F_{gt\xi}$	M^{L2}	电负荷损失期望费用系数
$I_{bt\xi}^{shed}$	P_ξ	场景 ξ 的概率
$P_{gt\xi}$	P_k^{Lmax}	电力传输线 k 的最大允许功率
$P_{wt\xi}^{WC}$	P_g^{max}, P_g^{min}	机组 g 的最大、最小出力
$P_{kt\xi}^L$	$P_{wt\xi}^W$	风电 w 在场景 ξ 下 t 时刻的出力
$r_{gt\xi}$	R_t	电力系统在 t 时刻所需的旋转备用
S_{kt}^L	R_c^{max}, R_c^{min}	加压站 c 的加压比上下限
S_t^R	S_g^U, S_g^D	机组 g 开启、关停时的最大可用功率
δ_v	T_g^U, T_g^D	机组 g 的最小开启、关停时间
$\pi_{nt\xi}$	U_g^R, D_g^R	机组 g 的向上、向下爬坡能力
0-1 决策变量	σ_c	加压站 c 的能耗系数
I_{gt}	β	CVaR 风险系数
	π_n^{max}, π_n^{min}	天然气节点 n 的压力上、下限

相比于燃煤机组,燃气机组启停迅速,发电厂的厂址设置灵活,环境效益好,节能减碳,在电力系统中的应用越来越广泛^[1]。2017 年全国天然气发电装机容量为 7 446 万 kW,2018 年增长至 8 330 万 kW,同比增长 11.87%。根据国家发改委《电力发

展“十三五”规划》^[2],2020 年全国天然气发电装机容量预计将达到 1.1 亿 kW。天然气发电将电力系统和天然气系统耦合起来,电-气综合能源系统将成为我国未来能源市场的重要形态^[3]。

电力系统的风险源于其概率特征。发电机和线

路等设备故障、新能源出力的不确定性和负荷的不确定性等一系列因素,都会给电力系统带来风险,可能造成机组停运,系统失稳,导致负荷的损失^[4]。同时,风电不确定性同样会影响到燃气发电机组出力^[5],燃气发电机组作为天然气系统的负荷,其不确定性势必影响天然气系统的运行。因此,需要对电-气综合能源系统的风险进行评估,联合考虑电力系统和天然气系统的运行,综合考虑两系统运行的经济性与安全性,平衡运行费用与运行风险。

条件风险价值(CVaR)理论描述了一种条件期望,表示的是超过设定风险值(VaR)的风险期望值^[6],常被用于金融和市场方面的风险分析。CVaR理论同样可以推广到电力系统的风险分析中,用来描述负荷损失风险。文献[7]将 CVaR 加入到模型约束中,建立了两阶段机组组合模型,并在模型中考虑了储能和需求侧响应。文献[8]将 CVaR 考虑在目标函数中,对电力系统的机组组合进行了基于 CVaR 理论的风险建模,在模型中考虑了风电的不确定性。文献[9]在配网层面基于 CVaR 理论对含电-气-热多能源的综合能源系统的经济优化调度进行了分析,侧重于考虑新能源不确定性产生的再调度风险费用。文献[10]将 CVaR 应用于高载能负荷-风电协调调度方法中,研究了风电的消纳。上述电力系统的风险研究基于 CVaR 从负荷损失风险、再调度风险、弃风风险等方面建立了模型,体现了 CVaR 描述电力系统风险的有效性。

电-气综合能源系统一方面促进了能源效率的提高,给新能源的消纳带来了机遇,但另一方面也带来了挑战。电力系统与天然气系统耦合,给系统建模、协调优化运行、风险分析等增加了难度。已有很多文献对综合能源系统的运行进行了研究,文献[11]提出了电力系统与天然气系统的联合考虑,建立了初步的电-气综合能源系统模型,并在模型基础上研究了天然气系统对电力系统机组组合的影响,结果表明了电力系统与天然气系统联合考虑的必要性。在此基础上,文献[12]建立了考虑天然气传输约束的电力系统安全约束机组组合模型,并采用 Benders 分解与牛顿法结合对天然气约束进行迭代求解。文献[13]对综合能源系统进行建模,通过分段线性化的方式处理了非线性的天然气管道传输方程,分析了系统的短期能源充裕度。文献[14]研究了综合能源系统的随机调度,并在模型中考虑了系统中的风电变化和 demand 侧响应。文献[15]研究了电力系统和天然气系统的协同规划,考虑了电网运营

商、天然气运营商等不同运营主体的利益。文献[16]建立了含电转气的电-气综合能源系统状态分析模型,提出了可靠性评估指标,进行了综合能源系统的可靠性分析。文献[17]对综合能源系统的随机机组组合问题进行建模,研究了电-气综合能源系统的协同运行和机组的灵活爬坡。文献[18]在燃气机组耦合的基础上研究电转气技术,分析了电转气技术在综合能源系统削峰填谷中的应用前景。文献[19]建立了基于机会约束规划的综合能源系统随机最优潮流,分析比较了不同置信度水平和不同波动性情形下系统运行状态以及运行成本的变化。文献[20]针对风电不确定性,研究了考虑天然气管道和电力传输线 $N-1$ 的综合能源系统鲁棒优化调度。

上述综合能源系统的已有研究主要侧重于考虑电-气耦合给电力系统运行带来的影响,尚无对新能源不确定性引起的综合能源系统的运行风险进行数学建模和定量分析。综合能源系统中电力系统和天然气系统耦合运行,如何协调电力系统与天然气系统的运行风险,同时提高可再生能源消纳比例及能源效率,成为一个亟待解决的问题^[21]。

为控制风电不确定性引起的综合能源系统负荷损失风险,平衡系统的运行费用和运行风险,本文基于 CVaR 理论,提出了电-气综合能源系统风险厌恶机组组合模型,在电力系统负荷损失风险的基础上,考虑了天然气负荷损失风险和天然气系统运行对电力系统的影响。采用 Benders 分解,将模型分解为机组组合主问题、分场景子问题和天然气系统风险校验问题,实现模型的高效求解。相比传统的随机机组组合模型,本文的电-气综合能源系统风险厌恶机组组合模型可以有效减少小概率极端场景下的负荷损失,协调电力系统和天然气系统的运行风险。算例分析表明了模型和算法的有效性。

1 负荷损失风险建模

传统的电-气综合能源系统随机机组组合模型中,机组组合的目标函数通常设为最小化系统运行费用与负荷损失费用的期望值^[22]。负荷损失期望值即(EENS)是可靠性评估中的指标,用来描述负荷损失的量。但是,实际计算中,一些极端场景会出现大量的电负荷损失或气负荷损失,由于这些极端场景发生的概率很小,所以对 EENS 的影响有限。因此,仅使用 EENS 可能会掩盖非常不利场景的信息,不能有效反映小概率场景的负荷损失情况,然而,这些非常不利的极端场景往往会造成很高的运

行风险。要提高计算的鲁棒性,就需要在运行中考虑小概率极端场景带来的风险。鲁棒优化得到的结果过于保守,忽略了运行的经济性。要平衡运行风险与经济性,就有必要在模型中对运行风险进行描述,控制在小概率场景下的运行风险。

本文在传统随机机组组合模型基础上引入条件风险价值,对电力系统和天然气系统的负荷损失风险进行描述。条件风险价值是一种在金融风险管理等领域广泛应用的风险度量指标,是一种条件期望,表示的是超过设定风险值的风险期望值^[6]。本文中,对于一个给定的 α , V_a^{VaR} 表示电负荷损失或气负荷损失分布的 α 分位数, C_a^{VaR} 表示负荷损失大于 V_a^{VaR} 部分的期望值,即 $C_a^{\text{VaR}} = E[L^{\text{shed}} | L^{\text{shed}} > V_a^{\text{VaR}}]$,实际利用场景进行计算

$$C_a^{\text{VaR}} = V_a^{\text{VaR}} + \frac{1}{1-\alpha} \sum_{\xi} P_{\xi} [L_{\xi}^{\text{shed}} - V_a^{\text{VaR}}]^+ \quad (1)$$

式中: P_{ξ} 为场景 ξ 的概率;符号 $[L_{\xi}^{\text{shed}} - V_a^{\text{VaR}}]^+$ 为 $\max\{L_{\xi}^{\text{shed}} - V_a^{\text{VaR}}, 0\}$; L_{ξ}^{shed} 为该场景的负荷损失。

相比于EENS,条件风险价值可以从风险角度描述电-气综合能源系统的负荷损失,反映潜在的小概率高风险极端场景,同时又可以避免鲁棒优化过于保守的问题。相比于单一电力系统,通过条件风险价值分别描述电力负荷损失和天然气负荷损失,可以考虑电力系统与天然气系统的相互影响,研究分析两个系统之间的风险关系。另外,条件风险价值可以表示为负荷损失的线性方程,方便地应用于电-气综合能源系统的建模和求解。

2 风险厌恶机组组合模型

本文建立的电-气综合能源系统风险厌恶机组组合模型以最小化系统运行费用为目标,综合考虑了风电不确定性、电力系统约束、天然气系统约束、电力系统与天然气系统的风险约束。电力系统负荷损失风险考虑在目标函数中,天然气系统负荷损失风险考虑在约束条件中。

2.1 目标函数

目标函数为调度周期内电力系统运行费用的最小化。电力系统运行费用包括机组的启停费用、机组的运行费用期望、电负荷损失风险费用和负荷损失费用期望

$$\min \sum_t \sum_g (C_g^{\text{SU}} Y_{gt} + C_g^{\text{SD}} Z_{gt} + \sum_{\xi} P_{\xi} F_{g\xi}) + \beta M^{\text{L1}} C_a^{\text{VaR}} + M^{\text{L2}} \sum_{\xi} P_{\xi} \sum_t \sum_b L_{bt\xi}^{\text{shed}} \quad (2)$$

2.2 电力系统模型

2.2.1 发电机组约束和风电约束 电力系统模型包括发电机组约束、风电约束、功率平衡、网络约束和备用约束,表示如下

$$I_{gt} - I_{g,t-1} = Y_{gt} - Z_{gt}, \quad \forall g, t \quad (3)$$

$$\sum_{\tau=t-T_g^{\text{U}}+1}^t Y_{g\tau} \leq I_{gt}, \quad \forall g, t \in [T_g^{\text{U}}, T] \quad (4)$$

$$\sum_{\tau=t-T_g^{\text{D}}+1}^t Z_{g\tau} \leq 1 - I_{gt}, \quad \forall g, t \in [T_g^{\text{D}}, T] \quad (5)$$

$$P_{gt\xi} + r_{gt\xi} \leq P_g^{\text{max}} I_{gt} - (P_g^{\text{max}} - S_g^{\text{U}}) Y_{gt} - (P_g^{\text{max}} - S_g^{\text{D}}) Z_{gt}, \quad \forall g, t, \xi \quad (6)$$

$$P_{gt\xi} - r_{gt\xi} \geq P_g^{\text{min}} I_{gt}, \quad \forall g, t, \xi \quad (7)$$

$$P_{gt\xi} + r_{gt\xi} - P_{g,t-1,\xi} \leq U_g^{\text{R}}, \quad \forall g, t, \xi \quad (8)$$

$$P_{g,t-1,\xi} - P_{gt\xi} + r_{gt\xi} \leq D_g^{\text{R}}, \quad \forall g, t, \xi \quad (9)$$

$$F_{g\xi} = a_g (P_{gt\xi})^2 + b_g P_{gt\xi} + c_g, \quad \forall g, t, \xi \quad (10)$$

$$f_{g\xi}^{\text{G}} = a_g^{\text{G}} (P_{gt\xi}^{\text{G}})^2 + b_g^{\text{G}} P_{gt\xi}^{\text{G}} + c_g^{\text{G}}, \quad \forall g \in U^{\text{G}}, t, \xi \quad (11)$$

$$0 \leq P_{wt\xi}^{\text{WC}} \leq P_{wt\xi}^{\text{W}}, \quad \forall w, t, \xi \quad (12)$$

式(3)表示机组的启停状态转换约束,机组的最小开启和最小关停时间约束分别如式(4)(5)所示。机组的出力 and 备用约束如式(6)(7)所示。机组的向上爬坡约束和向下爬坡约束如式(8)(9)所示。式(10)表示机组的运行费用,式(11)为燃气机组的天然气耗量,式(12)表示风电的弃用约束。

由于成本函数式(10)和天然气耗量函数式(11)都是凸二次函数,为方便求解,本文采用线性化的方法分别将式(10)(11)分为 R 段,得到

$$F_{gt\xi} \geq d_{gr} P_{gt\xi} + e_{gr} I_{gt}, \quad \forall g, t, \xi, r \quad (13)$$

$$f_{gt\xi}^{\text{G}} \geq d_{gr}^{\text{G}} P_{gt\xi}^{\text{G}} + e_{gr}^{\text{G}} I_{gt}, \quad \forall g \in U^{\text{G}}, t, \xi, r \quad (14)$$

2.2.2 功率平衡、网络约束和备用约束 功率平衡、网络约束和备用约束公式如下

$$\sum_g P_{gt\xi} + \sum_w P_{wt\xi}^{\text{W}} - \sum_w P_{wt\xi}^{\text{WC}} = \sum_b L_{bt} - \sum_b L_{bt\xi}^{\text{shed}}, \quad \forall t, \xi \quad (15)$$

$$0 \leq L_{bt\xi}^{\text{shed}} \leq L_{bt}, \quad \forall b, t, \xi \quad (16)$$

$$P_{kt\xi}^{\text{L}} = \sum_b H_{kb} \left(\sum_g A_{bg}^{\text{G}} P_{gt\xi}^{\text{G}} + \sum_w A_{bw}^{\text{W}} (P_{wt\xi}^{\text{W}} - P_{wt\xi}^{\text{WC}}) - (L_{bt} - L_{bt\xi}^{\text{shed}}) \right), \quad \forall k, t, \xi \quad (17)$$

$$-P_{kt}^{\text{Lmax}} \leq P_{kt\xi}^{\text{L}} \leq P_{kt}^{\text{Lmax}}, \quad \forall k, t, \xi \quad (18)$$

$$\sum_g r_{gt\xi} \geq R_t, \quad \forall t \quad (19)$$

式(15)为功率平衡约束,式(16)为切负荷约束,式(17)为线路的功率传输计算公式,线路传输的功率不能超过线路的额定容量如式(18)所示。另外,

所有机组在各场景下提供的旋转备用的和要大于系统所需的旋转备用值,如式(19)所示。

2.3 天然气系统模型

电-气综合能源系统中,新能源的接入给电力系统带来不确定性,会影响到燃气机组的启停和出力。燃气机组作为天然气系统的负荷,其不确定性会影响天然气系统的运行,给天然气系统运行带来风险。因此,有必要对天然气系统进行建模,对天然气系统的运行风险加以控制。

天然气系统主要由传输管道、加压站、气源和负荷等部分组成。在气体输送过程中会产生压降,因此需要加压站为天然气加压以保证天然气的长距离传输。描述公式如下

$$f_{li\xi}^{\text{GL}} | f_{li\xi}^{\text{GL}} = K_l^{\text{C}} (\pi_{n_{l1},i\xi}^2 - \pi_{n_{l2},i\xi}^2), \forall l, t, \xi \quad (20)$$

$$R_c^{\min} \leq \frac{\pi_{n_{c2},i\xi}}{\pi_{n_{c1},i\xi}} \leq R_c^{\max}, \forall c, t, \xi \quad (21)$$

$$f_{ci\xi}^{\text{LC}} = \sigma_c f_{ci\xi}^{\text{C}}, \forall c, t, \xi \quad (22)$$

$$f_{si\xi}^{\text{S}} \leq f_{si\xi}^{\text{Smax}}, \forall s, t, \xi \quad (23)$$

$$\pi_n^{\min} \leq \pi_{ni\xi} \leq \pi_n^{\max}, \forall n, t, \xi \quad (24)$$

$$\sum_l M_{nl}^{\text{L}} f_{li\xi}^{\text{GL}} + \sum_s M_{ms}^{\text{S}} f_{si\xi}^{\text{S}} + \sum_c M_{nc}^{\text{C}} f_{ci\xi}^{\text{LC}} - \sum_c M_{nc}^{\text{CS}} f_{ci\xi}^{\text{LC}} = (f_{ni}^{\text{L}} - f_{ni\xi}^{\text{LS}}) + \sum_{g \in U^{\text{G}}} M_{ng}^{\text{G}} (f_{gi\xi}^{\text{G}} - f_{gi\xi}^{\text{GLS}}), \forall n, t, \xi \quad (25)$$

$$0 \leq f_{gi\xi}^{\text{GLS}} \leq f_{gi\xi}^{\text{G}}, \forall g \in U^{\text{G}}, t, \xi \quad (26)$$

$$0 \leq f_{mi\xi}^{\text{LS}} \leq f_{mi}^{\text{L}}, \forall n, t, \xi \quad (27)$$

天然气管道传输方程(20)描述了管道两端节点压力与管道流量之间的关系,式(21)表示加压站的加压比约束,式(22)为加压站的能耗,式(23)为气源的最大产气量约束,式(24)为节点气压约束,式(25)为节点流量平衡方程,式(26)和式(27)分别为燃气发电机组供气削减约束和其他天然气负荷的负荷损失约束。要说明的是,考虑到经济效益,燃气发电机组签订的供气合同多为可中断供气合同^[23],优先级较低。在用气高峰期或天然气系统发生故障出现供气不足时,天然气供应商会首先限制燃气机组的供气。因此,本文将天然气系统的负荷分为两部分,一部分是燃气机组供气负荷,另一部分其他用户的天然气负荷。

式(20)是非凸非线性方程,难以直接求解,本文采用分段线性化技术^[13]进行处理。对于气压,将方程中的 π^2 看作变量,式(21)和式(24)可作平方处理,则模型中仅含压力的平方项;对于流量,引入辅助变量 δ_v 和 0-1 变量,将 $f_{li\xi}^{\text{GL}}$ 按以下方式进行分作

N_{PL} 段。

$$(f_{li\xi}^{\text{GL}})^2 \approx (f_{0,i}^{\text{GL}})^2 + \sum_v ((f_{v+1,i}^{\text{GL}})^2 - (f_{v,i}^{\text{GL}})^2) \delta_{v,t} \quad (28)$$

$$f_{li\xi}^{\text{GL}} = f_{0,i}^{\text{GL}} + \sum_v (f_{v+1,i}^{\text{GL}} - f_{v,i}^{\text{GL}}) \delta_{v,t} \quad (29)$$

$$\delta_{v+1,t} \leq \psi_{v,t} \leq \delta_{v,t}, 0 \leq \delta_{v,t} \leq 1, \psi_{v,t} \in \{0,1\} \quad (30)$$

式中: $y=0,1,2,\dots,N_{\text{PL}}-1$ 。

分段线性化处理后,式(20)中的 $f_{li\xi}^{\text{GL}} | f_{li\xi}^{\text{GL}}$ 用式(28)表示,节点流量平衡方程(25)中的 $f_{li\xi}^{\text{GL}}$ 用式(29)表示。

2.4 电力和天然气负荷损失风险建模和约束

为了方便说明和计算风险指标,令 ϕ_ξ 表示各场景中电力负荷损失大于 V_a^{aR} 的部分,则电力系统的运行负荷损失风险 C_a^{VaR} 可以表示为

$$\phi_\xi \geq \sum_t \sum_b L_{bt\xi}^{\text{shed}} - V_a^{\text{aR}}, \forall \xi \quad (31)$$

$$\phi_\xi \geq 0, \forall \xi \quad (32)$$

$$C_a^{\text{VaR}} = V_a^{\text{aR}} + \frac{1}{1-\alpha} \sum_\xi P_\xi \phi_\xi \quad (33)$$

同理,在天然气系统中,引入 C_a^{VaRG} 描述天然气系统的运行负荷损失风险

$$\phi_\xi^{\text{G}} \geq \sum_t \sum_n f_{ni\xi}^{\text{LS}} - V_a^{\text{aRG}}, \forall \xi \quad (34)$$

$$\phi_\xi^{\text{G}} \geq 0, \forall \xi \quad (35)$$

$$C_a^{\text{VaRG}} = V_a^{\text{aRG}} + \frac{1}{1-\alpha} \sum_\xi P_\xi \phi_\xi^{\text{G}} \quad (36)$$

$$C_a^{\text{VaRG}} \leq C_a^{\text{VaRGmax}} \quad (37)$$

由于燃气机组的供气风险已经体现在了电力负荷损失风险中,此处的天然气负荷损失风险考虑的是除燃气机组负荷外的其他天然气负荷。

本文建立的电-气综合能源系统风险厌恶机组组合模型,综合考虑了电力负荷损失风险和天然气负荷损失风险。电力负荷损失风险考虑在目标函数式(2)中,平衡电力系统的运行费用与运行风险。天然气负荷损失风险考虑在约束条件式(37)中,确保天然气系统运行在允许风险水平以下。至此,本文建立起了电-气综合能源系统的风险厌恶机组组合模型:目标函数为式(2),约束条件为式(3)~(9)和式(12)~(37)。

3 模型的求解

本文提出的风险厌恶电-气综合能源系统机组组合模型随着场景数目的增加,规模不断增加,给求解带来困难。Benders 分解是求解大规模混合整数

规划的有效方法,可以将问题分解成主问题和子问题,分别求解以提高计算效率。本文采用 Benders 分解的方法,将模型分解为主问题和分场景子问题,进行分解迭代求解。同时,对于天然气系统的负荷损失风险进行校验,保证天然气系统运行在要求的风险水平以下。

3.1 机组组合主问题

主问题包含表示机组状态和启停的 0-1 整数变量以及 V_a^{aR} 。机组组合主问题以运行费用最少为目标,考虑机组的启停状态变化约束

$$\min \sum_{\xi} P_{\xi} \varphi_{\xi} + \sum_t \sum_g (C_g^{\text{SU}} Y_{gt} + C_g^{\text{SD}} Z_{gt}) + \beta M^{\text{L1}} V_a^{\text{aR}} \quad (38)$$

$$\text{s. t.} \quad \text{式(3)} \sim \text{式(5)}$$

$$V_a^{\text{aR}} \geq 0 \quad (39)$$

$$\varphi_{\xi} \geq \omega_{\xi}^k + \sum_t \sum_g \hat{\lambda}_{gt\xi}^k (I_{gt} - \hat{I}_{gt}^k) + \sum_t \sum_g \hat{\mu}_{gt\xi}^k (Z_{gt} - \hat{Z}_{gt}^k) + \sum_t \sum_g \hat{\gamma}_{gt\xi}^k (Y_{gt} - \hat{Y}_{gt}^k) + \gamma_{\xi}^k (V_a^{\text{aR}} - \hat{V}_a^{\text{aR}}) \quad (40)$$

$$\forall k = 1, 2, \dots, \tau, \forall \xi \quad (41)$$

式(40)为第 τ 次迭代时的 Benders 最优割,每次迭代都会生成一个新的 Benders 割加入主问题的约束中,第 τ 次迭代共有 τ 个 Benders 割。 $\hat{\lambda}_{gt\xi}^k$ 、 $\hat{\mu}_{gt\xi}^k$ 、 $\hat{\gamma}_{gt\xi}^k$ 、 γ_{ξ}^k 分别为第 k 次迭代时子问题约束对应的对偶变量。

通过求解主问题,得到 $\hat{I}_{gt}$ 、 $\hat{Z}_{gt}$ 、 $\hat{Y}_{gt}$ 和 $\hat{V}_a^{\text{aR}}$,代入子问题,然后对子问题进行求解。对偶变量反映了子问题对相应约束的灵敏度,子问题利用 Benders 割将求解得到的信息回馈主问题。

3.2 分场景子问题

分场景子问题用以检验主问题得到的解是否达到最优。为避免子问题无解,加入功率传输松弛变量 S_{kt}^{L} 和旋转备用松弛变量 S_t^{R} ,保证子问题可解。

分场景子问题以每个场景的运行费用、负荷损失风险费用和负荷损失期望费用之和最小为目标,考虑电力系统的机组约束式(6)~(9)、式(12)~(14),电力系统的功率平衡、网络和备用约束式(15)~(19),以及电力系统的负荷损失风险式(31)~(32)。由于场景间互相独立,因此可以对各分场景子问题进行并行计算,以提高计算效率,表示为

$$\min \omega_{\xi} = \sum_t \sum_g F_{gt\xi} + \frac{\beta}{1-\alpha} M^{\text{L1}} \phi_{\xi} + M^{\text{L2}} \sum_t \sum_b L_{bt\xi}^{\text{shed}} + M^{\text{s}} \left(\sum_t \sum_k S_{kt}^{\text{L}} + \sum_t S_t^{\text{R}} \right) \quad (42)$$

$$\text{s. t.} \quad \text{式(6)} \sim \text{(9)}, \text{式(12)} \sim \text{(17)}, \text{式(31)} \sim \text{(32)}$$

$$I_{gt} = \hat{I}_{gt} : \lambda_{gt\xi}, \quad \forall g, t \quad (43)$$

$$Z_{gt} = \hat{Z}_{gt} : \mu_{gt\xi}, \quad \forall g, t \quad (44)$$

$$Y_{gt} = \hat{Y}_{gt} : \gamma_{gt\xi}, \quad \forall g, t \quad (45)$$

$$\hat{V}_a^{\text{aR}} = \hat{V}_a^{\text{aR}} : \gamma_{\xi} \quad (46)$$

$$\sum_g r_{gt\xi} + S_t^{\text{R}} \geq R_t, \quad \forall t \quad (47)$$

$$P_k^{\text{Lmax}} - S_{kt}^{\text{L}} \leq P_{kt}^{\text{L}} \leq P_k^{\text{Lmax}} + S_{kt}^{\text{L}}, \quad \forall k, t \quad (48)$$

$$S_{kt}^{\text{L}} \geq 0, \quad \forall k, t \quad (49)$$

$$S_t^{\text{R}} \geq 0, \quad \forall t \quad (50)$$

式中: M^{s} 是一个非常大的数,用以限制子问题中的松弛变量。

3.3 天然气系统的负荷损失风险校验

天然气系统的风险校验以最小化天然气系统的运行费用和负荷损失风险费用为目标,考虑天然气的管道流量传输约束式(28)~(30),加压站约束式(21)~(22),气源约束式(23),节点的流量平衡约束式(25),负荷损失约束式(26)~(27),天然气负荷损失风险式(34)~(35),对每个场景进行分别校验。在给定风险水平 C_a^{VaRG} 情况下计算需要削减的燃气机组供气量

$$\min \rho \sum_{\xi} P_{\xi} \sum_s \sum_t f_{st\xi}^{\text{S}} + M^{\text{LG}} \frac{\beta_G}{1-\alpha_G} \sum_{\xi} P_{\xi} \phi_{\xi}^{\text{G}} + \beta_G M^{\text{LG}} V_a^{\text{aRG}} + M^{\text{P}} \sum_{\xi} P_{\xi} f_{gt\xi}^{\text{GLS}} \quad (51)$$

$$\text{s. t.} \quad \text{式(21)} \sim \text{(30)}, \text{式(34)} \sim \text{(35)}$$

$$V_a^{\text{aRG}} \geq 0 \quad (52)$$

$$V_a^{\text{aRG}} + \frac{1}{1-\alpha} \sum_{\xi} P_{\xi} \phi_{\xi}^{\text{G}} \leq C_a^{\text{VaRG}} \quad (53)$$

式中: ρ 为单位天然气的购买费用系数; M^{LG} 为天然气负荷损失风险费用系数; M^{P} 为燃气机组供气削减损失费用系数。如果求解得到 $f_{gt\xi}^{\text{GLS}} > 0$,说明需要对燃气机组的天然气的供应进行限制。

3.4 风险厌恶机组组合计算流程

风险厌恶机组组合计算流程如图 1 所示,具体计算步骤说明如下。

第 1 步,根据风电历史数据生成风电场景。采用文献[24]的方法,使用基于历史数据的拉丁超立方抽样生成风电场景。

第 2 步,对场景进行削减。为平衡计算效率和计算精度,采用基于场景树的场景聚类方法^[25],对场景进行削减。

第 3 步,求解电力系统机组组合问题。首先初始化上下界,计算机组组合主问题,更新问题下界,将主问题的计算结果传递给分场景子问题。

第 4 步,计算分场景子问题。因为每个分场景子问题都是独立的,所以可以对分场景进行并行计

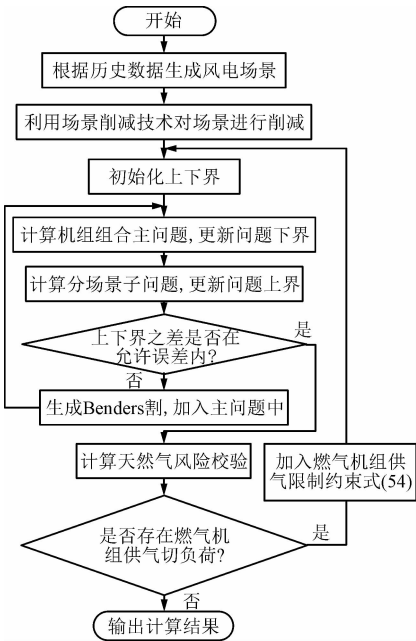


图 1 风险厌恶机组组合计算流程图

算,计算后生成 Benders 割。计算完所有场景后,更新问题的上界,如果上、下界的差在允许的误差范围内,则进行下一步计算,否则将 Benders 割加入主问题中重新计算。

第 5 步,对天然气系统进行负荷损失风险校验。如果出现某个场景中 $f_{g\zeta}^{GLS} > 0$,说明在该场景中出现了燃气机组的供气削减,此时需要对燃气机组在该场景该时刻中的用气加以限制,重新计算电力系统机组组合,表示为

$$f_{g\zeta}^G \leq \hat{f}_{g\zeta}^G - \hat{f}_{g\zeta}^{GLS}, \quad \forall \hat{f}_{g\zeta}^{GLS} > 0 \quad (54)$$

4 算例分析

4.1 6 节点电力系统-6 节点天然气系统

本文采用文献[17]中的 6 节点电力系统-6 节点天然气系统来说明模型和算法的有效性。系统结构如图 2 所示,共有 3 台燃气机组位于 1、2 和 6 节点,功率分别为 180、60 和 40 MW,在电力系统节点 5 处设有 60 MW 的风电场。天然气系统有 2 个气源,位于天然气系统节点 4 和节点 6 处,最大供气量分别为 1.42×10^5 和 1.70×10^5 m³/h。天然气负荷损失 C_a^{VaRG} 允许值设为 3.68×10^4 m³,设置风险系数 β 为 0.4,置信度 α 为 0.9。系统的电负荷和天然气负荷如图 3 所示,风电历史数据见文献[26]。算例将生成的 2 000 个场景,削减为 10 个场景,概率分别为 0.079 5、0.126 5、0.034、0.11、0.048、0.082 5、0.106、0.135 5、0.106 5 和 0.169 5。采用 Matlab 进行建模,调用 Cplex 求解器进行求解。

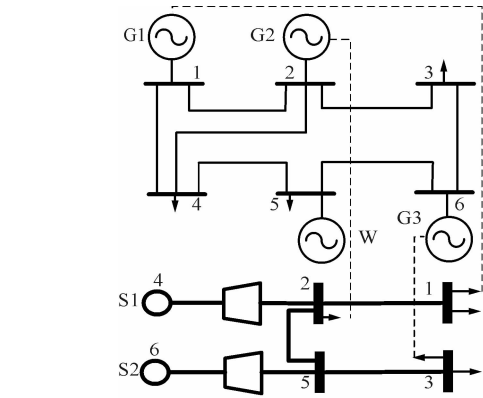


图 2 6 节点电力系统-6 节点天然气系统结构图

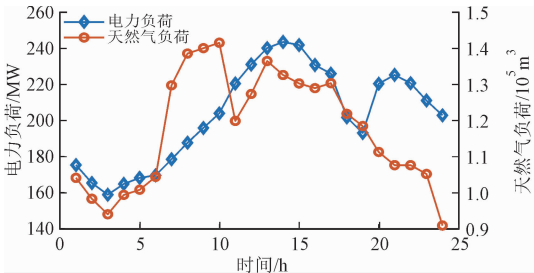


图 3 电力负荷和天然气负荷曲线

4.1.1 对比风险厌恶模型与传统机组组合模型

本文提出的风险厌恶模型与传统机组组合模型的对比见表 1,机组组合计算结果见表 2。表 2 中标星的部分是传统机组组合计算结果为 0(未开机)但本文厌恶模型计算结果为 1(开机)的时刻。两种模型计算结果都存在负荷损失,其中负荷损失最严重场景均为场景 5,概率为 0.048,属于小概率场景。从表 1 中可以看出,相比于传统的随机机组组合,本文模型最严重场景负荷损失从 34.62 MW 减少到 9.59 MW,减少了 72%。这是因为本文模型考虑的 C^{VaR} 反映的是负荷损失超过 V^{aR} 的期望值,对于超过 V^{aR} 的部分负荷损失,在具体计算时权重更大,故可以有效限制超出 V^{aR} 部分的负荷损失。但是,运行费用期望有所上升,这是因为限制了极端场景下的运行风险后,需要有更多的机组维持在开机状态(见表 2),增加了总运行费用。由此可见,本文模型可以有效约束负荷损失,特别是约束小概率极端场景的负荷损失。

表 1 风险厌恶模型与传统机组组合模型对比

模型	运行费	负荷损失	总费用	最严重场景
	用期望	费用期望	期望值	负荷损失
	值/美元	值/美元	/美元	/MW
风险厌恶	128 384	579	128 963	9.59
传统随机	126 069	1 511	127 220	34.62

表 2 风险厌恶机组组合运行状态计算结果

机组	运行状态																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
G1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1*	1	1	1	1	1	1	1	1*	1*	1*	1	1	1	0
G3	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

4.1.2 风险系数和置信度对结果的影响 图 4 表现了风险系数 β 对于负荷损失的影响,其中置信度 α 设为 0.9。随着风险系数的增加,系统的负荷损失期望值不断减少,场景最大负荷损失也不断减少。风险系数表现了系统对于风险的厌恶程度,风险系数越高,风险厌恶程度就越高,对应系统的负荷损失降低,系统运行也越保守。

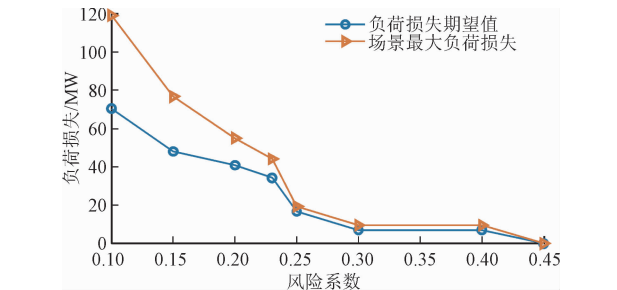


图 4 风险系数对负荷损失的影响

置信度 α 对负荷损失的影响的关系如图 5 所示。随着 α 的增加,场景最大负荷损失减少,场景最大负荷损失与期望值之差减少。这是因为 α 表现了系统对于超过 V^{aR} 部分负荷损失的允许程度,随着 α 的增加,系统中允许超过 V^{aR} 的负荷损失减少。因此,在 α 较低的情况下提高 α 可以有效约束高负荷损失的场景。但是,在 α 从 0.2 到 0.9 时,系统的负荷损失期望值随之增加; α 从 0.9 到 0.95 时,系统的负荷损失期望值减少,可以看出 α 并不能直接反映负荷损失的期望值,在具体计算时要根据算例系统的实际情况和运行要求选取合适的值。

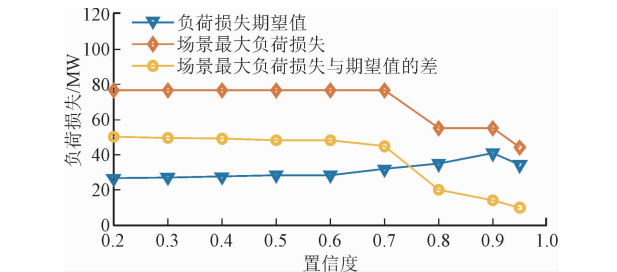


图 5 置信度对负荷损失的影响

4.1.3 天然气系统运行风险对电力系统的影响 电-气综合能源系统中,天然气系统与电力系统通过

燃气机组耦合起来。天然气系统需要根据运行要求限制某些场景下的燃气机组供气,以降低天然气的运行风险,满足运行要求。

图 6 表示了天然气负荷损失 C^{VaRG} 与电力系统负荷损失 C^{VaR} 的关系。当给定的天然气负荷损失 C^{VaRG} 允许值增加,电力系统相应的 C^{VaR} 减少。这是因为,随着 C^{VaRG} 的增加,天然气系统允许更多的其他负荷损失,可以供给燃气机组的天然气增加,因而燃气机组的出力提高, C^{VaR} 会随之下降。由此,天然气系统运行风险影响着燃气机组的供气,进而制约着电力系统的运行,影响电力系统的运行风险。当 C^{VaRG} 允许值继续增大, C^{VaR} 不再增加,此时天然气负荷对电力系统运行不再产生约束。在综合能源的风险厌恶机组组合中,需要根据系统运行要求,综合考虑电力系统和天然气系统的风险允许值,平衡运行费用与运行风险,使整个电-气综合能源系统运行安全经济。

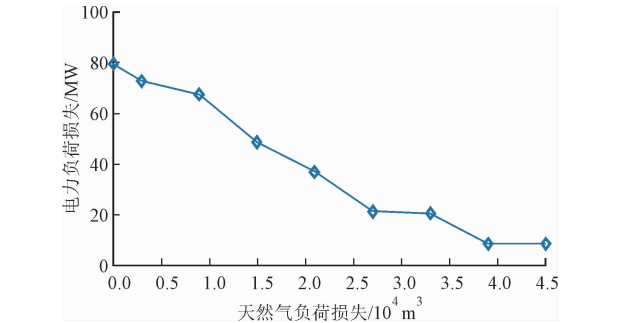


图 6 天然气负荷损失 C^{VaRG} 对电力负荷损失 C^{VaR} 的影响

4.2 118 节点电力系统-20 节点天然气系统 为了进一步说明模型的有效性,采用文献[27]中修改后的 IEEE118-20 节点天然气系统进行计算。系统总装机 5 620 MW,系统中设有 8 台燃气机组,共 1 600 MW,占总装机的 28.5%。在电力系统的 1、4、6、72、73、74、104、105、107 和 110 节点处分别加入 50 MW 的风电场,风电装机占总装机的 8.9%。 情景 1 为不考虑天然气系统风险的风险厌恶机组组合模型,情景 2 为考虑天然气系统风险的风险厌恶机组组合模型。天然气最大负荷为 2.63×10^6

m³,根据算例规模,天然气 C^{VaRG} 水平限制在 8.50×10⁴ m³,计算结果见表 3。

表 3 IEEE118-20 节点天然气系统计算结果

情景	电力系统	电力负	天然气系	天然气
	总运行费	荷损失	统总运行	负荷损
	用期望值	期望值	费用期望	失期望
	/美元	/MW	值/美元	值/m ³
情景 1	2 692 754	30.84	3 049 868	1.43×10 ⁵
情景 2	2 694 382	32.1	3 034 842	7.97×10 ⁴

对比情景 1 和情景 2,情景 2 中天然气负荷损失期望显著小于情景 1,这是因为情景 2 模型对天然气负荷损失风险进行限制,降低了天然气系统的负荷损失,进而降低了天然气系统总运行费用期望。同时,情景 2 中电力系统运行费用和电力负荷损失期望大于情景 1。由于情景 2 考虑了天然气负荷损失风险,限制了天然气负荷损失,在天然气负荷峰值时为确保天然气系统的运行安全,需要限制部分燃气机组的供气,影响了燃气机组的出力,进而影响电力系统的运行,使得电力负荷损失增加,运行费用增加。从情景 1 和情景 2 的对比中可以看到,本文提出的模型可以有效协调电力系统和天然气系统的负荷损失风险。

为说明 Benders 分解算法在基于 CVaR 的电-气综合能源组组合中的有效性,采用商业求解器 MOSEK 与 Benders 分解进行对比。6 节点电力系统-6 节点天然气系统取 100 个场景,118 节点电力系统-20 节点天然气系统取 40 个场景进行计算,计算时间对比见表 4。从中可以看出,在计算基于 CVaR 的机组组合问题时,Benders 分解比使用传统分支定界切割法的 MOSEK 计算效率更高。

表 4 两种解法的计算时间比较

计算方法	计算时间/s	
	6-6 节点系统	118-20 节点系统
Benders 分解	40.53	194.93
MOSEK	121.14	487.56

5 结 论

本文提出了一种考虑风电不确定性引起负荷损失风险的电-气综合能源系统风险厌恶机组组合模型,研究了电-气耦合下的综合能源系统运行风险问题。基于条件风险价值理论,分别描述了综合能源系统的电力负荷损失风险和天然气负荷损失风险。

采用 Benders 分解将所提模型分解为机组组合主问题、分场景子问题和天然气系统负荷损失校验问题,对模型进行了高效求解。通过算例仿真分析可以得到以下结论。

(1)相比于传统的随机机组组合模型,本文模型可以有效降低在小概率极端场景下的负荷损失,平衡综合能源系统的运行费用与运行风险。

(2)本文模型考虑了电力系统和天然气系统之间的相互影响,分别计算电力系统和天然气系统的负荷损失风险,通过对综合能源系统的统一调度,可以实现电力系统和天然气系统运行风险的协调。

参考文献:

[1] 闫海波,李海波,蒋韬. 电力体制改革下天然气发电产业的挑战与机遇 [J]. 燃气轮机技术, 2019, 32(3): 5-9.
YAN Haibo, LI Haibo, JIANG Tao. Challenges and opportunities of natural gas power industry under electric power system reform [J]. Gas Turbine Technology, 2019, 32(3): 5-9.

[2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 电力发展“十三五”规划 [A/OL]. (2017-06-05)[2019-11-21]. <https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/201706/W020191104624253414400.pdf>.

[3] 杨自娟,高赐威,赵明. 电力-天然气网络耦合系统研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 21-31, 56.
YANG Zijuan, GAO Ciwei, ZHAO Ming. Review of coupled system between power and natural gas network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 21-31, 56.

[4] 李文沅. 电力系统风险评估: 模型、方法和应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1.

[5] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.

[6] ROCKAFELLAR R T, URYASEV S. Optimization of conditional value-at-risk [J]. Journal of Risk, 2000, 3(3): 21-41.

[7] HUANG Yuping, ZHENG Qipeng, WANG Jianhui. Two-stage stochastic unit commitment model including non-generation resources with conditional value-at-risk constraints [J]. Electric Power Systems Research,

- 2014, 116: 427-438.
- [8] ZHANG Yao, WANG Jianxue, DING Tao, et al. Conditional value at risk-based stochastic unit commitment considering the uncertainty of wind power generation [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(2): 482-489.
- [9] 胡浩, 王英瑞, 曾博, 等. 基于 CVaR 理论的综合能源系统经济优化调度 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 209-219.
- HU Hao, WANG Yingrui, ZENG Bo, et al. CVaR-based economic optimal dispatch of integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 209-219.
- [10] 晋宏杨, 孙宏斌, 牛涛, 等. 考虑风险约束的高载能负荷——风电协调调度方法 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16): 9-18.
- JIN Hongyang, SUN Hongbin, NIU Tao, et al. Co-ordinated dispatch method of energy-extensive load and wind power risk constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 9-18.
- [11] SHAHIDEHPOUR M, FU Y, WIEDMAN T. Impact of natural gas infrastructure on electric power systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 1042-1056.
- [12] LIU Cong, SHAHIDEHPOUR M, FU Yong, et al. Security-constrained unit commitment with natural gas transmission constraints [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1523-1536.
- [13] CORREA-POSADA C M, SÁNCHEZ-MARTÍN P. Integrated power and natural gas model for energy adequacy in short-term operation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3347-3355.
- [14] ZHANG X, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWA-HAB A, et al. Hourly electricity demand response in the stochastic day-ahead scheduling of coordinated electricity and natural gas networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 592-601.
- [15] QIU Jing, DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, et al. Low carbon oriented expansion planning of integrated gas and power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 1035-1046.
- [16] 余娟, 马梦楠, 郭林, 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. Reliability evaluation of integrated electrical and natural-gas system with power-to-gas [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 708-715.
- [17] ZHANG X, CHE L, SHAHIDEHPOUR M, et al. Electricity-natural gas operation planning with hourly demand response for deployment of flexible ramp [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 996-1004.
- [18] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 计及电转气的电-气互联综合能源系统削峰填谷研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4601-4609, 885.
- WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Power-to-gas considered peak load shifting research for integrated electricity and natural-gas energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4601-4609, 885.
- [19] 张思德, 胡伟, 卫志农, 等. 基于机会约束规划的电-气互联综合能源系统随机最优潮流 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 121-128.
- ZHANG Side, HU Wei, WEI Zhinong, et al. Stochastic optimal power flow of integrated power and natural gas energy system based on chance-constrained programming [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 121-128.
- [20] BAI Linqun, LI Fangxing, JIANG Tao, et al. Robust scheduling for wind integrated energy systems considering gas pipeline and power transmission $N-1$ contingencies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(2): 1582-1584.
- [21] 严超, 别朝红, 王灿, 等. 面向新一代能源系统的风险评估研究现状及展望 [J]. 电网技术, 2019, 43(1): 12-22.
- YAN Chao, BIE Zhaohong, WANG Can, et al. Risk assessment studies for next-generation energy system [J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 12-22.
- [22] ZHAO B, CONEJO A J, SIOSHANSIS R. Unit commitment under gas-supply uncertainty and gas-price variability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2394-2405.
- [23] LIU C, SHAHIDEHPOUR M, WANG J. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow [J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2011, 21(2): 025102.
- [24] SHARIFZADEH H, AMJADY N, ZAREIPOUR H. Multi-period stochastic security-constrained OPF considering the uncertainty sources of wind power, load demand and equipment unavailability [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 146: 33-42.
- [25] BERALDI P, BRUNI M. A clustering approach for scenario tree reduction: an application to a stochastic

programming portfolio optimization problem [J]. TOP, 2014, 22(3): 934-949.

[26] HONG T, PINSON P, FAN S, et al. Probabilistic energy forecasting: global energy forecasting competition 2014 and beyond [J]. International Journal of Forecasting, 2016, 32(3): 896-913.

[27] CHEN Zexing, ZHANG Yongjun, JI Tianyao, et al. Coordinated optimal dispatch and market equilibrium of integrated electric power and natural gas networks with P2G embedded [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(3): 495-508.

(编辑 杜秀杰 陶晴)

中国科技期刊卓越行动计划入选项目

中文期刊梯队类项目(根据刊名拼音排序)

北京中医药大学学报*	控制与决策	植物营养与肥料学报
测绘学报	煤炭学报	中国安全科学学报
地理学报	棉纺织技术	中国病理生理杂志
地球物理学报	南方医科大学学报*	中国电机工程学报
地学前缘	农业工程学报	中国高等学校学术文摘·数学
地质学报	陕西师范大学学报(自然科学版)*	中国工程科学
电力系统自动化	生态学报	中国公路学报
电网技术	生物多样性	中国国家地理
电子测量与仪器学报	生物工程学报	中国激光
动物营养学报	生物技术通报	中国科学院院刊
纺织学报	石油学报	中国矿业大学学报*
复合材料学报	石油与天然气地质	中国农业科学
钢铁	食品科学	中国天然药物
高等学校化学学报	水科学进展	中国有色金属学报
高电压技术	天然气工业	中国中药杂志
工程力学	铁道科学与工程学报	中华儿科杂志
光学学报	通信学报	中华耳鼻咽喉头颈外科杂志
硅酸盐学报	同济大学学报(自然科学版)*	中华放射学杂志
海洋学报	土壤学报	中华放射医学与防护杂志
航空学报	推进技术	中华肝脏病杂志
航空知识	无线电	中华护理杂志
核技术	武汉大学学报·信息科学版*	中华结核和呼吸杂志
华西口腔医学杂志	物理学报	中华流行病学杂志
华中科技大学学报(自然科学版)*	西安交通大学学报*	中华内科杂志
化工进展	系统工程理论与实践	中华心血管病杂志
化工学报	压力容器	中华血液学杂志
环境科学	岩石力学与工程学报	中华预防医学杂志
机械工程学报	岩土力学	中华中医药杂志
计算机学报	仪器仪表学报	中南大学学报(自然科学版)*
交通运输工程学报	宇航学报	中医杂志
交通运输系统工程与信息	园艺学报	自动化学报
金属学报	知识就是力量	作物学报
精细化工	植物保护学报	
科学大众	植物生态学报	

* 为大学学报。