

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

张思德¹, 胡伟², 卫志农¹, 孙国强¹, 臧海祥¹, 陈胜¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

摘要:综合能源系统是未来能源利用的发展趋势,其中电力系统和天然气系统的联系最为紧密,但随机因素的增加也给综合能源系统的安全稳定运行带来了挑战。针对电-气互联综合能源系统的最优潮流问题,考虑风电场出力的随机性以及电力负荷、天然气负荷的随机性,建立其机会约束规划模型,并采用基于半不变量法和内点法的启发式算法进行求解。采用修改的 IEEE 30 节点电力网络与比利时 20 节点天然气网络构建电-气互联综合能源系统,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,并与确定性情形对比,结果表明机会约束规划模型有助于提高电-气互联综合能源系统运行的安全性。

关键词:电-气互联综合能源系统;电力系统;天然气系统;随机最优潮流;机会约束规划;半不变量;启发式算法;模型

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.09.018

0 引言

能源互联网 EI (Energy Internet) 已经引起全社会的重视。2016 年,国家发改委、能源局和工信部相继发布了《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》、《国家能源局关于组织实施“互联网+”智慧能源(能源互联网)示范项目的通知》等重要文件,为我国能源互联网的发展做了顶层设计和重点部署,加快推动了能源生产和消费模式的变革。文献[1]指出能源互联网是电力系统与天然气系统、交通系统等其他系统紧密耦合而形成的复杂多网流系统。其中,由于天然气的诸多优势以及联合循环轮机技术的发展,天然气系统与电力系统的联系最为紧密,使得电-气互联综合能源系统成为能源互联网的基础和过渡。

最优潮流是电-气互联综合能源系统经济调度、规划与运行、可靠性分析等问题的基础。目前,关于电-气互联综合能源系统确定性最优潮流问题的研究已经较为成熟。文献[2]对多能流综合能源系统的建模、优化调度和安全分析问题进行了综述。文献[3]介绍了“能源中心 EH (Energy Hub)”的概念并给出了其优化调度模型。文献[4-5]和文献[6]分别通过燃气轮机和电转气耦合电力系统和天然气系统,研究了其最优潮流问题。文献[7-8]计及了天然气网络暂态模型,研究了电-气互联综合能源系统

动态最优潮流的相关问题。上述电-气互联综合能源系统最优潮流问题研究的均是恒定电力负荷、恒定天然气负荷以及确定性约束条件下情形,未能深入考虑系统运行过程中随机因素的影响。

实际上,电-气互联综合能源系统在运行中存在多种随机因素,除了电力负荷、天然气负荷的波动性外,风电等可再生能源大规模并网、电动汽车的大量接入都增加了系统的随机性。这些随机因素均会对电-气互联综合能源系统的安全稳定运行产生重大影响,因此有必要在系统最优潮流分析中计及随机因素。文献[9]分析了天然气网络状态变化对电-气区域综合能源系统稳态运行的影响,但未考虑系统最优潮流问题和随机因素的概率特性。文献[10-11]分别采用鲁棒优化、区间优化模型处理电-气互联综合能源系统接入风电的随机性,但均未考虑负荷的波动性,而负荷波动是系统随机性的重要来源。文献[12-13]考虑了电-气互联综合能源系统的多种随机性,但文献[12]采用拉丁超立方采样加 Nataf 变换的方法进行处理,文献[13]采用 Nataf 变换加估计的方法进行计算,具有复杂度高、计算量大等不足。

机会约束规划用于解决在给定置信度水平下具有不确定因素的优化问题,允许所做决策在一定概率下不满足约束条件^[14]。虽然机会约束规划模型已在电力系统网络重构^[15]、经济调度^[16]、机组组合^[17]等多个方面广泛应用,但在电-气互联综合能源系统随机因素的处理中却鲜有涉及。机会约束规划模型的求解主要有 2 种途径:一种是采用随机模拟的方法直接求解^[14-15];另一种是先将机会约束规划模型转化为确定性模型然后再进行求解。文献[16-17]利用模糊理论将机会约束规划模型转化为其清晰等价类,而文献[18]提出了一种启发式算法,通过逐步调整机会约束限值进行求解,文献

收稿日期:2017-08-15;修回日期:2018-06-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877071);江苏省自然科学基金资助项目(BK20171433);国网江苏省电力有限公司科技项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877071), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20171433) and the Science and Technology Program of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.

[19]则基于半不变量法和 Cornish-Fisher 级数的概率潮流方法比较随机变量分位点和机会约束边界,进行迭代求解。随机模拟方法的精度不高且耗时太长,而基于半不变量法的启发式算法是解析方法,其实现简单、计算高效,是求解机会约束规划问题的有效算法。

本文针对电-气互联综合能源系统的诸多随机因素,利用机会约束规划模型研究了其最优潮流问题。在天然气系统模型的基础上,考虑风电场出力的随机性以及电力负荷、天然气负荷的波动性,建立了基于机会约束规划的电-气互联综合能源系统的最优潮流模型,采用基于半不变量法和内点法的启发式算法进行求解,并分析比较了不同置信度水平和不同波动性情形下电力系统节点电压、天然气系统节点压力以及综合系统运行成本的变化,并与确定性情形进行对比,揭示了随机因素对电-气互联综合能源系统的影响情况。

1 基于机会约束规划的随机最优潮流模型

1.1 电-气互联综合能源系统

电-气互联综合能源系统由天然气系统、电力系统以及耦合元件组成,实现了不同能源形式的转换、优势互补,提高了能源利用的稳定性和可靠性。

天然气系统主要由管道、加压站、连接节点等基本元件组成。管道将注入网络的天然气输送、分配至负荷侧;加压站可以提高所在管道的压力,用于补充能量传输过程中的压力损失。

天然气管道流量方程与管道两端压力及管道诸多物理特性有关,通常用非线性方程描述。对于理想绝热输气管道 k ,其首、末节点分别为 m 、 n ,其稳态流量 $f_{k,mn}$ 可表示为^[20]:

$$f_{k,mn} = S_{mn} c_{mn} \sqrt{S_{mn} (\pi_m^2 - \pi_n^2)} \quad (1)$$

$$S_{mn} = \begin{cases} 1 & \pi_m \geq \pi_n \\ -1 & \pi_m < \pi_n \end{cases} \quad (2)$$

其中, $f_{k,mn}$ 为天然气管道 k 中由首节点 m 流向末节点 n 的天然气流量; c_{mn} 为与管道效率、温度、长度、内径、压缩因子等有关的常数; π_m 、 π_n 分别为节点 m 、 n 的压力值; S_{mn} 表示管道流量的方向, $S_{mn} = 1$ 对应正方向, $S_{mn} = -1$ 对应反方向。

为了可靠传输天然气和补偿由于摩擦阻力造成的管道压力损失,天然气系统中需要配置一定数量的加压站。加压站最主要的部件是压缩机,假设压缩机消耗的能量来源于通过压缩机的天然气,可将其视为天然气网络中的负荷。图 1 为消耗天然气的压缩机模型示意图^[13]。图中, m 、 n 分别为压缩机的首、末节点; $f_{com,k}$ 为流过压缩机 k 的流量; $\tau_{com,k}$ 为压缩机 k 消耗能量的等效流量。

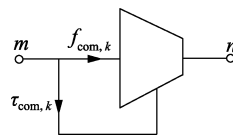


图 1 消耗天然气的压缩机模型

Fig.1 Model of compressor consuming natural gas

压缩机 k 消耗的能量和等效流量可分别表示为:

$$H_{k,mn} = B_k f_{com,k} \left[\left(\frac{\pi_n}{\pi_m} \right)^{Z_k} - 1 \right] \quad (3)$$

$$\tau_{com,k} = \alpha_k + \beta_k H_{com,k} + \gamma_k H_{com,k}^2 \quad (4)$$

其中, $H_{k,mn}$ 为位于首、末节点之间的压缩机 k 消耗的能量; B_k 为与压缩机 k 的效率、温度、天然气热值有关的常数; Z_k 为与压缩机 k 的压缩因子和天然气热值有关的常数; α_k 、 β_k 、 γ_k 为能量转换效率常数。

类似于电力系统中的节点功率平衡,根据流量守恒定律可以列写天然气系统中节点流量平衡方程,用矩阵的形式表示为:

$$(A+U)f + w - T\tau = 0 \quad (5)$$

其中, A 为节点-管道关联矩阵; U 为节点-压缩机关联矩阵; T 为节点与压缩机能量消耗的关联矩阵; f 为管道及通过压缩机的流量向量; τ 为压缩机消耗流量向量; w 为节点净注入天然气流量向量,为气源点注入流量、负荷流量、燃气轮机消耗流量的代数和。

天然气系统与电力系统的耦合元件有多种形式,如燃气轮机、电转气、能源中心等,本文主要考虑燃气轮机的耦合形式。燃气轮机的天然气输入可视为天然气系统的负荷,同时燃气轮机的电力输出是电力系统的电源。燃气轮机的耦合关系可表示为:

$$\varphi(P_{GT,i}) = K_{2i} P_{GT,i}^2 + K_{1i} P_{GT,i} + K_{0i} \quad (6)$$

其中, $\varphi(P_{GT,i})$ 为燃气轮机 i 消耗的天然气流量; $P_{GT,i}$ 为燃气轮机 i 的有功出力; K_{2i} 、 K_{1i} 、 K_{0i} 为燃气轮机 i 的耗量系数。

1.2 机会约束规划模型

机会约束规划是随机优化的重要分支,用于解决在给定置信度水平下具有不确定性因素的优化问题,允许在一定概率下不满足约束条件。机会约束规划模型在处理电-气互联综合能源系统随机因素问题、保障系统安全运行的同时兼顾了经济性。

a. 目标函数。

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模型以系统运行成本最低为目标函数,可表示为:

$$\min F = \min \sum_{i \in \Omega_{GF}} (a_i P_{GF,i}^2 + b_i P_{GF,i} + c_i) + \sum_{j \in \Omega_g} C_{g,j} w_{g,j} \quad (7)$$

其中, F 为系统运行成本; Ω_{GF} 为火电机组集合; a_i 、

b_i, c_i 为火电机组 i 的耗量特性曲线参数; $P_{GF,i}$ 为火电机组 i 的有功出力; Ω_g 为气源点集合; $C_{g,j}$ 为气源点 j 供应天然气的成本系数; $w_{g,j}$ 为气源点 j 供应的天然气的流量。

b. 期望值约束。

基于机会约束规划的电-气互联综合能源系统最优潮流模型的约束条件分为期望值约束和机会约束。其中期望值约束包括电力系统功率平衡约束、平衡节点相角平衡约束、发电机出力约束、线路功率约束、天然气网络节点流量平衡约束、气源点天然气供应量约束、压缩机压缩比约束,具体如下:

$$P_{G,i} + P_{W,i} - P_{L,i} - P_i = 0 \quad (8)$$

$$Q_{G,i} - Q_{L,i} - Q_i = 0 \quad (9)$$

$$\tan \theta_{\text{bal}} - \frac{f_{\text{bal}}}{e_{\text{bal}}} = 0 \quad (10)$$

$$w_{g,j} - w_{L,j} - \varphi(P_{GT,j}) + (A+U)f_{k,mn} - T\tau = 0 \quad (11)$$

$$P_{G,i,\min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i,\max} \quad (12)$$

$$Q_{G,i,\min} \leq Q_{G,i} \leq Q_{G,i,\max} \quad (13)$$

$$P_{l,\min} \leq P_l \leq P_{l,\max} \quad (14)$$

$$w_{g,j,\min} \leq w_{g,j} \leq w_{g,j,\max} \quad (15)$$

$$R_{k,\min} \leq \frac{\pi_n}{\pi_m} \leq R_{k,\max} \quad (16)$$

其中, $P_{G,i}, Q_{G,i}$ 分别为发电机 i 的有功、无功出力; $P_{L,i}, Q_{L,i}$ 分别为节点 i 的有功、无功负荷; P_i, Q_i 分别为直角坐标下节点 i 的有功、无功功率; $P_{W,i}$ 为节点 i 接入风电的有功功率; θ_{bal} 为平衡节点电压相角; $e_{\text{bal}}, f_{\text{bal}}$ 分别为平衡节点电压的实部和虚部; $w_{L,j}$ 为节点 j 的天然气的流量; A, U, T 分别为矩阵 A, U, T 的元素; $f_{k,mn}, \tau$ 分别为向量 f, τ 的元素; $P_{G,i,\max}, P_{G,i,\min}$ 和 $Q_{G,i,\max}, Q_{G,i,\min}$ 分别为发电机 i 有功出力上、下限和无功出力上、下限; P_l 为线路 l 的功率; $P_{l,\max}, P_{l,\min}$ 分别为线路 l 的功率上、下限; $w_{g,j,\max}, w_{g,j,\min}$ 分别为气源点 j 天然气供应流量上、下限; $R_{k,\max}, R_{k,\min}$ 分别为压缩机 k 的压缩比上、下限。

c. 机会约束。

电-气互联综合能源系统中,电力系统的节点电压和天然气系统的节点压力是2个重要的状态量,其波动性对系统的安全稳定运行影响重大,故将其改为机会约束形式,可表示为:

$$\begin{cases} p_r \{ V_i \leq V_{i,\max} \} \geq P_{V,\max} \\ p_r \{ V_i \geq V_{i,\min} \} \geq P_{V,\min} \\ p_r \{ \pi_j \leq \pi_{j,\max} \} \geq P_{\pi,\max} \\ p_r \{ \pi_j \geq \pi_{j,\min} \} \geq P_{\pi,\min} \end{cases} \quad (17)$$

其中, $p_r \{ \cdot \}$ 为机会约束 $\{ \cdot \}$ 成立的概率; V_i 为节点 i 的电压; $V_{i,\max}, V_{i,\min}$ 分别为节点 i 电压的上、下限; $P_{V,\max}, P_{V,\min}$ 分别为电压上、下限约束的置信水平;

$\pi_{j,\max}, \pi_{j,\min}$ 分别为节点 j 压力的上、下限; $P_{\pi,\max}, P_{\pi,\min}$ 分别为压力上、下限约束的置信水平。

1.3 随机模型

电-气互联综合能源系统在运行中存在多种随机因素,本文主要考虑接入风电场出力的随机性、电力负荷及天然气负荷的随机性。

a. 风电随机性。

风电受风速等多种自然环境因素的影响,具有天然的间歇性和波动性。一般采用威布尔分布描述风速的变化,其概率密度函数可表示为:

$$f(v) = \frac{K}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{K-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^K \right] \quad (18)$$

其中, $f(\cdot)$ 为概率密度函数; v 为风速; K 为形状参数; c 为尺度参数。

本文用一台风机等效代替整个风电场,并假设无功就地完全补偿,即风电场无功出力为0。则风电场出力与风速的关系可表示为:

$$P_w(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci}, v > v_{co} \\ P_r \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_r & v_r < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (19)$$

其中, $P_w(v)$ 为风电场有功出力; P_r 为风电场的额定有功功率; v_{ci} 为风机的切入风速; v_r 为风机的额定风速; v_{co} 为风机的切出风速。

b. 电力负荷、天然气负荷的随机性。

电力负荷和天然气负荷的预测存在一定的误差,假设它们均服从正态分布,其概率密度函数可表示为:

$$f(E_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{E_L}} \exp \left[- \frac{(E_L - \mu_{E_L})^2}{2\sigma_{E_L}^2} \right] \quad (20)$$

其中, E_L 为电力负荷/天然气负荷; μ_{E_L} 和 σ_{E_L} 分别为电力负荷/天然气负荷的期望值和标准差。

2 启发式调整算法

2.1 半不变量

半不变量是随机变量的一种数字特征,它可以由不高于相应阶次的随机变量各阶矩求得^[21-22]。对于服从正态分布和离散分布的随机变量,采用常规数值方法对分布函数的解析式进行推导以求得半不变量的解析式;而对于服从其他分布或分布函数未知的随机变量,可以采用文献[23]提出的蒙特卡洛抽样方法来计算其半不变量。

a. 电力负荷、天然气负荷的半不变量。

电-气互联综合能源系统中的电力负荷、天然气负荷均服从正态分布,其各阶中心矩可表示为:

$$M_v = \begin{cases} \sigma_{E_L}^v (v-1)!! & v \text{ 为偶数} \\ 0 & v \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (21)$$

其中, M_v 为电力负荷/天然气负荷的 v 阶中心矩; $!!$ 表示双阶乘。

根据文献[21-22]给出的各阶半不变量和中心矩的关系,有电力负荷/天然气负荷一阶半不变量 $\kappa_1 = \mu_{E_L}$, 二阶半不变量 $\kappa_2 = \sigma_{E_L}$, 其余阶半不变量均为 0。

b. 风电出力的半不变量。

由 1.3 节知, 风速服从威布尔分布, 常规数值方法难以求得半不变量, 故采用蒙特卡洛抽样方法计算。首先根据分布函数由蒙特卡洛抽样技术得到 N 个样本 $\{x_{s1}, x_{s2}, \dots, x_{sN}\}$, 然后计算各阶原点矩 χ_v :

$$\chi_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{si}^v \quad v = 1, 2, \dots \quad (22)$$

再由各阶半不变量与原点矩的关系^[22]求得各阶半不变量 κ_v :

$$\begin{cases} \kappa_1 = \chi_1 \\ \kappa_{v+1} = \chi_{v+1} - \sum_{j=1}^v C_v^j \chi_j \kappa_{v-j+1} \end{cases} \quad (23)$$

其中, C_v^j 为从 v 个不同元素中取 j 个元素的组合数; χ_j 为 j 阶原点矩。

2.2 概率潮流方法

基于半不变量可以解析计算系统概率潮流, 再结合 Gram-Charlier 级数或 Cornish-Fisher 级数能够拟合随机变量的概率密度函数和分位函数。该方法具有实现简单、计算高效的特点。

根据半不变量的性质即可计算系统概率潮流^[24], 假设各随机变量独立, 采用交流潮流模型, 首先在基准运行点处线性化, 用矩阵的形式可表示为:

$$\begin{cases} \Delta X = J_{E0}^{-1} \Delta Z = S_{E0} \Delta Z \\ \Delta Y = J_{G0}^{-1} \Delta W = S_{G0} \Delta W \end{cases} \quad (24)$$

其中, ΔX 、 ΔY 分别为电力系统状态量(电压幅值和相角)和天然气系统状态量(压力和通过压缩机的流量)的不平衡量; ΔZ 、 ΔW 分别为节点注入功率和注入天然气流量的不平衡量; J_{E0}^{-1} 、 J_{G0}^{-1} 和 S_{E0} 、 S_{G0} 分别为电力系统、天然气系统在基准运行点处的雅可比矩阵的逆和灵敏度矩阵。

由式(24)可知, 输出随机变量是输入随机变量的线性和, 已知输入随机变量的各阶半不变量即可计算输出随机变量的各阶半不变量。输出随机变量的各阶半不变量可由其性质和式(24)得到:

$$\begin{cases} \Delta X^{(v)} = S_{E0}^{(v)} \Delta Z^{(v)} \\ \Delta Y^{(v)} = S_{G0}^{(v)} \Delta W^{(v)} \end{cases} \quad (25)$$

其中, $S_{E0}^{(v)}$ 、 $S_{G0}^{(v)}$ 分别为 S_{E0} 、 S_{G0} 的 v 次幂。

对于非正态分布的随机变量而言, Cornish-Fisher 级数拟合其概率分布时具有更高的精度^[25], 因此本文采用 7 阶 Cornish-Fisher 级数拟合输出随机变量的分位函数, 以便在启发式算法中与机会约束边界

进行比较。

$$\begin{aligned} Z(\alpha) = & \xi(\alpha) + \frac{\xi^2(\alpha) - 1}{6} g_3 + \frac{\xi^3(\alpha) - 3\xi(\alpha)}{24} g_4 - \\ & \frac{2\xi^3(\alpha) - 5\xi(\alpha)}{36} g_3^2 + \frac{\xi^4(\alpha) - 6\xi^2(\alpha) + 3}{120} g_5 - \\ & \frac{\xi^4(\alpha) - 5\xi^2(\alpha)}{24} g_2 g_3 + \frac{12\xi^4(\alpha) - 53\xi^2(\alpha)}{324} g_3^3 + \dots \end{aligned} \quad (26)$$

其中, $Z(\alpha)$ 为随机变量在 α 处的分位数; $\xi(\alpha)$ 为标准正态分布的反函数; g_v 为规格化的 v 阶半不变量, $g_v = \kappa_v / \sqrt{\kappa_2^v}$ 。

根据 $f(\alpha) = Z^{-1}(\alpha)$ 即可求得输出随机变量的概率分布函数。

2.3 启发式算法

对于式(7)~(17)建立的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模型, 本文采用基于半不变量法和内点法的启发式算法, 将机会约束转化为等价的确定性约束, 进行迭代求解, 具体步骤如下^[19]。

a. 不考虑波动性, 将随机变量期望值代入模型, 形成确定性最优潮流模型, 采用内点法进行求解, 得到系统基准运行点, 本文假设随机最优潮流的解在基准运行点附近。

b. 利用 2.2 节介绍的半不变量结合 Cornish-Fisher 级数方法计算基准运行点处的概率潮流, 得到输出随机变量的分位函数。

c. 比较输出随机变量在机会约束置信水平的分位数与变量的边界, 如果有约束违反, 则调整变量的计算边界, 并重新求解确定性最优潮流, 更新基准运行点。边界调整的策略如下。

如果 $Z(P_{x, \max}) > x_{i, \max}$, 则调整输出随机变量 x_i 的计算上限:

$$\bar{x}_i = \bar{x}_i \cdot \max \left\{ 1 - \frac{Z(P_{x, \max}) - \bar{x}_i}{\bar{x}_i}, 1 - \alpha \right\} \quad (27)$$

如果 $Z(1 - P_{x, \min}) < x_{i, \min}$, 则调整输出随机变量 x_i 的计算下限:

$$\underline{x}_i = \underline{x}_i \cdot \min \left\{ 1 + \frac{x_i - Z(P_{x, \min})}{\underline{x}_i}, 1 + \alpha \right\} \quad (28)$$

其中, x_i 为输出随机变量, 即电力系统节点电压或天然气系统节点压力; $\bar{x}_i$ 、 $\underline{x}_i$ 分别为输出随机变量的计算上、下限, 初值取其实际值; α 为调整参数, 为了防止随机变量上、下限不合理的调整, 可取 1%~5%。

d. 重复上述过程, 直到没有约束违反时结束, 得到输出随机变量的概率密度函数。

基于半不变量法和内点法的启发式算法的完整

流程如图 2 所示。

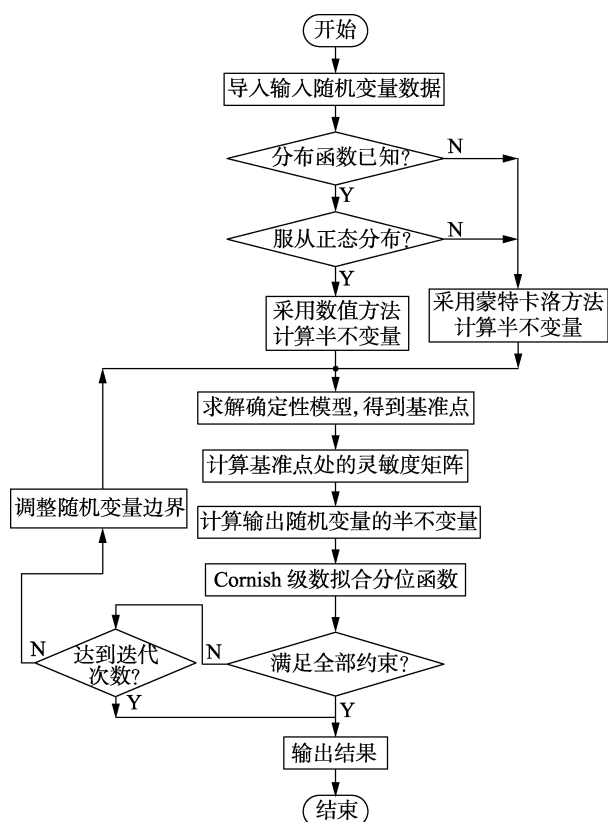


图 2 启发式算法流程图

Fig.2 Flowchart of heuristic algorithm

3 算例分析

3.1 算例说明

本文采用文献[26]提供的算例,通过燃气轮机组耦合修改的 IEEE 30 节点电力系统和比利时 20 节点天然气系统,构造电-气互联综合能源系统进行分析,天然气系统结构如图 3 所示。

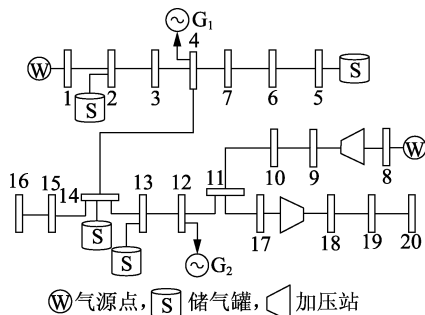


图3 修改的比利时天然气系统结构图

Fig.3 Structure of modified Belgium natural-gas transmission system

本文将电力负荷扩大为原负荷的 1.5 倍, 设定发电机组 G_1 和 G_2 为燃气轮机, 分别与天然气网络节点 4 和 12 相连。电力系统节点 28 接入额定功率为 30 MW 的风电场, 假设风速服从形状参数为 2.4、尺度参数为 7 的威布尔分布, 风电场切入风速为 3 m/s, 额度风速为 14 m/s, 切出风速为 25 m/s。

3.2 机会约束模型对系统运行影响分析

为了说明机会约束规划模型随机最优潮流对电气互联综合能源系统的安全稳定运行产生的影响,分别计算了机会约束置信度水平为 85% 和 95% 时电力系统节点 12 电压与天然气网络节点 16 压力的概率密度曲线,并与确定性最优潮流结果进行对比。设定电力负荷和天然气负荷的标准差为期望值的 10%,采用 2.3 节介绍的基于半不变量法和内点法的启发式算法,得到节点电压与压力的概率密度曲线分别如图 4 和图 5 所示,计算结果如表 1 所示(图 4 和表 1 中节点 12 电压为标幺值)。

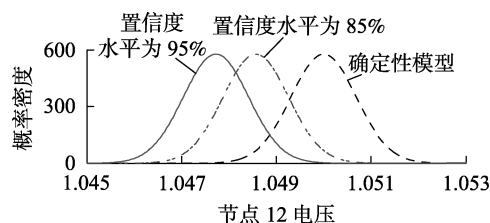


图 4 节点 12 电压概率密度曲线

Fig.4 Probability density curves of Bus 12 voltage

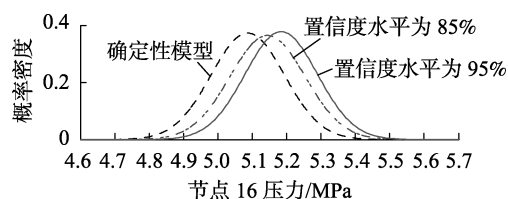


图 5 节点 16 压力概率密度曲线

Fig.5 Probability density curves of Node 16 pressure

由图4、图5和表1可知,在确定性模型中,电力系统节点12的电压为1.05 p.u.,达到了其上限,天然气系统节点16的压力为5.087 MPa,已经接近其下限,系统一旦发生扰动,电力系统节点电压和天然气系统节点压力都将越限,破坏系统的安全稳定运行。而机会约束规划模型可以显著减小节点电压和压力的越限风险,并且置信度水平越高,期望值距离限值的裕度越大;同时要求其不越限的概率越大,计算上下限越狭窄,这限制了波动范围,故其波动性减小,即越限的风险越小。可见,机会约束模型有助于提高电-气互联综合能源系统的运行安全性。

表 1 不同置信度水平下的计算结果比较

Table 1 Comparison of calculative results under different confidence levels

参数	上限	下限	期望值			标准差	
			确定性情形	置信度水平为 85%	置信度水平为 95%	置信度水平为 85%	置信度水平为 95%
节点 12 电压	1.05	0.95	1.050	1.048 6	1.047 7	6.904×10^{-4}	6.903×10^{-4}
节点 16 压力/MPa	6.62	5.00	5.087	5.145	5.184	1.191 6	1.109 9

3.3 置信度水平对系统运行的影响及计算效率分析

机会约束模型要求在一定置信度水平下满足约束条件,为了进一步分析置信度水平对电-气互联综合能源系统安全稳定运行的影响,本节比较了不同置信度水平下系统的运行成本、启发式算法迭代次数以及启发式的计算时间,如表 2 所示。置信度水平为 98% 时启发式算法的迭代曲线如图 6 所示。

表 2 不同置信度水平下计算结果比较

Table 2 Comparison of calculative results under different confidence levels

置信度水平/%	运行成本/\$	迭代次数	计算时间/s
确定性模型	343 870.593 2	—	0.295
80	343 873.254 2	4	1.167
82	343 873.491 1	4	1.171
84	343 873.745 8	4	1.180
86	343 874.023 1	4	1.257
88	343 874.329 7	4	1.306
90	343 874.676 1	5	1.539
92	343 875.079 1	6	1.760
94	343 875.569 8	6	1.866
96	343 876.215 6	7	2.193
98	343 877.222 9	8	2.450

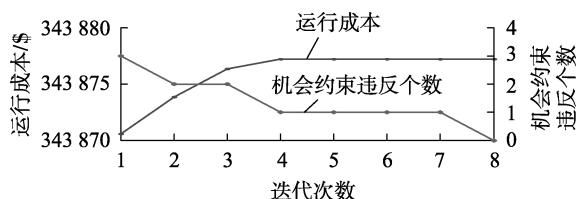


图 6 启发式算法迭代曲线

Fig.6 Iterative curve of heuristic algorithm

由表 2 可知,置信度水平越高,电-气互联综合能源系统的运行成本也越高,这是因为机会约束模型在满足更高的约束概率时必然要以牺牲一定的目标值为代价。因此,系统调度人员需要在系统安全性和经济性之间做出权衡。另外,置信度水平越高,启发式算法的迭代次数越多,即机会约束变量的边界调整次数越多,收敛越困难。

由图 6 可知,本文所提基于半不变量法和内点法的启发式算法在迭代初期的运行成本较低,但此时有机会约束违反边界,系统处于不安全的运行状态。随着迭代的进行,机会约束违反的个数减少,运行状态改变,运行成本增加并趋于稳定。而且启发式算法的收敛速度很快,在几次之内就可以达到收敛。从表 2 中也可以看出,虽然算法计算时间随着置信度水平的增加而增加,但基本在 2 s 以内,效率较蒙特卡洛等模拟算法提高了几十倍以上。

3.4 随机变量波动性对系统运行影响分析

输入随机变量的波动性对电-气互联综合能源系统的安全稳定运行有直接的影响,为此,设定机会约束置信度水平为 95%,分别计算了输入随机变量

标准差为期望值的 10%、15%、20% 时电力系统节点 12 电压与天然气系统节点 16 压力的概率密度曲线,分别如图 7 和图 8 所示,计算结果如表 3 所示(图 7 和表 3 中节点 12 电压为标么值)。

由图 7、图 8 和表 3 可知,随着输入随机变量波动性增加,输出随机变量的波动性也会增加,导致变量越限的风险相应增加。如图 7 中电力系统节点 12 的电压上限为 1.05 p.u.,当输入随机变量标准差为期望值的 10% 时电压几乎不会越限,而随着波动性增加,越限风险大幅增加。此外,为了承受波动性,电-气互联综合能源系统的运行成本随着波动性的增加而增加。

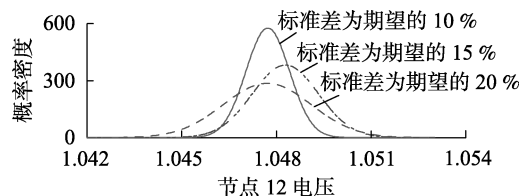


图 7 节点 12 电压概率密度曲线

Fig.7 Probability density curves of Bus 12 voltage

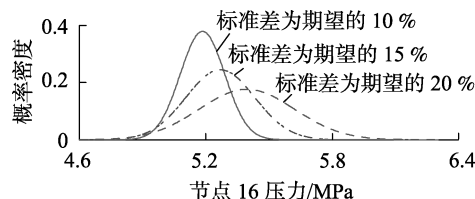


图 8 节点 16 压力概率密度曲线

Fig.8 Probability density curves of Node 16 pressure

表 3 不同波动性水平计算结果比较

Table 3 Comparison of calculative results under different volatility levels

波动性水平/%	节点 12 电压		节点 16 压力/MPa		成本/\$
	期望值	标准差	期望值	标准差	
10	1.047 7	$6.903\ 5 \times 10^{-4}$	5.184	1.109 9	343 875.866 2
15	1.048 3	$6.903\ 9 \times 10^{-4}$	5.269	1.139 8	343 877.568 9
20	1.047 7	$6.904\ 3 \times 10^{-4}$	5.395	1.191 6	343 880.016 3

4 结论

本文针对电-气互联综合能源系统的诸多随机因素,利用机会约束规划模型研究了其最优潮流问题,采用基于半不变量法和内点法的启发式算法进行求解,验证了该算法求解机会约束规划的有效性和可靠性。算例测试结果表明,机会约束模型有助于提高电-气互联综合能源系统运行的安全性,而且置信度水平越低、波动性程度越高,系统状态变量越限的风险越大,运行成本也会越高。本文的研究更深刻地揭示了电-气互联综合能源系统的运行状态,便于发现系统的安全薄弱环节,为系统调度人员作出更好的决策提供了依据。本文并未涉及随机变量间的相关性,这将是笔者下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等. 从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化,2014,38(15):1-11.
DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [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.
- [3] KRAUSE T, ANDERSSON G, FROHLICH K, et al. Multiple-energy carriers: modeling of production, delivery, and consumption[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 15-27.
- [4] UNSIHUAY C, LIMA J W M, SOUZA A C Z D. Modeling the integrated natural gas and electricity optimal power flow[C]//2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, USA; IEEE, 2007: 3955-3961.
- [5] AN S, LI Q, GEDRA T W. Natural gas and electricity optimal power flow[C]//2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Dallas, TX, USA; IEEE, 2004: 138-143.
- [6] 杜琳,孙亮,陈厚合. 计及电转气规划的综合能源系统运行多指标评价[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):110-116.
DU Lin, SUN Liang, CHEN Houhe. Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 110-116.
- [7] CORREA-POSADA C M, SANCHEZ-MARTIN 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.
- [8] CHAUDRY M, JENKINS N, STRBAC G. Multi-time period combined gas and electricity network optimisation[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(7): 3347-3355.
- [9] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等. 考虑天然气网络状态的电力-天然气区域综合能源系统稳态分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(5):1293-1304.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Steady state analysis of electricity-gas regional integrated energy system with consideration of NGS network status[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1293-1304.
- [10] MARTINEZ-MARES A, FUERTE-ESQUIVEL C R. A robust optimization approach for the interdependency analysis of integrated energy systems considering wind power uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3964-3976.
- [11] BAI Linquan, LI Fangxing, CUI Hantao, et al. Interval optimization based operating strategy for gas-electricity integrated energy systems considering demand response and wind uncertainty[J]. Applied Energy, 2016, 167: 270-279.
- [12] WEI Zhinong, CHEN Sheng, SUN Guoqiang, et al. Probabilistic available transfer capability calculation considering static security constraints and uncertainties of electricity-gas integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2016, 167: 305-316.
- [13] 孙国强,陈霜,卫志农,等. 计及相关性的电-气互联系统概率最优潮流[J]. 电力系统自动化,2015,39(21):11-17.
SUN Guoqiang, CHEN Shuang, WEI Zhinong, et al. Probabilistic optimal power flow of combined natural gas and electric system considering correlation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 11-17.
- [14] 王健,谢桦,孙健. 基于机会约束规划的主动配电网能量调度度研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(13):45-52.
WANG Jian, XIE Hua, SUN Jian. Study on energy dispatch strategy of active distribution network using chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 45-52.
- [15] 张雪丽,梁海平,朱涛,等. 基于模糊机会约束规划的电力系统网架重构优化[J]. 电力系统自动化,2015,39(14):67-74.
ZHANG Xueli, LIANG Haiping, ZHU Tao, et al. Optimization of power network reconfiguration based on fuzzy chance constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 67-74.
- [16] 任建文,渠卫东. 基于机会约束规划的孤岛模式下微电网动态经济调度[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):73-78.
REN Jianwen, QU Weidong. Dynamic economic dispatch based on chance-constrained programming for islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 73-78.
- [17] 熊虎,向铁元,陈红坤,等. 含大规模间歇式电源的模糊机会约束机组组合研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(13):36-44.
XIONG Hu, XIANG Tiejun, CHEN Hongkun, et al. Research of fuzzy chance constrained unit commitment containing large-scale intermittent power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 36-44.
- [18] 胡泽春,王锡凡. 考虑负荷概率分布的随机最优潮流方法[J]. 电力系统自动化,2007,31(16):14-18.
HU Zechun, WANG Xifan. Stochastic optimal power flow approach considering load probabilistic distributions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16): 14-18.
- [19] LI G, ZHANG X P. Stochastic optimal power flow approach considering correlated probabilistic load and wind farm generation[C]//IET Conference on Reliability of Transmission and Distribution Networks. London, UK; IET, 2011: 1-7.
- [20] LI Q, AN S, GEDAR T W. Solving natural gas load flow problems using electric load flow techniques[C]// Proceedings of the North American Power Symposium. [S.l.]: IEEE, 2003: 1-7.
- [21] 范宏,张艺,金义雄. 基于半不变量法的随机潮流计算模型及方法[J]. 上海电力学院学报,2012,28(4):313-316.
FAN Hong, ZHANG Yi, JIN Yixiong. Study on electric power stochastic power flow model and method[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2012, 28(4): 313-316.
- [22] ZHANG P, LEE S T. Probabilistic load flow computation using the method of combined cumulants and Gram-Charlier expansion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 676-682.
- [23] 石东源,蔡德福,陈金富,等. 计及输入变量相关性的半不变量法概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2012,32(28):104-113.
SHI Dongyuan, CAI Defu, CHEN Jinfu, et al. Probabilistic load flow calculation based on cumulant method considering correlation between input variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 104-113.
- [24] HU Yuan, LIAN Haoran, BIE Zhaozhong, et al. Unified probabilistic gas and power flow[J]. Journal of Modern Power Systems and Power Clean Energy, 2017, 5(3): 400-411.
- [25] USAOLA J. Probabilistic load flow with wind production uncertainty using cumulants and Cornish-Fisher expansion[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2009, 31: 474-481.
- [26] 卫志农,张思德,孙国强,等. 基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力系统自动化,2016,40(15):9-16.
WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Carbon trading

based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 9-16.

作者简介:

张思德(1992—),男,安徽池州人,硕士研究生,研究方向为综合能源系统优化运行(E-mail: Ade_hhu@163.com);

胡伟(1978—),男,江苏常熟人,高级工程师,主要从事电网调度运行及分析方面的研究工作;



张思德

卫志农(1962—),男,江苏江阴人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统运行分析与控制(E-mail: wzn_nj@263.net);

孙国强(1978—),男,江苏江阴人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统运行分析与控制(E-mail: hhusunguoqiang@163.com)。

Stochastic optimal power flow of integrated power and gas energy system based on chance-constrained programming

ZHANG Side¹, HU Wei², WEI Zhinong¹, SUN Guoqiang¹, ZANG Haixiang¹, CHEN Sheng¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: The integrated energy system is the development trend of future energy utilization, among which the connection between the electric power systems and the natural-gas systems is the closest. However, the increasing random factors bring new challenges to the safe and stable operation of the integrated energy system. Aiming at the optimal power flow of the integrated power and natural-gas energy system, a chance-constrained programming model is established considering the randomness of wind farm output, power load and natural-gas load, which is solved by the heuristic algorithm based on the cumulant method and the interior point method. An integrated power and gas energy system based on the modified IEEE 30-bus power system and the Belgian 20-bus natural-gas network is constructed, whose operation states and costs under different confidence levels and volatility situations are analyzed and compared. Compared with the deterministic situation, simulative results show that the proposed chance-constrained programming model is helpful to improve the operation safety of the integrated power and gas energy system.

Key words: integrated power and gas energy system; electric power systems; natural-gas system; stochastic optimal power flow; chance-constrained programming; cumulant; heuristic algorithm; models

(上接第120页 continued from page 120)

- [16] DERI A, TEVAN G, SEMLYEN A, et al. The complex ground return plane—a simplified model for homogeneous and multilayer earth return[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(8): 3686-3693.
- [17] SCHELKUNOFF S. The electromagnetic theory of coaxial transmission lines and cylindrical shields[J]. The Bell System Technical Journal, 1934, 13(4): 532-579.
- [18] TZIOUVARAS D, MCLAREN P, ALEXANDER G, et al. Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 62-72.
- [19] 王世勇. 基于极化电流行波的方向比较式纵联保护研究[D]. 北京:清华大学, 2011.

WANG Shiyong. Studies on directional comparison pilot protection

based on polarized current travelling wave [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.

作者简介:



冯腾

冯腾(1990—),男,山东东营人,博士研究生,从事电力系统故障分析及继电保护装置测试方面的研究;

董新洲(1963—),男,陕西周至人,教授,博士研究生导师, IET Fellow,从事行波保护、行波测距、行波选线、无通道保护、特高压输电线路保护、智能变电站、系统保护和

小波变换应用方面的研究(E-mail: xzdong@tsinghua.edu.cn)。

Performance test method of two-terminal traveling wave fault locator

FENG Teng, DONG Xinzhou

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the introduction of the working principle of two-terminal traveling wave fault locators, the main factors affecting the fault location accuracy are analyzed. On this basis, the performance test scheme of two-terminal traveling wave fault locator is designed. The testing system, testing content and simulation model are studied, and the models of transmission lines and secondary circuits are analyzed in detail. The performance of the two-terminal traveling wave fault locator is tested by the designed scheme, and the rationality and effectiveness of the designed scheme are verified.

Key words: traveling wave; relay protection; fault locator; performance test; test platform of protection equipments based on transient traveling wave; models