

考虑参数不确定性的区域电-气联合系统的 概率-模糊能流评估

赵霞, 胡潇云, 杨 仑, 颜 伟

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:电-气联合系统(EGS)中存在大量的不确定因素,而现有研究仅考虑了电、气负荷以及风电功率的概率不确定性对 EGS 能流分布的影响。为此,提出在 EGS 的能流分析中进一步考虑天然气管道及电-气耦合设备参数的不确定性,并根据这些参数呈现的不精确、受主观经验影响等特点,提出用模糊模型来描述其不确定性。在此基础上,以中压配电网和配气网耦合形成的区域 EGS 为对象,综合考虑上述概率、模糊不确定因素以及中压配电网的不对称、不接地特点,提出区域 EGS 的概率-模糊能流评估方法。所提方法以蒙特卡罗模拟、 α -截集法和证据理论为基础,适用于区域 EGS 能流的概率评估、模糊评估以及概率-模糊综合评估。以 33 节点中压配电网以及 11 节点配气网构成的区域 EGS 为算例,验证所提方法的有效性。仿真结果表明,不计及天然气管道和耦合设备参数的不确定性,很可能导致对区域 EGS 能流分布的评估结果过于乐观,从而低估区域 EGS 的运行风险。

关键词:区域电-气联合系统;概率不确定性;模糊不确定性;能流分析;蒙特卡罗模拟;证据理论;综合评估

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.020

0 引言

长期以来,电力和天然气系统独立运营、各自为政,能源利用率的总体水平低下;随着能源和环境问题日趋严峻,这种传统模式的弊病日益凸显。近年来,燃气机组的装机比例逐年增加,电转气 P2G (Power to Gas) 技术不断发展,电力和天然气系统之间的耦合不断加强;与此同时,以多种能源互联互通、梯级利用为基本特征的综合能源系统逐步从“概念”走向“落地”^[1]。因此,电-气联合系统(EGS)逐渐发展成为综合能源系统的一种典型形式,电-气协同规划与运行也因此引起了国内外学者的广泛关注。

能流计算是电-气协同规划与运行的基础,国内外学者已对 EGS 的能流计算进行了大量的研究。文献[2]考虑天然气系统的简化模型,将电力系统的潮流算法应用于天然气系统的稳态分析;文献[3]在天然气模型中详细考虑了环境温度的影响,提出 EGS 能流计算的统一求解方法;文献[4]考虑电-气能流的双向流动,提出了 EGS 的标幺化能流计算方法;文献[5]考虑天然气管网的慢动态特性,研究了 EGS 的准稳态能流计算方法;文献[6]考虑天然气的气质变化和配电网的不对称特性,研究了区域 EGS 的能流计算。然而,上述研究均属于确定性能流分析,难以考虑和评估 EGS 中存在的大量不确定因素及其对系统运行的影响。为此,部分研究

开始关注 EGS 的概率能流问题。文献[7]将电力系统的概率潮流分析方法推广至 EGS,分析了电/气/热负荷及风速(风电功率)的随机变化对 EGS 能流的影响;文献[8]进一步考虑了电/气/热负荷及风速之间的相关性,并提出了基于 EGS 分段线性化模型和蒙特卡罗模拟 MCS(Monte Carlo Simulation)的概率能流计算方法;文献[9]同样考虑了电/气负荷及风速的随机变化,基于半不变量法计算 EGS 的概率能流分布。

尽管现有研究^[7-9]已针对 EGS 的概率能流分析开展了一些工作,但所考虑的不确定因素还局限于电/气负荷或风电功率。事实上,在 EGS 中除了负荷以及电源功率这一类节点注入量具有不确定性之外,管道参数以及耦合设备(如 P2G 设备)的能量转换效率等参数同样具有不确定性。这些参数与设备的物理特性和运行工况密切相关^[3],通常仅能给出经验值或典型取值区间(如 P2G 设备的转换效率为 49%~65%)。关于这些不确定因素的分布特性及其对 EGS 能流分布的影响的研究目前鲜有涉及。同时,现有研究^[7-9]普遍假设电/气负荷服从正态分布,风速服从 Weibull 分布,基于概率方法研究不确定因素对 EGS 能流的影响。但是,对于管道参数这一类不确定性参数,目前尚无研究表明其具有明确的统计特性或者服从某种分布,仍采用概率方法来刻画其不确定性并不合适。相反地,模糊建模方法则更适用于描述这种因信息不完备、认知不完全或受主观经验影响而导致的,表现为不精确、不清晰的不确定因素^[10-12]。

此外,现有关于 EGS 能流的研究^[3-5,7-9]大多以

收稿日期:2018-06-14;修回日期:2018-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307186)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307186)

由输电网和输气网互联形成的大空间、跨区域 EGS 为对象,少量研究^[6]关注区域 EGS。实际上,与跨区域 EGS 相比,区域 EGS 在现阶段更具有工程实践和示范意义。

因此,本文以区域 EGS 为研究对象,在现有研究考虑电/气负荷及风电功率概率不确定性和相关性的基础上,进一步考虑管道参数及 P2G 设备的能量转换效率的模糊不确定性,并应用概率-模糊分析的基本思想^[10],提出区域 EGS 能流的概率-模糊综合评估方法。所提方法考虑燃气机组和 P2G 设备这 2 种耦合设备,以及中压配电网的不对称和不接地特性,分别采用结合拉丁超立方抽样的蒙特卡罗模拟(LHS-MCS)方法^[13]和 α -截集法^[11]对区域 EGS 的能流分布进行概率及模糊分析,并基于证据理论^[12]实现区域 EGS 能流的概率-模糊综合分析和评估。以 33 节点中压配电网^[14]以及 11 节点配气网^[6]构造区域 EGS 算例,验证本文所提概率-模糊综合评估方法的有效性。

1 区域 EGS 的稳态能流模型

1.1 中压配电网的潮流方程

我国的中压配电网一般为三相三线不接地系统,其典型的电压等级为 35 kV、10 kV。

不考虑对地电容,支路 $i-j$ 有以下电压方程:

$$\begin{bmatrix} U_i^a \\ U_i^b \\ U_i^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{ij}^{aa} & z_{ij}^{ab} & z_{ij}^{ac} \\ z_{ij}^{ba} & z_{ij}^{bb} & z_{ij}^{bc} \\ z_{ij}^{ca} & z_{ij}^{cb} & z_{ij}^{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ij}^a \\ I_{ij}^b \\ I_{ij}^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_j^a \\ U_j^b \\ U_j^c \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, U_i^φ 和 U_j^φ 分别为首、末节点的 φ 相电压, $\varphi \in \{a, b, c\}$; I_{ij}^φ 为支路 $i-j$ 的 φ 相电流; $z_{ij}^{\varphi\varphi}$ 、 $z_{ij}^{\varphi\psi}$ 分别为支路 $i-j$ 的自阻抗和互阻抗, $\psi \in \{a, b, c\}$ 且 $\psi \neq \varphi$ 。

任一节点 i 的电流平衡方程为:

$$I_i = \sum_{j \in i} I_{ij} \quad (2)$$

其中, $I_i = [I_i^a, I_i^b, I_i^c]^T$ 为节点 i 的三相注入电流列向量; $I_{ij} = [I_{ij}^a, I_{ij}^b, I_{ij}^c]^T$ 为支路 $i-j$ 的三相电流列向量; $j \in i$ 表示节点 j 与节点 i 直接相连。

不接地配电网无零序电流通路,即满足^[15]:

$$I_i^a + I_i^b + I_i^c = 0 \quad (3)$$

需要注意的是,节点注入电流为各节点所接入电源电流与负荷电流之差,其具体表达方式取决于电源的控制方式、负荷特性和接线形式^[15]。以星形接线的恒功率负荷为例,假设各相中性点的功率已知,则各相负荷注入电流为:

$$I_i^\varphi = - \left(\frac{\tilde{S}_i^{\varphi n}}{U_i^\varphi - U_i^n} \right)^* \quad (4)$$

其中, U_i^n 为节点 i 的中性点电压; $\tilde{S}_i^{\varphi n}$ 为 φ 相中性点

的功率;“*”表示取共轭。各相注入电流仍然满足式(3)。

1.2 配气网的稳态模型

配气网主要由气源、管道和气负荷组成,对于一些对压力有特殊要求的用户而言,可能还需要配置调压设备,如压缩机、调压阀。

天然气管道的流量与管道的物理特性、温度和气质等因素有关。不同的压力范围下,管道 q 的稳态流量方程^[6]为:

$$f_{q,ij} = \begin{cases} 5.72 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{(p_i - p_j) D^5}{f L S_G}} & [0, 75) \text{ mbar} \\ 7.57 \times 10^{-4} \frac{T_n}{p_n} \sqrt{\frac{(p_i^2 - p_j^2) D^5}{f L T S_G}} & (0.75, 7] \text{ bar} \\ 7.57 \times 10^{-4} \frac{T_n}{p_n} \sqrt{\frac{(p_i^2 - p_j^2) D^5}{f L T Z_G S_G}} & (7, +\infty) \text{ bar} \end{cases} \quad (5)$$

其中, p_i 、 p_j 分别为管道首节点 i 、末节点 j 的压力; L 和 D 分别为管道长度和直径; f 为摩擦系数; S_G 为天然气的相对密度; T_n 和 p_n 分别为标准工况下的温度和压力; T 为气体温度; Z_G 为表征气体压缩率的参数。

式(5)可以简化为:

$$f_{q,ij} = \begin{cases} K_L \sqrt{p_i - p_j} & [0, 75) \text{ mbar} \\ K_M \sqrt{p_i^2 - p_j^2} & (0.75, 7] \text{ bar} \\ K_H \sqrt{p_i^2 - p_j^2} & (7, +\infty) \text{ bar} \end{cases} \quad (6)$$

其中, K_L 、 K_M 和 K_H 为 3 个压力范围下的管道综合参数。

由式(5)、(6)可知,沿天然气的传输方向存在压力损失。为了满足终端用户的压力需求,可能需配置压缩机进行升压。压缩机可以采用燃气驱动或电力驱动,其中燃气驱动压缩机 c 的模型^[7]为:

$$\begin{cases} H_{c,ij} = B_{c,ij} f_{c,ij} [(p_j/p_i)^{Z_{c,ij}} - 1] \\ \tau_{c,ij} = \alpha_c + \beta_c H_{c,ij} + \gamma_c H_{c,ij}^2 \end{cases} \quad (7)$$

其中, $H_{c,ij}$ 为压缩机 c 消耗的功率; $\tau_{c,ij}$ 为燃气机组消耗的气流量; $f_{c,ij}$ 为流入压缩机 c 的天然气的流量; $B_{c,ij}$ 和 $Z_{c,ij}$ 为与压缩机 c 的温度、效率以及压缩因子等因素有关的参数; α_c 、 β_c 、 γ_c 为燃气机组的燃料比率系数。

相较于燃气驱动压缩机,电驱动压缩机更加清洁、环保。电力驱动压缩机可以视为电力系统的等效电负荷,若其接入电力系统节点 k ,则模型^[7]如式(8)所示。

$$P_{c,k} = \frac{0.745}{1000} H_{c,ij} \quad (8)$$

其中, $P_{c,k}$ 为电机驱动压缩机 c 接入节点 k 消耗的电功率。

天然气系统满足如下节点流量平衡方程^[3]:

$$f_i = \sum_{j \in i} f_{q,ij} + \sum_{j \in i} s_{c,ij} f_{c,ij} + \sum_{j \in i} \tau_{c,ij} \quad (9)$$

其中, f_i 为节点 i 的天然气注入流量; $j \in i$ 表示天然气系统中的节点 j 通过管道或压缩机与节点 i 直接相连; $s_{c,ij}$ 为方向变量, 若节点 i 为压缩机的入口节点, 则 $s_{c,ij} = 1$, 否则 $s_{c,ij} = -1$ 。

1.3 电-气耦合设备

本文考虑燃气机组以及 P2G 设备这 2 种耦合设备。

燃气机组是以天然气为燃料的电源, 其输入天然气量与输出电功率的关系^[4]如下:

$$f_{Gg} = \frac{\alpha_{Gg} + \beta_{Gg} P_{Gg} + \gamma_{Gg} P_{Gg}^2}{C_{GHV}} \quad (10)$$

其中, f_{Gg} 和 P_{Gg} 分别为燃气机组 g 的输入气量和输出电功率; α_{Gg} 、 β_{Gg} 和 γ_{Gg} 为燃气机组的能量转换系数; C_{GHV} 为固定热值, 本文中取为 39.12 MJ/m^3 。

P2G 设备通过电解水和 Sabatier 催化 2 个化学反应环节将电能转化为天然气, 其输入电功率和输出天然气量之间的关系^[4]为:

$$f_{P2G} = \frac{3 \ 600 \eta_{P2G} P_{P2G}}{C_{GHV}} \quad (11)$$

其中, P_{P2G} 和 f_{P2G} 分别为 P2G 设备消耗的电功率和产生的天然气量; η_{P2G} 为 P2G 设备的能量转换效率。

需要指出的是, 区域 EGS 中燃气机组和 P2G 设备的具体工作模式取决于配电网和配气网的互动方式。以燃气机组为例, 燃气机组既可优先按配电网的要求提供电力, 也可优先满足配气网的需求, 富余燃气向配电网供电。

1.4 区域 EGS 的稳态能流方程

综合考虑以上模型, 配电网中以节点的三相电压及星形接线负荷的中性点电压(模值和相角)为状态变量, 配气网中以节点压力为状态变量, 则区域 EGS 的稳态能流问题可表示为如下一般形式的非线性方程组:

$$h(U^a, U^b, U^c, U^n, \delta^a, \delta^b, \delta^c, \delta^n, p) = 0 \quad (12)$$

其中, U^ϕ 和 δ^ϕ 分别为配电网中待求节点的电压模值和相位向量, $\phi \in \{a, b, c, n\}$; p 为配气网中待求节点的压力向量。

本文基于 Newton 法, 结合耦合设备的运行方式, 通过电-气的交替迭代求解上述非线性方程。需要指出, 式(12)也是区域 EGS 的确定性能流问题。

2 不确定因素及其模型

对于 EGS 中的电/气负荷和风速这类不确定因

素而言, 沿用现有概率建模方法^[7-9]对其进行建模, 并考虑相关性。

采用正态分布^[7,9]描述配电网中各相有功负荷以及配气网中气负荷的随机性, 并假定配电网中各相负荷的功率因数恒定。

采用 Weibull 分布描述风速的不确定性, 并根据输出有功功率和风速之间的关系^[9]确定风电机组的出力。假设风电机组采用恒功率因数控制方式, 在三相潮流计算中将其简化为星形接线的等值负荷。

如前所述, EGS 中除了包括概率不确定因素外, 还存在大量不精确的或受主观经验参数影响而不适合用概率模型刻画的不确定因素。本文重点研究管道参数和 P2G 设备的能量转换效率, 并采用模糊模型描述其不确定性。

由式(5)可见, 管道流量与其长度、直径、摩擦系数以及天然气的温度、密度和压缩率等因素有关。这些参数一般都难以精确测定。另外, 实际工况与标准工况之间的转换系数(式(5)中的常数 5.72×10^{-4} 、 7.57×10^{-4})也依赖于经验取值。这些因素共同导致管道综合参数(K_L 、 K_M 和 K_H)具有不确定性。

类似地, P2G 设备的能量转换效率与具体的转化技术和反应工况有关, 一般仅能给出典型值或取值范围。例如, 电解水反应的能量转换效率约为 80%^[16], Sabatier 催化反应的能量转换效率为 75%~80%^[16], 而关于 P2G 设备的总体转换效率(式(11)中的 η_{P2G}), 文献[8, 17]指出其大小为 60%, 文献[18]中给出其大致范围为 49%~65%。

因此, 本文采用工程中常用的梯形模糊数^[11]来描述管道参数和 P2G 设备的能量转换效率的不确定性。不失一般性, 用梯形模糊数 $\tilde{X}$ 表示 K_L 、 K_M 、 K_H 或 η_{P2G} , 记 $\tilde{X} = [X_a, X_b, X_c, X_d]$, 其隶属度函数及 X_a 、 X_b 、 X_c 、 X_d 的定义如附录中图 A1 所示。当 $X_b = X_c$ 时, $\tilde{X}$ 转化为三角形模糊数。

对于任意置信水平 $\alpha \in [0, 1]$, $\tilde{X}$ 对应的 α -截集^[11]为 $X^\alpha = [\underline{X}^\alpha, \bar{X}^\alpha]$, 由附录中图 A1 易知:

$$\begin{cases} \underline{X}^\alpha = X_a + \alpha(X_b - X_a) \\ \bar{X}^\alpha = X_d - \alpha(X_d - X_c) \end{cases} \quad (13)$$

当 $\alpha = 1$ 时, $X^1 = [X_b, X_c]$ 为 $\tilde{X}$ 最有可能出现的取值区间; 相应地, 当 $\alpha = 0$ 时, $X^0 = [X_a, X_d]$ 为包含 $\tilde{X}$ 真值的一个偏保守(范围较大)的估计区间。

对于本文所考虑的管道参数和 P2G 设备的能量转换效率, 若具备大量的历史数据, 则可利用模糊统计方法确定其模糊模型; 否则, 可借助专家经验进行粗略估计。以 η_{P2G} 为例, 考虑其典型取值范围 49%~65%作为 $\alpha = 0$ 对应的取值区间, 然后将该区间适当缩小, 如选取 55%~60%作为 $\alpha = 1$ 对应的区间, 由此可得:

$$\tilde{\eta}_{P2G} = [49\%, 55\%, 60\%, 65\%] \quad (14)$$

事实上,相较于概率建模,模糊建模对基础数据的要求一般较低,这是因为其通常需要大量的数据才能确定某不确定因素的概率分布及其参数,而专家经验一般仅能给出不确定因素的取值范围。这也是本文选用模糊模型来描述管道参数等不确定因素的原因之一。

3 区域 EGS 能流的概率-模糊综合分析

同时考虑上述概率和模糊不确定因素,分别基于 LHS-MCS 方法和 α -截集法对区域 EGS 进行概率及模糊能流分析;在此基础上,基于证据理论实现区域 EGS 能流的概率-模糊综合分析和评估。

3.1 基于 LHS-MCS 方法的概率能流分析

当仅考虑电/气负荷及风速的概率不确定性时,区域 EGS 的能流计算为单纯的概率能流问题,如式(15)所示。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{h}(\mathbf{X}) \quad (15)$$

其中, $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T$ 为电/气负荷及风速等 n 维随机输入变量向量; $\mathbf{Y} = [Y_1, Y_2, \dots, Y_m]^T$ 为区域 EGS 的 m 维输出变量向量,如配电网中各节点的三相电压、各支路的三相潮流和配气网中各节点的压力、各条管道的气流量; $\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_m]^T$ 为输出与输入变量的函数关系,即有 $Y_j = h_j(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ($j=1, 2, \dots, m$)。

本文应用 Nataf 变换处理电/气负荷及风速的相关性,并基于 LHS-MCS 方法求解式(15),具体方法见文献[13]。

3.2 基于 α -截集法的模糊能流分析

类似地,当仅考虑管道参数和 P2G 设备的能量转换效率这类模糊不确定因素时,区域 EGS 的能流计算为单纯的模糊能流问题,如式(16)所示。

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{h}(\tilde{\mathbf{X}}) \quad (16)$$

其中, $\tilde{\mathbf{X}} = [\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_k]^T$ 为包括管道参数、P2G 设备的能量转换效率等的 k 维模糊输入变量向量; $\tilde{\mathbf{Y}}$ 中各变量的含义与 $\mathbf{Y}$ 中各变量的含义相同,但 $\mathbf{Y}$ 是随机变量,而 $\tilde{\mathbf{Y}}$ 是模糊变量。

模糊能流分析就是根据 $\tilde{\mathbf{X}}$ 确定输出变量 $\tilde{\mathbf{Y}}$ 的隶属度。基于 α -截集法求解式(16)的基本思想如下。

设任意输出变量 $\tilde{Y}_j = h_j(\tilde{\mathbf{X}})$ 的 α -截集为 $Y_j^\alpha = [Y_j^\alpha, \bar{Y}_j^\alpha]$, 则有^[11]:

$$\begin{cases} Y_j^\alpha = \inf \{ h_j(X_1^\alpha, X_2^\alpha, \dots, X_k^\alpha) \} \\ \bar{Y}_j^\alpha = \sup \{ h_j(X_1^\alpha, X_2^\alpha, \dots, X_k^\alpha) \} \end{cases} \quad (17)$$

其中, $\inf \{ \cdot \}$ 和 $\sup \{ \cdot \}$ 分别表示下确界和上确界; X_i^α ($i=1, 2, \dots, k$) 为 $\tilde{X}_i$ 的 α -截集。

式(17)一般可以转化为如下所示的优化问题:

$$\begin{cases} Y_j^\alpha = \min \{ h_j(X_1, X_2, \dots, X_k) \} \\ \bar{Y}_j^\alpha = \max \{ h_j(X_1, X_2, \dots, X_k) \} \\ \text{s.t. } X_i \in [X_i^\alpha, \bar{X}_i^\alpha] \quad i=1, 2, \dots, k \end{cases} \quad (18)$$

对于 $\alpha \in [0, 1]$, 按一定的步长 $\Delta\alpha$ 反复求解对应的优化问题式(18), 即可近似估计 $\tilde{Y}_j$ 的隶属度函数。

同时,根据可能性理论^[11], 设输出变量 $\tilde{Y}_j$ 的论域为 U , 对于 U 中任一集合(或事件) A 而言, 其可能性测度 $\Pi(A)$ 和必要性测度 $N(A)$ 如式(19)所示。

$$\begin{cases} \Pi(A) = \sup_{y \in A} \{ \pi_{\tilde{Y}_j}(y) \} \\ N(A) = \inf_{y \notin A} \{ 1 - \pi_{\tilde{Y}_j}(y) \} = 1 - \Pi(\bar{A}) \end{cases} \quad (19)$$

其中, $\pi_{\tilde{Y}_j}(y)$ 为模糊变量 $\tilde{Y}_j$ 的可能性分布函数, 其自变量为 y , $\pi_{\tilde{Y}_j}(y)$ 在数值上与 $\tilde{Y}_j$ 的隶属度函数相同; $\bar{A}$ 为 A 的对立集。

A 的可能性表征事件 A 发生的可能性, 而 A 的必要性表征对立事件 $\bar{A}$ 的不可能性。与概率测度不同, 可能性测度和必要性测度均不满足自对偶性, 即有 $\Pi(A) + \Pi(\bar{A}) \geq 1$, $N(A) + N(\bar{A}) \leq 1$ 。

至此, 基于 α -截集法可以得到区域 EGS 中任意输出变量的隶属度函数(可能性分布), 并可进一步依据式(19)对区域 EGS 的能流分布进行模糊评估(如评估某条支路潮流越限的可能性和必要性)。

3.3 证据理论

当同时考虑区域 EGS 中的概率和模糊不确定性时, 区域 EGS 的能流分析则为概率-模糊混合同题, 如式(20)所示。

$$\mathbf{Z} = \mathbf{h}(\mathbf{X}, \tilde{\mathbf{X}}) \quad (20)$$

由于输入变量同时包含随机变量和模糊变量, 则输出变量 $\mathbf{Z}$ 同时具有随机性和模糊性。例如, 某节点电压的某个 α -截集的下边界为随机变量。本文基于证据理论求解式(20)所示问题, 从而实现区域 EGS 能流分布的概率-模糊综合分析。

证据理论是一种处理多种不确定性的有效工具^[12]。用识别框架 Θ 表示问题所有可能且互斥的结果, 其幂集记为 2^Θ 。基本概率分配函数(mass 函数)定义为:

$$m_{\text{mass}}: 2^\Theta \rightarrow [0, 1], m_{\text{mass}}(\emptyset) = 0, \sum_{A \in 2^\Theta} m_{\text{mass}}(A) = 1 \quad (21)$$

其中, 若 $m_{\text{mass}}(A) > 0$, 则 A 称为焦元。

进一步定义 A 的信任函数 $P_{\text{Bel}}(A)$ 和似真函数 $P_{\text{Pl}}(A)$ 如式(22)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{Bel}}(A) = \sum_{B \subseteq A} m_{\text{mass}}(B) \\ P_{\text{Pl}}(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m_{\text{mass}}(B) = 1 - P_{\text{Bel}}(\bar{A}) \end{cases} \quad (22)$$

信任函数 $P_{\text{Bel}}(A)$ 表征对 A 的信任(或支持)程度,而 $P_{\text{Pl}}(A)$ 表征对 A 的不反对程度。 $P_{\text{Bel}}(A)$ 和 $P_{\text{Pl}}(A)$ 同时也分别称为 A 的信任度和似真度。

可见, mass 函数是证据理论的基础,而证据理论能同时处理概率和模糊不确定性的关键就在于将随机变量的概率分布与模糊变量的可能性分布同时转化为对应的 mass 函数。具体的构造方法参见文献[11]。

考虑任意输入变量 X , 其概率密度为 $p_X(x)$ 。取 X 的 n_x 个互不交叠的区间 $[a_i, a_{i+1}]$ ($i=1, 2, \dots, n_x$) 作为焦元 A_i , 可以按式(23)构造其 mass 函数。

$$m_{\text{mass}}(A_i) = P(A_i) = \int_{x \in A_i} p_X(x) dx \quad (23)$$

其中, $P(\cdot)$ 为概率测度。若 X 为连续随机变量, 则以上构造方法相当于将其离散化, 所得 mass 函数相当于离散随机变量的分布律。

对于可能性分布函数(隶属度函数)为 $\pi_{\tilde{X}}(x)$ 的某个模糊变量 $\tilde{X}$ 而言, 将区间 $[0, 1]$ 离散为 Q 个置信水平区间, 即在区间 $[0, 1]$ 上取 $\alpha_1 = 1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_Q > \alpha_{Q+1} = 0$, α_j 所对应的 α -截集 $[a_j, \bar{a}_j]$ ($j=1, 2, \dots, Q$) 作为焦元 A_j , 则其 mass 函数可取为:

$$m_{\text{mass}}(A_j) = \alpha_j - \alpha_{j+1} \quad (24)$$

可见, 随机变量的焦元 A_i 为一组互斥的集合, 而模糊变量的焦元 A_j 为一组嵌套的集合。

基于式(23)、(24)所定义的 mass 函数以及嵌套和互斥集合的性质, 文献[11]进一步证明了: 对于式(20)中输出变量 Z 的任意一个分量 Z , 在其值域中任取集合 A , A 的信任度和似真度如式(25)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{Bel}}^Z(A) = \sum_{i=1}^M p_{\text{pi}} \Pi_i^Z(A) \\ P_{\text{Pl}}^Z(A) = \sum_{i=1}^M p_{\text{pi}} N_i^Z(A) \end{cases} \quad (25)$$

其中, M 为 MCS 样本总数; $\Pi_i^Z(A)$ 和 $N_i^Z(A)$ 分别为 X 取值为 X_i 时, 输出分量 Z 的可能性测度和必要性测度。多维随机变量 X 经式(24)离散化处理后的联合分布律为 $\{X_i, p_{\text{pi}}\}$, 当采用 MCS 方法对 X 进行概率模拟时, 可以用 X 的第 i 个样本 X_i ($i=1, 2, \dots, M$) 的频率来近似 p_{pi} 。

同时, 文献[11]还指出: 当取 A 为 $Z \in (-\infty, z)$ 时, 式(25)所得信任函数和似真函数分别给出 Z 的平均累积概率分布函数的下限和上限, 如式(26)所示。

$$\begin{cases} \underline{F}(z) = \underline{P}(Z \in (-\infty, z)) = P_{\text{Bel}}^Z(Z \in (-\infty, z)) \\ \bar{F}(z) = \bar{P}(Z \in (-\infty, z)) = P_{\text{Pl}}^Z(Z \in (-\infty, z)) \end{cases} \quad (26)$$

由式(25)、(26)可见, 证据理论实现了对混合

问题式(20)的概率-模糊综合评估。

3.4 基于证据理论的概率-模糊能流综合分析

基于上述证据理论及其概率-模糊综合评估的基本思想, 实现区域 EGS 的综合分析和评估, 基本流程如图1所示。由图1可知, 本文所提区域 EGS 的概率-模糊综合分析方法主要包括内、外2个循环流程。外循环采用 LHS-MCS 方法实现对 EGS 能流的概率模拟, 内环基于 α -截集法实现对 EGS 能流的模糊分析, 最后基于证据理论计算信任度和似真度以实现区域 EGS 能流的概率-模糊综合分析。

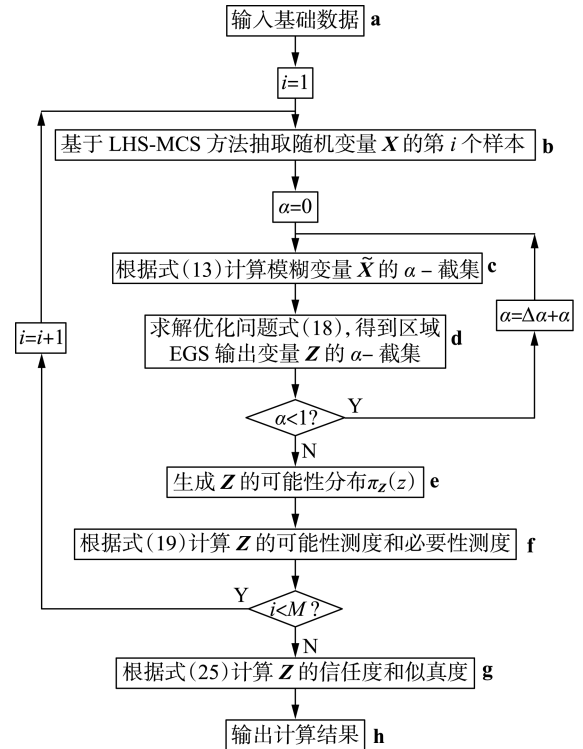


图1 区域 EGS 的概率-模糊能流综合分析流程

Fig.1 Flowchart of probabilistic-possibilistic energy flow comprehensive analysis for regional EGS

除了采用 LHS-MCS 方法外, 图1中的概率分析还可采用点估计、无迹变换等其他方法; 类似地, 也可基于灵敏度分析而非优化方法计算输出变量的可能性分布。

此外, 本文所提概率-模糊能流综合分析方法同样适用于单纯的概率/模糊能流分析。若仅进行概率能流分析, 只需将模糊变量视为确定性变量, 并省去图1中的内循环以及步骤 c、e—g, 此时, 步骤 d 的优化问题求解退化为一个确定性能流分析问题; 若仅进行模糊能流分析, 只需将随机变量视为确定性变量, 并省去图1中的外循环以及步骤 b、g。

4 算例分析

4.1 算例说明

以附录中图 A2 所示的区域 EGS 为例验证本文所提概率-模糊综合评估方法。该区域 EGS 由 33 节

点配电网和 11 节点配气网互联形成。33 节点配电网的负荷参数见文献[14];11 节点配气网与文献[6]中的天然气系统(NGS)2 一致。配电网中的节点 22 接有风电场 WF_1 和 WF_2 。风电场出力的 20% 通过 P2G 设备经节点 7 馈入配气网;燃气机组 NGU_1 和 NGU_2 的输出功率均为 0.1 MW,取 $\alpha_c = \gamma_c = 0, \beta_c = 7\,385 \text{ MJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。配气网中节点 9—11 的特殊用户要求的压力为 37 mbar,考虑配置电力驱动压缩机,采用出口压力固定的控制方式来满足其压力需求,取 $B_{c,ij} = 226.02, Z_{c,ij} = 0.233\,35$ 。

本文取文献[14]和文献[6]中的负荷为电、气负荷的均值,取均值的 5% 作为标准差;风速概率分布参数见附录中表 A1,表中 $\cos \varphi$ 为功率因数,其余参数含义见文献[9]。假设电、气负荷与风速间的相关系数为 $\rho_{EE} = \rho_{GG} = 0.6, \rho_{EG} = 0.4, \rho_{WW} = 0.8$ (下标 E、G、W 分别表示电、气负荷及风速)。基于文献[6]所给的数据,按照式(5)、式(6)计算各条管道综合参数的参考值 K_r (r 为管道编号),取 $[0.85K_r, 0.95K_r, 1.05K_r, 1.15K_r]$ 为对应管道综合参数的可能性分布;取 $[49\%, 55\%, 60\%, 65\%]$ 为 η_{P2G} 的可能性分布。

将本文所提评估方法与区域 EGS 能流的概率评估、模糊评估方法进行对比,验证本文所提概率-模糊综合评估方法的有效性。3 种方法的具体说明如下。

方法 1:区域 EGS 能流的概率评估方法。仅考虑电/气负荷及风速的概率不确定性,管道综合参数取基于文献[6]所给数据计算得到的值, $\eta_{P2G} = 57\%$ 。

方法 2:区域 EGS 能流的模糊评估方法。仅考虑 K_r 、 η_{P2G} 的模糊不确定性,电/气负荷及风速取其均值。

方法 3(本文所提方法):同时考虑区域 EGS 中的概率和模糊不确定性,对能流进行概率-模糊综合评估。

方法 1 和 3 中 LHS-MCS 方法的抽样次数取为 2 000;方法 2、3 中的 α -截集法取 $\Delta\alpha = 0.25$ 。

4.2 与概率方法的比较

以配气网中节点 7 的压力和配电网中节点 10 的 a 相电压为输出变量,方法 1 所得累积概率分布以及本文所提方法(方法 3)所得信任度和似真度分别如附录中图 A3、图 A4 所示(图 A4 中的 a 相电压幅值为标么值)。由附录中图 A3、图 A4 可见,概率分析方法(方法 1)给出了输出变量的累积概率分布,而本文所提方法(方法 3)给出了输出变量累积概率分布的上、下限。图 A3、图 A4 的结果表明,受模糊不确定因素的影响,无法准确地给定某一事件的概率,而只能给出事件概率的置信区间。因此,在对区域 EGS 的运行状态进行评估时,若忽略模糊不

确定因素的影响,很可能低估区域 EGS 的运行风险。具体说明如下。

a. 令事件 $E_1 = \{\text{配气网中节点 7 的压力 } p_7 \leq 35 \text{ mbar}\}$ 。由附录中图 A3 可见,当仅考虑概率不确定性时, E_1 发生的概率约为 0.2,而考虑模糊不确定性后, E_1 发生概率的置信区间约为 0~0.85,表明受模糊因素的影响, E_1 发生的概率出现了很大的不确定性。若区域 EGS 的运行要求 p_7 不能低于 35 mbar,则单纯的概率评估可能导致对区域 EGS 运行状态的评价过于乐观。

b. 令事件 $E_2 = \{\text{配电网中节点 10 的 a 相电压 } U_{10}^a \leq 0.95 \text{ p.u.}\}$ 。由附录中图 A4 可见,当仅考虑概率不确定性时, E_2 发生的概率为 0,而考虑模糊不确定性后, E_2 发生概率的置信区间约为 0~0.3。若取 0.95 p.u. 为节点 10 a 相电压的下限,则不考虑模糊不确定性会低估电压越限的可能性。

同时,比较附录中图 A3、图 A4 可以发现,配气网中节点 7 压力的信任度和似真度之间较大的间隔,而配电网中节点 10 电压的信任度和似真度之间的间隔则较小,事件 E_1 发生概率的置信区间也明显大于 E_2 ,表明配气网中节点 7 的压力受模糊不确定性的影响更大。这是因为本文所考虑的模糊不确定因素(K_r 和 η_{P2G})都存在于配气网,且节点 7 为 P2G 设备的接入节点,这些模糊不确定性经耦合设备传递给配电网,配电网的运行状态也因此受到影响,但其受影响程度小于配气网。

为了进一步分析不确定因素对配电网的影响,选择相电压不平衡度 ε 为衡量指标^[19],如式(27)所示。

$$\varepsilon = \frac{\max\{|U_i^a - \bar{U}_i|, |U_i^b - \bar{U}_i|, |U_i^c - \bar{U}_i|\}}{\bar{U}_i} \times 100\% \quad (27)$$

其中, U_i^φ 为节点 i 的 φ 相电压模值; $\bar{U}_i$ 为节点 i 三相电压模值的平均值。

应用本文所提方法,通过图 1 所示流程得到 ε 的隶属度曲线族,统计 $\alpha = 0$ 时各节点 ε 的上、下边界均值,如附录中图 A5 所示。图 A5 同时给出了方法 1 所得各节点电压 ε 的均值。

由图 A5 可见,概率方法仅能给出 ε 的均值,而本文所提方法可以给出其变化范围。同时,考虑模糊不确定因素后,配电网中各节点 ε 的均值的变化范围并不相同,其中,节点 10—18 的 ε 均值的变化范围最大,表明节点 10—18 受模糊不确定性的影响最为明显,这是因为节点 10—18 处于燃气机组 NGU_2 以及电力驱动压缩机附近,与配气网的耦合较紧密,这些节点同时又处于配电网的末端,因此受配气网运行状态的影响大。

4.3 与模糊方法的比较

以配气网中管道 11 的流量 f_{11} 为输出变量,方法

2 所得 f_{11} 的隶属度曲线如附录中图 A6(a) 所示,本文方法(方法 3)所得隶属度曲线族如附录中图 A6(b) 所示(为了方便表示,图 A6(b) 中仅给出了 10 条曲线)。

此外,取 $\alpha=0$ 、 $\alpha=1$ 这 2 个置信水平,令其 α -截集分别为 $f_{11}^0 = [\underline{f}_{11}^0, \bar{f}_{11}^0]$ 及 $f_{11}^1 = [\underline{f}_{11}^1, \bar{f}_{11}^1]$,附录中图 A7 给出了方法 3 所得 $\underline{f}_{11}^0$ 、 $\underline{f}_{11}^1$ 、 $\bar{f}_{11}^0$ 和 $\bar{f}_{11}^1$ 的概率密度曲线。

由附录中图 A6、图 A7 可知,模糊分析方法(方法 2)仅能给出确定的可能性分布,而应用本文所提方法可以同时分析可能性分布的概率特性。由图 A6(a) 可知 $f_{11}^0 = 12.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。令事件 $E_3 = \{f_{11} \leq 12.5 \text{ m}^3/\text{h}\}$,由图 A6(a) 易知 $\Pi(E_3) = N(E_3) = 0$,从模糊分析的角度来看, E_3 不可能出现;而图 A7 表明 f_{11}^0 以接近 50% 的概率处于 $0 \sim 12.5 \text{ m}^3/\text{h}$,说明 E_3 是完全有可能出现的。假设区域 EGS 为了满足气负荷需求,要求管道 11 的流量大于 $12.5 \text{ m}^3/\text{h}$,若不考虑电/气负荷以及风速等随机因素的影响,完全可能导致对管道 11 流量的乐观估计。

5 结论

EGS 中存在大量的不确定因素,而现有研究仅考虑了电、气负荷及风速等概率不确定因素对能流分布的影响。本文进一步考虑天然气管道参数及 P2G 设备的能量转换效率等设备参数的模糊不确定性,并提出区域 EGS 能流分布的概率-模糊综合评估方法。所提方法以 LHS-MCS 方法、 α -截集法和证据理论为基础,适用于区域 EGS 的概率评估、模糊评估以及概率-模糊综合评估。

以 33 节点中压配电网和 11 节点配气网构成的区域 EGS 为算例,通过概率评估、模糊评估以及综合评估 3 种方法的对比,验证了本文所提概率-模糊评估方法的有效性。

仿真结果表明,相较于概率评估或者模糊评估,本文所提方法能够同时考虑概率、模糊不确定性的影响,并实现区域 EGS 运行状态的综合评估;而忽略概率不确定性或模糊不确定性都可能出现过于乐观的评估结论而导致低估区域 EGS 的运行风险。

需要指出的是,本文虽以区域 EGS 为研究对象,但所提方法的基本思想同样适用于输电网与输气网互联形成的 EGS。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 张国荣,陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):1-7.
ZHANG Guorong, CHEN Xiaran. Future development of energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 1-7.

[2] LI Q, AN S, GEDRA T W. Solving natural gas loadflow problems using electric loadflow techniques [C] // Proceedings of the North American Power Symposium. Rolla, USA; IEEE, 2003: 1-7.
[3] MARTINEZ-MARES A, FUERTE-ESSQUEVEL C R. A unified gas and power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2156-2166.
[4] ZENG Q, FANG J, LI J, et al. Steady-state analysis of the integrated natural gas and electric power system with bi-directional energy conversion[J]. Applied Energy, 2016, 184: 1483-1492.
[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.
[6] 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):1293-1305.
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): 1293-1305.
[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.
CHEN 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.
[8] CHEN S, WEI Z N, SUN G Q, et al. Multi-linear probabilistic energy flow analysis of integrated electrical and natural-gas systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 1970-1979.
[9] HU Y, LIAN H R, BIE Z H, et al. Unified probabilistic gas and power flow[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(3): 400-411.
[10] GUYONNET D, BOURGINE B, DUBOIS D, et al. Hybrid approach for addressing uncertainty in risk assessments[J]. Journal of Environmental Engineering, 2003, 129(1): 68-78.
[11] BAUDRIT C, DUBOIS D, GUYONNET D. Joint propagation and exploitation of probabilistic and possibilistic information in risk assessment[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2006, 14(5): 593-608.
[12] SALICONE S. Measurement uncertainty—an approach via the mathematical theory of evidence [M]. New York, USA: Springer Science and Business Media, 2007: 93-105.
[13] 孙娟,卫志农,孙国强,等. 计及 P2H 的电-热互联综合能源系统概率能量流分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):62-68.
SUN Juan, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Analysis of probabilistic energy flow for integrated electricity-heat energy system with P2H[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 62-68.
[14] 刘一兵,吴文传,张伯明,等. 基于混合整数二阶锥规划的三相有源配电网无功优化[J]. 电力系统自动化,2014,38(15):58-64.
LIU Yibin, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Reactive power optimization for three-phase distribution networks with distributed generators based on mixed integer second-order cone programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 58-64.
[15] 罗兰,赵霞,颜伟,等. 考虑电源电压控制特性的不接地配电网改进三相潮流模型[J]. 电力系统自动化,2017,41(11):92-98.

- LUO Lan, ZHAO Xia, YAN Wei, et al. Improved three-phase power flow model for ungrounded distribution network considering controllability of line-to-line voltage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 92-98.
- [16] MOSKALENKO N, LOMBARDI P, KOMARNICKI P. Multi-criteria optimization for determining installation locations for the power-to-gas technologies [C] // 2014 IEEE PES General Meeting/Conference & Exposition. National Harbor, MD, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [17] 刘伟佳, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电转气技术的成本特征与运营经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 1-11.
- LIU Jiawei, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Cost characteristics and economic analysis of power-to-gas technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 1-11.
- [18] JENTSCH M, TROST T, STERNER M. Optimal use of power-to-gas energy storage systems in an 85% renewable energy scenario [J]. Energy Procedia, 2014, 46: 254-261.
- [19] 周林, 张有玉, 刘强, 等. 三相不平衡度算法的比较研究[J]. 华东电力, 2010, 38(2): 210-215.

ZHOU Lin, ZHANG Youyu, LIU Qiang, et al. Comparative study of three-phase unbalance algorithm [J]. East China Electric Power, 2010, 38(2): 210-215.

作者简介:



赵霞

赵霞(1975—),女,四川广元人,副教授,博士,主要研究方向为综合能源系统优化运行与风险评估(E-mail: zx@cqu.edu.cn);

胡潇云(1995—),女,四川广安人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统建模与分析(E-mail: huxiaoyun_1995@163.com);

com);

杨仑(1992—),男,湖北咸宁人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统建模与优化分析(E-mail: yanglun@cqu.edu.cn)。

Probabilistic-possibilistic energy flow evaluation of regional electricity-gas integrated system considering parameter uncertainties

ZHAO Xia, HU Xiaoyun, YANG Lun, YAN Wei

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: There are many uncertainties in the EGS (Electricity-Gas integrated System). However, the existing researches have only considered the influences of the probabilistic uncertainties of electricity/gas loads and wind power on the energy flow distribution of EGS. Therefore, the uncertainties of natural gas pipeline and electricity-gas coupling equipment parameters are further considered and the possibilistic model is proposed to describe these parameter uncertainties according to their features of imprecision and being influenced by subjective experiences. Based on this, a regional EGS formed by the coupling of medium-voltage distribution network and gas distribution network is taken as the object, and the probabilistic-possibilistic energy flow evaluation method for this regional EGS is proposed considering the above probabilities, possibilistic uncertainties and the asymmetric and ungrounded characteristics of medium-voltage distribution network. The proposed method is based on Monte Carlo simulation, α -cut set method and evidence theory and can be applied to pure probabilistic, pure possibilistic and probabilistic-possibilistic comprehensive evaluation of regional EGS energy flow. The effectiveness of the proposed method is verified by a regional EGS example composed of 33-bus medium voltage distribution network and 11-node gas distribution network. Simulative results demonstrate that the ignorance of the uncertainties of the natural gas pipeline and the coupling equipment parameters may lead to over-optimistic evaluation results of energy flow distribution, and thus the operational risk of regional EGS is underestimated.

Key words: regional electricity-gas system; probabilistic uncertainty; possibilistic uncertainty; energy flow analysis; Monte Carlo simulation; evidence theory; comprehensive evaluation

附录

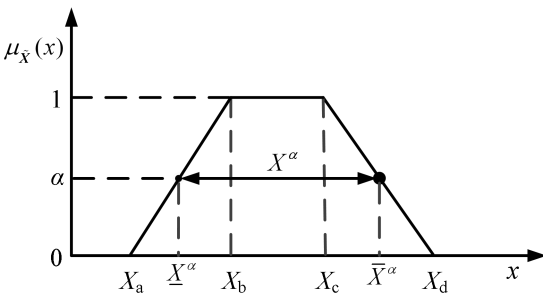


图 A1 $\tilde{X}$ 的隶属度函数

Fig.A1 Membership function of $\tilde{X}$

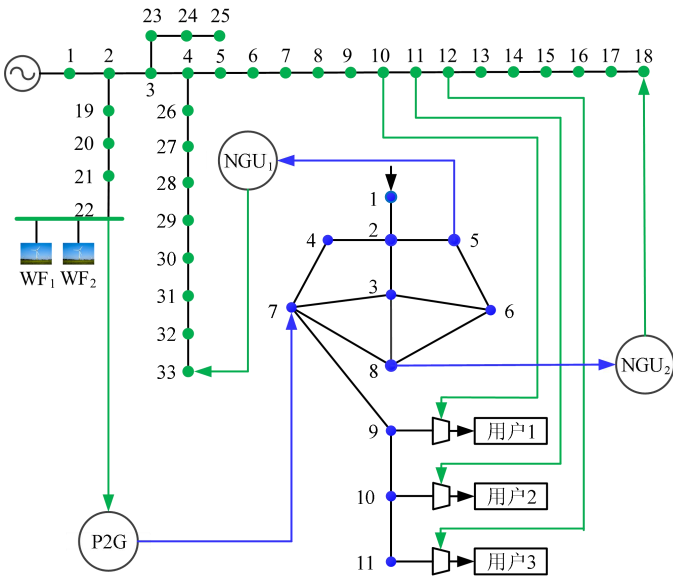


图 A2 区域 EGS 算例

Fig.A2 Example of regional EGS

表 A1 风电场参数

Table A1 Parameters of wind farms

风电场	P_N/MW	$v_{in}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_{out}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_{rated}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	b	a	$\cos\varphi$
WF ₁	0.75	3	14	25	1.4	6	0.85
WF ₂	0.75	3	13.5	20	1.8	7	0.85

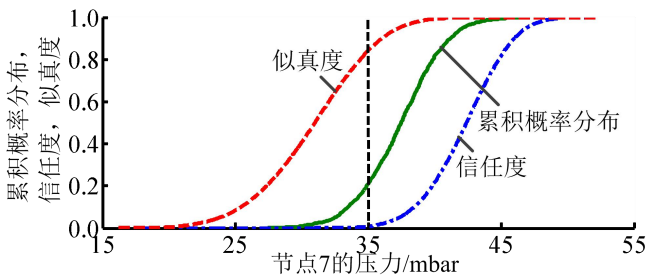


图 A3 配气网中节点 7 压力的累积概率分布、信任度、似真度

Fig.A3 Cumulative probability distribution, confidence degree and plausibility of Node 7 pressure in distribution gas network

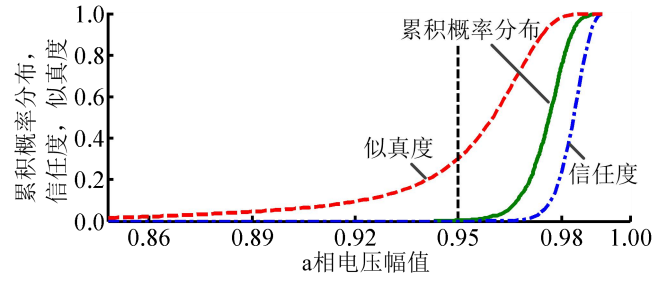


图 A4 配电网中节点 10 a 相电压幅值的累积概率分布、信任度、似真度
Fig.A4 Cumulative probability distribution, confidence degree and plausibility of
Bus 10 voltage magnitude in distribution network

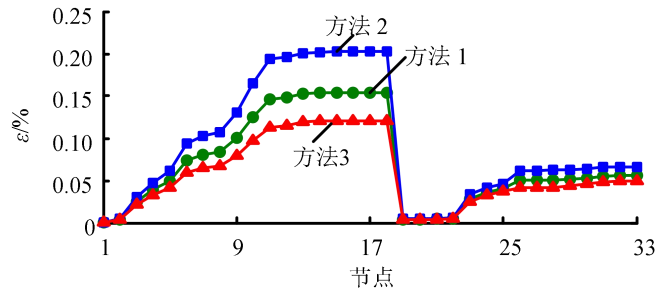


图 A5 节点相电压不平衡度均值
Fig.A5 Mean phase voltage unbalance degree of each bus

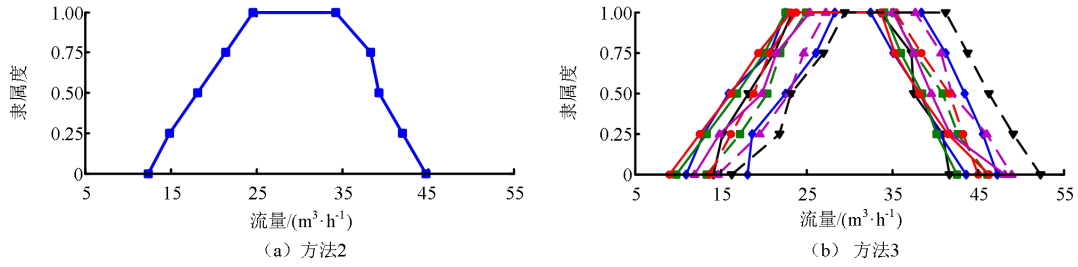


图 A6 管道 11 流量的隶属度函数
Fig.A6 Membership function of gas flow rate of Pipeline 11

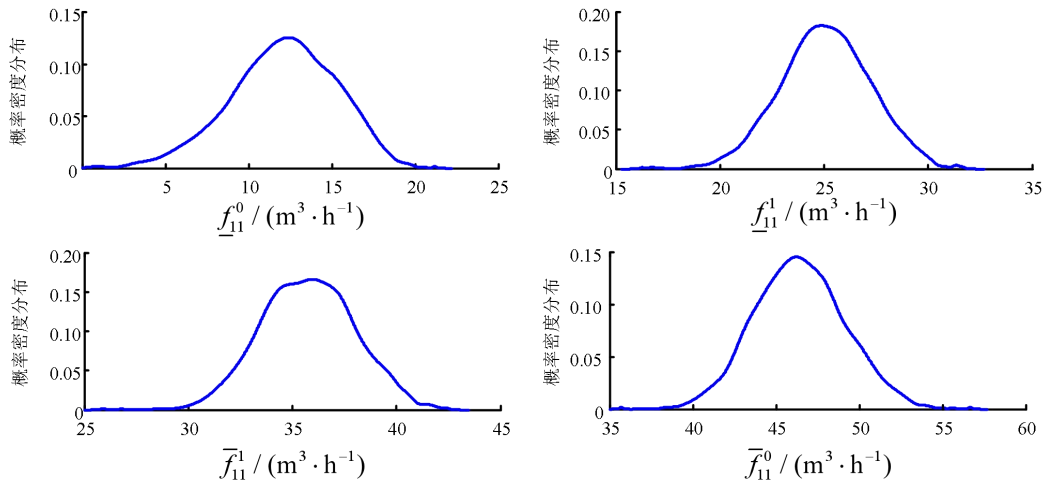


图 A7 管道 11 流量的概率密度分布
Fig.A7 Probability density distribution of gas flow rate of Pipeline 11