

基于随机响应面的电-气互联系统概率最优能流计算方法

杨鑫¹, 任洲洋¹, 郭冰², 丁岩³

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 2. 国网郑州供电公司, 河南 郑州 450006;
3. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450007)

摘要: 电-气互联系统(IEGS)作为一种新型能源供给模式,极具发展潜力。本文提出了一种基于随机响应面的电-气互联系统概率最优能流计算方法。首先,以IEGS总运行成本为目标,考虑电力系统、天然气系统的运行约束,并将电转气细分为电转氢气与电转天然气两种电-气耦合模式,建立了最优能流模型;然后,结合IEGS中不确定性因素的概率特性,建立概率最优能流模型,并采用随机响应面法与内点法求解。最后,以IEEE 39节点系统与20节点天然气系统组成的IEGS为例进行分析,仿真结果验证了本文所提方法的可行性。

关键词: 概率最优能流; 电-气互联系统; 随机响应面; 电转气

DOI: 10.12067/ATEEE2103003

文章编号: 1003-3076(2021)09-0001-09

中图分类号: TM744

1 引言

21世纪以来,随着能源危机与生态问题日益严峻,世界各国围绕着改善能源结构、提高能源利用效率开始了不同的探索与尝试^[1]。电-气互联系统(the Integrated Electric power and natural Gas System, IECS)将独立的电力系统、天然气系统视为一个整体进行规划与运行,具有灵活、高效、低碳等优势^[2-4],为未来能源形态的发展奠定了基础。伴随着燃气发电技术与电转气(Power to Gas, P2G)技术的不断进步,电力系统与天然气系统的耦合愈发紧密,因此IEGS的优化运行具有重要意义。

与电力系统类似,最优能流(Optimal Energy Flow, OEF)可以看作最优潮流在IEGS中的进一步拓展,目前已受到了广泛的关注与研究^[5-7]。然而,确定性的OEF难以面对新能源的持续波动^[8]以及电力/天然气负荷的变化,这可能使得优化结果过于理想。为此,计及不确定性因素的概率最优能流(Probabilistic Optimal Energy Flow, POEF)逐渐成为IEGS的研究热点之一。

POEF是指在已知新能源出力、电力/天然气负荷等控制变量概率特征条件下,根据设定的目标函数与约束条件,计算IEGS运行成本、新能源消纳电量等操作人员感兴趣的状态变量概率信息^[9]。目前,已有一些学者针对IEGS展开了与POEF相关的研究。POEF主要由概率分析方法与确定性OEF两部分组成。在有关IEGS的POEF文献中,涉及到的概率分析方法主要有蒙特卡洛(Monte Carlo, MC)方法^[10]与点估计法^[11-13](Point Estimate Method, PEM)两类。基于蒙特卡洛方法的概率最优能流计算方法(POEF based on Monte Carlo, POEF-MC)具有操作简单、精度高等特性^[10]。但是巨大的计算量限制了该方法的使用场合,一般只是将其作为验证其他方法的标准。因此,众多研究将PEM应用到POEF的计算中。文献[11]提出了一种基于PEM的POEF计算方法(POEF based on PEM, POEF-PEM)。在此基础上,文献[12]研究了考虑负荷之间相关性的IEGS运行成本的影响。文献[13]研究了IEGS考虑电转气机组的日前优化调度问题,进一步针对含大规模风电的输电系统,分析了电转气

收稿日期: 2021-03-01

基金项目: 重庆市院士牵头科技创新引导专项(cstc2018jcyj-yszxX0001)

作者简介: 杨鑫(1996-),男,四川籍,硕士研究生,研究方向为电-气互联系统运行;

任洲洋(1986-),男,河南籍,副教授,博士,研究方向为智慧能源优化运行与规划。

机组消纳风电的机理。文献[14]将 POEF-PEM 推广至电-气-热互联系统,并进一步考虑风速相关性对 IEGS 运行的影响。但是,PEM 需要依靠 Gram-Charlier 级数、Cornish-Fisher 级数或者 Edgeworth 级数才能拟合得到输出随机变量的累积概率曲线^[15]。这三种级数的鲁棒性与计算精度均难以保证,基于 Gram-Charlier 级数和 Edgeworth 级数可能计算出概率小于 0 的错误结果,而 Cornish-Fisher 级数在累积概率曲线尾部的拟合精度较差^[15,16]。因此需要研究一种新的概率分析方法解决此问题。在确定性 OEF 模型方面,现有研究主要以运行成本最小为目标建立优化运行模型^[12,13]。此外,电转气机组参与 IEGS 的耦合模式较为单一^[13,17],仅通过电转天然气作为电力系统到天然气系统的能量耦合路径。而文献[18]研究表明,天然气系统中可以充入一定量的氢气。在工业流程上电转氢气是电转天然气前序步骤,所以在转化效率与运行成本方面都比电转天然气更具有优势,但目前尚未有相关的 POEF 研究。

基于以上所述问题,本文考虑电转气机组的电转氢气与电转天然气两种电-气耦合模式,并提出了一种基于随机响应面^[16](Stochastic Response Surface Method, SRSM)的 POEF (POEF based on SRSM, POEF-SRSM)计算方法。首先,以电力系统、天然气系统运行约束,建立 IEGS 的确定性 OEF 模型;接着,考虑新能源机组出力、电力/天然气负荷概率特征,建立 IEGS 的 POEF 模型;然后采用 SRSM 与内点法求解;最后,通过算例分析验证本文所提方法的有效性。

2 IEGS 的 OEF 模型

2.1 IEGS 模型

2.1.1 天然气系统模型

(1)管道模型

本文研究稳态条件下的 IEGS 日前优化运行问题,天然气输气管道模型可采用 Weymouth 方程^[19]描述:

$$f_{km} = C_{km} \text{sign}(p_k, p_m) \sqrt{|p_k^2 - p_m^2|} \quad (1)$$

式中, f_{km} 为流经管道 $k-m$ 的气流量; C_{km} 为管道传输能力的常数; p_k, p_m 分别为节点 k 与节点 m 的气压; $\text{sign}(p_k, p_m)$ 为管道中天然气的实际流动方向,如果 $p_k > p_m$, 则取 1, 反之, 取 -1。流经管道的气流量应小于管道允许的最大值 f_{km}^{\max} , 即:

$$|f_{km}| \leq f_{km}^{\max} \quad (2)$$

(2)压缩机模型

天然气在传输过程中由于管道摩擦会损失部分能量,导致气压下降,因此需要为某些节点配备压缩机以满足系统运行条件。本文中的压缩机均由电力驱动,其数学模型可表示为:

$$r_{GC} = \frac{p_{GC,IN}}{p_{GC,OUT}} \quad (3)$$

$$P_{GC} = B_{GC} f_{GC} (r_{GC}^{Z_G} - 1) \quad (4)$$

式中, r_{GC} 为加压比; $p_{GC,IN}, p_{GC,OUT}$ 分别为压缩机的入口气压和出口气压; P_{GC} 为压缩机消耗的电功率; B_{GC} 为与压缩机工作效率相关的常数; f_{GC} 为流经压缩机的气流量; Z_G 为与天然气热值相关的常数。加压比 r_{GC} 需满足安全约束:

$$r_{GC}^{\min} \leq r_{GC} \leq r_{GC}^{\max} \quad (5)$$

式中, $r_{GC}^{\min}, r_{GC}^{\max}$ 分别为加压比的最小值与最大值。

(3)燃气轮机模型

燃气轮机出力 P_{GFC} 与所需天然气 f_{GFC} 之间的关系可采用式(6)拟合得到:

$$f_{GFC} = \frac{\alpha_{GFC} P_{GFC}^2 + \beta_{GFC} P_{GFC} + \gamma_{GFC}}{GHV_{CH_4}} \quad (6)$$

式中, $\alpha_{GFC}, \beta_{GFC}, \gamma_{GFC}$ 为拟合系数; GHV_{CH_4} 为天然气的总热值。

(4)电转气机组模型

电转气机组内部实际包括电解槽与甲烷反应器两部分^[20,21]。电解槽执行电转氢气 (Power to Hydrogen, P2H) 工艺,产生的氢气可以经甲烷反应器合成天然气^[22]。研究表明,天然气系统可以容纳少量氢气^[18]。因此,电转气机组可通过电转氢气与电转天然气两种电-气耦合模式实现电力系统到天然气系统的转化路径,进一步强化了 IEGS 内部的耦合程度。

电解槽产生的氢气流量 f_{H_2} 与消耗的电功率 P_{P2H} 满足:

$$f_{H_2} = \frac{\eta_{P2H} P_{P2H}}{GHV_{H_2}} \quad (7)$$

式中, η_{P2H} 为电解槽的效率; GHV_{H_2} 为氢气的总热值。电解槽输入功率 P_{P2H} 应该小于其装机容量 P_{P2H}^{\max} , 即:

$$0 \leq P_{P2H} \leq P_{P2H}^{\max} \quad (8)$$

电解槽产生的氢气再经甲烷反应器合成天然气,则天然气产量 f_{CH_4} 为:

$$f_{CH_4} = 0.25 \eta_{H_2C} f_{H_2, CH_4} \quad (9)$$

式中, 0.25 为单位体积氢气参与甲烷化反应生成的

天然气体积; η_{H_2G} 为甲烷反应器的效率; f_{H_2,CH_4} 为参与合成天然气的氢气流量。

氢气注入天然气系统会在一定程度上改变系统运行状态,但根据文献[18]可知注入少量氢气对节点气压的影响不大,因此本文不予讨论,而只考虑对天然气气井/储气站实际供气量的影响。下面分析氢气与天然气之间的折算关系。考虑到系统终端用户大多以燃烧的方式使用天然气。因此根据热值等价原则,取 $GHV_{H_2} = 18.79 \text{ MJ/m}^3$, $GHV_{CH_4} = 41.04 \text{ MJ/m}^3$,则氢气与天然气有如下关系:

$$f_{CH_4,H_2} = \frac{GHV_{H_2}}{GHV_{CH_4}} f_{H_2} = \frac{18.79}{41.04} f_{H_2} \approx 0.46 f_{H_2} \quad (10)$$

式中 f_{CH_4,H_2} 为氢气折算为天然气后的气流量。

电转气机组注入天然气系统的气流量总量 f_{P2G} 可表示为:

$$f_{P2G} = f_{CH_4,H_2} + f_{CH_4} = 0.46(f_{H_2} - f_{H_2,CH_4}) + f_{CH_4} \quad (11)$$

根据德国制定的相关标准^[23],系统中注入的氢气不得超过天然气总量的5%,则有:

$$f_{H_2} - f_{H_2,CH_4} \leq 5\% \times \left(\sum_{k \in \Omega_{GW}} f_{GW,k} + \sum_{k \in \Omega_{GS}} f_{GS,k} \right) \quad (12)$$

式中 Ω_{GW} 、 Ω_{GS} 分别为气井集合、储气站集合; $f_{GW,k}$ 、 $f_{GS,k}$ 分别为节点 k 处的气井、储气站注入的气流量。

(5) 气流平衡模型

对于天然气系统而言,其任意节点 k 满足广义的 KCL,即:

$$f_{GW,k} + f_{GS,k} + f_{P2G,k} + \sum_{m \in \Omega_k} f_{km} - f_{GL,k} - f_{Gfu,k} = 0 \quad (13)$$

式中 $f_{P2G,k}$ 为节点 k 处的电转气机组注入的气流量; $f_{GL,k}$ 、 $f_{Gfu,k}$ 分别为节点 k 处的天然气非燃气机组负荷以及燃气机组负荷; Ω_k 为与节点 k 相连节点的集合。

(6) 天然气系统其他约束

为保证天然气系统安全运行,还需要满足气井供应约束、储气站供应约束和节点气压约束:

$$f_{GW,k}^{\min} \leq f_{GW,k} \leq f_{GW,k}^{\max} \quad (14)$$

$$f_{GS,k}^{\min} \leq f_{GS,k} \leq f_{GS,k}^{\max} \quad (15)$$

$$p_k^{\min} \leq p_k \leq p_k^{\max} \quad (16)$$

式中 $f_{GW,k}^{\min}$ 、 $f_{GW,k}^{\max}$ 分别为节点 k 处气井的注入最小值与最大值; $f_{GS,k}^{\min}$ 、 $f_{GS,k}^{\max}$ 分别为节点 k 处储气站的注入最小值与最大值; p_k^{\min} 、 p_k^{\max} 分别为节点 k 的气压下限和上限。

2.1.2 电力系统模型

(1) 电力系统潮流模型

针对任意节点 i ,均满足潮流等式约束:

$$P_{GEN,i} - P_{L,i} - U_i \sum_{j \in \Omega_i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (17)$$

$$Q_{GEN,i} - Q_{L,i} - U_i \sum_{j \in \Omega_i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (18)$$

式中 $P_{GEN,i}$ 、 $Q_{GEN,i}$ 分别为机组发出的有功功率与无功功率; $P_{L,i}$ 、 $Q_{L,i}$ 分别为有功负荷与无功负荷; U_i 、 U_j 分别为节点 i 、节点 j 的电压幅值; θ_i 、 θ_j 分别为节点 i 与 j 的相角,相角差 $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为线路的电导与电纳; Ω_i 为与电力节点 i 相连节点的集合。

(2) 电力系统其他约束

除潮流约束以外,电力系统还需要满足发电机组有功与无功出力约束、节点电压约束、线路电流约束,即:

$$P_{GEN,i}^{\min} \leq P_{GEN,i} \leq P_{GEN,i}^{\max} \quad (19)$$

$$Q_{GEN,i}^{\min} \leq Q_{GEN,i} \leq Q_{GEN,i}^{\max} \quad (20)$$

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (21)$$

$$0 \leq I_{ij} \leq I_{ij}^{\max} \quad (22)$$

式中 $P_{GEN,i}^{\max}$ 、 $P_{GEN,i}^{\min}$ 分别为机组有功出力上、下限; $Q_{GEN,i}^{\max}$ 、 $Q_{GEN,i}^{\min}$ 分别为机组无功出力上、下限; U_i^{\max} 、 U_i^{\min} 分别为节点 i 的电压上、下限; I_{ij}^{\max} 为线路 $i-j$ 允许的最大电流。

2.2 OEF 模型

IEGS 的运行成本包括发电成本、购气成本、电转气机组运行成本。

发电成本由除燃气轮机以外的常规机组发电成本 $C_{CGU}(P_{CGU,i})$ 构成,计算公式如下所示:

$$C_{CGU}(P_{CGU,i}) = a_{CGU,i} P_{CGU,i}^2 + b_{CGU,i} P_{CGU,i} + c_{CGU,i} \quad (23)$$

$i \in \Omega_{CGU}$

式中 $a_{CGU,i}$ 、 $b_{CGU,i}$ 、 $c_{CGU,i}$ 为常规机组的发电价格系数; Ω_{CGU} 为常规机组集合; $P_{CGU,i}$ 为节点 i 处发电机的出力。

本文中天然气由气井与储气站供应,气井购气成本 $C_{GW}(f_{GW,k})$ 和储气站购气成本 $C_{GS}(f_{GS,k})$ 分别为:

$$C_{GW}(f_{GW,k}) = a_{GW,k} f_{GW,k} \quad k \in \Omega_{GW} \quad (24)$$

$$C_{GS}(f_{GS,k}) = \frac{1}{2} a_{GS,k} f_{GS,k}^2 \quad k \in \Omega_{GS} \quad (25)$$

式中 $a_{GW,k}$ 、 $a_{GS,k}$ 分别为气井与储气站购气价格系数。

电转气机组运行成本可分为购电成本与原料成

本,而购电成本已包括在系统的发电成本当中,故此处不再计算。原料成本 $C_{P2G}(f_{CH_4,k})$ 是指甲烷反应器所需的二氧化碳成本^[21],即:

$$C_{P2G}(f_{CH_4,k}) = a_{CO_2,k} f_{CH_4,k} \quad k \in \Omega_{P2G} \quad (26)$$

式中, $a_{CO_2,k}$ 为二氧化碳的价格系数; Ω_{P2G} 为电转气机组的集合; $f_{CH_4,k}$ 为节点 k 处由电转气机组注入的天然气流量。

以 IEGS 运行成本最小为目标函数建立日前优化调度模型,即:

$$\begin{cases} \min \sum_{i \in \Omega_{CGU}} C_{CGU}(P_{CGU,i}) + \sum_{k \in \Omega_{GW}} C_{GW}(f_{GW,k}) + \\ \sum_{k \in \Omega_{GS}} C_{GS}(f_{GS,k}) + \sum_{k \in \Omega_{P2G}} C_{P2G}(f_{CH_4,k}) \\ \text{s.t. 式(1) ~ 式(22)} \end{cases} \quad (27)$$

3 基于 SRSM 的 POEF 计算方法

3.1 随机变量模型

本文假设 IEGS 中的电力负荷、天然气负荷、风电场风速均满足以正态分布,并以预测值为均值,均值的 $\alpha\%$ 作为标准差^[13],则其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (28)$$

式中, x 为电力/天然气负荷值或风速; μ 、 σ 分别为均值和标准差。

3.2 SRSM 的基本原理

SRSM 的基本思路是通过混沌多项式函数 $f(\cdot)$ 将输出随机变量 Y (例如:运行成本、新能源消纳电量等) 表示为输入随机变量 X (例如:电力/天然气负荷) 的函数,即 $Y=f(X)$ 。然后根据 X 的概率分布抽取一定个数的样本,再进行确定性 OEF 计算,从而确定混沌多项式 $f(X)$ 中的待定系数,最后即可获取 Y 的概率分布。下面介绍 SRSM 的主要内容。

3.2.1 输入随机变量标准化

SRSM 要求输入随机变量 X 彼此相互独立,并且服从同一种标准分布。如果输入随机变量之间存在相关性,可参考文献[24]做去相关性处理。关于输入随机变量的标准化处理,虽然从理论上而言并不存在一个统一且固定的标准分布,但是考虑到标准正态分布 $N(0, 1)$ 在数学领域内的相关理论与技术已非常成熟,故在本文中将其作为 SRSM 的标准分布。

假设 IEGS 中共有 n 个输入随机变量,记为: $X =$

$[X_1, X_2, \dots, X_n]^T$, X_i 的分布函数为 $F_i(x_i)$, 其反函数为 $F_i^{-1}(x_i)$ 。服从标准正态分布的随机变量 $\xi = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n]^T$, ξ_i 的分布函数为 $\Phi(\xi_i)$ 。基于式(29)所示的等概率转换原则^[25], 可以将服从不同分布的随机变量 x_i 统一转化为服从标准正态分布的随机变量 ξ_i 。

$$x_i = F_i^{-1}(\Phi(\xi_i)) \quad (29)$$

3.2.2 混沌多项式展开

输入随机变量 X 经过上述标准化后变换为服从标准正态分布的 ξ 。基于 Hermite 正交多项式可以将输出随机变量 Y 表示为 ξ 的混沌多项式,解析表达如下所示:

$$Y = a_0 + \sum_{i_1=1}^n a_{i_1} H_1(\xi_{i_1}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} a_{i_1 i_2} H_2(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} \sum_{i_3=1}^{i_2} a_{i_1 i_2 i_3} H_3(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \xi_{i_3}) + \dots \quad (30)$$

式中, n 为输入随机变量的个数; a_0 、 a_{i_1} 、 $a_{i_1 i_2}$ 、 $a_{i_1 i_2 i_3}$ 为待定系数; $H_m(\cdot)$ 为 m 阶 Hermite 正交多项式,并将式(30)中 m 的最大取值作为混沌多项式的阶数。可知式(30)中待定系数总个数 N_a 为:

$$N_a = \frac{(m+n)!}{m! n!} \quad (31)$$

Hermite 正交多项式在不同领域内的定义各不相同。在概率分析领域中, Hermite 正交多项式满足如下正交关系:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} H_p(x) H_q(x) dx = 0 \quad p \neq q \quad (32)$$

由式(32)可得 m 阶 n 维 Hermite 正交多项式的解析表达式为^[26]:

$$H_m(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \dots, \xi_{i_m}) = (-1)^m e^{\frac{1}{2}\xi_u^T \xi_u} \frac{\partial^m e^{-\frac{1}{2}\xi_u^T \xi_u}}{\partial \xi_{i_1} \partial \xi_{i_2} \dots \partial \xi_{i_m}} \quad (33)$$

$$\xi_u = [\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \dots, \xi_{i_k}]$$

$$i_1 \neq i_2 \dots \neq i_k, i_k \leq n, k = 1, 2, \dots, m \quad (34)$$

由式(34)可计算任意阶数、维数的 Hermite 正交多项式。下面列举一维 Hermite 正交多项式的前三阶展开式:

$$\begin{cases} H_0(\xi) = 1 \\ H_1(\xi) = \xi \\ H_2(\xi) = \xi^2 - 1 \\ H_3(\xi) = \xi^3 - 3\xi \end{cases} \quad (35)$$

由式(33)~式(35)并结合式(30)可进一步计

算得到输出随机变量 Y 的二阶与三阶混沌展开式:

$$Y_2 = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \xi_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} (\xi_i^2 - 1) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i}^n a_{ij} \xi_i \xi_j \quad (36)$$

$$Y_3 = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \xi_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} (\xi_i^2 - 1) + \sum_{i=1}^n a_{iii} (\xi_i^3 - 3\xi_i) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i}^n a_{ij} \xi_i \xi_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} (\xi_i \xi_j^2 - \xi_i) + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j>i}^{n-1} \sum_{k>j}^n a_{ijk} \xi_i \xi_j \xi_k \quad (37)$$

由式(31)可知,二阶与三阶混沌展开式中需要确定的待定系数总个数分别为:

$$N_{a,2} = \frac{(n+2)(n+1)}{2} \quad (38)$$

$$N_{a,3} = \frac{(n+3)(n+2)(n+1)}{6} \quad (39)$$

对比式(38)、式(39)可知,当混沌展开式阶数越高,待定系数个数也会随之剧增。已有研究表明,当混沌多项式的阶数 ≥ 3 时,计算精度不会随着阶数的增加而明显提升。因此,采用二阶或者三阶混沌展开式通常能够使计算精度与效率达到平衡^[27]。

3.2.3 待定系数计算方法

(1) 待定系数计算步骤

待定系数的计算是 SRSM 的关键环节,下面先介绍其主要步骤:

1) 选取一定数量的配点(即标准化输入随机变量 ξ 的样本),形成配点组合。

2) 根据等概率转换原则式(29),依次将每一组配点转换为原始输入随机变量的样本,并进行确定性 OEF 计算,得到本组配点对应的输出值。

3) 假定配点的输出值与混沌多项式的估计值相同,并根据混沌多项式(30)、配点组合以及根据配点组合计算得到的输出值,建立关于待定系数的线性方程组。

4) 通过求解线性方程组即可确定混沌多项式中的待定系数。

下面以含有两个负荷随机变量的 IEGS 为例具体说明求解待定系数的思路。现假设采用二阶混沌展开式进行计算,则待定系数的个数 $N_a = 6$,待定系数 $\mathbf{a} = [a_0, a_1, a_2, a_{12}, a_{11}, a_{22}]^T$,待定系数矩阵 \mathbf{H} 为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & \xi_{11} & \xi_{21} & \xi_{11}\xi_{21} & \xi_{11}^2 - 1 & \xi_{21}^2 - 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \xi_{1j} & \xi_{2j} & \xi_{1j}\xi_{2j} & \xi_{1j}^2 - 1 & \xi_{2j}^2 - 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \xi_{1M} & \xi_{2M} & \xi_{1M}\xi_{2M} & \xi_{1M}^2 - 1 & \xi_{2M}^2 - 1 \end{bmatrix} \quad (40)$$

式中, ξ_{ij} 为第 i 个标准化输入随机变量的第 j 个配点值, $i=1, 2, j=1, 2, \dots, M$ 。 M 个配点对应的输出值为 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_M]$, 那么,关于待定系数 \mathbf{a} 的线性方程组为:

$$\mathbf{H}\mathbf{a} = \mathbf{Y} \quad (41)$$

如果选取的配点组合个数 M 等于待定系数个数 N_a , 则可直接计算待定系数, 即: $\mathbf{a} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{Y}$; 若配点组合个数 $M > N_a$, 需要通过最小二乘拟合计算待定系数 $\mathbf{a}^{[27]}$ 。

(2) 配点选取方法

对于 m 阶混沌展开式而言, 一般将 $(m+1)$ 阶一维 Hermite 多项式的根进行组合作为待选配点。因此, 对于含 n 个输入随机变量的 m 阶混沌展开式而言, 可供选择的配点数 N_c 为:

$$N_c = (m+1)^n \quad (42)$$

故二阶或三阶混沌展开式的可选配点数分别为 3^n 和 4^n 。不难发现, 这比各自的待定系数个数 $N_{a,2}$ 、 $N_{a,3}$ 大得多。显然, 配点的选取会直接影响计算精度。本文采用基于线性无关原则选取配点^[28], 该方法能够在保证计算精度的同时尽可能地减小计算量。下面介绍其具体步骤:

1) 随机组合 0 及 $(m+1)$ 阶 Hermite 正交多项式的根, 生成初始配点集合 Ω_ξ 。

2) 从集合 Ω_ξ 依次选取与待定系数的个数 N_a 相同数量的配点, 形成配点组合 $\Omega_c = [\xi_1, \xi_1, \dots, \xi_{N_a}]$, 并计算系数矩阵 \mathbf{H} 。

3) 记系数矩阵 \mathbf{H} 的秩为 R_H , 若 $R_H = N_a$, 则认为当前的配点组合 Ω_c 为最优配点组合, 配点选取操作结束; 否则, 剔除当前的配点组合 Ω_c 中 $(N_a - R_H)$ 个线性相关的配点, 再从集合 Ω_ξ 中选出 $(N_a - R_H)$ 个配点形成新的配点组合 Ω_c , 重复步骤 3)。

3.3 POEF-SRSM 计算流程

本文采用 POEF-SRSM 完成 IEGS 日前优化运行计算。POEF-SRSM 的计算流程如图 1 所示。具体计算步骤如下:

(1) 读取 IEGS 参数、随机变量概率模型等信息。

(2) 基于线性无关原则选取配点, 然后根据式 (29) 将配点组合依次转化为服从指定分布的原始输入随机变量样本。

(3) 依次抽取原始输入随机变量样本, 并利用内点法求解 OEF。

(4) 求解线性方程组式 (41), 根据得到的待定系数估计输出随机变量的统计信息与概率分布。

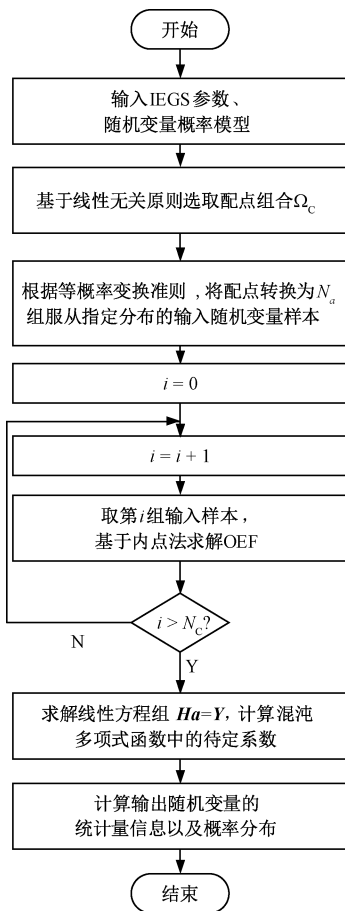


图1 POEF-SRSM 计算流程图

Fig.1 Flowchart of POEF-SRSM

4 算例分析

4.1 算例说明

本文采用 IEEE 39 节点系统与天然气 20 节点系统组成的 IEGS^[29] 进行仿真分析。天然气系统拓扑如图 2 所示。耦合设备连接信息见表 1。两个装机容量为 900 MW 的风电场站分别接在电力节点 32 和节点 33。假设电力/天然气负荷、风速均服从正态分布, 并以预测值为均值, 均值的 2% 作为标准差。电解槽效率 $\eta_{\text{P2H}} = 85\%$, 甲烷反应器的效率 $\eta_{\text{H2G}} = 80\%$ 。

4.2 POEF-SRSM 的准确性验证

本文采用 POEF-MC 方法进行 5 000 次拉丁方抽样模拟所得结果作为参考标准, 以验证本文所提方法的准确性。表 2 给出了节点电压、节点气压的均值与标准差的误差。总体来说, 状态变量的均值与标准差的最大误差都不超过 4%, 平均误差均不超过 2%。可见 POEF-SRSM 具有较高的计算精度。在计算效率方面, POEF-SRSM 相比于 POEF-MC 提高了约 94%。

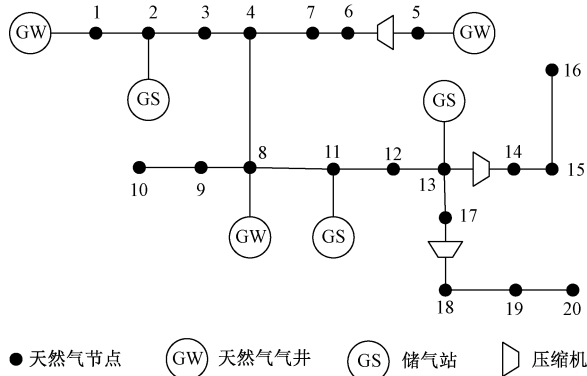


图2 20节点天然气系统拓扑

Fig.2 Topology of 20-node gas system

表1 耦合元件连接信息

Tab.1 Coupling facilities connection information

耦合设备	电网节点	气网节点 20-node
燃气轮机 1	30	3
燃气轮机 2	36	20
燃气轮机 3	37	12
压缩机 1	30	5, 6
压缩机 2	36	13, 14
压缩机 3	39	17, 18
电转气机组 1	32	5
电转气机组 2	33	8

表2 POEF-SRSM 计算误差

Tab.2 Calculation errors of POEF-SRSM

对比项	均值百分误差 (%)		标准差百分误差 (%)	
	最大值	平均值	最大值	平均值
节点电压	0.052	0.008 3	2.52	1.03
节点气压	0.039	0.011	3.31	0.79

4.3 场景说明

为分析 IEGS 的运行特性以及电转气机组耦合模式对系统运行的影响, 本文设置以下 3 种场景:

场景 1: 电力系统与天然气系统独立运行。

场景 2: 电力系统与天然气系统联合运行, 并且电转气机组仅以电转天然气耦合模式运行。

场景3:电力系统与天然气系统联合运行,并且电转气机组以电转天然气与电转氢气两种耦合模式运行。

4.4 IECS 运行分析

表3给出了各个场景下IECS的运行成本。场景2与场景3的系统总运行成本比场景1分别下降了约1.92%、4.46%。这说明电力系统与天然气系统联合运行有利于降低系统总运行成本,体现了IECS在经济运行方面的优势。场景1~3的弃风量与弃风率如表4所示。在场景1中,电力系统单独运行,由于风电场站本地负荷一般难以完全就地消纳,其次考虑到节点电压与输电线路的传输功率限制,故弃风问题比较明显。而在场景2与场景3中,电力系统与天然气系统联合运行,风电场站可以通过电转气机组将富裕的电能转化为天然气或者氢气输送到天然气系统,此时弃风问题得以显著改善。具体而言,场景2与场景3都是通过电解槽达到充分消纳多余风电的效果,所以二者的弃风率并无明显差别。

表3 场景1~3的运行成本

Tab.3 Operation costs under Case 1~3

(单位:千\$)

成本	场景1	场景2	场景3
总运行成本	3 075.51	3 016.37	2 938.37
发电成本	1 237.07	353.75	412.05
购气成本	1 838.45	2 637.28	2 515.75
电转气机组运行成本	—	25.34	10.56

表4 场景1~3的弃风量

Tab.4 Curtailed wind power under Case 1~3

弃风指标	场景1	场景2	场景3
弃风量/MW	3 171.34	0	0
弃风率(%)	19.59	0	0

4.5 电转气机组耦合模式分析

由表3可知,场景2的IECS运行成本为3 016千\$,而额外考虑电转氢气耦合模式的场景3成本为2 938千\$,相比于场景2降低了约2.59%,可以看出IECS运行成本受电转气机组耦合模式的直接影响。这是因为电转氢气耦合模式不需要额外购买CO₂,直接利用风电场站的清洁电力制取氢气,从而大大降低了电转气机组的原料成本。另一方面,这部分氢气还起到能够替代部分天然气的作用。根据热值等效原则式(10)可知,单位时间内体积为 f_{H_2} 的氢气可等效为 $0.46f_{H_2}$ 的天然气;若这部分氢气

全部参与甲烷反应器合成天然气,由式(9)可知生成的天然气体积约为 $0.2f_{H_2}$,即电解槽得到的氢气可替代约2.3倍由甲烷反应器生成的天然气。因此,电转氢气耦合模式相比于电转天然气模式可以更进一步减少天然气系统向气井/储气站的购气量,进而减少购气成本,最后使得IECS运行成本也随之降低。

5 结论

本文考虑了电转气机组的电转氢气与电转天然气两种电-气耦合模式,并提出了一种基于随机响应面的电-气互联系统概率最优能流计算方法。所得结论如下:

(1) POEF-SRSM计算方法具有与POEF-MC相近的精度,在求解效率上具有明显优势。

(2) 电力系统与天然气系统联合运行有助于缓解风电场站的弃风问题,降低系统运行成本。

(3) 电转气机组的电转天然气与电转氢气两种电-气耦合模式对风电消纳均具有积极作用。而电转氢气耦合模式避免了CO₂购买成本,同时相比于电转天然气耦合模式可以进一步减少天然气系统向气井/储气站的购气量,从而降低IECS的运行成本。

参考文献 (References):

- [1] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等 (Yu Xiaodan, Xu Xian-dong, Chen Shuoyi, et al.). 综合能源系统与能源互联网简述 (A brief review to integrated energy system and energy internet) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (1): 1-13.
- [2] 陆家亮,赵素平 (Lu Jialiang, Zhao Suping). 中国能源消费结构调整与天然气产业发展前景 (Optimization of energy consumption structure and natural gas industry development prospect in China) [J]. 天然气工业 (Natural Gas Industry), 2013, 33 (11): 9-15.
- [3] Omalley M, Kroposki B. Energy comes together: The integration of all systems [J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2013, 11 (5): 18-23.
- [4] 窦迅,赵文浩,郎伊紫禾,等 (Dou Xun, Zhao Wen-hao, Lang Yizihe, et al.). 计及电转气技术的天然气-电力耦合系统运行研究综述 (A review of operation of natural gas-electricity coupling system considering power-to-gas technology) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2019, 43 (1): 165-173.
- [5] Chen S, Wei Z, Sun G, et al. Identifying optimal energy

- flow solvability in electricity-gas integrated energy systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8 (2): 846-854.
- [6] Fang J, Zeng Q, Ai X, et al. Dynamic optimal energy flow in the integrated natural gas and electrical power systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9 (1): 188-198.
- [7] Shabanpour-Haghighi A, Seifi A R. Simultaneous integrated optimal energy flow of electricity, gas, and heat [J]. Energy Conversion & Management, 2015, 101: 579-591.
- [8] 孙珂, 孟健, 程林, 等 (Sun Ke, Meng Jian, Cheng Lin, et al.). 考虑最小弃风的风电场接入容量与位置优化方法 (Wind farm access capacity and access location optimization method aiming at minimum wind abandonment) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (8): 40-46.
- [9] Zhang N, Cheng J, Wang Y. Probabilistic optimal energy flow of district multienergy systems: An MPLP-based online dictionary-learning approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15: 4867-4877.
- [10] Chen S, Wei Z, Sun G, et al. Multilinear probabilistic energy flow analysis of integrated electrical and natural-gas systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32 (3): 1970-1979.
- [11] 张博文, 孙永辉, 张世达 (Zhang Bowen, Sun Yonghui, Zhang Shida). 基于 SOCP 的综合能源系统日前调度概率最优能量流 (Second-order cone programming based probabilistic optimal energy flow of day-ahead dispatch for integrated energy system) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2019, 43 (6): 25-33.
- [12] 孙国强, 陈霜, 卫志农, 等 (Sun Guoqiang, Chen Shuang, Wei Zhinong, et al.). 计及相关性的电气互联系统概率最优潮流 (Probabilistic optimal power flow of combined natural gas and electric system considering correlation) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power System), 2015, 39 (21): 11-17.
- [13] Sun G, Chen S, Wei Z, et al. Multi-period integrated natural gas and electric power system probabilistic optimal power flow incorporating power-to-gas units [J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2017, 5 (3): 412-423.
- [14] 韩佶, 苗世洪, 李超, 等 (Han Ji, Miao Shihong, Li Chao, et al.). 计及相关性的电-气-热综合能源系统概率最优能量流 (Probabilistic optimal energy flow of electricity-gas-heat integrated energy system considering correlation) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2019, 34 (5): 1055-1067.
- [15] Fan M, Vittal V, Heydt G, et al. Probabilistic power flow studies for transmission systems with photovoltaic generation using cumulants [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27 (4): 2251-2261.
- [16] Ren Z, Li W, Billinton R, et al. Probabilistic power flow analysis based on the stochastic response surface method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31 (3): 2307-2315.
- [17] 董帅, 王成福, 梁军, 等 (Dong Shuai, Wang Chengfu, Liang Jun, et al.). 计及电转气运行成本的综合能源系统多目标日前优化调度 (Multi-objective optimal day-ahead dispatch of integrated energy system considering power-to-gas operation cost) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power System), 2018, 42 (11): 8-15, 121.
- [18] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等 (Wang Weiliang, Wang Dan, Jia Hongjie, et al.). 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 (Steady state analysis of electricity-gas regional integrated energy system with consideration of NGS network status) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (5): 1293-1305.
- [19] Wolf D, Smeers Y. The gas transmission problem solved by an extension of the simplex algorithm [J]. Management Science, 2000, 46 (11): 1454-1465.
- [20] 闫存极, 李鑫, 窦立广, 等 (Yan Cunji, Li Xin, Dou Liguang, et al.). 电转甲烷储能技术的研究进展 (Research progress of power-to-methane energy storage technology) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (9): 42-51.
- [21] Parra D, Zhang X, Bauer C, et al. An integrated techno-economic and life cycle environmental assessment of power-to-gas systems [J]. Applied Energy, 2017, 193: 440-454.
- [22] Götz M, Lefebvre J, Mörs F, et al. Renewable power-to-gas: A technological and economic review [J]. Renewable Energy, 2016, (85): 1371-1390.
- [23] Schiebahn S, Grube T, Robinius M, et al. Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40 (12): 4285-4294.
- [24] 任洲洋 (Ren Zhouyang). 光伏时空概率模型及其在电力系统概率分析中的应用 (Research on the chronological and spatial modeling methods of photovoltaic generation and their application in the probabilistic analysis of

- power systems) [D]. 重庆: 重庆大学 (Chongqing: Chongqing University), 2014.
- [25] Isukapalli S. Uncertainty analysis of transport-transformation models [D]. New Jersey: The State University of New Jersey, 1999.
- [26] Huang S, Mahadevan S, Rebba R. Collocation-based stochastic finite element analysis for random field problems [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2007, 22 (2): 194-205.
- [27] 鲍海波, 韦化 (Bao Haibo, Wei Hua). 考虑风电的电压稳定概率评估的随机响应面法 (A stochastic response surface method for probabilistic evaluation of the voltage stability considering wind power) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2012, 32 (13): 77-85.
- [28] 蒋水华, 李典庆, 周创兵 (Jiang Shuihua, Li Dianqing, Zhou Chuangbing). 随机响应面法最优概率配点数目分析 (Optimal probabilistic collocation points for stochastic response surface method) [J]. 计算力学学报 (Chinese Journal of Computational Mechanics), 2012, 29 (3): 345-351.
- [29] Yang L, Xu Y, Sun H, et al. Two-stage convexification-based optimal electricity-gas flow [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11 (2): 1465-1475.

Probabilistic optimal energy flow of the integrated electric power and natural gas system using stochastic response surface method

YANG Xin¹, REN Zhou-yang¹, GUO Bing², DING Yan³

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2.State Grid Zhengzhou Electric Power Supply Company, Zhengzhou 450006, China;

3.State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: The integrated electric power and natural gas system (IEGS) has great potential for development as a new energy supply mode. This paper proposes a probabilistic optimal energy flow analysis method based on stochastic response surface method. First, the mode of a power to gas unit is divided into power to hydrogen mode and power to gas mode, and the optimal energy flow model is established by considering the operating constraints of the power system and natural gas system. According to the probability characteristics of the uncertain factors in IEGS, a probabilistic optimal energy flow model is built and solved by stochastic response surface method and interior point method. Finally, the feasibility of the method proposed is verified using the IEEE-39 bus and 20-node natural gas system.

Key words: probabilistic optimal energy flow; integrated electric power and natural gas system; stochastic response surface method; power to gas