

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240354

# 基于改进随机响应面法的电-气-热区域综合能源系统概率能量流计算

沈赋<sup>1</sup>, 张宇涛<sup>1</sup>, 王健<sup>1</sup>, 杨光兵<sup>1</sup>, 陈雪鸥<sup>2</sup>, 曹旻<sup>1</sup>, 翟苏巍<sup>3</sup>

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南电网有限责任公司培训与评价中心, 云南 昆明 650106; 3. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

**摘要:** 考虑风光出力的相关性及其不确定性对电-气-热区域综合能源系统(regional integrated energy systems, RIES)的影响日渐明显, 通过对电-气-热 RIES 概率能量流的分析可直观地反映其运行状态的变化。首先, 计及风光出力相关性与随机变量不确定性, 建立含风电、光伏的电-气-热 RIES 能量流计算模型。其次, 采用 Galerkin 投影法优化随机响应面法(stochastic response surface method, SRSM)来求解电-气-热 RIES 概率能量流, 得到各能量流状态变量的概率分布, 定量评估光伏出力与风电出力相关性对 RIES 概率能量流的影响。最后, 采用 IEEE 30 节点电力系统/IEEE 69 节点电力系统、20 节点热力系统、24 节点天然气系统构成电-气-热 RIES 对所提模型和求解方法进行验证。通过分析光伏出力与风电出力相关性和不确定性对概率能量流的影响, 验证所提模型的有效性和适用性以及求解方法的准确性和快速性。

**关键词:** 区域综合能源系统; 概率能量流; 相关性; 随机响应面法; Galerkin 投影法

## Probabilistic energy flow calculation for regional integrated electricity-gas-heat energy systems based on an improved stochastic response surface method

SHEN Fu<sup>1</sup>, ZHANG Yutao<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, YANG Guangbing<sup>1</sup>, CHEN Xueou<sup>2</sup>, CAO Yang<sup>1</sup>, ZHAI Suwei<sup>3</sup>

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500;  
2. Training and Evaluation Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650106, China;  
3. China Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

**Abstract:** As the impact of the correlation and uncertainty of photovoltaic (PV) and wind power generation on electricity-gas-heat regional integrated energy systems (RIES) becomes more pronounced, analyzing the probabilistic energy flow of the electricity-gas-heat RIES can provide an intuitive reflection of its operational state changes. First, considering the correlation between PV and wind power generation and the uncertainty of random variables, an energy flow calculation model for an electricity-gas-heat RIES that includes PV and wind power is established. Then, a stochastic response surface method (SRSM) optimized by the Galerkin projection method is proposed to calculate the RIES energy flow, and the probability distributions of the state variables of the energy flow are obtained to quantitatively assess the impact of the correlation between PV and wind power on the probabilistic energy flow of the RIES. Finally, the proposed model and the solution method are validated using an RIES formed by the IEEE 30-node power system/IEEE 69-node power system, 20-node heat system, and 24-node natural gas system. The validity and applicability of the proposed model and the accuracy and speed of the solution method are verified by analyzing the effects of the correlation between PV power and wind power on the probabilistic energy flow.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52107097).

**Key words:** regional integrated energy system; probabilistic energy flow; correlation; stochastic response surface method; Galerkin projection method

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52107097); 云南省应用基础研究计划项目资助(202101BE070001-061, 202201AU070111); 昆明理工大学高层次人才平台建设项目资助(KKZ7202004004); 云南省兴滇英才支持计划项目资助(KKRD202204021)

## 0 引言

在“双碳”目标下，含可再生能源的区域综合能源系统具有多能互补、绿色清洁、无污染等优点，受到广泛的关注和重视<sup>[1-2]</sup>。由于区域综合能源系统(regional integrated energy systems, RIES)涵盖供电、供热、供气等多种能源形式的能源系统<sup>[3-4]</sup>，同时存在可再生能源间歇性出力、负荷波动等不确定性因素，因此对于 RIES 的建模以及能量流计算提出了更高的要求<sup>[5]</sup>。

对于电力系统而言，计算概率潮流的方法主要分为模拟法<sup>[6-9]</sup>、近似法<sup>[10]</sup>、解析法<sup>[11]</sup>三类。模拟法中蒙特卡洛模拟(Monte Carlo simulation, MCS)原理简单，易于实现，在对大规模的样本进行运算后，计算结果精确，可用于检验潮流计算的准确性<sup>[12]</sup>。近似法中具有代表性的点估计法(point estimate method, PEM)利用输入随机变量的概率分布逼近待求输出随机变量的数字特征<sup>[13-14]</sup>。以半不变量法为代表的解析法在输入变量的各阶半不变量基础上，通过运算得到输出变量的半不变量<sup>[15]</sup>，从而获得输出变量的概率分布。除上述方法外，近年来随机响应面法(stochastic response surface method, SRSM)也逐渐受到关注。随机响应面法通过建立输入随机变量与输出变量之间的函数关系模型，利用较少的样本点来逼近系统的概率分布特性<sup>[16]</sup>。相比传统的 MCS, SRSM 大幅减少了计算量，同时能够较好地保持计算精度。

RIES 存在负荷波动及可再生能源出力不确定的因素，对系统概率能量流的影响不可忽略。因此，当计算 RIES 的概率能量流时需对不确定性因素进行分析。文献[17]将概率潮流的概念推广到了电-气混联综合能源系统(integrated energy systems, IES)中，并提出了一种基于蒙特卡洛模拟法的概率潮流计算方法；文献[18]建立了电-热互联 IES 概率能量流模型，提出了基于拉丁超立方采样(Latin hypercube sampling, LHS)的蒙特卡洛模拟法；文献[19]在电-热互联 IES 模型的基础上，针对系统采用半不变量法而存在的非线性问题，提出了多点线性方法；文献[20]在电-气 IES 稳态能量流模型的基础上，构建了风电和负荷不确定性模型，提出了输出状态变量半不变量的计算方法；文献[21]在电-气-热 IES 模型的基础上，提出了一种  $2m+1$  点估计策略的概率潮流计算方法。

RIES 中随机波动的风光出力作为系统不确定性变量，不仅具有不确定性的特点，在实际系统中的光伏、风力发电也具有相关性，且这种相关性会

对系统的能量流特性产生影响。文献[22]考虑了电力系统负荷与天然气系统负荷相关性对于电-气 IES 的影响；文献[23]考虑了电力系统负荷与热力系统负荷相关性对于电-热互联 IES 的影响；文献[24]计及冷、热、电、气负荷以及光伏的相关性对区域 IES 状态变量的影响；文献[25]分析了不同地区风电场风速相关性对电-气-热 IES 的影响；文献[26]提出了一种考虑各种风速之间相关性的电力系统概率潮流分析模型，通过历史学习样本将关联向量机引入风速的相关建模；文献[27]基于 Nataf 逆变换和 p-box 模型，提出了一种考虑注入功率相关性的基于仿射算法的区间点估计方法，该方法考虑了不确定的相关系数。考虑同系统风光出力间还具有一定程度的相关性<sup>[28]</sup>，若忽略风电、光伏间的相关性对电-气-热 RIES 概率能量流进行研究，会对电-气-热 RIES 运行稳定性造成影响。

鉴于此，本文首先建立了电力系统、热力系统、天然气系统稳态能量流模型，并利用燃气机组、热电联产机组(combined heat and power, CHP)、电转气(power to gas, P2G)设备实现了电力系统、热力系统、天然气系统的能量耦合；其次，针对光伏出力、风电出力、负荷等随机变量进行分析，建立了含有光伏和风电的电-气-热 RIES 概率能量流模型；再次，考虑同一地区光伏出力与风电出力间的相关性对系统状态变量的影响，提出采用 Galerkin 投影法优化随机响应面法(G-SRSM)来求解电-气-热 RIES 概率能量流；最后，在算例中通过将 G-SRSM 与其他方法对比，求解含光伏、风电的电-气-热 RIES 能量流计算模型，分析了光伏出力与风电出力相关性的变化对系统运行的影响，验证了所提模型的有效性和适用性，同时证明 G-SRSM 在求解含光伏、风电的电-气-热 RIES 能量流计算模型时具有较高的准确性和快速性。

## 1 电-气-热 RIES 稳态能量流

### 1.1 热力系统稳态模型

#### 1.1.1 水力模型

供热网络中水力过程与热力过程之间存在单向耦合，即水力过程会影响热力过程，而热力过程不会影响水力过程<sup>[29]</sup>。水力过程是指热水管网中热水从热源侧流至热用户侧的过程，该过程满足流量平衡方程以及回路压力平衡方程，如式(1)~式(3)所示。

$$A_h m = m_h \quad (1)$$

$$B h_f = 0 \quad (2)$$

$$h_f = K m |m| \quad (3)$$

式中:  $A_h$  为供热网络节点-支路关联矩阵;  $m$  为供热网络管道流量;  $m_h$  为注入节点的流量列向量;  $B$  为供热网络回路-支路关联矩阵;  $h_f$  为水流过管道摩擦造成的压头损失;  $K$  为供热网络管道阻力系数。

### 1.1.2 热力模型

通过建立热力模型, 可以求得供热网络节点温度。其中, 热力模型的热量方程、管道温降方程和节点混合温度方程如式(4)一式(6)所示。

$$\Phi = C_p m_h (T_s - T_o) \quad (4)$$

$$T_{\text{end}} = (T_{\text{start}} - T_a) e^{-\lambda L / (C_p m)} + T_a \quad (5)$$

$$\sum (m_{\text{in}} T_{\text{in}}) = \left( \sum m_{\text{out}} \right) T_{\text{out}} \quad (6)$$

式中:  $\Phi$  为热力系统各节点热功率;  $C_p$  为水的比热容;  $T_s$  为供热温度;  $T_o$  为输出温度;  $T_{\text{start}}$  和  $T_{\text{end}}$  分别为管道首端温度和末端温度;  $T_a$  为环境温度;  $\lambda$  为管道单位长度传热系数;  $L$  为供热网络管道长度;  $m_{\text{in}}$  和  $m_{\text{out}}$  分别为注入节点和流出节点的热水量;  $T_{\text{in}}$  和  $T_{\text{out}}$  分别为注入节点和流出节点的热水温。

### 1.2 天然气系统稳态模型

对电-气-热 RIES 概率能量流进行计算时, 需建立天然气系统管道模型, 分析天然气系统的潮流情况。其中, 管道流量方程如式(7)和式(8)所示。

$$G_{i,j_i} = k_{i,j_i} s_{i,j_i} \sqrt{s_{i,j_i} (p_i^2 - p_{j_i}^2)} \quad (7)$$

$$s_{i,j_i} = \begin{cases} +1, p_i - p_{j_i} \geq 0 \\ -1, p_i - p_{j_i} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $G_{i,j_i}$  为稳态条件下管道  $i,j_i$  的流量;  $k_{i,j_i}$  为管道参数;  $s_{i,j_i}$  为管道中天然气的流动方向;  $p_i$  和  $p_{j_i}$  分别为节点  $i$  和节点  $j_i$  的压力。

天然气网络需要满足流量连续性方程, 即

$$A_g G = G_g \quad (9)$$

式中:  $A_g$  为天然气网络的节点-支路关联矩阵;  $G$  为天然气网络管道流量;  $G_g$  为注入天然气网络节点的流量列向量。

### 1.3 电力系统稳态模型

电力系统稳态模型采用交流潮流模型, 系统的状态变量主要为节点电压幅值和相角, 用极坐标表示潮流方程为

$$\begin{cases} P_{i_c} = U_{i_c} \sum_{j_c=1}^{n_c} U_{j_c} (G_{i_c j_c} \cos \theta_{i_c j_c} + B_{i_c j_c} \sin \theta_{i_c j_c}) \\ Q_{i_c} = U_{i_c} \sum_{j_c=1}^{n_c} U_{j_c} (G_{i_c j_c} \sin \theta_{i_c j_c} - B_{i_c j_c} \cos \theta_{i_c j_c}) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $P_{i_c}$  和  $Q_{i_c}$  分别为注入节点  $i_c$  的有功功率和无

功功率;  $U_{i_c}$  和  $U_{j_c}$  分别为节点  $i_c$  和节点  $j_c$  的电压幅值;  $G_{i_c j_c}$  和  $B_{i_c j_c}$  分别为节点  $i_c$ 、 $j_c$  间支路的电导和电纳;  $\theta_{i_c j_c}$  为节点  $i_c$  和节点  $j_c$  之间的相角差;  $n_c$  为系统节点数。

### 1.4 耦合元件模型

#### 1.4.1 CHP 机组模型

CHP 机组是电-气-热 RIES 的重要耦合部分, 该机组消耗天然气产生电能, 并将生产过程中的废热供给热网, 实现能量最大化利用的目的, 背压式 CHP 机组满足式(11)。

$$C_{\text{CHP}} = \Phi_{\text{CHP}} P_{\text{CHP}} \quad (11)$$

式中:  $C_{\text{CHP}}$ 、 $P_{\text{CHP}}$  分别为 CHP 机组热出力和电出力;  $\Phi_{\text{CHP}}$  为机组定热电比。

#### 1.4.2 燃气机组

燃气机组是电力系统与天然气系统耦合的重要设备, 该机组不但是天然气系统的负荷节点, 同时也是电力系统的电源节点。燃气机组供应电力系统的发电量与天然气系统流入机组的天然气流量成正比, 气电转换关系如式(12)所示。

$$P_{\text{gas}} = \eta_{\text{G2P}} G_{\text{gas}} \quad (12)$$

式中:  $P_{\text{gas}}$  为燃气机组发电量;  $\eta_{\text{G2P}}$  为燃气机组转换天然气和电能的效率;  $G_{\text{gas}}$  为燃气机组耗气量。

#### 1.4.3 P2G 设备

当 RIES 中天然气负荷处于低谷或电力系统中风光等新能源出力较高需消纳时, P2G 设备将多余的电能转换为天然气, 实现能量的互补, 提高了能源利用效率, 转换过程如式(13)所示。

$$Q_{\text{P2G}} = \frac{P_{\text{P2G}} \eta_{\text{P2G}}}{H_{\text{CH}_4}} \quad (13)$$

式中:  $Q_{\text{P2G}}$  为天然气的生成量;  $P_{\text{P2G}}$  为 P2G 设备消耗的电功率;  $\eta_{\text{P2G}}$  为 P2G 设备转换效率;  $H_{\text{CH}_4}$  为天然气的高热值, 取值为 39 MJ/m<sup>3</sup>。

### 1.5 电-气-热 RIES 能量流模型

联合电力系统、天然气系统、热力系统以及耦合元件建立 RIES 模型, 实现了 RIES 中各子系统之间的多向耦合, 且风电和光伏发电具有不确定性和相关性的特点, 增加了能量流的复杂性。为避免产生局部最优解, 采用统一求解法将 RIES 作为一个整体进行建模和求解, 考虑各子系统之间的相互耦合关系, 避免次优解, 满足能量流计算的精确性要求。基于统一求解法, 本文建立了电-气-热 RIES 的稳态能量流计算统一模型, 并采用牛顿-拉夫逊法进行

求解, 其修正方程如式(14)所示。

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta \Phi \\ \Delta T \\ \Delta G \end{bmatrix}}_{\Delta W} = -J \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \\ \Delta m \\ \Delta T \\ \Delta G \end{bmatrix}}_{\Delta X} \quad (14)$$

$$J = \begin{bmatrix} J_{ee} & J_{eh} & J_{eg} \\ J_{he} & J_{hh} & J_{hg} \\ J_{ge} & J_{gh} & J_{gg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial V} & \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial m} & \frac{\partial \Delta P}{\partial T} & \frac{\partial \Delta P}{\partial G} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial m} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial T} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial G} \\ \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial V} & \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial m} & \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial T} & \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial G} \\ \frac{\partial \Delta T}{\partial V} & \frac{\partial \Delta T}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta T}{\partial m} & \frac{\partial \Delta T}{\partial T} & \frac{\partial \Delta T}{\partial G} \\ \frac{\partial \Delta G}{\partial V} & \frac{\partial \Delta G}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta G}{\partial m} & \frac{\partial \Delta G}{\partial T} & \frac{\partial \Delta G}{\partial G} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中:  $P$ 、 $Q$  分别为电力系统节点的有功和无功;  $\Delta W$  为输入变量的修正量;  $\Delta X$  为状态变量的修正量;  $T$  为热力系统温度变量矩阵;  $J$  为雅可比矩阵, 该矩阵由电力子阵  $J_{ee}$ 、电热力子阵  $J_{eh}$ 、电气子阵  $J_{eg}$ 、热电子子阵  $J_{he}$ 、热力子阵  $J_{hh}$ 、热气子阵  $J_{hg}$ 、气电子子阵  $J_{ge}$ 、气热力子阵  $J_{gh}$ 、气子阵  $J_{gg}$  组成;  $V$  为电压;  $\theta$  为相角; “ $\Delta$ ” 表示该变量的修正量。

## 2 计及相关性的概率能量流计算方法

由电力系统、天然气系统、热力系统、多能耦合设备构成的 RIES 具有显著的非凸特性, 对 RIES 的概率能量流计算造成较大的影响, 本文采用牛顿-拉夫逊法计算稳态能量流, 计及风光相关性提出了一种基于 Galerkin 投影法优化的 SRSM 的电-气-热互联 RIES 的概率能量流计算方法, 以避免非凸约束的影响, 提高计算精度和计算效率。

### 2.1 基于 Galerkin 投影法优化的随机响应面法

#### 2.1.1 随机响应面法

SRSM 本质上是一种采用多项式逼近模型从而对不确定变量进行量化的代理模型方法, 它可以对任意分布形式的随机变量实现较为精确的近似, 只要建立代理模型可得到所有的统计数据, 其模型可表示为式(16)。

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_{i1} H_1(\xi_1) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i a_{ij} H_2(\xi_1, \xi_2) + \dots = aH(\xi) \quad (16)$$

式中:  $a = [a_0, a_1, a_{ij}, \dots]$  为多项式展开待定系数;  $\xi$  为  $n$  维独立标准正态分布;  $n$  为系统输入随机变量的个数;  $H_s(\cdot)$  为  $s$  阶 Hermite 正交多项式;  $H(\xi)$  为 Hermite 正交多项式。

式(16)中展开待定系数的个数  $N_a$  为

$$N_a = (s+n)!/(s!n!) \quad (17)$$

由式(17)可知, 多项式展开待定系数的个数与多项式的阶数、输入随机变量的维数有关, 为对待定系数进行计算, 选择  $2N_a$  个配置点进行线性规划, 计算确定待定系数。

#### 2.1.2 改进随机响应面法

基于 Galerkin 投影方法的改进 SRSM 相较于 SRSM, 在综合能源系统概率能量流求解中具有明显优势。首先, Galerkin 投影方法通过在一个选择的函数空间内进行投影, 能够精确地满足系统方程的弱形式, 从而提供高精度的数值解, 能够捕捉更多的系统动态特性和细节。其次, 基于 Galerkin 投影法的改进 SRSM 应用于各种复杂系统的求解, 确保了求解基于解析法概率能量流计算的收敛性。以下为改进 SRSM 的具体过程。

$$Y = F(X) \quad (18)$$

如式(18)所示, 在 SRSM 求解概率能量流计算问题中, 待求的状态变量是模型  $F$  的输出响应  $Y$ , 即输出随机变量  $Y$  为待求潮流量, 为节点电压、节点气压、管道流量等参数。输入随机变量  $X$  为系统中的不确定性因素, 即本文所研究的风电场风速与光伏电站光照强度。计算过程如下所述。

#### 1) 标准输入变量的选择

选择适当的标准输入变量, 根据混沌多项式展开的需求, 选择满足标准正态分布的随机变量, 本文所研究的风电场风速与光伏电站光照强度分别满足如下分布。

风电出力主要由风速决定, 描述风速的不确定性一般采用 Weibull 分布<sup>[30]</sup>, 概率密度函数(probability density function, PDF)  $f(v)$  表达如式(19)所示。

$$f(v) = \frac{k_w}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k_w-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k_w}\right] \quad (19)$$

式中:  $k_w$  为形状系数;  $c$  为尺度系数;  $v$  为实际风速。

根据风速与风机输出功率的关系, 风电出力  $P(v)$  可近似表示为式(20)。

$$P(v) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v \leq v_{ci}, v > v_{co} \\ k_1 + k_2 v, & v_{ci} < v \leq v_N \\ P_N, & v_N < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (20)$$

$$k_1 = \frac{P_N}{v_N - v_{ci}} \quad (21)$$

$$k_2 = -k_1 v_{ci} \quad (22)$$

式中:  $P_N$  为风机额定功率;  $v_{ci}$ 、 $v_N$ 、 $v_{co}$  分别为切入风速、额定风速、切出风速;  $k_1$ 、 $k_2$  为风机功率特性参数。

光伏出力主要由光照强度决定, 根据历史数据可得, 光照强度在一定时间尺度下满足 Beta 分布, 因此, 可推出光伏出力在一定的的时间尺度内服从 Beta 分布<sup>[31]</sup>, 概率密度函数为

$$f(P_a) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left( \frac{P_a}{P_{\max}} \right)^{\alpha-1} \left( \frac{1-P_a}{P_{\max}} \right)^{\beta-1} \quad (23)$$

式中:  $\alpha$  和  $\beta$  为符合 Beta 分布的形状参数;  $P_a$  为光伏实际有功出力;  $P_{\max}$  为光伏最大有功出力。

基于 Hermite 正交多项式的 Wiener 混沌多项式展开在解决带有正态和其他非正态分布随机输入的不确定性分析问题非常有效, 但是对于其他一般的非正态随机输入, 收敛速度较慢, 在某些情况下收敛速度甚至严重恶化。考虑 G-SRSM 输入变量时需满足两项要求: 输入变量间不具有相关性, 即为独立变量; 输入变量满足标准正态分布。

2) 将输出响应  $Y$  用关于  $\xi$  的 Hermite 混沌多项式表示并确定待定系数个数, 如式(16)、式(17)所示。

3) 确定多项式展开项待定系数。SRSM 的精度受到随机采样点的影响, 而且随着样本点的增多和维数的增多, 系数矩阵容易病态, 在采用最小二乘法进行求解时精度会变差。因此本文使用 Galerkin 投影法进行计算, 首先基于最小二乘法建立一个基本的近似模型, 能够粗略描述系统的输入输出关系; 其次, 利用 Galerkin 投影方法, 将上式两边同时投影到各正交多项式上, 即将初始模型的复杂非线性问题投影到一个低维的、易处理的空间, 以便更精确地求解非凸问题, 实现模型的线性化, 可以得到式(24)。

$$\langle yH_j(\xi) \rangle = \left\langle \sum_{i=0}^n a_i H_i(\xi) H_j(\xi) \right\rangle, (j=0,1,\dots,n) \quad (24)$$

式中: “ $\langle \rangle$ ” 为内积运算;  $H_i$ 、 $H_j$  分别表示第  $i$ 、 $j$  项正交多项式;  $y$  表示系统的输出响应;  $a_i$  为多项式展开的待定系数。根据内积的定义, 可以利用正交多项式的正交性得到式(25)。

$$\langle H_i(\xi) H_j(\xi) \rangle = \langle H_i^2(\xi) \rangle \delta_{ij} \quad (25)$$

式中,  $\delta_{ij}$  表示正交多项式间的正交性, 当  $i=j$  时  $\delta_{ij}$  值为 1,  $i \neq j$  时  $\delta_{ij}$  值为 0。

整理式(25)可得

$$a_i = E[yH_i(\xi)] / E[H_i(\xi)H_i(\xi)], (i=0,1,\dots,n) \quad (26)$$

式中,  $E[\cdot]$  表示期望值运算。

则混沌多项式各系数可以通过式(26)进行计算, 式(26)中的分母  $E[H_i(\xi)H_i(\xi)]$  是对正交多项式求期望, 由于正交多项式是关于各标准随机变量  $\xi = [\xi_1, \dots, \xi_n]$  的函数, 其形式都是已知的, 因此可以快速、方便地计算分母的值。  $E[H_i(\xi)H_i(\xi)]$  是关于多维混合正交多项式  $H_i(\xi)$  的积分, 因此分母的计算可以看作是各正交多项式的积分  $E\{(h_k^i(\xi_k))^2\}$  的乘积, 即

$$E[H_i(\xi)H_i(\xi)] = \prod_{k=1}^n E\{(h_k^i(\xi_k))^2\} \quad (27)$$

式中:  $\xi_k$  表示第  $k$  个输入随机变量;  $h_k^i(\xi_k)$  为一维正交多项式。

其中, 关于各一维正交多项式积分  $E\{(h_k^i(\xi_k))^2\}$  存在封闭解析解, 非常容易计算, 因此计算量主要来自分子  $E[yH_i(\xi)]$  的计算, 相当于是计算  $yH_i(\xi)$  的期望。由于存在输出响应函数  $y$ , 分子几乎不可能得到封闭解, 需要调用一定次数的输出响应函数。  $E[yH_i(\xi)]$  可以通过数值方法或者抽样法求解, 考虑到当维数较高时, 抽样法求解效率较差, 且输入变量为二维随机变量, 故采用全因子数值积分法求解分子。全因子数值积分法的本质是 Gauss 求积公式, 其特点是对于不同的随机变量采用不同的权函数, 其各维度的节点和权值均可以通过高斯型分布表格查得。

Gauss 求积如式(28)所示。

$$E[yH_i(\xi)] = \int yH_i(\xi)W(\xi)d\xi \quad (28)$$

式中,  $W(\xi)$  为独立标准正态分布的权函数。

$$W(\xi) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n}} e^{-\xi^2/2} \quad (29)$$

结合式(24)、式(28)和式(29), 可解待定系数分子。

## 2.2 计及相关性的改进随机响应面法

在电-气-热 RIES 中, 随着风电和光伏在系统中的渗透率不断提高, 风光出力相关性对能量流影响不断提高, 进而影响概率能量流计算精度。风、光等可再生能源出力与环境温度、风速、天气密切相关, 具有随机性、波动性和季节性等特征。同一区域内的风光出力具有相关性, 而且这种相关性的程度随着地理位置和区域用能特性会产生变化, 同时, 风-光相关性随季节变化呈现出了不同的显著变化趋势<sup>[32]</sup>。忽略该相关性, 将难以准确刻画 RIES 中新能源出力的场景, 影响计算精度。

因此, 在 RIES 中, 同时接入电力系统的风电

机组和光伏机组，由于在时空分布上具有联系，输出的风电功率和光伏功率会存在较高相关性，相关性通过相关系数表征，考虑到两者间相关系数的影响，无法满足输入变量为标准输入变量的要求，常常采用 Nataf 变换对其做标准化处理，将输入随机变量  $\mathbf{X}$  映射为标准正态分布  $\boldsymbol{\eta}$ 。

1) 输入变量转化为非独立标准正态分布

对于输入随机变量矩阵  $\mathbf{X}$ ，由风光相关性，可计算得到  $\mathbf{X}$  的相关系数矩阵，设  $m$  阶输入变量  $\mathbf{X}$  的相关系数矩阵为  $\mathbf{C}_\rho$ ，运用斯皮尔曼秩相关系数计算方法对随机变量间的相关系数  $\rho_{ij}$  进行计算。

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{i,j=1}^N (x_i - \mu_i)(x_j - \mu_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_i)^2 \sum_{j=1}^N (x_j - \mu_j)^2}} \quad (30)$$

式中： $\mu_i$  和  $\mu_j$  分别为随机变量  $x_i$  和  $x_j$  的均值； $N$  为变量个数。

标准正态分布向量  $\boldsymbol{\eta}$  的相关系数矩阵为  $\mathbf{C}'_\rho$ ， $\rho'_{ij}$  为随机变量间的相关系数。

基于等概率转换原则，通过 Nataf 变换理论，满足非正态分布的  $\mathbf{X}$ ，通过变换可得

$$\rho_{ij} = -\frac{\mu_i \mu_j}{\sigma_i \sigma_j} + \frac{1}{2\pi \sigma_i \sigma_j} \iint F_i^{-1}(\phi(\eta_i)) \cdot F_j^{-1}(\phi(\rho'_{ij} \eta_i + \sqrt{1 - (\rho'_{ij})^2} \eta_j)) e^{-\frac{(\eta_i^2 + \eta_j^2)}{2}} d\eta_j d\eta_i \quad (31)$$

式中： $F_i^{-1}$ 、 $F_j^{-1}$  分别为随机变量  $x_i$ 、 $x_j$  的累积概率分布函数(cumulative distribution function, CDF)的反函数； $\eta_i$ 、 $\eta_j$  分别为随机变量  $x_i$ 、 $x_j$  对应的标准正态分布； $\sigma_i$ 、 $\sigma_j$  为  $x_i$ 、 $x_j$  的标准差； $\phi(\cdot)$  为标准正态分布密度函数。

2) 得到独立标准正态分布

考虑到  $\mathbf{C}'_\rho$  为对称矩阵，利用 Cholesky 分解法对  $\mathbf{C}'_\rho$  进行分解，得到下三角矩阵  $\mathbf{L}$ ，即可求得所需独立标准正态分布  $\boldsymbol{\xi}$ ，如式(32)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{C}'_\rho = \mathbf{L}\mathbf{L}^T \\ \boldsymbol{\xi} = \mathbf{L}^{-1}\boldsymbol{\eta} \end{cases} \quad (32)$$

2.3 计算流程

本文计及风光相关性提出的基于 G-SRSM 的电-气-热 RIES 概率能量流计算流程如图 1 所示。

具体步骤如下所述。

1) 输入电力系统、天然气系统、热力系统基础参数，分析了不同能量系统间耦合元件模型，建立

了电-气-热 RIES 稳态能量流模型。

2) 输入 RIES 中风电、光伏等随机变量的概率分布矩阵  $\mathbf{X}$ 。

3) 通过 Nataf 变换首先将  $\mathbf{X}$  转换为非独立标准正态分布，其次将该非独立标准正态分布转换为独立标准正态分布  $\boldsymbol{\xi}$  表示，将能量流方程的状态变量表示为关于  $\boldsymbol{\xi}$  的二阶 Hermite 混沌多项式形式。

4) 形成电、气、热的节点支路关联矩阵与回路-支路关联矩阵，进行  $N$  次迭代计算能量流，输出能量流计算结果，通过 G-SRSM 方法确定 3) 中二阶混沌多项式的待定系数，得到所需能量流方程状态变量的概率分布。

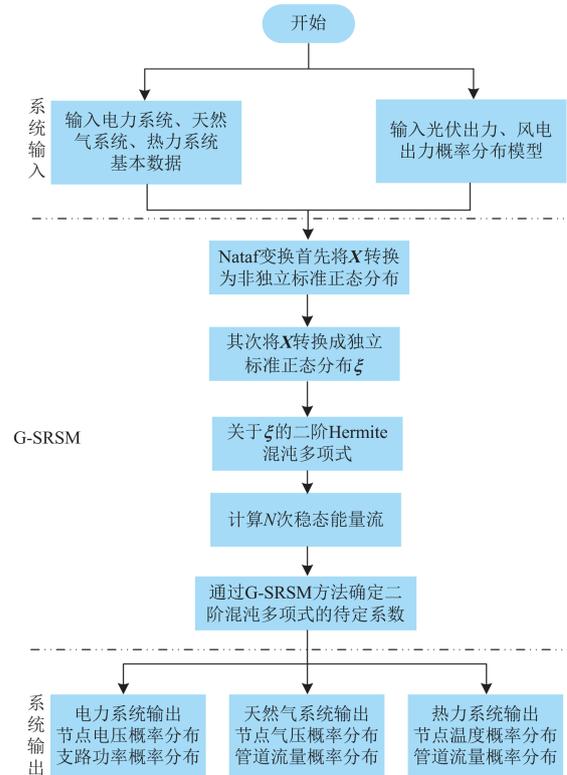


图 1 RIES 概率能量流计算流程

Fig. 1 Flow chart of RIES probabilistic energy flow

3 算例分析

3.1 算例说明

本节以 IEEE 30 节点电力系统、IEEE 69 节点电力系统、20 节点热力系统和 24 节点天然气系统组成的 RIES 进行仿真分析，同时为验证仿真的可靠性，设置两个仿真场景。系统拓扑结构如图 2 所示。

场景 1：由 IEEE 30 节点系统、20 节点热力系统、24 节点天然气系统组成的 RIES。

场景 2：由 IEEE 69 节点系统、20 节点热力系统、24 节点天然气系统组成的 RIES。

其中, 在电力系统 19 节点、30 节点处分别接入风电机组和光伏机组。电力系统中节点 14、15 分别通过 1 台燃气机组与天然气系统节点 12、13 相连。电力系统中节点 7、8、11、13 分别通过 1 台 CHP 机组与天然气系统节点 3、4、5、6 相连, 其中, 天然气系统的节点 7、8 与热力系统 S1 相连, 节点 9、10 与 S2 相连。在场景 1 中, 天然气系统节

点 2 与电力系统节点 14 接入 1 台 P2G 设备, 在场景 2 中, 天然气系统节点 2 与电力系统节点 2 接入 1 台 P2G 设备。假设电力系统、天然气系统、热力系统节点负荷(非燃气机组负荷)满足期望为初始值、标准差为期望值 5%的正态分布; MCS 的采样规模设为 10 000 次, 且满足方差为 5%的收敛判据<sup>[15]</sup>。

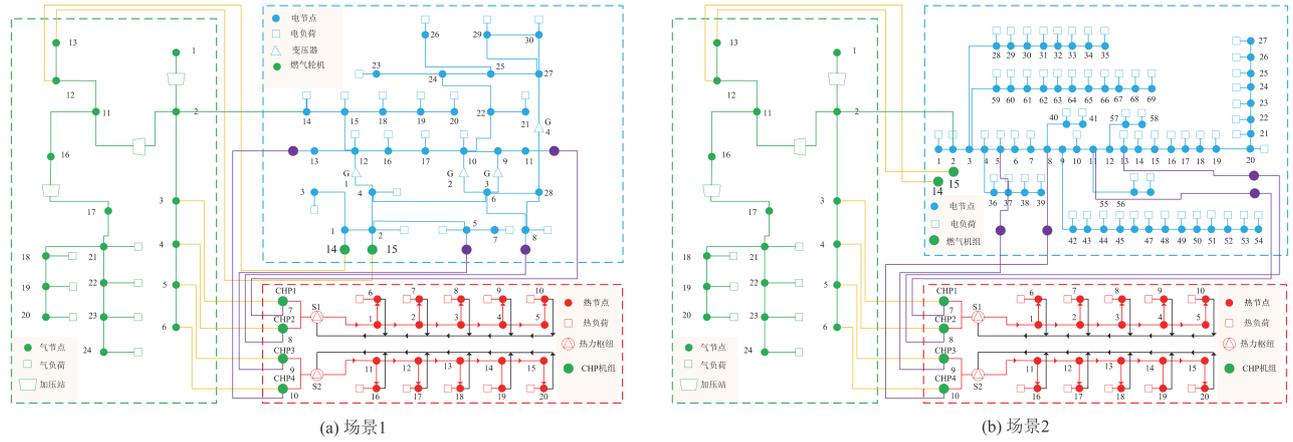


图 2 RIES 拓扑图

Fig. 2 Topological diagram of RIES

### 3.2 算法有效性验证

为验证 G-SRSM 方法的有效性, 结合 G-SRSM 在 IEEE 69 节点系统中进行概率能量流计算, 与 MCS、SRSM、基于均匀设计的拟蒙特卡洛方法 (Quasi-Monte Carlo method based on uniform design, UD-QMC)<sup>[33]</sup>、点估计法<sup>[34]</sup>计算结果进行对比, 如图 3—图 5、表 1 和表 2 所示。

图 3、图 4 和图 5 中分别为电力系统节点 10 电压幅值、天然气系统节点 10 气压、热力系统管道 4 流量的概率密度曲线, 表 1 和表 2 分别为电力系统节点 10 电压幅值、天然气系统节点 10 气压、热力系统管道 4 流量的期望和标准差及计算性能和精度。基于

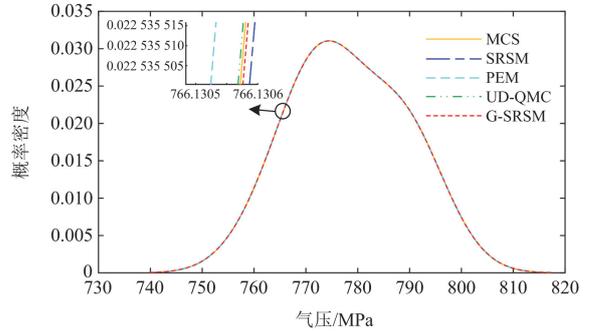


图 4 不同算法下天然气节点 10 气压概率密度 Fig. 4 PDF of node 10 gas pressure of gas system with different algorithms

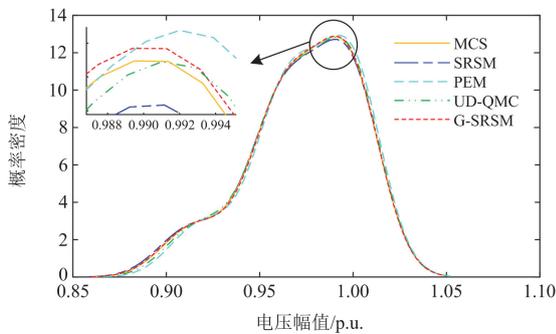


图 3 不同算法下电力系统节点 10 电压幅值概率密度 Fig. 3 PDF of node 10 voltage amplitude of power system with different algorithms

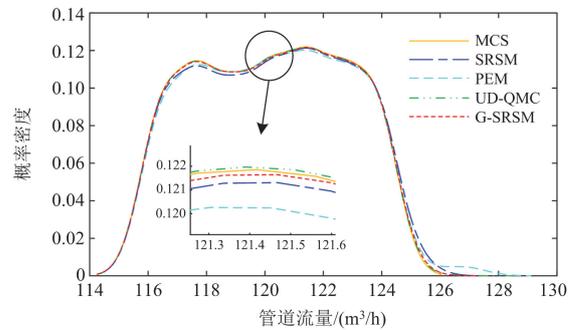


图 5 不同算法下热力系统管道 4 的流量概率密度 Fig. 5 PDF of pipe 4 flow heat system with different algorithms

表 1 不同算法下系统参数期望值和标准差

Table 1 Expectation value and standard deviation of system parameters with different algorithms

参数	算法	期望值	标准差
电力系统 节点 10 电压幅值 (标么值)	MCS	0.972 51	0.009 640
	SRSM	0.972 47	0.009 453
	PEM	0.972 56	0.009 489
	UD-QMC	0.972 48	0.009 603
	G-SRSM	0.972 53	0.009 615
天然气系统 节点 10 气压/ MPa	MCS	778.228 723	$8.7962 \times 10^{-5}$
	SRSM	778.228 745	$8.1142 \times 10^{-5}$
	PEM	778.228 695	$8.1355 \times 10^{-5}$
	UD-QMC	778.228 703	$8.4792 \times 10^{-5}$
	G-SRSM	778.228 706	$8.5420 \times 10^{-5}$
热力系统 管道 4 流量/(m <sup>3</sup> /h)	MCS	120.9305	3.0311
	SRSM	120.9728	3.2498
	PEM	120.9742	3.2501
	UD-QMC	120.9504	3.1145
	G-SRSM	120.9412	3.1037

表 2 不同算法下系统计算性能与精度

Table 2 Computational performance and accuracy with different algorithms

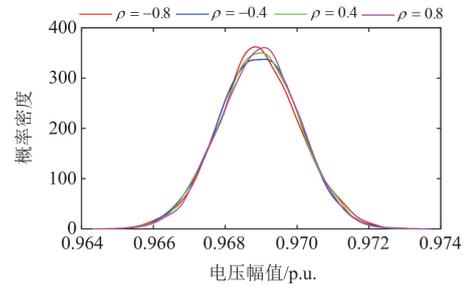
算法	计算时间/s	平均期望误差/%	平均标准差误差/%
MCS	63.7	—	—
SRSM	1.52	0.0130	3.312
PEM	2.56	0.0137	3.184
UD-QMC	0.87	0.0064	1.163
G-SRSM	0.62	0.0036	0.980

G-SRSM 的概率能量流计算结果, 与蒙特卡洛方法差别很小, 期望和标准差的最大误差都不超过 3%, 平均误差不超过 2%, 计算时间远短于文中对比方法, 表明 G-SRSM 方法具有可靠的计算精度和计算效率。

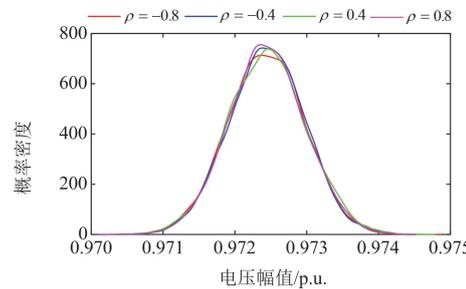
### 3.3 风光相关性对系统概率能量流的影响

考虑处于同一区域综合能源系统的风电场与光伏电站, 其地理位置和气候条件相同, 因此风速与光照强度一般具有较强的相关性, 风电场的输出功率与光伏电站的功率也具有较强相关性。为验证风光相关性变化对区域综合能源系统运行参数的影响, 设定不同的相关系数情景(相关系数分别为 -0.8、-0.4、0.4、0.8), 采用本文所提电-气-热 RIES 模型和 G-SRSM 计算方法来计算概率能量流。图 6、图 8、图 10 分别为电力系统节点 10 电压幅值、热力系统管道 4 流量、天然气系统节点 10 气压的概率密度曲线。图 7、图 9、图 11 分别为电力系统节点 10 电压幅值、热力系统管道 4 流量、天然气系统节

点 10 气压的累积概率曲线。表 3、表 4、表 5 分别为不同相关系数下电力系统节点 10 电压、热力系统管道 4 流量、天然气系统节点 10 气压均值和标准差。

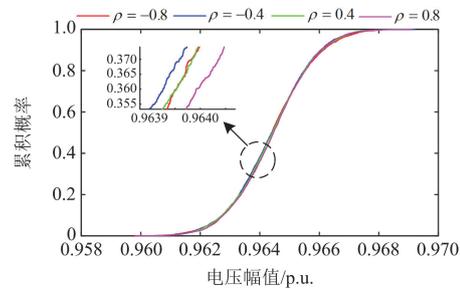


(a) 场景1电力系统节点10电压幅值概率密度

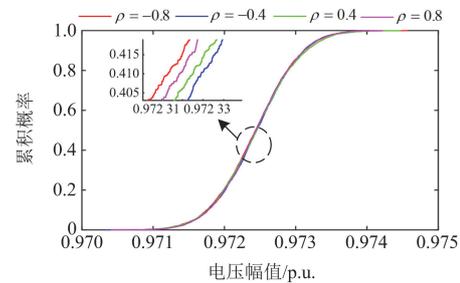


(b) 场景2电力系统节点10电压幅值概率密度

图 6 不同相关系数下电力系统节点 10 电压幅值概率密度  
Fig. 6 PDF of node 10 voltage amplitude of power system with different correlation coefficients

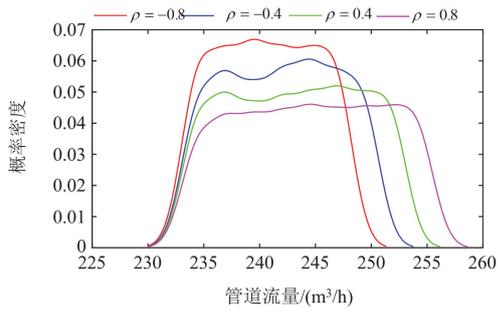


(a) 场景1电力系统节点10电压幅值累积概率

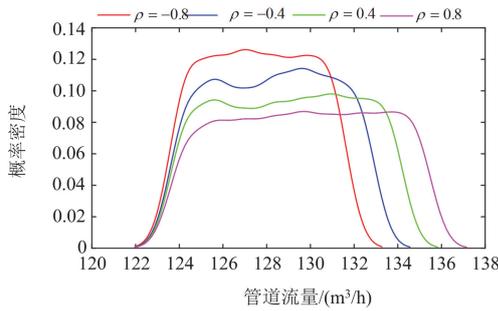


(b) 场景2电力系统节点10电压幅值累积概率

图 7 不同相关系数下电力系统节点 10 电压幅值累积概率  
Fig. 7 CDF of node 10 voltage of power system with different correlation coefficients

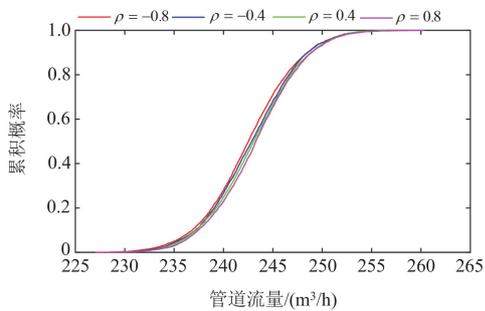


(a) 场景1热力系统管道4流量概率密度

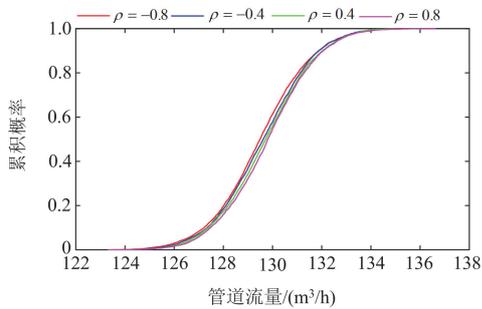


(b) 场景2热力系统管道4流量概率密度

图 8 不同相关系数下热力系统管道 4 流量概率密度  
Fig. 8 PDF of pipe 4 flow of heat system with different correlation coefficients

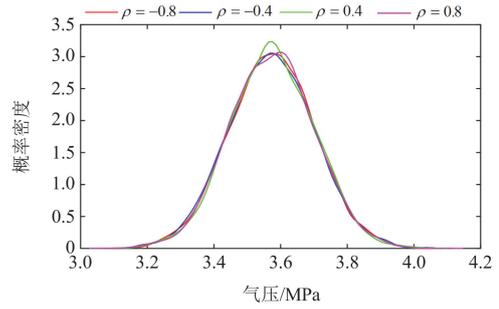


(a) 场景1热力系统管道4流量累积概率

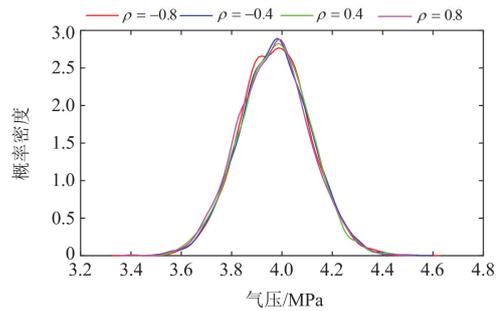


(b) 场景2热力系统管道4流量累积概率

图 9 不同相关系数下热力系统管道 4 流量累积概率  
Fig. 9 CDF of pipe 4 flow of heat system with different correlation coefficients

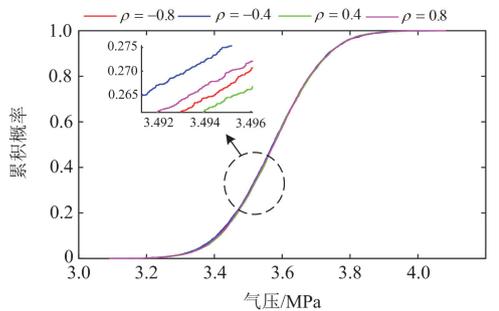


(a) 场景1天然气系统节点10气压概率密度

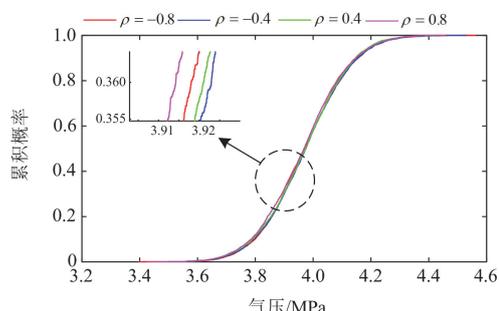


(b) 场景2天然气系统节点10气压概率密度

图 10 不同相关系数下天然气系统节点 10 气压概率密度  
Fig. 10 PDF of node 10 gas pressure of gas system with different correlation coefficients



(a) 场景1天然气系统节点10气压累积概率



(b) 场景2天然气系统节点10气压累积概率

图 11 不同相关系数下天然气系统节点 10 气压累积概率  
Fig. 11 CDF of node 10 gas pressure of gas system with different correlation coefficients

表 3 不同相关系数下电力系统节点 10 电压均值和标准差  
Table 3 Mean value and standard deviation of node 10 voltage with different correlation coefficients

场景	相关系数	节点 10 电压幅值/p.u.	
		均值	标准差
场景 1	-0.8	0.9757	0.019 07
	-0.4	0.9757	0.018 32
	0.4	0.9760	0.017 33
	0.8	0.9759	0.017 40
场景 2	-0.8	0.9724	0.000 522
	-0.4	0.9757	0.000 526
	0.4	0.9756	0.000 531
	0.8	0.9757	0.000 640

表 4 不同相关系数下热力系统管道 4 流量均值和标准差  
Table 4 Mean value and standard deviation of pipe 4 flow with different correlation coefficients

场景	相关系数	管道 4 流量/(m <sup>3</sup> /h)	
		均值	标准差
场景 1	-0.8	240.6365	6.3474
	-0.4	241.9445	5.0033
	0.4	243.2020	5.7623
	0.8	244.5351	6.4086
场景 2	-0.8	126.5809	28869
	-0.4	127.2689	2.6319
	0.4	127.9305	3.0311
	0.8	128.6317	3.3711

表 5 不同相关系数下天然气系统节点 10 气压均值和标准差  
Table 5 Mean value and standard deviation of node 10 gas pressure with different correlation coefficients

场景	相关系数	节点 10 气压/MPa	
		均值	标准差
场景 1	-0.8	39.7211	0.015 446 5
	-0.4	39.9740	0.015 361 5
	0.4	39.7038	0.015 367 6
	0.8	39.7553	0.015 368 0
场景 2	-0.8	28.2007	0.001 490 2
	-0.4	28.1987	0.001 419 0
	0.4	28.2019	0.001 419 2
	0.8	28.2165	0.001 439 9

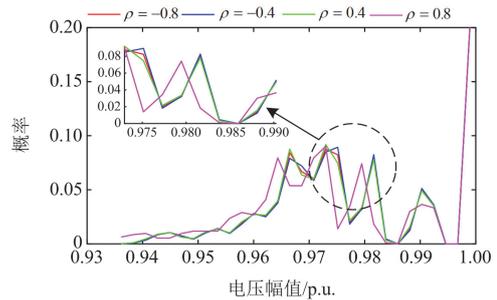
结合表 3 与图 6 可知, 相关系数由-0.8 增大至 0.8 的过程, 当光伏和风电呈正相关关系时, 相关性越大, 风电和光伏出力同时增大或减小, 导致电力系统节点 10 的电压幅值波动明显增大; 当光伏和风电呈负相关关系时, 风光出力不确定性显著增强, 系统中有功波动较大, 标准差随之变大, 表征电压幅值的波动范围明显增大。同时, 随着风电、光伏出力间相关性的变化, PDF 的峰值发生明显改变,

节点 10 电压幅值的波动范围也明显改变。

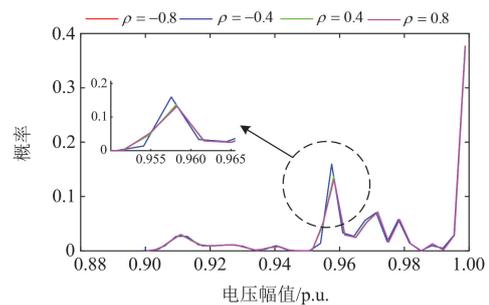
结合表 3 与图 7 可知, 相关系数由-0.8 增大至 0.8 的过程, 随着风电、光伏出力间相关系数的变化, 在场景 1 与场景 2 中 CDF 曲线存在显著偏移, 表明电力系统中节点 10 电压幅值波动较大, 影响电力系统能量流计算结果。

结合表 4、表 5 与图 8—图 11 可知, 相关系数由-0.8 增大至 0.8 的过程, 当光伏和风电呈现相关性变化时, 电力系统中功率波动显著增大。为避免电压越限的风险, 天然气系统、热力系统分别对能量流进行调节, 通过系统中电转气、CHP 机组、燃气轮机耦合环节平抑该部分功率波动。相关性变化造成了电压幅值波动剧烈, 能量流的波动通过耦合环节传递至热力系统和天然气系统, 导致 PDF 曲线峰值随之增大, CDF 曲线发生明显偏移, RIES 能量流整体产生较大波动。

由于风光相关性的变化会对整个电力系统的潮流产生影响, 通过分析系统各节点电压幅值的变化可反映系统的运行状态。不同相关系数下电力系统节点电压幅值分布如图 12 所示。



(a) 场景1电力系统节点电压幅值分布



(b) 场景2电力系统节点电压幅值分布

图 12 不同相关系数下电力系统节点电压幅值分布

Fig. 12 Distribution of node voltage magnitudes in power system with different correlation coefficients

由图 12 可知, 由于 69 节点系统对于不确定性引起的风光出力波动消纳能力强于 30 节点系统, 因此在相同风光相关性下, 场景 1 比场景 2 电压波动

大。在同一场景、不同相关性条件下: 1) 计及风电、光伏出力的相关性以及不确定性会使节点电压发生波动, 当节点电压幅值较高或者较低, 特别是电压幅值超过上、下限时, 会对电力系统稳定运行造成影响; 2) 在满足系统稳定性要求的前提下, 随着风电、光伏出力间相关性的增强, 各节点电压幅值整体会发生较大波动。

综上所述, 在 RIES 概率能量流计算中, 风电与光伏出力间相关性的变化, 会导致电力系统节点电压、天然气系统节点气压、热力系统管道流量等状态参数发生波动, 系统运行不确定性增强。

#### 4 结论

电-气-热 RIES 具有多种异质能源, 能实现多能互补, 有效提高能源利用率。但风光相关性会影响电-气-热 IES 的概率能量流, 对 RIES 的安全、稳定运行造成严重威胁。本文计及光伏、风电出力相关性提出了一种基于 G-SRSM 的电-气-热 RIES 概率能量流计算方法, 并通过算例仿真得到以下结论。

1) 与 MCS、SRSM、PEM、UD-QMC 对比可知, 所提 G-SRSM 算法可快速、准确地求得 RIES 概率能量流结果。

2) 当燃气机组、CHP 机组和 P2G 设备接入电力系统时, 可平衡电力系统中风电出力和光伏出力不确定性引起的电压波动, 电压幅值标准差随之变化, 影响了天然气系统和热力系统运行状态, 导致节点气压和管道流量波动范围增大。

3) 为消除不同系统结构下风光波动性消纳能力不同而造成的标准差的变化, 故设置两个场景, 分别在两个场景改变光伏与风电相关性系数, 得到同一规律, 即随着两者正负相关性的增强, 风光出力增大或减小, 导致电力系统节点电压幅值、热力系统管道流量及天然气系统节点气压标准差增大。

在后续研究中, 将考虑供冷系统在计及风光相关性的电-气-热-冷 RIES 中对概率能量流的影响。

#### 参考文献

[1] 王丹, 李思源, 贾宏杰, 等. 含可再生能源的区域 IES 区间化安全域研究(二): 全维观测与域的几何特征优化[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7809-7821.  
WANG Dan, LI Siyuan, JIA Hongjie, et al. Research on interval security region of regional integrated energy system integrated with renewable energy sources (II): full-dimensional observation and optimization of region geometric features[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7809-7821.

[2] 刘佳良, 王涛, 潘怡. 基于 tscTFCSNPS 路径选择的区域综合能源系统低碳优化方法[J]. 电力建设, 2024, 45(7): 54-67.  
LIU Jialiang, WANG Tao, PAN Yi. Low-carbon optimization method for regional integrated energy systems based on tscTFCSNPS path selection[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(7): 54-67.

[3] 刘鹏飞, 武家辉, 王海云, 等. 计及氢气注入与压缩因子的综合能源系统能流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 118-128.  
LIU Pengfei, WU Jiahui, WANG Haiyun, et al. Calculation of energy flow in integrated energy systems with hydrogen injection and compression factors[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 118-128.

[4] 高瑞阳, 王新宝, 高娴, 等. 考虑灵活性资源和多能共享的低碳区域综合能源系统联盟-配电网博弈优化调度[J]. 南方电网技术, 2024, 18(2): 77-88.  
GAO Ruiyang, WANG Xinbao, GAO Xian, et al. Optimal dispatching of low-carbon regional integrated energy system alliance and distribution network game considering flexible resources and multi energy sharing[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 77-88.

[5] 毕锐, 王孝淦, 袁华凯, 等. 考虑供需双侧响应和碳交易的氢能综合能源系统鲁棒调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 122-132.  
BI Rui, WANG Xiaogan, YUAN Huakai, et al. Robust dispatch of a hydrogen integrated energy system considering double side response and carbon trading mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 122-132.

[6] 丁明, 李生虎, 黄凯. 基于蒙特卡罗模拟的概率潮流计算[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 10-14, 22.  
DING Ming, LI Shenghu, HUANG Kai. Probabilistic load flow analysis based on Monte-Carlo simulation[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 10-14, 22.

[7] 王秀丽, 张择策, 侯雨伸. 基于拟蒙特卡罗模拟法的主动配电网随机潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 7-12.  
WANG Xiuli, ZHANG Zece, HOU Yushen. Stochastic load flow calculation based on quasi-Monte Carlo method for active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 7-12.

[8] 张建波, 张忠伟, 杨洋. 改进拉丁超立方蒙特卡罗模拟[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2018, 36(4): 452-458.  
ZHANG Jianbo, ZHANG Zhongwei, YANG Yang. Improvement of application of Latin hypercube Monte Carlo simulation[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2018, 36(4): 452-458.

- [9] 甘艳, 黄菁雯, 吴军, 等. 含风电光伏电力系统概率潮流计算改进方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(5): 34-43.  
GAN Yan, HUANG Jingwen, WU Jun, et al. Research on probabilistic power flow calculation improvement method of power system including wind and photovoltaic power generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 34-43.
- [10] 柳永妍, 乐健, 高鹏, 等. 基于两点估计法的有源配电网概率潮流计算方法研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(5): 1-8.  
LIU Yongyan, LE Jian, GAO Peng, et al. A study of probabilistic load flow calculation in active distribution network based on two-point estimation method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(5): 1-8.
- [11] 王正宇, 朱林, 黄师禹, 等. 基于高斯函数-最大熵展开的风电并网系统概率潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 91-98.  
WANG Zhengyu, ZHU Lin, HUANG Shiyu, et al. Probabilistic load flow calculation based on Gaussian function-maximum entropy expansion for a wind power integration system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 91-98.
- [12] 段玉兵, 龚宇雷, 谭兴国, 等. 基于蒙特卡罗模拟的微电网随机潮流计算方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(增刊 1): 274-278.  
DUAN Yubing, GONG Yulei, TAN Xingguo, et al. Probabilistic power flow calculation in microgrid based on Monte-Carlo simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(S1): 274-278.
- [13] 艾小猛, 文劲宇, 吴桐, 等. 基于点估计和 Gram-Charlier 展开的含风电电力系统概率潮流实用算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 16-23.  
AI Xiaomeng, WEN Jinyu, WU Tong, et al. A practical algorithm based on point estimation and Gram-Charlier expansion for probabilistic load flow calculation of power systems incorporating wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 16-23.
- [14] 毛晓明, 叶嘉俊. 主元分析结合 Cornish-Fisher 展开的概率潮流三点估计法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 66-72.  
MAO Xiaoming, YE Jiajun. A three-point estimate method for probabilistic load flow computation based on principal component analysis and Cornish-Fisher series[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 66-72.
- [15] 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, 12.  
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, 12.
- [16] 郭小璇, 龚仁喜, 鲍海波. 基于随机响应面法考虑随机变量相关性的概率潮流计算[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(2): 104-111, 115.  
GUO Xiaoxuan, GONG Renxi, BAO Haibo. Probabilistic load flow calculation considering correlative random variable based on stochastic response surface method[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(2): 104-111, 115.
- [17] 陈胜, 卫志农, 孙国强, 等. 电-气混联 IES 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 intergrated electricity and natural-gas energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6331-6340.
- [18] 孙娟, 卫志农, 孙国强, 等. 计及 P2H 的电-热互联 IES 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.
- [19] 廖星星, 吴奕, 卫志农, 等. 基于 GMM 及多点线性半不变量法的电-热互联 IES 概率潮流分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 55-62.  
LIAO Xingxing, WU Yi, WEI Zhinong, et al. Probabilistic power flow analysis of integrated electricity-heat energy system based on GMM and multi-point linear cumulant method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 55-62.
- [20] 张儒峰, 姜涛, 李国庆, 等. 基于最大熵原理的电-气 IES 概率能量流分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4430-4441.  
ZHANG Rufeng, JIANG Tao, LI Guoqing, et al. Maximum entropy based probabilistic energy flow calculation for integrated electricity and natural gas systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4430-4441.
- [21] MASSRUR H R, NIKNAM T, FOTUHI-FIRUZABAD M. Investigation of carrier demand response uncertainty on energy flow of renewable-based integrated electricity-gas-heat systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(11): 5133-5142.
- [22] 黎晨阳, 张沈习, 程浩忠, 等. 计及相关性的电-气互联区域 IES 概率多能流计算[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 42-49.  
LI Chenyang, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al.

- Correlation-based probabilistic multi-energy flow calculation of regional integrated energy system with combined electricity and natural gas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 42-49.
- [23] 唐建清, 勇晔, 薛溟枫, 等. 基于拟蒙特卡罗模拟法的电-热联合系统概率能量流分析[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(4): 17-22.  
TANG Jianqing, YONG Ye, XUE Mingfeng, et al. Probabilistic energy flow analysis of the combined heat and electricity system based on quasi-Monte Carlo simulation method[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(4): 17-22.
- [24] 杨家豪. 区域综合能源系统冷-热-电-气概率多能流计算[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 74-83.  
YANG Jiahao. Probabilistic multi-energy flow calculation for regional integrated energy system containing cooling, heating, electricity, and gas[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 74-83.
- [25] 邱宜彬, 欧阳誉波, 李奇, 等. 考虑多风电场相关性的场景概率潮流计算及无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 61-68.  
QIU Yibin, OUYANG Yubo, LI Qi, et al. Scenario probabilistic load flow calculation and reactive power optimization considering wind farms correlation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 61-68.
- [26] ZHU X, LIU C, SU C, et al. Learning-based probabilistic power flow calculation considering the correlation among multiple wind farms[J]. IEEE Access, 2020, 8: 136782-136793.
- [27] XIE Y, LIN S, LIANG W, et al. An interval probabilistic energy flow calculation method for CCHP campus microgrids[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(4): 6219-6230.
- [28] 段偲默, 苗世洪, 霍雪松, 等. 基于动态 Copula 的风光联合出力建模及动态相关性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 35-42.  
DUAN Simo, MIAO Shihong, HUO Xuesong, et al. Modeling and dynamic correlation analysis of wind/solar power joint output based on dynamic Copula[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 35-42.
- [29] 陈彬彬, 孙宏斌, 尹冠雄, 等. IES 分析的统一能路理论(二): 水路与热路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2133-2142, 2393.  
CHEN Binbin, SUN Hongbin, YIN Guanxiong, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (II): hydraulic circuit and thermal circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2133-2142, 2393.
- [30] VLACHOGIANNIS J G. Probabilistic constrained load flow considering integration of wind power generation and electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(4): 1808-1817.
- [31] 吴巍, 汪可友, 李国杰. 计及光伏发电相关性的多重积分法概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 568-575.  
WU Wei, WANG Keyou, LI Guojie. Probabilistic load flow calculation method based on multiple integral method considering correlation of photovoltaic generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 568-575.
- [32] 陈宇辛, 江岳文. 考虑变量相关性的改进场景优化法区间潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 161-167.  
CHEN Yuxin, JIANG Yuewen. Interval power flow calculation with improved scenario optimization method considering correlation of variables[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 161-167.
- [33] KRISHNA A B, ABHYANKAR A R. Uniform experimental design-based nonparametric quasi-Monte Carlo for efficient probabilistic power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2318-2332.
- [34] 曾博, 胡强, 刘裕, 等. 考虑需求响应复杂不确定性的电-气互联系统动态概率能流计算[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1161-1171, 1408.  
ZENG Bo, HU Qiang, LIU Yu, et al. Dynamic probabilistic energy flow calculation for interconnected electricity-gas system considering complex uncertainties of demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1161-1171, 1408.

收稿日期: 2024-03-29; 修回日期: 2024-07-25

作者简介:

沈 赋(1988—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新型电力系统建模; E-mail: shenfu@kust.edu.cn

张宇涛(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型电力系统建模; E-mail: zyt18205065323@163.com

王 健(1994—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为综合能源系统建模及可靠性评估。E-mail: jianwangzx@163.com

(编辑 魏小丽)