

# 含高比例风电的电-气互联系统概率能流计算分析

曾 博<sup>1</sup>, 胡 强<sup>1</sup>, 张玉莹<sup>2</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 神华国华(北京)电力研究院有限公司, 北京 100025)

**摘 要:** 为有效评估含高比例风电的电-气互联系统(IEGES)中不确定性因素对其运行安全造成的影响, 提出一种改进半不变量概率能流计算方法。首先分别建立 IEAGES 下各供能子系统的源-网-荷侧概率能流模型; 在此基础上, 进一步构建 IEAGES 概率能流计算模型, 并提出一种基于分段线性化的蒙特卡洛抽样法, 以提高复杂输入变量的半不变量计算精度, 同时, 针对不同类型用能负荷之间相互替代和同类用能负荷时间转移导致的相关性问题, 通过引入 Nataf 逆变换法, 修正了传统半不变量法求解方程。最后, 通过算例分析验证所提算法在实际应用中的有效性和实用性。仿真结果表明, IEAGES 可利用电转气技术显著提高其可再生能源风电的消纳能力。

**关键词:** 算法; 相关性; 高比例风电; 电-气互联系统; 电转气技术; 概率能流

**中图分类号:** TM761

**文献标志码:** A

## 0 引 言

快速增长的能源需求与日益严重的环境压力使得发展可再生能源发电(renewable energy generation, REG)与低碳能源供应体系变得势在必行<sup>[1]</sup>。在传统电力系统中, 由于受制于系统运行安全、供电质量和控制手段等诸多因素, 难以在短期内实现对可再生能源的高效消纳与利用<sup>[2]</sup>。为解决上述问题, 近年来学者们提出综合能源系统(integrated energy system, IES)的概念。在 IES 下的多种类型能源载体, 如电、热、燃气等, 通过系统中各类转换设备, 如热电联产(combined heat and power, CHP)机组、电转气(power to gas, P2G)设备等紧密耦合, 并借助统一的运行管理平台实现对多种能源的综合互补利用。IES 的出现使得多种能源得以在更大范围内优化配置, 这为推动可再生能源的高效利用提供了全新的解决思路<sup>[3]</sup>。

多种能源形式的互联耦合将显著改变能量在原有各自子系统内的分布与传输特性。为确保 IES 的最优规划和运行, 亟待开发高效的计算分析工具以适应上述发展要求。针对 IES 下多能流计算问题, 目前已有不少国内外学者开展了有关研究。文献[4]通过深入分析

IES 不同运行方式, 提出一种基于扩展 Newton-Raphson 的多能流计算方法; 文献[5-6]通过采用解耦求解方法, 对区域电力-天然气-热力系统的能流分布进行了研究。上述计算方法大多基于确定性稳态能流模型, 并未考虑 IES 中存在的大量不确定性因素, 如可再生能源出力波动等, 对系统运行造成的影响。为弥补上述不足, 不少研究者进一步引入电力系统概率潮流概念, 研究了适用于电-气互联系统(integrated electricity-gas energy system, IEAGES)的概率能流(probabilistic energy flow, PEF)计算方法。如文献[7]通过采用蒙特卡罗模拟法(Monte-Carlo simulation, MCS), 定量分析了系统中各类负荷以及风电场出力的波动对能流分布特性造成的影响; 在此基础上, 文献[8]进一步根据能源集线器模型, 提出了针对含新能源的 IEAGES 的 PEF 计算方法。虽然 MCS 法操作简单、通用性强, 但其在大规模系统中应用时, 却往往存在收敛速度慢的问题。为此, 文献[9]提出一种半不变量法, 使 PEF 计算效率得到了提高。文献[10]采用一种基于 Nataf 变换的三点估计方法, 并将其应用于电-气互联系统最优 PEF 分析。

上述综述表明, 针对 IEAGES 下 PEF 计算问题, 开发能够灵活兼顾仿真效率和精度的混合求解算法是当前

收稿日期: 2018-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(51507061; 71601078); 中央高校基本科研业务费专项基金(2018ZD13)

通信作者: 曾 博(1987—), 男, 博士、副教授, 主要从事综合能源系统规划与运行方面的研究。alosecity@126.com

的研究热点。其中,半不变量算法由于能够有效适应于大规模仿真计算的要求,因此被广泛认为具有更好的应用前景<sup>[9]</sup>。然而,针对现有研究,基于半不变量法的 PEF 算法仍存在以下 2 个方面重要问题,有待进一步分析解决:1)在 IEGES 中,由于风光等 REG 的大规模接入以及系统运行方式的复杂化,输入变量的变化范围通常很大,从而导致其他相关变量(如 P2G 转化量)也将在大范围内波动。对此,传统半不变量法采用基于单点线性化的变量获取方式会引起较大的截断误差,从而难以得到精确的半不变量解析式;2)传统半不变量法的应用前提为各输入变量之间相互独立,而在实际 IEGES 中,不同类型用能负荷之间相互替代和同类用能负荷时间转移而会导致相关性问题的。因此,必须对原有方法进行必要修正,以满足上述应用需求。

有鉴于此,本文对含高比例风电的 IEGES 的 PEF 计算方法进行研究。首先,计及系统中电、气负荷和风电出力等不确定性因素,建立由 CHP 机组和 P2G 设备耦合成的 IEGES 的 PEF 模型;然后,基于 Newton-Raphson 模型,提出一种改进半不变量的 PEF 计算方法(modified cumulant method, MCM)。其中,通过采用基于分段线性化的蒙特卡洛抽样法计算复杂输入变量的半不变量,并引入 Nataf 逆变换法修正传统半不变量法求解方程,以实现对不同输入变量之间相关性的有效处理。最后通过算例分析验证了本文所提算法的有效性和实用性。

## 1 IEGES 系统建模

本文面向研究的 IEGES 由电力系统和天然气系统通过 CHP 机组和 P2G 设备耦合而成,如图 1 所示。在该系统中,电力网络将电能从电源侧传输到负荷侧;天然气网络则将气源直接或经由压缩机提高压力后,送至终端用气负荷。CHP 机组和 P2G 设备能够根据需求实

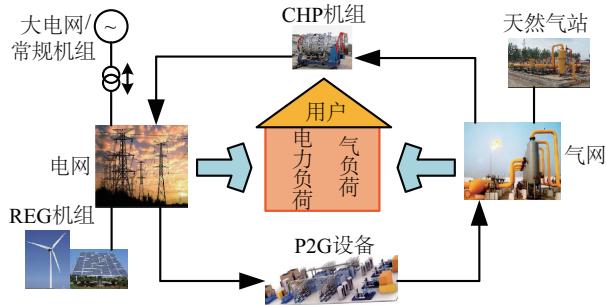


图 1 IEGES 结构图

Fig. 1 Configuration of IEGES

现电能与天然气之间的转换。当系统中 REG 比例较高时,用电低谷时段富余的可再生能源电量可通过 P2G 设备转化为易于大规模存储的天然气,并在高峰时段通过 CHP 机组发电重新利用。上述特性为 IEGES 中可再生能源高效利用提供了重要手段。

基于上述架构,下文将对图中各子系统分别进行建模。

### 1.1 电力系统模型

IEGES 中的电力子系统主要由电源、输电网络和电力负荷构成。其中,根据所用一次能源的类型,电源可分为常规发电机组和 REG 机组。

#### 1.1.1 电源模型

##### 1) 常规机组

在 IEGES 中,常规发电机组使用传统化石燃料作为能源,因此其发电出力通常具有完全的可调节性。为简便起见,本文假设系统中所有常规机组的有功出力均为恒定,并在 PEF 计算中可视作 PV 节点处理<sup>[6]</sup>。

##### 2) REG 机组

考虑到中国国情及相关技术的成熟度,本文仅以风力发电作为代表,对 REG 进行特性建模。

风电机组的输出功率主要与其所在位置的风速相关。大量研究表明,基于单峰正偏态双参数的威布尔分布可较好地描述风速的统计特性<sup>[11]</sup>:

$$f(v) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{v}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[ - \left( \frac{v}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (1)$$

式中,  $v$  —— 风速, m/s;  $\alpha$  —— 形状参数;  $\beta$  —— 尺度参数。

形状参数  $\alpha$  和尺度参数  $\beta$  的展开式为:

$$\alpha = \left( \frac{\sigma_w}{\mu_w} \right)^{-1.086} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2\mu_w}{\sqrt{\pi}} \quad (3)$$

式中,  $\mu_w$ 、 $\sigma_w$  —— 相关统计周期内风速的平均值与标准差,可由历史风速统计数据得到。

根据所在位置的风速  $v$ , 则风电机组的实际输出功率  $P_w(v)$  可由以下分段函数<sup>[12]</sup>计算得到:

$$P_w(v) = \begin{cases} 0, & v \leq v_{in}, v \geq v_{out} \\ k_1 v + k_2, & v_{in} < v < v_n \\ P_n, & v_n \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $P_n$  —— 风力发电机的额定功率, kW;  $v_n$  —— 额定风速, m/s;  $v_{in}$  —— 切入风速, m/s;  $v_{out}$  —— 切出风速, m/s;  $k_1$ 、 $k_2$  —— 参数,  $k_1 = P_n / (v_n - v_{in})$ 、 $k_2 = -(k_1 v_n)$ 。

本文假定 IEGES 中所有风电机组均采用恒功率因数控制方式,且其功率因数为 1,在 PEF 计算中作为 PQ 节点。

### 1.1.2 电力潮流模型

与传统的电力系统概率潮流分析相同,本文中 IEGES 的电力系统模型采用经典的极坐标形式下交流潮流模型描述:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $P_i$  ——节点  $i$  有功和无功功率注入量, kW;  $Q_i$  ——节点  $i$  无功功率注入量, kvar;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  ——节点导纳矩阵中元素的实部和虚部。

### 1.1.3 电力负荷模型

在实际运行中,用户的用电需求受环境、习惯和生产等多方面因素影响,因此具有高度的不确定性。针对 PEF 计算,电力负荷的随机性通常可用正态分布来描述<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} f(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left[-\frac{(P-\mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right] \\ f(Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_q} \exp\left[-\frac{(Q-\mu_q)^2}{2\sigma_q^2}\right] \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\mu_p$ 、 $\sigma_p$  ——电力负荷有功功率的期望和标准差;  $\mu_q$ 、 $\sigma_q$  ——电力负荷无功功率的期望和标准差。

## 1.2 天然气系统模型

天然气系统主要包括天然气站、管道、加压站、储气罐、调压阀和阀门<sup>[13]</sup>。

### 1.2.1 天然气站模型

IEGES 的燃气主要来源于天然气站。天然气由气站进入管道,经管网输送至用户。其间,可调节调压阀或阀门阀芯位置控制管网中节点的压力。本文假定天然气站有充足的天然气可保证天然气系统的运行,因而将其视为平衡节点<sup>[4]</sup>。

### 1.2.2 天然气传输模型

当天然气网络中不含压缩机时,天然气传输模型可表示为<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} f_R = K_r s_{ij} \sqrt{s_{ij} (\Pi_i - \Pi_j)} \\ \Delta \Pi = -A_g^T \Pi \\ A_g f_R = G \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $f_R$  ——天然气网络中管道  $R$  的流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $K_r$  ——管道常数;  $s_{ij}$  ——管道内天然气的流向,当时取 +1, 否则取 -1;  $\Pi$  ——节点  $i$  压力的平方, Pa;  $\Delta \Pi$  ——管道  $R$  的压力降, Pa;  $A_g$  ——去掉含压缩机管道的天然气网络的节点-支路关联矩阵;  $G$  ——天然气节点的消耗量,  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

在 IEGES 运行中,由于管道存在摩擦阻力,天然气传输过程中会有一定的压力损失,为达到供气压力要求,网络中通常会配置一定数量的加压站。含耗气式压缩机的管道模型如图 2 所示,其中,  $m$  代表压缩机上连接点;  $n$  为压缩机下连接点;  $i$  表示压缩机入口处节点;  $o$  表示压缩机出口处节点;  $f_{mi}$ 、 $f_{on}$  分别代表压缩机入口和出口管道的流量( $\text{m}^3/\text{h}$ )。压缩机的天然气消耗量  $f_{cp}$  主要受压缩机传输流量  $f_{com}$  及其压缩比  $f_{cp}$  影响,可表示为<sup>[4]</sup>:

$$f_{cp} = \frac{k_{cp} f_{com} T_g}{q_g} \left( k_{cp}^{\frac{a-1}{a}} - 1 \right) \quad (8)$$

式中,  $q_g$  ——天然气热值,  $\text{MJ}/\text{m}^3$ , 取  $39 \text{ MJ}/\text{m}^3$ ;  $T_g$  ——天然气温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $a$  ——多变指数,取决于压缩因子。

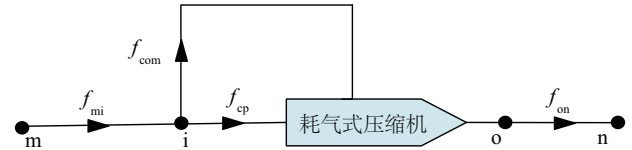


图2 含耗气式压缩机的管道模型

Fig. 2 Pipeline with compressor driven by gas turbine

根据系统运行目标的不同,压缩机可分别工作在以下 4 种控制模式<sup>[4]</sup>: 1) 出口压力已知; 2) 入口压力已知; 3) 通过压缩机的流量已知; 4) 压缩比已知。为方便分析,本文仅考虑上述“出口压力已知”的情况。

### 1.2.3 天然气负荷模型

与电力负荷类似,终端用户天然气负荷的随机性可用正态分布来描述<sup>[9]</sup>:

$$f(G) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_g} \exp\left[-\frac{(G-\mu_g)^2}{2\sigma_g^2}\right] \quad (9)$$

式中,  $\mu_g$ 、 $\sigma_g$  ——天然气负荷  $G$  的期望和标准差。

## 1.3 耦合元件模型

在 IEGES 中,耦合元件主要包括 CHP 机组和 P2G 设备。一方面 CHP 机组通过消耗天然气而产生电能,因此是天然气子系统的“荷”和电力子系统的“源”;而另一方面,P2G 设备可通过化工过程将电能转化为天然

气,因此是天然气子系统的“源”和电力子系统的“荷”。

### 1.3.1 CHP 机组模型

在 CHP 机组运行时,其燃气耗量  $Q_g$  与有功出力  $P_g$  呈二次函数关系<sup>[15]</sup>:

$$Q_g = k_1 P_g^2 + k_2 P_g + k_3 \quad (10)$$

式中,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ ——燃气轮机耗量系数<sup>[9]</sup>。

### 1.3.2 P2G 设备模型

针对 PEF 分析,P2G 模型可简化为一个关于功-能转换效率的线性函数,如式(11)所示<sup>[15]</sup>:

$$Q_p = \frac{\phi_p P_p}{q_g} \quad (11)$$

式中,  $Q_p$ ——P2G 设备产生的天然气流量,  $m^3/h$ ;  $P_p$ ——P2G 设备消耗的有功功率, MW;  $\phi_p$ ——P2G 设备的转换效率。

需要指出的是,由于本文考虑到 PEF 方法主要关注的是单个时间断面,故上述 P2G 设备采用的是静态模型,且其转化效率为固定值。

## 2 PEF 计算方法

### 2.1 IEGES 稳态能量流计算模型

基于系统构架,IEGES 稳态能量流计算模型可表示为:

$$W = f(X) \quad (12)$$

式中,  $W$ ——系统节点输入变量,包括节点有功功率  $P$ 、节点无功功率  $Q$  和节点天然气负荷  $G$ ;  $X$ ——系统节点状态变量,包括电压相角  $\theta$ 、电压幅值  $U$ 、节点压力平方  $\Pi$ 。

将天然气系统模型代入 Newton-Raphson 模型进行求解,可进一步得到修正方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta G \end{bmatrix} = -J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \\ \Delta \Pi \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$J = \begin{bmatrix} J_e & J_{eg} \\ J_{ge} & J_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial U} & \frac{\partial \Delta P}{\partial \Pi} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial U} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial \Pi} \\ \frac{\partial \Delta G}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta G}{\partial U} & \frac{\partial \Delta G}{\partial \Pi} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中,  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$ ——电力系统节点的有功和无功偏差;  $\Delta L$ ——节点流量偏差;  $\Delta \theta$ 、 $\Delta U$ ——电力系统节点电压的相角和幅值偏差;  $\Delta \Pi$ ——管道节点压力的平方偏差;  $J$ ——雅可比矩阵,由电力子阵  $J_e$ 、电气子阵  $J_{eg}$ 、气电子阵  $J_{ge}$ 、天然气子阵  $J_g$  组成。

### 2.2 计及输入变量相关性的 MCM 算法

#### 2.2.1 复杂输入变量的半不变量求取

在 IEGES 中,由于输入变量(如风电注入功率、P2G 设备转化功率等)的随机波动性较大,导致所得半不变量往往具有较大误差,从而影响最终 PEF 计算结果的有效性<sup>[16]</sup>。为解决上述问题,本文提出一种基于分段线性化的蒙特卡洛抽样法(piecewise linearization based Monte-Carlo simulation, PLMCS)以求取复杂输入变量的半不变量。PLMCS 的基本思想是通过将复杂函数多点泰勒展开后,再将各分段化作为样本离散点求取半不变量值。相比于传统半不变量法,PLMCS 在使用上更为方便,稳健性好,且求解精度更高。

基于 PLMCS 求取半不变量的主要步骤:

1)对于服从复杂分布函数或随机波动范围较大的随机变量  $W$ ,将其分布区间划分为  $N$  个区间,在每个区间内选取相应的基准运行点,并将潮流方程在各点处分别线性化:

$$X_N - X_{N0} = -(J_N)^{-1}(W_N - W_{N0}) \quad (15)$$

式中,  $N$ ——运行场景个数,根据随机变量  $W$  的分布情况可得其每个场景的概率  $p_i$ ,则  $\sum_{i=1}^N p_i = 1$ ;  $X_N$ 、 $W_N$ ——第  $N$  个运行场景的节点状态变量和节点输入变量;  $X_{N0}$ 、 $W_{N0}$ ——第  $N$  个运行场景的基准运行点和基准功率。

2)针对各区间场景,利用 MCS 得到  $M$  个样本  $\{w_{s1}, w_{s2}, \dots, w_{sM}\}$ ,并计算其各阶原点矩  $\alpha_v$ :

$$\alpha_v = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M w_{si}^v, v = 1, 2, \dots \quad (16)$$

3)根据半不变量与原点矩的关系<sup>[17]</sup>,进一步求取各分段区间的各阶半不变量:

$$\begin{cases} \kappa_1 = \alpha_1 \\ \kappa_{v+1} = \alpha_{v+1} - \sum_{j=1}^v C_v^j \alpha_j \kappa_{v-j+1} \end{cases} \quad (17)$$

在实际 PEF 分析时,若输入变量  $W$  的整体分布函数未知,可随机选用一组该变量的历史数据为参考样本,再依此计算其半不变量。

4)通过半不变量法求取每个场景中状态变量  $x$  的累积分布函数  $F_i(x)$ ,则状态变量  $x$  对应的累积分布函数可进一步表示为:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N p_i F_i(x) \quad (18)$$

在确定上述输入变量  $W$  的分段数  $N$  时,可根据其



分布函数复杂性设置区间最大允许值,从而使  $N$  随输入变量  $W$  的取值范围自适应变动。

### 2.2.2 输入变量的相关性处理

半不变量法的核心思想是利用半不变量的齐次性和可加性<sup>[18]</sup>,将各个随机变量  $\Delta W$  的卷积运算转换为其半不变量间的代数运算,从而获得与之对应的各阶半不变量,即:

$$\Delta X^{(k)} = (J_0^{-1})^{(k)} \Delta W^{(k)} = S_0^{(k)} \Delta W^{(k)} \quad (19)$$

式中,  $\Delta X^{(k)}$  ——  $X$  的  $k$  阶半不变量;  $J_0$  ——最新一次迭代的雅可比矩阵;  $S_0$  ——灵敏度矩阵;  $S_0^{(k)}$  ——矩阵  $S_0$  中元素的  $k$  次幂所构成的矩阵;  $\Delta W^{(k)}$  ——  $W$  的  $k$  阶半不变量,为节点注入量、风电、电负荷和气负荷等  $k$  阶半不变量之和。

半不变量法的应用前提为各输入变量相互独立,然而在实际 IEGES 运行中,不仅同类用能负荷之间存在相关性,不同类型负荷(如电负荷与气负荷)之间在时空变化上往往也存在相关性。故引入 Nataf 逆变换法修正半不变量法求解方程,以使半不变量法适应上述各类负荷相关性场景。

已知输入变量  $W$  的边际累积分布函数  $F(W)$  和相关系数矩阵  $C_w$ ,应用 Nataf 逆变换得到输入变量  $W$  的样本  $W_s$ ,详细步骤如下:

1)对相关系数矩阵  $C_w$  进行转换,得到标准正态分布变量  $Z$  的相关系数矩阵  $C_z$ ,其中  $C_z$  非对角元素,可由式(20)获得:

$$\rho_{z_{ij}} = D(\rho_{w_{ij}}) \rho_{w_{ij}} \quad (20)$$

式中,  $\rho_{z_{ij}}$ 、 $\rho_{w_{ij}}$  ——  $C_z$  和  $C_w$  的第  $i$  行第  $j$  列元素;  $D(\cdot)$  ——等效相关系数转换矩阵,  $D(\rho_{w_{ij}})$  的求解方法见文献[19],在此不再赘述。

2)通过式(21)得到相关系数矩阵为  $C_z$  的标准正态分布变量  $Z$  的样本  $Z_s$ :

$$Z_s = H_z E_s \quad (21)$$

式中,  $H_z$  ——对矩阵  $C_z$  进行 Cholesky 分解得到的下三角矩阵;  $E_s$  ——由蒙特卡罗抽样生成的独立标准正态分布变量  $E$  的样本。

3)根据等概率转换原则<sup>[16]</sup>,可进一步获得具有相关性的输入变量  $W$  的样本  $W_s$  为:

$$W_s = F^{-1}[\varphi(Z_s)] \quad (22)$$

式中,  $\varphi(Z_s)$  ——标准正态分布变量  $Z$  的累积分布。

根据样本  $W_s$ ,可求得其半不变量。由于相关系数

矩阵  $C_w$  为对称矩阵,则  $W$  可表示为不相关的变量  $Y$  的组合:

$$W = H_w Y \quad (23)$$

式中,  $H_w$  ——相关系数矩阵  $C_w$  进行 Cholesky 得到的下三角矩阵。

考虑到变量  $Y$  内部各子变量之间相互独立,故可根据式(19)求得其各阶半不变量:

$$\Delta X^{(k)} = (S_0 H_w)^{(k)} \Delta Y^{(k)} = S_1^{(k)} \Delta Y^{(k)} \quad (24)$$

### 2.2.3 输出变量概率分布表达

当已知待求输出变量  $X$  的半不变量后,通过级数展开的方法可以计算其概率分布。在实际计算中,常用的级数形式主要包括 Gram-Charlier 级数、Edgeworth 级数、Cornish-Fisher 级数等。与前 2 种级数相比, Cornish-Fisher 级数在拟合非正态分布变量的概率分布时具有较好的收敛性和更高的精度<sup>[20]</sup>。因此,本文采用 Cornish-Fisher 级数方法,对各待求变量  $x$  进行展开:

$$f(x) \approx g(x) + \frac{1}{6}[g^2(x) - 1]y^{(3)} + \frac{1}{24}[g^3(x) - 3g(x)]y^{(4)} - \frac{1}{36}[2g^3(x) - 5g(x)](y^{(3)})^2 + \frac{1}{120}[g^4(x) - 6g^2(x) + 3]y^{(5)} + \dots \quad (25)$$

式中,  $g(x) = \varphi^{-1}(x)$ ;  $y^{(k)}$  ——输出变量  $x$  的  $k$  阶规格化半不变量。

在此基础上,根据式(26)即可求得输出变量  $x$  的累积分布函数  $F(x)$ :

$$F(x) = \int f(x) dx \quad (26)$$

## 2.3 算法流程

根据上文所述,本文所提 MCM 算法的详细流程如图 3 所示。基于 MCM 计算 IEGES 概率能流,首先需读取系统中各子模块参数,并输入各状态量的初始值;然后,根据输入变量分布函数的形式,得到相应的运行场景;针对各运行场景,求取输入变量的半不变量,并通过稳态能流计算得到基准运行点的状态变量和对应的雅可比矩阵;接着,针对含相关性的输入变量,采用 Nataf 逆变换将其处理为彼此之间相互独立的变量,并计算其相应的半不变量;最后,采用 Cornish-Fisher 级数展开的方法,进一步求得输出变量的累积分布函数表达式,若存在分段区间,则将各运行场景得到的累积分布函数表达式依概率累加,得到输出变量最终的累积分布函数表达式。

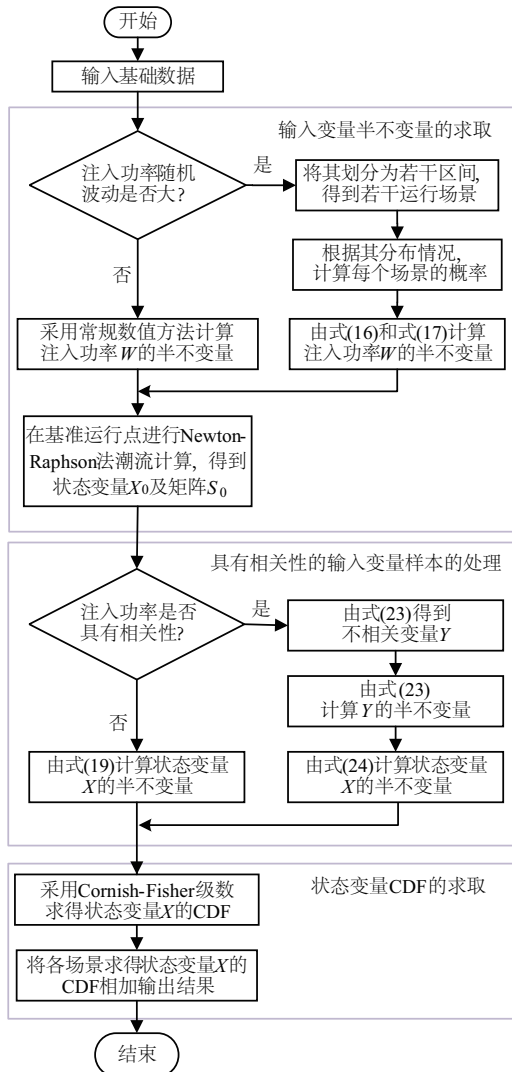


图3 MCM算法流程图

Fig. 3 Flowchart of MCM algorithm

### 3 算例分析

#### 3.1 仿真数据

本文结合 IEEE 9 节点系统和文献[4]中的 7 节点天然气系统构成 IEGES 进行仿真分析,以验证所提方法的有效性。如图 4 所示,电力子系统中共包括 3 台常规发电机组,分别位于电网节点 7~节点 9,总装机容量为 248 MW,输电线路 9 条,总有功负荷为 315 MW。假定节点 5 接有装机容量为 50 MW 的风电场,功率因数恒定为 1。风电场的风速服从尺度系数 10.70、形状系数 3.97 的威布尔分布。单台风电机组的切入风速为 3 m/s,额定风速为 15 m/s,切出风速为 25 m/s。天然气子系统中包括 7 个节点,7 条输气管道,1 个加

站,1 个天然气供应站,天然气总负荷为 10100 m<sup>3</sup>/h。在上述 IEGES 中,假设 CHP 机组的装机容量为 50 MW,分别连接气网节点 3 和电网节点 1,需求量的变化全部由平衡节点承担;P2G 设备的装机容量为 50 MW,分别连接气网节点 5 和电网节点 5,同时假定计算中加压站的出口压力已知,具体参数见文献[4]。

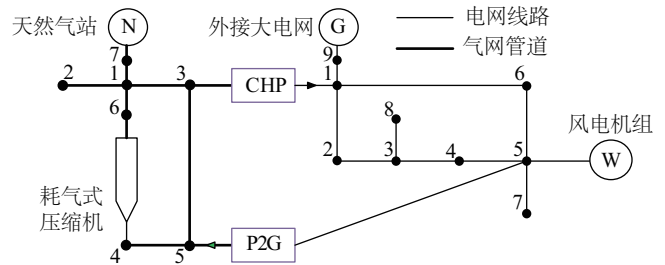


图4 含风电的电-气互联综合能源系统

Fig. 4 IEGES with wind power

本文假设风电出力 and 电、气负荷满足期望为其预测值,标准差为期望的 10%的正态分布函数。此外,电-电负荷、气-气负荷之间相关系数为 0.7,电-气负荷之间相关系数为 0.5。

#### 3.2 MCM 算法的有效性分析

为评估所提 MCM 算法的有效性,以循环次数为 10000 的 MCS 算法所得结果作为参照,引入方差和的根均值(average root mean square, ARMS)指标<sup>[21]</sup>,分析 MCM 算法的计算误差:

$$ARMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MCS_i - MCM_i)^2}{N}} \quad (27)$$

式中,  $MCS_i$ 、 $MCM_i$ ——MCS 算法和 MCM 算法得到的输出变量 CDF 上第  $i$  个点的值;  $N$ ——CDF 上的取点数,取 1000。

相关 ARMS 的指标结果如表 1 所示。在同精度级别下, MCS 算法耗时 51.286 s,而 MCM 算法只需 4.852 s。由计算结果可知, MCM 算法汲取了 MCS 算法的采样优势和半不变量法计算速度快的优点,表现出精度高而耗时少的综合优势,因此具有更好的计算性能。

表1 输出变量的 ARMS 指标

Table 1 ARMS of output variables

状态变量	ARMS/%	状态变量	ARMS/%
节点5电压	0.505	节点5压力	0.354
节点1电压	0.230	节点3压力	0.203

此外,在不考虑注入变量间相关性的情况下,分别

采用 MCM 算法与传统半不变量法对不同风电并网容量下的 IEGES 进行 PEF 计算。为此,以 20 MW 作为步长,考虑风电并网容量从 0 逐步增加至 80 MW,相关结果的误差比较如图 5 所示,其中,星、圈实线分别表示用 MCM 算法计算的电网节点 5 电压和气网节点 5 压力的 ARMS 值;星、圈虚线分别表示用半不变量法计算的电网节点 5 电压和气网节点 5 压力的 ARMS 值。由图 5 可知,随着风电渗透率的增加,用半不变量法所得节点电压和压力的 ARMS 值逐步增大,而用 MCM 算法得到的结果则基本保持不变,一直维持较高的精度。这说明本文所提算法的稳定性好,可有效满足含大规模可再生能源 IEGES 的 PEF 分析的需要。

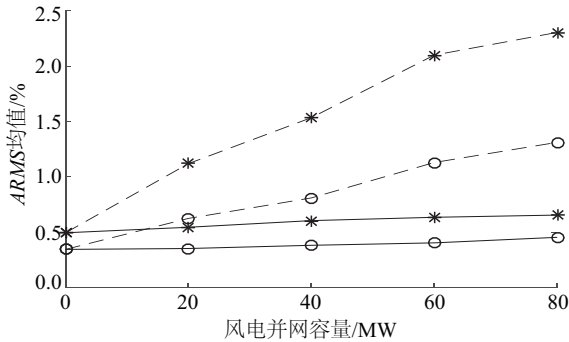


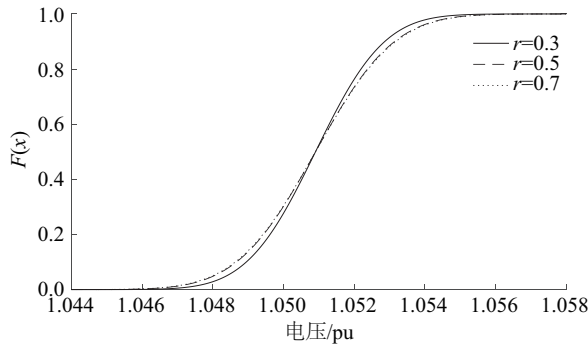
图5 不同风电并网容量下系统 ARMS 值

Fig. 5 ARMS with different capacity of wind power

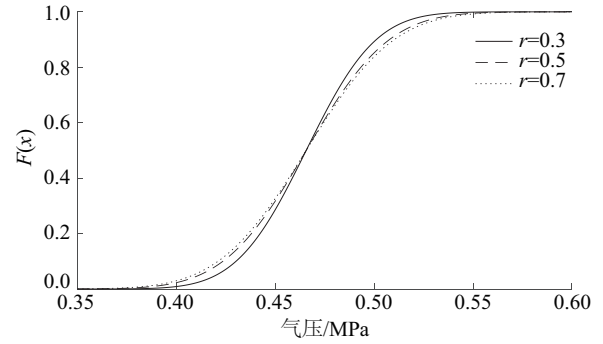
### 3.3 电-气负荷间的相关性对系统能流分布的影响

与已有研究相比,本文所提 PEF 计算方法不仅考虑了同类用能负荷之间的相关性,还特别计及了不同类型用能之间存在的时空关联性。为说明计及上述影响的必要性,本节将对电-气负荷的相关系数进行灵敏度分析,以揭示其对系统能流分布的影响。

为此,本文假设系统中电-气负荷相关系数  $r$  分别为 0.3(场景 1)、0.5(场景 2)和 0.7(场景 3),并以电网节点 5 和气网节点 5 各自对应的电压/气压为例,分析不同场景下 IEGES 中 PEF 情况,相关结果如图 6 所示。



a. 节点5电压CDF



b. 节点5压力CDF

图6 不同相关系数下输出变量的CDF曲线

Fig. 6 CDF of output variables with different correlation coefficient

可见,场景 1~场景 3 中电压/压力幅值的标准差逐渐增大。这说明随着电-气负荷相关系数的增大,电负荷高峰和气负荷高峰同时出现的频率越高,因此导致节点状态量波动也越为剧烈。

上述分析表明,IEGES 的 PEF 计算结果会受到电-气负荷时空分布特性的较大影响。因此,PEF 分析只有充分计及互联系统内不同类型用能负荷间的相关性,才能较好地保证最终计算结果和所得结论的有效性。

### 3.4 IEGES 的风电消纳能力分析

电压质量和供气压力是表征 IEGES 运行性能的重要指标。在实际情况下,由于系统中随机变量的存在,可能会导致运行过程中节点电压或气压出现越限的情况,从而危及系统运行的安全性。本节主要以节点电压标幺值和节点气压标幺值的越限概率为约束条件,假设 P2G 设备的转化效率为固定值,不随其容量变化,采用本文所提的概率能流计算方法计算分析在不同 P2G 设备容量下 IEGES 的风电消纳能力。

$$\begin{cases} \max (P_{wn}) \\ \text{s.t.} \begin{cases} W=f(X) \\ P(0.95 < U_i < 1.05) \leq 95\%, i=1,2,\dots,9 \\ P(0.4 < \sqrt{P_i} < 1.2) \leq 95\%, i=1,2,\dots,7 \end{cases} \end{cases} \quad (28)$$

式中,  $P_{wn}$  ——系统中所能接入的最大风电容量, kW。

为进行分析,假定以 10 MW 为步长,考虑 P2G 设备容量从 0 逐步增加至 80 MW,不同 P2G 容量下 IEGES 所能接纳风电最大容量的变化如图 7 所示。可见,当 P2G 容量为 0 时,受电力网络自身运行特性(如电压偏移)的限制,系统所能接入的风电容量较低。但随着 P2G 容量的提升,系统风电接纳能力显著提高。当节点 5 接入 110 MW 风电机组后,由于气网达到自身

运行约束上限,风电最大并网容量不再随 P2G 增容而提高,此时达到 IEGES 的风电极限接入容量。由此可见,P2G 技术对 IEGES 中 REG 利用具有显著影响。P2G 由于充分利用了天然气管道气压的越限裕度,从而显著提高了 IEGES 对 REG 的消纳能力,带来更好的经济与环境效益。

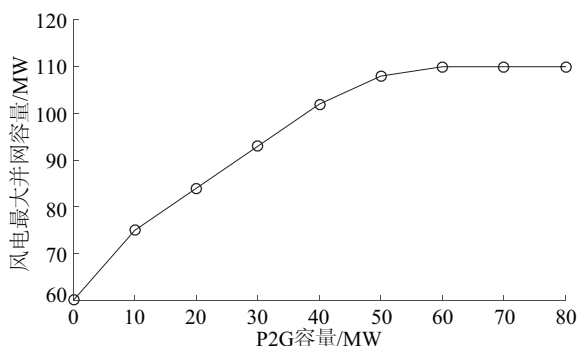


图7 不同P2G设备容量下风电最大并网容量

Fig. 7 Curve of maximum accommodated capacity of wind power with different sizes of P2G

## 4 结 论

针对含高比例风电 IEGES 运行分析问题,本文提出一种 MCM 概率能流计算方法。基于源-网-荷概率能流模型,构建 IEGES 概率能流计算模型,并提出基于分段线性化的 MCS 法,以提高复杂半不变量的计算效率。同时,针对异质用能负荷替代和同类用能负荷转移导致的相关性问题,引入 Nataf 逆变换法,修正传统半不变量法求解方程。

根据算例计算结果,所得结论为:

1)所提算法在含高比例风电 IEGES 中计算性能稳定,具有较好的有效性和实用性。

2)在 PEF 分析中,需充分计及 IEGES 内不同类型用能负荷间的相关性,才能保证计算结果的准确性,以更全面地反映互联系统的运行特性。

3)在 IEGES 中,考虑到天然气网节点气压的越限风险裕度,可利用 P2G 提高可再生能源风电的消纳能力,从而带来更好的经济环境效益。

### 【参考文献】

[1] 刘灿伟. 我国低碳能源发展战略研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.  
LIU C W. Study on the development strategy of low carbon energy[D]. Ji'nan: Shandong University, 2010.

[2] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 1-7.  
WU J Z. Study on drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of electric power systems, 2016, 40(5): 1-7.

[3] 杨经纬, 张宁, 王毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J]. 电力系统自动化, 2018 (4): 11-24.  
YANG J W, ZHANG N, WANG Y, et al. Review and prospect of multiple energy systems towards renewable energy accommodation[J]. Automation of electric power systems, 2018(4): 11-24.

[4] 王英瑞, 曾博, 郭经, 等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2942-2950.  
WANG Y R, ZENG B, GUO J, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas[J]. Power system technology, 2016, 40(10): 2942-2950.

[5] 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 W L, WANG D, JIA H J, 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.

[6] 林威, 靳小龙, 穆云飞, 等. 区域综合能源系统多目标最优混合潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5829-5839.  
LIN W, JIN X L, MU Y F, et al. Multi- objective optimal hybrid power flow algorithm for integrated local area energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5829-5839.

[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 S, WEI Z N, SUN G Q, 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 transaction on power systems, 2017, 32 (3): 1970-1979.



- [9] HU Y, LIAN H R, BIE Z H. Unified probabilistic gas and power flow [J]. Modern power system and clean energy, 2017, 5(3): 400-411.
- [10] 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 G Q, CHEN S, WEI Z N, 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.
- [11] 李轩, 张家安, 吴林林, 等. 可再生能源汇集地区风电与光伏发电的综合容量可信度评估[J]. 太阳能学报, 2017, 38(3): 707-714.  
LI X, ZHANG J A, WU L L, et al. Comprehensive capacity credit evaluation of wind and photovoltaic power in dense renewable energy areas[J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(3): 707-714.
- [12] 齐志远, 郭佳伟, 李晓扬. 基于联合概率分布的风光互补发电系统优化配置[J]. 太阳能学报, 2018, 39(1): 203-209.  
QI Z Y, GUO J W, LI X Y. Optimal co-nfiguration for wind power and solar power hybrid systems based on joint probability distribution of wind speed with solar irradiance[J]. Acta energiae solaris sinica, 2018, 39(1): 203-209.
- [13] PAZOUKI S, HAGHIFAM M R, MOSERC A. Uncertainty modeling in optimal operation of energy hub in presence of wind, storage and demand response[J]. Electrical power and energy systems, 2014, 61: 335-345.
- [14] 江茂泽, 徐羽镠, 王寿喜, 等. 输配气管网的模拟与分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 205-219.  
JIANG M Z, XU Y C, WANG S X, et al. Simulation and analysis of gas transmission and distribution network [M]. Beijing: China Petroleum Industry Press, 1995: 205-219.
- [15] 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 L, SUN L, CHEN H H. Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning[J]. Electric power automation equipment, 2017, 37(6): 110-116.
- [16] 蔡德福. 计及相关性的概率潮流计算算法及应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.  
CAI D F. Research on probabilistic load flow method considering dependence and its application [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [17] 胡泽春, 王锡凡, 张显, 等. 考虑线路故障的随机潮流[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 26-33.  
HU Z C, WANG X F, ZHANG X, et al. Probabilistic load flow method considering branch outages[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 26-33.
- [18] 朱星阳, 刘文霞, 张建华. 考虑大规模风电并网的电力系统随机潮流[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 77-85.  
ZHU X Y, LIU W X, ZHANG J H. Probabilistic load flow method considering large-scale wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 77-85.
- [19] LIU P L, DER KIUREGHIAN A. Multivariate distribution models with prescribed marginals and covariances [J]. Probabilistic engineering mechanics, 1986, 1(2): 105-112.
- [20] JASCHKE S. The cornish-fisher-expansion in the context of delta-gamma-normal approximations[J]. Journal of risk, 2002, 4(4): 33-52.
- [21] ZHANG P, LEE S T. Probabilistic load flow computation using the method of combined cumulants and Gram-Charlier expansion[J]. IEEE transaction on power systems, 2004, 19(1): 676-682.

## PROBABILISTIC ENERGY FLOW CALCULATION AND ANALYSIS OF INTEGRATED ELECTRICITY-GAS SYSTEMS WITH HIGH PENETRATION WIND POWER

Zeng Bo<sup>1</sup>, Hu Qiang<sup>1</sup>, Zhang Yuying<sup>2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources*,  
*North China Electric Power University, Beijing 102206, China*;

2. *Shenhua Guohua(Beijing) Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100025, China*)

**Abstract:** To effectively evaluate the impact of uncertain factors on the operation of integrated electricity-gas energy system (IEGES) with high proportion wind power, probabilistic energy flow calculation method using modified cumulant method is proposed. For this aim, a probabilistic energy flow model of IEGES is established. Furthermore, its calculation model is built. Then, a Monte Carlo method based on piecewise linearization is proposed to improve the cumulant calculation accuracy of complex input variables, and Nataf transform is used to modify traditional cumulant method solving equations. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified in case study. The simulation results show that P2G technology can effectively improve the accommodation of renewable energy in IEGES.

**Keywords:** algorithm; correlation; high penetration wind power; integrated electricity-gas energy system; power to gas technology; probabilistic energy flow