

基于拟蒙特卡罗模拟法的电-热联合系统 概率能量流分析

唐建清¹, 勇 晔¹, 薛溟枫¹, 仲磊磊², 卫志农²

(1. 国网江苏省电力有限公司 无锡供电分公司, 江苏 无锡 214061;

2. 河海大学 能源与电气学院, 南京 211100)

Probabilistic energy flow analysis of the combined heat and electricity system based on quasi-monte carlo simulation method

TANG Jianqing¹, YONG Ye¹, XUE Mingfeng¹, ZHONG Leilei², WEI Zhinong²

(1. Wuxi Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Wuxi 214061, China; 2. College of
Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

摘要:电-热联合系统中分布式可再生能源出力波动大、电和热负荷随机变化。建立电-热联合系统含不确定性的稳态能量流模型。通过Sobol点列构造低偏差点列,基于拟蒙特卡罗模拟法对随机变量抽样,考虑随机变量之间的相关性,求解电-热联合系统的概率能量流。算例表明所提方法收敛稳定性好,为后续研究电-热联合系统安全分析奠定了基础。

关键词:电-热联合系统;拟蒙特卡罗模拟;Sobol点列;概率能量流

Abstract: The output of distributed renewable energy fluctuates greatly and the electrical and thermal loads vary randomly in the combined heat and electricity system. A steady-state energy flow model with uncertainties for the combined heat and electricity system is established. A low deviation point series through Sobol point series is constructed. Based on the quasi-monte carlo simulation method, random variables are sampled, and the correlation between random variables is considered to solve the probabilistic energy flow of the combined heat and electricity system. The case shows that the proposed method has good convergence stability, which lays a foundation for the subsequent research on the safety analysis of the combined heat and electricity system.

Key words: combined heat and electricity system; quasi-monte carlo simulation; Sobol point; probabilistic energy flow

中图分类号:TK018;TM73 文献标志码:B

0 引言

综合能源系统^[1-3]的提出为研究多能源综合发展提供了新的思路,促进了多能源之间的融合,提高了能源的利用效率。综合能源系统包含供电、供气、供暖、供冷等^[4]。

近年来,风力发电、光伏发电等可再生能源因其环保、无污染、可持续的特性得到大力发展。研究风电和光伏与电-热联合系统协同运行成为新的挑战。但从电-热联合系统的角度看,并网时,风电和光伏出力的不确定性将影响电-热联合系统的运行状态,导致系统状态量急剧波动。随着风电与光伏在电-热联合系统中出力比重增加,该问题也将

愈发明显。因此,研究含不确定性的电-热联合系统的概率能量流具有重要意义。

目前,对于含不确定性电网概率潮流分析的研究较多^[5-7],而关于不确定的电-热联合系统概率能量流的研究相对较少。文献[8]基于蒙特卡罗(monte carlo simulation, MCS),考虑风电出力和电、热、气负荷的随机性,分析了电-气混联综合能源系统概率能量流问题。文献[9]基于Nataf变换和拉丁超立方采样的MCS法,研究了计及电转热的电-热互联综合综合系统概率能量流。

概率潮流的求解方法主要包括^[10]模拟法、近似法和解析法。模拟法在处理随机变量多和情况复杂的问题时效果较好^[10],而MCS法是常用的模拟法。拟蒙特卡罗(quasi-monte carlo simulation, QMCS)法相较于MCS法抽样均匀,相同抽样规模下更加接近于真解^[11]。文献[11]研究了基于QMCS法的电力系统可靠性评估问题;文献[12]基于QMCS法研究了主动配电网的随机潮流问题。

收稿日期:2019-05-15;修回日期:2019-05-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51877071);国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019017)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.51877071); Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. (No.J2019017)

基于此,本文提出了考虑不确定性的电-热联合系统的稳态能量流模型。通过Sobol点列构造低偏差点列,并基于QMCS法对随机变量抽样。考虑随机变量之间的相关性,求解电-热联合系统概率能量流。通过含风电与光伏出力的巴厘岛电-热联合系统,验证所提模型的可行性与有效性。

1 电-热联合系统稳态能量流模型

1.1 热力系统

热力系统包括水力模型和热力模型。

(1) 水力模型方程包括

$$Am = m_q \quad (1)$$

$$Bh_f = 0 \quad (2)$$

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

式中: A 为网络关联矩阵; m 为热网管道流量; m_q 为节点流入负荷流量; B 为回路关联矩阵; h_f 为由摩擦损失引起的管道压降; K 为管道阻力系数。

(2) 热力模型方程包括

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

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

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

式中: Φ 为热负荷; C_p 为水比热容; T_s 为节点供水温度; T_o 为节点回水温度; T_{start} 为管道首端温度; T_{end} 为管道末端温度; λ 为管道单位长度传热系数; L 为环境温度; T_a 为管道长度; m_{in} 、 m_{out} 为流入和流出节点的管道流量; T_{in} 、 T_{out} 为注入和流出节点的热水温度。

1.2 电力系统

电力系统交流潮流模型为

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i - V_i \sum_{j \in j} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_i = Q_i - V_i \sum_{j \in j} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_{ij} = (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) g_{ij} - V_i V_j \sin \theta_{ij} b_{ij} \\ Q_{ij} = -(V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) b_{ij} - V_i V_j \sin \theta_{ij} g_{ij} \end{cases} \quad (8)$$

式中: V_i 、 V_j 为节点 i 和 j 的电压幅值; ΔP_i 、 ΔQ_i 为节点 i 的有功和无功功率不平衡量; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 的相角差; G_{ij} 、 B_{ij} 为导纳矩阵中第 i 行第 j 列的实部和虚部, g_{ij} 、 b_{ij} 分别为线路的电导和电纳; P_{ij} 、 Q_{ij} 为节点 i 流向节点 j 的有功功率和无功功率。

1.3 耦合单元模型

热电联产(combined heat and power, CHP)消耗天然气产生电能和热能,根据产生电能与热能的比例是否恒定可以分为定热电比和变热电比两种^[13]

$$c_m = \Phi_{\text{CHP}} / P_{\text{CHP}} \quad (9)$$

$$c_z = \Phi_{\text{CHP}} / (\eta F_{\text{in}} - P_{\text{CHP}}) \quad (10)$$

式中: Φ_{CHP} 、 P_{CHP} 分别为CHP产生的热能和电能; η 为CHP机组变热电比的冷凝效率; F_{in} 为燃料输入效率; c_m 为固定值; c_z 为变化值。

1.4 电-热联合系统能量流分析

电-热联合系统能量流分析基于电力系统与热力系统的等式约束,采用牛顿-拉夫逊法求解,修正方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta \Phi \\ \Delta T \end{bmatrix}_{\Delta W} = -J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |U| \\ \Delta m \\ \Delta T \end{bmatrix}_{\Delta X} \quad (11)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial |U|} & \frac{\partial \Delta P}{\partial m} & \frac{\partial \Delta P}{\partial T} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial |U|} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial m} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial T} \\ \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial |U|} & \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial m} & \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial T} \\ \frac{\partial \Delta T}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta T}{\partial |U|} & \frac{\partial \Delta T}{\partial m} & \frac{\partial \Delta T}{\partial T} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: ΔW 为输入量的修正量; ΔX 为输出量的修正量; J 为雅可比矩阵。

2 电-热联合系统不确定性因素模拟模型

2.1 拟蒙特卡罗模拟法

QMC法和MC法都可作为抽样方法,QMC法抽样采用确定性的低偏差点列,MC法则采用伪随机数序列。低偏差点列致力于均匀性,故QMC法产生的点列相较于MC法产生的点列在超立方体中分布更加均匀。文献[12]详细介绍了QMC法原理以及一维情况下Sobol点列构造的步骤。

引入星偏差的概念^[12]以描述点列的均匀性。设 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 是 s 维单位超立方体 $[0, 1]^s$ 中的点列,则定义该点列的星偏差为

$$D_N^* = \sup_{V \subset [0, 1]^s} \left| \frac{M(X_1, X_2, \dots, X_N)}{N} - \mu(V) \right| \quad (13)$$

式中: $M(X_1, X_2, \dots, X_N)$ 是点列 $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ 包含在区域 V 中的点数; $\mu(V)$ 为 $[0, 1]^s$ 区域 V 的勒贝格测度, $\sup$ 为上确界函数。

目前主要选择Halton点列、Faure点列及Sobol点列构造QMC法中的低偏差点列。本文中选用Sobol点列,该方法相对简单,序列优越性明显,较为常用。该方法的具体步骤为^[11](一维情况下)

本原多项式

$$a^q + c_1 a^{q^{-1}} + \dots + c_{q-1} a + 1 \quad (14)$$

该多项式具有如下性质:(1) 不可约;(2) 该多项式

能够被整除的形如 $a^q + 1$ 的阶数最小值为 $2^q - 1$ 。符合上述性质的多项式称之为本原多项式。

选择奇数 $m_1, m_2, \dots, m_q, 0 < m_j < 2^j$, 定义方向数

$$v_j = \frac{m_j}{2^j} = 0.v_{j,1}v_{j,2}\dots \quad (15)$$

式中: $v_{j,i}$ 为 v_j 用二进制表示的第 i 位上的数字, 当 $j > q$ 时, 建立递推关系

$$v_j = c_1 v_{j-1} \oplus c_2 v_{j-2} \oplus \dots \oplus c_q v_{j-q} \oplus \frac{v_{j-q}}{2^q} \quad (16)$$

式中: $\oplus$ 为二进制按位异或运算; 通过 q 个奇数 m_j 便可以计算前 q 个方向数 v_j 。当 $j > q$ 时, m_j 同样有递推公式

$$m_j = 2c_1 m_{j-1} \oplus 2^2 c_2 m_{j-2} \oplus \dots \oplus 2^q c_q m_{j-q} \oplus m_{j-q} \quad (17)$$

可以得到 Sobol 点列的第 n 个数

$$r_n = b_1 v_1 \oplus b_2 v_2 \oplus b_3 v_3 \dots \quad (18)$$

式中: $\dots b_3 b_2 b_1$ 为 n 的二进制表示形式。

2.2 光伏出力概率模型

光伏出力概率模型采用 Beta 分布, Beta 分布对于光伏出力的模拟效果较佳^[9], 其概率密度函数为

$$f(P) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P}{P_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P}{P_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (19)$$

式中: Γ 为 Gamma 函数; P 为光伏电源出力; $P_{\max}$ 为光伏电源的最大出力; α 、 β 为 Beta 分布的尺度参数和形状参数。

2.3 风电出力概率模型

风电出力的风速模型选用 Weibull 分布^[8], 即

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (20)$$

式中: v 为风速; k 、 c 为 Weibull 分布的形状参数和尺度参数。

风电输出有功功率 P 可以表示为

$$P = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci} \\ k_1 v + k_2 & v_{ci} < v \leq v_N \\ P_N & v_N < v \leq v_{co} \\ 0 & v > v_{co} \end{cases} \quad (21)$$

式中: P_N 为风机的额定出力; v_{ci} 、 v_N 、 v_{co} 分别为切入风速、额定风速、切出风速; $k_1 = P_N / (v_{co} - v_{ci})$, $k_2 = -k_1 v_{ci}$ 。

假定风电机组的功率因数不变, 则已知风电机组有功出力可以得到风电机组的无功出力

$$Q = P \tan \varphi \quad (22)$$

式中: φ 为功率因数。

2.4 电、热负荷概率模型

本文中的电、热负荷概率模型采用正态分布^[9], 其概率密度函数为

$$f(P_{\text{load}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\text{load}}} \exp\left[-\frac{(P_{\text{load}} - \mu_{\text{load}})^2}{2\sigma_{\text{load}}^2}\right] \quad (23)$$

式中: P_{load} 为(电网有功功率、热)负荷功率; μ_{load} 、 σ_{load}

为(电网有功功率、热)负荷功率的期望和标准差。

3 算法流程

本文首先建立风电出力、光伏出力和电、热负荷的概率模型, 然后建立电-热联合系统稳态流模型, 最后基于 QMCS 法求解电-联合系统概率能量流。具体流程如图 1。

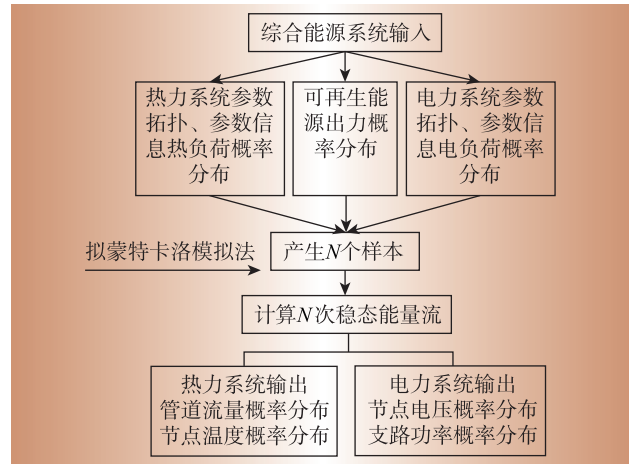


图 1 概率能量流计算流程

Fig. 1 Probabilistic energy flow calculation process

4 算例分析

本文中的测试系统为文献[13]中的巴厘岛电-热联合系统, 系统拓扑结构如图 2。

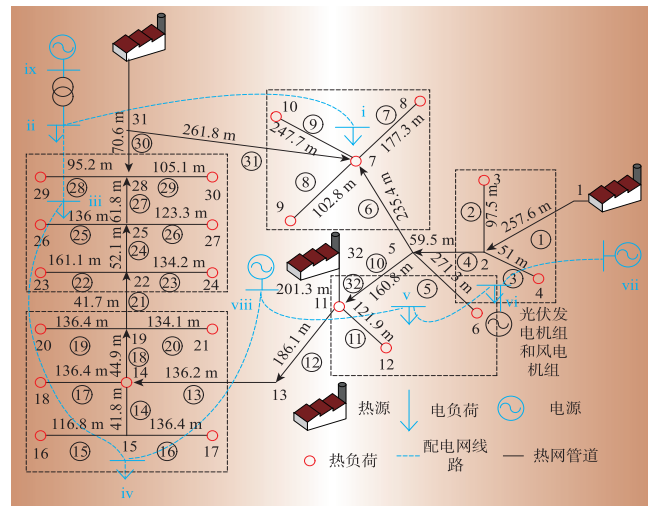


图 2 巴厘岛电-热联合系统

Fig. 2 Combined heat and electricity system of Bali

电网 ix 号节点为平衡节点, 热网 1 号节点为平衡节点。新能源发电并网节点为电网的 vi 号节点。电网和热网节点通过 CHP 连接, 其中 ix-31 处的 CHP 采用定热电比燃气轮机、viii-32 处的 CHP 采用定热电比复式内燃机, vii-1 处的 CHP 则采用变热电比抽气式汽轮机。

为了分析电-热联合系统中不确定因素对概率

能量流的影响,设计了两种测试场景:

场景1:不考虑电-热联合系统中电、热负荷的相关性;

场景2:考虑电-热联合系统中电、热负荷的相关性。

假设电负荷采用恒功率因数,同种可再生能源出力之间考虑相关性。相关性处理流程如图3。

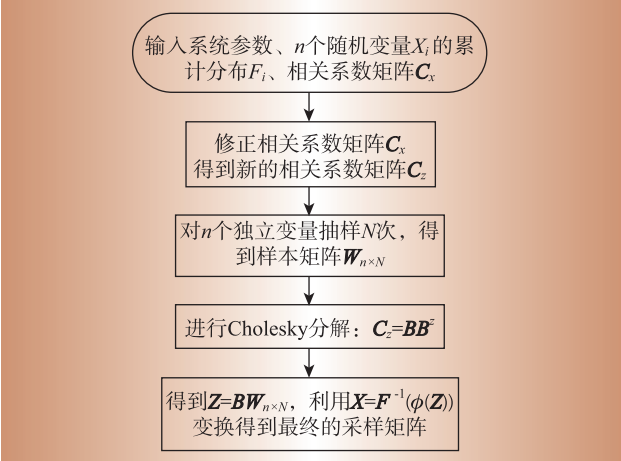


图3 相关性处理流程

Fig. 3 Correlation processing flow chart

风电、光伏发电机组的详细参数^[8-9]如表1和2。

表1 风电机组数据

Tab. 1 The data of wind turbine

参数	k	c	$\tan \varphi$	$v_{ci} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_N / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_{co} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	装机 容量/MW
2台风电机组	10.7	3.97	0.98	3	15	25	0.1

表2 光伏发电数据

Tab. 2 The data of photovoltaic generation

参数	装机容量/MW	α	β	功率因数
2台光伏发电机组	0.5	0.9	0.9	1

可在生能源出力的相关系数^[5,9]如表3,假设负荷相关系数可人为设定。

表3 相关性系数

Tab. 3 Correlation coefficient

	电-电 负荷	热-热 负荷	电-热 负荷	风电 机组	光伏发 电机组
相关性 系数	0.7	0.7	可调	0.5	0.8

假设基于MCS法采样100 000次得到的概率能量流为准确值,以 σ_N 表示该场景下输出随机变量的标准差。基于QMCS法和MCS法求得的标准差则用 σ_s 表示。本文将QMCS法和MCS法求得标准差与准确值的相对误差 σ_{error} 作为评判计算精确度的标准

$$\sigma_{\text{error}} = |(\sigma_s - \sigma_N) / \sigma_N| \times 100\% \quad (24)$$

为保证计算结果的精确性,本文确定采样规模情况下,计算100次取平均值最为最终的计算结果。

对场景1和场景2进行算例测试,场景2的电、热负荷相关系数设为0.5, σ_{error}^* 为各输出随机变量标准差的相对误差,抽样5 000次所得的相对误差如表4所示。

表4 场景1中QMCS法和MCS法误差比较

Tab. 4 QMCS method and MCS method error comparison in scene 1

方法	σ_{error}^U	$\sigma_{\text{error}}^\theta$	$\sigma_{\text{error}}^{T_s}$	$\sigma_{\text{error}}^{T_e}$	σ_{error}^m
QMCS	0.07	0.04	3.35	12.79	22.68
MCS	0.25	0.13	11.88	40.75	58.06

表5 场景2中QMCS法和MCS法误差比较

Tab. 5 QMCS method and MCS method error comparison in scene 2

方法	σ_{error}^U	$\sigma_{\text{error}}^\theta$	$\sigma_{\text{error}}^{T_s}$	$\sigma_{\text{error}}^{T_e}$	σ_{error}^m
QMCS	0.10	0.36	4.74	9.32	5.89
MCS	0.41	1.35	19.18	34.35	15.08

基于QMCS法求解电-热联合系统概率能量流,电、热负荷相关系数设为0.5,场景1和场景2抽样5 000次各输出变量标准差如表6所示。

表6 基于QMCS法的场景1和场景2标准差比较

Tab. 6 Standard deviation comparison of scene 1 and scene 2 based on QMCS method

场景	σ^U	σ^θ	σ^{T_s}	σ^{T_e}	σ^m
场景1	8.99e-3	0.020	0.173 2	0.174 8	1.470 3
场景2	9.03e-3	0.022	0.207 3	0.195 7	1.909 0

场景2情况下改变相关系数,基于QMCS法抽样5 000次计算输出随机变量标准差所得结果的如图4。为便于表示电、热负荷相关系数变化对于输出变量电压幅值、相角的波动影响,本文以电、热负荷相关性为0的各输出变量的标准差作为基准点,设为 σ_{c_N} ,以 $\Delta\sigma_c$ 表示相关系数变化时各输出变量标准差的变化情况

$$\Delta\sigma_c = \sigma_c - \sigma_{c_N} \quad (25)$$

式中: σ_c 为不同相关系数下各输出变量的标准差。

从表4、表5可以看出在相同的抽样规模下,基于QMCS法相较于基于MCS法求得的概率能量流结果更加接近于真实解。从改变误差阶的角度可以看出,QMCS法更具收敛稳定性。

由表6可以看出,计及电、热负荷相关性后,输出变量的标准差变大,可以判断电-热联合系统中

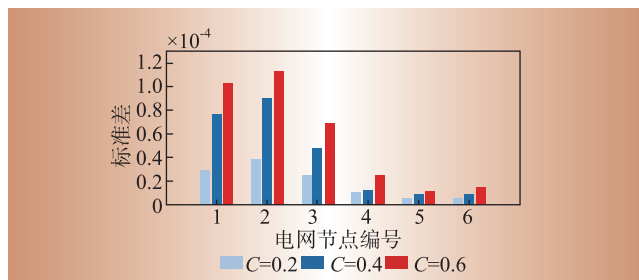


图4 相关性系数变化各节点电压幅值标准差变化情况

Fig. 4 The variation of the standard deviation of the voltage amplitude of each node when the correlation coefficient changes

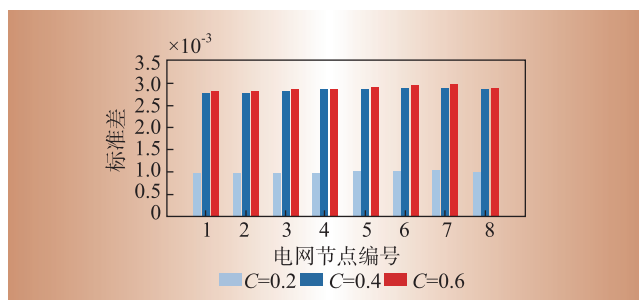


图5 相关性系数变化各节点电压相角标准差变化情况

Fig. 5 The variation of the standard deviation of the voltage phase angle of each node when the correlation coefficient changes

的状态量波动剧烈程度增加。图4和图5可以看出,随着电、热负荷相关系数逐渐增大,各节点电压幅值、相角的标准差也逐渐变大,即各节点电压幅值、相角波动更加剧烈。

场景2情况下电-热负荷设定为0.5,比较QMCS法和文献[9]采用的拉丁超立方采样法在抽样规模为5 000次所消耗的时间,结果如图6所示。

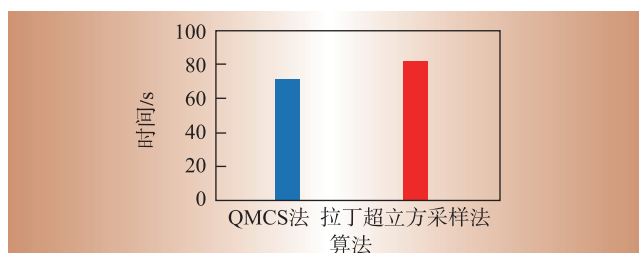


图6 不同抽样方法消耗时间对比

Fig. 6 Comparison of time consumption of different sampling methods

QMCS法和拉丁超立方采样法都致力于抽样均匀性,QMCS法一次性可生成所需序列,拉丁超立方采样法则抽样复杂,故相同抽样规模下QMCS法计算效率更高。

QMCS法以准随机数序列代替MCS法伪随机数序列,牺牲一定程度抽样的随机性,获得更高的抽样均匀性,从而更加真实、准确的反映含不确定性的电-热联合系统概率能量流问题的真实解。在

电-热联合系统的不确定因素中,同种新能源出力之间、不同负荷之间分布具有相关性,相关系数增加,也就代表着电、热负荷同时出现高峰和低谷的概率增大,这也必将导致系统状态量波动程度增加,进而影响系统的安全性与稳定性。故在研究电-热联合系统的概率能量流时应当重视不确定因素之间的相关性。

5 结论

本文基于QMCS法建立了电-热联合系统概率能量流模型,所得结论如下:

(1) QMCS法可以提高抽样的均匀性,在相同情况下相角于MCS法能更加准确、稳定的反映真解。

(2) 输入随机变量的相关性将影响电-热联合系统波动剧烈程度,因此在研究含不确定性的电-热联合系统概率能量流时应充分考虑输入随机变量之间的相关性。

(3) 本文为分析含不确定性的电-热联合系统概率能量流分析提供了一种新思路,为后续研究电-热联合系统的可靠性评估、优化运行奠定了一定的基础。

参考文献:

- [1] 李扬,宋天立,王子健. 基于用户数据深度挖掘的综合能源服务关键问题探析[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(3): 1-5.
LI Yang, SONG Tianli, WANG Zijian. Research on key issues of integrated energy services based on user data deep mining [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(3): 1-5.
- [2] 邓茂云,屈博,邢广进. 能源互联网背景下用户能源服务的商业模式探索[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(3): 59-62.
DENG Maoyun, QU Bo, XING Guangjin. Business model exploration of customer energy service under the background of energy Internet [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(3): 59-62.
- [3] 王之龙,于东立,门向阳,等. 含压缩空气储能的能源互联微网型系统优化配置[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(6): 40-45.
WANG Zhilong, YU Dongli, MEN Xiangyang, et al. Optimal configuration of energy interconnection microgrid system with compressed air energy storage [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(6): 40-45.
- [4] 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 Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 1-7.

- [5] 陈雁,文劲宇,程时杰.考虑输入变量相关性的概率潮流计算方法[J].中国电机工程学报,2011,31(22):80-87.
CHEN Yan, WEN Jinyu, CHENG Shijie. Probabilistic load flow analysis considering dependencies among input random variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 80-87.
- [6] 柳志航,卫志农,孙国强,等.计及参数模糊性的含风电场电力系统概率潮流计算[J].电网技术,2017,41(7):2 038-2 315.
LIU Zhihang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Probabilistic power flow calculation of power system with wind farms considering fuzzy parameters [J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2 038-2 315.
- [7] 陈璨,吴文传,张伯明,等.考虑光伏出力相关性的配电网概率潮流[J].电力系统自动化,2015,39(9):41-47.
CHEN Can, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Probabilistic load flow of distribution network considering correlated photovoltaic power output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 41-47.
- [8] 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):6 331-6 340.
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): 6 331-6 340.
- [9] 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.
- [10] 刘宇,高山,杨胜春,等.电力系统概率潮流算法综述[J].电力系统及其自动化,2014,38(23):127-135.
LIU Yu, GAO Shang, YANG Shengchun, et al. Overview of power system probabilistic power flow algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38 (23) : 127-135.
- [11] 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.
- [12] 侯雨伸,王秀丽,刘杰,等.基于拟蒙特卡罗方法的电力系统可靠性评估[J].电网技术,2015,39(3):744-750.
HOU Yushen, WANG Xiuli, LIU Jie, et al. A Quasi-Monte Carlo method based power system reliability evaluation [J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 744-750.
- [13] LIU X, JENKINS N, WU J, et al. Combined analysis of electricity and heat networks [D]. Cardiff, Britain: Cardiff University, 2014.

作者简介:

唐建清(1966),男,江苏常熟人,学士,研究员级高级工程师,主要从事电网运营管理;

勇晔(1971),男,江苏江阴人,学士,研究员级高级工程师,主要从事电力营销;

薛滨枫(1976),男,江苏无锡人,学士,工程师,主要从事电力营销。

(责任编辑 邵海雯)

(上接第16页)

- [7] 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):2 942-2 950.
WANG Yingrui, ZENG Bo, GUO Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2 942-2 950.
- [8] 王乾,王彬,方建勇,等.工业园区多能直供运营模式案例研究[J].电力自动化设备,2017,37(6):268-274.
WANG Qian, WANG Bin, FANG Jianyong, et al. Study of MEDS operating mode for industrial park [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 268-274.
- [9] 马溪原,郭晓斌,周长城,等.电网公司投资分布式光伏发电系统的典型运营模式分析[J].南方电网技术,2018,12(3):52-59.
MA Xiyuan, GUO Xiaobin, ZHOU Changcheng, et al. Typical operation mode analysis for distributed photovoltaic generation system invested by the electric power utility [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(3): 52-59.
- [10] 马溪原,周长城,刘育权,等.工业园区用户侧电池储能系统运营模式及其经济性分析[J].南方电网技术,2018,12(3):44-51.
MA Xiyuan, ZHOU Changcheng, LIU Yuquan, et al. Business mode and economy analysis of battery storage at user's side in industrial park [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(3): 44-51.
- [11] 叶珍.基于AHP的模糊综合评价方法研究及应用[D].广州:华南理工大学,2010.
YE Zhen. Study and application of fuzzy comprehensive evaluation based on AHP [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [12] 魏晓曼,余昆,陈星莺,等.基于Affinity propagation和K-means算法的电力大用户细分方法分析[J].电力需求侧管理,2018,20(1):15-19,35.
WEI Xiaoman, YU Kun, CHEN Xingying, et al. Analysis of power large user segmentation based on Affinity propagation and K-means algorithm [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1): 15-19, 35.

(责任编辑 李雅超)