62

# 计及 P2H 的电-热互联综合能源系统概率能量流分析

孙 娟,卫志农,孙国强,陈 胜,臧海祥,陈 霜 (河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100)

摘要: 电转热(P2H)技术可以平抑分布式可再生能源发电功率波动,促进光伏发电的消纳与电-热互联综合 能源系统的协同运行。建立了含光伏的电-热互联综合能源系统概率能量流模型,采用 Nataf 变换对相关非 正态的光伏输入随机变量进行抽样,并与拉丁超立方采样相结合,定量评估 P2H 对电力系统和热力系统概率 能量流的影响。实际巴厘岛的算例分析结果验证了所建立模型的有效性。在含光伏的电-热互联综合能 源系统中,P2H 可促进分布式可再生光伏的消纳,并有效增强系统的安全性。

关键词: 电-热互联综合能源系统: 电转热技术: 概率能量流; 光伏发电; 拉丁超立方采样

中图分类号: TM 761 文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.009

# 0 引言

随着社会能源结构调整,节能减排压力不断增加,可持续的能源开发与利用模式被公认为未来能源行业发展和变革的方向。综合能源系统、能源互联网和"互联网+智慧能源"等概念的相继提出,打破了各能源系统分开规划、独立运行的既有模式,为能源系统的分析提供了全新视角,带动了多领域、多学科、多维度间的交融与革新<sup>[1-4]</sup>。综合能源系统一般涵盖集成的供电、供气、供暖、供冷、供氢和电气化交通等能源系统,以及相关的通信和信息基础设施<sup>[5]</sup>。 其中,热电联供网络目前发展最为迅速<sup>[6]</sup>。

自 20世纪开始,热网在全球范围内逐步建立<sup>[6]</sup>。随着热网的普及及热电联产 CHP(Combined Heat and Power)机组的逐步应用,电力系统和热力系统 耦合不断加深,电-热互联综合能源系统逐渐引起广 泛关注。文献[7-8]建立了电-热互联综合能源系统 稳态模型,并提出了一种有效的潮流计算方法。文献 [6]研究了热电联合网络的状态估计。文献[9]提出 了面向能源互联网的多能流静态安全分析的概念和 方法。文献[10]重点分析了电热协调运行方式对风 电消纳的促进作用。文献[11]研究了含燃料电池、风 电、光伏的电-热微网最优协调调度。

近年来,以风、光为代表的分布式可再生能源发 电出力的随机性和波动性严重制约了其发展<sup>[12]</sup>,如何 增强其接入能力成为可再生能源系统构建的重点和 难点。电转热 P2H(Power-to-Heat)技术可将电网难 以消纳的光伏出力转化为热能提供给热网,为分布 式可再生光伏的消纳及电-热互联综合能源系统协

收稿日期:2017-03-01;修回日期:2017-05-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277052);中国博士 后科学基金资助项目(2015M571653) 同运行提供了新机遇。P2H 元件包括热泵、电锅炉、 储热机构等<sup>[13]</sup>。目前,以丹麦<sup>[14]</sup>和德国<sup>[15]</sup>为代表的欧 洲各国,主要从 P2H 的技术可行性和经济性角度出 发开展研究。文献[13]建立了基于 P2H 和需求侧响 应的最优控制模型,用以评估其应用于城市地区风、 光消纳的潜力。文献[16]提出了求解大规模多阶段 优化问题的分解协调算法,分析了含 P2H 的电-热互 联综合能源系统优化运行问题。然而,现有研究多 数基于确定性的模型,未充分考虑分布式可再生能源 的不确定性。

电-热互联综合能源系统的不确定性因素(例如 分布式可再生能源出力波动、负荷波动、系统故障 等)给系统的安全运行带来了极大的挑战。为此,本文 建立了含光伏的电-热互联综合能源系统概率能量 流模型,以定量评估不确定性因素对系统概率能量 流的影响以及 P2H 对光伏消纳的积极作用。

本文首先建立热力系统稳态能量流模型,并通过 CHP 机组和 P2H 元件建立电力系统和热力系统的 耦合关系;其次,对系统中光伏出力和电、热负荷等 随机变量建模,并最终建立含光伏的电-热互联综合 能源系统概率能量流模型;在此基础上,采用基于 Nataf 变换和拉丁超立方采样 LHS(Latin Hypercube Sampling)的蒙特卡罗模拟法,即 CLMCS(Correlation LHS-Monte Carlo Simulation)法<sup>[17-19]</sup>,定量评估 P2H 对电力系统和热力系统概率能量流的影响,同时计 及输入变量的随机性和相关性。对含光伏的巴厘岛 电-热互联综合能源系统进行算例分析,结果验证 了本文所建立模型的可行性与有效性。

# 1 电-热互联综合能源系统稳态能量流模型

电力系统和热力系统通过 CHP 机组和 P2H 元 件耦合成电-热互联综合能源系统。电力系统与热力 系统间的关系可以概括为:一方面两者有共同的源 (CHP 机组),另一方面热力系统也是电力系统的负

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277052) and China Postdoctoral Science Foundation (2015M571653)

荷(P2H元件消耗电能)<sup>[9]</sup>。

# 1.1 热力系统稳态模型

热力系统主要由热源、热网和热用户3个部分组成,承担着热力系统生产、传输和交换的职能<sup>[10]</sup>。热 网一般由输送和回收管道构成。管道中充以热水或 热水蒸汽(目前,在我国最常用的是热水管网),将热 量从热源侧输送到终端热用户侧<sup>[7]</sup>。

#### 1.1.1 水力模型

热网管道流量通过水力模型确定。热网水力模型与电网模型存在很多相似之处,如表1所示。

表1 电网与热网基本定律类比

Table 1 Analogy of basic rules between electrical and heat networks

系统	基本定律
电网	基尔霍夫电流定律、基尔霍夫电压定律、欧姆定律
热网	流量连续性定律、回路压头定律、压头损失定律

热网水力模型基本定律具体表述为:

$$Am = m_{q} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{B}\boldsymbol{h}_{f}=0 \tag{2}$$

$$\boldsymbol{h}_{f} = \boldsymbol{K}\boldsymbol{m} \mid \boldsymbol{m} \mid \tag{3}$$

其中,A 为热网节点-支路网络关联矩阵;m 为热网管道流量; $m_q$  为注入节点的流量;B 为热网回路-支路环路关联矩阵; $h_f$  为由管道摩擦造成的压头损失; K 为管道的阻力系数,在很大程度上取决于管道的直径,并可由摩擦因数 f 计算得到,详见文献[8]。

1.1.2 热力模型

热网节点温度通过热力模型确定。对于每一个 热网节点,供热温度 T<sub>s</sub>表示热水注入节点之前的温 度,输出温度 T<sub>o</sub>表示热水流出节点时的温度,回热 温度 T<sub>r</sub>表示热水流出节点并与其他管道的热水混 合汇入回收管道之后的温度。热力模型包括热量方 程、管道温度降落方程和节点混合温度方程,即:

$$\boldsymbol{\Phi} = C_{\rm p} \boldsymbol{m}_{\rm q} (\boldsymbol{T}_{\rm s} - \boldsymbol{T}_{\rm o}) \tag{4}$$

$$T_{\rm end} = (T_{\rm start} - T_{\rm a}) e^{-\lambda L/(C_{\rm p}m)} + T_{\rm a}$$
(5)

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

其中,  $\Phi$  为负荷得到或热源提供的热量;  $C_p$  为水的 比热容;  $T_{start}$  和  $T_{end}$  分别为管道起点和终点的温度;  $T_a$ 为环境温度;  $\lambda$  为管道单位长度传热系数; L 为管道 长度; m 为某一条管道的流量;  $m_{out}$  和  $m_{in}$  分别为流出 和注入节点的流量;  $T_{out}$  和  $T_{in}$  分别为流出和注入节 点的热水温度。

#### 1.2 耦合元件模型

#### 1.2.1 CHP 机组模型

CHP 机组利用天然气燃烧时的高品位热能做功 驱动微燃机发电,所排出的高温余热烟气经溴冷机 后用于取暖及供应生活热水<sup>[20]</sup>。CHP 机组同时产热 产电,可作为电力系统和热力系统两者共同的源。依 据其热电比是否变化,可分为定热电比(如燃气轮机、 往复式内燃机)和变热电比(如抽气式汽轮机)2种 类型,如图1所示。



图 1 CHP 机组的热电关系 Fig.1 Relation between heat generation and power generation of CHP units

$$c_{\rm m} = \Phi_{\rm CHP}^{c_{\rm m}} / P_{\rm CHP}^{c_{\rm m}} \tag{7}$$

$$c_{z} = \Phi_{\text{CHP}}^{c_{z}} / (\eta_{e} F_{\text{in}} - P_{\text{CHP}}^{c_{z}})$$

$$(8)$$

其中, $P_{CHP}^{e_{HP}}$ 、 $\Phi_{CHP}^{e_{HP}}$ 和  $c_m$ 分别为定热电比 CHP 机组的电 出力、热出力和定热电比; $P_{CHP}^{e_{CHP}}$ 、 $\Phi_{CHP}^{e_{HP}}$ 和  $c_x$ 分别为变热 电比 CHP 机组的电出力、热出力和变热电比; $\eta_e$ 为变 热电比 CHP 机组的冷凝效率; $F_{in}$ 为燃料输入速率。  $c_m$ 为一恒定值, 而  $c_x$ 为一个变化的值, 但是在实际某 个时段内, $c_x$ 保持不变<sup>[9]</sup>。

1.2.2 P2H 元件模型

P2H 元件包含热泵、电锅炉、储热机构等<sup>[13]</sup>。热 泵是一种利用高位能使热量从低位热源流向高位热 源的节能装置。电锅炉直接把电能转换为热能。两 者电热转换效率分别为:

$$COP = \Phi_{hp} / P_{hp}$$
 (9)

$$\eta_{\rm b} = \Phi_{\rm b} / P_{\rm b} \tag{10}$$

其中,COP 为热泵电热转换效率(Coefficient Of Performance); $P_{hp}$ 和  $\Phi_{hp}$ 分别为热泵消耗的有功功率和 相应的热出力; $\eta_b$ 为电锅炉电热转换效率; $P_b$ 和  $\Phi_b$ 分别为电锅炉消耗的有功功率和相应的热出力。

一般而言,热泵的 COP 可以达到 3,而高效节能 电锅炉的效率  $\eta_b$ 最高只能达到 98%。另一方面,热 泵的投资建设费用相对较高,且其应用的局限性(如 低位热源容量限制、地域限制等)极大地降低了电热 转换的灵活性。而电锅炉安装简单、控制灵活且维修 更换方便<sup>[20]</sup>。因此,热泵常与 CHP 机组联合使用来改 善系统热出力,如图 2 所示。其中, $\gamma$  为热泵消耗的有 功功率占 CHP 机组电出力的百分数; $P_{source}$ 和  $\Phi_{source}$ 分别为热泵与 CHP 机组联合系统的电、热出力。电 锅炉则在电价引导下配合 CHP 系统满足热负荷需



图 2 热泵与 CHP 机组联合系统 Fig.2 Integration of CHP unit and heat pump

求并增加谷时段用电量,对电热负荷进行峰谷协调<sup>[20]</sup>。 文献[21]从能源、经济和环境角度出发,对比分布式 CHP中的电锅炉和热泵的应用潜力。

## 1.3 电-热互联综合能源系统稳态能量流分析

电-热互联综合能源系统稳态能量流分析基于 电力系统潮流方程和热力系统水力-热力方程式(1)— (6),并计入系统间能量的流动(式(7)—(10))。本文 采用最常用的牛顿-拉夫逊法求解,修正方程如下:

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

$$\Delta F$$
  $\Delta X$ 

$$J = \begin{bmatrix} J_{e} & J_{eh} \\ J_{he} & J_{h} \end{bmatrix} \begin{vmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial |U|} & \frac{\partial \Delta P}{\partial m} & \frac{\partial \Delta P}{\partial T} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial |U|} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial m} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial T} \\ \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial |U|} & \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial m} & \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial T} \\ \frac{\partial \Delta T}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta T}{\partial |U|} & \frac{\partial \Delta T}{\partial m} & \frac{\partial \Delta T}{\partial T} \end{vmatrix}$$
(12)

其中, P 和 Q 分别为电力系统节点的有功和无功; $<math>\Delta F$ 为输入变量修正量;  $\theta 和 U 分别为电力系统节点$ 电压的相角和幅值;  $\Delta X$ 为状态变量修正量; J为雅 可比矩阵, 由电力子阵  $J_{ex}$ 电热子阵  $J_{ehx}$ 热电子阵  $J_{bex}$ 热力子阵  $J_{h}$ 组成。

基于式(11)、(12)同时求解电力系统潮流、热力 系统水力-热力潮流。其中,网络关联矩阵 A 和环路 关联矩阵 B 根据管道流量 m 的方向每次迭代更新。

# 2 随机变量概率模型

电-热互联综合能源系统的不确定性因素来源 于电力系统、热力系统以及耦合机构中的不确定量。 本文主要研究系统注入量(如光伏出力、负荷等的输 出功率)的不确定性,暂不考虑参数的不确定性。

#### 2.1 光伏出力的概率特性

光伏出力具有强随机性和波动性的特点。研究 表明,光照强度在短时间尺度(几个小时或者一天) 或者长时间尺度内,都服从 Beta 分布<sup>[22]</sup>。光伏出力 也满足 Beta<sup>[23]</sup>分布,概率密度函数为:

$$f(P_{\rm a}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{\rm a}}{P_{\rm max}}\right)^{\alpha - 1} \left(\frac{1 - P_{\rm a}}{P_{\rm max}}\right)^{\beta - 1}$$
(13)

其中, α 和 β 为 Beta 分布的形状参数; P<sub>a</sub> 和 P<sub>max</sub> 分别 为光伏电站实际有功出力和最大有功出力。

光伏发电机组采用恒功率因数控制。假设光伏 发电机组的功率因数为1,则其无功出力为0。

# 2.2 电、热负荷的概率特性

一般而言,正态分布可以较好地描述电、热负荷

的预测误差[24],电、热负荷概率密度函数分别为:

$$f(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_P}} \exp\left[-\frac{(P-\mu_P)^2}{2\sigma_P^2}\right]$$
(14)

$$f(\Phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\phi}} \exp\left[-\frac{(\Phi - \mu_{\phi})^2}{2\sigma_{\phi}^2}\right]$$
(15)

其中, $\mu_P$ 和 $\sigma_P$ 分别为电负荷有功功率P的期望和标 准差; $\mu_{\phi}$ 和 $\sigma_{\phi}$ 分别为热负荷 $\Phi$ 的期望和标准差。

电负荷无功功率按定功率因数随有功功率变化。

# 3 基于 Nataf 变换和 LHS 的 CLMCS 方法

LHS 是一种分层采样的方法<sup>[17-19,25-26]</sup>,主要思想 是通过产生更加均匀的样本来提高计算效率。传统 LHS 方法只针对输入随机变量相互独立的情况,为了 处理输入随机变量之间的相关性,本文采用基于 Nataf 变换和 LHS 的 CLMCS 方法<sup>[17-19]</sup>,该方法具有以下特 点:能给出输出随机变量的全面信息;能处理输入随 机变量的相关性,且不受输入随机变量概率分布类型 的约束;实现简单,稳健性好,结果精度高。

#### 3.1 Nataf 变换

设 n 维输入随机变量  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ ,其相关 系数矩阵为  $C_x$ 。引入相关系数矩阵为  $C_z$ 的 n 维标 准正态分布随机变量  $Z = (z_1, z_2, \dots, z_n)^T$ ,根据等概率 原则:

 $z_k = \psi_k^{-1}(F_k(x_k))$   $k = 1, 2, \dots, n$  (16) 其中,  $F_k$  为  $x_k$  的累积概率分布函数 CDF(Cumulative Distribution Function);  $\psi_k$  为  $z_k$  的 CDF。

 $C_z$ 为正定矩阵,对其进行 Cholesky 分解可得下 三角矩阵 D,则 n 维独立标准正态分布随机变量  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ 为:

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{D}^{-1} \boldsymbol{Z} \tag{17}$$

上述 Nataf 变换理论实现了从输入变量空间 X 到相关标准正态空间 Z 再到独立标准正态空间 Y 的转换,即式(16)和式(17)。因此,只要对独立标准 正态分布随机变量 Y 进行 N 次采样得到样本矩阵  $Y_{n\times N}$ ,利用 Nataf 逆变换由式(17)得到相关标准正态 分布随机变量 Z 的样本矩阵  $Z_{n\times N}$ ,再由式(16)就可 以得到输入随机变量 X 的样本矩阵  $X_{n\times N}$ 。

为了实现上述转换,关键是确定相关系数矩阵  $C_{zo}$ 对于  $C_x$  和  $C_z$  对应元素之间的关系,文献[27]给出 了几种常见分布的经验公式。J. M. Morales 等学者 首次将该方法应用到概率潮流的分析中<sup>[28]</sup>。尽管这 些经验公式的精度很高,但是所支持的概率分布类型 有限。对于服从 Beta 分布的光伏出力而言,缺乏可 供参考的经验公式。为此,本文采用二维 Nataf 变换 的方法,并与 Gauss-Hermite 积分相结合,得到相关 系数矩阵  $C_{zo}$ 该方法具有较高的精度,同时避免了无 穷积分的计算,具体步骤参见文献[29]。

## 3.2 CLMCS 方法

CLMCS 方法主要包括采样和排序 2 个步骤。

**a.** 采样。对 *n* 维任意分布的输入随机变量 *X*= $(x_1, x_2, \dots, x_n)^{T}$ 进行 LHS,采样规模为 *N*,形成的样本 矩阵为:

$$\boldsymbol{X}_{n\times N}^{\prime} = \begin{bmatrix} x_{11}^{\prime} & \cdots & x_{1N}^{\prime} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1}^{\prime} & \cdots & x_{nN}^{\prime} \end{bmatrix}$$
(18)

 $x'_{ij} = F_i^{-1}((j-1+u_{ij})/N)$   $i=1,2,\cdots,n; j=1,2,\cdots,N(19)$ 其中, $u_{ij}$ 为(0,1)均匀分布随机数。

**b.** 排序。通过改变采样值的排列顺序,使样本矩阵的相关系数矩阵尽可能地接近*C<sub>x</sub>*,即将样本矩阵 *X'<sub>a×N</sub>* 的每一行元素按顺序矩阵*L*<sub>s</sub>重新进行排列,得 到最终的样本矩阵*X<sub>a×N</sub>*。

由于 $F_{,\psi}$ 都是单调递增函数,因此,样本矩阵  $X_{n\times N}$ 和 $Z_{n\times N}$ 具有相同的顺序矩阵 $L_{s}$ ,即只要得到样本矩阵 $Z_{n\times N}$ ,就可以获得顺序矩阵 $L_{s}$ <sup>[17-18]</sup>。

#### 4 算法流程

本文首先建立了电-热互联综合能源系统稳态 能量流模型,接着分析了系统中光伏出力和电、热负 荷的概率分布,最后采用 CLMCS 方法定量评估 P2H 对电力系统和热力系统概率能量流的影响。本文所 提方法的基本流程如图 3 所示。



图 3 概率能量流算法流程

Fig.3 Flowchart of probabilistic energy flow

# 5 算例分析

#### 5.1 算例说明

本文测试算例为文献[7-8]中巴厘岛电-热互联综合能源系统,系统拓扑结构如图4所示。其中,电网为9节点配电网络,总有功负荷为1.6 MW;电网节点(6)接入2台分布式光伏发电机组,设每台机组的装机容量为0.5 MW,功率因数为1<sup>[18]</sup>,则本测试系统

的光伏发电渗透率为 38.5%;设 Beta 分布的形状参数为  $\alpha = \beta = 0.9^{[18]}$ 。热网为 32 节点环网,总热负荷为 2.164 MW。电网和热网通过 CHP 机组和 P2H 元件 (电锅炉)耦合,如表 2 所示。CHP1 为定热电比燃气 轮机,CHP2 为变热电比抽气式汽轮机,CHP3 为定 热电比往复式内燃机。选取其中容量较大的 CHP1 和 CHP2 分别作为电网和热网的平衡节点。



图 4 含光伏的巴厘岛电-热互联综合能源系统 Fig.4 Integrated electricity-heat energy system with PV of Barry Island

表 2 电网与热网耦合关系

Table 2 Interrependence between electrical and near network	Table 2	Interdependence	between	electrical	and	heat	networks
---	---------	-----------------	---------	------------	-----	------	----------

耦合元件	电网节点	热网节点	耦合元件	电网节点	热网节点
CHP1	(9)	31	CHP3	(8)	32
CHP2	(7)	1	电锅炉	(6)	4

本文假设光伏出力和电、热负荷的期望为其预测值,标准差为期望的5%,并考虑以下3种相关性: 同类型负荷之间的相关性,设电-电负荷、热-热负荷 之间相关系数为0.7;不同类型负荷之间的相关性,设 电-热负荷之间相关系数为0.5;光伏出力之间的相关 性,设相关系数为0.8<sup>[18]</sup>。假设不同场景下各 CHP 机 组的热电比恒定,需求量的变化全部由平衡节点承担。

综合考虑 CLMCS 方法的精度与效率,本测试算 例采样规模设为 2000。由于 CLMCS 方法的收敛过 程具有波动性,为了保证计算结果准确可靠,在确定 的采样规模下计算 100 次,取其平均值为最终结果。

# 5.2 P2H 对系统概率能量流的影响

5.2.1 P2H 对电力系统概率能量流的影响

光伏出力和电力系统负荷具有强随机性,有时 不能满足电力系统的网络安全约束,尤其是当光伏 出力达到峰值而电力系统负荷遭遇低谷,电力系统 网络越限的概率显著提高。目前根据电力行业相关 政策,一般通过弃光放弃一部分产能,以满足电力系 统的网络安全约束。在含光伏的电-热互联综合能源 系统中配置一定容量的 P2H,相对于原来的弃光政 策,可将部分电网难以消纳的光伏出力转化为热能。

电网节点(6)电压幅值的 CDF 随转化率 v 的变 化如图 5 所示(图中电压幅值为标幺值)。转化率 v 定义为电锅炉消耗的有功功率与总光伏有功出力之 比。当 v=0(即没有配置电锅炉)时,电网节点(6)电 压越限的概率超过 60%。这种运行模式将直接导致 大量弃光的产生。当 v 提高(即将部分电网难以消 纳的光伏出力用于驱动电锅炉)时,电压越限的概率 显著降低。当 v 提高到 0.4 时,电压越限的概率下降 到 20% 以内。可见,在含光伏的电-热互联综合能源 系统中配置一定容量的 P2H,可以有效降低电网电压 越限的概率,并为消纳弃光提供空间;另一方面,清 洁可再生光伏发电的接入,可以减少系统的非可再生 能源消耗,促进可再生能源系统的构建。



Fig.5 Impact of P2H on voltage magnitude of Node (6)

5.2.2 P2H 对热力系统概率能量流的影响

热力系统负荷同样具有随机性,高峰热负荷期间,CHP机组将面临巨大压力。尤其是当电力系统负荷遭遇低谷,而热力系统负荷达到峰值时,仅仅依靠调整 CHP机组的电热出力有时难以满足系统运行要求。利用电锅炉转化弃光所得的有效热出力就近平衡热网负荷,可以有效缓解热网压力。

热网管道流量随 v 的变化如图 6(a)所示。随着 v 的提高,管道流量呈现下降趋势(尤其是重载管道)。 以管道 4 为例,管道流量 CDF 随 v 的变化如图 6(b)所 示。v 越高,管道流量标准差 SD(Standard Deviation) 越小,可有效避免管道过载。但部分轻载管道的 SD 可能随着 v 的增大而增大,如图 6(c)所示。可见, P2H 会将电网中的不确定性传播到热网,从而加剧部 分轻载管道流量的波动;另一方面,P2H 为热网带来额 外的有效热输出,就近平衡热网负荷,改善了热网的 潮流分布,从而可有效平抑重载管道流量的波动,并 降低其越限风险。进一步地,由于 P2H 改善了热网 潮流的分布,热网的损耗率也显著降低,如图 7 所示。

通过上述分析,P2H的配置促进了电-热互联综合能源系统安全、高效和经济运行。电网节点电压、 热网管道流量随 v 的波动特性反映了网络安全约束 对 v 的敏感程度。从这个意义上而言,P2H 可作为系 统潜在预防校正控制策略。通过调整系统的转化率 v,可以更好地匹配分布式可再生光伏出力及电、热负



图 7 P2H 对热网损耗率的影响 Fig.7 Impact of P2H on heat loss rate

荷的峰谷特性,提高系统抵御随机波动侵害的能力, 增强系统的安全稳定性。另外,在电-热互联综合能 源系统协同优化运行中,v也是保证系统经济安全运 行的重要决策变量。

## 5.3 电-热负荷相关性对系统概率能量流的影响

值得注意的是,在含光伏的电-热互联综合能源 系统中,电、热负荷具有相关性,光伏出力的时空分 布也具有相关性。更重要的是,在综合能源系统背景 下,随着可再生分布式能源的进一步渗透,电力系统 和热力系统的耦合不断加深,电、热相关性不容忽视。 因此,有必要研究相关性对系统概率能量流的影响。

上述测试系统中电-热负荷相关系数 $\rho_{eh}$ 为 0.5。 然而,随着系统运行条件和时空的转换,电-热负荷 的相关程度也会有所波动。为分析 $\rho_{eh}$ 对系统概率能 量流的影响,本文设计了如下 3 种测试场景:场景 1 为 $\rho_{eh}=0.3$ ;场景 2 为 $\rho_{eh}=0.5$ ,即上述测试算例;场 景 3 为 $\rho_{eh}=0.7$ 。

图 8 为电网节点(1)和节点(2)在不同测试场景

下节点电压 SD 对比。由场景 1 到场景 3,电压幅值 的标准差逐渐增大。可见,相关性越强,电压波动越 剧烈。因而,在含可再生分布式能源的综合能源系统 概率能量流模型中应对随机变量之间的相关性予以 充分考虑。同时,相关性越强意味着高峰电负荷和高 峰热负荷同时出现的概率越高。因此,在确定电-热 负荷的相关系数 ρ<sub>eh</sub>时,有必要适当参考电力系统和 热力系统的历史负荷数据。



# 6 结论

本文建立了含光伏的电-热互联综合能源系统 概率能量流模型,采用 CLMCS 方法定量评估 P2H 对 电力系统和热力系统概率能量流的影响,同时计及 输入变量的随机性和相关性。所得结论如下。

**a.** P2H 可以促进分布式可再生光伏的消纳及可 再生能源系统的构建。

**b.** P2H 可作为系统潜在的预防校正控制策略。 通过调整系统的转化率 v,可以更好地匹配光伏出力 及电、热负荷的峰谷特性,增强系统的安全性,并促 进电-热互联综合能源系统的协同优化运行。

**c.**随机变量相关性越强则系统波动越剧烈,因此,在含可再生分布式能源的综合能源系统概率能量流模型中应对随机变量之间的相关性予以考虑。

d. 电-热互联综合能源系统概率能量流分析能 够更全面地揭示综合能源系统的运行特性,从而为 后续综合能源系统的规划、优化运行、风险评估等奠 定基础。

#### 参考文献:

[1] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光,等. 能源互联网:驱动力、评述与展望
 [J]. 电网技术,2015,39(11):3005-3013.

SUN Hongbin,GUO Qinglai,PAN Zhaoguang, et al. Energy internet:driving force,review and outlook[J]. Power System Technology, 2015,39(11):3005-3013.

[2] 邓建玲. 能源互联网的概念及发展模式[J]. 电力自动化设备, 2016,36(3):1-5.

DENG Jianling. Concept of energy internet and its development modes [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 1-5.

[3] 付学谦,孙宏斌,郭庆来,等. 能源互联网供能质量综合评估[J].
 电力自动化设备,2016,36(10):1-7.

FU Xueqian, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Comprehensive evaluation of energy quality for energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10):1-7.

[4] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(12): 3292-3305.

WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system underthe background of energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3305.

- [5] 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.
- [6] 董今妮,孙宏斌,郭庆来,等. 热电联合网络状态估计[J]. 电网技术,2016,40(6):1635-1641.
  DONG Jinni,SUN Hongbin,GUO Qinglai, et al. State estimation for combined electricity and heat networks[J]. Power System Technology,2016,40(6):1635-1641.
- [7] LIU X, WU J, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2016, 162:1238-1250.
- [8] LIU X, JENKINS N, WU J, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[D]. Cardiff, Britain: Cardiff University, 2014.
- [9] 潘昭光,孙宏斌,郭庆来.面向能源互联网的多能流静态安全分析方法[J].电网技术,2016,40(6):1627-1634.
  PAN Zhaoguang,SUN Hongbin,GUO Qinglai. Energy internet oriented static security analysis method for multi-energy flow[J]. Power System Technology,2016,40(6):1627-1634.
- [10] 顾泽鹏,康重庆,陈新宇,等.考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3596-3604.
  GU Zepeng,KANG Chongqing,CHEN Xinyu,et al. Operation optimization of integrated power and heat energy systems and the benefit on wind power accommodation considering heating network constraints[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14): 3596-3604.
- [11] BORNAPOUR M, HOOSHMAND R A, KHODABAKHSHIAN A, et al. Optimal coordinated scheduling of combined heat and power fuel cell, wind, and photovoltaic units in micro grids considering uncertainties[J]. Energy, 2016, 117:176-189.
- [12] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等.新能源消纳关键因素分析及解决 措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):1-8.
  SHU Yinbiao,ZHANG Zhigang,GUO Jianbo,et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation
  [J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(1):1-8.
- [13] SALPAKARI J, MIKKOLA J, LUND P D. Improved flexibility with large-scale variable renewable power in cities through optimal demand side management and power-to-heat conversion [J]. Energy Conversion & Management, 2016, 126:649-661.
- [14] LUND H, MÖLLER B, MATHIESEN B V, et al. The role of district heating in future renewable energy systems [J]. Energy, 2010,35:1381-1390.
- [15] BÖTTGER D,GÖTZ M,THEOFILIDI M, et al. Control power provision with power-to-heat plants in systems with high shares of renewable energy sources-an illustrative analysis for Germany based on the use of electric boilers in district heating grids [J]. Energy, 2015, 82:157-167.
- [16] LI J,FANG J,ZENG Q,et al. Optimal operation of the integrated

electrical and heating systems to accommodate the intermittent renewable sources[J]. Applied Energy,2016,167:244-254.

- [17] 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.
- [18] CHEN Y, WEN J, CHENG S. Probabilistic load flow method based on Nataf transformation and Latin hypercube sampling [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 294-301.
- [19] 黄煜,徐青山,卞海红,等. 基于拉丁超立方采样技术的半不变量 法随机潮流计算[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):112-119.
  HUANG Yu,XU Qingshan,BIAN Haihong,et al. Cumulant method based on Latin hypercube sampling for calculating probabilistic power flow[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):112-119.
- [20] 李正茂,张峰,梁军,等. 含电热联合系统的微电网运行优化[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3569-3576.
  LI Zhengmao,ZHANG Feng,LIANG Jun, et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3569-3576.
- [21] BLARKE M B. Towards an intermittency-friendly energy system: comparing electric boilers and heat pumps in distributed cogeneration[J]. Applied Energy, 2012, 91:349-365.
- [22] 王敏. 分布式电源的概率建模及其对电力系统的影响[D]. 合肥:合肥工业大学,2010.

WANG Min. The probabilistic modeling of distributed generation and its influences on power systems[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2010.

 [23] 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 photo-

voltaic power output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(9):41-47.

- [24] 陈胜,卫志农,孙国强,等. 电-气混联综合能源系统概率能量流 分析[J]. 中国电机工程学报,2015,35(24):6331-6340.
  CHEN Sheng,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. Probabilistic energy flow analysis in integrated electricity and natural-gas energy systems[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(24): 6331-6340.
- [25] YU H, CHUNG C Y, WONG K P, et al. Probabilistic load flow evaluation with hybrid Latin hypercube sampling and Cholesky decomposition[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2):661-667.
- [26] WEI Z, CHEN S, SUN G, et al. Probabilistic available transfer capability calculation considering static security constraints and uncertainties of electricity-gas integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2016, 167: 305-316.
- [27] LIU P L,KIUREGHIAN A D. Multivariate distribution models with prescribed marginals and covariances[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1986, 1(2):105-112.
- [28] MORALES J M, BARINGO L, CONEJO A J, et al. Probabilistic power flow with correlated wind sources[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2010, 4(5):641-651.
- [29] LI H S,LÜ Z Z,YUAN X K. Nataf transformation based point estimate method[J]. Science Bulletin, 2008, 53(17):2586-2592.

#### 作者简介:



孙 娟(1993—),女,江苏东台人,硕士 研究生,主要研究方向为电-热综合能源系 统分析与优化运行(E-mail:hhusunjuan@163. com);

卫志农(1962—),男,江苏江阴人,教 授,博士研究生导师,主要研究方向为电力 系统运行分析与控制、输配电系统自动化等 (**E-mail**:wzn\_nj@263.net);

孙 娟

孙国强(1978—),男,江苏江阴人,副教授,博士,主要方向为电力系统分析与运行控制(E-mail: hhusunguoqiang@163.com)。

# Analysis of probabilistic energy flow for integrated electricity-heat energy system with P2H

SUN Juan, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, CHEN Sheng, ZANG Haixiang, CHEN Shuang

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract**: P2H (Power-to-Heat) technology can be used to suppress the power generation fluctuation of distributed renewable energies and to promote the accommodation of PV (PhotoVoltaic) power and the synergistic operation with integrated electricity-heat energy system. A probabilistic energy flow model of integrated electricity-heat systems with PV is established and Nataf transformation is adopted to sample the correlated non-normal random variables of PV inputs, which is then combined with LHS(Latin Hypercube Sampling) to quantitatively assess the impact of P2H on the probabilistic energy flows of electrical and thermal systems. The effectiveness of the established model is verified by the analytic results of Barry Island case. The P2H technology in the integrated electricity-heat energy system promotes the accommodation of PV and enhances the system safety.

Key words: integrated electricity-heat energy system; P2H technology; probabilistic energy flow; photo-voltaic power generation; Latin hypercube sampling