

基于解析法的电-热互联综合能源系统概率潮流计算

李红, 王文学, 伏祥运, 何维祥, 王伟, 袁斌, 王舒捷

(国网江苏省电力有限公司连云港供电分公司, 江苏 连云港 222000)

摘要:综合能源系统包含了大量的不确定因素,因此需要考虑综合能源系统在不确定环境下的运行状态。文中基于解析法和近似法,提出一种辐射状供热网络概率潮流快速计算方法。首先通过正态分布函数的数字特征得到管道流量的均值与方差,然后利用连续型随机变量的性质得到了节点温度的均值与方差,当求得热电联产机组热出力概率分布后可得机组电出力概率分布,最后求得电网各状态变量的概率分布。文中方法不需要迭代即可计算出稳态潮流与概率潮流,且不存在收敛性问题。该方法能在保证计算精度的同时,极大地提高计算速度,可为综合能源系统的不确定性分析和风险评估提供参考。

关键词:综合能源系统;概率潮流;辐射状;概率分布;快速计算;解析法

中图分类号:TM711

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)05-0151-07

0 引言

区域综合能源系统以电力系统为核心,综合考虑电、气、热等多种用能需求,形成具有多能协同特征的综合系统^[1-4]。但目前电力系统、热力系统等普遍存在独立规划、独立运行的特点,各种能源网络间缺乏有效交互,难以发挥多能源系统的耦合互补的优势^[5-7]。电-热系统稳态潮流属于确定性分析,是对综合能源系统深入研究的基础。综合能源系统稳态潮流主要从模型和求解方法两方面进行研究:在模型方面,电网稳态潮流方程是由节点功率方程组成的非线性方程组^[8]。气网稳态模型包括管道流量方程、加压站方程和节点流量平衡方程^[9]。热网稳态模型主要包括水力模型和热力模型^[10]。目前主要利用牛拉法求解非线性方程组,一般分为统一求解和顺序求解^[11]。

随着新能源的大量并网,负荷的不确定性增大,同时能源转化设备应用日益广泛,增强了不同能源系统间的耦合程度,因此综合能源系统包含大量不确定性因素^[12],如各类负荷或新能源出力的波动、故障等,且不同能源网络之间存在相互影响,某网络的波动可能造成综合能源系统潮流分布产生根本性的变化^[13]。仅通过确定性分析难以把握综合能源系统在不确定环境下的运行状态,概率潮流能够充分考虑这些不确定性因素,从而更全面地反映系统运行状况。

目前,概率潮流的求解方法一般包括模拟法、解析法和近似法。模拟法中常用蒙特卡洛法,通过

生成大量场景,寻找状态量的概率信息^[14],文献[15]提出一种电-热互联系统概率潮流计算方法,定量评估电转热技术对系统概率潮流影响。解析法中常用的是半不变量法^[16-17],文献[18]提出一种基于多点线性半不变量法的电-热互联系统概率潮流计算方法,定量得到相关状态量的概率信息。近似法中常用点估计法,优点为无需求解输入输出的具体关系,但相比其他2种方法,计算精度一般较低^[19]。文献[20]提出一种计及相关性的电气-热综合能源系统概率最优能量流计算方法,并采用基于 Nataf 变换的三点估计法对该模型进行求解。

热网方程具有强非线性,以往半不变量法将状态量描述为关于电-热负荷的线性方程,一般无法同时满足计算复杂度、精度和计算速度的要求。文中基于解析法和近似法,提出一种辐射状供热网络概率潮流快速计算方法,将状态量描述为关于电-热负荷的非线性方程,可直接获得管道流量和节点温度的概率信息,显著提高了计算速度和求解精度。

1 热网模型

1.1 热网非线性模型

热网模型包括水力模型和热力模型^[21],水力模型包括流量平衡方程和管道压降方程:

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

$$h_f = Km |m| \quad (2)$$

式中: A 为系数矩阵; m, m_q 分别为管道流量向量和热负荷流量向量,kg/s; h_f 为环路管道压降组成的向量; $m; K$ 为环路管道阻尼系数组成的向量; $|m|$ 为管道流量的绝对值。

热力模型包括热负荷方程、管道温降方程和热

收稿日期:2021-03-28;修回日期:2021-06-03

基金项目:国家电网有限公司科技项目“储能在岸电系统中规划配置与协调运行关键技术研究与应用”(5210D0180006)

功率守恒方程。

$$\Phi = C_p m_q (T_s - T_o) \quad (3)$$

$$T_{\text{end}} = (T_{\text{start}} - T_a) e^{-\lambda L / (C_p m)} + T_a \quad (4)$$

$$T_{\text{out}} \sum m_{\text{out}} = \sum (m_{\text{in}} T_{\text{in}}) \quad (5)$$

式中： Φ 为热负荷向量，MW； C_p 为水比热容，且 $C_p = 4182 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ； T_s, T_o 分别为节点供水温度向量和回水温度向量， $^\circ\text{C}$ ； $T_{\text{start}}, T_{\text{end}}, T_a$ 分别为管道首端温度、管道末端温度和环境温度， $^\circ\text{C}$ ； λ 为传热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ； L 为管道长度，m； $m_{\text{in}}, m_{\text{out}}$ 分别为注入节点流量向量和流出节点流量向量， kg/s ； $T_{\text{in}}, T_{\text{out}}$ 分别为流入节点温度和节点混合温度， $^\circ\text{C}$ 。

热网方程式(1)一式(5)中含有指数方程，非线性程度较高，且管道流量与节点温度为乘积关系，耦合程度较高。目前常采用牛顿法求解稳态潮流，计算较为复杂，甚至可能存在不收敛等问题。

1.2 电热耦合元件模型

热电联产机组分为定热电比机组和变热电比机组2种，分别用式(6)和式(7)表示。

$$C_m = \Phi_{\text{CHP}} / P_{\text{CHP}} \quad (6)$$

$$C_z = \Phi_{\text{CHP}} / (\eta_e F_{\text{in}} - P_{\text{CHP}}) \quad (7)$$

式中： C_m, C_z 分别为机组的定热电比和变热电比； $\Phi_{\text{CHP}}, P_{\text{CHP}}$ 分别为机组的热出力和电出力； η_e, F_{in} 分别为机组的冷凝效率和燃料输入速率。

1.3 辐射状热网概率潮流模型

两节点供热网络如图1所示，图中 T_H, T_{H1}, T_{H2} 分别为热源温度、节点1温度和节点2温度； m_H 为热负荷流量。利用管道温降方程式(4)与热负荷功率方程式(3)推导^[22]可得式(8)。

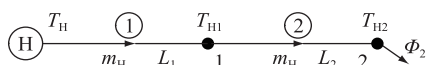


图1 两节点供热网络

Fig.1 District heating network with two nodes

$$m_H = \frac{\lambda_1 L_1 + \lambda_2 L_2}{C_p} \times \frac{T_H - T_a}{T_H - T_R} + \frac{\Phi_2}{C_p (T_H - T_R)} \quad (8)$$

式中： T_R 为热负荷回水温度； Φ_2 为节点2的热负荷。将式(8)推广至多根管道，如式(9)所示。

$$m_N = \frac{\lambda_1 L_1 + \dots + \lambda_N L_N}{C_p} \times \frac{T_H - T_a}{T_H - T_R} + \frac{\Phi_N}{C_p (T_H - T_R)} \quad (9)$$

多节点供热网络如图2所示，对于含有分支的节点，此时 $m_1 \neq m_2 \neq \dots \neq m_i$ ，其中 m_1, m_2, \dots, m_{i-1} 为管道流量， m_i 为热负荷流量。

图2中，引入变量 n_1, n_2, \dots, n_i ，令 $n_1 = m_1/m_i, n_2 = m_2/m_i, \dots, n_{i-1} = m_{i-1}/m_i, n_i = m_i/m_i = 1$ ，代入

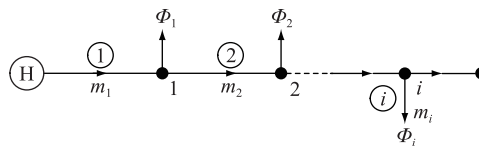


图2 多节点供热网络

Fig.2 District heating network with multiple nodes

式(10)可得 m_i 为：

$$m_i = \frac{\lambda_1 L_1}{n_1} + \dots + \frac{\lambda_i L_i}{n_i} \times \frac{T_H - T_a}{T_H - T_R} + \frac{\Phi_i}{C_p (T_H - T_R)} \quad (10)$$

由于潮流计算前管道流量未知，令：

$$n_k \approx \frac{C_p m_k T_k}{C_p m_i T_i} = \frac{Q_k}{\Phi_i} \quad (11)$$

式中： k 为热负荷流量 m_i 经过的干路管道编号； Φ_i 为节点 i 的热负荷； Q_k 为管道 k 所流入热能的期望值，因此 n_1, n_2, \dots, n_k 将为定值^[22]。

因此，由随机变量的数字特征， m_i 的均值和方差可表示为：

$$E(m_i) = \frac{\lambda_1 L_1}{n_1} + \dots + \frac{\lambda_i L_i}{n_i} \times \frac{T_H - T_a}{T_H - T_R} + \frac{E(\Phi_i)}{C_p (T_H - T_R)} \quad (12)$$

$$D(m_i) = \frac{1}{C_p^2 (T_H - T_R)^2} D(\Phi_i) \quad (13)$$

式中： $E(m_i)$ 为管道 i 中热负荷流量 m_i 的均值； $D(m_i)$ 为管道 i 中热负荷流量 m_i 的方差。由于比热容 $C_p = 4182 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，则当式(12)中 n_i 为定值时误差较小，因此由热负荷的均值和方差可得管道流量的均值和方差。将热负荷功率方程式(3)代入式(10)，移项变形可得式(14)。

$$T_{H_i} = T_H - \left(\frac{\lambda_1 L_1}{n_1} + \frac{\lambda_2 L_2}{n_2} + \dots + \frac{\lambda_i L_i}{n_i} \right) \times \frac{T_H - T_a}{C_p} \times \frac{1}{m_i} \quad (14)$$

再由随机变量的数字特征可得：

$$E(T_{H_i}) = T_H - \left(\frac{\lambda_1 L_1}{n_1} + \dots + \frac{\lambda_i L_i}{n_i} \right) \times \frac{T_H - T_a}{C_p} E\left(\frac{1}{m_i}\right) \quad (15)$$

$$D(T_{H_i}) = \left(\frac{\lambda_1 L_1}{n_1} + \dots + \frac{\lambda_i L_i}{n_i} \right)^2 \times \frac{(T_H - T_a)^2}{C_p^2} D\left(\frac{1}{m_i}\right) \quad (16)$$

由式(15)、式(16)可知，得到流量倒数的均值和流量倒数的方差后，可获得节点温度 T_{H_i} 的均值与方差。设正态分布随机变量 $x = m_i$ 的均值和标准

差分别为 μ_i, σ_i , 其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (17)$$

由连续型随机变量的概率密度函数性质可知, $y = 1/x = 1/m_i$, 概率密度函数为:

$$f(y) = \frac{1}{y^2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(1/y-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (18)$$

参考式(17)正态分布概率密度函数的形式,若式(18)中 y 的均值取 $1/\mu_i$, 标准差取 $\sigma_i y/\mu_i$, 其中 $y = 1/\mu_i$, 则标准差为 σ_i/μ_i^2 。

因此若正态分布随机变量 $x = m_i$ 的均值和标准差分别为 μ_i 与 σ_i , 则 $y = 1/x = 1/m_i$, 近似服从正态分布, 其均值与标准差分别为 $1/\mu_i$ 与 σ_i/μ_i^2 。

综上所述,由式(12)和式(13)可得供热网络管道流量的均值与方差,由式(15)一式(18)可得节点温度的均值与方差。求得热电联产(combined heating and power, CHP)热出力概率分布后,由机组热出力与电出力关系可得机组电出力概率分布,进而求得电网中各状态变量的概率分布。

2 辐射状热网概率潮流算例测试

23 节点辐射状热网算例如图 3 所示,CHP 源温度恒定为 80°C , 负荷节点回水温度恒定为 45°C , 环境温度 T_a 为 10°C , 测试采用 Matlab 编程, 仿真环境为 1.9 GHz CPU, 4.0 GB RAM 的 PC 机。

2.1 典型状态量的均值与方差

若每根管道长度设置为 500 m, 所有负荷节点热负荷均设置为 0.5 MW, 热负荷波动均在 $\pm 10\%$ 以内。文中方法和蒙特卡洛法所得流量均值、流量标准差分别为 $\mu_m, \sigma_m, \mu_{m,mcs}, \sigma_{m,mcs}$; 流量均值误差百分数、流量标准差误差分别为 $\delta_{\mu,m}, \delta_{\sigma,m}$ 。因此有:

$$\delta_{\mu,m} = (|\mu_m - \mu_{m,mcs}|/\mu_{m,mcs}) \times 100\% \quad (19)$$

$$\delta_{\sigma,m} = |\sigma_m - \sigma_{m,mcs}| \quad (20)$$

温度均值、温度标准差分别为 $\mu_T, \sigma_T, \mu_{T,mcs}, \sigma_{T,mcs}$; 温度均值误差百分数、温度标准差误差分别为 $\delta_{\mu,T}, \delta_{\sigma,T}$ 。因此有:

$$\delta_{\mu,T} = (|\mu_T - \mu_{T,mcs}|/\mu_{T,mcs}) \times 100\% \quad (21)$$

$$\delta_{\sigma,T} = |\sigma_T - \sigma_{T,mcs}| \quad (22)$$

其中蒙特卡洛结果是采用热网非线性模型计算所得, 采样 20 000 次。此时计算出的流量和温度的均值与标准差如表 1 和表 2 所示, 文中方法耗时 0.019 6 s, 蒙特卡洛法耗时 1 720.105 4 s。

表 1 所有管道流量均值和标准差的比较

Table 1 Comparison of mean and standard deviation of all pipe flow

管道编号	$\mu_m/$ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\sigma_m/$ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\mu_{m,mcs}/$ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\sigma_{m,mcs}/$ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\delta_{\mu,m}/$ %	$\delta_{\sigma,m}/$ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	42.266 9	0.394 4	42.264 5	0.397 5	0.005 6	0.003 1
2	38.794 5	0.379 0	38.792 6	0.381 4	0.004 9	0.002 4
3	31.782 2	0.342 8	31.781 1	0.343 3	0.003 5	0.000 5
4	28.290 8	0.323 2	28.288 7	0.323 8	0.007 3	0.000 6
5	21.233 8	0.279 9	21.231 8	0.280 9	0.009 4	0.001 0
6	7.093 6	0.161 6	7.092 6	0.163 2	0.014 3	0.001 6
7	3.561 0	0.114 3	3.560 7	0.114 8	0.008 4	0.000 5
8	3.472 4	0.109 4	3.472 2	0.109 9	0.005 8	0.000 5
9	7.012 3	0.161 6	7.012 7	0.162 3	0.005 2	0.000 7
10	3.508 1	0.114 3	3.508 0	0.114 9	0.003 7	0.000 6
11	3.504 1	0.114 3	3.503 9	0.115 0	0.005 7	0.000 7
12	3.491 5	0.114 3	3.491 3	0.114 8	0.005 7	0.000 5
13	7.056 9	0.161 6	7.056 2	0.162 9	0.010 5	0.001 4
14	3.532 0	0.114 3	3.531 2	0.115 7	0.024 4	0.001 5
15	3.525 0	0.114 3	3.524 8	0.115 6	0.005 7	0.001 3
16	3.504 8	0.114 3	3.504 6	0.115 4	0.005 7	0.001 1
17	10.635 4	0.197 9	10.634 2	0.200 1	0.010 9	0.002 2
18	7.115 7	0.161 6	7.114 9	0.162 0	0.011 2	0.000 4
19	3.552 3	0.114 3	3.551 9	0.116 3	0.012 1	0.002 1
20	3.519 7	0.114 3	3.519 5	0.116 0	0.005 7	0.001 7
21	3.563 4	0.114 3	3.563 1	0.116 2	0.008 4	0.001 9
22	3.532 6	0.114 3	3.532 5	0.115 8	0.002 8	0.001 5

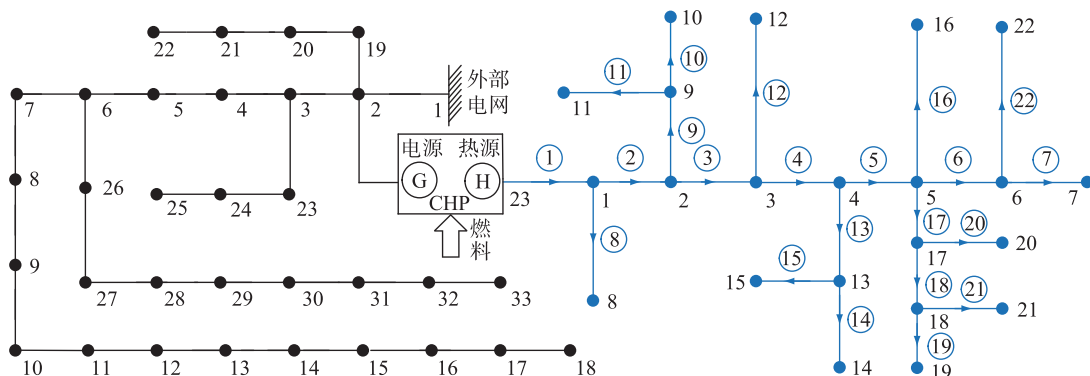


图 3 电-热互联综合能源系统

Fig.3 The diagram of combining electricity and heat networks

表2 所有节点温度均值和标准差的比较
Table 2 Comparison of mean and standard deviation of all node temperatures

节点编号	$\mu_T/^\circ\text{C}$	$\sigma_T/^\circ\text{C}$	$\mu_{T,mcs}/^\circ\text{C}$	$\sigma_{T,mcs}/^\circ\text{C}$	$\delta_{\mu,T}/\%$	$\delta_{\sigma,T}/^\circ\text{C}$
1	79.936 5	0.000 6	79.936 5	0.000 6	0.000 0	0.000 0
2	79.867 3	0.001 3	79.867 2	0.001 3	0.000 1	0.000 0
3	79.785 9	0.002 1	79.785 7	0.002 1	0.000 3	0.000 0
4	79.689 5	0.003 1	79.689 5	0.003 1	0.000 1	0.000 0
5	79.563 7	0.004 4	79.563 6	0.004 5	0.000 1	0.000 1
6	79.287 5	0.009 3	79.287 2	0.009 6	0.000 3	0.000 3
7	78.570 1	0.028 9	78.569 2	0.029 1	0.001 1	0.000 2
8	79.432 6	0.016 1	79.432 3	0.016 2	0.000 4	0.000 1
9	79.617 6	0.006 4	79.617 5	0.006 4	0.000 2	0.000 0
10	79.081 1	0.022 5	79.080 4	0.022 4	0.000 9	0.000 0
11	79.120 6	0.020 9	79.120 4	0.020 9	0.000 3	0.000 0
12	79.245 5	0.018 2	79.245 4	0.018 2	0.000 1	0.000 0
13	79.362 1	0.009 4	79.361 8	0.009 5	0.000 3	0.000 0
14	78.849 8	0.024 0	78.848 8	0.024 1	0.001 2	0.000 1
15	78.918 8	0.021 2	78.917 6	0.022 0	0.001 5	0.000 8
16	79.116 6	0.015 9	79.116 4	0.015 9	0.000 3	0.000 0
17	79.416 0	0.006 4	79.415 9	0.006 7	0.000 2	0.000 3
18	79.092 5	0.011 4	79.092 3	0.011 6	0.000 3	0.000 2
19	78.654 4	0.023 8	78.653 6	0.024 8	0.001 1	0.001 1
20	78.971 8	0.017 2	78.970 9	0.017 8	0.001 1	0.000 6
21	78.547 6	0.024 9	78.546 8	0.025 6	0.001 0	0.000 7
22	78.845 7	0.020 5	78.844 9	0.021 1	0.001 0	0.000 6

由表1可知,管道流量均值误差百分数最大值为0.024%,平均值为0.0080%,管道流量标准差误差最大值为0.0031 kg/s,平均值为0.0013 kg/s。由表2可知节点温度均值误差百分数最大值为0.0015%,平均值为0.0005%,节点温度标准差误差最大值为0.0011℃,平均值为0.0002℃。可见文中方法具有较高的计算精度和计算速度。

由表1可知,文中方法和蒙特卡洛法所得管道1的流量均值分别为42.2669 kg/s和42.2645 kg/s,2种方法求得的热源节点回水温度均值均为44.7122℃,由式(3)计算可得热源的热出力相差354.1769 W,若式(6)中定热电比取1.3,则2种方法求得的热出力误差引起的电压和相角误差分别如图4和图5所示。

由图4和图5可知,文中方法和蒙特卡洛法引起的电网电压误差和相角误差极小,表明文中方法产生的误差对电网影响极小,验证了该方法的有效性与合理性。

2.2 控制变量法

(1) 设置每个负荷节点热负荷均为1 MW,所有热负荷波动量为±10%且保持不变,逐渐同时增

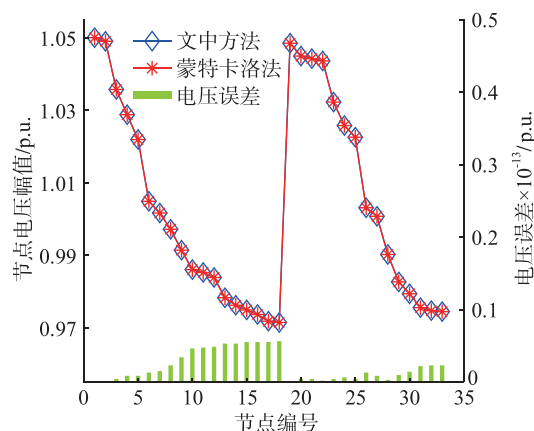


图4 热出力误差引起的电网电压误差
Fig.4 Error of voltage amplitude caused by thermal output

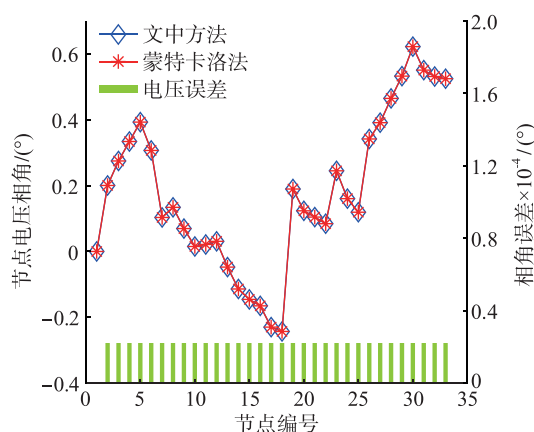


图5 热出力误差引起的电网相角误差
Fig.5 Error of voltage phase angle caused by thermal output

大每根管道长度,节点19温度标准差见图6(节点19温度标准差误差最大)。

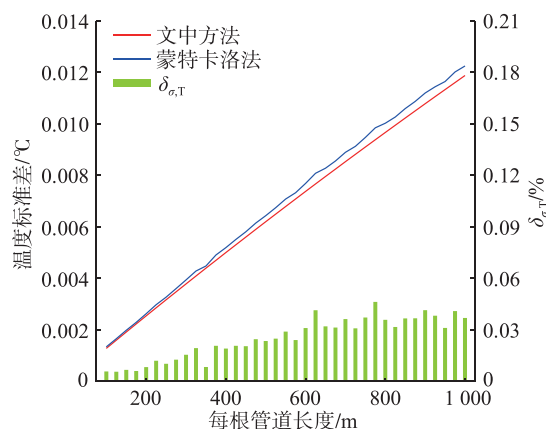


图6 节点19温度标准差随管道长度变化情况
Fig.6 The temperature standard deviation of node 19 varying with the length of the pipeline

由图6可知,节点19温度标准差与管道长度近似呈线性正相关,且 $\delta_{\sigma,T}$ 小于0.05%。

(2) 设置每根管道长度为 500 m,热负荷波动量为 $\pm 10\%$ 且保持不变,逐渐同时增大每个负荷节点热负荷值,节点 19 温度标准差如图 7 所示。

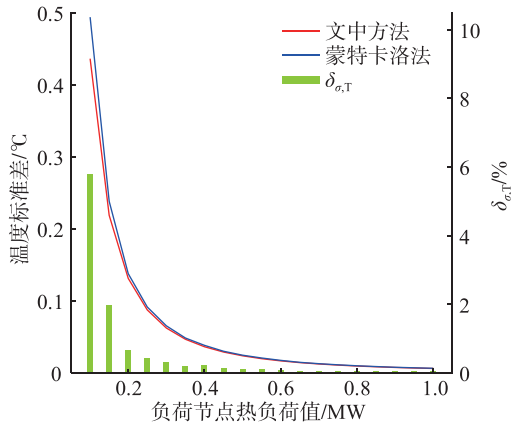


图 7 节点 19 温度标准差随热负荷值变化情况

Fig.7 The temperature standard deviation of node 19 varying with the heat load value

由图 7 可知,节点 19 温度标准差与热负荷值呈负相关,且曲线的切线逐渐平缓,热负荷值对节点温度标准差的影响相对较大。同时,随着热负荷值的增大,文中方法的误差逐渐缩小,当热负荷值为 1 MW 时,节点 19 温度标准差误差小于 0.02%。

(3) 设置管道长度为 500 m,热负荷为 1 MW 且保持不变,逐渐同时增大热负荷波动量,节点 19 温度标准差如图 8 所示。

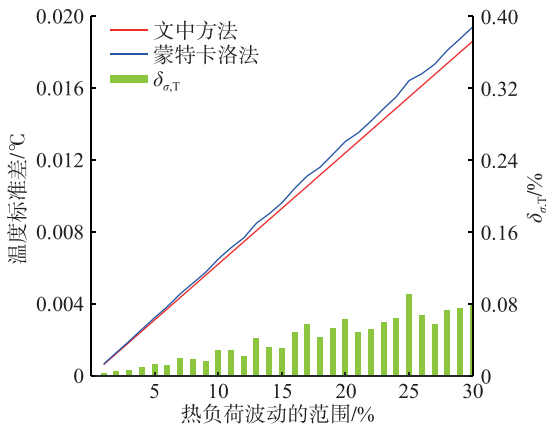


图 8 节点 19 温度标准差随热负荷波动量变化情况

Fig.8 The temperature standard deviation of node 19 varying with the fluctuation of heat load

由图 8 可知,节点 19 温度标准差与热负荷波动量近似呈线性正相关,且 $\delta_{\sigma,T}$ 小于 0.1%。

2.3 典型状态量的三维关系图

设置热负荷波动量为 $\pm 10\%$,当改变管道长度和热负荷值时,采用蒙特卡洛法所得管道 1 流量标准差和节点 19 温度标准差分别见图 9 和图 10。

由图 9 可知,管道长度与流量标准差没有呈现

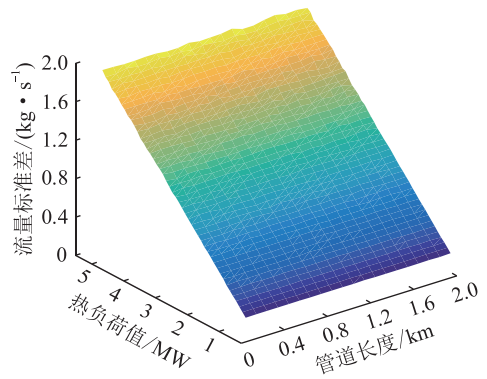


图 9 管道 1 流量标准差与管道长度和热负荷的关系

Fig.9 The relationship among the flow standard deviation of pipe 1, the pipe length and heat load value

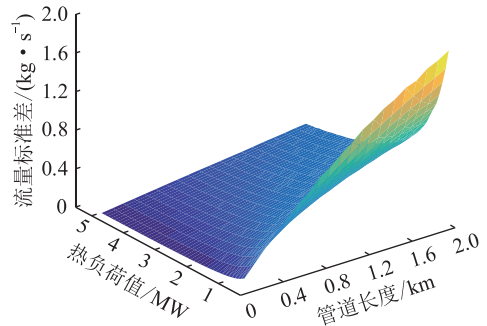


图 10 节点 19 温度标准差与管道长度和热负荷关系

Fig.10 The relationship among the temperature standard deviation of node 19, the pipe length and heat load value

相关性,热负荷值与流量标准差近似呈线性正相关。由图 10 可知,管道长度与节点温度标准差呈正相关,而热负荷值与节点温度标准差呈负相关。

3 结论

文中提出了一种辐射状供热网络概率潮流快速计算方法,可同时获得热力网的稳态潮流与概率潮流,无需迭代,计算准确度高且不存在收敛性问题,结论如下:

(1) 管道长度与流量标准差没有呈现相关性,管道流量标准差与热负荷值近似呈线性正相关。

(2) 节点温度标准差与热负荷波动量近似呈线性正相关,节点温度标准差与管道长度近似呈线性正相关,节点温度标准差与热负荷值呈负相关。

(3) 文中方法引起的热源热出力误差对电网电压和相角的影响极小。

文中方法在保证计算精度的同时,极大地提高了计算速度,可为综合能源系统不确定性分析提供参考。下一步将研究大规模可再生能源并网对电-热互联综合能源系统概率潮流的影响。

本文得到国网江苏省电力有限公司连云港供电分公司伏祥运劳模创新工作室 2021 年研究项目“电-热互联综合能源系统快速潮流计算方法与优化调度方法技术的研究与应用”(B110D02188D7)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光. 能源互联网:理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(19):1-8.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy Internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19):1-8.

[2] 杨海柱,李梦龙,江昭阳,等. 考虑需求侧电热气负荷响应的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(10):30-37.
YANG Haizhu, LI Menglong, JIANG Zhaoyang, et al. Optimal operation of regional integrated energy system considering demand side electricity heat and natural-gas loads response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10):30-37.

[3] 孙宏宇,张沛超,陈永华. 基于消息总线的综合能源系统时间序列潮流的协同仿真方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(17):76-83.
SUN Hongyu, ZHANG Peichao, CHEN Yonghua. A co-simulation method for time series energy flow of integrated energy system based on message bus[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17):76-83.

[4] 谢可,余晗,郝艳亚,等. 基于可信数据的综合能源交易系统的设计[J]. 电力信息与通信技术,2019,17(10):44-48.
XIE Ke, YU Han, HAO Yanya, et al. Design of integrated energy transaction system based on trusted data[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019, 17(10):44-48.

[5] 田世明,栾文鹏,张东霞,等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3482-3494.
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14):3482-3494.

[6] 丁涛,牟晨璐,别朝红,等. 能源互联网及其优化运行研究现状综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(15):4318-4328, 4632.
DING Tao, MU Chenlu, BIE Zhaohong, et al. Review of energy internet and its operation [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15):4318-4328, 4632.

[7] 李秋燕,王利利,张艺涵,等. 能源互联网多能流的耦合模型及动态优化方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19):180-186.
LI Qiuyan, WANG Lili, ZHANG Yihan, et al. A review of coupling models and dynamic optimization methods for energy internet multi-energy flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19):180-186.

[8] PURCHALA K, MEEUS L, VAN DOMMELEN D, et al. Usefulness of DC power flow for active power flow analysis[C]//IEEE

Power Engineering Society General Meeting, 2005. San Francisco, CA, USA. IEEE, 2005:454-459.

[9] QIAO Z, GUO Q L, SUN H B, et al. An interval gas flow analysis in natural gas and electricity coupled networks considering the uncertainty of wind power[J]. Applied Energy, 2017, 201:343-353.

[10] LIU X Z, JENKINS N, WU J Z, et al. Combined analysis of electricity and heat networks [J]. Energy Procedia, 2014, 61:155-159.

[11] 张刚,张峰,张利,等. 考虑多种耦合单元的电气热联合系统潮流分布式计算方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(22):6594-6605.
ZHANG Gang, ZHANG Feng, ZHANG Li, et al. Distributed algorithm for the power flow calculation of integrated electrical, gas, and heating network considering various coupling units [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22):6594-6605.

[12] 顾伟,陆帅,王珺,等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J]. 中国电机工程学报,2017,37(5):1305-1316.
GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5):1305-1316.

[13] 徐宪东,贾宏杰,靳小龙,等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3634-3642.
XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14):3634-3642.

[14] 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.

[15] HAJIAN M, ROSEHART W D, ZAREIPOUR H. Probabilistic power flow by Monte Carlo simulation with Latin supercube sampling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2):1550-1559.

[16] 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.

[17] 栗然,范航,张凡,等. 基于拟蒙特卡洛的半不变量法概率潮流计算[J]. 电力建设,2017,38(11):144-150.
LI Ran, FAN Hang, ZHANG Fan, et al. Quasi Monte Carlo based cumulant method for probabilistic load flow calculation

- [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(11):144-150.
- [18] ZHANG P, LEE S T. Probabilistic load flow computation using the method of combined cumulants and Gram-Charlier expansion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 676-682.
- [19] 卫鹏, 刘建坤, 周前, 等. 基于半不变量和 Gram-Charlier 级数展开法的随机潮流算法[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1):34-38.
WEI Peng, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. A probabilistic power flow algorithm based on semi-variable and gram-charlier series expansion[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1):34-38.
- [20] 廖星星, 吴奕, 卫志农, 等. 基于 GMM 及多点线性半不变量法的电-热互联综合能源系统概率潮流分析[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.
- [21] SAUNDERS C S. Point estimate method addressing correlated wind power for probabilistic optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3):1045-1054.
- [22] 韩佳, 苗世洪, 李超, 等. 计及相关性的电-气-热综合能源系统概率最优能量流[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5):1055-1067.
HAN Ji, MIAO Shihong, LI Chao, et al. Probabilistic optimal energy flow of electricity-gas-heat integrated energy system considering correlation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5):1055-1067.

作者简介:



李红

李红(1980),女,学士,高级工程师,从事配电网规划运行、综合能源系统运行与优化相关工作(E-mail:1677963967@qq.com);

王文学(1993),男,硕士,工程师,从事综合能源系统运行与优化相关工作;

伏祥运(1977),男,博士,研究员级高级工程师,从事电网调度相关工作。

Probability power flow calculation for electric-thermal interconnected integrated energy system based on analytical method

LI Hong, WANG Wenxue, FU Xiangyun, HE Weixiang, WANG Wei, YUAN Bin, WANG Shujie

(Lianyungang Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Lianyungang 222000, China)

Abstract: The integrated energy system contains a large number of uncertain factors, so it is necessary to consider the operating state of the integrated energy system in an uncertain environment. Based on the analytical method and the approximate method, a rapid calculation method for the probability power flow of a radial heating network is proposed in this paper. Firstly, the mean and variance of the mass flow rate within a pipe are obtained through the digital characteristics of the normal distribution function. Then, the mean and variance of the node temperature are calculated by the properties of continuous random variables. When the probability distribution of the heat output of the combined heating and power (CHP) unit is calculated, the probability distribution of the electric output of the unit is obtained. Finally the probability distribution of each state variable of the power system is calculated. The method proposed in this paper is able to calculate steady state power flow and probability power flow without iteration, and there is no convergence problem. The method greatly improves the calculation speed while ensuring the calculation accuracy, which provides a reference for the uncertainty analysis and risk assessment of the integrated energy system.

Keywords: integrated energy system; probability power flow; radial pattern; probability distributions; fast calculation; analytic method

(编辑 方晶)