

◆研究与探讨◆

DOI:10.3969/j.issn.1009-1831.2020.02.002

基于线性规划的电-热互联系统参数优化方法

张 勇,马洲俊,张 明,许洪华,路晓敏

(国网江苏省电力有限公司 南京供电分公司,南京 210019)

Parameter optimization method for electro-thermal interconnect system based on linear programming

ZHANG Yong, MA Zhoujun, ZHANG Ming, XU Honghua, LU Xiaomin

(Nanjing Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

摘要:鉴于热网潮流方程存在强非线性与强耦合特性,提出了一种基于多元函数泰勒展开的线性优化方法,该方法将复杂的非线性优化问题转化为多个易于求解的线性优化问题,各线性优化问题之间采用迭代方法逐步逼近最优解。以电-热互联系统总网络损耗最小为优化目标,可同时实现对多个热电联产机组的参数优化配置,降低了网络损耗,减少了系统运行成本,有利于实现不同能源之间的耦合互补与协调运行,从而提升系统调度能力、经济性和安全性。实际系统的测试分析验证了所提方法的有效性与合理性。

关键词:线性优化;电-热互联;热电联产运行参数;综合能源系统总网损

Abstract: In view of the strong nonlinear and strong coupling characteristics of the heat flow equation, a linear optimization method based on multivariate function Taylor expansion is proposed. This method transforms the complex nonlinear optimization problem into multiple linear optimization problems that are easy to solve. An iterative method is used to gradually approximate the optimal solution between optimization problems. Taking the minimum total network loss of the electro-thermal interconnect system as the optimization goal, the parameter optimization configuration of multiple cogeneration units can be realized at the same time, the network loss is reduced, the system operation cost is reduced, and coupling complementarity and coordinated operation is achieved between different energy sources, which can improve system scheduling, economy and security. The test analysis of the actual system verifies the validity and rationality of the proposed method.

Key words: linear optimization; electro-thermal interconnection; operating parameters of cogeneration; total energy loss of integrated energy system

0 引言

随着供热网络的广泛应用,热电联产机组的渗透越来越多,电转热技术的使用前景广阔,电力系统与区域供热系统的耦合越来越紧密,并在加速发展。在综合能源系统的协调优化领域,进行了大量的研究。文献[1]考虑到电力负荷、热负荷和光伏输出的不确定性以及这些不确定性之间的相关性,为电-热互联系统提出了一种机会约束的协调优化方法。文献[2]研究电-热互联综合能源系统区间潮流计算方法,并引入负荷不确定预算克服了潮流区间的保守性。文献[3]推导并建立了辐射状热网概率能量流的非线性解析算法。文献[4]研究了系统在有蓄能装置的情况下,满足四季不同能源需求的最经济的运行模式。文献[5]基于双层优化数学模型求解可再生能源配置,对多情形优化结果进

行多维度对比分析,为旅游岛实际开展能源定容规划工作提供思路。文献[6]通过区间描述了PV输出和电力负荷的不确定性,并提出了区间线性规划模型,为多个综合能源系统提供日前优化调度策略。文献[7]以安装成本、能耗成本和需求侧响应成本等构成的年运行费用最低为优化目标,分析对比不同场景下各类成本的影响。文献[8]建立了计及负荷和光伏不确定性的区域综合能源系统日前多目标优化调度模型,并使用NBI法构造Pareto前沿以描述多目标问题的解集。

但是上述文献均未考虑到热电联产(combined heat and power, CHP)热电比对系统优化结果的影响。本文将线性优化方法引入热网,提出一种考虑CHP运行参数的电-热互联综合能源系统网损最优选择方法。首先将电力潮流方程和热力潮流方程在初值点处进行多元泰勒函数展开,保留一阶项可将非线性方程组线性化,然后依次迭代求解系统网损最小时的CHP运行参数。对巴厘岛电-热互联综合能源系统进行算例测试,测试结果验证了本文方法的有效性与合理性。

收稿日期:2019-10-14;修回日期:2019-12-25

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2018066)

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. (No.J2018066)

1 综合能源系统稳态能量流模型

1.1 电力系统稳态模型

电力系统状态变量包括节点电压幅值 U 与相角 θ , 当负荷功率已知时, 即可确定电网的电压和相角。电网节点的功率方程为

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^{j=N} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^{j=N} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2)$$

式中: $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$, G_{ij} 、 B_{ij} 分别为 π 型等效电路的电导、电纳。

1.2 热力系统稳态模型

供热网络由供热管道和回水管道组成, 供热回水管道以热水形式将热量从热源侧传递到用户侧。

1.2.1 水力模型

水力模型主要有3类约束方程: 节点流量平衡方程、回路压力方程和压头损失方程, 具体表示为

$$Am = m_q \quad (3)$$

$$Bh_f = 0 \quad (4)$$

$$h_f = Km |m| \quad (5)$$

式中: A 为网络节点-支路关联矩阵; m 和 m_q 分别为每个管道内的质量流量和节点处的注入质量流量, kg/s; B 为回路关联矩阵; h_f 为水头压力损失的矢量, m; K 为管道阻力系数。

1.2.2 热力模型

热力模型有3类约束方程: 热负荷功率方程、管道温降方程和节点功率守恒方程, 分别由式(6)、式(7)和式(8)表示

$$\Phi = C_p m_q (T_s - T_o) \quad (6)$$

$$T_{end} = (T_{start} - T_a) e^{-\lambda L / (C_p m)} + T_a \quad (7)$$

$$(\sum m_{out}) T_{out} = \sum (m_{in} T_{in}) \quad (8)$$

式中: Φ 为消耗或供应的热功率的矢量, MW; C_p 为水的比热容; T_s 为节点处的供应温度, $^{\circ}\text{C}$; T_o 为节点回水温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{start} 和 T_{end} 分别为管道起始节点和终点节点的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_a 为周围环境温度, $^{\circ}\text{C}$; λ 为每单位长度的总传热系数 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$; m_{out} 和 m_{in} 分别为离开和进入节点的质量流量, kg/s; T_{in} 为输入管道末端的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{out} 为节点混合温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3 耦合元件模型

热电联产是利用热机或发电站同时产生电力和有用的热量, 即在常规发电中浪费的热量可被回收利用, 可提高资源利用效率。

依据 CHP 机组热电比是否变化, 可分为定热电比和变热电比2种。定热电比和变热电比的产电和产热可以分别用式(9)、式(10)表示

$$C_m = \phi_{\text{chp}} / P_{\text{chp}} \quad (9)$$

$$C_z = \Delta\phi / \Delta P = \phi_{\text{chp}} / (\eta_e F_{in} - P_{\text{chp}}) \quad (10)$$

式中: ϕ_{chp} 为 CHP 机组热出力; P_{chp} 为 CHP 机组电出力; η_e 为 CHP 机组冷凝效率; F_{in} 为燃料输入速率; C_m 为一恒定值; C_z 为一个可以调整变化的值。

2 电-热互联系统 CHP 运行参数优化方法

2.1 电-热系统 CHP 运行参数的非线性优化方法

将上述介绍的电-热互联综合能源系统负荷变量定义如下

$$Z_L = [P_L, Q_L, \Phi_L]^T \quad (11)$$

$$x = [m, T_{start}, T_{end}, U, \theta]^T \quad (12)$$

式中: P_L 为电网负荷有功功率; Q_L 为电网负荷无功功率; Φ_L 为热网负荷功率。

在满足各电负荷与热负荷需求的前提下, 通过设置 CHP 热源的热电比, 可协调控制各个 CHP 出力, 使电热互联系统网络总损耗最小, 其中总损耗为总的 CHP 出力减去总的电负荷与热负荷之和。

根据如下非线性方程组可以确定各个 CHP 的出力

$$z = F(x) = F(m, T_{start}, T_{end}, U, \theta) \quad (13)$$

式中: 非线性方程组 z 由式(1)一式(12)组成。且有 $x = [m_1 \cdots m_{n_1}, T_{start, 1} \cdots T_{start, n_1}, T_{end, 1} \cdots T_{end, n_1}, U_1 \cdots U_{n_2}, \theta_1 \cdots \theta_{n_2}]$, 其中 n_1 为热网管道个数, n_2 为电网节点个数。

电网和热网损耗可表示为

$$\Delta S = \sum P_{\text{chp}, i} - \sum P_j \quad (14)$$

$$\Delta\phi = \sum \phi_{\text{chp}, i} - \sum \phi_j \quad (15)$$

式中: ΔS 为电网总损耗; $P_{\text{chp}, i}$ 为第 i 个 CHP 电功率; P_j 和 Q_j 分别为第 j 个电负荷的有功功率与无功功率; $\Delta\phi$ 为热网总损耗; $\phi_{\text{chp}, i}$ 为第 i 个 CHP 热功率; ϕ_j 为第 j 个热负荷功率。

不等式约束

$$\underline{C_m} \leq C_m \leq \overline{C_m} \quad (16)$$

$$\underline{C_z} \leq C_z \leq \overline{C_z}$$

式中: C_m 为定热电比; C_z 为变热电比。

则电-热互联系统总损耗 H 可以通过式(17)解非线性优化(NLP)问题^[9]得到。

$$H = \min \Delta S + \Delta\phi \quad (17)$$

s.t. (13) and (16)

由于热网方程组非线性程度较高,求解式(17)较为困难,且可能遇到局部最优解,甚至不收敛问题。

2.2 电-热系统CHP运行参数的线性优化方法

由于非线性优化很难直接求解,而线性优化又难以保证精度,因此本文采用迭代方法来保证线性化精度,通过以下方法来选取迭代初值。

管道流量相差较大,故其对迭代收敛性影响较大,热网水力方程为

$$Am = m_q \quad (18)$$

$$B Km |m| = 0 \quad (19)$$

$$m_q = \Phi / C_p (T_s - T_o) \quad (20)$$

式中: T_o 为常数,由于热网节点温度变化较小,因此可设源温度 T_s 为迭代初值。

方程组 $z = F(x)$ 可表示为

$$\begin{cases} z_1 = F_1(x) = F_1(m, T_{start}, T_{end}, U, \theta) \\ z_2 = F_2(x) = F_2(m, T_{start}, T_{end}, U, \theta) \\ \vdots \\ z_N = F_N(x) = F_N(m, T_{start}, T_{end}, U, \theta) \end{cases} \quad (21)$$

将电力潮流与热力潮流方程组式(21)在迭代初值 $x^{(0)} = [m^{(0)}; T_{start}^{(0)}; T_{end}^{(0)}; U^{(0)}; \theta^{(0)}]^T$ 处采用多元函数泰勒展开,保留一阶项,则有

$$z = F(x) \approx F(x^{(0)}) + F'(x^{(0)})(x - x^{(0)}) \quad (22)$$

将式(22)表示成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(x^{(0)}) \\ F_2(x^{(0)}) \\ \vdots \\ F_N(x^{(0)}) \end{bmatrix} + J \begin{bmatrix} m_1 - m_1^{(0)} \\ m_2 - m_1^{(0)} \\ \vdots \\ \theta_{n_2} - \theta_{n_2}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中: J 为雅克比矩阵,如下所示

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(x^{(0)})}{\partial m_1} & \frac{\partial F_1(x^{(0)})}{\partial m_2} & \cdots & \frac{\partial F_1(x^{(0)})}{\partial \theta_{n_2}} \\ \frac{\partial F_2(x^{(0)})}{\partial m_1} & \frac{\partial F_2(x^{(0)})}{\partial m_2} & \cdots & \frac{\partial F_2(x^{(0)})}{\partial \theta_{n_2}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_N(x^{(0)})}{\partial m_1} & \frac{\partial F_N(x^{(0)})}{\partial m_2} & \cdots & \frac{\partial F_N(x^{(0)})}{\partial \theta_{n_2}} \end{bmatrix} \quad (24)$$

且有 $T_{start}^{(0)} = [T_{start,1}^{(0)}, T_{start,2}^{(0)}, \cdots, T_{start,n_1}^{(0)}];$

$m^{(0)} = [m_1^{(0)}, m_2^{(0)}, m_{n_1}^{(0)}]; T_{end}^{(0)} = [T_{end,1}^{(0)}, T_{end,2}^{(0)}, \cdots, T_{end,n_1}^{(0)}];$

$U^{(0)} = [U_1^{(0)}, U_2^{(0)}, U_{n_2}^{(0)}]; \theta^{(0)} = [\theta_1^{(0)}, \theta_2^{(0)}, \cdots, \theta_{n_2}^{(0)}];$

$x = [m_1, m_2, \cdots, m_{n_1}, T_{start,1}, T_{start,2}, \cdots, T_{start,n_1}, T_{end,1},$

$T_{end,2}, \cdots, T_{end,n_1}, U_1, U_2, \cdots, U_{n_2}, \theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_{n_2}]$, 其中 n_1 为热网管道个数, n_2 为电网节点个数,式(23)为线性方程组,则电-热互联系统总损耗 $H^{(1)}$ 可以通过式(25)解线性优化(LP)问题得到

$$\begin{aligned} H^{(1)} &= \min \Delta S^{(1)} + \Delta \varphi^{(1)} \\ s.t. & \text{ (13) and (23)} \end{aligned} \quad (25)$$

求出 $H^{(1)}$ 的同时能分别得到损耗取 $H^{(1)}$ 时对应的状态变量 $x^{(1)} = [m^{(1)}, T_{start}^{(1)}, T_{end}^{(1)}, U^{(1)}, \theta^{(1)}]^T$ 的值,将函数 $z = F(x)$ 在 $x^{(1)}$ 处采用多元函数泰勒展开,保留一阶项,有

$$z = F(x) \approx F(x^{(1)}) + F'(x^{(1)})(x - x^{(1)}) \quad (26)$$

$H^{(2)}$ 可通过公式(27)采用线性规划(LP)得到。

$$\begin{aligned} H^{(2)} &= \min \Delta S^{(2)} + \Delta \varphi^{(2)} \\ s.t. & \text{ (13) and (26)} \end{aligned} \quad (27)$$

重复以上过程可以得到 $H^{(1)}, H^{(2)}, \cdots, H^{(k)}$, 而 $H = \lim_{k \rightarrow \infty} H^{(k)}$, 则可得到电-热互联系统最优总损耗。

3 算例分析

本文以巴厘岛综合能源系统为例进行分析计算,测试系统如图1所示。电网和热网通过3台CHP机组耦合,其中CHP1为定热电比燃气轮机,CHP2为变热电比抽汽式汽轮机,CHP3为定热电比往复复式内燃机,其热电比分别为 C_{m1} 、 C_{m2} 与 C_{m3} 。各类型CHP热电比取值约束为: $1.3 \leq C_{m1} \leq 2, 2 \leq C_{m2} \leq 10, 1.1 \leq C_{m3} \leq 2.5$ 。固定CHP3热出力为0.3797 MW,且各CHP供水温度恒定为70℃,各热负荷回水温度恒定为30℃。算例测试不仅考虑供水网络热损耗,还计及回水网络热损耗,采用YALMIP优化工具箱求解。

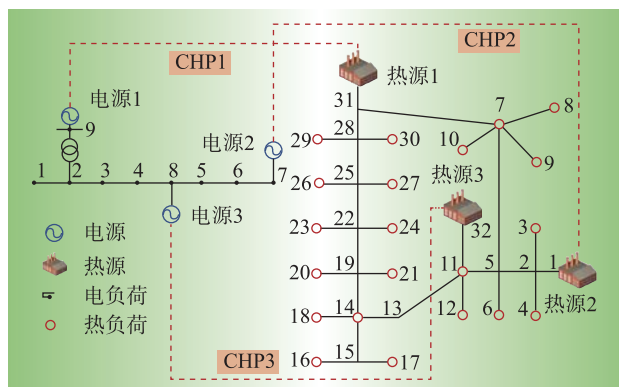


图1 电-热多能源结构图

Fig. 1 Structure of the combined electrical and district heating network

测试1:取CHP3热电比 $C_{m3} = 1/0.79$,得出电网与热网各CHP出力情况和各网络损耗与文献[4]结果一致,如表1所示,验证了所提模型在电-热互联系统稳态运行时各网络损耗的正确性。再证明当CHP3热电比取值在某一范围时,本文所提算法迭代收敛,即可验证本文算法的有效性。

测试2:固定CHP3热出力为0.3797 MW,取各CHP热电比约束: $1.3 \leq C_{m1} \leq 2, C_{m2} = 8.1$,表2第1列

表1 两种算法网损计算结果比较

Table 1 Comparison of calculation results of network loss between two algorithms

损耗参数	本文算法	文献[4]算法
电网总损耗	0.011 8	0.011 8
热网总损耗	0.080 9	0.080 9
电-热网络总损耗	0.092 7	0.092 7

为CHP3热电比 C_{m3} 约束范围,用 C_{m3_R} 表示;第2列为电-热系统总损耗最小时 C_{m1} 热电比取值,用 C_{m1_V} 表示;第3列为电-热系统总损耗最小时 C_{m2} 热电比取值,用 C_{m2_V} 表示;第4列为电网总有功损耗,用 ΔS 表示;第5列为热网总损耗,用 $\Delta \Phi$ 表示;第6列为电-热系统总网损,用 ΔH 表示。

由表2中热电比参数与网络损耗优化结果可知,当CHP2热电比 C_{m2} 固定时, C_{m1_V} 与 C_{m3_V} 值越小,电-热系统总损耗越小。且随着 C_{m3_V} 的增大,电网损耗增大幅度较明显,热网损耗增大幅度不明显。

表2 热电比参数与网络损耗优化结果

Table 2 Optimization results of heat-to-power ratio and network loss

C_{m3_R}	C_{m1_V}	C_{m2_V}	$\Delta S/MW$	$\Delta \Phi/MW$	$\Delta H/MW$
1.1~1.2	1.3	1.1	0.011 683	0.0 809 963	0.092 679
1.2~1.3	1.3	1.2	0.011 751	0.0 810 078	0.092 759
1.3~1.4	1.3	1.3	0.011 811	0.0 810 149	0.092 826
1.4~1.5	1.3	1.4	0.011 863	0.0 810 192	0.092 882
1.5~1.6	1.3	1.5	0.011 909	0.0 810 220	0.092 931
1.6~1.7	1.3	1.6	0.011 951	0.0 810 240	0.092 975
1.7~1.8	1.3	1.7	0.011 988	0.0 810 255	0.093 013
1.8~1.9	1.3	1.8	0.012 021	0.0 810 266	0.093 048
1.9~2.0	1.3	1.9	0.012 051	0.0 810 275	0.093 079
2.0~2.1	1.3	2.0	0.012 079	0.0 810 282	0.093 107
2.1~2.2	1.3	2.1	0.012 104	0.0 810 287	0.093 132
2.2~2.3	1.3	2.2	0.012 127	0.0 810 291	0.093 156
2.3~2.4	1.3	2.3	0.012 148	0.0 810 295	0.093 177
2.4~2.5	1.3	2.4	0.012 167	0.0 810 297	0.093 197

测试3:固定CHP3热出力为0.379 7 MW,取各CHP热电比约束: $1.3 \leq C_{m1} \leq 2, 2 \leq C_{m2} \leq 10$,表2第1列为CHP3热电比 C_{m3} 约束范围,用 C_{m3_R} 表示;第2列为电-热系统总损耗最小时 C_{m1} 的取值,用 C_{m1_V} 表示;第3列为电-热系统总损耗最小时 C_{m2} 的取值,用 C_{m2_V} 表示;第4列为电-热系统总损耗最小时 C_{m3} 的取值,用 C_{m3_V} 表示;第5列为电网总有功损耗,用 ΔS 表示;第6列为热网总损耗,用 $\Delta \Phi$ 表示;第7列为电-热系统总网损,用 ΔH 表示。

热电比参数与网络损耗优化结果如表3所示。由表3可知, C_{m1} 越小, C_{m2} 越大, C_{m3} 越小,此时电-热系统总网损越小。热电比 C_{m3_V} 与网络损耗关系如图2所示。图2横坐标为 C_{m3_V} ,纵坐标分别为电网总损耗与热网总损耗,由图2可知,随着热电比 C_{m3_V} 的增大,电网总网损近似线性增大,热网总网损也不断增大,且斜率逐渐减小,同时可以看出随着热电比 C_{m3_V} 增大,电网损耗增加的幅度较大,而热网损耗增加幅度较小。

表3 热电比参数与网络损耗优化结果

Table 3 Optimization results of heat-to-power ratio and network loss

C_{m3_R}	C_{m1_V}	C_{m2_V}	C_{m3_V}	$\Delta S/MW$	$\Delta \Phi/MW$	$\Delta H/MW$
1.1~1.2	1.3	10	1.1	0.011 687	0.080 982 9	0.092 670
1.2~1.3	1.3	10	1.2	0.011 755	0.081 000 6	0.092 755
1.3~1.4	1.3	10	1.3	0.011 813	0.081 009 8	0.092 823
1.4~1.5	1.3	10	1.4	0.011 865	0.081 015 4	0.092 880
1.5~1.6	1.3	10	1.5	0.011 911	0.081 019 1	0.092 930
1.6~1.7	1.3	10	1.6	0.011 952	0.081 021 7	0.092 973
1.7~1.8	1.3	10	1.7	0.011 988	0.081 023 6	0.093 012
1.8~1.9	1.3	10	1.8	0.012 021	0.081 025 1	0.093 046
1.9~2.0	1.3	10	1.9	0.012 051	0.081 026 2	0.093 077
2.0~2.1	1.3	10	2.0	0.012 078	0.081 027 0	0.093 105
2.1~2.2	1.3	10	2.1	0.012 103	0.081 027 7	0.093 131
2.2~2.3	1.3	10	2.2	0.012 126	0.081 028 2	0.093 154
2.3~2.4	1.3	10	2.3	0.012 147	0.081 028 7	0.093 175
2.4~2.5	1.3	10	2.4	0.012 166	0.081 029 1	0.093 195

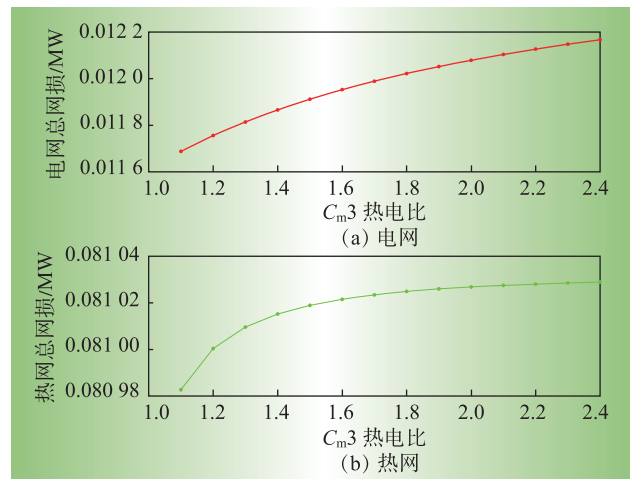
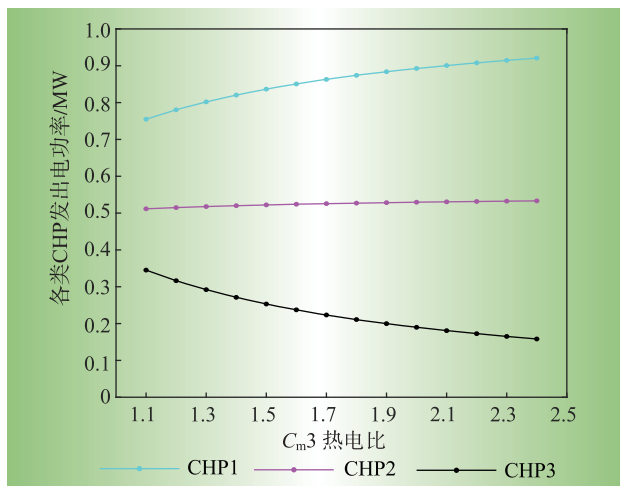
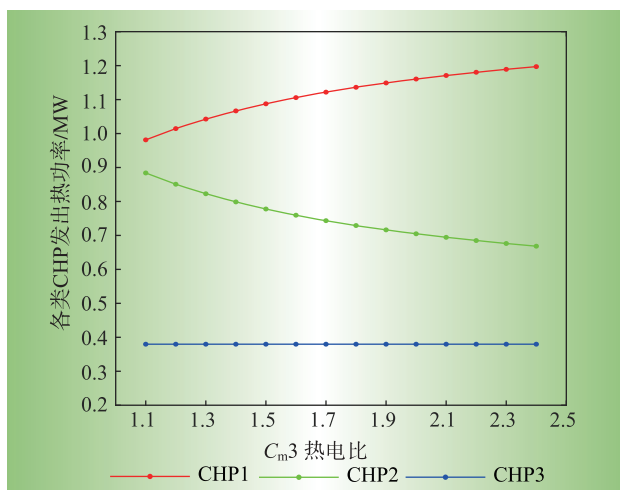


图2 热电比 C_{m3_V} 与网络损耗关系

Fig. 2 Relationship between heat-to-power ratio C_{m3_V} and network loss

图3与图4分别为 C_{m3_V} 与各类CHP发出的电功率和热功率的关系。由此可知热电比对电-热系统网络损耗的总体影响较小,但是对各个CHP的电出力与热出力影响较大。

图3 热电比 C_{m3_V} 与 CHP 电功率关系Fig. 3 Relationship between heat-to-power ratio C_{m3_V} and electrical power output图4 热电比 C_{m3_V} 与 CHP 热功率关系Fig. 4 Relationship between heat-to-power ratio C_{m3_V} and heat output

4 结束语

研究 CHP 运行参数对电-热互联系统各网络损耗的影响,并分析了 CHP 运行参数对于各 CHP 出力的影响,所得结论如下:① 当 CHP3 热出力固定时,热电比 C_{m1} 越小, C_{m2} 越大, C_{m3} 越小,此时电-热系统总网损越小;② 当 CHP3 热出力固定时,随着热电比 C_{m3} 的增大,电网总网损近似线性增大,热网总网损呈非线性增大,且 CHP 参数对电网损耗影响较大,而对热网损耗影响较小;③ 热电比对电-热系统网络损耗的总体影响较小,但是对某些 CHP 的电出力与热出力影响较大。

本文所提线性优化方法可同时实现对多个热电联产机组的参数优化配置,降低了网络损耗,减少了系统运行成本,有利于实现不同能源之间的耦合互补与协调运行,从而提升系统调度能力、经济性和安全性。D

参考文献:

- [1] WEI Z, SUN J, MA Z, et al. Chance-constrained coordinated optimization for urban electricity and heat networks [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(4):399-407.
- [2] 王文学,胡伟,孙国强,等. 电-热互联综合能源系统区间潮流计算方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1):83-95. WANG Wenxue, HU Wei, SUN Guoqiang, et al. Interval energy flow calculation method of integrated electro-thermal system[J]. Power System Technology, 2019, 43(1):83-95.
- [3] SUN G, WANG W, WU Y, et al. A nonlinear analytical algorithm for predicting the probabilistic mass flow of a radial district heating network[J]. Energies, 2019, 12(7):1 215.
- [4] 李伟,章维维,杨慧霖. 基于用户需求不确定性的冷热电三联供系统运行经济性 & 灵敏度分析[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(1):25-29. LI Wei, ZHANG Weiwei, YANG Yifei. Analysis of operation economy and sensitivity of CCHP system based on the uncertainty of user demand [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1):25-29.
- [5] 何礼鹏,李琳玮,郭子暄,等. 基于双层优化的季节旅游岛综合能源定容方法研究[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(2):24-29. HE Lipeng, LI Linwei, GUO Zixuan, et al. Research on sizing of integrated energy of stand-alone tourism island based on bi-level optimization [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(2):24-29.
- [6] CHEN S, WEI Z N, SUN G Q, et al. Multilinear probabilistic energy flow analysis of integrated electrical and natural-gas systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3):1 970-1 979.
- [7] 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.
- [8] 王瑾然,卫志农,张勇,等. 计及不确定性的区域综合能源系统日前多目标优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(11):3 496-3 503. WANG Jinran, WEI Zhinong, ZHANG Yong, et al. Multi objective optimal dispatching of regional integrated energy system considering uncertainty [J]. Grid Technology, 2018, 42(11):3 496-3 503.
- [9] ZHANG C, CHEN H, GUO M. DC power flow analysis incorporating interval input data and network parameters through the optimizing-scenarios method [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2018, 96:380-389.

作者简介:

张勇(1968),男,江苏南京人,本科,研究方向为电网调控运行;
马洲俊(1986),男,江苏无锡人,博士研究生,研究方向为电网调控运行与优化规划;
张明(1976),男,江苏无锡人,本科,研究方向为电网自动化;
许洪华(1981),男,山东临沂人,博士研究生,研究方向为电网规划、电力设备故障监测技术;
路晓敏(1993),女,山东滨州人,硕士,研究方向为电网调控运行与优化规划。

(责任编辑 陈 可)