

控制与决策

Control and Decision

计及混合潮流约束的热-电互联综合能源系统 多目标优化调度

司方远, 韩英华, 袁怀通, 汪晋宽, 赵强

引用本文:

司方远, 韩英华, 袁怀通, 等. 计及混合潮流约束的热-电互联综合能源系统 多目标优化调度[J]. *控制与决策*, 2022, 37(1): 97–107.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0913>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于正态云模型的状态转移算法求解多目标柔性作业车间调度问题](#)

State transition algorithm based on normal cloud model for solving multi-objective flexible job shop scheduling problem
控制与决策. 2021, 36(5): 1181–1190 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1233>

[铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化](#)

Integrating optimization of resource allocation and handling scheduling in railway container terminal
控制与决策. 2021, 36(12): 3063–3073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0597>

[混合决策下考虑第三方偏好的远程医疗服务匹配方法](#)

Matching method for telemedicine service considering third-party preferences in context of mixed decision-making
控制与决策. 2021, 36(11): 2803–2811 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0447>

[基于时空聚类求解带容积约束的选址-路径问题](#)

Time-space cluster based location-routing problem with capacitate constraints
控制与决策. 2021, 36(10): 2504–2510 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0073>

[带峰值能耗约束流水线调度的协同群智能优化](#)

Cooperative memetic optimization for flowshop scheduling with peak power consumption constraint
控制与决策. 2021, 36(10): 2350–2358 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0429>

计及混合潮流约束的热-电互联综合能源系统 多目标优化调度

司方远¹, 韩英华^{2†}, 袁怀通², 汪晋宽¹, 赵强³

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 东北大学秦皇岛分校 计算机与通信工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 3. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为满足多样化能源需求并提高能源网络的可靠性, 研究多能源系统优化管理和混合潮流问题. 针对多能源的网络约束及其耦合特性, 构建整合分布式发电、热电联产、电力网络和区域供热网络的热-电互联综合能源系统模型. 基于梯形模糊隶属函数构建模糊化软约束, 量化电力网络节点电压和区域供热网络节点供给温度的技术不满意度. 考虑系统的经济运行和网络节点的能源供给质量, 提出一种计及混合潮流约束的热-电互联综合能源系统多目标优化调度策略, 以最小化运行成本和网络节点状态变量的技术不满意度. 采用 epsilon 约束算法精确求解该多目标优化问题的 Pareto 前沿. 算例分析结果表明, 所构建的模型和提出的算法可以有效提高系统能源供给质量和优化决策的准确性. 研究成果进一步体现了所提出的多目标优化方案在兼顾经济性、能源供给质量以及复杂的运行约束, 保证系统经济稳定运行等方面的效益.

关键词: 热-电互联综合能源系统; 混合潮流; 技术不满意度; epsilon 约束算法; Pareto 前沿

中图分类号: TM721

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0913

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 司方远, 韩英华, 袁怀通, 等. 计及混合潮流约束的热-电互联综合能源系统多目标优化调度[J]. 控制与决策, 2022, 37(1): 97-107.

Multi-objective optimization scheduling for integrated electricity and heating system including hybrid power flow constraints

SI Fang-yuan¹, HAN Ying-hua^{2†}, YUAN Huai-tong², WANG Jin-kuan¹, ZHAO Qiang³

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. School of Computer and Communication Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 3. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The problems of multi-energy optimal management and hybrid power flow are investigated to improve the reliability of the energy network. Aiming at multi-energy network constraints and their coupling characteristics, an integrated electricity and heating system is established to integrate multi-energy networks. The fuzzy soft constraint is constructed to quantify the technical dissatisfaction of the networks. A multi-objective optimization scheduling strategy is proposed to minimize the operation cost and technical dissatisfaction of the system with hybrid power flow constraints. An epsilon constraint algorithm is adopted to obtain the Pareto front of the proposed multi-objective optimization problem. Results from the case study indicate that the proposed model and algorithm can effectively improve the quality of energy supply and the accuracy of optimal decisions. It further reflects the benefits of the proposed scheme in the aspects of the economy, quality and complex constraints, as well as ensuring the economical and stable operation of the system.

Keywords: integrated electricity and heating system; hybrid power flow; technical dissatisfaction; epsilon constraint algorithm; Pareto front

0 引言

随着分布式发电(distributed generation, DG)和热电联产(combined heat and power, CHP)相关技术的应

用和快速发展, 能源系统的复杂性不断增加, 传统的电热调度过程面临一些比较突出的问题和挑战^[1]. 当前的电热系统运行方式相互独立, 不利于电热负荷的

收稿日期: 2020-07-07; 录用日期: 2020-09-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1908213); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(N182303037); 河北省高等学校科学研究项目(QN2020504); 东北大学秦皇岛分校校内基金项目(XNB201803).

责任编辑: 郭庆来.

†通讯作者. E-mail: yhhan723@126.com.

统一协调调度.经典的“以热定电”CHP工作方式使得微型燃气轮机等微电源几乎没有能力独立参与电力调度^[2].此外,不同能源载体之间的耦合较差,针对能源网络的优化是相对独立的,严重限制了多能互补的灵活性^[3].因此,结合多能源网络耦合特性建立合理的热-电互联综合能源系统(integrated electricity and heating system, IEHS)^[4]协调优化模型是有效解决这些问题的关键.

IEHS指在能源系统的规划和运行过程中,通过整合DG、CHP、电力网络和区域供热网络(district heating network, DHN)实现源、网、荷多维度协调优化的产供消一体化系统.通过CHP等能源转换设备,IEHS可以建立电热能源载体及其网络化能量供给的耦合关系,从而将传统独立运行的电力系统和热力系统紧密关联,满足多样化、高质量的能源供给,实现多种能源的高效率转换与梯级利用,提升社会能源供给的可持续性和可靠性.

目前的相关研究主要集中于IEHS系统建模、规划和优化调度,研究范围从设备和整个系统的基本原理到处理实际调度问题的运行策略.例如, Mancarella^[5]全面概述了目前可用于分析多能源系统的最新模型和评估技术. Yang等^[6]结合DG、CHP、可再生能源和存储技术设计了能量枢纽,并提出了多区域能源产消者的运营模式.结果表明,互连的能量枢纽可以提高整个系统的运行灵活性和可靠性.

从系统优化调度目标选取的角度可进一步将IEHS协调优化分为单目标优化和多目标优化.具体而言,单目标优化通常选取经济性作为系统优化目标,其研究差异主要体现在不同的经济性核算方法.例如,孙鹏等^[7]考虑火电机组、CHP机组、弃风和散热器等总运行成本最小化的优化目标,提出了一种考虑热力系统多重热惯性的电热协调优化模型来提高系统运行的灵活性和经济性. Chen等^[8]分别以天然气系统收益最大化,热力和电力系统运行成本最小化为目标,构建电热气各子系统多边交易的混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)模型,并开发了两阶段优化算法以获得多能源市场均衡的解决方案.此外,环境效益作为能源系统规划过程中需要考虑的另一个重要指标,通常被量化为污染物排放量,并通过碳税转化为成本进行核算与优化.张刚等^[9]考虑碳交易机制以发电机组开关机费用、发电费用与碳交易费用之和最小为目标,提出了基于碳配额交易量约束的MILP模型,分析了碳配额交易量

和碳交易价格等对经济调度的影响.

单目标优化难以兼顾系统优化过程中多项性能指标或多个运行主体之间的协调,因此,IEHS多目标优化方法被陆续提出.楚晓琳等^[10]考虑随机能源价格和能源需求,以建筑楼宇各自电热能耗成本最小化为目标,分析了不同随机因素对局域和广域两阶段协调优化的影响. Si等^[11]以住宅产消者和工业产消者在电热能源交换过程中各自利益最大化为目标,提出了综合协调多能源转换和工业生产最优能源调度的多目标优化模型.但是,文献[10]和文献[11]仅关注能源的对等交换与优化,缺乏对多能源网络运行约束及混合潮流的分析与探讨,导致得到的优化方案难以满足实际能源网络稳定运行的需求.为此,郑超铭等^[12]设计了一种双层双 λ 迭代算法对IEHS运行参数进行优化,旨在最小化系统运行成本和总污染物排放量的同时分析网络传输损耗对系统供需平衡的影响.林威等^[13]以经济和环境效益为目标进一步提出了面向区域综合能源系统的多目标最优混合潮流算法,从经济性、环保性、安全性以及混合潮流约束等方面提供了多维度调度方案.

此外,提升网络节点的能量品质与供给质量是IEHS协调优化的重要任务之一,但在目前研究中较少考虑将其作为优化目标.胡泉等^[14]利用兼顾数量和品质的焓效率作为衡量区域综合能源系统能量利用水平的标准,提出的双层优化结构实现了系统运行过程中的经济性和焓效率目标之间的协调.针对传统方法不能完全满足配电网电压和功率因数要求的问题,刘洪^[15]提出了一种结合边界约束与可调节变量的约束调节策略来提高现有电网的供电质量.然而,IEHS的协调优化对耦合的多能源网络稳定运行及其能源供给质量提出了更高要求,且高质量的能源供给会对IEHS的经济性产生影响.

综上,IEHS多目标优化的研究工作尚未完善,特别是在多能源网络及混合潮流约束下,需进一步量化系统在优化调度过程中的能源供给质量,并深入分析其内在的制约因素.主要面临两个方面的困难:一方面,在多能源网络及其混合潮流约束下,表征能源供给质量的IEHS网络节点状态变量以及具体的量化指标难以界定,制约了IEHS能量供给水平的合理提升;另一方面,优化调度需兼顾IEHS多项性能之间的协调,并进一步明确该量化指标如何影响系统的经济性能.为此,本文提出一种计及混合潮流约束的IEHS多目标优化调度策略,以最小化运行成本和网络节

点状态变量的技术不满意度. 首先,分析IEHS多能源网络耦合特性及运行约束,并分别建立电力网络和DHN的线性化模型;其次,基于梯形模糊隶属函数构建模糊化软约束以量化网络节点状态变量的技术不满意度,并结合系统经济性目标建立IEHS多目标优化模型;再次,借助epsilon约束算法和Pareto最优理论将模型转化为易于求解的单目标优化问题迭代求解;最后,通过算例分析验证所提出的多目标优化方案在兼顾经济性、能源供给质量以及复杂的运行约束,保证系统经济稳定运行等方面的有效性.

1 IEHS系统建模

传统的电力系统和热力系统运行方式相互独立,其优化配置仅针对单一能源形式或网络状态,难以实现多能源优势互补及广域系统的协调运行. 本文考虑电热系统优化过程中多项性能指标之间的协调,通过整合DG、CHP、电力网络和DHN提出计及混合潮流约束的IEHS多目标优化调度策略,在减少系统运行成本的同时提高能源供给质量. 其中,对能量耦合单元CHP建模及非凸非线性的电热网络模型的线性化是IEHS优化问题获得全局最优解的前提^[4,16]. 为此,本文建立了包括燃气轮机、余热锅炉和蒸汽轮机等设备的CHP模型,并基于二阶锥松弛和温度调节方法分别建立电力网络和DHN的凸优化模型.

1.1 CHP模型

作为能量耦合单元,CHP利用热机同时产生电力和有用的热量. 针对CHP的实际工况进行建模,需要建立含有3次甚至更高次项的非线性函数来近似拟合CHP的实际效率曲线,然而这将导致模型求解上的困难,其收敛性、求解效率以及结果的最优性均难以保证. 因此,本文采用易于求解的恒定效率模型来近似CHP的实际效率曲线^[17]. 主要包括3个流程:燃气轮机消耗天然气发电并产生大量余热;余热锅炉通过换热器吸收燃气轮机排气余热;余热锅炉产生的蒸汽用于蒸汽轮机二次发电及热力系统供热. 具体流程如下所示:

$$\begin{cases} P_{e,t}^{\text{GT}} = \frac{1}{\kappa} \eta_{\text{ge}} P_{g,t} Q_{\text{GHV}}, \\ P_{\text{wh},t}^{\text{GT}} = \frac{1}{\kappa} (1 - \eta_{\text{ge}} - \eta_{g,\text{loss}}) P_{g,t} Q_{\text{GHV}}, \\ P_{\text{wh},t}^{\text{WHB}} = \eta_{\text{whr}} P_{\text{wh},t}^{\text{GT}}, \\ P_{e,t}^{\text{ST}} = \eta_{\text{whe}} P_{\text{wh},t}^{\text{WHB}}, \\ P_{\text{wh},t}^{\text{ST}} = (1 - \eta_{\text{whe}} - \eta_{\text{wh},\text{loss}}) P_{\text{wh},t}^{\text{WHB}}. \end{cases} \quad (1)$$

其中:下标 t 表示时间(下文不再赘述); $P_{e,t}^{\text{GT}}$ 、 $P_{\text{wh},t}^{\text{GT}}$ 、 $P_{\text{wh},t}^{\text{WHB}}$ 、 $P_{e,t}^{\text{ST}}$ 和 $P_{\text{wh},t}^{\text{ST}}$ 分别表示 t 时段内燃气轮机一次发电的电力产出、一次发电的余热产出、余热锅炉回收的热量、蒸汽轮机二次发电的电力产出和二次发电的余热产出; η_{ge} 、 $\eta_{g,\text{loss}}$ 、 η_{whr} 、 η_{whe} 和 $\eta_{\text{wh},\text{loss}}$ 分别表示燃气轮机发电效率、燃气损失系数、余热回收效率、蒸汽轮机发电效率和余热损失系数; $P_{g,t}$ 表示 t 时段内天然气消耗量; $Q_{\text{GHV}} = 36.18 \text{ MJ/N} \cdot \text{m}^3$ 表示天然气热值; $\kappa = 3600$ 表示热量(MJ)和功率(MWh)之间的换算关系. 因此,CHP小时电出力 $P_{e,t}^{\text{CHP}}$ 和热出力 $P_{h,t}^{\text{CHP}}$ 可以表示为

$$\begin{cases} P_{e,t}^{\text{CHP}} = P_{e,t}^{\text{GT}} + P_{e,t}^{\text{ST}}, \\ P_{h,t}^{\text{CHP}} = P_{\text{wh},t}^{\text{ST}}. \end{cases} \quad (2)$$

1.2 电力网络凸优化模型

假设电力网络拓扑呈辐射状,对于任意节点 $\forall i, j \in \Omega^{\text{en}}$ 及任意支路 $\forall ij \in \Omega^{\text{eb}}$,每条支路 ij 存在复阻抗 $z_{ij} = r_{ij} + jx_{ij}$. 其中: j 是虚数, r_{ij} 、 x_{ij} 是支路 ij 的阻抗. 总线 i 与以下复杂状态变量相关:总线电压 $U_{i,t}$ 、总线净功率注入 $P_{e,i,t}^{\text{N}}$ 、沿 ij 支路的电流 $I_{ij,t}$ 和功率流 $P_{e,ij,t}$. 稳态功率平衡关系可以用这些参数和变量表示如下:

$$P_{e,ij,t} = \sum_{j,k \in \Omega^{\text{en}}} (P_{e,ik,t} - z_{ji} |I_{jk,t}|^2) + P_{e,i,t}^{\text{N}}, \quad (3)$$

$$I_{ij,t} = (U_{i,t} - U_{j,t}) / z_{ij}, \quad (4)$$

$$P_{e,ij,t} = U_{i,t} I_{ij,t}^{\text{H}}. \quad (5)$$

其中:式(3)决定流入和流出总线 i 的所有功率之和为0;式(4)将支路电流 $I_{ij,t}$ 与相应的电压降 $U_{i,t} - U_{j,t}$ 联系起来;式(5)将支路功率流与电压和电流联系起来, H 是复共轭算子.

由于实数变量便于求解,式(3)~(5)中的实部和虚部可以分开考虑. 然而,这将导致引入更多的非线性项(如正、余弦等),并进一步增加问题的复杂度. 因此,引入辅助变量 $l_{ij,t} = I_{ij,t}^2$ 和 $V_{i,t} = U_{i,t}^2$,线性化电流 $I_{ij,t}$ 和电压 $U_{i,t}$ 的平方项. 此外,总线净功率注入和支路功率流可用有功功率和无功功率的分量分别表示,即 $P_{e,i,t}^{\text{N}} + jQ_{e,i,t}^{\text{N}}$ 和 $P_{e,ij,t} + jQ_{e,ij,t}$. 经变换,将式(5)代入(4),并将(5)乘以其自身的复共轭,得到DistFlow模型^[18]为

$$\begin{cases} P_{e,i,t}^{\text{N}} = \sum_{ij \in \Omega^{\text{eb}}} G_{e,ij} P_{e,ij,t} + r_{ij} l_{ij,t}, \\ Q_{e,i,t}^{\text{N}} = \sum_{ij \in \Omega^{\text{eb}}} G_{e,ij} Q_{e,ij,t} + x_{ij} l_{ij,t}. \end{cases} \quad (6)$$

其中: $G_{e,ij}$ 用于表征节点 i 和 j 之间的连接关系及功

率流向,当 $G_{e,ij} = 1$ 时,表示节点 i 和 j 之间存在电力线且功率流从 i 流向 j ;反之, $G_{e,ij}$ 等于 -1 或 0 . 相邻两节点间电压幅值的关系可以表示为

$$V_{i,t} - V_{j,t} = 2G_{e,ij}(r_{ij}P_{e,ij,t} + x_{ij}Q_{e,ij,t}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)\ell_{ij,t}. \quad (7)$$

此外,含有二次项的节点功率平衡约束 $\ell_{ij,t}V_{i,t} = P_{e,ij,t}^2 + Q_{e,ij,t}^2$ 可以被松弛为标准形式的二阶锥约束^[16,19],此类约束可以通过商业优化软件处理.

$$\left\| \begin{array}{l} 2P_{e,ij,t} \\ 2Q_{e,ij,t} \\ \ell_{ij,t} - V_{i,t} \end{array} \right\|_2 \leq \ell_{ij,t} + V_{i,t}. \quad (8)$$

同时,引入的辅助变量以及支路上的有功和无功功率均需满足如下边界约束:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{\min}^2 \leq \ell_{ij,t} \leq I_{\max}^2, \\ U_{\min}^2 \leq V_{i,t} \leq U_{\max}^2, \\ |P_{e,ij,t}| \leq P_{e,ij}^{\max}, \\ |Q_{e,ij,t}| \leq Q_{e,ij}^{\max}. \end{array} \right. \quad (9)$$

其中: $I_{ij,\min}$ 、 $I_{ij,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 分别表示支路电流和节点电压的上/下限值; $P_{e,ij}^{\max}$ 、 $Q_{e,ij}^{\max}$ 分别表示支路有功和无功功率的上限值.至此,式(6)~(9)可以表示电力网络凸优化模型.

1.3 DHN模型

目前,传统的供热调节技术主要有:1)温度调节.在进行温度调节时,只改变供热系统的供水温度,而用户的循环水量保持不变.此时,热媒温度与供热功率成正比.2)流量调节.在进行流量调节时,只改变供热系统的网路流量,而供水温度保持不变.此时,供热管道中热媒流体速度与供热功率成正比.然而,当管道流量减小到一定值时,热媒的流动状态将偏离阻力平方区,使流量分配比例失调,且摩擦阻力系数增大,不利于节能^[20].因此,为了保证供热工况的稳定性,本文采用温度调节的方式对供热管网的实际运行进行建模^[21].

CHP作为热源接入DHN的节点记为 s ,源节点热媒的注入温度、流量和返回的混合温度分别为 $h_{in,s,t}$ 、 $\tilde{M}_{w,s}$ 和 $h_{re,s,t}^{\text{mix}}$;对DHN中任意节点 $\forall m, n \in \Omega^{\text{hn}}$ 及任意管道 $\forall mn \in \Omega^{\text{hb}}$, ρ_{mn} 表示管道长度; $\tilde{m}_{w,m}$ 表示 m 节点的热媒注入流量; $L_{h,m,t}$ 表示 t 时段 m 节点的热负荷需求; $h_{in,m,t}$ 和 $h_{out,m,t}$ 分别表示 m 节点的入口温度和出口温度, $h_{in,m,t} = h_{in,s,t}$.DHN模型包含管道与节点两个部分,其中管道部分主要描述供热网络热媒流量平衡以及能量损失,节点部分主要描述热能

的供需平衡.因此,源节点热能供给可以表示为

$$P_{h,t}^{\text{CHP}} = \frac{1}{\kappa} C_w \tilde{M}_{w,s} (h_{in,s,t} - h_{re,s,t}^{\text{mix}}), \quad (10)$$

其中 $C_w = 4.2 \text{ MJ}/(\text{ton} \times ^\circ\text{C})$ 为热媒的比热容.此外,热媒流量守恒关系可以表示为

$$\tilde{M}_{w,s} = \tilde{m}_{w,m} + \tilde{M}_{w,mn}. \quad (11)$$

考虑到热能在管道中传输过程的能量损失,通常采用稳态热力网络的苏霍夫温降公式来描述相邻节点间入口温度的关系^[22],即

$$h_{in,n,t} = (h_{in,m,t} - h_{a,t}) e^{-\frac{\lambda \rho_{mn}}{C_w \tilde{M}_{w,mn}}} + h_{a,t}. \quad (12)$$

其中: $h_{a,t}$ 为管道所处的外部环境温度, λ 为管道热阻.在此基础上,可以进一步得到相邻节点间注入功率 $P_{h,m,t}^N$ 和 $P_{h,n,t}^N$ 的关系,即

$$P_{h,m,t}^N - P_{h,n,t}^N = \frac{1}{\kappa} C_w \tilde{M}_{w,mn} (h_{in,m,t} - h_{in,n,t}) + L_{h,m,t}. \quad (13)$$

根据热力学第一定律,出口温度可以表示为

$$h_{out,m,t} = h_{in,m,t} - \frac{\kappa L_{h,m,t}}{C_w \tilde{m}_{w,m}}. \quad (14)$$

利用苏霍夫温降公式计算返回的混合温度

$$\begin{aligned} & \tilde{M}_{w,m} h_{re,m,t}^{\text{mix}} = \\ & \tilde{m}_{w,m} h_{out,m,t} + \\ & \tilde{M}_{w,mn} ((h_{re,n,t}^{\text{mix}} - h_{a,t}) e^{-\frac{\lambda \rho_{mn}}{C_w \tilde{M}_{w,mn}}} + h_{a,t}). \end{aligned} \quad (15)$$

入口温度和出口温度受边界约束的限制,有

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{in}^{\min} \leq h_{in,m,t} \leq h_{in}^{\max}, \\ h_{out}^{\min} \leq h_{out,m,t} \leq h_{out}^{\max}. \end{array} \right. \quad (16)$$

其中: h_{in}^{\min} 、 h_{in}^{\max} 、 h_{out}^{\min} 、 h_{out}^{\max} 分别表示节点入口温度和出口温度的上/下限值.

至此,凸形式的式(10)~(16)联立即为DHN网络传输模型,可以较为精确地反映出DHN运行过程中的各状态参数.

2 IEHS多目标优化调度模型

IEHS多目标优化调度旨在满足上述CHP、电力网络和DHN模型及相关运行约束的前提下,使得系统运行过程中的经济性目标和网络节点状态变量的技术满意度同时达到最优,即实现IEHS的经济技术协调优化调度.以下给出了IEHS多目标优化调度问题的目标函数及约束条件.

2.1 目标函数

2.1.1 经济调度目标

本文以最小化产能机组运行成本为系统经济调度目标.其中,产能机组主要考虑DG机组和CHP机

组. 因此, IEHS经济调度的目标函数可以具体描述为

$$\min F_E = F_{DG} + F_{CHP}. \quad (17)$$

其中: F_E 表示产能机组运行总成本, F_{DG} 和 F_{CHP} 分别表示 DG 机组和 CHP 机组运行成本. 此外, 通常以二次凸函数的形式^[23]近似描述产能机组的各项费用, 分别为

$$F_{DG} = \sum_{i \in \Omega^{en}} \sum_{t=1}^T \alpha_i (P_{i,t}^{DG})^2 + \beta_i P_{i,t}^{DG} + \gamma_i, \quad (18)$$

$$F_{CHP} = \sum_{m \in \Omega^{hn}} \sum_{t=1}^T \alpha_m (P_{e,m,t}^{CHP})^2 + \beta_m P_{e,m,t}^{CHP} + \gamma_m. \quad (19)$$

其中: α 、 β 和 $\gamma > 0$ 表示产能机组运行成本参数; $P_{i,t}^{DG}$ 表示电力网络中 i 节点上 t 时段内的 DG 机组出力; $P_{e,m,t}^{CHP}$ 表示 DHN 中 m 节点上 t 时段内的 CHP 机组发电功率.

2.1.2 技术不满意度

IEHS 技术目标旨在最小化电力网络和 DHN 运行过程中的技术不满意度. 一般而言, 电力网络节点电压和 DHN 节点供给温度应保持在临界约束范围内. 然而, 传统依赖于经济调度的解决方案使节点电压和节点供给温度长时间处于临界水平, 这将进一步导致经济和技术方面的问题. 例如, 节点电压长期处于临界水平会加速电气设备绝缘老化, 降低其使用寿命. 节点供给温度长时间处于临界水平会降低用户的热舒适度. 因此, IEHS 网络需控制在适当的运行水平, 以期提高电热能源的供给质量. 为此, 文献[24]应用模糊集理论建立梯形模糊隶属函数以构造总线节点电压的软约束, 并表征电力系统对总线节点电压的满意程度. 文献[25]基于三角形模糊隶属函数建立了负荷、总线节点电压和电力市场价格的模糊域, 以表征电力系统不确定性和技术满意程度. 本文结合边界约束与可调节节点状态变量构建模糊化软约束, 用于量化电力网络节点电压和 DHN 节点供给温度的技术不满意度, 如图1所示.

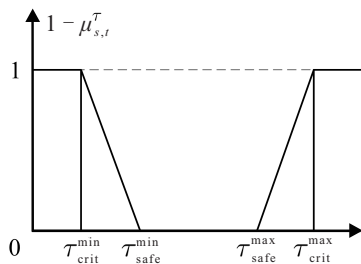


图1 技术不满意度示意图

当节点状态变量 $\tau_{s,t}$ 保持在区间 $[\tau_{safe}^{min}, \tau_{safe}^{max}]$ 内, 表明多能源网络满足安全运行约束, 其技术不满意度

为0, 达到最低水平; 当 $\tau_{crit}^{min} \leq \tau_{s,t} \leq \tau_{safe}^{min}$ 或 $\tau_{safe}^{max} \leq \tau_{s,t} \leq \tau_{crit}^{max}$ 时, 技术不满意度随着 $\tau_{s,t}$ 向临界运行边界 τ_{crit}^{min} 或 τ_{crit}^{max} 的趋近而不断增加; 当 $\tau_{s,t}$ 超过临界运行边界, 技术不满意度达到最高水平, 此时多能源网络将无法安全稳定运行. 其中: μ 表示技术满意度; τ 表示可调节节点状态变量, 即节点电压 V 或供给温度 h_{in} ; s 表示电力网络节点 i 或 DHN 节点 m ; τ_{safe}^{min} 、 τ_{safe}^{max} 、 τ_{crit}^{min} 、 τ_{crit}^{max} 分别表示节点状态变量安全运行和临界运行的上/下限值. 因此, 节点电压和供给温度状态变量的梯形模糊隶属函数具体描述为

$$1 - \mu_{s,t}^{\tau} = \begin{cases} \frac{\tau_{safe}^{min} - \tau_{s,t}}{\tau_{safe}^{min} - \tau_{crit}^{min}}, & \tau_{crit}^{min} \leq \tau_{s,t} \leq \tau_{safe}^{min}; \\ 0, & \tau_{safe}^{min} \leq \tau_{s,t} \leq \tau_{safe}^{max}; \\ \frac{\tau_{safe}^{max} - \tau_{s,t}}{\tau_{safe}^{max} - \tau_{crit}^{max}}, & \tau_{safe}^{max} \leq \tau_{s,t} \leq \tau_{crit}^{max}; \\ 1, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (20)$$

式(20)为4段连续线性函数 $f(\tau) = 1 - \mu_{s,t}^{\tau}$, 其分点为

$$b_1 = \tau_{crit}^{min}, \quad b_2 = \tau_{safe}^{min}, \\ b_3 = \tau_{safe}^{max}, \quad b_4 = \tau_{crit}^{max}, \quad b_5 = +\infty.$$

引入连续变量 w_k 将 τ 和 $f(\tau)$ 表示为

$$\tau = \sum_{k=1}^5 w_k b_k, \quad (21)$$

$$f(\tau) = \sum_{k=1}^5 w_k f(b_k). \quad (22)$$

引入的连续变量需满足 $\sum_{k=1}^5 w_k = 1, w_1 \leq z_1, w_2 \leq z_1 + z_2, w_3 \leq z_2 + z_3, w_4 \leq z_3 + z_4, w_5 \leq z_4$, 其中 z 为二进制变量, 且 $\sum_{k=1}^5 z_k = 1$. 可通过商业优化软件处理此类混合整数模型.

在此基础上, 考虑调度周期内电力网络和 DHN 两方面的技术不满意度, IEHS 协调优化运行的技术目标可以描述为

$$\min F_T = \sum_{i \in \Omega^{en}} \sum_{t=1}^T (1 - \mu_{i,t}^V) + \sum_{m \in \Omega^{hn}} \sum_{t=1}^T (1 - \mu_{m,t}^{h_{in}}). \quad (23)$$

其中 F_T 表示调度周期内的总技术不满意度.

2.2 约束条件

由上述 IEHS 模型及其多目标协调优化的目标函数可知, 约束条件主要包含能量耦合单元约束(1)和(2)、电力网络潮流约束(6)~(9)、DHN 网络潮流约束(10)~(16)以及表征节点能源供给质量的模糊

化约束(20).此外,还需要考虑必要的系统功率平衡约束和产能机组运行约束.

2.2.1 功率平衡约束

IEHS协调优化运行需要考虑各节点逐时功率平衡约束,包括电功率平衡和热功率平衡的等式约束,具体描述如下:

$$L_{e,i,t} + P_{e,i,t}^N = P_{i,t}^{\text{DG}} + P_{e,i,t}^{\text{CHP}}, \quad (24)$$

$$L_{h,m,t} + P_{h,n,t}^N = P_{h,m,t}^{\text{CHP}}. \quad (25)$$

其中: $L_{e,i,t}$ 表示电力网络中*i*节点在*t*时段内的电力负荷;式(25)表示当CHP机组接入DHN的*m*节点时的热功率平衡等式约束; $P_{h,n,t}^N$ 表示从源节点*m*向下游节点*n*注入的热功率.

2.2.2 产能机组运行约束

产能机组运行约束主要考虑DG和CHP的出力上下限约束及其爬坡约束.机组出力上下限约束可以描述为

$$P_{\min}^{\text{DG}} \leq P_{i,t}^{\text{DG}} \leq P_{\max}^{\text{DG}}, \quad (26)$$

$$P_{e,\min}^{\text{CHP}} \leq P_{e,i,t}^{\text{CHP}} \leq P_{e,\max}^{\text{CHP}}. \quad (27)$$

其中: P_{\min}^{DG} 、 P_{\max}^{DG} 、 $P_{e,\min}^{\text{CHP}}$ 、 $P_{e,\max}^{\text{CHP}}$ 分别表示DG和CHP发电功率的上/下限值.

此外,对于每台运行的发电机,两个连续时间间隔 $\Delta T = 1$ 的功率应满足以下爬坡约束^[26]:

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{DG}} - P_{i,t-1}^{\text{DG}} - U_i^{\text{DG}} \Delta T \leq 0, \\ P_{i,t-1}^{\text{DG}} - P_{i,t}^{\text{DG}} - D_i^{\text{DG}} \Delta T \leq 0; \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} P_{e,i,t}^{\text{CHP}} - P_{e,i,t-1}^{\text{CHP}} - U_i^{\text{CHP}} \Delta T \leq 0, \\ P_{e,i,t-1}^{\text{CHP}} - P_{e,i,t}^{\text{CHP}} - D_i^{\text{CHP}} \Delta T \leq 0. \end{cases} \quad (29)$$

其中 U 、 D 表示DG和CHP的向上、向下爬坡速率.

3 基于epsilon约束算法的模型求解

上述IEHS多目标优化调度模型通过耦合单元CHP以及网络运行约束建立系统经济和技术优化目标之间的内在关联.一般而言,该多目标优化问题可以描述为 $\min\{F_E, F_T\}$.由于存在多重约束,可能不存在同时优化所有目标的理想解决方案.因此,决策者更倾向于从优化问题的可行解空间中选择最优的折衷解,即Pareto前沿或Pareto最优解集.

传统上采用加权求和法处理多目标优化问题.通过赋给每个目标函数相应的权重因子将多目标优化问题转换为单一目标进行求解.然而,权重因子的选择依赖于大量的经验判断,且存在鲁棒性差和计算复杂度增加等问题.为此,本文引入最为常用的epsilon约束算法^[27-28]精确求解该多目标优化问题的

Pareto前沿.该算法由Haimes等^[29]首次提出,其基本思想是通过引入epsilon参数,将一个目标转化为约束,构造并求解一系列单目标epsilon约束问题,通过逐步减小epsilon值来获得优化问题的Pareto前沿.因此,它对于求解多目标优化特别是双目标优化问题尤为有效.

为更好地描述epsilon约束算法,结合本文的多目标优化问题定义以下解空间中的3类点^[30].

1)理想点 $F^I = (F_E^I, F_T^I)$,其中 $F_E^I = \min\{F_E\}$ 和 $F_T^I = \min\{F_T\}$ 分别表示两个目标独立优化时的最小值.

2)负理想点 $F^N = (F_E^N, F_T^N)$.其中: $F_E^N = \min\{F_E : F_T = F_T^I\}$ 表示在 $F_T = F_T^I$ 的条件下 F_E 的最小值, $F_T^N = \min\{F_T : F_E = F_E^I\}$ 表示在 $F_E = F_E^I$ 的条件下 F_T 的最小值.

3)极值点 $F^{Ex} = \{(F_E^I, F_T^N), (F_E^N, F_T^I)\}$,表示含有两个极值点的Pareto前沿.

在此基础上,引入 $\epsilon \in [F_T^I, F_T^N]$ 将本文的多目标优化问题转化为单目标优化,即

$$\min F_E.$$

$$\text{s.t. } F_T \leq \epsilon, \epsilon \in [F_T^I, F_T^N];$$

$$\text{式(1) ~ (2), (6) ~ (9), (10) ~ (16), (24) ~ (29).} \quad (30)$$

epsilon约束算法步骤具体描述如下.

step 1: 计算 $F^I = (F_E^I, F_T^I)$ 和 $F^N = (F_E^N, F_T^N)$,并设置Pareto前沿的起始点 (F_E^I, F_T^N) .

step 2: 确定 ϵ 调节区间 $[F_T^I, F_T^N]$,令 $\epsilon = F_T^N - \delta$, $\delta = 1$ 为调节步长.

step 3: 利用当前 ϵ 求解单目标优化问题(30),获得并记录一组最优解 (F_E^*, F_T^*) .

step 4: 令 $\epsilon = F_T^* - \delta$,如果 $\epsilon \geq F_T^I$,则转至step 3求解其他组最优解;否则, $\epsilon < F_T^I$,计算结束并输出完整的最优解集,即Pareto前沿.

考虑到Pareto前沿为候选解决方案的集合,基于逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)^[31]对多目标优化问题进行最优决策,并获得最佳的折衷解决方案,既能反映各种方案之间的差异,又能客观真实地反映实际情况,具有普适性、直观性、可靠性和精确性.基本思路为,通过计算并比较候选集合中的各解决方案与理想点和负理想点的欧氏距离,将接近理想点且距离负理想点较远的方案确定为最佳折衷解决方案.

首先,对所有解决方案的各个指标进行归一化

处理,消除不同数量级的影响.对于每一组最优解 (F_E^*, F_T^*) 有

$$\begin{cases} \bar{F}_E^* = \frac{F_E^* - F_E^{\min}}{F_E^{\max} - F_E^{\min}}, \\ \bar{F}_T^* = \frac{F_T^* - F_T^{\min}}{F_T^{\max} - F_T^{\min}}, \end{cases} \quad (31)$$

则相应的理想解和负理想解可以分别表示为 $(\bar{F}_E^I, \bar{F}_T^I)$ 和 $(\bar{F}_E^N, \bar{F}_T^N)$. 分别计算每一组最优解 $(\bar{F}_E^*, \bar{F}_T^*)$ 与理想解和负理想解之间的欧氏距离,即

$$\Omega_I = \sqrt{(\bar{F}_E^* - \bar{F}_E^I)^2 + (\bar{F}_T^* - \bar{F}_T^I)^2}, \quad (32)$$

$$\Omega_N = \sqrt{(\bar{F}_E^* - \bar{F}_E^N)^2 + (\bar{F}_T^* - \bar{F}_T^N)^2}. \quad (33)$$

对 Ω_I 和 Ω_N 排序确定最佳折衷解决方案,即满足 Ω_I^{\min} 且 Ω_N^{\max} 的方案.

4 算例分析

本文建立的计及混合潮流约束的IEHS多目标优化模型,通过epsilon约束算法反复迭代,直至求解出完整的Pareto前沿,为决策者提供多样化最优调度方案.开发的模型可借助成熟的数学建模软件和商业求解器如GAMS和LINDO快速求解.系统运行环境配置为: Intel(R) Core (TM) i7 CPU, 2.60 GHz, 16 G 内存.

4.1 系统描述

本文以文献[4]中由6-Bus电力系统和6-Node热力系统所组成的IEHS为实验对象,标么值参数基准为100 MVA,其系统结构如图2所示.其中:电网Bus1和Bus2节点各接入一台DG发电机组;两台CHP机组同时向电网Bus6节点和热网N1节点提供电热能源;电网Bus3~Bus5、热网N4~N6为负荷节点,描述系统所需的更详细数据参见文献[32].根据文献[33],将冬季典型日24小时内系统对电能和热能需求以及环境温度作为实验数据来源.

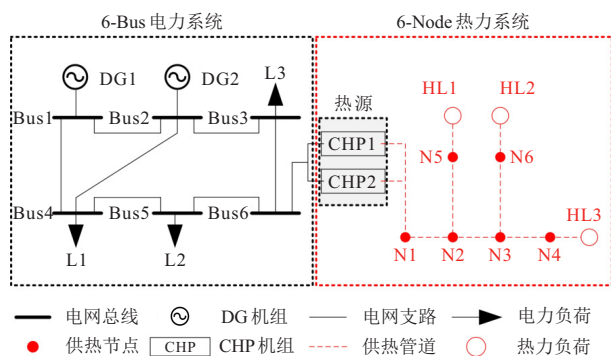


图2 6-Bus电力系统和6-Node热力系统组成的IEHS

根据上述构建的IEHS多目标优化调度模型,可以对比分析单目标经济调度、单目标技术不满意度、经济技术不满意度、多目标优化调度对IEHS系统协调运行过程中优化决策的影响.因此,设计以下3个案例.

Case 1: 传统单目标经济调度,仅最小化经济目标 F_E ,不考虑系统技术不满意度优化目标.

Case 2: 仅最小化系统技术不满意度目标 F_T ,不考虑系统经济目标.

Case 3: 同时考虑系统经济技术不满意度多目标优化调度,利用epsilon约束算法精确求解多目标优化问题的Pareto前沿.

以下给出3个案例详细的优化结果分析,以说明所提出的多目标优化方案的有效性.

4.2 优化结果分析

首先,分析上述案例下各节点状态变量的优化结果.其中,不同案例下各电力总线电压、热力节点入口温度的优化结果分别如图3和图4所示.不同案例下电力网络各总线电压和DHN各节点入口温度均满足临界运行的上下限(电力总线电压的临界约束分别为0.9 p.u.和1.1 p.u.,热力节点入口温度的临界约束分别为70°C和90°C),但Case 1和Case 3中 (F_E^I, F_T^N) 的总线电压和节点入口温度超过安全运行上下限(如图中浅色和深色虚线所示)的总时长均超过其他案例.由于在IEHS优化调度过程中考虑了技术不满意度的优化目标,Case 2和Case 3: (F_T^I, F_E^N) 两个案例明显改善了Case 1和Case 3: (F_E^I, F_T^N) 案例中节点状态变量超过安全运行上下限的情况,极大地提高了IEHS系统的能源供给质量.这种节点运行状态的改善以额外的调度成本为代价,因此决策者需要考虑调度成本和节点运行状态之间相对权衡的解决方案.如图中Case 3:折衷解所示,其节点运行状态变量的优化结果介于Case 3: (F_E^I, F_T^N) 和Case 3: (F_T^I, F_E^N) 两个案例节点运行状态变量值之间,即通过进一步调整节点运行状态变量可以实现同时优化调度成本和技术不满意度.

表1列出了3个案例的优化结果.其中,Case 1仅优化经济目标而不考虑技术不满意度,得到最小的调度成本为83 749.24\$,但技术不满意度高达80.相反,Case 2仅优化技术不满意度而不考虑经济目标,得到最小的技术不满意度为15,但经济目标高达84 872.23\$.与Case 1相比,Case 3中的极值点

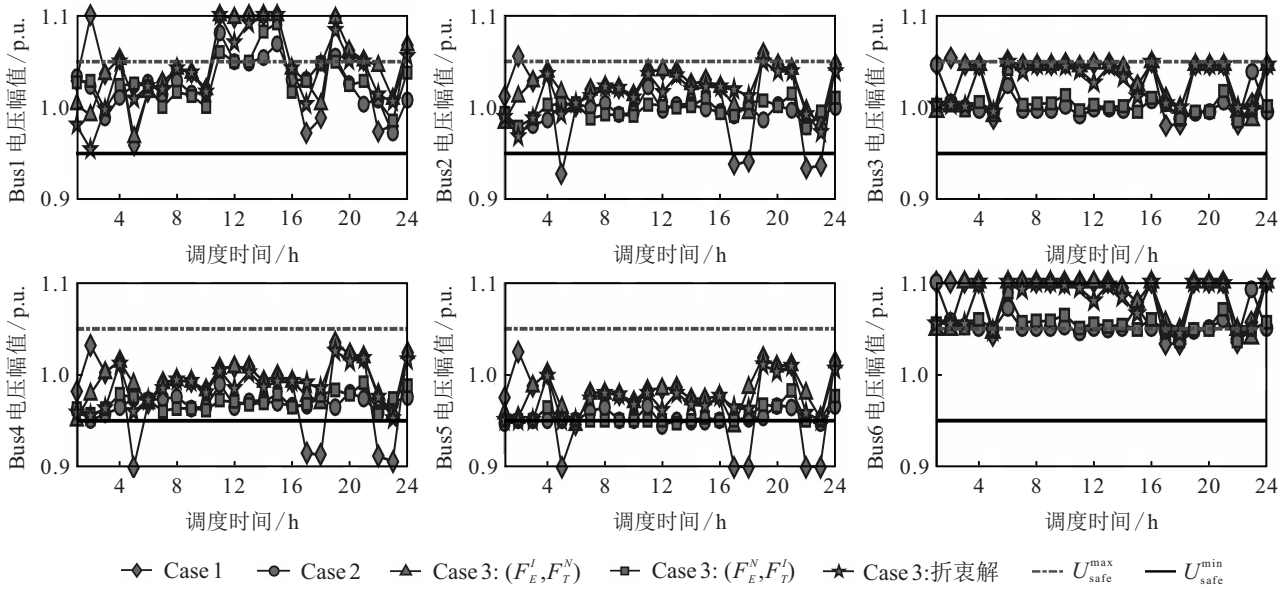


图3 不同案例下电力网络各总线电压优化结果

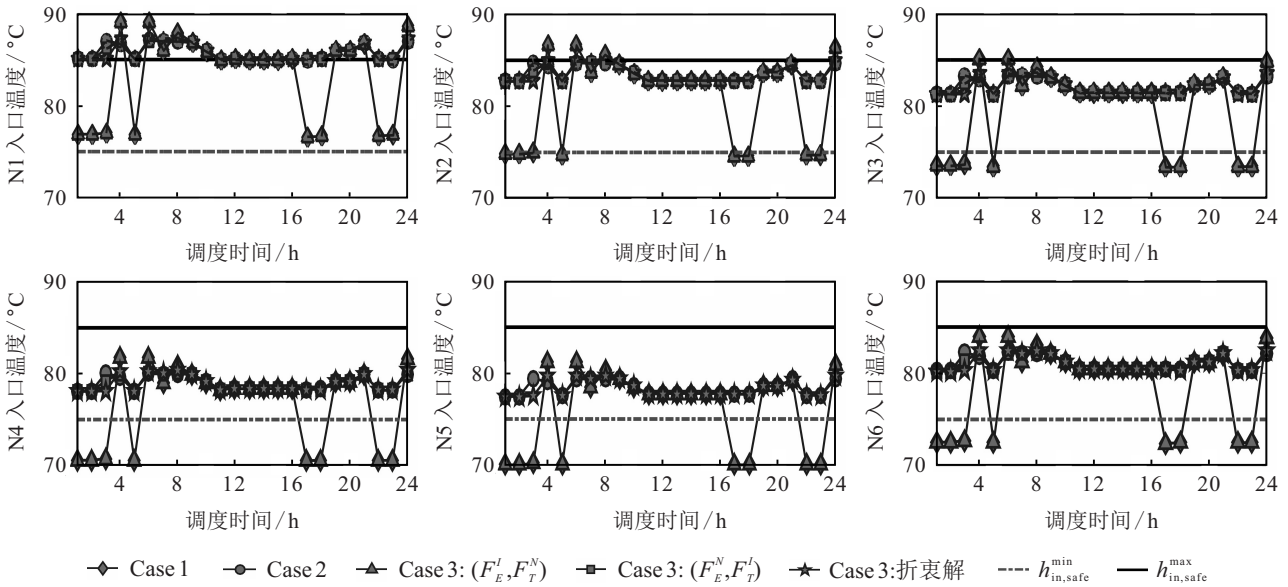


图4 不同案例下DHN各节点入口温度优化结果

表1 6-Bus电网和6-Node热网的IEHS优化结果对比

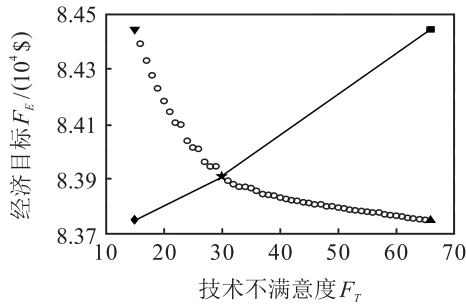
案例	$F_E / \$$	F_T	平均迭代次数
Case 1 (only min F_E)	83 749.24	80	190
Case 2 (only min F_T)	84 872.23	15	205
Case 3 (极值点: (F_E^I, F_T^N))	83 749.24	66	214
Case 3 (极值点: (F_E^N, F_T^I))	84 441.73	15	271
Case 3 (最佳折衷解)	83 907.98	30	233

(F_E^I, F_T^N) 是在最小化经济目标的前提下优化技术不满意度,得到了更优的解决方案,即在相同的调度成本下,技术不满意度为66,同比下降了17.5%。相比Case 2和Case 3中的极值点 (F_E^N, F_T^I) ,在相同的技术不满意度下,经济目标为84 441.73\$,节省了430.5\$的调度成本。相比单目标优化,多目标优化调度将对

计算效率产生影响。当仅考虑最小化经济目标 F_E 时,算法平均迭代次数为190次;当仅考虑最小化技术不满意度目标 F_T 时,平均迭代次数为205次;当同时优化两个目标时,其平均迭代次数随着技术不满意度的不断减小而增加。其中,最佳折衷解决方案所需的平均迭代次数为233次。

在IEHS多目标优化调度过程中,决策者还需要考虑调度成本和技术不满意度之间相对权衡的解决方案。采用epsilon约束算法可以求解出完整的Pareto前沿,如图5所示。其中,Pareto前沿上的点均为IEHS多目标优化调度问题的最优解,可为决策者提供多样化的调度方案。根据TOPSIS方法,由于最接近理想点且距离负理想点最远,点(30, 83 907.98)被确定为

最佳折衷解决方案. 根据优化结果可知, 相比极值点 (F_E^I, F_T^N) , 虽然调度成本增加了 158.74 \$, 但技术不满意度减少了 36; 相比极值点 (F_E^N, F_T^I) , 虽然技术不满意度增加了 15, 但调度成本减少了 533.75 \$. 这表明得到的解决方案在提升系统经济性和能源供给质量方面具有双重效益.



▼ Case 3: (F_E^N, F_T^I) ○ Case 3: Pareto 前沿 ◆ 理想点: (F_E^I, F_T^I)
▲ Case 3: (F_E^I, F_T^N) ★ Case 3: 最佳折衷解 ■ 负理想点: (F_E^N, F_T^N)

图5 IEHS多目标优化调度的Pareto前沿及最佳折衷解

为进一步说明所提出方法的适用性, 采用33-Bus电力系统和8-Node热力系统组成的更大规模的IEHS进行验证, 详细数据参见文献[32]. 调度结果显示, Case 1的调度成本为1 052 360 \$, 技术不满意度为862, 平均迭代次数为4 032; Case 2的技术不满意度为88, 经济目标达到1 486 177 \$, 平均迭代次数为4 475. 采用epsilon约束算法可以得到完整的Pareto前沿, 其中点(240, 1 093 482)由TOPSIS法确定为最佳折衷解决方案. 与Case 1和Case 2相比, 该方案的技术不满意度目标和经济目标分别下降了约90%和26%, 但算法的平均迭代次数分别增加了1 084次和641次. 虽然多目标优化方法对计算效率产生了一定影响, 但是仍然满足IEHS目前优化调度的计算时间需求. 这进一步验证了所提出的多目标优化方法和得到的解决方案在兼顾经济性、能源供给质量以及复杂的运行约束, 保证系统经济稳定运行等方面的有效性.

5 结论

本文针对IEHS多目标优化调度问题进行研究, 提出了计及混合潮流约束的IEHS多目标优化调度策略, 应用epsilon约束算法求解该多目标优化问题的完整Pareto前沿, 并采用TOPSIS方法进行最优决策, 得到的主要结论如下:

1) 分析了IEHS多能源网络耦合特性及运行约束, 所建立的电力网络和DHN线性化模型能够较为精确地描述多能源网络运行过程中的各状态参量.

2) 结合边界约束与可调节节点状态变量构建了模糊化软约束, 量化了电力网络节点电压和DHN节点供给温度的技术不满意度, 并将其作为独立优化目标与系统经济性目标相结合, 实现了IEHS优化过程中多项性能指标之间的协调.

3) 相比传统单目标经济调度, 所提出的方法能够有效减小技术不满意度, 并通过调整节点运行状态变量实现同时优化调度成本和技术不满意度的双重效益. 得到的Pareto前沿有利于为决策者权衡IEHS运行经济性和安全性提供参考.

4) 通过不同案例的对比分析, 验证了所提出的多目标优化方法和得到的解决方案在兼顾经济性、能源供给质量以及复杂的运行约束, 保证系统经济稳定运行等方面的有效性.

本文主要考虑确定性IEHS多目标优化调度问题, 在后续的研究中, 可以探讨储能的优化配置、DHN变温度和变流量同时调节方法以及考虑网络约束和源荷不确定性的IEHS鲁棒多目标优化问题, 以更加贴近工程实际.

参考文献(References)

- [1] 税月, 刘俊勇, 高红均, 等. 考虑风电不确定性的电热综合系统分布鲁棒协调优化调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7235-7247.
(Shui Y, Liu J Y, Gao H J, et al. A distributionally robust coordinated dispatch model for integrated electricity and heating systems considering uncertainty of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7235-7247.)
- [2] 黄大为, 黄征, 葛维春, 等. 以热定电模式下热电联产机组电功率灵活调节能力分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 27-35.
(Huang D W, Huang Z, Ge W C, et al. Analysis on electric power flexible regulation capacity for combined heat and power units in heat-led mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 27-35.)
- [3] 杨帅, 陈磊, 徐飞, 等. 基于能量流的电热综合能源系统弃风消纳优化调度模型[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 417-426.
(Yang S, Chen L, Xu F, et al. Optimal dispatch model of wind power accommodation in integrated electrical-thermal power system based on power flow model[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 417-426.)
- [4] Zhou H S, Li Z G, Zheng J H, et al. Robust scheduling of integrated electricity and heating system hedging heating network uncertainties[J]. IEEE Transactions on Smart

- Grid, 2020, 11(2): 1543-1555.
- [5] Mancarella P. MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models[J]. *Energy*, 2014, 65: 1-17.
- [6] Yang H M, Xiong T L, Qiu J, et al. Optimal operation of DES/CCHP based regional multi-energy prosumer with demand response[J]. *Applied Energy*, 2016, 167: 353-365.
- [7] 孙鹏, 滕云, 冷欧阳, 等. 考虑供热系统多重热惯性的电热联合系统协调优化[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(19): 6059-6071.
(Sun P, Teng Y, Leng O Y, et al. Coordinated optimization of combined heat and power systems considering multiple thermal inertia of heating system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(19): 6059-6071.)
- [8] Chen Y, Wei W, Liu F, et al. A multi-lateral trading model for coupled gas-heat-power energy networks[J]. *Applied Energy*, 2017, 200: 180-191.
- [9] 张刚, 张峰, 张利, 等. 考虑碳排放交易的日前调度双阶段鲁棒优化模型[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(18): 5490-5499.
(Zhang G, Zhang F, Zhang L, et al. Two-stage robust optimization model of day-ahead scheduling considering carbon emissions trading[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(18): 5490-5499.)
- [10] 楚晓琳, 杨东. 不确定因素下建筑集群冷热电联供系统多目标优化[J]. *控制与决策*, 2020, 35(1): 195-204.
(Chu X L, Yang D. Multi-objective programming for building clusters combined cooling, heating and power system under uncertainty[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(1): 195-204.)
- [11] Si F Y, Wang J K, Han Y H, et al. Cost-efficient multi-energy management with flexible complementarity strategy for energy internet[J]. *Applied Energy*, 2018, 231: 803-815.
- [12] 郑超铭, 黄博南, 王子心, 等. 计及网络传输损耗的电热综合能源系统多目标优化调度[J]. *电网技术*, 2020, 44(1): 141-154.
(Zheng C M, Huang B N, Wang Z X, et al. Multi-objective optimization dispatch for integrated electro-heating systems including network transmission losses[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(1): 141-154.)
- [13] 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.)
- [14] 胡泉, 尚策, 陈东文, 等. 考虑能量品质的区域综合能源系统多目标规划方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(19): 22-31.
(Hu X, Shang C, Chen D W, et al. Multi-objective planning method for regional integrated energy systems considering energy quality[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(19): 22-31.)
- [15] 刘洪. 面向供电质量提高的城市电网专项规划研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
(Liu H. Research on special planning in urban distribution system for advancing quality of power supply[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.)
- [16] 郭尊, 李庚银, 周明, 等. 考虑网络约束和源荷不确定性的区域综合能源系统两阶段鲁棒优化调度[J]. *电网技术*, 2019, 43(9): 3090-3100.
(Guo Z, Li G Y, Zhou M, et al. Two-stage robust optimal scheduling of regional integrated energy system considering network constraints and uncertainties in source and load[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(9): 3090-3100.)
- [17] Gvozdenac D, Urošević B G, Menke C, et al. High efficiency cogeneration: CHP and non-CHP energy[J]. *Energy*, 2017, 135: 269-278.
- [18] Nick M, Cherkaoui R, Paolone M. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(5): 2300-2310.
- [19] 林哲, 胡泽春, 宋永华. 最优潮流问题的凸松弛技术综述[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(13): 3717-3728.
(Lin Z, Hu Z C, Song Y H. Convex relaxation for optimal power flow problem: A recent review[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(13): 3717-3728.)
- [20] 姜永成, 方修睦, 郑瑞芸, 等. 供热负荷分阶段质量调节方法[P]. 中国: CN102003736A. 2011-04-06.
- [21] Cai H M, Ziras C, You S, et al. Demand side management in urban district heating networks[J]. *Applied Energy*, 2018, 230: 506-518.
- [22] 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 W, Lu S, Wang J, 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.)
- [23] Xu T, Wu W C, Zhen W Y, et al. Fully distributed quasi-newton multi-area dynamic economic dispatch method for active distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(4): 4253-4263.
- [24] Abdul-Rahman K H, Shahidehpour S M. A fuzzy-based optimal reactive power control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1993, 8(2): 662-670.

- [25] Haghifam M-R, Falaghi H, Malik O P. Risk-based distributed generation placement[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2(2): 252-260.
- [26] 税月, 刘俊勇, 高红均, 等. 考虑风电不确定性的电气能源系统两阶段分布鲁棒协同调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 43-50.
(Shui Y, Liu J Y, Gao H J, et al. Two-stage distributed robust cooperative dispatch for integrated electricity and natural gas energy systems considering uncertainty of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 43-50.)
- [27] Zuo X Q, Chen C, Tan W, et al. Vehicle scheduling of an urban bus line via an improved multiobjective genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(2): 1030-1041.
- [28] Wang N M, Zhang M, Che A, et al. Bi-objective vehicle routing for hazardous materials transportation with no vehicles travelling in echelon[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(6): 1867-1879.
- [29] Haimes Y Y, Lsaddon L S, Wismer D. On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1971, SMC-1(3): 296-297.
- [30] 王璐, 张小宁, 孙智慧, 等. 精确求解进港飞机调度双目标优化问题的epsilon约束算法[J]. 计算机科学, 2017, 44(S2): 580-582.
(Wang L, Zhang X N, Sun Z H, et al. Exact epsilon-constraint algorithm for bi-objective optimization of flight arrival scheduling problem[J]. Computer Science, 2017, 44(S2): 580-582.)
- [31] Zhao F, Zhang C H, Sun B, et al. Initiative optimization operation strategy and multi-objective energy management method for combined cooling heating and power[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3(4): 385-393.
- [32] Illinois Institute of Technology. Test data of a small-scale system for robust IEHS scheduling[EB/OL]. [2015-08-13](2020-07-01). <http://motor.ece.iit.edu/data/>.
- [33] Li Z G, Wu W C, Wang J H, et al. Transmission-constrained unit commitment considering combined electricity and district heating networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 480-492.

作者简介

司方远(1992—), 男, 博士生, 从事智慧能源系统优化运行与控制的研究, E-mail: sifangyuan@stumail.neu.edu.cn;
韩英华(1979—), 女, 教授, 博士生导师, 从事智能电网优化运行与控制等研究, E-mail: yhhan723@126.com;
袁怀通(1996—), 男, 硕士生, 从事电力系统不良数据辨识的研究, E-mail: 948224718@qq.com;
汪晋宽(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制与自适应信号处理等研究, E-mail: wjk@neq.edu.cn;
赵强(1981—), 男, 讲师, 从事智能电网优化运行与控制的研究, E-mail: learner_2003@163.com.

(责任编辑: 齐 霖)

著作权转让声明

论文作者须保证所投论文为原创作品且不存在涉密和一稿多投问题, 若发生侵权或泄密问题, 一切责任由论文作者承担. 论文作者保证所投论文的署名无争议, 若发生署名争议, 责任由论文作者承担.

本刊已许可中国知网以数字化方式复制、汇编、

发行、信息网络传播本刊全文. 本刊支付的稿酬已包含中国知网著作权使用费. 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明. 如有异议, 请在投稿时说明.