

考虑电能交互的冷热电多微网系统日前优化经济调度

徐青山¹, 李 淋¹, 蔡霖霖¹, 栾开宁², 杨 斌²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏省南京市 210096; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏省南京市 210024)

摘要: 多个冷热电联供型微网接入同一区域配电网, 形成以配电网为核心的冷热电联供型多微网系统。当冷热电联供型多微网间通过联络线进行电能交互时, 给传统的多微网系统优化调度问题带来了挑战。在分析典型冷热电联供型微网供能结构的基础上, 研究供用储设备间的冷热电能流动关系和设备的数学模型, 建立考虑微网间电能交互的冷热电联供型多微网系统优化经济调度模型。通过天津中新生态城算例, 分析各个冷热电联供型微网中设备出力和冷热电负荷平衡情况, 与多微网间不存在电能交互时的优化调度进行经济成本、CO₂ 排放量和各微网与电网交易电功率值的比较, 与传统冷热电联供系统“以热定电”和“以电定热”运行方式下多微网系统的总运行成本进行对比, 验证所提模型的经济性、环保性和有效性, 并对微网间交易电价的制定做进一步研究。

关键词: 冷热电联供; 多微网系统; 电能交互; 优化调度; CO₂ 排放量; 交易电价

0 引言

冷热电联供 (combined cooling, heating and power, CCHP) 系统能够同时对外供应冷能、热能和电能, 通过能量的高效梯级利用, 一次能源利用率可以达到 80% 以上, 并减少对环境的污染^[1-2]。随着传统煤炭、石油等化石能源的逐渐枯竭, 可再生能源如风能、太阳能、地热能等受到越来越多的重视^[3]。微网作为一种包含可再生能源的分布式电源综合集成技术, 是分布式发电的有效管理单元和重要组织形式^[4], 对于推进电力系统的环保性和经济性具有重要的意义^[5-6]。CCHP 技术与微网技术的结合, 将 CCHP 系统与微网中各种用户负荷、供用储设备及分布式电源等结合在一起, 满足用户冷、热、电负荷供需平衡, 提高整个微网系统的稳定性与可靠性^[7-9]。CCHP 型微网以高效的能源利用率、灵活的调度方式、较小的环境污染等优点, 成为国内能源可持续利用、发展低碳绿色经济的重要手段^[10]。

目前国内外对 CCHP 型微网优化调度模型和控制方法均有一定的研究。文献^[11]提出典型 CCHP 系统母线式结构, 设计了优化调度模型构架, 并建立了 CCHP 型微网日前动态经济调度的 0-1 混合线性规划模型。文献^[12]设计了一种集成太阳能

和联供系统的太阳能冷热电三联供系统, 基于生命周期分析法建立了多目标优化模型, 并对电跟随和热跟随两种运行策略下三联供系统的综合性能优化过程进行了对比分析。文献^[13]在考虑电能和天然气的不同费率结构及季节性差异的基础上, 建立了风光气储互补发电的 CCHP 优化协调模型, 以实际算例验证所提方法能够平抑清洁能源的波动性, 并实现多种电能的消纳。文献^[14]将微网供能架构内冷热电负荷细分为纯电负荷、热水负荷、空间热负荷、冷冻负荷和空间冷负荷, 建立 CCHP 型能源网经济优化调度模型, 采用基于 Hessian 矩阵迭代的内点法对模型求解, 并将优化结果与传统的“以热定电”和“以电定热”调度策略运行结果进行对比分析。文献^[15]提出基于模型预测控制的 CCHP 型微网动态优化调度策略, 并实时反馈校正冷热电负荷和可再生能源出力预测偏差, 实际算例验证了所提模型能够有效应对系统不确定性对经济调度的影响。

上述文献主要集中在单个 CCHP 型微网的经济优化调度问题。随着微网技术的发展, 多个微网连接在同一个局部配电网区域内, 研究局部配电网中多个 CCHP 型微网的经济优化问题具有实际意义, 然而涉及含 CCHP 的区域多微网系统优化经济调度的研究还比较少。文献^[16]将 CCHP 型多微网和主动配电网作为两个不同的利益主体, 采用分布式建模方法, 以及天津中新生态城的算例验证了提出的优化调度模型可以实现两个利益主体的经济最优, 但没有考虑 CCHP 型多微网间存在电能交互

收稿日期: 2018-04-17; 修回日期: 2018-05-31。

上网日期: 2018-08-28。

国家电网公司总部科技项目 (SGJSJX00YJJS1800721); 国家重点研发计划资助项目 (2017YFA0700300)。

情况对经济调度的影响。文献[17]提出考虑经济性和综合能效的含 CCHP 系统的区域多微网双目标优化调度方法,冷热电三联供系统实行以冷/热定电的运行模式,通过算例验证所提方法在保证综合能效的基础上能够进一步提高 CCHP 型多微网系统的经济性。文献[18]提出了考虑微网间功率交互和微网出力协调的区域多微网优化经济调度模型,多微网协调运行方式下 CCHP 型多微网系统总运行成本最小。但文献[17-18]中 CCHP 型多微网均采用传统的“以冷/热定电”的运行策略,由文献[14]可知,该文献提出的调度方法比传统的“以热定电”和“以电定热”调度策略经济性好。同时上述文献对具体的 CCHP 型多微网间交易电价的制定和多微网内冷热电负荷平衡状况没有做进一步的研究。

针对以上问题,本文建立考虑微网间电能交互的 CCHP 型多微网系统优化经济调度模型,采用以预测冷热电负荷平衡和总体经济成本最优来确定设备出力的运行策略。基于天津中新生态城的实际算例,通过分析各 CCHP 型微网内各设备出力、冷热电负荷平衡情况、经济运行成本和 CO₂ 排放量等来验证所提出模型的有效性、经济性与环保性,同时对多微网系统总运行成本与微网间交易电价的关系进行了深入研究。

1 CCHP 型微网结构及设备模型

CCHP 型微网中包含冷、热、电、气 4 种形式的能源,其结构示意图如图 1 所示。由图中可以看出,典型 CCHP 型微网中主要设备有:燃气轮机、余热锅炉、燃气锅炉、蒸汽热水换热装置、吸收式制冷机、电制冷机、蓄电池、风机和光伏电池。燃气轮机通过燃烧燃气产生电能,同时产生废热由余热锅炉收集起来,一部分通过换热装置供给热负荷,另一部分通过吸收式制冷机进行制冷供给冷负荷。不足的热负荷需求由燃气锅炉供给,不足的冷负荷需求由电制冷机供给,蓄电池用来存储电能。CCHP 型微网中分布式可再生电源为风力发电和光伏发电,并按照最大预测功率满电。电网、相邻微网和蓄电池与 CCHP 型微网间电能的交互是双向的,其他设备间的能量交互都是单向的。

典型的 CCHP 型微网中有冷负荷、热负荷、电负荷 3 种类型负荷,同时配备相应负荷的供用储设备。当图 1 所示微网中只有冷、电负荷和相应负荷的供用储设备时,该微网为冷电联供(combined cooling and power, CCP)型微网。同理,当只有热、电负荷和相应设备时,该微网为热电联供(combined heating and power, CHP)型微网。

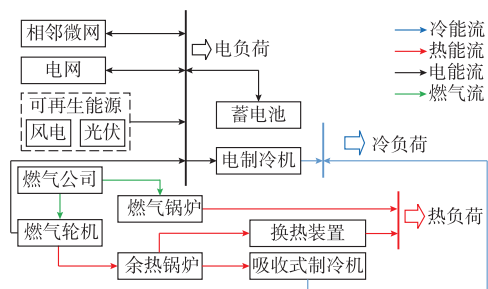


图 1 CCHP 型微网供能结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of energy supply structure of a CCHP microgrid

1.1 燃气轮机

燃气轮机作为 CCHP 系统中的核心设备,在燃烧燃气产生电能的同时,热能作为副产品供给整个系统的冷负荷和热负荷。当不考虑外界环境变化时,燃气轮机发电效率可以描述成关于机组电负荷率 β 的三次拟合多项式^[19]。

$$\eta_{GT} = a\beta^3 - b\beta^2 + c\beta + d \quad (1)$$

式中: η_{GT} 为 t 时段内燃气轮机的发电效率; a, b, c, d 为正常数。

燃气轮机燃气消耗量和排出烟气中的余热量的数学模型如下^[16,18]：

$$V_{GT} = \frac{\sum_{t=1}^{N_T} P_{GT}(t) \Delta t}{\eta_{GT} L_{NG}} \quad (2)$$

$$Q_{GT}(t) = P_{GT}(t) \frac{1 - \eta_{GT} - \eta_{GT,l}}{\eta_{GT}} \quad (3)$$

式中: V_{GT} 为燃气轮机消耗的燃气量; $P_{GT}(t)$ 为 t 时段内燃气轮机的发电功率; Δt 为时间间隔; N_T 为调度时间段; L_{NG} 为燃气热值,本文取燃气低热值 9.7 (kW·h)/m³; $Q_{GT}(t)$ 为燃气轮机排出烟气中的余热量; $\eta_{GT,l}$ 为燃气轮机的热损失系数。

燃气轮机的输出功率满足运行约束条件:

$$P_{GT}^{\min} \leq P_{GT}(t) \leq P_{GT}^{\max} \quad (4)$$

式中: P_{GT}^{\min} 和 P_{GT}^{\max} 分别为燃气轮机的最小和最大发电功率。

1.2 余热锅炉

燃气轮机排出烟气余热通过余热锅炉收集起来,供给 CCHP 系统的冷、热负荷需求,余热锅炉的输出热量与输入热量及余热锅炉效率有关^[14]：

$$\begin{cases} Q_{WH}(t) = Q_{WH,in}(t) \eta_{WH} \\ Q_{WH}^{\min} \leq Q_{WH}(t) \leq Q_{WH}^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $Q_{WH}(t)$ 为余热锅炉在 t 时段内的输出热量; $Q_{WH,in}(t)$ 为输入热量; η_{WH} 为余热锅炉的效率; Q_{WH}^{\min} 和 Q_{WH}^{\max} 分别为余热锅炉的最小和最大输出热量。

1.3 燃气锅炉

当余热锅炉中输出热量不足以供给供热系统热负荷需求时,燃气锅炉通过燃烧燃气对系统进行补热。数学模型如下^[16]:

$$\begin{cases} Q_{GB}(t) = F_{GB}(t)L_{NG}\eta_{GB} \\ Q_{GB}^{\min} \leq Q_{GB}(t) \leq Q_{GB}^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $Q_{GB}(t)$ 为燃气锅炉在 t 时段的输出热量; $F_{GB}(t)$ 为燃气锅炉的消耗燃气量; η_{GB} 为燃气锅炉的效率; Q_{GB}^{\min} 和 Q_{GB}^{\max} 分别为燃气锅炉的最小和最大输出热量。

1.4 蒸汽热水换热装置

换热装置将余热锅炉的蒸汽热量进行转换,供给系统热负荷需求。数学模型如下:

$$\begin{cases} Q_{HX}(t) = Q_{WH,heat}(t)\eta_{HX} \\ 0 \leq Q_{WH,heat}(t) \leq Q_{WH}(t) \\ Q_{HX}^{\min} \leq Q_{HX}(t) \leq Q_{HX}^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $Q_{HX}(t)$ 为换热装置在 t 时段内的输出热量; η_{HX} 为换热装置的效率; $Q_{WH,heat}(t)$ 为余热锅炉输出热量中用于供给系统热负荷的热量; Q_{WH}^{\min} 和 Q_{WH}^{\max} 分别为蒸汽热水换热装置的最小和最大输出热量。

1.5 吸收式制冷机

吸收式制冷机将余热锅炉中的热量进行制冷供给系统冷负荷需求。数学模型描述如下^[14]:

$$\begin{cases} Q_{AC}(t) = Q_{WH,cool}(t)\eta_{AC} \\ 0 \leq Q_{WH,cool}(t) \leq Q_{WH}(t) \\ Q_{AC}^{\min} \leq Q_{AC}(t) \leq Q_{AC}^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $Q_{AC}(t)$ 为吸收式制冷机在 t 时段内的输出制冷量; η_{AC} 为吸收式制冷机的效率; $Q_{WH,cool}(t)$ 为余热锅炉输出热量中用于供给系统冷负荷的热量; Q_{AC}^{\min} 和 Q_{AC}^{\max} 分别为吸收式制冷机的最小和最大制冷量。

1.6 电制冷机

在吸收式制冷机的输出制冷量不足以供给系统的冷负荷时,电制冷机通过消耗电能制冷对系统进行补冷。数学模型如下^[13]:

$$\begin{cases} Q_{EC}(t) = P_{EC}(t)\lambda_{EC} \\ P_{EC}^{\min} \leq P_{EC}(t) \leq P_{EC}^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $Q_{EC}(t)$ 为电制冷机在 t 时段内的输出制冷量; $P_{EC}(t)$ 为电制冷机的输入电功率; λ_{EC} 为能效比; P_{EC}^{\min} 和 P_{EC}^{\max} 分别为电制冷机的最小和最大输入电功率。

1.7 蓄电池

蓄电池可以在微网购电低谷电价时充电,在购电高峰电价时放电,以减少微网的总体运行成本。蓄电池的差分方程模型如下^[20-21]:

$$\begin{cases} S_{stor}(t+1) = (1-u)S_{stor}(t) + \left(\eta^{abs} P_{abs}(t) - \frac{1}{\eta^{relea}} P_{relea}(t) \right) \Delta t \\ S_{stor}^{\min} \leq S_{stor}(t) \leq S_{stor}^{\max} \\ P_{BT}^{\min} \leq P_{abs}(t) \leq P_{BT}^{\max} \\ P_{BT}^{\min} \leq P_{relea}(t) \leq P_{BT}^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $S_{stor}(t)$ 为蓄电池在 t 时段内存储的能量; u 为蓄电池向环境散能损失或自损耗的能量系数; η^{abs} 和 η^{relea} 分别为蓄电池的充放电效率; $P_{abs}(t)$ 和 $P_{relea}(t)$ 分别为蓄电池的充放电功率,且蓄电池同一时段充放电状态满足互斥条件,不能同时充放电; S_{stor}^{\min} 和 S_{stor}^{\max} 分别为蓄电池的最小和最大电量; P_{BT}^{\min} 和 P_{BT}^{\max} 分别为蓄电池的最小和最大充放电功率。

1.8 与电网和相邻微网交互电功率

当CCHP型微网中的分布式电源,即燃气轮机、风力发电和光伏发电不能满足微网的总电负荷需求时,微网从电网或者相邻的微网中购买电能;同理,当CCHP型微网中电能过剩时,微网向电网或者相邻微网售电。需要满足的约束条件如下:

$$\begin{cases} -P_{grid}^{\max} \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid}^{\max} \\ -P_{mg}^{\max} \leq P_{mg}^j(t) \leq P_{mg}^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{grid}(t)$ 为CCHP型微网在 t 时段与电网交互电功率值,若微网从电网购电则交互功率值为正,若售电则交互功率值为负; $P_{mg}^j(t)$ 为CCHP型微网与相邻微网 j 交互电功率值,若微网从相邻微网购电则交互功率值为正,若售电则交互功率值为负; P_{grid}^{\max} 为微网与电网交互电功率上限; P_{mg}^{\max} 为微网与相邻微网交互电功率上限。

2 CCHP型多微网优化调度模型

本文提出的考虑微网间电能交互的CCHP型多微网系统优化经济调度模型以多微网系统的经济性为优化目标,同时考虑约束条件,优化各个微网内设备的出力。由于多个CCHP型微网属于同一个局部配电网,忽略交互电功率过程中的电能损耗。

2.1 目标函数

CCHP型多微网系统的优化目标是在调度周期 N_T 内 m 个微网总的运行成本最小,即

$$\min F_{MG} = \sum_{i=1}^m (F_{fuel,i} + F_{Rm,i} + F_{grid,i} + F_{mg,i}) \quad (12)$$

式中: F_{MG} 为CCHP型多微网系统的总运行成本; m 为CCHP型微网的总个数; $F_{fuel,i}$ 为第 i 个CCHP型微网的燃气费用; $F_{Rm,i}$ 为第 i 个CCHP型微网的设备运行维护费用; $F_{grid,i}$ 为第 i 个CCHP型微网与电网交互电功率的费用; $F_{mg,i}$ 为第 i 个微网与所有相

邻微网交互电功率的费用。

燃气费用:

$$F_{\text{fuel},i} = \sum_{t=1}^{N_T} \left(\frac{c_{\text{Gas}} P_{\text{GT}}(t)}{\eta_{\text{GT}} L_{\text{NG}}} + c_{\text{Gas}} F_{\text{GB}}(t) \right) \Delta t \quad (13)$$

设备运行维护费用:

$$F_{\text{Rm},i} = \sum_{t=1}^{N_T} k_{\text{GT}} P_{\text{GT}}(t) + k_{\text{GB}} P_{\text{GB}}(t) + k_{\text{WH}} P_{\text{WH}}(t) + k_{\text{HX}} P_{\text{HX}}(t) + k_{\text{AC}} P_{\text{AC}}(t) + k_{\text{EC}} P_{\text{EC}}(t) + k_{\text{BT}} P_{\text{BT}}(t) + k_{\text{WT}} P_{\text{WT}}(t) + k_{\text{PV}} P_{\text{PV}}(t) \quad (14)$$

与电网交互功率费用:

$$F_{\text{grid},i} = \sum_{t=1}^{N_T} \tau(t) P_{\text{grid}}(t) \Delta t \quad (15)$$

与所有相邻微网交互功率费用:

$$F_{\text{mg},i} = \sum_{j=1, j \neq i}^m \sum_{t=1}^{N_T} \lambda(t) P_{\text{mg}}^j(t) \Delta t \quad (16)$$

式中: c_{Gas} 为燃气气价; k_{GT} , k_{GB} 和 k_{WH} 分别为燃气轮机、燃气锅炉和余热锅炉单位时段单位功率运行维护费用; k_{HX} , k_{AC} 和 k_{EC} 分别为换热装置、吸收式制冷机和电制冷机单位时段单位功率运行维护费用; k_{BT} , k_{WT} 和 k_{PV} 分别为蓄电池、风电、光伏发电单位时段单位功率运行维护费用; $P_{\text{GB}}(t)$, $P_{\text{WH}}(t)$, $P_{\text{HX}}(t)$ 和 $P_{\text{AC}}(t)$ 分别为燃气锅炉、余热锅炉、换热装置和吸收式制冷机的输出功率; $P_{\text{BT}}(t)$, $P_{\text{WT}}(t)$ 和 $P_{\text{PV}}(t)$ 分别为蓄电池、风电和光伏发电的输出功率; $\tau(t)$ 为 CCHP 型微网与电网交互电功率的电价; $\lambda(t)$ 为 CCHP 型微网与相邻微网交互电功率的电价。

2.2 约束条件

CCHP 型多微网系统运行约束条件包括各个微网内冷、热、电能平衡约束,设备出力约束,以及与电网、相邻微网的交互功率约束等,其中设备出力约束及交互功率约束在上一节中已述及。

冷平衡约束:

$$P_{\text{EC}}(t) \lambda_{\text{EC}} + Q_{\text{AC}}(t) = P_{\text{cooling}}(t) \Delta t \quad (17)$$

热平衡约束:

$$Q_{\text{GB}}(t) + Q_{\text{HX}}(t) = P_{\text{heating}}(t) \Delta t \quad (18)$$

电平衡约束:

$$P_{\text{GT}}(t) + P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{grid}}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^m P_{\text{mg}}^j(t) + P_{\text{relea}}(t) = P_{\text{EC}}(t) + P_{\text{load}}(t) + P_{\text{abs}}(t) \quad (19)$$

式中: $P_{\text{cooling}}(t)$, $P_{\text{heating}}(t)$, $P_{\text{load}}(t)$ 分别为 CCHP 型微网的冷负荷功率、热负荷功率和电负荷功率。

针对上述经济优化调度模型,在 MATLAB 中调用商业求解器 Cplex 进行求解^[22]。

3 算例分析

3.1 基础数据

采用天津中新生态城的典型 CCHP 型多微网系统算例,多微网系统由 CCP 型微网、CCHP 型微网和 CHP 型微网组成,如图 2 所示。

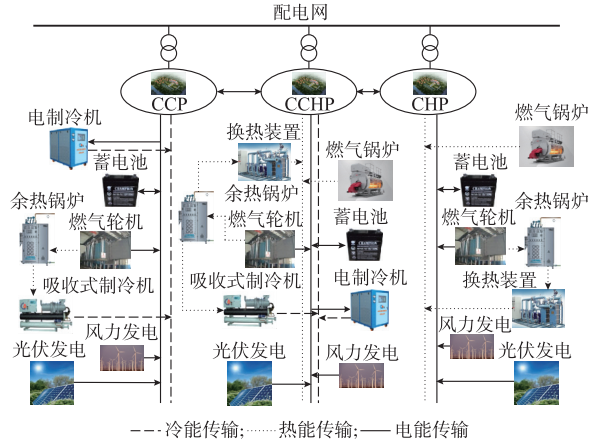


图 2 CCHP 型多微网系统示意图
Fig.2 Schematic diagram of CCHP multi-microgrid

CCHP 型微网与 CCP 型微网和 CHP 型微网通过联络线相连接,可以进行相互间的电功率交互,且多微网属于同一个配电网区域。三种类型微网中同类型设备参数相同,见附录 A 表 A1。各类型微网中光伏发电和风力发电功率、冷热电负荷预测数据见附录 A 图 A1。天然气的气价为 2.2 元/m³, CCHP 型多微网系统中微网与电网间、多微网间的交易电价^[23]见附录 A 表 A2。为保护电力公司利益,CCHP 型微网从电网购电的电价比微网向电网售电的电价高。微网售电给电网和其他相邻微网的电价相同,且与微网从其他相邻微网购电的电价相同。当 CCHP 型微网内分布式电源发电功率不能满足电负荷需求时,由于微网从其他相邻微网购电的电价低于从电网的购电电价,为了总体经济成本最优,微网优先从相邻微网购电,再从电网购电。同理,当微网内分布式电源发电量存在剩余时,而微网向电网和其他相邻微网的售电电价相同,为了总体经济性,微网会优先向相邻微网售电,再向电网售电。

下面针对天津中新生态城算例,研究考虑微网间电能交互的 CCHP 型多微网系统的经济性与环保性,分析多微网内的设备出力及冷热电负荷平衡情况,并对多微网间交易电价的制定做进一步研究。

3.2 结果分析

3.2.1 各 CCHP 型微网优化调度结果分析

当 CCHP 型多微网通过联络线进行微网间电能交互时,各个微网的设备出力及冷热电功率平衡

情况如图 3、图 4 所示。

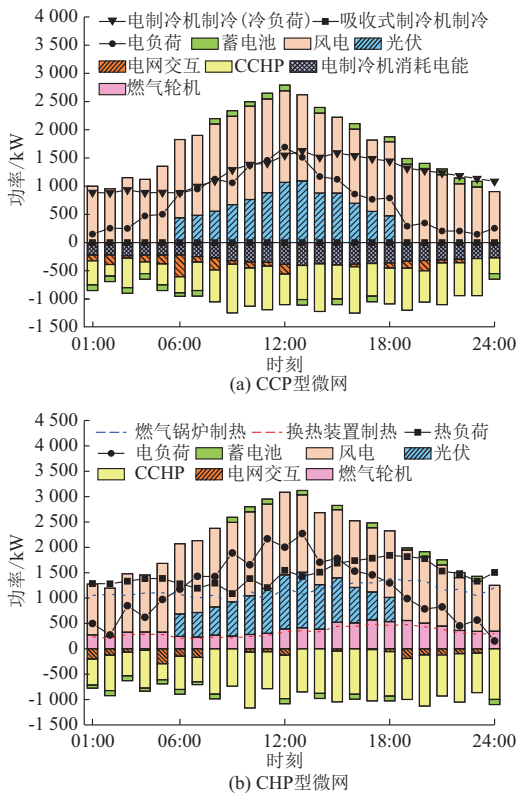


图 3 CCP 和 CHP 型微网冷热电负荷平衡及设备出力曲线

Fig.3 Cooling, heating, power balance curves and equipment output of CCP and CHP microgrid

CCP 型微网中光伏和风电的发电功率大于电负荷功率,存在电量剩余的情况,属于多电型微网,微网中多余的电量出售给 CCHP 型微网和电网。微网中燃气轮机没有出力,不产生电能和烟气废热。余热锅炉中没有从燃气轮机中收集的烟气废热,因此吸收式制冷机没有工作,微网中冷负荷功率全部由电制冷机提供。微网中电负荷与光伏发电、风力发电、蓄电池充放电、与电网交互电功率、与 CCHP 型微网交互电功率、电制冷机消耗电功率协调平衡。蓄电池在峰时段电价高时放电供给微网电能需求,在谷时段电价低时充电储存电能,以达到减少系统运行费用的优化目标,且蓄电池充放电功率在 08:00—12:00 和 19:00—24:00 时段达到最大充放电功率(100 kW)。

CHP 型微网中光伏和风电发电功率大于电负荷功率需求,属于多电型微网,通过向电网和 CCHP 型微网售电平衡电功率。燃气轮机的烟气废热经余热锅炉全部供给换热装置供热,微网中热负荷功率由换热装置和燃气锅炉提供,当换热装置的制热功率不能满足系统热负荷需求时,燃气锅炉进行补热。同时,蓄电池满足高电价时刻放电、低电价时刻充电

的规律,最大充放电功率为 100 kW。

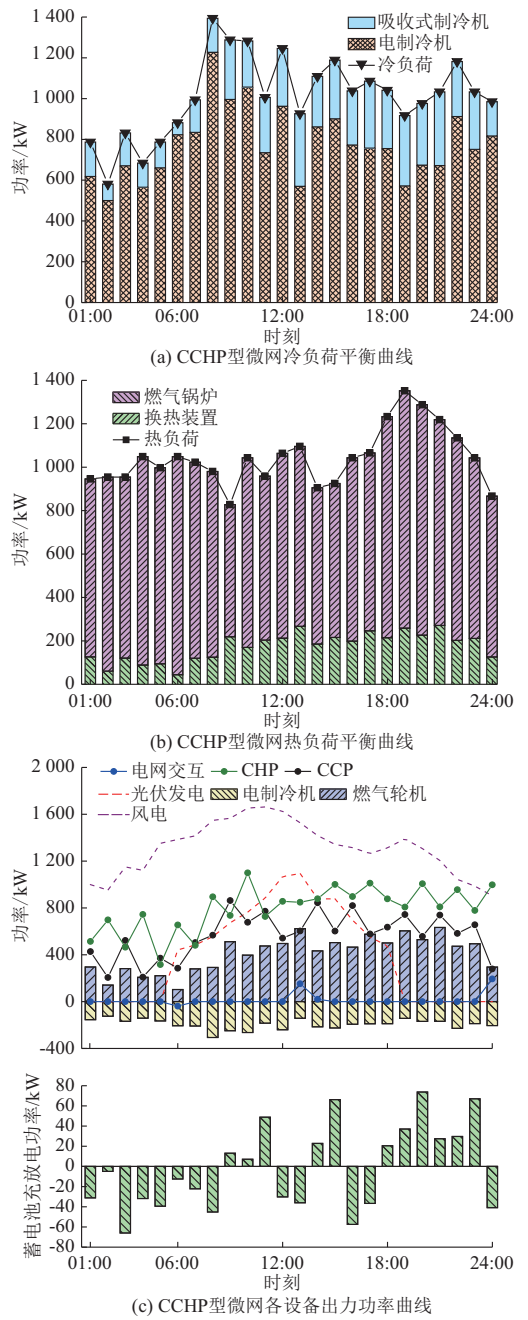


图 4 CCHP 型微网冷热电负荷平衡及设备出力曲线
Fig.4 Cooling, heating, power balance curves and equipment output of CCHP microgrid

CCHP 型微网中冷热电负荷功率平衡,且未出现弃冷/热/电能的情况。燃气轮机烟气废热经余热锅炉供给吸收式制冷机和换热装置,给微网供冷和供热。微网冷负荷功率由电制冷机和吸收式制冷机提供,当吸收式制冷机不足以提供微网冷负荷需求时,电制冷机进行补冷,且其在电价高时制冷功率所占比小,在电价低时比例高。微网热负荷功率由换热装置和燃气锅炉提供,当换热装置制热功率不

足以提供微网热负荷需求时,燃气锅炉进行补热。

微网电负荷功率与燃气轮机发电、电制冷机消耗电功率、与电网交互电功率、与 CCP 型微网交互电功率、与 CHP 型微网交互电功率、蓄电池充放电、光伏、风电协调平衡。由附录 A 图 A1(a)可以看出,微网电负荷功率大于光伏和风电的发电功率,属于缺电型微网,微网从电网、CCP 型微网和 CHP 型微网购电供给电负荷需求。燃气轮机在购电电价高时发电功率大,在购电电价低时发电功率小。从蓄电池的充放电功率可以看出,在低谷电价时段 23:00—07:00 蓄电池充电存储电能,在高峰电价时段 08:00—11:00 和 18:00—23:00 蓄电池放电供给电负荷需求,且最大充放电功率为 73 kW。

3.2.2 与多微网间无电能交互对比分析

当 CCHP 型多微网系统中微网间不存在电能交互时,各个微网独立运行,只与电网间存在电能的交易。为突出本文所提优化经济调度方法的优点,与多微网间独立运行的优化结果进行对比,从多微网系统电功率交互值、多微网系统经济性、多微网系统环保性三个方面展开分析。

1) 多微网系统电功率交互值

当微网间存在电能交互时,CCHP 型多微网系统中各微网与电网、各微网与相邻微网的功率交互曲线如图 5(a)所示;当微网间不存在电能交互时,各微网与电网的功率交互曲线如图 5(b)所示。

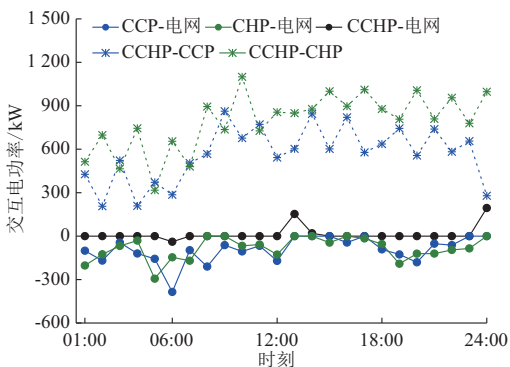
当微网间存在电能交互时,CCHP 型微网从相邻微网和电网中购电,由于从电网购电电价高于从微网购电电价,CCHP 型微网优先从相邻微网购电,若 CHP 型微网和 CCP 型微网中多余电功率值不足以提供 CCHP 型微网电功率需求,CCHP 型微网再从电网购电,如图 5(a)中 13:00 和 24:00 所示。CCHP 型微网从 CHP 型微网中购电量最大,其次是 CCP 型微网。微网向电网和相邻微网售电电价相同,为了多微网系统经济成本最优,多电型微网优先向相邻缺电型微网售电,当相邻微网的电功率需求已得到满足时,再向电网售电。

当各微网独立运行时,多电型 CCP 型微网和 CHP 型微网向电网售电,缺电型 CCHP 型微网向电网购电。从图中可以看出,各微网独立运行时,三个 CCHP 型微网与电网间交互电功率的值远大于各微网间存在电能交互时的值。因此当微网间存在电能交易时,可以大大降低微网与电网间输电线路的传输电功率压力。

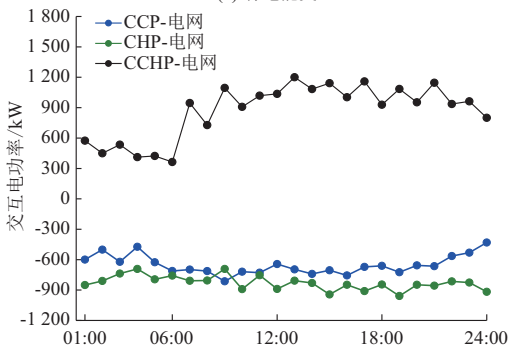
2) 多微网系统的经济性

与各微网独立运行相比,CCHP 型微网从 CCP 型微网和 CHP 型微网购电的电价比从电网购电的

电价低。附录 A 表 A3 给出 CCHP 型多微网系统在微网间存在电能交互和无电能交互场景下的经济成本。可见,当微网间无电功率交互时,多微网系统的总成本为 40 939.3 元,当微网间有电功率交互时,多微网系统的总成本为 37 285.5 元,成本下降 8.92%。CCHP 型微网独立运行时运行成本为 34 873.3 元,微网间有电能交互时运行成本为 31 049.8 元,成本下降 10.96%。CHP 型微网和 CCP 型微网由于售电给电网和 CCHP 型微网的电价相同,所以在两种场景下运行成本基本不变。



(a) 有电能交互



(b) 无电能交互

图5 多微网系统功率交互曲线
Fig.5 Curves of interaction power in multi-microgrid system

3) 多微网系统的环保性

CCHP 型多微网系统碳排放的主要来源为燃气轮机、燃气锅炉和配电网,燃气轮机和燃气锅炉燃烧天然气产生 CO_2 ,配电网中电能大部分由火力发电提供。多微网系统运行过程中 CO_2 排放量如下式:

$$F_{\text{CO}_2} = \sum_{t=1}^{N_T} (u_{c,\text{gas}} F_{\text{GT}}(t) + u_{c,\text{gas}} F_{\text{GB}}(t) + u_{c,\text{power}} P_{\text{grid}}(t)) \Delta t \quad (20)$$

式中: F_{CO_2} 为多微网系统运行过程中 CO_2 的排放量; $u_{c,\text{gas}}$ 为单位体积天然气燃烧时的 CO_2 排放率; $F_{\text{GT}}(t)$ 为燃气锅炉消耗燃气量; $u_{c,\text{power}}$ 为配电网中单位电能生产时的 CO_2 排放率。

根据天然气标准煤折算系数 1.2143 kg/m^3 ,标

准煤 CO_2 排放量 2.49 kg,可换算得天然气 CO_2 排放率 3.024 kg/m^3 ,配电网电能的 CO_2 排放率 $0.997 \text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ^[24]。附录 A 表 A4 给出 CCHP 型多微网系统在微网间存在电能交互和无电能交互场景下的 CO_2 排放量。可见,当微网间没有电能交互时,多微网系统的 CO_2 排放量为 100 307.7 kg,当微网间存在电能交互时,多微网系统的 CO_2 排放量为 51 712.7 kg,排放量减少 48.44%。

3.2.3 与 CCHP 传统运行方式对比分析

CCHP 系统的经济性能与燃气轮机的运行方式有关,目前普遍采用的两种传统运行方式为“以热定电”和“以电定热”^[14,18,25-26]。“以电定热”运行方式为 CCHP 系统中燃气轮机机组的出力跟随系统电负荷的变化,当燃气轮机机组的最大发电功率无法满足系统电负荷需求时,从电网或者其他相邻微网购电,燃气轮机机组产生的余热经余热锅炉根据不同的工况,经吸收式制冷机供给冷负荷或经换热装置供给热负荷,不足的冷热负荷需求由电制冷机和燃气锅炉提供,“以热定电”运行方式同理。

为突出本文提出的优化调度方法的经济性优势,在多微网间有电能交互的前提下,对 3 个 CCHP 型微网采用“以热定电”和“以电定热”运行方式进行仿真分析,分别计算两种传统运行方式下的多微网系统总成本,并与本文提出的优化调度方法进行对比,见附录 A 表 A5。与传统“以热定电”和“以电定热”运行方式相比,本文提出的优化调度方法可分别降低 5.33% 和 9.58% 的总运行成本。通过本文提出的优化调度方法,调度 CCHP 型多微网系统中各微网设备出力和各微网与电网、相邻微网间交互电功率值,可以显著降低多微网系统的总运行成本。

4 讨论

CCHP 型多微网系统运行经济成本与多微网间交易电价的制定有密切关系,以附录 A 表 A2 中电价为基础,研究多微网系统运行经济成本与微网间交易电价的关系如图 6 所示,其中 w 为微网交易电价与附录 A 表 A2 所设定的各相应时段基础电价间的差值。

可见,随着微网间购售电电价的增加,CCP 型微网的盈利越来越大,CHP 型微网的经济成本逐渐减低,这是由于微网间购售电电价升高,CCP 型微网和 CHP 型微网出售剩余电量获得的收益变大。由于 CCHP 型微网从相邻微网的购电电价增大,CCHP 型微网的经济成本逐渐增加,而整个 CCHP 型多微网系统的经济成本呈现逐渐降低的趋势。为遵循微网向电网售电电价不高于从电网购电电价的

原则,当微网间峰平谷时段交易电价取 0.69,0.42,0.17 元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$ (即 $w=0.04$ 元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$)时,CCHP 型多微网系统有最低运行经济成本 36 907 元。

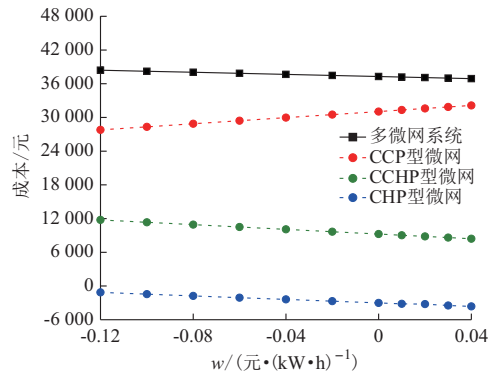


图 6 多微网系统成本与电价关系曲线
Fig.6 Relationship between cost and electricity prices of CCHP multi-microgrid system

5 结语

本文建立了考虑微网间电能交互的 CCHP 型多微网系统优化经济调度模型,通过天津中新生态城算例,分析各微网优化调度结果得出以下结论。

1) 当多微网间通过联络线交互电能时,缺电型 CCHP 型微网从 CCP 型微网、CHP 型微网和电网购买电能,多电型 CCP 微网和 CHP 微网向 CCHP 型微网和电网售电。CCP 型、CCHP 型和 CHP 型微网中冷热电负荷功率平衡,各微网中没有出现弃冷/热/电能的情况,多微网中各设备出力趋向于最小化整个 CCHP 型多微网系统经济运行成本。

2) 与多微网间无电能交互的优化调度相比,本文提出的考虑微网间电能交互的优化调度方法,可以减少各微网与电网间的购售电量,减少电网高峰时段的供电压力;同时可以降低 8.92% 的运行成本,减少 48.44% 的 CO_2 排放量,验证了本文所提模型的经济性和环保性。

3) 与传统的“以热定电”和“以电定热”运行方式相比,本文提出的考虑微网间电能交互的 CCHP 型多微网系统优化调度方法通过调度各微网内设备出力和微网与电网、相邻微网间交互电功率值,可以分别降低 5.33% 和 9.58% 的总运行成本。

4) CCHP 型多微网系统运行经济成本与微网间购售电电价有关,在电价允许范围内,随着微网间购售电电价的提高,多微网系统运行经济成本呈逐渐下降趋势,并在 $w=0.04$ 元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$ 时取最小值。

本文 CCHP 型微网中燃气仅作为燃气轮机和燃气锅炉的燃料,与微网内电能间没有耦合关系,随

着电转气(power-to-gas, P2G)技术的发展,能实现综合能源系统中电、气系统间能量的双向流动。未来将进一步研究包含电转气装置的 CCHP 型多微网系统优化经济调度问题,分析电转气技术消纳分布式电源发电所产生的经济效益,以及各个 CCHP 型微网内冷、热、电负荷的平衡情况。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] GU Wei, WU Zhi, BO Rui, et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: a review[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54(1): 26-37.
- [2] GU Wei, LU Shuai, WU Zhi, et al. Residential CCHP microgrid with load aggregator: operation mode, pricing strategy, and optimal dispatch[J]. Applied Energy, 2017, 205: 173-186.
- [3] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等.区域综合能源系统若干问题研究[J].电力系统自动化,2015,39(7):198-207. DOI: 10.7500/AEPS20141009011.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207. DOI: 10.7500/AEPS20141009011.
- [4] 吴雄,王秀丽,王建党,等.微网经济调度问题的混合整数规划方法[J].中国电机工程学报,2013,33(28):1-8.
WU Xiong, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. Economic generation scheduling of a microgrid using mixed integer programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 1-8.
- [5] 孙浩,张磊,许海林,等.微电网日内调度计划的混合整数规划模型[J].电力系统自动化,2015,39(19):21-27. DOI: 10.7500/AEPS20141117011.
SUN Hao, ZHANG Lei, XU Hailin, et al. Mixed integer programming model for microgrid intra-day scheduling [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 21-27. DOI: 10.7500/AEPS20141117011.
- [6] 谢敏,吉祥,柯少佳,等.基于目标级联分析法的多微网主动配电系统自治优化经济调度[J].中国电机工程学报,2017,37(17):4911-4921.
XIE Min, JI Xiang, KE Shaojia, et al. Autonomous optimized economic dispatch of active distribution power system with multi-microgrids based on analytical target cascading theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4911-4921.
- [7] GHADIMI P, KARA S, KORNFELD B. The optimal selection of on-site CHP systems through integrated sizing and operational strategy[J]. Applied Energy, 2014, 126: 38-46.
- [8] 管霖,陈鹏,唐宗顺,等.考虑冷热电存储的区域综合能源站优化设计方法[J].电网技术,2016,40(10):2934-2941.
GUAN Lin, CHEN Peng, TANG Zongshun, et al. Integrated energy station design considering cold and heat storage [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2934-2941.
- [9] GU Wei, TANG Yiyuan, PENG Shuyong, et al. Optimal configuration and analysis of combined cooling, heating, and power microgrid with thermal storage tank under uncertainty [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2015, 7(1): 2125-2141.
- [10] 魏大钧,张承慧,孙波.计及变负荷特性的小型冷热电联供系统经济优化运行研究[J].电网技术,2015,39(11):3240-3246.
WEI Dajun, ZHANG Chenghui, SUN Bo. Economic optimal operation of micro combined cooling heating and power system considering off-design performance [J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3240-3246.
- [11] 王成山,洪博文,郭力,等.冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J].中国电机工程学报,2013,33(31):26-33.
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 26-33.
- [12] 荆有印,白鹤,张建良.太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析[J].中国电机工程学报,2012,32(20):82-87.
JING Youyin, BAI He, ZHANG Jianliang. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of a solar combined cooling, heating and power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 82-87.
- [13] 熊焰,吴杰康,王强,等.风光气储互补发电的冷热电联供优化协调模型及求解方法[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3616-3625.
XIONG Yan, WU Jiekang, WANG Qiang, et al. An optimization coordination model and solution for combined cooling, heating and electric power systems with complimentary generation of wind, PV, gas and energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3616-3625.
- [14] 徐青山,曾艾东,王凯,等.基于 Hessian 内点法的微型能源网日前冷热电联供经济优化调度[J].电网技术,2016,40(6):1657-1665.
XU Qingshan, ZENG Aidong, WANG Kai, et al. Day-ahead optimized economic dispatching for combined cooling, heating and power in micro energy-grid based on Hessian interior point method [J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1657-1665.
- [15] GU W, WANG Z, WU Z, et al. An online optimal dispatch schedule for CCHP microgrids based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2332-2342.
- [16] 徐青山,李淋,盛业宏,等.冷热电联供型多微网主动配电系统日前优化经济调度[J].电网技术,2018,42(6):1726-1734.
XU Qingshan, LI Lin, SHENG Yehong, et al. Day-ahead optimized economic dispatch of active distribution power system with combined cooling, heating and power-based microgrids [J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1726-1734.
- [17] 王守相,吴志佳,袁霜晨,等.区域多微网系统的多目标优化调度方法[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(5):14-20.
WANG Shouxiang, WU Zhijia, YUAN Shuangchen, et al. Method of multi-objective optimal dispatching for regional multi-microgrid system [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(5): 14-20.
- [18] 王守相,吴志佳,庄剑.考虑微网间功率交互和微源出力协调的冷热电联供型区域多微网优化调度模型[J].中国电机工程学报,2017,37(24):7185-7194.
WANG Shouxiang, WU Zhijia, ZHUANG Jian. Optimal dispatching model of CCHP type regional multi-microgrids considering interactive power exchange among microgrids and

- output coordination among micro-sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7185-7194.
- [19] CARVALHO M, MARIA SERRA L, ANGEL LOZANO M. Optimal synthesis of tri-generation systems subject to environmental constraints [J]. Energy, 2011, 36(6): 3779-3790.
- [20] 杨永标, 于建成, 李奕杰, 等. 含光伏和蓄能的冷热电联供系统调峰调蓄优化调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 6-12. DOI: 10.7500/AEPS20160610002.
- YANG Yongbiao, YU Jiancheng, LI Yijie, et al. Optimal load leveling dispatch of CCHP incorporating photovoltaic and storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 6-12. DOI: 10.7500/AEPS20160610002.
- [21] 刘涤尘, 马恒瑞, 王波, 等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 113-120. DOI: 10.7500/AEPS20170512002.
- LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with CCHP and energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 113-120. DOI: 10.7500/AEPS20170512002.
- [22] ZHANG Ning, KANG Chongqing, XIA Qing, et al. A convex model of risk-based unit commitment for day-ahead market clearing considering wind power uncertainty [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1582-1592.
- [23] LIU T Q, JIANG D L. Economic operation of microgrid based on operation mode optimization of energy storage unit [J]. Power System Technology, 2012, 2(11): 2087-2089.
- [24] 徐敏姣, 徐青山, 蒋菱. 基于太阳能空调的冷热电联供系统多目标优化运行研究[J]. 现代电力, 2017, 34(3): 60-68.
- XU Minjiao, XU Qingshan, JIANG Ling. Research on multi-objective optimized operation of combined cooling heating and power system with solar air conditioning[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(3): 60-68.
- [25] 魏大钧, 孙波, 赵峰, 等. 小型生物质沼气冷热电联供系统多目标优化设计与运行分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 7-12. DOI: 10.7500/AEPS20141027001.
- WEI Dajun, SUN Bo, ZHAO Feng, et al. Multi-objective optimization design and operation analysis of a small biomass biogas combined cooling heating and power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 7-12. DOI: 10.7500/AEPS20141027001.
- [26] 刘星月, 吴红斌. 太阳能综合利用的冷热电联供系统控制策略和运行优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 1-6. DOI: 10.7500/AEPS20140626004.
- LIU Xingyue, WU Hongbin. A control strategy and operation optimization of combined cooling heating and power system considering solar comprehensive utilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 1-6. DOI: 10.7500/AEPS20140626004.

徐青山(1979—),男,博士,教授,主要研究方向:智能配电系统与微网。E-mail: xuqingshan@seu.edu.cn

李 淋(1994—),女,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:冷热电综合能源系统优化经济调度。E-mail: lin_lihhu@163.com

蔡霖霖(1991—),男,博士研究生,主要研究方向:新能源发电及微电网运行、规划与控制。E-mail: 230159180@seu.edu.cn

(编辑 章黎)

Day-ahead Optimized Economic Dispatch of CCHP Multi-microgrid System Considering Power Interaction Among Microgrids

XU Qingshan¹, LI Lin¹, CAI Jilin¹, LUAN Kaining², YANG Bin²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: As a large number of microgrids with combined cooling, heating and power (CCHP) are integrated into the same distribution network, it forms CCHP multi-microgrid system in which the distribution network is the core. When there is power interaction among multi-microgrid, it brings great challenges to the traditional optimized economic dispatch. On the basis of energy supply structure of CCHP microgrid, the cooling, heating and power energy flow among devices and equipment models are analyzed. The optimized economic dispatch model of CCHP multi-microgrid system considering the power interaction is also established. Through the example of Zhongxin district in Tianjin municipality, China, the output power of equipment and the balance of cooling, heating and power load in every CCHP microgrid are analyzed. Then it compares with economic dispatch of CCHP multi-microgrid without power interaction, about economy cost, CO₂ emission and power interaction with the grid. Finally, the whole system operation cost is compared with that of the conventional CCHP system in following the thermal load (FTL) and following the electric load (FEL) operation mode, which confirms that the model proposed is effective, economic and environment-friendly. The relationship between the total cost of multi-microgrid system and electricity transaction price among microgrids is further studied.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. SGJSX00YJJS1800721) and National Key R&D Program of China (No. 2017YFA0700300).

Key words: combined cooling, heating and power (CCHP); multi-microgrid system; power interaction; optimized dispatch; CO₂ emission; electricity transaction price