

具有2种制冷方式的冷热电联产系统时序仿真算法

贾善杰¹, 安勇¹, 梁荣¹, 冯亮¹, 付春梅², 郑志杰¹, 邹斌³

(1. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东 济南 250021; 2. 国网济南供电公司, 山东 济南 250021;

3. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444)

摘要:基于最优运行策略的分析,将具有2种制冷方式的冷热电联产系统的最优运行策略归结为5种运行策略,每种运行策略的设备出力可基于负荷平衡直接得到。提出了一种冷热电联产系统的时序仿真算法,该算法无需求解最优运行模型,实现了基于优化运行策略的仿真,具有明显的速度优势。基于实际系统的计算结果验证了所提算法的有效性。

关键词:冷热电联产;最优运行策略;时序仿真;吸收式制冷;电动制冷

中图分类号: TM 743

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.022

0 引言

冷热电联产 CCHP (Combined Cooling, Heating and Power) 系统是终端供能系统的关键组成部分,快速且准确的 CCHP 系统仿真是 CCHP 系统规划的基础算法,对 CCHP 系统的规划具有重要意义^[1-2]。

CCHP 系统的仿真方法之一是将热电联产系统的运行策略设定为以热定产 FTL (Following the Thermal Load) 策略、以电定产 FEL (Following the Electric Load) 策略或者混合运行 HET (Hybrid Electric-Thermal load) 策略,基于时序负荷估计 CCHP 系统的年度运行成本和燃料消耗量^[3-4]。CCHP 系统的仿真采用吸收式制冷满足冷负荷需求,电动制冷仅在吸收式制冷机组不能满足冷负荷需求时提供服务^[5],面对等价热、电负荷,按照 FTL、FEL 或者 HET 策略进行仿真。另外还有研究给出了新的运行策略,并通过仿真验证了其性能^[6-7]。

CCHP 系统的另一类仿真方法是基于多场景的日优化运行模型求解。文献[8-9]基于典型日线性混合整数规划运行模型,通过求解优化模型获得 CCHP 系统的日运行估计,将多个典型日的运行结果进行加权求和以获得全年的运行估计。CCHP 系统基于优化目标运行是目前的发展趋势,大量文献讨论了 CCHP 系统的短期运行调度方法^[10-14],CCHP 系统的年度仿真应体现其优化运行的特点。

基于 FTL、FEL 和 HET 运行策略的年度仿真无需进行优化求解,计算速度快,但没有体现优化运行的特点。基于典型日优化运行模型的仿真,其求解优化模型比较费时,只能选择典型场景组合方式完成全年运行成本估计,且尚无好的方法选择场景以保证整体估计的精度。

本文基于文献[15]的分析方法,对 CCHP 系统的运行策略进行了分析,提出了一种 CCHP 系统的仿真算法,该算法拥有较高的计算效率,能体现优化

运行的特点,为基于时序负荷的年度仿真提供了一种新的工具。

1 具有2种制冷方式的 CCHP 系统运行策略

CCHP 系统的结构图如图 1 所示。CCHP 系统的发电机组发电,热回收装置回收发电余热以供热,吸收式制冷机组和电动制冷机组满足制冷需求。若发电不足,则通过购电供给;若发电大于需求,则可售电给电网;若发电余热回收量不足,则由锅炉供应;若发电余热回收量大于需求,则可弃热。

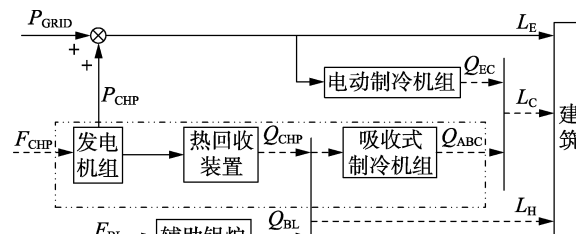


图1 CCHP系统的结构图

Fig.1 Structure diagram of CCHP system

图2为 CCHP 系统的运行策略示意图。其中 $Q-E$ 曲线是热电联产的关系曲线,由如下方程确定:

$$P_{CHP}(t) = F_{CHP}(t) \eta_{CHP,E} \quad (1)$$

$$Q_{CHP}(t) = F_{CHP}(t) (1 - \eta_{CHP,E}) \eta_{CHP,H} \quad (2)$$

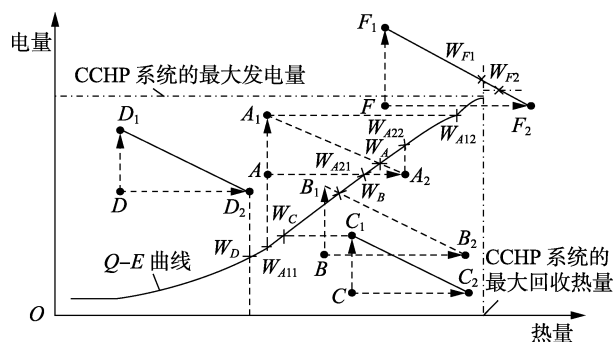


图2 CCHP系统的运行策略

Fig.2 Operation strategy of CCHP system

$$f = P_{\text{CHP}}(t) / P_{\text{CHP,MAX}} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{CHP,E}} = a + bf + cf^2 \quad (4)$$

其中, $P_{\text{CHP}}(t)$ 为发电机组在 t 时刻生产的电能, 单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$; $Q_{\text{CHP}}(t)$ 为热回收装置在 t 时刻回收的热量, 单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$; $F_{\text{CHP}}(t)$ 为 CCHP 系统 t 时刻的天然气消耗量, 单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$; $\eta_{\text{CHP,H}}$ 为 CCHP 系统的热回收效率; $\eta_{\text{CHP,E}}$ 为 CCHP 系统的发电效率; $P_{\text{CHP,MAX}}$ 为发电机组的最大发电量, 单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$; a, b, c 为 CCHP 系统的发电系数; f 为发电机组的出力比。

图 1 中 CCHP 系统在 t 时刻的负荷平衡方程为:

$$L_{\text{E}}(t) - P_{\text{CHP}}(t) - P_{\text{GRID}}(t) + Q_{\text{EC}}(t) / \text{COP}_{\text{EC}} = 0 \quad (5)$$

$$L_{\text{H}}(t) + Q_{\text{ABC}}(t) / \text{COP}_{\text{ABC}} - Q_{\text{CHP}}(t) - Q_{\text{BL}}(t) \leq 0 \quad (6)$$

$$L_{\text{C}}(t) - Q_{\text{ABC}}(t) - Q_{\text{EC}}(t) = 0 \quad (7)$$

其中, $L_{\text{E}}(t)$ 为 t 时刻的电负荷需求, 单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$; $P_{\text{GRID}}(t)$ 为 t 时刻从电网购买的电量, 单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$; $L_{\text{H}}(t)$ 为 t 时刻的热负荷需求, 单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$; $Q_{\text{EC}}(t)$ 为 t 时刻电动制冷机组的制冷量, 单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$; COP_{EC} 为电动制冷机组的效能系数; $Q_{\text{ABC}}(t)$ 为 t 时刻吸收式制冷机组的制冷量, 单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$; COP_{ABC} 为吸收式制冷机组的效能系数; $Q_{\text{BL}}(t)$ 为 t 时刻辅助锅炉的输出热能, 单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$; $L_{\text{C}}(t)$ 为 t 时刻的冷负荷需求, 单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

1.1 满足冷负荷的运行策略

由电动制冷机组单独满足冷负荷时, 包含电动制冷电需求的等价电负荷如式 (8) 所示。等价电负荷和热负荷构成满足冷负荷后的等价热电负荷, 如图 2 中的点 A_1 所示, 称为电制冷等价热电负荷。

$$L_{\text{E,E}}(t) = L_{\text{E}}(t) + L_{\text{C}}(t) / \text{COP}_{\text{EC}} \quad (8)$$

其中, $L_{\text{E,E}}(t)$ 为 t 时刻的等价电负荷。

当冷负荷由吸收式制冷机组满足时, 包含制冷所需热能的等价热负荷如式 (9) 所示。电负荷和等价热负荷构成满足冷负荷后的等价热电负荷, 如图 2 中的点 A_2 所示, 称为热制冷等价热电负荷。点 A_1 和 A_2 的连接线对应电动制冷机组和吸收式制冷机组同时工作满足冷负荷后的等价热电负荷。

$$L_{\text{H,E}}(t) = L_{\text{H}}(t) + L_{\text{C}}(t) / \text{COP}_{\text{ABC}} \quad (9)$$

其中, $L_{\text{H,E}}(t)$ 为 t 时刻的等价热负荷。

除了点 W_A , 2 个制冷设备同时工作满足制冷需求的运行策略都不是最优策略 (具体证明见附录 A、B)。满足制冷负荷且可能是最优的策略 (运行成本最小) 包含: 由电动制冷机组单独供冷的点 A_1 , 由吸收式制冷机组单独供冷的点 A_2 , 由吸收式制冷机组和电动制冷机组联合供冷的工作点 W_A 。

1.2 CCHP 系统的运行策略

当等价热电负荷为图 2 中的点 A_1 时, 运行策略包括欠出力策略、FTL 策略、弃热+购电策略、FEL 策

略、弃热+售电策略 5 种。其中, 欠出力策略中发电机组的出力较小, 需锅炉工作和从电网购电同时进行方可保证负荷平衡, 该策略的工作点位于图 2 所示 $Q-E$ 曲线上点 W_{A11} 的左侧; FTL 策略的工作点位于点 W_{A11} ; 弃热+购电策略的工作点位于点 W_{A11} 与点 W_{A12} 之间, 此时因余热回收量大于热需求而选择弃热, 机组发电不够则需要从电网购电; FEL 策略对应的工作点位于点 W_{A12} , 此时机组发电能够满足电需求, 但需要弃热; 弃热+售电策略的工作点位于点 W_{A12} 以上的位置, 此时机组发电多于电需求, 则向电网售电, 余热回收量大于热需求, 则需要弃热。

当等价热电负荷位于 $Q-E$ 曲线的右侧, 例如点 A_2 时, 运行策略包括欠出力策略、FEL 策略、售电+锅炉策略、FTL 策略、弃热+售电策略。其中, 欠出力策略的工作点低于点 W_{A21} , FEL 策略的工作点为点 W_{A21} , 售电+锅炉策略的工作点位于点 W_{A21} 与点 W_{A22} 之间, FTL 策略的工作点为点 W_{A22} , 弃热+售电策略的工作点高于点 W_{A22} 。

如果发电效率近似线性, 则欠出力策略、弃热+购电策略、售电+锅炉策略、弃热+售电策略不满足最优策略的必要条件, 即 KT 条件 (证明见附录 C—F)。可能的最优运行策略是 FEL 策略和 FTL 策略。

设 t 时刻的冷、热、电负荷分别为 $L_{\text{C}}(t)$ 、 $L_{\text{H}}(t)$ 、 $L_{\text{E}}(t)$, 点 W_A 处满足的条件为:

$$\begin{cases} Q_{\text{CHP}}(L_{\text{E,E}}(t)) > L_{\text{H}}(t) \\ Q_{\text{CHP}}(L_{\text{E}}(t)) < L_{\text{H,E}}(t) \end{cases} \quad (10)$$

其中, $Q_{\text{CHP}}(L_{\text{E}}(t))$ 是电负荷为 $L_{\text{E}}(t)$ 时 $Q-E$ 曲线上对应的热量; $Q_{\text{CHP}}(L_{\text{E,E}}(t))$ 是电负荷为 $L_{\text{E,E}}(t)$ 时 $Q-E$ 曲线上对应的热量。

当满足式 (10) 所示条件时, CCHP 系统的最优运行策略需要考虑点 A_1 、 A_2 、 W_A 对应的等价热电负荷的热电运行策略。点 A_1 的热电运行策略包括电制冷以热定产 EC-FTL (Electric Cooling Following the Thermal Load) 策略、电制冷以电定产 EC-FEL (Electric Cooling Following the Electricity Load) 策略。点 A_2 的热电运行策略包括热制冷以电定产策略 TC-FEL (Thermal Cooling Following the Electric Load)、热制冷以热定产策略 TC-FTL (Thermal Cooling Following the Thermal Load)。点 W_A 具有热电联产同时满足 TEWM (Thermal Electric While Meeting) 等价热电负荷的特点, 称为 TEWM 策略。

若满足式 (11) 所示条件, 则等价热电负荷的热电运行策略都在 $Q-E$ 曲线的右边, 如图 2 中的点 C_1 和点 C_2 所示。

$$\begin{cases} Q_{\text{CHP}}(L_{\text{E,E}}(t)) < L_{\text{H}}(t) \\ Q_{\text{CHP}}(L_{\text{E}}(t)) < L_{\text{H,E}}(t) \end{cases} \quad (11)$$

若满足式 (12) 所示条件, 则等价热电负荷的热

电运行策略都在 Q - E 曲线的左边,如图 2 中的点 D_1 和点 D_2 所示。

$$\begin{cases} Q_{\text{CHP}}(L_{\text{E},\text{E}}(t)) > L_{\text{H}}(t) \\ Q_{\text{CHP}}(L_{\text{E}}(t)) > L_{\text{H},\text{E}}(t) \end{cases} \quad (12)$$

上述 2 种情况可能的运行策略均包括 EC-FTL 策略、EC-FEL 策略、TC-FTL 策略、TC-FEL 策略。

2 运行策略的仿真计算

负荷和运行策略已知,则各设备出力可以根据负荷平衡方程式(5)~(7)获得。本节的计算中, $P_{\text{GRID}}(t) > 0$ 表示从电网购电, $P_{\text{GRID}}(t) < 0$ 表示售电。

在 EC-FTL 策略下,电动制冷机组满足制冷需求,在等价负荷上采用 FTL 策略,各台设备的出力为:

$$\begin{cases} Q_{\text{ABC}}(t) = 0, Q_{\text{BL}}(t) = 0, Q_{\text{EC}}(t) = L_{\text{C}}(t) \\ Q_{\text{CHP}}(t) = L_{\text{H}}(t) \xRightarrow{Q-E \text{ 曲线}} P_{\text{CHP}}(t) \\ P_{\text{GRID}}(t) = L_{\text{E}}(t) - P_{\text{CHP}}(t) + L_{\text{C}}(t) / \text{COP}_{\text{EC}} \end{cases} \quad (13)$$

在 EC-FEL 策略下,电动制冷机组满足制冷需求,在等价负荷上采用 FEL 策略,各台设备的出力为:

$$\begin{cases} Q_{\text{ABC}}(t) = 0, P_{\text{GRID}}(t) = 0, Q_{\text{EC}}(t) = L_{\text{C}}(t) \\ P_{\text{CHP}}(t) = L_{\text{E}}(t) + L_{\text{C}}(t) / \text{COP}_{\text{EC}} \xRightarrow{Q-E \text{ 曲线}} Q_{\text{CHP}}(t) \\ Q_{\text{BL}}(t) = L_{\text{H}}(t) - Q_{\text{CHP}}(t) \end{cases} \quad (14)$$

当采用 TC-FTL 策略时,吸收式制冷机组满足冷负荷需求,等价负荷采用 FTL 策略,各台设备的出力为:

$$\begin{cases} Q_{\text{EC}}(t) = 0, Q_{\text{BL}}(t) = 0, Q_{\text{ABC}}(t) = L_{\text{C}}(t) \\ Q_{\text{CHP}}(t) = L_{\text{H}}(t) + L_{\text{C}}(t) / \text{COP}_{\text{EC}} \xRightarrow{Q-E \text{ 曲线}} P_{\text{CHP}}(t) \\ P_{\text{GRID}}(t) = L_{\text{E}}(t) - P_{\text{CHP}}(t) \end{cases} \quad (15)$$

当采用 TC-FEL 策略时,吸收式制冷机组工作,在等价负荷上采用 FEL 策略。设备的出力为:

$$\begin{cases} Q_{\text{EC}}(t) = 0, P_{\text{GRID}}(t) = 0, Q_{\text{ABC}}(t) = L_{\text{C}}(t) \\ P_{\text{CHP}}(t) = L_{\text{E}}(t) \xRightarrow{Q-E \text{ 曲线}} Q_{\text{CHP}}(t) \\ Q_{\text{BL}}(t) = L_{\text{H}}(t) - Q_{\text{CHP}}(t) + L_{\text{C}}(t) / \text{COP}_{\text{EC}} \end{cases} \quad (16)$$

当采用 TEWM 策略时,将 $Q_{\text{BL}}(t) = 0$ 、 $P_{\text{GRID}}(t) = 0$ 代入负荷平衡方程,整理可得:

$$\text{COP}_{\text{EC}}[L_{\text{E}}(t) - P_{\text{CHP}}(t)] + \text{COP}_{\text{ABC}}[L_{\text{H}}(t) - Q_{\text{CHP}}(t)] + L_{\text{C}}(t) = 0 \quad (17)$$

式(17)中唯一的变量为 $P_{\text{CHP}}(t)$, $Q_{\text{CHP}}(t)$ 可根据 $P_{\text{CHP}}(t)$ 在 Q - E 曲线上的对应值确定。通过一维搜索可求解 $P_{\text{CHP}}(t)$ 。求得 $P_{\text{CHP}}(t)$ 后,按式(18)求得电动制冷机组和吸收式制冷机组的制冷量为:

$$\begin{cases} Q_{\text{EC}}(t) = \text{COP}_{\text{EC}}[P_{\text{CHP}}(t) - L_{\text{E}}(t)] \\ Q_{\text{ABC}}(t) = \text{COP}_{\text{ABC}}[Q_{\text{CHP}}(t) - L_{\text{H}}(t)] \end{cases} \quad (18)$$

当负荷超过发电机组的最大出力或者热回收装置供热时,如图 2 中的电制冷等价热电负荷 F_1 和热制冷等价热电负荷 F_2 ,其连线与最大回收热量曲线的交点 W_{F1} 、与最大发电出力线的交点 W_{F2} 是其可能的最优策略。此时发电机组满负荷发电,工作点 W_{F1} 需要从电网购电,工作点 W_{F2} 需要锅炉运行供热。具体的计算可按上述过程完成,此处不再赘述。

3 基于最优策略的仿真

综上所述,CCHP 系统可能的最优策略只有 5 种,且每种策略下设备的出力可快速得到。直接计算每种可能策略的运行成本,选择成本最小者为运行策略,可得到体现最优运行特点的仿真结果。

仿真的具体步骤如下。

a. 获得 8 760 h 的冷、热、电负荷和 CCHP 系统中各台设备的参数值,设置初始时刻 $t = 1$ 。

b. 获得 t 时刻的冷、热、电负荷,判别等价负荷是否大于 CCHP 系统的最大发电量和最大回收热量,若大于,则转步骤 c 做超限处理;否则转步骤 d。

c. 超限处理。计算图 2 中的点 W_{F1} 和 W_{F2} ,确定购电电量和锅炉供热量,比较两者的成本,取较小者为运行策略,转步骤 f。

d. 若不满足式(10)所示条件,则转步骤 e;否则,按照式(17)、(18)确定 TEWM 策略下设备的出力。

e. 按照式(13)~(16)确定 EC-FTL、EC-FEL、TC-FTL、TC-FEL 策略下设备的出力,选择运行成本最小者为实际策略。

f. $t = t + 1$,如果 $t \leq 8 760$,则转步骤 b;否则,仿真停止。

4 算例分析

为了检验本文算法,以文献[15]中的算例为例进行仿真。最大冷负荷为 2 579.6 kW·h,最大热负荷为 2 829.7 kW·h,最大电负荷为 1 000 kW·h。CCHP 系统的设备参数和购电电价、天然气价格如下:发电机组的最大出力为 900 kW,发电效率参数 $a = -0.2$ 、 $b = 0.4$ 、 $c = 0.1$,热回收效率 $\eta_{\text{CHP,H}} = 0.8$;吸收式制冷机组的最大出力为 3 000 kW,能效系数 $\text{COP}_{\text{ABC}} = 0.8$;电动制冷机组的最大出力为 3 000 kW,能效系数 $\text{COP}_{\text{EC}} = 4$;辅助锅炉的最大出力为 1 000 kW,效率 $\eta_{\text{BL}} = 0.8$;天然气低热值为 9.86 (kW·h)/m³,天然气价格为 3.99 元/m³,天然气优惠价格为 2.43 元/m³;低谷时段购电价格为 0.474 元/(kW·h),高峰时段购电价格为 1.032 元/(kW·h)。其中,低谷时段为 22:00 至次日 06:00,高峰时段为 07:00—22:00。

89 h 时冷、热、电负荷分别为 392.283 8 kW·h、

1 104.5 kW·h、867.121 2 kW·h。该负荷和设备参数能满足式(10)所示条件,可能的最优运行策略为 TEWM、EC-FTL、EC-FEL、TC-FEL、TC-FTL 策略。表 1 给出了该负荷条件下采用不同运行策略时各台设备的出力和运行成本,其中运行成本按照售电价格的不同给出了 2 种结果。

由表 1 可看出,EC-FTL 策略需要从电网购电,因电价较高故其运行成本较高;EC-FEL 策略有弃热行为,降低了其整体效率,因此其运行成本在 5 种策略中排第二;TEWM 策略的运行成本较低;在售电价格较高(0.8 元/(kW·h))的情况下,TC-FTL 策略的运行成本(运行成本 1)最小;如果售电价格一般(上网电价为 0.5 元/(kW·h)),则 TEWM 策略的运行成本(运行成本 2)最小。

选择 3 个负荷组合 1—3 分别满足式(10)—(12)所示的条件。在购电电价为高峰时段电价、售电电价为 0.5 元/(kW·h)、正常天然气价格的条件下,基于本文所提算法,3 个负荷组合的最优策略分别为 TEWM、TC-FTL、EC-FEL 策略,并基于原始对偶优化算法对这 3 个负荷组合进行优化,结果见表 2。

由表 2 可看出,2 种算法在发电量、购电量、售电量、锅炉产热量、电动制冷机组和吸收式制冷机组制冷量等特征上是一致的;2 种算法在目标函数的误差较小,最大也只有 0.15%。采用原始对偶算法求解的运行成本比本文所提算法高,原因是本文所提算法直接在最优点上进行计算,而原始对偶算法通过迭代逼近最优点。

表 3 给出了基于本文所提算法与 HET 仿真的全年仿真结果,其中售电电价为 0.5 元/(kW·h)。HET 仿真采用吸收式制冷机组满足制冷需求的方式,当等价值电负荷位于 $Q-E$ 曲线的左侧时,采用 FTL 策略;否则采用 FEL 策略。

表 3 全年仿真结果比较

Table 3 Comparison of annual simulative results

参数	本文算法	HET 仿真
发电机组发电量/(kW·h)	4 511 028.45	3 502 168.31
发电余热回收量/(kW·h)	8 577 306.64	7 088 033.33
售电量/(kW·h)	6 499.81	0
购电量/(kW·h)	1 903 590.73	2 621 061.77
锅炉产热量/(kW·h)	224 416.48	1 787 209.38
弃热量/(kW·h)	1 445 889.44	0
电动制冷机组制冷量/(kW·h)	2 373 290.79	1 233 733.62
吸收式制冷机组制冷量/(kW·h)	3 996 512.89	5 136 070.06
运行成本/元	4 951 297.59	6 015 860.95

由表 3 可知,本文所提算法的运行成本相较于 HET 仿真减少了 17.69%。这是因为本文所提算法中有 TEWM 这类运行成本小的策略,以及可以向电网售电以降低成本等。本文所提算法中 CCHP 系统的发电量和余热回收量相较于 HET 仿真均有所提高,CCHP 系统的整体效率是最高的,其产量的提高意味着运行成本下降。

上述仿真过程基于 MATLAB 软件实现,在 Intel 第四代酷睿 i7-4510U 处理器、8 GB 内存配置的手提电脑上完成一次全年时序仿真的用时为 1.2 s,运行速度足够快。

表 1 各种运行策略的设备出力和运行成本比较

Table 1 Comparison of equipment output and operation cost among operation strategies

运行策略	发电量/ (kW·h)	售电量/ (kW·h)	购电量/ (kW·h)	锅炉产热量/ (kW·h)	弃热量/ (kW·h)	电制冷量/ (kW·h)	热制冷量/ (kW·h)	运行成本 1/ 元	运行成本 2/ 元
TEWM	868.11	0	0	0	0	3.96	388.33	713.75	713.75
EC-FTL	760.23	0	139.77	0	0	131.52	260.77	778.98	778.98
EC-FEL	900.00	0	0	0	227.77	131.52	260.77	739.35	739.35
TC-FEL	867.12	0	0	7.00	0	0	392.28	716.52	716.52
TC-FTL	871.06	3.94	0	0	0	0	392.28	712.92	714.10

表 2 所提仿真算法与原始对偶算法的结果比较

Table 2 Comparison of results between proposed simulation algorithm and primal-dual algorithm

参数	负荷组合 1		负荷组合 2		负荷组合 3	
	本文算法	原始对偶算法	本文算法	原始对偶算法	本文算法	原始对偶算法
发电量/(kW·h)	868.11	868.48	870.75	877.62	635.81	635.87
购电量/(kW·h)	0	0	14.25	7.38	0	0
售电量/(kW·h)	0	0	0	0	0	0
锅炉产热量/(kW·h)	0	0	0	0	10.00	10.01
电制冷量/(kW·h)	3.96	4.15	0	0	150.23	150.24
热制冷量/(kW·h)	388.32	388.63	412.93	418.71	0	0.03
运行成本/元	1 172.00	1 172.54	1 190.18	1 192.01	915.38	915.44

5 结论

本文提出了一种新的 CCHP 系统仿真算法,该算法从 5 种可能的策略中选择 1 种为最优算法。所

提算法中只有 TEWM 策略有一个一维搜索,其他策略均为直接计算,因此具有较好的计算速度。本文所提算法为投资决策提供了基于最优运行策略进行全年时序仿真的仿真工具。未来将扩充该算法进一

步应用于包含储能、可再生能源等设备的 CCHP 系统的研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] WANG J J, JING Y Y, ZHANG C F, et al. Performance comparison of combined cooling heating and power system in different operation modes[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(12): 4621-4631.
- [2] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(29): 4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [3] 周晓倩, 余志文, 艾芊, 等. 含冷热电联供的微网优化调度策略综述[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6): 26-33.
ZHOU Xiaoqian, YU Zhiwen, AI Qian, et al. Review of optimal dispatch strategy of microgrid with CCHP system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 26-33.
- [4] 程林, 张靖, 黄仁乐, 等. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6): 282-287.
CHENG Lin, ZHANG Jing, HUANG Renle, et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 282-287.
- [5] MAGO P J, FUMO N, CHAMRA L M. Performance analysis of CCHP and CHP systems operating following the thermal and electric load[J]. *International Journal of Energy Research*, 2009, 33(9): 852-864.
- [6] LIU M X, SHI Y, FANG F. A new operation strategy for CCHP systems with hybrid chillers[J]. *Applied Energy*, 2012, 95: 164-173.
- [7] ZHENG C Y, WU J Y, ZHAI X Q. A novel operation strategy for CCHP systems based on minimum distance[J]. *Applied Energy*, 2014, 128: 325-335.
- [8] GUO L, LIU W J, CAI J J, et al. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 74: 433-445.
- [9] XU Z B, GUAN X H, JIA Q S, et al. Performance analysis and comparison on energy storage devices for smart building energy management[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(4): 2136-2147.
- [10] RONG A Y, LAHDELMA R. An efficient envelope-based branch and bound algorithm for non-convex combined heat and power production planning[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 183(1): 412-431.
- [11] SASHIREKHA A, PASUPULETI J, MOIN N H, et al. Combined Heat and Power(CHP) economic dispatch solved using Lagrangian relaxation with surrogate subgradient multiplier updates[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, 44(1): 421-430.
- [12] 龙虹毓, 徐瑞林, 何国军, 等. 基于热风电协调调度的系统日调峰能力分析[J]. *电力自动化设备*, 2013, 33(4): 30-34, 54.
LONG Hongyu, XU Ruilin, HE Guojun, et al. Analysis of peak-load regulation capability based on combined dispatch of wind power and thermal power[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(4): 30-34, 54.
- [13] 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.
- [14] 张华一, 文福拴, 张臻, 等. 计及舒适度的家庭能源中心运行优化模型[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(20): 32-39.
ZHANG Huayi, WEN Fushuan, ZHANG Can, et al. Operation optimization model of home energy hubs considering comfort level of customers[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(20): 32-39.
- [15] 吴奎华, 杨中源, 梁荣, 等. 具有两种制冷方式的 CCHP 系统优化运行策略及其判别条件[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(6): 18-24, 80.
WU Kuihua, YANG Zhongyuan, LIANG Rong, et al. Optimal operation strategy and their discriminating conditions for CCHP systems with two cooling ways[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(6): 18-24, 80.

作者简介:



贾善杰

贾善杰(1970—),男,安徽萧县人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统及其自动化;

梁荣(1987—),男,山东泰安人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统及其自动化;

邹斌(1965—),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力市场和电力规划(E-mail: ZouBin@shu.edu.cn)。

Sequence simulation algorithm of CCHP system with two cooling modes

JIA Shan-jie¹, AN Yong¹, LIANG Rong¹, FENG Liang¹, FU Chunmei², ZHENG Zhijie¹, ZOU Bin³

(1. Electric Power Economic and Technology Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company,

Jinan 250021, China; 2. State Grid Jinan Power Supply Company, Jinan 250021, China;

3. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Based on the analysis of optimal operation strategy, the optimal operation strategies of the CCHP (Combined Cooling, Heating and Power) system with two cooling modes are generally attributed to five operation strategies, and the equipment output of each operation strategy can be obtained directly based on load balance. A sequence simulation algorithm for CCHP system is proposed, which can realize the simulations based on the optimal operation strategies without solving the optimal operation model and has the obvious speed advantage. The calculative results of an actual system verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: CCHP; optimal operation strategy; sequence simulation; absorption cooling; electric cooling

附录 A: KT 条件。

考虑购电的最优运行模型见文献[15]，其运行成本按照如下公式计算得到：

$$\min[\rho_{\text{CHP}} F_{\text{CHP}}(t) + \rho_{\text{BL}} F_{\text{BL}}(t) + \rho_{\text{GRID}} P_{\text{GRID}}(t)] \quad (\text{A1})$$

其中， ρ_{CHP} 、 ρ_{BL} 为天然气的价格，单位为元/(kW h)。

对模型的 Lagrange 函数 L 求导，其 KT 条件要求：

$$\frac{\partial L}{\partial P_{\text{CHP}}} = \rho_{\text{CHP}} \frac{\partial F_{\text{CHP}}(t)}{\partial P_{\text{CHP}}} - \lambda_{\text{E}} - \lambda_{\text{H}} \left(\frac{\partial Q_{\text{CHP}}(t)}{\partial P_{\text{CHP}}} \right) + \mu_{\text{CHP}}^+ - \mu_{\text{CHP}}^- = 0 \quad (\text{A2})$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{\text{BL}}} = \rho_{\text{BL}} \frac{1}{\eta_{\text{BL}}} - \lambda_{\text{H}} + \mu_{\text{BL}}^+ - \mu_{\text{BL}}^- = 0 \quad (\text{A3})$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{\text{GRID}}(t)} = \rho_{\text{GRID}} - \lambda_{\text{E}} + \mu_{\text{GRID}}^+ - \mu_{\text{GRID}}^- = 0 \quad (\text{A4})$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{\text{ABC}}(t)} = -\lambda_{\text{C}} + \lambda_{\text{H}} \frac{1}{\text{COP}_{\text{ABC}}} + \mu_{\text{ABC}}^+ - \mu_{\text{ABC}}^- = 0 \quad (\text{A5})$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{\text{EC}}(t)} = \lambda_{\text{E}} \frac{1}{\text{COP}_{\text{EC}}} - \lambda_{\text{C}} + \mu_{\text{EC}}^+ - \mu_{\text{EC}}^- = 0 \quad (\text{A6})$$

其中， L 为最优运行模型的 Lagrange 函数，具体表达式见文献[15]； μ^+ 、 μ^- 分别为运行模型中决策变量的上限和下限约束所对应的 KT 乘子；下标 CHP、GRID、ABC、EC 分别表示热电联产发电机组、购/售电量、吸收式制冷机和电动制冷机； λ_{E} 、 λ_{H} 、 λ_{C} 分别为电、热、冷负荷平衡对应的 KT 乘子。

在向电网售电的情况下，系统将不需要从电网购电，用售电量替代购电量，则其成本函数为：

$$\min[\rho_{\text{CHP}} F_{\text{CHP}}(t) + \rho_{\text{BL}} F_{\text{BL}}(t) - \rho_{\text{GRID}}^{\text{S}} P_{\text{GRID}}(t)] \quad (\text{A7})$$

同时，向电网售电情况下的 KT 条件为：式 (A3)、(A5)、(A6)，将式 (A4) 改为式 (A8)。

$$\frac{\partial L}{\partial P_{\text{GRID}}^{\text{S}}(t)} = -\rho_{\text{GRID}}^{\text{S}} + \lambda_{\text{E}} + \mu_{\text{GRID}}^+ - \mu_{\text{GRID}}^- = 0 \quad (\text{A8})$$

其中， $P_{\text{GRID}}^{\text{S}}(t)$ 为售电量； $\rho_{\text{GRID}}^{\text{S}}$ 为售电电价。

附录 B: 2 种制冷装置同时满足冷负荷，且有锅炉供热、从电网购电或者向电网售电的情况则一定不满足 KKT 条件。

2 种制冷装置同时处于最大最小出力之间，有 $\mu_{\text{EC}}^+ = \mu_{\text{EC}}^- = \mu_{\text{ABC}}^+ = \mu_{\text{ABC}}^- = 0$ ，无论是从电网购电还是向电网售电都要求式 (A5)、(A6) 成立，将 KT 乘子代入有： $\lambda_{\text{E}} = \lambda_{\text{H}} (\text{COP}_{\text{EC}} / \text{COP}_{\text{ABC}})$ 。如果锅炉工作于最大最小出力之间，则 $\mu_{\text{BL}}^+ = \mu_{\text{BL}}^- = 0$ ，将其代入式 (A3) 得 $\lambda_{\text{H}} = \rho_{\text{BL}} / \eta_{\text{BL}}$ ；如果从电网的购电量在最大、最小约束之间，则 $\mu_{\text{GRID}}^+ = \mu_{\text{GRID}}^- = 0$ ，将其代入式 (A4) 得 $\lambda_{\text{E}} = \rho_{\text{GRID}}$ ；如果向电网的售电量在最大、最小约束之间， $\mu_{\text{GRID}}^+ = \mu_{\text{GRID}}^- = 0$ ，将其代入式 (A8) 得 $\lambda_{\text{E}} = \rho_{\text{GRID}}^{\text{S}}$ 。上述 3 种情况下 λ_{E} 、 λ_{H} 为确定值，如果发电机组的发电效率近似为线性，则 $\partial F_{\text{CHP}} / \partial P_{\text{CHP}}$ 和 $\partial Q_{\text{CHP}} / \partial P_{\text{CHP}}$ 是常数，式 (A2) 无解。

附录 C: 欠出力策略不满足 KT 条件。

此时，发电机组、锅炉、从电网的购电量均处于其最大、最小约束之间，则有 $\mu_{\text{CHP}}^+ = \mu_{\text{CHP}}^- = \mu_{\text{BL}}^+ = \mu_{\text{BL}}^- = \mu_{\text{GRID}}^+ = \mu_{\text{GRID}}^- = 0$ 。将其代入式 (A3) — (A6) 得 $\lambda_{\text{E}} = \rho_{\text{GRID}}$ 、 $\lambda_{\text{H}} = \rho_{\text{BL}} / \eta_{\text{BL}}$ 。如果发电机组的发电效率近似为线性，则 $\partial F_{\text{CHP}} / \partial P_{\text{CHP}}$ 和 $\partial Q_{\text{CHP}} / \partial P_{\text{CHP}}$ 是常数，这意味着式 (A2) 无解。

附录 D: 售电+弃热策略在近似线性发电效率下不满足 KT 条件。

此时，向电网的售电量在最大、最小约束之间，则 $\mu_{\text{GRID}}^+ = \mu_{\text{GRID}}^- = 0$ ，将其代入式 (A8) 得 $\lambda_{\text{E}} = \rho_{\text{GRID}}^{\text{S}}$ 。由于弃热所以 $\lambda_{\text{H}} = 0$ ，同时发电机组的出力处于最大最小约束之间，则 $\mu_{\text{CHP}}^+ = \mu_{\text{CHP}}^- = 0$ ，如果发电机组的发电效率近似为线性，则 $\partial F_{\text{CHP}} / \partial P_{\text{CHP}}$ 和 $\partial Q_{\text{CHP}} / \partial P_{\text{CHP}}$ 是常数，这意味着式 (A2) 无解。

附录 E：当热电负荷在 $Q-E$ 曲线的左边时，弃热+购电运行策略不满足 KT 条件。

此时，发电机组、从电网的购电量均处于最大、最小约束之间，有 $\mu_{\text{CHP}}^+ = \mu_{\text{CHP}}^- = \mu_{\text{GRID}}^+ = \mu_{\text{GRID}}^- = 0$ 。将上述 KT 乘子代入式 (A4) 得 $\lambda_E = \rho_{\text{GRID}}$ 。由于弃热所以 $\lambda_H = 0$ 。如果发电机组的发电效率近似为线性，则 $\partial F_{\text{CHP}} / \partial P_{\text{CHP}}$ 和 $\partial Q_{\text{CHP}} / \partial P_{\text{CHP}}$ 是常数，这意味着式 (A2) 无解。

附录 F：当热电负荷位于 $Q-E$ 曲线的右边时，售电+锅炉策略不满足 KT 条件。

此时，锅炉、向电网的售电量均处于最大、最小约束之间，有 $\mu_{\text{BL}}^+ = \mu_{\text{BL}}^- = \mu_{\text{GRID}}^+ = \mu_{\text{GRID}}^- = 0$ 。将其代入式 (A3)、(A8) 得 $\lambda_E = \rho^S$ 、 $\lambda_H = \rho_{\text{BL}} / \eta_{\text{BL}}$ 。如果发电机组的发电效率近似为线性，则 $\partial F_{\text{CHP}} / \partial P_{\text{CHP}}$ 和 $\partial Q_{\text{CHP}} / \partial P_{\text{CHP}}$ 是常数，这意味着式 (A2) 无解。