

文章编号:1008-1542(2020)02-0191-10

不同运行策略下的分布式系统多目标分析

王子驰¹, 雷炳银¹, 康利改², 张靖³, 贾娜¹, 孙炜哲¹

(1. 平高集团有限公司技术中心, 河南平顶山 467001; 2. 河北科技大学建筑工程学院, 河北石家庄 050018; 3. 清华大学能源互联网创新研究院, 北京市 100084)

摘要:为寻求能源供给系统在经济-安全-环保-节能的协调, 依托“互联网+”思维, 构建了一套分布式冷电联供系统, 主要包括动力子系统、地源热泵子系统、蓄能子系统。建立了在偏离设计工况时不同设备的性能模型, 在此基础上, 以运行费用、CO₂ 排放和一次能源消耗为目标函数, 分析了电负荷跟踪运行策略、热负荷跟踪运行策略、混合跟踪运行策略和动力设备(PGU)最大效率跟踪运行策略下系统中各设备的运行时间、运行状态及系统总性能的变化。结果表明, 与传统电网购电的分供系统相比, 分布式系统的经济性、环境性较好, 一次能源消耗较低。热负荷跟踪策略的经济性和环境友好性最优, 运行费用和 CO₂ 排放分别降低了 32.7% 和 45.3%; 最大效率跟踪策略经济性最差, 但由于 PGU 机组连续运行, 其一次能源消耗降低最多, 为 86.7%。不同运行策略结果可为分布式系统的运行提供一定的理论参考。

关键词:石油、天然气能; CCHP; 地源热泵; 运行策略; 系统性能

中图分类号:TK01⁺8 文献标识码:A doi:10.7535/hbkd.2020yx02009

Multi-objective analysis of distributed energy system under different operation strategies

WANG Zichi¹, LEI Bingyin¹, KANG Ligai², ZHANG Jing³, JIA Na¹, SUN Weizhe¹

(1. Technique Center, Pingao Group Company Limited, Pingdingshan, Henan 467001, China; 2. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 3. Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to seek the coordination of energy supply system in economy, security, environmental protection and energy conservation, relying on the "Internet plus", a distributed cooling, heating and power system integrated with power generation unit (PGU), ground source heat pump and energy storage system was constructed. The models about off-design condition of each device were illustrated. On this basis, four operation strategies were put forward: following electric load, following

收稿日期:2019-11-25;修回日期:2020-01-20;责任编辑:冯民

基金项目:河北省自然科学基金(E2019208191);石家庄市科学技术研究与发展计划项目(205790085A,191060255);平高集团科技项目(PGKJ2019-048)

第一作者简介:王子驰(1973—),男,北京人,硕士研究生,主要从事能源系统方案设计、协调组织方面的研究。

通讯作者:康利改博士。E-mail:ligaikang@hebust.edu.cn

王子驰,雷炳银,康利改,等.不同运行策略下的分布式系统多目标分析[J].河北科技大学学报,2020,41(2):191-200.

WANG Zichi, LEI Bingyin, KANG Ligai, et al. Multi-objective analysis of distributed energy system under different operation strategies [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2020, 41(2): 191-200.

thermal load, following hybrid load and following max efficiency of PGU. Then operation cost, carbon dioxide emission and primary energy were employed as objectives to analyze the operating time, output and performances of the proposed system under off-design condition. The results show that the proposed system has better economy, lower emissions and lower primary energy consumption than the conventional separate system. Under FTL strategy, the operation cost and carbon dioxide emission are the lowest, which are reduced by 32.7% and 45.3%, respectively. Because of the continuous operating, the reduction of primary energy is the most, which is 86.7%. The results can provide some theoretical references for the operation of distributed system.

Keywords: oil and natural gas; CCHP; ground source heat pump; operation strategy; system performance

传统分供系统所依赖的化石燃料燃烧引起的环境问题日益严重。在《联合国气候变化框架公约》第21次缔约方大会上,中国计划到2030年,温室气体排放单位国内生产总值减少到2005年温室气体排放单位国内生产总值的35%~40%,2030年左右CO₂排放达峰并争取提前达峰,一次能源消费比重中非化石能源达到20%左右^[1]。依托“互联网+”思维,能源互联网不断寻求系统在经济-安全-环保-节能的协调,分布式冷热电联供系统(CCHP系统)在其智能生态调控与综合优化方面的优势受到了广泛关注^[2-4]。

目前,CCHP系统在不同功能类型建筑中,如住宅^[5-6],包括商场、宾馆和医院等在内的商建^[7-10]和办公建筑^[11-14],得到了广泛应用。实际运行中,受气象条件及室内热扰的影响,建筑的冷热电负荷需求不断发生变化,导致系统运行时偏离设计工况。因此,进行系统规划设计及调控时,需要在多个影响因素如系统配置^[15-25]、设备容量优化、预测技术以及运行策略^[26-27]等之间进行权衡。

运行策略对系统的经济、能耗和环境等性能的影响至关重要。电负荷跟踪(FEL)和热负荷跟踪(FTL)运行策略是最常用的两种运行策略。FEL运行策略指任一时刻,PGU机组运行负荷根据建筑电负荷确定。FTL运行策略指PGU运行状态按满足建筑热负荷需求确定。MAGO等^[28-29]、WANG等^[30-31]基于两种常规运行策略,考虑不同气候特点和建筑类型分析了系统经济、节能和环保性能及综合性能。在此基础上,MAGO等^[32]、SMITH等^[33]提出了一种新的运行策略——混合跟踪策略(FHL),以不产生多余的回收热或多余的电为目标,根据系统热电比和建筑负荷热电比,系统运行策略在FEL和FTL之间切换。ZHENG等^[34]在系统供能热电比曲线上获取距离热电需求点最近的状态点,发现此策略运行的灵活性和适用性优于FEL,FTL和FHL运行策略。WANG等^[3]在FEL基础上提出了一种改进的运行策略,在此策略下,依据日均电力需求确定PGU的输出。除针对运行策略研究以外,政策激励一直是分布式系统的研究热点,直接影响能源系统的运行与设计。相关激励政策目前主要有分时电价和碳排放交易^[16-17,35-36]等。

紧扣“互联网+智慧能源”发展形势,本文在典型的分布式系统中,使用地源热泵系统作为辅助装置,综合考虑峰平谷电价、反向卖电和碳税惩罚,以天津市某生态城办公建筑分布式系统为研究对象,将运行费用节约率、CO₂减排率和一次能源消耗节约率三者综合为目标函数,分析了夏季某典型日工况下系统供冷、供电结果及性能的变化。

1 系统设计

1.1 模型构建

构建的分布式供能系统如图1所示。除PGU机组、热回收装置、溴化锂制冷机组、蓄能水箱外,加入地源热泵机组辅助,为末端用户提供冷、热、电负荷。其基本原理为天然气驱动PGU机组发电,同时,烟气余热被热回收装置回收用于驱动溴化锂制冷机组制冷。当建筑所需电负荷小于PGU机组发电量时,多余的发电量反向卖给电网;反之,电网补充不足的电负荷。当回收的热量大于溴化锂制冷机组所需热量时,若此时蓄能水箱未蓄满,则蓄能直至蓄满;反之,蓄能水箱补充部分热量驱动溴化锂制冷机组。当溴化锂制冷机组供冷量小于用户冷负荷时,不足冷量由地源热泵机组辅助提供。

1.2 运行策略

1.2.1 电负荷跟踪(FEL)运行策略

以电负荷为横坐标、热负荷为纵坐标,图2给出了FEL运行策略下的3种情景。图2中,黑色粗曲线表示系统在供能时的热电比匹配曲线, E_{\min} , E_{\max} , Q_{\min} 和 Q_{\max} 分别表示系统在最低运行负荷率下的发电量、额定发电量、最低负荷率对应的热回收量、额定热回收量。

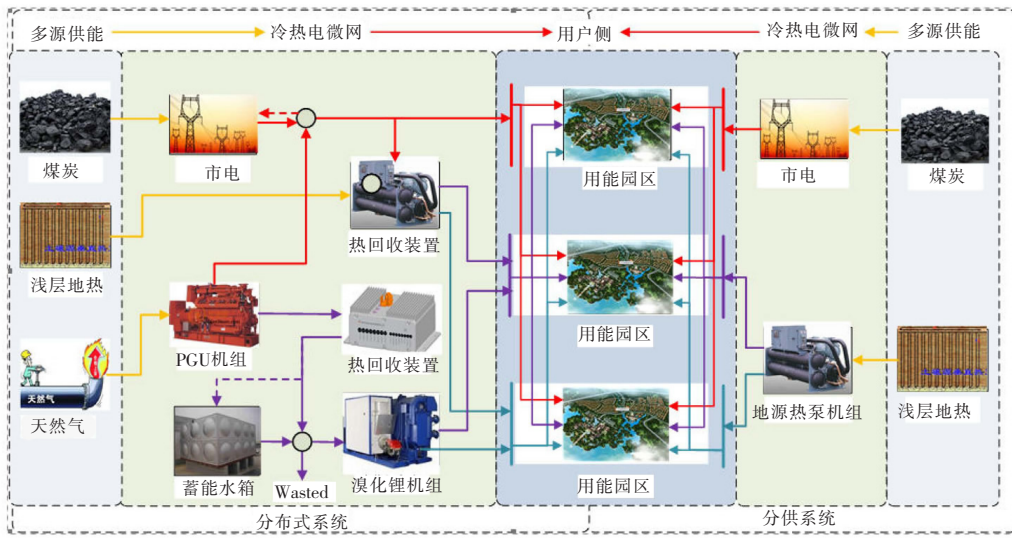


图 1 分布式系统与分供系统供能系统图

Fig.1 Schematic diagram of distributed system and separate system

情景 1: $E_{req} < E_{min}$, 其中, E_{req} 表示建筑用户所需电负荷。此情景下, 由于建筑用户所需电负荷小于 PGU 机组最低负荷率对应的发电量, PGU 机组不工作, 电网为建筑用户提供所需电负荷。热量先由蓄能水箱蓄存热量驱动溴化锂制冷机组提供, 若仍不足, 再由地源热泵(GSHP)机组辅助提供。

情景 2: $E_{min} \leq E_{req} \leq E_{max}$, 此时, PGU 运行状态根据建筑电负荷大小调控, 使 $E_{PGU} = E_{req}$, 即图 2 所示的 A, B, C 点分别以 A', B', C' 运行。当回收的热量较大且大于溴化锂制冷机组所需热量时(如 B 点), 蓄能水箱蓄能; 反之, 热量先由蓄能水箱蓄存热量驱动溴化锂制冷机组提供, 若仍然不能满足要求, 剩余部分再由地源热泵辅助提供。

情景 3: $E_{req} > E_{max}$, 此时, 建筑用户电需求大于 PGU 机组发电量, PGU 机组以额定负荷运行, 差额部分由电网补充。同情景 2, 若回收的热量大于溴化锂制冷机组所需热量时(如 D 点), 蓄能水箱蓄能; 反之, 蓄能水箱释能驱动溴化锂制冷机组, 如仍然不能满足要求, 启动地源热泵辅助提供剩余冷量。

1.2.2 热负荷跟踪(FTL)运行策略

图 3 给出了 FTL 下的 3 种情景。

情景 1: $E_{req} < E_{min}$ 或 $Q_{req} < Q_{min}$, 其中, Q_{req} 表示对应建筑冷负荷下溴化锂制冷机组所需热量。此时, PGU 机组停机, 溴化锂制冷机组亦不运行。此情景下, 建筑用户所需电负荷全部来自电网, 冷负荷优先考虑由蓄能水箱驱动溴化锂制冷机组制冷提供, 若仍不足, 开启地源热泵机组辅助提供。

情景 2: $E_{req} \geq E_{min}$ 且 $Q_{min} \leq Q_{req} \leq Q_{max}$ 。此情景下, 根据建筑冷负荷大小调控 PGU 机组运行的负荷率, 使 $Q_{PGU} = Q_{req}$, 即图 3 所示的 A, B, C 点分别以 A', B', C' 运行。此时, 当 PGU 机组的发电量小于建筑用户所需电负荷时(如 B 点、C 点), 电网补充不足部分; 反之, 多余部分卖给电网。

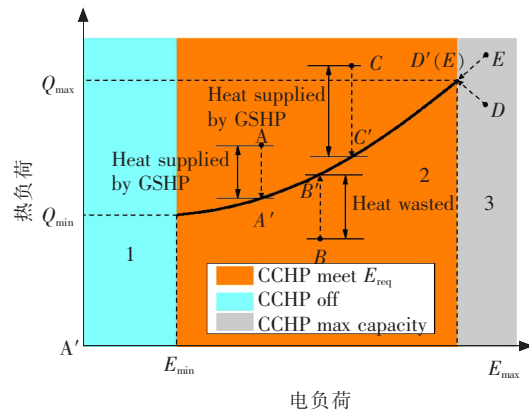


图 2 电负荷跟踪运行策略原理图

Fig.2 Schematic diagram of following electric load

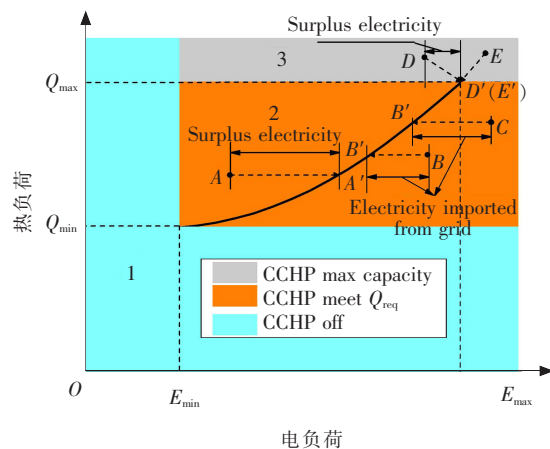


图 3 热负荷跟踪运行策略原理图

Fig.3 Schematic diagram of following thermal load

情景 3: $Q_{req} > Q_{max}$, 此时, PGU 机组以额定负荷运行, 不足电负荷(如 E 点)由电网满足, 若发电量有剩余(如 D 点), 反向卖给电网。无论 D 点或 E 点, 以 E' 运行时, 回收热量驱动溴化锂制冷机组制冷量不能满足要求, 若蓄能水箱有蓄能, 优先释能与回收热量一起驱动溴化锂制冷机组, 若冷负荷仍不能被满足, 则开启地源热泵机组, 辅助提供冷量。

1.2.3 混合跟踪(FHL)运行策略

图 4 给出了 FHL 下的 5 种情景。

情景 1: $E_{req} < E_{min}$, 此时, PGU 机组不运行, 电网提供全部的用电负荷。冷负荷优先考虑由蓄能水箱驱动溴化锂制冷机组提供, 若仍不足时, 启动地源热泵机组辅助提供。

情景 2: $E_{req} \geq E_{min}$ 且 $Q_{req} < Q_{min}$ 。此情景下, PGU 机组以最小负荷运行, 即系统以图 4 所示 A' 运行, 此时, $E_{PGU} = E_{min}$, $Q_{PGU} = Q_{min}$ 。不难发现, PGU 机组的发电量小于建筑用户所需电负荷, 回收热量大于所需热负荷。因此, 电网补充不足电量, 多余热量蓄存至蓄能水箱中。

情景 3: $Q_{min} < Q_{req} \leq Q_{opt}$ 且 $E_{req} \geq E_{min}$ 或 $Q_{req} \leq Q_{max}$ 且 $E_{req} \geq E_{min}$ 。其中, Q_{opt} 表示系统在某发电量下对应的热回收量。由于 FHL 下不允许产生多余的电量或热量, 此情景下, 若按照 FEL 运行, 则回收的热量多于所需热负荷, 有多余的热量浪费。因此, 此种情景采用 FTL 策略运行, 即图 4 所示 B 点和 C 点分别以 B' 和 C' 运行, 不足电量由电网补充。

情景 4: $Q_{req} > Q_{opt}$ 且 $E_{min} < E_{req} < E_{max}$ 。此情景下, 若以 FTL 运行, PGU 机组的发电量大于建筑电负荷, 有多余的电量浪费。因此, 此种情景采用 FEL 策略运行, 即图 4 所示 D 点和 E 点分别以 D' 和 E' 运行。不足冷负荷优先由蓄能水箱驱动溴化锂制冷机组提供, 若仍不足, 启动地源热泵机组辅助供能。

情景 5: $E_{req} > E_{max}$ 且 $Q_{req} > Q_{max}$ 。此情景下, PGU 机组运行工况为额定工况, 即 F' 点。此时, 电负荷、冷负荷均不能满足要求, 则电网补充电负荷不足部分。若蓄能水箱有蓄能, 蓄热量与回收热量一起驱动溴化锂制冷机组供冷; 若冷负荷仍不能被满足, 则开启地源热泵机组供能。

1.2.4 最大效率跟踪(Max-eff)运行策略

Max-eff 策略下, 不论建筑用户所需负荷的大小, PGU 机组均以最大电效率工况运行。若发电量小于建筑用户电负荷, 电网补充不足部分; 反之多余电量卖给电网。若回收的热量小于溴化锂制冷机组所需热量, 蓄能水箱蓄热量和回收热量共同驱动溴化锂制冷机组, 若仍不能满足要求, 启动地源热泵机组辅助供能; 反之蓄能水箱蓄存多余热量。

1.3 目标函数和约束条件

1.3.1 运行费用(COST)

分布式供能系统运行费用包括消耗天然气所需费用、电量不足导致的电网买电费用、碳税惩罚与发电量过多时的反向卖电收益组成。

$$COST = F_{PGU} \times C_f + \max\{E_{grid}, 0\} \times C_e + M_{CO_2} \times C_c + \min\{E_{grid}, 0\} \times \Delta C, \quad (1)$$

式中: F_{PGU} 为天然气耗量; E_{grid} 为从电网买电量(若值为正)或反向卖电量(若值为负); C_f, C_e, C_c 分别为天然气价格、电价和碳税惩罚价格; ΔC 为从电网购电价格与反向卖电电价差; M_{CO_2} 为 CO_2 排放量。

1.3.2 CO_2 排放量(CDE)

分布式供能系统的 CO_2 排放量包括系统燃烧天然气、对应买电量下电厂发电排放的 CO_2 及有反向卖电时分布式系统较传统发电所抵消的部分 CO_2 排放。

$$CDE = F_{PGU} \times \mu_f + \max\{E_{grid}, 0\} \times \mu_e + \min\{E_{grid}, 0\} \times \Delta\mu, \quad (2)$$

式中: μ_f, μ_e 分别为天然气、电网电的 CO_2 排放转换系数; $\Delta\mu$ 为分布式系统度电 CO_2 排放量与电网电度电 CO_2 排放量之差。

1.3.3 一次能源消耗(PEC)

分布式供能系统的一次能源消耗包括消耗的天然气与从电网买电量对应一次能源消耗及当有反向卖电

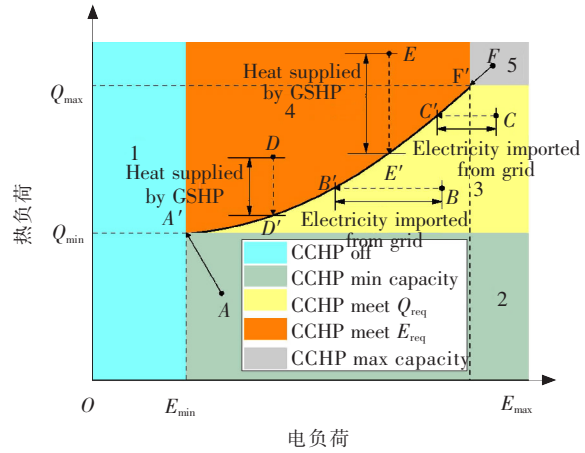


图 4 混合跟踪模式原理图

Fig.4 Schematic diagram of following hybrid load

时分布式系统较传统发电抵消的部分一次能源消耗。

$$PEC = F_{PGU} \times k_f + \max\{E_{grid}, 0\} \times k_e + \min\{E_{grid}, 0\} \times \Delta k, \quad (3)$$

式中: k_f, k_e 分别为所耗天然气、电网购电折算为一次能源的转换系数; Δk 为分布式系统度电一次能源消耗与电网度电一次能源消耗之差。

1.3.4 约束条件

约束条件分两部分。一为等式约束,为分布式供能系统供能和建筑用户用能的供需平衡约束:

$$f(\alpha) = 0; \quad (4)$$

二为不等式约束,为设备最大功率限制约束,即

$$g(\alpha) \leq 0. \quad (5)$$

另外,考虑到负荷率较低时,PGU 机组发电效率衰减很快,一次能源消耗激增,为充分发挥分布式系统节能、高效的优势,规定了设备最低运行功率,因此,其运行还受到设备最低运行负荷率限制的约束,即

$$\begin{cases} r_{PGU} = 0, & 0\% < r_{PGU} < 25\%, \\ r_{PGU} = r_{PGU}, & 25\% \leq r_{PGU} \leq 100\%, \\ r_{PGU} = 1, & r_{PGU} > 100\%, \end{cases} \quad (6)$$

式中 r_{PGU} 为 PGU 机组的负荷率。

2 案例分析

选取天津某生态城办公建筑为研究对象,采用清华大学研制的能耗计算软件 DeST 进行负荷模拟,模拟获得的建筑冷负荷和电负荷如图 5 所示。图 6 给出了天津市当前的阶梯电价。表 1 给出了所选设备额定参数及其他模拟所用参数。图 7 a)给出了所选 PGU 机组的电效率和热效率,图 7 b)给出了地源热泵和溴化锂制冷机组的 COP。

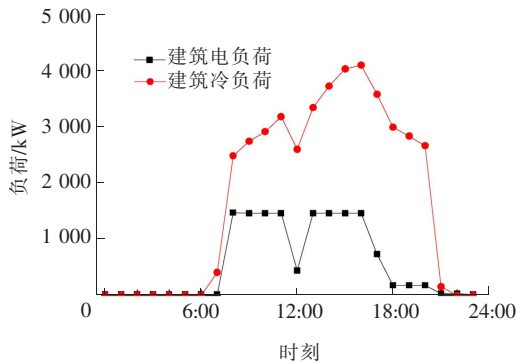


图 5 模拟建筑电负荷及冷负荷

Fig.5 Hourly electric load and cooling load

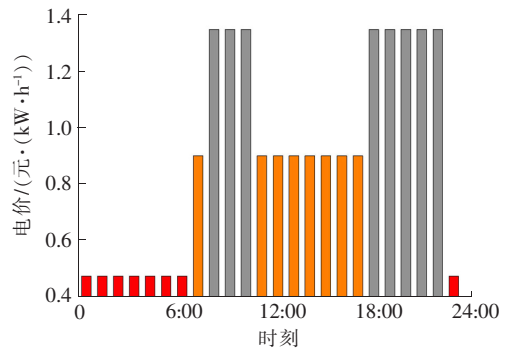


图 6 模拟建筑阶梯电价

Fig.6 Time-of-use electricity price

表 1 系统各设备的技术参数及模拟参数

Tab.1 Technical and simulated parameters of devices in the system

参 数	数 值
PGU 机组额定发电量(E_{PGU})/kW	1 489
PGU 机组额定电效率(η_{PGU_e})	0.43
PGU 机组额定热效率(η_{PGU_h})	0.43
溴化锂制冷机组额定制冷量(Q_{LiBr})/kW	2 200
溴化锂制冷机组额定 COP(COP_{LiBr})	1.5
地源热泵机组额定制冷(制热)量(Q_{gshp})/kW	2 717(制冷)/3 176(制热)
地源热泵机组额定 COP(COP_{gshp})	3.84
天然气的一次能源转换系数(k_f)/(kJ·m ⁻³)	35 159.7
电网电的一次能源转换系数(k_e)/(kJ·(kW·h) ⁻¹)	12 121.2
天然气的 CO ₂ 排放转换系数(μ_f)/(kg·m ⁻³)	7 071.4
电网电的 CO ₂ 排放转换系数(μ_e)/(kW·h)	0.999 1
天然气价格(C_f)/(元·m ⁻³)	3.15
碳税惩罚(C_c)/(元·kg ⁻¹)	0.3

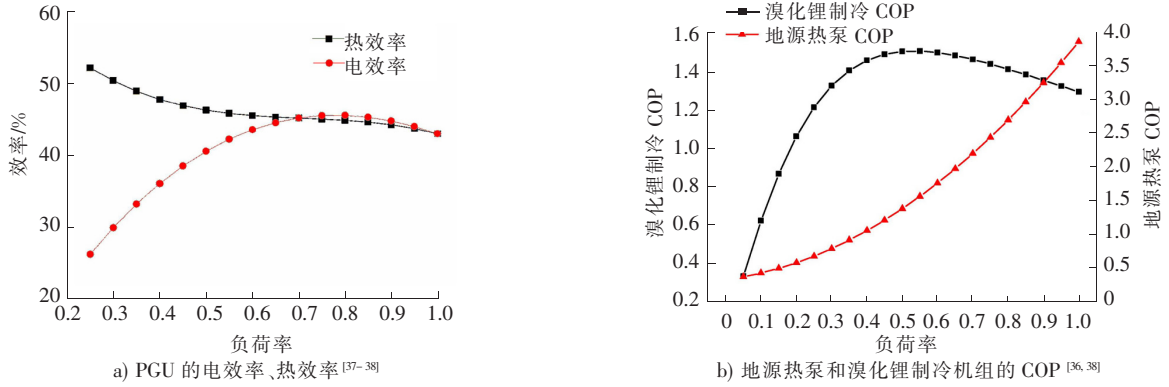


图7 部分负荷下设备的性能曲线

Fig.7 Performance curve of devices on part load ratio

3 结果和讨论

3.1 不同运行策略下的供电结果

图8给出了不同运行策略下的供电结果。从图8中可以看出,23:00—7:00间的夜间时段,建筑用户电负荷很低且小于PGU机组的额定发电量的25%,冷负荷为零。因此,除PGU最大效率运行策略(Max-eff)外,其他运行策略下PGU机组均不工作,建筑电负荷全部由电网满足;Max-eff策略下PGU机组连续运行,且运行负荷远大于建筑用户所需负荷,此时,多余电量反向卖给电网。

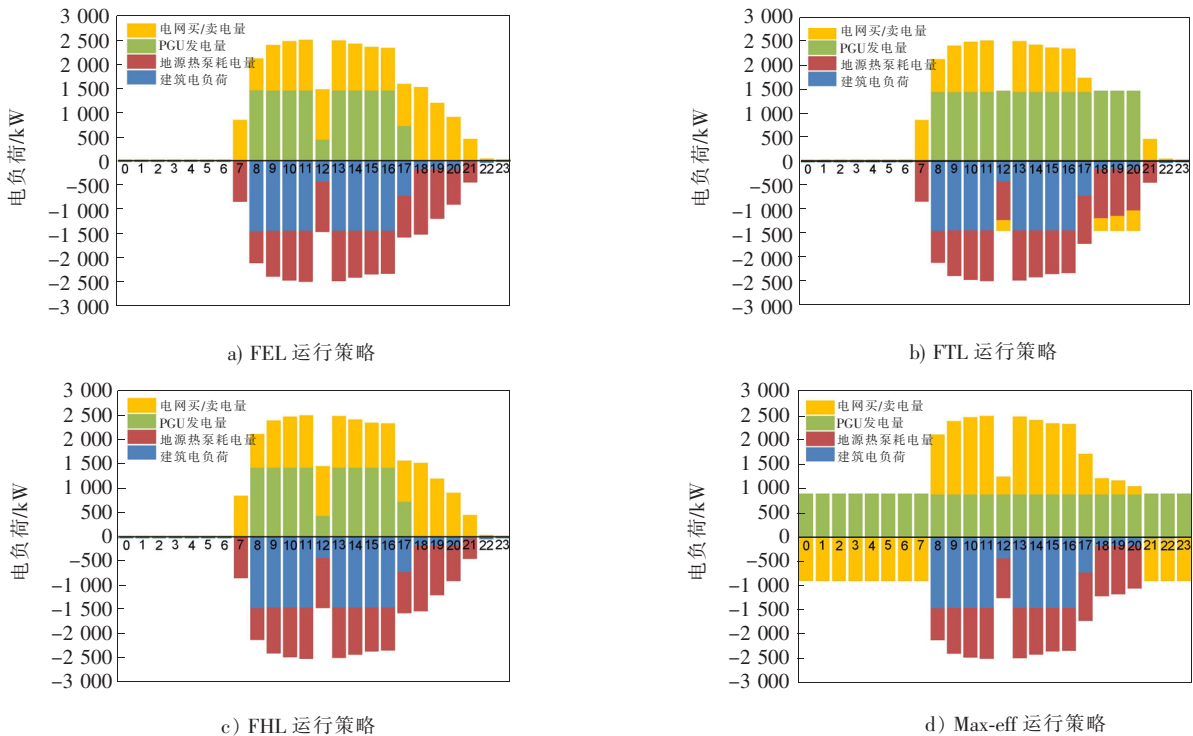


图8 不同运行策略下的供电结果

Fig.8 Hourly optimal power supply results of different operation strategies

7:00—23:00间的白天时段,FEL运行策略下,建筑用户电负荷处于PGU机组最低运行功率与额定负荷之间,所需电负荷全部由PGU机组发电量提供,若溴化锂制冷机组制冷量不满足要求而启动地源热泵时,地源热泵用电全部由电网满足,从电网买电量共计13 506 kW·h,占系统总用电量(包括建筑用户所需电负荷和地源热泵机组等设备用电)的50.1%。若以FTL运行策略运行时,在热电比较大的白天,冷负荷较大,驱动溴化锂制冷机组所需热量较多,PGU机组满负荷运行。此时由于12:00和18:00—20:00时间段建

筑电负荷较小,发电量大于建筑所需电量,多余电量反向卖给电网,电网回购电量共计 1 130.26 kW·h,约占 PGU 机组总发电量的 6%;电负荷、冷负荷其他时间均较高,发电量不能满足要求,由电网补充不足电量。此策略下,从电网买电共计 8 998 kW·h,占总用电量的 33.7%。

若分布式供能系统采用 FHL 策略运行,当末端负荷的电热比较小时,如白天 12:00 和 17:00,为避免产生多余电量,系统以 FEL 策略运行。反之,以 FTL 运行策略运行。18:00—7:00,电负荷低于 PGU 机组最小运行负荷率对应的发电量,PGU 机组不运行。FHL 策略下,系统买电量共计 14 229 kW·h,占系统总用电量的 52.9%,PGU 机组运行时间共计 10 h。若采用 Max-eff 运行策略,PGU 机组不间断运行。此策略下,发电量共计 21 442 kW·h,从电网买电共计 13 782 kW·h,占系统总用电量的 53.8%;反向卖电量共计 9 593.4 kW·h。若考虑用反向卖给电网的电量抵消从电网买入的电量,买电量将减少至 4 188.6 kW·h。4 种运行策略下发电量、用电量及发电占比如表 2 所示。

表 2 不同运行策略下 CCHP 系统的发电量、用电量及发电占比

Tab.2 Daily power supply and its ratio of CCHP system under different operation strategies

运行策略	总发电量/ (kW·h)	总用电量/ (kW·h)	发电占比/ %
FEL	12 849.8	27 133.5	47.4
FTL	18 812.5	26 859.8	70.0
FHL	12 694.1	27 102.7	46.8
Max-eff	24 441.6	25 629.9	83.7

3.2 不同策略运行下的供冷结果

不同策略下溴化锂制冷机组供冷量、地源热泵机组供冷量如图 9 所示。从图 9 可以看出,与供电结果类似,若 PGU 机组运行,建筑用户所需冷负荷优先由溴化锂制冷机组满足,若溴化锂制冷机组制冷量不能满足要求,地源热泵开启以提供剩余部分冷量。以 FEL 策略运行时,溴化锂制冷机组运行了 10 h,提供的冷量共计 2 063.4 kW,占建筑用户所需冷负荷的 49.6%。以 FTL 策略运行时,由于 PGU 机组按满足溴化锂制冷所需驱动热量调节,溴化锂制冷机组较 FEL 策略多运行 3 h,供冷量比 FEL 策略多 7 966 kW,提高了 19.2%。以 FHL 策略运行时,溴化锂制冷机组工作时间与 FEL 相同,供冷量较 FEL 策略稍有降低,为 2 046.1 kW。以 Max-eff 策略运行时,PGU 机组不间断运行,因此,只要建筑用户所需冷负荷不为零,溴化锂制冷机组均工作,供冷量共计 2 916.4 kW,占建筑冷负荷的 70.1%。除溴化锂制冷机组供冷外,若冷负荷仍不能满足要求,开启地源热泵机组辅助供能。

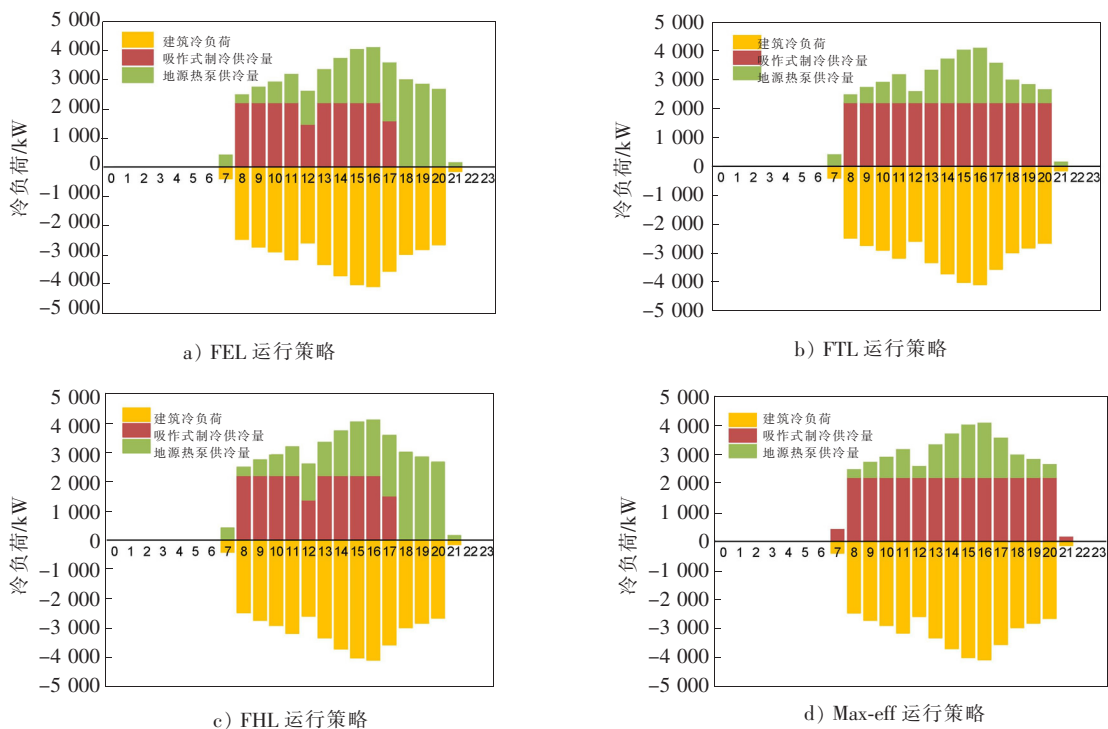


图 9 不同运行策略下的供冷结果

Fig.9 Hourly optimal cooling supply results of different operation strategies

3.3 不同运行策略的性能分析

图 10 a)—c)分别给出了不同运行策略运行时分供系统和分布式供能系统的逐时运行费用、逐时 CO₂ 排放和逐时一次能源消耗,图 10 d)给出了不同运行策略运行时,与分供系统相比运行费用、CO₂ 排放和一次能源消耗降低的比例。从图 10 可以看出,无论采用哪种策略,分布式供能系统的运行费用、CO₂ 排放和一次能源消耗较分供系统均有不同程度的降低,可见采用分布式供能系统后,系统更加经济、节能和环保。

同时,从图 10 a)—c)可以看出,FHL 和 FEL 策略的运行费用、CO₂ 排放和一次能源消耗大致相同。23:00—7:00 间的夜间时段,与其他 3 种策略相比,Max-eff 运行策略经济性较差,但由于设置了反向卖电,CO₂ 排放较低,一次能源消耗较小,甚至为负值。中午 12:00 及晚上 17:00—20:00,建筑所需电负荷少、冷负荷较高时,FTL 运行策略经济性较好、CO₂ 排放量和一次能源消耗最少。其余时间段内,在 FEL,FTL 和 FHL 运行策略下,PGU 机组运行负荷率相差很小,运行费用基本相同,分供系统运行费用最高,Max-eff 策略在运行费用次之;CO₂ 排放和一次能源消耗变化与运行费用变化趋势基本相同。另外,还可以发现,FTL 和 Max-eff 策略在部分时间段内 CO₂ 排放和一次能源消耗值小于零,主要是因为反向卖给电网的电和从电网买的电来源不同,度电排放的 CO₂ 和一次能源消耗不同,反向卖给电网的电排放的 CO₂ 和一次能源消耗均小于从电网买的电排放的 CO₂ 和一次能源消耗,致使当反向卖电量较大时,可抵消一部分 CO₂ 排放与一次能源消耗,因此,其值可能为负值。

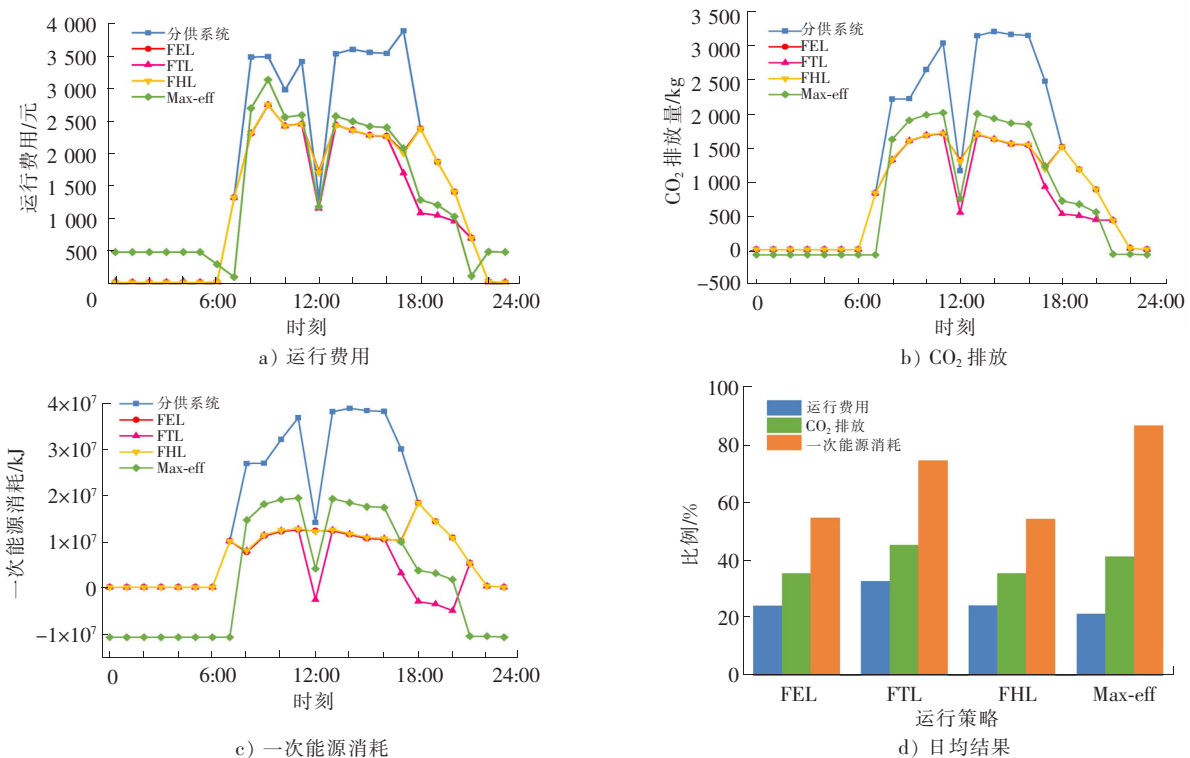


图 10 不同运行策略下系统逐时性能及总性能

Fig.10 Hourly performance and daily performance of different operation strategies

从图 10 d)可以看出,FTL 策略的日均运行费用节约率、CO₂ 减排率最优,与分供系统相比,其运行费用和 CO₂ 排放分别降低了 32.7%和和 45.25%;Max-eff 策略由于 PGU 机组连续运行,即使运行反向卖电,其经济性虽然最差,但仍低于分供系统。对一次能源的消耗,Max-eff 策略最低,较分供系统降低了 86.7%,其次为 FTL 策略,为 74.4%。不同运行策略下日均统计结果见表 3。

表 3 分布式系统与分供系统日运行结果

Tab.3 Operation cost of distributed system and conventional separate system

参数	分供系统	分布式系统			
		FEL	FTL	FHL	Max-eff
运行费用/元	40 526	30 776	27 283	30 732	31 930
CO ₂ 排放/kg	31 454	20 344	17 221	20 364	18 512
一次能源消耗×10 ⁻⁸ /kJ	3.82	1.73	0.98	1.75	0.51

4 结 论

本文构建了一套耦合地源热泵机组的分布式供能系统,对比给出了 4 种运行策略下各设备的供电、供冷结果及系统运行费用、CO₂ 排放量和一次能源消耗的变化。结果表明,PGU 机组运行时间除 Max-eff 策略不间断运行外,FTL 策略下 PGU 机组运行 13 h,FEL 和 FHL 策略下 PGU 机组运行 10 h。FTL 运行策略下 PGU 机组发电量共计 18 812.5 kW·h,溴化锂制冷机组供冷量共计 28 600 kW,发电占总用电量的 70%,溴化锂制冷占建筑所需冷负荷的 68.8%,与 FEL 策略相比制冷量提高了 19.2%。与分供系统相比,FTL 策略有很好的经济性和环境友好性;Max-eff 经济性最差,但一次能耗降低最多。

本文是在负荷特性和设备特性已知的前提下,对分布式冷热电联供系统进行的运行策略对比分析研究,实际运行中,由于天气等室外气象条件或人员在室率等室内热扰的变化、冷负荷的形成在不同传输环节下具有一定的滞后性,有可能导致系统运行决策失误。因此,有必要针对建筑负荷特性及随动规律,建立精准的预测模型,开展不同设备组合形式下的动态优化,进而实现系统的实时优化匹配。

参考文献/References:

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 2019 中国建筑节能年度发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [2] 王毅, 张宁, 康重庆, 等. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22):5669-5681. WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22):5669-5681.
- [3] WANG Jiangjiang, SUI Jun, JIN Hongguang. An improved operation strategy of combined cooling heating and power system following electrical load[J]. Energy, 2015, 85: 654-666.
- [4] JRADI M, RIFFAT S. Tri-generation systems: Energy policies, prime movers, cooling technologies, configurations and operation strategies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 32: 396-415.
- [5] GU Qunying, REN Hongbo, GAO Weijun, et al. Integrated assessment of combined cooling heating and power systems under different design and management options for residential buildings in Shanghai[J]. Energy and Buildings, 2012, 51: 143-152.
- [6] BRANDONI C, RENZI M, CARESANA F, et al. Simulation of hybrid renewable microgeneration systems for variable electricity prices [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 71(2): 667-676.
- [7] MAGO P J, LUCK R, SMITH A D. Environmental evaluation of base-loaded CHP systems for different climate conditions in the US[J]. International Journal of Ambient Energy, 2011, 32(4): 203-214.
- [8] SMITH A D, MAGO P J, FUMO N. Benefits of thermal energy storage option combined with CHP system for different commercial building types[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2013, 1: 3-12.
- [9] WU Qiong, REN Hongbo, GAO Weijun, et al. Multi-criteria assessment of combined cooling, heating and power systems located in different regions in Japan[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1): 660-670.
- [10] SMITH A D, MAGO P J. Effects of load-following operational methods on combined heat and power system efficiency[J]. Applied Energy, 2014, 115: 337-351.
- [11] FUMO N, MAGO P J, CHAMRA L M. Analysis of cooling, heating, and power systems based on site energy consumption[J]. Applied Energy, 2009, 86(6): 928-932.
- [12] FUMO N, MAGO P J, CHAMRA L M. Emission operational strategy for combined cooling, heating, and power systems[J]. Applied Energy, 2009, 86(11): 2344-2350.
- [13] MAGO P J, LUCK R. Evaluation of the potential use of a combined micro-turbine organic Rankine cycle for different geographic locations [J]. Applied Energy, 2013, 102: 1324-1333.
- [14] LIU Wei, CHEN Guanyi, YAN Beibei, et al. Hourly operation strategy of a CCHP system with GSHP and thermal energy storage (TES) under variable loads: A case study[J]. Energy and Buildings, 2015, 93: 143-153.
- [15] KANG Ligai, YANG Junhong, AN Qingsong, et al. Effects of load following operational strategy on CCHP system with an auxiliary ground source heat pump considering carbon tax and electricity feed in tariff[J]. Applied Energy, 2017, 194: 454-466.
- [16] FANG Fang, WEI Le, LIU Jizhen, et al. Complementary configuration and operation of a CCHP-ORC system[J]. Energy, 2012, 46(1): 211-220.
- [17] HAJABDOLLAHI H. Investigating the effects of load demands on selection of optimum CCHP-ORC plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 87:547-558.
- [18] KANG Ligai, YANG Junhong, AN Qingsong, et al. Complementary configuration and performance comparison of CCHP-ORC system with a ground source heat pump under three energy management modes[J]. Applied Energy, 2017, 194: 454-466.
- [19] WANG Jiangfeng, ZHAO Pan, NIU Xiaoqiang, et al. Parametric analysis of a new combined cooling, heating and power system with transcritical CO₂ driven by solar energy[J]. Applied Energy, 2012, 94: 58-64.

- [20] XU Xiaoxiao, LIU Chao, FU Xiang, et al. Energy and exergy analyses of a modified combined cooling, heating, and power system using supercritical CO₂[J]. *Energy*, 2015, 86: 414-422.
- [21] CHUA K J, YANG W M, ER S S, et al. Sustainable energy systems for a remote island community[J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 1752-1763.
- [22] FU Lin, ZHAO Xiling, ZHANG Shigang, et al. Laboratory research on combined cooling, heating and power (CCHP) systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(4): 977-982.
- [23] FU Lin, ZHAO Xiling, ZHANG Shigang, et al. Performance study of an innovative natural gas CHP system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(1): 321-328.
- [24] ZHAO Xiling, FU Lin, ZHANG Shigang, et al. Performance improvement of a 70 kWe natural gas combined heat and power (CHP) system[J]. *Energy*, 2010, 35(4): 1848-1853.
- [25] WANG Jiangjiang, YANG Ying, MAO Tianzhi, et al. Life cycle assessment (LCA) optimization of solar-assisted hybrid CCHP system [J]. *Applied Energy*, 2015, 146: 38-52.
- [26] TIAN Xue, SHUAI Deng, KANG Ligai, et al. Study on heat and power decoupling for CCHP system Methodology and case study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 142: 597-609.
- [27] 康利改. 分布式冷热电联供系统动态匹配的弱解耦优化研究[D]. 天津:天津大学, 2017.
KANG Ligai. Research on Weak Decoupling Optimization of Dynamic Matching Based Distributed Energy System[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [28] 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.
- [29] MAGO P J, LUCK R, KNIZLEY A. Combined heat and power systems with dual power generation units and thermal storage[J]. *International Journal of Energy Research*, 2014, 38(7): 896-907.
- [30] WANG Jiangjiang, JING Youyon, ZHANG Chunfa, et al. Performance comparison of combined cooling heating and power system in different operation modes[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(12): 4621-4631.
- [31] WANG Jiangjiang, ZHANG Chunfa, JING Youyin. Multi-criteria analysis of combined cooling, heating and power systems in different climate zones in China[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(4): 1247-1259.
- [32] MAGO P J, CHAMRA L M, RAMSAY J. Micro-combined cooling, heating and power systems hybrid electric-thermal load following operation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(8): 800-806.
- [33] SMITH A, LUCK R, MAGO P J. Analysis of a combined cooling, heating, and power system model under different operating strategies with input and model data uncertainty[J]. *Energy Build*, 2010, 42(11): 2231-2240.
- [34] ZHENG Chunyuan, WU Jingyi, ZHAI Xiaoqiang. A novel operation strategy for CCHP systems based on minimum distance[J]. *Applied Energy*, 2014, 128: 325-335.
- [35] ASKARI I B, SADEGH M O, AMERI M. Energy management and economics of a trigeneration system considering the effect of solar PV, solar collector and fuel price[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2015, 26: 43-55.
- [36] HAJABDOLLAHI H, HAJABDOLLAHI Z, HAJABDOLLAHI F. Soft Computing based optimization of cogeneration plant with different load demands[J]. *Heat Transfer-Asian Research*, 2015.doi:10.1002/htj.21176.
- [37] WANG Jialong, WU Jingyi, ZHENG Chunyuan. Simulation and evaluation of a CCHP system with exhaust gas deep-recovery and thermoelectric generator[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 86: 992-1000.
- [38] HAJABDOLLAHI H, GANJEHKAVIRI A, JAAFAR M N M. Assessment of new operational strategy in optimization of CCHP plant for different climates using evolutionary algorithms[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 75: 468-480.