

燃气三联供-热泵容量优化匹配分析方法

何桂雄¹, 黄子硕², 闫华光¹, 彭震伟², 于航², 杨柯³

(1. 电网安全与节能国家重点实验室, 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 100192;

2. 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室, 同济大学, 上海市 200092;

3. 上海朗诗规划建筑设计有限公司, 上海市 200092)

摘要: 园区级综合能源系统中,燃气三联供和热泵在供冷(热)时均可优先选用,确定二者最佳的匹配容量是综合能源系统规划设计重点之一。文中提出了一种通过解析法确定燃气三联供和热泵最佳匹配容量的方法。该方法基于各类设备单位装机容量在考察期内净现值的计算式,结合各负荷区间出现的频数统计,得到不同容量匹配方案下燃气三联供和热泵设备的年等效满负荷运行时数及相应的收益,通过比较考察期内系统总的净现值确定最优容量匹配方案。结合案例对本文所提出的分析方法进行了验证,指出推导分析法的优势在于可将最优结果产生的过程呈现,便于各参与方相机决策。

关键词: 综合能源; 燃气三联供; 热泵; 容量匹配优化; 负荷频数; 运行时数

0 引言

燃气冷热电三联供-热泵(CCHP-HP)耦合系统由燃气冷热电三联供与水源热泵、土壤源热泵及空气源热泵中的一种或多种热泵耦合而成,是一种较为典型的分布式供能系统。确定燃气冷热电三联供和热泵的最佳匹配容量是该类综合能源系统设计优化的关键。下文中燃气三联供均指燃气冷热电三联供,用CCHP表示。

建立能源系统仿真模型,通过模拟优化得到三联供、热泵等各类设备的最佳设计容量是当前的惯用做法^[1]。Moussawi等对三联供系统进行了分类,对其能效进行了评估,并汇总了常见的系统优化设计以及配置方案选择方法^[2]。Eugenia等对相邻建筑区域的热和电力生产供应系统进行建模,得到了区域建筑间能源交换种类、交换量以及能源转换设备的型号与数量^[3]。Van den Hil结合荷兰代尔夫特市某一案例构建了一个多目标优化模型,探讨社区综合能源系统在提高能源自治、减少碳排放及降低用能成本方面的优势^[4]。Li等建立了一个多能互补综合能源系统仿真模型以评估其可靠性^[5]。Chauhan等考虑需求侧响应,对一个可再生能源与

化石能源互补利用的社区能源系统中各供能设备的容量进行了优化^[6]。Mendes^[7]和Huang^[8]等对于综合能源系统综合优化的模型和工具DER-CAM、EAM、MARKAL/TIMES和RETScreen等进行了总结和讨论,指出了这些模型各自的特点和适用对象。王成山等提出了一种综合能源网优化调度建模方法^[9]。黄子硕等将区域建筑群的供用能系统视为一个总能系统并构建了系统模型,对多建筑的冷热电生产和分配系统进行综合优化,得到不同能源转换子系统的配置容量和冷热交易量^[10]。曾蓉利用遗传算法对地源热泵和CCHP耦合系统进行了建模优化^[11]。杨中源等研究了负荷特征、购电价格、天然气价格及热电联产效率与CCHP系统最优运行策略的关系^[12]。

综合能源系统方案涉及燃气公司、电力公司及用户等多方利益,使各利益相关方能够深度参与方案构建对于综合能源系统规划的落地实施具有积极意义。信息透明和共享是各方协调合作的前提,对于综合能源系统最优化运行而言,其优化的过程和结果同样重要。当前研究集中在对综合能源系统进行仿真优化方面,这些模型通过计算机搜索算法,可输出给定条件下综合能源系统的最优配置。但优化过程的不可见性使得各利益相关方难以了解到最优解产生的原因,不能根据情况的变化调整自身策略。

为此,本文提出基于各设备年等效满负荷运行时数的变化和考察期内净现值计算确定CCHP-HP系统最佳配置方案的方法。该方法通过理论解析法

收稿日期: 2017-09-05; 修回日期: 2017-11-17。

上网日期: 2018-01-10。

国家重点研发计划资助项目(2016YFC0700305); 国家电网公司科技项目(SGTJDK00DWJS1500100)。

将最优方案产生的过程进行呈现,为各个规划参与者的规划决策提供更为详尽的信息。

1 CCHP 和 HP 的单位净现值计算

为考察各类热泵和燃气热电联产在整个寿命周期(以 20 年为例)内的投入产出,本节给出 HP 和 CCHP 单位装机容量下的净现值计算式。CCHP 包括由原动机、吸收式制冷机及余热锅炉等附属设施组合而成一整套完整的冷、热、电三联供子系统;HP 是指一整套完整的供冷供热子系统,包括制冷制热主机及配套的水冷或风冷式冷却塔(器)等。

在单位供能功率下 CCHP 系统 20 年的净现值可由式(1)计算:

$$v_{TG} = \sum_{k=1}^{20} \frac{1}{(1+d)^k} \left[\left(C_e + C_h - \frac{C_f}{\eta_{TG,e}} \right) t_h + \left(C_e + C_c - \frac{C_f}{\eta_{TG,e}} \right) t_c - 1.4C_{TG}' \right] - 1.4C_{TG} \quad (1)$$

式中: v_{TG} 为 CCHP 系统单位供能功率下核算周期 $k=20$ 年的净现值; C_e 为售电价格; C_h 为售热价格; C_c 为售冷价格; C_f 为燃气价格; $\eta_{TG,e}$ 为 CCHP 的发电效率; t_h, t_c 分别为热电联产系统年等效满负荷供热、供冷时长; C_{TG}' 为热电联产系统单位装机的年均维护费用; C_{TG} 为热电联产系统单位装机成本;年贴现率为 d ;本文计算中假设系统实际装机容量为供能容量的 1.4 倍,设 CCHP 系统的热电比为 1。

空气源热泵(AHP)单位供能功率下 20 年的净现值 v_{AHP} 可由式(2)计算:

$$v_{AHP} = \sum_{k=1}^{20} \frac{\left(C_h - \frac{C_e}{P_{AHP}} \right) t_h + \left(C_c - \frac{C_e}{E_{AHP}} \right) t_c}{(1+d)^k} - 1.4C_{AHP} \quad (2)$$

式中: P_{AHP}, E_{AHP} 分别为空气源热泵制热、制冷时的能效; C_{AHP} 为空气源热泵系统单位装机成本;空气源热泵年维护成本忽略不计。

水源/土壤源热泵(WHP)单位供能功率下 20 年的净现值 v_{WHP} 可由式(3)计算:

$$v_{WHP} = \sum_{k=1}^{20} \frac{1}{(1+d)^k} \left[\left(C_h - \frac{C_e}{P_{WHP}} \right) t_h + \left(C_c - \frac{C_e}{E_{WHP}} \right) t_c - 1.4C_{WHP}' \right] - 1.4C_{WHP} \quad (3)$$

式中: P_{WHP}, E_{WHP} 分别为水源热泵制冷、制热时的能效; C_{WHP}' 为水源热泵系统单位装机年均维护费用; C_{WHP} 为水源热泵系统单位装机成本。

2 CCHP-HP 年等效满负荷运行时数分析

假设 CCHP 和 HP 总的装机容量需满足项目的冷热需求,且在各运行时段(峰、谷、供冷、供热)供

能收益最大者优先开机运行。基于以上两点假设,在给定年逐时冷热负荷和能源价格数据时,可以得到不同 CCHP 装机容量下 CCHP 和 HP 各自的年等效满负荷运行小时数及相应的净现值。该方法的思路如图 1 所示,具体步骤如下。

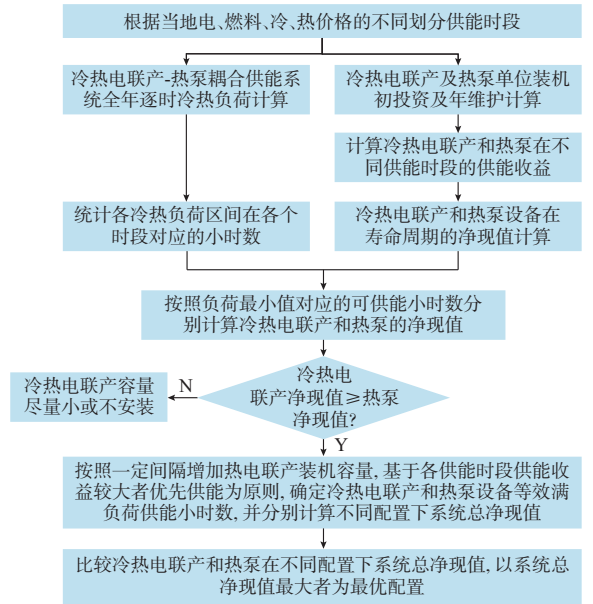


图 1 基于运行时数分析的燃气三联供-热泵容量优化匹配方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of analytical method for CCHP-HP capacity matching optimization based on service hour analysis

步骤 1:计算供能对象全年逐时冷热负荷值,找出最小负荷值,并按照设计规范确定供能系统的总装机容量。

步骤 2:按照冷负荷、热负荷及电价峰谷时段,分别统计冷、热负荷在峰谷时段各负荷区间内的负荷值出现的小时数,统计结果见附录 A 表 A1。

步骤 3:根据设备初投资、设备能效、年运行维护费、购买电力和燃气的价格、供冷供热供电价格,以年等效满负荷供能小时数为变量,得到单位装机容量下 CCHP 和 HP 系统在某一核算周期内单位装机容量的净现值计算公式,如式(1)至式(3)所示。

步骤 4:根据购买电力和燃气的价格,分别计算 CCHP 和 HP 系统峰谷时段供冷、供热、供电的单位供能收益(不计初投资,仅计运行收益)。

步骤 5:假定 CCHP 和 HP 分别按照 D_0 设定基准装机容量,基于峰谷时段单位供能收益较高的设备优先开机运行的原则,确定 CCHP 和 HP 年可能的满负荷供能小时数。

某供能设备等效满负荷在各运行时段内某一负荷区间(D_i, D_{i+1})内等效满负荷运行小时数计算如式(4)所示。

$$t = \frac{0.5(D_i + D_{i+1})t_i - P't_i'}{P} \quad (4)$$

式中: t_i 为各运行时段内某一负荷区间包含的小时数; P' 为其他供能子系统在该时段内承担的供能负荷; t_i' 为其他供能子系统在该时段内供能小时数; P 为某一供能子系统的理论装机容量。

步骤 6: 比较基准装机容量 (D_0) 时 v_{TG} 和 v_{AHP} 的大小, 若 $v_{TG} \leq v_{AHP}$, 则本系统中 CCHP 越小越好, 或者不配置 CCHP; 若 $v_{TG} > v_{AHP}$, 则分析 CCHP 装机容量大于 D_0 时的情况。

步骤 7: 若 CCHP 在基准装机容量 (D_0) 时净现值仍低于 HP, 则从经济角度出发本系统不宜安装 CCHP。

步骤 8: 若 CCHP 在基准装机容量 (D_0) 时净现值较大, 按照负荷区间间隔依次增加 CCHP 的装机容量, 计算 CCHP 在不同装机容量下 CCHP 和 HP 对应的等效满负荷工作小时数, 进而计算得到 CCHP 和 HP 的净现值, 两者相加得到系统总的净现值, 选择净现值最大的作为系统的最优配置。

由于供冷供热负荷的波动性, 在部分时段供冷供热系统不可避免地出现利用率较低的问题。该方法从燃气三联供和热泵系统可能达到的年等效满负荷供能小时数出发, 按照经济性最优的目标, 优化热泵设备和热电联产设备的容量配置, 通过提高初投资较高的设备的年利用率, 相应地减少初投资较低设备的年利用率, 提高整个系统的经济性。

3 案例分析

3.1 基础数据

3.1.1 项目负荷

选取的项目位于上海某商务区, 总建筑面积为 $9.2 \times 10^5 \text{ m}^2$, 包括酒店、商业、办公及部分居住建筑。经过模拟分析和项目调研, 确定冷、热负荷分布如表 1 所示。根据设计规范确定该项目供冷、供热装机容量为 73 MW。

表 1 项目冷热负荷分布
Table 1 Heating and cooling load

负荷区间/ MW	峰时时长/h		谷时时长/h	
	冷	热	冷	热
73~81	55	0	0	0
68~73	129	128	23	31
63~68	221	188	41	46
58~63	258	229	74	61
53~58	497	433	119	104
48~53	295	251	166	141
43~48	202	182	230	175
38~43	184	156	267	227
总计	1 841	1 567	919	785

3.1.2 经济与能效数据

各类供能系统的能效值按照附录 A 表 A2 选取。项目能源价格分别为 $C_e = 1.02 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, $C_e' = 0.49 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, $C_f = 0.24 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, $C_h = C_c = 0.4 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 并假设每年的供能时长相等, 则可得到各个供能时段各类供能子系统的供能收益, 见附录 A 表 A3。

3.2 不同情景下经济性最优的系统配置方案

3.2.1 基础容量 CCHP 与 WHP 选择的判断依据

本项目的基准负荷是 38 MW, 即某类供能技术装机容量小于等于该值时, 该供能子系统分别在各个供能区段(峰、谷、供冷供热)开机时长最大。由 $v_{TG} - v_{WHP} \geq 0$ 有

$$2C_e - 6.15C_f + C_e' \geq 0.74 \quad (5)$$

当 $C_e = 1.02 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, $C_e' = 0.49 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 时, CCHP 具有竞争力时燃气价格 C_f 应小于 $0.2911 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 本项目的燃气价格满足式(5), 从经济回报角度看基础负荷可采用 CCHP 系统。

3.2.2 燃气三联供容量确定

从附录 A 表 A4 和表 A5 可以看出, 在当前价格体系下, 峰时供冷供热及谷时供热, CCHP 系统均具有较好的收益, 在这些时段应优先保证 CCHP 系统开机。谷时供冷时, WHP 系统供能成本最低, 该时段应优先保证 WHP 系统开机。根据以上原则得到开机顺序如下:

1) 峰时供冷供热及谷时供热, 在该时段 CCHP 优先供能, 冷热负荷超出 CCHP 装机容量时, 采用 WHP 系统补充供能。

2) 谷时供冷, 在该时段 WHP 优先供能, 冷热负荷超出 HP 装机容量时, 采用 CCHP 系统补充供能。

按照上述原则得到 CCHP 和 WHP 在 CCHP 不同装机容量时的等效满负荷供能小时数及单位装机器的净现值 v 和子系统的净现值 V , 见附录 A 表 A4 和表 A5 所示。

系统总的净现值 V 通过式(6)计算。

$$V = P_{TG}v_{TG} + (73 - P_{TG})v_{WHP} \quad (6)$$

式中: P_{TG} 为燃气三联供系统的装机容量。

计算得到不同燃气三联供理论装机容量时项目总的净现值 V 如图 2 所示, 在燃气三联供理论装机容量为 53 MW 时, V 最大值为 46 173.024 万元。

3.2.3 各类热泵容量确定

CCHP 系统装机容量为 53 MW 时, 在 WHP 满足余下负荷的情况下, 由于运行小时数的不足, WHP 子系统部分容量的净现值为负。考虑 AHP 系统初投资较小, 可通过对 AHP 的应用来增加热

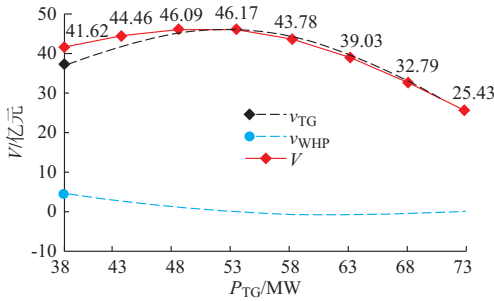


图2 CCHP不同装机容量下V变化图
Fig.2 V when CCHP has different installed capacities

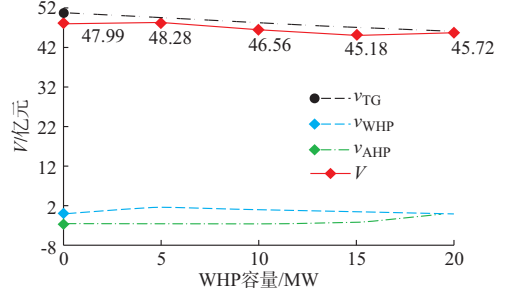


图3 WHP不同容量下各子系统及V变化 (CCHP为53 MW)

Fig.3 V when WHP has different installed capacities (CCHP is 53 MW)

泵子系统的经济性。因此,所探讨的WHP和AHP组合方案满足20 MW的负荷需求。

根据以上原则得到开机顺序如下:

1) 峰时供冷供热及谷时供热,在该时段由CCHP优先供能,冷热负荷超出CCHP装机容量时,WHP系统补充供能,最后由AHP系统供能。

2) 谷时供冷,在该时段由WHP优先供能,冷热负荷超出WHP装机容量时,采用CCHP系统补充供能,最后由AHP供能。

CCHP系统装机容量为53 MW时,改变WHP和AHP系统匹配容量,可得到整个系统中各子系统运行参数及系统总净现值V,计算结果如附录A表A6和表A7所示。

从表2可以看出,随着AHP的引入,由于任何时段CCHP的供能收益都大于AHP,其等效满负荷供能小时数将增加。

表2 WHP不同装机容量下相应的CCHP等效满负荷运行小时数、v及V(CCHP为53 MW)

Table 2 Annually equivalent full capacity service hour, v and V of CCHP when WHP has different capacities (CCHP is 53 MW)

WHP 装 机/MW	峰时时长/h		谷时时长/h		v/(元· kW ⁻¹)	V/万元
	冷	热	冷	热		
0	1 755.10	1 492.61	815.83	700.14	9 536.87	50 545.437
5	1 755.10	1 492.61	729.13	700.14	9 316.54	49 377.656
10	1 755.10	1 492.61	642.43	700.14	9 096.20	48 209.876
15	1 755.10	1 492.61	555.73	700.14	8 875.87	47 042.095
20	1 755.10	1 492.61	469.03	700.14	8 655.53	45 874.314

如图3所示,CCHP在电价较高时供能成本低于热泵,但是其初投资远大于热泵系统,在设备利用小时数较低时经济性较差。因此,案例项目的最佳配置为CCHP子系统取53 MW,WHP子系统取5 MW,AHP子系统取15 MW,此时项目总净现值V为48 286.171万元,比不采用AHP时提高了2 113.147万元。

4 结语

本文介绍了一种通过解析法分析确定CCHP-HP最佳匹配容量的方法。该方法遵循的基本原则是由初投资和运维成本相对较低而运行收益较差的子系统承担峰值负荷,由初投资及运维成本较高而运行收益较好的子系统承担基础负荷的供能任务,以改善项目投资回报。研究得到如下结论。

1) 相较于借助于计算机搜索寻优的模型优化法,解析法将最优解产生的过程予以呈现。考虑到在多方参与项目方案决策时,支撑决策的最优化过程和最优优化结果同样重要,本研究提出的解析法有助于各方明晰最优结果产生的具体过程,从而掌握各个相关因素与最优优化结果间的关联关系,帮助提升协作效率。

2) 在园区级综合能源项目中,燃气和电力是终端用户采购的最为主要的两种能源,而CCHP-HP最终的配置容量可视为两种能源竞争结果的体现。借助于案例分析可以发现,项目负荷特征对于系统的配置具有重要影响。燃气三联供分布式能源项目的经济性既受到能源价格的影响,又受项目负荷特征的制约。对于给定的能源价格体系,燃气和电力的相对竞争优势在不同项目上存在差异性。

由于蓄能系统的蓄能和释能时段具备灵活性特征,本文研究暂未将蓄能系统运行纳入。如何对含蓄能系统的综合能源系统的配置过程进行解析分析仍需进一步研究。

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

参考文献

[1] 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/OL].电力系统自动化[2017-10-09].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20171009.1443.002.html>.

- LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with CCHP and energy storage system [J/OL]. Automation of Electric Power Systems[2017-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20171009.1443.002.html>.
- [2] MOUSSAWI H A, FARDOUN F, LOUAHLIA-GUALOUS H. Review of tri-generation technologies: design evaluation, optimization, decision-making, and selection approach [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 120: 157-196.
- [3] EUGENIA D M, HARALAMBOS S, NIKOLAOS C M, et al. A mathematical programming approach for optimal design of distributed energy systems at the neighbourhood level [J]. Energy, 2012, 44(1): 96-104.
- [4] VAN DEN H E J. Multi-objective optimisation of integrated community energy systems and assessment of the impact on households[D]. Delft University of Technology, 2015.
- [5] LI G, BIE Z, KOU Y, et al. Reliability evaluation of integrated energy systems based on smart agent communication [J]. Applied Energy, 2016, 167: 397-406.
- [6] CHAUHAN A, SAINI R P. Size optimization and demand response of a stand-alone integrated renewable energy system [J]. Energy, 2017, 124: 59-73.
- [7] MENDES G, IOAKIMIDIS C, FERRAO P. On the planning and analysis of integrated community energy systems: a review and survey of available tools[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(9): 4836-4854.
- [8] HUANG Z, YU H, PENG Z, et al. Methods and tools for community energy planning: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 1335-1348.
- [9] 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 CSEE, 2013, 33(31): 26-33.
- [10] 黄子硕,于航,彭震伟,等.面向社区能源规划的建筑总能系统模型[J].浙江大学学报(工学版),2016,50(2):292-298.
HUANG Zishuo, YU Hang, PENG Zhenwei, et al. Building total energy system model (BETS) for community energy planning [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(2): 292-298.
- [11] 曾蓉.冷热电三联产系统及其与地源热泵耦合系统的优化研究[D].长沙:湖南大学,2016.
- [12] 杨中源,邹斌,朱峰,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/OL].电力系统自动化[2017-07-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20170718.1416.008.html>. DOI: 10.7500/AEPS20170304001.
YANG Zhongyuan, ZOU Bin, ZHU Feng, et al. Optimal operation strategies and their determining conditions for CCHP systems with two cooling way[J/OL]. Automation of Electric Power Systems [2017-07-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20170718.1416.008.html>. DOI: 10.7500/AEPS20170304001.

何桂雄(1986—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:综合能源系统优化。E-mail: heguixiong@epri.sgcc.com.cn
黄子硕(1987—),男,通信作者,博士,助理教授,主要研究方向:需求侧能源规划。E-mail: huangzs@tongji.edu.cn
闫华光(1976—),男,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向:电力需求侧管理、综合能源系统优化。E-mail: hgyan@epri.sgcc.com.cn

(编辑 张焱)

Analytical Method for Capacity Matching Optimization of CCHP-HP

HE Guixiong¹, HUANG Zishuo², YAN Huaguang¹, PENG Zhenwei², YU Hang², YANG Ke³

(1 State Key Laboratory of Security and Energy Saving, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Key Laboratory of Ecology and Energy-saving Study of Dense Habitat, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Shanghai Landsea Planning and Architecture Design Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The capacity matching optimization of various heating and cooling sources, such as the combined cooling, heating and power-heat pump (CCHP-HP) system, is one of the important tasks for planning and designing the integrated energy system. This paper proposes an analytical method which can identify the optimized matching capacity of CCHP-HP system. The method is based on the formulation of net present value (NPV) of unit installed capacity within different scenarios. Combined with the frequency statistics of each load internal, the equivalent full load service hours of CCHP-HP and the corresponding income are acquired under different capacity matching schemes. The optimal scheme of CCHP-HP can be acquired from the comparison of total NPV value. Combined with a case study, the advantages of the proposed method are illustrated and it is convenient for the participants to make appropriate decisions.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFC0700305) and State Grid Corporation of China (No. SGTJDK00DWJS1500100).

Key words: integrated energy system; combined cooling, heating and power (CCHP); heat pump (HP); capacity matching optimization; load time frequency; service hours