

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181568

太阳能冷热电联供系统的综合性能评价与研究

武家辉¹, 张强², 王维庆¹, 王海云¹, 王帅飞¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网新疆综合能源服务有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 为了高效利用丰富的太阳能资源, 同时满足用户多样化能源的需求, 可以采用太阳能实现冷热电联供。当太阳能作为热源或辅助电源时, 系统较为稳定且控制方法简单。但是当两种形式同时存在时, 会导致太阳能的能源利用率降低且成本升高。因此, 需要一种方法对太阳能冷热电联供系统(PV/T-CCHP)的优劣进行评估。提出采用基于 Fuzzy-AHP 的多目标决策法(MCDM), 建立 PV/T-CCHP 系统指标体系。以传统的分供系统作为参考, 从四个角度分别评估了 PV/T-CCHP 系统运行性能、不同控制策略下的运行性能以及综合运行性能。研究结果可以为 PV/T-CCHP 系统的设计运行提供参考。

关键词: 太阳能发电; 太阳能集热器; 冷热电联供系统; Fuzzy-AHP; MCDM

Evaluation and research on the comprehensive performance of a PV/T-CCHP system

WU Jiahui¹, ZHANG Qiang², WANG Weiqing¹, WANG Haiyun¹, WANG Shuaifei¹

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. State Grid Xinjiang Integrated Energy Services Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: In order to efficiently utilize the abundant solar energy resources and meet the demand of diversity of energy use, solar energy is proposed to realize the combined heat and power supply. As a heat source or auxiliary power supply, the solar combined CCHP system is not only stable but also simple. However, using two kinds of energy forms at the same time will lead to lower energy utilization and higher cost. Thus, new methods are needed to evaluate the advantages and disadvantages of the solar cooling heating and power cogeneration system (PV/T-CCHP). The multi-objective decision making theory based on Fuzzy-AHP is put forward, and PV/T-CCHP index system is also established. Taking the traditional separate system as a reference, the operation performance of PV/T-CCHP system is analyzed. The running performance and the comprehensive operation performance of different control strategies from four perspectives are also compared. The research results can be used for the design and operation references of PV/T-CCHP system.

This work is supported by Natural Science Foundation of China (No. 51667020), University Natural Science Research Program of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. XJEDU20171002), and Key Research and Development Projects of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2016B0201).

Key words: solar energy generation; solar thermal collector; solar cooling heating and power cogeneration system; Fuzzy-AHP; MCDM

0 引言

近年来, 国家提倡使用清洁能源的同时也提出提高能源利用率的要求。以一次能源为基础的互补发电在新一代智能电网的发展中得到

了广泛的应用^[1-3]。但互补模式的效率提高空间有限, 而冷热电联供(CCHP)系统的发展可以很好地解决这一问题^[4-6]。目前, CCHP 系统与可再生能源相结合的研究成为国内外研究的热点。例如将太阳能并入 CCHP 系统中, 可以减少联供系统非可再生能源的消耗, 同时弥补太阳能不连续、不稳定的缺点。文献[7]建立了一个考虑不同费率结构的风光气储互补发电的 CCHP 优化协调模型。文献[8]分析了太阳能 CCHP 系统的电制冷机最优制冷比、太阳能光

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51667020); 自治区高校科研计划自然科学基金项目资助(XJEDU20171002); 自治区重点研发计划项目资助(2016B0201)

光伏发电最优容量和运行控制策略的评估。文献[9]采用粒子群优化算法对太阳能冷热电联供系统的最优联供系统的机组台数和燃气轮机容量进行了优化。以上文献研究内容多集中在采用智能优化算法优化含太阳能的冷热电联供系统的设备选型、容量配置或者运行策略。从可获得的文献中尚未发现关于太阳能冷热电联供系统(PV/T-CCHP)综合性能评价的研究。

相关评估类研究主要是针对其他能源类型的CCHP系统的研究。文献[10]选取包含年总运行费用、一次能源消耗量和CO₂排放量在内的综合性能指标为优化的目标函数，建立燃气CCHP系统评估方法，其研究思路与方法可供借鉴。PV/T-CCHP系统与技术、经济、环境和社会等多方面因素之间相互影响、相互制约^[11-13]，单从某一方面分析无法得出全面的评价结果，应从多个角度提出系统的评价标准。多目标决策理论(MCDM)^[14-15]由于具有操作简单、可靠性高等优点，可为多能源与CCHP系统的综合性能决策提供理论基础和指导。

本文在上述研究的基础上，以系统经济、节能、环保和社会效益的共赢为目标，采用基于Fuzzy-AHP的多目标决策理论分析论证了PV/T-CCHP系统相较于分供系统的优越性。然后进一步分析了不同运行策略下PV/T-CCHP系统不同指标的月运行性能和综合运行性能，研究结果可以为太阳能冷热电联供系统的综合应用提供参考。

1 PV/T-CCHP 系统原理与控制策略分析

1.1 PV/T-CCHP 系统原理和能量流图

PV/T-CCHP系统由太阳能光伏发电机组、太阳能集热器和内燃机驱动的传统联供系统组成。输入的能量包括天然气、太阳能发电和公共电网电力，所涉及设备的容量和价格见表1。

表1 联供系统内主要设备的单位容量和价格
Table 1 Unit capacity and price of the equipment in the solar CCHP system

参数	燃气 锅炉	燃气 内燃机	太阳能 集热器	太阳能 发电机组	吸收式 制冷机
单位容量/ kW	200	110	200	10	500
单位价格/ 万元	10	80	85	13	190

PV/T-CCHP运行原理主要是通过太阳能发电设备进行发电，发电后的余热以及太阳能集热器通过制冷机及换热器来实现建筑的供电、制冷、供热及生活热水，PV/T-CCHP系统的能量流如图1所示。

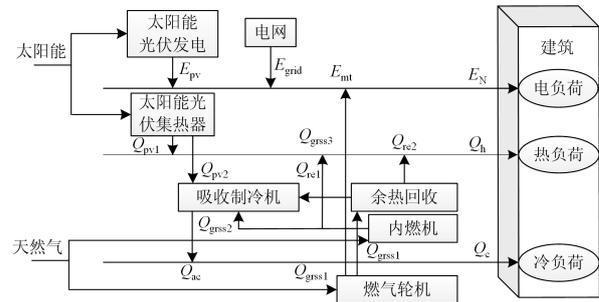


图1 太阳能冷热电三联供系统示意图

Fig. 1 Diagram of combined cooling heating and power system based on solar power

从图1中可以看出，首先供入燃气轮机的燃料与光伏发电用来发电以满足建筑的电负荷，当电负荷供不应求时通过电网购电。其次，空气和天然气在微燃机充分燃烧后在气缸中产生高压气体并释放大量的热，天然气经过燃烧后的温度可达到1000℃，利用高温高压烟气来推动燃气轮机叶片转动，再通过发电机励磁进行发电，发电后的烟气仍具有很高的温度，做功后的烟气温度高达500℃，将余热烟气送入溴冷机中，通过溴冷机实现建筑制冷。制冷后的烟气温度约为200℃，可以通过换热器进行采暖以及提供生活热水。最后，当溴冷机及换热器供冷、热能力不足时，可通过燃气补燃、光伏集热器继续向建筑提供差额热量，以满足公共建筑对冷热的需求。本文研究作以下假设。

- 1) 文中设备能够不随设备负载率的变化而变化，十分可靠；
- 2) 忽略能量输送过程中的损耗，供能系统到消耗系统的过程中无能量损失；
- 3) PV/T-CCHP系统的设备效率保持恒定值不变，且忽略设备出力限制；
- 4) 系统能够无故障运行，忽略设备维修系统故障等对系统造成的影响。

1.2 PV/T-CCHP 系统的运行策略

选择使系统综合性能最好的运行模式和调度策略，对于提高供能系统的性能具有重大意义。经过多年的运行经验积累，PV/T-CCHP系统通常考虑系统的经济性、能源利用率以及环境保护，采用以下两种操作模式，以电定热模式与以热定电模式。

1) “以电定热(FEL)”的运行策略

FEL运行策略是指光伏发电机组、燃气轮机，城市电网协调调度优先满足电功率的实时平衡，根据建筑所需电负荷确定其发电量。当光伏发电机和燃气轮机发出的电量不满足电负荷需求时由外部电

网补充; 当内燃机和光伏集热器产生热量不满足冷热负荷需求时, 由电制冷机补充。

2) “以热定电(FTL)” 的运行策略

FTL 运行策略是指内燃机和光伏集热器协调调度优先满足“热负荷”能量流的平衡, 根据建筑所需的“热负荷”来确定其发电量。系统的“热负荷”包括制冷需求与供暖需求两个方面。当系统发出的热量不满足冷热负荷需求时, 由电制冷机和电锅炉补充; 系统发出的电量不满足电负荷需求时由外部电网补充, 剩余电量上网售电。

2 PV/T-CCHP 指标体系建立

PV/T-CCHP 系统存在多种形式的能量输出, 且各模块之间呈现出多种不同的属性, 单从某一方面进行分析无法得出全面的评价结果, 应从多个角度提出系统的评价标准。

评价指标是构成综合评价体系的基础, 指标选取是构建综合评价体系的重要环节。一般的能源生产系统首要目标就是供给足量的能源, 以满足用户的需求。然而随着能源的日益枯竭、环境问题日益恶化, 不能仅追求能源的供需平衡与高能源利用率, 而更应考虑系统经济性、能源利用率和环保等因素。本文根据实际条件和相关文献^[16], 选取的指标包括环境、社会、经济和能效技术四方面的属性, 每个属性选取典型的定量(如 CO₂ 排放量、社会效益、运行维护成本等)或定性(如噪声、占地、社会效益等)指标, 所建立的 PV/T-CCHP 指标体系见表 2。

表 2 PV/T-CCHP 系统评价指标体系

Table 2 Evaluation indexes system for PV/T-CCHP

属性层	指标层/单位	指标类型
环境属性 P ₁	X ₁ CO ₂ 排放/(g·kWh)	成本型
	X ₂ NO _x 排放/(g·kWh)	成本型
	X ₃ 噪声/无	成本型
	X ₄ 占地/无	成本型
社会属性 P ₂	X ₅ 社会效益/无	效益型
	X ₆ 社会接受度/无	效益型
	X ₇ 工作岗位/(个·kWh)	效益型
经济属性 P ₃	X ₈ 运行维护成本/(¥·kWh)	成本型
	X ₉ 设备成本/(¥·kWh)	成本型
	X ₁₀ 设备寿命/年	效益型
能效技术属性 P ₄	X ₁₁ 一次能源消耗量/kWh	成本型
	X ₁₂ 一次能源利用率/%	效益型

3 基于 Fuzzy-AHP 的 MCDM 综合评价

国内外的一些学者通过对多种属性分配一定

权重, 以一个系统指标来表征多种属性, 用来整体评估某个系统。文献[17]采用最优化理论思想建立了冷热电联供系统(包含了经济效益和节能要求)的综合优化模型, 深入分析了经济性和节能要求在总目标函数中的权重对系统运行策略的影响。采用模糊层次分析法(Fuzzy-AHP)对四类指标进行综合分析。首先应用模糊理论(Fuzzy Theory)对定性指标进行量化处理, 然后应用层次分析法(AHP)确定指标的权重系数 ω , 用于定量描述该模型考虑的侧重点, 计算过程如下。

1) 所建立的指标系统构建评估因素集 $P = \{P_i\}$

作为主准则层, 再将特征因素集按属性细分为子评估因素集 X_i , 即 $X = \{X_i\}$ 。其次定义评价模型的评语集 $V = \{V_L, V_M, V_H\}$, 其中, V_L 表示差, V_M 表示一般, V_H 表示好。把准则层因素集 P_i 与子评估因素集 X_i 到评语集 V 看作模糊映射, 从而确定模糊评估矩阵 $R_i = [r_{ij}]_{m \times n}$ 。

对于模糊判断矩阵 R_i 中, r_{ij} 表示评价因素集中第 i 个因素与评语等级集 V 中第 j 个等级 V_j 的隶属程度。隶属度的确定对于 Fuzzy-TOPSIS 法来说十分重要, 本文采用三角隶属函数, 见图 2, 其表达式为

$$r_{ij}(V) = \begin{cases} 0, & x > \partial^L \\ \frac{x - \partial^L}{\partial^M - \partial^L}, & \partial^L \leq x < \partial^M \\ \frac{\partial^H - x}{\partial^H - \partial^M}, & \partial^M \leq x < \partial^H \\ 0, & x > \partial^H \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为定量指标的实际数值, ∂^L 、 ∂^M 和 ∂^H 分别表示第 i 个评语等级的区间范围值, 且 $\partial^L < \partial^M < \partial^H$ 。

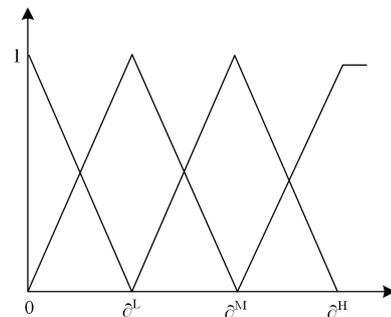


图 2 三角形隶属函数分布图

Fig. 2 Distribution of triangular function

2) 指标无量纲化。设 x_{ij} 为第 j 个系统中第 i 项指标的观测值。 m 个被评价对象对应于 n 个评价指

标的指标值构成指标矩阵 X 。

$$X = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & \cdots & P_m \\ X_1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ X_2 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_n & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{matrix} \quad (2)$$

由于各指标具有不同的量纲及数值量级差别, 需要将指标无量纲化处理。采用向量规范法实现评价指标的无量纲化, 见式(3)。

$$x_{ij}^* = \begin{cases} x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2} & (a) \\ \sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2} / x_{ij} & (b) \end{cases} \quad (3)$$

向量规范法的特点是当 $x_{ij} \geq 0$ 时, $x_{ij} \in (0,1)$,

无固定的最大、最小值, 且 $\sum_i (x_{ij}^*)^2 = 1$ 。其中式(3a)

应用于效益型指标无量纲化; 式(3b)应用于成本型指标无量纲化。

3) 确定系统中各元素决策层次之间的关系, 构建判断矩阵。判断矩阵 $A = [a_{ij}]$, a_{ij} 为子目标 i 相对于子目标 j 的重要程度, 且 $a_{ij} > 0, a_{ii} = 1, a_{ji} = 1/a_{ij}$ 。其中 a_{ij} 的赋值参考文献[18]。

4) 求判断矩阵 A 的最大特征值 λ_{\max} , 最大特征值对应的特征向量归一化后, 即为所求得指标的权重系数 ω 。

$$A\omega = \lambda_{\max}\omega \quad (4)$$

5) 一致性检验。衡量判断矩阵一致性的指标 C_R 可表示为

$$C_R = \frac{\lambda_{\max} - n}{\gamma_n(n-1)} \quad (5)$$

式中: n 为判断矩阵的阶数; γ_n 为判断矩阵阶数相对应的修正值, 其取值参考文献[18]。如果判断矩阵的一致性指标 $C_R < 0.1$, 则表明其一致性可以接受, 进入下一步; 反之, 则需重新对子目标进行两两比较判断, 直至判断矩阵通过一致性检验。

最后在建立的指标系统基础上, 确定其数值和权重, 采用加权平均法构建一个纯实量多元函数, 用以权衡评价方案的综合性能水平。

4 案例分析

PV/T-CCHP 系统在北京、上海、深圳等城市已得到广泛应用^[19-20], 但是针对西北地区尚未有相关

的应用文献。西北部大部分地区属中温带大陆性干旱气候, 春秋两季较短, 冬夏两季较长, 四季温差较大, 部分地区全年日照时数可达 3 200~3 300 h, 全年太阳能辐射强度为 6 700~8 370 MJ/m²。这些自然条件为 PV/T-CCHP 系统在西北地区的应用提供基础。

4.1 酒店概况

为了验证 PV/T-CCHP 系统的优越性, 找出 PV/T-CCHP 系统的最优运行策略, 且综合考虑西北地区太阳能光照条件和城市经济发展情况, 本文选取西部某城市 15 层酒店作为研究对象。该酒店总建筑面积约为 23 300 m², 窗墙比为 45%, 分为地下 3 层、地上 12 层。酒店内部主要区域可以划分为酒店大堂、客房、餐厅(会议厅)以及公共区域, 建筑的所需功能区域具体面积以及所需供能时间如表 3 所示。

表 3 酒店建筑功能面积及供能计划时间

Table 3 Building function area and function plan time of the proposed building

酒店区域分类	酒店区域面积/m ²	平均每天供能时间/h
大堂	800	24
餐厅(会议)	3 000	10
客房	14 200	20
公共区域	5 300	10

采用分布式能源对公共建筑进行冷热电联供, 理论上不具备调峰能力, 因此采用冷热电联供系统时, 系统所发出的电能仅对酒店的基础负荷进行供电, 基础负荷主要包括酒店建筑照明、电器设备等, 这些基础负荷具备使用时间及使用电量相对稳定的特点, 且一旦出现用电故障不会造成较大的影响, 符合冷热电联供系统的供电原则。采用 DeST (Designer's Simulation Toolkit)软件对该酒店冷热电负荷模拟仿真, 得到其月平均能耗量, 如图 3 所示。

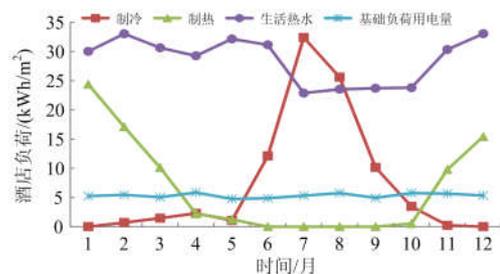


图 3 酒店单位面积月平均负荷

Fig. 3 Monthly average energy consumption of per unit area of the proposed building

根据图 3 所得的酒店单位面积月平均负荷, 可以看出: 该地区全年供暖期从 10 月中旬开始到次年的 4 月初结束, 此期间对供冷的需求较少; 从 5 月末开始到 9 月初主要以供冷为主, 酒店供热基本为 0; 而在过渡季节, 由于天气影响, 对冷热均有需求, 但需求量不大。由图 3 可知: 该酒店对制冷、供热以及供电需求基本相同, 并且具有很强的规律性; 对生活热水的需求较多, 这是因为热水受季节天气变化影响较小, 不同季节均对热水使用有需求; 酒店的基础用电负荷较为平稳。

4.2 PV/T-CCHP 指标权重计算与分析

组织专家对表 3 中的 PV/T-CCHP 指标体系进行赋值, 结果见表 4。

表 4 PV/T-CCHP 系统评价指标值

Table 4 Evaluation indexes values for PV/T-CCHP

属性	指标	SP	FEL	FTL
环境属性 P_1	X_1	1 314	956	892
	X_2	8.26	3.59	1.55
	X_3	中	中	高
	X_4	中	大	大
社会影响 P_2	X_5	低	高	高
	X_6	低	高	高
	X_7	15	20	20
经济指标 P_3	X_8	5 600	10 500	13 300
	X_9	1 350	3 700	5 600
	X_{10}	57	76	73
能效技术属性 P_4	X_{11}	17 600 000	5 600 000	3 100 000
	X_{12}	52.3	65.9	72.5

建立指标系统后, 基于 Fuzzy-AHP 法对各指标进行权重计算。首先, 对各方案的定性指标采用模糊三角函数的形式进行量化。量化定性指标后, 对其进行规范化处理, 同时应用式(3)将所有成本型指标转换成效益型指标, 即指标计算结果越高说明指标效益越好。同时采用层次分析法(AHP)对指标层进行总体评估赋权, 得到目标层对属性层的判断矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 1/3 \\ 1/3 & 1 & 1/3 & 1/5 \\ 1/2 & 3 & 1 & 1/3 \\ 3 & 5 & 3 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 归一化以及一致性检验}$$

后, 得到属性层主观权重矢量为: $\omega(A) = [0.2382, 0.0769, 0.1682, 0.5167]$ 。可知, 属性层中能效技术指标最重要, 其次是环境指标, 而指标的社会属性相较其他类型指标而言, 较不重要。

其次, 计算各属性层与指标层的判断矩阵, 即 P_1 层到 X_i 层的判断矩阵 A_1 , P_2 层到 X_i 层的判断矩

阵 A_2 , P_3 层到 X_i 层的判断矩阵 A_3 , P_4 层到 X_i 层的判断矩阵 A_4 , 计算结果分别为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 3 \\ 1/2 & 1 & 2 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

经过层次单排序, 归一化以及一致性检验后, 得到指标层各主观权重矢量分别为: $\omega(A_1) = [0.4401, 0.3109, 0.1459, 0.1031]$; $\omega(A_2) = [0.5944, 0.2489, 0.1567]$; $\omega(A_3) = [0.4934, 0.3108, 0.1958]$; $\omega(A_4) = [0.6667, 0.3333]$, 指标体系总主观权重最终计算结果见图 4。

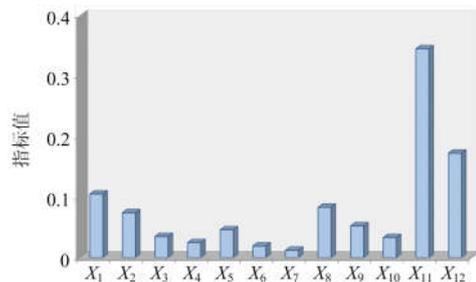


图 4 PV/T-CCHP 系统指标的主观权重

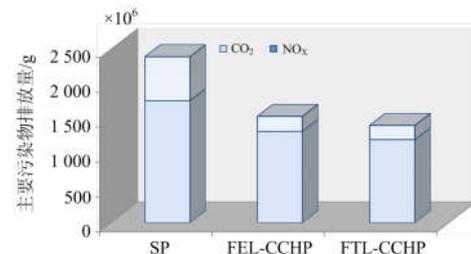
Fig. 4 Subjective weights of indexes of PV/T-CCHP system

由图 4 可知, PV/T-CCHP 系统的 CO_2 排放指标、社会效益指标、运行维护成本指标和一次能源利用率指标占用空间分别为环境属性、社会属性、经济属性和能效技术属性四个属性中的最高权重, 需要重点研究。

4.3 分供系统与联供系统关键指标比较

分别将 SP 系统和不同运行策略下(FTL 与 FEL 运行策略)的 PV/T-CCHP 系统应用于该酒店, 对比三个系统的环境、社会、经济、能源技术四个属性的关键指标, 结果如图 5 所示。

由图 5(a)可知, SP 系统的环境污染排放物 (CO_2 、 NO_x)排放量要高于联供系统, 同时 PV/T-CCHP



(a) 环境属性关键指标对比

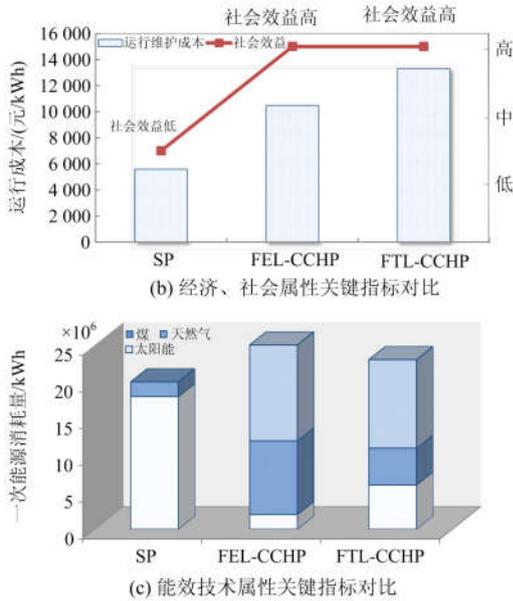


图 5 分供系统和不同运行策略下联供系统关键指标对比
Fig. 5 Key indexes analysis of SP system and PV/T-CCHP systems

系统运行在热跟随模式下的污染物排放量最小。图 5(b)分别从经济和社会两个方面对比了分供与联供系统的关键指标。单从经济方面考虑时 PV/T-CCHP 系统不经济，这是由于联供系统中增加了太阳能发电机组、光伏光热一体化机组，其安装成本和运行维护费用较高，因此付出的成本要多于分供系统，但是联供系统的社会效益要远远优于分供系统。图 5(c)中，SP 系统煤炭资源消耗最多而天然气耗量的排序正好相反。此外，联供系统的电跟随策略能消耗量要高于热跟随模式约 5%。

从环境、社会、经济和能效技术四个方面总体比较发现，虽然 PV/T-CCHP 系统的经济成本大于 SP 系统，但是联供系统相对于分供系统在环境保护、社会以及能效技术方面的“效益”均要优于分供系统。

4.4 联供系统不同运行策略下综合性能比较

本节进一步分析 PV/T-CCHP 系统 FEL 与 FTL 运行模式下不同指标的运行性能。根据第 3 节可知，建立了指标系统并确定其数值和权重后，采用加权平均法构建一个纯实量多元函数，用以计算评价方案的综合性能水平，得到两种运行策略下联供系统的综合性能评估值，如图 6 所示。

由图 6(a)可知，PV/T-CCHP 系统全年 FEL 模式下的环境综合热电比值高于 FTL 模式，但二者趋势保持一致。FTL 模式相对于 FEL 模式的环境综合指标全年波动范围较小。由图 6(b)可以看出，PV/T-CCHP 系统综合热电比的夏季月运行性能总体要优

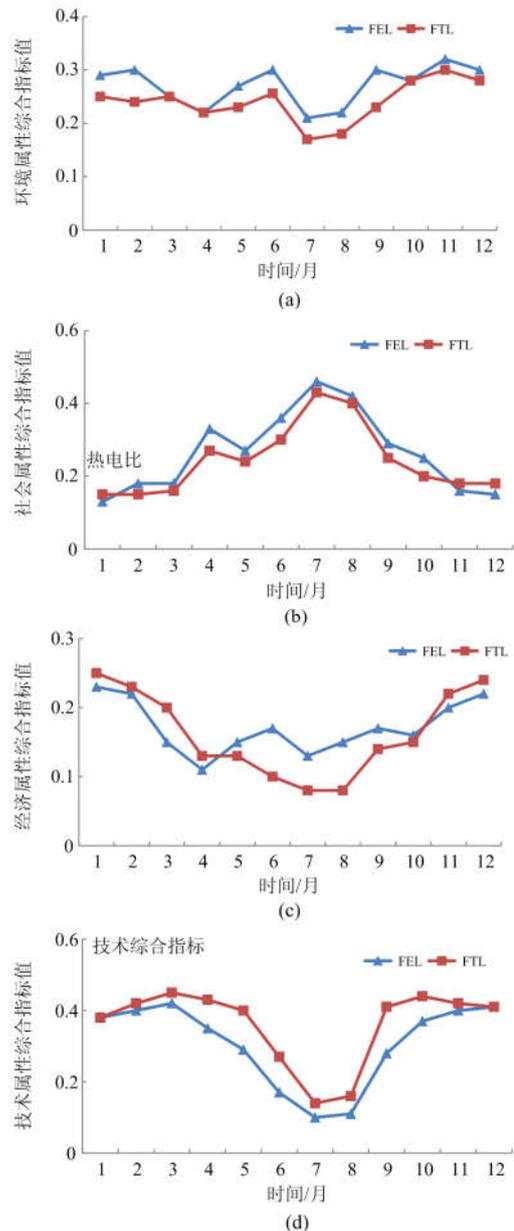


图 6 不同联供系统不同指标的月运行性能对比
Fig. 6 Comparison of different indexes between FEL and FTL system

于冬季的月运行性能，且 FEL 模式下的社会综合热电比值高于 FTL 模式。图 6(c)反映的 PV/T-CCHP 系统月运行性能趋势与图 6(b)相反，其整体冬季月运行性能要优于夏季，其中冬季 FEL 模式下的经济性优于 FTL 模式，而在其他季节热跟随模式下的经济性稍大于电跟随模式，从中也可得到热跟随模式并不适用于联供系统的全年运行。由图 6(d)可知，PV/T-CCHP 系统在两种模式下全年 12 个月的技术能耗指标趋势一致，FTL 模式下的节能性优于 FEL

模式, 夏季 PV/T-CCHP 系统的技术能耗指标最低。

最后, 采用加权平均法得到两种运行策略下联供系统的综合性能评估值见图 7。总体来说, 虽然 FTL 模式月运行性能的环保、社会、经济性等指标综合评价值均略于 FEL 模式, 但是其能源技术综合指标值高于 FEL 模式。由 4.3 节的计算结果可知, 技术指标就其他三种指标而言所占比重最高, 联供系统的 FTL 模式运行可以提高能源利用率, 充分利用能源资源可以带来最好的经济效益, 因此其综合性能优于 FEL 模式。

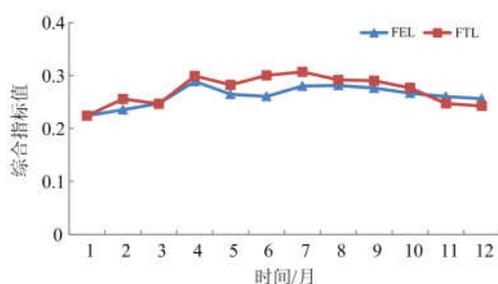


图 7 不同运行策略下联供系统综合性能评估

Fig. 7 Comprehensive performance evaluation between FEL and FTL system

5 结论

提出了一种采用带权重因子的多目标决策理论(MCDM)对太阳能驱动的冷热电联供系统进行综合评价的方法, 以分供系统为参照对象, 建立了联供系统的环境、社会、经济和能源技术效益的多指标模型。将 PV/T-CCHP 系统应用于西部地区某酒店进行分析, 得到以下结论:

1) 太阳能联供系统无论采用哪种运行模式, 其环境、社会和能耗技术效益都要优于分供系统;

2) 当采用 FEL 策略时的联供系统, 其环境、社会和经济效益更好, 当采用 FTL 策略时, 其能源技术效益更佳;

3) 对于所研究某西部地区的酒店建筑, 采用 FTL 策略时其综合性能最优。

参考文献

[1] 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 Wei, LU Shuai, WANG Jun, 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.

[2] 郑国太, 李昊, 赵宝国, 等. 基于供需能量平衡的用户

侧综合能源系统电/热储能设备综合优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 8-18.

ZHENG Guotai, LI Hao, ZHAO Baoguo, et al. Comprehensive optimization of electrical/ thermal energy storage equipments for integrated energy system near user side based on energy supply and demand balance[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 8-18.

[3] 曾雪婷, 刘天琪, 李茜, 等. 基于虚拟电源配置策略的风光水火多源互补短期优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1379-1386.

ZENG Xueting, LIU Tianqi, LI Qian, et al. Short-term complementary optimal dispatch model of multi-source hybrid power system based on virtual power configuration strategy[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1379-1386.

[4] 陈强, 韩巍, 张娜, 等. 新型微燃机分布式冷热电联供系统热力性能分析[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(7): 1253-1259.

CHEN Qiang, HAN Wei, ZHANG Na, et al. Thermodynamic analysis on a novel CCHP system consisting of a micro gas turbine, a rankine cycle, and LiBr-H₂O absorption chiller[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(7): 1253-1259.

[5] 蒋润花, 杨晓西, 杨敏林, 等. 冷热电联供系统运行方式性能优化分析[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(10): 1818-1822.

JIANG Runhua, YANG Xiaoxi, YANG Minlin, et al. The optimal analysis of CCHP operating modes' performance[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(10): 1818-1822.

[6] 胡荣, 马杰, 李振坤, 等. 分布式冷热电联供系统优化配置与适用性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 418-425.

HU Rong, MA Jie, LI Zhenkun, et al. Optimal allocation and applicability analysis of distributed combined cooling-heating-power system[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 418-425.

[7] 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.

[8] 吴红斌, 王东旭, 刘星月. 太阳能冷热电联供系统的策略评估和优化配置[J]. 电力系统自动化, 2015,

- 39(21): 46-51.
WU Hongbin, WANG Dongxu, LIU Xingyue. Strategies evaluation and optimal allocation of combined cooling heating and power system with solar[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 46-51.
- [9] 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.
- [10] 孙鹏飞, 隋合轼, 杨东升, 等. 多能源冷热电联供系统的经济优化与分析[J]. 控制工程, 2016, 23(10): 1584-1590.
SUN Pengfei, SUI Heshi, YANG Dongsheng, et al. Economic optimization and analysis on varied kinds of CCHP systems[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(10): 1584-1590.
- [11] 孔德成, 龙虹毓, 李光林, 等. 基于微能源网联供系统的光伏电源出力等效平滑策略研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(9): 2349-2357.
KONG Decheng, LONG Hongyu, LI Guanglin, et al. Research on equivalent smoothing strategy of PV output based on micro energy system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(9): 2349-2357.
- [12] 王琅, 陆建峰, 王维龙, 等. 楼宇型蓄能联产系统热力学及经济性分析[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(12): 2530-2536.
WANG Lang, LU Jianfeng, WANG Weilong, et al. The analysis of energy and economic performance of CCHP system with TES in buildings[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(12): 2530-2536.
- [13] 邵世圻, 戴赛, 胡林献, 等. 计及热网特性的电热联合系统调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 24-30.
SHAO Shiqi, DAI Sai, HU Linxian, et al. Research on heat-electricity combined scheduling method considering the characteristics of the heating network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 24-30.
- [14] 王江江, 杨颖. 基于太阳能利用的天然气管冷热电联供系统热力性能研究[J]. 热能动力工程, 2017, 32(5): 111-117.
WANG Jiangjiang, YANG Ying. Thermodynamic performance analysis of a combined cooling heating and power system driven by natural gas and based on solar energy[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(5): 111-117.
- [15] ZHOU Long, ZHANG Di, WU Weijie, et al. A comparative study on grid resource utilization rate between China Southern Power Grid and National Grid Plc of UK[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 277-284. DOI: 10.1186/s41601-018-0100-6.
- [16] 游盛水, 张峰源, 吴元旦, 等. 太阳能辅助式冷热电联供系统优化设计及性能分析[J]. 动力工程学报, 2017, 37(10): 855-860.
YOU Shengshui, ZHANG Fengyuan, WU Yuandan, et al. Design optimization and performance analysis of a hybrid solar CCHP system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(10): 855-860.
- [17] 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: 1247-1259.
- [18] 郭亚军. 综合评价理论方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 95-101.
- [19] 孙可, 吴臻, 尚楠, 等. 以省为实体的区域能源互联网内涵框架及发展方向分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 1-9.
SUN Ke, WU Zhen, SHANG Nan, et al. Provincial regional Energy Internet framework and development tendency analysis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 1-9.
- [20] 阮应君, 刘青荣, 袁寅, 等. 建筑冷热电联供系统在不同城市的经济性分析[J]. 煤气与热力, 2015, 35(1): 19-24.
RUAN Yingjun, LIU Qingrong, YUAN Yin, et al. Economic analysis on building combined cooling, heating and power system in different cities, China[J]. GAS & HEAT, 2015, 35(1): 19-24.

收稿日期: 2018-12-18; 修回日期: 2019-02-20

作者简介:

武家辉(1988—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为可再生能源发电与并网系统的稳定与控制; E-mail: wjha29@sina.com

张强(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为可再生能源发电系统与综合能源; E-mail: 244617740@qq.com

王维庆(1959—), 男, 通信作者, 教授, 研究方向为可再生能源并网, 电力系统稳定与分析。E-mail: wwq59@sina.com

(编辑 许威)