

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200283

基于能值分析和多目标决策法的 CCHP-PV-Wind 系统综合性能评估研究

钱嘉欣¹, 武家辉¹, 姚磊², 萨妮耶·麦合木提¹, 张强²

(1. 可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心(新疆大学), 新疆 乌鲁木齐 830047;
2. 国网新疆综合能源服务有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 为充分利用丰富的新能源, 满足用户多样化能源的需求, 可采用含新能源的系统实现冷热电联供。当新能源作为电源或辅助冷热源时, 可减少环境压力, 但多种能源形式会导致不确定性、能源利用率低且成本升高, 需要新的方法对含新能源的冷热电联供(CCHP-PV-Wind)系统的优劣进行评估。提出采用基于模糊层次分析(Fuzzy-Analytic Hierarchy Process, Fuzzy-AHP)和反熵权法(Anti-Entropy Weights, AEW)的多目标决策法(Multi-objective decision-making, MODM), 建立指标体系并计算权重。同时引入能值指标来描述系统的可持续发展水平, 并利用 Copula 理论中的 Kendall 秩相关系数(Kendall' τ)处理 CCHP 和 CCHP-PV-Wind 系统相关性问题。最后, 选取我国西部某城市建筑为研究对象, 结合能值理论对 CCHP 和 CCHP-PV-Wind 两种系统进行综合评估与分析, 研究结果可以为我国新能源的综合利用提供一定参考。

关键词: CCHP-PV-Wind; 模糊层次分析法; 能值分析; 多目标决策

Comprehensive performance evaluation of a CCHP-PV-Wind system based on energy analysis and a multi-objective decision method

QIAN Jiixin¹, WU Jiahui¹, YAO Lei², SANIYE Mahmut¹, ZHANG Qiang²

(1. State Centre for Engineering Research, Ministry of Education for Renewable Energy Generation and Grid-connected Control (Xinjiang University), Urumqi 830047, China; 2. State Grid Xinjiang Integrated Energy Service Company Limited, Urumqi 830011, China)

Abstract: In order to make full use of abundant new energy resources and meet the demand for diversity of energy use, the system containing new energy resources can be used to realize the combination of heat and power supply. As a power source or auxiliary cold and heat supply, it can reduce environmental pressure. However, various energy forms will lead to uncertain, lower energy use and higher cost. New methods are needed to evaluate the advantages and disadvantages of a CCHP-PV-Wind system. A MODM based on Fuzzy-AHP and AEW is proposed to establish an index system and calculate weight. An energy index is introduced to describe the sustainability of the system, and Kendall' τ in Copula theory is used to deal with the correlation between CCHP and CCHP-PV-Wind systems. Finally, energy theory is applied to evaluate and analyze both systems based on a selected building in the western part of China. The research results can provide some reference for the comprehensive use of new energy resources in China.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2020D01C068).

Key words: CCHP-PV-Wind; fuzzy-AHP; energy analysis; multi-objective decision-making

0 引言

传统的能源系统局限于电、热(冷)、气等单一

的能源系统, 彼此间缺乏协调, 因此容易造成能源利用率低、可靠性和安全性不高、环境效益低等问题。冷热电联产(CCHP)系统可以使能量得到梯级利用。为实现能源供应的可持续发展, 响应国家“开源节流”的号召, 将太阳能、风能这类新能源与清洁能源天然气结合在一起, 形成含新能源的冷热电

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助(2020D01C068)

联供(CCHP-PV-Wind)系统。太阳能用于发电和制热, 风能仅仅用于发电。目前, 已有不少学者在 CCHP 系统的模型、潮流计算、优化调度以及评估等方面开展了相关研究。文献[1]以提高清洁能源渗透性、降低微网成本为目标, 建立 CCHP 微网经济调度模型, 并采用 MACPSO 算法对模型进行求解, 以得到最优方案。文献[2]以实现系统净现值成本最小化、一次节能最大化为目标, 寻求 CCHP 微电网最佳容量对 CCHP 微网进行优化改进。文献[3]将储气备用引入调度优化, 采用 NSGAI 求解计及 CCHP 的气电互联网络的最优调度。以上文献的研究主要集中在 CCHP 系统的模型建立, 协调控制以及优化改进等方面。另外有一些文献则对 CCHP 系统进行了多方位评估。文献[4-5]选取了初投资、运行费用、一次能源消耗量以及 CO₂ 排放量等综合性能指标, 作为主要的优化目标函数, 建立了燃气 CCHP 系统评价方法。

只考虑系统某一方面的特点进行分析评价无法得到全面的结果。可以采用操作简单且可靠性高的 MODM^[6-8]对系统内部联系进行评估。同时, 能值分析已经涉及社会、经济、环境等广泛领域, 有利于全球可持续发展战略, 有利于区域经济投入、环境资源、发展模式和政策环境等方面的研究分析^[9]。文献[10]采用能值分析对风电系统的经济性、可再生性、可持续性进行了定量的分析评价。文献[11]利用能值分析法和生命周期两种方法对有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle, ORC)余热发电进行了可持续性发展的评价。文献[12]采用能值分析法结合市场价值评估对多能互补综合能源系统进行了评价。以上文献的分析研究方法为 CCHP-PV-Wind 系统的综合性能评估研究提供了思路。

综上所述, 本文提出将能值指标加入综合评价指标系统中, 结合能值分析和 MODM 对 CCHP-PV-Wind 系统进行评价。由前述可知, CCHP-PV-Wind 系统是在 CCHP 系统的基础上发展而成的, 两个系统具有一定关联性, 二者之间的相关程度将影响评价结果的可靠性。因此采用 Copula 理论中的 Kendall' τ 分析两个系统之间的相关性^[13], 从而将两个系统相对照, 进行评价。本文以环境、经济、不确定性、能效和社会效益共赢为目标, 建立基于能值指标的 CCHP-PV-Wind 指标体系, 结合能值分析和 MODM 建立综合评价模型^[14], 并对系统进行评价, 研究结果可以为我国新能源的综合利用提供一定参考。

1 CHP-PV-Wind 系统基本构架

CCHP-PV-Wind 系统主要由风力发电机组、光

伏发电设备、太阳能集热器、电制冷机、吸收式制冷机和内燃机驱动机组组成。输入的能量有公共电力网、天然气、太阳能发电和风能发电, 所涉及设备的容量、价格见表 1。

表 1 CCHP-PV-Wind 系统内主要设备的单位容量和价格

Table 1 Unit capacity and price of major equipment in the CCHP-PV-Wind system

参数	燃气 锅炉	燃气内 燃机	太阳能 集热器	光伏发 电设备	风电 机组	吸收式 制冷机	电制 冷机
单位容量/kW	200	110	200	10	10	500	130
单位价格/万元	10	80	85	13	18	190	3.1

CCHP-PV-Wind 系统运行原理主要是通过太阳能和风能发电设备发电, 发电后的余热通过电制冷机以及热交换器来实现建筑的供电、制冷、供热和生活热水, 其能量流图如图 1 所示。

由图 1 可以看出: 以天然气为主要燃料带动燃气轮机为系统提供电能, 燃气轮机和燃气锅炉产生的热能通过热回收装置一部分经过热交换器供给系统的热负荷, 另一部分通过吸收式制冷器制冷; 太阳能为光伏发电设备提供能量, 同时也通过太阳能集热器产生热量供给热负荷; 电网、风力发电机和光伏发电设备产生电能提供供电负荷, 同时电网也为电制冷机提供电能; 而电制冷机直接产生制冷量提供给冷负荷。因此, 在此系统中, 当太阳能和风能不能够满足电力需求和热需求时, 由燃气轮机、燃气锅炉和热交换器配合为系统提供电负荷和热负荷; 当电力不足时, 可以通过电网购电。

2 CCHP-PV-Wind 系统的能值分析

2.1 能值理论

能量类别的不同会带来品质和价值的不同^[15], 无法直接进行比较。而地球上各种能量均间接或直接来自太阳能, 因此, 统一用太阳能值来比较各个事物之间的联系很有必要。能值是指某种流动或储存的能量中所包含的另一类别能量的数量^[16], 它的实质就是物质所包含的能量。通过能值转换率来判别能量在能量系统中的等级高低, 不同类别能量通过能值转换率换算成太阳能值(单位 sej)。对于系统的某个能量流 B , 其太阳能值为

$$M = BT \quad (1)$$

式中, T 为太阳能转换率(单位为 sej/j 或 sej/g)。

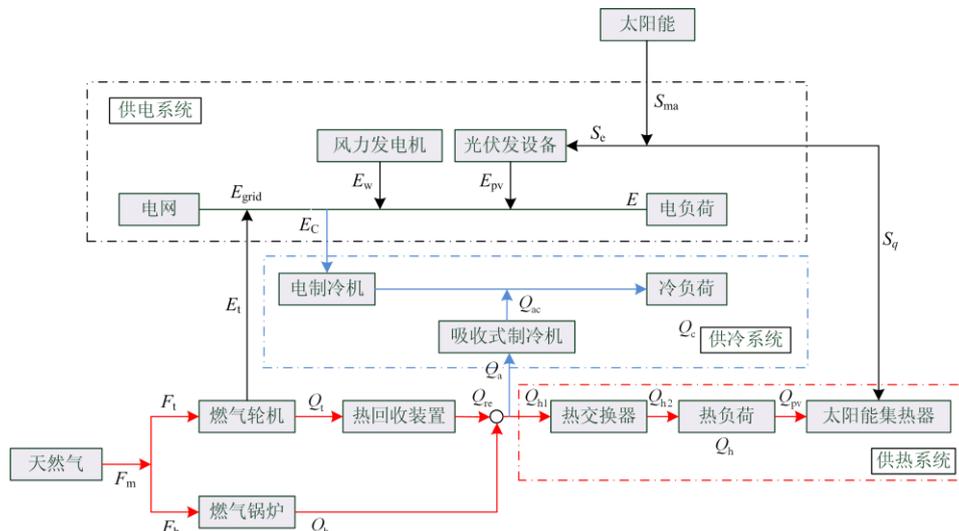


图 1 含新能源冷热电联供系统能量流动示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the energy flow of the cold-heat electric combined supply system with new energy

能值理论^[17-18]是热力学定律的补充，与传统能量分析不同的地方在于能量分析直接将各类能量进行加减评价，然而这些能量之间存在很大差异，是无法直接进行比较的，容易造成结果不准确的情况；而能值分析则将类别不同的能量转化成统一的标准(太阳能值)进行分析评价，具有客观准确的优点。

2.2 CCHP-PV-Wind 系统能值分析图

一个含新能源的冷热电联产系统的能值主要是由新能源能值 R ，不可再生能源能值 N ，购买性能能源能值 F 以及系统的产出能值 Y 构成，如图 2 所示。进行能值分析研究时，要在掌握含新能源系统以及社会各方面情况的基础上，绘制含新能源系统的能值分析图，展示各成分之间的相互作用关系。系统的产出能值 Y 满足式(2)。

$$Y = R + N + F \quad (2)$$

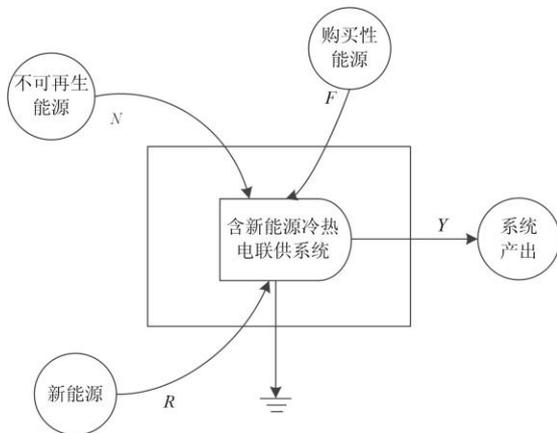


图 2 CCHP-PV-Wind 系统能值分析图

Fig. 2 Analysis of emery value of CCHP-PV-Wind system

2.3 能值分析方法

CCHP-PV-Wind 系统在形成过程中会投入应用一种有效能总量。因此，将其视为一种生态系统，基于能值分析方法对 CCHP-PV-Wind 系统评价，具体评价步骤和方法如下：

- 1) 选取具有代表性的研究区域，收集相关资料；
- 2) 将收集的资料进行归纳整理，集合同种类别或性质的物质、能量，不同种类别进行区别划分，绘制能值综合系统图；
- 3) 依据能值综合系统图，计算能值，绘制能值分析表；
- 4) 根据具体的需求建立能值评价指标体系。

3 CCHP-PV-Wind 系统指标体系建立

3.1 CCHP-PV-Wind 系统能值指标建立

CCHP-PV-Wind 系统中存在多种形式的能量输入输出，并且各个子系统之间呈现出不同的属性，单纯地从一方面去分析很难得出客观、公正、合理的全面评价。评价指标作为评价体系的基础，应根据实际条件，从多个指标、不同的角度去评价。能值分析作为本文评价系统的重要方法，需要建立一个与能值相关的指标体系进行分析。且能值作为一个客观量可以为系统的环境、经济等情况提供客观标准。本文选取以下 6 个指标作为评价指标。

1) 能值投资率

能值投资率(Energy Investment Ratio, EIR)是指购买性能值与新能源和不可再生能源能值和的比值。数值大小表明了经济发展程度的高低，即：值越大，发展程度越高。前者包括天然气、电力、维

修服务、劳务等, 均需花钱购买。

$$EIR = \frac{F}{N + R} \quad (3)$$

式中: F 为购买性能值; N 为不可再生能源能值; R 为新能源能值。

2) 能值自给率

能值自给率(Energy Self-sufficiency Ratio, ESR)表征系统的自组织能力, ESR 值越高, 表明系统的自组织能力越强。评价自然环境的支持能力。

$$ESR = \frac{R + N}{U} \quad (4)$$

式中, U 代表系统的总投入能值。

3) 可更新比

可更新比(Renewable Ratio, ΦR)反映系统运行过程中利用的新能源的比率。它等于新能源能值与能值投入的总量的比值。

$$\Phi R = \frac{R}{U} \quad (5)$$

4) 环境负载率

环境负载率(Environmental Loading Ratio, ELR)指系统中不可再生能源和购买性能值的和与新能源能值的比值^[19]。

$$ELR = \frac{F + N}{R} \quad (6)$$

5) 净能值产出率

净能值产出率(Energy Yield Ratio, EYR)指系统输出的能值总量与购买性能值的比值, 是评价系

统产出对经济贡献的指标, 同时也能体现系统的生产效率^[20]。EYR 值越大, 表明系统产出能值越大, 即生产效率越高。

$$EYR = \frac{Y}{F} \quad (7)$$

6) 能值/环境可持续指标

能值/环境可持续指标(Emergy/Environmental Sustainability Index, E/ESI)是一个综合性的指标, 它反映了系统在能值效益、环境压力以及自组织能力 3 个方面的特性, 数值越高表明自组织能力越强、能值效益越好、对环境的压力越小, 即系统的可持续发展能力越强。

$$E/ESI = \frac{ESR \cdot EYR}{ELR} \quad (8)$$

3.2 CCHP-PV-Wind 系统综合评价指标体系

在具体的能值分析过程中, 除了应用能值分析中基本的指标以外, 还应根据研究区域的情况, 增加传统的评价指标。含新能源的冷热电联供系统是一个综合体, 可以将其视为一个生态经济系统, 若单一考虑采用传统的评价指标, 会缺少必要的客观性; 若只考虑能值指标, 那么对某些不易量化的因素会存在计算偏颇的问题。因此, 将能值指标与传统指标相结合, 形成定量加定性的分析方法, 使系统的评价更加全面。结合能值分析方法与经济、环境、风光不确定性和能效技术传统指标, 构建评价指标体系如图 3 所示。

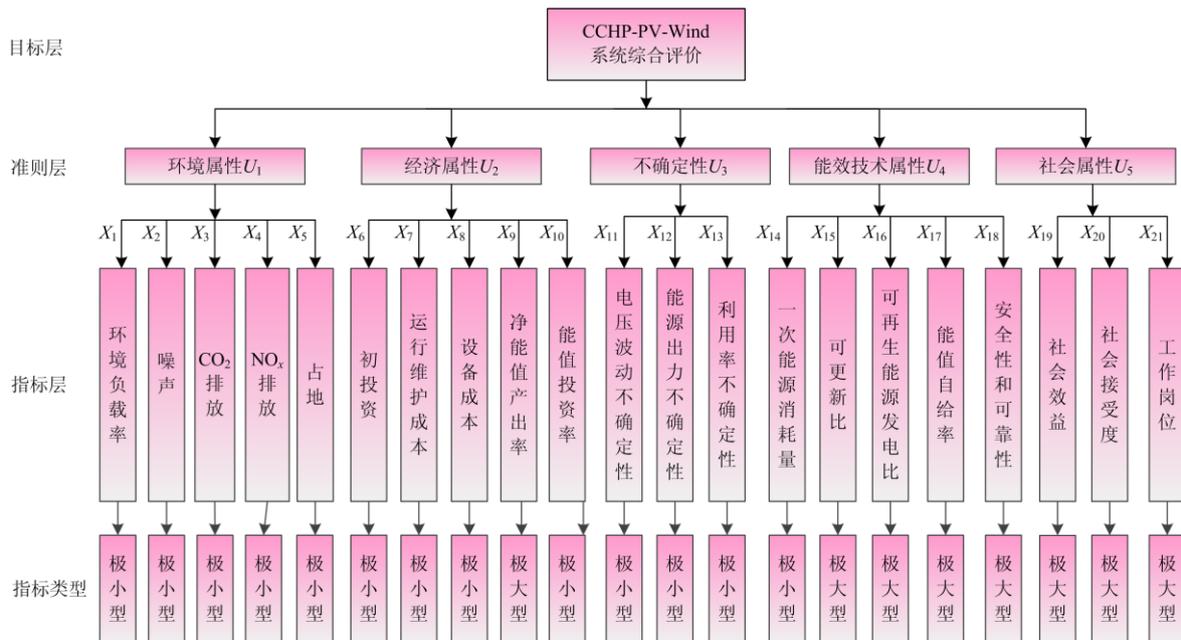


图 3 系统指标体系

Fig. 3 System indicators system

4 基于 Kendall 秩相关系数、Fuzzy-AHP 和 AEW 的综合评价

4.1 基于 Kendall 秩相关系数的分析

Kendall 秩相关系数(Kendall' τ)是指 n 个同类的对象按照特定的属性排序。设 $\{(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots\}$ 是随机向量 (X, Y) 的 N 组观测值组成的样本, 则随机变量 X, Y 的和谐性指标 τ [21] 定义为

$$\tau = \frac{N_c - N_d}{n(n-1)/2} = \frac{2S}{n(n-1)} \quad (9)$$

式中: N_c 为协同的观测值数量; N_d 为非协同的观测值数量; $\tau \in [-1, 1]$ 。

同样地, 也可以表示为观测值的协同和非协同的概率之差。

$$\tau_{xy} = \frac{P\{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2) > 0\} - P\{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2) < 0\}}{1} \quad (10)$$

4.2 基于 Fuzzy-AHP 的主观评价

CCHP-PV-Wind 系统的综合评价指标存在很多不易量化的因素, 因此本文采用模糊层次分析法[22-23]对这五类指标进行综合分析。根据模糊综合评价步骤如下。

1) 建立指标矩阵

将指标体系中评估因素集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 作为准则层, 把 m 个评价指标组成的子因素集记为 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$;

2) 确定评价集 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$

式中, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 分别表示差、较差、一般、较好、好, 并附相应的数值 $V = \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0\}$ 。

3) 建立因素的隶属程度的评判矩阵

即对 $X_i (i=1, 2, \dots, m)$ 的评判得到 V 上的模糊集 $\{r_{i1}, r_{i2}, \dots\}$, 从而确定模糊评估矩阵 $R_i = (R_1, R_2, \dots, R_n)^T = [r_{ij}]_{m \times n}$ 。式中, r_{ij} 表示 X_i 与 V_j 的隶属程度。

4) 指标无量纲化

评价指标构成的指标矩阵 X 为

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix} \quad (11)$$

指标之间由于各单位以及量级间的差距是不可忽视的, 因此需要对其进行无量纲化处理。采用

归一化处理, 见式(12)。

$$X = \begin{cases} x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2} & (a) \\ \sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2} / x_{ij} & (b) \end{cases} \quad (12)$$

5) 构建矩阵

确定系统各决策层之间的关系, 构建判断矩阵 A 。 $A = [a_{ij}]$, a_{ij} 的赋值参考文献[19]。

6) 求权重

计算出判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} , 最大特征值求得的特征向量经过归一化处理, 所得便是要求的权重。

$$A\omega = \lambda_{\max}\omega \quad (13)$$

7) 一致性检验

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} = \frac{\lambda_{\max} - m}{R.I.(m-1)} = \frac{\lambda_{\max} - m}{\alpha(m-1)} \quad (14)$$

式中, $R.I. = \alpha$, α 的值参考文献[19]。若满足 $C.R. < 0.1$, 表示有可接受的一致性; 若不满足此条件, 则继续进行判断, 直到一致性检验合格。

4.3 基于反熵权法的客观评价

AEW 是一种应用较为广泛的客观法。为避免 Fuzzy-AHP 法的主观色彩太浓厚, 提出采用客观方法再对主观权重进行修正。AEW 的计算步骤如下。

1) 数据标准化处理

选取 n 个系统, m 个指标, 形成矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times m}$, 则 x_{ij} 为第 i 个系统的第 j 个指标。

2) 计算指标比重

第 j 项指标在第 i 个系统所占比重, 见式(15)。

$$y_{ij} = x'_{ij} / \sum_{i=1}^n x'_{ij} \quad (15)$$

式中, $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, m$ 。

3) 熵值计算

第 j 项指标的熵值 e_j 见式(16)。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n y_{ij} \ln(y_{ij}) \quad (16)$$

式中, $k=1/\ln(n) > 0, e_i \geq 0$ 。

4) 求权重

$$\omega_j = d_j / \sum_{j=1}^m d_j \quad (17)$$

式中, $d_j = 1 - e_j$ 。

5) 综合评估各个系统

在上面步骤的基础上, 采用加权求和的方法计

算各个系统的综合评价价值:

$$s_i = \sum_{j=1}^m \omega_j y_{ij} \times 100 \quad (18)$$

4.4 综合评价

最后在建立指标系统, 确定其数值和主客观权重后, 采用加权最小绝对值^[24]构建一个纯量实多元函数, 计算出综合权重, 用以衡量评价方案的综合性能水平。

5 案例分析

CCHP 系统已广泛应用于北京、上海、深圳等城市的不同建筑中, 如学校、医院、超市和岛屿^[25], 但是针对西部地区应用的相关文献较少。西部大部分地区春秋较短, 冬夏较长, 温差较大, 部分地区年日照时数约 3×10^3 h, 年光射强度约为 7.5×10^3 MJ m⁻², 风速大于 4.38 m s⁻¹, 有效风速时间大于 2 000 h。这些自然条件为 CCHP-PV-Wind 系统在西北地区的应用提供基础。

5.1 建筑概况

本文选取西部城市 15 层建筑作为研究对象。该建筑总面积约为 2.33×10^4 m², 窗墙比为 45%, 主分为地下 3 层, 地上 12 层。建筑内部主要区域可以划分为大堂、餐厅、会议室、娱乐区以及综合区域, 建筑的所需功能区域具体面积以及所需供能时间如表 2。

表 2 建筑功能面积及计划时间

Table 2 Building function area and planned time

建筑区域分类	建筑区域面积/m ²	每天供能时间/h
大堂	800	24
餐厅	1 000	10
会议室	5 000	22
娱乐区	10 000	17
综合区域	6 500	10

采用新能源对公共建筑进行冷-热-电联供, 理论上不具备调峰能力。采用 CCHP-PV-Wind 时, 系统所发出的电能仅对建筑的基础负荷进行供电, 不考虑售电。基础负荷主要包括建筑照明、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且一旦出现用电故障不会造成较大的影响, 符合 CCHP 的供电原则。本文使用 DeST(Designer's Simulation Toolkit)软件对该建筑 E 、 Q_h 、 Q_c 负荷模拟仿真, 得到其月均能耗量, 见图 4。

由图 4 建筑单位面积月平均负荷可以看出, 该地区全年供暖期从十月中旬开始到次年的四月初结束供暖, 此期间对供冷的需求较少; 从五月末开始

到九月初主要以供冷为主, 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 4 可知该建筑对制冷、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; 建筑的基础用电负荷较为平稳^[26]。

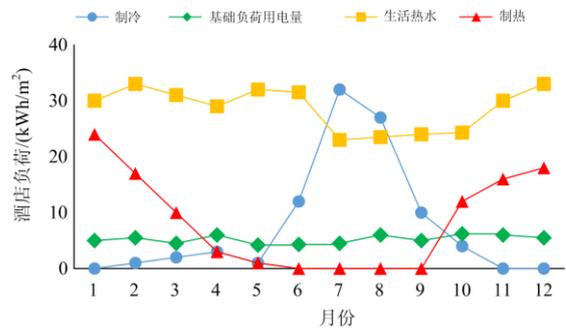


图 4 建筑单位面积月均负荷

Fig. 4 Monthly load per unit area

5.2 相关性分析

在原有的 CCHP 系统的基础上, 将太阳能和风能两种新能源与之结合构成 CCHP-PV-Wind 系统, 两者具有一定关联性。本文旨在研究 CCHP-PV-Wind 系统的最优综合性能。因此, 将已经成熟的 CCHP 系统作为参考对象是很有必要的。结合已有的指标体系, 将 Kendall' τ 作为量化指标对两系统的相关性进行分析。将 CCHP 系统中各个指标乱序排列, CCHP-PV-Wind 系统按照特定属性指标的重要性进行排序。如图 5 所示。

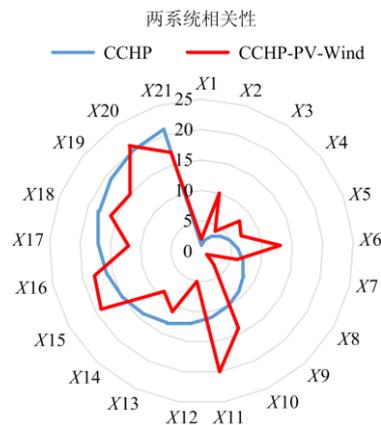


图 5 两系统相关性分析

Fig. 5 Analysis of the correlation between the two systems

由图 5 可以看出, 在此相关性分析中有 21 组观测对象; 协同观测数量 N_c 为 167; 非协同观测数量 N_d 为 43。代入式(9)和式(10), 计算可得 $\tau = 0.5905$, 满

足要求。即 CCHP 系统和 CCHP-PV-Wind 系统具有很强的相关性。可以利用构建的评价指标体系进行对比分析。

5.3 CCHP-PV-Wind 系统能值计算与分析

5.3.1 绘制能量系统图

将收集来的资料进行整理，将同一类别或者性质类似的物质、能量进行集合，不同种类进行区分划分，针对 CCHP-PV-Wind 系统的结构绘制能值分析图，如图 6 所示，其展示了系统能值流动的关系。

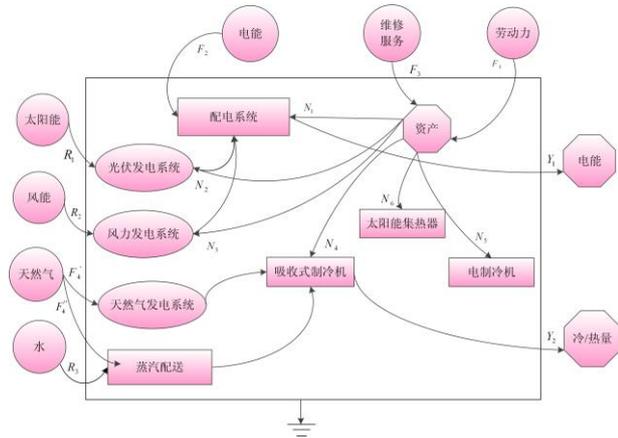


图 6 CCHP-PV-Wind 系统能值综合系统图

Fig. 6 Integrated system diagram of energy value of CCHP-PV-Wind system

由图 6 可以看出，该建筑的电能生产主要来自于太阳能、风能以及天然气。

5.3.2 能值分析表汇总

根据本文所建立的指标体系所需数据，按照能值计算规则，计算得到能值表。具体的计算规则见文献[16]与文献[27]。

其中，主要能值的计算方法为

$$S = s \times r \times T \quad (19)$$

$$N = V \times (E_v) \times T \quad (20)$$

$$W = h \times s \times \rho \times (k_c) \times g \times T \quad (21)$$

$$E = q \times (q_c) \times T \quad (22)$$

式中： S 、 s 、 r 、 N 、 V 、 E_v 、 W 、 h 、 ρ 、 k_c 、 g 、 E 、 q 、 q_c 分别表示太阳光能值、建筑面积、太阳光平均辐射量、天然气能值、天然气体积、(能量/体积)、风能能值、风能动力高度、空气密度、涡流扩散系数、风速梯度、电能能值、单位时间电量和单位电量的能量。

CCHP-PV-Wind 系统和 CCHP 系统各自所需的各类 R、N、F、Y 能值的情况，如图 7 所示。

由图 7 可以看出，对于购买性能值，CCHP 系统所需量更高，而 CCHP-PV-Wind 系统则需要更多的新能源与不可再生能源，但是 CCHP 系统的产出

能值远高于 CCHP-PV-Wind 系统；就总体输入能值而言两个系统相差甚小。

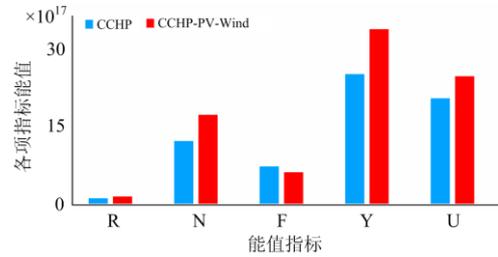


图 7 基于能值分析的各项指标总能值

Fig. 7 Total energy values for each index based on energy analysis

5.3.3 系统能值评价指标计算

由式(3)一式(7)计算得到两个系统的能值投资率(EIR)，能值自给率(ESR)，可更新比(ØR)，环境负载率(ELR)，净能值产出率(EYR)，见表 3。

表 3 基于能值分析的评价结果

Table 3 Evaluation results based on energy analysis

能值指标	CCHP	CCHP-PV-Wind
EIR	0.55	0.33
ESR	0.62	0.75
ØR	0.052	0.056
ELR	18.43	16.9
EYR	2.9	5.5

从表 3 可以看出，CCHP-PV-Wind 系统相对于 CCHP 系统 EYR 高，而 ELR 低，则表明 CCHP-PV-Wind 系统的环境压力小，生产效率高，可持续发展水平好；从 ESR 指标可以看出，CCHP-PV-Wind 系统的自组织能力更强，也即是说自然环境的支持能力更好；而从 EIR 指标看，CCHP 系统更高，即是说此系统投入的多，产出的少，回报率相对较弱，对环境的依赖性较低。

5.4 CCHP-PV-Wind 指标权重计算与分析

建立图 2 所示的指标体系后，首先运用 Fuzzy-AHP 法对各指标进行权重计算；其次，对各系统的定性指标采用 TMF(Triangular Membership Function)进行量化，量化后再进行规范化，同时应用式(12(a))将极大型指标转换成极小型指标，得到目标层对准则层的判断矩阵 A 为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 1/3 & 3 \\ 1/2 & 1 & 3 & 1/3 & 3 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 1/3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 1 & 5 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}$$

归一化和一致性检验后, 得到权重矢量为

$$\omega(A) = [0.2145, 0.1815, 0.1150, 0.4292, 0.0600]$$

可知, 准则层中能效技术指标最重要, 其次是环境属性指标, 经济属性和不确定性相对重要, 而社会属性相对于其他 4 个指标较不重要。其次, 计算各准则层对指标层的矩阵, U_1 层到 X_i 的判断矩阵 R_1 , U_2 层到 X_i 的判断矩阵 R_2 , U_3 层到 X_i 的判断矩阵 R_3 , U_4 层到 X_i 的判断矩阵 R_4 , U_5 层到 X_i 的判断矩阵 R_5 , 计算结果分别为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 & 3 & 5 \\ 1/4 & 1 & 1/2 & 1/3 & 2 \\ 1/2 & 2 & 1 & 2 & 4 \\ 1/3 & 3 & 1/2 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/2 & 1/4 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 1/5 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 2 & 1/5 & 1/5 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 1/6 & 1/5 \\ 5 & 6 & 6 & 1 & 2 \\ 2 & 5 & 5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 2 \\ 3 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 2 & 1/2 & 1/2 \\ 3 & 1 & 2 & 2 & 4 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 1/2 & 2 & 1 & 4 \\ 2 & 1/4 & 2 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

经过归一化及一致性检验后, 得到准则层对指标层的权重矢量分别: $\omega(R_1) = [0.4165, 0.0988, 0.2441, 0.1792, 0.0613]$; $\omega(R_2) = [0.1292, 0.0761, 0.0515, 0.4708, 0.2724]$; $\omega(R_3) = [0.2493, 0.5936, 0.1571]$; $\omega(R_4) = [0.1253, 0.3793, 0.1053, 0.2682, 0.1219]$; $\omega(R_5) = [0.5936, 0.2493, 0.1571]$ 。

基于 Fuzzy-AHP 法, 由式(11)一式(14)计算得指标系统主观权重比例柱形图如图 8 所示。

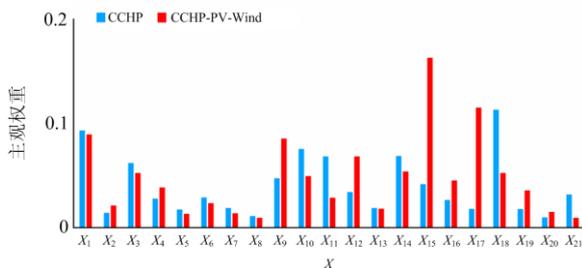


图 8 指标系统主观权重

Fig. 8 Subjective weight of indicator systems

由图 8 可以看出, CCHP-PV-Wind 系统的环境负载率、净能值产出率、能源出力不确定性、可更新比、社会效益指标占得权重比分别为环境属性、经济属性、不确定性、能效技术属性和社会属性等五个属性中的最高, 表示五种指标在评价系统中较为重要, 需进一步分析研究。

其次, 采用反熵权法计算各指标的客观权重, 由式(15)一式(18)计算所得各指标的客观权重如图 9 所示。

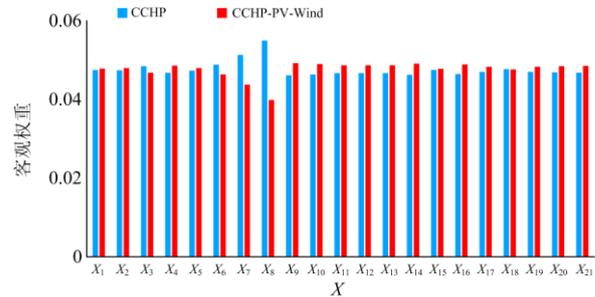


图 9 指标系统客观权重

Fig. 9 Objective weights of indicator systems

最后, 根据能值计算所得结果结合综合评价法, 采用加权最小绝对值得到 CCHP-PV-Wind 系统和 CCHP 系统两个系统综合性能评估值, 如图 10 所示。

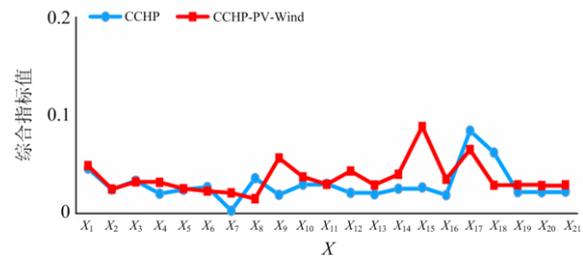


图 10 指标系统综合值

Fig. 10 Comprehensive values for indicator systems

5.5 结果分析

为了验证本文的合理性, 将能值分析、Fuzzy-AHP、AEW 以及综合权重法进行比较, 结果见表 4。

表 4 不同评价方法的计算结果比较

Table 4 Comparison of the results of different evaluation methods

方法	CCHP	CCHP-PV-Wind
Fuzzy-AHP	1.158 3	1.454 3
熵权法	4.625	4.904
综合权重法	0.642 3	0.763 2
E/ESI	0.122	0.244

由表 4 可以看出, 系统优劣顺序均为 CCHP-PV-Wind 系统优于 CCHP 系统。从能值分析法所得到的结果可知 CCHP-PV-Wind 系统除了成本比较高,

其他各项能值指标都优于 CCHP 系统。此外,由综合指标能值/环境可持续指标的对比可知,CCHP-PV-Wind 系统结果比 CCHP 系统高出一倍,即 CCHP-PV-Wind 系统自组织能力越强,能值效益越高,对环境的压力越小,可持续发展能力强,与 MODM 综合评价法结果近似。Fuzzy 综合评价法的模糊分布选择相对固化,客观性较差,但是结合反熵权法后可以克服这个缺点,能够有效进行定性和定量分析。从主客观相结合的综合权重法评估中也可以看出 CCHP-PV-Wind 系统优于 CCHP 系统。综上,本文所提的能值分析法能够客观地反映系统的本质,评估效果较为合理。

6 结论

提出一种采用带权重因子的多目标决策理论法对 CCHP-PV-Wind 系统进行综合性能评价,通过 Kendall' τ 量化 CCHP-PV-Wind 和 CCHP 两系统之间的相关性,并以 CCHP 系统作为参考对象,建立 CCHP-PV-Wind 系统的环境、经济、不确定性、能效技术和社会等层次的指标体系。将 CCHP-PV-Wind 系统应用于西部地区某建筑进行分析,得到以下结论:

1) 采用 Kendall' τ 分析可知,CCHP-PV-Wind 和 CCHP 两系统之间具有很强的相关性。

2) 通过能值分析分析了不同物质、不同类型的能量之间的关系,从环境资源与经济的本质中分析比较知,CCHP-PV-Wind 系统优于 CCHP 系统,但是初投资和后期维修服务费较大。

3) 采用 Fuzzy-AHP、反熵权法和能值分析计算各指标的主客观权重,基于加权最小绝对值计算出综合权重,分析可知,对于某西部某建筑 CCHP-PV-Wind 系统的环境、社会以及能效技术均优。

4) 对于所研究西部地区的酒店建筑,采用 CCHP-PV-Wind 系统时其综合性能最优。

参考文献

- [1] YANG J, WANG L, HU P, et al. Economic dispatching of CCHP microgrid considering grid-connected revenue[C] // 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), September 6-9, 2019, Yichang, China: 657-660.
- [2] YOUSEFI H, GHODUSINEJAD M H, KASAEIAN A. Multi-objective optimal component sizing of a hybrid ICE + PV/T driven CCHP microgrid[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 122.
- [3] 汪洋子, 陈茜. 计及冷、热、电联产的气电互联网络最优调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 168-175.
- [4] WANG Yangzi, CHEN Xi. Optimal dispatch of gas-electricity interconnection network taking into account the production of cold, heat and electricity[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 168-175.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [5] WANG Lang, LU Jianfeng, WANG Weilong, et al. Thermodynamics and economy analysis of cogeneration system for building type energy storage[J]. Journal of Engineering Thermal Physics, 2017, 38(12): 2530-2536.
- [6] CHEN W, YANG C, HUANG M, et al. Multi-objective optimization of a gas turbine based CCHP combined with solar and compressed air energy storage system[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 164: 93-101.
- [7] MURTY V V S N, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-20. DOI: 10.1186/s41601-019-0147-z.
- [8] HUANG Zhao, FANG Baling, DENG Jin. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. Springer Singapore, 2020, 5(10).
- [9] 林晓霞. 基于能值分析的鄱阳湖区耕地生态安全评价[D]. 南昌: 江西农业大学, 2018.
- [9] LIN Xiaoxia. Ecological security assessment of cultivated land in Poyang Lake area based on energy analysis[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2018.
- [10] YANG Jin, CHEN Bin. Energy-based sustainability evaluation of wind power generation systems[J]. Applied Energy, 2016, 177.
- [11] ZHANG H L, GUAN X, DING Y, et al. Energy analysis of organic rankine cycle (ORC) for waste heat power generation[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 183: 1207-1215.
- [12] 田立亭, 程林, 郭剑波, 等. 基于能值分析的多能互补综合能源系统价值评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2925-2934.
- [12] TIAN Liting, CHENG Lin, GUO Jianbo, et al. Value assessment method for multienergy complementary integrated energy systems based on energy value

- analysis[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(8): 2925-2934.
- [13] 赵书强, 王皓, 张辉, 等. 计及相关性的风电场和光伏电站时序出力模型研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(7): 52-58, 87.
ZHAO Shuqiang, WANG Hao, ZHANG Hui, et al. Wind farm and photovoltaic power station output time series model considering correlation[J]. *Smart Power*, 2020, 48(7): 52-58, 87.
- [14] 付忠广, 刘炳含, 王鹏凯, 等. 燃气电厂性能指标综合评价模型[J]. *热力发电*, 2019, 48(3): 7-13, 21.
FU Zhongguang, LIU Binghan, WANG Pengkai, et al. A comprehensive evaluation model for performance indexes of gas-fired power plants[J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(3): 7-13, 21.
- [15] 孙栓柱, 陈克, 李益国, 等. 基于区间粗糙数层次分析的冷热电联产系统综合性能评价方法[J]. *热力发电*, 2020, 49(4): 131-137.
SUN Shuanzhu, CHEN Ke, LI Yiguo, et al. Comprehensive performance evaluation method for CCHP system based on interval rough number analytic hierarchy process[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(4): 131-137.
- [16] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [17] LÜ Cuimei, LING Minhua, WU Zening, et al. Quantitative assessment of ecological compensation for groundwater overexploitation based on energy theory[J]. *Pubmed*, 2020, 42(3).
- [18] WAN Ajun, TU Runqiu, YUE Weidong, et al. Construction and case study of rural environmental value-added evaluation system based on energy theory[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2020, 4: 1-10.
- [19] 郭亚军. 综合评价理论方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [20] CHEN Wei, GENG Yong, DONG Huijuan, et al. An energy accounting based regional sustainability evaluation: a case of Qinghai in China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 88.
- [21] NELSEN R B. An introduction to Copulas[J]. *Lecture Notes in Statistics*, 1999, 139: 7-25, 125-134.
- [22] SI Tong, WANG Chunbo, LIU Ruiqi, et al. Multi-criteria comprehensive energy efficiency assessment based on fuzzy-AHP method: a case study of post-treatment technologies for coal-fired units[J]. Elsevier Ltd, 2020, 200.
- [23] 刘万勋, 于琳琳, 张丽华, 等. 基于 AHP 和多级模糊综合评判的电网发展水平评估[J]. *智慧电力*, 2020, 48(5): 80-85.
LIU Wanxun, YU Linlin, ZHANG Lihua, et al. Evaluation of power grid development level based on AHP and multi-level fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Smart Power*, 2020, 48(5): 80-85.
- [24] 陈艳波, 郑顺林, 杨宁, 等. 基于加权最小绝对值的电-气综合能源系统抗差状态估计[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(13): 61-74.
CHEN Yanbo, ZHENG Shunlin, YANG Ning, et al. Estimation of electrical-gas integrated energy system resistance based on weighted minimum absolute value[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(13): 61-74.
- [25] REHMAN A, LIU N, SIDDIQUE A, et al. Optimal scheduling and multi-objective assessment of CCHP system[C] // 2018 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET), September 10-12, 2018, Islamabad, Pakistan: 1-5.
- [26] 武家辉, 张强, 王维庆, 等. 太阳能冷热电联供系统的综合性能评价与研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(21): 179-186.
WU Jiahui, ZHANG Qiang, WANG Weiqing, et al. Comprehensive performance evaluation and research of solar cold-electric combined supply system[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(21): 179-186.
- [27] MARK T B, MATHEW C. Energy ecosystems and network analysis[J]. Second Edition. *Encyclopedia of Ecology*, 2019(4): 307-318.
- [28] PENG T, LU H F, WU W L. Should a small combined heat and power plant (CHP) open to its regional power and heat networks Integrated economic, energy, and energy evaluation of optimization plans for Jiufa CHP[J]. *Energy*, 2007, 33(3).

收稿日期: 2020-03-18; 修回日期: 2020-08-28

作者简介:

钱嘉欣(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统性能综合评价与优化; E-mail: 710040186@qq.com

武家辉(1988—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为复杂能源系统稳定与控制; E-mail: wjha29@sina.com

姚磊(1972—), 男, 中级工程师, 研究方向为综合能源系统开发与应用。E-mail: 244617740@qq.com

(编辑 周金梅)