

面向农村微能网的评价指标构建及应用

张 新^{1,2}, 杨建华^{1*}, 王维洲³, 井天军¹, 张 漫¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 内蒙古科技大学信息工程学院, 包头 014010;

3. 国家电网甘肃省电力公司, 兰州 730050)

摘 要: 为了客观的评价农村微能网规划结果的优缺点, 该研究建立农村微能网的规划评价指标体系, 该评价指标体系包含可靠性、经济性、环保性和效益性4个一级指标、7个二级指标和14个三级指标。首先运用熵权法对农村微能网各规划方案进行客观评价, 得到各规划方案的客观评价价值, 然后根据项目所在地的环境条件、项目资金情况和项目投资方需求不同, 运用专家评价法建立专家评价指标权重表, 将熵权法与专家评价法相结合, 得到适合微能网项目实际开发需要的评价指标的权重分布, 优选出适合项目投资方的微能网规划方案。算例结果表明, 采用熵权法得到农村微能网3个规划方案的客观评价价值分别为1.32、1.14和2.47, 得到具有供能装置、能量转换装置和冷-热-电多形式储能装置的方案3为农村微能网最优规划方案。采用专家评价法与熵权法相结合的主客观评价方法对农村微能网规划方案进行综合评价, 如果侧重关注环保性指标, 则未规划储能装置的方案2为最优选择, 如果侧重关注可靠性、效益性和经济性指标, 则具有供能装置、能量转换装置和冷-热-电多形式储能装置的方案3是最优选择, 证明了该研究所构建的微能网评价体系可以对微能网规划方案实现有效评价, 为微能网的建设规划提供有益的参考。

关键词: 农村; 电; 农村微能网; 规划评价; 指标权重; 熵权法; 专家评价法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.06.023

中图分类号: TM 926 文献标志码: A 文章编号: 1002-6819(2020)-06-0196-10

张 新, 杨建华, 王维洲, 井天军, 张 漫. 面向农村微能网的评价指标构建及应用[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 196–205. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.06.023 <http://www.tcsae.org>

Zhang Xin, Yang Jianhua, Wang Weizhou, Jing Tianjun, Zhang Man. Construction and application of evaluation indexes for rural micro-energy-grid[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(6): 196–205. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.06.023 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

随着煤炭、石油等化石能源的日益枯竭和环境污染的不断加重, 如何实现可再生能源的稳定应用, 提高能源的综合利用率, 减少环境污染, 保障能源的安全供应, 成为世界各国的重要研究课题^[1-3]。因此, 综合能源网络的概念应运而生^[4], 它由供能网络(电力网、天然气网络和冷热力网络)、能量交换环节(冷热电三联供机组, 空气源热泵等)、能量存储环节(蓄电池, 冷热蓄能装置等)和大量的终端综合能源单元构成, 实现冷-热-电-气能流的多向互动和可再生能源在多网络间的共享和稳定应用, 满足人民日益增长的优质能源服务需求^[5]。在农村地区配置的综合能源网络简称为农村微能网, 是一种用户侧能量综合利用单元。中国农村地区广阔, 生物质资源和可再生能源丰富, 通过农村微能网的研究可以实现上述各类资源的就地综合利用, 对新农村的建设具有重要意义^[6]。

目前, 国内外对于综合能源网络的建模、规划和优

化运行方面进行了大量研究^[7-20]。例如, 文献[9]针对中小型区域能源网络的运行优化问题, 提出双层优化调度模型, 采用自适应遗传算法进行求解, 取得较好的优化结果。文献[12]运用多场景理念对北方某综合能源网络进行规划并分析了综合能源网络具有的经济效益和社会效益。文献[19]针对综合能源网络的建模问题, 提出多时序仿真模型, 运用MATLAB-EXCEL VBA工具进行仿真模拟, 实现电力、热力和燃气网络的综合分析。文献[20]以伊朗德黑兰东部某住宅小区为例, 规划用户侧综合能源网络, 建立混合整数线性规划模型, 并对规划结果的优越性进行了阐述。

但是, 在综合能源网络的评价方面国内外的研究成果较少^[21-25]。例如, 文献[21-22]建立适用于单体建筑的多种分布式能源网络优化配置模型并对配置结果进行评价, 但指标设置较少, 未能全面的评价分布式能源网络的配置结果。文献[23]构建了从规划到运行具有普适性的区域综合能源网络评价指标体系并采用实际算例验证其指标和方法的有效性, 但指标适用面过于宽泛, 对沼气、冷热能方面的指标考虑较少。文献[24]提出了综合能源网络的典型物理架构并综述了当前综合能源网络的效益评价体系和评价方法。文献[25]运用能量枢纽的方法针对意大利卡利亚里地区 Brotzu 医院的综合能源网络的经济性进行了评估。

收稿日期: 2019-10-30 修订日期: 2020-02-16

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金(2019MS05047)

作者简介: 张新, 博士生, 讲师, 研究方向为新能源综合利用技术。

Email: zhangxin19861986@126.com

※通信作者: 杨建华, 教授, 研究方向为配电网规划与运行控制。

Email: yang.haag@163.com

综上所述,在农村微能网的规划评价研究方面存在以下问题:1)现阶段针对综合能源网络建模、规划和运行方面的研究成果较多,涉及评价方面的文章较少,尤其是本文研究农村微能网的规划评价。2)已有文献评价指标设置简单或指标设置繁杂,计算困难,无法有效实现对微能网规划方案的评价。3)已有文献评价指标适用面过于宽泛,未根据农村微能网规划建设的特点,建立科学合理的规划评价指标体系和评价方法,无法客观评价各规划方案的优缺点。针对上述研究问题,本文提出了包含可靠性、经济性、环保性效益性4个一级指标、7个二级指标和14个三级指标的农村微能网规划评价体系,并运用熵权法和专家经验相结合的综合评价方法,以期实现对农村微能网规划方案的客观、全面评价。

1 农村微能网系统架构

农村微能网主要由能量生产、传送、转换、储存和利用等单元构成。冷-热-电-气各类能量通过能量转换装

置、电力网络和冷热力管网实现能量流的多向互动和相互支撑,最终实现多种能源综合高效利用的目标,系统结构如图1所示。

1) 能量生产单元,是指将风能、光能和天然气等能源转换为系统所需冷-热-电能量的装置。主要包含风机、光伏、光热、微型燃气轮机和燃气锅炉等。

2) 能量传送单元,是指各类能量与负荷点之间的传送通道,主要包含电能网络、冷热能网络、沼气网等。

3) 能量转换单元,是指实现冷-热-电-气各能量互相转换的装置,主要包含电-热转换装置(空气源热泵)、电-冷转换装置(空气源热泵)、热-冷转换装置(溴化锂吸收式制冷机)和热-热转换装置(余热锅炉)。

4) 能量储存单元,是指实现冷-热-电能储存的装置,包括各类蓄电池(锂电池)、冷热储能罐。其主要作用为平抑风电、光伏等可再生能源的出力波动性,在系统内部实现削峰填谷的作用。

5) 能量利用单元,是指系统内部冷-热-电负荷点。

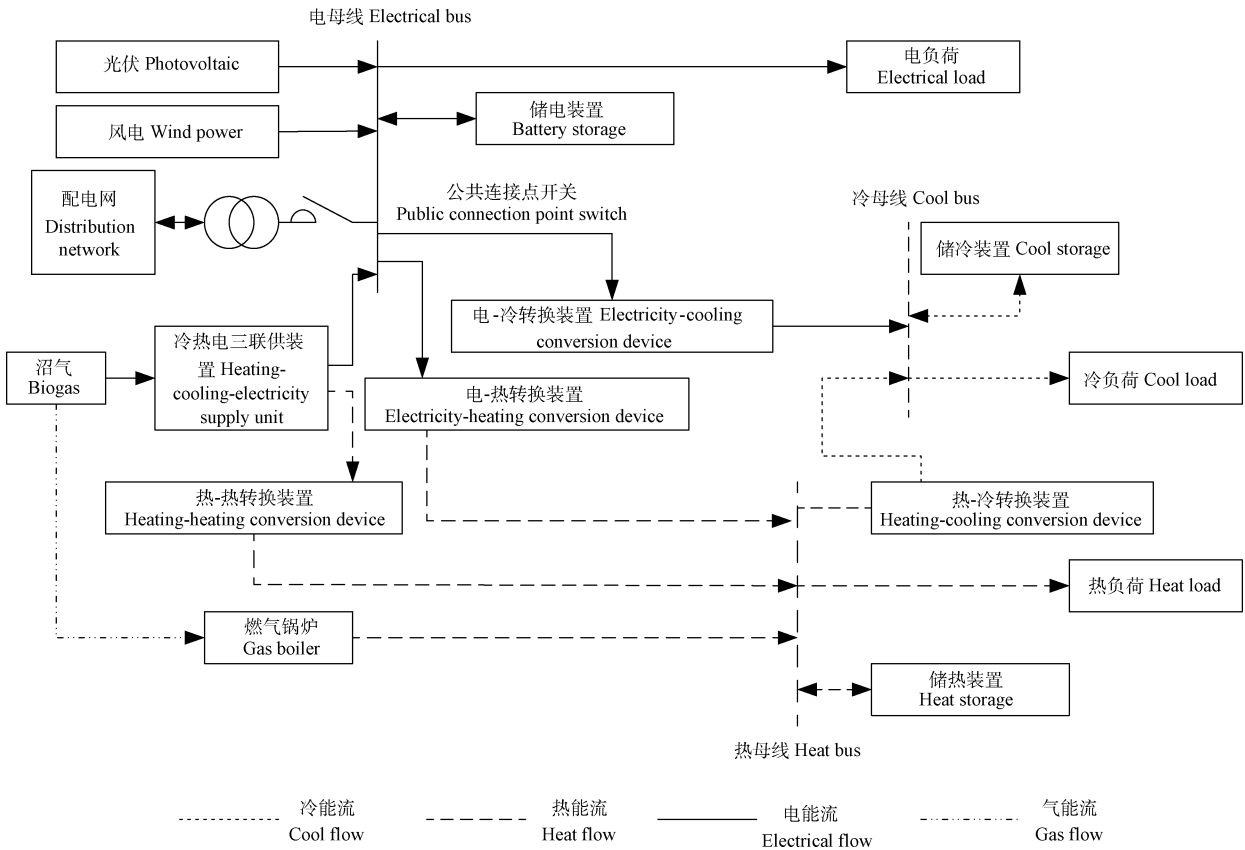


图1 农村微能网系统架构
Fig.1 System frame of rural micro-energy-grid

2 农村微能网规划评价指标

本研究以客观和全面为评价指标建立准则,以创新、协调、绿色、开放和共享发展理念为指导,以为人

民提供优质能源服务为目标,建立包含可靠性、经济性、环保性和效益性4个一级指标、7个二级指标和14个三级指标的农村微能网评价体系,评价体系如表1所示。

表1 农村微能网规划评价体系
Table 1 Evaluation system of rural micro-energy-grid

一级指标 Primary indicator	二级指标 Secondary indicator	三级指标 Tertiary indicator
可靠性 Reliability	供电可靠性	电能缺供率
	供冷热可靠性	热能缺供率
		冷能缺供率
经济性 Economics	系统经济性	系统投资费用
		系统运行维护费用
		系统设备使用年限与价格之比
环保性 Environmental protection	供能设备环保性	污染物排放量
		可再生能源的装机比例
	储能设备环保性	冷热电联供机组的装机比例
		储电设备更换周期率
		储热设备更换周期率
		储冷设备更换周期率
效益性 Benefit	稳定效益	与配电网功率交换费用
	环境效益	环境污染惩罚费用

2.1 可靠性指标

农村微能网可靠性指标集主要包含供电可靠性和供冷热可靠性2个二级指标和电能缺供率、冷能缺供率、热能缺供率3个三级指标。

1) 系统电能缺供率

$$s = \frac{\sum_{t=1}^T \Delta P_{\text{load}}(t)}{\sum_{t=1}^T P_{\text{load}}(t)} \quad (1)$$

式中 s 为系统电能缺供率； T 为系统运行周期，h； $\Delta P_{\text{load}}(t)$ 为系统电能在 t 时刻的缺供功率， $P_{\text{load}}(t)$ 为系统电能负荷在 t 时刻的需求功率，kW。

2) 系统冷能缺供率

$$v = \frac{\sum_{t=1}^T \Delta P_{\text{load}}(t)}{\sum_{t=1}^T P_{\text{load}}(t)} \quad (2)$$

式中 v 为系统冷能缺供率； $\Delta P_{\text{load}}(t)$ 为系统冷能在 t 时刻的缺供功率，kW； $P_{\text{load}}(t)$ 为系统冷能负荷在 t 时刻的需求功率，kW。

3) 系统热能缺供率

$$h = \frac{\sum_{t=1}^T \Delta P_{\text{load}}(t)}{\sum_{t=1}^T P_{\text{load}}(t)} \quad (3)$$

式中 h 为系统热能缺供率； $\Delta P_{\text{load}}(t)$ 为系统热能在 t 时刻的缺供功率，kW； $P_{\text{load}}(t)$ 为系统热能负荷在 t 时刻的需求功率，kW。

2.2 经济性指标

农村微能网经济性指标集包含系统经济性1个二级指标和系统投资费用、系统维护费用、系统设备价格和使用年限之比3个三级指标。

1) 系统投资费用

$$C_{\text{in}} = \sum_{d=1}^N C_{m_d} \frac{l(1+l)^{n_d}}{(1+l)^{n_d} - 1} P_d \quad (4)$$

式中 C_{in} 为微能网投资费用，元； N 为微源的类型数目； C_{m_d} 为第 d 种微源的初始投资成本，元/kW； l 为折现率； n_d 为第 d 种微源的使用年限，a； P_d 为第 d 种微源的额定功率，kW。

2) 系统运行维护费用

$$C_{\text{maintain}} = \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^N C_{m_d} P_d(t) \quad (5)$$

式中 C_{maintain} 为微能网运行维护费用，元； C_{m_d} 为微能网各供能设备单位维护费用，元； $P_d(t)$ 为第 d 种微源在 t 时刻的运行功率，kW。

3) 系统设备的价格和使用年限之比

$$H = \sum_{d=1}^N \frac{C_{m_d}}{a_d} \quad (6)$$

式中 H 为微能网各设备的使用年限与价格之比的和； a_d 为微能网第 d 种设备的使用年限，a。

2.3 环保性指标

农村微能网环保性指标集包含供能设备环保性和储能设备环保性2个二级指标，污染物排放量、可再生能源装机比例、冷热电联供机组的装机比例、储电设备更换周期率、储热设备更换周期率、储冷设备更换周期率6个三级指标。

1) 污染物排放量

在微型燃气轮机和燃气锅炉工作的时候会释放 NO_x 和 CO_2 等对环境有害的气体，公式如下：

$$C_{\text{po}} = \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^N \sum_{k=1}^U s_k P_d(t) \quad (7)$$

式中 C_{po} 为微能网各污染物的总排放量，kg； s_k 为微能网第 k 种污染物的排放系数，kg/(kW·h)； U 为污染物的类型数目。

2) 储电-冷-热设备更换周期率

$$\mu = \frac{G_{\text{store}}}{G_{\text{energy}}} \times 100\% \quad (8)$$

式中 μ 为微能网储电-冷-热设备更换周期率； G_{store} 为微能网储电-冷-热设备更换周期，a； G_{energy} 为微能网设计运行期限，a。

3) 可再生能源的装机比例

本研究所指可再生能源为光伏和风电，其装机比例定义为光伏和风电的装机容量与系统总装机容量的百分比，公式如下：

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^x P_{\text{DE},i}}{\sum_{i=1}^x P_{\text{DE},i} + \sum_{j=1}^c P_{\text{GE},j}} \times 100\% \quad (9)$$

式中 β 为可再生能源的装机比例； x 为可再生能源机组的种类； c 为微能网其余发电设备的种类； $P_{\text{DE},i}$ 为光伏/风电机组的额定容量，kW； $P_{\text{GE},j}$ 为微能网其余发电设备的额定容量，kW。

4) 冷热电联供机组装机比例

$$\alpha = \frac{P_{\text{CCHP}}}{\sum_{i=1}^x P_{\text{DE},i} + \sum_{j=1}^c P_{\text{GE},j}} \times 100\% \quad (10)$$

式中 α 为冷热电联供机组渗透率; P_{CCHP} 为冷热电联供机组的功率, kW。

2.4 效益性指标

农村微能网效益性指标集包含稳定效益和环境效益2个二级指标,与配电网功率交换费用和环境惩罚费用2个三级指标。

1) 环境污染惩罚费用

$$C_{\text{pomoney}} = \sum_{d=1}^N \sum_{k=1}^U s_k P_d (w_k + w'_k) \quad (11)$$

式中 w'_k 为第 k 种污染物的环境价值,元/kg; w_k 为第 k 种污染物的罚款,元/kg。

2) 微能网与配电网功率交换费用

微能网在自身电能供应量大于内部电负荷需求时,可以向上级配电网售电获得收益,微能网在自身电能供应量小于内部电负荷需求时,需要向上级配电网购电补充满足系统内部电负荷需求。但是,目前中国农村地区配电网相对薄弱,微能网与配电网的频繁交换势必会影响配电网的安全稳定运行,因此设计微能网与配电网功率交换费用这一指标来反映微能网对配电网运行造成的影响,如式(12)所示:

$$C_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T \left(\frac{C_{\text{buy}}(t) + C_{\text{sell}}(t)}{2} P_{\text{grid}}(t) + \frac{C_{\text{buy}}(t) - C_{\text{sell}}(t)}{2} |P_{\text{grid}}(t)| \right) \quad (12)$$

式中 C_{grid} 为微能网与配电网之间购电费用和售电费用的差值,元; $C_{\text{sell}}(t)$ 为微能网向上级配电网售电价格, $C_{\text{buy}}(t)$ 为微能网向上级配电网购电价格,元/(kW·h); $P_{\text{grid}}(t)$ 为微能网与配电网之间的功率交换值, kW。

3 综合评价方法

熵权法^[26-28]是一种客观赋权重的方法。微能网评价体系中某个指标的熵值越大,则表明该指标包含较少的信息,进而推得该指标所占评价体系的权重值较小;反之,当某个指标的熵值越小,表明该指标包含较多的信息,推得该指标所占评价体系的权重值较大。熵权法不受主观因素影响,计算过程简单,是一种方便、实用的评价方法,因此,本研究采用熵权法进行农村微能网的评价。

熵权法的计算步骤如下:

1) 建立农村微能网评价矩阵。假设参评的系统方案数为 m ,评价指标数为 n ,则评价矩阵如下所示:

$$Y = [y_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中 Y 为农村微能网评价矩阵; y_{ij} 为农村微能网评价第 i 个方案中的第 j 个指标。

2) 归一化农村微能网评价指标。将农村微能网评价指标 y_{ij} 进行归一化,得到归一化后的农村微能网评价矩阵如下所示:

$$F = [f_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \cdots & f_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$f_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^m z_{ij}} \quad (15)$$

$$\begin{cases} z_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_{y_i}}{\max_{y_i} - \min_{y_i}}, & \text{当指标值越大越优时} \\ z_{ij} = \frac{\max_{y_i} - y_{ij}}{\max_{y_i} - \min_{y_i}}, & \text{当指标值越小越优时} \end{cases} \quad (16)$$

式中 F 为归一化后的农村微能网评价矩阵; f_{ij} 为归一化计算后的农村微能网评价指标值; z_{ij} 为归一化计算过程中的中间值; \max_{y_i} 和 \min_{y_i} 为归一化前农村微能网同一评价指标的最大值和最小值。

3) 计算农村微能网各评价指标的熵。

$$a_j = - \frac{\sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}}{\ln m} \quad (17)$$

式中 a_j 为农村微能网各评价指标的熵值。

4) 计算农村微能网各评价指标的权重值。

$$x_j = \frac{1 - a_j}{\sum_{j=1}^n (1 - a_j)} \quad (18)$$

式中 x_j 为农村微能网各评价指标的权重值。

5) 计算各方案的评价值

$$b_{v,i} = \sum_{j=1}^n x_j f_{ij} \quad (19)$$

式中 $b_{v,i}$ 为农村微能网第 i 种规划方案的评价值。

运用熵权法对农村微能网规划方案进行评价的流程图如图2所示。

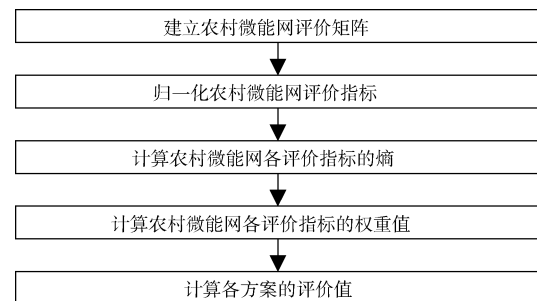


图2 熵权法评价流程图

Fig.2 Evaluation flow chart of entropy method

4 算例

4.1 算例相关参数

本文选取中国西部某村庄为例验证所提规划指标的合理性。该地区四季分明,冬季进行热能和电能的供应,

夏季进行冷能和电能的供应，春秋两季只供应电能。冷热电负荷数据采用蒙特卡洛模拟的方法求得，具体参考文献[29-30]。冬季典型日光伏、风电和热电负荷曲线如图3a所示，夏季典型日光伏、风电和冷热电负荷曲线如图3b所示，春秋季典型日光伏、风电和电负荷曲线如图3c所示。该村拟采用的供能和储能装置包括微型燃气轮

机、溴化锂吸收式制冷机、余热锅炉、燃气锅炉、蓄电池、冷热储能罐、空气源热泵、光伏和风电等。现有3种不同的农村微能网规划方案，如表2所示。微能网各装置参数^[31-33]如表3所示，微能网规划方案所在地分时电价^[6]如表4所示。污染物排放系数和评价标准^[34]如表5所示。

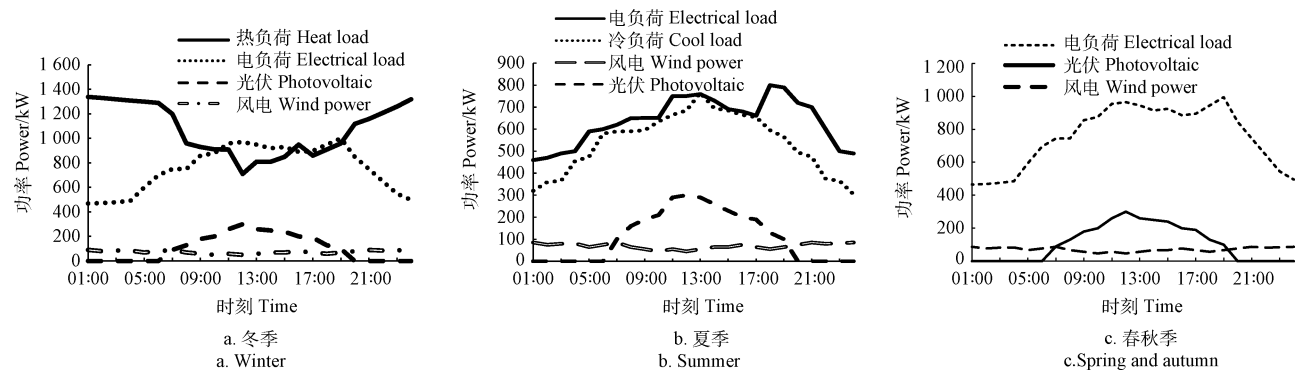


图3 不同季节典型日光伏、风电和冷-热-电负荷曲线

Fig.3 Photovoltaic, wind power and electricity-heating-cooling loads curves of typical day in different season

表2 农村微能网规划方案中各装置的功率和能量值

Table 2 Power and energy value of each device in planning scheme of rural micro-energy-grid

方案 Scheme	微型燃气轮机 Micro-turbine/kW	余热锅炉 Heat recovery boiler/kW	溴化锂吸收式制冷机 Lithium-bromide absorption-type refrigerator/kW	燃气锅炉 Gas boiler/kW	空气源热泵 Air-source heat/kW	光伏 Photovoltaic/kW	风电 Wind power/kW	蓄电池 Battery storage/(kW·h)	蓄冷储能罐 Heat storage/(kW·h)	蓄热储能罐 Cool storage/(kW·h)
方案1 Scheme 1	750	1 125	1 000	600	0	200	150	0	0	0
方案2 Scheme 2	700	1 050	900	300	300	200	200	0	0	0
方案3 Scheme 3	600	900	800	200	600	300	100	1 000	1 000	1 000

表3 农村微能网各装置参数^[31-33]

Table 3 Device parameters of rural micro-energy-grid

微源 Micro-source	初始投资成本 Initial investment cost/(元·kW ⁻¹)	运行维护成本 Maintenance cost/(元·(kW·h) ⁻¹)	使用年限 Available life/a	故障率 Failure rate/(次·a ⁻¹)	每年平均每次修复时间 Average repair time of each time in one year/h
风电 Wind power	10 000	0.110	20	0.11	70
光伏 Photovoltaic	750	0.080	20	0.13	72
微型燃气轮机 Micro-turbine	6 800	0.020	20	0.18	12
余热锅炉 Heat recovery boiler	300	0.025	20	0.12	10
溴化锂吸收式制冷机 Lithium-bromide absorption-type refrigerator	1 200	0.025	20	0.12	10
燃气锅炉 Gas boiler	200	0.030	20	0.10	10
空气源热泵 Air-source heat pumps	300	0.030	20	0.11	10
蓄电池 Battery storage	200	0.020	10	0.03	50
热储存器 Heat storage	200	0.020	20	0.05	10
冷储存器 Cool storage	200	0.020	20	0.05	10

表4 农村微能网分时电价^[6]

Table 4 Time-of-use electrical price of rural micro-energy-grid
元·(kW·h)⁻¹

周期 Cycle	时段 Period	购电价格 Buying electrical price	售电价格 Selling electrical price
峰周期 Peak cycle	08:00 - 11:00, 18:00 - 23:00	0.759	
平段 Flat cycle	07:00 - 08:00, 11:00 - 18:00	0.510	0.65
谷段 Valley cycle	23:00 - 24:00, 24:00 - 07:00	0.261	

表5 农村微能网污染物排放系数和评价标准^[34]

Table 5 Pollutant emission coefficient and evaluation standard of
rural micro-energy-grid

污染物 Pollutant	排放系数 Emission coefficient		评价标准 Evaluation standard	
	微型燃气轮机 Micro-turbine/ (kg·(kW·h) ⁻¹)	燃气锅炉 Gas boiler/ (kg·(kW·h) ⁻¹)	环境价值 Environmental value/ (元·kg ⁻¹)	罚款 Penalty/ (元·kg ⁻¹)
NO _x	6.19×10 ⁻⁴	6.23×10 ⁻⁴	7.064 1	1.766 0
CO ₂	0.184	0.190	0.020 3	0.008 8
CO	1.7×10 ⁻⁴	2.1×10 ⁻⁴	0.883 0	0.141 3
SO ₂	9.28×10 ⁻⁷	9.31×10 ⁻⁷	5.298 0	0.883 0

表6 农村微能网评价指标计算结果

Table 6 Calculation results of evaluation indexes of rural micro-energy-grid

一级指标 Primary indicator	二级指标 Secondary indicator	三级指标 Tertiary indicator	方案1 Scheme1	方案2 Scheme2	方案3 Scheme3	指标属性 Indicator property
可靠性 Reliability A	供电可靠性 Electrical reliability A1	电能缺供率 A11	1.01×10 ⁻⁵	1.1×10 ⁻⁵	7.27×10 ⁻⁶	↓
	供冷热可靠性 Heat and cool reliability A2	热能缺功率 A21	3.2×10 ⁻⁶	2.9×10 ⁻⁶	2.3×10 ⁻⁶	↓
		冷能缺供率 A22	2.6×10 ⁻⁶	2.1×10 ⁻⁶	1.9×10 ⁻⁶	↓
经济性 Economics B	系统经济性 System economics B1	系统投资费用 B11/元	9.7×10 ⁶	9.8×10 ⁶	9.3×10 ⁶	↓
		系统运行维护费用 B12/元	3 090.3	3 585.2	3 165.8	↓
		系统设备的价格与使用年限之比 B13	487 875	490 250	479 000	↓
环保性 Environmental protection C	供能设备环保性 Environmental protection of energy-supply equipment C1	污染物排放量 C11/kg	8 315.3	8 680.9	7 937.1	↓
		可再生能源的装机比例 C12/%	9.2	10.9	6.2	↑
	储能设备环保性 Environmental protection of energy-storage equipment C2	冷热电联供机组的装机比例 C13/%	19.6	19.2	9.2	↑
		储电设备更换周期率 C21/%	0	0	10	↑
		储冷设备更换周期率 C22/%	0	0	20	↑
		储热设备更换周期率 C23/%	0	0	20	↑
效益性 Benefit E	稳定效益 Stable benefit E1	与配电网功率交换费用 E11/元	6 531.5	5838.3	1 409.1	↓
	环境效益 Environmental benefit E2	环境污染惩罚费用 E21/元	497.1	518.3	415.9	↓

注: ↑代表指标数值越小越好; ↓代表指标越大越好。

Note: ↑ shows that the smaller numbers indicate the better indicators; ↓ shows that the bigger numbers indicate the better indicators.

4.3 基于熵权法得到农村微能网规划方案评价结果

本研究采用熵权法对农村微能网各规划方案指标进行评估,得到各指标的熵权如图4所示。通过图4可知,指标C12、C13、C21、C22和C23的权重值最大,对农村微能网各规划评价方案的最终评估结果影响最大;A22的权重值最小,对农村微能网各规划评价方案的最终评估结果影响最小;其余指标的权重值处于中间位置,对农村微能网各规划评价方案的最终评估结果有较大影响。

4.2 农村微能网评价指标仿真结果

经济性和环保性中的部分三级指标,如系统设备的价格与使用年限之比、可再生能源的装机比例和冷热电联供机组的装机比例等,采用算例所给参数进行直接计算,其余指标基于MATLAB平台运用粒子群算法编写农村微能网优化调度程序进行求解。模拟间隔时间Δt为1 h,总模拟时间为1 a。本研究设定冬季(供暖季)为11月至次年3月,夏季(供冷季)为6月至8月,春秋季节(不供应冷暖)为4月至5月和9月至10月。可靠性指标采用序贯蒙特卡洛法进行模拟计算。为了简化计算,本研究假设每个季节中每日的负荷需求相同。

农村微能网各指标的计算结果如表6所示。通过表6可得,从污染物排放量方面看,由于方案3规划的微型燃气轮机和燃气锅炉容量最小,所以污染物排放量最低,方案3是最优选择;从可再生能源和冷热电联供机组的装机比例方面看,方案1为最优选择。为了充分评估各指标对农村微能网系统的影响程度,需要采用合理的评估方法对农村微能网各指标进行综合评估。

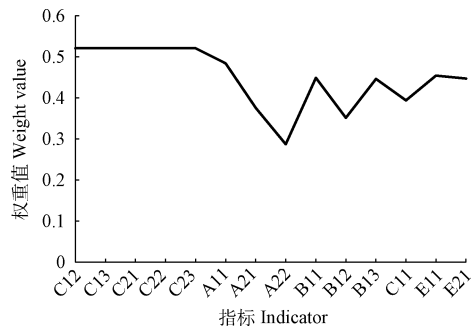


图4 农村微能网各指标熵权值

Fig.4 Entropy weight of each index of rural micro-energy-grid

本研究采用熵权法得到农村微能网各规划方案的最终评价结果如下：方案1的评价值为1.32，方案2的评价值为1.14，方案3的评价值为2.47。在可再生能源的装机比例和冷热电联供机组的装机比例方面，方案2为最优结果，但是，综合考虑可靠性、经济性、环保性和效益性方面的14个三级指标对农村微能网规划方案的影响程度，最终得到方案3是农村微能网最优规划方案。

4.4 基于熵权法与专家评价法得到农村微能网规划方案的评价结果

熵权法是一种客观的指标评价方法，它主要根据各指标的数值差异计算求得各指标的熵权值，进而求得各方案的综合评价值。但是，在项目的实际规划过程中，根据项目所在地的环境条件、项目资金情况和项目投资方需求等不同，需要侧重考虑环保性、经济性和可靠性等某一方面的指标，无法完全按照客观的评价结果选择规划方案。因此，根据专家对农村微能网各规划指标的侧重点不同，本研究假设4种专家主观指标权重，专家1侧重关注可靠性指标，专家2侧重关注经济性指标，专家3侧重关注环保性指标，专家4侧重关注效益性指标，通过调查问卷打分的形式得到专家评价指标权重如表7所示。

表7 专家评价指标权重
Table 7 Expert evaluation index weight

一级指标 Primary indicator	三级指标 Tertiary indicator	专家 Expert			
		1	2	3	4
可靠性 Reliability A	A11	0.2	0.03	0.03	0.03
	A21	0.2	0.04	0.04	0.04
	A22	0.2	0.03	0.03	0.03
经济性 Economics B	B11	0.03	0.2	0.03	0.03
	B12	0.04	0.2	0.04	0.04
	B13	0.03	0.2	0.03	0.03
环保性 Environmental protection C	C11	0.04	0.03	0.04	0.03
	C12	0.04	0.04	0.33	0.04
	C13	0.03	0.03	0.33	0.03
	C21	0.03	0.03	0.02	0.03
	C22	0.03	0.04	0.02	0.04
效益性 Benefit E	C23	0.03	0.03	0.02	0.03
	E11	0.05	0.05	0.02	0.3
	E21	0.05	0.05	0.02	0.3

将主客观评价方法即熵权法与专家评价法相结合，得到农村微能网规划方案各指标新的权重值，权重和农村微能网规划方案评价值计算公式^[22]如下所示：

$$\varphi_j = \frac{\theta_j x_j}{\sum_{j=1}^n \theta_j x_j} \tag{20}$$

$$b_{v,i} = \sum_{j=1}^n \varphi_j f_{ij} \tag{21}$$

式中 θ_j 为第 j 个指标的专家评价权重； φ_j 为第 j 个指标的熵权法与专家评价法结合计算求得的新权重值； f_{ij} 为农村微能网评价指标值。

运用专家评价法与熵权法相结合的方法对农村微能

网规划方案进行重新评价，评价结果如图5所示。由图5可知，由于专家3侧重关注环保性指标，所以方案2的综合评价值最高。对于专家1、2和4而言，方案3综合评价值最高，所以项目投资方如果更关注可靠性、效益性和经济性方面，方案3是最优选择。需要说明的是，上述算例负荷的变化，对评价结果没有影响。因为微能网规划方案的优劣由微能网规划评价指标决定，而微能网规划评价指标由文中“2农村微能网规划评价指标”中的公式求得。在文中“2.1可靠性指标”部分，系统冷-热-电能缺供功率3个指标虽然表面上与负荷情况变化有直接关系，但实际上系统冷-热-电能缺供功率由微能网规划方案中各供能设备的功率决定。在文中2.2-2.4部分，经济性、环保性和效益性指标的大小与微能网规划方案中各供能设备的出力大小决定。因此，负荷情况的变化对微能网评价结果没有影响。

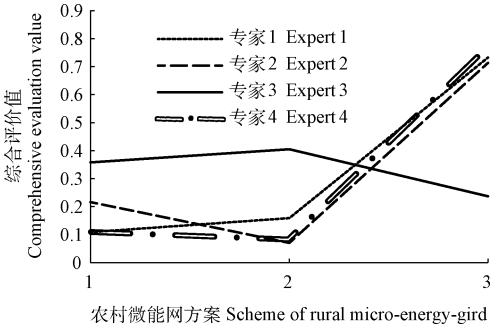


图5 专家评价法与熵权法结合评价结果
Fig.5 Evaluation results combining expert evaluation and entropy method

5 结 论

本研究建立包含可靠性、经济性、环保性和效益性4个一级指标、7个二级指标和14个三级指标的农村微能网规划评价体系，运用熵权法和专家评价相结合的方法对各微能网规划方案进行评价，得到如下结论：

1) 所提农村微能网规划评价指标均具有明确的物理含义和计算方法。算例结果表明，各指标可以为农村微能网规划方案的优劣评价提供数据支撑。

2) 熵权法是一种客观评价法，可以通过纸面数据客观得到农村微能网各规划方案的评价值分别为1.32、1.14和2.47，则具有供能装置、能量转换装置和冷-热-电多形式储能装置的方案3为农村微能网最优规划方案，实现了对农村微能网各规划方案优劣性的客观评价。根据项目所在地的环境条件和项目投资方需求等不同，建立专家评价指标权重表，将专家评价法（主观评价法）作为一种辅助评价方法，来配合熵权法（客观评价法）对农村微能网各规划方案进行综合评价，在环保性方面，未规划储能装置的方案2综合评价值最高，为农村微能网最优规划方案，在可靠性、效益性和经济性方面，具有供能装置、能量转换装置和冷-热-电多形式储能装置的方案3综合评价值最高，为农村微能网最优规划方案。上述结果可以为项目的实际运作提供个性化的解决方案，实现了项目投资方利益的最大化。

[参 考 文 献]

- [1] Nojavan S, Saberi K, Zare K. Risk-based performance of combined cooling, heating and power (CCHP) integrated with renewable energies using information gap decision theory[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 159: 113859—113875.
- [2] Saloux E, Sorin M, Teyssedou A. Exergo-economic analyses of two building integrated energy systems using an exergy diagram[J]. *Solar Energy*, 2019, 189: 333—343.
- [3] Saberi K, Pashaei-Didani H, Nouroollahi R, et al. Optimal performance of CCHP based microgrid considering environmental issue in the presence of real time demand response[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 45: 596—606.
- [4] Liu D, Wu J Y, Lin K J, et al. Planning of multi energy-type micro energy grid based on improved Kriging model[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 14569—14580.
- [5] Qiao X B, Zou Y, Li Y, et al. Impact of uncertainty and correlation on operation of micro-integrated energy system[J]. *International Journal of Electrical Power& Energy Systems*, 2019, 112: 262—271.
- [6] 张新, 张漫, 王维洲, 等. 基于改进杂交粒子群算法的农村微能网多能流优化调度[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(11): 157—164.
Zhang Xin, Zhang Man, Wang Weizhou, et al. Scheduling optimization for rural micro energy grid multi-energy flow based on improved crossbreeding particle swarm algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(11): 157—164. (in Chinese with English abstract)
- [7] Yun H B, Zhang C, Deng Z Q, et al. Economic optimization for configuration and sizing of micro integrated energy systems[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2018, 6(2): 330—341.
- [8] Li G Q, Zhang R F, Jiang T, et al. Optimal dispatch strategy for integrated energy systems with CCHP and wind power[J]. *Applied Energy*, 2017, 192: 408—419.
- [9] 郝然, 艾芊, 朱宇超, 等. 基于能源集线器的区域综合能源系统分层优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6): 171—178.
Hao Ran, Ai Qian, Zhu Yuchao, et al. Ierarchical optimal dispatch based on energy hub for regional integrated energy system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 171—178. (in Chinese with English abstract)
- [10] Barati F, Seifi H, Sepasian M, et al. Multi-period integrated framework of generation, transmission, and natural gas grid expansion planning for largescale systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(5): 2527—2537.
- [11] 孙娟, 卫志农, 孙国强, 等. 计及 P2H 的电-热互联综合能源系统概率能量流分析[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6): 62—68.
Sun Juan, Wei Zhinong, Sun Guoqiang, et al. Analysis of probabilistic energy flow for integrated electricity-heat energy system with P2H[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 62—68. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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. (in Chinese with English abstract)
- [13] 施锦月, 许健, 曾博, 等. 基于热电比可调模式的区域综合能源系统双层优化运行[J]. *电网技术*, 2016, 40(10): 2959—2966.
Shi Jinyue, Xu Jian, Zeng Bo, et al. A bi-level optimal operation for energy hub based on regulating heat-to-electric ratio mode[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(10): 2959—2966. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨帅, 陈磊, 徐飞, 等. 基于能量流的热电综合能源系统弃风消纳优化调度模型[J]. *电网技术*, 2018, 42(2): 417—425.
Yang Shuai, Chen Lei, Xu Fei, et al. Optimal dispatch model of wind power accommodation in integrated electrical - thermal power system based on power flow model[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(2): 417—425. (in Chinese with English abstract)
- [15] Mancarella P. MES(multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models[J]. *Energy*, 2014, 65(2): 1—17.
- [16] Solanki B, Raghurajan A, Bhattacharya K, et al. Including smart loads for optimal demand response in integrated energy management systems for isolated microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(4): 1739—1748.
- [17] Ojeda-esteybrd M, Rubio-barrosrg R, Vargasa A. Integrated operation planning of hydrothermal power and natural gas systems with large scale storages[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2017, 5(3): 299—313.
- [18] Kou Y, Zheng J, Li Z G, et al. Many-objective optimization for coordinated operation of integrated electricity and gas network[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2017, 5(3): 350—363.
- [19] Liu X Z, Mancarella P. Modelling, assessment and sankey diagrams of integrated electricity-heat-gas networks in multi-vector district energy systems[J]. *Applied Energy*, 2016, 167: 336—352.
- [20] Ameri M, Besharati Z. Optimal design and operation of district heating and cooling networks with CCHP systems in a residential complex[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 110: 135—148.
- [21] 董福贵, 张也, 尚美美. 分布式能源系统多指标综合评价研究[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(12): 3214—3222.
Dong Fugui, Zhang Ye, Shang Meimei. Multi-criteria comprehensive evaluation of distributed energy system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(12): 3214—3222. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张涛, 朱彤, 高乃平, 等. 分布式冷热电能源系统优化设计及多指标综合评价方法的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14): 3706—3713.
Zhang Tao, Zhu Tong, Gao Naiping, et al. Optimization design and multi-criteria comprehensive evaluation method of combined cooling heating and power system[J].

- Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3706 — 3713. (in Chinese with English abstract)
- [23] 陈柏森, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 区域综合能源系统的综合评估指标与方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 174—182.
Chen Baisen, Liao Qingfen, Liu Dichen, et al. Comprehensive evaluation indices and methods for regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 174 — 182. (in Chinese with English abstract)
- [24] 曾鸣, 刘英新, 周鹏程, 等. 综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1697—1708.
Zeng Ming, Liu Yingxin, Zhou Pengcheng, et al. Review and prospects of integrated energy system modeling and benefit evaluation[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1697—1708. (in Chinese with English abstract)
- [25] Alessandro B, Francesco V, Enrico F, et al. Technical-economic feasibility of CHP systems in large hospitals through the energy hub method: The case of Cagliari AOB[J]. Energy and Buildings, 2017, 147: 101—112.
- [26] 张文会, 宋贺贺, 管峰, 等. 基于熵权法和云模型的商品车运输安全评价研究[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2019, 33(8): 38—43.
Zhang Wenhui, Song Hehe, Guan Feng, et al. Safety evaluation for commodity car transportation based on entropy weight and cloud model[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2019, 33(8): 38—43. (in Chinese with English abstract)
- [27] 方诗圣, 田海涛, 黄德洲, 等. 基于熵权法-多维云模型的围岩稳定性分类研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(1): 229—232.
Fang Shisheng, Tian Haitao, Huang Dezhou, et al. Study on classification of stability of surrounding rock using entropy weight method and multi-dimensional cloud model[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(1): 229 — 232. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李峰, 孙波, 王轩, 等. 层次分析法结合熵权法评估农村屋顶光伏系统电能质量[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 159—166.
Li Feng, Sun Bo, Wang Xuan, et al. Power quality assessment for rural rooftop photovoltaic access system based on analytic hierarchy process and entropy weight method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transaction of the CSAE), 2019, 35(11): 159—166. (in Chinese with English abstract)
- [29] 鲜杏, 范传光, 文闪闪, 等. 考虑可再生能源随机性的孤岛微网容量优化配置方法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2016, 49(1): 100—104.
Xian Xing, Fan Chuanguang, Wen Shanshan, et al. Optimal deployment for island microgrid considering probabilistic factors of renewable energy generations[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(1): 100 — 104. (in Chinese with English abstract)
- [30] Pazouki S, Haghifam M R, Moser A. Uncertainty modeling in optimal operation of energy hub in presence of wind, storage and demand response[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 2014, 61: 33—345.
- [31] 徐青山, 曾艾东, 王凯, 等. 基于Hessian内点法的微型能源网日前冷热电联供经济优化调度[J]. 电网技术, 2016(6): 1657—1665.
Xu Qingshan, Zeng Aidong, Wang Kai, et al. Day-ahead optimized economic dispatching for combined cooling, heating and power in micro energy-grid Based on Hessian Interior Point Method[J]. Power System Technology, 2016 (6): 1657—1665. (in Chinese with English abstract)
- [32] 白牧可, 唐巍, 吴邦旭. 用户侧综合能源系统评估指标体系及其应用[J]. 分布式能源, 2018, 3(4): 41—46.
Bai Muke, Tang Wei, Wu Bangxu. Evaluation indexes of user side integrated energy system and its application[J]. Distributed energy, 2018, 3(4): 41 — 46. (in Chinese with English abstract)
- [33] 卢锦玲, 周松浩. 计及控制方式的孤岛微网供电可靠性评估[J]. 现代电力, 2017, 34(1): 23—29.
Lu Jinling, Zhou Songhao. Power supply reliability evaluation of islanded microgrid by considering control modes[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(1): 23 — 29. (in Chinese with English abstract)
- [34] 马溪原, 吴耀文, 方华亮, 等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 17—25.
Ma Xiyuan, Wu Yaowen, Fang Hualiang, et al. Optimal sizing of hybrid solar-wind distributed generation in an islanded microgrid using improved bacterial foraging algorithm[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2011, 31(25): 17 — 25. (in Chinese with English abstract)

Construction and application of evaluation indexes for rural micro-energy-grid

Zhang Xin^{1,2}, Yang Jianhua^{1*}, Wang Weizhou³, Jing Tianjun¹, Zhang Man¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

3. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The rural micro-energy-grid with electricity-heating-cooling-gas was a hot issue in the field of energy. Most researches have been done on the modeling, planning and operation of micro-energy-grid. But the planning evaluation system of rural micro-energy-grid is still lacking. To evaluate the planning performance on rural micro-energy-grid, the planning evaluation system of rural micro-energy-grid was established in this study. The planning evaluation system contained four primary indicators, seven secondary indicators and fourteen tertiary indicators. Specifically, the four primary indicators were the reliability, economics, environmental protection and benefit. The seven secondary indicators were the electrical reliability, heat and cool reliability, system economics, environmental protection of energy-supply equipment, environmental protection of energy-storage equipment, stable benefit, environmental benefit. The fourteen tertiary indicators were the electrical deficiency rate, heat deficiency rate, cool deficiency rate, initial investment cost, maintenance cost, ratio of price to available life on the equipment, pollutant emission, installation rate of renewable energy, installation rate of heating-cooling-electricity for supply unit, replacement cycle rate of battery storage, replacement cycle rate of cool storage, replacement cycle rate of heat storage, electrical power exchange cost with distribution network, environmental pollution penalty cost. The formula of each indicator were given for these 25 parameters. The weight of each evaluation indicator was solved using an entropy method, indicating a flow chart for the implementation. The weight distributions of these indicators were obtained in the micro-energy-grid, representing the evaluation value of each planning scheme. In the actual planning process of a project, it was usually focused on small parts of the indicators, depending on the environmental condition, funding and the needs of the project. It was not possible to select the whole planning scheme fully complying with these 25 indicators in the actual evaluation. Therefore, an expert evaluation method was also established to show the weight table of expert evaluation indicators. The new weight/values of the different indicators in the planning schemes were obtained combining the entropy and the expert evaluation method, as well the new evaluation values of the whole planning schemes on the rural micro-energy-grid. Three planning schemes of a village in the western China were selected as a case study to verify the proposed planning indicators in this paper. The loading data of the heating-cooling-electricity in four seasons was given before the simulation, as well the time-of-use electrical price and equipment parameters of the rural micro-energy-grid. The results showed that the evaluation values of the scheme 1, 2 and 3 were 1.32, 1.14 and 2.47, respectively, according to entropy method. In the scheme 2, there was the minimums in the installed rate of renewable energy and heating-cooling-electricity supply unit, whereas in the scheme 3, the maximums considering all the evaluation indicators were the reliability, economics, environmental protection and benefit. Therefore, the expert system 1, 2, 3 and 4 focused on the reliability, economics, environmental protection and benefit, respectively. The whole planning schemes of the rural micro-energy-grid were also re-evaluated by combining the method of expert evaluation and entropy. The comprehensive evaluation value of scheme 2 has the highest value because the expert system 3 focused on the environmental protection indicators. In experts 1, 2 and 4, the comprehensive evaluation value of scheme 3 has the highest value. If the project need is the reliability, economics and benefit, scheme 3 can be the best choice. The findings demonstrated that the proposed evaluation system can efficiently evaluate the planning scheme of the micro-energy-grid, and provide an insightful applied guidance for the construction and planning of micro-energy-grid in rural areas.

Keywords: rural areas; power; rural micro-energy-grid; planning evaluation; indicator weight; entropy method; expert evaluation method