

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.10.003

综合能源系统多场景优化运行模式综合评估方法研究

Comprehensive evaluation method for multi-scenario optimization operation
modes of the integrated energy system

钟永洁^{1,2,3}, 纪陵^{1,2,3}, 李靖霞^{1,2,3}, 檀庭方^{1,2,3}, 范仲鸣^{1,2,3}, 李昊航^{1,2,3}
ZHONG Yongjie^{1,2,3}, JI Ling^{1,2,3}, LI Jingxia^{1,2,3}, TAN Tingfang^{1,2,3},
FAN Zhongming^{1,2,3}, LI Haohang^{1,2,3}

(1.南京国电南自电网自动化有限公司,南京 211153; 2.国电南京自动化股份有限公司,南京 211153;
3.南京国电南自软件工程有限公司,南京 211153)

(1.Nanjing SAC Power Grid Automation Company Limited, Nanjing 211153, China; 2.Guodian Nanjing
Automation Company Limited, Nanjing 211153, China; 3.Nanjing SAC Software Engineering
Company Limited, Nanjing 211153, China)

摘 要: 综合能源系统通过合理优化调度、分配异质能源,可实现多能源的耦合与联合供应,提高能源综合利用效率,有效提升可再生能源消纳能力及供能可靠性。提出了一种基于层次分析法(AHP)的综合能源系统多场景优化运行模式综合评估方法。首先,构建综合能源系统评价指标,包括节能率、能量损失、新能源占比、新能源消纳率、运行维护成本;然后,建立综合能源系统多场景优化运行模式模型,包括经济型优化运行模式、环保型优化运行模式及节能型优化运行模式模型;最后,基于 AHP 建立综合能源系统层次结构模型,构造综合能源系统综合评价判断矩阵,进行层次单排序及其一致性检验以及层次总排序及其一致性检验,以综合评估综合能源系统多场景优化运行模式。算例分析表明,该评估方法可有效地对综合能源系统多场景优化运行模式进行综合评估。

关键词: 综合能源系统;多场景运行模式;层次分析法;一致性检验;可再生能源

中图分类号:TK 01:TM 73

文献标志码:A

文章编号:2097-0706(2023)10-0018-07

Abstract: Integrated energy systems dispatch and distribute heterogeneous energy with reasonable optimization strategy to achieve joint energy supply by taking advantages of the complementarity between different energy resources, improve the efficiency of comprehensive energy utilization, increase the penetration rate of renewable energy, and enhance the reliability of energy supply. A comprehensive evaluation method for multi-scenario optimization operation mode of integrated energy systems based on analytic hierarchy process (AHP) is proposed. The evaluation indexes, including energy saving rate, energy loss, new energy proportion, new energy consumption rate and operation and maintenance cost, are described. Then, models of the multi-scenario optimization operation modes including economic operation mode, environmental protection operation mode and energy saving operation mode are established. Then, the hierarchical structure of the AHP-based comprehensive evaluation method for an integrated energy system is established. The evaluation process includes constructing a comprehensive judgment matrix, making single-criteria ranking and its consistency test, and making multiple-criteria ranking and its consistency test. The results of a study case show that the proposed comprehensive evaluation method can effectively evaluate the optimal operation mode of integrated energy systems.

Keywords: integrated energy system; multi-scenario operation modes; analytic hierarchy process; consistency test; renewable energy

0 引言

能源为人类生活与生产提供能量,每一次工业革命都离不开能源类型和使用方式的革新^[1-3]。进入 21 世纪以来,随着全球一次能源价格的日益上涨

基金项目:中国华电集团科技项目(CHDKJ21-01-107)
Science and Technology Program of China Huadian Corporation
(CHDKJ21-01-107)

和环境的不断恶化,以风能、太阳能为代表的清洁可再生能源相对于传统的化石燃料在技术、经济方面的差距正不断缩小^[2,4-7]。近年来,能源系统源、网、荷各环节形态呈现多样化特征^[2,8-10],各种能源转化和存储设备的革新促进了能源系统的深度耦合,能源互联网、综合能源系统等概念成为产业界关注的热点^[4,11-13]。文献[6]提出了一种分布式协同双层优化模型,考虑上级电网实时电价和多园区系统供求关系的园区间交易机制,以保障各园区利益;文献[9]针对园区综合能源系统实际运行中综合需求响应不确定性问题,提出了计及综合需求响应不确定性的园区综合能源系统优化运行模型,提高了系统运行的经济性以及可再生能源的消纳水平;文献[11]建立了电-气-热耦合综合能源系统的混合能流计算模型,实现了时间断面的混合能流仿真。相比传统电网,综合能源系统有大量新能源接入,涵盖冷、热、电等多种能源形态^[3,7,13-15],集多种能源生产、转换、输送及消费各环节于一体,可以实现对冷、热、电等各类能源的综合管控,推动能源行业朝低碳、高效的方向发展^[6,9,16-18]。

综合能源系统作为能源互联网的重要载体^[4,9,19-20],是研究不同能源内部运行机理,推广能源先进技术的前沿阵地,具有重要的研究意义^[5,10,19-21]。它是多种能源转换技术的有机耦合和集成,打破了行业界限,实现了系统资源消耗少、能量转化效率高、污染物排放少的综合目标,是一种能源、资源和环境一体化的系统^[9,14,22-25]。文献[1]在传统可靠性评估指标的基础上进一步根据电-气耦合程度、供气系统延时特性建立了电-气综合能源系统可靠性评估指标体系,基于蒙特卡洛法从多角度全面分析了联合系统的可靠性;文献[4]归纳了能源互联网的多能流耦合特征,分析了能源互联网的多能流交互机理,对多源互补动态优化方法进行了深入剖析;文献[8]分析了电动汽车快充网-用户-交通网-配电网之间的耦合交互关系,提出了4个准则并在准则下构建了相应的评价指标,利用层次分析法和熵权法分别确定准则层和指标层权重,实现对各主体的影响并进行了综合评估。由于综合能源系统的开放性和复杂性,其组成形式可以多种多样,对外部环境的影响也各不相同,究竟应该采取何种形式以适应不同的发展要求^[7,16,22-24],简单的分析较难对各方案做出全面评价,迫切需要在多学科交叉的理论指引下,提出新的综合能源系统评价准则与方法^[8,13,26-28]。

由此可见,综合能源系统的综合评估是探究区域多能协同规划、系统配置设计、系统优化运行及

能效提升等方面的关键所在,科学合理的综合评估方法对综合能源系统的健康发展极为重要^[8-9,12,24]。因此,有必要采取系统工程理论和方法,对综合能源系统进行综合的性能分析和评价,从而指导系统的优化设计并为最终决策提供科学依据。

1 综合评估方法基本流程

本文提出基于层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 的综合能源系统多场景优化运行模式综合评估方法,综合考虑综合能源系统经济性、环保性、节能性需求,对综合能源系统进行准确、全面、综合、有效的评价,为综合能源系统最佳优化运行模式提供理论指导。该综合能源系统多场景优化运行模式综合评估流程如图1所示。

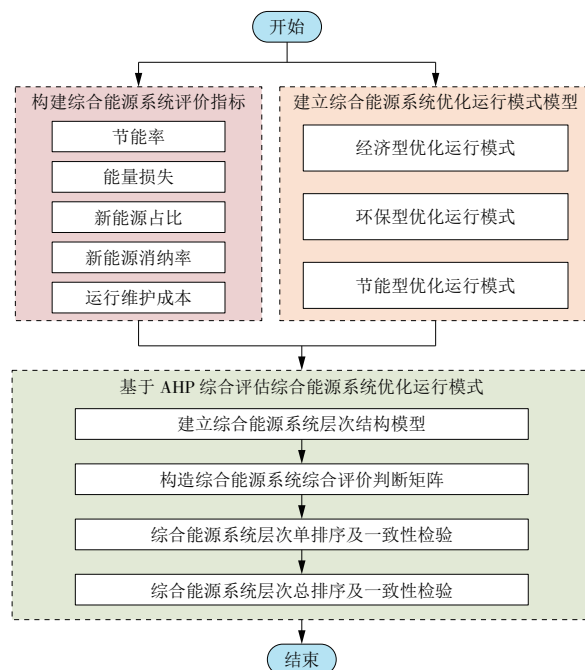


图1 综合能源系统多场景优化运行模式综合评估流程

Fig. 1 Comprehensive evaluation of integrated energy system multi-scenario optimization operation modes

基于AHP的综合能源系统优化运行模式综合评估方法基本流程主要包括以下3个步骤。

(1)构建综合能源系统评价指标,包括节能率、能量损失、新能源占比、新能源消纳率、运行维护成本。

(2)建立综合能源系统优化运行模式模型,包括经济型优化运行模式模型、环保型优化运行模式模型、节能型优化运行模式模型。

(3)基于AHP综合评估综合能源系统优化运行模式,包括建立综合能源系统层次结构模型、构造综合能源系统综合评价判断矩阵、综合能源系统层次单排序及一致性检验、综合能源系统层次总排序

及一致性检验。

2 综合能源系统评价指标

2.1 节能率

$$I_{\text{ESR}}^1 = \frac{E_f - E_1}{E_f}, \quad (1)$$

$$E_f = \sum_{t=1}^T \left(\frac{L_E(t)}{\eta_e \eta_1} + \frac{L_C(t)}{C_{\text{OP,ec}} \eta_e \eta_1} + \frac{L_H(t)}{\eta_{\text{eh}} \eta_e \eta_1} \right) \Delta t, \quad (2)$$

$$E_1 = \sum_{t=1}^T \left(\frac{S_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t)}{\eta_e \eta_1} + S_{\text{gas}}^{\text{buy}}(t) \right) \Delta t, \quad (3)$$

式中: I_{ESR}^1 为节能率; E_f 为分产系统在优化运行周期内消耗的一次能源总量; E_1 为综合能源系统在优化运行周期内消耗的一次能源总量; T 为综合能源系统及分产系统的优化运行周期; Δt 为优化运行仿真步长; $L_E(t)$, $L_C(t)$, $L_H(t)$ 分别为综合能源系统及分产系统在时刻 t 的电负荷、冷负荷、热负荷; η_e 为火电厂的平均发电效率; η_1 为电力系统电能传输损失系数; $C_{\text{OP,ec}}$ 为电制冷机性能系数; η_{eh} 为电热器制热效率; $S_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t)$ 为综合能源系统 t 时刻从大电网购买的电能; $S_{\text{gas}}^{\text{buy}}(t)$ 为综合能源系统 t 时刻从天然气网络购买的燃气量。

2.2 能量损失

$$I_{\text{EL}}^2 = \sum_c \sum_{t=1}^T (\zeta_c E_c(t)) \Delta t, \quad (4)$$

式中: I_{EL}^2 为能量损失; c 为综合能源系统中各类型能量转换设备; ζ_c 为能量转换设备 c 的能量损失系数; $E_c(t)$ 为 t 时刻能量转换设备 c 输出的能量。

2.3 新能源占比

$$I_{\text{RNE}}^3 = \sum_m \sum_{c \in e} \sum_{t=1}^T \left(\frac{P_m^a(t)}{S_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t) + P_m^a(t) + E_{c \in e}(t)} \right) \Delta t, \quad (5)$$

式中: I_{RNE}^3 为新能源占比; m 为综合能源系统中各类型新能源; $P_m^a(t)$ 为综合能源系统中新能源 m 的实际出力; $c \in e$ 为综合能源系统中可以发电的能量转换设备; $E_{c \in e}(t)$ 为 t 时刻能量转换设备 $c \in e$ 的发电量。

2.4 新能源消纳率

$$I_{\text{NECR}}^4 = \sum_m \sum_{t=1}^T \left(\frac{P_m^a(t)}{P_m^f(t)} \right) \Delta t, \quad (6)$$

式中: I_{NECR}^4 为新能源消纳率; $P_m^f(t)$ 为综合能源系统中新能源 m 的最大预测出力。

2.5 运行维护成本

$$I_{\text{OMC}}^5 = \sum_c \sum_{t=1}^T (\lambda_c E_c(t)) \Delta t, \quad (7)$$

式中: I_{OMC}^5 为运行维护成本指标; λ_c 为能量转换设备 c 单位出力的运行维护价格因子。

3 综合能源系统多场景优化运行模式

3.1 经济型优化运行模式模型

$$\min C_{\text{mode}}^{\text{CNY}} = \sum_{t=1}^T (p_{\text{grid}}(t) S_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t) + p_{\text{gas}}(t) S_{\text{gas}}^{\text{buy}}(t)) \Delta t, \quad (8)$$

式中: $C_{\text{mode}}^{\text{CNY}}$ 为综合能源系统在经济型优化运行模式下的能源费用总成本; $p_{\text{grid}}(t)$ 为 t 时刻综合能源系统的购电价; $p_{\text{gas}}(t)$ 为 t 时刻综合能源系统的购气价。

3.2 环保型优化运行模式模型

$$\min E_{\text{mode}}^{\text{kg}} = \sum_{t=1}^T (\mu_{\text{grid}} S_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t) + \mu_{\text{gas}} S_{\text{gas}}^{\text{buy}}(t)) \Delta t, \quad (9)$$

式中: $E_{\text{mode}}^{\text{kg}}$ 为综合能源系统在环保型优化运行模式下的二氧化碳排放总量; μ_{grid} 为综合能源系统从大电网购买单位电能的等效二氧化碳排放系数; μ_{gas} 为综合能源系统从天然气网络购买单位燃气的等效二氧化碳排放系数。

3.3 节能型优化运行模式模型

$$\min e_{\text{mode}}^{\text{E}} = \sum_{t=1}^T \left(\frac{S_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t)}{\gamma_{\text{grid}}} + \gamma_{\text{gas}} S_{\text{gas}}^{\text{buy}}(t) \right) \Delta t, \quad (10)$$

式中: $e_{\text{mode}}^{\text{E}}$ 为综合能源系统在节能型优化运行模式下的焓输入总量; γ_{grid} 为火电厂平均焓效率因子; γ_{gas} 为天然气燃料的焓因子。

4 基于 AHP 综合评估系统优化运行模式

4.1 建立综合能源系统层次结构模型

综合能源系统的目标层为最佳优化运行模式, 指标层包括 I_{ESR}^1 , I_{EL}^2 , I_{RNE}^3 , I_{NECR}^4 , I_{OMC}^5 , 方案层包括 $\min C_{\text{mode}}^{\text{CNY}}$, $\min E_{\text{mode}}^{\text{kg}}$, $\min e_{\text{mode}}^{\text{E}}$ 。

4.2 构造综合能源系统综合评价判断矩阵

假设目标层中的因素与指标层中的因素有联系, 则构造的判断矩阵为

$$B = (b_{ij})_{n \times n}, \quad (11)$$

式中: B 为综合能源系统综合评价判断矩阵; b_{ij} 为 B 的第 i 行、第 j 列元素, 其元素按 SANY 的 1—9 标度方法取值。

4.3 综合能源系统层次单排序及其一致性检验

综合能源系统层次单排序可以归结为计算判断矩阵的特征根和特征向量问题, 即

$$B\omega = \lambda_{\text{max}}^B \omega, \quad (12)$$

式中: λ_{max}^B 为 B 的最大特征根; ω 为对应于 λ_{max}^B 的正规化特征向量, 其分量即为相应指标单排序权值。

为了检验矩阵的不一致性, 需要计算它的一致性指标

$$I_c = \frac{\lambda_{\text{max}}^B - n}{n - 1}. \quad (13)$$

为衡量 I_c 的大小,引入随机一致性指标,获得一致性比率

$$R_c = I_c / I_R, \quad (14)$$

式中: I_R 为随机一致性指标,其按 SASTY 的方法结果取值; R_c 为一致性比率,一般情况下,当 $R_c < 0.1$ 时,认为 B 的不一致程度在容许范围内,通过一致性检验,可用其归一化特征向量作为权向量,否则要重新构造 B ,对 b_{ij} 加以调整。

4.4 综合能源系统层次总排序及其一致性检验

计算方案层的所有因素对于总目标相对重要性的权值,称为层次总排序。这一过程是从目标层到方案层依次进行的。

方案层上各元素对总目标的总排序为

$$w_p^c = \sum_q^n (u_{pq}^c w_q^b), \quad (15)$$

式中: w_p^c 为方案层中第 p 个元素对应目标层的权重; u_{pq}^c 为方案层对应指标层中元素得到的单排序向量的第 p 行、第 q 列元素; w_q^b 为对应于 $\lambda_{\max}^B$ 的正规化特

征向量中第 q 个元素; p 取值为 1, 2, 3; q 取值为 1, 2, 3, 4, 5, 6。

通过计算与单排序类似的检验量来评价层次总排序计算结果的一致性,方案层的总排序一致性比率为

$$R_c^t = \frac{\sum_q^n (w_q^b I_{Cq}^c)}{\sum_q^n (w_q^b I_{Rq}^c)}, \quad (16)$$

式中: R_c^t 为方案层总排序的一致性比率; w_q^b 为指标层中第 q 个元素相对应目标层的权重; I_{Cq}^c 为方案层中第 q 个元素单排序的一致性指标; I_{Rq}^c 为方案层与指标层中第 q 个元素平均随机一致性指标。

5 算例分析

5.1 算例介绍

文中算例以夏秋过渡季节的典型日为研究对象,优化仿真时间步长为 1 h,优化运行周期为 24 h,算例的基础结构如图 2 所示。

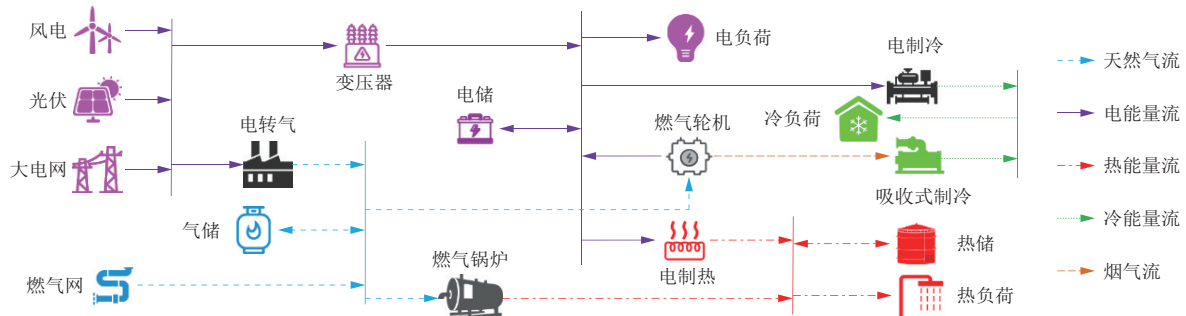


图 2 综合能源系统算例结构

Fig. 2 Structure of the exemplified integrated energy system

图 2 中,能量流程如下。

(1)输入端有大电网电能输入、天然气网络的天然气输入、计及风电和光伏的新能源输入。

(2)输出端有电负荷、冷负荷、热负荷;电转气设备从输入端的电能母线获得电能并将电能转换为天然气注入天然气母线。

(3)燃气锅炉从天然气母线获得天然气,通过燃烧加热冷水输出热负荷所需热能。

(4)燃气轮机从天然气母线获得天然气,生产的电能注入电能母线;同时,产生的高温烟气通入吸收式制冷机,吸收式制冷机充分利用余热为冷负荷供冷能。

(5)电制热能量转换设备如电热器通过消耗电能产生热能注入热能母线。

(6)电制冷能量转换设备通过消耗电能产生冷能注入冷能母线。

(7)气储、电储、热储均接入相应的能量类型

母线。

5.2 结果分析

获得综合能源系统综合评价判断矩阵为

$$B = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.5 & 4.0 & 3.0 & 3.0 \\ 2.0 & 1.0 & 7.0 & 5.0 & 5.0 \\ 0.3 & 0.1 & 1.0 & 0.5 & 0.3 \\ 0.3 & 0.2 & 2.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.3 & 0.2 & 3.0 & 1.0 & 1.0 \end{bmatrix}.$$

最大特征根 $\lambda_{\max}^B = 5.072$, 权向量 $w = (0.246, 0.477, 0.053, 0.099, 0.107)$, 一致性比率 $R_c = 0.016 < 0.100$,通过一致性检验。

本文采用通用的试用版商业优化求解软件 LINGO 并调用其集成的全局求解包处理文中所构建的优化目标优化数学模型。本文算例在不同优化运行模式下的目标优化结果见表 1。由表 1 可见:经济型优化运行模式目标函数最小值为 417 972.2 元,即一个优化运行周期内的能源消耗费用;环保

型优化运行模式目标函数最小值为 326.3 kg; 节能型优化运行模式目标函数最小值为 1 989.1 kW·h。

表 1 不同优化运行模式下综合能源系统目标值优化结果

Table 1 Optimized objective values of the integrated energy system under different optimization operation modes

目标值	$\min C_{\text{mode}}^{\text{CNY}}/\text{元}$	$\min E_{\text{mode}}^{\text{kg}}/\text{kg}$	$\min e_{\text{mode}}^{\text{E}}/(\text{kW}\cdot\text{h})$
优化运行结果	417 972.2	326.3	1 989.1

本文算例在不同优化运行模式下的各类型指标优化结果见表 2。

表 2 不同优化运行模式下综合能源系统各指标优化结果

Table 2 Optimized indexes of the integrated energy system under different optimization operation modes

优化运行模式	I_{ESR}^1	$I_{\text{EL}}^2/\text{MW}$	I_{RNE}^3	I_{NECR}^4	$I_{\text{OMC}}^5/\text{元}$
经济型	0.564 311 6	137.584 8	0.499 769 3	1	54 696.68
环保型	0.685 442 4	154.970 6	0.677 219 5	1	55 797.54
节能型	0.686 148 6	155.516 1	0.677 921 7	1	55 985.07

不同指标具有不同的单位、不同的数量级, 将它们进行直接比较是十分困难的, 因此需要将它们进行规范化处理, 其中节能率、新能源占比、新能源消纳率为效益型指标, 能量损失量、运行维护成本为成本型指标, 规范化后的结果见表 3。

表 3 不同优化运行模式下综合能源系统各指标规范化结果

Table 3 Standardized indexes of the integrated energy system under different optimization operation modes

优化运行模式	节能率	能量损失量	新能源占比	新能源消纳率	运行维护成本
经济型	0	1	0	1	1
环保型	0.994 204	0.030 422	0.996 058	1	0.145 554
节能型	1	0	1	1	0

根据表 3 及上述所的权向量, 可以获得不同优化运行模式下的规范化后综合评估值: 经济型优化运行模式综合评估值为 0.44, 环保型优化运行模式综合评估值为 0.29, 节能型优化运行模式综合评估值为 0.27。

从综合评估值看, 经济型优化运行模式是最佳的优化运行模式, 环保型优化运行模式与节能型优化运行模式综合评估值相近, 从数学优化目标表达式亦可以看出, 它们具有相同的线性平行关系, 进一步说明了本文所提综合能源系统多场景优化运行模式综合评估模型与方法的合理性、实用性与有效性。

6 结束语

与现有技术及研究相比, 本文所提综合评估方

法综合考虑了综合能源系统的节能率、能量损失、新能源占比、新能源消纳率、运行维护成本, 精确、全面反映和衡量了综合能源系统的本质特征。建立了经济型优化运行模式模型、环保型优化运行模式模型、节能型优化运行模式模型, 从系统工程角度出发, 更加真实、客观地描述现实系统的运行模式。基于 AHP 综合评估了综合能源系统多场景优化运行模式, 定性分析与定量分析相结合, 考虑长远利益与当前利益, 通过逐次分层分解和综合评估, 从而保证综合能源系统综合效益最大化。

参考文献:

- [1] 孔振宇, 李宏仲. 考虑多评估指标的电-气综合能源系统可靠性评估[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(2): 37-43.
KONG Zhenyu, LI Hongzhong. Reliability evaluation on an integrated electric-gas system considering multiple evaluation indexes[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(2): 37-43.
- [2] 王迪, 蔡东军, 房鑫炎, 等. 动态综合评价方法在电网应急能力评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 101-107.
WANG Di, CAI Dongjun, FANG Xinyan, et al. Application of dynamic comprehensive evaluation method in emergency capacity assessment of power grid [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 101-107.
- [3] 鲁鹏, 陈大军, 时珉, 等. 基于熵权法的电网应急能力水平评价研究[J]. 电力科学与工程, 2013, 29(11): 44-48.
LU Peng, CHEN Dajun, SHI Min, et al. Research on the level evaluation of power grid emergency capability based on entropy weight method [J]. Power Science and Engineering, 2013, 29(11): 44-48.
- [4] 李秋燕, 王利利, 张艺涵, 等. 能源互联网多能流的耦合模型及动态优化方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 180-186.
LI Qiuyan, WANG Lili, ZHANG Yihan, et al. A review of coupling models and dynamic optimization methods for energy internet multi-energy flow [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 180-186.
- [5] 黄伟, 刘文彬. 基于多能互补的园区综合能源站-网协同优化规划[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 20-28.
HUANG Wei, LIU Wenbin. Multi-energy complementary based coordinated optimal planning of park integrated energy station-network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 20-28.
- [6] 程义, 李更丰. 基于双层模仿学习的多园区综合能源系统分布式协同优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(24): 16-25.
CHENG Yi, LI Gengfeng. Distributed collaborative optimal

- dispatch of multi-park integrated energy system based on bilayer imitation learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 16–25.
- [7] 钟永洁, 孙永辉, 谢东亮, 等. 含电-热-气-冷子系统的区域综合能源系统多场景优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 76–84.
- ZHONG Yongjie, SUN Yonghui, XIE Dongliang, et al. Multi-scenario optimal dispatch of integrated community energy system with power-heating-gas-cooling subsystems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43 (12): 76–84.
- [8] 南琦琦, 穆云飞, 董晓红, 等. 电动汽车快速充电网综合评估指标体系与方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 83–91.
- NAN Qiqi, MU Yunfei, DONG Xiaohong, et al. Comprehensive evaluation index system and method for fast charging network of electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 83–91.
- [9] 闫梦阳, 李华强, 王俊翔, 等. 计及综合需求响应不确定性的园区综合能源系统优化运行模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 163–175.
- YAN Mengyang, LI Huaqiang, WANG Junxiang, et al. Optimal operation model of a park integrated energy system considering uncertainty of integrated demand response [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50 (2): 163–175.
- [10] ZHONG Y, ZHOU H, ZONG X, et al. Hierarchical multi-objective fuzzy collaborative optimization of integrated energy system under off-design performance[J]. Energies, 2019, 12(5): 1–27.
- [11] 郭祚刚, 袁智勇, 徐敏, 等. 多能互补综合能源系统混合能流计算方法及算例[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(7): 58–65.
- GUO Zuogang, YUAN Zhiyong, XU Min, et al. Multi-energy flow calculation method for multi-energy complementary integrated energy systems [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(7): 58–65.
- [12] YANG Z, HU J J, AI X, et al. Transactive energy supported economic operation for multi-energy complementary microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12 (1): 4–17.
- [13] 张涛, 郭玥彤, 李逸鸿, 等. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 52–61.
- ZHANG Tao, GUO Yuetong, LI Yihong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49 (1): 52–61.
- [14] 钟永洁, 李玉平, 胡兵, 等. 基于合作博弈的能源互联网经济能效分层协同优化调度[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 55–64.
- ZHONG Yongjie, LI Yuping, HU Bing, et al. Hierarchical collaborative optimal dispatching of economy energy efficiency in energy internet based on cooperative game [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42 (1): 55–64.
- [15] YANG J, ZHANG N, BOTTERUD A, et al. On an equivalent representation of the dynamics in district heating networks for combined electricity-heat operation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35 (1): 560–570.
- [16] 温港成, 石鑫, 张怡, 等. 考虑设备变工况特性的园区综合能源系统两阶段规划优化方法研究[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(10): 1–11.
- WEN Gangcheng, SHI Xin, ZHANG Yi, et al. Research on two-stage planning optimization approach for community integrated energy systems considering off-design conditions [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(10): 1–11.
- [17] BAHRAMI S, TOULABI M, RANJBAE S, et al. A decentralized energy management framework for energy hubs in dynamic pricing markets [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 9(6): 6780–6792.
- [18] 钟永洁, 孙永辉, 王庭华, 等. 电热气互联能源系统动态环保经济协同灵活性调度[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2458–2470.
- ZHONG Yongjie, SUN Yonghui, WANG Tinghua, et al. Dynamic environmental economic and collaborative flexibility dispatch of integrated power, heat and natural gas energy system [J]. Power System Technology, 2020, 44 (7): 2458–2470.
- [19] 程杉, 魏昭彬, 黄天力, 等. 基于多能互补的热电联供型微网优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 160–168.
- CHENG Shan, WEI Zhaobin, HUANG Tianli, et al. Multi-energy complementation based optimal operation of a microgrid with combined heat and power [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 160–168.
- [20] 钟永洁, 李玉平, 胡兵, 等. 园区与区域能源互联网需求互动的动态协同优化运行分析[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(12): 128–139.
- ZHONG Yongjie, LI Yuping, HU Bing, et al. Dynamic cooperative optimization and operation analysis of interaction demand between community and regional energy internet [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26 (12): 128–139.
- [21] HUANG W, ZHANG N, KANG C, et al. From demand response to integrated demand response: Review and prospect of research and application [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 1–13.

- [22] 石宜金, 谭贵生, 赵波, 等. 基于模糊综合评估模型与信息融合的电力变压器状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 167-176.
- SHI Yijin, TAN Guisheng, ZHAO Bo, et al. Condition assessment method for power transformers based on fuzzy comprehensive evaluation and information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 167-176.
- [23] 钟永洁, 纪陵, 李靖霞, 等. 虚拟电厂基础特征内涵与发展现状概述[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(6): 25-36.
- ZHONG Yongjie, JI Ling, LI Jingxia, et al. Overview on the characteristics, connotation and development status of virtual power plants in China [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(6): 25-36.
- [24] 杨照, 黄少伟, 陈颖. 基于多智能体强化学习的多园区综合能源系统协同优化运行研究[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(8): 1-10.
- YANG Zhao, HUANG Shaowei, CHEN Ying. Research on cooperative optimal operation of multi-park integrated energy system based on multi-agent reinforcement learning [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(8): 1-10.
- [25] 修晓青, 唐巍, 李建林, 等. 基于层次分析法的储能配置综合评估技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 72-78.
- XIU Xiaoqing, TANG Wei, LI Jianlin, et al. Comprehensive evaluation technology of energy storage configuration based on analytic hierarchy process [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 72-78.
- [26] 吕佳炜, 张沈习, 程浩忠, 等. 考虑互联互通的区域综合能源系统规划研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4001-4021.
- LYU Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Review on district-level integrated energy system planning considering interconnection and interaction [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4001-4021.
- [27] 杨梅, 周喜超, 魏强, 等. 考虑经济效益目标的源网荷储综合能源系统动态最优能流优化研究[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(11): 63-69.
- YANG Mei, ZHOU Xichao, WEI Qiang, et al. Study on dynamic optimal energy flow of a source-network-load-storage integrated energy system considering its economic benefit [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(11): 63-69.
- [28] 刘旭娜, 魏俊, 张文涛, 等. 基于信息熵和模糊分析法的配电网投资效益评估及决策[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 48-56.
- LIU Xuna, WEI Jun, ZHANG Wentao, et al. Investment benefits evaluation and decision for distribution network based on information entropy and fuzzy analysis method [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 48-56.

(本文责编: 刘芳)

收稿日期: 2023-04-22; 修回日期: 2023-05-10
上网日期: 2023-06-07; 附录网址: www.ienergy.cn

作者简介:

钟永洁(1990), 男, 高级开发设计师, 硕士, 从事虚拟电厂、综合能源系统、能源互联网建模及优化等方面的研究, zhongyongjieemail@163.com;

纪陵(1982), 男, 高级工程师, 硕士, 从事电力系统自动化、智能变电站、虚拟电厂等方面的研究;

李靖霞(1973), 女, 高级工程师, 博士, 从事虚拟电厂、智能变电站、电力系统自动化等方面的研究。