

控制与决策

Control and Decision

基于熵理论的综合能源系统不可能三角研究综述

孙秋野, 任一平, 刘子铭, 胡旭光

引用本文:

孙秋野,任一平,刘子铭,胡旭光. 基于熵理论的综合能源系统不可能三角研究综述[J]. *控制与决策*, 2023, 38(8): 2106–2121.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0395>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

数据驱动的综合能源系统运行优化方法研究综述

Review of research of data-driven methods on operational optimization of integrated energy systems

控制与决策. 2021, 36(2): 283–294 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0725>

基于模糊-两阶段超效率SBM的电网应急能力动态综合评价

Dynamic comprehensive evaluation of power grid emergency capability based on fuzzy-two-stage super efficiency SBM

控制与决策. 2021, 36(6): 1333–1341 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1128>

超启发式交叉熵算法求解模糊分布式流水线绿色调度问题

Hyper-heuristic cross-entropy algorithm for green distributed permutation flow-shop scheduling problem with fuzzy processing time

控制与决策. 2021, 36(6): 1387–1396 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1681>

基于群决策考虑属性效用一致性的DEA他评交叉效率公共权重排序法

A common-weight ranking method for DEA peer-efficiency based on group decision-making and considering the consistency of attribute utility

控制与决策. 2021, 36(9): 2279–2289 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1719>

基于策略权重的模糊多属性决策方法

Strategic weight manipulation in fuzzy multiple attribute decision making

控制与决策. 2021, 36(5): 1259–1267 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0542>

基于熵理论的综合能源系统不可能三角研究综述

孙秋野[†], 任一平, 刘子铭, 胡旭光

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

摘要: 面向“碳达峰、碳中和”目标, 能源系统呈现可再生能源高比例接入、电气冷热能源形式多样、源网荷储互动频繁、信息能源深度耦合等众多新特性, 综合能源系统面临着“环保-安全-经济”3个目标无法同时满足的能源不可能三角问题. 在信息深度耦合的综合能源系统中, 不可能三角问题将从传统的纯能量特性研究转向信息与能量的双重特性研究. 熵具有信息与能量的双重特性, 鉴于此, 对熵理论在综合能源系统中的研究展开综述. 首先介绍熵的基础理论并将其作为一种量化工具引入不可能三角问题; 然后基于能源不可能三角问题特性, 分类介绍熵理论在环保性、安全性与经济性3个方向的应用, 归纳并提炼综合能源系统运行中的新问题, 分析现有研究成果下熵理论应对不可能三角研究的优势; 最后对基于熵理论的综合能源系统不可能三角研究所面临的主要挑战及未来可能的研究方向进行总结和展望.

关键词: 综合能源系统; 能源不可能三角; 熵理论

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0395

引用格式: 孙秋野, 任一平, 刘子铭, 等. 基于熵理论的综合能源系统不可能三角研究综述[J]. 控制与决策, 2023, 38(8): 2106-2121.

Review of energy trilemma research of integrated energy system based on entropy theory

SUN Qiu-ye[†], REN Yi-ping, LIU Zi-ming, HU Xu-guang

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Facing the goal of "carbon peaking and carbon neutralization", the energy system presents many new characteristics, such as high proportion of renewable energy access, various forms of electrical cold and hot energy, frequent interaction between source network and storage, and deep coupling of information energy. Integrated energy system is faced with the energy trilemma problem that the three goals of "environmental sustainability-energy security-economy" cannot be met at the same time. In the integrated energy system with deep coupling of information, the impossible triangle problem will change from the traditional pure energy characteristic research to the dual characteristic research of information and energy. Entropy has the dual characteristics of information and energy. This paper summarizes the research of entropy theory in integrated energy system for the first time. Firstly, the basic theory of entropy is introduced and introduced into the impossible triangle problem as a quantitative tool. Then, based on the characteristics of energy impossibility triangle, the application of entropy theory in environmental protection, security and economy is introduced, the new problems in the operation of integrated energy system are summarized and refined, and the advantages of entropy theory in dealing with the impossibility triangle under the existing research results are analyzed. Finally, the main challenges and possible future research directions of the impossible triangle of integrated energy system based on entropy theory are summarized and prospected.

Keywords: integrated energy system; energy trilemma; entropy theory

0 引言

2011年, 世界能源委员会(WEC)提出能源领域“不可能三角”问题^[1], 即能源系统的环保、安全和

经济三者不可同时兼顾, 此后对不可能三角问题特性的研究成为提升系统效率、缓解能源危机的重要手段. 2020年以来, “碳达峰、碳中和”成为能源系统的

收稿日期: 2023-03-31; 录用日期: 2023-05-25.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0702200); 国家自然科学基金重点项目(U20A20190); 国家自然科学基金面上项目(62073065).

责任编辑: 杨光红.

[†]通讯作者. E-mail: sunqiuye@ise.neu.edu.cn.

重要目标,系统中新能源比例进一步提升^[2-3]. 总体而言,相比于传统能源系统,纳入高比例可再生能源后综合能源系统中源侧的碳排放降低,整体不确定性上升,可观可控性下降,系统需要配置额外备用容量实现能量平衡;同时,信息系统与能源系统耦合加剧,实

时获取网络及节点的状态信息,实现源网荷储一体化控制,使系统能控性上升^[4-6],信息处理在系统中的影响愈加重要. 综合能源系统的结构演化及其衍生出的新问题如图1所示.

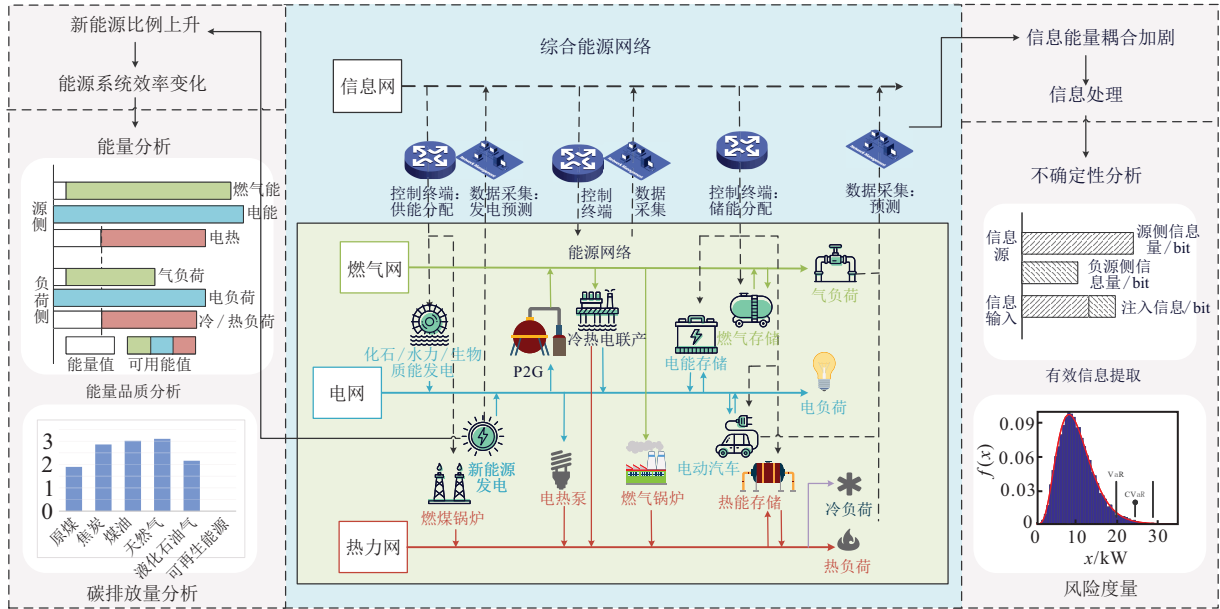


图1 综合能源系统的结构演化及其新问题

综合能源系统的新特性与传统不可能三角问题互相耦合,这给相关研究带来进一步挑战. 新系统中,在环保性方面需要厘清系统中能源效率及碳排放问题,在安全性方面对可再生能源带来不确定性加以度量,在经济性方面对系统的新型风险实现规划,内容如表1所示. 因此,需要一种理论方法在处理系统不确定性的基础上对能源系统碳排放、系统效率等相关指标进行分析.

表1 综合能源系统中能源不可能三角新特性

系统变化	系统特性	环保	安全	经济
化石能源 → 可再生能源	不确定性上升	—	↓	↓
	可观、可控性下降	—	↓	↓
	源荷波动耦合加剧	↓	↓	↓
	系统转为低碳系统	↑	—	↑
能源网络 → 信息能源耦合网络	能观性上升	—	↑	—
	能控性上升	↑	↑	↑
	信息物理耦合加剧	—	↓	—

本文其余部分组织如下. 第1节介绍熵的基础理论发展及其应用,并对熵理论量化不可能三角特性的优势进行说明,为破解不可能三角问题提出一种新的思路. 第2节介绍基于熵理论的系统环保性分析,并基于玻尔兹曼熵的定义从能量品质评估与碳流分析两个方面,分析熵理论在综合能源系统中度量能量质量、评估系统效率、计算碳流排放等方面的应用,从而

实现对综合能源系统的环保特性影响. 第3节介绍基于熵理论的系统安全性分析,并基于信息熵定义进行不确定性的度量评估,介绍信息熵在综合能源系统中提升模型精度、建立评估指标、消除系统不确定性等方面的应用,从而实现对综合能源系统的安全特性影响. 第4节介绍基于熵理论的系统经济性分析,分别介绍传统能量网络中考虑玻尔兹曼熵与经济成本的多目标优化方法与综合考虑多重影响因素的模糊决策方法,并介绍基于信息熵的信息价值评估,从而实现对综合能源系统的经济特性影响. 第5节对熵理论在综合能源系统不可能三角研究的未来应用进行展望.

1 熵理论发展及其在能源不可能三角问题中的应用

本节首先介绍熵的理论发展及应用,并将其作为一种量化工具引入不可能三角问题,做出理论分析.

1.1 熵理论发展

熵的概念由 Clausius^[7] 于 1865 年首次提出,用于宏观热力学系统描述系统状态变化. 1872 年,玻尔兹曼结合统计学概念,将熵的概念扩展到微观态. 1948 年,香农提出香农熵度量随机事件的信息量. 由此,熵的概念可以应用于热力学、统计热力学与信息学 3 门

学科中.

克劳修斯熵用于描述宏观物理系统无序或混乱程度,定义为

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}. \quad (1)$$

其中: T 为物质的热力学温度; ΔQ 为熵增过程中加入物质的热量,热力学中以此描述宏观系统中热与功之间相互转化及其转化限度的问题.

1872年,Boltzmann^[8]以分子运动论为基础,对热力学熵进行了理论拓展,通过对微观态(系统内粒子的某种分布方式)的观测引入了热力学概率,得出熵的微观表达式为

$$S = k_B \ln W. \quad (2)$$

其中: k_B 为玻尔兹曼常数, W 为微观态数目.定义微观状态*i*的发生概率为 p_i ,则 $p_i = 1/W$.玻尔兹曼熵可以写为 $S = -k_B \sum_{i=1}^W p_i \ln p_i$.玻尔兹曼熵反映了系统微观状态分布的复杂程度,对于封闭系统而言,熵增越多,意味着系统中无法转化为有用功的能量越多,系统效率越差.

玻尔兹曼熵与克劳修斯熵在综合能源系统中的理论应用主要集中于能效评估问题.以往的研究表明,系统中的能量损失主要来源于系统中的能量转化过程^[9],熵理论与热力学第一、第二定律相结合可以对系统内各个部件进行计算,评估整个系统的能源使用情况.相比于热力学第一定律,热力学第二定律可以基于熵的概念说明能量转换过程中能量质量的退化以及过程的方向(无论是否可能发生反向过程),实现不同种能源的数量与质量评估.

1948年,Shannon^[10]在信息论中提出香农熵的定义,一个随机变量 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 的香农熵可以表示为

$$H(X) = - \sum_{i=1}^N p(x_i) \log_2 p(x_i), \quad (3)$$

其中 $p(x_i)$ 为随机事件 x_i 发生的概率.式(3)中,对数的底数可以替换,当底数为2时,信息熵的单位为比特.当该变量为离散变量时,其信息熵是非负的.因此,基于式(3)可以对网络中的信息节点进行定量计算,进而评估系统的不确定性.香农熵在综合能源系统中的理论应用主要集中于数据处理与不确定性评估问题.大量研究表明,数据信息在能源的生产、传输、分配和利用环节均会产生巨大的影响.香农熵与传统模型、算法相结合,可以实现数据利用,有效降低系统模型的复杂性.

熵理论的发展及应用如图2所示,其中Gouy-

Stodola定理见第2.1.1节.

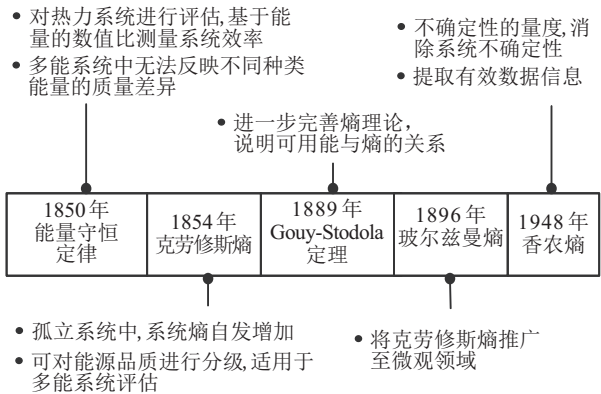


图2 熵理论的发展及应用

1.2 基于熵理论的能源不可能三角问题分析

能源系统中的不可能三角问题如图3所示.传统能源系统以化石能源为主,随可再生能源比例上升,系统环保性获得扩展,同时安全性、经济性有所下降;在信息与能量耦合的综合能源系统中,三角特性的可调范围相比于纯能量系统获得扩展.能源不可能三角特性随着系统发展进行耦合变化,因此需要一种理论对三角问题进行综合分析.熵泛指某些物质系统状态的一种量度,本质是形容一个系统“内在的混乱程度”,在综合能源系统中,表现为数据有效性(确定程度)与能源品质的变化(可利用程度).

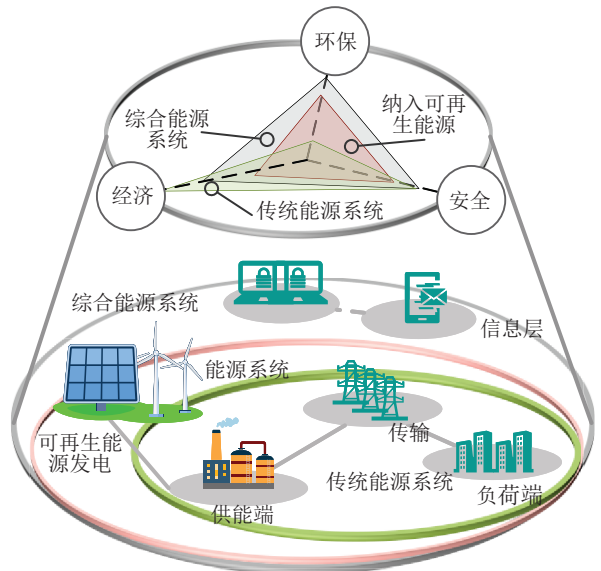


图3 能源系统中的不可能三角问题

在综合能源系统中,如何处理不同种类能源相互耦合问题并实现能源的高效利用,与如何分析可再生能源的影响并建立清洁低碳系统是环保性分析需要面对的两个基础问题.

针对能源高效利用问题,以克劳修斯熵或玻尔兹曼熵为主要评估参数的熵评估方法,可以评估不同种能源的质量与数量,也可以评估系统整体的能量利用

情况,是目前主流的系统效率评估方法. 针对能源清洁问题,系统的碳排放研究可以直接核算能源网络中的碳流动情况,在环保性分析中逐渐受到关注^[11]. 类比于熵流,基于碳流定义的碳熵分析可以将碳流从能量流中抽出,形成详细的碳轨迹追踪. 因此,通过熵理论进行能质评估并计算碳排情况,降低能量损失的同时提升能源清洁性,可以实现系统环保性分析.

在综合能源系统中,如何处理高比例可再生能源入网带来的不确定性并实现可再生能源消纳是安全性分析需要面对的主要问题.

传统的确定性能源系统中,一个模式具有可观性表示其变量可以被系统的输出量观测,一个模式具有可控性表示它可以被系统的输入量激发或抑制,可观可控性对于能源系统的安全运行、优化调度起着至关重要的作用. 在综合能源系统中,源、荷两端均存在不确定源,系统复杂性急剧上升,即认知不确定性提升,同时叠加固有不确定性影响,新系统的可观性与可控性同时下降. 其中,认知不确定性是由人类主观认识不足或所获得的知识和信息缺乏所导致,固有不确定是自然界或物理现象中存在的随机性或不确定性,人类无法控制或减少. 基于香农熵的定义,熵理

论可以对网络中的信息节点进行定量计算,进而评估系统的不确定性,实现系统安全性分析.

对不可能三角问题的研究表明,能源系统很难同时满足环保性、安全性和经济性目标,定义某种指标进行平衡,是破解能源三难问题的主流研究方向之一. 针对能源系统的传统经济性分析中,通常以成本作为量化指标,评估系统的整体性能. 因此在综合能源系统中,如何对含有不确定性的复杂系统进行合理量化分析,将不可能三角问题转为具有多阶段复杂约束的多目标优化问题,是经济性分析需要面对的基础问题.

在新系统中,一方面可类比于传统方法,基于建设成本与运行成本量化环保性指标,另一方面基于熵理论的综合决策方法,评估风险成本量化安全性指标. 此外,基于熵理论也可将信息作为一种“商品”进行价值核算,进一步量化不确定性带来的成本. 因此,基于熵理论可以对综合能源系统中各影响因素进行量化,建立合适的评估体系,实现系统经济性分析.

本文引入熵相关理论如表2所示,围绕综合能源系统不可能三角问题进行量化分析.

表2 部分熵测度

名称	作用	数学表达式
碳熵 ^[12]	度量源侧的能源清洁情况	$s_c^L = P^L e^N$
电力网络拓扑熵 ^[13]	度量节点重要程度	$H(U_i) = - \sum_{i=1}^N p(U_i) \log p(U_i)$
潮流熵 ^[14]	度量线路脆弱程度	$H(l_k) = - \sum_{i=1}^N p(l_k) \log p(l_k)$
潮流转移熵 ^[15]	度量系统安全容量裕度	$H(D_i) = - \sum_{i=1}^N p(D_i) \log p(D_i)$
联合熵 ^[16]	度量多组随机事件的联合概率	$H(Y X) = - \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x, y) \log p(x, y)$
交叉熵 ^[16]	度量理论概率分布的准确性	$H(X, q) = - \sum_x p(x) \log q(x)$

表2中: s_c^L 为碳熵, P^L 为负荷功率矩阵, e^N 为碳强度; 电力网络拓扑熵 $H(U_i)$ 、潮流熵 $H(l_k)$ 和潮流转移熵 $H(D_i)$ 的公式与香农熵类似; $P(U_i)$ 、 $P(l_k)$ 与 $P(D_i)$ 分别为线路电压等级、线路负载率和有功容量裕度变化处于某区间的概率; $H(Y|X)$ 为联合熵, $p(x, y)$ 为随机事件 X, Y 发生的联合概率; $H(X, q)$ 为交叉熵, $p(x)$ 为随机事件 X 的概率密度函数, $q(x)$ 为用于近似 $p(x)$ 的概率分布.

综上所述,不可能三角问题将从传统的纯能量特性研究转向信息与能量的双重特性研究. 熵具有信息与能量的双重特性,是一种合适的分析能源不可能三角问题的量化指标.

2 基于熵理论的系统环保性分析

传统改善系统环保性的方法以提高系统能效为主,基于熵的能量评估可以度量系统中可用能的变化. 该方法可以处理不同种类能源的相互耦合问题,实现能源的梯级利用,广泛用于多能系统. 在综合能源系统中,除传统提升能效的方法外,还可改变系统用能决策以降低系统中碳排放,实现能源的清洁. 本节主要研究内容如图4所示.

2.1 基于熵的能量品质分析

建立多能耦合的综合能源系统是提高系统效率、降低环境污染、优化能源利用结构的主流方法之一,其核心思想是在能量网络中整合不同种类能源,通过

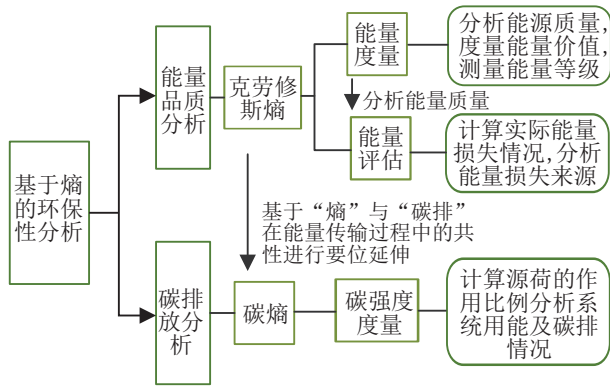


图4 基于熵理论的系统环保性分析

不同类型能源的梯级利用实现能量互补,提升能源效率与网络灵活性。

2.1.1 基于熵的能量度量

传统能量网络中以化石燃料为主要供能方式,并不对能量质量进行分类,一方面带来环境污染问题,另一方面由于忽视不同种类能源质量的差异^[9]带来能源低效利用问题.因此,在热力学第二定律提出后,基于卡诺循环引入焓描述系统中的可用能^[17],Gibbs^[18]、Tait^[19]也引入了类似于此的可用度定义.以上研究表明,虽然能量不能被凭空创造或破坏,但在转换过程中会退化或失去质量,直到达到系统平衡阶段,且被破坏的做功能力与产生的熵成正比^[20].独立于吉布斯的结果,Gouy-Stodola定理证明

了有用能与能量损失的关系^[21],熵与能量质量损耗的关系可以描述为

$$dW_{ex} = T_0 dS, \tag{4}$$

其中: T_0 为环境温度, dS 为能量传递过程中的熵增.

在后续的发展中,可用能的概念渐渐地不只局限于热力系统中,而是描述为物质流或能量流在与参考环境达到平衡时所能产生的最大功^[22],并将该部分能量定义为焓.以此为依据一方面可以对不同种能源的质量进行分析,另一方面可以对系统中能量退化的原因、大小和位置进行分析.目前,焓分析方法已广泛应用于工业设备及系统^[23],以评估设备或系统的能量使用效率.

为了有效地测量能量等级的差异,基于某一能量的可用能(在外部可以转化为功的能量) W 与其总能量 Q 定义能量质量系数,表示为

$$\lambda = \frac{W}{Q}. \tag{5}$$

能量质量系数反映了能量中包含的有用能与总能量间的关系,是一个无量纲数.基于能量质量系数可以描述不同能源的能量转换能力^[24],综合考虑环境因素的影响和不同等级能源的功能功率水平.与热力学第一定律相比,该方法结合能源的质量和数量,揭示了能源损失的原因,合理表征了能源利用程度.在综合能源系统中,不同能源的能量质量系数计算方法如表3所示.

表3 不同能源的能量质量系数

能源种类	能量质量系数	说明
电 ^[25]	$\lambda_e = 1$	电能可完全转化为其他形式能的能量,具有最高的能量价值
化石燃料 ^[25]	$\lambda_f = 1 - \frac{T_0}{T_{bum} - T_0} \ln \frac{T_{bum}}{T_0}$	化石燃料的有用能与燃料低位热值差别不大
热能(水) ^[26]	$\lambda_h = 1 - \frac{T_0}{T_{hv,1} - T_{hv,2}} \ln \frac{T_{h,1}}{T_{h,2}}$	热能的能量转化效率与环境温度有关,极限值为卡诺效率
热能(气) ^[26]	$\lambda_v = 1 - T_0 \frac{s''_{v,1} - s''_{v,2}}{h''_{v,1} - h''_{v,2}}$	蒸汽的放热过程类似于热水,但释放的热量不能直接计算,因为蒸汽的比热容在放热过程中不是恒定的
空间供热 ^[27]	$\lambda_{sh} = \frac{1}{\varepsilon_{mh}} = 1 - \frac{T_{sh,2}}{T_{ab,1}}$	空间供热以空调为主,具有室内室外两个热源
空间制冷 ^[27]	$\lambda_{sc} = \frac{1}{\varepsilon_{sc}} = \frac{T_{sc,1}}{T_{sc,2}} - 1$	空间制冷以空调为主,具有室内室外两个热源
可再生能源	$\lambda_{re} = 0$	从能源角度看,可再生能源是一种零成本的能源形式

上述研究中,基于能量品质分析可对不同种类能源进行区分,但针对可再生能源的能量度量仍然较为困难,通常采用较多不可行的弱假设(如假设可再生能源的能量质量系数为0),且缺乏实际数据.

2.1.2 基于熵的能量品质评估

本节结合熵的能量度量方法,根据目前已有的研究内容介绍了基于熵的能量品质度量评估多能系统中的能源有效利用情况.综合能源系统中除原有结

构复杂、能量耦合的特点外^[28],还伴随着可再生能源纳入系统后产生的转换效率、可变性^[29-30]的估算等新问题.为了实现能源系统的高效运行,必须确认系统中的实际能量损失的来源、原因和大小,因此需要在系统的规划阶段对能量损耗情况进行合理地评估.

传统针对系统的能量评估方法以热力学第一定律为核心,基于能量的数量评估系统的运行损耗,有力地证明了多能耦合相对于分供系统在能源的高效

利用方面的优势^[31-32]. 该指标同样针对可再生能源的消纳^[33]、能量梯级利用等^[34-35] 难点问题进行研究, 估测系统的能效情况, 构建经济指标. 由于其以纯数量的形式计算系统能量损耗, 该方法的主要缺陷在于无法表明能量转换过程中能量质量的退化, 无法准确估测系统做功能力的损失.

鉴于此, 在能量枢纽模型的基础上, 基于热力学熵提出了适用于综合能源系统的综合能源利用水平的评价标准如下式所示:

$$\eta_{ex} = \frac{\sum Ex_{out}}{\sum Ex_{in}} = \frac{\sum P_{out} \lambda_{out}}{\sum P_{in} \lambda_{in}}. \quad (6)$$

其中: η_{ex} 为焓效率; Ex_{out} 为网络中输出可用能; Ex_{in} 为输出可用能; P_{in} 为系统输入能量, 是系统耗能情况; P_{out} 为负荷功率; λ_{in} 、 λ_{out} 分别为对应能源的能源质量系数. 该指标以能量的质量分析为基础, 评估不同种能源的质量差异, 反应系统能量利用效率的同时表达了能量转化方向与系统的能源转换能力.

由于同时考虑了能量的数量和质量, 相比于纯数量评估方法, 可用能评估提供了更加合理可靠的评估标准, 在工业系统综合利用水平评估中得到了广泛应用^[36]. 在系统的能量转化环节, 文献[37-38]针对该过程同时存在能量平衡、熵平衡和焓平衡进行计算, 准确估测系统的能量损失来源, 改善系统结构. 在系统的整体效率评估中, 文献[39]针对系统的热力过程, 文献[40]针对纳入可再生能源情况, 实现了系统的能量利用效率、灵敏度、经济指标等多角度评估^[41], 反映了集成系统性能.

在现有的研究成果中, 通常认为基于能量品质分析对系统进行能量评估, 从能量尺度对不同能源进行综合测量, 可以更全面地反应系统的性能. 然而, 对系统进行有用能核算的难度较大, 很难对系统中具体的能量节点进行分析.

2.2 基于熵的碳排放分析

目前针对能源的环保性研究中, 碳排放是最主要的环保指标之一, 不仅在源侧的宏观计量, 而且在整个能源系统中, 根据能量流分布定量确定系统碳排放流的流动状态, 辨识电力系统中碳排放同样得到了研究.

社会科学中, 将碳排和固碳分别视为正碳熵和负碳熵过程^[42], 文献[12]基于熵理论描述能量传递过程中能量流携带碳排的无序化, 即能量流携带的碳排增加越多, 无序化程度越高. 该文基于负荷功率矩阵 P^L 与碳强度 e^N 定义负荷节点碳熵, 有

$$s_c^L = P^L e^N. \quad (7)$$

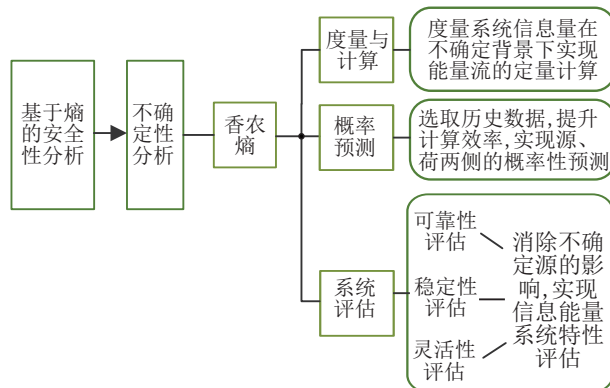
碳熵指碳源为碳荷提供的实际功率流对应的总碳排量. 相比于碳流追踪方法, 基于熵理论处理碳流, 能够在得到负荷碳强度的同时明确源荷作用比例, 细化节点碳指标, 实现对源荷的碳排关系进行整体追踪.

2.3 环保性分析中的熵理论应用

本节介绍了基于熵理论的综合能源系统环保性分析方法, 结果表明基于热力学熵或克劳修斯熵可以有效度量不同能源的品质, 实现对能源的高效利用, 对其概念进行延伸, 可以通过对能源系统的碳源追踪实现系统整体的能源清洁. 然而, 该理论仍然缺乏针对可再生能源的通用度量方法, 整体评估体系仍有缺陷, 且针对系统碳排放的研究内容较少.

3 基于熵理论的系统安全性分析

综合能源系统的源侧由确定性一次能源保障供能转为波动性的可再生能源, 带来系统安全的新问题. 本节基于熵的不确定性评估, 度量信息中的不确定性. 在传统数据预测模型与传统能源网络可靠性、灵敏性、稳定性分析的基础上, 根据熵理论提取数据中的有效信息, 处理不确定背景下复杂性急剧上升的综合能源系统问题. 本节主要研究内容如图5所示.



3.1 基于熵的不确定性度量与系统模型

目前, 香农熵作为定量计算信息员包含信息量多少的测度, 度量系统状态不确定性程度, 已应用于多个领域. 在实际系统中往往存在多组信息流, 因此本节首先介绍针对多组信息流进行分析的香农熵应用.

1) 联合熵.

熵是度量随机变量不确定性的测度, 当存在两个离散随机变量 X 、 Y 时, 定义联合熵 $H(X, Y)$ 描述二者同时发生的信息量为

$$H(X, Y) = - \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x, y) \log p(x, y), \quad (8)$$

其中: $p(x, y)$ 为随机事件 X 、 Y 发生的联合概率.

2) 互信息.

判断两个离散变量的相关性可以借助互信息,两个离散随机变量 X 、 Y 的互信息 $I(X, Y)$ 与其信息熵 $H(X)$ 、 $H(Y)$ 和联合熵 $H(X, Y)$ 有关,定义为

$$I(X, Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y). \quad (9)$$

互信息表示两个变量或多个变量之间共享的信息量,可以描述两个离散变量的相关性,当互信息 $I(X, Y) = 0$ 时,两个随机变量没有相关性.互信息在信息处理时可以作为分析信息相关性的度量,其最大优势在于可以有效刻画变量之间的非线性关系^[43].

互信息的应用比较广泛,例如机器学习中将互信息作为特征选择和特征变换的标准,用于表征变量的相关性和冗余性^[44];时间序列分析中,用于相位同步的检测;神经网络训练过程中,用于分析随机变量之间的因果关系^[45]等.

3) 最大熵原理.

针对不确定问题,1957年 Jaynes^[46] 将信息理论与统计力学相统一,基于香农熵形式提出了最大熵原理:在符合已知条件的情况下,获得所有可能的概率分布中,认为香农熵最大的解,其概率分布最符合自然情况,误差最小.其数学形式描述为

$$\begin{aligned} \max S &= - \int_R f(x) \ln[f(x)] dx; \\ \int_k f(x) dx &= 1; \\ \int_R x^i f(x) dx &= M_i, \quad i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (10)$$

其中: R 为随机变量 X 所在的集合; $f(x)$ 为 X 的密度函数; M_i 为第 i 阶原点矩; m 为 X 的矩的阶数.此模型可以引入拉格朗日乘子进行求解,即

$$\begin{aligned} \max S &= S + (\lambda_0 + 1) \left[\int_R f(x) dx - 1 \right] + \\ &\quad \sum_{i=1}^m \lambda_i \left[\int_R x^i f(x) dx - M_i \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

解得概率密度函数为

$$f(x) = \exp \left(\lambda_0 + \sum_{i=1}^m \lambda_i x^i \right). \quad (12)$$

因此,基于最大熵原理只要确定参数 λ 就可以获得对应函数.使用最大熵原理构建概率分布,在统计^[47]、通信、经济领域、时间序列分析和可靠性理论^[48] 等方向均有应用.

4) 交叉熵.

如果一个随机变量 X 的概率密度函数为 $p(x)$, $q(x)$ 为用于近似 $p(x)$ 的概率分布,则随机变量 X 与模型 q 之间的交叉熵定义为

$$H(X, q) = - \sum_x p(x) \log_2 q(x). \quad (13)$$

交叉熵的概念用以衡量估计模型与真实概率分布之

间的差异,交叉熵值越小两个概率分布越接近.

目前,以潮流计算为代表的电力系统能量流计算的理论基础与实践验证均已相当成熟,相比之下对于多能系统的研究,尤其是包含不确定性的多能系统研究较少.就目前研究成果而言,概率能量流相关研究热点分为系统建模^[49]与算法改进^[50]两个方面.

文献[51-52]为改善能量流计算时计算量大、耗时较长的问题,选择最优抽样概率密度函数代替原有的抽样函数.文献[51]通过香农熵计算可以评估最优概率抽样函数与实际采样函数的一致性简化最优抽样函数直接求解困难的问题.文献[52]基于香农熵理论拟合输出量的概率密度函数.文献[53-56]基于最大熵模型求解概率潮流,解决传统算法得到负值概率密度和存在截断误差的问题.

3.2 基于香农熵的系统预测

对系统供应与需求进行预测,降低系统不确定性的影响,提高可再生能源消纳是多能系统的研究热点.由于可再生能源的“不可调度”,具有系统中最大的不确定性,对其进行确定性预测难度极大,提供未来事件概率信息的不确定性预测在预测理论的发展中越来越受到重视.计及系统不确定性的概率预测是多能系统运行分析的基础.

将信息论引入综合能源系统中,基于香农熵理论对输入系统的可再生能源发电量与负荷功率的历史数据进行分析,可以客观计算该组数据提供的信息量,获得更高的预测精度.文献[57]在不同采样周期中同时预测步数与信息量提取香农熵,评估风电预测能力,降低了预测中对大数据的依赖.文献[58]以各个特征子集的总香农熵作为其权重系数,充分保存各子集的信息量.文献[59-60]基于熵理论提取与预测目标关联度较高的特征因素进行数据集筛选.文献[59]将各个特征因素对于风电机组功率曲线的影响量化,通过加入不同变量后的目标模型原始香农熵与条件香农熵的差值,分配该变量因素的权重.文献[60]基于香农熵计算各影响因素权重,并结合数学方法确定样本,提高了整体评价模型的准确性.

在降低预测模型计算量方面,互信息可以评估输入数据与预测输出的相关性,有效选择出与输出高度相关的解释变量.文献[59, 61]基于互信息计算不同特征子集相关性,充分提取子集信息,以气象特征-光伏数据间的互信息为特征评价指标,选择数据集训练模型.文献[57]基于互信息特征选择对光伏出力影响更大的数据组,为神经网络选择最佳输入,降低问题的复杂性和训练神经网络所需的时间.文献[62]

基于互信息的特征选择,为神经网络选择最佳输入,降低问题的复杂性和训练神经网络所需的时间。

3.3 基于香农熵的不确定性评估

综合能源系统的评估需要考虑不确定性因素的影响,与传统多能系统中基于确定性预测场景进行规划不同,由于系统的供需两端均无法进行完全准确的预测,且随着综合能源系统中的可再生能源渗透率增加,系统运行面临的不确定性进一步增强。为了维护系统的稳定运行,需要制定合适的指标消除系统不确定性,分析系统的运行情况。由于系统信息与能量的紧密耦合,不确定性评估的方法与传统能源系统评估方法紧密结合,本节基于熵的信息特性实现不确定性条件下的综合能源系统评估。

3.3.1 可靠性评估

传统的电力系统可靠性的评估指标主要包括负荷指标和系统指标^[63],二者分别反应了电力系统中特定负荷点的可靠性性能与整个系统可靠性水平。由于不同种类能源的转换,多能系统仍可沿用传统可靠性指标评估。随着可再生能源设备的普及,其波动性成为影响系统可靠性的主要因素,计及新能源的可靠性研究逐渐成为主流。可靠性评估本质上是一个组合数学问题,经常遇到维数灾难。如何有效提高电力系统可靠性评估的仿真速度,在短时间内模拟运行状态,计算可靠性指标,量化整个能源系统的可靠性,一直是几十年来的研究热点。其中重要抽样法是最有效的降低方差变化、提高系统可靠性评估仿真速度的方法,文献[64-65]基于重要抽样法提出不同方案改善抽样效率,加快蒙特卡洛模拟法收敛速度,有效计入各种复杂的运行策略对可靠性评估的影响。

交叉熵算法是一种新兴的重要抽样法,能够评估模拟概率密度分布与真实概率密度分布的相关性,得到最优参数的近似最优概率密度分布,在蒙特卡洛仿真中取得较好的收敛性加速效果。文献[66-69]将其应用于系统可靠性分析。文献[66]将交叉熵的概念引入到发电系统可靠性评估中,之后的研究中该算法经过进一步简化及发展,使其适用于大电网。文献[67-69]基于交叉熵算法,优化抽样过程获得最优概率参数分布,减小样本方差波动,加快收敛,实现快速可靠性评估。文献[65]针对故障状态概率构建元件,提出一种基于链表动态故障集并将之与交叉熵结合使用,通过变更负荷峰值改变系统可靠性裕度。

3.3.2 灵活性评估

在系统的运行过程中,系统的供能与负荷需要始终保持平衡。受不确定性影响,在对系统无法进行完

全准确预测的情况下,系统同时需要应对可再生能源的间歇性与波动性,这对系统的能量平衡能力提出了更高的要求。

在间歇性可再生能源应用之前,能源系统运营商只需进行负荷预测,并根据实际负荷调整供能情况。例如传统电力系统中,短期波动一般通过频率支持来处理,长期波动一般通过调节备用设备或负载跟踪来处理^[70]。多能系统则通过概率分析系统发电可靠性、可再生能源发电贡献及其预测误差大小计算高峰容量需求^[71]。显然,在这种计算方式下,各影响因素存在耦合情况。

可再生能源渗透率的增加提升了系统灵活性的要求。在目前的研究中,负荷和供能端都可以通过不同的方案提高系统灵活性^[72]。可再生能源发电贡献的关键因素是其输出与需求之间的关联程度,关联度高则需求的储备容量更少^[73]。电力系统通常通过频率偏差^[74-75]与功率偏差^[76]评估二者的匹配程度,考虑信息流与能量流的耦合情况,文献[77]将电源发电曲线与负荷需求曲线按单位时间进行离散化,通过二者的互信息评估可再生能源渗透对电力供需匹配的影响。相比于最大功率/频率偏差值,互信息指标可以有效区分供能端的波动情况,描述供需相关性,因此以互信息为指标对能量供需匹配进行量化,可以作为能源系统运行中评价供需匹配的新指标,反映系统能量的平衡情况。

3.3.3 稳定性评估

基于复杂网络理论的结构分析,选取相关结构指标,类比于香农定理描述结构混乱程度的物理量仍可以熵的形式定义,并应用于综合能源系统中。

文献[13]基于图论,通过构造结构熵指标来反映系统的结构特征。借助该方法定义的指标可以有效定义系统中节点重要程度^[78-79],对评估系统稳定性具有重要作用。文献[14-15]基于系统运行特性,构造潮流熵指标,评估系统的脆弱路线,提高系统的安全裕度。

文献[80]提出电力系统潮流均衡度分析方法,通过研究潮流变化特性,探索提高系统安全运行水平的新方法。文献[81-82]分别结合欧氏距离与灰色关联分析法定义距离熵和灰色关联熵,改善了原有方案的缺陷,体现了信息融合对原有能源系统的影响。

3.4 安全性分析中的熵理论应用

本节介绍了基于熵理论的综合能源系统安全性分析方法,结果表明基于香农熵可以有效度量信息的品质(信息量),改善系统计算模型精度,并建立不确

定条件下的系统安全性评估指标,改善综合能源系统的运行状况.然而,该理论仍然缺乏安全性机理分析,仍以数据处理与算法改进为主.

4 基于熵理论的系统经济性分析

能源网络经济性分析中,往往以系统成本作为唯一评估目标.而对能源不可能三角问题的研究表明,虽然无法获得三目标平衡,但往往可以环保、安全与经济其中两角取得优化,因此针对经济性的研究一般转化为系统优化问题.基于环保性与安全性的分析结果结合经济成本目标对系统结构组合的实际潜力进行改进,通过优化系统的运行,控制能量供应、转化设备的输出,获得高能效低排放、高可靠性、低运行成本等目标的最佳组合具有重要意义.基于熵理论核算信息成本的研究较少,部分研究以减少不确定性的影响分析信息价值.本节主要内容如图6所示.

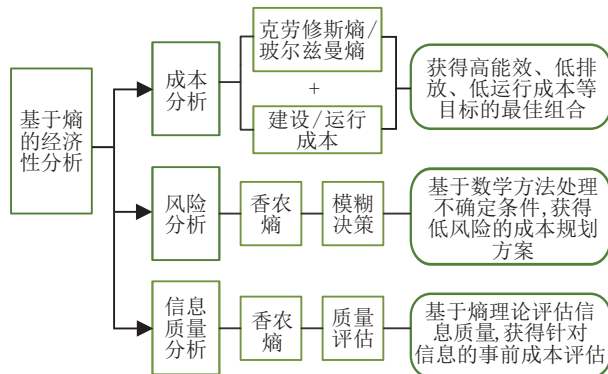


图6 基于熵理论的系统经济性分析

4.1 基于能量品质的系统运行优化

综合能源系统中对不同能源系统进行独立决策很难应对系统能量耦合的现状,因此需要对系统中多个子系统进行联合设计规划.本节基于系统应用场景对选择环保性与经济性作为目标指导系统最优方案的生成.

文献[83]提出了能源微网的规划模型,在基于能量质量及能量效率对拟建系统中所有子部件进行评估的基础上,提出了一种能量质量效率与经济评估的复合分析方法,评估系统升级后不同子系统改善情况.文献[84]建立了电热(冷)耦合的区域综合能源系统的双层规划模型,上层规划通过已知元件的能量枢纽模型,考虑设备的能量的品质分析结果,定量确定系统的能源结构,下层规划考虑系统的经济性 with 能量质量效率,确定能源结构中各设备的容量.文献[85-86]针对多能源系统进行了焓分析并基于分析结果选取不同算法,获得以焓经济损失最小为目标函数的优化结果.

4.2 基于香农熵的系统模糊决策

现有研究表明,针对可再生能源出力情况的预测误差无法避免^[87],即使是精度较高的商用预测方法,其标准偏差精度也可能高达15%~20%^[88],节点、网络的运行情况更加复杂,综合能源系统的规划求解更加困难.因此,如何处理系统不确定性,获得多因素影响下的综合决策方法得到了广泛研究.

部分研究表明,层次分析法是处理能源优化问题最常用的方法^[89],文献[90-91]基于层次分析法评估多种可再生能源的应用及替代方案.文献[92]运用模糊层次分析法-熵权决策法建立了一个综合评价指标体系.文献[93]采用基于蒙特卡罗模拟、熵和博尔达计数方法集成一种新的多属性决策方法对发电资源的备选方案进行评估.为了进一步消除评估数据导致的不确定性,文献[94]通过模糊熵方法获得标准权重;文献[95]利用决策矩阵的固有信息计算各个评估准则的香农熵,通过计算属性值与备选方案平均值之间的偏差评价信息效用;文献[96]将直觉模糊层次分析法的主观权重与改进熵权法的客观权重融合为最优权重,建立基于香农熵理论的混合信息目标权重组合,实现区域综合能源系统规划;文献[97]通过熵信息法及最大熵原理获得最优加权系数,扩展出一种考虑技术、经济、环境和社会等方面的多准则综合评估方法,以评估分布式能源供应系统的规划方案.

文献[98-100]建立了模糊测度以对可再生能源出力进行建模,处理高比例新能源下的运营成本变化问题.文献[101]提出了一个多目标平均半熵模型,在考虑光伏和风机不确定性的情况下,提供最大利润与最小风险之间的权衡解.文献[102]基于香农熵原理对隶属度矩阵中各指标提供的信息量进行计算,定义指标的差异性,评估各指标权重.此外,市场模型需综合考虑经济、能耗、节能减排等多目标因素,基于香农熵原理可评价各指标,并计算对系统的影响权重.

4.3 基于香农熵的信息价值核算

综合能源系统中信息与能量高度耦合,大量研究表明,数据信息在能源的生产、传输、分配和利用环节均会产生巨大的影响,如何衡量信息价值,引导供需双方创造更高经济价值成为关键问题.现有研究成果通过建立信息市场引入信息定价问题,文献[103-104]将信息作为一种商品,并将信息消除不确定性所产生的利润作为其价值.为了实现信息的事前估计,文献[105]提出一种基于香农熵的综合评估方法判断信息质量,通过香农熵评估概率事件的“有用性”,分析信息质量,实现了广义的信息价值评估.

4.4 经济性分析中的熵理论应用

本节介绍了基于熵理论的综合能源系统经济性分析方法,结果表明基于熵理论可以在能源不可能三角问题的基础上有效构建综合评估指标,将经济性分析转化为系统优化问题.此外,基于香农熵还可以完善信息价值评估,建立信息市场,引导供需双方创造更高经济价值.然而,该理论仍然缺乏针对可再生能源的成本量化方法,现有体系无法准确核算可再生能源成本.

5 综合能源系统中熵理论的研究与展望

本文介绍了熵理论在综合能源系统不可能三角研究中的应用,首先介绍了综合能源系统中为实现“碳达峰、碳中和”纳入高比例可再生能源后,对不可能三角问题的研究带来的新挑战;其次基于熵的信息、能量双重特性,介绍了熵理论在系统环保性、安全性与经济性研究的应用.从文献综述中可以发现,在对不可能三角问题的研究上,熵理论可以通过对能质损耗的度量,计算能质损失与碳排放强度,结合信息数据有效降低系统不确定性的影响,提高系统模型的精度,提升系统性能.

1) 基于熵理论对系统的环保性进行分析,一方面可以基于热力学熵或克劳修斯熵有效度量不同能源的品质,实现对能量的高效利用;另一方面可对其概念进行延伸,通过对能源系统的碳源追踪,实现系统能源的清洁.熵理论可以从两方面综合分析能源系统的环保特性.

2) 基于熵理论对系统的安全性进行分析,即根据香农熵定义度量系统不确定性,通过对有效信息的提取改善系统计算模型.从系统安全出发,一方面提升对不确定源概率的预测精度,另一方面建立不确定条件下的系统评估指标,改善能源系统的运行状况,处理高比例新能源入网后产生的不确定性问题.

3) 基于熵理论对系统的经济性进行分析,可以根据传统能量网络的成本评估方法,构建综合考虑不同三角特性的系统机组组合,也可以考虑综合能源系统中多种影响因素,通过熵理论构建模糊决策方案,获得低风险的成本规划方案.此外,基于熵理论还可以完善信息价值评估,建立信息市场,引导供需双方创造更高经济价值.

为了应对当下低碳化发展要求,可再生能源的大规模入网将给综合能源系统中的不可能三角问题带来新的挑战,使用传统方法对系统特性进行研究的难度将进一步增加.

如表4所示,将熵理论引入综合能源系统的不可

能三角研究仍需要大量探索.在环保性方面,没有基于熵理论的可再生能源的通用核算方法,其评估体系仍有缺陷,针对系统碳排放的研究较少;在安全性方面,缺乏基于熵理论的安全性机理分析,主流研究集中在数据处理与算法改进方面;在经济性方面,没有基于熵理论的可再生能源的成本量化方法,现有方法无法准确核算可再生能源成本.

表4 基于熵理论的不可能三角特性评估

系统特性	评估内容	指标	说明
环保性	系统效率	克劳修斯熵	无法计算可再生能源成本
	碳排放量	碳熵	研究内容较少
安全性	机理评估	交叉熵、潮流熵等	机理分析较少,主要处理不确定性
	可观可控	香农熵、互信息等	缺乏针对性研究
经济性	成本评估	金额	仅有基于熵理论的信息成本分析,无能源成本
	风险评估	香农熵	主要处理不确定性

基于以上分析结果,综合能源系统中对可再生能源的评估与传统网络不同,基于熵理论可以在能量尺度的基础上,根据不确定性将可再生能源对网络的影响做进一步分析.如电动汽车、热力负荷、电制氢等具有“熵减”特征的传统负荷设备,对可再生能源的消纳具有重要意义,相比于不可调负荷,具有可调节特性的柔性负荷对系统环保性具有更积极的意义.

综合能源系统中源侧由确定性的一次能源机组转为概率性的可再生能源机组,系统供需匹配难度提升,为系统安全性带来挑战.然而,系统中信息与能量的高度耦合带来能控性的进一步加强,通过信息流能够间接实现对能量流的控制.一方面基于熵理论及荷侧的新特性分析结果,针对具有一定弹性的柔性负荷设计综合考虑综合能源双重特性的调节机制,另一方面针对可再生能源入网的新特征,基于熵理论通过下垂控制、鲁棒控制等方法实现对网络中智能设备的控制,提升系统的整体安全性.

综合能源系统中信息流与能量流的双向流动使源、荷两端均可以与传统网络实现交互,综合能源系统的运行与调度将逐渐加入市场机制参与决策.针对可再生能源入网的新特点,基于熵理论度量可再生能源的风险成本及源侧碳排放成本,建立考虑可再生能源特点的新型市场交易策略,实现环保性与经济性的提升.相比于传统能源系统,综合能源系统的运行构架进一步复杂.在信息与能量的双向流动的条件下,传统网络中“不可控”的用户侧用能曲线可以以

价格等形式引导并改善,使系统中源荷双侧具备消纳可再生能源的能力,在可再生能源比例进一步提升的背景下,对提升系统的经济性具有重要作用.

此外,综合能源系统往往受到地理因素的影响.可再生能源资源丰富的地区,如海岛沙漠等环境,由于负荷不足,产生弃风弃光现象造成能量浪费,而负荷较高的地区,例如大型城市、工厂等通常不具备可再生能源资源.

综上所述,在不同场景下对能量节点的作用进行进一步细分,在传统不可能三角研究的基础上,更详细地考察综合能源系统中的特性变化,内容如表5所示.表5中:E、B、S表示不同空间特性,E类场景中能

源供应过剩,为可再生能源较为丰富的地区,可以对外供能;B类场景中能源供应与需求总体平衡;S类场景中能源供应短缺,需要外部供能.F、P表示不同时间特性,F为全时段特点,P为部分时段特点.例如EF场景即全时段中能源供应超过负荷需求,EP即部分时段中能源供应超过负荷需求,虽有时段存在供能不足的现象,但总体的能源供应超过需求,其中代表全时段源荷匹配的BF场景在实际系统中不存在.H、L表示系统中可再生能源的渗透率:H类为高渗透率,L类为低渗透率.例如EPL表示该地区可再生能源渗透率较高,且总体的能源供应超过需求,但部分时段存在供能不足现象.

表5 部分源转荷储设备在多种场景下的能源不可能三角特性评估指标

特性	场景	能源机组			储能设备			负荷		转化设备		
		新能源机组	化石能源机组	调峰机组	化学电储能	机械储能	热储能	普通负荷	柔性负荷	电制氢	电制热	冷热电联产
环保性	EFH	PM	NB	NM	NS	NS	NS	PB	PB	PB	NB	NM
	EFL	PM	NM	NB	NS	NS	NS	PB	PB	PM	NB	NM
	EPH	PB	NB	NM	PS	PM	PS	PM	PB	PB	PM	PS
	EPL	PB	NM	NB	PM	PS	PB	PM	PB	PM	PS	PM
	BFH	PB	NB	NM	PM	PB	PS	NM	PB	NS	PS	PM
	BFL	PB	NM	NB	PB	PM	PB	NS	PM	NS	NS	PB
	SFH	PB	NB	NM	NS	NS	NS	O	O	NB	NB	NM
	SFL	PB	NM	NB	NS	NS	NS	O	O	NB	NB	NM
	SPH	PB	NB	NM	PM	PB	PS	NS	PM	NB	NB	NM
SPL	PB	NM	NB	PM	PS	PB	NS	PS	NB	NB	NS	
安全性	EFH	PM	PS	PS	PS	PS	PS	NM	PS	PM	PM	PM
	EFL	PS	PS	PS	PS	PS	PS	NM	PS	PM	PS	PS
	EPH	NB	PS	PM	PM	PB	PM	NM	PM	PM	PM	PM
	EPL	NM	PS	PS	PM	PS	PM	NM	PS	PM	PS	PS
	BFH	NB	PS	PB	PM	PB	PM	NM	PB	PS	PM	PM
	BFL	NM	PS	PM	PB	PM	PM	NM	PB	PS	PS	PS
	SFH	NB	PS	PS	PS	PS	PS	NM	PS	PS	PM	PM
	SFL	NM	PS	PS	PS	PS	PS	NM	PM	PS	PS	PS
	SPH	NB	PS	PM	PS	PM	PM	NM	PB	PS	PM	PM
SPL	NM	PS	PS	PM	PS	PB	NM	PB	PS	PS	PS	
经济性	EFH	PB	NS	NM	NM	NM	NS	PB	PM	PB	PS	PS
	EFL	PM	NM	NM	NB	NB	NM	PB	NS	PM	PS	PS
	EPH	PM	NS	NM	PS	PM	PM	PB	NS	PB	PS	PS
	EPL	PS	NS	NS	PM	PS	PM	PB	NS	PM	PS	PS
	BFH	PS	NS	NM	PM	PB	PB	PB	NS	PS	PS	NS
	BFL	NS	PB	PM	PB	PM	PB	PB	NS	PS	NS	PS
	SFH	NM	PS	PS	NM	NM	NS	PB	NS	NM	PS	NS
	SFL	NS	PM	PS	NB	NB	NM	PB	NS	NB	NS	PS
	SPH	NB	PM	PS	PS	PM	PS	PB	NS	NM	PS	NS
SPL	NM	PB	PM	PM	PS	PM	PB	NS	NB	NS	PS	

表5对部分设备在多种场景下的能源不可能三角特性进行评估,基于克劳修斯熵与碳熵分析系统环保性变化,基于香农熵分析系统安全性变化,基于克劳修斯熵、碳熵与香农熵评估能效、碳排放与风险成本分析系统经济性变化.例如可再生能源设备可实现针对系统环保性的熵减,评估指标为表示对系统实现正向影响,具体影响程度与系统能源供应程

度有关,当系统能源供应全时段过剩时,设备对系统环保性的影响为中级M,其余情况影响程度更强为B级.针对系统安全性,可再生能源设备在EF场景中可通过弃风弃光降低系统不确定性,实现香农熵的熵减,因此评估指标为P.其他场景中为系统最大的不确定源,评估指标为N,表示对系统实现负向影响.

基于表5可以获得一些有益结论,针对设备特性

分析,如储能设备中热储能的经济性更好。P2G、热电锅炉等传统确定性的可控设备,可以增加能源网络的安全性,熵理论的分析结果表示系统荷侧不确定性低于源侧。其环保特性与设备的效率相关,能量转换过程中的能效损失仍是影响系统环保性的重要因素。柔性负荷相比于传统负荷,对系统环保性、与安全性均有积极影响,更加适合于未来能源系统的发展。针对不同场景分析,P2G更加适用于可再生能源过剩的地区,有效缓解弃风弃光造成的能源损耗,电储能与机械储能更加适用于可再生能源渗透率较高的系统。

以上研究可以表明:基于熵理论的不可能三角特性研究相较于其他方法,可以在多个维度中针对可再生能源入网及综合能源耦合问题,构建更加客观的评估指标,分析物理意义,支撑信息流与能量流有序分析与配置。在能量流与信息流高度融合且物理空间边界不断扩大的综合能源系统中,如何基于熵理论构建统一评估体系,平衡环保性、安全性与经济性三者关系,值得深入研究。

参考文献(References)

- [1] World Energy Council. World energy trilemma index[EB/OL]. [2023-02-25]. <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-index-2020>.
- [2] 习近平. 继往开来,开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话(2020年12月12日,北京)[N]. 人民日报,2020-12-13(2).
- [3] 肖先勇,郑子萱.“双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统:贡献、关键技术与挑战[J]. 工程科学与技术,2022(1): 47-59.
(Xiao X Y, Zheng Z X. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: Contribution, key techniques, and challenges[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022(1): 47-59.)
- [4] He X N, Wang R C, Wu J D, et al. Nature of power electronics and integration of power conversion with communication for talkative power[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-12.
- [5] 王睿,孙秋野,张化光,等. 基于信-能复合调制的多母线直流微电网电流边缘控制策略[J]. 控制与决策, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.2222.
(Wang R, Sun Q Y, Zhang H G, et al. Current edge-control strategy of multi-bus DC microgrids based on information-energy dual modulation[J]. *Control and Decision*, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.2222.)
- [6] 周孝信,曾嵘,高峰,等. 能源互联网的发展现状与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(2): 149-170.
(Zhou X X, Zeng R, Gao F, et al. Development status and prospects of the energy internet[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2017, 47(2): 149-170.)
- [7] Clausius R J E. The mechanical theory of heat[M]. Whitefish: Kessinger Publishing, 1865: 364.
- [8] Boltzmann L, Brush S G, Balazs N L. Lectures on gas theory[J]. *American Journal of Physics*, 1964, 17(9): 68.
- [9] Sangi R, Müller D. Application of the second law of thermodynamics to control: A review[J]. *Energy*, 2019, 174: 938-953.
- [10] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.
- [11] Chen S, Conejo A J, Wei Z N. Conjectural-variations equilibria in electricity, natural-gas, and carbon-emission markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(5): 4161-4171.
- [12] 王梦雪,赵浩然,刘春阳,等. 基于碳熵指标的电热互联综合能源系统碳轨迹追踪方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 13-22.
(Wang M X, Zhao H R, Liu C Y, et al. Carbon trajectory tracking method for electric-thermal interconnected integrated energy system based on carbon entropy index[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(9): 13-22.)
- [13] 梁才,刘文颖,温志伟,等. 电网组织结构对其自组织临界性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 6-11.
(Liang C, Liu W Y, Wen Z W, et al. The influences of power grid structure on self-organized criticality[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(20): 6-11.)
- [14] 桑茂盛,包铭磊,丁一,等. 考虑天然气网影响的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 34-43.
(Sang M S, Bao M L, Ding Y, et al. Identification of vulnerable lines in power grid considering impact of natural gas network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(21): 34-43.)
- [15] 蔡晔,曹一家,李勇,等. 考虑电压等级和运行状态的电网脆弱线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2124-2131.
(Cai Y, Cao Y J, Li Y, et al. Identification of vulnerable lines in urban power grid based on voltage grade and running state[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(13): 2124-2131.)
- [16] 朱雪龙. 应用信息论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 26-29.
(Zhu X L. *Fundamentals of applied information theory*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 26-29.)
- [17] Sciubba E, Wall G. A brief commented history of exergy[J]. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 2007, 10(1): 1-26.
- [18] Gibbs J W A. Method of geometrical representation of the thermodynamic properties of substances by means of surfaces[J]. *Transactions Connecticut Academy of Arts and Sciences*, 1876, 3: 108-248.

- [19] Tait P G. Sketch of thermodynamics[M]. Edinburgh: Edinburgh University Press, 1868: 100-106.
- [20] Streckien G, Martinaitis V, Bielskus J. From entropy generation to exergy efficiency at varying reference environment temperature: Case study of an air handling unit[J]. Entropy: Basel, Switzerland, 2019, 21(4): 361.
- [21] Reini M, Casisi M. The Gouy-Stodola theorem and the derivation of exergy revised[J]. Energy, 2020, 210: 118486.
- [22] Tsatsaronis G. Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics[J]. Energy, 2007, 32(4): 249-253.
- [23] Wang J J, Lu Z R, Li M, et al. Energy, exergy, exergoeconomic and environmental(4E) analysis of a distributed generation solar-assisted CCHP(combined cooling, heating and power) gas turbine system[J]. Energy, 2019, 175: 1246-1258.
- [24] 江亿, 刘晓华, 薛志峰, 等. 能源转换系统评价指标的研究[J]. 中国能源, 2004, 26(3): 27-31.
(Jiang Y, Liu X H, Xue Z F, et al. Study on ECC index of energy conversion system[J]. Energy of China, 2004, 26(3): 27-31.)
- [25] 冯志兵, 金红光. 冷热电联产系统的评价准则[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(5): 725-728.
(Feng Z B, Jin H G. Performance assessment of combined cooling, heating and power[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(5): 725-728.)
- [26] 朱明善. 能量系统的火用分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 180-342.
(Zhu M S. Exergy analysis of energy system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988: 180-342.)
- [27] Espirito S D B. Energy and exergy efficiency of a building internal combustion engine trigeneration system under two different operational strategies[J]. Energy and Buildings, 2012, 53: 28-38.
- [28] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3305.
(Wang W L, Wang D, Jia H J, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3305.)
- [29] Tehzeeb-Ul-Hassan H, Tahir M F, Mehmood K, et al. Optimization of power flow by using Hamiltonian technique[J]. Energy Reports, 2020, 6: 2267-2275.
- [30] Sinsel S R, Riemke R L, Hoffmann V H. Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—A review[J]. Renewable Energy, 2020, 145: 2271-2285.
- [31] Sun Z G, Wang R Z, Sun W Z. Energetic efficiency of a gas-engine-driven cooling and heating system[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(5/6): 941-947.
- [32] Grieco E, Poggio A. Simulation of the influence of flue gas cleaning system on the energetic efficiency of a waste-to-energy plant[J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1517-1523.
- [33] Comodi G, Renzi M, Cioccolanti L, et al. Hybrid system with micro gas turbine and PV (photovoltaic) plant: Guidelines for sizing and management strategies[J]. Energy, 2015, 89: 226-235.
- [34] Li Y, Wang W Q, Ma Y F, et al. Study of new cascade heating system with multi-heat sources based on exhausted steam waste heat utilization in power plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 136: 475-483.
- [35] 徐航, 董树锋, 何仲潇, 等. 考虑能量梯级利用的工厂综合能源系统多能协同优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 123-130.
(Xu H, Dong S F, He Z X, et al. Multi-energy cooperative optimization of integrated energy system in plant considering stepped utilization of energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 123-130.)
- [36] Bagdanavicius A, Jenkins N, Hammond G P. Assessment of community energy supply systems using energy, exergy and exergoeconomic analysis[J]. Energy, 2012, 45(1): 247-255.
- [37] Ghosh S, Dincer I. Development and analysis of a new integrated solar-wind-geothermal energy system[J]. Solar Energy, 2014, 107: 728-745.
- [38] Ghosh S, Dincer I. Development and performance assessment of a new integrated system for HVAC & R applications[J]. Energy, 2015, 80: 159-167.
- [39] 郭艳飞, 吴强, 程林, 等. 基于效率的综合能源系统能效分析模型[J]. 可再生能源, 2017, 35(9): 1387-1394.
(Guo Y F, Wu Q, Cheng L, et al. Efficiency analysis model of integrated energy system based on the exergy efficiency[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(9): 1387-1394.)
- [40] 刘晓鸥, 葛少云. 区域综合能源系统的能效定义及其相关性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 8-18.
(Liu X O, Ge S Y. Definition and correlation analysis on energy utilization efficiency of regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 8-18.)
- [41] Di Somma M, Yan B, Bianco N, et al. Multi-objective design optimization of distributed energy systems through cost and exergy assessments[J]. Applied Energy, 2017, 204: 1299-1316.
- [42] 李梦, 李作志. 面向碳排与固碳的中国碳熵动力系统研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(S1): 214-217.
(Li M, Li Z Z. Chinese carbon-entropy dynamic system oriented on industrial carbon and carbon sequestration[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(S1): 214-217.)
- [43] Reshef D N, Reshef Y A, Finucane H K, et al. Detecting novel associations in large data sets[J]. Science: New York, 2011, 334(6062): 1518-1524.
- [44] Kwak N, Choi C H. Input feature selection by mutual information based on Parzen window[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(12): 1667-1671.

- [45] Kamimura R. Supposed maximum mutual information for improving generalization and interpretation of multi-layered neural networks[J]. *Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research*, 2019, 9(2): 123-147.
- [46] Jaynes E T. Information theory and statistical mechanics[J]. *Physical Review*, 1957, 106(4): 620-630.
- [47] Davis S, González D, Gutiérrez G. Probabilistic inference for dynamical systems[J]. *Entropy*, 2018, 20(9): 696.
- [48] Zhang Y M. Principle of maximum entropy for reliability analysis in the design of machine components[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2019, 14(1): 21-32.
- [49] Huang Y J, Sun Q Y, Li Y S, et al. A multi-rate dynamic energy flow analysis method for integrated electricity-gas-heat system with different time-scale[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2023, 38(1): 231-243.
- [50] Huang Y J, Sun Q Y, Li Y S, et al. Damping technique empowered robust energy flow calculation for integrated energy systems[J]. *Applied Energy*, 2023, 343: 121168.
- [51] Chan J C C, Glynn P W, Kroese D P. A comparison of cross-entropy and variance minimization strategies[J]. *Journal of Applied Probability*, 2011, 48(A): 183-194.
- [52] Zhang P, Lee S T. Probabilistic load flow computation using the method of combined cumulants and Gram-Charlier expansion[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(1): 676-682.
- [53] Williams T, Crawford C. Probabilistic load flow modeling comparing maximum entropy and gram-charlier probability density function reconstructions[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(1): 272-280.
- [54] 张儒峰, 姜涛, 李国庆, 等. 基于最大熵原理的电-气综合能源系统概率能量流分析[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(15): 4430-4440.
(Zhang R F, Jiang T, Li G Q, et al. Probabilistic energy flow analysis of electric-gas integrated energy system based on maximum entropy principle[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(15): 4430-4440.)
- [55] 隋冰彦, 侯恺, 贾宏杰, 等. 基于最大熵原理的含风电和电动汽车电力系统概率潮流[J]. *电网技术*, 2016, 40(12): 3696-3705.
(Sui B Y, Hou K, Jia H J, et al. Probabilistic power flow of power system with wind power and electric vehicle based on maximum entropy principle[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(12): 3696-3705.)
- [56] 吴乃龙, 袁素云. 最大熵方法[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1991: 1042-1054.
(Wu N L, Yuan S Y. *The maximum entropy method*[M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 1991: 1042-1054.)
- [57] 邬超, 朱桂萍, 钱敏慧. 基于信息熵的历史数据选取对超短期风电功率预测精度影响研究[J]. *电网技术*, 2021, 45(5): 1767-1772.
(Wu C, Zhu G P, Qian M H. Influence of historical data selection based on information entropy on ultra-short-term wind power forecasting accuracy[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(5): 1767-1772.)
- [58] 刘嘉诚, 刘俊, 赵宏炎, 等. 基于DKDE与改进mRMR特征选择的短期光伏出力预测[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(14): 13-21.
(Liu J C, Liu J, Zhao H Y, et al. Short-term photovoltaic output forecasting based on diffusion kernel density estimation and improved max-relevance and Min-redundancy feature selection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(14): 13-21.)
- [59] 付德义, 高世桥, 孔令行, 等. 基于相关向量信息熵的风电机组功率曲线构建方法研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(5): 252-259.
(Fu D Y, Gao S Q, Kong L X, et al. Wind turbine power curve construction based on correlation vector information entropy[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(5): 252-259.)
- [60] 葛乐, 陆文伟, 袁晓冬, 等. 基于改进相似日和ABC-SVM的光伏电站功率预测[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(3): 775-782.
(Ge L, Lu W W, Yuan X D, et al. Power prediction of photovoltaic power station based on improved similar day and ABC-SVM[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2018, 39(3): 775-782.)
- [61] Liu J, Sun H W, Chang P, et al. Research of photovoltaic power forecasting based on big data and mRMR feature reduction[C]. 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Portland, 2018: 1-5.
- [62] Tahmasebifar R, Moghaddam M P, Sheikh-El-Eslami M K, et al. A new hybrid model for point and probabilistic forecasting of wind power[J]. *Energy*, 2020, 211: 119016.
- [63] Zhang S X, Wen M, Cheng H Z, et al. Reliability evaluation of electricity-heat integrated energy system with heat pump[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2018, 4(4): 425-433.
- [64] 杜江, 郭瑞鹏, 李传栋, 等. 电力系统可靠性评估中的重要控制法[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(5): 69-74.
(Du J, Guo R P, Li C D, et al. An importance-control method for power system reliability evaluation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(5): 69-74.)
- [65] 张巍峰, 车延博, 刘阳升. 电力系统可靠性评估中的改进拉丁超立方抽样方法[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(4): 52-57.
(Zhang W F, Che Y B, Liu Y S. Improved Latin hypercube sampling method for reliability evaluation of power systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(4): 52-57.)
- [66] Leite da Silva A M, Fernandez R A G, Singh C. Generating capacity reliability evaluation based on Monte Carlo simulation and cross-entropy methods[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(1): 129-137.
- [67] de Magalhães Carvalho L, González-Fernández R A, Leite da Silva A M, et al. Simplified cross-entropy based approach for generating capacity reliability assessment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 1609-1616.

- [68] González-Fernández R A, Leite da Silva A M, Resende L C, et al. Composite systems reliability evaluation based on Monte Carlo simulation and cross-entropy methods[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(4): 4598-4606.
- [69] 许鹏程, 陈启, 刘文霞, 等. 引入交叉熵与动态故障集的含风电大电网可靠性评估[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(13): 28-34.
(Xu P C, Chen Q, Liu W X, et al. Reliability evaluation in composite power system considering wind farms with cross entropy and dynamic fault set[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(13): 28-34.)
- [70] Cagnano A, de Tuglie E, Mancarella P. Microgrids: Overview and guidelines for practical implementations and operation[J]. *Applied Energy*, 2020, 258: 114039.
- [71] Dent C J, Bell K R W, Richards A W, et al. The role of risk modelling in the Great Britain transmission planning and operational standards[C]. 2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Singapore, 2010: 325-330.
- [72] Bavafa F, Niknam T, Azizipanah-Abarghooee R, et al. A new biobjective probabilistic risk-based wind-thermal unit commitment using heuristic techniques[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(1): 115-124.
- [73] Ogimoto K, Noone B, Bruce A, et al. Power system operation and augmentation planning with PV integration[J]. *International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme*, 2014: IEA PVPS T14-04.
- [74] Balaguer I J, Lei Q, Yang S T, et al. Control for grid-connected and intentional islanding operations of distributed power generation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(1): 147-157.
- [75] Papaefthymiou S V, Lakiotis V G, Margaritis I D, et al. Dynamic analysis of island systems with wind-pumped-storage hybrid power stations[J]. *Renewable Energy*, 2015, 74: 544-554.
- [76] Bell K R W, Nedic D P, San Martin L A S. The need for interconnection reserve in a system with wind generation[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012, 3(4): 703-712.
- [77] Luo Y, Shi Y X, Zheng Y, et al. Mutual information for evaluating renewable power penetration impacts in a distributed generation system[J]. *Energy*, 2017, 141: 290-303.
- [78] 刘文颖, 蔡万通, 张宁, 等. 基于加权网络拓扑熵的电网自组织临界状态演化[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(22): 5740-5748.
(Liu W Y, Cai W T, Zhang N, et al. Evolution of grid's self-organizing critical state based on weighted network topology entropy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(22): 5740-5748.)
- [79] Bao Z, Cao Y, Ding L, et al. Dynamics of load entropy during cascading failure propagation in scale-free networks[J]. *Physics Letters A*, 2008(372): 5778-5782.
- [80] 靳冰洁, 张步涵, 王珂. 基于熵理论的电力系统最优潮流均衡度分析[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(12): 80-86.
(Jin B J, Zhang B H, Wang K. Entropy theory based optimal power flow balancing analysis in power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(12): 80-86.)
- [81] Li R, Ma H Z, Wang F F, et al. Game optimization theory and application in distribution system expansion planning, including distributed generation[J]. *Energies*, 2013, 6(2): 1101-1124.
- [82] 王琦, 季顺祥, 钱子伟, 等. 基于熵理论和改进ELM的光伏发电功率预测[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(10): 151-158.
(Wang Q, Ji S X, Qian Z W, et al. Power prediction of photovoltaic generation based on entropy theory and improved ELM[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(10): 151-158.)
- [83] Ogbonnaya C, Turan A, Abeykoon C. Energy and exergy efficiencies enhancement analysis of integrated photovoltaic-based energy systems[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 26: 101029.
- [84] Xiao H U, Shang C, Chen D, et al. Multi-objective planning method for regional integrated energy systems considering energy quality[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(19): 22-31.
- [85] Chen H Y, Chen S M, Li M, et al. Optimal operation of integrated energy system based on exergy analysis and adaptive genetic algorithm[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 158752-158764.
- [86] Yuksel Y E, Ozturk M. Energy and exergy analysis of renewable energy sources-based integrated system for multi-generation application[J]. *International Journal of Exergy*, 2017, 22(3): 250-278.
- [87] Chen J J, Zhuang Y B, Li Y Z, et al. Risk-aware short term hydro-wind-thermal scheduling using a probability interval optimization model[J]. *Applied Energy*, 2017, 189: 534-554.
- [88] Ross M, Abbey C, Bouffard F, et al. Microgrid economic dispatch with energy storage systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(4): 3039-3047.
- [89] Wang Q, Poh K L. A survey of integrated decision analysis in energy and environmental modeling[J]. *Energy*, 2014, 77: 691-702.
- [90] Al Garni H, Kassem A, Awasthi A, et al. A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2016, 16: 137-150.
- [91] Haddad B, Liazid A, Ferreira P. A multi-criteria approach to rank renewables for the Algerian electricity system[J]. *Renewable Energy*, 2017, 107: 462-472.
- [92] Ye J B, Shen L J, Gu P. Study of the integrated evaluation index system of the design of energy-saving building and the optimization of these designs based on FAHP-entropy weight[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 357/358/359/360: 2859-2864.
- [93] Topcu I, Ülengin F, Kabak Ö, et al. The evaluation of

- electricity generation resources: The case of Turkey[J]. Energy, 2019, 167: 417-427.
- [94] Alkan Ö, Albayrak Ö K. Ranking of renewable energy sources for regions in Turkey by fuzzy entropy based fuzzy COPRAS and fuzzy multimora[J]. Renewable Energy, 2020, 162: 712-726.
- [95] Yang J H, Wu J H, Maihemuti S, et al. Notice of retraction: A hybrid fuzzy multiple criteria decision-making approach for comprehensive performance research and evaluation of RE-CCHP system[J]. IEEE Access, 2021(99): 1.
- [96] 曹宇, 李国杰. 考虑多重决策心理的海岛孤网调度综合评价[J]. 控制与决策, 2022, 37(6): 1591-1600. (Cao Y, Li G J. Comprehensive evaluation of island isolated microgrid dispatch considering multiple decision psychology[J]. Control and Decision, 2022, 37(6): 1591-1600.)
- [97] Yang K, Ding Y, Zhu N, et al. Multi-criteria integrated evaluation of distributed energy system for community energy planning based on improved grey incidence approach: A case study in Tianjin[J]. Applied Energy, 2018, 229: 352-363.
- [98] Miranda V, Hang P S. Economic dispatch model with fuzzy wind constraints and attitudes of dispatchers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 2143-2145.
- [99] Hong Y Y, Lin J K. Interactive multi-objective active power scheduling considering uncertain renewable energies using adaptive chaos clonal evolutionary programming[J]. Energy, 2013, 53: 212-220.
- [100] Wang L F, Singh C. Balancing risk and cost in fuzzy economic dispatch including wind power penetration based on particle swarm optimization[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(8): 1361-1368.
- [101] Jiao P H, Chen J J, Peng K, et al. Multi-objective mean-semi-entropy model for optimal standalone micro-grid planning with uncertain renewable energy resources[J]. Energy, 2020, 191: 116497.
- [102] Xu W F, Liu P, Cheng L, et al. Multi-step wind speed prediction by combining a WRF simulation and an error correction strategy[J]. Renewable Energy, 2021, 163: 772-782.
- [103] Wang B H, Guo Q L, Yang T Y, et al. Evaluation of information value for solar power plants in market environment[C]. IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Wuhan, 2021: 3574-3580.
- [104] Wang B H, Guo Q L, Yang T Y, et al. Value evaluation of wind power forecasting information for economic dispatch[C]. The 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Nanjing, 2020: 1-5.
- [105] Yu M K, Wang J X, Yan J, et al. Pricing information in smart grids: A quality-based data valuation paradigm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 3735-3747.

作者简介

孙秋野(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 从事能源互联网的建模与优化运行、多能源综合互补优化、分布式发电系统网络控制等研究, E-mail: sunqiuye@ise.neu.edu.cn;

任一平(1993—), 女, 博士生, 从事信息熵理论、多能源综合互补优化等研究, E-mail: 2010258@stu.neu.edu.cn;

刘子铭(1995—), 男, 博士生, 从事信息熵理论、电力市场和区块链技术等研究, E-mail: liuzimingee@stumail.neu.edu.cn;

胡旭光(1992—), 男, 讲师, 博士, 从事能源系统智能化建模、数据分析及故障诊断等研究, E-mail: huxuguang@mail.neu.edu.cn.



特邀专家 孙秋野, 教授, 博士生导师. 2007年毕业于东北大学控制理论与控制工程专业, 获工学博士学位. 沈阳工业大学副校长, 国家万人计划科技创新领军人才, 国家级教学名师, IET Fellow, 享受国务院政府特殊津贴. 近5年发表学术论文100余篇, 论文SCI引用超3000次. 授权发明专利100余项; 作为前三完成人曾获得国家自然科学二等奖、国家科技进步二等奖、辽宁省技术发明一等奖等重要奖项十余项. 担任自动化学会能源互联网专委会秘书长、CCDC组委会副主席等. 兼任《IEEE TNNLS》《IET CPS: T&A》《自动化学报》《中国电机工程学报》《控制与决策》等国内外权威期刊编委. 主持国家变革性技术课题、国家自然科学基金重点项目、军科委后勤保障部重点课题、国家电网公司重点攻关项目等多项研究课题.

专家寄语 知行合一, 笃行致远; 百年东大, 赓续辉煌.