

## 区域综合能源系统规划研究综述

程浩忠<sup>1</sup>, 胡 泉<sup>1</sup>, 王 莉<sup>2</sup>, 刘育权<sup>2</sup>, 于 琪<sup>2</sup>

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 200240;

2. 广州供电局有限公司, 广东省广州市 510620)

**摘要:** 区域综合能源系统作为能源互联网的重要物理载体,对提高综合能源利用效率、消纳可再生能源、保障供电安全可靠及节能减排具有重要意义。对区域综合能源系统进行合理有效规划,要打破行业壁垒,从技术、政策、地域等多方面实现突破。文中对区域综合能源系统规划中的多能耦合理论、负荷预测方法、技术经济性分析、规划优化建模与求解等关键问题进行了系统地总结归纳,对各问题所涉及的国内外研究现状、存在问题及难点进行了分析与概括。结合目前最新研究进展,概括了全面涵盖区域综合能源系统源、网、荷、储等环节的通用性能流模型、规划模型及求解流程,并对未来的研究方向进行了展望。

**关键词:** 区域综合能源系统; 能源系统规划; 多能耦合; 负荷预测; 技术经济性

### 0 引言

传统的能源系统规划、运行局限于电、气、热、冷等单一能源形式内部,无法充分发挥能源间的优势互补,能源利用效率、可再生能源消纳、节能减排等问题遭遇瓶颈。针对此问题,能源互联网(Energy Internet, EI)<sup>[1]</sup>、综合能源系统(integrated energy system, IES)<sup>[2]</sup>等概念相继被国内外学者提出并研究,构建了未来能源系统广泛互联、平等共享的愿景,正在推动新一轮的能源革命。EI 基于“互联网+”理念<sup>[3]</sup>,旨在利用先进的互联网思维和技术来改造传统能源工业,将能源与互联网深度融合;IES 则指在规划、建设和运行等过程中,通过对能源的产生、传输、转换分配、存储、消费等环节进行有机协调与优化后,形成的能源产供销一体化系统,是 EI 的物理载体<sup>[4]</sup>。近年来,IES 已经得到了各国政府和工业界的重视。瑞士于 2003 年启动了“未来能源网络愿景”项目,提出未来能源网是电、气、热、冷等形式能源耦合<sup>[5]</sup>;美国于 2007 年颁布了能源独立和安全法,明确要求电力和天然气系统必须开展联合规划<sup>[6]</sup>;2009 年加拿大国会审议并通过了旨在助推该国 IES 相关研究的报告,将构建覆盖加拿大全国的社区综合能源系统(integrated community energy system, ICES),将推进 ICES 技术研究和工程建设

列为 2010—2050 年的国家能源战略,同时启动了多项重大课题<sup>[7]</sup>。而中国近年来随着“工业园区多元用户互动的配用电系统关键技术与示范”等多个国家重点研发计划项目立项,已从国家层面正式开启对 IES 的全面探索。2017 年,国家电网有限公司和南方电网有限公司陆续发文,明确提出推进由电能供应商向综合能源服务商的全面转变。

根据地理因素与能源发/输/配/用特性,可将综合能源系统分为跨区级、区域级和用户级<sup>[8]</sup>。跨区级 IES 以大型输电、气等系统作为骨干网架,主要起能源远距离传输作用;用户级 IES 以智能用电系统、分布式/集中式供热系统、供水系统等耦合而成,主要关注能源的利用;而区域级 IES 则起到“承上启下”作用,由智能配电系统、中低压天然气系统、供热/冷/水系统等功能网络耦合而成,实现能源的传输、分配、转换、平衡等,是本文所讨论的重点。

对于区域综合能源系统(regional integrated energy system, RIES)规划,需要打破行业壁垒,由过去电、气、热、冷分产分供,独立规划模式转向多种形式能源联合规划,不仅要实现技术突破,更要破除政策、地域等界限。RIES 规划主要有以下难点。

1) 多能耦合建模。RIES 多能源间的耦合复杂,并广泛存在于源、网、荷、储等各个环节。准确、有效的多能耦合理论支撑 IES 规划的关键,且需满足静态、动态、时延特性等多方面建模需求。

2) 多元负荷预测。RIES 负荷预测需兼顾考虑电、气、热、冷等类型负荷及其相互耦合,且受到经

收稿日期: 2018-04-16; 修回日期: 2018-09-11。

上网日期: 2019-03-05。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901300)。

济、气候、建筑布局、人口密度等多种因素影响,其预测难度远超任何单一形式能源系统预测<sup>[9]</sup>。

3)技术经济性评估。RIES是由多种能源转换设备、储能设备、供能管线及用户等组成的有机整体,需要对系统的整体技术经济性进行重新评估。如电解制氢等电-气(P2G)技术,单纯以燃气系统角度其不具备投资经济性,但在IES中则可由于辅助可再生能源消纳而产生附加价值。另外,RIES运营模式的多元化也会使技术经济性评估更加复杂<sup>[10]</sup>。

4)规划优化模型与求解。RIES规划是多元素、多维度、多目标、多层次、非线性的复杂规划问题,建模与求解时需考虑连续、非连续、时变等特性,以及广泛存在于能源生产、传输、转换、消费等环节的各种不确定性。

本文以RIES为研究对象,对其规划领域的若干关键问题:①多能耦合;②负荷预测;③技术经济性分析;④规划优化建模与求解的国内外研究现状进行系统地总结与归纳,并概括出了RIES通用性的能流建模与规划模型及求解流程,为未来RIES规划提供新思路,并展望了其未来研究方向。

## 1 多种形式能源耦合理论研究

多种形式能源的耦合机理是实现RIES规划的首要问题。国际上对多能耦合模型理论的研究最早始于ETH Zurich在2005年IEEE电力与能源协会年会上所提出的Energy Hub(译为能源集线器或能源枢纽,简称EH)理论。该模型完整地构建了包含源、网、荷、储等各个环节的RIES多能耦合静态线性模型,并对耦合过程中的优化潜力进行了分析<sup>[11]</sup>。后续学者们基于EH模型在非线性、动态等多方面进行了探索,对多能耦合理论进行了发展。

### 1.1 能源集线器理论

能源集线器理论将RIES的能源形式归结到外部供应和终端需求两端,如图1所示。

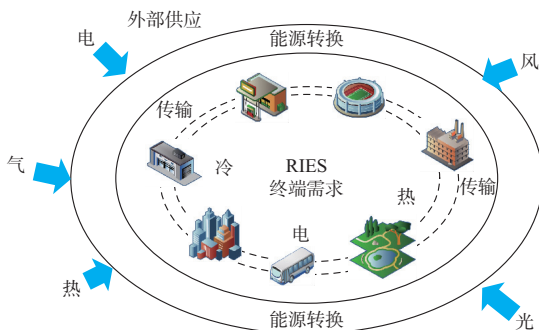


图1 RIES能源结构示意图

Fig.1 Basic architecture of district RIES

终端需求的能源形式被抽象为电、热、冷三类,而外部供应的能源形式则包括向区域内输入的所有能源,如电、气、热、风、光等。能源转换设备(energy converter, EC)将外部供应的能源形式转换为终端需求的能源形式,并通过供能网络(energy network, EN)传输给分散于区域内的各用户。此外,区域内还可能多种形式的储能设备(energy storage, ES)实现能源存储。从能源转换角度,外部供应能源对应于EH的输入 $P^\alpha, P^\beta, \dots, P^\chi$ ,而EH的输出 $L^\alpha, L^\beta, \dots, L^\chi$ 则对应于终端需求。通过构建耦合矩阵来描述EH的转换关系如下:

$$\begin{bmatrix} L^\alpha \\ L^\beta \\ \vdots \\ L^\chi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta^{\alpha\alpha} v^{\alpha\alpha} & \eta^{\beta\alpha} v^{\beta\alpha} & \dots & \eta^{\chi\alpha} v^{\chi\alpha} \\ \eta^{\alpha\beta} v^{\alpha\beta} & \eta^{\beta\beta} v^{\beta\beta} & \dots & \eta^{\chi\beta} v^{\chi\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \eta^{\alpha\chi} v^{\alpha\chi} & \eta^{\beta\chi} v^{\beta\chi} & \dots & \eta^{\chi\chi} v^{\chi\chi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^\alpha \\ P^\beta \\ \vdots \\ P^\chi \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\alpha, \beta, \dots, \chi$ 分别表示能源形式如电、气、热、冷等; $\eta^{\alpha\beta}$ 为能源 $\alpha$ 转换至 $\beta$ 的效率; $v$ 为分配系数,表征某一种能源在多个EC之间的分配比例。

式(1)中,假设转换效率 $\eta$ 为常数,则此模型为线性模型。 $v$ 作为变量,可为多种形式能源之间的互补优势与经济调度提供了优化空间。显然, $v$ 应满足如下约束:

$$\begin{cases} \sum_j v^{ij} = 1 \\ 0 \leq v^{ij} \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i, j = \alpha, \beta, \dots, \chi$ 。

进一步定义耦合系数 $c$ :

$$c^{ij} = \eta^{ij} v^{ij} \quad i, j = \alpha, \beta, \dots, \chi \quad (3)$$

以 $\mathbf{P}, \mathbf{L}, \mathbf{C}$ 分别表示式(1)中的输入矢量、输出矢量和耦合矩阵,则式(1)模型可表示为:

$$\mathbf{L} = \mathbf{C}\mathbf{P} \quad (4)$$

如考虑ES,则式(4)可改写为<sup>[11]</sup>:

$$\mathbf{L} = [\mathbf{C} \quad -\mathbf{S}] \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{E} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为ES能量; $\mathbf{E}$ 为ES实时功率; $\mathbf{S}$ 为ES耦合矩阵。

### 1.2 多能耦合理论的发展

EH理论提出后已被应用至不同层级的IES设计与优化,如楼宇级<sup>[12]</sup>、社区级<sup>[13]</sup>、区域级<sup>[14]</sup>和跨区域级<sup>[15]</sup>等。但EH模型在应用的过程中仍存在以下不足:①EH模型对EC和ES进行了简化处理为线性元件,转换效率 $\eta$ 固定不变,从而忽略了设备的变工况特性与系统的非线性;②EH模型的建立是基于系统的静态分析,对不同能源系统的时间尺度、不确定性未做考虑;③EH模型未对辅助IES运行的信息系统、控制系统和保护系统等设计与优化

提供解决方案。

基于上述问题,学者们对多能耦合理论进行了深入研究与发展,本文就相关主要成果分几个方面进行了归纳。

### 1.2.1 能源集线器非线性研究

能源集线器非线性主要体现为 EC 设备的变工况特性,即转换效率  $\bar{\eta}$  随实际负载率  $\bar{N}$  的变化而变化:

$$\bar{\eta} = f(\bar{N}) \quad (6)$$

RIES 中包含多种类型的 EC 设备,其中包括以下具有较明显变工况特性的设备。

1) 燃气轮机热电联产(CHP)机组: CHP 机组的性能与工作温度、湿度、抽气系数及负载率等多种因素相关<sup>[16-18]</sup>,假定其他参数恒定,则随着负载率的减小,CHP 机组的各效率值逐渐减小,循环功率和供热量逐渐变小,热电比增大;反之亦然。其变工况特性可建模如下<sup>[17]</sup>:

$$\bar{\eta} = 3.18\bar{N} - 4.69\bar{N}^2 + 3.69\bar{N}^3 - 1.18\bar{N}^4 \quad (7)$$

2) 燃气/余热锅炉: 燃气/余热锅炉在变工况下的转换效率可采用分段线性化近似描述<sup>[19-20]</sup>:

$$\bar{\eta} = \begin{cases} 0 & \bar{N} < 0.05 \\ 0.82 + 0.19(\bar{N} - 0.05) & 0.05 \leq \bar{N} \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

3) 空调(空气源热泵): 空调的转换效率一般用能效系数(coefficient of performance, COP)来表征,定义为  $\bar{C}_{OP}$ ,其值一般高于 1,在 3~4 之间。根据文献[21],其变工况特性可建模为二次多项式函数形式:

$$\bar{\eta} = \bar{C}_{OP} = k_1\bar{N}^2 + k_2\bar{N} \quad (9)$$

式中:  $k_1$  和  $k_2$  为常值系数,一般由厂家测定给出。

4) 吸收式制冷: 吸收式制冷常用的冷却剂有两种,溴化锂在亚洲和美国广泛采用,欧洲则是应用水/氨型较多。文献[17]建立了余热型溴化锂制冷机变工况模型如下:

$$\bar{\eta} = \begin{cases} 1 & 0.65 \leq \bar{N} < 1.0 \\ 0.5 + 0.83(\bar{N} - 0.05) & 0.05 \leq \bar{N} < 0.65 \end{cases} \quad (10)$$

### 1.2.2 能源集线器动态特性及不确定性研究

与电力系统相比,气、热系统暂态过程相对缓慢,这主要取决于它们较低的压强传播速度和介质流速,并受系统规模影响。一般来说,电力系统的功率传播速度接近光速( $3 \times 10^5$  km/s),其时间尺度一般为秒级或微秒级;而液压在管道中的传播速度接近声速(340 m/s),时间尺度为分钟级或秒级;流体在管道中的质量流速相对较慢,时间尺度在分钟级或小时级。时间尺度上的差异对 RIES 的规划、运

行及经济性、可靠性等指标测算上都会产生影响。文献[22]将电力系统潮流计算理念引入热电联供系统之中,并提出了联合能流计算方法,但忽视了热、电系统间的时间尺度差异。文献[23]通过建立准稳态多能流计算模型对区域 IES 的时间尺度问题进行了探索,将 IES 的动态特性分解为四个阶段的稳态模型,从而区分不同类型的能量在不同时间尺度上的响应能力。

在不确定性方面,由于 RIES 全面涵盖电、热、气、冷等能源形式,并具有种类众多的 EC, EN 和 ES,会受到诸多不确定因素的影响,其不确定性分析比电力系统更为复杂。近年来,有学者将电力系统不确定分析理论引入 RIES 之中,并考虑了更多的不确定因素,如文献[24]考虑了电、热负荷的不确定性,及风电出力的不确定性;文献[21]则在常规的电力系统不确定因素外建立了基于最大熵原理(POME)分布的温度不确定性;文献[25]则在兼顾风电与储能不确定性的基础上考虑了需求响应的不确定性。

### 1.2.3 能源路由器模型

能源路由器(energy router, ER)概念是由美国北卡州立大学 FREEDM 中心的 Alex Q. Huang 提出的用于解决 IES 能源耦合过程中信息流问题的模型<sup>[26]</sup>。与 EH 立足于描述 IES 功率与能量平衡及耦合不同,ER 侧重于 IES 的通信、控制与管理。其主要组成为固态变压器、能量管理与控制模块、网络通信模块等,根据信息流完成能量流的控制,具备能量控制、信息保障、定制化需求管理、网络运行管理的功能,是 IES 中的智能控制单元。ER 从信息层面对 EH 提供支持,有利于促进未来 RIES 的进一步发展<sup>[27]</sup>。

## 2 负荷预测方法研究

RIES 负荷预测结果的准确与否直接关系到规划与运行是否合理有效,因此是 RIES 规划的重要前提。传统的能源系统负荷预测方法局限于各形式能源的独立预测,虽然都已形成了成熟的理论方法并且经过了实践验证,但由于忽视了多能间的耦合及相互影响,已无法适用于未来 RIES 的负荷预测。

RIES 的负荷预测难点主要体现在以下两个方面:①影响因素众多。由于 RIES 全面涵盖电、气、热、冷等能源形式,因此会受到众多因素的影响,诸如气候、社会经济、区域布局结构、建筑设计特性等等,从而造成了建模的困难;②预测模型求解困难。多维度、多时间尺度造成了 RIES 负荷预测模型的求解难度增加。近年来,国内外学者对 RIES 负荷

预测方法进行了广泛而深入的探索,取得了不少有效成果,其主要表现为以下两个方面。

## 2.1 影响因素分析

RIES 的用能需求是所有分散于区域内的能源消费用户用能需求的总和,因此对单个用户单元的影响因素往往也会对整个区域用能情况造成类似影响,比如建筑的物理特性、照明、用户行为、用能类型、建筑密度、布局、人口密度等。可将所有可能对 RIES 负荷造成影响的因素归纳为五大类:建筑室内条件、建筑设计特性、区域布局、本地微气候和社会经济因素,如图 2 所示。

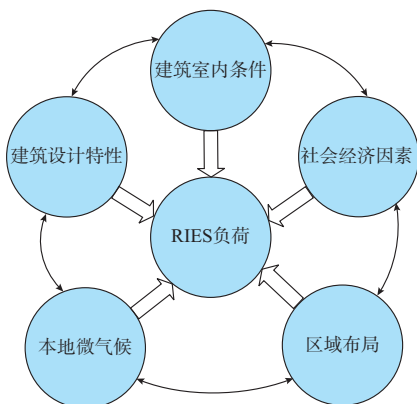


图 2 RIES 负荷影响因素

Fig. 2 Impact factors on RIES loads

1)建筑室内条件:主要包括照明、电气设备、用户行为、室内环境质量需求(温度、湿度、空气质量)、服务系统运行等,其中以室内环境质量需求对负荷的影响最大<sup>[28]</sup>。

2)建筑设计特性:主要包括建筑材料(热传导特性)、位置、尺寸、高度、形状、窗墙比等因素。建筑材料将影响建筑制热/制冷负荷,而位置、尺寸、高度、形状、窗墙比等则会影响建筑照明、太阳辐射强度及通风条件等<sup>[29]</sup>。

3)区域布局:主要包括建筑功能多样性、建筑物密度、绿化规划、地形地貌、道路规划等<sup>[30]</sup>。

4)本地微气候:主要包括室外温度、湿度、太阳辐射、风速、特殊气候(雾、露、霜等)。微气候因素会直接影响用户的用能需求,如在夏季建筑制冷负荷明显上升,而制热负荷、照明负荷等相应减小。

5)社会经济因素:主要包括教育水平、能源价格、区域经济水平(国民生产总值、人均收入等),将会决定用户行为、设备所有权等要素,从而对负荷造成影响<sup>[31]</sup>。

## 2.2 预测方法

如表 1 所示,根据 Swan 和 Ugursal 的研究,将 RIES 负荷预测方法的研究成果归纳总结并划分为

宏观类预测方法(top-down methods)和微观类预测方法(bottom-up methods)<sup>[32]</sup>。两类方法相辅相成,优势互补,可依据具体规划对象选用合适的预测方法,或组合预测方法。

宏观类负荷预测方法基于 RIES 能源消费和宏观量等历史数据,利用统计学方法从宏观角度寻找能源消费与经济、人口、工程技术、自然环境等因素之间的内在关联,通常使用的经典预测方法包括产值单耗法、弹性系数法、负荷密度法、时间序列法、趋势外推法、回归分析法等<sup>[33-36]</sup>。

微观类负荷预测方法通常采用非聚合类模型(disaggregated model),其着眼于区域中每个用户单元的用能需求情况,并最终得出区域总的能源消费预测结果。相比于宏观类预测方法,该类方法从区域内部挖掘能源消费特性,其建模更为详细透彻,能够得到更加精确的预测结果。但相应地,其前期数据调研工作复杂,建模难度增大。微观类负荷预测方法可划分为四类:经验模型、工程模型<sup>[37]</sup>、统计模型<sup>[38]</sup>和物理-统计混合模型<sup>[39-40]</sup>。

由于多能间耦合的广泛存在,RIES 的负荷预测将不再是各能源系统独立预测,而是多元负荷的联合预测。由于 RIES 各类相关因素交互影响,作用机理复杂,通过人工分析或经验模型已无法准确建立各相关因素之间的耦合关系。近年来,以机器学习、深度学习为代表的人工智能技术已被广泛应用至负荷预测领域<sup>[38,41]</sup>,由于不需要人为设定预测模型,仅需依据历史数据在监督或非监督的情况下自主学习,使得预测结果具备客观性。因此可以预见,基于大数据的人工智能理论将是未来解决 RIES 多元负荷联合预测的有效途径。同时,将机器学习与优化理论相结合,通过优化实现机器学习参数的自趋优,也是提高预测准确性的重要研究方向<sup>[38]</sup>。

## 3 RIES 技术经济性研究

RIES 涵盖电、气、热、冷等多种形式能源,在源-网-荷-储等环节包含种类众多的 EC、ES 及 EN 设备。许多技术处于快速发展之中,其技术经济性尚有待评估。多能间的耦合与优势互补更能够造就巨大潜在的经济价值。因此,技术经济性分析是未来 RIES 发展的重要问题之一。

目前,有关 RIES 技术经济性的研究热点主要集中在一些典型的设备,或者由两个及以上设备所组成的小型供能系统的技术经济性评估。其技术性评价的重点在于能源利用效率的改善与能量品位的提高,其分析方法基于热力学第一定律与第二定律;而经济性评估的重点则在于经济效益与节能减排,

一般引用工程经济学理论进行评估<sup>[42]</sup>。其存在研究价值的主要对象如表 1 所示。

表 1 RIES 技术经济性研究对象  
Table 1 Objects of technical and economical analysis on RIES

类型	主要研究对象	技术性	经济性
源	CHP、冷热电联产(CCHP)、电解制氢		
网	供能管线共通道敷设	能源利用 效率、能量 品位	经济效益、 排放量
储	电池储能、相变储能、 冰蓄冷水蓄冷、储气		
荷	能源梯级利用		

### 3.1 能源利用效率

能源利用效率(energy efficiency)是用以衡量 EC 设备工作性能的最基本指标。传统的能源利用效率的计算基于热力学第一定律(能量守恒定律),所反映的是能量在转换过程中总量的变化情况<sup>[43]</sup>。尽管 EC 设备种类繁多,特性各异,但从 EC 设备的外部特性而言,其能源利用效率  $\eta$  可直接表示为设备输出与输入总能量之间的比值:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n E_i^{\text{out}}}{\sum_{j=1}^m E_j^{\text{in}}} \quad (11)$$

式中: $E_j^{\text{in}}$  为第  $j$  类输入能源能量; $E_i^{\text{out}}$  为第  $i$  类输出能源能量。

### 3.2 能量品位

热力学第二定律认为,能量除具有“量”的属性之外,还具有“品质”属性。1988 年,吴仲华在专著《能的梯级利用与燃气轮机总能系统》一书中阐述了能量品位的概念,用以区分同样能量的能源之间的品质高低。后续学者们基于能量品位的思想,提出利用基于热力学第二定律的焓分析法<sup>[44-45]</sup>,通过定义能质系数来量化不同类型能源的能量品位。并基于此对能源利用效率的计算思想进行了发展,提出了更为全面合理的能源转换系统评价指标 ECC (energy conversion coefficient),定义为  $E_{\text{CC}}$ :

$$E_{\text{CC}} = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i^{\text{out}} \lambda_i)}{\sum_{j=1}^m (E_j^{\text{in}} \lambda_j)} \quad (12)$$

式中: $\lambda_i$  和  $\lambda_j$  分别为第  $i$  和  $j$  类能源的能质系数。

## 3.3 经济效益

### 3.3.1 CHP

CHP 被认为是替代热电分产分供,解决未来区域综合供能问题的有效途径,已得到了各国学术与工业界的充分重视与发展。文献[46]对燃气轮机型

CHP 机组的技术经济性进行了分析,论证了 CHP 在未来能源系统中的优势与潜力;文献[47]针对秸秆型 CHP 技术经济性进行了讨论,并论证了其在东北地区冬季供暖方面的潜力;文献[48]则论证了微型 CHP 在楼宇级能源综合利用方面具备成本优势。CHP 的热能输出形式包括热水和热蒸汽两类,以热蒸汽为例,考虑能量梯级利用,由余热锅炉出口的热蒸汽包括高温高压、中温中压、低温低压三个梯级,则建立如下 CHP 机组综合效益模型<sup>[49]</sup>:

$$K = E_c P_c + E_h^1 P_h^1 + E_h^2 P_h^2 + E_h^3 P_h^3 - E_g P_g - 1.05(E_h^1 + E_h^2 + E_h^3) P_w \quad (13)$$

式中: $E_c$  为产电量; $P_c$  为单位电价; $E_h^1, E_h^2, E_h^3$  分别为高温高压、中温中压、低温低压热蒸汽产量; $P_h^1, P_h^2, P_h^3$  分别为高温高压、中温中压、低温低压热蒸汽单价; $E_g$  为耗燃气量; $P_g$  为燃气单价; $P_w$  为补水单价。

### 3.3.2 CCHP

CCHP 一般是在 CHP 的基础上加入吸收式制冷机,对余热加以利用并转换为冷能输出。吸收式制冷机常用的冷却剂有两种,溴化锂/水在亚洲和美国广泛采用,欧洲则应用水/氨型较多。溴化锂机组制冷系数 COP 在 0.82 附近<sup>[17]</sup>。评估 CCHP 的经济效益,可在 CHP 的基础上,核算在加入吸收式制冷机组后替代电制冷的收益值:

$$K' = K + E_c P_c \quad (14)$$

式中: $E_c$  为 CHP 机组制冷量。

### 3.3.3 电解制氢

氢能被认为是最有希望替代化石燃料的能源形式。但氢不是一次能源,需要利用其他能源转化而来,而电解水制氢技术工艺过程简单,产品纯度高,最有潜力满足未来氢能的大规模利用需求。文献[50-51]对三类主要的电解制氢系统:碱性、固体聚合物电解质(SPE)和固体氧化物水电解(SOEC)的转换效率进行了评估,得出其总制氢效率分别为 25%, 35% 和 55%。总体而言,目前电解制氢的效率不高,但却对消纳可再生能源具有极大潜力,可在负荷低谷时将多余的电力转换为氢能并储存,减少弃风弃光,因此制氢厂也可视为可调度的电力用户。文献[52]分析了风电制氢的经济性,其结果表明目前风电制氢不具备投资经济性。总体而言,电解制氢技术虽然目前不具备大规模应用的条件,但随着技术成熟及成本的下降,将是未来解决可再生能源消纳的有效途径。

### 3.3.4 供能管线共通道敷设

区域 IES 包含多种形式的供能管线,如电缆、

天然气管道、供热/供冷管道等,地下管线沟、隧道、廊道等网络错综复杂。将总成本分解为两个部分:材料费  $C_{mtr}$  和建设费  $C_{bui}$ ,其中材料费指管线购置费用,建设费则包括报批、设计、施工、补偿协调、咨询、监理等在敷设过程中产生的费用。则总成本满足:

$$C = C_{mtr} + C_{bui} \quad (15)$$

一般  $C_{bui}$  占总成本比例为 60%~80%。由于中国长期的电、气、热、冷分产分供的模式,各类管线分属不同单位,报批和施工相对独立。设  $\{\alpha, \beta, \dots, \chi\}$  为能源类型集合,则各系统管线独立敷设时的总成本为:

$$C = \sum_{i \in \{\alpha, \beta, \dots, \chi\}} C_{mtr}^i + \sum_{i \in \{\alpha, \beta, \dots, \chi\}} C_{bui}^i \quad (16)$$

而当管线共通道敷设时,其  $C_{mtr}$  不发生改变,但由于避免了重复报批、设计、挖沟等环节,  $C_{bui}$  会大大降低,故其总成本变为:

$$C = \sum_{i \in \{\alpha, \beta, \dots, \chi\}} C_{mtr}^i + \sigma \sum_{i \in \{\alpha, \beta, \dots, \chi\}} C_{bui}^i + C_{sec} \quad (17)$$

式中:  $\delta \in [0, 1]$  为折算系数;  $C_{sec}$  为多种管线共通道敷设时为保证其安全稳定而产生的附加费用。由于共通道能够带来一系列的社会效益,为推动共通道

建设,  $C_{sec}$  宜由政府相关部门出资承担。

### 3.4 排放量

排放量是评估 RIES 性能的另一重要指标,在规划时可与经济效益指标组成多目标规划,或者作为约束条件对系统的排放量加以限制。RIES 的排放量包括两个部分:①输入能源本身携带的排放量,如外部向区域注入的电能,其自身在生产过程中即产生了排放量;②区域内部在能源转换过程中产生的排放量,如燃气轮机等<sup>[11]</sup>。因此,RIES 总排放量为:

$$T_E = \sum_{i \in \{\alpha, \beta, \dots, \chi\}} (c_{pre}^i + c_{int}^i) P^i \quad (18)$$

式中:  $c_{pre}^i$  和  $c_{int}^i$  分别为输入能源排放量系数和内部转换排放量系数。

## 4 RIES 规划优化建模与求解研究

### 4.1 RIES 能流建模

区域总能量流建模如图 3 所示,外部向区域供应的初始能量  $P$  (电、气、热、光、风等) 经过转换、储存、传输、需求侧管理等环节,最终满足区域内部的终端需求  $L$ 。该过程可表示为:

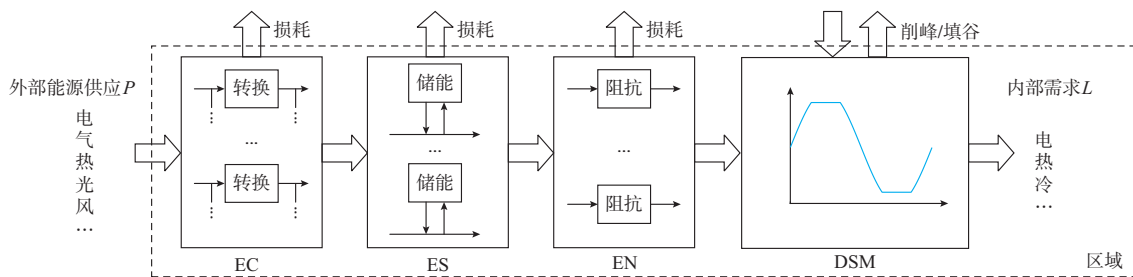


图 3 RIES 能量流基本框架  
Fig. 3 Basic structure of energy flow in RIES

$$L = f(P, C, S, N, D) \quad (19)$$

式中:  $C, S, N, D$  分别代表能源转换、储存、传输、需求侧管理的变化过程。其中  $C$  和  $S$  的具体模型见式(5),  $D$  则与需求侧管理的具体控制策略有关,可视为对终端需求的修改,表示为:

$$L' = D(L) \quad (20)$$

而  $N$  包含电、气、热(冷)等系统供能网络的传输过程,其特性各异,具体讨论如下<sup>[53]</sup>。

1) 电力系统:电力系统潮流计算以节点电压幅值和相位作为状态变量,建立有功、无功平衡方程:

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} = U_i \sum_{j \in \mathcal{N}} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Li} = U_i \sum_{j \in \mathcal{N}} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (21)$$

式(21)方程具有以下特征:①光滑连续;②所需的解在  $U_i = 1, \theta_{ij} = 0$  附近;③结构稀疏。

2) 天然气系统:天然气系统能流以节点气压为状态变量,建立节点气量平衡方程:

$$Q_i - \sum f_{im} + \sum f_{ni} - \sum E_{id} F_d = 0 \quad (22)$$

式中:  $Q_i$  为节点  $i$  处天然气的净注入量;  $f_{ni}$  和  $f_{im}$  分别为自上游节点  $n$  注入和向下游节点  $m$  输出流量;  $F_d$  为压缩机的气体消耗;当压缩机从节点  $i$  取气时,关联系数  $E_{id}$  取 1,否则为 0。支路流量按下式计算:

$$f_{im} = \begin{cases} W_{im} \sqrt{p_i^2 - p_m^2} & p_i \geq p_m \\ -W_{im} \sqrt{p_m^2 - p_i^2} & p_i < p_m \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $f_{im}$  为支路  $im$  的流量;  $W_{im}$  为支路  $im$  的阻尼

系数;  $p_i$  和  $p_m$  为节点气压。

压缩机气耗量为:

$$F_d = \begin{cases} \frac{\alpha f_{im}}{\eta_d} \left[ k_1 \left( \frac{p_m}{p_i} \right)^\psi - k_2 \right] & p_m \geq p_i \\ \frac{\alpha f_{im}}{\eta_d} \left[ k_1 \left( \frac{p_i}{p_m} \right)^\psi - k_2 \right] & p_m < p_i \end{cases} \quad (24)$$

对于不含压缩机的配气网,式(22)也可简化为:

$$p_i - p_m = s_{im} | f_{im} |^{\beta-1} f_{im} \quad (25)$$

式中:  $\eta_d$  为压缩机效率;  $\alpha, \psi, k_1, k_2$  为有关常系数;  $s_{im}$  为管道的阻力系数;  $\beta$  为与气流、管道特性相关的常系数。

3) 供热(冷)系统: 供热(冷)系统分析包含水力分析和热力分析两部分。其水力分析选取支路流量  $\mathbf{M}$  为状态变量, 对一个含有  $N$  个节点和  $b$  条支路的供水网络可建立  $N-1$  个流量平衡方程和  $b-N+1$  个回路压降方程:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_h \mathbf{M} = \mathbf{Q} \\ \mathbf{B}_i (\mathbf{S} | \mathbf{M} | \mathbf{M} + \mathbf{Z} - \mathbf{H}) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $\mathbf{A}_h$  为节点-支路关联矩阵;  $\mathbf{Q}$  为各节点处的净注入流量;  $\mathbf{B}_i$  为基本回路支路关联矩阵;  $\mathbf{S}$  为各管道阻力系数对角阵;  $\mathbf{Z}$  为管道高程差向量;  $\mathbf{H}$  为支路水泵扬程向量。

热力分析则可建立供水网络和回水网络的温度平衡方程:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_s \mathbf{T}_s = \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_r \mathbf{T}_r + \mathbf{B}_r \mathbf{T}_0 = \mathbf{0} \end{cases} \quad (27)$$

式中:  $\mathbf{T}_s, \mathbf{T}_r$  和  $\mathbf{T}_0$  分别为供水网络、回水网络节点和用户处回水温度向量;  $\mathbf{A}_s, \mathbf{A}_r$  和  $\mathbf{B}_r$  分别为与流量、温度、损耗相关的矩阵。

4) 求解方法: 以上各能源系统虽特性各异, 但均满足基尔霍夫定律与能量守恒定律, 可通过 Newton-Raphson 方法或其他迭代算法实现方程组的求解<sup>[54-55]</sup>。混合潮流的求解可以通过构建混合网络的综合方程、利用增广雅可比矩阵统一迭代进行求解<sup>[22]</sup>, 也可以通过能源耦合部分的能量等值将混合潮流待求信息分配到不同能源的各自求解方法分立求解。

## 4.2 RIES 规划通用性模型

由于多能耦合密切, RIES 的优化空间广泛存在于源、网、荷、储等各个环节。国内外对 RIES 规划的早期探索主要集中于以某一种典型耦合设备 (CHP 和 CCHP 等) 为核心或少数几种确定的设备组成的小型供能系统, 以及“以热定电”等相关运行策略的制定, 未充分考虑系统设备选型的优化空间<sup>[56-57]</sup>。后续 RIES 规划一般基于 EH 理论, 并通过分层建模求解实现设备选型选址定容与运行调度

方案的协同优化。文献[58-59]以设备容量和运行调度方案为决策变量构建了单目标双层优化模型, 其优化目标为投资周期内的经济性最优; 文献[60]以经济性、排放量、一次能源消耗量等指标构建了多目标优化模型, 采用层次分析法进行求解; 文献[61]考虑了电、水、气综合网架, 对分布式能源的选址定容与供能网络进行了联合规划; 文献[62]则在规划中考虑了冷、热、电等多种形式的储能设备, 提出了建模与求解方法。文献[63]则基于源、网、荷、储等因素, 构建了 RIES 一体化规划框架。

综合上述文献, 总结概括出 RIES 可选取的决策变量如表 2 所示。

表 2 RIES 可选取的决策变量  
Table 2 Decision variables of RIES planning

对象	决策变量
EC	配置容量 $M_C$ 、选址 $S_C$ 、调度方案 $D_C$
ES	配置容量 $M_S$ 、功率 $W_S$ 、选址 $S_S$ 、调度方案 $D_S$
EN	管线选型 $T$ 、网络拓扑结构 $N$
DSM	可控负荷调度方案 $D_L$

由此概括出区域 IES 规划通用性模型如下:

$$\begin{cases} \min f(M_C, S_C, D_C, M_S, W_S, S_S, D_S, T, N, D_L) \\ \text{s. t. } g(M_C, S_C, D_C, M_S, W_S, S_S, D_S, T, N, D_L) = 0 \\ h(M_C, S_C, D_C, M_S, W_S, S_S, D_S, T, N, D_L) \leq 0 \end{cases} \quad (28)$$

式中:  $g$  和  $h$  分别为规划模型中的等式结束集和不等式约束集。

### 4.2.1 目标函数

RIES 规划与运行关系密切, 源、网、荷、储等各个环节耦合性强, 其目标可以是单目标或多目标, 以下列出 RIES 规划所主要考虑的目标, 单目标规划则选取其中之一, 而多目标规划则选取若干个目标的有机组合。

1) 经济性: 经济性直接关系到规划方案是否具备落地条件。评估 RIES 经济性一般要考核整个全寿命周期内的效益, 可建模如下<sup>[63]</sup>:

$$\min f_E = C_1(M_C, M_S, T, N) + C_2(M_C, W_S, T, N) + C_3(D_C, D_S, D_L) + C_4(D_C, D_S, D_L, S_C, S_S) \quad (29)$$

式中:  $C_1, C_2, C_3, C_4$  分别为初始投资成本、运行维护成本、能源消费成本、网损成本。部分典型设备的成本模型请参见第 3.3 节。

2) 排放量: 一般指 RIES 碳排放量, 其模型已在第 3.4 节中讨论。环境性目标可表示为:

$$f_v = \min T_E(D_C, D_S, D_L) \quad (30)$$

3) 能源利用效率: 与设备的选型及调度相关, 旨在使区域内综合能源利用效率达到最大, 表示为:

$$f_y = \max \sum \eta_k \mu_k \quad (31)$$

式中: $\eta_k$  表达式参考式(11),为设备  $k$  的转换效率; $\mu_k$  为该设备的权重系数。

4)ECC:与能源利用效率相比,在核算过程中兼顾考虑了能量品位,能够更为合理地评估 RIES 性能,可表示为:

$$f_c = \max \sum E_{CC,k} \mu_k \quad (32)$$

式中: $E_{CC,k}$  表达式参考式(12)。

5)可靠性:可靠性用定性或定量指标反映系统的能源供应中断的风险水平,从而指导 RIES 的规划、运行等生产实践活动,具有重要意义。近年来,有不少学者将电力系统可靠性的评估理念引入 RIES 之中,提出了相应的指标体系,通过蒙特卡洛模拟实现可靠性评估<sup>[64-66]</sup>。如文献[65]提出利用供能不足期望值的指标用以评估系统可靠性:

$$E_{DNS,i} = \sum P_i(x) C_i(x) \quad (33)$$

故其目标函数可表示为:

$$f_r = \max \sum E_{DNS,i} \epsilon_i \quad (34)$$

式中: $i$  表示能源类型; $P_i(x)$  为系统状态  $x$  的概率; $C_i(x)$  为系统状态  $x$  的负荷削减量; $\epsilon_i$  为能源  $i$  占能源总量的权重系数。

#### 4.2.2 约束条件

式(28)中的等式约束主要包括:①区域功率能量平衡约束式(19);②能流方程约束,见式(21)至式(27)。不等式约束主要包括设备配置容量约束、系统运行约束、能源集线器自身约束、资金及场地空间约束等信息。

#### 4.2.3 求解算法

RIES 规划问题本质上是复杂的混合整数非线性规划(MINLP)问题,经典凸优化算法难以直接求解。目前的求解思路主要分为两类:一类是通过简化将优化模型近似为线性问题,然后通过凸优化算法如序列二次规划法、内点法、分支定界法、Benders 分解法等寻优,并可借助 CPLEX 和 MATLAB 等优化软件直接求解;另一类则是通过智能算法如粒子群算法、遗传算法、强化学习、模拟退火算法等直接求解,可寻找到模型的近似最优解<sup>[67-68]</sup>。对于多目标优化问题的求解,则一般基于 Pareto 前端思想,并套用求解算法如 NBI 法、NSGA-II 法等<sup>[69-70]</sup>。

#### 4.2.4 求解流程

RIES 规划范围广、模型维度高,宜采用分层求解思想,将主问题分解为若干子问题,通过数据传递实现整体迭代寻优<sup>[71]</sup>。其通用性求解流程可设计为三层优化过程:第 I 层为 EC 和 ES 设备容量规划

层,用以优化  $M_C, M_S$  和  $W_S$ ;第 II 层为 EN 规划及 EC 和 ES 选址层,用以优化  $T, N, S_C$  和  $S_S$ ;第 III 层为运行调度层,用以优化  $D_C, D_S$  和  $D_L$ 。求解流程如图 4 所示。

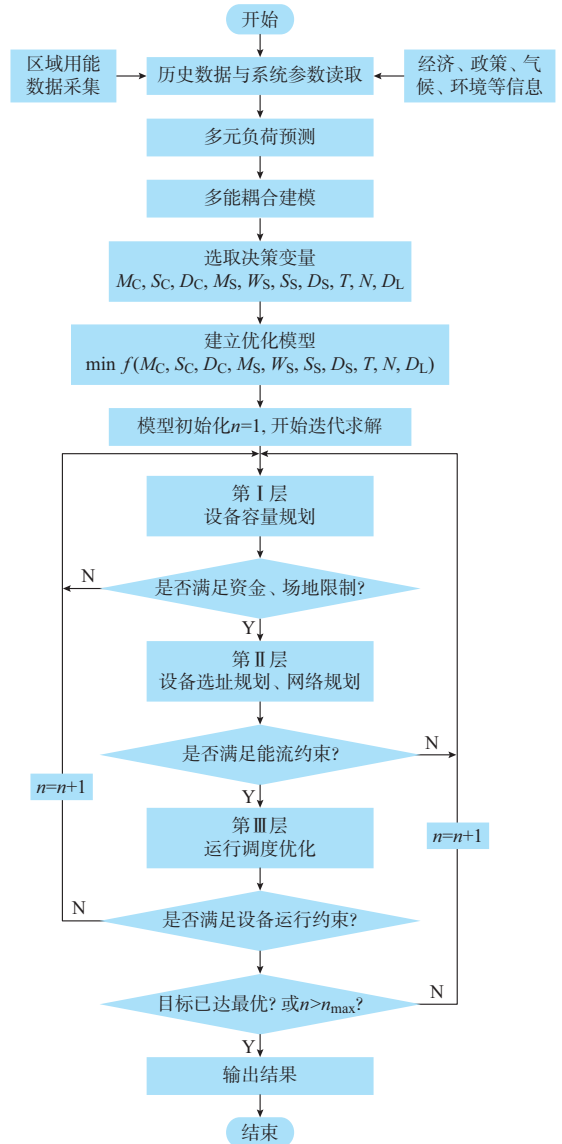


图 4 RIES 通用性模型求解流程图

Fig. 4 Flow scheme of universal model for RIES

## 5 结语

本文对规划中的若干关键问题,包括多能耦合理论、负荷预测方法、技术经济性分析、规划优化建模与求解等进行了系统性归纳,总结了目前国内外的研究成果与最新进展,并概括出了涵盖区域综合能源系统源、网、荷、储等环节的通用性能流计算模型、规划模型与求解流程。RIES 规划本质上是多元素、多维度、多目标、多层次、非线性的复杂规划问题。要破除行业壁垒,由过去分产分供、独立规划的



模式转变为多能系统联合规划,未来的研究任重而道远。当前研究存在的问题及展望如下。

1)动态特性、多时间尺度特性。目前RIES规划相关研究大多仍停留在稳态分析层面,现有的统一模型对电、气、热、冷系统的暂态与时延特性考虑较少,造成RIES运行可靠性与安全性评估准确性不足。区域IES本质上是含多时间尺度的复杂系统,需要对不同时间常数系统合理数学建模,建立不同能流的差异化优化周期确定方法,以准确地描述能量的转换与传输过程。

2)多重不确定性分析与建模。RIES全面涵盖电、气、热、冷等各种能源形式,其不确定性复杂度远超过任何单一系统,可能存在于能源生产、传输、转换、消费等所有环节。因此在不确定性分析与建模上,除新能源出力、负荷、设备故障等因素外,还需考虑如气象条件对热、冷负荷,外界温度对热管道传输效率,建筑布局对制冷制热需求的影响作用等。

3)多能流安全分析与控制。由于RIES中多能源间的强耦合性,安全性不再是单一系统自身问题,而是整个系统联合作用的结果。这需要研究多能流联合计算方法,实现多能流统一求解。目前电力系统、热力系统等的安全可靠评估研究已较成熟,如何将已有的安全性评估模型与方法发展并应用于RIES是未来亟待解决的问题。

4)市场机制与交易架构。随着传统能源行业边界逐渐消退,市场参与主体可能具有生产者、批发商、零售商和消费者等多种身份。市场主体多元化,多类型用户、能源生产商、能源代理商、多能交易中心、电热气网络调度中心等新兴主体不断加入,并且各主体的结构特性和空间特性差异显著。这要求学者们一方面需要对多能优势互补下的RIES技术经济性进行深入探索与分析;另一方面需要建立多层次市场机制和交易架构,包含用户、多类型能源生产商、能源代理商、区域能源服务商等。转变能源开发利用的思路,鼓励社会资本的广泛注入。

## 参 考 文 献

- [1] RIFKIN J. The third industrial revolution[J]. International Study Reference, 2008, 3(7): 26-27.
- [2] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 4(7): 198-207.  
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power systems, 2015, 4(7): 198-207.
- [3] 国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见[EB/OL]. [2018-04-01]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-07/04/content\\_10002.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-07/04/content_10002.htm).
- [4] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 1-7.  
WU Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 1-7.
- [5] GEIDL M, ANDERSSON G. Optimal power flow of multiple energy carriers [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 145-155.
- [6] Energy independence and security ACT of 2007 [EB/OL]. [2014-10-09]. <http://www.ferc.gov/eventcalendar/files/20050608125055-grid-2030.pdf>.
- [7] Combining our energies-integrated energy systems for Canadian communities [EB/OL]. [2014-10-09]. [http://publications.gc.ca/collections/collection\\_2009/parl/xc49-402-1-1-01e.pdf](http://publications.gc.ca/collections/collection_2009/parl/xc49-402-1-1-01e.pdf).
- [8] 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 Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical integrated energy system under the background of energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3305.
- [9] MA W, FANG S, LIU G, et al. Modeling of district load forecasting for distributed energy system[J]. Applied Energy, 2017, 20(4): 181-205.
- [10] 艾芊,郝然. 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 2-10. DOI: 10.7500/AEPS20170927008.  
AI Qian, HAO Ran. Key technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 2-10. DOI: 10.7500/AEPS20170927008.
- [11] GEIDL M. Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems [D]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2007.
- [12] RASTEGAR M, FOTUHI M, LEHTONEN M. Home load management in a residential energy hub[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 119(119): 322-328.
- [13] KOIRALA B P, AVILA J P C, GÓMEZ T, et al. Local alternative for energy supply: performance assessment of integrated community energy systems[J]. Energies, 2016, 9(12): 981.
- [14] WANG Yue, HOU Kai, JIA Hongjie, et al. Decoupled optimization of integrated energy system considering CHP plant based on energy hub model[J]. Energy Procedia, 2017, 142: 2683-2688.
- [15] 王珺,顾伟,陆帅,等. 结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 17-24.  
WANG Jun, GU Wei, LU Shuai, et al. Coordinated planning of multi-district integrated energy system combining heating network model [J]. Automation of Electric Power systems, 2016, 40(15): 17-24.

- [16] 杨承,黄志峰.联合循环热电联产机组变工况性能分析[J].中国电机工程学报,2017,37(12):3514-3524.  
YANG Cheng, HUANG Zhifeng. Study on off-design characteristics of combined heat and power based on combined cycle gas turbine units[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3514-3524.
- [17] 杨经纬,张宁,王毅,等.面向可再生能源消纳的多能源系统:述评与展望[J].电力系统自动化,2018,42(4):11-24. DOI: 10.7500/AEPS20171002004.  
YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 11-24. DOI: 10.7500/AEPS20171002004.
- [18] ZHANG N, CAI R. Analytical solutions and typical characteristics of part-load performances of single shaft gas turbine and its cogeneration [J]. Energy Conversion & Management, 2002, 43(9-12): 1323-1337.
- [19] 蔡斌,钟巍.锅炉变工况热力计算分析系统的应用[J].内蒙古电力技术,2011,29(5):72-75.  
CAI Bin, ZHONG Wai. Application of boiler maneuvering condition heat calculation analysis system[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2011, 29(5): 72-75.
- [20] 蔡睿贤,胡自勤.余热锅炉变工况计算[J].工程热物理学报,1990,11(1):17-20.  
CAI Ruixian, HU Ziqin. Off-design performance calculation of heat recovery system generators[J]. Journal of engineering thermophysics, 1990, 11(1): 17-20.
- [21] FU X, SUN H, GUO Q, et al. Uncertainty analysis of an integrated energy system based on information theory [J]. Energy, 2017, 122: 649-662.
- [22] LIU X, JENKINS N, WU J, et al. Combined analysis of electricity and heat networks [J]. Energy Procedia, 2014, 8(61): 155-159.
- [23] PAN Z, GUO Q, SUN H. Interactions of district electricity and heating systems considering time-scale characteristics based on quasi-steady multi-energy flow[J]. Applied Energy, 2016, 167: 230-243.
- [24] WEI Z, CHEN S, SUN G, et al. Probabilistic available transfer capability calculation considering static security constraints and uncertainties of electricity-gas integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2016, 167(5): 305-316.
- [25] PAZOUKI S, HAGHIFAM M R. 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: 335-345.
- [26] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the Energy Internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 99(1): 133-148.
- [27] 吴聪,唐巍,白牧可,等.基于能源路由器的用户侧能源互联网规划[J].电力系统自动化,2017,41(4):20-28. DOI:10.7500/AEPS20160802010.  
WU Cong, TANG Wei, BAI Muke, et al. Energy router based planning of Energy Internet at user side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 20-28. DOI: 10.7500/AEPS20160802010.
- [28] LIBRARY W E. American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers [J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 2(3): 56-57.
- [29] ANTONAIA A, ASCIONE F, CASTALDO A, et al. Cool materials for reducing summer energy consumptions in Mediterranean climate: in-lab experiments and numerical analysis of a new coating based on acrylic paint[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 102: 91-107.
- [30] ANDERSEN J S, SATTRUP P A. The urban canyon and building energy use: urban density versus daylight and passive solar gains[J]. Energy & Buildings, 2011, 43(8): 2011-2020.
- [31] MA J, CHENG J C P. Identifying the influential features on the regional energy use intensity of residential buildings based on random forests[J]. Applied Energy, 2016, 183: 193-201.
- [32] SWAN L G, UGURSAL V I. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: a review of modeling techniques[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(8): 1819-1835.
- [33] BIANCO V, MANCA O, NARDINI S. Electricity consumption forecasting in Italy using linear regression models [J]. Energy, 2009, 34(9): 1413-1421.
- [34] UIHLEIN A, EDER P, EDER P. Policy options towards an energy efficient residential building stock in the EU-27 [J]. Energy & Buildings, 2010, 42(6): 791-798.
- [35] APADULA F, BASSINI A, ELLI A, et al. Relationships between meteorological variables and monthly electricity demand[J]. Applied Energy, 2012, 98(5): 346-356.
- [36] LIN B, LIU H. China's building energy efficiency and urbanization[J]. Energy & Buildings, 2015, 86(1): 356-365.
- [37] PEDERSEN L, STANG J, ULSETH R. Load prediction method for heat and electricity demand in buildings for the purpose of planning for mixed energy distribution systems[J]. Energy & Buildings, 2008, 40(7): 1124-1134.
- [38] 江梦洋.基于相关向量机的电力系统月度负荷预测[D].上海:上海交通大学,2016.  
JIANG Mengyang. Research on power system load forecasting based on relevance vector machine [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [39] SWAN L, UGURSAL V I. Implementation of a Canadian residential energy end-use model for assessing new technology impacts[C]// Eleventh International IBPSA Conference, July 27-30, 2009, Glasgow, Scotland: 1429-1436.
- [40] YU Z, HAGHIGHAT F, FUNG B C M, et al. A decision tree method for building energy demand modeling[J]. Energy & Buildings, 2010, 42(10): 1637-1646.
- [41] 史佳琪,谭涛,郭经,等.基于深度结构多任务学习的园区型综合能源系统多元负荷预测[J].电网技术,2018,42(3):699-706.  
SHI Jiaqi, TAN Tao, GUO Jing, et al. Multi-task learning based on deep architecture for various types of load forecasting in regional energy system integration [J]. Power System

- Technology, 2018, 42(3): 699-706.
- [42] HENRY S, 张芳. 工程经济学原理[M]. 北京: 经济科学出版社, 2000.  
HENRY S, ZHANG Fang. Principles of engineering economy [M]. Beijing: Economic Science Press, 2000.
- [43] 葛莉瑶. 热电联产系统性能评价及案例分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.  
GE Liyao. Thermal performance evaluation and case analysis of the combined heat and power system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [44] 徐聪, 刘泰秀, 隋军, 等. 多能源热互补分布式能源系统的节能率评价方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 151-157. DOI: 10.7500/AEPS20170927006.  
XU Cong, LIU Taixiu, SUI Jun, et al. Evaluation method for energy saving ratio of distributed energy system with multi-energy thermal complementarity [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 151-157. DOI: 10.7500/AEPS20170927006.
- [45] 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 Yi, LIU Xiaohua, XUE Zhifeng, et al. Study of energy converter system evaluating index [J]. China Energy, 2004, 26(3): 27-31.
- [46] 何丽. 热电联产系统技术经济性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.  
HE Li. Technical economic analysis of cogeneration system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.
- [47] 白莉, 张晓航, 褚家瑞. 东北地区区域秸秆热电联产技术经济性分析[J]. 吉林建筑大学学报, 2011, 28(5): 47-49.  
BAI Li, ZHANG Xiaohang, CHU Jiarui. The technical economical analysis on the cogeneration by straw in the northeast area country [J]. Journal of Jilin Institute of Architecture & Civil Engineering, 2011, 28(5): 47-49.
- [48] 罗勇, 尤占平, 胡定科. 楼宇级冷热电联产的技术经济分析[J]. 暖通空调, 2005, 35(7): 47-49.  
LUO Yong, YOU Zhanping, HU Dingke. Technical and economic analysis of building cooling heating and power [J]. Heating, Ventilation & Air Conditioning, 2005, 35(7): 47-49.
- [49] 王承斌. 燃气轮机热电协调优化模型及经济性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
WANG Chengbin. Thermoelectric coordination optimization model of gas turbine and economic analysis [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [50] 刘明义, 于波, 徐景明. 固体氧化物电解水制氢系统效率[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(6): 868-871.  
LIU Mingyi, YU Bo, XU Jingming. Efficiency of solid oxide water electrolysis system for hydrogen production [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(6): 868-871.
- [51] MUELLER-LANGER F, TZIMAS E, KALTSCHMITT M, et al. Techno-economic assessment of hydrogen production processes for the hydrogen economy for the short and medium term [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(16): 3797-3810.
- [52] 时璟丽, 高虎, 王红芳. 风电制氢经济性分析[J]. 可再生能源, 2015, 37(2): 11-14.  
SHI Jingli, GAO Hu, WANG Hongfang. Economic analysis of P2G by wind power [J]. Renewable energy, 2015, 37(2): 11-14.
- [53] 邵成成, 王锡凡, 王秀丽, 等. 多能源系统分析规划初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3817-3828.  
SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Probe into analysis and planning of multi-energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3817-3828.
- [54] GEIDL M, ANDERSSON G. A modeling and optimization approach for multiple energy carrier power flow [C]// 2005 IEEE Russia Power Tech, June 27-30, 2005, St. Petersburg, Russia: 1-7.
- [55] 周游, 李嘉. 多热源环状热网水力计算研究[J]. 煤气与热力, 2011, 31(7): 19-22.  
ZHOU You, LI Jia. Research on hydraulic calculation of loop heating network with multiple heat sources [J]. Gas & Heat, 2011, 31(7): 19-22.
- [56] 安青松. 基于燃气轮机的冷热电三联供系统优化模拟[D]. 天津: 天津大学, 2004.  
AN Qingsong. Optimization of combined cooling, heating and power system simulation based on gas turbines [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [57] WANG Jiangjiang, JING Youyin, ZHANG Chunfa, et al. Performance comparison of combined cooling heating and power system in different operation modes [J]. Applied Energy, 2011, 88(12): 4621-4631.
- [58] YANG Y, ZHANG S, XIAO Y. Optimal design of distributed energy resource systems based on two-stage stochastic programming [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 1358-1370.
- [59] GUO L. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system [J]. Energy Conversion & Management, 2013, 74(10): 433-445.
- [60] 蒋润花, 曾蓉, 李洪强, 等. 考虑气候条件及建筑类型等因素的分布式冷热电三联产系统的多目标优化及评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3206-3213.  
JIANG Runhua, ZENG Rong, LI Hongqiang, et al. Multi-objective optimization and evaluation of distributed CCHP system considering influence of climate condition and building type [J]. Proceedings of CSEE, 2016, 36(12): 3206-3213.
- [61] ZHANG X J, KARADY G G, ARIARATNAM S T. Optimal allocation of CHP-based distributed generation on urban energy distribution networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 5(1): 246-253.
- [62] 管霖, 陈鹏, 唐宗顺, 等. 考虑冷热电存储的区域综合能源站优化设计方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2934-2941.  
GUAN Lin, CHEN Peng, TANG Zongshun, et al. Integrated energy station design considering cold and heat storage [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2934-2941.
- [63] HU Xiao, CHENG Haozhong, TANG Senkai, et al. Integrated modeling and planning of district multi-carrier

- energy systems[C]// IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, November 26-28, 2017, Beijing, China: 1-6.
- [64] 李更丰, 别朝红, 王睿豪, 等. 综合能源系统可靠性评估的研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 114-121.  
LI Gengfeng, BIE Zhaohong, WANG Ruihao, et al. Research status and prospects on reliability evaluation of integrated energy system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 114-121.
- [65] 葛少云, 李吉峰, 刘洪, 等. 考虑多能耦合及品位差异的含储能微网可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 165-173. DOI:10.7500/AEPS20170903002.  
GE Shaoyun, LI Jifeng, LIU Hong, et al. Reliability evaluation of microgrid containing energy storage system considering multi-energy coupling and grade difference [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 165-173. DOI: 10.7500/AEPS20170903002.
- [66] LI G, KOU Y, JIANG J, et al. Researches on the reliability evaluation of integrated energy system based on Energy Hub [C]// 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), August 10-13, 2016, Xi'an, China: 69.
- [67] QIU J, DONG Z Y, ZHAO J H, et al. Low carbon oriented expansion planning of integrated gas and power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 1035-1046.
- [68] ZHENG Y, DONG Z Y, LUO F J, et al. Optimal allocation of energy storage system for risk mitigation of DISCOs with high renewable penetrations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 212-220.
- [69] WANG Huaizhi, ZHANG Rongquan, PENG Jianchun, et al. GPNBI-inspired MOSFA for Pareto operation optimization of integrated energy system [J]. Energy Conversion & Management, 2017, 151: 524-537.
- [70] HAMDY M, PALONEN M, HASAN A. Implementation of pareto-archive NSGA-II algorithms to a nearly-zero-energy building optimization problem[C]// First Building Simulation and Optimization Conference, September 10-11, 2012, Loughborough, UK: 181-188.
- [71] LI G, ZHANG R, JIANG T, et al. Security-constrained bi-level economic dispatch model for integrated natural gas and electricity systems considering wind power and power-to-gas process[J]. Applied Energy, 2017, 194: 696-704.

程浩忠(1962—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统规划、综合能源系统规划。E-mail: hzcheng@sjtu.edu.cn

胡 泉(1989—),男,博士研究生,主要研究方向:综合能源系统规划、配电网规划。E-mail: hxisee@163.com

王 莉(1969—),女,高级工程师,主要研究方向:电力系统运行管理。

(编辑 代长振)

## Review on Research of Regional Integrated Energy System Planning

CHENG Haozhong<sup>1</sup>, HU Xiao<sup>1</sup>, WANG Li<sup>2</sup>, LIU Yuquan<sup>2</sup>, YU Qi<sup>2</sup>

1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, (Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China;
2. Guangzhou Power Supply Bureau Co. Ltd., Guangzhou 510620, China)

**Abstract:** As the physical carrier of Energy Internet, regional integrated energy system (RIES) has become an important role for improving comprehensive energy utilization efficiency, renewable energy consumption, energy supply reliability, energy saving and emission reduction. The planning of RIES encounters many challenges, such as industry boundaries, policies, regional differences and techniques. In this paper, the key problems of RIES planning are discussed including multi-energy coupling, load forecasting, technical economy and optimization modelling. The domestic and foreign relative researches are summarized systematically. Based on the latest research progress, a universal energy flow model, planning model and solution process covering the source, network, load and storage of district integrated energy system are summarized, and the future research directions are prospected.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0901300).

**Key words:** regional integrated energy system; energy system planning; multi-energy coupling; load forecasting; technical economy