

综合能源系统规划方法与工具

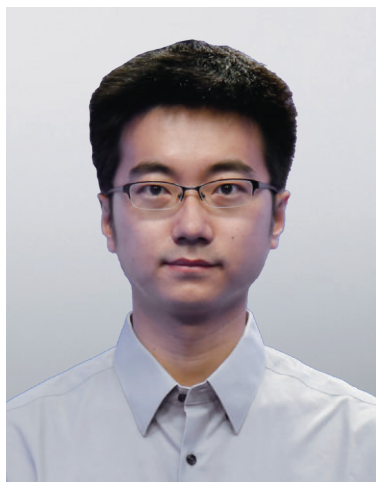
文/国网能源研究院能源互联网研究所 张宁 吴潇雨 卢静 汤芳

综合能源系统的发展趋势

当前我国能源发展面临化石能源占比高、油气对外依存度高和单位产值平均能耗高的“三高”问题。为了解决能源结构问题和能源效率问题，综合能源系统解决方案应运而生。所谓综合能源系统，是指一定区域内利用一些先进的物理信息技术和创新管理模式，整合区域内不同的能源品种，如煤、油、气、电、热以及冷等多种能源，实现多元异质能源子系统之间的协调规划、优化运行和互补互进。在满足多元化用能需求的同时，有效提升能效、促进能源可持续发展的新型一体化能源系统。

综合能源系统，涵盖广泛，行业内也有不同侧重，但目前来看，更多还是侧重在用户侧的综合能源系统，也就是综合能源服务。相对于较大的能源系统来说，用户侧的多能耦合场景更丰富、多能互补的可行性更强，因此当前学术、产业界都在重点关注电、热、冷和气协同互补的终端综合能源系统。

综合能源系统具有两个比较突出的特征：一是跨环节的源网荷储协调，打破了源、网、荷和储不同环节间的壁垒，实现供需双向灵活互动，不再是供应追着需求，而是需求侧也可以进行主动



张宁

国网能源研究院能源互联网研究所
高级研究员、博士

调节，实现双向优化；二是跨系统的多能耦合互补，打破了电、热、冷和气等不同能源系统间的壁垒，实现多能协调优化互补，主要是通过挖掘电、热和气互补潜力，利用热力和天然气易存储、时间惯性大的特点来加强电力系统的灵活性。

多能耦合互补是综合能源系统一个关键的着力点。具体而言，比如建筑的供热供冷平衡、天然气平衡，都是有调节范围的，通过多能耦合转换设备，就能使相关的电力需求在一定范围内进行调节。当电力负荷变得更加灵活，就可以更多地消纳新能源。

目前，新能源或清洁能源主要还是以电力为配置载体，在这种情况下，就能够以综合能源协调互补的方式促进我国的能源转型和清洁能源的高效消纳、高效利用。这对于改善能源供应结构、降低用能成本、降低碳排放以及实现经济效益环境效益的协同都大有裨益。

多能耦合互补不是一个简单的加法，而是要挖掘各种能量之间耦合互补的潜力，实现“1+1>2”的效果。

规划模型构建

综合能源系统是一个相对来说比较复杂的系统，有多种能源耦合在一起，还有多类型设备需要协同，其规划较传统的能源单一的系统更为复杂。不同类型的设备，其差异化机理也要考虑在内。除此之外，还意味着因为扩大了优化的范围，潜在的组合数量是呈急剧上升态势的。

此外，由于不同的能源品种供需特征不同，因此最大负荷出现的时间点也不同，互相之间还存在时序负荷特性的耦合关系，所有因素交织在一起，所以还需要进行多场景的平衡。在规划过程中，不仅要满足极端时刻，即预测一个最大负荷时刻和整体电量的

平衡,还要将不同季节、不同时段的平衡作为约束嵌套在其中。

另外,多元化的技经参数也是综合能源系统规划面临的挑战之一。需要了解能反应热、冷和气相关设备与系统的技术和经济特性参数,从而构成一个多元化的参数体系。

最后一个挑战就是政策影响,包括相关的补贴政策、能源结构等多方面外部政策因素。如某些地区不允许用以燃气为供应的多能转换设备,有些地区对于电气化率或者可再生能源渗透率等有一定的政策要求,这些都要考虑到综合能源系统的建模和综合能源系统规划方案生成的过程中去。

针对这些挑战,我们的思路是结合用户侧综合能源系统的实际情况,有针对性地构建需求预测、资源评估、优化规划及生产模拟等模型来实现综合能源系统规划。通过一整套的模型体系,生成一个最优化的综合能源系统的解决方案。综合能源系统架构示意如图1所示。

1. 需求预测模型

重点面向建筑、工业企业、农业和园区四种测算对象,采用比较常用的空间密度法,同时叠加产品单耗法。对于工业企业来说,不同行业企业在占地相等的情况下,用能密度的差异是比较大的。模型的测算对象是电、

热、冷和气四种能源品种需求,得到年、月、日和时4级时间尺度典型负荷值,为用户进行能效评估、综合能源规划等提供依据。

2. 资源评估模型

面向综合能源系统的资源评估,目标包括风能资源评估和太阳能资源评估两类。对同一平台建设中购买的风能、太阳能数值和计算数据进行二次加工利用,综合考虑规划实际需求、用户使用习惯以及软件总体体量,采用二维地图形式,以行政区县为基本单元,进行风电和光伏发电的装机容量概算、典型日和全8760 h出力曲线计算。具体方式相对明确,首先锁定地理范围;然后进行电能转化计算;最后生成典型曲线。

3. 优化规划模型

这是整个综合能源系统规划中最核心的模块。面向用户侧综合能源系统(区域能源互联网),统筹考虑电、热、冷和气四类能源品种,实现对光伏、风电、燃气发电、热电联产、三联供、燃气锅炉、电锅炉、热泵、压缩式制冷、吸收式制冷、电储能、冰蓄冷、水蓄冷/热、固体蓄热和储气罐15类能源设备,以及电网线路、热网管道和气网管道三类能源网络建设扩容方案的统筹优化求解。

要实现这些功能,首先是从能源品种的角度考虑,包括电、热力、冷和天然气等。以电为例,

要重新梳理需求和供应,相比做较大能源规划而言,还要更复杂一些。如果走向用户侧,走向园区工业企业,走向建筑甚至更深入探究,就会发现需求是可以细分的,包括终端用电需求和多能转换产生的电力需求。以往关注的电力需求其实是这两部分的叠加,视之为常量,而做用户侧综合能源规划只有真正的终端电力需求是常量,电力供应方式包括电网供电(外部输入)、分布式光伏、风电、燃气发电、燃气热电联产、燃气冷热电三联供、需求响应以及电储能等。

总体来说,电力最具有“多来源、多去向”特征,涉及的元素和平衡关系最多。以电为中心的能源转换利用方式会增加园区内的电力需求,且会改变负荷时序特性。电力供应组合方式也比较多元,包括外部电网供电和多种类型的分布式电源,未来储能和需求响应也将在电力平衡中发挥较大作用,相关约束关系趋于复杂化。当电与其他能源同时在综合能源系统优化建模里出现时,就需要考虑它们之间的耦合,包括能量耦合、时间耦合、空间耦合、成本耦合以及能源结构耦合。

谈及能源品种中的多能综合,从实际操作规范来看,不同能源品种的规划包括负荷预测、电热气源选择、网络规划设计以及配

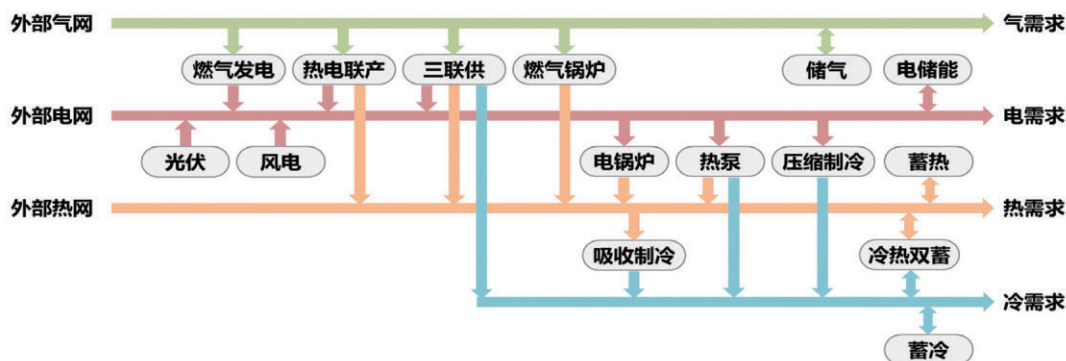


图1 综合能源系统架构示意

套设施规划等环节，基本流程相似。所以讨论完电、热和气分别的情况之后，在做多能综合的时候，我们会抽离出其中的一些共性。不同能源系统在规划层面都更关注功率和能量，考虑负荷特性，确保供需平衡，对运行层面的复杂物理过程做简化处理。仅在专门的电、热和气网专项规划测算中进行潮流、水流和气流计算。

规划虽然把运行层面关于电、热、冷和气的差异化物理状态做了简化和协同化处理，但是因为规划问题相比较运行分析问题来说，变量和不确定性更大。如果进行运行分析计算，可以考虑像热和气这样具有各自特点的复杂的物理过程。每一类单一能源品种的设备容量是确定的，运行方式也是确定的，如果逐步把变量扩大，就会变成运行优化问题，以及源、网、荷和储协调规划问题，这时每一类能源比如电力系统，其电源和电网的容量就不再确定，运行方式不再确定，甚至负荷和储能都变成了变量。

基于这些特点，我们在综合能源系统规划里，对不同能源品种做最大程度的同质化处理，也就是一定程度地简化掉冷、热和气差异化的物理特性。同时，考虑一部分电、热、冷和气的差异化特性。从源、网、荷和储4个环节对它们进行不同的考虑和差异化处理。

更多的差异化处理其实是体现在能源转换设备层面。这里一共考虑了15类设备，以具有代表性的热泵为例，做成本模型，计入整个规划模型的目标函数。同时热泵在热和冷平衡中是一类候选的供应方式，在电平衡中会增加相应时段的需求。通过不同能源品种平衡的刻画，也影响了能效水平和能源结构。

规划模型的设备参数库也同样重要。目前针对热泵，我们有约70个常见机型的参数库，其中有一些主要参数，通过参数的维度来刻画这一类设备需要在规划中考虑的一些特性。比如热泵的主要参数指标有设备型号、建设成本、运维成本、额定容量、寿命期以及COP。如果考虑网架的规划，还要包括网架位置等。这些维度与具体的设备品种轴，会形成一个二维矩阵，也就是热泵的数据体系。

基于电、热、冷和气不同能源品种，以及在设备层之间不同的设备，如热泵、三联供等十余类设备以及网架，把这些因素分别梳理清楚，然后就可以构建整体的综合能源系统规划模型，这样就能确保得到一个更加科学合理的综合能源落地综合解决方案。

规划模型的输入包括能源系统已有设备相关参数，各类待选能源转换、传输和存储设备相关参数，还包括各类终端能源负荷需求、需求响应潜力、资源条件时序数据、能源价格及其他参数等。模型输出包括各类待选能源转换、传输和存储设备优化建设方案，以及系统投资估算、系统主要能源指标、系统各时段功率平衡状态和各台设备优化运行状态。

数学优化模型，包括目标函数和约束条件两部分。目前综合能源系统规划的目标包括经济目标（总体投资运维成本最小化）、环境目标（总体排放最小化）、能效目标（系统整体能效水平最大化）以及能源结构目标（能源结构最优化）四类，用户可根据自身实际需求选择优化目标。系统平衡类约束条件包括各时刻和各节点的电、热、冷和气功率平衡约束，刻画系统全时间、全空间和全品种能量供需平衡，确

保规划方案满足用户各类能源需求。此外，还包括各类元素单台设备出力容量约束、新能源发电时序资源条件约束、各类元素单台设备多能转换效率约束、各类元素在各节点建设规模约束、电/热/气网络各条线路/管道传输容量约束、电/热/气网络扩建线路候选集合及建设回数上限约束、变电站/配气站/换热站容量约束、各节点各类需求响应容量约束、各节点各类需求响应时段约束、各节点各类需求响应累积响应电量约束、各类储能元素单台设备充放功率约束、各类储能元素单台设备能量平衡约束、电储能单台设备SOC（荷电状态）上下限约束以及各类储能元素在各节点建设规模约束等。

软件工具开发

基于上面提到的规划方法，我们近期开发了一款综合能源系统规划软件PIES（Planning for Integrated Energy System）。该软件包括负荷预测、资源评估、优化规划、生产模拟和财务评价五大功能模块，可实现多能源需求预测、本地新能源资源条件评估、综合能源系统方案规划、系统运行模拟以及项目财务指标测算等功能。面向对象覆盖单体建筑/工业企业、建筑群/工业园区和城市等不同尺度不同场景的综合能源规划需求。五大功能模块既可以独立运行，支撑用户某一功能需求，也可以联合运行，为用户提供一站式系统化决策支持服务。PIES各模型充分考虑了各种用户类型的特征，各种元素的技术经济参数，以及能源价格、政策税费等外部影响因素，并且支持在不同场景下的多方案对比分析。综合能源系统规划软件模型功能示意如图2所示。

软件中构建了四大基础数据

库,让软件更加实用、更好地服务用户,包括覆盖千米级空间颗粒度的全年8 760 h风光资源数据库、考虑分区域分用户分场景刻画的用户负荷数据库、覆盖市场主要品牌共计约500种型号的能源设备数据库以及覆盖各省区的能源价格数据库。另外,软件涵盖“15+3”类能源设施无限制全链接自动组合,包括15类能源转换设备和3类能源网络,后台可以生成组合方案,确保找到一种最优方案。在交互方式和操作模式方面,包括报告生成方面,我们也开发了一些比较友好的操作性能,可以支持自动导出报告,以图表形式或以报告形式更好地辅助用户进行规划。

软件同步开发了单机版和网络版。单机版完全由我们自主开发,可以单机运行,可做一些定制化、个性化的程序改造;网络版是与专业化的软件团队共同开发,界面更美观,支持原件拖拽式的建模,且支持能流图分析。网络版的核心计算程序跟单机版相同,都是自主开发的全流程5个模型模块的计算程序。目前,该软件已经通过了中国软件评测中心的测试,并申请了综合能源系统规划软件的著作权。综合能源系统规划软件界面如图3所示。

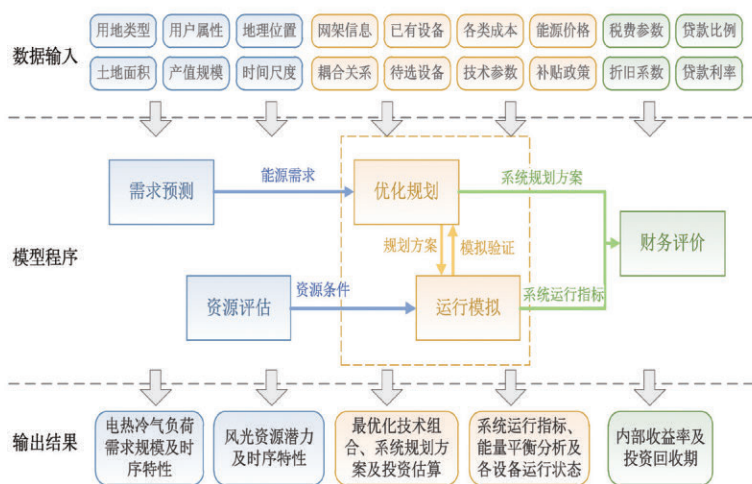


图2 综合能源系统规划软件模型功能示意

在做综合能源系统规划相关研究以及开发软件的过程中,我们参与了国家电网公司三项企业标准的编制,包括《综合能源系统规划导则》《综合能源系统设计规范》《综合能源系统规划设计评价导则》,预计2020年内会正式对外公布。

应用案例

综合能源系统规划的方法和软件,目前已经在一些地区和企业应用。如山东寨里农业园区,这是非常现代化的很有特色的一个农业园区,占地面积3 000亩,有大量的高性能大棚,这也意味着有较大的能源需求。同时还有一些其他的像办公、电商以及民

宿等。寨里园区处于基本投运阶段,已开展部分特色能源设施建设,如大棚中的空气源热泵,但尚未开展系统性的综合能源规划。基于这些情况,我们对它进行了负荷预测、资源评估和优化规划等,做了模型的输出,得到系统各类经济指标、结构指标、能效指标与环境指标,为寨里园区的综合能源合理使用提供了有效的建议和规划方案。

另外,软件应用还包括支撑江苏连云港连岛开展全流程综合能源系统规划分析,协助北京大兴国际机场开展综合能源生产模拟与扩展规划等。EA

(本文基于张宁博士在电气时代在线论坛的演讲整理而成)



图3 综合能源系统规划软件界面