

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.02.002

分布式供能系统建模优化能流逻辑思维图详解

华贲

(华南理工大学 天然气利用研究中心, 广州 510640)

摘要: 针对复杂分布式供能系统 DES/CCHP 建模优化中把不同子系统的目标函数形式上加合成为系统目标函数但其相互间并不存在关联而无法求解的问题, 给出了表述 DES/CCHP 与其各个子系统的能流关系的逻辑思维图, 指出了 DES/CCHP 包括蒸汽动力、区域供冷、区域供暖、生活热水、可再生能源发电、工业余热利用、智能微电网、天然气微网及 LNG 物流、氢能等 9 个子系统, 提出了采用分解协调优化的策略和方法; 首先对拓扑结构、设备参数、各种变量之间有可描述关系的各子系统分别建模和优化求解; 然后在各个子系统之间多次迭代协调优化, 电力是最重要的协调变量; 进而指出上图是物理模型和能流模型的集成, 但也蕴含着多种功能层次模型; 只有在多种运行/营销层次工况初步优化结果的基础上才能建立设计/决策层次模型, 并反复迭代才能获得优化结果。强调优化的直接目标是经济性, 最高能效目标来自基于科学用能原理所选择的子系统拓扑结构和参数, 碳排放最少的目标则取决于能效和一次能源的构成。上述方法已用于多个天然气 DES/CCHP 工程的规划和建设, 有重要的科学意义和实用前景。

关键词: 分布式供能系统; 建模优化; 能流图; 分解协调; 运性/设计建模迭代

中图分类号: TK07

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)02-0017-07

The Logic Modeling/Optimizing Energy Flux Chart of DES/CCHP

HUA Ben

(Natural Gas Research Center, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: For the dilemma of modeling & optimizing of DES/CCHP due to the absents of variable-interrelation among sub-systems, a logic modeling/optimizing energy flux chart of DES/CCHP is advanced, which including 9 sub-systems, that are power-system, DCS, DWS, hot water, renewable generating, SMG, gas/LNG, hydrogen, and industrial waste heat. It was pointed out that the topology structure & parameters inside a sub-systems are may be described and optimized, but not existed among different sub-systems. Therefore, a Decomposing/Coordinating strategy has been adapted and electricity is the main coordinating variable. Two main strategies are advanced: (1) Modeling & optimization was realized via optimizing and iterating among multi-operation-subsystem modeling with design modeling; (2) The direct targets of optimization was the economic benefit, high energy-efficiency target comes from sub-system decision according to the principle of "Use energy scientifically", while low carbon target depends upon energy efficiency and choosing of primal energy. Above method has been applied in design & construction of many natural gas DES/CCHP projects. Thus, it has important scientific meaning and practical prospect.

Key words: distributed-energy-system; modeling/optimization; energy-flux chart; decomposing/coordinating; iterating among multi-operation-subsystem modeling with design modeling

收稿日期: 2017-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“综合能源网规划和运行的基础理论和方法研究”(51437006)

作者简介: 华贲(1937), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 主要从事能源系统工程研究和工程开发, 包括能量系统优化、天然气利用, 分布式冷热电联供区域能源系统、低碳能源战略等(e-mail)cehuaben@scut.edu.cn。

随着能源互联网研究工作的逐步深入, 作为能源互联网基本单元的分布式供能系统(以下简称 DES/CCHP)建模优化的研究越来越多。而伴随着一次能源逐步向可再生能源转型, “多能互补”一词也开始大量应用。在部分 DES/CCHP 研究提出的目标函数中, “多能互补”表现为多种一次能源转换

的子系统目标函数的简单加和。这是一种简单化、概念化的思维陷阱。因为把实际上不存在相互关联的子项加和起来的目标函数，无论用什么方法都是得不到解的。

笔者已是耄耋之年，没有条件再协同年轻的研究生一起开展严谨、深入的研究工作。愿把基于近40年从事能量系统集成建模优化和上百个工业和建筑物节能工程项目的实践而获得的对于DES/CCHP建模优化的逻辑思维，奉献给学术界，以助一臂之力。

1 基本思路

无论是能源互联网(以下简称EI)还是分布式冷热电联供能源系统(以下简称DES/CCHP)，在能源利用的全过程中其功能都是能源转换和传输，即将各种一次能源高效、经济地转换为各个终端用户所需要的三种形式：电、热(包括冷、暖、蒸汽、热水)运输动力。基于目前的实用技术，DES/

CCHP系统中可能包括A—K等9个子系统，如图2所示。

在每个子系统内部，拓扑结构、设备参数、各种变量之间客观上存在着确定的、可描述的关系；可以写出总费用最小的目标函数关联式建模求解。其所依据或必须满足的边界条件有三类：一是各种一、二次能源的可用性和成本(包括上网电价)；二是该子系统所服务的用户对各种终端能源形式的市场价格和时变性的需求；三是子系统之间互供的能流参数。而在不同子系统之间，各自的拓扑结构、设备及其运行参数相互间并不存在相互的关联。数学形式上把它们的目标函数加合在一起作为大系统的目标函数，但实际上无法求解。

怎么办呢？只能按客观实际，采用分解协调优化的思路实现建模优化。在当前的技术条件下，各个子系统之间系统优化的最主要协调变量就是在所有子系统中都是重要参量的电。而在上一个层次，即能源互联网EI大系统中，电也是千万个DES/

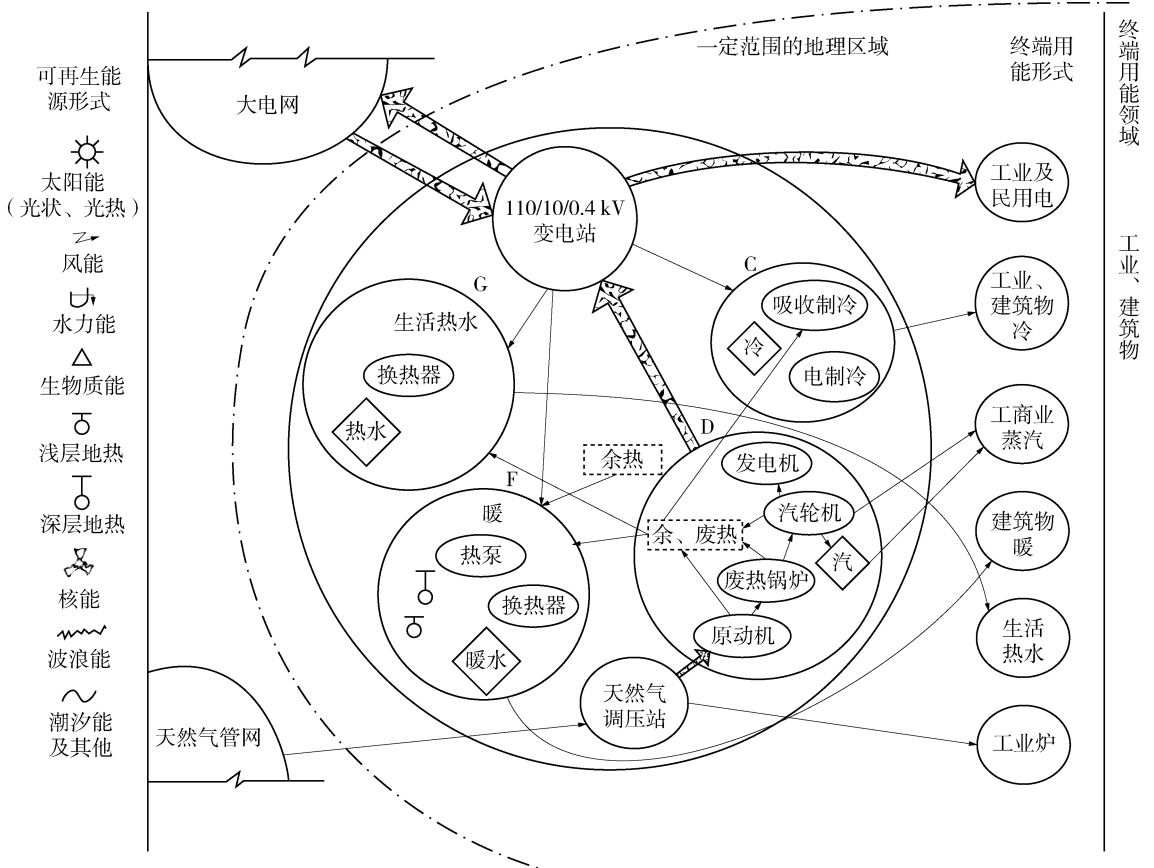


图1 目前天然气分布式供能系统建模优化能流逻辑思维图

Fig. 1 The logic modeling/optimizing energy flux chart of present natural gas DES/CCHP

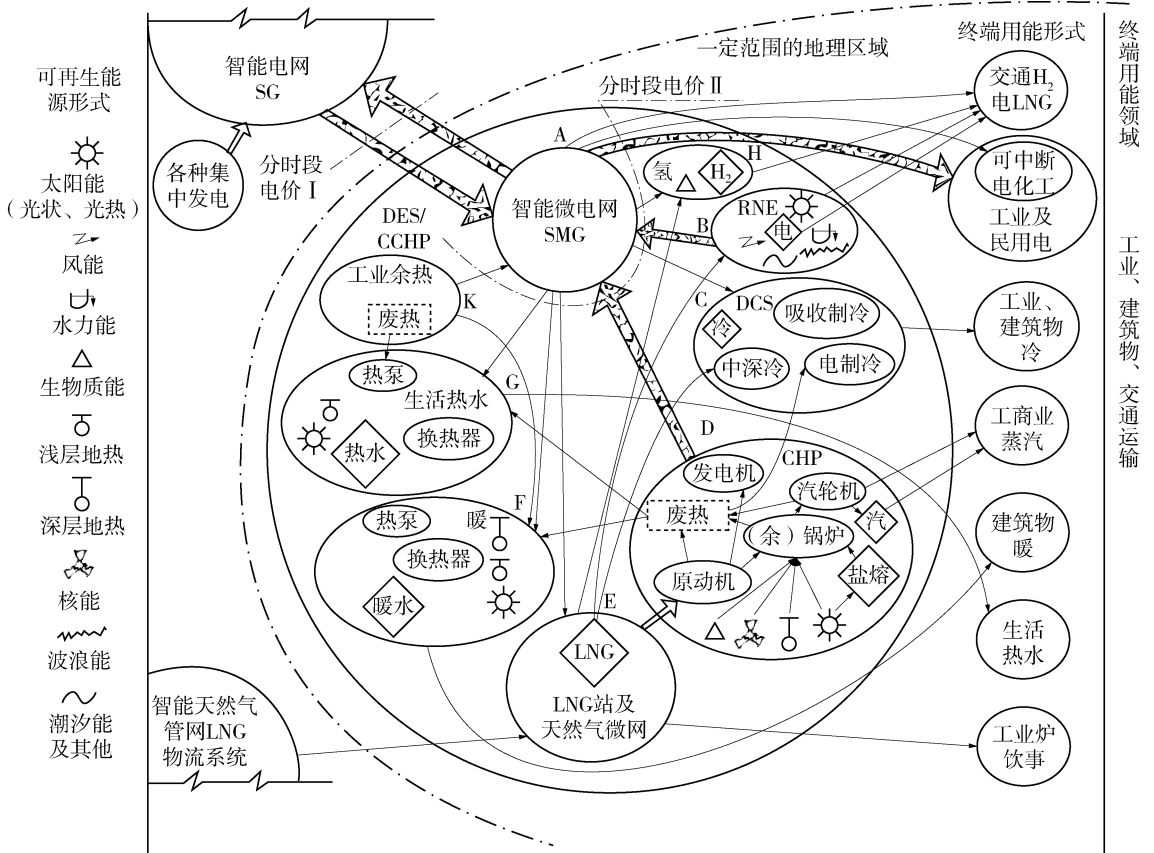


图 2 可再生能源时代分布式供能系统建模优化能流逻辑思维图

Fig. 2 The logic modeling/optimizing energy flux chart of DES/CCHP In low carbon era

CCHP 与智能电网 SG 及辅助集中发电子系统之间的协调变量。所以 SG 是 EI 中的核心子系统^[1]；同理，智能微电网 SMG 也是 DES/CCHP 之中的核心子系统。

2 复杂能源系统建模优化的逻辑思维图

图 1 是目前的区域型(服务于工业园区和大型社区)DES/CCHP 建模优化的逻辑思维图(未包括交通运输)。在 DES/CCHP 边界线内有 4 个子系统。均可分别在上述边界条件下建模优化。110/10 kV 变电站联结着各子系统所产(需)的电力；天然气由大管网通过调压站供应；这两者只是简单的传输单元，不构成子系统。在已知区域总体规划和分期分批建设规划、以及土地利用详规的前提下，按照各个用户实时需求数据，首先初步规划 4 个子系统的拓扑结构和设备选型。然后分别在上述边界条件下建模优化^[2-4]。此时一类边界条件就是上网电价(应昼夜不同)和天然气价，二类是用户对冷、

热、电、汽及热水等形式终端用能市场价格以及及时变性的数量需求，三类边界条件就是余热在子系统之间互供的价格，这是可以按照经济学方法计算的。

图 2 是未来可再生能源为主时代 EI 架构下普适的 DES/CCHP 建模优化逻辑思维图。比图 1 增加了 5 个子系统；各具体项目并非都包括所有 9 个子系统。例如以光伏为主的小型建筑物 DES/CCHP 只包括 B、C、F、G 等 4 个子系统。大型区域 DES/CCHP 才会包括 8~9 个子系统。

控制气候变化和第三次工业革命——信息化时代所要求的由化石能源向低碳可再生能源的历史性转型决定了能源转换传输系统由集中、垄断、自上而下转向分散、共享、水平多向。因为其一，可再生能源是低能量密度的、分散的；科技突破必将使大多数地区所需能源能以可再生能源就地分布式利用而满足，集中发电远程输送只是一种补充。其二，新时代要求必须高效用能；热力学规律决定，

凡是经过热力循环转化的一次能源(天然气、太阳能光热、核物质、干热岩等)都应该藉 DES/CCHP 实现高效转换。其三,冷、热、电、蒸汽都有一定的经济送距离,这决定 DES/CCHP 只能是分布式的,其范围一般不超过几十平方千米。其四,电力的实时供需平衡使得 DES/CCHP 很难孤立运行,而必须借助于 EI 中的核心 SG 实现物理上的互联^[5]。

图 1 和图 2 的说明:

1)大圆圈表示 DES/CCHP 系统的边界,可包括 A 到 K 等 9 个子系统。点划线右侧表示其所服务的一定范围,即由冷、热、电、汽等经济输送距离决定的地理区域;一般小于几十平方千米。最右侧列出工业、建筑物和交通运输三个用能领域及其 7 种终端用能形式用户。

2)图左侧以图标形式示出了 9 种形式可再生能源。各个子系统可能采用的可再生能源分别以图标表示,用以代表一次能源供入的连接线以免图上线条过于密集。左侧上端为 EI 的核心:SG;左下端为 EI 中的另一个广域网络——智能天然气管网 SGG 及 LNG 物联网。

3)子系统 A 即智能微电网 SMG 是 DES/CCHP 系统内的核心子系统,是 DES 与大智能电网 SG 以及 EI 联结的关键单元,也是所有子系统之间协调优化的平台。在可再生能源时代,半数以上的电力是在靠近用户的千万个 DES/CCHP 内产生并经由 SMG 就地供应用户的^[6]。多余部分响应大电网智能化自动示出的分时段电价,在峰段或部分平段上网售卖;而在大电网低谷电价时段停运主机,改为从大电网购入电力消费或在 B 单元储存。这些操作切换是 SMG 基于大电网分时段电价 I^[7]和系统内各种大数据,以经济效益和能效为判据进行模拟优化,进而发布分时段电价 II 引导各个子系统用电或向 SMG 供电行为的结果所做出的。

在另一种特殊状况下,即子系统 D 主机发电系统因严重故障停运时,启用备用变压器,按照协商价格从 SG 购入电力维持用电需求。

4)子系统 B 包括所有无需通过热力循环直接发电的可再生能源发电设施;从光伏、水力、风力到波浪、潮汐等等。配备相应规模的储电设施,一方面平衡产电的随机性,另一方面响应分时段电价 II 按时段向 SMG 售电。既包括大型储电设施也包括批量

可移动的电动汽车电池,后者随时可以提供给交通运输设施运用。在小规模建筑物用能系统采用子系统 D 缺乏经济竞争力时,子系统 B 是 DES 能源转换的主体。

5)子系统 D 是较大型工业园区或社区 DES/CCHP 的主力。现阶段天然气为一次能源时以燃气轮机联合循环为主体。小于 5 MW 左右则一般采用内燃机(此时余热锅炉较小)。主机(内燃机包括循环冷却水和润滑油冷却水)、汽轮机和余热锅炉的余(废)热供给子系统 C、F、或 G;电力则按电压等级不同,接入 SMG 的 110 或 10/0.38 kV 回路。当一次能源为太阳能热发电、小型核能、生物质能或深层地热、干热岩时无需原动机,热能直接在锅炉产汽进入汽轮机。汽轮机一般采用抽凝式,抽出所需压力等级的蒸汽供给用户,并可灵活调节,如无供汽时可全凝发电;若用汽户为 8 000 h/a 运行的过程工业,可设置背压式汽轮机。根据需要可设置蒸汽储存设施。在太阳能热发电时,可以设置高温热载体(熔盐)储槽,以平衡日发电的不均衡性。

6)子系统 C 是一个区域供冷系统 DCS。在制造业为主的工业园区和高住区,宜采用大型电压压缩制冷机,以便在夜间主机停运时仍能采用低谷网电制冷。必要时设置吸收制冷设施。在分时电价下蓄冷设施因具有电力和供冷负荷双调峰功能而有经济效益和节能效益。

7)子系统 E 是系统内的天然气微网和 LNG 站。天然气用作子系统 D 的燃料和子系统 H 的制氢原料,并直供高温热用户。LNG 储站可以是低温储罐,也可以是 LNG 集装箱堆场+车船用加注站。在 LNG 气化补充天然气微网时,气化过程副产的温度更低的中、深度冷量可以用于子系统 C,如制冰、冷藏设施等用。

8)子系统 F 是区域供暖系统 DWS,建模优化可使其充分利用包括深、浅层地热、太阳能和各种低品位的余热、废热,并采用热泵设施使供暖成本最低。该子系统也可设置供暖循环水储罐,以平衡不同时间段的供需变化。

9)子系统 G 是生活热水系统,提高全系统能效和经济性不可忽视。以其它子系统的低温余、废热,或浅层地热、太阳能热水器等为热源。设计关键是充分利用换热器(图中以 HE 表示)和热泵实现“能量梯级利用”,使成本最低。为平衡各种热源和

用户用水时间的不确定性，在靠近用户侧设置多个够 24 h 用的储罐以适应夜间动力机组停运。

10) 子系统 H 是在大型系统中设置的氢气制造、储存和集散系统。来源有电负荷低谷时段电解水、太阳能电解水、天然气制氢和生物质发酵制氢三种。储氢设施可为大型储罐或可移动置换的高压气瓶。

11) 子系统 K 是工业余热利用。鉴于不同余热的温位、可用量和时变性的不同，系统的建模优化的重要性和复杂性不亚于其他子系统。

温位较高者可先采用有机工质朗肯循环发电，低温位用于供热。

3 复杂 DES/CCHP 系统建模优化策略

选择最优化的拓扑结构和参数，使之能够因地制宜利用各种一次能源，经转换传输和储存，满足终端用户对电力和冷、暖、蒸汽、热水等各种形式的能源的实时变化负荷的需求，达到最高能效、最经济、最少碳排放的目标——这就是 DES/CCHP 优化的本质^[8]。

3.1 复杂大系统建模包含四个阶段

按照 973 项目“高效节能的关键科学问题”的研究成果之一——“复杂能量系统集成建模的策略方

法”的研究，复杂大系统建模应有四个阶段。物理模型，流结构模型，功能层次模型，最后才是开发软件工程实现模型^[9-13]。图 1 和图 2 是 DES/CCHP 建模的重要基础工具；既表述了物理模型，也是关键的能流结构模型；在宏观层次上进行建模优化，没有必要再分别建立详细的物流、信息流、资金流、工件流和人件流模型；虽然在目标函数中必然涉及到这些流的大量参数和数据。

3.2 能源系统也存在着三个层次、六种不同的功能

能源系统也存在着三个层次、六种不同的功能如图 3 所示。

由于终端需求的时变性和分时电价的时变性而致的季节、昼夜、工作日和假日、以及电网负荷的峰谷等种种变化，图 1 和图 2 的系统都有多种不同的运行工况，但却并没有在规划设计拓扑结构下运行，即供电、热、蒸汽、冷负荷同时为最大的工况。图 1 和图 2 所示的模型可以分别用于描述设计、运行、控制三个层次。

一个极其重要的理念是：必须在多种运行/营销工况逐一分别初步建模优化结果的基础上才能集成建立设计/决策层次上的拓扑结构和参数。反过来再来校核各个运行工况能流价格中的折旧成本，修正各工况初步优化结果。经多次反复迭代协

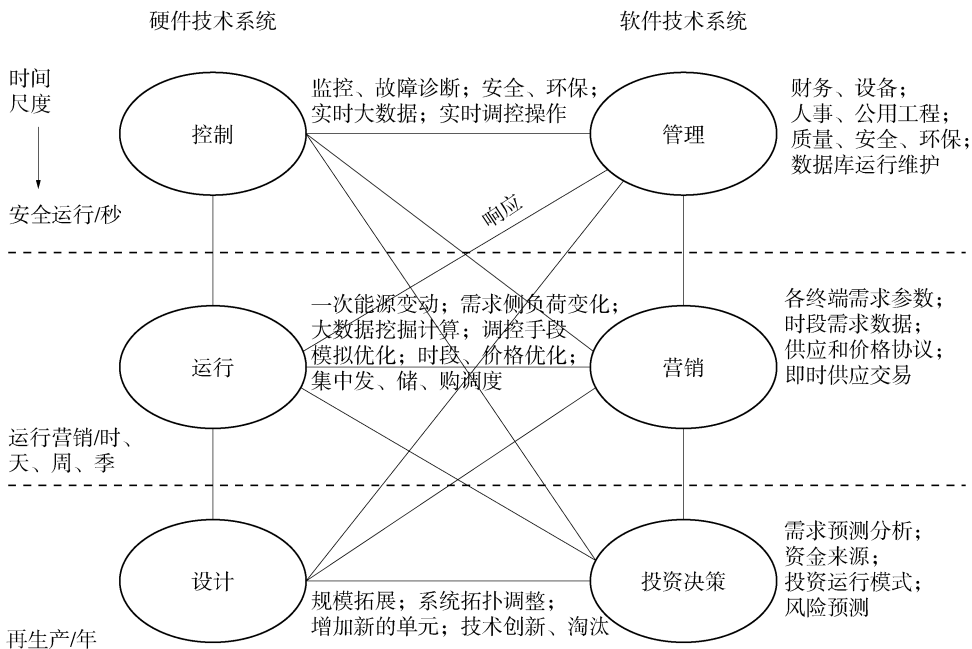


图 3 以运行营销为重点的分布式供能系统功能层次模型示意图

Fig. 3 The function/level modeling chart emphasizing operation/marketing level

调的才能获得设计、运行两个层次优化的结果。控制层次的建模优化则可基于这个结果而实现。

举建筑物 DCS 子系统为例, 空调制冷负荷率按全年运行小时数有从 0% ~ 20% 到 100% 的 6 种工况。由于 DCS 是与园区建设同步逐渐扩大的, 而且早期 DCS 投运前开始运行的企业或建筑物用户必须自建中央空调, 待 DCS 一期设施投运后再通过循环冷水向这些用户供价格较低的冷量。此时用户的末端设施仍可利用, 而主机(室外机)则将停运。DCS 运营商可以按残值价格收购用户停运的中央空调室外机, 作为系统的调峰机组。下一步按照峰谷电价和用户负荷时变数据决定是否选用蓄冷设施及其参数。在此前提下, DCS 规划设计容量不需要取 100% 的极端尖峰负荷, 而可取其 70% ~ 90%, 尖峰时段由备用机组和蓄冷释放补足; 一则降低投资, 二则提高大部分机组的年运行时数, 从而进一步降低供冷的折旧费用。由此可见只有与多个运营工况建模优化的迭代协调才能优化规划设计的设备选型和参数。

同理, 子系统 D, 特别是面向建筑物用户的系统建模更为复杂, 因为它不仅在冬、夏季都有很大的昼夜负荷差, 而且在春、秋季节, 当缺乏供冷热负荷时, 除了生活热水之外, 基本上就是联合循环发电; 因此会有 6 种基本的运行工况。建模优化将决定何种昼夜分时电价差之下它运行或停运。这将于 D 子系统, 而会涉及所有的子系统。

图 1 和图 2 中的每一条能流线在不同工况(时段)下都隐含着不同流量和价格的信息; 也包含着物理流的信息。例如电流是通过电缆传输的, 蒸汽和热水是通过管网单向传输的; 而冷、暖则是通过一个循环回路传输的。交通运输用的氢气(H₂)、LNG 和电力(无轨车)则是间歇式充装的。

3.3 DES 系统优化目标: 经济性、能效与碳排放及其间关系

3.3.1 经济性

DES 系统优化的直接目标是经济性, 目标函数是全系统整个经济寿命期内的总费用; 这包括一次投资和经济寿命期内的总运行费用(能源消耗、折旧、管理等)。优化目标就是总费用最小, 并且投

资应达到一定的内部收益率; 目前阶段需要达到 10% ~ 15%, 高于一般公用工程项目的 8% ~ 10%。这是因为目前人们迄今还拘限于传统观念, 对 DES 的认识不足, 一般的收益率难以吸引投资。

3.3.2 能效

以经济性为目标函数的建模优化并不能决定能效的高低。能效的高低取决于设计者在拟定系统拓扑结构时对“高能高用、低能低用, 温度对口、梯级利用”科学用能原则的掌握。例如, 若子系统 D 中选用天然气蒸汽锅炉补充供汽, 从热力学第一定律看效率可达 90%, 但热力学第二定律的火用效率却只有 30%, 是严重的“高能低用”。因为天然气直接供低温热而没有联产电, 就得多买网电; 而目前我国网电的总体一次能源效率(包括输变损失)只有 30% 多。耗用网电时必须按宏观效率折算一次能源, 结果能效连 30% 都不到。传统的抽 0.5 MPa 蒸汽(150 °C 左右)加热供暖水(45 ~ 60 °C)也是“高能低用”, 因为 100 °C 的传热温差意味着巨大的火用损失。天然气热水锅炉的火用效率更低, 只有 10% 左右。采用各种低温余热、废热和热泵供暖就可以节省大量的一次能源。这里能效与经济性的权衡体现为传热温差和传热面积之间的优化。

对 DES/CCHP 而言, 能效绝不是联合循环机组在设计工况下的燃料利用效率, 而是整个区域全年累计总耗费的所有一次能源转化为全部终端用能的效率, 因而是一个宏观、统计的数值^[8]。在系统所有的运行工况下都尽可能实现“梯级利用”而避免“高能低用”, 全年累计能效自然会高。对所服务的区域来说, 反映能效的宏观参数是能源强度 ε , 即单位 GDP 所消耗的一次能源最低; ε 是国家对各区域能源利用水平的考核指标。

3.3.3 碳排放

碳排放最少的目标取决于能效和一次能源的构成。反映碳排放的宏观参数是碳强度 κ , 即单位 GDP 的碳排放量。 $\omega = \kappa/\varepsilon$ 称为“能源碳强度”, 为单位能源的碳排放, 与 GDP 无关。研究指出:

$$\omega = 2.5 \cdot \gamma$$

$$= C + O + G - a \quad (1)$$

式中: C 为煤在一次能源中的分数; O 为石油在一

次能源中的分数; G 为天然气在一次能源中的分数; a 为反映 C 、 O 、 G 各自的含碳量和采用碳捕捉 (CCS) 部分占比的参量, 详见文献[14])。

由此可得:

$$\kappa = 2.5 \cdot \varepsilon \cdot \gamma \quad (2)$$

即 κ 取决于能源强度和一次能源中化石能源所占分率。 κ 是国家对区域碳排放约束、考核的指标。所以减碳的关键是降低能源强度和一次能源中煤和石油的分率。在本文图 1 中未包括交通运输, 故未显示石油应用。但是如果 DES 自发电不够, 需从网上购电, 那么就必须要考虑到目前我国 70% 的电力来自煤电, 其碳排放系数接近于 1.0; 即购入网煤电大部分来自高碳一次能源, 将推高 κ 。

碳排放最少的目标是可以部分融入经济目标来实现的, 即把碳排放与碳税或碳交易数据关联起来; 以经济代价反映碳排放的约束。

3.3.4 三者之间的关系

运用图 1 或图 2 建模优化的前提是实行科学用能和尽可能用低碳一次能源, 特别是科学用能。因为只有高效率才能降低一次能源的消耗费用, 并且提高投资回报率, 减少折旧费用; 从而获得更好的经济效益。另外, 只有高效率的千万个 DES/CCHP 全部就地利用可再生能源、发电自给、多余上网, 才能逐步减少集中的燃煤发电所占的比率, 实现绿色、低碳、可持续发展的目标。

上述方法已经用于多个天然气 DES/CCHP 工程的规划设计和建设, 具有重要的科学意义和实用前景^[15]。

4 结论

1) DES/CCHP 内部包括智能微电网、蒸汽动力、可再生能源发电等 9 个子系统, 各个子系统的拓扑结构、设备及其运行参数之间并不存在相互的关联; 所以必须采用分解协调的方法建模优化。电力是最主要的协调变量。

2) 必须在多种运行/营销工况初步优化结果的基础上, 并经过反复迭代才能建立设计/决策层次上的模型和优化结果。

3) 建模优化的直接目标是经济性, 最高能效来

自基于科学用能原理所选择的子系统拓扑结构和参数, 碳排放最少的目标则取决于能效和一次能源的构成。

参考文献:

- [1] 华贲. 分布式供能系统协同电网调峰是历史的必然 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(4): 8-12.
HUA B. Distributed energy system in coordination with peak load regulation of power system is historically inevitable [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(4): 8-12.
- [2] 华南理工大学. 广州大学城分布式能源系统规划报告 [R]. 广州: 华南理工大学, 2003.
- [3] 华南理工大学. 珠海横琴新区冷热电联供能源规划研究报告 [R]. 广州: 华南理工大学天然气利用研究中心, 2010.
- [4] 华南理工大学. 洋西新城区区域能源规划研究报告 [R]. 广州: 华南理工大学天然气利用研究中心, 2012.
- [5] HUA B. Cogitating about the hierarchy of energy internet [J]. Journal of Energy & Power Systems, will be Published in 2017.
- [6] 何勇健. 电从远方来, 还是从身边来 [EB/OL]. 2016-02-18. http://www.360doc.com/content/16/0218/07/5507330_535408616.shtml.
- [7] 冯兆丽, 茅佳佳, 温书胜, 等. 智能电网实时电价研究综述: 模型与优化方法 [J]. 工业控制计算机, 2012, 25(2): 87-90.
FENG Z L, MAO J J, WEN S S, et al. Review on real-time pricing for smart grid: models and optimization methods [J]. Industrial Control Computer, 2012, 25(2): 87-90.
- [8] 华贲. 中国分布式供能产业发展的几个问题 [J]. 中外能源, 2016, 21(7): 1-5.
- [9] HUA B. Energy optimization through energy-economic evaluation [J]. Journal of Energy Resources Technology, 1989, 111(3): 148-153.
- [10] 李萍, 周章玉, 华贲. 过程工业供应链流结构及其管理研究 [J]. 计算机与应用化学, 2004, 21(1): 88-92.
- [11] HUA B. Keynote speaking at 7th world conference on integrated design & process technology [R]. Beijing: Advances in Integrated Design & Process Technology of Energy Systems, 2005.
- [12] 罗向龙, 华贲, 张冰剑. 基于管网模拟的蒸汽动力系统多周期运行优化 [J]. 石油学报 (石油加工), 2006, 22(5): 56-62.
- [13] 华贲. 过程系统的能量综合和优化 [J]. 化工进展, 1994(3): 6-15.
- [14] 华贲. 天然气与中国能源低碳转型战略 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2015.
- [15] 华贲. 区域型分布式冷热电联供能源系统的规划设计 [J]. 中外能源, 2011, 16(3): 13-20.

(责任编辑 郑文棠)