152

基于配置-运行协同优化的分布式能源站选型与定容规划

王丹1,孟政吉1,贾宏杰1,吴琳2,杜炜2,陈宁3,王旭东4

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072;2. 国电南瑞科技股份有限公司,江苏 南京 210000;

3. 中国电力科学研究院有限公司 新能源与储能运行控制国家重点实验室,江苏 南京 210003;

4. 国网天津市电力公司,天津 300010)

摘要:对分布式能源站(DES)进行综合建模,结合规划与运行2类约束条件,从设备规划与系统运行总体经济 最优的角度,提出了一种基于混合整数线性规划的DES配置-运行协同优化方法。通过算例验证表明,提出 的方法可在考虑系统全年运行优化的基础上实现DES的选型与定容规划,减少设备配置冗余,降低系统运行 成本,并且对于复杂的规划对象具有较高的求解效率。

关键词:区域综合能源系统;分布式能源站;选型规划;定容规划;优化调度

中图分类号:TM 715;TM 73 文献标志码:A

DOI:10.16081 / j.epae.201908009

0 引言

近年来,能源生产利用带来的环境问题日益加 剧^[1],优化用能形式、大力发展清洁能源成为我国乃 至世界大多数国家的战略选择^[2]。通过多能源互补 互济解决上述问题的区域综合能源系统 RIES(Regional Integrated Energy System)成为国内外学者关 注的重点。分布式能源站 DES(Distributed Energy Station)是 RIES 中典型多能耦合的重要载体,集成了 多种能源耦合设备。作为 RIES 能源网络中的广义 节点与运营中心, DES 将用户与各能源网络紧密相 连,起到对能源管控、对负荷供能的作用。DES 的应 用推广改变了现有能源系统独立运行的传统模式, 对于优化能源结构、促进能效提升具有重要意义^[3]。

DES的快速发展与以热电联产 CHP(Combined Heat and Power)为代表的各类耦合组件以及可再 生能源技术的兴起密不可分。DES系统供用能特征 与其集成多种能源耦合设备息息相关,对其关键设 备进行合理、准确的规划,可提升资产的利用率,减 少投资冗余,进一步优化系统运行状态^[4]。DES的 规划与运行优化属于2个不同的研究方向,但二者 之间又存在联系,互相影响。规划结果可指导调度 计划的制定,运行状态又可对规划方案进行校验。 DES负荷类型多样、耦合方式复杂,为了适应众多的

收稿日期:2018-12-18;修回日期:2019-06-01

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0905000); 国家自然科学基金联合基金资助项目(U1766210);国家电 网公司总部科技项目(SGTJDK00DWJS1800232);分布式能 源与微网国际联合实验室合作项目

Project supported by the National Key R&D Program of China (2018YFB0905000), the Joint Research Fund of the National Natural Science Foundation of China(U1766210), the Science and Technology Project of SGCC(SGTJDK00DWJS1800232) and the Cooperation Program of UNILAB-DEM

运行场景,规划需要与运行相结合。规划时考虑运 行优化可以使系统充分发挥各种能源的耦合和互补 关系,为规划计算提供更加实际的运行参数,使结果 更加准确。运行优化通常以DES各组件运行状态为 对象,目标为系统运行成本最优。文献[5]提出了一 种基于3层协同优化策略的系统集成设计方案优化 冷热电联供系统运行状态,以运行成本最低为目标 的同时提升了能源的利用效率与可再生能源消纳能 力。文献[6]基于能源集线器模型,对含电转气P2G (Power to Gas)多源储能型微网系统进行日前最优 经济调度,证明考虑P2G的微网系统能够提升风电 消纳,降低系统运行成本。规划多用于解决DES中 各类能源设备的连接方法、装设容量等问题,再结合 一定的运行状态,目标为总投资和运行成本最优。 文献[7]对分布式能源CHP进行了网络接入位置以 及容量的规划,但求解过程中未考虑运行优化对规 划结果的影响。文献[8]提出一种太阳能冷热电联 供系统规划模型,建立了能源、环境、经济综合评估 的多指标评价体系,但仍基于特定运行策略优化系 统配置。文献[9-10]考虑运行、环境等多方面因素, 研究了冷热电联供综合能源站设备规划方法,文献 [9]提出一种多目标粒子群-单纯形两阶段算法规划 能源站集成设备容量,文献[10]采用上层遗传算法、 下层混合整数线性算法规划设备类型和容量,优化 系统运行调度。文献[11]研究了考虑典型日经济运 行的能源站容量配置方法,虽然其采用单层优化模 型,但受限于模型的非线性约束,仍通过自适应粒子 群优化算法进行求解。

目前,对于DES容量规划的研究较多也较为成 熟,但可以看出大多研究只考虑了设备容量配置,对 于实际工程中常涉及的同种设备多类型选取问题考 虑较少;现有考虑运行优化的规划问题,大多通过非 线性算法求解双层模型,对于复杂的优化规划问题, 受限于上下层迭代次数较多,算法易陷入局部最优, 求解速度也相对较慢。因此,本文在充分考虑系统 供用能特征以及负荷需求的情况下,将 DES 作为规 划主体,研究了一种基于混合整数线性规划的 DES 配置-运行协同优化 COCO (Coordinated Optimization of Configuration and Operation)算法,其中配置 即指设备选型与定容规划。该方法通过将能源站配 置问题转变成为相应的约束条件,添加到传统线性 运行优化模型中,构建了一种线性的和单层的 DES 选型、定容规划与运行优化统一求解模型。线性模 型不仅具有最优的规划结果,不易陷入局部最优,而 且单层算法还避免了双层算法的频繁迭代,兼具了 较高的求解效率。

本文首先对包含 CHP、热泵 HP(Heat Pump)、燃 气锅炉 GB(Gas Boiler)、可再生能源、储能在内的 DES进行综合建模分析;然后,结合规划、运行 2类 约束条件,提出了以设备投资、能源购置、运行维护、 碳税征收整体最优为目标的配置-运行协同规划方 法;最后,通过该方法实现了 DES 选型、定容规划与 系统全年运行优化的统一求解。对比仿真结果可 知,相较于一般双层规划,所提方法具有更高的求解 效率。

1 DES系统模型

1.1 DES简介

DES也称为园区能源站,其作为能源网络中的 广义节点,是一种分布在用户侧,将用户与各能源网 络紧密相连的耦合形式,是满足用户多样化用能需 求并形成区域多能互补能源系统的重要载体。DES 从结构上可以分为能源供给、能源转换、能源存储3 个主要部分,各部分由特定的能源耦合设备组成,相 互联结形成一个整体。本文研究的面向用户的DES 规划模型可用图1所示的结构描述。



从图1可以看出,该DES与配电网络、燃气网

络、区域热力网络相连,将包括电、气、可再生能源在 内的多种能源形式转化成电、热输出,能量流中待规 划确定的部分以虚线表示。考虑到本文算例中研究 对象的供能特性与用能需求,能源供给装置包含光 伏、风机;能源转换装置以供热设备为主,包含CHP、 热泵、燃气锅炉;能源存储装置包含电储能、热储能。 但是,其中各类设备的规划容量未知,并且联供设备 CHP机组有3个待选类型,供热设备热泵、燃气锅炉 分别有2个待选类型,各类型设备主要存在单位成 本以及转换效率的差异。

1.2 DES数学描述

为了对 DES 进行系统的优化规划设计,本文借助能源集线器的概念对其进行数学描述,通过矩阵 表示能源间的转换、存储和传递关系^[12],由输入(供应)端、转换端、输出(负荷)端表示,即:

$$L=CP$$
(1)

其中,**P**和L分别为能源集线器的输入和输出向量; C为耦合矩阵。

由于本文中DES结构较为复杂,包含了能源设 备间的串联结构,所以需要对能源集线器模型进行 修正,下面以图1所示的能源结构为例,按照供给、 转换、存储3个部分进行描述。

1.2.1 能源供给部分

DES的能源供给部分在配电网、燃气网络输入的基础上增加了光伏、风力发电,相当于对能源集线器输入端向量P进行修正。能量关系表示为:

$$\boldsymbol{P}_{\rm in} = \boldsymbol{P}_{\rm net} + \boldsymbol{P}_{\rm re} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{P}_{\rm in} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{\rm net}^{\rm e} \\ \boldsymbol{P}_{\rm g}^{\rm e} \\ \boldsymbol{P}_{\rm g}^{\rm e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{\rm pv} + \boldsymbol{P}_{\rm wt} \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix}$$
(3)

其中, P_{in} 、 P_{net} 、 P_{re} 分别为能源供给部分输出、能源网络输入、可再生能源输入的能量矩阵; P_{net}^{e} 、 P_{net}^{g} 分别为配电网、燃气网络的输入功率; P_{wt} 为风机出力; P_{pv} 为光伏的输出功率,其与光伏面板单位面积上接受到的辐射程度 R_{g} 有关,可通过式(4)表示^[13]。

$$P_{\rm pv} = \frac{P_{\rm rpv} R_{\beta} [1 + \beta (T_t - T_r)]}{R_r}$$

$$\tag{4}$$

其中, P_{m} 为光伏的额定输出功率; β 为功率温度系数; T_t 、 T_r 分别为t时刻光伏设备温度和标准环境下的参考温度; R_t 为标准环境下的光照强度。

风机出力大小 P_{wt} 与风速v相关,可通过式(5) 表示^[14]。

$$P_{\rm wt} = \begin{cases} 0 & v < V_{\rm c} \\ \frac{1}{2} C_{\rm wt} \rho A_{\rm wt} v^3 & V_{\rm c} \le v < V_{\rm r} \\ P_{\rm wt}^{\rm r} & V_{\rm r} \le v < V_{\rm f} \\ 0 & v \ge V_{\rm f} \end{cases}$$
(5)

其中,*C*_{wt}为风机效率;ρ为空气密度;*A*_{wt}为风机叶片 扫过面积在与风速垂直平面上的投影;*P*^r_{wt}为风机额 定功率;*V_e*、*V_f*、*V_f*分别为风机的切入风速、额定风速和切出风速。

1.2.2 能源转换部分

能源转换部分通过调度 CHP 机组、热泵、燃气 锅炉的出力将能源供给部分输入的电、气转换成电、 热输出,可通过式(6)表示。

$$C_{\text{tran}} = \begin{bmatrix} 1 - \lambda_{1} & \mu_{1} \eta_{\text{CHP}}^{\text{e}} \\ \lambda_{1} \eta_{\text{HP}}^{\text{h}} & \mu_{1} \eta_{\text{CHP}}^{\text{h}} + \mu_{2} \eta_{\text{CB}}^{\text{h}} \\ 0 & 1 - (\mu_{1} + \mu_{2}) \end{bmatrix}$$
(6)

其中, *C*_{tran}为能源转换部分的转换矩阵; λ₁为热泵消 耗电能占电能供给部分的比例;μ₁、μ₂分别为 CHP 机组、燃气锅炉消耗天然气占天然气供给部分的比 例。其中 CHP 机组、热泵、燃气锅炉具体能量关系和 转换效率参数定义可参见文献[15],这里不再赘述。 1.2.3 能源存储部分

能源存储部分与负荷直接相连,可以当作对输 出(负荷)端的修正:

$$L_{\text{out}} = L_{\text{load}} - P_{\text{store}}$$
(7)

$$\boldsymbol{L}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{L}_{\text{load}}^{\text{e}} \\ \boldsymbol{L}_{\text{load}}^{\text{h}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{\text{ch}}^{\text{e}} - \boldsymbol{P}_{\text{ch}}^{\text{e}} \\ \boldsymbol{P}_{\text{dch}}^{\text{h}} - \boldsymbol{P}_{\text{ch}}^{\text{h}} \\ \boldsymbol{L}_{\text{gasd}}^{\text{g}} \end{bmatrix}$$
(8)

其中, L_{out} 、 L_{load} 分别为能源存储部分的输出矩阵和负荷矩阵; $L_{\text{load}}^{\text{e}}$ 、 $L_{\text{load}}^{\text{h}}$ 分别为电、热、气负荷(本文所研究模型中气负荷为0); P_{store} 为储能功率矩阵,由电储能和热储能两部分组成,其充放能关系可通过式(9)表示^[15]。

$$W(t+1) = (1 - \delta_{de}^{s}) W(t) + \left(\eta_{ch}^{s} P_{ch}^{s}(t) - \frac{P_{dch}^{s}(t)}{\eta_{dch}^{s}}\right) \Delta t \quad (9)$$

其中,上标S表示电储能或热储能;W(t)为储能在t时刻存储的能量; δ^{s}_{de} 为储能的自损耗系数; $\eta^{s}_{de}, \eta^{s}_{de}$ 分别为储能的充能、放能效率; $P^{s}_{ch}(t), P^{s}_{deh}(t)$ 分别为储能在t时刻充能功率和放能功率。

将上述三部分能量方程联立、变形可以得到基 于能源集线器的DES模型,表达式为:

$$L_{\text{load}} - P_{\text{store}} = C_{\text{tran}} (P_{\text{net}} + P_{\text{re}})$$
(10)

通过该模型可以实现 DES 的统一建模,针对不同的规划结果,只需改变矩阵中不同位置的参数即可实现对模型的修改。

2 DES的COCO方法

COCO方法是一种适用于 DES 设备选型、定容 规划与运行优化统一求解的方法。通过将能源站设 备规划问题转变成为相应的决策变量、约束条件,并 整合规划、运行两部分目标函数实现设备选型、定容 配置与系统运行优化的单层线性求解。考虑到本文 研究的是 DES 选型与定容优化规划问题,进行了以 下的假设:待规划 DES 已确定配电网、配气网的连接 位置;DES能源输入功率能够满足配电网、配气网安 全约束。

2.1 目标函数

本文以 DES 设备投资成本 C_{inv} 与规划年运行成本 C_{over} 总体最小为规划目标,目标函数为:

$$C_{\text{cost}} = \min(C_{\text{inv}} + C_{\text{oper}})$$
(11)

2.1.1 设备投资成本

$$\begin{cases} C_{\text{inv}} = \sum f_{\text{CAP}i}^{s} \omega_{i}^{s,\text{inv}} R\\ R = \frac{r(1+r)^{T_{i}}}{(1+r)^{T_{i}} - 1} \end{cases}$$
(12)

其中, $f_{CAPi}^{s}\omega_{i}^{s,inv}$ 分别为第s种类型设备i的规划容量 和单位容量成本;R为设备的折旧系数;r为设备的 折旧率; T_{i} 为设备i使用年限。

2.1.2 规划年运行成本

规划年运行成本包含设备能源购置成本 C_{e} 、设备运行维护成本 C_{m} 和等值碳税成本 C_{e} ,运行部分目标函数为:

$$C_{\rm oper} = C_{\rm c} + C_{\rm m} + C_{\rm e} \tag{13}$$

(1)设备能源购置成本。

能源购置成本包含购电与购气成本,具体如下: $C_{c} = \sum P_{net}^{k}(t) \pi^{k}$ (14)

其中, $P_{net}^{k}(t)$ 为t时刻电力或天然气的能源消耗功率; π^{k} 为能源k的单位耗量成本,k表示电或天然气。

(2)设备运行维护成本。

$$C_{\rm m} = \sum P_i^s(t) \,\omega_i^{s,\rm m} \tag{15}$$

其中, $P_i^s(t)$ 为第s种类型设备i的输出功率; ω_i^{sm} 为设备i第s种类型的单位功率运行维护成本。

(3)等值碳税成本。

本文通过等值碳税成本表示环境成本,具体 如下:

$$C_{\rm e} = \sum \left(\frac{E_{\rm grid}}{\eta_{\rm grid}} P_{\rm net}^{\rm e}(t) + E_{\rm gas} P_{\rm net}^{\rm g}(t) \right) \omega^{\rm Ctax} \quad (16)$$

其中, E_{grid} 、 E_{gas} 分别为传统发电厂和天然气的单位产能 CO₂排放; η_{grid} 为配电网的传输效率; ω^{Ctax} 为等值 碳税。

2.2 约束条件

2.2.1 规划类约束

DES设备定容的同时考虑设备的选型会增加规 划问题的复杂度,规划类约束的设定可以仅通过变 量与约束的配合,起到限制设备配置容量、选择设备 装设类型的作用。

(1)设备投运约束。

$$\chi_i f_{CAPi_min} \leq f_{CAPi} \leq \chi_i f_{CAPi_max}$$
 (17)
其中, $\chi_i \in \{1,0\}$ 为设备*i*投运系数,1表示非选型设
备被投运,0表示未被投运; f_{CAPi} 为各类规划设备*i*的

154

规划容量; f_{CAPi_max} 、 f_{CAPi_min} 分别为容量的上限和下限。 (2)设备选型约束。

$$\delta_i^s f_{\text{CAP}i_\min} \leq f_{\text{CAP}i} \leq \delta_i^s f_{\text{CAP}i_\max}$$
(18)

 $\delta_i^1 + \delta_i^2 + \dots + \delta_i^i = 1 或 \delta_i^1 + \delta_i^2 + \dots + \delta_i^i \leq 1$ (19) 其中, $\delta_i^i \in \{1, 0\}$ 为设备 *i* 第 *s* 种类型的选型系数, 1 表示设备 *i* 的第 *s* 种类型被选择, 0 表示未被选择。 每种选型系数相加等于1可使设备*i* 有且仅选择 一种类型, 小于等于1可使设备*i* 最多选择一种 类型。

(3)设备定容约束。

为了实现设备容量配置,又满足系统线性特征, 同时实现规划与运行优化间的相互作用,需要设置 定容约束,使得设备运行功率不能超过其规划容 量,即:

$$P_{i \max}^{s,k} = f_{\text{CAP}i} \tag{20}$$

其中,P^{s,k}_{i max}为所有设备的运行功率上限。

2.2.2 运行类约束

DES运行约束主要包含了功率平衡约束、各设 备运行安全约束等。

(1)功率平衡约束。

借助式(10)可以化简得到电、热、气各能量子系 统存在以下的能量平衡,通过运行功率可以表示为:

$$L_{\text{load}}^{\text{e}} + P_{\text{ch}}^{\text{e}} - P_{\text{dch}}^{\text{e}} = P_{\text{net}}^{\text{e}} + P_{\text{pv}} + P_{\text{wt}} - P_{\text{HP}}^{\text{e}}$$
(21)

$$L_{\text{load}}^{\text{h}} + P_{\text{ch}}^{\text{h}} - P_{\text{dch}}^{\text{h}} = P_{\text{CHP}}^{\text{h}} + P_{\text{GB}}^{\text{h}} + P_{\text{HP}}^{\text{h}}$$
(22)

$$L_{\text{load}}^{g} = P_{\text{net}}^{g} - P_{\text{CHP}}^{g} - P_{\text{GB}}^{g}$$
(23)

令 *P*^{*i*} 为设备*i* 对于能源 *q* 总共的输入或输出功率,*q* 表示电、气或热,与能源设备类型有关,即待选型设备 *P*^{*i*} 的值由各类型求和表示,如式(24)所示。

$$P_i^q = \sum P_i^{s,q} \tag{24}$$

(2)能源网络功率约束。

考虑到能源网络运行可靠性与安全性,需要对 其与DES接口网络设置功率约束:

$$0 \le P_{\text{net}}^k \le P_{\text{net max}}^k \tag{25}$$

其中,P^k_{net max}为能源网络k的传输功率上限。

(3)CHP机组运行约束。

CHP 机组运行约束包含了 CHP 的出力约束以 及爬坡率约束,分别为:

$$P_{\text{CHP}_{\text{min}}}^{s,d} \leq P_{\text{CHP}}^{s,d} \leq P_{\text{CHP}_{\text{max}}}^{s,d}$$
(26)

$$\Delta R_{\text{CHP}-\text{min}}^{\text{chP}-\text{min}} \leqslant \Delta P_{\text{CHP}}^{\text{chP}} \leqslant \Delta R_{\text{CHP}-\text{max}}^{\text{chP}-\text{max}}$$
(27)

其中, $P_{CHP}^{s,d}$, $P_{CHP_{max}}^{s,d}$, $P_{CHP_{min}}^{s,d}$ 分别为第s种类型CHP机 组的运行功率及其上限和下限,d表示电或者热; $\Delta P_{CHP}^{s,d}$, $\Delta R_{CHP_{max}}^{s,d}$, $\Delta R_{CHP_{min}}^{s,d}$ 分别为第s种 CHP机组的 电、热输出功率变化量及其爬坡率的上限和下限。

(4)热泵、燃气锅炉运行约束。

热泵、燃气锅炉运行约束主要是设备的出力约 束,即:

$$P_{i_\min}^{s,h} \leq P_i^{s,h} \leq P_{i_\max}^{s,h}$$
(28)

其中, $P_i^{s,h}$ 、 $P_{i_{max}}^{s,h}$ 、 $P_{i_{min}}^{s,h}$ 分别为第s种类型热泵、燃气锅 炉的运行功率及其上限和下限。

(5)储能设备运行约束。

本文设置了电储能的充放电功率约束,同时借助荷电状态SOC(State Of Charge)模型对电储能约束条件进行表述。考虑到过度充放电会降低电储能的寿命,其SOC应该被限制在一定的范围内:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ch}^{e} \leq x_{c}^{ch} P_{e,max}^{ch} \\ 0 \leq P_{dch}^{e} \leq x_{c}^{dch} P_{e,max}^{dch} \\ 0 \leq x_{c}^{ch} + x_{e}^{dch} \leq 1 \\ SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \end{cases}$$
(29)

其中, $P_{e,\max}^{ch}$, $P_{e,\max}^{dh}$ 分别为蓄电池充、放电功率上限, 蓄电池充放电功率约束即表示蓄电池SOC的爬坡率 约束; x_e^{ch} , x_e^{dch} 分别为电储能的充、放电0-1状态变 量,取1时表示电储能处于充电状态,取0时则相反, x_e^{dch} 与之类似;SOC(t)为蓄电池在t时刻的SOC; SOC_{min}、SOC_{max}为蓄电池的充放电深度,即分别为 SOC下、上限。

相较于电储能,热储能约束较为简单,本文仅考虑输入、输出功率约束:

其中, $P_{h_{max}}^{ch}$, $P_{h_{max}}^{dch}$ 分别为热储能充、放热功率上限; x_{h}^{ch} , x_{h}^{dch} 分别为热储能的蓄热、放热0-1状态变量, x_{h}^{ch} 取1时表示热储能处于蓄热状态,取0时则相反, x_{h}^{dch} 与之类似。

2.3 算法求解

不同于一般的规划、运行优化双层求解思路, COCO算法是在传统运行优化模型的基础上,增设 规划类决策变量与约束条件,实现设备选型、定容规 划与运行优化统一求解,属于单层优化。通过式 (11)—(30)可以看出,该方法建立的模型中涉及的 所有目标函数、约束条件均为决策变量与等式、不等 式构成的线性公式,其中整数决策变量为式(17)— (20)中的投运、选型系数、各设备规划容量及式(29) 和式(30)中的储能状态变量,连续型决策变量为式 (21)—(30)中各设备的运行出力。其求解模型可以 表示为:

$$\begin{cases} \min f_{inv}(\boldsymbol{x}) + f_{oper}(\boldsymbol{y}) \\ \text{s.t.} \quad \boldsymbol{h}_{inv}(\boldsymbol{x}) = 0 \\ \boldsymbol{g}_{inv}(\boldsymbol{x}) \leq 0 \\ \boldsymbol{h}_{DES}(\boldsymbol{y}) = 0 \\ \boldsymbol{g}_{oper}(\boldsymbol{y}) \leq 0 \end{cases}$$
(31)

其中, $f_{inv}(\mathbf{x})$ 、 $f_{oper}(\mathbf{y})$ 分别为运行、规划部分目标函数; $h_{inv}(\mathbf{x})$ 、 $g_{oper}(\mathbf{y})$ 分别为规划类约束中的

等式、不等式约束及运行约束;h_{DES}(y)为DES能量 流平衡方程;x为规划决策变量(设备安装容量及选 型投运系数);y为运行决策变量(设备运行输入输 出功率)。通过总结得到,COCO算法与一般双层规 划算法的区别如表1所示。

表1 COCO算法与一般双层规划算法区别

 Table 1
 Difference between COCO algorithm and general bi-level planning algorithm

类别	COCO 算法	一般双层规划算法[13,16-17]
基本属性	单层线性模型	双层非线性模型
建模方式	运行模型增设规划类 决策变量与约束	规划与运行分别建模
规划运行 关系	运行嵌套规划 协同求解	规划、运行依序 迭代求解
求解方式	混合整数线性求解	非线性算法、 智能算法求解
求解特征	线性模型求解快、 精度高,可解决包含 较多变量、约束的问题	非线性模型求解较慢、 收敛性较差,适用于包含 较少变量、约束的问题

本文借助YALMIP求解器调用CPLEX在软件 MATLAB中对所提模型进行仿真和求解,求解算法 为CPLEX自带的经典分支定界法,对于混合整数线 性化问题,该方法具有较高的求解效率^[18]。求解流 程可主要分为以下的3个阶段,流程图如附录中图 A1所示。

(1)参数输入阶段:输入DES负荷信息、可再生 能源信息、待规划设备信息以及能源价格等信息。

(2)综合建模阶段:分析 DES 系统特征,建立求 解目标函数与规划、运行约束;依据规划需求设定各 设备规划所需决策变量,依据运行需求设定各设备 运行所需决策变量。

(3)算法求解阶段:借助于规划、运行2类约束 条件的限制,实现目标函数下各决策变量的取值,完 成规划与运行优化的统一求解。本阶段算法求解流 程可描述为:首先不考虑规划部分整数约束,求解原 模型的松弛问题,若最优解中规划变量刚好是整数 变量,则该值为混合整数优化的最优解,输出优化规 划结果;否则通过分支定界法求解可行解集,再将可 行解集不断切割、细分,直至得到满足整数约束的最 优解。

3 算例分析

3.1 算例描述

本文算例以北方某工业园区为规划对象,园区 主要从事材料加工产业,负荷以电、热负荷为主。针 对其供能特征与用能需求,选取了如图1所示的 DES进行选型与定容规划设计。其中,CHP、热泵、 燃气锅炉为待选型定容设备;光伏、风机、电/热储 能为待定容设备。同时,借助附录中图A2、A3给出 的园区电、热负荷以及可再生能源特性曲线进行小时级等值年运行优化调度。

本文所涉及的各种待定设备参数信息由附录中 表A1—A3给出^[19-21],考虑到多设备联合供能可使园 区生产更为可靠,设备规划容量按电负荷最大值设定 为300 kW,结合实际安装环境,设可再生能源装机容 量为100 kW。设置分时电价中峰时(08:00—10:00 和18:00—22:00)、平时(07:00和11:00—17:00)、 谷时(01:00—06:00和23:00—24:00)电价分别为 0.9640、0.6785、0.4090元/(kW·h),天然气价格折 合成单位热值价格为0.34元/(kW·h)。电网的线损 率取7%, ω^{Clax} =0.3元/kg^[20]。燃煤电厂、天然气燃 烧CO₂排放系数分别为0.80、0.19 kg/(kW·h)^[20]。

3.2 算例分析

通过规划求解,可以在既满足系统不同种类的 供用能需求又实现经济性的情况下,得到DES选型 与定容规划以及系统全年运行优化调度结果。求解 得到的规划与运行优化综合成本如下:投资成本、购 电成本、购气成本、运行维护成本、环境成本、总成本 分别为42.35、39.36、53.07、2.28、25.53、163.24万元。 可以看出,求解结果中包含购电、购气、运维、环境多 项的等值年运行成本,比投资成本占总成本比重大, 导致以能源价格主导的各类运行因素对优化规划结 果存在较大影响。如能源价格会影响能源耦合方式 的优选,DES倾向于首先选取某时段经济性高的能 源形式;同时,不同能源利用形式又将影响能源设备 的选择,从而影响规划结果。

DES具体的选型与定容规划结果如表2所示。可见CHP选择了效率较高的3型CHP机组,规划容量为197kW;而燃气锅炉和热泵部分分别选择了价格相对较低的1型燃气锅炉和空气源热泵机组,容量达到了300kW和290kW;另外,光伏、风机虽然造价很高,但由于不存在消耗与环境成本,规划容量均达到了100kW,这表明DES倾向于可再生能源的最大化利用;储能部分作为协调可再生能源的消纳以及利用削峰填谷提升系统经济性的关键设备,也得到了充分规划,但由于电储能单位成本较高,使用年限较短,相较热储能规划容量较低。

根据本文提出的模型,得到的等值年运行优化

表2 DES规划结果

Table 2	Planning resul	ts of DES
类别	规划类型	规划容量
CHP机组	3型CHP机组	197 kW
燃气锅炉	1型燃气锅炉	300 kW
热泵	空气源热泵	290 kW
光伏	—	100 kW
风机	—	100 kW
电储能	_	234 kW \cdot h
热储能	_	300 kW • h

调度结果如图2、3所示。从整体趋势上而言,由于 天然气价格大多时段比电价占优(除谷时电价之 外),且CHP机组能同时产生电、热能,能源综合利 用率较高、经济性较高,成为了电、热负荷的主要供 能设备。但由于受分时电价影响以及CHP机组容 量、运行状态的限制,CHP机组不能独自实现能源的 最优利用,也不能完全供应负荷高峰时全部的能源 需求,因此需要电网或其他设备择优进行补充,相互 协调。具体地,光伏、风机、CHP机组以及电网协同 供应电能,电储能调节充放配合系统优化运行。在 电能供应顺序上,由于光伏、风机等可再生能源在运 行过程中仅存在设备运行维护成本,其在经济、环境 成本上占优,因此规划结果中成为首选供应设备。 但受限于环境因素与容量的限制,难以满足全部电 力负荷的需求,剩余部分需要CHP、电网等进行补 充,其供应情况如图2所示。结合CHP供电曲线可 以看出,受能源价格影响,电网主要在CHP出力达 到上限或出力较小时配合供电,特别是在夏季和秋 季3700-6500h时段(此时CHP出力较低),电网 出力较大,用于补充较高的电力需求。

对电储能设备制定优化充放策略,可以对系统



 $\overline{\mathcal{H}} \cdot (k W \cdot h)^{-1}]$



整体电能供应进行调节,其运行状态主要与风机、光 伏出力以及分时电价有关。一方面,如图2(b)所 示,当秋季、冬季风机出力较大或夏季光伏出力较大 时,可再生能源能够完全满足电力需求,其富余部分 可以通过电储能充放进行协调(如11:00-22:00), 既减少其他能源的消耗,又提升了整体系统对光伏、 风机消纳能力。另一方面,如图2(c)所示,由于夜晚 负荷较少时电价也较低,白天电价较高时负荷较多, 因此电储能可以在夜间负荷低谷时存储低价电能, 白天负荷高峰时放电,充分利用夜间电价优势,与电 网出力相互协调,提升供电经济性。

热负荷主要通过热泵、CHP、燃气锅炉供应,热 储能与之配合实现最优运行。以冬季某天系统供热 情况为例,得到的结果如图3(b)所示。为描述热负 荷与各设备出力的关系,图3(b)中热储能运行状态 为负时表示蓄热,为正时表示放热。当夜间热力需 求不高,并且购电价格低于购气价格时(如23:00至 次日06:00),首先通过热泵进行供热,且在夜间电价 较低时热储能蓄热。相反白天热力需求增多时,电 价较高,天然气价格较低(如13:00-21:00),且CHP 机组同时供应电、热能,相比燃气锅炉运行更为经 济,因此优先选择CHP机组进行供热,热储能与其 配合。热泵比燃气锅炉具有更高的产热效率,消耗 同样成本的能源能够产生更多的热能,所以若CHP 机组出力达到上限仍不能满足热力需求,热泵首先 投运补充热能供应(如07:00-12:00、22:00),若仍 不能满足需求,再由燃气锅炉进行补充(如07:00)。 需要注意的是,在3600-6300h时段,热力需求基 本维持在50kW,但此时段CHP机组仍然持续保持 了峰值100kW左右的供热出力,CHP供热出力大于 热力需求,如图3(a)中CHP供热功率所示。这是由 于CHP机组具有一定的热电比,产生电能的同时也 会产生相应的热能,由于分时电价的影响,CHP机组 尽可能在电价高时运行以减少购电成本,此时多余 部分的热能则通过热储能蓄放热进行协调,实现热 电解耦最优运行,即热储能配合CHP机组协调运 行,如图3(c)所示。图中,热储能运行状态为正时表 示蓄热,为负时表示放热。综合以上分析可以看出, 电、热储能对于 DES 实现能源间的协调调度及系统 最优运行起到了支撑作用,这也是规划结果中热储 能容量达到上限的原因之一。

158

为了分析 DES集成多类型能源耦合设备协调供能的优势,对2种场景进行对比研究。其中,场景 A 为电、气、热分立运行系统的数据分析,电网供电,1 型燃气锅炉供热,结构如附录中图 A4 所示。场景 B 为图1所示 DES 的多能协同系统的数据分析。

表3为不同场景下优化结果对比。由于场景 B 中 DES 的规划提高了可再生能源的消纳水平,并促 进了以 CHP 机组为主导的各类能源耦合单元的协 同运行,电网购电量显著降低,清洁能源和天然气购 气量明显提高,系统能源利用形式得到良好改善。

表3 不同场景下优化结果对比

Table 3 Comparison of optimization results under different scenes

different scenes						
场景	购电量 / (kW・h)	购气量 / (kW・h)	投资 费用 / 万元	购电购气 费用 / 万元	环境 费用 / 万元	总费 用 / 万元
Α	135.1	127.1	3.4	148.6	42.1	196.4
В	64.5	156.7	42.4	92.4	25.5	163.2

虽然场景 B 中增加了 DES 的建设投资成本,但 场景 A 系统运行成本显著高于场景 B,如图4所示。 图中夏季出现了4个运行成本高峰段,这是由于这 些时段电力需求较高、电网出力较大、购电成本较高 所致。



场景A的分立运行系统,供能设备独立且出力 固定,缺少供能设备间的合理配合,而在场景B的多 能互补条件下,各供能设备实现深度耦合,通过协同 调度满足热、电负荷需求,使得系统成本大幅降低。 通过计算可知,相比于场景A,场景B购电购气成本 降低了约37.8%。同时,可再生能源与清洁能源的 充分利用也使得环境成本降低了约39.4%,因此在 区域综合能源系统中,合理规划布置DES进行多能 供应,可以获得更好的经济与环境效益。

为体现 COCO 算法在模型求解方面的优势,在 上述 2种场景下,对 COCO 算法与双层规划算法的求 解结果与计算时间进行对比。一般情况下,双层规 划算法上层确定能源站设备类型、容量、连接拓扑 等,下层基于上层规划结果进行运行优化,规划、运 行依序迭代求解。基于上述模型结构,本文双层规 划模型上层选择粒子群优化算法,下层选择 CPLEX 算法。基于 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1620 V2 CPU@3.70 GHz 计算机,在 MATLAB 2016环境下进 行求解,结果如表4所示。可以看出,由于 COCO 算 法求解的是线性模型,在 2种场景下采用 COCO 算法 的计算时间具有显著优势。

表4 COCO算法与双层规划算法的计算时间对比

 Table 4
 Comparison of calculation time between COCO

algorithm and bi-level planning algorithm					
忆星	总成本 / 万元		计算时间 / s		
切京	COCO算法	双层规划算法	COCO算法	双层规划算法	
А	196.4	196.4	3.1	97.3	
В	163.2	164.2	70.5	2682.8	

对于模型较为简单的场景A,COCO算法与传统 双层规划算法结果一致,但双层规划算法计算时间 较长。对于模型较为复杂的场景B,多种设备选型 定容导致整数优化变量增多,多种设备运行调度场 景显著增加了约束条件的数量。双层规划算法需要 进行多次层迭代,消耗大量计算时间,而COCO算法 由于采用了线性化单层模型,不仅能得到更经济的 规划结果,而且显著提高了计算效率。

4 结论

针对 DES 选型与定容规划问题,本文首先借助 能源集线器概念建立了适用于规划的 DES 模型;其 次,通过将规划问题转变成为相应的约束条件,添加 到传统运行优化模型中,提出了一种基于混合整数 线性规划的 DES COCO 方法。结果表明:①规划与 运行协同优化可以使规划算法充分考虑多运行场景 中多能源耦合和互补特性,使得规划方案更具适应 性;②考虑设备合理选型可使规划结果更进一步适 应系统供用能特征,减少设备配置冗余;③线性单层 规划算法避免了传统双层规划算法繁琐迭代陷入局 部最优的隐患,具有较高求解效率。

后续研究将在现有规划方法基础上,考虑电动 汽车、柔性负荷等用户侧可调资源接入能源站或者 多能网络的情况,研究分析能源系统供需双侧互动、 不确定性因素等特征对系统或者能源站规划方案的 影响;在充分考虑多能源站区域系统运行特性的基 础上,研究不同特性的能源站之间协同规划的方案。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]洪居华,刘俊勇,向月,等.城市能源互联网初步认识与研究展望[J].电力自动化设备,2017,37(6):15-25.
 HONG Juhua, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. Preliminary understanding and research prospect of urban energy internet [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):15-25.
- [2] 邓建玲. 能源互联网的概念及发展模式[J]. 电力自动化设备, 2016,36(3):1-5.
 DENG Jianling. Concept of energy internet and its development modes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 1-5.
- [3] 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 steadystate analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12):3292-3305.

- [4]别朝红,王旭,胡源. 能源互联网规划研究综述及展望[J].中 国电机工程学报,2017,37(22):6445-6462.
 BIE Zhaohong,WANG Xu,HU Yuan. Review and prospect of planning of energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 (22):6445-6462.
- [5] ZENG Q, ZHANG B, FANG J, et al. A bi-level programming for multistage co-expansion planning of the integrated gas and electricity system[J]. Applied Energy, 2017, 200: 192-203.
- [6]陈沼宇,王丹,贾宏杰,等.考虑P2G多源储能型微网日前最优 经济调度策略研究[J].中国电机工程学报,2017,37(11):13-23,308.

CHEN Zhaoyu, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Research on optimal day-ahead economic dispatching strategy for microgrid considering P2G and multi-source energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11):13-23, 308.

[7] ZHANG X, 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.

- [8] 吴红斌,王东旭,刘星月.太阳能冷热电联供系统的策略评估和优化配置[J].电力系统自动化,2015,39(21):46-51.
 WU Hongbin,WANG Dongxu,LIU Xingyue. Strategies evaluation and optimal allocation of combined cooling heating and power system with solar[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21):46-51.
- [9]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.
- [10] GUO L,LIU W,CAI J,et al. 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.
- [11] 刘泽健,杨苹,许志荣.考虑典型日经济运行的综合能源系统 容量配置[J].电力建设,2017,38(12):51-59.
 LIU Zejian, YANG Ping, XU Zhirong. Capacity allocation of integrated energy system considering typical day economic operation
 [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(12):51-59.
- [12] 郝然,艾芊,朱字超,等.基于能源集线器的区域综合能源系统 分层优化调度[J].电力自动化设备,2017,37(6):171-178.
 HAO Ran, AI Qian, ZHU Yuchao, et al. Hierarchical optimal dispatch based on energy hub for regional integrated energy system
 [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):171-178.
- [13] HONG B, CHEN J, ZHANG W, et al. Integrated energy system planning at modular regional-user level based on a two-layer bus structure[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4 (2):188-196.
- [14] ZHENG Y, JENKINS B M, KORNBLUTH K, et al. Optimization under uncertainty of a biomass-integrated renewable energy microgrid with energy storage [J]. Renewable Energy, 2018, 123: 204-217.
- [15] SALIMI M, GHASEMI H, ADELPOUR M, et al. Optimal planning of energy hubs in interconnected energy systems: a case study for natural gas and electricity[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(8):695-707.
- [16] 许志恒,张勇军,陈泽兴,等.考虑运行策略和投资主体利益的 电转气容量双层优化配置[J].电力系统自动化,2018,42 (13):76-84.

XU Zhiheng, ZHANG Yongjun, CHEN Zexing, et al. Bi-level optimal capacity configuration for power to gas facilities considering operation strategy and investment subject benefit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13):76-84.

[17] 郑恩泽,顾洁,刘波,等.基于双层优化模型的多能互补微网储 能优化配置[J].电气自动化,2017,39(3):45-48.
ZHENG Enze, GU Jie, LIU Bo, et al. Optimal configuration of energy storage for multi-energy complementary micro-grids based on a bi-level optimization model[J]. Electrical Automation, 2017, 39(3):45-48.

- [18] 蒋争明,关青苗. 基于 CPLEX 和 C++语言求解优化问题的过程
 [J]. 电脑知识与技术,2015,11(23):49-50.
 JIANG Zhengming, GUAN Qingmiao. The process of solving optimization problems based on CPLEX and C++ language[J]. Computer Knowledge and Technology,2015,11(23):49-50.
- [19] 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.
 WU Cong,TANG Wei,BAI Muke, et al. Energy outer based planning of energy internet at user side [J]. Automation of Electric



Power Systems, 2017, 41(4): 20-28.

- [20] SHEIKHI A, RANJBAR A M, SAFE F, et al. CHP optimized selection methodology for an energy hub system [C] //2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Rome, Italy: IEEE, 2011:1-5.
- [21] ZHOU Z, LIU P, LI Z, et al. An engine to the optimal design of distributed energy systems in China [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 53(2):387-396.

作者简介:

王 丹(1981-),男,安徽安庆人,副教授,博士,通信作



者,研究方向为综合能源系统分析、智能配电系统分析、需求响应(E-mail;wangdantjuee@tju.edu.cn):

孟政吉(1994—),男,河北邯郸人,硕 士研究生,主要研究方向为综合能源电力 系统优化规划(E-mail:mengzhengji@tju.edu. cn):

贾宏杰(1973-),男,河北石家庄人,

教授,博士,主要研究方向为大电网稳定性分析、电网规划、新 能源集成(E-mail:hjjia@tju.edu.cn)。

Siting and sizing planning for distributed energy station based on coordinated optimization of configuration and operation

WANG Dan¹, MENG Zhengji¹, JIA Hongjie¹, WU Lin², DU Wei², CHEN Ning³, WANG Xudong⁴

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 3. State Key Laboratory of Operation and

Control of Renewable Energy & Storage Systems, China Electric Power Research Institute,

Nanjing 210003, China; 4. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China)

Abstract: A DES (Distributed Energy Station) model is proposed considering constraints of both planning and operation stages. A coordinated optimization method of configuration and operation based on mixed integer linear programming is proposed to minimize the cost of both planning and operation stages. Numerical results indicate that the proposed approach provides optimal siting and sizing planning strategy of DES considering annual operation costs. Moreover, the proposed approach effectively reduces the redundancy of equipment configuration and the system operating cost, and exhibits high computational efficiency for solving complicated planning problems.

Key words: regional integrated energy system; distributed energy station; siting planning; sizing planning; optimal dispatch



附

录

Fig.A1 Schematic diagram of synchronous solution of optimal planning



图 A2 DES 电负荷与热负荷特性曲线 Fig.A2 Load curves of power and heat of DES



图 A3 光照强度与风速曲线 Fig.A3 Curve of light intensity and wind speed



Fig.A4 Schematic magram of Scenario A

表 A1 CHP 机组各型号设备参数 Table A1 Equipment parameters of three types CHP unit

设备种类	1型CHP	2型CHP	3型CHP
规划容量/kW	0~300	0~300	0~300
单位容量成本/(元•kW ⁻¹)	5230	5950	6500
运行维护成本/(元•kW ⁻¹)	0.025	0.025	0.025
机组发电效率/%	33	37	40
机组产热效率/%	40	42	45
使用年限/a	25	25	25

表 A2 热泵、燃气锅炉各型号设备参数 Table A2 Equipment parameters of heat pumps and boilers

	1.1	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	1	
设备种类	空气源热泵	地源热泵	1型燃气锅炉	2型燃气锅炉
规划容量/kW	0~300	0~300	0~300	0~300
单位容量成本/(元•kW ⁻¹)	1200	3000	320	340
运行维护成本/(元•kW ⁻¹)	0.097	0.097	0.02	0.02
产热效率/%	300	440	90	91
使用年限/a	20	20	20	20

表 A3 其他设备参数 Table A3 Parameters of other equipment

			·	
设备种类	光伏	风机	电储能	热储能
规划容量/kW	0~100	0~100	—	—
规划容量/(kW•h)	—	—	0~300	0~300
单位容量成本/(元•kW ⁻¹)	10000	4000	—	—
单位容量成本/[元・(kW・h ⁻¹)]	—	—	1000	35
运行维护成本/(元•kW ⁻¹)	0.01	0.049	0.0016	0.0018
自损失率/%	—	—	1	1
使用年限/a	25	20	10	20