基于 Tent 映射混沌优化 NSGA- II 算法的 综合能源系统多目标协同优化运行

曾 鸣¹,韩 旭¹,李源非¹,刘金洁²,彭丽霖¹
 (1.华北电力大学 经济与管理学院,北京 102206;
 2.华北电力大学 电气与电子工程学院,北京 102206)

摘要:为了提高能源综合利用效率与分布式可再生能源就地消纳能力,结合能源互联网建设过程中自动需求响应系统的应用趋势,构建了基于自动需求响应和储能的综合能源系统多目标协同优化运行模型,并提出了基于 Tent 映射混沌优化的 NSGA-II 多目标函数求解算法。将所提模型及求解算法应用于我国某典型园区综合能源系统的实际算例中,结果表明:Tent 映射混沌优化 NSGA-II 算法求解此类问题具有可行性;考虑自动需求响应和储能作用的综合能源系统相较于其他3种情景具有显著经济、技术和环境效益,促进了新能源并网消纳。

关键词:综合能源系统;自动需求响应;协同优化;Tent映射;混沌优化;NSGA-II算法 中图分类号:TM 761 文献标识码:A DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.029

0 引言

随着能源和环境问题的日益凸显,能源变革成 为世界各国的必然选择。针对我国能源体系出现的 供需不匹配、缺乏系统性等问题,能源互联网被认为 是实现我国能源革命的重要技术支撑¹¹。综合能源 系统是现阶段能源互联网的重要形态,也是当前我国 建设能源互联网的主攻方向。然而综合能源系统具 有的系统耦合多元化、供能方式多样化、运行方式复 杂化等特征,将使得其在运行调度层面面临更大的 挑战¹²¹。

作为能源互联网框架下的重要互动资源,自动 需求响应 Auto-DR(Automatic Demand Response)不 依赖于任何人工操作,通过接收外部信号触发用户侧 需求响应程序,可大幅提高综合能源系统运行的可 靠性、鲁棒性和成本效益^[3]。而随着储能技术的日趋 完善和储能设备的普遍应用,储能参与带来的负荷 优化成为综合能源系统运营过程中不可忽视的重要 因素^[4]。在 Auto-DR 发展背景下,考虑需求响应和储 能作用的综合能源系统协同优化运行,不仅能够实 现多能互补,还能充分发挥 Auto-DR 与储能设备的 综合调节潜力,促进分布式可再生能源消纳,实现供 需动态优化平衡,提升资源优化配置水平,具有重要 的研究意义。

目前针对综合能源系统的研究多集中于理论、 技术以及规划等方面。文献[5]讨论了综合能源系统 的特点以及欧洲综合能源系统发展的驱动力和发展 现状:文献[6]对区域综合能源系统的一系列理论以 及国内外研究现状进行了系统归纳,对区域综合能 源技术在中国的发展前景和典型应用形式进行了探 讨。在技术研究及规划运行方面,文献[7]在能源互 联网背景下考虑综合能源系统各环节协调优化的运 营模式,提出了整合的关键技术:文献[8]从规划和 运行2个角度探讨了能源互联网和综合能源系统的 支撑技术;文献[9]研究了基于冷热电联供系统和热 网构建的多区域综合能源系统的优化问题;文献 [10]提出了燃气系统和电力系统的动态规划模型. 但该模型仅在燃料供给侧对电、气系统进行有限耦 合:文献[11]给出区域综合能源系统不同耦合形式 下的能源供应模式,并提出适用的混合潮流算法。上 述文献与本文的研究领域相似,所建模型简单直接、 易于计算,但对供需互动环节缺乏考虑,有待深化。 另外,尽管针对综合能源系统理论的相关研究较多, 但在实际模型构建层面的研究还处于初步探索阶 段,较少已有的模型大多仅是针对系统规划问题,而 全面考虑多类型电源、储能、需求响应资源、大电网 互动等因素的综合能源系统优化调度问题目前鲜有 研究。

针对上述问题,本文提出 Auto-DR 背景下综合能 源系统协同优化运行框架,构建了计及 Auto-DR 和储 能的系统多目标优化运行模型;在此基础上运用 Tent 映射混沌优化 NSGA-II 算法进行求解。传统 NSGA-II 算法虽然在多目标优化领域获得了广泛的 应用,但仍然存在局部最优问题,本文将 Tent 映射

收稿日期:2017-03-01;修回日期:2017-04-20

基金项目:国家电网公司科技项目(适应我国售电侧放开的自动需求响应仿真技术研究)(SCTYHT/15-JS-191);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016XS84)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(Research on Automatic Demand Response Simulation Technology Adapting to the Open Electricity Sale Market in China) (SGTYHT/15-JS-191) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2016XS84)

的混沌优化算法嵌套入 NSGA-II 算法主体流程中, 通过改进算法的初始化过程和精英保留过程,扩大 了搜索空间,避免算法陷入局部最优,同时加快算法 收敛速度,提高了运算效率,加强了算法鲁棒性,扩 展了算法的适用性,最终提高了对多目标优化模型 的求解性能。通过算例对我国某典型园区进行综合 能源系统优化,与非完全考虑 Auto-DR 和储能作用的 3 种情景比较,结果表明本文所建模型可显著提高经 济、技术和环境效益,更具优越性。

1 Auto-DR 背景下综合能源系统多目标协同 优化运行框架

综合能源系统并非多个独立供能系统的简单叠 加,而是通过对多种供能单元的协同调控以及对供 需双侧的协同优化,在满足系统能量需求的同时获 得比各能量系统独立优化时更高的效益。因此,结合 能源互联网中需求响应实现自动化的发展趋势,本 文提出 Auto-DR 背景下综合能源系统多目标协同优 化运行框架(如图 1 所示),以提高能源利用效率、优 化系统运行与管理。

图 1 中综合能源系统主要包括电力系统、热力 系统、天然气系统、储能系统以及 Auto-DR 系统,其 中 Auto-DR 系统充分接收各模块单元的信息指令, 经过设备基础理论学习,提供决策反馈,促进综合能 源系统实现总费用最低、可靠性最高以及减排率最 高的多目标协同优化运行。综合能源系统运行中心 与配电网、供热网、Auto-DR 系统、各能源系统进行 信息输送和传递,实现对多种能源的整体协调和局 部调度。

与传统调度运行框架相比,本文所提协同优化 运行框架具有如下特点。

a. 多能协同实时化。综合能源系统涉及多种类型终端能源的一体化供应,每一种终端能源系统又

由不同类型的供能单元满足。在优化运行的过程中, 根据各系统的综合响应信息,动态更新参与调节机组 和负荷的模型,固定不可调的机组和负荷,优化可调 的机组和负荷,做到各个能量系统的实时动态平衡。

b.供需互动自动化。Auto-DR系统通过基础信息采集以及不同时间尺度负荷预测、用户需求特性分析等基础理论方法学习,可自动优化需求侧可控资源,形成智能决策控制。而进一步考虑将储能系统作为主要调节电源之一,可以间接修正系统负荷预测和新能源预测结果,减少系统供需双侧随机波动的影响,全面实现综合能源系统供需互动的自动化。

c. 调度运行多目标化。相较于传统能源系统的 调度优化,Auto-DR 背景下的综合能源系统不是仅 强调经济成本的最优,而是从经济、技术及环境多角 度同时切入,综合考虑了系统的总体运行成本、稳定 可靠性以及节能减排效果,切实提高了能源的综合利 用效率以及分布式可再生能源的就地消纳水平。

2 计及 Auto-DR 和储能的多目标优化运行 模型

本文构建的计及 Auto-DR 和储能的多目标协同 优化模型旨在实现系统总运行费用最低、可靠性和减 排率最高。对于 Auto-DR 和储能的考虑主要体现在 基于可调控负荷的需求响应约束和储能设备的运行 约束。考虑风光可再生能源并利用蒙特卡洛抽样进 行模拟,假设其服从贝塔分布和威布尔分布。同时, 由于系统并网,当内部电源供应不足时,从外网购电; 当内部消纳过剩时,向电网输电^[12]。此外,由于现有 的硬件设备暂无法实现天然气和冷、热、电在网络端 和用户终端的交互耦合,因此用户直接燃烧天然气所 产生的天然气负荷总是独立于冷、热、电负荷之外, 且不对其他机组的调度产生影响。因此,为了简化模 型且不失一般性,暂不对系统终端的天然气负荷进



图 1 Auto-DR 背景下综合能源系统多目标协同优化运行框架

Fig.1 Framework of integrated energy system operation with multi-objective cooperative optimization in background of Auto-DR

行建模,而只考虑其在电源、热源侧作为燃料使用。

2.1 目标函数

(1)系统总费用最低。

综合能源系统在调度周期总时段数 T 内的总费用 C_{total,T} 由周期内的生产运维成本 C_{opma,T}、清洁机组补 偿费用 C_{comp,T} 和向电网的净购电费用 C_{netp,T} 三部分组成,即:

$$C_{\text{total},T} = C_{\text{opma},T} + C_{\text{comp},T} + C_{\text{netp},T}$$
(1)

生产运维成本主要来自于设备的燃料消耗以及 定期的维护成本。由于设备的单位供能成本已经能 够充分包括燃料消耗和维护成本,因此系统在调度 周期总时段数 T 内的生产运维成本可以表示为:

$$C_{\text{opma},T} = \sum_{t=1}^{T} \sum_{u \in U} W_{u,t} c_u \tag{2}$$

其中,U为系统中设备的集合; $W_{u,t}$ 为设备u在时段t的供能量; c_u 为设备u的单位供能成本。

清洁机组补偿费用可表示为:

$$C_{\text{comp},T} = \sum_{t=1}^{T} \sum_{a \in A} \left(\lambda_{a,t}^{\circ} P_{a,t}^{\circ} + \lambda_{a,t}^{u} P_{a,t}^{u} \right)$$
(3)

其中,A为系统中清洁能源机组集合; $P_{a,t}^{o}$ 为清洁能源 机组 a 因过调度引起的缺电量; $\lambda_{a,t}^{o}$ 为机组 a 的过调 度补偿系数; $P_{a,t}^{u}$ 为清洁能源机组 a 因欠调度引起的 窝电量; $\lambda_{a,t}^{u}$ 为机组 a 的欠调度补偿系数。

调度周期总时段数 T 内的净购电费用 C_{netp.T} 为 各时段净购电费用之和,即:

$$C_{\text{netp},T} = \sum_{t=1}^{T} \left(C_{\text{purc},t} - D_{\text{sale},t} \right)$$
(4)

其中,*C*_{pure,t}表示时段 *t* 购电费用,为该时段主网供电量与向主网购电电价的乘积;*D*_{sale,t}表示时段 *t* 卖电收入,为该时段向主网售电量与向主网售电电价的乘积。

(2)系统可靠性最高。

系统缺电率 LPSP(Loss of Power Supply Probability)指一定周期内系统缺供电量占该周期系统 总需求电量的比值。LPSP 是电力系统常用的供电可 靠性指标,结合综合能源系统中的电源种类,LPSP 的 表达式为:

$$LPSP(T) = \left[\sum_{t=1}^{T} W_{\text{load},t} - \left(\sum_{t=1}^{T} W_{\text{gss},t} + \sum_{t=1}^{T} W_{\text{PV},t} + \sum_{t=1}^{T} W_{\text{wind},t} + \sum_{t=1}^{T} W_{\text{grid},t} - \sum_{t=1}^{T} W_{\text{sell},t}\right)\right] / \sum_{t=1}^{T} W_{\text{load},t}$$
(5)

其中, $W_{\text{load},t}$ 为时段 t 系统的电量需求; $W_{\text{gus},t}$ 、 $W_{\text{PV},t}$ 、 $W_{\text{wind},t}$ 、 $W_{\text{grid},t}$ 分别为时段 t 燃气机组、光伏、风机发电 量和向主网购电的电量; $W_{\text{sell},t}$ 为时段 t 向主网售电 的电量。

(3)系统减排率最高。

系统减排率为综合能源系统相较于传统天然气 联供系统发电的污染物减排率。

$$E_T = \left(L_{\mathrm{S},T} - \sum_{t=1}^T \sum_{u \in U} P_{u,t} \lambda_u - \sum_{t=1}^T P_{\mathrm{i},t} \lambda_\mathrm{g} \right) / L_{\mathrm{S},T}$$
(6)

其中, E_T 为综合能源系统在调度周期总时段数 T内 的减排率; $L_{s,T}$ 为传统天然气联供系统发电的污染物 排放值; $P_{u,t}$ 为设备 u 在时段 t 的等效发电量; λ_u 为 设备 u 的等效平均单位发电污染物排放系数; $P_{i,t}$ 为 时段 t 与电网交换的电量; λ_g 为电网侧供电的污染 物排放系数,本文假设电网侧的电力全部由传统煤 电生产,因此 λ_g 取煤电污染物排放系数。

2.2 系统约束

2.2.1 系统能量平衡约束

(1)可靠性约束。

本文认为,当供电可靠性提升到一定程度后,进 一步提升供电可靠性将以增加成本、提升能耗为代 价。结合当前的宏观形势,单纯追求可靠性最大并不 一定是最优的选择。因此,本文在电量平衡的考量 中,并不要求机组出力与主网购电的加和结果一定 不小于负荷,而是将可靠性作为优化目标进行优化。 但根据国家的相关规定,需要为供电可靠性设计下限 值,结合本文指标,要求 LPSP 不能高于其上限,即:

$$LPSP(t) \leq LPSP \tag{7}$$

其中, LPSP为 LPSP 上限, 参考国家对微电网项目供 电可靠性的要求, 取 LPSP=3%^[13-14]。

(2)热量平衡约束。

热量平衡约束包括热平衡和冷平衡约束,其物理 含义为:从各个热源获得的热量在考虑了设备效率和 相关损耗后,分别全部转化为冷负荷和热负荷。

a. 热平衡约束为:

$$Q_{\text{recly},t}^{\text{heat}} \eta_{\text{recly}} + Q_{\text{gas},t}^{\text{heat}} \eta_{\text{gas}} + Q_{\text{solar},t}^{\text{heat}} \eta_{\text{solar}} = Q_t^{\text{heat}}$$
(8)

$$Q_{\text{recly},t}^{\text{heat}} = W_{\text{gas},t} \left(\frac{1}{\eta_{\text{gas}}^{\text{elec}}} - 1 \right) r_{\text{recly}}$$
(9)

$$Q_{\text{solar},t}^{\text{heat}} = \theta(t) S_{\text{solar},t}^{\text{heat}} \eta_{\text{solar}}^{\text{heat}}$$
(10)

其中, $t=1,2,...,T;Q^{heat}_{redy,t},Q^{heat}_{solar,t}$ 和 $Q^{heat}_{solar,t}$ 分别为时段t余热回收热量、燃气燃烧的热量和太阳能热水锅炉收集的光热; Q^{heat}_{t} 为时段t的热负荷; η_{redy},η_{gas} 和 η_{solar} 分别为余热、燃气和太阳能热水锅炉的热量利用效率; η^{elec}_{gas} 为燃气轮机的电效率; r_{redy} 为余热回收率; $\theta(t)$ 为时段t当地太阳辐射量; $S^{heat}_{solar,t}$ 为太阳能热水锅炉集热板面积; η^{heat}_{solar} 为太阳能热水锅炉的转化效率。

b. 冷平衡约束为:

$$Q_{\text{absor},t}^{\text{cool}} \eta_{\text{absor}} + W_{\text{elec},t}^{\text{cool}} \eta_{\text{elec}} = Q_t^{\text{cool}}$$
(11)

$$Q_{\text{absor},t}^{\text{cool}} = \theta(t) S_{\text{absor},t}^{\text{cool}} \eta_{\text{absor}}^{\text{cool}}$$
(12)

其中, $Q_{absor,t}^{cool}$ 为时段 t 吸收式制冷机收集的光热; $W_{ebc,t}^{cool}$ 为时段 t 电制冷机的耗电量; η_{absor} 和 η_{ebc} 分别为吸收 式制冷机和电制冷机的效率; Q_{t}^{cool} 为时段 t 的冷负 荷; $S_{absor,t}^{cool}$ 为吸收式制冷机集热板面积; η_{absor}^{cool} 为吸收 式制冷机的转化效率。 第6期

2.2.2 设备运行约束

(1)发电机组运行约束。

a. 光伏机组运行约束。

光伏机组的出力上限是该时段当地太阳能辐射 量、太阳能板面积和太阳转化效率的乘积,同时还应 小于机组的额定功率。在调度需要时可通过弃光降 低光伏机组的出力,但必须保证其出力在最小限额 之上^[15],即:

$$\overline{P}_{PV}(t) = \min\{P_{capa}, \theta(t)S_{PV}\eta_{PV}\}$$
(13)

$$\underline{P}_{\rm PV} \leqslant P_{\rm PV}(t) \leqslant \overline{P}_{\rm PV}(t) \tag{14}$$

其中, $P_{PV}(t)$ 为时段 t 光伏机组的电功率; P_{capa} 为光伏 机组的额定装机容量; η_{PV} 为太阳能转化效率; S_{PV} 为 太阳能板的面积; \underline{P}_{PV} 、 $\overline{P}_{PV}(t)$ 分别为光伏机组的最小、 最大发电功率。

b. 天然气内燃机机组运行约束。

机组实时出力应在上、下限之间,同时机组功率 的变化率受到爬坡率的限制。

$$\underline{P}_{\text{gas}} \leqslant P_{\text{gas}}(t) \leqslant \overline{P}_{\text{gas}} \tag{15}$$

$$P_{\rm gas}(t) - P_{\rm gas}(t-1) \leq U_{\rm Pgas} \Delta t \tag{16}$$

$$P_{\rm gas}(t) - P_{\rm gas}(t-1) \ge -D_{\rm Ngas}\Delta t \tag{17}$$

其中, $P_{gas}(t)$ 为时段t燃气轮机的发电功率; \underline{P}_{gas} 和 \overline{P}_{gas} 分别为燃气轮机最小和最大发电功率; U_{Pgas} 和 D_{Ngas} 分别为燃气轮机的向上和向下爬坡速率。

c. 风力发电机组运行约束。

风电机组约束的物理含义与光伏类似,但其出力 上限与气象条件呈分段函数关系^[15]。

$$\underline{P}_{wind}(t) \leq P_{wind}(t) \leq \overline{P}_{wind}(t)$$

$$\overline{P}_{wind}(t) = \begin{cases} 0 \quad v_{rate} < v(t) < v_{in} , v(t) > v_{out} \\ \frac{v(t) - v_{in}}{v_{rate} - v_{in}} P_{rate} \quad v_{in} \leq v(t) \leq v_{rate} \\ \end{cases}$$

$$(19)$$

 $P_{\text{rate}} \quad v_{\text{rate}} < v(t) \leq v_{\text{out}}$

其中, $P_{wind}(t)$ 为时段 t 风电机组的发电功率; \underline{P}_{wind} 和 \overline{P}_{wind} 分别为风电机组最小和最大发电功率; P_{rate} 为机 组的额定输出功率; v_{in} 和 v_{out} 分别为切入和切出风 速; v_{rate} 为额定风速。

(2)制冷机运行约束。

吸收式制冷机和电制冷机的功率必须为正,且 不能超过其功率上限,即:

$$0 \leq P_{\text{cold}}^{\text{inso}}(t) \leq P_{\text{cold}}^{\text{inso}}$$
(20)

$$0 \leq P_{\text{cold}}^{\text{elec}}(t) \leq \overline{P}_{\text{cold}}^{\text{elec}} \tag{21}$$

其中, $P_{\text{cold}}^{\text{inso}}(t)$ 和 $\overline{P}_{\text{cold}}^{\text{inso}}$ 分别为吸收式制冷机在时段t的制冷功率和最大功率; $P_{\text{cold}}^{\text{dec}}(t)$ 和 $\overline{P}_{\text{cold}}^{\text{dec}}$ 分别为电制冷机在时段t的制冷功率和最大功率。

2.2.3 储能约束

储能电池具有充电、放电2种状态,其充放电过 程可以描述如下。

当电池处于充电状态时,有:

$$S_{t+1} = S_t (1-\varepsilon) + P_{SOC,t+1}^c \eta_c$$
(22)
当电池处于放电状态时,有:

$$S_{t+1} = S_t (1 - \varepsilon) - P_{\text{SOC}, t+1}^{\text{D}} / \eta_{\text{D}}$$
(23)

$$S_{t+1} = S_t (1 - \varepsilon) \tag{24}$$

其中, S_{t+1} 为储能电池在时段t+1结束时的剩余电量; $P_{SOC,t+1}^{c}$, $P_{SOC,t+1}^{D}$ 分别为电池在时段t+1的充、放电 功率; η_{c} , η_{D} 分别为电池的充、放电效率; ε 为漏电率。 进一步考虑储能电池的寿命和安全性,还应添加以 下约束条件。

a. 充放电功率约束:充放电功率为正且不超过 其上限。

$$\begin{cases} 0 \leqslant P_{\text{SOC},t}^{\text{C}} \leqslant \overline{P}_{\text{SOC},t}^{\text{C}} \\ 0 \leqslant P_{\text{SOC},t}^{\text{D}} \leqslant \overline{P}_{\text{SOC},t}^{\text{D}} \end{cases}$$
(25)

其中, P^c_{soc,t}和 P^b_{soc,t}分别为电池充电和放电功率的 上限。

b.荷电状态约束:电池剩余电量应保持在一定范 围内,既不能过于接近充满状态,也不能过于接近完 全空电状态。

$$\begin{cases} B_{\text{SOC},t} = S_t / \overline{S} \\ \underline{B}_{\text{SOC}} \leqslant B_{\text{SOC},t} \leqslant \overline{B}_{\text{SOC}} \end{cases}$$
(26)

其中, $B_{\text{SOC},t}$ 为储能在时段t结束时剩余电量 S_t 占总 电量 \overline{S} 的比例,即电池的荷电状态;<u> B_{SOC} 和 $\overline{B}_{\text{SOC}}$ 分别 为电池荷电状态的下限和上限。</u>

2.2.4 需求响应约束

需求侧负荷可分为固定负荷、随机负荷和可转移 负荷3类。相比固定负荷的不可调性和随机负荷的 不可预知性,可转移负荷为用户将负荷从某个时间 段转移到其他时间段的负荷,具有可调控性,运用高 密度信息流合理调度可转移负荷是综合能源系统实 现 Auto-DR 的重要手段。基于可转移负荷的需求响 应约束如下。

a. 转移容量约束。

转出时段的转出电量和转入时段的转入电量都 应小于其上限,即:

$$\begin{cases} \Delta W(t_{\text{out}}) \leq \Delta \overline{W}(t_{\text{out}}) \\ \Delta W(t_{\text{in}}) \leq \Delta \overline{W}(t_{\text{in}}) \end{cases} \quad \forall t_{\text{in}}, t_{\text{out}} \end{cases}$$

$$(27)$$

其中, t_{out} 和 t_{in} 分别为负荷转出时段和负荷转入时 段; $\Delta W(t_{out})$ 和 $\Delta W(t_{in})$ 分别为时段 t_{out} 转出电量和时 段 t_{in} 转入电量; $\Delta \overline{W}(t_{out})$ 和 $\Delta \overline{W}(t_{in})$ 分别为时段 t_{out} 转 出电量上限和时段 t_{in} 转入电量的上限。

b.平衡约束。

在整个调度周期内,各时段转出负荷的总量与转 入负荷的总量相等,即:

$$\sum_{t_{\rm ex}} \Delta W(t_{\rm out}) = \sum_{t_{\rm ex}} \Delta W(t_{\rm in}) \tag{28}$$

则转移后的的负荷可用以下公式表示:

$$W^{\rm af}(t_{\rm out}) = W^{\rm be}(t_{\rm out}) - \Delta W(t_{\rm out})$$
⁽²⁹⁾

$$W^{\rm af}(t_{\rm in}) = W^{\rm be}(t_{\rm in}) + \Delta W(t_{\rm in})$$
(30)

其中, $W^{af}(t_{out})$ 和 $W^{be}(t_{out})$ 分别为转移后和转移前时段 t_{out} 的负荷; $W^{af}(t_{in})$ 和 $W^{be}(t_{in})$ 分别为转移后和转移前 时段 t_{in} 的负荷。

3 基于 Tent 映射混沌优化的 NSGA-Ⅱ算法

本文所构建的目标函数是多目标优化问题。为此,引入在多目标优化领域应用广泛的 NSGA-II 算法,并应用混沌优化算法对其进行适应性改进,以实现模型更优求解。

3.1 NSGA-II算法

NSGA-Ⅱ算法是一种经典的多目标遗传算法, 引入快速非支配排序法和精英策略,定义拥挤度取 代适应值共享,降低了算法的计算复杂性,提高了计 算效率。若有 N 个子目标,则 NSGA-Ⅱ算法将个体 *i* 的拥挤度定义为:

$$P(i) = \sum_{k=1}^{N} \left| f_k(i+1) - f_k(i-1) \right|$$
(31)

其中,*f_k(i+1)和f_k(i−1)分别为个体 i+1* 和个体 *i−1* 在第 *k* 个目标的优化值。传统 NSGA-II 算法的详细 计算过程见文献[16]。

3.2 Tent 映射的混沌优化算法

混沌优化是将优化变量通过混沌映射规则映射 到混沌变量空间的取值区间内,利用混沌变量的遍历 性和规律性寻优搜索,将优化解线性转化到优化空 间^[17],通常采用的是 Logistic 映射,但近期相关研究 表明,Tent 映射经过改进后具有比 Logistic 映射更优 越的混沌特性^[18]。改进后的 Tent 映射如式(32)、 (33)所示。

$$\begin{cases} x_{k+1} = T(x_k) + 0.1 \times \text{rand}(0, 1) \\ x_k = 0, 0.25, 0.5, 0.75 \ \text{\mathbb{R}} \ x_k = x_{k-m} \\ x_{k+1} = T(x_k) \ \text{\mathbb{H}} \ \text{$\mathbb{H}$$

3.3 组合算法流程

NSGA-II算法虽然在多目标优化领域获得了广 泛的应用,但仍然存在显著的局部最优问题^[19]。这是 因为精英策略使得局部最优解在算法后期的迭代中 具有过大的遗传优势,从而限制了算法进一步搜寻 到更宽广或者更优的区域。与此同时,算法的初始化 过程完全采用随机值,使得多峰函数可能存在搜索 盲区^[20]。为此,本文提出改进的 NSGA-II算法,将基 于 Tent 映射的混沌优化算法嵌套入 NSGA-II 算法 主体流程中,通过改进算法的初始化过程和精英保 留过程,一方面加快了算法收敛速度,能够提升算法 初期寻优的效率;另一方面能够扩大搜索空间,在算法后期削弱精英策略的遗传优势,使得算法能够跳出局部最优,增加其获得全局最优解的概率,同时加强了算法鲁棒性,扩展算法的适用性,最终整体提高了算法的优化性能。基于 Tent 映射混沌优化的 NSGA-II算法的流程如图 2 所示。



算法的流程图 Fig.2 Flowchart of NSGA-Ⅱ algorithm combined with Tent mapping

4 算例分析

4.1 基础数据输入

本文以我国某典型园区为研究对象,分析前文 构建模型和算法的性能。根据该园区运行的实际情况,算例所需主要基本数据如下:燃气轮机2台,爬 坡速率为10kW/min,下坡速率为5kW/min,单机 最大功率为60kW,单机最小功率为6kW;风电机组 3台,单机最大功率为25kW,单机最小功率为0kW; 光伏机组2台,单机最大功率为30kW,单机最小功 率为0kW;储能漏电率为0.14%/h,最大充电功率 为30kW,最大放电功率为45kW;太阳能热水锅炉 4台,单机最大功率为40kW;天然气锅炉2台,单机 最大功率为130kW;吸收式制冷机2台,单机最大 功率为30kW;电制冷机1台,单机最大功率为40 kW。受计算机性能限制,本文不进行全年逐时仿真, 仅考虑周期长度为24h的系统典型调度日负荷情 况,在此基础上,设置各调度子时段时长为1h(24个

224

时段),系统典型日负荷曲线如图 3 所示。向主网购 电的分时电价见图 4,而向主网售电的电价则参考我 国各地的分布式电源上网标杆电价,取恒定值。不失 一般性,本文以天然气机组、风电机组和光伏机组的 平均上网电价 0.525 元/(kW·h)作为向主网的售电 价格。



设置混沌优化 NSGA-Ⅱ算法的参数取值如下: 初始化每代种群个体数量为 200 个;混沌优化过程 总是产生所需向量 3 倍的混沌解,用于择优选择; NSGA-Ⅱ算法中的变异率为 0.8,交叉率为 0.2;设置 算法最大迭代次数 t_{max}=1000。

4.2 优化结果分析

4.2.1 Pareto 解集

通过求解优化模型得到该综合能源系统多目标 优化的 Pareto 解集如图 5 所示。





由图 5 可知,不存在同时满足高减排率、低 LPSP、 低系统成本的优化结果,本文构建的 3 个目标函数之 间存在此消彼长的矛盾关系,难以同时获得最优解。 这主要是因为:若需要降低系统经济成本,则需要尽 可能用光伏和风电机组代替化石能源机组出力,虽 然这一策略能够同时增加减排率,但降低了系统可 靠性,故在低成本和高减排率区域不存在低 LPSP 的 解;为提升系统供电可靠性,应尽可能让化石能源机 组出力,并考虑增大主网购电量,这会显著增加系统 成本和系统排放量,高可靠性区域不存在低成本和 高减排率的解。因此,本文所建模型中采用的多目标 优化思路,避免了将多个目标函数通过人工赋权的 方式整合为单目标优化思路的盲目性。实际规划 中,决策者可根据项目实际需求选择偏好方案作为 调度方案,从而为切实实现经济、技术、环境层面的 多目标优化提供支撑。

4.2.2 典型方案仿真结果

为进一步分析该综合能源系统的运行情况,在 Pareto 解集中选择 3 个目标函数优化结果较为均衡 的一个解作为典型解,分析其在典型调度日的运行 情况。该系统 3 个目标函数的优化结果为:系统成本 为 5638 元;LPSP 为 1.22%;系统减排率为 19.73%。 由于我国的综合能源系统目前处于政府牵头的试点 阶段,为了更好地发挥示范效果,通常希望系统运行 各个层面的指标能够实现均衡优化,因此可认为本 文选择的典型解具有可观的现实意义。该系统的典 型调度日的电负荷优化情况如图 6 所示。



由图 6 可见,典型调度日的原始负荷在昼间和夜 间存在尖峰负荷时段,而在凌晨和下午则处于负荷低 谷时段:经过需求响应负荷转移后的等效电负荷曲 线,虽然负荷的峰谷特征与原始负荷曲线相似,但整 体曲线更为平缓,说明系统通过调控可转移负荷资源, 实现了削峰填谷,优化了系统的负荷特性。进一步分 析各机组出力情况可知,该综合能源系统典型调度日 电负荷需求由分布式光伏、分布式风电、燃气机组、 主网供电满足,储能设备则能够在电源和负荷状态 进行切换。该地区可用风力资源十分丰富,全天风电 的出力水平都较高,在夜间负荷较低的时段以及下 午光伏出力较高的时段,多余的可再生电力被储能 设备吸收。在昼间和夜间的负荷高峰时段,由于主网 电价较高,因此储能启动放电模式,作为系统电源缓 解负荷压力,系统的负荷缺口由调节能力较强的燃 气机组满足。夜间用户负荷处于低谷,由于主网电价 较低,系统将额外从主网购电为储能充电,以备日间 所需。

另外,对于该系统热负荷和冷负荷的优化情况 为:热负荷相对稳定,昼间光照条件较好时,启用太 阳能热水锅炉满足热负荷需求;冷负荷需求由电制 冷机及吸收式制冷机2种供冷方式供应,高峰时段 主要由成本较低的吸收式制冷机进行冷负荷供应, 电制冷机多在夜间的谷时段运行。

4.2.3 模型情景分析

上述相关分析表明,本文所提出的模型能够将 Auto-DR 和储能资源同时整合进综合能源系统的调 度中,实现综合能源系统的多能协同、供需协同优 化。为进一步揭示 Auto-DR 和储能同时参与综合能 源系统调度的综合效益,分别将本文所建模型(情景 1)的优化结果与其他 3 种情景的优化结果进行对 比。其他 3 种情景设置如下:情景 2 既不含 Auto-DR 也不含储能的调度模型;情景 3 仅含 Auto-DR、不含 储能的调度模型;情景 4 仅含储能、不含 Auto-DR 的 调度模型。

各情景的求解算法和参数设置与前文保持一 致,将包含 Pareto 解集中所有解的各目标函数值分别 取平均值,作为模型的平均优化结果,如表1所示。

表 1 不同情景优化结果分析对比 Table 1 Comparison of optimization results among four dispatch models

	-	-	
情景	系统成本/元	LPSP/%	系统减排率/%
情景 1	5623	1.20	20.51
情景 2	6521	2.98	7.62
情景 3	6298	2.82	9.77
情景 4	6052	2.27	13.36

储能和 Auto-DR 对系统调度的优化主要来自于 其对系统等效负荷特性的改善^[21],为分析 Auto-DR 和储能同时参与调度时对系统运行特性的协同优化 作用,将 4 种情景产生的所有优化结果的等效负荷 曲线进行等权重加权,并绘制在同一坐标系中,如图 7 所示。对于系统中包含储能的情况,其等效负荷曲 线为系统的功率曲线减去储能的功率曲线。



Fig.7 Comparison of equivalent load curve among four dispatch models

由表1和图7可见,本文所建模型(情景1)的3 个目标函数优化结果要全面优于另外3种情景。综 合对比4种情景的优化结果,可进一步得以下结论。

a. 引入 Auto-DR 能够有效提升系统的运行水 平,改善负荷曲线特性。由表1结果可知,相较于情 景 2,情景 1 和情景 3 均引入了 Auto-DR,二者的系 统成本分别减少了 898 元、223 元,LPSP 分别下降 了 1.78%、0.16%,减排率在情景 3 中提升了 2.15%。 通过图 7 可进一步看出,引入 Auto-DR 可以削峰填谷、 改善峰谷差,其原因在于 Auto-DR 能够削减系统峰 荷,减少高峰期向主网购买高价电能的成本;同时 Auto-DR 能够有效转移高峰负荷,在多目标优化中 为 LPSP 和减排率提供了进一步优化的空间。

b. 引入储能能够显著改善系统的各项指标,克 服清洁能源出力的随机性。由表1结果可知,情景1 和情景4均引入了储能,二者的系统成本、LPSP和 减排率均优于情景2,系统成本均明显降低,情景4 较情景2减排率显著提高5.74%。同时,对比图7中 各情景的等效负荷特性,有储能的情景可以改善负 荷曲线,且夜间改善效果更为明显。这是因为储能的 自由充放电特性能够在不影响系统可靠性的同时, 有效克服清洁能源出力的间歇性和波动性,提升消 纳水平。同时,控制储能设备在系统高峰期供电,也 能有效控制系统的经济成本。因此,应引入储能资 源,将其纳入系统调度方案的设计中,以提升系统综 合效益。

c. 在综合能源系统优化运行中同时考虑 Auto-DR 和储能,能够实现系统运行目标的全面显著提升, 较完全不考虑 Auto-DR 和储能的情景 2,情景 1 的 系统成本和 LPSP 分别减少 898 元和 1.78%,减排率 提升了 12.89%,且其提升幅度要大于单独引入 Auto-DR 或储能时对系统指标提升的简单加和。图 7 中, Auto-DR 和储能作用的叠加对平滑负荷曲线的效果 明显,进一步克服了风光出力的间歇性和波动性,在 提升系统灵活性的同时能够有效消纳新能源出力。

综上所述,本文构建的综合能源系统多目标协同 优化模型通过同时引入 Auto-DR 和储能,能够有效 实现供需协同优化,相较于非完全考虑 Auto-DR 和储 能作用的另外 3 种情景,其优化结果能够在有效降低 成本的同时,提升系统的可靠性并带来环境效益。 4.2.4 算法性能分析

4.2.4 昇法性能分析

为了证明本文所提基于 Tent 映射混沌优化的改进 NSGA-II 算法的优越性,本文还利用传统 NSGA-II 算法和同样在多目标领域广泛使用的多目标粒子群优化算法对本文所建模型进行计算求解,各算法的求解结果如表 2 所示。

由表 2 数据可知,基于 Tent 映射混沌优化的 改进 NSGA-II 算法计算得到的系统成本、LPSP、减排 率分别为 5623 元、1.20%、20.51%,其优化效果远远 优于传统 NSGA-II 算法和多目标粒子群优化算法, 说明改进的 NSGA-II 算法通过引入混沌优化机制, 多目标粒子群优化算法

 表 2 3 种算法的计算结果

 Table 2 Calculative results of three algorithms

 算法
 系统成本/元
 LPSP/%
 系统减排率/%

 改进 NSGA-II算法
 5623
 1.20
 20.51

 传统 NSGA-II算法
 6273
 1.74
 17.32

6125

1.81

19.28

使得算法在运行过程中能够遍布整个搜索空间,有 效地避免了传统算法容易陷入局部最优的缺点,提 高了算法获得全局最优解的概率,增强了算法的优化 性能。

5 结论

a. 研究了综合能源系统多目标协同优化运行问题,在系统调度中同时引入了 Auto-DR 和储能,构建 了综合考虑系统成本最低、系统可靠性最高和系统减 排率最高的多目标优化模型。通过 Auto-DR 和储能 的协同作用,本文提出的优化运行方案明显改善了 系统的负荷特性,同时能够有效平抑风电、光伏出力 的随机波动,使系统在提升经济性、保证可靠性的同 时,改善了清洁能源的消纳水平。

b. 利用 Tent 映射的混沌优化算法对 NSGA-II 算法进行改进以实现多目标模型求解,改进后的 NSGA-II 算法在算法初期提升了求解效率,在算法后 期削弱了精英解的优势,提高了算法跳出局部最优、 在更大空间内继续寻优的可能性。算法对比结果表 明,本文所提算法要优于传统 NSGA-II 算法和多目标 粒子群优化算法,在求解此类多目标优化问题时具 有较好的适用性和可推广性。

综合能源系统在我国的不断发展,需要精益化的 系统模型作为支撑。本文所建的模型覆盖了多元负 荷、供需协同、主网互动、多目标决策等综合能源系 统的关键要素,在理论上属于较为完备的模型。未来 可结合实际系统情况对本文所建的模型进行调整和 推广,从而形成面向实际系统的优化模型。同时,不 论是在规划层面还是调度运行层面,综合能源系统模 型的求解都是一个多目标非确定性多项式难题,本 文所提出的优化算法也为其解决提供了一种可行的 工具。

参考文献:

[1] 曾鸣. 能源互联网推动能源变革[J]. 中国电力企业管理,2016(10): 24-25.

ZENG Ming. Energy internet to promote energy change[J]. China Power Enterprise Management, 2016(10): 24-25.

 [2] 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. Study on steady-state analysis of typical regional integrated energy systems in the background of energy internet [J]. Proceedings of the

CSEE, 2016, 36(12): 3292-3305.

- [3] 高赐威,梁甜甜,李慧星,等. 开放式自动需求响应通信规范的发展和应用综述[J]. 电网技术,2013,37(3):692-698.
 GAO Ciwei,LIANG Tiantian,LI Huixing,et al. Study on the development and application of open automatic demand response communication specification[J]. Power System Technology,2013, 37(3):692-698.
- [4] 徐飞,闵勇,陈磊,等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5063-5072.
 XU Fei,MIN Yong,CHEN Lei,et al. Electric-thermal joint system with large capacity heat storage[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(29):5063-5072.
- [5] 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. European integrated energy system development and the status quo[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(5):1-7.

- [6] 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,2015,39(7):198-207.
 JIA Hongjie,WANG Dan,XU Xiandong,et al. Study on some problems of regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(7):198-207.
- [7] 曾鸣,杨雍琦,李源非,等. 能源互联网背景下新能源电力系统运 营模式及关键技术初探[J]. 中国电机工程学报,2016,36(3): 681-691.

ZENG Ming, YANG Yongqi, LI Yuanfei, et al. Preliminary study on the operation mode and key technology of new energy power system under the background of energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3):681-691.

- [8] 文劲宇,方家琨. 能源互联网中的关键设备与支撑技术[J]. 南方 电网技术,2016,10(3):1-10.
 WEN Jinyu,FANG Jiakun. Energy internet in the key equipment and support technology[J]. Southern Power Grid Technology,2016, 10(3):1-10.
- [9] 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. Cooperation planning of multi-regional integrated energy system combined with heat network model[J]. Automation of Electric Power Systems,2016, 40(15):17-24.
- [10] XU X D,JIA H J,CHIANG H D,et al. Dynamic modeling and interaction of hybrid natural gas and electricity supply system in microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30 (3):1212-1221.
- [11] 徐宪东,贾宏杰,靳小龙,等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3634-3642.
 XU Xiandong,JIA Hongjie,JIN Xiaolong, et al. Study on electric/gas/heat mixing power flow algorithm for regional integrated energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642.
- [12] 孙秋野, 滕菲, 张化光,等. 能源互联网动态协调优化控制体系 构建[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3667-3677.
 SUN Qiuye, TENG Fei, ZHANG Huaguang, et al. Energy internet dynamic coordination optimization control system construction [J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3667-3677.
- [13] 王韶,谭文,黄晗,等. 计及微电网中可再生能源间歇性影响的 配电网可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):31-37.
 WANG Shao,TAN Wen,HUANG Han, et al. Distribution system

reliability evaluation considering influence of intermittent renewable energy sources for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4); 31-37.

- [14] 国家能源局. 国家能源局综合司关于征求《微电网管理办法意见》的函[EB/OL]. (2017-02-07)[2017-02-15]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto84/201702/t20170209_2561.htm.
- [15] MILANOVIC J V,XU Y. Methodology for estimation of dynamic response of demand using limited data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3):1288-1297.
- [16] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182-197.
- [17] 王爽心,姜妍,韩芳. 一种综合负荷模型参数辨识的混沌优化策略[J]. 中国电机工程学报,2006,26(12):111-116.
 WANG Shuangxin,JIANG Yan,HAN Fang. Chaos optimization strategy for parameter identification of integrated load model [J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(12):111-116.
- [18] 单梁,强浩,李军,等. 基于 Tent 映射的混沌优化算法[J]. 控制 与决策,2005,20(2):179-182.
 SHAN Liang,QIANG Hao,LI Jun,et al. Optimization algorithm based on Tent map chaotic[J]. Control and Decision,2005,20 (2):179-182.
- [19] ZHENG X W,LI Y,LIU H,et al. A study on a cooperative character modeling based on an improved NSGA II[J]. Multimedia Tools and Applications, 2016, 75(8):4305-4320.
- [20] 李娟,杨琳,刘金龙,等.基于自适应混沌粒子群优化算法的多 目标无功优化[J].电力系统保护与控制,2011,39(9):26-31.

LI Juan, YANG Lin, LIU Jinlong, et al. Multi-objective reactive power optimization based on adaptive chaos particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011,39(9):26-31.

[21] GUPTA R A,GUPTA N K. A robust optimization based approach for microgrid operation in deregulated environment[J]. Energy Conversion & Management, 2015, 93:121-131.

作者简介:



曾 鸣(1957—),男,山西太原人,教 授,博士研究生导师,主要研究方向为需求 侧响应、综合能源系统规划运行等(E-mail: zengmingbj@vip.sina.com);

韩 旭(1990—),女,天津人,博士研究 生,主要研究方向为需求侧响应、综合能源系 统规划运行(E-mail:lxyhx0601@163.com);

李源非(1993-),男,福建福州人,硕

士研究生,主要研究方向为能源互联网协同

规划、需求侧管理等(E-mail:409969850@qq.com);

刘金洁(1995—),女,山东聊城人,硕士研究生,主要研究 方向为电力系统自动化、需求侧管理等(E-mail:875331013@ qq.com);

彭丽霖(1990—),女,四川成都人,博士研究生,研究方向 为需求侧响应、综合能源系统规划运行(E-mail:921735063@ qq.com)。

Multi-objective cooperative optimization based on Tent mapping chaos optimization NSGA-II algorithm for integrated energy system

ZENG Ming¹, HAN Xu¹, LI Yuanfei¹, LIU Jinjie², PENG Lilin¹

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Combined with the trend of automatic demand response system application in the energy internet construction, a multi-objective cooperative optimization model based on the automatic demand response and energy storage is established for improving the comprehensive utilization efficiency of energy and the localized consumption of distributed renewable energy, and the NSGA-II algorithm combined with Tent mapping chaos optimization is proposed to solve the multi-objective function. The proposed model and algorithm is applied to an integrated energy system of a typical park in China and the calculative results show that, the proposed algorithm is applicable to this kind of problem and, being conducive to the grid-connection and accommodation of new energies, the integrated energy system with the considerations of automatic demand response and energy storage has the most significant economic, technical and environmental effectiveness among four dispatch models.

Key words: integrated energy system; automatic demand response; collaborative optimization; Tent mapping; chaos optimization; NSGA-II algorithm