

考虑不确定性及电/热储能的综合能源系统两阶段规划-运行联合优化方法

雷金勇¹, 郭祚刚¹, 陈 聪², 袁智勇¹, 马溪原¹, 沈欣炜², 孙宏斌^{2,3}

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663; 2. 清华大学 清华-伯克利深圳学院, 广东 深圳 518055;
3. 清华大学 电机工程与应用电子技术系 电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:随着高比例可再生能源接入综合能源系统,在系统规划及运行优化过程中充分考虑不确定性及电/热储能灵活性的问题至关重要。提出了一种考虑可再生能源及多能负载不确定性的综合能源系统两阶段规划-运行联合优化方法。充分挖掘电/热储能的灵活性与上述不确定性的关系,进行互补平衡并改善系统的可靠性与经济性。所提出的两阶段优化问题在第一阶段主要考虑综合能源系统及储能设备的规划问题,包含0-1变量;第二阶段考虑系统运行问题,包含不确定性参数及多种连续变量。通过仿真算例分析了多类型储能配置对综合能源系统规划问题的影响和不确定性参数的场景数量在两阶段随机优化问题中的影响,并对比分析了两阶段随机优化与两阶段鲁棒优化的优缺点。分析结果为综合能源系统灵活配置电/热储能设备、考虑不确定性参数问题提供建模求解的策略及建议。

关键词:综合能源系统;电储能;热储能;两阶段随机优化;规划-运行联合优化;优化

中图分类号:TM 734

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201908046

0 引言

近年来,全球气候变化和能源危机问题所引发的关注日益增加,世界各国都非常重视通过利用可再生能源、建设综合能源系统 IES(Integrated Energy System)(如能源枢纽)等方法提高能源利用率。IES 中包含多能流能量传递、转换和储存的重要设备^[1-2]。多种 IES 的物理系统(如楼宇、工业园区等具有冷/热/电/气等多种能量转换、存储及供应需求的系统)均可基于能源枢纽的统一模型来进行分析^[3-4]。在可再生能源利用方面,由于光伏(PV)和风力发电的建设成本持续下降,以及政策驱动下可再生能源的装机容量持续增加^[5],现有能源系统需要更大的灵活性应对这些具有不确定性的可再生能源资源的大范围整合问题。充分挖掘能源系统灵活性以补偿系统所接纳的不确定性、实现供能实时平衡,是解决大规模不确定性新能源并网的关键方法。IES 所具有的多能耦合的灵活性及系统中多类型储能所具有的灵活性,成为补偿可再生能源资源与多能负载的不确定性波动的重要研究方向^[3]。为了提高 IES 规划及运行方案的可靠性和经济性,充分考虑电/热储能灵活性、充分分析 IES 在不确定性接入情况下可能的运行场景^[6],对实现系统最优规划-运行优化的目标至关重要^[7-8]。

在考虑不确定性的 IES 优化方面,由于新能源

RER(Renewable Energy Resource)、多能负荷、电动汽车等大规模具有不确定性的设备接入能源系统,发电侧与负荷侧的不确定性成为了 IES 中的关键不确定性问题。为了建立可靠、经济、高效的 IES 规划方案,充分利用鲁棒优化 RO(Robust Optimization)、随机优化 SO(Stochastic Optimization)等方法对不确定性进行建模及求解,成为现阶段 IES 优化运行配置的关键。在 SO 的研究中,相关研究主要结合蒙特卡罗法进行随机场景生成,并将其应用于电力系统的优化问题中^[9],并且部分学者通过多场景^[10]及场景生成/削减^[11]的方法在高效地解决系统不确定性问题时得到较好的规划方案。在 RO 的研究中,优化问题的关键在于找出不确定性参数的最坏场景以提高最优解的鲁棒性,该方法也被广泛应用于含大规模新能源接入的系统中^[12-14]。然而 RO 难以在鲁棒性及经济性中实现较优的平衡,容易得到过于保守的优化结果;为了避免该情况,相关研究开始尝试将不确定参数的分布代入 RO 中^[15]。为了探讨 RO 及 SO 在考虑不确定性问题时模型的适用性及优缺点,本文结合多场景生成/筛选等方法建立了两阶段 SO 模型,并与文献[14]所建立的两阶段 RO 模型对比,分析 2 种方法在优化结果、求解效率上的优缺点,提供考虑不确定性问题时的建模建议。

在 IES 规划问题中,通过文献调研可以发现,大多数现有的 IES 以及能量枢纽规划方法都集中于优化多种能源的基础设施,包括电力、供暖、制冷、天然气等^[17-18],其中关于联合优化电储能 BESS(Battery Energy Storage System)以及热储能 TESS(Thermal

收稿日期:2019-04-15;修回日期:2019-07-10

基金项目:南方电网公司科技项目(ZBKJXM20180209)

Project supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid(ZBKJXM20180209)

Energy Storage System)的研究较少。据预测,BESS的投资成本将在近年内持续下降^[19],并且合理建设成本低且寿命长的TESS设备,可提高系统的经济性,因此如何在IES中经济高效地建设和运营多类型储能系统成为值得分析的重要问题。文献[11]考虑了不确定性存在情况下微网的储能裕度,文献[16]考虑了TESS在IES中的配置问题。由于储能所提供的灵活性对于补偿能源系统中的不确定性十分重要,且多类型储能之间可能存在互补因素,因此本文在考虑不确定性情况下进行IES规划-运行联合优化时,对BESS与TESS的配置问题进行了协同优化。

综上所述,本文提出一种两阶段规划-运行联合优化方法,用于解决含多类型储能的IES规划问题,并确定各设备在考虑新能源及负荷不确定性下的调度运行策略,主要贡献点如下:①考虑了RER和多能负荷的不确定性问题以及多类型储能(包括BESS和TESS)的灵活配置问题,提出了两阶段随机规划-运行联合优化模型以提升系统经济性与最大带载能力;②分析了IES在含不确定参数时可考虑的SO及RO建模策略,对比分析了RO与SO的适用情况及优缺点,并分析了SO中随机场景数目的影响,为IES考虑不确定性参数问题提供建模求解的策略和建议。

1 IES规划-运行联合优化模型

1.1 规划-运行联合优化方法的目标函数

IES规划-运行联合优化方法的目标函数包括投资成本和运营成本,如式(1)~(3)所示。它们包含建设阶段的0-1决策变量 z 和运行阶段的连续变量 y 。 z 和 y 的具体说明在第2节两阶段随机规划模型部分给出。整体所提模型的目标函数如下:

$$\min_{y,z} C^{\text{CON}} + \sigma C^{\text{OPE}} \quad (1)$$

$$C^{\text{CON}} = \sum_{g \in G} \sum_{n \in N} \frac{1}{(1+r)^{k-1}} C_{g,n} I_{g,n} \quad (2)$$

$$C^{\text{OPE}} = \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} f_{m,t} P_{m,t} \quad (3)$$

其中, C^{CON} 为建设成本,它由设备的投资决策0-1变量 $I_{g,n}$ 和已知的所选设备的建设成本 $C_{g,n}$ 相乘所得; C^{OPE} 为购买能源过程中的运行成本,包括来自可再生能源资源的供电成本、来自外部电网的购电成本以及购买天然气的耗能成本; σ 为使建设成本和运行成本可相比较的系数,通常用于折算运行时间; g 与 t 分别为设备位置的编号与时间序列; G 与 T 分别为IES含有的设备位置节点集合及时间序列集合; n 为同一种设备具有的不同容量等级类型的编号; N 为同一种设备具有的不同容量等级类型的集合; r 为利率; k 为时间; m 为输入IES节点的编号,且 $m \in M$; M 为输入IES节点的集合; $f_{m,t}$ 为输入节点 m 上的能

源价格; $P_{m,t}$ 为对应的能源输入功率。

1.2 规划-运行联合优化方法的约束条件

规划-运行联合优化方法的约束条件由储能系统模型、IES模型、不确定性参数模型三部分组成。

1.2.1 储能系统模型

为了简化两阶段随机优化问题,本文考虑BESS和TESS的简化模型。式(4)为储能的电量 $E_{g,t}^{\text{ess}}$ 与充电功率 $E_{g,t}^{\text{char}}$ / 放电功率 $E_{g,t}^{\text{dischar}}$ 之间的关系。为便于对储能进行周期性控制,式(5)为限制每天起始和结束时刻储能的电量处于相同水平的约束条件。式(6)和式(7)分别为储能可存储电量和储能进/出线上潮流的约束条件。式(8)和式(9)为解决储能的选型定容问题的约束条件。

$$E_{g,t+1}^{\text{ess}} - E_{g,t}^{\text{ess}} = e_{\text{fc}} E_{g,t}^{\text{char}} - E_{g,t}^{\text{dischar}} / e_{\text{fd}} \quad (4)$$

$$E_{g,1}^{\text{ess}} = E_{g,K}^{\text{ess}} \quad (5)$$

$$E_{g,t}^{\text{min}} \leq E_{g,t}^{\text{ess}} \leq E_{g,t}^{\text{max}} \quad (6)$$

$$0 \leq V_{i,t} \leq g_i^{\text{max}} \quad (7)$$

$$E_g^{\text{min}} = \sum_{n \in N} I_{g,n} E_{g,n}^{\text{essmin}} \quad (8)$$

$$E_g^{\text{max}} = \sum_{n \in N} I_{g,n} E_{g,n}^{\text{essmax}} \quad (9)$$

其中, $g \in \Omega_{\text{ess}}$; $t \in T$; $i \in \Omega_{\text{line}}$; Ω_{ess} 和 Ω_{line} 分别为储能系统的设备位置节点集合以及线路集合; e_{fc} 、 e_{fd} 分别为储能系统的充、放电效率; K 为最后一个时间序列; E_g^{min} 和 E_g^{max} 分别为储能电量的最小值和最大值; g_i^{max} 为线路 i 的最大潮流, g_i^{max} 为其矩阵形式; $E_{g,n}^{\text{essmin}}$ 和 $E_{g,n}^{\text{essmax}}$ 分别为储能设备 g 容量等级类型 n 的最小和最大电量水平,为已知参数; $V_{i,t}$ 为 t 时刻线路 i 上的潮流, $V_{i,t}$ 为其矩阵形式。

1.2.2 IES模型

IES模型包括设备的能量转换约束、输入/输出约束、线路容量约束和投资的逻辑约束。本文采用能源枢纽的模型对IES进行建模分析。式(10)和式(11)为IES中的能量转换关系,具有与能源枢纽中的耦合矩阵类似的用法,并且可包含功率平衡约束^[18]。由于本文重点研究微电网等级的IES规划和运行问题,因此忽略多能网络等更细致的潮流约束,采用简单的供需平衡潮流模型,重点分析不确定性参数及多类型储能所带来的影响。式(12)和式(13)为能量枢纽与其输入、输出之间的功率平衡约束条件。式(14)~(16)为能量枢纽的线路容量约束及相应的设备选型,具体设备选址选型的逻辑约束条件体现在式(17)和式(18)中。

$$H_i A_i V_{i,t} = 0 \quad t \in T, i \in \Omega_{\text{line}} \quad (10)$$

$$H_i A_i V_{i,t} = E_{g,t+1}^{\text{ess}} - E_{g,t}^{\text{ess}} \quad t \in T, g \in \Omega_{\text{ess}} \quad (11)$$

$$P_{m,t} \geq U_{m,t} V_{i,t} \quad m \in M, t \in T \quad (12)$$

$$L_{j,t} = W_{j,t} V_{i,t} \quad j \in J, t \in T \quad (13)$$

$$0 \leq A_i V_{i,t} \leq g_i^{\max} \quad i \in \Omega_{\text{line}} \quad (14)$$

$$g_i^{\max} = \sum_{n \in N} I_{g,n} C_{g,n}^{\max} \quad i \in \Omega_{\text{line}}, t \in T \quad (15)$$

$$0 \leq \sum_{t \in T} V_{i,t} \leq \lambda F_i \quad i \in \Omega_{\text{line}} \quad (16)$$

$$\sum_{n \in N} I_{g,n} \leq 1 \quad (17)$$

$$0 \leq F_i \leq \sum_{n \in N} I_{g,n} \quad i \in \Omega_{\text{line}} \quad (18)$$

其中, H_i 为能量转换特性矩阵; A_i 为能量各分支的入射矩阵; $U_{m,t}$ 和 $W_{j,t}$ 分别为输入、输出的入射矩阵, 表示能量枢纽与外部线路的连接关系; $P_{m,t}$ 和 $L_{j,t}$ 分别为能量枢纽的输入、输出功率; j 为能源枢纽输出(即多能负荷)的编号; J 为能源枢纽输出线路的集合; λ 为较大已知常数, 通过添加相应的约束条件式(16)可实现线路规划决策约束与线路潮流约束的耦合; F_i 为线路的建设决策变量, 为 0-1 整数变量。

1.2.3 不确定性参数模型

不确定性广泛存在于 IES 的负荷端与电源端, 利用大规模新能源及负荷的历史数据进行合理的数据预处理、不确定性参数建模、场景生成/削减, 可以建立 IES 不确定性的模型。其步骤主要如下。

(1) 数据预处理。

对新能源发电及多能负荷的历史数据进行缺漏筛查与聚类分析, 可结合地区气候特征等选取完整的特征数据。

(2) 不确定性参数建模。

分析预处理后的特征数据, 若不确定参数难以用多场景刻画, 则可采用 RO 建立式(19)所示模型, 需要结合特征数据计算不确定性参数的上下界等参数; 若不确定参数能够用一定数量的代表性场景描述, 则可采用 SO 结合特征数据计算数据的分布来建立不确定性参数模型, 例如不确定性参数符合高斯分布则可建立式(20)所示模型。

$$\xi \in [\xi^{\min}, \xi^{\max}] \quad (19)$$

$$\xi \sim N(\mu, \delta^2) \quad (20)$$

其中, 多能负荷及可再生能源资源的不确定性参数由随机向量 ξ 描述, $\xi = [P_{m,t}^{\max}, P_{j,t}^D, P_{m,t}^{\max}]$ 为新能源的最大输出集合, $P_{j,t}^D$ 为多能负荷需求集合, 均为不确定参数; μ 为均值; δ 为标准差。

(3) 场景生成。

若采用 SO, 则需要根据不确定性参数分布模型运用蒙特卡罗模拟产生大量针对不确定参数的典型场景, 并根据计算效率、可靠性及经济性的需求, 考虑使用适当的场景削减方法。

详细的不确定参数建模过程如附录 A 中图 A1 及图 A2 所示。本文选取了哈佛开放数据库中的某工业园区负荷数据及湖北某 PV 电站的发电数据模

拟 IES 负荷及新能源最大出力的不确定性^[20]。

a. 在数据预处理过程中, 由于负荷及 PV 均位于四季分明地带, 本文从每个季节的历史数据中选择了 3 个典型场景。

b. 在不确定性参数建模过程中, 本文将所选出的 12 个场景进行特性拟合得出不确定性参数模型。如图 A1 所示, 应用于 SO 中的不确定性模型的主要参数为均值及方差, 一般可涵盖所有历史数据的 90% 以上; 而图 A2 中, 应用于 RO 中的不确定模型的主要参数为上界及下界, 一般可涵盖 100% 的不确定性参数历史数据。两图中数据每 5 min 记录一次, 1 d 共记录 288 个点。

c. 针对 SO 中的场景生成过程, 基于所得到的热/电负荷不确定性参数平均值、偏差和分布等信息, 采用蒙特卡罗法模拟生成所需数量的 SO 场景, 后续可代入两阶段 SO 模型中的第二阶段进行计算。值得补充的是, 当系统对计算效率与计算量有要求时, 可以适当结合负荷的特性进行场景的削减, 保证 SO 问题的高效求解。同理利用类似的方法可以对 PV 等新能源所具有的不确定参数进行处理并得到相应的随机场景。

2 两阶段优化模型及求解

结合第 1 节中所建立的 IES 规划-运行联合优化方法的目标函数及约束条件, 本文在图 1 所示的方法 1 中建立了如下两阶段 SO 模型, 以便在对系统进行规划优化时充分考虑运行阶段的不确定性。模型目标函数包括投资成本和运营成本, 由式(1)可得:

$$\begin{cases} \min_z C^{\text{CON}} + E_{\xi}(\sigma C^{\text{OPE}}) \\ \text{s.t. 式(4) — (18)} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \min_z C^{\text{CON}} + \sum_{s=1}^S p_s \sigma C^{\text{OPE}} \\ \text{s.t. 式(4) — (18)} \end{cases} \quad (22)$$

其中, s 为场景的编号; S 为场景的总数。

式(21)和式(22)中, 多能负荷及可再生能源资源的不确定性参数由随机向量 ξ 描述。基于不确定性模型中的多场景方法及蒙特卡罗法所产生场景的概率, 可以得到受概率 $p_1, p_2, \dots, p_s$ 影响的不确定参数的随机场景 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_s$ 。因此, 式(21)中的两阶段 SO 问题可以转换为式(22)所述的问题形式。整个问题可以作为两阶段 SO, 投资规划计划为上层第一阶段问题, 调度运行策略为第二阶段问题, 并且在运行阶段考虑不确定因素的影响。第一阶段包含规划建设决策的整数变量, $z = [F_i, I_{g,n}]$, 第二阶段包含运行阶段的不确定性参数和决定运行情况的连续变量, $y = [V_{i,t}, E_{g,t}^{\text{ess}}, E_{g,t}^{\min}, E_{g,t}^{\max}, g_i^{\max}, P_{m,t}, L_{j,t}]$ 。

最后所建立的两阶段随机优化问题可以转为能

用商业软件解决的大规模混合整数线性优化 MILP (Mix Integer Linear Program) 问题。图 1 中方法 2 所对比的两阶段 RO 模型主要结合对偶范数对问题进行求解, 详细内容可参考文献[14]。整体来看, 本文所提出的两阶段规划-运行联合优化建模及求解方法如图 1 所示。

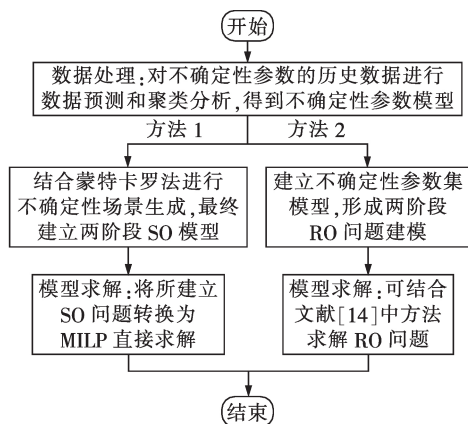


图 1 建模及求解方法流程图

Fig.1 Flowchart of modeling and solution method

3 算例分析

本文将所建立方法应用于图 2 所示 IES 进行为期 10 a 的规划-运行联合优化, 其中运行阶段的成本主要考虑购买电力及天然气的用能成本。待建设能源系统有 3 处能源接入(外电网购电 / PV 购电 / 天然气购气)和 2 处能源输出(电 / 热), IES 中各节点的连线为待计划建设的线路, 可建设的多能设备包括热电联产 CHP (Combined Heat and Power) 系统、BESS、TESS、变压器、热泵 HP (Heat Pump) 等, 相应编号①等为设备所处节点位置, 待选设备的类型及价格如表 1 所示。算例中的不确定性主要存在于 PV 最大输出、电负荷及热负荷中。在算例分析过程中, PV 最大输出和多能负荷需求均是处于正态分布的随机参数, 详细数据来源于哈佛开放数据库及湖北某 PV 电站数据, 所使用的不同负荷需求水平数据以及分时电价数据见文献[20]。该文献包含算例分析中的所有数据, 如建筑成本、设备类型、负荷场景、PV 最大输出场景等(包括不确定参数的平均值及方差等)。所采用天然气价格为 $0.425 \text{ 元} / \text{m}^3$, PV 电价为 $0.7 \text{ 元} / (\text{kW} \cdot \text{h})$, 储能的选型需要同时兼顾储能额定容量(单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$)以及额定功率(单位为 kW)两方面, 本文所选择的 BESS 额定功率大小为额定容量大小的 $1/4$, TESS 的额定功率大小为额定容量大小的 $1/2$ 。机组效率参数方面, CHP 机组的发热效率为 0.45, 发电效率为 0.3; 热泵的产热效率为 0.89; 变压器的发电效率为 0.9; 储能的充电效率为 0.89; 放电效率为 0.88。在优化过程中, 以 5 min 作为运行时间间隔进行规划-运行联合优化。仿真平台的处

理器是 Intel(R) Core(TM) i5-4590 CPU@3.30 GHz, RAM 8.0 GB, 64 bit。MATLAB R2017b 中的 YALMIP 工具箱用于建模和 CPLEX 12.8 优化器的求解。

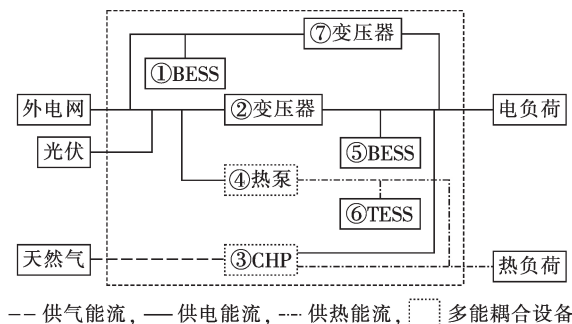


图 2 待建设 IES 示意图

Fig2 Schematic diagram of IES waiting to be constructed

表 1 待选设备的容量及成本价格

Table 1 Capacity and corresponding costs of candidate devices

设备	类型 1		类型 2	
	功率 / kW	价格 / 万元	功率 / kW	价格 / 万元
BESS	300	120	200	60
变压器	800	10	700	8
CHP	600	3 000	300	1 500
热泵	300	540	200	360
TESS	300	30	200	20

3.1 多类型储能建设对 IES 的影响

本节设计了 4 个算例对比进行仿真验证, 分别考虑负荷需求大小不同情况下多类型储能对 IES 的影响。算例 1 为在低负荷需求水平下采用 RO 进行 IES 的规划-运行联合优化, 且规定规划中可配置储能; 算例 2 为在低负荷需求水平下采用 RO 进行 IES 的规划-运行联合优化, 且规划中不可配置储能; 算例 3 为在高负荷需求水平下采用 RO 进行 IES 的规划-运行联合优化, 且规划中可配置储能; 算例 4 为在高负荷需求水平下采用 RO 进行该 IES 的规划-运行联合优化, 且规划中不可配置储能。各算例的最优规划方案如表 2 和表 3 所示, 算例 4 无法得出可行的最优规划方案; 为分析同时建设多类型储能可带来的经济效益, 本文针对算例 3 补充了含不可建设 TESS 情况限制条件下的优化结果, 即算例 3 (无

表 2 各算例最优规划方案(1)

Table 2 Optimal construction plan of every case(1)

算例	①BESS		⑤BESS		⑥TESS	
	功率 / kW	费用 / 万元	功率 / kW	费用 / 万元	功率 / kW	费用 / 万元
1	0	0	0	0	200	20
3	200	60	300	120	300	30
3*	0	0	200	60	—	—

注: 算例 3* 由于限制了不可建设 TESS, 因此规划结果为“—”, 表示该设备无法被选择。

表 3 各算例最优规划方案(2)
Table 3 Optimal construction plan of every case(2)

算例	④热泵		②变压器		③CHP		⑦变压器	
	功率/ kW	费用/ 万元	功率/ kW	费用/ 万元	功率/ kW	费用/ 万元	功率/ kW	费用/ 万元
1	200	360	0	0	0	0	800	10
2	300	540	0	0	0	0	800	10
3	300	540	800	10	300	1500	800	10
3*	300	540	800	10	600	3000	800	10

TESS), 简称为 3*, 分析结果如下。

(1) 储能系统的配置可以提升 IES 的经济性。

对比表 2.3 中算例 1 与算例 2 的最优建设方案可发现, 在系统可配置储能的情况下 IES 最优规划方案建设费用更低。算例 1 选择建设 400 kW·h 的 TESS 而算例 2 选择建设更大额定功率为 300 kW 的热泵, 由于热蓄水池类的 TESS 建设成本较低, 这使得储能的配置可以提升系统建设方案的经济性。

(2) 储能可以提升 IES 的带载能力。

对比算例 3 与算例 4 的最优建设方案可发现, 当负荷需求水平上升时, 算例 4 无法提出可行的建设方案; 而当系统中允许建设电/热储能时, 算例 3 可仅通过储能的配置使 IES 可提供充分的带载能力, 提出可行的最优规划方案。

(3) 同时配置 BESS 与 TESS 可以提升系统的经济效益。

算例 3(无 TESS)选择建设更大额定功率 600 kW 的 CHP 以保证系统的供热及供电, 而算例 3 通过同时在节点①处增加 800 kW·h 的 BESS 以及在节点⑥处增加 800 kW·h 的 TESS, 提出了建设成本更低的最优规划方案。

3.2 RO 与 SO 在 IES 中的应用对比

本节设计了 3 个对比算例来进行仿真验证。算例 1 采用 RO 进行待建设 IES 的规划-运行联合优化(简称为 RO)。算例 2 采用 SO 方法在筛选出的 20 个不确定性参数的场景下进行 IES 的优化(简称为 SO(20))。算例 3 采用 SO 方法在筛选出的 100 个不确定性参数的场景下进行 IES 的优化(简称为 SO(100))。所有算例中都充分考虑 BESS 及 TESS 在 IES 中的配置运行情况。具体在 SO(20)及 SO(100)中, 假设不确定参数(如 PV 的最大输出以及多能负荷等)均符合高斯分布, 并在对不确定性参数进行历史数据的处理分析后, 结合蒙特卡罗法生成大量不确定性场景; 且 SO 与 RO 所处理的不确定性参数的历史数据相同。算例 2 和算例 3 亦选择了四季的典型场景。在算例分析的过程中, 对比了不同算例在优化结果、所需不确定性的场景数量以及计算效率的区别。图 3 比较了不同算例的建设成本、运行成本、切电负荷和切热负荷的情况, 表 4 及表 5 说明了 3 种算例的最优规划方案, 分析结果如下。

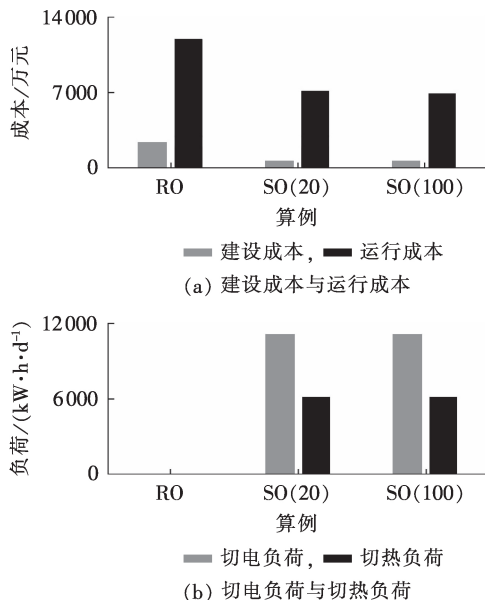


图 3 不同算例优化结果

Fig 3 Optimal results of different cases

表 4 SO(20)与 SO(100)算例的规划方案

Table 4 Planning scheme for SO(20) and SO(100)

参数	①	⑤	⑥	④	②	③	⑦
	BESS	BESS	TESS	热泵	变压器	CHP	变压器
功率/kW	300	200	300	300	700	0	800
费用/万元	120	80	30	540	8	0	10

注: SO(20)与 SO(100)具有相同的优化结果。

表 5 RO 算例的规划方案

Table 5 Planning scheme for RO

设备	功率/ kW	费用/ 万元	设备	功率/ kW	费用/ 万元
①BESS	200	80	②变压器	800	10
⑤BESS	300	120	③CHP	300	1500
⑥TESS	300	30	⑦变压器	800	10
④热泵	300	540			

(1) SO 模型可以提供更经济的 IES 建设及运行方案。由图 3(a)、表 4 及表 5 可知, RO 的运行成本远高于 SO(20)和 SO(100), 这主要是由于 RO 需考虑许多不确定性参数的最恶劣场景, 但相关场景出现频率低, 这使得其建设成本及运行成本高出 SO 近 2 倍; 而 SO 适用于出现频率较高的不确定性场景, 因此可发现在常见情况下的 SO 在运行方面的成本更低。

(2) 场景生成/筛选机制合理时, SO 可通过较少的不确定性参数经典场景得到较优的优化方案, 且计算量较小。分析图 3 及表 4 中的结果可以发现, SO(20)可在较小计算量的情况下得到与 SO(100)几乎等效的优化结果, 这说明在不确定场景筛选机制合理的情况下, SO 可利用较少但典型的不确定性场景达到相同的优化结果。

(3) RO 模型可以提供更可靠的运行方案。如图

3(b)所示,SO(20)和SO(100)算例中每天都有大量的电/热切负荷,并且增加SO场景对于减少电/热切负荷量、提高运行的可靠性的帮助较小,这主要是由于SO专注于最常见、高频的不确定性场景,而RO则关注最恶劣的场景,因此RO由于在最恶劣场景下进行优化而保证了所有负荷的可靠供应,使得电/热切负荷情况均为0。

在模型求解效率方面,结合CPLEX的计算结果可以发现,RO的计算用时为360.39 s,SO(20)为6 786.74 s,SO(100)为259 124.10 s,SO相关算例的计算速度较RO慢。这主要是由于它们包含的不确定性参数场景数目多,使得模型在求解的过程中需要的计算量大。然而基于前述SO的优点,为了求解出满足不确定参数中的最频繁场景的最优IES规划方案,SO模型的求解效率仍是可接受的。同时可发现,当场景数量从20增加到100时,SO花费的计算时长有明显的增长;但图3及表4中显示的不同场景数目下,SO(20)和SO(100)的优化结果差距并不大,这也说明了SO通过场景筛选算法所选择的场景具有数量较少但是更为典型的特点,可提高模型求解速度并提出实用的优化解决方案。

4 结论

本文提出了一种两阶段优化的规划-运行联合优化方法,用于计算IES如能量枢纽等在不确定性因素接入时的最优规划方案和运行策略,并且在模型中充分考虑了电/热储能的灵活配置以提升IES的经济性及带载能力。进一步通过两阶段SO方法与RO方法的对比分析中,可发现当IES的优化侧重经济性时,SO可结合高频的不确定性场景提供更经济的规划运行方案,并且在合理的不确定参数场景生成/筛选机制下,SO所选择的不确定性场景具有数量较少但是更为典型的特点,可达到与RO相同的优化结果。而当IES的优化更注重系统的可靠性及安全性时,RO可结合最劣不确定性参数场景,提出切负荷最小的规划运行方案。值得强调的是,由于需要计算较多不确定性场景,SO的计算效率通常比RO低,这也说明了在SO模型中结合场景筛选算法所选择的典型场景具有数量较少但是更为典型的特点。本文研究为IES在考虑不确定性时的建模策略及考虑电/热储能的配置策略方面提供参考及建议。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] GEIDL M, KOEPEL G, FAVRE-PERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [2] SUN Hongbin, GUO Qinglai, ZHANG Boming, et al. Integrated

energy management system: concept, design, and demonstration in China[J]. IEEE Electrification Magazine, 2018, 6(2): 42-50.

- [3] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
- SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8.
- [4] MANCARELLA P. MES (Multi-Energy Systems): an overview of concepts and evaluation models[J]. Energy, 2014, 65: 1-17.
- [5] BIROL F. World energy outlook 2017 [EB/OL]. [2019-04-15]. <https://www.iea.org/>.
- [6] SHEN X, SHAHIDEHPOUR M, ZHU S, et al. Multi-stage planning of active distribution networks considering the co-optimization of operation strategies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1425-1433.
- [7] COBOS N G, ARROYO J M, ALGUACIL N, et al. Robust energy and reserve scheduling considering bulk energy storage units and wind uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5206-5216.
- [8] GIBB D, JOHNSON M, JOAQUIM R, et al. Process integration of thermal energy storage systems-evaluation methodology and case studies[J]. Applied Energy, 2018, 230: 750-760.
- [9] 杨洪明, 王爽, 易德鑫, 等. 考虑多风电场出力相关性的电力系统随机优化调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 114-120.
- YANG Hongming, WANG Shuang, YI Dexin, et al. Stochastic optimal dispatch of power system considering multi-wind power correlation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 114-120.
- [10] 程林, 张靖, 黄仁乐, 等. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 282-287.
- CHENG Lin, ZHANG Jing, HUANG Renle, et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 282-287.
- [11] 胡晓通, 刘天琪, 何川. 考虑随机特性的独立微网储能裕度计算方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 80-85.
- HU Xiaotong, LIU Tianqi, HE Chuan. Calculation method of storage capacity margin for standalone microgrid considering stochastic characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 80-85.
- [12] 张刘冬, 袁宇波, 孙大雁, 等. 基于两阶段鲁棒区间优化的风储联合运行调度模型[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 59-66.
- ZHANG Liudong, YUAN Yubo, SUN Dayan, et al. Joint operation model of wind-storage system based on two-stage robust interval optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 59-66.
- [13] ZHANG Cuo, XU Yan, DONG Zhaoyang, et al. Robust operation of microgrids via two-stage coordinated energy storage and direct load control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2858-2868.
- [14] CHEN Cong, SHEN Xinwei, GUO Qinglai, et al. Robust planning-operation co-optimization of energy hub considering precise model of batteries' economic efficiency[C]//International Conference on Applied Energy. Hong Kong, China: Energy Procedia, 2019: 6496-6501.
- [15] 张尚, 顾雪平, 王涛. 基于分布鲁棒优化的含风电系统静态安

全校正控制方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 58-64.

ZHANG Shang, GU Xueping, WANG Tao. Static security corrective control method of wind power-integrated system based on distributional robust optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 58-64.

- [16] 于婧, 孙宏斌, 沈欣炜. 考虑储热装置的风电-热电机组联合优化运行策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 139-145.

YU Jing, SUN Hongbin, SHEN Xinwei. Optimal operating strategy of integrated power system with wind farm, CHP unit and heat storage device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 139-145.

- [17] SHAO C, SHAHIDEHPOUR M, WANG X, et al. Integrated planning of electricity and natural gas transportation systems for enhancing the power grid resilience[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4418-4429.

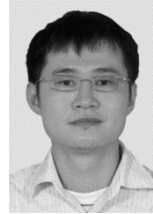
- [18] WANG Y, ZHANG N, ZHUO Z, et al. Mixed-integer linear programming-based optimal configuration planning for energy hub: starting from scratch[J]. Applied Energy, 2018, 210: 1141-1150.

- [19] JACOBS K M. Lazard leveled cost of energy version11[EB/OL]. [2019-04-15]. <https://www.lazard.com/media/450337/lazard-levelized-cost-of-energy-version-110.pdf>.

- [20] LEI Jinyong. Data[EB/OL]. [2019-04-15]. <https://pan.baidu.com/s/1l-43jd5upWecPRhdhS7ydgwithextractioncoderv61>.

com / s / 1l-43jd5upWecPRhdhS7ydgwithextractioncoderv61.

作者简介:



雷金勇

雷金勇(1982—),男,广东惠州人,教授级高级工程师,博士,研究方向为分布式新能源、配电网及综合能源系统(E-mail: leijy@csg.cn);

郭祚刚(1985—),男,湖南永州人,高级工程师,博士,主要研究方向为综合能源及新能源技术(E-mail: guozg@csg.cn);

陈聪(1995—),女,湖北随州人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统规划及调度运行(E-mail: chencong17@mails.tsinghua.edu.cn);

袁智勇(1978—),男,湖北黄冈人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为智能电网技术和综合能源系统(E-mail: yuanyz1@csg.cn);

沈欣炜(1988—),男,福建龙岩人,研究员,博士,通信作者,研究方向为能源互联网、主动配电网规划与运行(E-mail: sxw.tbsi@sz.tsinghua.edu.cn)。

Two-stage planning-operation co-optimization of IES considering uncertainty and electrical / thermal energy storage

LEI Jinyong¹, GUO Zuogang¹, CHEN Cong², YUAN Zhiyong¹,

MA Xiuyan¹, SHEN Xinwei², SUN Hongbin^{2,3}

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China;

2. Tsinghua-Berkeley Shenzhen Institute, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China;

3. State Key Laboratory of Power System, Department of Electrical Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The increasing integration of RER(Renewable Energy Resources) in IES(Integrated Energy System) makes it vital to consider uncertainty, BESS(Battery Energy Storage System) and TESS(Thermal Energy Storage System) in energy system. A two-stage planning-operation co-optimization method for IES considering uncertainties from RER and multi-load demands is proposed. Both BESS and TESS are considered to compensate for the uncertainties and improve the reliability and economy of the system. A two-stage optimization problem is proposed with planning considering IES and energy storage equipment as first-stage problem, which contains 0-1 variables, and IES operation as second-stage problem, which contains uncertainty parameters and multiple continuous variables. Through case studies, the influences of constructing multiple types of storages on IES planning are analyzed, the influences of the scenario's number in two-stage SO(Stochastic Optimization) are discussed and comparison between SO and RO(Robust Optimization) are illustrated, which can provide suggestions for optimal storage construction and appropriate modeling strategy of uncertainty in IES.

Key words: IES; BESS; TESS; two-stage stochastic optimization; planning-operation co-optimization; optimization

附录 A

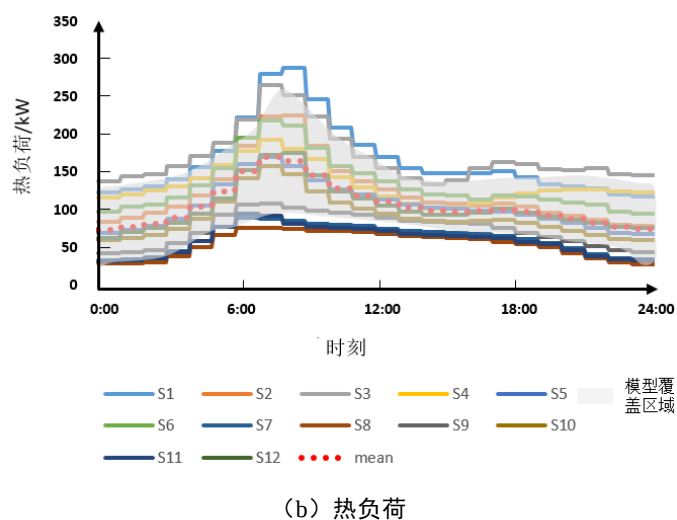
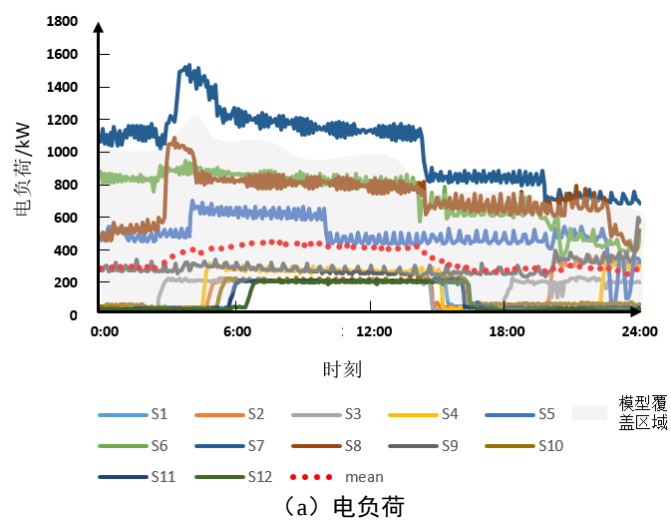
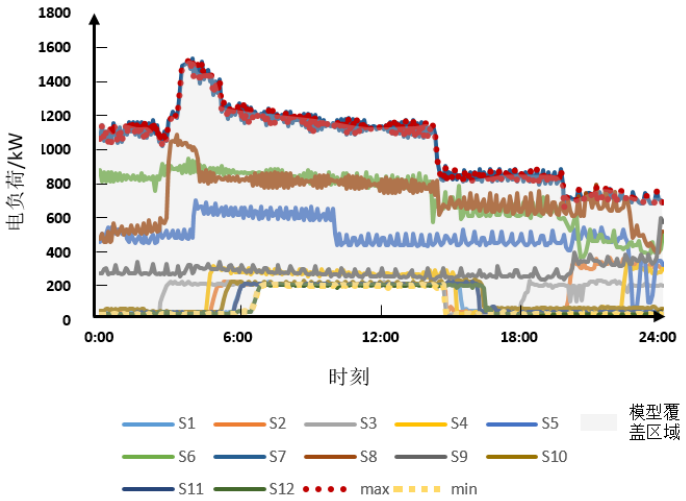
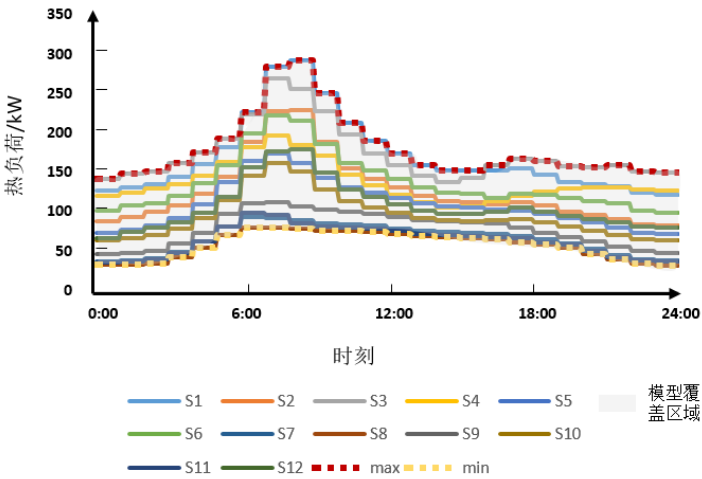


图 A1 随机优化中不确定性模型处理

FigA1 Model of uncertainties in SO



(a) 电负荷



(b) 热负荷

图 A2 鲁棒优化中不确定性模型处理

FigA2 Model of uncertainties in RO