

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.2.115

中图分类号: TM734

文献标志码: A

考虑灵活性资源的微电网双层优化策略

余运俊¹, 杨林锋¹, 哈志蕊², 钟志萍², 衷国璘², 龚海¹

(1.南昌大学信息工程学院, 南昌 330031; 2.萍乡供电公司, 萍乡 337000)

摘要:为提高微电网应对新能源出力 and 负荷不确定性的能力, 提出1种考虑灵活性资源的微电网优化控制策略。根据各类灵活性资源的源储荷特性进行分类, 建立微电网双层优化调度模型。用户层引入用户侧灵活性资源, 以用户费用和净负荷差值最小为优化目标, 决策变量为电动汽车和可平移负荷出力功率。源储层模型加入储能侧与发电侧灵活性资源, 以微电网运营商成本和失负荷率最小为优化目标, 决策变量为燃气轮机、主网联络线和储能单元出力功率。使用场景缩减的季节典型日数据进行算例仿真, 采用改进后的基于分解的多目标进化 MOEA/D(multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition)算法对双层优化调度模型进行求解, 年均用户费用降低 6.85%, 运营商年均总成本下降 14.68%, 年均失负荷率下降 6.65%, 验证了本文所提模型的合理性和有效性。

关键词: 可再生能源; 微电网; 调度; 灵活性资源; 改进 MOEA/D 算法; 多目标优化

Two-layer Optimal Strategy for Microgrid Considering Flexible Resources

YU Yunjun¹, YANG Linfeng¹, HA Zhirui², ZHONG Zhiping², ZHONG Guoying², GONG Hai¹

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Pingxiang Power Supply Company, Pingxiang 337000, China)

Abstract: To improve the capability of microgrid in coping with new energy output and load uncertainty, an optimal control strategy for microgrid considering flexible resources is proposed. According to the source-storage-load characteristics of various flexible resources, a two-layer optimal scheduling model for microgrid is established. In the user layer, user-side flexibility resources are introduced, with an optimization goal of minimizing the difference between user costs and net load and decision variables of electric vehicles and output power of translatable loads. In the source-storage layer model, flexible resources are added to the energy storage and power generation sides, with an optimization goal of minimizing the microgrid operators' cost and load loss rate and decision variables of gas turbines, main network tie-line and output power of energy storage unit. A case study based on scenario-reduced seasonal typical daily data is simulated, and the improved MOEA/D(multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition) algorithm is used to solve the two-layer optimal scheduling model. Results show that the average annual user cost is reduced by 6.85%, the average annual total cost of operators is reduced by 14.68%, and the average annual load loss rate is reduced by 6.65%. The results verified the

correctness and effectiveness of the proposed method.

Keywords: Renewable energy; microgrid; scheduling; flexible resource; improved MOEA/D algorithm; multi-objective optimization

收稿日期: 2022-07-10; 修回日期: 2022-10-18; 录用日期:

2022-11-06; 网络首发日期: 2023-01-13

基金项目: 江西省重点研发计划资助项目(20214BBG74006); 国家自然科学基金资助项目(61563034); 国家国际科技合作专项资助项目(2014DFG72240)

This work is supported by Jiangxi Province Key R&D Program Project under the grant 20214BBG74006; National Natural Science Foundation of China under the grant 61563034; National Special Project for International Science and Technology Cooperation under the grant 2014DFG72240

作为目前分布式电源最有效的组织形式, 微电网系统不仅可以实现能量的梯级利用, 还能提升能源消纳率, 实现光伏和风电等可再生能源的高比例接入^[1-3]。但是受自身容量限制及可再生能源出力

与负荷需求不确定性的影响,很难保证系统的经济可靠运行^[4-5]。因此,考虑微电网内部的多类灵活性资源并搭配合理的优化调度计划成为新形势下微电网研究工作的重点。

目前国内外学者的研究侧重于灵活性评估指标的构建和系统规划中灵活性评价,对电力系统灵活性的定义进行了详细介绍^[6],从灵活性充裕视角分析各类灵活性资源的供需特性,提出灵活性量化指标以提高系统的消纳能力^[7]。同时,为合理调度微电网内部多类灵活性资源,国内外学者在含新能源及电动汽车的微电网多层优化协同控制方法上进行了大量研究。文献^[8]将微电网作为上层领导者,以自身收益最大为目标函数,与下层电动汽车充换储一体化电站传输交易,下层通过调整内部电价改变充放电计划以最大化自身收益,同时采用差分进化算法分别对上、下层优化问题进行求解;文献^[9]采取多目标分级方法,根据微电网内部各灵活性资源运行所起作用的不同,将其分为负荷级、源荷级和源网荷级的三级优化问题,同时采用变异粒子群优化 MPSO(mutation particle swarm optimization)算法分别对分级后的 3 个模型进行求解;文献^[10]提出了 1 种考虑电动汽车随机接入的微电网多目标优化负荷分配模型,并使用改进的粒子群算法在 3 种不同调度场景下进行求解,验证其所提方法的科学性及有效性。其次,以经济性为优化目标,如以总运行成本最小为优化目标,制定离网状态下的最优调度方案^[11],但未考虑不同季节对调度计划有效性的影响,对于涉及的灵活性资源的研究也不够全面^[12],如文献^[13]从调度灵活性视角分析需求响应中可平移负荷对离网型微电网系统的影响,但其响应策略没有准确数据支撑,无法得到真实情况下可平移负荷参与时的调度方案。

本文通过加入用户侧、储能侧与发电侧灵活性资源,建立以用户费用、运营商成本、净负荷均值及失负荷率最低为优化目标的微电网双层优化调度模型,实现对灵活性资源的合理分配,制定最优调度方案。算例以不同季节下的微电网系统为研究对象,验证本文所提模型的合理性和有效性。

1 微电网各灵活性资源及其数学模型

本文研究的微电网系统架构如图 1 所示,内部由光伏单元、风力发电单元、发电侧灵活性资源的可控式发电单元和储能系统向基础负荷、电动汽车 EV (electric vehicle) 负荷和可平移负荷供电,并与上级电网通过联络线进行能量交互,确保系统功率平衡。

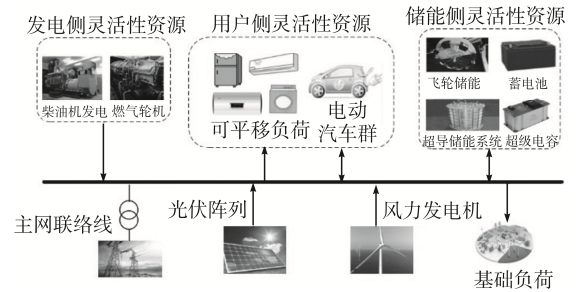


图 1 含灵活性资源的微电网系统结构

Fig. 1 Structure of microgrid system with flexible resources

根据灵活性资源的源储荷特性,本文选取电动汽车单元与可平移负荷单元作为用户侧灵活性资源,将柴油发电机与燃气轮机作为发电侧灵活性资源,飞轮储能、蓄电池、超级电容与超导储能系统 SMES (superconducting magnetic energy storage) 等归为储能侧灵活性资源。

1.1 用户侧灵活性资源

1.1.1 电动汽车

以微电网灵活性的角度分析,电动汽车放电时,可视为移动电源,减少负荷需求大于可再生能源发电量时的失负荷量;充电时可作为移动负荷,减少可再生能源发电量高于负荷需求时的弃风弃光量。利用电动汽车的双重特性,合理安排其充放电调度,可以有效减少净负荷差值及用户的购电成本^[14]。其中电动汽车 i 的荷电状态 SOC(state of charge)为

$$S_i(t) = S_{0,i} + \sum_{t=T_{in,i}}^{T_{out,i}+24} \frac{P_i(t) \cdot \eta_i \cdot \mu_i(t)}{Q_{s,i}} \quad (1)$$

式中: $S_i(t)$ 为车辆 i 在 t 时刻的荷电状态; $S_{0,i}$ 为车辆 i 初始时刻荷电状态; $P_i(t)$ 为车辆 i 在 t 时刻的充电或放电功率; η_i 为电能转化效率; $\mu_i(t)$ 为

车辆 i 在 t 时刻的充放电状态; $Q_{s,i}$ 为电池总容量; $T_{in,i}$ 为车辆 i 结束出行的入网时刻; $T_{out,i}$ 为车辆 i 离开微电网的出行开始时刻。

1.1.2 可平移负荷

可平移负荷是调整开启时间对其用电时段进行平移但总量保持不变的负荷, 如空调、洗衣机、冰箱、热水器及大/中型工商业用户等。通过峰谷电价与电网补贴等方式调整用电时间与用电功率, 能够达到削峰填谷, 消纳多余可再生能源和实现系统经济运行的目的, 是微电网优化调度中重要的资源^[5], 其过程可表示为

$$\sum_{t=1}^T L_{tr}(t) - \sum_{t=1}^T P_{tr}(t) = 0 \quad (2)$$

式中, $L_{tr}(t)$ 、 $P_{tr}(t)$ 分别为 t 时刻调度前、后的可平移负荷功率。

1.2 储能侧灵活性资源

储能是微电网的重要组成部分, 其调峰调频与用户需求管理功能契合灵活性资源的特点。在可再生能源充足时储存电能, 不足时释放电能。本文选取微电网中常见的蓄电池代表储能侧灵活性资源, 其荷电状态反映储能系统 ESS(energy storage system) 当前时段容量占总容量的比例, 决定了储能系统调度周期内后续时刻的充放电状态, 其计算公式为

$$S_{ess}(t+1) = (1-\delta) \cdot S_{ess}(t) - \frac{\Delta t \cdot \eta_{ess}(t) \cdot P_{ess}(t)}{E_{ess}} \quad (3)$$

式中: $S_{ess}(t)$ 为 t 时刻 ESS 荷电状态; δ 为 ESS 自放电效率; $\Delta t=1\text{h}$; $\eta_{ess}(t)$ 为 ESS 在 t 时刻的充放电效率; $P_{ess}(t)$ 为 t 时刻 ESS 的充、放电功率, 其值大于 0 时表示储能向微电网放电, 小于 0 时表示储能系统充电; E_{ess} 为 ESS 的最大容量。

1.3 发电侧灵活性资源

本文所述发电侧灵活性资源采用燃气轮机, 其通过燃烧天然气, 将天然气中的化学能转化为电能和热能, 以弥补风机和光伏单元发电的不足, 保证微电网的可持续供电, 为用户提供可靠的电力服务。燃气轮机的发电功率为

$$P_{MT}(t) = V_{MT}(t) \cdot L_{MT} \eta_{MT} \quad (4)$$

式中, $P_{MT}(t)$ 、 $V_{MT}(t)$ 、 L_{MT} 、 η_{MT} 分别为 t 时刻燃气轮机的发电功率、单位时间天然气消耗量、燃气热值、发电效率。

2 考虑灵活性资源的微电网双层优化模型

2.1 双层优化模型结构

微电网系统中灵活性资源的存在形式可分为用户侧灵活性资源、储能侧灵活性资源与发电侧灵活性资源, 所建立的双层优化模型如图 2 所示。该模型先利用用户侧灵活性资源减少系统内的净负荷波动, 再合理安排储能侧与发电侧灵活性资源出力状态, 在协调源荷特性的同时有利于更好发挥灵活性资源的经济优势。用户层模型中的微电网需求负荷响应中心通过调度微电网系统内的可平移负荷与电动汽车单元, 制定出合理的用户需求曲线, 能够有效减少用户的购电费用与净负荷波动; 再基于用户层所提供的优化后总负荷曲线, 源储层模型中的微电网运营商调度中心可通过对发电侧灵活性资源与储能侧灵活性资源进行协调调度, 以降低微电网系统的失负荷量与运营商成本。

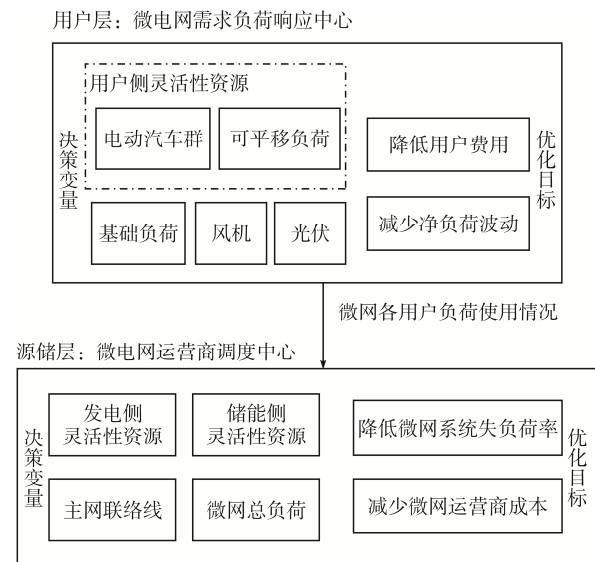


图 2 考虑灵活性资源的微电网双层优化框架
Fig. 2 Framework of two-layer optimization of microgrid considering flexible resources

2.2 负荷层优化模型

2.2.1 目标函数

用户层模型的目标函数为用户成本 F_1 及净负荷差值 F_2 最小。用户成本 F_1 包括电动汽车充电费用及放电补贴之和 $C_{ev,cost}$ 、可平移负荷购电费用 $C_{tr,cost}$ 与不可平移负荷购电费用 $C_{im,cost}$ 。净负荷差值 F_2 为微电网在日前调度期间负荷总值 $P_L(t)$ 与风光出力预测值 $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 之差。 F_1 和 F_2 的表达式分别为

$$F_1 = C_{ev,cost} + C_{tr,cost} + C_{im,cost} \quad (5)$$

$$C_{ev,cost} = \sum_{t=1}^{24} P_{L,ev}(t) \cdot P_r(t) \quad (6)$$

$$C_{tr,cost} = \sum_{t=1}^{24} P_{L,tr}(t) \cdot P_r(t) \quad (7)$$

$$C_{im,cost} = \sum_{t=1}^{24} P_{L,im}(t) \cdot P_r(t) \quad (8)$$

$$F_2 = \sum_{t=1}^{24} |P_L(t) - P_{WT}(t) + P_{PV}(t)| \quad (9)$$

$$P_L(t) = P_{L,ev}(t) + P_{L,im}(t) + P_{L,tr}(t) \quad (10)$$

式中： $P_{L,ev}(t)$ 、 $P_{L,tr}(t)$ 、 $P_{L,im}(t)$ 分别为 t 时刻电动汽车、可平移负荷、不可平移负荷的实时功率； $P_r(t)$ 为微电网 t 时刻的分时电价； $P_L(t)$ 、 $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 分别为 t 时刻微电网总负荷、风机出力、光伏出力的预测功率。不可平移负荷为运行过程中不可被微电网系统所调控的负荷单元，且其出力具有不确定性。目前不可平移负荷的预测精度很高，较好的预测模型精度可达 95% 以上。

2.2.2 约束条件

电动汽车充、放电约束条件表示为

$$\begin{cases} S_{ev}^{\min} \leq S_{ev}(t) \leq S_{ev}^{\max} \\ P_{ev}^{\min} \leq P_{ev}(t) \leq P_{ev}^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $S_{ev}(t)$ 、 S_{ev}^{\max} 、 S_{ev}^{\min} 分别为 t 时刻的电动汽车荷电状态、电动汽车荷电状态上限、电动汽车荷电状态下限； $P_{ev}(t)$ 、 P_{ev}^{\max} 、 P_{ev}^{\min} 分别为 t 时刻的电动汽车充电功率、电动汽车最大充电功率、电动汽车最大放电功率。

可平移负荷需求总量约束条件表示为

$$W_{L,tr} = \sum_{t=1}^T P_{L,tr}(t) \cdot \Delta T \quad (12)$$

式中， $W_{L,tr}$ 为调度周期内的可平移负荷需求总量，平移前、后整个调度周期内的总负荷量都应保持不变。

可平移负荷功率上、下限表示为

$$P_{L,tr}^{\min} \leq P_{L,tr}(t) \leq P_{L,tr}^{\max} \quad (13)$$

式中， $P_{L,tr}^{\max}$ 和 $P_{L,tr}^{\min}$ 分别为可平移负荷在 t 时刻的用电功率上限和下限。

2.3 源储层优化模型

2.3.1 目标函数

源储层模型的目标函数为微电网运营商成本 F_3 及微电网运行周期内的失负荷率 F_4 最小。其中运营商成本 F_3 包括燃气轮机运行产生的综合运行成本 $C_{MT,cost}$ 、主网联络线的总成本 $C_{grid,cost}$ 、储能系统的运维成本 $C_{ess,cost}$ 与购电成本 C_{buy} 。 F_3 和 F_4 的表达式分别为

$$F_3 = C_{MT,cost} + C_{grid,cost} + C_{ess,cost} + C_{buy} \quad (14)$$

$$C_{MT,cost} = C_{MT,om} + C_{MT,EN} + C_{MT,fuel} \quad (15)$$

$$C_{MT,om} = \sum_{t=1}^T K_{om,MT} \cdot P_{MT}(t) \quad (16)$$

$$C_{MT,EN} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (C_k \gamma_{MT,k}) \cdot P_{MT}(t) \quad (17)$$

$$C_{MT,fuel} = \sum_{t=1}^T K_{fuel,MT} \cdot P_{MT}(t) \quad (18)$$

$$C_{grid,cost} = C_{grid,price} + C_{grid,EN} + C_{grid,wave} \quad (19)$$

$$C_{grid,price} = \sum_{t=1}^T P_r(t) \cdot P_{grid}(t) \quad (20)$$

$$C_{grid,EN} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (C_k \gamma_{grid,k}) |P_{grid}(t)| \quad (21)$$

$$C_{grid,wave} = \gamma_{grid,w} \left| \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^T P_{grid}(t) - P_{grid}(t) \right| \quad (22)$$

$$C_{ess,cost} = |P_{ess}(t)| \alpha_{ess,om} \quad (23)$$

$$C_{buy} = P_{WT}(t) \cdot C_{WT} + P_{PV}(t) \cdot C_{PV} \quad (24)$$

$$P_g(t) = P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{grid}(t) + P_{ess}(t) + P_{MT}(t) \quad (25)$$

$$F_4 = \frac{\sum_{t=1}^{24} P_L(t) - \sum_{t=1}^{24} P_g(t)}{\sum_{t=1}^{24} P_L(t)} \quad (26)$$

式中: $C_{MT,om}$ 为运行维护成本; $C_{MT,EN}$ 为环境治理成本; $C_{MT,fuel}$ 为燃料成本; $K_{om,MT}$ 为燃气轮机的运行维护系数; $P_{MT}(t)$ 为 t 时刻燃气轮机发电机组出力总和; C_k 为对第 k 类污染物的治理费用; $\gamma_{MT,k}$ 为燃气轮机运行过程中产生的第 k 类污染物总排放量; $K_{fuel,MT}$ 为燃气轮机的燃料系数; $C_{grid,price}$ 为主网与微电网电量的交易成本; $C_{grid,EN}$ 为主网产生的环境治理成本; $\gamma_{grid,k}$ 为主网联络线运行过程中产生的第 k 类污染物总排放量; $C_{grid,wave}$ 为主网联络线功率惩罚费用; $\gamma_{grid,w}$ 为主网联络线功率惩罚系数; $P_{grid}(t)$ 为主网 t 时刻的联络线功率, 其值大于 0 时表示微电网向主网联络线购电, 小于 0 时表示微电网向主网联络线售电; $\alpha_{ess,om}$ 为储能系统的运行维护系数; C_{WT} 与 C_{PV} 分别为风机与光伏发电单元的售电电价; $P_L(t)$ 与 $P_g(t)$ 分别为微电网失负荷率 F_4 中的负荷需求总量与发电总量。

2.3.2 约束条件

功率平衡约束条件表示为

$$P_{grid}(t) + P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{MT}(t) + P_{ess}(t) = P_L(t) \quad (27)$$

燃气轮机出力约束条件表示为

$$\begin{cases} P_{MT}(t) - P_{MT}(t-1) \leq R_{MT,max}^{up} \\ P_{MT}(t-1) - P_{MT}(t) \leq R_{MT,max}^{down} \end{cases} \quad (28)$$

式中, $R_{MT,max}^{up}$ 和 $R_{MT,max}^{down}$ 分别为燃气轮机最大向上爬坡速率和最大向下爬坡速率。

储能电池充放电约束条件表示为

$$\begin{cases} S_{ess,min} \leq S_{ess}(t) \leq S_{ess,max} \\ |P_{ess}(t)| \cdot \Delta t \leq 0.2E_{ess} \end{cases} \quad (29)$$

式中, $S_{ess,min}$ 和 $S_{ess,max}$ 分别为 ESS 荷电状态的上限和下线。

主网联络线功率上、下限表示为

$$P_{grid}^{min} \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid}^{max} \quad (30)$$

式中, P_{grid}^{max} 和 P_{grid}^{min} 分别为主网联络线功率的最大值和最小值。

2.4 算法求解流程

本文采用改进的基于分解的多目标进化 MOEA/D(multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition)算法进行求解。改进算法在原算法^[16]的基础上, 增加了满足约束的初始化策略及考虑最大适应值提升的取代策略, 有效解决了原算法出现的收敛过早和全局搜索能力差等缺点。算法由 2 个部分组成: 第 1 部分是先将多目标问题分解为一系列的单目标子问题, 实现对整个帕累托(Pareto)前沿的逼近; 第 2 部分为针对每一个单目标优化子问题进行信息协同进化, 通过不停迭代计算以实现对整个 Pareto 前沿的有效覆盖。为避免算法在求解过程中陷入局部最优, 每次迭代结束, 种群始终是由每个子问题的潜在最优解组成, 并通过选取恰当的子问题对邻域进行优化, 使不同子问题相互交换信息, 保证算法的寻优能力, 并采用模糊隶属度函数从 Pareto 前沿上选取最恰当的解决方案。具体流程如图 3 所示。

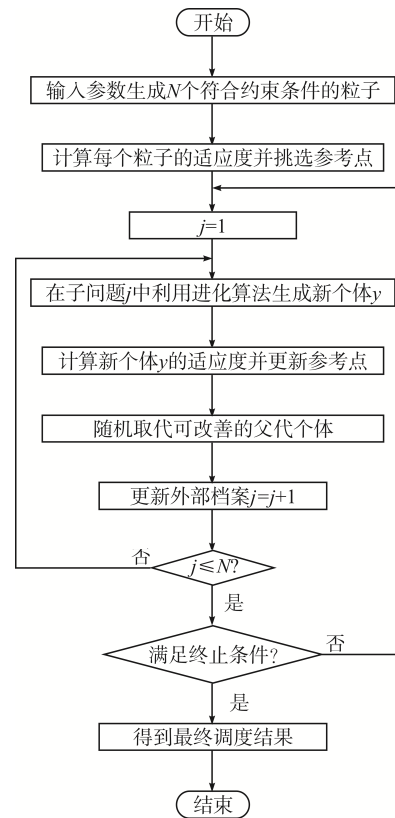


图 3 改进的 MOEA/D 算法整体流程

Fig. 3 Overall process of improved MOEA/D algorithm

3 仿真实验与结果分析

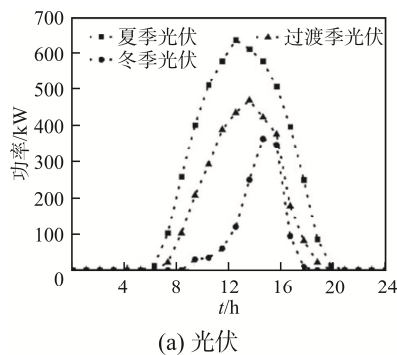
3.1 基础数据

本文以含光伏、风机、负荷、电动汽车及储能系统的某商业园区为例^[7],对微电网系统的灵活性资源优化调度问题进行研究,相关仿真参数设置见表 1^[9],不同季节典型日的源荷数据如图 4 所示,调度周期为 1 d,时间间隔为 1 h,设定调度时间内的可平移负荷总量不超过总负荷的 10%,电动汽车群数量为 100 辆,单位时间内主网联络线最大交互功率取 500 kW,功率波动惩罚成本为 0.3 元/(kW·h),碳排放惩罚成本为 0.187 元/(kW·h),风机和光伏上网单位电价分别为 0.38 和 0.42 元/(kW·h)。

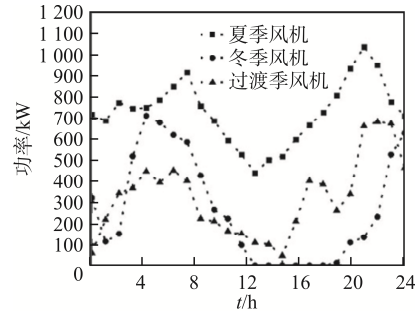
表 1 各灵活性资源运行参数

Tab. 1 Operating parameters of each flexible resource

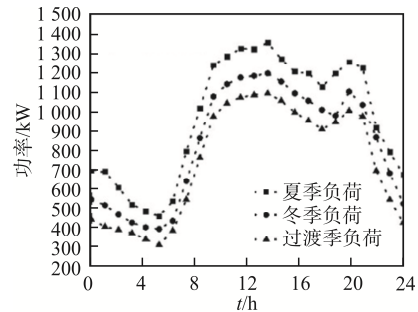
设备类型	设备参数	数值
燃气轮机	最大功率/kW	150
	最小功率/kW	20
	维护费用/(元·kW ⁻¹)	0.040 1
	燃料费用/(元·kW ⁻¹)	0.41
	碳排放惩罚/(元·kW ⁻¹)	0.152 04
储能系统	最大功率/kW	200
	最小功率/kW	-200
	SOC 上、下限	[0.25,0.95]
	维护费用/(元·kW ⁻¹)	0.104
	充放电效率	0.9
电动汽车	最大功率/kW	4
	最小功率/kW	-4
	SOC 上、下限	[0.3,0.9]
可平移负荷	充放电效率	0.9
	最大功率/kW	200
	最小功率/kW	0



(a) 光伏



(b) 风机



(c) 负荷

图 4 各季节典型日负荷与可再生能源功率预测曲线

Fig. 4 Typical daily load and renewable energy power forecast curves in different seasons

微电网与主网的电能交易采用分时电价形式,参考上海市分时电价,具体见表 2。

表 2 微电网分时电价

Tab. 2 Time-of-use electricity price for microgrid

时段类型	具体时段	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
峰	08:00—10:00	0.964
	18:00—20:00	
谷	22:00—05:00	0.273
平	05:00—08:00	0.575
	10:00—18:00	
	20:00—22:00	

3.2 结果分析

通过 MATLAB 2018a 软件进行仿真实验,电脑配置为 Intel(R) Core(TM) i7-4790M CPU@3.6GHz。

3.2.1 负荷层优化结果

利用改进后 MOEA/D 算法对各季节典型日负荷层的电动汽车单元与可平移负荷单元进行优化调度,所得出力结果及微电网系统优化前后总负荷曲线如图 5 所示。可以看出,09:00 至 17:00 期间电动汽车单元为离网状态,既不充电也不放电,较符合用户的行驶习惯。17:00 之后电动汽车并网,参与微电网系统的调度并在晚高峰期间放电缓解

用电紧缺情况。同时可平移负荷单元也在早高峰与晚高峰时期, 尽量减少出力, 将其平移至净负荷较低时工作。优化后, 电动汽车的有序充放电与可平移负荷单元的“削峰填谷”使夏季典型日净负荷差值降低 55.7%, 冬季典型日净负荷差值降低 12.4%, 过渡季典型日净负荷差值降低 10.2%。且电动汽车充电和可平移负荷大功率工作主要集中在谷时电价, 可有效减少用户的购电费用; 同时电动汽车单元也集中在峰时时刻进行放电, 可极大缓解用电紧缺。

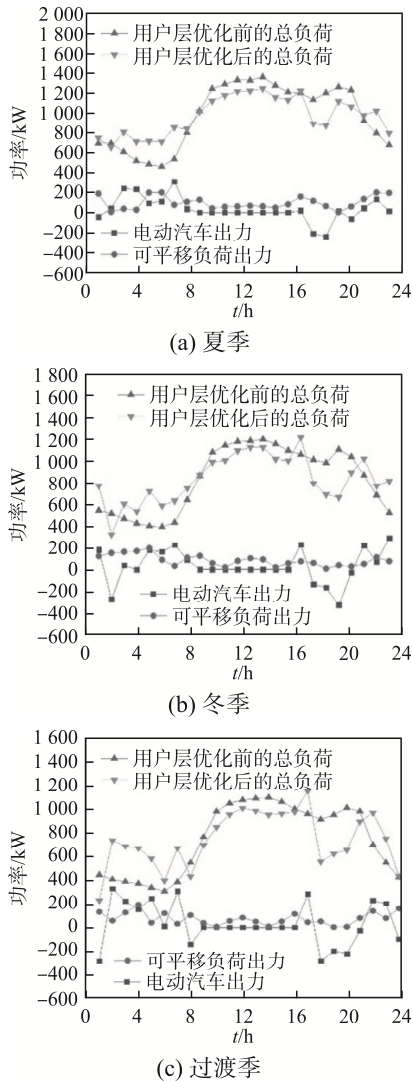


图 5 负荷层优化后微电网各单元出力曲线

Fig. 5 Output curve of each unit of microgrid after load layer optimization

3.2.2 源储层优化结果

参与源储层优化的运行单元为储能侧灵活性资源、发电侧灵活性资源与主网联络线。将用户层

优化后的微电网总负荷结果代入源储层模型中, 利用改进的 MOEA/D 算法对其求解, 可得出源储层各调度单元的出力情况, 如图 6 所示。可以看出, 夏季典型日中主网联络线购电功率与储能充电功率相对较低, 这是因为夏季的风光资源充分, 对应新能源出力最大, 能确保大部分负荷正常供电。冬季的风光资源相应较少, 燃气轮机出力功率、主网

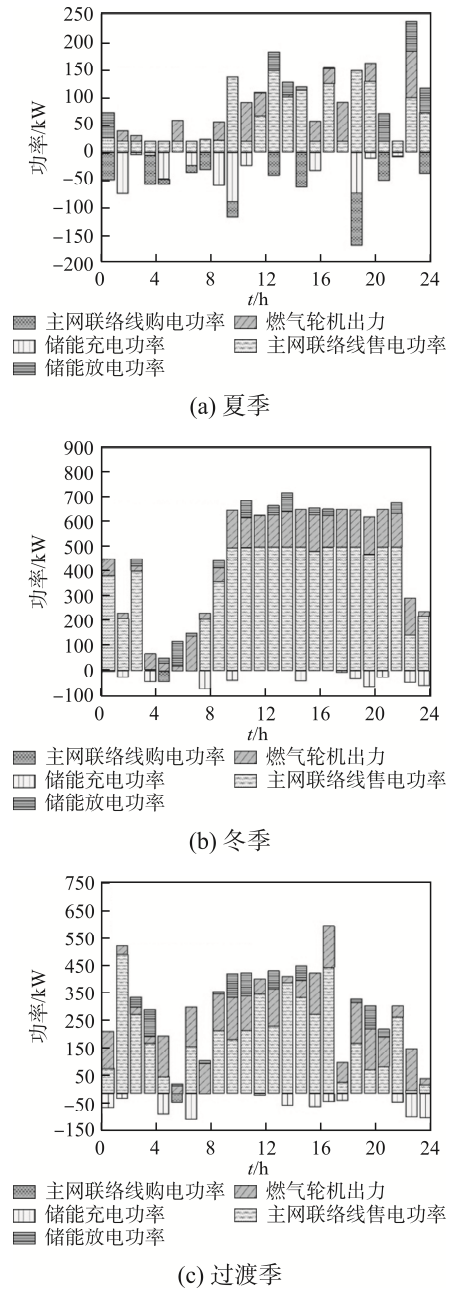


图 6 源储层优化后微电网各单元出力曲线

Fig. 6 Output curve of each unit of microgrid after source-storage layer optimization

联络线售电功率与储能放电功率相对其他季节都较高。在源储层模型中,优化目标为失负荷率与微电网运营商费用最低,主网联络线、储能与燃气轮机的功率都在尽可能满足用户供电的基础上跟随微电网分时电价的变化趋势而上升或下降。

3.2.3 对比分析

为更清晰地验证灵活性资源及双层优化调度策略对提升系统应对新能源出力和负荷不确定性能力的有效性,本文设定以下 5 种方案进行验证:

方案 1,未使用双层优化调度方法的微电网常规调度方案;方案 2,仅使用用户层优化调度方案,优化方法采用 MOEA/D 算法;方案 3,仅使用源储层优化调度方案,优化方法采用 MOEA/D 算法;方案 4,使用双层优化调度方案,优化方法采用 MOEA/D 算法;方案 5,使用双层优化调度方案,优化方法采用改进后的 MOEA/D 算法。分别对夏季、冬季与过渡季典型日数据进行算例分析,以上述方案进行仿真,实验结果见表 3 与图 7。

表 3 典型日不同方案的优化结果

Tab. 3 Optimization results under different schemes on typical day

季节	结果	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
夏季	用户费用/元	14 325	13 704	14 325	13 704	13 704
	失负荷率/%	0	0	0	0	0
	运营成本/元	11 348	11 348	10 591	9 689	9 487
	运行时间/s	602	629	627	654	680
冬季	用户费用/元	12 381	11 678	12 381	11 678	11 678
	失负荷率/%	26.2%	26.2%	17.7%	8.35%	7.34%
	运营成本/元	15 145	15 145	14 629	13 801	13 565
	运行时间/s	541	562	569	592	640
过渡季	用户费用/元	11 135	10 169	11 135	10 169	10 169
	失负荷率/%	3.88%	3.88%	3.49%	0.69%	0
	运营成本/元	12 141	12 141	11 120	10 475	10 055
	运行时间/s	623	642	649	672	699

由表 3 可见,夏季典型日中方案 2 比方案 1 的用户费用下降 4.34%;方案 3 比方案 1 的运营成本降低 6.67%。冬季典型日中方案 2 比方案 1 的用户费用降低 5.68%;方案 3 比方案 1 的运营成本降低 3.41%,失负荷率降低 8.50 个百分点。过渡季典型日中方案 2 比方案 1 的用户费用降低 8.67%;方案 3 比方案 1 的运营成本降低 8.41%,失负荷率降低 0.39 个百分点。

由图 7 可见,在 3 个季节典型日的仿真结果中,

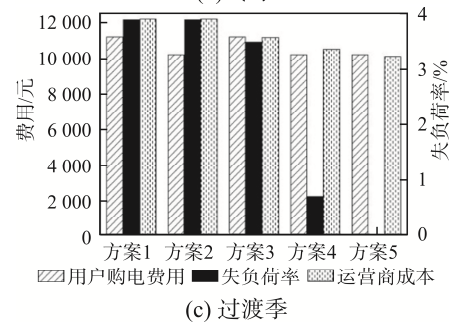
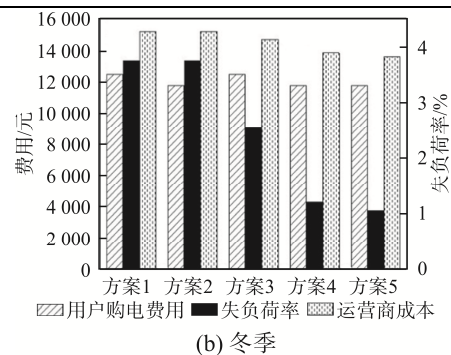
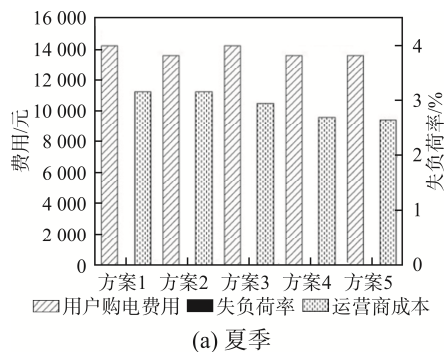


图 7 各季节典型日的方案结果对比

Fig. 7 Comparison of results under different schemes for typical days in different seasons

方案2相对方案1只能相应减少用户费用1个指标,对于失负荷率与运营商成本并没有进行优化,而方案3相对方案1可以有效降低失负荷率与运营商的成本,但没有对用户费用进行优化。方案4、方案5在考虑用户侧、储能侧与发电侧灵活性资源的基础上,使用双层优化调度方法,可以同时优化用户费用、失负荷率与运营商成本3个目标函数。结果表明相对另外3个方案,方案4、方案5能有效提高微电网系统应对不确定性的能力,减小经济损失,有效降低微电网失负荷率,提高系统运行水平。但在失负荷率和运营成本2个优化目标上,采用改进后的MOEA/D算法进行优化的方案5比采用原算法的方案4所得结果更优。

4 结语

本文综合考虑微电网中灵活性资源的源储荷特性,并基于此建立计及灵活性资源的微电网双层优化调度模型,以提高微电网应对新能源出力和负荷不确定性的能力。仿真结果表明,在微电网进行优化调度时,考虑灵活性资源,能更好地应对微电网中可再生能源与用户负荷随机性、波动性所造成的功率大幅波动,有效减少系统运行成本和用户费用,在保证系统灵活性充裕度的基础上可以最大程度降低微电网的切负荷量。采用本文所提方法获得的调度方案,年均用户费用降低6.85%,运营商年均总成本下降14.68%,年均失负荷率下降6.65%。

参考文献:

- [1] 苗中磊,蔡逢煌,王群兴,等. 分布式直流微电网分级控制技术综述[J]. 电源学报, 2019, 17(6): 115-127.
Miao Zhonglei, Cai Fenghuang, Wang Qunxing, et al. Review of hierarchical control of distributed DC microgrid [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(6): 115-127. (in Chinese)
- [2] Yu Yunjun, Cao Junfei, Zhu Jianyong. An LSTM short-term solar irradiance forecasting under complicated weather conditions [J]. IEEE Access, 2019, 7: 145651-145666.
- [3] Liu Caicheng, Li Ming, Yu Yunjun, et al. A review of multitemporal and multispatial scales photovoltaic forecasting methods [J]. IEEE Access, 2022, 10: 35073-35093.
- [4] 李颖杰,温启良. 含风-光-储的微电网接入对配电网供电可靠性的影响[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 98-103.
Li Yingjie, Wen Qiliang. Effect of micro-grid access with wind-light-storage on power supply reliability of distribution network [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 98-103. (in Chinese)
- [5] 马智远,周凯,李晨懿,等. 考虑不确定区域的敏感设备电压暂降兼容能力分析[J]. 电源学报, 2020, 18(5): 210-216.
Ma Zhiyuan, Zhou Kai, Li Chenyi, et al. Analysis of voltage sag compatibility capability of sensitive equipment considering uncertain area [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(5): 210-216. (in Chinese)
- [6] Lannoye E, Flynn D, O'Malley M. Transmission, variable generation, and power system flexibility [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 57-66.
- [7] 李则衡,陈磊,路晓敏,等. 基于系统灵活性的可再生能源接纳评估[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2187-2194.
Li Zeheng, Chen Lei, Lu Xiaomin, et al. Assessment of renewable energy accommodation based on system flexibility analysis [J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2187-2194. (in Chinese)
- [8] 程杉,倪凯旋,赵孟雨. 基于Stackelberg博弈的充换储一体化电站微电网双层协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 49-55.
Cheng Shan, Ni Kaixuan, Zhao Mengyu. Stackelberg game based bi-level coordinated optimal scheduling of microgrid accessed with charging-swapping-storage integrated station [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 49-55. (in Chinese)
- [9] 侯慧,薛梦雅,陈国炎,等. 计及电动汽车充放电的微电网多目标分级经济调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 55-62.
Hou Hui, Xue Mengya, Chen Guoyan, et al. Multi-objective hierarchical economic dispatch for microgrid considering charging and discharging of electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 55-62. (in Chinese)
- [10] Lu Xinhui, Zhou Kaile, Yang Shanlin, et al. Multi-objective

- optimal load dispatch of microgrid with stochastic access of electric vehicles [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 187-199.
- [11] 黄弦超, 封钰. 考虑机组灵活性的独立微网日前日内协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 125-131.
Huang Xianchao, Feng Yu. Day-ahead and intra-day coordinated optimal scheduling of stand-alone microgrid considering unit flexibility [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 125-131. (in Chinese)
- [12] Heydarian-Forushani E, Golshan M E H, Shafie-khah M, et al. Optimal operation of emerging flexible resources considering sub-hourly flexible ramp product [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 916-929.
- [13] 杨龙杰, 李华强, 余雪莹, 等. 计及灵活性的孤岛型微电网多目标日前优化调度方法[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1432-1440.
Yang Longjie, Li Huaqiang, Yu Xueying, et al. Multi-objective day-ahead optimal scheduling of isolated microgrid considering flexibility [J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1432-1440. (in Chinese)
- [14] 周天沛, 孙伟. 基于微电网的电动汽车与电网互动技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 98-104, 117.
Zhou Tianwei, Li Wei. Electric vehicle-to-grid technology based on microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 98-104, 117. (in Chinese)
- [15] 杨茂, 王金鑫. 考虑可再生能源出力不确定的孤岛型微电网优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 973-984.
Yang Mao, Wang Jinxin. Optimal scheduling of islanded microgrid considering uncertain output of renewable energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 973-984. (in Chinese)
- [16] Zhang Qingfu, Li Hui. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, 11(6): 712-731.
- [17] 蒋向兵, 汤波, 余光正, 等. 面向新能源就地消纳的园区储能与电价协调优化方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(5): 51-61.
Jiang Xiangbing, Tang Bo, Yu Guangzheng, et al. Coordination and optimization method of park-level energy storage and electricity price for local accommodation of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(5): 51-61. (in Chinese)



余运俊

作者简介:

余运俊(1978—),男,通信作者,博士,副教授。研究方向:智能微电网控制、光伏预测、最优控制及其在光伏微电网系统中的应用。E-mail: yuyunjun@ncu.edu.cn。

杨林锋(1998—),男,硕士研究生。研究方向:微电网优化调度。E-mail: 3466976761@qq.com。

哈志蕊(1986—),女,硕士。研究方向:微电网优化调度。E-mail: harren258@163.com。

钟志萍(1986—),女,硕士。研究方向:微电网优化调度。E-mail: 44873245@qq.com。

袁国瑛(1992—),男,硕士。研究方向:微电网优化调度。E-mail: 876637802@qq.com。

龚海(1997—),男,硕士研究生。研究方向:微电网优化调度。E-mail: 289563051@qq.com。

(责任编辑:郭凯凯)