

DOI: 10.7667/PSPC201738

基于禁忌搜索算法的微电网源/荷安全经济调度

王艳松¹, 宋阳阳¹, 吴昊¹, 衣京波²

(1. 中国石油大学信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 胜利石油管理局胜利发电厂, 山东 东营 257087)

摘要: 合理求解微电源/荷协调调度方案是微电网安全经济运行的理论依据。在分析各分布式电源发电成本和可控负荷特性的基础上, 建立两种时域运营成本最低的目标函数。以微电网有功功率平衡、分布式电源出力上下限和爬坡速率以及可控负荷的用电特性为约束, 建立微电网源/荷协调安全经济调度数学模型。以优先利用可再生能源和调度成本最低为原则制定优化调度策略。利用禁忌搜索算法求解微电网源/荷调度模型得到微电网源/荷调度方案, 并与应用单纯形法的全局最优解结果进行比较。算例分析表明禁忌搜索算法解得的调度方案接近于全局最优解, 以日时域 24 h 为调度周期的调度方案与以单位时域 1 h 为调度周期的调度方案结果相近。

关键词: 微电网; 经济调度; 可控负荷; 禁忌搜索算法; 单纯形法

Security and economic dispatch of source/load for micro-grid based on Tabu search algorithm

WANG Yansong¹, SONG Yangyang¹, WU Hao¹, YI Jingbo²

(1. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Shengli Power Plant, Shengli Petroleum Administration, Dongying 257087, China)

Abstract: Reasonable coordination between micro-source and load is the theoretical basis of security and economic operation for micro-grid. Based on the analysis of the distributed generation cost and controllable load characteristic, this paper establishes the objective function with lowest operating cost of two time domains. With the constraints such as the balance of active power of microgrids, the upper-lower limits of distributed generation output, creep speed and the electricity utilization characteristics of controllable loads, it establishes security and economic dispatch mathematical model of source/load for micro-grid. The optimization strategy is formulated with the principle of giving priority to the use of renewable energy and the cost minimum. Tabu search is used to solve the dispatch model of micro-grid and the dispatch plan of micro-grid source/load is gained. Finally, the global optimal result is compared with that of simplex method. The example analysis indicates that the dispatch scheme based on Tabu search algorithm is close to global optimal solution. The dispatch scheme result of 24-hour scheduling cycle is similar to that of 1-hour scheduling cycle.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477184).

Key words: micro-grid; economic dispatch; controllable load; Tabu search; simplex method

0 引言

微电网是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统, 既可以与外部电网并网运行, 也可以孤立运行。为充分利用可再生能源, 合理调度微电网内部各类分布式电源的出力和弹性负荷的用电, 实现微电网源/荷安全经济运行备受关注。

文献[1-3]研究了多目标的微电网安全调度, 考虑经济因素和环境因素, 采用模糊思想, 确定各个

目标的权重系数后转化为单目标调度问题来求解, 最终达到运行成本 and 环境污染最小的目标。文献[4]以发电成本最低、环境效益最好以及蓄电池损耗最小为目标对微网进行调度, 通过一种改进的MOPSO算法, 采用全局最优自适应选取策略以及拉丁超立方抽样获得了较好的优化效果。文献[5]在综合考虑各类分布式电源发电成本和环境成本的基础上, 计及热电联供收益、电能交易收益和电价补贴等多项运行收益, 建立微电网多目标经济函数。文献[6-7]考虑各时段的耦合关系, 建立动态模型, 并以发电成本最低为目标进行调度。文献[8]建立了

基金项目: 国家自然科学基金项目(51477184)

以微电网运行成本及环境污染度为目标的微电网多目标优化模型, 并采用鸟群算法进行求解。文献[9]以储能电池为研究对象, 以包含储能电池的微电网为例, 研究了不同目标(运行成本最低、折旧成本最低和环境效益最好)对优化结果的影响。文献[10]分析电动汽车的行驶特性, 建立基于峰谷分时电价的有序充放电负荷模型。文献[11-13]对含柔性负荷的微电网调度问题进行了研究, 通过分析柔性负荷用电特性建立调度模型, 并以发电成本最低为目标, 实现微电网经济调度。文献[14]采用了一种以 24 h 为调度周期的调度模型来优化主动配电网, 考虑了微电网各调度量在时间上的耦合, 达到了微电网发电成本最低的目标。

本文以微电网运营成本最低为目标, 计及静态安全约束和动态安全约束, 考虑不同时域的调度周期分别建立微电网安全经济调度的数学模型, 以充分利用分布式电源为基础制定调度策略, 应用禁忌搜索算法求解调度数学模型, 并与线性规划最优化方法进行比较。

1 微电网的安全经济调度模型

1.1 分布式电源的发电成本模型

分布式电源包括风力发电、太阳能发电、微型燃气轮机和燃料电池等, 分布式电源的发电成本主要是指其燃料成本。

微型燃气轮机的燃料成本和燃料电池的燃料成本模型^[1]如式(1)、式(2)。

$$C_m = \sum \frac{0.2577P_m}{\eta_m} \quad (1)$$

$$C_f = \sum \frac{0.2577P_f}{-0.0023P_f + 0.6735} \quad (2)$$

式中: η_m 、 P_m 、 C_m 分别为燃气轮机发电效率、燃气轮机发电功率和微型燃气轮机的燃料成本; P_f 、 C_f 分别为燃料电池发电功率和燃料电池的燃料成本。

1.2 负荷的用电特性模型

微网的负荷分为刚性负荷和柔性负荷, 柔性负荷又分为可削减负荷、可平移负荷和充放电类负荷^[12]。

1.2.1 可削减负荷的用电特性

可削减负荷(如空调、水泵等)可根据电价分时特点进行合理调度, 峰时段将该类负荷削减至零, 谷时段将该类负荷不进行削减, 平时段该类负荷的削减量随着电价的波动而变化, 其用电特性如式(3)、式(4)。

$$P_x = \begin{cases} P_x & C_t = C_L \\ P_x & C_L \leq C_t \leq C_H \\ 0 & C_t > C_H \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad 0 \leq P_x \leq P_x \quad (4)$$

式中: P_x 、 P_x 分别为可削减负荷的最大功率和可削减负荷的实际用电功率; C_t 为实时电价; C_L 、 C_H 分别为削减负荷的电价最低值和最高值。

1.2.2 可平移负荷的用电特性

可平移负荷(如洗衣机、电饭煲和洗碗机等)用电时间段可以进行平移, 其用电特性如式(5)。

$$\text{s.t.} \quad \sum_{t=t_1}^{T+t_1} P_y t = A_y \quad (5)$$

式中: P_y 、 A_y 分别为可平移负荷的额定功率和日用电量; t_1 、 T 分别为可平移负荷调度后开始用电时刻和连续用电时间。

1.2.3 充放电类负荷的用电特性

充放电类负荷(如蓄电池和电动汽车等)可以进行充电和放电。充电时 P_d 为正, 放电时 P_d 为负, 其充放电特性即其用电特性如式(6)。

$$\text{s.t.} \quad -P_{d,\max} \leq P_d \leq P_{d,\max} \quad (6)$$

式中: $P_{d,\max}$ 、 $-P_{d,\max}$ 分别为充电功率上限和放电功率下限; P_d 为充放电类负荷的功率。

1.2.4 刚性负荷的用电特性

刚性负荷不参加调度, 其用电特性如式(7)。

$$P_g = P_{g0} \quad (7)$$

式中: P_{g0} 、 P_g 分别为刚性负荷的固定功率和刚性负荷功率。

1.3 安全经济调度模型的建立

综合考虑微型燃气轮机和燃料电池的发电成本^[15]、与电网电能交换成本^[16]、削减负荷补偿成本^[12]和充放电类负荷调度成本^[5], 构成微电网运营成本最小目标函数; 综合考虑微电网源/荷静态约束和动态约束, 计及微网功率平衡、发电机出力上下限及爬坡速率、联络线功率上限和下限^[1]以及柔性负荷用电特性^[12]等约束, 通过选择小时、日的不同时域, 建立两种时域的微电网安全经济调度模型。

首先, 以单位小时的各分布式电源的出力、可控负荷的大小为控制变量 $[P_m \ P_f \ P_x \ P_y \ P_d \ P_{\text{grid}}]$ 。

考虑单位小时的微网运营成本, 建立单位小时的微电网安全经济调度模型, 如式(8)~式(16), 其中, 式(11)、式(12)、式(15)为发电机爬坡速率和可平移负荷用电连续性的动态约束, 满足控制变量的时间耦合性。

$$\min f_t = C_m \cdot P_m + C_f \cdot P_f + C_{\text{grid}} \cdot P_{\text{grid}} + C_x \cdot (P_x - P_x) + C_y \cdot P_y + C_d \cdot P_d \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum P_{gi} + P_{\text{grid}} = \sum P_{Li} \quad (9)$$

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \quad (10)$$

$$P_m(t) - P_m(t-1) \leq R_u \quad (11)$$

$$P_m(t-1) - P_m(t) \leq R_d \quad (12)$$

$$-P_{\text{grid}}^{\max} \leq P_{\text{grid}} \leq P_{\text{grid}}^{\max} \quad (13)$$

$$0 \leq P_x \leq P_x \quad (14)$$

$$\sum_{t=t_1}^{T+t_1} P_y t = A_y \quad (15)$$

$$-P_{d,\max} \leq P_d \leq P_{d,\max} \quad (16)$$

式中: C_m 、 C_f 分别为微型燃气轮机成本系数和燃料电池成本系数; C_{grid} 、 C_x 、 C_d 分别为功率交换实时电价、削减负荷补偿系数和充放电类负荷成本系数; $P_{\text{gi}}=[P_{\text{mi}} P_{\text{fi}} P_{\text{wi}} P_{\text{vi}}]$ 为微电网中分布式电源的出力,包括微型燃气轮机的 P_{mi} 、燃料电池的 P_{fi} 、风力发电机的 P_{wi} 和光伏电池的 P_{vi} ; P_{Li} 为电网负荷,包括刚性负荷 P_{g0i} 、可削减负荷 P_{xi} 、可平移负荷 P_{yi} 和充放电负荷 P_{di} ; P_{gi}^{\max} 、 P_{gi}^{\min} 分别为微电网中各分布式电源出力的上下限; $P_m(t)$ 、 $P_m(t-1)$ 分别为微型燃气轮机在 t 时段和 $t-1$ 时段的出力; R_u 、 R_d 分别为微型燃气轮机的上升出力限制和下降出力限制; P_{grid} 、 P_{grid}^{\max} 分别为联络线交换功率及其上限值; 其他物理量的意义,同上文。

其次,以日24h的各分布式电源的出力、可控负荷的大小为控制变量

$$\begin{bmatrix} P_{m1} & P_{f1} & P_{x1} & P_{y1} & P_{d1} & P_{\text{grid}1} \\ P_{m2} & P_{f2} & P_{x2} & P_{y2} & P_{d2} & P_{\text{grid}2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{m24} & P_{f24} & P_{x24} & P_{y24} & P_{d24} & P_{\text{grid}24} \end{bmatrix}$$

考虑日24h的微网运营成本,建立全日时间段的调度模型^[14],其目标函数如式(17),按约束条件(11)、(12)、(15)对控制变量列向量进行赋值,满足控制变量在时间上的耦合性,方法简单。

$$\min F = \sum_{t=1}^{24} f_t \quad (17)$$

2 微电网的安全经济调度优化方法

2.1 安全经济调度策略

为充分利用可再生能源,提高微电网中发电的环保性和柔性负荷调度的合理性,采用下面的安全经济调度策略:

1) 对于风力发电和光伏发电,由于是绿色清洁能源,按照日前负荷预测,采用最大功率跟踪发电,不参与调度。

2) 对于燃气轮机和燃料电池等微源,按发电成本最小分配发电计划。

3) 对于充放电类负荷:在用电低谷电价较低

时,充电作为用电负荷;用电高峰电价较高时,放电作为电源,微电网需支付一定的费用。

4) 对于可平移负荷,根据负荷预测平移到连续 T 小时总电价较低的时间段,微电网需支付一定的费用。

5) 对于可削减负荷,根据分时段电价的划分,在峰谷时段的用电功率按其上下限用电不可调,在平时段的用电功率参与调度。

2.2 调度模型求解方法

禁忌搜索算法(Tabu Search, TS)从一个初始可行解出发,通过在其邻域移动形成候选解集,选择使目标函数值变化最多的移动作为局部最优解,并作为新的当前解,并对当前解→移动→局部最优解的搜索过程反复循环。为了避免陷入局部最优解,TS搜索中采用了一种灵活的“记忆”技术,对已经寻找的优化过程采用禁忌策略^[17],指导下一步的搜索方向。应用禁忌搜索算法求解微网安全经济调度的流程如图1所示。

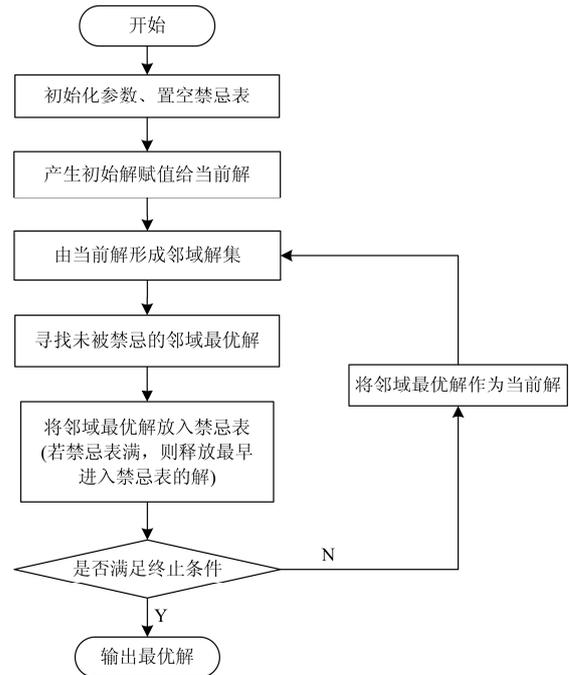


图1 禁忌搜索算法实现微网调度流程图

Fig. 1 Flow chart of achieving dispatch of microgrid using Tabu search algorithm

本文以可控分布式电源(微型燃气轮机、燃料电池)出力和可控负荷(可平移负荷、可削减负荷、充放电类负荷及联络线交互功率)用电为调度变量,运用禁忌搜索算法通过邻域的移动和解的禁忌与释放,寻找安全经济调度的最优解。禁忌搜索算法主要包括当前解的确定、生成邻域解、最优解的禁忌

与释放等步骤。

2.2.1 当前解与邻域最优解的确定

根据微电源和负荷特性约束, 给定初始解赋值给当前解 $x_p=[P_m P_f P_x P_y P_d P_{grid}]$, 以当前解为中心生成邻域解 $x_p=[P_m P_f P_x P_y P_d]+k\Delta x$, 其中, $\Delta x=[\Delta P_m \Delta P_f \Delta P_x \Delta P_y \Delta P_d]$ 为相应各调度变量的移动步长, k 为移动的步长。判断生成的每个邻域解是否满足约束条件, 若不满足, 改变 k 值重新生成; 若满足, 根据功率平衡如式(9)求出与电网交互功率, 并判断是否满足联络线功率传输约束, 若不满足重新生成邻域解, 若满足则保留。如此循环 m 次, 在生成的 m 个邻域解中。通过比较调度数学模型中目标函数值的大小找出邻域最优解 x_g 。

2.2.2 最优解的禁忌与释放

对于寻找到的邻域最优解 x_g , 先将其放入禁忌表中, 防止再次被寻找。若禁忌表中的元素大于禁忌长度, 则最早进入禁忌表中的禁忌对象被释放。并将此解替换为当前解, 作为下次邻域寻找的前提。

3 算例分析

本文构建了一个含分布式电源(微型燃气轮机、燃料电池、风力发电机、光伏发电机)以及可控负荷(可平移负荷、可削减负荷、充放电类负荷)的微电网。各微源运行成本参数以及功率约束见表 1^[15,18]。联络线输电上下限为 30 kW 和-30 kW(以微网向外网吸收功率为正, 反之为负)。调度前日负荷^[16]和电价预测参见表 2。蓄电池组充放电功率上限 30 kW(初始容量为 30 kW)。可平移负荷需连续工作两个小时, 固定功率是 10 kW。可削减负荷补偿系数 C_x 取 0.4 元/kWh; 当充放电类负荷充电时充放电类负荷成本系数 C_d 取 0, 放电时 C_d 取 0.2 元/kWh。

表 1 微网中各 DG 的参数

DG 类型	成本系数/ (元/kWh)	单个功率约束/ kW	个数
光伏电池板	1.826	0~0.2	300
风力发电机	0.737	0~20	3
微型燃气轮机	0.240	6~30	1
燃料电池	0.320	5~40	1

3.1 不同调度时段的禁忌搜索算法优化结果

3.1.1 单位小时调度模型的调度方案分析

应用本文提出的调度策略和禁忌搜索算法求解单位小时调度模型得到的各分布式电源出力和可控负荷用电状况如图 2 所示。风光发电出力预测和日负荷实际用电曲线如图 3 所示。

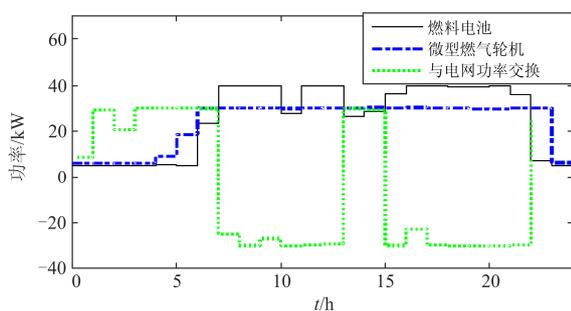
表 2 日负荷及电价预测

Table 2 Daily load and electricity cost prediction

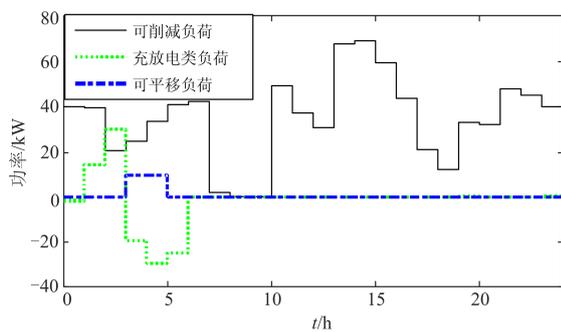
时段/h	可削减 负荷/kW	可平移 负荷/kW	刚性 负荷/kW	电价/ (元/kWh)
0—1	40.000	10	40.000	0.20
1—2	39.500	10	39.500	0.18
2—3	20.931	0	20.931	0.12
3—4	25.000	0	25.000	0.12
4—5	33.570	0	33.570	0.10
5—6	41.000	0	41.000	0.18
6—7	42.543	0	42.543	0.30
7—8	55.438	0	55.438	0.42
8—9	57.624	0	57.624	0.54
9—10	60.344	0	60.344	0.63
10—11	49.393	0	49.393	0.54
11—12	51.972	0	51.972	0.54
12—13	60.814	0	60.814	0.50
13—14	68.075	0	68.075	0.30
14—15	68.876	0	68.876	0.30
15—16	59.412	0	59.412	0.40
16—17	69.611	0	69.611	0.40
17—18	78.579	0	78.579	0.50
18—19	50.844	0	50.844	0.72
19—20	63.700	0	63.700	0.84
20—21	67.656	0	67.656	0.84
21—22	48.346	0	48.346	0.36
22—23	45.121	0	45.121	0.30
23—24	40.000	0	40.000	0.20

由图 2(a)可以看出, 对应表 2 所示的两个电价高峰时段(8:00—13:00 和 17:00—21:00), 微型燃气轮机出力达到上限, 燃料电池出力在上限附近, 联络线的功率是由微网流向配电网, 功率值接近于 30 kW, 微网处于售电状态。对应表 2 所示的电价低谷时段(0:00—6:00), 由图 2(b)可以看出, 可平移负荷在此期间用电, 蓄电池组完成一次充放电, 微型燃气轮机和燃料电池的出力基本处于最低功率下限约束值, 联络线的功率是由配电网流向微网, 功率值接近于 30 kW, 微网处于买电状态。

由图 3 可以看出, 实际用电总负荷跟踪了风光发电负荷的趋势。在风、光伏发电高峰时段(10:00—18:00), 日负荷的实际用电功率相对较高, 基本处于 100 kW 以上; 在风、光伏发电低谷时段(3:00—10:00), 日负荷的实际用电功率相对较低, 基本处于 50 kW 左右。



(a) 各微源调度结果



(b) 负荷调度结果

图 2 以 1 h 为调度时段禁忌搜索算法优化结果

Fig. 2 Optimal results of Tabu search algorithm with 1 hour period

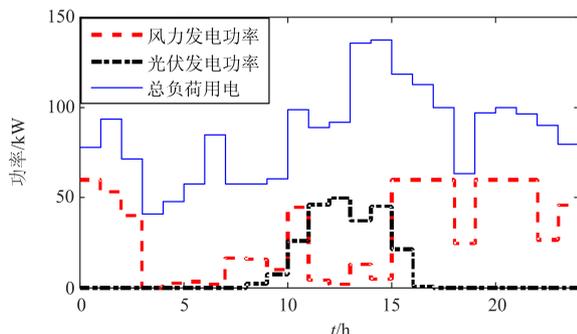


图 3 风、光发电预测和日负荷实际用电曲线

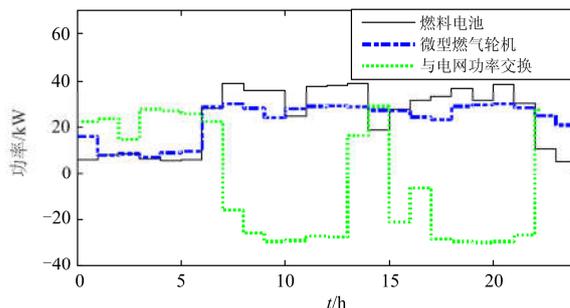
Fig. 3 Curves of wind-photovoltaic power generation forecast and electricity consumption of daily load

3.1.2 全日调度模型的调度方案分析

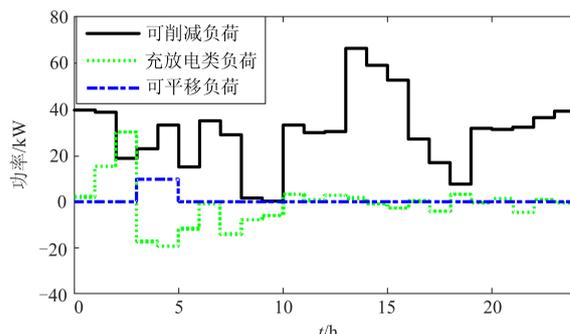
应用本文提出的调度策略和禁忌搜索算法求解日调度模型得到的各分布式电源出力和可控负荷用电状况如图 4 所示。

由图 4(a)可以看出, 对应表 2 所示的两个电价高峰时段(8:00—13:00 和 17:00—21:00), 微电网微型燃气轮机出力接近上限, 燃料电池出力在上限附近, 联络线的功率是由微网流向配电网, 功率值接近于 30 kW, 微网处于售电状态。蓄电池组有多次充放电, 每次的充放电功率较小。由图 4(b)对应表 2 所示的电价低谷时段(0:00—6:00), 可平移负荷在

此期间用电, 蓄电池组有一次充电和两次放电, 可削减负荷基本不进行削减。微型燃气轮机和燃料电池的出力基本处于最低功率下限约束值, 联络线的功率是由配电网流向微网, 功率值接近于 30 kW, 微网处于买电状态。



(a) 各微源调度结果



(b) 负荷调度结果

图 4 以 24 h 为调度周期的禁忌搜索算法优化结果

Fig. 4 Optimal results of Tabu search algorithm with 24 hour period

3.2 结果分析

微电网安全经济调度数学模型是标准的线性规划数学模型, 分别应用禁忌搜索算法与单纯形法求解两种时域的调度模型, 所得调度方案的各项经济指标对比如表 3 所示。

表 3 日调度方案各项经济指标比较

Table 3 Target value of different optimization algorithms

成本类型	小时调度模型		日调度模型	
	禁忌搜索算法/元	单纯形法/元	禁忌搜索算法/元	单纯形法/元
MT 发电成本	135.690	148.560	140.566	148.560
FC 发电成本	197.834	200.432	199.772	205.115
风力发电成本	538.174	538.174	538.174	538.174
光伏发电成本	434.153	434.153	434.153	434.153
与电网交互成本	-148.488	-155.510	-138.002	-148.63
削减负荷补偿	161.127	156.808	143.846	128.577
充放电负荷成本	14.963	6	17.181	15.072
总成本	1333.5	1328.6	1335.7	1321.0

由表 3 可以看出,两种求解方法得出的调度方案的各项经济效益差异较小,禁忌搜索法得出的解是非常接近于线性规划法的最优解,另外,两种调度模型得出的调度方案的结果相近。

当优化问题的控制时域长度较大时,求解对应的多参数规划问题的计算工作量大,复杂度与控制时域长度成指数关系^[19]。按日、小时不同时域建立微电网安全经济调度模型的计算规模不同,随着计算规模的增加,线性规划法程序编写的复杂度大幅增加,而禁忌搜索算法只需稍加改动便可解决不同规模的优化问题,彰显其求解大规模优化问题的优越性。

4 结论

以经济效益最高为目标函数,计及安全约束建立含有分布式电源和柔性负荷的微网调度模型,以提高微电网中发电的环保性和柔性负荷调度的合理性制定调度策略,运用禁忌搜索法进行优化,结论如下。

1) 本文验证了两种时间域的调度模型均可行,其中单位小时调度模型的计算规模比全日调度模型的计算规模小,两种调度模型得出的调度方案的结果相近。

2) 通过负荷调度后,总负荷的实际用电趋势与风光发电趋势相同,可以满足最大功率跟踪风光发电功率,充分利用可再生能源。

3) 通过与单纯形算法比较可知,禁忌搜索法可以得到微网调度问题的近似最优解,并适用于求解大规模的线性规划和非线性优化问题,算法简单。

参考文献

- [1] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 微网多目标经济调度优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 57-66.
CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Microgrid multi-objective economic dispatch optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 57-66.
- [2] 陈靖, 李雨薇, 习朋, 等. 微网系统经济运行优化[J]. 华东电力, 2012, 40(2): 167-172.
CHEN Jing, LI Yuwei, XI Peng, et al. Optimization of microgrid economic operation[J]. East China Electric Power, 2012, 40(2): 167-172.
- [3] 季美红. 基于粒子群法的微电网多目标经济调度模型研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
JI Meihong. Research of multi-objective economic dispatch model for a micro-grid based on particle swarm optimization[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
- [4] 胡晓通, 刘天琪, 何川, 等. 计及蓄电池损耗特性的微网多目标优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2674-2681.
HU Xiaotong, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Multi-objective optimal operation of microgrid considering the battery loss characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2674-2681.
- [5] 吴昊, 王艳松. 基于智能单粒子算法的微电网经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 43-49.
WU Hao, WANG Yansong. Economic dispatch of microgrid using intelligent single particle optimizer algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 43-49.
- [6] 刘小平, 丁明, 张颖媛, 等. 微网系统的动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 77-84.
LIU Xiaoping, DING Ming, ZHANG Yingyuan, et al. Dynamic economic dispatch for microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 77-84.
- [7] 周玮, 彭昱, 孙辉, 等. 含风电场的电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 13-18.
ZHOU Wei, PENG Yu, SUN Hui, et al. Dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 13-18.
- [8] 曾嵘, 彭春华, 王奎, 等. 基于鸟群算法的微电网多目标运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 117-122.
ZENG Ceng, PENG Chunhua, WANG Kui, et al. Multi-objective operation optimization of micro grid based on bird swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 117-122.
- [9] 丁明, 张颖媛, 茆美琴. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [10] 王璟, 王利利, 郭勇, 等. 计及电动汽车的微电网经济调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 111-117.
WANG Jing, WANG Lili, GUO Yong, et al. Microgrid economic dispatch method considering electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 111-117.
- [11] 阮冰洁, 杨强, 颜文俊. 计及实时电价的柔性负荷系统需求侧响应机制研究[J]. 机电工程, 2015, 32(6): 857-862.
RUAN Bingjie, YANG Qiang, YAN Wenjun. Demand response under real-time price for domestic energy

- system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(6): 857-862.
- [12] 童小娇, 尹昆, 刘亚娟, 等. 包含可控负荷的微电网经济调度[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 21-36.
TONG Xiaojiao, YIN Kun, LIU Yajuan, et al. Economic dispatch for microgrid with controllable loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 21-36.
- [13] 孙伟卿, 王承民, 张焰. 智能电网中的柔性负荷[J]. 电力需求侧管理, 2012, 14(3): 10-13.
SUN Weiqing, WANG Chengmin, ZHANG Yan. Flexible load in smart grids[J]. Demand Side Management, 2012, 14(3): 10-13.
- [14] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 177-183.
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Review of wide area PSS control system and its engineering application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 177-183.
- [15] 白峪豪. 含分布式电源的微电网经济调度模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
BAI Yuhao. Research on micro-grid economic dispatch model with distributed power sources embedded[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [16] 洪博文, 郭力, 王成山. 微电网多目标动态优化调度模型与方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 100-107.
HONG Bowen, GUO Li, WANG Chengshan. Model and method of dynamic multi-objective optimal dispatch for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 100-107.
- [17] 董宗然, 周慧. 禁忌搜索算法评述[J]. 软件工程师, 2010, 1(增刊 1): 96-98.
DONG Zongran, ZHOU Hui. Review of Tabu search algorithm[J]. Software Engineering, 2010, 1(S1): 96-98.
- [18] 符杨, 李振坤, 卫春峰. 计及可平移负荷的微网经济优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2612-2620.
FU Yang, LI Zhenkun, WEI Chunfeng. Optimal economic dispatch for microgrid considering shiftable loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2612-2620.
- [19] 张聚, 王万良. 基于动态规划的约束优化问题多参数规划求解方法及应用[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(6): 1135-1138.
ZHANG Ju, WANG Wanliang. Dynamic-programming-based multi-parametric programming method for constrained optimal control problem and its application[J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(6): 1135-1138.

收稿日期: 2017-02-27; 修回日期: 2017-05-19

作者简介:

王艳松(1965—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电网的优化规划与节能技术, 电网故障诊断与配电自动化, 电力负荷预测, 电能质量分析与谐波治理等; E-mail: wys91517@163.com

宋阳阳(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网优化调度;

吴昊(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网优化调度。

(编辑 周金梅)