

DOI: 10.7667/PSPC171050

采用分布式单纯形法的微电网分散式动态经济调度

王志军, 刘明波

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 对含多种分布式电源的微电网, 基于分布式单纯形法, 提出了一种求解微电网动态经济调度问题的分散式优化算法。通过对目标函数进行线性化, 建立了微电网动态经济调度的线性规划模型。将每个分布式电源均视为独立的智能体, 从而将线性规划模型中的成本向量和约束方程系数矩阵按智能体进行分块, 进而采用分布式单纯形法求解。每次迭代过程中, 智能体通过通信网络传递当前解对应的最优基和成本向量。所提算法不需要中央控制器的参与, 智能体间具有一定的信息保密性, 且通信次数与通信网络的直径成线性增长的关系。最后, 以某实际微电网为测试系统, 验证了线性化模型的准确性和算法的有效性。

关键词: 微电网; 动态经济调度; 线性规划; 分布式单纯形法; 分散式优化

Decentralized dynamic economic dispatch of microgrids using distributed simplex method

WANG Zhijun, LIU Mingbo

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To address the microgrid with several kinds of Distributed Energy Resources (DERs), this paper proposes a decentralized method for solving its Dynamic Economic Dispatch (DED) problem based on distributed simplex method. By leveraging linearization of the objective function, DED problem is converted into a linear programming model. Regarding each DER as an individual agent, the cost vector and constraints coefficient matrix in this model can be partitioned into blocks according to agents. This is convenient to use the distributed simplex method to solve it. During iterations, each agent exchanges the optimal basis and corresponding cost vector with its neighbors through a communication network. Without the participation of the central controller, the privacy information of agents can be protected effectively, and the number of communication rounds grows linearly with the diameter of communication network. Simulation on a real microgrid verifies the accuracy of the linearized model, and demonstrates the effectiveness of the proposed approach.

This work is supported by National Key Basic Research and Development Program of China (973 Program) (No. 2013CB228205).

Key words: microgrids; dynamic economic dispatch; linear programming; distributed simplex method; decentralized optimization

0 引言

近年来, 微电网作为一种包含可再生能源等分布式电源的综合集成中低压配电系统, 得到了广泛的关注。多能互补发电是微电网的常见组成形式, 因此如何实现微电网中多分布式电源的协调控制, 最大利用分布式能源, 是未来微电网研究的重点之

—^[1-3]。文献[4-7]分别介绍了含有多种分布式电源微电网的容量配置和协调控制策略。

迄今微电网动态经济调度问题的研究已经取得了丰硕成果, 但以集中式优化算法居多。文献[8-9]建立了混合整数规划的微电网 DED 模型, 并直接调用 CPLEX 求解器进行求解。文献[10-12]分别将电动汽车^[10]、和可削减负荷^[11]和风光互补特性^[12]纳入含多种分布式电源的微电网优化调度模型, 并采用启发式算法求解。文献[13]将可平移负荷、可削减负荷和可转移负荷三类互动负荷模型应用于用户

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2013CB228205)

参与互动环境下的微电网经济调度中。文献[14-15]分别研究了储能系统对微电网日前和实时优化调度的影响。文献[16]将电转气技术与微电网系统相结合,研究了基于P2G多源储能型微电网的日前优化调度模型,并采用内点法求解。

随着越来越多的可控设备接入微电网,上述集中式算法在收集全局信息时不仅面临着通信瓶颈等问题的挑战,而且还意味着私有信息的暴露。在此背景下,微电网分散式经济调度应运而生,它具有即插即用和自愈的特性,是未来优化调度的理想方式。文献[17]根据互联网中“和式增加,积式减少”(Additive Increase Multiplicative Decrease)的思想,忽略了网络结构,提出了解决微电网实时经济调度的分散式优化算法。文献[18]根据预估校正近端乘子(Predictor Corrector Proximal Multiplier)算法设计了一套可分散式求解的能量管理系统,并基于IEC 61850通信标准搭建了一个真实微电网的分布式架构。文献[19-21]利用交替方向乘子法分别实现了微电网^[19-20]和主动配电网^[21]经济调度问题的分散式优化。文献[22]基于对偶分解算法,提出了一种以隐私保护为目的的分散式微电网能量管理算法。

单纯形法是求解线性规划问题的一种有效算法,至今仍然是使用最多的优化工具之一。文献[23]采用摄动法解决了单纯形法求解时遇到的原始退化与对偶退化问题。文献[24]在此基础上,利用字典排序(Lexicographic Sorting)提出了分布式单纯形(Distributed Simplex)法,使得不同的智能体在充分交流信息后能够取得一致的最优解。

本文通过建立含风、光、柴、储的微电网动态经济调度的线性规划模型,把每个分布式电源均视为独立的智能体,从而将线性规划模型中的成本向量和约束方程系数矩阵按智能体进行分块,并采用分布式单纯形法实现了动态经济调度问题的分散式求解。

1 微电网动态经济调度模型

1.1 目标函数

图1给出了一个包含风、光、柴、储的某实际微电网。目标函数定义为柴油发电机的发电成本(F_1)、光伏电站的弃光惩罚费用(F_2)、风电场的弃风惩罚费用(F_3)以及蓄电池的折旧费用(F_4)之和,具体表示如式(1)。

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (1)$$

$$F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^{N_G} (a_g P_{g,t}^2 + b_g P_{g,t}) \quad (2)$$

$$F_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^{N_S} (\bar{P}_{s,t} - P_{s,t}) C_s \quad (3)$$

$$F_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^{N_W} (\bar{P}_{w,t} - P_{w,t}) C_w \quad (4)$$

$$F_4 = \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^{N_B} \sigma |P_{b,t}| \quad (5)$$

式中: $P_{g,t}$ 表示第 g 台柴油发电机在 t 时刻的出力; a_g 与 b_g 分别是第 g 台柴油发电机发电成本的二次项和一次项系数; N_G 为柴油发电机的总台数; $P_{s,t}$ 和 $\bar{P}_{s,t}$ 分别为第 s 台光伏电站在 t 时刻的实际出力和预测最大出力; C_s 为相应的每千瓦时的弃光成本; N_S 为光伏电站数量; $P_{w,t}$ 和 $\bar{P}_{w,t}$ 分别为第 w 个风电场在 t 时刻的实际出力和预测最大出力; C_w 为相应的每千瓦时的弃风惩罚费用; N_W 为风电场数量; $P_{b,t}$ 为第 b 个蓄电池装置在 t 时刻的充放电情况, $P_{b,t}$ 为负时表示充电,此时相当于消耗功率的负荷,为正时表示放电,此时相当于提供功率支撑的微电源; σ 为所设计蓄电池的充放电折旧系数,这里取为常数; N_B 为蓄电池装置数量; T 为一天内的总的时段数。

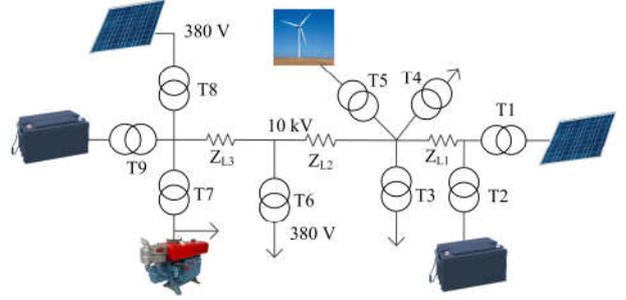


图1 某实际微电网接线图

Fig. 1 Connection diagram of a real microgrid

1.2 约束条件

1) 功率平衡约束

孤岛状态下,假设微电网内的负荷需求始终小于分布式电源在相应时段可提供的最大功率输出,则微电网的功率平衡方程可表示为

$$\sum_{g=1}^{N_G} P_{g,t} + \sum_{s=1}^{N_S} P_{s,t} + \sum_{w=1}^{N_W} P_{w,t} + \sum_{b=1}^{N_B} P_{b,t} = \sum_{d=1}^{N_D} P_{d,t} \quad (6)$$

式中: $P_{d,t}$ 为节点 d 在时刻 t 的有功负荷大小; N_D 为负荷节点数。此处忽略了网络损耗。

2) 分布式电源出力上下限约束

各分布式电源的出力上下限约束可表示为

$$P_{g,\min} \leq P_{g,t} \leq P_{g,\max} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{s,t} \leq \bar{P}_{s,t} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{w,t} \leq \bar{P}_{w,t} \quad (9)$$

$$-P_{b,\max} \leq P_{b,t} \leq P_{b,\max} \quad (10)$$

其中: 式(7)表示柴油发电机的功率输出始终维持在最小输出功率 $P_{g,\min}$ 和最大输出功率 $P_{g,\max}$ 之间; 式(8)和式(9)分别表示光伏电站和风电场的出力约束; 式(10)表示蓄电池装置的充放电功率约束, $-P_{b,\max}$ 和 $P_{b,\max}$ 分别表示第 b 个蓄电池装置的充放电功率的大小限制。

3) 柴油发电机爬坡约束

柴油发电机出力的变化受到爬坡/滑坡速度的限制, 可表示为

$$P_{g,t} - P_{g,t-1} \leq U_{R,g} \Delta T \quad (11)$$

$$P_{g,t-1} - P_{g,t} \leq D_{R,g} \Delta T \quad (12)$$

式中: $U_{R,g}$ 和 $D_{R,g}$ 分别表示第 g 台柴油发电机的爬坡/滑坡速率限值; ΔT 为连续两个时段的间隔大小。

4) 蓄电池装置容量约束

蓄电池的荷电状态是指某一时刻蓄电池中存储电量与蓄电池总容量的比值。实际上, 为防止蓄电池过度充放电, 对其荷电状态范围通常有一定的限制, 即蓄电池中的储电量存在上下限约束。

$$SOC_{b,\min} \leq SOC_{b,t} \leq SOC_{b,\max} \quad (13)$$

$$SOC_{b,t} = SOC_{b,t-1} - P_{b,t} \Delta T \quad (14)$$

式中: $SOC_{b,\min}$ 和 $SOC_{b,\max}$ 分别表示蓄电池 b 的储电量上下限; $SOC_{b,t}$ 表示蓄电池在时刻 t 的储电量。

1.3 动态经济调度模型的线性化

由于柴油发电机的发电成本中包含了二次项, 以及蓄电池的费用函数中含有绝对值项, 因此上述建立的微电网动态经济调度模型是非线性的。为建立微电网动态经济调度的线性模型, 柴油发电机的发电成本可用分段线性化近似表示^[25], 如图2所示。

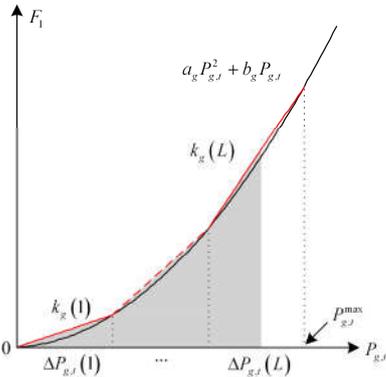


图2 柴油发电机发电成本的分段线性化

Fig. 2 Piecewise linear approximation of generation cost of a diesel generator

图2的分段线性化过程用公式可以表示为

$$F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^{N_G} \sum_{l=1}^L k_g(l) \Delta P_{g,t}(l) \quad (15)$$

$$P_{g,t} = \sum_{l=1}^L \Delta P_{g,t}(l) \quad (16)$$

$$0 \leq \Delta P_{g,t}(l) \leq P_{g,t}^{\max} / L \quad (17)$$

$$k_g(l) = (2l-1) a_g (P_{g,t}^{\max} / L) + b_g \quad (18)$$

$$l = 1, 2, \dots, L$$

式中: $\Delta P_{g,t}(l)$ 为第 g 台柴油发电机在时刻 t 的输出功率在第 l 段线性部分的取值; $k_g(l)$ 为第 g 台柴油发电机在第 l 段线性部分的斜率; L 为分段线性化的最大分段数, L 越大, 分段线性化的误差越小。

对于蓄电池的折旧费用中的绝对值项 $|P_{b,t}|$, 可引用两个非负的变量进行等效变换, 即

$$F_4 = \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^{N_B} \sigma(P_{b,t}^+ + P_{b,t}^-) \quad (19)$$

$$P_{b,t} = P_{b,t}^+ - P_{b,t}^- \quad (20)$$

$$P_{b,t}^+, P_{b,t}^- \geq 0 \quad (21)$$

至此, 对包含柴油发电机、光伏电站、风电场和蓄电池的微电网 DED 的线性化模型可完整地表述为

$$\begin{aligned} \min \quad & F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ \text{s.t.} \quad & \text{式(3), 式(4), 式(6)一式(21)} \end{aligned} \quad (22)$$

2 基于分布式单纯形法的动态经济调度模型的分散式求解

2.1 单纯形法的基本原理

原始单纯形法的基本思路是: 从一个初始基本可行解(可行域顶点)开始, 通过选取进基变量和离基变量, 不断转换到相邻且改善了当前目标函数值的基本可行解, 直到找到最优解为止^[26], 如图3所示。

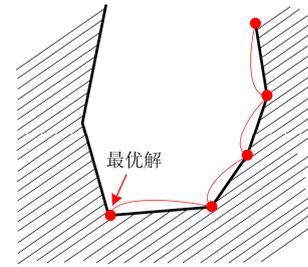


图3 单纯形法的寻优路径示意图

Fig. 3 Map for the optimization process of simplex method

式(22)表示的微电网 DED 的线性模型标准化后可表示为如式(23)所示紧凑的数学模型。

$$\begin{aligned} \min \quad & z = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b}, \quad \mathbf{x} \geq 0 \end{aligned} \quad (23)$$

式中: $\mathbf{x} = [\Delta P_G^T, P_s^T, P_w^T, P_B^T, \mathbf{x}_s^T]^T$ 为柴油发电机、光伏

电站、风电场、蓄电池出力以及不等式约束的松弛/剩余变量构成的列向量； $\mathbf{c}=[\mathbf{k}_G^T, \mathbf{C}_S^T, \mathbf{C}_W^T, \mathbf{\sigma}_B^T, \mathbf{0}^T]^T$ 为上述变量依次在目标函数中相应的成本向量； \mathbf{A} 为 \mathbf{x} 在约束条件中相应的系数矩阵； \mathbf{b} 为约束中的常数项构成的向量。设 $\mathbf{c} \in R^n$, $\mathbf{x} \in R^n$, $\mathbf{A} \in R^{m \times n}$, $\mathbf{b} \in R^m$ 。

由第 1 节建立的微电网 DED 模型可知，向量 \mathbf{c} 和矩阵 \mathbf{A} 有如式(24)所示的稀疏形式。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}^T \\ \mathbf{A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_G^T & \mathbf{C}_S^T & \mathbf{C}_W^T & \mathbf{\sigma}_B^T & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_G & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{GS} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_S & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{SS} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_W & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{WS} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_B & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{BS} \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中： \mathbf{A}_G 、 \mathbf{A}_S 、 \mathbf{A}_W 、 \mathbf{A}_B 分别为柴油发电机、光伏电站、风电场和蓄电池相应约束中的系数矩阵； \mathbf{A}_{GS} 、 \mathbf{A}_{SS} 、 \mathbf{A}_{WS} 、 \mathbf{A}_{BS} 分别为相应约束松弛/剩余变量的系数矩阵； \mathbf{A} 中的最后一行为微电网的功率平衡方程。

原始单纯形法中，定义 \mathbf{A} 中任一 m 阶可逆矩阵 $\mathbf{B} \in R^{m \times m}$ 为基矩阵，其余 $n-m$ 个列向量构成非基矩阵 \mathbf{N} ，相应的变量索引集合分别记为 Ω_B 、 Ω_N 。对应每一个基本可行解，定义其检验数 \mathbf{S} 为^[26]

$$\mathbf{S} = \mathbf{c} - \mathbf{A}^T \mathbf{B}^{-T} \mathbf{c}_B = \mathbf{r}\mathbf{c} \quad (25)$$

式中： \mathbf{c}_B 为基矩阵 \mathbf{B} 相应的成本向量； $\mathbf{r}_N = \mathbf{I}_N$, $\mathbf{r}_B = \mathbf{I}_B \mathbf{B}^{-T} \mathbf{A}^T \mathbf{B}^{-T}$, $\mathbf{I} \in R^{n \times n}$ 为单位矩阵。

当 $\mathbf{S} \geq 0$ 时，当前解即为最优解；否则，进行换基，即选择检验数 $S_q < 0$, $q \in \Omega_N$ 的非基变量作为进基变量，同时离基变量的选择原则为

$$l(q) = \arg \min_{j \in \Omega_B} \left\{ \left(\mathbf{B}^{-1} \mathbf{b} \right)_j / t_j \mid t_j > 0 \right\} \quad (26)$$

式中， $\mathbf{t} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A}_q$ 。

当待求解的线性规划问题为退化问题时，意味着线性规划问题有多个最优基或者多个目标函数值相同而变量取值不同的最优解，且寻优的过程可能会陷入死循环。当线性规划模型存在多个最优解时，不同的初始基矩阵可能会求得不一致的最优解。

由文献[23]可知，对于退化的线性规划问题，存在足够小的正数 ε_1 和 δ_1 ，使得对于任意的 $0 < \varepsilon_0 < \varepsilon_1$ 和 $0 < \delta_0 < \delta_1$ ，退化的原线性规划问题的求解可等价地转化为求解如式(27)的非退化的线性规划问题。

$$\begin{aligned} \min \quad & z' = (\mathbf{c} + \boldsymbol{\delta})^T \mathbf{x} \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad \mathbf{x} \geq 0 \end{aligned} \quad (27)$$

式中： $\boldsymbol{\delta} = [\delta_0, \delta_0^2, \dots, \delta_0^n]^T$ ； $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_0, \varepsilon_0^2, \dots, \varepsilon_0^n]^T$ 。

此时，单纯形法的换基原则由式(26)变为

$$[\mathbf{r}\mathbf{c} \quad \mathbf{r}]_q < 0 \quad (28)$$

$$l_{\text{lex}}(q) = \text{lex} \min_{j \in \Omega_B} \left\{ \left[\mathbf{B}^{-1} \mathbf{b} \quad \mathbf{B}^{-1} \right]_j / t_j > 0 \mid t_j > 0 \right\} \quad (29)$$

式中：符号 $<$ 表示向量 $[\bullet]$ 的第一个非零元素为负； $\text{lexmin}\{\}$ 表示字典最小。

称采用式(28)和式(29)为换基原则的单纯形法为修正单纯形法，则当线性规划问题为退化问题时，可等效地转化为如式(27)所示的模型，进而利用修正单纯形法进行求解。由换基原则式(28)和式(29)可知，模型(27)的求解过程并不涉及 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 和 $\boldsymbol{\delta}$ 的选择。

2.2 动态经济调度模型的分散式求解

用 (\mathbf{H}, \mathbf{b}) 表示式(23)的动态经济调度模型，其中， $\mathbf{H} = \{\mathbf{h}_i\}_{i \in \{1, \dots, n\}}$, $\mathbf{h}_i = [c_i, \mathbf{A}_i^T]^T$, c_i 和 \mathbf{A}_i^T 分别表示第 i 个变量在向量 \mathbf{c} 和矩阵 \mathbf{A} 中对应的元素。

假设微电网中有 N 个智能体，则存在一种对微电网动态经济调度问题的按智能体的分区模式 $\mathbf{P} = \{\mathbf{P}^{[1]}, \dots, \mathbf{P}^{[N]}\}$ ，使得 $\mathbf{H} = \cup_{i=1}^N \mathbf{P}^{[i]}$ 以及 $\mathbf{P}^{[i]} \cap \mathbf{P}^{[j]} = \emptyset$ 。以图 1 所示的微电网为例，将柴油发电机、光伏电站、风电场和蓄电池分别视为一个独立的智能体，则分区形式可表示为

$$\mathbf{P} = [\mathbf{P}^G, \mathbf{P}^S, \mathbf{P}^W, \mathbf{P}^B] = \begin{bmatrix} \overbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{k}_G^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_G & \mathbf{A}_{GS} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{1} & \mathbf{0} \end{bmatrix}}^{\mathbf{P}^G} & \overbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{C}_S^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_S & \mathbf{A}_{SS} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{1} & \mathbf{0} \end{bmatrix}}^{\mathbf{P}^S} & \overbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{C}_W^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_W & \mathbf{A}_{WS} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{1} & \mathbf{0} \end{bmatrix}}^{\mathbf{P}^W} & \overbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{C}_B^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_B & \mathbf{A}_{BS} \\ \mathbf{1} & \mathbf{0} \end{bmatrix}}^{\mathbf{P}^B} \end{bmatrix} \quad (30)$$

式中， \mathbf{P}^G 、 \mathbf{P}^S 、 \mathbf{P}^W 和 \mathbf{P}^B 分别表示柴油发电机、光伏电站、风电场和蓄电池分区。

由式(30)可知，在这样的分区模式下，微电网中每个智能体 i 初始时拥有的信息仅为 $\mathbf{P}^{[i]}$ ，即每个智能体初始时都只拥有成本向量 \mathbf{c} 和系数矩阵 \mathbf{A} 中与自己相关的分块。由微电网 DED 模型可以发现，每个分布式电源拥有的分块信息即为各分布式电源的发电费用和各类约束条件。

设微电网中智能体的有向通信网络为 ζ ， $\text{dia}(\zeta)$ 表示网络直径。用 $\mathbf{N}_1(i)$ 表示向智能体 i 传递信息的智能体集合，用 $\mathbf{N}_0(i)$ 表示接收智能体 i 信息的智能体集合。以自身费用函数和约束信息为初始信息，微电网中每个智能体接收信息后，利用修正单纯形法进行求解，寻优结束后得到一个与当前最优出力

相对应的最优基和成本向量, 记为信息集 $w^{[i]} = \{c_B, B^{[i]}\}$, 用于不同智能体间的传递。因此, 每个智能体都永久拥有一部分属于自己的信息 $P^{[i]}$, 并在接收到 $N_1(i)$ 的信息集 $\bigcup_{j \in N_1(i)} w^{[j]}$ 后, 完成以下两个任务^[24]:

1) 对所有的信息进行列的字典排序, 即 $\text{lexsort}\{P^{[i]}, w^{[i]}, \bigcup_{j \in N_1(i)} w^{[j]}\}$ 。

2) 利用修正单纯形法进行求解, 更新信息集 $w^{[i]}$, 并向 $N_0(i)$ 广播。

通过任务 1), 各个智能体在充分传递信息后所有变量间的相对位置保持一致, 保证了各个智能体最终收敛到的最优解是一致的。任务 2) 根据智能体接收到的信息和自身固有的信息, 再次利用修正单纯形法求解, 可以求得一个比上一次更接近最优解的状态信息, 即得到一个更接近最优解的基矩阵, 从而逐步趋向于最优解。由文献[24]可知, 当智能体的最优出力对应的信息在 $k=2\text{dia}(\zeta)+1$ 次内保持不变时, 各个智能体当前的最优解即为全局最优解。

假设微电网中的智能体间采用单向环状的通信方式, 从风电场智能体的角度出发, 则图 1 所示的微电网 DED 的分散式优化算法可表示成如图 4 所示的框架。由图 4 可知, 风电场的 $N_1(i)$ 为蓄电池, $N_0(i)$ 为光伏电站。

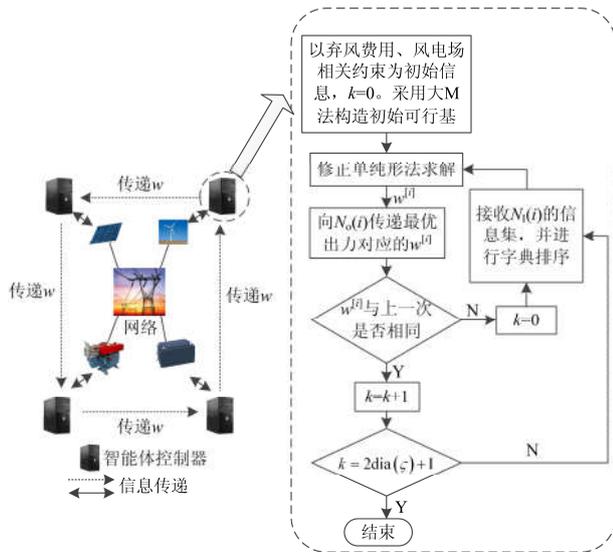


图 4 DED 分散式优化框架

Fig. 4 Framework of decentralized optimization of DED

3 算例分析

本文将分布式单纯形法应用于如图 1 所示的某实际微电网中。各项参数为^[13]: 柴油发电机的装机容量为 600 kW, 爬坡和滑坡速率限制均为 5 kW/min,

发电成本的二次项系数 $a_g=0.000\ 463$ 元/(kW²h), 一次项系数 $b_g=1.69$ 元/kWh。蓄电池储能装置的总容量为 1 800 kWh, 其中蓄电池 1 的最大出力为 300 kW, 最大容量为 1 300 kWh; 蓄电池 2 的最大出力为 150 kW, 最大容量为 500 kWh。弃风惩罚系数 $C_w=0.61$ 元/kWh, 弃光惩罚系数 $C_s=1$ 元/kWh。蓄电池单位充放电的折旧系数 $\sigma=0.5$ 元/kWh。日前经济调度的时段数为 $T=24$, 即 $\Delta T=1$ h。柴油发电机费用函数 F_1 的最大分段数 L 取 5。微电网内的各个可再生能源的出力预测及负荷大小如图 5 所示。

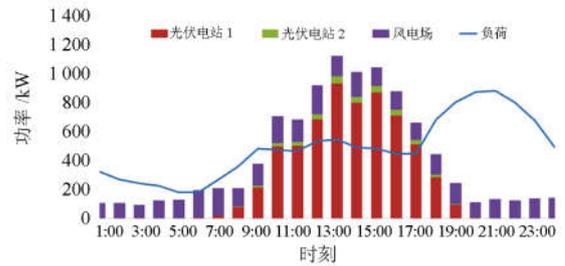


图 5 微电网负荷和分布式电源出力预测

Fig. 5 Forecasted load demand and power output of DERs

3.1 线性化模型精度评估

在 GAMS 上分别调用 CONOPT 和 CPLEX 求解器求解微电网动态经济调度的非线性模型和线性模型, 计算机采用 Intel(R)Core(TM) i5-4570 处理器, 内存为 16 G, 优化结果如表 1 所示。

表 1 非线性模型与线性模型优化结果对比

Table 1 Comparison of optimization results from nonlinear model and linear model

费用/元	非线性模型	线性模型	误差/%
柴油机发电成本	5 654.104	5 672.781	0.33
弃风惩罚	761.636	761.636	0
弃光惩罚	150.119	150.119	0
蓄电池折旧费用	1 815.694	1 815.694	0
总费用	8 381.553	8 400.229	0.22

由表 1 可以发现, 线性模型与非线性模型的优化结果非常接近, 总费用的误差仅为 0.22%, 且优化结果中各项费用的差别仅在于柴油发电机的发电成本一项上, 误差为 0.33%, 这是由于对含二次项的发电成本进行分段线性化所导致的。由此可见, 本文所提的线性模型可以精确反映微电网 DED 的优化结果。

图 6 为使用线性模型进行优化的各个分布式电源的出力情况。可以发现, 在正午时分, 光伏电站在阳光充足的条件下出力迅速上升, 此时由于弃风和弃光都将引起目标函数值的增加, 即总费用的上升, 而弃光的惩罚费用比弃风惩罚费用高, 因此当

正午时分光伏电站的预测出力比负荷需求大时，采取柴油发电机停机、弃风、蓄电池充电的策略。夜晚的时候，光伏电站的出力为零，负荷需求在 21 时左右达到全天的最高峰，此时仅靠风电场的出力远远不能满足负荷需求，因此除风电场需要按照最大预测功率出力外，还需启动柴油发电机，同时使两个蓄电池装置放电，以满足负荷需求。



图 6 分布式电源出力情况
Fig. 6 Power output of DERs

3.2 集中式优化与分散式优化对比

在 Matlab 2014a 上搭建图 1 所示的微电网动态经济调度模型，并分别采用单纯形法和分布式单纯形法进行求解。将同类型的分布式电源均视为一个独立的智能体，即微电网中包含风、光、柴、储 4 个独立的智能体，通信方式采用如图 4 所示的单向环状通信方式。结果如表 2 所示。

表 2 各项费用和计算时间对比

Tab 2 Comparison of costs and computational times

费用/元	单纯形法	分布式单纯形法
柴油发电机发电成本	5 672.781	5 672.781
弃风惩罚	761.636	761.636
弃光惩罚	150.119	150.119
蓄电池折旧费用	1 815.694	1 815.694
总费用	8 400.229	8 400.229
时间/s	8.28	36.76

由表 2 的结果可以发现，分别采用单纯形法和分布式单纯形法求解微电网的 DED 线性模型时，目标函数值及各项费用均完全一致。

图 7 为微电网在集中式与分散式两种优化方法下的各个微电源的出力曲线对比图。结合表 2 和图 7 所示的微电网在集中式与分散式优化方法下的调度结果，可以发现集中式优化结果与分散式优化结果在各个时刻均完全一致，这既说明了微电网 DED 分散式模型与集中式模型是等价的，又说明分布式单纯形法可以寻得微电网 DED 模型的全局最优解。

考虑如图 8 所示的智能体间的四种通信网络，黑色箭头表示智能体间信息的传递方向。其中通信网络 2 和图 4 所示的信息传递方式一致，通信网络

1 将信息的传递方向由单向传递改为双向传递。通信网络 3 和 4 将微电网中的每个分布式电源都视为一个独立的智能体，且均为单向传递网络。四个通信网络的网络直径 $dia(\zeta)$ 分别为 2、3、4、5。

分别在图 8 所示的四种通信网络下采用分布式单纯形法求解上述微电网 DED 模型，考察其优化调度结果和通信次数，结果如表 3 所示。

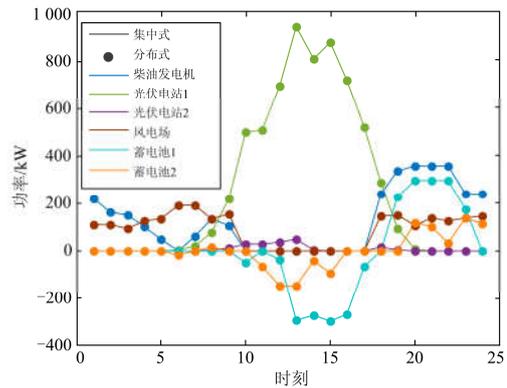


图 7 各分布式电源出力对比

Fig. 7 Comparison of power output curves of DERs

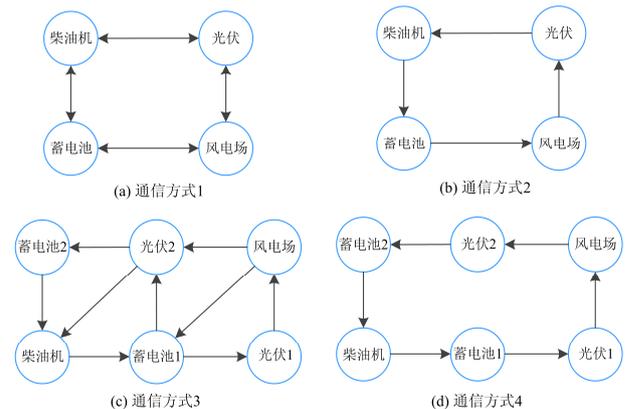


图 8 几种不同的通信网络

Fig. 8 Several kinds of communication networks

表 3 不同通信网络下的优化结果

Table 3 Optimization results in several kinds of communication networks

通信网络	$dia(\zeta)$	总费用/元	通信次数
1	2	8 400.229	9
2	3	8 400.229	12
3	4	8 400.229	18
4	5	8 400.229	21

分析表 3 可以发现，在不同的通信网络下各个分布式电源在充分交流信息后均可以收敛到一致的最优解。由通信次数的增长规律可知，随着通信网络直径的增加，分布式电源间的紧密程度减弱，通

信次数成线性关系增长。即通信网络直径的减小意味着通信次数的降低, 这有利于算法的收敛和智能体间信息保密性的提高。

4 结论

本文基于分布式单纯形法, 提出了一种求解含多种分布式电源的微电网动态经济调度的分散式优化算法, 通过算例测试验证了该算法的准确性和有效性。该方法有以下几个特性: 1) 构建的线性模型的近似程度高, 算法可以收敛到与集中式方法完全一致的全局最优解; 2) 无需全局协调, 只需在相邻的智能体间进行信息的传递, 有利于提高智能体间的信息保密性; 3) 智能体间的通信次数与通信网络的直径成线性增长的关系。

参考文献

- [1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [3] 张建华, 曾博, 张玉莹, 等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13-23.
ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.
- [4] 丁伯剑, 郑秀玉, 周逢权, 等. 微电网多能互补电源容量配置方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 144-148.
DING Bojian, ZHENG Xiuyu, ZHOU Fengquan, et al. Research on method of capacity configuration for hybrid power in microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 144-148.
- [5] 米阳, 吴彦伟, 符杨, 等. 独立光储直流微电网分层协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 37-45.
MI Yang, WU Yanwei, FU Yang, et al. Hierarchical coordinated control of island DC microgrid with photovoltaic and storage system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 37-45.
- [6] 刘梦璇, 郭力, 王成山, 等. 风光柴储孤立微电网系统协调运行控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 19-24.
LIU Mengxuan, GUO Li, WANG Chengshan, et al. A coordinated operating control strategy for hybrid isolated microgrid including wind power, photovoltaic system, diesel generator, and battery storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 19-24.
- [7] 张建华, 于雷, 刘念, 等. 含风/光/柴/蓄及海水淡化负荷的微电网容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 102-112.
ZHANG Jianhua, YU Lei, LIU Nian, et al. Capacity configuration optimization for island microgrid with wind/photovoltaic/diesel/storage and seawater desalination load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 102-112.
- [8] PARISIO A, GLIELMO L. A mixed integer linear formulation for microgrid economic scheduling[C] // IEEE International Conference on Smart Grid Communications, October 17-20, 2011, Brussels, Belgium: 505-510.
- [9] 汪隆君, 许海林, 王钢. 计及分布式电源功率特性的微电网经济调度模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 31-38.
WANG Longjun, XU Hailin, WANG Gang, et al. Economic dispatch model for microgrid considering power characteristics of distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 31-38.
- [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] 李东东, 徐连连, 刘翔, 等. 考虑可削减负荷参与的含风光储微电网经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 35-41.
LI Dongdong, XU Lianlian, LIU Xiang, et al. Optimal dispatching of microgrid considering the participation of reducible loads, distributed generators (DG) and energy storage units[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 35-41.
- [12] 谢敏, 柯少佳, 吉祥, 等. 考虑风光互补特性的微电网动态经济优化调度[J]. 智慧电力, 2017, 45(8): 9-14, 20.
XIE Min, KE Shaojia, JI Xiang, et al. Microgrid dynamic economic dispatch considering wind-solar complementary characteristics[J]. Smart Power, 2017, 45(8): 9-14, 20.

- [13] 孙川, 汪隆君, 许海林. 用户互动负荷模型及其微电网日前经济调度的应用[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2009-2016.
SUN Chuan, WANG Longjun, XU Hailin. An interaction load model and its application in microgrid day-ahead economic scheduling[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2009-2016.
- [14] 林琳, 马超, 王朋. 基于储能电量控制的交直流混合微网实时经济调度方法[J]. 智慧电力, 2017, 45(9): 1-6.
LIN Lin, MA Chao, WANG Peng. Real time economic dispatch method of AC/DC hybrid microgrid based on energy storage control[J]. Smart Power, 2017, 45(9): 1-6.
- [15] 杨艳红, 裴玮, 邓卫, 等. 计及蓄电池储能寿命影响的微电网日前调度优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 172-180.
YANG Yanhong, PEI Wei, DENG Wei, et al. Day-ahead scheduling optimization for microgrid with battery life model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 172-180.
- [16] 陈沼宇, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑P2G多源储能型微电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): 3067-3077.
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): 3067-3077.
- [17] CRISOSTOMI E, LIU M, RAUGI M, et al. Plug-and-play distributed algorithms for optimized power generation in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 2145-2154.
- [18] SHI W B, XIE X R, CHU C C, et al. Distributed optimal energy management in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1137-1146.
- [19] 窦春霞, 李娜, 徐晓龙. 基于多智能体系统的微电网分散协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 125-134.
DOU Chunxia, LI Na, XU Xiaolong. Multi-agent system based decentralized coordinated control strategy for micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 125-134.
- [20] ZHANG Y, GIANNAKIS G B. Efficient decentralized economic dispatch for microgrids with wind power integration[C] // Sixth Annual IEEE Green Technologies Conference, April 3-4, 2014, Corpus Christi, USA: 7-12.
- [21] ZHENG W Y, WU W C, ZHANG B M, et al. Fully distributed multi-area economic dispatch method for active distribution networks[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(12): 1341-1351.
- [22] WANG Z, YANG K, WANG X D. Privacy-preserving energy scheduling in microgrid systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 1810-1820.
- [23] JONES C N, KERRIGAN E C, MACIEJOWSKI J M. Lexicographic perturbation for multiparametric linear programming with applications to control[J]. Automatica, 2007, 43(10): 1808-1816.
- [24] BÜRGER M, NOTARSTEFANO G, BULLO F, et al. A distributed simplex algorithm for degenerate linear programs and multi-agent assignments[J]. Automatica, 2012, 48(9): 2298-2304.
- [25] ZHANG H, VITTAL V, HEYDT G T, et al. A mixed-integer linear programming approach for multi-stage security-constrained transmission expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1125-1133.
- [26] 蒋金山, 何春雄, 潘少华. 最优化计算方法[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2007.

收稿日期: 2017-07-15; 修回日期: 2017-09-01

作者简介:

王志军(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化与控制; E-mail: epzjwang@163.com

刘明波(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化与控制。E-mail: epmbliu@scut.edu.cn

(编辑 周金梅)