

A Multi-Agent Based Distributed Economic Droop Control for Islanded Microgrid

Weifang Ling¹, Minyou Chen¹, Qiang Li¹, Feixiong Chen¹, Zuolin Wei¹, Chi Yao¹, Haoran Wu²

¹State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing

²State Grid Henan Electric Power Company Shangqiu Power Supply Company, Shangqiu Henan
Email: lingweifangzsu@163.com

Received: Apr. 10th, 2017; accepted: Apr. 24th, 2017; published: Apr. 27th, 2017

Abstract

The active power is distributed proportionally to capacities of DGs in traditional droop control, which may result in the high operation cost because of no considering the cost. Based on this problem, a novel distributed economic droop control model based on the multi-agent theory is proposed for islanded microgrids. The proposed control model consists of two layers, where the top layer is a multi-agent based communication network, and the bottom layer is a droop controlled microgrid. Based on the model, a distributed economic optimal algorithm is proposed in terms of the equal incremental cost criterion. Then the frequency reference is optimized and the economic operation of DGs is achieved. In the algorithm only the local information is exchanged and the system power balance won't be broken at the same time. Finally, case studies are carried out to test the performance, in which cases with capacity constraints are considered when both environmental and load demand fluctuate. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords

Multi-Agent System, Islanded Microgrid, Economic Droop, Distributed, Hierarchical Control

基于MAS的孤岛微网分布式经济下垂控制

凌伟方¹, 陈民铀¹, 李强¹, 陈飞雄¹, 韦佐霖¹, 姚池¹, 吴浩然²

¹输电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆

²国网河南省电力公司商丘供电公司, 河南 商丘

Email: lingweifangzsu@163.com

收稿日期: 2017年4月10日; 录用日期: 2017年4月24日; 发布日期: 2017年4月27日

文章引用: 凌伟方, 陈民铀, 李强, 陈飞雄, 韦佐霖, 姚池, 吴浩然. 基于 MAS 的孤岛微网分布式经济下垂控制[J]. 智能电网, 2017, 7(2): 67-78. <https://doi.org/10.12677/sg.2017.72008>

摘要

传统下垂控制一般按照额定容量分配有功功率, 未考虑分布式电源的运行成本, 易引起微网运行成本偏高, 针对这一问题, 本文基于MAS理论提出了一种分布式经济下垂控制模型, 实现了微网的最优经济运行。该模型采用两层控制结构, 上层是基于MAS的通信网络, 下层是基于下垂控制的微网。基于此模型, 根据等微增率准则, 提出分布式经济优化算法对目标函数进行求解, 进而优化下垂控制的参考频率, 实现了分布式电源按成本经济运行。该算法只需局部通信, 在迭代过程中能够不会打破系统原有的功率平衡, 且能够克服容量越界问题, 具有较好的鲁棒性。通过算例分析了所提算法考虑出力越界以及环境和负荷同时波动情况下的收敛情况, 仿真结果验证了所提算法的有效性。

关键词

MAS, 孤岛微网, 经济下垂, 分布式, 分层控制

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微网是由分布式电源(distributed generations, DGs)、储能装置、负荷以及控制装置组成的独立供电系统[1], 具有并网和孤岛两种运行模式[2]。当其孤岛运行时, 通常采用基于下垂控制的多机并联运行方式承担负荷分配, 按照容量比例分配功率。但是 DG 的类型、运行成本及效率各不相同, 按照传统的根据容量分配功率的方法易导致微网的运行成本偏高。为了实现微网最优经济运行, 需要考虑 DG 的运行成本进行功率优化分配[3]。

目前, 针对微网的经济优化运行控制问题, 已经有很多集中式方法研究[4] [5] [6] [7] [8], 集中式控制方法需要一个中心控制器收集全局信息, 利用优化算法求得模型的最优解, 并将其外送给本地控制器, 从而实现系统的最优经济运行。然而, 集中式算法存在单点故障的风险, 可靠性差。因此, 有学者提出分散下垂控制的策略, 文献[9] [10]根据 DG 的运行成本和容量设计下垂曲线的斜率, 降低了运行成本, 但预设优先级需要事先得到其余单元的信息, 因此不能满足即插即用的需求。文献[11]采用三级分层控制结构, 将 DG 成本融合进三次控制, 实现了发电单元的微增率相等和微网的运行成本最小化, 但是低通滤波器的存在降低了动态响应速度。

为了克服集中式控制和分散式控制的不足, 近年来国内外学者提出了一些基于多智能体(multi-agent system, MAS)的分布式算法[12] [13]。文献[12]选择微增率为一致性变量, 提出微增率一致性算法, 实现了经济调度的分布式计算, 但需要一个领导节点收集全局的功率缺额信息, 存在单点故障的风险。文献[13]提出“一致项+更新项”的分布式经济调度方法, 更新项的存在确保在微增率趋于一致时, 系统的总有功出力等于负荷需求, 其更新项由本地信息决定。文献[3]提出基于边际成本的改进电压-有功下垂控制, 并通过分布式二次优化控制提高了功率分配精度, 实现了微网的经济运行。

本文在现有研究的基础上, 提出了一种基于 MAS 的分布式经济下垂控制策略, 实现了微网的最优经济运行。该策略采用两层控制结构, 上层是基于 MAS 的通信网络, 下层是基于下垂控制的微网。基于此模型, 根据等微增率准则, 提出分布式经济优化算法, 优化下垂控制的参考频率, 实现了微网的运行成

本最小化。所提策略只需 Agent 之间的局部通信，克服了集中控制收集全局信息的缺点，可靠性高；此外，所提算法能够求得最优经济运行点，且能克服容量越界问题，具有一定的鲁棒性。最后，本文对所提算法的收敛性进行了严格的推导和证明，并通过 5 节点和 14 节点仿真算例，验证了算法的有效性。

2. 等微增率准则

等微增率准则是指电力系统中的各发电单元按相等的耗量微增率运行，从而使总的运行成本最小，运行最经济[14]。微网的分布式电源既包括柴油发电机、燃气轮机等可控发电单元，又包括风机、光伏等不可控发电单元[15]。DG 的运行成本主要包括燃料成本和维护成本[16]，燃料成本一般为有功功率的二次函数，维护成本为有功功率的线性函数，虽然不同的 DG 有着不同的运行成本，但其成本函数均可以统一表示为关于有功功率的二次函数形式：

$$C_i(P_i) = \gamma_i P_i^2 + \beta_i P_i + \alpha_i \quad (1)$$

式中， γ_i 、 β_i 和 α_i 分别为成本系数。由于风机、光伏等不可控单元为清洁能源，假设其运行成本为零。

因此，以系统可控发电单元总运行成本之和最小为目标的孤岛微网经济优化模型为：

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n C_i(P_i) \quad (2)$$

同时微网要满足有功功率平衡约束条件和发电单元容量约束条件，分别为：

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^n P_i = P_D \quad (3)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中， P_i 、 $P_{i,\min}$ 和 $P_{i,\max}$ 分别为可控发电单元的有功出力、有功出力的下限值和上限值， P_D 为系统的总有功负荷， n 为可控发电单元数。

对(1)式关于有功功率求导数，可得可控单元 i 的微增率如下：

$$\lambda_i = \frac{\partial C_i(P_i)}{\partial P_i} = 2\gamma_i P_i + \beta_i \quad (5)$$

式中， λ_i 为可控单元 i 的微增率。

根据等微增率准则，可由(2)、(3)和(4)式组成的经济优化模型的解析解为[17]：

$$\begin{cases} \lambda_i = \lambda^*, & P_{i,\min} < P_i < P_{i,\max} \\ \lambda_i \leq \lambda^*, & P_i = P_{i,\max} \\ \lambda_i \geq \lambda^*, & P_i = P_{i,\min} \end{cases} \quad (6)$$

式中， λ^* 为系统最优微增率。当可控单元的有功出力均在容量约束范围之内时， λ^* 表示如下[17]：

$$\lambda^* = \left(P_D + \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{2\gamma_i} \right) / \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\gamma_i} \right) \quad (7)$$

3. 基于 MAS 的分布式经济优化下垂控制

根据等微增率准则，当 λ 趋于一致时，式(2)表示的目标函数达到最小值，系统实现最优经济运行，本文设计基于 MAS 的分布式优化算法来实现这一目的。本节先介绍基于 MAS 的微网分布式控制模型，然后基于此模型，提出分布式经济优化下垂控制策略，最后对分布式优化算法的收敛性进行证明。

3.1. 基于 MAS 的微网分布式控制模型

本文采用的微网分布式控制模型由两层控制结构组成[18]。上层是基于 MAS 的通信网络，下层是由 DG 和负载组成的微网，如图 1 所示为 5 节点微网分布式控制模型。

其中，每个可控 DG 分配一个 Agent， n 为 Agent 数。DG 和 Agent 之间通过通信线路(图中黑色虚线)连接，Agent 收集 DG 的信息，经自身的智能处理单元计算出外送信息和控制指令，从而实现控制微网物理层的目的。

上层通信网络用图 G 表示，各个 Agent 即为图的节点，Agent 之间的边(图中黑色实线)表示通信链路，用于与邻居 Agent 的信息交流；Agent 的连接关系用边权邻接矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 表示，如果 Agent i 和 Agent j 之间有连接边，则 $a_{ij} = 1$ ，否则 $a_{ij} = 0$ ，特殊地， $a_{ii} = 0$ 。每个 Agent 所连接边的数量之和表示节点的度，用 d_{ii} 表示： $d_{ii} = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ 。为了下文叙述方便，这里定义一个对角矩阵 D ，其主对角元由各个节点的度 d_{ii} 组成，具体表示如下：

$$D = \text{diag}(d_{11}, d_{22}, \dots, d_{nn}) \quad (8)$$

基于此 MAS 控制模型，我们可以设计相应的分布式控制策略，实现微网的最优经济运行。

3.2. 布式经济下垂控制策略

分布式经济优化下垂的控制框图如图 2 所示。主要由两部分组成：网络控制层和本地控制层。

在网络控制层，本地 Agent 与邻居 Agent 进行信息交互，从而生成本地控制层 DG 的最优目标功率值和全网平均频率。然后，在本地控制层，二次控制根据网络控制层反馈的目标有功功率和平均频率，通过 PI 控制器调节，生成 P-f 下垂控制中参考频率的修正量，从而实现跟踪目标有功功率和恢复频率的作用。

(1) 网络层控制策略

根据网络控制层的通信网络图 G ，本文设计如下分布式经济优化控制律。

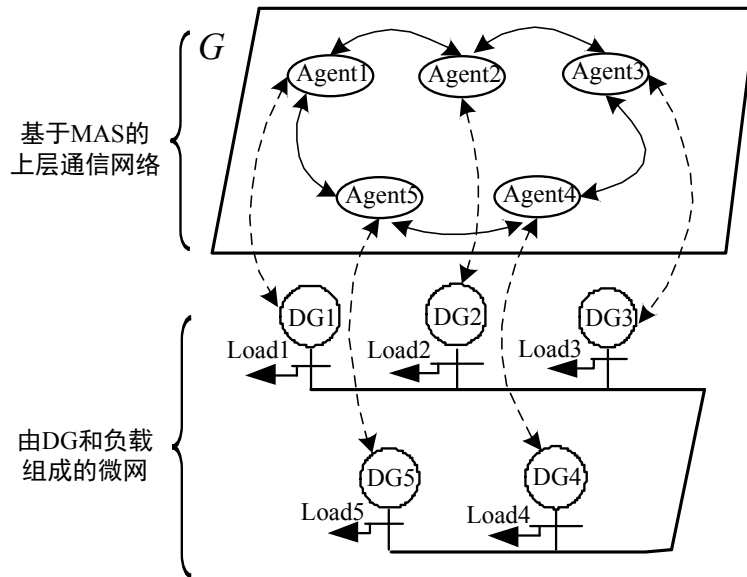


Figure 1. Control structure of a microgrid based on MAS
图 1. 基于 MAS 的微网控制结构

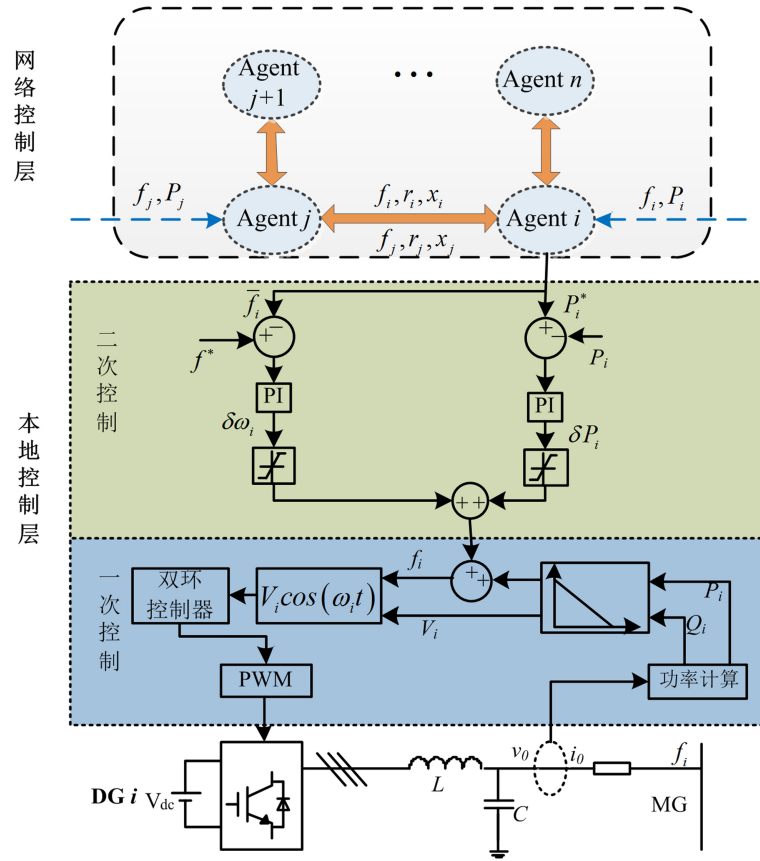


Figure 2. Block diagram of droop control structure
图 2. 分布经济下垂控制结构框图

$$\mathbf{P}(t+1) = \text{diag}(\mathbf{D}^{-1}\mathbf{R}) \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{D}^{-1} \cdot (\mathbf{P}(t) + \mathbf{B}) - \mathbf{B} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{P} = [P_i]_{n \times 1}$ 是有功功率列向量, $\mathbf{R} = [r_i]_{n \times 1}$, $\mathbf{B} = [b_i]_{n \times 1}$ 分别是成本系数列向量。其中, $r_i = 1/(2\gamma_i)$, $b_i = \beta_i/(2\gamma_i)$, β_i, γ_i 分别是成本函数(4)中的成本系数。另外, 式中系数矩阵 $\mathbf{W} = [w_{ij}]_{n \times n}$ 的元素 w_{ij} 定义如下:

$$w_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{r_i/d_{ii} + r_j/d_{jj}} & j \in N_i, j \neq i \\ \sum_{j \in N_i} w_{ij} & j = i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

由式(9)可知, 此控制律通过迭代方式计算出可控 DG 的最优有功出力, 实现微网的分布式经济运行。

令 $\mathbf{M} = \text{diag}(\mathbf{D}^{-1}\mathbf{R}) \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{D}^{-1}$, $\mathbf{X} = \mathbf{P} + \mathbf{B}$, 则控制律(9)可以进一步简化成如下形式:

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{M} \cdot \mathbf{X}(t) \quad (11)$$

式中, $\mathbf{X} = [x_i]_{n \times 1}$ 。由式(11)可知, 根据 MAS 通信网络, Agent 与 Agent 之间只需交换彼此的 r 和 x 信息即可更新自身状态, 求得最优目标功率。

具体到每个可控 DG, 其有功出力迭代更新表达式如下:

$$P_i(t+1) = \frac{r_i}{d_{ii}} \cdot \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot \frac{P_j(t) + b_j}{d_{jj}} - b_i \quad (12)$$

式中, $P_j(t)$ 是节点 j 在 t 时刻的有功出力, $P_i(t+1)$ 是节点 i 在 $t+1$ 时刻的有功出力。上式之所以引入各个节点的度是为了保证当系统的通信网络发生变化时, 算法依然具有较好的鲁棒性和自适应性。

当算法收敛时, Agent i 将求得的最优功率 P_i^* 送给底层的二次控制, 从而实现最优经济运行。

当系统重载, 成本低的 DG 输出功率可能达到其容量, 为防止 DG 功率越界, 可以采取如下判定策略。若 DG i 功率越界, 则将 P_i^* 限制为边界值, 退出 Agent 网络, 通信网络拓扑结构发生变化, 同时向邻居发送功率越界信号 ΔP_i , $\Delta P_i = (P_i^* - P_{i,m})/d_{ii}$, $P_{i,m} = P_{i,\min}$ or $P_{i,\max}$, d_{ii} 为 Agent i 的邻居数。

若 Agent j 为 Agent i 的邻居, 则当其检测到 Agent i 发送的 ΔP_i 信号时, 将自身功率变为式(13)。

$$P_j^* = P_j^* + \Delta P_i \quad (13)$$

然后 Agent 将最优功率送给底层的二次控制, 实现经济运行。

(2) 本地层二次控制策略

本地控制的一次控制采用传统的 P-f 和 Q-V 下垂控制, 为了使下垂控制输出目标有功功率和稳定系统频率, 需要本地二次控制的调节。

对于 DG i 来说, 其二次控制将网络控制层传来的 P_i^* 与 DG i 的输出有功功率比较经 PI 调节, 得到有功修正量 δP_i 如下:

$$\delta P_i = (P_i^* - P_i) \left(k_{p,p} + \frac{k_{I,p}}{s} \right) \quad (14)$$

式中, $k_{p,p}$ 和 $k_{I,p}$ 分别为有功频率修正中 PI 控制器的参数。

由于传统下垂控制的一次控制会引起频率偏差, 同时, 在跟踪目标有功的过程中也会引起频率偏差, 因此需要对频率进行修正, 使系统频率恢复到额定值, 平均频率的修正量为:

$$\delta \omega_i = (f^* - \bar{f}) \left(k_{p,f} + \frac{k_{I,f}}{s} \right) \quad (15)$$

式中, $k_{p,f}$ 和 $k_{I,f}$ 分别为平均频率修正中 PI 控制器的参数, \bar{f} 为分布式平均一致性算法求得的平均频率。

因此, 下垂控制的参考频率优化为:

$$f_i = f_{\max} - m_i P_i + \delta P_i + \delta f_i \quad (16)$$

式中, f_{\max} 为最大频率偏差, m_i 为有功下垂系数。

通过参考频率的优化, 下垂控制将跟踪最优出力, 实现微网最优经济运行。

3.3. 分布式经济优化算法的收敛性

为了证明所提分布式经济优化控制律的收敛性, 本节先通过定理 1 证明该控制律在进行功率重新分配时不会破坏系统原有的功率平衡, 然后通过定理 2 证明算法能够可靠收敛, 最后通过定理 3 证明当算法收敛时, 满足等微增率准则。

已知 DG i 在迭代初始时刻和迭代时刻 t 的有功出力分别为 $P_i(0)$ 和 $P_i(t)$, 任意时刻的微增率为 λ_i , 初始总有功负荷为 $P_D(0)$; Agent i 在迭代初始时刻和迭代时刻 t 的状态值分别为 $x_i(0)$ 、 $x_i(t)$ 。

定理 1 当系统功率平衡时, 通过分布式经济优化控制律可以实现负荷在 DG 之间重新分配, 不会破坏系统的功率平衡, 即功率优化分配前后总功率恒定不变, 即 $\sum_{i=1}^n P_i(t+1) = \sum_{i=1}^n P_i(t) = P_D(0)$ 。

证明: 令 $\bar{r}_i = r_i/d_{ii}$, $\bar{P}_i(t) = P_i(t)/d_{ii}$, $\bar{b}_i = b_i/d_{ii}$, $\bar{x}_i(t) = \bar{P}_i(t) + \bar{b}_i$, 则迭代公式(12)可化为:

$$P_i(t+1) = \bar{r}_i \cdot \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot (\bar{P}_j(t) + \bar{b}_j) - b_i \quad (17)$$

将元素 w_{ij} 的值代入，上式可化为：

$$P_i(t+1) = \bar{r}_i \cdot \sum_{j=1}^n \frac{(\bar{P}_i(t) + \bar{b}_i) + (\bar{P}_j(t) + \bar{b}_j)}{\bar{r}_i + \bar{r}_j} \cdot a_{ij} - b_i \quad (18)$$

上式两边同时求和得到：

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n P_i(t+1) &= \sum_{i=1}^n \bar{r}_i \cdot \sum_{j=1}^n \frac{\bar{P}_i(t) + \bar{b}_i + \bar{P}_j(t) + \bar{b}_j}{\bar{r}_i + \bar{r}_j} \cdot a_{ij} - \sum_{i=1}^n b_i \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\bar{r}_i}{\bar{r}_i + \bar{r}_j} \cdot a_{ij} \cdot (\bar{P}_i(t) + \bar{b}_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\bar{r}_j}{\bar{r}_i + \bar{r}_j} \cdot a_{ij} \cdot (\bar{P}_j(t) + \bar{b}_j) - \sum_{i=1}^n b_i \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\bar{r}_i}{\bar{r}_i + \bar{r}_j} \cdot a_{ij} \cdot (\bar{P}_i(t) + \bar{b}_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\bar{r}_j}{\bar{r}_i + \bar{r}_j} \cdot a_{ij} \cdot (\bar{P}_i(t) + \bar{b}_i) - \sum_{i=1}^n b_i \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\bar{r}_i + \bar{r}_j}{\bar{r}_i + \bar{r}_j} \cdot a_{ij} \cdot (\bar{P}_i(t) + \bar{b}_i) - \sum_{i=1}^n b_i \\ &= \sum_{i=1}^n (\bar{P}_i(t) + \bar{b}_i) \sum_{j=1}^n a_{ij} - \sum_{i=1}^n b_i = \sum_{i=1}^n P_i(t) \end{aligned}$$

因此，可得：

$$\sum_{i=1}^n P_i(t+1) = \sum_{i=1}^n P_i(t) = \dots = \sum_{i=1}^n P_i(1) = \sum_{i=1}^n P_i(0) \quad (1)$$

又有 $\sum_{i=1}^n P_i(0) = P_D(0)$ ，故 $\sum_{i=1}^n P_i(t) = P_D(0)$ 。

证毕。

定理 1: 说明了功率在经济优化分配的过程中，系统仍能保持原有的功率平衡，DG 总功率输出不变。当负荷波动时，下垂控制调节功率输出适应负荷变化，以保证系统功率平衡，然后通过分布式经济优化控制律实现功率的重新分配，系统实现最优经济运行。

定理 2: 当 t 趋于无穷时，状态值 $x_i(t)$ 收敛，有 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_i(t) = \mu_i \sum_{i=1}^n x_i(0)$ ， $\mu_i \in (0,1)$ 。

证明：对矩阵 \mathbf{M} 每一列元素求和，可得：

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n m_{ij} &= \sum_{i=1}^n \bar{r}_i \cdot w_{ij} \cdot \frac{1}{d_{jj}} = \bar{r}_j \cdot w_{jj} \cdot \frac{1}{d_{jj}} + \sum_{i=1, i \neq j}^n \bar{r}_i \cdot w_{ij} \cdot \frac{1}{d_{jj}} \\ &= \bar{r}_j \sum_{i=1}^n \frac{a_{ji}}{\bar{r}_j + \bar{r}_i} \cdot \frac{1}{d_{jj}} + \sum_{i=1, i \neq j}^n \frac{\bar{r}_i \cdot a_{ij}}{\bar{r}_i + \bar{r}_j} \cdot \frac{1}{d_{jj}} \\ &= \bar{r}_j \sum_{i=1}^n \frac{a_{ij}}{\bar{r}_i + \bar{r}_j} \cdot \frac{1}{d_{jj}} + \sum_{i=1}^n \frac{\bar{r}_i \cdot a_{ij}}{\bar{r}_i + \bar{r}_j} \cdot \frac{1}{d_{jj}} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{\bar{r}_i + \bar{r}_j}{\bar{r}_i + \bar{r}_j} \cdot \frac{a_{ij}}{d_{jj}} = d_{jj} \sum_{i=1}^n a_{ij} = 1 \end{aligned}$$

由上述推导可知矩阵 \mathbf{M} 每一列元素的和均为 1，所以矩阵 \mathbf{M} 是列随机矩阵， $\rho(\mathbf{M})=1$ 。又因矩阵的对角元素都为正，所以 $\mathbf{M}^{n-1} > 0$ ，矩阵 \mathbf{M} 为素矩阵。因此，矩阵 \mathbf{M} 有如下特性[14]：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{M}^t = \boldsymbol{\mu} \mathbf{1}^T \quad (20)$$

式中， $\boldsymbol{\mu} > 0$ ， $\mathbf{1}^T \boldsymbol{\mu} = 1$ ， $\mathbf{1}_{n \times 1}$ 为 n 维单位列向量。

由上述特性可得: $\lim_{t \rightarrow \infty} x_i(t) = \mu_i \sum_{i=1}^n x_i(0)$, 即状态值 $x_i(t)$ 收敛。其中, μ_i 是 $\boldsymbol{\mu}$ 的第 i 个元素。

证毕。

定理 2 说明本文推导出的分布式经济优化控制律经过有限次迭代后可收敛。下面证明算法能够收敛时满足等微增率准则。

定理 3 若式(11)收敛, 设收敛时可控 DG i 的微增率值为 λ_i^* , 则当算法收敛时所有可控 DG 的微增率相等, 等于常数 k , 即 $\lambda_1^* = \lambda_2^* = \dots = \lambda_i^* = \dots = \lambda_n^* = k$ 。

证明: 由定理 2 可知本文所提算法能够收敛, 假设状态变量 \mathbf{X} 最终收敛到 \mathbf{X}^* , 式(11)可化为 $\mathbf{X}^* = \mathbf{M} \cdot \mathbf{X}^*$, 等式两边同时减去 \mathbf{X}^* , 则有 $(\mathbf{M} - \mathbf{I}) \cdot \mathbf{X}^* = \mathbf{0}$, 写成齐次线性方程组形式为:

$$\begin{bmatrix} m_{11} - 1 & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} - 1 & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \\ \vdots \\ x_n^* \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (21)$$

令 $\mathbf{M} - \mathbf{I} = \mathbf{H}$, 由于 $\sum_{i=1}^n m_{ij} = 1$, 因此,

$$|\mathbf{H}| = 0 \quad (22)$$

由式(22)可推出矩阵 \mathbf{H} 的秩为:

$$\text{rank}(\mathbf{H}) = \text{rank}(\mathbf{H}^T) = n - 1 \quad (23)$$

因此上述齐次线性方程组有多解, 可以验证其通解为:

$$\begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \\ \vdots \\ x_n^* \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} \quad (24)$$

又有 $x_i^* = P_i + b_i, i = 1, 2, \dots, n$, 可得:

$$\frac{P_1^* + b_1}{r_1} = \frac{P_2^* + b_2}{r_2} = \dots = \frac{P_i^* + b_i}{r_i} = \dots = \frac{P_n^* + b_n}{r_n} = k \quad (25)$$

将 $r_i = 1/(2\gamma_i)$, $b_i = \beta_i/(2\gamma_i)$ 代入上式, 即有:

$$\lambda_1^* = \lambda_2^* = \dots = \lambda_i^* = \dots = \lambda_n^* = k \quad (26)$$

证毕。

定理 3 说明了当分布式经济优化算法收敛时, 微网中所有可控 DG 的微增率相等, 目标函数达到最小值, 微网实现最优经济运行。

4. 算例分析

为验证所提分布式经济下垂策略的有效性, 本文利用 Matlab/Simulink 搭建了如图 3(a)和(b)所示的 5 节点和 14 节点孤岛微网仿真模型。其中, DG1~5 分别表示 5 个可控 DG, 均采用下垂控制; PV 和 WT 分别表示光伏和风机, 始终运行于 MPPT 模式。DG 的成本和容量参数[17]见表 1。考虑到系统的稳定性和算法的收敛性, 分布式控制器的采样周期设为 1 ms, 每隔 30 ms 将最优目标值送给本地二次控制一次。

本节通过两个仿真算例验证所提控制策略的有效性。4.1 考虑功率越界情况对算法的收敛性进行验证;

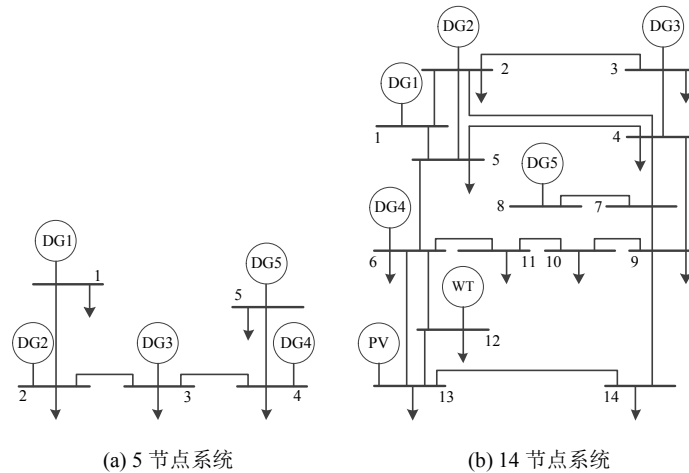


Figure 3. Simulation model of an islanded microgrid

图 3. 孤岛微网仿真模型

Table 1. System parameter

表 1. 系统参数

DG_i	γ_i	β_i	α_i	$P_{i,min}(kW)$	$P_{i,max}(kW)$
1	0.094	1.22	51	10	80
2	0.078	3.41	31	8	60
3	0.105	2.53	78	3.8	40
4	0.082	4.02	42	5.4	45
5	0.074	3.17	62	4.2	18

4.2 验证环境和负荷同时变化对算法的影响。

4.1. 算法收敛性分析

为了验证所提分布式经济下垂控制的有效性，本节采用 5 节点仿真模型进行仿真分析，系统 0~0.5 s 采用传统的下垂控制，0.5 s 启动分布式优化算法，1.5 s 前未考虑容量越界情况，1.5~2.5 s 考虑容量越界情况，仿真结果如图 4 所示。

由图 4(a)可知，启动控制策略后，DG1~5 的有功出力发生变化，成本高的少出力，成本低的多出力，并逐渐趋于稳定，1.5 s 以后，考虑容量越界情况，DG5 的有功出力最终稳定在容量上界值。由于微增率与有功出力是正相关的一次函数关系，因此各个 DG 的微增率变化规律与其有功出力相同，如图 4(b)所示，最终各 DG 的微增率收敛到一致值，说明 DG1~5 的运行成本之和达到最小值。此外，由图 4(c)可知，系统的总成本相比传统下垂控制下降，但是 1.5 s 以后总成本增加，这是因为 DG5 有功出力达到最大值，系统多余的有功只能在其它 DG 单元之间分配，因此总成本增加。由图 4(d)可知，由于控制策略的切换带来一定的扰动，系统的频率始终稳定在 50 Hz，符合 IEEE 1547 标准[19]对频率的要求。

4.2. 环境和负荷同时变化对系统的影响

由于在实际的微网中，可再生能源的出力受环境影响有很大的波动性、间歇性和不确定性，同时负荷在不同时段也有所不同，因此本节模拟实际的运行条件，分析环境和负荷同时波动情况对系统运行的影响。采用如图 3(b)所示的微网 14 节点模型，系统初始有功负荷设为 150 kW 且可控 DG1~5 在初始时刻均已达到最优经济出力，假设 DG 的容量足够大。风机和光伏的有功出力波动情况如图 5(a)所示，系统

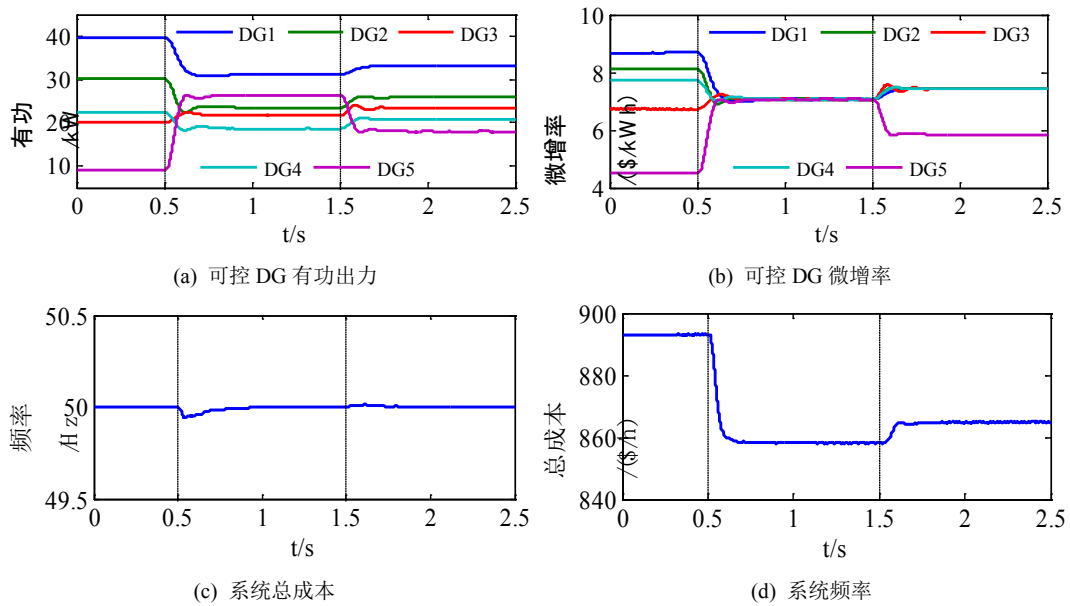


Figure 4. Results of the convergence

图 4. 收敛性仿真结果

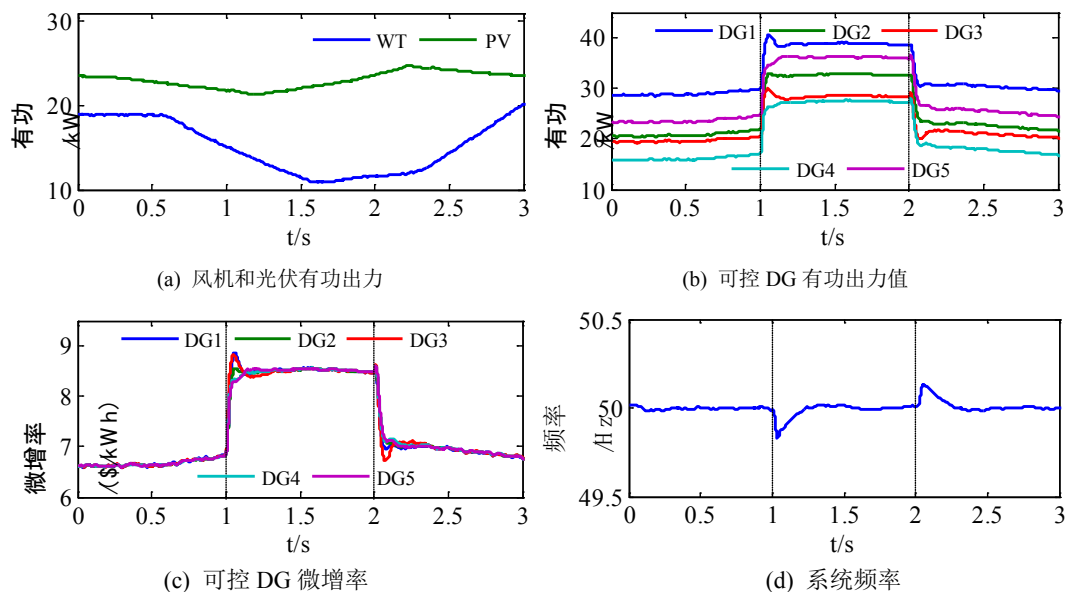


Figure 5. Results of both environmental conditions and load demand fluctuations

图 5. 环境和负荷同时波动仿真结果

的有功负荷在 1 s 时增加 30%，2 s 时减小 20%。仿真结果如图 5(b)~(f)所示。

由图 5(b)可知，在 1 s 以前，由于风机和光伏的出力波动不大，因此 DG1~5 的有功出力波动也较小。1 s 时，由于负荷突然增加，可控 DG1~5 增加其有功出力以维持系统的功率平衡，随着风机和光伏有功出力的减小，可控 DG1~5 的有功出力将继续增加，负荷减小和可再生能源出力增加时的情况与此类似。由图 5(c)可知，DG1~5 的微增率将跟随其有功出力变化，且在其它时刻始终相等，仅在负荷波动瞬间有些许冲击，说明在环境和负荷同时波动的情况下，可控 DG1~5 的运行成本之和能够在波动之后迅速恢复到最小值，系统继续最优经济运行。由图 5(d)可知频率波动也在允许范围之内。

5. 结论

本文提出了一种基于 MAS 理论的分布式经济下垂控制策略, 实现了微网的最优经济运行。该模型采用两层控制结构, 上层是基于 MAS 的通信网络, 下层是基于下垂控制的微网。上层控制通过本地 Agent 与邻居 Agent 的信息交互, 计算生成下层控制中 DG 的有功出力参考值; 下层控制的二次控制完成目标有功功率的跟踪控制, 实现可控 DG 的最优有功出力, 同时二次调频环节的存在稳定了微网的频率。所提算法只需局部通信, 克服了集中控制收集全局信息的缺点, 可靠性高; 此外, 该算法在迭代过程中能够保证功率的恒定性, 同时考虑了功率越界的情况对算法修正, 具有较好的鲁棒性。最后通过仿真分析, 验证了所提算法在功率越界和不越界情况下以及负荷和环境同时波动的情况下的有效性。

基金项目

国家自然科学基金项目(51177177)。

参考文献 (References)

- [1] 王成山, 高菲, 李鹏, 等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 2-8.
- [2] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
- [3] 苏晨, 吴在军, 吕振宇, 等. 基于边际成本下垂控制的自治微电网分布式经济运行控制[J]. 电力自动化设备, 2016(11): 59-66.
- [4] Lin, C.E. and Viviani, G.L. (1984) Hierarchical Economic Dispatch for Piecewise Quadratic Cost Functions. *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, **103**, 1170-1175. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1984.318445>
- [5] Lin, C.E., Chen, S.T. and Huang, C.L. (1992) A Direct Newton-Raphson Economic Dispatch. *IEEE Transactions on Power Systems*, **7**, 1149-1154. <https://doi.org/10.1109/59.207328>
- [6] Kuo, C.C. (2008) A Novel Coding Scheme for Practical Economic Dispatch by Modified Particle Swarm Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, **23**, 1825-1835. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.2002297>
- [7] Chiang, C.L. (2007) Genetic-Based Algorithm for Power Economic Load Dispatch. *Iet Generation Transmission & Distribution*, **1**, 261-269. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20060130>
- [8] Sinha, N., Chakrabarti, R. and Chattopadhyay, P.K. (2003) Evolutionary Programming Techniques for Economic Load Dispatch. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **7**, 83-94. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2002.806788>
- [9] Nutkani, I.U., Loh, P.C. and Blaabjerg, F. (2013) Cost-Prioritized Droop Schemes for Autonomous Microgrids. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Denver, 15-19 September 2013, 1021-1025.
- [10] Nutkani, I.U., Loh, P.C., Wang, P., et al. (2015) Decentralized Economic Dispatch Scheme with Online Power Reserve for Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **8**.
- [11] 赵睿, 章雷其, 辛焕海, 等. 微网孤岛运行的分散自趋优控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015(21): 30-36.
- [12] Olfati-Saber, R., Fax, A. and Murray, R.M. (2007) Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems. *Proceedings of the IEEE*, **95**, 215-233. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.887293>
- [13] Zhang, Z. and Chow M.Y. (2012) Convergence Analysis of the Incremental Cost Consensus Algorithm under Different Communication Network Topologies in a Smart Grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, **27**, 1761-1768. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2188912>
- [14] Yang, S., Tan, S. and Xu, J.X. (2013) Consensus Based Approach for Economic Dispatch Problem in a Smart Grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, **28**, 4416-4426. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2271640>
- [15] 吕朋蓬, 赵晋泉, 李端超, 等. 基于信息物理系统的孤岛微网实时调度的一致性协同算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1471-1480.
- [16] 陈刚, 李志勇, 赵中原. 微电网系统的分布式优化下垂控制[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(8): 999-1006.
- [17] Chen, G., Lewis, F.L., Feng, E.N., et al. (2015) Distributed Optimal Active Power Control of Multiple Generation Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **62**, 1.
- [18] Li, Q., Chen, F., Chen, M., et al. (2015) Agent-Based Decentralized Control Method for Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **7**, 637-649.

-
- [19] Basso, T.S. and Deblasio, R. (2004) IEEE 1547 Series of Standards: Interconnection Issues. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **19**, 1159-1162. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.834000>

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：sg@hanspub.org