

Distributed Control Method with Local Information for Islanded Microgrids

Wenfa Kang¹, Qiang Li¹, Congbo Peng¹, Mengkai Gao¹, Tao Chen², Jin Gao²

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

²State Grid Chongqing Electric Power Company Electric Power Science Institute, Chongqing
Email: 18883724521@163.com

Received: Apr. 13th, 2017; accepted: Apr. 27th, 2017; published: Apr. 30th, 2017

Abstract

A distributed control method with local information for islanded microgrids is proposed in this paper. First, a communication network composed of agents is established, on which local information is exchanged among agents, and agents compute setting points and regulate outputs of distributed generation at the next time step. Furthermore, a systematic method is presented to derive a set of control laws from any given communication network. Moreover, it is proved that the control laws not only balance the system, but also make the outputs of controllable distributed generation proportional to their capacities. Finally, two cases are designed to evaluate the performance of the proposed method. The simulation results show that the proposed methods can maintain power supply-demand balance, and also can guarantee power dispatched proportionally, when load demand and environmental conditions fluctuate.

Keywords

Islanded Microgrid, Multi-Agent System (MAS), Distributed Control, Secondary Control, Networked Control

采用局域信息的孤岛微电网分布式控制方法

康文发¹, 李强¹, 彭琮波¹, 高孟凯¹, 陈涛², 高晋²

¹输配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国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆

Email: 18883724521@163.com

收稿日期: 2017年4月13日; 录用日期: 2017年4月27日; 发布日期: 2017年4月30日

摘要

本文提出一种仅利用局域信息的孤岛微电网分布式控制方法。该方法利用agent构造通信网络,并进行局域信息交换。Agent根据收集的信息,计算下一时刻分布式电源的输出设定值,从而调整下一时刻分布式电源的输出。本文系统地给出,从任意通信网络为agent导出分布式控制律的一般方法,并且在理论上证明,该分布式控制律不仅能够保证微电网内功率平衡,而且能够使得可控分布式电源输出与其容量成比例。最后,设计两组实验,验证文中提出的分布式控制律有效性。仿真结果表明,当环境和负载变化时,文中提出的方法能够维持微电网内功率平衡,保证功率在可控分布式电源之间按照容量大小进行分配。

关键词

孤岛微电网,多Agent系统,分布式控制,第二级控制,网络化控制

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

可再生能源的开发与利用已经受到各国研究人员的关注。微电网能够更好的接纳可再生能源,成为研究热点[1]。通常,微电网能够融合多种分布式电源为有机整体,如光伏电源、风力发电电源、微型燃气轮机、燃料电池,储能电源等,为用户提供清洁、可靠、灵活的电能。微电网有两种运行方式[2] [3],第一种运行方式是通过并网开关与大电网连接的并网运行方式;第二种是不与大电网相连接的孤岛运行方式。孤岛运行的微电网,缺乏电压频率的支撑,分布式电源(DG)的逆变器响应速度快,过载能力小,间歇性电源输出不稳定,负载变化随机等导致孤岛微电网控制逐渐成为研究热点[4]。

随着研究的不断深入,多种控制策略[5]-[23]用于控制微电网稳定运行,包含集中式控制方法[12],分层控制方法[13] [14] [15],基于MAS的分布式控制方法[19] [20] [21] [22] [23],其中分布式控制方法受到了人们广泛研究。与集中式控制相比,分布式控制的通信网络结构灵活,通信系统投资成本低,不需要中央控制器,不会发生单点故障,控制方式灵活多样,容易实现DG的即插即用,更加适应间歇性可再生能源的输出随机波动特性[12] [23]。

文献[9] [10] [11]提出了改进的下垂控制方法用于控制微电网中的分布式电源,有效的提高了无功功率在系统中的合理分配,但是都未曾考虑可再生能源接入对微电网运行的影响。文献[16]提出了一种分布式频率电压合作制策略,在保证DG发电成本最小时,能够使得系统频率稳定,节点电压维持在稳定值,系统无功功率均衡分配。作者[17]提出孤岛微电网分布式电压预测控制方案,在不借助通信系统时也能够保证系统电压稳定,并建立小信号模型分析提出方法的稳定性,但当机组加入和退出运行时,需要重新修改预测控制方程。结合分布式控制与分层控制的思想,文献[18]提出针对不确定通信网络结构的微电网控制策略,提供了电压频率恢复的解决办法,但提出的方法中需要一个虚拟节点提供电压和频率参考值。文献[19] [20]借鉴多Agent系统,提出了微电网运行控制策略,但文献未考虑可控DG成比例输出的功能。基于此问题,文献[21]提出了孤岛微电网分布式控制策略,有效的解决了可再生能源输出波动对系统的影响,随后,在此基础上提出了分布式最优控制方法[22],使得微电网中功率按照DG的容量分配。

上述一些文献采用的控制方法较为复杂，不能快速响应环境负载的剧烈变化，针对上述问题，本文提出一种仅利用局域信息的微电网分布式控制策略。文章中提出的分布式控制方法为完全分布式的方法，只需要局部信息就可以实现微电网中功率供需平衡，可控 DG 成比例输出的功能，实现微电网中功率在可控 DG 之间按照容量大小分配。

文章内容安排如下。首先，介绍分布式分层控制策略，控制策略包含通信网络的构建和分布式控制律的设计；其次，证明分布式控制律的功率平衡特性与收敛特性；随后，介绍微电网仿真系统；然后，设计实验验证文中控制方法的有效性，并分析仿真结果；最后，总结文章。

2. 孤岛微电网分布式控制模型

本文提出的仅利用局域信息的分布式控制模型，首先构造由 Agent 组成的通信网络。由 Agent 组成的通信网络中，Agent 节点只收集邻居 Agent 的信息，不需要收集全网的信息。对于任意给定的通信网络，本文系统地给出为 Agent 导出分布式控制律的方法，从理论上证明分布式控制律的功率平衡特性与收敛性。理论证明，若 Agent 通过分布式控制律调节可控 DG 的功率输出设定值，则能够保持系统功率供需平衡，通过迭代的方法，能够逐渐使得可控 DG 成比例输出，实现微电网系统功率最优分配。

2.1. 通信网络结构设计

如图 1 所示，微电网中，分布式电源由微型燃气轮机(MT)、光伏电源(PV)、永磁同步风力发电机(WT)，蓄电池(BESS)等组成。而通信网络由 Agent 组成，用于信息传递、处理和计算。网络 G 中，所有的 Agent 都不收集负载的信息，只收集 DG 的输出功率信息。并且，定义与微型燃气轮机(可控 DG)相连的 Agent 为可控 Agent，与蓄电池(半可控 DG)相连的为半可控 Agent。由于光伏、风机(不可控 DG)采用最大功率跟踪(MPPT)控制方式，不对其输出进行调节，所以没有对应的 Agent，从而减少了通信投资。图 1 中，可控 Agent 与可控 Agent 之间采用双向通信方式，半可控 Agent 与可控 Agent 之间采用单向通信方式，信息由半可控 Agent 传递给邻居可控 Agent。虚线表示通信网络与微电网中 DG 的局部控制器之间的信息流动，箭头表示信息传递方向。可控 Agent 既收集对应 DG 的信息，又控制底层可控 DG，半可控 Agent

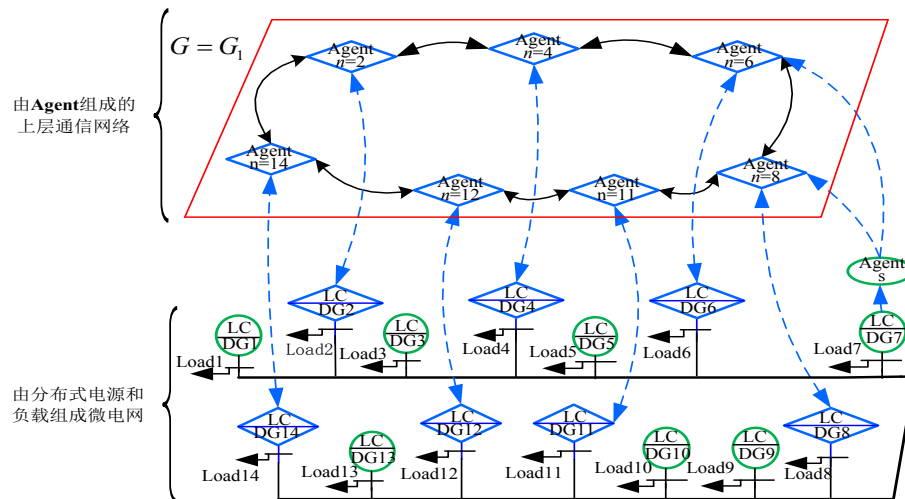


Figure 1. The control model for an MG, where partially controllable agents are indicated by circles, while controllable agents are indicated by diamonds. Besides, the dash lines between the two layers indicate the relationships among agents and their connecting DGs, and the arrows on them represent the directions of information transmitted

图 1. 微电网控制模型，上层为 Agent 组成的通信网络，半可控 Agent 由椭圆表示，可控 Agent 由菱形表示。此外，两个网络层之间的虚线表示 Agent 与底层 DG 的连接，箭头表示信息的传递方向

只收集半可控 DG 的信息，不控制半可控 DG。

本文中，蓄电池采用电压频率(V/F)控制，由其控制方式可知，其输出可以大致表明了系统的功率缺额。只要半可控 DG 输出不为零，半可控 Agent 就会将此信息传送给相连的可控 Agent，通过计算，使得可控 DG 分担半可控 DG 的输出，从而使得半可控 DG 输出归零。进一步，在网络 G 上，将可控 DG 的输出进行再分配，通过迭代的方式逐渐实现可控 DG 的输出与其容量成比例。由于半可控 Agent 只发送信息，而不参与迭代，因此通信网络 G 中，不包含半可控 Agent。

假设通信网络 G 包含 n 个可控 Agent。对角矩阵 $D = [d_{ij}]_{n \times n}$ 表示节点的出度，出度定义为 Agent 出边的条数。此外，记半可控 Agent v 的出度为 d_v ，例如，半可控 Agent 有两条出边，则 $d_v = 2$ 。为使得控制律中所有矩阵维数相等，Agent 的编号与对应 DG 的编号相同，并且可控 Agent 的个数与可控 DG 的个数相等。

2.2. 分布式控制律导出

上面详细介绍了通信网络 G 的结构和 Agent 之间的通信方式，这部分将系统地给出，从任意通信网络，为 Agent 导出分布式控制律的方法。首先，给出系统功率平衡条件。若以下条件成立时，我们认为系统的功率供需是平衡的，

$$\begin{cases} \sum P(t+1) = \sum P(t) + P_v(t) \\ \sum Q(t+1) = \sum Q(t) + Q_v(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $P(t+1) = [p_i(t+1)]_{n \times 1}$ ， $Q(t+1) = [q_i(t+1)]_{n \times 1}$ 是 $t+1$ 时刻可控 DG 的输出向量， $P_v(t)$ ， $Q_v(t)$ 为半可控电源在 t 时刻的有功功率和无功功率输出值。根据文献[21]可知，采用 V/F 控制的 DG 能够根据电压频率的变化输出功率，维持系统电压频率稳定，补偿系统瞬时功率缺额，从而采用 V/F 控制 DG 的输出值能够表示系统的功率缺额。因此，等式(1)表示，当可控 DG 下一时刻的输出等于可控 DG 上一时刻的输出与半可控 DG 输出的加和时，系统的功率是平衡的。

为使得半可控 DG 在瞬间补充系统缺额后，其输出由可控 DG 分担，半可控 Agent 将半可控 DG 的输出功率值发送给邻居(可控 Agent)。半可控 Agent 向邻居发送信息后，可控 Agent 的输出根据以下等式(2)确定，

$$\begin{cases} P'(t) = P(t) + P_v(t) \cdot Z \\ Q'(t) = Q(t) + Q_v(t) \cdot Z \end{cases} \quad (2)$$

其中 $P'(t)$ 、 $P(t)$ 和 $Q'(t)$ 、 $Q(t)$ 为 $n \times 1$ 的可控 DG 功率输出列向量。 Z 为 $n \times 1$ 列向量，若 Agent i 能够接收到半可控 Agent v 的信息，则 Z 中对应的元素 $z_i = 1/d_v$ ，否则 $z_i = 0$ 。由向量 Z 的定义可知 $\sum_{i=1}^n Z = 1$ 。

可控 Agent 若根据等式(2)调节可控 DG 的输出，能够保证等式(2)成立，系统功率平衡，但不能保证可控 DG 按照其容量大小输出。为保证系统功率平衡时，可控 DG 的输出与容量大小成比例，设计如下分布式控制律，

$$P(t+1) = F \cdot P'(t) \quad (3)$$

其中 $P(t+1) = [p_i(t+1)]_{n \times 1}$ ， $P'(t) = [p'_i(t)]_{n \times 1}$ 为可控 Agent 的有功列向量， F 为权值矩阵。权值矩阵 F 中的元素 f_{ij} 根据以下等式(4)确定，

$$f_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{R} \cdot \frac{s_i^p}{s_i^p + s_j^p}, & j \in N_i \\ 1 - \frac{1}{R} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{s_j^p}{s_i^p + s_j^p}, & i = j \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $R = \max \{d_{ii} \mid i = 1, 2, \dots, n\}$, $S = [s_i^p]_{n \times 1}$ 表示可控 DG 的有功容量列向量, N_i 表示节点 i 的邻居集合。将控制律(3)中的 $P'(t)$ 换成 $Q'(t)$, $P(t)$ 换成 $Q(t)$, s_i^p 替换成 s_i^q 就可以得到无功功率的分布式控制律。可控 Agent 根据分布式控制律(3)调节可控 DG 的输出, 就可以使得微电网中的功率平衡, 并且经过迭代使得功率按照可控 DG 的容量大小分配。

2.3. 功率平衡特性和收敛性分析

首先证明分布式控制律(3)的功率平衡特性, 随后证明其收敛特性。

定理 1: 在网络 G 上, 若可控 Agent 根据分布式控制律(3)调节可控 DG 的输出, 则等式(1)成立, 同时在可控 DG 分担半可控 DG 的输出时, 能够保证微电网中功率供需平衡。

证明: 首先证明 F 矩阵的列和为 1。将矩阵 F 中的第 j 列相加得到,

$$\begin{aligned} f_{1j} + f_{2j} + \dots + f_{jj} + \dots + f_{nj} &= \frac{1}{R} \frac{s_1^p}{s_1^p + s_j^p} + \frac{1}{R} \frac{s_2^p}{s_2^p + s_j^p} + \dots \\ &+ \left[1 - \frac{1}{R} \left(\frac{s_1^p}{s_1^p + s_i^p} + \frac{s_2^p}{s_2^p + c_i^p} + \dots + \frac{s_n^p}{s_n^p + s_i^p} \right) \right] \\ &+ \dots + \frac{1}{R} \frac{s_n^p}{s_i^p + s_n^p} = 1 \\ \therefore \mathbf{1}^T \cdot F &= \mathbf{1}^T \end{aligned} \quad (5)$$

然后, 证明等式(1)成立。将等式(3)两边相加, 并利用 F 矩阵列和为 1, 得到

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n P(t+1) &= \sum_{i=1}^n F \cdot P'(t) \\ &= f_{11} \cdot P'_1(t) + \dots + f_{1i} \cdot P'_i(t) + \dots + f_{1n} \cdot P'_n(t) + \dots \\ &\quad + f_{i1} \cdot P'_1(t) + \dots + f_{ii} \cdot P'_i(t) + \dots + f_{in} \cdot P'_n(t) + \dots \\ &\quad + f_{n1} \cdot P'_1(t) + \dots + f_{ni} \cdot P'_i(t) + \dots + f_{nn} \cdot P'_n(t) \\ &= (f_{11} + \dots + f_{i1} + \dots + f_{n1}) \cdot P'_1(t) + \dots \\ &\quad + (f_{1i} + \dots + f_{ii} + \dots + f_{ni}) \cdot P'_i(t) + \dots \\ &\quad + (f_{1n} + \dots + f_{in} + \dots + f_{nn}) \cdot P'_n(t) \\ &= \sum_{i=1}^n P'_i(t) \end{aligned} \quad (6)$$

由于 $\sum_{i=1}^n Z = 1$, 并根据等式(2)和等式(6)得到,

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n P(t+1) &= \sum_{i=1}^n F \cdot P'(t) = \sum_{i=1}^n P'_i(t) \\ &= \sum_{i=1}^n p_i(t) + \sum_{i=1}^n P_v(t) \cdot Z \\ &= \sum_{i=1}^n p_i(t) + P_v(t) \cdot \sum_{i=1}^n Z \\ &= \sum_{i=1}^n p_i(t) + P_v(t) \end{aligned} \quad (7)$$

证毕。

定理 2: 在网络 G 上, 若可控 Agent 根据分布式控制律(3)调节可控 DG 的输出, 通过迭代就能够实现微电网中功率在可控 DG 之间成比例分配, 使得可控 DG 的输出功率与其容量的比值

$$\alpha = \left[\sum p_i(0) \right] / \left[\sum s_i^p \right].$$

证明: 将矩阵 F 的第 j 行与容量列向量 S 相乘, 得到,

$$\begin{aligned}
f_{1i}s_1^p + f_{2i}s_2^p + \dots + f_{ii}s_j^p + \dots + f_{ni}s_n^p &= \frac{1}{R} \left(\frac{s_i^p}{s_1^p + s_i^p} \right) s_1^p + \frac{1}{R} \left(\frac{s_i^p}{s_2^p + s_i^p} \right) s_2^p + \dots \\
&+ \left[1 - \frac{1}{R} \left(\frac{s_1^p}{s_1^p + s_i^p} + \frac{s_2^p}{s_2^p + s_i^p} + \dots + \frac{s_n^p}{s_n^p + s_i^p} \right) \right] s_i^p + \dots + \frac{1}{R} \left(\frac{s_i^p}{s_n^p + s_i^p} \right) s_n^p \\
&= s_i^p + \frac{1}{R} \left(\frac{s_i^p s_1^p}{s_1^p + s_i^p} - \frac{s_1^p s_i^p}{s_1^p + s_i^p} + \frac{s_2^p s_2^p}{s_2^p + s_i^p} - \frac{s_2^p s_i^p}{s_2^p + s_i^p} + \dots + \frac{s_i^p s_n^p}{s_n^p + s_i^p} - \frac{s_n^p s_i^p}{s_n^p + s_i^p} \right) \\
&= s_i^p \\
\therefore F \cdot S &= S. \tag{8}
\end{aligned}$$

同时, 根据文献[25]的推论 1 和网络 G 的结构可知, 矩阵 F 只包含单一的幅值为 1 的特征值, 又由于矩阵 F 的谱半径特性可知,

$$\rho(F) \leq \|F\|_1 = 1 \tag{9}$$

其中, $\|F\|_1 = \max_j \sum_{i=1}^n |f_{ij}|$ 为矩阵的 1 范数。记 $H = (F - (S \cdot 1^T)) / (1^T \cdot S)$, 写出矩阵 F 和 H 的特征值表达式, 并对其做相同的行列式变化, 得到

$$\begin{aligned}
|\lambda I - F| &= (\lambda - 1) |L(\lambda)| = 0 \\
|\lambda I - H| &= \lambda |L(\lambda)| = 0
\end{aligned} \tag{10}$$

根据 F 的 1 特征值的唯一性, 结合等式(10)得到,

$$\rho \left(F - \frac{S \cdot 1^T}{1^T \cdot S} \right) = \rho(H) = \rho_2(F) < 1 \tag{11}$$

其中 $\rho(F)$, $\rho_2(F)$ 分别是矩阵 F 的谱半径、第二大特征值幅值。结合等式(8), (9)和(11), 并根据文献[26]的定理 2 可知, $\lim_{k \rightarrow \infty} (F)^k = (S \cdot 1^T) / (1^T \cdot S)$ 。所以得到,

$$P(t) = F^t \cdot P(0) \stackrel{t \rightarrow \infty}{=} \frac{S \cdot 1^T}{1^T \cdot S} \cdot P(0) \stackrel{t \rightarrow \infty}{=} \left(\frac{\sum_{i=1}^n P_i(0)}{\sum_{i=1}^n s_i^p} \right) \cdot S = \alpha \cdot S. \tag{12}$$

证毕。

定理 2 说明分布式控制律(3)能够调节可控 DG 的输出, 通过迭代使得可控 DG 功率输出与容量的比值为 $\alpha = [\sum p_i(0)] / [\sum s_i^p]$, 实现微电网中功率在可控 DG 之间按比例分配。

3. 微电网系统结构及参数设置

孤岛微电网仿真系统由 MATLAB/Simulink 搭建而成, 包含 14 组 DG 和负载, 采用辐射状结构, 如图 2 所示。设置线路阻抗为 $0.169 + j0.07 \Omega/\text{km}$, 系统频率为 50 Hz, 标准电压为 380 V。考虑分布式 DG 的物理特性, 仿真中设置各 DG 输出不超过容量限制, 储能电源 DG_7 在瞬时输出功率时也不超越容量限制。微电网仿真系统中, 可控分布式 $\text{DG}_{i=2,4,6,8,11,12,14}$ 采用恒功率(PQ)控制, 由理想直流电压源 V_{dc} [24] 模拟; 光伏电源 $\text{DG}_{i=1,9}$ 采用最大功率跟踪(MPPT)控制, 永磁同步风机 $\text{DG}_{i=3,5,10,13}$ 也采用 MPPT 控制; DG_7 采用 V/F 控制, 由储能系统组成, 为孤岛微电网提供频率和电压支撑[21]。在仿真中, 设定不可控分布式 DG 不产生无功功率, 即 $Q_{i=1,3,5,9,10,13} = 0 \text{ kVar}$ 。DG 容量和负载参数见于表 1 中。在仿真中, 可控 Agent 之间的通信周期为 1 ms, 半可控 Agent 每间隔 10 ms 给可控 Agent 传递一次信息。设定可再生光伏电源 $\text{DG}_{1,9}$ 的有功功率输出在 25 kW 到 35 kW 之间变化, 永磁同步风机 $\text{DG}_{3,5,10,13}$ 的有功功率输出在 8 kW 到 42 kW 之间变化, 如图 3 所示。

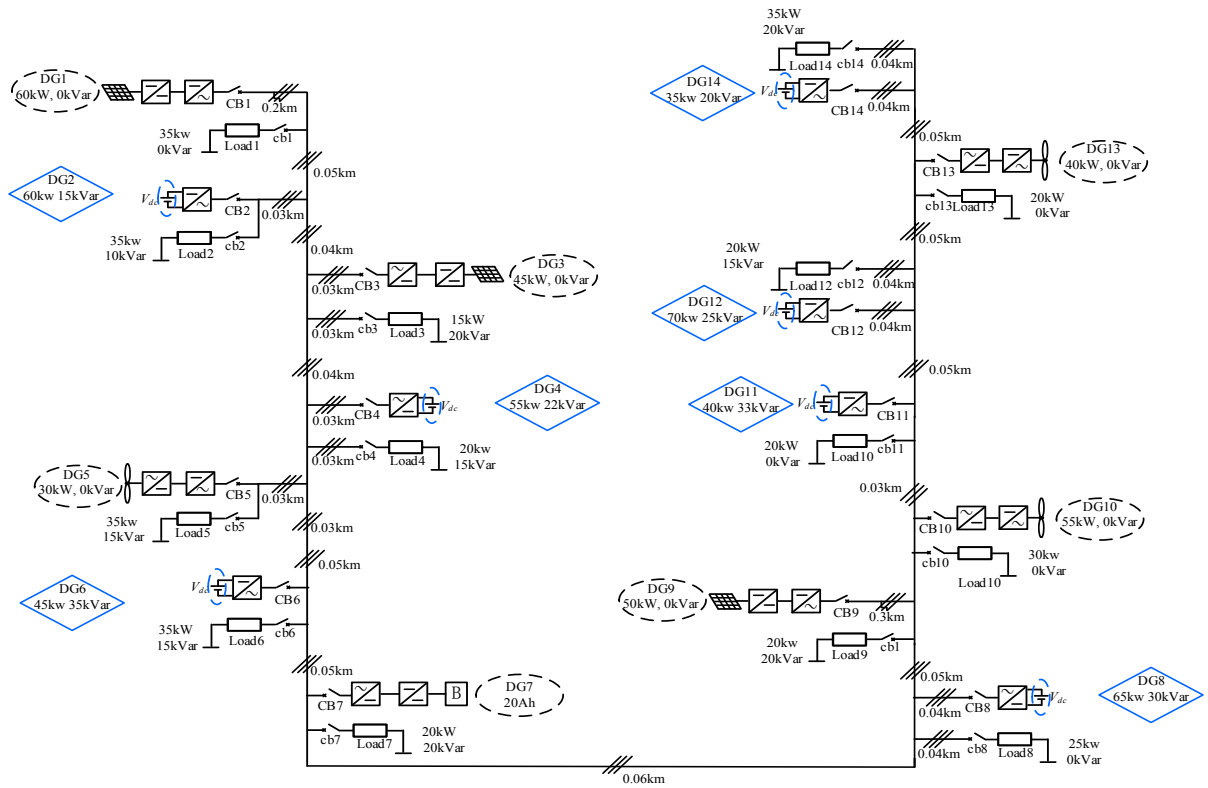


Figure 2. The structure of the islanded microgrid

图 2. 孤岛微电网结构

Table 1. Setup and parameters of DGs and loads

表 1. DG 和负载参设置

电源	容量	控制	负载	最大需求
DG ₁	60 kW, 0 kVar	MPPT	Load ₁	35 kW, 0 kVar
DG ₂	60 kW, 15 kVar	PQ	Load ₂	35 kW, 10 kVar
DG ₃	45 kW, 0 kVar	MPPT	Load ₃	15 kW, 20 kVar
DG ₄	55 kW, 22 kVar	PQ	Load ₄	20 kW, 15 kVar
DG ₅	30 kW, 0 kVar	MPPT	Load ₅	30 kW, 15 kVar
DG ₆	45 kW, 35 kVar	PQ	Load ₆	35 kW, 15 kVar
DG ₇	20 Ah	V/F	Load ₇	20 kW, 20 kVar
DG ₈	65 kW, 30 kVar	PQ	Load ₈	25 kW, 0 kVar
DG ₉	50 kW, 0 kVar	MPPT	Load ₉	20 kW, 20 kVar
DG ₁₀	55 kW, 0 kVar	MPPT	Load ₁₀	30 kW, 0 kVar
DG ₁₁	40 kW, 33 kVar	PQ	Load ₁₁	20 kW, 0 kVar
DG ₁₂	70 kW, 25 kVar	PQ	Load ₁₂	20 kW, 15 kVar
DG ₁₃	40 kW, 0 kVar	MPPT	Load ₁₃	20 kW, 0 kVar
DG ₁₄	35 kW, 20 kVar	PQ	Load ₁₄	35 kW, 20 kVar

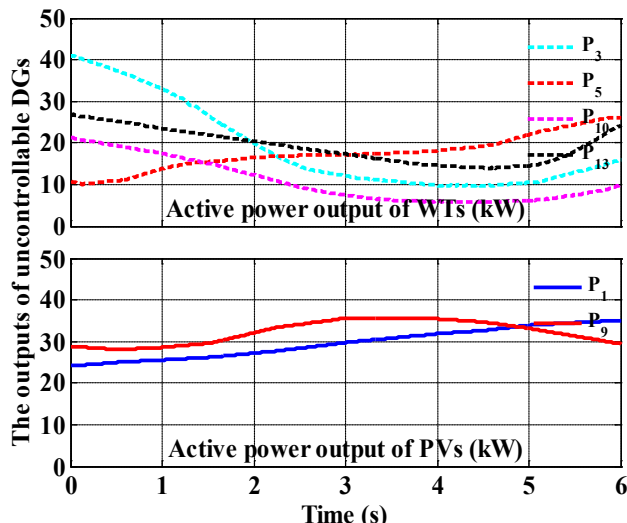


Figure 3. The outputs of uncontrollable DGs
图3. 不可控 DG 功率输出

4. 仿真结果及分析

这部分仿真实验部分，设计两组仿真实验验证提出的分布式控制策略的有效性。首先，验证在环境变化时，在分布式控制律的作用下，验证微电网系统的功率平衡特性、系统电压幅值、频率稳定变化，可控 DG 按比例输出功能。其次，分析在环境和负载变化时，在分布式控制律的作用下，验证系统功率平衡特性、电压频率稳定，可控 DG 按比例输出功能。最后，总结分析仿真实验结果。

4.1. 环境变化的仿真结果

当环境变化，负载不变时，可控 Agent 采用控制律(3)调节可控 DG 的输出，得到在网络结构 G_1 下的仿真结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出，可控 DG 能够平稳输出功率，系统电压维持在 380V，系统频率保持在 50 Hz，DG₇ 的输出功率始终保持为 0，微电网系统能够稳定运行。此外，从图 3 的(c,f)两图中看出，可控 DG 是输出功率与其容量的比例都相等，说明在控制律(3)的调节作用下，即使在环境变化时，系统功率能够在可控 DG 之间合理分配。仿真结果表明，只要通信网络 G 连通，不存在孤立节点，Agent 采用控制律(3)就可以实现微电网中功率在可控 DG 之间按照其容量大小分配。

4.2. 环境和负载同时变化时的仿真结果

实际微电网中，系统负载是变化的，因此，这部分仿真实验验证当负载和环境同时变化时控制律(3)的控制效果。设置系统负载变化情况为：1) $t = 2$ s 时刻，Load_{5,13} 接入微电网中，2) $t = 4$ s 时刻，系统有功功率减少 50 kW，无功功率减少 20 kVar；3) $t = 6$ s 时刻，Load_{5,13} 从微电网中切除。

Agent 在网络 G_1 中，按照控制律(3)调节可控 DG 的输出，得到的系统的动态仿真结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出，在负载和环境剧烈变化的情况下，可控 DG 在控制律(3)的调节作用小，可控 DG 能够平稳输出功率，微电网系统首尾两端的电压幅值，即 Load₂ 和 Load₁₄ 两端的负载电压，分别维持在 380 V 附近，系统频率保持在 50 Hz。在负载剧烈变化的时刻，系统电压频率也不超过允许范围，微电网系统能稳定正常运行。储能电源 DG₇ 在瞬时输出或者吸收功率后，经可控 DG 的调节作用，能够快速变为 0。此外，更为重要的是，即使在负载和环境同时变化的情况下，可控 DG 的输出功率与容量的比例值相等，实现了系统功率在可控 DG 之间按照可控 DG 的容量大小分配。

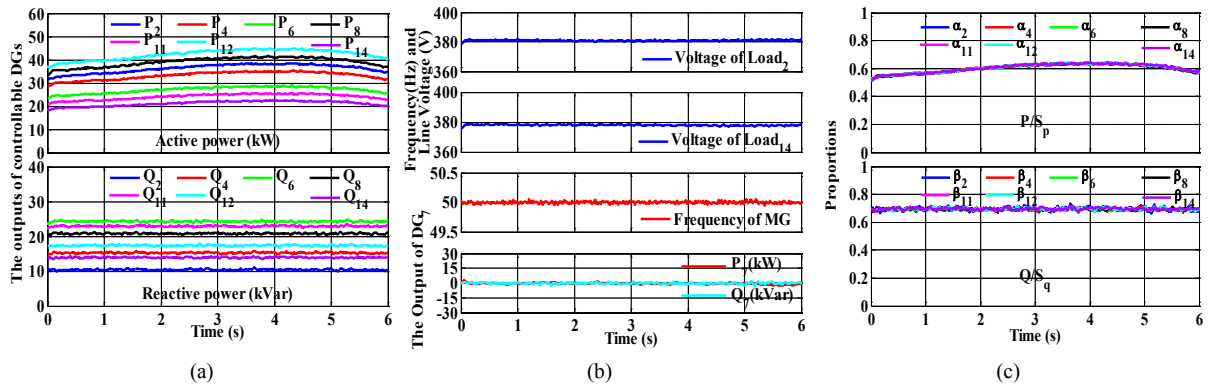


Figure 4. Simulation results when environmental conditions fluctuate. (a) The outputs of controllable DGs. (b) The line voltages, the frequency in the MG and the outputs of the BESS. (c) The proportions of the outputs of controllable DGs to their capacities
图 4. 环境变化时的仿真结果。(a) 可控 DG 的有功和无功功率输出。(b) 系统电压频率和 BESS 输出变化情况。(c) 可控 DG 的功率输出与其容量的比例值

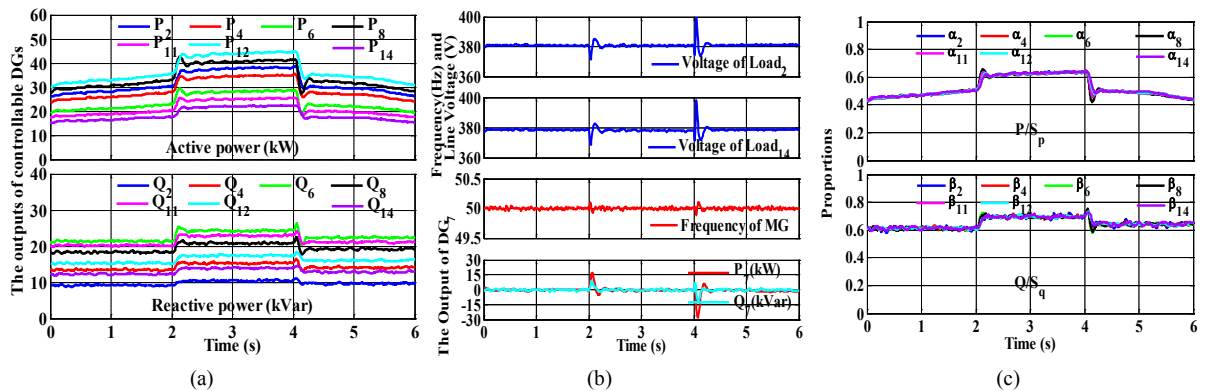


Figure 5. Simulation results when both load demand and environmental conditions fluctuate. (a) The outputs of controllable DGs. (b) The line voltages, the frequency in the MG and the outputs of the BESS. (c) The proportions of the outputs of controllable DGs to their capacities
图 5. 负载和环境同时变化时的仿真结果。(a) 可控 DG 的有功和无功功率输出。(b) 系统电压频率和 BESS 输出变化情况。(c) 可控 DG 的功率输出与其容量的比例值

5. 结论

本文针对孤岛微电网的分布式控制问题，提出一种只利用局域信息的分布式控制方法。此方法为两层网络结构，其中上层是由 Agent 组成的通信网络，用于处理、传递信息，而下层网络是由分布式 DG 和负载组成的微电网。针对任意给定的连通网络，本文系统地 Agent 设计了分布式控制律，用于调节可控 DG 的输出，使得微电网内功率供需平衡，并且通过迭代的方法，逐渐实现可控 DG 按比例输出的功能。此外，本文从理论上证明了提出的分布式控制律的功率平衡特性与收敛特性。最后，仿真结果表明，即使负载和环境同时变化，文中提出的控制方法都能使得微电网系统中电压频率稳定，实现可控 DG 的输出与其容量成比例。

基金项目

国家自然科学基金项目(51177177)。

参考文献 (References)

- [1] Lasseter, R.H. and Paigi, P. (2004) Microgrid: A Conceptual Solution. *Power Electronics Specialists Conference*, 6, 4285-4290. <https://doi.org/10.1109/pesc.2004.1354758>

- [2] Katiraei, F., Iravani, R., Hatziargyriou, N., *et al.* (2008) Microgrids Management. *IEEE Power & Energy Magazine*, **6**, 54-65. <https://doi.org/10.1109/MPE.2008.918702>
- [3] 马添翼, 金新民, 梁建钢. 孤岛模式微电网逆变器的复合式虚拟阻抗控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 304-312.
- [4] Olivares, D.E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A.H., *et al.* (2014) Trends in Microgrid control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **5** 1905-1919. <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>.
- [5] 易永辉, 任志航, 马红伟, 等. 分布式电源高渗透率的微电网快速稳定控制技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 31-36.
- [6] 杨欢, 赵荣祥, 辛焕海, 等. 海岛电网发展现状与研究动态[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 95-105.
- [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(2): 102-112.
- [8] Pogaku, N., Prodanovic, M. and Green, T.C. (2007) Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **22**, 613-625. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.890003>
- [9] 徐玉琴, 马焕均. 基于改进下垂控制的逆变器并联运行技术[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 103-107.
- [10] 高晓芝, 李林川, 张蕾. 含电压源型逆变器和同步电机接口的微网控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 145-150.
- [11] 陈丽娟, 王致杰. 基于改进下垂控制的微电网运行控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016(4): 16-21.
- [12] Tan, K.T., Peng, X.Y., So, P.L., *et al.* (2012) Centralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters in Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **3**, 1977-1987. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2205952>
- [13] Vasquez, J.C., Guerrero, J.M., Miret, J., *et al.* (2010) Hierarchical Control of Intelligent Microgrids. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, **4**, 23-29. <https://doi.org/10.1109/MIE.2010.938720>.
- [14] Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., Matas, J., *et al.* (2009) Hierarchical Control of Droop-Controlled DC and AC Microgrids—A General Approach towards Standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **58**, 158-172. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534>
- [15] Guerrero, J.M., Loh, P.C., Lee, T.L., *et al.* (2013) Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part I: Decentralized and Hierarchical Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **60**, 1254-1262. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2194969>
- [16] Wu, X., Shen, C. and Iravani, R. (2016) A Distributed, Cooperative Frequency and Voltage Control for Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **PP**, 1.
- [17] Wang, Y., Chen, Z., Wang, X., *et al.* (2015) An Estimator-Based Distributed Voltage-Predictive Control Strategy for AC Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **30**, 3934-3951. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2345696>
- [18] Lu, X., Yu, X., Lai, J., *et al.* (2016) Distributed Secondary Voltage and Frequency Control for Islanded Microgrids with Uncertain Communication Links. *Transactions on Industrial Informatics*, **PP**, 1.
- [19] 贾星蓓, 窦春霞, 岳东, 等. 基于多代理系统的微电网多尺度能量管理[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 63-73.
- [20] 李中雷, 宋慧慧, 曲延滨. 基于母线 Agent 的微电网孤岛协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2015(S1): 370-376.
- [21] Li, Q., Chen, F., Chen, M., *et al.* (2016) Agent-Based Decentralized Control Method for Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **7**, 637-649.
- [22] Li, Q., Peng, C., Chen, M., *et al.* (2017) Networked and Distributed Control Method with Optimal Power Dispatch for Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **64**, 493-504. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2598799>
- [23] Chen, F., Chen, M., Li, Q., *et al.* (2016) Multiagent-Based Reactive Power Sharing and Control Model for Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **7**, 1232-1244. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2539213>
- [24] Majumder, R., Ghosh, A., Ledwich, G., *et al.* (2010) Power Management and Power Flow Control with Back-to-Back Converters in a Utility Connected Microgrid. *IEEE Transactions on Power Systems*, **25**, 821-834. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2034666>
- [25] Ren, W., Beard, R.W. and McLain, T.W. (2005) Coordination Variables and Consensus Building in Multiple Vehicle Systems. *Lecture Notes in Control & Information Sciences*, **309**, 439-442.
- [26] Liu, J. and Morse, A.S. (2011) Accelerated Linear Iterations for Distributed Averaging. *Annual Reviews in Control*, **35**, 160-165. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2011.10.005>

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