

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.12.009

基于等微增率准则的微电网分布式经济调度方法

徐瑞林¹, 杨云², 李俊杰¹, 廖玥熙³, 夏海波^{3,4}, 陈民铀³

(1. 国网重庆市电力公司 电力科学研究院, 重庆 400021; 2. 国网重庆市电力公司, 重庆 400014;

3. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

4. 国网重庆市电力公司 南岸供电分公司, 重庆 401336)

摘要:针对微电网运行成本最小化问题,提出一种微电网的双层经济调度模型,其中上层是进行信息传输的通信网络层,下层为进行电力传输的微电网层。通信网络包含两个子网络,其中第一个网络包含所有 agent,第二个网络只包含可控 agent。随后建立通信网络的构建规则,系统性地给出从任意通信网络导出分布式控制律的一般方法。从第一个子网络中推导出的分布式控制律能够保证系统的功率平衡,而从第二个子网络中推导出的控制律能够实现系统内可控分布式电源(distributed generation, DG)的发电成本最小化。通过第二个子网络的可控 agent 的反复迭代,达到增量成本一致,根据等微增率准则,实现所有可控 DG 的运行成本最小化。最后,设计两个仿真算例,对所提控制律进行测试。仿真结果表明,在可再生能源和负载需求剧烈波动的情况下,提出的方法均能实现微电网的运行成本最小化。

关键词:分布式控制;经济调度;增量成本;微电网

中图分类号:TM711

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)12-073-10

Distributed economic dispatch method for microgrids based on the equal incremental cost criterion

XU Ruilin¹, YANG Yun², LI Junjie¹, LIAO Yuexi³, XIA Haibo^{3,4}, CHEN Minyou³

(1. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 400021, P.R.China;

2. State Grid Chongqing Electrical Power Company, Chongqing 400014, P.R.China; 3. State Key

Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China; 4. State Grid Chongqing Nan'an Power

Supply Company, Chongqing 401336, P.R.China)

Abstract: To achieve the minimal operation cost of microgrids (MGs), a distributed economic dispatch method was proposed, in which a two-layer model was used. The upper layer is a communication network for information transmission, while the lower layer is a MG for power transmission. The communication network consists of two sub-networks, one of which is composed of all agents while the other is only composed of controllable agents. Then construction rules of communication network was established, and a general method was systematically given to derive distributed control laws from any communication

收稿日期:2018-06-15

基金项目:国家电网公司科技项目(5220001600V6)。

Supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5220001600V6).

作者简介:徐瑞林(1965—),男,高级工程师,主要从事电力系统优化调度方法研究,(E-mail)ruilinxu@163.com。

networks. The distributed control laws derived from the first sub-network ensure the supply-demand balance, while the distributed control laws derived from the second sub-network minimize the cost of power generation, thus realizing the consensus of incremental cost of all the controllable DGs via the iteration of controllable agents. Based on equal incremental principle, the minimal operation cost of all controllable DGs was obtained. Finally, two simulation cases were designed to evaluate the performance of the method. The simulation results show that the proposed method can realize the minimal operation cost of MGs when the loads and renewable resources fluctuate widely.

Keywords: distributed control; economic dispatch; incremental cost; microgrid

化石能源的大量使用,导致全球能源危机和环境问题越来越严重,因此利用可再生能源发电,优化电力能源结构已成为世界各国能源政策发展的趋势。分布式发电技术为可再生能源的高效利用提供了技术支持,但是,可再生能源发电具有明显的间歇性,如果分布式电源无序接入,将严重影响主网的安全稳定运行,因此微电网技术应运而生^[1]。微电网作为分布式电源的一种有效管理方式,能提高可再生能源的渗透率,减小对主网稳定运行的冲击,对解决全球能源危机以及环境问题具有重大的意义^[2]。

微电网的分布式特性,分散了系统运行与调度的风险,提高了供电的可靠性。但是,数量众多的分布式电源及其输出的不确定性和波动性,增加了微电网运行控制的难度,并且,微电网特有的低惯性以及双向潮流,对微电网的经济调度带来严峻的挑战^[3]。微电网的控制方式正在从集中式控制^[4]发展到分布式控制^[5],而微电网的分布式经济调度是目前研究的热点^[6]。

通常,经济调度问题可以看做是一个优化问题^[7],其求解方法可以分为集中式方法和分布式方法。在集中式方法中,梯度搜索法^[8]、遗传算法^[9]等解析性方法已经被广泛地应用。在这种模式下,需要中央控制器搜集整个系统的信息,实现集中式处理。然而,电力系统会越来越庞大,其拓扑结构也日趋复杂,需要搜集和处理的信息不断增加,数据量的增加会使得中央控制器的响应速度下降,这将导致系统的实时控制变得更加困难^[10-11]。同时,集中控制器发生单点故障的概率也会越来越高。

为了提高系统的性能,满足复杂电力系统的控制要求,分布式算法应运而生。基于多代理的分布式控制,不需要中央处理器搜集处理全局信息,所有控制单元只需与它们的邻居通信,通过与邻居交换信息,进行迭代,就可以得到全局最优解^[12]。根据等微增量成本准则,在分布式控制方式下,只要增量成本达到一致,系统的运行成本就能够实现最小化^[11]。但是,其中的一些方法并不是严格的分布式算法。例如,为了搜集全局信息,必须选取领导节点,而为了选取领导节点,需要添加一些集中式的测量节点。此外,在分布式算法中引入学习增益,可以提高算法的响应速度^[13-14]。

针对微电网运行成本最小化,笔者提出一种微电网双层经济调度模型,其中上层是进行信息传输的通信网络层,下层为进行电力传输的微电网层。随后,给出通信网络的构建规则,提出从任意通信网络推导出分布式控制律的一般方法,通过分布式控制律使得分布式电源的增量成本达到一致,从而实现微电网运行成本最小化。最后,设计出仿真案例对所提控制律进行测试,仿真结果表明,在可再生能源和负载需求剧烈波动的情况下,提出的方法均能实现微电网的运行成本最小化。

1 经济调度模型

一般的经济调度问题可以由式(1)-(3)表示:

$$\text{Min}F = \sum_{i=1}^n F_i(p_i), \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^n p_i = P_{\text{load}}, \quad (2)$$

$$p_i^{\min} \leq p_i \leq p_i^{\max}, \quad (3)$$

式中: P_{load} 为总的负载需求,满足约束 $\sum_{i=1}^n p_i^{\min} \leq P_{\text{load}} \leq \sum_{i=1}^n p_i^{\max}$; p_i 为发电机 i 的输出; p_i^{\min} 和 p_i^{\max} 分别为发电机 i 的最小和最大输出; $F_i(p_i)$ 为发电机 i 的成本函数。

对于传统柴油发电机,成本函数通常被定义为有功输出的二次凸函数,

$$F_i(p_i) = a_i p_i^2 + b_i p_i + c_i, \quad (4)$$

式中: $a_i \geq 0, b_i > 0$ 且 $c_i > 0$, 均为发电机 i 的成本参数。

为了表示的简便性,令 $\rho_i = b_i/2a_i, \theta_i = 1/2a_i$ 和 $\psi_i = c_i - b_i^2/4a_i$, 则成本函数可表示如下:

$$F_i(p_i) = \frac{(p_i + \rho_i)^2}{2\theta_i} + \psi_i. \quad (5)$$

发电机的增量成本 λ 可由成本函数 F_i 的一阶导数表示如下:

$$\lambda = \frac{\partial F_i(p_i)}{\partial p_i} = \frac{p_i + \rho_i}{\theta_i}. \quad (6)$$

根据等微增量成本准则,如果所有 DG 的增量成本相等,就得到了所有 DG 的最优增量成本^[15]。基于上述准则,对该模型进行求解。假设 $p_i^{\max} = \infty$ 和 $p_i^{\min} = -\infty$, 采用拉格朗日乘法,经济调度问题能够表示为:

$$U = \sum_{i=1}^n F_i(p_i) + \lambda (\sum_{i=1}^n p_i - P_{\text{load}}). \quad (7)$$

基于一阶最优解条件,可以得到:

$$\lambda^* = \frac{\partial U}{\partial p_i} = \frac{p_i^* + \rho_i}{\theta_i}, \quad (8)$$

式中: p_i^* 为发电机 i 的最优输出; λ^* 为相应的增量成本。结合式(2),可以得到:

$$\lambda^* = \frac{P_{\text{load}} + \sum_{i=1}^n \rho_i}{\sum_{i=1}^n \theta_i}. \quad (9)$$

式(9)为在总负荷需求为 P_{load} 时,最优增量成本的表达式。相应地,发电机 i 的最优输出可表示为:

$$p_i^* = \theta_i \lambda^* - \rho_i. \quad (10)$$

2 微电网分布式调度模型

笔者提出一种微电网双层调度模型,如图 1 所示。图 1(#1) 为包含微电网和通信网络的双层模型。微电网双层模型的下层为微电网层,其中包含的 DG 可分为可控 DG、不可控 DG 和半可控 DG。可以调节输出功率的 DG,例如微型燃气轮机,定义为可控 DG;而输出功率受环境影响的 DG,如太阳能(PV)系统或风机(WT),则定义为不可控 DG;在孤岛微电网正常运行时,需要一个 DG,如储能系统(BESS),工作在电压和频率控制(V/F 控制)模式下,从而快速地提供系统的功率缺额,这类 DG 定义为半可控 DG。可控 DG 都工作在有功和无功功率控制(PQ 控制)模式下,而不可控 DG 都工作在最大功率点跟踪(MPPT)控制模式下。

微电网双层模型的上层为通信网络层,由 3 种类型的 agent 组成。根据其于 DG 的连接关系,分别是可控 agent、不可控 agent 和半可控 agent。在通信网络中,不可控 agent 只能发送信息。与之相反,可控 agent 既能够发送信息也能够接收信息。此外,可控 agent 能够通过自环接收自己的信息。图 1(#2) 为通信网络 1。

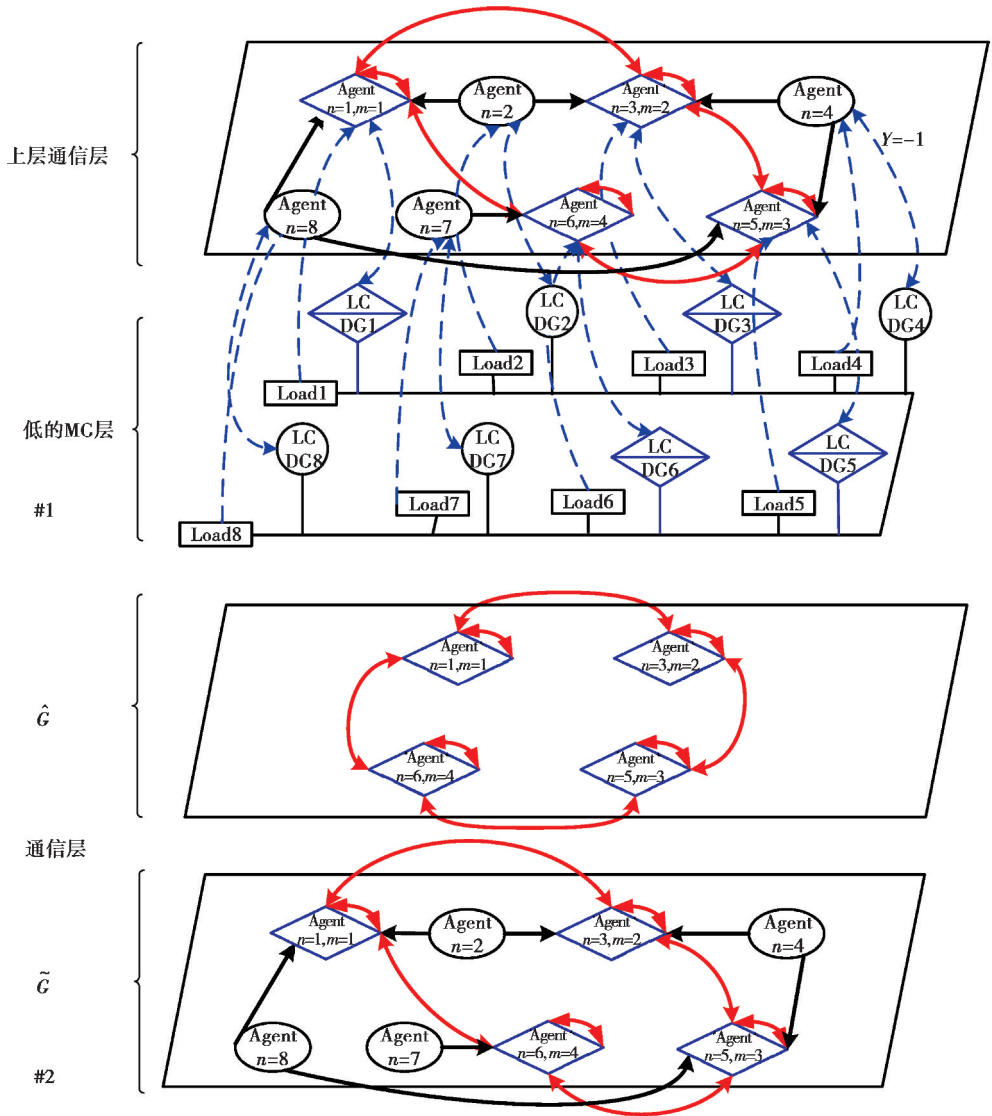


图 1 微电网双层经济调度模型

Fig.1 The two-layer economic dispatch model for MGs

3 分布式控制律的设计

假设通信网络 G 由 n 个 agent 组成,其中子网络 \tilde{G} 包含了所有类型的 agent,而子网络 \hat{G} 只包含了 m 个可控 agent。值得注意的是,在两个子网络中,可控 agent 均为同一 agent。此外,子网络 \hat{G} 是一个有向图,而子网络 \tilde{G} 是一个双向图,如图 1 所示。根据通信网络 G 能够推导出两套控制律。根据子网络 \tilde{G} ,可以推导出第一套控制律,从而实现微电网的功率平衡;而根据子网络 \hat{G} ,可以得到第二套控制律,从而重新分配可控 DG 的输出,实现微电网的经济调度。

在子网络 \tilde{G} 中,采用权值矩阵 $\mathbf{W}=[\omega_{ij}]_{n \times n}$ 描述所有 agent 之间的关系。如果从 agent i 到 agent j 之间有一条连边,则连边上的权值为:

$$\omega_{ij} = \frac{1}{g_i}, \tag{11}$$

式中: g_i 为 agent i 在子网络 \tilde{G} 的出边数。此外,自环上的权值 ω_{ij} 为 1,则权值矩阵 \mathbf{W} 的每一行和为 1,如式(12)所示。

$$\sum_{i=1}^n \omega_{ij} = 1. \quad (12)$$

采用对角矩阵 $\mathbf{E} = [e_{ii}]_{n \times n}$ 描述 agent 的类型。若 agent 为可控 agent, $e_{ii} = 1$, 否则 $e_{ii} = 0$ 。

系统中, 当下一时刻 $t+1$ 所有可控 DG 的输出等于上一时刻 t 总的负载需求与总的不可控 DG 的输出之差时, 则认为该系统是平衡的。

此外, 在 V/F 控制模式下的 DG 与其相连的半可控 agent 之间, 加入参数 γ 。当 $\gamma = -1$ 时, V/F 控制模式下的 DG 的输出会被认为是负载, 从而其输出能够被可控 DG 所分担^[16]。

首先, 根据子网络 \tilde{G} 推导出第一套控制律。在子网络 \tilde{G} 中, 控制律表示如下:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{E} \cdot \mathbf{P}(t+1) &= \mathbf{E} \cdot \mathbf{P}(t) + \mathbf{W}^T \cdot [\mathbf{L}^p(t) - \mathbf{P}(t)], \\ \mathbf{E} \cdot \mathbf{Q}(t+1) &= \mathbf{E} \cdot \mathbf{Q}(t) + \mathbf{W}^T \cdot [\mathbf{L}^q(t) - \mathbf{Q}(t)], \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{P}(t+1) = [p_i(t+1)]_{n \times 1}$, $\mathbf{Q}(t+1) = [q_i(t+1)]_{n \times 1}$, $\mathbf{L}^p(t) = [l_i^p(t)]_{n \times 1}$ 和 $\mathbf{L}^q(t) = [l_i^q(t)]_{n \times 1}$, 分别是有功和无功功率输出的列向量, 有功和无功负载需求的列向量。 \mathbf{I} 为 $n \times n$ 的单位矩阵, $(\cdot)^T$ 表示矩阵的转置。控制律(13)能够维持系统的功率平衡, 但是不能实现所有可控 DG 的最小运行成本。

因此, 根据子网络 \hat{G} 推导出第二套控制律用于实现微电网的经济调度。首先, 定义一个 $m \times m$ 的矩阵 \mathbf{V} 来表示所有可控 agent 之间的关系, 矩阵 \mathbf{V} 中的每个元素则表示 agent 之间的连边上的权值。假设从可控 agent i 到可控 agent j 存在一条连边, 则这条连边上的权值为:

$$v_{ij} = \frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_i} \cdot \frac{\theta_i/d_i}{\theta_i/d_i + \theta_j/d_j} \quad (j \in N_i, j \neq i), \quad (14)$$

式中: θ_i 和 θ_j 分别为 DG_i 和 DG_j 的成本参量, 已在章节 2 中定义。 d_i 和 d_j 分别为 agent i 和 agent j 在子网络 \hat{G} 上的出边数/入边数。 N_i 是与 agent i 相连的所有 agent 的集合。相应地, 定义可控 agent i 的自环上的权重为:

$$v_{ii} = 1 - \frac{1}{d_i} \cdot \sum \frac{\theta_i/d_i}{\theta_i/d_i + \theta_j/d_j} \quad (j \in N_i). \quad (15)$$

则微电网中解决经济调度问题的第二套控制律可表示如下:

$$\tilde{P}'(t+1) = \mathbf{V}^T \cdot [\tilde{P}(t+1) + \rho] - \rho, \quad (16)$$

式中: $\tilde{P}(t+1) = [\tilde{p}_i(t+1)]_{m \times 1}$ 是一个 $m \times 1$ 的列向量, 其中的元素均为式(17)中 $P(t+1) = [p_i(t+1)]_{n \times 1}$ 对应的可控 DG 的输出设定值。可控 DG 之间迭代重新分配有功功率, 从而实现最小成本运行, 所得输出功率向量为 $P^T(t+1) = [P^T(t+1)]_{m \times 1}$ 。 $\rho = [\rho_i]_{m \times 1}$ 是成本参数向量。令 $\tilde{P}'_i = P'_i + \rho_i$ 和 $P_i^e = \tilde{P}_i + \rho_i$, 则式(16)也可表示为:

$$\tilde{P}'^e(t+1) = \mathbf{V}^T \cdot \tilde{P}^e(t+1). \quad (17)$$

因此, 通过式(16)和式(17)两套分布式控制方法, 就能够实现微电网中的经济调度。

4 仿真平台及参数设置

为了测试控制算法的有效性, 在 Matlab/Simulink 中搭建仿真平台, 平台中的放射型孤岛微电网包含 8 个 DG 和 8 个负载, 如图 2 所示。在孤岛微电网中, $\{\text{DG}_i | i = 1, 3, 5, 6\}$ 全为由理想直流电源 V_{dc} 构成的可控 DG。 $\{\text{DG}_i | i = 2, 7, 8\}$ 均为不可控 DG, 其中 DG_7 为光伏电源, DG_2 和 DG_8 为风机。 DG_4 为半可控 DG, 由储能电池系统构成, 它将为微电网提供频率和电压的参考。 DG 的具体参数详见表 1。

在仿真过程中, 光伏电源和风机的输出将同环境一起波动。不可控 DG 的输出功率如图 3 所示。此外, 仿真过程中负载的需求规划如下, $t = 1$ s: 有功和无功负载均增加 20%; $t = 3$ s: Load_4 和 Load_8 从微电网中切除; $t = 5$ s: 有功和无功负载均减少 20%。上述负载需求规划用于所有的仿真案例。

系统中, 线电压设定为 380 V, 系统频率为 50 Hz, 设定系统的线阻抗为 $0.169 + j0.07 \Omega/\text{km}$ 。在子网络 \tilde{G} 中, agent 之间每隔 45 ms 交换一次信息, 而在子网络 \hat{G} 中, agent 之间每隔 1 ms 交换一次信息。起初, 假设系统运行在稳定状态。

表 1 DG 参数
Table 1 Setup and parameters of DGs

电源	容量	控制方式	a	b	c
DG ₁	50 kW, 40 kVar	PQ	0.059	6.71	80
DG ₂	30 kW, 0 kVar	MPPT	—	—	—
DG ₃	60 kW, 25 kVar	PQ	0.047	7.08	56
DG ₄	30 Ah	V/F	—	—	—
DG ₅	55 kW, 20 kVar	PQ	0.066	6.29	43
DG ₆	65 kW, 30 kVar	PQ	0.031	7.53	35
DG ₇	50 kW, 0 kVar	MPPT	—	—	—
DG ₈	35 kW, 0 kVar	MPPT	—	—	—

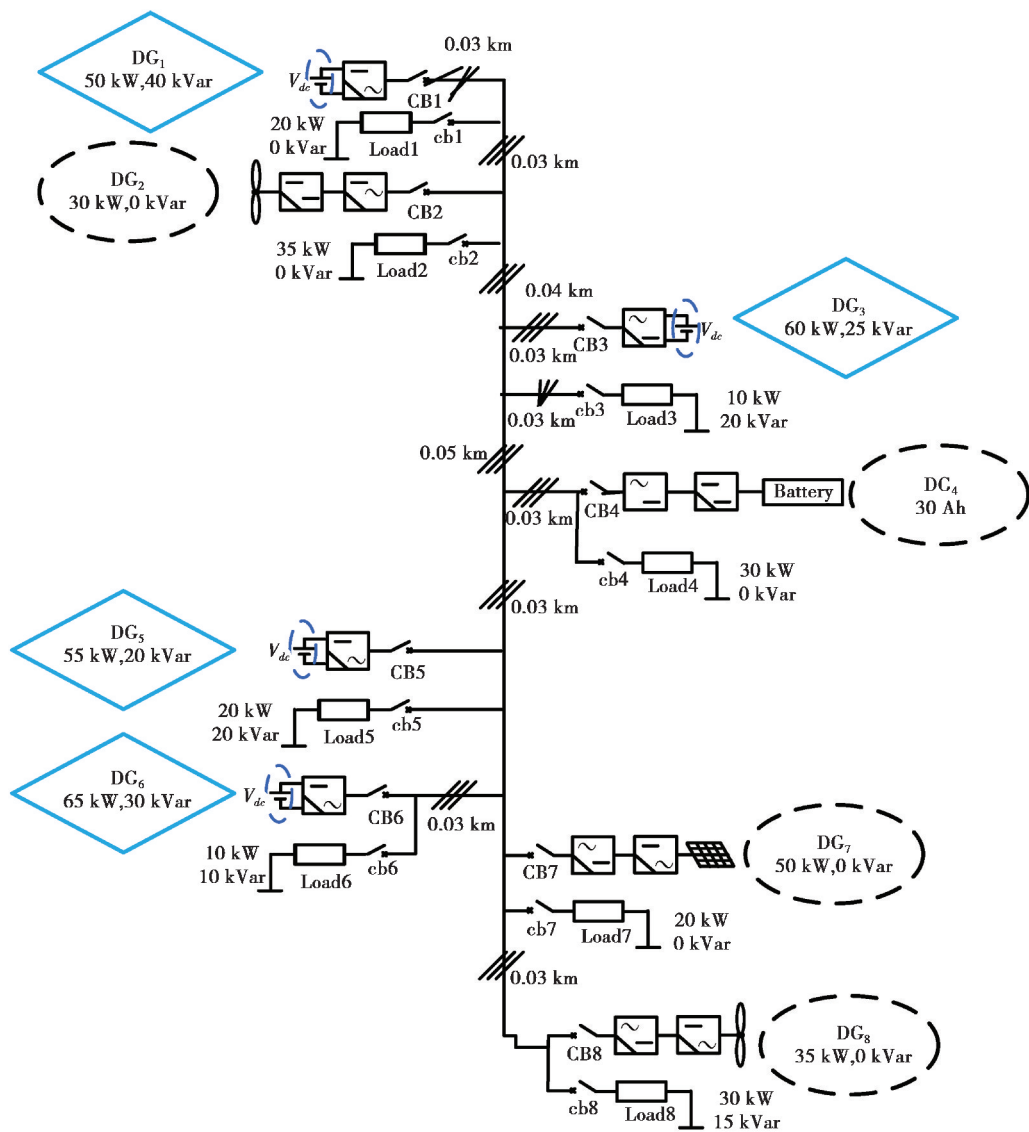


图 2 放射型微电网结构
Fig.2 Topology of a radial MG

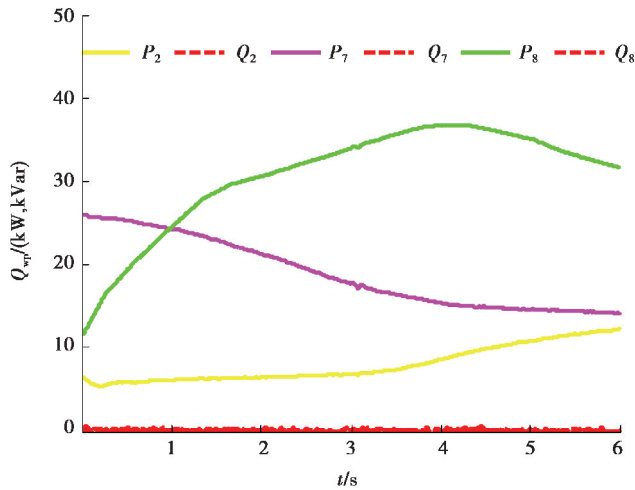


图 3 所有风机、光伏的输出
Fig.3 Outputs of all PVs and WTs

5 仿真算例

为了测试所提算法的有效性,在周围环境和负载需求同时改变时,设计出两个仿真案例。在算例 1 中,测试研究算法的性能;在算例 2 中,研究不同网络结构对算法的影响。

5.1 分布式经济调度的有效性(算例 1)

在本算例中,在负载需求和环境条件同时波动下,对包含 DG 容量限制的经济调度问题进行研究。从图 4(#1)和(#2)得出,负载在 $t=2\text{ s}$ 时增加 20%,所有可控 DG 的最优输出增加。与此同时,所有可控 DG 的增量成本也增加并最终趋于同一个值,即得到了最优增量成本。

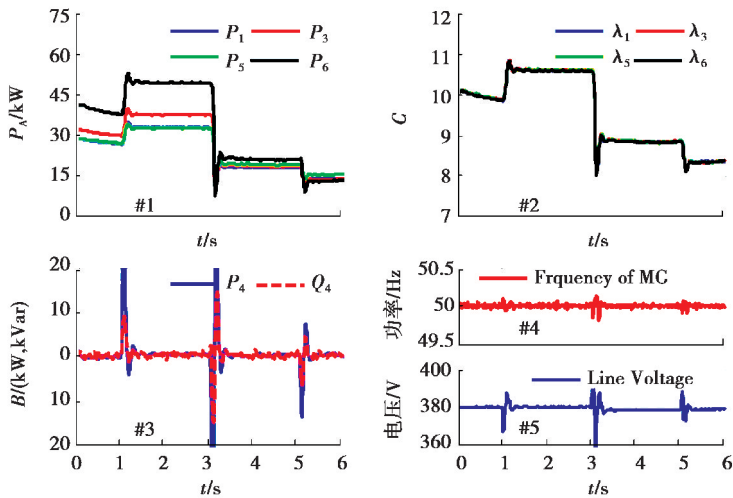


图 4 在环境和负载同时变化下,不考虑 DG 容量限制的经济调度仿真结果

Fig.4 Simulation results of economic dispatch without constraints of DG capacities, when fluctuations of load demand and environmental conditions are considered

图 4(#1)为可控 DG 的有功和无功输出,图 4(#2)为可控 DG 的增量成本,图 4(#3)为 DG_4 的功率输出,图 4(#4)为微电网的系统频率,图 4(#5)为微电网的线电压。在图 4(#3)中, DG_4 ,即储能电池系统,能迅速从系统中吸收功率或者为系统注入功率从而补偿系统功率差额实现功率平衡。根据推导出的控制律,

DG₄ 的输出又将被可控 DG 分担,并逐渐减少为零。图 4(#4)和(#5)显示了线电压和系统频率的波动情况,可以看出,在负载发生变化时,线电压和系统频率有一定的波动,但都能快速地恢复正常。

5.2 不同网络结构对算法的影响(算例 2)

如图 5 所示,本研究设计出了两种不同的网络结构:网络 2 和网络 3,测试网络结构对所提算法的影响。与网络 1 相比,在网络 2 的子网络 \hat{G} 中,agent 3 和 agent 8 之间添加了一条连边,如图 5(#1)所示。与网络 1 相比,在网络 3 的子网络 \hat{G} 中,agent 1 和 agent 3 之间添加了一条连边,如图 5(#2)所示。其他参数均与算例 1 相同。

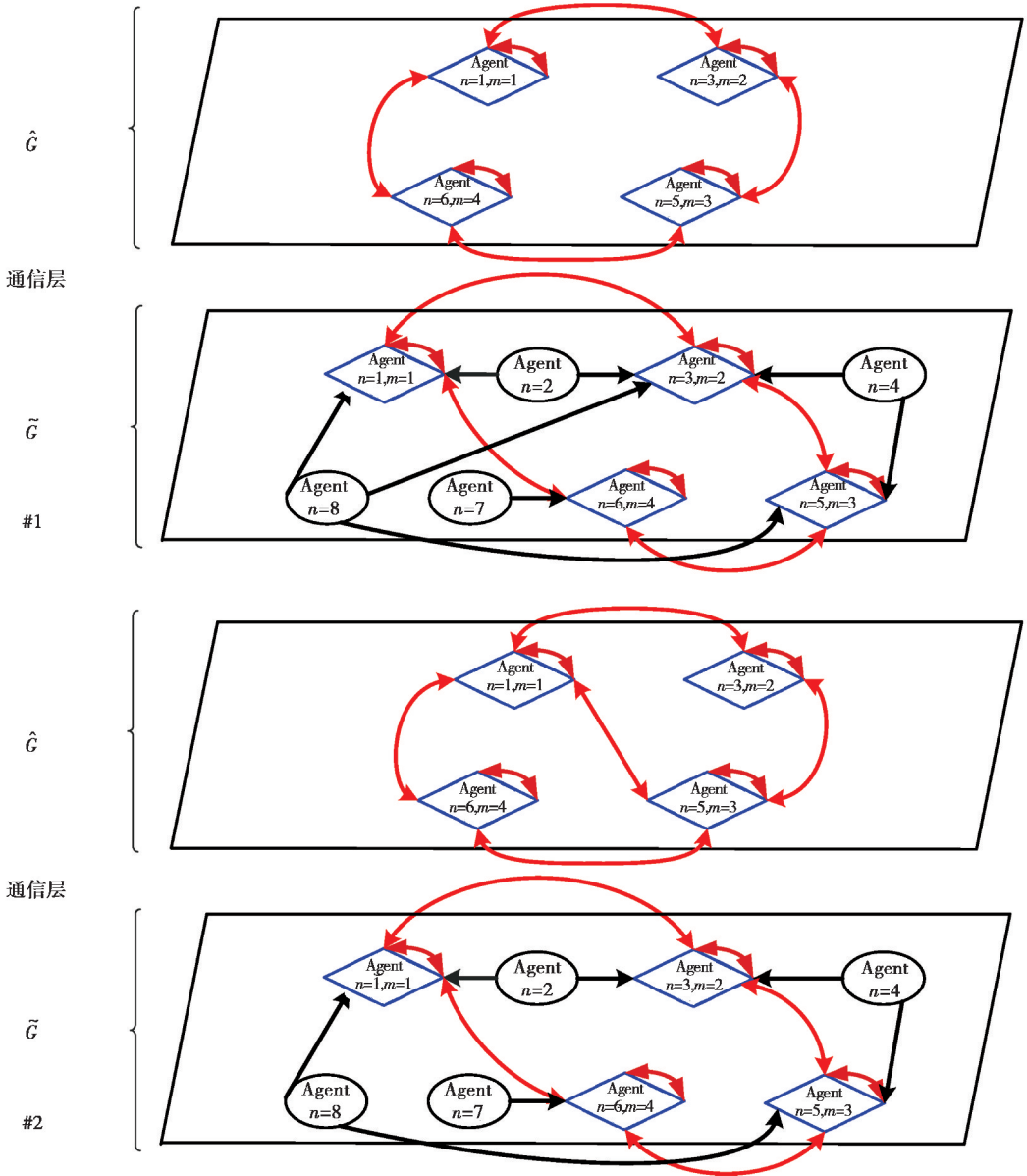


图 5 网络 2 和网络 3 的双层网络模型

Fig.5 Different topologies of communication networks: Network 2 and Network 3

基于两个网络结构的仿真结果如图 6 和图 7 所示。每个子图表示的内容与算例 1 中相同。结果显示,提出的控制方法并不受网络结构的影响,因此,控制律能够很好地适用于不同的网络结构。

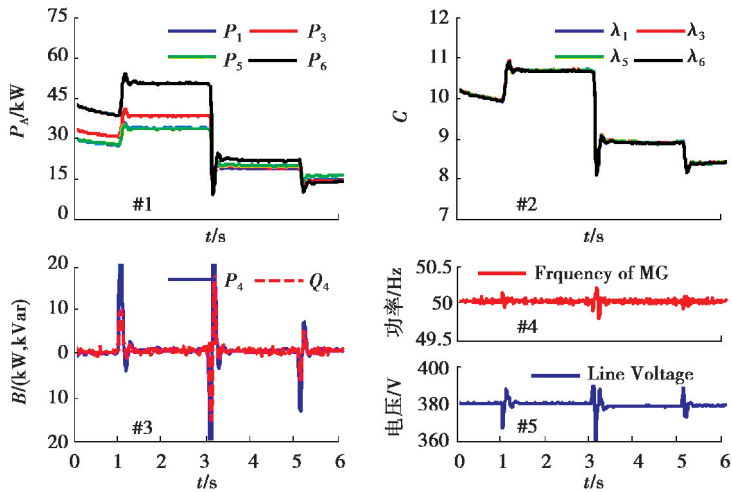


图 6 在环境和负载同时变化下,算法在网络 2 中的仿真结果

Fig.6 Simulation results on Network 2, when fluctuations of load demand and environmental conditions are considered

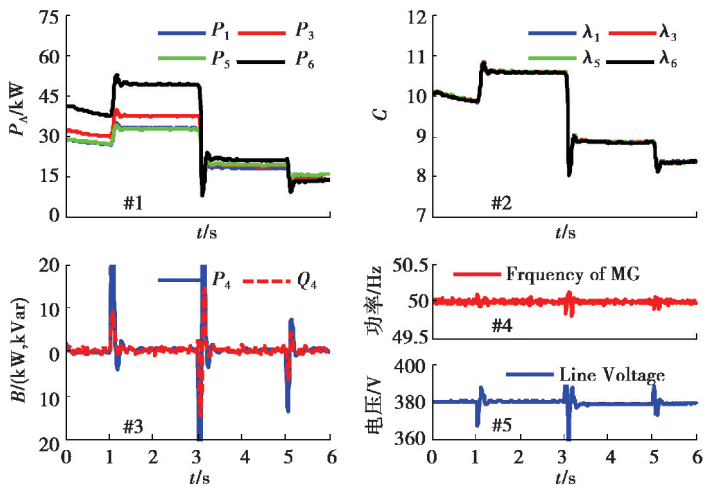


图 7 在环境和负载同时变化下,算法在网络 3 中的仿真结果

Fig.7 Simulation results on Network 3, when fluctuations of load demand and environmental conditions are considered

6 结 语

笔者提出了微电网经济调度双层模型,并且根据建立的模型推导出两套分布式控制律用于实现孤岛微电网的经济调度。该模型中,网络上层为由 agent 组成的通信网络,网络下层为微电网。通信网络由两个子网络构成,其中子网络 \tilde{G} 包含了所有的 agent,而子网络 \hat{G} 仅由可控 agent 组成。基于建立的两个子网络,分别推导出了两套控制律,从而实现孤岛微电网的经济调度。基于子网络 \tilde{G} 的控制律实现网络的功率平衡,而从子网络 \hat{G} 推导出的控制律在等微增量成本准则下实现经济调度。最后,设计了两组仿真实验测试控制率的有效性以及网络结构对控制率的影响。仿真结果显示,所提出的控制率能够在负载和环境同时波动的情况下维持系统的稳定运行,使系统电压和频率能够保持在规定值附近,并且实现最小运行成本。除此之外,网络结构的变化不会影响控制率的有效性,也验证了提出的控制率的普适性。

参考文献:

- [1] 周念成, 胡斌, 王强钢, 等. 含多种形式能源发电的微网状态转换协调控制策略[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(9):61-69.
ZHOU Niancheng, HU Bin, WANG Qianggang, et al. A coordinated state transition control strategy for microgrid with multi-energy generation systems[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(9):61-69.(in Chinese)
- [2] 龙勇, 汪谷腾, 孟卫东, 等. 微电网与大电网的竞合关系及其对社会福利效应的影响[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(7):147-152.
LONG Yong, WANG Guteng, MENG Weidong, et al. The competing relationship of micro-grid and large-grid and its impact on social welfare effects[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(7):147-152.(in Chinese)
- [3] Wang Z, Wu W, Zhang B. A Fully distributed power dispatch method for fast frequency recovery and minimal generation cost in autonomous microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1):19-31.
- [4] 陈前宇, 陈维荣, 戴朝华, 等. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2):8-13.
CHEN Qianyu, CHEN Weirong, DAI Zhaohua, et al. Reactive power optimization based on modified particle swarm optimization algorithm for power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(2):8-13.(in Chinese)
- [5] 康文发, 李强, 陈民铀, 等. 孤岛微电网多 Agent 分布式双层控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3):770-781.
KANG Wenfa, LI Qiang, CHEN Minyou, et al. A two-layer distributed control method for islanded microgrids by using multi-agent systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3):770-781.(in Chinese)
- [6] Liang H, Choi B J, Abdrabou A, et al. Decentralized economic dispatch in microgrids via heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(6):1061-1074.
- [7] Chen G, Ren J, Feng E N. Distributed finite-time economic dispatch of a network of energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2):822-832.
- [8] Lin C E, Viviani G L. Hierarchical economic dispatch for piecewise quadratic cost functions[J]. Power Apparatus & Systems IEEE Transactions on, 2007, PAS-103(6):1170-1175.
- [9] Bakirtzis A, Petridis V, Kazarlis S. Genetic algorithm solution to the economic dispatch problem[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(4):377-382.
- [10] Ma Y, Zhang W, Liu W, et al. Fully distributed social welfare optimization with line flow constraint consideration[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(6):1532-1541.
- [11] Guo F, Wen C, Mao J, et al. Distributed economic dispatch for smart grids with random wind power[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3):1572-1583.
- [12] Chen F, Chen M, Li Q, et al. Cost based droop schemes for economic dispatch in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1):63-74.
- [13] Yang S, Tan S, Xu J X. Consensus based approach for economic dispatch problem in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4):4416-4426.
- [14] Mudumbai R, Dasgupta S, Cho B B. Distributed control for optimal economic dispatch of a network of heterogeneous power generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4):1750-1760.
- [15] Joye A. Power generation, operation and control[M]. Wiley, 2003.
- [16] Li Q, Peng C, Chen M, et al. Networked and distributed control method with optimal power dispatch for islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(1):493-504.