

DOI: 10.7667/PSPC170999

基于一致性的微网分布式能量管理调度策略

阮博¹, 俞德华², 李斯吾¹

(1. 国网湖北省电力公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 国网湖北省电力公司, 湖北 武汉 430077)

摘要: 基于多智能体一致性理论, 设计了具有完全分布式特征的微网能量管理调度策略, 以解决集中式控制方式通信压力大和无法满足即插即用要求的问题。以可控发电单元和储能单元运行成本最低为目标函数, 结合微网功率平衡和发电单元出力的约束条件, 建立了分布控制式微网最优经济调度模型。根据多智能体及一致性理论设计了微网的分布式能量管理调度算法, 给出了该方法的具体实施步骤。通过在 IEEE-14 节点微电网系统中的仿真算例, 验证了所提出调度策略的正确性和有效性。

关键词: 分布式电源; 微电网; 多智能体系统; 一致性算法; 能量管理

Consensus algorithm based distributed energy management strategy of microgrids

RUAN Bo¹, YU Dehua², LI Siwu¹

(1. State Grid Hubei Electric Power Company Power Economic Technology Research Institute, Wuhan 430077, China;
2. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China)

Abstract: On the basis of the MAS consensus theory, this paper studies the distributed energy management scheduling strategy of the microgrid, aiming at solving the disadvantages of the central-controlled strategies such as high communication pressure and incapable of satisfying the requirement of plug and play. Taking the minimum cost of all controllable generators and the energy storage units as the objective function and combining the constraints of the microgrid power balance and generator outputs, the distributed-control optimal economic scheduling model of microgrids is established. According to the multi-agent system framework and consensus algorithm, this paper presents a distributed energy management algorithm for microgrids, and gives the concrete implementation steps of distributed energy management scheduling strategy of microgrids. Through the simulation of the IEEE-14 test system, the correctness and validity of the proposed scheduling strategy is verified.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52182017000W).

Key words: distributed generation; micro-grid; multi agent system; consensus algorithm; energy management

0 引言

目前集中式微电网能量管理系统要求各被控对象向集中控制器发送状态信息并接收功率指令, 对通信网络和集中控制器性能要求很高^[1-3], 无法实现微网分布式电源即插即用的要求。作为一种分布式结构, 多智能体系统有良好启发性和自主性, 能够适用于动态和分布的复杂电力系统, 尤其适用于微网的能量管理^[4-6]。基于多智能体一致性算法的分布式控制结构仅需各智能体获取本地单元与邻近智能体的信息, 通信网络传输信息量小, 优化收敛速度

快, 满足即插即用要求, 可获得理想的控制效果。

一致性理论已在电力系统中得到了越来越多的应用。文献[7]将分布式一致性算法应用于含风电场的飞轮储能矩阵系统的调度控制问题, 各智能体经由通信网络进行信息交换, 最终各智能体状态都趋于相同。文献[8]将电力系统中每个发电单元的成本微增率选取为一致性变量。将发电功率和负荷之间的差额作为反馈, 使成本微增率收敛到最优值。该算法要求发电机之间采用的双向通信拓扑, 且要求具有领导智能体进行功率差额的计算, 本质上不是完全分布式。文献[9]将分布式频率控制和最优经济调度方法应用于发电机输出功率控制, 结果表明该算法相比传统算法具有更好的鲁棒性。文献[10]通

过新颖的一致性算法以分布式方式求解多发电机的经济调度问题,将预测功率误差作为反馈来调整各发电机的输出功率,实现所有发电机自动降低发电成本至最小值。基于两个并行的一致性算法,文献[11]解决了考虑输电线路损耗和发电约束的经济调度问题。文献[12]研究了智能电网发电侧和负荷侧的能量管理问题,基于发电单元和负荷单元间的通信网络,设计了相应一致性算法。文献[13]根据分布式原-对偶次梯度算法考虑了虚拟发电厂的最优经济调度问题。文献[14]在智能电网环境下以成本微增率为一致性变量,提出了分布式经济调度方法,但该算法未考虑发电约束且需要一个领导节点传递负荷需求信息,并不是完全分布式的能量管理算法。文献[15]依据多智能体系统一致性算法,设计了一种解决电力系统经济调度问题的分布式算法,该算法以发电机组的成本微增量和柔性可控负荷的效益微增量作为一致性变量,但未考虑发电机组的发电约束。文献[16]分析了采用离散一阶一致性的虚拟发电厂分布式控制算法的收敛性,研究了通信网络拓扑、领导节点所处位置、各条通信线路权值和反馈功率偏差系数等因素对一致性算法收敛性的影响,但同样未考虑分布式电源的发电功率约束。

本文基于多智能体一致性理论,对微网分布式能量管理的调度策略进行了研究。以各分布式电源发电成本最低为目标函数,结合微网功率平衡和分布式电源发电出力的约束条件,建立了分布式控制微网最优经济调度模型,再根据多智能体系统的框架以及一致性理论提出了微网的分布式能量管理算法,给出了微电网分布式该能量管理调度策略的具体实施步骤,并通过在 IEEE-14 节点微电网系统中的仿真算例验证了所提出分布式能量管理策略的正确性和有效性。

1 图论和一致性理论

1.1 图论

微网的通信网络可用图 $G=(V, E, A)$ 来表示, $V=\{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n\}$ 为节点集合, $i=\{1, 2, \dots, n\}$, n 为节点总数; E 为各节点对构成的边的集合, $E \subseteq V \times V$, A 为描述节点和边之间关系的邻接矩阵。

若第 i 个节点能向第 j 个节点传递信息,则该连接表示为 (v_i, v_j) , 且 $(v_i, v_j) \in E$ 。若通信网络无方向,则 $(v_i, v_j) \in E$ 等同于 $(v_j, v_i) \in E$, 有向图中则该关系不一定成立。对于有向图中任意的一个节点 v_i , 其入度定义为指向该节点边的总数, 出度定义为从该节点出发的边的总数。若 $(v_j, v_i) \in E$, 则称节点 v_j 是节点 v_i 的输入型邻域, 节点 v_i 输入型邻域的集合

为 $N_i^+ = \{v_j \in V | (v_j, v_i) \in E\}$; 若 $(v_i, v_j) \in E$, 则称节点 v_j 是节点 v_i 的输出型邻域, 节点 v_i 的输出型邻域集合为 $N_i^- = \{v_j \in V | (v_i, v_j) \in E\}$, 第 i 个单元能够从其输入型邻域接受信息, 并向其输出型邻域发送信息。

1.2 一致性理论

一致性算法用于描述多智能体系统中各智能体之间互相作用的一种方式, 也称之为一致性协议。在离散采样时间系统里, 需要将一致性算法表示成离散时间的形式^[17], 如式(1)。

$$\begin{cases} x_i[k+1] = x_i[k] + u_i[k] \\ u_i[k] = \eta \sum_{v_j \in N_i^-} a_{ij} (x_j[k] - x_i[k]) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_i[k]$ 是智能体 i 在时刻 k 的状态; N_i^- 为智能体 i 的邻域; $u_i[k]$ 是对应的控制输入; η 为耦合系数。

整个系统的一致性算法可表达为

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{H}\mathbf{x}[k] \quad (2)$$

式中, $\mathbf{H} = \mathbf{I} - \eta\mathbf{L}$, \mathbf{H} 为一个 n 阶非负矩阵, \mathbf{I} 为 n 阶单位阵, \mathbf{L} 为该通信拓扑的拉普拉斯矩阵。

若矩阵 \mathbf{H} 满足两个条件, 即 \mathbf{H} 为非负的行随机矩阵且所有的特征值都不大于 1^[17], 则该系统的所有智能体经过足够多次的迭代运算会收敛到一个相同的值。

$$\tilde{x}_i = \frac{1}{n} \sum_i x_i[0] \quad (3)$$

式中: \tilde{x}_i 表示各智能体最终收敛值; $x_i[0]$ 为各智能体状态 x_i 的初值。

2 微网能量管理控制模型

本文考虑的微电网中各单元分为三类, 即发电单元、储能单元和负荷单元。发电单元既包括柴油机、燃气轮机等同步电机, 也包括风力发电、太阳能发电等可再生能源发电单元。

以微电网中可调控发电单元及储能单元的运行成本最小为能量管理目标, 即

$$\text{Min} \sum_{i \in \Omega_G} C_{G,i}(P_{G,i}) + \sum_{j \in \Omega_B} C_{B,j}(P_{B,j}) \quad (4)$$

式中, Ω_G 和 Ω_B 分别为可控发电单元和储能单元的集合。

可控发电单元及储能单元的运行成本函数分别为

$$C_{G,i}(P_{G,i}) = \frac{1}{2} a_i (P_{G,i})^2 + b_i P_{G,i} + c_i \quad (5)$$

$$C_{B,j}(P_{B,j}) = \frac{1}{2} a_j P_{B,j}^2 \quad (6)$$

式中: $P_{G,i}$ 为第 i 个可控发电单元的输出功率; a_i 、

b_i 和 c_i 为相应系数; $P_{B,j}$ 为第 j 个储能单元的输出功率, 输出功率的正负分别表示放电和充电; a_j 为相应的成本系数。

微电网功率平衡约束条件可表达为

$$\sum_{i \in \Omega_G} P_{G,i} + \sum_{j \in \Omega_B} P_{B,j} + \sum_{k \in \Omega_R} P_{R,i} = \sum_{l \in \Omega} P_{D,l} \quad (7)$$

式中, Ω_R 和 Ω 分别为不可调控发电单元和所有负荷单元的集合。

可控发电单元有功出力上下限约束为

$$P_{G,i,\min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i,\max} \quad (8)$$

储能系统出力上下限约束为

$$P_{B,i,\min} \leq P_{B,i} \leq P_{B,i,\max} \quad (9)$$

为简化表达, 用 P_i 表示第 i 个单元(分布式电源或者储能)的输出功率。进一步将成本 C_i 对输出功率 P_i 的导数定义为第 i 个单元的成本微增率 r_i , 如式(10)。

$$r_i = a_i P_i + b_i \quad (10)$$

“等成本微增率准则”是解决经济优化调度问题的经典方法^[18], 即

$$\begin{cases} a_i P_i + b_i = r^*, & P_{i,\min} < P_i < P_{i,\max} \\ a_i P_i + b_i < r^*, & P_i = P_{i,\max} \\ a_i P_i + b_i > r^*, & P_i = P_{i,\min} \end{cases} \quad (11)$$

式中, r^* 为系统最优的成本微增率。

3 分布式能量管理算法

3.1 算法原理

本文设计的分布式最优能量管理策略中每个智能体只需要本地局部信息及邻域智能体的信息, 以各单元的成本微增率作为一致性变量, 通过通信网络进行信息交互, 使得成本微增率 r 向同一个固定值收敛, 满足“等成本微增率准则”的要求。

智能体一致性更新规则为

$$\begin{cases} r_i[t+1] = \sum_{j \in N_i^+} w_{ij} r_j[t] + \varepsilon \cdot f_i[t] \\ P_i[t+1] = \frac{r_i[t+1] - b_i}{a_i} \\ f_i[t+1] = \sum_{j \in N_i^+} v_{ij} f_j[t] - (P_i[t+1] - P_i[t]) \end{cases} \quad (12)$$

式中: 通信网络参数 w_{ij} 为系数矩阵 W 的第 i 行第 j 列元素, 系数矩阵 W 为非负行随机矩阵; 通信网络参数 v_{ij} 是矩阵 V 的第 i 行第 j 列元素, V 为非负列随机矩阵; N_i^+ 为第 i 个单元的输入型邻域集合; $r_i[t+1]$ 为单元 i 在 $t+1$ 时刻的成本微增率; $P_i[t+1]$ 为单元 i 在 $t+1$ 时刻的输出功率; $f_i[t]$ 为单元 i 输出

功率和负荷需求差额的预测值; ε 为正的反馈系数, 其值通常很小。

考虑发电功率约束时有

$$\phi_i(r_i) = \begin{cases} P_{i,\max}, & r_i > r_{i,\max} \\ \frac{r_i - b_i}{a_i}, & r_{i,\min} \leq r_i \leq r_{i,\max} \\ P_{i,\min}, & r_i < r_{i,\min} \end{cases} \quad \forall i \in \Omega \quad (13)$$

写成矩阵形式为

$$\begin{cases} \mathbf{r}[t+1] = \mathbf{W} \cdot \mathbf{r}[t] + \varepsilon \cdot \mathbf{f}[t] \\ \mathbf{P}[t+1] = \boldsymbol{\phi}(\mathbf{r}[t+1]) \\ \mathbf{f}[t+1] = \mathbf{V} \cdot \mathbf{f}[t] - (\mathbf{P}[t+1] - \mathbf{P}[t]) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\boldsymbol{\phi} = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N]^T$; $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_N]^T$; $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_N]^T$; $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_N]^T$ 。

一致项系数矩阵 W 和反馈项系数矩阵 V 对分布式能量管理算法的收敛速度的影响较大, 本文提出的系数设置方法为

$$w_{i,j} = \begin{cases} \xi_i & j = i \\ (1 - \xi_i) / d_i^+ & j \in N_i^+ \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

式中: d_i^+ 为单元 i 输入型领域集合 N_i^+ 的总个数; ξ_i 为给单元 i 分配的一致项权重, 经过多次试验取值为 0.5。

$$v_{i,j} = \begin{cases} \xi'_j & i = j \\ (1 - \xi'_j) / d_i^- & i \in N_j^- \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

式中: d_i^- 为单元 j 输出型领域集合 N_j^- 的总个数; ξ'_j 为给单元 j 分配的反馈项权重, 经过多次试验取值为 0.5。

初值的选取方法为: 母线 i 上的负荷需求记为 $P_{D,i}$, 第 i 个单元输出功率的初值 $P_i[0]$ 可取值为

$$P_i[0] = \begin{cases} P_{i,\min}, & P_{D,i} < P_{i,\min} \\ P_{D,i}, & P_{i,\min} \leq P_{D,i} \leq P_{i,\max} \\ P_{i,\max}, & P_{D,i} > P_{i,\max} \end{cases} \quad (17)$$

则第 i 个单元的初始成本微增率 $r_i[0]$ 以及输出功率和负荷需求差额的预测值 $f_i[0]$ 为

$$\begin{cases} r_i[0] = a_i \cdot P_i[0] + b_i \\ f_i[0] = P_{D,i} - P_i[0] \end{cases} \quad (18)$$

如果母线 i 仅有负荷, 则 $P_{i,\max} = P_{i,\min} = 0$ 。上述初始化过程没有利用全局负荷需求信息, 因此算法完全分布式的, 将所有的 $f_i[0]$ 对 i 求和, 可以得到

$\sum_{i \in \Omega} f_i[0] = \sum_{i \in \Omega} (P_{D,i} - P_i[0]) = P_D - \sum_{i \in \Omega} P_i[0]$ ，这是系统发电功率输出和负荷需求差额的实际值，另外，等式条件 $\sum_{i \in \Omega} f_i[t] = P_D - \sum_{i \in \Omega} P_i[t]$ 随着时间 t 是满足的。

3.2 实施步骤

算法的实施步骤如下所述。

1) 初始时刻，单元 i 的 Agent i 获取测量得到的本地负荷信息 $P_{D,i}$ ，并对单元 i 的成本微增率 $r_i[0]$ 和输出功率 $P_i[0]$ 及输出功率和负荷需求差额的预测值 $f_i[0]$ 进行初始化；

2) 在 t 时刻，Agent i 从输入型领域 Agent j 接收 $r_j[t]$ 和 $f_j[t]$ ，同时向输出型领域 Agent j 发送 $r_i[t]$ 和 $f_i[t]$ ；

3) 按照式(14)中第 1 式和第 3 式来更新成本微增率信息，并利用本地信息按照式(14)第 2 式对单元 i 的输出功率进行更新；

4) 在 $t+1$ 时刻，得到第 $t+1$ 采样时刻单元 i 的输出功率信息 $P_i[t+1]$ 与本地负荷需求信息 $P_{D,i}[t+1]$ ，继续转到第 2) 步，进行 $t+1$ 时刻的更新计算。

4 算例分析

将所设计的完全分布式能量管理算法应用于修改后的 IEEE 14 节点系统，修改后的 IEEE 14 节点系统如图 1 所示，该微网系统的 1、2、3 和 6 号节点接入发电机单元，7 号节点接入由 BESS 构成的储能单元，8 号节点接入一个风力发电机，其余节点为纯负荷节点，该系统所采用的同步发电机、BESS 储能单元和风电机组的成本参数及发电约束如表 1 所示。该微网系统各节点的负荷参数 $P_{D,i}$ 如表 2 所示，由表 2 中参数可算出，该系统总的负荷需求为 $P_D=231$ MW。

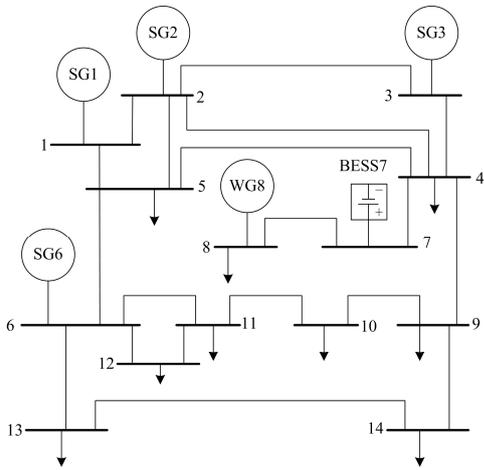


图 1 修改后的 IEEE 14 节点系统

Fig. 1 The modified IEEE 14 nodes system

表 1 成本参数及发电约束

类型	$a_i/$ \$(/(\text{MW}^2\text{h}))	$b_i/$ \$(/(\text{MWh}))	$c_i/$ (\$/h)	$PG_{i,\min}/$ MW	$PG_{i,\max}/$ MW
SG1	0.08	2.25	0	0	80
SG2	0.062	4.20	0	0	90
SG3	0.075	3.25	0	0	70
SG6	0.070	4.05	0	0	70
BESS7	0.35	0	0	-20	20
WG8	—	—	—	0	60

表 2 负荷参数

节点编号	$P_{D,i}/\text{MW}$	节点编号	$P_{D,i}/\text{MW}$
1	0	8	0
2	21.7	9	29.5
3	66.2	10	9
4	47.8	11	3.5
5	7.6	12	6.1
6	11.2	13	13.5
7	0	14	14.9

为该微网系统每个节点分配一个智能体，智能体的编号与节点编号一致，智能体之间的通信拓扑可独立于微网的物理连接结构。本文假设智能体与邻近编号的两个智能体进行信息交换，令其通信拓扑的有向图表示为 $G=(V, E, A)$ ，该通信拓扑的边集 E 可以表示为

$$E = \{(i, i+1), (i, i+2) | 1 \leq i \leq 12\} \cup \{(13, 14), (13, 1), (14, 1), (14, 2)\}$$

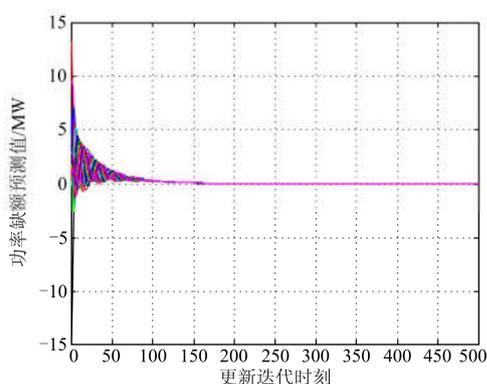
该图是强联通的，总的边数为 $|E|=28$ ，而所有可能的边的总数为 $|V| \cdot |V|=196$ ，可知该图的密度仅为 $29/196=0.143$ ，即该图是相当稀疏的。给定该微网系统的通信拓扑后，即可以计算出该通信网络的一致性系数矩阵 W 和反馈项系数矩阵 V 。

现将该微网系统中各节点的负荷需求 $P'_{D,i}$ 较正常运行时增加 20%，即总的负荷需求 $P'_D = P_D \times (1+20\%)=277.2$ MW，风力发电机的输出功率增加为 25 MW，利用完全分布式能量管理算法计算新的运行条件下微网的最优成本微增率以及各同步发电机和储能单元的输出功率。将正常运行时微网的最优成本微增率和各同步发电机和储能单元的出力作为新运行条件下微网分布式能量管理算法的初值 $r_i(0)$ 和 $P_i(0)$ 。

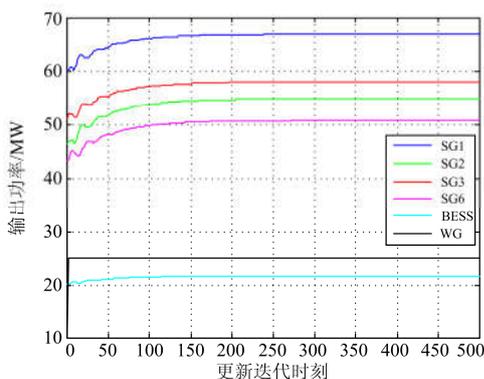
该微网系统正常运行时，各负荷需求 $P_{D,i}$ 为表 2 中标准的节点负荷参数值，风力发电机 WG 的出力为 10 MW，同步发电机和 BESS 储能单元按照经济最优的方式运行，由完全分布式能量管理算法可

以求得正常运行时的最优成本微增率为 $r_i(0)=7.073$ \$/MWh, 各同步发电机和储能单元的出力分别为 $P_1(0)=60.29$ MW, $P_2(0)=46.34$ MW, $P_3(0)=50.97$ MW, $P_6(0)=43.19$ MW, $P_8(0)=20.21$ MW。微网新运行条件下, 各节点负荷需求与输出功率差额的初值可按取值为: $f_i(0)=P_{D,i} \times 20\%$, 其不需要全局信息。

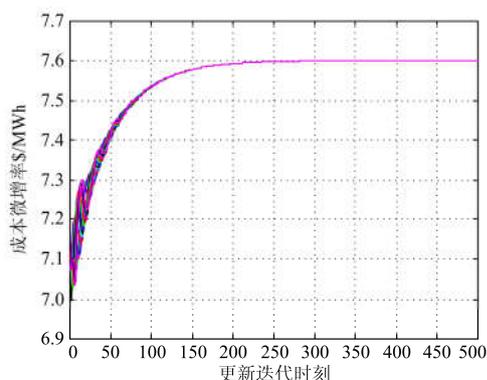
将完全分布式能量管理算法应用于该微网系统新的运行条件下, 反馈系数取值为 $\varepsilon=5 \times 10^{-3}$, 可得仿真结果如图 2 所示, 可以看出所有同步电机和储能单元的出力都在运行约束范围内, 各节点负荷需求与输出功率差额值都收敛到了 0, 微网内输出的总的功率达到了总的目标负荷需求值, 所有节点的成



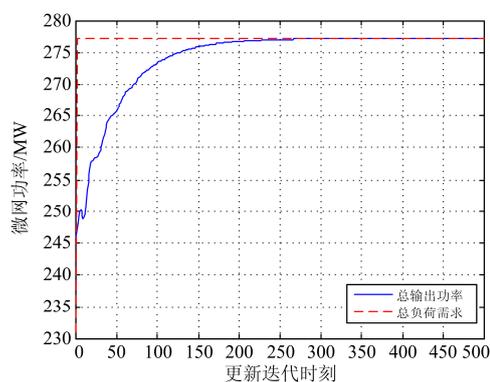
(a) 功率差额的预测值



(b) 各发电单元的输出功率



(c) 各节点的成本微增率



(d) 总输出功率和负荷需求

图 2 稳态运行情况下的仿真结果

Fig. 2 Simulation results under steady-state operation

本微增率都收敛到了相同的值 $r^*=7.60$ \$/MWh, 各同步发电机和储能单元的输出功率分别为 $P_1^*=66.89$ MW, $P_2^*=54.85$ MW, $P_3^*=58.01$ MW, $P_6^*=50.73$ MW, $P_8^*=21.72$ MW, 即完成了该系统的最优能量管理。

5 结论

本文针对微网的最优经济调度问题, 提出了基于多智能体一致性理论的微网分布式能量管理算法。首先建立了微网能量管理算法的模型, 包括微网能量管理的目标函数和约束条件; 再根据多智能体系统的框架以及一致性理论, 引入投影算子得到了考虑发电约束的微网分布式能量管理算法; 给出了微网分布式能量管理算法的实施过程; 在 IEEE-14 节点系统中的仿真结果表明该分布式能量管理算法可通过强连通的通信网络使得微网各单元各智能体进行信息交换, 调整各分布式发电单元出力, 使其在满足功率约束的同时达到微网运行发电成本最低的目的。

参考文献

- [1] 孙宏斌, 郭庆来, 吴文传, 等. 风电场分布式能量管理系统: 体系架构和关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 26-31.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, WU Wenchuan, et al. Wind farm distributed energy management system: architecture and key technologies[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 26-31.
- [2] LI H, Abinet T E, ZHANG J H, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.

- [3] 李培强, 段克会, 董彦婷, 等. 含分布式混合储能系统的光伏直流微网能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 42-48.
LI Peiqiang, DUAN Kehui, DONG Yanting, et al. Energy management strategy for photovoltaic DC microgrid with distributed hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 42-48.
- [4] ROCHE R, BLUNIER B, MIRAOUI A, et al. Multi-agent systems for grid energy management: a short review[C] // IECON 2010 - 36th Conference on IEEE Industrial Electronics Society, November 7-10, 2010, Glendale, USA: 3341-3346.
- [5] 高大棚, 叶兴旺, 兰启奎. 基于 MAS 的配电网复电系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 103-110.
GAO Dapeng, YE Xingwang, LAN Qikui. Design of active power restoration system for distribution network based on MAS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 103-110.
- [6] 林霞, 李瑶, 李强, 等. 基于多 Agent 的分层扩展电网故障信息融合处理系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 129-137.
LIN Xia, LI Yao, LI Qiang, et al. Information integration processing system of layered-expanding grid fault based on multiple Agent[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 129-137.
- [7] CAO Q, SONG Y D, GUERRERO J M, et al. Coordinated control for flywheel energy storage matrix systems for wind farm based on charging/discharging ratio consensus algorithms[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1259-1267.
- [8] ZHANG Z, CHOW M Y. Convergence analysis of the incremental cost consensus algorithm under different communication network topologies in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1761-1768.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] BINETTI G, DAVOUDI A, LEWIS F L, et al. Distributed consensus-based economic dispatch with transmission losses[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1711-1720.
- [12] ZHAO C, HE J, CHENG P, et al. Consensus-based energy management in smart grid with transmission losses and directed communication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2049-2061.
- [13] YANG H, YI D, ZHAO J, et al. Distributed optimal dispatch of virtual power plant via limited communication[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3511-3512.
- [14] ZHANG Z, CHOW M Y. Incremental cost consensus algorithm in a smart grid environment[C] // Power and Energy Society General Meeting, July 24-29, 2011, San Diego, USA: 1-6.
- [15] 谢俊, 陈凯旋, 岳东, 等. 基于多智能体系统一致性算法的电力系统分布式经济调度策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 112-117.
XIE Jun, CHEN Kaixuan, YUE Dong, et al. Distributed economic dispatch based on consensus algorithm of multi agent system for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 112-117.
- [16] 赵亦岚, 陈彬, 范元亮, 等. 虚拟发电厂分布式控制收敛速度分析及优化[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2288-2294.
ZHAO Yilan, CHEN Bin, FAN Yuanliang, et al. Convergence speed analysis and optimization for distributed control of virtual power plant[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2288-2294.
- [17] OLFATI-SABER R, FAX J A, MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 215-233.
- [18] WOOD A J, WOLLENBERG B F. Power generation, operation, and control[M]. John Wiley & Sons, 2012.

收稿日期: 2017-07-06; 修回日期: 2017-09-07

作者简介:

阮博(1989—), 男, 工程师, 主要研究方向为智能电网运行与控制; E-mail: ruanbo@qq.com

俞德华(1975—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电力生产统计与分析; E-mail: ydh6060@qq.com

李斯吾(1988—), 男, 工程师, 主要研究方向为电力经济活动分析。E-mail: lisiwu_hb@sina.com

(编辑 周金梅)