

面向能源互联网的多能源局域网两层功率优化分配

米 阳,刘红业,宋根新,李战强,符 杨,李振坤

(上海电力学院 电气工程学院,上海 200090)

摘要:针对面向能源互联网的多能源局域网运行调度中的实时功率分配问题,提出一种基于多智能体两层一致性理论的多能源局域网实时动态功率分配策略。将能源互联网划分为若干个能源局域网,同时以各能源局域网和能源局域网内各分布式电源的增量成本作为一致性状态变量设计一致性功率分配算法,使得各能源局域网根据自身情况承担能源互联网系统的功率不平衡量,进一步使得各分布式电源根据自身情况承担能源局域网的功率不平衡量,从而达到降低系统发电成本的目的。该算法通过相邻智能体之间的信息交互,减少了数据通信量,并且能够很好地应对能源互联网和能源局域网拓扑结构的变化。仿真结果验证了所提方法的有效性和可行性。

关键词:能源互联网;能源局域网;一致性算法;增量成本;实时动态功率分配

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.07.001

0 引言

化石能源的日益枯竭、全球环境的日益恶化,使得可再生能源得到大力发展^[1]。含高密度间歇性能源的能源互联网 EI (Energy Internet)^[2-10] 逐步发展为一种新的能源结构。能源互联网是包含多个能源局域网 ELN (Energy Local Network) 的大系统,本文研究的能源局域网均以电能为主要的能源形式,其内部融合了大量的分布式可再生能源及其他分布式发电单元^[11-12],由于这些不同种类的发电单元具有各自的特点,如发电的间歇性、发电技术的成熟性等,使得各种发电单元的控制特性和成本各不相同。而能源互联网运行调度的目标是在保证能源互联网整体实时功率平衡的同时,降低分布式电源总的发电成本,相当于将经济调度问题转换为功率分配过程中增量成本一致性的问题^[13-14]。因此研究能源互联网运行调度中的实时功率分配问题具有重要的意义。

在目前已有的文献中,许多智能算法被用来解决优化调度问题,如拉格朗日乘子法^[15]、线性规划^[16]、遗传算法^[17]、粒子群优化算法^[18]等,但是这些算法都属于集中式调控方法,需要通过中央控制器与分布式电源的通信获取全局信息才能实现优化

调度,因此其计算量大、通信集中、可靠性差、投资成本高,且无法适应系统灵活的拓扑结构^[19-21]。而分布式控制方式^[22]中每个分布式电源的控制单元仅需其本地和相邻分布式电源的信息,利用局部信息交换实现协调控制,因此其通信量少、可靠性高且扩展性强。

由于能源互联网中可再生能源的高渗透率,能源互联网中需要协调的分布式设备的数量也十分庞大,集中式协调优化方法缺乏灵活性和鲁棒性,而分布式控制方式不需要中央控制器,更能够满足能源互联网的拓扑结构灵活多变和即插即用特性。多智能体一致性算法作为一种分布式调控方式已经得到了广泛应用。文献[23]采用二次凸成本函数分析经济调度问题,提出了等增量成本的一致性算法,引入了“领导者”和“跟随者”的概念,有效地解决了在各种通信网络下的经济调度分散优化问题。文献[24-26]提出了一种“一致项+修正项”的调度算法,一致项确保增量成本收敛到最优值,修正项根据物理设备的实际运行情况计算反馈量进行实时修正,保证供需平衡。上述一致性创新方法使得主节点的设定不再必要。文献[24-26]均研究了由智能体组建的通信网络对应的拓扑图是无向图的经济调度问题。文献[27]则进一步研究了通信网络图是强连通图时的经济调度问题,拓宽了算法的应用范围。文献[28]考虑了电力系统经济调度中通信网络中断的问题。多智能体一致性算法不仅适用于微网,同样也适用于能源互联网。文献[29]提出对多能源互联的分布式控制方法,在保证负荷功率在各分布式电源间精确分配的基础上,使各分布式电源的输出电压相角和幅值保持一致,从而减小甚至消除分布式电源间的计算电流。

然而,上述文献主要集中于单个微网或能源局

收稿日期:2017-05-03;修回日期:2018-02-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61403246);上海市科委项目(18020500700);上海绿色能源并网工程技术研究中心项目(13DZ2251900);“电气工程”上海市Ⅱ类高原学科项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61403246), Shanghai Committee of Science and Technology Project(18020500700), Shanghai Green Energy Grid Engineering Technology Research Center Project(13DZ2251900) and the Program of “Electrical Engineering” Shanghai Class II Plateau Discipline

域网的经济调度研究,而能源互联网是包含多个能源局域网的大系统,因此在上述研究的基础上,本文提出一种包含多能源局域网的能源互联网运行调度方法。以孤岛型能源互联网为研究对象,针对能源互联网运行调度中的实时功率分配问题,引入两层一致性理论构建能源互联网实时功率分配框架。将能源互联网划分为若干个能源局域网,同时以各能源局域网和能源局域网内各分布式电源的增量成本作为一致性状态变量设计一致性功率分配算法,使得各能源局域网根据自身情况均衡地承担能源互联网系统的功率不平衡量,进一步使得各分布式电源根据自身情况均衡地承担能源局域网的功率不平衡量,从而达到降低系统发电成本的目的。本文是在能源互联网的背景下,研究能源互联网中分布式电源间的功率分配,虽然只包括电源,但也可以由此扩展到更多的其他能源形式,有一定的研究意义。

1 基于多智能体的能源互联网架构

1.1 能源互联网物理拓扑

能源互联网是一个信息网络与物理网络高度融合的电网,且两者的拓扑结构可以相互独立^[5,7,10]。由于能源互联网内需要协调控制的分布式设备的数量很大,且设备本身具有自治性及协作性等特点,因此本文基于多智能体系统设计能源互联网的基本架构,如图 1 所示。

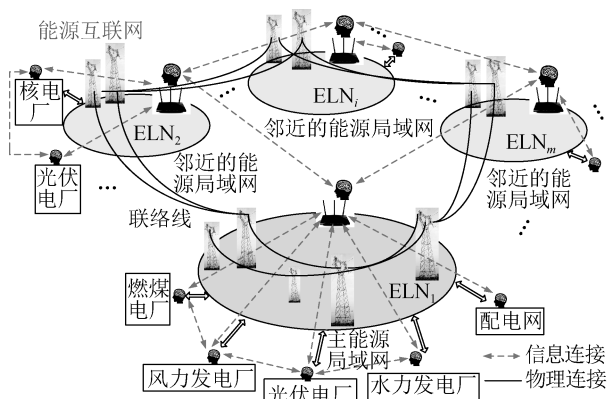


图 1 基于多智能体的能源互联网基本架构

Fig.1 Basic architecture of energy internet based on multi-agent

由图 1 可知,基于多智能体的能源互联网的基本架构主要包括 2 个层次。①能源互联网内包含若干个能源局域网,每个能源局域网中包含多种分布式电源,如传统燃煤发电、水力发电、光伏发电、风力发电等;同时在各能源局域网间和各个分布式电源机组间增加了通信。②每个智能体只与相邻的智能体进行通信,并获知所在层级调度中心(能源局域网领导者或分布式电源领导者)计算得到的总功率指令,通过一致性算法,每台机组即可获得发电功率

指令。

1.2 能源互联网通信网络

能源互联网的通信网络如图 2 所示,通信网络的分区与实际拓扑结构的分区是一致的,只是由于算法的需要,在每个实际的能源局域网拓扑结构中的相邻分布式电源间添加通信而形成的。在各能源局域网间和能源局域网内各台分布式电源机组间分别选取一个领导者,其余均为跟随者,各自的功能如下。

a. 能源局域网领导者:能源局域网间采用“领导者-跟随者”的模式进行通信协作,定义能源局域网间只有一个领导者,该领导者是能源互联网中多个能源局域网的调度中心,负责整个能源互联网的功率扰动平衡,同时负责各个能源局域网之间的协同运行。

b. 能源局域网跟随者:即普通的能源局域网,主要负责与领导者进行交互协同,同时与邻接的能源局域网进行通信,获取邻接能源局域网信息,并通过离散型一致性算法更新其状态。

c. 分布式电源领导者:负责能源局域网内部和外部的信息交流,定义每个能源局域网内只有一个领导者,该领导者是能源局域网内各种分布式电源的调度中心,负责与上级及能源局域网内其他分布式电源进行通信协作。

d. 分布式电源跟随者:即能源局域网内的普通分布式电源,负责与领导者进行交互协同,同时与邻接的分布式电源进行通信,获取邻接分布式电源信息,并通过离散型一致性算法更新其状态。

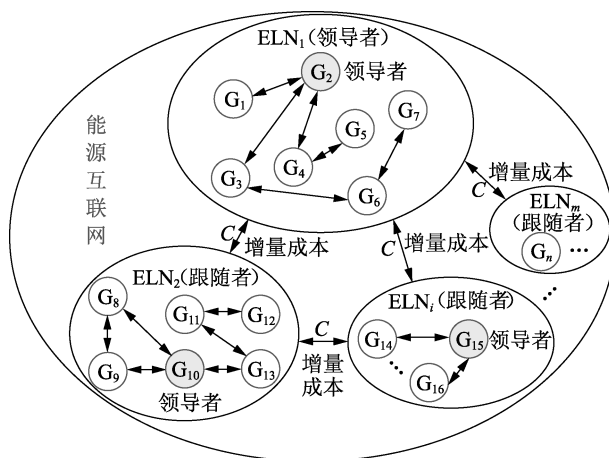


图 2 能源互联网通信网络结构

Fig.2 Structure of communication network in energy internet

因此能源互联网的功率分配主要分为 2 个过程:采集母线的频率偏差 Δf , 计算实时的总发电功率指令,在各个能源局域网通信后,采用“领导者-跟随者”^[23]一致性算法将总功率指令分配到各个能源局域网;在各台分布式电源机组执行通信后,采用“领导者-跟随者”一致性算法将每个能源局域网的

功率指令分配到各台分布式电源机组。

2 能源互联网优化调度模型

2.1 目标函数

以能源互联网的总生产成本最小作为优化目标,如式(1)所示。

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^N F_{in}(P_{Gin}) \quad (1)$$

其中, m 和 N 分别为能源局域网个数和能源局域网内分布式电源的个数; P_{Gin} 为能源互联网中第 i 个能源局域网中第 n 台分布式电源的发电功率; F_{in} 为能源互联网中第 i 个能源局域网中第 n 台分布式电源的发电成本,如式(2)所示^[28,30]。

$$F_{in}(P_{Gin}) = \alpha_{in} P_{Gin}^2 + \beta_{in} P_{Gin} + \gamma_{in} \quad (2)$$

其中, α_{in} 、 β_{in} 、 γ_{in} 为第 i 个能源局域网中第 n 台分布式电源的发电成本参数。

增量成本可表示为:

$$C_{in}(P_{Gin}) = \frac{\partial F_{in}(P_{Gin})}{\partial P_{Gin}} = 2\alpha_{in} P_{Gin} + \beta_{in} \quad (3)$$

2.2 约束条件

能源互联网优化调度的约束条件如下。

a. 功率平衡约束。

全系统功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^N (P_{Gin} - P_{Gin}(0)) = \Delta P \quad (4)$$

每个能源局域网内功率平衡约束:

$$P_i + P_i^L = P_i^{\text{load}} \quad (5)$$

b. 分布式电源出力上、下限约束。

$$P_{Gin}^{\min} \leq P_{Gin} \leq P_{Gin}^{\max} \quad (6)$$

c. 联络线传输功率约束。

$$P_{\min}^L \leq P_i^L \leq P_{\max}^L \quad (7)$$

其中, ΔP 为由 Δf 计算得到的总功率指令; $P_{Gin}(0)$ 、 $P_{Gin}^{\min}$ 和 $P_{Gin}^{\max}$ 分别为第 i 个能源局域网中第 n 台分布式电源的初始发电功率、最小和最大输出功率; P_i 、 P_i^{load} 分别为第 i 个能源局域网中分布式电源总发电功率、总负荷量; P_i^L 为第 i 个能源局域网中联络线功率, $P_i^L > 0$ 表示联络线功率流进能源局域网, $P_i^L < 0$ 表示联络线功率流出能源局域网; $P_{\max}^L$ 、 $P_{\min}^L$ 分别为联络线传输功率的上、下限。

因此,当能源互联网中负荷发生扰动时,为了使能源互联网的发电成本最低,需使平均发电成本较低的能源局域网和发电成本低的机组承担更多的功率。为了使平均发电成本较低的能源局域网承担更多的功率扰动,本文选取增量成本作为能源局域网之间的一致性状态变量,并采用“领导者-跟随者”

模式的功率分配算法;为了使发电成本低的机组承担更多的功率,同样选取增量成本作为机组之间的一致性状态变量,并采用“领导者-跟随者”模式的功率分配算法。

当第 i 个能源局域网因发生故障脱离能源互联网运行时,该能源局域网内的有功功率缺额需要根据频率偏差求取^[31]。设第 i 个能源局域网的额定频率为 f_n ,现有频率为 f_z ,频率偏差为 $\Delta f = f_n - f_z$,为了满足维持额定频率的需求,分布式电源需增发的有功功率 ΔP_R 为:

$$\Delta P_R = -C_G K_S \Delta f_* \quad (8)$$

$$\Delta P_i = \Delta P_R \quad (9)$$

$$\Delta f_* = \frac{f_z}{f_n} - 1 \quad (10)$$

$$C_G = 1 - K_G \Delta f_* \quad (11)$$

$$K_S = \frac{K_G P_{Gz}}{1 - K_G \Delta f_*} + \frac{K_L P_{Lz}}{1 + K_L \Delta f_*} \quad (12)$$

其中, C_G 为分布式电源的有功功率调节系数; K_S 为单位频率调节响应系数; K_G 为分布式电源的单位频率调节响应系数; K_L 为负荷单位频率调节响应系数; $\Delta P_i = P_i - P_i(0)$, $P_i(0)$ 为第 i 个能源局域网的初始发电功率; P_{Gz} 、 P_{Lz} 分别为频率为 f_z 时分布式电源出力和负荷功率。由此可见,当 $f_z < f_n$ 时, $\Delta P_R > 0$;当 $f_z > f_n$ 时, $\Delta P_R < 0$ 。

3 基于一致性算法的能源互联网优化调度

3.1 能源局域网间增量成本一致性算法

在选取增量成本作为能源局域网间的一致性状态变量后,第 i 个能源局域网的增量成本可定义为:

$$C_i = 2\alpha_i P_i + \beta_i \quad (13)$$

其中, α_i 、 β_i 为第 i 个能源局域网的发电成本参数。则第 i 个能源局域网的增量成本一致性更新如下:

$$C_i(k+1) = \sum_{j=1}^m d_{ij} C_j(k) \quad (14)$$

其中, $C_i(k)$ 为第 i 个能源局域网第 k 步迭代计算得到的增量成本; d_{ij} 为能源局域网构成的通信网络对应的状态转移矩阵系数,由通信网络结构决定,状态转移矩阵可由通信网络的Laplace矩阵求得,详细定义与计算公式可参见文献[23]。

同时,为了保证功率平衡,能源局域网领导者的增量成本应更新如下:

$$C_i(k+1) = \begin{cases} \sum_{j=1}^m d_{ij}(k) C_j(k) + \eta \Delta P_{\text{error}} & \Delta P > 0 \\ \sum_{j=1}^m d_{ij}(k) C_j(k) - \eta \Delta P_{\text{error}} & \Delta P < 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\Delta P_{\text{error}} = \Delta P - \sum_{i=1}^m \Delta P_i \quad (16)$$

其中, η 为功率平衡调节因子; ΔP_{error} 为总功率指令与各能源局域网功率指令之和的偏差, 当 $|\Delta P_{\text{error}}| < \delta$ 时, 一致性算法达到收敛。

由式 (16) 可以看出, 当总功率指令 $\Delta P > 0$ 时, 若 $\Delta P_{\text{error}} > 0$, 则说明各能源局域网的功率指令总和仍不足以平衡当前的功率不平衡量, 增量成本需要相应地增加, 若 $\Delta P_{\text{error}} < 0$, 则增量成本需要相应地减少; 当 $\Delta P < 0$ 时, 增量成本的增减趋势则相反。

根据式 (13), 第 i 个能源局域网的发电功率更新为:

$$P_i(k+1) = \frac{C_i(k+1) - \beta_i}{2\alpha_i} \quad (17)$$

采用增量成本一致性算法时, 有可能导致某个能源局域网的功率超出其总功率最大值, 当达到限值时, 能源局域网应从通信网络中退出, 此时应修改相应的邻接矩阵。当达到功率限值时, 能源局域网的功率可修改为:

$$P_i(k+1) = \begin{cases} P_i^{\min} & \frac{C_i(k+1) - \beta_i}{2\alpha_i} < P_i^{\min} \\ \frac{C_i(k+1) - \beta_i}{2\alpha_i} & P_i^{\min} \leq \frac{C_i(k+1) - \beta_i}{2\alpha_i} \leq P_i^{\max} \\ P_i^{\max} & \frac{C_i(k+1) - \beta_i}{2\alpha_i} > P_i^{\max} \end{cases} \quad (18)$$

其中, $P_i^{\min}$ 和 $P_i^{\max}$ 分别为第 i 个能源局域网最小和最大发电功率。

与此同时, 邻接矩阵元素修改如下:

$$a_{ij} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

在能源局域网间功率传输的过程中, 当某条联络线的传输功率超出其限值时, 联络线功率可修改为:

$$P_i^L = \begin{cases} P_i^{\min} & P_i - P_i^{\text{load}} < P_i^{\min} \\ P_i^{\max} & P_i - P_i^{\text{load}} > P_i^{\max} \end{cases}$$

当 3 条联络线的传输功率均达到限值时, 表明系统功率难以通过能源局域网间的功率交换实现平衡, 需要进行并网操作或切负荷、切电源操作。

3.2 能源局域网内增量成本一致性算法

第 i 个能源局域网中第 n 台分布式电源的一致性增量成本的更新规则为:

$$C_{in}(k+1) = \sum_{w=1}^N d_{nw}(k) C_{iw}(k) \quad (20)$$

其中, $C_{in}(k)$ 为第 i 个能源局域网中第 n 台分布式电源在第 k 步迭代计算得到的增量成本; d_{nw} 为第 i 个

能源局域网中分布式电源构成的通信网络对应的状态转移矩阵系数。

为了保证能源局域网内功率平衡, 分布式电源领导者的一致性增量成本的更新规则为:

$$C_{in}(k+1) = \begin{cases} \sum_{w=1}^N d_{nw}(k) C_{iw}(k) + \mu_i \Delta P_{\text{error}i} & \Delta P_i > 0 \\ \sum_{w=1}^N d_{nw}(k) C_{iw}(k) - \mu_i \Delta P_{\text{error}i} & \Delta P_i < 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$\Delta P_{\text{error}i} = \Delta P_i - \sum_{n=1}^N \Delta P_{Gin} \quad (22)$$

其中, μ_i 为第 i 个能源局域网的功率平衡调节因子, 取值为正数, 借助该参数, 领导者可实现功率平衡约束; $\Delta P_{Gin} = P_{Gin} - P_{Gin}(0)$; $\Delta P_{\text{error}i}$ 为第 i 个能源局域网的总功率指令及所有分布式电源的总功率指令的偏差, 当 $|\Delta P_{\text{error}i}| < \varepsilon_i$ 时, 一致性算法达到收敛。功率平衡调节因子 μ_i 是影响算法收敛的重要因素, 当 μ_i 取较大值时, 收敛速度快, 但容易引起系统振荡; 当 μ_i 取较小值时, 收敛精度好, 但速度慢。

根据式 (3), 第 i 个能源局域网中第 n 台分布式电源的发电功率更新为:

$$P_{Gin}(k+1) = \frac{C_{in}(k+1) - \beta_{in}}{2\alpha_{in}} \quad (23)$$

采用增量成本一致性算法时, 有可能导致某台分布式电源的功率超出其功率最大值。当达到限值时, 分布式电源应从通信网络中退出, 此时应修改相应的邻接矩阵。当达到功率限值时, 分布式电源的功率可修改为:

$$P_{Gin}(k+1) = \begin{cases} P_{Gin}^{\min} & \frac{C_{in}(k+1) - \beta_{in}}{2\alpha_{in}} < P_{Gin}^{\min} \\ \frac{C_{in}(k+1) - \beta_{in}}{2\alpha_{in}} & P_{Gin}^{\min} \leq \frac{C_{in}(k+1) - \beta_{in}}{2\alpha_{in}} \leq P_{Gin}^{\max} \\ P_{Gin}^{\max} & \frac{C_{in}(k+1) - \beta_{in}}{2\alpha_{in}} > P_{Gin}^{\max} \end{cases} \quad (24)$$

与此同时, 邻接矩阵元素修改如下:

$$a_{nw} = 0 \quad w = 1, 2, \dots, N \quad (25)$$

3.3 能源互联网增量成本一致性算法流程

能源互联网双层一致性算法的流程如图 3 所示, 具体步骤如下:

a. 求取能源互联网的总功率指令 ΔP ;

b. 由能源局域网间的通信网络图形成 Laplace 矩阵, 并形成相应的状态转移矩阵;

c. 根据式 (14)、(15), 利用增量成本一致性算法更新各能源局域网的增量成本, 并求取更新后的能源局域网发电功率 $P_i(k+1)$;

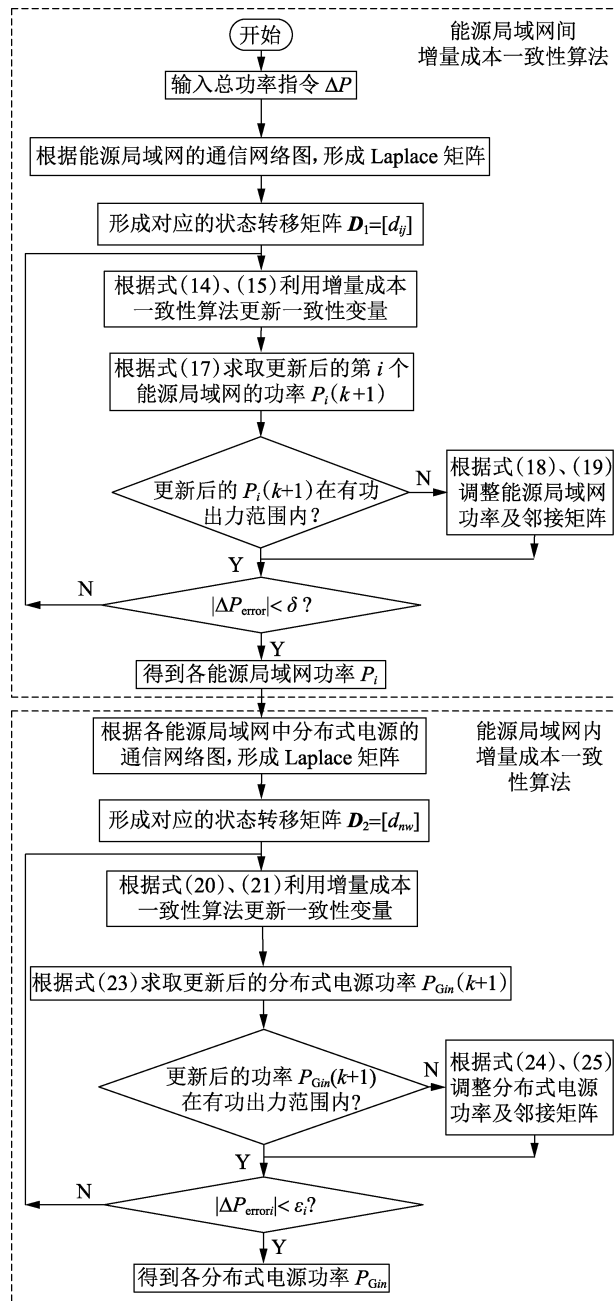


图 3 增量成本一致性算法流程图

Fig.3 Flowchart of incremental cost consensus algorithm

d. 判断更新后的能源局域网功率 $P_i(k+1)$ 是否在其功率范围内,若超出其有功出力范围,则按式(18)、(19)调整能源局域网有功出力及邻接矩阵;

e. 求出 ΔP_{error} ,判断收敛条件 $|\Delta P_{\text{error}}| < \delta$ 是否成立,若不成立则进行下一步的迭代计算,直到收敛条件成立为止,输出各能源局域网发电功率 P_i ;

f. 根据每个能源局域网中分布式电源的通信网络图形成 Laplace 矩阵,并形成相应的状态转移矩阵;

g. 根据式(20)、(21),利用增量成本一致性算法更新各分布式电源增量成本,并求取更新后的分布式电源功率 $P_{\text{Gin}}(k+1)$;

h. 判断更新后的分布式电源功率 $P_{\text{Gin}}(k+1)$ 是否在其功率范围内,若超出其有功出力范围,则按式(24)、(25)调整分布式电源有功出力及邻接矩阵;

i. 求出 ΔP_{error} ,判断收敛条件 $|\Delta P_{\text{error}}| < \varepsilon_i$ 是否成立,若不成立则进行下一步的迭代计算,直到收敛条件成立为止,输出各分布式电源功率 P_{Gin} 。

4 仿真算例分析

为了验证所提基于两层一致性理论的多能源局域网实时动态功率分配策略的有效性,建立了由 3 个能源局域网互联形成的能源互联网模型,其实际拓扑结构和对应的能源局域网间的通信网络分别如附录中图 A1 和图 A2 所示,在能源局域网未出现功率越限的情况下,任意 2 个能源局域网之间均存在通信。选取 ELN₂ 作为能源局域网领导者,ELN₁ 和 ELN₃ 作为能源局域网跟随者。在 ELN₂ 中,分布式电源的个数为 7,它们之间的通信网络图如附录中图 A3 所示,选取 DG₂ 作为分布式电源领导者,其余均为分布式电源跟随者。各能源局域网和各分布式电源的成本系数和状态参数如附录中表 A1—A3 所示。

4.1 能源局域网间增量成本一致性仿真

本算例验证增量成本一致性算法在能源局域网间功率分配的有效性。假设由 Δf 计算的能源互联网总的功率不平衡量为 $\Delta P = 400$ MW,功率平衡调节因子 $\eta = 0.001$,收敛系数 $\delta = 0.6$,则能源局域网间增量成本一致性收敛过程如图 4 所示。

由图 4(a)可以看出,领导者 ELN₂ 的增量成本先下降后逐渐上升,而作为跟随者的 ELN₁ 和 ELN₃,其增量成本一直增加,经过 89 次迭代之后,算法达到收敛,三者的增量成本收敛于一个最优的共同值 $C_i = 6.36$ 元/MW,系统经济成本达到优化;由图 4(b)可看出,算法达到收敛时 3 个能源局域网的发电功率分别为 $P_1 = 334.4$ MW、 $P_2 = 287.7$ MW、 $P_3 = 297.3$ MW,且均在最大允许发电功率范围之内;由图 4(c)可以看出,3 个能源局域网总的发电功率变化量与能源互联网的发电功率指令最终达到平衡。综上,增量成本一致性算法能够在降低能源互联网发电成本条件下优化功率不平衡量的实时分配。

4.2 能源局域网内增量成本一致性仿真

本算例验证增量成本一致性算法在能源局域网内功率分配的有效性。由 4.1 节算例得出 ELN₂ 的发电功率为 $P_2 = 287.7$ MW,根据附录表 A3 中各分布式电源的初始值,可得 $\Delta P_2 = 48.7$ MW。假设功率平衡调节因子 $\mu_2 = 0.0005$,收敛系数 $\varepsilon_2 = 0.1$,则 ELN₂ 内各分布式电源的增量成本和有功出力变化情况分别如图 5(a)、(b)所示,系统有功功率平衡如图 5(c)所示。

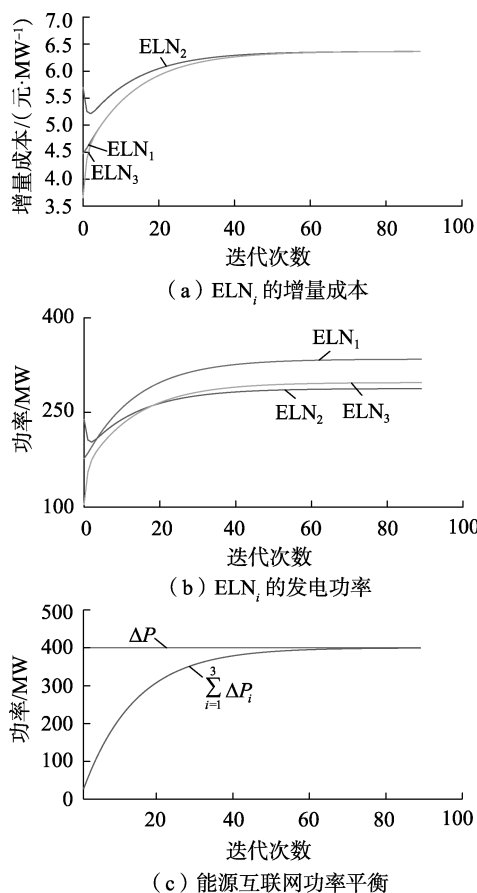


图 4 能源局域网间一致性收敛过程

Fig.4 Consistency convergence process between ELNs

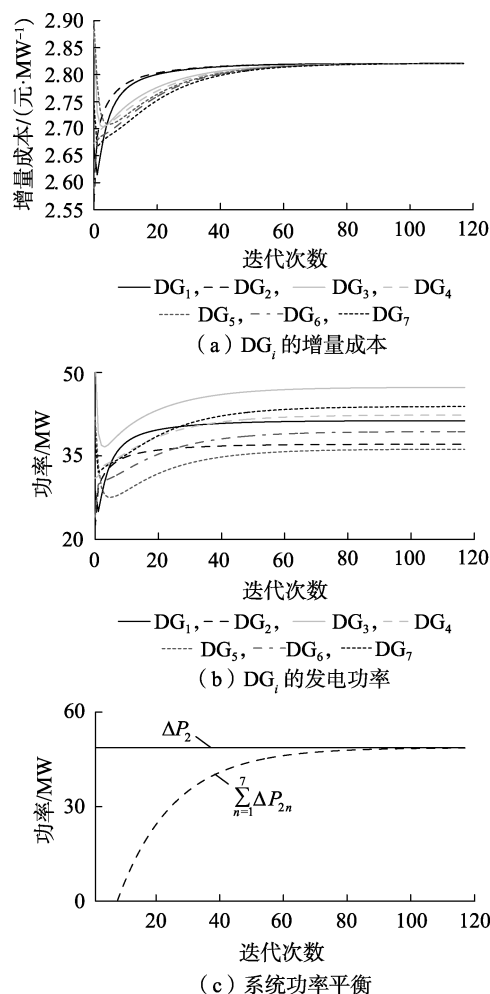
由图 5(a)、(b)可以看出,经过 117 次迭代后算法达到收敛,ELN₂ 内所有分布式电源的增量成本收敛于一个最优的共同值 $C_i = 2.82$ 元/MW,并且 7 台分布式电源的发电功率分别为 41.3 MW、37.1 MW、47.3 MW、42.4 MW、36.2 MW、39.4 MW、43.9 MW;由图 5(c)可知,ELN₂ 内分布式电源总的发电功率变化量最终与 ELN₂ 的发电功率指令相等,系统最终达到功率平衡。综上可知,增量成本一致性算法能够在降低能源局域网发电成本的前提下优化功率不平衡量的实时分配。

综合 4.1 节和 4.2 节算例可知,通过采用双层一致性算法,能源互联网总的不平衡功率能够实时分配到各台机组,并实现能源互联网整体发电成本的降低。

4.3 ΔP 连续变化时的增量成本一致性仿真

为了验证所提算法在因负荷变化而引起的发电功率指令连续变化情况下的有效性,以 ELN₂ 为例,设置 ELN₂ 通过第一层一致性算法获得的发电功率指令 ΔP_2 由 80 MW 变化至 280 MW,断面 1—4 对应的发电功率指令依次为 80 MW、150 MW、200 MW、280 MW,对每个断面研究一致性算法在能源局域网内功率分配的有效性,结果如图 6 所示。

由图 6(a)可以看出,随着负荷变化而引起的发

图 5 ELN₂ 内一致性收敛过程Fig.5 Consistency convergence process in ELN₂

电功率指令的连续增加,在每个断面,ELN₂ 内所有分布式电源的一致性变量最终均能趋于一致,且随着发电功率指令的增加,ELN₂ 的增量成本也逐渐增加;由图 6(b)、(c)可以看出,在每个断面,每台分布式电源的有功出力均能趋于稳定,ELN₂ 内分布式电源总的发电功率变化量最终与 ELN₂ 的发电功率指令相等,系统有功功率最终都能达到平衡。综上可知, ΔP 连续变化时,所提一致性算法依然能够实现不平衡功率在各分布式电源间的优化分配。

4.4 ELN₂ 中分布式电源发电功率越限时的增量成本一致性仿真

为了验证所提算法在分布式电源发电功率达到极限时的有效性,以 ELN₂ 为例,设置 $\Delta P_2 = 330$ MW,算法的收敛过程如图 7 所示。

由图 7 可以看出,随着算法迭代次数的增加,分布式电源发电功率也随之增加,当迭代至 48 次时 DG₅ 的发电功率达到最大值 80 kW,增量成本也达到最大值,为了维持系统有功功率的平衡,其他分布式电源将承担更多的发电功率扰动。当不考虑发电功率限值时,仿真结果如附录中图 A4 所示,2 种情

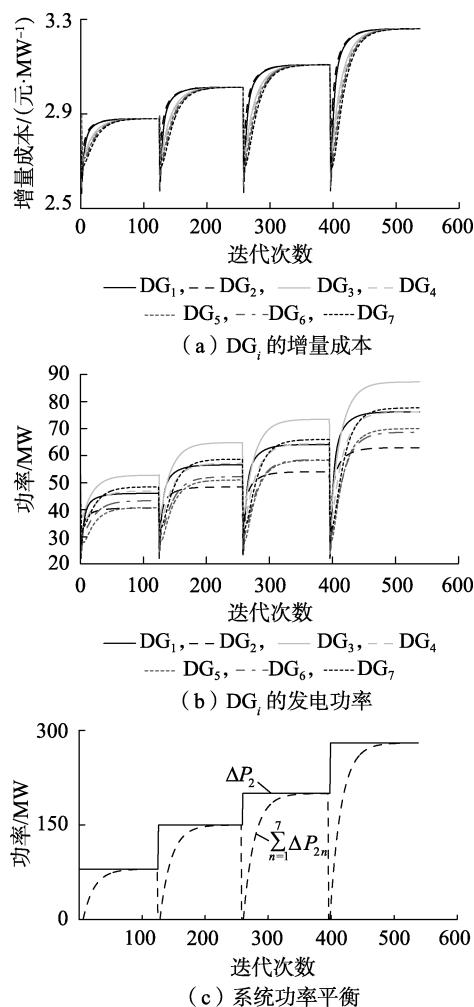
图6 ΔP 连续变化时的一致性收敛过程

Fig.6 Consistency convergence process when ΔP continuously varies

况的对比结果如附录中表 A4 所示,通过对比可以发现,当 DG₅ 的发电功率达到限值后,算法达到收敛时的增量成本和其余分布式电源的发电功率相比,不考虑发电功率约束时的增量成本和其余分布式电源的发电功率均有所增加。图 7(c) 表明系统有功功率最终达到平衡,所提一致性算法的有效性得到证明。

4.5 分布式电源即插即用时的增量成本一致性仿真

能源互联网和能源局域网的运行必须满足分布式电源的即插即用,为了验证所提算法在分布式电源即插即用时的有效性,设置如下情景:ELN₂ 的发电功率指令 $\Delta P_2 = 100$ MW,在算法迭代至 126 次时, DG₈ 接入 ELN₂ 中,接入的位置如附录中图 A5 所示,算法的收敛过程如图 8 所示。

由图 8 可以看出, DG₈ 接入后,其将承担一部分的功率扰动,其余分布式电源的发电功率有所减少,系统增量成本也有所降低。因此,所提一致性算法能够满足系统中分布式电源的即插即用。

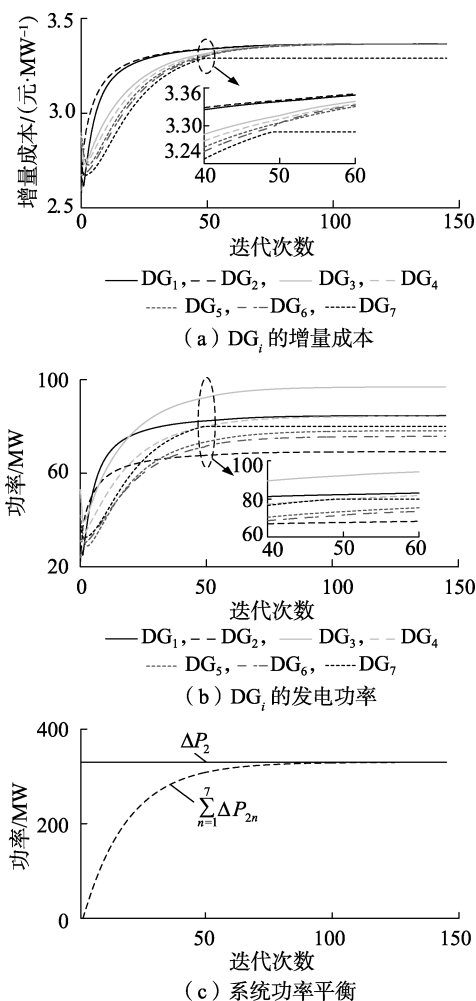
图7 ELN₂ 中分布式电源发电功率越限时的一致性收敛过程

Fig.7 Consistency convergence process when power of DG in ELN₂ is out-of-limit

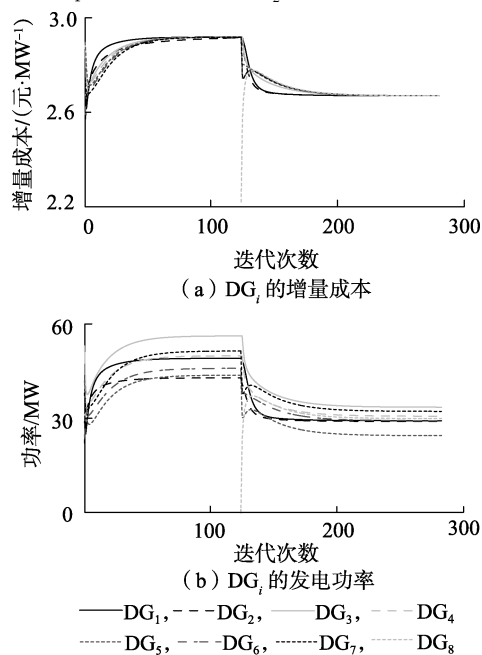


图8 分布式电源即插即用的一致性收敛过程

Fig.8 Consistency convergence process when DG is plug and play

4.6 功率平衡调节因子对算法收敛速度的影响分析

功率平衡调节因子对算法的收敛性和收敛速度有很大的影响,如果功率平衡调节因子选择不当,将会使系统收敛速度减慢,或者引起系统振荡。为了研究功率平衡调节因子对算法收敛性的影响,以 ELN_2 为例,令 $\Delta P_2 = 48.7$ MW,图 9 和表 1 给出了不同功率平衡调节因子 μ_2 时算法的收敛情况。

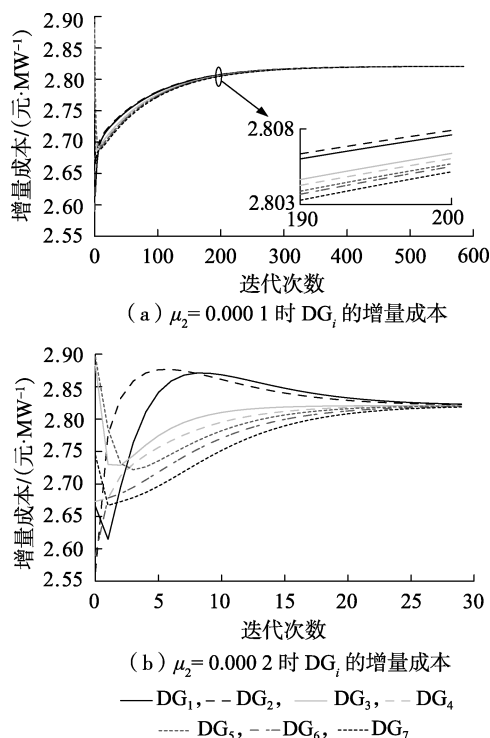


图 9 不同功率平衡调节因子时的一致性收敛过程

Fig.9 Consistency convergence process with different power balance regulatory factors

表 1 不同功率平衡调节因子时算法的收敛速度

Table 1 Convergence rate of algorithm with different power balance regulatory factors

ΔP_2 /MW	收敛步数			
	$\mu_2 = 0.0001$	$\mu_2 = 0.0005$	$\mu_2 = 0.002$	$\mu_2 = 0.02$
48.7	585	117	29	不收敛
150	662	132	32	不收敛
280	711	142	35	不收敛

结合图 5、图 9 和表 1 可以看出,当 μ_2 取较小值时,算法收敛速度慢,但收敛精度好;当 μ_2 取较大值时,算法收敛速度快,但也容易引起系统振荡。因此算法迭代时应选择合适的功率平衡调节因子。

4.7 联络线传输功率约束对算法收敛性的影响分析

联络线传输功率约束对算法的收敛过程也有一定的影响。为了便于分析联络线传输功率约束对算法收敛性的影响,在 4.1 节算例的基础上,仅考虑联络线 L_3 存在功率约束的情况。联络线 L_3 因发生故

障等原因使其存在较小的传输功率约束 $-70 \text{ MW} \leq P_3^L \leq 70 \text{ MW}$,3 个能源局域网内的初始负荷功率和负荷变化如附录中表 A5 所示,则考虑联络线传输功率约束时算法的一致性收敛过程如图 10 所示。

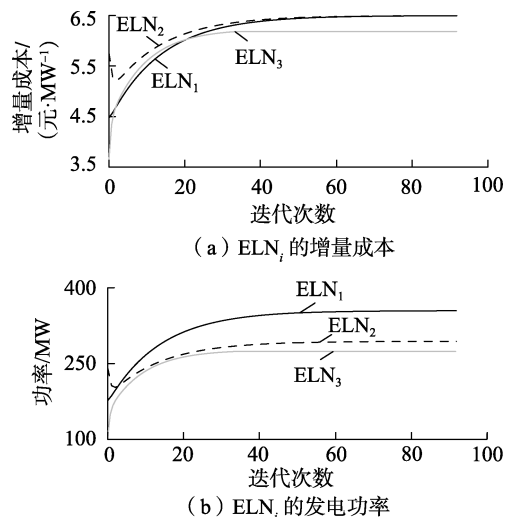


图 10 考虑联络线传输功率约束时的一致性收敛过程

Fig.10 Consistency convergence process considering power limits of tie-line

由图 10 可以看出,由于传输功率约束,联络线 L_3 上将按传输功率限额 -70 MW 流过传输功率, ELN_3 内的发电功率被约束为一个固定值 274 MW ,相比于 4.1 节算例, ELN_3 内的发电功率降低,为了维持系统的稳定运行, ELN_1 、 ELN_2 的发电功率将分别增加 353.5 MW 、 292.4 MW ,联络线 L_1 和 L_2 上的传输功率也有所增加,分别为 -76.5 MW 、 146.6 MW (4.1 节算例中联络线 L_1 和 L_2 上的传输功率分别为 -57.4 MW 、 151.3 MW),系统增量成本有所上升,为 6.51 元/MW 。可见该种情况下联络线功率约束使得系统的增量成本有所上升。

5 结论

本文针对孤岛型能源互联网运行调度的实时功率分配问题,提出一种基于多智能体双层一致性理论的能源互联网实时动态功率分配策略。该方法主要有以下优势:

a. 同时以各能源局域网和能源局域网内各分布式电源的增量成本作为一致性状态变量设计一致性功率分配算法,能使得各能源局域网根据自身情况共同承担能源互联网系统的功率不平衡量,进一步使得各分布式电源共同承担能源局域网的功率不平衡量,从而达到降低成本的目的;

b. 相比于集中调控方式,该分布式调控方式只需要通过本地相邻智能体之间的信息交互,数据通信量减少,并且能够很好地应对能源互联网拓扑结构的变化。

能源互联网是从电力网扩展到更大的能源系统范畴,是从分布式电源扩展到分布式能源,但电力网仍是其核心基础网络设施,分布式电源仍是其核心能源设备。本文是在能源互联网的背景下,仅研究能源互联网中分布式电源间的功率分配,虽然只包括电源,但也可以由此扩展到更多的其他能源形式,有一定的研究意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京:中国电力出版社,2015:119-253.
- [2] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management FREEDM system: the energy internet [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [3] 查亚兵,张涛,黄卓,等. 能源互联网关键技术分析[J]. 中国科学:信息科学,2014,44(6):702-713.
ZHA Yabing, ZHANG Tao, HUANG Zhuo, et al. Analysis of energy internet key technologies[J]. Science China: Information Sciences, 2014, 44(6): 702-713.
- [4] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等. 从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化,2014,38(15):1-11.
DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [5] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光. 能源互联网:理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(19):1-8.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8.
- [6] 马钊,周孝信,盛万兴,等. 能源互联网概念、关键技术及发展模式探索[J]. 电网技术,2015,39(11):3014-3022.
MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHENG Wanxing, et al. Exploring the concept, key technologies and development model of energy internet [J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3014-3022.
- [7] 田世明,栾文鹏,张东霞,等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3482-3494.
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [8] 孙秋野,王冰玉,黄博南,等. 狭义能源互联网优化控制框架及实现[J]. 中国电机工程学报,2015,35(18):4571-4580.
SUN Qiuye, WANG Bingyu, HUANG Bonan, et al. Framework and implementation of optimal control of special energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4571-4580.
- [9] ZHOU X, WANG F, MA Y. An overview on energy internet [C] // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Beijing, China: IEEE, 2015: 126-131.
- [10] CAO J, YANG M. Energy internet: towards smart grid 2.0 [C] // Fourth International Conference on Networking and Distributed Computing. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2014: 105-110.
- [11] 张彦,张涛,刘亚杰,等. 基于随机模型预测控制的能源局域网优化调度研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(13):3451-3462.
ZHANG Yan, ZHANG Tao, LIU Yajie, et al. Stochastic model predictive control for energy management optimization of an energy local network [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3451-3462.
- [12] 宋永华,林今,胡泽春,等. 能源局域网:物理架构、运行模式与市场机制[J]. 中国电机工程学报,2016,36(21):5776-5787.
SONG Yonghua, LIN Jin, HU Zechun, et al. Energy distribution network: infrastructure, operation mode and market mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5776-5787.
- [13] ZHANG Z, CHOW M Y. Incremental cost consensus algorithm in a smart grid environment [C] // Power and Energy Society General Meeting. Detroit, MI, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [14] CHEN G, FENG E. Distributed secondary control and optimal power sharing in microgrids [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2015, 2(3): 304-312.
- [15] LIN C E, VIVIANI G L. Hierarchical economic dispatch for piecewise quadratic cost functions [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1984, PAS-103(6): 1170-1175.
- [16] FAN J Y, ZHANG L. Real-time economic dispatch with line flow and emission constraints using quadratic programming [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2): 320-325.
- [17] KING D J, OEZVEREN C S, WARSONO O. A Genetic Algorithm based Economic Dispatch (GAED) with environmental constraint optimisation [C] // Universities' Power Engineering Conference. Soest, Germany: VDE, 2011: 1-6.
- [18] VICTOIRE T A A, JEYAKUMAR A E. Discussion of "particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints" [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 2121-2122.
- [19] LU X, GUERRERO J M, SUN K, et al. Hierarchical control of parallel AC-DC converter interfaces for hybrid microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 683-692.
- [20] SAVAGHEBI M, JALILIAN A, VASQUEZ J C, et al. Secondary control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 797-807.
- [21] GUERRERO J M, VÁSQUEZ J C, TEODORESCU R. Hierarchical control of droop-controlled DC and AC microgrids - a general approach towards standardization [C] // 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2009. Porto, Portugal: IEEE, 2010: 4305-4310.
- [22] ANAND S, FERNANDES B G, GUERRERO J. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1900-1913.
- [23] 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.
- [24] KAR S, HUG G. Distributed robust economic dispatch in power systems: a consensus + innovations approach [C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: IEEE, 2012: 1-8.
- [25] HUG G, KAR S, WU C. Consensus + innovations approach for distributed multiagent coordination in a microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 6(4): 1893-1903.
- [26] 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.
LÜ Pengpeng, ZHAO Jinquan, LI Duanchao, et al. Real time scheduling consistency collaborative algorithm for islanded microgrid based on information physical system [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2016, 36(6): 1471-1480.

- duling of island microgrid based on information physics system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1471-1480.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] SUN Q, HAN R, ZHANG H, et al. A multiagent-based consensus algorithm for distributed coordinated control of distributed generators in the energy internet[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 3006-3019.
- [30] HUANG B, LI Y, ZHANG H, et al. Distributed optimal co-multi-microgrids energy management for energy internet[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3(4): 357-364.
- [31] 姚莉娜, 杨东海, 段运鑫, 等. 微电网离网运行有功缺额计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 137-144.

YAO Lina, YANG Donghai, DUAN Yunxin, et al. The active power shortage calculation method of island microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 137-144.

作者简介:



米 阳

米 阳(1976—),女,河南南阳人,教授,博士,主要研究方向为微网控制和电力系统稳定控制等(E-mail: miyangmi@163.com);

刘红业(1992—),女,河南郑州人,硕士研究生,主要研究方向为能源互联网协调控制(E-mail: liuhongye1032@163.com);

宋根新(1994—),男,湖南永州人,硕士研究生,主要研究方向为能源互联网协调控制(E-mail: 13657170976@163.com)。

Two-layer power optimization allocation of multi-energy local networks oriented to energy internet

MI Yang, LIU Hongye, SONG Genxin, LI Zhanqiang, FU Yang, LI Zhenkun

(College of Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to solve the problem of real-time power allocation in the operation of multi-energy local networks oriented to energy internet, a real-time dynamic power allocation strategy of multi-energy local networks based on the two-layer consistency theory of multi-agent is proposed. The energy internet is divided into several energy local networks, and the consensus power allocation algorithm is designed by selecting the incremental costs of each energy local network and each distributed generation as the consensus state variables, so that the energy local networks can assume the power imbalance of the energy internet according to their own situation, and further the distributed generations can assume the power imbalance of the energy local networks according to their own situation, which reduces the power generation costs of the system. The algorithm reduces the communication traffic through the information exchange among neighboring agents, and can adapt to the topology changes of the energy internet and energy local networks flexibly. Simulative results verify the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: energy internet; energy local networks; consensus algorithm; incremental cost; real-time dynamic power allocation

附录

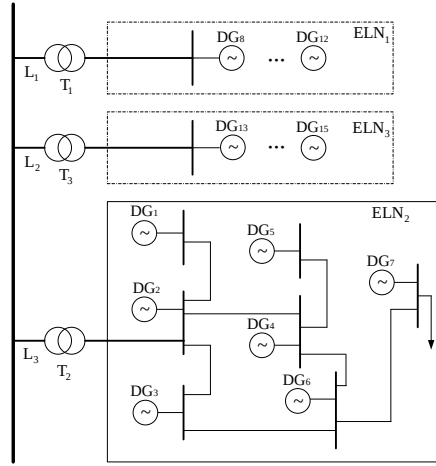


图 A1 能源互联网实际拓扑结构
Fig.A1 Actual topology of energy internet

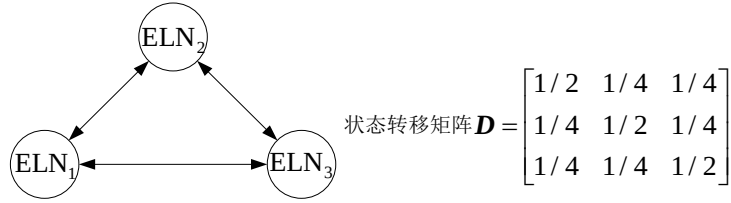


图 A2 能源互联网通信网络图
Fig.A2 Communication network of energy internet

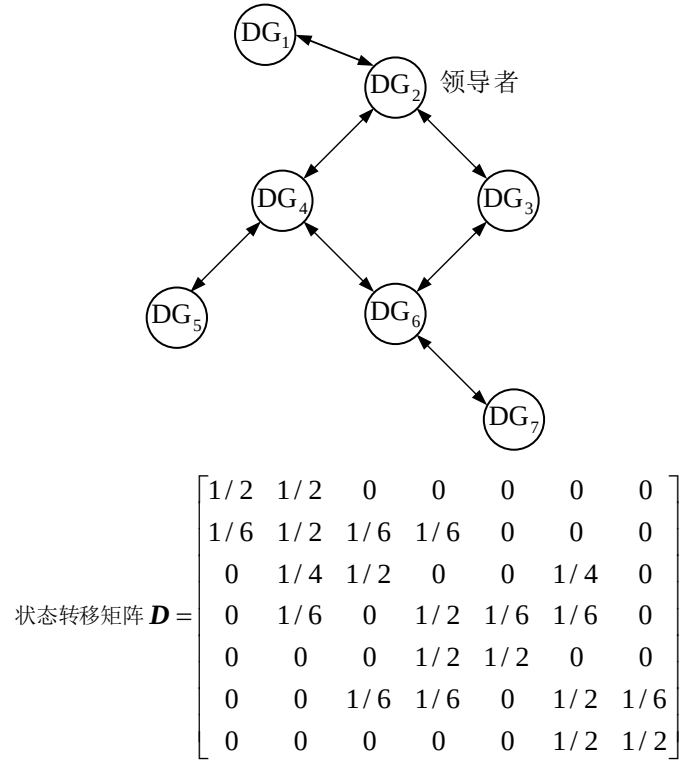


图 A3 ELN₂ 内通信网络图
Fig.A3 Communication network in ELN₂

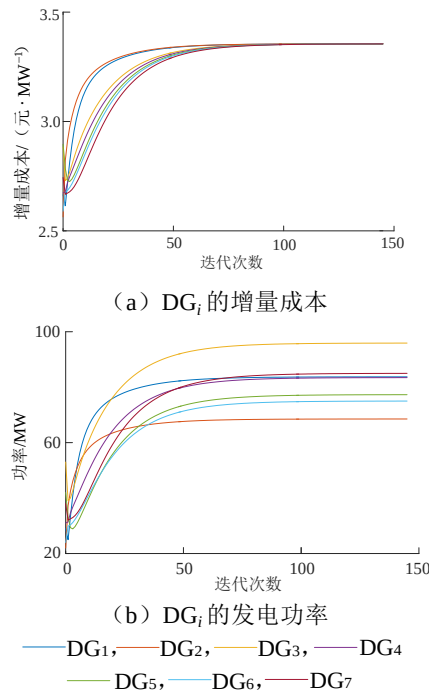


图 A4 不考虑功率限值时的一致性收敛过程
Fig.A4 Consistency convergence process not considering power limits

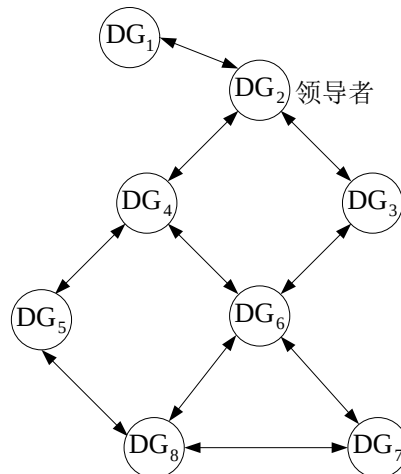


图 A5 DG_8 接入 ELN_2 的通信网络图
Fig.A5 Communication network with DG_8 integrated in ELN_2

表 A1 分布式电源成本系数
Table A1 Cost coefficients of distributed generations

能源局域网	分布式电源	α_{in}	β_{in}	γ_{in}
ELN_2	DG_1	0.0063	2.3	300
	DG_2	0.0085	2.19	210
	DG_3	0.0055	2.3	290
	DG_4	0.0065	2.27	320
	DG_5	0.0065	2.35	280
	DG_6	0.0075	2.23	270
	DG_7	0.0065	2.25	180
ELN_1	DG_8	0.0063	2.3	300
	DG_9	0.0085	2.19	210
	DG_{10}	0.0055	2.3	290
	DG_{11}	0.0065	2.27	320
	DG_{12}	0.0065	2.35	280
ELN_3	DG_{13}	0.0065	2.35	280
	DG_{14}	0.0075	2.23	270
	DG_{15}	0.0065	2.25	180

表 A2 能源局域网成本系数
Table A2 Cost coefficients of ELNs

能源局域网	α_i	β_i	γ_i
ELN ₁	0.0060	2.35	310
ELN ₂	0.0068	2.45	300
ELN ₃	0.0070	2.2	280

表 A3 分布式电源状态参数
Table A3 State parameters of distributed generations

能源局域网	分布式电源	$\Delta P^{\max}/\text{MW}$	$\Delta P^{\min}/\text{MW}$	$P(0)/\text{MW}$
ELN ₂	DG ₁	100	0	29
	DG ₂	100	0	22
	DG ₃	100	0	53
	DG ₄	85	0	31
	DG ₅	100	0	42
	DG ₆	90	0	24
	DG ₇	80	0	38
合计		655	0	239
ELN ₁	DG ₈	100	0	29
	DG ₉	100	0	22
	DG ₁₀	100	0	53
	DG ₁₁	85	0	31
	DG ₁₂	100	0	42
合计		485	0	177
ELN ₃	DG ₁₃	100	0	42
	DG ₁₄	100	0	24
	DG ₁₅	100	0	38
合计		300	0	104

表 A4 考虑和不考虑功率限值时算法收敛结果对比
Table A4 Convergence result comparison between considering and not considering power limit

是否考虑功率限值	$C/(\text{元 MW}^{-1})$	P_1/MW	P_2/MW	P_3/MW	P_4/MW	P_5/MW	P_6/MW	P_7/MW
不考虑	3.355	83.7	68.5	95.9	83.46	77.3	74.99	84.99
考虑	3.366	84.6	69.18	96.9	84.3	78.15	75.73	80

表 A5 能源局域网网内负荷参数
Table A5 Load parameters in ELNs

能源局域网	初始负荷功率/MW	负荷变化量/MW
ELN ₁	177	100
ELN ₂	239	200
ELN ₃	104	100