

基于利用 Aumann-Shapley 值分摊网损和排放减少量的 DLMP 计算研究

陈星莺, 郁清云, 谢俊, 余昆, 甘磊

(河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要:分布式电源(DG)接入配电网后对系统运行带来影响,提出一种含 DG 的配电网节点边际电价(DLMP)计算方法。该方法主要包含 2 个部分:一是通过 Aumann-Shapley 值法计算网损和排放减少分摊量,得到各 DG 的有功和无功 DLMP 值;二是通过迭代计算 DG 的最优发电出力,保证 DG 收益的最大化。算例仿真分析表明:基于 Aumann-Shapley 值分摊的 DLMP 迭代算法不仅能保证网损和排放减少量在各 DG 间的公平分摊,还能克服组合爆炸问题;与传统的 DLMP 计算模型相比,所提出的 DLMP 计算模型能更大幅度地对各 DG 提供电价激励,减少系统网损和排放量,同时还能实现分摊方案的零销售盈余。

关键词:电力市场;配电网节点边际电价;Aumann-Shapley 值;迭代算法;网损和排放减少量分摊

中图分类号:TM 73;F 123.9

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.04.003

0 引言

由于环境污染压力的日益增大及传统电力系统的不足,近年来安全、清洁、灵活的分布式电源 DG (Distributed Generation) 越来越受到人们的关注。传统配电网是放射状结构的无源网络,潮流是单向流动的,DG 并网使传统配电网从单电源放射状网络变为双端甚至多端电源网络,其注入的有功和无功改变了配电网潮流大小及流向,会给配电网电压质量、网损和可靠性带来正面或负面影响^[1-3]。在电力市场环境下,为了维护配电网的安全可靠运行,配电网公司可以通过电价激励的方式对并网的 DG 间接进行管理和控制。

DG 的接入使配电网从传统的无源网络转变为有源网络,配电网特征更加趋向于输电网络,因此一些适用于输电网络的运行策略也能运用于配电网:节点电价法是目前输电网络最为有效的电价机制之一,实际应用中可以采用节点边际电价 LMP (Locational Marginal Price)。某节点处的 LMP 可定义为在该节点处新增单位负荷所产生的系统边际成本^[4]。输电网络中各节点的 LMP 包含边际能量价格、边际损耗价格和边际阻塞价格 3 个部分。与输电网络不同的是,配电线路的线径较小,导致配电网的 R/X 较大,因此电能损耗占较大份额,而由于配电网一般呈辐射状,

其阻塞价格可以忽略不计^[5]。

近年来,国内外对配电网节点边际电价 DLMP (Distribution Locational Marginal Price) 进行了系统的研究:文献[6]首次在配电网中应用 LMP,DG 节点处的 LMP 能反映其对减少网损作出的贡献;文献[7]提出一种根据各 DG 对系统网损的边际贡献来确定其 DLMP 的方法,并引入修正因子实现了零销售盈余,该方法能在一定程度上减少系统网损,但是难以实现公平分摊;文献[8]提出一种基于 Shapley 值法分摊的网损减少量来计算配电网中 DG 节点处 DLMP 的方法,该方法在减少系统网损的同时还能实现零销售盈余,但是随着配电网中 DG 数目的增多,会出现组合爆炸问题,Shapley 值的计算量将大幅增加,因此该方法只适用于 DG 数较少的配电网,且其并未考虑 DG 的环境效益,存在局限性;文献[9]在文献[8]的基础上考虑了环境效益,但是仍未解决伴随 DG 数目增多而产生的组合爆炸问题。

在 DG 接入配电网的多目标优化运行研究中,网损和污染气体排放量是 2 个重要优化目标^[10],为了在 DLMP 中反映各 DG 对减少网损和污染气体排放的贡献,需要将网损和污染气体排放量在 DLMP 计算中进行分摊。近年来,基于合作博弈的分摊理论被广泛应用,为了克服博弈者数目增多出现的组合爆炸问题,本文采用合作博弈中用于处理无限多局中人联盟博弈的方法——Aumann-Shapley 值法(以下简称 A-S 值法)进行分摊。目前,A-S 值法已在输电成本分摊^[11-12]、输电网络网损分摊^[13]、阻塞费用分摊^[14-15]及辅助服务费用分摊^[16]等问题中得到了应用。文献[11]应用电路理论和 A-S 值法将输电费用分摊给发电侧和用电侧共同承担,能保证输电费用的完全回收;文献[12]应用 A-S 值法分摊输电费用,计算简单且具有公平性;文献[13]应用电

收稿日期:2018-10-30;修回日期:2019-01-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0901100);国家自然科学基金资助项目(U1766203);国家电网公司科技项目(城区用户与电网供需友好互动系统)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0901100), the National Natural Science Foundation of China (U1766203) and the Science and Technology Project of SGCC (Friendly Interaction System of Supply-demand between Urban Electric Power Customers and Power Grid)

路理论和 A-S 值法分摊有功和无功网损,考虑反向潮流的特殊情形,并验证了其有效性;文献[15]提出一种基于边际成本和 A-S 值法的阻塞费用分摊方法,能提供经济信号,实现分摊方案零销售盈余。

以 A-S 值法计算的网损和污染排放分摊量为基准,本文提出一种用于计算配电网中 DLMP 值的方法。通过 A-S 值法分摊网损和污染排放减少量可以公平确定各 DG 对减少网损和污染排放所作的贡献,能为其提供积极的经济激励信号;同时,配电网网损和污染排放量的减少能为配电网公司带来额外收益,A-S 值法将这些额外收益完全分摊给各 DG,即实现分摊方案零销售盈余;由于电价的激励作用,各 DG 为了尽可能地增加收益将对其发电出力进行调整,这有利于配电网公司对 DG 的管理和控制;配电网公司可以根据网损和排放量的优先级调整权重因子,有侧重地激励不同类型的 DG 减少网损或排放量。基于 IEEE 33 节点系统和 IEEE 69 节点系统的算例分析验证了本文 DLMP 计算方法的特点和有效性。

1 基于合作博弈理论的分摊方法

DG 并网后配电网网损和排放量减少^[8-9],为了计算 DLMP,首先需要对网损和排放减少量进行分摊,可以将该分摊问题看作是一个合作博弈问题,其求解方法一般是 Shapley 值法及 A-S 值法。

1.1 Shapley 值分摊法

Shapley 值是一种 n 人合作博弈的求解方法,能实现联盟总收益在各成员间的公平、有效分配。基于 Shapley 值法计算配电网中各 DG 的网损/排放减少分摊量的公式如下^[16-17]:

$$\phi_i^k(v) = \sum_{i \in S} \{ W(|S|) [v^k(S) - v^k(S - \{i\})] \} \quad k = 1, e \quad (1)$$

$$W(|S|) = \frac{(n - |S|)! (|S| - 1)!}{n!} \quad (2)$$

其中, ϕ_i^k 为分摊给 DG_i 的网损(1)/排放(e)减少量; S 为包含 DG_i 的联盟, $|S|$ 为联盟 S 中的 DG 数目; n 为参与配电网网损和排放减少量分摊的 DG 总数目; $v^k(S) - v^k(S - \{i\})$ 计算由于 DG_i 加入联盟 S 给联盟 S 带来的收益增加值,即联盟 S 的边际收益。 $n!$ 表示大联盟 DG (包括所有 DG) 所有可能加入次序的排列, Shapley 值只考虑 DG_i 最后一个加入联盟 S 且 DG_i 的加入次序先于联盟 S 之外所有成员的排列, $(|S| - 1)!$ 表示满足 DG_i 最后一个加入联盟 S 的排列数目, $(n - |S|)!$ 表示满足 DG_i 的加入次序先于联盟 S 中其他成员的排列数目, Shapley 值以相同的比例 $1/n!$ 向这些 DG 分摊联盟 S 的边际收益,因此 $W(|S|)$ 代表一个权值,表示 DG_i 应该分到的联盟 S 边际收益的份额。总而言之,对于所有包含成员

DG_i 的联盟, Shapley 值计算成员 DG_i 应该分到的联盟边际收益,再将这些结果相加就得到了成员 DG_i 的收益分摊值^[15,18-19]。

Shapley 值具有边际特性,即 DG_i 对联盟收益的边际贡献是确定其分摊结果的唯一指标,体现了按责任分摊的原则,因此, Shapley 值法所得到的分摊结果被视为公平^[9]。但是,随着配电网中 DG 数目的增多, Shapley 值的计算量也将急剧增加,会出现组合爆炸的问题(当 DG 数目为 M 时, Shapley 值的计算组合量为 $M!$)。

1.2 A-S 值法^[20-21]

A-S 值法是 Shapley 值理论在无限多局中人联盟中的一种延拓,能通过极限化处理和解析方法很好地解决无限多局中人的收益分摊问题。其基本思想是将每个局中人分割为无限多个局中人,然后对每一个无限小局中人采用 Shapley 值法计算其分摊量。A-S 值法的实质是求取各局中人对各合作联盟边际贡献的平均值,因此可忽略各局中人加入联盟的次序对分摊结果的影响,具有经济一致性和平等性,能够实现公平合理的分摊。

表面上看,由于联盟数大幅增加, A-S 值法的计算量将远大于 Shapley 值法,但 A-S 值法对各局中中进行无限分割,因此分摊结果与各局中人加入联盟的次序无关,可以通过解析方法计算分摊量。

假设配电网中 DG_i 在某一时刻的发电出力为 g^* , 则该 DG_i 造成的网损/排放减少量为 $f(g^*)$ 。对 DG_i 出力进行无限分割,若此时 DG_i 出力增加一个无穷小量 Δg_i ($\Delta g_i \rightarrow 0$), 则 Δg_i 对减少网损/排放量的边际贡献为^[11-12]:

$$\frac{f(g^* + \Delta g_i) - f(g^*)}{\Delta g_i} \approx \left. \frac{\partial f(g)}{\partial g_i} \right|_{g=g^*} \quad (3)$$

当 DG_i 的发电出力 g_i 从 0 增加到其最大值时,则可得到 DG_i 的网损/排放减少分摊量为:

$$\psi_i = g_i \int_0^1 \frac{\partial f^k(\lambda g)}{\partial g_i} d\lambda \quad (4)$$

其中, λ 为积分变量; g_i 为 DG_i 的发电出力; $f^k(\lambda g)$ 为在给定 λ 值下配电网的网损/排放减少量。

然而由于配电网网损以及排放量问题的复杂性,难以将网损/排放减少量分摊表达为规范的 Aumann-Shapley 形式。为此本文采用简化 A-S 值法,将 DG_i 进行有限次分割,分别计算每一小部分的 DG_i 最后一个接入系统时给系统带来的网损和排放减少量,求和即可得到 DG_i 的分摊结果。

2 DLMP 的计算模型

2.1 传统 DLMP 计算模型

计算 DLMP 值的传统方法有 2 种:一种是统一

电价法,即所有节点处的 DLMP 均为相同的电价;另一种是边际网损法^[6-7],即节点 i 处的 DLMP 由该节点对网损的边际贡献确定。这 2 种方法均不能实现零销售盈余,为解决该问题,文献[7]在传统边际网损法中引入修正因子 R ,则修正后节点 i 处的有功和无功 DLMP 分别见式(5)和式(6)。

$$(\pi^a)_i = \rho^a \left(1 + R \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P_i} \right) \quad (5)$$

$$(\pi^r)_i = \rho^a \left(R \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q_i} \right) \quad (6)$$

$$R = \frac{P_{\text{loss}}}{\sum_{i=1}^M \left(\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P_i} P_i + \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q_i} Q_i \right)} \quad (7)$$

其中, ρ^a 为统一市场出清价格; P_{loss} 为配电网网损; P_i 和 Q_i 分别为节点 i 处的有功和无功功率。

假设平衡节点处的无功电价为 0, 式(8)表示采用边际网损法时的销售盈余^[22], 结合式(5)~(7)可知此时的销售盈余为 0。

$$M_S = \sum_{i=1}^M [(\pi^a)_i P_i + (\pi^r)_i Q_i] - \rho^a P_0 = 0 \quad (8)$$

其中, P_0 为平衡节点处的注入有功。这种改进边际网损法虽然能实现零销售盈余, 但并不能保证额外收益的公平分摊。

2.2 基于 A-S 值法的 DLMP 计算模型

为了保证 DG 并网后系统的安全稳定运行, 配电网公司需要对 DG 的发电出力进行调控, 为此, 本文引入一种迭代算法, 旨在通过电价激励的方式控制 DG 出力。因此, 本文提出的 DLMP 计算模型主要包含 2 个部分: 一是通过 A-S 值法计算网损和排放减少分摊量, 得到各 DG 的有功和无功 DLMP 值; 二是通过迭代计算 DG 的最优发电出力, 保证 DG 收益的最大化。

下面将对该 DLMP 计算模型的算法流程进行分析。

a. 首先考虑所有 DG 的 DLMP 均为统一市场出清价格(平衡节点处的电价), 即 $(\pi^a)_i = \rho^a$, 获得 DG 的初始运行状态。

b. 根据 DG 的成本函数可以得到各 DG 的有功出力计算公式为:

$$C_{\text{DG}i} = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (9)$$

$$P_i^{j+1} = \frac{(\pi^a)_i^j - b_i}{2a_i} \quad (10)$$

其中, a_i, b_i, c_i 为 DG_i 的成本函数参数; $(\pi^a)_i^j$ 为 DG_i 在第 j 次迭代时得到的 DLMP 值。

c. 由式(11)、(12)分别计算接入 DG 后的配电

网网损和污染排放量。

$$P_{\text{loss}} = \sum_{b=1}^{N_b} R_b |I_b|^2 \quad (11)$$

$$\begin{cases} E = \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} E_{\text{DG}i} + E_{\text{grid}} \\ E_{\text{DG}i} = E_{\text{DG}i}^{\text{CO}_2} + E_{\text{DG}i}^{\text{NO}_x} + E_{\text{DG}i}^{\text{SO}_2} + E_{\text{DG}i}^{\text{CO}} = \sum F_{\text{DG}i}^e P_i \\ E_{\text{grid}} = E_{\text{grid}}^{\text{CO}_2} + E_{\text{grid}}^{\text{NO}_x} + E_{\text{grid}}^{\text{SO}_2} + E_{\text{grid}}^{\text{CO}} = \sum F_{\text{grid}}^e P_{\text{grid}} \end{cases} \quad (12)$$

其中, N_b 为支路数; R_b 和 I_b 分别为支路 b 的电阻和流过支路 b 的电流; N_{DG} 为 DG 总数; $E_{\text{DG}i}$ 和 E_{grid} 分别为 DG_i 和电厂的污染排放量(kg); $E_{\text{DG}i}^{\text{CO}_2}$ 、 $E_{\text{DG}i}^{\text{NO}_x}$ 、 $E_{\text{DG}i}^{\text{SO}_2}$ 和 $E_{\text{DG}i}^{\text{CO}}$ 分别为 DG_i 的二氧化碳、氮氧化物、硫化物和一氧化碳排放量(kg); $E_{\text{grid}}^{\text{CO}_2}$ 、 $E_{\text{grid}}^{\text{NO}_x}$ 、 $E_{\text{grid}}^{\text{SO}_2}$ 和 $E_{\text{grid}}^{\text{CO}}$ 分别为电厂的二氧化碳、氮氧化物、硫化物和一氧化碳排放量(kg); $F_{\text{DG}i}^e$ 和 F_{grid}^e 分别为 DG_i 和电厂的污染排放因子(kg/kW); P_{grid} 为平衡节点处的功率(kW)。

d. 通过 A-S 值法计算各 DG 的网损和排放减少分摊量后, 分别计算 DG 节点的有功和无功 DLMP 修正量, 其中, 有功 DLMP 修正量由网损减少分量和排放减少分量 2 个分量构成。

$$(\Delta \pi^a)_i^j = (\Delta \pi_1^a)_i^j + (\Delta \pi_e^a)_i^j \quad (13)$$

$$(\Delta \pi_1^a)_i^j = \omega_1 \frac{x_i^{1,j} \rho^a}{P_{\text{loss}}^{\text{base}} - P_{\text{loss}}^j}, \quad (\Delta \pi_e^a)_i^j = \omega_2 \frac{x_i^e \rho^a}{E^{\text{base}} - E^j} \quad (14)$$

$$(\Delta \pi^r)_i^j = \frac{x_i^{1,j} \rho^a}{Q_i^j} \quad (15)$$

其中, $(\Delta \pi^a)_i^j$ 和 $(\Delta \pi^r)_i^j$ 分别为 DG_i 在第 j 次迭代时的有功和无功 DLMP 修正量; $(\Delta \pi_1^a)_i^j$ 和 $(\Delta \pi_e^a)_i^j$ 分别为 DG_i 的有功 DLMP 的网损和排放减少修正分量, 对应权重分别为 ω_1 和 ω_2 , 且满足 $\omega_1 + \omega_2 = 1$; $x_i^{1,j}$ 和 x_i^e 分别为 DG_i 在第 j 次迭代时的网损和排放减少分摊量; P_{loss}^j 和 E^j 分别为接入 DG 后第 j 次迭代时的网损和排放量; $P_{\text{loss}}^{\text{base}}$ 和 E^{base} 分别为未接入 DG 时的网损和排放量; Q_i^j 为 DG_i 在第 j 次迭代时的无功出力(kvar)。然后利用式(16)对 DG_i 的原有功和无功 DLMP 值进行修正:

$$\begin{cases} (\pi^a)_i^{j+1} = (\pi^a)_i^j + \rho^a \\ (\pi^r)_i^{j+1} = (\pi^r)_i^j + \rho^r \end{cases} \quad (16)$$

平衡节点处的无功电价不到有功电价的 1%, 可忽略不计, 因此 $\rho^r \approx 0$ 。

e. 判断是否满足式(17)所示终止条件, 若满足, 则迭代结束; 若不满足, 则回到步骤 **b** 重复修正各 DG 的有功和无功 DLMP。

$$\max \{ P_i^{j+1} - P_i^j \} < \varepsilon \quad (17)$$

当满足式(17)时,即使增加 DG_i 的有功出力,也无法减少网损和污染排放量,即失去了电价激励的作用。式(18)表示配电网公司的收益:

$$B^j = \pi^c D - \rho^a (D + P_{\text{loss}}^j) - \sum_{i=1}^{N_{DG}} P_i^j ((\pi^a)_i^j - \rho^a) - \sum_{i=1}^{N_{DG}} Q_i^j ((\pi^r)_i^j - E^j \gamma_e) \quad (18)$$

其中, B^j 为配电网公司获得的收益; π^c 为用户 DLMP; D 为负荷需求; γ_e 为单位污染排放成本(\$/kg)。当采用统一电价法确定各 DG 的有功和无功 DLMP 时,式(18)等号右边第三和第四项均为 0,即:

$$B^{\text{base}} = \pi^c D - \rho^a (D + P_{\text{loss}}^{\text{base}}) - E^{\text{base}} \gamma_e \quad (19)$$

两式相减即可得到配电网公司的额外收益,即销售盈余为:

$$\Delta B^j = B^{\text{base}} - B^j = M_1^j + M_e^j \quad (20)$$

$$M_1^j = \rho^a (P_{\text{loss}}^{\text{base}} - P_{\text{loss}}^j) - \sum_{i=1}^{N_{DG}} Q_i^j ((\pi^r)_i^j - E^j \gamma_e) - \sum_{i=1}^{N_{DG}} P_i^j ((\pi^a)_i^j - \rho^a) \quad (21)$$

$$M_e^j = (E^{\text{base}} - E^j) \gamma_e \quad (22)$$

其中, M_1^j 和 M_e^j 分别为因网损和排放减少给配电网公司带来的额外收益。

图 1 为本文所提出的 DLMP 计算模型流程图。

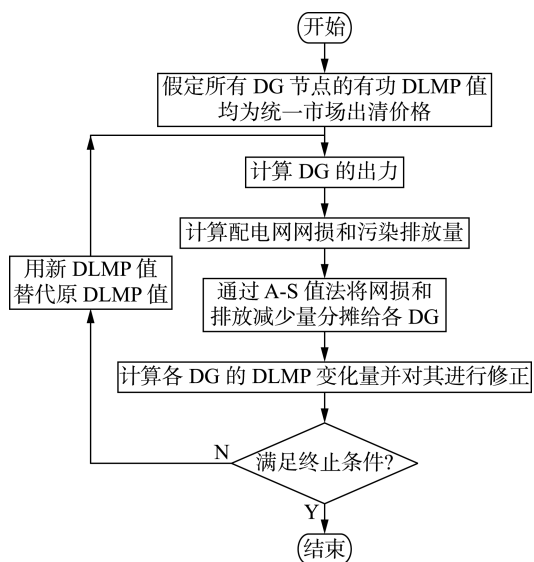


图 1 DLMP 迭代计算模型流程图

Fig.1 Flowchart of DLMP iterative calculation model

3 算例分析

通过修改的 IEEE 33 节点系统和 IEEE 69 节点系统 2 个典型配电网对本文所提出的 DLMP 计算模型进行仿真。通过电价分析及与传统 DLMP 计算结果的对比,验证该模型的可行性和有效性。

3.1 IEEE 33 节点配电系统

选用 IEEE 33 节点配电网络仿真分析简化 A-S 值法的有效性。该配电网络含有 33 个节点和 3 条分支线,分别在节点 8、12 和 23 处接入 DG,其拓扑结构如附录中图 A1 所示。待接入 DG 的排放因子见附录中表 A1,功率因数均为滞后 0.9。未接入 DG 时,该系统的网损和排放量分别为 259.6 kW 和 3 480.4 kg。

本节将分别通过 Shapley 值与 A-S 值法对 IEEE 33 节点系统的网损和排放减少量进行分摊。假设所有 DG 的有功出力均为 500 kW,3 台 DG 可视为 3 个局中人,记为 $N = \{1, 2, 3\}$,全体局中人集合及每一个非空子集都形成一个联盟,各联盟的网损和排放减少量见表 1。

表 1 各联盟的网损和排放减少量

Table 1 Power loss and emission reduction of each alliance

联盟	网损减少量/kW	排放减少量/kg
1	75.23	288.66
2	85.70	197.07
3	30.67	182.81
1&2	132.99	461.30
1&3	101.88	467.99
2&3	112.21	376.27
1&2&3	155.92	637.36

通过 Shapley 值计算 3 台 DG 的网损和排放减少分摊量,结果见表 2。

表 2 Shapley 值和 A-S 值法分摊结果

Table 2 Allocation results of Shapley and A-S methods

机组	A-S 值法		Shapley 值法	
	网损减少量/kW	排放减少量/kg	网损减少量/kW	排放减少量/kg
DG ₁	60.8	276.1	59.4	274.8
DG ₂	68.8	182.3	69.8	183.2
DG ₃	26.3	179.0	26.7	179.4
总和	155.9	637.4	155.9	637.4

当采用 A-S 值法计算分摊量时,由于配电网网损和排放量分摊问题的复杂性,本文采用简化 A-S 值法将 DG_i 进行有限次分割,即将 DG_i 等分为 p 个小部分,然后分别计算每一小部分的 DG_i 最后一个接入系统时给系统带来的网损和排放减少量,求和即可得到 DG_i 的分摊结果。为说明问题,本节以 $p = 10$ 为例,将 DG_i 分割成 10 个部分,由上文可知,此时可忽略 DG_i 加入联盟的次序对分摊结果的影响。表 3 为每一小部分 DG_i 加入联盟时给系统带来的网损减少量,分摊结果见表 2。

对比表 2 中 Shapley 值和简化 A-S 值法的分摊结果可见,简化 A-S 值法所得到的 3 台 DG 的网损和排放减少量与 Shapley 值的分摊结果相比误差很小,因此该简化 A-S 值法的计算结果也符合公平性原则;但是,Shapley 值法的计算量会随着配电网中

表3 A-S 值法计算的网损减少量
Table 3 Reduced power loss of A-S method

步骤	网损减少量/kW		
	DG ₁	DG ₂	DG ₃
1	8.86	10.68	3.47
2	8.18	9.74	3.27
3	7.52	8.84	3.08
4	6.89	7.97	2.89
5	6.29	7.15	2.70
6	5.70	6.36	2.52
7	5.14	5.60	2.34
8	4.59	4.86	2.17
9	4.07	4.16	2.00
10	3.56	3.48	1.83
总和	60.80	68.80	26.30

DG 数目的增多而急剧增加(例如当 DG 数目为 10 时,需要计算的联盟数为 3 628 800),而 A-S 值法引入极限化处理和解析方法,能很好地解决这种组合爆炸问题,计算更为简单。

3.2 IEEE 69 节点配电系统

选用 IEEE 69 节点配电系统来仿真分析本文所提 DLMP 的特点,其拓扑结构如附录中图 A2 所示,网络中含有 3 种类型的 DG,每种类型的 DG 各 4 台,所有 DG 的功率因数均为滞后 0.9;各 DG 的发电容量、成本函数参数及排放因子分别见附录中表 A2 和表 A3。未接入 DG 时,该系统的网损和排放量分别为 570 kW 和 4 920 kg。

由 A-S 值法计算出各 DG 的网损和排放减少分摊量后,通过迭代计算可得到不同市场出清价格下对应不同权重因子时的 DG 有功出力、DG 节点处的 DLMP 值及相应的网损和排放量,结果分别见附录中表 A4 和表 A5。

由附录中表 A4 可知,该系统未接入 DG 时,配电网网损和排放量分别为 570 kW 和 4 920 kg,而在 DG 接入配电网后,网损值和排放量大幅减少;当市场出清价格为 20 \$/MW 时,由于市场价格低于 DG 成本函数参数 b_i 值,因此所有 DG 均停机,网损和排放量保持不变;当市场出清价格为 25 \$/MW 以及 30 \$/MW 时,随着 ω_1 增加,网损减少;随着 ω_2 增加,系统排放量减少,这意味着增加 ω_1 表示配电网公司希望对网损减少有较大贡献的 DG 多出力,同样的,增加 ω_2 表示配电网公司希望对排放减少有较大贡献的 DG 多出力,例如属于类型 1 的 DG₁—DG₄ 的排放因子比其他类型 DG 的排放因子小,因此随着 ω_2 的增大,DG₁—DG₄ 的发电出力增加。

附录中表 A5 为不同市场出清价格下计算得到的各 DG 的有功 DLMP 值。从表中可以看出,当市场出清价格为 20 \$/MW 时,所有的 DG 均停机,对减少网损和排放量并未作出贡献,因此所有 DG 的有功 DLMP 值均等于统一市场出清价格;当市场出清价格大于 DG 成本函数参数 b_i 值时,各 DG 的有

功 DLMP 值是根据其对减少网损和排放量所作出的贡献(即 A-S 值法的分摊结果)来确定的,例如当市场出清价格为 25 \$/MW 时,随着 ω_1 的增加,DG₆ 的有功 DLMP 值也增加,这意味着 DG₆ 对减少网损有更大的贡献;而随着 ω_2 的增加,DG₈ 的有功 DLMP 值增加,这意味着 DG₈ 对减少排放量有更大的贡献。

DG 的接入减少了系统网损和排放量,为配电网系统带来了额外收益。为了验证本文所提出的基于 A-S 值分摊方法的 DLMP 迭代计算模型相比于其他模型的优越性,表 4 给出了 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ 时,分别利用统一电价法、改进边际网损法和 A-S 值分摊法的 DLMP 迭代算法得出的不同市场出清价格下各类型 DG 所获得的收益。显然,本文提出的方法相比于其他 2 种传统方法能显著提高 DG 的总收益,这是因为本文方法引入了合作博弈的概念,能将网损和排放减少量(即额外收益)按责任完全且公平地分摊给各 DG,DG 能获得最大程度的电价补偿(惩罚),而 DG 为获得最大收益,将对其出力进行调整,从而实现配电网公司对 DG 出力的间接管理控制;而在统一电价法下,DG 获得的收益最小,额外收益仍归配电网公司所有,因而存在销售盈余;改进边际网损法虽能实现零销售盈余,但其引入了式(7)所示修正因子 R ,并不能保证额外收益的公平分摊及最大

表4 不同市场出清价格下 3 种电价方法的
DG 收益和网损/排放量

Table 4 DG's benefit and power loss/emission of three pricing methods under different market prices

出清电价/ (\$ · MW ⁻¹)	电价方法	DG 收益/ \$			网损值/ kW	排放量/ kg
		类型 1	类型 2	类型 3		
20	本文方法	0	0	0	570	4 920
	改进边际网损法	0	0	0	570	4 920
	统一电价法	0	0	0	570	4 920
22	本文方法	0.39	1.57	0.40	261	4 321
	改进边际网损法	0.30	1.36	0.31	314	4 491
	统一电价法	0.06	0.27	0.07	445	4 619
24	本文方法	1.45	2.70	1.64	152	3 988
	改进边际网损法	1.31	1.93	1.10	213	4 072
	统一电价法	0.57	1.07	0.59	307	4 237
26	本文方法	3.07	4.57	3.54	87	3 697
	改进边际网损法	2.34	3.19	2.65	139	3 791
	统一电价法	1.58	2.40	1.63	210	3 890
28	本文方法	5.28	7.01	6.14	71	3 440
	改进边际网损法	4.01	5.09	4.33	106	3 521
	统一电价法	3.10	4.27	3.20	148	3 574
30	本文方法	8.06	9.97	9.50	67	3 214
	改进边际网损法	6.48	7.58	6.47	78	3 247
	统一电价法	5.13	6.67	5.29	117	3 283

化 DG 的收益,且出清价格越高,额外收益的分摊越不公平,因而无法提供公平的经济信号。

图2为利用上述3种方法确定各DG节点的DLMP后系统的总网损值。结合表4和图2可知,对接入配电网的DG进行节点电价补偿能减少系统网损和排放量,推动系统经济运行。同时,相比于统一电价法和改进边际网损法,本文方法能按责任将网损和排放减少量分摊给各DG,通过迭代计算的DLMP值能正确反映各DG对网损和排放减少所作出的贡献,能提供正确的经济信号,因而更能激励DG调整其出力,最大化减少网损和排放量以获得最大收益。

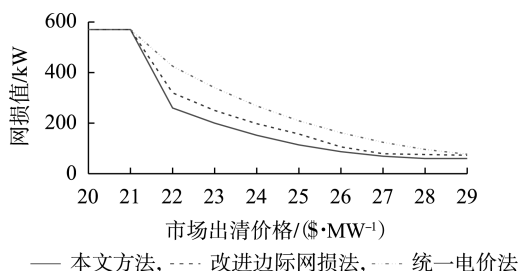


图2 不同市场出清价格下3种电价方法的总网损值

Fig.2 Total power loss of three pricing methods under different market prices

综上所述,相比于改进边际网损法,基于A-S值分摊方法确定的DLMP能为各DG提供更为有效的电价激励,因而能更最大限度地减少系统网损和排放量,提高系统经济运行水平。

4 结论

对于接入DG的配电网,本文提出一种新的DLMP计算模型,该模型主要包含2个过程:一是通过A-S值法分摊网损和排放减少量,二是通过迭代计算DG的最优发电出力和DLMP值。

该DLMP计算模型中引入A-S值分摊方法,克服了Shapley值分摊方法的组合爆炸问题,对于接入较多DG的配电网具有一定的适用性。该DLMP计算模型不仅能同时减少网损和排放量,还能通过电价激励实现配电网公司对DG出力的管理和控制。与传统方法相比,该模型能更限度地对各DG进行电价激励,减少系统网损和排放量。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 栗然,马慧卓,祝晋尧,等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):6-13.
LI Ran, MA Huizhuo, ZHU Jinyao, et al. Multi-objective optimization for DG integration into distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 6-13.

[2] 孙惠娟,刘君,彭春华. 基于分类概率综合多场景分析的分布式电源多目标规划[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):39-45.

SUN Huijuan, LIU Jun, PENG Chunhua. Multi-objective DG planning based on classified probability integration multi-scenario analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 39-45.

[3] 王守相,刘响,张颖. 多DG不确定性建模及其对配电网谐波潮流的影响[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):1-6.
WANG Shouxiang, LIU Xiang, ZHANG Ying. Uncertainty modeling of multiple DGs and their influence on harmonic power flow in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 1-6.

[4] HU Z C, CHENG H Z, YAN Z, et al. An iterative LMP calculation method considering loss distributions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1469-1477.

[5] PENG J C, JIANG H, XU G, et al. Independent marginal losses with application to locational marginal price calculation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2009, 3(7): 679-689.

[6] SOTKIEWICZ P M, VIGNOLO J M. Nodal pricing for distribution networks: efficient pricing for efficiency enhancing DG[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 1013-1014.

[7] SOTKIEWICZ P M, VIGNOLO J M. Towards a cost causation-based tariff for distribution networks with DG[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1051-1060.

[8] SHALOUDEGI K, MADINEHI N, HOSSEINIAN S H, et al. A novel policy for locational marginal price calculation in distribution systems based on loss reduction allocation using game theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 811-820.

[9] FARSANI E A, ABYANEH H A, HOSSEINIAN S H. A novel policy for LMP calculation in distribution networks based on loss and emission reduction allocation using nucleolus theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 143-152.

[10] LIU G Z, YU C W, LI X R, et al. Impacts of emission trading and renewable energy support schemes on electricity market operation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(6): 650-655.

[11] MOLINA Y P, SAAVEDRA O R, AMARIS H. Transmission network cost allocation based on circuit theory and the Aumann-Shapley method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4568-4577.

[12] JUNQUEIRA M, COSTA L C, BARROSO L A, et al. An Aumann-Shapley approach to allocate transmission service cost among network users in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1532-1546.

[13] MOLINA Y P, PRADA R B, SAAVEDRA O R. Complex losses allocation to generators and loads based on circuit theory and Aumann-Shapley method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(4): 1928-1936.

[14] BAKIRTZIS A G. Aumann-Shapley transmission congestion pricing[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(3): 67-69.

[15] 杨洪明,段献忠. 双边交易模式下基于Aumann-Shapley值的阻塞费用分摊方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 59-63.
YANG Hongming, DUAN Xianzhong. A study of the Aumann-Shapley value based allocation method for congestion cost in bilateral transaction environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 59-63.

[16] TAN X, LIE T T. Application of the Shapley value on transmission cost allocation in the competitive power market environment[J]. IEEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(1): 15-20.

[17] STAMTSIS G C, ERLICH I. Use of cooperative game theory in power system fixed-cost allocation[J]. IEEE Proceedings of Generation,

- Transmission and Distribution, 2004, 151(3):401-406.
- [18] ZOLEZZI J M, RUDNICK H. Transmission cost allocation by cooperative games and coalition formation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4):1008-1015.
- [19] 胡朝阳, 甘德强, 韩祯祥, 等. 市场机制下机组启动费用的分摊研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20):1-6.
HU Zhaoyang, GAN Deqiang, HAN Zhenxiang, et al. Study on allocation of unit start-up costs under power market environment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20):1-6.
- [20] 葛炬, 张粒子. 备用服务 A-S 定价方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14):31-35.
GE Ju, ZHANG Lizi. Study of reserve Aumann-Shapley pricing mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14):31-35.
- [21] ZANO R O, NERVES A C. An Aumann-Shapley approach to allocation of bilateral transmission loss cost in a gross-pool energy market using independent marginal losses and transaction loss factors [C]// TENCON 2012 IEEE Region 10 Conference. Cebu, Philippines: IEEE, 2012:1-5.
- [22] CUI Q, WANG X L, WANG X F, et al. Residential appliance direct load control in real-time using cooperative game [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1):226-233.

作者简介:



陈星莺

陈星莺 (1964—), 女, 江苏无锡人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为配用电系统与电力市场、能源管控与能源经济 (E-mail: xychen@hhu.edu.cn);

郁清云 (1995—), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力市场与电力经济 (E-mail: yuqingyun138136@163.com);

谢俊 (1979—), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力系统优化运行与电力市场 (E-mail: jxie@hhu.edu.cn)。

DLMP calculation based on power loss and emission reduction allocation using Aumann-Shapley method

CHEN Xingying, YU Qingyun, XIE Jun, YU Kun, GAN Lei

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Since the integration of DG (Distributed Generation) into distribution network effects the system operation, a DLMP (Distribution Locational Marginal Price) calculation method with DG is proposed, which mainly consists of two parts. In the first part, the allocation amounts of power loss and emission reduction are calculated by Aumann-Shapley method to obtain the active power and reactive power DLMP of each DG. In the second part, the optimal output of DG is iteratively calculated to maximize the DG profit. Case simulation and analysis show that: the proposed method can not only guarantee fair allocation of power loss and emission reduction among each DG, but also conquer the combinational explosion problem; compared with the traditional DLMP calculation model, the proposed model can provide more financial incentives to each DG and reduce system power loss and emission, meanwhile it can also realize zero sales surplus of the allocation scheme.

Key words: electricity market; distribution locational marginal price; Aumann-Shapley method; iterative algorithm; power loss and emission reduction allocation

附录：

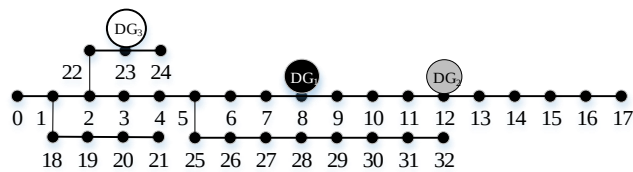


图 A1 IEEE 33 节点系统单线图
Fig.A1 Single-line diagram of IEEE 33-bus system

表 A1 DG 及母线排放因子
Table A1 Emission coefficients of DG and bus

对象	排放因子/(g•kW ⁻¹)			
	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO
DG ₁	430	0.022	0.014	0
DG ₂	626	1.13	1.92	2.52
DG ₃	563	0.029	0.26	0.38
母线	869	5.08	1.5	0.063

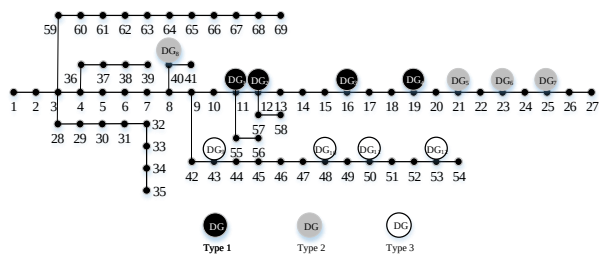


图 A2 IEEE 69 节点系统单线图
Fig.A2 Single-line diagram of IEEE 69-bus system

表 A2 DG 参数
Table A2 DG parameters

类型	机组	有功出力/ kW	DG 成本函数系数		
			$a_i/(\$/\text{MW}^2)$	$b_i/(\$/\text{MW}^1)$	$c_i/\$$
1	DG ₁ —DG ₄	500	15.8	21	0
2	DG ₅ —DG ₈	500	15	20	0
3	DG ₉ —DG ₁₂	500	15.3	21	0

表 A3 DG 及母线排放因子
Table A3 Emission coefficients of DG and bus

对象	排放因子/(g•kW ⁻¹)			
	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO
DG ₁	430	0.022	0.014	0
DG ₂	626	1.13	1.92	2.52
DG ₃	563	0.029	0.26	0.38
母线	869	5.08	1.5	0.063

表 A4 不同市场出清价格下 ω_1 和 ω_2 对 DG 有功出力、网损和排放量的影响

Table A4 Impact of ω_1 and ω_2 on active power of DG, power loss, and emission for different market prices

出清电价/ (\$•MW ⁻¹)	ω_1, ω_2	DG 有功出力/kW												网损值/ (kW•h)	排放量/ kg
		DG ₁	DG ₂	DG ₃	DG ₄	DG ₅	DG ₆	DG ₇	DG ₈	DG ₉	DG ₁₀	DG ₁₁	DG ₁₂		
20	1, 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	570	4920
	0.75, 0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	570	4920
	0.5, 0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	570	4920
	0.25, 0.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	570	4920
	0, 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	570	4920
25	1, 0	149	155	192	198	275	275	275	185	150	203	226	229	110	3848
	0.75, 0.25	151	159	199	205	265	271	264	192	160	210	220	217	112	3843
	0.5, 0.5	152	162	205	210	254	266	254	200	172	217	213	206	114	3838
	0.25, 0.75	154	165	211	216	243	260	243	208	185	224	207	195	116	3833
	0, 1	155	169	217	221	232	253	233	216	200	230	200	185	118	3828
30	1, 0	316	322	360	365	437	435	432	357	323	405	438	438	65	3227
	0.75, 0.25	318	327	368	373	427	432	424	367	338	411	424	418	66	3220
	0.5, 0.5	320	332	376	380	418	429	415	377	355	415	410	399	67	3214
	0.25, 0.75	322	337	384	387	408	425	406	387	373	418	396	380	68	3207
	0, 1	324	342	392	394	398	420	398	398	392	420	382	362	70	3200

表 A5 不同市场价格下 ω_1 和 ω_2 对 DG 的有功 DLMP 的影响Table A5 Impact of ω_1 and ω_2 on active power DLMP of DG for different market prices

出清电价/ (\$•MW ⁻¹)	ω_1, ω_2	DG 的有功 DLMP 值/(\$•MW ⁻¹)												网损/ (kW•h)	排放量/ kg
		DG ₁	DG ₂	DG ₃	DG ₄	DG ₅	DG ₆	DG ₇	DG ₈	DG ₉	DG ₁₀	DG ₁₁	DG ₁₂		
20	1, 0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	570	4920
	0.75, 0.25	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	570	4920
	0.5, 0.5	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	570	4920
	0.25, 0.75	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	570	4920
	0, 1	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	570	4920
25	1, 0	25.7	25.9	27.1	27.3	28.3	28.3	28.3	25.5	25.6	27.2	27.9	28.0	110	3848
	0.75, 0.25	25.8	26.0	27.3	27.5	27.9	28.1	27.9	25.8	25.9	27.4	27.7	27.6	112	3843
	0.5, 0.5	25.8	26.1	27.5	27.7	27.6	28.0	27.6	26.0	26.3	27.7	27.5	27.3	114	3838
	0.25, 0.75	25.9	26.2	27.7	27.8	27.3	27.8	27.3	26.2	26.7	27.9	27.3	27.0	116	3833
	0, 1	25.9	26.3	27.9	28.0	27.0	27.6	27.0	26.4	27.1	28.0	27.1	26.4	118	3828
30	1, 0	31.0	31.1	32.4	32.5	33.1	33.1	33.0	30.7	30.9	33.4	34.4	34.4	65	3227
	0.75, 0.25	31.1	31.3	32.6	32.8	32.8	33.0	32.7	31.0	31.3	33.6	34.0	33.8	66	3220
	0.5, 0.5	31.1	31.5	32.9	33.0	32.5	32.9	32.5	31.3	31.9	33.7	33.6	33.2	67	3214
	0.25, 0.75	31.2	31.7	33.1	33.2	32.2	32.7	32.2	31.6	32.4	33.8	33.1	32.6	68	3207
	0, 1	31.2	31.8	33.4	33.5	32.0	32.6	31.9	31.9	33.0	33.9	32.7	32.1	70	3200