DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.220 **中图分类号**：TM60 **文献标志码**：A

配电网光伏逆变器参与的双层主从博弈谐波交易模型

汪 清[1](中国电源学会会员)，张华赢[1](中国电源学会会员)，李敬毅[2]，汪 颖[2]
(1.南方电网公司新型智慧城市高品质供电联合实验室(深圳供电局有限公司)，深圳 518020；
2.四川大学电气工程学院，成都 610000)

摘要：随着电力电子设备接入配电网，配网谐波问题日益严重，光伏逆变器与有源滤波器拓扑同源，具备可控的谐波治理能力。然而，应用光伏逆变器进行谐波治理涉及到多利益主体，光伏用户定价具有较强自主性，尚缺乏计及谐波治理的交易模式。基于此，首先提出谐波治理聚合商的概念，作为第三方参与谐波治理交易，实现对多光伏用户随机定价行为的统一约束；其次，提出三方参与的双层主从博弈谐波治理交易模型，在上层实现谐波治理聚合商与谐波源用户价格博弈，在下层进行谐波治理聚合商与各光伏用户价格博弈；最后，在IEEE-13节点系统验证所提算法，仿真结果表明，所提模型谐波治理效果明显，各方收益显著，可有效激励三方的参与积极性。

关键词：谐波治理聚合商；谐波交易；主从博弈；光伏逆变器；电能质量

Two-layer Master-slave Game Harmonic Trading Model with PV Inverters Participating in Distribution Networks

WANG Qing[1], *Member, CPSS*, ZHANG Huaying[1], *Member, CPSS*, LI Jingyi[2], WANG Ying[2]
(1. New Smart City High Quality Power Supply Joint Laboratory of China Southern Power Grid Co., Ltd. (Shenzhen Power Supply Co., Ltd.), Shenzhen 518020, China; 2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610000, China)

Abstract: With the access of power electronic equipment to distribution networks, the harmonic problem therein is becoming increasingly serious. Photovoltaic (PV) inverters are topologically homologous with active filters, which have the capability of controllable harmonic management. However, the application of PV inverters for harmonic management involves multiple entities of interest, more independence is granted to PV users in terms of pricing, and there is still a lack of trading models that account for harmonic management. First, the concept of a harmonic management aggregator is proposed, which is involved in harmonic management trading as a third party and thus realizes a unified constraint on the random pricing behaviors of multiple PV user. Second, a two-layer master-slave game harmonic management trading model with the participation of three parties is formulated, in which a price game between the harmonic management aggregator and harmonic source users is realized in the upper layer and a price game between the aggregator and PV users is performed in the lower layer. Finally, the proposed method is verified by an IEEE 13-node system, and simulation results show that the established model has an obvious harmonic management effect and different parties have significant benefits, which can effectively incentivize the three parties to participate in the management.

Keywords: Harmonic management aggregator; harmonic trading; master-slave game; photovoltaic (PV) inverter; power quality

收稿日期：2024-08-28；**修回日期**：2024-09-30；**录用日期**：2024-10-26；**网络首发日期**：2024-11-22

基金项目：南方电网公司科技资助项目(090000KK52222153, SZKJXM20222151)

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. under the grant 090000 KK52222153 and SZKJXM20222151

近年来，随着“双碳”目标的大力推进，以光伏发电单元为代表的各类电力电子设备并网比例快速上升[1-5]，加剧了配电网谐波超标问题。传统谐波治理的典型方式，是在用户侧加装有源滤波器APF(active power filter)等装置，抵消谐波源发射的谐波电流，以降低电压谐波畸变率[6]，然而APF安装和使用经济性较低[7]。有源配电网中大量配置的光伏逆变器与APF拓扑同源，能实现可控的谐波发射，是有源配电网中的新型电能质量治理资源[8-11]。

在硬件研发方面，国网河南省电力公司电力科学研究院成功投运了国内第1套具备电能质量治理功能的光伏设备[12]，解决了光伏逆变器进行电能质量治理的硬件设计、研发相关问题。在运行模式方面，文献[13]提出了1种基于光伏逆变器和储能系统协同运行的谐波治理优化模型，解决了光伏参与谐波治理的运行问题。然而，应用用户的光伏逆变器进行谐波治理，涉及到多参与方的成本分担与利益分配的问题，目前尚缺乏合理的商业模式保障上述技术创新在工程中的应用。

在光伏逆变器参与谐波治理的商业模式中，各光伏逆变器设备发出畸变功率以抵消由谐波源用户发出的谐波污染。光伏用户和谐波源用户分别为服务提供方和享用方，在定价方面存在明显经济利益冲突，针对此类多主体的优化问题，博弈论方法提供了一系列解决方案。现有研究主要集中于电力市场考虑虚拟电厂或负荷聚合商的多主体博弈模型的构建，以及考虑电、碳等多种类型资源交易耦合的电力市场博弈模型构建等方面。在多主体博弈模型构建方面，文献[14]考虑电动汽车群体、电池储能系统和虚拟电厂，提出1种多主体协同的主辅市场联合优化策略；文献[15]提出1种基于古诺模型(Cournot model)的风电商联合参与市场投标策略；文献[16]提出1种多新型市场主体虚拟电厂博弈竞价及效益分配策略；文献[17]提出1种基于合作博弈的共享储能与分布式光伏容量协同规划方法。在考虑多类型资源交易耦合的电力市场博弈模型构建方面，文献[18]建立了多个微网电碳耦合的合作博弈模型；文献[19]构建了多电力生产者和消费者之间的电碳交易博弈模型；文献[20]构建了虚拟电厂参与日前电力现货市场投标的主从博弈模型。上述研究通过博弈优化，均能有效提高各主体的效益，对于处理电力市场各方利益冲突问题具有现实意义。然而，现有电力市场运营模式研究集中于有功功率电力交易，未涉及谐波治理交易方面的研究。同时，多光伏逆变器进入谐波治理交易市场后，对畸变功率定价参差不齐，导致价格信号失真，浪费电力资源，对配电网统一协调谐波电流提出了新的挑战。

因此，本文提出了计及谐波治理聚合商的主从博弈谐波治理交易模式，提高谐波交易市场各利益主体的积极性，解决各参与方的利益冲突问题。首先，提出谐波治理聚合商HA(harmonic management aggregator)的概念，构建了三方参与的谐波治理交易模型，规范畸变功率市场价格。然后，以各方经济效益最大化为目标，以基波潮流、谐波潮流等为约束条件，建立双层主从博弈优化模型。谐波治理聚合商基于谐波源用户的畸变功率需求量制定畸变功率用能策略，对各光伏用户畸变功率供给量进行协调调度，在三方的博弈策略交互的动态过程中实现利益均衡。最后，对本文建立的博弈模型进行求解，仿真结果证明了本文所提计及谐波治理聚合商的主从博弈谐波治理交易模型的正确性和适用性。

1　交易模型设计

本文研究设计了包含光伏用户、谐波治理聚合商和谐波源用户3个主体的综合谐波治理交易模型。谐波治理聚合商作为第三方参与谐波治理，一方面与谐波源用户签订参与谐波治理需求响应合约；另一方面与诸多光伏用户签订代理服务合约，统一光伏用户提供谐波治理畸变功率的价格。

谐波源用户将谐波治理畸变功率需求量上报给谐波治理聚合商，谐波治理聚合商依据畸变功率需求量制定畸变功率用能策略；然后，谐波治理聚合商在供给侧实施畸变功率用能策略，各光伏用户

对畸变功率进行报价。将谐波源用户、谐波治理聚合商和光伏用户作为谐波治理交易的参与者，针对三方的利益博弈行为构建双层主从博弈模型。

本文双层交易框架中，谐波源用户、谐波治理聚合商和光伏用户三者自上而下形成谐波治理交易模式的利益链条。上层关系中，在谐波源用户和谐波治理聚合商两者之间，谐波源用户作为交易的主动方，给出谐波治理畸变功率需求量，作为被动方的谐波治理聚合商制定谐波治理用能策略，即将总畸变功率需求量分配到各光伏用户并依据下层关系中光伏用户报价情况，辅助光伏用户公布谐波治理畸变功率价格，此过程符合主从博弈模型的特点。下层关系中，谐波治理聚合商作为主动方，面向光伏用户实施谐波治理用能策略并公布谐波治理代理服务费，光伏用户随畸变功率需求量的变化，考虑自身有功出力情况，优化自身定价行为，此过程同样符合主从博弈关系。

基于此，本文构建了计及谐波治理聚合商在内的双层主从博弈谐波治理交易模型，在动态博弈过程中达到光伏用户、谐波治理聚合商和谐波源用户的三方利益均衡点，双层博弈模型框架如图 1 所示。

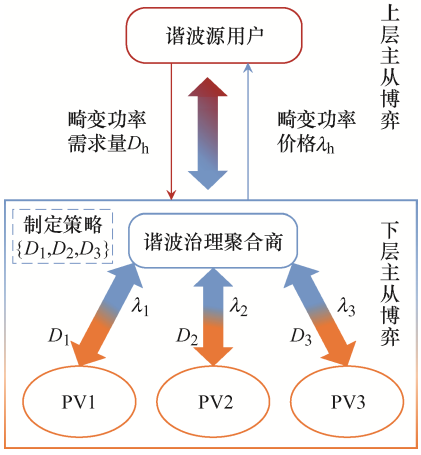


图 1 双层博弈模型框架

Fig. 1 Framework of two-layer game model

2 双层主从博弈谐波交易模型构建

主从博弈参与者分为领导者与跟随者，其过程是动态的，参与者行动有先后之分，跟随者的行为往往依赖于领导者的决策。本文博弈模型包含上层主从博弈模型和下层主从博弈模型 2 个层次。

2.1 上层主从博弈模型

本文将谐波源用户提出谐波治理畸变功率需求量，谐波治理聚合商依据需求量制定谐波治理用能策略并公布谐波治理畸变功率价格的过程，构建为上层主从博弈模型。

在博弈过程中，谐波源用户作为需求方(领导者)，具有先行决定畸变功率需求量的优势；谐波治理聚合商(跟随者)根据畸变功率需求量改变用户侧畸变功率单价并修改供给侧畸变功率用能策略。谐波治理聚合商对畸变功率需求量的响应也会影响谐波源用户的效益，因此谐波源用户与谐波治理聚合商的经济性之间存在冲突。谐波源用户在给出畸变功率需求量时，谐波治理聚合商会根据需求量调整供给侧畸变功率用能响应策略及需求侧畸变功率单价，谐波源用户可以调整畸变功率需求量从而再次引导谐波治理聚合商调整策略。博弈中不断重复该过程，直到达到博弈均衡。

2.1.1 谐波源用户收益模型

由于谐波源用户本身的自主行为意愿，用户主动根据畸变功率价格调整自身用能行为，考虑自身治理需求寻求最优用能量，以此减小成本，获得最优利益。其成本主要包含支付给谐波治理聚合商的用能成本。对于谐波源用户，其效用函数表示为

$$\min\ I_{\mathrm{HS}}=\sum_{t}^{24}\lambda_{\mathrm{h}}D_{\mathrm{h}}(t) \tag{1}$$

式中：λ_{h}为谐波治理聚合商向谐波源用户公布的畸变功率价格，元/kVA；$D_{\mathrm{h}}(t)$为谐波源用户 t 时刻消耗的畸变功率，其计算公式为

$$D_{\mathrm{h}}(t)=\sqrt{U_1^2(t)\sum_{H=2}^{\infty}I_H^2(t)} \tag{2}$$

式中：$U_1(t)$为 t 时刻基波电压有效值；$I_H(t)$为 t 时刻谐波源用户消耗的 H 次谐波电流。

约束条件为成本约束和治理效果约束，谐波源用户通过谐波治理聚合商治理谐波的成本应小于自行购买并安装 APF 进行谐波治理的成本，即

$$dV_{\mathrm{d}}\leqslant V_{\mathrm{APF}} \tag{3}$$

式中：d 为谐波源用户 1 年当中的典型生产日天数；V_{d} 为谐波源用户通过光伏逆变器治理谐波的日成本；V_{APF} 为购置 APF 治理谐波的年成本。

各个节点的电压总谐波畸变率不应超过配电系统允许的电压总谐波畸变率最大值，因此设置谐波约束为

$$\mathrm{THD}_U^i(t) \leqslant \mathrm{THD}_U^{\max} \tag{4}$$

式中：$\mathrm{THD}_U^i(t)$为 t 时刻节点 i 的电压总谐波畸变率；$\mathrm{THD}_U^{\max}$ 为配电网所允许的节点电压总谐波畸变率最大值。

2.1.2　谐波治理聚合商收益模型

本文谐波治理聚合商收益主要包含向谐波源用户售卖畸变功率的售能收益，成本主要包含向各光伏用户支付的购能成本。对于谐波治理聚合商，其效用函数表示为

$$\max\ I_{\mathrm{HA}} = F_{\mathrm{HA}} - C_{\mathrm{HA}} \tag{5}$$

式中，F_{HA} 和 C_{HA} 分别为谐波治理聚合商的售能收益和购能成本。其中，售能收益表示为

$$F_{\mathrm{HA}} = \sum_{t}^{24} \lambda_{\mathrm{h}} D_{\mathrm{h}}(t) \tag{6}$$

谐波治理聚合商的购能成本表示为

$$C_{\mathrm{HA}} = \sum_{i}^{n} \sum_{t}^{24} \lambda_i D_i(t) \tag{7}$$

式中：λ_i 为谐波治理聚合商从光伏用户 i 处购买畸变功率的单价，元/kVA；$D_i(t)$为 t 时刻光伏用户 i 向谐波治理聚合商出售的畸变功率供给量。

约束条件为获利约束，谐波治理聚合商向谐波源用户售能的收益应高于从各光伏用户购能的成本之和。

2.2　下层主从博弈模型

在下层博弈模型中，谐波治理聚合商在供给侧实施畸变功率用能策略，依据上层博弈模型中的总畸变功率需求量向各光伏用户提出各自畸变功率供给量，各光伏用户依据谐波治理聚合商要求的供给量，考虑自身光伏出力水平，公布畸变功率价格。本文将该过程构建为下层主从博弈模型。

对于光伏用户 i，其效用函数表示为

$$\max\ I_{\mathrm{PV},i} = F_{\mathrm{PV},i} \tag{8}$$

式中，$F_{\mathrm{PV},i}$ 为光伏用户 i 向谐波治理聚合商出售畸变功率的收益，可表示为

$$F_{\mathrm{PV},i} = \sum_{t}^{24} \lambda_i D_i(t) \tag{9}$$

光伏逆变器参与配电网谐波治理，向配电网中注入谐波畸变功率，应满足配电网基波潮流约束、谐波潮流约束和电压约束，同时也要满足光伏逆变器功率约束。

2.3　博弈均衡解存在证明

在上层博弈中，谐波治理聚合商作为谐波源用户的跟随者；在下层博弈中，谐波治理聚合商作为光伏用户的领导者。谐波源用户、谐波治理聚合商和光伏用户之间的决策存在先后顺序。主从博弈中的 3 个基本要素分别为参与者 P、策略 S 和效用 U。博弈过程中，谐波源用户的策略为畸变功率需求量 D_{h}，谐波治理聚合商的策略为各光伏用户畸变功率供给量D_i，光伏用户的策略为谐波畸变功率价格 λ_i，三者通过调整策略 S 最大化提升各自的效用 U。

本文采用主从均衡 SE(Stackelberg equilibrium)的形式来表示该双层主从博弈的结果。SE 的表达式为

$$\begin{cases} U_{\mathrm{HS}}(D_{\mathrm{h}}^*, D_i^*, \lambda_i^*) \leqslant U_{\mathrm{HS}}(D_{\mathrm{h}}, D_i^*, \lambda_i^*) \\ U_{\mathrm{HA}}(D_{\mathrm{h}}^*, D_i^*, \lambda_i^*) \geqslant U_{\mathrm{HA}}(D_{\mathrm{h}}^*, D_i, \lambda_i^*) \\ U_{\mathrm{PV},i}(D_{\mathrm{h}}^*, D_i^*, \lambda_i^*) \geqslant U_{\mathrm{PV},i}(D_{\mathrm{h}}^*, D_i^*, \lambda_i) \end{cases} \tag{10}$$

式中：U_{HS}、U_{HA}、$U_{\mathrm{PV},i}$ 分别为谐波源用户、谐波治理聚合商和光伏用户 i 的效用；D_{h}^*、D_i^*、λ_i^*分别表示使三方效用最大化的最优策略。若该双层主从博弈结果满足式(10)，则本文所构建的计及谐波治理聚合商的双层主从博弈的均衡可表示为(D_{h}^*, D_i^*, λ_i^*)。在所有参与者的策略均为主从均衡策略的情况下，任何个体均无法通过单方面改变自身的策略来增加自身收益。假设存在以唯一的策略组合(D_{h}^*, D_i^*, λ_i^*)为模型的 SE，且设定谐波源用户、谐波治理聚合商和光伏用户均采用纯策略进行决策，则可以通过文献[21]提出的方法对本文所提双层博弈优化模型均衡解进行证明，从而确立主从均衡的存在性。

3 算例分析

3.1 算例设置

本文选取 IEEE-13 节点系统作为算例，系统参数和负载参考文献[22]，系统网络拓扑图如图 2 所示。通过 MATLAB 和 OpenDSS 软件进行联合仿真计算，采用改进的粒子群算法求解。系统电压基准值为 4.16 kV，系统的节点电压总谐波畸变率限值为 5%。仿真设置 1 个谐波源用户和 3 个光伏用户，选择节点 633 为谐波源节点，节点 646、684 和 675 为 PV 节点。3 个光伏用户额定容量均设置为 500 kW，谐波源用户负荷为 155+j110 kVA。在 OpenDSS 软件中对谐波源用户的谐波频谱进行设置，谐波源节点的谐波电流曲线及电压总谐波畸变率分别如图 3 和图 4 所示。

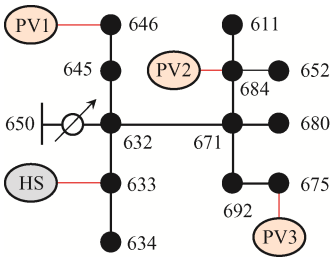


图 2 IEEE-13 节点系统网络拓扑

Fig. 2 Network topology of IEEE 13-node system

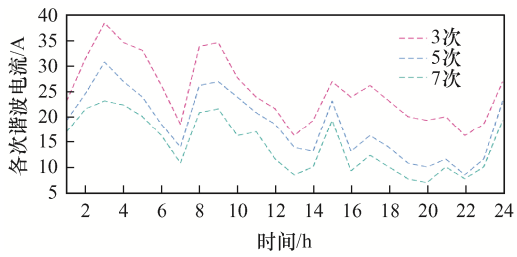


图 3 谐波源节点 3、5、7 次谐波电流曲线

Fig. 3 3rd, 5th and 7th harmonic current curves for harmonic source node

由图 3 可见，3 次谐波电流含量最高，7 次谐波含量最低，在 24 h 中 03:00 和 09:00 时刻谐波电流总含量较高。由图 4 可见：谐波源节点电压总谐波畸变率在 03:00 和 09:00 时刻超过了 5%的限值，需要进行谐波治理；在其余时刻谐波电流含量较低，处于允许范围内。

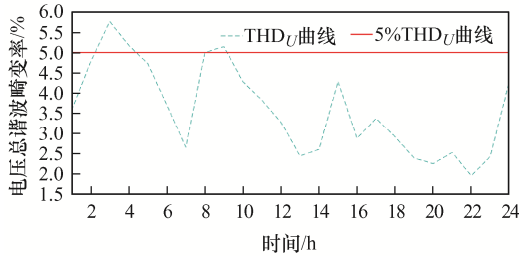


图 4 谐波源节点电压总谐波畸变率曲线

Fig. 4 Voltage THD curve for harmonic source node

3.2 方案设置与结果分析

本文根据需求设置 3 种方案进行对比分析。方案 1 不考虑谐波治理聚合商参与谐波治理交易市场；方案 2 考虑谐波治理聚合商作为第三方参与谐波治理交易市场，对光伏用户定价进行统筹约束；方案 3 计及谐波治理聚合商参与谐波治理交易市场的同时，考虑各主体间的通信延迟，说明本文方法的通用性和适用性。3 种方案基本设置见表 1。

表 1 方案设置

Tab. 1 Settings in schemes

方案	HA 是否参与谐波治理	HS 节点	PV1 节点	PV2 节点	PV3 节点
方案 1	否	633	646	684	675
方案 2	是	633	646	684	675
方案 3	是	633	646	684	675

3.2.1 方案 1

当模型不考虑谐波治理聚合商参与谐波治理交易时，谐波源用户仅与各光伏用户进行谐波治理交易，各光伏用户之间的能源定价和出力具有较大差异，博弈后的各光伏用户畸变功率定价和出力结果见表 2。

表 2 方案 1 博弈结果

Tab. 2 Game results in Scheme 1

时间	光伏用户	畸变功率单价/元	畸变功率出力/kVA
03:00	PV1	0.221	36.43
	PV2	0.129	17.08
	PV3	0.131	9.23
09:00	PV1	0.207	18.14
	PV2	0.116	10.64
	PV3	0.124	4.23

由表 2 可知，在方案 1 中，谐波源用户通过与 3 个光伏用户进行谐波治理交易博弈，PV1、PV2、

PV3 售卖谐波畸变功率收益分别为 11.806、3.438、1.734 元，谐波源用户从各光伏用户处购买谐波畸变功率的谐波治理日成本为 16.978 元，假定谐波源用户每年有 150 个典型生产日，则谐波治理年成本为 2 546.7 元。

分析数据可知，各光伏用户之间的出力和定价皆有较大差异，光伏用户距离谐波源用户越近，输出畸变功率越高，PV1 距离谐波源用户最近，输出畸变功率最高为 36.43 kVA。畸变功率单价最大值与最小值之间相差 0.09 元，3 个光伏用户的畸变功率单价之间相差较大，表明了各光伏用户之间定价信息共享和协调机制存在短板。

3.2.2　方案 2

当考虑谐波治理聚合商作为独立的第三方参与谐波治理交易市场中时，通过市场分析与优化策略，对各光伏用户的畸变功率定价施加合理的约束力，实现价格的统一管理和优化调整。谐波源用户从谐波治理聚合商处购买谐波畸变功率进行谐波治理，其博弈结果见表 3。

表 3　方案 2 博弈结果

Tab. 3 Game results in Scheme 2

时间	光伏用户	畸变功率单价/元	畸变功率/kVA
03:00	PV1	0.166	46.16
	PV2	0.138	28.51
	PV3	0.163	10.37
09:00	PV1	0.143	37.54
	PV2	0.182	17.67
	PV3	0.137	5.10

由表 3 可知，当考虑谐波治理聚合商时，3 个光伏用户之间对谐波畸变功率的定价行为受到约束，03:00 和 09:00 的畸变功率定价差值最大仅为 0.045 元。PV1、PV2、PV3 售卖谐波畸变功率日收益分别为 13.031、7.150、2.389 元，与方案 1 相比，收益明显提高。谐波治理聚合商的畸变功率购买成本为 22.57 元。

谐波治理聚合商与谐波源用户的博弈结果见表 4，谐波治理聚合商的收益为 24.388 元，大于其从光伏用户购买畸变功率的总成本，保证了谐波治理聚合商能有所收益。

表 4　方案 2 谐波治理聚合商与谐波源用户博弈结果

Tab. 4 Results of game between harmonic management aggregator and harmonic source users in Scheme 2

时间	畸变功率单价/元	畸变功率/kVA
03:00	0.469	30.69
09:00	0.418	23.91

3.2.3　方案 3

设置谐波治理聚合商参与谐波治理交易市场，并考虑光伏用户与谐波治理聚合商之间存在通信延迟，方案 3 仿真中设置 PV2 在 03:00 时刻和 PV3 在 09:00 时刻的畸变功率定价和畸变功率被抹去，方案 3 博弈结果、谐波治理聚合商与谐波源用户博弈结果分别见表 5 和表 6。

表 5　方案 3 博弈结果

Tab. 5 Game results in Scheme 3

时间	光伏用户	畸变功率单价/元	畸变功率/kVA
03:00	PV1	0.153	50.23
	PV2	—	—
	PV3	0.159	13.41
09:00	PV1	0.139	39.17
	PV2	0.178	18.52
	PV3	—	—

表 6　方案 3 谐波治理聚合商与谐波源用户博弈结果

Tab. 6 Results of game between harmonic management aggregator and harmonic source users in Scheme 3

时间	畸变功率单价/元	畸变功率/kVA
03:00	0.469	29.86
09:00	0.418	22.87

由表 5 和表 6 可知，谐波治理聚合商 03:00 和 09:00 时刻向谐波源用户售卖畸变功率的总收入分别为 14.004 和 9.559 元，而从光伏用户购买畸变功率的成本分别为 9.817 和 8.741 元。当存在通信延迟导致某一时刻某一光伏用户被迫退出博弈时，本文所提方法仍能保证谐波治理聚合商有利可图，证明了该方法的适用性和通用性。

对比 3 种方案结果可知，当考虑谐波治理聚合商作为第三方参与谐波治理交易市场时，各光伏用户对谐波畸变功率的定价和出力均有所改变，得出如下结论：①各光伏用户的定价行为不再是自由

的，而受到谐波治理聚合商的定价约束；②各光伏用户输出畸变功率增大，表明各光伏用户参与谐波治理的意愿有所提高；③当谐波治理聚合商参与谐波治理交易市场时，谐波源用户的谐波治理成本也有所提高，但仍然远低于其购买 APF 用于谐波治理的成本；④当存在通信延迟时，本文所提方法对谐波治理交易仍然有效。

4 结语

为了限制和约束光伏逆变器参与谐波治理交易市场的定价和出力行为，统一谐波畸变功率供给侧价格，管理谐波治理交易市场，本文提出了谐波治理聚合商的概念，建立了计及谐波治理聚合商的双层主从博弈优化模型，最后通过优化后的粒子群算法对目标函数进行求解。仿真结果验证了本文所提博弈模型的可行性，约束了各光伏逆变器的谐波畸变功率价格，提高了光伏逆变器参与谐波治理交易的积极性。在下一步工作中，需要进一步考虑以季度或年为单位的长期交易机制，提高该谐波治理交易模式的长久性。

参考文献：

[1] 梁志峰, 康重庆, 隋凌峰, 等. 含高比例分布式光伏的主配网运行风险评估与防控策略研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2024, 64(11): 1964-1978.
Liang Zhifeng, Kang Chongqing, Sui Lingfeng, et al. Research on risk warning and prevention strategies for main distribution networks with high proportion distributed photovoltaics [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2024, 64(11): 1964-1978. (in Chinese)

[2] 李圣清，江宇，罗朝旭. 基于多谐振前馈与电流估计的光伏并网逆变器控制策略研究[J]. 电源学报，2023, 21(4): 67-73.
Li Shengqing, Jiang Yu, Luo Zhaoxu. Research on photovoltaic grid-connected inverter control strategy based on multi-resonance feed-forward and current estimation [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 67-73. (in Chinese)

[3] 陈璐，张溪，党晓圆，等. 采用新型模型预测的光伏虚拟同步机低电压穿越控制[J]. 电源学报，2024, 22(4): 163-172.
Chen Lu, Zhang Xi, Dang Xiaoyuan, et al. Low-voltage ride-through control of photovoltaic virtual synchronous generator using novel model prediction [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 163-172. (in Chinese)

[4] 吴俊勇. 含高比例分布式光伏配电网的规划与优化运行[J]. 供用电, 2024, 41(6): 1-2.
Wu Junyong. Planning and optimal operation of distributed photovoltaic distribution network with high proportion [J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(6): 1-2. (in Chinese)

[5] 王宇飞，吕晓宁，时海，等. 基于 EGAT 的高比例分布式光伏配电网的脆弱性辨识[J/OL]. 电源学报，1-13. (2024-06-19)[2024-08-28]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240618.1728.002.html.
Wang Yufei, Lü Xiaoning, Shi Hai, et al. Vulnerability identification of high proportion distributed photovoltaic power distribution network based on EGAT [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-13. (2024-06-19)[2024-08-28]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM. 20240618.1728.002.html. (in Chinese)

[6] 亚志政. 有源电力滤波器控制方法研究现状[J]. 天津科技, 2021, 48(7): 87-89.
Ya Zhizheng. Research status of control methods for active power filter [J]. Tianjin Science & Technology, 2021, 48(7): 87-89. (in Chinese)

[7] 黎燕，罗安. 大功率低成本新型混合型有源滤波器设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 94-98.
Li Yan, Luo An. A new type of hybrid active power filter with high capacity and low cost [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 94-98. (in Chinese)

[8] Devassy S, Singh B. Implementation of solar photovoltaic system with universal active filtering capability [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3926-3934.

[9] Wang Jian, Mu Shuai, Zhou Qian, et al. Design and performance analysis of PV-SMES-based microgrid integrated with power fluctuation suppression and active filter-

ing control [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 5402705.

[10] Mastromauro R A, Liserre M, Kerekes T, et al. A single-phase voltage-controlled grid-connected photovoltaic system with power quality conditioner functionality [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4436-4444.

[11] Liang Xiaodong, Andalib-Bin-Karim C. Harmonics and mitigation techniques through advanced control in grid-connected renewable energy sources: A review [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3100-3111.

[12] 王毅，王雨辰. 国内首套！兼具电能质量治理功能的光伏并网逆变器投运[N]. 河南日报, 2024-07-21(04).

[13] Wang Ying, Wang Xinru, Li Shunyi, et al. Optimization model for harmonic mitigation based on PV-ESS collaboration in small distribution systems [J]. Applied Energy, 2024, 356: 122410.

[14] Hong N N, Minh Q D, Minh P V. Two-stage optimal scheduling of virtual power plant with wind-photovoltaic-storage-electric vehicles in the day-ahead market [C]// 2023 Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering (EEE-AM). Hanoi, Vietnam, 2023: 1-6.

[15] Sharma K C, Bhakar R, Padhy N P. Stochastic Cournot model for wind power trading in electricity markets [C]// 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. National Harbor, MD, USA, 2014: 1-5.

[16] Fan Xuanxuan, Zhang L, Sun Hui, et al. The day-ahead bidding strategy of virtual power plant for participating in electric energy market and peak regulation market [C]// 2022 4th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). Chengdu, China, 2022: 242-247.

[17] 王再闯，陈来军，李笑竹，等. 基于合作博弈的产销者社区分布式光伏与共享储能容量优化[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 5922-5932.
Wang Zaichaung, Chen Laijun, Li Xiaozhu, et al. Capacity optimization of distributed PV and shared energy storage of prosumer community based on cooperative game [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 5922-5932. (in Chinese)

[18] 董雷，李扬，陈盛，等. 考虑多重不确定性与电碳耦合交易的多微网合作博弈优化调度[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2635-2651.
Dong Lei, Li Yang, Chen Sheng, et al. Multi-microgrid cooperative game optimization scheduling considering multiple uncertainties and coupled electricity-carbon transactions [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2635-2651. (in Chinese)

[19] Chang Yadi, Zhang Shengnan, Song Li, et al. Coordination mechanism of electricity market and carbon market [C]// 2022 2nd International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS). Nanjing, China, 2022: 500-503.

[20] Zhang Tao, Li Yihong, Yan Renwu, et al. A master-slave game optimization model for electric power companies considering virtual power plant [J]. IEEE Access, 2022, 10: 21812-21820.

[21] 刘宇明，仰文林，赵选宗，等. 基于主从博弈理论的综合能源系统优化运行方法[J]. 可再生能源, 2021, 39(1): 123-129.
Liu Yuming, Yang Wenlin, Zhao Xuanzong, et al. Optimal operation method of comprehensive energy system based on master-slave game theory [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(1): 123-129. (in Chinese)

[22] IEEE Distribution System Subcommittee. IEEE 13 Node Test Feeder Report [R]. 2001.



汪清

作者简介：

汪清(1987—　)，女，中国电源学会会员，硕士，高级工程师。研究方向：电能质量监测。E-mail：csgwang@126.com。

张华赢(1981—　)，男，中国电源学会会员，硕士，教授级高级工程师。研究方向：电能质量监测与治理技术。E-mail：zhyszpower@163.com。

李敬毅(2000—　)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：电能质量。E-mail：2649587317@qq.com。

汪颖(1981—　)，女，博士，教授。研究方向：电能质量。E-mail：769429505@qq.com。

(责任编辑：耿越)