

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230284

考虑电能质量的配电网增值服务双层优化模型

钟浩^{1,2}, 舒栋^{1,2}, 张磊^{1,2}, 夏鑫^{1,2}, 董雪薇^{1,2}, 吴凡^{1,2}

(1. 三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 大规模分布式光伏接入使得配电网谐波污染严重, 而谐波治理效果与网络拓扑结构相关, 存在其他就近节点“搭便车”的现象。为改善用户的用电效率和提升配电网的经济效益, 提出一种考虑电能质量的配电网增值服务双层优化模型。首先, 采用支持向量机算法预测谐波源不同出力情况下负荷节点的谐波电压畸变率。然后, 建立了配电网与需求用户的购售电双层优化模型。上层以配电网运营商作为主体, 考虑网络拓扑结构对电能质量治理效果和成本的影响, 以配电网运营商收益最大为目标, 建立谐波电压治理模型, 制定不同电能质量等级的电价。下层以对电能质量有需求用户作为主体, 根据不同电能质量等级的电价, 用户以运行成本最小为目标, 建立电能质量选购策略模型。最后采用 IEEE14 节点算例进行分析验证, 结果表明所提模型能够更有针对性地提升电能质量, 提高配电网的经济收益, 并为用户的差异化用电提供了解决方案。

关键词: 电能质量; 配电网; 增值服务; 双层优化

A two-layer optimization model of value-added service in a distribution network considering power quality

ZHONG Hao^{1,2}, SHU Dong^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2}, XIA Xin^{1,2}, DONG Xuewei^{1,2}, WU Fan^{1,2}

(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydro-power Station, China Three

Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The access of large-scale distributed photovoltaic energy seriously increases the harmonic pollution of distribution networks. The effect of harmonic control is related to the network topology and other nearby nodes "hitchhike" phenomena exist. To improve the consumption efficiency of users and enhance the economic benefits of the distribution network, a two-layer optimization model of value-added service considering power quality is proposed. First, the support vector machine algorithm is used to predict the harmonic voltage distortion rate of load nodes in different output conditions of harmonic sources. Then, a two-layer optimization model of purchasing and selling electricity between the distribution network and demand users is established. The upper layer, which considers the influence of the network topology structure on the power quality governance effect and cost, takes the maximum of distribution network operator profit as the target. It takes the distribution network operator as the main body, builds the harmonic voltage control model and establishes the electricity price for different power quality levels. The lower layer, which is based on the price of a different power quality, takes the users aim to minimize the operational cost as the target. It takes the users with differentiated power quality requirements as the main body and establishes the power quality purchasing strategy model. Finally, this paper uses the IEEE14-node example analysis for verification, and the results show that the proposed model can improve the power quality and the economic benefits of the distribution network, as well as providing a solution for the differentiated consumption of users.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52007103).

Key words: power quality; distribution network; value-added service; two-layer optimization

0 引言

在我国提出以“碳达峰、碳中和”为目标的大

背景下, 以光伏为代表的清洁能源上网比例快速上升^[1-3]。大量电力电子设备的接入使得配电网谐波电压畸变率等电能质量问题愈发严重^[4-5]。配电网的电能质量不仅影响电网的安全、稳定与经济运行, 而且直接影响着用户侧用电设备的正常工作, 一些需要高精密设备装置的行业如医疗、半导体制造等,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52007103); 湖北省自然科学基金联合基金项目资助(2022CFD167)

它们对电能质量问题极其敏感,微小的电压扰动会造成巨额的经济损失,这使得用户对电能质量提出了更高的要求。

以往对谐波治理的研究是在负荷侧安装有源滤波器(active power filters, APF),通过检测谐波源所在馈线的谐波电流,并控制 APF 注入与之大小相反的谐波电流,从而抑制谐波电压畸变率^[6-10]。而电力电子化配电网中微谐波源数量多且分布范围广,对微谐波源进行点对点的治理时成本较高,经济性较低。基于此,有学者提出以电压检测型 APF(voltage detection APF, VDAPF)对电力系统的谐波进行综合治理^[11-13]。文献[14]通过谐波治理灵敏度确定谐波治理的参考接入点,分析治理强度与谐波电压相关的 VDAPF 本地运行特性来实现谐波在线实时控制。在此基础上,文献[15]研究了 VDAPF 的运行机理以及系统控制参数对谐波治理稳定性的影响,文献[16]考虑了谐波和电压偏差综合治理,提出了相应的优化配置方案。文献[17]通过互插值寻优算法提取网络中电能质量的重要特征,采用灰色关联理论确定电能质量分区的主导节点,进而通过分区控制实现电能质量的全局治理。文献[18]考虑了多个有源电力滤波器的耦合性和传递性,运用粒子群算法优化治理设备的实际输出来达到对区域谐波污染的最优治理。上述研究为电网谐波治理提供了有效的途径,为实施优质电能的供给奠定了基础。但这种垂直一体化的治理并没有考虑用户的需求,未计及售电企业和电能质量需求用户(本文简称需求用户)之间的互动,导致用户没有选择权,只能被迫接受这种模式下的供电方式。

在电力市场环境下,电能作为商品,其价值不仅仅与电量有关而且与质量也相关。目前国内外学者将电能质量引入电力市场并针对其交易策略进行了研究。文献[19]将电能质量引入到电力市场,建立多主体购售电双层博弈模型,帮助售电方和用户在双边市场中制定按质定价策略。文献[20]引入最高不合格率和最高违约次数两个指标对电能质量进行约束,并将基本电价和电能质量电价进行分离,促进了电力市场环境下不同质量等级电能供应的实现。文献[21]以微电网利益最大化为目标,构建考虑电能质量保险的定价模型。文献[22]计及治理成本和治理回收率,构建售电企业和集群用户之间的购售电主从博弈模型。然而,上述研究虽然建立了电能质量按质定价的模型,充分体现了购售电双方之间的互动,但是未考虑网络拓扑对电能质量治理效果和治理成本的影响,谐波治理效果与网络拓扑结构相关,治理点离 APF 距离越远,需要投入的容

量越大,治理成本也就越高,且存在其他就近节点“搭便车”的现象,影响需求用户选购优质电能的积极性。

基于此,本文结合实际网络拓扑结构,考虑配电网运营商与用户之间的互动,提出一种考虑电能质量的配电网增值服务双层优化模型。首先,运用支持向量机算法预测谐波源不同出力情况下需求用户节点的谐波电压畸变率;然后,建立配电网与需求用户的购售电双层优化模型,上层以配电网运营商作为主体,考虑网络拓扑结构对电能质量治理效果和成本的影响,以配电网运营商收益最大为目标,建立谐波电压治理模型,并制定不同电能质量等级的电价;下层以差异化电能质量需求用户作为主体,根据不同电能质量的电价,用户以运行成本最小化为目标,建立电能质量选购策略模型。最后,以 IEEE14 节点为仿真对象对所建立的模型进行算例分析与验证。

1 双层模型框架设计

考虑电能质量的配电网增值服务双层优化模型框架如图 1 所示。

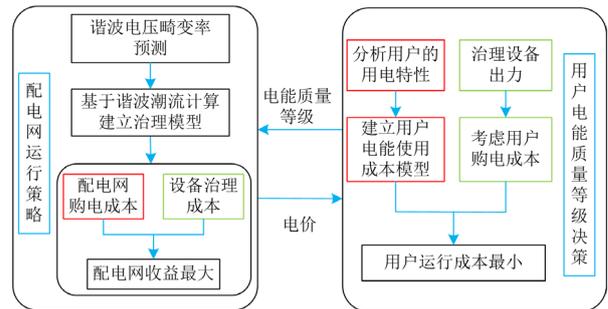


图 1 双层模型框架图

Fig. 1 Frame diagram of double-layer model

本文研究的是配电网与多个用户之间的优质电能质量增值服务问题。上层为配电网运行策略模型,配电网作为售电主体,为满足需求用户差异化电能的诉求以及提高售电收益,基于谐波电压治理模型,以配电网运营商收益最大为目标,制定不同质量等级电能的价格。下层为用户电能质量等级决策模型,用户作为购电主体,考虑自身的投入产出,以运行成本最小为目标,建立电能质量选购策略模型,并将其决策结果反馈给配电网。在优化过程中,每个用户对电能质量等级选择的情况会影响各等级的治理成本以及配电网对其他用户的报价,进而影响其他用户的收益以及等级决策,配电网电能定价与用户电能质量等级决策之间相互制约和影响,双方均希望在市场交易过程中获取最大利益。

2 配电网电能质量计算模型

2.1 负荷节点电能质量预测

负荷节点的谐波电压畸变率与电压、电流、有功功率等特征有关^[23], 因此本文参考文献[24]的方法, 根据获取的历史数据采用支持向量机算法预测负荷节点的谐波电压畸变率, 如式(1)所示。

$$D_{TH,i,t} = F(I_{i,t}, U_{i,t}, P_{i,t}) \quad (1)$$

式中: $D_{TH,i,t}$ 为 t 时刻第 i 个负荷节点的谐波电压畸变率; $I_{i,t}$ 为 t 时刻注入第 i 个负荷节点的电流; $U_{i,t}$ 为 t 时刻注入第 i 个负荷节点的电压; $P_{i,t}$ 为 t 时刻第 i 个负荷节点的有功功率。

2.2 电能质量治理模型

谐波以谐波电流的方式经过网络进行传递, 因此采用诺顿模型等效电力电子设备谐波源^[18], 根据配电网网络结构和元件特性构建谐波潮流模型, 如式(2)所示。

$$Y_h U_h = I_h \quad (2)$$

式中: Y_h 为由系统网络参数决定的 h 次谐波导纳矩阵; U_h 为 h 次谐波电压列向量; I_h 为 h 次谐波电流列向量; h 为谐波次数, 本文考虑 5、7、11 次谐波。

与传统的有源电力滤波器不同, VDAPF 的外特性相当于一个并联虚拟电导支路^[15], 对于各 h 次谐波, 即在支路中并联一个对应的 h 次谐波电导, 使得谐波导纳矩阵的值变大, 从而降低各次谐波电压值。等效电导 G 存在于对角元素中, 根据谐波潮流模型, 谐波电压治理模型如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} G_1 + Y_{11} & \cdots & Y_{1j} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ Y_{j1} & \cdots & G_j + Y_{jj} & & Y_{jn} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nj} & \cdots & G_n + Y_{nn} \end{bmatrix}^h \times \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_j \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix}^h = \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_j \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}^h \quad (3)$$

式中: U_j 为节点 j 的谐波电压值; I_j 为节点 j 的谐波电流值; Y_{jn} 为节点 j 和节点 n 的互导纳; Y_{jj} 为节点 j 的自导纳; G_j 为节点 j 接入 VDAPF 的等效电导值。因此, 通过改变 VDAPF 接入的 G_j 即可实现对 h 次谐波电压的治理。

VDAPF 的实际补偿容量为

$$S_{APF} = \sqrt{\sum_{h=2}^H (G_{h,ci}^* \times U_{h,ci})^2} \quad (4)$$

式中: S_{APF} 为 VDAPF 的实际补偿容量; $G_{h,ci}^*$ 为 VDAPF 接入节点的 h 次补偿谐波电导值; $U_{h,ci}$ 为

VDAPF 接入节点的 h 次谐波电压值; H 为最高次谐波的次数。

谐波电压畸变率 $D_{TH,l}$ 的计算式为

$$D_{TH,l} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H U_{h,l}^2}}{U_{1,l}} \quad (5)$$

式中: $U_{1,l}$ 为 l 节点基波电压有效值, 可由基波潮流计算求得; $U_{h,l}$ 为 l 节点 h 次谐波电压有效值, 可由式(2)对应的 h 次谐波潮流计算求得。

3 计及电能质量增值服务双层优化模型

3.1 电能质量等级划分

本文将电能质量引入电力市场环境中, 在供电侧划分电能质量等级以使用户按需选购^[25]。目前关于电能质量等级评估的研究已经非常成熟, 由于篇幅有限, 这里不再赘述电能质量评估工作, 参考文献[26]的数据进行电能质量等级划分, 如表 1 所示。

表 1 电能质量等级划分

| 等级 | 1 级 | 2 级 | 3 级 | 4 级 | 5 级 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 谐波电压畸变率/% | ≤5 | ≤4 | ≤3 | ≤2 | ≤1 |

Table 1 Power quality classification

3.2 考虑电能质量的双层优化模型

3.2.1 配电网收益

配电网的收益主要来源于出售优质电能的收入减去支付给发电商的购电成本以及对各个等级电能质量的治理成本。建立上层模型, 配电网的收益目标函数如式(6)所示。

$$\max E_s = C_{in} - C_{APF,z} - C_b \quad (6)$$

式中: E_s 为配电网的净收益; C_{in} 为配电网的售电收入; $C_{APF,z}$ 为配电网电能质量的治理成本; C_b 为支付给发电企业的购电成本。

配电网支付给发电企业的购电成本可表示为

$$C_b = P_G Q_c \quad (7)$$

式中: P_G 为单位电量的购电价格; Q_c 为配电网的总购电量。

电能质量的治理成本可表示为

$$C_{APF,z} = \sum_{t=1}^T C_{APF,dy} S_{APF,t} \quad (8)$$

式中: $C_{APF,dy}$ 为 VDAPF 的单位容量治理成本; $S_{APF,t}$ 为 t 时刻 VDAPF 的补偿容量; T 为时段总数。

配电网的售电收入可表示为

$$C_{in} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M P_{m,t}^k Q_{m,t}^k \quad (9)$$

$$P_{m,t}^k = P_{\text{com}} + Z_{m,t}^k \quad (10)$$

式中: $P_{m,t}^k$ 为用户 m 在 t 时刻选购第 k 电能质量等级的售电价格; M 为需求用户的个数; $Q_{m,t}^k$ 为用户 m 在 t 时刻选购第 k 电能质量等级的电量; P_{com} 为基本电价; $Z_{m,t}^k$ 为用户 m 在 t 时刻选购第 k 个等级的优质电能质量的电价。

优质电能质量电价表示为

$$Z_{m,t}^k = \frac{\alpha(g_k)C_{\text{APF},z,t}}{\sum_{m=1}^M Q_{m,t}^k} \quad (11)$$

$$\alpha_{\max}(g_k) = \frac{C_{m,t}^k(g_0) - C_{m,t}^k(g_k)}{C_{\text{APF},z,t}} \quad (12)$$

式中: $\alpha(g_k) \in [1, \alpha_{\max}(g_k)]$, 为电价修正系数; $C_{\text{APF},z,t}$ 为 t 时刻配电网电能质量的治理成本; $C_{m,t}^k(g_0)$ 、 $C_{m,t}^k(g_k)$ 分别表示用户 m 在 t 时刻选购 g_0 、 g_k 等级电能质量时的电能使用成本, g_0 为未治理前用户的初始等级, g_k 为用户选购的等级。

3.2.2 约束条件

1) 系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^T P_G = \sum_{i=1}^T P_{\text{loss}} + \sum_{i=1}^T P_{\text{load}} \quad (13)$$

式中: P_G 为配电网购买的有功功率; P_{loss} 为网络损耗; P_{load} 为负荷需求功率。

2) 系统电压约束

$$U_j^{\min} \leq U_j \leq U_j^{\max} \quad (14)$$

式中: U_j 为 j 节点基波电压; U_j^{\max} 和 U_j^{\min} 分别为 j 节点基波电压的最大值和最小值。

3) 容量约束

VDAPF 谐波补偿过程中, 其最大补偿量不能超出容量的限值。

$$S_{\text{APF}} \leq L_{\text{APF}} \times S_{\text{APF}}^n \quad (15)$$

式中: L_{APF} 为预留容量系数; S_{APF}^n 为 VDAPF 的额定容量。

4) 谐波污染水平约束

$$D_{\text{TH},l} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H U_{h,l}^2}}{U_{1,l}} \times 100\% \leq D_{\text{TH}}^{\max} \quad (16)$$

式中, D_{TH}^{\max} 为需求用户选购电能质量等级时对应谐波电压畸变率的最大值。由式(3)可知, 通过改变 VDAPF 的容量, 对其接入的电导进行调整, 即可对各个节点各次谐波电压进行治理, 然后根据式

(16)判断各个节点的谐波电压畸变率是否满足用户的要求。

5) 电价约束

$$P^{\min} \leq P_m^k \leq P^{\max} \quad (17)$$

式中: P_m^k 为用户 m 选购第 k 电能质量等级的售电价格; P^{\max} 和 P^{\min} 分别为配电网对需求用户销售电价的上下限。

3.3 用户电能质量需求模型

3.3.1 用户成本

用户成本包括选购第 k 电能质量等级的购电成本 C_G 和电能使用成本 C_m^k 两部分。供电质量越好, 所需要的治理方案的标准也就越高, 相应的治理费用也会增加, 因此用户的购电成本也就越高; 当然, 电能质量等级越好, 用户在使用过程中潜在的经济损失以及运维成本就会越低, 即电能的使用成本也越低。用户的期望是在保证经济利益的前提下追求电能质量最优, 图 2 所示为用户期望支付函数, 用户最经济的电能质量等级为 g^* , 选择这种等级的电能会使用户总的运行成本最小。

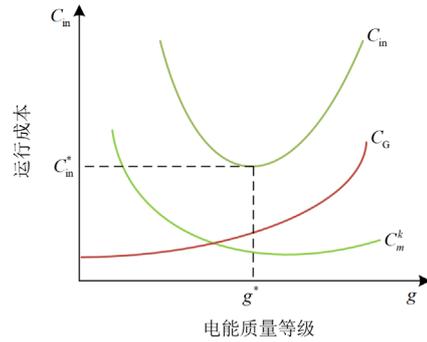


图 2 用户支付函数

Fig. 2 User payment function

需求用户根据配电网反馈的不同电能质量的电价, 以自身运行成本最小为目标, 建立下层模型, 目标函数为

$$\min f = C_G + C_m^k \quad (18)$$

$$C_G = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M p_{m,t}^k Q_{m,t}^k \quad (19)$$

式中: f 为用户总的运行成本; C_G 为用户选购第 k 电能质量等级的购电成本; C_m^k 为用户选购第 k 电能质量等级的使用成本。

本文采用二次函数模型来模拟用户的单位电能使用成本^[27], 使用成本表示为

$$C_m^k = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M C_{m,dy}^k Q_{m,t}^k \quad (20)$$

$$C_{m,dy}^k = c_0 g_k^2 + c_1 g_k + C_{s0} \quad (21)$$

式中： $C_{m,dy}^k$ 为用户 m 在选择第 k 电能质量等级下的单位电能使用成本； c_0 、 c_1 为单位电能使用成本函数的系数，均为常数； C_{s0} 为电能质量等级为 g_0 时对应的单位使用成本。

3.3.2 约束条件

用户选购优质电能质量的本质是降低总的运行成本，因此每个用户在选择电能质量等级的时候需要满足个人理想约束和激励相容约束^[28]。

用户在选购 g_k 等级电能时的总成本不高于该用户选购 g_0 等级电能时的总成本。

$$f(g_k) \leq f(g_0) \quad (22)$$

4 基于双层粒子群算法的模型求解

本文采用双层粒子群算法对配电网和多个需求用户之间的模型进行求解。粒子群优化算法是一种基于群体的优化算法，模拟鸟捕食行为，通过不断更新粒子位置和速度寻找最优解^[29]。具体求解流程如图 3 所示，求解步骤如下所述。

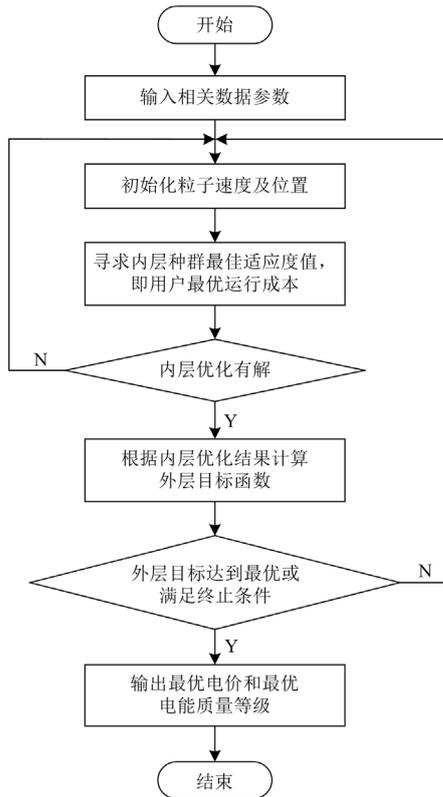


图 3 求解流程图

Fig. 3 Model solving flow chart

1) 输入参数。包括配电网的网络参数、光伏有功参数、用户电能使用成本系数等参数。

2) 初始化粒子的速度和位置，即配电网申报的电价和用户选购的电能质量等级。

3) 以外层优化目标和约束条件作为输入，优化各个时间段的治理效果和治理设备的出力情况，并将决策变量电价反馈到内层。

4) 内层接受外层反馈的数据，计算内层的约束条件和目标函数，优化选购的电能质量等级决策。

5) 更新粒子种群，内外层循环迭代重复步骤 2)~4)；同时判断是否满足迭代停止条件，若是，则输出迭代停止时的粒子，即最优电价和最优电能质量等级。

5 算例分析

5.1 算例设置

本文以 IEEE14 节点配电网系统为例进行算例分析，如图 4 所示。光伏接入位置为节点 5、9、14，其注入的谐波对配电网谐波电压畸变率造成主要影响，各光伏出力曲线如图 5 所示；同时为表征电力电子化配电网其他节点的谐波注入对配电网谐波畸变率的影响，本文认为各节点注入的谐波电流取其基波的 2%~10%^[14]。设定 4 个需求用户，分别为 3、8、9、14 节点，需求用户有功功率时间序列如图 6 所示。配电网的谐波治理装置 VDAPF 分别配置在节点 9、14，其容量分别为 275 A 和 200 A。以 15 min 为一个调度周期，优化一天内各个时间段用户的电能质量等级选购策略。

对用户在不同等级电能下的用电数据参数进行拟合^[26]，可得到式(21)中电能使用成本的关键参数 c_0 、 c_1 和 C_{s0} 。本文假设同一个节点所受电能质量造成的潜在损失是相同的，结合实际调研数据和文献[22]及文献[30]中电能质量损失数据，分别得到各个节点用户的电能使用成本参数如表 2 所示。其中售电企业相关参数为： $P_{com} = 0.5$ 元/kWh、 $P_G = 0.35$ 元/kWh、 $C_{APF,dy} = 986.3$ 元/kA。

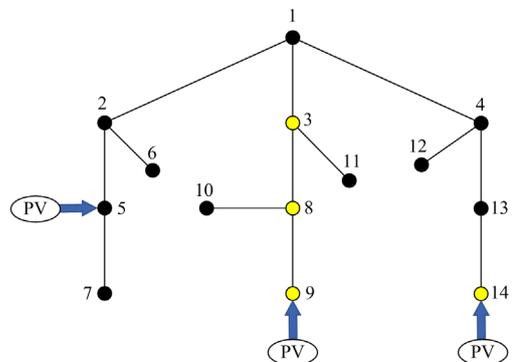


图 4 IEEE14 节点

Fig. 4 IEEE14 node

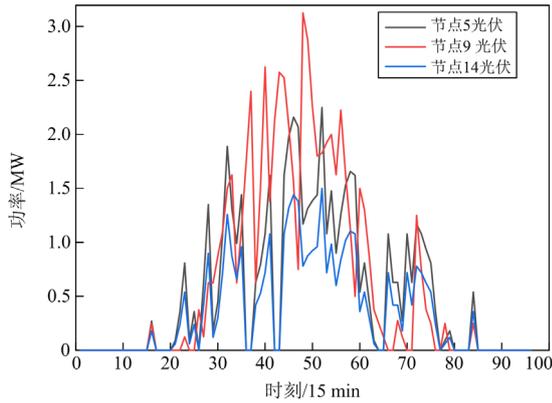


图 5 光伏的时序有功出力

Fig. 5 Temporal active power output of PV

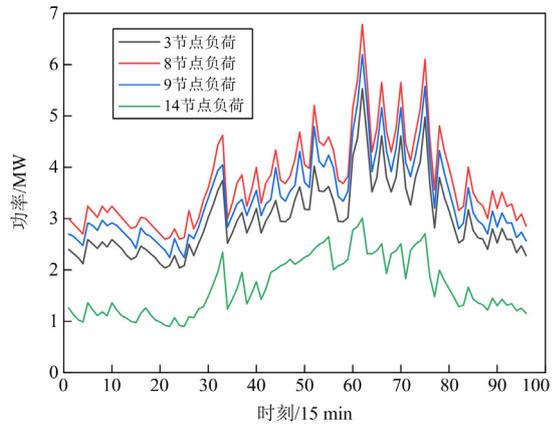


图 6 需求用户有功功率时间序列

Fig. 6 Time series of active power of demand users

表 2 电能使用成本参数

Table 2 Cost parameters of electric energy use

| 需求用户节点 | c_0 | c_1 | C_{s0} |
|--------|-------|-------|----------|
| 3 | 0.028 | -0.27 | 1.36 |
| 8 | 0.035 | -0.51 | 2.26 |
| 9 | 0.038 | -0.63 | 2.87 |
| 14 | 0.044 | -0.85 | 3.42 |

采用双层粒子群算法对模型进行求解, 双层粒子群优化算法的参数设置均相同, 最大惯性权重 ω_{max} 为 0.9; 最小惯性权重 ω_{min} 为 0.4; 学习因子初始值均为 2; 种群规模为 100; 最大迭代次数为 100; 当适应度函数连续迭代 6 次不更新时, 停止迭代。

5.2 算例结果分析

5.2.1 谐波治理效果分析

图 7 给出了节点 3 和节点 9 治理前后的谐波电压畸变率。从图 7 中可以看出, 治理前节点 9 的谐波电压畸变率明显要高于节点 3。这是因为节点 9

离谐波源的距离较节点 3 近, 所受到谐波污染较大, 对应的谐波畸变率则越高。治理后节点 9 和节点 3 的谐波电压畸变率较治理前明显降低, 整体保持在 2% 左右, 谐波污染得到了有效控制。

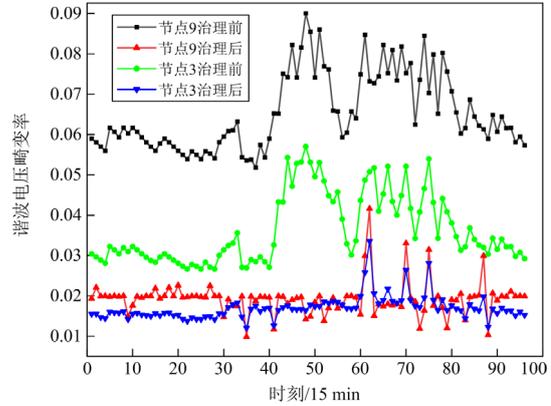


图 7 治理前后各节点谐波电压畸变率

Fig. 7 Harmonic voltage distortion rate of each node before and after treatment

治理前后第 30 时刻各个节点的谐波电压畸变率如图 8 所示。各节点在治理后谐波电压畸变率明显降低, 需求用户节点 3、8、9、14 的电能质量提升显著。这是因为这些节点对谐波含量有较高的要求, 并通过购买增值服务提升自身电能质量。

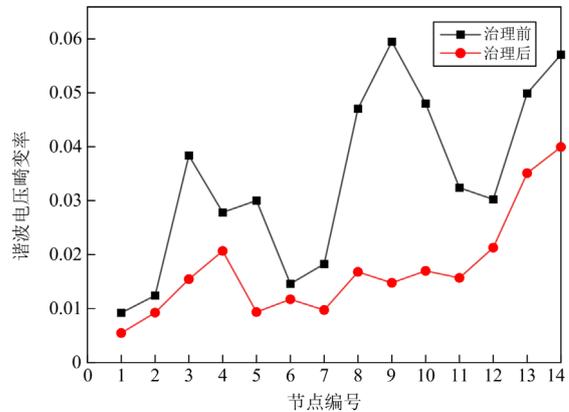


图 8 治理前后第 30 时刻各节点谐波电压畸变率

Fig. 8 Distortion rate of each harmonic voltage before and after treatment at the 30th moment

另外, 在同一条治理路径上, 例如节点 9-8-3 路径, VDADF 安装在节点 9 上, 从图 8 中可以看出, 节点 9 的治理效果最好, 节点 8 次之。因此, 如果节点 3 对谐波含量要求较高, 则存在节点 8、9 “搭便车” 的现象, 从而可能导致节点 3 的用户支付较多的治理费用, 而节点 8、9 提升了电能质量, 但承担的治理费用很少或者不需要承担费用。所以, 需要考虑配电网的电能质量治理成本和各个用户的

用电成本, 制定电能质量增值服务方案, 确保谐波治理费用分摊的公平性, 提升需求用户选购优质电能的积极性, 保障电能商品按质定价政策的稳步实施。

表3为VDAPF的各个时间优化的谐波电导值。从表3中可以看出, 谐波次数越高注入量越小, 对应的电导值也就越小。

表3 VDAPF 谐波电导值优化结果

Table 3 Optimization results of harmonic conductance of VDAPF

| 时刻 | APF1 | | | 时刻 | APF2 | | |
|-----|-----------|------|------|-----|-----------|------|------|
| | 各次谐波电导值/S | | | | 各次谐波电导值/S | | |
| | 5次 | 7次 | 11次 | | 5次 | 7次 | 11次 |
| 1 | 0.94 | 0.6 | 0.4 | 1 | 0.75 | 0.62 | 0.40 |
| 2 | 0.91 | 0.67 | 0.40 | 2 | 0.65 | 0.60 | 0.42 |
| 3 | 0.77 | 0.66 | 0.38 | 3 | 0.90 | 0.67 | 0.41 |
| 4 | 0.90 | 0.67 | 0.42 | 4 | 0.85 | 0.63 | 0.40 |
| 5 | 0.94 | 0.66 | 0.42 | 5 | 0.72 | 0.59 | 0.42 |
| 6 | 0.89 | 0.67 | 0.42 | 6 | 0.54 | 0.62 | 0.42 |
| 7 | 0.94 | 0.66 | 0.42 | 7 | 0.94 | 0.51 | 0.40 |
| 8 | 0.80 | 0.64 | 0.42 | 8 | 0.66 | 0.61 | 0.29 |
| 9 | 0.91 | 0.67 | 0.41 | 9 | 0.70 | 0.61 | 0.42 |
| 10 | 0.9 | 0.66 | 0.41 | 10 | 0.94 | 0.56 | 0.42 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 96 | 0.88 | 0.66 | 0.41 | 96 | 0.83 | 0.62 | 0.42 |

5.2.2 需求用户购电策略分析

图9—图11分别展示需求用户节点3和9在各个时间段选择优质电能的电价以及对应的电能质量等级。明显看出节点9电价高于节点3, 这是因为节点9离谐波源的距离近, 受到的污染大, 治理成本高; 并且9节点的治理效果好, 相应分摊治理费用的比例较高。

表4所示为第48时刻用户选择的最佳电能质量等级以及对应的电价。对比需求用户节点3、8、9、14的电价, 在选购相同电能质量等级的情况下, 节点9的电价明显高于其他节点。这是因为节点9离

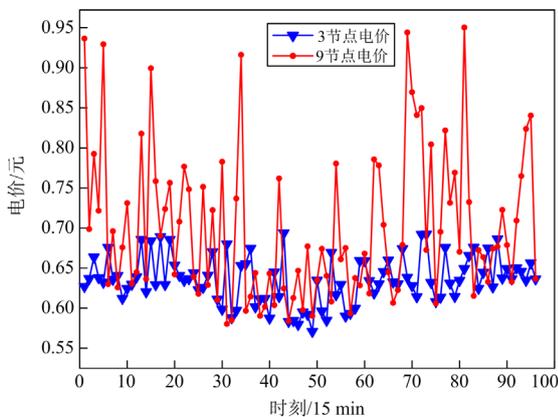


图9 需求用户电价

Fig. 9 Electricity price of demand users

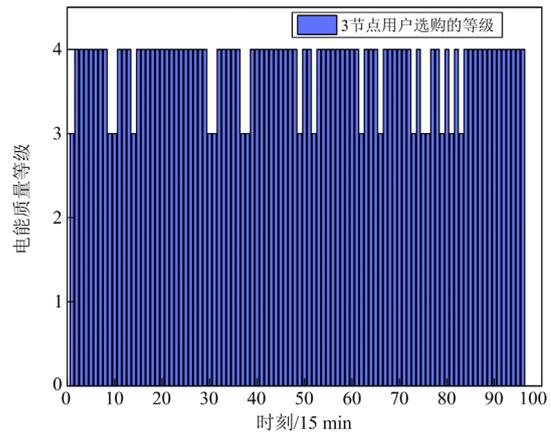


图10 节点3选购的等级

Fig. 10 Selected levels of Node 3

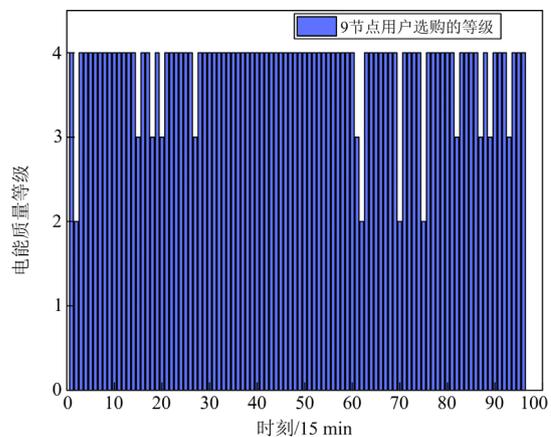


图11 节点9选购的等级

Fig. 11 Selected levels of Node 9

表4 需求用户决策结果

Table 4 Decision results of demand users

| 需求用户节点 | 选购等级 | 电价/元 |
|--------|------|-------|
| 3 | 4 | 0.595 |
| 8 | 4 | 0.634 |
| 9 | 4 | 0.677 |
| 14 | 3 | 0.592 |

治理点的位置较近, APF的治理效果明显要优于节点3和节点8, 相应的分摊电能的治理成本就会越多, 电价就会偏高; 其次由于这3个负荷节点的投入产出效益不同, 因电能质量提升使得用户的效益越大, 相应分摊电能的治理成本就会越多, 电价就会越高。在选购不同电能质量等级的情况下, 等级越高电价也就越高, 这体现了电能作为商品按质定价的原则。

5.2.3 需求用户经济效益分析

本文设置两种模式进行对比分析, 配电网未对

电能质量进行治理定义为模式 1；本文所提方法为模式 2。

图 12 为第 48 时刻用户的投入产出效益图，用户的运行成本由电能使用成本和购电成本组成。从图中可以看出，模式 2 的运行成本明显小于模式 1。这是因为配电网通过提供电能质量增值服务虽然增加了用户电能质量购电成本，但是由于电能质量的提升，降低了电能质量高要求用户的用电损失，总体上收益大于支出，从而用户的用电成本大幅降低。

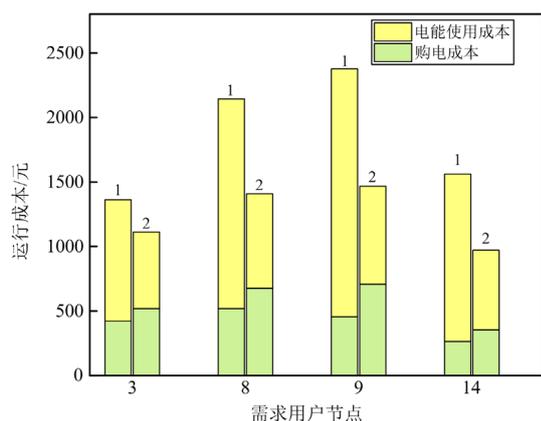


图 12 用户投入产出效益图

Fig. 12 User input-output benefit chart

虽然需求用户在选购电能质量增值服务后，存在其他用户“搭便车”的现象，但从需求用户各自的经济效益可以看出，电能质量增值服务策略既提升了用户的用能效率，也提升了配电网总体电能质量水平，实现了购售电双方共赢。

5.2.4 配电网经济效益分析

图 13 为两种模式下配电网的收益。对比可知，采用模式 2 时配电网的收益明显增多。这是因为当

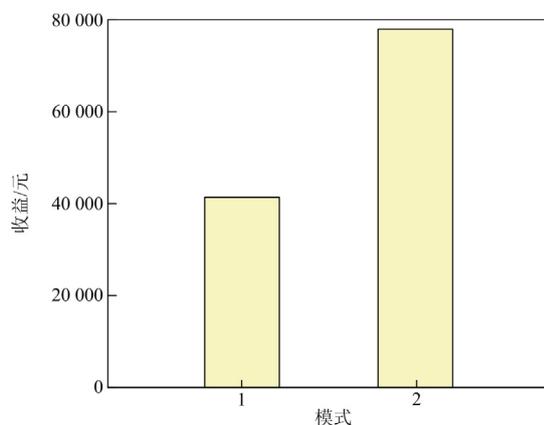


图 13 治理前后配电网的收益

Fig. 13 Income of distribution network before and after governance

配电网提供增值服务后，用户不仅需要支付基本电能的费用，还需要支付额外的治理费用，电能遵循“优质高价”的原则，电能质量越好，对应电价越高，当然用户的用能效率也得到提升，用户愿意为高质量电能买单，相应配电网的收益就会增多。

6 结论

本文以电能“优质高价”的原则为切入点，提出一种考虑电能质量的配电网增值服务双层优化模型。主要结论如下：

1) 针对分布式光伏高比例接入使得配电网谐波污染严重的问题，在电网侧安装 VDAPF 实现了电能质量分布式治理，有效降低了需求用户的谐波电压畸变率。

2) 考虑了网络拓扑结构对电能质量治理效果和成本的影响，使得电能质量治理费用分摊更公平，激励有电能质量需求的用户积极选购优质电能，提升自身用能效率，节约用能成本。

3) 基于购售电双方互动的差异化电能质量增值服务策略，有效提升了售电主体的经济效益，丰富了售电企业差异化服务内容，有效落实了电能按质定价的政策，推动售电侧改革发展。

参考文献

- [1] 彭静, 王军, 亓富军, 等. “双碳”目标下配电网多阶段扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 153-161.
PENG Jing, WANG Jun, QI Fujun, et al. Multi-stage expansion planning of a distribution network with double-carbon policy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 153-161.
- [2] 张敏, 祗会强, 张世锋, 等. 考虑配电网电能质量改善的分布式光伏优化调度方法[J]. 电力建设, 2022, 43(10): 147-157.
ZHANG Min, ZHI Huiqiang, ZHANG Shifeng, et al. Optimal scheduling method for distributed photovoltaic generation in distribution network considering power quality improvement[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 147-157.
- [3] 汪泽州, 张明明, 钱峰强, 等. 含光伏接入的中压配电网集中调控优化策略[J]. 中国电力, 2023, 56(2): 15-22.
WANG Zezhou, ZHANG Mingming, QIAN Fengqiang, et al. Centralized regulation and optimization strategy for MV distribution network with PV integration[J]. Electric Power, 2023, 56(2): 15-22.
- [4] 刘文龙, 吕志鹏, 刘海涛. 电力电子化配台区形态发展以及运行控制技术综述[J/OL]. 中国电机工程学

- 报: 1-25[2023-06-12]. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.220890.
- LIU Wenlong, LÜ Zhipeng, LIU Haitao. An overview of morphological development and operation control technology of power electronics dominated distribution area[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-25[2023-06-12]. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.220890.
- [5] 李嘉彬, 杨建华, 张涛, 等. 电力电子设备谐波对配电网电压骤升的影响研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(5): 35-41, 84.
- LI Jiabin, YANG Jianhua, ZHANG Tao, et al. Harmonic impact of power electronic devices upon voltage swell in distribution networks[J]. Smart Power, 2021, 49(5): 35-41, 84.
- [6] 陆康, 刁倩. 有源滤波器在不同网络中的应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 143-149.
- LU Kang, DIAO Qian. Analysis of active power filter applications in different networks[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 143-149.
- [7] 王清亮, 宋曦, 王旭东, 等. 背景谐波电压环境下的负载谐波电流检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 58-65.
- WANG Qingliang, SONG Xi, WANG Xudong, et al. A load harmonic current detection method in a background harmonic voltage environment[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 58-65.
- [8] 阴晓晴, 易皓, 杨泽斌, 等. 基于 SAPF 的电网多节点电压谐波优化补偿方法[J]. 中国电力, 2021, 54(8): 2-10.
- YIN Xiaoping, YI Hao, YANG Zebin, et al. Optimal compensation method for multi-node voltage harmonics based on SAPF[J]. Electric Power, 2021, 54(8): 2-10.
- [9] 沈建强, 邢砾云, 周振雄, 等. 基于改进 SOGIQ PLL 与卡尔曼滤波的 APF 谐波检测方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(10): 1-10.
- SHEN Jianqiang, XING Liyun, ZHOU Zhenxiong, et al. Research on harmonic detection method of APF based on improved SOGIQ PLL and Kalman filter[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 1-10.
- [10] 徐艳春, 阚锐涵, 高永康, 等. 混合动力系统电能质量扰动分析及治理[J]. 电力建设, 2021, 42(4): 17-26.
- XU Yanchun, KAN Ruihan, GAO Yongkang, et al. Research on power quality improvement of hybrid power system[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(4): 17-26.
- [11] AKAGI H, FUJITA H, WADA K. A shunt active filter based on voltage detection for harmonic termination of a radial power distribution line[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(3): 638-645.
- [12] WADA K, FUJITA H, AKAGI H. Considerations of a shunt active filter based on voltage detection for installation on a long distribution feeder[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(4): 1123-1130.
- [13] 林丽娟, 贾清泉, 田书娅, 等. 基于一致性算法的配电网谐波分布式治理策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 109-117.
- LIN Lijuan, JIA Qingquan, TIAN Shuya, et al. Distributed harmonic mitigation strategy of distribution network based on consensus algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2): 109-117.
- [14] 石磊磊, 贾清泉, 林丽娟, 等. 电力电子化配电网谐波分布式全局优化治理策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2914-2924.
- SHI Leilei, JIA Qingquan, LIN Lijuan, et al. Distributed global optimal harmonic mitigation strategy for power electronics high penetrated distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2914-2924.
- [15] 卜令岩, 贾清泉, 田书娅, 等. 电压检测型 APF 构成的分布式谐波治理系统稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 99-106.
- BU Lingyan, JIA Qingquan, TIAN Shuya, et al. Stability analysis for distributed harmonic mitigation system composed of voltage detection based active power filters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 99-106.
- [16] 田书娅, 贾清泉, 林丽娟, 等. 面向谐波和电压综合治理的电压检测型 APF 与 SVG 协同配置[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 149-157.
- TIAN Shuya, JIA Qingquan, LIN Lijuan, et al. Collaborative allocation of voltage detection active power filter and static var generator for harmonic and voltage comprehensive mitigation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 149-157.
- [17] 石磊磊, 贾清泉, 孙海东, 等. 基于数据驱动的电能质量分区治理策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 992-1001.
- SHI Leilei, JIA Qingquan, SUN Haidong, et al. Regional Abatement strategy for power quality based on data driven[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 992-1001.
- [18] 张巍舟, 陶骏, 汪清, 等. 考虑区域协调的 SAPF 分布式谐波动态优化治理[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(10): 42-49.
- ZHANG Weizhou, TAO Jun, WANG Qing, et al. Distributed dynamic harmonic optimized suppression of SAPF with regional coordination[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(10): 42-49.
- [19] 向悦萍, 杨健维, 臧天磊, 等. 计及电能质量的电力市场

- 多主体博弈模型[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3383-3394.
XIANG Yueping, YANG Jianwei, ZANG Tianlei, et al. Multi-agent game model in electricity market considering power quality[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3383-3394.
- [20] 金广厚, 李庚银, 周明. 基于质量保险的多质量等级电能定价方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 113-119.
JIN Guanghou, LI Gengyin, ZHOU Ming. Quality insurance based electric energy pricing with multi-quality grades[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 113-119.
- [21] 翁国庆, 王强, 戚军, 等. 电能质量可用户定制微网的按质定价方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 384-392.
WENG Guoqing, WANG Qiang, QI Jun, et al. A novel microgrid electricity pricing method with featured customizable power quality control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 384-392.
- [22] 董海艳, 陈杰, 贾清泉, 等. 考虑敏感用户需求的电能质量分级与购售电策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(2): 201-209.
DONG Haiyan, CHEN Jie, JIA Qingquan, et al. Power quality gradation and power purchase and sale strategy considering sensitive users' demand[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 201-209.
- [23] 赵长伟, 骈睿珺, 杜天硕, 等. 基于 LSTM 的重要用户电能质量趋势预测分析模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(7): 26-33.
ZHAO Changwei, PIAN Ruijun, DU Tianshuo, et al. Power quality trend prediction and analysis model based on LSTM[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(7): 26-33.
- [24] 林顺富, 汤继开, 汤波, 等. 典型电能质量稳态指标预测模型研究[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 614-620.
LIN Shunfu, TANG Jikai, TANG Bo, et al. Study on forecasting model of typical power quality steady state indices[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 614-620.
- [25] 刘颖英, 冯丹丹, 林才华, 等. 电能质量综合评估研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 167-176.
LIU Yingying, FENG Dandan, LIN Caihua, et al. Current status and development trend of power quality comprehensive assessment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 167-176.
- [26] 赵洪山, 李静璇, 米增强, 等. 基于 CRITIC 和改进 Grey-TOPSIS 的电能质量分级评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 1-8.
ZHAO Hongshan, LI Jingxuan, MI Zengqiang, et al. Grading evaluation of power quality based on CRITIC and improved Grey-TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 1-8.
- [27] 杨进, 李庚银, 周明. 基于差别定价的电能质量服务定价方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 41-46.
YANG Jin, LI Gengyin, ZHOU Ming. Power quality service pricing method based on differential pricing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 41-46.
- [28] 刘阳, 肖先勇, 刘旭娜, 等. 考虑用户定量需求的优质电力园区 DVR 优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 823-828.
LIU Yang, XIAO Xianyong, LIU Xuna, et al. Optimal configuration of DVR in premium power park considering customers quantitative demand[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 823-828.
- [29] 任智君, 郭红霞, 杨苹, 等. 含高比例可再生能源配电网灵活资源双层优化配置[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 33-38.
REN Zhijun, GUO Hongxia, YANG Ping, et al. Double-layer optimal configuration of flexible resources with high proportion of renewable energy distribution network[J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(9): 33-38.
- [30] LI Y G, LI T, MA G H, et al. Discussion on the system of electricity price charge system based on power quality[C] // 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), October 20-22, 2018, Beijing, China: 1-6.
-
- 收稿日期: 2023-03-19; 修回日期: 2023-06-16
作者简介:
钟 浩(1983—), 男, 博士, 副教授, 研究生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: zhonghao022@163.com
舒 栋(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行、分析与控制; E-mail: 455349326@qq.com
张 磊(1986—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为综合能源系统、大规模新能源接入后电力系统优化运行与控制。E-mail: leizhang3188@163.com
(编辑 魏小丽)