

# 计及需求响应的分布式光伏集群 承载能力评估

于昊正<sup>1</sup>, 赵寒杰<sup>2</sup>, 李科<sup>1</sup>, 朱星旭<sup>2</sup>, 皇甫霄文<sup>1</sup>,  
樊江川<sup>1</sup>, 李翠萍<sup>2</sup>, 李军徽<sup>2</sup>

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 郑州市 450000;

2. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林省吉林市 132012)

**摘 要:** 针对传统配电网分布式光伏承载能力评估方法中未考虑光伏集群的问题, 构建了一种以光伏集群为评估单元的承载能力双层评估模型。模型外层通过价格弹性系数描述负荷需求变化, 以售电商收益最大为目标优化分时电价, 采用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法进行求解。内层以不往主网反送电作为指标, 考虑电压偏差和设备热稳定约束, 提出灵敏度排序方法求取光伏承载能力。在我国某县域实际配电网中求取了配电网光伏集群的承载能力, 验证了所提模型和算法的有效性。

**关键词:** 配电网; 分布式光伏; 用户侧需求响应; 承载力; 集群

## Carrying Capacity Evaluation of Distribution Network for Distributed Photovoltaic Cluster Considering User-Side Demand Response

YU Haozheng<sup>1</sup>, ZHAO Hanjie<sup>2</sup>, LI Ke<sup>1</sup>, ZHU Xingxu<sup>2</sup>, HUANGFU Xiaowen<sup>1</sup>,  
FAN Jiangchuan<sup>1</sup>, LI Cuiping<sup>2</sup>, LI Junhui<sup>2</sup>

(1. State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou 450000 China;

2. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education(Northeast Electric Power University), Jilin 132012, Jilin Province, China)

**ABSTRACT:** Aiming at the problem that photovoltaic clusters are not considered in the traditional evaluation method of carrying capacity of distribution network for distributed photovoltaic power, a two-layer model of carrying capacity with photovoltaic clusters as the evaluation unit is constructed. In the outer layer of the model, PSO algorithm is used to describe the change of load demand through price elasticity coefficient, and the time-of-use price is optimized with the goal of maximizing the income of E-seller. In the inner layer, taking no reverse power transmission to the main network as the index, considering the voltage deviation and equipment thermal stability constraints, a sensitivity ranking method is proposed to calculate the carrying capacity for photovoltaic power. In the actual distribution network of a county in China, the impact of a single photovoltaic cluster on the carrying capacity of the distribution network is calculated, and the carrying capacity of the distribution network for the photovoltaic cluster is calculated to verify the effectiveness of the proposed model and algorithm.

This work is supported by the project 'Coordinated Development of Distribution Network Acceptance and Planning under High Proportion of Distributed Generation' (No. SGHAYJ00GHJS2100075) and Jilin Provincial Natural Science Foundation Joint Fund Project(No. YDZJ202101ZYTS152).

**KEYWORDS:** distribution network; distributed photovoltaic power; demand response; carrying capacity; cluster

中图分类号: TM 721

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2023)02-0122-10

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2023.02.012

基金项目: 国网河南经济技术研究院 2021 年成本项目“高比例分布式电源与中压配电网协同发展措施研究”(SGHAYJ00GHJS2100075); 吉林省自然科学基金联合基金项目资助(YDZJ202101ZYTS152)

<http://www.cepc.com.cn>

## 0 引言

“双碳”背景下,新能源迎来快速发展。截至2021年底,光伏发电并网装机容量达到3.06亿kW,在“整县推进”政策的驱动下,分布式光伏新增约2900万kW,约占全部新增光伏发电装机的55%,历史上首次突破50%<sup>[1-2]</sup>,引导着主要能源消费系统向可再生、清洁化方向发展<sup>[3-4]</sup>。

配电网大规模接入具有间歇性、随机性等特点的分布式光伏时,部分节点的负荷特性转变为电源特性<sup>[5]</sup>。引起潮流反向<sup>[6]</sup>,导致分布式光伏就地消纳难<sup>[7]</sup>、频率响应减弱<sup>[8]</sup>、功率层层倒送<sup>[9]</sup>和节点电压越限<sup>[10-11]</sup>等一系列问题,从而使电网不得不选择性地接受光伏<sup>[12-13]</sup>。为保证配电网的安全稳定运行,文献[14-19]对配电网分布式光伏的承载能力进行了研究。文献[14]从倒送功率约束的角度出发,结合节点电压及潮流约束,建立了以分布式电源(distributed generation, DG)接入容量最大为目标的数学模型并进行求解。文献[15]在考虑节点电压约束的前提下,建立了含负荷不确定性的分布式电源接入配电网最大准入容量的双层规划模型,将求解双层规划问题变成求解多次单层规划问题,并提出采用可信赖域序列规划算法来求解。文献[14-15]主要针对单个角度对分布式光伏承载力进行计算。在评估分布式光伏承载能力时,应充分考虑配电网的实际运行状态,得到更贴切的评估结果。对此,文献[16-18]进一步基于配电网安全稳定运行边界进行研究。文献[16]基于配电网实际运行状态和安全边界,考虑电压偏差、热稳定、短路电流和谐波约束,提出了一种数据驱动的配电网分布式光伏承载力评估方法。文献[17]构建集成数据中心的电-气互联综合能源系统分布式光伏最大准入容量优化模型,利用凸松弛技术和增量分段线性化方法将模型转化为混合整数二阶锥模型求解。文献[18]以电压偏差、线路极限传输容量及配电变压器额定容量为约束条件,建立分布式光伏接入低压配电网最大容量优化模型,提出罚函数法求解该模型,针对某光伏扶贫项目最大接入容量进行定量计算。文献[19]从多元化接入体的用能特性入手,根据可控性及能量交互方式对接入体的特性进行统一描述。应用相似性度量方法分析接入体特性与配电网承载能力之间的关联关系。文献[16-19]虽对配电网分布式光伏承载能力展开了研究,但是,评估结果未充分考虑需求响应对评估结果的影响。

需求响应是指在实时电价、激励措施下,用户主动改变自己的用电方式和用电行为,能够实现协调电量

供需关系平衡<sup>[20]</sup>、削峰填谷<sup>[21]</sup>和抑制新能源波动<sup>[22]</sup>等目的,在负载转移方面扮演着重要角色<sup>[23]</sup>。对额外消纳的光伏进行电价补贴,可以引导用户改变用电方式,进而影响配电网分布式光伏的承载能力评估结果。同时,随着光伏在配电系统中的渗透率不断增加,未来光伏规模化、集群化将成为趋势。文献[24]在集群划分过程中引入复杂网络模块度函数的概念,通过优化模块度函数,无需人为设定集群的数目即可得到合理的集群划分结果。文献[25]根据系统网架结构和节点负荷特性对配电网进行集群划分,构成配电网-集群-节点多层级网架结构。文献[26]提出虚拟集群概念,并基于社团理论提出适应调控目标变化的虚拟集群动态划分方法。文献[27]引入改进的电气距离概念,用谱聚类方法,将含高渗透率分布式可再生能源系统划分为若干亚群落,并确定各集群内关键节点。

目前,关于集群划分的研究已有较多的研究成果,但如何对集群划分后的光伏承载力进行评估的研究较少,本文基于已有的集群划分研究,提出计及需求响应的分布光伏集群承载能力评估方法,为调度中心提供分布式光伏集群优化出力。首先,构建计及需求响应的分布式光伏集群承载能力双层评估模型。然后,在外层模型以售电商收益最大为目标进行分时电价优化。在内层模型中,采用灵敏度排序的方法对光伏集群进行承载能力评估。最后,在我国某县域实际电网中验证所提集群评估方法的有效性。

## 1 问题描述

随着大量分布式光伏进入到用户侧,含高比例分布式光伏的区域配电网逐步形成,本文以含有多个分布式光伏的配电网为研究对象,其结构示意图如图1所示。图1中 $P_G(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 、 $P_L(t)$ 分别为 $t$ 时刻发电机、分布式光伏、负荷的功率, $P_s$ 表示上级电网向配电网所供给的功率大小, $P_s > 0$ 功率流向与图中参考方向相同, $P_s < 0$ 表示配电网富余功率向主网倒送。因此,如图2所示,本文研究的重点是在已有的光伏集群划分基础上,将光伏集群和需求响应纳入到传统考虑配电网安全稳定约束的分布式光伏承载能力评估模型中,进行更贴合实际情况的承载能力评估,为调度中心提供分布式光伏集群的优化出力。

## 2 分布式光伏承载力双层评估模型

### 2.1 双层模型的架构

本文设计了一种计及需求响应的配电网分布式光伏集群承载能力双层评估模型,其框架如图3所示,包含分时电价优化层和集群承载力优化层。

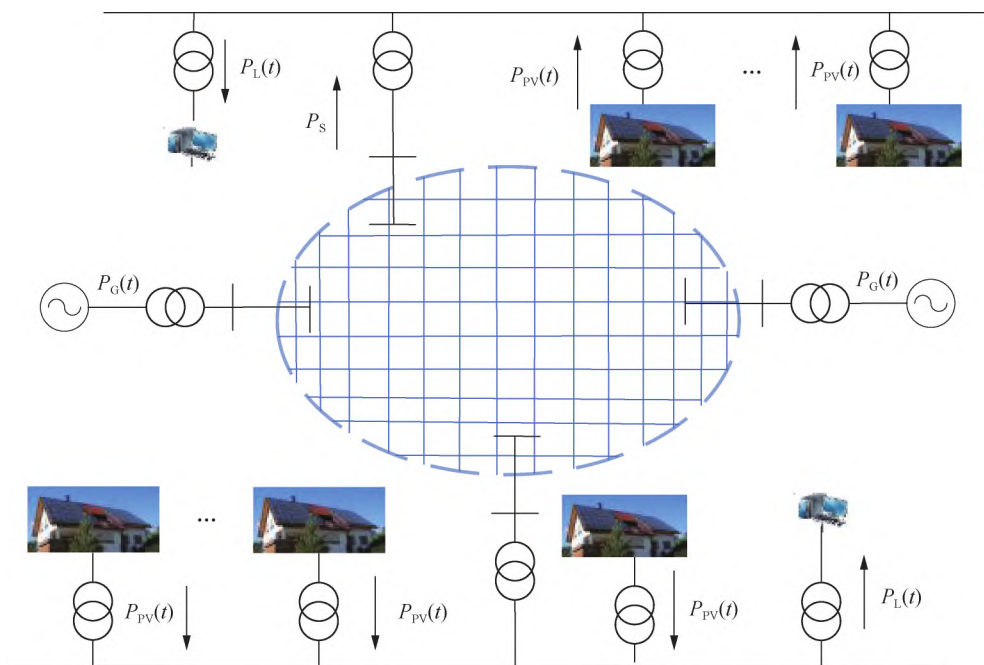


图1 分布式光伏高比例接入的电网结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of power grid with high proportion of distributed photovoltaic power access

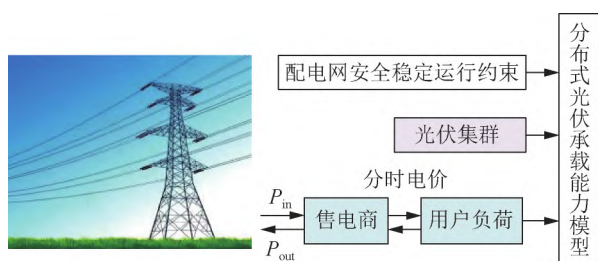


图2 分布式光伏承载力影响因素

Fig. 2 Influencing factors of carrying capacity for distributed photovoltaic power

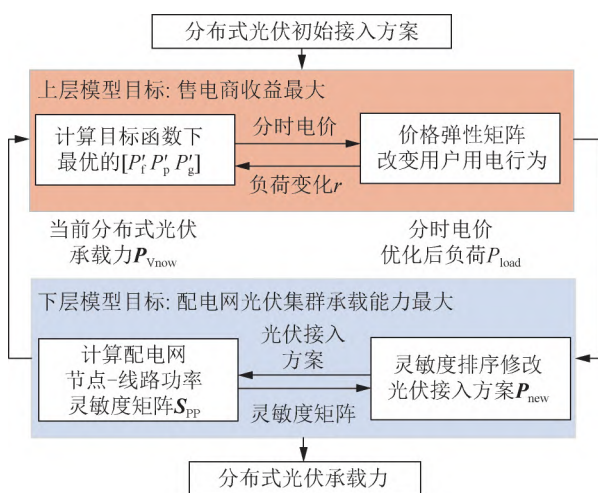


图3 分布式光伏承载力双层模型

Fig. 3 Two-layer model of carrying capacity for distributed photovoltaic power

1) 分时电价优化层采用价格弹性矩阵改变用户用电行为。并对额外消纳的分布式光伏进行电价补

贴,以售电商收益最大为目标,计算优化后的负荷。

2) 承载能力优化层接受分时电价优化层中发送的负荷,以不往主网倒送功率为主要指标,考虑电压偏差和热稳定约束,采用灵敏度排序的方法调节各个光伏集群出力,实现承载能力的优化。

双层模型具体输入输出流程如图4所示。

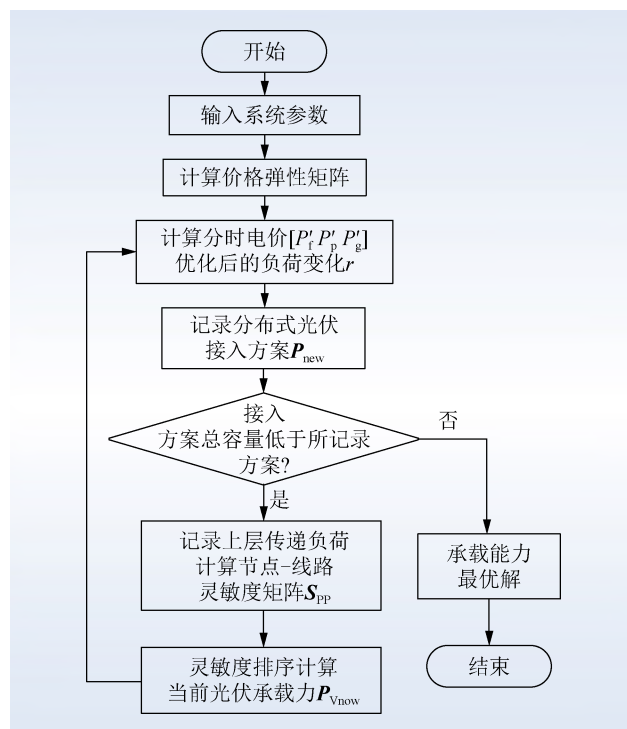


图4 分布式光伏承载力双层模型流程

Fig. 4 Flow chart of two-layer model of carrying capacity for distributed photovoltaic power



## 2.2 外层用户侧需求响应模型构建

售电商从主网购电后采用分时电价售卖时,一天中不同时间段的负荷会根据用户对电价的反应发生偏移,本文中使用的价格弹性矩阵来描述电力负荷的变化。

根据经济学原理,价格弹性可以反映电量需求变化与电价变化之间的关系,电价弹性系数分为自弹性系数和交叉弹性系数,其物理意义分别为用户对当前时段电价的反应和对其他时段电价的反应。

$$\gamma_{aa} = \frac{\Delta E_a}{E_a} \left( \frac{\Delta P_a}{P_a} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$\gamma_{ab} = \frac{\Delta E_a}{E_a} \left( \frac{\Delta P_b}{P_b} \right)^{-1} \quad (2)$$

式中:  $\gamma_{aa}$  表示自弹性系数;  $\gamma_{ab}$  表示互弹性系数;  $E_a$  和  $\Delta E_a$  表示第  $a$  个时间段的负荷和负荷变化量;  $P_a$  和  $\Delta P_a$  表示第  $a$  个时间段的电价和电价变化量;  $P_b$  和  $\Delta P_b$  表示第  $b$  个时间段的电价和电价变化量。

对  $n$  时段的用户对电价响应行为建模,则可以根据电价弹性矩阵计算电价发生变化时用户用电量的变化情况,如式(3)所示:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta E_1}{E_1} \\ \frac{\Delta E_2}{E_2} \\ \vdots \\ \frac{\Delta E_n}{E_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & \gamma_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_1}{P_1} \\ \frac{\Delta P_2}{P_2} \\ \vdots \\ \frac{\Delta P_n}{P_n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

则用户行为引起的各节点负荷的变化量  $r$  可以表示为:

$$r = \left[ \frac{\Delta E_1}{E_1}, \frac{\Delta E_2}{E_2}, \cdots, \frac{\Delta E_n}{E_n} \right] \quad (4)$$

## 2.3 内层光伏极限承载能力模型构建

在已有的光伏集群划分结果的基础上,内层模型结合光伏出力的随机性、接入点与接入容量的不确定性,通过场景法来刻画实际可能出现的光伏接入容量。

1) 如式(5)所示构建能够表征分布式光伏在配电网接入点的随机场景集。

$$y = [y_1, y_2, \cdots, y_i, \cdots, y_{n_{pv}}] \quad (5)$$

式中:  $y$  表示分布式光伏集群的接入方案;  $y_i$  表示节点  $i$  是否接入光伏集群;  $n_{pv}$  表示网络中光伏集群数目。

2) 如式(6)所示,各接入节点的分布式光伏容量从0开始,按照步长  $k$  不断变化。

$$x_i = [0, k, 2k, \cdots, \xi_i k] \quad (6)$$

式中:  $x_i$  表示第  $i$  个分布式光伏接入的容量序列;  $k$  表

示容量增长的步长;  $\xi_i$  为第  $i$  个分布式光伏接入容量最大变化次数。

经过步骤1)和2)形成分布式光伏接入的场景集合。内层模型满足潮流约束和各节点电压、线路电流约束:

$$P_i(t) - P_{L,i}(t) + j[Q_i(t) - Q_{L,i}(t)] = U_i(t) \sum_{j \in N_z} Y_{ij} U_j(t) \quad (7)$$

$$\begin{cases} u_{i,\min} \leq U_i(t) \leq u_{i,\max}, \forall i \in N_z, ij \in M_z \\ I_{ij}(t) \leq I_{ij}^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $P_i(t)$ 、 $Q_i(t)$  表示  $t$  时刻  $i$  节点分布式光伏的有功、无功出力;  $P_{L,i}(t)$ 、 $Q_{L,i}(t)$  表示  $t$  时刻  $i$  节点负荷的有功和无功功率;  $U_i(t)$  表示  $t$  时刻  $i$  节点的电压;  $Y_{ij}$  表示节点  $i$  与节点  $j$  之间的导纳;  $N_z$ 、 $M_z$  分别表示配电网的节点集合和线路集合;  $u_{i,\max}$  和  $u_{i,\min}$  表示电压上限和下限;  $I_{ij}(t)$  和  $I_{ij}^{\max}$  表示线路  $ij$  上的电流和电流上限。

## 3 承载力模型求解方法

### 3.1 外层分时电价优化求解方法

外层问题的目标是获得配电网在已有分布式光伏装机容量下,售电商收益最大的分时电价和负荷。采用粒子群算法来解决该问题,具体实施流程如图5所示,设置初始的峰谷平电价为  $P_{D,S} = [P_f, P_g, P_p]$ ,适应度函数构造如下:

$$F = P'_f + P'_g + P'_p + P'_{pv} \quad (9)$$

式中:  $P'_f$ 、 $P'_g$ 、 $P'_p$  为光伏接入后售电商在峰、谷和平时负荷下的收益;  $P'_{pv}$  为售电商的补贴收益。

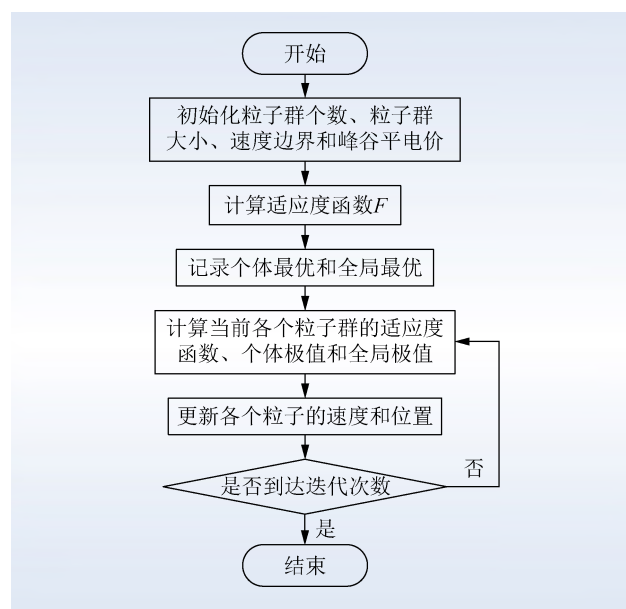


图5 基于 PSO 算法的分时电价优化流程  
Fig. 5 Flow chart of TOU price optimization based on PSO algorithm

### 3.2 内层光伏集群承载力求解方法

由于引入了大量整数变量来确定光伏集群在配电网中接入的位置,内层模型属于混合整数非线性规划问题,考虑到技术约束,提出了一种基于功率灵敏度排序的承载力计算方法。首先计算光伏集群-线路功率灵敏度,然后考虑光伏集群接入的位置,按照排序结果,对灵敏度高的光伏集群按照步长减少光伏接入容量,对灵敏度低的光伏集群按照步长增加光伏接入容量,同时保证全网光伏渗透率不变,使其满足安全稳定运行约束,进一步不断增大光伏渗透率直至达到承载力极限。

首先计算各个节点对配电网光伏承载能力的灵敏度,并将灵敏度相同的光伏接入节点进行聚类。则配电网中各光伏集群出力-线路功率灵敏度关系如式(10)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{12} \\ \vdots \\ \Delta P_{n_{pv}-1, n_{pv}} \end{bmatrix} = S_{pp} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_{n_{pv}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $\Delta P_{n_{pv}-1, n_{pv}}$  为线路  $(n_{pv}-1, n_{pv})$  的功率变化量;  $\Delta P_{n_{pv}}$  为第  $n_{pv}$  个光伏集群注入的有功功率变化量;  $S_{pp}$  为光伏集群注入功率对各线路的功率灵敏度矩阵。

网络中各支路对 220 kV 线路对应的灵敏度矩阵进行排序,如式(11)所示:

$$\begin{cases} S_{PV} = [S_{PV}^{(m,1)} & S_{PV}^{(m,2)} & \cdots & S_{PV}^{(m,N_T)}] \\ S_{avr} = \frac{\sum_{l=1}^{N_T} S_{PV}^{(m,l)}}{N_T} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $S_{PV}$  为排序后的网络各节点对互联线路的功率灵敏度矩阵;  $S_{avr}$  为功率灵敏度的平均值;  $S_{PV}^{(m,l)}$  为功率灵敏度矩阵中第  $m$  行第  $l$  列元素;  $N_T$  为可接入光伏节点数。

通过比较可得功率灵敏度矩阵中小于平均值最后一个电压灵敏度值  $S_L$ , 因此增加与减少的光伏序列按照  $P_{new}$  进行变化,即保证全网渗透率保持不变,如式(12)所示。

$$\begin{cases} P_{add} = [S_{avr} - S_1 & \cdots & S_{avr} - S_L] P_{max} \eta_{start} S_{tep} \\ P_{cut} = \frac{\sum_{l=1}^L P_{add}^{(1,l)} [S_L \cdots S_{N_T}]}{\sum_{l=L}^{N_T} (S_{avr} - S_l)} \\ P_{new} = [P_{add} \quad P_{cut}] \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $P_{add}$  是光伏接入容量增加的序列;  $P_{cut}$  是光伏接

入容量减少的序列;  $S_{tep}$  为步长;  $L$  为小于平均值的最大功率灵敏度序号;  $\eta_{start}$  为光伏渗透率;  $P_{max}$  为网络最大负荷;  $P_{new}$  为光伏的变化序列。

则修改后光伏接入方案如式(13)所示:

$$P_{V_{now}} = P_{V_b} + P_{new} \quad (13)$$

式中:  $P_{V_{now}}$  为修改后的光伏接入序列;  $P_{V_b}$  为初始光伏接入序列。

将修改后的光伏容量序列接入配电网中,计算反送电指标,若指标满足,则继续增大渗透率,直至输出光伏极限承载力接入方案,流程如图6所示。

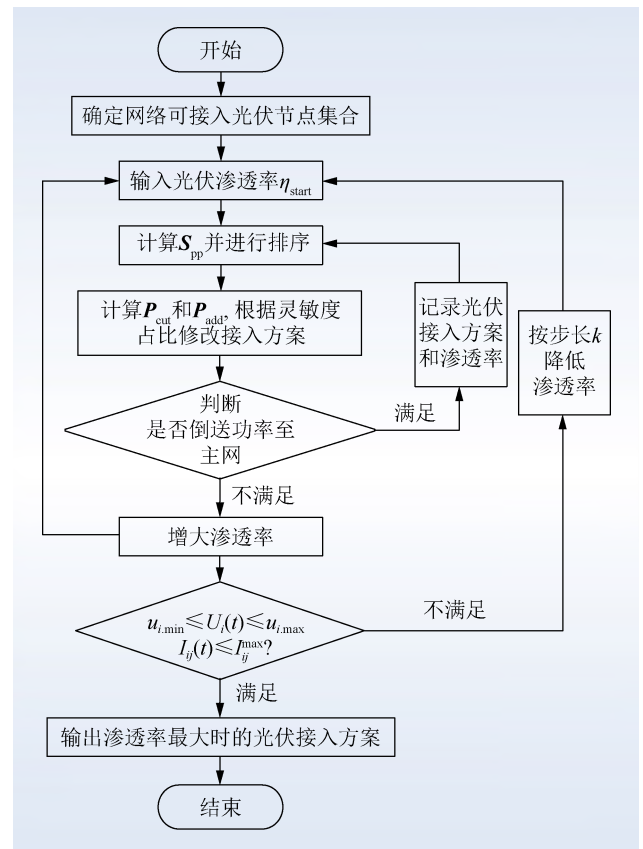


图6 极限承载力计算流程

Fig. 6 Flow chart of ultimate carrying capacity

## 4 算例分析

### 4.1 算例条件设置

分布式光伏规模化接入配电网,基于所提光伏集群评估方法从促进新能源消纳、各光伏集群对配电网承载力影响和各光伏集群自身承载力影响三个角度对配电网中光伏集群承载力进行评估,验证所提方法的有效性。

采取实际配电网模型作为算例进行分析,其网络拓扑如图7所示。

光伏集群接入到 10 kV 电压等级,节点编号为 57—105。分时电价及新能源电价补贴情况如表1所示。

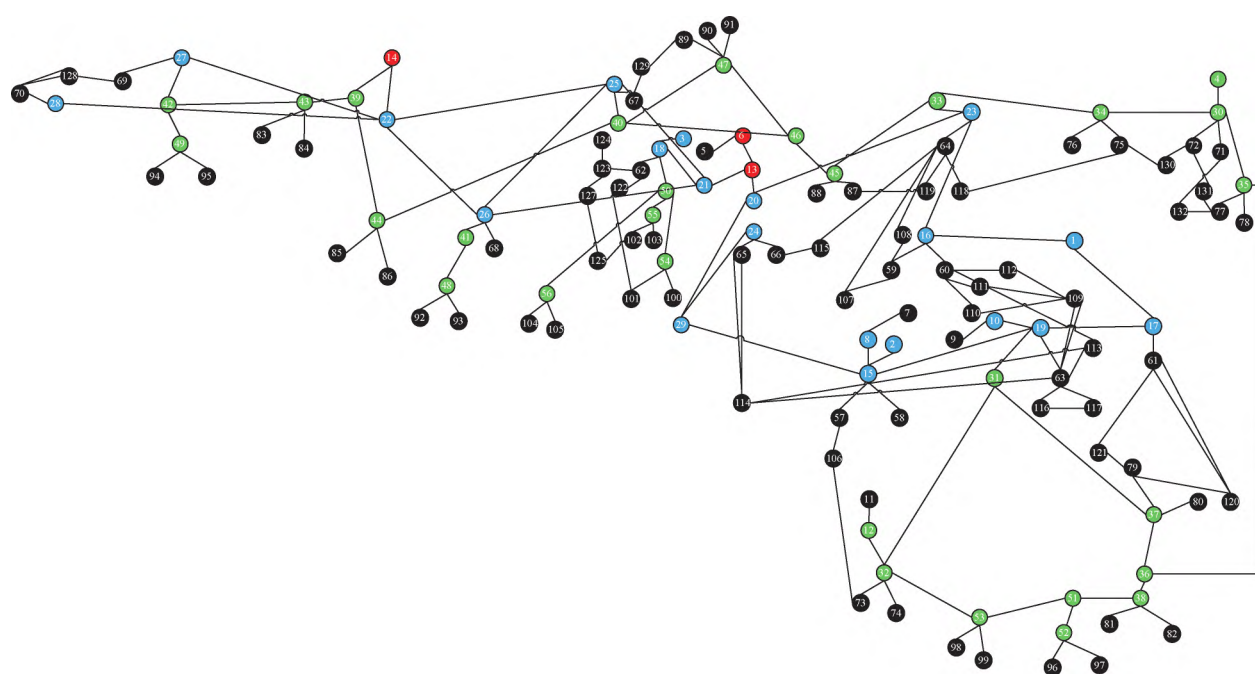


图 7 算例电网拓扑  
Fig. 7 Topology of example power grid

表 1 分时电价参数  
Table 1 Time-of-use price parameter

电价类别	电价/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]
峰时	1.011 86
谷时	0.610 53
平时	0.293 50
补贴	0.420 00

外层 PSO 算法群体权重系数选择 0.9 ,加速常数  $c_1 = c_2 = 1.49$ 。价格交叉弹性系数和自弹性系数选取如表 2 所示。

表 2 价格弹性矩阵参数  
Table 2 Parameter table of price elasticity matrix

自弹性系数	交叉弹性系数		
	峰平	峰谷	平谷
-1.2	0.02	0.04	0.02

4.2 电价补贴下光伏集群承载力评估

在本小节中设计了一种新的电价机制 除了正常的售电外还对分时电价引导下多消纳的光伏进行电价补贴。在此场景下评估需求响应对配电网分布式光伏承载能力的影响和各集群的光伏承载能力大小。

负荷在电价补贴机制优化前后结果如图 8 所示。蓝色曲线表示的是正常运行情况下用户负荷需求 ,在正午光伏大发时刻 ,负荷较低。而在价格激励的驱动下 ,售电商的收益包含正常售电部分和补贴部分 ,售电商调整弃光时期的电价 ,改变用户的用电需求 ,使 10:00—14:00 时间段的负荷提高。

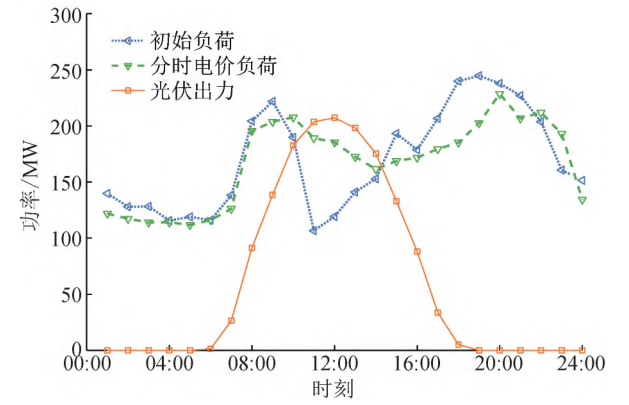


图 8 分时电价优化前后负荷  
Fig. 8 Load before and after TOU price optimization

采用表 2 所设置的电价参数计算分时电价优化前后的售电商收益 ,结果如表 3 所示 ,可以看出 ,优化后不仅改变了负荷也增加了售电商的收益。

表 3 收益对比表  
Table 3 Income comparison statement

场景	收益/万元
初始负荷	156.3
分时电价优化	172.4

内层模型接收到外层发送的负荷后 ,采用本文所提方法进行灵敏度排序调节。具体调节过程如图 9 所示 ,两条曲线从总体上看随着调节方案次数的增加 ,线路上的反向负载率在不断下降。图中黄色和蓝色曲线表示的是随着方案的调节 ,最终不向主网反送电和仍向主网反送电的情况。证明了灵敏度排序调



节的有效性。各光伏集群分时电价优化前后分布式光伏极限接入容量如图10所示。

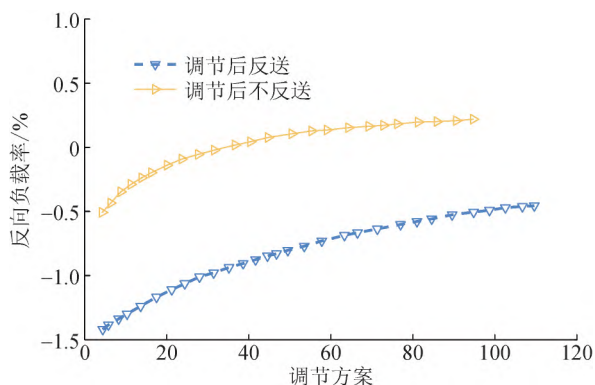


图9 灵敏度排序调节过程图

Fig. 9 Process for sensitivity sorting adjustment

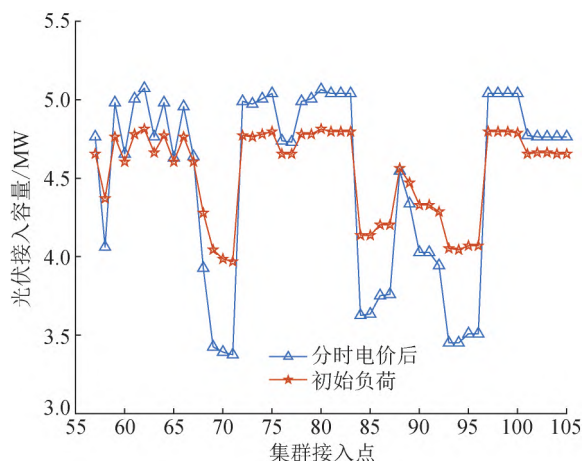


图10 分时电价优化前后各集群光伏承载力

Fig. 10 Carrying capacity of each PV cluster before and after TOU optimization

进一步,设置不同的补贴电价,考虑不同电价补贴下配电网各个分布式光伏集群承载能力结果如图11所示。

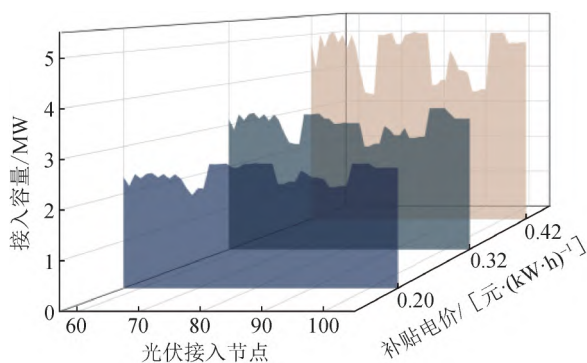


图11 不同电价补贴下承载力评估结果

Fig. 11 Load carrying evaluation results under different electricity price subsidies

由图11看出,不同电价激励下评估结果为118.32 MW、147.41 MW和219.85 MW。

综上所述,所提方法不仅可以在满足约束的条件下求解正常运行状态下各个光伏集群的极限接入容量,也可以计算及用户侧需求响应的各光伏集群极限接入容量,为调度优化光伏集群承载力提供决策依据。对上述考虑需求响应的光伏承载能力结果进行电压和热稳定校核,各节点的电压分布和各支路负载率情况如图12和图13所示(图中场景1、2、3对应补贴电价0.20、0.32、0.42元/(kW·h)),满足电压偏差和热稳定约束。

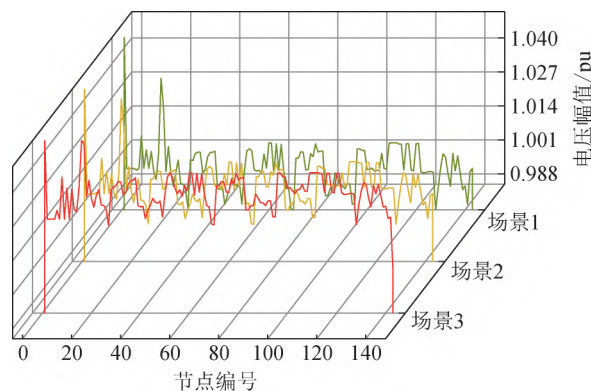


图12 各场景电压幅值

Fig. 12 Voltage amplitudes in different scenarios

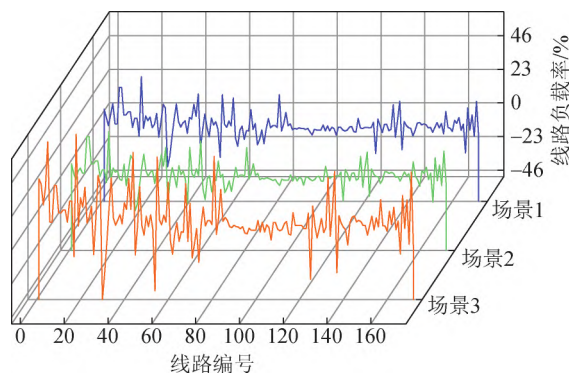


图13 各场景线路负载率

Fig. 13 Reverse load rate of each scenario

#### 4.3 各光伏集群对承载力灵敏度分析

随着配电网中光伏的渗透率不断提高,超过承载力极限会威胁其安全稳定运行。而分析各个光伏集群对配电网承载力的影响能够为优化光伏集群出力提供决策支撑。

因此,本小节采用所提灵敏度排序方法分析算例系统中每一个光伏集群对配电网承载能力的影响。算例中各个光伏集群对配电网光伏承载能力的灵敏度如图14所示。由图14可知,各光伏集群对整个配电网承载能力的影响程度(灵敏度)不同,影响最大为集群11,影响最小为集群2。

按照承载力灵敏度的高低将光伏集群划分为关键集群和非关键集群。关键集群如表4所示。

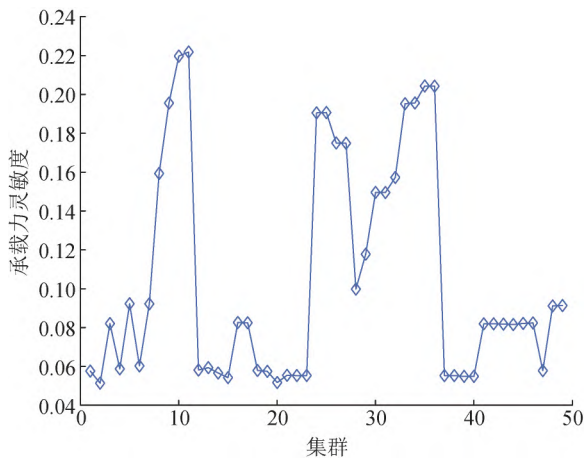


图 14 光伏集群对配电网承载力灵敏度  
Fig. 14 Sensitivity of photovoltaic cluster to distribution network carrying capacity

表 4 关键集群灵敏度  
Table 4 Sensitivity table key clusters

集群	灵敏度	集群	灵敏度
8	0.159	27	0.176
9	0.196	32	0.157
10	0.221	33	0.195
11	0.222	34	0.196
24	0.191	35	0.204
25	0.192	36	0.204
26	0.175		

进一步,对光伏关键集群和非关键集群向配电网注入的功率进行摄动,验证所计算灵敏度的有效性。摄动后配电网反送电指标变化结果如图 15 所示。

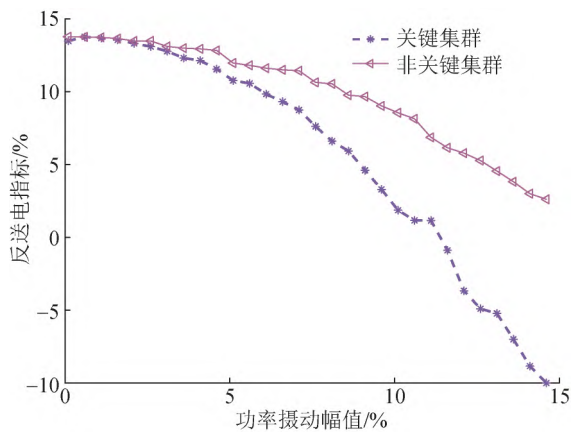


图 15 关键集群与非关键集群功率摄动  
Fig. 15 Power perturbation of critical and non-critical clusters

由图 15 看出,在相同功率摄动下,关键集群对反送电的指标影响比非关键集群更大。进一步,随着摄动功率幅值的增加,关键集群对反送电指标影响越

明显。

因此,关键光伏集群对配电网承载能力的影响较大,调度时调节灵敏度较高的光伏关键集群,可以使得优化结果更加有效。验证了本文所提评估方法的优越性。

#### 4.4 各光伏集群间承载力的灵敏度分析

当调节单个集群的分布式光伏时,由于其出力与其他光伏集群间存在耦合作用,将引起其他集群承载能力的变化。基于上一小节,进一步分析各个光伏集群之间承载能力的相互作用。

按照所提灵敏度排序方法将配电网总体承载力在各光伏集群间解耦,以集群 8 和 13 为例,各光伏集群承载力对集群 8 和 13 光伏承载力的灵敏度如图 16 所示。

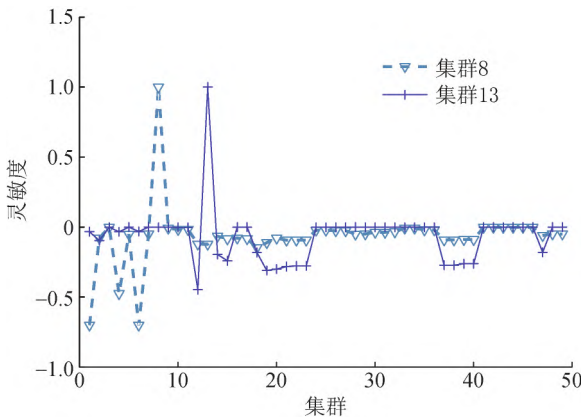


图 16 集群间承载力灵敏度  
Fig. 16 Carrying capacity sensitivity of Inter cluster

由图 16 可见,当其他集群光伏承载能力升高时,会降低集群 8 和集群 13 的承载力;集群 12 对集群 13 的承载力影响最大,集群 6 对集群 8 的影响最大。因此,要提高集群 8 或集群 13 所在区域的分布式出力,可通过降低其他光伏集群的出力完成。

## 5 结 论

针对分布式光伏集群化、规模化接入的配电网,提出了计及需求响应的分布光伏集群承载能力评估方法,为调度中心优化分布式光伏集群出力提供依据。主要结论如下:

1) 本文所提双层评估方法将光伏集群和需求响应纳入到分布式光伏承载能力评估模型中,更贴近配电系统中户用光伏爆发式增长的实际情况,为调度中心提供优化后的光伏集群出力。

2) 所提光伏集群灵敏度排序法能够计算各个光伏集群对配电网承载能力的灵敏度,并按照影响大小分为关键集群与非关键集群,为优化调度提供有效的决策支持。



3) 采用本文所提双层模型对比分析不同光伏集群间承载能力的影响。随着分布式能源在配电网中的比例不断增高,对含高比例集群化、规模化的可再生能源配电网承载能力评估起着积极的促进作用,有很好的工程应用潜力。

## 6 参考文献

- [1] 国家能源局. 我国光伏发电并网装机容量突破3亿千瓦分布式发展成新亮点[EB/OL]. (2022-01-20) [2022-04-12]. [http://www.nea.gov.cn/2022-01/20/c\\_1310432517.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-01/20/c_1310432517.htm).
- [2] 国家能源局. 清洁低碳安全高效“十四五”现代能源体系这样建[EB/OL]. (2022-03-25) [2022-04-12]. [http://www.nea.gov.cn/2022-03/25/c\\_1310529475.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-03/25/c_1310529475.htm).
- [3] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J/OL]. 中国电机工程学报, 2022(2022-03-30) [2022-04-12]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212716>.  
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2022(2022-03-30) [2022-04-12]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212716>.
- [4] 康重庆, 杜尔顺, 李姚旺, 等. 新型电力系统的“碳视角”: 科学问题与研究框架[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 821-833.  
KANG Chongqing, DU Ershun, LI Yaowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 821-833.
- [5] 马喜平, 贾嵘, 梁琛, 等. 高比例新能源接入下电力系统降损研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4305-4315.  
MA Xiping, JIA Rong, LIANG Chen, et al. Review of researches on loss reduction in context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4305-4315.
- [6] 武昭原, 周明, 王剑晓, 等. 双碳目标下提升电力系统灵活性的市场机制综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7746-7763.  
WU Zhaoyuan, ZHOU Ming, WANG Jianxiao, et al. Review on market mechanism to enhance the flexibility of power system under the dual-carbon target[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7746-7763.
- [7] 董逸超, 王守相, 闫秉科. 配电网分布式电源接入能力评估方法与提升技术研究综述[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2258-2266.  
DONG Yichao, WANG Shouxiang, YAN Bingke. Review on evaluation methods and improvement techniques of DG hosting capacity in distribution network[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2258-2266.
- [8] 张程铭, 柳璐, 程浩忠, 等. 考虑频率安全的电力系统规划与运行优化研究综述与展望[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 250-265.  
ZHANG Chengming, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Review and prospects of planning and operation optimization for electrical power systems considering frequency security[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 250-265.
- [9] DING M, XU Z, WANG W, et al. A review on China's large-scale PV integration: progress, challenges and recommendations[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 639-652.
- [10] 朱星旭, 韩学山, 杨明, 等. 含分布式光伏与储能配电网时变最优潮流追踪的分布式算法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2644-2658.  
ZHU Xingxu, HAN Xueshan, YANG Ming, et al. A distributed algorithm for time-varying optimal power flow tracking in distribution networks with photovoltaics and energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2644-2658.
- [11] 李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 提升配电网新能源消纳能力的分布式储能集群优化控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 76-83.  
LI Cuiping, DONG Zheming, LI Junhui, et al. Optimal control strategy of distributed energy storage cluster for prompting renewable energy accommodation in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 76-83.
- [12] 李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 配电网分布式储能集群调压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 133-141.  
LI Cuiping, DONG Zheming, LI Junhui, et al. Control strategy of voltage regulation for distributed energy storage cluster in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 133-141.
- [13] GIANNITRAPANI A, PAOLETTI S, VICINO A, et al. Optimal allocation of energy storage systems for voltage control in LV distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2859-2870.
- [14] 曾强, 谢善益, 周刚, 等. 倒送功率约束下的分布式电源最大接入容量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 16-22.  
ZENG Qiang, XIE Shanyu, ZHOU Gang, et al. Maximum capacity analysis for distributed generation considering reverse power constraint[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 16-22.
- [15] 刘科研, 刘永梅, 盛万兴, 等. 考虑电压约束的分布式电源接入配电网最大准入容量计算方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 81-87.  
LIU Keyan, LIU Yongmei, SHENG Wanxing, et al. Maximal allowable DG penetration capacity calculation considering voltage constraints[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 81-87.
- [16] 梁志峰, 夏俊荣, 孙檬檬, 等. 数据驱动的配电网分布式光伏承载力评估技术研究[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2430-2439.  
LIANG Zhifeng, XIA Junrong, SUN Mengmeng, et al. Data driven assessment of distributed photovoltaic hosting capacity in distribution network[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2430-2439.
- [17] 孟宇红, 毕猛强, 史梓男, 等. 分布式光伏扶贫多点接入配电网最大容量分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(10): 110-116.  
MENG Yuhong, BI Mengqiang, SHI Zinan, et al. Analysis of maximum capacity of distributed photovoltaic poverty alleviation with multiple access points to distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2019, 31(10): 110-116.
- [18] 王丹阳, 张沈习, 程浩忠, 等. 考虑数据中心用能时空可调的电-气互联综合能源系统分布式光伏最大准入容量计算[J/OL]. 电力

- 系统及其自动化学报, 2022(2022-03-28) [2022-04-12]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000976>.
- WANG Danyang, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Calculation method for maximum allowable access capacity of distributed pv in electricity-gas integrated energy system with data centers[J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022(2022-03-28) [2022-04-12]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000976>.
- [19] 李宏仲, 汪瑶, 胡哲晟, 等. 双碳背景下配电网对多元接入体的承载能力评估[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3595-3604.
- LI Hongzhong, WANG Yao, HU Zhesheng, et al. Carrying capacity assessment of distribution network for multiple access bodies under the background of double carbon[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3595-3604.
- [20] 程瑜, 赵鹏飞. 含光伏及储能的民用负荷需求响应策略与效益分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(4): 1055-1062.
- CHENG Yu, ZHAO Pengfei. Demand response strategy and benefit analysis of residential load with PV and energy storage[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(4): 1055-1062.
- [21] WU H Y, SHAHIDEPOUR M, KHODAYAR M E. Hourly demand response in day-ahead scheduling considering generating unit ramping cost[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2446-2454.
- [22] 李卫东, 贺鸿鹏. 考虑风电消纳的源-荷协同优化调度策略[J]. 发电技术, 2020, 41(2): 126-130.
- LI Weidong, HE Hongpeng. Source-load cooperative optimization dispatch strategy considering wind power accommodation[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(2): 126-130.
- [23] 禹威威, 刘世林, 陈其工, 等. 考虑需求侧管理的光伏微电网多目标优化调度方法[J]. 太阳能学报, 2017, 38(11): 2972-2981.
- YU Weiwei, LIU Shilin, CHEN Qigong, et al. Multi-objective optimization scheduling method for photovoltaic based microgrid considering demand side management[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(11): 2972-2981.
- [24] 王磊, 张帆, 寇凌峰, 等. 基于 Fast Unfolding 聚类算法的规模化分布式光伏电源集群划分[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 29-34.
- WANG Lei, ZHANG Fan, KOU Lingfeng, et al. Large-scale distributed PV cluster division based on fast unfolding clustering algorithm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(10): 29-34.
- [25] 丁明, 方慧, 毕锐, 等. 基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2187-2201.
- DING Ming, FANG Hui, BI Rui, et al. Optimal siting and sizing of distributed PV-storage in distribution network based on cluster partition[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2187-2201.
- [26] 窦晓波, 常莉敏, 倪春花, 等. 面向分布式光伏虚拟集群的有源配电网多级调控[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 21-31.
- DOU Xiaobo, CHANG Limin, NI Chunhua, et al. Multi-level dispatching and control of active distribution network for virtual cluster of distributed photovoltaic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 21-31.
- [27] 张倩, 丁津津, 张道农, 等. 基于集群划分的高渗透率分布式系统无功优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 130-137.
- ZHANG Qian, DING Jinjin, ZHANG Daonong, et al. Reactive power optimization of high-penetration distributed generation system based on clusters partition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 130-137.
- 
- 收稿日期: 2022-04-12
- 作者简介:
- 于昊正(1992) 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为配电网规划、新型电力系统建设等方面;
- 赵寒杰(1997) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网分布式光伏消纳及储能优化调度;
- 李科(1987) 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划;
- 朱星旭(1989) 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统运行与控制;
- 皇甫雷文(1995) 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为配电网规划、分布式电源;
- 樊江川(1986) 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划;
- 李翠萍(1982) 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源发电联网运行关键技术和储能技术应用等;
- 李军徽(1976) 男, 博士, 教授, 通信作者, 主要研究方向为新能源发电联网运行关键技术和储能技术应用等, E-mail: lijunhui@neepu.edu.cn.
- (编辑 张小飞)