

内嵌可行性测试的输电权市场 拍卖收益权分配方法

王梦圆¹, 顾依凡¹, 曾丹², 平健¹, 孙珂³, 唐琦雯³, 严正¹

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 200240;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 南京市 210000; 3. 国网浙江省电力有限公司, 杭州市 310007)

摘要:【目的】为了保证拍卖收益权的分配结果在实际电网中具有物理可执行性, 拍卖收益权的分配结果需要满足可行性测试。传统的基于灵敏度因子的可行性校验算法使得拍卖收益权的分配结果依赖于线路的次序, 从而影响削减结果的公平性。为此, 提出了一种内嵌可行性测试的拍卖收益权分配方法。【方法】首先, 提出拍卖收益权的分配原则和申报方式, 保障参与者的基本用电权益。然后, 提出一种内嵌可行性测试的拍卖收益权分配算法。该算法以最小化用户总申请容量的削减量为目标, 考虑线路潮流约束, 建立拍卖收益权分配模型并求解。最后, 基于 IEEE 5 节点系统, 将所提算法与采用传统可行性校验的分配算法进行对比。【结果】结果表明, 所提方法相比传统方法在节点边际电价 (locational marginal pricing, LMP) 机制下总削减量减少可达 25.0%, 线路利用率提高可达 7.2 个百分点; 在负荷侧统一电价机制下总削减量减少了 20.9%, 线路利用率提高了 9.2 个百分点。【结论】所提方法可以提升拍卖收益权分配的公平性, 降低总削减量, 提高线路利用率。

关键词: 电力市场; 输电拥堵; 拍卖收益权; 可行性测试

中图分类号: TM73; F724

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2025)11-0173-08

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2025.11.015

An Embedded Feasibility Testing Method for Auction Revenue Rights Allocation in Transmission Rights Markets

WANG Mengyuan¹, GU Yifan¹, ZENG Dan², PING Jian¹, SUN Ke³,
TANG Qiwen³, YAN Zheng¹

(1. Key Laboratory of Power Transmission and Conversion (Shanghai Jiao Tong University), Ministry of Education, Shanghai 200240, China; 2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210000, China;
3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

ABSTRACT: [Objective] In ensuring the physical feasibility of auction revenue right (ARR) allocation in actual power grids, feasibility tests must be satisfied. Traditional post-feasibility verification algorithms based on sensitivity factors make ARR allocation results dependent on line sequences, which affects the fairness of the results. This study proposes an ARR allocation method with embedded feasibility testing. [Methods] First, ARR allocation principles and application methods are proposed to safeguard the basic electricity rights of the participants. Subsequently, an ARR allocation algorithm with embedded feasibility testing is developed. This algorithm aims to minimize the total reduction in the users' requested capacity while considering line-flow constraints, by establishing and solving an ARR allocation model. Finally, based on the IEEE 5-bus system, the proposed algorithm is compared with the traditional post-feasibility verification allocation algorithm. [Results] Compared with traditional methods, the proposed method decreased total capacity reduction by up to 25.0% and increased line utilization rate by up to 7.2% under the locational marginal pricing (LMP) mechanism. Under the load-side uniform pricing mechanism, total capacity reduction decreased by 20.9% and line utilization rate increased by 9.2%. [Conclusions] The results show that the proposed method improves the fairness of ARR allocation, decreases total capacity reduction, and increases line utilization rate.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5108-202355043A-1-1-ZN).

KEYWORDS: electricity market; transmission congestion; auction revenue rights; feasibility testing

0 引言

自 20 世纪 90 年代以来,许多国家开始进行电力市场改革,引入竞争机制,提高效率,降低成本^[1-2]。传统电力行业垂直一体化的结构被打破,划分为发电、输电和配电等独立的市场环节^[3]。相较于传统发输配一体化的模式,电力市场各主体之间呈现出多方博弈的特点^[4-5]。一方面,系统运营商需要根据市场实时的供需情况优化调度;另一方面,发电商可能为获取额外利润而采取投机行为,导致电力系统运行调度问题日趋复杂^[6]。受限于输电线路的物理特性,发电成本最低的发电机组可能无法执行输电计划,导致输电阻塞现象的出现^[7]。随着我国电力市场改革的不断深入,我国输电阻塞费用规模正在不断扩大^[8-11]。

针对输电阻塞问题,现有研究提出了各种适应不同市场结构的阻塞管理方法,如市场分割^[12]、分区电价^[13-14]、基于潮流的市场耦合^[15]以及金融输电权(financial transmission right, FTR)^[16]等。英国于 2005 年起实行英国电力交易和输电协议(British electricity trading and transmission arrangements, BETTA)模式,BETTA 模式下的“再调度”过程由平衡机制实现。英国电力市场中容量大于 50 MW 且与国家电网电力传输公司(National Grid Electricity Transmission, NGET)具有远程通信连接的发电商和供电商可作为平衡机制单元(balancing mechanism unit, BMU),通过申报 Bid/Offer 参与系统平衡控制以解决阻塞和功率不平衡等问题^[17]。欧盟直接将拥堵收入分配至输电系统运营商(transmission system operator, TSO),来解决输电线路拥堵问题,称为拥堵收入的分配^[18]。在美国得州电力市场,采用堵塞收益权(congestion revenue right, CRR)分配阻塞盈余。得克萨斯州电力可靠性委员会将可用的 CRR 的一部分作为预分配的 CRR(pre-allocated CRR, PCRR)^[19]分配给向公众提供能源且未进入竞争性零售市场的主体,通常是电力合作社或市政拥有的公用事业公司^[20]。与其他阻塞管理方法相比,FTR 赋予持有者获得阻塞费用补偿的权利,是一种金融工具,并不改变系统的实际调度和运行^[21]。FTR 从不同的角度为解决输电阻塞问题提供了新的思路,在美国 PJM (Pennsylvania-New Jersey-Maryland)电力市场得到应

用^[22-26]。在美国 PJM 电力市场,采用双层分配方式进行 FTR 的分配和拍卖,即拍卖收益权(auction revenue rights, ARR)的分配和 FTR 的拍卖^[12]。ARR 的分配对象主要是网络输电用户和点对点输电服务用户,于每年 3 月开始,分为 3 个阶段进行分配^[27]。在新英格兰电力市场,ARR 被分配给提高传输能力的输电升级支付实体,以及支付拥堵费用的负荷服务商^[26]。每月 FTR 拍卖完成时确定 ARR,以分配该月相关的净 FTR 拍卖收入,每次 ARR 分配分为 4 个阶段进行。此外,新英格兰电力市场的独立系统运营商还为能够增加系统传输能力的实体分配增量 ARR。

ARR 机制^[28]作为 FTR 的重要基础,为用户提供 FTR 拍卖收益的分配权利。ARR 持有者可以在 FTR 拍卖中将其 ARR 兑换成 FTR,从而获得阻塞费用的对冲。未被兑换的 ARR 将按照拍卖结算价格获得相应收益。文献[29]分析了 ARR 在金融输电权市场中的作用。文献[30]提出了一种适应广东电力现货市场环境的阻塞收益权分配机制。文献[31]从 ARR 的角度研究了拍卖收入不足的问题。

在分配 ARR 时,需要考虑分配结果的可行性问题。由于电网中存在多条线路,每条线路都有最大输电容量限制,且线路之间可能相互影响,因此,ARR 的分配必须确保结果在实际电网中具有物理可执行性^[32-34]。目前常用的 ARR 容量分配的可行性测试方法是基于灵敏度因子的可行性测试,即用户提交 ARR 申请后,再进行直流潮流计算,如果出现线路过载,则根据线路容量以及各合同对阻塞线路的影响程度进行削减^[35]。

总的来看,现有文献鲜少涉及 ARR 分配机制的设计原则,在 ARR 分配过程中采用传统的可行性测试方法可能会导致 ARR 的分配结果依赖于线路的次序,影响削减结果的公平性。为此,本文提出 ARR 的申报原则和分配方法,进一步提出一种内嵌可行性测试的 ARR 分配算法。该内嵌可行性测试的 ARR 分配算法将各申请容量作为优化变量,以最小化用户申请总容量的削减量为目标,考虑线路潮流约束,建立初始容量的分配模型并求解。相比采用传统可行性校验的 ARR 分配方法,所提方法能够提升拍卖收益权分配的公平性,降低总削减量,提高线路利用率。

1 拍卖收益权分配的原则与申报方式

1.1 拍卖收益权分配的原则

ARR 机制是为分配年度金融输电权拍卖收益而设计的,当用户和发电商参与年度金融输电权拍卖收益的分配时,将获得 ARR。ARR 主要分为现货部分和中长期合同部分。市场参与者申请 ARR 后,需要经过可行性测试,申请可能被全额通过、部分通过或者不通过。ARR 的经济价值取决于其容量以及从年度金融输电权拍卖出清结果计算出的 2 个节点注入、撤出电力的价格差。

为了使得市场参与者能够获得分配 FTR 拍卖收益的合理权利,本文提出遵循“谁承担阻塞风险,谁获得拍卖收益权”的原则分配 ARR,具体的,设计如下 2 条分配原则:

1) 现货部分 ARR 分配给用户。中长期合同部分,当交货点在用户侧,发电商承担阻塞导致的价差,当交货点在发电商侧,用户承担阻塞导致的价差。据此,中长期合同部分 ARR 的分配根据交货点来确定:若交货点在发电商侧,则相应的 ARR 分配给发电商,当出现阻塞时,发电商得到相应的阻塞盈余,保证其收益的稳定性;若交货点在用户侧,则相应的 ARR 分配给用户,当出现阻塞时,用户得到阻塞盈余,保证其购电成本的稳定性。

2) 优先保证基荷容量获得相应的 ARR:先分配基荷容量对应的 ARR,再分配峰荷容量对应的 ARR,优先保证基荷容量获得相应的 ARR,分配结果的示意如图 1 所示。直接分配基荷和峰荷容量对应的 ARR 结果如图 2 所示。

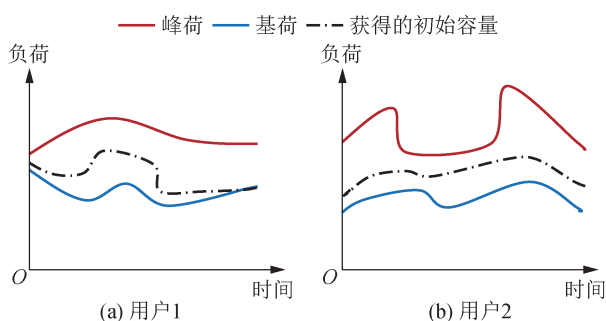


图 1 方案 1:先分配基荷容量的 ARR,再分配峰荷容量的 ARR

Fig. 1 Scheme 1: sequential allocation of ARR for base-load followed by peak-load

对比 2 种分配方式的结果可以发现,直接分配基荷和峰荷容量可能会导致部分用户的 ARR 小于其基荷容量,影响其基本用电权益。先分配基荷容量的 ARR,可以避免这一问题,在峰荷容量分配时进行更

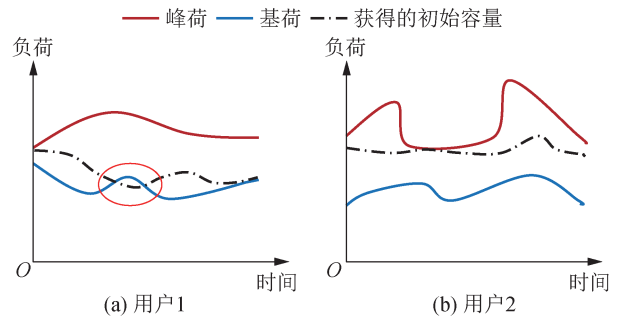


图 2 方案 2:直接分配 ARR

Fig. 2 Scheme 2: directly allocation of ARR

多削减,有利于引导用户的用电行为。

1.2 拍卖收益权分配的申报方式

根据上述所提出的分配原则,以在中长期合同部分交货点在负荷侧为例,设计如下的 ARR 申报方式:

1) 用户申报现货部分 ARR。

用户需要申报现货部分对应的 ARR,并说明路径和容量。基荷容量部分和峰荷容量部分的划分方法如图 3 所示,申报量计算方式如下:

(1) 基荷容量部分: $\max\{0, \text{历史基荷容量} - \text{中长期合同容量}\}$ 。

(2) 峰荷容量部分: $\min\{\text{历史峰荷容量} - \text{中长期合同容量}, \text{历史峰荷容量} - \text{历史基荷容量}\}$ 。

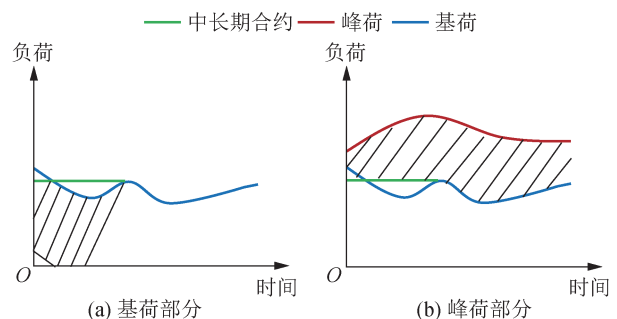


图 3 用户划分基荷容量部分和峰荷容量部分

Fig. 3 Dividing base load and peak load of customers

2) 发电商申报中长期合同部分 ARR。

发电商根据签订的中长期合同容量提交 ARR 申请,且必须申请相关节点对应的 ARR,如图 4 所示。

下面,以图 5 所示的 IEEE 5 节点系统为例,假设发电商 G1 与用户 3 签订了 70 MW 的中长期合同,列举各市场参与者的申报方式,如表 1 所示。

2 内嵌可行性测试的拍卖收益权分配算法

在系统发生阻塞的情况下,从用户侧收取的电费总额高于向发电侧支付的费用,由此产生盈余。当采用 ARR 在电力市场中分配这一阻塞盈余时,

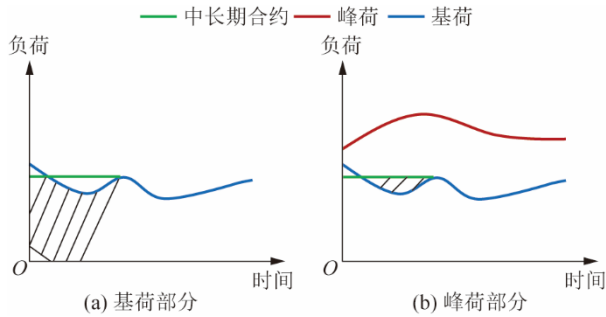


图 4 发电机划分基荷容量部分和峰荷容量部分

Fig. 4 Dividing base load and peak load of generator

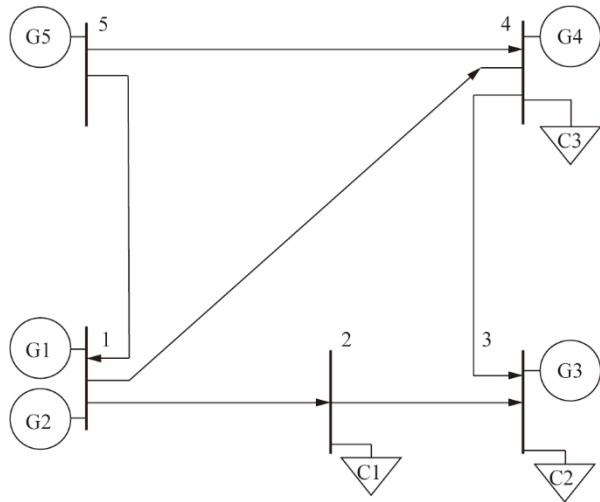


图 5 IEEE 5 节点系统

Fig. 5 IEEE 5 node system

ARR 作为金融合同而存在,不受物理约束。为保证所有分配的 ARR 在正常运行条件下都能兑现,需要对提交的每一份 ARR 申请进行可行性测试,以确保电网阻塞收费的收入足以支付 ARR。下面分别介绍采用传统可行性测试的 ARR 容量分配算法以及本文所提内嵌可行性测试的 ARR 分配算法。

2.1 基于传统可行性校验的拍卖收益权分配算法

基于传统可行性校验的拍卖收益权分配是指在所有用户提交 ARR 申请后,进行直流潮流计算,如果出现线路阻塞,则根据各线路阻塞严重程度,考虑线

路容量以及各合同路径和容量,进行削减。如果同时有多条线路发生阻塞,则依次在各阻塞线路上进行削减,直至解除阻塞。采用的削减方法为:分配容量(MW)=总申请容量(MW)×合同申请容量(MW)÷每 MW 申请容量对线路的影响。该方法的流程如图 6 所示。

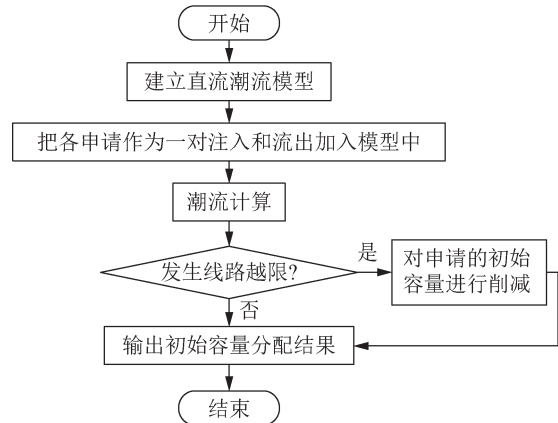


图 6 基于传统可行性校验的拍卖收益权分配算法流程

Fig. 6 Flowchart of the auction revenue rights allocation algorithm based on post-feasibility test

2.2 内嵌可行性测试的拍卖收益权分配算法

2.2.1 目标函数

内嵌可行性测试的容量分配算法将各申请容量作为优化变量,以最小化申请总容量的减少量为目标,同时考虑了同时可行性测试和线路潮流约束,目标函数为:

$$\min \left\{ \sum_{k=1}^K (L_k - l_k) + \sum_{s=1}^S (G_s - g_s) \right\} \quad (1)$$

式中: L_k 表示用户提交的第 k 份合同的申请容量; l_k 表示用户提交的第 k 份合同经过同时可行性测试后的分配容量; G_s 表示发电商提交的第 s 份合同的申请容量; g_s 表示发电商提交的第 s 份合同经过同时可行性测试后的分配容量。

2.2.2 约束条件

1) 用户提交的第 k 份合同分配容量上下限约束。

表 1 ARR 的申报方式示例

Table 1 Example of application for ARR

用户或发电商	基荷容量/ MW	历史峰荷/ MW	峰荷容量/ MW	中长期合同/ MW	拍卖收益权申请
用户 1	400	400	100		①发电商 G5 至用户 1 的 400 MW ②发电商 G5 至用户 1 的 100 MW
用户 2	350	350	50		①发电商 G3 至用户 2 的 150 MW; 发电商 G5 至用户 2 的 200 MW ②发电商 G3 至用户 2 的 50 MW
用户 3	350	280	100		①发电商 G3 至用户 3 的 220 MW; 发电商 G4 至用户 3 的 60 MW ②发电商 G3 至用户 3 的 100 MW
发电商 G5				70	①发电商 G1 至用户 3 的 70 MW

$$0 \leq l_k \leq L_k \quad (2)$$

$$0 \leq g_s \leq G_s \quad (3)$$

2)节点注入量约束。节点注入量定义为所有起始于该节点的申请容量之和:

$$N_i = \sum_{k=1}^{K_i} L_k + \sum_{s=1}^{S_i} G_s \quad (4)$$

式中: N_i 为第*i*个节点的节点注入量; K_i 为起始于节点*i*的用户提交的所有合同数; S_i 为起始于节点*i*的发电商提交的所有合同数。

3)线路潮流约束。

$$|P_l| = \left| \sum_i^N \sigma_{l,i}^{PTDF} N_i \right| \leq C_l \quad (5)$$

式中: P_l 为线路*l*的功率; $\sigma_{l,i}^{PTDF}$ 为由于在节点*i*注入引起的线路*l*的潮流分布因子; C_l 为输电线路*l*的最大功率容量; N 为节点总数。

3 仿真分析

本节在图5所示的IEEE 5节点系统上进行测试,该系统各线路的容量如表2所示,参与者提交的ARR申请如表3所示,该系统的敏感因子矩阵如表4所示。

3.1 拍卖收益权分配原则的效果验证

为验证所提ARR分配原则的效果,本节将对先分配基荷再分配峰荷的方案与直接分配的方案的分配结果。

先分配基荷电量再分配峰荷电量的分配结果如表5所示。在先分配基荷再分配峰荷的情况下,所有用户都保证了与其基荷用容量对应的ARR。直接分

表2 线路容量
Table 2 Line limits

线路	起始节点	到达节点	线路容量/MW
1	1	2	400
2	1	4	60
3	1	5	
4	2	3	
5	3	4	
6	4	5	

表3 ARR申请
Table 3 Application for ARR

用户或发电商	总容量/MW	ARRs 申请
用户1	600	发电商G5至用户1的600 MW
用户2	130	发电商G5至用户2的130 MW
发电商G5	70	发电商G5至用户2的70 MW

表4 传输分布因子矩阵
Table 4 Power transfer distribution factors matrix

线路	节点1	节点2	节点3	节点4	节点5
1	0.193 9	-0.475 9	-0.349 0	0	0.159 5
2	0.437 6	0.258 3	0.189 5	0	0.360 0
3	0.368 5	0.217 6	0.159 5	0	-0.519 5
4	0.193 9	0.524 1	-0.349 0	0	0.159 5
5	0.193 9	0.524 1	0.651 0	0	0.159 5
6	-0.368 5	-0.217 6	-0.159 5	0	-0.480 5

配的分配结果如表6所示,直接分配的方式导致用户2获得的ARR小于其基荷用容量,影响其基本用电权益。

表5 先分配基荷电量再分配峰荷电量的分配结果
Table 5 Results of sequential allocation for base-load followed by peak-load

用户或发电商	总容量/MW	ARR 申请		ARR 分配结果	
		基荷	峰荷	基荷	峰荷
用户1	600	发电商G5至用户1的300 MW	发电商G5至用户1的300 MW	发电商G5至用户1的300 MW	发电商G5至用户1的101.8 MW
用户2	130	发电商G5至用户2的60 MW	发电商G5至用户2的70 MW	发电商G5至用户2的60 MW	发电商G5至用户2的14.2 MW
发电商G5	70	发电商G5至用户2的30 MW	发电商G5至用户2的40 MW	发电商G5至用户2的30 MW	发电商G5至用户2的8.1 MW

表6 直接分配的分配结果
Table 6 Results of direct allocation

用户或发电商	总容量/MW	ARR 申请	ARR 分配结果
用户1	600	发电商G5至用户1的600 MW	发电商G5至用户1的442.6 MW
用户2	600	发电商G5至用户2的130 MW	发电商G5至用户2的57.2 MW
发电商G5	130	发电商G5至用户2的70 MW	发电商G5至用户2的30.8 MW

3.2 不同 ARR 容量分配算法结果对比

本节对不同分配算法的 ARR 分配结果进行对比分析。申报方式均对应 1.2 节中的申报方式,参与者提交的 ARR 申请如表 3 所示。算法结果评价指标包括总削减量和线路利用率,其中总削减量为各合同申报容量与获得 ARR 之差的总和;线路利用率为系

统中所有有容量限制的线路上各线路流量与其最大容量之比平均值。

3.2.1 LMP 机制下 ARR 容量分配结果分析

节点边际电价 (locational marginal pricing, LMP) 机制下,基于传统可行性测试和内嵌可行性测试的 ARR 容量分配结果如表 7 所示。

表 7 LMP 机制下 ARR 的分配结果
Table 7 Results of ARR under the LMP mechanism

方法	阻塞线路	优先削减	二次削减	分配结果	总削减量/MW	线路利用率/%
传统可行性测试	1—2 1—4	1—2	1—4	用户 1:416.5 MW 用户 2:67.3 MW 发电商 G5:36.2 MW	279.9	89.7
	1—2 1—4	1—2		用户 1:442.6 MW 用户 2:57.2 MW 发电商 G5:30.8 MW	269.4	90.8
内嵌可行性测试	1—2 1—4			用户 1:590.2 MW 用户 2:0 MW 发电商 G5:0 MW	209.8	96.9

对于采用传统可行性测试的 ARR 容量分配算法,由于线路 1—2 和 1—4 都发生阻塞。该算法需依次根据阻塞线路进行削减。当先按线路 1—2 进行削减,再按线路 1—4 进行削减时,用户 1 分配的 ARR 为 416.5 MW,用户 2 分配的 ARR 为 67.3 MW,发电商 G5 分配的 ARR 为 36.2 MW。总削减量为 279.9 MW,线路利用率为 89.7%。反之,如果先按线路 1—4 进行削减,则执行一轮削减后,线路 1—2 不再出现阻塞。用户 1 分配的 ARR 为 442.6 MW,用户 2 分配的 ARR 为 57.2 MW,发电商 G5 分配的 ARR 为 30.8 MW,总削减量为 269.4 MW,线路利用率为 90.8%。该结果表明采用传统可行性测试的 ARR 容量分配算法受到削减时阻塞线路顺序的影

响,会得到不同的 ARR 分配结果,影响削减结果的公平性。

对于内嵌可行性测试的 ARR 容量分配算法,用户 1 分配的 ARR 为 590.2 MW,用户 2 和发电商 G5 分配的 ARR 为 0 MW,总削减量为 209.8 MW,线路利用率为 96.9%。可以看到,所提方法实现了总削减量最小、线路利用率最大,不存在优先削减受阻塞影响大的用户 ARR 的情况,削减结果具有公平性。

3.2.2 负荷侧统一电价机制下 ARR 容量分配结果分析

在负荷侧统一电价机制下,采用传统可行性测试和内嵌可行性测试的 ARR 分配算法的分配结果如表 8 所示。

表 8 负荷侧统一电价机制下 ARR 的分配结果
Table 8 Results of ARR under the load-side uniform pricing mechanism

方法	阻塞线路	优先削减	二次削减	分配结果	总削减量/MW	线路利用率/%
传统可行性测试	1—4	1—4		用户 1:277.2 MW 用户 2:60.0 MW 发电商 G5:32.3 MW	430.5	74.2
内嵌可行性测试	1—4			用户 1:392.8 MW 用户 2:43.3 MW 发电商 G5:23.3 MW	340.7	83.4

在该情况下,只有线路 1—4 出现阻塞。对于采用传统可行性测试的 ARR 容量分配算法,用户 1 分配的 ARR 为 277.2 MW,用户 2 分配的 ARR 为 60.0 MW,发电商 G5 分配的 ARR 为 32.3 MW,总削减量为 430.5 MW,线路利用率为 74.2%。对于内嵌可行性测试的 ARR 容量分配算法,用户 1 分配的 ARR 为 392.8 MW,用户 2 分

配的 ARR 为 43.3 MW,发电商 G5 分配的 ARR 为 23.3 MW,总削减量为 340.7 MW,线路利用率为 83.4%。

可以看到,所提方法实现了更低的总削减量和更高的线路利用率。此外,在负荷侧统一电价机制下,不存在优先削减受阻塞影响大的用户 ARR 的情况,保证了公平性。

4 结 论

本文研究了负荷侧统一电价模式下的 ARR 分配机制与算法。提出了基于“谁承担阻塞风险,谁获得 ARR”和“优先保证基荷容量获得相应的 ARR”的分配原则,设计了市场参与者的 ARR 申报方式,保障了参与者的基本用电权益,进一步提出了内嵌可行性测试的 ARR 分配算法。基于 IEEE 5 节点系统进行仿真分析,验证了所提的分配原则可以保障用户的基本用电权益。相比采用传统可行性测试的 ARR 分配算法,所提内嵌可行性测试的 ARR 分配方法提高了 ARR 分配结果的公平性,减少了总削减量,提高了线路利用率。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明 (Authors' Contributions):

王梦圆设计研究思路,起草论文并参与论文修订;顾依凡参与算例实验数据分析;曾丹参与设计研究思路与研究方案可行性调查分析;平健参与设计研究思路与设计研究方案;孙珂参与确定研究对象范围;唐琦雯参与研究方案可行性调查分析;严正参与研究方案可行性调查分析,审核论文内容。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

5 参考文献

- [1] 陈熠,王晗,徐潇源,等. 省间-省内两级市场协调下两阶段分布鲁棒经济调度模型[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(9): 1114-1125.
CHEN Yi, WANG Han, XU Xiaoyuan, et al. A two-stage distributionally robust economic dispatch model under the coordination of inter-provincial and intra-provincial bi-level market [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(9): 1114-1125.
- [2] 朱彦名,徐潇源,严正,等. 面向电力物联网的含可再生能源配电网运行展望[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 176-187.
ZHU Yanming, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Prospect of renewable energy integrated distribution network operation in the power internet of things [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 176-187.
- [3] 刘政,雷少锋,王清亮,等. 考虑备用共享的区域电力现货市场出清模型[J]. 电力建设, 2021, 42(11): 63-71.
LIU Zheng, LEI Shaofeng, WANG Qingliang, et al. Clearing model of regional electricity spot market considering reserve sharing [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(11): 63-71.
- [4] 陶冶,魏震波,兰森林,等. 考虑电力期货交易的发电企业全市场收益优化模型[J]. 电力建设, 2024, 45(5): 141-149.
TAO Ye, WEI Zhenbo, LAN Senlin, et al. Market-wide revenue optimization model of power generation company considering electricity futures trading [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(5): 141-149.
- [5] CHENG X Y, YAO R Q, POSTNIKOV A, et al. Decentralized intelligent multi-party competitive aggregation framework for electricity prosumers [J]. Applied Energy, 2024, 373: 123860.
- [6] 刘丽,叶钰童,王宝,等. 面向省间电力现货市场的购电博弈竞价模型[J]. 浙江电力, 2024, 43(7): 111-119.
LIU Li, YE Yutong, WANG Bao, et al. A game bidding model for electricity purchasing tailored to inter-provincial electricity spot market [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(7): 111-119.
- [7] 黄涵颖. 电力市场下的阻塞管理方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
HUANG Hanying. Research on congestion management in power market [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [8] 王宁,吴明兴,王浩浩,等. 广东现货市场阻塞费用分配机制现状与发展方向分析[J]. 电力建设, 2023, 44(4): 1-7.
WANG Ning, WU Mingxing, WANG Haohao, et al. Analysis on congestion revenue allocation mechanism in Guangdong power spot market and future development [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4): 1-7.
- [9] 张潮,谢珣,顾卫祥,等. 考虑特高压直流输电影响的省间电力现货市场协调交易方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(5): 83-90.
ZHANG Chao, XIE Xun, GU Weixiang, et al. A coordinated trading method for the inter-provincial electricity spot market considering the impact of UHVDC transmission systems [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(5): 83-90.
- [10] 赵懿雯,温家兴,陈斐,等. 可再生能源配额制下电力市场发电主体决策优化模型[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 150-155, 162.
ZHAO Yiwen, WEN Jiaying, CHEN Fei, et al. Optimization model of power generation subject decision-making in electricity market under renewable energy quota system [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 150-155, 162.
- [11] 王正风,王吉文,高卫恒,等. 电力现货市场阻塞费用结算机制分析[J]. 浙江电力, 2024, 43(1): 57-63.
WANG Zhengfeng, WANG Jiwen, GAO Weiheng, et al. Analysis of congestion cost settlement mechanisms in electricity spot market [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(1): 57-63.
- [12] 杨争林,曾丹,冯树海,等. 电力市场实验能力建设面临的挑战及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 111-120.
YANG Zhenglin, ZENG Dan, FENG Shuhai, et al. Challenges and key technologies of experiment capability construction for electricity market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 111-120.
- [13] YE Y J, QIU D W, SUN M Y, et al. Deep reinforcement learning for strategic bidding in electricity markets [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1343-1355.
- [14] 刘扬. 考虑输电阻塞的电力系统分区策略研究与应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
LIU Yang. Research and application of power system partition strategy considering transmission congestion [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [15] 苏健,彭建春,江辉,等. 基于交流潮流的双边交易模式下阻塞费用分摊[J]. 继电器, 2007, 35(5): 41-44.
SU Jian, PENG Jianchun, JIANG Hui, et al. A new method for congestion cost allocation considering AC power flow under bilateral transaction [J]. Relay, 2007, 35(5): 41-44.

- [16] TYNAN A C, DRAYTON J. Market segmentation [J]. *Journal of Marketing Management*, 1987, 2(3): 301-335.
- [17] 孙可, 兰洲, 林振智, 等. 国际典型电力市场阻塞管理机制及其对中国的启示研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(12): 170-178.
SUN Ke, LAN Zhou, LIN Zhenzhi, et al. Transmission congestion management mechanism of typical international power markets and possible guidance for China's power market [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(12): 170-178.
- [18] Commission Regulation (EU) 2015/1222 of 24 July 2015 establishing a guideline on capacity allocation and congestion management (Text with EEA relevance) [EB/OL]. (2015-07-24) [2024-06-15]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015R1222>.
- [19] ERCOT CRR market overview [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://www.pjm.com/-/media/committees-groups/task-forces/afmtf/2020/20200325/20200325-item-09-ercot-crr-market-overview.ashx>.
- [20] GUAN Y F, KEZUNOVIC M. Contingency-based nodal market operation using intelligent economic alarm processor [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(1): 540-548.
- [21] FELDER F A. Financial transmission rights: analysis, experiences and prospects [J]. *The Energy Journal*, 2016, 37(1): 292-295.
- [22] 甘子莘, 荆朝霞, 谢文锦, 等. 适应中国电力市场改革现状的输电权分配机制[J]. *中国电力*, 2021, 54(6): 54-61.
GAN Zishen, JING Zhaoxia, XIE Wenjin, et al. Financial transmission right mechanism and its application in China electricity market [J]. *Electric Power*, 2021, 54(6): 54-61.
- [23] 别佩, 王宁, 王浩浩, 等. 美国金融输电权机制比较及其借鉴 [J]. *价格理论与实践*, 2022(11): 120-124.
BIE Pei, WANG Ning, WANG Haohao, et al. American FTR mechanism and its reference value [J]. *Price (Theory & Practice)*, 2022(11): 120-124.
- [24] 曾鸣, 刘超, 段金辉, 等. 美国与北欧电力双边交易市场模式的经验借鉴 [J]. *华东电力*, 2013, 41(1): 5-10.
ZENG Ming, LIU Chao, DUAN Jinhui, et al. The bilateral electricity market modes of typical countries and our reference from America and Nordic [J]. *East China Electric Power*, 2013, 41(1): 5-10.
- [25] 谢开. 美国电力市场运行与监管实例分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [26] ISO New England Inc. ISO New England manual for financial transmission rights [EB/OL]. [2024-06-15]. https://www.iso-ne.com/static-assets/documents/2018/10/manual_06_financial_transmission_rights_rev11_20181004.pdf.
- [27] Monitoring Analytics. Financial transmission and auction revenue rights [R/OL]. [2024-06-15]. https://www.monitoringanalytics.com/reports/PJM_State_of_the_Market/2016/2016-som-pjm-sec13.pdf.
- [28] BYKHOVSKY A, HANSON C, JAMES D A. Incremental auction revenue right portfolios as qualified upgrade award replacement in the New England market [C]//2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. IEEE, 2006: 8.
- [29] OPGRAND J J. The role of auction revenue rights in markets for financial transmission rights [D]. West Lafayette, IN, USA: Purdue University, 2019.
- [30] 林少华, 别佩, 王浩浩, 等. 在南方(以广东起步)电力现货市场下的阻塞收益权分配机制 [J]. *南方电网技术*, 2022, 16(5): 115-122.
LIN Shaohua, BIE Pei, WANG Haohao, et al. Allocation mechanism of congestion revenue right in Southern China (starting from Guangdong Province) electric spot market [J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(5): 115-122.
- [31] OPGRAND J, PRECKEL P V, GOTHAM D J, et al. Price formation in auctions for financial transmission rights [J]. *The Energy Journal*, 2022, 43(3): 33-57.
- [32] 杨柳, 曾智健, 张杰, 等. 统一结算点电价机制下金融输电权的交易模拟与结算风险评估 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(6): 116-122.
YANG Liu, ZENG Zhijian, ZHANG Jie, et al. Transaction simulation and settlement risk assessment of financial transmission right with electricity pricing mechanism of unified settlement point [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(6): 116-122.
- [33] KRISTIANSEN T. Allocation of long-term financial transmission rights for transmission expansion [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 184(3): 1122-1139.
- [34] 刘志鹏, 林顺富, 钱亮, 等. 考虑金融输电权的配电网阻塞管理 [J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(2): 86-94.
LIU Zhipeng, LIN Shunfu, QIAN Liang, et al. Congestion management of a distribution network considering financial transmission rights [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(2): 86-94.
- [35] Monitoring Analytics. 2010 state of the market report for PJM: technical reference for PJM markets [R/OL]. (2011-03-11) [2024-06-15]. http://www.monitoringanalytics.com/reports/Technical_References/docs/2010-som-pjm-technical-reference.pdf.

收稿日期: 2024-06-21 修回日期: 2024-08-15

作者简介:

王梦圆(1994),女,博士,助理研究员,通信作者,主要研究方向为电力市场、新能源发电建模、感知与预测,E-mail: wangmy@sjtu.edu.cn;

顾依凡(2002),女,硕士研究生,主要研究方向为电力市场、电力系统优化运行,E-mail: guyifan02@sjtu.edu.cn;

曾丹(1986),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力市场、需求响应、电网优化调度,E-mail: zengdan@epri.sgcc.com.cn;

平健(1994),男,博士,助理教授,主要研究方向为能源区块链、分布式新能源交易运行、电力市场,E-mail: ppjj1994@sjtu.edu.cn;

孙珂(1982),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化,E-mail: 2893862@qq.com;

唐琦雯(1989),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化,E-mail: tangqiwen8888@126.com;

严正(1964),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统优化运行、电力系统稳定分析及智能电网,E-mail: yanz@sjtu.edu.cn。

(编辑 景贺峰)