

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210233

# 基于图论网络流算法的新能源跨区域交易路径输电定价策略

罗治强<sup>1</sup>, 姚寅<sup>2</sup>, 董时萌<sup>1</sup>, 郑晓雨<sup>1</sup>, 关立<sup>1</sup>, 周波<sup>2</sup>, 陆大欢<sup>2</sup>

(1. 国家电网公司国家电力调度控制中心, 北京 100031; 2. 上海电力大学, 上海 200090)

**摘要:** 针对新能源跨区域消纳中存在的 key 节点辨识、最大输送额度评估、输电成本归集与分摊问题, 提出了一种基于图论网络流算法的跨区域交易路径输电定价策略。首先, 通过构建特高压网络的拓扑结构简化图模型, 对简化图的网络连通度、系统 key 节点的易损性进行分析。其次, 在简化图中设定与交易路径中售电、购电方对应的源、汇点, 采用 Edmond-Karp 算法对源、汇点间的增广路径进行搜索, 对交易路径的最大输送额度实现有效的快速评估。最后, 以社会福利最大化为优化目标, 对多个可行交易路径中的不同流量进行优化配置。采用基于图论的输电成本分摊方法对青海至湖南的新能源跨区域交易路径进行了算例分析, 与现行交易路径的输电成本进行了对比分析, 验证了所提交易路径输电定价策略的有效性与优越性。

**关键词:** 图论; 网络流算法; 新能源消纳; 交易路径; 输电成本分摊; 电力市场

## Transmission cost allocation strategy of a renewable energy cross-regional transaction path based on a graph theory network flow algorithm

LUO Zhiqiang<sup>1</sup>, YAO Yin<sup>2</sup>, DONG Shimeng<sup>1</sup>, ZHENG Xiaoyu<sup>1</sup>, GUAN Li<sup>1</sup>, ZHOU Bo<sup>2</sup>, LU Dahuan<sup>2</sup>

(1. National Electric Power Dispatching and Control Center, State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;

2. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** There are issues of identification of key nodes in cross-regional consumption of renewable energy, in rapid assessment of the maximum transmission quota, and in the collection and allocation of transmission costs. Thus this paper proposes a cross-regional transaction path Transmission Cost Allocation (TCA) strategy based on a graph-theory network-flow algorithm. First, this paper builds a simplified graph model of the UHV network from the perspective of pure topological structure, analyzes the network connectivity of the simplified graph, and obtains the identification of the key nodes in the system. Secondly, the source and sink nodes are set corresponding to the electricity sellers and buyers in the transaction path, and to increase the maximum feasible flow between the sources and sinks by the Edmond-Karp algorithm. The search for augmenting path realizes an effective and rapid estimation of the maximum delivery amount of the transaction path. Finally, a case study is carried out on the Qinghai-Hunan renewable-energy consumption transaction path through graph theory based TCA, and the results of the current transaction path are introduced to verify the effectiveness, rationality and feasibility of the algorithm.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Promote the Key Technologies Research and Application of Inter-Provincial Incremental Allocation of Spot Electricity Market for Renewable Energy Consumption" (No. SGJS0000DKJS1900147).

**Key words:** graph theory; network flow algorithm; renewable energy consumption; transaction path; transmission cost allocation; power market

## 0 引言

中国能源分布的不均衡性、地区经济发展的差

异性造成了能源供需的逆向分布。以青海新能源发电与消纳为例, 西北地区本地消纳能力有限, 必须通过全国范围内的资源优化分配, 即鼓励新能源跨区域交易的政策支持下, 才能有效改善大规模弃风、弃光的情况<sup>[1]</sup>。

在《电力发展“十三五规划”(2016~2020年)》中, 国家电网公司提出合理筹划建设电力外送通道,

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“促进新能源消纳的省间增量配置电力现货市场关键技术研究与应用”(SGJS0000DKJS1900147)

增强电力资源跨省跨区域输送和接受能力。目前,国内特高压通道相对单一,国家电网公司一般按照年度、季度或者月度统筹组织跨区域电量交易。新能源跨区域交易主体以直流为主,远距离输电产生的容量成本与运维成本,通过市场总负荷进行分摊。但是,随着特高压线路的逐渐增多,输电网络复杂度将持续提升,省间电力交易路径的配置问题将日益突出。

文献[1-2]综述了我国8个试点省间现货市场建设以及对于新能源消纳的促进作用。文献[3]考虑了稳态与动态的有功平衡约束,提出了新能源消纳能力的综合评估方法。文献[4]提出了最大受电公平性指标,对跨区域直流消纳方案的优劣进行了量化评估。

然而在复杂电网结构下,针对跨区域交易路径的输电成本分摊问题的研究仍相对匮乏。输电成本分摊主要有两种方法:第一种是基于成本分摊,另一种是基于使用量分摊。

1) 基于成本分摊的方法分为嵌入成本法和局部边际成本法。嵌入成本法本质上是对输电成本的核算。该方法着眼于抵消电网运行的实际支出和投资成本。文献[5]在最常用的邮票法基础上,将固定成本和运营成本的分配问题定义为无限多人合作博弈。Aumann-Shapley值被用于输电成本分摊<sup>[5]</sup>、传输损耗分配<sup>[6]</sup>、需求侧资源聚合商的利润分配<sup>[7]</sup>和对支路互耦合功率的损耗分摊<sup>[8]</sup>。基于博弈论的分配方法保证了总成本的公平分配与回收。但是,价格信号并不包含任何经济信息,不能有效指导电网资源的优化利用和电网的长远发展。

局部边际成本法以经济效益最大化为目标,有效地指导了电网的经济运行。文献[9]提出了一种基于责任的算法,将传输阻塞与损耗的成本分摊至各网络节点,克服了局部边际成本法的不对称性。文献[10]考虑了基于边际定价的合作博弈论问题的复杂性,利用最小-最大公平策略在多项式时间内求解了这一难题。随着可再生能源渗透率的增加,文献[11]考虑了交直流混合的传输结构,提出了基于局部边际成本的节点定价方法。文献[12]将输电网络的扩展问题和资源配置问题定义为基于局部边际成本的三层级优化问题。文献[13]提出了计及电力现货市场竞争效率的输电定价量化评价指标。综上所述,为满足未来微小增量需求的长期边际成本法需要使用一些高度不确定性的假设,计算过程比较复杂。短期边际成本法不能保证收支平衡。如果电网建设的投资无法收回,电网公司将不会接受这种分摊方案。

2) 基于使用量分摊的方法根据电网或设备的使用情况,确定市场参与者在总成本中所占的比例。文献[14]提出了一种基于广义负荷分布因子和全负荷使用程度的主动配电网成本分摊方法。文献[15]建立了备用费用在各责任方之间的公平分摊模型,有效保证了备用费用分摊的公平性。文献[16]中线容量被 $N-1$ 安全条件下的最大线路负荷所取代,在联合电力市场中实现了更公平的固定成本分配。文献[17]考虑了负荷质量,在兆瓦-公里法中引入了功率因数。文献[18]将传输容量分为正常状态容量、应急容量、未来使用容量和无效容量。文献[19]提出了一种基于电路理论的输电成本分摊方法,将Aumann-Shapley值用于分配相关组件之间的交互项。现有研究主要根据有功功率确定线路使用量,发电调度对最终结果影响很大,且忽略了电网的剩余传输潜力。因此,该方法不能反映跨区域交易对省间联络线的真实使用情况。

除电力经济理论外,现有研究也基于图论从拓扑结构方面对跨区域电力传输进行了分析。文献[20]以社会效益最大、交易量最大为目标,提出了新能源跨区域交易的优化算法,解决了点-弧模型对于含正权环路径的优化问题。文献[21]提出了拓展网络流算法,实现了每笔跨区域交易的有效追踪。文献[22]基于图论分析了关键节点的移除对于电力系统全局网络易损性的影响。现有研究主要采用图论进行网络易损性分析,对于基于图论的输电成本分摊方向的研究仍显不足。

本文针对跨区域交易路径配置中存在的易损性分析、最大输电容量评估、输电成本分摊问题,提出了基于图论的输电成本分摊方法。改进了传统的直流最优潮流算法必须考虑松弛节点与逆向潮流的问题;量化分析了复杂网络下跨区域交易路径的最大流量;构建了基于图论网络流算法的输电成本分摊策略。最后,通过算例分析验证了本文所提策略的有效性 with 优越性。

## 1 基于图论的跨区域交易路径建模

### 1.1 图的定义

工程数理问题中涉及系统的连通性与相互关系时,可以定义图以便直观可视化地分析解决问题。电力系统输电网络中各节点可描述为图 $G$ 中的顶点集,各输电线路可描述为图 $G$ 中的边集,节点 $u$ 、 $v$ 间电流的方向描述为流 $f(u,v)$ 的方向,输电线路-电力系统传输网络可描述为由节点顶点集 $V(G)$ 、输电线路边集 $E(G)$ 、线路容量集 $C(G)$ 组成的有向简单图 $G(V, E, C)$ 。

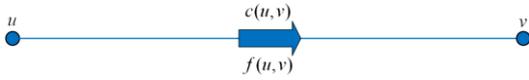


图1 图论输电线路简化模型

Fig. 1 Simplified graph model of transmission line

### 1.2 交易路径的连通度

电力市场以完善的、不会轻易瘫痪的电力传输网络为基础。电力交易中的售电方，如西北地区风场，在图  $G$  中描述为源点  $s$ 。电力交易中的买电方，如长三角地区负载，在图  $G$  中描述为汇点  $t$ 。

源汇点间交易路径的连通度定义为：如果图  $G$  的顶点子集  $S \in V(G)$  使得  $G-S$  的分支多于一个，则称之为  $G$  的一个分离集或点割。图  $G$  中使得  $G-S$  不连通或者只有一个顶点的子集  $S$  的最小势，称为  $G$  的连通度，记作  $K(G)$ 。如果图  $G$  的连通度至少为  $K$ ，则称之为  $K$ -连通。

### 1.3 交易路径网络流的最大流

另一个评估交易路径的重要问题是搜索源点与汇点间的总传输量最大方案。即对于有向加权图  $G$ ，每条有向边都连接两个特定的顶点，并且拥有一个对应的权值代表该路径的单位时间最大承载量，假设流不能在有向边的连接点处聚集，求解给定网络中的源点  $s$  和汇点  $t$  之间的最大流量。该问题的求解同样从纯拓扑结构角度对交易路径的配置给出了单位时间最大流量的参考值，并且对传输系统中可能产生的瓶颈线路给出了可视化的评估。

网络流定义如下：一个网络是一个有向图，它的每条边  $e$  均具有非负容量  $c(e)$ ，且它有相互区别的源点  $s$  和汇点  $t$ 。一个流为每一条边  $e$  分配一个值  $f(e)$ ， $f(u,v)$  为从  $u$  到  $v$  的可行流。在定义了网络中的可行流后，便可引入残留网络以及增广路径的概念，两者在电力传输网络中也具有相对应的物理意义。

1) 残留网络在电力传输网络中的物理意义为：电力传输网络中仍有残留容量的线路所构成的输电网络。跨区域的新能源消纳是构建在省内输电需求优先的基础上的，因此，新能源消纳交易路径的配置必然也是构建在计入省内输电额度后的残留网络基础上，搜索并利用源汇点之间的电能传输增量。

2) 增广路径在电力传输网络中的物理意义为：残留电力传输网络中，源汇点之间能够提供正向流增量的交易路径。新能源的跨区域消纳可通过多端直流互联网或传统交流互联网进行。如选择传统交流互联网，必然需要考虑其他类型的跨区域电力输

送。通过增广路径的概念可以将各个可行流协调分配给不同类型的电力输送。

最大流算法能够从拓扑结构角度对交易路径的系统回能以及最大输送能力给出可视化的数值估计。算法应用的关键点在于增广路径的搜索方法与计算效率。

本文采用 Edmond-Karp(EK)算法进行增广路径搜索，EK 算法归类为 Ford-Fulkson 类方法。EK 算法采用广度优先搜索(Breadth First Search, BFS)作为增广路径搜索方法。广度优先搜索方法是基础搜索法，所以 EK 算法逻辑较为简单，适用于跨区域的复杂电力系统<sup>[23]</sup>。

Edmond-Karp 算法基本步骤如下。

1) 初始化网络中所有边的容量， $c<u,v>$  继承改变的容量， $c<u,v>$  初始化为 0，其中边  $<v,u>$  即为退回边。初始化最大流为 0。

2) 在残留网络中广度优先搜索一条从源点  $s$  到汇点  $t$  的增广路径  $p$ 。当队头弹出的点为终点时即可判增广路径找到，则转步骤(3)；如不能找到，则转步骤(5)。

3) 在增广路径  $p$  中找到所谓的“瓶颈”边，即路径中容量最小的边，记录下这个值  $X$ ，并且累加到最大流中，转步骤(4)。

4) 将增广路径中所有  $c<u,v>$  减去  $X$ ，所有  $c<v,u>$  加上  $X$ ，构成新的残留网络。转步骤(2)。

5) 得到网络的最大流，退出。

EK 算法中使用 BFS 增广时增广次数不超过  $E \cdot V$  次。 $E$  为图  $G$  中边的数量， $V$  为图  $G$  中顶点的数量。

## 2 基于网络流的输电成本优化与分摊算法

本项目考虑跨区域联络线网络的复杂性以及输电成本分摊的公平性问题，提出了基于网络流理论的输电成本优化与分摊算法。该算法能对同一线路内多个交易路径的使用流量进行解耦，构建以线路使用量为基准的输电成本分摊策略，提高了输电成本分摊算法的公平性。

### 2.1 跨区域交易路径的输电成本优化

网络流优化的决策变量为边上的流量  $e(u,v)$ 。在复杂网络中，不同的买卖双方可在同一线路同时进行多笔交易。现有的输电成本分摊方法只能提供基于边上总潮流的解决方案，不能进一步细分每个交易路径的流。因此，本文采用基于扩展图理论的输电成本分摊方法来解决复杂网络中多个交易路径的并发性问题<sup>[21]</sup>。

优化变量由原来的二维变量  $f(u,v)$  展开为四维优化变量  $f_{uv}^{st}$ 。每条边的价差收益率参数  $b(u,v)$  也扩展到四维  $b_{uv}^{st}$ , 其中  $s$  代表卖方,  $t$  代表买方。当多个交易经过同一条边  $e(u,v)$  时, 可通过购售交易对  $(s,t)$  进行区分, 并对同一条边上的多个交易路径进行解耦。社会福利最大化的目标函数如下式所示。

$$\max U = \sum_{(s,t) \in Z} f_{uv}^{st} b_{uv}^{st} \quad (1)$$

$$b_{uv}^{st} = \begin{cases} -p_s, & u = s, s \in S \\ p_t, & v = t, t \in T \\ -l_{uv} p_s, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \sum_{(s,t) \in Z} x_{uv}^{st} \leq c_{uv} \quad (3)$$

$$\sum_{v=1}^n f_{uv}^{st} - \sum_{v=1}^n f_{vu}^{st} = 0, u \in TX \quad (4)$$

$$\sum_{(s,t) \in Z} \frac{f_{uv}^{st} t_{uv}}{c_{uv}} + \sum_{(s,t) \in Z} \frac{f_{vu}^{st} t_{vu}}{c_{vu}} = t_{uv}, u, v \in TX \quad (5)$$

式中:  $p_s$  为节点  $s$  的申报电价;  $p_t$  为节点  $t$  的申报电价;  $l_{uv}$  为边  $(u,v)$  的网损率;  $S$  为所有卖方的集合;  $T$  为所有买方的集合;  $Z$  为所有购售交易对的集合;  $TX$  是所有买方和卖方的集合。假设节点排序从  $s$  开始到  $t$ , 节点总数为  $n$ 。式(3)、式(4)、式(5)分别为潮流传输容量约束、节点流量平衡约束、线路正向和反向利用小时约束。式(3)约束表示所有经过边  $e(u,v)$  的来自不同购售交易对  $(s,t)$  的交易流量累加后小于边  $e(u,v)$  的潮流传输容量  $c_{uv}$ ; 式(4)约束表示对于所有中间节点, 每个购售交易对  $(s,t)$  的流入潮流等于流出潮流; 式(5)约束考虑了联络线通道不能正反向同时输送电能, 所以在联络线输送容量约束的基础上增加正反向利用小时数约束。对于每一段输电线路, 其正反向利用小时数之和应等于该输电线路总的可利用小时数  $t_{uv}$ 。

## 2.2 基于网络流算法的输电成本分摊

兆瓦-公里法是将电网公司发生的所有输电成本按照交易输电量及电量输送距离进行平均分摊的定价方法。此方法根据输电业务实际流入与流出节点确定电力系统潮流情况, 对输电总成本在全网进行分摊<sup>[17]</sup>, 计算公式如式(6)所示。

$$C_j = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{T_c \cdot L_i \cdot P_i^j}{\bar{P}_i} \right] + C_0 \quad (6)$$

式中:  $C_j$  为用户  $j$  的输电费用(CNY);  $T_c$  为预先确定的线路单位成本(CNY/km);  $L_i$  为线路  $i$  的长度(km);  $P_i^j$  为用户  $j$  在线路  $i$  的潮流(MW);  $\bar{P}_i$  为线路  $i$  的额定容量(MW);  $N$  为交易路径的线路总数;  $C_0$

为包括网损的输电运行成本。

合理的输电成本分摊方法应对涉及逆向潮流的交易路径提供适当的经济信号。在最大流算法的增广进程中已经计及逆向潮流。因此, 与经典的兆瓦-公里法相比, 基于图论的输电成本分摊方法具有以下优点。首先, 简化图中不存在松弛节点。其次, 无需对逆向潮流单独给予或收取费用。再次, 残留网络提供了交易路径的最大使用容量评估。最后, 基于网络流理论的输电成本分摊算法仍然是基于线路流量。因此, 输电成本分摊取决于流量使用, 而不是一段时间内的能量使用。

针对购售交易对间存在多个可行交易路径的情况, 根据 Menger 定理: 如果源点  $s$  与汇点  $t$  是图  $G$  的节点且  $st \notin E(G)$ , 则  $s,t$ -割的大小的最小值等于两两内部互不相交的  $s,t$ -路径的最大条数<sup>[24]</sup>。源汇节点间最小割  $K$  即确定不相交路径的最大条数也为  $K$ , 本文所提算法的具体步骤如下:

1) 对交易路径  $\langle s,t \rangle$  进行连通度测试, 确定路径最小割  $K(s,t)$ , 对  $K$  条不同路径分别计算输电价格, 每条不同路径内边的总数为  $E_k$ 。

2) 从  $k=1$  开始根据式(7)计算输电价格。

$$\begin{cases} TC[f(s,t)] = \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{e=1}^{E_k} TC_e \frac{f_e^k(u,v)}{c_e} \right] \\ f_e^k(u,v) \in [0, F_{e,\max}^{s,t}] \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $f_e^k(u,v)$  为路径  $k$  上线路  $e$  的可行流;  $c_e$  为线路  $e$  的容量;  $F_{e,\max}^{s,t}$  为购售交易对  $(s,t)$  在线路  $e$  的最大流。

3)  $k=K$  时计算结束, 输出现行路径输电价格及最大流情况下的输电价格。

## 3 算例分析

本文算例以国内现行特高压输电网架构为参考, 对省间联络线通道进行简化等值。首先采集各省申报的未来某个时段的电量余缺情况和交易价格, 统筹考虑跨区域交易通道上的网损、检修情况等因素; 其次按照本文所提基于网络流理论的交易路径优化与分摊算法, 形成跨区域新能源交易路径预案; 最后调度部门对交易路径预案进行安全校核, 生成购售电合同, 为电力市场电量结算提供依据。

本文着重分析新能源消纳的交易路径配置问题, 因此售电方选择青海省。青海省作为弃风限电最严重的省份之一, 西北地区本地消纳能力有限, 正积极通过参与省间现货市场以及中长期交易, 以

促进风电、光电发电量的“双增”，同时实现弃风弃光的“双降”。购电方选择湖南省，湖南省占据了华中地区一定的购电量。青海至湖南的现行交易路径为青海-甘肃-陕西-河南-湖北-湖南。

下文算例将从网络连通度及最大流算法两个方面分析该交易路径的系统回能以及探索该交易路径的最大输电额度。

网络连通度测试如图 2 所示。图  $G(E,V,C)$  为 1-连通图，割点以红色表示分别为湖北、陕西、河南。通过割点可将图  $G$  分割为 4 个子图，分别对应地理环境中的 1.华北东北地区、2.华东地区、3.华中地区、4.西北地区。青海-湖南交易路径涉及 3 个子图，割点数大于等于 2 个。

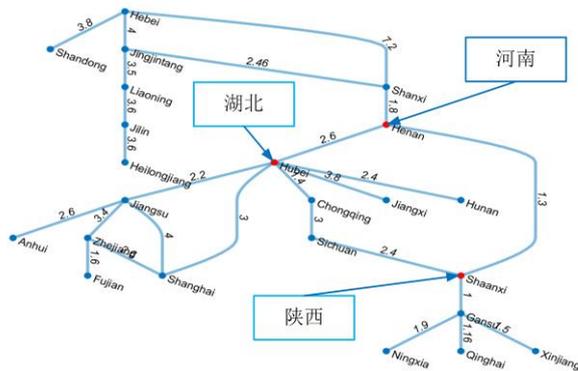


图 2 等值简化网络连通度测试

Fig. 2 Simplified network connectivity test

交易路径最大输送额度评估采用 EK 算法，输电限额根据输电线路容量，考虑检修等情况后，计算可得 30 天内可传输电量限额。EK 算法所得增广路径如图 3 所示。单位为 GWh。可行路径和“瓶颈”线路分别用绿色和红色标注。

目前青海-湖南路径的成交量为 418.6 GWh。在不考虑其余购售交易对的情况下，最大流算法在原有交易路径(青海-甘肃-陕西-河南-湖北-湖南)的基础上，新增交易路径(青海-甘肃-陕西-四川-重庆-湖北-湖南)。“瓶颈”线路为甘肃-陕西 1 411.2 GWh 及陕西-河南 705.6 GWh。在不考虑市场剩余交易的情况下，最大传输评估值为 1 411.2 GWh，非瓶颈线路最大使用率不超过 81.67%。仿真结果表明，在考虑现有电力市场交易的条件下，跨区域联络线仍有较大的未使用输电容量，跨区域新能源消纳潜力巨大。

交易路径中的陕西至湖北段，存在陕西-四川-重庆-湖北和陕西-河南-湖北两个互不相交的路径，

则陕西，湖北的最小割等于 2，当其中一段线路发生故障时，整条交易路径仍可处于工作流通状态。

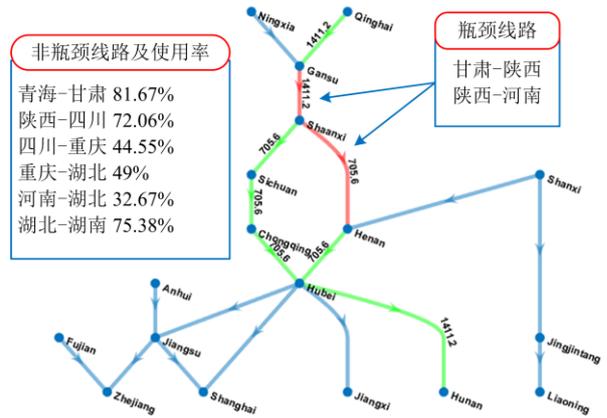


图 3 青海-湖南交易路径瓶颈线路

Fig. 3 Edmond-Karp maxflow algorithm for Qinghai-Hunan transaction path

采用传统交易路径配置、优化交易路径配置和最大流交易路径配置三种输电定价策略，对青海-湖南交易路径的输电分摊成本问题进行分析。仿真结果如图 4 所示，潮流单位为 MW。传统交易路径配置法采用兆瓦-公里法进行求解。

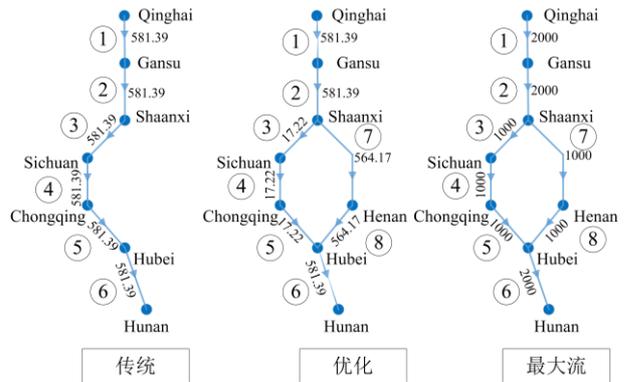


图 4 基于图论的青海-湖南交易路径输电成本分摊

Fig. 4 Graph theory based transmission cost allocation of Qinghai-Hunan transaction path

$$TC[f(\text{Qinghai}, \text{Hunan})] = \sum_{e=1}^6 \left[ TC_e \frac{f_e(u,v)}{c_e} \right] = 101104.2 \text{元} \quad (8)$$

优化交易路径配置法采用式(1)—式(5)进行求解，其中陕西至湖北段使用以社会福利为目标优化后的线路潮流为边流量。

$$\begin{aligned}
TC_{\text{opt}}[f(\text{Qinghai}, \text{Hunan})] &= \overbrace{\sum_{e=1}^2 TC_e \frac{f_e(u, v)}{c_e}}^{\text{Qinghai-Shaanxi}} + \\
&\left[ \overbrace{\sum_{e=3}^5 TC_e \frac{f_{e,\text{opt}}(u, v)}{c_e} + \sum_{e=7}^8 TC_e \frac{f_{e,\text{opt}}(u, v)}{c_e}}^{\text{Shaanxi-Sichuan-Chongqing-Hubei和Shaanxi-Henan-Hubei}} \right] + \\
&\overbrace{\sum_{e=6}^6 TC_e \frac{f_e(u, v)}{c_e}}^{\text{Hubei-Hunan}} = 89\,410.7 \text{ 元}
\end{aligned} \quad (9)$$

最大流交易路径配置法在青海至湖南段均使用残余网络中的线路潮流为边流量进行求解。

$$\begin{aligned}
TC_{\text{res}}[f(\text{Qinghai}, \text{Hunan})] &= \sum_{e=1}^2 TC_e \frac{f_{e,\text{res}}(u, v)}{c_e} + \\
&\left[ \sum_{e=3}^5 TC_e \frac{f_{e,\text{res}}(u, v)}{c_e} + \sum_{e=7}^8 TC_e \frac{f_{e,\text{res}}(u, v)}{c_e} \right] + \\
&\sum_{e=6}^6 TC_e \frac{f_{e,\text{res}}(u, v)}{c_e} = 237\,664.03 \text{ 元}
\end{aligned} \quad (10)$$

传统路径配置方法下, 单一交易路径中各联络线上流量相同。虽然采用兆瓦-公里算法简单直接, 但是尚未有效利用剩余线路的输电容量, 造成输电总成本高。源汇点间 581.39 MW 的输电总成本为 101 104.2 元, 输电单位成本为 0.174 元/kWh。同等交易量采用社会福利优化法后的输电总成本为 89 410.7 元, 输电单位成本为 0.154 元/kWh。两种方法对比可得, 优化交易路径配置可使输电分摊成本降低 11.57%。此外, 在不考虑其余购售交易对的条件, 青海至湖南的交易路径拥有 2 000 MW 最大流量, 从现有交易量提升至最大交易量的额外输电总成本为 237 664.03 元, 输电单位成本为 0.164 元/kWh, 仍低于采用传统路径配置方法的输电单位成本。

综上所述, 基于图论的输电成本分摊方法能够有效识别关键节点和“瓶颈”线路, 实现社会福利最大化, 为线路容量的未来使用成本提供参考。

## 4 结语

本文将图论网络流算法引入省间交易路径配置问题, 从拓扑结构的角度, 研究了复杂网络条件下, 跨区域交易路径配置与输电成本分摊问题。

研究表明, 简化等值图算法能对交易路径的系统回能进行可视化评估。在复杂网络下, 对交易路径的最大输送额度进行预测评估。基于网络流理论的输电成本分摊算法能为新能源通过省间联络线进行跨区域交易消纳以及输电成本的合理分配提供有

力的理论支撑。

## 参考文献

- [1] 樊宇琦, 丁涛, 孙瑜歌, 等. 国内外促进可再生能源消纳的电力现货市场发展综述与思考[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1729-1752.  
FAN Yuqi, DING Tao, SUN Yuge, et al. Review and cogitation for worldwide spot market development to promote renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1729-1752.
- [2] 赵东元, 胡楠, 傅靖, 等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 1-8.  
ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, et al. Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 1-8.
- [3] 盛四清, 邱昊, 张文朝, 等. 考虑稳态和动态有功平衡约束的新能源消纳综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 51-56.  
SHENG Siqing, QIU Hao, ZHANG Wenchao, et al. Comprehensive assessment method of new energy consumption considering steady and dynamic active power equilibrium constraints[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 51-56.
- [4] 侯依昕, 丁坚勇, 杨东俊. 基于最大受电公平性指标的跨区直流消纳模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 80-87.  
HOU Yixin, DING Jianyong, YANG Dongjun. Model for cross-region DC power consumption based on the index of fairness for maximum receiving electric power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 80-87.
- [5] 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.
- [6] AMARIS H, MOLINA Y P, ALONSO M, et al. Loss allocation in distribution networks based on Aumann-Shapley[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6655-6666.
- [7] LI B, WANG X, SHAHIDEHPOUR M, et al. Robust bidding strategy and profit allocation for cooperative dsr aggregators with correlated wind power generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1904-1915.
- [8] 王峥, 刘创华, 魏珍, 等. 基于叠加定理和 Aumann-Shapley法的发电权交易网损分摊[J]. 电力系统保护与

- 控制, 2014, 42(2): 13-22.
- WANG Zheng, LIU Chuanghua, WEI Zhen, et al. Losses allocation resulting from generation rights trade based on superposition principle and Aumann-Shapley method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 13-22.
- [9] RAU N S. Transmission loss and congestion cost allocation-an approach based on responsibility[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1401-1409.
- [10] RAO M S S, SOMAN S A. Marginal pricing of transmission services using min-max fairness policy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 573-584.
- [11] HOTZ M, UTSCHICK W. The hybrid transmission grid architecture: benefits in nodal pricing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1431-1442.
- [12] WANG J, ZHONG H, TANG W, et al. Tri-level expansion planning for transmission networks and distributed energy resources considering transmission cost allocation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1844-1856.
- [13] 丛野, 张粒子, 陶文斌. 计及电力现货市场竞争效率的输电定价机制量化评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6925-6936.
- CONG Ye, ZHANG Lizi, TAO Wenbin. Quantitative evaluation method of transmission pricing mechanism under circumstance of electricity spot market[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6925-6936.
- [14] 张伊, 陈启鑫, 夏清, 等. 基于分布因子法的主动配电网成本分摊方法[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 13-21.
- ZHANG Yi, CHEN Qixin, XIA Qing, et al. Active distribution network cost allocation method based on distribution factor method[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 13-21.
- [15] 邵立政, 刘荣辉, 汪红波, 等. 基于条件风险价值的备用成本分摊方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 23-30.
- SHAO Lizheng, LIU Ronghui, WANG Hongbo, et al. A method for cost allocation of reserve based on conditional value at risk[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 23-30.
- [16] ORFANOS G A, GEORGILAKIS P S, HATZIARGYRIOU N D. A more fair power flow based transmission cost allocation scheme considering maximum line loading for N-1 security[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3344-3352.
- [17] NOJENG S, HASSAN M Y, SAID D M, et al. Improving the MW-mile method using the power factor-based approach for pricing the transmission services[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2042-2048.
- [18] YANG Z, ZHONG H, XIA Q, et al. A structural transmission cost allocation scheme based on capacity usage identification[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2876-2884.
- [19] POUYAFAR S, HAGH M T, ZARE K. Development of a circuit-theory based transmission cost allocation method by orthogonal projection and equal-sharing principle[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(2): 159-170.
- [20] 郑亚先, 程海花, 杨争林, 等. 计及清洁能源的跨区域跨省交易路径优化建模与算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 112-119.
- ZHENG Yaxian, CHENG Haihua, YANG Zhenglin, et al. Path-optimized modeling and algorithm for trans-regional and trans-provincial electricity trading considering clean energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 112-119.
- [21] 程海花, 郑亚先, 耿建, 等. 基于拓展网络流方法的跨区域跨省交易路径优化[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 129-134.
- CHENG Haihua, ZHENG Yaxian, GENG Jian, et al. Path optimization model of trans-regional and trans-provincial electricity trade based on expand network flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 129-134.
- [22] ALBERT R, ALBERT I, NAKARADO G L. Structural vulnerability of the North American power grid[J]. Physical review E, 2004, 69(2).
- [23] WERHO T, VITTAL V, KOLLURI S, et al. Power system connectivity monitoring using a graph theory network flow algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4945-4952.
- [24] THOMASSEN C, VELLA A. Graph-like continua, augmenting arcs, and Menger's theorem[J]. Combinatorica, 2008, 28(5): 595-623.

收稿日期: 2021-03-05; 修回日期: 2021-04-14

作者简介:

罗治强(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为调度计划、电力市场; E-mail: luo-zhiqiang@sccc.com.cn

姚寅(1986—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为新能源消纳、电力市场。E-mail: yin.yao@shiep.edu.cn

(编辑 魏小丽)