

计及清洁能源的跨区跨省交易路径优化建模与算法

郑亚先, 程海花, 杨争林, 耿建

(中国电力科学研究院(南京), 江苏省南京市 210003)

摘要: 中国电力供需逆向分布、经济发展水平差异显著等特点, 决定了其需要优化跨区、跨省电力输送容量, 以实现发电资源在更大范围的全局优化。文中建立了基于点-弧模型的多成分并发清洁能源跨区、跨省交易路径优化模型, 可计及最大社会效益、最大成交量等不同优化目标, 并可实现考虑时段间耦合、波动率约束、输电通道容量等约束的跨区、跨省交易路径优化。同时提出了计及清洁能源的跨区、跨省交易路径优化弧-路模型, 解决了点-弧模型对于含正权环路径优化问题的求解难题。基于中国特高压网架的简化网络模型进行计算, 计算结果验证了所提模型和算法的有效性。

关键词: 清洁能源; 消纳能力; 跨区; 跨省; 路径优化

0 引言

中国能源供需逆向分布、地区间能源资源禀赋、经济发展水平差异显著等特点, 决定了必须在全国范围内优化能源配置, 目前中国的跨区、跨省交易优化实际上是一个计及清洁能源的输电路径优化问题, 主要体现为以下方面。

1) 通过价格激励的市场化方式解决清洁能源消纳问题是趋势, 将成本最低的清洁能源通过最低的输电成本输送至购电价格最高的地区, 是促进清洁能源消纳积极性的现实基础。

2) 清洁能源新增交易优化形成的输电路径及交易结果更多的是一种用于结算的金融路径, 而非用于生产运行中调度计划安排的物理路径。

3) 跨区、跨省输电合同涉及交易的售电方、所有输电方和购电方, 因此, 交易结果应体现包含售电方、所有输电方和购电方的完整交易路径。

在计及清洁能源的输电路径优化问题方面, 文献[1]提出了长周期大范围风电消纳的电力电量联合优化模型, 该模型以系统运行成本最小为目标, 解决了时段耦合的电力电量联合优化建模问题。多元发电、发输电协调优化建模等长周期优化的关键问题, 通过混合整数规划加以求解, 可实现长周期大范围风电消纳的定量决策。文献[2]将联络线交换功

率作为可优化的资源, 在满足联络线功率调整各种特性要求的前提下, 通过联络线功率的调整促进互联电网的新能源消纳。文献[3]研究了综合考虑风光出力特性、负荷特性、机组调峰特性、供热机组热电耦合特性、开机方式和电网输送能力的清洁能源消纳能力仿真模型。文献[4]研究提出了基于网络流方法的跨区、跨省交易路径优化模型, 解决了跨区、跨省电量交易的路径优化问题。文献[5]提出了一种基于网络流的发输电计划协调优化的两阶段模型来实现次日发输电计划的协调优化, 并得到次日地区间联络线计划与开停机方式。文献[6]将网络流引入发电权交易, 并利用网络最大流进行阻塞管理, 但该模型没有考虑网损及交易路径, 阻塞管理也较为简单。

总体来看, 在计及清洁能源的跨区、跨省交易路径优化方面, 还存在以下待解决的问题。

1) 已有的跨区、跨省路径优化方法, 仅针对交易电量建立优化模型, 并形成优化的交易路径与交易电量, 适用于中长期电量消纳优化, 无法反映清洁能源的波动特性。

2) 已有的跨区、跨省清洁能源消纳优化方法, 多采用省内机组组合、省间通道出力曲线优化建模, 形成省内发电、省间通道电力计划, 但实际交易组织中, 由于不同输电通道网损不同, 因此跨省、跨区交易路径优化必须计及多方转运, 跟踪包含买方、卖方和多个转运方的完整交易路径, 目前的优化方法无法形成计及输电价格, 涵盖发、输、购电方的完整交易路径优化结果。

收稿日期: 2017-06-15; 修回日期: 2017-09-18。

上网日期: 2017-10-20。

国家自然科学基金资助项目(51477157); 国家电网公司科技项目“跨省区清洁能源消纳辅助决策技术研究”。

本文针对计及清洁能源的跨区、跨省交易路径优化问题所涉及的输电通道、交易主体、输电费等相关要素进行了建模分析,建立了考虑清洁能源波动性,以及时段间耦合、波动率约束、输电通道容量约束等输电通道特性的跨区、跨省交易优化模型,可支持最大社会效益、最低网损费用、最大成交量等不同优化目标下最优交易路径的计算,支持开展跨区、跨省复杂网络下的大范围电力交易流优化。

1 清洁能源跨地区交易路径优化问题建模分析

1.1 基于图论的网络流建模基本原理

1.1.1 基本概念介绍

1) 两点之间不带箭头的连线称为边,带箭头的连线称为弧^[5]。

2) 如果一幅图 G 是由点及边所构成的,则称之为无向图(undirected graph),记为 $G=(V,E)$,其中 V 和 E 分别是 G 的点集合和边集合。一条连接点 $v_i, v_j \in V$ 的边记为 $[v_i, v_j]$ (或 $[v_j, v_i]$)^[5]。

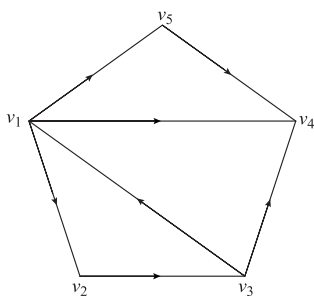


图1 典型网络流示意图

Fig.1 Schematic diagram of typical network flow

如果一幅图是由点与弧所构成,则称为有向图(directed graph),记为 $D=(V,A)$,其中 V 和 A 分别是 G 的点集合和弧集合,一条方向是从 v_i 指向 v_j 的弧记为 (v_i, v_j) 。

3) 给定一幅无向图 $G=(V,E)$,一个由点和边构成的交错序列 $(v_{i_1}, e_{i_1}, v_{i_2}, e_{i_2}, \dots, v_{i_{k-1}}, e_{i_{k-1}}, v_{i_k})$,如果满足 $e_{i_t}=[v_{i_t}, v_{i_{t+1}}]$ ($t=1, 2, \dots, k-1$),则称为一条连接 v_{i_1} 和 v_{i_k} 的链,记为 $(v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_{k-1}}, v_{i_k})$,有时称点 $v_{i_2}, v_{i_3}, \dots, v_{i_{k-1}}$ 为链的中间点。

链 $(v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_{k-1}}, v_{i_k})$ 中,若 $v_{i_1}=v_{i_k}$,则称之为一个圈,记为 $(v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_{k-1}}, v_{i_1})$ 。若链 $(v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_{k-1}}, v_{i_k})$ 中,点 $v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_{k-1}}, v_{i_k}$ 都是不同的,则称之为初等链;若圈中 $v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_{k-1}}, v_{i_1}$ 都是不同的,则称之为初等圈。若链(圈)中含的边均不相同,则称之为简单链(圈)。

4) 对于有向图,链和圈有同样的定义。特别的,

如果 $(v_{i_1}, a_{i_1}, v_{i_2}, a_{i_2}, \dots, v_{i_{k-1}}, a_{i_{k-1}}, v_{i_k})$ 是 D 中的一条链,并且对 $t=1, 2, \dots, k-1$, 均有 $a_{i_t}=(v_{i_t}, v_{i_{t+1}})$,称之为从 v_{i_1} 到 v_{i_k} 的一条路。若路的第1个点和最后1个点相同,则称为回路,类似定义初等路(回路)。

1.1.2 网络与流

给定一个有向图 $D=(V,A)$,在 V 中指定了一点称为发点(记为 v_S),而另一点称为收点(记为 v_K),其余的点叫中间点。对于每一条弧 $(v_i, v_j) \in A$,对应有一个 $c(v_i, v_j) \geq 0$ (或简写为 c_{ij}) 称为弧的容量。通常我们把这样的 D 称为一个网络。记作 $D=(V,A,C)$,其中 C 为由 c_{ij} 组成的容量集合。

所谓网络上的流,是指定义在弧集合 A 上的一个函数 $f=\{f(v_i, v_j)\}$,并称 $f(v_i, v_j)$ 为弧 (v_i, v_j) 上的流量(有时也简记作 f_{ij})。

1.1.3 可行流与最大流

对于一个实际的网络,每条弧上的流量不能超过网络的最大输送能力,即弧容量。而对于每一中间节点,流入该节点的流量应该等于流出该节点的流量,即中间节点的流量应当平衡。因此有以下约束条件。

1) 容量限制条件

$$\text{对于每一条弧 } (v_i, v_j) \in A, \quad 0 \leq f_{ij} \leq c_{ij} \quad (1)$$

2) 流量平衡条件

对于中间节点,流入量等于流出量,即对每个 $i (i \neq S, K)$ 有

$$\sum_{(v_i, v_j) \in A} f_{ij} - \sum_{(v_j, v_i) \in A} f_{ji} = 0 \quad (2)$$

对于发点 v_S , 记

$$\sum_{(v_S, v_j) \in A} f_{sj} - \sum_{(v_j, v_S) \in A} f_{js} = c_f(f) \quad (3)$$

对于收点 v_K , 记

$$\sum_{(v_K, v_j) \in A} f_{Kj} - \sum_{(v_j, v_K) \in A} f_{jK} = -c_f(f) \quad (4)$$

式中: $c_f(f)$ 为这个流的可行流量,即发点的净输出量(或收点的净输入量)。

满足以上条件的流称为可行流。可行流总是存在的,例如所有弧上流量均为0的流(称为零流)就是一个可行流。

1.2 图论方法建模合理性分析

1.2.1 输电通道建模

在物理运行的层面上,跨区、跨省电力交易交换的电都要通过输电线路输送,因此,跨区、跨省交易路径优化需要考虑输电线路的建模。跨区、跨省电力交易中,输电线路电量交换具有以下特点。

1) 由于在成交之前,输电线路交易流的方向

并不确定,根据实际物理输电线路建立输电网的网络模型时,应当考虑双向均有可能达成交易,因此采用 2 条方向相反的有向弧代表一条输电线路。

2)实际输电过程中由于需要考虑到线路容量限制、变压器容量限制、电力系统稳定等多方面因素,其输送容量并非无限,因此,在建立输电网等效模型时需要考虑到输电断面的限额,采用每条弧上的弧容量限制 c_{ij} 表征输电通道的输电容量限额。

3)实际输电线路上传送电量,需要考虑多次转运产生的输电损耗,以网损折价方式考虑多次转运所产生的网络损耗。

4)输电网络中的任一节点,在任一时刻,流出(流进)该节点的所有支路电流的代数和等于 0,因此采用流量平衡来表征该特点,由于文中研究建立的方法应用于交易路径优化,因此采用直流方式进行线性化建模。在流量平衡中,文中采用有功功率流量平衡来表征。

5)输电网络的任一回路,在任一时刻,沿着该回路的所有支路电压降的代数和等于 0,由于文中研究建立的方法应用于交易路径优化,因此采用直流方式进行线性化建模,不考虑电压问题。

综上所述,采用附录 A 图 A1 建模原理可以表征输电通道。

1.2.2 交易主体建模

文中研究定位于已有的跨区、跨省交易基础上,考虑通道限额的增量交易优化,在实际的交易中,存在以下 2 种模式。

1)送出省、购入省的市场主体由省代理参与,各省申报时,申报的是总量,市场角色包括:售电方(申报售电)、购电方(申报购电)和纯转运方(既不申报售电也不申报购电,只负责转运电能)。各省只能作为售电方、购电方、转运方中的一种,不能既申报售电又申报购电。

2)送出省、购入省的市场主体自主申报,市场角色包括:发电企业(申报售电)、电力用户或售电公司(申报购电)和电网企业(既不申报售电也不申报购电,只负责转运电能)。

考虑到省间交易的目标是解决全局资源优化和清洁能源跨地区消纳问题,文中针对上述的第 1 种模式建模,并进行省间交易优化,确定省间边界,用于交易组织。在此范围下,用点来表征送出省和购入省,用中间点表征转运省。

1.2.3 交易输电费用处理

目前,在输电费用的计算方面主要有以下 3 种计算方式。

1)综合成本法。根据电网以前的投资数据及年

运行成本,计算输电公司在提供输电服务时的总成本,然后在各次交易中,按照某种原则分摊,在此基础上求解输电价格。综合成本法包括合同路径法、邮票法、分布因子法以及潮流追逐法等^[4]。其中,①合同路径法根据网络的拓扑结构,基于人为经验或约定,假定功率流通的连续路径;②分布因子法考虑了网络拓扑结构及注入功率、位置,基于节点对支路灵敏度形成分配系数,进行输电费用分摊;③潮流追踪法假设功率在全系统混合流动,潮流在各节点上按比例分布,计算输电线路的功率组成和发电机与负荷间的功率传输关系。

2)长期边际成本法。长期边际成本法是将输电公司在提供输电服务时,引起电网将来投资成本的长期微增变化作为计算的依据。

3)短期边际成本法。短期边际成本法计算输电价格时,不考虑电网固定资产的折旧和回报等,仅考虑电网提供输电服务时引起电网运行成本的微增变化。它由边际运行费和收支协调项这 2 部分组成。

总体来看,上述 3 种方法,各有优缺点,详细分析见附录 A 表 A1。

考虑到中国目前电力系统的成本及电价计算均采用综合成本方法,以及目前以省为实体的电力政策,跨区、跨省交易组织针对输电方向、输电路径开展等实际情况,文中对于省间电力交易路径的建模采用合同路径法。

综合上述建模分析,在基于直流的交易路径优化问题中,利用基于图论的网络流建模方法可以表征输电通道的基本特点。

2 计及清洁能源跨区、跨省交易路径优化的点-弧模型

2.1 点-弧模型建模分析

图 2 为点-弧模型的示意图。

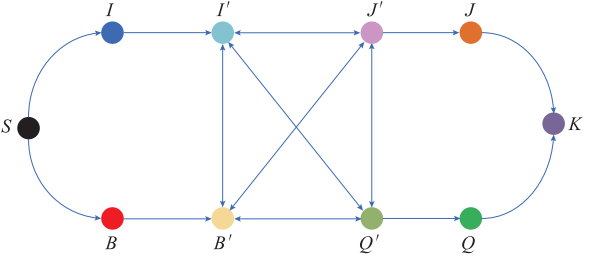


图 2 点-弧模型示意图
Fig.2 Schematic diagram of point-arc model

图中,S 和 K 点为虚拟源点及虚拟收点;I,B,J,Q 为虚拟购售电节点;I',B',J',Q' 为实际转运节点。所有的虚拟售电节点均与点 S 相连接(如 I,B 同 S 相连),所有的虚拟购电节点均与点 K 相连

接(如 J 和 Q 同 K 相连)。每一个参与交易的虚拟点均由一个实际转运节点与之相连接(如 I' 点和 I 点)。而实际转运节点(I', B', J', Q')之间的连接情况,视实际输电线路而定。

2.2 优化目标及约束

文中主要考虑了最大社会效益目标、最大成交量目标,以及最低网损费用目标^[4]。

2.2.1 最大社会效益目标

跨区、跨省交易根据买方、卖方报价,考虑输电网损和输送通道的容量,组织买方、卖方达成交易,通常按照社会福利最大原则,在计及输电网损的情况下,买卖双方价差最大的优先成交。文中采用社会效益最大来表征社会福利最大目标,即买卖双方价差减去输电网损后产生的收益最大。

1) 目标函数

$$\max U = \sum_{t \in T} \left(\sum_{\substack{o, d \in O \\ (k, i) \in V}} x_{t, k, i, od} p_{t, k, i} - \sum_{\substack{o, d \in O \\ (i, j) \in L}} x_{t, i, j, od} \eta_{i, j} - \sum_{\substack{o, d \in O \\ (j, l) \in V}} x_{t, j, l, od} p_{t, j, l} \right) \quad (5)$$

式中: U 为社会效益; $x_{t, k, i, od}$ 为购电节点 k 在时刻 t 成交的购电量; $x_{t, j, l, od}$ 为售电节点 l 在时刻 t 成交的售电量; $x_{t, i, j, od}$ 为从节点 k 到 l 的线路中,某段实际输电线路(i, j)上输送的电量,对于时刻 t 的某一笔从 k 到 l 的交易, $x_{t, k, i, od} = x_{t, i, j, od} = x_{t, j, l, od}$; o 和 d 为购售电交易对; O 为购售电交易对集合; $p_{t, k, i}$ 为时刻 t 购电节点 k 的申报购电电价; $p_{t, j, l}$ 为时刻 t 售电节点 l 的申报售电电价; $\eta_{i, j}$ 为输电线路(i, j)的网损折价; T 为总时间; L 为转运输电线路集合。

此处社会效益指的是所有交易所对应的买方购电价减去卖方售电价以及网损折价后,所产生的收益。该优化目标根据购、售电方以及转运方的申报电价及申报电量,对每段输电线路上一时段的输电电量进行优化,从而得到最大社会效益目标下的交易路径及流量。

2) 约束条件

该优化目标的计算需满足节点平衡约束、弧容量约束、检修计划约束、等波动率约束等约束条件。

节点平衡约束如式(6)所示,该约束为节点流量平衡约束,对于所有中间转运节点,流入节点的某购售电交易对的流量应等于流出节点的该购售电交易对的流量。该约束满足网络流理论,符合基尔霍夫第一定律,并添加了时刻及交易对,实现了任一时刻交易对流量在节点上的平衡。

$$\sum_{m=1, i \neq m}^M x_{t, i, m, od} = \sum_{m=1, m \neq i}^M x_{t, m, i, od} \quad (6)$$

式中: M 为总节点数。

弧容量约束如式(7)和式(8)所示。当(m, n)为转运弧时,该参数表示输电线路容量上限;当(m, n)为虚拟弧时,该参数表示时刻 t 的申报购售电量。该约束要求在任意时刻,输电线路所有交易对在该输电线路产生的流量之和应小于该时刻该输电线路的容量上限。

$$0 \leq \sum_{o, d \in O} x_{t, m, n, od} \leq X_{t, m, n} \quad (7)$$

$$X_{t, m, n} = \begin{cases} d_{t, k, i} & (m, n) \in L \\ d_{t, k, i} \text{ 或者 } d_{t, j, l} & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $X_{t, m, n}$ 为输电线路(m, n)在时刻 t 的输电容量上限; $x_{t, m, n, od}$ 为时刻 t 输电线路(m, n)上交易对 od 的流量; $d_{t, k, i}$ 和 $d_{t, j, l}$ 分别为时刻 t 节点 k 到节点 i 、节点 j 到节点 l 转运路径上的输电容量上限。

检修计划约束如式(9)所示。加入检修计划约束,输电线路的实际容量上限应考虑线路检修计划表。

$$X_{t, i, j} = X_{t, i, j} \omega_{t, i, j} \quad (i, j) \in L \quad (9)$$

式中: $\omega_{t, i, j}$ 为输电线路(i, j)在时刻 t 时的检修情况, $\omega_{t, i, j}$ 为 0,表示检修,为 1 表示没有检修。

以 3 个时刻,新疆—河南,山西—湖北,四川—上海,四川—江苏的检修情况为例,检修计划表如附录 A 表 A2 所示。

波动率约束^[4] 如式(10)所示,由于模型优化时间粒度为 15 min,因此需要考虑输电线路功率变化情况。约束要求时刻 $t+1$ 较时刻 t 的电量变化率绝对值不得超过 θ 。其中, θ 为设定的约束值;

$\sum_{\substack{o, d \in O \\ (i, j) \in L}} x_{t, i, j, od}$ 表示时刻 t 经过节点 i 和 j 的买卖方 o, d 对的输送功率总和。实际建模时,采用上调节速率和下调节速率限额来约束,类似于机组的爬坡率和滑坡率约束。

$$\left| \frac{\sum_{\substack{o, d \in O \\ (i, j) \in L}} x_{t+1, i, j, od}}{\sum_{\substack{o, d \in O \\ (i, j) \in L}} x_{t, i, j, od}} - 1 \right| \leq \theta \quad (10)$$

2.2.2 最大成交量目标

1) 目标函数

为提高清洁能源的消纳量,研究如何在满足申报电量、输电通道容量等因素的情况下,使得网络在最大承载能力下,消纳更多的清洁能源。针对最大成交量 F 目标(式(11))进行研究和计算,对提高清洁能源的消纳具有重要意义。

$$\max F = \sum_{t \in T} \sum_{(k, i) \in V} x_{t, k, i, od} \quad (11)$$

2)约束条件

最大成交量模型的约束与最大社会效益优化目标相同。

2.3 点-弧模型中的正权环问题分析

2.3.1 问题分析

点-弧模型以弧流量为基本变量,在计算最大输电收益优化目标时,将正收益的弧串联在一起将会形成多个正权回路,即正权环。而带有环流的费用流问题在运筹学界尚无较好的解决方案,因此点-弧模型并未对最大收益目标进行计算。环流问题可表现为以下 2 种形式。

1) 二元环流

如图 3 所示,二元环流是指发生在 2 个节点之间的流量相同,方向相反的闭合环流。

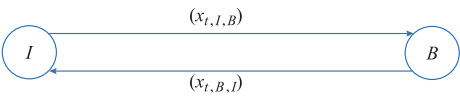


图 3 二元环流示意图
Fig.3 Schematic diagram of binary circulation

2) 多元环流

而多元环流则是指发生在 2 个以上节点之间的闭合环流。这几股流量数量相等,首尾相连,形成一个闭合回路,如图 4 所示。附录 A 表 A3 中加粗部分表示的交易结果均属于多元环流。

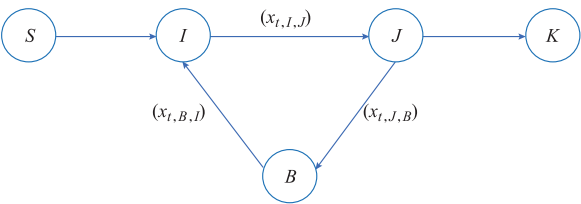


图 4 多元环流示意图
Fig.4 Schematic diagram of multivariate circulation

2.3.2 解决思路

对于点-弧模型最大输电收益优化目标的环流问题,文中提出了以下解决方案。

1)针对二元环流问题,增加正反向交易约束可以得到有效解决。然而不利的影响是,新增加 0-1 变量,降低计算效率。

2)针对多元环流的问题,有文献指出若不将路径在计算时显式表达,将难以计算带有路径约束的费用流问题;也有文献提出通过将正权取反转化为负权,进而采用连续最短路算法计算最小费用可行流来解决环流问题,但该方法并不适用于最大费用目标的求解,并且该算法为动态规划,难以在 AIMMS 软件中实现。

3)通过在计算最大收益目标时增加输电网损费

用约束,即通过设置一定的输电网损费用上限,要求在计算最大输电收益的同时,网络流所产生的输电网损费用不得超过某一阈值,进而引导优化结果满足要求。然而该方法只适用于解决多元环流的问题,二元环流问题难以得到有效抑制。

在点-弧模型中计算输电收益最大目标时,由于弧上收益均为正,即存在正权环,而优化目标为求最大值,且网络模型中存在闭合环,因此计算结果中存在较多环流。建议增加含 0-1 变量的正反向交易约束以解决。

3 清洁能源跨区、跨省交易路径优化的弧-路模型

3.1 弧-路模型建模分析

弧-路模型首先通过深度优先搜索算法遍历出输电网络结构中的所有可行路径,将得到的可行路径及相关路径参数作为输入数据代入网络流模型进行优化计算。相比于点-弧模型,弧-路模型的建模过程更加简单、清晰,并且可以在路径搜索的过程当中剔除含有环流的路径,保留简单路径,便于计算最大费用最大流类型的问题。然而基于弧-路模型的思路需要对全部 96 个时段的路径及其相应的路径参数(如路径收益、输电费用、输电网损等)进行计算,因此输入的数据量相较于点-弧模型更大。

基于弧-路模型的清洁能源跨区、跨省交易路径优化模型在弧-路模型的基础上,将可行路径、申报电价及电量、输电费用、输电网损等参数拓展至时域。首先通过深度优先搜索算法对 96 个时段内的所有可行路径,及其相对应的路径参数,如路径收益、输电费用、输电网损等进行计算,接着将计算所得到的参数作为模型输入数据,分别计算在最大社会效益、最大成交量、最低网损费用,以及最大输电收益等优化目标下的最优路径组合。该模型由于是以完整的路径作为输入数据,因此优化结果可以直接得到完整的路径组合,更便于理解与分析。

3.2 优化目标及约束

3.2.1 最大社会效益目标

1)目标函数

该优化目标与点-弧模型中最大社会效益目标一致,由于弧-路模型在优化计算之前就已经对交易路径、路径价格等数据进行处理,因此路径价格已包括了购电、售电方以及转运方的收益,从而在计算时较为简便,且只需考虑所有可行路径及其收益。具体计算公式如式(12)所示。

$$\max U = \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} x_{t,p} b_{t,p} \tag{12}$$

式中: $b_{t,p}$ 为路径 p 的社会效益,其计算方式为路径

p 上每段弧的社会效益的累加,而每段弧上社会效益的计算与点弧模型中的计算方法一致; $x_{t,p}$ 为路径 p 的流量; P 为路径集合。

2)约束条件
弧-路模型除不用考虑节点平衡约束以外,其他约束与点-弧模型一致。其中弧容量约束如式(7)和式(8)所示。

在弧-路模型中,仍然采用弧容量约束而非路径约束,原因是路径容量受到其含有的每段弧的容量影响,因此用弧容量表示更为直接。弧 (i,j) 与路径 p 的关系通过关系矩阵 $[p,(i,j)]$ 表示。

路径 1 为从四川水电到京津唐购电的一条路径,途经重庆、湖北、河南、山西、河北,则这一路径如附录 A 表 A4 所示。另外,检修计划约束如式(9)所示;波动率约束如式(10)所示。

3.2.2 最大成交量目标

1)目标函数
弧-路模型在计算最大流优化目标时,同样也是计算所有交易路径在总时间 T 上的路径流量,在考虑输电线路容量上限及检修计划的情况下,计算网络所能承载的最大流量 F ,并得到该最大流量下的最优路径组合。具体计算如式(13)所示。

$$\max F = \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} x_{t,p} \tag{13}$$

2)约束条件
最大成交量目标模型除不考虑节点平衡约束外,其余约束与社会效益最大目标模型的约束相同。

3.2.3 最大输电收益目标

1)目标函数
弧-路模型相比于点-弧模型,增加了最大输电收益这一优化目标。输电收益是指国家电网公司在跨区、跨省交易时,根据交易所经过路径收取的过网费。模型进行优化计算前,在遍历所有可行交易路径的同时,计算每条交易路径在每个时段的过网费,并作为输入参数代入模型进行计算,模型将自动优化参与交易的路径。过网费 R 是根据可行路径上所有弧段的过网费累加得到。

$$\max R = \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} x_{t,p} r_{t,p} \tag{14}$$

式中: $r_{t,p}$ 为可行路径 p 在时刻 t 的过网费。

2)约束条件
弧-路模型除不用考虑节点平衡约束以外,其他的约束与点-弧模型一致。

4 算例分析

本节中所采用网架结构同基于点-弧模型的路

径优化模型相同,同样包括了全国 5 个大区的 23 个省,计及多种交易成分,其中参与售电的省为四川(水电)、甘肃(风电)以及青海(光伏)省;参与购电的省和直辖市为江苏、浙江以及上海。其余省为转运省。具体信息见附录 B 表 B1 至表 B7。

4.1 固定交易路径

本节首先对基于固定交易路径的算法进行计算,以便于之后与优化计算结果进行比对。为了方便比对,本节对前 3 时段的固定交易路径进行优化计算,选取了 6 条路径收益较高的交易路径参与清洁能源跨地区交易,路径信息如附录 C 表 C1 所示。

根据人工经验,选取路径收益较高的路径作为固定交易路径,且每个时段均采用相同的交易路径,路径价格根据不同时段的申报购售电价计算。各路径的收益情况见附录 C 表 C2,交易结果见附录 C 图 C1。

各交易路径成交量则由路径上每段输电线路的最大输电限额决定,每笔交易中若有部分输电线路相重合,则需对该线路上不同交易成分的成交量进行累加,保证交易结果不超过输电线路限额。

4.2 点-弧模型求解结果

点-弧模型首先对每一段弧在 96 时段产生的收益进行求解,计算方法如前文所述,即弧末端节点申报价格减去弧首端节点申报价格再减去该弧上所产生的网损费用。以弧京津唐-河北为例,该弧在时段 1 内的社会效益为 20.18(=410-389-410×0.002)元/(MW·h),见附录 C 表 C3。

在此基础上,采用线性规划求解。由于计算结果涉及 96 个时段的路径优化组合,整理后如附录 C 图 C2 所示,形成 6 笔购售交易,经由 13 条交易路径,达成交易总量 12.794 亿 kW·h,产生的社会总收益为 3.339 亿元,见附录 A 表 A3 和附录 C 表 C4。

4.3 弧-路模型求解结果

计算结果涉及 96 个时段的路径优化组合,整理后,如附录 C 图 C3 所示优化出 15 条交易路径,共形成交易结果 12.794 亿 kW·h,见附录 C 表 C5。

基于弧-路模型的路径优化模型在 96 时段内共产生了 3.339 亿元的社会效益,总成交量达 12.794 亿 kW·h,优化时间为 12.13 s,见附录 C 表 C6。

4.4 适用性及效果分析

4.4.1 适用性分析

针对全部 96 个时段的输入数据,分别在点-弧模型和弧-路模型下计算了最大社会效益、最大流

量、最低网损以及最大输电收益的优化目标。经对比可知,点-弧模型和弧-路模型在最大社会效益优化目标、最大流优化目标以及最低网损优化目标下,均得到了一致的优化结果。计算得到,96时段的最大社会效益为 3.339 亿元,最大成交量为 12.794 亿 kW·h,最低网损费用为 60.48 万元。此外,这 2 个模型在上述 3 个优化目标的计算时间均十分接近,无明显差异。点-弧模型、弧-路模型在优化计算、建模等方面各有优劣。虽然基于点-弧模型的路径优化模型由于无法对含正权环的问题进行优化计算,因此对最大输电收益的优化计算无法进行,但是它无须事先进行路径遍历,模型能够自动进行路径搜索,与弧-路模型相比更加简单。基于弧-路模型的路径优化模型能够在深度优先搜索算法中,对简单路径进行筛选,从而筛选掉含正权环的含环流路径,因此能够计算最大输电收益优化目标,在处理含正权环的复杂电网结构下更有优势,见附录 C 表 C7。

4.4.2 与固定路径方法结果比对

首先比较分析在最大社会效益目标下,固定交易路径方法与点-弧模型和弧-路模型的优化结果,见附录 C 表 C8 和图 5。其中,固定路径方法获得总收益为 2.789 亿元;点-弧模型和弧-路模型获得总收益均是 3.339 亿元。

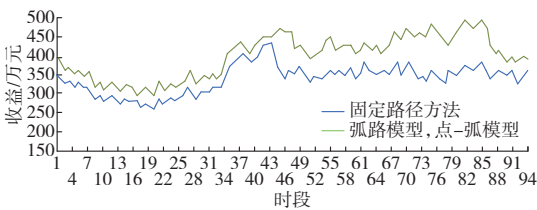


图 5 固定路径方法、点-弧模型和弧-路模型交易结果比对
Fig.5 Comparison among fix-path method, point-arc model and arc-path model

由于点-弧模型和弧-路模型不再固定于原来指定的 6 条路径,而是通过优化自动搜索匹配路径,因此交易结果中新增多条交易通道,充分利用这些通道提升了清洁能源的消纳总量,提高了社会效益,如附录 C 表 C9 所示。

5 结语

文中建立的跨区、跨省交易优化模型实现了最大社会效益、最大成交量、最低网损费用,以及最大输电收益等不同优化目标下计及清洁能源的跨区、跨省交易路径优化,基于中国最新的跨区、跨省网架结构的算例结果,验证了模型算法的适用性和计算

性能。基于文中研究成果形成的路径优化软件,已在北京电力交易中心得到初步应用。

文中建立的模型还需要进一步考虑到跨区、跨省电力市场开展中的交易合规等约束限制,另外如果考虑模型用于市场出清计算,还需要考虑分段报价等因素,下一步将对此开展研究,并对大范围复杂网络下的模型计算规模的计算效率进行验证,进一步提升模型的实用化水平。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 刘秋华,郑亚先,杨胜春.长周期大范围风电消纳的电力电量联合优化模型与应用[J].电力系统自动化,2015,39(18):145-150. DOI:10.7500/AEPS20141209003.
LIU Qiuhua, ZHENG Yaxian, YANG Shengchun. A power and energy joint optimization model and its application for long-term large-range wind power accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 145-150. DOI: 10.7500/AEPS20141209003.
[2] 钟海旺,夏清,丁茂生,等.以直流联络线运行方式优化提升新能源消纳能力的新模式[J].电力系统自动化,2015,39(3):36-42. DOI:10.7500/AEPS20140529005.
ZHONG Haiwang, XIA Qing, DING Maosheng, et al. A new mode of HVDC tie-line operation optimization for maximizing renewable energy accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 36-42. DOI: 10.7500/AEPS20140529005.
[3] 曹阳,李鹏,袁越,等.基于时序仿真的新能源消纳能力分析及其低碳效益评估[J].电力系统自动化,2014,38(17):60-66. DOI: 10.7500/AEPS20140329002.
CAO Yang, LI Peng, YUAN Yue, et al. Analysis on accommodating capability of renewable energy and assessment on low-carbon benefits based on time sequence simulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 60-66. DOI: 10.7500/AEPS20140329002.
[4] 程海花,郑亚先,耿建,等.基于拓展网络流方法的跨区跨省交易路径优化[J].电力系统自动化,2016,40(9):129-134. DOI: 10.7500/AEPS20150906010.
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. DOI: 10.7500/AEPS20150906010.
[5] 张显,周鑫,耿建,等.基于网络流的发输电计划协调优化方法[J].电力系统自动化,2013,37(19):55-60.
ZHANG Xian, ZHOU Xin, GENG Jian, et al. A coordination and optimization method for generation and transmission scheduling of power system based on network flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 55-60.
[6] 陈启鑫,康重庆,程旭东,等.考虑阻塞管理的发电权交易模型及其网络流算法[J].中国电机工程学报,2008,28(34):106-111.
CHEN Qixin, KANG Chongqing, CHENG Xudong, et al.

Generation rights trade model and its network flow algorithm considering congestion management [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 106-111.

郑亚先(1982—),男,通信作者,高级工程师,主要研究方向:电力系统优化、电力市场运营。E-mail: zhengyaxian@epri.sgcc.com.cn

程海花(1977—),女,高级工程师,主要研究方向:电力系统优化、电力市场运营。

杨争林(1974—),男,研究员级高级工程师,主要研究方向:电力系统优化、电力市场运营。E-mail: yangzhenglin@epri.sgcc.com.cn

(编辑 顾晓荣)

Path-optimized Modeling and Algorithm for Trans-regional and Trans-provincial Electricity Trading Considering Clean Energy

ZHENG Yaxian, CHENG Haihua, YANG Zhenglin, GENG Jian

(China Electric Power Research Institute (Nanjing), Nanjing 210003, China)

Abstract: Owing to the reverse distribution of energy supply and demand, and the different economic development levels in different areas in China, it's important to optimize trans-regional and trans-provincial transmission power to realize the global optimization of the generation sources in the wider areas of the whole country. The point-arc-model based path-optimization model for trans-regional and trans-provincial electricity trade taking into account multi-component clean energy is developed based on the different optimization targets, including maximum social benefits, minimum loss costs, and maximum volume, and realizing the electricity-trading-path optimization with constraints such as the period coupling, volatility and the transmission channel capacity, etc. The trans-regional and trans-provincial arc-path optimization model is also proposed to solve the difficult power-ring-routing optimization problem in the point-arc model. The simplified network model based on the backbone ultra-high-voltage power grid of China is adopted to implement the calculation that proves the validity of the proposed model and algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477157) and State Grid Corporation of China.

Key words: clean energy; accommodation capacity; trans-regional; trans-provincial; path optimization