

计及多重交易耦合的省间交易通道 可用输电能力优化方法

魏聪颖¹, 徐箭², 汪旻¹, 徐浩¹, 廖思阳²

(1. 国家电网有限公司华中分部, 湖北省 武汉市 430077;

2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北省 武汉市 430072)

Optimal Available Transfer Capacities for Inter-provincial Electricity Trading Channels Considering Multiple Trading Paths

WEI Congying¹, XU Jian², WANG Yang¹, XU Hao¹, LIAO Siyang²

(1. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, Hubei Province, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The simplification of the market model for inter-provincial electricity makes the virtual transaction flow inconsistent with the actual power flow, which leads to operation risks in the regional power grid. In this regard, this paper proposes an optimization method for the available transfer capacities of inter-provincial trading channels in regional power grids, where the couplings of multiple inter-provincial trading paths and the power flow congestion are both considered. On the premise of safe operation, the space of a feasible region for inter-provincial trading is maximized to give full play to the advantages of resource allocation in the regional power grid. First, the network constraints for inter-provincial electricity trading are constructed based on the relationship between the virtual trading network and the actual electricity network. Second, the vertex-oriented projection algorithm is used to find out the boundaries of the feasible region, and the calculation of the available transfer capacities is transformed into the optimal coverage problem of the feasible region. Then, the directed measure theory is introduced to describe the space size of the feasible region quantitatively, and a two-layer hybrid algorithm is designed, where the intelligent algorithm is used in the outer layer and the classic linear programming is used in the inner layer. Finally, the practicality and timeliness of the proposed method are verified in actual operating scenarios.

KEY WORDS: inter-provincial electricity market; available transfer capacity; network congestion; feasible region; measure theory

摘要: 省间电力交易模型的简化使得虚拟交易流和实际电力流不一致, 在区域电网内存在安全运行风险。对此, 提出一种考虑多重省间交易耦合及潮流阻塞的区域电网省间交易通道可用输电能力优化方法, 在保证电网安全运行的前提下, 最大化交易可行域空间, 以发挥区域电网资源配置优势。首先, 以虚拟交易网络 and 实际物理网络关联关系为基础, 构建了省间电力交易的网络约束模型。其次, 采用平面外拓方法搜索网络约束的可行域边界, 从而将可用输电能力优化问题归结为可行域覆盖问题。然后, 引入有向测度的概念定量刻画可行域的大小, 并设计了以智能算法为外层框架、经典线性规划为内层主体的双层混合求解算法。最后, 在实际场景中验证了所提方法的适用性和时效性。

关键词: 省间电力市场; 可用输电能力; 网络阻塞; 可行域; 测度论

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0186

0 引言

在“统一市场, 两级运作”的电力市场顶层设计框架下, 省间现货^[1]、省间调峰及备用辅助服务^[2]等日内省间电力市场已初步建成。然而, 如何在省间电力市场运营过程中合理防范大电网安全运行风险是电力调度部门重点关注的问题。在日内省间交易的组织中, 区域调度机构负责填报省间交易通道的可用输电能力(available transfer capacity, ATC), 作为市场出清边界发布^[3]。但是, 区域电网的潮流复杂多样, 省间交易网络无法完全刻画实际电网全貌, 即电力流和交易流不完全一致。若设置的 ATC 过大, 交易执行时可能出现网络阻塞, 存在安全风险^[4], 其中, 省间电力交易可能带来的省间潮流穿越和省内断面阻塞问题尤为突出。若设置的

基金项目: 国家电网有限公司华中分部科技项目(52140023000J)。

Project Supported by Science and Technology Project of Central China Branch of State Grid Corporation of China (52140023000J).

ATC 过小, 有可能过分限制了电力交易, 存在合规风险。如何制定合理的省间交易通道 ATC, 使其既能满足日内电网安全运行要求, 又能提供尽可能多的交易空间以避免对省间交易造成不必要的干扰, 是目前区域调度机构亟需解决的问题^[5]。

关于互联电网 ATC 的研究, 常用方法包括重复潮流^[6-7]、最优潮流^[8]、人工智能^[9]等。随着计算方法的完善, 部分研究着眼于不同应用场景, 如计及不确定性的概率 ATC^[10], 无功协同优化的 ATC 提升方法^[11], 以及综合能源系统 ATC^[12]等。上述方法可以利用已知的发、用、受电信息, 准确得到某一条省间通道的 ATC。但是, 同一时段可能有多笔省间交易成交, 且计算 ATC 时市场出清尚未开展, 具体成交电力无法确定。因此, 受电边界不完整的情况下如何考虑多省间交易“通道挤占”等相互影响关系, 是测算 ATC 时面临的实际难题。

对于多省间通道的耦合关系刻画, 现有研究基于多参数规划^[13]、可行域投影^[14]、平面外拓^[15]、双层优化^[16]等方法, 已能刻画出以多条省间通道输电功率为自变量的实际电网运行可行域。但是, 电力交易组织是按照虚拟交易网络约束开展, 而非是实际电力网络约束, 两者之间存在差异。因此, 还需要进一步结合虚拟交易网络的结构, 转化得到符合数据规范的省间交易通道 ATC。文献[17]分析了实际电网和交易网络之间的关系, 并以省网为单位测算 ATC。但是, 区域电网内部、各省网之间多采用交流“网对网”输电模式, 以省网为单位测算 ATC 难以准确刻画省网潮流之间的影响作用。

针对所述问题, 适应实际生产需要, 本文提出了计及多重交易耦合和区内潮流阻塞的省间交易通道 ATC 优化配置方法。首先, 构建省间交易网络模型及其对应的实际电网约束, 并以多面体测度最大化作为目标函数, 形成省间交易通道可用输电能力优化模型。然后, 设计了具有双层迭代结构的混合求解算法: 内层结构采用经典线性规划理论, 基于平面外拓法定量刻画网络可行域边界; 外层主体结构采用智能算法, 评估可行域之间的覆盖关系, 并动态更新最优通道可用输电能力。最后, 根据华中电网实际运行场景进行了仿真测试。

1 区域省间电力市场网络建模

1.1 概况

目前, 日内省间电力交易主要有省间现货交易^[1]和省间辅助服务交易^[2](主要是调峰和备用辅助服务)。两类市场本质上均是以省网为基本单位, 解

决 15min 时间尺度上的电力平衡问题。此外, 为便于实际生产, 在华中区域内两类市场采用的交易网络拓扑也十分相近, 如图 1 所示, 且均由区域调度机构负责区内省间交易通道 ATC 的测算。

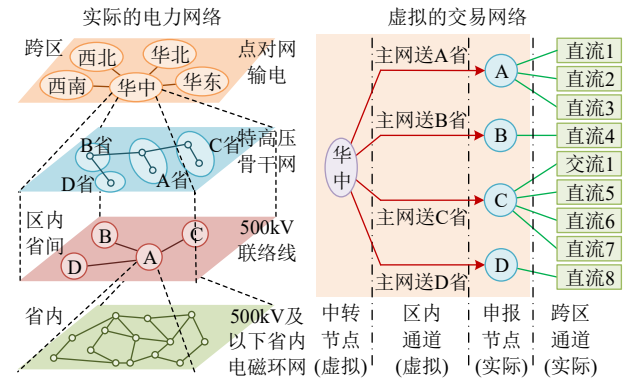


图 1 华中电力网络与交易网络示意图

Fig. 1 Electricity and trading network in central China

对比交易网络和物理电网可知: 华中电网的实际电力网络为多电压等级交直流混联电磁环网。区外大多采用“点对网”输电模式, 与华北、华东、西北、西南、南方电网互联; 区内(涵盖 A、B、C、D 四省)采用“网对网”输电模式, A 省-B 省、A 省-C 省、A 省-D 省和 B 省-D 省均有直接电气联系。华中省间交易网络是以“华中”为中心、以四省网为子节点的辐射状网络: “华中”节点不实际存在, 不进行购售电申报; 四省以省网为单位申报购售电需求。网络结构不同使得 ATC 计算面临三大挑战:

1) 省间输电通道不对应。华中区内省间交易通道为虚拟通道, 可解释为, 除跨区联络线外, 某省网从所有区内省间联络线中受入的总电力^[18]。但是, 当省网有多条区内省间交流联络线时, “网对网”输电模式难以精准控制每条联络线上的潮流, 进而难以判断省网总送受电能力。

2) 省间潮流穿越现象刻画不足。一方面, C 省和 D 省无直接线路联络, 两省之间的电力交易不可避免地过境其他省网; 另一方面, 即使有线路直接联络, 也会影响其他省网潮流。例如, B 省和 D 省进行电力交易时, 有一部分电力通过“B 省-A 省-D 省”这一路径传输。即两省网之间的电力交易并非按照交易网络只改变两省网潮流, 对相邻非交易省网的潮流分布亦有影响。必要时应优化调整部分省网交易通道 ATC 以限制相应省间交易的最大成交电力, 保障全网的安全稳定运行。

3) 省内输电阻塞刻画少。目前, 省间输电通道大多含有特高压线路, 输电能力强、限额大。但是, 省内输电通道多由 500kV 交流线路构成, 部分电磁环网通道还含有 220kV 线路, 潮流疏散能力相

对较弱。省网节点未根据网络阻塞情况进一步划分枢纽节点^[19]，故省间电力交易时可能出现省间输电通道有裕度而省内疏散通道重载的情况。

上述3点使得区域调度机构在日内填报ATC时，要综合判断省网潮流之间的相互影响，并考虑未来可能的交易情况，优化得到ATC，而非是仅按照省间输电限额和省网受电计划直接计算。

1.2 交易网络的建模

当前省间电力交易大多按照交易路径价差匹配出清，其中，交易路径是指买卖节点之间由若干交易通道构成的有向通路^[20]。交易网络建模的重点是建立交易路径与交易通道的关系。调度机构可通过限制交易通道的ATC，进而限制与该交易通道有关联的交易路径上成交电力，避免实际电网潮流阻塞。不同交易路径可能有相同的组成成份(交易通道或交易对象)，故引入关联矩阵 A_{CP} 和 B_{NP} 分别刻画多条省间交易路径在交易通道和交易对象上互有重叠这一耦合特征，如式(1)和(2)。其中，式(1)表明交易通道上的成交电力不应超出填报的ATC范围；式(2)表明申报节点(省网)填报的售购电需求不应超过该省网的正反向平衡裕度。

$$C_{\min} \leq A_{CP} \mathbf{x}_p \leq C_{\max} \quad (1)$$

$$R_{\min} \leq B_{NP} \mathbf{x}_p \leq R_{\max} \quad (2)$$

式中： \mathbf{x}_p 为交易路径的功率列向量，第 p 行的元素表示通过交易路径 p 的成交电力； C_{\max} 和 C_{\min} 为通道ATC列向量，第 c 行元素分别表示交易通道 c 的正反向ATC，是本文重点关注的优化变量； R_{\max} 和 R_{\min} 为省网平衡裕度列向量，第 n 行元素分别为省网 n 的正反向平衡裕度； A_{CP} 为交易通道与交易路径之间的关联矩阵，当交易路径 p 包含交易通道 c 时，若两者正方向一致， A_{CP} 第 c 行第 p 列元素为1，相反为-1，否则为0； B_{NP} 为省网与交易路径之间的关联矩阵，当申报节点 n 为交易路径 p 送端时，第 n 行第 p 列取1，受端时取-1，否则为0。

此外，华中电网作为全国电力传输的枢纽，可组合成百上千条交易路径。但是，日内不可能也没有必要考虑所有交易路径。通常调度机构可根据相邻/相似时段的成交规律以及超短期平衡裕度，预测交易参与方，推算下一交易周期大概率会成交的若干交易路径(后文简称关键交易路径)。同时，省网几乎不会在短时间内转换购售电身份，故在同一交易周期内仅考虑交易路径单向成交，如式(3)。

$$\mathbf{x}_p \geq 0 \quad (3)$$

1.3 物理网络的建模

物理网络建模重点分析交易路径上成交电力

变化对实际电网潮流的影响。具体按如下流程：

1) 省间电力交易导致省内机组功率调整。省间电力交易的物理本质是，区域调度机构改变省网受电计划，省级调度机构以受电为边界调整省内机组发电计划，保证发、用、受电平衡。即省间电力交易的结果最终都将落实为省网内机组功率变化，如式(4)。其中，等式左边表征省网受电功率变化量，等式右边表征省网机组功率调整量。

$$B_{NP} \mathbf{x}_p = B_{NG} \Delta P_G \quad (4)$$

式中： ΔP_G 为机组出力增量列向量，第 g 行元素表示机组 g 出力的增加量； B_{NG} 为省网与机组之间的关联矩阵，当机组 g 位于省网 n 时，第 n 行第 g 列元素为1，否则为0。

2) 省内机组功率调整改变全网潮流分布。全国电网综合网损率4.54%^[21]，而区域电网主网架由特高压、超高压线路构成，网损率更低，故其影响可忽略不计，通常用节点功率灵敏度评估潮流变化，其中“点对网”传输模式的跨区联络线可以作为虚拟发电机。区域调度机构将若干线路组合成一个整体(即输电断面)进行网络阻塞评估，如式(5)。一方面，多条省间交易路径在执行层面的电力流可能经过同一实际输电断面，故需要联立式(4)和式(5)，综合研判多条省间交易路径之间是否存在“通道挤占”等间接耦合关系。另一方面，在交流电网中一台机组出力或省间交易电力变化对大部分非终端线路的潮流都有影响，故式(5)应包含区域内所有省间、省内断面，以准确反映刻画省内输电阻塞、省间潮流穿越、多断面联合控制等问题。

$$P_{L,\min} \leq P_{L,B} + G_{LG} \Delta P_G \leq P_{L,\max} \quad (5)$$

式中： G_{LG} 为灵敏度矩阵，第 l 行第 g 列元素表示输电断面 l 功率对机组 g 出力的灵敏度； $P_{L,B}$ 为初始运行方式下输电断面的功率； $P_{L,\max}$ 和 $P_{L,\min}$ 分别为上下限额，是相关部门事先在校验多种典型运行方式下电网安全稳定水平后给出的已知定值。

3) 判断机组是否有足够能力将输电断面功率限制在规定范围内，进而评估省间电力交易的可行性，形成省间交易的物理边界。受限于容量、爬坡能力等性能，机组功率调整量有限，且日内机组出力不宜大幅偏移日前计划曲线。故在判断式(5)是否成立时，需考虑机组出力变化范围，如式(6)。

$$\Delta P_{G,\min} \leq \Delta P_G \leq \Delta P_{G,\max} \quad (6)$$

式中： $\Delta P_{G,\max}$ 和 $\Delta P_{G,\min}$ 分别为机组出力增加量的综合上下限额。此外，当某机组并非本次交易的送受端省网机组时，对应限额取0，即非购售电省网的机组没有义务为其他省网购售电腾挪通道空间。

2 省间交易通道可用输电能力优化

2.1 优化问题的构建

调度机构测算交易通道 ATC 的关键点是,在保障电网运行安全的前提下提供更多的通道交易能力,以减小对市场出清可能造成的影响。但是,由于无法准确知晓未来的成交情况,调度机构不能按照交易路径最大输电能力直接计算交易通道 ATC:在图 2 中, A 点代表交易路径 1 输电能力达到最大。但若有其他交易路径成交时, A 点可能偏移至 B 点,进而造成断面越限,形成不可行交易方案。

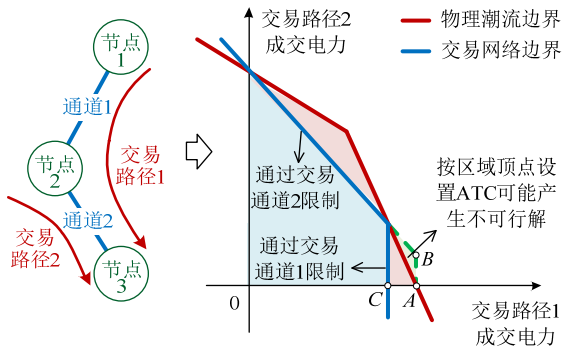


图 2 两交易路径场景下的可行域分析

Fig. 2 Analysis of feasible regions with two trading paths

交易通道 ATC 测算工作可归结为,在第一象限范围内,控制蓝色区域应尽可能多地覆盖红色区域,但不超出红色区域。设 $\varphi = \{x_p | \text{式(1)一(3)}\}$ 为交易网络可行域, $\psi = \{x_p | \text{式(3)一(6)}\}$ 为实际电网可行域,则本文问题可定性归结如下。

优化目标: φ 的所包含的空间范围尽可能大。

约束条件: $\varphi \subseteq \psi$ 。

至此,本文问题转化为:一是如何获得 φ 以判断约束条件成立与否;二是如何量化目标函数。

2.2 可行域的搜索

本文采用平面外拓的方法搜索 φ 的顶点^[22]。

步骤 1: 设向量 x_p 的维度为 M 。给出至少包含 $M+1$ 个满足式(1)一(3)的非退化初始顶点 V_i , i 为顶点编号,构成的凸包络多面体为初始空间,记为 φ_k 。

步骤 2: 构建 φ_k 的第 r 个外表面,如式(7)。

$$S_r = \{V_{i_1}, V_{i_2}, \dots, V_{i_M}\} \quad (7)$$

式中: S_r 为 φ_k 的外表面,是由顶点的取值序列构成的集合; i_1, i_2, \dots, i_M 为外表面所含顶点的编号。

步骤 3: 对于表面 S_r , 取 φ_k 内部任一列向量 X_B (可取 φ_k 的质心), 则在以 X_B 为基点, 以方向分别与 $V_{i_1}-X_B, V_{i_2}-X_B, \dots, V_{i_M}-X_B$ 一致的射线为棱所构成的放射体中, 任意一点 X 均可按式(8)线性转化。若 $(e_w)^T w_r > 1$, 则 X 与 X_B 分居平面 S_r 两侧。据此, 以式(9)为目标函数, 式(1)一(3)和式(8)为约束

条件, 判断是否有可行解在 φ_k 的外部。

$$X = X_B + [V_{i_1} - X_B, \dots, V_{i_M} - X_B] w_r \quad (8)$$

$$\max(e_w)^T w_r \quad (9)$$

式中: w_r 为线性组合权重列向量, 维度与 S_r 元素数量一致; e_w 为 M 维元素为 1 的列向量。

步骤 4: 若对于所有表面均有 $(e_w)^T w_r \leq 1$, 则说明 φ_k 的外部无可行解, 输出 $\varphi = \varphi_k$; 否则, 将式(9)的最优解纳入到顶点集合 $\{V_i\}$ 中, 并将 S_r 拓展为如图 3 所示的新外表面, 更新 φ_k 后返回至步骤 2。

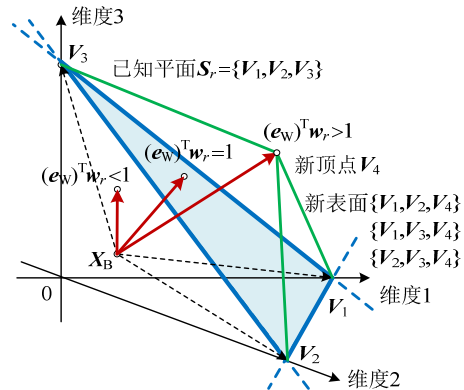


图 3 多面体的顶点搜索

Fig. 3 Searching for vertices of convex polyhedron

采用上述方法可得到 φ 的顶点。考虑到线性规划的解必在边界处取得, 故只需校验 φ 的顶点是否全部满足式(3)一(6)即可, 具体见第 2.4 节。

2.3 目标函数的选择

区域调度机构填报的 ATC 应能够在保证电网安全的客观前提下提供充分的交易空间。一种思路是直观法, 令填报的通道 ATC 尽可能地贴近其限额, 如式(10)一(12)所示。

$$\min (e_c)^T (\delta_{\max} + \delta_{\min}) \quad (10)$$

$$\delta_{\max} = P_{C,\max} - P_{C,B} - C_{\max} \geq 0 \quad (11)$$

$$\delta_{\min} = C_{\min} + P_{C,B} - P_{C,\min} \geq 0 \quad (12)$$

式中: δ_{\max} 和 δ_{\min} 分别为通道正反向交易能力和相应输电断面功率上下限之差; $P_{C,B}$ 为计及中长期交易、日前交易等已成交结果所形成的初始运行方式下, 交易通道的计划输电功率列向量; $P_{C,\max}$ 和 $P_{C,\min}$ 分别为稳定规定中对应的通道功率上下限额; e_c 为与 C_{\max}, C_{\min} 维度相同且元素为 1 的列向量。

然而, 在实际生产中, 式(10)难以克服输电能力冗余带来的误判问题: 日内运行方式多变, 通道无法时刻都能按典型运行方式下的理论限值输送功率。文献[17]将这种通道理论最大裕度与通道实际剩余能力的差值称为输电能力冗余, 并指出式(11)和(12)应扣除冗余量, 否则可能出现为争取冗余的、无实际效力的 ATC 而对非冗余通道 ATC

进行削减的情况。但是，在单交易路径场景中可通过计算各省网日内最大送受电能力来判断输电能力冗余，而多交易路径场景下如何定量计算还有待研究。

对此，本文引入测度的概念，衡量交易可行域空间的大小。 φ 的测度在二维场景下对应多边形面积，三维场景下对应多面体体积，物理含义为：在电网实际可行域空间大小(面积/体积)一定的情况下，交易可行域的空间越大，可提供的交易方案数量越多，限制省间交易出清的可能性就越小。计算方法为：首先，取 φ 内的一点 X_B ，将 φ 拆分为若干个由 X_B 与外表面 $S_r = \{V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{im}\}$ 构成的凸多面体，二维情景如附录 A 所示；然后，按式(13)计算 X_B 与表面 S_r 构成的子空间有向测度^[23]；最后，由于 φ 为凸多面体且 X_B 在 φ 内部， φ 的空间大小即为所有子空间有向测度绝对值之和，如式(14)。

$$F_r = \det([V_i - X_B, \dots, V_{im} - X_B]) / (M!) \quad (13)$$

$$\max F_M = \sum_r |F_r| \quad (14)$$

式中： F_r 为子空间的有向测度； F_M 为其绝对值之和； $\det(\cdot)$ 求取矩阵的行列式值。

2.4 求解算法的设计

综上所述，本文采用交替迭代的方式实现交易网络和物理网络的配合：假设交易网络约束的限值已知，构建其可行域，找到交易网络的边界运行点。将交易网络的边界运行点带入到物理网络模型中，判断是否能够通过调整机组出力的方式保证所有断面都不越限。若可以实现断面不越限，则适当增大交易网络约束的限值；反之，则适当缩小交易网络约束的限值。对此，第 2.1 节优化问题的求解可采用混合式求解算法，由智能算法作为外层循环体，由内点法作为内部基本单元，流程如下：

首先，由智能算法给出样本群，每个样本在式(11)和(12)所示的范围内给定一组 C_{max} 和 C_{min} 。然后，在各样本内调用第 2.2 节方法确定样本的 φ ，其中，式(9)采用 CPLEX 求解；最后，比较样本优劣并更新样本群：若 $\varphi \subseteq \psi$ 成立，则以测度大的样本为优；若 $\varphi \not\subseteq \psi$ 不成立，则以满足约束的样本为优。据此，构造式(15)所示的适应度函数，并以适应度数值越小的样本为优，流程框图如图 4。

$$f = \begin{cases} -F_M, & \max\{\alpha_i\} \leq 0 \\ K \cdot \max\{\alpha_i\}, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中： f 为样本的适应度值； K 为惩罚系数； α_i 为顶点 i 对于断面约束的松弛因子，用于判断 φ 的顶点

是否在 ψ 内部，计算方法如下：

目标函数：式(16)。

约束条件：式(6)(17)(18)。

$$\min \alpha_i \quad (16)$$

$$B_{NP} V_i = B_{NG} \Delta P_G \quad (17)$$

$$P_{L,min} - e_L \alpha_i \leq P_{L,B} + G_{LG} \Delta P_G \leq P_{L,max} + e_L \alpha_i \quad (18)$$

式中： e_L 为维度与 $P_{L,B}$ 一致的单位列向量。

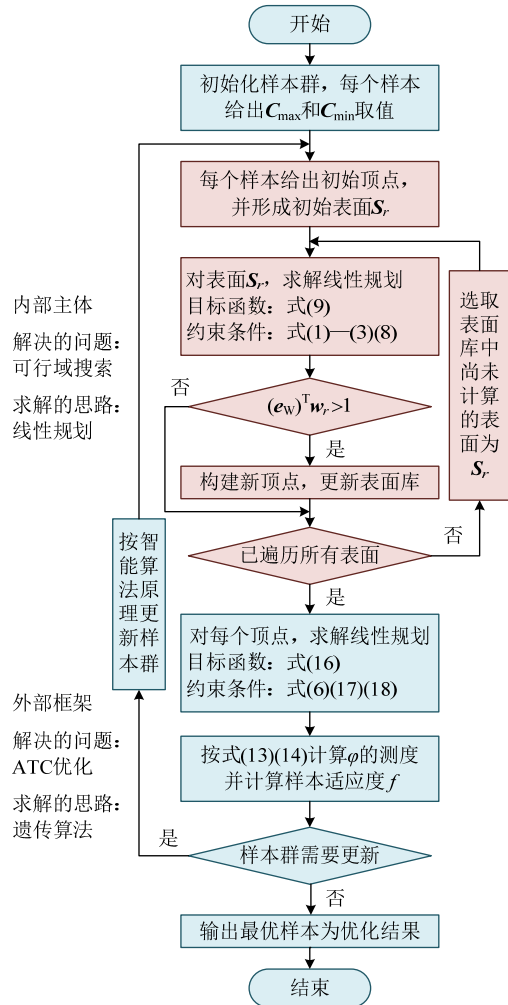


图 4 算法基本流程

Fig. 4 Process of intelligent algorithm

不失一般性，智能算法采用常见的遗传算法，参数设置为 MATLAB GA 工具箱和 CPLEX 求解器的默认值。当交易可行域边界并非由通道 ATC 约束限制时，无需对相应通道 ATC 进行重复限制。对此，在智能算法收敛后的样本群中，对比样本在各维度上的取值，当某样本在某一维度上的取值与其他样本相差较大时，说明该通道 ATC 的缩减可能无实际意义，需经过附录 B 所述的方法检验。

3 算例分析

3.1 仿真背景介绍

以华中电网常见的场景，D 省购入 B、C 两省

富余电力为例。该场景重点考察 B 省送出、C 省送出和 D 省受入 3 条省间交易通道的 ATC, 500kV 输电断面 16 个, 220kV 及以上并网机组 262 台, 如附录 C。其中, 断面灵敏度计算由在线仿真系统完成^[24]。将本文方法和两种常见 ATC 计算方法对比。此外, 为判断不同交易通道 ATC 计算方法所得结果的优劣, 引入覆盖率指标, 定义为交易可行域空间占实际电网可行域空间的比率, 如式(19)所示。

方案 1(传统方法): 采用文献[25]的方法计算各省网的最大送受电能力, 并以此设置 ATC。

方案 2(直观方法): 以式(10)所示的差额最小化为目标函数优化设置各交易通道 ATC。

方案 3(本文方法): 以式(14)所示的测度最大化为目标优化设置各交易通道 ATC。

$$\eta = F_M / F_E \times 100\% \quad (19)$$

式中: η 为覆盖率指标; F_E 为实际电网可行域 ψ 按第 2.3 节方法计算的测度。

3.2 仿真结果分析

3 种方法下得到的各通道 ATC 如表 1, 对应的可行域空间如图 5。其中, 图 5 标注的边界主导因素判断方法为, 将外表面(边界)所含顶点带入约束条件: 若所有顶点都使式(1)取等号, 则该边界由通道能力约束主导; 若所有顶点都使式(2)取等号, 则该边界由平衡裕度约束主导。

表 1 不同方案下优化设置的 ATC
Table 1 Optimal ATC in different schemes

方案	B 省送出 通道/MW	C 省送出 通道/MW	D 省受入 通道/MW	覆盖率/%
方案 1	2694	838	3081	103.24
方案 2	7861	389	4748	49.91
方案 3	7861	831	2784	94.07

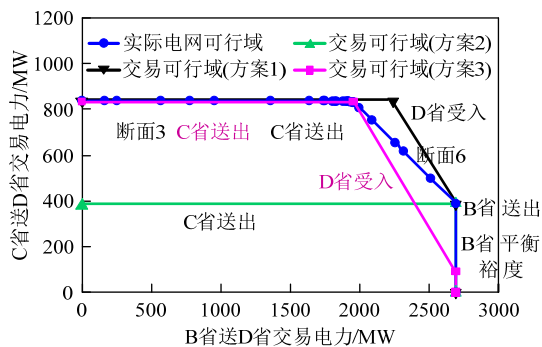


图 5 交易网络可行域及其限制因素

Fig. 5 Feasible region and limitations of trading network

3.2.1 电网潮流阻塞的影响

由图 5 可知, 当 D 省购入电力较大时, 省间交易的主要限制因素为输电断面 6 阻塞。但是, 输电断面 6 是 A 省内部的输电通道, 而 A 省并未开展购售电。该断面阻塞的原因即为第 1.1 节中指出的

“省间潮流穿越”问题。A 省位于华中区域电网的中心, B、C 两省电力外送都不可避免“借道”A 省, 进而影响 A 省内部潮流。但是, 上述两笔交易在交易网络中仅体现为“B-华中-D”和“C-华中-D”两条交易路径, 与 A 节点无直接关系。故区域电网调度机构在测算 ATC 时需从整个区域电网的角度, 通盘考虑交易路径的耦合关系。在方案 1 中, 由于仅着眼于送受端省网自身的交易能力, 错误提供了 3.24% 的不可行交易空间, 致使省间电力交易可能存在安全风险。

3.2.2 通道输电能力冗余的影响

当省间电力交易可能导致网络阻塞时, 区域电网调度机构可采取如下两种解决方法: 一种是限制售电省网送出, 即调整 B、C 两省送出通道 ATC; 另一种是限制购电省网受入, 即调整 D 省受入通道 ATC。由于 D 省受入通道裕度大于 C 省送出通道裕度, 因而方案 2 从“限制较小者、保全较大者”的角度选择了第一种方法, 削减 C 省送出通道 ATC 以换得更多 D 省受入通道 ATC, 实现交易通道 ATC 总量的最大化。但方案 2 的覆盖率指标比方案 3 小, 说明方案 2 提供的交易空间小。此缺陷的产生根本原因为通道输电能力冗余^[17]: 虽然直观上看, 方案 2 提供的通道 ATC 总量(12998MW)比方案 3 (11476MW)多。但是, 由方案 1 可知, 在当前运行方式下 D 省受入功率最多增加 3081MW, 而非最大裕度 4054MW。即当 D 省受入通道 ATC 超过 3081MW 后, 通道产生冗余, 继续增加该通道 ATC 无助于扩大省间交易规模。

3.2.3 省网平衡裕度的影响

省间交易既可能受限于式(5)所示的网络阻塞约束, 也可能受限于式(2)和(6)所示的平衡裕度约束, 对应图 5 的最右侧。由表 1 可知, 对于平衡裕度约束限定的实际电网可行域边界, 方案 3 不需要额外限制交易通道的 ATC。换言之, 即使不根据 B 省的平衡裕度限制 B 省送出通道和 D 省受入通道的 ATC 至 2694MW, 实际电网可行域依然能够覆盖虚拟交易可行域。这符合省间电力交易的基本规则: 平衡裕度在电力交易中对应省网购售电能力, 这类约束应当反映在市场出清的供需关系模型中, 具体成交多少由双方竞价决定, 而非是将其刻画为安全约束进而通过省间交易通道 ATC 限制。

3.3 计算性能分析

“时间紧、节点多、环环相扣”是日内市场组织的基本特征之一。目前区域调度机构仅有不到 30min 时间计算 ATC。此外, 考虑到同一交易周期

内,与华中区域相关的日内省间现货交易路径数量大多数情况下不超过3组,若选择过多的关键交易路径进行分析容易使ATC结果偏保守,降低输电通道利用率,不符合经济性要求。因此,本文以第4.1节数据为基础,分别设置如下交易路径数量场景进行测试:2组路径场景(D省购入B、C省电力),3组路径场景(D省购入A、B、C省电力),以及4组路径场景(B、D省购入A、C省电力)。

将所提算法运行100次,求解时间统计如表2,对应的累计概率分布如图6,其中,横坐标取值已按表2中各场景的最大、最小用时归一化处理。

场景	最大用时/s	最小用时/s	平均用时/s
2组路径	236	138	181
3组路径	417	244	341
4组路径	894	621	745

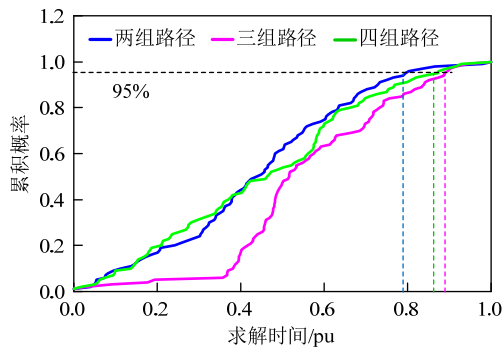


图6 算法求解时间

Fig. 6 Time consumption for solving algorithms

由图6可知,各场景求解用时的上5%分位数分别为216、398、859s,均不超过15min。因此,可认为本文所提的省间交易通道ATC求解算法满足时效性要求。当然,若采用收敛性能高的智能优化算法,配以串并行混合计算技术,可进一步提升算法计算速度。此非本文重点,故不再赘述。

4 结论

针对目前区域电力调度机构面临的省间交易通道可用输电能力测算难问题,提出了考虑多重省间交易耦合和多级输电断面阻塞的区域电网省间交易通道可用输电能力优化方法。方法将可用输电能力优化问题转化为交易网络可行域与物理电网可行域之间的空间覆盖问题,较传统方法可提供更多省间交易空间,以避免对市场出清带来不必要干扰。通过场景仿真验证了方法特点:

1) 由于方法不依赖离线计算的通道传输限额,故在计算可用输电能力时不受通道输电能力冗余的影响。

2) 方法可正确区分网络阻塞主导的运行边界和平衡裕度主导的运行边界,从而规避因平衡裕度不足限制交易通道可用输电能力的现象,符合交易基本规则。

此外,在实际交易组织中,除了在出清前调整通道ATC的方式以外,出清后潮流校核调整亦起到可避免不可行交易方案的作用,两种保障电网安全的手段之间如何配合是下一步需要研究的问题。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 国家电网有限公司. 省间电力现货交易规则(试行)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- [2] 国家能源局华中监管局. 华中省间电力调峰及备用辅助服务市场运营规则[EB/OL]. [2022-10-14]. https://hzj.nea.gov.cn/UploadFiles/2022/2531665454528171_496879fd-fbba-4206-accd-2c47f3365ffc.pdf.
- [3] 孙大雁, 关立, 胡晨旭, 等. 省间电力现货交易机制设计与探索[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 421-428.
SUN Dayan, GUAN Li, HU Chenxu, et al. Design and exploration of inter-provincial power spot trading mechanism[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 421-428(in Chinese).
- [4] 刘昊, 郭焯, 孙宏斌. 中国跨区域跨省电力交易综述及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 187-199.
LIU Hao, GUO Ye, SUN Hongbin. Review and prospect of inter-regional and inter-provincial power trading in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 187-199(in Chinese).
- [5] 周迪雅, 冯树海, 朱忆宁, 等. 适应我国电力市场环境的可用传输容量(ATC)应用分析及关键问题探讨[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3357-3366.
ZHOU Diya, FENG Shuhai, ZHU Yining, et al. Application analysis and key issues of available transfer capability (ATC) adapted to electricity market environment in China[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3357-3366(in Chinese).
- [6] 徐劭翔, 苗世洪, 周良松. 跨区域互联电网的可用输电能力计算方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 74-80, 135.
XU Shaoxiang, MIAO Shihong, ZHOU Liangsong. Calculation method of available transfer capability for cross-regional interconnected power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 74-80, 135(in Chinese).
- [7] CHAUHAN R, NARESH R, KENEDY M, et al. A streamlined and enhanced iterative method for analysing power system available transfer capability and security[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 223: 109528.
- [8] 孙鑫, 饶宇飞, 肖浩, 等. 基于线性化最优潮流的电网可用输电能力计算[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 194-199.
SUN Xin, RAO Yufei, XIAO Hao, et al. Available transfer capability calculation based on linearized optimal power flow[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 194-199(in Chinese).
- [9] 张沛, 周钰朋, 崔晖, 等. 基于可解释机制的极限传输能力计算知识表达模型[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 179-187.
ZHANG Pei, ZHOU Yupeng, CUI Hui, et al. Interpretable mechanism based knowledge expression model for total transfer capability computation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 179-187(in Chinese).
- [10] 姜涛, 李春晖, 张儒峰, 等. 基于多项式混沌展开的电力系统概

- 率可用输电能力评估[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 489-503.
JIANG Tao, LI Chunhui, ZHANG Rufeng, et al. Probabilistic available transfer capacity evaluation of power systems using polynomial chaos expansion[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 489-503(in Chinese).
- [11] CHEN Yanbo, WANG Deshuai, LI Jiaqi, et al. A SSSC optimal configuration method to enhance available transfer capability considering multi-wind farm access[J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17(16): 3777-3792.
- [12] JIANG Tao, LI Xue, KOU Xiao, et al. Available transfer capability evaluation in electricity-dominated integrated hybrid energy systems with uncertain wind power: an interval optimization solution[J]. Applied Energy, 2022, 314: 119001.
- [13] 张林, 杨高峰, 汪洋, 等. 基于多参数规划理论的互联网直流联络线功率可行域确定方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5763-5771.
ZHANG Lin, YANG Gaofeng, WANG Yang, et al. Determination of the DC tie-line transfer capacity region of the interconnected power grid: a multi-parametric programming approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5763-5771(in Chinese).
- [14] 宋懿洋, 赵德洁, 王剑晓, 等. 基于可行域投影的多区域电力市场交易模型与算法研究[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 91-99.
SONG Yiyang, ZHAO Dejie, WANG Jianxiao, et al. Multi-regional electricity market trading model and algorithm based on feasible region projection[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 91-99(in Chinese).
- [15] 袁泉, 马骞, 李豹, 等. 基于联络线可行域分析的跨区通道传输能力评估方法[J/OL]. 电力自动化设备, 2023: 1-17(2023-12-21). <https://doi.org/10.16081/j.epae.202312023>.
YUAN Quan, MA Qian, LI Bao, et al. Transfer capacity evaluation method of cross-regional channel based on tie-line feasible region analysis[J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 2023: 1-17(2023-12-21). <https://doi.org/10.16081/j.epae.202312023>(in Chinese).
- [16] 林伟, 杨知方, 余娟, 等. 考虑机组启停的省间电量交易可行域确定方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5119-5127.
LIN Wei, YANG Zhifang, YU Juan, et al. Determination on energy trading region among regional networks considering unit commitment [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5119-5127(in Chinese).
- [17] 魏聪颖, 汪旸, 徐箭, 等. 面向日内省间电力现货市场的区域电网交易通道可用输电能力优化方法[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4255-4262.
WEI Congying, WANG Yang, XU Jian, et al. Optimization of available transfer capability for regional power grids in inter-provincial electricity spot markets[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4255-4262(in Chinese).
- [18] 关立, 常江, 孙大雁, 等. 省间电力现货市场试运行分析及思考[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(11): 2-10.
GUAN Li, CHANG Jiang, SUN Dayan, et al. Analysis and reflection on trial operation of inter-provincial electricity spot markets in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(11): 2-10(in Chinese).
- [19] 季天瑶, 杜哲宇, 张经纬, 等. 集中式电力市场下基于谱聚类与图注意力网络的电力枢纽节点设计方法研究[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 697-709.
JI Tianyao, DU Zheyu, ZHANG Jingwei, et al. Power hub nodes design based on spectral clustering and graph attention network under integrated power markets[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 697-709(in Chinese).
- [20] 樊宇琦, 丁涛, 汤洪海, 等. 考虑路径折算的跨省跨区可再生能源增量现货交易模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 103-112.
FAN Yuqi, DING Tao, TANG Honghai, et al. Cross-provincial and cross-regional incremental spot trading model for renewable energy considering path conversion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 103-112(in Chinese).
- [21] 国家能源局. 国家能源局发布 2023 年全国电力工业统计数据 [EB/OL]. [2024-01-26]. https://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm.
- [22] TAN Zhenfei, ZHONG Haiwang, WANG Jianxiao, et al. Enforcing intra-regional constraints in tie-line scheduling: a projection-based framework[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4751-4761.
- [23] 何朝葵, 郑苏娟, 孙中喜. 行列式的几何意义及多面体体积的计算[J]. 大学数学, 2021, 37(3): 105-109.
HE Zhaokui, ZHENG Sujuan, SUN Zhongxi. The geometric significance of determinant and calculation of polyhedron volume[J]. College Mathematics, 2021, 37(3): 105-109(in Chinese).
- [24] 董向明, 孙略, 陈钟钟, 等. 计及调度操作行为的电网运行趋势智能模拟推演系统[J]. 电网技术, 2023, 47(S2): 1-14.
DONG Xiangming, SUN Lue, CHEN Zhongzhong, et al. Intelligent simulation and prediction system of power grid operation trends considering dispatching operational behaviors[J]. Power System Technology, 2023, 47(S2): 1-14(in Chinese).
- [25] 汪旸, 李群山, 黄牧涛, 等. 考虑输电断面耦合与直流稳定支撑的大电网最大供电能力评估方法[J/OL]. 电网技术, 2023: 1-11(2023-10-11). <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1199>.
WANG Yang, LI Qunshan, HUANG Mutao, et al. Evaluation method of maximum power supply capacity of bulk power grid considering transmission section coupling and DC stability support[J/OL]. Power System Technology, 2023: 1-11(2023-10-11). <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1199>(in Chinese).



魏聪颖

在线出版日期: 2024-07-29。

收稿日期: 2024-01-29。

作者简介:

魏聪颖(1993), 男, 博士, 研究方向为电网调度控制, E-mail: weicongying@whu.edu.cn;

徐箭(1980), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定控制, E-mail: xujian@whu.edu.cn;

汪旸(1981), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电网调度控制, E-mail: wangy@cc.sgcc.com.cn;

徐浩(1988), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网调度控制, E-mail: xuhao11@cc.sgcc.com.cn;

廖思阳(1989), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定控制, E-mail: liaosiyang@whu.edu.cn。

(责任编辑 王金芝)

附录 A

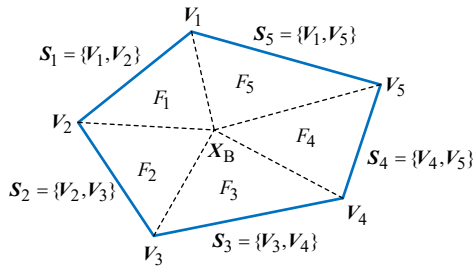


图 A1 二维多边形有向测度计算

Fig. A1 Calculation of directed measures for polygons

附录 B

在智能算法收敛终止后，执行如下步骤进一步优化结果，其中，样本的决策变量序列都已按 $[0,1]$ 的取值范围进行归一化处理。

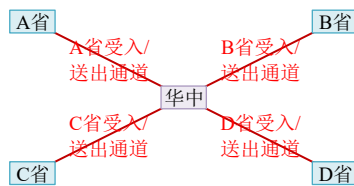
步骤 1: 对于收敛后的所有样本，取适应值最大的样本为最优样本。若有多个样本的适应值都与最大值相差无几，则在这些样本中取通道 ATC 绝对值之和最大的样本作为最优样本。最优样本的取值序列记为 X_{opt} ，并令 $d=1$ ；

步骤 2: 对于所有样本中的第 d 维变量，若存在样本 Y ，满足 $|X_{opt}(d)-Y(d)| \geq \epsilon$ ，则令 $X_{opt}(d)=1$ ，重新计算最优样本对应的交易可行域空间后转至步骤 3；否则转至步骤 4。

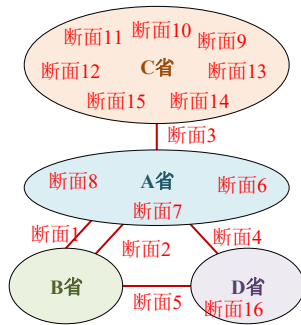
步骤 3: 若修改前后最优样本的可行域空间无明显变化，则说明从 d 维度对通道 ATC 限制无实际意义，故 $X_{opt}(d)$ 最终取值为 1；否则保留原先的序列取值。

步骤 4: 若已遍历所有维度，则输出 X_{opt} 并换算成有名值；否则， $d=d+1$ ，并转至步骤 2。

附录 C



(a) 虚拟交易网络



(b) 实际电力网络

图 C1 仿真算例拓扑图

Fig. C1 Topology diagrams for simulation

表 C1 输电断面以及省间通道功率

Table C1 Power flow of lines and trading channels

名称	物理含义	最大裕度/MW	
		正向	反向
输电断面 1	A、B 省间联络断面	2092	-4308
输电断面 2	A、B 省间联络断面	574	-4626
输电断面 3	A、C 省间联络断面	4920	-880
输电断面 4	A、D 省间联络断面	2921	-829
输电断面 5	B、D 省间联络断面	2328	-2872
输电断面 6	A 省内部断面	450	-3150
输电断面 7	A 省内部断面	2564	-1836
输电断面 8	A 省内部断面	2634	-4766
输电断面 9	C 省内部断面	4234	-2566
输电断面 10	C 省内部断面	3445	-2255
输电断面 11	C 省内部断面	1184	-2816
输电断面 12	C 省内部断面	3113	-2887
输电断面 13	C 省内部断面	2215	-2485
输电断面 14	C 省内部断面	3166	-5234
输电断面 15	C 省内部断面	2437	-2363
输电断面 16	D 省内部断面	1280	-2420
A 省平衡裕度	A 省机组日内出力	2894	-5015
B 省平衡裕度	B 省机组日内出力	2694	-3054
C 省平衡裕度	C 省机组日内出力	8596	-8604
D 省平衡裕度	D 省机组日内出力	2242	-4054
B 省送出通道	B 省区内交流受电	—	-7861
C 省送出通道	C 省区内交流受电	—	-880
D 省受入通道	D 省区内交流受电	4748	—