

可用输电能力计算与分配方法: 研究进展、实践综述与未来展望

季天瑶¹, 曾家国¹, 荆朝霞¹, 张艳红²

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510641; 2. 国网江西省电力有限公司经济技术研究院, 南昌 330006)

摘要: 在全国统一电力市场建设和高比例可再生能源并网的背景下, 我国正形成多层次跨区域市场格局。不同层级、区域和时间点达成的交易在实时交割中共同作用于同一互联电网, 使高效、准确地计算可用输电能力及设计其分配机制成为关键问题。首先梳理了可用输电能力的概念与理论框架, 并总结了现有计算方法的主要技术路线及其不足。随后汇总典型市场中同时涉及可用输电能力的计算与分配机制的研究进展, 并分析其特点与局限。在此基础上, 系统比较美国PJM、欧洲以及我国国家电网和南方电网的可用输电能力计算与分配机制, 揭示不同机制背后的制度逻辑与市场适配性。最后, 从学术研究与市场实践两个层面总结可用输电能力的计算和分配机制未来的发展方向, 并结合我国市场建设需求提出相应的优化建议。

关键词: 电力市场; 可用输电能力; 发电转移权重; 跨区市场交易

Available Transfer Capability Computation and Allocation Methods: Research Progress, Practical Review and Future Perspectives

JI Tianyao¹, ZENG Jiaguo¹, JING Zhaoxia¹, ZHANG Yanhong²

(1. College of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Economic and Technological Research Institute, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330006, China)

Abstract: Against the backdrop of building a unified national electricity market and integrating high shares of renewable energy, China is forming a multi-level, cross-regional market structure. Transactions concluded at different levels, regions, and time points ultimately act on the same interconnected grid during real-time delivery, making the efficient and accurate calculation of available transfer capability (ATC) and the design of its allocation mechanisms critical. This paper first clarifies the concept and theoretical framework of ATC, and summarizes the main technical approaches and limitations of existing calculation methods. It then reviews research progress in typical markets that simultaneously address ATC calculation and allocation, highlighting their characteristics and shortcomings. Building on this, the paper compares ATC calculation and allocation mechanisms in PJM, Europe, and the China State Grid and China Southern Grid regions, revealing the institutional logic and market suitability underlying different designs. Finally, it outlines future research and practical development directions and proposes optimization recommendations for ATC calculation and allocation mechanisms in light of China's market development needs.

Key words: electricity market; available transfer capability; generation shift key; cross-regional market transactions

0 引言

在我国加快建设全国统一电力市场体系的背景下^[1], 我国跨区域电力市场在区域内省间、跨区跨

省和跨电网经营区3个维度取得了突破性进展。首先, 作为《关于开展电力现货市场试点工作的通知》指定的首批试点区域的南方区域电力市场于2025年6月28日正式转入连续结算试运行阶段^[2], 取得了重大突破。与此同时, 其他区域内的省间市场也发展迅速, 例如华东区域的跨省电力中长期市场快速推进^[3], 有效促进了省间发电资源的互济与优化

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52077081)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52077081).

配置。其次,对于跨区跨省层级,北京电力交易中心发布了《跨区跨省电力中长期交易实施细则(2024年修订稿)》,并于2024年7月1日起实施^[4],进一步健全了交易机制以及优化了业务流程,为跨区跨省中长期交易的连续运行和新能源消纳提供了制度保障。此外,国家发改委和国家能源局近日联合批复了《跨电网经营区常态化电力交易机制方案》,标志着我国首次在国家电网与南方电网两大经营区之间建立起常态化的市场交易通道,为全国统一电力市场体系建设迈出了里程碑式的一步^[5]。

在当前的形势发展下,多层次跨区域电力市场的建设已势在必行。在此格局下,不同层级和不同区域市场上达成的不同时间点的交易,最终都将在交割阶段物理性地作用于同一互联电网。因此,如何准确计算电网的剩余可用容量并将稀缺的输电资源分配给各时间点和各层级市场成为建设多层次跨区域电力市场的关键问题,这也正是电力市场中的可用输电能力研究所要解决的核心问题。

电力市场中可用输电能力的两个核心问题在于计算与分配,即:“在前序市场形成交易结果后,计算剩余的可用于市场交易的电网能力”以及“输电容量在系统中以何种方式进行出清分配”。已有许多专家学者投入到了可用输电能力的研究中,也有一些文献对研究成果进行了综述:文献[6]主要围绕确定性模型展开,对不同方法的基本原理与差异进行了对比分析;在此基础上,文献[7]进一步从模型实用化、计算速度以及不确定性因素建模3个角度总结了研究进展,凸显了传统方法在实际应用中面临的瓶颈。随后,研究开始更加关注确定性与概率性模型的对比与融合。文献[8-10]均对这两类模型进行了系统性梳理与优劣比较,其中文献[8]指出了现有方法在实际应用中的局限并提出改进建议;文献[9]则进一步将暂态稳定约束及其他关键影响因素纳入分析,提出了更为可行的发展方向;而文献[10]则强调在新型电力系统发展背景下提升ATC计算精度与效率的重要性。针对风电等可再生能源的不确定性影响,文献[11-13]展开了专门探讨:文献[11]综述了含风电场电力系统的概率ATC计算方法,系统比较了不同方法的优劣并展望未来研究;文献[12]则从电力市场视角出发探讨了风电并网导致的输电阻塞问题,并系统梳理了ATC的定义、模型和算法特点;文献[13]则更进一步从输

电可靠性、市场运行与新能源不确定性等多维度系统分析了ATC评估的挑战与前景。此外,研究也在不断拓展ATC的功能定位,例如文献[14]将智能算法方法纳入综述,揭示其在求解效率与复杂系统建模中的潜力;而文献[15]则将ATC作为电力系统网络传输灵活性的重要指标进行评价,为理解其在系统层面上的作用提供了新的视角。

上述研究成果主要从确定性模型、概率性模型以及基于智能算法的计算模型3个维度对可用输电能力的计算方法进行了综述,并对其基本定义与研究现状进行了系统讨论。然而,现有研究仍存在一定的局限性,有待进一步突破。

其一,当前关于可用输电能力研究的综述性成果整体滞后,尚未系统梳理近年来在前沿计算方法、建模技术以及实践方面的最新进展,亦缺乏结合我国当前多层次跨区域电力市场的建设实际,提出针对性的政策建议,难以为当前背景下的市场机制优化提供理论支撑。

其二,现有文献对典型跨区域电力市场中可用输电能力的计算与分配机制缺乏系统性的横向比较,未能深入剖析各类机制与其所依托的市场模式之间的适配关系,难以揭示各类机制选择背后的机制协调因素与适用边界,导致相关研究在机制分析深度和应用指导价值方面均有所欠缺。

其三,已有学术综述多聚焦于可用输电能力的计算模型本身,分别从确定性模型、概率性模型与基于智能优化算法的计算模型等技术路径出发,探讨其适用条件与建模特点,但未能充分认识到计算模型与市场模式、分配机制之间的耦合关系。缺乏从电力市场整体机制出发,对计算方法与分配策略协同适应性进行综合评估与系统性分析,研究视角相对割裂,分析维度亦较为单一。

本文将结合可用输电能力计算和分配研究的最新进展,以及结合多层次跨区域市场建设的现状,从更完整的角度总结当前最新的学术研究与机制实践。首先,介绍可用输电能力的定义,廓清可用输电能力的理论框架。然后,对可用输电能力计算相关的学术研究进行系统梳理,提炼研究思路与不足之处。接着,总结了既关注典型市场实际情况、又兼顾计算与分配机制的相关文献,为后续分析奠定基础。之后总结和对比分析典型电力市场的可用输电能力计算与分配现行机制,揭示各典型市场机制

选择背后的动因。随后,从学术研究和市场机制实践的角度出发,总结现有可用输电能力计算和分配的研究路径,并针对学术研究和市场机制设计提出建议,最后对我国可用输电能力计算和分配机制的发展提出建议。

1 可用输电能力的概念

本文所使用的“可用输电能力”(available transfer capability, ATC)一词,是借鉴了美国与欧洲电力市场中对该术语的标准化定义。ATC概念在不同场景下具有不同的内涵。为确保术语使用的规范性与一致性,本节对其基础定义和概念进行系统梳理。

在北美,电力系统的可用输电能力定义最早由北美电力系统可靠性委员会(North American Electric Reliability Council, NERC)于1996年提出,其表述为:ATC指在当前交易基础上,物理输电网络中可供新增商业交易使用的剩余输电能力。其值用 A_{TC} 表示,计算公式如式(1)所示^[16]。

$$A_{TC} = T_{TC} - T_{RM} - C_{BM} - E_{TC} \quad (1)$$

式中: T_{TC} 为最大输电容量(total transfer capability); T_{RM} 为输电可靠性裕度(transmission reliability margin); C_{BM} 为容量效益裕度(capacity benefit margin); E_{TC} 为现有输电协议(existing transfer capability)。

在欧洲,输电系统运营商(European Transmission System Operators, ETSO)于1999年也对输电容量相关概念进行了标准化定义,提出了净输电容量(net transfer capacity, NTC)和可用输电容量(available transfer capacity)等术语^[17]。其中, N_{TC} 为特定区域间在给定安全标准下的最大可交易电力传输能力,而可用输电容量则是在 N_{TC} 基础上扣除已分配容量后的可用于新增交易的容量。

$$N_{TC} = T_{TC} - T_{RM} \quad (2)$$

$$A_{TC} = N_{TC} - A_{AC} \quad (3)$$

式中: A_{AC} 为已分配容量(already allocated capacity)。

由于“ATC”在不同地区、不同场景中存在表述与内涵差异,国内文献在定义ATC时也采用了不同的翻译:可用输电能力^[18-19]、可用传输能力^[20-21]、可用输电容量^[22-23]和可用传输容量^[24-25],甚至一些文章中会对同一术语“available transfer capability”在上下文产生不同的翻译^[20-21]。

为避免术语和定义的混淆,本文将ATC统称为“可用输电能力”,其定义为在当前交易情况下,基于任意两个节点或区域之间的电网中,剩余且可用于市场交易的输电功率。在使用可用输电能力这个概念时,需要注意与基于单条线路的可用于市场交易的输电容量的概念进行区分。

同时,本文还需要对“available transmission capacity”做进一步的概念辨析,它是FERC在1995年提出可用输电能力(available transfer capability)之前的过渡性用词,其本身缺乏数学和市场机制上的正式定义^[16]。在可用输电能力(available transfer capability)正式定义以后,可以认为“available transmission capacity”同样指代可用输电能力,但是同样需要注意避免与单条输电线路的剩余容量或额定容量混淆。

此外,需要对可用输电能力的“计算”与“分配”概念进行定义。在广义上,可用输电能力分配包括了可用输电能力计算方法,输电容量分配方式以及输电容量价格形成机制的全过程。为避免概念混淆,本文将可用输电能力的计算定义为在考虑电网拓扑结构、电源与负荷分布、安全运行约束及市场已完成的交易的基础上,采用一定的数学建模与仿真分析方法,确定不同时间尺度、不同节点或区域间可用于新增市场交易使用的剩余电网容量的过程。而可用输电能力的分配则指在计算得到的可用输电能力范围内,按照一定的分配方法或市场机制将其在各类市场主体之间进行分配的过程。

2 可用输电能力的基本计算模型与方法综述

基于模型数学特性的不同,本节分别从确定性模型、概率性模型以及基于智能优化算法的计算模型3个方面对可用输电能力的计算模型研究进行综述,初步地系统梳理了在前序市场形成交易结果后,如何计算剩余可用于市场交易的电网能力的主要研究路径与研究内容。

2.1 确定性模型与概率性模型

在研究早期,大多数研究者基于确定的电力系统基准运行方式出发,建立适当的模型来计算该运行方式下的可用输电能力。确定性模型由于其模型较为简单且易于实施,成为早期的研究重点。确定性模型研究可按照不同的计算方法划分:重复潮流

法(repeated power flow, RPF)、连续潮流法(continuation power flow, CPF)、最优潮流法(optimal power flow, OPF)、线性分布因子法(power transfer distribution factor, PTDF-based method)以及灵敏度分析法。

重复潮流法和连续潮流法都是通过不断提高送端区域的发电水平和受端区域的负荷水平直至系统达到安全性约束条件来得到 ATC。重复潮流法和连续潮流法都是在 ATC 明确定义前就存在的一种潮流计算方法^[26], 学界将其引入计算 ATC 的研究中^[27-28], 并且主要针对计算速度的提升进行改进, 例如文献[27]通过在计算环节中将交流模型简化为直流模型等方法简化计算过程, 提高计算速度。对比两种方法可知, 重复潮流法在接近电压稳定极限点时, 由于雅可比矩阵趋于奇异, 可能导致潮流不收敛, 而连续潮流法通过参数化系统方程并沿功率变化方向(P-V 曲线)逐步逼近极限点, 能有效克服收敛困难, 准确获取电压稳定极限下的可用输电能力。

相较于 RPF 和 CPF, 最优潮流法和线性分布因子法采用优化模型求解 ATC, 大大提升了计算速度。其中, 最优潮流法通过建立优化模型, 以系统安全稳定约束为条件、最大化传输能力为目标, 精确计算可用输电能力, 适用于考虑多种实际运行约束和非线性特性的场景^[29-30]。而线性分布因子法则是在 OPF 的基础上, 采用直流潮流并基于潮流线性化假设, 使用 PTDF 等敏感性系数近似描述功率注入对网络潮流的影响, 建模简便的同时进一步提升了计算速度, 适用于在线快速评估或大规模系统中。相较而言, 两者分别基于交流潮流和直流潮流。最优潮流法能够全面反映系统非线性特征和多种复杂约束, 但建模复杂、计算开销大; 线性分布因子法则以牺牲一定精度为代价, 换取计算速度, 在大规模实时调度或预估场景中具有较强实用性。

线性分布因子法计算速度快但精度有限; 重复潮流法、连续潮流法与最优潮流法虽然能更准确反映系统约束下的可用输电能力, 但计算耗时, 难以满足在线应用需求, 且前两者结果往往偏保守。在此背景下, 灵敏度分析法被提出。该方法依托已有 ATC 结果, 通过分析关键参数变动对 ATC 的影响, 实现快速响应, 兼顾效率与精度。需指出, 灵敏度分析法并非独立的计算方法, 而是一种高效辅助手

段, 可在系统状态变化后无需重新潮流计算, 迅速评估特定断面 ATC 的变化^[31-32]。

综上所述, 确定性模型的建立与求解都相对简单, 恰恰对应着可用输电能力计算研究的起步阶段。而且在可用输电能力计算研究的起步阶段, 不确定性因素主要来源于发电机与线路的故障, 以及负荷预测, 不确定性来源较少, 不确定性水平较低, 因此在可用输电能力计算方面针对不确定性因素的建模研究较少。

随着学者与研究人员对可用输电能力计算模型的认识不断深入, 而且高比例可再生能源的并入使得电力系统的不确定性特征显著增强, 可用输电能力计算的研究重点逐渐转移到概率性模型。概率性模型主要以各种不确定性建模方法区分, 如基于蒙特卡洛的方法^[33-36]、基于鲁棒优化的方法^[37]以及基于机会约束的方法^[22-23]等。3类概率性方法在可用输电能力计算中的适用场景和特点各不相同, 体现出对系统不确定性建模策略的多样性与权衡。

蒙特卡洛方法以大量随机样本模拟不确定因素的分布特征, 通过统计评估得到 ATC 的概率分布, 具有较强的建模灵活性和精度优势, 适用于复杂不确定性下的系统分析。然而, 该方法由于计算速度慢而限制了其在实际中的应用。

鲁棒优化方法则基于不确定参数的确定性区间或集合, 追求在最不利情形下仍能保持系统安全运行, 其优势在于无需对概率分布做精确假设, 具备良好的稳健性, 适合用于对系统安全性要求高的场景。但鲁棒优化方法的计算结果往往趋于保守, 可能导致输电通道资源利用率下降。

机会约束方法则在概率意义上放松系统约束, 允许在一定置信水平下约束被违反, 从而在保障系统可靠性的同时提高可用输电能力的利用水平。此类方法在性能与风险之间实现了较好平衡, 但对概率分布的准确建模提出了更高要求, 且其求解过程复杂。

综合来看, 3种方法在 ATC 计算中各有侧重: 蒙特卡洛方法偏重于结果的全面性与准确性, 鲁棒优化强调模型的保守性与稳健性, 而机会约束方法则注重在风险可控前提下提升系统运行灵活性。具体选用何种方法, 需依据应用场景需求以及不确定性来源综合权衡与选择。

确定性模型与概率性模型构成了可用输电能力

计算方法的两大基本范式,也是现有综述性文献重点总结的内容。在高比例可再生能源接入电力系统的背景下,系统运行的不确定性显著增强,这使得概率性模型持续成为研究热点。值得强调的是,无论从何种模型构建视角出发,均需重视模型在规模扩展过程中的适应能力,以及其在实际运行环境中的可实施性与工程适配性。

2.2 基于智能优化算法的计算模型

在确定性模型与概率性模型两类基础方法的框架下,部分研究引入了智能优化算法以提升可用输电能力计算的效率与适应性。这类算法采用人工智能方法,主要包括粒子群优化算法^[38-39]、遗传算法^[40-41]以及属于机器学习中深度学习范畴的神经网络模型算法^[42-43]等,能够有效应对复杂系统中的非线性关系与高维计算问题,拓展了传统方法在实际场景中的应用边界。

3种常见的智能算法在可用输电能力计算中的应用各具优缺点。粒子群优化算法具备较快的收敛速度和良好的连续优化能力,适用于最优潮流模型的求解,但易陷入局部最优,稳定性受限。遗传算法在处理全局优化和离散变量方面表现突出,适合复杂约束问题,但计算效率较低,对参数敏感,可能导致收敛不稳定。神经网络依赖其强大的非线性映射能力,可实现ATC的快速估算,适用于在线应用,但对训练数据依赖性强。不同算法需结合应用场景进行权衡选取^[44-45]。

聚焦基于智能优化算法的计算模型研究,粒子群算法适用于ATC计算模型中包含大规模连续变量的场景,遗传算法则在处理组合优化与全局搜索方面表现较好,而神经网络更适用于构建ATC的快速估算模型。总体而言,采用智能优化算法的ATC计算模型在处理难以通过解析方法解决的复杂非线性约束时表现卓越,并且能够确保结果的准确性。但是这类方法和模型存在着数据集要求较高,以及结果可解释性不足的问题^[13]。因此,不同智能算法的选取应根据模型结构、数据集的优劣及应用场景的具体需求进行权衡和选择。

纵观整个ATC基本计算模型的研究,可以从以下两方面给出总结。

1)从现有基本ATC计算模型的代表性研究成果来看,现有研究普遍遵循在计算资源有限的前提下,提升ATC计算速度与精度的基本科学逻辑,

研究重点主要聚焦于速度与准确性之间的权衡下如何找到更优的平衡点。

2)从研究现状来看,目前对确定性模型的研究已经比较成熟,然而难以在不确定性水平高的新型电力系统背景下实际应用。而概率性模型和基于智能优化算法的计算模型的研究符合当前应用背景,但是在面对大规模复杂结构的电网时,概率性模型的计算速度较低,同时基于智能算法的计算模型对数据集要求较高,结果可解释性不足,难以反映系统机制。

综上所述,如何充分考虑新型电力系统中的各类不确定性因素,在综合权衡计算速度和计算精度中构建适用于大规模且复杂电网的概率性模型和基于智能优化算法的ATC计算模型,是未来研究的重难点。图1对可用输电能力的基本计算模型的相关研究作了总结。

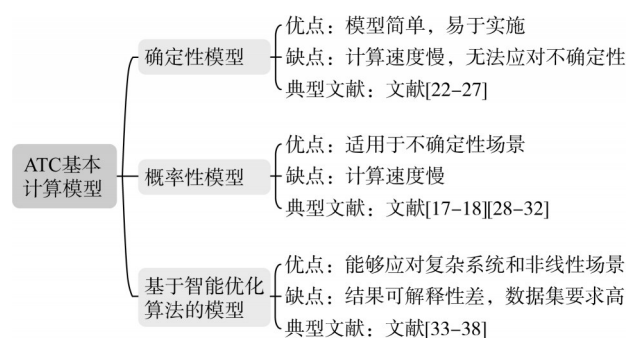


图1 ATC的基本计算模型的相关研究总结图

Fig. 1 Summary diagram of related researches on basic computational models for ATC

3 面向多层级跨区域市场的可用输电能力计算模型研究进展综述

本节从多层级跨区域市场中的ATC建模挑战与改进方法和计算模型优化目标研究两方面对可用输电能力的计算模型研究进行了综述,进一步地系统梳理了在前序市场形成交易结果后,如何计算剩余可用于市场交易的电网能力的主要研究路径与研究内容。

3.1 可用输电能力计算模型建模方法的改进

上述基本ATC计算模型研究在面对多层级跨区域电力市场的研究背景时,所涉及的电网结构复杂、规模庞大,其模型难以直接应用。为控制模型规模并提高计算效率,实际工程中通常仅对跨区域

联络线以及区域内的关键线路进行建模,而忽略对区域内部其他节点和相关约束的精细刻画,从而导致模型精度不足的问题。

在此背景下,如何在保证建模效率与计算速度的前提下,有效考虑区域内部节点、线路以及相关安全约束,成为多层级跨区域电力市场的 ATC 计算中的关键研究问题之一。目前,主要存在两类解决思路:一类是基于发电转移因子(generation shift key, GSK)的方法,通过简化区域内部发电与负荷的响应特性来间接反映内部约束;另一类是通过引入协调优化(coordinated optimization)方法,基于联络线功率可行域的方法,直接在区域边界刻画可行的功率交换范围,从而显式保留区域内部约束对边界功率的影响。两者在模型精度与计算复杂度之间形成了不同的权衡,都是当前研究的核心方向。

3.1.1 基于发电转移权重的建模方法

发电转移权重是一种用于简化区域内部发电与负荷响应特性、以紧凑方式反映区域内部约束的关键参数。该方法最早源于欧洲基于区域报价与定价的电力市场模式。在该模式下,为评估跨区交易对区域内易发生阻塞的线路产生的影响,需将基于区域层面的报价数据转换为节点层面的信息。然而,区域报价机制本身不提供足够的节点粒度数据,这使得跨区域潮流影响分析面临挑战。为此,引入了 GSK 以及价区功率转移因子(generation shift distribution factor, GSDF)等参数,有效实现了从价区到节点层面的映射,从而为基于区域交易模式下的潮流分析与输电能力评估提供了可行方案。

按照不同时序市场研究背景划分,现有基于 GSK 的建模方法研究可分为中长期时间尺度^[46-47]和 GSK 研究^[48-55]。按照具体研究方向与内容不同,现有基于 GSK 的建模方法研究又可再细分为两个方向:其一是将 GSK 作为可用输电能力计算的参数之一,分析现有典型 GSK 计算方法对可用输电能力计算结果以及进一步的市场出清结果的影响。文献[53-54]评估了多种 GSK 计算方法对机组调度偏差、电力市场出清价格、交易可行域及线路潮流分布等关键市场参数的影响,并提出基于典型运行方式的 GSK 构建方法以提升 ATC 计算模型的适应性与计算精度。文献[46, 49-52]对比不同 GSK 计算方法对 PTDF 计算偏差,线路潮流偏差、线路阻塞和跨区市场交易量、市场出清价格波动以

及社会福利等一系列市场出清模型参数与出清结果的影响。上述文献研究可以得出以下的共同结论:一方面, GSK 的引入以较小计算时间成本的增加使得基本 ATC 计算模型适用于大规模而复杂的多区域电网。另一方面, GSK 作为通过简化和紧凑方式反映区域内部要素的跨区域市场可用输电能力计算的关键参数之一,将不可避免地引入一定的误差。因此需要根据不同的市场特性来选择或创新 GSK 计算方法来减少误差水平,即如下所述的现有 GSK 研究的第二种方向。

其二是在现有典型 GSK 计算方法的基础上构建新的计算方法,以减少 GSK 的误差,进一步提升可用输电能力计算的速度和精度。现有典型 GSK 计算方法研究文献从增加建模细节和优化计算流畅来降低 GSK 计算的误差水平,其研究的基本科学逻辑是在以较低计算成本的增加(模型细节、复杂度和流畅的增加)以换取计算精度的增加(误差水平的降低)。具体而言,文献[47]将 GSK 与固定发电机组参数和市场出清参数解耦,考虑机组启停状态构建了基于两步回归的 GSK 计算方法;文献[48]提出了一种改进的 GSK 计算方法,对节点功率进行分类并对每个类别的 GSK 单独进行计算,从而减小计算中长期 GSK 带来的偏差;文献[55]总结了平均分配法、按边际机组分配法、按发电比例分配法等各种 GSK 计算方法,并建立了基于发电转移权重迭代的 ATC 计算模型。

3.1.2 基于联络线功率可行域的建模方法

随着跨区域市场的耦合日益紧密,部分研究者认为传统的 ATC 计算方法暴露出一系列局限性:传统的 ATC 通常仅基于联络线的自身传输极限计算,未能准确反映区域内部安全约束对边界功率可行域的影响,导致联络线利用效率偏低或安全越限。因此研究者通过引入协调优化方法,提出了“可行域”和“联络线功率可行域”的概念以精准刻画跨区域联络线的功率可用传输空间。究其本质,本文第一节中所提出的 ATC 定义同样包含可行域的概念,但是可行域的概念更突出强调了在多区域市场背景下区域联络线可用输电能力的耦合关系。

与基于 GSK 的建模方法研究不同,基于联络线功率可行域的建模方法研究不考虑或较少引入假设前提和简化过程,通过应用特定的数学方法来精准刻画区域内部的各种要素。在研究的早期,大多

数研究从基于迭代式的协调优化方法入手。迭代式方法通过上下两层主体的迭代式信息交换,将下层即区域内部的各类信息要素形成实时的可行域作为上层市场出清的边界,而上层的实时出清结果又传递到下层作为可行域形成的输入数据,通过这一不断迭代的过程最终得到一个收敛的出清结果,在这一出清的过程中也完成了ATC或可行域的计算和应用。文献[56-61]分别应用了广义Benders分解法、多参数规划和分布式优化方法作为迭代式算法来进行可行域的计算并将其直接应用在多区域市场出清中。基于迭代式的数学方法虽在系统建模上具备较强灵活性和可扩展性,但存在收敛性问题,而且对参数调节以及通讯要求高,在实际应用于多层级跨区域市场的可用输电能力计算以及出清时不稳定。

随着学者与研究人员对可用输电能力计算模型的认识不断深入,基于非迭代式的算法被引入到可行域的计算和应用研究中,包括Fourier-Motzkin消元^[62]、压缩建模方法(condensed system representation, CSR)^[63]、模型等效^[64]以及等效投影法^[65-66]。对于Fourier-Motzkin消元法,虽然不涉及上下层之间的通讯迭代,但是其算法内部存在迭代式的搜索过程或约束生成,并非完全的非迭代式方法,在模型求解规模增大时仍带来较高的计算成本。而CSR方法与等效投影方法都是由下层一次性提交区域内部的等效模型,使得上层可以直接优化全系统,其本质都是通过问题降维和非关键变量/约束的消除来达到非迭代式的目的,而使得计算复杂度与信息交互负担降低。这类方法在大规模、高维度的电力市场协调优化中具有重要应用价值。然而这两种方法同样存在模型可扩展性的限制,如等效投影算法适用于凸优化或线性约束系统。

相较于基于GSK的建模方法,基于联络线功率可行域建模方法的基本科学逻辑在于进一步以计算成本的增加(复杂的数学方法)以换取计算精度的增加(较少引入误差)。

3.2 可用输电能力计算模型优化目标的改进

在ATC优化模型的发展过程中,其目标函数的设计经历了从注重系统安全性向兼顾经济性与社会效益的演进。在研究的早期阶段,学者主要关注ATC对系统运行安全的保障作用,因此常以最大化系统交易能力或总ATC为优化目标,强调物理层

面的可行性与安全裕度^[30-33]。随着对电力市场机制的理解加深,研究逐步拓展至ATC配置对市场经济效率的影响。例如,文献[67]提出在多场景下以期望社会福利最大化为目标确定ATC可行域,并进一步以总ATC最大化为目标求得最终的ATC配置方案。

在当前“双碳”背景下电力市场发展的重要性日益凸显,而电力交易的社会属性与外部性问题也日益突出,包括供电安全保障、环境影响与低碳转型等因素。未来ATC计算不仅需兼顾系统安全与市场效率,还可能需纳入外部性价值评估,如碳减排贡献和清洁能源消纳等要素,这将促使计算面向优化目标设计的进一步发展^[68]。

此外,在多层级跨区域电力市场协同发展的趋势下,ATC计算面临新的挑战:即如何在保障物理可行性的同时,实现不同市场层级之间的经济性最优分配与协调。这将推动ATC计算模型从单一层级的安全约束计算,向面向多层级市场机制的协同优化建模方向拓展,成为未来计算模型优化目标研究的重要方向之一。图2对适应多层级跨区域市场发展的ATC计算模型相关研究作了总结。

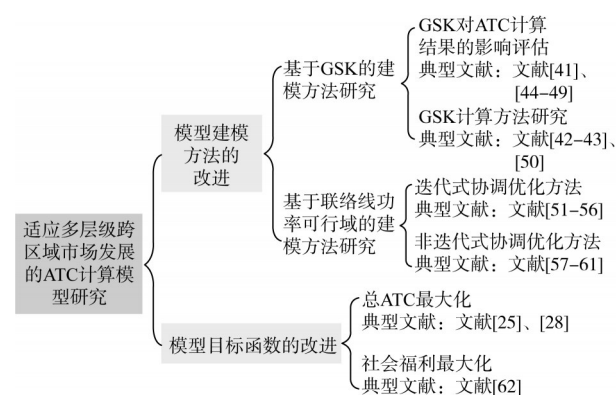


Fig. 2 Summary diagram of ATC computational models adapted to multi-level cross-regional market development

4 国内外典型电力市场ATC计算与分配机制

在前述系统梳理了ATC计算方法的基础上,本节对国内外典型电力市场ATC计算与分配机制的学术研究进行综述,并对现行机制进行阐述和横向对比,深入剖析各类机制与其所依托的市场模式

之间的适配关系,为后续提出对我国 ATC 计算与分配机制发展的建议与启示做铺垫。

值得注意的是,由于 ATC 计算模型与分配模型在实际应用中密切相关,这是本节在分析现行 ATC 机制时得出的关键结论之一,因此本节在综述学术研究和各典型市场实际应用的 ATC 分配方法时,同时阐述了其配套的 ATC 计算方法,而并未单独设置 ATC 分配方法综述的章节。

4.1 研究现状

4.1.1 国外典型市场

可用输电能力的计算与分配机制是实现全国统一电力市场建设的关键环节,而分析跨区域市场典范——欧洲统一电力市场的运行机制与建模方法为我国提供了重要参考。国内外学者主要从市场模式分析和可用输电能力计算与分配模型研究两方面,针对欧洲统一电力市场进行了深入研究。

在市场模式方面,学者们普遍从市场架构、市场运行机制和输电管理机制三方面展开研究。文献[69–70]系统回顾了欧盟电力市场化改革的历程与关键举措,指出其统一市场的建设不仅涉及市场架构和交易范围的扩展,也深刻影响了输电容量等资源的跨区域优化配置的方式;在具体市场运行机制层面,文献[71–72]则深入剖析了欧洲日前统一电力市场的出清机制及报价方式,阐明了价格耦合和容量计算在市场高效运行中的作用;进一步地,学者们直接聚焦跨区域市场的输电容量管理机制,文献[73–74]聚焦于欧洲电力市场的输电管理机制发展,总结了跨区域交易中的输电通道分配与市场衔接方式,并结合中国面临的跨区输电问题提出针对性建议。

在 ATC 计算与分配模型研究方面,欧洲在日前市场中引入的基于潮流的市场耦合成为学界关注的焦点,学者展开了大部分关于模型参数的研究。文献[75]通过实证分析发现,FBMC 在引入初期显著提升了跨境交易量和电价收敛性,但其效益在长期运行中受到关键通道容量收缩的制约。文献[76]则从理论与方法论角度出发,总结了 FBMC 的基本原理与关键参数对输电容量分配和市场出清结果的重要作用。文献[77]针对欧盟政策中规定的最小跨区交易容量进行了福利效应评估。文献[78]则分别对 FBMC 中的关键线路集和 GSK 选择进行了建模与优化研究。

4.1.2 国内典型市场

对于国内典型市场的可用输电能力计算与分配机制的研究,研究者主要沿着“总结国内外典型市场经验并提炼启示”到“开发适应我国多区域交易实际的输电容量分配模型”的研究路径逐步深入推进。文献[79]基于欧美典型电力市场的建设经验,提出了我国电力市场 ATC 的关键问题与解决思路,并建立了一个计及 ATC 的省间省内电力市场优化出清双层模型。文献[80]建立了基于跨区跨省输电网络简化模型的跨区跨省 ATC 交易出清模型。文献[81]建立交直流混联下的省间输电网络简化模型和基于省间 ATC 的优化交易模型。文献[82–83]针对省间中长期交易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,但没有考虑交直流混联网络的特性以及交流电网的潮流分布规律。文献[84]侧重于交直流混联情况下区域电力市场设计的特殊性,构建了考虑交直流混联的区域电网现货市场出清模型。在上文的基础上,文献[85]综合考虑了路径折算和线路损耗,建立了基于跨省跨区 ATC 分配的增量现货交易模型。文献[86]提出了交直流混联网络和交易路径搜索算法,建立基于路径和计及通道的可用输电能力的省间中长期交易优化出清算法。文献[87]提出了考虑省内输电断面阻塞和多重交易路径耦合的区域电网省间通道 ATC 优化方法,通过空间层面区域内各省网间的解耦和时间层面的实用化简化,大幅减少了变量维度以及求解时间。

综上所述,现有研究围绕国内外典型区域的市场模式和可用输电能力计算与分配机制,从市场的综述总结和仿真分析,到可用输电能力计算和分配模型的设计,形成了较为系统的理论框架。该类研究为构建高效透明的多层级跨区域可用输电能力计算和分配机制的研究提供了重要理论与实践借鉴。然而,现有研究在针对可用输电能力计算和分配机制进行分析时局限于单一市场进行分析,缺乏横向对比以及机制本质的剖析。图 3 对国内外典型电力市场 ATC 计算与分配机制的学术研究进行总结。

4.2 现行机制的基本模式总结与对比

针对上述研究的局限性,本节对于 4 个国内外典型区域的现行可用输电能力计算和分配机制进行阐述和横向对比,深入机制设计和市场模式之间的联系。

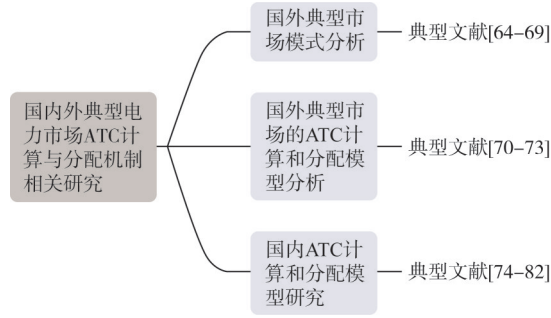


图3 国内外典型电力市场ATC计算与分配机制相关研究
总结图

Fig. 3 Summary diagram of research on ATC calculation and allocation mechanisms in typical domestic and international electricity markets

4.2.1 美国PJM

在ATC分配方式方面,PJM的ATC分配方式分为基于电能量出清分配的方式和基于自计划量分配的方式。

在PJM内部的电力市场交易形式为全电量申报并集中优化出清,在其中长期市场中用户只能签订金融合约,因而PJM内部的ATC分配方式是在实时市场阶段,通过在统一的电能量出清模型中考虑ATC约束,将ATC跟随电能量的出清结果来进行分配,即采用基于电能量出清分配的ATC分配方式。

PJM是跨区域输电组织(regional transmission organization, RTO)之一,PJM的用户在进行跨RTO交易时可选择两种ATC分配方式。其一为基于自计划量分配的方式,市场成员若想达成跨RTO物理合约,则需要先在美国统一的输电服务实时信息系统(open access same-time information system, OASIS)上申报相应的固定点到点输电服务(firm point-to-point transmission service)以获得输电网的优先使用权,OASIS会对通过同时可行性测试的固定点到点输电服务对应的跨区域物理交易设置E-tag标记。然后在跨区域实时市场阶段中,市场成员在所属的内部市场中将带有E-tag标记的跨区域交易量申报为自计划量,系统优先为这部分交易提供所需ATC。其二为基于电能量出清分配的方式,也即直接在跨区域交易平台上申报跨区域交易,各RTO通过信息交互,先将自计划量设置为地板价保证出清,再考虑ATC约束集中优化出清电能量,将ATC跟随电能量的出清结果来进行分配。

在ATC计算模型方面,当ATC分配方式为基于电能量出清分配的方式时,只需要在出清模型中构造如式(4)的ATC约束即可形成交易可行域,也即完成了对ATC的计算。

$$P_l^{\min} \leq \sum_{n \in N} s_{n,l} \cdot (P_{n,t}^G - P_{n,t}^D) \leq P_l^{\max} \quad (4)$$

式中: $P_l^{\max}$ 、 $P_l^{\min}$ 分别为线路 l 的传输功率上下限; $s_{n,l}$ 为节点 n 对线路 l 的发电功率转移分布因子; $P_{n,t}^G$ 为发电机组所在节点 n 在交易时段 t 的发电功率; $P_{n,t}^D$ 为负荷所在节点 n 在交易时段 t 的系统负荷。

当ATC分配方式为基于自计划量分配的方式时,固定点到点输电服务提供者必须知道还剩余多少容量可以分配给市场成员,即ATC。

PJM定义了潮流关口(flow gate)和潮流关口可用容量(available flow-gate capacity, AFC)的概念^[88]。潮流关口指的是容易出现安全约束越限的一条线路或一组线路。根据可用输电能力的定义可知,其计算的对象是通过两个节点/区域之间(下文简称为“点到点”之间)所有潮流关口可以从一个节点/区域向另一个节点/区域输送的最大功率。具体而言,计算某“点到点”的ATC时,考虑该路径对预先定义的若干潮流关口可用容量的影响,其中在新增“点到点”交易量时,受该影响而最先达到输送极限的关口,决定了该“点到点”的ATC,具体计算表达式为:

$$F_i^{\text{ATC}} = \min \{ F_i^{\text{AFC}} / s_{1,i}^F, \dots, F_i^{\text{AFC}} / s_{l,i}^F \}, \quad \forall i \in I, l \in L \quad (5)$$

式中: i 为“点到点”输电路径; I 为所有“点到点”输电路径的集合; l 为潮流关口; L 为所有潮流关口的集合; F_i^{AFC} 为输电路径 i 的可用输电能力; F_l^{AFC} 为输电路径 l 的可用输电能力; F_l^{AFC} 为第 l 个潮流关口的可用关口容量; $s_{1,i}^F$ 为输电路径 1 对第 l 个潮流关口的潮流分配系数; $s_{l,i}^F$ 为输电路径 i 对第 l 个潮流关口的潮流分配系数,表示输电路径 i 上交易量发生变化对潮流关口 l 的影响。只有当潮流分配系数大于0.3的时候,才在输电路径ATC计算中考虑该关口,对某些关口还要考虑故障情况下的潮流分配系数。

对比两种ATC计算和分配方式可知,计算方式和分配方式紧密相关,相互影响。ATC分配方式决定了需要ATC计算的对象。在采用基于电能量出清分配的方式分配ATC时,其分配方式的本质是通过集中优化一次分配ATC,因此ATC计算需

要形成一个相互耦合的交易可行域结果, 这种形式下 ATC 的计算和分配较为精确。而在采用基于自计划量分配的方式分配 ATC 时, 其分配方式的本质是分散分配, 因此 ATC 计算需要形成一个解耦的结果。这违背了 ATC 相互耦合的本性。如式(5)所示, ATC 的计算只考虑单条点到点输电路径对潮流关口的影响, 缺乏对潮流间耦合关系的精确建模。因此, 其 AFC 值可能需要采用较为保守的值, 来保证安全约束不被违反。

4.2.2 欧洲电力市场

欧洲电力市场的 ATC 分配方式都是集中分配。然而在构造交易可行域时, 各容量计算区域(capacity calculation region, CCR)分别采用了以下两种不同的模型: 基于净输电容量(net transfer capacity, NTC)或 ATC 的方法和基于潮流(flow-based, FB)的方法, 如表 1 所示^[89]。

表 1 欧洲电力市场容量计算区域构造交易可行域的方法
Tab. 1 Method for constructing the trading feasible domain of capacity calculation regions in the european electricity market

容量计算区域	区域所负责计算的边界	构造交易可行域时所采用方法
Nordic	挪威、瑞典、芬兰和丹麦之间的边界	基于潮流的方法
Core	法国、比利时、荷兰、德国、奥地利、捷克、波兰、斯洛伐克、克罗地亚、匈牙利和罗马尼亚之间的边界	基于潮流的方法
Italy North	意大利北部、法国、奥地利和斯洛伐克之间的边界	基于净输电容量的方法
South-west Europe	葡萄牙、西班牙和法国之间的边界	基于净输电容量的方法
Baltic	芬兰、立陶宛、拉脱维亚、爱沙尼亚、瑞典之间的边界	基于净输电容量的方法
South-east Europe	罗马尼亚、保加利亚和希腊之间的边界	基于净输电容量的方法
Hansa	荷兰、德国、丹麦、波兰和挪威之间的边界	基于净输电容量的方法
Greece-Italy	希腊和意大利之间的边界	基于净输电容量的方法

当采用基于净输电容量的方法时, 分配限制约束将写成如下的形式。

$$C_{i,j}^{\min} \leq P_{i,j}^{\text{PTP}} \leq C_{i,j}^{\max}, \forall i \in I, j \in I \quad (6)$$

式中: $C_{i,j}^{\max}$ 和 $C_{i,j}^{\min}$ 分别为点(区域) i 到点(区域) j 的可用输电能力上下限; $P_{i,j}^{\text{PTP}}$ 为点 i 到点 j 的输电权实际分配量或电能量交易功率, 取决于显式分配还是隐式分配; I 为市场中节点的集合。

当采用基于 FB 的方法时, 分配限制约束将写成如下的形式。

$$C_l^{\min} \leq \sum_{ij \in Z} G_{ij,l} P_{i,j}^{\text{PTP}} \leq C_l^{\max}, \forall l \in L \quad (7)$$

式中: $C_l^{\max}$ 和 $C_l^{\min}$ 分别为线路 l 的输电容量上下限; $P_{i,j}^{\text{PTP}}$ 为点 i 到点 j 的输电权实际分配量或电能量交易功率; Z 为市场中点到点交易对的集合; $G_{ij,l}$ 为点 i 到点 j 的交易量对线路 l 的灵敏度; L 为线路集合。

可以看出, 基于 NTC 的方法在建立输电容量分配约束时, 并未考虑各线路间潮流的耦合关系, 而是对每一条点到点的输电路径分别设置容量限制, 模型呈现出显著的解耦特性。在容量限制的上下限计算时, 通常采用简单的扣减机制, 即在总线路容量的基础上扣除既有交易量和安全裕度即可得到上限和下限, 计算过程简便但忽略了电网拓扑和潮流分布的复杂性。

相较之下, 基于 FB 的方法在建模时则系统地考虑了不同输电路径间的耦合关系, 通过引入线性潮流约束刻画各路径分配量之间的内在关联, 更加贴近实际电网运行特性。

在交流电网中, 线路间潮流天然存在强耦合的关系, 若仍采用基于 NTC 的方法将各路径看作相互独立, 虽然简化了建模, 也带来了潜在的风险: 若 NTC 计算未能充分考虑实际潮流耦合, 将可能导致潮流越限问题的发生。为了降低这种风险, 基于 NTC 的方法通常需计算一组即使在忽略耦合关系的情况下也能确保系统安全的上下限值。但这种保守性的计算方法往往会限制电网通道的利用效率, 导致输电资源浪费, 降低市场交易的灵活性和经济性。因此, 欧洲电力市场在 2015 年后逐渐开始从基于 NTC 的计算方法过渡到 FB 计算方法, 以更加准确地对物理潮流进行建模, 提高跨价区联络线利用率。如表 1 所示, 目前, 北欧电力市场(Nordic)和核心(Core)容量计算区域在远期市场和短期市场均已采用基于 FB 的计算方法来计算跨价区可用输电能力^[89], 而在汉萨(Hansa)、意大利北部(Italy North)、希腊-意大利(Greece-Italy)、西南欧(South-west Europe)、波罗的海(Baltic)、东南欧

(South-east Europe)等其他容量计算区域则仍采用基于ATC的计算方法计算跨报价区可用输电能力。

4.2.3 国网经营区域

我国的跨区域输电成本回收机制有别于国外,在市场出清过程中必须考虑买卖方位置,出清结果需要包含交易路径,与“按通道收费”的输电收费模式相协调。

在这种市场模式下,无论是中长期阶段(包含双边交易、集中竞价、挂牌交易等多种交易方式)还是现货阶段的省间交易,都采用基于成交路径的方法将点到点(省到省)的交易对成交电力按照成交路径分配到相关的联络线通道,然后根据通道的剩余输电容量校验调整。这种分配限制约束构建模式缺乏对实际潮流耦合关系的建模,因此其可用输电能力计算和交易可行域的构建十分粗糙,这导致其交易结果通常不能通过安全校核,为电网的安全运营带来了巨大的挑战^[86]。

4.2.4 南方电网经营区域

与PJM内部的ATC分配方式类似,南方电网运营区域的ATC分配统一在区域现货出清后完成,属于基于电能量出清分配的方式^[90-91]。然而,南方电网区域市场与PJM市场模式的差别在于:其一,区域市场的中长期存在物理合约,而对于这些物理合约的ATC分配则通过区域现货出清模型中的省间优先计划约束,最后同样基于电能量出清结果而分配出清;其二,PJM的ATC分配基于电能量出清结果,通过PTDF将节点功率映射到线路潮流,最终完成ATC的分配。然而其ATC分配结果不影响结算,只是用以保证通道安全约束不越限^[92]。但是南方电网运营区域采用“按通道收费”的跨省通道输电成本回收模式。一方面,出清模型将节点功率通过PTDF映射到线路潮流中,借助通道容量约束保证通道安全约束不越限;另一方面,南方电网构建交易成分的概念,并且对于任一省份的物理关口必有“其所有相关交流、直流线路的潮流之和等于其相关所有交易成分的传输功率之和”的关系。最终通过“输电费(输电价格)-交易成分-物理关口”三者的匹配,南方电网运营区域的区域市场实现了区域现货出清模型与输电定价机制的衔接。

4.2.5 总结与对比

综上所述,ATC的计算与分配机制由于制度背景和市场设计的差异,呈现出多样化的特征,同时其

计算方法和分配机制也逐步展现出一定的协调趋势。

以PJM为例,其内部采用的是全电量申报、集中优化出清的市场模式,而RTO之间的交易则是基于物理合约,这种差异导致PJM内部同时存在集中分配和分散分配两种形式。分散分配机制对于一次交易后的ATC更新速度要求较高,因此其ATC计算方法往往采用计算较为粗糙、但速度快的算法。而集中分配机制则是在统一出清的基础上进行,交易集中完成后再进行分配,因此对ATC更新速度的要求较低,也便于实现更为精确的计算和约束构造。

相比之下,欧洲电力市场同样采取集中分配的方式,但由于其市场结构是基于价区,而且其面临多区域耦合和电网结构庞杂的问题,因此其ATC计算在初期主要采用相对简单、粗略的基于NTC的方法。现在欧洲电力市场虽逐渐过渡到基于FB的ATC计算方式,但由于该方法需要引入GSK来映射区域电量至实际线路,这本身就带来了不可避免的误差,无论哪种方式,其计算精度都不高,可以看作是实现多区域市场耦合过程中的一种技术代价。

在我国,国家电网和南方电网的运营区域都采用集中分配的ATC分配方式,但与国外市场有较大差异,主要体现在输电定价机制上。我国采用“按通道收费”的模式,尤其在国家电网运营区域,为了使ATC分配与该定价机制对接,需要将“电力按照成交路径映射到相关联络线通道作为潮流功率”的方法引入约束构造中。这种建模方式导致ATC计算、分配以及潮流模拟的精度整体偏低,无法很好地反映系统实际运行特性。但是南方电网运营区域在市场发展中通过在机制设计上更进一步的创新,引入了“交易成分”概念,并结合PTDF及ATC约束,在保证ATC计算和潮流建模精度的同时,还实现了输电价格、交易成分和物理关口三者之间的良好匹配,较好地实现了区域现货市场出清模型与输电定价机制之间的衔接。表2对比了4个典型市场现有ATC计算和分配机制。

5 可用输电能力计算和分配研究的研究路径分析与展望

5.1 研究路径分析

本文所综述的3类关于可用输电能力研究内容的总结和归纳如图4所示,其中展示了3类研究内容之间的关系和各自的重难点。

表 2 典型市场现有 ATC 计算和分配机制对比

Tab. 2 Comparison of existing ATC calculation and allocation mechanisms in typical markets

市场区域	PJM	欧洲电力市场	国网运营区域	南方电网运营区域
分配机制类型	分散+集中分配并存	集中分配	集中分配	集中分配
分配方式特点	分散方式基于物理合约,强调分配便捷;集中方式基于统一出清	基于价区模式,统一出清,适应多区域耦合	按路径映射分配,与输电通道挂钩	引入交易成分与 PTDF,保持精度与经济性
ATC 计算方法与精度	分散方式采用计算粗糙但快速的 ATC 方法;集中方式计算较精确	初期采用基于 NTC 方法,精度较低;后期采用 FB 方法,需引入 GSK,仍存在误差	因路径映射建模粗糙,计算精度较低	采用 PTDF 约束与 ATC 匹配,模型精度较高

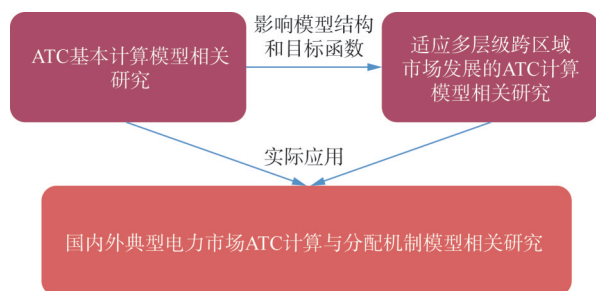


图 4 ATC 问题研究内容关系图

Fig. 4 Relationship diagram of research topics on ATC issues

无论是 ATC 计算模型从确定性模型到概率性模型以及基于智能优化算法模型的研究重心转移,还是从传统的 ATC 研究发展到基于联络线功率可行域的研究,或者是 ATC 计算模型目标函数由追求 ATC 总和最大化逐步转向经济性目标,都是为了令 ATC 计算更好地契合当前新型电力系统和电力市场发展的双重背景。与此同时,对国内外典型电力市场 ATC 计算与分配机制的研究,本质上是将 ATC 计算和 ATC 分配都作为电力市场运营的关键环节,从整体协调的机制设计和更好地达成市场目标的双重角度展开研究。

5.2 可用输电能力计算和分配研究的建议与展望

基于 5.1 节的分析,可用输电能力计算和分配研究分别存在两方面挑战:其一,在学术研究方面,如何更好地应对新型电力系统中可再生能源高比例嵌入而不确定性水平不断上升的背景,并且充

分考虑大规模复杂电网的建模难点;其二,在市场机制实践方面,如何更好地推动现有理论研究成果落地应用于市场机制设计中。

在学术研究上,针对不确定性水平不断升高所带来的建模难点,需要对现有的蒙特卡洛方法和鲁棒优化等概率性模型以及现有基于智能算法的 ATC 计算模型进一步优化,在权衡计算速度和计算精度的过程中找到更优的平衡点,同时考虑模型的可扩展性和智能算法可解释性等问题。此外,可考虑引入更精细化的不确定性建模方法,考虑在不同时间尺度上不确定性因素的差异化统计特征。针对多层级跨区域市场发展背景下的 ATC 计算研究挑战,需要优化现有基于 GSK 和基于可行域的建模方法,一方面通过深入发掘 GSK 方法的误差来源,在考虑计算成本的约束下提出针对性的降低误差的措施;另一方面,对于现有基于可行域的方法,进一步优化所采用的现有算法以增强模型的可扩展性和实际场景适用性。

在市场机制实践方面,首先,需要进一步认识到 ATC 计算和分配机制是作为电力市场运营流程的关键环节,充分考虑市场模式与 ATC 计算机制以及分配机制之间的联系,从输电管理体系的整体视角考虑 ATC 计算和分配机制的协同性设计。其次,现有关于 ATC 计算与分配机制的学术研究大多将关键参数作为固定输入,尚未充分考虑其在实际应用中的动态影响。诸如市场区域划分、关键支路选择以及系统典型运行方式等模型参数,若要在工程实践中实现有效应用,需要进行更为细致的测算与验证。最后,随着全国统一电力市场体系的加快推进,有必要探索更加灵活的跨区 ATC 分配机制,以在送电省、受电省与电网公司之间实现多元利益的合理平衡,并推动跨省区电力交易与现货市场的高效衔接。

5.3 对我国可用输电能力计算和分配机制设计的建议

目前,我国的可用输电能力计算和分配机制建设处于关键发展时期。在多层级跨区域市场建设背景下,输电通道容量整体利用率不高和部分输电通道经常阻塞的矛盾场景经常发生,为建立更精确的 ATC 计算机制以及促进输电通道利用率提升的 ATC 分配机制,本文提出以下建议。

1)对于国网运营区域,需要充分考虑其庞大的

市场规模和复杂的电网结构所带来的限制因素。一方面,在现有实践中,ATC计算与分配多采用基于路径映射的方法,与“按通道收费”的输电定价模式相衔接,但其建模精度相对粗糙,难以全面反映实际潮流特性,未来的优化路径应着眼于机制与定价体系的整体协同,在保持现有定价模式相对稳定的前提下,逐步改进ATC计算方法的精度和适用性,同时权衡模型计算速度和模型计算精度,保证优化后的ATC计算和分配模型能够实际落地。另一方面,在优化现有ATC计算和分配机制的同时保证与输电定价体系的平滑衔接,可采取多阶段实施方案使得市场主体利益免遭较大变动,从而在提升输电通道利用率的同时,维持市场的稳定与公平。

2)对于南方电网运营区域,其ATC分配方式在机制设计上已有较大创新,通过引入“交易成分”并结合PTDF约束,实现了出清模型与输电定价机制的有效衔接。然而,在高比例可再生能源接入和跨区电力交易规模扩大的背景下,现有模式仍需进一步优化。未来可考虑在现有实践的基础上,引入输电权机制进一步优化现有输电定价机制,一方面可以进一步解放ATC计算和分配机制的优化空间,另一方面可促进输电通道利用率的提高。

6 结论

在全国统一电力市场体系加快建设和新型电力系统发展的双重背景下,多层次跨区域市场中建立高效而科学的可用输电能力计算和分配机制十分关键。本文首先介绍了可用输电能力的基本概念,梳理了其理论框架。其次,对现有ATC计算方面的研究成果进行了总结,归纳了主要方法及待改进方向。进一步地,归纳了既涵盖典型市场实际情况又涉及计算与分配机制的相关研究成果,凸显其方法特征与不足。接着分析了美国PJM、欧洲电力市场、国网运营区域和南方电网运营区域等典型区域的电力市场的ATC计算与分配机制,并对不同机制背后的制度和市场逻辑进行了比较。之后从学术研究与市场机制实践两个角度总结了当前的研究方向,并提出了建议。最后,结合我国电力市场现状,对ATC计算和分配机制的改进提出了建议。

参考文献

- [1] 国家发展改革委,国家能源局.关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见[EB/OL]. (2022-1-18)[2025-08-02]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/30/content_5671296.htm.
- [2] 国家能源局.南方区域电力市场启动连续结算试运行全国统一电力市场建设取得重大标志性成果[EB/OL]. (2025-07-01)[2025-08-02]. <https://www.nea.gov.cn/20250701/dc548c119e754bf1afa29c3766daf901/c.html>.
- [3] 国家能源局.华东能源监管局修订印发《华东区域跨省电力中长期交易规则》[EB/OL]. (2022-08-01)[2025-08-02]. https://hdj.nea.gov.cn/dtyw/jgdt/202309/t20230927_124211.html.
- [4] 北极星电力网.7月1日起施行!北京电力交易中心跨区跨省电力中长期交易实施细则(2024年修订稿)发布[EB/OL]. (2024-06-18)[2025-08-02]. <https://news.bjx.com.cn/html/20240618/1383419.shtml>.
- [5] 国家发展改革委,国家能源局.国家发展改革委 国家能源局关于跨电网经营区常态化电力交易机制方案的复函[EB/OL]. (2025-07)[2025-08-02]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202507/content_7031714.htm.
- [6] 刘皓明,倪以信,吴军基,等.计算电网可用输电能力的方法述评[J].继电器,2003(10):45-50.
LIU Haoming, NI Yixin, WU Junji, et al. Review of methods for calculating available transfer capability of power grid [J]. Relay, 2003(10): 45-50.
- [7] 王成山,王兴刚,魏炜.输电系统可用输电能力研究[J].电力系统及其自动化学报,2005,17(5):42-49.
WANG Chengshan, WANG Xinggang, WEI Wei. Study on available transfer capability of power systems [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2005, 17(5): 42-49.
- [8] 李彤岩.电力系统区域间可用输电能力研究综述[J].黑龙江电力,2007(4):255-258,262.
LI Tongyan. Survey on transmission capability available among areas consumptions in an interconnected power system [J]. Heilongjiang Electric Power, 2007(4): 255-258,262.
- [9] MOHAMMED O O, MUSTAFA M W, MOHAMMED D S S, et al. Available transfer capability calculation methods: A comprehensive review [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(6): 2050-7038.
- [10] 张磊,任惠,胡文平.电网区域间可用输电能力的计算方法分析[J].广东电力,2010,23(7):12-17,42.
ZHANG Lei, REN Hui, HU Wenping. Calculating methods on available transfer capability among areas in an interconnected grid [J]. Guangdong Electric Power, 2010, 23(7): 12-17,42.
- [11] 张友骞,张靖,何宇,等.含风电场的概率可用输电能力研究综述[J].电测与仪表,2020,57(1):21-29,54.
ZHANG Youqian, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Review on study for probabilistic available transfer capability in wind farm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(1): 21-29,54.
- [12] 李鹏飞,肖隆恩,胡婕.风电并网的可用输电能力分析综述[J].电气开关,2015,53(5):1-4.
LI Pengfei, XIAO Longen, HU Jie. Review of wind power available transfer capability analysis [J]. Electric Switchgear, 2015, 53(5): 1-4.
- [13] EDEH U E, LIE T T, MAHMUD M A. Assessment of transmission reliability margin: existing methods and challenges and future prospects [J]. Energies, 2025, 18(9): 2267.
- [14] OBALOWU M O, WAZIR M M, SASI M D S, et al. Available transfer capability calculation methods: a review [J].

[1] 国家发展改革委,国家能源局.关于加快建设全国统一电力

- International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(6): 1–24.
- [15] 马英浩, 刘琛, 谢开贵, 等. 电力系统网络传输灵活性及其评价综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5429–5441. MA Yinghao, LIU Chen, XIE Kaigui, et al. Review on network transmission flexibility of power system and its evaluation [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5429–5441.
- [16] NERC. Available transfer capability definition and determination [EB/OL]. (1996–1–18) [2025–08–02]. <https://www.ece.iit.edu/~flueck/ece562/atcfinal.pdf>.
- [17] ETSO. Definitions of transfer capacities in liberalized electricity markets [EB/OL]. (2001–04–01) [2025–08–02]. https://eepublicdownloads.azureedge.net/clean-documents/pre2015/ntc/entsoe_transferCapacityDefinitions.pdf.
- [18] 李国庆, 王成山, 余贻鑫. 大型互联电力系统区域间功率交换能力研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 20–25. LI Guoging, WANG Chengshan, YU Yixin. A survey on transmission transfer capability of interconnected electric power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 20–25.
- [19] 周明, 冉瑞江, 李庚银. 风电并网系统可用输电能力的评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 14–21. ZHOU Ming, RAN Ruijiang, LI Gengyin. Assessment on available transfer capability of wind farm incorporated system [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 14–21.
- [20] 袁越, 久保川淳司, 佐佐木博司. 考虑暂态稳定约束的可用传输能力计算[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 34–39. YUAN Yue, KUBOKAWA Junji, SASAKI Hiroshi. Available transfer capability determination considering transient stability constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(10): 34–39.
- [21] 崔雅莉, 别朝红, 王锡凡. 输电系统可用传输能力的研究[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(4): 70–75. CUI Yali, BIE Zhaohong, WANG Xifan. Study on available transfer capability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(4): 70–75.
- [22] 杨燕, 文福拴, 李力, 等. 可用输电容量协调决策的多目标机会约束规划模型与方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13): 37–43. YANG Yan, WEN Fushuan, LI Li, et al. Coordinated model for available transfer capability decision-making employing multi-objective chance constrained programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 37–43.
- [23] 杨燕, 文福拴, 李力, 等. 计及风险控制策略的电力系统可用输电容量决策[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 50–55. YANG Yan, WEN Fushuan, LI Li, et al. Design of a photovoltaic grid and power quality compound control system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 50–55.
- [24] 刘明波, 夏岩, 吴捷. 计及暂态稳定约束的可用传输容量计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 28–33. LIU Mingbo, XIA Yan, WU Jie. Calculation of available transfer capability with transient stability constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 28–33.
- [25] 默哈莫德·夏班, 刘皓明, 李卫星, 等. 静态安全约束下基于 Benders 分解算法的可用传输容量计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 7–11. MOHAMED Shaaban, LIU Haoming, LI Weixing, et al. ATC calculation with static security constraints using Benders decomposition [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 7–11.
- [26] CHIANG H D, FLUECK A J, SHAH K S, et al. CPFLOW: A practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 623–634.
- [27] GRAVENER M H, NWANKPA C. Available transfer capability and first order sensitivity [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2): 512–518.
- [28] OU Y, SINGH C. Assessment of available transfer capability and margins [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2): 463–468.
- [29] 丁晓莺, 王锡凡. 最优潮流在电力市场环境下的最新发展[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(13): 1–7, 19. DING Xiaoying, WANG Xifan. Recent development of optimal power flow in power market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 1–7, 19.
- [30] LUO X, PATTON A D, SINGH C. Real power transfer capability calculations using multi-layer feed-forward neural networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 903–908.
- [31] EJEBE G C, WAIGHT J G, SANOTS-NIETO M, et al. Fast calculation of linear available transfer capability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(3): 1112–1116.
- [32] GRIJALVA S, SAUER P W. Reactive power considerations in linear ATC computation [C]//Proceedings of the 32nd Annual Hawaii International Conference on Systems Sciences, January 5–8, 1999, Maui, HI, USA. New York: IEEE, 1999: 11.
- [33] MELLO J C O, MELO A C G, GRANVILLE S. Simultaneous transfer capability assessment by combining interior point methods and Monte Carlo simulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(2): 736–742.
- [34] RODRIGUES A B, DA SILVA M G. Solution of simultaneous transfer capability problem by means of Monte Carlo simulation and primal-dual interior-point method [C]//PowerCon 2000: 2000 International Conference on Power System Technology, December 4–7, 2000, Perth, WA, Australia. New York: IEEE, 2000: 1047–1052.
- [35] 崔雅莉, 别朝红, 王锡凡. 输电系统可用输电能力的概率模型及计算[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 36–40. CUI Yali, BIE Zhaohong, WANG Xifan. Study on probabilistic models and algorithms of available transfer capability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(14): 36–40.
- [36] 王俊, 蔡兴国, 季峰, 等. 考虑新能源发电不确定性的可用输电能力风险效益评估[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 108–112. WANG Jun, CAI Xingguo, JI Feng, et al. Evaluation of risk and benefit of ATC relating to uncertainty of renewable energy power generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 108–112.
- [37] 王璐. 鲁棒优化方法在输电系统规划与运行中的应用研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
- [38] SU H, QI Y, SONG X. The available transfer capability based on a chaos cloud particle swarm algorithm [C]//2013 Ninth International Conference on Natural Computation, July 23–25, 2013, Shenyang, China. New York: IEEE, 2013: 574–579.

- [39] 李国庆, 陈厚合. 改进粒子群优化算法的概率可用输电能力研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 18-23.
- LI Guoqing, CHEN Houhe. Study of probabilistic available transfer capability by improved particle swarm optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(24): 18-23.
- [40] 李国庆, 冀瑞芳, 张健, 等. 基于改进微分进化算法的可用输电能力研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 22-25, 27, 33.
- LI Guoqing, JI Ruifang, ZHANG Jian, et al. Study of available transfer capability based on improved differential evolution algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 22-25, 27, 33.
- [41] ONGSAKUL W, JIRAPONG P. Calculation of total transfer capability by evolutionary programming [C]//2004 IEEE Region 10 Conference TENCN 2004, November 24-24, 2004, Chiang Mai, Thailand. New York: IEEE, 2004(3): 492-495.
- [42] JAIN T, SINGH S N, SRIVASTAVA S C. A neural network based method for fast ATC estimation in electricity markets [C]//2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA. New York: IEEE, 2007: 1-8.
- [43] 罗昊, 王长江, 王建国. 面向数字孪生的电-气综合能源系统可用输电能力计算[J]. 电力建设, 2023, 44(11): 113-127.
- LUO Hao, WANG Changjiang, WANG Jianguo. Calculation of available transmission capacity of electricity-gas integrated energy system for digital twin[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(11): 113-127.
- [44] ALRASHIDI M R, EL HAWARY M E. A survey of particle swarm optimization applications in electric power systems[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009 13(4): 913-918.
- [45] 陈建华, 李先允, 邓东华, 等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用综述[J]. 继电器, 2007, 35(23): 77-84.
- CHEN Jianhua, LI Xianyun, DENG Donghua, et al. A review on application of particle swarm optimization in electric power systems[J]. Relay, 2007, 35(23): 77-84.
- [46] BERGH K V D, BOURY J, DELARUE E. The flow-based market coupling in central western Europe: concepts and definitions[J]. The Electricity Journal, 2016, 29(1): 24-29.
- [47] BERGH K V D, DELARUE E. An improved method to calculate injection shift keys [J]. Electric Power Systems Research, 2016(134): 197-204.
- [48] SCHÖNHEIT D, SIKORA R. A statistical approach to generation shift keys [C]//IEEE International Conference on the European Energy Market, June 27-29, 2018, Lodz, Poland. New York: IEEE, 2018: 1-6.
- [49] DIERSTEIN C. Impact of generation shift key determination on flow based market coupling [C]//IEEE International Conference on the European Energy Market, June 6-9, 2017, Dresden, Germany. New York: IEEE, 2017: 1-7.
- [50] MARIEN A, LUICKX P, TIREZ A, et al. Importance of design parameters on flow-based market coupling implementation [C]//IEEE International Conference on the European Energy Market, May 27-31, 2013, Stockholm, Sweden. New York: IEEE, 2013: 1-8.
- [51] VUKASOVIC M, SKULETIC S. Implementation of different methods for PTDF matrix calculation in flow-based coordinated auction [C]//IEEE International Conference on Power Engineering, April 12-14, 2007, Setubal, Portugal. New York: IEEE, 2007: 791-795.
- [52] JAO. CWE enhanced flow-based MC feasibility report [EB/OL]. (2011-10-19)[2025-08-02]. https://www.jao.eu/sites/default/files/2020-04/CWE_FB-MC_feasibility_report_2.0_19102011.pdf.
- [53] FINCK R, ARDONE A, FICHTNER W. Impact of flow-based market coupling on generator dispatch in CEE region [C]//IEEE International Conference on the European Energy Market, June 27-29, 2018, Lodz, Poland. New York: IEEE, 2018: 1-5.
- [54] SCHÖNHEIT D, WEINHOLD R, DIERSTEIN C. The impact of different strategies for generation shift keys (GSKs) on the flow-based market coupling domain: A model-based analysis of Central Western Europe [J]. Applied Energy, 2020(258): 114067.
- [55] 陈紫颖, 荆朝霞, 曾鹏骁, 等. 区域电力市场中基于发电转移权重的交易可行域计算模型研究[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1290-1301.
- CHEN Ziyang, JING Zhaoxia, ZENG Pengxiao, et al. Calculation model of feasible domain for regional power market based on generation shift key [J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1290-1301.
- [56] LI Z, WU W, ZHANG B, et al. Decentralized multi-area dynamic economic dispatch using modified generalized benders decomposition [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 526-538.
- [57] GUO Y, TONG L, WU W, et al. Coordinated multi-area economic dispatch via critical region projection [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3736-3746.
- [58] 张林, 杨高峰, 汪洋, 等. 基于多参数规划理论的互联电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, 5904.
- 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, 5904.
- [59] DING T, BIE Z. Parallel augmented Lagrangian relaxation for dynamic economic dispatch using diagonal quadratic approximation method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1115-1126.
- [60] NOGALES F J, PRIETO F J, CONEJO A J. A decomposition methodology applied to the multi-area optimal power flow problem [J]. Annals of Operations Research, 2003, 120(1): 99-116.
- [61] QIN J, WAN Y, YU X, et al. A Newton method-based distributed algorithm for multi-area economic dispatch [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 986-996.
- [62] ABIRI-JAHROMI A, BOUFFARD F. On the loadability sets of power systems—part II: minimal representations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 146-156.
- [63] TAN Z, ZHONG H, XIA Q, et al. Non-iterative multi-area coordinated dispatch via condensed system representation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1594-1604.
- [64] 刘昊, 郭焱, 孙宏斌. 省间电力现货交易优化设计与定价机制[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 76-85.
- LIU Hao, GUO Ye, SUN Hongbin. Optimal design and pricing

- ing method for inter-provincial electricity spot trading [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(4): 76–85.
- [65] 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): 91–102.
- 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): 91–102.
- [66] TAN Z, YAN Z, ZHONG H, et al. Non-iterative solution for coordinated optimal dispatch via equivalent projection—part II: method and applications [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(1): 899–908.
- [67] 张艳红, 荆朝霞, 季天瑶, 等. 面向社会福利最大化的跨价区中长期净可用传输能力计算模型[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(13): 93–102.
- ZHANG Yanhong, JING Zhaoxia, JI Tianyao, et al. Calculation model of cross-zonal medium-and long-term net available transfer capability for maximizing social welfare [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(13): 93–102.
- [68] 荆朝霞, 李煜鹏, 赵昱宣, 等. 能源系统低碳转型背景下的混合电力市场体系结构与运行[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(11): 24–36.
- JING Zhaoxia, LI Yupeng, ZHAO Yuxuan, et al. Architecture and design of hybrid electricity market system under background of low-carbon transformation of energy system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(11): 24–36.
- [69] 李竹, 庞博, 李国栋, 等. 欧洲统一电力市场建设及对中国电力市场模式的启示[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(24): 2–9.
- LI Zhu, PANG Bo, LI Guodong, et al. Development of unified European electricity market and its implications for China [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(24): 2–9.
- [70] 丁一, 谢开, 庞博, 等. 中国特色、全国统一的电力市场关键问题研究(1): 国外市场启示、比对与建议[J]. *电网技术*, 2020, 44(7): 2401–2410.
- DING Yi, XIE Kai, PANG Bo, et al. Key issues of national unified electricity market with Chinese characteristics (1): enlightenment, and from foreign comparison suggestions countries [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(7): 2401–2410.
- [71] 赵文猛, 周保荣, 毛田, 等. 欧洲统一电力市场演变和日前市场出清模型[J]. *南方电网技术*, 2020, 14(5): 74–79.
- ZHAO Wenmeng, ZHOU Baorong, MAO Tian, et al. European unified electricity market evolution and its day-ahead model [J]. *Southern market clearing Power System Technology*, 2020, 14(5): 74–79.
- [72] 陈达鹏, 刘庆. 欧洲日前统一电力市场耦合出清机制分析及启示[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(11): 100–110.
- CHEN Dapeng, LIU Qing. Analysis on coupling clearing mechanism of European unified day-ahead electricity market and its enlightenment [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(11): 100–110.
- [73] 陈启鑫, 张维静, 滕飞, 等. 欧洲跨国电力市场的输电机制与耦合方式[J]. *全球能源互联网*, 2020, 3(5): 423–429.
- CHEN Qixin, ZHANG Weijing, TENG Fei, et al. Transmission mechanisms and coupling approaches in European transnational electricity markets [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(5): 423–429.
- [74] 朱一兵, 丛野, 张粒子, 等. 跨国跨州/跨省跨区输电定价机制及对中国专项工程定价的启示[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(4): 86–100.
- ZHU Yibing, CONG Ye, ZHANG Lizi, et al. Review of research on cross-provincial transmission pricing and its enlightenment for transmission pricing of dedicated projects in China [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(4): 86–100.
- [75] OVAERE M, KENIS M, BERGH K V, et al. The effect of flow-based market coupling on cross-border exchange volumes and price convergence in Central Western European electricity markets [J]. *Energy Economics*, 2023(118): 106519.
- [76] SCHÖNHEIT D, KENIS M, LORENZ L, et al. Toward a fundamental understanding of flow-based market coupling for cross-border electricity trading [J]. *Advances in Applied Energy*, 2021(2): 100027.
- [77] SCHÖNHEIT D, DIERSTEIN C, MÖST D. Do minimum trading capacities for the cross-zonal exchange of electricity lead to welfare losses [J]. *Energy Policy*, 2021(149): 112030.
- [78] SCHÖNHEIT D, BRUNINX K, KENIS M, et al. Improved selection of critical network elements for flow-based market coupling based on congestion patterns [J]. *Applied Energy*, 2022(306): 118028.
- [79] 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.
- [80] 曾丹, 谢开, 庞博, 等. 中国特色、全国统一的电力市场关键问题研究(3): 省间省内电力市场协调运行的交易出清模型[J]. *电网技术*, 2020, 44(8): 2809–2819.
- ZENG Dan, XIE Kai, PANG Bo, et al. Key issues of national unified electricity market with Chinese characteristics (3): transaction clearing models and algorithms adapting to the coordinated operation of provincial electricity markets [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(8): 2809–2819.
- [81] 曾丹, 杨争林, 冯树海, 等. 交直流混联电网下基于ATC的省间交易优化出清建模[J]. *电网技术*, 2020, 44(10): 3893–3899.
- ZENG Dan, YANG Zhenglin, FENG Shuhai, et al. Inter-provincial power exchange optimization modeling considering ATC constraints of hybrid AC/DC power system [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(10): 3893–3899.
- [82] 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.
- CHENG Haihua, ZHENG Yaxian, GENG Jian, et al. Path optimization model of transregional and trans-provincial electricity trade based on expand network flow [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(9): 129–134.
- [83] 郑亚先, 程海花, 杨争林, 等. 计及清洁能源的跨区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 transprovincial electricity trading considering clean energy [J]

- Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 112 – 119.
- [84] 彭超逸, 顾慧杰, 朱文, 等. 交直流混联区域电网现货市场出清模型研究[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 323 – 331.
PENG Chaoyi, GU Huijie, ZHU Wen, et al. Study on spot market clearing model of regional power grid considering AC/DC hybrid connection[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 323 – 331.
- [85] 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.
- [86] 程海花, 杨辰星, 刘硕, 等. 基于路径组合计及ATC的省间中长期交易优化出清和系统研发[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4762 – 4774.
CHENG Haihua, YANG Chenxing, LIU Shuo, et al. Optimization clearing and system development of inter-provincial medium and long term trade considering ATC base on path combination[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4762 – 4774.
- [87] 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 – 4264.
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 – 4264.
- [88] PJM. Available Transfer Capability Implementation Document (ATCID) [EB/OL]. (2024 – 04 – 30) [2025 – 08 – 02]. <https://www.pjm.com/pjmfiles/pub/oasis/ATCID.pdf>.
- [89] ACER. Documentation on the approval processes of the capacity calculation methodologies of each capacity calculation region [EB/OL]. (2024 – 04 – 30) [2025 – 08 – 02]. https://www.acer.europa.eu/electricity/market-rules/capacity-allocation-and-congestion-management/capacity-calculation/16_CCM.
- [90] 广州电力交易中心. 南方区域电力市场中长期电能量交易实施细则(V3.0版)征求意见稿[EB/OL]. (2024 – 9 – 19) [2025 – 08 – 02]. <https://news.bjx.com.cn/html/20240919/1401289-1.shtml>.
- [91] 广州电力交易中心. 南方区域电力市场现货电能量交易实施细则(V3.0版)征求意见稿[EB/OL]. (2024 – 9 – 19) [2025 – 08 – 02]. <https://news.bjx.com.cn/html/20240919/1401289-1.shtml>.
- [92] 蔡葆锐, 梁彦杰. 考虑跨省优先计划及输电费的南方区域电力现货市场出清模型设计[J]. 南方电网技术, 2023, 17(12): 42 – 51.
CAI Baorui, LIANG Yanjie. Electricity spot market clearing model designing of southern China region considering inter-provincial plan and transmission cost [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(12): 42 – 51.
-
- 收稿日期: 2025-08-02; 网络首发日期: 2025-12-17
- 作者简介:
- 季天瑶(1981), 女, 教授, 博士, 研究方向为信号与信息处理及其在电力系统和电力市场中的应用, tyji@scut.edu.cn;
- 曾家国(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场, 202321014306@mail.scut.edu.cn;
- 荆朝霞(1975), 女, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为电力市场、综合能源建模与优化, zxjing@scut.edu.cn。