

智能电网中分布式能源的优化调度与博弈策略

朗朗

沈阳工程学院电气工程学院, 辽宁沈阳, 中国

【摘要】 本文探讨了智能电网中分布式能源的优化调度与博弈策略。分析了分布式能源特性对建模的影响, 讨论了多目标优化和鲁棒优化方法。阐释了非合作与合作博弈的场景, 研究了电网运营商与能源所有者之间的博弈均衡, 并提出了激励机制。构建了融合优化与博弈策略的联合模型, 探讨了区块链与边缘计算在信息交互中的作用, 展望了人工智能与博弈论在动态调度中的潜力。研究为智能电网多主体协同决策提供了理论与方法支持。

【关键词】 智能电网; 分布式能源; 优化调度; 博弈论; 协同框架

1. 引言

能源结构改变及智能化电网背景下, 分布式能源的协调、集成调度管理成为优化重点。集中式调控管理与分布式能源的分散和随机的特性不匹配, 博弈可描述不同利益主体的对策决策管理, 本文旨在研究智能电网背景下分布式能源的协调优化调度, 从博弈策略分析利益主体, 提高分布式能源系统在经济性和稳定性。本文在归类分析既有论文的基础上, 从模型、优化和对策上进行论述, 对分布式能源进行统一调度管理, 对分布式能源进行有益探索。

2. 分布式能源优化调度的理论基础

2.1 分布式能源的特性与建模方法

DERs 的联合调度问题主要存在于其本身的不确定性和地缘上的分散性: 新能源(如光伏、风电)出力受气象条件的影响较大, 因而可预测性和可控性较差, 微燃机、储能等受地缘限制, 进而电网调度无法得到全局性最优解。不确定性使得传统调度中难以准确预测资源出力, 容易造成有功缺额或过量备用; 分散性使得通信和协调方面更加复杂, 在引入多主体决策的情况下, 一地的局部决策可能会对系统产生全局的不利影响。因此, 针对此问题的建模, 需从主变量和约束条件两个角度综合考虑。其建模参数方面, 需量化可再生能源的预测不确定性和标准差、储能的能量和功率密度以及负荷需求的波动, 此外, 在约束条件中还需考虑各节点的潮流平衡、节点的电压限幅、线路的损耗及输电瓶颈等约束条件, 同时, 还应通过市场/政策导向型的模糊限制体现其“柔性”的特性。目前普遍采用的建模方式有随机规划、鲁棒优化和机会约束规划, 在这种

模型下可对间歇性进行概率和不确定性集进行描述, 同时利用分布式的解算方法或者基于“主从控制”思想的体系架构, 对于分散性的耦合作用进行协调, 为后续优化调度提供必要的理论准备。

2.2 智能电网中的优化目标与算法

考虑智能电网背景下的分布式能源优化调度应满足经济型、环保型、可靠型等多目标共同考虑建立综合框架[1]。经济型目标是为了最小化发电费用、网损费用和购售电费用来减少能源消耗, 提高能量利用效果; 环保型目标包括减少温室气体的排放、降低化石燃料的燃烧消耗量; 可靠型目标是指防止电能供应中断, 从而出现电压越上、下限或系统频率崩溃等稳定问题。优先调度价格比较便宜但高排放的能源将对环保型目标造成伤害, 将稳定优先但会导致成本费用增加, 必须运用多目标优化的思路进行决策, 经典算法中的线性规划、二次规划和混合整数规划对解决确定性模型的效果较好, 在高维复杂的非线性问题下的算法速度较慢, 智能算法(比如遗传算法、粒子群优化、深度强化学习)计算具有较强的全局搜索能力和适应性, 更加适用于多目标优化中的约束复杂性和不确定性的处理方法, 然而智能算法的收敛性和解释性尚处于探究阶段, 后续研究中, 探索智能算法与经典算法配合进行研究以获得较好的调度决策。

2.3 不确定性因素的应对策略

因此, 风、光、负荷出力的不确定性是智能电网中不确定性的重要来源之一, 应对不确定性的电网调度决策优化方法是鲁棒性优化[2]。鲁棒性优化以保证电网调度方案对不确定参数变化的适应性为优化目标, 与

确定性优化相比,鲁棒性优化假设各参数和输入数据保持不变,实则在电网调控中风、光出力因天气和随机性等因素具有波动性,同时用户的电力需求具有随机性和不可预测性。当考虑不确定性时,目前一般可以将风光、负荷出力采用区间形式表示,并结合日负荷的峰值和谷值进行制定。并且也可将负荷预测误差表示为区间集合,将风光不确定性的集合通过不确定性集合来表达。使用机会约束来将约束的偏离风险限定在允许的概率水平,或使用分布的鲁棒性约束来利用过去的运行数据构建不确定性信息的模糊集合,来减轻或移除对已知的精确分布的依赖性;在此基础上可进一步对不确定性集合或分布进行描述或提出基于风险的鲁棒方法以满足确定性的约束。当前的鲁棒优化计算规模复杂度较大,难以在实际中应用,可与分布式计算、启发式搜索算法结合以在求解复杂化过程中加速计算。目前,在人工智能技术驱动下,可在“经济安全”和“动态”两个层级进行优化求解,制定更有效的动态鲁棒性策略。

3.多主体博弈的策略设计与分析

3.1 博弈论在能源调度中的适用性

博弈论作为分析能源资源协同参与市场资源调度的系统性框架,适用于智能电网中多个参与主体参与能源协同调度时面临的利益诉求不一致问题。非合作博弈理论是对分布式能源等参与主体以最大利益为目标的一类利益冲突主体间相互竞争博弈过程的描述,例如不同的分布式能源所有者之间在某个时刻的发电量出清和负荷聚合商对未来电价的响应决策过程等[3];此类博弈通常选用纳什均衡作为求解结果,代表着个体理性下的系统稳定均衡点,系统却可能陷入“囚徒困境”的博弈均衡中而使得收益水平次优;而合作博弈过程在一定约束和信任体系下是一类寻求合作并寻求双方均获益最大或一收益损失最小的集体理性状态,例如目前研究较少的虚拟电厂模式下针对能源的共享或备用容量的联合报价等[4];这类合作博弈是基于一定的信任和约束,签订契约和分配利益体系,借助相关契约实现未来长期合作;与非合作博弈的根本区别在于约束和信息结构上的本质差异,非合作博弈的约束仅反映为个体策略间的约束,但合作博弈则表现出可以执行契约和信任体系的存在。因此,在智能电网中能源资源协同调度时可根

据当前市场阶段、监管、技术发展的阶段依据实际情况选择适合的博弈方式,例如现阶段智能电网发展过程中在电力市场化初期应用非合作博弈以促进竞争,在具备成熟的信任机制后采用合作博弈挖掘协同潜力,即能够灵活切换的动态过程是将博弈论应用于能源领域的独特之处。

3.2 主从博弈与分布式决策

对于这种存在上下级关系的电网运营商与分布式能源主体,可以借助典型的主从博弈(如 Stackelberg)对它们之间存在的上下级博弈进行建模。主从博弈中,电网运营商处于领导地位,首先发出一系列约束,而分布式能源主体处于从属地位,只能在满足领导者的约束下做出相应博弈方案,也就是决定他们各自控制的目标变量。双方最终经过一系列动态博弈达到各自的纳什均衡。基于此,解决三个问题:(1)领导者需预测跟随者的反应函数以防止制订政策偏离实际,比如设置过高的输电价而使分布式能源退场;(2)跟随者的决策会具有一定时间延迟而使得均衡点偏离,可借助即时通信缩短延迟时间;(3)存在多个均衡点则需提供稳定性约束,比如利用李雅普诺夫方程证明均衡点吸引域。事实上主从博弈本身就具有分布式的特性,将智能合约类比为双方的动态博弈,则其可行方案可以被实现,而共识机制则对应着博弈结果的公开性,待边缘计算能提高决策精度时,甚至可以使主从博弈中“决策-反馈-调整”的循环达到秒级,并起到真正支持实时电力平衡的效果。

3.3 激励机制与长期稳定性

实施多主体博弈策略,有必要构建既能提高短期效益也能使博弈关系长期稳定的激励机制,即解决“搭便车”与“道德风险”问题。价格信号激励方式是通过改变市场价格信号的供给引导其需求变化,比如实时电价能根据节点边际成本指导分布式能源在峰谷时投入或减少注入功率、容量电价机制可使提供备用服务的市场成员获得利益补偿。而约束程度更强的激励方式表现为通过 PPA 机制保障远期收益的获取、通过 PPA 中绩效担保条款的承诺保障储能系统的可用性、通过绿色证书交易转移可再生能源发电所带来的环境价值。其实施条件既在于对激励方式强度的要求,如分布式光伏业主需要获得足够的时间来回收前期投资;在于对利益分配机制下承担风险进行均衡化考量的举措,

例如通过建立平衡基金平摊电价波动影响损失；还在于对博弈成员间信息不对称问题的修正机制，如基于智能表计收集的可核验信息作为交易结算依据等。值得一提的是，伴随着碳约束日益趋紧，将碳足迹纳入激励中也成为新的激励方式，包括通过将碳信用与电力交易的耦合设计，使其作用于博弈参与者内化选择能源配置方式，实现能源生产消费的双赢。这两者也恰恰是构建智能电网博弈策略关键——走出“短期有效长期失效”的轨道的新手段。

4. 优化与博弈的协同框架

4.1 联合优化模型的构建

智能化泛在互联网分布式能源协调优化调度与博弈协同建模目标主要是实现可以合理兼顾技术目标和经济目标的协调优化数学模型，即传统优化调度和博弈论模型的“整合化”建模思路问题[5]。所谓整合化，是指模型结构上需要颠覆目前传统的分开进行优化调度和博弈研究的惯例，实现3种维度上的结合：一是在目标函数上，既要考虑电网的经济度目标函数也要兼顾博弈决策主体的效用函数，二是在决策变量维度上，既要具备物理系统的连续决策变量（如功率波动）也要有博弈论中的离散策略，这就需要提出一种新的混合整数规划方法；三是在时间尺度维度上，近远期优化调度决策和长期博弈均衡计算的衔接的博弈均衡研究思路。尤其需要强调的一点是，电网公平性作为一种协调博弈框架的重点，本身就应该用合作博弈进行量化，不能只强调电网运行的高效性和优化度，而忽视了利益分配的均衡性。双重视角（技术维度-经济维度）的协调优化建模思路，既可以追求电网高效安全运行，也可以维持市场竞争动力不减弱，为新型电力系统协调运行提供理论技术手段[6-8]。

4.2 信息交互与通信架构

高度集成的博弈决策难以脱离先进的信息技术支撑，以区块链+边缘计算为核心的技术更新正改变着能源系统的通讯格局。在区块链的去中心化账本上，每个博弈主体都具有决策状态的变化记录，其智能合约能力可以自动完成竞价清分、备用使用等博弈规则的自动决策，博弈摩擦降至最低程度。比如在电力交易层面，可再生能源业主发输的电力电量数据以及购电、售电企业的实时需求通过链上注册存证，一方面实现了交易主

体的博弈信息真实性验证，另一方面以共识机制替代了中心化机构所造成的博弈信任困境。边缘计算将博弈决策的计算流程进行分层，置于靠近信息源的终端上，毫秒级的速度实现了交易决策的实时响应，在主从博弈过程中的大量计算迭代操作会带来较重的计算负担，这些都是区块链+边缘计算的核心价值。它们联合运作的分层处理框架，在系统层通过区块链技术维护全局博弈规则及历史状态数据，在单个局部边缘节点上通过边缘计算技术实现实时计算决策的优化，节点间利用轻量级通讯机制更新信息。亟需厘清的难题在于隐私保密和算力分摊之间的权衡，在博弈数据的透明和交易主体的商业机密之间，“零知识”证明、联邦学习）等前沿技术的有效组合可充当“防火墙”。

4.3 未来技术融合方向

AI+博弈建模将构建新一代动态能源调度研究方法框架，这一趋势可由三个方面的潜能来体现：从感知角度，深度强化学习(DRL)可在仿真互动中自行探索出博弈纳什均衡，例如传统数理建模难以描述的高可再生资源发电电系中；从预测角度，GAN可还原多个玩家博弈策略迭代的交互图，为系统运营商提供某种福利预判服务，以免付诸实施后的全局性失败；从优化角度，GNN可捕获电网网络关系与博弈关系之间的映射模式，实现物理约束条件对策略搜索域的自然融入。这一联合并非拼凑关系，而是必须搭建桥梁、构建新的理论机理：一方面将博弈论理性人公理导出的DRL的奖励函数制定规则，另一方面也将博弈策略搜索的边值由机制设计的方案来限制，避免AI出现“策略飞行”，即未付诸实践即产生不符合预期结果的探索结果。基于数字孪生成熟的技术背景，未来会出现真实系统与模型之间互联互通的博弈训练平台，让参与者先在虚拟电网系统中进行政策后果检验，再将测试后效果最佳的策略导入真实的物理系统运行，从而构成一种“策略试错、学习更新、策略优选”的循环迭代机制，以更快培养电网运行领域的“能量小精灵”。

5. 结论

文章从分布式电源的优化调度和博弈问题着手，在理论模型求解和多主体优化博弈等方向开展智能电网中分布式电源优化运行方法研究，获得的结果分析了优化算法与博弈分析相结合进行分布式电源竞争合作行为

均衡和协调的可能性，同时对未来智能电网发展可能的动态适应性，例如智能电网调度和发电市场竞价分析进行了必要的讨论，从而推进对能源互联网发展的相关研究。

参考文献

- [1]余贻鑫,栾文鹏.智能电网[J].电网与清洁能源,2009,25(01):7-11.
- [2]谢开,刘永奇,朱治中,等.面向未来的智能电网[J].中国电力,2008,(06):19-22.
- [3]分布式能源发电.北京市,清华大学,2005-01-01.
- [4]华贲.我国分布式能源发展战略探讨[J].科

- 技管理研究,2004,(01):3-5+31.
- [5]慕春棣.大电网高效能量管理中的优化调度[J].内蒙古电力技术,1995,(01):57-62.
- [6]现代博弈论问答[J].信息经济与技
术,1995,(02):36-37.
- [7]优化电网调度,提高高压机组发电比[J].华
中电力,1991,(05):39-40.
- [8]马光文,王黎.水电站群随机优化调度方法
的研究[J].西安理工大学学
报,1988,(04):71-
84+124.DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-
4710.1988.04.007.