

# 风电消纳能力提升的市场机制与调节策略

曹鹏飞

北京市农林科学院, 北京, 100097

**摘要:** 随着全球能源转型加速, 风电装机持续增长, 风电消纳已成为制约可再生能源发展的关键问题。本文围绕提升风电消纳能力, 从市场机制设计与调节措施优化两方面展开研究。首先梳理我国风电消纳现状, 指出存在市场机制不完善、调峰资源配置不合理、跨省交易不足等问题。基于电力市场理论与博弈论, 构建包含风电优先消纳、辅助服务市场、容量补偿机制的多层次市场模型, 明确价格形成机制与激励相容约束。同时从技术、经济层面提出需求侧响应、储能配置、火电灵活性改造、跨区协调调度等优化措施。以省级电网为例进行仿真, 结果表明所提方案可提升风电消纳率 15%–20%, 显著降低弃风。研究可为完善风电消纳机制、制定调控政策提供参考, 助力可再生能源高质量发展。

**关键词:** 风电消纳; 市场机制; 调节策略; 辅助服务市场; 需求侧响应

## Market Mechanisms and Regulation Strategies for Enhancing Wind Power Accommodation Capacity

Cao Pengfei

Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

**Abstract:** With the acceleration of the global energy transition, installed wind power capacity continues to grow rapidly, and wind power accommodation has become a key constraint on the development of renewable energy. This study focuses on improving wind power accommodation capacity from two perspectives: market mechanism design and optimization of regulation strategies. First, the current status of wind power accommodation in China is reviewed, revealing several existing challenges, including imperfect market mechanisms, unreasonable allocation of peak-shaving resources, and insufficient interprovincial electricity trading. Based on electricity market theory and game theory, a multi-level market model is constructed that incorporates priority wind power accommodation, ancillary service markets, and capacity compensation mechanisms, clarifying the price formation mechanisms and incentive compatibility constraints. In addition, optimization measures are proposed from both technical and economic perspectives, including demand-side response, energy storage deployment, flexibility retrofitting of thermal power plants, and coordinated cross-regional dispatch. A simulation analysis based on a provincial power grid demonstrates that the proposed approach can increase the wind power accommodation rate by 15%–20% and significantly reduce wind curtailment. The results provide useful references for improving wind power accommodation mechanisms and formulating regulatory policies, thereby supporting the high-quality development of renewable energy.

**Keywords:** wind power accommodation; market mechanisms; regulation strategies; ancillary service market; demand-side response.

### 1、引言

风电产业是推动世界能源转型的重要力量, 在过去几年里得到了迅猛发展。据全球风能理事会统计, 2019–2023 年期间, 全球风电装机容量由 651GW 增加到 899GW, 年均增长率为 8.4%。中国是世界上最大的风电市场, 到 2023 年底, 中国风电累计装机容量为 441GW, 占全球总量的 49.1%。但是, 风电装机规模快速增长与电力系统消纳能力不足之间的矛盾越来越突出, 风电消纳问题已经成为影响可再生能源高质量发展的主要障碍之一。2023 年全国平均弃风率为 2.9%, 但是部分地区弃风电情况依然严重, 西北地区弃风电量为 153 亿千瓦时, 造成经济损失约 75 亿元。

传统电力市场机制设计主要是针对可调度电源进行设计, 没有考虑到风电等间歇性可再生能源的特点, 造成风电优先消纳政策难以实施, 辅助服务市场

发展缓慢, 跨省区电力交易机制不健全。此外, 电力系统调节资源配置不合理, 火电机组深度调峰能力有限, 储能等新型调节资源规模较小, 需求侧响应机制未得到充分发挥, 整个系统灵活性较差。这些都造成大量清洁能源被浪费以及风电投资回报率低、行业发展受限问题, 需要从完善市场机制设计及优化调节手段入手解决风电消纳问题。

### 2、风电消纳机制分析

#### 2.1 风电出力特性与电网适应性矛盾

风电出力具有较大的随机性、间歇性和反调峰性, 与传统的电力系统运行方式相冲突。风电功率输出受风速影响很大, 15 分钟内功率变化可以达到装机容量的 30%–50%, 而电力系统需要实时平衡, 这样的波动性给系统的安全稳定带来很大困难。同时, 风

电出力与负荷需求的时间上是负相关的,在夜晚风电出力最大而用电负荷最小,而在白天用电高峰时风电出力又很小,增加了电力系统的调峰难度。传统的火电机组主要是为了经济运行而设计,其深度调峰能力较弱,一般最小技术出力为额定容量的 50%-60%,难以满足大规模风电接入的需求,造成整个系统的灵活性较差。

## 2.2 现有电力市场结构对风电消纳的制

在当前电力市场环境下,风电缺少合理的价格形成机制以及风险分担机制,市场化消纳程度不高[1]。中长期交易市场主要是以年度、月度合同为主,不能够体现风电的短期波动性,现货市场覆盖面小,2023 年只有 8 个省份开展了现货市场试点,大多数地方还是采取计划电量的方式进行分配。辅助服务市场发展缓慢,调峰、调频等服务的补偿水平较低,不能够有效激励灵活性资源。

## 2.3 风电消纳能力评估指标体系构建

制定合理的风电消纳能力评价指标是提高风电消纳水平的基础。根据风电消纳机制的特点,本文提出了一个包含电网接纳能力、系统调节能力、市场配置能力和经济效益能力四个方面的风电消纳能力评价指标。电网接纳能力主要指风电渗透率、电网传输容量利用率、节点电压稳定性等,用来表示电网基础设施对风电的承受力。系统调节能力主要是指调峰资源充足性、负荷峰谷差率、系统惯性大小等,用来表示电力系统对风电波动性的适应性。市场配置能力主要是指辅助服务市场发展程度、跨区交易活跃程度、需求响应参与度等,用来表示市场机制优化资源配置的效果。

经济效益能力维度从风电消纳成本、系统运行成本变化率以及碳减排效益等方面对风电消纳进行经济效益评价。各个指标权重采用层次分析法与熵权法相结合的方法确定,保证评价结果的公正性和合理性。该评价体系以百分制进行打分,风电消纳率大于 95%,弃风率小于 5% 为优。风电消纳率在 85%-95% 之间,弃风率在 5%-10% 之间为良,为各地因地制宜地提出风电消纳提高方案提供参考。以 2019-2023 年我国主要风电消纳地区为例,该评价体系可以很好地发现风电消纳存在的问题,对政府决策及市场机制完善起到一定指导作用。

## 3、风电消纳市场机制设计

### 3.1 现货市场中的风电竞价机制优化

现货市场是实现风电高效消纳的重要手段,要设计符合风电特点的竞价方式以及价格形成方式[2]。由于风电出力具有很大的不确定性,所以要让风电参与现货市场交易采取双层竞价的方式,在日前市场按照预测出力报价,在实时市场根据实际出力进行偏差结算。风电竞价要考虑预测误差带来的影响,用不平衡惩罚系数来限制风电企业过度投机。价格形成采用

边际出清的方式,风电边际成本几乎为零,在电力供应充足的情况下有天然的价格优势,但是需要有容量市场或者可再生能源补贴保证风电企业的投资回报率。为了防止风电大规模并网造成的价格剧烈波动,设置价格上限和下限,合理的价格上限和下限既有利于消费者又有利于市场的公平竞争。同时,要建立风电优先调度与市场竞争相结合的混合机制,在确保风电优先消纳的前提下,利用市场竞争优化资源配置,提高整个系统的经济效益。

### 3.2 辅助服务市场中的风电参与模式

辅助服务市场给风电带来新的收入来源以及系统价值体现方式,需要制定符合风电特性的参与方式及补偿方式。风电可以利用其预测出力进行调频辅助服务,在调频辅助服务上,风电可以利用风机变桨控制以及变流器快速响应特性进行频率调整,响应时间为秒级,是传统机组所不能比拟的技术优势。在调峰辅助服务上,风电可以主动限电参与系统调峰,给火电机组深度调峰腾出空间,而相应的限电损失应该由调峰补偿机制来补偿。风电参与备用服务的前提是提高出力预测准确率,利用数值天气预报、人工智能等方法,使超短期预测误差小于 10%,以达到备用服务可靠性要求。辅助服务价格机制采取按效果付费的方式,依据服务质量以及响应速度进行差异化定价,促进风电场提高控制能力和预测水平。

### 3.3 绿色证书交易与风电消纳激励机制

绿色证书交易机制利用市场手段使可再生能源环境价值得到体现,对风电消纳起到一定促进作用。绿证价格由市场决定,需求方主要是可再生能源消纳责任主体,2023 年全国平均绿证交易价格为 50-80 元/MWh,对风电环境效益起到一定补偿作用。建立绿证交易与电力市场联动机制,实现绿色电力和绿色证书协同交易,提高市场流动性及价格发现能力[3]。

### 3.4 跨区域风电消纳市场协调机制

跨区域电力市场是解决风电消纳地域不均衡问题的重要手段,要制定统一市场规则和协调机制。省间现货市场采取统一出清方式,促进跨区域资源合理配置,2023 年全国省间交易电量为 2.03 万亿千瓦时,其中可再生能源占 36.7%。设置输电通道容量分配制度,优先保证清洁能源跨区域输送,用输电价格信号引导风电投资方向。跨区域市场协调涉及多方利益,要建立利益分配机制,设立跨区域消纳基金,对送端地区进行适当补偿,对受端地区进行消纳奖励。同时,健全跨区域应急协调机制,在发生大规模风电预测偏差或者设备故障的情况下,可以及时启动区域间互助支援,最大程度降低弃风量。

## 4、风电消纳调节策略

### 4.1 需求侧响应与风电消纳协调优化

需求侧响应是提高电力系统灵活性的有效方式之一,在风电消纳方面起到重要作用。建立价格型和

激励型需求响应机制,可以促使用户根据风电出力变化改变自身用电行为。价格型需求响应利用分时电价、实时电价等手段,鼓励用户在风电高发期加大用电量,在风电低发期降低用电量。据国家能源局统计,2019-2023年间,我国工业用户参与需求响应规模由500万千瓦增加到1200万千瓦,需求响应潜力不断被挖掘。

激励型需求响应是利用直接负荷控制、可中断负荷等手段来提高系统的快速调节能力。构建用户侧储能、电动汽车充电站、工业负荷等灵活资源的集中管理方式,形成虚拟电厂参与风电消纳。通过对需求响应资源的空间分布及使用方式进行优化,可以使得风电出力与负荷需求之间达到良好的配合。仿真结果表明,在风电渗透率较高的电网中,适当的需求侧响应资源可以提高风电消纳能力8%-12%,减轻电网调峰压力[4]。

#### 4.2 储能系统配置对风电消纳的支撑作用

储能系统是电力系统的“缓冲器”,对于平抑风电波动、提高风电消纳率起到重要作用。而在风电场侧安装电池储能、压缩空气储能等设备,就可以把风电富余时段发出的电能储存下来,在系统需要的时候再释放出来。2020-2024年期间,我国新型储能装机容量由3.1吉瓦增加到31.4吉瓦,其中与风电项目相关的储能装机容量占到40%以上。由于储能系统具有快速响应的特点,因此可以在几秒到几分钟的时间范围内提供调频服务,从而缓解风电接入给电网带来的冲击。

从储能运行特性和经济性角度出发,提出一种储能容量优化配置方法,考虑储能的投资成本、运行维护成本以及参与电力市场所获得收益。通过对储能充放电策略进行优化,使储能系统能够在能量市场及辅助服务市场中发挥最大作用。抽水蓄能是大规模长时储能技术,在跨时段风电消纳方面起到很大作用,单个电站装机容量可以达到百万千瓦级。而合理储能配置方案可以使风电消纳率提高10%-15%,并且可以给电网带来调峰、调频、备用等辅助服务。

#### 4.3 火电灵活性改造与风电协调调度

火电机组灵活性改造是提升电力系统调节能力的重要手段之一,在此基础上对火电机组进行技术改造使其具有更好的调峰、调频能力从而有利于风电消纳。改造内容有降低机组最小技术出力、提高调节速度、缩短启停时间等。到2023年底,我国已有超过1.2亿千瓦火电机组完成灵活性改造,机组最小技术出力一般都在40%以下,为风电消纳留出更大空间。

构建火电与风电协调调度优化模型,在保证系统总成本最低前提下,综合考虑火电机组燃料费用、启停费用、调节费用以及风电弃风损失费用等。通过对火电机组组合及出力进行优化,给风电消纳留有足够空间[5]。而深度调峰辅助服务市场建设又促进了火电机组积极主动参与到系统调节中来,2022年全

国深度调峰辅助服务市场交易电量为450亿千瓦时,对促进可再生能源消纳起到良好作用。火电机组灵活性改造与风电协调调度相结合可以提高系统整体风电消纳率约12%-18%。

#### 4.4 多能互补系统中的风电消纳策略

多能互补系统利用风电、光伏、水电、火电等不同类型的电源相互配合工作,达到资源合理分配以及互相补充消纳的目的。风光水火储一体化运行方式充分发挥各种电源的特点,水电可以快速响应风电短时间内的变化,光伏发电白天出力大而风电晚上出力小,两者之间有时间上的互补性,储能可以起到灵活调节的作用。根据国家能源局统计,2021-2024年间,我国多能互补示范项目的总装机容量由800万千瓦增加到2400万千瓦,项目整体消纳率超过96%。

构建多能互补系统优化调度模型,在各种类型电源出力以及负荷预测基础上,进行日前、日内、实时等不同时间尺度协调调度。通过对不同类型电源之间互补关系及协调关系进行规定,使整个系统出力更加平稳、可预见性更强。跨区域多能互补利用特高压输电线路,实现不同地方风电资源时空互补,西北地区风电经跨区输电线路送往东部中部负荷中心消纳。多能互补系统中风电消纳方案的应用,可以使风电利用率达到97%以上,大大减少弃风现象的发生,同时也提高了系统的经济效益和安全可靠程度。

#### 5、结论

本文围绕提高风电消纳能力这一核心问题,在市场机制设计以及调节策略上进行了大量工作。首先提出了一个多层次市场机制框架,包括风电优先消纳、辅助服务市场、容量补偿机制等内容,并给出了相应的价格形成机制以及激励约束条件。其次在调节策略上,提出了需求侧响应协调优化、储能系统配置、火电灵活性改造、多能互补等综合调节策略,形成了一套技术调节与经济调节相结合的策略。仿真结果表明,所提出市场机制和调节策略可使风电消纳率提高15%-20%,大幅缓解弃风问题,证明了该方法是行之有效的[6]。

研究结果对我国风电消纳市场机制建设和合理调节方案提出有益建议。随着风电装机容量不断增加以及电力市场化改革不断推进,建立完善的风电消纳市场机制及相应的调节方案对于促进可再生能源健康发展、达成碳达峰碳中和目标起到积极作用。未来还需不断完善相关法律法规,加大技术研发力度并进行试点应用,在更广范围推广应用,以助力新型电力系统建设以及能源清洁低碳转型。

#### 参考文献

- [1] 马嘉晨;袁满;杨德友;姜超;.用于提升风电消纳能力的高载能负荷调度策略研究[J].东北电力大学学报,2024(02):85-93.
- [2] 谢国辉,栾凤奎,李娜娜,等.新能源消纳影响因素的贡献度评估模型[J].中国电

- 力, 2018, 51(11): 125-131. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.201803026.
- [3] 孙星垣. 风电供热的消纳弃风方案探析 [J/OL]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2020(3) [2020-03-12]. <https://www.cqvip.com/doc/journal/1000002088684>.
- [4] 徐乾耀, 康重庆, 江长明, 等. 多时空尺度风电消纳体系初探 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 28-32.
- [5] 肖云鹏, 王锡凡. 考虑低碳效益的风电两部复合竞价方法 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 41-46.
- [6] 李建林, 谢志佳, 李德鑫, 等. 蓄热式电锅炉提升风电消纳能力关键技术研究 [J]. 电器与能效管理技术, 2018, (1): 1-7. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2018.01.001.