

[碳排放管理]

计及碳排放管理的配电网灵活性资源优化策略研究

文/刘健 王昱博 齐振开 李星举
国网鞍山供电公司

构建以新能源为主体的新型电力系统速度不断加快，为实现电网公司的“双碳”目标，计及碳排放管理的电网规划、建设、调度和运行等方面研究日趋成为主流。国家电网公司统计数据显示，风电场、光伏电厂年均利用小时数分别为2 100 h、1 300 h，仅为传统火电厂年均利用小时数50%左右。在短期内无法迅速提高风光发电利用小时的情况下，为保证电网具备足够灵活性资源，除保留足量传统火电厂外，亟需开展新一代储能技术和虚拟电厂技术相关研究。从电网公司配电网碳排放基本原理和主流技术梳理出发，全面探究提升新型电力系统灵活性的储能、虚拟电厂的资源模型与优化方案，并结合行业标准、需求响应和规划调度等方面，提出优化配电网灵活性资源的有效策略。

2024年，在电力系统与新能源融合驱动下，以减排控增为特点的碳管理成为研究重点领域。然而新能源发电在有效减少发电端碳排放的同时，也对电网侧灵活性资源提出更多挑战。目前，提升电网灵活性的方法集中在改善功率调节速度、建设大规模储能站和应用虚拟电厂技术。从提升发电厂功率调节速度上看，传统火电厂调节速度在数十个小时量级，水电厂调节速度在数分钟量级，只是国内水力发电未开发资源所剩不多，而且地理分布不均，改善地区性电网灵活性能力有限^[1]。

基于碳达峰、碳中和目标，我国承诺2030年风电、光伏装机不低于12亿kW。截至2024年6月，我国电力装机已达27.1亿kW，其中风电装机3.9亿kW，光伏发电装机4.7亿kW。综合来看，我国风电、光伏和生物质等新能源装机占比已超过50%，如图1所示。根据国际可再生能源署（IRENA）数据，2023年我国占据全球新增风电、光伏比例为45.6%和48.5%。与传统化石能源不同的是，新能源发电具有明显的周期性特征，受天气影响较大，因

此对电网灵活性提出更高要求。

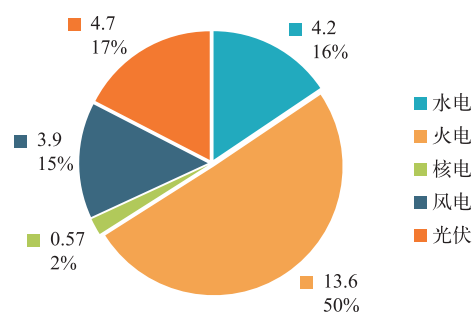


图1 2024年上半年我国电力装机分类装机量及占比
(单位/亿kW·h)

储能技术是实现虚拟电厂技术的关键技术之一，虚拟电厂发展与应用对于提升电网灵活性、减少弃风弃光起到重要作用。当前储能技术以抽水蓄能方式为主，电化学储能等新型储能增长迅速，熔融盐储能占比不高。在新型配电网接入的新能源发电设备地理分布上十分分散，利用虚拟电厂技术可以明显化解资源分配不均问题。虚拟电厂需要先进信息技术与新型储能技术相结合，提升负荷预测，

最大化风光并网消纳，进一步优化环境友好和灵活性。全球储能装机趋势如图2所示。

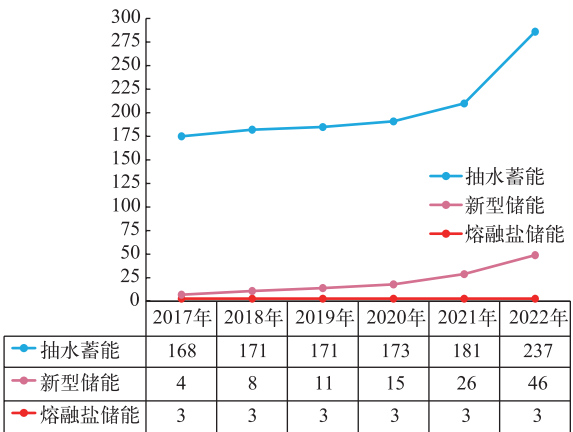


图2 2017—2022年全球储能装机累积规模趋势图（单位/GW）

本文结合计及碳排放管理的配电网建设灵活性资源优化开展了如下工作：①从电网公司配电网碳排放基本原理和主流技术梳理出发，全面探究提升新型电力系统灵活性的储能、虚拟电厂的资源模型与优化方案；②结合行业标准、需求响应和规划调度等方面，提出优化配电网灵活性资源的有效策略，为实现“双碳”目标进行前瞻展望。

配电网碳管理基本原理及相关研究

1. 配电网碳管理基本原理

配电网为实现“双碳”目标，在发电侧、电网侧和用户侧实施全流程碳管理。文中所述“碳”包括CO₂、CH₄、N_xO_x和SF₆等，根据联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）建议，“碳”视为对全球气候产生温室效应的气体统称。碳排放是一种发电、用电和储能等过程中产生的物理过程，具有负外部性。

碳管理的基本原理是：针对碳源、碳流、碳汇和利用全过程进行监测、分析和统计，并采用云计算、人工智能（Artificial Intelligence, AI）、机器学习、物联网和碳捕集技术（Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS）等，最终实现碳的减排控增、有效利用。目前，电网正在加快发电侧碳管理能力，但受新型配电网碳管理目标约束，需要关注新能源广泛接入与电网灵活性之间的协调关系。表1汇总配电网各领域碳管理典型特征，即

低碳化、数据化和智能化，并梳理有效做法和前瞻预测。

表1 配电网各领域碳管理典型特征

	低碳化	数据化	智能化
发电侧	引入光伏、风电等新能源发电设备，减少发电环节碳排放	加强发电设备及污染物处理设备的碳监测	依托区块链技术构建智能合约，为末端“绿电”交易提供数据支撑
电网侧	采取多种手段降低线损，进一步控制碳排放	利用5G、云计算和机器学习等新技术，优化配电网运维AI模型	应用虚拟电厂技术，在设计、规划、调度等环节进行低碳化重构
用户侧	建立“微电网”，装设储能设备	通过综合用能方案APP，获得多样化电能产品选择	享受“双向互动”电网便利；参与调节区域电网灵活性的分布式储能等项目，获得收益

2. 提升配电网碳管理水平的基础研究

计及碳排放管理条件下，储能技术研究成果较多。文献[2]针对可再生能源接入电网后，电力系统功率分配性能较差的问题，设计了电网储能多阶段规划模型，并进行初步验证，对进一步优化电力系统经济性和灵活性展开探究。文献[3]基于乡村新型配电网建设可靠性提升这一课题，结合“双碳”目标实现的发展方向和技术需求，着重分析应用新一代储能技术对实现配电网低碳发展目标和改善电网灵活性的可行策略，并结合具体运维数据分析进行初步定性验证。文献[4]针对分布式电源大规模接入配电网后灵活性不足问题，提出一种用于提高分布式电源消纳和储能系统经济性的集群储能控制策略，并经算例仿真，验证该控制策略可以在相同储能配置下可提高新能源消纳比例最高至15%，并提高日运行收益15%。

虚拟电厂在优化调度运行和改善灵活性等方面已经展开了应用。文献[5]从大量分布式资源集群调度问题切入，基于系统态势感知和外界风险感知，优化灵活性资源调度构建分布式能源管理、新能源消纳和区域综合能源协同优化等功能于一身的虚拟电厂综合平台。文献[6]基于电动汽车、数据中心和P2X（Power-to-X）等需求侧资源在提高电力系统提供灵活性上的潜在优势，在聚合技术、电碳协同优化调控策略、可信调节能力量化和通信与信息交换标准等方面，梳理了新型电力系统在“双碳”目标约束下的虚拟电厂关键技术应用。文献[7]逐一进行

了智能计量、信息通信和协调控制3项虚拟电厂关键技术综述，并以上海、江苏和浙江某市3家不同类型虚拟电厂的运行情况作为实例，得出虚拟电厂关键技术与低碳调度方式相结合的新型电力系统建设策略。

综上所述，在实现配电网灵活性的同时不失新型电力系统的低碳性，需要详细分析储能技术、虚拟电厂的碳管理贡献，探索配电网碳管理优化策略。

新型配电网灵活性的资源建模与优化

1. 灵活性的内涵

配电网灵活性被定义为“为满足多元负荷泛在接入、即插即用的需求，采用先进用电信息采集、聚合、筛选、分析和通信等技术，并全面利用配电网自动化的智能分布式供用电体系”^[8]。在风光等新能源发电端接入和潮流约束、功率约束、裕度约束等诸多条件互相耦合、互相作用的背景下，配合新型储能技术，进一步实现多层次虚拟电厂，是建设新型配电网的可行路径。

分析新型配电网灵活性资源需建立量化模型，其目标函数是提升高比例新能源消纳，降低配电网规划建设成本和储能设备投资，引导供用电各参与方投入灵活性资源，实现全社会共享的“双碳”目标。具体而言，考虑超级电容、飞轮储能、液流电池和锂离子电池等新型储能维持基本安全状态的灵活性起始功率 P_0 ，在虚拟电厂技术介入的条件下，可参与调节灵活性的功率区间为 $\{P_{\text{exp1}}, P_{\text{exp2}}\}$ ，如图3所示。客观上，风电和光伏的发电出力具有明显周期性，每天发电时间窗口在24 h以内，因此 t_0 、 t_{max} 分别表示虚拟电厂调度新型储能灵活性资源入网和离网时间。

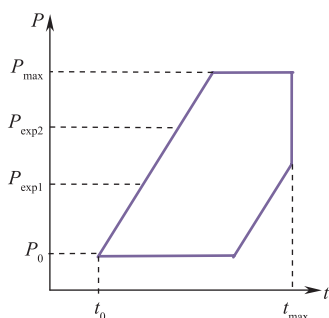


图3 参与虚拟电厂调节的新型储能灵活性资源可行域

2. 新型储能设备资源建模

新型储能具备响应速度快、兼容耦合性好等特点，相较于传统的火电厂或抽水蓄能的水电厂，在灵活性供给的物理性质上具有明显优势。在大规模储能调度期间，虚拟电厂可以有效利用用户侧的需求响应，新能源发电资源可以实现在电力市场及时出清，有助于削峰填谷，提升电网综合碳管理水平^[9]。

$$0 \leq P_{i,t}^E \leq P_{i,\text{max}} \quad (1)$$

$$E_{i,t} = (1-\alpha)E_{i,t'} + (t-t')\eta P_{i,t}^E \quad (2)$$

式中， $P_{i,t}^E$ 、 $P_{i,\text{max}}$ 分别为新型储能设备 i 在 t 时刻的功率总和以及设备 i 储能最大值； $E_{i,t}$ 、 $E_{i,t'}$ 分别为新型储能设备 i 在 t 和 t' 时刻的储能余量； α 为新型储能设备的自放电率； η 为新型储能设备的放电效率。

3. 虚拟电厂灵活性优化模型

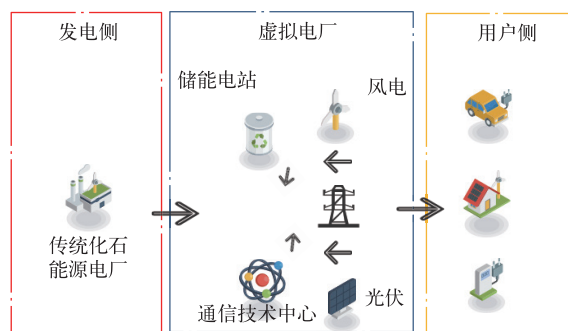


图4 传统化石能源电厂与虚拟电厂耦合示意图

通过计及碳排放管理的新型配电网灵活性资源优化配置，从图4可以得知：新型配电网需要在规划建设中实现“双碳”目标的碳管理纳入考虑，并对新型储能设备和分布式新能源发电对配电网运行方式影响进行充分考虑，进而优化新型配电网的灵活性和经济性^[10]。由于新能源发电具有绿色溢价，新型储能和虚拟电厂应用后贡献价值的目标函数应包括配电网规划建设成本 f_{net} 、储能设备投资成本 f_{nes} 、虚拟电厂技术实现投入成本 f_{vpp} 和平抑绿色溢价的碳管理成本 f_{ccus} 。供应灵活性的成本目标函数为

$$\min \{f_{\text{sum}} | f_{\text{sum}} = f_{\text{net}} + f_{\text{esc}} + f_{\text{vpp}} + f_{\text{ccus}}\} \quad (3)$$

对于新型配电网，虚拟电厂技术应用可以在负荷上调时及时消纳新能源电量，在有效考虑新型储能设备投运的情况下，可以更加快速响应短期电力市场出清，鼓励新能源发电，降低全社会碳排放强度，增加社会总体福利^[11]。同时，有利于虚拟电厂

各参与方关注减排控增技术投入，有效减少弃风弃光现象，形成反应碳管理成效的价格机制，实现各参与方盈利。

为验证计及碳排放管理的新型配电网灵活性资源模型有效性，可采用IEEE-24节点系统进行仿真计算，连接有2个风电场，2个光伏电站，5个虚拟电厂（VPP），利用改进粒子群算法或利用建模软件进行数值运算，限于本文主旨侧重优化灵活性资源的策略研究与前瞻建议，不再赘述。

计及碳排放管理的新型配电网灵活性发展建议

1. 行业标准

依据现行《县域配电自动化技术导则》，电力系统灵活性需要灵活应对大规模、分布式新能源发电接入，并适应其带来的波动性和随机性，最大限度保障配电网安全稳定经济运行。同时，配电网灵活性应针对符合波动、外界扰动进行自动化调整，满足智能电网的自愈性需求。在“双碳”目标下，计及碳排放管理的新型配电网运行管理需要在新能源发电侧、电网侧和用户侧探究长时间周期、大空间尺度的高效灵活性资源规划和分配准则与算法，并建立与区域电网发展相适应的指标评估体系。

由表1可知，电网作为实现国家碳减排、实现碳中和目标的重点领域，各参与方在投资成本、运行安全和绿色金融等约束条件中，需尽快形成具有明显碳管理特征的电力产品产销行业标准，推动新型储能设备广泛建设，虚拟电厂技术逐渐普及。面对新能源车占有率持续上升、充换电站布局规模不断扩大等现状，在新型配电网行业标准制定中体现低碳化与灵活性综合价值，尤其在东北地区，探索支撑“风光火核储”的新型电力系统具备储能技术与装备制造优势，有助于为新型配电网建设和运行提供前瞻性参考。

2. 需求响应

结合新型电力系统发展规模和战略布局，已有11个省从需求侧潜力挖掘、响应能力建设、市场模式设计和可再生电力消纳等多方面开展需求响应研究和实践^[12]。但从新型配电网角度分析，兼顾普遍性和地区差异性面临挑战。由于缺少足够的虚拟电厂技术应用和新型储能设备投入，需求响应的功能价值定位、市场主体培育、市场机制创新和响应能

力建设存在滞后电力市场需求的难题。由于用电企业及用户将在产品和服务中更加突出低碳化特征，因此新型电力系统在应对能源结构转型过程中，应增强灵活性和柔性，构建多能互补、源网荷储高效协调，尽快形成激励计及碳管理成本的需求响应竞价机制。

在美国PJM市场中，由削减服务提供商(CSP)组织具有削减负荷潜力并愿意参与需求响应的电力终端用户资源直接参与电能量市场申报，并按市场出清价格结算，对我国加快建设中长期电力市场有一定参考意义^[13]。同时，需要进一步优化分时电价机制，持续降低“度电碳成本”，并逐步将需求响应补贴退出，将各方碳管理成效反应在电能产品中，满足需求侧优质绿色高效的用能需求。不同发电类型成本见表2。

表2 不同发电类型成本梳理

	发电成本[元/(kW·h)]	上网价格	碳治理成本
火电	0.3~0.4	0.38~0.45	较高
水电	0.07~0.1	0.31~0.35	较低
核电	0.4	0.45	极低
风电	0.2	0.30~0.35	极低
光伏	0.3~0.5	0.4	极低

3. 规划调度

目前，新型电力系统的规划已充分考虑将虚拟电厂的灵活性资源与新型储能持续投入作为提升新能源发电比例接纳和减少全社会碳排放的重要方式。在建设规划阶段，以降低新型配电网供电可靠性、潮流约束与综合调度运行成本最小化为目标的应用案例较多。在多个虚拟电厂间协同运行，尤其是协调储能设备与大规模风光发电设备经济运行，明显增加了调度复杂度。下阶段可展开包含ChatGPT的相关研究，进一步验证灵活性资源配置与碳减排的可行性。

将电网视为平台进行碳排放权交易，带动低碳经济发展，其底层支撑源于虚拟电厂技术等新技术应用和新型储能等新设备投运，优化分配电力负荷，实现经济成本最小化。随着配电带电作业、5G、人工智能和云计算等新技术等应用，发挥虚拟电厂在提升碳管理的时空互补作用，支撑形成虚拟电厂集群运营商，将在新型配电网实现更优调度的基础上实现。

结束语

为解决新型配电网建设、规划需要兼顾的碳排放管理目标和灵活性资源投入不足、分配不均问题,从电网公司配电网碳排放基本原理和主流技术梳理出发,全面探究提升新型电力系统灵活性的储能、虚拟电厂的资源模型与优化方案,并结合行业标准、需求响应和规划调度等方面,提出优化配电网灵活性资源的以下建议。

在“双碳”目标下,计及碳管理的新型配电网运行管理需要在新能源发电侧、电网侧和用户侧探究长时间周期、大空间尺度的高效灵活性资源规划和分配准则与算法,推动新型储能设备广泛建设,虚拟电厂技术逐渐普及,并建立与区域电网发展相适应的指标评估体系。

由于用电企业及用户将在产品和服务中更加突出低碳化特征,因此新型电力系统在应对能源结构转型过程中,增强灵活性和柔性,构建多能互补、源网荷储高效协调,尽快形成激励计及碳管理成本的需求响应竞价机制和绿证交易平台,满足需求侧优质绿色高效的用能需求。

随着配电带电作业、5G、人工智能和云计算等新技术的应用,发挥虚拟电厂在提升碳管理的时空互补作用,支撑形成虚拟电厂集群运营商,将在新型配电网实现更优调度的基础上实现。下阶段可开展包含ChatGPT的相关研究,进一步验证灵活性资源配置与碳减排的可行性。**EA**

(收稿日期:2024-05-13)

参考文献

- [1] 严欢,胡俊杰,等.考虑电动汽车虚拟电厂灵活性和高比例光伏接入的配电网规划[J].电力建设,2022,43(11):14-23.
- [2] 陈盛燃.碳排放约束下可再生能源接入电网储能多阶段规划模型[J].能源与环保,2022,44(9):240-245.
- [3] 李星举,郭峰,等.乡村配电网供电可靠性提升研究[J].东北电力技术,2023,44(7):15-19.
- [4] 李翠萍,东泽民,等.提升配电网新能源消纳能力的分布式储能集群优化控制策略[J].电力系统自动化,2023,37(6):272-276.
- [5] 潘美琪,贺兴,等.新型配电系统分布式资源调度研究现状与展望[J/OL].电网技术:1-16[2023-09-06].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0716>.
- [6] 吴林林,陈璨,等.支撑新能源电力系统灵活性需求的用户侧资源应用与关键技术[J/OL].电网技术:1-12[2023-05-19].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0199>.
- [7] 吴晓刚,唐家俊,等.“双碳”目标下虚拟电厂关键技术与建设现状[J].浙江电力,2022,41(10):64-71.
- [8] 刘帅,李华强,等.考虑灵活性资源传输精细化建模的配电网优化运行[J/OL].电网技术:1-15[2023-07-26].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0398>.
- [9] 胡静哲.低碳背景下考虑主动配电网响应的电力系统协调调度研究[D].上海:上海交通大学,2020.
- [10] 李云燕.计及电动汽车的虚拟电厂市场化运营决策方法研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- [11] KORRAKI D, STRUNZ K. Wind and solar power integration in electricity markets and distribution networks through services-centric virtual power plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 473-485.
- [12] 何奇琳,艾芊.售电测放开环境下含需求响应虚拟电厂的电力市场竞价策略[J].电力建设,2019,40(2):1-10.
- [13] 云秋晨,田立亭,等.基于投资组合理论的虚拟电厂资源优化组合方法[J].电力系统自动化,2022,46(1):146-154.