

高比例分布式能源接入下的零碳产业园 微电网稳定控制与市场化交易机制研究

李 胜

(中铁铁工城市建设有限公司, 北京 102600)

摘 要 随着能源结构由集中式向分布式、由单一化向多元化转型, 传统电力系统的调度逻辑与运行模式正面临系统性重构。本文构建了“源—网—荷—储”一体化技术体系, 重点分析系统运行特征与架构演化规律。在此基础上, 提出基于虚拟惯量、储能快速调节及多时间尺度协调的稳定控制策略, 并进一步设计园区内电力现货交易、辅助服务补偿及动态定价机制, 旨在对实现技术控制与市场信号的协同耦合有所裨益。

关键词 分布式能源; 零碳产业园; 微电网; 市场化交易机制

中图分类号: TM73; F426.61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.027

0 引言

零碳产业园作为新型能源系统的重要实践载体, 其核心在于通过高比例分布式能源接入, 实现能源自平衡与低碳运行。随着光伏、风电等新能源渗透率不断提升, 传统电力系统基于同步机惯性支撑与集中调度的运行逻辑受到显著冲击, 系统频率稳定性、电压支撑能力以及供需动态匹配能力均面临新的挑战。与此同时, 零碳产业园的运行不再局限于技术层面的稳定控制, 而逐渐呈现出“技术系统—市场机制—运营模式”协同发展的特征^[1]。

1 零碳产业园微电网运行特征

1.1 多源耦合特征

零碳产业园微电网形成的是“源—网—荷—储”深度融合的整体架构, 从能源方面看是以分布式光伏发电、分布式风电、储能设施为主构建起来的模式。在零碳产业园里, 光伏系统的装机量一般可达 60% ~ 75%, 储能系统的配备量大约是 20% ~ 30%, 通过 10 kV 或 35 kV 配电网来进行区域性的电力供需调节。相较于传统的集中型电源而言, 这样的多点接入形式大幅提高了能源利用率, 但是也存在电源分布过于分散、调度难等问题。

1.2 波动与不确定性

当有较大比例的新能源接入的情况下, 微网的功率输出表现出很大的随机抖动特性。例如: 光伏发电系统在晴转阴骤变的过程中, 其出力可在短短的几分

钟内上升或是下降 20% ~ 40%, 而风力发电机的输出功率也可以产生额定功率 30% 以上的剧烈跳变, 使得系统频率出现较大的偏差^[2]。如果没有相应的调控措施的话, 该频率的变化会达到 ± 0.2 Hz, 远远超过理想的运行区间 (± 0.05 Hz)。

1.3 负荷柔性增强

零碳产业园区内用电负荷结构朝着灵活化的趋势发展, 在对工业负荷、电动汽车充电、空调系统等方面而言, 其可调节性也得到了很大程度上的提高。从园区的实际情况来看, 能够进行调节的柔性负荷占整个负荷总量的比例一般会达到 25% ~ 40%, 而且充电负荷可调率甚至达到了 60% 以上。基于需求响应调控机制的作用之下, 企业园区可以在 15 ~ 30 分钟之内完成大约 10% ~ 20% 之间的负荷转移量, 达到平滑用电曲线的目的。

2 高比例分布式能源接入下的零碳产业园微电网的架构分析

在高渗透率分布式电源接入情况下, 零碳园区微电网逐渐从传统的“配电网延伸结构”转变为“源—网—荷—储—控”的集成模式, 主要目的已不仅仅是输送电力, 而是要依靠多层次节点联动来完成对能量流、信息流以及价值流的统一调度^[3]。该模式注重分级管控、区域独立以及平台运营, 满足新能源随机性和市场机制运行的要求。典型零碳产业园微电网架构配置参数如表 1 所示。

零碳产业园微电网也不再是单一的电力系统, 它

作者简介: 李胜 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 经营开发。

表1 典型零碳产业园微电网架构配置参数

模块类别	子系统构成	装机 / 容量	响应时间	控制方式	数据交互周期
电源侧	分布式光伏	45 MW	≤ 1 s	MPPT+VSG	1 s
	分散式风电	18 MW	≤ 2 s	下垂控制	2 s
储能侧	锂电储能系统	20 MW/40 MWh	≤ 100 ms	双向变流控制	0.5 s
负荷侧	工业可调负荷	25 MW	≤ 5 min	需求响应	5 min
	充电负荷	12 MW	≤ 1 min	聚合控制	1 min
网络侧	配电网络 (10kV)	80 MW 承载能力	—	潮流控制	2 s
控制层	微电网主控系统	—	≤ 200 ms	分层协调控制	1 s
平台层	能源管理与交易平台	—	≤ 1 min	优化调度 + 交易撮合	5 min

是一个具有多维度耦合特征的多能系统，在电源端分布式能源占到70%以上并且以光伏及风电为主，对它们的控制策略也由传统的最大功率跟踪逐渐向能够提供惯量支撑的虚拟同步控制过渡；同时，新能源不再仅是生产电能的角色，在其中还起到了一部分系统稳态的作用。

在网络及控制系统方面，10 kV 配电网具有电力输送以及局部调整的功能，而微电网主控系统通过对系统的分层控制来达到对整体优化和局部自主的统一，其控制时延不超过200 ms，可以满足动态稳定的需要。

3 高比例分布式能源接入下的零碳产业园微电网稳定控制策略

3.1 虚拟惯量与频率支撑控制

对于较高渗透率下分布式电源接入情况，系统转动惯量大幅度降低、频率容易受到负荷波动的影响增大，所以要进行虚拟惯性控制以补充系统的惯性不足。实现方法就是在光伏并网逆变器以及储能变流器里加入虚拟同步机 (VSG) 控制器，设置等效惯量常数 (一般为2~6 s)，阻尼比 (0.5~1.5)，使逆变器具有类似同步发电机的频率动态特性。

在实际应用过程中，对于系统的负荷突然增加5 MW的情况来说，没有使用VSG的情况下电网频率降低可以达到0.18 Hz，在加入了虚拟惯性之后电网的频率变化就可限制在0.05 Hz以内，回复时间也只需要3~5 s^[4]。并且利用有功功率下的下垂特性来协调多个电源间的有功功率分摊，防止一个电源过度负担，这种方法就是用“控制模拟物理惯量”的方法增强电力系统的暂态稳定性，在弱电网或者是孤岛状态下尤为重要。

3.2 储能快速调节与功率平衡控制

储能系统是微网稳定运行的重要组成部分，它对系统的抗干扰程度有着决定性的作用，在示范型零碳

园区里，储能装置的装机容量一般占到新能源装机容量的20%~30%，功率占比在0.5C~1C左右，保证具有较强的充放电速度，控制系统方面运用“频率—功率”的双闭环控制系统，使得储能装置能够在频率出现大于等于±0.03 Hz后自动参与调节，它的反应速度不超过50~100 ms，正常运行下光伏出力在10 min内减少了30% (大约15 MW左右)的情况下，储能系统能在1 s内提供10 MW功率用于调节，把功率变化的范围降到最初的40%以下。

3.3 多时间尺度协调控制策略

微网运行包括从毫秒级动态调节到小时级最优化决策的一系列不同时间尺度的问题，所以要形成一个分级协同的控制系统^[5]。在短期内 (0~1 s)，利用逆变器调节、储能的快速调节来抑制频率、电压的变化等；在中期 (1~15 min)，用滚动优化调度调整储能出力以及可调负荷分摊比例；而在长期 (大于1 h) 时采用预测模型 (新能源预测误差一般控制在±10%左右) 来进行日内的调节优化。例如：在典型运行工况下，应用日前预测加滚动修正的方法可以使调度误差由原来的15%下降到小于6%，从而节省大约20%的备用能力。并且，在此基础上增加模型预测控制法 (MPC)，对未来的负载及发电情况提前做出预测并及时采取措施，在其变化之前就有所准备。此方法采用“预测—调度—反馈”的闭环方式，能够把各个不同时间段的控制联系在一起。

3.4 柔性负荷协同调节控制

在高占比新能源背景下，仅通过电源侧调节不足以彻底抵消波动冲击的作用，在此情况下应充分发挥负荷侧调节能力的作用。零碳园区中可调负荷占比一般可达其总负荷量的30%以上，其中主要包含着工业负荷及充电负荷等。以价格信号联动和控制指令双轮驱动的方式，当系统频率偏移幅度大于等于±0.05 Hz

或者电价变动幅度大于等于 20% 时, 就会引起负荷做出相应的反应。而实际运行中, 对于工业负荷可以在短时间内作出 10% ~ 15% 的功率变动; 充电负荷也仅需一分钟时间就可以做到 20% 以上的功率减小或者转移出去。例如: 在晚高峰期间, 负荷侧调节能削减系统最高负荷达到 8 MW 左右, 降低峰谷差达 30% 及以上的水平。在具体措施上, 园区可以建设负荷聚合控制系统、将分散负荷进行统一管理, 它的响应准确度可以做到 $\pm 2\%$ 内。这样的方式就是把负荷变为“可调资源”, 实现了发用电侧联合调节的能力增强的同时也为其后市场交易打下了良好的基础。

4 大比例分布式电源接入下的零碳园区微电网市场交易规则研究

4.1 园区内多主体电力现货交易机制

零碳产业园区内部要搭建一个针对多方参与者的电力现货市场, 在此平台之上能够让分布式电源、储能装置、用电客户能够开展即时的交易。即在园区内建立周期为 5 ~ 15 min 的滚动出清模式, 将边际电价设定为市场的信号源, 从而达到供求平衡的目的。

在标准运行条件下, 光伏出力足的时候, 园区电价可以降低到 0.25 ~ 0.35 元/kWh, 让企业提高用能或是储能充电; 而新能源出力不够或者负荷高峰的情况下, 电价可以升高到 0.70 ~ 0.90 元/kWh, 使负荷侧降低用能或者是放电储能。这样园区内的新能源就地消纳率就可以从原来的 75% 左右提高到 90% 以上, 减少了对购电的比例 20% ~ 30%。从技术上来说, 交易平台要实时与微电网控制系统连接起来, 通过数据采集频率(一般为 1 ~ 5 min), 达到电价及调度同步更新的效果, 形成一个完整的“价格引导调节”闭环控制过程。

4.2 基于辅助服务的价值补偿机制

高比例分布式电源系统稳定性的保障很大程度上取决于储能以及柔性负载所提供的调节支持, 所以要建立一个辅助性服务市场来评价补偿频率调整、电压支撑以及备用容量等服务的价值。

园区在建设初期即可把调频服务根据反应时间划分为两类: 快速(≤ 1 s)、一般(≤ 10 s), 并相应地给予补偿价格为 0.8 ~ 1.2 元/kW·次、0.4 ~ 0.6 元/kW·次; 对于备用容量则以能够供电量来进行补偿量(约为 50 ~ 80 元/kW·年)。储能装置通过提供调频服务来获得收入, 每年收益可达到总收入的 30% 及以上; 而工业企业所付出的备用容量以及削峰等服务所获取的经济补贴也足以抵消其 10% 左右的电费开支。该机制的关键点就是把“稳定性贡献”的价值变现为可以买

卖的经济效益, 让原本需要系统免费提供的调频义务变成市场化的刺激, 提高各方面主体对于系统调频的积极性, 在技术上提升微网本身的自我调节功能。

4.3 技术—交易耦合的动态定价机制

为了使技术创新同市场竞争相结合, 需要建立起一种以运行状态为基础的动态电价体系, 把系统的频率、电压以及功率的裕度这些重要的参数转换成市场价格信息, 可以设立“状态变量—价格映射模型”, 当系统的频率偏移值 $\geq \pm 0.04$ Hz 或者备用电源 $\leq 20\%$ 的时候, 就启动价格的上升机制, 即上涨大约在 15% ~ 30%, 如果此时处于比较充裕的状态下, 那么价格就会降下来, 这样就使得价格不只是传递了供求信息, 同时也传递了系统运行的安全水平。

在实际操作中, 该措施可促使储能反应时效加快大约 25%, 负荷侧反应比率提升到 85% 以上, 大大地提高了整个系统的调节水平。并且能够借助于微电网控制系统的信息接口联动(信息刷新时间小于 1 min), 做到电价信号、控制措施的同步协调, 让“控制指令驱动”过渡到“价格信号驱动”。其实质就是建立起一个基于技术条件下的市场反馈体系, 使得微电网在确保自身安全的基础上达到资源调配水平的最大化。

5 结束语

在能源系统由集中走向分布、由单一走向协同的发展过程中, 零碳产业园微电网已逐步成为新型电力系统的重要实践单元, 其运行逻辑呈现出由“技术主导”向“技术与市场协同驱动”的深层转变。围绕高比例分布式能源接入带来的不确定性与波动性, 单纯依赖控制技术已难以支撑系统长期稳定运行, 必须通过控制策略与市场机制的耦合, 重构能源系统的运行逻辑与价值实现路径。

参考文献:

- [1] 张锋, 张怡, 张炜, 等. 县域电网视角下零碳园区建设路径探析与对策研究[J]. 农村电气化, 2025(11):1-7.
- [2] 顾用祥, 李苗苗. 5G 网络与智能电网的融合与应用[J]. 农电管理, 2025(11):27-28.
- [3] 周颖, 白保华, 蒲田, 等. 零碳产业园的构建与示范[J]. 化工进展, 2025, 44(07):4282-4286.
- [4] 李永鹏, 王宏霞. 打造智慧零碳电力系统推动绿色低碳发展: 国网青海电力服务青海首个零碳产业园发展侧记[J]. 农村电工, 2022, 30(12):28.
- [5] 孟建辉, 石新春, 王毅, 等. 改善微电网频率稳定性的分布式逆变电源控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(04):70-79.