

园区绿电直供低压配网系统运行调控策略研究

许 朔^{1,2} 吴昊宇^{1,2} 何豪帅³ 胡士博³ 赵东旺¹

1.河北鲲鹏电力工程咨询有限公司, 河北 石家庄 050003

2.河北省分布式能源应用技术创新中心, 河北 石家庄 050000

3.河北静林电力工程设计咨询有限公司, 河北 石家庄 050002

[摘要]由于分布式新能源在园区大规模接入, 因此绿电直供成为工业园区低碳转型的主要方式。由于新能源出力具有随机性、负荷用电具有时变性, 所以园区低压配网会遇到电压越限、供需失衡、调控效率低等问题。本文在分析绿电直供系统运行特点的基础上, 对目前低压配网存在的主要问题梳理, 然后从新能源出力预测与调控、负荷侧柔性调节、储能系统协同调控、源荷储协调运行、配网电压与功率优化控制五个方面提出系统化的运行调控策略, 为园区绿电直供系统的安全高效运行提供参考。

[关键词]园区绿电直供; 低压配网; 源荷储协调; 运行调控; 柔性调节

DOI: 10.33142/hst.v9i8.20433

中图分类号: TM727.2+1

文献标识码: A

Research on the Operation and Control Strategy of Low Voltage Distribution Network System for Green Power Direct Supply in the Park

XU Shuo^{1,2}, WU Haoyu^{1,2}, HE Haoshuai³, HU Shibo³, ZHAO Dongwang¹

1. Hebei Kunneng Power Engineering Consulting Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050003, China

2. Hebei Province Distributed Energy Application Technology Innovation Center, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

3. Hebei Jinglin Electric Power Engineering Design Consulting Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050002, China

Abstract: Due to the large-scale integration of distributed new energy in industrial parks, direct supply of green electricity has become the main way for low-carbon transformation in industrial parks. Due to the randomness of new energy output and the variability of load electrical appliances, the low-voltage distribution network in the park may encounter problems such as voltage exceeding limits, supply-demand imbalance, and low regulation efficiency. Based on the analysis of the operating characteristics of the green power direct supply system, this article summarizes the main problems existing in the current low-voltage distribution network. Then, systematic operation and control strategies are proposed from five aspects: new energy output prediction and regulation, load side flexible regulation, energy storage system coordinated regulation, source load storage coordinated operation, and distribution network voltage and power optimization control, providing reference for the safe and efficient operation of the green power direct supply system in the park.

Keywords: park green power direct supply; low voltage distribution network; source load storage coordination; operational regulation; flexible adjustment

引言

在双碳目标的推动下, 工业园区作为能源消耗和碳排放的主要承载者, 其绿色低碳转型已经迫在眉睫。绿电直供依靠新能源就近消纳、物理溯源清楚等特点, 正在成为工业园区降碳增效的重要途径。园区内分布式光伏采用低压配网直接供电给负荷, 减少远距离输电损耗。但是随着分布式光伏装机容量快速增加, 光伏发电天然的间歇性使

配网线路负荷潮流波动增大, 电压调节越来越难。大量的新能源以低压的方式接入, 使得传统的以无源单向辐射为主的低压配网迅速向有源双向交互系统转变。分布式光伏发电具有高随机性、间歇性等特征, 传统的调控方法对于高比例可再生能源渗透面下的调节来说存在很大困难; 园区负荷结构越来越复杂, 用电行为时变性加大了供需匹配的难度。储能系统接入给配网调控带来了新的方式, 但是

协同优化还存在技术难题。根据以上背景,本文从园区绿电直供系统运行特点入手,对目前运行中出现的主要问题进行分析,并提出相应的调节措施。

1 绿电直供系统运行特点

园区绿电直供系统是以园区内部及周边分布式新能源发电设施为依托,利用低压配电网直接向园区内各种用电负荷供电的一种电力供应模式,其电源构成、网络结构、运行方式具有明显的特征。从电源构成上来说,园区绿电直供系统是以分布式光伏发电为主,配以分散式风电,形成了多元绿电协同供应的局面。光伏发电受光照强度、云层遮挡等的影响,出力有明显的日周期性和天气随机性,午间达到峰值,早晚和阴雨天气大幅下降,这种反调峰特性与园区负荷的用电规律存在错位。从网络结构上来说,园区低压配电一般采用 380V、220V 电压等级供电,拓扑结构为辐射状。与传统的配网不同的是,绿电直供系统中功率流向不再只有一种,即从变电站流向用户,而是双向流动,这就给配网的电压分布、保护配置以及运行调控带来了新的要求。就运行方式而言,园区绿电直供系统坚持就地消纳、余电上网的原则,要兼顾经济性、可靠性、环保性这三个目标。园区内负荷种类繁多,既有连续生产的大功率设备,又有空调、照明等可以调节的负荷以及充电桩等新型负荷,各种负荷的用电特性、可调性、响应速度等差别很大,给运行调控留有空间,也增加了难度。

2 园区绿电直供低压配网运行现状及问题

2.1 新能源出力波动问题

园区绿电直供系统新能源出力波动是造成配网安全稳定运行的第一位原因。分布式光伏发电对气象条件影响较大,它的出力在分钟级、小时级、日级等各时间段上都会有较大的波动。从分钟尺度上看,云层快速移动会造成光伏出力在数分钟内急剧下降然后迅速回升,给配网电压稳定性带来直接威胁。日级尺度上光伏出力具有典型的午高峰特征,午间出力急剧增加造成配网节点电压普遍上升,高渗透率分布式光伏接入引发的电压越限问题愈发严重。尤其是在节假日园区负荷较低的时候,光伏大发时段很容易出现电压越上限、功率反向馈入上级电网的情况。大规模分布式光伏接入配电网之后,由于光伏发电具有间歇性、波动性的特点,配电网的潮流分布以及电压稳定性都会受到影响。分散式风电的日际、季节性出力波动比较大,风速的随机变化使得出力不能准确地预测。新能源出力的强波动性不但加大了配网调压、无功补偿的压力,而且使得传统的以历史数据为基础的运行方式不能适应新的工况。

2.2 负荷用电波动问题

园区负荷用电的波动性也是造成绿电直供系统供需不匹配的因素之一。园区负荷在不同的时间模式下总量以及曲线形态存在较大差别,从负荷构成上看既有刚性的连续生产负荷也有空调、照明等柔性负荷和电动汽车充电桩等随机负荷。工业园区负荷种类繁多,用能特性也十分复杂,不同的负荷响应性能也大相径庭。空调负荷受室外温度影响较大,存在明显的季节性特征,电动汽车充电负荷同通勤行为相关联,有早晚两个充电高峰^[1]。更复杂的是一旦出现负荷波动和新能源出力波动的时间错位,就会造成供需失衡。光伏出力高峰出现在午间,用电高峰则多发生在上午和下午的生产时段,这就造成了源荷时序错位,加大了供需平衡的难度。当负荷高峰和新能源出力低谷同时出现的时候,园区就要从大电网购买大量的电力;而当新能源出力高峰和负荷低谷同时出现的时候,就会产生弃光限电的压力。

2.3 电能供需协调能力不足

园区绿电直供系统对于电能供需的协调存在明显的结构性缺陷。目前大部分园区电源、负荷、储能是相对独立地运行着,没有形成一个协调的优化机制。一方面新能源发电调度管理还不健全,分布式光伏以前没有“可观、可测、可控、可调”的有效调控手段。很多早期投运的光伏项目设备老化,没有远程控制功能,光伏出力对配网来说是“黑箱”,调度人员不能实时掌握光伏出力状态,更不能主动调节。另一方面是负荷侧的可调潜力还没有被充分挖掘出来,大量的柔性负荷没有被纳入到统一的调控体系中来,需求响应不能有效地协调系统的动态供需关系。储能系统配置和运行大多以峰谷价差套利为唯一目的,不能充分发挥出它对波动平抑、紧急支撑等各方面的价值。由于源、荷、储三者之间没有实现有效的信息互通和协调联动,系统的整体运行灵活度和经济性受到严重影响,绿电就地消纳率低,弃光现象时有发生。

2.4 配网运行调控效率有待提升

园区绿电直供低压配网运行调控效率成了制约整个系统性能的主要障碍。首先,调控手段比较单一,目前大部分园区仍然采用人工经验的方式进行调压,调压主要依靠有载调压变压器和电容器组投切,响应速度慢、精度低,不能应对新能源出力的快速波动。其次,传统集中式控制存在通信延时、计算量大、控制设备多等现实问题,随着分布式电源、智能终端数量的增加,集中式调控的通信负担、数据压力越来越大,指令的时效性、可靠性越来越难以保证。再次,各个调控子系统之间缺少协同,预测系统、

负荷管理、储能控制和电压优化等常常是由不同的厂商提供、运行在不同的平台上^[2],信息孤岛现象比较严重。园区配网智能化水平参差不齐,大型园区、新建园区已经基本实现了自动化控制,但是中小型园区、老旧园区设备陈旧、通信网络不健全,智能化调控手段不能得到广泛应用。

3 园区绿电直供低压配网运行调控策略

3.1 新能源出力预测与调控

提高新能源出力预测的准确性,是进行主动调控的前提。对于光伏出力的强波动性,园区应该创建起以新能源发电功率预测为根基的日前、日内多时间尺度预测体系。日前尺度上,综合使用数值天气预报、卫星云图、历史出力数据,用深度学习的方法建立预测模型,得到未来 24h 内逐 15min 的光伏出力曲线;日内尺度上,用地面辐照仪等实时数据对日前预测进行滚动修正。在预测的基础上,在电网平衡不能满足、断面越限等情况之下,通过控制分布式光伏上网电力来达到分布式光伏的可观、可测、可控。当预测到午间光伏出力会引发电压越限时,提前利用逆变器无功调节或者有功限功率功能实施柔性控制。采用物联网、光伏接入单元、接口转换器、载波通讯等技术方案,把分布式光伏电源点准确接入到管控网络中,可以对发电状态进行实时感知并进行柔性调节。以某园区为例,部署光伏预测和调控系统后,光伏出力预测误差由原来的 18% 降低到现在的 7%,午间电压越限时长减少了 62%。

3.2 负荷侧柔性调节

充分挖掘负荷侧可调潜力就是实现源荷互动的关键。园区要按照负荷的用电特性及可调节能力来创建分级分类管理机制,把空调、照明、充电桩这些具有弹性调节能力的负荷归入调控资源池。从实施上来说,用分时电价等价格信号来引导用户主动调整用电行为,根据光伏出力信息来引导用户参与需求响应。空调系统可以设置温度上下限、提前预冷预热等手段来达到功率柔性调节的目的;电动汽车充电桩根据优化结果控制充电负荷的并网时段和充电功率,从最大程度上满足用户侧的利益出发来进行优化控制。紧急情况下可以采用直接负荷控制进行快速削减,得到秒级到分钟级的功率响应。负荷侧柔性调节把传统的源随荷动模式变成源荷互动模式,把负荷从被动消费者变成主动的灵活性资源提供者^[3]。以该园区的空调系统、充电桩为需求响应资源池,在午间光伏发电量多的时候,自动将空调设定温度调高,把充电时间往后推迟,从而将高峰负荷减少 800kW 左右,绿电消纳率提高 12 个百分点。

3.3 储能系统协同调控

储能系统是平抑新能源波动、实现能量时移的主要调

节资源。园区应根据新能源装机规模、负荷特性、配网结构等实际情况来安排储能的容量。储能在运行策略上起到三方面的作用,即平抑高频波动、能量时移和紧急支撑。利用储能毫秒级到秒级的响应速度来对光伏短时剧烈波动进行实时补偿,根据分时电价谷时储能、峰时释能的方式,在午间富余电能的时候储存起来,在晚间或者出力不足的时候释放出来。储能模块可以动态调节负载的能量,从而减轻变压器阶段性过载的压力,并且大大提高了分布式光伏的消纳能力。当配网和大电网之间发生故障导致停电的时候,储能可以迅速切换到离网运行模式给重要负荷供电。储能系统要同预测系统、负荷管理系统达成信息共享,自动制订充放电策略和 SOC 区间管理方案,从而达到充放电功率的最优调度。

3.4 源荷储协调运行

源荷储协调运行就是将前面的策略有机地结合起来,形成合力的重要环节,它的基本思想就是把电源、负荷、储能看作一个统一的动态系统,用多目标优化来达到全局最优。在时间尺度上形成“日前计划-日内滚动-实时调整”的三级架构,日前阶段把最小化用户日用电总成本作为目标函数,创建包含光伏、储能以及各种负荷的优化控制模型,日内依靠最新的数据实施滚动修正,实时依靠本地控制器对秒级波动展开自动补偿。从空间尺度上实现台区自治和园区协同的分层调控,以感知、预测、预知、分析、控制为自平衡策略,对台区内光、储、充和负荷进行远程调度,实现光伏电量就地消纳,减少能量跨区域流动^[4]。每个台区作为基本自治单元先就地平衡,不能平衡时用柔性互联装置进行功率互济,把随机波动的新能源变成稳定的产业动力。

3.5 配网电压与功率优化控制

电压、功率的优化控制属于保证配网电能质量、安全的重要方法。随着分布式光伏高比例接入,配电网电压越限、功率波动问题越来越严重,需要从无功优化和有功调节两个方面入手进行综合施策。无功优化上利用逆变器无功支撑来实现分布式电源对配网电压的主动支撑,电压过高时吸收感性无功,过低时发出感性无功,配合储能无功调节和电容器投切来实现分层分区平衡。当电压越限不能用无功来解决的时候,先减少距离越限节点最近的光伏出力,把弃光量控制在最小范围之内。实时控制依靠模型预测控制等先进的算法,对配网未来短时电压走势进行预测,提前采取预防性的控制措施,构建起“源网荷储协同+数字智能调控”的技术架构,从而达到全链条电压精细化的管理目的。五种策略的对比见表 1。

表 1 园区绿电直供低压配网运行调控策略对比

调控策略	调控对象	时间尺度	核心手段	主要目标
新能源出力预测与调控	分布式光伏/风电	日前-日内-实时	深度学习预测、逆变器限功率/无功调节	降低预测误差,提升出力可控性
负荷侧柔性调节	空调/照明/充电桩等	分钟-小时	价格信号引导、直接负荷控制	削峰填谷,提升负荷可调性
储能系统协同调控	电化学储能	秒-小时	充放电策略优化、SOC 区间管理	平抑波动、能量时移、紧急支撑
源荷储协调运行	源+荷+储整体	日前-日内-实时	多目标优化、滚动调度、分层自治	全局经济性与可靠性最优
配网电压与功率优化	配网节点/馈线	秒-分钟	逆变器无功支撑、模型预测控制	电压合格、网损降低、电能质量提升

4 结语

园区绿电直供低压配网系统属于新型电力系统在用户侧的重要实践形式。本文对目前运行中出现的主要问题进行了系统的分析,从五个方面提出相应的调控策略。研究显示,单一种类的控制手段不能解决复杂的运行问题,创建起以“源、荷、储”为协同主体的智能调节体系才是实现绿电高效接纳和配网安全运行的主要途径。随着人工智能、边缘计算等技术不断进步,园区要加快分布式光伏发电接入电网的承载力和调控能力,推进配网设备智能化改造、调控平台集成化建设,把绿电直供作为工业园区低碳转型可靠的支撑。

项目基金:河北省分布式能源应用技术创新中心资助项目(平台编号:SG20182050)。

[参考文献]

- [1]曹宁,陶然.基于大数据的配网负荷预测与优化关键技术研究[J].自动化应用,2025,66(14):113-115.
 - [2]徐珊珊,徐峰,李方健.基于智能化的电力配网工程数字化技术方案研究[J].无线互联科技,2025,22(11):23-26.
 - [3]苏路顺,崔强.工业园区分布式能源站的电气系统配置分析[J].电工电气,2023(6):68-70.
 - [4]徐文进.智能化电力配网工程中数字化技术应用[J].电力设备管理,2025(24):58-60.
- 作者简介:许朔(2000—),男,汉族,河北省唐山市丰润区人,学士学历,毕业于河北科技大学电气工程及其自动化专业,现从事电力设计工作。