

面向碳中和的园区多能互补微电网研究

文/左 涛¹ 刘建涛² 李 敏³ 朱西平⁴

1. 乐山一拉得电网自动化有限公司；2. 西南交通大学；3. 乐山师范学院；4. 西南石油大学

以在乐山一拉得电气工业园区建造的光风充储荷多能互补微电网系统为例，详细分析了园区微电网建设需求和总体设计思路，介绍了由分布式光伏、风力、电动汽车充放电、电池储能和用电负荷组成的光风充储荷一体化微电网系统，保障了园区重要负荷不间断供电，提高了园区节能降耗与降本增效方面的性能。

工业园区是实现碳中和能源战略目标的中坚力量，我国近70%的工业用能集中在工业园区，随着绿色环保、多重融合、高效智能等微电网新理念的不断深化，在园区根据用电需求建造一套由分布式电源、储能电源、电动汽车充放电装置、监控保护装置和用电负荷等电力设备组成的，通过发用电能量管理与微电网策略控制，将光风充储荷等多种元素进行多重融合和柔性互联互通的多能互补微电网系统，对于最大限度地实现可再生能源在工业园区高效利用，保障园区电力供需平衡，确保园区重要负荷不间断供电，促进园区节能降耗与降本增效，打造面向碳中和的低碳园区具有重大意义。

本文以四川乐山一拉得电网自动化有限公司电气工业园建造的光风充储荷多能互补微电网系统为例，对微电网在工业园区的实际应用进行了详细的探讨和研究。

园区微电网建设需求分析与总体设计

该工业园区多能互补微电网系统以解决多种新

能源柔性互联互通为依托，建设规模包含20 kW分布式光伏发电系统、5 kW分布式风力发电系统、6×10 kW电动汽车充放电系统、80 kW·h电池储能系统、35 kW重要负荷（园区办公楼照明和计算机电源等）和多站合一智慧能源舱等部分。

1. 园区微电网建设需求分析

工业园区希望通过投资建设多能互补微电网发挥两方面的作用：一是实现园区重要负荷无感知不间断供电，当配电网由于计划性断电或外部扰动导致的非计划性断电时，系统能够在20 ms的时间内由并网转到独立运行模式（即孤岛运行状态），迅速恢复供电并持续供电2 h，使重要负荷不间断运行；二是光伏发电、风力发电、电动汽车充放电和电池储能等多种能源系统实现柔性互联互通，通过高峰时段参与削峰填谷，实现节能降耗、降本增效，取得一定的社会效益。为此，园区微电网要具备各种运行策略下的能量路由、信息交互、负荷管理、能量优化、电能质量调节、并离网运行和微电网调度等多种功能，实现全生命周期内的安全、可靠、经济、高效及自治运行。

基金项目：乐山市2019年重点科技计划项目（新能源微网箱式变电站研发项目）（19GZD021）。

2. 微电网系统总体设计方案

2.1 辐射型拓扑结构设计

拓扑结构是指网络中的结构设计，包含电气内部接线网络、光伏发电、风力发电、电动汽车充放电、电池储能和用电负荷在网络中所处的位置。根据微电网的工作特点，拓扑结构通常有辐射型拓扑结构、环型拓扑结构和中心环型拓扑结构三种。综

合考虑园区分布式电源和交直流负荷的分布特性，采用辐射型拓扑结构。该拓扑结构中，光伏、风力发电系统对园区配电网容量进行补给，电动汽车充放电和电池储能参与削峰填谷，使配电网负荷曲线趋于平缓，降低了电力负荷需求，缓解了配电容量增容矛盾。

多能互补微电网系统拓扑结构如图1所示。



图1 园区微电网系统拓扑结构

2.2 交直流混联架构设计

传统微电网均以交流供电为主，光伏发电需要经过逆变、升压、降压后才能实现电能利用，为了减少电能转换的中间环节，提高能源利用效率，系统电压母线采用AC 380 V与DC 765 V混联的架构，属直流性质的光伏发电、电动汽车充放电和电池储能直接接引至直流母线，属交流性质的风力发电、重要用电负荷直接接引至交流母线。

2.3 协调控制策略设计

微电网各子系统通过电力电子装置实现能量的转换，并提供必要的控制。因此，微电网的运行离不开稳定且完善的控制策略，国内外对于微电网控制策略的研究主要集中在两个方向：一是微电网与配电网并网运行模式下，各级微电源系统的控制；二是当配电网系统遭遇外部扰动（故障）时，微电网系统基于本地信息自主、迅速做出反应，微电网脱离配电网进入孤岛运行模式下各级微电源系统的控制。分为并网启动策略、并网稳定运行策略、孤岛稳定运行策略、孤转并策略、并转孤策略（计划性）和并转孤策略（非计划性）六种。如图2

所示。

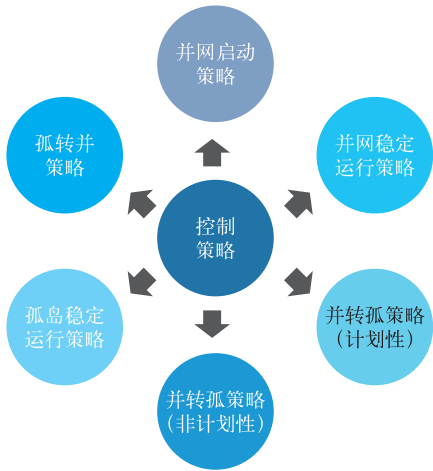


图2 系统运行控制策略

(1) 并网稳定运行策略

微电网并网稳定运行按照“自发自用、余电上网、错峰用电”的运行模式。策略基本原则是微电网与本地配电网连接，光伏发电系统工作于最大功率点跟踪（MPPT）控制，风力发电系统通过尾舵对风获得最大风能，在峰谷分时电价机制下[乐山市峰

电价0.85元/（kW·h），谷电价0.32元/（kW·h）]，有两种运行场景。

- 1）光伏和风力充足，出力大于负荷需求时，给负荷供电，多余的电能为电动汽车和储能电池充电，充满电后，剩余电能全部上网。
- 2）光伏和风力不足，出力小于负荷需求时，在电价高峰1时段（07:00—11:00），光伏、风力、电动汽车、储能电池和配电网按照优先顺序对负荷供电，当电动汽车和储能电池放电深度DOD=80%时，电动汽车和储能电池停止放电，由光伏、风

力和配电网共同对负荷供电；在电价高峰2时段（19:00—23:00），风力、配电网共同对负荷供电，若风力发电留有余量，则为电动汽车和储能电池充电；在夜间电价低谷时段（23:00—次日07:00），风力和配电网共同为负荷供电，为电动汽车和储能电池充电；在电价平价时段（11:00—19:00），光伏、风力和配电网共同对负荷供电，电动汽车和储能电池接受光伏和风力的剩余电量充电。

微电网系统充放电策略见表1。

表1 系统充放电策略

时间	电价水平	光伏发电	风力发电	电动汽车	储能电池	负荷受电电源	备注
23:00—次日07:00	谷电	无	全部自用	市电充电	市电充电	风力+市电	
07:00—11:00	峰电	全部自用	全部自用	放电	放电	光伏+风力+电动汽车+储能电池+市电	
11:00—19:00	平价	全部自用	全部自用	光风余量充电	光风余量充电	光伏+风力+市电	
19:00—23:00	峰电	无	全部自用	风力余量充电	风力余量充电	风力+市电	

（2）孤岛稳定运行策略

在孤岛运行时，电动汽车和储能电池作为主电源向负荷供电，功率输出自动补偿光伏、风力出力与重要负荷之间的差额，从而维持微电网功率平衡。孤岛运行的时间取决于微电网系统内分布式电源的发电能力和储能的配备，按照GB/T的要求，向负荷持续供电时间不低于2 h。同时，当微电网遭到配电网停电或者内部故障且进入全黑状态时，微电网要具备黑启动能力，不依靠配电网或其他微电网的帮助，仅通过储能电池作为主电源进行自启动，在储能设备稳定住母线电压后，带动微电网中不具备自启动能力的光伏发电和风力发电设备，从而逐步恢复微电网的供电能力和范围，最终实现整个微电网的重新启动。

（3）孤转并策略

当孤岛运行的微电网与配电网并网前，微电网启动准同期并网控制，当微电网电压偏差满足GB/T 12325，电压波动和闪变满足GB/T 12326，谐波满足GB/T 14549，三相电压不平衡度满足GB/T 15543时，并离网快速切换开关闭合，在20 ms内完成由孤岛切换到并网的切换过渡。

（4）并转孤策略（计划性与非计划性）

当配电网因计划性停电或遭遇外部故障造成市电失电时，微电网并离网快速切换开关断开，20 ms

内完成由并网切换到孤岛的切换过渡，利用分布式发电、电动汽车放电和电池储能，保持微电网电压母线稳定，重要负荷受电不受影响，实现系统并离网切换过程无感知运行。

2.4 多站合一智慧能源舱设计

常规微电网系统的分布式发电系统、充电系统、储能系统和变配电系统等子系统的管控部分均各自独立分散布置在单体柜内，单体柜集中放置在土建结构的配电房内，由于土建配电房现场施工流程和建站模式上的缺陷，常规微电网存在系统集成度低、设备运行环境差、施工难度大、建设周期长且占地面积大等诸多弊端。园区微电网系统利用预制舱式产品集成化、模块化的理念，将变配电系统、光伏发电系统、风力发电系统、电动汽车充放电系统和电池储能系统等子系统进行箱柜一体化结构设计，内部采用模块化组装，高度集成在一台预制式舱体内，形成一套完整的多站合一的智慧能源舱式产品，使其成为一个具备能量路由、信息交互、负荷管理、能量优化、电能质量调节、并离网运行和微电网调度等多功能于一体的能量魔方，实现对多种能源的协调控制与交互；同时满足微电网建设系统集成化、装配模块化、建设过程工厂化和施工简单化的要求。

多站合一智慧能源舱如图3所示，其内部结构布

置如图4所示。



图3 多站合一智慧能源舱



图4 多站合一智慧能源舱内景图

多能互补微电网系统硬件组成

多能互补微电网系统包括光伏发电系统、风力发电系统、电动汽车充放电系统、电池储能系统和智慧能源舱等。

1. 光伏发电系统

光伏发电系统由能源舱外光伏组件与能源舱内光伏控制柜模块组成。由于单晶硅光伏电池相较于多晶硅光伏电池具有功率密度大、光电转换效率高优点，以及综合考虑技术成熟性、价格和服务等，舱外光伏组件采用24串3并共72块TPS-M6U (60)-290 W型单晶硅光伏电池组件，并且为了达到最佳的能源供给，光伏板水平夹角为 21° ，光伏系统出力随光照强度及温度变化而变化。

能源舱内光伏控制柜模块包含光伏控制器、直流断路器等。光伏控制器采用扰动观察法(P&O)，如图5所示，通过改变光伏电池的直流电压实现输出功率变化，比较不同电压下的输出功率，直至搜索到最高的功率点，实现最大功率点跟

踪(MPPT)，并控制光伏发电系统启停、电压调节、反孤岛保护和电能质量调整等。

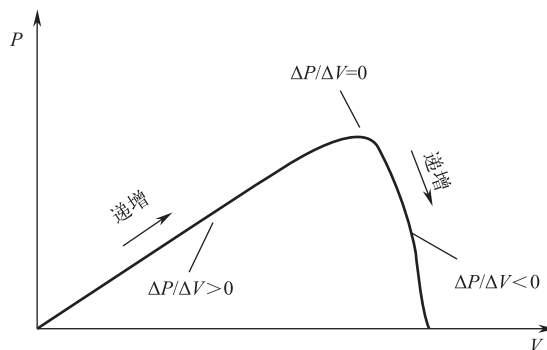


图5 光伏控制器P&O搜索示意图

2. 风力发电系统

风力发电系统由舱外XG-5 kW型360 V变桨距风力发电机和舱内风电控制柜模块组成。变桨距风力发电机具有全气候应用、高效率、高安全性等特点。舱内风电控制柜模块包含风电并网控制一体机、直流断路器等，风电并网控制一体机与风力发电机配合使用，能够将发电机输出的直流电进行整流、逆变和汇流后接入交流母线。

3. 电动汽车充放电系统

电动汽车充放电系统由能源舱外落地式直流充电桩和能源舱内双向充放电控制柜模块组成。落地式直流充电桩是智慧能源舱与电动汽车能量双向流动和交互的接口设备，以落地式安装居多，也有壁挂式、车档式等不同安装方式。舱内双向充放电控制柜模块包含1台功率分配单元(PDU)以及 6×10 kW双向DC/DC充电模块。直流PDU采用矩阵式连接，大大提高了电力电子模块的利用率，可对直流电能的流动进行双向控制与计量，使功率输出和分配更具柔性，从而实现电动汽车充放电管理、CMS柔性充电、主动防护故障处理和充电优先级等功能。双向DC/DC充电模块是电动汽车与电网能量交互的控制开关，具有体积小、噪声小、抗高温、高效率 and 宽电压范围等特点，具有功率双向流动能力，同时模块内含有双向直流变压器(BDCT)，能够实现微电网与配电网两侧之间高频隔离和电压变换。

4. 电池储能系统

电池储能系统直接接引至直流母线，可再生能源富足时实现对电能的储存；电网负荷高峰时释放

电能，实现调峰削峰，减小负荷峰谷差；配电网失电时，稳定直流母线电压，保证重要负荷不间断供电；有效应对风光等可再生能源的随机波动性和不确定性，减少可再生能源接入电网时带来的波动，提高供电可靠性和供电质量，赋予了电能和时间维度上的转移。

电池储能系统集成在智慧能源舱内，由储能电池簇（柜）和储能控制柜模块组成。由于磷酸铁锂电池的电化学储能性能相较于钴酸锂电池、锰酸锂电池、三元锂电池和钛酸锂电池，具有功率密度高、输出电压高、输出电压稳定、充放电循环性能好、循环寿命长、工作温度范围广和安全可靠等优点，故舱内电池储能采用384个单体额定容量5 A·h、额定电压3.2 V的磷酸铁锂电池单体经过串并联组合，形成标称电压为614.4 V、标称容量为150 A·h和最大电量为92.16 kW·h的储能电池簇（柜）。储能控制柜模块包含DC/DC变换模块、直流断路器等。其中DC/DC变换模块功率达到60 kW，对直流微电网与储能单元进行大功率电能交互控制。

多能互补微电网系统软件组成

系统软件管理部分包括能量管理系统和电动汽车群管群控系统。

1. 能量管理系统

主要负责监视和控制配电负荷及接入的光伏、风力、电动汽车和储能电池的运行情况，并与后台系统、充电云平台和能源云平台进行远程交互，实现远程监测、管理、计量、自动计费和电网协同调度。同时，监测系统并网点的用电量、余量上网的光伏发电量及充放电、光伏收益，帮助园区运营人员做出精准的电能使用决策，最大限度降低企业用能成本。

能量管理系统的主界面主要包括园区配电、能耗概况、光伏监控、用电分布、报表查询和告警管理几个部分，如图6所示。可以实时查看各种可调配负荷的状况，当天园区光伏、风力可再生能源发电情况，以及当日的用电量、节电量，实现对园区配电设备运行状态的全方位在线监控和电气设备的全生命周期智能运维管理。



图6 能量管理系统主界面

2. 电动汽车群管群控系统

电动汽车群管群控系统是一套包含电能交互层、智能监控层和数据平台层的智能充电系统，如图7所示。电能交互层包含电网接入、变电设备、配电设备、充放电设备和电动车接口等，设备集成在双向充放电控制柜模块内，完成高低压供电和交直流充电功能，并实现每路的自动检测、保护和计量计费功能。智能监控层通过群管群控实现智能微

调度、电网安全管理和负荷平衡，并创新柔性充电技术，提高充电效率和模块利用率，通过对电池的主动充电管理，对电池进行全寿命智能充电，电池寿命大幅提高。数据平台层基于移动互联技术和大数据分析技术，从业务接入、业务支撑、数据交换、系统集成和增值服务五个方面，通过APP人机对话实现运营监控、充电服务管理、租车修车服务、云支付和电子电商等功能。

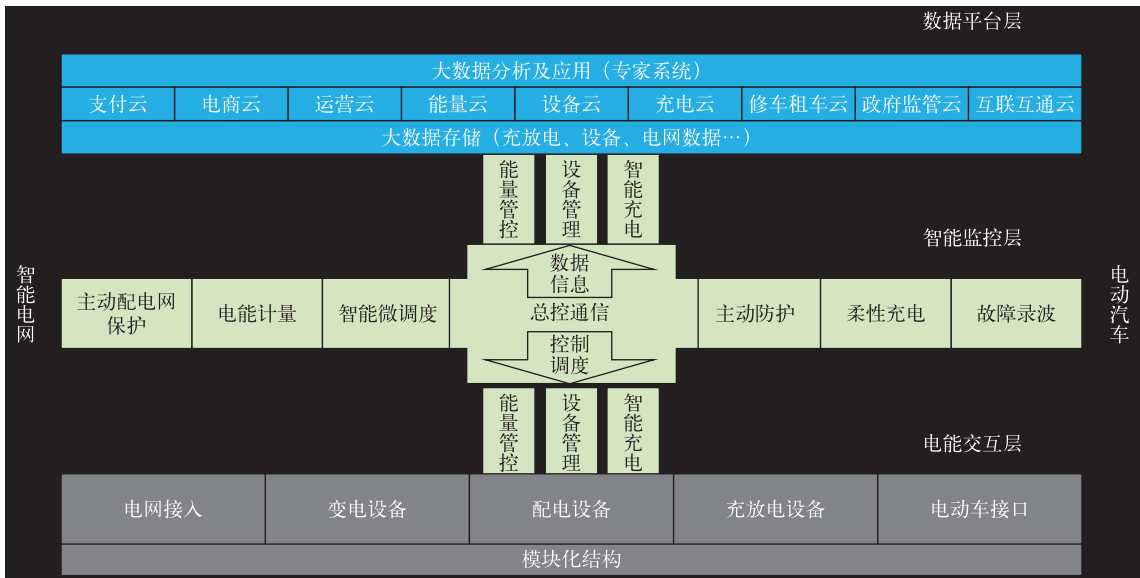


图7 电动汽车充放电技术体系

多能互补微电网系统关键技术

1. 交直流混联微电网技术

本工业园区的微电网架构采用交直流混联的形式，由交流子网、直流子网以及DC/AC四象限变换器组成，融合了交流微电网和直流微电网各自优点，具有损耗小、效率高、灵活性强和电网改造成本低等特点，利于分布式电源的接入，提高了系统的稳定性、可靠性、安全性和经济性。在系统拓扑结构中，将直流电驱动的光伏发电、电动汽车充放电和电池储能直接接引至直流子网，风力发电系统、配电系统直接接引至交流子网，省去了传统微电网中大量直流到交流再到直流的变换环节和交流系统同相、同频和同幅过程，减少了因多层级变换而产生的电能损耗，交直流子网通过DC/AC四象限变换器进行功率传输和能量多向交互流动。DC/AC四象限变换器是实现能量路由与互联的核心器件，整合了逆变、整流、SVG、APF、离网运行、储能变流器、光伏逆变器等电力电子产品的多种功能，具有正向、反向工作功能，以高效、柔性、经济和可控的方式将传统垂直刚性结构配电网柔性化和扁平化。

2. 电动汽车双向充放电技术

电动汽车是支撑电网运行的分布式移动储能资源。作为负荷，电动汽车可以消纳可再生能源的间歇性发电，减少弃风、弃光现象的发生；作为

电源，电动汽车是零成本的移动储能单元，能够协助电网削峰填谷，通过低谷充电、高峰卖电，实现电动汽车和配电网的双向能量交互，同时也利用配电网峰谷电价差获取直接经济效益。园区电动汽车要实现双向能量交互，必须依靠双向DC/DC充电模块的能量双向充放电控制技术，相较于电动汽车传统的单向充电技术，双向充放电采用具备低电磁干扰、小关断电流、控制策略简单和转换效率高的CLLC-BDCT双向直流电压器拓扑及四象限控制技术，能够提供更宽的功率变换范围，支持对端口电压、电流及其变化速率等进行更灵活的调整，适应并改善电池侧的不均衡性和电网侧的电能质量。

3. 新型高效电力电子器件技术

电力电子器件是电动汽车双向充放电中实现电能变换和控制的核心，是影响充放电效率、可靠性、安全性及性价比的关键基础。以氮化镓（GaN）、碳化硅（SiC）和氮化铝（AlN）为代表的第三代宽禁带半导体材料，其带隙宽度不小于2.3eV，使导体材料中的电子跃迁到导带所需的能量变大，不容易成为导体，从而使导体材料承受温度极限和电压等级的水平和能力提高。其良好的耐高温、抗辐射、击穿电场强度、化学稳定性等性能，非常适合于制作抗辐射、高频、大功率和高密度集成的电子器件，从而使应用了新型高效电力电子器件的双向DC/DC充电模块在更高电压等级

(1000 V+)、更高功率密度 (60 W/in³) 和更高峰值效率 (98%) 等诸多性能方面得到突破。

4. 模块化预制舱集成技术

针对传统微电网设计和建设的弊端, 园区微电网采用模块化预制舱集成技术, 将变配电系统、光伏发电系统、风力发电系统、电动汽车充放电系统和电池储能系统按照统一标准和统一模数的箱柜一体化结构设计, 各系统通过模块化组装和连接, 高度集成在一台可移动、防腐防潮、隔热隔音和抗冲击的预制式舱体内, 从而形成一套完整多站合一的智慧能源舱产品, 实现了工业园区微电网建设系统集成化、装配模块化、建设过程工厂化和施工简单化。

多能互补微电网系统应用效果验证

1. 无感知不间断供电效果

园区多能互补微电网系统建成投运后, 在某次配电网非计划突然停电时, 系统瞬时感知, 按照并转孤策略, 在20 ms内完成了由并网切换到孤岛运行的状态转化, 并利用分布式发电、电动汽车放电和电池储能放电, 保持了系统电压母线稳定并持续供电2 h, 实现了园区重要负荷无感知不间断供电。

2. 削峰填谷、降本增效效果

以该园区某天的实际用电为例, 展示系统的削峰填谷、降本增效效果。

图8为整个园区的用能情况, 用电负荷主要集中在日间, 且负荷变化趋势与电价峰值时段基本吻合, 在电价高峰时段负荷逐步增大, 11时左右达到峰值, 午后逐渐下降。



图8 园区日负荷曲线

图9为电动汽车不接受调度, 处于插枪后立即启动充电的无序充电状态, 导致园区用电负荷在峰值电价时进一步增加。

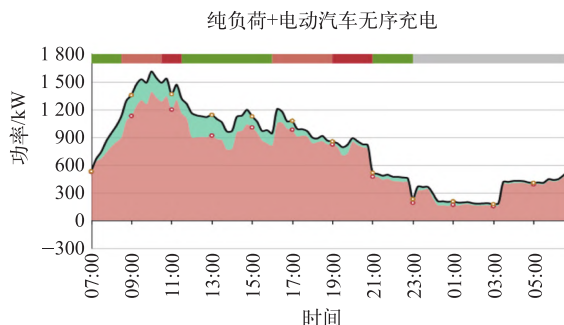


图9 纯负荷+电动汽车无序充电负荷曲线

图10为光伏和风力参加削峰调峰, 发出的电能最大化自发自用, 减少配电网购入电量, 可使负荷功率和购入电价下降。

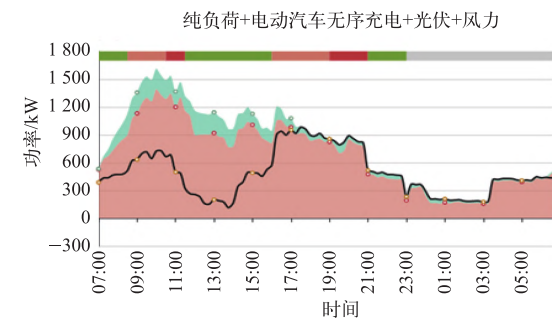


图10 纯负荷+电动汽车无序充电+光伏+风力负荷曲线

图11为在图10的基础上, 电动汽车接受电网调度, 实行群管群控的有序充放电, 并增加电池储能的低充高放、削峰调峰功能, 使负荷功率和购入电价进一步下降。

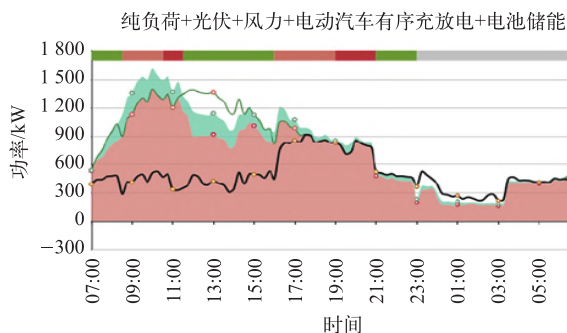


图11 纯负荷+光伏+风力+电动汽车有序充放电+电池储能负荷曲线

由此可见, 多能互补微电网系统将多种能源系统柔性互联互通, 削峰填谷, 实现节能降耗、降本增效的作用和效果主要体现在: ①项目收益构成为光伏自用收益+风电自用收益+电动汽车参与削峰填谷收益+电池储能参与削峰填谷收益; ②分布式

光伏发电系统每年发电量约20 000 kW·h，光伏电量全部自发自用，结合乐山市峰值电价，每年节约电费约1.7万元；分布式风力发电系统每年发电量约8 000 kW·h，风力电量全部自发自用，每年节约电费约0.85万元；电动汽车每天参与削峰填谷1次，每年放电收益约1.2万元；80 kW·h电池储能系统每天参与削峰填谷1次，日均按80%放电深度，乐山市峰谷电价差按0.53元计算，电池储能每年放电收益约1.24万元，项目年盈利约5万元，具有较好的经济收益。

微电网主要成本为：20 kW分布式光伏发电系统光伏发电约4元/kW，光伏发电系统成本为20 kW×4 kW=8万元，5 kW分布式风力发电系统成本3万元，80 kW·h电池储能系统6万元，多站合一智慧能源舱（含配套后台软件）8万元，总计25万元，成本回收年限为25÷5=5年。

需要说明的是，四川乐山地区属于弱光、弱风地域，光伏和风力发电效益并不明显，如果把该系统应用到光照和风力资源较好的区域，则会取得较好的经济收益。

结束语

本文以在乐山一拉得电气工业园区建造的光风充储荷多能互补微电网系统为例，详细分析了园区微电网建设需求和总体设计思路，介绍了由分布式光伏、风力、电动汽车充放电、电池储能和用电负荷构成的光风充储荷一体化微电网系统的硬件和软件，阐明了支持微电网系统建设和运行的关键核心技术，并通过实际应用效果对微电网性能进行了验证。可以得出，园区多能互补微电网系统可以将光风充储荷等多种元素进行多重融合和柔性互联互通与控制，实现了可再生能源在工业园区的最大高效利用，保障了园区重要负荷不间断供电，促进了园区节能降耗与降本增效，对打造面向碳中和的低碳工业园区具有重大的示范引领作用。EA

（收稿日期：2023-03-30）

参考文献

- [1] 祝振鹏. 新能源微电网发展概要[J]. 供用电, 2017(2): 23-27.
- [2] 微电网接入电力系统技术规定: GB/T 33589—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [3] 张丽荣, 曲鸣飞. 风电直流微电网的拓扑结构研究[J]. 中国新通信, 2018, 20(3): 207.
- [4] 冯恽彬, 汪科, 葛晓慧, 等. 交直流混合微电网系统设计与控制架构分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018(23): 143-150.
- [5] 李钢, 赵静, 姚振纪. 智能微电网的控制策略研究综述[J]. 电工电气, 2012(1): 14-18.
- [6] 李锋. 光储充一体化智能微电网工程应用技术研究[J]. 钢铁技术, 2019(2): 53-56.
- [7] 牛曙斌, 张辉, 毛知新. 需求侧光储一体化微电网的应用研究[J]. 通信电源技术, 2018(2): 26-27.
- [8] 杨荣, 赵兴勇, 赵钰彬, 等. 一种适用于微电网黑启动的改进微源电压控制策略[J]. 可再生能源, 2019, 37(10): 1504-1510.
- [9] 牟龙华, 夏明栋, 刘仲. 微电网的黑启动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014(22): 32-37.
- [10] 单栋梁, 刘向立, 徐利凯, 等. 用户侧光储充一体化智能微电网系统应用研究[J]. 电器与能效管理技术, 2020(2): 41-46.
- [11] 王飞飞, 吴燕, 王锦涵, 等. 新能源微电网供电在产业园区建设中的应用研究[J]. 机电信息, 2019(17): 54-55.
- [12] 梁继深. 工业园区微电网“源-网-荷-车-储”协同运行优化研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
- [13] 解磊, 王建基, 耿敏, 等. 光储充一体化电站建设关键技术研究[J]. 通信电源技术, 2018(12): 26-27.
- [14] 王少林, 王刚, 王晓磊, 等. 基于改进蜂群算法的电动汽车微电网优化调度[J]. 电气应用, 2022, 41(4): 63-70.
- [15] 班国邦, 徐玉韬. 国内首个五端柔性直流配电示范工程进入试运行(之二)[J]. 电力大数据, 2018(10): 93.
- [16] 吕正, 颜湘武. 直流纳电网中用于高频隔离的CLLC型双向直流变压器的模态分析与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2016(21): 5918-5929.
- [17] 张琪琪, 莫峻, 高志展, 等. 基于多代理的微电网需求响应机制研究[J]. 电气应用, 2021, 40(5): 61-67.