

# 典型园区综合能源示范系统智能微网储能配置设计效果研究

文/国网（北京）综合能源规划设计研究院有限公司 王泰棚 张若思 陈征 蒋丽君 陈晶鑫

以典型园区综合能源项目为例，研究储能技术在综合能源智能微电网中的应用情况，通过介绍典型案例的建设情况、微网架构设计和储能配置策略等系统化建设方案，研究储能系统在微网运行中的作用和效果，介绍多类型储能介质性能及经济性评价分析储能配置前后微网出力及负载变化比较，论证检验储能在微网中的调节作用。

储能是电力系统“采—发—输—配—用—储”的重要组成部分，是构建新能源微网的基础，通过储能系统对电能进行缓冲，可以优化电能质量和提高新能源微电网的稳定性。近年来，我国电化学储能（以下简称“储能”）技术应用快速发展，已在电力系统各个环节得到示范应用。本文就以典型案例的形式，介绍在具体某园区综合能源智能微电网项目中如何进行储能配置，各类型电池比选以及运行效果评价。

## 微电网场景简介

### 1. 微电网配置情况

某典型园区综合能源示范项目是国家发改委、能源局批准的全国首批综合能源微电网示范项目。2018年4月开工，2018年9月20日试运行，2018年12月18日投入使用。项目建设了10栋公寓楼空气源热泵辅助太阳能热水系统、约2 MW光伏发电系统（单晶、多晶、BHPV和高效组件等多种组件）、300 kW风力发电系统、1套混合储能系统，49 kW光电一体化充电站以及一体化智慧路灯；1套智慧能源管理系统，实现建筑能效管理、综合节能管理和源网荷储协调运行。

### 2. 微电网运行方式

项目微网部分主要由分布于1#~3#公共教学

楼、农机学院、学术交流中心屋顶上的光伏和坐落于校园西北角的风机，以及位于图文信息综合大楼的储能和控制中心组成。该项目智能微电网建设形式为风光储一体化建设。

其中光伏装机容量为405 kW，考虑组件朝向、监督、遮挡及发电效率等因素，预计整个光伏系统峰值功率不超过285 kW，日发电量峰值不超过1 710 kW·h。光伏组件连接（部分需要汇流箱）至光伏逆变器，逆变器经可控开关连接至微网一次母线。全系统共11台逆变器，每台逆变器均可自动控制，限功率运行。

风机装机容量约为330 kW，考虑组件风速、风向和风切换角等因素，预计整个风机风电系统峰值功率不超过90 kW，日发电量不超过550 kW·h。若做模式切换时，可根据需要切除部分光伏、风机，以保证系统内能量前后平衡；离网模式下，若发电量大于用电量时，同样需要切除部分光伏、风机。另外，每台逆变器AC侧均配置一个小型断路器，方便检修同时可以手动控制单台逆变器的起停。

微网一次母线400 V，经可控开关，通过变压器升压变电至校园10 kV母线，实现并网。在并网模式下，开关闭合，微网多发电量通过升压变压器送至校园10 kV母线实现消纳；离网模式下，开

关断开，微网内部持续供电。

综合考虑能源高效利用和多系统集中展示需要，智能微网工作站计划设立在新校区能源中心与动力馆，与图文信息综合大楼内的微网运行控制设备间通过校园内网光纤实现远距离通信。多目标优化控制如图1所示。



图1 多目标优化控制

### 3. 微电网接入方式

微网系统采用AC 380 V电压接入图文信息综合大楼10 kV变电站低压母线。其中，1#公共教学楼、学术交流及事务中心和能机学院3栋楼的光伏发电系统分别接入微网光储一体机直流端；2#公共教学楼、3#公共教学楼和图文信息综合大楼3栋楼光伏发电系统分别经逆变器逆变后接入微网交流母线；铅炭电池分别接入微网光储一体机直流端，超级电容电池经过储能逆变器接入微网交流母线；风力发电机接入微网交流母线。接入微网的负荷分布在图文信息综合大楼及2#公共教学楼，其中校园网机房约250 kW属于1级负荷，其他均为2级负荷。采用交流380 V双母线接线，本楼10 kV变电站维持现有接线方式不变。如图2所示。



图2 接入方式

## 储能系统设计与经济性评价

### 1. 储能电池系统简介

#### 1) 铅炭电池：铅从传统的铅酸电池演进出

来的技术，它是在铅酸电池的负极中加入了活性炭，能够显著提高铅酸电池的寿命。使用了铅炭技术后，铅炭电池的性能远远优于传统的铅酸蓄电池，可应用于新能源车辆中，如：混合动力汽车、电动自行车等领域；也可用于新能源储能领域，如风光发电储能等。

2) 磷酸铁锂电池：是指用磷酸铁锂作为正极材料的锂离子电池，具有寿命长、高温性能好、大容量、无记忆效应、重量轻且更环保等特点，相较于传统铅酸电池，性能价格比理论上为铅酸电池的4倍以上，由于它的性能特别适于动力方面的应用，则在名称中加入“动力”两字，即磷酸铁锂动力电池。也有人把它称为“锂铁（LiFe）动力电池”。

3) 超级电容电池：是依据双电层原理直接存储电能，是一种介于常规电容器和电池之间的储能装置，充放电过程具有良好的可逆性，可以反复储能数10万次，超级电容储能的效率达到70%~80%。

### 2. 储能电池运行效果经济性分析

典型电池储能系统技术经济指标如表1所示。

### 3. 储能配置原则

#### (1) 容量配比原则

1) 微电网系统的分布式发电容量一般按照就地消纳原则进行确定。

2) 分布式发电与储能的容量配比应充分考虑到当地自然资源的特性，使得微电网总体输出功率尽量平稳、波动性小。

3) 在考虑经济性的前提下，储能系统的容量在极端情况下保证微电网系统内重要负荷持续供电一定时间。

在微网系统中，储能在正常并网时主要起到平滑分布式发电出力、进行削峰填谷的作用，在紧急情况和一些特定控制条件下，储能起到备用电源的作用。

储能的容量配置也是基于以上目的而进行的，因此，在考虑经济性的前提下，结合光伏、风力发电功率的估算和上海地区的供电可靠性指标，本方案配置容量为100 kW×2 h磷酸铁锂电池，150 kW×2 h铅炭电池；同时考虑到离网运行启动电动机类负载的冲击电流，另配置100 kW×10 s的超级电容储能，以满足急速调功需求。

#### (2) 运行方式

白天光伏所发电能除给用户负荷供电外，多

表1 典型电池储能系统技术经济指标

| 电池类型   | 能量密度<br>(W·h)/kg | 功率密度<br>(W/kg) | 能量效率<br>(%) | 倍率性能<br>(最快充满电时间) | 循环寿命<br>/次   | 成本<br>(元/kW·h) |
|--------|------------------|----------------|-------------|-------------------|--------------|----------------|
| 磷酸铁锂电池 | 70~200           | 1 000          | 85~98       | 15 min            | 2 000~10 000 | 1000~3000      |
| 铅炭电池   | 40               | 300            | 80~90       | 5 h               | 2 000~4 000  | 800~1300       |
| 超级电容电池 | 1.5~2.5          | 1 000~10 000   | 90~95       | 1 ms-1 min        | 1 000 000    | 9 000~13 000   |

余电能储存到储能系统中；晚上适量安排储能系统释放一部分电能，以便第二天白天有适当的空间进行再次储能。结合微电网运行控制对储能的要求，本项目中的储能采用铅炭电池，用于平滑新能源的发电输出，提高新能源发电的输出特性和出力可控性，另添加超级电容储能以配合。

## 储能效果验证

### 1. 验证储能对重要负荷的保障

根据项配置原则，储能配置总容量为350 kW，其中电化学储能电池总容量250 kW×2 h，超级电容总容量为100 kW×10 s，满足校园Ⅰ级负荷机房的不间断供电工作。如表2、表3所示。

表2 储能配置

| 微网用电单元   | 容量/kW | 备注               |
|----------|-------|------------------|
| 图文信息综合大楼 | 769.5 | Ⅰ级负荷校园机房负荷250 kW |
| 2#公共教学楼  | 447   | 其他为Ⅱ级负荷          |

表3 负荷

| 负荷特性 | 容量/kW | 备注 | 开关 |
|------|-------|----|----|
| 冲击负荷 | 75    | 空调 | S1 |
| Ⅰ级负荷 | 150   | 机房 | S3 |
| Ⅱ级负荷 | 991.5 | 照明 | S2 |

2019年4月3日时23，某大学进行断电测试，机房所有系统运行正常，未发现断点数据，证明储能对重要负荷有保障作用。

### 2. 验证储能对光伏效率的提高

据气象信息某市2019年4月平均日出时间为北京时间06：49，日落时间为北京时间16：56，因此一天17：00~次日06：50分之间为非日照时间，光伏组件不出力。若该时间段微网用电负荷并网开关仍有电量并网，则说明该段时间并网电量为储能系统出力，即可证明储能系统对光伏发电效率有提高。

验证方法：通过调用微电网管理系统4月1日~4月30日，典型时刻18：00，市电与微网分界点，断路器110瞬时电量数据，若某一时刻存在数据为负，则说明此时微网仍处于发电上网状态，而此时又无日照，光伏组件无法发电，则说明并网电量为储能设备存储电量即光伏发电富裕电量。

结论：通过数据统计，4月共有9天在日落后微网仍在发电，证明储能在做功及提高了光伏利用效率。如表4所示。

### 3. 验证对电能质量的提高

在微电网中，由于要把其他形式的DG发出的电能变成合适的交流电，导致微电网中有很多电力电子装置。同时，微电网的负荷中也可能含有很多无功和非线性负荷，它们在运行时都会严重恶化微电网的电能质量。在微电网运行时，这些电力电子装置会不断地开通和关闭，从而产生大量的谐波，进而影响到负荷侧负荷的正常运行。同时，微电网中无功和非线性负荷在运行时还会从电网中吸收无功，从而导致微电网的无功不足，进而影响微电网的正常运行。因而需要微电网在运行时候，既可以从大电网获得电能，也可以向大电网输送电能。由于风电、光伏等可再生能源具有间歇性，其输出功率会有波动，而且负荷也会突变，因此需要在微电网中增加一个能量存储装置，解决风力发电、光伏发电输出功率的波动性。

验证方法：通过比较含有储能装置的微网并网开关D110上网侧供电质量与其他非微网光伏并网点电压质量，判断储能装置对微网电压质量的积极影响。

选择4月4日，2#、3#教学楼光伏直接并网开关K2侧功率因数情况与微网并网点总开关D110功率因数变化情况比较。

结论：通过比较K2侧功率因数波动曲线较D110侧较大，且功率因数低于微网，说明微网储能对电网质量有积极作用。如图3所示。

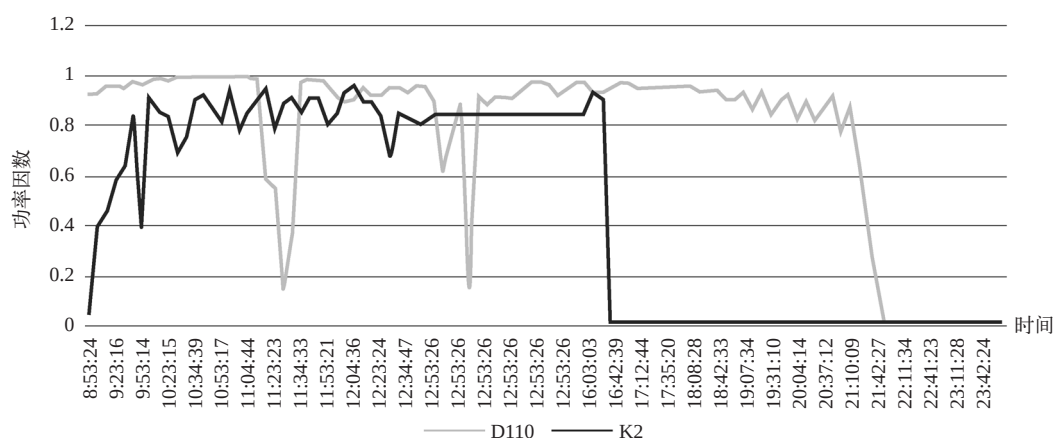
### 4. 验证储能电池对新能源平滑出力的价值

为降低光伏、风电等新能源功率的随机波动性对电网造成的不利影响，该项目采用低通滤波算法平滑并网新能源输出有功功率的风储联合运行控制策略，通过研究储能电池-超级电容器混合储能的运行数据，以及对比同时段非微网功率运行情况，评价储能对新能源平滑效果的影响。

验证方法：选择某一天风机出力最大的一天，微网并网开关D110侧，功率变化曲线与同时

表4 4月数据统计

| 日期    | 时间       | 110开关计量情况   | 判断 | 此时微网状态 | 备注  |
|-------|----------|-------------|----|--------|-----|
| 4月1日  | 18:12:09 | 15.345284   | 正  | 用电     | 星期一 |
| 4月2日  | 18:11:54 | -24.343565  | 负  | 发电     | 星期二 |
| 4月3日  | 18:06:27 | 106.452881  | 正  | 用电     | 星期三 |
| 4月4日  | 18:02:01 | 125.493881  | 正  | 用电     | 星期四 |
| 4月5日  | 19:09:50 | -124.449455 | 负  | 发电     | 星期五 |
| 4月6日  | 19:36:34 | -179.001526 | 负  | 发电     | 星期六 |
| 4月7日  | 18:00:56 | 111.353737  | 正  | 用电     | 星期日 |
| 4月8日  | 18:06:11 | 142.365662  | 正  | 用电     | 星期一 |
| 4月9日  | 18:08:36 | 85.001625   | 正  | 用电     | 星期二 |
| 4月10日 | 18:58:15 | 90.223846   | 正  | 用电     | 星期三 |
| 4月11日 | 18:07:28 | 97.77597    | 正  | 用电     | 星期四 |
| 4月12日 | 18:11:30 | -66.52301   | 负  | 发电     | 星期五 |
| 4月13日 | 18:16:17 | -45.714485  | 负  | 发电     | 星期六 |
| 4月14日 | 18:20:50 | -155.46138  | 负  | 发电     | 星期日 |
| 4月15日 | 18:06:23 | 104.363998  | 正  | 用电     | 星期一 |
| 4月16日 | 18:58:04 | -18.31793   | 负  | 发电     | 星期二 |
| 4月17日 | 18:00:32 | 116.495613  | 正  | 用电     | 星期三 |
| 4月18日 | 18:01:21 | 122.039192  | 正  | 用电     | 星期四 |
| 4月19日 | 18:04:42 | 72.227272   | 正  | 用电     | 星期五 |
| 4月20日 | 18:06:31 | 121.878502  | 正  | 用电     | 星期六 |
| 4月21日 | 18:04:29 | 81.627266   | 正  | 用电     | 星期日 |
| 4月22日 | 18:04:14 | 85.242645   | 正  | 用电     | 星期一 |
| 4月23日 | 18:35:13 | 94.481956   | 正  | 用电     | 星期二 |
| 4月24日 | 18:34:18 | -113.040909 | 负  | 发电     | 星期三 |
| 4月25日 | 18:24:54 | 58.970879   | 正  | 用电     | 星期四 |
| 4月26日 | 18:16:55 | 8.194863    | 正  | 用电     | 星期五 |
| 4月27日 | 18:11:17 | -18.478613  | 负  | 发电     | 星期六 |
| 4月28日 | 18:03:03 | 136.099014  | 正  | 用电     | 星期日 |
| 4月29日 | 18:18:54 | 80.181114   | 正  | 用电     | 星期一 |
| 4月30日 | 18:34:35 | 29.164072   | 正  | 用电     | 星期二 |



4月4日微网与非微网并网点功率因数比较

图3 功率因数比较

段非微网光伏K2功率曲线,判断储能电池对新能源平衡出力的积极影响。

结论:选择4月9日,风机发电量最大日作为典型日,研究新能源发电并网D110功率曲线与并网开关K2曲线变化情况,论证储能系统对风机平

滑出力的积极影响。如图4所示。

## 5. 验证整站带载黑启动

负荷的投入对光储微网系统的稳定性造成了一定冲击,负荷侧母线电压和频率均出现跌落,电压变化控制在0.7~1.1 pu之间,频率变化幅度

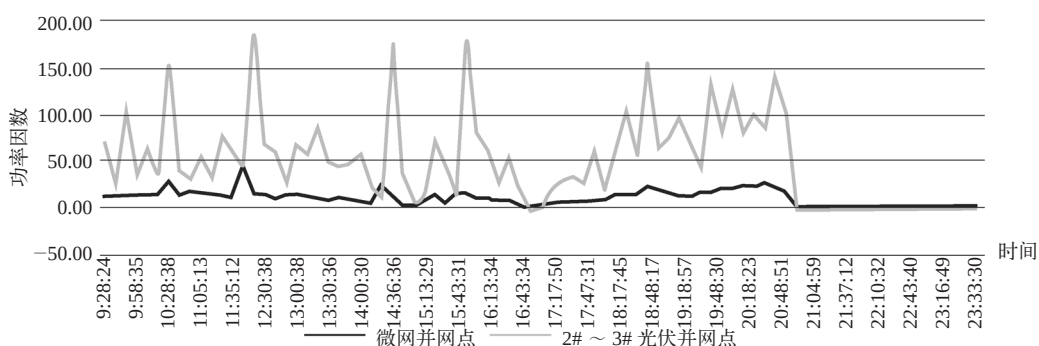


图4 4月9日功率波动情况

在0.5 Hz以内，短时间内电压和频率重新恢复到稳定状态。光伏输出的功率不足以供给负荷，由储能来补足，光储联合发电系统带动负荷稳定运行。当光伏出力减小时，储能根据光伏出力下降做出迅速响应，增大功率输出，以保障负荷供给需要，维持了系统功率的平衡。

当市电停电时，且光伏不出力时，微网系统二次设备可以有储能供电，保障D110开关及以下正常操作。

结论：光储微网系统在实现自启动后，能够快速实现带负荷稳定运行，因此此项目微网光储联合黑启动取得良好效果。

## 结束语

随着示范项目和商业化项目的深入，储能将在电网中呈现多点分布特性，多点布局的储能系统通过电力系统统一调度，可实现多点分布式储能的有序聚合，除了满足就地应用功能外，可为电网提供紧急功率支撑、提高电网安全稳定、有效提升电网对可再生能源的消纳能力、丰富电网调峰、调频和调压等辅助服务手段，使电力系统变得更加“柔性”和“智能”，促进电网发展模式变革。因此，满足源—网—荷多功能需求的储能选址及配置技术是值得深入研究的问题。EA

(上接第28页)

取天气、供水和供热等信息。最上面的应用服务非常灵活，对电网内业务来说可以提供光储充等绿色经济用能的服务，从而减少用能成本，提高用电质量；对电网外的业务来说可以进行数据的联动，例如向政府机构提供企业生产指数、人员流动等信息。

多元能效管理包括分布式电源接入与调度管理、分布式电源接入运行监视、分布式电源接入并网监测与控制、分布式电源接入详细量测、智能告警、电能质量分析、发电功率平衡分析和节能减排分析等。

现代城市的能源结构主要由电和燃气等组成，需要构建多能综合协调信息网络，实现能量流和信息流的双向互动。多能综合协调信息网络实际上由4个复杂的网络系统构成，即由电能源管理平台、燃气管理平台、水资源管理平台和信息网络紧密耦合构成。

能源信息一张网的典型应用就是为用户提供全方位的增值服务，例如用户内部的资产管理，

原来更多的是靠手工录用、台账的方式，通过云平台管理之后，可以实现全智能化的管理，更为便利。另外就是用电能效的管理，可以按月提供能耗统计的报表，通过分析向一些用电大户提供针对性的节能降耗的解决方案，从而满足用户对绿色经济运行的需求。

## 配电网未来发展新的展望

配电网的未来发展分5个方面：①柔性配电。随着技术的发展，配电网结构将由单向到多向、由交流到交直流发展，甚至最后是直流配电网。②高度自愈。故障自愈、电能质量自愈和灾变自愈能力会得到大范围的提升。③主动消纳。目前大范围分布式电源逐渐接入配电网，需要提高主动消纳分布式可再生能源的能力；④能源服务。配电网管理由电能供给向能源服务转变。⑤5G应用。在配电网，诸如差动保护、视频特征获取和智能巡检等都会得到大范围的应用。EA