

# 电力需求侧管理

## DIANLI XUQIUCE GUANLI

2023 第25卷第4期

1999年10月创刊  
总第144期  
7月15日出版

(双月刊)

中国科技核心期刊 / 全国优秀电力期刊 / 全国优秀能源期刊 / 入选《能源电力领域高质量科技期刊分级目录》电力系统及其自动化专业 / 英国《科学文摘》(SA) 收录期刊 / 美国《剑桥科学文摘》(CSA) 收录期刊 / 波兰《哥白尼索引》(IC) 收录期刊 / 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊 / 《中国期刊全文数据库》全文收录期刊 / 《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊 / 中文科技期刊数据库收录期刊 / 《CAJ-CD 规范》执行优秀期刊 / 全国百家期刊阅览室指定赠刊

### 编委会

主任 李明

副主任 夏勇 吴争 刘清鑫 蔡义清

委员 (以姓氏笔画为序)

丁一	卫志农	王宇	王红	王永利	王建学
王蓓蓓	文福拴	甘海庆	龙禹	卢毅	付文杰
付学谦	吕斌	刘庆涛	刘皓明	刘憬奇	汤奕
孙小亮	孙宏斌	杨迪	李扬	李炳胜	李德智
肖勇	吴英俊	吴俊勇	何龙	何胜	何文其
宋梦	张放	张永强	张兴华	张吴敏	张沛超
张爱群	陆畅	陈涛	陈宋宋	陈启鑫	陈皓勇
范焯	明昊	周伏秋	郑世英	赵芳	赵长军
赵永彬	赵剑锋	胡秦然	姚明路	秦帅	袁世文
徐杰彦	高山	高赐威	郭雷	郭云峰	郭云涛
郭平平	郭鸿业	黄会	黄必鹤	黄富才	董建军
董振斌	韩文德	喻洁	谢俊	熊谊红	潘继雄
霍大伟					

总编 董振斌

特约主编 陈启鑫 黄俊灵 郭鸿业

责任编辑 孙晶 水鸽 于丽芳 张文翰

英文责任编辑 水鸽

发行广告 周珏 胡业 骆永芳

主管 英大传媒投资集团有限公司  
主办 英大传媒投资集团南京有限公司  
国网(江苏)电力需求侧管理指导中心有限公司

学术支持 东南大学

编辑出版 《电力需求侧管理》编辑部

地址 南京市北京西路20号

邮编 210024

电话 (025)85082711 85082713  
85082716 85082717

投稿网址 <http://dsm.ijournals.cn>

投稿邮箱 [dsm@sgdsm.com](mailto:dsm@sgdsm.com)

印刷 中闻集团南京印务有限公司

照排 南京凯建文化发展有限公司

国内订阅 本刊广告发行部

广告 (025)85082722

发行 (025)85082466 85082479

发行邮箱 [fx@sgdsm.com](mailto:fx@sgdsm.com)

技术推广 (025)85082722

国外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

国外发行代号 4855BM

发行范围 公开

中国标准连续出版物号 ISSN 1009-1831  
CN 32-1592/TK

广告发布登记编号 广登32000000191

国内定价 15.00元

本刊已与相关数据库合作,许可在其数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文,该数据库著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意本刊上述声明。如有异议,请在投稿时说明,本刊将按作者说明处理。



2023年 第25卷·第4期·总第144期

## □ 源荷互动技术及机制设计专辑

01 基于主从博弈的共享储能定价策略及园区用户日前优化决策

张天雨,王 罗,孙 勇,于 傲,郑可迪,郭鸿业,陈启鑫

08 基于混合博弈的园区虚拟电厂广义储能共享与协同优化调度

田壁源,常喜强,戚红燕,张新燕

15 考虑低碳和柔性负荷的有源配网扩展规划模型

刘艾旺,朱萧轶,姚宝明,谢益峰,舒能文,邹 健,施云辉

21 多站融合模式下基于共享储能的多主体交易机制设计

封 钰,俞永杰,史雪晨,张 贇,胡 阳,冯家欢

28 促进中国电力系统灵活性建设的市场机制探索

孙 田,闵 睿,郭倬辰

34 基于区块链的园区微网分布式电力交易实现机制综述

陈宋宋,龚桃荣,田 珂,宫飞翔,甘海庆,陈 堃

41 三峡集团乌兰察布“源网荷储一体化”示范项目设计

王新宇,卢韦伟,石睿杰,陈启鑫,张 达,杜尔顺,黄俊灵

## □ 研究与探讨

48 基于排放因子法的抽水蓄能碳减排量化方法研究

许一洲,刘皓明,潘方圆,朱 婧,梁 钊,景 瞳

55 基于组合集成学习模型的区域碳排放预测方法研究

王 涵,白宏坤,王世谦,王圆圆,李秋燕,宋大为,韩 丁,卢旭霆

60 含热泵和电热混合储能的建筑微能源网经济优化调度

黄 庆,顾海飞,许庆江,黄德海,孙晓蕾,吴正刚,朱 静,孙明汉

66 基于大数据挖掘的终端用户供电需求划分方法

胡丹蕾,赵 冬,姜世公,王云飞,张重阳,柳 伟

## □ 能量与负荷管理

73 基于电动汽车价格弹性需求响应的综合能源系统优化调度

胥 栋,叶傲霜,张少迪,罗其华,官乐乐,杨继光

80 基于Stackelberg博弈实时定价机制的电-气综合能源系统优化调度

李 宁,撒奥洋,张智晟

86 双碳背景下微电网的优化配置研究

王 恺,赵文会,张伟时,余金龙,李若纯

93 考虑产业链的有序用电轮休方案制定策略

甘海庆,朱 竞,马璘劫,王蓓蓓

## □ 电力市场与客户服务

99 电力市场不同发展阶段下抽水蓄能电站电价机制研究

谢道清,张 茂,刘思佳,范长城,李文浩,王川陵

105 基于改进协同过滤算法的电力营销渠道引流策略

翟千惠,李 明,蔡 潇,程雅梦,俞 阳,朱 萌

110 针对蒙东电力交易抄表误差导致的电费结算偏差问题的分析与措施

李 鑫,赵予嘉,林延平,刘 茹,窦大伟,卢博伦,许方圆

## 59 广告索引

# 三峡集团乌兰察布“源网荷储一体化”示范项目设计

王新宇<sup>1,2</sup>, 卢韦伟<sup>1,2</sup>, 石睿杰<sup>1,2</sup>, 陈启鑫<sup>1,3</sup>, 张 达<sup>1,4</sup>, 杜尔顺<sup>1,5</sup>, 黄俊灵<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学-中国长江三峡集团有限公司气候变化治理机制与绿色低碳转型战略联合研究中心, 北京 100000; 2. 中国长江三峡集团有限公司 国际清洁能源研究室, 北京 100000; 3. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100000; 4. 清华大学 能源环境经济研究所, 北京 100000; 5. 清华大学 气候变化与可持续发展研究院, 北京 100000)

## Design of China Three Gorges corporation-Ulanqab “source-grid-load-storage integration” demonstration project

WANG Xinyu<sup>1,2</sup>, LU Weiwei<sup>1,2</sup>, SHI Ruijie<sup>1,2</sup>, CHEN Qixin<sup>1,3</sup>, ZHANG Da<sup>1,4</sup>, DU Ershun<sup>1,5</sup>, HUANG Junling<sup>1,2</sup>

(1. Tsinghua University-China Three Gorges Corporation Joint Research Center for Climate Governance Mechanism and Green Low-carbon Transformation Strategy, Beijing 100000, China; 2. International Clean Energy Research Office, China Three Gorges Corporation, Beijing 100000, China; 3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100000, China; 4. Institute of Energy, Environment and Economy, Tsinghua University, Beijing 100000, China; 5. Institute of Climate Change and Sustainable Development, Tsinghua University, Beijing 100000, China)

**摘要:**源网荷储一体化对助力实现碳达峰、碳中和目标、推动电力系统绿色低碳转型有重要的意义。以示范项目的核心子项目——新一代电网友好绿色电站示范项目为案例, 综述“源网荷储一体化”项目的设计思路。该项目通过储能规模配置及一体化智慧调控两方面的设计实现对电网友好的功能。在储能配置方面, 采用先进电池储能系统支撑储能技术转化应用和规模化发展; 在智慧调控方面, 针对常规新能源电站发电出力的随机性波动性问题, 设计了不同集中调度运行模式。目前新一代电网友好绿色电站示范项目首批机组成功并网并仍在积极建设中。该项目将对保证电力系统安全稳定运行、探索新能源开发建设新模式、开展规模化储能科技创新等将具有重要示范意义。

**关键词:**源网荷储一体化; 示范项目; 友好绿色电站; 三峡集团; 乌兰察布

**Abstract:** Integration of power generation, transmission, distribution, consumption, and energy storage is crucial in facilitating the goals of carbon peaking and carbon neutrality and promoting the green and low-carbon transformation of the power system. The core sub-project of the Ulanqab demonstration project, new-generation grid-friendly green power station demonstration project, is taken as a case study to provide an overview of the design concept of source-grid-load-storage integration project. The demonstration project achieves grid-friendly functionality through the design of large-scale equipped storage and integrated intelligent regulation and control. In terms of energy storage, the project adopts lithium-ion battery energy storage systems to support the transformation and application of energy storage technologies and their large-scale development. In terms of intelligent control, the project designs different centralized dispatch and operation modes to address the randomness and fluctuation issues of conventional renewable energy power plants. The first units of the demonstration project had successfully integrated into the grid, and the project is still under active construction. The project will have demonstration significance in ensuring the safe and stable operation of the power system, exploring new models for the development of renewable energy, and conducting large-scale energy storage technology innovation.

**Key words:** source-grid-load-storage integration; demonstration project; friendly green electricity; China Three Gorges corporation; Ulanqab

## 0 引言

气候变化是当今全球面临的重大挑战, 气候治理需要全球合作, 中国一直在积极推进全球气候治

理的进程。2020年9月22日, 习近平总书记在第七十五届联合国大会上提出2030年碳达峰、2060年碳中和的目标。

“碳达峰、碳中和”目标对中国电力系统低碳转型提出更高要求, 风光等可再生能源发电及储能等配套设施需要持续快速发展<sup>[1-2]</sup>。随着新能源在电

收稿日期: 2023-03-10; 修回日期: 2023-04-20

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目(NBWL202200615)

电力系统中的比例不断提高,如何实现新型电力系统的高效稳定运行成为了电力行业亟待解决的问题。我国电力系统低碳转型需要在技术进步、系统运行、市场设计及商业模式等多方面发力<sup>[3-4]</sup>。充分利用包括“源网荷储”在内的电力系统多种资源有助于提高电力系统控制能力和电网运行的经济水平<sup>[5]</sup>。“源网荷储一体化”是指通过优化整合本地资源,以先进技术突破和体制机制创新为支撑,探索“源网荷储”高度融合的电力系统发展路径,强调发挥负荷侧调节能力、就地就近灵活发展及激发市场活力,引导市场预期<sup>[6]</sup>。

央企在建设“源网荷储一体化”等大型项目方面具有独特优势。央企在资源调配、资金投入、人才培养等方面拥有较大的执行力,可以更加高效地配置科技创新的力量资源,推动项目的顺利实施。“源网荷储一体化”项目涉及多个学科领域,如电力系统、能源技术、信息技术等,需要在技术研发、工程设计、运维管理等多方面协作共同完成大型项目建设<sup>[7]</sup>。央企具有较强的组织协调能力,能够更加有力地组织跨学科领域的协同攻关,推动项目的科技创新和技术突破。

三峡集团作为中国领先的清洁能源集团,努力为实现碳达峰、碳中和目标,促进经济社会发展全面绿色转型作出更大贡献。截至2022年年底,三峡集团可控装机达1.25亿kW,其中清洁能源装机占比达96%。为服务国家“双碳”目标,三峡集团勾勒新能源“线路图”,加强新型储能和“源网荷储一体化”技术研究,更好实现风、光、储多能互补<sup>[8]</sup>。

2018年3月5日,习近平总书记在参加十三届全国人大一次会议内蒙古代表团审议时强调“要把现代能源经济这篇文章做好,紧跟世界能源技术革命新趋势。”习近平总书记在2019年在内蒙古考察期间,强调内蒙古“要在大规模储能等领域开展前沿技术攻关,率先取得重大关键技术突破”。为支撑新能源快速发展和高比例接入电网,内蒙古近年来大力推进储能多种技术路线合力发展。根据内蒙古自治区加快推动新型储能发展的实施意见,内蒙古将选择用电负荷集中、新能源资源条件较好的地区,依托电力“源网荷储一体化”发展模式,推动新型储能规模化发展和商业化应用,并结合负荷灵活调节能力,合理优化新型储能建设规模。

本文将重点围绕内蒙古乌兰察布“源网荷储一体化”示范项目的核心子项目——乌兰察布新一代电网友好绿色电站示范项目的系统设计,介绍“源网荷储一体化”示范项目如何更好地支撑新型电力系统的构建与发展。

## 1 乌兰察布“源网荷储一体化”示范项目总体介绍

2020年10月,乌兰察布“源网荷储一体化”示范项目正式启动。项目计划新增280万kW风电、30万kW光伏,同步配套88万kW储能。乌兰察布“源网荷储一体化”示范项目分为4个子项目开展建设。

乌兰察布新一代电网友好绿色电站示范项目是乌兰察布“源网荷储一体化”示范项目的第一个子项目,总装机容量包括170万kW的风电、30万kW的光伏发电,以及55万kW/2h的储能系统,共分为4个风光储单元,配套建设4座升压储能一体化站和1座智慧联合调控中心<sup>[9-13]</sup>。项目位于内蒙古乌兰察布四子王旗境内,场址范围约950 km<sup>2</sup>如图1所示。该项目分3期建设,一期项目42.5万kW风电、7.5万kW光伏和14万kW/2h储能已于2021年12月30日前全部投产<sup>[14]</sup>。二期计划建设风电62.5万kW,光伏12.5万kW,配置27万kW/2h储能系统。三期计划建设风电65万kW,光伏10万kW,配置14万kW/2h储能系统。目前二、三期项目仍在建设中。

“源网荷储一体化绿色供电工业园区示范”是“源网荷储一体化”示范项目的第二个子项目,计划建设100万kW风电,同步建设30万kW/2h的储能电站,通过专线向工业负荷供电,作为工业负荷的绿色电能补充。此外,计划在“源网荷储一体化”示范项目中建设绿色大数据中心和电网侧储能电站示范等其他子项目。

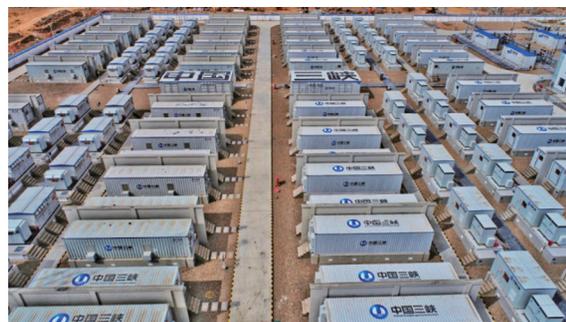


图1 三峡乌兰察布“新一代电网友好绿色电站”示范项目  
Fig. 1 China Three Gorges corporation “the new-generation grid-friendly green power station” demonstration project in Ulanqab

考虑乌兰察布“源网荷储一体化”示范项目总体示范规模较大,可按照总体规划、分步实施的原则逐步推进。第一阶段优先建设新一代电网友好绿色电站示范项目。第二阶段在积累第一阶段建设运行经验的基础上,进一步建设工业园区示范和大数据中心等示范项目。

此外,在“源网荷储一体化”示范项目建设同时,三峡集团在乌兰察布建设了“三峡现代能源创新示范园”<sup>[10]</sup>,三峡现代能源创新示范园是一座集“风、光、储一体化”高端装备产业集群、“源网荷储”技术研发试验基地为一体的“产学研用”现代能源创新示范园。示范园一期创新综合基地、标准厂房、科研中心等设施已于2022年6月建成投运,示范园内“源网荷储一体化”功率路由器示范工程、大规模新能源及储能综合仿真与实验平台、飞轮储能系统等一批科研项目已具备投运条件;二期风电与光伏装备基地正加紧推进。

## 2 新一代电网友好绿色电站示范意义

### 2.1 乌兰察布限电问题背景

乌兰察布市位于内蒙古自治区中部,处于晋冀蒙三省交界处,是连接东北、华北、西北三大经济圈的交通枢纽。该地风能和太阳能资源丰富,属于国家一类资源地区,可开发利用的风电资源达3 000万kW,光伏资源5 600万kW,具有明显的优势和巨大的开发潜力。近年来,乌兰察布市吸引了京津冀、东北工业负荷转移以及大数据等产业的落户,导致本地负荷不断增加,电力装机缺口较大。仅2019年,乌兰察布市共限电约100次,最大限电功率超过250万kW,主要集中在晚高峰时段。预计在“十四五”时期,乌兰察布市全网电力缺口将达到约400万kW<sup>[11]</sup>。

限电问题主要集中在晚高峰时段,同时也恰逢新能源出力较低的时间段如图2所示。在晚高峰时段,当地用电负荷保持较高水平,而蒙西向华北输送的420万kW电力同样处于较高水平,而此时光伏发电出力迅速下降,风电出力也较低,导致当地容易发生限电情况。

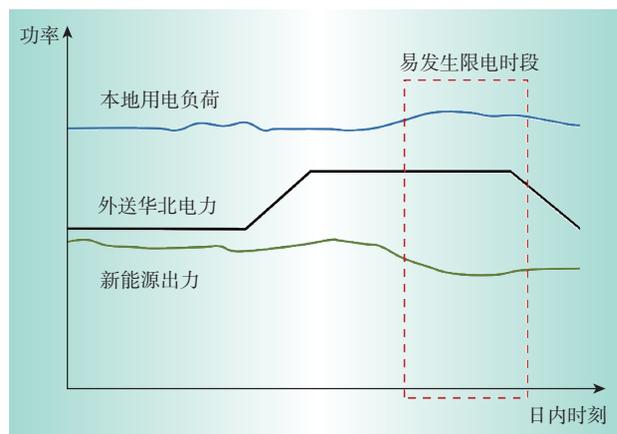


图2 乌兰察布限电问题发生示意

Fig. 2 Ulanqab's local power shortage problem

### 2.2 新一代电网友好绿色电站示范意义

作为乌兰察布“源网荷储一体化”示范项目的

核心子项目,三峡乌兰察布新一代电网友好绿色电站示范项目是深入贯彻落实习近平总书记关于“要把现代能源经济这篇文章做好”的重要指示精神的生动实践。

新一代电网友好绿色电站示范项目旨在满足高峰时段的可靠顶峰供电需求,提高新能源的安全可靠替代水平。综合运用智慧一体化调控技术和先进的风光功率预测技术,最大限度地利用新能源自然的出力功率。在提高电网安全性方面,该项目将发挥大规模电化学储能的系统级功能,保障自身充分消纳的同时,还可以通过灵活运营、高效管理,积极参与蒙西电网的调峰消纳,有效降低公网调峰和容量支撑压力<sup>[12]</sup>。

该项目在社会经济效益方面也将有所贡献,为当地创造就业机会,推动区域经济的发展。同时,减少传统火电等高污染、高排放能源的使用,促进减污降碳。项目建成,每年可发电量将达到63.32亿kWh,二氧化碳排放减少520万t,碳减排效益显著<sup>[13]</sup>。

## 3 新一代电网友好绿色电站项目功能设计

常规新能源电站因未配备储能或者储能配比低,导致其发电出力的随机性、间歇性和波动性问题突出,并网友友好性较差。为了解决该项问题,新一代电网友好绿色电站项目设计通过“储能规模配置”和“一体化智慧调控”,在传统电力系统基础上增加储能,使发电变得易于控制,功率输出特性趋于平滑,从而解决电站发电出力的随机性、间歇性和波动性等问题。

### 3.1 储能规模配置设计

在储能规模配置方面,该项目设计了约占风光总装机30%比例的储能系统,为电站实现并网友友好提供了物理基础。

为有效支撑前沿储能技术转化应用和规模化发展,综合考虑各方面因素,本项目将以50万kW、时长2h的锂离子电池储能系统为主体。

#### 3.1.1 锂离子电池储能系统示范选型与设计

在电化学储能选型过程中,考虑各类电化学储能技术的性能参数和单位造价,如表1所示。

在实际应用中,铅炭电池主要限制在于能量密度低、循环寿命短;钠硫电池需要高温运行,自身技术特点导致安全性较差;全钒液流电池能量密度低且造价较高;水系钠离子电池仍处于研发示范阶段,技术成熟度有待提升。综合来看,锂离子电池特别是磷酸铁锂电池具有转换效率高、循环寿命长、能量密度大等方面的优势<sup>[14-15]</sup>。

表1 拟选用电池基本参数对比

Table 1 Comparison table of the parameters of different batteries

参数	铅炭电池	磷酸铁锂电池	全钒液流电池
能量密度	中	优	差
成本/(元·kWh <sup>-1</sup> )	约1 000	约2 000	约4 000
充放电倍率/C	<0.3	<1	0.25
循环次数/次	约2 000	约5 000	>10 000
效率	0.80	0.95	0.70
充放电深度	0.5	0.8~0.9	0.9
优势	价格低	能量密度高、功率特性好	循环寿命长
劣势	能量密度低、不能深度充放电	成本较高、大规模应用的安全性有待实证检验	成本高、占地面积大

考虑到项目建设可行性,乌兰察布一期项目储能系统基于磷酸铁锂电池储能技术进行设计。电池单元采用模块化设计。电池预制舱内具有温控、消防、照明、视频监控等系统,确保电池系统具有最优的转换效率及运作性能,同时具有安全可靠的保护措施。

### 3.1.2 前沿储能技术示范设计

为发挥示范引领作用,本项目设计配套建设5万kW新型储能设施,含小规模钠离子电池储能、热储能和压缩空气储能系统。

(1) 水系钠离子电池:是一种新兴电池技术,一般以中性水溶液为电解液,通过碱金属离子在正负极的可逆脱嵌、嵌入,实现充放电循环<sup>[15]</sup>。水系钠离子电池具有成本低、循环寿命长、高度安全、环保等优势,但同时能量密度较低、电极材料开发的难度较大。在当前产业化初期阶段,小规模生产的水系钠离子电池已经实现了与铅炭电池可比的度电储能成本,可替代部分铅蓄电池的应用。结合乌兰察布的实际情况,可以设计开展较小规模的前沿技术示范。

(2) 热储能技术:将太阳能热以及谷电、弃风、弃光等电能储存于蓄热介质中。需要释放的时候,将热量转化为电能。同时可根据负荷需要,提供高温蒸汽,余热可供采暖及制冷<sup>[16]</sup>。

结合乌兰察布的实

际情况,可以考虑采用储热罐和燃气轮机形式,储热介质为熔盐作为热储能系统选型。储热储存时间长,同时储热罐可以通过数倍于放电功率的速度将弃电迅速存储。热储能示范重点为应对长时间弃风。

(3) 压缩空气储能技术:是在用电低谷时期,使用电能将空气压缩转化为空气的内能并存储于储气室中;在用电高峰,高压空气从储气室释放驱动透平发电<sup>[17]</sup>。目前压缩空气储能技术其效率仍低于电化学储能,同时造价较高。

由于乌兰察布地区缺少天然气资源,且不具备盐穴、矿井等自然储气资源条件,适宜选取基于管线钢的非补燃式压缩空气储能技术路线。

### 3.2 智慧联合调度中心功能设计

在“一体化智慧调控”方面,该项目结合需求场景进行技术攻关,设计了智慧联合调度系统,解决高配比储能与风光新能源的智慧协调运行问题。智慧联合调度中心三峡乌兰察布新一代电网友好绿色电站示范项目的核心,充当项目的“中枢大脑”,负责与电网调度交易中心进行智能化自主化交互通讯、灵活调整运行模式、联合调度控制场站内设备的优化、数字化设备监控和运检等重要功能。

该项目风光储一体化控制由风光储中心协调控制器和场站协调控制器两级组成如图3所示。其中,风光储中心协调控制器实现调度指令的场站群优化及下发;风光储单场站协调控制器实现调度指令的站内优化及执行。

该调度架构支持不同的调度模式:当省调对本场站作为一个整体进行调度时,电能管理系统接收调控指令,通过大数据分析的结果,结合风光功率

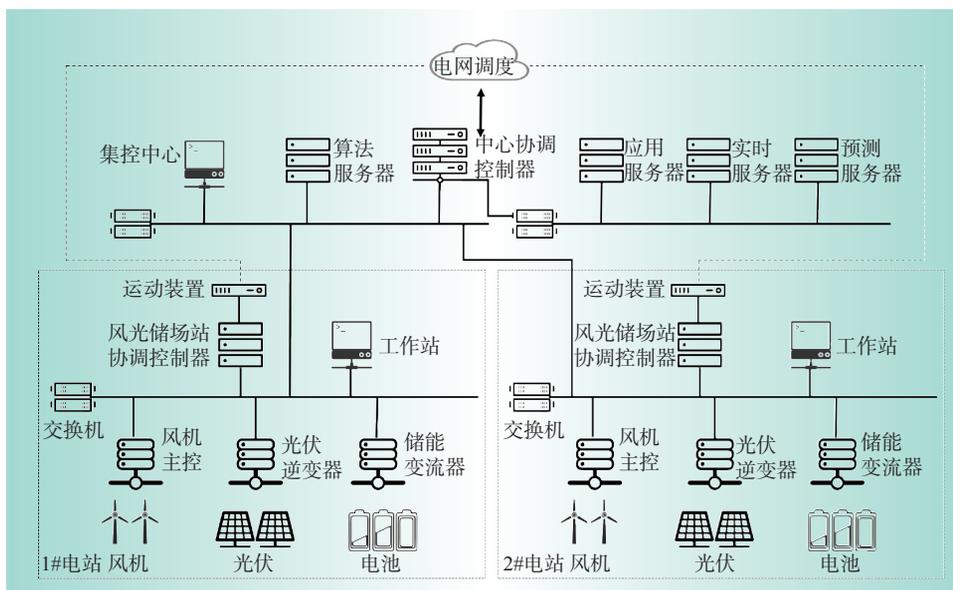


图3 示范电站风光储一体化控制架构图

Fig. 3 Wind-solar-storage integrated control framework for the demonstration power station

预测结果,选择不同的调度模式,同时利用内置的调度算法对各个场站进行优化调度,省调对本场站的各个子站分别进行调度时,电能管理系统服务器对调度指令进行转发,从而间接实现省调直接对各个子站的调度。根据项目的系统功能定位,考虑设计以下集中调度运行模式<sup>[9]</sup>。

(1) 顶峰供电运行模式:为蒙西电网提供特定时段的可靠顶峰供电能力是本项目的重要功能。乌兰察布及蒙西地区的供电紧张问题一般发生在傍晚,供电缺口持续时间一般在2~4 h。若按提供2 h可靠顶峰供电考虑,风电根据当地风能资源特性概率统计,自身的容量置信度达到3%以上。170 kW 风电预计能提供约5万kWh的可信容量。加上55万kWh的储能容量,可向系统提供约60万kW的2 h可靠顶峰供电能力。该运行模式下,智慧调度中心提前一天向电网调度上报是否具备下一天顶峰供电的能力。电网调度提前一天向智慧调度中心下发下一天风光储站需求顶峰时段和顶峰容量,智慧调度中心结合场内设备状态和风光功率预测结果优化自身的运行策略。

(2) 最大化消纳利用运行模式:最大化消纳利用运行模式即仅考虑风光储自身的需要保证消纳。在不考虑上网电价波动的情况下,在限电时段充电,在非限电时段及时放电。尽可能吸纳弃电量,但不要吸纳本可以正常发出的电量,从而最大程度减少弃风弃光。

(3) 系统调峰电站运行模式:电站在解决自身风光调峰消纳问题的同时,还可为电网系统提供一定额外的调峰能力。当预测到该风光储电站自身的风、光出力将处于较低水平,储能有较大调峰充裕度,风光储电站可视作电网的系统级调峰电源。

(4) 近区新能源共享调峰电站运行模式:智慧调度中心除接入本项目170万kW风电和30万kW光伏的实时出力数据外,还接入近区其他风光电站的实时出力。通过监测储能充电状态和近区所有新能源项目的出力状态,可统计监测储能对各风光项目缓解弃风的共享量。

(5) 参与电力现货市场优化运行模式:蒙西地区是全国第一批电力现货试点地区,在电力现货市场高峰期电价较高时,电站可以将储存下来的能量放电,将电力供应到市场,获取较高的收益;而在电力现货市场低谷期电价较低时,电站可以储存电能以备用,从而实现电价的套利。

(6) 功率跟踪运行模式:在该模式下,自动发电控制系统控制发电出力跟踪预先规划好的计划出力曲线。通过协调储能系统,对风光实际出力与

发电计划之间的偏差进行实时补偿,可使风光储联合发电依据计划功率稳定输出。

(7) 平滑出力波动控制模式:通过引入储能系统的充放电功率,消除风光电力输出功率的不稳定,在保证储能系统合理荷电状态下实现对出力功率波动的抑制。

综上,乌兰察布新一代电网友好绿色电站可以通过多种运行模式的灵活组合,实现风光储电站的最优化运行,提供系统级调峰服务,为乌兰察布地区带来可持续、高效的能源解决方案。

### 3.3 大数据平台架构设计

为了更好的管理场站内外数据,实现场站内各类电力设备的智慧调度,可以在智慧联合调度中心建立大数据管理平台,平台主要由基础设施层、数据存储层、基础组件层、基础服务层、业务应用层组成,如图4所示。



图4 示范电站大数据平台整体架构设计

Fig. 4 Organization structure design of big data platform for the demonstration power station

其中,基础设施层主要为大数据平台提供基础的软硬件环境,包括服务器类集群、操作系统、网络通道及交换设备等,以及防火墙和加密设备。数据存储层主要为存储中心接入的各类数据,既包括各类统计报表数据、设备基础信息等,也包括场站内各类实时运行数据。基础组件层主要是为了搭建大数据平台而采用的第三方成熟的相关技术组件,主要包括大数据相关的技术。基础服务层主要构建面向应用的业务服务,包括数据采集服务,数据治理服务、统一的数据查询服务、日志管理服务、模型计算服务、数据共享服务等。业务应用层包括智慧调度、实时监测、智能诊断、远程运检、辅助决策等几方面的应用。

## 4 “源网荷储”技术研发试验案例

三峡集团联合中国科学院、清华大学、华北电力大学等20余所国内顶尖科研机构 and 院校在内蒙

古乌兰察布三峡现代能源创新示范园打造三峡乌兰察布“源网荷储”技术研发试验基地,为新型电力系统综合效率不高、各类电源互补互济不足等问题带来新的解决方案<sup>[13]</sup>。试验基地将以“源网荷储”技术研发和国家储能重点实验室为核心,集成建设氢能、压缩空气和电化学等多种储能形式,旨在打造产业推广示范基地。这些成果经过示范验证后,有望推广应用到国内其他新能源项目中,填补研发与应用之间的技术空白<sup>[18]</sup>。

为了解决大规模风电的间歇性和波动性、风机变流器与电网相互作用所导致的风电场并网系统的安全稳定运行问题,三峡集团联合清华大学等团队,正在研发储能二期STATCOM储能系统与三期数字储能系统如图5所示,有望提高大容量风电场并网安全性、稳定性<sup>[19]</sup>。

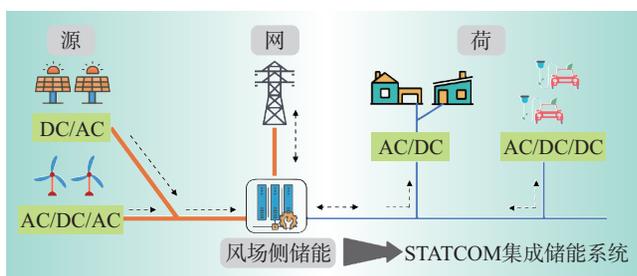


图5 大容量STATCOM集成储能系统研究

Fig. 5 Research on high capacity STATCOM integrated energy storage system

## 5 结束语

“源网荷储一体化”是落实“四个革命、一个合作”能源安全新战略、保障电力高质量发展的重要举措,可以有效应对可再生能源发电的波动性和间歇性问题,提高电力系统可靠性和灵活性。“源网荷储一体化”的大规模实现需要政府、企业和高校等各方共同努力,加强合作,从关键技术和市场机制方面共同推进,解决如下问题:

(1) 推动电力市场化改革。建立健全市场机制,加快推动完善电力价格形成机制,推动健全电力辅助服务市场,完善储能投资回报机制。

(2) 加强关键技术研发。针对“源网荷储一体化”的技术瓶颈,深入推进创新链产业链协同,有计划有分工地开展技术研发,推动多元协调控制技术、新型储能技术等新型技术的落地示范应用。

(3) 加快数字化应用与推广。推动现代信息通讯及智能化技术、新型先进传感技术、人工智能和大数据技术等数字化技术在构建新型电力系统中的应用,促进能源信息深度融合与数字化转型。

(4) 大力发展储能部署。随着碳减排进程推进,可再生能源份额进一步提高,储能需求将继续增加。需要大力部署用于平抑新能源波动的发电侧储能,用于支撑电网安全稳定运行的电网侧储能,和用于提升负荷可控性与灵活性的需求侧储能。

三峡乌兰察布“源网荷储一体化”示范项目,从关键技术和市场机制等多方面力图解决在构建以新能源为主的新型电力系统中面临的诸多问题:

在关键技术方面,三峡集团联合国内顶尖科研机构 and 院校在乌兰察布打造三峡乌兰察布源网荷储技术研发试验基地,为新型电力系统综合效率不高、各类电源互补互济不足等问题带来新的解决方案。

在市场机制方面,乌兰察布“源网荷储一体化”示范项目通过智慧联合调度中心与电网调度交易中心进行智能化自主化交互通讯,灵活调整运行模式,提高清洁能源消纳水平,增强地区电力尖峰负荷保障能力。为探索不同场景下的收益机制提供了实践场景示范。D

## 参考文献:

- [1] 李政,陈思源,董文娟,等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 3 987-4 001.  
LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3 987-4 001.
- [2] 康重庆,陈启鑫,夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 1-7.  
KANG Chongqing, CHEN Qixin, XIA Qing. Prospects of low-carbon electricity [J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 1-7.
- [3] 周孝信,曾嵘,高峰,等. 能源互联网的发展现状与展望[J]. 中国科学:信息科学, 2017, 47(2): 149-170.  
ZHOU Xiaoxin, ZENG Rong, GAO Feng, et al. Development status and prospects of the energy Internet [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2017, 47(2): 149-170.
- [4] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-124.  
ZENG Ming, YANG Yongqi, LIU Dunnan, et al. “Generation-grid-load-storage” coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 114-124.
- [5] 冯迎春,李雪松,范洁,等. 考虑清洁能源消纳的源网荷储互动交易实践[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(6): 69-74.  
FENG Yingchun, LI Xuesong, FAN Jie, et al. Practice of

- the source-grid-load-storage interactive transaction considering clean energy consumption [J]. *Power Demand Side Management*, 2020, 22(6):69-74.
- [6] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(8):2 806-2 819.
- ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(8):2 806-2 819.
- [7] 雷鸣山. 中国三峡集团:践行能源安全新战略推动清洁能源业务高质量发展[J]. *能源*, 2022(12):11-14, 10.
- LEI Mingshan. China Three Gorges corporation: practicing new strategy for energy security and promoting high-quality development of clean energy business [J]. *Energy*, 2022(12):11-14, 10.
- [8] 王璐,马冠朴,徐强. 存下“草原风光”迈向“电网友好”[N]. *中国三峡集团*, 2022-09-20.
- WANG Lu, MA Guanpu, XU Qiang. Save the “grassland scenery” and move towards “grid-friendliness” [N]. *China Three Gorges Corporation*, 2022-09-20.
- [9] 戴雪. 三峡乌兰察布新一代电网友好绿色电站示范项目实现首批机组并网发电[N]. *乌兰察布日报*, 2021-12-30.
- DAI Xue. The first batch of units of the Three Gorges Ulanqab new generation grid-friendly green power station demonstration project have been grid-connected and generating power [N]. *Ulanqab Daily*, 2021-12-30.
- [10] 王璐,马冠朴,徐强. 在“草原云谷”,打造一座“源网荷储”样板间[N]. *中国三峡集团*, 2022-09-05.
- WANG Lu, MA Guanpu, XU Qiang. Building a “generation-network-load-storage” model in the “grassland cloud valley” [N]. *China Three Gorges Corporation*, 2022-09-05.
- [11] 王轶辰. 超大型“源网荷储”示范项目开工[N]. *经济日报*, 2020-11-12.
- WANG Yichen. Construction starts on super large-scale “generation-network-load-storage” demonstration project [N]. *Economic Daily*, 2020-11-12.
- [12] 李时宇. “风光储”一体化,这座新能源场站实现储能配置最大[N]. *科技日报*, 2021-12-31.
- LI Shiyu. Integrated “wind-photovoltaic-energy storage” system achieves maximum energy storage configuration [N]. *Science and Technology Daily*, 2021-12-31.
- [13] 赛娜. 立足优势资源发展“绿色”产业[N]. *乌兰察布新闻网*, 2021-02-01.
- SAI Na. Development of “green” industries based on advantageous resources [N]. *Ulanqab News Network*, 2021-02-01.
- [14] 刘阳,滕卫军,谷青发,等. 规模化多元电化学储能度电成本及其经济性分析[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(1):312-318.
- LIU Yang, TENG Weijun, GU Qingfa, et al. Scaled-up diversified electrochemical energy storage LCOE and its economic analysis [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(1):312-318.
- [15] 曹翊,王永刚,王青,等. 水系钠离子电池的现状与展望[J]. *储能科学与技术*, 2016, 5(3):317-323.
- CAO Yi, WANG Yonggang, WANG Qing, et al. Development of aqueous sodium ion battery [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2016, 5(3):317-323.
- [16] 杜尔顺,张宁,康重庆,等. 太阳能光热发电并网运行及优化规划研究综述与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(21):5 765-5 775, 6 019.
- DU Ershun, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Reviews and prospects of the operation and planning optimization for grid integrated concentrating solar power [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(21):5 765-5 775, 6 019.
- [17] 梅生伟,公茂琼,秦国良,等. 基于盐穴储气的先进绝热压缩空气储能技术及应用前景[J]. *电网技术*, 2017, 41(10):3 392-3 399.
- MEI Shengwei, GONG Maoqiong, QIN Guoliang, et al. Advanced adiabatic compressed air energy storage system with salt cavern air storage and its application prospects [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(10):3 392-3 399.
- [18] 马晓晴,王璐,吴卓彦. 三峡乌兰察布“源网荷储”试验基地创下多项“国内之最”[J]. *新能源科技*, 2022(6):23-24.
- MA Xiaqing, WANG Lu, WU Zhuoyan. The Three Gorges Ulanqab “generation-network-load-storage” test base sets multiple “domestic firsts” [J]. *New Energy Science and Technology*, 2022(6):23-24.
- [19] 李冉,王明强,杨明,等. 考虑故障概率和净负荷不确定性的鲁棒随机备用优化[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(6):20-29.
- LI Ran, WANG Mingqiang, YANG Ming, et al. Robust-stochastic reserve optimization considering uncertainties of failure probability and net load [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(6):20-29.

#### 作者简介:

王新宇(1991),男,辽宁本溪人,博士,高级工程师,研究方向为清洁能源科技创新;

卢韦伟(1991),女,湖北仙桃人,博士,工程师,研究方向为清洁能源科技创新;

石睿杰(1996),女,安徽阜阳人,博士,研究方向为能源与气候变化经济学;

黄俊灵(1986),男,通信作者,山西潞城人,博士,高级工程师,研究方向为工程科学。

(责任编辑 于丽芳)