

## 基于风光液流储能一体化技术研究

隋晓峰 谢正和 刘英杰

北京源深节能技术有限责任公司, 北京 100089

[摘要] 通过研究在风电场和光伏电站侧配置动态响应特性好、寿命长、可靠性高的大规模液流电池储能装置, 能更好地解决风、光等可再生能源发电的间歇性问题, 通过优化储能控制系统控制策略, 开发风光储电站联合监控系统, 可使风光储电站实现平滑出力、跟踪计划出力、参与系统调峰、调频等功能, 提高源网协调能力、提升新能源的消纳能力, 为新能源集约化开发和利用提供示范引领作用。

[关键词] 储能; 液流电池; 源网协调

Abstract: By researching the large-scale liquid-flow battery energy storage device with good dynamic response, long life and high reliability on the side of wind farm and photovoltaic power station, the intermittent problem of renewable energy generation such as wind and solar energy can be better solved. By optimizing the control strategy of energy storage control system, the joint monitoring system of wind-solar storage power station can be developed. Make the wind and solar storage power station achieve smooth output, tracking plan output, participating in system peak shaving, frequency modulation and other functions, improve the coordination ability of the source network, enhance the absorption capacity of new energy, and provide a demonstration leading role for the intensive development and utilization of new energy.

Key words: Energy storage Liquid flow battery Source network coordination

### 1 引言

随着我国经济发展和人民生活水平的提高, 能源需求增长迅速, 然而, 能源安全与环境污染已经成为我国国民经济发展的掣肘。化石能源日益消耗, 2015 年, 我国石油和天然气对外依存度分别为 60.6% 和 32.2%<sup>[1]</sup>。因此, 如何安全、清洁的解决我国能源问题是一个重大议题。中国风电资源和负荷逆向分布的特点, 以及大规模集中开发的模式, 使得新能源消纳应用矛盾十分突出, 弃风弃光电量呈逐年增加趋势, 2017 年我国弃风电量 419 亿千瓦时、弃光电量 73 亿千瓦时, 弃风、弃光率分别为 13.7%、6.2%。图 1 为 2011 年至 2017 年全国弃风弃光率统计表。部分地区仍存在较高的限电比例, 其中甘肃 (弃风率 33%)、新疆 (弃风率 29%)、吉林 (弃风率 21%)、内蒙古 (弃风率 15%)、黑龙江 (弃风率 14%), 弃光率超过 5% 的地区包括陕西、新疆、甘肃、青海、宁夏。较高比例的弃风弃光造成可再生能源的巨大浪费和发电效益的巨大损失。



图 1 2011-2017 年弃风情况 (数据来源: 国家可再生能源中心)

风电、光伏发电等间歇性能源并网给电网带来了深远的影响。风电、光伏等新能源大多以电力电子设备并网, 电网高度电力电子化特征将逐步凸显, 新能源机组不具备常规机组的频率和电压支撑能力, 会导致系统有功和无功储备减少, 降低电网的频率和电压调节能力, 电网的安全稳定运行面临巨大技术挑战。如何减小规模化风光并网给电网带来的冲击一直是行业内面临的迫切问题。研究表明, 风电、光伏发电在时间和空间上存在一定的互补性, 而大规模储能可以实现风光发电在时间上的重新分布, 利用风光储联合发电的模式解决新能源并网面临的问题已经得到行业内的

普遍认可，国内外已有成功的工程实例，如国家风光储输示范工程，配套建设了储能系统 70 兆瓦，风光储多类型电源互补运行有效改善了单一间歇式能源并网带来的问题。同时在德国、丹麦、美国等风能利用发达国家都不乏这样的工程实践。

2 国内外发展现状及趋势

2.1 液流储能技术

液流电池是一种极具有商业化潜质的大容量电池储能技术，其功率和容量可独立设计，在工程应用方面具有较大的灵活性，根据电解质的不同，主要包括锌溴液流电池、多硫化钠 / 溴液流电池和全钒液流电池。

全钒液流电池自新南威尔士大学 M. Skyllas-Kazacos 等人提出以来<sup>[2-3]</sup>，以其独特的技术优势引起了众多科学工作者的关注。全钒液流电池是一种高效的电化学储能装置。含有活性物质——钒离子的电解液是电能存储介质，存储在电池外部储罐中。钒电解质溶液通过循环系统进入电堆，在电极表面发生氧化还原反应。放电时，电池正负极电势差降低，化学能转化为电能；充电时，电池正负极电势差升高，电能转化为化学能，从而实现了电能的存储与释放。在各储能技术领域，全钒液流电池因其安全性高、使用寿命长、可实时直接监测其充放电状态等特点，已成为规模储能技术领域的首选储能设备之一。

通过近 10 余年的研究开发和示范应用，国内外全钒液流电池技术水平得到显著提高，并积累了丰富的工程经验，典型示范工程见下表 1 所示：

表 1 全钒液流电池典型工程应用

	液流储能系统规格	应用场景	液流电池生产企业
美国犹他州太平洋电力变电站	250kW*1000kWh	削峰填谷	VRB
日本北海道风电场	4MW*1.5h	风储并用	SEI
日本横滨光伏电站	1MW*5h	光储协调	SEI
张家口风光储输示范电站	2MW*4h	风光储联合运行	普能
卧牛石风电场	5MW*2h	风储联合运行	大连融科

当前全钒液流电池已经达到了实际应用水平，但是在电池结构设计和电能变换耦合机理协调控制等方面仍要有所突破。

2.2 新能源电站功率控制技术

在新能源有功功率控制方面，大量学者开展了相关研究。在风电机组有功控制方面，研究在电网限负荷时<sup>[4]</sup>，风电机组采用桨距角和转矩控制的模式进行有功控制的策略，确定转矩控制具有更好的动态性能；研究不测量风速<sup>[5]</sup>，利用模糊控制的方法使风机保持在最优转速以追踪最大风能作为有功控制目标，同时设定最优无功以优化机组效率；研究在电网正常运行时风机进行超速减载<sup>[6]</sup>，在电网频率跌落时风机采用模拟惯量控制，从而为电网发生频率跌落时提供更多的有功功率以达到维持电网频率的目的；基于经典优先顺序法提出了一种应用于变速恒频风电场的限出力有功控制策略<sup>[7]</sup>。综合考虑场内风电机组的预测信息、运行状态与控制特性，建立了以风电机组调节性能指标为排序指标的风电场限出力控制序列；研究考虑储能的风电场有功控制 3 层模型<sup>[8]</sup>，即能量管理层、风电场调度层及风力发电机控制层，可实现输出限制、AGC 曲线跟踪控制、调峰控制等综合控制目标；提出根据对风电场下一功率控制周期的各机组预测功率及机组自身运行状况进行分类<sup>[9]</sup>，按不同类机组升降功率的能力不同进行控制；提出一种基于机组实时风速信息分类的有功功率控制策略，该方法根据风力发电机组的运行状态和实时风速等信息对机组进行动态分类，并按风电机组最大发电能力和运行约束条件建立有功分配模型。

在新能源场站无功电压控制方面，研究了双馈风电场内多无功源在时间尺度上的动态响应配合和空间粒度上的物理分布特性<sup>[10]</sup>，研究综合考虑升压站集中动态无功补偿设备和双馈风电机组的无功电压协调控制策略。

3 本研究技术创新点

1) 液流储能系统设计与集成

研究液流电池堆场布置、电池活性物质的反应均匀性，以减小流动阻力与流道泄露电流为目的研究电解液流场优化参数，对大功率液流电池研发情况摸底，基于电池 SOC 或端电压的电池主动均衡与容量维持控制策略；大规模液流储能系统的高效电能变换耦合机理协调控制策略，实现液流储能系统的灵活应用和多能源互联切换等技术调研分析。

2) 储能变流器主动支撑控制策略研究与开发

研究基于电压源型虚拟同步发电机和高速通讯网络的站内液流电池系统主动支撑控制策略；对储能与新能源机组的协同调频控制策略，液流储能电池参与电网主动支撑的优化容量配置方案开展专题论证会；对主动支撑、高低电压穿越、黑启动、有源阻尼功能的液流电池储能变流器分析；研究液流电池储能系统特有指标参数，为标准撰写和后续产品提供参考。

3) 风光储联合运行控制策略研究与系统开发

对采用双向 DC/DC 模块二级或者三级升降压（图 2），实现钒电池与充放电设备的电压匹配，在充放电设备设计预充电开关，实现钒电池的预充电激活；通过系统监测钒电池运行状态，在储能系统充放电功率小于一定值时，使系统进入待机状态，泵定期循环，减少泵的耗能；在能量转换系统中，能量来源的切换时间问题及多能源之间的分配控制策略问题是钒电池储能系统灵活应用的一个关键技术进行专项论证。

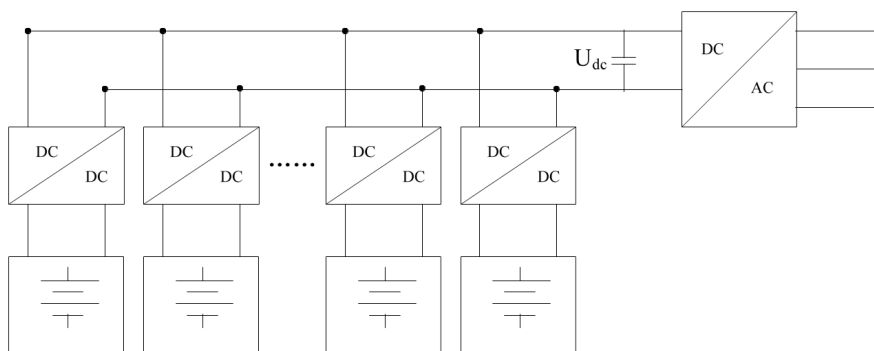


图 2 双级式储能系统 PCS

研究基于液流储能参与电网主动支撑的风光储联合运行控制策略，提出风、光、储多种组合运行控制模式、功能要求和技术性能指标，调研开展联合监控系统的现场调试及技术性能测试，跟踪分析监控系统的运行效果，优化完善监控系统的控制性能。

#### 4) 电压源型虚拟同步发电机控制策略以及风-光-储联合调频控制策略的研究。

风电、光伏等新能源大多以电力电子设备并网，基本不具备惯性和阻尼，新能源高占比情况下会降低系统鲁棒性，增加运行风险，所以新能源具备一次调频功能是大势所趋。然而目前为止虚拟同步发电机技术主要示范于微电网中，应用于大电网商业工程鲜见于报端，本项目需从稳定性分析、策略仿真、硬件设计、实际运行效果等方面进行开发；对于新能源机组-储能联合调频控制策略的研究与工程实现，需要根据新能源机组与储能机组运行性能提出一种协调控制策略；在工程实现的过程中，针对多机组协同控制，仅仅改造变流器而不集群统一控制是行不通的，所以需从场站级别进行整体调研设计。

#### 5) 大数据平台建设

研究电池管理系统（BMS）、能量转换系统（PCS）和无线云端数据系统之间的调控机制和关联作用；研究 BMS 按照固定程序与能量转换系统通讯方式与途径（图 3），提出钒液流电池的充放电控制及泵循环控制，通过研究传感器实时采集钒液流电池中温度、电流、电压、管道压力等数据，深入了解信号读取和传送机制，将采集数据接入能源大数据平台。

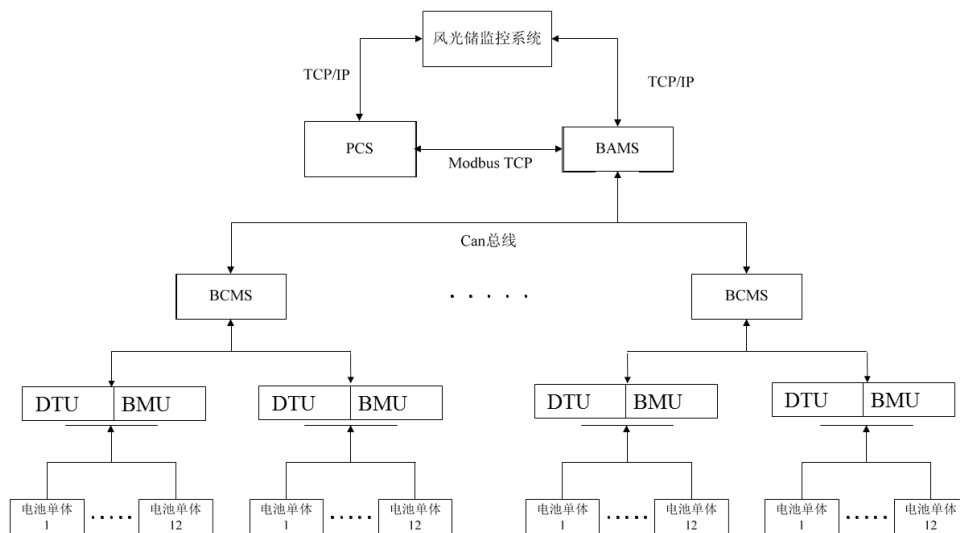


图 3.6-2 储能系统通讯构架

图 3 储能系统通讯构架

### 3 结论

通过本项目的技术集成研究为风光液流储能一体化系统提供技术支撑，探索一条“风-光-储”集约化、高效化的发展解决路径，为我国新能源的开发建设提供示范引领作用。利用本项目研究成果为国内某大型风光储项目提供技术服务；拟实施项目总投资约 7000 万元，全寿命净成本 4200 万元，年消纳风电场弃风电量 550 万度，调峰电量达到 550 万度，风电上网电价按 0.5 元/度计算，调峰服务电价按照 0.38 元/度，每年收入 584 万元，静态投资回收期为 7.19 年。

#### [参考文献]

- [1] 贾承造，庞雄奇，姜福杰．中国油气资源研究现状与发展方向[J]．石油科学通报，2016，1(1):2-23.
- [2] Wang W, Luo Q, Li B, et al. Recent progress in redox flow battery research and development[J]. Advanced Functional Materials, 2013, 23(8): 970-986.

[3]Xiao S, Yu L, Wu L, et al. Broad temperature adaptability of vanadium redox flow battery—Part 1: Electrolyte research[J]. Electrochimica Acta, 2016, 187: 525-534.

[4] 肖运启, 贺贯举, 王昆朋, 等. 电网约束下变速风电机组的限负荷控制策略 [J]. 电网技术, 2014, 38(2): 456-462.

[5] 徐大平, 肖运启, 吕跃刚, 等. 基于模糊逻辑的双馈型风电机组最优功率控制 [J]. 太阳能学报, 2008, 29(6): 644-651.

[6] 丁磊, 尹善耀, 王同晓, 等. 结合超速备用和模拟惯性的双馈风机频率控制策略 [J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2385-2391.

[7] 林俐, 谢永俊, 朱晨宸, 等. 基于优先顺序法的风电场限出力有功控制策略 [J]. 电网技术, 2013, 37(4): 960-966.

[8] 乔颖, 鲁宗相. 考虑电网约束的风电场自动有功控制 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 88-93.

[9] 邹见效, 李丹, 郑刚, 等. 基于机组状态分类的风电场有功功率控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 28-32.

[10] 梅华威, 米增强, 李聪, 等. 采用机组风速信息动态分类的风电场有功控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(2): 66-68.

作者简介: 隋晓峰, 男, 辽宁抚顺人, 高级工程师, 主要研究方向为能源高效利用、节能环保领域。