

飞轮储能正处于市场爆发前夜

——访清华大学能源互联网创新研究院高速飞轮与复合储能研究室主任姜新建

■本报记者 苏南



青海省海西州格尔木市20兆瓦飞轮储能项目开工建设、吉林辽源100兆瓦飞轮+锂电池混合储能独立调频电站项目加速推进、山西30兆瓦飞轮储能项目已投运……飞轮储能项目相关的信息正逐渐走进视野。数据显示,2025年中国飞轮储能行业市场规模达到14.35亿元,同比增长19%。

在“双碳”目标深入推进、新型电力系统建设加速前行的背景下,飞轮储能作为一种高频次、长寿命、高效率的物理储能技术,未来发展趋势如何?应用场景有哪些?面临哪些挑战?带着上述问题,《中国能源报》记者专访国家“十四五”重点研发计划飞轮储能项目首席科学家、近30年深耕飞轮储能技术研究与示范应用的清华大学能源互联网创新研究院高速飞轮与复合储能研究室主任姜新建。

为电网提供高频次调频与惯量支撑

中国能源报:当前,储能技术路线百花齐放,为何在此时强调飞轮储能技术的应用价值?

姜新建:当前储能各技术路线并行发展,是行业成熟的标志。我们强调飞轮储能,不是要替代其他技术,而是为了解决新型电力系统面临的核心痛点。随着新能源占比的提高和火电机组的逐步退出,电力电子设备大量替代传统同步机,但电力电子本身不提供旋转惯量,而惯量是电网的“压舱石”,一旦缺失,系统抗扰动能力就会大幅下降,因此对电网的频率调节能力提出了更高要求。

在新能源大规模并网的今天,电网需要的不只是“能量”,更是“惯量”和“频率支撑”。高比例新能源接入的送端电网,尤其在“沙戈荒”新能源大基地,一天内的调频需求可能达到几百次甚至几千次。新能源场站必须像传统火电一样具备惯性响应、一次调频和二次调频的能力,以承担系统频率稳定的主体责任。

在现有主流储能技术中,化学电池适配长时间调峰场景,但循环寿命仅有数千次,难以应对电网每年数十万次的高频短时调频需求。

相比而言,飞轮储能是物理功率型储能,核心优势在于“毫秒级响应”“百万次充放电频次”“25年长寿命”,效率高、无污染、安全性好。这种特性正好契合电网对

惯量支撑和一次调频的刚需。简单来说,飞轮储能就是把电能转化为高速旋转的动能,需要时再通过降低转速释放电能,在几秒到几十秒的短时间内快速响应,平抑电网波动。

中国能源报:您和研究团队首次提到“惯量飞轮”的概念,这与常说的飞轮储能有何不同?

姜新建:两者均以飞轮转子为储能载体,具备毫秒级快速响应能力,共同服务于电网频率稳定,但在并网方式、功能定位上存在本质差异。目前,传统飞轮储能是通过电力电子变流器接入电网的,仅能依靠算法提供间接虚拟惯量,也就是构网型飞轮储能技术,主打功率调节,是电网高频次一、二次调频的有效技术手段。

我们提出的“惯量飞轮”是一个由同步调相机、电磁耦合器和大惯量飞轮转子“三位一体”构成的系统,是通过电机接口连接电网,其转子转动与电网频率深度耦合,能够在极端工况下输出真实的高过载直接机械惯量及暂态有功/无功支撑。也就是说它利用飞轮天生具备的机械转动惯量,直接向电网提供物理惯量。因为电力系统现在极度缺乏机械惯量,而“惯量飞轮”就像是给电网安装了一个“机械心脏”。可以把“惯量飞轮”看成是一台短时、高响应的同步发电机组,能更快速响应,成为新型电力系统里的稳定器。

二者并非替代关系,“惯量飞轮”负责在扰动瞬间守住第一道防线,传统飞轮承接后续精细功率调节,共同构成“惯量兜底+快速功率响应”的复合安全体系。

跨多个学科集成高端储能技术

中国能源报:飞轮储能的理论基础很

扎实,但为什么目前的商业化应用不如锂电池那样普及?技术发展的瓶颈在哪里?

姜新建:飞轮储能的本质是将电能转化为高速旋转的动能。它放电时长很短,只有几十秒到几分钟,但优势突出:毫秒级响应、可高频次充放电、瞬间输出大功率。这些恰恰是锂电池不擅长的事。飞轮储能与锂电池并非替代关系,二者技术不同,功能互补,可从不同维度共同支撑电网稳定。

飞轮储能看起来原理简单——一个转子和一个电机,但实际上它是电、磁、热、力、控制等多个学科高端技术的集大成者。

行业发展目前确实卡在几个关键的技术难点上:首先是飞轮材料要求高。飞轮在高速旋转下,转速可达10000转甚至更高,这对复合材料或钢材的强度、动平衡特性提出了极高要求。为了降低损耗,飞轮必须在真空环境中运行,且必须依靠磁悬浮轴承悬浮,因为机械轴承的寿命难以支撑几百万次的高速旋转。五自由度全磁悬浮轴承的控制精度和稳定性是核心,特别是对于大重载情况下的磁悬浮控制,难度极大。

其次是真空环境下的电机转子散热问题。飞轮为了高效运行必须处于真空罐中,但电机在高速运转时会产生大量热量,在真空条件下,空气对流散热失效,如何将电机转子的热量高效导出,直接决定了设备的可靠性和寿命。此外,高速旋转部件的密封技术也是难点,既要保证真空度,又要允许轴的高速旋转,这对密封材料和结构设计提出了苛刻要求。

飞轮寿命长,但初期建设成本相对较高,参与电力辅助服务的市场机制还有待完善。当前电力市场以“电量”为核心定价,而非功率,使其短时高频调节的技术优势难以兑现合理收益,还要承担容量折算、充电损耗、并网接入等成本错配,且依托“两个细则”体现其高频调节价值的政策尚未在全国落地,各地政策执行不一,虽然山西、西北等地已探索示范项目,但在全国范围内,如何通过“两个细则”让飞轮储能的高频次调节价值得到合理回报,还需要政策进一步落地。飞轮储能的市场认知还需要时间,当电力系统对“安全性”和“响应速度”要求越来越高时,飞轮储能一定会迎来爆发期。

中国能源报:面对这些挑战,目前飞轮储能技术攻关方向是什么?

姜新建:在“十四五”重点项目研发中,

针对飞轮储能目前面临的技术瓶颈,我们重点攻关了飞轮转子、电机、磁轴承和本质安全四大方向。我们的目标是实现“十四五”国家重点研发项目提出的指标,即1.5兆瓦功率、150兆焦储能能量、10000转/分钟转速以及高充放电频次。

技术上,我们正在研发更先进的高速飞轮电机热管理等解决方案,解决真空散热难题;同时,针对大容量、高转速的磁悬浮控制算法进行优化。在“惯量飞轮”方面,正在攻克大重载磁悬浮和复杂系统协同控制技术,尽快将这一新型拓扑从实验室的理论推向工程应用。我们承担的51兆瓦级磁悬浮飞轮储能项目预计今年年底并网,这将是技术验证的重要里程碑。

构建新型电力系统的“稳定器”

中国能源报:除了调频,飞轮储能人工智能数据中心(AIDC)领域应用的逻辑是什么?

姜新建:这是一个非常有潜力的增量市场。随着AI大模型的爆发,AIDC的能耗特性发生了变化。与传统数据中心不同,AIDC的负荷每次波动时间短,但功率变化速率极快,且次数极其频繁。

这带来三大挑战:一是化学电池难以覆盖这种短时间尺度的频繁充放电;二是功率变化速率可能超出电网的接纳能力;三是设备需要长期承受重复性功率过载。

解决上述难题,飞轮储能几乎是“天选之子”。它凭借毫秒级的响应速度、千万次的循环寿命的核心优势,完美匹配AIDC负荷在100毫秒到10秒区间内的波动特性。在美国、英国,已经有算力中心飞轮储能UPS的案例应用,有效提升了供电可靠性,并降低了全生命周期的能源与维护成本。在中国,随着算力需求的爆发,飞轮储能将成为保障数据中心供电稳定性的重要基础设施。

中国能源报:展望未来,您如何看待飞轮储能的发展趋势?

姜新建:飞轮储能正迎来从细分赛道向规模化商用的关键转折。随着新能源渗透率持续提升,电力系统对毫秒级响应、高频次调节的需求日益迫切,飞轮的独特价值正被重新认识。加上政策层面推动辅助服务市场和容量电价机制完善,行业已步入规模化爆发期。从技术趋势看,提高单机容量是降本的核心路径,随着磁悬浮轴

承等关键部件国产化加速,未来三到五年单位投资有望下降10%至30%。未来,飞轮储能不会单打独斗,而是走“飞轮+混合储能”的路线。飞轮储能负责高频次的毫秒级至分钟级调节(惯量支撑、一次调频),电化学电池负责长时调节(二次调频、削峰填谷),两者互补,既能保护电池寿命,又能最大化收益。与此同时,飞轮的应用场景正从电网调频向AI算力中心的冲击负荷平抑等新兴领域延伸。可以说,飞轮储能不再是概念验证,而是已经用工程实践证明价值——它不是要取代谁,而是在一个被多元化需求重塑的储能市场中,找到了不可替代的位置。

中国能源报:对飞轮储能高质量发展您有何建议?

姜新建:第一,市场机制要给“功率价值”一个合理的定价。飞轮最大的优势是毫秒级响应、百万次循环寿命,这种短时高频调节能力在传统以“电量”为核心的计价体系里很难兑现收益。未来应该在国家层面明确功率型储能的价值定位,把惯量支撑、爬坡响应这类服务纳入市场化交易品种。建议各地加快落实辅助服务市场“两个细则”,赋予飞轮储能参与调频市场的合理身份,体现其高频次调节的技术价值,让投资者看到明确的回报路径。

第二,国家要大力支持针对飞轮真空散热、大容量磁悬浮等“卡脖子”技术的科研投入,加快关键部件国产化的替代步伐,通过规模化量产来降本。同时,加快制定飞轮储能并网、验收及安全标准,规范行业发展。

第三,政策端要持续释放积极信号,让企业敢于投入。从《新型储能规模化建设行动方案》到山西等地出台的落地细则,飞轮已经被明确列为重点支持的成熟技术路线。如果能进一步加快容量电价机制的完善,给飞轮这类短时功率型储能一个合理的固定成本回收通道,让产业的正循环真正转起来。

第四,除了电网侧,应鼓励飞轮储能在轨道交通、AIDC、油田节能等领域的示范应用,通过场景迭代带动技术成熟和成本下降。

飞轮储能集中了多学科的前沿成果,虽然目前面临挑战,但随着技术成熟和商业模式的完善,必将在构建清洁低碳、安全充裕的新型电力系统中发挥不可替代的作用。

国产F级重型燃机首次成套出口

本报讯 8月28日,在四川德阳,“东方曙光”1号(G50)重型燃气轮机正式启程,前往哈萨克斯坦江布尔州,这是我国自主研发的F级重型燃气轮机首次成套出口。这台国之重器,将用于当地首个70兆瓦燃气联合循环电站项目。

该项目是哈萨克斯坦重点工程,东方电气为其提供3台G50燃机及全生命周期服务保障,确保燃机安全稳定运行。项目投产后,将显著增强哈萨克斯坦江布尔州电网的韧性,优化当地能源结构,为区域经济社会发展提供稳定可靠的电力保障。

此次“出海”,是国产化重型燃机走向国际的重要跨越。建立的自主燃机海外运行服务模式,将有助于推动我国自主燃机从“产品输出”向“技术+服务+品牌”综合输出转型,代表着我国已完全具备自主研制、成套出口和海外服务的完整能力,对电力高端装备出海具备示范效应。

该项目采用“燃气—蒸汽联合循环”技术路线,在高效发电的同时,兼顾供热需求。针对当地的极寒气候、小电网调峰、负荷波动较大等特点,东方电气为其量身定制项目优化方案。在进气系

统方面,加装IBH进气加热系统,确保机组在低温环境下稳定启动、安全运行;在转子系统方面,优化转子持热惯性设计,使机组十余分钟即可升至满负荷,灵活适配当地气候条件及快速调频需求。

作为我国重型燃机产业的骨干企业,东方电气已构建起多个功率等级的自主燃机产品谱系,形成了从设计研发、材料制备、部件制造到整机集成、试验验证、运行维护的完整产业链能力,可广泛满足分布式能源、区域供暖供冷、工业驱动、电网调峰及海上平台发电等多元化场景需求。东方电气持续推进“燃机+”综合能源解决方案,将燃机产品与新能源、储能、数字化智能运维有机融合,为客户提供定制化、全生命周期的清洁能源服务。

G50燃机的成功“出海”,不仅展示了我国高端装备的制造实力,更是中哈两国深化能源合作、共建“一带一路”的生动实践。东方电气将继续以开放共赢的姿态携手全球合作伙伴,推动自主燃机技术持续迭代升级,加速拓展海外市场,为全球能源低碳转型贡献更多“中国方案”与“中国力量”。

(林洋 蒋峥嵘)



于喜宝/摄

图片新闻



全球首艘32.5万载重吨甲醇双燃料矿砂船出江试航

9月3日,全球首艘32.5万载重吨甲醇双燃料矿砂船“远海丝路”轮顺利驶离位于江苏省扬州市江都区的扬州中远海运重工有限公司3号码头,经芒稻河、长江至相关海域开展海上试航。

人民图片

云南电网磁控无级调压技术实现『零越限』突破

本报讯 近日,由云南电网公司自主研发的磁控无级调压配电变压器交出亮眼成绩单——首批投运的2台变压器在三个月的试用期内实现电压“零越限”,标志着该技术在解决分布式光伏接入等引发的电压质量问题上取得实质性突破。

今年6月,两台磁控无级调压配电变压器在云南楚雄州禄丰市挂网运行,截至8月底,两台设备运行平稳,未发生任何电压越限问题,彻底扭转了此前频繁越限局面。数据显示,投运前,两台变压器的年累计电压越限时间分别高达2980分钟和3630分钟。

据悉,磁控无级调压技术为云南电网公司电力科学研究院自主创新攻坚成果。核心在于将功率半导体与电磁变换相融合,实现电压毫秒级快速无级平滑调节。与基于分接开关的传统有载调压方式相比,新技术具备调压响应快、精度高、运维经济、适应性广等显著优势,可有效应对分布式光伏间歇性波动引发的高低电压越限,以及节假日潮汐式负荷导致的电压跌落、灯光闪变等顽疾,大幅提升供电电压合格率。

目前,该技术已申请15项国家发明专利,填补了区域配电网高精度无级调压领域的应用空白,为新型电力系统下配电网电压治理提供了极具推广价值的“云南方案”。

(聂永杰 刘慧萍 田江瑶)