

电力微型智能传感器 推动数字电网感知层建设

■田兵

我国运行管理着世界上最大的电网，“双碳”目标正在推动以新能源为主体的新型电力系统的加速建设。经过几年的探索和实践，电网的数字化转型已经成为行业共识，数字电网的重要特征和标志是实现电网全环节、全要素、全时空的可观、可测、可控。而传感器对于数字电网来说，就像人体的神经末梢一般，无时无刻不在感知和产生各类量测数据，是物理电网数字化的关键基础元件。

在电力系统诞生的一百多年时间里，互感器作为电力系统主要的传感测量设备，能够很好地解决传统电力系统的测量问题。然而，随着具有随机性、间歇性、波动性特征的新能源占比越来越大，直至成为新型电力系统的主体，电网的电压、电流状态的特征以及测量需求发生了巨大变化：一是直流环节，尤其是中低压直流环节大幅增加，带来的直流测量需求也大幅增加，而且直流测量需求往往与kHz-MHz的高频交流测量需求伴随出现，因此，不仅需要测量元件兼顾到直流测量，而且对测量频率范围也提出了较高要求。二是电流的变化范围更大，尤其是对小电流的测量需求增长快速，比如光伏、充电桩等设备uA-mA级的泄漏电流监测正在成为行业标准，因此需要测量元件更加灵敏，能够准确检测到更小的电流。三是电流的变化速度更快，风、光等新能源的出力变化极快，传

统的SCADA系统15分钟级的采集频次漏掉很多细节变化，不利于精准控制，因此需要测量元件能够满足高频次采集的要求。四是参与新型电力系统的分布式主体数量呈指数增长，所需要的测量布点也是指数增长，大规模部署测量元件本身也可能导致占地大、引入新的安全风险、消耗能源等问题，因此需要测量元件体积小、安全性高、功耗低。传统基于铁芯和线圈的互感器不能测量直流、频带范围窄、小电流测量困难、体积大、存在开路(电流互感器)或者短路(电压互感器)的安全风险，难以适应新型电力系统带来的新测量需求。

近年来，随着新型敏感材料和微机电(MEMS)工艺的快速发展，涌现出了磁阻、压电、光电、磁光等先进传感技术和元器件，它们具备微纳体积、高精度、高信噪比、宽频带、超低功耗等优势，为新一代电力微型智能传感器发展提供了新的技术路径。同时，高端传感器也是国际科技竞争的重要领域。研发和应用基于MEMS技术的电力微型智能传感器，除需要满足前述新型电力系统的基本需求外，还需要着重关注和研究以下几个方面的技术。

一是抗强电磁干扰的新材料和防护技术。MEMS元件工作在电力系统强电磁环境中，磁场可达T级、电场可达100kV/m级，MEMS元器件内部的材料和结构在强电磁环境下不应发生击穿、改性等现象。因此，有必要不断探索能够适应强电磁环境

的新材料，研究强电磁防护技术，提升MEMS传感器的使用寿命。

二是非侵入式原位测量技术。不与一次带电导体接触的非侵入式测量是保障测量安全的根本措施。对于电流测量，单导线的非侵入式测量较容易实现，多芯电缆的非侵入式测量分布非常复杂，非侵入式测量十分困难；对于电压测量，由于电压是两点电势差的本质原因，传统的电压测量方法必须与待测导体和参考点金属接触，非侵入式的电压精确测量是世界性难题，需要持续攻关，从工程上找到误差可以接受的测量方法。

三是低功耗模拟/数字芯片技术与低功耗通信技术。低功耗技术是一种系统性技术。当前，国内模拟芯片和数字芯片的功耗与国际领先水平相比还有差距。在这一细分领域，还需要长时间的摸索和经验积累，才能打破国外的技术垄断。实践表明，无线通信的功耗占到智能传感器功耗的一半以上，目前市面上宣传的低功耗无线通信技术，要么以牺牲通信距离为代价，要么以牺牲通信数据量和延长通信间隔为代价，还需要进一步研发极低功耗约束下的无线通信技术。

四是空间能量收集技术。目前在电网中最为可行的空间能量收集技术的是CT取能、振动、温差等取能方式的能量密度太低，与当前电子元件的功耗水平相差太远，但随着模拟/数字芯片的功耗水平不断降低，取能材料的性能不断提升，未来两者

实现匹配，将对传感器技术起到巨大推进作用。能量收集的另一个研究热点是能量收集芯片的设计与制造，目前这一细分领域也被国外垄断，国内目前还几乎是空白。空间能量收集技术与低功耗技术可共同实现传感器自供能式的无源无线运行。

近年来，我国出台了多项促进高端传感器产业发展的规划和措施，珠三角、长三角等地区已组建传感器产业集群。电力行业从满足产业需求的角度出发，率先成立电力微型智能传感技术标准化委员会和专委会，以需求为引领，攻克了一批高端传感器设计制造技术，培育了一批传感材料、芯片、模组、应用等产业链上下游中坚企业。以电流和电压传感器为例，从2017年李立溟院士提出微型智能电流传感器以来，在TMR磁传感器、电流非侵入式测量方法、宽范围取能、智能电流传感装置集成等方面，南网数字集团联合高校、研究所、制造厂商和电网公司开展了大量研究与应用工作，取得显著技术进步，6年内，TMR磁传感器的线性范围提升了10倍，灵敏度提升了3倍，线性度从1%提升到0.2%，功耗降低两个数量级。在电力线性测量领域，TMR整体技术从2017年全面落后国外厂商到如今整体领先国外厂商，实现了工业级线性磁传感器的自立自强。在电压传感器方面，南网数字集团提出非侵入式电压测量方法，打破了国外的技术垄断，研发了世界首款非侵

入式自取能电压传感器，非侵入式电压测量精度达到1%，在中低压配网实现规模化应用，解决了配网电压监测“最后一公里”的问题。此外，还研发了自供能的输电线路多物理量集成传感器，实现了电流、温湿度、可见光图像/视频、红外图像、振动/舞动、气压/海拔等多物理量的实时监测和传感器端侧人工智能异常识别和告警，大幅降低了山区和无人区输电线路的运维工作难度和工作量。南网数字集团形成了“数研极目”传感器自主品牌，涵盖电气量、非电气量等多个产品系列，在世界范围内推广应用了数十万套电力微型智能传感器。

随着在电力系统内的应用越来越广泛，微型智能传感器在行业内得到越来越多的认可，未来将进入一个快速发展期，南网数字集团将继续与产业链上下游研究机构 and 制造厂商一道，致力于高端工业传感器研发与产业应用，打造良性生态循环，争取在国际科技竞争格局中取得关键优势，摆脱高端传感器依赖进口的现状，实现高端传感器自主可控。

(作者系南方电网数字电网集团有限公司智能传感团队负责人、高级专家)



灵活调节资源调用要兼顾两种商业模式

核心阅读

电力调度机构及其调用的灵活调节资源是电力辅助服务的主体。电力辅助服务具有系统性、垄断性和不确定性。同时，电力辅助服务具有公共品的经济学属性。在此背景下，电力调度机构在调用灵活调节资源时，要兼顾长期租赁和辅助服务两种商业模式，其产生的成本也应由电力用户公平负担。

■赵宏 王庆

由于新能源具有波动性、间歇性和随机性等特点，构建以新能源为主体的新型电力系统，必须增加系统灵活性，提高电力系统安全保障能力，统筹好电力系统发展与安全的关系。作为新型电力系统的总调度和调节者，电力调度机构调用灵活调节资源，应尊重行业特点和客观规律，要兼顾长期租赁和辅助服务市场两种商业模式。

电力辅助服务具有三大特点

电力调度机构及其调用的灵活调节资源是电力辅助服务的主体。

电力系统安全调节服务亦称电力辅助服务，主要包括调峰、调频、调相、系统备用和黑启动等服务类型。调峰是电力调度机构调用灵活调节资源，平衡发电和用电的电力负荷，从而保障系统运行安全；调频、调相是电力调度机构调用灵活调节资源，通过增加或减少系统有功或无功来稳定频率和电压，提高电能质量；系统备用和黑启动是电力调度机构调用灵活调节资源进行的安全调节服务，以维护电力系统安全稳定运行、保证电能质量。灵活调节资源除包括分布在发电侧、电网侧、用户侧的储能外，还包括传统高载能工业负荷、工商业可中断负荷、电动汽车充换电设施、负荷聚合商、虚拟电厂、有源微电网等能够响应电力调度指令的可调节负荷。

电力辅助服务具有系统性、垄断性和不确定性。

一方面，电力辅助服务具有系统性。保障电力系统安全稳定运行是一项系统性工作。只有通过电力调度机构统一组织协调，才能保证电力辅助服务的及时

性、有效性和准确性，同时相较于发电电源或电力用户自行调节，系统性调节最具经济性。

另一方面，电力辅助服务具有垄断性。电力调度机构是各类调度指令的组织和发布者，灵活调节资源是调度指令的发布者。灵活调节资源需要满足电力调度机构进行电力辅助服务所需技术条件后，才能协助电力调度机构共同为整个电力系统提供安全调节服务。并且，电力辅助服务与电能输送同步进行，需要通过具有自然垄断性的输配电网络实现。

此外，电力辅助服务具有不确定性。灵活调节资源的运行严格按照区域电网或省级电网调度机构下达的调度指令执行。由于各地电力负荷、电源结构、峰谷差等呈现不同特征，且电力辅助服务类型和需求数量存在较大差异，导致辅助服务具有较大不确定性。随着特高压加快建设、新能源高比例接入电网，以及受自然灾害增多和经济周期变化等影响，紧急安全事件明显增多，电力系统安全调节的不确定性进一步加剧。

调用灵活调节资源应兼顾长期租赁和辅助服务两种模式

首先，要保有相当比例长期租赁的灵活调节资源，以积极应对系统调节的不确定性。

电力辅助服务的系统性、垄断性特点，决定了具有信息垄断地位的电力调度机构是灵活调节资源的唯一购买方。同时，由于电力辅助服务的不确定性，决定了电力调度机构需维持一定规模的长期合作的灵活调节资源。从应用最广泛、技术最成熟、经济性最好的抽水蓄能国内外实践来看，绝大多数的抽水蓄能电站均采用电网统一运营或电网租赁运营的模式，即长期合作模式，即使是个别较多采用现货市场的英国抽水蓄能电站，其70%—80%的收入也要通过长期协议固定下来，其余部分通过现货市场获得，这样才能应对安全调节业务的不确定性并保证电站正常运营。

其次，要避免长期租赁灵活调节资源无序利用，以有效防止系统调节成本过度上涨。

对于电力调度机构来说，保有相当比例的长期租赁的灵活调节资源才能保障电网安全稳定运行；对于灵活调节资源来说，签订长期合同更容易获得稳定收益以保障其正常运营。电力调度机构调用灵活调节资源有长期租赁市场和辅助服务市场两种商业模式。目前，不同技术路线的灵活调节资源纷纷要求效仿抽水蓄能，采用长期租赁商业模式，即设定容量电价以补偿成本，以规避不确定性对其正常投资回报的影响。但从提高系统安全调节经济性的角度考虑，在不划定具体技术路线的前提下，应将容量大、调节周期长且具备多种辅助服务功能的灵活调节资源纳入长期租赁商业模式。同时，在调节容量、调节周期等技术指标上设置准入标准，提高长期租赁的灵活资源准入门槛，控制安全调节成本过度上涨的风险。

再次，要鼓励各类灵活调节资源积极参与电力辅助服务市场，以全方位提升系统调节能力。

依托大数据、云计算、人工智能、区块链等技术，促进储能能在虚拟电厂、云储能、市场化交易等领域技术创新。积极支持共享储能、云储能等新型商业模式，推动电动汽车充换电设施、大数据中心以及5G基站配建储能等设施的高效利用。明确各类灵活调节资源参与辅助服务的市场主体地位和准入条件，进一步完善辅助服务市场交易规则，丰富辅助服务品种，推动独立储能、负荷聚合商、虚拟电厂、独立可调

节负荷等参与辅助服务市场，扩大系统灵活调节资源范围。

调用灵活调节资源的成本费用应由电力用户公平负担

电力辅助服务具有公共品的经济学属性。首先，某一用户对辅助服务的享用，不会减少其他用户使用电能的安全性和高质量，即新增消费者不会影响到原消费者对服务的使用效用，且提供该服务的边际成本几乎为零，所以辅助服务具有消费的非竞争性。其次，辅助服务确保电网提供安全高质量电能，在技术上没有办法将一部分用户排除在电网系统的安全之外，故其具有供给的非排他性。第三，辅助服务使用方的受益大小无法客观准确衡量，其效用价值被整个电力系统共享，具有效用的不可分割性。

基于这一公共品属性，无论是通过长期租赁市场还是辅助服务市场，电力调度机构调用灵活调节资源的所有成本费用，均应由电力用户公平负担。对于具

体分摊方式，灵活调节资源参与电力辅助服务的成本应在其服务的地域范围内进行分摊。也就是说，对于响应区域电网或省级电网调度机构指令参与辅助服务的灵活调节资源，其成本费用之和应按该区域电网或省级电网输送的全部电量平均分摊，而电力用户则应按实际用电量承担相应的成本，分摊方法为：电力用户承担的辅助服务成本=该用户用电量×(该区域电网或省级电网内调用灵活调节资源总成本/该区域电网或省级电网输送的全部电量)。

综上，新一轮电力体制改革以来，我国电网企业与各类电源均成为独立的市场主体。隶属于电网的电力调度机构，调用抽水蓄能等灵活调节资源也实现了市场化运作。但基于电力辅助服务的不确定性和公共品属性，电力调度机构在调用灵活调节资源时要兼顾长期租赁和辅助服务市场两种商业模式，并促进两种模式有机协调。

(作者均供职于国家发改委价格成本调查中心)

