电能质量产业发展相关问题探讨

访安徽大学教育部电能质量工程研究中心李令冬教授

■ 杨 帆/本刊记者

市场需求大、设备制造能力强、产业规模小和系统服务能力弱的严重不对称是当前电能质量产业发展面临的主要瓶颈问题。

随着中国制造工业特别是高耗能企业和高科技产业的规模化高速发展、人民生活水平的迅速提高等因素使中国已成为世界第一用电大国，电力用户对电网电能质量的扰动越来越严重、对电能的要求也越来越高；智能电网和分布式新能源发电的规模化高速发展、当今世界最大的中国电力系统建设和运行等因素使电能质量控制越来越困难，对电能质量的要求也越来越高。上述发输电和配用电的变化及节能环保国策带来的节电压力等形成了对提高电能质量服务的巨大需求。为了对电能质量产业的发展有更进一步的了解，本刊记者特别采访了安徽大学教育部电能质量工程研究中心李令冬教授。

发展现状及发展趋势分析

电气应用：您好！李教授，首先非常感谢您在百忙之中接受本刊的专访。请问您认为目前电能质量产业的现状如何？您预计未来发展趋势怎样？

李令冬：目前电能质量产业的现状分析及发展趋势预计如下。

1. 我国已初步形成电能质量产业体系

良好的产业基础和巨大的市场使电能质量产业的发展十分迅速 ，近十年来，以电能质量为己任的公司、教学科研机构等如雨后春笋般地建立起来了，我国已形成较为完整的电能质量标准、设备制造、工程服务、技术监督管理和教育科研体系。

1）我国主要的电能质量标准化组织。全国电压电流等级和频率标准化技术委员会，电力行业电能质量与柔性输电标准化技术委员会等。

2）已形成的电能质量标准体系。该体系包括电能质量限值标准、电能质量测试与控制设备标准和电能质量测试与控制技术标准共三大类电能质量标准。

3）主要电能质量工程研究中心。国家电力电子

中国知网 https://www.cnki.net

工程研究中心（中国电力科学研究院）、教育部电能质量工程研究中心（安徽大学）、国网智能电网研究院电力电子研究所和清华大学柔性输配电系统研究所等。

2. 在未来几年，电能质量产业价值规模将超过700亿元（人民币）/年

（1）在未来几年，储能发电产业的价值规模约为600亿元/年

有功控制技术是电能质量控制的关键技术，储能发电是实现有功控制的主要手段。在三大驱动力，即分布式电源接入电网和负荷终端对有功控制的需求、储能技术进步使其成本下降及强大的政策支持共同作用下，储能发电产业已开始呈现爆发式增长趋势。到2020年，中国储能新增容量将超过100 GW，其中70%为抽水储能发电，30%为压缩空气储能发电和化学储能发电。抽水储能发电的投资约为7 000元/kW，压缩空气储能发电的投资约为4 000元/kW。粗略估计，在未来几年内，储能发电产业价值规模将约为600亿元/年，有功控制技术将成为电能质量产业最重要的支撑技术。

（2）滤波与无功补偿产业价值规模约为85亿元/年

滤波与无功补偿技术仍然是电能质量控制的关键支撑技术。2014年全社会平均用电功率约为6.305 1亿kW，设无源无功补偿与滤波装置（FC）安装容量约为平均用电功率的1.4倍，设其价格为80元/kvar，寿命20年，维护费用为2%，同时考虑我国用电量年增长率在4%左右等因素，近几年FC产业价值规模约为60亿元/年。

有源动态无功补偿装置（SVG）的安装容量约为平均用电功率的20%，设其价格为160元/ kvar，寿命15年，维护费用为2%，同时考虑我国用电量年增长率在4%左右等因素，近几年SVG产业价值规模约为20亿元/年。

节能照明器具、计算机等办公设备、空调器等家用电器和现代通信设备的广泛应用，使低压系统中的无功波动和3次谐波问题十分严重，而无源滤波装置对3次谐波滤波效果很差，这给低压有源滤波器（APF）的广泛应用带来很大的市场。2014年居民、商业、通信、轨道交通及办公等低压系统用电量约占全社会用电量的20%，平均用电功率约为1.26亿kW，总电流约为21 000万A，需要APF补偿的电流约占总电流的2%，即410万A，设其价格为15万元/100 A，寿命15年，维护费用为2%，同时考虑我国用电量年增长率在4%左右等因素，则低压APF产业价值规模约为5亿元/年。滤波与无功补偿产业总价值规模约为85亿元/年。

（3）动态电压恢复器（DVR）产业价值规模约为4亿元/年

负荷功率冲击、开关过程、雷击及短路故障等会引起电网电压的暂升或暂降，而高效、节能并连续的工业制造流程、重要工作流程、精密加工制造流程和微电子制造流程等对其非常敏感，会使流程中断或设备损坏，经济损失巨大，目前解决这一问题最常用的办法是应用动态电压恢复器（DVR）。2014年上述敏感负荷总平均功率约占全社会用电功率的10%，即0.63亿kW，需要DVR补偿的功率约占敏感负荷的20%，即为1 260万kW，设其价格为400元/kW，寿命15年，维护费用为2%，同时考虑我国用电量年增长率在4%左右等因素，则低压DVR产业价值规模约为4亿元/年。

（4）电能质量监测及系统产业价值规模约为4.4亿元/年

为了保障发输配用电系统安全可靠、稳定高效运行，电能质量监测评估已成为执行电能质量标准、电力负荷、新能源发电并网、电力调度控制或故障诊断中的必不可少的技术措施。

2014年我国全口径发电容量为136 019万kW，设发电系统电能质量监测及系统费用为1元/kW，寿命10年，维护费用为5%，则发电行业的电能质量监测及系统产业价值规模约为1.4亿元/年。

2014年全社会平均用电功率为63 051万kW，设输电、配电和用电系统电能质量监测及系统费用为3元/kW，寿命10年，维护费用为5%，则输电、配电和用电系统电能质量监测及系统产业价值规模约为3亿元/年。

发电、输电、配电和用电系统电能质量监测及系统产业总价值规模约为4.4亿元/年。

（5）其他（如SVC、SSTS和飞轮储能装置等）电能质量产业价值规模约为5亿元/年

综上所述，我国电能质量产业价值规模约为695亿元/年，如果计及电能质量产业向智能电网电力自动化、节电、电能计量和继电保护等方向的延伸，则电能质量产业价值规模可达700亿元/年以上。我国是一个发展中的国家，随着发电量和用电量的增加和分布式电源在总电源中比例的增大，我国电能质量产业价值规模将继续扩大，估计其年增长率在5%以上。

瓶颈问题与突破口

电气应用：针对目前电能质量产业现状，您认为目前我国电能质量产业发展存在哪些问题？制约改善电能

中国知网 https://www.cnki.net

质量产业发展的瓶颈又是什么？

李令冬：目前我国电能质量产业发展主要存在以下问题：①整体产业规模大，单个产业规模小（多小于10亿元）。②设备制造能力较强，系统服务能力较弱。③建成工程多，优质运行工程较少。④解决局部问题工程多，整体解决方案的大工程少。⑤同质化服务、低价竞争，利润较低。⑥技术上多局限于无功补偿和谐波滤波。以上六大问题可归结为一个问题，即系统服务能力弱。

市场需求大、设备制造能力强、产业规模小和系统服务能力弱的严重不对称是当前电能质量产业发展面临的主要瓶颈问题。系统服务能力弱制约了电能质量产业的健康发展：方案简单化、同质化，缺少系统化、个性化考虑，问题工程多；缺少仿真软件支撑，设计方案难以避免错误，系统优化程度低，工程质量不高；治理工程与节能减排、生产工艺及安全可靠运行等结合不够，工程效益不能最大化。

电气应用：您认为解决电能质量产业发展所面临瓶颈问题的突破口是什么？

李令冬：解决电能质量产业发展所面临瓶颈问题的突破口是推进电能质量产业的SPF转型升级。

1）系统化（Systemazation，S）升级。S升级是企业功能定位和技术能力的升级，包含三个方面的含义：①企业功能升级。由单一的电能质量治理向电能质量治理、节电控制、提高供电可靠性、电网重构、故障诊断与预测和分布式电源并网控制等综合控制发展。②企业核心技术能力升级。由拥有设备制造技术能力向同时拥有软件开发能力和系统集成技术能力发展。③S升级的目标。提高项目的规模和综合效益。

2）个性化 （Personality，P）升级。P升级是服务能力升级，即根据用户具体个性化需求定制电能质量产品或解决方案，避免同质化大规模制造和服务，以降低用户设备制造和服务成本并提高服务质量。

3）精细化（Fine，F）升级。F升级是管理模式升级，即改变粗放式管理模式为精细化管理模式，精细化管理贯穿于方案设计、产品制造、系统集成及服务全过程，以提高项目完成的质量。

电能质量产业SPF升级的关键是提高企业的系统集成能力，培养供配用电系统分析专家。系统集成的支撑技术是软件技术，没有设计仿真软件就没有现代工程。为了加快实现企业的SPF升级，企业必须重点做好以下三项工作：①在组织机构上增加或加强系统集成部、软件开发部、专业运行维护部和标准化部。②大力引进和培养系统集成、软件开发、面向行业的专业运行维护人才。③在营销和技术战略上要不断地提高承接重大工程的能力，完成单个工程项目的规模大小是工程技术类公司能否做大做强的重要标志。

经典案例分析

电气应用：在您的工作经历中，请您为读者分享两个有关电能质量产业的经典案例。

李令冬：下面是在我的工作经历中，两个比较经典的案例分析。案例1说明，现代电能质量故障往往非常复杂，解决电能质量故障问题是对系统进行准确的测试分析和仿真。案例2说明，高密度分布式电源接入电网会引起电压不稳定甚至发生低频振荡，解决这一问题的途径是应用储能技术和相关设备。储能产业将是电能质量产业的重要组成部分。

1. 配电网谐波故障分析与解决方案

（1）故障描述

某汽车冷轧厂生产时，80 MV·A、110/10 kV供电变压器发出刺耳高频啸叫声，220 V控制电源所带部分电源模块发生随机损坏。初步分析是由控制电源中的高次谐波电压超标造成，谐波源为酸轧机的10 kV高压变频器。

（2）故障建模

1）建模目的。根据测试数据，计算谐波电流源的负荷阻抗、系统谐波阻抗，建立谐波传输模型，给出解决方案。

2）建模方法。两点测量辨识：①测量点。10 kV供电母线总进线公共连接点A和酸轧机10 kV馈线供电关口B。②测量工况。供配电系统为正常运行方式，正常生产。③测量内容。A、B两点三相电压和三相电流同步录波，数据采集速度为每通道128 K/s，采样准确度为16 bit，录波长度为1 h。④辨识内容。故障模型结构与参数为A、B两点电压和电流波形与频谱图；A、B两点基波和主导谐波的电压、电流、阻抗及功率参数；主导谐波电压电流传输特性参数。⑤辨识验证及模型参数的内插、外推及修改。辨识验证为辨识结果与已知参数相符，仿真结果与辨识结果相符；模型参数的内插、外推及修改应用仿真曲线实现。⑥故障分析结论。根据特征谐波传输特性的辨识结果分析故障的根源。⑦解决方案。 通过重构配电网，改变B点的阻抗特性，从而改变谐波传输特性，减小谐波对配电网的干扰。

（3）测量辨识结果

电源基波阻抗的测量辨识值2.50 Ω，实际值2.44 Ω，

中国知网 https://www.cnki.net

误差+2.5%；流入系统的65、66、67和68次谐波电流放大倍数的测量辨识值分别为3.00、3.16、3.18和3.10，仿真值分别为2.60、2.73、2.86和3.00，误差分别为+15.4%、+15.8%、+11.2%和+3.3%。

10 kV特征谐波电压含有率高达10%，远大于配用电网络与设备的电磁兼容值（小于0.5%），这是该配电网发生变压器高频啸叫和控制设备损坏故障的根本原因。

（4）解决方案

特征谐波电流放大是配电电缆电容与系统电源的感性阻抗发生并联谐振的结果，因此解决方案是：重构阻抗网络，谐振次数左移至非特征谐波次数，特征谐波的谐波电流系数小于1，使流入系统的谐波电流和供电母线的谐波电压在规定的限值之内。

2. 方法在配电网低频功率振荡分析中的应用

（1）故障描述

某港口桥吊为变频桥吊，当货船多、桥吊投入数量大且工作频度高时，10 kV母线总进线桥吊群供电点发生严重的低频功率振荡故障，减少投入运行的桥吊数量，振荡故障消除。

（2）故障建模的要点

1）测量点。10 kV总进线。

2）建模重点。桥吊吊起重物时用电，放下物时发电，配电网是一个含高密度不确定性分布式电源的非线性配电系统，建模重点是分析低频功率振荡的原因、计算特征参数和优化控制方案。

（3）测量辨识结果

1）振荡频率约为12.5 Hz。

2）振荡全过程时间为7 s，其中，增幅振荡过程2.5 s，等幅振荡过程1.5 s，衰减振荡过程3.0 s。

3）有功功率振荡幅值（峰峰值）22.5 MW，无功功率振荡幅值（峰峰值）22.5 Mvar。

4）额定基波相电压5 774 V，相电压振荡幅值（峰峰值）850 V。

5）参数验证。已知10 kV母线运行短路容量180 MV·A，由振荡模型参数计算运行短路容量为[22.5×5 774/850] MV·A=153 MV·A，误差为15%。

（4）故障分析

运行数据表明：当桥吊群注入电网的1.25次间谐波电流大于40 A时，系统阻尼减小为负值，系统开始发生12.5 Hz的增幅低频振荡，减小注入系统的1.25次间谐波电流可以使系统阻尼由负变为正，使低频振荡衰减，40 A为该系统的起振阈值。

（5）解决方案

设计一套超级电容储能式功率协调控制器，当桥吊群注入电网的1.25次间谐波电流接近起振阈值40 A时，控制器发出大小相等、相位相反的1.25次间谐波电流减小，增大系统阻尼，使系统阻尼由负变正，抑制低频振荡。

机遇与挑战

电气应用：我国风电、太阳能发电等发展迅速，请问这些新兴的分布式发电厂会引起电能质量产业哪些新的问题？您认为对这些产生的问题应如何改善？

李令冬：分布式发电引起的主要电能质量问题有接入点功率的波动和峰谷差问题、电压和频率稳定问题、无功波动与闪变问题、谐波问题、低电压穿越问题和孤岛运行问题等。本文只讨论对电能质量产业影响最大的接入点功率波动和峰谷差问题。

分布式电源输出功率的不确定性使其接入点功率波动和峰谷差加大、由此引起的低频振荡和电压不稳定限制了电网接纳分布式发电的能力，严重地制约了风能、太阳能等可再生能源发电的发展。这是当前电能质量产业必须关注的新问题。

解决有功峰谷差问题最有效的途径是储能技术与设备的应用。通过储能稳定电力系统的功率潮流，解决高密度分布式电源接入电网的瓶颈技术问题。

电气应用：电能质量问题及其研究课题已引起电气工程界、电力用户和电力公司的极大关注，那么电能质量产业将面临哪些机遇与挑战？

李令冬：在分析电能质量发展现状及趋势的中，上面我提到过储能产业价值规模达到整个电能质量产业价值规模的85.9%，分布式发电产业的快速发展无疑给电能质量产业发展带来了巨大的机遇。

我国储能产业发展还面临很多困难：储能产业为资金密集型高科技企业，需要政府给予更多的政策支持和资金扶持；国际上压缩空气发电技术已经比较成熟，在德国已有290 MW的压缩空气发电机组在运行，而我国的压缩空气发电则刚刚起步；动力电池仍然是目前新能源汽车发展的瓶颈问题，包括循环寿命比较低、充电时间比较长和工作温度范围比较窄等问题；储能发电与其他分布式电源如何协调、有序且高效的工作，还有很多技术难题需要解决。

上述问题是目前储能产业发展面临的巨大挑战，我们必须通过技术和管理创新来解决，加速发展我国的储能产业，以适应分布式电源和新能源汽车的高速发展。EA

中国知网 https://www.cnki.net