

智能电网的关键技术及发展方向

访中国科学院电工研究所所长肖立业

■ 崔岩/本刊记者



肖立业 研究员
中国科学院电工研究所所长

理想的电网，能够将广域范围内的各种变幻莫测的电力资源转变成满足变幻莫测的电力需求所需要的能源，并保障电网安全可靠运行。因此，可以将智能电网看成一个“能源计算网络”，用户从“能源计算网络”中获取可靠的电能。

当前，电网的智能化建设与改造面临着诸多难题。随着新理念的不断提出，智能电网建设逐步进入新阶段，新技术、新思路的融合使智能电网各项技术不断衍生与完善，人们对于智能电网的理解也更加宽泛和深入。为了对当前所提出的“能源互联网”及智能电网部分关键技术及其发展方向有进一步的了解，本刊记者采访了中国科学院电工研究所所长肖立业先生，请他对相关问题予以解答。

智能电网与能源互联网

电气应用：肖所长您好！能源互联网是当前的热点话题之一，如何理解能源互联网，随着可再生能源的应用比重日益增大，未来实现电网的“能源互联”面临着哪些问题？

肖立业：能源互联网是当前广受关注的一个概念。能源包含煤炭、天然气、石油等传统的化石能源以及可再生能源和由这些能源所产生的电力以及热力，它们组成了一个能源系统。而不同能源的载体、输配方式和使用方式是有根本性差异的，比如煤炭多用火车、汽车来运输，天然气多用管道来输送，石油多用管道或普通工具来输送。能源不同，能源的载体和输配方式便不同，但是能源系统的信息载体与网络是可以实现统一和融合的。

能源互联网的发展可以分为信息层面和物理层面。在信息层面，用户已经可以借助市场和信息清晰化其能源需求并进行选择，能源体系的信息化已经趋于成熟，今后受能源的供需关系和市场化的影响，借助新的平台和信息渠道，能源体系的信息化还将继续发展。在物理层面，不同的能源可以通过转化设备与电力网、热力网在物理层实现融合，今后能源互联网物理层面的融合将会是能源互联网发展中较为重要的一部分。能源转化如何与电力网、热力网有效构成一个物理层网络，特别是

与电力网,这将是未来能源互联网发展应关注的重点问题之一。

未来,能源体系的构成将以可再生能源为主已经成为共识,今后可再生能源的发展速度可能会超过我们的预期。据相关报道,到2020年,德国的可再生能源发电将占到其电力发电总体的35%,到2040年,德国的可再生能源发电将占到其电力发电总体的三分之二,这一进展是十分迅速的。可再生能源的主要利用方式包括集中发电、分布式发电和直接热利用等方面,目前这些方式在我国已得到了大量应用。除此之外,还有一种非常重要的形式,就是将可再生能源转换成为其他形式的能源载体,如氢、人工光合作用合成燃料等,这些载体可继续转换成为电能和热能,这种利用形式将是未来可再生能源体系的重要组成。由此可以看出,未来实现电网的“能源互联”,解决可再生能源与信息的融合将是关键问题之一。

现如今,人类所用到的终端能源中,燃料仍占较大比重,将可再生能源转换成新型的燃料来替代化石能源,可以大大减少化石能源的应用,从而真正实现能源变革。例如合成氢和液体燃料,欧洲已经有了试验成果(运用技术手段将可再生能源配合二氧化碳和水等,合成液体燃料,这些液体燃料可直接应用在航空发动机上,且无需对航空发动机做任何改造);再如,利用太阳能配合水、二氧化碳人工合成甲烷的技术也已经成熟,以及应用非常广泛的制氢技术,这些合成的燃料可以用来发电,可以响应风电和光伏的间歇性,可以用来产生热能,也可以应用于电动汽车,作为混合型电动汽车的燃料。目前,这些转换的技术路径已经打通,今后问题的关键是在于怎样降低成本,提高转换效率。

今后,可再生能源发电仍将是可再生能源利用的主要方式,电能终端能源中的比重也将继续上升,但同时,可再生能源合成氢等燃料的利用模式的发展前景非常广阔。未来可再生能源的利用方式主要分为3个方面,即发电与电网、热转化与热力网以及燃料转换发电,以此构造一个以可再生能源电力为主的高效清洁的能源供应系统,实现能源革命,满足人类的能源需求。随着技术的成熟,如果未来可再生能源能大量变成燃料,那么可再生能源各个利用方式的比重也将发生调整。

就技术问题而言,智能电网与能源互联网涉及的技术非常多,其中智能电网关键技术是核心,可大致分成两类,如下图所示。第一类是信息技术,如新型高性能传感器及其网络技术、能源网通信技术、专用芯片技

术和能源网云计算技术等;第二类是装备与材料技术,如未来电网的结构和网络重构技术、电网的安全稳定控制技术、智能电力设备和储能技术等。智能电网的发展中,物理层面主要通过装备和材料来体现,而许多信息层面的内容也会融入到物理层面中,并促进物理层面的升级改造。

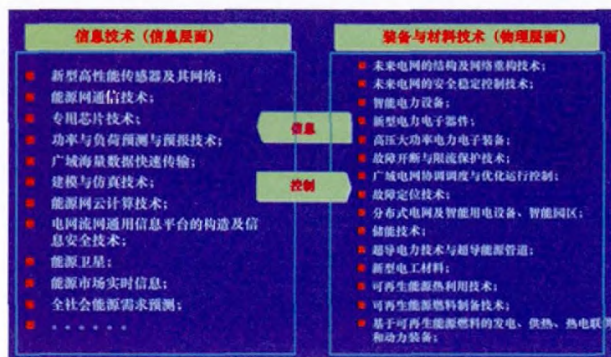


图 智能电网关键技术

可再生能源的时空互补性

电气应用:近年来,可再生能源发电快速发展,在电网中的比重不断增大,但同时也面临着并网困难、无法消纳的问题,对此您有什么建议?

肖立业:过去存在着可再生能源大量输出、电网无法消纳方面的问题等,如果孤立地来看待各个地区的风电场和光伏电站,这些问题会非常明显。但如果从全国乃至从全球能源互联网的角度来看,会发现可利用各种可再生能源的时空互补性解决这些问题。合理利用广域可再生能源时空互补性能实现能源网跨地理区域资源优化配置,同时有助于改善电网有功功率瞬态平衡问题,提高电网运行经济性和稳定性。因此,构建广域电网仍将是我国智能电网发展的必然趋势。

目前我国智能电网面临着两方面的挑战。一是有功功率实时平衡的保持。可再生能源输出功率依赖于天气,随机性强,具有间歇性和波动性,而电力系统作为一个复杂的动态过程,需维持供电和用电的实时平衡,以保证系统的安全稳定。二是发电资源和负荷地理分布不平衡。广域可再生能源时空互补性的研究,对于解决以交流电网为主的电网供应模式有很大的帮助。未来,从西部地区、北部地区向中东部地区、南部地区供应能源将是一个长期的趋势,即使可再生能源占比不断增大,跨区域、大范围进行各种电力资源的调度和配置也是必要的,电网仍然是要保持一个全国性的广域电网,这就为时空互补性的利用提供了一个很大的空间。关于

广域时空互补性的研究,美国 and 欧洲也做了大量的工作,但这些国家的地理条件等与我国有很大的差距。

中国科学院电工研究所对国内的一系列可再生能源互补性问题做了相关研究,首先从国家气象局获得了大量的数据,并做了一系列的研究和分析。经研究,如果将某区域内风电场的电能进行集中再进行外送,那么其波动性相对于每个风电场都分别进行外送的情况时要小很多。如果将全国的风电场通过一个有效的电网进行有机整合,那么其波动性是可以进一步减少的。时空互补性如果被有效地利用起来,对于未来能源的发展非常有利。

中国科学院电工研究所对于我国太阳能的时空互补性也做了同样的调查研究,如果太阳能、风能这两者再进行风光互补,效果就会进一步体现出来。与此同时,还有其他很多资源也是可以与太阳能和风能进行进一步互补的。例如生物资源,作为一种灵活、可调度的能源,其与传统的化石能源一样,也可以根据需要进行调度,并可用来应对风电和光伏的波动性。据统计,目前有相当于5亿kW的生物质能发电设施,规模很大。此外,我国水电资源丰富,也可以用来对风电和光伏发电进行互补。近年来,电动汽车产业高速发展,作为储能与可控资源,电动汽车也可参与电网互动与电源实现互补。

总的来说,我国电网首先是一个广域大电网,其次是分布式电网,二者的有机共存需要发展大量的智能化设备,以解决可再生能源时空互补上的技术难题。未来,广域可再生能源时空互补技术的发展方向主要有可再生能源输电网的构建、包含可再生能源电网的运行方式、大电网不同时间尺度下储能需求评估以及跨区域多端直流输电线路容量优化等。

直流电网技术

电气应用: 2009年,我国就提出了发展直流电网以构建国家新能源电网的构想,直流电网较交流电网有哪些优势,当前国内外对于直流电网的研究现状如何?

肖立业: 相对于交流输电网,直流输电网不存在交流输电网的稳定性问题,适合于构建超大规模电力网络,特别适合于不稳定性电源的规模化接入,电网的运行与电源动态特性无关,可更加方便接入不同类型的电源。同时,直流输电具有输电距离远、网络损耗相对小以及对环境无电磁干扰等优势。在过去,直流输电大多是指传统的直流输电,但今后的直流输电将会构造一个

网络。

近期,国家电网公司规划了一个500 kW的张家口到北京的多端柔性直流输电网络,以输送张家口的风电和光伏发电。虽然柔性直流输电本身还有一些技术问题需要解决,但一旦这些问题解决,柔性直流输电未来会有非常大的发展。在新能源领域,直流输电的方式是最有利的。从配电网来讲,直流输电负荷占了相当大的比重,尽管现在配电网采用的是交流模式,但直流电网相较交流电网有很多优势。从未来发展来看,无论是输电网、配电网还是微电网,都需要发展直流模式或者至少是交直流共存的模式。直流电网是未来电网的一个重要发展方式,相应的输电网、配电网和微电网关键技术和装备,是装备制造企业面临的机遇和挑战。

国内外也有很多对于未来直流电网发展的研究和尝试,并有了一定的共识。如香山科学会议第436次学术讨论会上,国内电气工程领域众多学者对于未来电网发展趋势达成的共识:为适应未来接纳大规模可再生能源电力和各种电源大范围电能传输、互补的需求,多端直流输电和直流输电技术将会得到发展;2012年,中国科学院咨询项目“能源革命中电网技术发展预测和对策研究”报告中,针对未来电网的发展趋势指出:未来电网的发展将受到新能源电力发展和智能化技术发展的作用,对未来电网发展模式影响最大的3项前瞻性技术是多端直流输电技术、超导输电技术和储能技术;2013年4月,美国麻省理工学院(MIT)公布了未来可能改变世界的十大科学技术,“直流电超级电网”就是其中的一项,研究认为直流电网使得遥远的可再生能源连接更加有效。国际上也正在开展一些重大的直流电网工程(如下表所示),同时还包括配电网和直流配电网数据中心方面的应用。中国科学院电工研究所在直流电网方面也提出了构造我国未来直流电网的一些想法,2010年就首次提出分层直流环网的结构模式,也研制了具有自主知识产权的直流电网装备。

超导与新材料的应用

电气应用: 请介绍国内外电工新材料的研究与应用进展,以及未来电工新材料的发展方向?

肖立业: 材料是构造电气设备的物质基础,电气设备的功能特点在某种程度上是由材料的性质决定的。因此,采用新材料提升电气设备的性能对于智能电网的发展非常重要,新材料也将成为电气装备制造业未来发展的一个关键点。

表 国外高压直流电网重要工程实施计划

国家	研究计划	目标	技术摘要
美国	近海风电直联联网	大西洋风能传输网	间歇性能源互补输电容量为6 000 MW
欧洲	北海各国海上风电计划	北海海上可再生能源通过直流电网并入欧洲电网	多种资源互补；风能、太阳能、水电和波浪能多端直流电网；环网状或放射状
加拿大	多端直流输电	魁北克-新英格兰	三端高压直流环网，输电容量为2 250 MW
印度	超高压多端直流输电	印度东北部-Agra	四端超高压直流环网，输电容量为8 000 MW；输电距离为1 728 km

(1) 新型节能材料

高导电材料方面。国外在架空导线用电工铝合金导体材料方面，以日本住友电工和古河电工、意大利比瑞利公司、法国内克森公司及美国通用电缆公司为代表，开发出一系列具有世界先进水平的电工铝及铝合金导体材料及导线产品，并在国外输电线路获得了大规模应用和推广，其相关导线产品的综合性能都明显优于我国；近年来，国家电网公司进行科技攻关，开展61%IACS耐热铝合金导线、59.2%IACS中强全铝合金导线以及63%IACS硬铝导线的研制及应用技术研究工作，目前已获得了一定的技术突破；基于碳纳米管掺杂的高导电铜材、铝材或引入纳米孪晶的高导电铜是未来导电材料的重要发展方向，已在实验室取得成功，如能工业化，影响巨大。

磁性材料方面。国外在电力变压器用取向硅钢、配电变压器用非晶合金、电力电子设备用高频软磁材料、高压/特高压变压器用低磁钢材料等电工磁性材料方面取得了重要新进展；在标准体系方面，欧盟、美国不断推陈出新，拥有完善的电工磁性材料评价标准体系；2010~2015年，国家电网公司在0.27 mm取向硅钢在高压/特高压变压器应用技术、0.18 mm取向硅钢研发技术、高电压等级变压器取向硅钢评估技术和非晶合金在配电变压器中的应用技术等开展相关研究，目前处于国际先进水平。

(2) 新型能源材料

国外在储氢、燃料电池和超级电容器储能方面开展了大量研究工作，日本、美国等发达国家走在世界前列。固态储氢材料方面，开展研究工作的代表单位包括

日本原子能研究所、日本东北大学、美国加利福尼亚大学和宾夕法尼亚大学等，其中过渡族金属化合物已在日本得到应用；燃料电池方面，电力用燃料电池发展重点为固体氧化物燃料电池，美国、日本走在前列，代表单位包括西屋、日本京瓷等公司；超级电容器储能方面，国外关于超级电容器等化学储能电极材料基础及应用技术方面的研究起步较早，投入较多，日本、美国和欧盟等国家的研发水平处于世界领先地位，部分高性能产品处于垄断地位。

国内在相应领域的研究水平与技术水平与国外差距较大。储氢材料方面，代表单位包括钢研院、浙江大学、北京科技大学、中国科学院大连化物所等单位，但储氢新材料实用化进程与国外差距较大；固体氧化物燃料电池方面，LaMnO₃、YSZ电极材料和ZrO₂-Y₂O₃电解质材料等核心材料问题亟待解决；我国超级电容器等化学储能电极材料方面的研究起步较晚，但跟进速度较快，大量基础研发及应用技术研究工作亟待开展。

(3) 新型智能材料

国外关于电网用智能材料及其应用技术的起步较早，投入力度较大，以美国、日本和德国等发达国家为代表，如美国邦纳、霍尼韦尔、日本三菱集团和德国施克等知名公司；国内在电网用智能材料研发及其应用方面的研究工作主要以清华大学、中国科学院、浙江大学、北京航空航天大学 and 武汉大学等研究机构 and 高校为主，尽管已在国内电网相关领域，如接地网、输电线路和继电保护等输变电工程上获得了少量试点应用，但如传感器用智能材料仍以硅、石英、钛酸铅、锆钛酸铅、氧化锌、形状记忆合金、碲化铅和碲化铋等传统功能材料为主。

(4) 新型电工绝缘材料

国外在高等级电工环氧、聚乙烯和液体硅橡胶等基础原材料方面掌握核心技术，在直流电缆用绝缘材料、屏蔽材料、直流开关设备用材料、热塑性绝缘材料、电力电子器件封装材料和变压器用纳米绝缘油等方面处于领先地位，高电压等级固体绝缘穿墙套管、芳纶绝缘拉杆、换流阀用绝缘螺杆及紧扎带等关键绝缘部件制造技术仍被国外公司垄断。此外，国外的电工绝缘材料基础性试验研究和检测技术研究都远强于我国，在绝缘材料特性方面的基础研究投入很大，对绝缘材料在电气设备运行过程中性能的变化、衍生物形成机理研究及检出技术的研究也正趋于成熟。

国内在电工绝缘材料领域的研究同国外相比还存在

较大差距。

(5) 超导与新材料的未来发展方向

新型半导体材料：以SiC、GaN材料为代表，材料及工艺的进步，产量的提升，生产成本的进一步控制，宽禁带电力电子器件的研发与产业化；新型节能材料：以超导材料为代表，新型超导体的探索、先进合成技术与掺杂技术的发展，新型高导电材料的研发；新型能源材料：生产成本的进一步降低，实现关键材料的批量化生产，高比能量的高性能储能材料的进一步探索，储氢材料的研制与实用化，电化学储能电极材料、电解质材料的研发；新型智能材料：以电力传感器材料为代表，针对电网特定服役工况及监测预警使用性能要求的新型智能材料的研发及其应用，新型环保智能材料的研发制备，传感元件的微加工制作；新型电工绝缘材料：高耐压等级、高寿命和环境友好的绝缘材料，新型纳米绝缘材料的研发。

信息技术的应用与智能微电网技术

电气应用：现如今，信息技术的应用在日常生产、生活中的作用日益凸显，基于现有的信息技术与电网实际情况，请谈一谈如何实现电网的智能化与能源互联？

肖立业：随着技术的进步，信息技术与整个能源系统高度融合构成一个信息物理系统是未来的发展方向。University of Padova and Patavina Technologies的Nicola Bui等人对互联网技术在智能电网以及未来能源网中的应用进行了研究，包含联网的解决方案、相互协作的通信以及可视化技术等；University College London

的K.V.Katsaros等人提出在电网中利用中心网络架构(ICN)实现了智能电网从P2P的信息交互方式到M2M方式的转变；美国的S.E.Collier认为物联网技术的发展将促进电网与能源网的发展，未来智能电网与能源网的发展依托于物联网技术。

伴随着清洁、高效和绿色用电的需求日益增长，针对规模化推广分布式能源的趋势，尤其是分布式可再生能源接入的系列问题，以及用户侧的电动汽车充电站、分布式储能、热电联供等多类型用户和能源大量的接入需求，未来以智能微电网为基础构建能源互联网将是主要的发展模式，其主要包括以下几个方面。信息融合：通过信息-能源-设备-网络的广域融合，实现信息的扩展、融合、分析和挖掘，提供更多感知信息和决策；能源融合：通过多种能源相互补充和转化，发挥不同供用能系统间的互动和转化能力，并充分利用电能需求、天然气需求以及供热需求间的峰谷交错，既能改善可再生能源间歇性和随机性的缺陷，也有利于提高能源综合利用效率，增强运行灵活性和互动能力；网架：通过基于多端直流的能量路由器互联，将垂直网络扁平化，释放网络更大的能源接入潜力和互动能力。

智能微电网作为能源互联网的重要构成单元，可以通过对用户、能源和电网区域范围的聚合，解决大量分散资源参与的机制和运行问题，也可以激发更多的商业模式。微电网群互联和互动构成的能源互联网将在满足高度供电可靠性和高效率的前提下，为用户侧各种类型用电设备和分布式能源提供良好的接入环境，并能够充分利用用户侧资源，使电网和用户共同受益。EA

广告|AD



baiipo 佰珀新型材料

青春 谦学 责任 奉献

上海佰珀新型材料有限公司地处上海青浦，以独特的区位优势，深得中国经济发展先机。佰珀新型材料已经成为中国知名的SMC材料、模压制品、绝缘板材供应商。

产品广泛应用于电气电气、汽车、卡车、农业机械、轨道交通、建材、卫浴用品等领域。公司拥有丰富的研发资源，出众的工程技术。

地址：上海市青浦区天淀路168号 Post Code:201713
Add: Shanghai city Qingpu District days Lake Road No.168
Fax: 021-59831666 57766999
M.T: 138 1612 7328
http: www.bai-poo.com
E-mail:401071998@qq.com



让绝缘变得轻松自如!