

德国智能电网的实践及启示

李慧杰

德国斯图加特大学技术与环境社会学学院, 斯图加特 70174

摘要 德国一直致力于在可再生能源时代领军世界,而智能电网是未来低碳电力系统的重要一环,其中企业、政府的支持与管制对智能电网的发展尤为为重要。德国E-Energy(信息化能源)试点项目,旨在通过一个开放式的区域电力市场,将发电商、用电可调节的消费者、能源服务供应商、电网运营商集成为一体,借助信息和通信技术将发电直至消费的全部流程集成在一个平台,及时地交换信息进而优化整个系统。而需求侧作为缓解电力供需平衡的一种重要资源,在电力用户主动参与方面有很大的发展空间。本文综述德国智能电网的发展、实践及经验,分析其对中国电网发展的启示。

关键词 智能电网;德国;需求侧管理;可再生能源

1 智能电网的重要性

2010年3月3日,欧盟委员会公布“欧洲2020战略”,提出了欧盟未来10年的发展重点和具体目标。该项计划要求,欧盟到2020年可再生能源占最终能耗来源的比例提高至20%,能源消耗降低20%,温室气体减排较1990年减少20%。

在该计划基础上,德国于2011年提出更为严苛的温室气体减排目标:到2020年较1990年相比减少40%,到2050年至少减少80%。因德国温室气体排放大约40%来自于发电过程,尤其是火力发电厂,这一减排目标要求到2050年德国能源消费100%来自可再生能源。

因欧洲电网部分电网老化,翻新需要一笔费用,也可以趁此机会将其智能化,以应对新的挑战——大量可再生能源尤其是分布式电源的接入。既要确保电力供应稳定且经济,又要保证供电系统安全可靠,智能电网被提出用来处理多样化的接入电源,供给和需求侧的实时双向信息和电力流动使更有效地进行资源配置成为可能,因此也使智能电网成为未来低碳电力系统的重要一环^[1]。

2 德国智能电网的发展

2.1 相关政策

德国迄今尚无专门针对智能电网的法律法规,表1列出的主要有德国出台的能源效率政策、电网相关的一些主要政策,如《能源经济法》开始电力市场化改革、《可再生能源法》支持可再生能源入网。从中可看出,能源效率政策贯彻始终,建筑节能首当其冲,热电联产技术日益受到重视。

德国政府还参与支持了一些新能源项目,如1989年开始的100 MW风能项目,1991年开始的250 MW风能项目,

表1 与德国智能电网相关的重大法规或事件

Table 1 Regulations/Events relevant to smart grid development in Germany

时间	事件
1977年	《建筑节能法》实施,其后被多次修订
1977年	《建筑保温条例》生效
1978年	《供暖设备法令》生效
1981年	《供暖成本法令》生效
1991年	《电力输送法》施行,确保可再生能源电力入网,固定电价制推出
1998年	实施新的《能源经济法》,建立有竞争机制的电力市场
2000年	《可再生能源法》生效,取代《电力输送法》,可提供最长达20年的固定电价
2002年	《节约能源条例》实施
2002年	《建筑节能条例》开始实施,要求新建筑有能耗证书,取代《建筑保温条例》和《供暖设备法令》,之后被多次修订,不断提高了新老建筑的节能标准
2002年	《热电联产法》实施
2002年	《能耗标识法》实施
2005年	开始碳排放贸易机制
2007年	实施“全国能源效率行动计划(NEEAP)”
2008年	《耗能产品生态设计要求法》生效
2009年	《可再生能源供热法》实施
2009年	“沙漠计划”项目(DESERTEC)启动,在非洲北部投资建设太阳能发电站
2009年	经修订的《热电联产法》实施,计划提高热电联产发电量的份额
2011年	提出2022年彻底退核和能源转型战略

收稿日期:2015-05-25;修回日期:2015-07-28

作者简介:李慧杰,博士研究生,研究方向为能源与社会系统的耦合、公众对新技术的接受度分析等,电子信箱:huijie.li@sowi.uni-stuttgart.de

引用格式:李慧杰. 德国智能电网的实践及启示[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 299-303; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.042

1991—1995年的1000个太阳能屋顶计划,1998—2004年的10万个太阳能屋顶计划。德国通过项目所积累的经验,结合新情况不断对法规进行修订,例如2004年修订《可再生能源法》,区分不同级别的装机容量并分别定价;2009年修订《可再生能源法》,限制可再生能源上网电价补贴额度和时间;2012年实施新的《可再生能源法》,不仅提高了德国可再生能源电力的中期发展目标,还将可再生能源电力的长期目标写入了法律;2014年修订《可再生能源法》,再度削减上网电价补贴费率、限定年度新增规模,推进可再生能源的市场一体化。

另一个结合实际问题修订法规的例子是,1998年实施的《能源经济法》打破了能源市场的垄断,使得电价明显下降;2005年新颁布的《能源经济法》,结合环保问题将环境可承载性纳入到目标之中;2011年修订的《能源经济法》,针对推广智能电表测量系统制定了新的法律规范。

2.2 智能电网相关的项目

德国智能电网的发展,与本国的能源政策息息相关,也与欧盟的能源政策密不可分。例如,欧盟2009年开始酝酿可再生能源超级电网的宏伟计划,目标是建立一套横贯欧洲大陆的高压直流电网;智能电表作为智能电网的重要部分,欧盟大力推动成员国应用智能电表,鼓励智能电表的覆盖率在2020年达到80%。2013年更新的欧盟报告^[2,3]列出了德国所

开展的智能电网方面的项目,大概有1/3涉及智能电表的试点。德国的智能电表不像意大利等国铺开甚广,但德国对智能电网的测试非常重视产电、输电、配电到终端消费整个链条的契合。2008年,德国政府发起了E-Energy计划(<http://www.e-energy.de/en/32.php>),投资1.4亿欧元,在6个示范地区(E-Telligence、E-DeMa、MeRegio、曼海姆 MoMA、RegMod-Harz、Smart Watts)开发和测试智能电网的核心技术,其中包括技术的可操作性、市场的设计与运行等。表2^[2,3]列出了E-Energy试点项目的基本情况,张卫平^[4]曾作详细介绍。

欧盟报告^[2,3]列出的德国的26个项目(包括E-Energy项目),除1个智能电表项目在2006年开始外,绝大多数项目于2008年以后开始,历时2~3年。在26个项目中,所参与的机构(包括地方分公司在内),出现最多的能源企业为RWE公司、Vattenfall公司、EnBW公司、E.ON公司,这是德国能源行业的四大寡头,分别控制着德国不同地区的供电,也参与了绝大部分智能电网相关的项目。除这些能源寡头外,小公司在各项目中参与度也较高,个别大学、Fraunhofer研究协会也参与其中。而26个项目中,“系统整合”占16个,“用户应用”占9个,“智能电表”占8个,“配电、输电技术的开发与测试”占5个,关于储能技术的试点项目占3个。除此之外,欧盟报告中还提到了1个专门针对制度框架研究的项目。

表2 德国E-Energy试点项目
Table 2 German E-Energy program

项目名称	重要参与机构	项目类别	网址
E-Telligence	EWE公司	系统整合、智能电表、用户应用	http://www.etelligence.de
E-DeMa	RWE分公司	系统整合、用户应用	http://www.e-dema.de
E-MeRegio	EnBW能源公司	系统整合	http://www.meregio.de
曼海姆 MoMA	MVV能源公司	系统整合	http://www.modellstadt-mannheim.de/moma/web/de/home/index.html
RegModHarz	E.ON分公司, Vattenfall公司, Fraunhofer研究协会	智能电表、自动配电、系统整合、储能技术试点	http://www.regmodharz.de
Smart Watts	亚琛 Utilicount公司	智能电表、用户应用、系统整合	http://www.smartwatts.de

3 智能电网的行为主体

无论是智能电网的市场推广还是智能电网标准与相关政策的制定中,企业毋庸置疑是很重要的一个行为主体。在德国,企业在智能电网项目投资中居主体地位,尤其是德国电信及RWE公司、Vattenfall公司、EnBW公司、E.ON公司四大电力寡头等占比较大,传统大集团同当地的能源小公司、研究机构进行合作也具有重要作用。在新时期,四大电力寡头受到不小的冲击,其作为核能持有大户,2011年后才慢慢转变对新能源的态度,有时因为接入电网的新能源使得电力盈余,核电厂还不得不保持产能最低状态。日本福岛事件所

带来的“弃核”冲击及德国政府对新能源的大力支持,使得传统的四大能源集团必须重新寻找新的投资方案和商业运作模式来适应。

政府自然是更为重要的一个行为主体。德国联邦经济部、联邦环境部、联邦教育与科研部在资助智能电网的项目中都很活跃,而且多有合作,尤其是下属的能源理事会和电信理事会之间的协作。德国智能电网技术的应用始于2004年,是在联邦经济部的推动下实施的^[6]。E-Energy被认为是继电子商务、政府电子化管理之后信息化改革的新任务。E-Energy计划由联邦经济部发起并提供一半资金支持(6个项

目中有2个由联邦环境部提供资助),合作企业负责筹集另一半。

德国联邦经济部与联邦环境部在2010年6月共同发起了电网平台,旨在快速跟踪国家电网在能源转型中的拓展。后来演变成一个活跃的对话平台,有助于为智能电网的引入提供一个框架,广泛听取不同组织包括电力部门、环境部门、NGO、消费者群体、企业协会等的意见,共同探讨智能电网标准^[5]。

负责监管电力和电信的德国联邦网络局,作为智能电网最为重要的管制方,平行于联邦经济部的能源理事会,在智能电表项目中也发挥了重要作用。德国联邦网络局2011年底发表了“智能电网与智能市场”白皮书,呼吁相关方理清智能电网技术拓展中各自的责任。联邦网络局的主要任务是使电力行业尽可能的自由化,而减少政府干预,不同于联邦经济部与环境部的是,联邦网络监管局无需考虑能源转型的目标^[5]。

从未来电力市场(智能市场)的角度,Konrad等^[6]总结了相关研究提到的智能电网系统中的不同行为主体,主要涉及电网(TSO、DSO)、市场、可施加影响的主体(如政府)3个方面,并对不同行为主体的需求和功能予以了详细说明。其中产-消合一者是传统电网中所没有的角色,指电力消费者可以发电上网,白天可高价入网卖掉,晚上买平价电自用。除个人独资,也可以以一个社区或村为单位共同投资太阳能或风力发电站。德国已出现不少100%用可再生能源自给自足的社区,当地居民可投资入股,成功的例子如Schönau电厂(<http://www.ews-schoenau.de/>)、Feldheim新能源村(<http://www.neue-energien-forum-feldheim.de/index.php/self-sufficient-village>),供热亦可以完成本地自己供应,由当地农民负责能源作物的种植及沼气所需肥料的提供,同时也为当地创造了不少就业机会。

4 德国E-energy项目可借鉴的经验

德国E-Energy计划从2008年开始,为期4年,主要由RWE公司、Vattenfall公司、EnBW公司、E.ON公司四大能源寡头、示范地区的电网运营商和本地的发电企业共同参与。该项目基于一个开放式的区域电力市场,通过市场将发电商、用电可调节的消费者、能源服务供应商和电网运营商集成为一体,借助信息和通信技术将发电直至消费的全部流程集成在一个平台,通过及时的信息交换进而优化整个系统,而需求侧管理和储能设备可以平衡短期负荷来降低基础设施成本。电动汽车的充电站、热泵、冷却设备、取暖及纳凉等装置都是潜在的电力缓冲源,转移短期负荷的重要力量。E-Energy计划的试点项目还分别测试了不同供电密度的农村与城市、有代表性的人口结构和社会阶层分布的地区。从6个试点地区得到的宝贵经验^[7,8]有:

1) eTelligence项目发现由热电联系统(如冷库、热电站)

帮助储能调控非常有效,即使在可再生能源大规模并网的情况下也能比较经济地运行。

2) E-DeMa项目测试了产-消合一的用户,即既是电力消费者,同时又是电力生产者。通过信息化的电力市场将分散的电力汇集起来,分布式小型生产者的可控性整合由14个微型热电联产机组在网络中进行协调。

3) MeRegio项目测试了年用电量在100万~1000万度电的企业(尤其是中小型企业)的需求侧管理,参与的30家企业涉及公共部门、餐饮业、机械及金属加工行业。对企业能源消费进行实时监控,可以使企业对自己的能效提高及错峰用电的可行性有更明晰的认识。

4) MoMA项目中曼海姆作为示范城市,将电力系统设计成由单元构成保证安全供电。能源市场及电网控制由中心单元管理,中心单元再为各对象网络单元分配市场调节者、网络调节者。因此可以进行区域性调节,保持各网络单元电力供应与消费的平衡,断电如若发生,便于把受影响的范围及时控制在局部,不会让电力系统全面瘫痪。

5) RegModHarz项目将示范区不同的可再生能源(如风能、太阳能、生物质能)发电商、消费者和储能装置(如燃料电池)集成于一个虚拟的发电厂。通过包括智能电表在内的管理调控机制协调发电、储电和耗电,证明即使可再生能源发电比例较高,按需供电尽量降低残余负荷的电力系统也稳定、可靠。在测试的14天里,虚拟电厂所卖出的330万度电来自分散的可再生能源发电,该项目还证实,通过对风力状况进行短期预测可以降低对储能的需求,生物沼气的灵活使用也为平衡风力和太阳能发电做出很大贡献。

6) 15个公共市政公司参加了Smart Watts项目,目的在于通过连接不同行业(电力、供热、燃气)来进一步优化调控系统。电、气、热共用信息和通信技术网关,实现供电系统的互用性和标准化。浮动电力的价格则是基于神经网络的人工智能计算得来的。

5 对中国的启示

德国一直致力于在可再生能源时代领军世界。对德国2050年能源消费100%来自可再生能源,经可再生能源研究协会初步研究表明,其在技术上并不是问题^[9]。德国与中国在能源问题上有许多相似之处:能源消费量都较大;除煤炭资源丰富外,石油和天然气很大程度上依赖进口。德国现在面临的很多能源问题,中国也有可能碰到。减少化石能源的燃烧不仅可以降低二氧化碳排放量以应对国际压力,对内改善环境质量,而且有效利用本地免费资源(光、风、水),降低对能源进口的依赖也大为必要。因此,中国智能电网的发展可以借鉴德国能源转型的经验。

智能电网和新能源的发展是密不可分的^[10]。大幅度提高新能源接入电网的比例所带来的电力供应的可靠性问题,一方面可以依赖储能来平衡电力供应的盈余与不足,但成本较

高。现在德国有些研究机构的主要努力方向是多余能量转换成便于运输的X,比如转换成燃气;其他机构尤其是从事电气工程研究的更看好电动汽车未来接入电网中所能发挥的巨大作用。另一方面可以从需求侧进行管理,政府可以鼓励用电量较大的行业(如化工、冶金、造纸等)从优化自身生产流程考虑提高能源使用效率,电力公司亦可鼓励用电大户的企业签订紧急状态下的省电合同,每年按照约定的次数在若干时间段停掉某些工艺而又不影响生产。而这对商业或者办公大楼也同样适用。德国E-Energy项目得出,在信息化的能源管理系统帮助下,商业部门节电最多可达20%,负荷转移最多可达20%,在制冷、热处理等工艺流程方面尤其有潜力。而6个示范区都测试了家庭用电的需求侧管理,发现居民节电最多可达10%,负荷转移最多可达10%。

中国对电力需求侧管理(DSM)的研究起步较晚,但电力需求侧管理是世界公认的缓解电力缺口最有效的方法之一,也是一种重要资源^[11]。通过更加透明化的电力信息系统,让公众意识到电力资源的有限性,在有激励的定价和反馈系统(如电力消耗、电费结构及在线咨询均实现联网可视化)的支持下,即使是单个家庭也可以为能源效率的改善贡献力量。将需求侧资源与供电资源一起规划,可以降低电力建设投资,减少能源消耗。需求侧管理可以结合峰谷、分时电价一同开展,为想节电又能省钱的用户提供更多的选择余地。但有两点需要注意^[7,8]:

1) 需求侧管理要让用户比较容易上手。德国E-energy项目中借鉴交通信号灯的电价指示灯,亮红灯表示超高的电价,亮黄灯表示电价处于普通水平,亮绿灯表示超低电价,以简单明了的形式通知用户当前的电价情况颇受好评。用户也可以选择为手机安装能源管理App,随时了解能源消费情况。除此之外,用户可以手动设置家用电器在电力充足、低价格的时段打开,也可以将联网的智能家电(如洗衣机、洗碗机等)设置成在低价格的时段自动运行。而能源管家自动化管理智能家电以响应浮动的电价,更大大提高了消费者对需求侧管理的接受度。

2) 电价能否调动用户积极参与需求侧管理尤为关键。德国E-energy项目中成效比较显著的是事件电价(event tariff),它是分时电价的延伸,如果预测到特别不利或有利的天气情况,至少提前1天告知用户在未来某一时间段上涨或下跌之后的电价。以eTelligence试点项目为例,在平时非用电高峰期(晚8:00至早8:00)、周末电价是每度电11.67欧分,用电高峰期(早8:00至晚8:00)电价一般是每度电39.79欧分,而在恶劣天气的时间段内电价甚至有可能涨到每度电140欧分,在天气极好的时间段内电价可能几乎为0欧分。650户家庭参与了节电与错峰用电的项目,事件电价的运用使得试点家庭平均节电量在早8:00至晚8:00的高峰期达到12%。在极端高价的时间段有大约20%的用电量被错开了,而极端低价的时间段多了30%的用电量。这些主要归功于特殊的定

价机制及智能电表的实时反馈。消费者有了及时审视自己消费情况的机会,加上电价激励机制(如对错峰和避峰负荷给予一定的奖励),会更积极地参与电力需求侧管理。

对提高电网的智能化水平,相比较而言,中国重视“坚强”输电网的建设,德国更注重可再生能源贡献产电的比例。同时,德国也面临着一个前所未有的挑战:分散的公众(46%,2012)较传统电力寡头(5%,2012)占有更多可再生能源装机容量^[12]。中国可以向德国学习分布式小型生产者的可控性整合(E-DeMa项目),分散但又有一定程度集中地发展新能源。更加开放的虚拟电厂可以吸纳小的市场参与者(RegModHarz项目),并通过需求侧管理与分散发电进行区域性匹配。

从法律法规角度看,能源效率政策是非常重要的过渡,建筑行业首当其冲。中国非常重视节约用电。而德国居民主要是从使用能效高的家用电器来节电,生活舒适度没有降低,通过提高效率就减少了对能源的消耗。为此在新旧房屋供热节能方面,德国早年发布多部法律规定建筑保温要求、提高建筑节能标准,并根据实际情况多次修订相关法律,如新增建筑须配备能耗证书、通过政府补贴鼓励居民为房屋安装隔热层,中国在改善能效方面还有很大的发展空间。

参考文献(References)

- [1] Giordano V, Bossart S. Assessing smart grid benefits and impacts: EU and US initiatives[EB/OL]. 2012 [2015-07-27]. <http://ses.jrc.ec.europa.eu/assessing-smart-grid-benefits-and-impacts-eu-and-us-initiatives>.
- [2] European Commission Joint Research Centre. Smart grid projects in Europe: Lessons learned and current developments[EB/OL]. 2011 [2015-07-27]. http://ses.jrc.ec.europa.eu/sites/ese.jrc.ec.europa.eu/files/documents/smart_grid_projects_in_europe_lessons_learned_and_current_developments.pdf.
- [3] European Commission Joint Research Centre. Smart grid projects in Europe: Lessons learned and current developments[EB/OL]. 2013 [2015-07-27]. http://ses.jrc.ec.europa.eu/sites/ese.jrc.ec.europa.eu/files/documents/ld-na-25815-en-n_final_online_version_april_15_smart_grid_projects_in_europe_lessons_learned_and_current_developments_-2012_update.pdf.
- [4] 张卫平. 德国智能电网的发展现状[J]. 全球科技经济瞭望, 2011, 26(1): 18-25.
Zhang Weiping. Smart grid in Germany[J]. Global Science, Technology and Economy Outlook, 2011, 26(1): 18-25.
- [5] Bichler M. Smart grids and the energy transformation: Mapping smart grid activities in Germany[EB/OL]. 2012 [2015-07-27]. http://www.sefep.eu/activities/publications-1/SEFEP-Smart%20Grids_report%20M.Bichler.pdf.
- [6] Konrad W, Scheer D. Das smart grid aus gesellschaftlicher perspektive [EB/OL]. 2014 [2015-07-27]. <http://www.innosmart-projekt.de/veroeffentlichungen.html>.
- [7] BAUM Consult GmbH. Smart energy made in Germany—Interim results of the E-Energy pilot projects towards the internet of energy[EB/OL]. 2012 [2015-07-27]. http://www.e-energy.de/documents/E-Energy_Interim_results_Feb_2012.pdf.
- [8] BAUM Consult GmbH. E-Energy abschlussbericht. ergebnisse und

- erkenntnisse aus der evaluation der sechs leuchtturmprojekte[EB/OL]. 2013-12-20 [2015-07-27]. http://www.e-energie.info/documents/E-Energy_Ergebnisbericht_Handlungsempfehlungen_BAUM_140212.pdf.
- [9] Forschungs Verbund Erneuerbare Energien. Energy concept 2050 for Germany with an European and global perspective[EB/OL]. 2010 [2015-07-27]. http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische_Papiere_FVEE/10.06.Energy_Concept_2050/EK2010_EN.pdf.
- [10] 张卫东. 智能电网的发展与政策[N]. 2014-04-01 [2015-07-27]. <http://www.chinapower.com.cn/newsarticle/1207/new1207679.asp>. Zhang Weidong. Smart grid development and policies[N]. 2014-04-01 [2015-07-27]. <http://www.chinapower.com.cn/newsarticle/1207/new1207679.asp>.
- [11] 林晓明, 肖勇. 智能电网建设中加强电力需求侧管理研究[J]. 中国电力教育, 2011(30): 46-48. Lin Xiaoming, Xiao Yong. Smart grid implementation of demand side management[J]. China Electric Power Education, 2011(30): 46-48.
- [12] Agentur für Erneuerbare Energien. Eigentumsverteilung an erneuerbaren energien-anlagen 2012[R]. 2013-04 [2015-07-27]. <http://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/eigentumsverteilung-an-erneuerbaren-energien-anlagen-2012>.

Smart grid practices in Germany

LI Huijie

Department of Technology and Environmental Sociology, University of Stuttgart, Stuttgart 70174, Germany

Abstract Germany keeps a leading place in renewable energies, where the smart grid plays a key role in managing the demand and the volatile green energy supply. Germany and China face many similar challenges in energy issues, therefore, China might learn from the German experience with respect to the smart grid development: making full use of local renewable resources and then reducing the use of fossil fuels, to not only cut down CO₂ emissions, but also improve the air quality, and less energy import means more energy independence and more security. Some big events or policies relevant to the smart grid development in Germany are reviewed in this paper. Field tests relevant to smart grid applications in Germany are found to focus mainly on the integrated system and the customer behavior. The smart meter as a key part of a smart grid has received some attention too. And the grid automation distribution, the grid automation transmission and the storage technology demonstration are planned to be tested in practice. In the field projects, apart from the traditional big four utility companies, Germany pays more attention to involve customers and small and medium-sized enterprises, which is an indispensable part of the innovation diffusion. Smart appliances need smart consumers. Besides the policy incentive, the user experience matters a great deal for a new product. The green energy creates many job opportunities. More investment possibilities like in the cooperatives could be provided in wind or solar parks. Supported by users and investors, new technologies have a better chance to hold a place in the market. In addition, German E-energy pilot projects provide some precious experience in the smart grid. The information and communication technology makes the energy system transparent and intelligent with respects to regional marketplaces to bring together consumers with shiftable loads, producers, energy service providers and grid operators. Electronic meters could provide the real-time information on major parts of the grid, which helps the optimization of the whole system. The demand side management (DSM) as one kind of flexibility resource, is very important for balancing the electricity generation and consumption. The potential of the DSM in the Chinese residential sector is great.

Keywords smart grid; Germany; demand side management; renewable energy

(责任编辑 陈广仁)