

英国智能电网概述

Nick Jenkins, Chao Long*, Jianzhong Wu

摘要: 本文为英国智能电网发展现状的概述。文中介绍了智能电网发展期间的相关定义、政策和技术驱动因素、激励机制、技术重点和行业发展情况,并特别详细说明了低碳网络基金和电网创新竞赛项目,展示了智能电表的相关部署情况。这些电力投资和智能电表安装将共同打造一个更加可测、可控的自动集成式电网。本文主要关注的是配电网络、受益于改进信息和通信技术的供电商与用户间的实时信息流及互动、有功潮流管理、需求管理和蓄能。从英国智能电网计划中取得的经验将为英国和其他国家未来智能电网的发展提供可贵的指导。

关键词: 智能电网, 电力系统, 可再生能源, 低碳网络基金, 智能电表

1 引言

由于气候学家一致认为温室气体(GHG)的排放将导致危险的气候变化,所以必须寻找更高效、无GHG排放或GHG排放量有限的发电方式 [1]。

就英国而言,电力行业是目前单个行业中GHG排放量最大的行业,排放量约占总GHG排放量的27% [2]。到2050年,英国计划将其电力行业的GHG排放量减少至零。在英国,虽然预计未来去碳化的电力系统极有可能依赖于可再生能源、核动力发电机和具有碳捕获和储存(CCS)技术的化石燃料发电厂来发电 [2],但这类混合发电方式却难以管理。因为这类发电体系中不仅混合有不断变化的可再生能源发电,而且从技术和商业角度出发,

还需确保大型中央发电机输出恒定。此外,随着供热和交通的电气化发展,电力需求的形式也将更加多变。因此,电力供需平衡需要更加智能的电力系统,而智能电网被广泛认为是现代电力系统的未来发展方向。智能电网的发展包括现有电网的现代化发展、现有电网运营方式的改变、促进能源用户的行为改变、新服务设施的供给、以及向可持续低碳经济转变的服务支持 [3]。

时至今日,英国在智能电网布局方面成绩显著,并在智能电网研究和示范项目方面进行了大量投资。这些项目都是通过一系列的计划进行的,如天然气和电力市场办公室(Ofgem)建立了着眼于支持电网创新的价格控制模型,并创立了5亿英镑的低碳网络基金(LCNF)及其后续项目——电网创新竞赛(ENIC)。承接创新项目、尝试新型电网技术和方案的电网公司不仅可以从这些竞赛计划中获取资金,还可通过电网创新补贴(NIA)[4]和上述创新资金激励政策(IFI)来获取更多的有限资金。此外,英国还全面展开了智能电表安装计划。这不仅能改进电网管理,还可帮助减少电力需求,促进供需体系的转变。

英国的智能电网发展涉及许多执行机构,包括政府机构(能源和气候变化部门,DECC)、国家监管部门(Ofgem)、电网公司、设备制造商和相关学术界。本文展示了英国电网发展现状和过去几年这些执行机构在电网发展中的角色,并说明了重点关注领域和迄今为止取得的成就,以及形成低碳智能电网未来所需做的工作。从中所学经验将为英国和其他国家的未来智能电网发展提供可贵的指导。

Institute of Energy, School of Engineering, Cardiff University, Cardiff CF24 3AA, UK

* Correspondence author. E-mail: longc6@cardiff.ac.uk

Received 29 September 2015; received in revised form 7 December 2015; accepted 9 December 2015

© The Author(s) 2015. Published by Engineering Sciences Press. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

英文原文: Engineering 2015, 1(4): 413–421

引用本文: Nick Jenkins, Chao Long, Jianzhong Wu. An Overview of the Smart Grid in Great Britain. *Engineering*, DOI 10.15302/J-ENG-2015112

2 智能电网的定义

未来电力系统预计将会广泛利用现代信息和通信技术(ICT),以支撑一个灵活、安全和经济高效的去碳化电力系统。智能电网可智能控制主动电网,促进可再生能源与电力系统的整合[5]。

世界各地使用的智能电网的定义均有所不同,并无一个通用的概念。这里列出英国常用的两种智能电网定义。

欧洲技术平台2006年编制的智能电网定义:

智能电网是一种为实现高效可持续、具有经济安全性的供电,智能整合所有与之相连的用户(发电商、用户或两者兼之)行为的电网。

智能电网中融合了创新产品和服务,以及智能监测、控制、交流和自我修复技术,以达到下列目标:

- 更利于采用不同规模和技术发电商的并入和运营;
- 能使用户共同参与协助系统运营的优化;
- 可为用户提供更多电力信息和供电选择;
- 可显著减少整个供电系统的环境影响;
- 能维护甚至提高现有高级系统的供电可靠性、质量水平和安全性;
- 可保持并改进现有服务设施的高效性;
- 能促使市场向欧洲一体化市场迈进[1,5,6]。

能源网络协会(ENA)对智能电网的定义如下:

智能电网指从发电到家庭自动化的整体结构,以智能电表作为重要元件,通过连接各网络设备、通信技术和通信过程来共同构建一个高效、智能的电网。

未来,完善的智能电网不仅能实现家用电器和智能电表间的通信交流,还能确保电网相关基础电力设施的高效利用,保障需求响应和能源管理,而这些对于充分利用间歇性的可再生能源、照亮价格实惠的低碳能源未来道路来说至关重要[7]。

3 智能电网的驱动因素

在英国,智能电网的驱动因素涉及两个方面——政策方面和技术方面。

3.1 政策方面

《2008年气候变化法案》[8]建立了具有法律约束

力的减排目标:①到2050年,英国的碳排放量比1990年的基准量减少80%;②到2020年,英国GHG排放量在1990年水平上减少1/3。2009年,欧盟委员会(EC)通过了相关立法,确保欧盟(EU)能在2020年达到艰巨的气候和能源目标。这些目标又称为“20-20-20”可再生能源指令,指令的三个主要目标如下[9]:

- 欧盟GHG排放量在1990年水平上减少20%;
- 将欧盟的可再生资源能耗比例提高至20%;
- 将欧盟的能源效率提高20%。

根据这三个总目标,欧盟就各成员国的具体气候和环境情况制定了不同的具体目标。英国的目标是:到2020年,15%的一次能源都来自可再生能源。随着这一指令的实施,欧盟大多成员国的可再生能耗都出现了显著的增长。

虽然英国能源丰富,但是现在英国的能源主要依赖于化石燃料中的天然资源。2005年和2009年使用的一次能源中,来自可再生能源的比例仅占1.3%和3.1%[10]。与欧盟的许多其他成员国相比,由于英国最开始的可再生能耗水平极低,所以2020年达到目标的挑战性也极大。

英国政府行动方案目标为:到2020年,通过实施国内法案将可再生能源输送量比例提升到15%。为达到这一目标,英国政府将各行业能耗中的可再生能源比例规定如下:

- 电力需求中可再生能源比例约占30%,其中2%来自小型电源;
- 交通需求中可再生能源比例占10%;
- 供热需求中,可再生能源比例占12%[10]。

由此可看出,电力、交通和供热方面的可再生能耗增加计划与碳排放预算一致,而这也有助于英国逐步达到2050年目标(GHG排放量减少80%[11])。为达到这些目标,英国发电和使用能源方式的改变主要在电力、交通以及供热方面[2]。

电力方面主要从可再生能源、核能和配有CCS技术的燃煤和燃气电站入手。交通方面计划采用超低排放汽车,包括全自动汽车、插电式混合动力汽车和正在研发的燃料电池驱动汽车。供热方面则计划采用空气源/地源热泵系统和电站供热等技术。

电力变化是这些变化中的核心。目前,英国发电量约为78 GW,高峰时期(电力需求约为58 GW)的过剩产能(又叫总容量裕度)约占34%[12]。随着供热、交通和工业生产过程的潜在电气化,电力需求可能会提升30%~60%[2]。因此,可能需要现在两倍的发电能力才能满足未来的高峰用电需求。预计所需发电量的一半都将来自可再生能源。CCS技术的发展有望降低相关成本

和风险,使得这项技术能应用于商业环境。无CCS技术的化石燃料发电厂将仅用于用电需求极高时的备用电源 [2]。

虽然英国政府在可持续能源、核能和CCS技术方面进行了大量投资,但是英国政府并没单独选择发展某项技术,而是在技术方面保持中立。哪种低碳技术的成本最低,市场份额就会最大。第4节介绍了一些相应的激励政策,第5节和第6节则详细汇报了电力行业的主要活动——LCNF项目和智能电表。

3.2 技术方面

3.2.1 老化的电网资产

在20世纪五六十年代,世界许多国家(如美国和多数欧洲国家)的电力系统都在迅速发展壮大。当时安装的输电和配电设备现在早已超出其设计寿命,需要进行设备更换 [1]。由于同等设备更换的建设成本极其高昂,所以输电和配电电路的更替显然是对新设计和运营惯例进行创新的良好机会。一些现有设备和线路的操作负荷已经接近最大容量,而这一情形限制了更多可再生能源发电机的接入。例如,为维护英国用电服务设施的质量,2010—2015年大约需要更换英国配电网中10%的开关设备和6%的132/33 kV变压器 [13]。这类设备更换需要更加合理、智能的布置,以在动态提高输电能力的同时充分利用那些负荷较小的线路。

3.2.2 操作限制

由于轻负荷期间的分布式发电可引起过压,并且热负荷(如电热泵)和电动汽车的电气化引起的用电需求增加也会引起低压,所以为能合理管理电压,需要协调本地发电、有载分接开关和其他设备(如稳压器和电容器组合)的操作。随着用电需求增加,分布式发电引起的就地逆流可能会使现有输电和配电设备与电路的发热超过规定限值。动态负荷评估有时可增加电路容量,另外通过用电需求管理或增加分布式发电的可控性可以克服发热的制约。一些分布式发电机采用直接连接的旋转电机,如老式风力涡轮机和使用感应发电机的小型水力涡轮机等,而热电联供(CHP)和大型水力涡轮机则采用同步发电机。这些发电机和新产生的旋转负荷可使最大故障电流超过配电系统的故障水平负荷评估值。为维持电力系统的安全操作,未来可能需要采用新型故障限流技术或服务设施。

综上所述,为反映发电的数量、地理位置和间歇性,应对新形式负荷,需要更智能的电网运营。若非如此,则须对传统的昂贵的电网进行改造。

3.2.3 供电可靠性

在未来10年,英国的电力市场将会发生显著变化。随着众多过度污染的燃煤和燃油电厂的关闭,以及一些核电厂逐渐达到其工作寿命,新项目的不断上线使可再生能源发电量不断增加。这将逐渐提高间歇性能源在能源结构中的比例,降低供电的整体可预测性。此外,电力容量裕度的降低也会增加供电安全的风。为满足政府的可靠性供电标准要求(甩负荷期望值不超过3 h [14]),英国国家电网(英国输电网络运营商)已另行购买了平衡服务设施作为平衡电力系统的额外工具 [15],如补充式蓄能平衡服务设施和需求方面的平衡服务设施。这一局势也迫使研究者着眼于蓄能方面(如先进的电池技术),以批量、经济地进行蓄能,或关注需求响应,以减少高峰用电需求。

4 英国智能电网激励措施和当前可再生能源的装机容量

英国已实施了一些激励方案来促进可再生能源的利用。第4.1~4.4节中对这些激励方案进行了说明。第4.5节则说明了具有同等目标的低碳技术项目。

4.1 气候变化税

2001年英国引进的气候变化税(CCL)是一种针对工商业在照明、供热和电力方面所用燃料而征收的税费,这些工商业包括工业、商业、农业、公共管理部门和其他服务设施。截至2015年4月,CCL针对电力的税率是 $0.554 \text{ p} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$,针对天然气的税率是 $0.193 \text{ p} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$,针对液化石油气的税率是 $1.240 \text{ p} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ [16],但使用可再生能源或高质CHP则可免税。气候变化税旨在推广可再生能源,提高能源的利用效率。

居民所用燃料不在CCL的征收范围内。免收居民的税金避免因燃料费用而增加家庭的负担。

4.2 可再生能源义务法

《可再生能源义务法》(RO,2002年在英国实施,2005年在北爱尔兰实施)是英国可再生电力项目的主要支持计划。该法律增加了英国供电商的责任,使得他们的一部分电力必须来自可再生资源。这一比例每年都在朝规定目标值增加。

可再生能源义务资格证(ROC)为绿色电力证书,主要颁发给经认可的可再生能源发电站,以证明其所生产的电力为可再生能源电力。供电商也将ROC视为其可再生能源电力已达标的证明。当供电商没有充分的ROC来证明其可再生能源电力已达标时,这些供电商须向“并购”基金

缴纳同等数量的资金，该基金的收入将会按比例退回给有足够ROC的供电商。

4.3 上网电价

英国2010年4月1日实施的上网电价 (FIT) 补贴政策是针对促进小型可再生能源和低碳发电技术推广而设计的政府方案。这些新能源技术包括太阳能光伏(PV)发电、风能发电、水力发电和厌氧消化技术，这些技术的最大装机容量为5 MW，而化石燃料CHP微型发电的最大装机容量为2 kW [17]。根据这一政策，无论是否输出至电网，持证供电商(FIT持有者)均应向这些小型新能源发电商补贴上网电价(如截至2015年4月1日，针对装机容量为4 kW_p或更低的太阳能PV的发电补贴为13.39 p·(kW·h)⁻¹ [18])。此外，如果这类电力将输出至电网，那么还需单独进行输出补贴(如截至2015年4月1日，这一补贴为4.85 p·(kW·h)⁻¹ [18]) [17]。

上网电价补贴价格由Ofgem根据DECC相关法律计算，并会随着零售价格指数和零售价格下降(即价格降低，表示可再生能源设备的成本减少)情况而变化。该补贴每隔三个月就可变更一次。只要设备可用(如20年)，就应持续为单独装机设备发放发电补贴和输出补贴，补贴依据是有效期、技术类型、装机容量和能效要求。引进FIT补贴政策后，针对新能源装机的补贴就在一直降低。例如，针对总装机容量为4 kW_p或更低的太阳能PV的初始补贴(截至2010年4月1日)为48.84 p·(kW·h)⁻¹。2012年3月这一补贴跌至22.59 p·(kW·h)⁻¹，目前这一补贴为13.39 p·(kW·h)⁻¹ (截至2015年4月1日) [18]。降低补贴的主要原因是新能源装机成本已经降低，并且FIT补贴政策的实施数量已经超过DECC的预测金额和所设计的资金分配量。

4.4 可再生供热刺激政策

2011年发布的可再生供热刺激政策(RHI)是政府实施的一项环境方案，旨在利用财务刺激政策推动可再生供热的应用。RHI将为英国合法的可再生供热发电机和发电商提供20年的可再生供热补贴。RHI以单位能源为单位，额外对家庭用户(从2013年3月起开始补贴)和非家庭用户(从2011年起开始补贴)的英国可再生供热发电商进行补贴，这些可再生供热包括太阳能热、生物质锅炉和空气源/地源热泵系统等。以前英国供热主要基于化石燃料技术，而RHI鼓励供热方面的技术发展，旨在显著提高供热中的可再生供热比例 [19]。

4.5 低碳技术的示范和部署项目

为应对21世纪二三十年去碳化技术高速发展的需求，除上述刺激政策外，政府也支持了许多低碳技术的示范项目和部署项目，这些项目对于电力市场来说是改革，而电网改革又被视为这次改革中极其重要的一步。目前，政府已经开始进行下列工作：

- 通过设立“海上风电成本削减任务” [20] 帮助企业减少海上风电的成本(旨在到2020年，将海上风电成本降低至100 英镑·(MW·h)⁻¹);
- 支持CCS技术的发展(投资10亿英镑)，以减少成本，降低风险；
- 承诺投资5000万英镑来支持海洋和海上技术的创新；
- 通过克服障碍促进成熟低碳技术(如核能)间的相互竞争；
- 支持电动汽车充电基础设施的建设，并投入3000万英镑来推动充电场所的框架建设 [21]；
- 在2010—2015年，联手Ofgem和工业界(投资5亿英镑)推动LCNF项目，2015年以后，对ENIC项目进行更多有限的资金资助。

通过上述政策和技术驱动，英国已在过去5年显著提升了其可再生能源发电的容量：2010年年初，英国的可再生能源发电量低于9 GW，到2015年 [22]已经提升到25 GW以上(见图1)，而陆上风电也从2010年年初的3.8 GW增加至2015年年初的8.5 GW。在同一时期，海上风电也从原先的1 GW以下增加至2015年的4.7 GW，而太阳能PV发电也从原有的41 MW增加至2015年的6.8 GW。2010年，生物质发电量只有2 GW，而在2013年的第二季度

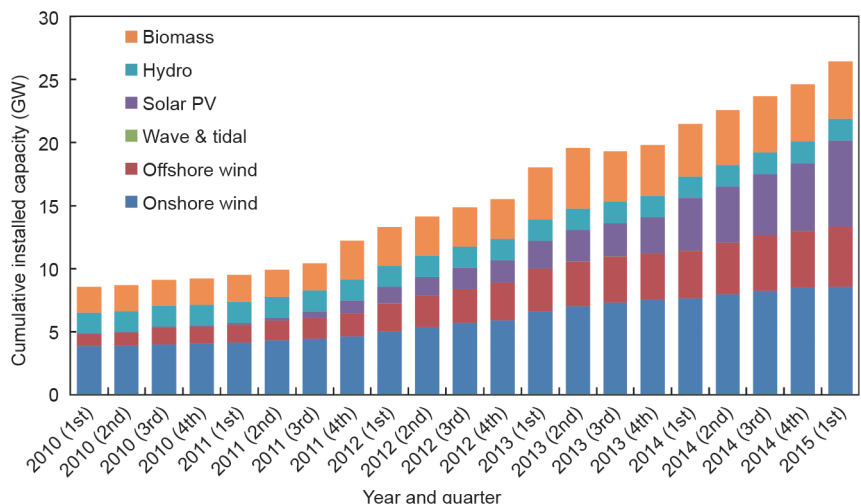


图 1. 2010—2015 年累计可再生能源发电装机容量 (按技术分类) [22]。

就已经增加到4.9 GW，此后则一直保持该装机容量至今(2015年)。由此可以看出，这些技术的装机容量在过去5年内的增长量已超过两倍，其中太阳能PV的增长态势最强。

然而，政府现在已经开始商议减少对可再生能源的刺激政策。减少刺激政策的原因有很多，例如，无论是在装机数量方面还是总装机容量方面，FIT补贴政策都已经超过所有可再生能源的部署预期。因此，政府已开始计划对2016年1月的新申请者进一步降低发电补贴，但仍将输出补贴作为促进可再生电力销售的途径之一 [23]。根据此方案，针对装机容量在10 kW_p或更低的太阳能PV的发电补贴将进一步跌至1.63 p·(kW·h)⁻¹。

5 LCNF 和 ENIC 项目的实施和进展

5.1 英国智能电网的焦点：配电网

英国的智能电网主要聚焦于配电网，因为配电网最需要充分的前期工作。首先，由于绝大部分电力损失都来自配电网，所以配电网运营商(DNO)必须具有管理其碳足迹的能力。此外，电热泵和电动汽车的应用，小型风力发电、家庭和社区微型发电方面的投资，以及其他促进去碳能源技术应用的激励措施也将对配电网的电力需求性质和模式产生深远影响。DNO可能需要积极管理间歇性电源和双向电流，而这类管理又需要显著改进其发电技术和电力需求技术 [24]。因此，由于最开始时对配电网实施智能干预措施的机会最大，所以需要配电网进行大量投资，以应对不断增长的电力需求和随之产生的许多新要求 [25]。

5.2 LCNF 和 ENIC 项目介绍

英国有14家持证DNO，这些DNO仅负责运营网络，不进行供电，电力来自各个单独的供电商。这些DNO均为区域性垄断组织，即各DNO只负责各区域的配电服务。这14家DNO由6家不同商业集团持有，用户是根据Ofgem相关措施以合理价格取得所需要的供电服务，而非单纯地让这些DNO进行竞争。Ofgem负责确定DNO可从用户处获得的总收入，并负责实施刺激政策来促使DNO对技术进行创新并寻找改善其服务设施高效性和质量的新途径。该目标通过实施被称为配电价格控制审查(DPCR)的价格控制措施完成，Ofgem对该审查计划的设置以5年为期。本次DPCR的5年期限从2010年4月开始，至2015年3月结束。

为鼓励DNO向低碳经济转变并促进新技术和商业惯例的实施，英国政府为本次DPCR的5年期限启动了

5亿英镑的LCNF项目基金。LCNF项目将对尝试新技术、新运营方式和新商业布置的DNO给予支持。该项目旨在帮助所有DNO了解其在英国迈向低碳经济的过程中，为达到安全和物有所值供电这一目标所需采取的措施。

LCNF基金下设两级基金。一级基金可弥补DNO在这类小型新能源项目上产生的一部分开支(每年1600万英镑)。Ofgem将使用二级基金来举办年度新能源项目竞赛，以资助一小部分新能源旗舰项目 [26]，最高奖金配置为6400万英镑。在这个过程中，DNO将会不断探索并展示其电网与低碳和节能激励政策的配合方式，如电动汽车、热泵、微型和就地发电以及需求侧管理等。同时，DNO也会研究分析智能电表的投入对电力公司的影响。从这些项目中获得的经验将与所有DNO和其他利益方息息相关。所有英国用户最终都能从这些项目中获益。政府计划首先对这类技术进行小型试点，成功后再进行大规模的实施。

2015年4月开始的新价格控制时期中增加了ENIC和NIA项目。这些项目是LCNF项目的后续项目，但是项目架构更广。除LCNF一级基金外，NIA还加设了IFI元素(IFI之前属于价格控制措施)。ENIC项目的二级基金范围比LCNF项目的二级基金更广，ENIC项目允许DNO和输电运营商(TO)都参与到最佳创新项目的竞赛中(每年最高奖金配置为8100万英镑)。这些项目将帮助所有网络运营商了解其在英国迈向低碳经济的过程中 [27]，为达到获得环境效益、降低供电成本和安全供电这一目标所需实施的工作。

5.3 二级项目的技术焦点

Ofgem每年会进行4~6个拟建二级项目的招标，根据项目应用和项目性质的不同，项目投资金额从几百万英镑到两千万英镑不等。表1右列中列出了近5年的所有已中标项目名称，由同一DNO集团实施的项目采用同一底色标注。表1左侧为这些项目对应的电压等级和涉及的主要技术问题。通过表1可以清楚地看出各DNO相关的技术领域和电压等级，以及智能电网目前发展阶段的焦点。

由表1可以看出：在整合各电压等级的分布式能源(DER)的同时，试点项目中也尝试了包括用户电压等级在内的所有电压等级；电压和热过载是限制DER整合的两大因素；在许多项目中，DNO所探索的是能解决不只一个技术问题的技术。

图2列出了所有二级项目中每种技术项目所占的比例。如图所示，通信技术在未来智能电网发展中的地位

表 1. 二级项目及其对应电压等级和所涉及的技术问题

LCNF project focus	Constraint			
	Voltage	Current/thermal	Fault level	
132 kV circuits			Y	A Capacity to Customers B Customer Load Active System Services (CLASS) C Smart Street V Fault Level Active Response D Customer-Led Network Revolution
EHV network (33 kV circuits)	U	R, K		E My Electric Avenue F Northern Isles New Energy Solutions G Solent Achieving Value from Efficiency H New Thames Valley Vision W Low Energy Automated Network
HV network (11 kV or 6.6 kV circuits)		J, N, I, Q	P, V	I Accelerating Renewable Connections J Flexible Networks for a Low Carbon Future
LV network (< 1000 V)	B, C, L, H	A, S		K Flexible Plug and Play Low Carbon Network L Flexible Urban Networks—Low Voltage M Low Carbon London N Smarter Network Storage O Vulnerable Customers and Energy Efficiency Y Kent Area System Management
Demand side		D, M, T, E, F, G		P FlexDGrid Q FALCON R Low Carbon Hub S LV Network Templates T Sola Bristol U Network Equilibrium

注：该表来源于参考文献[28].

至关重要，并且大多试点项目都采用了ICT技术。为改进电网的可视化管理、实施电网的控制和自动化，配电网中安装的传感器和远程终端设备(RTU)越来越多。例如，在“低压网络模板”和“智能街道”项目中，许多低压馈线(400 V)和中压馈线(6.6 kV和11 kV)都装有传感器。50 %以上的项目都在研究其电网潮流的主动管理问题，并关注相关的电压/热过载约束。故障水平管理也是另一个关注的区域。配电网重构被认为是平衡负荷和/或改善电压稳定性的最有效的方式之一。配电网重构主要通过增加自动开关或电力电子器件实现。DNO也阐述了用户参与以提高电力需求响应水平的问题。另外，由于分布式发电的接入，对减缓电力损失的关注度与传统电网相比有所降低。

根据这些LCNF项目，可以看出英国智能电网的发展呈现下列趋势。

- 智能电网发展中的支持力量主要来自新技术设备和新服务设施范例，尤其是通信技术的应用以及通过需求侧管理来促进电力系统的控制和优化。
- 通过安装众多新电网设备来完善电力资产的可视化管理和控制。智能电网须具有自我修复和弹性功能。同时，还研究了电力电子器件在电力系统中的运用情况。
- 探索蓄能问题，研究在提高电网运营价值、确定电网蓄能发展的技术中立规范目标的过程中，应采用的合适的蓄能方式和蓄能地点。

5.4 ENIC 项目未来的发展方向

2015年度ENIC竞赛已经完成了项目选择过程。中标

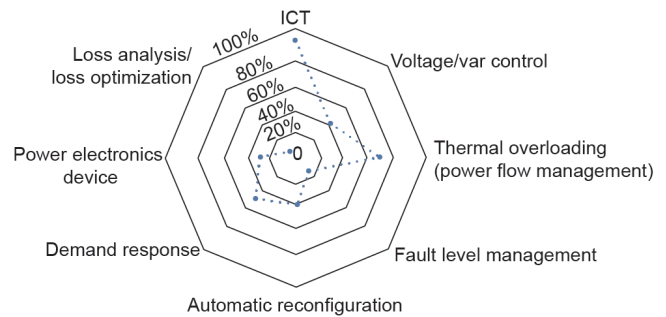


图 2. 所有二级项目的技术焦点列表。

的5个项目投资金额总计4490万英镑 [29]。从这些ENIC中标项目可以看出行业的一些关注点，而这些关注点也是英国智能电网未来的发展方向。

• 这些项目中，延长输电资产寿命的趋势十分明显。为延长输电网络的使用寿命，在完善创新方法和技术的同时，也将通过相应研究和示范项目来克服操作中遇到的困难。

• 为减少新架空线路的成本、提高大众的接受度，目前也在探索输电塔的创新设计。项目中也特别强调了在所需地形上将可再生能源发电机与132 kV和275 kV电网进行连接。

• 为使电力网络中各部分的并入更加可控，也将开展中压直流电(MVDC)技术(30 kV，约30 MW)应用的示范项目。开展该示范项目将有助于提高与电网相连的可再生能源发电机的容量。

• 强调先进通信技术在输电网络方面的更广泛的应用。为增加电网的可控性、降低环境影响、提高电站安全性、允许电网的快速部署，在数字通信技术中将采用

光纤而非铜质硬接线。未来还将对部分275 kV变电站开展示范项目，使该变电站完全符合EN 68150标准。同时，为检验设备的兼容性，还将采用来自两个供应商的设备。

- 未来仍将继续关注并探索配电系统的优化，以使电网公司在通过现有电力资产增加发电量的同时，不会损伤现有电力资产的健康状况和可靠性。

6 智能电表

6.1 国家首次投入智能电表

政府已承诺在2020年年底以前，为所有家庭和多数小型企业安装智能电表和燃气表。更换约4700万的燃气表和电表总共需投入86亿英镑，预计这一投入在未来20年会产生总计146亿英镑的收益 [30]。在这些收益中，供电商收益总计63.3亿英镑(占总收益的43.3%)，该收益包括节省抄表费用所获得的收益(26.9亿英镑)，以及减少咨询和客户管理费用所获得的收益(11.3亿英镑)；用户收益总计64.3亿英镑(占44%)，包括节能收益(42.3亿英镑)和负荷转移/时间电价(10.6亿英镑)收益。负荷转移/时间电价补贴部分通过电力市场上游进行，并假定将转嫁给用户 [30]。

6.2 电网采用智能电表的收益

虽然投入智能电表的初衷并不完全是为了电网，但是智能电网的发展也受益于智能电表的安装。

电网规划收益。对智能电表的负荷分布和电压分布进行分析将提高配电网的电力资产利用率。目前，对新电网并入和电网加固的要求进行评估时，电网运营商采用的是通用负荷分布。随着热泵和电动汽车的不断投入以及需求响应方案的普遍实施，这些负荷分布在未来极有可能改变，而已记录的智能电表数据将为未来电压和电力需求运营范围提供更加准确的预测依据。此外，智能电表的安装也能使电网设计者更加准确地设定所需设备、避免新型设备的过度花费、推迟电力资产的更新时间 [31]。

电网运营收益。使用智能电表将有助于电力中断处的定位，缩短电力恢复的时间。传统的电力故障管理依赖于用户报告。根据现在智能电表的有限投入，已经可以证明智能电表在电力中断时能协助定位电力故障处 [31]。此外，通过智能电表，电网运营商也能及时确定中断的电源是否已经恢复。安装智能电表能减少运营商在电力中断时对用户报告的依赖性，也能缩短电力恢复的时间。

用电需求管理收益。智能电表系统被视为广泛实施电力需求响应的一个先导条件。随着直接控制等激励性方案的提出，智能电表将通过向用户传达多种定价等级的方式来支持需求响应。

7 英国智能电网路线图

7.1 未来智能电网的环境

从电网角度来看，英国已经开始受到向低碳经济转型的影响：发电结构在逐渐变化，发电结构中可再生能源发电和其他低碳发电的比例在不断增加。就配电网层面而言，不断增加的太阳能PV系统、陆上风电厂和其他配电系统的并入请求带来了许多技术挑战，而这些挑战也对输电系统造成了冲击 [25]。除此之外，与日俱增的供热和交通电气化所带来的需求增加也可能超出传统设计电线/电缆和电力设备的装机容量。

从技术角度出发，电网中装设的ICT设备(如传感器和RTU等)和新型技术设备越来越多。随着智能电表的安装，这些已经测试的技术将极有益于未来智能电网的发展。

综上所述，对智能电网发展带来影响的有效响应以及用户的积极参与都将是智能电网持久发展的关键因素。

7.2 可能的角色和关系

智能电网的发展将为电力系统中的各相关方赋予新的角色和关系，各相关方包括供应商、发电商、网络运营商和用户(见图3)。

供应商将负责在整个英国安装智能电表，并将引入新时间电价补贴政策，以奖励避免在高峰期用电的用户。分布式发电机在响应局部用电需求方面将发挥更加积极的作用。用户也将在智能电表的帮助下通过用电需求管理，在协助用电供需平衡方面发挥更加积极的作用。

DNO(或其他组织)需要面临传统DNO角色的转变，传统DNO大多负责管理被动网络，而现在新型DNO为配电系统运营商(DSO)，需要负责支持本地电力平衡和系统优化 [25]。第一，运营商需要更好地管理电力资产。目前，配电系统的弹性大小取决于电力设备的容量裕度。电力设备中会预留产能过剩空间，从而在进行日常维护、新电网并入、电网加固和设备故障等操作时关闭部分电网，避免影响家庭和企业的供电。这类风险管理极有可能与已改进的网络可视化操作、实时电力资产容量的利用及用电需求的主动控制、发电和蓄能等进行整合。第二，当地也需要更好地管理用电供需关系。随着投资的

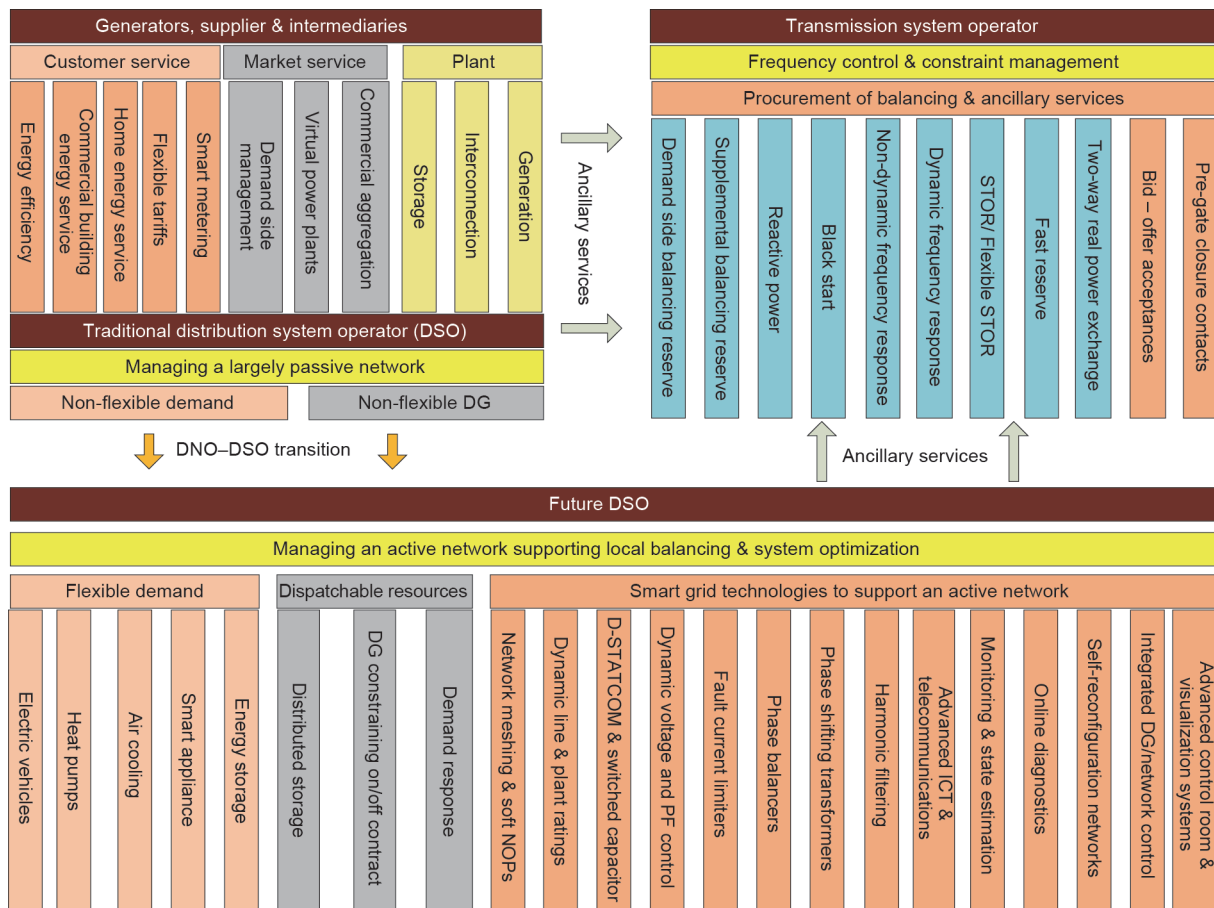


图 3. 未来电力行业可能的角色和关系 (转载自参考文献 [25])。DG: 分布式发电。

增多(如安装传感器、采用自动电源开关及安装通信电缆和设备等),为支持当地的用电平衡和系统优化,整个配电系统的运营范围也将扩大。第三,网络运营商须开发新的用户关系。配电网络必须与用户进行交互,并扩大实施低碳技术的新途径。

8 结论

未来,英国智能电网的建设面临着挑战,但是也充满着巨大的机遇。通过相关政策和技术驱动因素以及英国智能电网的激励政策和预测,本文展示了英国智能电网发展的现状、相关方面的角色、重点关注方面、迄今取得的成就以及未来为实现低碳智能电网所需进行的工作。

从文中可以看出,迄今英国取得的成就主要集中在配电网方面,包括受益于改进ICT技术的供电商与用户间的实时信息流及互动,以及有功潮流管理和用电需求管理。全国范围内智能电表安装是智能电网发展中国网络规划和运营及在用电需求中纳入用户参与的重要机遇。DNO向DSO的未来过渡也是英国智能电网运营可能的发展方向。

致谢

感谢中英NSFC/ EPSRC OPEN项目(EP/K006274/1和51261130473)和“地平线(Horizon)”2020项目P2P-智能试验(P2P-SmartTest)对本文部分内容提供的支持。

Compliance with ethics guidelines

Nick Jenkins was a member of the Ofgem LCNF Panel and is presently a member of the Ofgem ENIC panel.

Nick Jenkins, Chao Long, and Jianzhong Wu declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

1. J. Ekanayake, K. Liyanage, J. Wu, A. Yokoyama, N. Jenkins. *Smart Grid: Technology and Applications*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2012
2. HM Government. The Carbon Plan: Delivering our low carbon future. 2011[2015-09-15]. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/47613/3702-the-carbon-plan-delivering-our-low-carbon-future.pdf
3. Q. Sun, J. Wu, Y. Zhang, N. Jenkins, J. Ekanayake. Comparison of the development of Smart Grids in China and the United Kingdom. In: *Proceedings of 2010 IEEE*

- PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies Europe*. Gothenburg, Sweden, 2010: 1–6
4. Ofgem. Electricity Network Innovation Allowance. [2015-09-14]. <https://www.ofgem.gov.uk/network-regulation-riio-model/network-innovation/electricity-network-innovation-allowance>
 5. N. Jenkins, J. B. Ekanayake, G. Strbac. *Distributed Generation*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2010
 6. European Commission. European Technology Platform for the Electricity Networks of the Future. [2015-12-02]. <http://www.smartgrids.eu/ETPSmartGrids>
 7. Energy Network Association. Electricity—Smart networks overview. [2015-08-16]. <http://www.energynetworks.org/electricity/smart-grid-portal/overview.html>
 8. HM's Stationery Office and Queen's Printer of Acts of Parliament. Climate Change Act 2008. 2008[2015-09-15]. http://www.legislation.gov.uk/ukpga/2008/27/pdfs/ukpga_20080027_en.pdf
 9. European Parliament, Council of the European Union. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. 2009
 10. Department of Energy and Climate Change. National renewable energy action plan for the United Kingdom: Article 4 of the Renewable Energy Directive 2009/28/EC. 2010
 11. Department of Energy and Climate Change. UK renewable energy roadmap. 2011[2015-09-15]. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/48128/2167-uk-renewable-energy-roadmap.pdf
 12. Royal Academy of Engineering. GB electricity capacity margin. 2013[2015-08-23]. <http://www.raeng.org.uk/publications/reports/gb-electricity-capacity-margin>
 13. Ofgem. Electricity distribution price control review: Initial proposals—Incentives and obligations. 2009
 14. Department of Energy and Climate Change. Annex C: Reliability standard methodology. 2013[2015-09-01]. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/223653/emr_consultation_annex_c.pdf
 15. Ofgem. Electricity security of supply: A commentary on National Grid's Future Energy Scenarios for the next three winters. 2015[2015-09-01]. https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2015/07/electricitysecurityofsupplyreport_final_0.pdf
 16. HM Revenue and Customs. Climate change levy rates. [2015-09-15]. <https://www.gov.uk/government/publications/rates-and-allowances-climate-change-levy/climate-change-levy-rates>
 17. Ofgem. The Feed-in Tariff scheme—Factsheet. 2013[2013-06-22]. <http://www.ofgem.gov.uk/Media/FactSheets/Documents1/feed-in-tariff-scheme-FS.pdf>
 18. Ofgem. Feed-in Tariff generation & export payment rate table for photovoltaic installations—FIT year 6 (2015/16). [2015-09-18]. https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2015/01/fit_pv_tariff_table_for_1_april_2015_-_amended_0.pdf
 19. Ofgem. Non-Domestic Renewable Heat Incentives (RHI). [2015-08-20]. <http://www.ofgem.gov.uk/e-serve/RHI/Pages/RHI.aspx>
 20. Department of Energy and Climate Change. Offshore Wind Cost Reduction Task Force. [2015-08-20]. <https://www.gov.uk/government/groups/offshore-wind-cost-reduction-task-force>
 21. Department of Energy and Climate Change. Guidance: Plugged-in Places. 2013[2015-08-20]. <https://www.gov.uk/government/publications/plugged-in-places>
 22. Department of Energy and Climate Change. National Statistics: Energy Trends section 6: Renewables. 2013[2015-08-27]. <https://www.gov.uk/government/statistics/energy-trends-section-6-renewables>
 23. Department of Energy and Climate Change. Consultation on a review of the Feed-in Tariffs scheme. 2015[2015-09-20]. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/458660/Consultation_on_a_review_of_the_Feed-in_Tariffs_scheme.pdf
 24. Ofgem. Electricity distribution price control review initial proposals. 2009
 25. Department of Energy and Climate Change. Smart Grid vision and routemap. 2014[2015-09-15]. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/285417/Smart_Grid_Vision_and_RoutemapFINAL.pdf
 26. Ofgem. Low Carbon Network Fund. [2015-08-20]. <https://www.ofgem.gov.uk/electricity/distribution-networks/network-innovation/low-carbon-networks-fund>
 27. Ofgem. Electricity Network Innovation Competition Governance Document. 2015[2015-09-20]. https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2015/07/elec_nic_2-1_stat_con.pdf
 28. Ofgem. Low Carbon Networks Fund submission from Western Power Distribution—Network Equilibrium. 2014[2015-08-23]. <https://www.ofgem.gov.uk/publications-and-updates/low-carbon-networks-fund-submission-western-power-distribution-%E2%80%93-network-equilibrium>
 29. Ofgem. Electricity Network Innovation Competition: 2015 funding decision. 2015[2015-12-06]. https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/elec_nic_decision_2015.pdf
 30. Department of Energy and Climate Change, Ofgem. Impact Assessment of a GB-wide smart meter rollout for the domestic sector. 2010[2015-08-20]. <https://www.ofgem.gov.uk/ofgem-publications/63551/decc-impact-assessment-domestic.pdf>
 31. L. Thomas, N. Jenkins. Smart metering for the UK. 2012[2015-09-20]. <http://www.hubnet.org.uk/filebyid/191/SmartMetering.pdf>