

# 英国交直流输电网规划方法及对中国电网规划的启示

朱介北<sup>1\*</sup>, 周小尧<sup>2</sup>, 曾平良<sup>3</sup>, 张小平<sup>4</sup>, 王成山<sup>1</sup>

(1. 天津大学, 天津市 南开区 300072; 2. 英国国家电网公司, 英国 华威 CV34 6DA;  
3. 杭州电子科技大学, 浙江省 杭州市 310018; 4. 伯明翰大学, 英国 伯明翰 B15 2TT)

## Great Britain's Transmission Grid Planning Method and Its Enlightenment to China's Grid Planning

ZHU Jiebei<sup>1\*</sup>, ZHOU Xiaoyao<sup>2</sup>, ZENG Pingliang<sup>3</sup>, ZHANG Xiaoping<sup>4</sup>, WANG Chengshan<sup>1</sup>

(1. Tianjin University, Nankai District, Tianjin 300072, China; 2. National Grid Plc, Warwick CV34 6DA, UK;  
3. Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, Zhejiang Province, China; 4. University of Birmingham, Birmingham B15 2TT, UK)

**Abstract:** This article starts with the presentation of the development status of Great Britain's (GB) alternating current (AC) and direct current (DC) transmission grid. On this basis, this article addressed GB's AC grid planning and DC grid planning separately. In terms of GB's AC grid planning, the selection and establishment of future energy scenarios and transmission grid model, grid demand analysis, and the technical and economic benefit analysis are introduced. In terms of GB's DC grid planning, the economic benefit analysis of the AC network power congestion costs incurred by the DC grids, capital expenditure references, and economic analysis are introduced. Case studies for the AC and DC transmission planning assessments are presented and discussed. Finally, the significance of its reference to China's grid planning is proposed to provide comparison and reference for China's future grid planning work.

**Keywords:** transmission grid planning; future energy scenarios; economic benefit analysis

**摘要:** 首先简要概述英国交直流输电网的发展现状, 然后从交流和直流规划两方面阐述了其理念和方法。交流电网规划方面包括未来电力能源情景的选择和制定、电网模型的建立、未来电网需求分析、电网规划技术性和经济性分析等, 直流输电系统规划方面包括直流输电系统对交流输电网络潮流阻塞成本的影响、直流输电规划的参考成本以及直流输电系统的经济性分析等, 并分别给出了实践案例。最后结合英国电网规划的理念和方法, 提出了其对中国电网规划的借鉴意义, 以为中国未来电网规划工作提供对比和参考。

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA070220)。

National Key Research and Development Program of China (2018YFA070220).

**关键词:** 输电网规划方法; 电力能源情景; 电网规划经济性分析

## 0 引言

英国由不列颠岛(包括英格兰、威尔士、苏格兰)和爱尔兰岛北部的北爱尔兰区域、以及周围的上千个群岛组成, 国土面积约为25万km<sup>2</sup>(相当于中国广西的面积), 人口约为6500万人, 2016年英国国内生产总值为2.65万亿美元, 位居欧洲第三、世界第六。私营企业产值占国民经济生产总值的60%以上, 构成英国的经济主体。服务业尤其是金融服务业为英国的支柱产业, 其产值约占国民生产总值的三分之二<sup>[1]</sup>。

英国发电资源丰富, 是欧洲各国发电资源最多样的国家, 主要有煤、天然气、核能、水力和风能等。近20年来, 英国大力发展风电, 其中陆上风电的开发程度因土地限制趋于饱和; 同时, 因临近风能资源丰富的北海, 正在大力开发具备商业价值的海上风电, 目前估计海上风电可开发量为48 GW, 约占欧洲总体可开发风量的三分之一。

英国电力系统经过100多年的发展, 由实践探索形成了先进的规划理念、经验与标准规范, 尤其是高度开放的电力市场、成熟的电力监管机制和激励政策、完善的输配电规划与运行标准, 对于中国电力行业改革和未来电网发展格局具有较强的借鉴意义<sup>[2]</sup>。近20年来, 英国政府高度重视低碳可再生能源技术, 积极建设发展风电、光伏和直流输电等新技术, 截至2017年

底, 风电和光伏装机已占总装机的约30%<sup>[1]</sup>。如今英国实现了高比例可再生能源电力系统运行, 足见其发展新能源的雄心魄力和对本国电网规划运行技术的信心。

英国在输电规划方面正在推行积极有力的改革<sup>[3]</sup>。2015年之前, 英国国家电网 (National Grid)、苏格兰电力 (Scottish Power)、苏格兰及南部能源 (Scottish and Southern Energy) 3家输电公司在各自所属领域进行独立的电网规划和实施。在没有引入市场竞争的情况下, 它们各自的成本和效益由英国电监会 (office of gas and electricity markets, OFGEM) 制定的价格管制框架进行控制。2015年后, 主要进行2个阶段的改革: 第一个阶段改革, 是随着大型离岸风电场的快速发展, 英国电监会允许通过招标程序成立独立的离岸输电公司 (offshore transmission owners, OFTO), 这是第一次在电网规划方面引入竞争; 第二个阶段改革称为整合输电系统规划与管理 (integrated transmission planning and regulation, ITPR), 是为实现高效、协调、经济的输电规划目标, 将英国国家电网公司的调度部门作为独立公司完全分离出来, 强化其在电网规划方面的权力。

本文第1章从英国电网发展现状入手, 在第2章和第3章分别探讨英国交、直流输电系统的技术性设计和经济性分析, 同时详细介绍英国交直流输电的规划理念与方法。第4章分析了英国输电规划方法对中国电网规划研究的借鉴意义, 第5章总结全文。

## 1 英国电网发展现状

根据图1的英国峰值负荷曲线 (各情景说明见2.1

节), 英国不列颠岛2018年最大电力负荷为62 GW。由于用电能效提高、经济放缓, 英国用电负荷峰值近十年来呈现逐年下降的趋势。英国的用电高峰在冬季, 低峰在夏季 (最低为17 GW), 负荷大多数时间在30 GW至40 GW的区间变化。

截至2017年底, 英国的发电装机容量按照发电技术分类如图2所示。燃煤电厂在政府的高二氧化碳排放税的限制下逐渐关停, 新能源发电尤其是风电在 Renewable Obligation和Contract for Difference等新能源鼓励政策的驱动下发展迅速。值得一提的是, 英国于2017年4月21日首次实现了自工业革命以来的24 h零煤炭发电, 这标志着英国在新能源发展和降低工业二氧化碳排放方面跨入了一个新阶段。

英国的输电网电压等级为400 kV和275 kV (苏格兰地区为132 kV), 架空线长度为23 000 km, 电缆长度为1500 km, 变电站数量为700余座, 主变压器数量为1200余台。配电网主要电压等级为132 kV (英格兰及威尔士)、66 kV、33 kV、11 kV和400 V, 其中城市配电线路以电缆为主<sup>[1]</sup>。

英国不列颠岛目前有4条跨国直流输电线路 (如图3绿色线路所示) 和1条国内高压直流线路<sup>[3]</sup>。4条跨国直流线路分别连接爱尔兰 (EWIC, 容量为500 MW)、北爱尔兰 (Moyle, 容量为500 MW)、法国 (IFA, 容量为2000 MW) 和荷兰 (BritNed, 容量为1000 MW)。1条国内高压直流线路 (Western Link, 容量为2400 MW) 连接苏格兰西部海岸与英格兰西北部海岸, 2017年投运后该线路保障了苏格兰多条风能向英格兰用电中心的输送。如图3橘红色和蓝色线路所

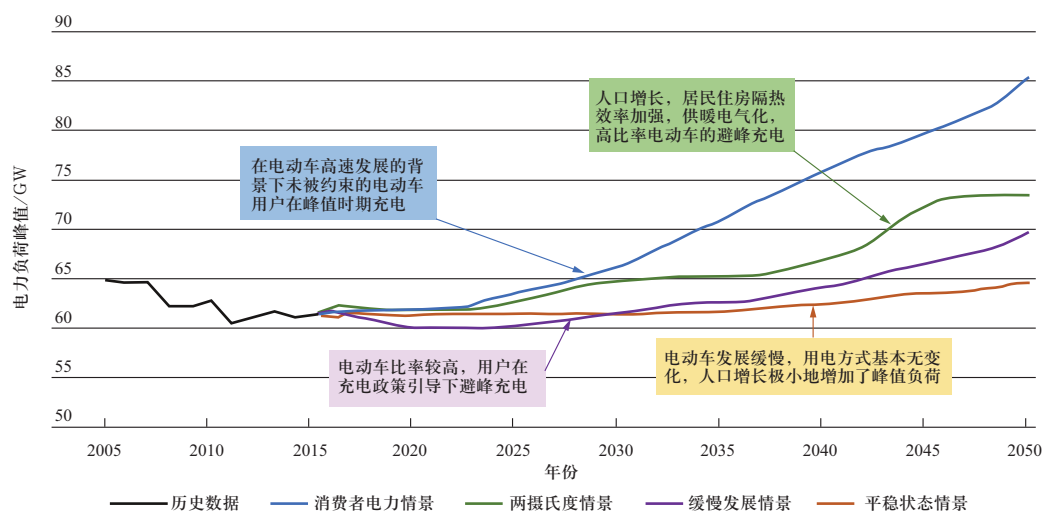


图1 英国峰值负荷曲线

Fig. 1 Electricity peak load curve of Great Britain (GB)

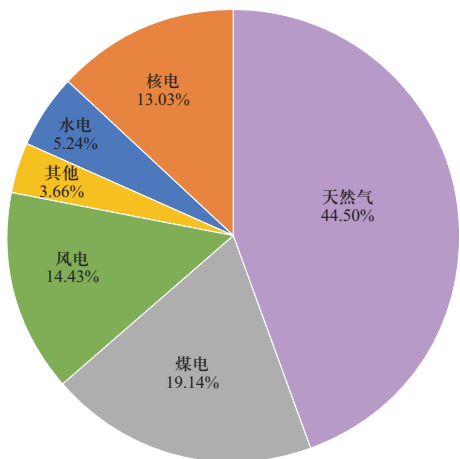


图2 2017年英国发电装机容量构成

Fig. 2 GB installed generation composition (2017)

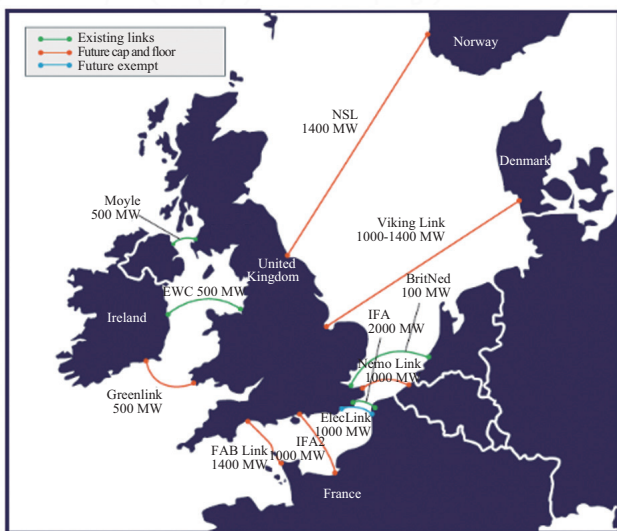


图3 2030年英国直流输电系统展望图

Fig. 3 GB DC grid outlook (2030)

示，英国未来初步规划了多条连接挪威、丹麦、比利时、法国、爱尔兰的跨国直流输电系统。为了实现最大的经济效益，未来电网的线路和容量每年都需要由规划部进行优化和更新，这就是本文所要探讨的一个重点。

另外，英国的发电、售电和计量已经实现完全竞争。发电市场分为期货市场和现货市场，期货市场是提前2年至1个月进行的大宗电力交易；现货市场分为日前市场和日内市场，发电商和售电商依据各自的需求进行小量微调和交易。持有售电营业执照的售电商有200余家，其中比较活跃的有40余家。目前输电和配电仍然属于区域性垄断状态，输配电公司对接入的

发电商和供电商收取并网费和过网费，其中过网费包括输、配电网的建设、运行和维护费用，英国电监会（OFGEM）实施价格管制。OFGEM主要对如下内容进行监管：①依据合理的未来发展规划成本和历史成本，设定下一个电价监管周期内（一般为5年）允许的收入水平，并纳入电价；②设定各公司在允许的收入水平下需要达到的绩效目标，并通过激励机制，促进输、配电公司的高效运行。

## 2 英国交流输电电网规划方法

考虑负荷分布、电源规划、新能源规划等因素，依据不同地域的不同发展定位和需求，英国输电网规划研究和制定整体电网发展策略和目标网架，立足于解决现有电网存在的问题，优化电网结构，提高供电能力和适应性，充分评估电网规划的可实施性，在保障电网可靠运行和供电质量的前提下，实现电网供电能力上的合理储备、空间上的合理布局以及时间上的合理过渡。

英国国家电网公司作为英国不列颠岛唯一持有调度执照的公司，被OFGEM要求每年进行未来十年的英国输电网评估与规划，公开分析校验结果并发布于英国国家电网主要年度出版物：①《未来能源情景》（future energy scenarios, FES）；②《电力十年报表》（electricity ten year statement, ETYS）；③《电网规划方案评估》（network options assessment, NOA）。这3个年度出版物在英国输电网规划过程中相辅相成、紧密联系，如图4所示。

第一阶段为未来能源情景预测，由英国国家电网公司从能源界主要环节和领域获取数据，预测未来接入电网的发电和负荷的容量、类型、时间、空间等参数——即制定FES。第二阶段为电力系统规划建模和电网强化需求分析，由英国国家电网公司的建模与数据部完成，将FES应用至英国全网细节模型中，得出电网传输断面的未来潮流，通过对比传输断面的输电能力，得出是否需要强化电网的结论，此数据和结论发表于ETYS中。第三阶段的电网规划评估包括3步：①电网设计部辨别出对电网强化有需求的传输断面，设计分析强化方案并定制规划方案，将规划方案交付电网规划部；②电网规划部进行电网规划方案的详细技术和经济分析，得出最终的推荐规划方案；③将推荐投资方案发表于NOA中。





图4 英国交流输电电网规划技术路线及主要出版物

Fig. 4 GB HVAC transmission planning procedures and key publications

## 2.1 电力情景设计与预测-FES

未来电力情景数据依据“三元论”原则制定，即供电安全（security of supply）、可持续发展（sustainability）和可承受性（affordability），参照历史发电和负荷数据，结合未来能源政策、电厂建设合同等，制定未来二十年的发电和负荷电力情景<sup>[4]</sup>。作为输电网规划分析的数据基础，未来能源情景的选择和准确程度从根本上影响着英国未来电网的发展格局。如图5所示，2017年FES主要有4个情景：消费者电力情景（consumer power, CP）、两摄氏度情景（two degrees, 2D）、缓慢发展情景（slow progression, SP）、平稳状态情景（steady state, SS）。

CP情景：经济迅速发展，社会可支配财富增加。电力消费者乐意采用更加环保的发电用电技术，其消费行为加速驱动创新和科技进步，居民、工业和交通耗能显著电气化，电动车数量激增；以市场为导向的发电投资聚焦于小型分布式电源，以此获得短期回报；鼓励新能源发展的政府干预和激励政策极少。

2D情景：社会经济达到最繁荣的水平，依照《巴黎协定》的长期目标将全球升温控制在工业化前2℃以内的水平。社会大量的资金保证了低碳能源的迅速发展；消费者清晰地对清洁能源做出选择，并且具备经济实力去承担新型发电技术（主要是风能、光伏、核能、生物质能）的发展；政府对新能源的促进和鼓励政策强力有效，有雄心实现能源去碳化，对碳排放



图5 《未来能源情景》的4个情景

Fig. 5 Four scenarios in Future Energy Scenarios

量高的发电厂征收高额排放税，完全实现制定的新能源高水平发展目标。

SP情景：社会经济发展缓慢，国家追求清洁能源和减少碳排放的经济实力有限。因为资金有限，投资倾向于长期的本轻利厚的发电技术；政府有效的能源政策促使形成了新能源、低碳和分布式发电混合的发电形势；由于经济发展缓慢，天然气价格上涨影响了天然气发电的建设；用户虽有清洁能源意识，但他们仍然选择低成本发电技术。

SS情景：社会经济停滞不前，电力系统规划的目的

标是在降低成本的前提下保障供电安全。此情景为4个情景中社会经济最不富裕和最不追求清洁电力的情景。国家没有经济实力保障低碳能源的长期发展，没有激励政策去引导投资者和用户选择清洁电力；消费者强调低成本电力，没有物质条件去选择昂贵的电力供暖技术和低碳能源；技术创新停滞不前。

## 2.2 电力系统规划建模和电网强化需求分析-ETYS

ETYS是针对电力系统规划建模和电网强化需求方面的分析<sup>[5]</sup>。发电建模方面，将FES的未来发电容量，依据《英国供电安全和质量标准》(security and quality of supply standard, SQSS)<sup>[6]</sup>中经济发电调度原则(modelling of economy planned transfer)的要求，优先安排在图6上区的发电形式，各类型发电技术按照一个固定系数调度其出力，例如核电按85%、高压直流输电按100%、风电按70%等；仍然无法满足的剩余负荷部分，再调度图6排在下区的发电形式，其调度出力系数为同一个值，即总剩余负荷与下区发电装机总容量之比。将每一个电厂的调度出力应用至英国全网模型中。

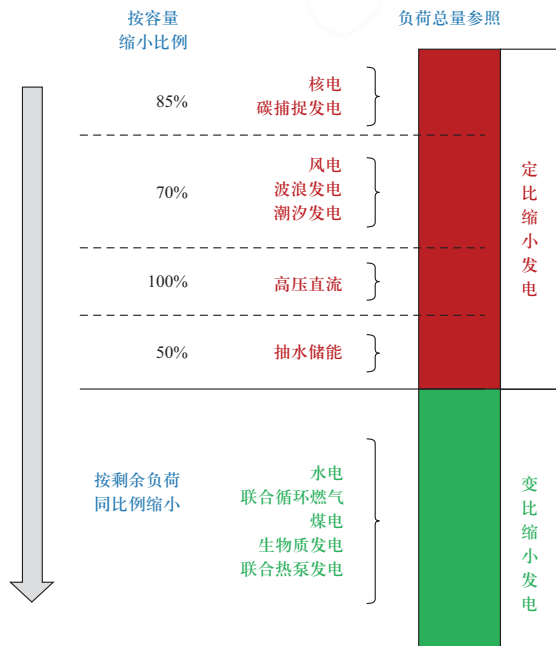


图6 英国供电安全和质量标准中的经济型调度方案  
Fig. 6 “Modelling of economic planned transfer” principle in GB SQSS procedure

本阶段规划负荷建模采用的是冬季12月圣诞节前后用电峰值数据。首先用过去5年用电峰值时各类型负荷的平均值计算得到其占比，再将其应用于FES提供的英国各电网分区(flop zones)的负荷预测峰值，得到英国全网负荷模型。

得到英国全网的发电和峰值负荷模型后，首先进行电网规划的潮流分析。为方便电网规划分析和实时安全性分析，英国国家电网依据潮流走向、现有输电能力、发电和负荷地理位置，将电网在图形上定义了一些切割线，一般情况下这些切割线都有大潮流的输电通道穿过，见图7。这些切割线可分为局部范围(local boundary)和宽广范围(wider boundary)2种“传输断面”。局部范围传输断面为发电较为集中但负荷较少的局部电网传输断面；宽广范围传输断面为具有较大潮流转移量的全局电网传输断面。由于宽广范围传输断面的输电能力对全局电网影响更大，且数量较多，故电网规划工作重点是分析和增强宽广范围传输断面的输电能力。图7展示了英国输电网系统的6条主要宽广范围传输断面。

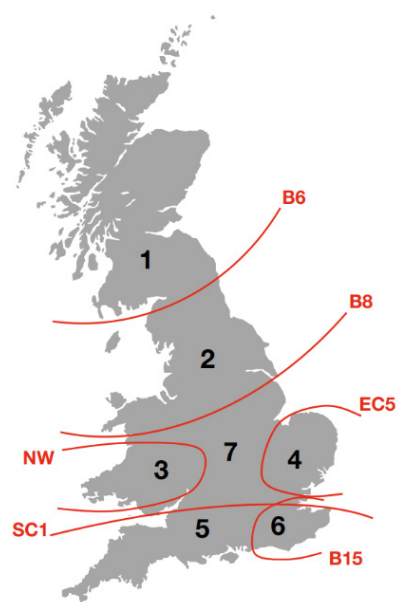


图7 电网规划的6条主要传输断面和分区  
Fig. 7 Network six key boundaries and zones for transmission grid planning

以位于英格兰北部的宽广范围传输断面B8为例，其穿过了4条400 kV长距离双回输电网，承载由苏格兰大规模风电自北向南流向英格兰的电力流，成为最容易出现超载的宽广范围传输断面之一。根据FES电网模型预测的B8宽广范围传输断面未来20年的电力流如图8所示，分别以2016年和2017年ETYS数据为基础，得到4个电力情景中的8组宽广范围传输断面B8电力流预测值，另外浅蓝色直线是2017年(上一年规划结果得出)的B8现极限容量值11 GW。按照绿色实线表示的2017年两摄氏度情景下的B8电力流预测值，在

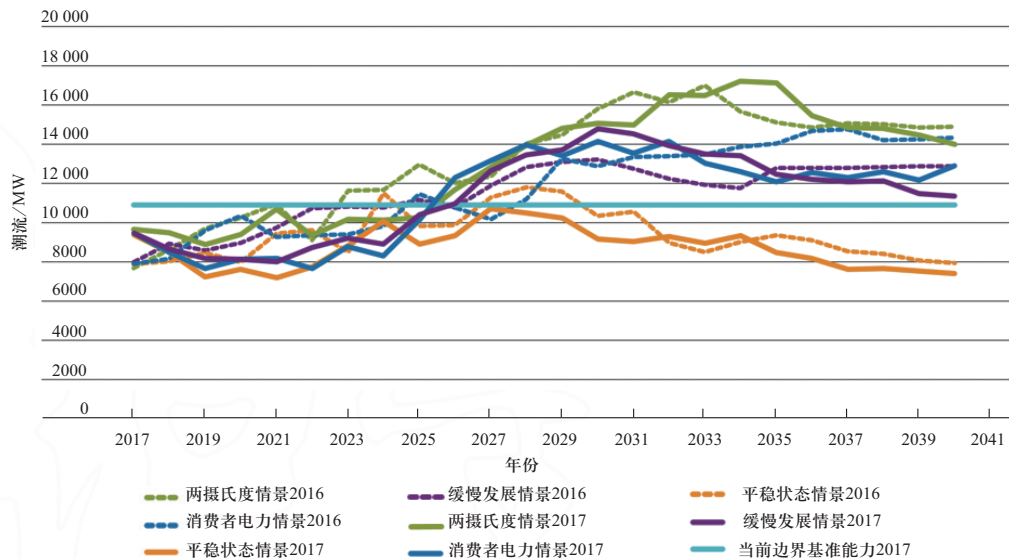


图8 《电力十年报表》分析获得的宽广范围传输断面B8的未来潮流

Fig. 8 ETYS obtained future power flow for boundary B8

2021年B8电力流虽然将接近其极限容量值，但随后又有一定程度的跌落，故不需要做电网强化；而2025年B8电力流将超过其现极限容量，故2025年之前电网强化项目必须竣工投运。

通过ETYS分析，能够初步得到各区域主要的电网规划需求及其时间紧迫性的情况。

### 2.3 电网规划的技术性和经济性分析-NOA

在英国电网的电力调度和市场环境中，当电网某一传输断面容量无法满足未来电力流增长时，调度中心不得不减少对传输断面潮流影响较大但报价较低机组的出力，同时为了满足供需平衡会提高或开启报价较高的机组来替代不足的出力，二者价格差即为电网阻塞成本。电网阻塞成本随时间累积会成为英国国家电网很可观的支出成本。节约电网安全保障方面的成本，是英国电网规划决策过程中一项重要的考虑因素。NOA主要考虑技术性分析和经济性分析两个方面<sup>[7]</sup>。

#### 2.3.1 电网规划的技术性分析

电网规划主要围绕提高电网传输断面容量、尤其是宽广范围传输断面能力而开展。技术性分析是以英国全网详细模型为基础，以SQSS要求必须保障的输电网故障为标准（例如英格兰和威尔士地区故障标准为 $N-2$ ，苏格兰地区为 $N-1$ ），对电网中主要边界进行热稳定、电压稳定、频率稳定和功角稳定等详细分析，得出未来十年内每一年的传输断面具体容量极限值。比较传输断面容量极限值与预测潮流，得出电网规划的技术需求。

电网规划方案及其技术目标主要有：①修建输电线路：增加输电网的热容量等；②电网导体升级：增加输电网的热容量；③电网额定电压升级：减小输电损耗，提高电压稳定性；④新建变电站：建设发电厂或直流换流站的电网连接点；⑤现有变电站改造：增加变电站潮流调控能力和故障电流应对能力；⑥更换老旧变压器：提高容量，降低损耗；⑦修建潮流控制器：提高潮流调控能力，增加电网容量利用率，降低边界限制成本；⑧新建无功补偿设备：提高系统压控能力；⑨安装串联电抗器：限制故障电流，增加潮流调控；⑩安装串联电容器：提高系统功角和频率稳定性；⑪国内同步互联型直流线路的建设：强化供电能力；⑫跨国异步互联型直流线路的建设：提高供电可靠性、经济性和灵活性。

#### 2.3.2 电网规划的经济性分析

在OFGEM监管下，英国国家电网必须选择合适的电网规划方案和合理的投运时间，最大化用户利益。过早投资会导致资源浪费，过晚投资会导致调度成本过高。NOA的经济性分析将得出具体项目进行与否和投运时间的推荐意见。

提高某个具体传输断面容量的规划方案不止一种，因提高传输断面容量而带来的经济效应也不同。NOA遵循“单年最小效益遗憾”原则，即在4种能源情景中计算出平均每年净效益最高的方案，作为本情景所有规划方案的基准效益；其他电网方案的净效益与本情景的基准效益做减法，得出各自的效益遗憾。



如表1示例所示，对于CP情景，在规划方案运行寿命期内，假设方案1平均每年投资40万英镑，节约阻塞成本420万英镑，净效益为380万英镑；假设方案2平均每年投资20万英镑，节约阻塞成本220万英镑，净效益为200万英镑；假设方案3平均每年投资60万英镑，节约阻塞成本460万英镑，净效益为400万英镑。很明显方案3为最佳方案，作为CP情景的基准效益其净效益为400万英镑，得出方案1和方案2的效益遗憾分别为20万英镑和200万英镑，如表2所示。

表1 3个电网规划方案在4种能源情景的净经济效益

Table 1 Grid benefits from three proposals across four scenarios

情景	净效益/万英镑		
	规划方案1	规划方案2	规划方案3
CP	380	200	400
2D	120	165	125
SP	350	50	250
SS	160	150	185

表2 单年最小效益遗憾

Table 2 One-year minimal benefits regret

情景	效益遗憾/万英镑		
	规划方案1	规划方案2	规划方案3
CP	20	200	0
2D	45	0	40
SP	0	300	100
SS	25	35	0
最大值	45	300	100

表2列出了3种规划方案在其他3个能源情景的效益遗憾。在4个能源情景中效益遗憾最大值最小的规划方案，即方案1成为经济效益最佳的推荐方案。

虽然单年最小效益遗憾原则为了追求效益遗憾的最小化而考虑了所有能源情景，但考虑到能源情景的发生可能性不同，“平均”考虑四种情景发生的可能性会导致规划方案筛选的偏差和失准，所以基于单年最小效益遗憾原则，在4种能源情景分析的初步结果基础上，NOA选取4种能源情景中最可能发生的2种能源情景（一般为前面提到的以市场为主导的“消费者电力”情景和最大化新能源发电的“两摄氏度”情景），作为经济性分析结果的重要补充信息。例如，如果规划方案1和方案2的效益遗憾分析结果非常接近，成为难以取舍的2个方案，假设表2中CP情景发

生概率为 $p$ ，则2D情景发生概率为 $1-p$ 。考虑2个方案在2个情景的净效益，采取方案1而放弃方案2的条件为：

$$350 \times p + 120 \times (1 - p) \geq 50 \times p + 165 \times (1 - p) \quad (1)$$

由此计算出当CP情景发生的概率至少大于13.04%或当2D情景发生的概率至少小于86.96%的情况下，方案1为最佳方案。否则，方案2为最佳方案。采用这种方法，能够在单年最小效益遗憾原则的基础上，为电力规划者提供权衡能源情景发生可能性的灵活度，使规划方案的选择更加符合实际。

2016年之前，英国国家电网采用一个名为“电力情景演示器”（electricity scenario illustrator）、基于Excel代码的工具来完成电网规划的经济性分析。之后从Pöyry Management Consulting公司购买了更为专业的电力经济分析工具BID3，其主要用于预测未来十年英国国家电网为解决传输断面潮流限制调度行为所需要的成本，并由Strathclyde大学和Imperial College大学评估和检测BID3结果的合理性和可行性。

### 2.3.3 电网规划方案评估结果

经过上述步骤的分析和论证，得出英国未来十年电网规划的推荐结果，包括规划方案是否最优、是否进行修建及其最佳投运时间等。4种情景下的所有规划方案各评估结果交付资产部（transmission owner），并由其进行项目建设的具体设计、融资、采购和项目管理等方面的工作。

2017年《电网规划方案评估》项目<sup>[7]</sup>分析了2017年至2026年10年内的76项电网规划方案草案，有53项至少在一种能源情景中被论证为最优化的，23项是非最优的。53项最优方案中有22项被论证为是关键，31项是非关键的。22项关键方案中有20项进行实施，2项被延迟实施；31项非关键项目有1项进行实施，30项被暂缓搁置。23项非最优方案中仅有1项进行实施，1项暂缓搁置，其他21项停止实施。

## 3 英国跨国直流输电规划

截至2017年底，英国不列颠岛与外界电网互联的高压直流输电线路有4条，总计容量为4 GW。据经验，在欧洲新建一条高压直流输电线路最快的投运速度是7年<sup>[5]</sup>，所以直流输电规划仅考虑7年之后可能的容量增（减）量。直流输电规划的经济性分析变量为英国与欧洲其他国家直流输电系统的点对点容量。因每个国家

电力市场有相互作用，且一些欧洲国家有单独的电力定价政策，比如挪威有多个不同电价区域，因此，分析社会经济福利（social economic welfare, SEW）时采用直流输电系统并网点所在区域电价。

为了统一整个欧洲直流输电系统规划工作的基础数据，由34个成员国电网公司组成的欧洲输电运营商联盟（ENTSO-E）采用适用于整个欧洲能源情景的“统一欧洲能源情景”，此情景由Pöyry Management Consulting公司负责制定。由于欧洲幅员辽阔，欧洲能源情景不可能具体给出每个国家发电和负荷的位置以及容量等具体数据，所以只规定了每个国家用电峰值时的负荷及不同能源种类的比例。所以需要结合“统一欧洲能源情景”与英国FES，构建适合英国、并与欧洲协调的能源情景<sup>[5]</sup>。

英国与欧洲大陆及爱尔兰岛互联的直流输电系统规划，是SEW、交流输电网阻塞成本和项目建设成本三者的平衡与博弈<sup>[8]</sup>。直流输电系统带来的SEW，主要包括以下2点：①双边电价差异（决定SEW的主要因素）：调度使用更廉价的直流传输电力来满足负荷，使跨国两侧电价进一步趋同；②减小弃风弃光：通过跨国两侧电力平衡实现更多新能源并网，减少碳排放税。当然，电价负杠杆效应、直流输电系统维护成本、跨国两侧的系统辅助服务也会影响到直流输电系统的SEW，但相比前2点影响微弱，故未纳入直流输电系统规划工作的范畴。

### 3.1 跨国直流输电系统对交流输电网潮流阻塞分析

当跨国直流输电系统接入交流电网时，若并网点靠近发电中心，附近的电网传输断面容量可能因达到极限而无法承受未来电力流。从长期考虑，英国国家电网会启动该传输断面附近的电网强化工作；从短期考虑，调度会关停该传输断面内的廉价发电而使用传输断面外的非经济发电，产生额外投资或运行成本。而当跨国直流输电系统并网点靠近负荷中心时，新建的直流输电系统将在一定程度上缓解电网传输断面从其他交流线路调度电力流来满足负荷的压力，延缓电网强化项目，能够降低因电网阻塞而产生的调度成本。

类似于交流输电网规划，分析直流输电系统对交流输电网阻塞的影响，也是将FES应用至英国全网模型中，以SQSS要求必须保障的输电网故障为标

准，对电网中主要边界进行热稳定、电压稳定、频率稳定和功角稳定等详细分析，主要分析图7中不列颠岛电力系统6个主要传输断面的容量极限，得出传输断面极限容量和阻塞程度，最后将直流输电系统对提高/缓解阻塞程度的影响货币化，加入经济性分析的考虑范围中。

### 3.2 直流输电系统的规划参考成本

直流输电系统项目建设成本主要包括3方面：①本体建设成本，主要包括换流站成本和电缆成本；②并网建设成本，主要是周边电网及变电站的建设和改造成本；③大电网边界强化成本，指的是联网直流输电系统所做的大电网强化成本。

表3列出了英国与欧洲其他8国互联的直流输电系统的线路长度和潜在并网点。线路长度由ENTSO-E提供的欧洲输电网布局图估算获得<sup>[8]</sup>，并网点位置参考图7。

表3 与英国联网的跨国直流输电系统连接点和线路长度  
Table 3 European HVDC GB connection zones and their DC circuit lengths

国家	英国直流换流站并网点（对应图7）	距离/km
挪威	1	705
	2	795
法国	5	175
	6	100
荷兰	4	215
	6	210
丹麦	4	620
	7	660
爱尔兰	2	220
	3	220
德国	4	520
	7	590
比利时	4	185
	6	140
西班牙	5	810

统一假设直流换流站至并网点的交流输电线路中80%为架空线、20%为地下电缆。直流输电系统的线路和换流站修建成本，参考欧洲已建项目成本的平均值，如表4所示<sup>[8]</sup>。



表 4 直流输电系统规划的参照成本

Table 4 Capital cost reference for DC grid planning

设备	参数	平均价格
直流换流站	250~500 kV	8.7万欧元/MVA
海底直流电缆	250~500 kV	75.8万欧元/km <sup>①</sup>
陆上交流架空线	380~400 kV (双回路)	106.1万欧元/km
陆上交流电缆	380~400 kV (双回路)	490.6万欧元/km

①注：电缆价格的基准容量为500 MW；如果使用更高容量的电缆，价格以500 MW为基准按比例增加。）

### 3.3 直流输电系统的经济性分析方法

与交流输电电网规划经济性分析方法类似<sup>[3]</sup>，直流输电系统经济性分析方法也遵循“最小经济效益遗憾”原则，其步骤如图9所示：①建立所有直流输电系统初始容量，英国与欧洲其他8国电力市场的初始容量由FES给出，FES采用的是上一年分析结果（2016年英国与欧洲其他国家的最优直流输电系统总容量为15.9 GW）；②建立用于经济灵敏度分析的电网模型，以1 GW为单元分别加在与欧洲8国互联容量初始值上，加入对主要传输断面（如图7所示）阻塞成本影响大的电网强化项目；③在4个英国未来能源情景下，分别运行因并网地点不同、有无交流电网强化的多个分析组合（与欧洲8国约有30种分析组合<sup>[5]</sup>）；④计算每一种组合的净经济效益：如前所述，净经济效益=社

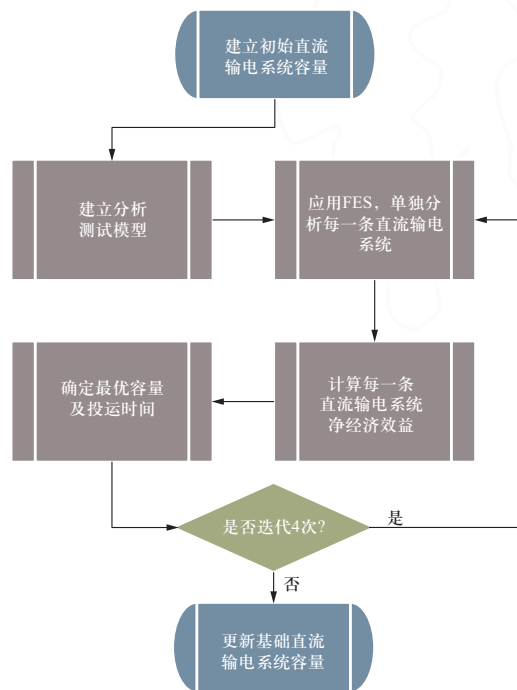


图 9 直流输电系统项目优化的迭代流程

Fig. 9 Iterative process for grid optimization

会经济福利-建设成本-交流传输断面阻塞成本；⑤确定最优解容量，考虑30种组合在未来第7年、第10年和第13年的最小经济效益遗憾；⑥以最优解更新输电电网初始容量，再从步骤③迭代运行3次（共4次），得到最终结果。

FES初始容量虽然考量最新的国内经济、政治和环境因素，然而未必是最优化的容量配比。例如，在CP能源情景下，英国与法国初始互联容量为2 GW，与挪威初始互联容量为1 GW，与爱尔兰初始互联容量为1 GW<sup>[8]</sup>。分别对3个国家互联容量增加1 GW，进行社会经济福利、经济成本和交流电网阻塞成本的经济性分析，得到年净效益分别为700万英镑、300万英镑、1100万英镑，如表5所示。

表 5 CP情景下英国与欧洲3国直流互联的净效益增量

Table 5 Incremental net present values for the British DC grid with three European countries under CP scenario

互联国家	初始容量/GW	模拟一		模拟二		模拟三	
		增加量/GW	模拟容量/GW	增加量/GW	模拟容量/GW	增加量/GW	模拟容量/GW
法国	2	+1	3	0	2	0	2
挪威	1	0	1	+1	2	0	1
爱尔兰	1	0	1	0	1	+1	2
净效益/百万英镑	0	+7		+3		+11	

在其他3个能源情景2D、SP和SS下，计算直流输电系统1 GW容量增量的净效益。将4个能源情景下的分析汇总至表6。

表 6 4种能源情景下英国与其他国家互联的直流输电系统的净效益增量

Table 6 Incremental net present values for the HVDC systems between UK and the interconnected countries under four energy scenarios

互联国家	净效益/百万英镑			
	CP	2D	SP	SS
法国	7	12	5	3
挪威	3	4	1	0.5
爱尔兰	11	11	2	4
最大净效益	11	12	5	4

4种能源情景下1 GW容量增量的效益遗憾值见表7。比较最大效益遗憾的最小值，得到结论：英国与爱尔兰

兰的直流输电容量增量取得了最小效益遗憾，为第1次迭代的最佳投资方案。

表7 4种能源情景下英国与其他国家互联的直流输电系统的经济效益遗憾值

Table 7 Benefits regret for the HVDC systems between UK and the interconnected countries under four energy scenarios

互联国家	效益遗憾/百万英镑				最大效益遗憾
	CP	2D	SP	SS	
法国	4	0	0	1	4
挪威	8	8	4	3.5	8
爱尔兰	3	1	3	0	3

将互联爱尔兰的1 GW容量增量更新至初始直流输电系统容量值，再重复3次前面的步骤。按照上述步骤，结合2017年直流输电系统规划的分析结果，得出3点关键结论<sup>[7]</sup>：①建设英国和他国的跨国直流输电系统，能同时为英国和他国的用户提供更多的经济效益；②以15.9 GW为直流输电系统的初始容量值，增加1.5 GW至17.4 GW，能把英国电力市场的风险降至最低，为英国直流输电系统的最优容量；③英国互联挪威的1 GW容量增量、英国互联爱尔兰的0.5 GW容量增量，将为英国及欧洲他国电力用户提供最小经济效益遗憾，为最佳投资方案。

#### 4 对中国电网规划的借鉴意义

中国的资源禀赋和负荷区域特征，决定了电力供需格局将长期存在大容量“西电东送”“北电南送”的电力流向。直流输电技术输电容量大、输送距离远，特高压直流输电系统将在2020—2030年间定位于西南水电、西北及东北煤电和风电的输送。而在2030—2050年间，随着分布式电源的高速发展，中国电力流格局将变得难以准确预测，或将形成3种可能的局面<sup>[10]</sup>：①持续建设超/特高压直流输电交直流混合联网模式；②以常温超导新技术为驱动的超/特高压交流占主导的输电模式；③电源和负荷就地匹配的无需新增大规模远距离输送的模式。

现阶段中国电网规划的首要任务仍是以满足负荷快速增长需要及接纳新能源为主，而英国则是追求节能减排、实现高比例可再生电源、并进一步开放本国电力市场以更好地融入泛在欧洲电力市场。笔者对比两国情况，总结英国电网规划理念对中国的借鉴意义如下。

1) 持续积累和规范电网规划理念。英国电力系统历经“私有化→国有化→再次私有化”3次主要电力市场改革，在用电需求上也经历了“初步形成→加速增长→起伏波动→放缓发展→微弱下降”的过程，多年来电力系统改革、规划和运行的丰富经验，使其形成比较健全、严谨、完善的规划理念和规则制度。而中国仍处于经济高速发展期，应当持续积累经验，适度借鉴英国规划理念，在规划好电网后，建立合理的电网结构，再追求低成本扩张并向投资者反馈信息<sup>[11]</sup>。由于两国电网所处的发展时期不同，不可照搬英国规划方法，而应当立足规范化管理，发展具有中国特色的先进规划方法。

2) 在确保供电安全的前提下适当追求电网规划的经济性。英国电网规划追求经济效益<sup>[12]</sup>，如前所述，英国电网规划方法在《英国供电安全和质量标准》中的“安全发电调度原则”和“经济发电调度原则”2种方案中选择了后者，在满足英国电监会OFGEM监管要求、不降低供电可靠性的前提下寻找最优投资的平衡点，不盲目追求为提高可靠性和运营指标而进行的过度电网建设。因此，宜研究和制定能客观反映中国电网状况的规章制度，合理确定考核指标，平衡安全与经济的博弈，树立强烈的成本意识，规范电网规划的技术经济分析。

3) 改善和规范用于电网规划的数据收集、分析和提炼过程。英国的规划方法和实践，是以完整、准确的基础数据为支持的。如前所述，英国《未来能源情景》的预测和制定，结合了实时收集当前数据、历史数据以及电力系统发输配各个领域提供的数据，并接受电网内外参与者的反馈和修正，保障了数据的完整性、准确性及延续性，同时英国国家电网公司在负荷预测时特别重视气候因素对负荷数据的影响。而国内在数据收集上存在数据不完全或重复收集的问题，准确性依赖于预测者的技能和经验，一旦人员变动则难以延续，同时负荷结构中气候相关的负荷比重也在不断上升，因此国内在数据收集、分析和提炼过程的改善和规范方面及负荷预测方法和提高预测准确度方面均需进一步加强。

4) 加强电网规划的闭环式管理和制定合理的电网发展战略<sup>[13]</sup>。如前所述，英国电网规划是一个从需求分析至项目方案优选、从项目批准至详细设计和基建的流程，英国国家电网公司每年进行的《未来能源情景》《电力十年报表》和《电网规划方案评估》3个电网规划子项目，都采取对往年数据和结果进行回顾

和校核的闭环过程, 对于明显差异需进行详细解释和分析, 并及时调整规划方案。而国内规划相关职能部门按照规划、建设、运行的顺序阶段性地开展工作, 较难形成准确的数据闭环过程。有必要强化每一个规划环节的回顾和校核, 提高各个规划部门的协调性, 不断改进闭环化管理, 同时制定合理的适合中国发展的电网战略。

## 5 结语

本文概述了英国交直流输电电网规划方法, 从英国电网发展现状入手, 介绍了英国交直流输电电网规划具体步骤: 以制定合理的多样化能源情景为分析基础, 以最小效益遗憾原则为规划方案选择的经济性方法, 提高社会经济福利, 选择低成本规划方案, 降低边界容量阻塞成本, 最大化电力消费者利益。本文最后结合英国电网规划的理念, 提出了其对中国电网规划的借鉴意义, 希望本文为国内未来电网规划工作提供对比和参考。

## 参考文献

- [1] 杨晓梅. 英国电网建设及配电系统规划概览[J]. 供用电, 2015, 32(9): 44-49.  
YANG Xiaomei. An overview of UK power network construction and distribution planning[J]. Distribution & Utilization, 2015, 32(9): 44-49(in Chinese).
- [2] 张小平, 李佳宁, 付灏. 英国电力零售市场的改革与挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 10-16.  
ZHANG Xiaoping, LI Jianing, FU Hao. UK retail electricity market reform and challenges[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 10-16(in Chinese).
- [3] Ofgem UK. Integrated transmission planning and regulation project: final conclusion[EB/OL]. <https://www.ofgem.gov.uk/ofgem-publications/93917/itprfinalconclusionsdecisionstatementpublicationfinal.pdf>.
- [4] National Grid Plc (UK). Future energy scenarios [EB/OL]. <https://www.nationalgrid.com/uk/publications/future-energy-scenarios-fes>.
- [5] National Grid Plc (UK). Electricity ten year statement [EB/OL]. <https://www.nationalgrid.com/uk/publications/electricity-ten-year-statement-etys>.
- [6] National Grid Plc (UK). Security and quality of supply standard [EB/OL]. <https://www.nationalgrid.com/uk/electricity/codes/security-and-quality-supply-standards?code-documents>.
- [7] National Grid Plc (UK). Network option assessment [EB/

OL]. <https://www.nationalgrid.com/uk/publications/network-options-assessment-noa>.

- [8] National Grid Plc (UK). Network options assessment for interconnectors [EB/OL]. <https://www.nationalgrid.com/sites/default/files/documents/NOA%20for%20IC%20methodology%20final.pdf>.
- [9] 中国能源中长期发展战略研究项目组. 中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究-电力·油气·核能·环境卷[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 3-88.
- [10] 孙玉娇, 周勤勇, 申洪. 未来中国输电网发展模式的分析与展望[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1929-1935.  
SUN Yujiao, ZHOU Qinyong, SHEN Hong. Analysis and prospect on development patterns of china's power transmission network in future[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1929-1935(in Chinese).
- [11] 张运洲. 英国电力工业管理和电网规划综述[J]. 中国电力, 1997, 30(6): 55-58.  
ZHANG Yunzhou. Electric power industry management and power system planning in UK [J]. Electric Power, 1997, 30(6): 55-58(in Chinese).
- [12] SUSTERAS G L, RAMOS D S. Experiences of the electricity system operator incentive scheme in great Britain[J]. Energy and Power Engineering, 2012, 4(4): 218-225.
- [13] SATAØEN H L, BREKKE O A, BATEL S, et al. Towards a sustainable grid development regime? A comparison of British, Norwegian, and Swedish grid development[J]. Energy Research & Social Science, 2015, 9: 178-187.

收稿日期: 2019-07-05; 修回日期: 2019-11-15。



朱介北

### 作者简介:

朱介北(1987), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为柔性直流输电系统、新能源发电系统、电网规划与调度。通信作者, E-mail: zhujiebei@hotmail.com。

周小尧(1975), 男, 博士, 英国国家电网公司技术政策部经理, 主要研究方向为技术政策制定与分析,

E-mail: xiaoyao.zhou@nationalgrid.com。

曾平良(1962), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统规划, E-mail: plzeng@hotmail.com。

张小平(1967), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为全球电力能源互联网、能源共同体、电力市场、高压直流输电、可再生能源控制、智能电网, E-mail: x.p.zhang@bham.ac.uk。

王成山(1963), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为配电网规划与设计、微电网技术, E-mail: cswang@tju.edu.cn。

(责任编辑 张宇)