

考虑国家风险的清洁能源跨国输送通道规划方法

鲁宗相, 李昊, 乔颖

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

Wide-area Interconnection Grid Planning for Clean Power Integration Considering the Effect of Country Risks

LU Zong-xiang, LI Hao, QIAO Ying

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments
(Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

Abstract: In the context of energy revolution and the situation of asymmetrical distribution of global energy resources and loads, it is worth exploring renewable generation development in wind/solar resources rich area and transmission through nations and continents. The comprehensive level of political, economic and technical as well as the degree of friendship between countries are the key factors and have “one-vote negation” impact on the international transmission, whose degree of importance has even exceeded technical and cost issues of the transmission project. A planning method of international and inter-continental transmission for clean energy is proposed in this paper, in which country risks are taken into account. Based on the analysis of key features of a particular planning scenario, a country risk quantification model, an equivalent cost model that includes country risks and a transmission expansion planning model that aims to maximize the clean energy consumption are established and solved. The case study shows a vision for the interconnection of wide-area power grids for clean power in 2030, and compares it with the current interconnection plans developed by many countries and finally analyzes the sensitivity of country risks, verifying the effectiveness of planning models and methods.

Key words: country risk; interconnection; high penetration of renewable energy; power flow

摘要: 在能源革命背景及全球能源资源与负荷分布不均的现状下, 对全球可再生能源资源富集区域进行集中开发并跨国跨洲输送是一条值得探索的发展途径。实现跨国输电, 相关国家的政治、经济和技术综合水平及国与国之间的友好程

度是其关键影响因素, 甚至超过了输电通道本身的技术和成本因素而成为一票否决性的条件。本文提出了考虑国家风险的清洁能源跨国跨洲输电通道规划方法。在分析特定规划场景的关键特征基础上, 构建了国家风险量化模型、包含国家风险的等效成本模型和以清洁能源最大化消纳为目标的通道扩展模型, 并进行模型求解。算例构建了2030年清洁电力的广域网互联蓝图, 并与各国的电网互联计划进行对比, 最后对国家风险进行了敏感性分析, 验证了规划模型和方法的有效性。

关键词: 国家风险; 跨国互联; 高比例可再生能源; 电力流

0 引言

目前, 在全球能源革命的背景下, 国际上诸多机构开展了针对可再生能源开发利用的研究。国际可再生能源机构(International Renewable Energy Agency, IRENA)提出^[1], 2030年可再生能源电力占全球总发电量的比例将由目前的23%增长到45%。斯坦福大学的Jacobson教授团队提出全球139个国家在2050年达到终端能源消费100%来自清洁能源的发展路线图^[2], 并提出在交通、工业、农业等领域完全实现电气化。对全球可再生能源资源富集区域进行集中开发并跨国跨洲输送, 成为一些国际机构积极探索的方案。国际能源署(International Energy Agency, IEA)进行的相关研究认为电力的广域互联将会增加电力系统的灵活性, 降低局部电网的峰值容量需求, 极大发挥可再生能源的潜力^[3]。该研究还对欧洲大陆国家联网、美洲国家联网、东南亚国家联网进行了分析。国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGTYHT/14-JS-188)。

Project Supported by Science and Technology Foundation of SGCC(SGTYHT/14-JS-188).

也进行了全球能源互联的相关研究^[4],认为面对全球能源消费飞速增长的现状和未来,通过全球能源互联大规模开发利用可再生能源是重要的应对措施。2017年11月联合国举办的全球能源互联高级别研讨会上,全球能源互联网正式纳入联合国工作框架^[5]。可见,为实现全球可再生能源的大规模开发利用,跨国跨洲电网互联将是未来发展趋势。

目前在电力跨国跨洲输送方面全球已经有诸多实践。亚洲方面,中俄、中蒙之间通过交、直流线路互联,哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦之间形成500 kV交流环网,伊拉克、叙利亚、约旦和黎巴嫩电网互联形成北中东半岛电网并与伊朗电网互联,沙特阿拉伯、科威特、巴林等国互联形成海湾电网;欧洲方面,目前已经形成自西延伸到欧洲东部的大型同步电网;美洲方面,北美互联电网连接了加拿大、美国和墨西哥;非洲方面,南非电网内的9个国家通过不同电压等级的交流线路互联。未来,中国的“一带一路”倡议、欧洲“超级电网”计划、欧洲和北非之间的Desertec计划、环地中海国家的Medgrid项目等将继续推动电网广域互联的进程^[6-8]。

在现有跨国输电研究中,文献[6]研究了欧洲Supergrid计划,规划中主要考虑电源结构、电源规划、输电方式选择等技术方面,文献[7]展望了亚洲超级电网的图景,其主要考虑能源的发展情况和输电方式的经济性,文献[8]提出了全球能源互联网的设想,其主要从能源供需平衡角度构建全球电力流。上述研究均聚焦在工程相关的技术、经济因素分析,然而跨国跨洲电网互联作为一种新的跨国交易,在技术上的挑战并非最大的难题,而政治、经济、社会等外部宏观因素对其影响较为显著^[3]。如何构建国际关系对跨国输电通道影响的量化风险评估模型并纳入规划约束条件,是一个全新的技术问题。

本文建立了综合技术、经济、政治和国际关系等因素的国家风险评价模型,提出了计及国家风险的跨国跨洲输电通道规划方法,通过算例分析了2030年全球电网广域互联可能的情景,并进行了敏感性分析。

1 国家风险评价模型

1.1 国家风险的概念及内涵

本文所述国家风险是指在跨国输电工程规划建设中,综合考量相关国家在政治、经济、技术等方面的

发展水平和国与国之间友好关系而确定的内部和外部影响工程可行性的比例系数,分别称为国内风险和国国家间风险。本文采用“互联适宜度”指标对国内风险和国国家间风险进行综合表征,风险越小,适宜度越高。

为实现跨国跨洲电网互联,对拟建设的互联通道所涉及的国家或区域进行风险评估是十分必要的。若互联通道相关国家的风险过大,电力互联方案可能因此搁浅;即使风险处于可接受范围内,互联通道上的电力传输量也将与该风险值密切相关。因此,对跨国联网工程而言,不考虑国家因素仅从技术角度得到的待选通道集及规划通道方案缺少实践意义,在实际中可能因为国家因素的强制约作用而难以实施。

1.2 国家风险的量化方法

1.2.1 国家风险评价的层次模型

采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)对国家风险进行评估,基本思想是建立评价层次体系,通过不同指标两两之间的重要性比较,确定各指标的权重,完成对目标的定量评价。考虑到影响因素的差异,国内风险和国国家间风险采用不同的层次模型进行评估。

国内风险主要考虑被评估国的技术、经济、政治三方面的影响。技术方面,主要指标有电力系统装机量、近10年事故数、可再生能源经济可开发量、负荷增长率,这些指标描述一个国家或地区的电力系统发展水平及发展潜力,发展水平越高,则风险越小;经济方面,由于涉及问题较多,故采用《华尔街日报》和美国传统基金会提出的“经济自由度指数”进行评价,这一指标是商业自由、贸易自由、财政自由、政府开支等10个要素的综合评价,可以评估国家经济环境及对外来投资的接纳程度,是全球权威的经济自由度评价指标之一;政治方面,主要选取中长期较为稳定的政治评价指标,具体包含政府稳定度、国内冲突、宗教局势、种族冲突和腐败。

国国家间风险则以其间发生摩擦的严重程度及持续时间为指标进行评价。

评价体系的层次模型如图1。图中,“A国”、“B国”表示参与互联的国家或区域,省略号是对B国风险具体评价指标的省略,其与A国的评价指标相同。

1.2.2 评价方法

AHP的具体步骤如下,更为详细的过程可参考文献[9]。

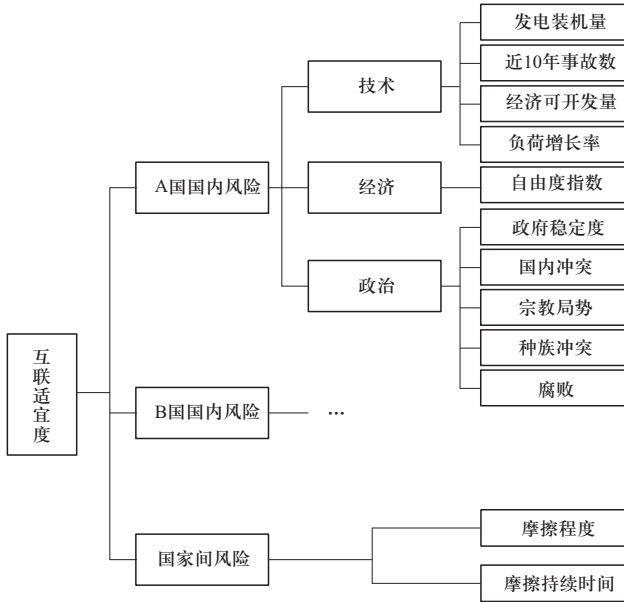


图1 互联适宜度评价体系
Fig. 1 Index system of interconnection fitness

(1) 建立层次结构模型，本文的层次结构模型如图1。

(2) 对每层中各因子的重要程度两两比较，建立判断矩阵。

(3) 层次单排序及一致性检验。

(4) 层次总排序及一致性检验。

将得到的层次总排序中各因子的权值乘以对应指标的数值大小后累加即为互联适宜度的值。需要注意的是，由于各指标的量纲、数量级不同，需要进行标准化后再使用层次分析法评价。最终得到取值在0~1之间的互联适宜度指标值。

2 考虑国家风险的跨国跨洲输电通道规划

2.1 规划的合理性假设和流程

考虑到清洁能源跨国跨洲输电通道规划的特点，合理假设如下：

(1) 综合考虑电压支撑、电力分配等问题，互联通道宜接入当地最高电压等级主网架。现阶段由于世界各国内部数据较难获得，国家内电网结构复杂，差异较大，现有条件下仅考虑国家之间通道的搭建，暂不考虑内部网架的影响。

(2) 由于各国电网长期发展形成的自然结构很难因几条互联线路而大幅调整，故互联方式按大容量点对点网注入功率模式来构建，特高压交流或直流输电方式成为首选技术方案。

(3) 跨国跨洲互联工程相关参数参考国内远距离输电典型工程的相关数据。

(4) 基于国家风险提出互联适宜度指标，用来评价国家或区域之间电网互联工程的可行性。

清洁能源跨国跨洲输电通道规划的流程如图2所示，具体步骤如下：

(1) 考虑参与互联的国家或区域，根据地理分布设定待选通道集。

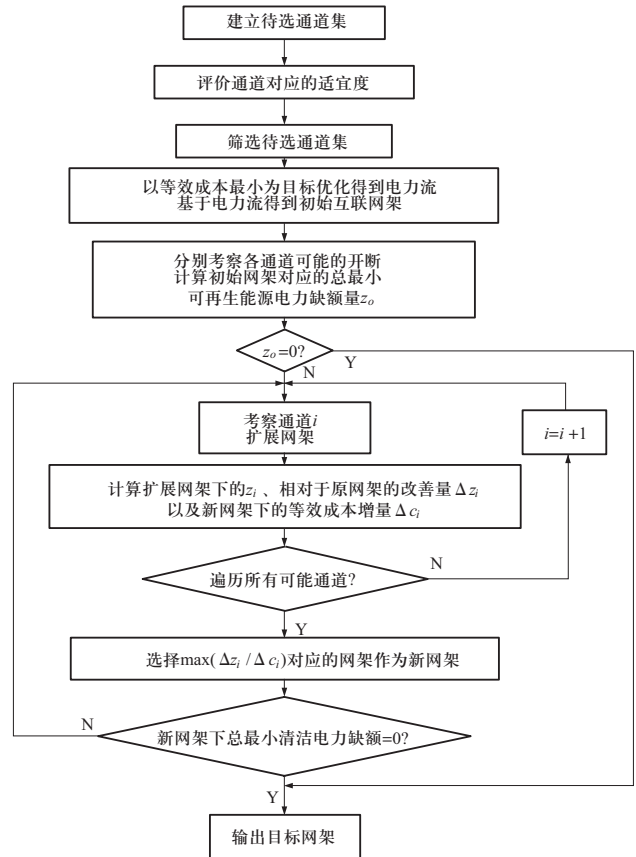


图2 广域互联电网规划流程
Fig. 2 Flow chart of wide-area interconnection grid planning

(2) 采用前述评价方法评价通道的适宜度，设定阈值 σ ，将适宜度小于 σ 的通道从待选集中剔除。

(3) 以考虑国家风险的等效成本最小为目标计算电力流，根据电力流的分布构建相应互联通道，形成初始互联网架。

(4) 建立最小清洁能源电力缺额模型。考虑未来运行过程中的国家风险劣化而导致互联通道断开的可能性，故逐一对各条通道所有线路进行开断分析，计算初始网架在这些情况下各国的最小清洁能源电力缺额量，若总最小清洁能源电力缺额为0，则此网架在经济性目标下满足各国清洁能源电力使用要求，输

出网架结果, 否则转到(5)。

(5) 对现有网架进行扩展。在可选择的互联通道集合中逐条考察, 若此通道未在现有网架中, 则将其加入网架; 否则, 在满足小于通道理论最大容量的前提下扩大其容量。计算修改后的网架对应的总最小清洁能源电力缺额量及扩建成本。

(6) 遍历集合中所有通道, 计算每次考察下扩展网架对应的总最小清洁能源电力缺额量的减小量及等效成本增加量, 选择两者比值中最大者对应的网架作为新网架。若新网架对应的总清洁能源电力缺额量为0, 则输出此网架, 否则转到(5)。最终得到满足各国可再生能源使用要求且经济性最优的广域互联电网。

需要说明的是:

(1) 跨国跨洲电力传输中断的首要风险来自国家因素, 其次才是技术和自然因素。所以在规划中进行成本分析时, 将传统的经济成本扩展为包含国家风险的等效成本。

(2) 最小清洁能源电力缺额模型, 是基于跨国输电相关国家已经设定清洁能源消费量目标的前提建立的。根据REN21《再生能源全球现状报告》2017版的统计, 截止到2016年底, 已有176个国家设定了可再生能源发展目标。通过清洁能源跨国跨洲输电通道和国内清洁能源电力开发, 共同实现其清洁能源消费量目标。

2.2 包含国家风险的等效成本模型

互联通道规划中, 所考虑的成本包括发电成本及电力传输成本。

发电成本可表示为:

$$C_{g,i} = \sum_k c_{g,k,i} P_{g,k,i} \quad k \in G \quad (1)$$

式中, i 表示国家或区域, G 是发电技术的集合, k 表示不同的发电技术, $c_{g,k,i}$ 和 $P_{g,k,i}$ 分别表示发电技术 k 在国家 i 的单位发电成本和发电量。

输电成本包含线路建设成本、运行成本及损耗成本, 可表示为:

$$C_{trans,j} = C_{base,j} + C_{operate,j} + C_{loss,j} \quad j \in J \quad (2)$$

其中

$$C_{base,j} = c_{trans,j} \cdot \frac{a(1+a)^T}{(1+a)^T - 1} \quad (3)$$

$$C_{operate,j} = c_{trans,j} \cdot \delta \quad (4)$$

$$C_{loss,j} = \begin{cases} v_i(\mu_{x,j}L_j + \mu_{h,j})P_j & \text{陆上直流} \\ (2(\frac{P_j}{t_j U_{DC,j}})^2 R_j L_j t_j + S_j)v_i & \text{海缆直流} \\ v_i \mu_j P_j^2 L_j / t_j & \text{交流} \end{cases} \quad (5)$$

j 表示输电通道, J 是所有可能的输电通道的集合, $c_{trans,j}$ 为线路 j 的初始投资, $c_{trans,j} = \eta_j L_j S_j$, η_j 为输电工程单位容量、单位长度的投资, L_j 为线路长度, S_j 为通道的传输容量, P_j 为线路的年传输电量, a 为折现率, T 为运营期, δ 为运行维护费率。 v_i 为送电地区的标杆上网电价, $\mu_{x,j}$ 为陆上直流线损系数, $\mu_{h,j}$ 为换流站损耗系数, t_j 为通道的利用小时数, $U_{DC,j}$ 为直流海缆正负极电压差, R_j 为单位长度直流电阻, μ_j 为交流线损系数。

设待选通道集中各条通道对应的互联适宜度为 u_j , 并将国家风险的影响通过等效输电成本反映出来。通道对应的风险越大, 等效的输电成本越大, 故设等效输电成本为:

$$C'_{trans,j} = C_{trans,j} / u_j \quad (6)$$

2.3 电力流计算及初始网架的形成

电力流计算的优化变量有: 以电量表示的国家或区域间的电力流 P_j , 设定其参考方向, 若实际方向与参考方向相同, 则 P_j 为正, 否则为负; 各输电通道的容量 S_j , 由于每条通道都由若干回路组成, 故通道容量为单回路容量的整数倍。目标函数为经济性最优, 即等效成本最小:

$$\min C = \sum_i C_{g,i} + \sum_j C'_{trans,j} \quad (7)$$

约束条件为:

$$\sum_k P_{g,k,i} + \sum_{j \in J_i} P_j = P_{L,i} \quad k \in G, i \in B \quad (8)$$

$$P_{g,min,k,i} \leq P_{g,k,i} \leq P_{g,max,k,i} \quad i \in B, k \in G \quad (9)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{k \in RE} P_{g,k,i} = r \sum_{i \in B} P_{L,i} \quad (10)$$

$$-S_{j,max} \leq P_j / t_j \leq S_{j,max} \quad j \in J \quad (11)$$

$$S_j = (\text{int} \left[\frac{P_j}{t_j \cdot S'_{j,max}} \right] + 1) \cdot S'_{j,max} \quad (12)$$

其中, B 表示所有国家和区域的集合, $P_{L,i}$ 表示第 i 个国家或区域在规划水平年的负荷, J_i 表示和国家或区域 i 相连的通道集合, $P_{g,min,k,i}$ 和 $P_{g,max,k,i}$ 分别为国家或区域 i 中第 k 种发电方式的最小和最大发电量, RE 为可再生能源发电方式的集合, r 表示可再生能源发电量在

所有参与国家总负荷中的占比, $S_{j\max}$ 表示通道 j 的输电容量上限, int 为取整函数, $S'_{j\max}$ 表示通道 j 所用输电技术单回线路的最大容量。式 (8) 为电量平衡约束, 式 (9) 为发电量约束, 式 (10) 为可再生能源占比要求, 式 (11) 为通道最大容量约束, 式 (12) 依据单回线路最大容量限制计算满足电力流的通道容量。

由此模型可以计算出满足经济性的全球电力流、各国或地区的发电量及互联通道容量, 并假设各国基于此电力流及内部可再生能源发电量优化结果设定本国的清洁电力消费目标。

2.4 最小清洁能源电力缺额模型

优化目标为在通道 j 切断的情况下清洁能源电力缺额总量最小, 即:

$$\min \sum_i P_{\text{curt},i,j} \quad i \in B \quad (13)$$

约束条件为:

$$\sum_k P_{g,k,i} + \sum_{j \in J} P_j + P_{\text{curt},j,i} = P_{L,i} \quad i \in B, k \in G \quad (14)$$

$$P_{g\min,k,i} \leq P_{g,k,i} \leq \beta_k P'_{g,k,i} \quad i \in B, k \in G \quad (15)$$

$$\beta_k P'_{g,k,i} \leq P_{g\max,k,i} \quad i \in B, k \in RE \quad (16)$$

$$-S_j \leq P_j / t_j \leq S_j \quad j \in J0 \quad (17)$$

$$0 \leq P_{\text{curt},i,j} \leq P_{L,i} \quad i \in B, j \in J0 \quad (18)$$

其中, $P_{\text{curt},i,j}$ 表示通道 j 断开时国家或区域 i 的清洁能源电力缺额量, $P'_{g\max,k,i}$ 表示在没有通道断开时国家或区域 i 在所述经济性最优电力流方式下第 k 种发电方式的发电量, β_k 为略大于 1 的系数。 $J0$ 为现有网架中输电通道的集合。式 (14) 是在有清洁能源电力缺额时的电量平衡方程, 式 (15) 是发电量约束, 经济性最优情况下各国各种发电方式的发电量为 $P'_{g,k,i}$, 有互联线路断开时, 需国家或地区内部可再生能源电站增发弥补缺额, 而受限于机组增发容量能力约束, 各种发电方式的发电量上限为 $\beta_k P'_{g,k,i}$, 即需要乘以一个略大于 1 的比例系数。式 (16) 保证了各种发电方式的发电量小于理论最大发电量。式 (17) 为通道容量约束。式 (18) 限制了清洁能源电力缺额非负且小于本地最大负荷。

遍历所有通道, 得到各条通道对应的清洁能源电力缺额总量之和, 即为此网架对应的总最小清洁能源电力缺额量 P_{sumcurt} 。

2.5 网架扩展

若现有网架下的 P_{sumcurt} 不为 0, 则需对网架进行修改。从 J 中选择一条输电通道 m , 其容量的优化基于最小清洁能源电力缺额模型, 需要对模型中部分约束条件进行修改。

若 $m \in J0$, 则将式 (17) 修改为

$$-S_j \leq P_j / t_j \leq S_j \quad j \in J0 \setminus m \quad (19)$$

其中, $J0 \setminus m$ 表示现有网架对应的 $J0$ 中去除通道 m 后剩余通道的集合, 增加约束:

$$-S_{m\max} \leq P_m / t_m \leq S_{m\max} \quad (20)$$

并通过式 (21) 计算通道 m 的容量:

$$S_m = (\text{int} \left[\frac{P_m}{t_j \cdot S'_{m\max}} \right] + 1) \cdot S'_{m\max} \quad (21)$$

若 $m \notin J0$, 则无需修改 (17), 增加约束 (20) 并用式 (21) 计算即可。

由此模型即可得到以最小化总最小清洁能源电力缺额量为目标、只修改 1 条通道之后的扩展网架。

2.6 网架方案的优化选择

对 J 中的所有输电通道依次进行考察, 每次只修改一条通道, 则可得到多个扩展网架。考虑清洁能源电力消费目标与经济性, 从中选择最优的网架作为新网架。

首先计算与原有网架相比, 各扩展网架下总最小清洁能源电力缺额量的改善值 $\Delta P_{\text{sumcurt},l}$:

$$\Delta P_{\text{sumcurt},l} = P_{\text{sumcurt}0} - P_{\text{sumcurt},l} \quad (22)$$

其中 $P_{\text{sumcurt}0}$ 和 $P_{\text{sumcurt},l}$ 分别为现有网架和第 l 个扩展网架对应的总最小清洁能源电力缺额量。

计算各扩展网架对应的等效成本增量 ΔC_l 。由于初始网架在形成时对应最优的电力流, 故扩展网架下的最优运行情况与初始网架的相同, 其对应的成本增量即为建设成本与运行成本的增量。

$$\Delta C_l = \Delta C_{\text{base},m} + \Delta C_{\text{operate},m} \quad (23)$$

定义有效度 E_l 为扩展网架 l 对应的总最小清洁能源电力缺额量改善量与等效成本增量的比值

$$E_l = \Delta P_{\text{sumcurt},l} / \Delta C_l \quad (24)$$

总最小清洁能源电力缺额量的改善量越大、等效成本增量越小, 则 E_l 越大。选择 E_l 最大的网架替换原有网架。若新网架对应的总最小清洁能源电力缺额量为 0, 则此网架满足经济性与各国清洁能源电力使用要求, 即为最终网架; 否则, 在此网架上继续进行扩展, 直至满足各国清洁能源电力使用要求为止。

3 算例

3.1 互联适宜度评价

根据专家打分, 确定层次评价的判断矩阵, 根据判断矩阵得到各指标的权重值。以政治方面的5个指标为例, 依据政治事件的影响面大小, 借鉴相关权威研究结论^[10], 设定判断矩阵为

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 & 1/5 & 5 \\ 3 & 1 & 1/3 & 1/3 & 7 \\ 5 & 3 & 1 & 1/2 & 8 \\ 5 & 3 & 2 & 1 & 9 \\ 1/5 & 1/7 & 1/8 & 1/9 & 1 \end{pmatrix} \quad (25)$$

计算矩阵对应于最大特征值的特征向量, 归一化后即得层次单排序后的权重排序权值(0.081,0.161,0.312,0.416,0.029), 且一致性检验通过。

同样对其他指标进行分析, 最终得到各指标总排序后的权重值如表1所示。

表1 各指标权重值

Table 1 Indices weight values

指标	发电装机量	近10年事故数	经济可开发量	负荷增长率
总权重	0.030	0.021	0.012	0.012
指标	自由度指数	政府稳定度	国内冲突	宗教局势
总权重	0.075	0.012	0.024	0.047
指标	种族冲突	腐败	摩擦程度	持续时间
总权重	0.062	0.004	0.200	0.200

选择参与互联的国家和地区有中国、日本、韩国、北美(主要包含美国、加拿大)、欧洲大陆(主要包含德国、法国等)、俄罗斯、北欧、北非、中东、中亚、南美等, 共有21条可选通道。依据政治风险服务集团(The PRS Group)^[11]、IEA^[12]、美国传统基金会^[13]、透明国际(Transparency International)^[14]、海德堡国际冲突研究协会^[15]等发布的报告中的相关数据, 进行互联适宜度的评价, 得到各通道的适宜度指标见表2。

表2 各通道适宜度

Table 2 Fitness of interconnections

通道编号	互联国家/区域	适宜度	通道编号	互联国家/区域	适宜度
1	中国 日本	0.530	12	欧洲 俄罗斯	0.550
2	中国 韩国	0.639	13	欧洲 北欧	0.822
3	中国 欧洲	0.820	14	欧洲 北非	0.779
4	中国 俄罗斯	0.621	15	欧洲 中东	0.487
5	中国 中东	0.729	16	俄罗斯 北欧	0.569

续表

通道编号	互联国家/区域	适宜度	通道编号	互联国家/区域	适宜度
6	中国 中亚	0.593	17	俄罗斯 中东	0.426
7	日本 韩国	0.595	18	俄罗斯 中亚	0.489
8	日本 俄罗斯	0.500	19	北非 中东	0.698
9	韩国 俄罗斯	0.586	20	北非 中亚	0.768
10	北美 俄罗斯	0.561	21	中东 中亚	0.426
11	北美 南美	0.556			

3.2 2030年广域互联电网基本设想

目前全球可再生能源(含水)发电量占总发电量的23.7%。参考国际可再生能源署的预测^[1], 本算例中设可再生能源(含水)发电量占总发电量的比例为40%。

由权威机构发布的报告^[1,16-18]得到2030年各国的负荷(Ld)及可再生能源经济可开发量(Re), 并以两者之差乘以一定倍数作为常规能源经济可开发量(Ge), 列于表3。

表3 2030年不同国家或区域负荷、可再生能源及常规能源经济可开发量(TWh)

Table 3 Load, renewable and conventional energy maximum generation of countries and regions in 2030 (TWh)

	Ld	Re	Ge	Ld	Re	Ge	
中国	10000	3000	7700	北欧	400	1680	132
日本	1177	276	991	北非	500	850	385
韩国	636	65	628	中东	1382	636	1216
北美	6178	2471	4077	中亚	300	420	264
欧洲	5056	2275	3059	南美	1482	1666	896
俄罗斯	2000	3200	1760				

目前大容量远距离输电技术主要有特高压交直流输电, 跨海输电中输送容量最大的为±500 kV直流海缆输电。这些输电方式的容量及经济数据在文献[19-21]中列出。由于交流输电难以异步联网, 海底输电时交流输电存在较大的电容电流, 故在本算例中, 假设跨海区域间采用直流海缆, 其余通道采用特高压直流输电。预计2030年各通道最大可容纳10回线路, 以此作为各通道最大容量约束。

设定适宜度阈值 σ 为0.5, 根据前述评价结果, 将互联适宜度小于0.5的通道15, 17, 18, 21剔除。

年费用计算参数取自文献[19-21], 各发电方式的单位发电成本见文献[22]。

针对清洁能源电力利用小时数不高的特点, 对通道利用率进行假设。北极地区风电利用小时数在3800~4200 h之间, 考虑风光、风水联合外送, 输电通

道的利用小时数按4000 h计算；赤道地区光伏利用小时数约2000 h，未来极具发展潜力的光热发电的利用小时数可达到5000 h，综合考虑输电通道的利用小时数也按4000 h计算；同时其余国家之间的输电通道利用小时数均按4000 h计算。

根据经济性最优得到全球电力流及相应的通道容量，利用最小清洁能源电力缺额模型计算初始网架的总最小清洁能源电力缺额为371.3 TWh，按照2.5节的扩展方法，对网架进行逐次扩展，每次扩展后最优网架对应的总最小清洁能源电力缺额如表4。

表4 不同网架下的总最小清洁能源电力缺额 (TWh)

Table 4 The minimum amount of clean energy power shortage of different grids (TWh)

初始网架	第1次扩展网架	第2次扩展网架	第3次扩展网架
371.3	147.3	40.4	0

得到最终网架在图3中用红线和黄线表示（对应的通道容量见表5），并采用不同的图例（单线、双线和三线）表示通道的容量。

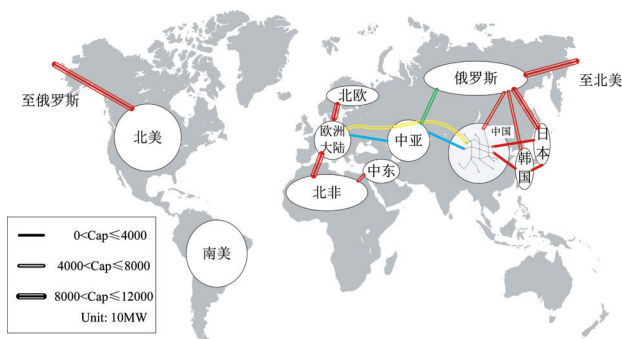


图3 2030年广域电力互联通道规划蓝图

Fig. 3 Wide-area interconnection grid vision in 2030

表5 互联网架各通道输送容量

Table 5 Capacity of transmission paths

通道编号	互联国家/区域	容量 (万kW)	通道编号	互联国家/区域	容量 (万kW)
1	中国 日本	2800	9	韩国 俄罗斯	6600
2	中国 韩国	2240	10	北美 俄罗斯	11000
3	中国 欧洲	4400	13	欧洲 北欧	11000
4	中国 俄罗斯	7700	14	欧洲 北非	11000
7	日本 韩国	2800	19	北非 中东	4400
8	日本 俄罗斯	11000			

由图3看出，全球负荷密集区（中国、日本、韩国、欧洲、北美）均与可再生能源资源富集区域进行互联，接受外来清洁电力。负荷中心之间，如中、日、韩三国，也互相连接，以满足各国清洁能源电力使用要求。除北美外，各负荷中心均有至少2条通道与他国互联。而北美本地资源丰富，仅与北极新能源基地相联，与南美资源富集区暂未连接。将规划结果与已有的互联计划相比较，东北亚区域互联情况与“亚洲超级电网”计划较为相符，中国与欧洲的互联互通通道与“一带一路”倡议相符，欧洲大陆与北欧、北非的互联以及北非与中东的互联也与“超级电网”计划、Desertec项目中的规划较为吻合。

同时，注意到互联与否与通道适宜度大小之间并不呈现显著的对应关系，如中国—中东的适宜度较高，但其相距较远，且中东与北非的互联即可满足本地区需求，故通道5并未出现在规划结果中。又如中日之间通道适宜度不高，在初始电力流规划中并未出现两国间电力输送，但在网架扩展中为满足互联通道可能的开断下清洁电力使用要求，两国之间需搭建互联通道。可见，跨国跨洲输电通道的规划中除国家因素的重要影响外，传统的经济、技术约束依然不能忽视。

3.3 敏感性分析

3.3.1 不考虑国家风险的规划

假设规划中不考虑国家因素，得到规划结果在图3中用红线和绿线表示。

与上一结果对比可以看出，由于不考虑国家风险，原来被从待选集中剔除的通道18（俄罗斯—中亚）出现在规划结果中，由于经评估该通道的风险较大，实际中将很难被两方所考虑。同时，在评估中风险较小的中国—欧洲大陆之间的互联通道未出现在此规划结果中。可见，若不计及国家因素，规划的结果将与实际相差较大。

3.3.2 考虑国家风险动态变化

预计在“一带一路”倡议下，中国与中亚国家的关系与合作将更加密切，考虑这种发展趋势，进行灵敏度分析，将中国—中亚互联通道的适宜度适当提高，在此基础上进行互联通道规划，发现当适宜度提高0.14以上时，规划结果将保持不变，得到的规划结果在图3中用红线和蓝线表示。

从图中可以看出，由于适宜度提高，相应的国家风险下降，中国与中亚之间互联通道的等效输电成本降低，中国与中亚形成互联通道。规划时，中亚与欧

洲大陆搭建互联通道,保证了中亚地区的清洁能源使用要求。规划结果中的“中国—中亚—欧洲大陆”互联通道与“一带一路”倡议相呼应,可见考虑国家因素的跨国跨洲互联通道规划可以反映出国家风险的动态变化情况,规划结果更具有工程可行性。

4 结论

在能源资源与需求分布不均及可再生能源大规模发展的背景下,跨国跨洲电力互联具有显著的经济和环境价值。跨国跨洲输电通道以清洁能源开发、配置为核心,以国家或地区为参与对象,基于远距离大容量输电技术,构建点对点大功率注入的跨国互联电网。本文针对跨国跨洲输电通道的特点,以实现大规模可再生能源的供需平衡为目标,对参与互联的国家或地区建立考虑技术、经济、政治等方面的国家风险评价模型,并基于此提出了跨国跨洲输电通道规划方法。

算例表明,考虑国家风险的跨国跨洲输电通道规划更加具有现实意义。与不考虑国家风险的规划相比,该方法得到的结果更加符合实际情况,且提出的评价模型可以反映国家风险的动态变化,从而得到更具工程可行性的规划结果。

参考文献

- [1] International Renewable Energy Agency (IRENA). REmap: Roadmap for a renewable energy future, 2016 edition [EB/OL]. [2017-11-30]. <http://www.irena.org/publications/2016/Mar/REmap-Roadmap-for-A-Renewable-Energy-Future-2016-Edition>.
- [2] JACOBSON, MARK Z, et al. 100% Clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for 139 countries of the world[J]. *Joule*, 2017, 1 (1): 108-121.
- [3] IEA. Large-scale electricity interconnection [EB/OL]. [2017-11-30]. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/large-scale-electricity-interconnection-technology-and-prospects-for-cross-regional-networks.html>.
- [4] IEC. Global energy interconnection [EB/OL]. [2017-11-30]. <http://www.iec.ch/whitepaper/globalenergy/?ref=extfooter>.
- [5] UN. UN daily news [EB/OL]. [2017-11-01]. <http://www.un.org/News/dh/pdf/english/2017/01112017.pdf>.
- [6] PLATZER, WERNER et al. Supergrid – approach for the integration of renewable energy in Europe and North Africa [EB/OL]. [2017-11-30]. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/Study_Supergrid_final_160412_.pdf.
- [7] MANO S, OVGOR B, SAMADOV Z, et al. Gobitec and Asian super grid for renewable energies in Northeast Asia [EB/OL]. [2017-11-30]. <http://www.energycharter.org/what-we-do/investment/investment-thematic-reports/gobitec-and-the-asian-supergrid-for-renewable-energy-sources-in-northeast-asia-2014>.
- [8] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [9] 司守奎, 孙玺菁. 数学建模算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [10] HOWELL L D. International country risk guide methodology [EB/OL]. [2017-11-30]. <https://www.prsgroup.com/about-us/our-two-methodologies/icrg>.
- [11] The PRS Group. International country risk guide (1984-2012) [EB/OL]. [2017-11-30]. <http://www.prsgroup.com/about-us/our-two-methodologies/icrg>.
- [12] BIROL F. World energy outlook [EB/OL]. [2017-11-30]. <https://www.iea.org/newsroom/news/2016/november/world-energy-outlook-2016.html>.
- [13] Heritage Foundation. Index of economic freedom [EB/OL]. [2017-11-09]. <http://www.heritage.org/index/>.
- [14] Transparency International. Corruption perceptions index 2016[EB/OL]. [2017-11-09]. <https://www.transparency.org>
- [15] HIIK. Conflict barometer [EB/OL]. [2017-11-09]. <https://www.hiik.de/en/konfliktbarometer/>.
- [16] Stanford University. Evaluation of global wind power [EB/OL]. [2016-05-29]. http://web.stanford.edu/group/efmh/winds/global_winds.html.
- [17] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究[EB/OL]. [2017-11-30]. <http://www.cnrec.org.cn/cbw/zh/2015-05-22-473.html>.
- [18] SCHELLEKENS G, BATTAGLINI A, LILLIESTAM J, et al. 100% renewable electricity: A roadmap to 2050 for Europe and North Africa [EB/OL]. [2017-11-09]. <http://pure.iiasa.ac.at/9383/>.
- [19] 应启良. 我国发展直流海底电力电缆的前景[J]. *电线电缆*, 2012(3): 1-7.
YING Qiliang. The prospect of development of DC submarine cables in China[J]. *Electric Wire & Cable*, 2012(3):1-7 (in Chinese).
- [20] 程斌杰, 徐政, 宣耀伟, 等. 海底交直流电缆输电系统经济性比较[J]. *电力建设*, 2014, 35(12): 131-136.
CHENG Binjie, XU Zheng, XUAN Yaowei, et al. Economic comparison of AC/DC power transmission system for submarine cables[J]. *Electric Power Construction*, 2014, 35(12): 131-136 (in Chinese).
- [21] 孙珂, 张琳, 宋福龙, 等. 电力流向及规模优化研究模型和研究方法[J]. *电力建设*, 2012, 33(8): 8-11.
SUN Ke, ZHANG Lin, SONG Fulong, et al. Model and method of study on power flow and scale optimization[J]. *Electric Power Construction*, 2012,33(8): 8-11 (in Chinese).
- [22] EIA U S. Levelized avoided cost of new generation resources in the annual energy outlook 2017 [EB/OL]. [2017-11-30]. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/electricity_generation.php.



鲁宗相

收稿日期：2017-11-13。

作者简介：

鲁宗相（1974），男，副教授，研究方向为风电/太阳能发电并网分析与控制、能源与电力宏观规划、电力系统可靠性、分布式电源及微电网。E-mail: luzongxiang98@tsinghua.edu.cn。

李昊（1994），男，博士研究生，研究方向为电力系统规划。E-mail: h-116@mails.tsinghua.edu.cn。

乔颖（1981），女，副研究员，研究方向为新能源、分布式发电、电力系统安全与控制。E-mail: qiaoying@tsinghua.edu.cn。

（责任编辑 夏雪）