



跨国跨洲电网互联技术与展望

全球能源互联网发展合作组织

2017年2月22日



1. 研究背景

2. 主要研究内容及成果

- 电网互联现状与展望
- 跨国跨洲电网互联案例分析
- 电网互联的市场和监管框架





为全面深入分析探讨应对气候变化背景下联网技术发展现状及其趋势，论证跨国跨洲电网互联对于促进可再生能源开发、实现大范围能源资源优化配置的贡献，从而更好地推动跨国跨洲联网发展并提供政策建议，全球能源互联网发展合作组织（GEIDCO）联合国际能源署（IEA）、国家电网公司（SGCC）等有关机构开展本课题研究。

2016年11月，国际能源署在摩洛哥举办的第22届世界气候大会（COP22）上进行了研究成果的预告发布，取得了良好反响。

1 研究背景



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

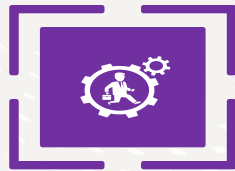
本报告重点分析了跨国跨洲电网互联发展技术现状、互联发展案例和影响电网的政策机制，展望了电网互联的发展趋势及愿景。主要包括：



基于IEA应对气候变化的情景假设，研究了跨国跨洲电网发展现状及技术创新，提出了跨国跨洲电网互联愿景和技术发展趋势。



基于全球主要区域电网互联的案例分析，验证了跨国跨洲电网互联在错峰调节、降低系统备用容量、促进可再生能源并网及大范围优化配置能源资源等方面的综合效益。



系统研究了跨国跨洲互联电网的市场框架、监管措施及商业投资模式，提出设立跨国协调机构、完善市场规则、联合开展规划等措施，针对跨国互联新建项目和电网运营的关键问题分别深入阐述。



1. 研究背景

2. 主要研究内容及成果

- 电网互联现状与展望
- 跨国跨洲电网互联案例分析
- 电网互联的市场和监管框架



2.1 电网互联现状与展望



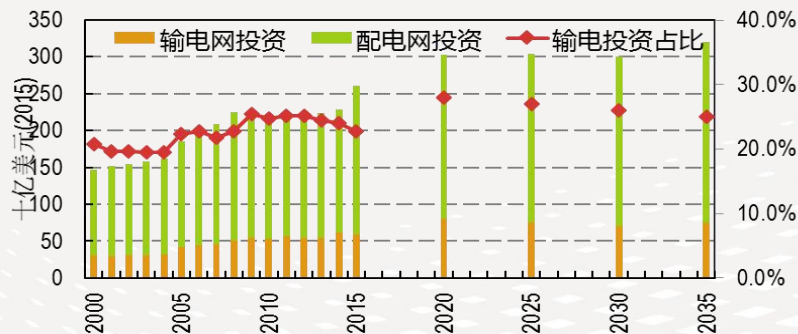
Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

电网互联场景

目前，全球电网线路总长度约**7500万千米**，其中跨国电网互联线路长度接近**1万千米**，跨国联网容量约**2.5亿千瓦**，预计2020年将达到**3.3亿千瓦**。中国电网互联发展迅速，截至2016年**中国特高压电网**累计输送电量达**6150亿千瓦时**。

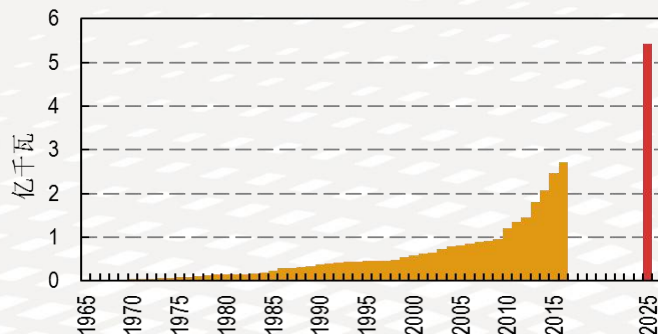
- 2015年全球电力行业投资约7000亿美元，其中电网投资占将近40%
- IEA预测，随着大范围电网互联，未来20年输电侧投资还将再增加1/3
- 电网互联的技术方案选择（交流或直流）取决于其目的，典型场景有：**远距离低成本输送、异步电网互联、能源基地集中送出、可再生能源并网等**

全球电网投资情况



资料来源：IEA(2016)《世界能源投资》、《世界能源展望2016》

高压输电容量增长趋势



资料来源：彭博新能源财经(Bloomberg New Energy Finance, BNEF)、IEA(2016)、《能源技术观点2016》

2.1 电网互联现状与展望



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

电网互联场景



扎鲁特-青州特高压直流

远距离低成本送电

发展现状：特高压/高压直流输电技术快速推广

- **目前跨国最长：**挪威至荷兰NorNed link工程，600千米/70万千瓦
- **中国：**哈密南-郑州±800kV特高压直流工程，2191千米/800万千瓦

前景展望：多项电网互联项目被提上日程

- 北欧和英国之间的北海直流联网工程，730千米/140万千瓦
- 中国扎鲁特-青州±800kV特高压直流输电工程，1234千米/1000万千瓦

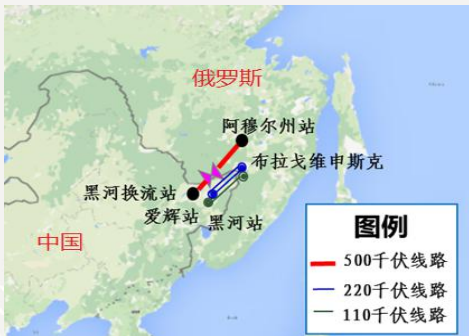
异步电网互联

发展现状：全球异步联网的系统容量约1300万千瓦，不含中国国内区域互联电网

- **跨国互联电压等级最高：**中国-俄罗斯±500千伏背靠背联网工程
- **中国：**华中与华东电网通过总容量3170万千瓦的多条直流异步互联

前景展望：异步电网互联需求强烈

- 连接波罗的海与北欧地区的NordBalt link工程
- 巴西-阿根廷-乌拉圭的电网互联工程
- 蒙古-中国-韩国-日本电网互联工程



中-俄直流背靠背联网

2.1 电网互联现状与展望



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

电网互联场景

能源基地送出

发展现状：提升电压等级以实现偏远地区的能源基地送出

- **目前最长：**巴西马德拉河水电送出工程，将亚马逊盆地水电输送至2800千米外的圣保罗地区
- **中国：**六条特高压直流输电线路，输送西部、北部、西南的水电、风电、太阳能至中东部负荷中心

前景展望：大范围资源优化配置

- 中国 ± 1100 千伏准东-皖南特高压直流输电工程，3324千米/1200万千瓦，在输电距离、电压等级及输电容量等方面将创历史新高

可再生能源并网

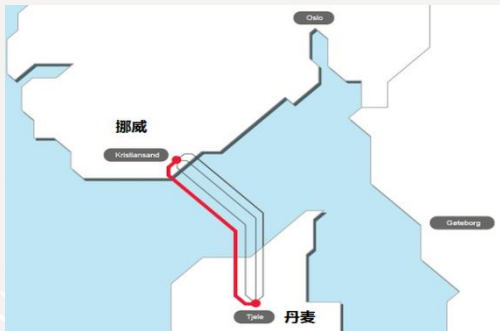
发展现状：灵活交流输电、柔性直流输电、虚拟同步机技术应用

- 绝缘栅双极型晶体管（IGBT）的成本8年间降低了2/3
- 丹麦Skagerrak-4 柔性直流输电工程，支撑高风电渗透率场景
- **世界首个真双极接线工程：**中国厦门 ± 320 千伏柔性直流输电工程

前景展望：核心技术持续升级应用



准东-皖南特高压直流



丹麦Skagerrak-4柔性直流

2.1 电网互联现状与展望



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

电网互联技术创新



晋东南-南阳-荆门特高压交流输电示范工程



±1100千伏直流换流阀

特高压交流输电技术

主要特点：输电距离远、输电容量大，构建特高压骨干网架，可为直流多馈入的受端电网提供坚强的电压和无功支撑

现状：世界首条商业运行:中国晋东南-南阳-荆门1000千伏特高压交流输电示范工程，640千米/500万千瓦。随后淮南-南京-上海、浙北-福州、淮南-浙北-上海、锡盟-山东等多条特高压交流线路陆续建成投运

前景展望：特高压半波长输电技术具有更远的输送距离和更大的输送容量，可作为洲际同步互联电网设想的技术选项

特高压直流输电技术

主要特点：输电距离远、容量大、潮流方向和大小可控，可点对点直接将电力送往负荷中心，减少或避免大量过网潮流

现状：基于晶闸管的直流输电工程最高电压等级已经达到了±1100千伏，输电容量1200万千瓦，输送距离可超过4000千米

前景展望：研发更高电压、更大容量、高可靠性的换流变压器、换流阀、套管、直流滤波器等关键设备。中国已启动±800千伏直流电缆研制工作

2.1 电网互联现状与展望



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

电网互联技术创新



柔性直流换流阀



舟山多端柔性直流输电工程地理接线图

柔性直流输电技术

主要特点：可向无源电网供电、不会出现换相失败、易于构成多端直流电网

现状：柔性直流输电技术处于示范应用阶段，全球已投运工程20项，在建工程超过20项；欧洲柔性直流输电工程项目数量最多；在风电并网、薄弱电网互联等领域应用较多

前景展望：提高柔性直流输电容量和电压等级

多端高压直流输电技术

主要特点：能够实现多个电源区域向多个负荷中心供电。可解决单回大容量直流接入交流电网引起的稳定性问题

现状：意大利-科西嘉-撒丁岛多端直流是世界上第一个正式运行的多端直流输电工程。魁北克-新英格兰多端直流输电工程也已建成投运。中国多端直流输电均采用柔直技术，已投运的舟山多端柔性直流输电示范工程是世界上第一个五端柔性直流输电工程

前景展望：突破高压直流断路器、建模仿真、电网主接线、快速故障保护与故障恢复、绝缘配合、运行控制技术

2.1 电网互联现状与展望——小结



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

1 未来全球电力需求增长速度高于能源需求总体增速，可再生能源在未来能源格局中将占据重要地位。要实现可再生能源大规模开发和利用，必须加强电网互联和输送能力，提升电力系统的灵活性。

2 电网互联的典型应用场景包括：远距离低成本输送、异步电网互联、能源基地集中送出、可再生能源并网等。

3 未来电网互联技术发展趋势主要包括特高压交直流输电技术、柔性直流输电技术、多端直流输电技术等。

4 特高压输电技术是实现超远距离、超大容量输电的重要基础。充分发挥各类技术优势，实现不同时空能源资源的高效开发和利用，对构建互联电网具有重要意义。



1. 研究背景

2. 主要研究内容及成果

- 电网互联现状与展望
- 跨国跨洲电网互联案例分析
- 电网互联的市场和监管框架



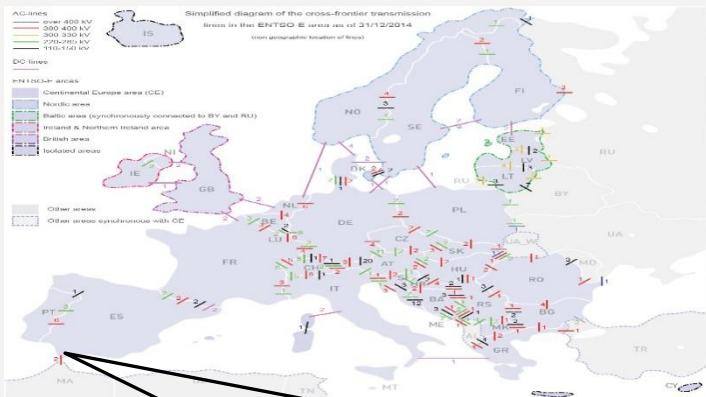
2.2 跨国跨洲电网互联案例分析



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

案例1：欧洲北非互联

欧洲北非电网互联示意图



欧洲大陆同步电网

- 全球容量最大的区域互联电网，总容量超10亿千瓦

欧洲北非互联-南部区域

- 欧洲大陆电网与北非电网同步互联，覆盖欧洲输电运行商联盟内部的24个成员国，以及摩洛哥、阿尔及利亚和突尼斯等北非国家
- 互联情况：已有西班牙和摩洛哥间两条400 千伏交流海底电缆

欧洲北非互联-北部区域

- 由丹麦、瑞典、挪威和芬兰四国组成的北欧同步电网与欧洲大陆同步电网经多条直流线路互联

2.2 跨国跨洲电网互联案例分析



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

案例1：欧洲北非互联-南部区域

电力贸易

- ◆ 北非国家电力需求增长迅速，摩洛哥进口电力几乎全部来自于西班牙

中期机遇

- ◆ 加强西班牙至摩洛哥的电网互联
- ◆ 突尼斯与意大利间计划修建跨海直流互联工程，200千米/60万千瓦
- ◆ 摩洛哥与葡萄牙间100万千瓦电网互联项目已签署协议

电网互联效益

- ◆ 非洲廉价的可再生能源替代非、欧两大洲的火电，降低碳排放
- ◆ 促进各国紧密合作、破除壁垒，建立相互依存、互信互利的工作机制，促进能源和谐开发利用

机遇与挑战

- ◆ 需要建立明确的监管规则、协议、标准，保障互联电力系统有效运行
- ◆ 推动欧洲和非洲的电力系统互联，促进北非国家可再生能源大规模开发

2.2 跨国跨洲电网互联案例分析



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

案例1：欧洲北非互联-北部区域

电力贸易

- ◆ 2015年，挪威净出口电量占本国总发电量的10%，瑞典净出口电量占本国发电总量的15%

中期机遇

- ◆ 北欧零碳情景下，可再生能源占比将从2013年的7%增长到2050年的30%
- ◆ 建设北海国家离岸电网

电网互联效益

- ◆ 发挥大型水电调峰优势，利用双向电力贸易，提升电力系统灵活性，促进可再生能源开发利用
- ◆ 通过波罗的海南部离岸电网，将海上风电输送到欧洲大陆

机遇与挑战

- ◆ 促进发电形式的多样化，提高系统安全性，使相关国家从中受益
- ◆ 释放北欧地区之外国家对风电的需求，更好地应对欧洲大陆的电价上涨
- ◆ 成本收益分摊以及国内电网升级会加强非经济壁垒

2.2 跨国跨洲电网互联案例分析

案例2：中美洲互联



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织



中美洲电网互联示意图

中美洲电网

六大国家：巴拿马，哥斯达黎加，洪都拉斯，尼加拉瓜、萨尔瓦多和危地马拉

国际化运营：在中美洲电气一体化框架协议下成立国际输电线路公司，股东覆盖中美洲与西班牙等外部区域国家

联网现状

- 以1800千米单回230千伏输电线为主，输电容量30万千瓦
- **一体化布局：**通过架设36芯复合架空地线（OPGW）满足中美洲、墨西哥和哥伦比亚通信基础设施一体化需求

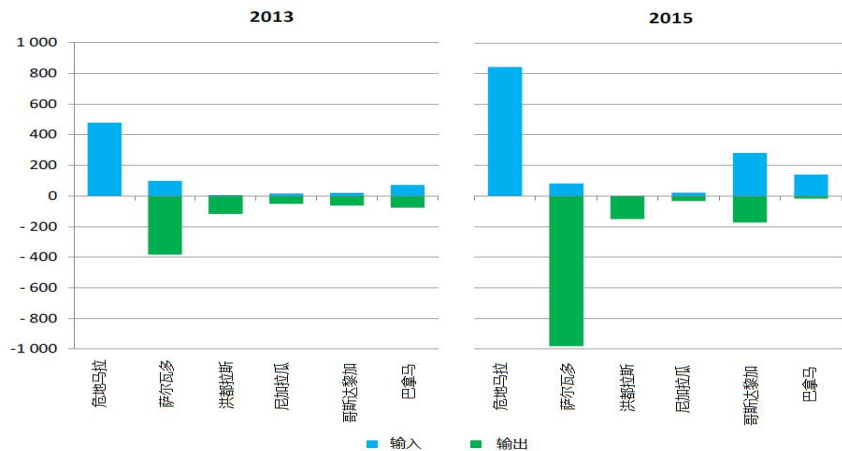
2.2 跨国跨洲电网互联案例分析

案例2：中美洲互联



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

2013与2015年中美洲区域电力市场交易



电力贸易

6个国家的电力市场结构存在显著差异，既有完全竞争的批发市场，也有垂直一体化电网企业构成的单一买方市场

电网互联效益

有利于促进当地水力资源开发，提高区域内火力发电厂的运行效率，促进地区间的电力交易，增强该地区的能源安全

机遇与挑战

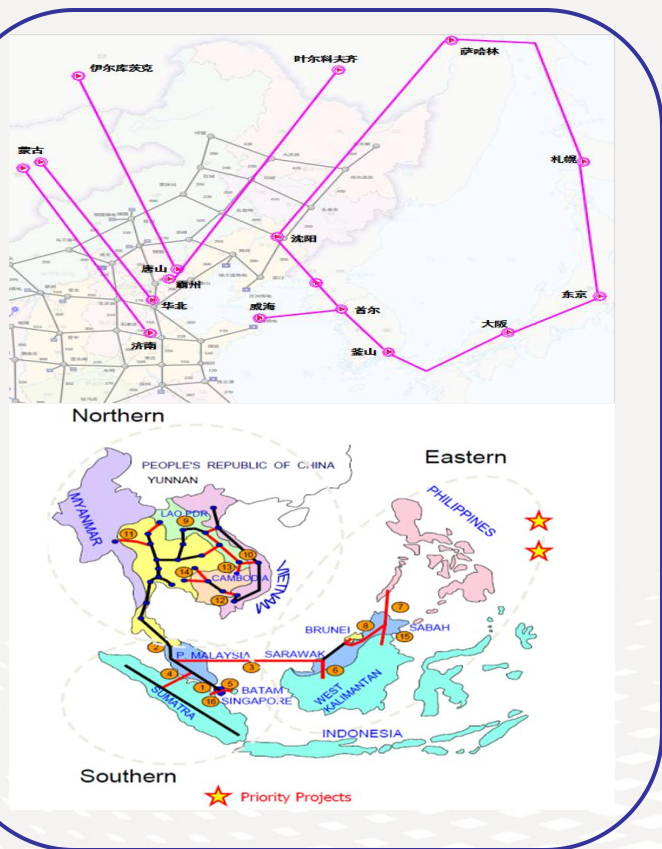
- 启动中美洲电网互联项目第二回线路建设，提高传输容量，分担第一回线路中的潮流，从而提高该地区电网的可靠性和安全性
- 实施哥伦比亚 - 巴拿马联网项目，巩固该地区经济一体化
- 共同制定区域电力发展规划

2.2 跨国跨洲电网互联案例分析



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

案例3：东亚地区互联



- **东亚地区**，位于亚洲东部，太平洋西岸，包括中国、蒙古、俄罗斯（远东及西伯利亚地区）、朝鲜、韩国、日本和东南亚十国

东亚地区互联-东北亚

- **互联情况**：现有的跨国电力互联项目连接俄罗斯与蒙古、俄罗斯与中国、中国与蒙古，总体规模相对较小

东亚地区互联-东南亚

- 东南亚互联电网划分为3个分区
- **互联情况**：东南亚地区电网互联输送总容量将达2320万千瓦

2.2 跨国跨洲电网互联案例分析



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

案例3：东亚地区互联-东北亚

电力贸易

- ◆ 东北亚尚不存在统一的电力市场
- ◆ 现有跨国电力交易主要集中在俄罗斯与蒙古、俄罗斯与中国、蒙古与中国

中期机遇

- ◆ 东北亚各国逐渐识到加强能源互联互通、经济金融政策对话的必要性
- ◆ 相关组织和输电网运营商正在积极扩大东北亚区域之间的跨境电力贸易

电网互联效益

- ◆ 提高电力系统灵活性，促进可再生能源开发、跨国电力贸易，减少二氧化碳排放，创造新的就业机会

机遇与挑战

- ◆ 建立政府间的委员会，支持能源基础设施建设
- ◆ 建立地区能源合作机制，为跨国电力贸易立法或完善相关法律
- ◆ 需要加强融资能力

2.2 跨国跨洲电网互联案例分析



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

案例3：东亚地区互联-东南亚

电力贸易

- ◆ 东盟各国只存在双边协议，多边协议还在规划当中
- ◆ 东盟各国两种主要模式：一是泰国-老挝电力互济模式，二是新加坡-马来西亚的净能量交换模式

中期机遇

- ◆ 一些东盟国家提出了多边电力贸易的倡议，从老挝经由泰国和马来西亚输送10万千瓦电力到新加坡

电网互联效益

- ◆ 有效保障低成本清洁电力供应、增加就业、拉动经济发展，为能源电力可持续发展提供根本解决方案

机遇与挑战

- ◆ 对加强区域电网互联可能危害国家主权的担忧，会妨碍跨国联网的进程，在协调各国工作的同时应尊重国家主权

2.2 跨国跨洲电网互联案例分析—小结



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

上述案例分析介绍了当前各大洲的部分跨国电网互联工程，由于各区域存在时差和气候带差，负荷的峰谷期不同，以及能源资源决定的电源结构差异，大规模电网互联将产生巨大的综合效益。

1

将大型可再生能源基地的低成本电力输送到发电成本较高的地区，可降低受电地区的电力供应成本。

2

跨国电网能促进各国能源资源开发利用、加强区域间经济合作。



1. 研究背景

2. 主要研究内容及成果

- 电网互联现状与展望
- 跨国跨洲电网互联案例分析
- 电网互联的市场和监管框架



2.3 电网互联的市场和监管框架



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

跨国跨洲电网互联的影响因素

相同点

1. 协调相关机构
2. 满足技术和环境方面的政策和监管要求
3. 吸引股东入股分摊成本

不同点

1. 跨境合作
2. 选址复杂

关键举措

1. 签订相关成员国机构间谅解备忘录，紧密合作
2. 常设跨国机构协调管理

电网互联的市场框架

电力跨境交易模型

基于成本差异或独立发电公司
(IPP) 进口的单向交易

国家公用事业间的双边或
多边电力贸易

多买方、多卖方
市场交易

2.3 电网互联的市场和监管框架



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

市场框架核心



成本分摊

- 普遍采用“谁受益谁付费”原则
- 需明确定义成本分摊的界限
- 大型电网互联项目中，如何确定相关利益者



商业投资

- 商业投资回收成本的途径：收取过网费和出售线路特许经营权
- 电网互联的商业投资面临障碍

根据不同的市场框架及市场化程度，研究适合的成本分摊方式与商业投资模式。

监管框架核心

确定联
网传输
容量



分配联
网传输
容量



建立统
一监管
框架

建立统一监管体系，进行数据信息共享、跨国调度合作以及市场规则设计，合理利用输电线路。

2.3 电网互联的市场和监管框架—小结



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

1

跨境电力市场框架主要考虑两个方面内容，其中新建项目最关键的是成本分摊和商业投资问题，电网运营最关键的是确定联网传输容量及其分配。

2

为便于项目规划协调，电力线路前期规划需要在各国能源基础设施主管部门之间设立跨国规划机构。

3

电网投资分摊是国际电力市场中最需要被关注的因素。

4

大范围一体化的电力市场有助于提高系统运行的稳定性、经济性，降低大规模高比例可再生能源并网后的系统运行潜在风险。

跨国跨洲电网互联方兴未艾，是电网未来发展的基本趋势，是构建全球能源互联网的基本内容，也是一项复杂的系统工程，需要各方共同努力。

借此研究，我们希望吸引更多力量行动起来，共同建设全球能源互联网，为实现绿色和谐的地球村贡献力量。



Global Energy Interconnection
Development and Cooperation Organization
全球能源互联网发展合作组织

谢谢！

