

量子保密通信组网在东北亚互联大电网中的应用

张梓平¹,刘国军¹,李建岐¹,陆旭²,黄兴³

(1.全球能源互联网研究院有限公司 电力通信网络技术实验室,北京 102209;

2. 国网内蒙古东部电力有限公司 信息通信分公司,呼和浩特 010020;3. 国网辽宁省电力有限公司 信息通信分公司,沈阳 110006)

摘要:随着对东北亚互联大电网研究的逐步深入,跨国电力敏感信息的安全传输问题渐渐受到重视,而量子密钥分发(QKD)技术则为解决该问题提供了新的思路。在调研东北亚跨国光纤资源与光纤量子网络结构的基础上,提出在东北亚着重构建3条光纤战略通道及3种光纤量子保密通信组网方案。待当前光纤量子保密通信系统单跨度传输距离不足的问题解决后,该方案有望在东北亚实现。

关键词:东北亚互联大电网;量子密钥分发;光纤量子网络

中图分类号:TN929.11 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)03-0008-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.03.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of quantum secure communication network in Northeast Asia interconnected power grid

ZHANG Ziping¹, LIU Guojun¹, LI Jianqi¹, LU Xu², HUANG Xing³

(1. Laboratory of Electric Power Communication Network Technology,

Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. Information communication branch, State Grid Eastern Inner Mongolia Electric Power Co., Ltd., Hohhot 010020, China;

3. Information communication branch, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: With the deepening of the research on the interconnected power grid in Northeast Asia, more and more attention has been paid to the secure transmission of transnational power sensitive information. Quantum key distribution (QKD) technology provides a new way to solve this problem. On the basis of investigating the transnational optical fiber resources and the structure of optical fiber quantum network in Northeast Asia, three optical fiber strategic channels and three optical fiber quantum secure communication networking schemes are proposed. The above schemes are expected to be implemented in Northeast Asia after solving the problem of insufficient single-span transmission distance in the current optical fiber quantum secure communication system.

Key words: Northeast Asia interconnected power grid; quantum key distribution (QKD); optical fiber quantum network

0 引言

东北亚互联大电网^[1]是国家电网公司根据亚洲电力供需和互联基础提出的未来亚洲“5+1”互联电网格局中的重要一环,也是全球能源互联网规划中的重要组成部分^[2-5]。由于未来跨国电力通信网可能会涉及到

收稿日期:2018-10-17。

基金项目:国家电网公司总部科技项目(SGRIWLZXJSKF20171082)资助。

作者简介:张梓平(1988-),男,北京人,博士,工程师。主要研究方向是光通信、微波光子学和电力量子保密通信。参与国家电网公司科技项目“特高压、东北亚电网互联量子通信技术研究”、“量子保密通信天地体系架构及组网关键技术研究”和“基于量子态技术的保护信号远程传输可行性研究”等。



诸如跨国电力交易等大量敏感信息的传输问题,这需要很高安全等级的加密措施来保障。在当前能够保障信息安全传输的众多加密技术中,量子加密被认为是理论上绝对无法被破解的加密技术。如果在东北亚跨国电力信息通信网中引入量子加密技术,则有可能在不大改现有纵向加密认证机制的基础上提升跨国调度自动化类业务的安全性,或者以较低成本对跨国敏感信息进行高安全等级加密,彻底解决跨国电力信息的安全传输问题。

本文提出3条东北亚光纤战略通道与3种光纤量子组网方案,同时依托实验室针对该方案又提出电网业务承载能力实验验证方案。

1 东北亚跨国光纤通道资源

东北亚跨国光纤资源主要由两部分组成:一是运营商的跨国通信光缆,包括海底光缆与陆地光缆;二是跨国电力光纤通信专网,包括陆地上的电力架空光缆与地埋光缆,乃至今后要建设的海底电缆中的光纤部分。

1.1 运营商跨国光纤资源

在国内的三大通信运营商中,中国电信拥有数量最多的跨国光缆,其陆地光缆连接了几乎所有的陆地邻国。在这些陆地光缆中,有3条位于A国-D国之间:①A国E市和D国之间的陆地光缆,途径X市与A国-D国边界,全长970km,是A国开通的首条国际陆地光缆;②A国H市和D国之间的陆地光缆,属于“亚欧光缆”项目合作协议的一部分;③A国M市和D国之间的陆地光缆,属于连接A国和欧洲的高速率陆地光缆系统的一部分。此外,还有A国与其它陆地邻国之间的陆缆,这些陆缆均属于亚欧光缆的一部分,主要服务于东北亚地区中处于亚洲大陆的国家。而接入东北亚海底光缆的国家主要有A国、B国、C国和D国,其中,A国-B国-C国之间的海底光缆数量较多。

1.2 跨国电力光纤资源

根据东北亚能源互联网的建设愿景,第一阶段需整合A国-D国-E国3国的陆地跨国互联电网;第二阶段需推动B国-C国2国加入能源互联网^[6],而电力光纤通信专网会与此同步建设。目前东北亚区域的主要跨国输电线路由A国-D国、A国-E国和A国-B国-C国3部分组成:一是AD输电线路(已建成),包括电压为110kV的D国-A国输电线路、220kV的D国-A国输电线路和500kV的D国-A国直流线路;二是A国-E国直流输电工程(计划&在建),包括电压为660kV的E国-A国直流输电工程和800kV的E国-A国特高压直流输电工程;三是A国-B国-C国-D国的电力联网工程(计划)。目前,A国-B国-C国电力联网项目预可行性研究已接近尾声,拟规划建设500kV直流海底电缆联网项目,AB段起点A国Q市,落点B国R市;BC段起点B国F市,落点C国J市。

2 光纤量子保密通信网络结构

由于单光子的不可分割特性注定了量子网络与经典网络会有较大差别,而目前量子保密通信网络中广泛使用的可信中继(而非量子中继)也会限制量子组网的灵活性。因此,在设计东北亚光纤量子保密通信组网方案之前,应充分调研已经被证明可行的方

案,目前主要有以下几种:①链式/总线型光纤量子组网方案。如2017年开通的我国首条广域量子通信骨干网络-“京沪干线”^[7],它通过中继节点连接北京、上海,贯穿济南、合肥等地,全长约2000km,同时将沿线城域网连入其中,为政府和金融机构提供最高安全等级的通信保障;②星型光纤量子组网方案。如2009年潘建伟院士团队在合肥搭建的5节点星型量子电话网络^[8],其中使用了1种新型的8端口光开关设备,可以实现任意两端口间的互联;③环型光纤量子组网方案。目前已有许多文献提出了该方案,如文献[9]提出的一种基于OADM的环形量子密钥分配(QKD)骨干网结构,其中每一个节点均与一个或多个接入网连接,由波分复用(WDM)技术实现量子信号与经典信号的上、下行功能。因此,在进行东北亚光纤量子保密通信网络设计时应根据实际情况,尽量使用以上3种网络拓扑或其组合方案。

3 东北亚光纤量子保密通信组网

本文充分调研了东北亚跨国光纤资源与当前光纤量子网络结构,并在综合考虑东北亚各国地理位置、通信业务量和相关项目进展等因素的基础上,得出3种东北亚光纤量子保密通信组网方式:A国-B国-C国-D国4国的链式组网、A国-D国-E国3国的环型组网和东北亚6国量子保密通信组网。

3.1 A国-B国-C国-D国4国链式组网方案

由于A国-B国-C国-D国4国间存在大量的海底通信光缆,可以考虑利用该公共网络实现这4国间量子保密通信信号的传输,其中可以利用的光纤通道如图1所示。但其不利因素在于:一是4国之间的信息交互业务数量庞大,光缆资源可能较为紧缺;二是A

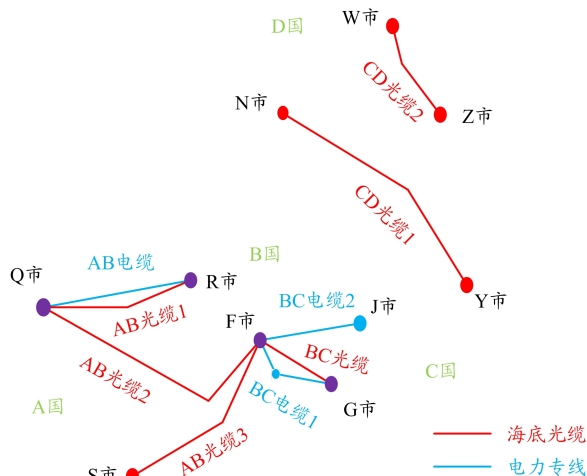


图1 A国-B国-C国-D国4国链式量子保密通信网络通道

张梓平,刘国军,李建岐,等;量子保密通信组网在东北亚互联大电网中的应用

国-B国及A国-C国之间的海上跨度较大,对目前主流的量子保密通信设备来说难以实现单跨度无中继传输,而在海底铺设量子可信中继难度极大且成本很高,即使考虑未来将要建立的4国海底电力通信专线,该状况也很难改变,需等待长距离量子保密通信技术逐步成熟。

3.2 A国-D国-E国3国环型组网方案

相对于A国-B国-C国-D国4国,A国-D国-E国3国之间的光缆数据通信业务量较小,并都处于大陆地区,比海底更容易进行网络敷设与改造。此外,A国-D国、D国-E国之间早已存在输电线路,跨国电力交易已进行多年,而A国-E国之间新的特高压线路已在设计与建造之中,利用电力通信专网传输量子信号的基本条件已经具备。但其挑战在于陆地地区特高压站点或经典光通信系统的中继距离均在200km以上,目前量子保密通信设备的传输距离还很难达到这一指标。根据前文调研的结果,本文拟在A国-D国-E国3国间构建量子保密通信环型网络,具体可能利用到的光纤线路如图2所示。

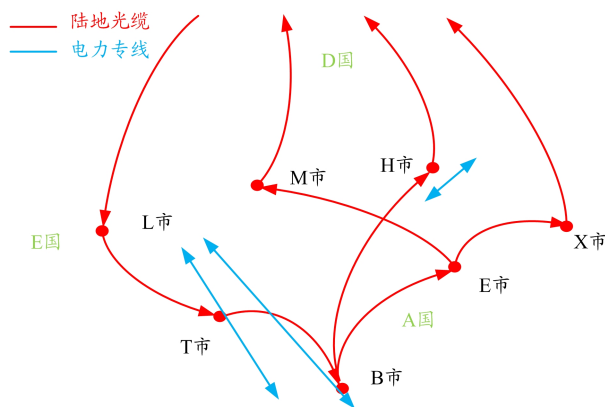


图2 A国、D国和E国3国环型量子保密通信网络通道

3.3 θ 型量子保密通信网络方案

根据东北亚地区现有和即将建设的光纤通道,并结合上文链式及环型网络方案设计,我们分别以A国A区域和D国为顶点,提出连接这2个顶点的3条光纤战略通道:①从A国A区域出发向东经C国到达D国的东线;②从A国A区域出发经A国B区域直接到达D国的中线;③从A国A区域出发经E国到达D国的西线。据此,本文提出东北亚 θ 型量子保密通信网络结构设计,如图3所示。可以看出,这种网络拓扑结构较为简单,能够充分利用已有的或即将建成的光纤线路,同时能够覆盖东北亚绝大多数国家,但需要先解决光纤量子密钥的长距离分发问题。

由于当前还未见有针对 θ 型量子保密通信网络的深入研究与大规模应用,所以该方案可能存在一些新的技术问题,后续需要对其开展量子网络结构与电网业务承载能力等一系列研究与验证工作。

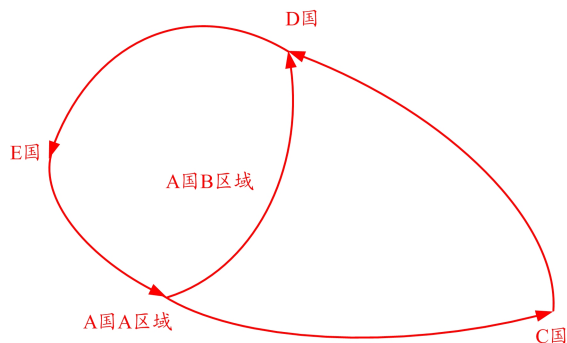


图3 东北亚 θ 型光纤量子保密通信网络结构

4 θ 型光纤量子保密通信网络实验验证方案

本文依托于国家电网公司电力通信网络技术实验室,针对东北亚 θ 型量子保密通信网络结构设计了实验验证方案,如图4所示。该方案除了开展点对点长距离量子密钥生成性能等常规测试工作之外,还需要模拟东北亚量子保密通信网络结构,研究该网络的整体性能,并对电网业务承载能力进行验证。由图4可知,该验证网络由5个节点组成(如绿圈所示),每个节点都包含1套独立的QKD设备和1套业务加密设备。QKD设备主要包括QKD收发一体机、量子交换机等;业务加密设备主要包括IP网量子网关或E1专线量子网关。图中红线部分为量子网络,传输介质为光纤(假设量子信号与协商信号均在光纤中传输),每2台量子交换机之间采用可信中继来模拟长距离传输。测试量子网络时应重点关注量子设备组网后其性能指标和点对点传输时的区别,同时需要研究量子密钥成码率与节点位置、光纤损耗和中继距离等因素的关系,最终实现整体最优。量子密钥生成后可用于对电网信息类业务或电网生产类业务加密。信息类业务需用IP网量子网关加密,加密后通过以太网口进入数据网业务环境(如图中蓝线所示)。承载信息类业务时应重点关注带宽问题,即网络中任意2个节点在特定密钥成码率的前提下能够承载多大带宽的业务,研究如何在保证安全性的条件下,使用尽量少的密钥量加密尽量多的业务数据量。生产类业务(以继保业务为例)需用定制的E1专线量子网关加密,加密后通过专用2M接口进入专线类业务环境(如图中蓝线所示);承载生产类业务时应重点关注延时问题,即网络中任

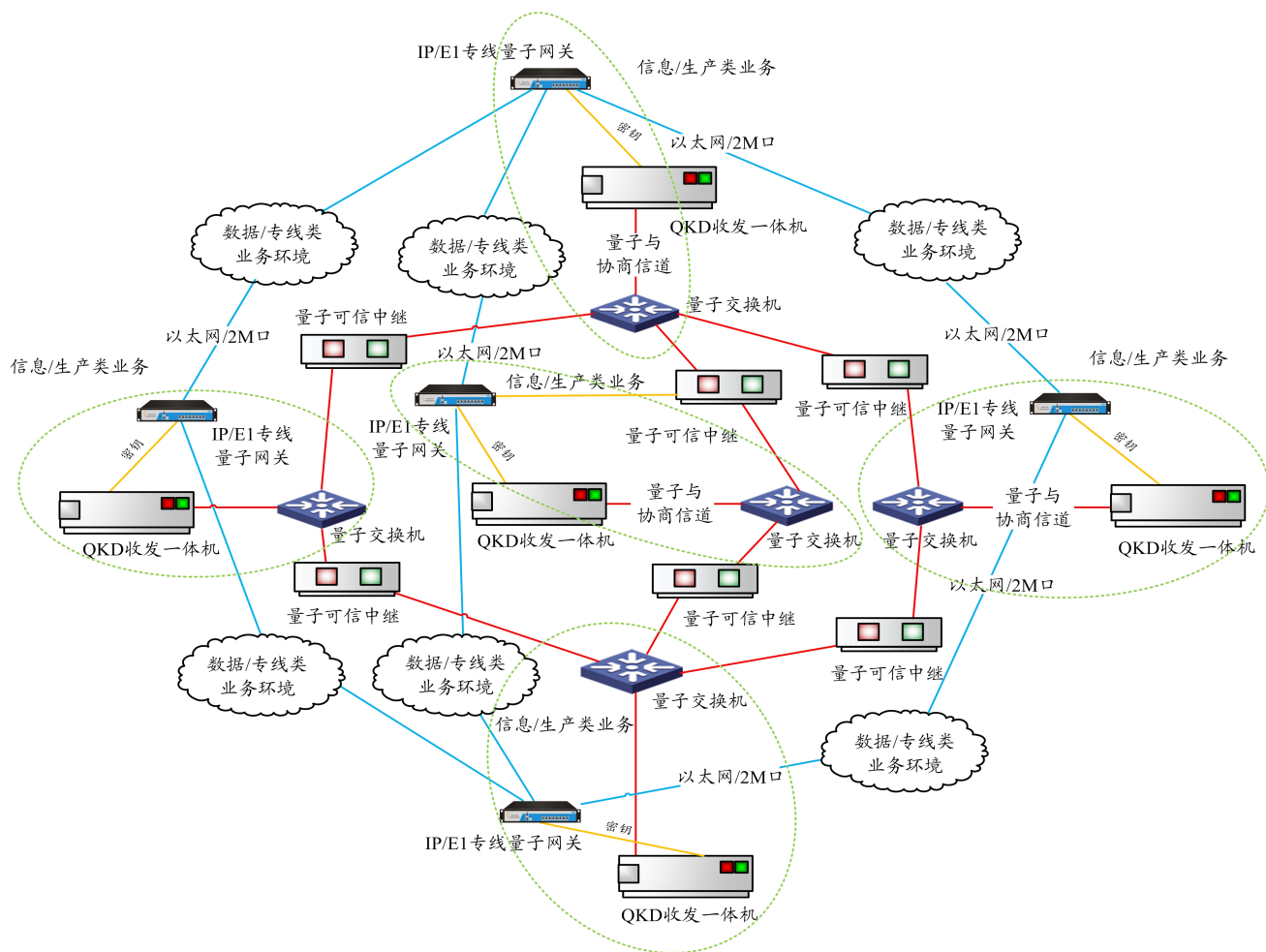


图4 0型量子保密通信网络电网业务承载实验验证方案

意2个节点间采用量子加密与不加密时的延时差,研究如何减小加密时延以满足业务需求。

5 结束语

随着东北亚互联大电网的规划与建设,国内电力信息通信网中所承载的一些特定业务在涉及到跨国传输时将面临更大的安全风险。在此背景下,本文引入量子保密通信技术,随东北亚电网同步构建东北亚量子保密通信网,提升跨国业务加密安全等级便具有了现实意义。

针对当前光纤量子保密通信系统单跨度传输距离不足、难以和特高压变电站及经典光纤通信网络融合以及海底中继困难等现实因素会制约东北亚0型光纤量子保密通信网络落地的问题,本文提出以卫星为主实现量子密钥的跨区域分配、以光纤为辅实现量子密钥的城域分配的组网方案,这可作为东北亚广域量子组网的近期解决方案之一。待上述问题解决后,以光纤为主的量子保密通信网络最终会覆盖东北亚。

参考文献:

- [1] Asia Pacific Energy Research Centre. Electric Power Grid Interconnections in Northeast Asia[R]. Tokyo: APERC, 2015.
- [2] 杨昆. 积极构建东北亚电力互联互通多级合作机制 [J]. 中国电力企业管理, 2016(31): 14-19.
- [3] 张玉红. 东北亚地区跨国电力联网模式及技术可行性初步研究[J]. 全球能源互联网, 2018(A1): 213-221.
- [4] 孔清华. 东北亚电力互联互通大家谈 [J]. 中国电力企业管理, 2016, (11): 24-27.
- [5] 王裕霜. 国内外海底电缆输电工程综述 [J]. 南方电网技术, 2012, 6 (2): 26-30.
- [6] 李天籽. 东北亚区域能源互联网建设研究 [J]. 东北亚论坛, 2016(6): 58-68.
- [7] 吴月辉. “京沪干线”开通 我国成功实现首次洲际量子通信[Z/OL]. 人民网, 2017-09-30[2018-10-17]. <http://politics.people.com.cn/n1/2017/0930/c1001-29569348.html>.
- [8] CHEN T Y, WANG J, LIANG H, et al. Metropolitan all-pass and inter-city quantum communication network [J]. Optics Express, 2010, 18: 27217-27225.
- [9] CIURANA A, MARTÍNEZMATEO J, PEEV M, et al. Quantum metropolitan optical network based on wavelength division multiplexing[J]. Optics Express, 2014, 22: 1576-1593.