

Adaptability Analysis of Transmission Grid Protection Signal Based on Quantum Teleportation Technology

Lifeng Lu¹, Xianglong Li², Zhen Chen², Xiangbing Zhu³

¹Global Energy Internet Research Institute Limited, Beijing

²State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing

³Department of Physics, Anhui Normal University, Wuhu Anhui

Email: m15055310550@163.com

Received: Mar. 7th, 2018; accepted: Mar. 22nd, 2018; published: Mar. 29th, 2018

Abstract

The grid protection signal is related to the safe and reliable operation of the power grid. The use of new communication technologies to improve the performance of the power grid is a demand for power grid development. Quantum teleportation technology has some unparalleled advantages. In this paper, we apply quantum teleportation technology to transmit grid protection signal and study the service adaptability, including bit error rate, delay, transmission rate and transmission distance etc., to analyze the feasibility of applying quantum teleportation technique to grid.

Keywords

Quantum Remote Transmission Technology, Power Grid, Performance, Adaptability

量子传态技术传输电网保护信号的适配性分析

卢利锋¹, 李香龙², 陈 振², 朱向冰³

¹全球能源互联网研究院有限公司, 北京

²国网北京市电力公司, 北京

³安徽师范大学物理系, 安徽 芜湖

Email: m15055310550@163.com

收稿日期: 2018年3月7日; 录用日期: 2018年3月22日; 发布日期: 2018年3月29日

摘要

电网保护信号关系到电网安全可靠的运行，采用新通信技术改善电网性能是电网发展的需求，而量子远程传态技术具有一些难以比拟的优点，本文用量子远程传态技术传递电网保护信号，研究量子远程传态技术的业务适配性，包括误码率、时延、传输速率和传输距离等，分析量子远程传态技术应用到电力系统中的可行性。

关键词

量子远程传态技术，电网，性能，适配性

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电力系统中的通信业务关系到电网的稳定可靠运行，当电力系统受到严重损害时，如果不能及时发送保护信号告知运营人员并向跳闸器发送命令来终止事件的发展，电网可能会瘫痪，给国家造成不可估量的经济损失。电力系统的损害有人为损害、环境损害以及电力系统本身因素造成的损害等，在人为损害过程中，犯罪分子攻击电力通信系统也可使电网瘫痪，所以需要采用新技术不断提高电力通信系统的性能，国家在电力发展规划中提出了需要采用新的通信技术[1]。

量子远程传态是一种可以有效传递量子态的新兴技术，自 1993 年被提出后，量子远程传态在理论和实验方面均获得了长足的发展，受到了广泛的关注。2016 年合肥和卡尔加里的 2 个实验小组解决了独立源的干涉问题，同时完成了拥有独立源的量子远程传态的外场实验[2] [3]，为实现量子传态网络迈向了关键一步。本文提出构建传输电力保护信号的量子远程传态系统，研究量子远程传态技术在电力系统业务的适配性，分析量子远程传态技术应用到电力系统中的优势和挑战。

2. 电网中的保护信号

为了电力系统的稳定运行，保障设备的安全，电力系统采用继电保护技术，在电力系统中设置了继电保护装置和安全自动装置，当电力系统出现重大故障时，检测设备就会自动产生继电保护信号，电力系统中的其它装置接收到继电保护信号，产生继电保护动作。为了保护 110 kV 以上的高压输电线路，在

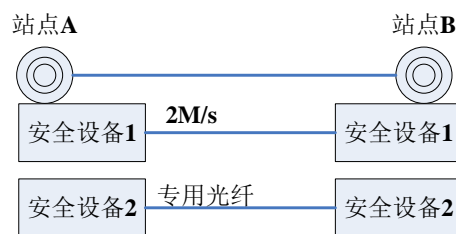


Figure 1. The model of Line Protection

图 1. 线路保护模型

继电保护信号中设置了线路保护信号，由于高压线路的距离较长，从高压线路一端发送到另一端的线路保护信号也需要传输较远的距离，所以对通信线路有一定的要求。如图 1 所示，站点 A 和站点 B 之间是高压输电线路，每个站点都有安全设备，保护信号从一点传到相邻的另一点，线路保护对实时性要求较高。

现阶段高压输电线路一般具备光纤通道，其中复用的 2 Mb/s 光纤用来传输线路保护信号，如果输电线路的长度不超过 60 公里，也可采用专用光纤纤芯传输线路保护信号。为了保证传输的可靠性，在高压输电线路中一般要设置两条通信线路传输保护信号。

当高压输电线路出现故障时，检测设备产生的保护信号长度很小，但要求立即传送给继电保护装置，不仅要确保对方能收到正确的信号，误码率低到 10^{-8} ，还要求传输速度快，传输时间在数十毫秒以内[4]。随着输电线路长度的增加，信号传输的时间和通信误码率都会增加。

现阶段电力系统的光纤网络有与民用的互联网的接口，这就为犯罪分子破坏电网提供了可能性，2015 年 12 月 23 日乌克兰国家电网在恶意代码攻击下瘫痪，证明了现有的电力通信网络有待完善。

为了改善电力保护信号的传输性能，本文研究用量子远程传态技术传输电网保护信号，分析量子远程传态技术性能参数与电力系统保护信号的要求是否适配。

3. 量子远程传态技术

1993 年提出了量子远程传态方案[5]，1997 年首次实验实现了量子远程传态[6]，量子远程传态是量子信息领域中重要的研究方向之一。在量子远程传态技术中，习惯上称发送者为 Alice，接受者为 Bob，Alice 有一个粒子 1 处于某个量子态，经过量子远程传态后，Bob 的粒子 3 也处于该量子态。本文中的粒子都用光子，这是现阶段最成熟的技术。

为了实现远程传态，Alice 和 Bob 之间需要具备两种信道，其中经典信道是传统的通信方式所使用的通道，光纤、微波和电力载波甚至互联网都可以作为经典信道；第二种信道是量子信道，通常采用自发参量下转换技术产生的光子对(光子 2 和 3)作为量子信道，光子 2 和光子 3 通过自由空间或光纤分发给 Alice 和 Bob。Alice 对光子 1 和光子 2 进行测量，把测量结果告知 Bob，Bob 在获得经典信息和光子 3 以后，就可以复制出光子 1 的未知量子态。

由于 Bob 需要得到 Alice 发送的经典信息才能重建未知量子态，而经典信息的传输速度不可能快于光速，所以量子远程传态并不是超光速通信。

要使用基于量子远程传态技术，要能够制备、传输和测量光子对，还要有经典信道，本文采用文献[7]提供的方案制备和测量光子对，采用已有的电力光纤网络作为经典信道。文献[8]提出了一种基于纠缠光子对和纠缠交换的量子通信网方案并分析了它的性能，但该方案并非针对传输电力保护信号设计的，不能根据实际情况充分发挥量子远程传态的优点，本文根据电力保护信号的情况修改了该方案。在本文的方案中纠缠光子源放在高压输电线路两端的站点中，纠缠光子源不断产生纠缠光子对，一个光子留在原站点，另外一个光子发给对方站点，站点之间始终都有有效的纠缠光子对。下图 2 是本文设计的针对电力系统传输保护信号的量子远程传态方案。站点 A 和站点 B 分别在高压输电线路的两端，为了提高可靠性，每个站点中的都有两套量子通信终端，与通信终端连接的电力设备检测高压电缆上的行波信号、产生继电保护信号并根据收到的继电保护信号驱动跳闸器。

4. 适配性分析

由于电力通信系统对时延、传输速率、误码率和传输距离等有要求，以下对量子远程传态网络中的这些性能进行分析研究。

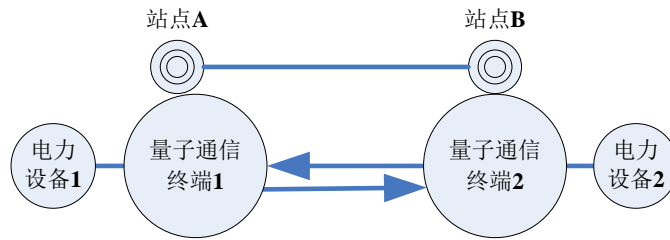


Figure 2. The quantum remote transmission design for transmitting power grid protection signals
图 2. 传输电力保护信号的量子远程传态方案

4.1. 时延和传输速率

图 2 中，传送一个量子比特所需要的时延可表示为：

$$T = T_e + T_m + T_t + T_d + T_c \quad (1)$$

式中 T_e 为收、发端建立纠缠光子对的平均时间，由于本方案中收发双方始终都存在纠缠光子对，在本文的方案中 T_e 等于零； T_m 为发送端完成 Bell 态测量的时间； T_t 为测量结果在经典信道的平均传输时间，主要表现为传播时延和处理时延，单模光纤中传输时延为 5 us/km，处理时延是发送者将经典信号转换为光信号以及接受者将光信号转换为完整的经典信号的时间，处理时延一般小于 20 us； T_d 为接收端根据经典信号恢复量子信息的时间； T_c 是发送端将电力保护信号转化为量子信息和接收端将量子信息转化为电力保护信号的总时间。根据上式可知量子远程传态的时延肯定大于经典信号的时延，而现有的电力系统用光纤传输保护信号，光纤属于经典信道，因此现阶段采用量子远程传态技术传输电力系统信息至少比原来的方案多消耗 $T_m + T_d + T_c$ 。

在一个量子比特的传递过程中，设发送端成功进行 Bell 态测量的概率为 P_m ，接收端成功检测到量子比特的概率为 P_d ，如果传递多个量子态，多次平均以后 $T_m = \frac{1}{P_m} \tau_m$ ， $T_d = \frac{1}{P_d} \tau_d$ ， τ_m 为发送端进行一次 Bell 态测量的时间， τ_d 为接收端检测一次量子比特所需要的时间，如果每次只传递一个量子态，则 $T_m \geq \tau_m$ ， $T_d \geq \tau_d$ 。

根据现有技术，可以认为 $\tau_m = 2 \text{ ns}$ 、 $\tau_d = 5 \text{ ns}$ 、 $T_c = 1 \text{ us}$ ，所以采用量子远程传态技术传输 1 个 bit 至少多延迟 1 us，而传统技术中采用光纤通道传输继电保护信息，传输延迟远大于 1 us，所以在最佳状态下，可以近似认为采用量子远程传态技术传输一个 bit 几乎没有额外的时延。

只有在发送端正确完成 Bell 态测量，接收端收到完整的经典信号后，接收端才能重建量子态，在成功的重建量子态后才能得到电力保护信号。对传输失败的信息重复传输会消耗大量的时间，为节省时间，要在传递信息中插入纠错码。如果接收端的 $P_d = 0.95$ ，纠错码的长度至少为原始信息的 5%，纠错码明显降低了传输速率，随着 P_d 的下降其传输速度也明显下降，随着 P_d 的增加其传输速度接近与传统的光纤技术。上述结果仅考虑接受端的成功重建量子态的几率，而实际应用过程中受到其它多种因素的影响，量子传态技术的速率可能会进一步下降。

4.2. 误码率和传输距离

由于高压输电网的输电距离可达数百公里，所以量子远程传态技术的传输距离也应到达数百公里。因传输信道和光学系统引入的传输损耗以及各种噪声使得量子远程传态网络的传输距离受到限制，现阶段量子远程传态技术的传输距离只能达到 130 公里。

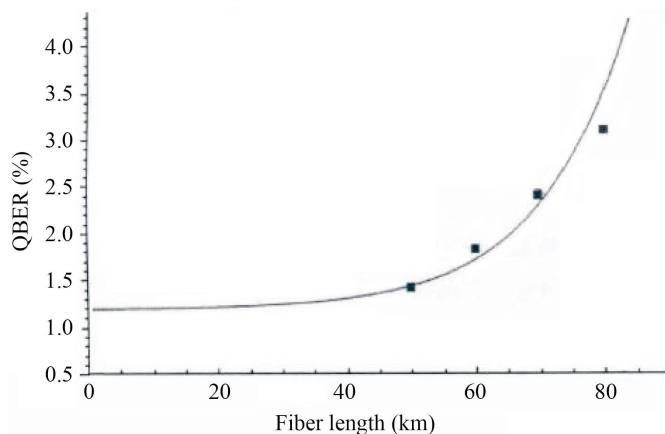


Figure 3. The relationship between optical fiber transmission distance and bit error rate

图 3. 光纤传输距离与误码率的关系

误码率与传输距离有关，误码率(QBER)是量子远程传态的重要性能指标[9]，其公式为：

$$QBER = \frac{N_{error}}{N_{sift}} \quad (2)$$

上式中，分子为接收到的错误比特数，分母为接收的全部比特数。不仅系统中的光学设备可以产生错误的比特，电光转换设备也能产生错误的比特，甚至量子信道也会产生错误的比特。

图 3 给出了光纤传输距离与量子误码率的关系[10]，在 50~70 km 传输距离时，量子误码率在 1.4%~2.3%，低于经典光通信的误码率 2.4%；在 80 km 的同向传输时，也就是经典光通信的一个标准跨段距离，此时的量子误码率在 3.1%，高于经典误码率 2.4%。

图 3 中仅考虑了光学系统的误差引起的误码率，而没有考虑量子信道引入的误码。测量 Bell 态过程中会导致误码，重建量子态过程中也会产生误码，两者的误码率可以达到 1% 以上，并且与传输距离无关；使用光电转换装置将信号调制到量子态上的误码率可以忽略不计。即便是在 50~70 km 传输距离，使用量子远程传态技术总的误码率也高于传统的光纤网络，所以在误码率方面量子远程传态技术还不具备优势。

5. 结论

量子远程传态技术是最安全的通信技术，将量子远程传态技术应用到电网中，可以明显提高电网的安全性，由于纠缠光子对被分发到两点，即使攻击者获得经典信息也不能复现量子态，不会得到量子传态传输的实际信息。但是现阶段量子远程传态技术传输速率明显低于传统的通信技术，还需要完善量子传态的各个技术环节以提高传输速率；量子远程传态技术的距离暂时还不能满足电力系统的需求，需要降低传输损耗和噪声，减少各个因素引起的误码。随着科学技术的不断完善，量子远程传态技术将会用到电网通信中。

基金项目

国家电网公司 2017 科技项目(No.SGRIXTKJ[2017]658)。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 电力发展“十三五”规划(2016-2020年) [EB/OL]. <http://www.ndrc.gov.cn/>
- [2] Sun, Q.C., Mao, Y.L., Chen, S.J., *et al.* (2016) Quantum Teleportation with Independent Sources And Prior Entangle-

- ment Distribution over a Network. *Nature Photonics*, **10**, 671-675. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.179>
- [3] Valivarthi, R., Puigibert, M.L.G., Zhou, Q., *et al.* (2016) Quantum Teleportation across a Metropolitan Fibre Network. *Nature Photonics*, **10**, 676-680. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.180>
- [4] 邢宁哲. 智能电网中通信网络可靠性保障技术的研究[D]: [博士学位论文]. 北京交通大学, 2017.
- [5] Bennett, C.H., Brassard, G., Crepeau, C., *et al.* (1993) Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels. *Physical Review Letters*, **70**, 1895-1899. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.70.1895>
- [6] Bouwmeester, D., Pan, J.W., Mattle, K., *et al.* (1997) Experimental Quantum Teleportation. *Nature*, **390**, 575-579.
- [7] 张娜娜, 李淑静, 闫红梅, 王海. 偏振纠缠光子对产生中的相位补偿[J]. 2017, 23(3): 222-227.
- [8] 朱伟, 聂敏. 量子信令交换机模型设计及性能分析[J]. 物理学报, 2013, 62(13): 130304-130304.
- [9] 韩宝斌. 量子光纤信道与相关研究[D]: [博士学位论文]. 西安电子科技大学, 2010.
- [10] 王留军. 量子密钥分发与经典光通信融合的实验研究[D]: [博士学位论文]. 中国科学技术大学, 2016.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5450, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: oe@hanspub.org