

量子通信技术在主配网调控运行中的应用前景

白子谦 柴段鲲 高翔宇

国网北京大兴供电公司 北京 102600

摘要: 随着信息技术的飞速发展,传统通信技术正面着临严峻挑战,在此背景下量子通信技术凭借其高效率、绝对安全等独特优势,成为近年来国际上量子物理与信息科学领域的研究热点,本文深入探讨了量子通信技术在主配网调控运行中的应用前景,详细分析了量子通信的基本原理、面临的技术挑战以及其在主配网调控中展现出的巨大潜力和实际应用价值。

关键词: 量子通信技术; 主配网; 调控运行; 应用前景

现代电力系统的稳定运行依赖于高效、可靠的通信技术,主配网调控运行作为电力系统的核心环节,对通信技术要求尤为严格,量子通信技术作为一种新兴的通信方式,具有超高安全性、超大信道容量、超高通信速率和超高隐蔽性等特点,为电力系统的通信提供了新的解决方案,本文将深入探讨量子通信技术在主配网调控运行中的应用前景。

1. 量子通信的基本原理

量子通信是一种基于量子力学原理的新型通信技术,它利用了量子力学中独特的物理现象来实现信息的安全传输,量子通信不仅能够提供传统通信技术无法比拟的安全性,还能够特定条件下显著提升通信效率。

1.1 量子纠缠与量子隐形传态

量子纠缠是量子通信中最核心的概念之一,指的是在量子系统中,两个或多个粒子即使相隔很远也能保持一种特殊的关联状态,当一对或多对粒子产生或相互作用后,每个粒子的量子状态都必须依据整个系统的状态来描述,而不能单独描述任何一个粒子的状态。这意味着一旦其中一个粒子的状态发生改变,另一个纠缠粒子的状态也会即刻相应地发生变化,无论它们之间的距离有多远,这种现象最初是由爱因斯坦、波多尔斯基和罗森在1935年提出并被称为EPR悖论,爱因斯坦本人对此现象持有怀疑态度,称其为“鬼魅般的超距作用”。量子隐形传态(Quantum Teleportation)是利用量子纠缠来传输量子信息的过程,在这个过程中,一个粒子的未知量子态可以通过量子纠缠通道被传输到远处的另一个粒子上,而原始粒子则失去其原有的量子态,这一过程并不传输物质本身,而是传输量子态的信息,因此不会违反相对论中的速度限制。量子隐形传态的一个重要特点是,信

息的传输需要经典通信作为辅助,也就是说,在完成量子态传输的同时,还需要通过传统的通信手段发送一些必要的经典信息来确保接收方正正确重构成原始的量子态,量子隐形传态提供了理论上完全安全的信息传输方式,因为任何试图窃听传输过程的行为都会破坏量子态,进而被立即发现^[1]。

1.2 量子通信的主要类型

1. 量子密码通信(Quantum Cryptography): 也称为量子密钥分发(Quantum Key Distribution, QKD),是利用量子力学原理来保证通信双方可以安全地共享密钥的技术,QKD的核心在于,任何尝试窃听通信过程的行为都会不可避免地改变量子态,从而被通信双方所察觉,这种特性使得量子密码通信成为了一种理论上不可破解的安全通信方式。

2. 量子远程传态(Quantum Teleportation): 如前所述,量子远程传态是一种利用量子纠缠来实现信息远距离传输的技术,通过这种方式不仅可以实现信息的安全传输,还可以在不直接传输物理粒子的情况下完成信息的转移。

3. 量子密集编码(Quantum Dense Coding): 这是一种利用量子态的叠加和纠缠性质来增加信息传输密度的方法,在经典通信中一个比特只能表示两种状态之一;而在量子密集编码中利用一对纠缠的量子比特(qubits),可以有效地编码两个经典比特的信息,从而在相同的物理资源下实现了信息量的加倍,这种方法提高了通信信道的使用效率,特别是在长距离通信中显示出巨大的潜力。

2. 量子通信的技术挑战

2.1 量子态的维持

量子态的脆弱性是其在实际应用中面临的首要挑战,量子态非常敏感,极易受到外界环境的干扰,导致“量子退

相干”现象的发生，这种现象会使得量子态迅速崩溃，从而影响到量子信息的传输质量和效率。在量子通信中维持稳定的量子态是确保信息传输准确性的前提，然而，如何在更长时间和更大范围内维持稳定的量子态，却是一个亟待解决的技术难题，这不仅需要科学家们深入研究量子态的物理特性，还需要开发新的技术手段来有效隔离和消除外界环境的干扰，从而确保量子态的稳定性和持久性。

2.2 量子信息的精准传输

量子通信依赖于量子纠缠状态的精确制备和传输，量子纠缠是量子通信的核心原理之一，它使得两个或多个粒子之间形成一种神秘的关联，无论它们相隔多远，一个粒子的状态变化都会立即影响到另一个粒子的状态，然而这种纠缠状态在传输过程中极易受到各种因素的干扰，从而导致信息的损失或错误。因此如何在长距离传输中保持量子信息的完整性和准确性，是科学家们必须解决的关键问题，这要求研究者们不仅要具备深厚的量子力学理论基础，还需要开发新的传输技术和纠错算法，以确保量子信息在传输过程中的准确性和可靠性。

2.3 量子存储技术的提升

量子信息的存储是量子通信中的另一个重要环节，量子信息需要在量子存储介质中保存，以便在需要时进行读取和处理，然而目前现有的量子存储介质存在存储时间有限、容易受到外界干扰等问题，这严重限制了量子通信的实用性和可靠性^[2]。因此研发出高效稳定的量子存储介质对于量子通信的长远发展至关重要，这要求研究者们不仅要深入了解量子存储的物理机制和原理，还需要开发新的存储材料和存储技术，以提高量子存储介质的存储效率和稳定性。

2.4 构建实用量子网络的复杂性

构建实用量子网络是量子通信技术发展的最终目标之一，然而量子网络的构建需要高度复杂的技术支持，包括量子中继技术的发展、量子加密协议的实现以及大规模量子系统的稳定运行等，这些技术的集成与优化是构建可实用量子网络的重要前提，量子中继技术的发展可以延长量子通信的距离，提高通信的覆盖范围；量子加密协议的实现可以确保通信的安全性，防止信息的泄露和篡改；大规模量子系统的稳定运行则是量子网络实用化的基础。然而这些技术的实现和优化都面临着巨大的挑战，研究者们需要在量子中继技术的设计、量子加密协议的开发以及大规模量子系统的管理和维护等方面进行深入的研究和探索，以确保量子网络的稳定

性和可靠性，同时还需要加强跨学科的合作和交流，推动量子通信技术的全面发展和广泛应用。

3. 量子通信技术在主配网调控中的应用前景

3.1 提高通信安全性和可靠性

在主配网调控运行中，量子通信技术首先展现出了其在提升通信安全性和可靠性方面的巨大潜力，传统通信技术因固有的安全漏洞面临着被窃听和破解的风险，这对于电网这一关键基础设施来说无疑构成了严重的安全威胁，而量子通信技术凭借其独特的“一次一密”加密方式，成为了目前唯一被理论证明无条件安全的通信手段。这意味着利用量子通信技术传输的主配网调控信息，将能够彻底避免信息泄露和篡改的风险，为电网的安全运行提供了坚实的保障，此外量子通信技术还具备超强的抗干扰能力和传输能力，即便在复杂多变的电磁环境中，也能保持稳定的通信质量，从而进一步提升了主配网调控的可靠性。

3.2 实现快速故障隔离与恢复

在主配网调控的日常运行中，故障的及时发现、快速隔离与有效恢复，是确保电网稳定运行、减少停电损失的关键，量子通信技术以其传输速度快、准确性高的特点，为这一过程带来了革命性的改变。借助量子通信技术，电网可以在极短的时间内实现大量数据的传输和处理，从而显著提高故障隔离与恢复的效率，当电网发生故障时，调控中心能够迅速获取故障信息并精准定位故障点，及时采取隔离措施防止故障扩大，同时快速恢复受影响区域的供电，最大限度地减少停电时间和影响范围。

3.3 优化电网资源配置与调度

量子通信技术在主配网调控中的另一重要应用，是优化电网资源的配置与调度，通过实时监测和分析电网的运行数据，量子通信技术能够为主配网调控提供更加精确、全面的信息支持，这有助于电网调度人员准确判断电网的负荷情况和运行状态，从而制定出更加科学合理的调度策略。例如在高峰时段，量子通信技术可以协助调度人员快速调整电网结构，优化电力分配，确保电网的供需平衡；在低谷时段则可以通过优化调度策略，降低电网损耗、提高能源利用效率，这种基于实时数据的智能调度方式，将极大提升电网的运行效率和经济效益。

3.4 提升电网智能化水平

量子通信技术的引入还将进一步推动电网向智能化方向

发展,智能电网作为未来电网的发展趋势,其核心在于实现电网的实时监控、故障预警和自适应控制,而量子通信技术以其高效、安全的通信能力,为智能电网的建设提供了有力的技术支持^[3]。通过量子通信技术,智能电网中的各种终端设备可以实现高效、安全的互联互通,形成一个高度集成的信息传输网络,这不仅有助于提升电网的监控能力和预警准确性,还能实现电网的自适应控制,即根据电网的实际运行状态和负荷需求,自动调整电网结构和运行策略,确保电网的稳定运行和高效供电,这种智能化的电网管理方式,将极大提升电网的灵活性和适应性,为电力系统的可持续发展奠定坚实基础。

4. 量子通信技术在电力系统中的实际应用案例

4.1 绍兴供电公司的量子化改造

绍兴供电公司在电力系统中成功应用了量子通信技术,通过量子化改造实现了对配网线路故障的自动分段隔离、对变电站负荷的实时感知和柔性调节、对分布式光伏的实时出力信息的接入和远程调节等功能,极大地提升了电力系统的智能化水平和运行效率。绍兴供电公司利用量子通信技术实现了对配网线路故障的自动分段隔离,当配网线路发生故障时,量子通信系统能够迅速将故障信息传输至调控中心,调控中心根据故障信息自动判断故障点位置,并控制相应的开关设备将故障段隔离,从而实现对配网线路故障的自动分段隔离,这一应用不仅将配网故障处置时间从小时级降到秒级,提高了故障处理的效率,还避免了故障扩大对电网稳定运行的影响,提升了电网的稳定性和可靠性。绍兴供电公司还利用量子通信技术,实现了对变电站负荷的实时感知和柔性调节,通过量子通信系统调控中心能够实时获取变电站的负荷信息,并根据负荷信息对变电站进行柔性调节,避免设备重载运行,提高电网资源利用率,这一应用不仅有助于降低电网损耗,提高能源利用效率,还能有效应对电网负荷的波动和变化,保障电网的稳定运行。此外绍兴供电公司还利用量子通信技术,实现了对分布式光伏的实时出力信息的接入和远程调节,通过量子通信系统调控中心能够实时获取分布式光伏的出力信息,并根据出力信息对分布式光伏进行远程调节,从而实现对分布式光伏的智能化管理和控制,这一应用不仅有助于优化分布式光伏的出力,提高能源利用效率,还能有效应对分布式光伏接入电网带来的挑战和问题,保障电网的安全稳定运行。

4.2 国网绍兴供电公司的“量子+”方案

国网绍兴供电公司为国盾量子合作,通过自主设计研发远程控制模块,以安装“量子+”遥控发电机替代传统末端联络方案,实现了对线路综合检修和改造提升的同时保障了用户侧不停电,这一方案不仅解决了线路故障时影响范围大、时间长的难题,还实现了对配电网的调频、调压和孤岛运行等多种应用功能,为电力系统的安全稳定运行提供了有力支持。国网绍兴供电公司通过量子加密技术的融合,保障了控制指令和采集数据信息的安全性,通过量子通信系统传输的控制指令和采集数据信息,采用量子加密技术进行加密处理,确保了数据的机密性和完整性,这一应用不仅减少了传统人工控制时间,提高了控制效率和准确性,还在故障发生后能够迅速控制风险,防止故障扩大对电网稳定运行的影响。同时,“量子+”方案还实现了对配电网的调频、调压和孤岛运行等多种应用功能,通过量子通信系统传输的实时数据和控制指令,调控中心能够对配电网进行精准调控和管理,例如在配电网出现频率波动或电压波动时,调控中心能够迅速采取措施进行调频或调压;在配电网出现孤岛运行时,调控中心能够迅速切换至孤岛运行模式,保障孤岛内用户的正常用电需求,这一应用不仅提高了配电网的运行效率和稳定性,还提升了电力系统的整体可靠性和安全性。

结论:量子通信技术作为一种新兴的通信方式,具有超高安全性、超大信道容量、超高通信速率和超高隐蔽性等特点,在主配网调控运行中具有广阔的应用前景,通过提高通信安全性和可靠性、实现快速故障隔离与恢复、优化电网资源配置与调度以及提升电网智能化水平等方面的应用,量子通信技术可以为电力系统的稳定运行提供更加全面、高效的解决方案,随着技术的不断创新和突破以及应用场景的拓展,量子通信技术将在电力系统中发挥更加重要的作用。

参考文献:

- [1] 赵悟.量子通信和量子计算等创新新技术引导下测绘地理信发展探索[C]//云南省测绘地理信息学会2016年学术年会.2024-11-12.
- [2] 管立伟,卢宇,吴进营,等.基于STM32的嵌入式网络通信终端设计与实现[J].陕西理工学院学报(自然科学版),2016(4):23-28,38共7页.
- [3] 黄媛,赵家钰,王金东,等.一种基于波分复用的实时光纤信道偏振补偿系统[J].光学学报,2020,40(14):10.