



电力调度量子密钥供给及动态调整策略

邓伟, 于卓智, 张叶峰, 陈雅琳, 马永红
(北京国电通网络技术有限公司, 北京 100070)

摘要: 为了保障电力调度业务数据传输的安全性, 提出了一种面向电力调度业务的量子密钥供给及动态调整算法。首先, 根据调度业务的重要程度, 确定了密钥应用方式, 并给出了密钥池容量计算方案。其次, 基于密钥更新频率和密钥应用方式设计了量子密钥动态调整算法。最后, 建立了调度系统业务模型, 针对点对点 and 点对多点两种架构对算法在不同场景中的应用性能进行了仿真测试。测试结果表明, 该算法可以很好地实现量子密钥在设定时间内的动态调整, 进而提升调度数据网数据传输的安全性。

关键词: 电力调度业务; 量子密钥分发; 动态调整

中图分类号: TN918

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018310

Quantum key supply and dynamic adjustment strategies for power dispatch

DENG Wei, YU Zhuozhi, ZHANG Yefeng, CHEN Yalin, MA Yonghong
Beijing GuoDianTong Network Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China

Abstract: In order to ensure the transmission security of electric power dispatching service data, a quantum key supply and dynamic adjustment algorithm was provided. Firstly, the key application mode was determined according to the priority of different services, and the calculation method of the key pool capacity was also provided. Secondly, the quantum key dynamic adjustment algorithm was designed based on the key update frequency and application mode. Finally, the traffic model for the dispatching system was established, and the algorithm's application performance for different scenarios was simulated within point-to-point/multipoint architectures. The test results show that the algorithm can realize the dynamic key adjustment in the selected adjustment period, and thus improves the security of the scheduling data transmissions.

Key words: electric power dispatching service, quantum key distribution, dynamic adjustment

1 引言

电力调度数据网是现代大型互联电网的重要

组成部分, 是实现电网调度自动化的基础^[1-2]。随着信息与通信技术的迅猛发展, 电力调度数据网的规模不断扩大, 承载的业务不断增多, 使其在

收稿日期: 2018-10-11; 修回日期: 2018-12-10

基金项目: 北京市科技计划资助项目 (No.Z171100001217002)

Foundation Item: Beijing Science and Technology Plan Funding Project (No.Z171100001217002)

电力系统运行和日常管理中的作用愈发突出^[3-5],进而也使其面临的信息安全风险更大。因此采用先进的信息加密、身份认证、入侵检测、物理隔离等安全防护措施保障电力调度数据网信息传输的安全性具有非常重要的现实意义。电力调度业务系统遵循电力信息业务系统“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”的原则,目前配置了网络隔离和纵向认证设备,并主要对安全一区多数业务、二区的电能量计费业务和三区的用电信息采集等业务进行了数据加密传输,这在一定程度上保障了电力调度系统的信息安全。但由于这些安全措施基于经典的密码算法,密钥的安全性难以得到保障,同时在电力调度系统中还有相当数量的业务直接采用明文传输,因而使得电力调度系统存在着较大的信息安全隐患^[6-8]。

为此,本文旨在将当今最为成熟的 QKD (quantum key distribution, 量子密钥分发) 技术引入电力调度系统中,通过深度融合 QKD 技术与电力调度数据业务系统,并借助量子密钥动态调整算法,最大限度地提升密钥的使用效率,进而提升电力调度业务数据传输的安全性。

2 电力调度业务量子密钥供给方案

2.1 量子密钥应用方式

考虑到现今 QKD 设备量子密钥生成率较低,若全部采用一次一密方式会导致密钥供给量不足。通过对电力调度业务的深入调研,决定采用不同的密钥应用方式来应对这一问题。根据调度业务的相对重要性,将量子密钥应用形式分为一次一密、替换会话密钥、替换主密钥 3 种形式,其安全等级依次下降,详细说明如下。

(1) 一次一密: 消耗的量子密钥量与加密的数据量等长。

(2) 替换会话密钥: 设定采用 AES-128 加密算法,数据分组与每次加密使用的密钥长度均为 128 bit。密钥更新频率计算式如下:

$$f = B / I \quad (1)$$

其中, f 为量子密钥更新频率, B 为每秒的业务数据流量, I 为此类业务的数据传输阈值,表示使用 128 bit 量子密钥最多可加密的数据长度。则加密 B_i 业务量消耗的量子密钥量为 $128B_i / I$ 。

考虑到密钥数据传输阈值过大会导致密钥新鲜度降低并由此带来潜在的安全风险,故设置每加密 8~16 个分组,更新一次密钥,数据传输阈值的取值范围为 1~2 KB。

(3) 替换主密钥

$$K = \text{prf}(K_M, r, N) \quad (2)$$

其中, K 为会话密钥, r 是由两站点事先协商的随机值, N 是由协议指定的非随机串,用来防止不同的上下文选择了相同的密钥, K_M 为主密钥,长度可记为 128 bit。prf 是伪随机函数,通常采用散列函数计算,可取安全性较高的 SHA-256,生成会话密钥长度为 256 bit,由主密钥和会话密钥比例关系可知,替换主密钥时,密钥更新阈值和量子密钥更新频率分别为替换会话密钥时的 2 倍和 1/2,则加密 B_i 业务量消耗的量子密钥量为 $64B_i / I$ 。

对一般重要的业务,直接采用经典密钥加密,不消耗量子密钥,所以下文业务处理中不予考虑。

2.2 量子密钥池容量计算

若使用量子密钥加密业务数据,需为站点建立相应密钥池来缓存数据加密所需的量子密钥。由于相互通信的两站点之间传输业务相同,则其密钥需求量和密钥池容量也相同,即密钥池成对出现。

密钥池容量 Q 的设计原则为没有密钥生成时,密钥池也能维持 t 时间内的数据加密,其中, t 称为密钥池比例因子,可取观测时间。则 t 时刻密钥池剩余的密钥量为:

$$\Delta_t = Q - \left(\sum_{i=1}^{n_1} P_1^i(t) + \sum_{j=1}^{n_2} P_2^j(t) + \sum_{k=1}^{n_3} P_3^k(t) \right) \quad (3)$$



其中, $P_1^i(t)$ 、 $P_2^j(t)$ 和 $P_3^k(t)$ 分别表示第 i 种一次一密业务、第 j 种量子密钥替换会话密钥业务和第 k 种替换主密钥业务在时间 t 内消耗的密钥量, n_1 、 n_2 、 n_3 分别表示 3 种业务的数量。

由此可知: 若 $\Delta_i < 0$, 则数据分组必须等待一段时间, 直至密钥池剩余密钥量充足时才可以获得加密密钥, 故站点密钥池容量至少为:

$$Q = \sum_{i=1}^{n_1} P_1^i(t) + \sum_{j=1}^{n_2} P_2^j(t) + \sum_{k=1}^{n_3} P_3^k(t) \quad (4)$$

3 量子密钥动态调整策略

电力调度系统具有多站点、高业务流量的特点, 且系统状态的多变性容易影响量子密钥的使用, 如业务系统的更新拓展、对特殊应急情况的处理等, 都会导致量子密钥不足, 因此根据站点的业务种类提出了一种基于业务排队的密钥调整算法。对一次一密、替换会话密钥、替换主密钥 3 种量子密钥应用形式分配业务指针, 分别为 3、2、1。

将电力调度系统中的不同业务依据重要程度分为高、中、低 3 个优先级。同时对业务进行排队, 使用业务指针将其映射到不同密钥应用方式, 其默认业务指针分别为 3、2、1。

首先要考虑何为调整成功的标志。要保证密钥池中密钥量保持在一个合理范围内, 范围上限为密钥池容量, 下限计为 P_l 。池中的密钥量升降取决于密钥净增长速率 ΔR , 即密钥生成速率与密钥消耗速率之差, ΔR 为正时, 池中密钥量随时间增加, 反之下降。为防止密钥量上升时净增长速率过于缓慢, 将成功的标志设置为 $\Delta R > 0.5R$, 其中 R 为量子密钥分发速率。

算法主要使用减小密钥更新频率和改变密钥应用方式的方法对密钥消耗速率进行调整, 为保证数据通信的安全性, 密钥更新频率不能无限减小, 需要为其设置一个下限 f_l 。算法流程如图 1 所示。

如图 1 所示, 各业务按默认密钥应用方式进

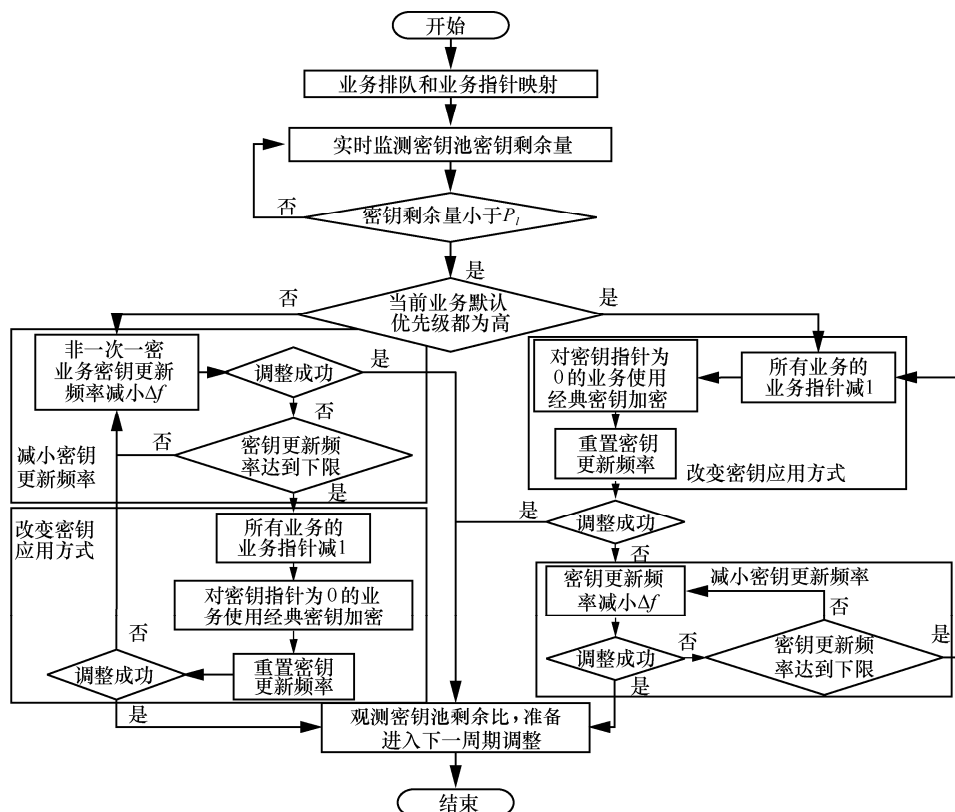


图 1 量子密钥动态调整总流程

行加密, 实时观测池中密钥量, 当池中密钥量小于 P_l 时需要调整。若站点业务的优先级都为高, 需要调整时, 由于默认采用一次一密的方式, 首先改变密钥应用方式, 即业务指针减 1, 没有调整成功则减小密钥更新频率, 每次减小 Δf , 若密钥更新频率减小到 f_l 时仍未调整成功, 则将业务指针减 1, 同时重置密钥更新频率, 若业务指针减小到 0, 则使用经典密钥对业务进行加密。采取交替改变密钥更新频率和密钥应用方式的方法, 直至调整成功为止。若站点存在中、低优先级业务, 则首先调整密钥更新频率, 再调整密钥应用方式。首先减小中、低优先级业务的密钥更新频率, 每次减小 Δf 。若密钥更新频率下降到 f_l 时仍未调整成功, 则采用以上方法改变密钥应用方式, 同时重置密钥更新频率。若未调整成功则按前述方法改变此时业务指针非 0 业务的密钥更新频率。按照此种方法持续调整, 直至调整成功。调整成功时, 池中密钥量开始上升, 直至密钥池充满时, 终止调整策略并重置密钥更新频率和密钥应用方式, 进入下一个调整周期。

此外, 量子密钥源因某些故障不可用时, 系统自动完成经典密钥源的备份切换, 当故障排除时, 再切换回量子密钥加密。

4 仿真分析

为验证所提出的量子密钥预分配及动态调整算法的实际效果, 使用 MATLAB 对算法编程进行了性能仿真, 密钥池密钥剩余量波动范围下限取密钥池容量的 20%, 池中初始密钥量取容量的 50%, 每秒观察一次池中剩余密钥量并判断是否需要调整。为全面体现调整效果, 总观测时间设置为 5 min。

量子密钥通过广泛应用的 BB84 协议产生^[9], 节点间量子密钥的生成速率可表示为:

$$R = \frac{1}{2} q f_{\text{req}} t_{\text{link}} \mu \eta \quad (5)$$

其中, $1/2$ 是丢失因子, q (通常为 $1/2$) 代表一些相位编码系统中的损耗因子; f_{req} 是脉冲重复频率, 取 40 MHz; t_{link} 是链路损耗, $t_{\text{link}} = 10^{-l_f/10}$, 这里 l_f 是光纤传输损耗, 与距离 d 之间的关系可近似为线性关系 $l_f = 0.25d$ 。 μ 是每个脉冲的平均光子数, 取 0.1; η 是光探测器的量子效率, 对于 InGaAs 检测器, 通常为 10%。通过计算, 得到量子密钥生成速率与节点间距离的关系如图 2 所示。

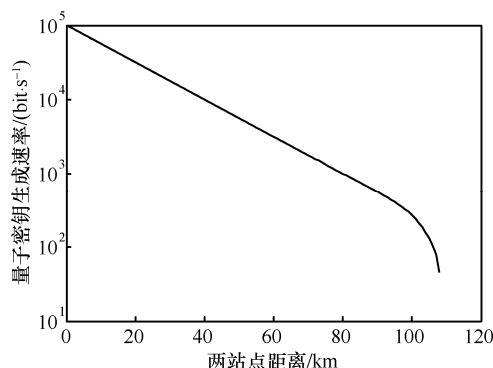


图 2 密钥生成速率与站间距离关系

4.1 电力调度系统及业务模型

调度数据网选择典型星型架构, 如图 3 所示。设一级主站与发电厂相距 25 km, 与二级主站相距 35 km, 与变电站相距 30 km, 各站点分别配置 QKD 设备, 并在站点间铺设量子信道与经典信道。由式 (5) 计算可得相应量子密钥生成速率依次为 23.7 kbit/s、13.3 kbit/s、17.8 kbit/s, 观测时间内生成密钥量分别为 7 110 KB、3 990 KB、5 340 KB。

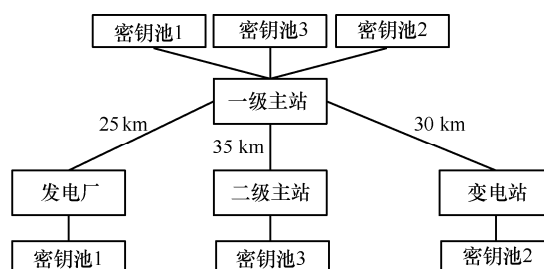


图 3 典型调度数据网络架构

电力调度业务根据业务特性可分为两种, 一是如遥控业务、遥调业务等随机性业务, 其业务



数据发生时间服从泊松分布；二是如遥测业务、继电保护管理业务、分布式能源监控业务等周期性业务，其业务数据发生时间服从周期分布^[10-12]。根据对现有电力调度系统业务调研的结果，依据图3中的网络架构，选取表1所列举的几种典型调度业务，相应的默认密钥应用方式见表1中第5列。仿真中，随机性业务的突发频率设定为观测时间内突发20次，每次发1s；周期性业务的发送周期计为5s，每次发2s。

根据参考文献[13]中的弹性系数法，可估算系统业务断面流量，根据密钥应用方式及业务流量，可估算出各业务在观测时间内消耗的密钥量。由于篇幅限制，以一级主站和变电站之间的遥测业务为例进行估算。设每次传输采集128点遥测数据，每点遥测计为4字节浮点数和8点时标信息，观测时间内一共传输60次，冗余因子取2，容灾因子取1.3，业务并发因子取1，则总流量为 $128 \times (4 + 8) \times 8 \times 1.3 \times 2 \times 60 = 1\,917\text{ KB}$ ，由于遥测业务为一次一密传输，则观测时间内密钥消耗量与业务流量相同。观测时间内各业务数据流量及相应的量子密钥消耗量见表1中第6~7列。

在实际的量子加密通信网络中，普遍认为业务数据按分组形式依次到达，最合理的假设是数据分组到达时间服从泊松分布，数据分组大小服从指数分布，单位时间内的业务数据流量 B 取决于数据分组的大小和发送的时间间隔：

$$B = \sum_{i=1}^M Q_i \quad (6)$$

其中，设单位时间内分组到达数为 M ， Q_i 为第 i 个数据分组的长度。

4.2 点对点架构量子密钥动态调整仿真与分析

点对点架构，选取一级主站与变电站作为分析主体，分别分析单业务与多业务传输情况。

首先分析点对点架构的单业务情况，一级主站与变电站之间只传输遥测业务。遥测业务为周期传输，5s传输一次，每次传2s。由式(4)可计算出密钥池容量为1.92 MB。点对点单业务正常情况下剩余密钥量的变化如图4(a)所示，可见在正常情况下，池中密钥量总体呈增长趋势，直至密钥池充满。说明此时密钥生成量可以满足密钥消耗量，无需调整。

某些突发状况会使相应的密钥产销情况发生变化。图4(b)展示了一级站点与变电站之间的通信线路舞动导致密钥生成速率降为原来1/4时，剩余密钥量的变化及调整结果。由图4可见，生成密钥无法满足密钥消耗需求，池中密钥量急速减少，在102s时检测到密钥池剩余量达到下限，调整算法启动。此时，密钥使用方式由一次一密变为替换会话密钥，密钥更新频率为16次/s，经过调整，池中密钥量开始回升。而若未采取调整策略，在151s时密钥便会被消耗殆尽，充分展现了调整算法的性能。

表1 电力调度业务特性及密钥应用方案

站点对	业务名称	业务特性	业务优先级	默认密钥应用方式	观测时间内业务流量/KB	观测时间内密钥消耗量/KB
一级主站—发电厂	遥控业务	突发	高	一次一密	760	760
	遥信业务	周期	高	一次一密	1 443	1 443
	发电侧市场交易业务	周期	中	会话密钥	13 800	1 725
一级主站—变电站	遥调业务	突发	高	一次一密	721	721
	遥测业务	周期	高	一次一密	1 917	1 917
	继电保护管理业务	周期	中	会话密钥	11 880	1 485
一级主站—二级主站	调度中心间能量交换业务	突发	高	一次一密	2 562	2 562

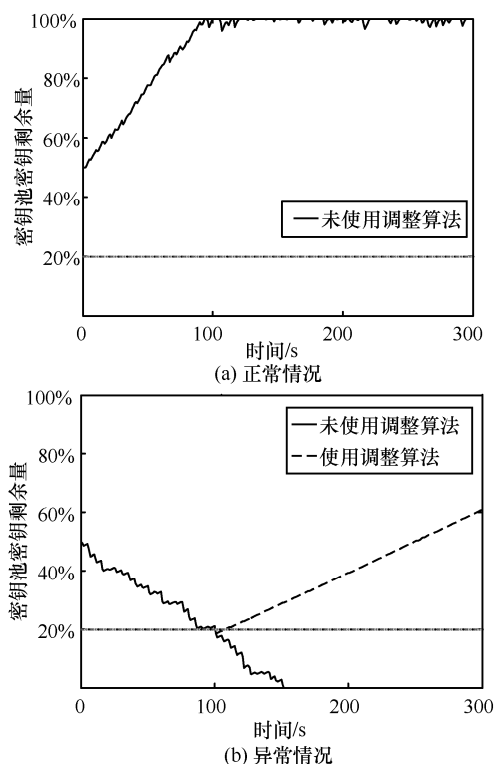


图4 点对点单业务情况下剩余密钥量的变化

下面考虑站点间多业务传输情况,选取遥调、遥测和继电保护信息管理3种业务。由式(4)和表1中的密钥消耗量计算可知密钥池容量为4.13 MB。图5(a)给出了正常情况下密钥池中密钥剩余量的变化过程。由于业务时序属性的不同,密钥消耗的过程也会有所不同,其中若遥控业务在一段时间内连续突发,密钥量消耗会比较大,池中剩余密钥量下降会比较明显。但在观察时间内,密钥产生量与密钥消耗量总体差别不大,池中剩余密钥量基本不变。

若变电站发生故障,遥调业务发生频率和数据流量会急剧增加。图5(b)展示了一级站点与变电站之间的业务突发频率和单位时间内业务流量均变为正常情况下的3倍时剩余密钥量的变化及调整结果。由图5可以看出在未使用调整算法的情况下,业务流量的增大会使密钥剩余量逐渐减少,在75 s时会消耗殆尽。若采用本文提出的动态调整算法,在44 s时检测到剩余密钥量小于20%时,此时触动调整算法。通过将遥调和遥测

业务密钥使用方式改为替换会话密钥,继电保护管理业务密钥使用方式改为替换主密钥,密钥更新频率降低20%时可圆满完成调整任务。密钥池在268 s时重新充满,这时将重置密钥应用方式和密钥更新频率。

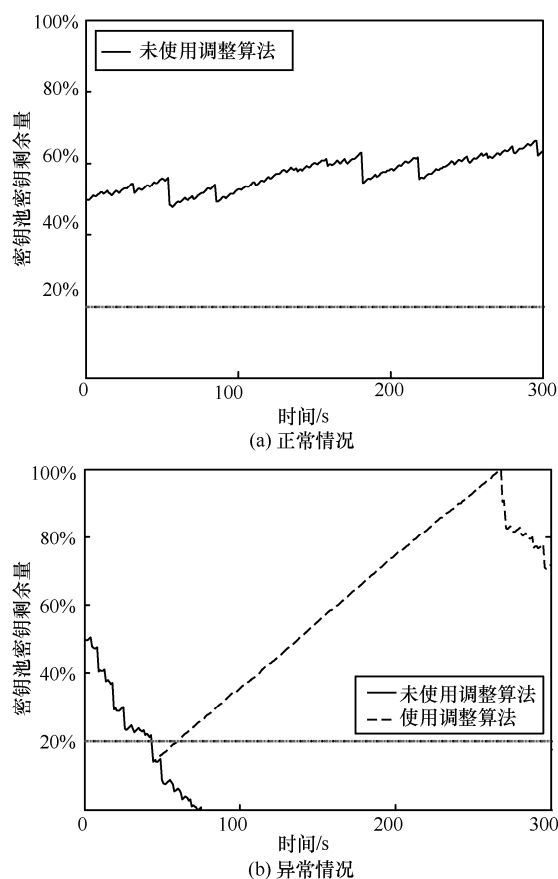


图5 点对点多业务情况下剩余密钥量的变化

4.3 点对多点架构量子密钥动态调整仿真与分析

对点对多点架构,由于各站点等级以及业务流量的不同,各站点需要的密钥量也不同,为此,需为每对站点建立相应的密钥池对。假设多站点间只传输一种业务流量较小、安全性较高的调度业务,对一级主站,为节省投资,可以采用时分复用技术与多对子站点实现量子密钥的分发。传统时分复用方法将时隙按站点数量均分,可能导致各站点密钥产生与消耗的不匹配。因此,提出一种基于观测时间内密钥产销比的时隙分配方案,各站点时隙比例 L_i 可



用式 (7) 计算:

$$L_i = \frac{P_i(t)/G_i(t)}{\sum_{k=1}^n (P_k(t)/G_k(t))} \quad (7)$$

其中, $P_i(t)$ 和 $G_i(t)$ 分别为观测时间 t 内站点 i 的密钥消耗量和密钥生成量, n 为中心站点一共连接的站点数量, L_i 范围为 0~1。

设一级主站和发电厂、变电站、二级主站之间分别传输遥信业务、遥测业务及调度中心间能量交换业务, 各业务估算流量与密钥消耗量见表 1。根据式 (4) 和表 1 可知密钥池 1、2、3 的容量分别为 1.44 MB、1.92 MB、1.28 MB, 根据式 (7) 计算的初始密钥分发时隙比例分别为 0.41、0.32、0.36。由图 6 可见, 通过时隙的合理分配, 3 个密钥池的密钥生成量均可满足消耗要求, 无需调整。

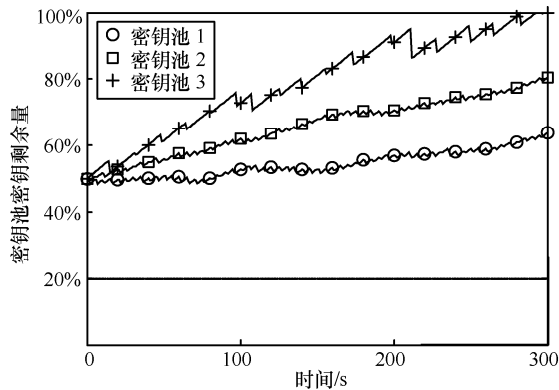


图 6 点对多点架构正常情况下剩余密钥量的变化

当某一线路流量或密钥分发速率出现异常时, 时隙比例应根据具体情况进行调整, 减少密钥产销比较小站点间的分发时隙, 以相对增加需要补充密钥站点间的分发时隙, 但时隙比例的调整必须保证正常线路密钥产销比不小于 1, 即故障线路不能影响正常线路的密钥分发。

假设一级主站与发电厂之间的线路发生故障, 密钥产生速率减小 1/4, 则需根据式 (7) 重新调整时隙分发比例, 调整结果分别为 0.28、0.38、0.34。此时, 密钥池剩余密钥量变化如图 7 (a)

所示, 通过时隙的重新分配, 3 个密钥池的密钥生成均可满足密钥消耗, 无需调整。

若密钥生成或密钥消耗变化过大, 则无法仅通过调整时隙来满足密钥产销匹配。假设一级主站与发电厂之间密钥产生速率变为原来的 1/2, 重新调整时隙分发比例为 0.32、0.36、0.32。密钥池剩余密钥量变化如图 7 (b) 所示, 由于时隙的重新分配, 密钥池 1 和密钥池 2 的总体变化较小, 密钥产销比趋近于 1, 但此时密钥池 1 的密钥生成仍不能满足密钥消耗, 所以开始呈下降趋势, 147 s 时达到密钥池下限, 启动调整算法, 密钥应用方式由一次一密变为替换会话密钥时进行调整, 密钥更新频率变为原来一半时调整成功, 池中密钥量开始上升。

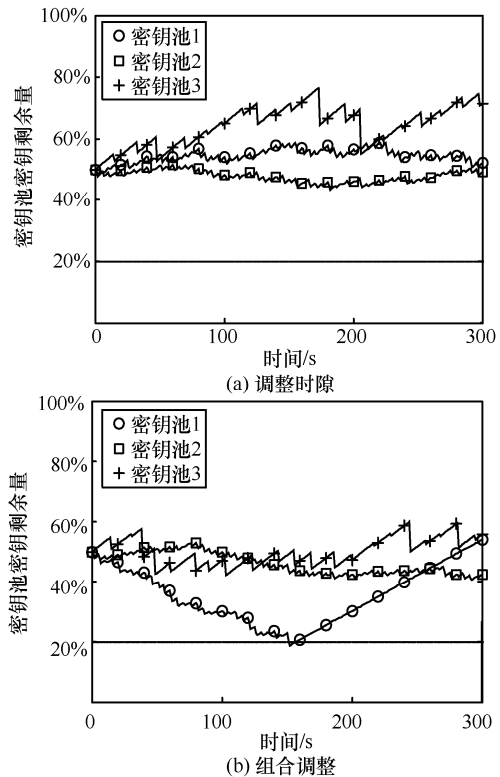


图 7 点对多点架构异常情况下经调整后的剩余密钥量的变化结果

若密钥生成速率出现较大范围的起伏, 可能会导致密钥池密钥量波动较大、本文调整方案不能使池中密钥量迅速上升的情况。这时,

可以在池中密钥量小于调整下限后以固定周期进行实时调整,使密钥净增长速率大于0,虽然增大了调整开销,但能使池中密钥量持续上升,提高安全性。

若站点间有多种业务需要加密传输,则中心站点的密钥分发压力较大,如果成本允许,可采用波分复用方式进行量子密钥的分发,以提高密钥分发速率。

5 结束语

本文通过将量子密钥分发技术与电力调度数据网络深度融合,提出了一种多站点多业务电力调度量子密钥供给与动态调整算法。大量的仿真实验表明:业务流量在预测模型的正常范围内时,密钥剩余量能够满足应用要求而无需调整。当遇到异常突发情况时,可采用逐级调整密钥应用方式和降低密钥更新频率的方法进行调整,在设定密钥更新频率内基本都能调整成功。对点对多点架构采用时分复用实现密钥分发的情况,应首先调整时隙分配比例,然后再根据上述调整方法进行调整。该工作成果能够为量子密钥分发技术在电力系统中的实际应用提供理论指导。下一步的工作将致力于研究该算法在更为复杂的调度数据网络架构中的应用性能。

参考文献:

- [1] SOHNEN J, FAN Y Y, OGDEN J. et al. A network-based dispatch model for evaluating the spatial and temporal effects of plug-in electric vehicle charging on GHG emissions [J]. Transportation Research, Part D: Transport and Environment, 2015(38): 80-93.
- [2] 辛耀中. 智能电网调度控制技术国际标准体系研究[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 1-10.
XIN Y Z. Research on international standard architecture for smart grid dispatching and control technology [J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 1-10.
- [3] HE D J, CHAN S, ZHANG Y, et al. Secure service provision in smart grid communications [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(8): 53-61.
- [4] 鲁文, 杜红卫, 丁恰, 等. 智能配电网优化调度设计及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 1-6, 88.
LU W, DU H W, DING Q, et al. Design and key technologies of optimal dispatch for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 1-6, 88.
- [5] 于宏文, 郑春伟, 汪洋, 等. 智能电网调度控制系统中历史数据服务优化方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 113-118.
YU H W, ZHENG C W, WANG Y, et al. Historical data service optimization scheme for smart grid dispatching and control systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 113-118.
- [6] HSU R C, LIU C T, CHAN D Y. A reinforcement-learning-based assisted power management with QoR provisioning for human-electric hybrid bicycle [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(8): 3350-3359.
- [7] 尚学伟, 赵林, 范泽龙, 等. 基于调度数据网的广域数据总线体系架构和关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 109-114.
SHANG X W, ZHAO L, FAN Z L, et al. Architecture and key technologies of wide-area data bus based on dispatching data network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 109-114.
- [8] STUCKI D, LEGRE M, BUNTSCHU F, et al. Long-term performance of the swiss quantum key distribution network in a field environment [J]. New Journal of Physics, 2011(13): 1231.
- [9] 温浩. 量子密钥分配网络的协议和机制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
WEN H. Protocols and mechanisms in the quantum key distribution networks [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008.
- [10] 傅裕斌, 葛梦昕, 樊友平, 等. 基于节点流量重要度的电网关键节点辨识[J]. 现代电力, 2018, 35(3): 1-8.
FU Y B, GE M X, FAN Y P, et al. Identification of critical nodes in power grid based on node traffic importance degree [J]. Modern Electric Power, 2018, 35(3): 1-8.
- [11] WEN H, HAN Z F, GUO G C, et al. The queuing model for quantum key distribution network [J]. Chinese Physics B, 2009, 18(1): 46-50.
- [12] 邵炜平, 陆阳, 李建岐, 等. 面向电力业务接入的跨频段融合与宽窄一体无线专网[J]. 电信科学, 2018, 34(8): 167-176.
SHAO W P, LU Y, LI J Q, et al. Cross-band fusion and wide-narrow integrated wireless private network oriented electric service access [J]. Telecommunications Science, 2018, 34(8): 167-176.
- [13] 赵子岩, 胡浩. 一种基于业务断面的智能配用电通信网业务



流量计算方法[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 12-17.

ZHAO Z Y, HU H. New service section based method to calculate service data flow of communication network for smart power distribution and utilization system [J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 12-17.

[作者简介]



邓伟（1976-），男，北京国电通网络技术有限公司高级工程师，主要研究方向为信息通信。



于卓智（1966-），女，北京国电通网络技术有限公司高级工程师，主要研究方向为信息通信。



张叶峰（1986-），男，北京国电通网络技术有限公司中级工程师，主要研究方向为信息通信。



陈雅琳（1994-），女，现就职于北京国电通网络技术有限公司，主要研究方向为智能电网通信及其信息安全。



马永红（1967-），男，博士，北京国电通网络技术有限公司工程师，主要研究方向为智能电网通信及信息安全。