

DOI: 10.7667/PSPC180085

广域保护通信重负载下迂回路径重构算法

李振兴¹, 龚 旻², 翁汉琍¹, 邓靖雷², 程宜兴²

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 新能源微电网湖北省协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

摘要: 在恶劣环境或人为破坏等情况下, 广域保护通信网络可能会发生线路中断的情况, 这也是阻碍广域保护技术得以广泛应用的重要因素之一。以重负载时的广域保护通信网络为研究对象, 为保证中断信道上的数据不间断传输, 针对特性不同的 GOOSE 报文和 SV 报文设计不同的路径重构算法。针对时延要求、重要程度均最高的 GOOSE 报文, 采用单一迂回路径重构算法。在此基础上, 对数据量较大的 SV 报文, 设计一种分流迂回路径重构算法。该算法的关键在于考虑了迂回路径中短板信道的带宽可用裕度, 将站域所有 SV 报文分成多股, 基于短板信道的带宽裕度比, 确定最佳分流系数, 从而保证重载通信系统分流后网络负载较为均衡。通过 OPNET 仿真软件搭建 IEEE14 节点通信仿真模型, 对迂回路径重构算法的延时和均衡性进行了仿真实验。

关键词: 广域保护; 通信中断; 迂回路径重构算法; 重负载通信; 分流迂回

Reconstruction algorithm for WAP communication network with heavy load

LI Zhenxing¹, GONG Yang², WENG Hanli¹, DENG Jinglei², CHENG Yixing²

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid (China Three Gorges University), Yichang 443002, China)

Abstract: Communication network of wide area protection may be interrupted because of severe environment or artificial damage. It is also one of the factors which affect the application of wide area protection. In order to maintain the transmission of the data on the interrupted channel, this paper designs different paths reconstructing algorithms for GOOSE and SV respectively by taking communication network of wide-area protection when heavy load as an object. Due to the importance of GOOSE and its high requirement for real-time, a single roundabout path reconstruction algorithm is proposed. As for SV whose amount of data is large, a reconstruction algorithm of shunt paths is proposed. It is the key that the available margin of bandwidth of weakest channel among the circuitous paths is considered in the algorithm. All the SV are divided into several streams according to the ratio of margin to entire bandwidth of the weakest channel, so that the balance of communication network with heavy load can be ensured after dividing. Finally, IEEE14 nodes network is built with OPNET. Delay and balance of the reconstruction strategy of circuitous communication paths are tested.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607106), Key Projects of the Science and Technology Research Program of the Hubei Provincial Education Department (No. Z2017037), and Research Fund for Excellent Dissertation of China Three Gorges University (No. 2018SSPY082).

Key words: wide area protection; channel been interrupted; reconstruction algorithm for circuitous communication path; communication network with heavy load; shunt circuitous algorithm

0 引言

广域保护数据采集范围广、采集频率高、采集

量大^[1-3]。对于早期建设的通信线路, 由于存在通信技术、通信成本的限制以及对未来通信业务发展估计不足等因素, 通信带宽设置的相对较小^[4-6]。因此, 在广域网络中不可避免地会出现通信线路重负载的情况。广域保护的数据传输一般通过设置于架空地线中的电力通信光缆实现, 光缆可能会因雷电、酸雨腐蚀等自然因素或恶意破坏等人为因素而中

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607106); 湖北省教育厅科学技术研究计划重点项目资助(Z2017037); 三峡大学学位论文培优基金项目资助(2018SSPY082)

断^[7-8]。如不采取一定的措施, 必将使部分通信业务中断, 进而影响电力系统的正常运行。针对这一问题, 较好的解决办法是提前或者在通信中断时, 为中断信道上的数据选择合适的迂回路径, 使信道中断时通信数据沿着迂回路径继续传输。

当前已有较多学者对通信迂回路径选择进行了研究, 但大多数以通信系统负担轻、带宽可用裕量大、排队时延不发生变化为假设前提, 在多条可供选择的迂回路径中选择一条最优迂回路径。文献[9-10]提出根据最短路径长度选择出最优迂回路径。但是仅依靠最短路径长度这一指标, 所选择出的最优迂回路径不能确保所选择最优迂回路径时延短。这是因为通信时延由四部分构成, 分别是发送时延、传播时延、排队时延和处理时延, 路径长度仅能反映传播时延。文献[11]构建带宽利用率和统计时延指标, 采用蚁群寻优算法, 寻找最优迂回路径。统计时延的大小只能反映通信状况良好情况下的时延, 当有中断信道上的数据转移到迂回路径上, 由于迂回路径上数据量大增, 统计时延不能准确地描述中断信道上数据流入后迂回路径的时延长短。文献[12]以迂回路径通信可靠性最高同时兼顾通信时延约束为最优目标, 通过构建可靠性和时延约束模型, 选择最优迂回路径。但未考虑中断信道上数据对迂回路径时延的影响。文献[13-14]强调了从安全性的角度为继电保护业务配置最佳路径的必要性, 提出了基于安全性的最优迂回路径重构方法。但是, 广域网上存在大量实时性要求很高的继电保护业务, 该方法未考虑保护所需时延因素^[15]。

本文对广域保护通信系统重负载下可能发生通信中断的情况进行了研究。以重负载下迂回后网络负载均衡为目标, 着重考虑了中断信道上数据对迂回路径排队时延的影响。先对通信质量要求较高的 GOOSE 报文采用单一迂回路径重构算法; 在此基础上, 重点对数据量较大的 SV 报文设计重负载通信下分流迂回路径重构算法; 并建立相应的迂回路径重构模型。最后使用 OPNET 通信仿真软件搭建 IEEE14 节点通信网络模型, 对通信重构模型进行验证。

1 广域保护通信重负载网络的特点

网络利用率是全网络信道利用率的加权平均值, 用以反映网络负载状况。当网络利用率小于 0.5 时, 属于轻负载; 网络利用率超过 0.5 时就属于重负载。对于广域保护而言, 正常运行时网络通信信息量较大, 但时延并不是很长, 能够满足保护判别的要求。但当系统发生故障时, 网络通信信息量剧

增, 导致信息传输排队较长, 延时增大。因此, 通信延时与网络负载有关, 即与网络利用率有关。根据网络通信基础, 通信时延与网络利用率的关系如图 1 所示^[16]。

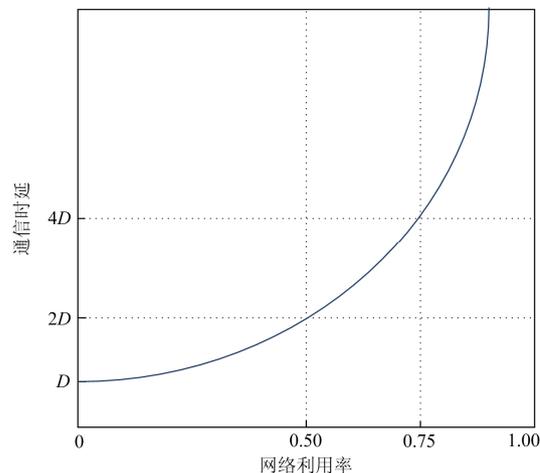


图 1 通信时延与网络利用率的关系

Fig. 1 Relationship between delay and utilization

图 1 中, 纵坐标 D 表示网络空闲时的时延。由图 1 可知, 在网络轻负载与重负载下通信时延的特征规律存在很大的差异:

1) 重负载时网络时延明显大于轻负载时的时延。主要是重负载时通信量大, 在各个路由器处的排队时延增加。

2) 随网络利用率的增长, 重负载时通信时延增长速度快于轻负载时的情况。

正因为重负载与轻负载情况下的网络通信时延特性存在差异, 当发生通信中断时, 采用迂回路径实现信息的不间断传输, 中断信道上迂回的同数量数据, 在重负载网络上产生的时延将远大于轻负载网络情况。因此, 对于重负载下通信中断的情况, 应该根据信息特点和网络负载特点, 制定适合于信息迂回的迂回路径重构策略。

2 广域保护通信重负载下路径重构算法

广域保护通信系统重负载时, 网络利用率原本就很大。如果中断信道上数据量也很大, 并且全部迂回至一条路径, 必然引起迂回路径部分信道利用率剧增, 使得数据包在相应路由器处的排队时延急剧增加, 甚至出现堵塞和丢包的情况。因此, 根据中断信道上数据的特点, 首先利用单一迂回路径算法, 为时延要求和重要性最高的 GOOSE 报文优先选择最优迂回路径。然后将数据量较大的 SV 报文, 按照一定的原则分成多股, 采用多条迂回路径进行

分流迂回。将大量数据对一条迂回路径的影响分散到多条迂回路径中，能够有效减少网络利用率的增大，进而尽可能减小迂回之后的通信时延。

2.1 重负载下 GOOSE 报文路径重构算法

根据文献[17]，单个间隔上传到广域网上的 GOOSE 报文最大量是 1.2 Mbit/s。GOOSE 报文的吞吐量相对于广域网络带宽较小。而 GOOSE 报文包含的信息有：跳闸、合闸命令，闭锁信号，保护、断路器启动失灵信号，联闭锁信号等，这些是电力系统故障处理的关键信息，它有最严格的通信时延要求。针对 GOOSE 报文的这些特性，宜参照文献[18]对其采用单一迂回路径算法，为其选择时延最短的最优迂回路径。

2.2 重负载下 SV 报文路径重构算法

2.2.1 分流迂回的原则

SV 报文包含的信息有：三相电压、电流，零序电压、电流，一些保护判断需要的序分量、特殊计算量以及有功、无功、功率因数等。根据文献[17]，单个间隔发送 SV 报文量为 2.14 Mbit/s。单间隔的 SV 报文量已经很大，当一个变电站包含多个间隔时，广域网上的 SV 报文流量将会比 GOOSE 报文多得多。如果 SV 报文只单独寻找一条迂回路径进行传输，在通信网络重负载情况下，将难以满足 SV 报文时延要求并可能发生堵塞和丢包等严重情况。而通过多路径以实现流量均衡技术在网络通信技术中已较为成熟^[19-20]。因此，根据 SV 报文的特点，选择多条迂回路径来分担较大的数据量是实现广域保护的关键因素之一。

针对 SV 报文，设计分流迂回路径的原则如下。

1) 原则一，分流迂回的目标是分流的均衡度最佳。用于分流的路径越多，迂回路径网络利用率变化越小，对每一条迂回路径时延的影响越小，但过多的迂回路径给控制带来复杂度。

假设当某一条信道中断时，总共有 p 条适合分流的迂回路径，每一条迂回路径分得 SV 报文量的比例分别为 k_1, k_2, \dots, k_p 。分流的具体目标就是确定最佳的一组 k_1, k_2, \dots, k_p 分流系数值，使得按照这样的比例分配 SV 报文时，对每一条迂回路径时延影响较为均衡。

首先确定用于分流的路径个数，参与 SV 报文分流的路径应满足以下两个约束条件。

第一个约束是迂回路径跳数约束，如式(1)。

$$h_p \leq M \quad (1)$$

式中， h_p 代表一条迂回路径中路由器总数(即跳数)。跳数可大体上反映迂回路径的时延。通过 M 值可以

限定迂回路径的跳数，一方面可剔除跳数过多的迂回路径，另一方面可以使所选多条迂回路径跳数基本相同，使 SV 报文通过各个迂回路径传输时时延大体相同。 M 值随网络范围、源节点与目的节点位置变化而变化，应根据系统通信延时需要进行整定，这里选取所有迂回路径跳数的平均值，如式(2)。

$$M = \left(\sum_{i=1}^m A_i \right) / m \quad (2)$$

式中： A_i 表示第 i 条迂回路径的跳数； m 代表可供选择的迂回路径总条数。

第二个约束条件是迂回路径信道利用率约束。针对组成迂回路径的各个信道，其信道利用率应该在合理区间内，才能保证 SV 报文流入迂回路径后不发生堵塞和丢包。信道利用率约束如式(3)。

$$\forall u_i \leq 75\% \quad (3)$$

式中，设定任意一段迂回信道的利用率不超过 75%，是因为当信道利用率增长到 75% 时，再增加数据流量，在该信道上产生的时延就会急剧增大，甚至产生堵塞和丢包等严重情况。

根据上述两条约束条件，系统可以挑选出任意两节点可用于 SV 报文分流迂回的 p 条路径，进一步可以确定每条路径的分流系数，以合理分配所承担的分流信息量。

2) 原则二，分流系数值取决于每条路径中短板信道的带宽可用裕度。所谓短板信道是指在一条迂回路径中，可容纳 SV 报文量最少的信道。在分配中断信道上的 SV 数据时，必须根据短板信道的情况来分配，否则就会因没有顾及到短板信道而导致短板信道利用率超标。

短板信道可容纳的分流数据量一般根据短板信道带宽可用裕度来确定。短板信道带宽可用裕度指不使短板信道堵塞的情况下，可再容纳 SV 数据量的最大值。只有基于此方式，才可使得分流对每条路径中原有数据的影响均最小，即达到分流均衡度最佳。

下一步是如何确定短板信道带宽可用裕度。由图 1 可知，当一段信道的利用率达到 75% 时，再增加数据量就会使通信时延急剧增大。因此，本文以短板信道的最大利用率 75% 为上限，并考虑原信道通信量，计算短板信道带宽可用裕度，如式(4)。

$$T_{\max}^i = BW_i \times 75\% - T_i - TG_i \quad (4)$$

式中： T_{\max}^i 指短板信道 i 的带宽可用裕度； BW_i 为短板信道 i 的带宽； T_i 为短板信道 i 在网络正常情况

下的原有流量; TG_i 指如果信道 i 也作为 GOOSE 迂回通道时, 被转移的 GOOSE 信息流量。

针对所有可用的迂回路径, 其分配的 SV 报文量均应小于相应的短板信道带宽可用裕度, 用式(5)表示。

$$K_i \times T_{SV} \leq T_{\max}^i \quad (5)$$

按照短板信道带宽可用裕度比, 确定每条迂回路径分配 SV 报文的分流系数值, 可使带宽裕度大的路径分得的 SV 报文较多, 裕度小的路径分得的 SV 报文较少, 实现分流数据对每一条迂回路径时延的影响较为均衡。在此种情况下, 分流系数的计算如式(6)。

$$\begin{cases} K_1 : K_2 : \dots : K_p = T_{\max}^1 : T_{\max}^2 : \dots : T_{\max}^p \\ K_1 + K_2 + \dots + K_p = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: T_{\max}^p 指第 p 条路径其短板信道的带宽可用裕度; K_1, K_2, \dots, K_p 分别指第 $1 \sim p$ 条迂回路径可分配 SV 报文的分流系数。

当所分配的 SV 报文流量超过短板信道带宽可用裕度时, 只能按照短板信道带宽可用裕度的最大值来分配, 即式(7)。

$$K_i \times T_{SV} = T_{\max}^i, \text{ when } K_i \times T_{SV} > T_{\max}^i \quad (7)$$

式(7)指出, 若第 i 条路径按带宽比例所分得的 SV 流量 ($K_i \times T_{SV}$) 超过了其短板信道的带宽裕度 (T_{\max}^i), 则令其可分得 SV 流量为相应的短板信道带宽裕度, 同时按照式(6)与式(7)分配流量的差额, 再次按照式(6)对其余流量进行二次分配, 叠加后的通道流量仍需进行式(7)的判断。

2.2.2 分流迂回的模型

综合以上分析, 确立分流迂回目标函数, 并对关键指标进行约束, 其建立的模型为

$$\begin{cases} K_1 + K_2 + \dots + K_p = 1 \text{ 目标函数} \\ K_1 : K_2 : \dots : K_p = T_{\max}^1 : T_{\max}^2 : \dots : T_{\max}^p \text{ 确定分流系数} \\ h_p \leq M = \left(\sum_{i=1}^m A_i \right) / m \text{ 跳数约束} \\ \forall u_i \leq 75\% \text{ 信道利用率约束} \\ K_i \times T_{SV} \leq T_{\max}^i \text{ 带宽裕度约束1} \\ K_i \times T_{SV} = T_{\max}^i, \text{ when } K_i \times T_{SV} > T_{\max}^i \text{ 带宽裕度约束2} \end{cases}$$

2.2.3 分流迂回算法的实现

根据分流迂回的原则和模型, 分流迂回的流程图如图 2 所示。

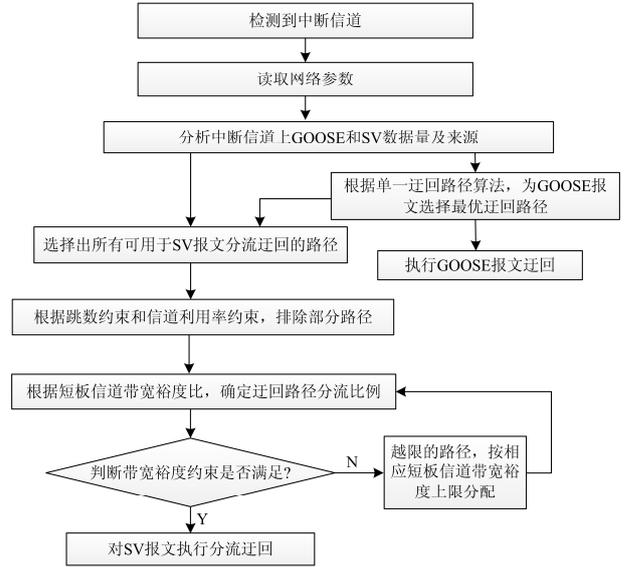


图 2 重负载下分流迂回算法流程图

Fig. 2 Shunt circuitous algorithm with overload

3 算法仿真实验

为了验证本文所提出的重载通信环境下迂回路径的有效性, 本文利用 OPNET 通信仿真软件搭建 IEEE14 节点模型, 并从两个方面对分流迂回算法进行仿真实验。

1) 比较通信中断后, 待迂回数据中的 SV 报文按“分流迂回算法”迂回与按“单一迂回路径算法”迂回时, 对迂回信道时延的影响;

2) 针对迂回数据按“重负载下分流迂回算法”迂回的情况, 比较分流后被转移的 SV 报文数据对不同迂回路径短板信道时延的影响以及均衡性。

仿真模型如图 3 所示。

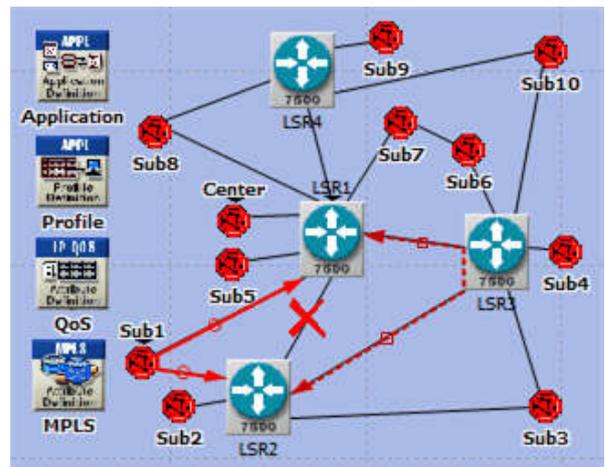


图 3 IEEE14 节点通信仿真模型

Fig. 3 Communication simulation mode of IEEE 14 nodes

图 3 中, 假设 LSR2—LSR1 间信道中断, 为中断信道上数据(即 Sub2 内 GOOSE、SV 和少量背景流量)寻找迂回路径。由前述仿真要求, 该部分总共进行了三类仿真: 第一类为“通信正常情况下”仿真; 第二类是所有中断数据按“单一迂回路径算法”迂回仿真; 第三类是按“重负载下分流迂回算法”迂回仿真。

3.1 实时性分析

根据“单一迂回路径算法”和“分流迂回算法”, 在 LSR2—LSR1 间信道中断时, 选择出最优路径, 如表 1 所示。同时, 表 1 也计算出 Sub2 内数据传输到广域保护决策中心 WAPSDC 上正常通信和迂回路径的距离。

表 1 Sub2 内数据传输路径及距离

Table 1 Transmission path and distance of data in Sub2		
	Sub2 内数据传输路径	距离/km
正常通信	LSR2—LSR1	86
单一迂回 路径迂回	LSR2—LSR3—LSR1	157.2
分流迂回	Path1:LSR2—Sub1—LSR1	path1:146.8
	Path2:LSR2—LSR3—LSR1	path2:157.2

表 1 中, 在“分流迂回”时, GOOSE 报文优先选择最优迂回路径 path2 传输。之后, path1 分得 SV 报文 7.49 Mbit/s 和背景流量。由于 path2 的带宽可用裕度仍较大, 分得 SV 报文 18.2 Mbit/s。由表 1 可知, 迂回时, 数据传输距离较正常通信时增加较多, 因此路径时延不可避免地增大。

设置广域保护决策中心在图 2 的 Dispatch Center 内, 可收集仿真中 GOOSE 报文和 SV 报文的单端时延, 如表 2 所示。这里的单端时延指数据由发送端到接收端的单程时延。

表 2 Sub2 内数据单端时延

Table 2 End to end delay of data in Sub2		
	GOOSE/ μ s	SV/ μ s
正常通信	701	737
单一迂回 路径迂回	1 270	1 277
分流迂回	993	path1:1 108
		path2:1 032

表 2 中, 相比正常通信时延, “单一迂回路径迂回”和“分流迂回”下单端时延均有较大增长, 主要原因是迂回时路径距离变长和跳数变多。

对广域网络时延的要求随着广域网范围不同(由几百千米到几千千米)而变化。但是, 为了满足广域保护实时性的要求, 通信时延应该尽可能地小。

表 2 中, “分流迂回”时单端时延明显小于“单一迂回路径迂回”时的时延, 说明重负载下分流迂回有效。“单一迂回路径迂回”时的时延增长更剧烈, 主要是因为路由器处排队时延增长较快。例如, 在 LSR3—LSR1 信道上, 统计得到路由器 LSR1 处的排队时延数据如图 4 所示。

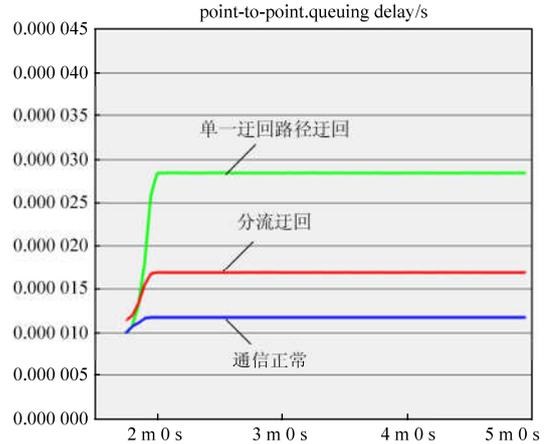


图 4 三类仿真中 LSR3—LSR1 信道排队时延比较
Fig. 4 Comparison of delay in channel LSR3—LSR1 among three kinds of simulation

由图 4 可知, 在“单一迂回路径迂回”仿真中, 全部数据从一条迂回路径 LSR2—LSR3—LSR1 迂回, 在短板信道 LSR3—LSR1 处, 信道利用率增长过快, 排队时延也就大大增加。

仿真比较 LSR3—LSR1 信道利用率如图 5 所示。

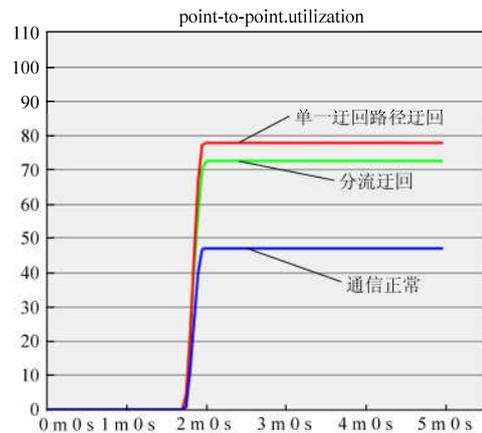


图 5 LSR3—LSR1 上信道利用率

Fig. 5 Channel's utilization in LSR3—LSR1

图 5 中, “单一迂回路径迂回”短板信道本身网络负载已较重, 此时需要被转移的数据量很大, 达到 45.77 Mbit/s, 导致短板信道的利用率超过了 75%, 达到 79%。结合图 1 网络利用率与延时的关系分析, 当 LSR3—LSR1 信道利用率超过了 75%时,

其信道利用率相比于正常情况会急剧增大。相比于“分流迂回”仿真中,分流迂回时短板信道的利用率也有较大幅度增加,这是因为需要转移的数据量很大,但是,其信道的利用率未超过 75%,时延增长不是很剧烈。

3.2 均衡性分析

在“分流迂回”仿真中,SV 报文被分为两部分,分别迂回至路径 LSR2—Sub1—LSR1 和路径 LSR2—LSR3—LSR1。一股 SV 报文对短板信道 LSR3—LSR1 排队时延的影响如图 4 所示;另外一股 SV 报文对短板信道 Sub1—LSR1 排队时延的影响如图 6 所示。

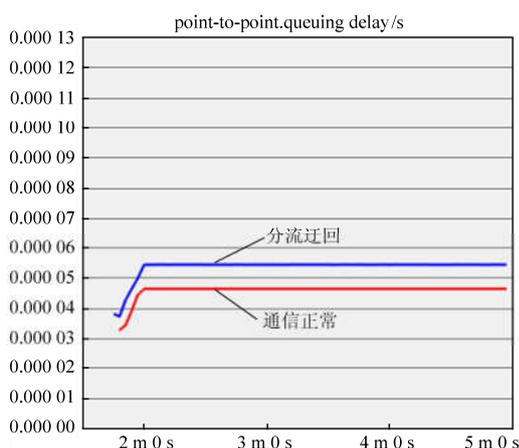


图 6 Sub1~LSR1 间信道排队时延

Fig. 6 Queuing delay in channel Sub1~LSR1

由图 4 可知,分流后 LSR3—LSR1 间的信道排队时延由 11 μ s 增加到了 16.3 μ s,增加了 5.3 μ s。由图 6 可知,分流后 Sub1—LSR1 间信道排队时延有所增加,从原来的 48.3 μ s 增加到 52.8 μ s,增加了 4.5 μ s。分流后两部分 SV 报文对排队时延的影响不同,其主要原因是:对于 LSR3—LSR1,不仅仅分流一部分 SV 报文,由于其带宽裕度较大,同时承担了所有的 GOOSE 报文迂回。因此,图 4 所统计的排队时延包含了 GOOSE 报文的影响,它使排队时延的增长比 Node1—LSR1 大 0.8 μ s,但这属于正常增加。总地来看,分流算法可实现两部分 SV 报文对短板信道排队时延的影响基本相同。

综合图 4—图 6 的分析可知:“分流迂回”比“单一迂回路径迂回”时对信道排队时延的影响小,分流的两部分 SV 报文可以实现对短板信道排队时延影响基本相同,实现影响均衡分摊。

4 结论

本文针对重负载下广域通信网可能发生中断

的情况,提出迂回路径重构算法。对于通信质量要求最高的 GOOSE 报文,使用单一迂回路径重构算法选择时延最短的迂回路径;对于容量大的 SV 报文,采用分流迂回的方法,有效地减小了中断信道上数据的转移对通信网的影响。同时对下一步的研究展望:1) 本文研究的是广域网络,广域网络一般通过 OPGW 沿着高压电网铺设。对于低压配电网,其网络形式、设备等各个方面均与广域网存在差异,因此本文的算法能否适用于配电网,仍有待进一步地研究。2) 当电力系统发生大规模灾变(如 2008 年的极端冰雪灾害)时,大量甚至全部 OPGW 线路因覆冰而压断,此时电力通信迂回路径已经无法满足要求,如何启用其他应急通信技术,实现不间断迂回传输,仍需进一步研究。

参考文献

- [1] 信息采集系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 孔德洪, 吕飞鹏. 基于区域多信息融合的广域后备保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 26-32.
KONG Dehong, LÜ Feipeng. Wide area backup protection algorithm based on regional multi-information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 26-32.
- [3] 韩旭杉, 王玉财, 吕飞鹏, 等. 基于故障关联系数的广域后备保护新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 48-54.
HAN Xushan, WANG Yucui, LÜ Feipeng, et al. A new method of wide-area backup protection based on fault correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 48-54.
- [4] 潘天亮, 蔡泽祥, 席禹, 等. 基于 OPNET 的广域测量系统仿真与通信延时性能分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 51-57.
PAN Tianliang, CAI Zexiang, XI Yu, et al. OPNET-based wide area measurement system simulation and communication delay performance analysis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 51-57.
- [5] HE J, LIU L, LI W, et al. Development and research on integrated protection system based on redundant information analysis[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 108-120. DOI: 10.1186/s41601-016-0024-y.
- [6] 白加林, 高昌培, 王宇恩, 等. 基于数据源共享的广域智能保护及控制系统研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 157-162.
BAI Jialin, GAO Changpei, WANG Yuen, et al. Research and application of wide area intelligent protection and control system based on data source sharing[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 157-162.

- [7] 孙军平, 盛万兴, 王孙安. 新一代变电站自动化网络通信系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 16-19.
SUN Junping, SHENG Wanxing, WANG Sunan. Study on the new substation automation network communication system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 16-19.
- [8] 陈国炎, 张哲, 尹项根, 等. 广域后备保护通信模式及其性能评估[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 186-196.
CHEN Guoyan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Wide area backup protection communication mode and its performance evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 186-196.
- [9] 鲍晓慧. 基于迂回方式的继电保护信道重构技术[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 23(4): 578-582.
BAO Xiaohui. The reconstruction technology of protective relaying channel based on circuitous style[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 23(4): 578-582.
- [10] 王阳光. 应对灾变的广域保护信息处理及通信技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [11] 刘宝, 尹项根, 李振兴, 等. 基于 WSN 重构广域保护紧急通信通道的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 91-95.
LIU Bao, YIN Xianggen, LI Zhenxing, et al. Study on communication channel reconstruction based on WSN for wide area protection[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 91-95.
- [12] 熊小伏, 吴玲燕, 陈星田. 满足广域保护通信可靠性和实时要求的路由选择方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(3): 44-48.
XIONG Xiaofu, WU Lingyan, CHEN Xingtian. A method of routing selection meeting reliability and the demand of time in WAPC network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 44-48.
- [13] 高会生, 王慧芳. 基于安全性的继电保护光纤迂回通道路径选择[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 25-31.
GAO Huisheng, WANG Huifang. Path selection based on security measure for relay protection services of fiber circuitous channel[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 25-31.
- [14] 高会生, 孙逸群, 冉静学. 电力光纤保护通道安全风险评价指标的研究[J]. 继电器, 2007, 35(3): 61-64.
GAO Huisheng, SUN Yiqun, RAN Jingxue. Research of the security risk evaluation indices for electric power optical-fiber relay protection channel[J]. Relay, 2007, 35(3): 61-64.
- [15] 熊小萍, 谭建成, 林湘宁. 基于 MPLS 的广域保护通信系统路由算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 257-263.
XIONG Xiaoping, TAN Jiancheng, LIN Xiangning. Routing algorithm for communication system in wide-area protection based on MPLS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 257-263.
- [16] 谢希仁. 计算机网络[M]. 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [17] 张新昌, 张项安. 层次化保护控制系统及其网络通信技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 129-133.
ZHANG Xinchang, ZHANG Xiangan. Research of hierarchical protection and control system and its communication technology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 129-133.
- [18] 李振兴, 张腾飞, 王欣, 等. 考虑时延与流量均衡性的广域保护通信迂回路径重构算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 130-136.
LI Zhenxing, ZHANG Tengfei, WANG Xin, et al. Reconstruction algorithm for circuitous route of wide area protection communication considering time delay and traffic balance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 130-136.
- [19] 杨洋, 杨家海, 秦董洪. 数据中心网络多路径路由算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(3): 262-268.
YANG Yang, YANG Jiahai, QIN Donghong. Multipath routing algorithm for data center network[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2016, 56(3): 262-268.
- [20] 孙毅, 刘浩程, 曾璐琨, 等. 面向配电通信网的 WMSNs 多路径 QoS 路由算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(11): 3387-3390, 3395.
SUN Yi, LIU Haocheng, ZENG Lukun, et al. QoS assured multipath routing algorithm for distribution communication network[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(11): 3387-3390, 3395.

收稿日期: 2018-01-18; 修回日期: 2018-05-07

作者简介:

李振兴(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制; E-mail: lzx2007001@163.com

龚 旸(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制。E-mail: 122988772@qq.com

(编辑 魏小丽)