

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191339

基于贪心流量调度的智能变电站过程层网络拓扑 高可用无缝冗余配置方法

黎其浩¹, 岳杨¹, 蒋京辰², 张颖², 钟加勇³

(1. 国网重庆市电力公司建设分公司, 重庆 401121; 2. 重庆市送变电工程有限公司, 重庆 400039;
3. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401121)

摘要: 泛在电力物联网背景下, 智能变电站中负责运行状态上传与控制命令下达的过程层网络负载将急剧升高。传统 IEC61850 标准协议中的高可用性无缝冗余(High-Availability Seamless Redundancy, HSR)通信链路配置方法由于数据副本在存在环路的网络内循环产生额外流量与额外传输延时, 存在信息传输实时性差的缺点。因此, 提出基于贪心流量优化算法的过程层网络拓扑高冗余无缝配置方法。首先, 在分析采用 HSR 技术的智能变电站过程层网络工作原理的技术上, 提出两种高可用性无缝冗余配置方案: 交叉(Cross-Links, CLs)方案与四连通环(Four-Connected Rings, FCRs)方案。其次, 为避免过程层网络在流量汇聚时易产生拥塞导致传输时效性变差, 提出基于贪心算法的流量调度策略。最后, 基于 Opnet 的变电站仿真算例表明, 与传统网络拓扑配置方案相比, 所提方案的数据平均传输跳数与传统拓扑方案比下降 50%, 而采用贪心算法的过程层网络流量调度策略在数据拥塞时的传输延时、丢包率和吞吐量衰退服务分别降低 32.7%, 63.5%和 33.3%。因此, 所提方案能够显著提升智能变电站过程层网络性能。

关键词: 智能变电站; 过程层网络; 无缝冗余拓扑配置; 流量调度; 贪心算法

High-availability seamless redundancy topology configuration method with for process-level network in intelligent substations combined with greedy flow scheduling algorithm

LI Qihao¹, YUE Yang¹, JIANG Jingchen², ZHANG Ying², ZHONG Jiayong³

(1. State Grid Chongqing Electric Power Company Construction Branch, Chongqing 401121, China;
2. State Grid Chongqing Power Transmission & Transformer Engineering Company, Chongqing 400039, China;
3. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401121, China)

Abstract: In the ubiquitous electric internet of things, the traffic load of the process-level in smart substations, which is responsible for uploading operation status and issuing control instructions in smart substations, will be increased sharply. High-availability Seamless Redundancy (HSR) topology configuration method in traditional IEC61850 standard protocol has the disadvantage of poor real-time transmission of information due to the extra traffic and corresponding transmission delay caused by data replicas circulating in the rings. Therefore, a seamless configuration method based on greedy traffic optimization scheduling algorithm for process-level network is proposed. Firstly, two kinds of HSR configuration schemes are proposed: Cross-Links (CLs) scheme and Four-Connected Rings (FCRs) scheme. Secondly, in order to avoid congestion in process-level network, which leads to poor transmission timeliness, a traffic scheduling strategy based on greedy algorithm is proposed. Finally, a substation simulation example based on Opnet shows that, compared with the traditional network topology configuration scheme, the average data transmission hops of the proposed scheme are 50% lower than those of the traditional network topology scheme. In addition, the recession of the transmission delay, packet loss rate and throughput of the process-level network using proposed greedy algorithm are reduced by 32.7%, 63.5% and 33.3% respectively compared with the traditional scheduling algorithms in congestion situation. Therefore, the proposed scheme can significantly improve the performance of process-level network in smart substation.

This work is supported by Project of State Grid Chongqing Electric Power Company and National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902800) "Key Techniques Research on Intelligent Distribution Network Operation based on Micro Synchronization Phasor Measurement".

Key words: smart substation; process-level network; seamless redundancy configuration; traffic scheduling; greedy algorithm

0 引言

随着国网公司“泛在电力物联网”工程的部署与推广建设, 智能变电站作为电力系统中电能传输与分配的重要节点, 对其内部海量智能电子设备实现实时状态监测与可靠控制是泛在电力物联网中全面感知与精细化调控的基本要求^[1-3]。

智能变电站采用 IEC61850 标准设计, 其中, 过程层网络作为底层设备状态量上传与控制中心控制指令下达的核心部分, 高连通度、低延时量与低丢包率是过程层网络的基本要求^[4]。一般地, 过程层网络采用高可用性无缝冗余 (High-Availability Seamless Redundancy, HSR) 进行拓扑配置^[5]。其基本原理为, 在过程层网络发生链路或节点任何单一故障, 通过冗余网络的容错能力与重复丢弃防止环路生成技术实现链路的及时恢复^[6-7]。然而, HSR 方案存在如下两个缺点:

1) 生成的重复数据副本在过程层网络内生成与传播会导致过程层网络产生额外流量, 导致网络负荷上升;

2) 重复数据副本在过程层网络中每个节点或每条链路传输时都将引发排队延时与传输延时。

上述两个缺点导致过程层网络在链路/节点故障时网络服务质量(Quality of Service, QoS)下降, 造成数据实时性不足。因此, 现有文献主要从过程层网络拓扑监控与数据传输机制两方面对 HSR 方案进行改进。例如, 文献[8]提出一种通过过程层交换机动态学习网络拓扑与链路映射关系的智能变电站过程层网络快速故障定位与运行状态监控方法, 但方法仅能辨识故障位置, 并不能保证故障状态下过程层网络的服务质量。文献[9]提出一种过程层网络报文传输延时计算方法, 建立了 SV 报文传输时间抖动模型, 并据此提出通过控制报文发送时序与转发条件的延时抖动抑制方法。但文中并未展开故障链路上传输延时防抖动研究。

因此, 提出一种基于贪心流量优化算法的过程层网络拓扑高冗余无缝配置方法。主要创新点为:

1) 传统方法中, 链路成环是造成重复数据副本循环传播、导致额外时间开销的主要原因。因此, 提出两种高可用性无缝冗余拓扑配置方案: 交叉 (Cross-Links, CLs) 方案与四连通环 (Four-Connected Rings, FCRs) 方案, 从而减少报文传播跳数, 缩短传

输延时。

2) 现有 HSR 方法未考虑传输层流量优化问题, 有可能造成拥塞风险导致数据传输时效性变差。而本文提出的基于贪心流量调度算法则综合考虑了链路利用率与流量负载率等因素实现传输路径的择优选取。

1 基于 HSR 的过程层网络基本架构

1.1 过程层网络通信基本原理

图 1 示出了 IEC61850 标准中的基本协议栈。其中, 过程层网络主要承载 IEC61850-9-2 中定义的 SV 报文以及 IEC61850-8-1 中定义的 GOOSE 报文^[10]。为减少报文通过 OSI 参考体系下传输层与网络层时产生的排队延时, GOOSE 和 SV 报文直接标记为具有 IEEE802.1Q 优先级。一般地, SV 报文通常将合并单元的电压电流采样值传输到智能电子设备以完成计量或保护功能; GOOSE 报文则允许智能电子设备在设备层与过程层或设备层内交换数据, 例如跳闸信号逻辑互锁等。

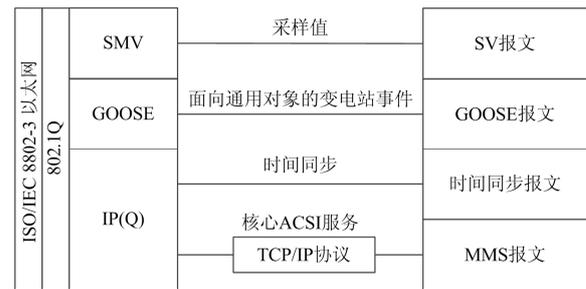


图 1 IEC61850 基本协议栈

Fig. 1 Basic protocol stack of IEC61850

过程层网络中, SV 报文由于具有不重传机制且最短传输间隔低至 3 ms, 是智能变电站内时间敏感业务的首选报文, 同时也是过程层网络中的主要流量来源^[11-14]。进一步地, IEC61850 国际用户组织 UCAlug 规定了 SV 报文的两种工作模式: 1) 80 点用于变电站保护业务; 2) 256 点用于电能质量分析与录波业务。换言之, 在 50 Hz 电力系统中, 上述两种模式的采样频率分别为 4 000 Hz 和 12 800 Hz^[15-16]。

1.2 基于 HSR 的过程层网络拓扑配置

如图 2 所示, HSR 方案中, 每个交换节点都通过全双工链路连接成环形网络。源节点发出的数据报文首先生成一个副本进行相反方向的发送, 并在环绕整个环形网络后返回到源节点。正常情形下, 每一节点都将收到统一数据报文的两个副本, 从而触发重复丢弃机制从而接收先到达的报文而丢弃另一报文副本^[17-19]。反之, 若链路中存在故障时, 节点将会收到两个报文副本中的其中一个, 从而 HSR

方案能够保证网络链路的无缝冗余与零恢复时间。

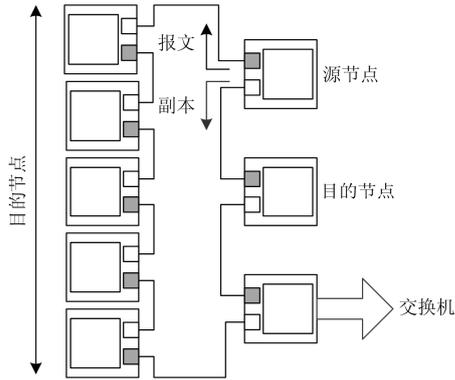


图 2 HSR 过程层网络配置

Fig. 2 Configuration of process-level network with HSR

然而,虽然使用 HSR 方案具有低投资与低维护成本,满足高可用性与可靠性的要求,由于副本传输机制带来的额外流量将增加过程层网络传输压力,在通信带宽有限的情况下,HSR 方案有导致过程层报文传输延时过大的风险。此外,传统 HSR 方案无法保证过程层网络出现多条链路故障下的传统可靠性。因此,减少额外流量、缩短最大端到端延时、优化流量调度策略是 HSR 的三个必要方向。

2 基于贪心流量优化的改进 HSR 方案

针对现有 HSR 方案的三个主要缺点,本文从拓扑链路设计与链路快速修复算法两方面对传统 HSR 方案进行改进。

2.1 网络拓扑链路设计

为避免过程层网络中出现环形网络导致不必要的时间开销,首先对网络拓扑进行改进,提出如下两种拓扑方案。

2.1.1 交叉 HSR(Cross-link HSR, CL-HSR)方案

如图 3 所示,CL-HSR 方案中,采用全双工链路将对角的转发节点连接起来。其中, DANH 为 HSR 双连接节点(Doubly Attached Node for HSR, DANH)^[20-22]。从而单环链路中由于 CL 方案的引入将产生两个对角的子环(记为①和②)。对于每个子环,可采用两个 RedBox 或 QuadBox,其中两个端口用于 HSR 环,而一个端口用于子环。RedBox 和 QuadBox 的功能为:

RedBox 作为 HSR 中各节点的连接,生成 HSR 环。

QuadBox 具有推进帧数据能力的四端口设备,适用于数据流量超过一个单环能力的场合。

值得一提的是,根据 HSR 网络的规模,子环的数量是可以自适应改变的。不失一般性,本文使用两个子环和 4 个 RedBox 来说明所提方案的优越性。

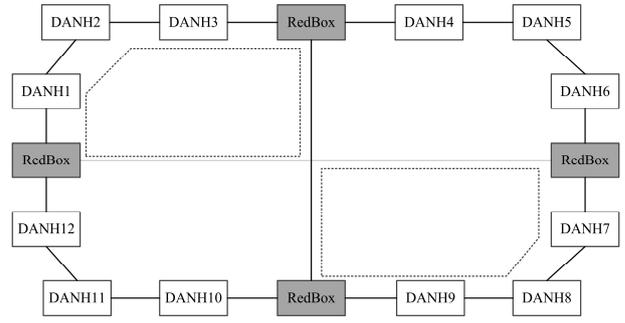


图 3 交叉链路 CL-HSR 方案

Fig. 3 Proposed CL-HSR scheme

RedBox 通过实现各转发节点间的冗余互联通路,提高了 HSR 环路的可靠性,同时防止各节点因重复丢弃机制引发的环网问题。此外,通过此种方案,数据包传输跳数可以大幅减少,从而相应地缩短了端到端的最大传输延时。因此,CL 方案有助于提升过程层网络的容错性与 QoS 性能。

从图 3 中可知,从源到网络内所有目的地的帧所需的最小跳数是环中总跳数的一半,在单环链路中发生单一链路故障时,所需最小跳数等于总跳数减去 1。设所有的单环网络节点均为 DANH(如智能电子设备),当单环网络中所有的总跳数等于 DANH 的数量,则在链路正常情况下,单环网络中最小的跳数为

$$N_{\text{单环}} = 0.5 \times N_{\text{DANH}} \quad (1)$$

式中: $N_{\text{单环}}$ 为单环网络中的跳数; N_{DANH} 为 DANH 的数量。

对于所提出的 CL-HSR 方案,由于交叉链路和 4 个额外 RedBox 的引入,总跳数将会增加。此外,CL-HSR 中最小跳数并不是由主环决定的,而是由图 3 中所示虚线的子环①和②所定义的。故子环中的总跳数应等于主环中 DANH 数量的一半加上两个 CL 子环,即

$$N_{\text{CL}} = 0.5 \times (N_{\text{DANH}} + 4) + 2 \quad (2)$$

式中, N_{CL} 为 CL-HSR 方案的总跳数。因此,报文传输的最小跳数为 N_{CL} 的一半,即

$$N_{\text{CL-HSR}} = 0.5 \times N_{\text{CL-HSR}} = (N_{\text{DANH}} + 8) / 4 \quad (3)$$

式中, $N_{\text{CL-HSR}}$ 为所提 CL-HSR 方案的最小跳数。

根据式(1)和式(3),当 $N_{\text{DANH}}=8$ 时,传统单环方案与所提 CL-HSR 方案的最小跳数相同,而当 DANH 数量变多时,所提方案则具有更小的传输跳数,即

$$\lim_{N_{\text{DANH}} \rightarrow \infty} \frac{N_{\text{CL-HSR}}}{N_{\text{单环}}} = 0.5 \quad (4)$$

2.1.2 四连通环 HSR(Four-connected rings HSR, FCRs-HSR)方案

如图 4 所示, 所提 FCRs-HSR 方案包含 4 个子环, 由 4 个 QuadBox 互联, 所有节点间报文传输所需最小跳数取决于子环内 DANH 以及 QuadBox 的数量, 如虚线所示。设 FCRs-HSR 中每个子环具有相同数量的 DANH, 令子环总跳数为 $N_{\text{子环}}$, 有

$$N_{\text{子环}} = 0.5 \times N_{\text{DANH}} + 4 \quad (5)$$

且 FCRs-HSR 方案的最小跳数(记为 $N_{\text{FCRs-HSR}}$)为

$$N_{\text{FCRs-HSR}} = 0.5 \times N_{\text{子环}} = (N_{\text{DANH}} + 8) / 4 \quad (6)$$

类似地, 当 DANH 的数量趋近于无穷大时, 所提 FCRs-HSR 方案下的总跳数约为传统单环链路下的一半。

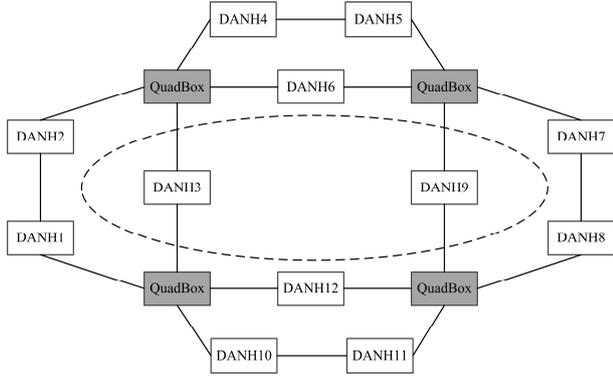


图 4 四连通环 FCRs-HSR 方案

Fig. 4 Proposed FCRs-HSR scheme

图 5 示出了文献[12]所提单环 HSR 和文献[13]所提双环 HSR 方案与本文所提 CL-HSR 和 FCRs-HSR 方案的最小跳数随 DANH 的数量变化情况。可见, 与传统单环或双环链路相比, 所提 CL-HSR 和 FCRs-HSR 方案的最小跳数在 DANH 数量较多时可以缩减 50%, 从而可以大幅节约端到端的延时量。

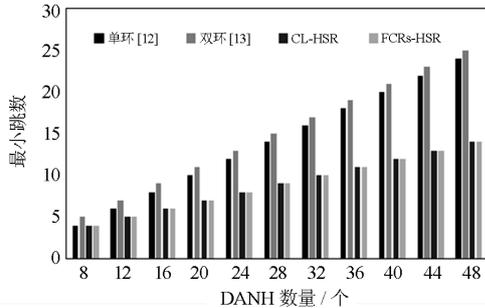


图 5 不同 HSR 拓扑方案下最小跳数

Fig. 5 Minimum hops with different HSR topological schemes

2.2 贪心流量优化调度算法

2.1 节中所提拓扑配置方案仅描述了采用重复

丢弃操作时数据传输的最大跳数。事实上, 若智能变电站中所有报文均采用“数据副本-重复丢弃”模式时, 由于未考虑到节点的数据发送量以及链路负载率与利用率的差异, 当所有节点均处于高并发工作模式时, 过程层网络存在拥塞风险^[23-24]。为此, 提出一种贪心流量优化调度算法。

2.2.1 链路流量负载率与节点流量负载率

定义 l_{ij} 为节点 i 到节点 j 的有向链路, 其流量为 $\varphi(l_{ij})$, Q_{ij} 为节点 i 到节点 j 的报文队列长度, M_i 为节点 i 的邻居节点数, 并定义过程层网络中最大邻居节点数为 $M = \max(M_i)$, 从而链路 l_{ij} 负载率定义为

$$\varphi(l_{ij}) = \max\left(\frac{1}{M} \sum_{i \in NB_j} \varphi(l_{ij}), Q_{ij}\right) \quad (7)$$

式中, NB_j 为节点 j 的邻居节点集合, 而节点 j 的流量负载率定义为

$$\varphi(j) = \max\left(\frac{1}{M_j} \sum_{k \in NB_j} \varphi(l_{jk}), \frac{\varphi_{\max} + \varphi_{\min}}{2}\right) \quad (8)$$

式中, φ_{\max} 和 φ_{\min} 分别为节点 j 的输出链路中的流量最大值负载率与最小负载率。进一步地, 节点 i 向节点 j 传输数据的归一化流量负载率(记为 $\bar{\varphi}_{ij}$)可定义为

$$\bar{\varphi}_{ij} = F[\varphi(j) - \varphi(l_{ij})] \quad (9)$$

式中, $F[\cdot]$ 为归一化操作。

2.2.2 链路利用率

本文中, 链路利用率定义为过程层网络链路上业务总速率与网络传输速率的比值。不妨设 S 为过程层的节点集合, R 为过程层中网络路径集合, B 为过程层中业务流集合。令 b_r ($b \in B, r \in R$) 为业务流 B , 在 R 上传播的速率为 v_r^b , 因此, 业务流的总速率为 $v_r = \sum v_r^b$ 。定义布尔函数 $x(l_{ij}, r)$ 表示链路 l_{ij} 是否在传播路径 b 上, 即

$$x(l_{ij}, r) = \begin{cases} 0 & l_{ij} \text{ 不在路径 } r \text{ 上} \\ 1 & l_{ij} \text{ 在路径 } r \text{ 上} \end{cases} \quad (10)$$

因此, 经过链路 l_{ij} 的业务总速率为

$$v(l_{ij}) = \sum_{b \in B} \sum_{r \in R} x(l_{ij}, r) v_r^b \quad (11)$$

式中, v 即为过程层网络传输速率。链路 l_{ij} 的利用率(记为 η_{ij})为

$$\eta_{ij} = \sum_{b \in B} \sum_{r \in R} \frac{x(l_{ij}, r) v_r^b}{v} \quad (12)$$

2.2.3 有向边权重值

定义链路 l_{ij} 的权值为 w_{ij} , 其综合考虑了流量负载率、链路利用率和节点跳数, 即

$$w_{ij} = \max\{\gamma_1 \bar{\varphi}_{ij} + \gamma_2 \eta_{ij} + \gamma_3 N_{ij}\} \quad (13)$$

式中： N_{ij} 过程层网络中采用不同拓扑配置方案下节点 i 和 j 间的跳数； $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 为权重系数，满足 $\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = 1$ 。

因此，所提贪心流量优化调度算法为，对于每一个网络节点，其向下一跳转发报文时选择权重最高的链路 with 对应节点作为传输路径。

3 算例仿真与结果讨论

为验证所提方案的可行性与优越性，本文基于 Opnet 网络仿真软件搭建变电站过程层网络实验平台^[25-26]。软/硬件参数为：Windows 10 旗舰版，i5-3230M Core 4 核 CPU，4 GB 内存，512 GB SSD。

本文设 SV 报文 80 点工作模式，过程层网络链路中 DANH 数量为 36，权重系数 $(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ 采用文献^[14]所提方法求取，结果为 $(0.3, 0.5, 0.2)$ 。

3.1 平均端到端延时

端到端延时主要由传输延时和等待延时构成，传输延时根据 2.1 节讨论，主要与传输跳数有关，而等待延时则取决于报文在传输路径中的排队等待时长。不妨令节点数据流到达目的节点的跳数为 N ，单跳传输延时为 τ_h ，节点发送数据包时延为 τ_p ，因此端到端延时计算如下：

$$T_d = N \times \tau_h + \sum_{(i,j) \in b} Q_{ij} \times \tau_p \quad (14)$$

选择文献^[15]所提 SPF 流量调度算法和文献^[16]所提 WRR 调度算法作为对比，分别在所提 CL-HSR 和 FCR-HSR 拓扑上进行分析，图 6(a)、图 6(b) 示出了不同流量调度算法与不同拓扑配置方案下的平均端到端通信延时。

可以看出，CL-HSR 方案与 FCRs-HSR 方案展现出类似的仿真结果。以 CL-HSR 方案为例，当节点负载率较低时，所提算法与 SPF 算法和 WRR 算法的平均端到端延时相当。随着节点数据生成速率的增大，节点缓存队列长度不断增加，从而导致各流量调度算法的平均端到端延时增加。但由于所提算法综合考虑了跳数、节点流量负载与链路负载，

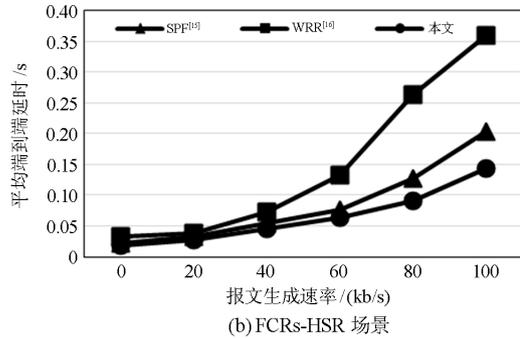
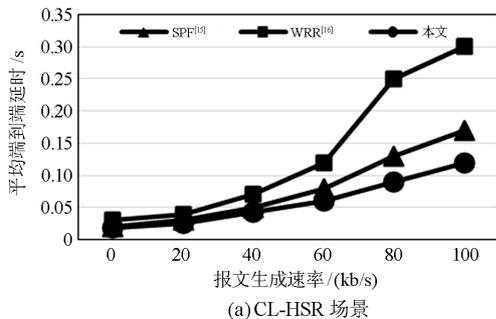


图 6 不同流量调度算法下的平均端到端延时

Fig. 6 Average end-to-end delay with different traffic scheduling algorithms

因此规避了向拥塞节点发送速率的缺点，端到端延时的增长幅度比 SPF 算法与 WRR 算法相比慢 32.7% 和 62.6%，提升了智能变电站过程层网络的服务性能。

3.2 丢包率

进一步地，研究数据生成速率对数据丢包率的影响。如图 7 所示，CL-HSR 方案和 FCRs-HSR 方案下呈现出类似的结果。以前者为例分析，随着数据生成速率的增加，各流量调度方案下报文丢包率均有所上升，但所提方案由于规避了向拥塞节点传输报文的弊端，故丢包率始终比 SPF 算法和 WRR 算法低，且丢包率的增长幅度比另外两种算法分别低 66.7% 和 63.5%。因此，本文所提方案具有更低的丢包率。

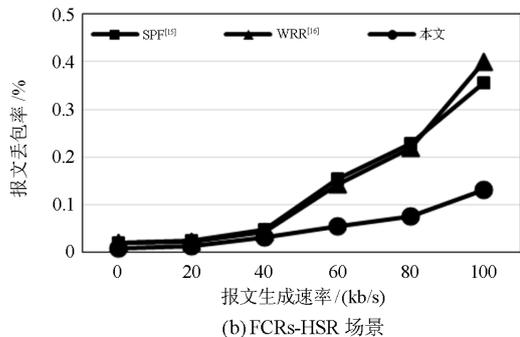
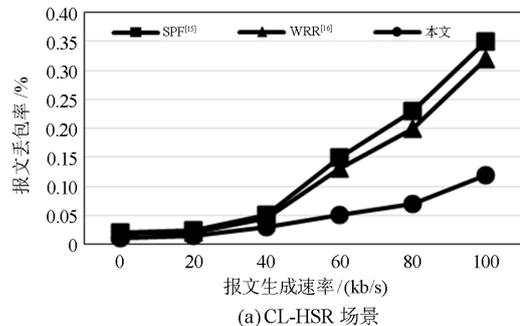


图 7 不同流量调度算法下的丢包率

Fig. 7 Packet loss rate with different traffic scheduling algorithms

3.3 网络吞吐量

如图8所示,以CL-HSR方案为例分析,随着数据生成速率的增大,过程层网络负载逐渐趋于饱和,更多数据将滞留于缓存队列中或直接溢出丢弃,因此网络吞吐量随传输数据量的增大而逐渐下降。三种调度算法下,由于本文所提算法综合考虑了节点条数、链路负载率和节点负载率,因而过程层网络流量分布将更为均匀,吞吐量下降幅度分别比SPF算法和WRR算法的下降幅度缓慢40%和33.3%。

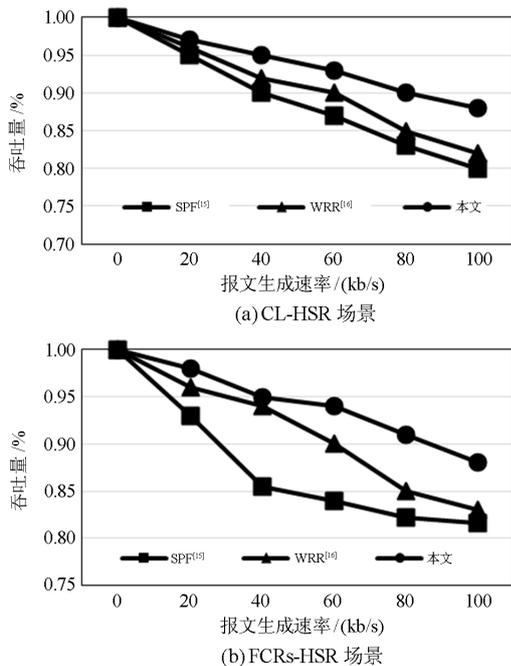


图8 不同流量调度算法下的吞吐量

Fig. 8 Throughput with different traffic scheduling algorithms

4 结论

针对现有过程层网络由于重复丢弃机制与未考虑拥塞带来的数据传输时效性差的缺点,研究了基于贪心流量优化调度与网络拓扑优化配置的方案,算例结果表明所提方案比现有方案具有更小的传输跳数与更高的服务质量。在泛在电力物联网背景下,应用本文所提方案将使数据传输时效性更强。

现有工作未考虑过程层网络中报文优先级问题,未来研究工作将着眼于考虑报文优先级的流量优化调度算法设计。

参考文献

[1] 刘洋, 马进, 张籍, 等. 考虑继电保护系统的新一代智能变电站可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 147-154.

LIU Yang, MA Jin, ZHANG Ji, et al. Reliability evaluation of a new generation smart substation considering relay protection system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 147-154.

[2] 郝唯杰, 杨强, 李炜. 基于FARIMA模型的智能变电站通信流量异常分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 158-167.

HAO Weijie, YANG Qiang, LI Wei. Abnormal analysis of communication flow in intelligent substation based on FARIMA model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 158-167.

[3] 胡国, 梅德冬. 智能变电站采样值报文安全分析与实现[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2215-2221.

HU Guo, MEI Dedong. Security analysis and implementation of sampling value message in intelligent substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2215-2221.

[4] LEE S, KANG J, CHOI S, et al. Design of PTP TC/Slave over seamless redundancy network for power utility automation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2018, 67(7): 1617-1625.

[5] HE R, DENG J, LAI L. Reliability evaluation of communication-constrained protection systems using stochastic-flow network models[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2371-2381.

[6] YANG Zhiyuan, TEN C, GINTER A. Extended enumeration of hypothesized substations outages incorporating overload implication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 65(9): 104-118.

[7] 伊洋, 胡苏凯, 周宇, 等. 智能变电站SCD文件二维校验码校验方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 113-118.

YI Yang, HU Sukai, ZHOU Yu, et al. Research on verification method of 2D check code for SCD document of intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 113-118.

[8] 周华良, 郑玉平, 杨志宏, 等. 面向智能变电站三网合一网络的PRP/HSR实现方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 222-229.

ZHOU Hualiang, ZHENG Yuping, YANG Zhihong, et al. PrP/HSR implementation scheme for three networks in one network of intelligent substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 222-229.

[9] 罗凌璐, 彭奇, 王德辉, 等. 智能变电站过程层网络监控方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 151-156.

LUO Linglu, PENG Qi, WANG Dehui, et al. Process layer network monitoring method of intelligent substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 151-156.

- [10] 佟为明, 高吉星, 金显吉, 等. 智能变电站过程层网络报文传输时间计算及抖动抑制方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 131-137.
TONG Weiming, GAO Jixing, JIN Xianji, et al. Calculation of process layer network message transmission time and jitter suppression method of intelligent substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 131-137.
- [11] 孙海波, 徐志强, 张亮, 等. 智能变电站网管系统通信业务的自动发现的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 144-149.
SUN Haibo, XU Zhiqiang, ZHANG Liang, et al. Research on automatic discovery of communication services in intelligent substation network management system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 144-149.
- [12] LIU Y, GAO H, GAO W, et al. Development of a substation-area backup protective relay for smart substation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2544-2553.
- [13] SANTOS A D, SOARES B, FAN C, et al. Characterization of substation process bus network delays[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(5): 2085-2094.
- [14] TIEN N, KIM S, RHEE J. A novel ring-based dual paths approach for reducing redundant traffic in HSR networks[J]. Computer Networks, 2016, 110(9): 338-350.
- [15] XIAO F, ZHANG Z, YIN X. Reliability evaluation of the centralized substation protection system in smart substation[J]. IEEE Transactions on Electrical & Electronic Engineering, 2017, 12(3): 317-327.
- [16] ZHANG Y, ZHANG H, WANG C. Reliability-aware low energy scheduling in real time systems with shared resources[J]. Microprocessors & Microsystems, 2017, 52(1): 312-324.
- [17] 沈奕菲, 高亮, 田鑫. 基于改进WRR算法的智能变电站站内通信队列调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 91-96.
SHEN Yifei, GAO Liang, TIAN Xin. Research on communication queue scheduling in intelligent substation based on improved WRR algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 91-96.
- [18] JING Shi, HUANG Qi, WU Jie. A novel whole-view test approach for onsite commissioning in smart substation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1715-1722.
- [19] ZHU Y, YAN J, TANG Y, et al. Joint substation-transmission line vulnerability assessment against the smart grid[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2017, 10(5): 1010-1024.
- [20] ABOMAILEK C, CAPELLI F, RIBA J R, et al. Transient thermal modelling of substation connectors by means of dimensionality reduction[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 562-572.
- [21] ZHEN L, LUO L, SHENG G, et al. UHF partial discharge localisation method in substation based on dimension-reduced RSSI fingerprint[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(2): 398-405.
- [22] 王磊, 陈青, 高洪雨, 等. 基于大数据挖掘技术的智能变电站故障追踪架构[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 84-91.
WANG Lei, CHEN Qing, GAO Hongyu, et al. Framework of fault trace for smart substation based on big data mining technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 84-91.
- [23] 杨毅, 高翔, 朱海兵, 等. 智能变电站SCD应用模型实例化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 107-113.
YANG Yi, GAO Xiang, ZHU Haibing, et al. Instantiation research on SCD application model of intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 107-113.
- [24] CHATTOPADHYAY A, UKIL A, JAP D, et al. Towards threat of implementation attacks on substation security: case study on fault detection and isolation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(6): 2442-2451.
- [25] XU Yan, LIU Jingyan, FU Yuan. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 267-276. DOI: 10.1186/s41601-018-0098-9.
- [26] CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, LI Zhihao. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of ubiquitous power internet of things[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 151-158. DOI: 10.1186/s41601-019-0128-2.

收稿日期: 2019-10-28; 修回日期: 2019-12-03

作者简介:

黎其浩(1979—), 男, 大专, 工程师, 主要研究领域为电气自动化、继电保护等;

岳杨(1981—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究领域为电气自动化、继电保护等;

蒋京辰(1985—), 男, 本科, 工程师, 主要研究领域为电气自动化、继电保护等。E-mail: fsy19881227@163.com

(编辑 葛艳娜)