

DOI: 10.7667/PSPC170886

基于改进 WRR 算法的智能变电站站内通信队列调度研究

沈奕菲, 高亮, 田鑫

(上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 智能变电站中数据通过以太网架构综合信息一体化传输网络进行共享, 及时有效的数据交互是确保智能变电站正常运行的重要环节。针对现有的数据优先级调度策略所存在的缺陷, 对传统加权轮询算法进行改进, 并将其运用于智能变电站综合数据调度中。以 220 kV 典型智能变电站为例, 在 OPNET 网络仿真软件中建立站内通信模型进行实例仿真。结果表明, 紧急情况下, 改进后的加权轮询算法可以为高实时性要求报文提供更好的服务。

关键词: 智能变电站; 加权轮询算法; IEC 61850; OPNET; 通信

Research on smart substation inner communication queue scheduling based on improved WRR algorithm

SHEN Yifei, GAO Liang, TIAN Xin

(College of Electric Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The transmission of network data through Ethernet architecture integrated information share the information in smart substation, and the timely and effective data interaction plays an important part in the protection of the normal operation of smart substation. In view of the deficiency of the existing data priority scheduling strategy, an improvement of the traditional weighted polling algorithm is proposed, which is applied in the smart substation integrated data scheduling. Taking the typical intelligent substation of 220 kV for example, this paper establishes the communication network in OPNET for instance simulation model. Simulation results show the improved weighted round robin scheduling strategy can provide a better service for the high real-time request message in emergency circumstances.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607110) and Natural Science Foundation of Shanghai (No. 14ZR1417600).

Key words: smart substation; weighted round robin algorithm; IEC 61850; OPNET; communication

0 引言

近年来, IEC 61850 通信协议的颁布及智能化电气设备、工业交换式以太网技术的快速发展为智能变电站各层间设备的数据交换以及全站数据共享提供了更广阔的途径, 且有利于简化系统中复杂的二次接线和配置的数据集内容, 降低系统运行维护的难度^[1]。与此同时, 这也意味着通信网络将贯穿整个变电站自动化保护系统, 在正常运行或故障产生情况下, 变电站相关电气量等信息的传输可靠性和实时性都必须得到保障^[2]。

目前, 智能变电站中普遍采用 100 M 以太网作

为传输媒介。而以太网作为一种面向非链接的网络, 存在资源竞争的情况, 非链接竞争的通信方式可以做到最大限度地提高通信资源的利用率^[3], 但同时却牺牲了通信的可靠性和资源的最优分配。当前, 智能变电站主要采用的是基于严格优先级 (Strict Priority Queue, SPQ) 的排队策略调度方式, 这种方式相较于无标记数据流, 在一定程度上优化了传输信道的资源分配与信道利用率^[4]。但在紧急情况下, 系统扰动产生大量突发流量可能导致网络拥塞占用, 影响报文的传输实时性, 造成网络服务质量下降。因此, 研究可以满足智能变电站内复杂通信网络并兼顾多类报文服务需求的综合调度算法对现阶段智能变电站发展具有十分重要的现实意义^[5]。

文献[6]具体阐述了智能变电站网络与 IED 设备在 OPNET 中的建模, 文献[7]运用 IEC 61850 动

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (51607110); 上海市自然科学基金项目资助 (14ZR1417600)

态数据集技术,提高了变电站数据源端维护效率,文献[8]对智能变电站合并单元可能产生异常情况的原因进行了分析与排查,文献[9-10]分析了智能变电站内传输报文种类与其对应的实时性要求,文献[11-12]提出了过程层网络报文的描述与计算模型,并进行定量研究,对智能变电站内通信的研究具有一定的工程应用价值。

在有限带宽的条件下,分组调度算法可以区别对待不同类型的数据流,并为之提供不同等级的服务。文献[13]提出了一种改进的 WRR 算法,可以更为公平地分配带宽,改善由于分组长度不同而造成的队列间实际传输优先级的不公平性。文献[14]对 WRR 调度算法运用于站内 GOOSE 报文通信进行了仿真,并证实其传输延迟特性优于现有的 PQ 调度方式。

本文根据智能变电站报文的特性,对传统的加权轮询(Weighted Round Robin, WRR)算法进行适当改进,并结合优先级队列,使其更适用于智能变电站站内报文通信。

1 智能变电站报文分析

智能变电站采用光纤以太网进行报文传输与信息交互,其报文种类复杂,且通信过程不透明、不可视,这使得变电站间隔层网络通信不可控^[15]。

依据 IEC 61850 要求,智能变电站内报文的核心内容由信息片 PICOM 组成,这些报文在内容、长度、允许的最坏情况传输时间以及安全性上的复杂程度各不相同。根据变电站和系统的活动,传输的报文类型随不同的时刻而变化。智能变电站报文按其时域特性可以分为周期性报文、随机性报文和突发性报文。周期性报文指变电站中定时、稳定出现的数据流,具有连续性强和变化量小的特点,且信息量较大,对传输实时性要求也很高,是智能变电站网络通信的主要部分。随机性报文通常由外界触发而产生,前后到达的数据具有无相关性;突发性报文是指需满足快速或中速传输要求的开关跳合闸、保护动作和时间顺序记录等突发性明显的数据流,具有报文长度短、出现时间集中的特点^[16],实时性要求最高。

按照智能变电站报文不同的实时性要求与传输机制,本文将其分为四类不同优先级,分别为突发性 GOOSE 报文、周期性采样值报文、设备状态信息报文和文件传输报文。

其中 GOOSE 报文包含命令、数据、简单报文等简单二进制编码,如“闭锁”、“跳闸”、“重合”等^[16]。一般传输于间隔层以及间隔层与变电站层之间。常规情况下,变电站自动化系统要求 IED 设备

相关功能块在接收到此类报文后必须立即做出响应。此类报文对实时性的要求最高,一般规定在 4 ms 内完成传输。周期性采样值报文由来自多个 IED 的连续的同步数据流构成,包含数字互感器和数字传感器的输出数据。主要用于合并单元向保护与测控装置传递实时采样值,依据 IEC 61850 规定可采用 80 点/周或 256 点/周的采样频率进行采样,传输时间按采样频率的不同,一般要求控制在 10 ms 内^[17]。设备状态信息报文主要传输于间隔层与变电站层之间,其产生的时刻十分重要,而传输时间要求则并不苛刻。其中,正常“状态”的信息也属于此类报文。按照变电站内要求,该报文传输时间要求控制在 100 ms 内。文件传输报文通常为携带时标的复杂报文,用于传输事件记录、慢速自动控制功能、系统数据一般显示以及读取或改变设定点的值。这类报文存在于几乎全部接口,实时性要求较低,一般要求传输时间小于 500 ms 即可。

根据不同报文对实时性的要求不同,为其分配优先级,由高到低依次为 GOOSE 报文 M1、采样值报文 M2、设备状态信息报文 M3 和文件传输报文 M4。智能变电站中,采样值报文流量较大且产生稳定,属于站内通信流量的主要构成部分。而 GOOSE 报文流量很小,正常情况下,其发包速率稳定,属于心跳发包机制^[18],但紧急情况下,会产生大量突发 GOOSE 报文,因其具有最高实时性要求,需要被立即送达,以保证系统安全与稳定。设备状态信息报文为突发性报文,具有报文长度短、出现时间集中的特点。文件传输报文则具有一定无记忆性,属于随机性报文,携带内容容量大,报文较长。针对不同报文大小与实时性要求各不相同,应充分利用通信信道的潜力,保证各类报文传输实时性与可靠性。

2 WRR 综合调度算法

在有限带宽条件下,实现电力系统信息综合传输需要解决多种信息业务综合传输中的流量冲突问题,以保证信息业务的服务质量^[19-20]。队列调度算法可以用来为需求不同的业务提供调度,进而实现分级的链路共享,并让数据业务可以公平地共享带宽^[21]。目前,基于优先级队列划分,常规使用的队列调度算法包括先入先出(FIFO)算法、严格优先级(S PQ)算法、加权公平队列(WFQ)算法和加权轮询(WRR)算法。

其中 FIFO 算法不区分业务优先级,仅根据报文到达的先后次序选择要服务的报文,不适用于变电站内复杂的通信网络。SPQ 算法优先处理高优先

级队列, 当且仅当高优先级队列为空时, 才会服务于低优先级队列, 这对变电站内多种实时性要求不一的报文传输造成了一定压力。而 WFQ 算法充分考虑了队列优先级及分组长度的因素, 在公平性、时延及时延抖动等方面都有比较好的性能^[13]; 其算法的核心与复杂性主要体现在系统虚拟时间的计算与分组虚拟结束时间的计算、储存及排序中, 因而计算复杂度无可避免, 不利于硬件实现, 在实际应用中受到了极大的限制, 不适用于高速网络设备中^[13]。

2.1 传统 WRR 调度算法

加权轮询调度算法(WRR)通过辨别队列优先级与相应权重来区别对待各种报文, 相较于 WFQ 算法更为简洁。WRR 算法通过识别帧头优先级标志, 将到达报文分配入对应的缓存队列, 并为每个队列分配一个权重 ω_i , 因而可得到相应队列获得的带宽为 $(\omega_i \cdot B) / (\sum \omega_i)$, ω_i 一般为正整数, 该值对应于每个调度周期中该队列总计发送的分组数。每个队列按其权重赋予一个等值计数器, 初值为 ω_i , 即在每个调度周期中, 调度器将为该队列服务 ω_i 个分组, 继而转入下一个队列。若当调度器访问时, 该队列为空, 则跳过本轮访问, 进入下一个队列。

图 1 显示了加权轮询调度算法的基本原理, 调度器中数据以队列的形式进行传送, 而调度器同一时刻只能为一个数据队列提供服务。当调度器服务于某一队列时, 它将用输出链路的全部带宽来完成这个队列的发送, 此后才能继续为下一个队列提供服务。

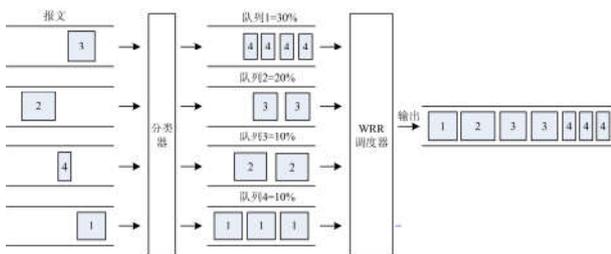


图 1 WRR 调度算法

Fig. 1 Weighted round robin scheme algorithm

然而, WRR 算法仅考虑队列优先级, 并未考虑报文长度不同而导致的队列间不公平性。当低优先级报文长度远大于高优先级报文时, 占用服务时间较长, 故障情况下, 可能对需要即刻送达的紧急报文造成额外的延迟, 对变电站安全与稳定的维护也十分不利。在此, 对原有的 WRR 算法进行一定改进, 提出一种适用于智能变电站调度的改进 WRR

算法, 提高队列之间带宽分配的相对公平性, 从而保证不同优先级报文对时延的要求, 提高通信网络的服务质量。

2.2 改进 WRR 调度算法

设参与 WRR 调度的队列个数为 k , 每个队列权重 $\omega_i = i (i = 1, \dots, k)$, 每个队列的分组长度为 L_i ; 在此将一个完整的调度周期划分为 k 个子周期, 每个子周期期间的权重为 ω_i , 即权重为 6 的队列在全部 6 个子周期中都有调度机会, 权重为 5 的队列仅在其中的 5 个子周期中有调度机会, 并以此类推, 每个子周期中满足 $a_i L_i = a_j L_j (i \neq j)$, 从而保证不同优先级队列间的实际公平性; 其中, $a_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 为整数, 表示每个子周期中第 i 个队列被调度的次数。以 $k=6$ 为例, 其调度顺序可以表示为

$$R_{\text{改进WRR}} = [6 \cdots 6 \quad 5 \cdots 5 \quad 4 \cdots 4 \quad 3 \cdots 3 \quad 2 \cdots 2 \quad 6 \cdots 6 \quad 5 \cdots 5 \quad 4 \cdots 4 \quad 3 \cdots 3 \quad 6 \cdots 6 \quad 5 \cdots 5 \quad 6 \cdots 6 \quad 6 \cdots 6 \quad 5 \cdots 5 \quad 4 \cdots 4 \quad 6 \cdots 6 \quad 5 \cdots 5 \quad 4 \cdots 4 \quad 3 \cdots 3 \quad 2 \cdots 2 \quad 1 \cdots 1]$$

此外, 由于紧急情况下, GOOSE 报文的实时性要求最高, 因此将其设为最高优先级, 并列为单独的缓冲队列, 选用传统严格优先级队列的调度方式, 其余队列则采用改进后的 WRR 算法进行调度, 如图 2 所示。这样, 即使在紧急情况下, 也可以保证快速报文及时被发送; 而其余报文按优先级分配队列, 通过改进后的 WRR 调度算法依次进行转发, 相对优先级较高的原始数据采样报文也不会被长度较长的文件传输报文等低优先级报文占用太多传输时间与带宽, 保障了各类报文的实时性与服务质量。

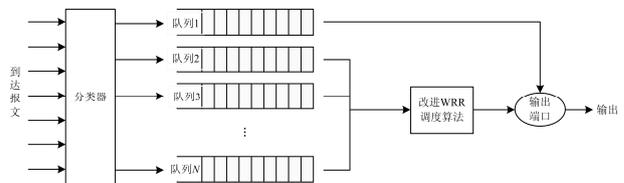


图 2 带有优先级队列的改进 WRR 调度策略

Fig. 2 An improved WRR scheduling policy with a priority queue

经过这一步改进, WRR 调法可以更加公平地为各类报文提供调度服务, 在紧急情况下, 长度较大的低优先级报文也不会过多占用带宽, 为高优先级报文的快速发送提供了良好的保障。

3 案例仿真与结果分析

3.1 案例模型

本文以国内某 220 kV 智能变电站为例，在 OPNET 软件中建立仿真模型，对比分析采用改进后的 WRR 综合调度策略与传统 WRR 调度策略在仿真时对报文延时情况的影响。将变电站间隔层划分为两个变压器间隔、两个线路间隔以及一个母线间隔。其中，线路间隔及母线间隔包含一个合并单元 MU、一台断路器、一台保护设备以及一台测控设备，变压器间隔则由一台保护设备、一台测控设备、两台断路器和一个合并单元 MU 组成。变电站各间隔内部 IED 连接于过程层交换机上，各间隔交换机通过站控层中央交换机连接，以此实现间隔之间以及与站控层的信息交互。站内交换机均采用以太网 100 M 交换机，以实现数据的储存与转发。其中突发性 GOOSE 报文与设备状态信息报文为突发性数据流，研究表明，重尾分布和 ON/OFF 模型可以较好地解释其产生的原因^[22]。采样值报文为周期性数据流，属于时间驱动型数据，可在模型中用产生周期、帧长度、最大允许时延对其进行建模。文件传输报文属于随机性数据流，在一时间段内以某一概率出现一个报文，可用泊松分布对其产生情况进行模拟。

在 OPNET 中建立智能变电站通信网络仿真模型，如图 3 所示。

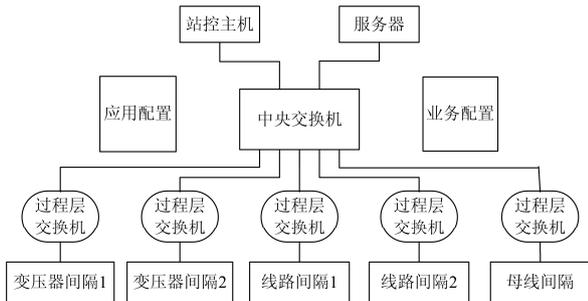


图 3 智能变电站 OPNET 仿真模型

Fig. 3 OPNET simulation model of smart substation

设线路间隔 1 发生故障，仿真该情况下智能变电站内各类报文的传输延时情况，并对比分析采用 WRR 与改进 WRR 调度策略对其延时特性造成的影响。

3.2 仿真结果与分析

图 4—图 7 为故障情况下，M1、M2、M3 与 M4 报文分别在 WRR 算法与改进 WRR 算法下的传输延时情况。

对比图 4—图 6 可以看出，改进后的 WRR 算法对于高优先报文比传统 WRR 算法有着更好的时

延性能。M1 报文的平均延时从 1.798 ms 降低到 1.387 ms，减少了约 23%；M2 报文的平均延时由原来的 2.344 ms 下降到 1.881 ms，减少了约 19.6%；M3 报文则由原本的 12.383 ms 稍有降低，减少为

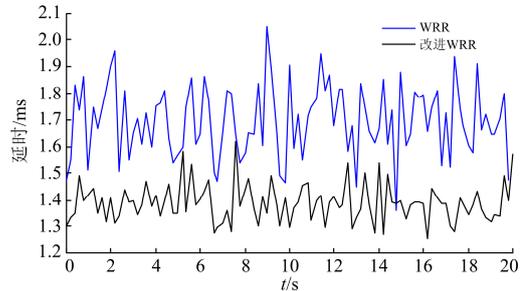


图 4 故障情况下，M1 报文的延时对比

Fig. 4 Delay comparison of M1 message in fault circumstances

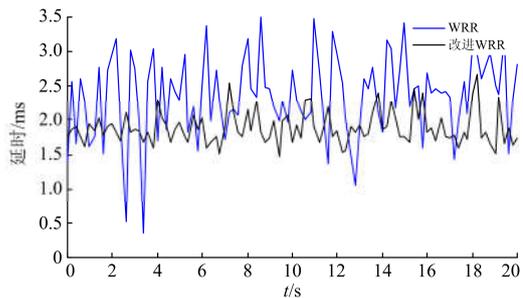


图 5 故障情况下，M2 报文的延时对比

Fig. 5 Delay comparison of M2 message in fault circumstances

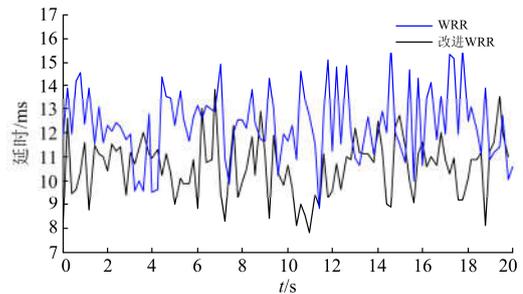


图 6 故障情况下，M3 报文的延时对比

Fig. 6 Delay comparison of M3 message in fault circumstances

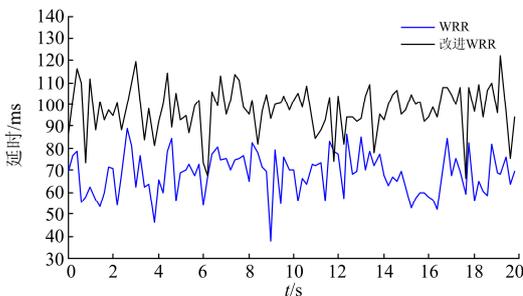


图 7 故障情况，M4 报文的延时对比

Fig. 7 Delay comparison of M4 message in fault circumstances

10.591 ms, 减少了 14.5%。这是由于在交换机交换队列中, M1 报文被列为单独队列优先进行转发, 不受其余报文长度与到达时间的影响, 从而提高了其传输时间, 降低了端到端延时; 而 M2 报文与 M3 报文则在改进 WRR 算法下保证了公平带宽, 在与低优先级报文共存的情况下仍可获得更多的传输空间, 因而提高了其转发效率。

低优先级且内容较大的 M4 报文在改进 WRR 算法下延时相比传统 WRR 算法略有增加, 这是由于在每个调度周期中, 其所获得的传输机会相对减少了, 但延时仍控制在要求范围内, 且留有较大余地。

4 结论

本文提出了一种适用于智能变电站通信网络的改进加权轮循算法, 并在 OPNET 中进行案例仿真, 对比了传统 WRR 算法与改进后的 WRR 算法对站内多类报文延时特性的影响。仿真结果验证了改进后的 WRR 调度算法提高了高优先级报文的传输效率, 有效缩短了其端到端延时, 为紧急情况下报文的快速送达提供了更为可靠的保障。但是低优先级报文在此调度算法下延时略有增加, 因此如何在保证高优先级队列实时性的同时兼顾低优先级队列的传输, 是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 谭文恕. 变电站通信网络和系统协议 IEC61850 介绍[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 8-11.
TAN Wenshu. An introduction to substation communication network and system: IEC61850[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 8-11.
- [2] 王明松, 马鸿雁. 基于组态王的变电站运行状态在线监控系统设计与应用[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 484-489.
WANG Mingsong, MA Hongyan. Design and application of running status of substation online monitoring system based on kingview[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 484-489.
- [3] GEORG H, DORSCH N, PUTZKE M, et al. Performance evaluation of time-critical communication networks for smart grids based on IEC 61850[C] // INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE, April 14-19, 2013, Turin, Italy: 43-48.
- [4] 龚石林, 王晨, 冯彦钊, 等. 基于改进加权公平队列的变电站局域网通信队列调度策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 76-81.
GONG Shilin, WANG Chen, FENG Yanzhao, et al. A smart substation LAN communication queue scheduling strategy based on improved WFQ algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 76-81.
- [5] 张俊奇, 金建东. 基于 IEC 61850 的箱式变电站智能电子设备及其预警技术[J]. 广东电力, 2016, 29(10): 49-53.
ZHANG Junqi, JIN Jiandong. Intelligent electronic equipment of box-type substation and its pre-warning technology based on IEC 61850[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(10): 49-53.
- [6] 黄明辉, 邵向潮, 张弛, 等. 基于 OPNET 的智能变电站继电保护建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 144-149.
HUANG Minghui, SHAO Xiangchao, ZHANG Chi, et al. Modeling and simulation of relay protection for intelligent substation based on OPNET[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 144-149.
- [7] 胡春潮. 基于 IEC 61850 动态数据集的源端维护技术研究[J]. 广东电力, 2016, 29(12): 57-61.
HU Chunchao. Substation data source-side maintenance based on IEC 61850 dynamic dataset[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(12): 57-61.
- [8] 嵇建飞, 袁宇波, 王立辉, 等. 某 110 kV 智能变电站合并单元异常情况分析及对策[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 255-260.
JI Jianfei, YUAN Yubo, WANG Lihui, et al. Analysis and countermeasure on abnormal operation of one 110 kV intelligent substation merging unit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 255-260.
- [9] 高吉普, 徐长宝, 张道农, 等. 智能变电站通信网络时间性能的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 144-148.
GAO Jipu, XU Changbao, ZHANG Daonong, et al. Time performance discussion for smart substation communication network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 144-148.
- [10] 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, 145.
SUN Junping, SHENG Wanxing, WANG Sunan. Study on the new substation automation network communication system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 16-19, 145.
- [11] 陈桥平, 陈志光, 黄勇, 等. 智能变电站过程层网络保温与流量分布计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 117-121.
CHEN Qiaoping, CHEN Zhiguang, HUANG Yong, et al. Calculation of distribution of message and traffic load for process bus network in smart substation[J]. Power

- System Protection and Control, 2016, 44(9): 117-121.
- [12] 凌光, 许伟国, 王志亮, 等. 基于 EPON+的高可靠性固定时延网络在智能变电站应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 89-94.
LING Guang, XU Weiguo, WANG Zhiliang, et al. Research on communication architecture of smart substation with characteristic of high reliability and fixed latency based on EPON+[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 89-94.
- [13] 李秉权, 张松, 王兆伟, 等. WFQ 与 WRR 调度算法的性能分析与改进[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(3): 316-320.
LI Bingquan, ZHANG Song, WANG Zhaowei, et al. Performance analysis and improvement about WFQ and WRR schedule algorithm[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(3): 316-320.
- [14] SIDHU T S, INJETI S, KANABAR M G, et al. Packet scheduling of GOOSE messages in IEC 61850 based substation intelligent electronic devices (IEDs)[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, July 25-29, 2010, Providence, USA: 1-8.
- [15] 刘玮, 王海柱, 张延旭. 智能变电站过程层网络报文特性分析与通信配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 110-115.
LIU Wei, WANG Haizhu, ZHANG Yanxu. Study on message characteristics and communication configuration of process layer network of intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 110-115.
- [16] 高翔. 数字化变电站应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [17] 黄新庭. 智能变电站数据流分析及其网络通信性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
HUANG Xinting. Research on data flow analysis and performance of network communication in smart substation[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.
- [18] 段雄鹰, 尹睿涵, 孟晗, 等. 基于 ARM 的 GOOSE 通信系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 130-135.
DUAN Xiongying, YIN Ruihan, MENG Han, et al. GOOSE communication system based on ARM[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 130-135.
- [19] 莫峻, 谭建成. 智能变电站过程总线通信模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1072-1078.
MO Jun, TAN Jiancheng. A mathematical model of process bus communication in smart substations[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1072-1078.
- [20] 常国锋, 李爽. 一种新的混合路由算法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2014, 42(4): 154-158.
CHANG Guofeng, LI Shuang. A new hybrid routing algorithm[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2014, 42(4): 154-158.
- [21] 穆晓霞, 范海菊, 牛振齐. 无线局域网的理论与技术研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 154-157.
MU Xiaoxia, FAN Haiju, NIU Zhenqiyi. Theory and technology of wireless local area network[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2011, 39(6): 154-157.
- [22] 张志丹, 黄小庆, 曹一家, 等. 基于虚拟局域网的变电站综合数据流分析与通信网络仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 204-209.
ZHANG Zhidan, HUANG Xiaoqing, CAO Yijia, et al. Comprehensive data flow analysis and communication network simulation for virtual local area network-based substation[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 204-209.

收稿日期: 2017-06-13; 修回日期: 2017-08-27

作者简介:

沈奕菲(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为基于 IEC61850 的智能变电站通信; E-mail: syf_sh188@163.com

高亮(1960—), 男, 教授, 研究方向为电力系统继电保护与数字化变电站;

田鑫(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与直流配电系统。

(编辑 魏小丽)