

数字化变电站信息传输时延上界计算方法

辛建波, 上官帖

(江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330006)

摘要: 针对现有基于排队论的信息传输时延计算方法的不足, 提出了基于网络演算的数字化变电站信息传输时延上界计算方法, 分析了数字化变电站内信息类型和特性, 建立了变电站内信息的漏桶模型, 引入微流和级联网络的概念, 应用网络演算理论, 推导了普遍适用、形式统一的计算时延上界的解析表达式, 据此可以在信息传输前准确判断传输时延能否满足时限要求。以一典型 220 kV 数字化变电站为例, 采用该方法得到了变电站内各种信息流的传输时延上界, 表明本方法的有效性。该方法为构建满足时延要求的数字化变电站提供了理论依据。

关键词: 数字化变电站; 网络演算; 信息传输; 时延上界

A method for calculating the upper delay of information transmission inside digital substation

XIN Jian-bo, SHANGGUAN Tie

(Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330006, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of the methods based on queuing theory, the method based on network calculus for calculating the upper delay of information transmission inside digital substation is proposed. Firstly, the characteristic of various information flows inside substation is classified and analyzed. Secondly, the leaky bucket model is established. Finally, the concept of micro-flow and connected networks is introduced, the unification of formulation of the upper delay of various information flows is derived through introducing network calculus theory. The formulas above can be used to verify whether the delay of each information flow meets constraint. Taking the case of a typical 220kV digital substation as an example, the upper delay of various information flows inside the digital substation is derived applying the method. The case study indicates the validity and feasibility of the method proposed. The method proposed provides the theoretical basis for constructing a digital substation meeting the delay constraint.

Key words: digital substation; network calculus; information transmission; upper delay

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)11-0044-05

0 引言

随着以太网技术的发展、电子式互感器、智能一次设备以及IEC61850标准的制定, 为数字化变电站的实现提供了可能。由于数字化变电站具有数据共享, 信息全面, 安装、运行、维护、升级方便, 底层数据格式相同, 设备成本低, 便于提供先进的应用功能等优点, 国家电网公司制定了未来5年内研究和推广数字化变电站技术的实施方案, 先后有20多个网、省电力公司申报了数字化变电站示范工程项目。这表明数字化变电站的实施已推进到一个新的实用的层面。

通信网络是数字化变电站的重要组成部分, 尤其过程总线取代传统的硬接线, 使得网络系统从二次延伸到一次。遵循IEC61850 标准^[1]的不同厂家的

一次和二次智能电子设备 (IED) 都将接入同一以太网网络。而且每个IED能够向网络发送任意大小和速率的数据, 多个IED发送不节制的网络流量可能会引起网络过载, 特别在紧急情况下, 由于网络流量剧增可能出现网络拥塞、流量冲突等问题, 不能保证时间紧急信息 (如采样测量与跳闸信息) 传输的时延上界, 可能由于信息丢失或传输违反时限要求, 出现大面积停电等灾难性后果。

传统分析数字化变电站信息传输时延的排队论方法^[2], 是以概率论和随机过程为基础的。采用该方法得到的是服从某种分布的随机时延, 只能得到时延的平均值和大致区间估计。但是对于变电站内的时间紧急信息而言, 仅仅得到概率时延是不够的, 还需要得到最坏情况下的时延上界。

基于以上考虑, 本文引入网络演算理论, 提出基于网络演算的数字化变电站内信息传输时延上界计算方法。其基本思想是: 根据数字化变电站内信息流

基金项目: 江西省电力公司重点科技项目 (200650601)

的到达曲线和交换机的服务曲线,计算最坏情况下各种信息流的时延上界。首先分析了数字化变电站信息流特性;建立了信息流的漏桶模型,提出了信息传输时延上界计算方法;最后以一典型数字化变电站为例,得到了最坏情况下各种信息流的时延上界。

1 数字化变电站内信息特性分析

按信息的实时性和周期性划分,可以将数字化变电站内的信息流分为四种类型:面向系统范围事件的通用对象(GOOSE)信息流 MT_1 、采样测量值(SMV)信息流 MT_2 、监控信息流 MT_3 、维护信息流 MT_4 ,其特性如表1所示。

表1 信息流的特性

Tab.1 The characteristic of information flow

特性	信息流类型			
	MT_1	MT_2	MT_3	MT_4
描述	GOOSE 信息流	SMV 信息流	监控信息流	维护信息流
通信模式	发布/订阅	发布/订阅	客户/服务器	客户/服务器
服务模型	GOOSE 模型	SMV模型	报告和记录模型	文件传输模型
周期性	突发	周期	突发	随机
实时性	硬实时	硬实时	软实时	非实时
优先级	高	次高	中	低

MT_1 主要用于传送过程层设备和间隔层设备间,以及间隔内或间隔间设备的事件驱动报文,例如,同期、联锁、跳闸信息,设备的动作信息,运行状态等。 MT_1 具有突发性和硬实时的特点。所谓硬实时是指要求在截止期完成信息传输,否则可能会产生灾难性后果。此类信息流一般要求在规定的时间内(通常为1~4 ms)内完成传送,传送的优先级是最高的。在IEC61850中, MT_1 采用基于发布/订阅机制的GOOSE服务模型,并通过特殊通信服务映射(SCSM)方法将此模型直接映射到以太网的数据链路协议上。

MT_2 主要用于传送过程层电子式传感器与间隔层设备间的周期性采样测量值。实际应用中,通常采用合并单元(MU)按周期循环地将一个间隔内的电压和电流等采样测量值传送至间隔层设备。 MT_2 的通信量大且实时性要求高。根据设定采样率的不同,传输一般要求在3~10 ms内完成。此类信息流采用基于发布/订阅机制的SMV服务模型,并通过SCSM将此模型直接映射到以太网的数据链路层。

MT_3 主要用于传送间隔层与变电站层设备间的一次设备运行状态和控制信息。为了简化分析,本文将着重对其中较为关键的告警等事件驱动信息进行研究。此类信息流具有突发性的特点,其传输时间通常为100 ms左右,允许有少量的超限,属于软实时信息。 MT_3 主要采用客户/服务器机制的报告和记录服务模型实现,并通过SCSM将此模型映射到

TCP/IP/MMS。

MT_4 主要用于传送变电站层与间隔层和过程层设备间的维护、诊断和配置等信息,具有随机性、通信量大和实时性不高的特点。此类信息流通常采用基于TCP/IP的文件传输模型实现。

2 数字化变电站内信息流的漏桶模型

传统描述通信量特性通常采用基于概率统计的建模方法,它是通过分析和预测所研究网络的信息特征、通信负载、信息分布等平均统计特性,得出与信息模型有关的量化随机参数。该方法的不足之处是,这些随机模型不能精确地描述工业设备产生的信息流,假设的信息流的到达过程与实际到达过程往往存在一定的差距。采用这种方法并不能保证变电站内信息传输的时延上界。为此,本文采用基于漏桶的信息建模方法。

2.1 基于漏桶的信息建模方法

基于漏桶的信息建模方法^[3,4]使用一个漏桶来调节离开节点的流量,漏桶的工作好比一个底部有洞的水桶,水桶底部的洞使水流能够以稳定的速率流出,其工作原理如图1所示。

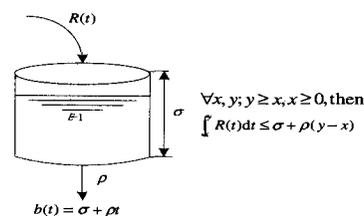


图1 漏桶的工作原理

Fig.1 Principle diagram for leaky bucket

图1中, $R(t)$ 表示 t 时刻注入网络的突发速率,

$\int_x^y R(t)dt$ 表示在 $[x,y]$ 时段注入网络的报文数; σ 表示非常短的时间间隔内连续注入到网络中的最大分组数; ρ 表示恒定的输出平均速率;

$\int_x^y R(t)dt \leq \sigma + \rho(y-x)$ 表示进入网络的信息流必须满足的突发性约束; $b(t) = \sigma + \rho$ 表示任何时间间隔 t 内,准许进入网络的流量上界。

2.2 数字化变电站内信息流的漏桶模型

采用满足突发性约束的确定性参数(σ, ρ)作为信息流的特征属性,能够精确地描述信息流的最大通信需求,但是文献[3]中并没有给出实际应用的确定性参数确定方法。为此,本文根据数字化变电站内信息流特性,提出了参数的确定方法,建立了信息流的漏桶模型。

1) 对于周期性的 MT_2 ,其模型参数可按式确定:

$$\sigma^{MT_2} = L^{MT_2} \quad (1)$$

$$\rho^{MT_2} = L^{MT_2} \times f \times N \quad (2)$$

式中： L^{MT_2} 为 MT_2 的报文长度，固定为123字节，123字节=以太网报头(26字节)+优先级标记(4字节)+协议数据单元(8字节)+ASN.1标记/长度(2字节)+块的数目(2字节)+基本数据集(46字节)+状态指示(23字节)+以太网帧间隙(12字节)， f 为电网频率， N 为每周周期采样次数。

2) MT_1 和 MT_3 是变电站特有的信息流，在确定模型参数时需要考虑以下特点：其一，采用漏桶整形器能降低信息流的突发性，使其变得更可预测，但采用漏桶整形器会带来额外延迟，因此，对于有时限要求的 MT_1 和 MT_3 ，不适合使用整形器；其二， MT_1 和 MT_3 的发生不可预测，其模型参数难以直接确定，但是考虑到我们只是想确保此类信息流在规定时间内传输，于是，可以假设最坏情况下的峰值到达速率等于平均发送速率。基于以上特点， MT_1 和 MT_3 的模型参数可以分别利用以下公式来计算。 MT_1 的参数可表示为

$$\sigma^{MT_1} = L^{MT_1} \quad (3)$$

$$\rho^{MT_1} = L^{MT_1} \times (1000 / T_{Min}^{MT_1}) \quad (4)$$

式中： L^{MT_1} 为 MT_1 的报文长度，典型值为152字节，其中报文头(76字节)，数据(26字节)，协议开销(50字节)； $T_{Min}^{MT_1}$ 为 MT_1 到达的最小间隔时间。

MT_3 的模型参数可定义为

$$\sigma^{MT_3} = L^{MT_3} \quad (5)$$

$$\rho^{MT_3} = L^{MT_3} \times \lambda^{MT_3} \quad (6)$$

式中： L^{MT_3} 为 MT_3 的报文长度，典型值为1 106字节，其中协议数据单元(1 017字节)，协议开销(89字节)； MT_3 的到达率

$$\lambda^{MT_3} = (8\% \times N_{analog} + 3\% \times N_{digital}) / s \quad [5]; \quad \text{式中，}$$

N_{analog} 为模拟量点数， $N_{digital}$ 为状态量点数。

3) 为了防止 MT_4 过分干扰其它流，在源节点采用漏桶整形器控制进入网络的速率和数量，其参数由下式确定：

$$\sigma^{MT_4} = N^{MT_4} \times L^{MT_4} \quad (7)$$

$$\rho^{MT_4} = \sigma^{MT_4} \times 1000 / T_{Max}^{MT_4} \quad (8)$$

式中： N^{MT_4} 为突发报文数， L^{MT_4} 为 MT_4 的报文长度，典型值为1 542字节，其中 IEEE802.1p 的以太网最长帧(1 522字节)，以太网帧间隙(12字节)，帧前同步码(8字节)； $T_{Max}^{MT_4}$ 为 MT_4 的最大传输延迟时间。

3 基于网络演算的时延上界计算方法

3.1 网络演算理论简介

网络演算 (network calculus) 是由 Cruz^[6] 首先

提出的，是基于最坏情况的确定性队列系统分析理论。它使用了两个确定性的信息流属性作为其参数：一是假定进入网络的信息流沿着预先设定的确定路径从源节点到达目的节点；二是假定进入网络的信息流满足突发性约束，并将此约束条件作为信息流的特征属性。前者采用 IEEE 802.1w 定义的快速生成树协议 RSTP^[7] (Rapid Spanning Tree Protocol) 可以实现；后者采用本文 2.2 节的方法，可以满足。

网络演算的理论基础为最小加代数 (Min-Plus Algebra)，其主要概念包括到达曲线、服务曲线以及最小加代数下的卷积和反卷积运算。其中到达曲线描述的是信息流的到达上界，服务曲线描述的是网络节点提供的服务特性。网络演算利用以上工具和最小加卷积代数，可得到信息流的端到端时延上界。

3.2 定义和假定

为了行文的简洁和流畅，研究这一方法之前，需要做以下定义和约定。

1) 为便于区分到达交换机的信息，引入微流的概念，所谓微流是指某源节点发送的优先级相同的比特流。于是，信息流可表示为多个微流的聚合。

2) 以任一微流 F^{MT_j} 作为研究对象，该微流可以用一个四元组 $(\sigma^{MT_j}, \rho^{MT_j}, p^{MT_j}, L^{MT_j})$ 描述，其中， σ^{MT_j} 表示微流的最大突发大小， ρ^{MT_j} 表示微流的平均传输速率， p^{MT_j} 表示微流的优先级， L^{MT_j} 表示微流的报文长度。

3) 微流从源节点传送到目的节点所经过的路径，可采用由源节点、 q 个交换机以及目的节点串接的级联网络来描述。

4) 优先级高于 F^{MT_j} 的微流集 $F_{EP}^{MT_j}$ 定义为：

$$F_{EP}^{MT_j} = \bigcup \{F^{MT_k} : p^{MT_k} = p^{MT_j}\}; \quad \text{而优先级等于 } F^{MT_j} \text{ 的}$$

$$\text{微流 } F_{EP}^{MT_j} \text{ 定义为: } F_{EP}^{MT_j} = \bigcup \{F^{MT_k} : p^{MT_k} > p^{MT_j}\}; \quad F_{EP}^{MT_j} \text{ 和}$$

$F_{EP}^{MT_j}$ 以非抢占式优先级方式接受交换机服务。而由

$F_{EP}^{MT_j}$ 和 $F_{EP}^{MT_j}$ 聚合而成的聚合流 $F_{AP}^{MT_j}$ 定义为：

$$F_{AP}^{MT_j} = \bigcup \{F^{MT_k} : p^{MT_k} \geq p^{MT_j}\}.$$

5) 优先级低于 F^{MT_j} 的微流的最大报文长度

$$\text{定义为: } L_{max}^{MT_j} = \max \{L^{MT_k} : p^{MT_k} < p^{MT_j}\}.$$

3.3 微流的到达曲线

微流 F^{MT_j} 的到达曲线是微流的到达上界，可以采用上节建立的确定性模型 (σ, ρ) 来描述，即

$$V^{MT_j}(t) = \sigma^{MT_j} + \rho^{MT_j} \times t \quad (9)$$

设与 F^{MT_j} 同优先级的微流数为 EP^{MT_j} ，比 F^{MT_j} 优先级高的微流数为 HP^{MT_j} ，于是， $F_{EP}^{MT_j}$ 和 $F_{HP}^{MT_j}$ 的到达曲线可分别表示为

$$V_{EP}^{MT_j}(t) = \sum_{n=1}^{EP^{MT_j}} V_n^{MT_k}(t), \{p^{MT_k} = p^{MT_j}\} \quad (10)$$

$$V_{HP}^{MT_j}(t) = \sum_{n=1}^{HP^{MT_j}} V_n^{MT_k}(t), \{p^{MT_k} > p^{MT_j}\} \quad (11)$$

3.4 级联网络为微流提供的服务曲线

3.4.1 级联网络中某交换机的服务曲线

首先, 推导级联网络中某交换机 $\{SW_i: 1 \leq i \leq q\}$ 为信息流 $F_{EP}^{MT_j}$ 提供的服务曲线。设该交换机输出端口的传输速率为 C_i^{out} , 则其服务曲线可表示为

$$\beta_{sw_i}(t) = C_i^{out} \times [t - 0]^+ \quad (12)$$

应用文献[8]的推论, SW_i 为聚合流 $F_{AP}^{MT_j}$ 提供的服务曲线为

$$\beta_{sw_i}(F_{AP}^{MT_j}, t) = [\beta_{sw_i}(t) - L_{max}^{MT_j}]^+ \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)中, 得

$$\beta_{sw_i}(F_{AP}^{MT_j}, t) = C_i^{out} \times [t - L_{max}^{MT_j} / C_i^{out}]^+ \quad (14)$$

根据文献[8]的推导, 信息流 $F_{EP}^{MT_j}$ 的服务曲线为

$$\beta_{sw_i}(F_{EP}^{MT_j}, t) = [\beta_{sw_i}(F_{AP}^{MT_j}, t) - V_{HP}^{MT_j}(t)]^+ \quad (15)$$

因为

$$V_{HP}^{MT_j}(t) = \sum_{n=1}^{HP^{MT_j}} \sigma_n^{MT_k} + \sum_{n=1}^{HP^{MT_j}} \rho_n^{MT_k} \times t, \{p^{MT_k} > p^{MT_j}\} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)中, 得

$$\beta_{sw_i}(F_{EP}^{MT_j}, t) = [C_i^{out} - \sum_{n=1}^{HP^{MT_j}} \rho_n^{MT_k}] \times [t - \frac{L_{max}^{MT_j} + \sum_{n=1}^{HP^{MT_j}} \sigma_n^{MT_k}}{C_i^{out} - \sum_{n=1}^{HP^{MT_j}} \rho_n^{MT_k}}] \cdot \{p^{MT_k} > p^{MT_j}\} \quad (17)$$

由上式可得, SW_i 为 $F_{EP}^{MT_j}$ 提供的服务速率及延迟可分别表示为

$$R_{sw_i}(F_{EP}^{MT_j}) = C_i^{out} - \sum_{n=1}^{HP^{MT_j}} \rho_n^{MT_k}, \{p^{MT_k} > p^{MT_j}\} \quad (18)$$

$$T_{sw_i}(F_{EP}^{MT_j}) = [L_{max}^{MT_j} + \sum_{n=1}^{HP^{MT_j}} \sigma_n^{MT_k}] / R_{sw_i}(F_{EP}^{MT_j}) \quad (19)$$

对于以FCFS方式接受 SW_i 服务的 $F_{EP}^{MT_j}$ 中所有微流, 由文献[8]得 SW_i 为微流 F^{MT_j} 提供的服务曲线为

$$\beta_{sw_i}^{MT_j}(t) = [\beta_{sw_i}(F_{EP}^{MT_j}, t) - (V_{EP}^{MT_j}(t - \theta) - V^{MT_j}(t - \theta))]^+ \quad (20)$$

式中, θ 由下式确定

$$\beta_{sw_i}(F_{EP}^{MT_j}, \theta) = V_{EP}^{MT_j}(0) - \sigma^{MT_j} \quad (21)$$

将式(10)和(17)代入式(21), 得

$$\theta = T_{sw_i}(F_{EP}^{MT_j}) + (V_{EP}^{MT_j}(0) - \sigma^{MT_j}) / R_{sw_i}(F_{EP}^{MT_j}) \quad (22)$$

将式(10)、(17)和(22)代入式(20)中, 得

$$\beta_{sw_i}^{MT_j}(t) = [R_{sw_i}(F_{EP}^{MT_j}) - \sum_{n=1}^{EP^{MT_j}} \rho_n^{MT_k} + \rho^{MT_j}] \times [t - \frac{\sum_{n=1}^{EP^{MT_j}} \sigma_n^{MT_k} - \sigma^{MT_j}}{R_{sw_i}(F_{EP}^{MT_j})} - T_{sw_i}(F_{EP}^{MT_j})]^+ \quad (23)$$

对于采用存储转发方式的交换机, 只有接收到整个完整报文帧后, 才对其进行处理。这就相当于在交换机的输出端加入了一个数据分包器, 使服务时延增加了一个报文帧的传输时间^[8]。于是, 微流 F^{MT_j} 的服务速率和服务时延参数可分别表示为

$$R_{sw_i}^{MT_j} = R_{sw_i}(F_{EP}^{MT_j}) - \sum_{n=1}^{EP^{MT_j}} \rho_n^{MT_k} + \rho^{MT_j} \quad (24)$$

$$T_{sw_i}^{MT_j} = \frac{\sum_{n=1}^{EP^{MT_j}} \sigma_n^{MT_k} - \sigma^{MT_j}}{R_{sw_i}(F_{EP}^{MT_j})} + T_{sw_i}(F_{EP}^{MT_j}) + \frac{L^{MT_j}}{R_{sw_i}(F_{EP}^{MT_j})} \quad (25)$$

3.4.2 级联网络中其他交换机的服务曲线

F^{MT_j} 经过服务曲线为 $\beta_{sw_i}^{MT_j}(t)$ 的交换机 SW_i 后, 限制其输出的离开曲线可利用以下公式得到^[8]

$$V_{out}^{MT_j}(t) = V^{MT_j}(t + T_{sw_i}^{MT_j}) \quad (26)$$

将式(9)代入式(26)中, 得

$$\sigma_{out}^{MT_j} = \sigma^{MT_j} + \rho^{MT_j} \times T_{sw_i}^{MT_j}, \quad \rho_{out}^{MT_j} = \rho^{MT_j} \quad (27)$$

对于级联网络, F^{MT_j} 到达交换机 SW_{i+1} 的到达曲线等于其离开 SW_i 的离开曲线。于是, 采用与上节类似的步骤可得到 SW_{i+1} 为微流 F^{MT_j} 提供的服务曲线。重复上述的计算, 可得到级联网络中其他交换机的服务曲线。

3.4.3 级联网络的服务曲线和延迟上界

整个级联网络为微流 F^{MT_j} 提供的全局服务曲线可以通过最小加代数下的卷积运算得到^[8], 即

$$\beta_{NET}^{MT_j}(t) = \beta_{sw_1}^{MT_j}(t) \otimes \beta_{sw_2}^{MT_j}(t) \otimes \dots \otimes \beta_{sw_q}^{MT_j}(t) \quad (28)$$

由上式可得到微流 F^{MT_j} 的服务速率 $R_{NET}^{MT_j}$ 和服务时延 $T_{NET}^{MT_j}$ 。最后, 微流 F^{MT_j} 经过级联网络的端到端延迟上界可以通过全局服务曲线和到达曲线得到, 即可由下式确定

$$D_{NET}^{MT_j} = T_{NET}^{MT_j} + \sigma^{MT_j} / R_{NET}^{MT_j} \quad (29)$$

4 案例及结果分析

4.1 概述

下面以1个双母分段、10个间隔的数字化变电站为例, 验证本文所提方法的可行性和有效性。为简化分析, 假定每个间隔由2台合并单元(MU)、1台断路器(CB)、3台隔离开关(DS)、2台接地开关(ES)、1台高速接地开关(FES)、1台间隔控制器(BCU)、1台线路保护(BPU1)、1台差动保护(BPU2)、1台断路器失灵保护(BPU3)、1台重合闸装置(BPU4)和1台间隔监测器(BMU)组成; 母线保护功能通过变电站主控单元(SMU)采集不同间隔MU的电流、电压测量值实现。以上设备通过1台变电站层交换机(SW_2)以及10台过程层交换机构成的两级树型拓扑结构的变电站以太网进行信

息交换,如图2所示。

假定:①保护和控制设备的性能级别为IEC 61850中定义的P3级,对性能级P3,要求MU的采样率为每周期(50 Hz)采样32点,传输延迟小于3 ms^[9];②所有交换机均采用存储转发方式,物理链路为全双工的100 Mbps链路;③每个端节点发送特性相同的同一类型微流,所有微流同时呈现出最坏情况;④采用恒定速率为65 kb/s,可容纳10个报文的漏桶对MT₄进行整形;⑤典型保护和控制设备中的模拟量和数字量点数分别为131和27。

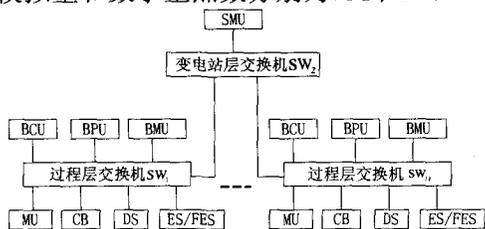


图 2 数字化变电站自动化系统结构

Fig.2 Structure of digital substation automation system

4.2 计算各种信息流的传输时延上界

1) 确定微流途经的级联网络、数目和到达曲线

本文着重研究最坏情况下变电站内信息传输的时延上界,因而只需对网络中负载最高的级联网络进行研究。根据第2节的信息流分析,本案例中母线保护与多个间隔的MU/CB/BCU/BPU/BMU之间都有信息交换,信息流分布呈现集聚的特点,大量信息汇集到变电站层的SMU,使SW₁与SW₂、SW₂与SMU间的链路成为重载链路。对由源节点、SW₁、SW₂及目的节点组成的级联网络进行分析,即可得延迟上界。根据本案例的假定可得途径SW₁的微流数目,由式(1)~(8)和式(26)可得微流到达和离开SW₁的到达曲线 $V_{in}^{MT_j}(t)$ 和离开曲线 $V_{out}^{MT_j}(t)$,如表2所示。

表2 微流数目及其到达和离开曲线

Tab.2 The analysis result of micoflow

信息流	途径SW ₁ 微流数目		到达曲线 $V_{in}^{MT_j}(t)$		离开曲线 $V_{out}^{MT_j}(t)$	
	EP^{MT_j} /个	HP^{MT_j} /个	σ^{MT_j} /Bytes	ρ^{MT_j} /Mbps	$\sigma_{out}^{MT_j}$ /Bytes	$\rho_{out}^{MT_j}$ /Mbps
MT ₁	4	0	152	0.405 3	231	0.405 3
MT ₂	2	4	123	1.918 8	454	1.918 8
MT ₃	6	6	1 106	0.106 2	1 188	0.106 2
MT ₄	15	12	15 420	0.065 0	16 652	0.065 0

2) 由表2及式(18)、(19)、(24)~(29)可分别得到SW₁、SW₂和级联网络的服务曲线 $\beta_{SW_1}^{MT_j}(t)$ 、 $\beta_{SW_2}^{MT_j}(t)$ 、 $\beta_{NET}^{MT_j}(t)$ 以及MT_j(j=1~4)的时延上界 $D_{NET}^{MT_j}$,如表3所示。

表 3 服务曲线和传输时延上界

Tab.3 Result of service curve and upper-delay

信息流	$\beta_{SW_1}^{MT_j}(t)$		$\beta_{SW_2}^{MT_j}(t)$		$\beta_{NET}^{MT_j}(t)$		
	$R_{SW_1}^{MT_j}$ /Mbps	$T_{SW_1}^{MT_j}$ /ms	$R_{SW_2}^{MT_j}$ /Mbps	$T_{SW_2}^{MT_j}$ /ms	$R_{NET}^{MT_j}$ /Mbps	$T_{NET}^{MT_j}$ /ms	$D_{NET}^{MT_j}$ /ms
MT ₁	98.64	0.17	84.19	1.01	84.19	1.18	1.20
MT ₂	96.46	0.20	47.33	2.52	47.33	2.72	2.74
MT ₃	94.01	0.77	39.15	18.1	39.15	18.87	19.1
MT ₄	92.99	18.9	29.36	683	29.36	701.9	706

5 结束语

数字化变电站受到普遍喜爱,一些建设中的问题需要大家献计献策。本文提出了一种计算数字化变电站内信息传输时延上界的方法,据此可以在信息传输前准确判断传输时延能否满足时限要求,该研究为构建满足时延要求的数字化变电站提供了理论依据。

参考文献

- [1] IEC 61850, Communication Networks and Systems in Substations: Part 1-10[S].
- [2] XIN Jian-bo, DUAN Xian-zhong. Study on Method for Determining the Buffer Size of Communication Module Inside SMU On Emergency[A]. In:IEEE-PES T&D 2003 Conference & Exhibition[C]. Dalian(China):2005.
- [3] Boudec J L, Thiran P. Network Calculus: a Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet[M]. Berlin: Spring Verlag, 2002.
- [4] 张信明,陈国良,顾钧.基于网络演算的流量整形模型[J].软件学报,2000,13(12):2225-2230. ZHANG Xin-ming, CHEN Guo-liang, GU Jun. A Traffic Shaping Framework Based on Network Calculus[J]. Journal of Software, 2000, 13(12):2225- 2230.
- [5] TR84.0.02, draft Technical Report, Network Based Automation[Z]. IEEE Technical Report, NC: Geneva, International Electrotechnical Commission, 2001.
- [6] Cruz R. A Calculus for Network Delay, part I: Network Elements in Isolation[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1991, 37(1): 114-131.
- [7] Roese J J. Switched LAN's: Implementation, Operation, Maintenance[M]. McGraw Hill, 1998.
- [8] Chang C S, Stability, Queue Length and Delay, Part I: Deterministic Queuing Networks[Z]. IBM Technical Report, RC 17708, 1992.
- [9] 徐立子. IEC61850对变电站自动化系统报文性能的要求[J]. 电网技术, 2002, 24(8):62-64. XU Li-zi. Requirement of IEC 61850 to Performance of Messages for Substation Automation System[J]. Power System Technology, 2002, 24(8):62-64.

收稿日期: 2006-11-06

作者简介:

辛建波(1970-),男,博士,主要从事数字化变电站自动化技术研究;E-mail: Mandyzhuhai@163.com

上官帖(1958-),男,教授级高工,主要从事继电保护、数字化变电站自动化技术研究。