

文章编号:1000-3673(2000)06-0070-05

变电站通信网络性能的仿真研究

谷米¹, 贺仁睦²

(1. 中国电力科学研究院农电所, 北京 100085; 2. 华北电力大学(北京), 北京 100085)

SIMULATION AND RESEARCH OF PERFORMANCE OF COMMUNICATION NETWORK IN SUBSTATION

GU Mi¹, HE Ren-mu²

(1. Electric Power Research Institute, China, Beijing 100085, China;
2. North China Electric Power University(Beijing), Beijing 100085, China)

ABSTRACT: The performance of communication network in the substation is a critical factor influencing the function of the substation automation, the reliability and speed of the network are especially important. Taking the competitive network LonWorks as example, the random behavior of network is analyzed, a simulation model of the LonWorks is found. After the authentication of the validity of the model with the practical data, a research on the network performance is carried out on the simulator, which will help to choose the network parameters, improve the transporting capacity and raise the reliability and the property of the substation automation.

KEY WORDS: communication network; network behavior; simulation model

摘要: 变电站通信网络性能是影响变电站自动化功能的重要因素, 变电站自动化对通信网络的要求主要有两个方面, 一是可靠性, 二是速度。文章以竞争性网络 LonWorks 为例, 对变电站通信网络的随机性行为进行了分析, 建立了通信网络的仿真模型。在通过与实测数据对比验证了模型的正确性之后, 利用仿真模型对变电站通信网络的性能进行了研究, 从而为选择合适的网络参数, 更好地发挥通信网络的传输能力, 提高变电站自动化的性能和可靠性提供了依据。

关键词: 通信网络; 网络行为; 仿真模型

中图分类号: TM764 文献标识码: A

1 前言

通信网络是变电站自动化的关键环节之一, 也是影响变电站当地监控系统性能的重要因素之一。当前, 变电站自动化系统一般采用以计算机网络为基础的分布式结构, 该结构一般分为两层: 间隔层和变电站层。间隔层设备(称为子站)实现一次设备的继电保护、故障录波、数据采集和控制等功能; 变电站层设备(称为主站)实现对全站的就地监控和与远

方调度中心的通信。通信网络是子站与主站之间信息交换的通道, 起着信息传送的枢纽作用。因此, 通信网络在变电站自动化中的地位是至关重要的。

变电站自动化对通信网络的要求主要有两方面, 一是可靠性, 二是速度。可靠性要求是指网络上传送的重要报文不会因各节点争发报文而发生碰撞或因其它原因而丢失, 以及报文丢失后可以通过重发等手段来保证可靠传送。速度要求是指单位时间内网络传输的信息量要满足变电站内通信, 尤其是发生故障时通信的要求。因此, 很有必要对网络的性能进行研究和评价, 然后根据现场要求来选择合适的网络, 配置网络参数, 选择适当的网络报文服务类型。这样, 一方面可以充分发挥网络的性能, 满足现场对网络性能的要求; 另一方面, 充分了解网络的传输性能, 对于分析研究整个系统的可靠性和可用性也是一个不可缺少的因素。同时, 这也可以为以后设计建造性能价格比优异的测控网络提供理论依据和设计思想。

研究网络性能的方法有许多种, 如数学建模、现场实测以及建立仿真模型等。由于变电站内的通信网络非常复杂, 网络行为具有随机性, 如果采用数学建模法来研究网络性能, 对系统作精确的描述是十分困难的, 或者虽然能建立相应的数学模型, 却因模型过于复杂庞大而根本无法求解, 而对系统进行大量简化后得出的结果又难以令人满意。结合现场硬件进行实测得出的结果比较精确, 但对变电站内的通信网络来说, 在现场进行测量研究不仅得不到运行人员的支持, 而且也很难观测到故障时的网络性

能。因此,用建立仿真模型的方法来研究网络性能就成为一种切实可行的方法。

仿真就是模仿实际系统的运行状态及其随时间变化的过程,并通过仿真运行过程的观察和统计,得到被仿真系统的参数和基本特性,以此来估计和推断实际系统的真实参数和真实性能^[1]。仿真可以直接面向所要研究的问题来建立模型,使仿真模型与实际过程具有形式上和内容上的对应性与直观性,从而建模分析人员有可能把主要精力用于深入了解所研究问题或过程本身,建立出与实际系统相吻合的仿真模型,得出令人满意的结果。对于变电站内的通信网络这样一个具有较强随机性的系统,可以通过延长仿真时间来得出统计结果,根据概率论中的大数定理,如果抽样次数足够多,那么抽样均值就会非常接近于期望的平均值,所以通过延长仿真时间得出的统计结果与现场实际应该是相符的。

目前变电站中的通信网络主要可以分为两类:非竞争性网络和竞争性网络。非竞争性网络如支持 POLLING 规约的 485 总线网,网络上只有主节点才能主动发送报文,从节点只有当主节点问询到本节点时才能发送应答报文。这种网络不会因为节点竞争使用网络而丢失报文,但是如果从节点上发生遥信变位或遥测越限时,只有下一次问询到时才能上送事故信息,因此实时性较差,只能用于系统末端中低压变电站。另一种网络是竞争性网络,各节点可以竞争使用网络,如 LonWorks 网络。非竞争性网络的网络行为随机性不强,仿真比较容易,本文主要以 LonWorks 网络为例来研究竞争性网络的行为,建立网络仿真模型,并利用仿真模型来研究网络的性能。

2 LonWorks 网络及其行为分析

LonWorks 是美国 Echelon 公司于 1993 年推出的局部网络技术, LonTalk 协议是 LonWorks 网络的通信协议, LonTalk 的介质访问子层协议在 IEEE 802.3 标准所规定的 CSMA 协议的基础上,作了许多改进,包括以下主要内容:

(1) 每个节点在发送报文前,必须先对介质进行侦听,如果介质上有数据传输,则继续侦听;如果介质空闲,则等待随机时间片间隔,如果介质仍然空闲,则立即发送报文;若介质改为忙状态(该节点等待过程中,有其他节点抢先占用介质),则重复此过程。

(2) 每个节点发送前所等待的时间间隔是 $1 \sim N \times 16$ 个随机时间片。其中, N 为网络工作量积压估计,是对当前准备发送报文的节点数的估计值。LonTalk 协议根据网络的负载动态调整 N 值。当网络空闲时, N 取 1, 每个节点发送前随机插入 $1 \sim 16$ 个时间片,平均为 8 个。

(3) 节点每次发送前先要等待一个空闲槽(idle slot)的时间,只有介质在空闲槽的间隔内持续保持空闲状态,节点才会认为介质是空闲的。这种机制避免了由于电信号的有限传播速度可能导致的网络碰撞。随机时间槽(randomizing slot)的长度依赖于信号的传播速度。对于双绞线介质,时间槽的宽度是 8 位传输时间。

(4) 为提高紧急事件的响应时间, LonWorks 网络提供了一个优先级机制。该机制允许用户为每个需要优先服务的节点分配一个优先级时间槽,在发送过程中,该节点的优先级报文将在该时间槽内被发送出去。优先级时间槽是加在普通随机时间片之前,因此,优先级节点总比非优先级节点有更快的响应时间。

在建立仿真模型之前,首先要分析 LonWorks 网络的行为模式。本文采用随机离散事件系统来描述,每一台有通信功能的保护装置以及监控计算机都被看作是 LonWorks 网的一个节点。LonWorks 网络的行为可以视为按时序展开的一组事件。这些事件导致节点与介质的状态迁移。在变电站自动化系统中, LonWorks 网络的行为主要由以下事件构成:

(1) 报文到达节点,即装置采集现场变量,产生报文。节点准备发送报文,同时网络的工作积压量增加。这里,以泊松分布来描述报文到达的发生时间。

(2) 报文开始发送。指节点争用网络成功后开始发送报文,网络状态由空闲变为忙;其他准备发送报文的节点进入等待状态。

(3) 报文发送完毕。网络由忙转为空闲,如果是本节点的最后一帧报文,则节点将进入空闲状态,否则将继续准备发送报文。同时,网络的工作积压量减少。

(4) 报文发生碰撞。指多个节点恰好在同一时间槽内发送报文。这将导致网络进入回避状态,此时任何节点都不能发送报文,造成碰撞的报文将重新发送。

(5) 碰撞结束,网络转为空闲状态,各节点可以争用网络。

由此可见,仿真 LonWorks 网络就是对报文的到达、传输、离开等事件构成的过程进行仿真,在仿真过程中记录各个参数的变化,仿真结束后通过分析仿真结果来得出所要研究的网络参数。

3 仿真程序

(1) 随机数的产生

LonWorks 的仿真涉及到两种随机数的产生。一种是随机时间槽,其取值服从 $(1, N \times 16)$ 上的均匀分布。这可以利用 C 语言的库函数来实现。另一种随机数是服从泊松分布的报文到达模式,同样可利用 C 的库函数,并经下述变换后得到。

如果报文的到达模式服从泊松分布,即在固定时间 t 内平均到达速率为 λ 的报文数 j 的分布为

$$P_j(t) = \frac{(\lambda t)^j}{j!} e^{-\lambda t}, \quad j=0, 1, 2, \dots$$

则报文到达的间隔时间 τ 将服从指数分布,即

$$F_\tau(x) = 1 - e^{-\lambda x}, \quad x \geq 0$$

由此可得其反函数

$$F_\tau^{-1}(u) = -\frac{1}{\lambda} \ln(1-u), \quad 0 < u < 1$$

于是,对于区间 $(0, 1)$ 中的任一样本值 u ,就可以得到对应的样本值 x

$$x = -\frac{1}{\lambda} \ln(1-u)$$

因此,就可以利用均匀分布的随机变量 u 来得到指数分布的随机变量样本。考虑到 $1-u$ 的分布与 u 相同,以后者代替前者,就可得到

$$x = -\frac{1}{\lambda} \ln u$$

(2) 仿真时钟的设置

现场测量方法的障碍之一就是难于在短时间内获得足够多的样本。仿真程序通过压缩、甚至取消与网络性能不相关的事件间隔,可以有效地加快这一过程。而这主要依赖于仿真时钟的设置。仿真时钟反映实际时钟的时序变化,依序处理系统内的各个事件,实现时间的推移。LonWorks 网络仿真主要关注事件发生的瞬间及其导致的状态改变。在两个相邻的事件之间,系统状态保持不变,因此仿真时钟就可以忽略这些“不活动”周期,直接推进到下一个事件。仿真时钟的推进是由事件触发的。通过给定时间或给定发送报文数的仿真运行,就可以得到网络性能的统计数据。

(3) 网络工作积压量

仿真程序在节点争用介质前查询每个节点的状态,统计出准备发送报文的节点数,并以此作为网络积压工作量的估计值来调整随机时间槽。

(4) 事件管理

仿真程序通过一系列沿时序展开的事件及其导致的系统状态迁移来模拟实际系统的运行。显然,事件的发生、持续与结束是程序的核心所在。为此,仿真程序建立了一个队列来管理系统中的全部事件。队列中记录每一尚未结束的事件的类型、发生时刻以及其他相关属性,事件按照其发生时间依次进入队列。在程序启动时,仿真时钟复位,同时第一帧报文进入队列,激发程序的处理流程。如此循环,直至满足程序的终止条件。

本文对传输速率为 78.3 kbit/s 的双绞线介质 LonWorks 网络进行了仿真。报文的有效长度为 31 B,经过其余各层的封装后,报文的长度为 43 B。报文采用非重发的无应答方式发送,优先级可选。仿真程序的流程如图 1 所示。

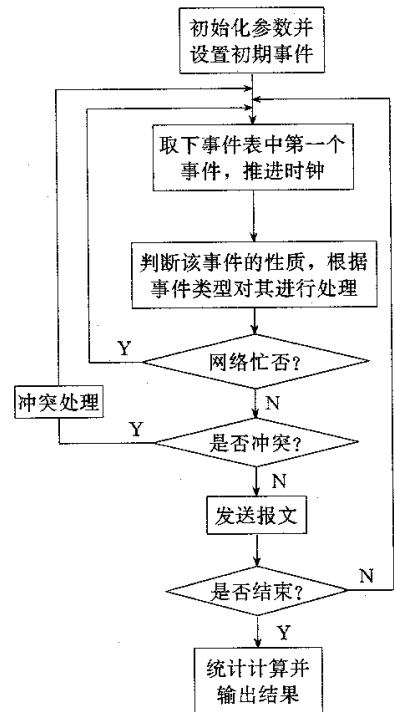


图 1 仿真程序流程图

Fig. 1 Flow chart of simulation program

4 仿真结果及讨论

就网络性能来说,所关注的焦点之一是网络的最大吞吐量。这里,最大吞吐量是指得到有效传输的报文流量,而不是发送到网上的报文流量。本文分别仿真了仅有一个节点发送报文与 30 个节点同时发

送报文的情况下,网络的吞吐量,其结果如表1和表2所示。由表中数据可以看出,在发送节点数为1和30的两种情况下,网络吞吐量均随着发送速率的增加而同步提高,但分别达到157.5帧/s和152.7帧/s后,就不再随发送速率的增加而增加。后者的最大速率值略低于前者。这是容易理解的,在多个节点同时争用介质的情况下,报文之间的碰撞将使网络的吞吐量有所降低。而仅有一个节点发送报文时,没有其他节点与其争用介质,所以不会发生报文之间的碰撞。对于优先级报文,由于直接从优先级时间槽就开始发送,而不必等待优先级时间槽之后的随机时间槽,因而提高了网络的吞吐量。

表1 单发送节点的双绞线 LonWorks 网络的流量仿真结果

Tab.1 Capacity of twisted-line LonWorks with one node by simulation

报文类型	发送速率/(帧/s)	接收速率/(帧/s)
非优先级报文	161.2	157.5
优先级报文	174.0	173.3

表2 30发送节点的双绞线 LonWorks 网络的流量仿真结果

Tab.2 Capacity of twisted-line LonWorks with 30 nodes by simulation

序号	发送速率/(帧/s)	接收速率/(帧/s)
1	30	29.8
2	48	46.7
3	78	77.2
4	117	112.0
5	133	129.0
6	142	135.7
7	151	143.4
8	156	147.0
9	162	150.4
10	173	152.5
11	187	152.4
12	234	152.7

为确保上述仿真结论的可信性,需要建立测试系统作为对照组。通过两者之间的对比分析和互相参照,能够增强所得结论的可靠性。测试系统由通过双绞线 LonWorks 网络互连的发报文 PC 机和 LonWorks 网络专用监控平台 LonBuilder 构成。另外一台 PC 机作为 LonBuilder 的输出显示,发报文 PC 机通过专用接口卡 PCLTA 连接到网上,作为网络的发送节点。通过 LonBuilder 内置的网络运行监视器,可以获得网上报文长度以及报文吞吐量等网络运行数据。发报文 PC 节点通过运行报文生成程序向 LonWorks 网络连续发送报文,同时

LonBuilder 来监视网络的运行状况,主要是网络的最大吞吐量。测试结果如表3所示。

由表3可见,单个节点发送报文时,网络的最大吞吐量与仿真得出的结果非常相近,非优先级报文与优先级报文分别相差0.32%与1.33%。考虑到网络物理特性等各种因素的影响,因此可以认为仿真与测试所得到的结果是吻合的。这也证实了仿真结果的可信性。

表3 单发送节点的双绞线 LonWorks 网络的流量测试结果
Tab.3 Capacity of twisted-line LonWorks with one node by test

报文类型	发送速率/(帧/s)	接收速率/(帧/s)
非优先级报文	157.0	157.0
优先级报文	171.5	171.0

5 网络性能研究

建立了通信网络仿真模型,就可以根据现场的要求和运行仿真程序来选择合适的网络参数及报文服务方式。

首先确定报文服务是否选用应答方式。如果选用应答方式,由于每一帧报文至少有一帧对应的应答报文,所以在相同的输入报文速率下,网络上的负载会成倍增加,致使冲突率增加。而且发送报文的节点会一直等待对方节点的应答,应答来时才进行下一帧报文的发送,若等待超时,则重发报文。这样,节点等待应答时,容易使本节点缓存区满而丢失报文。更重要的是,变电站内的报文大多是单方向传递信息用的,用于双方交换信息的报文很少,因此,变电站内的报文发送方式最好采用无应答方式,为保证其可靠性,可采用重发的服务方式。

其次,选择适当的重发次数来适应变电站的需求。选用30个节点为例,假设每个节点平均每秒发送一帧报文,这样,不重发时网络输入报文速率是30帧/s。表4中的数据就是网络在不同重发次数下的冲突率。表中的冲突率是指每一帧报文发出后被冲突的概率。报文丢失率是指经过重发,报文每次均被冲突而最终丢失的概率。例如重发一次时,网络上实际的报文输入速率是60帧/s,在这一速率下报文的冲突率为0.4%,两次发报文都被冲突的概率为 $0.4\% \times 0.4\% = 0.0016\%$ 。同理可以得出重发两次、重发三次的报文丢失率。由表中数据可以看出,重发次数越多,报文丢失率就越低。

但是,实际情况并不仅仅如此。表4中的数据仅

仅是在变电站正常运行情况下的报文发送情况。当变电站发生故障时,报文中往往会有大幅度增加,这时如果重发次数过多,容易使网络负载大于网络传输能力而造成大量报文因缓冲区不够而丢失。假设变电站故障时报文量是平时的 1.5 倍,即 45 帧/s,重发 3 次后网络上实际报文输入速率是 180 帧/s,在这一速率下,网络报文冲突率是 6%,因缓冲区不够而丢失报文的概率是 9.4%,这时,重发 3 次后报文全部被冲突而丢失的概率为 0.05%。而重发 2 次时,报文输入速率是 135 帧/s,在这一速率下,报文冲突率是 3%,重发 2 次后都被冲突的概率为 0.0027%。比较在正常和故障两种情况下的报文丢失率,可以看出重发 2 次在两种情况下的性能都不错,而重发 3 次在故障时的性能就比较差。如果故障时报文量更大,重发 3 次在故障时的性能就更差了。因此,必须正确估计变电站在正常和故障情况下的报文量,并结合变电站用户的需求来确定合适的报文重发次数。

表 4 不同重发次数下报文的冲突率和丢失率仿真结果

Tab. 4 Collision rate and loss rate under different sending time by simulation

重发次数	冲突率/%	报文丢失率/%
0	0.104	0.104 000
1	0.400	0.001 600
2	1.000	0.000 100
3	2.000	0.000 016

另外,如何选择报文的长度,怎样通过重要数据在不同报文之间的冗余来提高可靠性,以及如何确定某些重要报文的优先级等,都可以利用仿真模型并结合现场需求来确定。本文篇幅所限,不再一一赘述。

6 结语

通信网络是变电站自动化的关键环节。本文以一种竞争性网络 LonWorks 为例,分析了变电站通信网络的随机性行为,建立了通信网络的仿真模型,并通过实测数据验证了该仿真模型的正确性,然后利用该仿真模型研究了通信网络的性能,并解决了一些实际问题。

参考文献:

- [1] 熊光楞,肖田元,张燕云. 连续系统仿真与离散事件系统仿真[M]. 北京:清华大学出版社,1991.
- [2] 逯昭义,王思明. 计算机通信网信息量理论[M]. 北京:电子工业出版社,1997.

收稿日期:1999-10-25; 改回日期:2000-01-24。

作者简介:

谷 米(1974-),男,硕士,从事变电站自动化方面的研究工作;

贾仁睦(1944-),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为变电站

自动化和负荷建模等。