

基于时间敏感网络的变电站 通信网络低时延控制方法

冯宇^{1†}, 王博龙¹, 程硕¹, 倪继宏¹, 董思蒙²

(1. 国网辽宁信通公司, 辽宁 沈阳 110006; 2. 国网营口供电公司, 辽宁 营口 115002)

摘 要:以降低变电站通信网络时延为目标, 基于时间敏感网络设计了一种低时延控制方法。首先, 在变电站通信网络的站控层和过程层中, 利用时间敏感网络交换机组建时间敏感子网络, 再将不同交换机终端辨识为多个线性参数模型。然后, 利用模糊控制方法控制交换机同步时钟的误差, 根据模糊 C 均值聚类方法确定低时延控制的模糊规则前件, 利用时间敏感网络的参数辨识获取模糊规则后件。最后, 依据模糊控制前件与后件, 结合模糊控制与广义预测控制, 实现时间敏感网络时延的反馈校正。实验结果表明, 采用该方法控制变电站通信网络时延量后, 网络通信最大时延被控制在 100 μ s 以内, 最大时延抖动被控制在 20 μ s 以内, 说明该方法有效实现了设计预期。

关键词: 时间敏感网络; 变电站; 通信网络; 低时延控制; 交换机; 模糊控制方法

中图分类号: TM73

文献标识码: A

Low Time Delay Control Method of Substation Communication Network Based on Time Sensitive Network

FENG Yu^{1†}, WANG Bolong¹, CHENG Shuo¹, NI Jihong¹, DONG Simeng²

(1. State Grid Liaoning Information and Communication Company, Shenyang, Liaoning 110006, China;

2. State Grid Yingkou Electric Power Supply Company, Yingkou, Liaoning 115002, China)

Abstract: With the goal of reducing the delay of substation communication network, this paper designs a low delay control method based on time sensitive networks. Firstly, in the station control layer and process layer of the substation communication network, time sensitive network switches are used to construct time sensitive subnetworks, and different switch terminals are identified as multiple linear parameter models. Then, fuzzy control method is used to control the synchronization clock error of the switch, and fuzzy rule antecedents for low latency control are determined based on fuzzy C-means clustering method. Fuzzy rule antecedents are obtained through parameter identification of time sensitive networks. Finally, based on the pre and post components of fuzzy control, combined with fuzzy control and generalized predictive control, feedback correction of time sensitive network delay is achieved. The experimental results show that after using this method to control the delay of the substation communication network, the maximum delay of network communication is controlled within 100 μ s, and the maximum delay jitter is controlled within 20 μ s, indicating that this method effectively achieves the design expectations.

Key words: time-sensitive network; substation; communication network; low delay control; switch; fuzzy control method

智能变电站是智能电网的重要组成部分^[1]。变电站通信网络是智能变电站测量、控制保护的基

础。伴随智能变电站 IEC 61850 通信标准的不断完善,变电站对通信质量要求更高,通信网络时延直接影响着变电站的运行稳定性。

在现代化通信技术不断发展的当下^[2-4],电力通信网络从传统的固定电话通信方式,逐步发展为多元化综合通信方式。变电站通信网络的数据流量呈指数增长,常规的通信网络已难以满足过多业务量的通信实时性需求^[5-7],高性能通信网络的研究已经迫在眉睫。目前众多研究学者针对电力通信网络时延控制措施展开研究。高会生等人^[8]针对风电场通信系统数据类型多,导致数据传输实时性差的问题,构建端到端时延改进模型,分析调度周期等因素对通信时延的影响,实现网络时延的有效控制。郑伟军等人^[9]研究了电力通信网络中不同参数的业务请求排序,设置相邻节点重要性和网络拓扑属性作为网络通信的排序参数,通过最优映射链路降低通信时延。以上两种方法虽然可以实现电力通信网络时延的有效控制,但是存在控制过程过于复杂的问题,时延控制效果并不理想。

时间敏感网络是一组 IEEE 协议标准,时间敏感网络运行时包含多个协议。变电站通信网络为电力用户提供数字化、共享化、网络化的通信服务^[10]。变电站对数据采集具有低丢包率和低时延的需求,针对变电站通信网络的时间敏感网络,提出低时延控制方法,具有较高的必要性。针对变电站构建的时间敏感网络,仅存在于变电站通信网络二层数据的链路层,可以实现网络的快速组网,网络架构互联较容易。时间敏感网络是提升网络稳定性与传输效率的重要方式。

因此,针对上述传统方法在电力通信网络时延控制中存在的问题,以提高变电站网络通信的运行平稳性为目的,设计了一种基于时间敏感网络的低时延控制方法。

1 变电站通信网络低时延控制方法设计

1.1 构建时间敏感网络

变电站通信网络的数据类型以及数据量不断增加,对通信网络可靠性和安全性的需求也不断提升。变电站通信网络一般为“三层两网”的形式,其中的“三层”分别为站控层、间隔层、过程层,“两网”分别为过程层网络与站控层网络。

变电站通过将带宽限制在 30% 以内,来降低通信时延以及抖动,但是这种方式容易造成带宽浪费情况^[11]。在变电站通信网络中构建时间敏感网络,降低数据传输时延,避免数据传输抖动情况,提升电网运行的稳健性。引入具备时间敏感特性的

交换机设备,重新组建电网的通信网络架构。

在过程层和站控层中设置时间敏感网络,其中包含多个体现时间敏感网络特性的交换机。利用时间敏感网络,降低变电站通信网络不同层间的传输时延^[12],为变电站通信网络提供低时延、低抖动的服务。将时间敏感网络交换机引入变电站通信网络中,形成时间敏感网络,变电站通信网络利用时间敏感网络,为电力系统用户提供低时延抖动以及低时延的传输能力。

在变电站通信网络中构建的时间敏感网络结构图如图 1 所示。

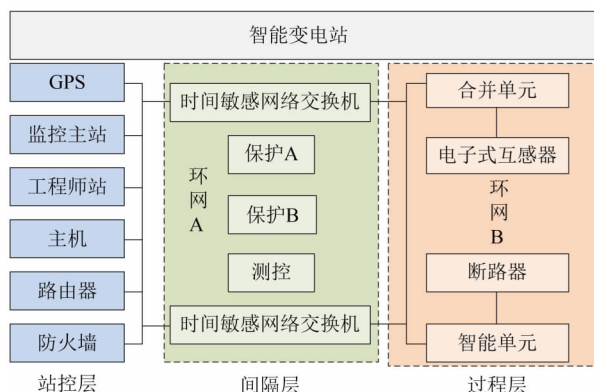


图 1 基于时间敏感网络的变电站通信网络架构

图 1 中,将时间敏感网络交换机作为通信网络的节点设备,应用于变电站通信网络中。利用时间敏感网络交换机^[13],过滤变电站通信网络中的非时间敏感数据,保护变电站通信网络中的时间敏感数据流。

时间敏感网络中,数据从发送终端传送到接收终端的传输过程如图 2 所示。

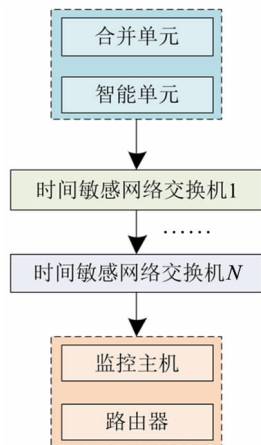


图 2 交换机传输过程示意图

通过图 2 可以看出,时间敏感网络交换机从一个发送终端传送到接收终端的传输时间表达式如下:

$$D_s = D_t + \sum_{i=1}^{n+1} D_f + \sum_{i=1}^n D_v + D_r \quad (1)$$

公式(1)中, D_t 与 D_r 分别表示发送设备端与接收设备端的发送时延与接收时延; D_f 与 D_v 分别表示固定线路传输时延以及交换机变换传输时延。其中, D_f 的表达式如下:

$$D_f = D_p + P/R \quad (2)$$

公式(2)中, P 与 D_p 分别表示数据包长度以及线路传输时延; R 表示交换机端口速率。

公式(1)中的 D_v 的表达式如下:

$$D_v = D_f + D_q \pm D_j \quad (3)$$

公式(3)中, D_q 与 D_j 分别表示交换机内部数据流排队调度时延以及芯片等原因导致的额外抖动时延; D_f 表示交换机存储转发时延。

结合以上公式,将公式(1)转化如下:

$$D_s = D_t + D_r + \sum_{i=1}^{n+1} D_p + \sum_{i=1}^n \frac{P}{R} + \sum_{i=1}^{n+1} (D_f + D_q + D_j) \quad (4)$$

分析公式(4)可知,在变电站通信网络的时间敏感网络中,通过控制交换机变换传输时延 D_v , 实现时间敏感网络端到端时延和抖动的有效优化。

1.2 时间敏感网络的时延抖动的同步误差分析

利用时间敏感网络交换机在变电站通信网络中构建时间敏感网络时,交换机作为通信网络的透明时钟。依据时钟的同步功能,交换机变换传输时延主要包括端到端透明时钟与点到点时钟两种类型^[14]。

时间敏感网络中,当交换机处于运行状态时,不可避免地会存在同步时钟误差。因此,当同步时钟精度较高时,需要及时处理时钟的同步误差,以此来降低变电站通信网络时延。

用 D_v 表示时间敏感网络的交换机变换传输时延,依据交换机同步时钟运行状况,构建 D_v 的表达式如下:

$$D_v = D_b + \epsilon \quad (5)$$

公式(5)中, D_b 与 ϵ 分别表示基础时延以及时延误差,时延误差的表达式如下:

$$\epsilon = D_1 - D_2 = \epsilon_1 - \epsilon_2 \quad (6)$$

公式(6)中, D_1 与 D_2 分别表示时间敏感网络交换机 1 与交换机 2 的同步时钟误差。

由于交换机硬件等原因,容易造成时间戳标记不准确等情况,造成时间敏感网络交换机传输时存在偶然误差 e_r , 此时的同步误差计算公式如下:

$$e = e_d/2 + e_r \quad (7)$$

除了同步误差外,在交换机时钟运行的过程中,因晶振老化以及环境因素的作用,使得时钟频率存在不稳定的情况,这会导致主、从时钟间的偏

差增大^[15]。当时间为 t 时,交换机时钟的时钟值计算公式如下:

$$C(t) = t_0 + Kt \quad (8)$$

公式(8)中, t_0 表示初始时间; K 表示时钟时间与真实时钟间的关系系数,该系数会对时钟频率产生直接影响。伴随变电站通信网络中时间敏感网络的运行,交换机时钟偏差表达式如下:

$$e_f = C_s(t) - C_m(t) = (K_s - K_m)t \quad (9)$$

公式(9)中, s 与 m 分别表示主时钟与从时钟。依据公式(9)可知,伴随通信时间的不断增加,时钟频率偏差越高,时钟的时间偏差成比例提升。

从以上分析可以看出,为了降低变电站通信网络中时间敏感网络的通信时延,需要重视同步误差对通信网络时延的影响。通过优化同步误差,获取高精度、高稳定性的同步时间值,提升变电站通信网络的低时延控制效果。

1.3 基于模糊控制的低时延控制方法

模糊控制方法是利用专家控制经验和时间敏感网络局部信息,通过随机精度逼近时间敏感网络的非线性不确定被控对象。将时间敏感网络的不同交换机终端,辨识为多个线性参数模型,在每个时间敏感网络交换机上,建立相应的线性子模型。针对不同线性模型,第 i 条规则为 $x_1 = A_1^i, x_2 = A_2^i, \dots, x_m = A_m^i$ 时,存在时钟敏感网络同步时钟模糊控制的表达式如下:

$$y^i(k) = a_{0i} + a_{1i}x_1(k - \tau_k) + a_{2i}x_2(k - \tau_k) + \dots + a_{mi}x_m(k - \tau_k) \quad (10)$$

公式(10)中, x_i 表示模糊控制的前件变量; a_i 表示模糊控制的后件参数; A_j^i 表示第 i 条规则的第 j 个隶属函数; $y^i(k)$ 表示模糊控制的输出结果。

公式(10)中 $\hat{y}(k)$ 的表达式如下:

$$\hat{y}(k) = \frac{\sum_{i=1}^m \mu^i(k) y^i(k)}{\sum_{i=1}^m \mu^i(k)} \quad (11)$$

公式(11)中, $\hat{y}(k)$ 表示利用隶属函数反模糊化处理后,模糊控制系统的最终控制输出序列; $\mu^i(k)$ 表示时间为 k 时规则 i 的隶属度。

利用模糊 C 均值聚类方法,获取变电站通信网络中,时间敏感网络低时延控制的模糊前件,通过时间敏感网络的参数辨识,获取规则后件。模糊 C 均值聚类方法是利用隶属度确定数据样本属于某中心的方法,构建模糊 C 均值聚类方法获取前件的目标函数表达式如下:

$$I_m = \min \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n \{ [\mu^i(k) x(k)]^m d_i(k) \} \quad (12)$$

公式(12)中, $d_i(k)$ 表示聚类中心与 $x(k)$ 之间的欧式距离; m 表示加权指数; $\mu^i(k)$ 表示聚类中心的隶属度。

将模糊控制与广义预测控制方法结合,实现时间敏感网络时延的反馈校正。构建时间敏感网络时延预测的状态空间观测器模型,表达式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{X}(k+1) = \mathbf{B}\mathbf{X}(k) + \Delta u(k - \tau_k) + \xi(k) \\ y(k) = \mathbf{X}(k) + \xi(k) \end{cases}$$

(13)

公式(13)中, B 表示后移算子的多项式参数; $\Delta u(k - \tau_k)$ 与 $\xi(k)$ 分别表示模糊控制系统的输入与均值为 0 的白噪声序列; $\mathbf{X}(k)$ 表示时间敏感网络的时延预测向量。

定义时间敏感网络低时延控制方法的控制性能指标表达式如下:

$$J = \sum_{j=1} [\mathbf{y}(k) - \mathbf{y}_r(k+j)^2] + \sum_{j=1} \lambda [\Delta u(k+j - \tau_k)]^2$$

(14)

公式(14)中, $y_r(k+j)$ 与 $\Delta u(k+j) - \tau_k - 1$ 分别表示输入的同步时钟参考信号以及时延控制增量; λ 表示时钟控制加权系数。

对公式(14)求导,令变电站通信网络低时延控制的性能指标最优,获取模糊规则控制的最优控制率如下:

$$\Delta u(k) = K_1[Y - f(F_k Y' + H_k U)]$$

(15)

公式(15)中, $\mathbf{Y}'$ 与 $\mathbf{U}$ 分别表示由 $y(t)$ 和 $\Delta u(k - \tau_k)$ 构成的输出矩阵与输入矩阵。

时间敏感网络伴随时间不断变化,下一时刻的最优时延控制率公式如下:

$$\Delta u(k - \tau_k) = u(k - \tau_k - 1) + \Delta u(k)$$

(16)

利用时间敏感网络实时运行获取的通信时延信息,实现变电站通信网络中,各时间敏感网络交换机同步时钟的实时优化,降低变电站通信网络时延。

2 实验与结果分析

为了验证所研究的低时延控制方法对变电站通信网络的时延控制性能,选取某城市某变电站的通信网络作为研究对象,展开如下实验。

实验设置变电站通信网络的时钟频率偏差为 15 pmm,时间敏感网络交换机时钟系统的时钟同步周期为 20 ms。设置时间敏感网络的主从时钟之间的基础时延为 15 μ s,同步时钟系统的最大时延抖动为 1 μ s,时钟运行时间为 7000 ms,交换机同步时钟系统的采样点间隔为 1 μ s。变电站通信网络依据通信时间需求,精准划分不同类型数据,变电站通信网络传输不同类型数据的通信时延要

求如表 1 所示。

表 1 变电站通信网络通信时延要求

数据类型	报文类型	时延要求/ms	优先级	带宽	周期性
中速报文	MMS	<80	中	低	周期
低速报文	MMS	<450	中	低	周期
原始数据	SV	<5	高	高	周期
文件传输	MMS	>1200	低	中	连续
时间同步	Sync	<5	中高	中	周期
控制命令	MMS	<5	中低	低	周期

统计采用本文方法对变电站通信网络进行低时延控制,不同数据流传输时的时延控制结果,统计结果如表 2 所示。

表 2 低时延控制对比数据

通信流序号	时间敏感	速率/Mbps	发包数量/字节	收包数量/字节	最大时延/ μ s	最大抖动/ μ s
1	是	800	156158	156158	3.54	0.15
2	是	700	5215841	5215841	6.52	0.16
3	是	1000	265484	265484	5.48	0.15
4	否	900	1338451	1338451	4.18	0.18
5	是	800	258469	258469	1.52	0.21
6	是	600	8545612	8545612	3.85	0.18
7	是	1000	815822	815822	8.46	0.16
8	是	800	846182	846182	9.85	0.13

通过表 2 统计结果可以看出,采用本文方法对变电站通信网络进行低时延控制后,最大时延和最大时延抖动均控制在理想范围内。变电站通信网络传输数据时,不同传输速率的最大时延和最大时延抖动均保持在较低的范围,变电站通信网络的通信性能有了明显提升。

本文方法依据时延预测结果,实现变电站通信网络低时延控制。统计采用本文方法对不同时间敏感网络交换机的时延预测结果,统计结果如图 3 所示。

通过图 3 实验结果可以看出,采用本文方法预测时间敏感网络交换机的时延,时延预测结果与实际通信时延相差较小。本文方法的时延预测结果较好,依据时延预测结果,有效提升变电站通信网络的时延控制性能。

统计采用本文方法对变电站通信网络低时延控制,传输时间敏感数据流时,变电站通信网络的时延和时延抖动控制性能,控制结果如图 4 所示。

通过图 4 变电站通信网络时延控制结果可以看出,采用本文方法控制变电站通信网络时延,可将网络通信的最大时延控制在 100 μ s 以内,将变

电站通信网络的最大时延抖动控制在 $20\ \mu\text{s}$ 以内。实验结果验证了本文方法的时延控制性能。本文方法在多条业务流环境下,仍然具有良好的时延控制性能,将时间敏感数据流的时延控制在理想范围内,具有良好的时延控制效果。

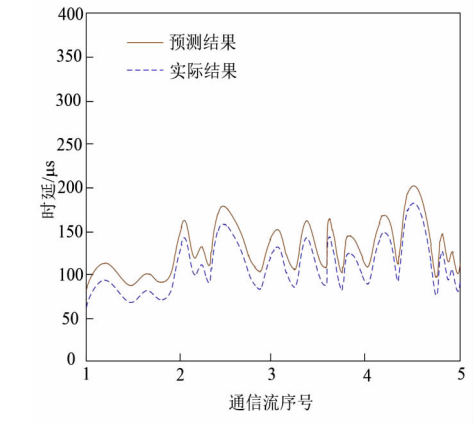
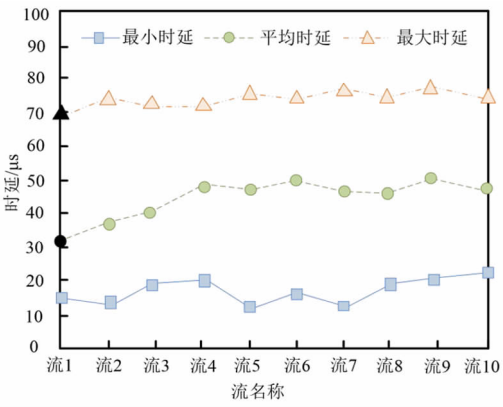
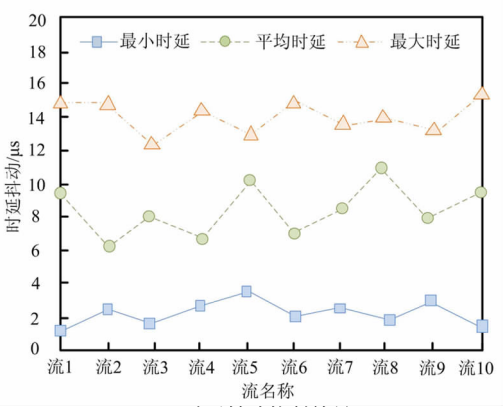


图 3 时间敏感网络交换机预测结果



(a)时延控制结果



(b)时延抖动控制结果

图 4 低时延控制性能

3 结 论

变电站通信网络面向大数据、智能化发展,为了满足变电站通信网络数据流量增长以及信息传输实时性的需求,解决网络通信实时性与通信流量

冲突的矛盾,针对变电站通信网络时延,提出了低时延控制方法。变电站通信网络的时延控制性能,决定了变电站运行的计量、控制等功能运行状况。

为了提升变电站通信网络的时延控制性能,在变电站通信网络中构建时间敏感网络,将模糊控制方法与广义预测控制方法结合,实现变电站通信网络的低时延控制。该方法可以实现变电站通信网络时间敏感数据流的低时延控制,满足智能通信网络的低时延抖动需求,为提升变电站通信网络的通信质量提供良好的基础。

参考文献

[1] 杨挺, 侯显丞, 赵黎媛, 等. 基于时-频域混合特征的变电站通信网异常流量检测方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16):79-86.

[2] 向敏, 饶华阳, 张进进, 等. 基于图卷积神经网络的软件定义电力通信网络路由控制策略[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(2):388-395.

[3] 熊楠, 饶赞, 宁楠, 等. 面向智能变电站通信网络故障自愈能力研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(8):147-154.

[4] 陈超, 张士兵, 李业. 基于网络编码的低信噪比多跳中继传输方案[J]. 电讯技术, 2021, 61(9):1151-1157.

[5] 潘成胜, 张松, 赵晨, 等. 一种基于 TCP-ARED 的网络动态拥塞控制策略[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(1):1-7.

[6] 信金灿, 许森, 张化, 等. 面向时间敏感网络的 5G 无线网增强技术研究[J]. 电信科学, 2022, 38(5):18-25.

[7] 裴金川, 胡宇翔, 田乐, 等. 联合路由规划的时间敏感网络流量调度方法[J]. 通信学报, 2022, 43(12):54-65.

[8] 高会生, 于文思, 韩东升. 基于时间敏感网络的风电场通信网时延特性分析[J]. 现代电力, 2021, 38(4):465-472.

[9] 郑伟军, 徐宏, 王征, 等. 基于电力业务时延敏感度和服务可靠性的虚拟网络映射方法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2021, 41(6):10-17.

[10] 曹志鹏, 刘勤让, 刘冬培, 等. 面向时间敏感网络的流量调度方法[J]. 计算机工程, 2021, 47(7):168-175+182.

[11] 周飞飞, 何迎利, 赵华, 等. 基于时间敏感网络的流量调度机制在智能变电站中的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19):107-114.

[12] 韩存武, 周慧, 刘蕾, 等. 基于数据的无线通信网络功率和速率控制[J]. 计算机仿真, 2022, 39(2):375-379+511.

[13] 李昊天, 盛益强. 一致性场景下的边缘网络低时延存储算法[J]. 计算机工程, 2021, 47(5):176-180+188.

[14] 徐川, 刘俊斌, 邢媛, 等. 有线无线融合的卫星时间敏感网络流调度研究[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3):1014-1023.

[15] 胡峰, 刘泽响, 徐丹妮. 时间敏感网络路径动态冗余策略研究[J]. 微电子学与计算机, 2022, 39(11):54-61.