

智能变电站稳定控制装置数字采样的设计与实现

程维杰¹, 王计林², 马刚³, 刘金生¹, 翁毅选¹

(1. 中国南方电网深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518040; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 3. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210046)

摘要:在智能变电站中, 电网安全稳定控制装置作为跨间隔设备, 需要同时接收、处理多个间隔的采样量。针对稳定控制装置“直采”模式下多间隔采样同步问题, 提出了基于本地时标的同步和重采样插值合并处理的方法。以本地时标为基准, 借助系统提供的辅助时钟, 以重采样间隔对采样数据进行同步和线性插值重采样, 并对线性插值误差进行分析。最后, 依托 FPGA+DSP 硬件平台实现了稳控装置的数字化采样, 并搭建试验系统, 从采样精度和同步有效性方面对文中提出的基于本地时标的同步重采样插值算法的时效性和可行性进行验证, 试验结果验证了基于本地时标的同步线性重采样方法能够满足稳定控制装置实际工程对实时性和精度要求。

关键词:智能变电站; 稳定控制装置; 多间隔采样; 同步采样; 线性插值

中图分类号: TM76

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)02-0173-05

0 引言

稳定控制装置(简称稳控装置)作为一种跨间隔设备, 具备跨不同电压等级多路采样、多元件控制等特点, 是电网不可或缺的组成部分^[1-3]。稳控装置数字采样方式分为“直采”模式和“网采”模式。“直采”模式即装置与合并单元直接点对点连接, 忽略光纤传输的时延, 采样延时准确可靠。“网采”模式即合并单元通过站内过程层交换机实现采样数据给不同装置数据共享, 具有接线灵活等优点^[4-5]。因过程层交换机对采样报文转发时延无法测定, 依据国家电网公司的规范要求^[6-7], 稳控装置对跨间隔采样只使用“直采”模式。文中只讨论“直采”模式下稳控装置跨间隔采样的同步、重采样问题。

如果智能变电站内合并单元出现采样间隔抖动, 将使稳控装置采样同步出现偏差^[8]。现阶段, 智能变电站跨间隔采样多采用先同步, 后插值重采样, 研究的重点多集中在插值方法以及插值误差分析^[9-13]。先同步、后插值的采样方法流程清晰, 但在同步和插值计算时需要频繁对采样进行读、写, 且要保证同步与插值计算的时序配合^[14-15]。针对稳控装置的数字化采样特点, 提出了基于本地时标的稳控装置数字化采样方法。在稳控装置接收到采样报文后, 记录报文到达时刻的本地时标, 利用该时标对采样异常、连续性进行判断, 剔除异常报文; 再利用系统提供的辅助时钟, 以重采样的时间间隔对接收到的采样报文同时进行同步判断和重

采样插值计算, 结合线性插值对整个重采样误差进行分析; 最后, 采用 FPGA (field programmable gate array) + DSP (digital signal processor) 硬件架构^[16-18], 实现了稳控装置对“直采”模式下跨间隔采样方法, 并通过搭建测试环境, 测试、并验证文中提出同步和重采样方法的时效性和可行性。

1 基于本地时标的稳控装置采样方法

1.1 同步插值采样

现阶段, 智能变电站合并单元数字采样频率为 4 000 Hz, 即每周波 80 点, 采样间隔为 250 μs 。稳控装置需要将 80 点采样转换为 24 点采样进行幅频转换以及频率分析。

基于本地时标的同步插值采样的关键是找到各个合并单元采样数据的统一基准时标, 以及下一个重采样数据的选取。同步插值采样如图 1 所示, 稳控装置在接收到合并单元 M_1 、 M_2 采样报文后, 对采样报文进行时标标定, 将合并单元 M_1 、 M_2 最新采样点作为重采样同步基准点 T_s ; 选取重采样基准点后, 在 T_s 的基础上加 833 μs 的重采样间隔, 即为下一时刻重采样时刻 T_n 。每个合并单元重采样点时标必须满足 $T_p \leq T_n \leq T_c$, 即重采样点 T_c 必须大于或等于重采样参考时标 T_n , 而重采样点的前一时刻采样点时标 T_p 必须小于或等于重采样参考时标。系统会以小于重采样间隔的中断去每个合并单元采样缓存区选取最新采样点与重采样时刻 T_n 比较, 由于查询合并单元最新采样点的时间间隔较重采样时刻小, 经多次查询必定能选取到重采样所需的采样点, 且不会丢失重采样点。

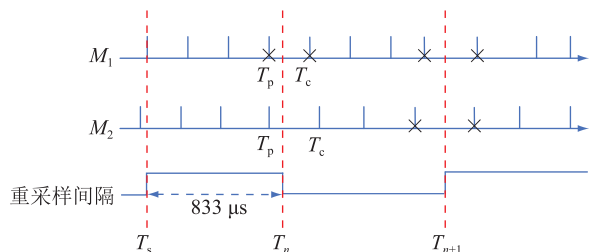


图1 同步插值采样示意

Fig.1 Synchronous sampling diagram

对合并单元出现抖动、丢帧采样异常以及异常恢复的处理也是稳控装置采样重要环节。正常情况下,合并单元发送采样报文间隔为 250 μs,允许抖动偏差在 10 μs^[7]。在进行同步插值前,稳控装置会根据本地时标判断合并单元采样报文抖动以及丢帧,前后两帧报文的时间间隔 Δt (单位为 μs)有以下情况:

$$\begin{cases} \Delta t \leq 10 \\ 480 < \Delta t < 520 \\ \Delta t \leq 240 \parallel (260 \leq \Delta t < 480) \\ \Delta t \geq 520 \end{cases} \quad (1)$$

利用式(1)中的时间差对采样报文进行抖动、丢帧判断,若 Δt 满足式(1)的公式 1,说明报文正常,无需做任何处理;若 Δt 满足式(1)的公式 2,则接收的报文的前序丢失,需要进行插值补全;若 Δt 满足式(1)的公式 3,则接收报文存在抖动;若 Δt 满足式(1)的公式 4,则报文丢失超过 2 帧。式(1)的公式 3,4 属于采样异常,需要将采样点丢弃,丢弃的采样点将导致重采样无法同步,需要等待一段时间。采样异常有偶发性和持续性 2 种情况,为了减少异常恢复的等待时间,文中采用动态时间监测的方法,即稳控装置出现采样异常时,恢复采样等待时间为前一次等待间隔的 2 倍,直至采样异常消失。

1.2 插值误差分析

目前,在计算采样插值中使用的插值算法有 Lagrange 插值、Newton 插值、最小二乘法、线性插值等^[13]。在工程应用中,低次插值多项式被经常使用,其中,一次多项式插值即线性插值多项式,二次插值多项式的图形为抛物线。一般采用线性插值算法对丢失数据进行插值补偿,如式(2):

$$f(t) = f(t_1) \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} + f(t_2) \frac{t - t_2}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中: f(t) 为待插值时刻的采样值; f(t₁) 为 t₁ 时刻的采样值; f(t₂) 为 t₂ 时刻的采样值。对丢失点进行插值计算时,式(2)选用丢失点的前一点和后一点,可以将式(2)简化成式(3):

$$f(t) = \frac{f(t_1) + f(t_2)}{2} \quad (3)$$

如图 2 所示,采用线性插值后得到的采样点与实际值存在一定的误差。假设实际采样值曲线为: f(t) = A cos(ωt + ψ), 通过对式(3)进行替代,可以得出插值误差为:

$$\Delta f(t) = A \cos(\omega t + \psi) [1 - \cos(\omega \Delta t)] \quad (4)$$

其中, Δt 为采样间隔。为了便于逻辑计算,需要将 80 采样点进行位 24 点的重采样计算,重采样点需满足如下公式:

$$r_n = n \frac{N_1}{N_2} \quad (5)$$

式中: N₁ 为采样频率; N₂ 为重采样频率; n 为重采样次数。依据式(5)可计算出以 80 转 24 点重采样,一个周波 24 次重采样过程中只有 8 个点不需要进行插值,其余点都需要插值计算,则一个周波插值累加误差为:

$$\Delta y = \sum_{i=0}^{i=16} \Delta f(i) \quad (6)$$

其中, Δf(i) 为式(4)中第 i 次插值误差,通过迭代,最终一个周波的重采样误差为:

$$\Delta y = A \sum_{i=0}^{i=16} \cos(\omega t + \psi) \cos(\omega \Delta t) \quad (7)$$

通过式(7)可以得出,重采样的误差与采样间隔有关。

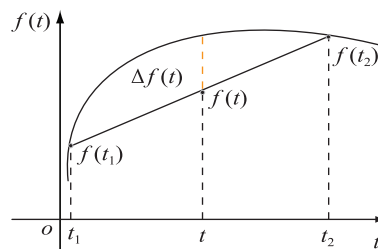


图2 插值采样示意

Fig.2 Interpolation sampling diagram

2 系统实现

稳控装置数字化采样采用基于 FPGA+DSP 硬件架构,如图 3 所示。前端 FPGA 用于对采样报文预处理和本地时标的设置,DSP1 用于对稳控装置数字化采样同步和重采样计算,并将采样结果映射到采样单元供 DSP2 进行逻辑计算。该架构可提供 6 个采样接口,能够满足稳控装置同时接收来自 6 个不同合并单元的采样报文,适应多种跨间隔采样类型,例如多间隔采样方式下的 2 路 3/2 接线,或 3 路电流、电压分开采样等。

如图 4 所示,稳控装置以小于 250 μs 的中断间

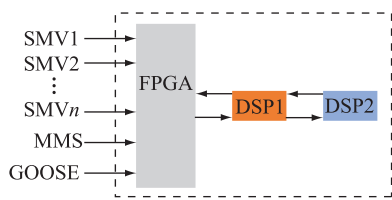


图3 采样模块硬件架构

Fig.3 Hardware architecture module

隔读取数据接收缓存区的采样数据,并对采样报文进行解析,丢帧、错误、乱序检查,并对丢帧数据进行线性插值计算,并将采样数据存入采样缓存区中。同时,稳控装置以 625 μs 的重采样间隔对所有采样数据进行同步、重采样插值计算,将重采样后的数据存入二级采样缓存,供 DSP2 进行逻辑计算。

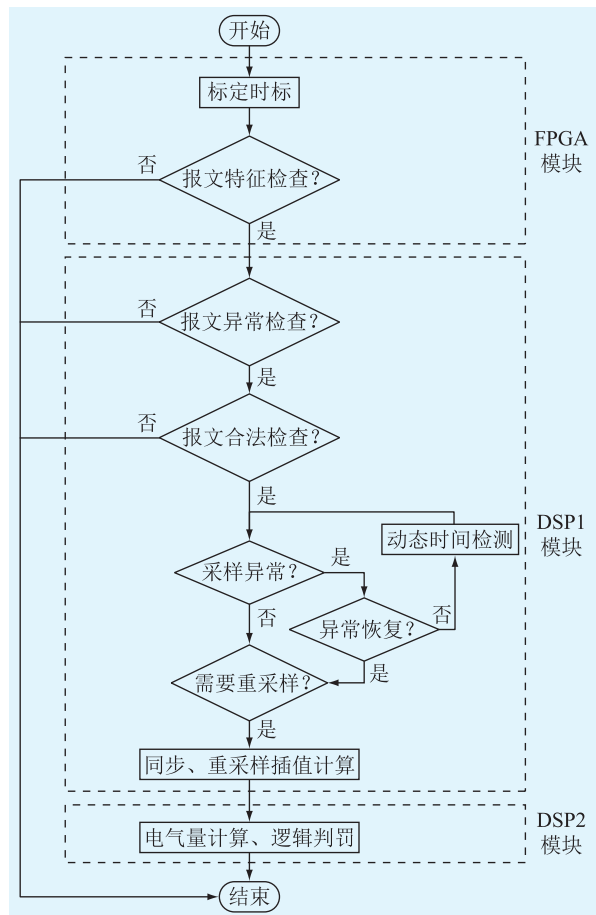


图4 软件设计流程

Fig.4 Flow chat of software design

利用前端 FPGA 的高速可并行计算特点,对采样报文精选甄别、过滤和标定本地时标,将标定后的采样数据依据订阅合并单元控制块存入采样数据缓存供 DSP1 使用。DSP1 集中对采样数据依据标定时标进行采样连续性、采样异常处理以及采样数据的同步和插值重采样计算;同时,采用插值数据缓存的二级缓存方式,使采样数据不会因采样速

率不同导致覆盖、丢失;最后,将插值重采样后的数据提交至 DSP2,供其进行稳控策略的逻辑计算。利用 FPGA+DSP1 的嵌入式分布式架构,能够均衡各个模块的计算负载,保证了稳控装置采样精度和稳控控制策略的实时响应。

3 试验验证

为了验证文中提出的同步及插值重采样方法的准确性和时效性,依据 GB/T7261—2008 继电保护和安全自动装置基本试验方法、继电保护和安全自动装置的 DL/T860 通信测试方案分别对采样同步和精度两方面进行验证,具体的试验架构如图 5 所示。2 台继电保护测试仪用于模拟不同合并单元对装置施加基于 IEC 61850-9-2 规约的采样量 (sampled value, SV)。

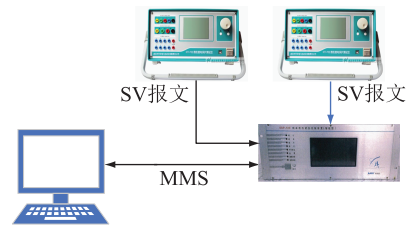
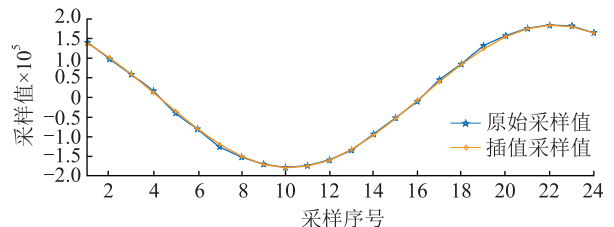


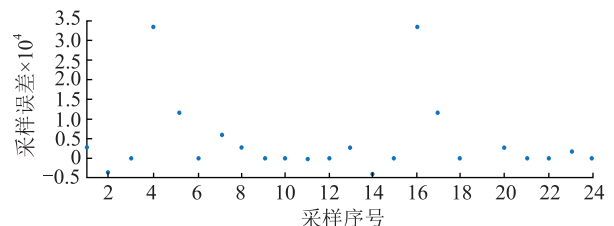
图5 测试系统架构

Fig.5 Architecture of test system

继电保护测试仪采用 1:1 000 变比随机发送不连续丢 2 帧报文,测试结果如图 6 所示,通过对比采样原始值以及重采样值,其中最大相对误差为 0.03%,满足稳控装置对采样精度的要求。



(a) 采样对比比例



(b) 采样误差统计

图6 测试结果对比

Fig.6 Comparison of test results

为了验证文中提出的同步、插值重采样方法不受合并单元失步影响,采样方法的有效性,测试系统修改继电保护测试仪的采样报文发送间隔以模

拟现场合并单元失步的情况。同时,与采用采样报文序号 smpCnt 作为基准的同步采样比较,试验结果如图 7 所示。

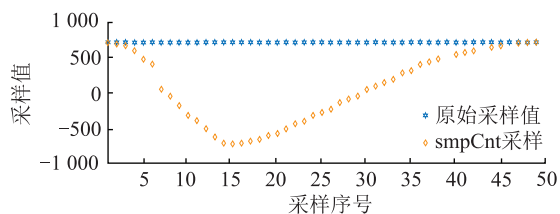


图 7 同步采样方法对比结果

Fig.7 Comparison results of synchronous sampling methods

修改采样报文的发送间隔,若以 smpCnt 作为同步采样依据,采样有效值的计算不受影响,但由于采样间隔改变,使电流、电压存在一定的相位差,随之时间的推移,相位差会越来越大,从而导致采样计算功率存在偏差。以文中提出的以本地时标作为同步采样的基准,对未同步的点进行插值计算,能够保障电流、电压相位同步,功率计算不受影响。

4 结语

针对稳控装置的采样特点,提出并实现了的基于本地时标同步重采样的插值计算方法,该方法利用本地时标,对“直采”模式下多间隔采样进行同步重采样,避免了因合并单元失步,导致稳控装置出现采样偏差。利用 FPGA+DSP 的嵌入式硬件架构,均衡各功能模块计算负载,确保了稳控装置数字采样的实时性。通过对稳控装置采样精度、同步采样对比测试,验证了文中提出的基于本地时标的同步重采样插值计算能够解决稳控装置多间隔采样同时采样的时效性。

针对“网采”模式过程层交换机网络延时问题,现阶段研究的重点在对交换机网络延时的测定,主流的做法利用基于 IEC 1588 协议的同步机制,以及利用锁相环来标点采样报文在经交换机转发后的延时。如果过程层交换机能够对采样报文转发的延时进行准确标定,并将延时累加至采样延时中,文中提出的同步重采样插值方法也可以适用于“网采”模式。

本文得到深圳电力有限公司科技项目(090000-KK52170077)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 宋锦海,宣筱青,朱开阳,等. 基于 IEC61850 的安全稳定控制装置方案设计[J]. 电力系统自动化,2010,34(12):72-75. SONG Jinhai, XUAN Xiaqing, ZHU Kaiyang, et al. Security and stability control device for digital substation based on IEC

61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12):72-75.

[2] 叶振风,杨立斌,任建峰,等. 智能变电站稳定控制装置 SV、GOOSE 异常处理分析[J]. 电子技术应用,2014:248-250. YE Zhenfeng, YANG Libin, REN Jianfeng, et al. Analysis of abnormal processing of SV and GOOSE of intelligent substation stability control device[J]. Electronic Technology Application. 2014:248-250.

[3] 叶振风,宋景海,李秋华,等. 嵌入式 Linux 在数字化变电站实时采样单元中的应用[J]. 电力系统自动化,2010,34(10):109-112. YE Zhenfeng, SONG Jinghai, LI Qiuhua, et al. Application of embedded Linux in real-time sampling unit of digital substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10):109-112.

[4] 姚志强,吴艳平,徐歆,等. 面向智能电网的主厂站一体化关键技术探讨[J]. 电力系统自动化,2017,41(8):179-185. YAO Zhiqiang, WU Yanping, XU Xin, et al. Exploration of key technologies in integration of dispatching center and substation for smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8):179-185.

[5] 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):151-155. LUO Linglu, PENG Qi, WANG Dehui, et al. Monitoring method of process level network in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11):151-155.

[6] 智能变电站低频减载装置采购标准:Q/GDW 13219.1—2014[S]. 北京:国家电网公司,2014. Purchasing standard of low frequency load shedding device in intelligent substation: Q/GDW 13219.1—2014[S]. Beijing: State Grid Company, 2014.

[7] 智能变电站继电保护技术规范:Q/GDW 441—2010[S]. 北京:国家电网公司,2010. Technical specification for intelligent substation relay protection: Q/GDW 441—2010[S]. Beijing: State Grid Company, 2010.

[8] 侯连金,章坚民,金乃正,等. 变电站过程层与 SMV 安全传输的网络攻击检测与取证设计[J]. 电力系统自动化,2016,40(17):87-90. HOU Lianjin, ZHANG Jianmin, JIN Naizheng, et al. Design of cyber-attack detection and evidence taking of substation process layer and SMV secure transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17):87-90.

[9] 吕航,陈军,杨贵,等. 基于交换机数据传输延时测量的采样同步方案[J]. 电力系统自动化,2016,40(9):124-128. LYU Hang, CHEN Jun, YANG Gui, et al. Synchronous sampling method based on measurement of switch data transmission delay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9):124-128.

[10] 冯亚东,李彦,王松,等. IEC 61850-9-2 点对点采样值传输在继电保护中的实现与应用[J]. 电力系统自动化,2012,36(2):82-85.

- FENG Yadong, LI Yan, WANG Song, et al. Realization and application of peer to peer IEC 61850-9-2 sampled value transmission in digital substation protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 82-85.
- [11] 刘伟良, 李辉, 欧阳帆, 等. 智能变电站继电保护采样数据同步方法[J]. 湖南电力, 2013, 33(1): 31-33.
- LIU Weiliang, LI Hui, OUYANG Fan, et al. Synchronization method of sampling data for relay protection of intelligent substation [J]. Hunan Electric Power, 2013, 33(1): 31-33.
- [12] 丁泉, 李帅. 智能变电站重采样应用研究及其线性插值法误差分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 132-136.
- DING Quan, LI Shuai. Application study on resampling in smart substation with error analysis of linear interpolation [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 132-136.
- [13] 闫志辉, 胡彦民, 周丽娟, 等. 重采样移相技术在过程层 IED 中的应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 64-66.
- YAN Zhihui, HU Yanmin, ZHOU Lijuan, et al. Application of resample phase shifter technique in process layer IED [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 64-66.
- [14] 赵家庆, 徐春雷, 高宗和, 等. 基于分布式同步方法的智能变电站采样值组网技术 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24): 60-65.
- ZHAO Jiaqing, XU Chunlei, GAO Zonghe, et al. A networking technology for sampled values in smart substations based on distributed synchronization method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 60-65.
- [15] 张言苍. 智能变电站网络采样同步新技术 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 143-147.
- ZHANG Yancang. Network sampling synchronization method for smart substation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 143-147.
- [16] 张雷, 张国, 邱亚琴. Lagrange 插值的改进算法研究及误差分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 66-68.
- ZHANG Lei, ZHANG Guo, QIU Yaqin. Research and error analysis of an improved Lagrange interpolation algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 66-68.
- [17] 周华良, 郑玉平, 姚吉文, 等. 面向智能变电站二次设备的网络报文管控技术 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 96-100.
- ZHOU Hualiang, ZHENG Yuping, YAO Jiwen, et al. Network packet control technology for secondary equipment's in smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 96-100.
- [18] 沈峻. 用 FPGA 实现的具有过滤报文功能的 Mac 在电力系统中的应用 [J]. 电子世界, 2014(23): 69-70.
- SHEN Jun. Application of Mac with filtered message function in power system using FPGA [J]. Electric World, 2014(23): 69-70.

作者简介:



程维杰

程维杰(1982),男,学士,高级工程师,从事电力系统安稳分析与控制相关工作(E-mail:chengweijie@sz.csg.cn);

王计林(1985),男,硕士,工程师,从事电力系统自动化相关工作;

马刚(1984),男,博士,副教授,研究方向为新能源发电并网技术、综合能源系统。

Stability control device digital sampling in smart substation

CHENG Weijie¹, WANG Jilin², MA Gang³, LIU Jinsheng¹, WENG Yixuan¹

(1. China Southern Power Grid Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518040, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3. NARI School of Electrical

Automation and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: In smart substation, the stability control device as a cross-interval device needs to receive and process a plurality of spaced sampling quantities simultaneously. Aiming at the problem of multi-interval sampling synchronization in "direct sampling", a synchronization and resampling interpolation combining processing method based on local time scale is proposed. The message time stamp is used as the stability control device in the "direct sampling" for multi-interval sampling synchronization and resampling reference. With the auxiliary clock, the sampling data is synchronized, resampling by linearly interpolated and analyzed the interpolation error. Finally, the digital sampling of the stability control device is realized by FPGA+DSP hardware platform, and the experimental system is built. The timeliness of the local time-scale based synchronization interpolation algorithm proposed in this paper is analyzed from the aspects of sampling accuracy and synchronization effectiveness. The feasibility is verified. The test results verify that the synchronous linear resampling based on local time scale can meet the real-time and accuracy requirements of the actual engineering of the stability control device.

Keywords: smart substation; stability control device; cross-interval sampling; sample synchronized; interpolation algorithm

(编辑 钱悦)