

基于 consensus 滤波器的新型电压监测仪的设计

颜秉勇, 张鹏浩, 赵贺, 李行素, 谢圣

(华东理工大学 化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室, 上海 200237)

摘要: 在进行深入分析 consensus 滤波器原理的基础上, 提出了一种新的电压监测仪设计方法: 首先将数模转换器在各个时刻测量的电压有效值看做一个小世界网络模型 G 中的一个节点; 由于测量的电压信号容易被电网中的随机噪声所污染, 通过 consensus 滤波器算法进行滤波, 使得数模转换器测量的信号最终趋近于一个稳定的数值; 仿真结果表明, 该方法可以有效的还原被噪声污染的电压信号, 而且即使在某一个时刻数模转换器出现故障失灵, 所测量的数据也不受影响, 仿真结果和实际应用表明了文章所提出方法的有效性和可行性。

关键词: 电压监测仪; 随机噪声; consensus 滤波器; 小世界网络

Design of a Novel Voltage Monitoring Device Based on Consensus Filter

Yan Bingyong, Zhang Penghao, Zhao he, Li Xingsu, Xie Sheng

(East China University of Science and technology, Ministerial Key Laboratory of Advanced Control and Optimization for Chemical Processes, Shanghai 200237, China)

Abstract: A novel voltage monitoring device is designed by analyzing the theory of consensus filter. Firstly, a small world networked model is selected as complex network to consensus filter. Then treating the data of AD measured in every cycle time as a node of a small world network and use the consensus filter to filter the measured voltage. The simulation results show the proposed method can give an estimation of the polluted voltage signal and can filter even in some mutation condition. This can illustrate the feasibility and effectiveness of the proposed approach.

Keywords: voltage monitor; random noise; consensus filter; small world network

0 引言

近年来, 随着国家十二五规划提出的智能化电网建设的深入, 各类工程系统的复杂性增加, 系统的可靠性和安全性已经成为保障经济效益和社会效益的一个关键因素, 因此各种测量和故障

数据诊断的理论与方法的研究, 受到了广泛的重视, 并得到了迅速的发展^[1-11]。在供电系统部门, 对于电能质量的分析和考核是极为重要的, 电能质量是供电企业从事经营、生产活动的重要决策依据, 也是衡量一个供电企业效益的重要指标。随着计算机技术和远程通信技术的发展和日臻完善, 出现了许多智能化的抄表设备, 改变了过去基于 IC 卡的抄表方式。做到足不出户, 不需要抄表员到现场抄表, 就可以读取各种电能质量参数, 大量地节省了人力、物力资源, 又可避免人力抄表所带来的误差。但是, 现场电网电压的波动频繁, 各种高频噪声干扰对于电压测量的准确性的影响一直是关注的焦点内容之一。现在许多厂家的电压监测仪产品, 是根据一分钟内电压的平均值作为测量的有效值, 来进行计算的。在电网电压波动较小的情况下, 可以很好的计算出电压有效值。但是对于周期性的, 或者谐波干扰较为严重的场合, 电压监测仪计算的精度就会受到很大的影响, 特别是在一些三次谐波影响较大的情

况下。

本文根据以往电压监测仪存在的缺点, 提出了一种基于 consensus 滤波器的改进的新型电压监测仪, 可以显著提高电压监测的精度, 加快运算的速度, 克服了传统监测仪的缺点。更为重要的是, 即使出现大幅度的电压波动, 新型的检测仪也可以有效滤除随机噪声的干扰, 给供电部门进行电能质量考核提供了有效的依据。

1 系统功能与模块设计

传统的电压监测仪具有如下主要功能: 采集被测电压的瞬时值、电压谐波的总畸变率、各次谐波的含有率以及当前时刻, 同时还需要完成各种统计功能, 计算本日(本月)的电压合格率及合格时间、超上(下)限率及超上(下)限时间、最大(小)值及最大(小)值出现的时间、平均电压及运行总时间、停电次数、失电时刻及上电时刻等。同时, 上位机系统进行数据招测时, 电压监测仪还需要使用短信或者 GPRS 的方式将数据上传到服务器中, 供用户查询使用。目前比较流行的电压监测仪分为短信型和 GPRS 型。本文所设计的新电压监测仪主要由信号隔离模块、信号调理模块、数据采集与滤波模块、单片机处理模块、通讯模块、显示模块、人机交互界面等几个模块组成。系统主要结构组成框图如图 1 所示。

信号隔离模块主要将待测的 0~700 V 范围内的交流电压转换为 0~2 mA 的交流电流信号, 完成信号的隔离, 以保障电压监测仪采样系统的安全。然后, 将 0~2 mA 的交流电流信号输入到信号调理模块中, 将信号由交流电流转换为 0~150 mV 的交流电压信号, 经过滤波电路后, 输入到 AD 芯片中。AD 芯片将 0~150 mV 的交流电压信号转换为数字量, 通过 SPI 接口输入给单片机, 单片机完成信号的采集与滤波算法

收稿日期: 2014-08-01; 修回日期: 2014-09-30。

基金项目: 华东理工大学交叉学科与重大项目培育基金(WJ1313004-1, H200-4-13192); 国家大学生创新实验项目; 国家青年自然科学基金(51407078)。

作者简介: 颜秉勇(1980-), 男, 山东枣庄人, 博士, 讲师, 主要从事检测技术与自动化装置方向的研究。

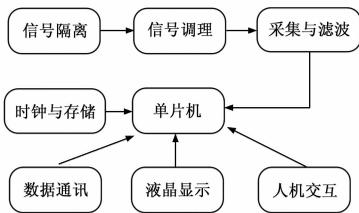


图 1 电压监测仪系统结构图

处理后，通过液晶将瞬时电压显示给用户。同时，单片机根据当前采样值，完成电压的统计工作。判断是否最大电压或者最小电压，如果是最大电压或者最小电压，还需要记录下来此时发生的时间。然后，判断是否超上限或者超下限，并将系统运行总时加 1，并保存到 EEPROM 芯片中，以供用户查看。与此同时，如果外部有按键按下或者接收到无线通讯命令，单片机通过中断响应各种操作，以便完成相应功能。

以上介绍了电压监测仪系统各个模块的设计思路和主要功能。由于电网电压的波动和各种随机干扰的存在，使得采集到的瞬时电压的准确性受到很大影响。而电压信号的采集和滤波，是电压监测仪设计过程中的重点内容之一。因此，本文将重点介绍数据采集与滤波模块，完成电压信号的采集和处理，并通过高压直流输电系统对所设计的电压监测仪的采集与滤波模块进行仿真和验证。

2 基于 consensus 滤波器的电压计算

近年来，由于协调控制具有组成灵活方便，可以协调各个子节点的控制状态等优点，引起了广大学者的研究兴趣，并且取得了丰富的研究成果^[12-13]。下面根据文献 [12] 提出的 consensus 滤波器的算法来设计电压监测仪系统中电压采集与滤波模块的算法。具体的 consensus 算法原理可以参考文献 [12]。

实现选取 consensus 滤波器中使用的复杂网络拓扑结构，以小世界网络模型 G 做为 consensus 滤波器中各个节点的连接方式。假设各个节点之间的权值连接为随机数， $A = \{a_{ij}\}$ 为小世界网络 G 的关系拓扑矩阵，并令 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 为小世界网络中各个节点的状态。由于随机噪声的干扰，假设在时刻 t ，电压监测仪进行硬件电路滤波和通过 AD 芯片多次采样计算后的电压有效值赋值给小世界网络模型中的各个节点，此时小世界网络中各个节点的状态 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 的值为当前采集的电压有效值。如果将 t 时刻的采样值直接输出，由于受到各种随机噪声的干扰，所测量的电压有效值往往会偏离实际值，给测量造成误差。以往的处理方式是采集一分钟的电压有效值，做平均值处理，当做此时电压的采样值。这样处理得到的电压值往往含有较大的测量误差，而且在谐波严重的场合，测量结果偏离实际值较大。为了提高测量的精度，采用公式 (1)^[12] 所示的 consensus 滤波器算法来提高测量精度。

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) + \sum_{j \in J_j} a_{ij} (u_j(t) - x_i(t)) \quad (1)$$

其中： a_{ij} 代表选取的小世界网络的权值矩阵里面的元素， $x_i(t)$ 表示小世界网络中各个节点的状态， $u_j(t) (j = 1, \dots, n)$ 为各个节点测量的瞬时电压有效值，即 $x_1(t) = u_1(t), x_2(t) = u_2(t), \dots, x_n(t) = u_n(t)$ 。通过 consensus 滤波器后，各个节点的状态将会达到 consensus 状态 $u(t)$ 。 $u(t)$ 为各个节点最

终达到 ϵ -consensus 时的状态，即最终滤波后输出的电压有效值。这样计算出来的电压有效值 $u(t)$ 可以过滤随机噪声的干扰，而且不会受到高频噪声的干扰。即使在 3 次谐波干扰严重的情况下，也会保证相当高的测量精度。

新型电压监测仪的 consensus 滤波器算法的设计步骤为：

1) 初始化系统，包括 AD，串口通信参数，小世界网络模型参数，consensus 滤波器参数，无线通信模块 (GSM 或者 GPRS) 等等。

2) 在时刻 t ，多次测量电压的有效值 $u_j(t) (j = 1, \dots, n)$ ，并暂存单片机的 RAM 区域内。

3) 定时器中断，判断是否 1 分钟时间到。如果到达 1 分钟时间，则根据暂存在 RAM 区域内的数据，根据公式：

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) + \sum_{j \in J_j} a_{ij} (u_j(t) - x_i(t))$$

计算小世界网络模型中各个节点的状态。

4) 各个节点达到 consensus 状态后，取各个节点的加权值作为滤波器输出结果，即做为当前测量的电压有效值。

5) 在下一个时刻，重复 2) ~ 5) 步。

3 系统仿真模型的建立

为了对所设计的电压监测仪进行性能测试，采用国际大电网会议在 1994 年提出的双极远距离架空线单极等值参数模型^[14]，系统结构图如图 2 所示。

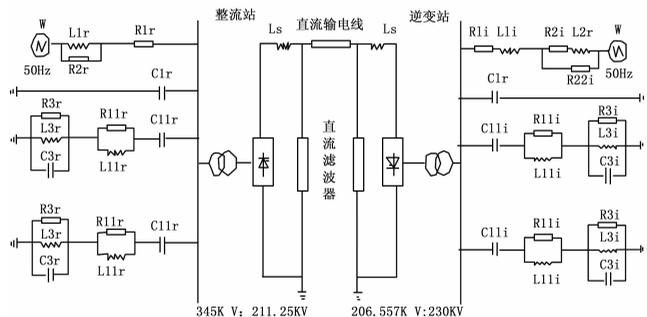


图 2 HVDC 标准模型

基于图 2 的模型，经过仿真实验研究，已经证实可以模拟实际 HVDC 系统的各种电量参数，得到与实际相符的结果。这里采用仿真软件 EMTDC/ PSCAD4.01 建立研究系统模型，系统参数为 12 脉冲，500 kV，1 000 MW，50 Hz。借助 EMTDC/ PSCAD 元件模型库，构造出主接线图，输入元件参数。仿真结果数据保存成 Matlab 可以识别的格式，然后通过调用 Matlab 函数进行处理。

为了验证所设计的滤波算法的可行性和有效性，将新型的电压监测仪安装到整流侧的输入电压上，假设输入电压为 $U_a(t), U_b(t), U_c(t)$ 。由于电网电压的波动，测量过程中会不可避免的引入各种干扰噪声。假设系统运行正常的情况下，整流侧 A 相电压 $U_a(t)$ 的有效值为 200 V。系统没有随机噪声干扰的时候仿真结果如图 3 所示。为了研究方便起见，引入能量为 0.1 的白噪声作为随机干扰信号。有噪声干扰情况下的电压测量曲线如图 4 所示。对比图 3 和图 4 可以发现，如果采用传统的电压监测仪进行测量，由于随机噪声的干扰，A 相的电压波形曲线被引入的随机噪声干扰所埋没，因此测量的电压有效值的精度就会大大降低。

根据本文所设计的新型电压监测仪滤波算法, 采用文献 [15] 中提出的网络拓补结构, 如图 5 所示。网络中的节点个数为 200 个, 每个节点之间的连接状态为随机连接, 而且每个节点的初始状态值为 $[0, 1]$ 之间的随机值。在 $0 \sim 60$ s 内, 采用由 200 个节点组成的网络拓补结构来做为 consensus 滤波器的结构图, consensus 滤波的输出曲线波形如图 6 所示。图 6 中的每条曲线代表网络拓补结构图中的一个节点的状态。经过公式 (1) 的 consensus 滤波器进行滤波之后, 每个节点的状态达到状态一致, 输出曲线如图 7 所示。通过对比图 3、图 4 和图 7 可以看出, 使用本文所提出的方法测量高压直流输电系统整流侧 A 相电压的精度大大提高, 而且方便使用单片机实现所 consensus 滤波算法。高压直流输电系统整流侧 B 相和 C 相测量的方法和原理同 A 相类似, 由于篇幅所限, 此处不再累述。

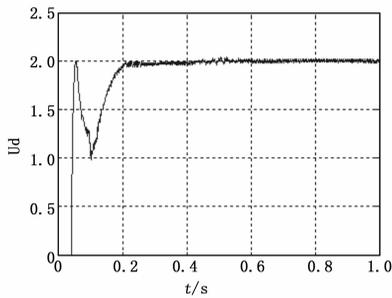


图 3 正常情况下整流侧 A 相电压有效值波形

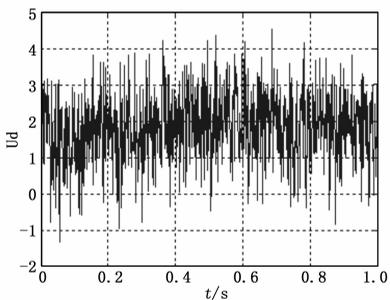


图 4 含有随机噪声干扰时整流侧 A 相电压有效值波形



图 5 网络拓补结构

新型电压监测仪系统已经成功应用到了多个供电部门的电网电压监测中。图 8 所示为采用短信形式读取的整点电压的波形图。从图 8 可以看出, 经过 consensus 滤波器对测量的电压值进行滤波之后, 精度大大提高, 满足供电部门对于测量电压精度的要求。同时, 根据 consensus 滤波器输出的电压有效

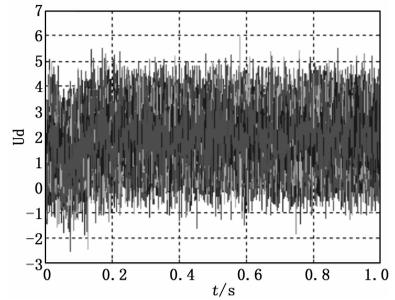


图 6 每个节点的状态曲线

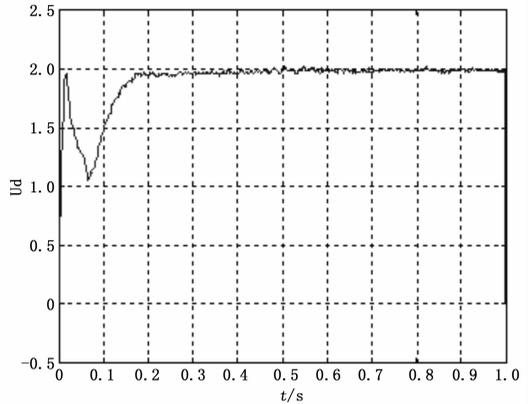


图 7 consensus 滤波器滤波结果

值计算出来的电压谐波含量的精确度也得到了提高。这些为供电部门对于供电质量的评估起到了很好的参考作用。

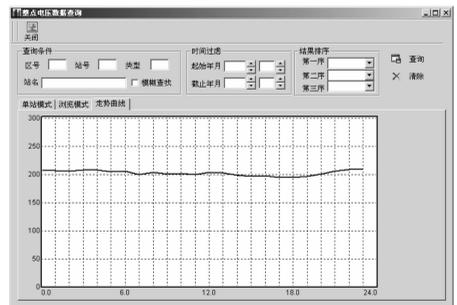


图 8 日电压曲线图

4 结语

本文根据 consensus 滤波器的原理, 设计了一种新型的电压监测仪。该监测仪最大的特点是在测量线路电压受到随机噪声干扰的时候, 可以有有效的还原系统电压的有效值, 从而提高测量精度。而且, 方便使用单片机实现所提出的方法, 具有较强的实用性。同时, 对于突变的测量值, 可以有有效的滤除。仿真结果和实践应用表明了本文所提出方法的可行性和有效性。

参考文献:

[1] 洪晓芳, 王玉振. 一类变时滞饱和和不确定系统鲁棒 H_{∞} 滤波器设计 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29 (10): 1245-1252.
 [2] Yao L N, Qin J F, Wang H. Design of new fault diagnosis and fault tolerant control scheme for non-Gaussian singular stochastic distribution systems [J]. Automatica, 2012, 48 (9): 2305-2313.

ZoomOutFin 用于完成一些指定操作, 例如隐藏一些窗体, 或者显示一些窗体。重绘函数 PrepareMemDC 用于在缩放过程中的窗体显示重绘。

3) 具备多种测试功能随意重组:

万用测试仪集 9 种仪器功能于一身, 具有仪器资源的自动或手动配置能力; 每种仪器功能既可单独使用, 也可并行工作。用户可根据测试需要, 既任意组合现有仪器功能, 也可以额外增加选件选配其它仪器功能, 万用测试仪均可以灵活多变地适应这种仪器自定义功能。

图 7 是常用的一种“5 合 1 组合测试功能”呈现的仪器工作界面, 五种功能包括: 数字多用表、射频信号源、任意波形发生器、数字示波器、频谱分析仪。其中, 射频信号源、任意波形发生器属于信号激励模块, 在完成参数设置后, 模块可以在应用软件不参与的情况下完成信号输出功能; 而数字多用表、数字示波器、频谱分析仪功能独立性体现在内部模块独立完成信号测试并缓存数据, 应用软件采用中断触发机制来获取

并显示测试结果。

3 结束语

将 PXI 仪器模块的灵活性和台式仪器的便携性结合于一体的^[10]万用测试仪, 最大限度的利用了 PXI 模块的现有资源, 快速实现台式仪器的功能组合和更新, 凭借其性价比高、体积小、重量轻等众多优势, 不但可为被测设备的现场测试提供有效保障, 而且将大大减少仪器资源的占用量, 极大地降低保障设备或系统的购置成本, 同时, 一体化的万用测试仪也利于维修保障人员的现场携带和使用。万用测试仪必然在工业生产、民用航空和科研测试等领域呈现出良好的市场发展前景。

参考文献:

[1] 于劲松, 李行善. 下一代自动测试系统体系结构与关键技术[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13 (1): 1-3, 17.
 [2] 种 山, 吴昱程, 王凯让. 合成仪器体系架构与关键技术研究[J]. 宇航计测技术, 2011, 31 (1): 7-10.
 [3] 方葛丰, 黄珍元, 宋 斌. 合成仪器技术的发展及应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2011, 16 (5): 595-597, 612.
 [4] PXI Systems Alliance, PXI Hardware Specification [S]. Revision 2.1, February 4, 2003.
 [5] Nagal C, Evjen B, Glynn J, 等. C# 高级编程 (第 6 版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
 [6] PXI Systems Alliance, PXI Software Specification [S], Revision 2.1, February 4, 2003.
 [7] 史贤俊. 基于 NET 的 PXI 总线平台软件架构设计 [J]. 电子测量技术, 2011, 34 (6): 68-72.
 [8] 童红兵. 组件技术发展与应用前景 [J]. 宿州教育学院学报, 2012, 15 (1): 137-140.
 [9] 闫宇晗, 常 鑫. 在 C# 中用 GDI+ 实现图形动态显示 [J]. 计算机技术与发展, 2003, 16 (12), 116-118.
 [10] 黄盛霖, 沈聪辉, 孙伟超, 等. 下一代自动测试系统的核心: 合成仪器系统 [J]. 电子测量技术, 2011, 34 (5): 64-67.

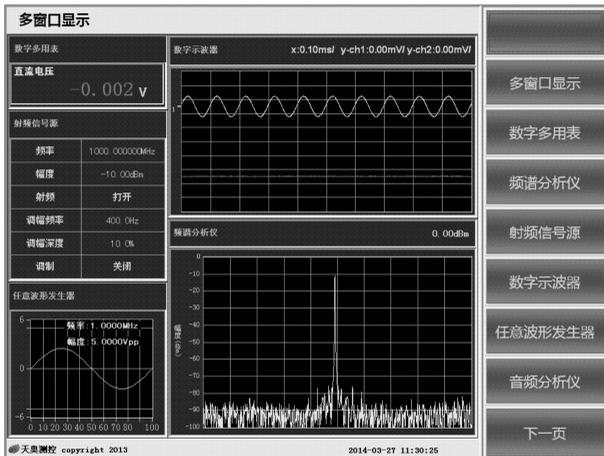


图 7 万用测试仪“5 合 1 组合测试功能”界面

(上接第 1815 页)

[3] 牛尔卓, 王 青, 董朝阳, 等. 马尔可夫跳变系统的鲁棒故障检测与时域优化 [J]. 控制与决策, 2014, (2): 379-384.
 [4] Mozaffari-Kermani M, Azarderakhsh R. Efficient fault diagnosis schemes for reliable lightweight cryptographic ISO/IEC Standard CLEFIA benchmarked on ASIC and FPGA [J]. IEEE Transactions on Automatic Control. 2013, 60 (12): 5925-5932.
 [5] Mohammed Chadli, Ali Abdo, Steven X. Ding. H- / H ∞ fault detection filter design for discrete-time Takagi - Sugeno fuzzy system [J]. Automatica, 2013, 49 (7): 1996-2005.
 [6] Zhang S G, Pattipati K R, Hu Z, Wen X S, Sankavaram C. Dynamic coupled fault diagnosis with propagation and observation delays [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 43 (6): 1424-1439.
 [7] Su Y F, Huang J. Cooperative adaptive output regulation for a class of nonlinear uncertain multi-agent systems with unknown leader [J]. Systems & Control Letters, 2013, 62 (6): 461-467.
 [8] Arun T. Vemuri, Marios M. Polycarpou, and Amt R. Fault diagnosis and fault-tolerant control in linear drives using the Kalman filter [J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 2013, 59 (11): 4285-4292.
 [9] Xu C H, Li J, Zhang P, at al. ESO-based fault diagnosis and fault

- tolerant for incipient actuator faults [A]. Guiyang; Control and Decision Conference (CCDC) [C]. 2013, 143-152.
 [10] Yoo S J. Distributed adaptive containment control of uncertain nonlinear multi-agent systems in strict-feedback form. system control letter [J]. Automatica, 2013. 49 (5): 1304-1309.
 [11] Lizarralde F, Antonio C L, Liu H, et al. Adaptive visual servoing scheme free of image velocity measurement for uncertain robot manipulators [J], Automatica, 2013, 31 (2): 297-300.
 [12] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 49 (9): 1520-1533, September 2004.
 [13] 颜秉勇, 田作华, 吕冬梅. 一类非线性随机时滞系统的故障诊断 [J]. 化工自动化及仪表, 2007, 1 (2): 12-15.
 [14] CIGRE Working Group 14. 02. The CIGRE HVDC Benchmark Model- A New Proposal with Revised Parameters [J]. Electra, 1994, (157): 61-64.
 [15] Olfati-Saber R. Distributed Kalman Filter with embedded consensus filters [A]. IEEE Conference on Decision and Control & European Control Conferencel [C]. vol. 8, no. 1, pp. 8179-8184, Dec, 2005.