

基于 IIR 低通滤波器的快速正弦电压有效值新算法

蔡克卫, 王宁会*, 李国锋

(大连理工大学 电子信息与电气工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对 Vehicle to Grid 充电系统, 在比较全周期采样法、导数法以及迭代法求正弦电压有效值的基础上, 提出基于 IIR 低通滤波器的快速计算正弦电压有效值的新方法. 该算法对一个电压采样值进行平方计算, 得到一个含有直流分量的交流信号, 随后对该信号进行 IIR 低通滤波, 滤除直流以外的一切交流信号, 得到直流分量, 即电压最大值的平方的一半, 亦即电压有效值的平方, 从而得到电压有效值. 这一过程可以保证滤波后得到的直流分量不含有任何高频信号, 并且, 只需一个电压采样值就可以计算得出电压有效值, 相对于前 3 种方法更加快速、便捷, 具有更强的抗扰能力. 利用 Matlab/Simulink 建立 Vehicle to Grid 充电系统模型, 运用新算法求电压有效值, 结果达到预期效果.

关键词: V2G; 电压有效值; IIR 低通滤波器; 导数法; 全周期采样法

中图分类号: TM131 **文献标志码:** A

0 引言

随着我国汽车工业的快速发展, 人民生活水平的日益提高, 私家车的数量也在逐步增长, 从而, 汽车造成的环境问题以及能源消耗问题就越来越突出^[1]. 环境与能源问题已经成为世界汽车工业发展的两大主题, 汽车的可持续发展也成为我国亟待解决的问题, 绿色新能源纯电动汽车必将成为我国乃至世界汽车工业发展的重要选择. Vehicle to Grid (V2G) 技术, 是描述电动汽车与电网互联的一个桥梁, 可实现将闲置的汽车电能反馈电网, 实现电池能量的双向流动.

Vehicle to Grid 充电系统一般采用三相全桥整流、逆变平台, 同时结合基于 d 、 q 旋转坐标的 SVPWM 算法^[2-3], 对电动汽车进行充、放电, 实现能量的双向流动. 当 d 、 q 坐标转换为 abc 静止坐标时, 电压有效值需要参与运算, 并且, 充电系统的过压、欠压保护和数值显示等都与电压有效值密切相关, 因此, 电压有效值计算的快速与准确性, 能够直接决定 Vehicle to Grid 充电系统性能及其运行的可靠性. 本文采用低通滤波器原理, 求取正弦电压有效值, 只需采集一个电压值就可以

计算得到有效值, 从而有效提高求取有效值的效率以及可靠性.

1 有效值计算方法

一个周期电压信号, 在其周期内, 有效值计算公式为

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \quad (1)$$

式中: U 为交流电压有效值; u 为交流电压瞬时值; T 为交流电压周期.

假设电压信号为正弦交流电压信号, 则

$$u = U_m \sin(\omega t) \quad (2)$$

其中 U_m 为交流电压最大值, ω 为交流电压角速度. 将式(2)代入式(1)得

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_m^2 \sin^2(\omega t) dt} = \\ &= \sqrt{\frac{U_m^2}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} dt} = \\ U_m &\sqrt{\frac{1}{2T} \left(\int_0^T dt - \int_0^T \cos(2\omega t) dt \right)} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \end{aligned} \quad (3)$$

收稿日期: 2012-04-10; 修回日期: 2013-03-19.

作者简介: 蔡克卫(1984-), 男, 博士生, E-mail: caikw0602@live.cn; 王宁会*(1954-), 男, 研究员, 博士生导师, E-mail: ninghuiw@263.net.

由式(3)可以看出,正弦交流电压有效值与交流电压最大值密切相关.

下面逐一分析几种有效值计算方法.

1.1 全周期采样法

全周期采样法,是通过数字处理芯片的 A/D 采样模块对正弦信号进行全周期采样,并在采样过程中对采集数据进行比较,在一采样周期结束后得到电压最大值 (U_m),从而得到电压有效值 (U).

利用全周期采样法得到的电压最大值有时并不是真实的电压最大值,由图 1 可以看出,当每周进行 n 次采样时,由于采样点过于稀疏,电压最大值位于第 i 个采样点与第 $i+1$ 个采样点之间,并不能够被正确采集到.为了解决这一问题,增加每周采样次数到 $N=2n$,只有当每周采样次数足够多时,才可以得到准确的电压最大值,如图 2 所示.

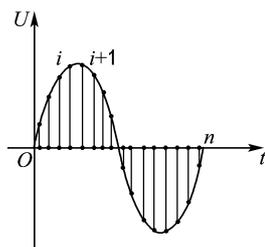


图 1 稀疏采样

Fig. 1 Sampling sparsely

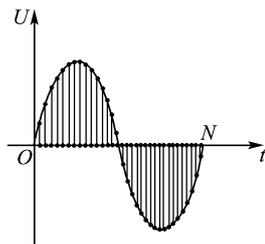


图 2 密集采样

Fig. 2 Sampling intensively

该方法不仅需要经过整个周期采样后才能取得电压最大值,进而求取有效值,而且可靠性低,必须通过增加周期采样次数,牺牲采样处理时间,来提高得到数据的准确性.其具有采集的数据量大,动态性能低,失真率高等缺点,一般不适用精度、实时性要求高的系统.

1.2 导数法

比较全周期采样法的缺点及其局限性,文献[4]提出一种基于导数法的快速电压有效值算法.假设 u_0 为电压的瞬时值, f 为电压信号频率,其解析表达式为

$$u_0 = U_m \sin(\omega t) = U_m \sin(2\pi ft) = \sqrt{2} U \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

对式(4)进行求导运算可得

$$u'_0 = 2\pi f U_m \cos(2\pi ft) = 2\sqrt{2}\pi f U \cos(2\pi ft) \quad (5)$$

结合式(4)、(5),可得

$$U = \sqrt{\frac{u_0^2 + (u'_0/2\pi f)^2}{2}} \quad (6)$$

设采样周期为 T_s ,在 t_1 时刻的采样瞬时电压为 u_1 ,在 $t_1 + T_s$ 时刻的采样瞬时电压为 u_2 ,可以得到瞬时电压的导数表达式为

$$u'_1 = (u_2 - u_1)/T_s \quad (7)$$

由式(6)可以得到

$$U_1 = \sqrt{\frac{u_1^2 + (u'_1/2\pi f)^2}{2}} \quad (8)$$

即根据 2 个采样点就可以快速求出输出电压的有效值.相比全周期采样法,该方法大大减少了周期采样数据点,并且提高了可靠性,有效地提高了动态响应.

在实际的 Vehicle to Grid 充电系统运行环境中,含有较大的谐波干扰,其中以高频谐波为主,连续 2 个相邻的采样值往往不能够准确反映系统的电压值,特别地,当正好采集到干扰值时,利用该方法求出的有效值将与实际值有较大的偏差,因此该方法抗干扰能力较差.

1.3 迭代法

针对全周期采样法与导数法的不足,文献[5]提出了基于迭代法的快速电压有效值算法.假设 u_i, u_{i+1}, u_{i+2} 为相邻时刻的采样瞬时电压,其表达式为

$$u_i = U_m \sin(\omega t) = U_m \sin(2\pi ft) = \sqrt{2} U \sin(2\pi ft) \quad (9)$$

$$u_{i+1} = U_m \sin(\omega(t + T_s)) = U_m \sin(2\pi f(t + T_s)) = \sqrt{2} U \sin[2\pi f(t + T_s)] \quad (10)$$

$$u_{i+2} = \sqrt{2} U \sin[2\pi f(t + 2T_s)] \quad (11)$$

根据式(9)、(10)、(11),可得

$$U^2 = \frac{u_{i+1}^2 - u_i u_{i+2}}{1 - \cos(4\pi f T_s)} = \frac{u_{i+1}^2 - u_i u_{i+2}}{2 - 2\cos^2(2\pi f T_s)} \quad (12)$$

同样可得

$$\cos(2\pi f T_s) = \frac{u_i + u_{i+2}}{2u_{i+1}} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12),可得

$$U^2 = \frac{2u_{i+1}^4 - 2u_i u_{i+2} u_{i+1}^2}{4u_{i+1}^2 - u_i^2 - u_{i+2}^2 - 2u_i u_{i+2}} \quad (14)$$

该方法需要根据 3 个采样点才能够得出电压的有效值,需比导数法多采集一个数据,并且式(14)中需要进行大量的乘除运算,乘方次数最高达到 4 次,这样高次数的乘方运算会给控制芯片,如单片机或 DSP 带来额外的负担,增加了整体算法的运算时间,难以满足高实时性的要求^[6-10].

2 快速计算电压有效值新算法

在本文第 1 章,介绍了 3 种获得正弦电压有效值的方法,本章提出基于低通滤波器的电压有效值算法,该算法相对于导数法,只需要知道一个电压瞬时值就可获得电压有效值.相对于迭代法,不需要进行 4 次乘方运算,减轻了控制芯片负担,提高了运算速度,具有可靠性高,动态响应快,适用于实时性要求高的系统的优点.

2.1 算法的提出

式(2)表示了正弦电压信号的解析表达式,对其进行平方可得

$$u^2 = U_m^2 \sin^2(\omega t) = \frac{U_m^2}{2}(1 - \cos(2\omega t)) = \frac{U_m^2}{2} - \frac{U_m^2}{2} \cos(2\omega t) \quad (15)$$

式(15)说明,瞬时电压的平方实际上是一个电压最大值的平方的一半的直流分量与一个以 2ω 为角速度的交流信号之和.若将直流以外的谐波信号滤掉,即可得到电压最大值的平方的一半,亦即电压有效值的平方,进一步开方即可得到电压有效值.

2.2 低通滤波器

滤波器将输入信号进行某些频率成分或某个频带的压缩、放大,主要用于检测信号、参数估计等领域.

2.2.1 模拟与数字低通滤波器 低通滤波器容

许低频信号通过,减弱甚至阻止频率高于截止频率的信号通过^[11-13].理想的低通滤波器能够完全去除高于截止频率的所有信号,并且能够使低于截止频率的信号完全地通过.低通滤波器有模拟滤波器和数字滤波器两种.模拟滤波器主要由一系列电子元器件组成,这类滤波器受时间、温度、电压漂移等因素影响,会降低滤波效果,可靠性低.数字滤波器相对于模拟滤波器更容易进行滤波代数运算,能够实现近似于理想的响应,对滤除谐波具有更高的实时性和准确性,更加适用于数字信号处理系统,可以大幅度提高 Vehicle to Grid 充电系统的可靠性.

2.2.2 理想数字滤波器 理想数字滤波器是无法采用物理方法实现的,只能近似实现.在滤波器的通带内幅度为常数(非零),在阻带内,幅度为零,单位脉冲响应是非因果无限长序列.

理想数字滤波器的传输函数为

$$H(e^{j\omega}) = \begin{cases} Ce^{-j\omega n} & \omega_1 < \omega < \omega_2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

其中 C 和 n 为常数.

幅度特性:

$$|H(e^{j\omega})| = C$$

相位特性:

$$\varphi(\omega) = -\omega n_0$$

假设低通滤波器的频率响应为

$$H(e^{j\omega}) = \begin{cases} e^{-j\omega n_0} & |\omega| < \omega_c \\ 0 & \omega_c < |\omega| \leq \pi \end{cases} \quad (17)$$

式中: n_0 为通带截止频率,为正整数; ω_c 为截止角速度.

2.3 低通滤波器离散化

本文采用 IIR 数字低通滤波器,以一阶滤波器为例,其系统函数为

$$H(z) = \frac{1 - A_1}{2} \frac{1 + z^{-1}}{1 - A_1 z^{-1}} \quad (18)$$

对式(18)进一步变换,可得

$$y(n) = A_1 * x(n) + (1 - A_1) * y(n-1) \quad (19)$$

式中: $x(n)$ 为本次采样值; $y(n-1)$ 为上一次滤波输出值; $y(n)$ 为本次滤波输出值; A_1 为滤波系数.

设 f_1 为截止频率,则有

$$f_1 = A_1 / 2\pi T_s \quad (20)$$

由式(19)可以看出,只需有一次瞬时电压的采样值,就可以得到信号的最大值平方的一半,从而得到有效值.与全周期采样法、导数法以及迭代法相比,基于低通滤波器的快速正弦电压有效值算法,只需更少的采样点,具有更高的实时性与可靠性,避免了导数法的抗干扰能力差、迭代法需要更多采样点的缺点,同时,在数字信号处理芯片上实现更加容易.

2.4 仿真结果

为了有效验证基于 IIR 低通滤波器的快速正弦电压有效值算法的性能,本节建立 Vehicle to Grid 充电系统模型,如图 3 所示.仿真模型参数如下:电网侧三相交流输入电压 $V_a(V_b, V_c)$ 带有高频干扰,幅值为 310 V,电网侧等效电阻 $R_a(R_b, R_c)$ 均为 1 m Ω ,电网侧滤波电感 $L_a(L_b, L_c)$ 均为 4 mH, Vehicle to Grid 充电系统输出侧滤波电容 C 为 200 μ F.

在实际 Vehicle to Grid 充电系统中^[14-16],由于开关频率、采样频率均远高于电网频率,同时,系统中的开关电源也有很高的开关频率,在系统中常存在高频谐波干扰,三相电网电压的 A/D 采

样数据会有高频谐波量^[11].因此,A/D 采样数据在使用前都要进行滤波处理,本文中采用 IIR 低通滤波器进行采样滤波,滤波之后的电压信号为正弦波形.本文设计低通滤波器时,采样滤波处理的截止频率为 $f_{is} = 50$ Hz,有效值算法的低通滤波器的截止频率选择极低的频率,这里 $f_{id} = 1$ Hz.

通过低通滤波器,可以有效滤除高频杂波,得到真实的 a 相电压波形,如图 4、5 所示. a 相电压平方后波形如图 6 所示.

图 7 说明,电压信号的平方值经过低通滤波器可以有效滤除交流分量,得到电压最大值,从而获得电压有效值^[12].

图 8 是电压平方进行低通滤波稳定后的局部放大图,虽然滤波后电压最大值仍有波动,但电压有效值的最大误差仅为 4%,在可接受范围内,通过该算法可以快速、准确地得到电压有效值.

当电压最大值发生变化时,该算法也可以有效快速跟踪,达到实时监测电压有效值的目的.在 1.0 s 附近, a 相电压最大值突然增大为 350 V 后, a 相电压平方经过低通滤波后的波形如图 9 所示.可以看出,该算法能够快速跟踪电压最大值变化,实时得到电压有效值.

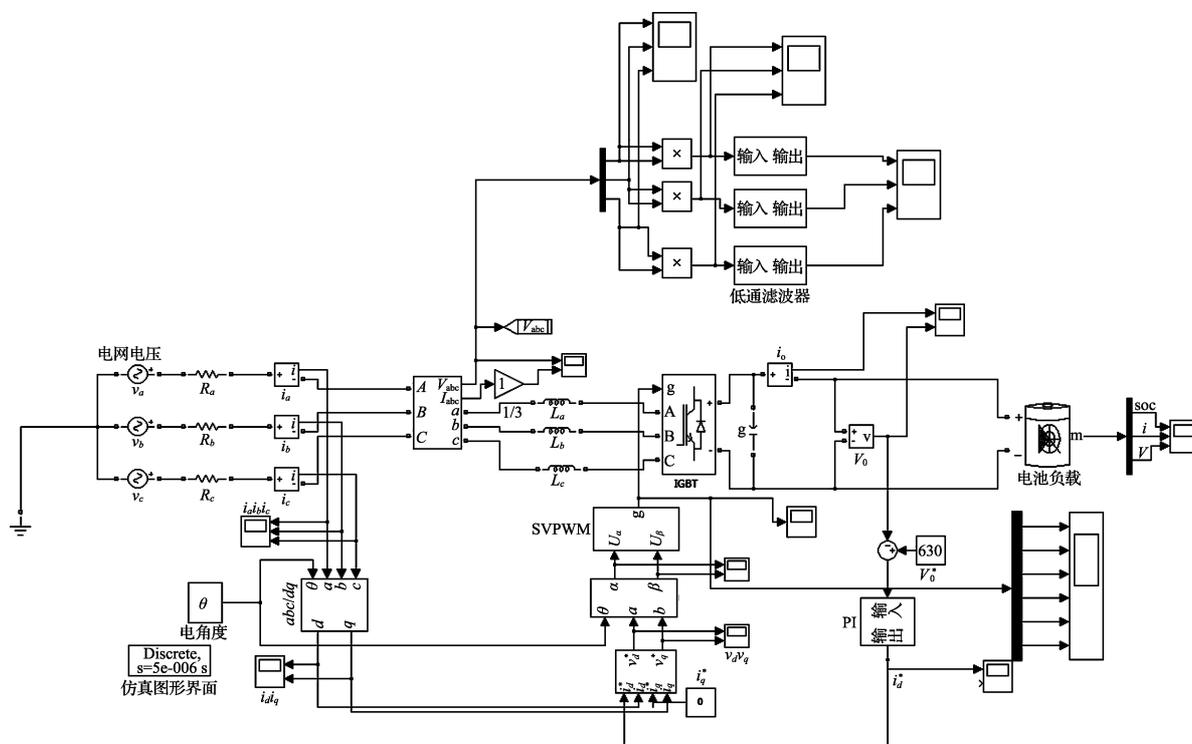


图 3 Vehicle to Grid 充电拓扑结构

Fig. 3 Topology structure of the Vehicle to Grid charge system

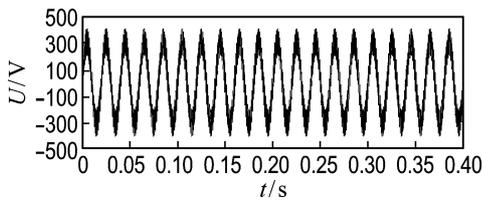


图 4 带有高频干扰的 a 相电压波形
Fig.4 Voltage wave of Phase a with high frequency harmonics

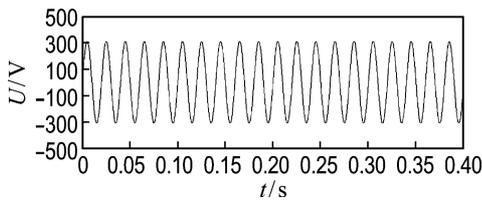


图 5 a 相电压滤波后的波形
Fig. 5 Voltage wave of Phase a filtered

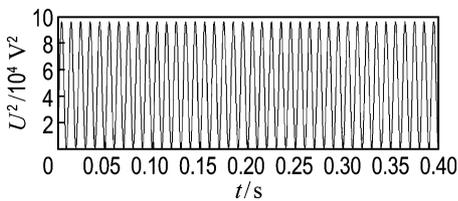


图 6 a 相电压平方后的波形
Fig. 6 Wave of square of voltage of Phase a

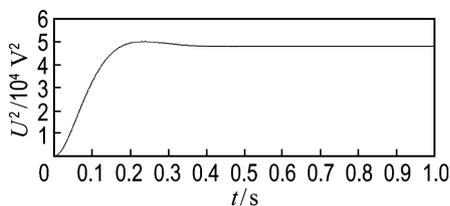


图 7 a 相电压平方进行低通滤波后的波形
Fig. 7 Wave of square of voltage of Phase a after low-pass filtered

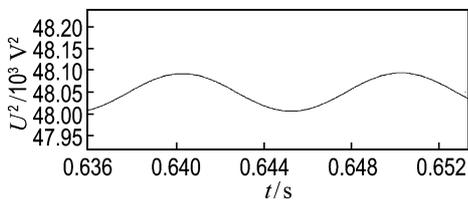


图 8 图 7 滤波稳定后的局部放大
Fig. 8 Part enlarged of Fig. 7 filtered

表 1 为全周期采样法、导数法、迭代法以及基于 IIR 低通滤波器的有效值新算法的稳定性比较. 假设输入正弦电压有效值为 220 V, 频率为

50 Hz, 采样频率为 1 kHz. 为了更加明显看出各算法的比较效果, 截取 0.50~0.52 s 时间段即算法稳定后, 一个周期内的输入电压数据及各算法在这段时间内计算的电压有效值.

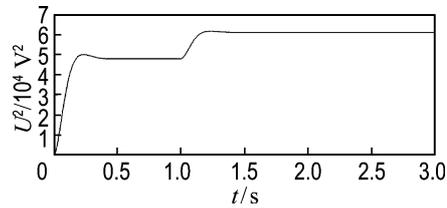


图 9 a 相电压最大值的平方突然变化的波形
Fig. 9 The wave of square of maximum voltage of Phase a changed suddenly

表 1 0.50~0.52 s 时间段输入电压数据及各算法在这段时间内计算的电压有效值

Tab. 1 Input voltage data and the effective voltage calculation using the four algorithms in the period of 0.50-0.52 s

电压瞬时值/V	电压有效值/V			
	全周期采样法	导数法	迭代法	新算法(本文)
0	—	220.649 3	220.629 5	220.617 3
96.41	—	220.649 6	220.630 5	220.617 3
183.38	—	220.649 9	220.631 5	220.617 3
252.41	—	220.650 1	220.632 5	220.617 3
296.72	—	220.650 4	220.633 5	220.617 3
312.00	—	220.650 7	220.634 5	220.617 3
296.72	—	220.651 0	220.636 5	220.617 3
252.41	—	220.651 3	220.638 5	220.617 3
183.38	—	220.651 7	220.640 5	220.617 3
96.41	—	220.652 0	220.641 5	220.617 3
0	—	220.652 3	220.642 5	220.617 3
-96.41	—	220.652 7	220.645 2	220.617 3
-183.38	—	220.653 0	220.647 3	220.617 3
-252.41	—	220.653 4	220.649 4	220.617 3
-296.72	—	220.653 7	220.650 5	220.617 3
-312.00	—	220.654 1	220.653 5	220.617 3
-296.72	—	220.654 4	220.655 5	220.617 3
-252.41	—	220.654 8	220.657 5	220.617 3
-183.38	—	220.655 2	220.659 5	220.617 3
-96.41	220.650 6	220.655 6	220.660 5	220.617 3

从表 1 可以看出, 4 种算法中, 本文提出的基于 IIR 低通滤波器的电压有效值算法最稳定, 同时, 计算方法最为简便. 导数法与迭代法由于计算过程较为复杂, 电压有效值在一定范围内有所波

动;全周期采样法在一个周期内只能计算一个电压有效值,效率最低,可靠性最差。

3 结 论

本文详细阐述了基于 Vehicle to Grid 充电系统求取电压有效值的新算法。该算法基于 IIR 低通滤波器,只需知道一点电压瞬时值,就能够准确求出电压有效值。从仿真实验结果可以看出,由于截止频率为 1 Hz,当信号通过 IIR 低通滤波器后,能够有效滤除交流分量,得到纯净的直流量,即电压最大值,从而得到准确的有效值。所得到的有效值最大误差仅为 4%。相比于全周期采样法、导数法、迭代法等求取电压有效值的算法,更加方便、快捷、准确。该算法可以运用到所有需要求取电压有效值的场合,大大降低了电压有效值的求取难度,且增加了电压有效值的求取准确性。同时,可以扩展到电流有效值等其他电力参数有效值的求取。在未来的电力系统、电力电子设备的控制中,该算法将会得到广泛运用。

参考文献:

- [1] WANG Xiao-lei, YAN Pan, YANG Liang, *et al.* A V2G vector control model of electric car charging and discharging machine [C] // **2011 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, ICAMechS 2011**. Piscataway: IEEE Computer Society, 2011:342-347.
- [2] Mehdi J E, Torbjörn T, Saeid H. Performance and losses analysis of charging and discharging mode of a bidirectional DC/DC fullbridge converter using PWM switching pattern [C] // **2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2011**. Piscataway:IEEE Computer Society, 2011.
- [3] SHI Lei, XU Hai-ping, LI Dong-xu, *et al.* A novel high power factor PWM rectifier inverter for electric vehicle charging station [C] // **2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2011**. Piscataway:IEEE Computer Society, 2011.
- [4] 郑 颖,王成华,洪 峰. 基于快速有效值算法的逆变器三环控制策略[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 2010, **11**(4):428-432.
- ZHENG Jie, WANG Cheng-hua, HONG Feng. Based on rapid and valid values for the inverter loop control strategy [J]. **PLA University of Science: Natural Science**, 2010, **11** (4): 428-432. (in Chinese)
- [5] 蓝 波,周义明,曹泽菀. 快速求取电压有效值与频率的一种新方法[J]. 北京石油化工学院学报, 2007, **15**(4):49-51.
- LAN Bo, ZHOU Yi-ming, CAO Ze-chun. A new algorithm of measuring voltage RMS and frequency [J]. **Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology**, 2007, **15**(4):49-51. (in Chinese)
- [6] 徐 垦. 交流信号真有效值数字测量方法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2006, **34**(2):51-54.
- XU Ken. Digital measurement for true effective value of AC signal [J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition**, 2006, **34**(2):51-54. (in Chinese)
- [7] 陈晓荣,蔡 萍,周红全. 基于单片机的频率测量的几种实用方法[J]. 工业仪表自动化装置, 2003, **1**(1):40-42.
- CHEN Xiao-rong, CAI Ping, ZHOU Hong-quan. Several practical methods of frequency measurement based on a single-chip computer [J]. **Industrial Instrumentation & Automation**, 2003, **1**(1):40-42. (in Chinese)
- [8] Albu M, Heydt G T. On the use of RMS values in power quality assessment [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2003, **18**(4):1586-1587.
- [9] Zollanvari A, Braga-Neto U M, Dougherty E R. Sample size calculation from specified RMS of the resubstitution error for linear classifiers [C] // **2009 IEEE International Workshop on Genomic Signal Processing and Statistics, GENSIPS 2009**. Piscataway:IEEE Computer Society, 2009.
- [10] Daglio A, Malcovati P, Maloberti F. A multiplier-free digital RMS calculation unit for integrated microsystems [C] // **Third International Workshop on Design of Mixed-mode Integrated Circuits and Applications**. Piscataway:IEEE Computer Society, 1999.

- [11] Suomalainen E P, Hallstrom J. An accurate asynchronous calculation method for evaluating peak and RMS values from sampled data [C] // **2008 Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, CPEM 2008**. Piscataway: IEEE, 2008.
- [12] Mog G E, Ribeiro E P. One cycle AC RMS calculations for power quality monitoring under frequency deviation [C] // **11th International Conference on Harmonics and Quality of Power**. Piscataway:IEEE, 2004.
- [13] GONG Liang, LIU Cheng-liang, GUO Lei. Residual adaptive algorithm applied in intelligent real-time calculation of current RMS value during resistance spot welding [C] // **Proceedings of 2005 International Conference on Neural Networks and Brain Proceedings, ICNNB' 05**. Piscataway: IEEE Computer Society, 2005.
- [14] WEI Cai-hong, LEI Sheng, WEI Chen, *et al.* Research of effective value measurement method in smart grid [C] // **2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering**. Piscataway:IEEE Computer Society, 2011.
- [15] Steven R E. An experimental effective value of the quadrature-axis synchronous reactance of a synchronous machine [J]. **Proceedings of the IEE — Part A: Power Engineering**, 1961, **108** (42): 559-566.
- [16] 方宇, 裘迅, 邢岩. 三相高功率因数电压型 PWM 整流器建模与仿真 [J]. **电工技术学报**, 2009, **21**(10):44-49
- FANG Yu, QIU Xun, XING Yan. Modeling and simulation of three-phase high-power-factor PWM rectifier [J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2009, **21**(10):44-49. (in Chinese)

New algorithm to rapidly get sinusoidal voltage effective value based on IIR low-pass filter

CAI Ke-wei, WANG Ning-hui*, LI Guo-feng

(Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, China)

Abstract: A new method is proposed to rapidly get sinusoidal voltage effective value based on IIR low-pass filter comparing full-cycle sampling method, derivative method and iterative method in charging system for the Vehicle to Grid. Firstly, the mean-square of voltage is calculated to get AC signal with DC component. Then, the AC component of the mean-square voltage is filtered using IIR low-pass filter and get the half of the mean-square of maximum voltage, which is the square of voltage effective value, and then the voltage effective value is obtained. This algorithm can get filtered DC component without high-frequency components, only needs one sample of voltage to get voltage effective value rapidly as well as conveniently and has strong anti-jamming capability comparing to the other three methods previously mentioned. The Vehicle to Grid charging system model is established in Matlab / Simulink, and the desired voltage effective value is achieved using the new algorithm.

Key words: Vehicle to Grid; voltage effective value; IIR low-pass filter; derivative method; full-cycle sampling method