

基于 WPT 技术的电参量测量算法研究

季肖枫¹, 董鹏飞², 贾君瑞¹

(1. 南通航运职业技术学院 机电系, 江苏 南通 226010; 2. 中天昱品科技有限公司, 江苏 南通 226010)

摘 要:文章分析了 WPT 技术,在准同步采样原理的基础上,利用矩形自卷积窗作为加窗方法,对其控制系统电参量进行了测量,对实验测量数据进行了拟合以及误差分析。结果显示,该方法可以将采样不同步引起的测量误差控制在较好的范围内,适用无线充电器的电参量测量,有助于改善充电器的性能,提高运行指标。

关键词:WPT 技术;电量参数;测量算法

中图分类号:TM930.1

文献标识码:A

文章编号:1671-9891(2017)02-0047-05

0 引言

近年来,全球环境和能源问题日益突显。作为能源消耗大国,我国的车辆燃油消耗达到总石油消耗的 1/3 以上。因此,大力发展电动汽车(Electric Vehicle, EV)成为目前公认的缓解能源短缺及解决环境污染的有效策略。在各国政府大力推进新能源产业发展的背景下,电动汽车也成为各大汽车生产商的重点发展方向。而动力电池充电站和续航里程制约着 EV 的发展。^[1]EV 充电站目前以接触式为主,采用插头与插座的金属接触进行导电。而无线充电(Wireless Power Transmission, WPT)是一项新兴技术,通过电磁耦合技术传输电能对车辆进行供电。WPT 使用方便安全,无火花及触电危险,无积尘和接触损耗,可适应多种恶劣环境和天气等优点,得到了广泛的研究。本文在 WPT 运行过程中,进行了电量数据采集优化,抑制了测量误差,降低了 WPT 的硬件和软件复杂度。

1 WPT 技术

WPT 技术主要分为三种:射频或微波 WPT、电磁共振式 WPT、电磁感应式 WPT。其中,微波 WPT 由于工作频率高,系统效率较低,不适合于 EV 这种能量传输距离较短的应用场合;在中小距离场合,电磁共振式 WPT 和电磁感应式 WPT 的因传输效率相对较高,更适合于 EV 充电。电磁感应式 WPT 是将电网的工频交流电进行整流和逆变被转化为高频交流电,通过补偿电路到达原边发射线圈,并产生高频电磁场,汽车上的接收线圈吸收原边的电磁场,经过高频整流、电池管理电路等环节,最终给负载电池充电。^[2]电磁共振式 WPT 最早由 MIT 的研究人员提出,基本思想是:具有相同自谐振频率的两个线圈通过电磁场高效传能,而频率不同的物体却基本不受磁场的影响。无线充电器的结构示意图如图 1 所示,包括功率因数校正(Power Factor Correction, PFC)变换器、逆变器、非接触变压器、非接触反馈和接收电路等部分。其中,非接触变压器的设计、变换器拓扑及其控制和非接触反馈技术,是 EV 用 WPT 技术的研究重点。本文对 WPT 变换器控制系统电量数据采集进行了测量。电量数据的稳定性和精度直接决定了充电器的性能和运行指标。电量数据测量技术的提高,有利于改善充电器的性能,提高其运行指标,加快 WPT 技术的推广使用。

2 矩形自卷积窗算法

在一般采样测量中,通过引入同步补偿的方法,减少因不同步导致的测量误差。但是,该方法增加了硬件成本及软件的复杂程度。在不引入同步措施的前提下,为了实现有效抑制采样不同步而产生的测量误差,

收稿日期:2016-12-10

基金项目:2015 年度南通市科技计划项目“基于太阳能供电的电动自行车无线充电系统设计”(项目编号:MS12015034)。

作者简介:季肖枫(1980—),男,江苏南通人,南通航运职业技术学院机电系讲师,硕士。

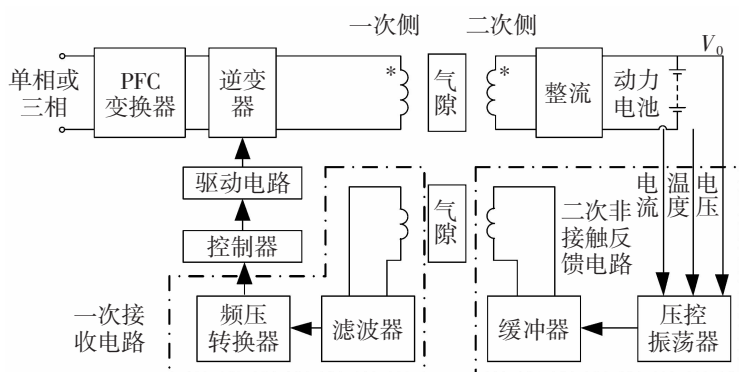


图1 无线充电器结构框图

本文拟采用准同步采样原理,利用矩形自卷积窗构成滤波器,对电参量进行测量。^[3]卷积窗是利用若干矩形窗的自卷积运算,构造出一类新的窗函数,其具有最小的频谱泄漏效应。^[4]在交流电压、电流有效值、有功功率及功率因数等电气参量的采样法测量中,能彻底有效地抑制采样不同步带来的测量误差。

2.1 电压有效值的计算

设含有谐波的电压的瞬时值如式(1)所示。

$$u(t) = \sum_{k=1}^R \sqrt{2} U_k \sin(k\Omega_1 t + \alpha_k) \quad (1)$$

式中, U_k 为电压 k 次谐波的有效值; α_k 为电压 k 次谐波的初始相位; Ω_1 为基波信号角频率; R 为电压最高谐波次数。

根据定义,电压有效值如式(2)所示。

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{T_0}^{T_0+T_1} \left[\sum_{k=1}^R \sqrt{2} U_k \sin(k\Omega_1 t + \alpha_k) \right]^2 dt} \quad (2)$$

式中, $T_1 = 2\pi / \Omega_1$ 为信号的周期。根据三角函数的正交性质,式(2)经过化简可得式(3):

$$U^2 = \sum_{k=1}^R U_k^2 \quad (3)$$

令 $\tilde{u}(t) = u^2(t)$, 利用三角函数性质可得到式(4)。

$$\tilde{u}(t) = \left[\sum_{k=1}^R \sqrt{2} U_k \sin(k\Omega_1 t + \alpha_k) \right]^2 = \tilde{U}_0 + \sum_{k=1}^{2R} \sqrt{2} \tilde{U} \sin(k\Omega_1 t + \gamma_k) \quad (4)$$

上述表达式中, $\tilde{u}(t)$ 由直流分量 \tilde{U}_0 和基波及各次谐波组成。对于直流分量 \tilde{U}_0 可由三角函数性质求得,如式(5)所示。

$$\tilde{U}_0 = \sum_{k=1}^R U_k^2 \quad (5)$$

因此,电压有效值 U 的估算,转换为求取直流分量 \tilde{U}_0 ; 电流有效值的算法也与此相同。

2.2 有功功率的计算

有功功率根据其定义,并由三角函数的正交性化简,如式(6)所示。

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_{T_0}^{T_0+T_1} u(t) i(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_{T_0}^{T_0+T_1} \left[\sum_{k=1}^R \sqrt{2} U_k \sin(k\Omega_1 t + \alpha_k) \right] \left[\sum_{k=1}^S \sqrt{2} I_k \sin(k\Omega_1 t + \beta_k) \right] dt \\ &= \sum_{k=1}^{K_{\max}} U_k I_k \cos(\alpha_k - \beta_k) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $K_{\min} = \min(R, S)$ 。

式(6)表明,同频率的电压和电流才可能产生有功功率,而总的有功功率为各次谐波有功功率之和,如式(7)所示。

$$\begin{aligned}
 p(t) &= u(t)i(t) \\
 &= \left[\sum_{k=1}^R \sqrt{2} U_k \sin(k\Omega_1 t + \alpha_k) \right] \left[\sum_{k=1}^S \sqrt{2} I_k \sin(k\Omega_1 t + \beta_k) \right] \\
 &= \sum_{k=1}^{K_{\min}} U_k I_k \cos(\alpha_k - \beta_k) + \sum_{k=1}^{R+S} P_k \sin(k\Omega_1 t + \phi_k) \\
 &= P + \sum_{k=1}^{R+S} P_k \sin(k\Omega_1 t + \phi_k)
 \end{aligned} \tag{7}$$

与电压表达式 $\tilde{u}(t)$ 类似, $p(t)$ 也由直流分量和基波及各次谐波组成,求取有功功率 P 也转换为从 $p(t)$ 中取得直流分量的问题。通过以上分析可知,电压、电流有效值和有功功率的估计,都可转化为某一信号直流分量的提取问题。而要得到一个准确的直流分量,只要设计一个数字滤波器,滤除信号中的基波以及各次谐波分量即可。

2.3 基于矩形自卷积窗算法的滤波器设计

本文利用矩形自卷积窗算法来设计滤波器,并以有功功率为例加以说明该方法的原理。设 T_s 为采样周期,对某一频率 $p(t)$ 进行采样,得长度为 N 的序列 $p(n)$ ($n=0, 1, 2, \dots, N-1$),由式(7)可得式(8)。

$$P(n) = P + \sum_{k=1}^{R+S} P_k \sin(k\Omega_1 n T_s + \phi_k) = P + \sum_{k=1}^{R+S} P_k \sin(kn\omega_1 + \phi_k) \tag{8}$$

其中, $\omega_1 = \Omega_1 T_s$ 为基波角频率。利用所设计的数字滤波器对 $p(n)$ 进行滤波,得到单位响应 $h(n)$ ($n=0, 1, 2, \dots, N-1$),得到频率 P 的估计值,如式(9)所示。

$$P^* = \sum_{n=0}^{N-1} p(n)h(N-n-1) \tag{9}$$

由上式可知,如果在各次谐波数字角频率 $\omega = k\omega_1$ 处, $h(n)$ 的幅频特性为 0 或者可以忽略不计,就可滤除 $p(n)$ 中的基波和各次谐波分量,从而得到 $p(n)$ 中的零频分量。

而 m 阶矩形自卷积窗在 $\omega = 2km\pi/N$ ($k=\pm 1, \pm 2, \dots$) 处的频谱幅值为 0,且频谱的 $1-(m-1)$ 阶导数也为 0。因此,由式(9)可知,频谱在 $\omega = 2km\pi/N$ 这些点处的取值为零或者很小,可忽略不计。在实际运用中,较难实现严格的同步,若采样时间窗为信号周期的 m 倍,则矩形自卷积窗幅频特性在零点处的 $1-(m-1)$ 阶导数也均为 0,卷积窗零点附近采样点的幅频特性值很小,可以忽略。

因此,采用矩形自卷积窗算法的滤波器,能很好地滤除 $p(n)$ 中的基波和各次谐波分量,达到满意的滤波效果。该方法对电压、电流有效值的估算同样有效。

3 算法实现步骤

3.1 确定采样周期

若卷积窗阶数为 m ,则采样频率如式(10)所示。

$$T_s = mT_e / N \quad (T_e=0.02s, \text{工频周期}) \tag{10}$$

3.2 确定采样序列

按 T_s 采样电流,电压信号,得到采样序列如下:

电压采样序列为: $\dots, u(i), u(i+1), \dots, u(i+N-1), \dots$

电流采样序列为: $\dots, i(i), i(i+1), \dots, i(i+N-1), \dots$

3.3 计算估计值

根据公式计算一个估计值 P^* ,如式(11)所示。

$$P^*(i) = \sum_{n=0}^{N-1} w_{R^n} (N-n-1) u(i+n) i(i+n) \quad (11)$$

3.4 循环计算

对电压、电流不断采样,从采样序列中各再获取 N 个连续采样值,按式(11)计算有功功率新的估计值。

4 数据测量

为验证该算法的有效性,通过软件编程完成了对数据的测量实验。利用三相交直流标准源提供电流和电压,测量实际的电压和电流信号,电流信号以 0.5 A 为增量,最大值为 5 A;电压信号以 10 V 为增量,最大值为 220 V,为了模拟实际应用环境的干扰情况,加入相应比例的谐波。同时,为得到更加准确的测量结果,对实测数据进行了拟合。由于硬件稳定性和量化误差等客观因素的存在,实测结果存在误差。

通过拟合发现,测量值与标准值之间存在着明显的线性关系。电压的实测结果如图 2 所示。在低压段测量结果误差相对较大,高压段误差相对较小,而充电桩工作在 220 V,因此,这个测量误差完全可以满足使用要求。电流的误差结果和电压结果类似,如图 3 所示。有功功率的测量效果有较小的波动,如图 4 所示。为了定量分析实测数据的准确度,对所测得的数据进行了误差分析。电压测量误差如图 5 所示;电流测量误差如图 6 所示;有功功率测量误差如图 7 所示。对于电压和电流,在低压及小电流段有所偏差,正常工作时偏差很小,有功功率的最大相对误差控制在 0.8 % 以内,都不影响使用。实验数据验证了该方法在充电桩的数据测量中具有很好的效果。

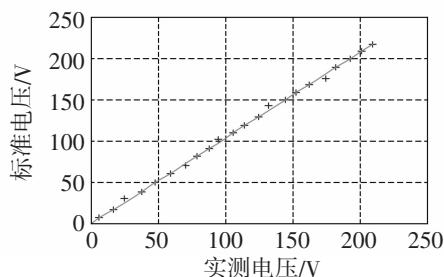


图 2 实测电压拟合图

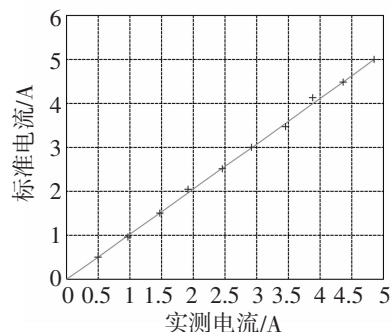


图 3 实测电流拟合图

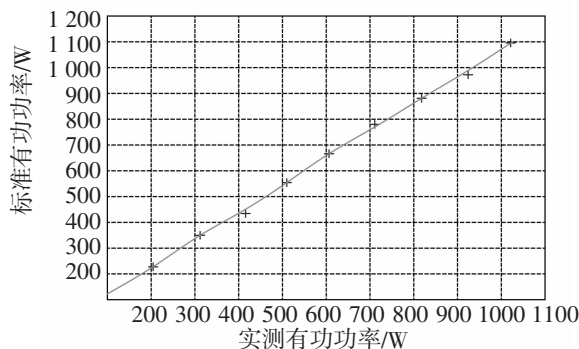


图 4 实测有功功率拟合图

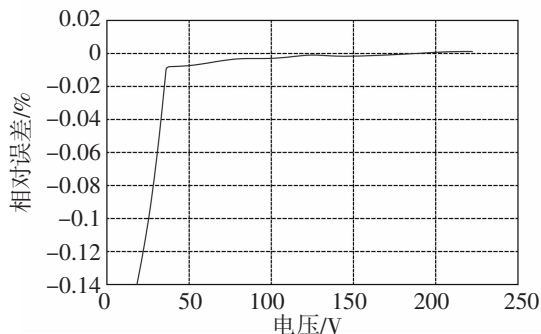


图 5 电压测量误差

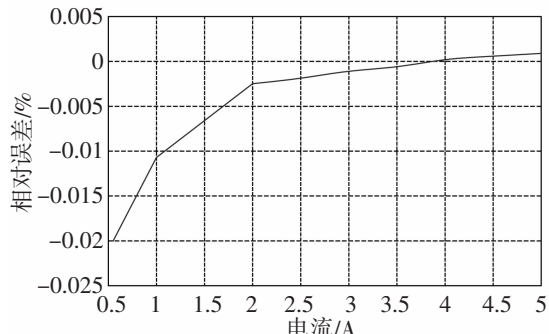


图 6 电流测量误差

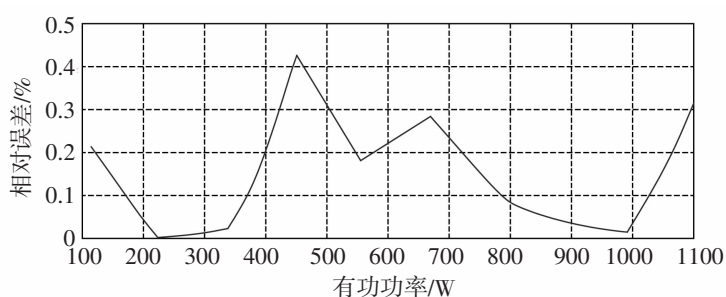


图7 有功功率测量误差

5 结束语

通过实验数据验证,矩形自卷积窗构成的滤波器可以完成对充电桩的电压、电流有效值及有功功率的测量,可以将因采样不同步所引起的测量误差控制在较小的范围内。因此,该方法应用于无线充电桩,可改善其性能,提高运行指标。

参考文献:

- [1]陈宗璋,吴振军.电动汽车充电建设[J].大众用电,2008(6):34-36.
- [2]Boys J T, Covic G A, Green A W. Stability and control of inductively coupled power transfer systems [J]. IEE Proc Electrical Power Application,2000(1):37-43.
- [3]戴先中.准同步采样及其在非正弦功率测量中的应用[J].仪器仪表学报,1984(4):390-396.
- [4]张介秋,梁昌洪,陈砚圃.一类新的窗函数—卷积窗及其应用[J].中国科学:工程科学 材料科学,2005(7):773-784.

Research on Electric Parameter Measurement Algorithm Based on WPT Technology

JI Xiao-feng¹, DONG Hang-fei², JIA Jun-rui¹

(1. Dept. of Mechatronics, Nantong Vocational & Technical Shipping College, Nantong 226010, China;

2. Zhongtian Yupin Science & Technology Co., Ltd., Nantong 226010, China)

Abstract: Combined with WPT technology and based on the quasi synchronous sampling principle, this article applies the rectangular self-convolution window to the measurement of the electrical parameters of the control system and makes a fitting and error analysis of experimental data. The results indicate that this method can keep the measurement errors, caused by asynchronous sampling, within the proper range and is applicable for wireless chargers to measure electric parameters, which is helpful for the improvement of charger's performance and operational indices.

Key words: WPT technology; Electric parameter; Measurement algorithm