

文章编号:1671-6833(2016)05-0062-05

混沌调制技术降低无线充电系统 EMI 水平研究

高金峰¹,余 亚¹,张旭辉²,司丞坤³

(1. 郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001; 2. 奇瑞汽车股份有限公司博士后科研工作站,安徽 芜湖 241000; 3. 三门峡供电公司,河南 三门峡 472000)

摘 要: 定频 PWM(pulse width modulation)控制模式下发射/接收线圈电流频谱能量集中,导致对外电磁干扰水平较高. 将混沌载频调制技术应用在电动汽车无线充电系统的高频逆变器中. 这种调制技术能够展宽发射/接收线圈的电流频谱,将相同的传输能量类似随机地分布在不同的频线上,从而改善空间电磁场的频率谱,降低了无线充电系统对外电磁干扰水平. 计算机模拟和实验结果都证明了方法的有效性.

关键词: 定占空比混沌载频调制;无线充电;电磁干扰;高频逆变器

中图分类号: TM464 **文献标志码:** A **doi:**10. 13705/j. issn. 1671-6833. 2016. 05. 012

0 引言

发展电动汽车是节能、环保和低碳经济的需求,无线充电是电动汽车充电技术的发展趋势^[1-2]. 无线充电系统发射/接收线圈存在高频交流,其产生的电磁干扰(EMI)是设计者需要重点关注的问题. 对于标准 PWM 控制方式,无线充电系统逆变器输出电流的频谱是离散谱,它的能量集中在开关频率及倍频处. 因此,对外的电磁辐射水平较高,难以满足电磁兼容性的要求.

目前,利用通信工程中的扩频技术降低 EMI 的方法备受关注. 其基本思想是,通过调制信号频率,将集中在各次谐波处的能量扩展到宽范围的边带内,消减了谐波峰值,从而降低对外电磁干扰水平^[3]. 采用不同的调制函数,扩频技术可分为:周期调制技术^[4]、随机调制技术、混沌调制技术等. 周期调制是使用周期函数作为调制信号,调制后边带内频谱是离散的,频谱峰值抑制能力弱. 随机调制和混沌调制后信号频谱是连续的,降低 EMI 效果较好. 但随机调制技术所使用的理想随机信号难以获取,混沌信号是一种易于获取的类随机信号. 大量文献研究表明混沌调制技术能有效降低 EMI 水平^[5-7]. 文献[7]给出了定占空比混沌载频调制(CCFMFD)模式在降低 BUCK 型直

流变换器输出电流峰值上作用明显的结论.

笔者介绍了 CCFMFD 模式的原理与实现方法. 在保证无线充电系统负载端输出电压、输出功率、输出效率不变的情况下,对比分析了标准 PWM、CCFMFD 两种方式下发射线圈中电流的频谱. 计算机模拟和实验验证了该方法在降低无线充电系统电磁干扰上的有效性及实际系统的可实现性.

1 无线充电系统等效模型

图 1 是无线充电系统结构图. 发射线圈和接收线圈等效成一个松耦合变压器^[8]. L_1 是发射线圈等效电感, L_2 是接收线圈等效电感, M 是两个线圈间的互感. R_1 与 R_2 分别是发射线圈和接收线圈在高频下的等效电阻. 为了提升功率传输能力、减小对电源视在功率的要求,系统采用原边串联、副边并联型补偿结构,串联电容 C_1 和并联电容 C_2 使发射线圈和接收线圈工作在谐振或接近谐振的状态^[9]. 二极管 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 组成全桥整流电路, C_3 为滤波电容, R_L 为负载电阻. 无线充电系统的工作原理是,直流电经全桥逆变电路转变为高频交流,然后通过发射线圈以电磁能的形式发送出去. 通过磁场耦合,接收线圈将来自发射端的磁场能量转换成电能,再经过整流滤波后对负载供电.

收稿日期:2016-02-17;修订日期:2016-06-13

基金项目:上海市宝山科委产学研合作项目(CXY-2012-40)

作者简介:高金峰(1963—),男,河南项城人,郑州大学教授,博导,主要从事非线性理论与功率电子学等研究,

E-mail:jfgao@zzu.edu.cn.

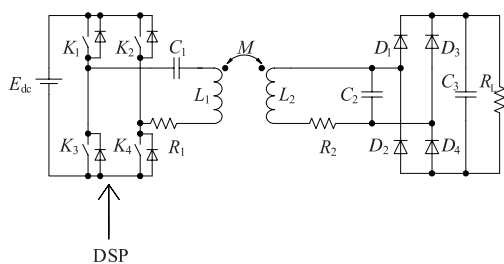


图 1 无线充电系统结构图

Fig.1 Structure of wireless charging system

2 定占空比混沌载频调制

混沌信号具有内在随机性、连续谱的特征,且易于获取、实现.文献[7]用混沌信号代替随机信号,形成了 4 种混沌开关模式.其中 CCFMFD 模式表示开关信号在每个周期内具有恒定的占空比,而周期(或载频)是混沌变化的,中心频率与标准 PWM 方式下的固定频率一致.这种调制方式将原本集中在开关频率及倍频上的能量扩展到一个更宽的频带上,使信号频谱由离散谱扩展为连续谱.因此,在信号总功率(能量)相同的前提下,减小了频谱中的谐波峰值,相应的降低了 EMI 水平,更易于符合国际 EMC 规范^[10].

笔者使用 C-MEX S 函数^[11]编写了逆变器开关信号发生模块.图 2 为 Logistic 混沌信号波形. Logistic 映射是一种常用的混沌模型,迭代公式简单,易于实现.基于 Logistic 映射的混沌调制技术是一种软件手段,这种技术不需要增加硬件,便可以达到降低电磁干扰的目的,具有经济性.将 Logistic 映射迭代产生的混沌序列,叠加到标准 PWM 开关信号上,产生频率跟随混沌序列一起变化的开关信号. Logistic 映射迭代公式为

$$X_{n+1} = k \times X_n \times (1 - X_n). \quad (1)$$

取 $k=4$, X 具有遍历性, $X \in (0, 1)$.

CCFMFD 模式下逆变器开关频率可以表示为

$$f = f_0 + 2 \times (X - 0.5) \times \Delta f. \quad (2)$$

式中: f_0 为中心频率; X 为混沌序列; Δf 为频率最大偏移量.

为了更好的研究 Δf 对扩展频谱的影响,引入频率抖动宽度,定义为

$$\zeta = \frac{\Delta f}{f_0}. \quad (3)$$

当 $\zeta = 0$ 时,系统工作于标准 PWM 方式;当 $\zeta \neq 0$ 时,系统工作于 CCFMFD 模式.

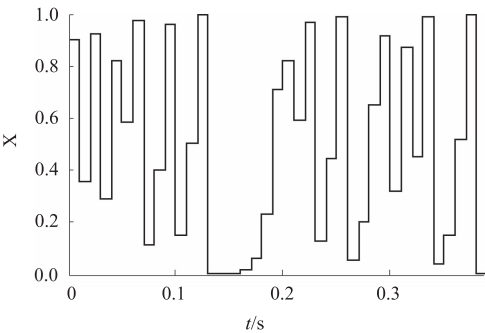


图 2 Logistic 混沌信号波形

Fig.2 Waveform of Logistic chaotic signal

3 计算机模拟与实验结果分析

在 MATLAB/simulink 平台上对无线充电系统进行仿真.仿真参数如下:直流电源 $E_{dc} = 60 \text{ V}$, 发射线圈等效电感 $L_1 = 7 \times 10^{-4} \text{ H}$, 发射端串联补偿电容 $C_1 = 10 \text{ nF}$, 接收线圈等效电感 $L_2 = 6.18 \times 10^{-5} \text{ H}$, 接收端并联补偿电容 $C_2 = 100 \text{ nF}$. 滤波电容 $C_3 = 2000 \text{ }\mu\text{F}$, 负载 $R_L = 65 \text{ }\Omega$. 开关频率为 64 kHz , 占空比取 0.5, 采样时间为 $1.5625 \times 10^{-7} \text{ s}$.

根据文献[12]可知,采用串-并联补偿的无线充电系统简化模型的传递函数为

$$G(s) = \frac{k^2}{MC_2(1-k^2)s^2} \cdot \frac{s^4 + \frac{\omega_0}{Q_2}s^3 + \omega_0^2\left(1 + \frac{1}{1-k^2}\right)s^2 + \frac{\omega_0^3}{Q_2}s + \omega_0^4}{s^4 + \frac{\omega_0}{Q_2}s^3 + \omega_0^2\left(1 + \frac{1}{1-k^2}\right)s^2 + \frac{\omega_0^3}{Q_2}s + \omega_0^4}. \quad (4)$$

式中: $Q_2 = \frac{R}{\omega_0 L_2}$ 为二次侧品质因数,此处 Q_2 约为 2.2, R 代表接收端之后电路的等效负载.

图 3 为无线充电系统简化模型的幅频特性曲线,横轴为归一化频率,以 64 kHz 为基准.可以看出,幅频特性曲线在较宽的频带范围内变化很小.以此作为参考,选择合适的频率抖动宽度,混沌调制技术对系统的影响也就较小.

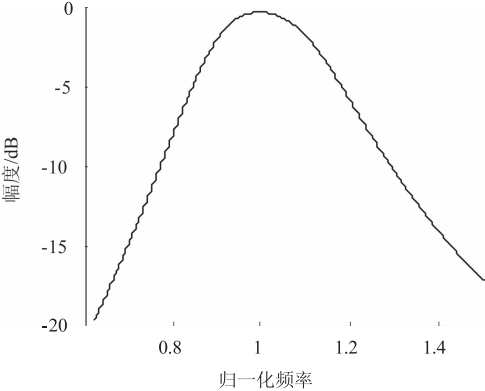


图 3 无线充电系统幅频特性

Fig.3 Amplitude frequency characteristics of wireless charging system

令 $\zeta = 0$, 系统工作于标准 PWM 方式, 无线充电系统逆变器开关频率固定为 64 kHz, 占空比为 0.5. 令 $\zeta = 0.025, 0.05, 0.1$, 系统工作于 CCFMFD 模式, 开关频率在 $64 \pm \Delta f$ (kHz) 范围内混沌变化, 占空比保持 0.5 不变.

图 4 为 $\zeta = 0, 0.025, 0.05, 0.1$ 时无线充电系统逆变器输出电流频谱. 横坐标对应的是谐波次数, 纵坐标为各次谐波的幅度, 以 PWM 模式下基频处峰值为基准. 如图 4(a) 所示, 由于采用了标准 PWM 方式, 无线充电系统逆变器输出电流频谱呈离散状态, 具有较高的谐波峰值, 对外的电磁干扰比较严重. 从图 4(b)、(c) 和 (d) 可以看出, 相比于标准 PWM 方式, CCFMFD 模式下逆变器输出电流频谱从离散谱拓宽为连续谱, 倍频处的

谐波峰值均有降低. 随着 Δf 的增大, 谐波频谱变得更加“连续、均匀”, 峰值降低的幅度也越大.

表 1 为标准 PWM 模式和 CCFMFD 两种模式下 1~19 次谐波频谱峰值的分贝值比较结果, $\zeta = 0.05$. 从表 1 中可以看出, 在 CCFMFD 模式下, 逆变器输出电流各奇次谐波邻域内的峰值都有不同程度的降低. 其中, 频谱中基频处的峰值降低了约 34%.

图 5 为不同 ζ 下, 负载电压波形和传输效率曲线对比, ζ 依次为 0、0.025、0.05、0.1. 效率计算公式为

$$\eta = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_2 dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u_1 i_1 dt}.$$

(5)

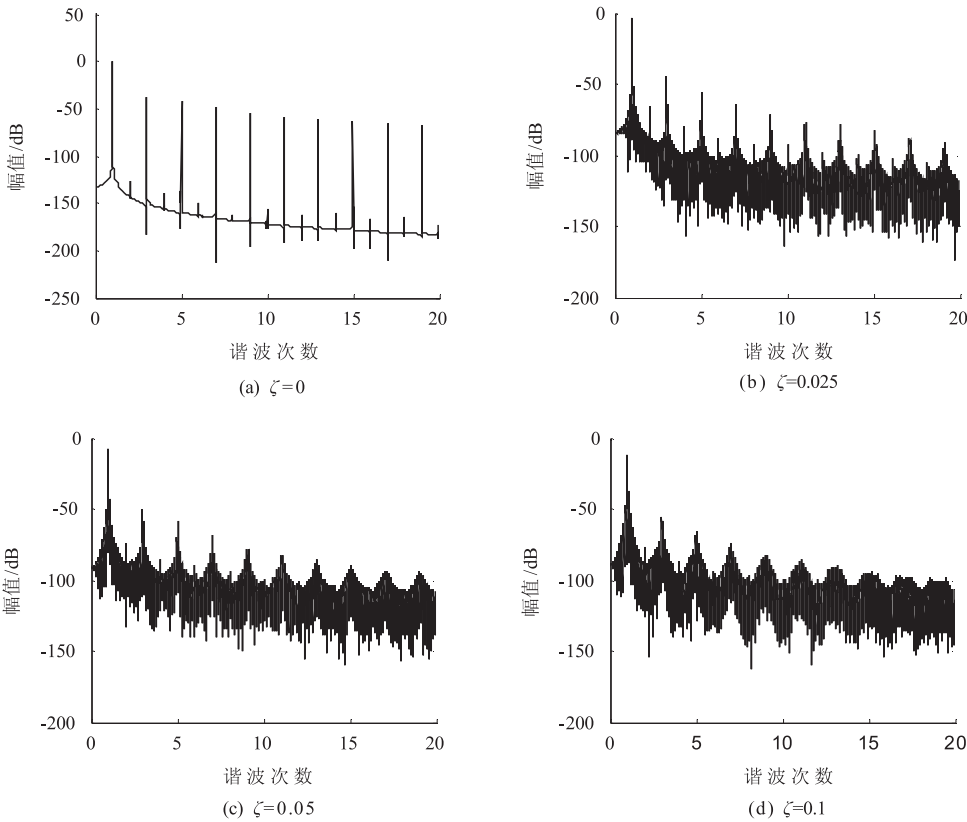


图 4 不同 ζ 下输出电流频谱

Fig. 4 Output current spectrum with various ζ

表 1 CCFMFD 和 PWM 相比峰值减小的值

Tab.1 Compare to PWM,reduction of output current spectral peaks of CCFMFD										dB
开关方式	谐波次数									
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
PWM	0	-37.7	-44.5	-51.0	-53.4	-56.5	-59.8	-62.8	-65.7	-70.0
CCFMFD	-3.80	-48.1	-55.8	-59.6	-66.3	-70.6	-75.6	-77.8	-81.0	-83.7
峰值减小量	3.80	10.4	11.3	8.60	12.9	14.1	15.8	15.0	15.3	13.7

式中: u_2 、 i_2 分别代表输出电压和输出电流; u_1 、 i_1 分别代表输入电压和输入电流.

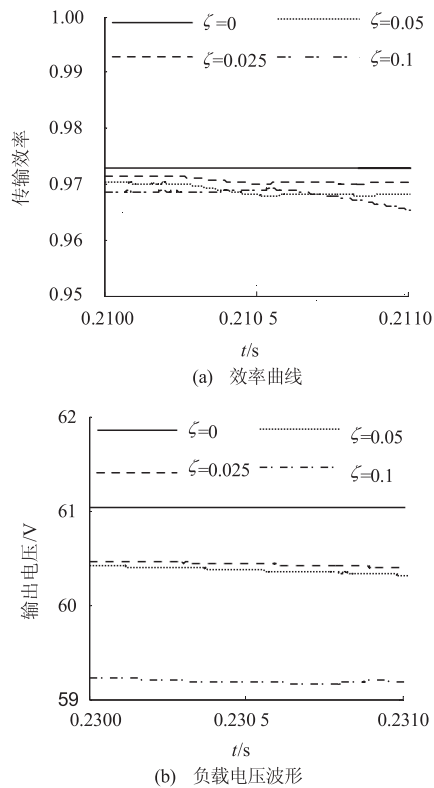


图 5 不同 ζ 下效率曲线和负载电压波形
Fig. 5 Load voltage waveforms and Efficiency curves with various ζ

当 $\zeta=0.025、0.05$ 时,负载电压和效率均有微小的波动,但与标准 PWM 下的情形几乎相等.当 ζ 增大至 0.1 时,负载电压下降,功率输出减小,系统效率有少许降低.仿真发现,当 $\zeta=0.05$ 时,谐波频谱峰值已经有较大幅度的降低,此时的频率抖动对系统输出影响较小,因此, $\zeta=0.05$ 是一个合适的选择.

实验中使用 TMS320F2812 控制器中事件管理器(EV)模块实现了标准 PWM 和 CCFMFD 两种开关模式,对电动汽车无线充电系统发射线圈电流对外电磁干扰问题进行了研究.图 6(a)为标准 PWM 模式下电动汽车无线充电系统的实验波形和频谱.图 6(b)为 CCFMFD 模式下电动汽车无线充电系统的实验波形和频谱.在图 6(a)和(b)中,通道 2(i_1)显示的是无线充电系统发射线圈电流波形,通道 3(u_1)显示的是无线充电系统逆变器输出电压波形,最下面的是无线充电系统发射线圈电流对应的频谱,频谱的纵坐标为各次谐波对应的分贝值.显然,采用混沌调制后,发射线圈电流频谱“毛刺”减少,谐波峰值降低,即集中的能量被分散到更宽的频带上.由于 ζ 的选取较合

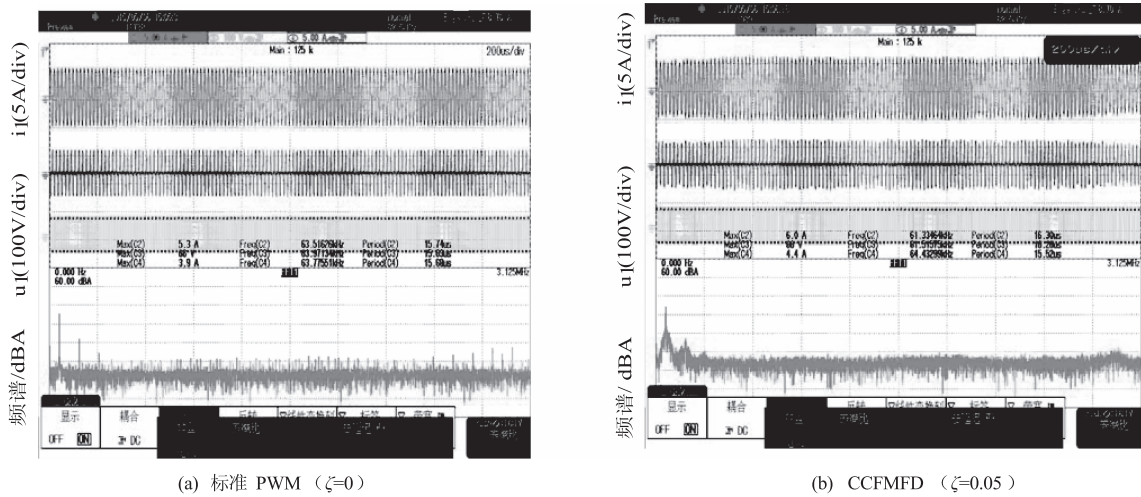


图 6 实验波形和频谱
Fig. 6 Experimental waveforms and spectrum

适,使用混沌调制后,充电系统的输出性能变化不大.实验证明了应用混沌调制技术降低 EMI 的有效性.

4 结论

提出将混沌调制技术应用于降低电动汽车无

线充电系统电磁干扰水平.仿真和实验结果均表明:① CCFMFD 模式能拓宽各次谐波频谱,有效降低各次谐波频谱峰值;② 可以结合幅频特性曲线选择合适的 ζ ,既能尽可能地降低电磁干扰,又能保证无线充电系统的工作稳定.总体来说,对于对电磁干扰要求严格的电动汽车无线充电系统,

混沌调制技术在降低 EMI 增强 EMC 上具有较大的应用价值。

参考文献:

- [1] 曹玲玲, 陈乾宏, 任小永, 等. 电动汽车高效率无线充电技术的研究进展[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8):1-13.
- [2] DEFLORIO F, GUGLIELMI P, PINNA I, et al. Modeling and Analysis of Wireless “Charge While Driving” Operations for Fully Electric Vehicles[J]. Transportation Research Procedia, 2015(5):161-174.
- [3] 齐琛, 陈希有, 牟宪民. PWM 逆变器混合扩频调制技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24):38-44.
- [4] STEPINS D, HUANG J. Optimization of modulation waveforms for improved EMI attenuation in switching frequency modulated power converters[J]. Power Engineering and Electrical Engineering, 2015, 13(1):10-21.
- [5] 陆益民, 张波, 毛宗源. 混沌 SPWM 原理及其谐波抑制特性分析[J]. 机械工程学报, 2006, 42(1):126-129.
- [6] ZHANG Z, CHAU K T, WANG Z, et al. Improvement of electromagnetic compatibility of motor drives using hybrid chaotic pulse width modulation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10):4018-4021.
- [7] 高金峰, 吴振军, 赵坤. 混沌调制技术降低 Buck 型变换器电磁干扰水平研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18(6):23-27.
- [8] 何秀, 颜国正, 马官营. 互感系数的影响因素及其对无线能量传输系统效率的影响[J]. 测控技术, 2007, 26(11):57-60.
- [9] 栗安鑫, 张江飞, 张祖洸. 磁耦合电能传输系统两类建模法的等效性分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(5):40-43.
- [10] 张建军, 张莉明, 丘水生. 混沌调制抑制开关变换器 EMI 的实验研究[J]. 航天控制, 2006, 24(4):87-90.
- [11] 张亮, 郭仕剑, 王宝顺, 等. MATLAB7. X 系统建模与仿真[M]. 北京:人民邮电出版社, 2006.
- [12] 程志远, 朱春波. 非接触式大功率感应充电系统谐振变换器的设计[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1增):404-408.

Research on Suppressing Electromagnetic Interference Level of Wireless Charging System by Using Chaotic Modulation Technology

GAO Jinfeng¹, YU Ya¹, ZHANG Xuhui², SI Chengkun³

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou university, Zhengzhou 450001, China; 2. Chery Automobile Postdoctoral Working Station, Wuhu 241000, China; 3. Sanmenxia Power Supply Company, Sanmenxia 467001, China)

Abstract: In the PWM control mode with fixed frequency, the concentrated energy of current spectrum in transmitting/receiving coil resulted in the high level of external electromagnetic interference. This paper applied the chaotic carrier-frequency modulation with fixed-duty cycle to the high-frequency inverter of wireless charging system in electric vehicle. The modulation technique could broaden current spectrum of transmitting/receiving coil, randomly-like distributed the same transmission energy over different frequency lines, thus improving the frequency spectrum of electromagnetic field in space and reducing the level of external electromagnetic interference of wireless charging system. Both simulation and experimental results are given to support the validity of the method.

Key words: CCFMFD; wireless charging; EMI; high-frequency inverter