

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.01.015

基于FSK的LCLP型ICPT系统信号传输方法研究

赵乐¹, 李欣^{2,3}

(1. 兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学新能源与动力工程学院, 兰州 730070; 3. 兰州交通大学甘肃省轨道交通电气自动化工程实验室, 兰州 730070)

摘要: 针对传统感应耦合电能传输(Inductive Coupling Power Transfer, ICPT)系统存在的开关管损耗较大和变换器工作时产生电压或电流谐波等问题, 基于LCLP型谐振拓扑结构, 提出了一种以ICPT系统作为主电路的电能与频移键控调制(FSK)信号同步传输方法. 通过LCLP型ICPT系统原理分析和信号调制解调策略研究建立了电能与信号同步传输数学模型; 以电能传输能力最大化为前提分析计算了系统参数, 搭建了仿真模型, 进行验证分析. 仿真结果表明, 非噪声环境下的误码率为零; 噪声环境下, 信噪比(Signal Noise Ratio, SNR) < -4 时, 误码率随SNR的增大而减小, 直至SNR ≥ -4 时, 误码率为零. 在信号传输电路引入前后, 谐振输出电压幅值基本不变, BODE图曲线变化趋势以及衰减值不变, 负载处谐波畸变率降为13.24%. 系统在保证低误码率信号传输的同时没有对电能传输造成明显影响.

关键词: 感应耦合电能传输; FSK; 同步传输; 误码率; 传输特性

中图分类号: TM92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2019)01-0078-09

Research on signal transmission method of LCLP type ICPT system based on FSK

ZHAO Le¹, LI Xin^{2,3}

(1. Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and Intelligent Control Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of New Energy & Power Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Rail Transit Electrical Automation Engineering Laboratory, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The traditional inductively coupled power transmission system has problems such as large loss of switches and voltage or current harmonics generated when the converter is working. This paper, based on the LCLP topology, proposes a method for synchronous transmission of electrical energy, which regards the ICPT system as the main circuit and Frequency Shift Keying (FSK) modulation signal. Through the principle analysis of LCLP type ICPT system and the research of signal modulation and demodulation strategy, a mathematical model was established for the simultaneous transmission of electric energy and signal. On account of the premise of maximizing the power transmission capability, the system parameters were calculated, and the simulation model was built for verification and analysis. The simulation results show that the Bit Error Rate (BER) is zero in non-noise environment; In the noise environment, the BER decreases with the increase of SNR when SNR < -4 , the BER is zero when the SNR ≥ -4 . Before and after the introduction of the signal transmission circuit, the resonant output voltage

收稿日期: 2018-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(51767015); 甘肃省科技计划(甘肃省自然科学基金)(18JR3RA117)

作者简介: 赵乐(1994-), 男, 陕西省延安富县人, 硕士研究生, 研究方向为无线电能传输. E-mail: 18215157759@163.com

通讯作者: 李欣. E-mail: lxfp167@163.com

amplitude is basically unchanged, the BODE curves' change trend and attenuation value are unchanged as well, and the harmonic distortion rate at the load is reduced to 13.24%. The system has no significant impact on power transmission while transmitting signal in low BER condition.

Keywords: Inductive coupling power transfer; Synchronous transmission; FSK; Symbol error rate; Transmission characteristics

1 引言

感应耦合电能传输 (Inductive Coupling Power Transfer, ICPT) 系统作为一种新型供电方式已经逐步实现了近距离大功率无线电能传输、移动式 ICPT 系统电能传输和多负载 ICPT 系统电能传输. 该技术即克服了传统供电方式由于接触不良、电缆磨损所导致的电火花、漏电等问题, 保证了较高的安全可靠, 也减少了设备冗余性, 安全可靠、灵活多变的特性大大减少了维修性. 因此, ICPT 技术逐渐应用在交通运输领域、智能家电领域、医疗保健领域、生产建设领域等.

由于信号可用于工作状态的信息反馈和传递控制指令, 因此基于 ICPT 系统的电能与信号的同步传输也越来越成为国内外研究热点之一. 比如, 我国在轨道交通的车-地通信、轨道电路等环境中电能传输就伴随着信号传输. 如果 ICPT 系统实现了电能与信号的同步传输, 并且解决了其他相应的技术问题, 就可以将该技术应用在轨道交通中, 实现上述环境中电能与信号的同步传输, 避免了传统分离式传输所存在的干扰问题, 同时也会减少建设成本, 减小设备体积, 提高安全可靠.

目前, 关于电能与信号无线同步传输研究越来越多, 主要分为磁谐振耦合式无线电能传输 (Magnetic Resonance Coupled Wireless Power Transfer, MRCWPT) 技术^[1-3]和感应耦合式电能传输. 由于 MRCWPT 系统在将工频变频到 MHz 级的高频存在着经济性和电能浪费问题, 因此极大地限制了它在大功率环境下的使用. 所以, 本文以 ICPT 系统为研究对象进行电能与信号的同步传输研究. 根据信号传输模式的不同, 选择不同的数字通信方式, 比如振幅键控调制 (ASK)^[2,3]、频移键控调制 (FSK)^[4,5]、相移键控调制 (PSK). 信号的传输方法也是多种多样, 主要有 5 种, 分别是在 ICPT 系统主电路上增设两对耦合线圈, 作为信号的加载和拾取线圈; 在 ICPT 系统主电路上增设开关器件, 通过开关的闭合与切断改变电流幅值, 达到信号传输目的; 切换 ICPT 系统多软件工作点来

改变谐振电流幅值进行信号传输; 通过电容与电感的串、并联所具有的阻抗特性来实现信号的传输; 通过改变谐振补偿电容来传输信号. 文献[4-7]就是增设耦合线圈实现信号的加载与拾取. 不同的是文献[4,5]以 PP 型 ICPT 系统为基础, 通过在原、副边各增设一组信号加载线圈和拾取线圈完成 FSK 信号的传输. 但是, 文献[6,7]是在原边增设了耦合线圈, 副边则是单独的拾取线圈, 独立于副边主电路. 它们的补偿方法都是基本谐振补偿结构, 在电能经过变换器时会产生较大谐波, 频率鲁棒性限制了使用范围. 文献[7-10]是上文中所提到的在主电路上增设开关器件, 通过数字信号来控制开关的闭合与切断, 改变电流幅值, 完成信号的传输. 该方法使电能传输效率下降, 逆变器只能工作在小功率的情况下, 应用范围受到极大的限制. 此外, 需要 8~10 个电能周期来描述信号, 大大降低了通信速率. 文献[10,11]利用 ICPT 系统多软件开关工作点特性, 通过切换系统的工作频率改变电流幅值来进行信号的传输. 当系统工作频率为 3 次或 3 次以上谐波处时, 电流幅值会大幅度下降, 影响了电能传输效率. 文献[12-15]是利用电容与电感串并联所具有的阻抗特性实现了信号的传输. 该方法需要增设阻波电路, 增加了系统的复杂度, 对频率要求较高. 文献[16]是通过改变谐振补偿电容来传输信号, 不仅可以实现信号的正向传输, 也是反向传输的主要方法之一, 但是存在对电能传输影响较大, 对频率变换敏感的问题. 在串联谐振变换器中, 通过开关管的电流与导轨电流相等, 开关管导通损耗较大; 在并联谐振变换器中, 开关管所承受的电压为输入的 Q 倍 (Q 为 LC 谐振网络的品质因数, 通常远大于 1), 开关管容易损坏^[17]. 但是, LCL 谐振补偿结构可以避免这一问题. 此外, LCLP 型相比较传统的 ICPT 系统而言, 它具有有效提高系统的频率鲁棒性、改善原边的电压或电流的应力、滤除变换器工作时产生的电压或电流谐波等特点^[18]. 因此, 本文基于 FSK 数字通信方式, 以 LCLP 型 ICPT 系统为研究对象, 在原、副边增设耦合线圈实现了信号的传输. 通过对混联拓扑结构

LCLP 型谐振电路的原理分析,以及信号调制解调^[19]策略的研究,完成了信号传输;其次,在保证电能传输能力最优情况下进行了系统参数分析计算,并且完成了信号传输电路引入前后各部分电路的建模分析,获取了传递函数;最后,基于 MATLAB/Simulink 软件搭建的系统仿真模型进行了验证,通过 BODE 图、频谱分析图对各传输特性进行了比较分析。

2 LCLP 型 ICPT 系统电能与信号同步传输研究

2.1 LCLP 型 ICPT 系统电能与信号同步传输机理分析

按照谐振补偿电路的复杂程度,我们可以将其分为 4 种基本谐振补偿电路和混联型补偿电路。传统的 ICPT 系统原理框图如图 1 所示。

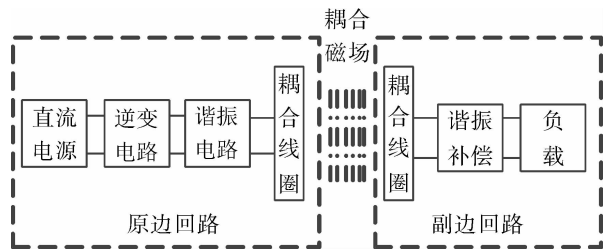


图 1 传统 ICPT 系统原理框图

Fig. 1 Traditional ICPT System Block Diagram

直流电源经逆变器转化为高频交流电流,通过谐振补偿电路后经能量耦合线圈产生高频交变磁场,进而传输到副边回路。副边回路将经补偿电路加强的电能能量为负载所用。

本文主要是针对 LCLP 型的 ICPT 系统展开研究,通过在原、副边增设耦合线圈实现 FSK 信号传输,如图 2 所示。 L_r 为原边谐振电感; L_p 为原边耦合线圈电感; L_s 为副边耦合线圈电感; R_r, R_p, R_s 分别为 L_r, L_p, L_s 的串联等效电阻; C_p 为原边谐振补偿电容; C_s 为副边谐振补偿电容; R 为负载等效

电阻; M_2 为原、副边线圈电感的互感值。 L_1 和 L_2 是信号的加载线圈, L_3 和 L_4 是信号的拾取线圈,是信号传输的重要传输机构。 M_1, M_3 分别是加载线圈和拾取线圈的互感值。

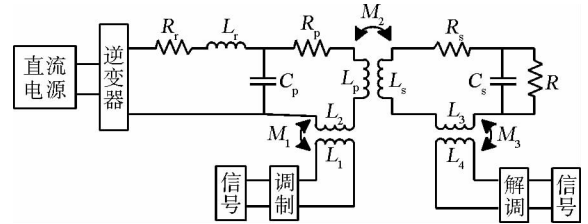


图 2 LCLP 型 ICPT 系统电能与信号同步传输原理图

Fig. 2 Synchronous transmission of power and signal in LCLP type ICPT system

信号传输中,本文在原、副边各增设了一组线圈,进行信号的加载与拾取。信号经 FSK 调制后通过信号耦合线圈加载到主电路中,传输到副边回路之后再由另一组信号耦合线圈拾取,并进行解调。该方法在既不改变主电路电能传输的拓扑结构,也不影响主电路的正常工作的前提下实现了 FSK 信号的传输。

2.2 信号调制解调策略

现在的通信方式主要是数字通信系统和模拟通信系统。但是,相比较而言,数字通信系统在传输质量,抗干扰性,系统功能以及保密性等方面要强于模拟通信系统。值得注意的是,根据文献[4]可知,ASK 的信号调制解调只能在逆变器开关切换的间断时间段内传输,无法保证信号的传输速度。PSK 的信号调制解调因为 ICPT 系统所存在的谐振网络会对相角变换有一个过渡过程,导致信号无法正常解调。

本文选用的是 FSK 信号调制解调方式。在参数选择方面,参考应答器的技术指标,选取了该设备的两个载波频率:3.952 MHz(逻辑 0)和 4.516 MHz(逻辑 1),原理图如图 3 所示。

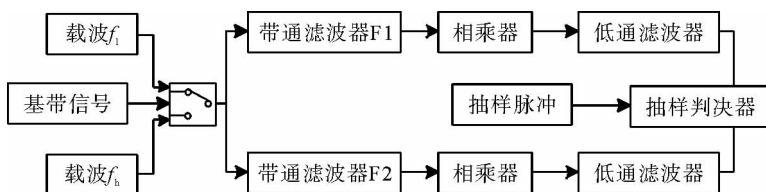


图 3 2FSK 调制解调原理图

Fig. 3 2FSK modulation and demodulation schematic

选取的 3.951 MHz 和 4.516 MHz 的载波频

率远大于 kHz 级别的主电路工作频率,可以在信

号拾取端进行滤波处理,避免主电路电能传输的影响,达到信号低误码率的还原目的。

3 LCLP 型 ICPT 系统电能与信号同步传输建模分析

3.1 信号传输电路引入前系统建模分析

LCLP 型的 ICPT 系统的等效电路图如图 4 所示。

在图 4 中, L_r 为原边谐振电感; L_p 为原边耦合线圈电感; L_s 为副边耦合线圈电感; R_r 、 R_p 、 R_s 分别为 L_r 、 L_p 、 L_s 的串联等效电阻; C_p 为原边谐振补偿电容; C_s 为副边谐振补偿电容; R 为负载等效电阻; M 为原、副边线圈电感的互感值; i_p 、 i_s 为原边和副边的电流; $j\omega M i_p$ 、 $j\omega M i_s$ 为原边和副边的感应电压。

在进行参数配置时,原边和副边都应该遵守感性阻抗和容性阻抗相抵消的原则,即达到谐振状态。该情况下,原、副边的阻抗呈纯阻性,能够使电能传输能力极大提高。此外,为确保电能传输能力的更大化,系统的工作频率我们采用副边的谐振频率。注意,本文是从副边到原边的顺序进行参数设置的。

副边阻抗如下式。

$$Z_s = j\omega L_s + R_s + \frac{1}{j\omega C_s + \frac{1}{R}} \quad (1)$$

整理得

$$Z_s = \frac{R + R_s + \omega^2 C_s^2 R^2 R_s}{1 + \omega^2 C_s^2 R^2} + j \frac{\omega L_s + \omega^3 L_s C_s^2 R^2 - \omega C_s R^2}{1 + \omega^2 C_s^2 R^2} \quad (2)$$

要使副边呈纯阻性,令式(2)虚部为零,从而求得 ω 。

系统原边耦合线圈电感为

$$L_p = \frac{M^2}{k^2 L_s} \quad (3)$$

副边反射到原边线圈的反射阻抗为

$$Z_t = \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} \quad (4)$$

原边电路的总阻抗:

$$Z_p = j\omega L_r + R_r + \frac{1}{j\omega C_p + \frac{1}{j\omega L_p + R_p + Z_t}} \quad (5)$$

该式过于繁杂,借用 MATLAB 软件进行化简计算。令原边阻抗虚部为零,求得原边谐振补偿电容 C_p 。

在进行传递函数分析计算时,为了简化式子,不考虑耦合线圈的内阻。令 u_p 为系统输入电压, u_s

为负载电压,则经拉氏变换后,

$$\begin{cases} Z_p(s) = L_r s + R_r + \frac{1}{C_p s + \frac{1}{L_p s + Z_t(s)}} \\ Z_s(s) = L_s s + \frac{1}{C_s s + \frac{1}{R}} \\ Z_t(s) = -\frac{s^2 M^2}{Z_s(s)} \end{cases} \quad (6)$$

由 KCL、KVL 可知电流、电压关系,

$$\begin{cases} u_p = Z_p i_p - j\omega M i_s \\ j\omega M i_p = Z_s i_s \\ u_s = Z_s i_s \end{cases} \quad (7)$$

经拉氏变换后,

$$\begin{cases} u_p(s) = Z_p(s) i_p(s) - M s i_s(s) \\ M s i_p(s) = Z_s(s) i_s(s) \\ u_s(s) = Z_s(s) i_s(s) \end{cases} \quad (8)$$

整理得相应的传递函数,

$$\begin{cases} G_1(s) = \frac{i_s(s)}{u_p(s)} = \frac{M s}{Z_p(s) Z_s(s) - M^2 s^2} \\ G_2(s) = \frac{u_s(s)}{i_s(s)} = Z_s(s) \end{cases} \quad (9)$$

因此,总传递函数为

$$G(s) = \frac{u_s(s)}{u_p(s)} = G_1(s) \cdot G_2(s) = \frac{Z_s(s) M s}{Z_p(s) Z_s(s) - M^2 s^2} \quad (10)$$

3.2 信号传输电路引入后系统建模分析

LCLP 型 ICPT 系统电能与信号同步传输原理图如图 2 所示。令 Z_{p1} 、 Z_{sp} 、 Z_{2s} 为系统原边部分对信号调制部分电路、系统副边对原边部分电路、信号解调部分对系统副边部分电路的反射阻抗。所以反射阻抗将存在 3 个部分,即

$$\begin{cases} Z_{p1} = \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_p'} \\ Z_{sp} = \frac{\omega^2 M_2^2}{Z_s'} \\ Z_{2s} = \frac{\omega^2 M_3^2}{Z_2} \end{cases} \quad (11)$$

在进行信号传输后,该系统电能传输的通道阻抗分析为

$$\begin{cases} Z_p' = j\omega L_r + R_r + \frac{1}{j\omega C_p + \frac{1}{j\omega L_p + R_p + j\omega L_2 + R_2 + Z_{sp}}} \\ Z_s' = j\omega L_s + R_s + j\omega L_3 + R_3 + \frac{1}{j\omega C_s + \frac{1}{R}} + Z_{2s} \end{cases} \quad (12)$$

此处的传递函数计算为简化式子忽略了耦合线圈内阻,则

$$\begin{cases} Z_p'(s) = L_r s + R_r + \frac{1}{C_p s + \frac{1}{L_p s + L_2 s + Z_{sp}(s)}} \\ Z_s'(s) = L_s s + L_3 s + \frac{1}{C_s s + \frac{1}{R}} + Z_{2s}(s) \end{cases} \quad (13)$$

由上文分析可知,信号叠加前后电能传输通道的传递函数表达式不变,如式(8)~(10)。

理想电压源的内阻为零,因此对该系统进行信道阻抗分析时看成短路。此外,为简化式子忽略耦合电感内阻。令 Z_1 、 Z_2 为信号调制部分电路阻抗和信号解调部分电路阻抗, Z_p' 和 Z_s' 为同步传输系统原边电路阻抗和副边电路阻抗,则各部分电路阻抗分析有

$$\begin{cases} Z_1 = Z_{11} + Z_{p1} = j\omega L_{-1} + Z_{p1} \\ Z_p' = Z_{pp} + Z_{sp} = j\omega L_{-2} + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p + \frac{1}{j\omega L_r + R_r}} + Z_{sp} \\ Z_s' = Z_{ss} + Z_{2s} = j\omega L_{-s} + j\omega L_3 + \frac{1}{j\omega C_s + \frac{1}{R}} + Z_{2s} \\ Z_2 = j\omega L_4 \end{cases} \quad (14)$$

经拉氏变换,得

$$\begin{cases} Z_{p1}(s) = -\frac{s^2 M^2}{Z_p(s)} \\ Z_{sp}(s) = -\frac{s^2 M^2}{Z_s(s)} \\ Z_{2s}(s) = -\frac{s^2 M^2}{Z_2(s)} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} Z_1(s) = Z_{11}(s) + Z_{p1}(s) \\ Z_p'(s) = Z_{pp}(s) + Z_{ps}(s) \\ Z_s'(s) = Z_{ss}(s) + Z_{2s}(s) \\ Z_2(s) = Z_{22}(s) \end{cases} \quad (16)$$

由 KCL、KVL 可知电流、电压关系,

$$\begin{cases} u_i = j\omega L_{-1} i_1 - j\omega M i_2 \\ -j\omega M i_1 + Z_p i_2 = 0 \\ -j\omega M i_2 + Z_s i_3 = 0 \\ -j\omega M i_3 + Z_2 i_4 = 0 \\ u_0 = j\omega L_4 i_4 \end{cases} \quad (17)$$

经拉氏变换,整理得各传递函数,

$$\begin{cases} G_1(s) = \frac{i_2(s)}{u_i(s)} = \frac{1}{\frac{Z_p(s)}{M_1} L_1 - M_1 s} \\ G_2(s) = \frac{i_3(s)}{i_2(s)} = \frac{M_2 s}{Z_s(s)} \\ G_3(s) = \frac{i_4(s)}{i_3(s)} = \frac{M_3 s}{Z_2(s)} \\ G_4(s) = \frac{u_0(s)}{i_4(s)} = Z_2(s) \end{cases} \quad (18)$$

因此,信道的总传递函数为

$$G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot G_3(s) \cdot G_4(s) \quad (19)$$

4 仿真分析

为了方便信号在拾取端进行滤波处理,避免电能传输对 MHz 级别的信号传输造成影响,参考文献[18]选取原边谐振电感 $L_r = 106.98 \mu\text{H}$,内阻 $R_r = 0.3 \Omega$,副边谐振电容 $C_s = 0.68 \mu\text{F}$,系统工作频率 $f = 28400 \text{ Hz}$,结合式(1)~(5)分析计算其余参数,如表 1 所示。

表 1 LCLP 型系统参数
Tab. 1 LCLP type system parameters

参数名称	参数值
原边谐振电感 L_r (μH)	106.98
原边谐振电感内阻 R_r (μH)	0.3
原边谐振电感 L_p (μH)	23.854
原边谐振电感内阻 R_p (μH)	0.02
原边谐振电容 C_p (μH)	1.582
副边谐振电感 L_s (μH)	44.963
副边谐振电感内阻 R_s (μH)	0.05
副边谐振电容 C_s (μH)	0.68
耦合线圈互感 M (μH)	7.86
输入直流电压 E_{dc} (V)	20
负载 R (Ω)	50
PWM 载频 (Hz)	28400
PWM 调制波频率 (Hz)	1420
FSK 载频 f_1 (MHz)	3.952
FSK 载频 f_b (MHz)	4.516
副边谐振频率 (Hz)	28400

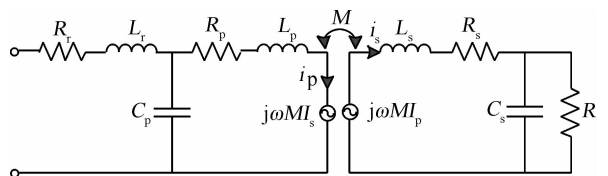


图 4 LCL 等效电路图

Fig. 4 LCL equivalent circuit diagram

为了进行信号传输误码率以及对电能传输的影响的验证比较, 根据图 2 和图 4 所示在 MATLAB/Simulink 仿真环境下搭建了模型, 进行仿真结果的比较分析. 系统参数设置如表 1 所示.

4.1 电能传输仿真结果

为了观察信号传输对电能传输的影响, 本文分别对 ICPT 系统和电能与信号同步传输系统在基于 MATLAB/Simulink 软件环境中进行了模型搭建, 并进行仿真验证, 如图 5 和图 6 所示. 参数选择如表 1 所示.

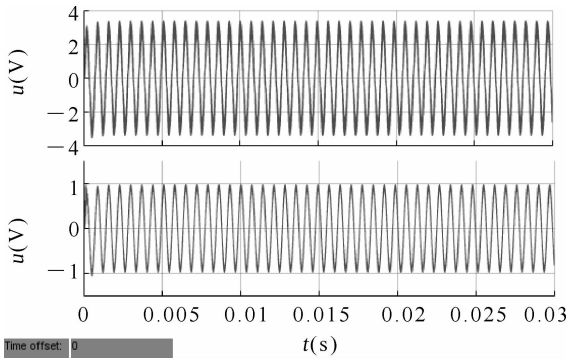


图 5 LCLP 型 ICPT 系统原、副边谐振电压仿真图
Fig. 5 Simulation of primary and secondary resonant voltages in LCLP type ICPT system

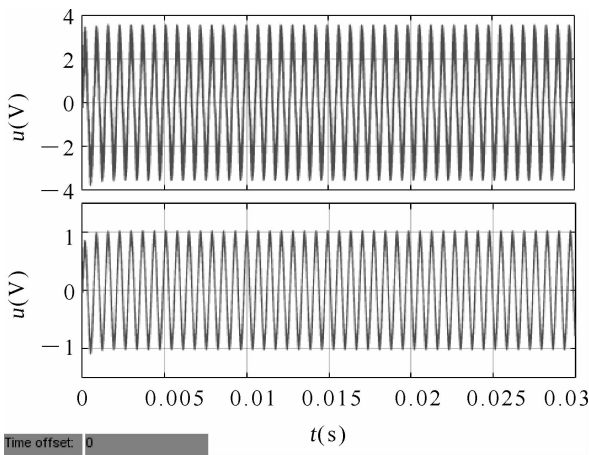


图 6 LCLP 型同步传输系统原、副边谐振电压仿真图
Fig. 6 Simulation of primary and secondary resonant voltages of LCLP synchronous transmission system

图 5 是 LCLP 型的 ICPT 系统仿真结果, 图 6 是 LCLP 型的电能与信号同步传输系统仿真结果. 其中, 两幅仿真图的上半部分为原边谐振位置的电压波形图, 下半部分为副边谐振位置的电压波形图. 在信号传输部分加载线圈和拾取线圈的加入后, LCLP 型的原、副边谐振电压波形基本保持不变, 电能传输效率也保持不变, 即信号能够在不影

响电能传输的前提下完成传输.

4.2 信号传输仿真结果

为了验证 LCLP 型的 ICPT 系统的信号传输低误码率, 本文基于 MATLAB/Simulink 软件环境进行了系统仿真. 为保证信号还原准确性以及紧密结合应答器参数选择, FSK 载波频率参数选取如表 1 所示. 仿真中给传输码元 100 个, 仿真结果如图 7 所示.

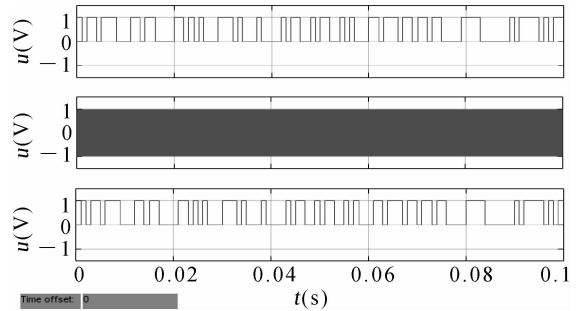


图 7 LCLP 型同步传输系统信号传输结果仿真图
Fig. 7 Simulation results of signal transmission results of LCLP synchronous transmission system

图 7 是 LCLP 型同步传输系统的信号传输仿真图. 其中, 最上面的部分为基带信号, 中间部分是已调信号, 最下面的部分为解调信号. 经在 MATLAB/Simulink 仿真图中加入“Error Rate Calculation”模块和“Display”模块, 测得传输码元 100 个, 误码率是 0, 如图 8 所示. 从而看出, 该系统可以实现信号的传输, 并且能够正确调制解调数字信号.

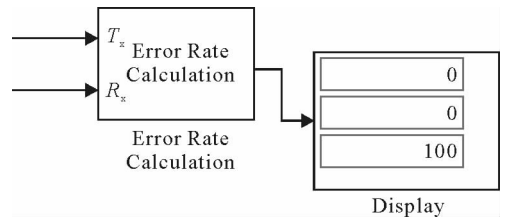


图 8 LCLP 型同步传输系统误码率仿真结果
Fig. 8 Error rate simulation result of LCLP synchronous transmission system

4.3 噪声环境下信号传输误码率分析

为了验证噪声环境下该系统的信号传输低误码率, 参考文献[20-27], 在信道中添加了不同信噪比的高斯白噪声, 并基于 MATLAB/Simulink 软件环境下进行了仿真. 仿真中, 传输码元 100 个, SNR=-9, -4 的误码率仿真结果如图 9 和图 10 所示.

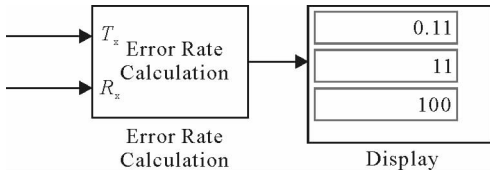


图 9 信噪比 SNR=-9 的噪声环境下信号传输误码率

Fig. 9 Signal transmission error rate in noisy environment at SNR=-9

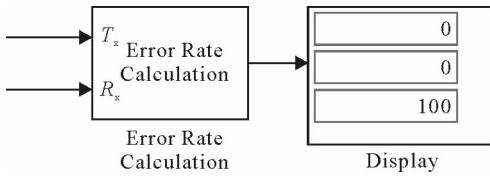


图 10 信噪比 SNR=-4 的噪声环境下信号传输误码率

Fig. 10 Signal transmission error rate in noisy environment at SNR=-4

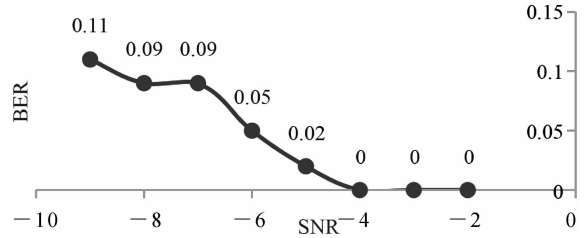


图 11 不同信噪比的噪声环境下信号传输误码率曲线图

Fig. 11 Signal transmission error rate curve under noise environment with different SNR

从图 11 中可以看出,随着信噪比 SNR 值的逐渐增大,信号传输误码率逐渐减小. 当 SNR=-4 时,误码率为 0,即当 SNR≥-4 时,误码率恒为零.

4.4 信号传输电路引入前后系统负载处频谱分析

为了观察信号传输电路引入前后对系统负载处频谱影响,基于 MATLAB/Simulink 软件环境下进行了系统负载处的频谱分析. 信号传输电路引入前后,系统主电路参数保持不变,如表 1 所示. 在经过对电路引入前和引入后进行频谱分析后得频谱响应图,如图 12 和图 13 所示.

为了更好地分析噪声环境下不同信噪比的误码率,基于 MATLAB/Simulink 软件环境下进行了其它信噪比的仿真分析,并绘制了误码率曲线图,如图 11 所示.

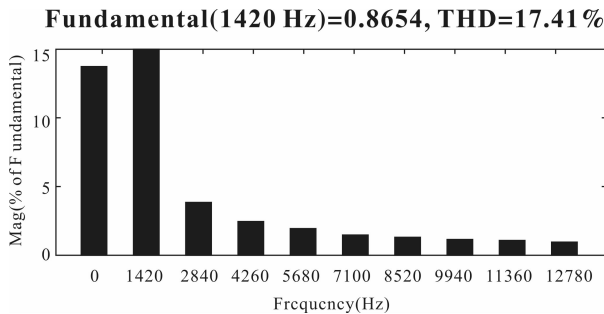


图 12 LCLP 型 ICPT 系统负载处频谱分析图

Fig. 12 Spectrum analysis diagram at LCLP type ICPT system's load

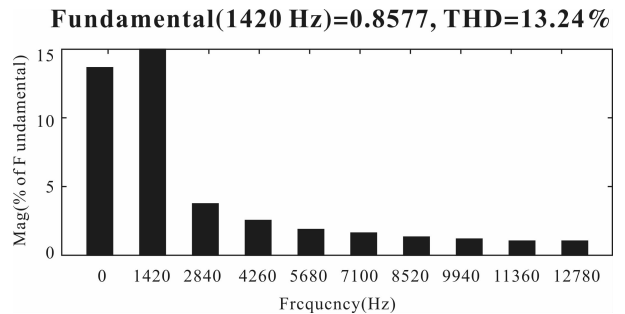


图 13 LCLP 型同步传输系统负载处频谱分析图

Fig. 13 Spectrum analysis diagram at LCLP type synchronous transmission system's load

通过对 LCLP 型的 ICPT 系统和同步传输系统负载处进行频谱分析,可得到 ICPT 系统的谐波畸变率为 17.41%,在增加信号传输通道后谐波畸变率降为 13.24%. 两个系统的谐波分量在一次谐波处最大,二次谐波就大幅度下降,且逐渐减少. 由此看来,信号传输对 ICPT 电能传输并没造成大的影响.

4.5 电能与信号传输通道频域响应分析

为了分析信号传输电路引入前后对电能传输通道频域响应的影响以及 LCLP 型同步传输系统信道频谱响应,通过对信号传输电路引入前后电能传输通道阻抗分析,建立数学模型,推导传递函数,

基于 MATLAB/Simulink 软件环境下进行了系统负载处的频谱响应分析. 系统的参数选择如表 1 所示. 在电路引入前和引入后进行了 BODE 图的绘制,如图 14 和图 15 所示.

图 14 为信号传输电路引入前系统电能传输通道 BODE 图,该结构下的幅值增益趋于一个恒值,并且该处的衰减度较小. 因此,当频率大于某一值时,电能幅值增益不变,且在副边容易接收到足够功率的电能. 图 15 为信号传输电路引入后系统电能传输通道 BODE 图,经比较,两幅图的 BODE 图曲线变化趋势以及衰减度不变,只是在峰值处的值有所增大,但是并不影响在其他频率下的电能传输

性能. 因此, 信号电路的引入对电能传输通道的频

域响应并没有造成大的影响.

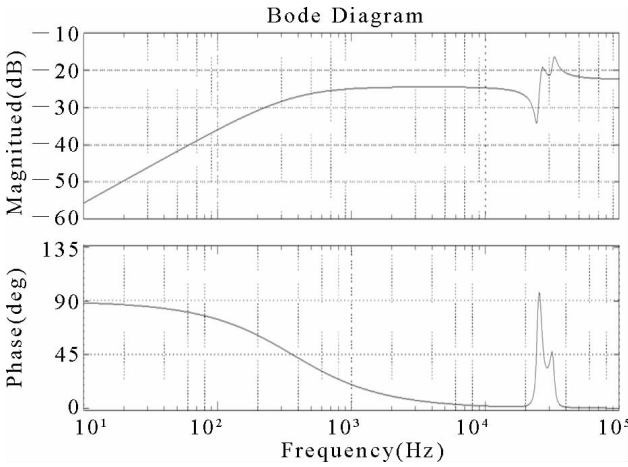


图 14 信号传输电路引入前系统电能传输通道 BODE 图
 Fig. 14 Bode diagram of system power transmission channel without signal transmission circuit

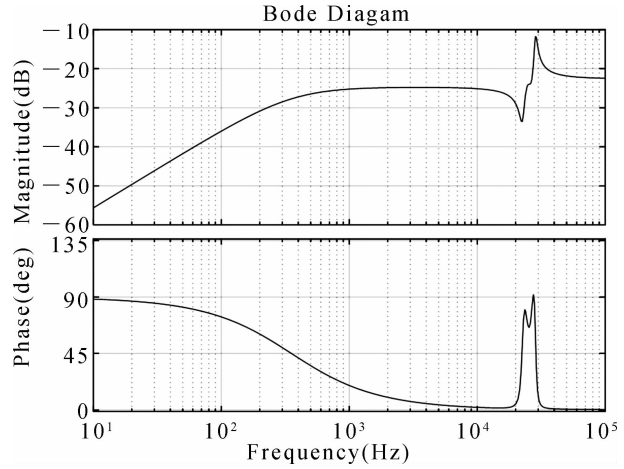


图 15 信号传输电路引入后系统电能传输通道 BODE 图
 Fig. 15 Bode diagram of system power transmission channel with signal transmission circuit

LCLP 型同步传输系统信道进行了 BODE 图的绘制, 如图 16 所示.

并且在 MATLAB/Simulink 软件环境下仿真验证了信号传输码元 100 个, 无噪声下误码率为零; 噪声环境下, 误码率在 $SNR < -4$ 时, 随着 SNR 的增大而减小, 直至 $SNR \geq -4$ 时衡为零; 在信号传输电路引入前后对系统建立数学模型, 求取传递函数, 通过绘制 BODE 图、频谱图对比分析, 表明信号传输对主电路的电能传输频域相应、谐波畸变率以及传输效率等方面没有造成明显影响. 应答器的 FSK 信号载频是基于应答器选择的, 这为系统能够应用在轨道交通上提供了可能性. 但是, 本文仍然存在不足. 未在考虑信号加载、拾取线圈存在的条件下进行参数分析计算, 导致谐振频率的偏移, 电能传输能力受到了一定影响, 应进一步考虑多方面因素, 优化谐振参数, 确保在完全谐振条件下完成信号和电能的同步传输, 实现低误码率和最大传输效率; 仅仅实现了信号的正向低误码率传输, 对于有着同样意义的反向传输有待进一步研究, 以实现电能与信号的同步双向传输.

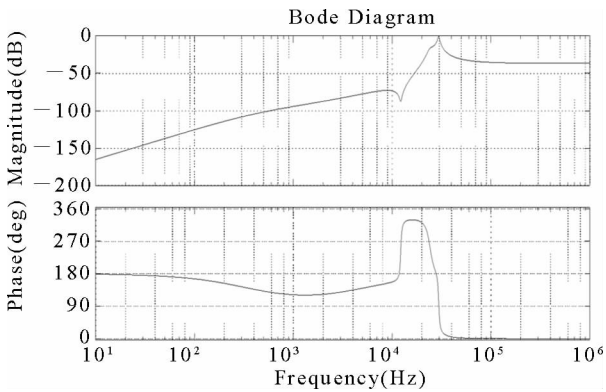


图 16 LCLP 型同步传输系统信道 BODE 图
 Fig. 16 Bode diagram of LCLP type synchronous transmission system channel

图 16 为 LCLP 型同步传输系统信道 BODE 图, 该结构图下, 相角增益趋于 0° , 即信号频率大于某一值, 信号相角不变, 保证了不同频率下的信号传输误码率最小.

5 结 论

本文以 LCLP 型 ICPT 系统作为主电路, 以电能传输能力最优为前提实现了信号与电能同步传输. 文中详细分析了 LCLP 型 ICPT 系统原理, 并进行了系统参数的分析计算; 通过对信号调制解调策略研究, 在原、副边增设耦合线圈完成了 FSK 信号的搭载与拾取, 实现了信号与电能的同步传输,

参考文献:

[1] 陈毅. 基于磁耦合谐振的无线能量与信息同步传输系统设计与实现 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
 [2] 何亚伟. 磁耦合谐振式无线电能与信号同步传输方法研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2015.
 [3] 杨庆新, 李阳, 尹建斌, 等. 基于移幅键控的磁耦合谐振式无线电能和信号同步传输方法 [J]. 电工技术学报, 2017, 32: 153
 [4] 戴欣, 杜人杰, 唐春森, 等. 基于 2FSK 的 ICPT 系

- 统高速信号传输方法 [J]. 西南交通大学学报, 2013, 48: 892.
- [5] 杜人杰. ICPT 系统高速信号传输技术与实现 [D]. 重庆: 重庆大学自动化学院, 2013.
- [6] 伊雪梅. 感应耦合电能与信号传输技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- [7] 张爱国. 感应式电能和信号同步传输技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学电气工程及其自动化学院, 2013.
- [8] 刘洋. ICPT 系统中信号双向传输机理研究 [D]. 重庆: 重庆大学自动化学院, 2014.
- [9] 周锦锋, 孙跃, 苏玉刚, 等. 感应耦合电能与信号同步传输技术 [J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2009, 2: 93.
- [10] 王琛琛. 感应耦合电能与信号混合传输系统研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [11] 孙跃, 王琛琛, 唐春森, 等. CPT 系统能量与信号混合传输技术 [J]. 电工电能新技术, 2010, 29: 10.
- [12] Son Y H, Jang B J. Simultaneous data and power transmission in resonant wireless power system [C]//Microwave Conference Proceedings (APMC). Seoul, South Korea: IEEE, 2013.
- [13] Boheemen E L V, Boys J T, Covic G A. Dual-tuning IPT systems for low bandwidth communications [C]//2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Harbin, China: IEEE, 2007.
- [14] 孙跃, 闫鹏旭, 王智慧, 等. ICPT 系统电能信号共享通道实时同步传输方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36: 5172.
- [15] 闫鹏旭. 基于共享通道的 ICPT 系统能量信号并行传输技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [16] 伏思庆. 基于频率和相位调制 ICPT 系统信号双向传输 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [17] 周继昆, 张荣, 张毅. LCL 谐振型感应电能传输系统特性 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14: 615.
- [18] 戴欣, 孙跃, 唐春森, 等. 无线电能传输技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [19] 欧剑, 赵欣. 信号调制三值噪声作用下有源低通滤波器中的随机共振 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2016, 53: 105.
- [20] 苏立轩, 张晨. 动车组过分相暂态过程对信号设备电磁影响 [J]. 铁道工程学报, 2016, 33: 71.
- [21] 赵会兵, 全宏宇, 梁迪. 应答器上行链路信号自适应解调方法 [J]. 交通运输工程学报, 2013, 13: 107.
- [22] 杨红强, 米根锁, 王宝宝. 自适应小波阈值算法在应答器信号去噪中的应用 [J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2016, 37: 31.
- [23] 徐宁, 张季良, 王财进, 等. 列车高速运行条件下应答器车载测试设备关键技术 [J]. 中国铁道科学, 2010, 31: 131.
- [24] 吕城锦, 赵会兵, 朱林富, 等. 基于 Kalman 滤波的应答器上行链路信号处理的研究 [J]. 铁道学报, 2016, 38: 64.
- [25] 刘宇, 刘琼, 周帆, 等. 基于自适应 UKF 微型航空系统噪声在线估计 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2016, 28: 285.
- [26] 李春腾, 蒋宇中, 刘芳君, 等. 超低频天线设计中的运动感应噪声研究 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2018, 30: 470.
- [27] 郑建宏, 李玉菱, 龚明苇, 等. 基于信噪比排序的 MIMO-OFDM 信号检测方法 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2017, 29: 427.

引用本文格式:

中文: 赵乐, 李欣. 基于 FSK 的 LCLP 型 ICPT 系统信号传输方法研究 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2019, 56: 78.

英文: Zhao L, Li X. Research on signal transmission method of LCLP type ICPT system based on FSK [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2019, 56: 78.