

计及信号与电能同步传输影响的ICPT系统谐振参数优化方法

李欣^{1,2}, 赵乐³

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

摘要:针对信号与电能同步传输的感应耦合电能传输(ICPT)系统中信号耦合线圈对电能传输效率影响的问题,基于LCLP型ICPT系统谐振拓扑结构,利用在原、副边增设耦合线圈对信号进行加载和拾取,实现了信号与电能的同步传输;通过分析原、副边电流的关系,利用耦合变压器、信号发射耦合线圈和信号接收耦合线圈的互感反射阻抗,建立了信号耦合线圈与电能传输效率之间相关联的非线性规划模型,分析了信号耦合线圈对传输效率的影响,给出了相对应的电能传输效率目标函数和约束条件,在此基础上利用自适应粒子群优化算法对谐振补偿参数进行优化,并进行了仿真验证。仿真结果表明相较于同类型信号传输方法,优化后的系统信号传输误码率有所降低,电能传输效率有所提高;波特图表明优化后的信号传输电路并未对电能传输造成较大影响,负载处谐波畸变率有所降低。

关键词:信号与电能同步传输;ICPT;自适应粒子群优化算法;非线性规划;优化

中图分类号:TM 92

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202007028

0 引言

作为骨干和主要的交通运输模式,轨道交通是国民经济大动脉和现代城市运行的骨架,是国家关键基础设施和重要基础产业,在我国经济社会发展中的地位和作用至关重要^[1-2]。轨道交通高效率牵引供电与传动关键技术是轨道交通科技持续创新十大重点任务之一,而可储能的绿色无线供电装置将是2035年智能高铁的核心智能装备。

目前轨道交通牵引供电普遍采用传统的实时接触式供电方式,传统接触式牵引供电方式中架空接触网易出现打弧、接触火花、摩擦磨损等问题,需要定期维护和更换,提升了维护成本;积碳、振动离线、雷击断电等不可靠现象对正常运营构成了潜在的危害。

相较于接触式的供电方式,非接触式供电方式综合利用电力电子变换技术、电磁场耦合技术以及控制理论,以非导线接触方式实现了电网与用电设备间的能量交互。目前无线电能传输方式主要包括

微波辐射、磁共振耦合、感应耦合和电场耦合4种,其中感应耦合电能传输ICPT(Inductively Coupled Power Transfer)技术具有非接触、大功率、近距离、供电灵活、安全可靠、维护成本低的特点,可以非接触供电方式为列车提供实时大功率牵引电能。

在采用非接触式牵引供电方式下,信号可以与电能共享通道进行双向传输,并有效简化车地之间的通信设备,轨道交通中的车地通信和轨道电路中存在类似的信号同步传输需求,因此电能与信号同步传输的研究已成为国内外无线电能传输领域的研究热点。

ICPT系统电能与信号的并行传输分为信号与电能的正向并行传输、信号与电能的反向并行传输以及信号与电能双向并行传输。在信号与电能双向并行传输研究中,主要利用单线圈双谐振的耦合结构或通过谐振线圈与信号耦合线圈间接并联实现信号经由电能传输通路的双向并行传输。目前,对于基于ICPT系统电能与信号同步传输的研究主要有信号通过主电路原、副边增设的耦合线圈实现加载与拾取^[4-5];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^[6-7];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^[7-8];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^[9-11];通过改变谐振补偿电容来传输信号^[12]。但是,选择不同的信号传输方法、不同的谐振参数所能达到的传输效率是不同的。

收稿日期:2019-12-27; **修回日期:**2020-06-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51767015);甘肃省科技计划(甘肃省自然科学基金资助项目)(18JR3RA117);兰州交通大学-天津大学联合创新基金资助项目(2019051)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51767015), Gansu Provincial Science and Technology Program (Gansu Natural Science Foundation) (18JR3RA117) and Lanzhou Jiaotong University-Tianjin University Joint Innovation Fund Project(2019051)

ICPT系统中,由于松耦合变压器的耦合系数较低,主磁路磁阻较大,因此传输效率较低,为实现气隙磁路条件下的高密度和高效能量传输,减小线圈电感产生的无功分量,提高系统功率因数,通常在原、副边分别增设补偿网络以补偿漏感和励磁电感,减小线路损耗和电源容量^[13]。目前对ICPT系统的补偿谐振参数优化的研究主要有以电能传输效率为优化目标的单目标优化^[14-15]、以电能传输功率和传输效率为优化目标的多目标优化^[16-17]、对优化算法的改进和建立指标评价体系并进行优化^[18-19]。针对信号与电能同步传输ICPT系统的研究主要集中于信号调制方法、传输速率、误码率和信噪比等方面,对信号与电能同步传输条件下ICPT系统的谐振补偿的优化鲜见报道。

ICPT系统谐振补偿电路结构和参数对系统电能的传输的功率和效率有重要影响,目前针对电能与信号同步传输ICPT系统谐振补偿参数优化的研究均只考虑电能传输本身,而未考虑增设的信号传输耦合线圈对系统电能传输的影响。在实际ICPT系统中信号传输耦合线圈对系统电能传输的影响不能忽略,在对ICPT系统谐振补偿参数进行优化时需要考虑信号传输的影响选取目标函数和确立约束条件,进行谐振参数优化。这样才能全面有效提高信号与电能同步传输ICPT系统的传输效率。

本文针对电能与信号同步传输ICPT系统中信号耦合线圈对电能传输效率影响的问题,以电能传输效率为目标,以自适应粒子群优化算法为优化工具,在考虑信号传输电路对电能传输的影响条件下对电能传输的谐振补偿网络进行了参数优化,提升了电能与信号同步传输ICPT系统的传输性能。首先,对基于频移键控FSK(Frequency Shift Keying)调制的LCLP型ICPT信号与电能同步传输机理进行分析;其次,在考虑了信号耦合线圈的情况下,根据原、副边干支路的电流关系,采用交流阻抗分析法建立了非线性规划(NLP)模型,同时选取电能传输效率作为目标函数、确立了约束条件,经过拉氏变换获取了信道的总传递函数,利用自适应粒子群优化算法对谐振补偿参数进行优化;最后,在MATLAB/Simulink软件环境建立电能与信号同步传输ICPT系统动态仿真模型对最优参数解和通过阻抗分析计算得到的匹配参数值进行对比仿真研究,给出了电能与信号传输通道频域响应分析,验证了同步传输系统的可靠性。

1 LCLP型ICPT系统信号与电能同步传输机理分析

按照谐振补偿结构不同,可以将其分为4种基

本谐振补偿电路和混联型补偿电路。在ICPT系统中,为了提高系统传输效率和减小开关管损耗,在系统原边通常采用谐振变换器来产生高频导轨电流。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 (Q 为LC谐振网络的品质因数,其值通常远大于1)倍,开关管容易损坏^[20]。

为了避免上述情况发生,本文采用LCLP型ICPT系统作为信号与电能同步传输系统的主电路。此外,为了不改变主电路的基本结构,减少对主电路电能传输的影响,本文通过在LCLP型ICPT系统的原、副边增设耦合线圈来实现信号与电能的同步传输,如图1所示。图中, L_r 、 L_p 分别为原边谐振电感、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 、 C_s 分别为原、副边谐振补偿电容; R 为负载等效电阻; L_1 、 L_2 为信号的加载线圈电感, L_3 、 L_4 为信号的拾取线圈电感,这些线圈为信号传输的重要传输机构; M_1 、 M_2 、 M_3 分别为加载线圈互感值、原边与副边线圈的互感值、拾取线圈的互感值; i_p 、 i'_p 、 i''_p 分别为原边干路电流、流经原边电感的电流、流经原边谐振电容的电流; i_s 、 i'_s 、 i''_s 分别为副边干路电流、流经副边谐振电容的电流、流经副边负载的电流。

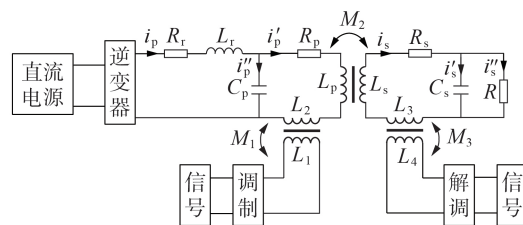


图1 LCLP型ICPT系统电能与信号同步传输原理图

Fig.1 Principle diagram of synchronous transmission of power energy and signal in LCLP-type ICPT system

逆变器将直流电源变为高频交流电流,然后经谐振电路补偿后注入原边耦合线圈,根据电磁感应原理,副边耦合线圈将感应出高频电压。副边回路将感应电能经谐振电路后供给负载使用。而信号传输电路以不改变ICPT系统的主电路拓扑结构为前提,在原、副边增设信号耦合线圈实现信号传输。信号经FSK调制后通过信号耦合线圈加载到主电路中,传输到副边回路再由另一组信号耦合线圈拾取,并进行解调。FSK调制解调原理图如图2所示。

2 LCLP型ICPT系统电能与信号同步传输NLP建模与分析

在进行谐振参数优化前,需要考虑信号耦合线圈的情况,根据原、副边干支路的电流关系,以交流

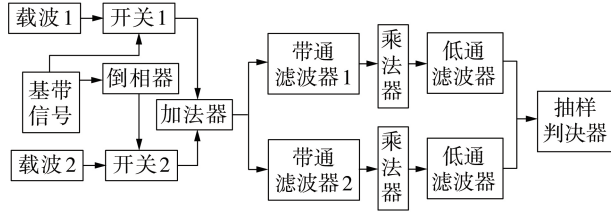


图2 FSK 调制解调原理图

Fig.2 Principle diagram of FSK modulation and demodulation

阻抗分析法为基础,选取电能传输效率为优化目标,以系统各部分的电流、电压额定值等要求为约束条件,构造 NLP 数学模型,同时经过拉氏变换获取信道的总传递函数,为后续系统频率分析奠定基础。

2.1 原、副边各支路的电流关系

在建立 NLP 模型过程中,需要对原、副边回路分析计算电能输入、输出功率以及电能传输效率。为了方便分析计算,通过对图 1 的电路原理分析,建立了原、副边总路电流和各支路电流间的等式关系。

为方便后续计算,在分析原、副边各支路的电流关系时忽略耦合线圈反射阻抗的影响。则 i'_p 、 i''_p 与 i_p 的关系为:

$$i'_p = i_p \frac{X_{C_p}}{X_{C_p} + X_{L_p} + X_{L_2}} = i_p \frac{1}{1 + \omega_0^2 C_p L_p + \omega_0^2 C_p L_2} \quad (1)$$

$$i''_p = i_p \frac{X_{L_p} + X_{L_2}}{X_{C_p} + X_{L_p} + X_{L_2}} = i_p \frac{\omega_0^2 C_p L_p + \omega_0^2 C_p L_2}{1 + \omega_0^2 C_p L_p + \omega_0^2 C_p L_2} \quad (2)$$

其中, X_{L_p} 、 X_{C_p} 、 X_{L_2} 分别为 L_p 、 C_p 、 L_2 的电抗; ω_0 为原、副边谐振频率。

则 i'_p 与 i''_p 的电流关系为:

$$i'_p = i''_p \frac{1}{\omega_0^2 C_p L_p + \omega_0^2 C_p L_2} \quad (3)$$

副边各支路电流 i'_s 、 i''_s 与干路电流 i_s 的关系为:

$$i'_s = i_s \frac{R}{X_{C_s} + R} = i_s \frac{\omega_0 C_s R}{1 + \omega_0 C_s R} \quad (4)$$

$$i''_s = i_s \frac{X_{C_s}}{X_{C_s} + R} = i_s \frac{1}{1 + \omega_0 C_s R} \quad (5)$$

其中, X_{C_s} 为 C_s 的电抗。则 i'_s 与 i''_s 的电流关系为:

$$i'_s = i''_s \omega_0 C_s R \quad (6)$$

2.2 NLP 数学模型

交流阻抗分析法是建立参数优化数学模型的常用方法,其根据 ICPT 系统中互感模型的反射阻抗得到原、副边谐振结构的参数关系,从而构建了数学模型。为确保电能传输能力的最大化,令系统工作的频率与原、副边的谐振频率相同。令 Z_{p1} 、 Z_{sp} 、 Z_{2s} 分别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。则反射阻抗包含 3 个部分,即:

$$\begin{cases} Z_{p1} = \frac{\omega_0^2 M_1^2}{Z'_p} \\ Z_{sp} = \frac{\omega_0^2 M_2^2}{Z'_s} \\ Z_{2s} = \frac{\omega_0^2 M_3^2}{Z_2} \end{cases} \quad (7)$$

其中, Z'_p 、 Z'_s 、 Z_2 分别为同步传输系统原边、副边、信号解调部分的电路阻抗。

原、副边的输入阻抗分别为:

$$\begin{cases} Z_p = j\omega_0 L_r + R_r + \\ 1/[j\omega_0^2 C_p + 1/(j\omega_0 L_p + R_p + j\omega_0^2 L_2 + R_2 + Z_{sp})] \\ Z_s = j\omega_0 L_s + R_s + j\omega_0 L_3 + R_3 + 1/(j\omega_0 C_s + 1/R) + Z_{2s} \end{cases} \quad (8)$$

其中, Z_p 、 Z_s 分别为原、副边的输入阻抗。

系统输出功率 P_i 为:

$$P_i = (i''_s)^2 R = \frac{-\omega_0^2 M_2^2 i_p^2 R}{Z_s^2 (1 + \omega_0^2 C_p L_p + \omega_0^2 L_2 C_p)^2 (1 + \omega_0 C_s R)^2} \quad (9)$$

系统输入功率 P_i 为:

$$P_i = i_p^2 Z_p \quad (10)$$

综上,系统的传输效率 η 为:

$$\eta = \frac{P_i}{P_i} = \frac{-\omega_0^2 M_2^2 R}{Z_s^2 Z_p (1 + \omega_0^2 C_p L_p + \omega_0^2 L_2 C_p)^2 (1 + \omega_0 C_s R)^2} \quad (11)$$

在参数设计过程中,待优化的变量为 L_r 、 L_p 、 L_s 、 L_2 、 C_p 、 C_s 、 f_0 ($f_0 = \omega_0 / (2\pi)$),这 7 个参数根据实际情况给出了相应的取值范围,即给出了每个优化变量的最大值和最小值(分别用下标 max、min 表示),构成了优化变量的解空间,如式(12)所示。

$$\begin{cases} L_{r_min} < L_r < L_{r_max}, L_{p_min} < L_p < L_{p_max} \\ L_{s_min} < L_s < L_{s_max}, L_{2_min} < L_2 < L_{2_max} \\ C_{p_min} < C_p < C_{p_max}, C_{s_min} < C_s < C_{s_max} \end{cases} \quad (12)$$

此外,电路中各电感和电容的电压、电流必须小于其额定值,即:

$$\begin{cases} i_p < i_{p_rate}, i_s < i_{s_rate} \\ i_{Lr} < i_{Lr_rate}, i_p < i_{p_rate}, i_{Cp} < i_{Cp_rate} \\ i_{Ls} < i_{Ls_rate}, i_{Cs} < i_{Cs_rate}, i_{L2} < i_{L2_rate} \\ u_{Lr} < u_{Lr_rate}, u_{Lp} < u_{Lp_rate}, u_{Cp} < u_{Cp_rate} \\ u_{Ls} < u_{Ls_rate}, u_{Cs} < u_{Cs_rate}, u_{L2} < u_{L2_rate} \end{cases} \quad (13)$$

其中, i_{Cp_rate} 为流过 C_p 的电流 i_{Cp} 的额定电流值; u_{Cp_rate} 为 C_p 两端电压 u_{Cp} 的额定值;其他参数含义类似。

将式(1)~(6)代入式(13)中,整理得 14 项约束条件具体见附录中式(A1)。综上,选取式(11)为目标函数,式(A1)为约束条件,共同构成了 NLP 数学模型。式(12)为优化变量解空间。

2.3 传递函数模型

为方便谐振参数优化后的传输特性分析,需要

基于阻抗分析进行传递函数的计算。在进行传递函数推导时,为简化方程式,忽略耦合线圈内阻,则经拉氏变换后,式(8)变为:

$$\begin{cases} Z_p(s) = L_i s + R_i + \frac{1}{C_p s + 1/(L_p s + L_2 s + Z_{sp}(s))} \\ Z_s(s) = L_s s + L_3 s + \frac{1}{C_s s + 1/R} + Z_{2s}(s) \end{cases} \quad (14)$$

由基尔霍夫电流定律(KCL)、基尔霍夫电压定律(KVL)可得电流、电压的函数关系,经拉氏变换后,可得:

$$\begin{cases} u_p(s) = Z_p(s) i_p(s) - M_2 s i_s(s) \\ M_2 s i_p(s) = Z_s(s) i_s(s) \\ u_s(s) = Z_s(s) i_s(s) \end{cases} \quad (15)$$

则电能传输通道的传递函数 G_1 为:

$$G_1(s) = \frac{u_s(s)}{u_p(s)} = G_2(s) G_3(s) = \frac{Z_s(s) M_2 s}{Z_p(s) Z_s(s) - M_2^2 s^2} \quad (16)$$

其中, G_2 、 G_3 分别为信号传输电路引入后电能传输通道的原、副边传递函数。

理想电压源的内阻为0,因此对该系统进行信道阻抗分析时看成短路。为简化方程式,忽略耦合电感内阻。各部分电路阻抗为:

$$\begin{cases} Z_1 = Z_{11} + Z'_{p1} = j\omega_0 L_1 + Z'_{p1} \\ Z'_p = Z_{pp} + Z'_{sp} = j\omega_0 L_2 + \\ \quad j\omega_0 L_p + \frac{1}{j\omega_0 C_p + 1/(j\omega_0 L_r + R_r)} + Z'_{sp} \\ Z'_s = Z_{ss} + Z'_{2s} = \\ \quad j\omega_0 L_s + j\omega_0 L_3 + 1/(j\omega_0 C_s + 1/R) + Z'_{2s} \\ Z_2 = Z_{22} = j\omega_0 L_4 \end{cases} \quad (17)$$

其中, Z_1 为信号调制部分的电路阻抗; Z'_{p1} 、 Z'_{sp} 、 Z'_{2s} 分别为信道阻抗分析中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; Z_{11} 、 Z_{22} 和 Z_{pp} 、 Z_{ss} 分别为信号调制部分电路、解调部分电路和并行传输系统原边电路、副边电路中除去反射阻抗的其余阻抗。

对式(17)进行拉氏变换,可得:

$$\begin{cases} Z'_{p1}(s) = -\frac{s^2 M_1^2}{Z_p(s)} \\ Z'_{sp}(s) = -\frac{s^2 M_2^2}{Z'_p(s)} \\ Z'_{2s}(s) = -\frac{s^2 M_3^2}{Z_2(s)} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} Z_1(s) = Z_{11}(s) + Z'_{p1}(s) \\ Z'_p(s) = Z_{pp}(s) + Z'_{sp}(s) \\ Z'_s(s) = Z_{ss}(s) + Z'_{2s}(s) \\ Z_2(s) = Z_{22}(s) \end{cases} \quad (19)$$

由KCL、KVL可知,电流、电压的关系为:

$$\begin{cases} u_i = j\omega_0 L_1 i_1 - j\omega_0 M_1 i'_p \\ -j\omega_0 M_1 i_1 + Z'_p i'_p = 0 \\ -j\omega_0 M_2 i'_p + Z'_s i_s = 0 \\ -j\omega_0 M_3 i_s + Z_2 i_2 = 0 \\ u_o = j\omega_0 L_4 i_2 \end{cases} \quad (20)$$

其中, i_1 、 i_2 分别为调制部分、解调部分电路电流; u_i 、 u_o 分别为信号加载线圈的输入电压、信号拾取线圈的输出电压。

经拉氏变换可得信道的总传递函数 G_4 为:

$$G_4(s) = G_5(s) G_6(s) G_7(s) G_8(s) \quad (21)$$

其中, G_5 为信道的信号调制电路传递函数; G_6 、 G_7 分别为经拉氏变换后电能传输通道的原、副边电路传递函数; G_8 为信道的信号解调电路传递函数。

3 参数优化及仿真分析

3.1 谐振补偿参数优化

以式(11)和式(14)所构成的数学模型为优化对象,参考MATLAB/Simulink中的仿真实验结果,给出已知参数值和约束值,选取耦合系数 k 为0.24,其他参数见附录中表A1^[10]。

优化变量 f_0 、 L_p 、 L_s 、 C_p 、 C_s 、 L_2 、 L_r 的解空间分别为(1,50) kHz、(0.001,0.5) mH、(0.001,0.5) mH、(0.001,10) μ F、(0.001,10) μ F、(0.1,1 000) μ H、(1,500) μ H。

自适应粒子群优化算法具有良好的全局搜索性能和求解精度,能够兼顾全局寻优能力和局部搜索能力,而且实现方式相比于其他算法更简单。相比于蚁群算法及遗传算法,自适应粒子群优化算法在参数匹配速度与匹配精度方面有明显的优越性。为实现电能与信号同步传输过程中电能传输效率的最大化,本文利用自适应粒子群优化算法对该系统的参数进行优化,算法流程图如附录中图A1所示。算法优化结果如图3所示。由图3可知,电能传输效率的最优解为0.8253,比文献[6]中同类信号传输方法的电能传输效率高5.52%,优化得到最优参数为 $f_0=15.055$ kHz, $L_p=0.256$ mH, $L_s=0.026$ mH, $C_p=0.01$ μ F, $C_s=4$ μ F, $L_2=1$ μ H, $L_r=78.915$ μ H。

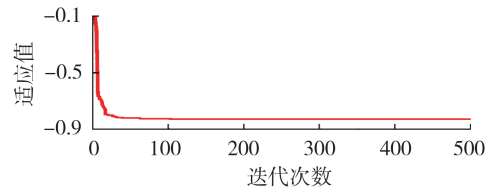


图3 优化结果适应度曲线

Fig.3 Fitness curve of optimization result

3.2 电能传输仿真分析

为了验证优化参数结果的有效性,本文结合理论分析,参考最优参数解和通过阻抗分析计算得到

的匹配参数值,基于 MATLAB / Simulink 软件环境对电能与信号同步传输系统搭建仿真模型,系统仿真模型见附录中图 A2。其中,系统的各个参数如表 1 所示。表中, E_{dc} 为输入直流电压; f_1 为 FSK 载波 1 的频率; f_h 为 FSK 载波 2 的频率。

表 1 同步传输系统参数

Table 1 Parameters of synchronous transmission system

参数	最优参数值	匹配参数值	参数	最优参数值	匹配参数值
$L_e / \mu\text{H}$	78.915	106.98	$L_2 / \mu\text{H}$	1	4.27
L_p / mH	0.256	0.023	$L_3 / \mu\text{H}$	39.23	39.23
$C_p / \mu\text{F}$	0.01	1.582	$L_4 / \mu\text{H}$	3.97	3.97
L_s / mH	0.026	0.044	E_{dc} / V	20	20
$C_s / \mu\text{F}$	4	0.68	R / Ω	50	50
$M / \mu\text{H}$	7.86	7.86	f_1 / MHz	3.952	3.952
L_1 / mH	38.19	38.19	f_h / MHz	4.516	4.516

为比较在最优参数值和匹配参数值下电能的传输效果,通过在原、副边耦合线圈处以及负载处添加“scope”模块。图 4 上、下两图分别为最优参数和匹配参数下负载处电压幅值仿真结果图,由于优化目标仅为电能传输效率,未能考虑输出功率,优化后的电压幅值有所下降,但已达到电能传输的要求。

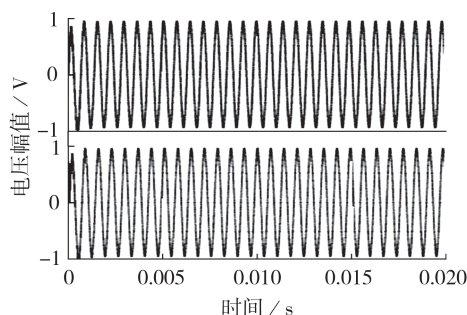


图 4 最优参数与匹配参数下负载处电压幅值仿真结果

Fig.4 Simulative results of load voltage under optimal parameters and matching parameters

3.3 信号传输仿真分析

为了验证在最优参数基础上进行的信号传输低误码率,基于 MATLAB / Simulink 软件环境搭建了仿真模型。为紧密结合轨道应用背景,FSK 载频参考应答器的载波频率分别为 3.952 MHz (逻辑 0) 和 4.516 MHz (逻辑 1)。在仿真过程中,传输码元为 100 个,电能与信号同步传输系统的信号传输仿真结果如图 5 所示,图中由上至下依次为基带信号、调制信号和解调信号。为了更直观地观察误码率,在仿真模型图中加入“Error Rate Calculation”模块和“Display”模块。仿真结果见附录中图 A3,其中传输码元为 100 个,误码率为 0。由此可见,在最优参数的情况下可以实现信号的有效传输。

3.4 负载处频谱分析

为了观察在最优参数的情况下负载处频谱影

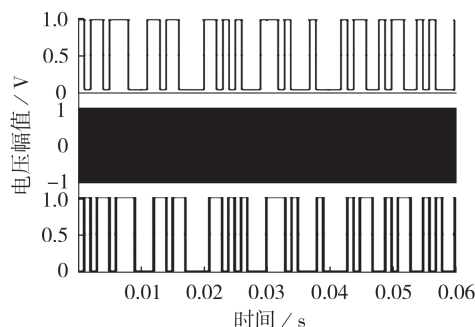


图 5 信号传输仿真结果

Fig.5 Simulative result of signal transmission

响,基于 MATLAB / Simulink 软件环境下分别进行了负载处最优参数和匹配参数下的频谱分析,得到如图 6 所示的频谱分析图。图 6(a)为最优参数下负载处频谱分析图,由图可知负载处的谐波畸变率为 10.10%,在基波处的谐波分量最大,但在二次谐波处大幅减小,而且整体谐波分量趋于减小。相比于图 6(b)中匹配参数下负载处频谱分析图而言,谐波畸变率降低 3.15%。由此看来,通过优化所得到参数值大幅提高了电能传输的质量。

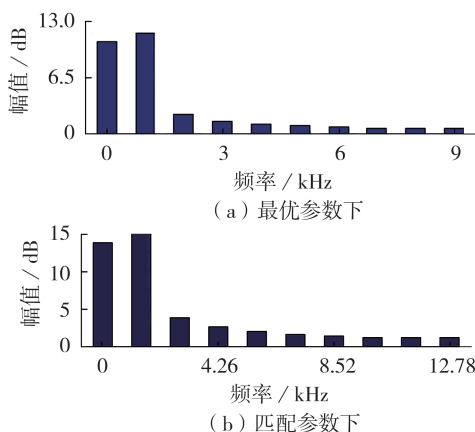


图 6 负载处频谱分析图

Fig.6 Spectrum analysis diagram at load

3.5 电能与信号传输通道频域响应分析

为了分析在最优参数和匹配参数情况下电能传输通道和信道的频域响应,本文通过数学建模推导其传递函数,并在 MATLAB 软件环境下绘制了波特图,如附录中图 A4、图 A5 所示。

图 A4(a)为最优参数下的电能传输波特图,其幅值增益趋于恒定值,即频率大于某一值,电能幅值增益保持不变。图 A4(b)为匹配参数下的电能传输波特图。通过比较可以发现,最优参数结果下电能传输通道波特图的幅值增益在频率大于 105 Hz 时趋于恒定值,而匹配参数结果下的幅值增益在频率小于 105 Hz 时就已趋于恒定值,且 2 个恒定值基本相等。

图 A5(a)为最优参数下的信道波特图,其相角

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的低误码率。图A5(b)为匹配参数下的信道波特图。可以发现,最优参数结果下信道波特图的相值增益趋于0所对应的频率要大于匹配参数下所对应的频率。因此,最优参数下系统的工作频率值要求更高。

4 结论

本文针对电能与信号同步传输ICPT系统中信号耦合线圈对电能传输效率的影响,在给出LCLP型ICPT系统信号与电能同步传输原理和确定信号传输方法的基础上,通过分析原、副边干支路电流关系,利用耦合变压器、信号发射耦合线圈和信号接收耦合线圈的互感反射阻抗建立信号耦合线圈与电能传输效率之间相关联的NLP模型,同时对信号耦合线圈对传输效率的影响进行分析,给出了电能传输效率目标函数和约束条件,以MATLAB软件为平台,通过自适应粒子群优化算法完成了电能传输效率优化和仿真验证。谐振参数优化后的系统电能传输效率达到82.53%,相比同类型信号传输方法下的电能传输效率提高了5.52%,负载处谐波畸变率为10.10%,比优化前降低了3.15%;信号传输在噪声环境下误码率为0,通过绘制波特图、频谱图进行特性比较分析,确保优化结果的稳定可靠。结果表明该优化方法可有效提高电能与信号同步传输ICPT系统的电能传输效率和质量。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 贾利民,秦勇,王莉. 轨道交通科技发展的方向与任务[J]. 北京交通大学学报,2016,40(4):25-31.
JIA Limin, QIN Yong, WANG Li. Scientific and technological innovation of rail transportation trends and tasks[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, 40(4):25-31.
- [2] WANG H, LI X. Review and research progress of wireless power transfer for railway transportation[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2019, 14(3):475-484.
- [3] 麦瑞坤,李勇,何正友,等. 无线电能传输技术及其在轨道交通中研究进展[J]. 西南交通大学学报,2016,51(3):446-461.
MAI Ruikun, LI Yong, HE Zhengyou, et al. Wireless power transfer technology and its research progress in rail transportation[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(3):446-461.
- [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(5):892-897.
DAI Xin, DU Renjie, TANG Chunsen, et al. A 2FSK-based high-speed signal transmission method for ICPT system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(5):892-897.
- [5] 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(1):78-86.
ZHAO Le, LI Xin. Research on signal transmission method of LCLP type ICPT system based on FSK[J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition), 2019, 56(1):78-86.
- [6] 刘洋. ICPT系统中信号双向传输机理研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
LIU Yang. Study on signal bidirectional transmission mechanism of ICPT system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [7] 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.
WANG Chenchen. Study on inductively coupled power and data transfer system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [8] 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(4):10-13,22.
SUN Yue, WANG Chenchen, TANG Chunsen, et al. Study on inductively coupled synchronous transmission of power and signal[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2010, 29(4):10-13, 22.
- [9] 刘晓胜,顾轩涛,姚友素,等. 基于电容调制的无线电能传输系统信号电能同步传输[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):140-146,154.
LIU Xiaosheng, GU Xuanpu, YAO Yousu, et al. Synchronous transmission of signal and power in WPT system based on capacitor modulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3):140-146, 154.
- [10] 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(19):5172-5178,5398.
SUN Yue, YAN Pengxu, WANG Zhihui, et al. Research on real-time synchronization transmission of power and data via a shared channel in inductive coupling power transfer systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19):5172-5178, 5398.
- [11] 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.
YAN Pengxu. Research on power and data parallel transmission technology via a shared channel for ICPT system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [12] 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.
FU Siqing. Bidirectional signal of ICPT system based on frequency and phase modulation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [13] 夏晨阳,陈国平,任思源,等. 采用新型负载恒流供电复合谐振网络的无线电能传输系统[J]. 电力系统自动化,2017,41(2):46-52.
XIA Chenyang, CHEN Guoping, REN Siyuan, et al. Wireless power transfer system using composite resonant network for constant-current power supply of load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2):46-52.
- [14] 左兰,戴鹏,李建功,等. 基于改进粒子群算法的ICPT系统多约束多参数优化[J]. 电工电能新技术,2013,32(2):76-81.
ZUO Lan, DAI Peng, LI Jiangong, et al. Multi-constraint multi-parameter optimization on efficiency of inductive coupling power transfer system based on improved particle swarm optimization[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(2):76-81.
- [15] 高键鑫,吴旭升,高崑,等. 一种基波电流补偿高次谐波电流的LCCL谐振结构参数设计方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):201-207.
GAO Jianxin, WU Xusheng, GAO Wei, et al. Design method of fundamental current compensating harmonic current parameters for LCCL resonant structure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6):201-207.

- [16] 赵志斌. 基于NLP建模的ICPT系统参数优化[D]. 重庆:重庆大学,2012.
ZHAO Zhibin. Parameter optimization of ICPT systems based on NLP modeling[D]. Chongqing:Chongqing University,2012.
- [17] 李长生,张合,曹娟,等. 磁共振耦合电能传输系统功率与效率传输特性分析与优化[J]. 电力系统自动化,2015,39(8):92-97.
LI Changsheng,ZHANG He,CAO Juan,et al. Analysis and optimal design for power and efficiency transmission characteristics of magnetic resonance coupling power transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(8):92-97.
- [18] 赵志斌,孙跃,周诗杰,等. 非接触电能传输系统参数优化的改进遗传解法[J]. 西安交通大学学报,2012,46(2):106-112.
ZHAO Zhibin,SUN Yue,ZHOU Shijie,et al. Improved genetic algorithm for parameter optimization in contactless-power-transfer system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2012,46(2):106-112.
- [19] 邹洋. ICPT系统鲁棒多目标遗传优化与最优谐振拓扑搜寻研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.

ZOU Yang. Investigation on robust multi-objective evolutionary optimization and optimal resonant topology search of ICPT system[D]. Chongqing:Chongqing University,2015.

- [20] 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(4):615-620.
ZHOU Jikun,ZHANG Rong,ZHANG Yi. Characteristics of LCL resonant inductive power transfer system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology,2016,14(4):615-620.

作者简介:



李欣

李欣(1978—),男,云南昆明人,教授,博士,主要研究方向为电气化交通与能源融合技术(E-mail:lxfp167@163.com);

赵乐(1994—),男,陕西延安人,硕士研究生,主要研究方向为无线电能传输(E-mail:18215157759@163.com);

(编辑 王欣竹)

Resonance parameter optimization of ICPT system considering influence on synchronous transmission of signal and power energy

LI Xin^{1,2}, ZHAO Le³

(1. School of New Energy & Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Rail Transit Electrical Automation Engineering Laboratory, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

3. Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and Intelligent Control Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aiming at the problem of the effect of the signal coupling coil on the power transmission efficiency in the ICPT (Inductively Coupled Power Transfer) system considering the influence on synchronous transmission of signal and power energy. Based on the LCLP-type resonance topology structure of ICPT system, additional coupling coils are added on the primary and secondary sides to load and pick up the signal, and the synchronous transmission of signal and power energy is realized. By analyzing the current relationship between the primary and secondary sides, the nonlinear programming model that correlates the signal coupling coil with the power transmission efficiency is established by using the mutual inductance reflection impedance of coupled transformer, signal transmitting coupling coil and signal receiving coupling coil. Then, the influence of the signal coupling coil on the transmission efficiency is analyzed, and the corresponding objective function and constraints of the power transmission efficiency are given. On this basis, adaptive particle swarm optimization is used to optimize the resonance compensation parameters, and simulation verification is performed. Simulative results show that compared with the same type of signal transmission method, the optimized system signal transmission error rate has been reduced and the power transmission efficiency has been improved. The Bode diagram shows that the optimized signal transmission circuit does not have a large impact on the power transmission, and the harmonic distortion rate at the load is reduced.

Key words: synchronous transmission of signal and power energy; ICPT; adaptive particle swarm optimization algorithm; nonlinear programming; optimization

附录

$$\begin{cases}
 g(1) = u_i - i_{p_rate} Z_p < 0 \\
 g(2) = u_i \omega_0 M_2 (1 + \omega_0^2 C_s^2 R^2) - Z_p R i_{s_rate} (1 + \omega_0^2 L_p C_p + \omega_0^2 L_2 C_p) < 0 \\
 g(3) = u_i - i_{L2_rate} Z_p < 0 \\
 g(4) = u_i - Z_p (1 + \omega_0^2 C_p L_p + \omega_0^2 L_2 C_p) i_{Lp_rate} < 0 \\
 g(5) = u_i (\omega_0^2 L_p C_p + \omega_0^2 L_2 C_p) - Z_p i_{Cp_rate} (1 + \omega_0^2 L_p C_p + \omega_0^2 L_2 C_p) < 0 \\
 g(6) = u_i \omega_0 M_2 (1 + \omega_0^2 C_s^2 R^2) - Z_p R (1 + \omega_0^2 L_p C_p + \omega_0^2 L_2 C_s) i_{Ls_rate} < 0 \\
 g(7) = u_i \omega_0^2 M_2 C_s (1 + \omega_0^2 C_s^2 R^2) - Z_p (1 + \omega_0^2 C_p L_p + \omega_0^2 C_p L_2) (1 + \omega_0 C_s R) i_{Cs_rate} < 0 \\
 g(8) = u_i - Z_p (1 + \omega_0^2 C_p L_p + \omega_0^2 L_2 C_p) - i_{L2_rate} < 0 \\
 g(9) = u_i \omega_0 L_r - Z_p u_{Lr_rate} < 0 \\
 g(10) = u_i \omega_0 L_p - Z_p (1 + \omega_0^2 C_p L_p + \omega_0^2 C_p L_2) u_{Lp_rate} < 0 \\
 g(11) = u_i (\omega_0^2 L_p C_p + \omega_0^2 L_2 C_p) - u_{Cp_rate} Z_p \omega_0 C_p (1 + \omega_0^2 L_p C_p + \omega_0^2 L_2 C_p) < 0 \\
 g(12) = u_i \omega_0^2 M_2 L_s (1 + \omega_0^2 C_s^2 R^2) - Z_p R u_{Ls_rate} (1 + \omega_0^2 L_p C_p + \omega_0^2 L_2 C_p) < 0 \\
 g(13) = u_i \omega_0 M_2 (1 + \omega_0^2 C_s^2 R^2) - Z_p (1 + \omega_0^2 L_p C_p + \omega_0^2 L_2 C_p) (1 + \omega_0 C_s R) u_{Cs_rate} < 0 \\
 g(14) = u_i \omega_0 L_2 - u_{L2_rate} Z_p (1 + \omega_0^2 C_p L_p + \omega_0^2 L_2 C_p) < 0
 \end{cases} \quad (A1)$$

表A1 参数设定值

Table A1 Parameter setting

参数名称	参数值	参数名称	参数值
耦合系数 k	0.24	i_{Cs_rate}/A	25
负载电阻 R/Ω	50	i_{L2_rate}/A	25
输入电压 u_i/V	20	u_{Lr_rate}/V	100
i_{p_rate}/A	100	u_{Lp_rate}/V	80
i_{s_rate}/A	25	u_{Cp_rate}/V	80
i_{Lr_rate}/A	100	u_{Ls_rate}/V	25
i_{Lp_rate}/A	25	u_{Cs_rate}/V	25
i_{Cp_rate}/A	100	u_{Lr_rate}/V	25
i_{Ls_rate}/A	25		

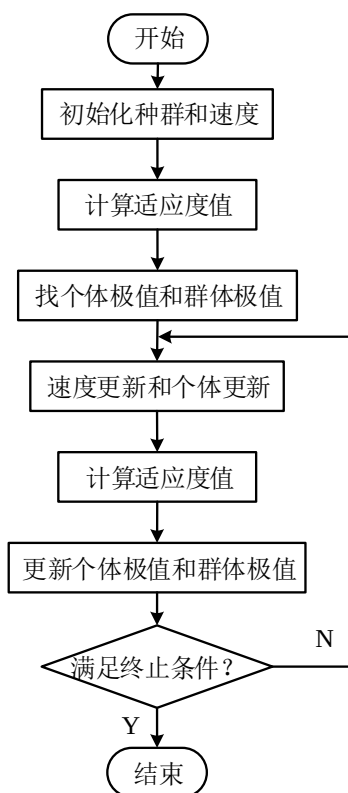


图 A1 APSO 算法流程图

Fig.A1 Flowchart of APSO algorithm

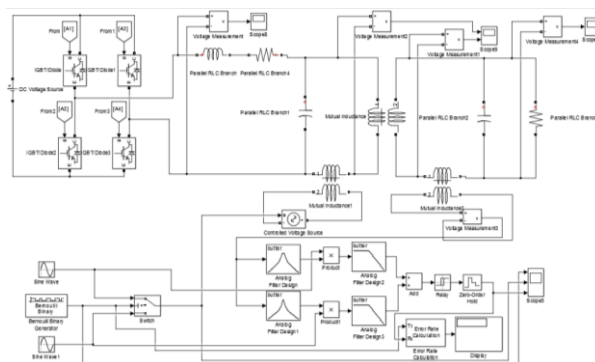


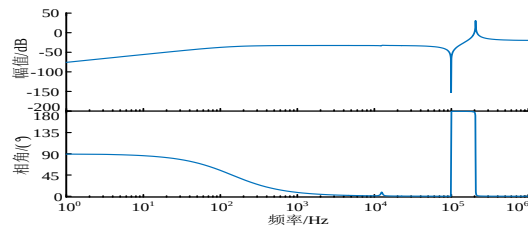
图 A2 系统仿真模型图

Fig.A2 Simulation model of system

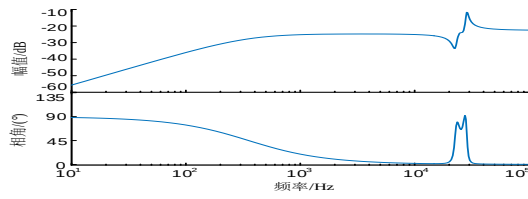


图 A3 误码率仿真结果图

Fig.A3 Simulative result of bit error rate



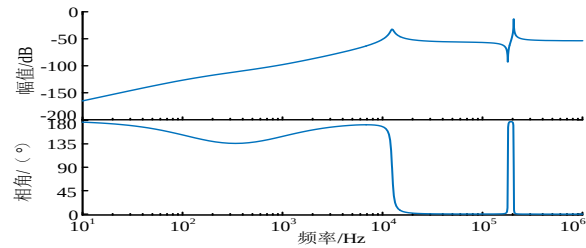
(a) 最优参数下



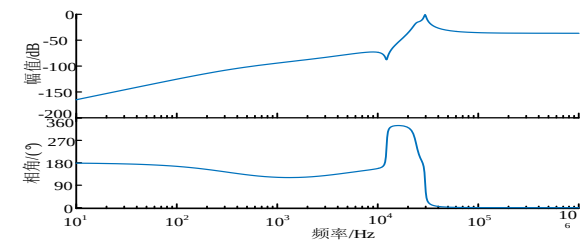
(b) 匹配参数下

图 A4 电能传输通道波特图

Fig.A4 Bode diagram of power transmission channel



(a) 最优参数下



(b) 匹配参数下

图 A5 信道波特图

Fig.A5 Bode diagram of channel