

三线圈无线电能传输系统传输特性的研究

张淑美,李媛,程泽[†]

(天津大学 电气自动化与信息工程学院,天津 300072)

摘要:针对三线圈无线电能传输系统中继线圈的位置对系统的输出功率和传输效率等传输特性的影响问题展开研究,设计一种采用 DC-DC 转换电路的传输策略,使得整个系统能在中继线圈的摆放位置不发生改变的情况下,通过调整负载的等效阻抗,将传输效率维持在一个较高的水平.实验结果表明,该传输策略不仅适用于中继线圈固定、负载阻值改变的情况,在负载保持不变而中继线圈位置产生变化时依旧能保持较高的传输效率.

关键词:无线电能传输;线圈分析;磁耦合谐振;DC-DC 转换

中图分类号:TM55

文献标志码:A

Research on Transmission Characteristics of Three-coil Wireless Power Transmission System

ZHANG Shumei, LI Yuan, CHENG Ze[†]

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This work analyzed the influence of the position of relay coil on the output power and transmission efficiency in the three-coil wireless power transmission system. A transmission strategy using a DC-DC conversion circuit was designed to maintain the transmission efficiency at a high level by adjusting equivalent impedance of load without changing the placement of the relay coil. The experiments show that the proposed transmission strategy is not only suitable for the situation where the relay coil is fixed and load resistance is changed, but also can maintain high transmission efficiency when the load remains the same but the position of the relay coil changes.

Key words: wireless power transfer; coil analysis; magnetic coupling resonance; DC-DC converter

无线电能传输技术^[1-2],经过长期发展,衍生出了多种多样的电能传输形式^[3-7].在传统无线电能传输系统的基础上,有学者提出增加一个谐振线圈的新型三线圈结构可以延长无线电能的传输距离^[8],但未对增加线圈后系统的效率影响进行讨论.在此基础

上, Kim 等^[9]对三线圈系统进行了效率分析,发现适当使用中继线圈可以提高系统效率.为了进一步提高效率,有学者提出将磁芯放置在中继线圈与接收线圈之间的解决方案,通过仿真分析发现在三线圈结构中加入平板磁芯对增加传输距离与提高传输效

* 收稿日期:2020-11-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61903272,61873180), National Natural Science Foundation of China(61903272,61873180)

作者简介:张淑美(1988—)女,河北保定人,天津大学副教授,博士

[†] 通信联系人, E-mail: chengze@tju.edu.cn

率有明显效果^[10]. 文献[11]发现,通过对三线圈结构参数的设计,可以使系统在更大的负荷范围内获得更高的效率,然而该研究忽略了线圈间的耦合效应和工作频率变化的情况. 还有研究聚焦于对三线圈结构系统的耦合情况,总结出临界耦合条件及最大功率传输条件,提出了一种改变谐振频率的三线圈系统设计方法^[12]. 然而上述文献仅集中在通过引入中继线圈来改善无线电能传输系统的性能,对于中继线圈的具体摆放位置及其对系统的传输功率、传输效率的影响却鲜有分析^[13-17]. 截至目前,大多数的三线圈结构默认将中继线圈放在发射线圈和接收线圈的正对位置,使整个系统的耦合达到一个较优值^[18-22]. 但是,对于:1)是否正中间就是中继线圈的最佳位置;2)中继线圈对于系统的传输特性影响是否一致;3)系统的功率与效率是否只与中继线圈的位置有关等问题,并未得到系统的分析和理论验证.

本文基于三线圈结构的无线电能传输系统展开研究,首先对系统进行了数学建模,得到中继线圈位置的改变对于系统传输特性的影响,并从数值仿真、磁场仿真、实验证明三个方面进行分析讨论,总结出中继线圈处于不同位置时系统传输特性的变化情况,并在考虑实际的基础上设计了一种改进的三线圈谐振系统,使其能在负载发生变化时,保持较高的传输功率和传输效率.

1 三线圈结构的无线电能传输系统

如图 1 所示,三线圈结构的无线电能传输系统的组成部分包括:发射线圈、中继线圈、接收线圈、逆变模块以及整流模块等. 该系统可将直流电逆变后变为高频交流电,然后通过发射线圈将电能以谐振耦合的方式传送到中继线圈,再通过中继线圈转送到接收线圈,进而为负载提供电能. 其中,发射线圈与中继线圈之间的距离记作 d_1 , 中继线圈与接收线圈之间的距离记作 d_2 , 而发射线圈与接收线圈之间的距离则记为 d_3 .

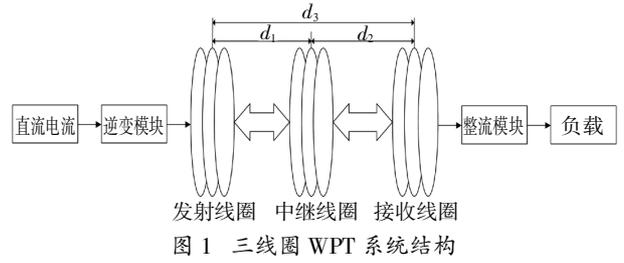


Fig.1 The structure of three-coil WPT system

设三个回路中的总阻抗分别记为 Z_1, Z_2, Z_3 , 电源的工作角频率为 ω , 则它们的值可以用以下等式表示:

$$\begin{cases} Z_1 = R_s + R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) \\ Z_2 = R_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}) \\ Z_3 = R_L + R_3 + j(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}) \end{cases} \quad (1)$$

假设三个线圈的结构都相同,即认为三个线圈各自的电感值相等,线圈自身携带的电阻相等,完全谐振匹配时所需的补偿电容值相等, $L_1 = L_2 = L_3 = L$, $R_1 = R_2 = R_3 = R$, $C_1 = C_2 = C_3 = C$. 当 $\omega = 1/\sqrt{LC}$ 时,三个回路均处于完全谐振状态,负载阻抗虚部为 0, 则式(1)可简化为:

$$\begin{cases} Z_1 = R_s + R \\ Z_2 = R \\ Z_3 = R_L + R \end{cases} \quad (2)$$

根据基尔霍夫电压定律,可从图 2 得到以下电路方程.

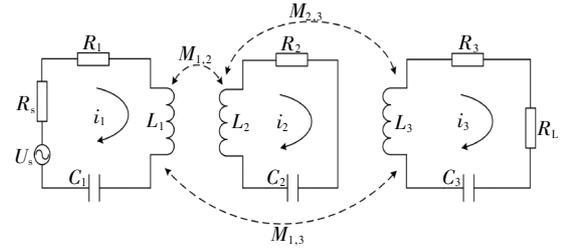


图 2 三线圈 WPT 系统等效电路

Fig.2 The equivalent circuit of three-coil WPT system

$$\begin{bmatrix} R_s + R & j\omega M_{1,2} & j\omega M_{1,3} \\ j\omega M_{1,2} & R & j\omega M_{2,3} \\ j\omega M_{1,3} & j\omega M_{2,3} & R_L + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

各个回路中的电流分别为:

$$\begin{cases} i_1 = \frac{R(R_L + R) + (\omega M_{2,3})^2}{(R_s + R)R(R_L + R) + (R_L + R)(\omega M_{1,2})^2 + (R_s + R)(\omega M_{2,3})^2 + R(\omega M_{1,3})^2 + j2\omega^3 M_{1,2} M_{2,3} M_{1,3}} U_s \\ i_2 = \frac{\omega^2 M_{2,3} M_{1,3} + j\omega M_{1,2}(R_L + R)}{(R_s + R)R(R_L + R) + (R_L + R)(\omega M_{1,2})^2 + (R_s + R)(\omega M_{2,3})^2 + R(\omega M_{1,3})^2 + j2\omega^3 M_{1,2} M_{2,3} M_{1,3}} U_s \\ i_3 = \frac{\omega^2 M_{1,2} M_{2,3} + j\omega M_{1,3} R}{(R_s + R)R(R_L + R) + (R_L + R)(\omega M_{1,2})^2 + (R_s + R)(\omega M_{2,3})^2 + R(\omega M_{1,3})^2 + j2\omega^3 M_{1,2} M_{2,3} M_{1,3}} U_s \end{cases} \quad (4)$$

当发射线圈与接收线圈距离较远时,二者耦合较弱,互感 $M_{1,3}$ 可以忽略,因此负载的输出功率 P_L

与系统传输效率 η 可以近似地表示为:

$$P_L = \frac{\omega^4 M_{1,2}^2 M_{2,3}^2 U_s^2 R_L}{[(R_s + R)R(R_L + R) + (R_L + R)(\omega M_{1,2})^2 + (R_s + R)(\omega M_{2,3})^2]^2} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\omega^4 M_{1,2}^2 M_{2,3}^2 U_s^2 R_L}{[(R_s + R)R(R_L + R) + (R_L + R)(\omega M_{1,2})^2 + (R_s + R)(\omega M_{2,3})^2][(R(R_L + R) + (\omega M_{2,3})^2)]} \quad (6)$$

2 三线圈系统的数值仿真

本章利用 Matlab 对三线圈结构系统进行了数值仿真.通过数值仿真结果进一步了解三线圈系统的优越性,详细分析了中继线圈的不同位置变化所导致的系统输出功率和传输效率的变化情况.

由式(5)(6)可以看出,该系统的传输效率是与负载阻值 R_L 和互感 $M_{1,2}, M_{2,3}$ 有关的函数.然而,当发射线圈与接收线圈的距离 d_3 固定时,中继线圈具体的位置变化会同时导致 $M_{1,2}, M_{2,3}$ 发生变化.两个线圈之间的互感与二者间的距离有关,三个线圈之间的距离满足 $d_1 + d_2 = d_3$,因此 $M_{1,2}, M_{2,3}$ 都可以表示成发射线圈与中继线圈距离 d_1 的函数.同轴放置的两个平面螺旋线圈之间的互感可以近似表示为:

$$M = \frac{\mu_0 \pi N_1 N_2 r_1^2 r_2^2}{2(d_1^2 + r_1^2)} \quad (7)$$

式中: μ_0 表示真空磁导率; N_1, N_2 分别表示两个线圈的匝数; r_1, r_2 则表示两个线圈的半径; d_1 指代线圈之间的距离.

由于线圈结构完全相等,因此,可令线圈匝数为 N ,半径为 r ,则 $M_{1,2}, M_{2,3}$ 可以表示为:

$$\begin{cases} M_{1,2} = \frac{\mu_0 \pi N^2 r^4}{2(d_1^2 + r^2)} \\ M_{2,3} = \frac{\mu_0 \pi N^2 r^4}{2[(d_3 - d_1)^2 + r^2]} \end{cases} \quad (8)$$

2.1 中继线圈位置对系统输出功率的影响

将式(8)代入式(5),进行数值仿真,得到输出功率 P_L 关于发射线圈与中继线圈间距 d_1 的曲线,如图3所示.其中,线圈的仿真参数见表1.

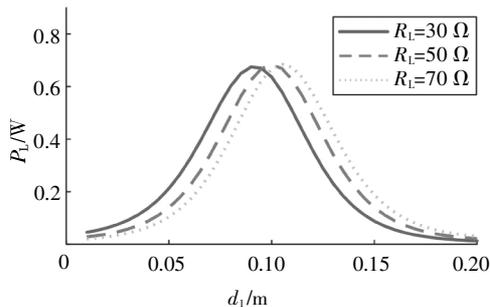


图3 输出功率关于线圈位置的曲线

Fig.3 Curve of output power with respect to coil position

表1 线圈的仿真参数
Tab.1 Simulation parameters of coil

线圈匝数 n	线圈半径 r/cm	电源电压 U_s/V	线圈电阻 R/Ω	电源内阻 R_s/Ω	线圈电感 $L/\mu H$	线圈线径 a/cm	负载阻值 R_L/Ω
30	10	12	0.5	50	177.6	0.1	50

从图3可以看出,中继线圈与发射线圈的间距 d_1 对于输出功率的最佳位置有且仅有一个最优值,且该最优值的变化随着负载阻值的变化而发生变化.当 $R_L = R_s$ 时,最大输出功率所对应的位置接近发射线圈与接收线圈的正中间;当 $R_L > R_s$ 时,最大输出功率所对应的中继线圈的最佳位置靠近接收线圈一侧;当 $R_L < R_s$ 时,最佳位置靠近发射线圈一侧.输出功率 P_L 对负载阻值 R_L 进行求导,令 $\Delta P_L / \Delta R_L = 0$,得到输出功率最大时的最佳阻抗 $R_{L,opt1}$ 的表达式为:

$$R_{L,opt1} = R + \frac{(R_s + R)(\omega M_{2,3})^2}{(R_s + R)R + (\omega M_{1,2})^2} \quad (9)$$

从式(9)可以看出,最佳阻抗 $R_{L,opt1}$ 的变化趋势是随互感 $M_{1,2}$ 的增大而减小,随互感 $M_{2,3}$ 的增大而增大.当中继线圈位于正中间时,中继线圈与左右两线圈的互感相等,即 $M_{1,2} = M_{2,3}$,若此时的线圈自身的阻抗 R 远小于电源内阻,则此时的最佳阻抗 $R_{L,opt1} \approx R_s$,接近于电源内阻,与图3的仿真结果一致.

2.2 中继线圈位置对系统传输效率的影响

在参数不变的情况下,对于系统的传输效率 η 进行数值仿真,得到传输效率对于中继线圈位置变化的曲线,如图4所示.

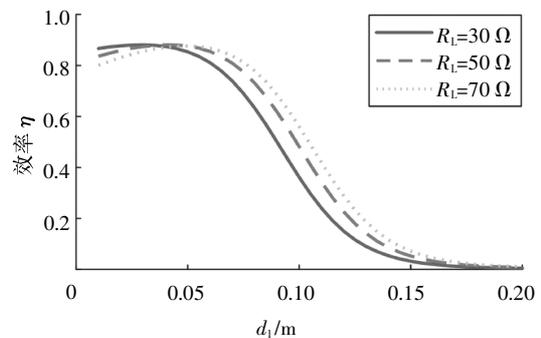


图4 传输效率关于线圈位置的曲线

Fig.4 Curve of transmission efficiency with respect to coil position

由图 4 可知,关于系统效率的中继线圈的最佳位置同样仅有一个最优值.与输出效率不同的是,当负载的阻值发生变化时,系统效率的最佳位置一直处于靠近发射线圈的一侧,只是在该侧略微移动.负载的最佳阻值与电源内阻并无联系,当阻值慢慢增大时,最佳位置逐渐远离发射线圈.而当中继线圈的位置越过中间位置靠近接收线圈时,系统的效率开始急剧下降,逐渐趋于 0.

同理,通过系统效率 η 对负载电阻 R_L 进行求导,并令 $\Delta\eta/\Delta R_L = 0$,则系统效率的最佳阻抗 $R_{L,opt2}$ 的表达式为:

$$R_{L,opt2} = \sqrt{R^2 + (\omega M_{2,3})^2 + \frac{(R_s + R)(\omega M_{2,3})^2 [R^2 + (\omega M_{2,3})^2]}{(R_s + R)R^2 + (\omega M_{1,2})^2 R}} \quad (10)$$

从式(10)可以看出,与 $R_{L,opt1}$ 类似,系统效率的最佳阻抗 $R_{L,opt2}$ 也是随 $M_{1,2}$ 的增大而减小,随 $M_{2,3}$ 的增大而增大.但是值得注意的是, $R_{L,opt2}$ 的值始终大于 ω 与 $M_{2,3}$ 的乘积,其中 $\omega = 2\pi f$, f 为电源频率,决定了线圈处的磁场强度,通常取 10 k ~ 100 MHz.因此当 $M_{2,3}$ 增加时, $R_{L,opt2}$ 会急剧增加.运用相同的参数进行仿真,得出系统效率和输出功率的最佳负载关于线圈位置的特性曲线如图 5 所示.

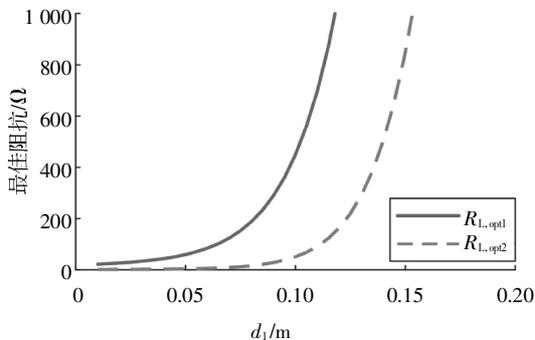


图 5 最佳阻抗关于线圈位置的曲线

Fig.5 Curve of best impedance with respect to coil position

从图 5 可以看出,系统效率的最佳阻抗值 $R_{L,opt2}$ 总是大于输出功率的最佳阻抗 $R_{L,opt1}$.此外,当中继线圈越过中间位置时, $R_{L,opt2}$ 的值已经达到 500 以上并仍在急剧上升,这是一般负载所不能达到的,而在靠近发射线圈一侧二者的差距并不明显.因此,由最佳阻抗关于线圈位置的数值仿真结果可知,中继线圈靠近接收线圈时的三线圈系统更适合大负载的情况.当系统负载远超过电源内阻时,中继线圈的位置应该靠近接收线圈以保证系统有较高的传输效率.但在实际应用中,如果只能随着负载的变化而改变中继线圈的位置,以其来保证系统的传输效率和输

出功率的话,将与无线传能技术方便快捷的应用目的背道而驰.

3 三线圈系统的电磁仿真

为了进一步分析中继线圈对电磁场的影响情况,本文选取几个典型的中继线圈位置来对三线圈结构的无线电能传输系统的电磁场情况进行仿真.其中,发射线圈和接收线圈的间距固定设置为 20 cm,而中继线圈则分别放在与发射线圈相距 5 cm、10 cm 和 15 cm 的位置,用于模拟中继线圈靠近发射线圈时、处在发射线圈和接收线圈正中间时以及靠近接收线圈时三个典型情况的位置.

通过第二节的数值分析可知,系统的输出功率大小与电源内阻值有很大关系.然而常用的 Simplorer 仿真中,其电压源均为理想电源,因此建立带电源内阻的联合仿真模型非常必要.图 6 为新的 Simplorer 仿真模型,其中 R_s 为电源内阻,其阻值和负载阻值相同,均设为 50 Ω .

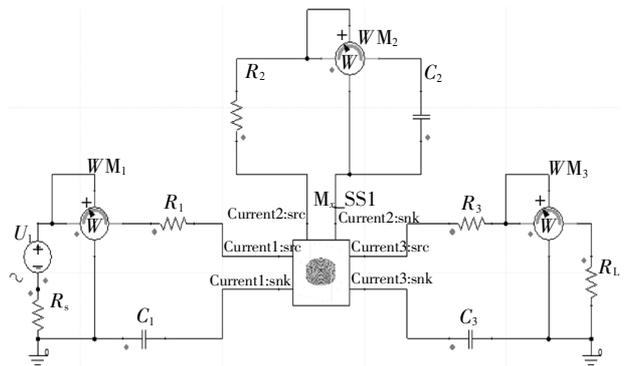


图 6 带电源内阻的 Simplorer 仿真模型

Fig.6 Simplorer simulation model with source resistance

3.1 不同位置下磁感应强度分布情况

通过对带电源内阻的 Simplorer 仿真模型进行仿真,得到三个回路中的电流大小及其相位差,将其作为三个线圈的激励源,从而得到在不同线圈位置下,三线圈结构的无线电能传输系统的磁感应强度分布情况,分别如图 7、图 8 和图 9 所示.在负载阻值和电源内阻相等的条件下,对比三张仿真结果图可以发现:

1)当中继线圈靠近发射线圈一侧时,该系统磁感应强度集中分布在发射线圈与中继线圈附近,接收线圈处的磁感应强度则相对较弱,因此导致电流较小,输出功率也相对较小.

2)当中继线圈与发射线圈间的距离等于它与接

收线圈间的距离时,接收线圈处的磁感应强度显著提升,并超过中继线圈处的磁感应强度,系统能量大部分被传递到了接收线圈处,故而,该位置下系统的输出功率相对更高。

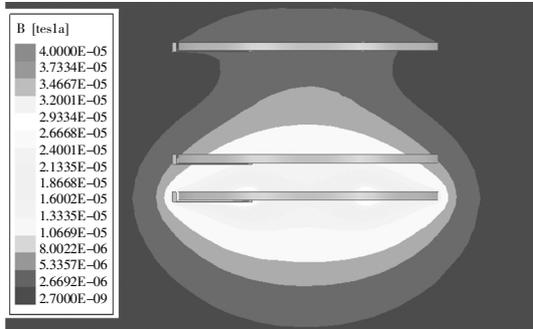


图7 中继线圈位于5 cm处的磁感应强度分布

Fig.7 Magnetic induction intensity distribution when relay coil is located at 5 cm

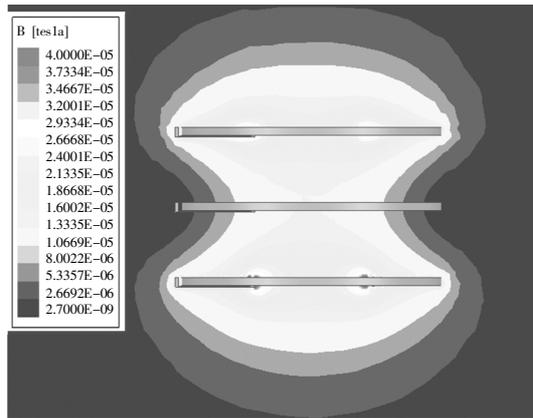


图8 中继线圈位于10 cm处的磁感应强度分布

Fig.8 Magnetic induction intensity distribution when relay coil is located at 10 cm

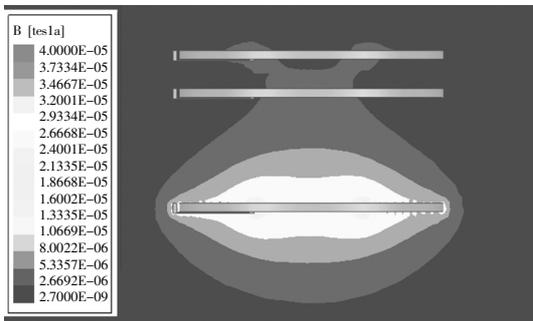


图9 中继线圈位于15 cm处的磁感应强度分布

Fig.9 Magnetic induction intensity distribution when relay coil is located at 15 cm

3)当中继线圈靠近接收线圈一侧时,接收线圈处的磁感应强度却迅速下降,甚至更逊于靠近发射线圈一侧时的情况.发射线圈处的磁感应强度也比

图7中的强度更低一些,系统整体的输出功率明显降低。

以上仿真结果与第二节中所提出的“当负载的大小与电源内阻相等时,中继线圈的最佳功率位置大约在发射线圈和接收线圈正中间”这一推论相符。

3.2 不同位置下系统的传输效率

中继线圈的最大效率位置从磁场分布中难以辨别,图9中的系统相比于图7中的系统,发射线圈和接收线圈处的功率均有所下降,难以比较二者之间效率孰优孰劣.另外,磁感应强度能定性表示三个回路中电流 i_1, i_2, i_3 的大小,而系统的传输效率 $\eta = U_s i_1 / i_3^2 R_L$,只对 i_1 和 i_3 的变化进行比较,并不能代表系统效率的变化.因此,需利用图6的Simplorer仿真模型中的功率计来测量系统的输入输出功率,从而模拟出三个位置下系统的效率变化情况。

在负载为 50Ω 的前提下,不同中继线圈位置的三线圈无线电能传输系统的输入输出功率变化情况如图10、图11和图12所示。

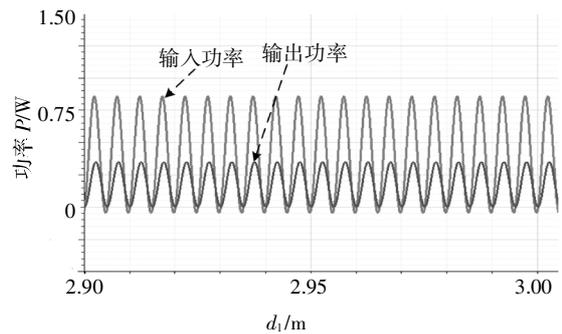


图10 中继线圈位于5 cm处的输入输出功率变化情况

Fig.10 Waveforms of input power and output power when relay coil is located at 5 cm

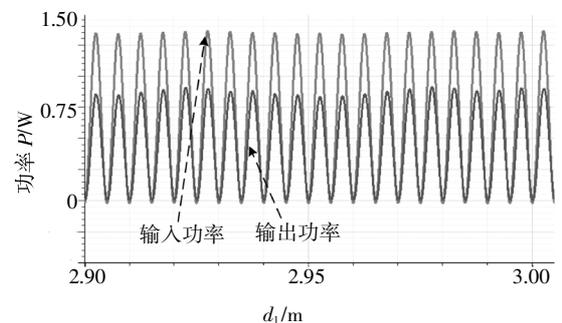


图11 中继线圈位于10 cm处的输入输出功率变化情况

Fig.11 Waveforms of input power and output power when relay coil is located at 10 cm

结合图10~图12中的数据,用输出功率的峰值除以输入功率的峰值,即可得到三个位置下,系统的传输效率分别为40.7%、68.1%、35.7%。在发射线圈

与接收线圈间距离不变的前提下,当中继线圈分别与发射、接收线圈间的距离相等时,三线圈结构系统的传输效率最高,其次是中继线圈靠近发射线圈一侧时,而在其靠近接收线圈侧时系统的传输效率最低.

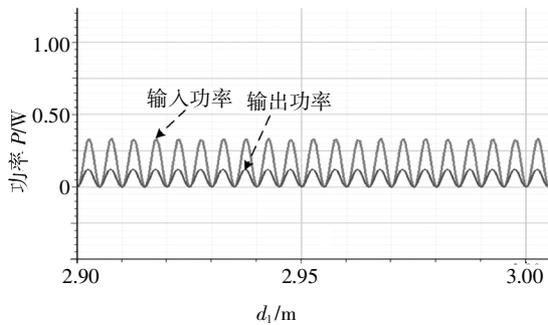


图 12 中继线圈位于 15 cm 处的输入输出功率变化情况

Fig.12 Waveforms of input power and output power when relay coil is located at 15 cm

由于中继线圈的最佳效率位置和电源内阻无关,取不同阻值的负载进行仿真,得到不同的负载条件,三线圈无线电能传输系统的三个典型位置的传输效率如表 2 所示.

表 2 三个位置下不同负载的传输效率

Tab.2 Transmission efficiency of different loads in three positions

负载 R_L/Ω	位置/cm		
	5	10	15
1	61.7%	22.9%	5.9%
5	81.4%	46.9%	11.7%
10	75.8%	57.4%	22.5%
30	52.0%	74.2%	27.6%
50	40.7%	68.1%	35.2%
70	30.9%	52.9%	41.3%
100	22.7%	50.7%	48.5%
120	22.1%	43.3%	53.2%
150	18.5%	36.5%	46.5%

从表 2 可以看出,中继线圈在三个位置时各有一个最佳负载:1) 中继线圈距发射线圈 5 cm 时,最佳负载在 5 Ω 左右;2) 距离 10 cm 时,最佳负载在 30 Ω 左右;3) 距离 15 cm 时,最佳负载则在 120 Ω 左右.此外,随着负载阻值的增大,系统的最佳效率位置也逐渐从 5 cm, 10 cm 变成 15 cm, 这与第二节中分析的结果基本吻合.

4 DC-DC 转换电路无线电能传输策略

经过理论分析与仿真验证可知,负载 R_L 大小的变化影响系统取得最佳效率处中继线圈位置的变化.但对于一般的无线电能传输系统,其负载 R_L 的值通常不是固定的,若每次都因为负载阻值的变化而去改变中继线圈的位置,这种做法是不现实的.因此针对该状况,本文在接收回路中添加可控 DC-DC 转换器,令其能够调整负载的有效阻抗,让其接近于传能系统的最佳阻抗,以使整个三线圈无线电能传输系统,在负载阻抗变化的情况下,仍能保持较高的输出功率与传输效率.

4.1 DC-DC 转换电路

DC-DC 转换电路是一种转变直流输入电压后,输出特定电压的转换装置,采用脉冲宽度调制方式来进行控制,通过改变回路中电力电子开关的触发信号来进一步改变其输出电压的大小.当负载的输出电压发生变化时,DC-DC 转换电路输入端的阻抗也会随之发生相应的改变.利用 DC-DC 转换电路这一特性,去匹配当前中继线圈所处位置下三线圈系统的最佳阻抗,从而对系统的传输特性进行改善.

常见的 DC-DC 转换电路有 Buck 转换、Boost 转换、Buck-Boost 转换以及 Cuk 转换四种结构,其电路结构的特性如表 3 所示.比较四种转换电路的特性可知,Buck-Boost 转换电路和 Cuk 转换电路的电路阻抗可调节范围相较于其他两种更大.但是由于 Cuk 转换电路相较于 Buck-Boost 转换电路而言,其电路结构更为复杂,因此本文使用 Buck-Boost 转换作为 DC-DC 转换电路.

表 3 DC-DC 转换电路的特性

Tab.3 Characteristics of DC-DC conversion circuit

转换电路	输入阻抗	阻抗范围
Buck	$\frac{R_L}{D^2}$	$R_L \sim +\infty$
Boost	$(1 - D^2)R_L$	$0 \sim R_L$
Buck- Boost	$\frac{1 - D^2}{D^2} R_L$	$0 \sim +\infty$
Cuk	$\frac{1 - D^2}{D^2} R_L$	$0 \sim +\infty$

如图 13 所示,负载处的回路结构设计由整流模块和转换电路两部分组成.其中,接收侧回路指代接收线圈和谐振电容,图中虚线框表示整流桥, C_L 为滤波电容,整流模块由二者组成.接收侧两端的电压和

电流分别记为 U_1 和 I_1 , 阻值定义为等效阻抗 R_e , DC-DC 转换电路的输入侧的阻抗定义为 R_{in} , 输出侧负载阻抗为 R_L , 输入侧的电流记为 I_{in} , 两侧电压分别记为 U_{in} 和 U_{out} .

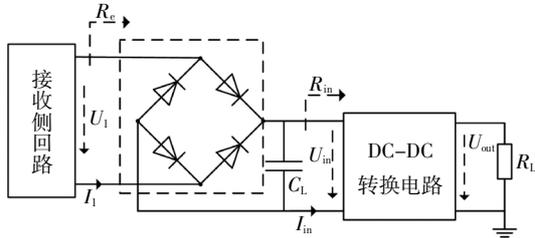


图 13 负载处的回路设计
Fig.13 Circuit design of load

假设转换电路都是理想的, 忽略整流模块处的损耗, 由整流电路的特性可得:

$$U_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{in} \quad (11)$$

$$I_1 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_{in} \quad (12)$$

将式(11)(12)带入等效电阻计算中可得:

$$R_e = \frac{8R_{in}}{\pi^2} \quad (13)$$

而在 Buck-Boost 变换电路中, 有:

$$R_{in} = \frac{1-D^2}{D^2} R_L \quad (14)$$

因此, 连接在无线电能传输系统中的等效阻抗 R_e 与负载 R_L 之间的关系为:

$$R_e = \frac{8(1-D^2)}{\pi^2 D^2} R_L \quad (15)$$

由式(15)得出, Buck-Boost 变换电路满足输入端呈纯阻性, 且阻值变化与输出端所接负载无关, 输入端的能量可全部传送到输出端. 在忽略元件损耗和电感电流断续的情况下, 其等效电阻仅与 MOS 管的 PWM(Pulse Width Modulation)信号的占空比 D 有关. 只需改变脉冲信号占空比 D 的大小, 便能在负载 R_L 变化的条件下, 使系统中的等效阻抗 R_e 保持在一个稳定值, 从而保持整个三线圈结构的无线电能传输系统有较良好的传输特性.

因此, 本文选择在 DC-DC 转换电路的基础上添加控制芯片, 采集系统输入输出的电流与电压, 用控制芯片所产生的 PWM 输出信号来控制 DC-DC 转换电路中 MOS 管的导通时间, 从而改变系统的传输效率. 由于三线圈系统在传输过程中, 仅存在一个最佳阻抗 $R_{opt,\eta}$ 使系统的效率最大. 换言之, 在等效阻抗 R_e 的变化范围内有且仅有一个值能使系统的效

率达到最大, 故该控制系统不需要复杂的搜索算法.

4.2 类爬山搜索算法

本文设计了一种基于扰动和观测方法的搜索算法, 通过比较当前系统效率与改变控制芯片输出的 PWM 波的占空比之后的系统效率, 来分析占空比改变方向, 从而确定当前线圈位置下系统的最佳占空比. 算法流程图如图 14 所示.

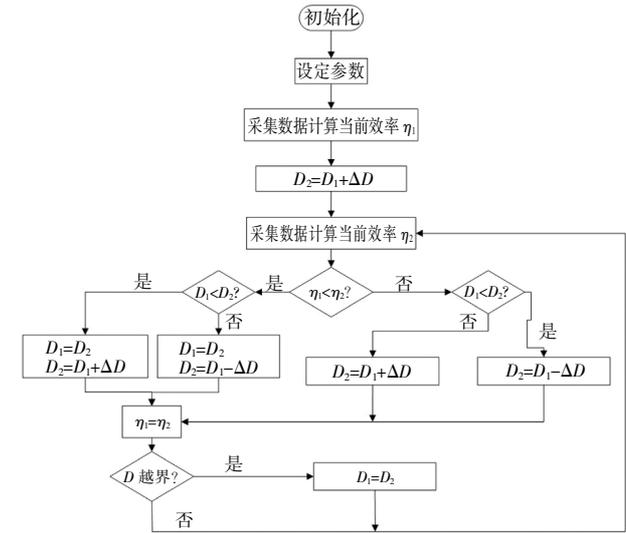


图 14 算法控制流程图

Fig.14 Flow chart of the adopted algorithm

其运算原理如下:

1) 对控制芯片进行初始化.

2) 设定基本参数, 其中包括占空比的上限 D_{max} 和下限 D_{min} , 占空比改变的步长 ΔD , 占空比的初始值设定为最小值 D_{min} .

3) 控制芯片采集无线电能传输系统的输入与输出的电流电压, 计算当前状态下系统的效率 η_1 , 记当前状态的 PWM 输出的占空比为 D_1 .

4) 将 D_1 增加一个步长, 采集数据通过计算得到新的效率 η_2 以及新的占空比 D_2 .

5) 比较 η_1 和 η_2 的大小. 若 $\eta_1 > \eta_2$, 则占空比的改变趋势无误. 通过比较 D_1 和 D_2 的大小得到占空比的改变方向, 改变占空比的大小, 并将 D_2 和 η_2 的值赋给 D_1 和 η_1 ; 若 $\eta_1 < \eta_2$, 则说明占空比的改变趋势有误. 通过比较 D_1 和 D_2 的大小得到占空比的改变方向, 将 D_2 进行反向改变.

6) 判断新赋值的占空比是否满足占空比的上限 D_{max} 与下限 D_{min} 间的范围. 如果超出了上限或下限, 则取消这一步改变, 系统保持原来的占空比; 若未超出该范围, 则继续采集数据并计算新的传输效率, 重复以上过程.

本文的研究重点针对三线圈无线电能传输系统效率,故所提出的搜索算法也是针对系统传输效率而进行设计.由于三线圈结构同样仅存在一个最佳阻抗 $R_{opt,p}$ 使得系统的输出功率达到最大,故上述搜索算法对于系统输出功率的调节也同样适用.相比之下,输出功率的搜索算法更为简单,只需要采集负载处的电流值或电压值,根据电流或电压的变化情况便能知道输出功率的变化情况,该控制方法更为简单,本文将不再讨论.

5 三线圈结构系统的实验

5.1 系统的总体结构设计

为了进一步验证数值仿真、电磁仿真结果的正确性以及本文所提传输策略的可行性,搭建了三线圈的磁耦合谐振式无线电能谐振系统的实验电路,总体结构框图如图 15 所示,实物图如 16 所示.

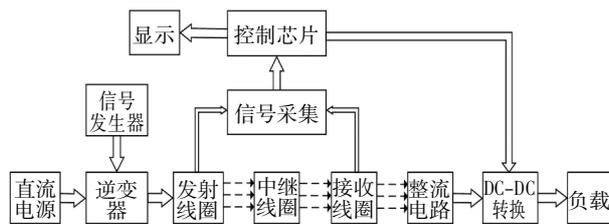


图 15 实验系统的总体结构框图

Fig.15 Overall structure of the experimental system

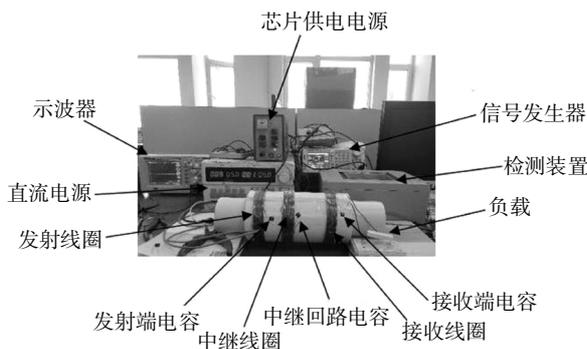


图 16 三线圈系统实验实物图

Fig.16 Physical picture of three-coil experimental system

该系统主要包括了 5 个部分,分别为:1)直流电源、信号发生器与逆变器组成的电源模块;2)发射线圈、中继线圈与接收线圈组成的能量传输模块;3)包括整流电路与 DC-DC 转换电路的阻抗调节模块;4)信号采集、控制芯片与显示屏构成的控制模块;5)负载模块.通过直流电源对系统进行供能,并利用信号发生器进行频率调节,经过逆变器形成高频交流电

信号传送到发射线圈侧,串联电容使得发射线圈、中继线圈和接收线圈在电源频率下产生谐振,能量从发射线圈传至中继线圈再传输到接收线圈,最后经过电路的整流与转换,为负载供电.期间采集发射线圈和接收线圈处的电压电流信号,计算得到系统的输入输出功率与效率,由控制芯片控制 DC-DC 电路中 MOS 管的脉冲宽度,从而改变接收线圈处负载的等效阻抗,使系统保持较高的传输效率,并将这些数据显示在液晶显示屏上.

5.2 实验结果验证

假设发射线圈与接收线圈之间的距离固定为 14 cm,电源电压设为 12 V,负载为 5 Ω .增加一个中继线圈分别进行实验,得到不同中继线圈位置下,系统的输出功率和效率如表 4 所示,其中 d_1 表示中继线圈到发射线圈的距离.

表 4 不同线圈位置下系统的输出功率与效率

Tab.4 Output power and efficiency at different positions of relay coil

d_1/cm	P_L/W	$\eta/\%$
3	1.99	45.7
4	2.15	56.7
5	2.71	58.5
6	3.34	55.5
7	3.74	48.0
8	3.45	49.3
9	3.03	35.6
10	2.51	32.0
11	2.05	30.1
14	2.68	32.4

从表 4 可以看出,增加中继线圈后,系统的传输效率有明显提升,当中继线圈位于发射线圈和接收线圈正中间时效果更为显著.但通过实验发现,当 $d_1 > 10$ cm 时,三线圈系统的传输效率明显下降.应当注意的是,当 $d_1 = 14$ cm 时,代表发射线圈与接收线圈中间未增加中继线圈,此时为两线圈系统,从表 4 可以看出,两线圈系统的效率为 32.4%,已超过中继线圈位于距发射线圈 10 cm 处时的效率 (32.0%).之所以发生该情况,是因为中继线圈靠近接收线圈的三线圈系统,适合大负载的传输,而表 2 中的数据是基于负载为 5 Ω 时的情况.当负载过小时,增加线圈带来的损耗已经超过中继线圈所带来的效率提升.对于输出功率,从表中可以看出,在中继线圈距离发射线圈大约 7 cm 的时候最大,说明电源的内阻大约为 5 Ω .

而对于系统传输效率的最佳位置,改变负载,其他条件不变,进行重复实验,得到不同负载下中继线圈的最佳位置如图 17 所示.从图中可以看出,当负载的阻值增大时,中继线圈的最佳效率位置也开始增大,即中继线圈的位置逐渐靠近接收线圈.其结论与第二节理论分析的结果吻合.

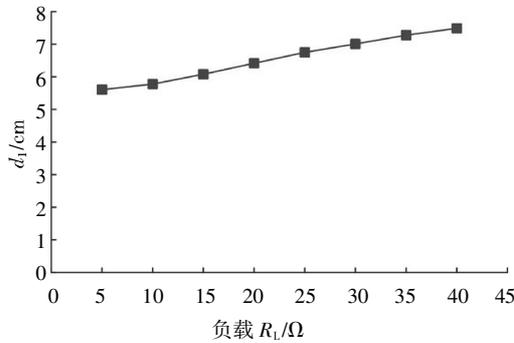


图 17 不同负载下传输效率的最佳位置

Fig.17 Optimal location of transmission efficiency at different loads

5.3 DC-DC 转换电路传输策略的实验

电源频率不变,改变谐振电容的大小,重建三线圈无线电能传输系统.设发射线圈与接收线圈的距离为 15 cm,中继线圈位于发射与接收线圈正中间,即距发射线圈 7 cm 处.占空比 D 为 20%~80%.令负载改变,取不同负载进行实验,分别得到有 DC-DC 转换电路和无 DC-DC 转换电路两种情况下的效率,结果如图 18 所示.

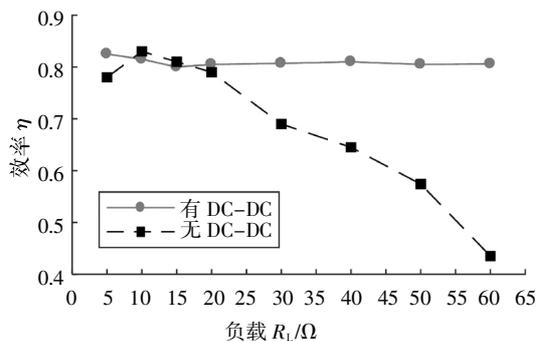


图 18 $d_1=7\text{ cm}$ 时不同负载下的传输效率

Fig.18 Transmission efficiency at different loads when $d_1=7\text{ cm}$

从图 18 可以看出,在未加入 DC-DC 转换电路时,系统仅在低负载时有较高的效率,但随着负载的增大效率显著降低.而加入 DC-DC 转换电路后,尽管负载变化,系统仍然保持较高的传输效率,总传输效率在 80% 左右.因此,本文所提出的基于 DC-DC 转换电路的传输策略既能保证系统的高传输效率,又能有效提高系统对负载的适应能力.该系统产生的损耗主要包括线圈向外辐射的损耗、DC-DC 转换

的损耗、整流部分产生的损耗以及测量电路的损耗.而负载在 10 Ω 和 15 Ω 时,传输效率略低于添加了 DC-DC 转换电路的效率,这是由于此时的负载在系统的最佳效率阻抗附近,添加 DC-DC 模块反而增加了系统多余的损耗,但从整体来看,该传输策略对于系统效率的提升还是显而易见的,特别是在负载较大的情况下,该系统的传输效率相对于无 DC-DC 转换系统有明显优势.

为了进一步证明该传输策略的有效性,本文还针对负载阻值保持不变,中继线圈位置不断变化的情况进行实验.取负载 $R_L=5\ \Omega$,在不同的线圈位置进行实验得到如图 19 所示的实验结果.

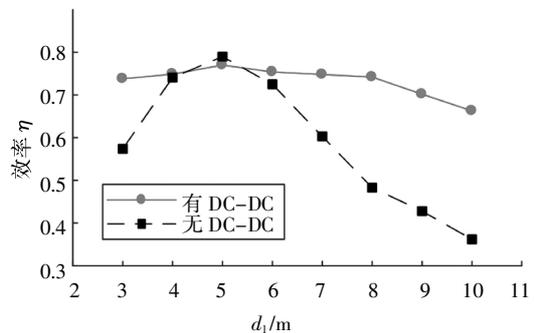


图 19 负载为 5 Ω 时不同线圈位置下的传输效率

Fig.19 Transmission efficiency in different positions with 5 Ω load

从图 19 看出,当中继线圈位置变化时,未加入 DC-DC 转换电路的三线圈系统仅在 4~6 cm 附近有较高的效率,随着线圈距离的增大效率显著降低.而本文提出的传输策略能通过改变 DC-DC 转换电路中 MOS 管的导通时间来改变接收端的等效阻抗,令负载维持在不同线圈位置下的最佳阻抗附近,从而使系统在距离增大时仍可保持较高的传输效率,克服了未加入 DC-DC 转换电路时系统效率低下的问题.图 19 中,当中继线圈距发射线圈 5 cm 时,传输策略下的效率略低于没有 DC-DC 转换电路的效率,这是因为此时负载接近系统的最佳阻抗,添加 DC-DC 转换电路之后增加了多余的损耗.除该点外,在 d_1 的变化范围中,有 DC-DC 转换的系统传输效率一直高于无 DC-DC 转换的系统传输效率,尤其在 7~10 cm,该传输效率比无 DC-DC 传输效率高 20% 以上,进一步证明了该传输策略不仅适用于负载变化线圈位置固定的情况,而且在线圈位置变化负载不变的情况也能保持稳定的传输效率.

6 结论

本文针对三线圈结构下的磁耦合谐振式无线电

能传输技术进行分析,对其传输效率和传输策略进行了详细研究,分析了处于不同位置的中继线圈对于三线圈系统的传输特性的影响,并设计了一种带DC-DC转换电路的优化传输策略.通过调节DC-DC转换电路中MOS管的导通时间,在中继线圈位置固定不变的情况下,调节电能接收侧回路中负载的等效阻抗,以匹配该线圈位置下系统的最佳效率阻抗,使得系统能够保持较高的传输效率.通过数值及电磁仿真验证三线圈系统的传输特性,并通过搭建实验电路,分析了传输策略,验证了所提方法的可行性.经理论分析和实验验证得出,增加DC-DC转换电路的三线圈结构系统,能在中继线圈位置不变,负载变化的情况下,自动调节负载的等效阻抗使系统维持较高的传输效率,并验证了该策略同样适用于负载保持不变而中继线圈变化的情况.

参考文献

- [1] UDDIN M K, RAMASAMY G, MEKHILEF S, *et al.* A review on high frequency resonant inverter technologies for wireless power transfer using magnetic resonance coupling [C]//2014 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON). Johor Bahru: IEEE, 2014: 412—417.
- [2] EL RAYES M M, UNIVERSITY F, NAGIB G, *et al.* A review on wireless power transfer [J]. International Journal of Engineering Trends and Technology, 2016, 40(5): 272—280.
- [3] FU M F, MA C B, ZHU X N. A cascaded boost-buck converter for high-efficiency wireless power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(3): 1972—1980.
- [4] 张波, 疏许健, 黄润鸿. 感应和谐振无线电能传输技术的发展[J]. 电工技术学报, 201, 32(18): 3—17.
ZHANG B, SHU X J, HUANG R H. The development of inductive and resonant wireless power transfer technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 3—17. (In Chinese)
- [5] 赵争鸣, 刘方, 陈凯楠. 电动汽车无线充电技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 30—40.
ZHAO Z M, LIU F, CHEN K N. New progress of wireless charging technology for electric vehicles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 30—40. (In Chinese)
- [6] SAMPATH J P K, ALPHONES A, SHIMASAKI H. Coil design guidelines for high efficiency of wireless power transfer (WPT) [C]//2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). Singapore: IEEE, 2016: 726—729.
- [7] KIANI M, GHOVANLOO M. The circuit theory behind coupled-mode magnetic resonance-based wireless power transmission [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2012, 59(9): 2065—2074.
- [8] HAMAM R E, KARALIS A, JOANNOPOULOS, *et al.* Efficient weakly-radiative wireless energy transfer: an EIT-like approach [J]. Annals of Physics, 2009, 324(8): 1783—1795.
- [9] KIM J, SON H C, KIM K H, *et al.* Efficiency analysis of magnetic resonance wireless power transfer with intermediate resonant coil [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10: 389—392.
- [10] 周永勤, 王传宇, 朱萌, 等. 一种磁耦合谐振式无线电能传输系统研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 22(2): 55—60.
ZHOU Y Q, WANG C Y, ZHU M, *et al.* Research on wireless power transfer system via magnetically coupled resonance [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 22(2): 55—60. (In Chinese)
- [11] ZHANG J, YUAN X M, WANG C, *et al.* Comparative analysis of two-coil and three-coil structures for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 341—352.
- [12] SEO D W. Design method of three-coil WPT system based on critical coupling conditions [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3): 3802—3811.
- [13] 黄晓生, 谢辉煌, 林抒毅. 一种四线圈 WPT 系统的耦合动态调整方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1440—1447.
HUANG X S, XIE H H, LIN S Y. A novel adjustable coupling method of four-coil WPT system [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1440—1447. (In Chinese)
- [14] 汪世娇, 马小三, 程祥. 基于 Maxwell 软件的耦合线圈设计与优化[J]. 常州工学院学报, 2019, 32(5): 37—40.
WANG S J, MA X S, CHENG X. The design and optimization of coupling coils based on Maxwell software [J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 2019, 32(5): 37—40. (In Chinese)
- [15] 陈飞彬, 麦瑞坤, 李勇, 等. 基于中继线圈切换的三线圈结构 WPT 系统效率优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6373—6383.
CHEN F B, MAI R K, LI Y, *et al.* Efficiency optimization of three-coil structure WPT systems based on relay coil switching [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6373—6383. (In Chinese)
- [16] FU M F, YIN H, LIU M, *et al.* Loading and power control for a high-efficiency class E PA-driven megahertz WPT system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(11): 6867—6876.
- [17] WANG S M, CHEN J F, HU Z Y, *et al.* Optimisation design for series-series dynamic WPT system maintaining stable transfer power [J]. IET Power Electronics, 2017, 10(9): 987—995.
- [18] 罗斌, 刘婉, 钟晨明, 等. 磁耦合谐振三线圈无线电能传输的交叉耦合效应及电抗补偿 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 105—112.
LUO B, LIU W, ZHONG C M, *et al.* Cross coupling effect and reactance compensation method for three-coil magnetic coupling resonant wireless power transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 105—112. (In Chinese)
- [19] DIONIGI M, MONGIARDO M. Magnetically coupled resonant Wireless Power Transmission systems with relay elements [C]//2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications. Kyoto: IEEE, 2012: 223—226.
- [20] AHN D, HONG S. A study on magnetic field repeater in wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 360—371.
- [21] HUANG R H, ZHANG B. Frequency, impedance characteristics and HF converters of two-coil and four-coil wireless power transfer [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 177—183.
- [22] SEO D W, LEE J H, LEE H S. Optimal coupling to achieve maximum output power in a WPT system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(6): 3994—3998.