

基于 E 类功率放大器的非接触感应耦合电能传输系统

牟宪民^{*1}, 陈希有¹, 焦海坤¹, 周宇翔²

(1. 大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 中电投吉林核电有限公司, 吉林 长春 130000)

摘要: 为了提高非接触感应耦合电能传输系统的可靠性, 提出了一种基于 E 类功率放大器的拓扑结构. 将发射线圈和接收线圈的耦合电感进行等效变换, 把发射线圈的漏感作为 E 类功率放大器谐振单元, 把励磁电感作为折算后负载电阻的匹配电感. 在电能非接触传输的同时实现了阻抗变换, 把等效负载电阻限制在一定的范围内. 提出的拓扑结构简单, 无需额外的补偿网络. 并且负载电阻变化时, 均能满足 E 类功率放大器的零电压软开关条件. 仿真和实验结果验证了新拓扑结构电路的可行性.

关键词: 非接触电能传输; 感应耦合; E 类功率放大器; 逆变器电路; 零电压软开关
中图分类号: TM724 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201706014

0 引言

非接触感应式电能传输技术基于感应耦合原理, 通过发射线圈和接收线圈实现电能的非接触传输. 对于移动设备供电, 非接触电能传输技术相比于有线的电能传输方式, 具有可靠、灵活和易用等显著的优点, 因此近年来得到了广泛的关注. 对于感应式无线电能传输技术的研究可以追溯到 20 世纪的法拉第和特斯拉时代^[1]. 2000 年奥克兰大学的学者首先定义了感应耦合电能传输的概念^[2], 随后深入研究了基本原理和控制策略等内容, 获得了一系列成果^[3-4].

E 类功率放大器在 1975 年被 Sokal 等提出之后, 由于其结构简单、效率高, 得到了广泛关注^[5-7]. 近年来的许多研究工作将 E 类功率放大器应用到非接触的电能传输系统中. 文献[8]给出了一种可以自振荡激励的 E 类功率放大器, 实现了非接触的电能传输. 文献[9-11]给出了非接触电能传输系统元件参数的优化计算方法, 将发射线圈的自感作为 E 类功率放大器的谐振电感, 设计了接收线圈的补偿谐振回路. 文献[12]给出了发射线圈和接收线圈侧的补偿网络设计方法, 并

给出了负载电阻变化时的有计划设计方法. 文献[13]提出了一种双路 E 类放大器拓扑, 设计了系统的补偿网络, 实现了系统的高效工作. 文献[14]和[15]采用闭环进行系统的频率控制, 实现了系统频率跟踪. 目前采用 E 类功率放大器的无线电能传输系统, 为实现系统在工作频率点有效的谐振状态运行, 在发射侧和接收侧都使用电容进行了补偿.

E 类功率放大器工作在于软开关条件, 具有效率高的特点. 一般需要根据负载的大小, 进行相应的谐振电路元件设计. 当负载发生变化时, 谐振电路的谐振条件发生变化, 可能使 E 类功率放大器工作在于非软开关状态, 效率降低. 因此一般 E 类功率放大器在工作时, 需要限制负载电阻变化范围.

非接触感应耦合电能传输系统包括发射线圈和接收线圈, 发射线圈和接收线圈耦合系数较小, 为获得较大的传输功率和效率, 发射侧和接收侧都要进行补偿, 同时在运行时采用频率跟踪方法使系统处于谐振状态. 一般采用的补偿方式有串联-串联补偿、串联-并联补偿、并联-串联补偿、并联-并联补偿. 不同形式的补偿电路具有不同的特

点,可以根据需要采用不同的补偿方式.然而补偿电路的存在使得系统变得复杂.当需要较好的系统特性时,需要采用具有更多元件的高阶补偿电路,使得电路变得更加复杂,难以控制.

本文提出基于 E 类功率放大器的非接触感应耦合电能传输系统,发射侧和接收侧无须进行补偿,元件数量显著减少,使系统效率和可靠性得到显著提高.

1 E 类功率放大器工作原理

E 类功率放大器电路如图 1 所示,直流电感 L_0 和电压源 U_i 构成一个电流源,开关管为 MOSFET,与开关管 Q 并联电容 C_p ,形成一个由 L_s 、 C_s 、 R_1 构成的 L - C - R 谐振网络.其中并联电容 C_p 可以利用开关管的漏源结电容实现.谐振网络的品质因数足够大,负载电阻中电流 i_o 近似正弦.在开关管导通期间,由于并联电容 C_p 被短路,谐振网络包括串联电感 L_s 、串联电容 C_s 和负载电阻 R_1 ;开关管断开期间,谐振网络则包含串联电感 L_s 、串联电容 C_s 、负载 R_1 和并联电容 C_p ,等效电容 C_{eq} 为 C_s 和 C_p 的串联电容.负载网络的特性由这两种情况下的谐振频率和品质因数决定.

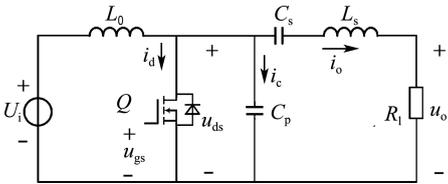


图 1 E 类功率放大器原理图

Fig. 1 Principle schematic of class E power amplifier

通过适当的设计,可以使 E 类功率放大器在特定负载电阻下同时满足零电压(ZVS)条件和零电压导数(ZDS)条件. ZVS 条件保证漏源电压为零;ZDS 条件保证漏源电压导数为零,也就是并联电容电流为零.此时开关管 MOSFET 的开关损耗达到最小,实现 E 类功率放大器的最优设计,负载电阻为最佳负载电阻.当负载电阻为最佳负载电阻时,同时满足 ZVS 和 ZDS 条件;当负载电阻小于最佳负载电阻时,可以满足 ZVS 条件,但不满足 ZDS 条件;当负载电阻大于最佳负载电阻时,ZVS 和 ZDS 条件都不满足,因此 E 类功率放大器的效率最低.为实现 E 类功率放大器高效

工作,要求负载电阻在变化时满足小于最佳负载电阻.图 2 给出了理想条件下的 E 类功率放大器 MOSFET 的栅极电压 u_{gs} 、漏极电流 i_d 、并联电容 C_p 的电流 i_c 和漏极电压 u_{ds} 波形.图 2(a)为最佳负载电阻时的波形.图 2(b)为负载电阻小于最佳负载电阻条件下的波形.图 2(c)为负载电阻大于最佳负载电阻条件下的波形.

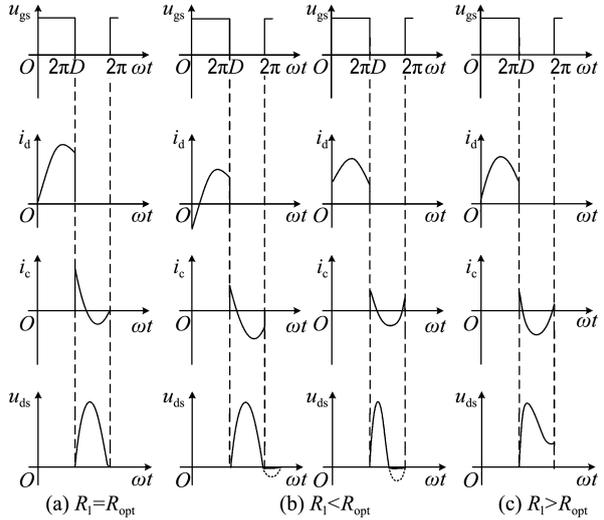


图 2 E 类功率放大器不同负载电阻时的波形
Fig. 2 Waveforms of class E power amplifier at different load resistances

2 新型非接触感应耦合电能传输系统

本文提出的新型非接触感应耦合电能传输(ICPT)系统如图 3 所示.电压源 U_i 和电感 L_0 构成电流型电源输入级,开关管 Q 、电容 C_p 、电容 C_s 和耦合电感的 L_1 (发射线圈)组成 E 类功率放大器,其中负载电阻 R_1 并联连接在耦合电感 L_2 (接收线圈)的两端.

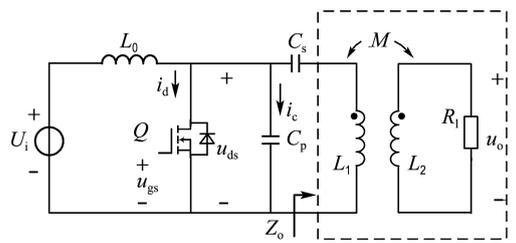


图 3 基于 E 类功率放大器的非接触感应耦合电能传输系统
Fig. 3 Contactless ICPT system based on class E power amplifier

系统中,发射线圈 L_1 和接收线圈 L_2 采用耦合电感 M 模型,实现电能的非接触传输.利用耦合电感的等效变压器模型,将耦合电感 M 等效成理想变压器 T 、漏感 L_{1k} 和励磁电感 L_m 三部分,如图 4 所示.

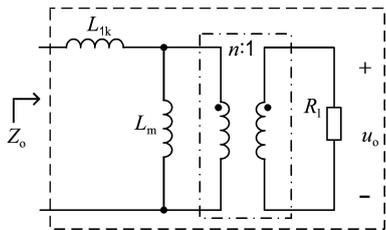


图 4 负载理想变压器等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of load-use ideal transformer

图中的参数,变压器变比 n 、励磁电感 L_m 和漏感 L_{1k} 分别为

$$n = k \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \tag{1}$$

$$L_m = k^2 L_1 \tag{2}$$

$$L_{1k} = (1 - k^2) L_1 \tag{3}$$

式中: k 为耦合电感 M 的耦合系数, $k = M / \sqrt{L_1 L_2}$.

将负载电阻 R_1 折算到理想变压器的一次侧,等效电路如图 5 所示.折算后电阻 $R_{11} = n^2 R_1$.

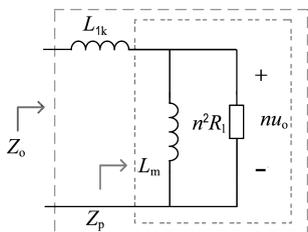


图 5 负载电阻折算后的等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of load resistance after conversion

随后将励磁电感和电阻并联电路转换成等效的串联形式.电路如图 6 所示.

其中,串联电感 L_{ms} 的串联电阻 R_{1s} 和感抗分别为

$$R_{1s} = \frac{n^2 R_1}{1 - q^2} = \frac{n^2 R_1}{1 - \left(\frac{X_{L_m}}{n^2 R_1}\right)^2} \tag{4}$$

$$X_{L_{ms}} = \frac{X_{L_m}}{1 - q^2} = \frac{X_{L_m}}{1 - \left(\frac{n^2 R_1}{X_{L_m}}\right)^2} \tag{5}$$

式中: X_{L_m} 为图 5 中励磁电感的感抗.

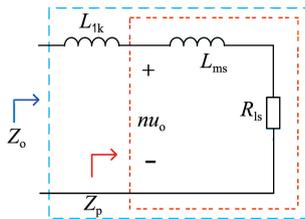


图 6 并联阻感电路的串联等效电路

Fig. 6 Series equivalent circuit of parallel resistance and inductance circuit

负载电阻 R_1 发生变化时,串联等效电阻和串联等效感抗也发生变化,变化趋势如图 7 所示.当 $n^2 R_1 < X_{L_m}$ 时,串联等效电阻 R_{1s} 随负载电阻 R_1 增加而增加,当 $n^2 R_1 = X_{L_m}$ 时达到最大值,此时 $R_{1s} = 0.5 X_{L_m}$;当 $n^2 R_1 > X_{L_m}$ 时,串联等效电阻 R_{1s} 随负载电阻 R_1 增加而减小,当 $n^2 R_1 = \infty$ 时达到最小值,此时 $R_{1s} = 0$. 串联等效感抗 $X_{L_{ms}}$ 随负载电阻 R_1 增加而增加,当 $n^2 R_1 = X_{L_m}$ 时, $X_{L_{ms}} = 0.5 X_{L_m}$;当 $n^2 R_1 = \infty$ 时达到最大值,此时 $X_{L_{ms}} = X_{L_m}$.

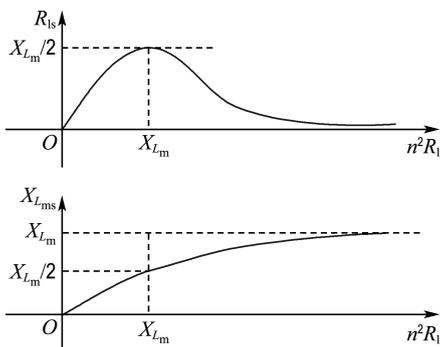


图 7 串联等效电路的参数变化曲线

Fig. 7 Parameter variation curve of series equivalent circuit

根据 E 类功率放大器的特点,负载电阻小于最佳负载电阻时,可以满足 ZVS 条件,实现 E 类功率放大器的开关元件的软开关.

本文提出的基于 E 类功率放大器非接触感应耦合电能传输系统的等效电路如图 8 所示.在参数设计时,使经过等效后的负载电阻 R_{1s} 的最大值为最佳负载电阻,即可以保证 E 类功率放大器

的 ZVS 软开关条件。

等效电路中耦合电感的漏感 L_{lk} 和等效串联电感 L_{ms} 共同作为 E 类功率放大器的谐振网络电感。

电路参数的设计过程如下：(1) 选定开关频率。(2) 按照传统 E 类功率放大器确定最大功率输出时的电阻值。(3) 根据系统的耦合电感参数及式(4)和式(5)确定 R_s 和 L_{ms} 的大小。(4) 确定 E 类功率放大器的其他参数。

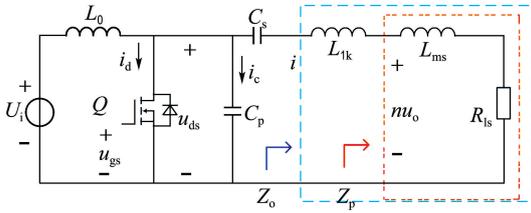


图 8 非接触感应耦合电能传输系统等效电路

Fig. 8 Equivalent circuit of contactless ICPT system

3 仿真及实验

3.1 仿真模型

给定开关频率 100 kHz、电源电压 24 V 及最大输出功率 100 W 等具体要求，根据简要设计过程，确定表 1 中的参数进行仿真。仿真模型如图 9 所示。

表 1 仿真模型参数

Tab.1 Parameters of simulation model

L_0 / mH	C_p / nF	C_s / nF	U_s /V	L_1 / μ H	L_2 / μ H	M/μ H	R_s/Ω
2	100	69	24	46.51	46.44	15.22	0~2 000

图 9 中下半部分为仿真电路原理图，包括电源 V_1 、开关 M_1 、并联电容 C_1 ，E 类功率放大器的谐振电容 C_2 及耦合电感 L_1 和 L_2 。仿真结果波形在图中上半部分，给出了负载电阻上的输出电压波形 V_{output} ，近似正弦；开关两端的电压 V_{cp} 电压波形为半波，在开关截止时电压开始上升，电压下降到零之后，开关导通，实现零电压开通。改变负载电阻大小，得到不同电阻时的输出电压和功率，绘制曲线结果见图 10。负载电阻减小时，输出电流增大，输出电压减小，输出功率先增加、后减小，

存在最大输出功率。

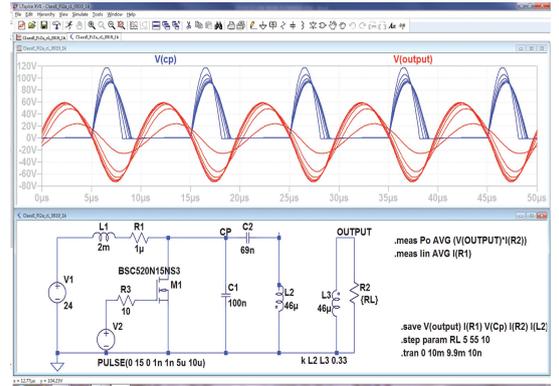


图 9 非接触感应耦合电能传输系统仿真模型及仿真结果波形

Fig. 9 Simulation model and waveform of contactless ICPT system

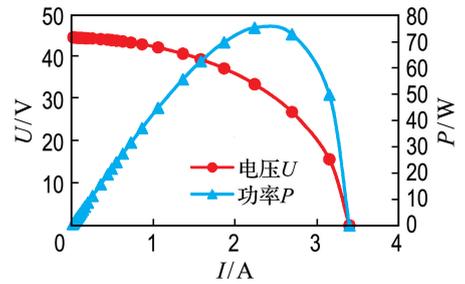


图 10 系统输出特性仿真结果

Fig. 10 Simulation results of system output characteristics

3.2 实验模型

根据仿真模型的参数搭建实验平台，进行实验。

图 11 给出了负载电阻 7 Ω 和 330 Ω 时的实验结果。

图中最下侧波形(第 1 通道)为开关两端电压波形，可以看到开关在零电压开通；中间波形(第 3 通道)为负载电阻的电流；最上侧波形(第 4 通道)为负载电阻的电压。负载电阻电压和电流存在相位差，是由于采用的大功率负载电阻为绕线型金属丝电阻，较大的电感值导致电流滞后电压一个角度，呈感性。

改变负载电阻大小，测量输出电压和输出功率，绘制曲线如图 12 所示。结果与仿真结果接近。

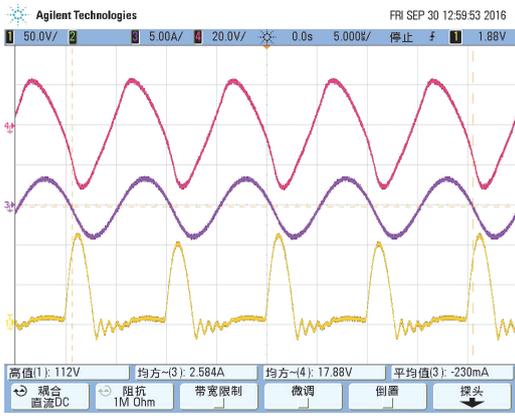
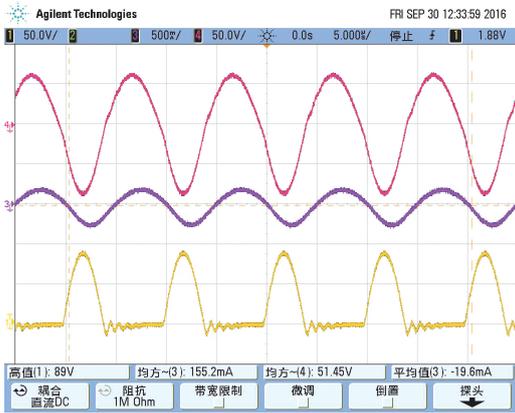
(a) $R_1 = 7 \Omega$ (b) $R_1 = 330 \Omega$

图 11 非接触感应耦合电能传输系统实验结果波形

Fig. 11 Experimental result waveform of contactless ICPT system

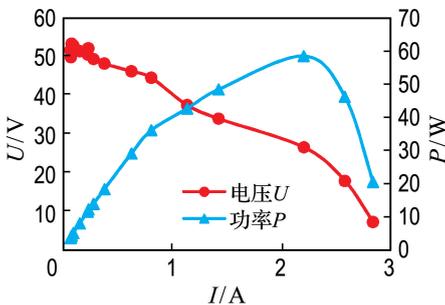


图 12 输出特性曲线实验结果

Fig. 12 Experimental result of output characteristic curve

4 结论

(1) 本文提出的新型基于 E 类功率放大器的非接触感应耦合电能传输系统中的 E 类功率放大器, 开关元件少, 电路结构简单;

(2) 除基本的 E 类功率放大器所需的谐振电感和电容, 无需其他补偿元件;

(3) 系统可以在任何负载大小情况下实现 E 类功率放大器的零电压软开关条件, 实现电能的高效率传输;

(4) 系统开关频率固定, 开环工作, 无需闭环控制电路, 简单可靠.

参考文献:

- [1] TESLA N. The transmission of electrical energy without wires as a means for furthering peace [J]. **Electrical World and Engineer**, 1905, 1:21-24.
- [2] STIELAU O H, COVIC G A. Design of loosely coupled inductive power transfer systems [C] // **2000 International Conference on Power System Technology, Proceedings**. Perth: IEEE, 2000: 85-90.
- [3] COVIC G A, BOYS J T. Modern trends in inductive power transfer for transportation applications [J]. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, 2013, 1(1): 28-41.
- [4] COVIC G A, BOYS J T. Inductive power transfer [J]. **Proceedings of the IEEE**, 2013, 101(6): 1276-1289.
- [5] SOKAL N O, SOKAL A D. Class E-A new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers [J]. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, 1975, SC-10(3): 168-176.
- [6] RAAB F H. Idealized operation of the class E tuned power amplifier [J]. **IEEE Transactions on Circuits and Systems**, 1977, CAS-24(12): 725-735.
- [7] ACAR M, ANNEMA A J, NAUTA B. Analytical design equations for class-E power amplifiers [J]. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I-Regular Papers**, 2007, 54(12): 2706-2717.
- [8] LASKOVSKI A N, YUCC M R. Class-E oscillators as wireless power transmitters for biomedical implants [C] // **2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2010)**. Rome: IEEE, 2010: 1-5.
- [9] KENDIR G A, LIU W T, WANG G X, et al. An optimal design methodology for inductive power link with class-E amplifier [J]. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I-Regular Papers**, 2005, 52(5): 857-866.

- [10] 李艳红, 刘国强, 张超, 等. 宽频磁耦合谐振式无线电能传输系统电源变换器技术[J]. 电工技术学报, 2016, **31**(z1):25-31.
LI Yanhong, LIU Guoqiang, ZHANG Chao, *et al.* Broadband power converter for wireless power transfer system via coupled magnetic resonances [J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2016, **31**(z1):25-31. (in Chinese)
- [11] CASANOVA J J, LOW Z N, LIN J. Design and optimization of a Class-E amplifier for a loosely coupled planar wireless power system [J]. **IEEE Transactions on Circuits and Systems II-Express Briefs**, 2009, **56**(11):830-834.
- [12] 冷志伟, 陈希有. 基于E类放大器的感应电能传输系统研究[J]. 电测与仪表, 2011, **48**(11):92-96.
LENG Zhiwei, CHEN Xiyou. Research on inductive power transfer system based on Class-E amplifier [J]. **Electrical Measurement & Instrumentation**, 2011, **48**(11):92-96. (in Chinese)
- [13] 黄晓生, 陈为, 陈庆彬. 用于WPT的双路E类逆变器功率合成拓扑及其电感耦合集成[J]. 中国电机工程学报, 2015, **35**(21):5577-5584.
HUANG Xiaosheng, CHEN Wei, CHEN Qingbin. Topology of the power combination with dual class E inverters and magnetics integration of coupled inductors for WPT applications [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2015, **35**(21):5577-5584. (in Chinese)
- [14] 李艳红, 张超, 刘国强, 等. 基于E类功放的谐振式无线电能传输控制设计[J]. 电工电能新技术, 2015, **34**(7):63-68, 74.
LI Yanhong, ZHANG Chao, LIU Guoqiang, *et al.* Control design of resonant wireless power transmission based on class E power amplifier [J]. **Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy**, 2015, **34**(7):63-68, 74. (in Chinese)
- [15] 黄晓生, 陈为. E类逆变器在无线电能传输系统中的设计与应用[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2015, **43**(3):352-358.
HUANG Xiaosheng, CHEN Wei. Application and design of class E inverter in wireless power transfer system [J]. **Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)**, 2015, **43**(3):352-358. (in Chinese)

Contactless inductive coupled power transfer system based on class E power amplifier

MU Xianmin^{*1}, CHEN Xiyou¹, JIAO Haikun¹, ZHOU Yuxiang²

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. CPI Jilin Nuclear Power Co., Ltd., Changchun 130000, China)

Abstract: To improve the performance of contactless inductive coupled power transfer system, topology structure based on class E power amplifier is proposed. For transforming coupling inductance of the transmitting and the receiving coils, the leakage inductance of the transmitting coil is used as the class E power amplifier resonating unit, and the excitation inductance is used as the matching inductance of the converted load resistance. The equivalent load resistance is limited while the power is contactlessly transforming. The proposed topology structure is simple and no additional compensation network is required. The zero-voltage soft-switching conditions of class E power amplifier can be met while load resistance changing. Simulation and experimental results verify the feasibility of new topology structure circuit.

Key words: contactless power transfer; inductive couple; class E power amplifier; inverter circuit; zero-voltage soft-switching