

交流包络调制无线电能传输系统恒压输出研究

张 莲 杨洪杰 张 路* 经廷伟 官 宇

(重庆理工大学电气与电子工程学院 重庆 400054)

摘 要 针对交流包络调制无线电能传输系统恒压输出的问题,通过对串联/串联型交流包络调制无线电能传输系统模型的分析,得到使系统输出电压保持恒定的约束关系;选择在一次侧加入改进型 AC-AC Boost 变换器以实现系统的恒压输出,分析并设计变换器的控制逻辑;通过搭建仿真模型,仿真验证所设计系统的可行性。仿真表明,所设计的交流包络调制无线电能传输系统不仅可满足恒压输出要求,还拥有低谐波、高功率因数的优点。

关键词 无线电能传输 交流 包络调制 串联/串联 恒压

中图分类号 TP3

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2024.12.010

CONSTANT VOLTAGE OUTPUT OF AC ENVELOPE MODULATION WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM

Zhang Lian Yang Hongjie Zhang Lu* Jing Tingwei Gong Yu

(School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract Aimed at the constant voltage output of the AC envelope modulation wireless power transfer system, through the analysis of the series/series type AC envelope modulation wireless power transfer system model, the constraint relationship that keeps the system output voltage constant was obtained. Choosing to add an improved AC-AC Boost converter on the primary side to realize the constant voltage output of the system, the control logic of the converter was analyzed and designed. By building a simulation model, simulation verified the feasibility of the designed system. Simulation shows that the AC envelope modulation wireless power transfer system designed in this paper can not only meet the requirements of constant voltage output, but also has the advantages of low harmonics and high power factors.

Keywords Wireless power transfer AC Envelope modulation Series/series Constant voltage

0 引 言

采用无线电能传输(Wireless Power Transfer, WPT)系统基于电磁感应技术,利用高频磁场实现能量的无线传输,因其摆脱了导线的束缚,与传统电能传输模式相较,具有更高的灵活性和安全性,在电动汽车^[1-2]、便携式电子设备^[3],以及特殊工作环境^[4]等有着广泛的应用前景。传统的 WPT 系统由于传输效率低、控制复杂、功率因数低以及成本高等问题,限制了技术的推广^[5]。针对传统 WPT 系统的不足,文献[6]将通信原理中的包络线调制技术与 WPT 技术相结合,提出了基于包络调制的 WPT 技术,该技术去掉了直流调压与

大电容滤波环节,可提高系统的传输效率以及功率密度。

针对 WPT 系统恒压输出的研究,文献[7]在一次侧加入 DC-DC 变换器,通过将输入交流电滤波为直流电后进行调压,再逆变为高频交流电以实现系统的恒压输出,但电能的变换环节较多,增加了系统的控制难度。文献[8]通过特定两种拓扑的输出特性,在一次侧根据负载变化进行拓扑切换,以实现宽负载恒压输出,但并联/串联型谐振补偿拓扑的引进,需利用大电感保证电源能提供稳定的电流,增大了系统体积以及控制难度。文献[9]根据包络调制 WPT 系统的特性,在不增加系统电路复杂度的情况下,利用能量注入与自由振荡模态组合的形式,调整注入初级回路的能量

规模以适应负载的功率变化,从而实现动态负载条件下输出端的恒压输出。文献[10]采用的适用于包络调制无线电能传输系统的 AD/DC/AD 结构,具有结构简单、特点。它去掉了直流滤波和调压环节,降低了次级侧控制难度。但对于负载发生变化时,输出交流电压的稳定性问题尚待解决。

在上述研究基础上,本文通过对串联/串联(SS)型交流包络调制 WPT 系统模型的分析,得到了使系统输出电压保持恒定的约束关系;并结合包络调制的特点,选择在一次侧加入改进型 AC-AC Boost 变换器的控制策略,进一步设计了变换器的控制逻辑以实现 SS 型交流包络调制 WPT 系统的恒压输出;最后通过搭建仿真模型进行验证。

1 交流包络调制 WPT 系统建模分析

本文以 SS 型交流包络调制 WPT 系统作为恒压输出的研究对象,系统模型如图 1 所示。

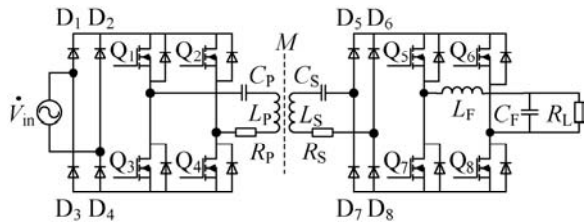


图 1 SS 型交流包络调制 WPT 系统模型

可以看出, \$\dot{V}_{in}\$ 为工频交流输入电源,四个二极管 \$D_1, D_2, D_3\$ 与 \$D_4\$ 组成一次侧全波整流电路; \$Q_1, Q_2, Q_3\$ 与 \$Q_4\$ 为功率开关管,构成一次侧高频全桥逆变电路;一次侧补偿电容 \$C_p\$ 与一次侧发射线圈 \$L_p\$ 构成一次侧串联谐振补偿网络, \$R_p\$ 为发射线圈 \$L_p\$ 的内阻。一次侧包络调制过程如图 2 所示。

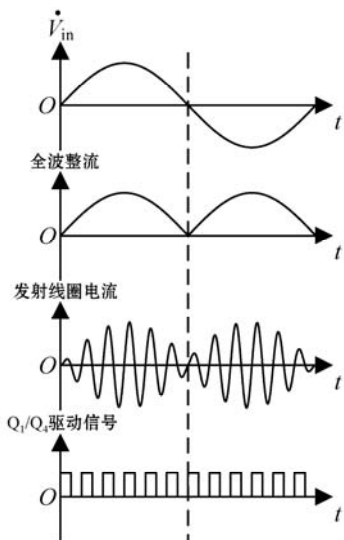


图 2 一次侧包络调制过程

次侧串联谐振补偿网络, \$R_s\$ 为接收线圈 \$L_s\$ 的内阻; \$M\$ 为两线圈间的互感; \$D_5, D_6, D_7\$ 与 \$D_8\$ 组成二次侧全波整流电路; \$Q_5, Q_6, Q_7\$ 与 \$Q_8\$ 组成二次侧极性切换电路;滤波电容 \$C_F\$ 与滤波电感 \$L_F\$ 构成低通滤波电路, \$R_L\$ 为电阻负载。二次侧包络解调过程如图 3 所示。

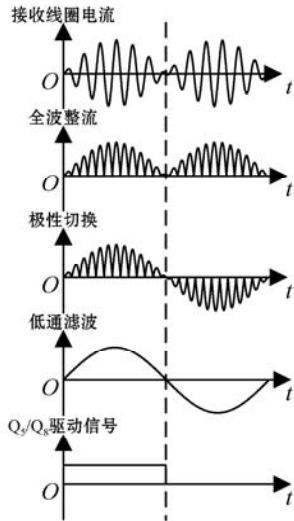


图 3 二次侧包络解调过程

交流阻抗分析法可探究 WPT 系统的阻抗及频率特性,从频域角度对系统进行分析。SS 型 WPT 系统阻抗模型如图 4 所示。

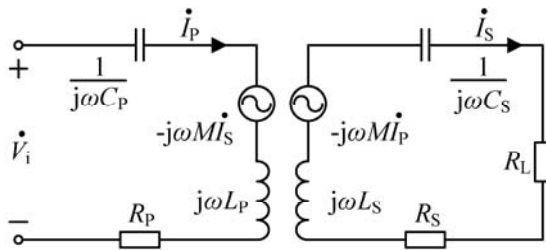


图 4 SS 型 WPT 系统阻抗模型

图 4 中 \$\dot{V}_i\$ 为一次侧谐振补偿网络输入电压; \$\dot{I}_p\$、\$\dot{I}_s\$ 分别为发射线圈和接收线圈电流; \$\omega\$ 为系统工作角频率。根据图 4 可得到 SS 型 WPT 系统一次侧及二次侧电路的 KVL 方程为:

$$\begin{cases} \left(j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} + R_p \right) \dot{I}_p - j\omega M \dot{I}_s = \dot{V}_i \\ \left(j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_s + R_L \right) \dot{I}_s - j\omega M \dot{I}_p = 0 \end{cases} \quad (1)$$

一次侧阻抗 \$Z_p\$ 和二次侧阻抗 \$Z_s\$ 分别为:

$$\begin{cases} Z_s = j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_s + R_L \\ Z_p = j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} + R_p + Z_R \end{cases} \quad (2)$$

\$Z_R\$ 为二次侧反射至一次侧的等效阻抗,其表达式为:

$$Z_R = \frac{\omega^2 M^2}{j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_s + R_L} \quad (3)$$

二次侧补偿电容 \$C_s\$ 与二次侧接收线圈 \$L_s\$ 构成二

为提高 WPT 系统的功率传输能力,利用谐振原理对系统进行无功补偿,使系统工作在谐振状态,即 $\omega = \omega_0$, ω_0 为系统谐振角频率。此时系统一次侧、二次侧电路阻抗呈纯阻性,电感与电容不消耗能量。SS 型 WPT 系统谐振角频率表达式为:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_p C_p}} = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (4)$$

当系统发生谐振时,可得一次侧电流 $\dot{I}_p$ 、二次侧电流 $\dot{I}_s$ 表达式分别为:

$$\begin{cases} \dot{I}_p = \frac{(R_s + R_L) \dot{V}_i}{R_p(R_s + R_L) + \omega_0^2 M^2} \\ \dot{I}_s = \frac{j\omega_0 M \dot{V}_i}{R_p(R_s + R_L) + \omega_0^2 M^2} \end{cases} \quad (5)$$

进一步得到 SS 型 WPT 系统的电阻负载 R_L 电压即系统输出电压 $\dot{V}_L$ 为:

$$\dot{V}_L = \frac{j\omega_0 M R_L \dot{V}_i}{R_p(R_s + R_L) + \omega_0^2 M^2} = \frac{j\omega_0 M R_L \dot{I}_p}{R_s + R_L} \quad (6)$$

2 恒压输出原理及控制策略

根据式(6)可知,当系统电阻负载 R_L 远大于系统内阻时,此时 SS 型 WPT 系统输出电压表达式为:

$$\dot{V}_L = \frac{jR_L \dot{V}_i}{\omega_0 M} = j\omega_0 M \dot{I}_p \quad (7)$$

从式(7)可发现,若要实现 SS 型 WPT 系统在负载变化情况下,负载电压 $\dot{V}_L$ 仍能保持恒定不变,只需满足一次侧电流 $\dot{I}_p$ 保持恒定即可。利用包络调制在一次侧全波整流后,无需大电容滤波,电压呈脉动直流电的特性,可在整流电路前引入 AC-AC 变换器,给定变化器输出电流期望值,通过变换器输出电压的调节,实现负载变化时,一次侧电流 $\dot{I}_p$ 的恒定,从而实现交流恒压输出。

DC-DC 变换器中,Boost 变换器输入电流连续,输入输出同极性,且结构简单,易于控制,但在 AC-AC 变换应用中,无法调节交流电的负半周,故需加入反向开关管以应对交流电的负半周,从而实现 AC-AC 变换。AC-AC Boost 变换器拓扑如图 5 所示。

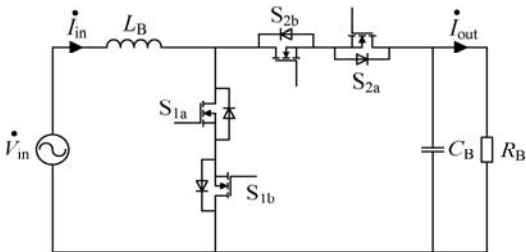


图 5 AC-AC Boost 变换器

图 5 中, L_B 为储能电感; C_B 为储能电容; R_B 为变换器后级电路等效负载; $\dot{I}_{in}$ 为输入电流,即流经电感 L_B 的电流; $\dot{I}_{out}$ 为输出电流; S_{1a} 、 S_{2a} 、 S_{1b} 与 S_{2b} 为功率开关管。

根据输入电压 $\dot{V}_{in}$ 的极性以及电感电流 $\dot{I}_{in}$ 的控制方式, AC-AC Boost 变换器存在四种工作模式^[10]:

1) 当 $\dot{V}_{in} > 0$ 时,若控制电感电流 $\dot{I}_{in}$ 增大。此时 S_{1b} 、 S_{2b} 始终保持导通, S_{1a} 导通, S_{2a} 关断, 电感电流 $\dot{I}_{in}$ 经电感 L_B 、开关管 S_{1a} 与 S_{1b} 后返回电源, 如图 6 所示。此时电感 L_B 处于储能状态, 电感电流 $\dot{I}_{in}$ 增大; 电容 C_B 给负载 R_B 放电, 输出电流 $\dot{I}_{out}$ 减小。

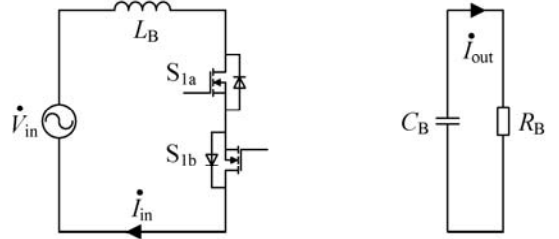


图 6 工作模式 1

2) 当 $\dot{V}_{in}$ 时,若控制电感电流 $\dot{I}_{in}$ 减小。此时 S_{1b} 、 S_{2b} 始终保持导通, S_{2a} 导通, S_{1a} 关断, 电感电流 $\dot{I}_{in}$ 经电感 L_B 、开关管 S_{2a} 与 S_{2b} 后, 分别流经电容 C_B 、电阻负载 R_B 返回电源, 如图 7 所示。此时电感 L_B 处于释能状态, 电感电流 $\dot{I}_{in}$ 减小; 输出电流 $\dot{I}_{out}$ 上升。

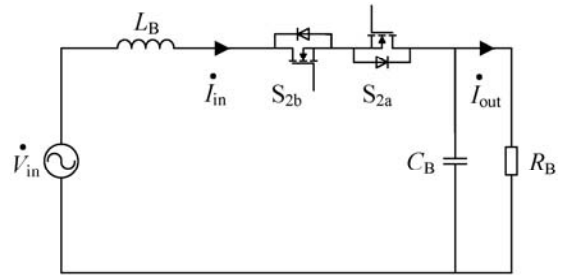


图 7 工作模式 2

3) 当 $\dot{V}_{in}$ 时,若控制电感电流 $\dot{I}_{in}$ 增大。此时 S_{1a} 、 S_{2a} 始终保持导通, S_{1b} 导通, S_{2b} 关断, 电感电流 $\dot{I}_{in}$ 经电感 L_B 、开关管 S_{1a} 与 S_{1b} 后返回电源, 如图 8 所示。此时电感 L_B 处于储能状态, 电感电流 $\dot{I}_{in}$ 上升; 电容 C_B 给负载放电, 输出电流 $\dot{I}_{out}$ 减小。

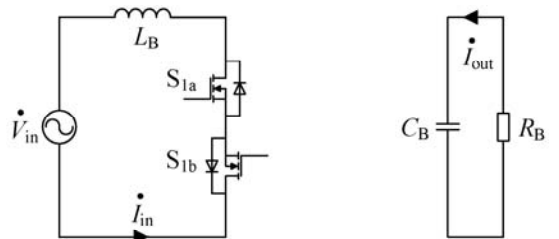


图 8 工作模式 3

4) 当 $\dot{V}_{in}$ 时,若控制电感电流 $\dot{i}_{in}$ 减小。此时 S_{1a} 、 S_{2a} 始终保持导通, S_{2b} 导通, S_{1b} 关断, 电感电流 $\dot{i}_{in}$ 经电感 L_B 、开关管 S_{2a} 与 S_{2b} 后, 分别流经电容 C_B 、电阻负载 R_B 返回电源, 如图 9 所示。此时电感 L_B 处于释能状态, 电感电流 $\dot{i}_{in}$ 下降; 输出电流 $\dot{i}_{out}$ 上升。

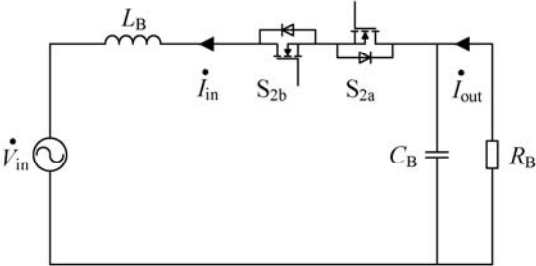


图 9 工作模式 4

通过对 AC-AC Boost 变换器四种工作模式的分析可知,若要控制输出电流 $\dot{i}_{out}$ 恒定,可通过控制电感电流 $\dot{i}_{in}$ 的变化实现。假设 AC-AC Boost 变换器无能量损耗,根据功率守恒定律,可得电感电流 $\dot{i}_{in}$ 的控制表达式为:

$$\dot{i}_{in} = \frac{\dot{i}_{out}^2 R_B}{\dot{V}_{in}} \quad (8)$$

式(8)中,输入电压、输出电流 $\dot{i}_{out}$ 是给定量,只需通过测量后级电路等效电阻负载 R_B 即可实现输出电流 $\dot{i}_{out}$ 的恒定控制。故 SS 型交流包络调制 WPT 系统动态负载恒压输出的 AC-AC Boost 变换器控制逻辑如图 10 所示。

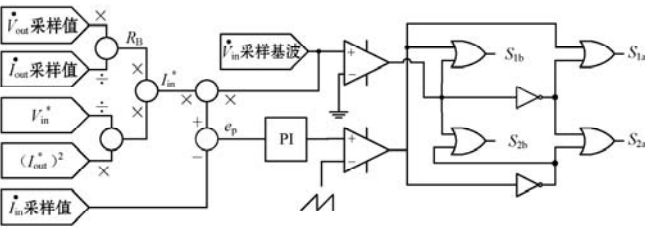


图 10 AC-AC Boost 变换器控制逻辑

图 10 中,将变换器输出电压 $\dot{V}_{out}$ 采样值与输出电流 $\dot{i}_{out}$ 采样值相比可得到变换器后级电路等效电阻 R_B ,从而与预设输入电压幅值 V_{in}^* 和预设输出电流幅值 I_{out}^* 通过式得到期望输入电流幅值 I_{in}^* ,再与输入电压 $\dot{V}_{in}$ 的基波相乘即可得到期望输入电流,将期望值与采样值相比较得到输入电流误差 e_p ;输入电流误差 e_p 经 PWM 调制,得到变换器开关管的 PWM 信号,此信号与输入电压的过零信号一起经逻辑电路,从而控制 AC-AC Boost 变换器开关管的导通与关断。

AC-AC 包络调制 SS 型 WPT 系统动态负载稳压输出一次侧电路如图 11 所示。

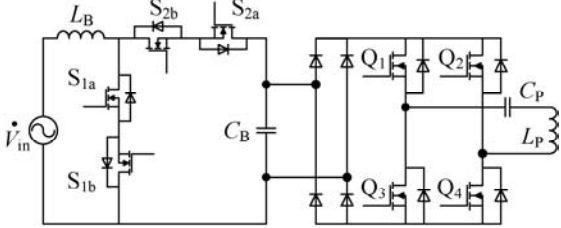


图 11 一次侧完整电路

3 仿真实验

MATLAB 是美国 MathWork 公司出品的商业数学软件,用于数据分析、无线通信、深度学习、图像处理与计算机视觉、信号处理、风险管理、机器人、控制系统等领域。Simulink 是 MATLAB 中的一种可视化仿真工具,它提供一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境。

为了验证上述理论的正确性,在 MATLAB/Simulink 中搭建以图 1 与图 11 相结合的 SS 型交流包络调制 WPT 系统进行仿真验证,并与文献[9]的仿真实验进行对比分析。仿真参数如表 1 所示。

表 1 MATLAB 仿真参数

参数名称	参数值
V_{in}^*/V	$22\sqrt{3}$
$L_p/\mu H$	202.6
$L_s/\mu H$	202.6
$C_p/\mu F$	0.05
$C_s/\mu F$	0.05
L_f/mH	1
$C_f/\mu F$	0.1
f_0/kHz	50
$M/\mu H$	65

选取 25Ω 与 50Ω 作为电阻负载 R_L 值,测得一次侧电路未加 AC-AC Boost 变换器时,系统输入电压与输入电流仿真波形如图 12 所示。

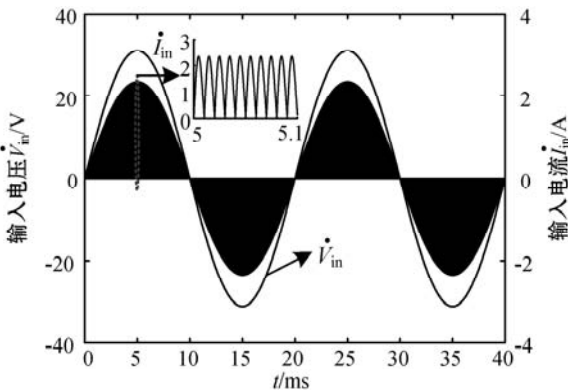


图 12 未加变换器时, $\dot{V}_{in}$ 与 $\dot{i}_{in}$ 仿真波形

可以发现,输入电流 $\dot{i}_{in}$ 的包络线与输入电压 $\dot{V}_{in}$ 是同相的,但由于输入电流 $\dot{i}_{in}$ 是脉动的,会造成系统一次侧功率因数降低。测得未加入变换器时,系统一次侧功率因数如图 13 所示。

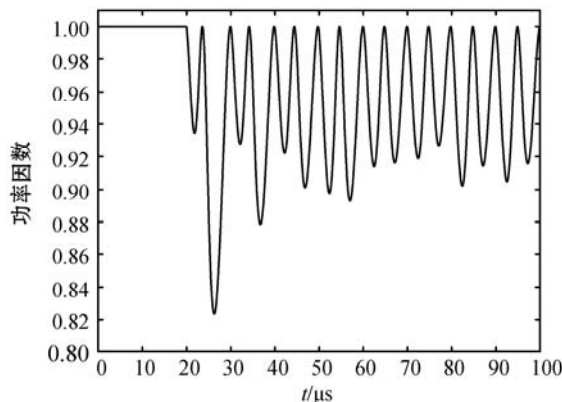


图 13 未加变换器时,系统一次侧功率因数

可以看出,系统一次侧的功率因数由于包络调制的特性,也呈现脉动的变化趋势。图 14 为对输入电流进行傅里叶分析得到的分析数据,可看出未加入变换器时,系统一次侧总谐波畸变率 THD 值较高,达到了 47.86%,谐波含量较大。

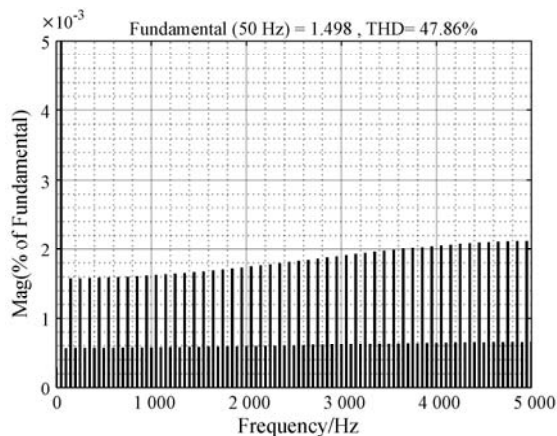


图 14 未加变换器时, $\dot{i}_{in}$ 的傅里叶分析

当在系统一次侧整流桥前加入 AC-AC Boost 变换器时,系统一次侧功率因数以及输入电流 $\dot{i}_{in}$ 的 FFT 分析如图 15 - 图 16 所示。

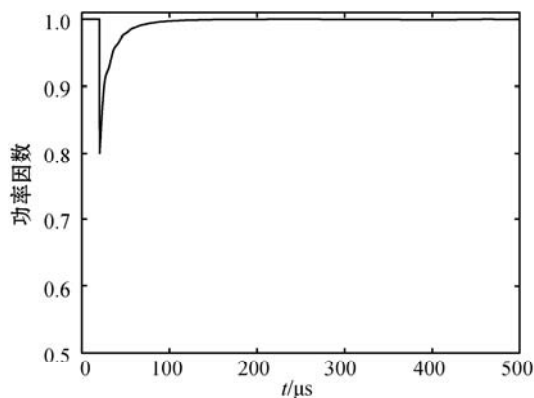


图 15 加入变换器时,系统一次侧功率因数

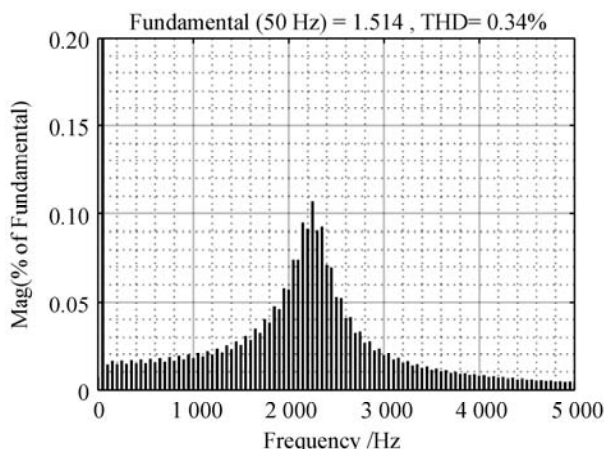


图 16 加入变换器时, $\dot{i}_{in}$ 的傅里叶分析

可以看出,系统加入 AC-AC Boost 变换器后,功率因数有了明显改善,THD 值也仅有 0.34%,谐波含量显著降低。

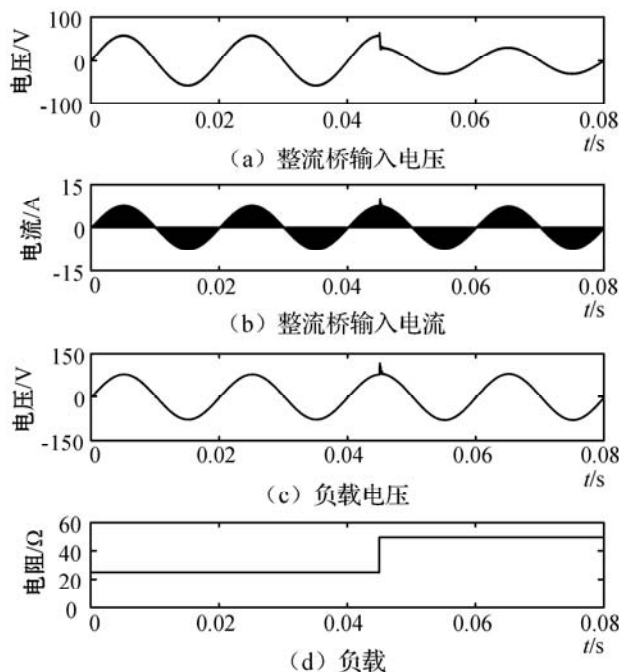


图 17 系统主要参数仿真波形

测得系统各主要参数仿真波形变化如图 17 所示。图 17(d) 为系统负载电阻 R_L 变化情况,设置系统在 $t = 0.045$ s 时,负载电阻 R_L 从 25 Ω 突变为 50 Ω 。图 17(a)、17(b) 为整流桥输入侧电压和电流波形,其值等于变换器输出电压 $\dot{V}_{out}$ 和输出电流 $\dot{i}_{out}$ 。当负载发生突变时,由于给定了 AC-AC Boost 变换器的输出电流值 $\dot{i}_{out}$,输出电压经 AC-AC Boost 变换器调节后,使变换器的输出电流即整流桥输入电流经过短暂振荡后再次稳定于预设值。图 17(c) 为负载电压仿真波形,由于一次侧电流保持恒定,在负载突变后,负载电压在短暂波动后,重新稳定在负载电阻变化前时的水平,实现了交流包络调制 WPT 系统的恒压输出。

文献[9]同样是以 SS 型拓扑为研究对象,实现了

动态负载条件下输出端的稳压。图 18 为文献[9]的完整电路图,图 19 为文献[9]稳压仿真结果图。

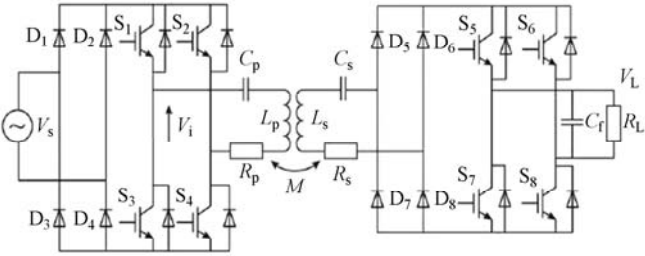


图 18 WPT 系统结构

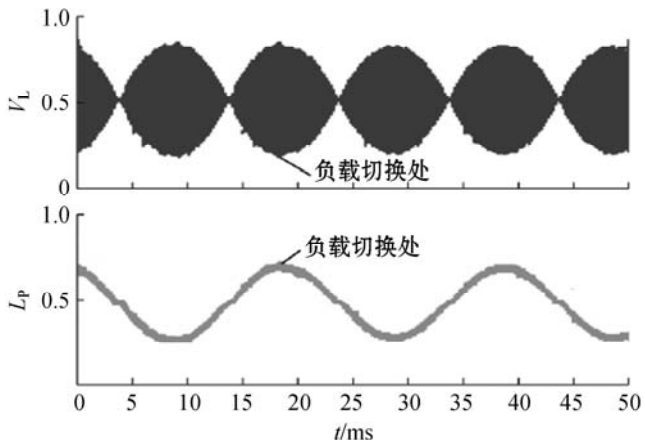


图 19 负载切换条件下的电流与电压波形

对比两个实验的仿真结果来看,同样都实现了系统负载切换时,系统输出交流电压保持恒定。在控制方面,文献[9]基于冲量定理与能量守恒原理,在初级侧采用能量注入模态与自由震荡模态有机结合,通过改变注入谐振网络的电压有效值调整初级侧注入功率,从而控制开关管来实现动态负载条件下输出端的稳压,这种方法为进一步降低谐波对电网的危害,在整流桥输入侧加入了由电感以及电容组成的网侧滤波电路,提高网侧功率因数,但滤波电路若配置不当,则可能造成输入电压与电流有相位差,从而影响后级包络调制电路传输质量;本文选择在一次侧加入改进 AC-AC Boost 变换器以实现系统的恒压输出,由于本文所设计 AC-AC Boost 变换器的控制方式具有有源功率因数校正 (APFC) 的作用,故无需在一次侧电路中添加网侧滤波器,进一步降低了系统级联环节。

文献[9]通过控制开关管来实现能量守恒从而达到输出电压稳定,无法防止电源波动,而系统对电源质量要求较高,电源的波动会影响包络解调的质量,从而影响输出效果。本文采用的一次侧加入控制电路的控制方式,电源的质量会被实时调整至期望状态,避免了电源波动对包络线的影响。

4 结 语

本文简述了包络调制 WPT 系统的工作原理,并通过对 SS 型交流包络调制 WPT 系统模型的分析,得到了使系统输出电压保持恒定的约束关系;结合包络调制的特点,选择在一次侧加入改进型 AC-AC Boost 变换器的控制策略,进一步设计了变换器的控制逻辑以实现 SS 型交流包络调制 WPT 系统的恒压输出。通过仿真验证了所设计系统的可行性,并与类似实验仿真进行了对比分析。仿真表明,本文所设计交流包络调制 WPT 系统不仅可满足恒压输出要求,还拥有低谐波、高功率因数优点。因 AC-AC Boost 变换器本身特性的限制,使得负载电阻无法全范围变化,下一步将针对可使负载电阻全范围调节的 AC-AC 变换器做进一步研究。

参 考 文 献

[1] 吴理豪,张波. 电动汽车静态无线充电技术研究综述(下篇)[J]. 电工技术学报,2020,35(8):1662-1678.

[2] Kan T, Nguyen T D, Wjite J C, et al. A new integration method for an electric vehicle wireless charging system using LCC compensation topology: Analysis and design[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 1638-1650.

[3] 夏能弘,朱益民,程志远. 基于垂直中继线圈结构的 L 形无线充电装置设计与优化[J]. 电工技术学报,2019,34(13):2671-2678.

[4] 刘晓文,王习,陈迪,等. 煤矿井下磁耦合谐振 WPT 系统优化设计[J]. 煤炭学报,2016,41(11):2889-2896.

[5] 张路. 包络调制无线电能传输系统关键问题研究[D]. 重庆:重庆大学,2017.

[6] 王智慧. 基于包络线调制的非接触电能传输模式研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.

[7] 赵志斌,孙跃,翟渊,等. 电压型 CPT 系统动态负载恒压输出研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2011,39(9):66-71.

[8] 孙跃,张欢,陶维,等. 基于变结构模式的宽负载恒压感应耦合电能传输系统[J]. 电力系统自动化,2016,40(5):109-114.

[9] 孙跃,张路,王智慧,等. 交流包络调制无线电能传输系统的负载稳压输出研究[J]. 电力系统自动化,2017,41(2):33-37.

[10] 戴欣,孙跃,苏玉刚,等. 非接触电能双向推送模式研究[J]. 中国电机工程学报,2010,30(18):55-61.

[11] 丁明昌,张友军,任永保,等. 单相 Boost 型 AC/AC 交流变换器的分析与实现[J]. 电源世界,2010(3):21-25.