

# AGV 无线充电全波同步整流尖峰电压抑制方法

童湛安心, 苏建徽, 张健, 杜燕

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院 光伏系统教育部工程研究中心,  
安徽 合肥 230009)

**摘要:**自动导引运输车(AGV)电池组的无线充电要求是低压大电流,全波同步整流(FWSR)可以提高效率并降低成本。首先详细介绍了AGV无线充电拓扑和工作原理,其次针对实验过程发现的同步整流管电压尖峰问题,进行了理论建模和过程原因分析,并提出了有效的抑制措施和吸收电路设计,最后设计了一台样机,通过实验验证了方案的有效性。实验结果表明,该系统实现了3 kW的运行功率,效率可达91%以上,采用同步整流有效提高了系统功率密度。

**关键词:**感应耦合式无线充电;全波同步整流;谐振;漏感

**中图分类号:**TM724 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24200

## Suppression Method of Spike Voltage of AGV Wireless Charging by Full-wave Synchronous Rectification

TONG Zhan'anxin, SU Jianhui, ZHANG Jian, DU Yan

(Education Ministry Engineering Research Center of Photovoltaic System, School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

**Abstract:**The requirements for wireless charging of automated guided vehicle (AGV) batteries are low voltage and high current, full-wave-synchronous-rectification (FWSR) can improve efficiency and reduce costs. Firstly, AGV wireless charging topology and working principle were introduced in detail. Secondly, aiming at the problem of voltage spike of synchronous rectifier tube found in the experimental process, theoretical modeling and process cause analysis were carried out, and the effective suppression measures and absorption circuit design were proposed. Finally, a prototype was designed to verify the effectiveness of the scheme through experiments. Experimental results show that the system achieves 3 kW operating power, and the efficiency can reach more than 91%, meanwhile, the power density of the system is remarkably improved by synchronous rectifier.

**Key words:** inductive coupling wireless charging; full-wave-synchronous-rectification (FWSR); resonance; leakage inductance

目前常见的自动导引运输车(automated guided vehicle, AGV)的电池充电一般采用接触式充电方式,由于其电压低电流大(24 V或48 V/80~150 A),其存在维护成本高、环境适应性差、供电安全性低等缺点,无线电能传输技术的发展带来了充电效率极大提高及成本竞争优势,使得AGV引入感应耦合式无线电能传输(inductive coupled power transfer, ICPT)技术成为可能,同时采用同步整流(synchronous-rectification, SR)技术,对于提高工作效率具有重要作用。

文献[1]对SR技术在无线电能传输系统中的

应用进行了研究,给出了全桥拓扑SR实现软开关的控制方法;文献[2-4]运用SS、SP拓扑讨论了AGV无线充电系统的可行性,但功率和效率都不高;文献[5-6]均采用LCC-S拓扑对AGV无线充电系统进行研究,其中文献[6]在副边运用了四开关 Buck-Boost 变换器 (four-switches-Buck-Boost, FSBB),虽然提高了工作效率,但较多的开关器件增加了成本,且过高的输出电压并不适用于大部分AGV的低压电池组。为了提高AGV无线充电的灵活性,文献[7]基于双边LCC补偿网络 and 全波整流,提出使用一种在AGV停车点使用间歇脉冲

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2021YFB2601403)

**作者简介:**童湛安心(1996—),男,硕士研究生,Email:787830053@qq.com

式的充电方法,功率达到了1.5 kW,但同样针对的是高压电池的充电,实用性并不高;文献[8]提出了一种建立同步整流器的方法,低负荷时自动切换到被动不控整流,大功率传输时可以提高工作效率;文献[9]设计了一种双独立可调输出的无DC-DC变换器无线电能传输(wireless power transmission, WPT)系统,二次侧的整流电路只使用两个二极管和两个MOSFET;文献[10]提出一种针对AGV的具有互操作功率调节机构的模块化道路无线电力传输系统,系统设计包括一种基于检测阻抗的互操作功率调节技术,从而了解AGV的运动位置,便于更灵活地调整各个传动模块的输出功率。文献[11]设计了一种原边采用LCL、副边采用复合型结构的新型无线充电系统,通过改变副边补偿电容工作参数,实现恒压、恒流、最大功率三种工作模式的转换。针对上述文献中,很多整流拓扑采用的全桥电路,导通电阻为两组串联开关管之和,与全波整流电路相比,同样的导通阻抗,开关管数量要增加一倍。且由于存在开关换相死区,大电流下死区期间二极管的导通损耗也是不可忽略的。全波整流电路结构比较简单、器件较少,同样数量的管子,其损耗会较低,因此有必要研究其在低压大电流充电场景的实用性。但是在实验中发现,全波同步整流(full-wave-synchronous-rectification, FWSR)的MOSFET关断 $u_{ds}$ 并不是理论上的两倍负载电压,其在大电流条件下,关断电压尖峰远大于2倍负载电压,且存在高频振荡问题。针对此问题,本文进行了详细分析,提出了解决方法。

## 1 无线充电系统原理与设计

### 1.1 LCC-S补偿ICPT系统工作原理

本文所设计的ICPT系统如图1所示,LCC-S补偿是指一次侧发射端采用LCC补偿网络,二次侧接收端采用串联(Series, S)电容补偿网络。

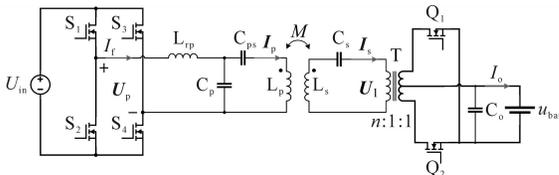


图1 基于SR技术的ICPT系统结构

Fig.1 ICPT system architecture based on SR

三相电网输入的能量经过整流和Buck变换器调制后,由直流母线电压输入给高频逆变电路,LCC谐振补偿电路与发射线圈相连,通过发

射与接收线圈的互感将能量传递至二次接收侧补偿网络,再经由降压变压器(匝比为 $n:1:1$ )和整流电路将直流电能输出给电池。 $U_{in}$ 为直流电压源,系统能量完全由此直流源提供; $S_1\sim S_4$ 构成了高频逆变全桥电路; $U_p$ 为全桥输出电压; $L_p$ 和 $L_s$ 分别为原边和副边耦合线圈的自感;互感为 $M$ ; $L_p, C_p, C_{ps}$ 组成原边LCC谐振补偿网络;副边采用 $C_s$ 串联补偿; $C_o$ 为输出滤波电容。

通过对补偿网络参数配置,当系统原、副边均处于谐振状态时,LCC-S型ICPT系统呈现原边发射线圈恒流、副边输出恒压特性,降低了系统复杂度,同时输出电压不受负载波动影响。忽略寄生参数影响有<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} I_p \approx \frac{U_p}{j\omega_0 p L_p} \\ U_1 \approx \frac{M U_p}{p L_p} \\ I_s \approx \frac{j\omega_0 k L_p I_p}{Z_s} = \frac{k U_p}{p Z_s} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\omega_0 = 2\pi f_0$$

$$p = L_p / L_p$$

$$M = k / \sqrt{L_p L_s}$$

式中: $\omega_0$ 为补偿网络与线圈的固有谐振角频率; $f_0$ 为谐振频率; $p$ 为原边补偿电感与发射线圈自感的电感比; $k$ 为两线圈的耦合系数; $Z_s$ 为副边阻抗。

定频定相调压调控时,二次侧输出充电电压可以采用多闭环控制。通过采样电池电压并进行反馈闭环控制一次侧输入直流电压 $U_{in}$ , $U_{in}$ 可以通过控制前级AC-DC或DC-DC实现调节。

### 1.2 二次侧全波SR技术原理分析

理想状态下,负载端电池的电压钳位, $u_1$ 为高频交流方波,其幅值为 $n \cdot u_2$ 。由于副边补偿网络处在谐振状态,其输出电流波形接近于正弦。考虑补偿网络输出电流的影响,FWSR等效电路如图2所示。

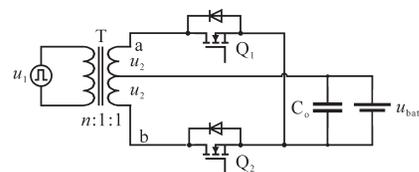


图2 FWSR等效电路

Fig.2 FWSR equivalent circuit

副边谐振补偿电容  $C_s$  输出的方波电压  $u_1$  经降压变压器 T 输出给共源 FWSR 电路,从图 3 可以看出,理想状态下一个工作周期内系统有 4 个模式。

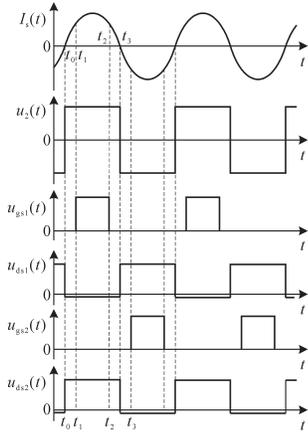


图3 同步整流工作波形

Fig.3 Operating waveforms of SR

图 4 为 4 个不同工作模式等效电路图。

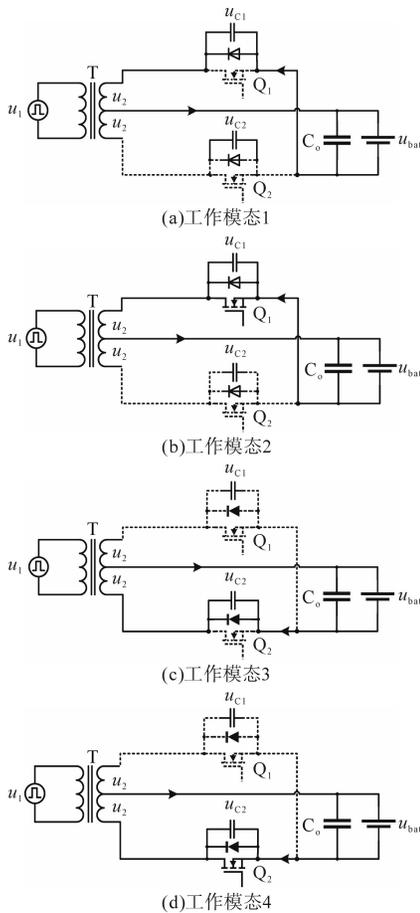


图4 不同工作模式等效电路图

Fig.4 Equivalent circuits diagram of different operating modes

工作模式 1:在  $t_0-t_1$  时间段内,  $u_2$  正半周,  $Q_1$  体二极管率先导通,  $Q_2$  承受反压截止关断,工作模式等效电路如图 4a 所示。

工作模式 2:在  $t_1-t_2$  时间段内,  $Q_1$  导通,  $Q_2$  关断,实现二次侧电压反向同步整流输出,在  $u_2$  进入负半周之前  $Q_1$  关断,工作模式等效电路如图 4b 所示。

工作模式 3:在  $t_2-t_3$  时间段内,  $u_2$  进入负半周,同理可得,  $Q_2$  体二极管率先导通,  $Q_1$  体二极管承受反压截止,工作模式等效电路如图 4c 所示。

工作模式 4:在  $t_3-t_4$  时间段内,  $Q_2$  导通,  $Q_1$  关断,实现二次侧电压反向同步整流输出,工作模式等效电路如图 4d 所示。

由于 MOSFET 导通电阻很小,且运用多管并联的方式,  $Q_1$  漏源极寄生结电容  $u_{C1}$  被钳位在导通压降,即  $u_{C1} = nI_{sd}R_{ds}/m < V_f$ , 其中  $I_{sd}$  为通过 MOSFET 源极至漏极的电流,  $R_{ds}$  为导通内阻,  $m$  为每一桥臂 MOSFET 并联数,  $V_f$  为体二极管导通压降。检测 MOSFET 源-漏极通过电流  $I_{sd}$  是否大于 0, 或者使用同步整流芯片 NCP4306, 通过检测 MOSFET 漏-源极电压  $U_{ds}$ , 当  $U_{ds} \leq -75$  mV 时, 可认为体二极管已先先导通, 从而控制  $Q_1$  和  $Q_2$  互补导通。由于 MOSFET 体二极管先导通, 因此开通瞬间近似实现了零电压开关 (zero voltage switch, ZVS)。与之同理, 由于电流接近于正弦波, MOSFET 在关断时电流接近于 0, 实现了零电流开关 (zero current switch, ZCS), 因此, 整个同步整流过程可认为无条件实现了软开关。

### 1.3 漏感对同步整流影响分析

实验中发现, 全波整流一侧 MOSFET 关断时漏-源极电压远高于电池电压的两倍, 存在非常高的电压尖峰与剧烈的振荡, 电流越大, 尖峰与振荡越明显, 如图 5 所示。

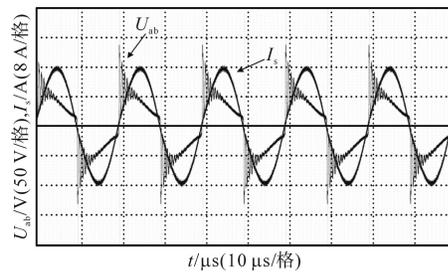


图5 FWSR  $U_{ab}$  与  $I_s$  波形

Fig.5 Waveforms of  $U_{ab}$  and  $I_s$

实际中, 需要考虑变压器两个次级线圈之间存在的漏感, 在电流急剧变化时产生的感生电动势加在了 MOSFET 的结电容上, 导致较高的电压尖峰和振荡。在使用高导通电流能力 MOSFET 的高频电路中, 因 MOSFET 寄生电容较大, 尖峰

较高,振荡衰减较慢,这种振荡甚至会存在于整个关断期间,改变 $U_{ds}$ 波形,不利于MOSFET正常工作。

将变压器T初级等效为理想正弦电流源,在 $t_0$ 时刻, $I_s(t_0) = 0$ ,考虑到变压器漏感与功率管寄生参数,FWSR零状态等效电路如图6所示。

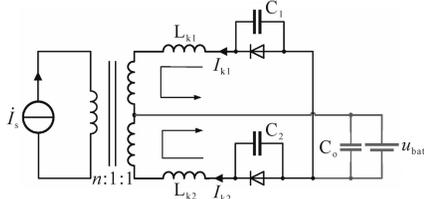


图6 零状态响应系统等效电路

Fig.6 Equivalent circuit of zero state response system

此时 $Q_1$ 导通, $Q_2$ 关断截止,下支路的次级 $Q_2$ 寄生电容 $C_2$ 和变压器漏感 $L_{k2}$ 以及次级绕组构成放电通路。上下支路的漏感电压与次级绕组电压全部加在 $Q_2$ 上,根据基尔霍夫定律有:

$$u_{lk1}(t) + 2u_2(t) + u_{lk2}(t) - u_{C2}(t) = 0 \quad (2)$$

下管 $Q_2$ 需要承受漏感和次级绕组的全部电压,而漏感电压可表示为

$$\begin{cases} u_{lk1}(t) = L_{k1} \frac{dI_{k1}(t)}{dt} \\ u_{lk2}(t) = L_{k2} \frac{dI_{k2}(t)}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

根据变压器匝比又有:

$$\begin{cases} I_{k1}(t) = I_{k2}(t) = nI_k(t) \\ u_2(t) = \frac{1}{n}u_1(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $I_k$ 为漏感电流。

由式(1)可得:

$$u_1(t) = \frac{k}{p}u_p(t) \quad (5)$$

联立式(2)~式(5)可得:

$$u_{C2}(t) = u_{ds2}(t) = nk(L_{k1} + L_{k2}) \frac{dI_k(t)}{dt} + \frac{2k}{np}u_p(t) \quad (6)$$

式中: $u_{C2}$ 为 $C_2$ 电压; $u_{ds2}$ 为 $Q_2$ 开关管漏-源极电压。

只考虑基波分量, $Q_2$ 开关管漏-源极电压 $u_{ds2}$ 由方波与余弦波构成,在 $t_0$ 时刻达到最大值, $Q_1$ 同理。尽量减少漏感,可有效降低开关管压降,保护电路安全,改善系统特性。

## 2 吸收钳位电路分析

### 2.1 吸收钳位电路原理

降低变压器漏感,主要手段为选用磁路更为

封闭的磁芯,如PQ系列磁芯、GU系列磁罐;利兹线密绕且使用“三明治”绕法等。实验中将PQ5050磁芯替换为GU59后,振荡现象能够有所改善。但是在电流情景下,当变压器工艺不能进一步优化电流急剧变化带来的波形改变,为了降低开关管应力,需要增加吸收电路。RCD吸收电路作为最常用的无源吸收电路,结构简单便于设计,广泛应用于各类开关电源中。但在全波整流充电电路中,待机状态下电池通过变压器绕组和吸收电路二极管向R放电,会不可避免地产生待机损耗,如图7a所示,而在输出母线上串联防反功率二极管又会进一步增加功耗,因此需要对吸收电路加以改进。改进后的吸收电路如图7b所示,其主要由二极管D,稳压管ZD,泄放电阻R,吸收电容C和三极管K构成。

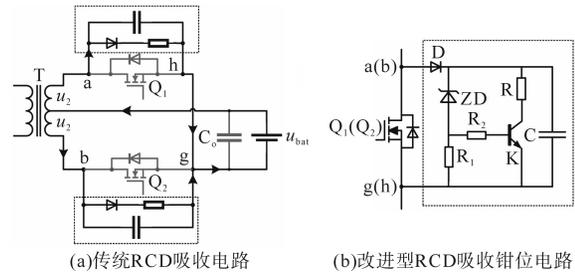


图7 RCD吸收钳位电路

Fig.7 RCD absorption clamp circuit

通过增加稳压管,不仅能阻断待机损耗,在开关管关断 $t_0$ 时刻,尖峰能量被吸收电容C吸收,由于尖峰电压高于稳压管电压,稳压管钳位,继而三极管基极获得电流导通,吸收电容C中的能量经过电阻R泄放。

### 2.2 吸收钳位电路功耗分析

在吸收电路工作过程中,通常为了减小电路损耗,会将吸收电容电压 $u_c$ 波动值控制在一个小范围<sup>[13]</sup>,保证 $RC \leq T_s$ ,其中 $T_s$ 表示MOSFET开关工作周期。NPN三极管K的 $v_{BE}$ 很小,可以忽略不计,在电容两端并联稳压管ZD和限流电阻 $R_1$ ,因此可以近似认为吸收电容电压 $U_c$ 等于稳压管稳压值 $U_{ZD}$ ,即 $U_c \approx U_{ZD}$ 。设定稳压管稳压值稍大于两倍电池电压,使稳压管并非在整个周期工作,从而获得较小的电容电压纹波。为简化分析,考虑最坏情况下,假设稳压管在全周期工作,便可以简化为RCD电路,吸收电容在全周期通过R放电,则吸收电容放电功率为

$$P_R = \frac{U_{ZD}^2}{R} \quad (7)$$

其中

$$U_{ZD} \geq 2u_2$$

稳压管稳压值小可以让三极管一直保持导通状态,当泄放电阻阻值较小时,吸收电容可以泄放更多能量,减小开关管漏源极过压,但是会造成稳压管和三极管过热;稳压管稳压值大可以让稳压管间歇工作,吸收电容在充电过程中被稳压管稳压,工作状态一直保持到电容放电,电压降至稳压管电压,随后三极管关断,停止放电,但是吸收的能量有限。在设计吸收钳位电路时,需要根据允许的电压要求,综合考虑吸收电路损耗、泄放电流,期望选取稍高稳压值的稳压管以及高放大倍数和集电极允许电流的三极管,尽量使三极管工作在开关状态,同时在考虑吸收电容电压的情况下选择合适的电容容值和泄放电阻阻值。

### 3 实验结果与分析

通过上述基于全波同步整流的无线充电系统各部分原理和问题分析,对整个系统进行参数设计,其硬件实际参数为:输入电压为600~750 V,后经过一级Buck电路进行功率调制得到全桥逆变母线电压 $U_{in}=300\sim 500\text{ V}$ ;开关频率 $f=90\sim 100\text{ kHz}$ ;谐振电感 $L_p=101\text{ }\mu\text{H}$ ;并联补偿电容 $C_p=25.3\text{ }\mu\text{F}$ ;串联补偿电容 $C_{ps}=28.5\text{ }\mu\text{F}$ ;距离50 mm下,发射线圈 $L_p=189\text{ }\mu\text{H}$ ,拾取线圈 $L_s=184\text{ }\mu\text{H}$ ,互感 $M=83.0\text{ }\mu\text{H}$ ;接收端串联补偿电容 $C_s=13.7\text{ }\mu\text{F}$ ;降压变压器漏感 $L_{s1}=L_{s2}=0.6\text{ }\mu\text{H}$ 。控制策略采用TMS320F28035型DSP实现,示波器采用的是横河YOKOGAWA-DLM2024。基于上述参数搭建实验平台如图8所示。

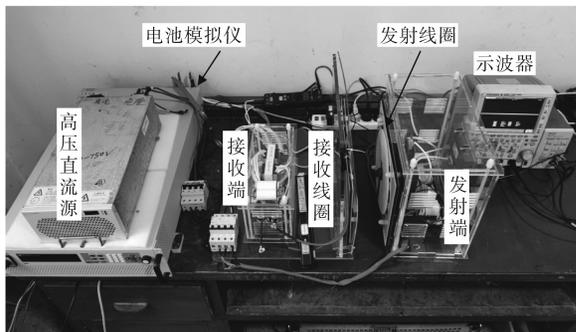


图8 实验平台

Fig.8 Experimental platform

使用可编程直流电源电池模拟功能代替电池,设置电池参数为满电电压28.8 V,空电电压20 V,电池内阻15 mΩ,最大充电电流140 A,SOC为10%,实验显示,系统满功率运行时输入电压640 V,输入电流4.7 A,输出充电电压20.9 V,充

电电流131 A,发射端逆变输出的工作波形如图9a所示。

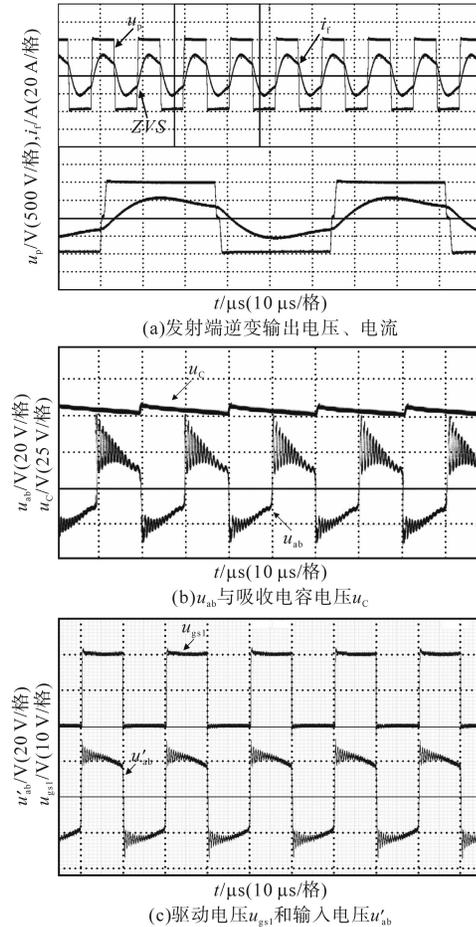


图9 实验波形

Fig.9 Experimental waveforms

在验证系统工作能力的同时,也对RCD吸收钳位电路的效果进行对比验证。在全波电路的 $Q_2$ 漏-源极两端焊接RCD吸收电路,其中 $R=700\text{ }\Omega$ , $C=100\text{ nF}$ ,D型号为US3M,上桥臂维持原拓扑, $u_{ab}$ 与吸收电容电压 $u_c$ 波形如图9b所示,RCD电路能够明显改善波形;将上下桥臂均加装吸收电路后驱动电压 $u_{gs}$ 和输入电压 $u'_{ab}$ 如图9c所示,同步整流驱动信号正常工作,上下桥臂实现交替导通。

### 4 结论

设计了一种低压大电流的无线充电系统,采用LCC-S谐振补偿拓扑和全波整流,分析了该系统副边整流部分出现的振荡问题。系统接收端采用了降压变压器的降压策略,以及全波整流拓扑,在实现同步整流的同时,利用一种吸收钳位电路,有效抑制整流电路换流带来的电压冲击,以此保证系统安全性,进一步提高系统效率。通过搭建实验平台,验证了整个系统的可行性。在

相同输入条件和电池条件下,所搭建的无线充电系统实现了3 kW的稳定功率输出,其传输效率最大达到了95%,全功率输出时也有91%的工作效率。针对低压电动车、AGV等工业级应用场合,能够安全稳定地实现快速充电,具有一定的应用参考价值。

#### 参考文献

- [1] 苏玉刚,张宁,方少乾,等.同步整流技术在ICPT系统中的应用[J].电工技术学报,2013,28(12):313-318.  
SU Yugang, ZHANG Ning, FANG Shaoqian, et al. Application of synchronous rectifiers in inductive coupled power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 313-318.
- [2] 李坤.应用于AGV的无线充电技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.  
LI Kun. Research on wireless charging technology for AGV[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [3] 郝延彪.高频中功率磁耦合谐振式无线电能传输系统研究[D].北京:北京交通大学,2019.  
HAO Yanbiao. Research on high frequency and medium power magnetic coupling resonant wireless power transfer system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [4] 郭丕凤,邹必昌.双边控制的恒压无线充电系统设计[J].电气传动,2020,50(7):113-117.  
GUO Pifeng, ZOU Bichang. Design of constant-voltage wireless charging system with dual-side control[J]. Electric Drive, 2020, 50(7): 113-117.
- [5] 舒文彬.基于LCC-S补偿的AGV低压大电流无线供电系统研究与设计[D].昆明:昆明理工大学,2019.  
SHU Wenbin. Research and design of AGV low voltage and large current wireless power supply system based on LCC-S compensation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [6] 陈耀羽. DC/DC拓扑对LCC-WPT系统的影响分析与效率优化研究[D].北京:北京交通大学,2020.  
CHEN Yaoyu. Research on effect analysis and efficiency optimization of DC/DC topology on LCC-WPT system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [7] CHEN J, LIU J, SUN Z, et al. Research on passive control strategy of AGV wireless power transfer system[C]//2019-34th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), 2019: 200-205.
- [8] MAUCH S, REICHLER H, BENYOUCEF D. Synchronous rectifier for high-power wireless transfer applications[C]//IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2018: 288-293.
- [9] ZHU C, YU J, GU Y, et al. Analysis and design of cost-effective WPT systems with dual independently regulatable outputs for automatic guided vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 6183-6187.
- [10] HUANG S, LEE T, LI W, et al. Modular on-road AGV wireless charging systems via interoperable power adjustment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 5918-5928.
- [11] 黄悦华,谌桥,程江洲,等.电动汽车LCL复合型无线充电研究[J].电气传动,2021,51(10):69-75,80.  
HUANG Yuehua, CHEN Qiao, CHENG Jiangzhou, et al. Research on LCL-compound wireless charging of electric vehicle [J]. Electric Drive, 2021, 51(10): 69-75, 80.
- [12] 国玉刚,崔纳新.LCC-S型无线电能传输系统优化配置及特性研究[J].电工技术学报,2019,34(18):3723-3731.  
GUO Yugang, CUI Naxin. Research on optimal configuration and characteristics based on LCC-S type wireless power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3723-3731.
- [13] 张亚楠,梁志华,罗欣儿,等.基于双向反激变换器的电池组主动均衡系统[J].电力电子技术,2021,55(7):1-6,45.  
ZHANG Yanan, LIANG Zhihua, LUO Xiner, et al. Active balancing system of battery pack based on bidirectional flyback converter[J]. Power Electronics, 2021, 55(7): 1-6, 45.

收稿日期:2022-02-21

修改稿日期:2022-04-01