

# Single-Stage Electrolytic Capacitor-less AC-DC Converter with High Frequency Isolation for EV Charger\*

HE Suxia\*, ZHANG Jujin

(Faculty of Engineering, Huanghe Science and Technology University, Zhengzhou He'nan 450063, China)

**Abstract:** A novel single-stage AC-DC high-frequency isolated electrolytic capacitor-free converter is proposed for the existing vehicle-mounted charging devices, which have a large number of electrolytic capacitors that affect the service life of the converter. The proposed single-stage structure does not have a diode bridge at the input stage and electrolytic capacitor at the DC-link. The two single-phase full-bridge converters play double roles as both AC-DC converter for PFC and the primary-side circuit of the isolated DC-DC converter. This structure effectively reduces the magnitude of the magnetisation current, thereby reducing the size and excess core losses. Also, the proposed converter can achieve ZVS turn on of switches and ZCS turn off of diodes. A 3-kW prototype of the proposed converter is built and tested to verify the effectiveness and validity of the operation of the proposed converter.

**Key words:** single-stage; AC-DC converter; electrolytic capacitor; high frequency isolation; EV charger

EEACC: 1265H

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2022.05.027

# 一种新型单级无电解电容 AC-DC 高频隔离变换器\*

贺素霞\*, 张具琴

(黄河科技学院工学部, 河南 郑州 450063)

**摘要:** 针对现有车载式充装置存在的大量电解电容影响变换器使用寿命的现象, 提出了一种新型单级 AC-DC 高频隔离式无电解电容变换器。所提单级拓扑输入端无二极管整流桥, 同时直流母线不存在电解电容。所提变换器拓扑单元中的两个全桥单元不仅可以实现功率因数校正, 而且可充当隔离式 DC-DC 变换器的初级侧电路。该结构可有效降低磁化电流的大小, 从而减小变压器体积和减少多余的磁芯损耗。另外, 该变换器可实现开关 ZVS 导通和 ZCS 关断。最后, 通过搭建一台 3 kW 的实验样机, 以验证所提变换器的有效性和可行性。

**关键词:** 单级 AC-DC 变换器; 电解电容; 高频隔离; 车载充电

中图分类号: TN624

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2022)05-1182-05

为了减少化石燃料的消耗和温室气体排放, 基于锂离子电池电源的改进电子设备电动汽车 (Electronic Vehicles, EVs) 和插电式混合动力汽车 (Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEVs) 成为重要的研究方向<sup>[1-2]</sup>。根据高效率 and 有限空间燃油经济性高的功率密度要求, 车载充电器在续航里程方面起到很重要的作用。车载充电器拓扑由 AC-DC 转换器组成两级结构用于整流和功率因数校正 (Power Factor

Correction, PFC), DC-DC 模块用于隔离和输出的变换器<sup>[3-6]</sup>。两级结构具有较宽的调节范围、高功率因数等特点。但是, 两级结构在提高效率方面有局限性, 而且由于元件数量多, 成本高。值得注意的是两级变换器需大的电解电容, 以保证 DC/DC 环节的母线电压恒定。这将势必导致系统整体功率密度较低, 且寿命严重受到电解电容的影响。

为了克服上述两级结构和系统寿命的问题, 国

项目来源: 河南省高等学校重点科研项目 (15A480008)

收稿日期: 2021-09-29 修改日期: 2022-03-21

内、外专家提出了适用于中高功率应用的单级结构<sup>[7-8]</sup>。最为常见的一类拓扑结构为前级 boost 型 PFC 电路和后级隔离式 DC-DC 变换器相整合,减少了开关等组件及其控制和栅极驱动单元,降低了电路成本。但是,单级结构电解电容输出的低频纹波使得该类变换器应用场合受限<sup>[8]</sup>。值得注意的是纹波电流是造成二倍工频功率脉动的主要原因。它明显影响锂离子效率和电池的寿命<sup>[9-10]</sup>。对此,文献[11-13]介绍了一种串联纹波消除电路(Ripple Cancellation Circuit, RCC)的变换器。串联的纹波消除电路可以是单向变换器<sup>[11]</sup>,也可以是双向变换器<sup>[12]</sup>。其基本的工作方式是通过 RCC 产生一个与主输出电压纹波大小相等方向相反的电压,以抵消输出的纹波。但是,该类电路拓扑依然无法完全消除电路对电解电容的依赖,同时控制单路随着纹波率的减少,复杂度骤增。

鉴于上述工作存在的不足,提出了一种新型具有高频隔离功能的单级无电解电容 AC-DC 变换器。所提变换器具有以下特点:(1)无桥无电解电容结构:输入级没有整流二极管和电解电容;(2)消除了变压器中线频分量,减小铁芯体积和铁芯损失;(3)开关管 ZVS 导通,且不受电压和负载变化;(4)二极管 ZCS 关断,从而可以实现高效率和高功率密度。最后搭建并测试了 3 kW 的实验样机,以验证所提变换器的有效性和正确性。

### 1 变换器工作原理

图 1 为所提出的单级高频隔离 AC-DC 变换器电路拓扑。值得注意的是两个单相全桥变换器用于 AC-DC 变换器和 DC-AC 斩波器的双重作用。两个单相全桥 PWM 变换器 U1 和 U2 的连接方式消除了两个变换器在变压器初级侧的低频分量。因此,该变压器可以工作于高频状态。低频分量允许加在电容 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 两端的电压上,所需的小容量电容可以通过薄膜电容来实现。由于减少了功率转换级,通过高频变压器和小型母线电容,进一步有效地减小了变换器的体积和质量。

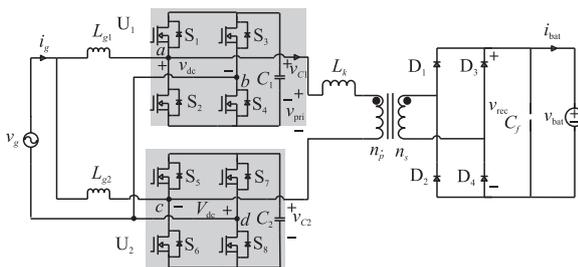


图 1 单级高频隔离 AC-DC 变换器

### 1.1 工作原理

图 2 和图 3 为所提变换器的电流波形和工作模式图。如图 2 所示,两个全桥 PWM 变换器 U<sub>1</sub> 和 U<sub>2</sub> 使用双极开关,并且彼此驱动相位差 180°,用以减少输入电流纹波,实现开关 ZVS 导通和二极管 ZCS 关断。所提变换器有 4 种工作模式,如图 3 所示。图 4(a)为电压和电流波形,图 4(b)为变换器谐波频谱。开关的栅极信号通过将参考电压 v<sub>r</sub> 与载波信号比较得出 v<sub>tri</sub>。其中,变化的开关管占空比用于使电网电流形成正弦波。同时,电压 v<sub>c1</sub> 和 v<sub>c2</sub> 被斩波为交流电压。参考电压 v<sub>r</sub> 可表示为:

$$v_r(t) = 0.5 - m_a \cdot \sin(\omega t) \quad (1)$$

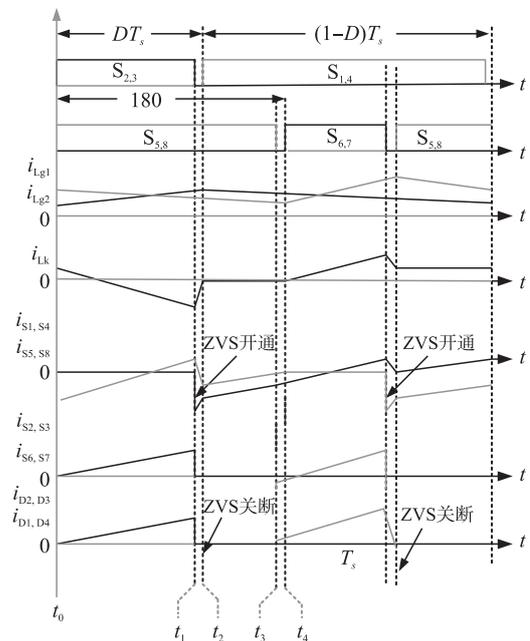


图 2 所提变换器在正电网周期的运行波形

如图 4(a)所示,斩波电压 v<sub>ab</sub> 和 v<sub>dc</sub> 具有相同的幅值,但极性相反,用傅立叶级数可分别表示为

$$v_{ab,1(t)} = \left[ \frac{2V_c}{\pi} \cdot \sin(\omega t) + \frac{\Delta V_c}{\pi} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \right] \times \sum_{n=1}^k [(-1)^{n-1} \cos \alpha_n] \quad (2)$$

$$v_{dc,1(t)} = - \left[ \frac{2V_c}{\pi} \cdot \sin(\omega t) + \frac{\Delta V_c}{\pi} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \right] \times \sum_{n=1}^k [(-1)^{n-1} \cos \alpha_n] \quad (3)$$

变压器初级绕组电压 v<sub>pri</sub> 为两个电压 v<sub>ab</sub> 和 v<sub>dc</sub> 之和,其数值为零,如式(4)所示。

$$v_{pri,1(t)} = v_{ab,1(t)} + v_{dc,1(t)} = 0 \quad (4)$$

图 4 为所提变换器的关键波形和对应的频谱。观察图 4(b)可知,所提出电路拓扑消除了变压器初级绕组电压的基波分量,降低了磁化电流。

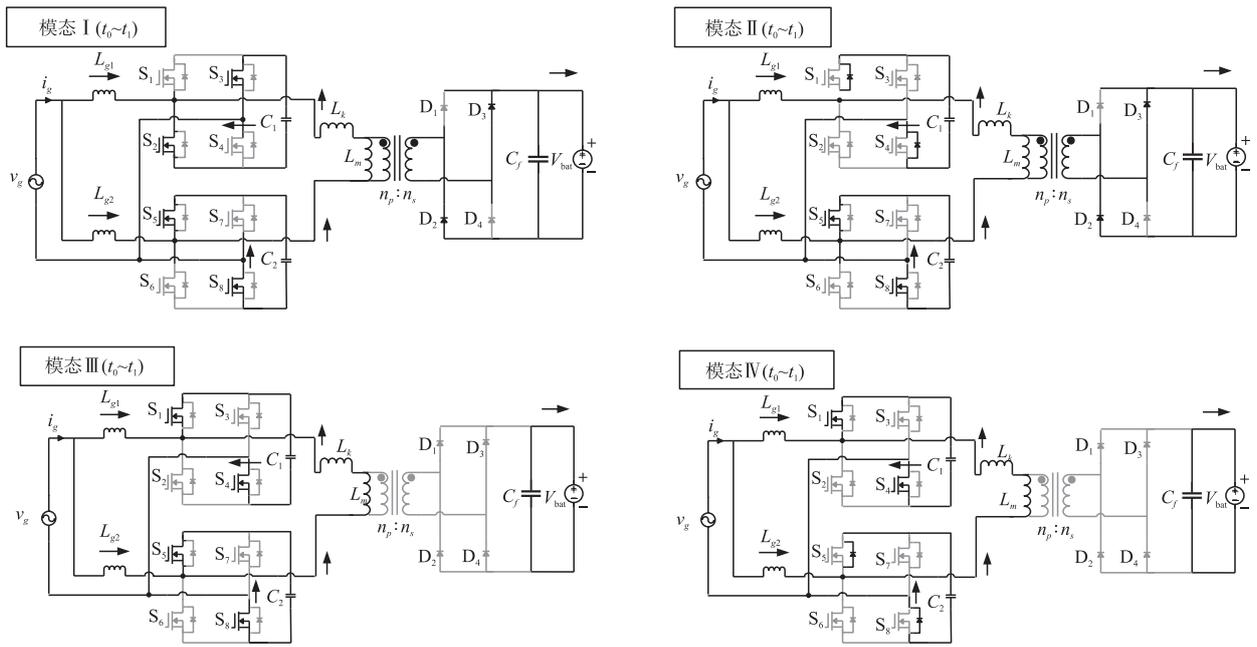


图 3 所提变换器的工作模式

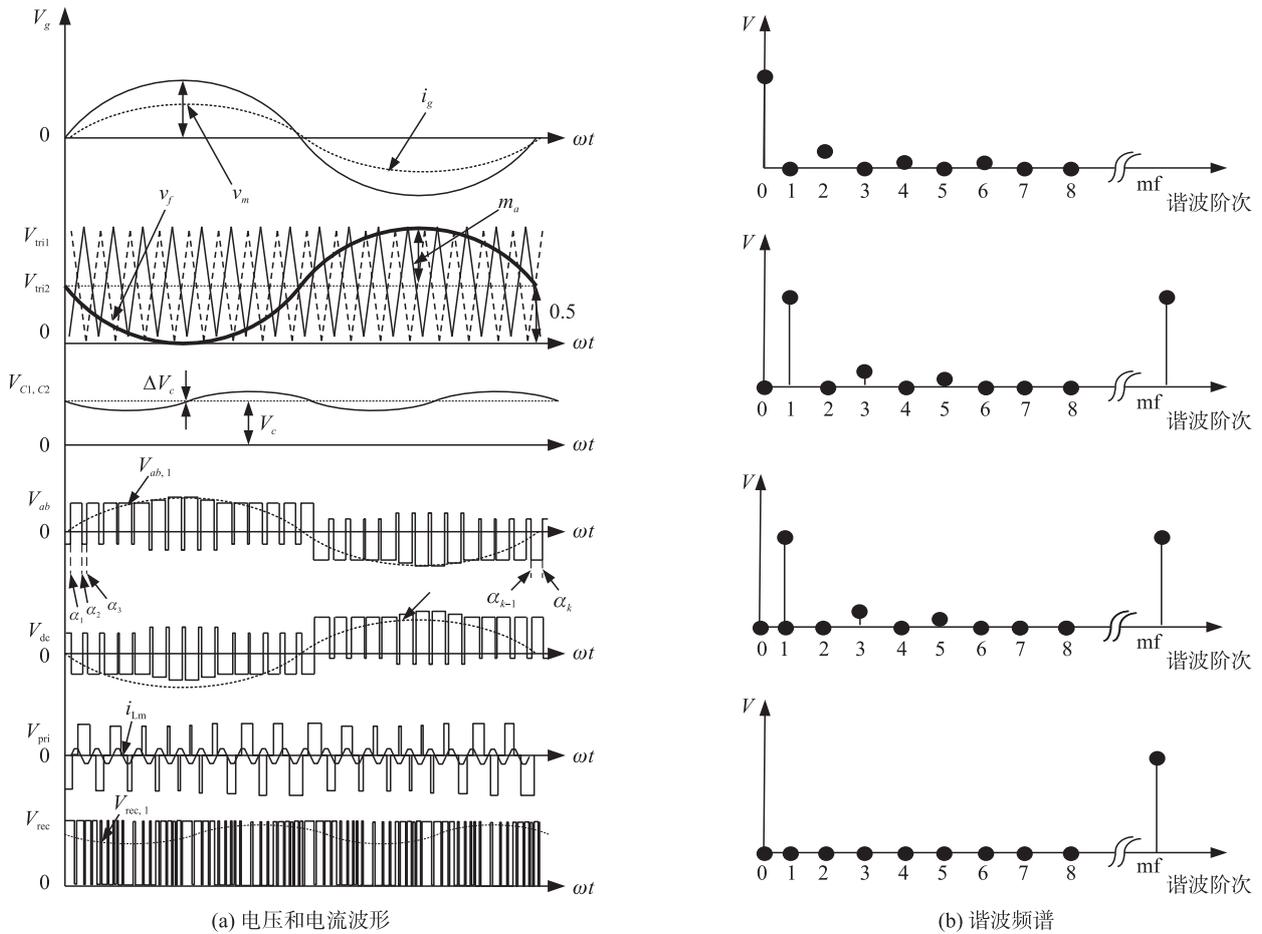


图 4 所提变换器驱动波形

### 1.2 控制策略

图 5 为所提变换器的控制框图。该控制系统所含控制器包括电网电流内环控制和输出电压外环控制、相位控制器以及三次谐波补偿器。变换器采用了  $dq$

模型中所设计 PI 控制器的  $d$  轴和  $q$  轴进行解耦。由于母线电容值较小,电压  $v_{c1}$  和  $v_{c2}$  包括较多的两倍频分量,导致电网电流产生三次谐波。对此,所提出变换器通过引入三次谐波补偿器来实现单位功率因数。



### 3 结论

本文介绍了一种新型单级无电解电容高频隔离型 AC-DC 变换器,作为电动汽车充电装置。该变换器减少了功率转换级,无桥结构优化了半导体器件数量。同时,所应用的高频变压器和软开关技术能够实现高效率和高功率密度传输。最后,通过 3 kW 样机验证了所提拓扑的可行性和优异性能。

#### 参考文献:

- [1] 梁国壮,田涵雷,王子园,等. 一种单级无桥式高功率因数无电解电容 AC-DC LED 驱动器[J]. 电工技术学报,2019,34(16):3396-3407.
- [2] Ren L, Gong C Y, He K Y, et al. Modified Hybrid Modulation Scheme with Even Switch Thermal Distribution for H-Bridge Hybrid Cascaded Inverters[J]. IET Power Electronics,2017,10(1):261-268.
- [3] 陈仲,许亚明,袁涛. 一种基于载波层叠脉宽调制的倍频调制方法[J]. 电工技术学报,2018,33(10):2334-2344.
- [4] Saccol G A, Giacomini J C, Batschauer A L, et al. Comprehensive Analysis of Single-Phase Full-Bridge Asymmetrical Flying Capacitor Inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2019,55(2):1775-1786.
- [5] Rodriguez J, Bernet S, Steimer P K, et al. A Survey on Neutral-Point-Clamped Inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2010,57(7):2219-2230.
- [6] 胡文华,刘剑锋. 双低压型混合级联逆变器的改进混合调制[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(2):7-13.
- [7] Sun X F, Wang B C, Zhou Y, et al. A Single DC Source Cascaded Seven-Level Inverter Integrating Switched-Capacitor Techniques [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2016,63(11):7184-7194.
- [8] 张琦,李江江,孙向东,等. 单相级联七电平逆变器拓扑结构及其控制方法[J]. 电工技术学报,2019,34(18):3843-3853.
- [9] Kangarlu M F, Babaei E. A Generalized Cascaded Multilevel Inverter Using Series Connection of Sub-Multilevel Inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(2):625-636.
- [10] Gupta K K, Jain S. Topology for Multilevel Inverters to Attain Maximum Number of Levels from Given DC Sources [J]. IET Power Electronics,2012,5(4):435-446.
- [11] Waltrich G, Barbi I. Three-Phase Cascaded Multilevel Inverter Using Power Cells with Two Inverter Legs in Series [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2010,57(8):2605-2612.
- [12] Minshull S R, Bingham C M, Stone D A, et al. Compensation of Nonlinearities in Diode-Clamped Multilevel Converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2010,57(8):2651-2658.
- [13] Liu J F, Tian H L, Liang G Z, et al. A Bridgeless Electrolytic Capacitor-Free LED Driver Based on Series-Resonant Converter with Constant Frequency Control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2019,34(3):2712-2725.



贺素霞(1980—),女,河南商丘人,硕士,副教授,主要研究方向:电子技术及应用,hsx822@126.com。