

一种组合式宽输入高效率 DC-DC 变换器

李劲晖¹, 贲洪奇¹, 朱俊函², 宁继超¹

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 华为技术股份有限公司, 广东 东莞 523000)

摘要:针对车载 DC-DC 变换器输入电压变化范围大的问题,提出一种组合式宽输入高效率 DC-DC 变换器。该变换器包括飞跨电容(FC)型三电平 Buck 电路和 LLC 谐振电路两部分,FC 三电平 Buck 电路输出端口与 LLC 谐振电路输入端口串联,通过控制 FC 三电平 Buck 电路占空比实现输出电压调节以适应宽输入电压范围,同时三电平结构降低了开关管电压应力、减小了损耗;LLC 谐振电路传输负载所需全部功率,采用定频开环控制以获得高效率和稳定增益,同时实现了电气隔离。详细分析了组合式变换器的拓扑结构、直流增益以及工作效率,并与相同电路构成的级联式变换器进行了效率特性对比,根据组合式变换器的拓扑结构和工作特性,提出一种解耦控制策略,实现输出电压稳定和飞跨电容电压平衡,最后搭建了一个 200~400 V 输入、12 V/20 A 输出的实验电路进行验证,实验结果表明所提组合式变换器的正确性和可行性。

关键词:组合式变换器;飞跨电容型三电平 Buck;LLC;宽输入电压范围;高效率;解耦控制

DOI:10.15938/j.emc.2024.03.002

中图分类号:TM46

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2024)03-0013-11

Combined wide input and high efficiency DC-DC converter

LI Jinhui¹, BEN Hongqi¹, ZHU Junhan², NING Jichao¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Huawei Technologies Co., Ltd., Dongguan 523000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the input voltage of the vehicle-mounted DC-DC converter varies widely, a combined wide-input high-efficiency DC-DC converter was proposed. The converter consists of two parts: a flying capacitor (FC) type three-level Buck circuit and an LLC resonant circuit. The output port of the FC three-level Buck circuit is connected in series with the input port of the LLC resonant circuit. By controlling the duty cycle of the FC three-level Buck circuit, the output voltage was adjusted to adapt to a wide input voltage range. At the same time, the three-level structure reduces the voltage stress of the power switches and reduces the loss; the LLC resonant circuit transmits all the power required by the load. Using fixed-frequency and open-loop control, high efficiency and stable gain were achieved while achieving electrical isolation. The topology, DC gain and working efficiency of the combined converter were analyzed in detail, and the efficiency characteristics were compared with the cascaded converter composed of the same circuit. According to the topology and working characteristics of the combined converter, a decoupling control strategy was proposed to achieve output voltage stability and flying capacitor voltage balance. Finally, an experimental circuit with 200~400 V input and 12 V/20 A output was built for verification. The experimental results show correctness and feasibility of the proposed com-

收稿日期: 2023-09-19

作者简介: 李劲晖(2000—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动;

贲洪奇(1965—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力电子系统数字控制技术;

朱俊函(1999—),男,硕士,研究方向为电力电子与电力传动;

宁继超(1995—),男,博士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

通信作者: 李劲晖

bined converter.

Keywords: combined converter; flying capacitor type three-level Buck; LLC; wide input voltage range; high efficiency; decoupling control

0 引言

随着化石能源逐渐枯竭所引发的环境污染问题日益严重,清洁能源在未来社会经济发展中的地位越发重要,电动汽车(electric vehicles, EV)作为减少化石能源消耗和二氧化碳排放的重要手段之一^[1],近年来,因其经济、无污染的特点得到迅速发展^[2-3]。然而,由锂离子电池组成的车载动力电池组输出电压波动范围较宽^[4],要求车载 DC-DC 变换器能够适应较宽的输入电压范围。

LLC 谐振变换器能够在全电压范围和全负载范围内实现原边开关管零电压开通(zero voltage switching, ZVS)和副边整流管零电流关断(zero current switching, ZCS),从而减小损耗,提高效率^[5-6]。但 LLC 谐振变换器通常采用变频控制,当增益变化范围较宽时,其开关频率变换范围也较宽^[7],不利于磁性元器件的设计。为使 LLC 谐振变换器能够适应宽输入电压要求,部分学者在传统 LLC 谐振变换器的基础上做出改进^[8-12]。文献[8]提出一种新型的半桥 LLC 谐振变换器,用耦合变压器代替带有中心抽头的变压器,通过继电器改变耦合变压器的匝数比,从而减小频率调节范围,但耦合变压器的使用提高了变换器的结构复杂度,同时继电器的使用降低了变换器的可靠性。文献[9]提出一种定频控制三电平 LLC 谐振变换器,变换器工作在固定频率以获得高效率,通过控制变压器原副边开关管驱动信号移相角调节变换器直流增益,副边采用多绕组方式增加变换器的增益范围,但多绕组方式增加了变压器的体积和优化设计难度。文献[10]提出一种采用新型整流结构的全桥 LLC 谐振变换器,其整流网络能够工作在三倍压、四倍压和五倍压整流 3 种工作模式下,减小了变换器的频率调节范围并提供更高的电压增益,但变换器结构复杂度提高,且副边整流网络工作模式切换时存在较大的谐振电流尖峰。文献[11-12]虽然获得了宽电压增益和高效率,但输入电压范围受到限制。

两级式 DC-DC 变换器因其具有高效率、隔离和宽输入电压范围的特点,在车载 DC-DC 变换器领域得到了广泛应用^[13-14]。文献[15-16]采用 Boost

电路与 LLC 谐振电路级联的变换器结构, LLC 谐振电路采用定频开环控制,直流增益恒定,通过调节 Boost 电路占空比实现输出电压调节以适应宽输入电压范围,但在高输入电压场合,其中间母线电压和后级 LLC 谐振电路开关管较难选取。文献[17-18]采用 Buck 电路与 LLC 谐振电路级联的变换器结构,工作原理与上述级联式变换器相似,能够克服上述开关管难以选取的缺点,但这种结构的级联式变换器中间母线电压总是低于输入电压,不利于变换器效率的优化设计。文献[19-21]采用四开关 Buck-Boost 电路级联 LLC 谐振电路的变换器结构,能够克服上述母线电压和开关管难以选取的问题且有利于变换器效率的优化设计,但与上述 2 种结构的级联式变换器存在相同不足,其前级非隔离 DC-DC 电路需处理全部负载功率,损耗较高。采用级联式变换器,虽然适应了宽输入电压范围,但变换器前级非隔离 DC-DC 电路制约着效率的进一步提升。

针对上述问题,本文提出一种由飞跨电容(flying capacitor, FC)型三电平 Buck 电路和 LLC 谐振电路构成的组合式 DC-DC 变换器, FC 三电平 Buck 电路输出端口与 LLC 谐振电路输入端口串联,通过 FC 三电平 Buck 电路实现输出电压调节,使变换器适应宽输入电压范围,与普通两电平 Buck 电路相比,电感电流纹波和开关管电压应力降低^[22]; LLC 谐振电路工作在高效率的定频开环状态,其工作模式相当于直流变压器(direct current transformer, DCT),向负载传输功率并实现电气隔离。由于变换器的负载功率全部由 LLC 谐振电路提供, FC 三电平 Buck 电路仅处理部分功率实现电压调节,减少了非隔离电路损耗。所提出的组合式变换器具有控制简单、适应宽输入电压范围且具有较高效率的优点,可用于设计车载锂离子电池动力组后级的 DC-DC 变换器。

1 拓扑结构与工作原理

1.1 拓扑结构

由 FC 三电平 Buck 电路和 LLC 谐振电路构成的组合式 DC-DC 变换器如图 1 所示,变换器输入电

压为 V_{in} , 输出电压为 V_o 。其中: Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 C_f 、 L 等组成 FC 三电平 Buck 电路, 其输出端口电压为 V_{o_buck} ; Q_5 、 Q_6 、 L_r 、 C_r 、 L_m 、 T_1 、 SR_1 、 SR_2 等组成 LLC 谐振电路, 副边采用同步整流 (synchronous rectification, SR) 技术, 变压器变比为 n , 其输入端口与 FC 三电平 Buck 电路的输出端口串联, 其输入端口电压 $V_{in_LLC} = 2nV_o = V_{in} - V_{o_buck}$ 。

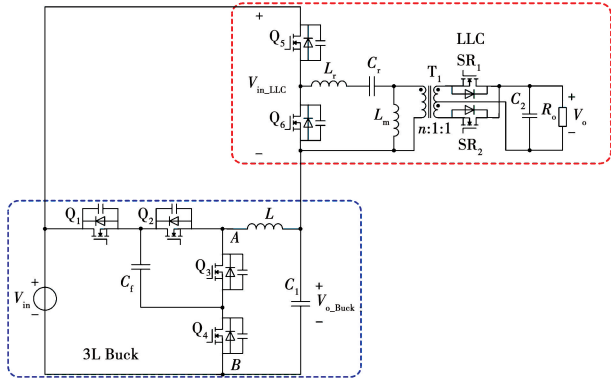


图1 组合式 DC-DC 变换器

Fig. 1 Combined DC-DC converter

1.2 工作原理及模式分析

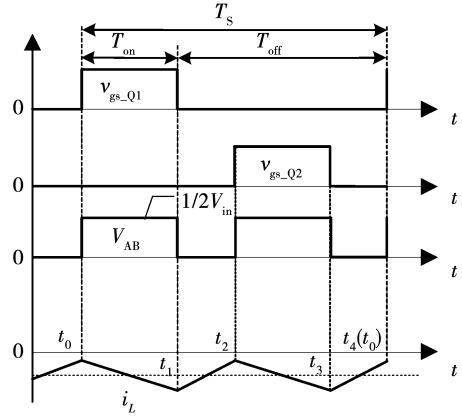
组合式变换器中, 开关管 Q_1 、 Q_2 与 Q_4 、 Q_3 以占空比 D_1 互补导通, Q_2 、 Q_4 与 Q_1 、 Q_3 驱动信号相位相差 180° , 采用 PWM 调制方式, 通过控制 FC 三电平 Buck 电路输出端口电压 V_{o_buck} 使 LLC 谐振电路输入端口电压 V_{in_LLC} 恒定, 从而使变换器在不同输入电压下维持输出电压不变; 开关管 Q_5 与 Q_6 以固定占空比 D_2 ($D_2 = 0.5$) 互补导通, 为 LLC 谐振槽提供输入电压 u_{tank} , 向负载传输功率的同时起到电气隔离的作用。

LLC 谐振电路始终开环工作在谐振频率处, 电压增益恒定, 其工作模式相当于一个直流变压器, 稳态时的工作波形与独立工作的 LLC 谐振电路相同, 原边开关管实现了 ZVS, 副边整流管实现了 ZCS, 同时副边 SR 技术的应用, 使 LLC 谐振电路效率最优。

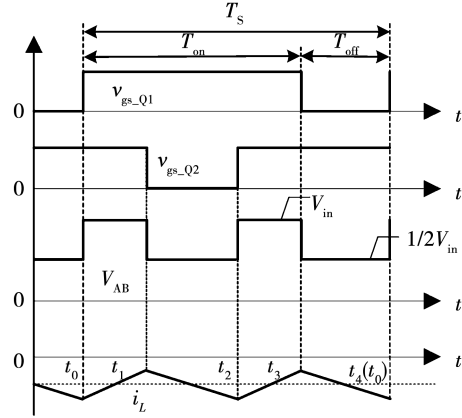
组合式变换器通过 FC 三电平 Buck 电路实现输出电压的调节, 根据占空比 D_1 的大小, FC 三电平 Buck 电路具有 2 种不同的工作模式, 稳态时的主要工作波形如图 2 所示。当组合式变换器输入电压 $V_{in} < 4nV_o$ 时, FC 三电平 Buck 电路占空比 $0 < D_1 < 0.5$, 工作在模式 1, 此时 FC 三电平 Buck 电路 A、B 两点间电压 V_{AB} 在 0 和 $V_{in}/2$ 之间交替运行; 当组合式变换器输入电压 $V_{in} > 4nV_o$ 时, FC 三电平 Buck 电路占空比 $0.5 < D_1 < 1$, 工作在模式 2, 此时 FC 三电

平 Buck 电路 A、B 两点间电压 V_{AB} 在 V_{in} 和 $V_{in}/2$ 之间交替运行。

随着组合式变换器输入电压的升高, FC 三电平 Buck 电路由工作模式 1 转变为工作模式 2, 但电感电流 i_L 始终为负, FC 三电平 Buck 电路电流由输出端口流向输入电源, 处理部分功率实现电压调节但不向负载供电, 负载所需功率全部由 LLC 谐振电路提供。



(a) 工作模式1稳态波形



(b) 工作模式2稳态波形

图2 FC 三电平 Buck 电路稳态工作波形

Fig. 2 Steady-state operating waveforms of the FC three-level Buck circuit

与相同电路构成的级联式变换器相比, LLC 谐振电路同样处理全部负载功率, 但与级联式变换器非隔离电路处理全部负载功率不同, 组合式变换器中 FC 三电平 Buck 电路仅处理部分功率实现电压调节, 变换器非隔离部分损耗减少, 效率提高。

2 组合式变换器特性分析

2.1 增益特性分析

对于提出的组合式变换器, FC 三电平 Buck 电路输入端口电压为变换器输入电压 V_{in} , 输出端口电压为 V_{o_buck} ; LLC 谐振电路输入端口电压为 V_{in_LLC} 、

输出端口电压为变换器输出电压 V_o 。FC 三电平 Buck 电路与 LLC 谐振电路无任何共用元件,两者的增益互不影响,因此,设 FC 三电平 Buck 电路的直流增益为 M_{Buck} , LLC 谐振电路的增益为 M_{LLC} ,组合式变换器的增益为 M_c 。

组合式变换器的输入电压和输出电压分别为:

$$V_{\text{in}} = \frac{V_{\text{in_LLC}}}{1 - M_{\text{Buck}}}; \quad (1)$$

$$V_o = \frac{V_{\text{in_LLC}} M_{\text{LLC}}}{2n}. \quad (2)$$

由式(1)和式(2)求得组合式变换器的直流增益为

$$M_{\text{dc}} = \frac{V_o}{V_{\text{in}}} = \frac{(1 - M_{\text{Buck}}) M_{\text{LLC}}}{2n}. \quad (3)$$

根据文献[23]可知,FC 三电平 Buck 电路的直流增益为

$$M_{\text{Buck}} = \frac{V_{o_Buck}}{V_{\text{in}}} = D_1. \quad (4)$$

无论工作在模式 1 还是模式 2, FC 三电平 Buck 电路的增益始终为开关管 Q_1 、 Q_2 的占空比 D_1 。

LLC 谐振电路始终开环工作在谐振频率处以获得最优效率,其开关频率为

$$f_s = f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r C_r}}. \quad (5)$$

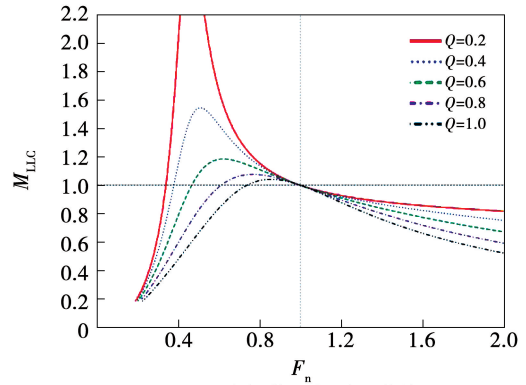
通过基波近似法 (first harmonic approximation, FHA) 分析得到 LLC 谐振电路的直流增益^[24]为

$$M_{\text{LLC}} = \frac{2nV_o}{V_{\text{in_LLC}}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda F_n^2}\right)^2 + Q^2 \left(F_n - \frac{1}{F_n}\right)^2}}. \quad (6)$$

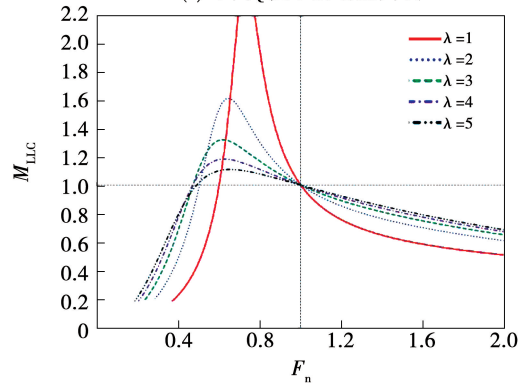
式中: n 为变压器变比;电感系数 $\lambda = L_m/L_r$;归一化频率 $F_n = f_s/f_r$;品质因数 $Q = \sqrt{L_r/(R_{ac} C_r)^2}$;交流等效电阻 $R_{ac} = 8n^2 R_o/\pi^2$ 。

LLC 谐振电路在电感系数 $\lambda = 4$ 、不同 Q 值时的增益曲线与品质因数 $Q = 0.6$ 、不同 λ 值时的增益曲线如图 3 所示。从 LLC 谐振电路直流增益曲线可知,当 LLC 谐振电路工作在谐振频率时,其直流增益 M_{LLC} 不受谐振元件参数的影响,始终为 1,工作模式相当于变比固定的直流变压器。将式(4)和 $M_{\text{LLC}} = 1$ 代入式(3),求得组合式变换器直流增益为

$$M_{\text{dc}} = \frac{1 - D_1}{2n}. \quad (7)$$



(a) 不同 Q 值下的增益曲线



(b) 不同 λ 值下的增益曲线

图 3 LLC 谐振电路直流增益曲线

Fig. 3 DC gain curves of LLC resonant circuit

图 4 为不同 LLC 谐振电路变压器变比时的组合式变换器直流增益曲线,可以看出,组合式变换器的直流增益随着 FC 三电平 Buck 电路占空比的增加而减小,增益范围随着变压器变比的减小而增大。通过调整 LLC 谐振电路的变压器变比,即可获得所需的增益范围,通过控制 FC 三电平 Buck 电路的占空比 D_1 ,即可使变换器在较宽的输入电压范围内实现输出电压稳定。

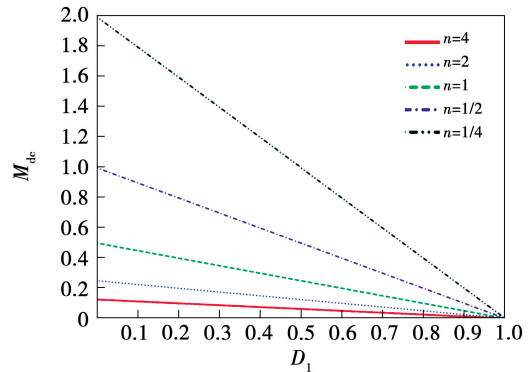


图 4 组合式变换器直流增益曲线

Fig. 4 DC gain curves of the combined converter

2.2 效率特性分析

组合式变换器由 FC 三电平 Buck 电路和 LLC 谐振电路两部分组成,设 FC 三电平 Buck 电路的效率为 η_1 , LLC 谐振电路的效率为 η_2 。

由组合式变换器的拓扑结构可知, LLC 谐振电路的输入端口电压和 FC 三电平 Buck 电路的输出端口电压分别为:

$$V_{in_LLC} = 2nV_o; \quad (8)$$

$$V_{o_Buck} = V_{in} - V_{in_LLC} = V_{in} - 2nV_o. \quad (9)$$

组合式变换器的输出功率即为 LLC 谐振电路的输出功率,由此求得 LLC 谐振电路输入端口功率为

$$P_{in_LLC} = \frac{P_o}{\eta_2} = \frac{V_o I_o}{\eta_2}. \quad (10)$$

式中: P_o 为组合式变换器输出功率; I_o 为组合式变换器输出电流。

由组合式变换器拓扑结构可知, FC 三电平 Buck 电路输出端口空载与 LLC 谐振电路输入端口串联,故 FC 三电平 Buck 电路输出端口电流与 LLC 谐振电路输入端口电流相等,由此可得 FC 三电平 Buck 电路输出端口电流为

$$I_{o_Buck} = I_{in_LLC} = \frac{P_{in_LLC}}{V_{in_LLC}} = \frac{I_o}{2n\eta_2}. \quad (11)$$

由于 FC 三电平 Buck 电路电感电流 i_L 始终为负,功率由其输出端口流向输入端口,因此其输入端口功率为

$$P_{in_Buck} = \eta_1 P_{o_Buck} = \eta_1 V_{o_Buck} I_{o_Buck}. \quad (12)$$

式中 P_{o_Buck} 为 FC 三电平 Buck 电路输出端口功率。

由式(12)求得 FC 三电平 Buck 电路的输入端口电流为

$$I_{in_Buck} = \frac{P_{in_Buck}}{V_{in}} = \frac{\eta_1 V_{o_Buck} I_{o_Buck}}{V_{in}}. \quad (13)$$

根据 LLC 谐振电路输入端口和 FC 三电平 Buck 电路输入端口电流流向,结合式(8)~式(13)求得组合式变换器输入电流为

$$I_{in} = I_{in_LLC} - I_{in_Buck} = \left[1 - \frac{\eta_1 (V_{in} - 2nV_o)}{V_{in}} \right] \frac{I_o}{2n\eta_2}. \quad (14)$$

由式(14)求得组合式变换器输入功率为

$$P_{in} = V_{in} I_{in} = \left[1 - \frac{\eta_1 (V_{in} - 2nV_o)}{V_{in}} \right] \frac{V_{in} I_o}{2n\eta_2}. \quad (15)$$

由式(10)和式(15)求得组合式变换器效率为

$$\eta_c = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{2n\eta_2 V_o}{V_{in} - \eta_1 (V_{in} - 2nV_o)}. \quad (16)$$

假设 $\eta_1 = 0.9$ 、 $\eta_2 = 0.95$ 。在输出电压 $V_o = 12$ V、不同变压器变比 n 时,组合式变换器效率与输入电压之间的关系如图 5 所示,在变压器变比 $n = 8$ 时,FC 三电平 Buck 电路和 LLC 谐振电路处理功率大小与输入电压之间的关系如图 6 所示。

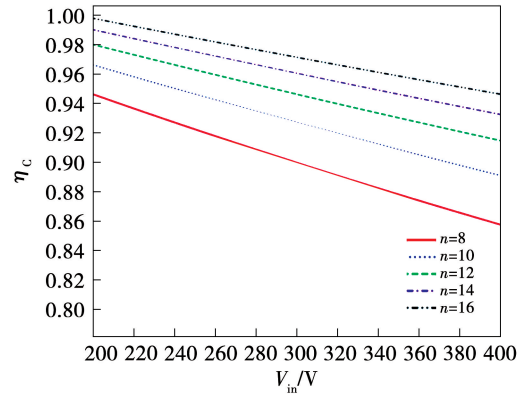


图5 组合式变换器效率与输入电压之间的关系

Fig. 5 Relationship between efficiency and input voltage of the combined converter

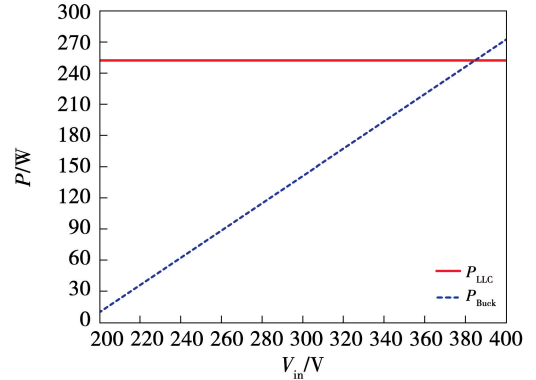


图6 组合式变换器各组成电路处理功率大小与输入电压之间的关系

Fig. 6 Relationship between power and input voltage for each component circuit of the combined converter

根据图 5 和图 6 可知,当 LLC 谐振电路变压器变比恒定时,随着输入电压的上升,FC 三电平 Buck 电路处理功率增加,非隔离部分损耗增加,组合式变换器效率降低;当组合式变换器输入电压恒定时,随着 LLC 谐振电路变压器变比的增大,LLC 谐振电路

输入端口电压上升、电流下降,FC 三电平 Buck 电路处理功率减少,非隔离部分损耗减少,组合式变换器效率升高。

结合组合式变换器的增益特性分析和效率特性分析,根据输入电压范围选择合适的 LLC 谐振电路变压器变比,即可在满足变换器所需增益范围的同时,使 FC 三电平 Buck 电路处理尽可能少的功率,从而提升变换器效率。

2.3 应力特性分析

2.3.1 电压应力分析

根据文献[23]可知,FC 三电平 Buck 电路开关管 $Q_1 \sim Q_4$ 的电压应力不受其工作模式的影响,始终为组合式变换器输入电压的一半,即

$$V_{Q1 \sim 4_max} = \frac{V_{in}}{2} \quad (17)$$

在组合式变换器中,LLC 谐振电路输入端口电压受占空比 D_1 控制保持不变,其工作模式与独立工作的 LLC 谐振电路相同,因此,开关管 Q_5 、 Q_6 电压应力即为 LLC 谐振电路输入端口电压,即

$$V_{Q5,6_max} = V_{in_LLC} = 2nV_o \quad (18)$$

LLC 谐振电路副边采用 SR 技术,整流管 SR_1 、 SR_2 电压应力即为组合式变换器输出电压的二倍,即

$$V_{SR1,2_max} = 2V_o \quad (19)$$

2.3.2 电流应力分析

根据文献[23]可知,FC 三电平 Buck 电路电感电流纹波为:

$$\Delta i_L = \begin{cases} \frac{V_{in}(1-2D_1)}{2Lf_s} D_1, 0 < D_1 < 0.5; \\ \frac{V_{in}(2D_1-1)}{2Lf_s} (1-D_1), 0.5 < D_1 < 1. \end{cases} \quad (20)$$

式中 f_s 为 FC 三电平 Buck 电路开关频率。

组合式变换器中,FC 三电平 Buck 电路占空比为

$$D_1 = \frac{V_{o_Buck}}{V_{in}} = \frac{V_{in} - 2nV_o}{V_{in}} \quad (21)$$

假设 LLC 谐振电路效率为 1,由组合式变换器拓扑结构可知,FC 三电平 Buck 电路输出端口电流与 LLC 谐振电路输入端口电流相等,结合式(11)、式(20)和式(21)求得开关管 $Q_1 \sim Q_4$ 电流应力为:

$$I_{CQ1 \sim 4_max} = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{I_o}{2n}\right)^2 + \left(\frac{(4nV_o - V_{in})(V_{in} - 2nV_o)}{24Lf_s V_{in}}\right)^2} \times \sqrt{\frac{V_{in} - 2nV_o}{V_{in}}}, V_{in} < 4nV_o; \\ \sqrt{\left(\frac{I_o}{2n}\right)^2 + \left(\frac{(V_{in} - 4nV_o)2nV_o}{24Lf_s V_{in}}\right)^2} \times \sqrt{\frac{V_{in} - 2nV_o}{V_{in}}}, V_{in} > 4nV_o. \end{cases} \quad (22)$$

组合式变换器中的 LLC 谐振电路工作模式与独立工作的 LLC 谐振电路相同,根据 LLC 谐振电路工作原理,求得开关管 Q_5 、 Q_6 电流应力和整流管 SR_1 、 SR_2 电流应力为:

$$I_{Q5,6_max} = \sqrt{\left(\frac{\pi I_o}{2n}\right)^2 + \left(\frac{2nV_o}{\pi^2 f_r L_m}\right)^2}; \quad (23)$$

$$I_{SR1,2_max} = \frac{\pi I_o}{2} \quad (24)$$

由上述分析可知,与相同电路构成的级联式变换器相比,所有开关管电压应力相同,LLC 谐振电路开关管电流应力也相同。

当 FC 三电平 Buck 电路与相同 LLC 谐振电路构成级联式变换器时,开关管电流应力为:

$$I_{SQ1 \sim 4_max} = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{I_o}{2n}\right)^2 + \left(\frac{(4nV_o - V_{in})(V_{in} - 2nV_o)}{24Lf_s V_{in}}\right)^2} \times \sqrt{\frac{2nV_o}{V_{in}}}, V_{in} < 4nV_o; \\ \sqrt{\left(\frac{I_o}{2n}\right)^2 + \left(\frac{(V_{in} - 4nV_o)2nV_o}{24Lf_s V_{in}}\right)^2} \times \sqrt{\frac{2nV_o}{V_{in}}}, V_{in} > 4nV_o. \end{cases} \quad (25)$$

假设 FC 三电平 Buck 电路效率为 1,在输入电压 $V_{in} = 200 \sim 400$ V、输出电压 $V_o = 12$ V、输出电流 $I_o = 20$ A、变压器变比 $n = 8$ 、电感 $L = 100$ μ H、开关频率 $f_s = 50$ kHz 时,组合式变换器与级联式变换器中 FC 三电平 Buck 电路开关管电流应力随输入电压变化的曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,在变换器输入电压 $V_{in} < 4nV_o$ 时,组合式变换器中 FC 三电平 Buck 电路开关管电流应力较小,且输入电压越低,电流应力相较越低;在

变换器输入电压 $V_{in} > 4nV_o$ 时,组合式变换器中 FC 三电平 Buck 电路开关管电流应力较大,且输入电压越高,电流应力相较越高。

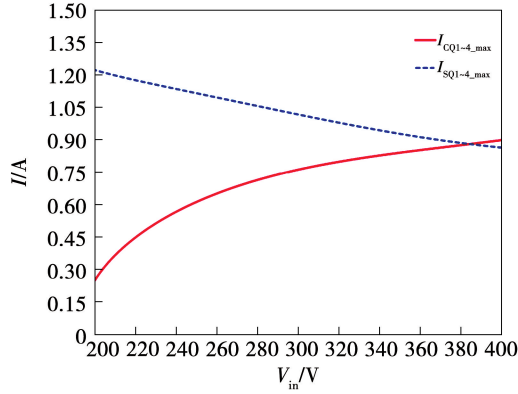


图7 FC 三电平 Buck 电路开关管电流应力曲线

Fig.7 Current stress curves of FC three-level Buck circuit power switches

3 组合式变换器解耦控制策略

针对由 FC 三电平 Buck 电路和 LLC 谐振电路构成的组合式变换器,提出一种解耦控制策略,控制框图如图 8 所示。组合式变换器的闭环控制包含输出电压调节和 FC 三电平 Buck 电路飞跨电容电压平衡两部分,补偿环节均为 PI 补偿器。

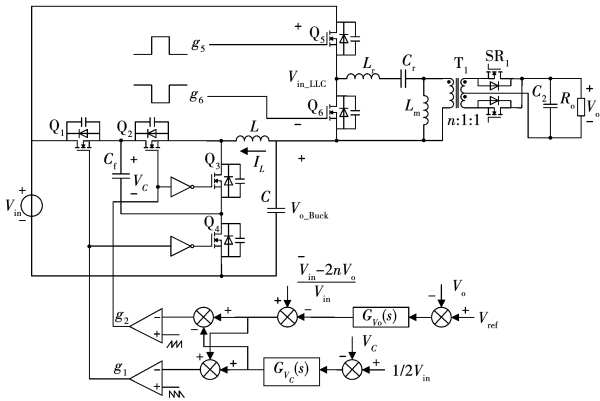


图8 组合式变换器控制框图

Fig.8 Control block diagram of the combined converter

组合式变换器通过控制 FC 三电平 Buck 电路占空比调节其输出端口电压 V_{o_buck} ,使开环工作在谐振频率处的 LLC 谐振电路输入端口电压 V_{in_LLC} 保持恒定,从而使变换器输出电压 V_o 恒定。当输出电压升高时,FC 三电平 Buck 电路应提高输出端口电

压,若直接使用补偿器输出作为 PWM 调制部分的输入信号,当输出电压升高偏差信号变大,补偿器输出减小,FC 三电平 Buck 电路输出端口电压下降,输出电压进一步升高,系统无法稳定。因此,在补偿器之后加入前馈环节,当输出电压升高偏差信号变大时,PWM 调制部分输入信号增大,FC 三电平 Buck 电路输出电压上升,变换器输出电压降低,实现系统稳定。

用于实现电压调节的 FC 三电平 Buck 电路在各参数之间相互匹配时,通过交错控制,其飞跨电容电压具有自平衡特性,但在实际电路中,自平衡特性受到负载阻抗、电流纹波等的影响,飞跨电容电压存在偏移。

为使 FC 三电平 Buck 电路正常工作实现输出电压调节,对输出电压 V_o 与飞跨电容电压 V_C 进行解耦控制。将输出电压与给定信号的偏差经过补偿器 $G_{V_o}(s)$ 和前馈控制环节后得到占空比 D_1 ,将飞跨电容电压与输入电压一半的偏差经补偿器 $G_{V_C}(s)$ 后得到占空比微调量 ΔD ,对占空比 D_1 加减 ΔD 后进行 PWM 调制得到开关管 Q_1 、 Q_2 的驱动信号, Q_1 、 Q_2 的驱动信号之间的相位相差 180° 。

通过控制 FC 三电平 Buck 电路占空比 D_1 ,实现输出电压调节;通过控制开关管 Q_1 、 Q_2 驱动信号占空比之差,主动调节飞跨电容电压,实现电压平衡。对占空比 D_1 施加的微调量 ΔD 远小于其本身,既不影响变换器输出电压的稳定,又不影响交错控制时的同步整流特性。

4 实验验证

为验证理论分析的正确性和所提组合式变换器的可行性,搭建了一个 200 ~ 400 V 输入、12 V/20 A 输出的实验电路,变换器具体参数如表 1 所示,变换器主要器件型号如表 2 所示。在组合式变换器的解耦控制中,输出电压控制环路补偿器参数 $K_{pV_o} = 0.2$ 、 $K_{iV_o} = 0.1$,飞跨电容电压平衡控制环路补偿器参数 $K_{pV_C} = 0.0003$ 、 $K_{iV_C} = 1.0$ 。由于实验过程需改变 FC 三电平 Buck 电路与 LLC 谐振电路的连接方式来分别构成组合式变换器与级联式变换器,故实验电路采用多模块组合结构,变换器实验电路构成示意图如图 9 所示。

表 1 组合式变换器参数

Table 1 Parameters of the combined converter

参数	数值
输入电压 V_{in}/V	200 ~ 400
Buck 滤波电感 $L/\mu H$	100
Buck 输出电容 $C_1/\mu F$	300
Buck 飞跨电容 $C_f/\mu F$	50
Buck 开关频率 f_{Buck}/kHz	50
LLC 励磁电感 $L_m/\mu H$	26.5
LLC 谐振电感 $L_r/\mu H$	2.5
LLC 谐振电容 C_r/nF	200
LL 变压器变比 n	8:1:1
LLC 输出电容 $C_2/\mu F$	470
LLC 开关频率 f_{LLC}/kHz	220
输出电压	12
输出最大功率 P/kW	240

表 2 组合式变换器主要器件型号

Table 2 Main device models of the combined converter

器件	型号
Buck 开关管	NCE65TF099
LLC 原边开关管	IPP60R180C7
LLC 副边整流管	BSC010N04LS
开关管驱动芯片	2EDS8265H
同步整流驱动芯片	UCC24624
控制器 (DSP)	TMS320F28379D

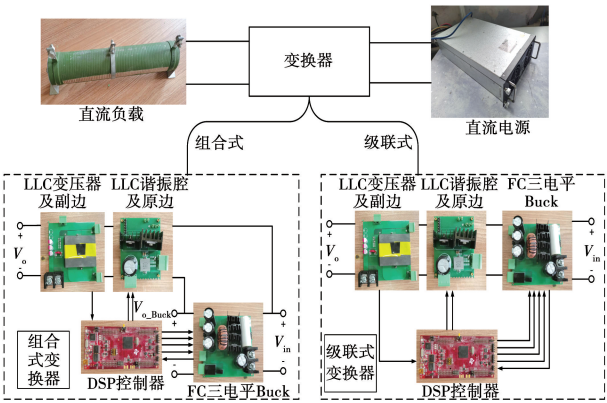


图 9 变换器实验电路构成示意图

Fig. 9 Experimental prototype of the combined converter

图 10 为输入电压 $V_{in} = 200\text{ V}$ 时组合式变换器的启动波形和稳态实验波形,此时 FC 三电平 Buck 电路 $D_1 = 0.04$, $V_{o_buck} = 8\text{ V}$, 开关管电压应力为 100 V 、电流应力约为 0.3 A ;图 11 所示为输入电压 $V_{in} = 300\text{ V}$ 时组合式变换器的启动波形和稳态实验波形,此时 $D_1 = 0.36$, $V_{o_buck} = 108\text{ V}$, 开关管电压应

力为 150 V 、电流应力约为 0.7 A ;图 12 所示为输入电压 $V_{in} = 400\text{ V}$ 时组合式变换器的启动波形和稳态实验波形,此时 $D_1 = 0.52$, $V_{o_buck} = 208\text{ V}$, 开关管电压应力为 200 V 、电流应力约为 1 A 。

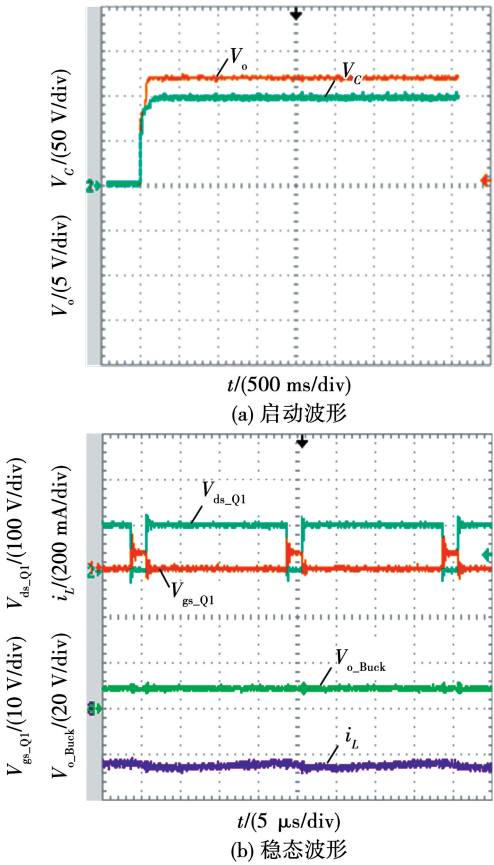


图 10 $V_{in} = 200\text{ V}$ 时实验波形

Fig. 10 Experimental waveforms at $V_{in} = 200\text{ V}$

由图 10 ~ 图 12 可知,变换器实验波形与理论分析一致,提出的解耦控制策略对变换器实现有效控制,在不同的输入电压下,启动过程中,FC 三电平 Buck 电路飞跨电容电压逐渐稳定在输入电压的一半,同时变换器输出电压稳定;随着输入电压的升高,FC 三电平 Buck 电路占空比 D_1 上升,开关管电压电流应力上升。

LLC 谐振电路稳态实验波形如图 13 所示,可以看出,谐振波形与独立工作的 LLC 谐振电路相同,开关管电压应力即为 LLC 谐振电路输入端口电压 $V_{in_LLC} = 192\text{ V}$ 、电流应力约为 4 A ,与理论分析一致; LLC 谐振电路副边整流管驱动信号由同步整流驱动芯片 UCC24624 生成,驱动电压在整流管漏极与源极之间电压超过 -35 mV 时由 10 V 降至 SR 阈值电压,能够防止同步整流管过早关断造成体二极管导通,损耗增加,同时能够缩短关断延迟时间。

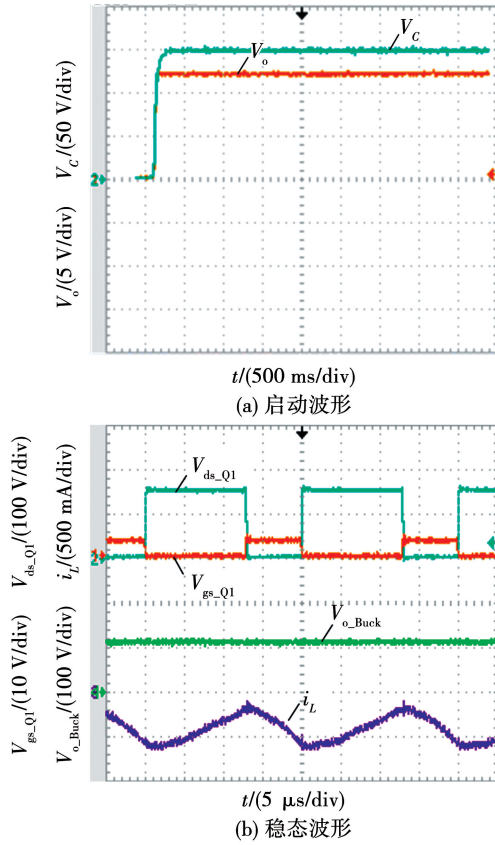
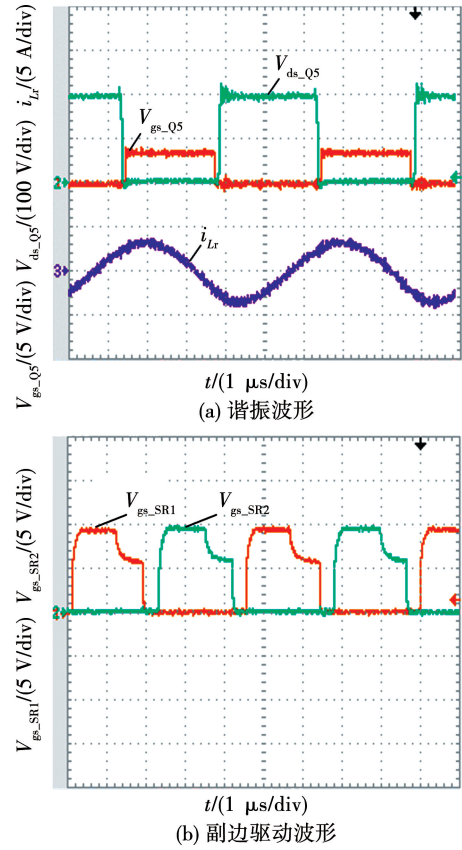
图 11 $V_{in} = 300$ V 时实验波形Fig. 11 Experimental waveforms at $V_{in} = 300$ V

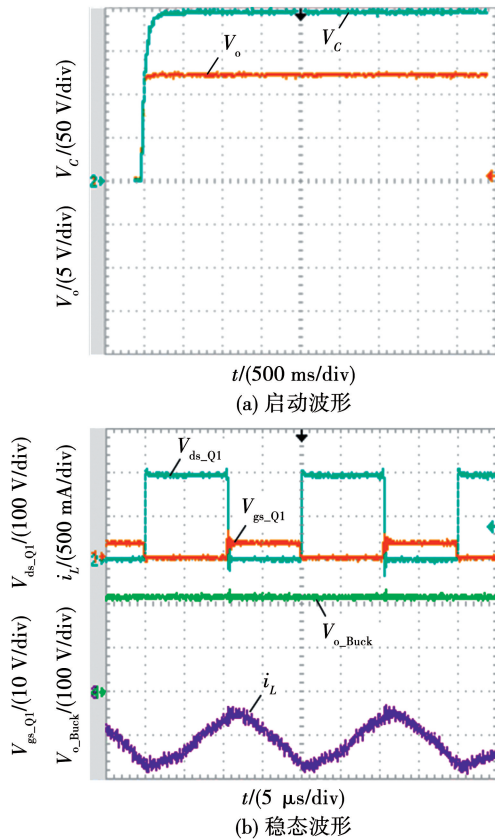
图 13 LLC 谐振电路实验波形

Fig. 13 Experimental waveforms of LLC resonant circuit

组合式变换器动态响应实验波形如图 14 所示,当变换器输入电压突变时,输出电压可迅速调节至稳定,同时飞跨电容电压调节至输入电压的一半;当变换器负载突变时,变换器经过短暂调节,输出电压能够始终稳定在 12 V,飞跨电容电压基本保持不变,验证了所提解耦控制策略的有效性。

图 15 为组合式变换器在不同输入电压下随输出功率变化的效率曲线,可以看出,变换器效率随着输出功率的上升而上升;变换器在输入电压较低时的效率特性要优于输入电压较高时,与理论分析一致。

改变电路连接方式,将组合式结构修改为级联式结构重测输入电压 $V_{in} = 200$ V 时变换器不同输出功率时的效率并与组合式变换器对比,如图 16 所示,可以看出,相较于级联式变换器,组合式变换器的效率特性有所提升,且随着输出功率的上升,效率优势越发明显。

图 12 $V_{in} = 400$ V 时实验波形Fig. 12 Experimental waveforms at $V_{in} = 400$ V

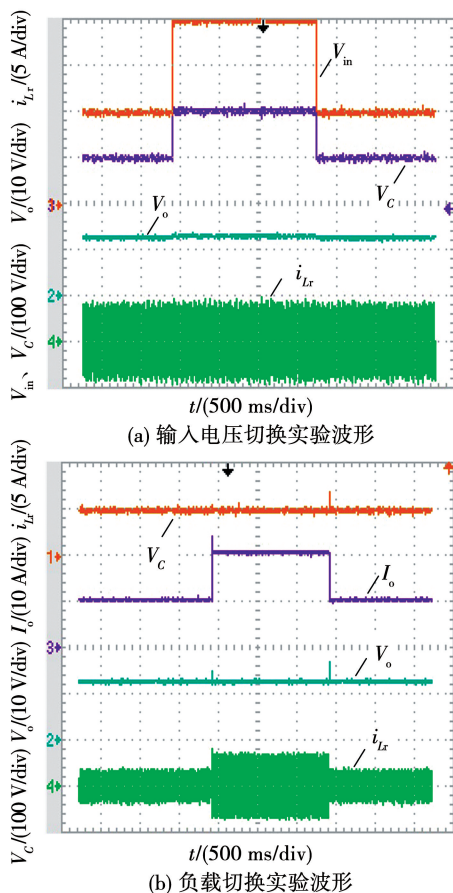


图14 组合式变换器动态响应实验波形

Fig. 14 Dynamic experimental waveforms of the combined converter

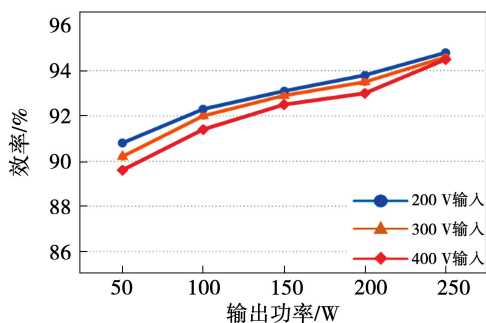


图15 组合式变换器效率曲线

Fig. 15 Efficiency curves of the combined converter

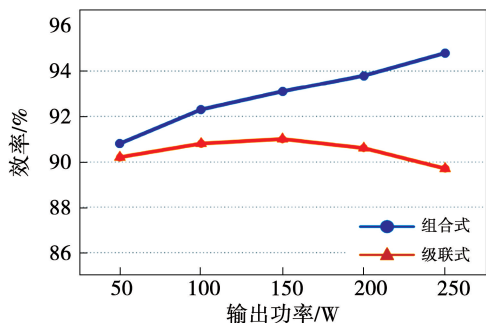


图16 组合式与级联式效率曲线

Fig. 16 Efficiency curves of the combined converter and the cascaded converter

5 结 论

本文提出了一种具有宽输入电压范围与高效率特性的组合式变换器,解决了 LLC 谐振变换器增益范围窄和级联式变换器效率受限的问题。此外,提出的变换器还具有以下优点:

1) LLC 谐振电路开环工作在谐振频率处,效率最优,增益恒定,传输负载所需全部功率,同时实现原边开关管 ZVS 和副边整流管 ZCS。

2) Buck 电路采用飞跨电容三电平结构,与普通两电平 Buck 电路相比,开关管电压应力降低;输出端口空载,仅处理部分功率实现电压调节,变换器非隔离电路损耗减少。

3) 调整 FC 三电平 Buck 电路占空比即可实现对输出电压的控制,控制策略简单、实现容易。

参 考 文 献:

- [1] 王永中. 碳达峰、碳中和目标与中国的新能源革命[J]. 人民论坛·学术前沿, 2021, 222(14): 88.
WANG Yongzhong. The targets of carbon peak and carbon neutralization and China's new energy revolution[J]. People's Forum Academic Frontiers, 2021, 222(14): 88.
- [2] 张涛. LLC 全桥变换器电动汽车充电机设计[J]. 电气技术, 2018, 19(8): 164.
ZHANG Tao. The design of full bridge EV charger based on LLC[J]. Electrical Engineering, 2018, 19(8): 164.
- [3] 蒋栋, 高加楼, 李柏杨, 等. 电动汽车电机驱动系统零转矩充电复用技术简介[J]. 电工技术学报, 2022, 37(19): 4862.
JIANG Dong, GAO Jialou, LI Boyang, et al. Introduction of integrated motor drive-charger technologies for electric vehicle with zero torque[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(19): 4862.
- [4] 童军, 吴伟东, 李发成, 等. 基于 GaN 器件的高频高效 LLC 谐振变换器[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S2): 635.
TONG Jun, WU Weidong, LI Facheng, et al. High frequency and high efficiency LLC resonant converter based on GaN device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S2): 635.
- [5] 陈宗祥, 陈克难, 熊宣, 等. 基于可变电感的变频 LLC 谐振变换器交错并联技术[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(12): 97.
CHEN Zongxiang, CHEN Kenan, XIONG Xuan, et al. Variable frequency interleaved parallel LLC resonant converter based on variable inductor[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(12): 97.
- [6] 何圣仲, 陈宇航, 代东雷, 等. 一种 PWM 控制宽输出 LLC 变换器[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(6): 62.

- HE Shengzhong, CHEN Yuhang, DAI Donglei, et al. PWM controlled wide output LLC converter[J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(6): 62.
- [7] 朱天宇, 纪延超, 王建曈. 一种高效率的宽输出电压范围 LLC 谐振变换器及其控制方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(18): 4697.
- ZHUN Tianyu, JI Yanchao, WANG Jianze. A high efficiency and wide gain range LLC resonant converter and its control method [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(18): 4697.
- [8] KIM C E, BAEK J I, LEE J B. High-efficiency single-stage LLC resonant converter for wide-input-voltage range[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(9): 7832.
- [9] CANALES F, BARBOSA P, LEE F C. A wide input voltage and load output variations fixed-frequency ZVS DC/DC LLC resonant converter for high-power applications [C]// 37th IAS Annual Meeting, Pittsburgh, Oct. 13 - 18, 2002, PA, USA. 2002: 2306 - 2313.
- [10] ALAQL F, ALHATLANI A, BATARSEH I. Multi-mode rectifier-based LLC resonant converter for wide input voltage range applications[C]//2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), June 14 - 17, 2021, Phoenix, AZ, USA. 2021: 349 - 354.
- [11] 刘瑞欣, 王议锋, 韩富强, 等. 应用于宽输入电压范围的两模式切换型软开关谐振直流变换器[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(22): 4739.
- LIU Ruixin, WANG Yifeng, HAN Fuqiang, et al. Two-mode switching soft-switching resonant DC converter for wide input voltage range [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(22): 4739.
- [12] 袁义生, 梅相龙, 张伟先, 等. 一种混合调制的五电平 LLC 谐振变换器[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(6): 107.
- YUAN Yisheng, MEI Xianglong, ZHANG Weixian, et al. Five-level LLC resonant converter with mix-modulation method [J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(6): 107.
- [13] 何圣仲, 代东雷, 何晓琼, 等. 一种交错级联多模式变频宽输出 LLC 变换器[J]. *电机与控制学报*, 2021, 25(6): 54.
- HE Shengzhong, DAI Donglei, HE Xiaoqiong, et al. Interleaved cascaded multi-mode variable frequency wide output LLC converter[J]. *Electric Machines and Control*, 2021, 25(6): 54.
- [14] 刘宇博, 王旭东. 电动汽车车载电源 LLC 谐振变换器滑模控制[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(3): 131.
- LIU Yubo, WANG Xudong. Sliding mode control of LLC resonant converter for electric vehicle power supply[J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(3): 131.
- [15] 孙孝峰, 申彦峰, 朱云娥, 等. 一种 Boost 型宽电压范围输入 LLC 谐振变换器[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(15): 3895.
- SUN Xiaofeng, SHEN Yanfeng, ZHU Yune, et al. A Boost-integrated LLC resonant converter for wide input voltage range[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(15): 3895.
- [16] 管乐诗, 王懿杰, 王卫, 等. 基于临界模式 Boost 电路与 LLC 谐振电路的单级交直变换器[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(11): 41.
- GUAN Yueshi, WANG Yijie, WANG Wei, et al. Single-stage AC-DC converter based on critical mode Boost circuit and LLC resonant circuit[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(11): 41.
- [17] WANG W, LIU Y, ZHAO J, et al. A dynamic control method for Buck + LLC cascaded converter with a wide input voltage range[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(2): 1522.
- [18] TSANG H K T, FONG Y C, KAN K L J, et al. A study of LLC converter with Buck converter for CC-CV charging [C]//2020 8th international conference on power electronics systems and applications (PESA), Dec. 7 - 10, 2020, Hong Kong, China. 2020: 1 - 5.
- [19] 孙孝峰, 仇江峰, 栗晓华, 等. 一种具有宽输入电压范围的集成 Buck-Boost LLC 级联变换器[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(6): 1667.
- SUN Xiaofeng, QIU Jiangfeng, SU Xiaohua, et al. An integrated Buck-Boost LLC cascaded converter with wide input voltage range [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(6): 1667.
- [20] WANG Y, GUAN Y, HUANG J, et al. A single-stage LED driver based on interleaved Buck-Boost circuit and LLC resonant converter[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, 3(3): 732.
- [21] WANG Z, WU Z, LIU T, et al. A high-efficiency and high-power-density interleaved integrated Buck Boost-LLC converter and its comprehensive optimal design method[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(9): 10849.
- [22] MUKHERJEE S, KUMAR Giri S, KUNDU S, et al. A generalized discontinuous PWM scheme for three-level NPC traction inverter with minimum switching loss for electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(1): 516.
- [23] 薛雅丽, 李斌, 阮新波. Buck 三电平变换器[J]. *电工技术学报*, 2003, 18(3): 29.
- XUE Yali, LI Bin, RUAN Xinbo. Buck three-level converter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2003, 18(3): 29.
- [24] YANG Bo, LEE F C, ZHANG A J, et al. LLC resonant converter for front end DC/DC conversion[C]//APEC Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 10 - 14, 2002, Dallas, TX, USA. 2002: 1108 - 1112.

(编辑:刘琳琳)