

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230666

宽增益高效谐振型直流变换器技术

龚春阳¹, 夏潇^{2,3}, 包俊⁴, 郑建⁵, 陈辉¹, 陈晓琳⁵, 王志新², 黄冬梅¹

(1. 上海电力大学, 上海 200090; 2. 上海交通大学, 上海 200240; 3. 施耐德电气(中国)有限公司上海分公司, 上海 201203; 4. 上海禧龙股份有限公司, 上海 201517; 5. 上海正泰电源系统有限公司, 上海 201620)

摘要: 直流变换器广泛应用于电动汽车充电系统与光伏发电系统, 如何适应输入/输出电压大范围变化, 实现直流变换器的宽增益和高传输效率为学术界和工业界所关注。其中, LLC、LLC_{LC}、LLCLC 谐振变换器虽具有高功率密度、低电磁干扰等特性, 但存在磁元件与谐振网络参数设计难度大, 造成变换器输出不稳定等不足, 难以满足实际应用的要求。为此, 提出了宽增益高效谐振型直流变换器技术。首先总结了谐振型直流变换器的基本原理, 围绕其拓扑结构及调制策略的国内外研究进展, 重点就宽增益与高效谐振型直流变换器应用需求进行阐述。然后分析了 LLC_{LC}、LLCLC 多模式 PWM 倍压整流变换器拓扑及调制策略。最后结合仿真与实验验证结果, 证明了该宽增益高效谐振型直流变换器拓扑及其调制策略的有效性, 最高可实现输出电压范围为 1~6.2, 转换效率达 96.1%, 具有较宽广的应用前景。

关键词: 谐振变换器; 宽增益; 高效率; 拓扑结构; 调制策略

Wide gain and high efficiency resonant DC-DC converter technology

GONG Chunyang¹, XIA Xiao^{2,3}, BAO Jun⁴, ZHENG Jian⁵, CHEN Hui¹, CHEN Xiaolin⁵, WANG Zhixin², HUANG Dongmei¹

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Schneider Electric (China) Co., Ltd. Shanghai Branch, Shanghai 201203, China; 4. Shanghai Xilong Technology Co., Ltd., Shanghai 201517, China; 5. Shanghai Chint Power Co., Ltd., Shanghai 201620, China)

Abstract: The DC-DC converter is widely used in electric vehicle charging and the photovoltaic power generation system. How to adapt to input/output voltage changes over a wide range, and realize the wide gain and maximum transmission efficiency have attracted attention from academia and industry. Especially, since the LLC and LLC_{LC} as well as the LLCLC resonant converter have characteristics such as high-power density and low electromagnetic interference, there are shortcomings including difficulty in designing magnetic components and resonant network parameters. These cause instability for the converter output, and it is difficult to meet the requirements for practical application. Thus a wide gain and high efficiency resonant DC-DC converter technology is proposed. The fundamental principle of the resonant DC-DC converter is summarized. Then research progress, both domestic and abroad, for topology and modulation strategy, is examined. The paper elaborates the application requirement for a wide gain and high efficiency resonant DC-DC converter. Then the topology and modulation strategy for both LLC_{LC} and LLCLC with multi-mode PWM voltage-multiplying rectifying converter are analyzed. Through simulation and experimental verification, the effectiveness of the topology and modulation strategy for two wide gain and high efficiency resonant DC-DC converters is verified, to show a maximum output voltage range of 1~6.2, and a conversion efficiency of 96.1%. This shows good prospects for application.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC1401902).

Key words: resonant converter; wide gain; high efficiency; topology structure; modulation strategy

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFC1401902); 上海市经信委工业强基专项资助(GYQJ-2022-1-14); 上海市科技计划项目资助(21DZ1207300)

0 引言

为进一步推动落实“双碳”目标，以新能源为主体的新型电力系统建设受到广泛关注，其实际运行中呈现出高比例新能源、高比例电力电子设备接入的“双高”特性^[1-4]。面对分布式光伏等新能源的大规模应用，直流变换通常为功率转换必不可少的环节，须具备宽输入/输出电压范围能力，同时要求高转换效率。因此，宽增益高效率直流变换器的研制开发成为目前工业界及学术界的研究热点^[5-8]。

谐振型直流变换器由于具有优良的软开关特性、低电磁噪声和高功率密度，广泛应用于车载充电系统、光伏发电系统等^[9-10]。相较串、并联谐振变换器，LLC谐振变换器具有宽增益、功率密度大、零电压开通(zero voltage switch, ZVS)、零电流关断(zero current switch, ZCS)以及无须输出滤波电感等特点^[11]，但同时也存在电压范围受负载增加影响、滤波器受电磁干扰、磁元件优化设计难度大、开关损耗增加、高峰值增益导致通态损耗等缺陷^[12]。对此，有学者提出融合脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)开关变换器特性的替代方案，即LLC_{LC}、LLCLC谐振变换器，然而大功率变换器对应的串联电容电流较大，损耗势必增加，限制了该变换器在宽增益高效率电力变换应用场景上的应用^[13]。

针对 LLC 谐振变换器运行性能提升的研究主要侧重于拓扑结构及调制策略，拓扑结构的改进聚焦于基本拓扑与组合式拓扑两方面，前者采用 PWM 倍压整流单元与改变谐振网络结构两种主流的技术手段，后者采用两级级联拓扑、输入串联输出并联拓扑(input series output parallel, ISOP)以及输入并联输出串联拓扑(input parallel output series, IPOS)。

1) 在基本拓扑方面，文献[14-15]提出二次侧多模式+混合调制的 LLC 谐振变换器，可在二倍压整流、四倍压整流和 PWM 模式之间切换，采用脉冲频率调制(pulse frequency modulation, PFM)、脉冲移相调制(pulse shift modulation, PSM)方式配合。文献[16]提出一种通过辅助绕组耦合陷波谐振网络的谐振变换器。文献[17]提出了一种增加零电平的变拓扑控制策略，在避免辅助电感偏磁的前提下实现了 L-LLC 谐振变换器全桥模式和半桥模式的灵活切换。

2) 在组合式拓扑方面，文献[18-20]提出采用 Boost 变换器与 LLC 谐振变换器级联的方式，将 Boost 变换器放置于前级，LLC 谐振变换器运行于谐振频率。文献[21]在 LLC 谐振变换器谐振回路中

串联辅助变压器，经整流环节后与 buck 变换器级联。文献[22]提出了一种由两个 LLC 谐振变换器构成输入输出均为并联的拓扑，通过调节两组 LLC 谐振变换器脉冲间的移相角实现电压调控。

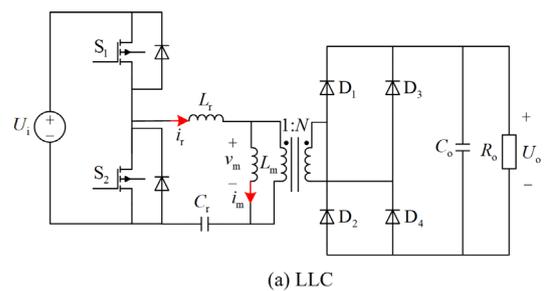
3) 文献[23-24]通过对输入逆变桥进行半桥和全桥的切换以提升性能。文献[25]提出一种混合可调开关频率的占空比调制技术，用于提高轻载效率，同时在预先选定优化占空比的前提下进行 PFM 调制。

综上，现有文献对于 LLC 谐振变换器运行性能的提升方法，主要基于研究成果分散式地展开了论述。但面向 LLC 谐振变换器突出的宽增益与高效率目标，其对应关键技术及发展趋势尚未有文献进行系统性地归纳总结。对此，本文针对上述目标，基于谐振型直流变换器原理、拓扑结构及调制策略，着重对其性能提升的关键技术及应用需求进行全面梳理。同时，针对现有方案的不足，分别提出基于 LLC_{LC} 与 LLCLC 谐振网络的宽增益高效直流变换器，并采用不同调制策略应用实现。

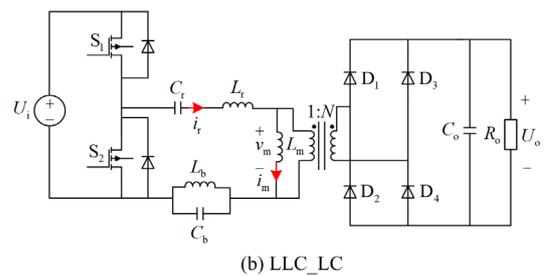
1 谐振型直流变换器拓扑及调制策略

1.1 变换器拓扑

LLC 谐振变换器拓扑如图 1(a)所示，变换器以变比为 1:N 的变压器作为隔离与变压元件，其一次侧为半桥结构并由直流电压 U_i 作为输入， L_r 、 C_r 、 L_m 组成谐振网络；其二次侧 D_1 — D_4 构成了全桥整流结构，经滤波电容与负载电阻输出直流电压 U_o 。在此基础上，LLC_{LC} 谐振变换器与 LLCLC 谐振变换器通过增设 L_b 与 C_b 元件，在拓扑结构上进行了相应改进，如图 1(b)、图 1(c)所示，其中 LLC_{LC}



(a) LLC



(b) LLC_{LC}

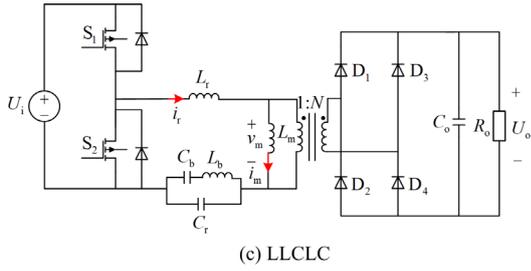


图 1 LLC、LLC_LC、LLCLC 谐振变换器拓扑

Fig. 1 Topology of LLC, LLC_LC and LLCLC resonant converter

谐振变换器通过 L_r 、 C_r 和 L_b 形成低频带通滤波器传递基波功率, 通过 L_r 、 C_r 和 C_b 形成高频带通滤波器传递高次谐波功率; LLCLC 谐振变换器通过 L_r 、 L_b 和 C_b 形成低频带通滤波器传递基波功率, 通过 L_r 、 C_r 形成高频带通滤波器传递高次谐波功率。两种方案均将三次谐波 f_{r3} 对应的频率设定为基波频率 f_{r1} 的 3 倍, 以此实现三次谐波功率传递。

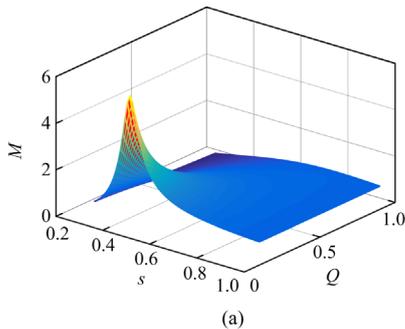
1.2 变换器调制策略

LLC 谐振变换器通常采用 PFM 调制, 即在一个周期中 S_1 、 S_2 各工作半个周期, 通过调节其开关频率控制输出电压。当 D_1 和 D_4 、 D_2 和 D_3 分别成组导通时, 对应励磁电感电压钳位于 $\pm U_o/N$, 此时励磁电感电流均为三角波。而当励磁电感电压不被钳位时, 谐振电流为纯正弦波^[26]。

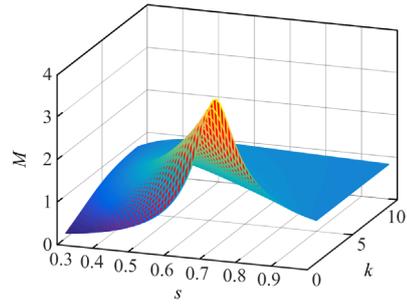
在此基础上, 由基波近似法可得 LLC 谐振变换器归一化增益 M 关于归一化频率 s 、品质因数 Q 以及电感比 k 的关系如式(1)所示, 相关特性如图 2 所示。由图 2 可看出, 随着 Q 或 k 的增大, 峰值增益将逐渐减小。

$$M = \frac{|R_o // j\omega L_m|}{|R_o // j\omega L_m + j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C_r}|} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{k} - \frac{1}{ks^2}\right)^2 + \left(s - \frac{1}{s}\right)^2 Q^2}} \quad (1)$$

式中: ω 为角频率; R_o 为负载阻抗 R_o 归算至一次侧的等效值。



(a)



(b)

图 2 LLC 谐振变换器增益特性

Fig. 2 Gain characteristic of LLC resonant converter

当输入阻抗虚部为零时, 得到边界条件下峰值增益 M_p 如式(2)所示。

$$M_p = \frac{s}{\sqrt{s^2 \left(1 + \frac{1}{k}\right) - \frac{1}{k}}} \quad (2)$$

边界条件下 LLC 谐振变换器增益特性如图 3 所示。即当 k 较小时, 随着 s 降低 Q 快速减小, 峰值增益逐渐增加; 当 s 进一步降低时, Q 减小放缓, 峰值增益大幅增加, 此时若频率调节范围较大可获得一定范围的增益; 而当 k 较大时, 峰值增益一直保持在较低值, 此时获得较窄的增益。

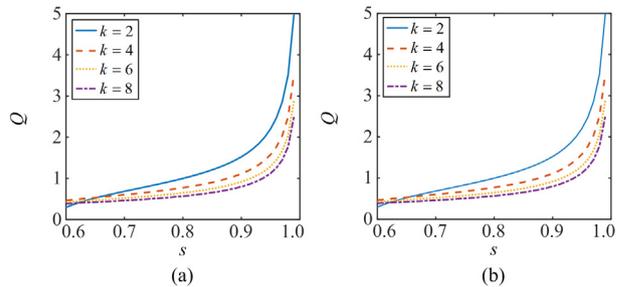
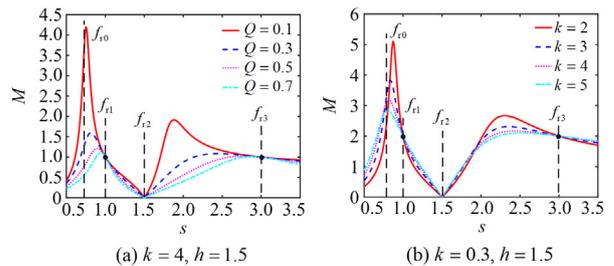


图 3 边界条件下 LLC 谐振变换器增益特性

Fig. 3 Gain characteristic of LLC resonant converter in margin condition

当拓扑结构为 LLC_LC 谐振变换器时, 由基波近似法可推导此时的增益特性如图 4 所示。此时, 为了不影响三次谐波功率的传输, 陷波频率 f_{r2} 与基波频率 f_{r1} 的比值设为 h , $h \in [1.5, 2.5]$ ^[27]。当频率远



(a) $k = 4, h = 1.5$

(b) $k = 0.3, h = 1.5$

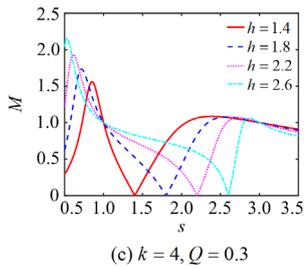


图 4 LLC_LC 谐振变换器增益特性

Fig. 4 Gain characteristics of LLC_LC resonant converter

离谐振频率同时靠近峰值增益时，三次谐波功率传输能力将减弱。同时，谐振网络的增益范围受负载变化影响，当频率靠近陷波频率时，功率传递能力弱，轻载时调压困难，谐振网络参数设计难度大^[28]。

LLCLC 谐振变换器由基波近似法得到增益特性如图 5 所示。 h 取 $[1.5, 2.5]$ 时，在 f_{r1} 和 f_{r3} 处谐振网络增益恒为 1，在 f_{r2} 处增益恒为 0。由此得知，在 $[f_{r1}, f_{r2}]$ 范围内，增益特性单调且和负载的相关性较弱。

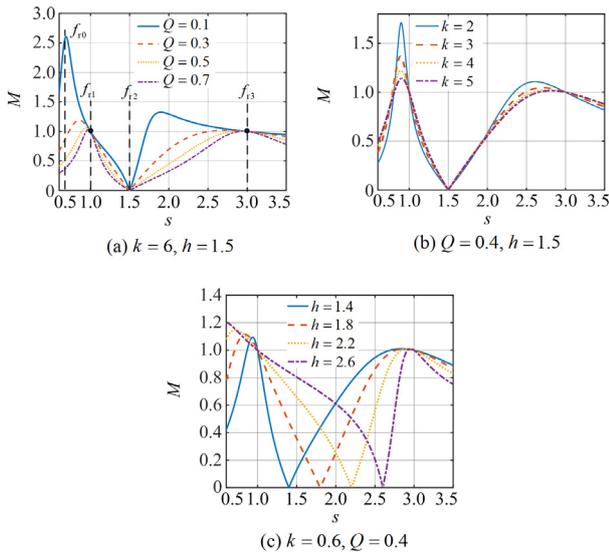


图 5 LLCLC 谐振变换器增益特性

Fig. 5 Gain characteristics of LLCLC resonant converter

当忽略损耗时，经归一化处理可得到 LLC_LC 与 LLCLC 谐振变换器功率 P_{net} 传输特性，如图 6 所示。由于当开关频率接近 f_{r2} 时谐振网络阻抗趋近无穷大，表征此时功率传输能力将大幅下降。

2 宽增益高效谐振型直流变换器

2.1 宽增益谐振型直流变换器

在拓扑结构方面，文献[29]提出二次侧变结构的 LLC 谐振变换器，如附录图 A1(a)所示。文献[30]提出复合谐振全桥变换器，如附录图 A1(b)所示，通

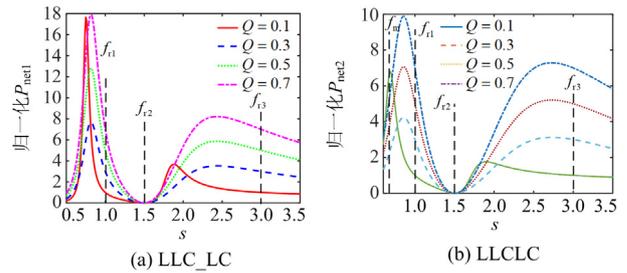


图 6 LLC_LC、LLCLC 谐振变换器功率传输特性

($k = 4, h = 1.5$)

Fig. 6 Power transfer characteristic of LLC_LC and LLCLC resonant converter ($k = 4, h = 1.5$)

过增加输入电感副边绕组构成 Flyback 模式，在主变压器侧串联电容构成 LC 谐振模式。文献[31]提出一种三桥 LLC 谐振变换器，桥臂间的变压器一次侧并联、二次侧串联。文献[32]提出一种升压电路级联的谐振变换器(Boost-LCL)，辅助变压器既是反激变压器，其原边绕组又复用作谐振电感和 Boost 电感。文献[33]提出以 IPOS 连接的 LCLC 谐振变换器，在谐振网络中配置开关电容以匹配谐振阻抗。

在调制策略方面，文献[34]提出半桥/全桥 LLC 结合的谐振变换器，采用 PWM 调制后减弱了增益与负载及谐振参数的相关性。文献[35-37]针对逆变桥组合拓扑，经调制后其增益特性和励磁电感取值无关。文献[38]提出一种 L-LLC 谐振双向直流变换器拓扑，并采用变频-移相混合控制策略。文献[39]针对拓扑结构提出同步整流开关管替换桥臂的方案，并采用 PSM 调制。文献[40]提出了一种基于五开关逆变桥的双 LLC 谐振变换器拓扑，经调制可形成集成半桥、半桥、混合桥和全桥 4 种模式。文献[41]提出了一种三电平 LLC 谐振变换器，经调制使得每个主开关电压应力为输入电压的一半。文献[42]基于二次侧有源桥结构，提出控制二次侧绕组电压以提升谐振电容电压的调制策略。文献[43-44]提出在 LLC 谐振变换器二次侧增加辅助补偿电路，提升开关周期内谐振网络注入的电荷量。文献[45-48]分别针对 LLC 谐振变换器与 LCC 变换器，提出 PWM + PFM 与 PFM + PSM 调制策略。

宽增益谐振型直流变换器典型技术方案比较如表 1 所示。

2.2 高效谐振型直流变换器

在拓扑结构方面，文献[58]提出利用 LC 串联结构替换 LLC 谐振变换器中的励磁电感，LC 串联结构本质上等效为可变励磁电感。文献[59-60]采用两相 buck 变换器和 LLC 谐振变换器级联，两相 buck

表 1 宽增益典型谐振型直流变换器技术方案对比

Table 1 Comparison of technical schemes for wide gain typical resonant DC-DC converter

性能提升手段	文献	主要技术方案	优点	缺点
拓扑结构	[49]	提出谐振网络交错连接、二次侧 PWM 整流器 IPOS 连接的 LLC 谐振变换器	获得独立于负载的宽增益	结构过于复杂、采用元件多
	[50]	采用两个变压器加一个辅助开关的 LLC 谐振网络, 针对不同工况, 变换器可以工作于 4 种模式	获得较宽增益	谐振网络结构较为复杂, 不利于参数优化设计
	[51]	提出切换一次侧绕组的串并联连接方式, 通过改变变压器的变比提升性能	获得较宽增益	结构较为复杂, 元件利用率低
	[52]	提出一种 LLC-C 谐振变换器, 通过辅助开关使谐振网络可以在 LLC 和 LCCL 模式间切换	获得较宽增益	谐振网络参数设计难度大
调制策略	[53]	提出基于双变压器的 LLC 谐振变换器, 结合半桥 LLC 和全桥 LLC 谐振变换器, 采用 PSM 调制并复用一条桥臂	获得较宽增益	无功环流较大
	[54]	提出一种全桥变频-移相不对称(doubled-PWM, DPWM)控制的平滑柔性变模态控制策略	获得较宽增益	控制策略实现较为复杂
	[55]	通过增加一个辅助 LC 电路, 调节谐振电感值	获得较宽增益	精度不能保证且实现起来较为困难
	[56]	提出了基于变压器切换实现谐振网络变结构的 LLC 变换器, 本质上改变了电感比	获得较宽增益	变压器利用率低, 谐振网络结构复杂, 效率较低
	[57]	针对三电平 LLC 谐振变换器, 通过不同开关管通断组合实现两电平和三电平模式	缩减频率调节范围, 拓宽增益范围	存在和传统谐振变换器同样的参数设计问题

变换器运行于临界模式并采用电感反耦。文献[61]提出了一种由两相交错 Boost 变换器和 LC 串联谐振变换器级联的变换器, 保持谐振电流断续的同时, Boost 变换器可运行于临界模式。文献[62]提出了一种由 LLC 谐振变换器和 buck 变换器组成的拓扑结构, 该结构采用 ISOP 形成 Sigma 变换器, 功率可被分配到不同的变换器以发挥各自优势。

在调制策略方面, 文献[63]提出一种基于突发控制-变占空比控制(Burst-PWM)的混合控制模式。文献[64]将变频乘法器应用于 LLC 谐振变换器, 实现基波/谐波功率传递切换。文献[65]提出了一种 PWM 串联谐振变换器, 在二次侧采用两个 PWM 升压开关管, 控制谐振电流使变换器具有两个效率峰值点。文献[66]提出将 LLC 谐振变换器集成到移相全桥变换器内, 经调制形成一种混合直流变换器。文献[67]提出了一种电流注入辅助控制电路, 通过控制开关周期内注入谐振电容的电流调节电压。

同样地, 针对高效率谐振型直流变换器, 本文梳理了现阶段较为典型的技术方案并进行了横向比较, 如表 2 所示。

综上, LLC 谐振变换器、LLC_{LC}、LLCLC 谐振变换器具备优良的软开关特性、高功率密度、低电磁干扰和电气隔离等特点。然而, 在宽电压应用场合, 较宽的频率调节范围增大了磁元件的设计难度; 同时, 负载变化也会导致增益特性的变化, 引起谐振网络参数设计难度大和变换器控制不稳定等问题。

对此, 本文分别基于 LLC_{LC} 谐振网络与 LLCLC 谐振网络, 提出了两种多模式 PWM 倍压整流单元宽增益高效直流变换器拓扑, 前者采用 PWM 调制方式, 后者采用脉冲频率 PFM+PWM 调制方式。两种方案均获得与负载解耦的宽增益, 同时, 通过谐振网络传输三次谐波功率, 有效提高了变换器的传输效率。

2.3 LLC_{LC}、LLCLC 多模式 PWM 倍压整流谐振型直流变换器

2.3.1 拓扑结构与模态分析

基于 LLC_{LC} 与 LLCLC 谐振网络的宽增益、高效直流变换器拓扑如图 7 所示。前者采用 PWM 调制, 分为 PWM_{FD}(full bridge to double-voltage bridge, FD) 与 PWM_{DQ}(double-voltage bridge to quadruple-voltage bridge, DQ)两种工作模式, 各模式下细分出 8 种模态; 后者采用 PFM 与 PWM 相结合的调制方式, 分为 PFM_{FR}(低增益)、PWM_{FD}(中增益)以及 PWM_{DT}(高增益)3 种工作模式, 其中 PFM_{FR} 模式含 4 种模态, PWM_{FD} 与 PWM_{DT} 均含 8 种模态。关于工作模态相关分析, 详见文献 [79-80]。两种拓扑将多模式 PWM 倍压整流单元与多元件谐振网络优势相结合, 所含有源器件配置相对较少, 同时 PWM 与 PFM 调制方式较为简单, 每种工作模式只需控制一个开关管或一对互补开关管。

表 2 高效率典型谐振型直流变换器技术方案对比

Table 2 Comparison of technical schemes for high efficiency typical resonant DC-DC converter

性能提升手段	文献	主要技术方案	优点	缺点
拓扑结构	[68-72]	提出定频 PWM 调制方式, 谐振网络为 LLC 结构, 一次侧开关频率固定于谐振频率, 二次侧采用 PWM 调制倍压整流网络	获得较高效率	受二次侧拓扑限制, 输出电压范围有限
	[73]	提出将两相 Boost 变换器与 LLC 谐振变换器级联的方式	有效减小了变换器输入电流脉动, 获得较高效率	谐振电容体积和一次侧电流应力较大, 二次侧绕组电流较难保持平衡
	[74]	提出将四开关 buck-Boost 变换器用作前级调节变换器, 并与 LLC 谐振变换器复用半桥实现集成, 采用 PWM + PSM 控制	减少了变换器开关器件, 提高了功率密度和效率, 原边各开关管在全输入电压和全负载范围内均能够实现 ZVS, 获得较高效率	存在前级 buck-Boost 扼流电感电流谐波分量大的问题
	[75]	提出了一种两电平和三电平复合的 LLC 谐振变换器, 适合于宽输入电压范围的应用场合, 三电平桥臂的开关管电压应力仅为输入电压的一半	整流二极管实现 ZCS, 电压应力仅为输出电压, 可以在全负载范围内实现 ZVS, 获得较高效率	结构较为复杂, 有源器件较多
调制策略	[76]	对应 LLC 谐振变换器宽电压范围应用, 提出了一种参数设计方法	获得较高效率	步骤较复杂, 且调频范围较宽, 不利于磁性元件优化设计
	[77]	提出通过检测开关频率, 使变换器工作在三相交错、单相全桥和单相半桥 LLC 结构, 基于数字控制器设计了一种脉冲宽度柔性过渡策略以实现单相全桥和单相半桥的平滑切换	获得较高效率	实现起来较为复杂, 由于采用 PFM 调制, 频率调节范围较大, 同时谐振网络参数设计难度非常大
	[78]	针对 LLC 谐振变换器采用 PFM + 不对称 PWM 调制	获得较高效率	不对称 PWM 调制导致变压器存在直流偏磁, 损耗较大

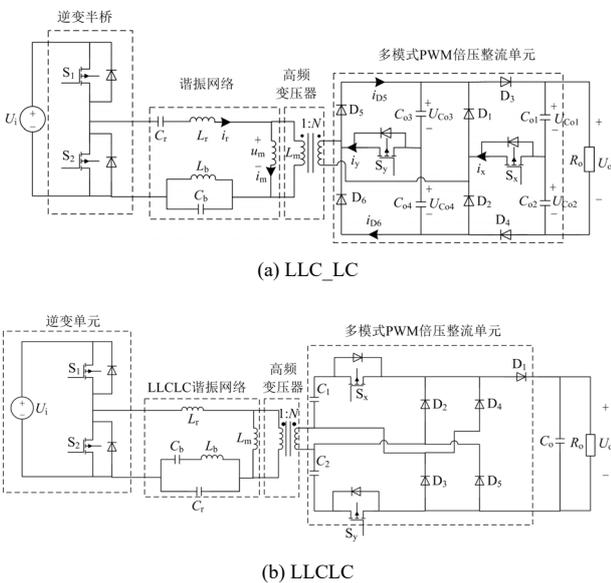


图 7 LLC_LC、LLCLC 多模式 PWM 倍压整流变换器拓扑
Fig. 7 Topology of LLC_LC and LLCLC with multi-mode PWM voltage-multiplying rectifying converter

2.3.2 特性分析

1) 增益特性

定义变换器的归一化增益 M 为

$$M = \frac{2U_o}{NU_i} \quad (3)$$

针对 LLC_LC 多模式 PWM 倍压整流变换器, 在 PWM_FD 与 PWM_DQ 模式下, 其增益特性如附录图 B1 所示, 可见, 各模式增益特性单调, 增益范围固定于 [1, 4], 且不受负载影响。而对于 LLCLC 多模式 PWM 倍压整流变换器, 其增益特性如附录图 B2、图 B3 所示, 其中 PWM_FD 与 PWM_DT 模式类似, 增益特性单调, 增益范围固定于 [1, 3], 且不受负载影响; PFM_FR 模式主要体现了第一谐振频率至陷波频率区间内的增益特性, 该频段增益受负载影响较小, 且完全单调。

2) 功率传输特性

针对 LLC_LC 多模式 PWM 倍压整流变换器, 根据文献[79]所做假设及两种模式下功率特性分析, 可见三次谐波被用于功率传输时, 在全增益范围内, 其占比均保持在较高水平, 提高了变换器的效率。而对于 LLCLC 多模式 PWM 倍压整流变换器, 根据文献[80]无功环流特性分析, 可见通过选取适当的 Q 值, 3 种工作模式均能在获得宽输出电压范围的同时保持较小的无功环流。

2.3.3 仿真与实验验证

1) 仿真及结果分析

根据文献[11]所述, 两种变换器均采用 PLECS 建立仿真模型, 在各工作模式下, 其对应仿真结果验证了两种变换器在较窄调频范围内的宽增益输出效果, 有利于优化设计磁元件。同时, 在各工作模式运行切换时, 输出电压 U_o 几乎不变或仅有较小升高, 可实现模式间平滑切换。

对于 LLC_{LC} 多模式 PWM 倍压整流变换器, 在两种工作模式下对其谐波进行分析, 均可得知其他谐波分量远远小于三次谐波和基波, 证明了三次谐波进行功率传输的有效性^[79]。而对于 LLCLC 多模式 PWM 倍压整流变换器, 可见其开关频率接近第一谐振频率, 减小了无功环流和开关损耗^[80]。

2) 实验结果及分析

LLC_{LC} 与 LLCLC 多模式 PWM 倍压整流变换器实验平台如附录图 B4、图 B5 所示, 其相关元件型号及参数如附录表 B1、表 B2 所示。

针对宽增益目标, 由各工作模式下对应的实验结果可知, 其与理论及仿真数据保持一致, 针对不同电压输出模式, 通过分别采用 PFM 和 PWM 调制方式, 有利于扩大输出电压的范围, 最高可达[1, 6.2], 同时可实现开关管 ZVS; 针对高效率目标, 实验结果证明了各模式间可实现平稳切换, 同时两种变换器各自在 PWM_{DQ} 与 PWM_{DT} 模式下, 可实现最高转换效率分别为 93.3%、96.1%^[11]。

3 结论

针对谐振型直流变换器性能提升关键技术, 本文基于国内外相关研究现状, 对其基本拓扑与调制技术进行了介绍, 从宽增益与高效率两个性能提升目标出发, 梳理并对比分析了现有方案的优缺点, 并基于此分别提出了 LLC_{LC} 与 LLCLC 多模式 PWM 倍压整流变换器优化方案。论文的主要结论如下。

1) LLC 谐振变换器存在增益精确设计与磁元件优化设计难度大等问题, 在宽电压范围应用场景受限。LLC_{LC} 及 LLCLC 谐振变换器虽具有谐波功率传输, 能提供 1 以下单位增益等优点, 但仍然存在和上述 LLC 谐振变换器类似的不足。根据以上分析, 分别提出了两种新型的宽增益、高效谐振型直流变换器拓扑。

2) LLC_{LC} 多模式 PWM 倍压整流变换器, 将频率固定于第一谐振频率, 优化磁元件设计, 二次侧采用多模式 PWM 倍压整流单元, 增益特性单调、

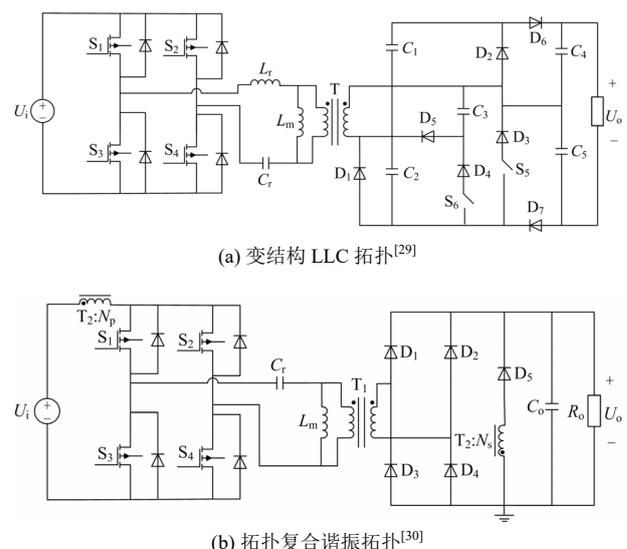
范围宽且不受负载影响。谐振网络参数不影响增益, 通过各谐振频率关系即可进行设计, 当选取较大 k 值时将进一步提高效率。

3) LLCLC 多模式 PWM 倍压整流变换器, 采用 PFM + PWM 调制方式, 即对谐振网络采用 PFM 调制, 对二次侧多模式 PWM 倍压整流单元采用 PWM 调制。将谐振网络 1 以下单位增益特性与多模式 PWM 倍压整流单元的 1 以上单位增益特性相结合, 进一步拓宽增益范围。变换器共有 3 种运行模式, 其中 1 以上单位增益范围不受负载及谐振网络参数影响, 1 以下单位增益通过在最小品质因数位置进行谐振网络参数设计, 在采用 PFM 调制时可响应负载变化对增益范围的影响。

4) 本文所提方案给出了运行模式平滑切换策略, 所有开关管均可实现 ZVS 导通及损耗降低。方案均制作样机, 通过仿真与实验验证了方案的可行性, 并与其他方案进行性能对比, 体现了本文所提宽增益、高效谐振型直流变换器拓扑及其调制策略的有效性先进性。

针对宽增益、高效谐振型直流变换器发展趋势, 未来可继续从拓扑结构及调制策略两方面入手开展研究。前者考虑通过改变谐振网络结构, 例如网络内增设辅助开关或采用 L3C 谐振变换器, 实现较窄频率范围内获得较宽增益; 后者采用新型的调制策略, 例如基于变频的零无功环流移相调制与频率自适应移相调制, 进一步提升转换效率的同时, 减小了无功环流, 并获得了独立于负载的宽增益。

附录 A



(a) 变结构 LLC 拓扑^[29]

(b) 拓扑复合谐振拓扑^[30]

图 A1 文献[29-30]拓扑

Fig. A1 Topology of in [29-30]

附录 B

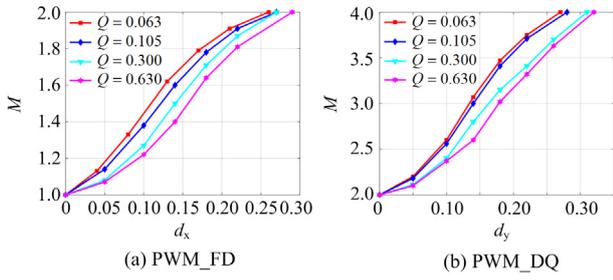


图 B1 PWM_FD、PWM_DQ 模式增益特性

Fig. B1 Gain characteristics of PWM_FD and PWM_DQ mode

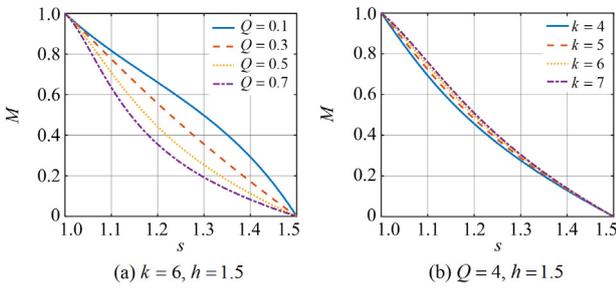


图 B2 PFM_FR 模式增益特性

Fig. B2 Gain characteristics of PFM_FR mode

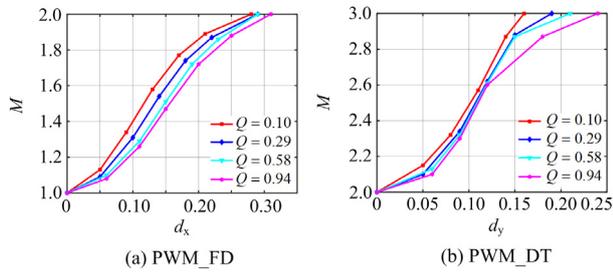


图 B3 PWM_FD、PWM_DT 模式增益特性

Fig. B3 Gain characteristics of PWM_FD and PWM_DT mode

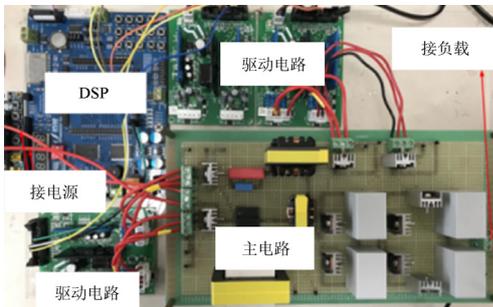


图 B4 LLC_LC 多模式 PWM 倍压整流变换器实验平台

Fig. B4 Experimental platform of LLC_LC with multi-mode PWM voltage-multiplying rectifying converter

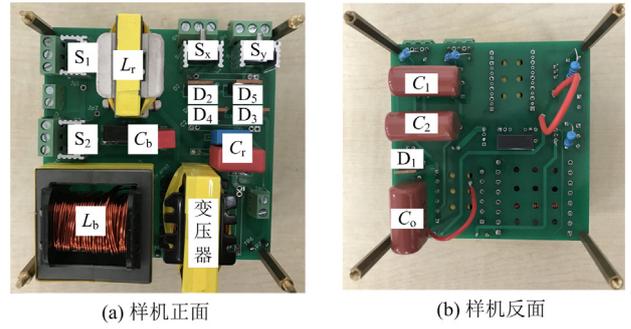


图 B5 LLCLC 多模式 PWM 倍压整流变换器实验平台

Fig. B5 Experimental platform of LLCLC with multi-mode PWM voltage-multiplying rectifying converter

表 B1 LLC_LC 多模式 PWM 倍压整流变换器
实验样机元件参数

Table B1 Component parameters of experimental prototype for LLC_LC with multi-mode PWM voltage-multiplying rectifying converter

元件	值	型号
开关管 S_1, S_2	—	IPP057N06N3G
开关管 S_x, S_y	—	IPP200N15N3G
二极管 D_1-D_6	—	MBR40250G
谐振电容 $C_r/\mu\text{F}$	0.615	X2-LE224
谐振电感 $L_r/\mu\text{H}$	24.02	EE25(PC40)
谐波滤波器电感 $L_b/\mu\text{H}$	40.35	EE40(PC40)
谐波滤波器电容 $C_b/\mu\text{F}$	0.656	MKP-X2
变压器	96.14 μH ; 19:19	EE50(PC40)
输出稳压电容 $C_{o1}-C_{o4}/\mu\text{F}$	15	MPEB-V5

表 B2 LLCLC 多模式 PWM 倍压整流变换器
实验样机元件参数

Table B2 Component parameters of experimental prototype for LLCLC with multi-mode PWM voltage-multiplying rectifying converter

元件	值	型号
主开关管 S_1, S_2	—	IPP200N15N3G
开关管 S_x, S_y	—	IPP200N15N3G
二极管 D_1-D_5	—	MBR40250G
谐振电容 $C_r/\mu\text{F}$	0.606	X2-LE224
谐振电感 $L_r/\mu\text{H}$	4.474	EE35(PC40)
电感 $L_b/\mu\text{H}$	30.58	EE42/15(PC40)
电容 $C_b/\mu\text{F}$	0.575	MKP-X2
变压器	26.62 μH ; 5:13	EE40(PC40)
稳压电容 $C_o/\mu\text{F}$	10	Panasonic CBB106
调压电容 $C_1, C_2/\mu\text{F}$	10	Panasonic CBB106

参考文献

- [1] 张硕, 李薇, 李英姿, 等. 面向新型电力系统的可再生能源绿色电力证书差异化配置模型[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(12): 1561-1571.
ZHANG Shuo, LI Wei, LI Yingzi, et al. Differentiated allocation model of renewable energy green certificates for new-type power system[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(12): 1561-1571.
- [2] 夏潇, 龚春阳, 包俊, 等. 宽增益高效率 LLC 谐振变换器拓扑[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 99-107.
XIA Xiao, GONG Chunyang, BAO Jun, et al. LLC resonant converter topology with wide gain and high efficiency[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 99-107.
- [3] YANG Bo, LIU Bingqiang, ZHOU Hongyu, et al. A critical survey of technologies of large offshore wind farm integration: summary, advances, and perspectives. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(2): 233-264.
- [4] 郑嘉龙, 杨鹤, 陈开宇, 等. LCL 型多逆变器并网系统谐振研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 177-186.
ZHENG Jialong, YANG Ge, CHEN Kaiyu, et al. An overview on resonance for a multiple LCL-type inverter grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 177-186.
- [5] 周原冰, 杨方, 余潇潇, 等. 中国能源电力碳中和实现路径及实施关键问题[J]. 中国电力, 2022, 55(5): 1-11.
ZHOU Yuanbing, YANG Fang, YU Xiaoxiao, et al. Realization pathways and key problems of carbon neutrality in China's energy and power system[J]. Electric Power, 2022, 55(5): 1-11.
- [6] 唐忠, 白健, 赖立. 基于 IPOS 双 LLC 谐振变换器的恒压恒流充电研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 88-95.
TANG Zhong, BAI Jian, LAI Li. Constant voltage and constant current charging based on an IPOS dual-LLC resonant converter[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 88-95.
- [7] 苏适, 栾思平, 罗恩博, 等. 一种基于级联 Buck-Boost 变换器的多储能并联系统及其控制策略设计[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 70-76.
SU Shi, LUAN Siping, LUO Enbo, et al. A multi-storage parallel system based on cascaded Buck-Boost converter and its control strategy design[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 70-76.
- [8] SEVERNS R P. Topologies for three-element resonant converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(1): 89-98.
- [9] 戈现勉. 高效率 LLC 谐振变换器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
GE Xianmian. Research on high efficiency LLC resonant converter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [10] AFFAM A, BUSWIG Y M, OTHMAN A, et al. A review of multiple input DC-DC converter topologies linked with hybrid electric vehicles and renewable energy systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135.
- [11] 夏潇. 宽增益谐振型直流变换器研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2023.
XIA Xiao. Research on wide gain resonant DC-DC converter[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2023.
- [12] YUAN Yisheng, PENG Neng, LIU Wei, et al. A linear-resonant hybrid bridge DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(2): 1478-1488.
- [13] FU Dianbo, LEE F C, LIU Ya, et al. Novel multi-element resonant converters for front-end DC/DC converters[C] // IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 15-19, 2008, Rhodes Greece: 250-256.
- [14] ABBASI M, EMAMALIPOUR R, KANATHIPAN K, et al. A step-up reconfigurable multimode LLC converter module with extended high-efficiency range for wide voltage gain application in medium voltage DC grid systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(7): 8118-8132.
- [15] TANG Xinxi, XING Yan, WU Hongfei, et al. An improved LLC resonant converter with reconfigurable hybrid voltage multiplier and PWM-plus-PFM hybrid control for wide output range applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 185-197.
- [16] KIM M, JEONG H, HAN B, et al. New parallel loaded resonant converter with wide output voltage range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4): 3106-3114.
- [17] 刘建强, 张泽辉, 艾宇, 等. 一种变拓扑 L-LLC 谐振变换器研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8652-8664.
LIU Jianqiang, ZHANG Zehui, AI Yu, et al. Research on a variable topology L-LLC resonant converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8652-8664.
- [18] LEE J Y, JEONG Y S, HAN B M. An isolated DC/DC converter using high-frequency unregulated LLC resonant converter for fuel cell applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(7): 2926-2934.
- [19] KIM B C, PARK K B, KIM C E. LLC resonant converter with adaptive link-voltage variation for a high-power-density adapter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(9): 2248-2252.
- [20] WANG Laili, ZHANG Weiming, PEI Yunqing, et al. A two-stage topology for 24 V input low voltage high current DC/DC converter[C] // 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, May 17-20, 2009, Wuhan, China: 804-809.
- [21] WU Xinke, CHEN Hui, QIAN Zhaoming. 1 MHz LLC resonant DC transformer (DCX) with regulating

- capability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 2904-2912.
- [22] XUE Bo, WANG Haoyu, LIANG Junrui, et al. Phase-shift modulated interleaved LLC converter with ultrawide output voltage range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 493-503.
- [23] LIANG Zhigang, GUO Rong, WANG Gangyao, et al. A new wide input range high efficiency photovoltaic inverter[C] // IEEE Energy Conversion Congress and Expo (ECCE), September 12-16, 2010, Atlanta, USA: 2937-2943.
- [24] JOVANOVI M M, IRVING B T. On-the-fly topology-morphing control—efficiency optimization method for LLC resonant converters operating in wide input- and/or output-voltage range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 2596-2608.
- [25] AWASTHI A, BAGAWADE S, JAIN P K. Analysis of a hybrid variable-frequency-duty-cycle-modulated low-Q LLC resonant converter for improving the light-load efficiency for a wide input voltage range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 8476-8493.
- [26] LAZAR J F, MARTINELLI R. Steady-state analysis of the LLC series resonant converter[C] // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 4-8, 2001, Anaheim, USA: 728-735.
- [27] WU Hongfei, JIN Xiang, HU Haibing, et al. Multielement resonant converters with a notch filter on secondary side[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(6): 3999-4004.
- [28] MISHIMA T, MIZUTANI H, NAKAOKA M. A sensitivity-improved PFM LLC resonant full-bridge DC-DC converter with LC antiresonant circuitry[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 310-324.
- [29] 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, USA: 349-354.
- [30] 袁义生, 赖立. 一种适用于宽范围输出的复合谐振型全桥变换器[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6694-6704.
- YUAN Yisheng, LAI Li. A compound resonant full-bridge converter suitable for wide range output[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6694-6704.
- [31] OH J, LEE J, KIM M, et al. A 3-Bridge LLC resonant converter operating with a wide output voltage control range using morphing control for mode transitions[C] // 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 17-21, 2019, Anaheim, USA: 2300-2304.
- [32] 袁义生, 梅相龙, 姬鹏远. 一种 Boost-LCL 谐振变换器[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 2166-2175.
- YUAN Yisheng, MEI Xianglong, JI Pengyuan. A Boost-LCL resonant converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 2166-2175.
- [33] FOROUZESH M, LIU Yanfei. Interleaved LCLC resonant converter with precise current balancing over a wide input voltage range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9): 10330-10342.
- [34] SUN Xiaofeng, LI Xiaohua, SHEN Yanfeng, et al. Dual-bridge LLC resonant converter with fixed-frequency PWM control for wide input applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 69-80.
- [35] SHEN Yanfeng, WANG Huai, AL-DURRA A, et al. A structure-reconfigurable series resonant DC-DC converter with wide-input and configurable-output voltages[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(2): 1752-1764.
- [36] WU Hongfei, MU Tiantian, GAO Xun, et al. A secondary-side phase-shift-controlled LLC resonant converter with reduced conduction loss at normal operation for hold-up time compensation application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5352-5357.
- [37] 周国华, 范先焱, 许多, 等. 具有宽范围输入和高效率的改进型 LLC 谐振变换器[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(10): 9-18.
- ZHOU Guohua, FAN Xianyan, XU Duo, et al. Improved LLC resonant converter with wide range input and high efficiency[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(10): 9-18.
- [38] 吕正, 颜湘武, 孙磊. 基于变频-移相混合控制的 L-LLC 谐振双向 DC-DC 变换器[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 12-24.
- LÜ Zheng, YAN Xiangwu, SUN Lei. A L-LLC resonant bidirectional DC-DC converter based on hybrid control of variable frequency and phase shift[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(4): 12-24.
- [39] KIM J W, MOON G W. A new LLC series resonant converter with a narrow switching frequency variation and reduced conduction losses[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4278-4287.
- [40] LI Cheng, WANG Haoyu, SHANG Ming. A five-switch bridge based reconfigurable LLC converter for deeply depleted PEV charging applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(5): 4031-4035.
- [41] GU Yilei, LU Zhengyu, QIAN Zhaoming. Three level LLC series resonant DC/DC converter[C] // Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, February 22-26, 2004, Anaheim, USA: 1647-1652.
- [42] SHIMADA T, NAKAHARA M, ISHIGAKI T. Boost assist control of LLC resonant converter for wide voltage range by use of secondary-side MOSFETs with ZVS using reverse recovery current of body diodes[C] // 2021

- IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), October 10-14, 2021, Vancouver, Canada: 2149-2154.
- [43] KIM B C, PARK K B, CHOI S W, et al. LLC series resonant converter with auxiliary circuit for hold-up time[C] // INTELEC 2009-31st International Telecommunications Energy Conference, October 18-22, 2009, Incheon, South Korea: 1-4.
- [44] KIM M Y, KIM B C, PARK K B, et al. LLC series resonant converter with auxiliary hold-up time compensation circuit[C] // 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia, May 30-June 3, 2011, Jeju, South Korea: 628-633.
- [45] 李菊, 阮新波. 全桥 LLC 谐振变换器的混合式控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 72-79, 94.
LI Ju, RUAN Xinbo. Hybrid control strategy of full bridge LLC converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 72-79, 94.
- [46] 陶文栋, 王玉斌, 张丰一, 等. 双向 LLC 谐振变换器的变频-移相控制方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5856-5863.
TAO Wendong, WANG Yubin, ZHANG Fengyi, et al. Pulse frequency modulation and phase shift combined control method for bidirectional LLC resonant converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(24): 5856-5863.
- [47] 王暄, 王广柱, 孙晓伟, 等. 具有宽范围输出电压的三电平半桥 LLC 谐振变换器控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 24-33.
WANG Xuan, WANG Guangzhu, SUN Xiaowei, et al. Research on control strategy of three-level half-bridge LLC resonant converter with wide output voltage range[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 24-33.
- [48] 曹靖, 许建平, 陈一鸣, 等. PWM-PFM 混合控制 LCC 谐振变换器研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3629-3637, 23.
CAO Jing, XU Jianping, CHEN Yiming, et al. Study of PWM-PFM hybrid controlled LCC resonant converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3629-3637, 23.
- [49] LI Zhiqing, XUE Bo, WANG Haoyu. An interleaved secondary-side modulated LLC resonant converter for wide output range applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(2): 1124-1135.
- [50] HU Haibing, FANG Xiang, CHEN F, et al. A modified high-efficiency LLC converter with two transformers for wide input-voltage range applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1946-1960.
- [51] 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): 7832-7840.
- [52] YANG Liang, DONG Shimeng, WANG Yifeng, et al. A high-efficiency LLC-C resonant converter for wide-gain-range application[C] // 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), November 4-7, 2018, Shenzhen, China: 1-6.
- [53] KHAN S, SHA Deshang, JIA Xiangshuai, et al. Resonant LLC DC-DC converter employing fixed switching frequency based on dual-transformer with wide input-voltage range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 607-616.
- [54] 缪哲语, 仝昊, 姚文熙, 等. 一种柔性多模态宽范围全桥 LLC 变换器控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 747-761.
MIU Zheyu, TONG Hao, YAO Wenxi, et al. A flexible variable-mode control method for wide-range full-bridge LLC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 747-761.
- [55] KIM D K, MOON S C, YEON C O, et al. High-efficiency LLC resonant converter with high voltage gain using an auxiliary LC resonant circuit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 6901-6909.
- [56] 刘晓东, 董保成, 吴慧辉, 等. 基于并联变压器切换的 LLC 谐振变换器宽范围效率优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(14): 3018-3029.
LIU Xiaodong, DONG Baocheng, WU Huihui, et al. Wide range efficiency optimization control strategy for LLC resonant converter based on parallel transformer switching[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(14): 3018-3029.
- [57] 李浩昱, 李振伟, 赵雷, 等. 宽输入 LLC 谐振变换器多电平控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 48-57.
LI Haoyu, LI Zhenwei, ZHAO Lei, et al. Multi-level control strategy of wide input LLC resonant converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(4): 48-57.
- [58] CHEN Yang, WANG Hongliang, HU Zhiyuan, et al. LCLC converter with optimal capacitor utilization for hold-up mode operation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2385-2396.
- [59] FU Minfan, FEI Chao, YANG Yuchen, et al. Optimal design of planar magnetic components for a two-stage GaN-based DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3329-3338.
- [60] FU Minfan, FEI Chao, YANG Yuchen, et al. A GaN-based DC-DC module for railway applications: design consideration and high-frequency digital control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(2): 1638-1647.
- [61] XU Jingtao, SUN Yao, XU Guo, et al. Current-fed LC series resonant converter with load-independent voltage-gain characteristics for wide voltage range applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 11509-11522.
- [62] SUN Julu, XU Ming, REUSCH D, et al. High efficiency quasi-parallel voltage regulators[C] // 2008 Twenty-Third

- Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, February 24-28, 2008, Austin, USA: 811-817.
- [63] 石林, 刘邦银, 段善旭. 一种基于 Burst-PWM 混合控制的 LLC 谐振变换器宽电压范围输出策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(22): 4772-4780.
- SHI Lin, LIU Bangyin, DUAN Shanxu. A Burst-PWM hybrid control method for wide output voltage range of LLC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(22): 4772-4780.
- [64] INAM W, AFRIDI K K, PERREAULT D J. Variable frequency multiplier technique for high-efficiency conversion over a wide operating range[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(2): 335-343.
- [65] KIM J W, BARBOSA P. PWM-controlled series resonant converter for universal electric vehicle charger[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 13578-13588.
- [66] PAHLEVANI M, PAN Shangzhi, JAIN P. A hybrid phase-shift modulation technique for DC/DC converters with a wide range of operating conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7498-7510.
- [67] QIAN Ting. An adaptive current injection scheme for resonant capacitor of LLC resonant converters with suppressed frequency variation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(12): 8074-8080.
- [68] SHANG Ming, WANG Haoyu. A voltage quadrupler rectifier based pulse width modulated LLC converter with wide output range[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6): 6159-6168.
- [69] SHANG Ming, WANG Haoyu, CAO Qi. Reconfigurable LLC topology with squeezed frequency span for high-voltage bus-based photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 3688-3692.
- [70] WANG Haoyu, LI Zhiqing. A PWM LLC type resonant converter adapted to wide output range in PEV charging applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 3791-3801.
- [71] WU Hongfei, LI Yuewei, XING Yan. LLC resonant converter with semiactive variable-structure rectifier (SA-VSR) for wide output voltage range application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3389-3394.
- [72] DANG Hengkai, DU Sixing, ZHANG Yan, et al. A novel LLC resonant converter with configurable capacitors in output stage for wide output voltage range operation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 6233-6236.
- [73] WEN Peng, HU Changsheng, YANG Haitao, et al. A two stage DC/DC converter with wide input range for EV[C]// 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA), May 18-21, 2014, Hiroshima, Japan: 782-789.
- [74] 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): 1667-1673.
- SUN Xiaofeng, QIU Jiangfeng, LI Xiaohua, et al. An integrated Buck-Boost LLC cascaded converter with wide input voltage range[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1667-1673.
- [75] 金科, 阮新波. 复合式全桥三电平 LLC 谐振变换器[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 53-58.
- JIN Ke, RUAN Xinbo. Hybrid full bridge three-level LLC resonant converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 53-58.
- [76] BEIRANVAND R, RASHIDIAN B, ZOLGHADRI M R, et al. A design procedure for optimizing the LLC resonant converter as a wide output range voltage source[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(8): 3749-3763.
- [77] 冯兴田, 邵康, 崔晓, 等. 基于多模态切换的宽电压增益 LLC 谐振变换器控制策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(20): 4350-4360.
- FENG Xingtian, SHAO Kang, CUI Xiao, et al. Control strategy of wide voltage gain LLC resonant converter based on multi-mode switching[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(20): 4350-4360.
- [78] 潘海燕, 贺超, 蒋友明, 等. 高效的 LLC 谐振变换器变模式控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 71-78.
- PAN Haiyan, HE Chao, JIANG Youmin, et al. Efficient variant mode control of LLC resonant converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 71-78.
- [79] 夏潇, 龚春阳, 陈辉, 等. 基于五元件谐振网络的宽增益直流变换器[J/OL]. 高电压技术: 1-13[2023-05-27]. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20220298.
- XIA Xiao, GONG Chunyang, CHEN Hui, et al. DC converter with wide gain based on five-element resonant network[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-13[2023-05-27]. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20220298.
- [80] 王志新, 夏潇, 龚春阳, 等. 具有宽输出电压范围的 LLCLC 谐振变换器[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(1): 12-22.
- WANG Zhixin, XIA Xiao, GONG Chunyang, et al. LLCLC resonant converter with wide output voltage[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(1): 12-22.

收稿日期: 2023-06-01; 修回日期: 2023-07-31

作者简介:

龚春阳(1991—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为新能源发电规划与控制; E-mail: sh19900307@163.com

黄冬梅(1964—), 女, 通信作者, 硕士, 教授, 研究方向为海洋与电力时空信息技术。E-mail: dmhuang@shou.edu.cn

(编辑 张颖)