

分数阶 LLC 谐振变换器建模与 参数设计方法研究

游瀚文, 陈曦

(三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:针对半桥 LLC 谐振变换器中谐振电容器的“参数漂移”现象, 提出基于分数阶微积分的建模方法, 用于分析半桥 LLC 谐振变换器的工作模态以及谐振电容器“参数漂移”对变换器每个模态造成的影响。然后, 基于 Oustaloup 滤波算法搭建计及谐振电容器分数阶参数特性的半桥 LLC 谐振变换器仿真模型, 对理论分析结果进行验证。搭建一台 240 W 样机对理论分析与仿真结果进行验证, 结果表明, 所提分数阶等效模型相比于传统整数阶模型能更准确地表征谐振电容器参数漂移现象对 LLC 谐振变换器系统工作特性的影响。因此, 所提基于分数阶微积分的建模方法能为 LLC 谐振变换器的优化设计提供更精确有效的理论依据。

关键词:分数阶微积分; LLC 谐振变换器; Oustaloup 滤波算法; 谐振电容器

中图分类号: TN710.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed26463

Modeling and Parameter Design of Fractional-order LLC Resonant Converters

YOU Hanwen, CHEN Xi

(College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University,
Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: A modeling method based on fractional calculus was proposed to analyze the working mode of half bridge LLC resonant converters and the influence of the "parameter drift" of the resonant capacitor on the working mode of the converters. Then, based on the Oustaloup's filtering algorithm, a simulation model of a half bridge LLC resonant converters was built to verify the theoretical analysis results, which considers the fractional-order parameter characteristics of the resonant capacitor. A 240 W test prototype was built up, and the results indicate that the proposed fractional-order equivalent model can more accurately characterize the parameter drift influence of the resonant capacitor on the operating characteristics of LLC resonant converters compared to traditional integer-order models. Therefore, the proposed fractional-order modeling method can provide an accurate and effective theoretical basis for the optimization design of LLC resonant converters.

Key words: fractional calculus; LLC resonant converter; Oustaloup's filtering algorithm; resonant capacitor

LLC 谐振变换器可实现零电压开关, 具有较高的功率密度, 因此在各种工业供电场景中被广泛使用^[1-2]。为了指导这类变换器的设计, 诸如扩展描述函数法、模态分析法、广义状态空间平均法、基波近似法、等效小参量法等建模与分析方法相继被提出^[3-8]。部分方法已被用于 LLC 谐振变换器的设计和元器件选型, 但上述方法普遍忽

略了谐振电容器在复杂工况下的“参数漂移”现象, 因此实际所得 LLC 谐振变换器性能与理论设计结果之间存在偏差。本文考虑谐振电容器的“参数漂移”现象, 提出基于分数阶等效电路的半桥 LLC 谐振变换器建模与分析方法, 并展开了数值验证。通过仿真和实验结果的对比, 验证了所建立的分数阶模型和理论分析的有效性。

基金项目: 湖北省自然科学基金(2024AFB584)

作者简介: 游瀚文(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分数阶变换器, Email: 2284084135@qq.com

通讯作者: 陈曦(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为非线性系统建模与控制方法, Email: eene_chenxi@ctgu.edu.cn

1 谐振电容器参数漂移特性

电容器作为关键的无源器件,在功率变换器,特别是由电感和电容构成的谐振腔中,占据着举足轻重的地位。它具备抑制电压纹波、调整电流电压波形、吸收谐波以及平衡功率变换器瞬时功率差等诸多功能^[9-10]。

然而不可忽视的是,电容器发生“参数漂移”的原因在于其内部电化学反应具有“长程相关性”。电容器极易受到温度、频率等环境因素的干扰,这些因素会致使电容器的寿命缩短,其电气特征参数容易出现漂移现象,进而导致故障率升高^[11]。有研究指出,大约有30%的变换器故障是由电容器故障引发的,基于此,电容器被普遍视作对电力电子系统稳定性影响最大的无源器件^[12]。

现已有研究工作表明分数阶等效阻抗模型能够准确反映由外加电场频率引起的电解电容“参数漂移”现象^[13]。而薄膜电容与电解电容具备类似的电化学反应原理与载流子分布。

在此做假设,LLC谐振变换器中谐振电容所广泛采用的薄膜电容“参数漂移”现象同样具备分数阶特性。为证实这一假设,选取了来自不同厂商、不同材质的三种电容器,分别为RISYM耐压1 kV的22 nF高压瓷片电容、KNSCHA耐压630 V的15 nF薄膜电容、JAKEC耐压50 V的10 μ F直插式铝电解电容。为对电容器的“参数漂移”现象进行验证,需要通过精密LCR电桥测试三种电容在100 Hz到1 MHz频带内的电容值与阻抗值的变化趋势,测试结果如图1所示。

从图1中的测试结果可以看出,随着测试频率以每10倍频递增,三种电容的容值均呈不同程度的下降趋势。电解电容在中低频段下降趋势偏平缓,高频下降趋势较为明显。薄膜电容的变化趋势与电解电容变化趋势类似。高压瓷片电容的容值变化趋势与薄膜电容的中低频段变化趋势类似,但在接近1 MHz的频段内,存在容值的跃升,其随频率变化的“参数漂移”现象特征依然存在。三种电容的阻抗值也伴随着频率的变化呈下降趋势。图中还标注出了三种电容在118 kHz处的容值与阻抗值。

综上所述,精密LCR电桥测试结果验证了薄膜电容的参数随工作频率的变化,存在“参数漂移”现象,且该现象与电解电容“参数漂移”现象

类似。因此,本文引入电容器的分数阶等效阻抗模型,并建立计及电容器分数阶特性的半桥LLC谐振变换器分数阶等效电路模型。

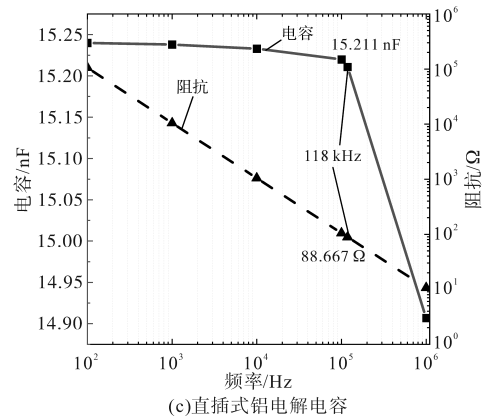
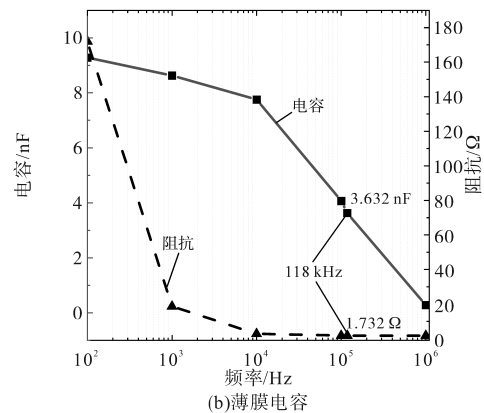
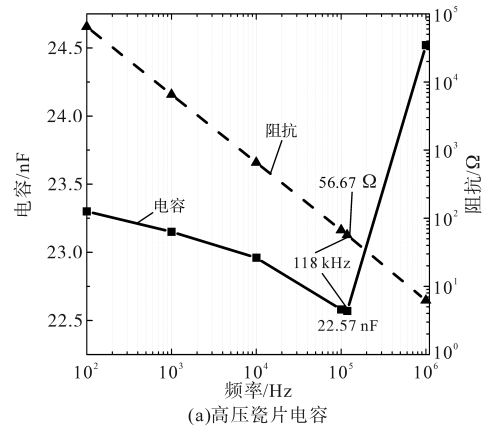


图1 不同类型电容参数变化趋势

Fig.1 Trends in the variation of parameters of various capacitor types

2 LLC谐振变换器分数阶等效模型

2.1 分数阶等效拓扑

基于分数阶微积分搭建研究对象的数学模型,可以更准确地描述复杂系统的本质特征和动态特性^[14]。在电力电子变换器传统的分析和建模中,电感和电容通常被视为整数阶元件。研究表明,使用分数阶模型可以更准确地阐明电力电子

变换器的实际运行特性,而基于对电感和电容的理论建模,可以发现不存在理想的整数阶电容和电感^[15]。

随着分数阶建模技术在电力电子领域的应用和发展,不同的分数阶建模方法被应用于各种开关变换器中。分数阶变换器的建模思路主要有小信号建模、数值求解等思路。

常用的DC-DC变换器小信号建模方法以状态空间平均法为主。文献[16]使用状态空间平均法,对电感电流断续模式-伪连续模式下的Boost变换器建立了分数阶状态空间平均模型,并相较于整数阶状态空间模型验证了分数阶模型的精确有效性。状态空间平均法还可用于Buck变换器^[17]、Buck-Boost变换器^[18]等DC-DC变换器的分数阶小信号模型求解。

另一方面,获取变换器状态变量数值解析解的建模思路,例如分数阶预估校正法、分数阶微积分定义法(Grünwald-Letnikov定义、Riemann-Liouville定义、Caputo定义)、等效小参量法等。文献[19]以零电压开关准谐振变换器为研究对象,应用分数阶预估校正法、Oustaloup有理逼近法求解变换器的数值解,并应用Grünwald-Letnikov定义法(G-L定义)获得了该变换器的解析解。揭示了分数阶谐振电容对变换器过零点(zero crossing point, ZCP)和谐振状态的影响。并通过验证,对比分析了不同数值求解方式的有效性。

在数值求解的研究进程中,为了避开不同的分数阶微积分定义所带来的争议,同时获得状态变量解析解,等效小参量法被应用于不同的开关变换器拓扑结构的解析解求取,如分数阶ZCS PWM Buck变换器^[20]、基于E类逆变器的磁谐振无线电能传输(wireless power transmission, WPT)系统等^[21]。

在上述介绍的分数阶开关变换器建模方法中,状态空间平均法主要通过对变换器的一个开关周期中的状态变量进行平均化,并以一个线性时不变的状态方程来近似处理,得到准确简化的系统小信号模型。对于LLC谐振变换器的小信号建模来说,忽略了大量的开关频率次谐波分量,建模过程滤除了较多有效信息而致使小信号模型存在较大误差^[22]。

扩展描述函数法能实现LLC谐振变换器的精确小信号建模。从分数阶系统的角度分析,对开关角频率 ω_s 进行扰动化的过程如下式所示:

$$\omega_s^\alpha = (\Omega_s + \hat{\omega}_s)^\alpha \quad (1)$$

式中: Ω_s 为稳态量; $\hat{\omega}_s$ 为小信号扰动量。

可以发现,当 α 为分数阶阶次时,不能对式(1)进行扰动量和稳态量的简单分离,导致无法顺利进行线性化推导。

从数值求解的角度看,分数阶微积分定义法和分数阶预估校正法的数值求解过程中,离不开对变换器的不同工作模态进行单独计算^[19]。LLC谐振变换器因其工作模态较多,增加了计算量和复杂程度。等效小参量法的应用场景中,变换器的工作拓扑不尽相同^[20]。介于LLC谐振变换器的上半周期与下半周期类似的特点,导致该方法在求解主振荡分量、一阶修正量和二阶修正量的系数矩阵 G 时,无法顺利求得周期稳态解析解。

介于传统的整数阶建模方法,例如扩展描述函数法,在描述半桥LLC谐振变换器的动态特性时,通常基于一些理想化的假设,所有的状态变量均被看作整数阶元件,而整数阶模型无法准确地描述谐振电容器的分数阶特性,及其分数阶特性对LLC谐振变换器系统的影响。

在精确表征系统分数阶特性的前提下,为避开不同的分数阶微积分定义带来的争议的同时,简化计算和验证过程。根据所提分数阶微积分的LLC谐振变换器数学模型,采用Oustaloup滤波器算法进行求解。

首先,根据文献[15]中提出的几种分数阶电容模型,选用简化分数阶模型,该模型以理想分数阶电容和等效串联电阻ESR串联构成,使得分数阶等效阻抗模型精简的同时保证了建模的精确性^[15],其结构如图2所示。替换整数阶电容后可以得到分数阶系统的电路拓扑图,如图3所示。在对半桥LLC谐振变换器的建模中,需要考虑电

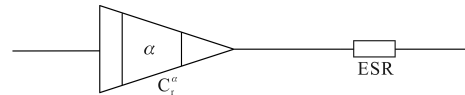


图2 简化分数阶等效模型

Fig.2 Simplified fractional-order equivalent model

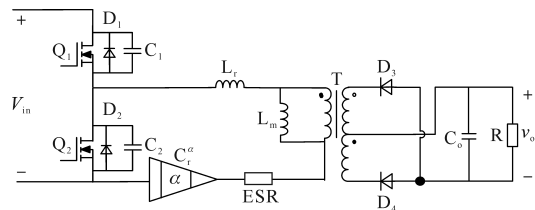


图3 分数阶电路拓扑图

Fig.3 Topological diagram of fractional-order circuit

容的分数阶特性。根据分数阶拓扑模型,在引入简化分数阶等效模型后,基于该模型进行数学模型的推导。

2.2 分数阶LLC谐振变换器数学模型

通过基尔霍夫电压和电流定律,可得到描述半桥LLC谐振变换器系统状态变量之间相互作用的数学模型,其关系表达式如下式所示:

$$\frac{di_{Lr}}{dt} = \frac{V_{in}}{L_r} - \frac{v_{Cr}}{L_r} - \frac{nv_o}{L_r} \text{sign}(i_{Lr} - i_{Lm}) \quad (2)$$

$$\frac{d^\alpha v_{Cr}}{dt^\alpha} = \frac{i_{Lr}}{C_r} \quad (3)$$

$$\frac{di_{Lm}}{dt} = \frac{nv_o}{L_m} \text{sign}(i_{Lr} - i_{Lm}) \quad (4)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{n}{C_o} |i_{Lm} - i_{Lr}| - \frac{v_o}{RC_o} \quad (5)$$

式中: i_{Lr} , v_{Cr} , i_{Lm} , v_o 分别为谐振电感电流、谐振电容电压、励磁电感电流、输出负载电压; V_{in} 为输入电压; n 为变压器原边副边匝数比; R 为负载电阻; C_o 为输出滤波电容。

sign 函数表达式如下式所示:

$$\text{sign}(i_{Lr} - i_{Lm}) = \begin{cases} -1 & i_{Lr} - i_{Lm} < 0 \\ 1 & i_{Lr} - i_{Lm} \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

基于Oustaloup滤波器算法,可得到分数阶微积分的半桥LLC谐振变换器的仿真模型,如图4所示。该算法是一种有理逼近算法,通过对特定频率范围的分数阶微分算子 s^α 在相频、幅频特性曲线进行拟合,是实现分数阶微积分计算的重要方式之一,其计算公式如下:

$$s^\alpha = K \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k} \quad (7)$$

其中

$$\omega'_k = \omega_b (\omega_h / \omega_b)^{[k + N + 0.5(1 - \alpha)] / (2N + 1)} \quad (8)$$

$$\omega_k = \omega_b (\omega_h / \omega_b)^{[k + N + 0.5(1 + \alpha)] / (2N + 1)} \quad (9)$$

$$K = (\omega_\mu / \omega_h)^\alpha \quad (10)$$

$$\omega_\mu = (\omega_h \cdot \omega_b)^{1/2} \quad (11)$$

式中: N 为滤波器拟合阶数; α 为分数阶阶数; ω_h , ω_b 分别为拟合频段的上限和下限。

本文根据半桥LLC谐振变换器的工作频率选择拟合分数阶算子的频段为 $[1e-7, 1e7]$ 、拟合阶数为10。

图4中, Fractional Int s^{-q} 模块是算法的实现模块,利用Matlab/Simulink的模块封装技术进行封装后得到。

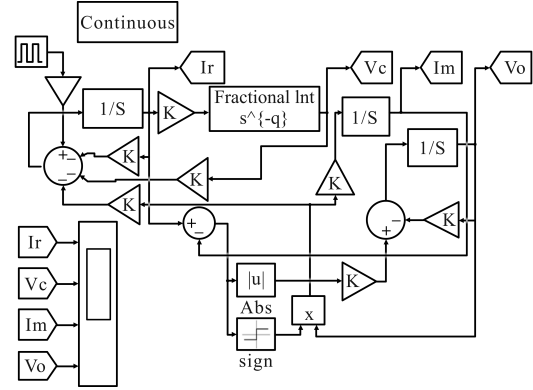


图4 Matlab/Simulink 仿真模型

Fig.4 Matlab/Simulink simulation mode

3 验证分析

3.1 仿真验证

为验证第2节所提半桥LLC谐振变换器分数阶等效模型的有效性,在PLECS软件中搭建了240 W的分数阶半桥LLC谐振变换器的仿真模型,如图5所示。仿真输入电压 $V_{in}=400$ V,谐振电感 $L_r=60e-6$ H,励磁电感 $L_m=230e-6$ H;谐振电容 $C_r=30e-9$ F,变压器变比 $n=9$,输出电容 $C_o=6 \times 470e-6$ F,输出电阻 $ESR=30e-3/6 \Omega$,负载电阻 $R=2.4 \Omega$,开关频率 $f_s=100$ kHz。

基于频域特性近似的分抗逼近原理,构建了如图6所示的无源阻抗网络,其中分数阶电容元件由电容电阻并联组成的分抗电路模型来模拟。

随即,通过Oustaloup滤波器算法得到拟合传递函数并进行部分分式分解,与分抗电路传递函

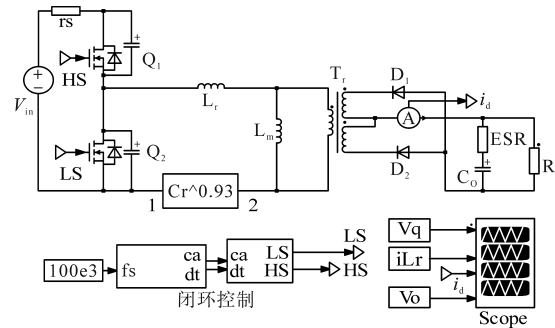


图5 分数阶LLC电路仿真模型

Fig.5 Simulation model of the fractional-order LLC circuit

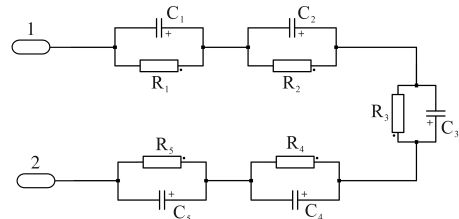


图6 分数阶电容等效电路模型

Fig.6 Equivalent circuit model of the fractional-order capacitance

数比较即可获得分抗模型的元件参数。当分数阶阶次 $\alpha=0.9, \alpha=0.93$,谐振电容为 $30e-9$ F时的理想分数阶电容、电阻参数取值如表1所示。

表1 分抗电路元件参数

| $\alpha=0.9$ | | $\alpha=0.93$ | |
|--------------|----------|---------------|----------|
| R/Ω | C/F | R/Ω | C/F |
| 0.12e-03 | 3.40e-09 | 7.28e-05 | 8.38e-09 |
| 0.012 | 5.70e-09 | 0.05 | 1.38e-08 |
| 1.20 | 9.5e-09 | 37.71 | 2.26e-08 |
| 1.2e-02 | 1.59e-08 | 69 377.3 | 1.45e-08 |
| 1.2e-04 | 2.63e-08 | 50e-06 | 1.68e-05 |
| 2.97e-06 | 1.78e-08 | — | — |
| 2.97e-08 | 2.90e-06 | — | — |

通过使用不同阶次的分抗模型对分数阶电容进行替换,模拟仿真可得不同电容阶次 α 的条件下,半桥LLC谐振变换器处于欠谐振状态下的主要波形。当 $\alpha=0.93$ 时,其数学模型与仿真模型的状态变量波形对比结果如图7所示。

对比验证结果显示,谐振电容电流 i_{Cr} 峰峰值

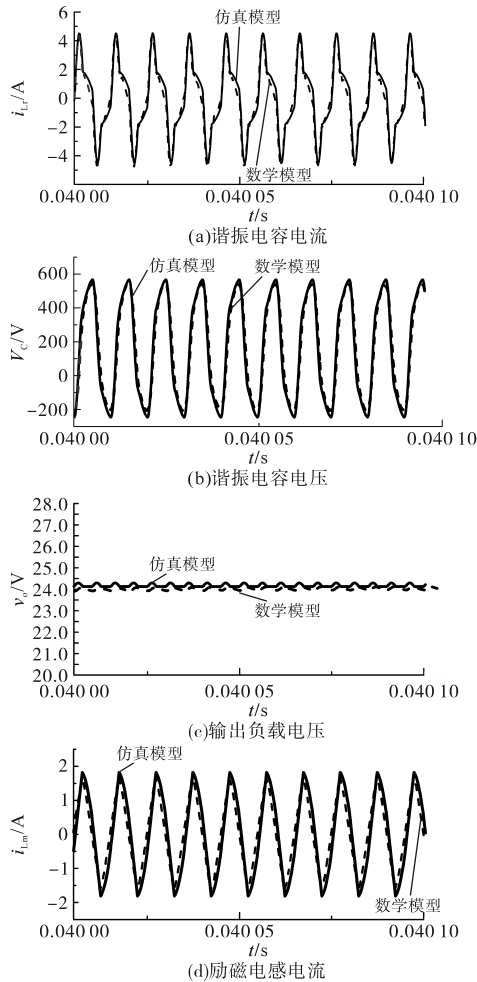


图7 不同模型状态变量对比

Fig.7 Contrast of the state variables for different models

在数学模型和仿真模型的结果分别约为8.8 A, 9.03 A。同一开关周期中,仿真模型与数学模型所体现的二元谐振和三元谐振周期百分比约为50%,周期为 $10 \mu s$ 。谐振电容电压 V_c 峰峰值约为800 V,上下半周期斜率变化趋势相近。仿真模型输出电压 v_0 在24.1~24.3 V范围内波动,而数学模型输出电压 v_0 波动范围为23.9~24.1 V,相对误差为0.8%。励磁电感电流 i_{lm} 峰峰值对比可发现,仿真模型与数学模型峰峰值均接近3.64 A,不同方式所得波形吻合较好。根据半桥LLC谐振变换器的分数阶数学模型,可发现系统状态变量会受到谐振电容器分数阶阶次取值的影响。

为验证这一现象以及探究电容器分数阶阶次对半桥LLC谐振变换器的影响,根据构造的分数阶电容等效电路,对比了分数阶阶次 $\alpha=0.9, \alpha=0.93, \alpha=1$ 时的各状态变量仿真结果,如图8所示。从图8中可发现谐振电容的分数阶阶次对半桥LLC谐振变换器电路输入电压、谐振电流、励磁电流、整流二极管电流、输出电压均产生了影响。

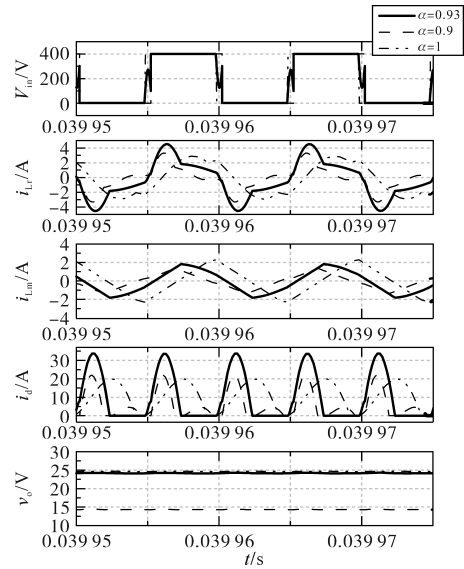


图8 状态变量各阶次对比

Fig.8 Comparison of different orders of state variables

通过分析可得,0.9阶和1阶的系统谐振腔输入电压上升沿和下降沿较为平整,0.93阶上升沿和下降沿存在突变,但周期均为 $10 \mu s$ 。随着谐振电容阶次由0.9阶向1阶增加,谐振电容电流 i_{Cr} 波形中三元谐振状态在开关周期中的持续时间占比随之降低;谐振电容电流峰峰值指标中,0.9阶时谐振电容电流峰峰值为6.62 A,0.93阶时谐振电容电流峰峰值为9.027 A,1阶时谐振电容电流峰峰值为5.603 A,随着分数阶阶次的增加,谐

振电容电流达到峰值的时刻延后,且峰峰值存在先上升后下降的趋势。

从励磁电感电流 i_{L_m} 峰峰值对比可发现,谐振电容器为1阶时 i_{L_m} 峰峰值为4.57 A,谐振电容器为0.93阶时 i_{L_m} 峰峰值为3.64 A,谐振电容器为0.9阶时 i_{L_m} 峰峰值为2.7 A。同一周期中,谐振电容电流 i_{L_r} 与励磁电感电流 i_{L_m} 到达峰值的时间随阶次变化的趋势一致;三元谐振状态时,两状态变量的波形变化趋势同样类似。

副边二极管电流 i_d 中,谐振电容器为0.9阶、0.93阶和1阶时系统的副边二极管电流 i_d 波动范围分别为0~21.9 A,0~33.7 A,0~19.8 A,随着阶次的增加,变化趋势存在先上升再下降的特征。从副边二极管电流 i_d 和谐振电容电流 i_{L_r} 的三个阶次对比可以发现,三元谐振持续时间和副边二极管电流为0的持续时间成正相关性,正好反映了三元谐振状态时变压器原副边不传递能量的特点。

当谐振电容器为不同分数阶阶次时的输出电压 v_o 的波动范围分别是:1阶为24.5~24.7 V;0.93阶为24.1~24.3 V;0.9阶为14.2~14.4 V。可以发现,随着分数阶阶次的变化,其对输出电压同样存在影响。

通过对半桥LLC谐振变换器各状态变量的波形对比可知,谐振电容器为0.93阶和1阶时的系统状态变量参数变化趋势更相近。相较于谐振电容器为0.9阶的情况,谐振电容器分数阶阶次为0.93时,理论分析与仿真结果更符合240 W LLC谐振变换器的参数设计,且更能准确地表征分数阶电容对半桥LLC谐振变换器系统工作特性的影响。

3.2 测试平台

搭建了以STM32F334为控制核心的240 W测试平台。LLC谐振变换器测试样机通过STM32F334给出的高频方波,将输入的400 V直流电变为400 V与0 V之间跳变的高频交流电,并将高频交流电送至谐振腔。谐振腔中包含了高频变压器,在保证输出侧与输入侧电气隔离的情况下,将原边交流电传输至副边全波整流模块,全波整流后经过电容滤波,得到平稳的24 V直流电。具体元件参数为:输入电压 $V_{in}=400$ V,输出电压 $v_o=24$ V,输出功率 $P=240$ W,励磁电感 $L_m=230$ μ H,谐振电感 $L_r=60$ μ H,谐振电容 $C_r=30$ nF,开关频率 $f_s=118$ kHz。

选型部分工作具体如下:

1)主变压器:选定磁芯型号为PQ35/35,为方便设计,节省磁芯设计体积,设计原副边匝数比 $N_p:N_s=18:2$ 。

2)谐振电感:经计算LLC谐振变换器的谐振电感取值60 μ H,主变压器漏感取值为5 μ H,因此仅需设计一个55 μ H的独立谐振电感。选择磁芯为PQ26/25,经计算,设计谐振电感的匝数为16匝。

3)谐振电容:根据半桥LLC谐振变换器通流和耐压能力,选用两个耐压值630 V、容值15 nF的薄膜电容并联组成谐振电容。

4)输出电容:选取6个耐压值为35 V、容值为470 μ F及ESR为30 m Ω 的电解电容并联作为输出电容。

5)原边开关管:选择耐压值650 V的新洁能NCE65TF180D型号的mos管。

6)副边开关管:选择耐压值100 V的新洁能NCEP039N10D型号的mos管。

为实现分数阶电容的特性验证环境,在此选择分数阶阶次 $\alpha=0.93$ 的分数阶等效模型进行实物验证,测试平台如图9所示。同样地,引入分抗模型来代替谐振电容进行特性验证,分抗电路中的电容、电阻元件参数参照仿真分抗模型进行搭建,分数阶半桥LLC谐振变换器样机如图10所示。240 W半桥LLC谐振变换器实验样机整数阶和0.93阶的对比实验波形如图11所示。

根据实验波形,表2给出了谐振电容电流峰值 i_{L_r-pp} 和三元谐振周期百分比 e_1 基于PLECS物

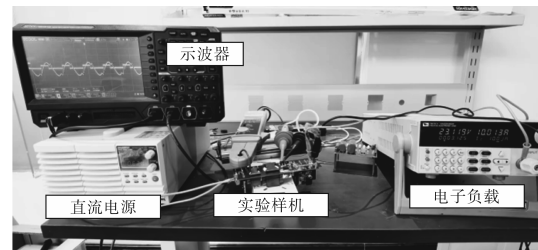


图9 测试平台图

Fig.9 Graph of the test platform

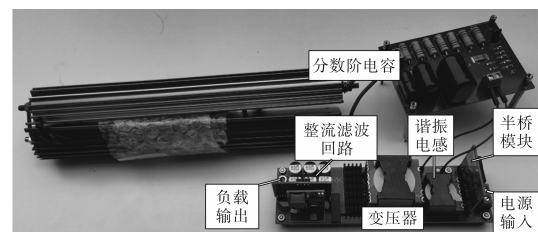
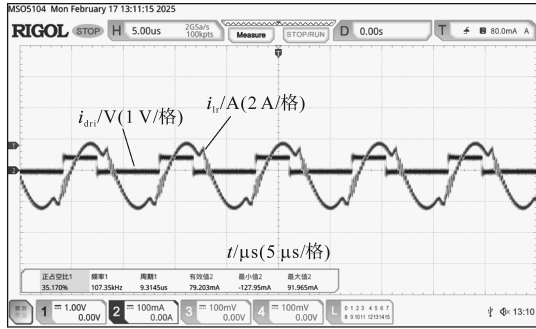


图10 分数阶半桥LLC谐振变换器样机

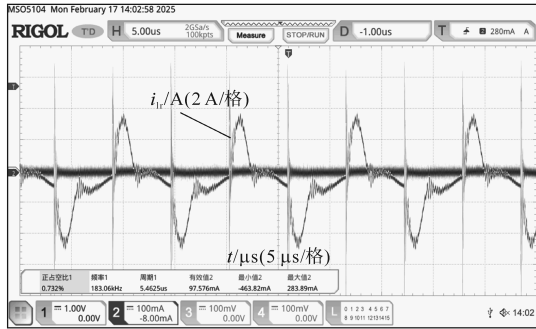
Fig.10 Prototype of fractional-order half-bridge LLC resonant converter

理仿真模型与实验结果的数据对比。表3为仿真与实验数据相对误差结果。

体现系统的分数阶特性变化,实测效果与仿真结果基本吻合。



(a)整数阶谐振电流波形



(b)0.93阶谐振电流波形

图11 实验波形

Fig.11 Experimental waveforms

表2 仿真与实验数据对比

Tab.2 Comparison of simulation and experimental data

| | i_{Lr-pp}/A | $e_i/\%$ |
|-----------------------|---------------|----------|
| $\alpha=1$ (PLECS) | 5.603 | 14.27 |
| $\alpha=0.93$ (PLECS) | 9.027 | 53.15 |
| $\alpha=1$ (实验) | 4.398 | 11.32 |
| $\alpha=0.93$ (实验) | 8.733 | 56.72 |

表3 仿真与实验数据相对误差

Tab.3 Relative error between simulation and experimental data

| | 相对误差/ $\%$ | |
|---------------|-------------|-------|
| | i_{Lr-pp} | e_i |
| $\alpha=1$ | 21.51 | 20.67 |
| $\alpha=0.93$ | 3.26 | 6.72 |

经分析可得,基于仿真模型和实验结果的整数阶谐振电容电流峰峰值和三元谐振周期百分比结果相近。谐振电容分数阶阶次 $\alpha=0.93$ 时,物理仿真波形与实验结果一致性较高,且实验波形中二元谐振状态和三元谐振状态波形变化趋势与仿真结果吻合较好。谐振电容电流峰峰值相对误差为3.26%,三元谐振周期百分比相对误差为6.72%。因此,由整数阶和0.93阶半桥LLC谐振变换器验证结果可见,相较于整数阶模型,所提基于分数阶的半桥LLC谐振变换器模型更能

4 结论

本文计及谐振电容器的分数阶“参数漂移”特性,建立了半桥LLC谐振变换器的分数阶等效模型,并利用所建立的分数阶等效模型,探讨了谐振电容器的分数阶特性对半桥LLC谐振变换器系统的影响。基于Oustaloup滤波算法,通过PLECS仿真软件构建了物理仿真模型,并搭建了基于STM32F334控制芯片的240 W实验测试平台。验证结果表明,所提分数阶等效模型能较为准确地表征谐振电容器“参数漂移”现象对半桥LLC谐振变换器系统工作特性的影响,同一周期中,基于整数阶和分数阶模型的半桥LLC谐振变换器的输出电压、谐振电容电流与仿真、实验验证结果基本一致。因此,所提基于分数阶微积分的建模方法能为半桥LLC谐振变换器的参数设计提供更精确有效的理论依据。

参考文献

- [1] ZUO Y, PAN X W, WANG C. A reconfigurable bidirectional isolated LLC resonant converter for ultra-wide voltage-gain range applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(6): 5713-5723.
- [2] TENG J H, CHEN S S, CHOU Z X, et al. Novel half-bridge LLC resonant converter with variable resonant inductor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(6): 6952-6962.
- [3] MENKE M F, SEIDEL Á R, TAMBARA R V. LLC LED driver small-signal modeling and digital control design for active ripple compensation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1): 387-396.
- [4] GUO Z Q, HUANG Z J, CHEN Z Y. Small-signal modeling and comparisons of the pulse frequency modulation and time shift control for the LLC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(1): 526-539.
- [5] 卢世蕾,孙凯,曹国恩,等. 面向光伏直流升压系统的高压大功率LLC谐振变换器设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5970-5983.
- [6] LU S L, SUN K, CAO G E, et al. A design method of high voltage and high power LLC resonant converter for photovoltaic DC voltage boosting system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5970-5983.
- [7] 石旭东,成博源,鲍中航,等. 基于广义状态空间平均的LLC谐振变换器建模及稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 146-155.
- [8] SHI X D, CHENG B Y, BAO Z H, et al. Modeling and stability

- analysis of an LLC resonant converter based on generalized state space averaging[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(12):146-155.
- [7] 颜湘武,刘新新,孙磊,等. LLC谐振变换器典型分析方法对比[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(4):128-132.
YAN X W, LIU X X, SUN L. Comparative study of typical analysis methods for the LLC resonant converter[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(4):128-132.
- [8] CHEN Y F, XIAO W X, GUAN Z P, et al. Nonlinear modeling and harmonic analysis of magnetic resonant WPT system based on equivalent small parameter method[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(8):6604-6612.
- [9] WANG H R, WANG H, ZHU G R, et al. An overview of capacitive DC-links-topology derivation and scalability analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(2):1805-1829.
- [10] LIAO Z T, BROOKS N C, PILAWA-PODGURSKI R C N. Design constraints for series-stacked energy decoupling buffers in single-phase converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(9):7305-7308.
- [11] MA K, WANG H, BLAABJERG F. New approaches to reliability assessment: using physics of-failure for prediction and design in power electronics systems[J]. *IEEE Power Electronics Magazine*, 2016, 3(4):28-41.
- [12] 田号,徐迪飞. 铝电解电容失效分析[C]//2020年中国家用电器技术大会:2020年中国家用电器技术大会论文集,宁波, 2020:1916-1921.
TIAN H, XU D F. Analysis on failure of aluminum electrolytic capacitor[C]//2020 China Household Electrical Appliances Technical Conference: Proceedings of 2020 China Household Electrical Appliances Technical Conference, Ningbo, 2020:1916-1921.
- [13] XU J L, GU L, RIVAS-DAVILA J. Effect of class 2 ceramic capacitor variations on switched-capacitor and resonant switched-capacitor converters[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(3):2268-2275.
- [14] 李迪. V2G车载变换器分数阶控制策略研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2023.
LI Di. Research on fractional control strategy of V2G on-board converter[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [15] CHEN X, XI L, ZHANG Y N, et al. Fractional techniques to characterize non-solid aluminum electrolytic capacitors for power electronic applications[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2019, 98(4):3125-3141.
- [16] 谭程,丁祝顺,滑艺,等. DCM-PCCM二次型Boost变换器的分数阶建模与分析[J]. *物联网技术*, 2018, 8(7):50-53.
TAN C, DING Z S, HUA Y, et al. Fractional-order modeling and analysis of DCM-PCCM quadratic Boost converter[J]. *Internet of Things Technologies*, 2018, 8(7):50-53.
- [17] FU W L, LI J Y, ZHANG Y N, et al. Design and performance analysis of a non-isolated DC-DC converter with a fractional-order output filtering capacitor[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2024, 71(9):4336-4340.
- [18] 胡旭旭,范秋华. Buck-Boost变换器断续模式下的分数阶建模与分析[J]. *现代电子技术*, 2020, 43(24):126-130, 134.
HU X X, FAN Q H. Fractional-order modeling and analysis of Buck-Boost converter in discontinuous conduction mode[J]. *Modern Electronics Technique*, 2020, 43(24):126-130, 134.
- [19] CAO W Z F, CHEN X. On the influence of fractional-order resonant capacitors on zero-voltage-switching quasi-resonant converters[J]. *Electronics*, 2024, 13(13):2562.
- [20] WEN D R, CHEN Y F, ZHANG B, et al. Transient analysis of ZCS PWM converter based on equivalent small parameter method[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(4):4188-4199.
- [21] CHEN Y F, XIAO W X, GUAN Z P, et al. Nonlinear modeling and harmonic analysis of magnetic resonant WPT system based on equivalent small parameter method[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(8):6604-6612.
- [22] 赵鹏程. 半桥LLC谐振DC-DC变换器的研究[D]. 北京:北方工业大学,2024.
ZHAO P C. Research on half bridge LLC resonant DC-DC converter[D]. Beijing:North China University of Technology, 2024.

收稿日期:2025-02-19

修改稿日期:2025-03-13