

## The Research on PFM+PWM Hybrid Control Method of LLC Resonant Converter \*

BAO Erheng<sup>1\*</sup>, ZHENG Dacheng<sup>2</sup>, HE Ling<sup>1</sup>

(1. Department of Automation Engineering Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou Guangdong 510925, China; 2. Shenzhen Huarui New Energy Technology Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518110, China)

**Abstract:** Under the influence of specific resonant tank parameter design and circuit parasitic parameters, the LLC resonant converter usually has such a problem that the frequency adjustment effect on the circuit gain is greatly weakened or even lost adjustment, this makes it difficult to design LLC resonant converter in a wide range of output voltage applications. In the digital control power supply, the PFM combined with phase shift control or PWM control is an effective solution. The problems existing when LLC resonant converter adopts single PFM or PWM control under certain conditions are analyzed, and effective hybrid control design methods are put forward. At last, the design practice of 2 000 W LLC resonant converter with a wide range of output voltage is used as an example for experimental \ verification.

**Key words:** LLC resonant converter; PWM; PFM; hybrid control

EEACC: 1320 doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2022.01.017

## LLC 谐振变换器 PFM+PWM 混合控制方法研究 \*

包尔恒<sup>1\*</sup>, 郑大成<sup>2</sup>, 何 玲<sup>1</sup>

(1. 广东水利电力职业技术学院自动化工程系, 广东 广州 510925; 2. 深圳市华瑞新能源技术有限公司, 广东 深圳 518110)

**摘 要:** LLC 谐振变换器在特定的谐振腔参数设计及电路寄生参数的影响下, 通常会出现高频段频率对增益的调节作用大大减弱甚至失去调节作用的现象, 造成其在宽范围输出电压应用场合的设计困难, 在数字化控制电源中, PFM 结合移相控制或 PWM 控制是有效的解决途径。分析了特定条件下 LLC 谐振变换器采用单一的 PFM 或 PWM 控制时存在的问题, 提出了有效的 PFM+PWM 混合控制设计方法, 并以 2 000 W 宽范围输出电压 LLC 谐振变换器设计实践为例进行了实验验证。

**关键词:** LLC 谐振变换器; 脉冲宽度调制; 脉冲频率调制; 混合控制

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2022)01-0102-04

从 LLC 的频率-增益特性可知(见图 1), 随着输出电压的降低和负载的减小, 需要不断提高开关频率<sup>[1]</sup>。在低压轻载或空载时开关频率达到最大值, 该最大值和谐振腔参数的设计有关, 如励磁电感和谐振电感的比值越大(高变换效率设计中<sup>[2-3]</sup>), 特性曲线越平坦, 需要的开关频率也就越高, 由于开关器件开关速度的限制, 开关频率不可能无限制的高, 因而单纯的 PFM(Pulse Frequency Modulation, 脉冲频率调制)控制很难满足宽范围输出电压的应用场合<sup>[4-5]</sup>, 而目前常见的 LLC 谐振变换器专用模拟控制芯片只

能进行 PFM 控制, 因此无法满足要求。近年在较为先进的系统级电源产品中(如通信电源模块和充电桩模块等), 出现了基于 DSP 数字控制的 PFM+PWM(Pulse Width Modulation, 脉冲宽度调制)或 PFM+移相控制的混合控制方式<sup>[6]</sup>, 出发点大多是出于解决宽范围输出电压应用场合中低压轻载时开关频率过高或高频段频率调节作用减弱甚至失调的问题, 但如何进行混合控制方式下控制区域的划分是设计的难点, 本文以 2 kW 宽范围输出电压通信电源模块对此问题进行分析 and 实验验证, 为混合控制方式的实施提供参考。

项目来源: 2020 年度广东省普通高校特色创新项目(2020KTSCX261)

收稿日期: 2021-01-08 修改日期: 2021-04-10

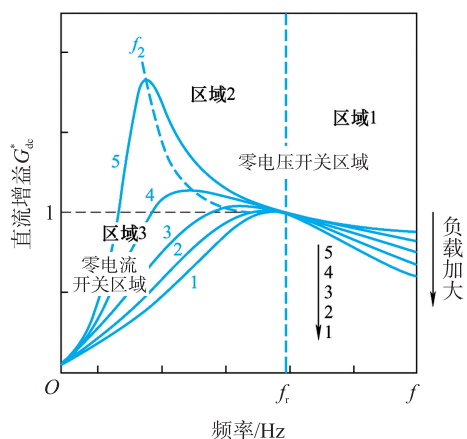


图 1 LLC 特性曲线

## 1 宽范围输出电压 LLC 谐振变换器分析

### 1.1 PFM 控制模式

在宽范围输出电压设计中,通常将额定输出对应的开关频率设置在谐振频率附近(略低于谐振频率),根据 LLC 谐振变换器增益-频率特性曲线,输出电压越低、负载越轻,频率越高,实际应用中存在下述问题:(1)对于诸如通信电源模块的低压限流态,由于输出电压低而输出电流大,原边存在大的谐振电流的同时开关频率远远高于谐振频率,开关管有在谐振电流峰值处关断的可能性,高的开关频率加上大的关断电流,导致开关关断损耗大大增加;(2)在低压轻载/空载时,开关频率达到最高,对于功率开关,结电容的存在限制了开关频率(设计中进行最高开关频率的设置),因此在低压轻载时变换器将无法进行频率对增益的调节;(3)在追求高效率的变换器谐振腔参数设计中(如大的励磁电感和谐振电感比值),特性曲线将趋于平坦,导致高频段的特性呈现直线特性或由于寄生参数的存在有可能出现上翘,PFM 控制失去单调性。基于上述分析,在宽范围输出电压应用场合,单纯的 PFM 控制难以满足设计要求。

### 1.2 PWM 控制模式

针对 2.1 分析的宽范围输出电压下 PFM 控制存在的问题,通常设计方法是设置一个 PFM 控制模式的最高工作频率,频率高于最高工作频率后进入 PWM 控制模式,即 PWM 控制的 LLC 谐振变换器<sup>[7-8]</sup>。下面对 PWM 控制模式存在的问题进行分析:对某设计参数的半桥 LLC 变换器(图 2),在占空比 40%时对其进行仿真分析(图 3),在  $Q_1$  关断后的  $t_1 \sim t_2$  段,由于谐振电流通过  $Q_2$  的体二极管在续流(对应的变换器工作模态如图 2 中粗线及箭头所

示),在电流过零前  $Q_2$  的驱动信号出现时刻并不能改变电路的工作状态,即不能调节输出电压的大小<sup>[9]</sup>。占空比越大,这个失控时间段越长。在小占空比下,当  $Q_2$  的驱动信号在  $t_2$  时刻后出现时,占空比的变化才能引起电路工作状态改变,从而进行输出电压的调节,也就是只有在小占空比下才不存在输出电压 PWM 控制的失控区。对于实际设计的 LLC 谐振变换器,这个临界的占空比大小是多少?工程设计上通常通过仿真和实验手段确定(见本文实例)。

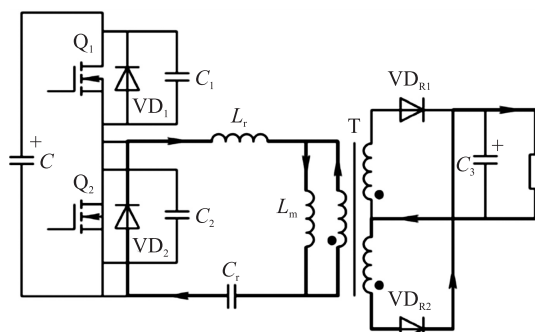


图 2 半桥变换器及工作模态

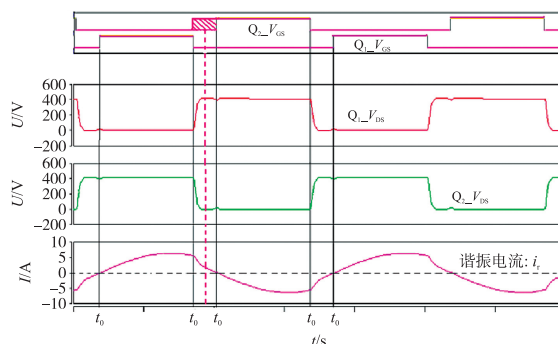


图 3 PWM 控制 40% 占空比仿真波形

### 1.3 PFM+PWM 混合控制模式

从上述分析可知:在宽范围输出电压应用场合, PWM 控制大占空比时的失控和 PFM 控制高频段的限制,导致单一的 PFM 或 PWM 控制都难以实现 LLC 谐振变换器的控制要求。根据 LLC 谐振变换器的频率-增益特性,由于占空比调节和频率调节的方向相反,即 PFM 高频段对应 PWM 控制的小占空比段,因此合理设计 PWM+PFM 混合控制就可以实现各自单一控制模式的缺陷互补,具体如下:宽范围输出电压的低压轻载段(高频段),PFM 控制作用减弱,但低压轻载段正好对应 PWM 控制具有良好调节特性的小占空比区段,该区段采用 PWM 控制正好可以实现 PFM 控制存在的问题;在高压输出和负载电流较大的区段对应频率-增益特性的陡峭段(低频段),调频模式具有良好的调节特性,因此将

两者结合可以解决宽范围输出电压应用中输出电压的良好调节作用。

## 2 设计实例及实验

以后级直流-直流变换部分采用半桥 LLC 谐振变换拓扑的 2 kW 通信电源模块设计为例, LLC 变换器输入电压为直流 400 V, 电源模块要求的输出外特性如图 4 所示, 基于上述三种控制模式的分析并结合外特性要求, 对混合控制的区间规划如图 5。

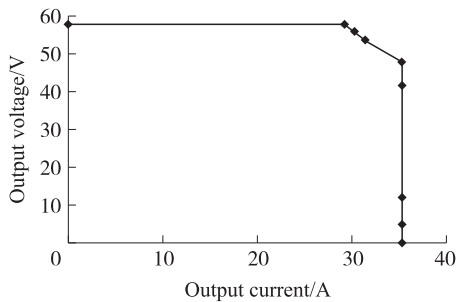


图 4 变换器输出特性

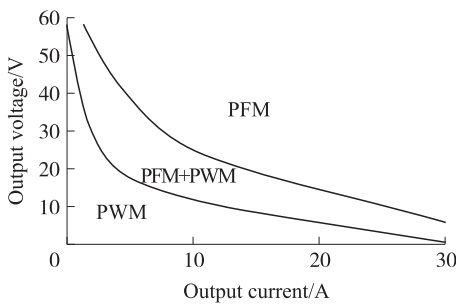


图 5 混合控制区间规划图

半桥 LLC 谐振变换器的增益-频率特性表达式为:

$$M = \frac{0.5}{n \sqrt{\left\{ 1 + \frac{L_r}{L_m} \left[ 1 - \left( \frac{f_r}{f_s} \right)^2 \right]^2 \right\}^2 + Q_s^2 \left( \frac{f_s}{f_r} - \frac{f_r}{f_s} \right)^2}}$$

$$Q_s = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{R_e}$$

$$R_e = \frac{8}{\pi^2} \cdot n^2 \cdot \frac{V_o^2}{P_o}$$

$f_s$  为开关频率,  $f_r$  为谐振频率,  $R_e$  为折算到原边侧的等效负载电阻,  $n$  为变压器原副边匝数比,  $L_r$  为谐振电感量,  $L_m$  为励磁电感量,  $Q_s$  为品质因数,  $P_o$  为输出功率,  $V_o$  为输出电压。本文设计采用的谐振腔参数如下:

$$L_r = 20 \mu\text{H}$$

$$L_m = 130 \mu\text{H}$$

$$C_r = 0.112 \mu\text{F}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r \cdot C_r}} = 106 \text{ kHz}$$

$$K = \frac{L_m}{L_r} = \frac{130 \mu\text{H}}{20 \mu\text{H}} = 6.5$$

$$n = 15 : 4 : 4$$

对上述设计参数的 LLC 变换器在 PWM 控制模式下进行测试: 输入电压 400 VDC、6 Ω 恒阻性负载下将频率固定为最高限制频率 350 kHz, 测得占空比和输出电压的关系曲线如图 6 (横坐标为占空比、纵坐标为输出电压)。从实验测试结果可以看出: 占空比达到 30% 后, 增益-占空比特性变得非常平坦甚至有一段递减的区域, 也就是大占空比下存在不单调现象。

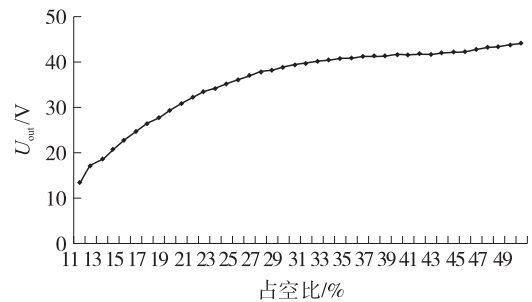


图 6 PWM 态占空比-输出电压测试曲线

图 7 测量了开关频率 357 kHz 下前述  $t_1$  到  $t_2$  的时间为 396 ns ( $C_1$  为  $Q_2$  驱动  $V_{GS}$ ;  $C_2$  为  $Q_2$  电压  $V_{DS}$ ;  $C_3$  为  $Q_2$  电流  $I_{DS}$ ), 该时间段的特征在于 MOSFET 的  $V_{DS}$  电压为零, 说明其体二极管在续流, 此时不管开关是否有驱动, 传递到副边的能量都是一样的, 占空比的改变不影响输出电压, 即前述的 PWM 控制模态的不单调现象。加上死区时间 190 ns (设置值) 共 586 ns, 50% 占空比对应时间为 1 400 ns, 则可以计算 PWM 不单调的区间长度为:  $(586 / 1\ 400) / 2 = 21\%$ , 也就是说此时占空比 50% 和 29% 输出电压是一样的, 即占空比在 29~50% 范围不单调。

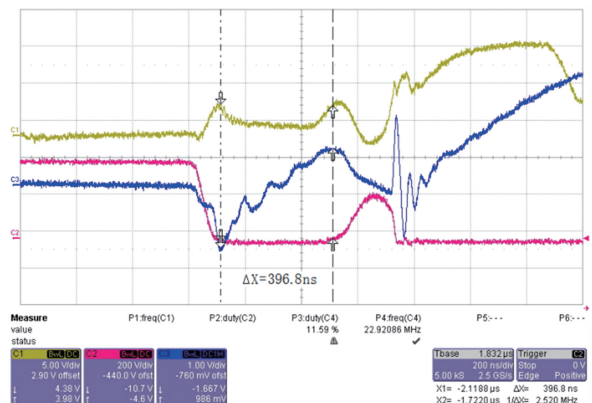


图 7 不单调占空比区间测试

基于实验测试, 结合前述对 PFM、PWM 及 PFM+PWM 控制模式的分析, 对该变换器混合控制模式设计方法如图 8<sup>[9-10]</sup>, 进一步说明如下: 纵坐标表示频率 & 占空比 (frequency & Duty cycle, f&D)。在宽范围输出电压的低压轻载输出状态, LLC 谐振变换器易呈现频率-增益特性曲线平坦, 导致 PFM 控制的不单调, 采用单一的 PWM 控制, 开关频率保持设置的最高开关频率, 即 OA 段; 当占空比增大到一定值出现不单调时, 采用 PFM+PWM 混合控制模式, 即 AB 段 (开关频率从最大值开始降低而占空比从较小值逐渐增大), 该模式对应宽范围输出电压的中压段和中轻载输出状态; 在变换器工作的额定态附近, 由于特性曲线较为陡峭, PFM 控制模式具有良好的调节特性, 采用单纯的 PFM 控制 (占空比保持最大占空比 50% 不变), 即 BC 段。

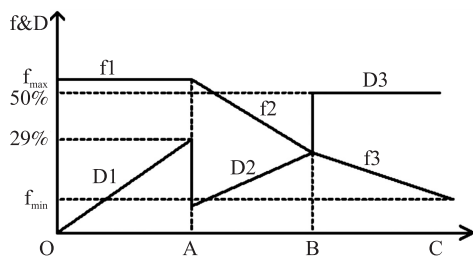


图 8 混合控制方案

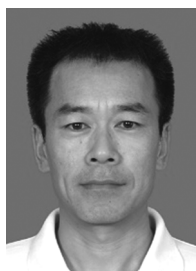
### 3 结论

LLC 谐振变换器在宽范围输出电压应用中, 单一的 PFM 或 PWM 控制都存在各自的局限性, 根据实验或仿真手段可以构建合理的混合调制方案。本文在

分析单一 PFM 或 PWM 控制局限性的基础上, 提出了 PFM+PWM 混合控制的设计方法, 对该应用场合且额定态高效率要求的 LLC 谐振变换器设计具有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] Yang B. Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System [D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [2] 牛志强, 王正仕. 高效率半桥 LLC 谐振变换器的研究 [J]. 电力电子技术, 2012, 46(6): 64-65.
- [3] 胡海兵, 王万宝, 孙文进, 等. LLC 谐振变换器效率优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 48-56.
- [4] 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.
- [5] Musavi F, Craciun M, Gautam D S, et al. An LLC Resonant DC-DC Converter for Wide Output Voltage Range Battery Charging Applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 28(12): 5437-5445.
- [6] Yamamoto J, Zaitu T, Abe S, et al. PFM and PWM Hybrid Controlled LLC converter [J]. International Power Electronics Conference, 2014: 177-182.
- [7] Wu L M, Chen P S. Interleaved Three-Level LLC Resonant Converter with Fixed-Frequency PWM Control [J]. IEEE International Telecommunications Energy Conference, 2014: 1-8.
- [8] 管松敏, 陈乾宏. PWM 控制 LLC 变换器的工作原理和外特性分析 [J]. 电力电子技术, 2012, 46(3): 55-57.
- [9] 包尔恒, 王红涛, 高军. PWM 控制 LLC 谐振变换器的单调性研究 [J]. 电气传动, 2017, 47(6): 28-31.
- [10] 陈滨. 谐振拓扑电路的功率变换器的控制方法和装置. 艾默生网络能源系统北美公司: 中国, 200910117939 [P]. 2012-04-11.



包尔恒 (1971—), 男, 汉族, 甘肃定西人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力电子技术应用, beh880825@126.com。