

# 100 W 半桥 LLC 谐振变换器快速响应的控制策略设计

饶 刚, 严 帅, 金 彬, 王文军

(武汉科技大学 机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081)

**摘要:** 针对通信电源在负载设备有大数据流量涌入瞬间的动态特性问题, 提出一种基于变论域模糊 PID 控制的半桥 LLC 谐振变换器快速响应的控制策略设计。该设计在传统 PID 控制的基础上, 引入模糊数学及快速标量乘法运算控制理论; 并在 MATLAB/simulink 平台上对该策略与传统 PID 控制策略进行仿真比较; 最后, 搭建实验样机对该控制策略进行验证。通过实验对比发现, 变论域模糊 PID 控制下 LLC 谐振变换器响应速度更快, 具有更好的动态特性。

**关键词:** 变论域模糊 PID 控制; 半桥 LLC 谐振变换器; 通信电源; 动态特性

中图分类号: TN86

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211628

中文引用格式: 饶刚, 严帅, 金彬, 等. 100 W 半桥 LLC 谐振变换器快速响应的控制策略设计[J]. 电子技术应用, 2022, 48(2): 101-106, 110.

英文引用格式: Rao Gang, Yan Shuai, Jin Bin, et al. Control strategy design of 100 W fast response half bridge LLC resonant converter[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(2): 101-106, 110.

## Control strategy design of 100 W fast response half bridge LLC resonant converter

Rao Gang, Yan Shuai, Jin Bin, Wang Wenjun

(Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering,  
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** For the dynamic characteristics of communication power supply when there is an inflow of big data traffic, a design of half-bridge LLC resonant converter based on variable universe fuzzy-PID control is proposed, which can realize the fast response control. Based on the traditional-PID control, it's also adopted fuzzy mathematics and fast scalar multiplication algorithms that can help to improve the fast convergence characteristic of the system. Later, MATLAB/simulink software was used to simulate this strategy, compared with the traditional PID control scheme. Finally, an experimental prototype was designed for experimental verification. The experimental results show that the LLC resonant converter under variable universe fuzzy PID control has faster response speed and better dynamic characteristics.

**Key words:** variable universe fuzzy-PID control; half-bridge LLC resonant converter; communication power supply; dynamic characteristics

## 0 引言

随着通信技术的发展及网络覆盖深度与广度的不断提升, 人们对于通信质量的要求也逐渐增加, 而通信电源作为通信系统的“心脏”, 一直以来都是通信与电源领域的重点研究对象<sup>[1]</sup>。当前通信电源普遍采用两级式电路结构, 前级为有源功率因数校正电路, 后级为 LLC 谐振变换器电路<sup>[2]</sup>。随着开关频率的提升, LLC 拓扑电源的电路损耗相应增加, 而负载的非线性变化也对电源的快速响应特性提出了更高的要求<sup>[3]</sup>。故而, 如何提升电源快速响应特性一直是工程师在进行电源设计时需要考虑的难点。

由于谐振电源器件参数固化, 其动态特性的提升多从控制回路着手。文献[4]通过对谐振电容两端电压进

行分压串联实现电流信息的采样工作, 该种方案替代了电流互感器, 但实现过程较为复杂, 对电压电流的采样精度有较高要求。文献[5]提出一种将变频控制和移相控制相结合的控制方法, 基于该种方法能实现变换器的宽电压增益及全负载范围的软开关, 但控制环节较为复杂, 且 PI 环节的使用依旧存在控制回路对非线性负载跟随性差的问题。文献[6]依据轨迹控制需实时检测输出状态的特性提出一种简化的轨迹控制策略, 该策略在一定程度上消除了 PID 控制积分环节过大带来的输出过冲影响, 但在实际应用中受器件寄生参数及频率的影响较大, 而文中对此并没有进行深入探讨。此外, 平均电流控制<sup>[7]</sup>、电荷控制<sup>[8-9]</sup>、脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)与脉冲频率调制(Pulse Frequency Mod-

ulation, PFM)混合控制<sup>[10]</sup>等控制方式在参数匹配的情况下对LLC谐振变换器的动态特性都进行了提升,但在系统参数发生改变时,上述控制方式将难以获得理想的控制效果。

模糊PID控制是在传统PID控制技术的基础上发展来的一种控制技术,最开始多应用于对温度、蒸汽的精细化控制上<sup>[11-12]</sup>,由于它不依赖于被控对象的精确模型,对非线性负载工况具有良好的识别跟随特性,近年来,在工业生产中应用较为广泛。对于直流变换器的控制,文献[13]提出了一种基于模糊PID控制的多模态切换控制策略,解决了车载充电过程中电压过充及充电电流断流问题,但其复杂的控制流程也使得该种策略在实际应用时有一定的局限性。模糊控制本身也具有一定的局限性,主要体现在以下两方面:首先,传统模糊控制隶属度函数的论域分布具有很强的主观特性,多为设计人员按经验进行设计;其次,其论域在正常工作时是固定不变的,不能响应输入的改变。最早提出变论域模糊控制思想的是李洪兴教授<sup>[14]</sup>,利用伸缩因子对论域进行调整,以提升规则的利用率,从而提升系统的控制精度。

本文以100 W LLC谐振变换器为研究对象,通过对变换器特性进行分析,建立对应的数学模型;引入变论域模糊PID控制算法对其进行控制;并就控制方案响应速度于MATLAB中进行建模分析。对比模糊PID控制器和传统PID控制器的实际控制效果,验证本文所提方案的可靠性和实用性。

## 1 半桥LLC谐振变换器拓扑及特性分析

### 1.1 半桥LLC谐振变换器拓扑结构

图1所示为半桥LLC谐振变换器的拓扑结构图,其中,Q1与Q2为两个MOSFET开关管,C1与C2为MOS管寄生电容,其中Q1、Q2、C1、C2共同构成了变换器的开关网络;谐振电感L<sub>r</sub>、励磁电感L<sub>r</sub>与谐振电容C<sub>r</sub>则构成了变换器的谐振回路;变压器匝比为n,与之相连的是两个晶体二极管D1与D2,构成变换器的整流电路;C<sub>0</sub>为输出电容,R<sub>L</sub>为负载电阻。

### 1.2 变换器增益特性分析

基于基波近似法(FHA)<sup>[15]</sup>可将图1所示结构图简化为图2所示等效二端口网络。

LLC谐振变换器主要通过控制输入频率以实现谐

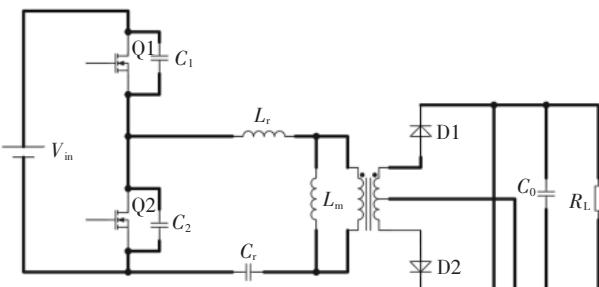


图1 半桥LLC谐振变换器拓扑结构图

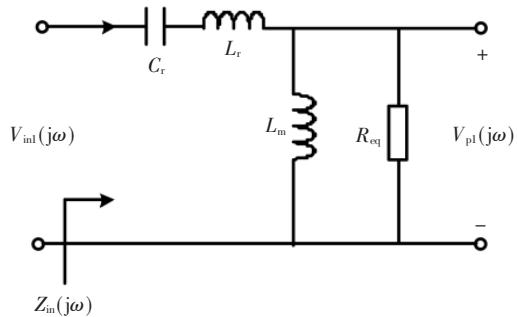


图2 LLC谐振变换器的FHA等效二端口网络

振腔内阻抗分配的自适应调整,从而达到控制输出电压的目的。由此,通过对谐振腔整体阻抗Z<sub>in</sub>(jω)的求解,可推导出谐振腔的直流输出电压增益为:

$$M(F_x, m, Q) = |H(j\omega)| = \frac{m F_x^2}{\sqrt{[(m+1)F_x^2 - 1]^2 + Q^2 m^2 F_x^2 (F_x^2 - 1)^2}} \quad (1)$$

式中,  $m = \frac{L_m}{L_r}$ ;  $F_x = \frac{f_s}{f_r}$ ;  $Q = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R_{eq}}$ ;  $f_s$  为开关频率,  $f_r$  为谐振频率,  $R_{eq}$  为原边折算电阻。

由式(1)可得电压增益变化率( $G$ )与归一化频率( $F_x$ )及品质因数( $Q$ )的关系,如图3所示。

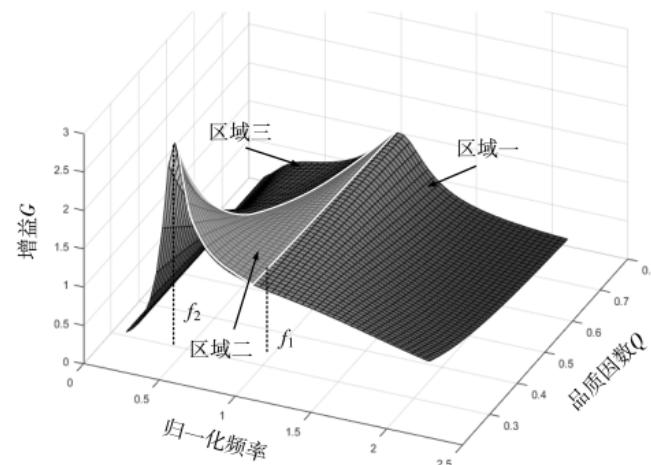


图3 电压增益与归一化频率及品质因数的关系

分析图3,当开关频率( $f_s$ )大于 $f_2$ 时,电压增益随品质因数的增大而减小;在实际工作过程中,对于品质因数的选择主要考虑当谐振变换器满载工作时,其电压增益须大于1,即区域二所示,此时有 $f_2 < f_s < f_1$ ;当变换器处于轻载运行时,为保证电路的稳压输出,需开关频率大于谐振频率( $f_s > f_1$ ),如区域一所示。基于此,可制定相应的模糊控制规则。

### 2 变论域模糊控制原理及规则确定

#### 2.1 变论域模糊控制原理

在变论域控制思想刚被提出时,并未改变控制规则在形式上的变化,仅通过对论域的收缩来提升控制的精

确度,期间采用到了伸缩因子,即图4中的 $\alpha(x)$ 与 $\beta(x)$ <sup>[14]</sup>。

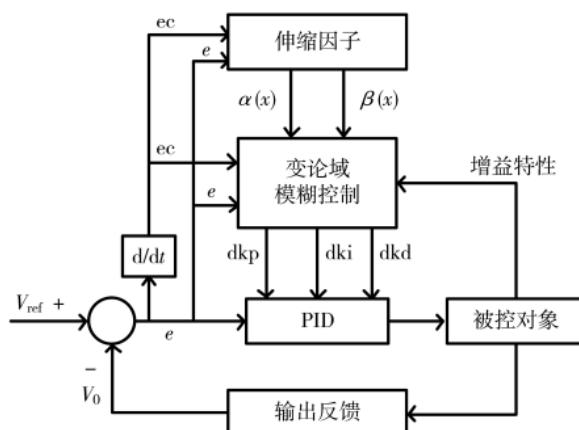


图4 变论域模糊控制结构框图

$\alpha(x)$ 是值域为 $[0, 1]$ 的偶函数,它的形式多样:比例指数型、自然对数型或者优化自然对数型等<sup>[16]</sup>;虽然可作为伸缩因子的函数较多,但伸缩因子的构造还需满足对偶性、避零性等特点<sup>[17]</sup>。假设误差输入初始论域范围为 $[-E, E]$ ,通过伸缩因子变换后可得到的新的论域范围为 $[-\alpha(x)E, \alpha(x)E]$ 。图5所示为变论域控制原理示意图,其中 $x \in [-E, E]$ 。

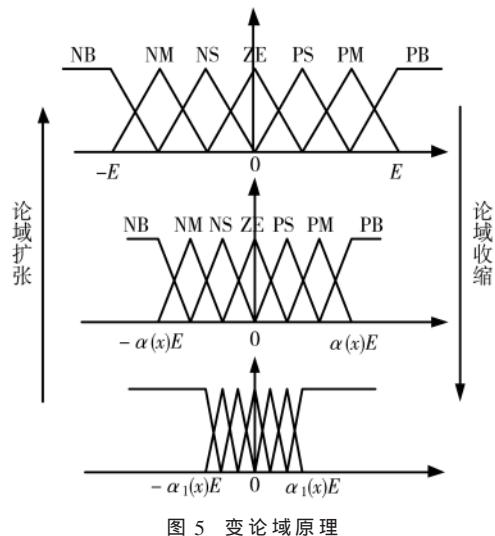


图5 变论域原理

此外,变论域控制的另外一种思想即直接改变论域所包含模糊集合的数量,通过增加模糊规则提升控制精度,如图6所示;但模糊控制规则的增加会导致模糊推理难度的指数性提升,耗时长且对硬件的要求非常高。所以,文献[18]中明确指出,控制规则的数目以3~10个为宜,且模糊集合在论域上的分布应符合以下特性:

- (1)完备性。论域中的元素至少对应一个模糊集合。
- (2)一致性。论域中任意一个元素不能同时对应两个或者两个以上隶属度为1的模糊集合。

图6(a)为常用模糊集合等量分布图,也是使用最为广泛的模糊控制集合设置;图6(b)增加了一组集合,提

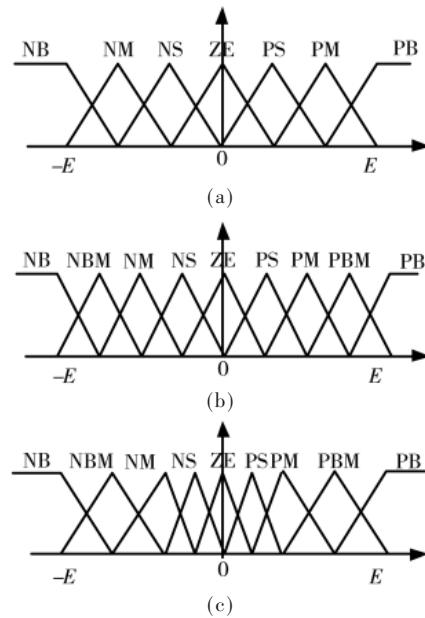


图6 增加模糊集合数目

升了论域的利用率,但带来的是多了近一倍的计算量,对于系统硬件的要求也随之提高;图6(c)将图6(b)中等量分布的论域集合作进一步规划,牺牲了较大误差时输入调节精度,加强对小误差信号的控制,更加符合系统快速响应的控制需求。本文参考图6(c)论域集合分布设置,详见图7。

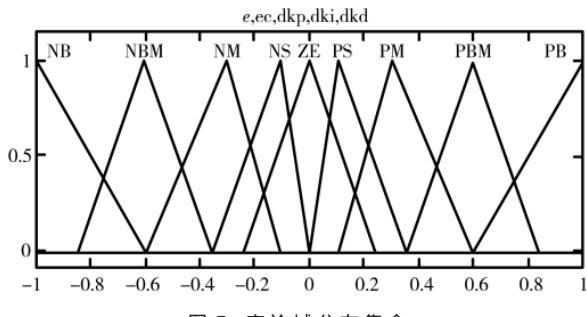


图7 变论域分布集合

## 2.2 100 W 半桥 LLC 谐振变换器模糊控制规则确定

根据PID控制规则及前文提到的电压增益随归一化频率的变化规律,结合采样电压与设定电压差值的大小及方向,可对PID参数自适应调整的范围进行估计。为实现PID参数的在线自整定调整,在确定参数调整范围后还需对范围进行进一步的划分,即建立模糊控制规则。

由图3可看出,电压增益随着归一化频率的变化而时刻发生着改变,故而希望通过频率进行调节去稳定电压增益,进而稳定输出电压。本文的输入语言变量主要为误差 $e$ 以及误差变化率 $ec$ ,输出语言变量为PID的参数调整量 $dkp$ 、 $dk_i$ 。为方便模糊规则设计,将输入/输出语言变量均取为:“负大”[NB],“负中”[NM],“负小”[NS],“零”[ZE],“正小”[PS],“正中”[PM],“正大”[PB];将变量域量化为 $(-1, 1)$ ,实际论域范围可通过添加增益进

行调节；隶属函数选用三角形隶属函数(trimf)。具体规则设定如下：

(1) 误差  $e$  与变化率  $ec$  的乘积较大时, 为保证系统的响应速度, 比例环节取较大的值; 为防止起始偏差突增造成过饱和问题, 微分环节则取较小值; 同样为防止积分饱和造成系统响应过大, 积分环节取 0;

(2) 当  $ec$  的值中等时, 为降低响应超调, 稳定响应速度, 比例环节应取较小值; 而此阶段微分环节对系统高频噪声过于敏感, 所以其取值应更小; 积分环节开始主导系统的响应控制, 可取中等值;

(3) 当  $e$  较小时, 微分环节对系统的影响最大, 所以, 在  $ec$  较小时, 微分环节取大, 当  $ec$  较大时, 微分环节取小, 其余时间取中等值。

由此即可确定  $dkp$ 、 $dki$ 、 $dkd$  的控制规则表, 如表 1 所示。

### 3 仿真与结果分析

在 MATLAB/Simulink 下搭建变论域模糊 PID 控制半桥 LLC 谐振变换器系统仿真, 电路参数计算参考文献[19]。文中 400 V 额定输入电压由市电经升压功率因数校正电路(PFC)得来, 其具体实现过程参考文献[20], 表 2 为 LLC 谐振变换器主电路仿真参数。

基于前文分析, 搭建如图 8 所示仿真模型。为对比

表 2 100 W 半桥 LLC 谐振变换器主电路仿真参数设计

参数	数值	
额定输入电压/V	400	
谐振电容/nF	17	
谐振电感/ $\mu$ H	150.84	
励磁电感/ $\mu$ H	754.22	
变压器匝比	8.1	
ESR/m $\Omega$	20	
滤波电容 $C/\mu$ F	1 007	
负载电阻/ $\Omega$	5.76	
输出电压/V	24	
满载频率/kHz	40	
工作频率	谐振频率/kHz	100
	轻载频率/kHz	300

注: 1) ESR 为输出滤波电容等效串联电阻;

2)  $C$  为输出滤波电容值

控制效果, 现将三种控制方式下的仿真曲线进行汇总, 其中 A1 为传统 PI 控制方案仿真结构示意, A2 为等量论域分布模糊 PID 控制方案仿真结构示意, A3 为变论域模糊 PID 控制方案仿真结构示意; 仿真阶段所有主电路功率参数相同, 设定输出参考电压为 24 V, 仿真结果如图 9 所示。

表 1 100 W 半桥 LLC 谐振变换器模糊控制规则表( $dkp/dki/dkd$ )

$e$	ec									
	NB	NBM	NM	NS	ZE	PS	PM	PBM	PB	
NB	PB/NB/PS	PBM/NBM/PS	PM/NM/NS	PM/NM/NB	PS/NM/NB	PS/NS/NB	ZE/NS/NM	ZE/ZE/PS	ZE/ZE/PS	
NBM	PB/NB/PS	PBM/NBM/ZE	PM/NM/NS	PS/NM/NB	PS/NS/NB	PS/NS/NB	ZE/NS/NS	ZE/ZE/ZE	NS/ZE/PS	
NM	PBM/NBM/PS	PBM/NBM/ZE	PM/NM/NS	PS/NS/NB	PS/NS/NM	PS/ZE/NM	ZE/ZE/NS	NS/PS/ZE	NS/PS/ZE	
NS	PBM/NBM/ZE	PM/NBM/ZE	PM/NM/NS	PS/NS/NM	ZE/NS/NM	ZE/ZE/NS	NS/ZE/NS	NS/PS/ZE	NS/PS/ZE	
ZE	PM/NM/ZE	PM/ NS/ZE	PS/NS/NS	ZE/NS/NS	ZE/ZE/NS	NS/PS/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZE	NM/PM/ZE	
PS	PM/NM/ZE	PS/NS/ZE	PS/ZE/PS	ZE/ZE/ZE	ZE/PS/ZE	NS/PM/ZE	NS/PS/ZE	NM/PM/NS	NBM/PBM/NS	
PM	PS/NS/PBM	PS/NS/PM	ZE/ZE/PS	NS/PS/PS	NS/PS/PS	NM/PBM/PS	NM/PM/PS	NM/PBM/PM	NBM/PBM/PBM	
PBM	PS/NS/PBM	ZE/ZE/PM	ZE/PS/PM	NS/PS/PM	NS/PS/PS	NM/PBM/PS	NM/PM/PM	NBM/PBM/PM	NB/PB/PBM	
PB	ZE/ZE/PB	NS/ZE/PBM	NS/PS/PBM	NM/PS/PM	NS/PM/PM	NM/PBM/PS	NBM/PM/PM	NBM/PBM/PBM	NB/PB/PB	

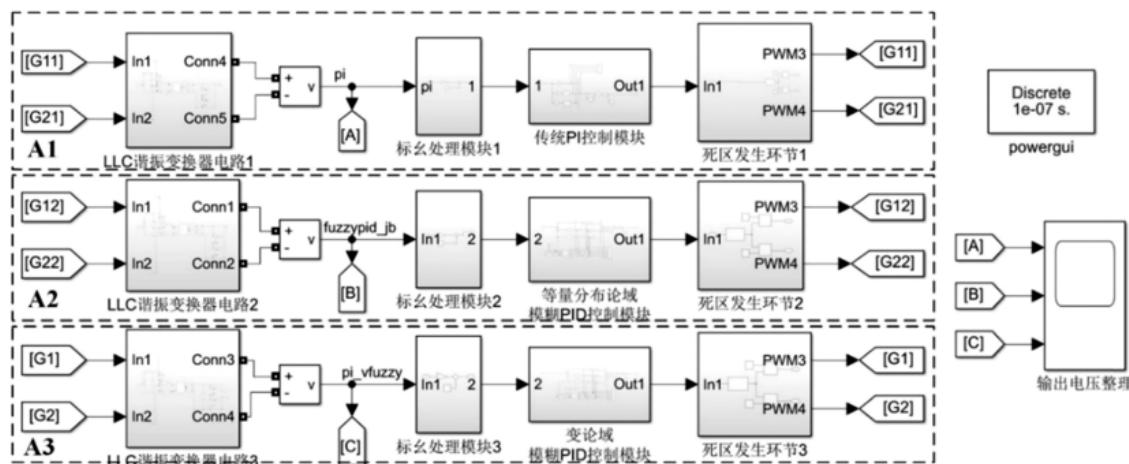


图 8 多种控制策略 100 W 半桥 LLC 谐振变换器仿真原理图汇总

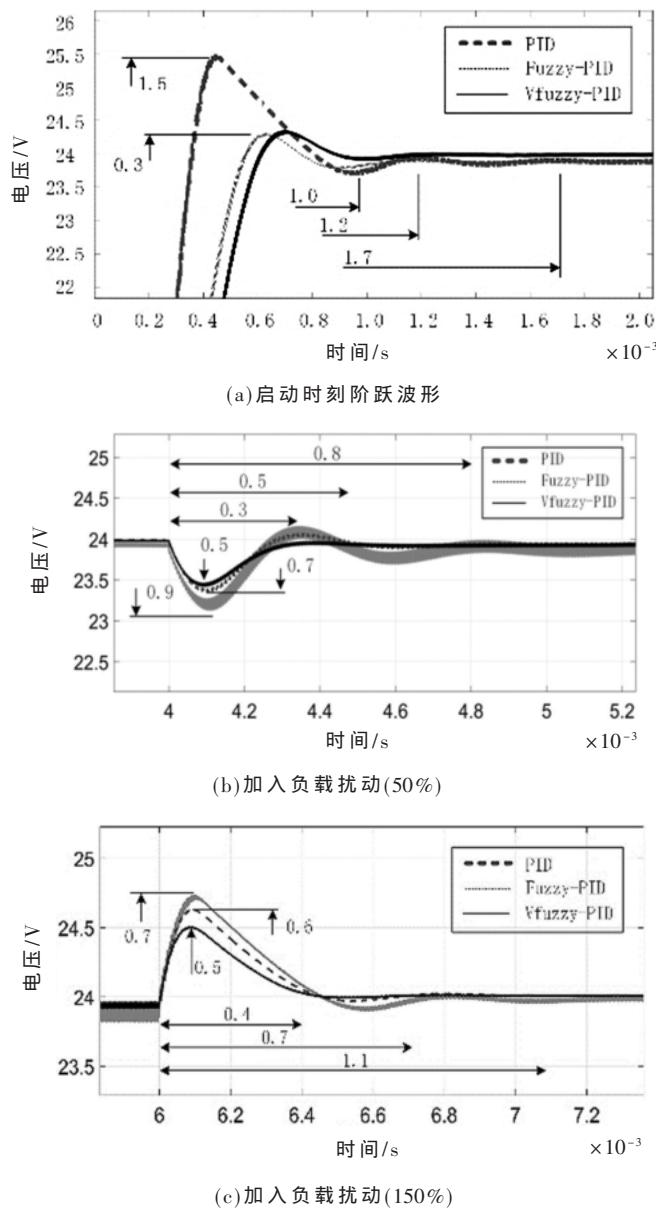


图 9 不同控制策略下 100 W 半桥 LLC 谐振变换器  
电压输出仿真波形

图 9(a)所示为启动时刻阶跃波形,基于变论域模糊 PID 控制的谐振电路能更迅速地达到目标输出电压,过冲更小,输出稳定调节时间更短;图 9(b)和图 9(c)为加入负载扰动时的输出电压波形图,这里利用负载的改变模拟输出环境的变化,即数据流量的突增与突减。图(b)设置负载突变为满载的 50%,图(c)设置突变为满载的 150%,由图可知,相较于传统 PID 控制和模糊 PID 控制,变论域模糊 PID 控制下的 LLC 谐振变换电路具有更好的动态响应特性,更能满足现行通信电源设计标准中关于负载效应恢复时间的设定。不同控制策略下变换器输出效果数据对比如表 3 所示。

#### 4 实验与结果分析

为了验证该控制策略在 LLC 谐振变换器上的快速

表 3 不同控制策略下变换器输出效果数据对比

控制策略	上电响应	负载突变	
		100%~50%	100%~150%
PI	时间/ms	1.7	0.8
	过冲/V	1.5	0.7
Fuzzy-PID	时间/ms	1.2	0.5
	过冲/V	0.3	0.6
VFuzzy-PID	时间/ms	1.0	0.3
	过冲/V	0.3	0.5

响应特性,搭建了一台额定输入电压 400 V,额定输出 24 V/4 A 的实验样机。样机采用 DSP 芯片 TMS320F28034 为主控芯片,其控制系统软件部分流程图如图 10 所示。

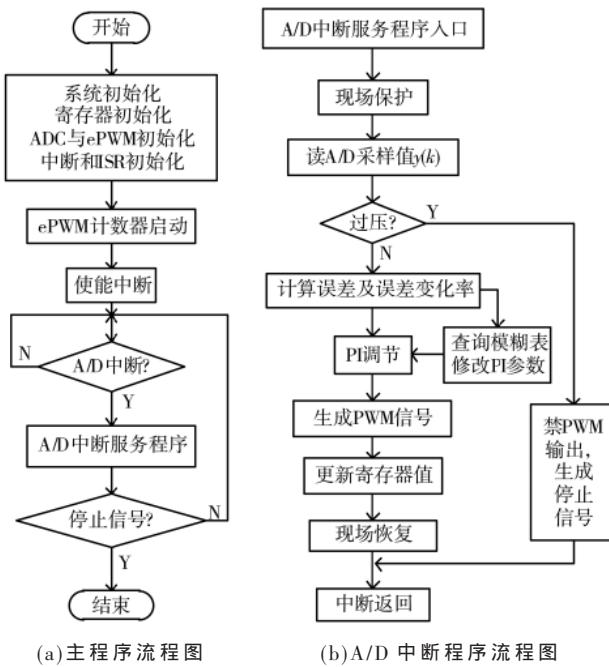


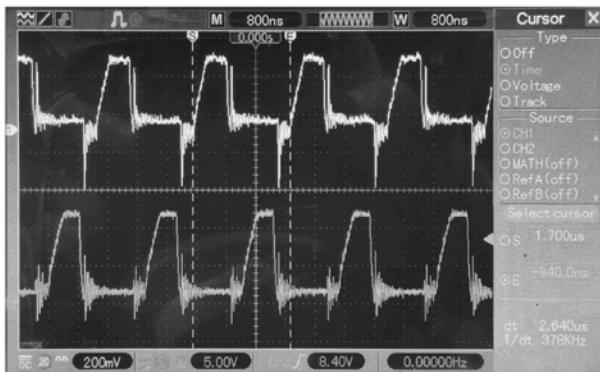
图 10 基于变论域模糊 PID 控制 100 W  
半桥 LLC 谐振变换器系统控制流程图

图 10(a)为主程序流程图,图 10(b)为 A/D 中断程序流程图。变换器参数:匝比 8.1;谐振频率理论值 100 kHz,实际值为 95.4 kHz;谐振电感理论值 150.84  $\mu$ H,实际值 158  $\mu$ H;谐振电容理论值为 17 nF,实际采用 8 颗容值为 2.2 nF 电容并联;输出滤波电容理论值为 1.007 mF,实际采用 3 颗 470  $\mu$ F(16 m $\Omega$ )电容并联。测试使用 GA1112-DAL 做输出波形观测,通过 ETA-5056 差分探头做信号采集,采集探头做 10 倍衰减。

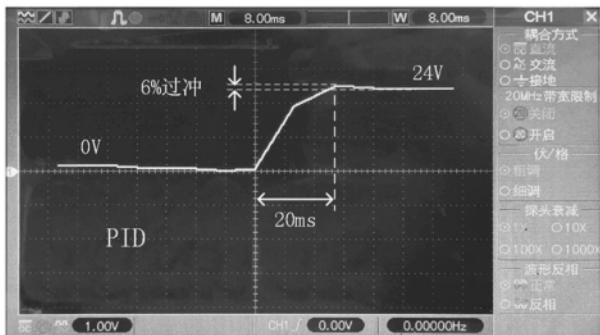
图 11 为现场实测环境搭建图;图 12(a)为开关网络驱动波形,根据波形图可知,上下管在导通与关断过程中较好地实现了软启动特性;图 12(b)为传统 PID 控制上电响应输出波形图,响应时间在 20 ms,有 6% 过冲;图 12(c)为变论域模糊 PID 控制上电快速响应阶段输出波形图,响应时间在 8 ms,有 5% 的过冲。



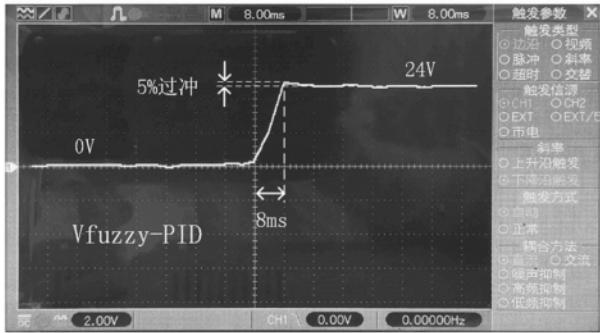
图 11 现场实测环境搭建



(a) 开关网络驱动波形



(b) 传统 PID 控制



(c) 变论域模糊 PID 控制

图 12 100 W 半桥 LLC 谐振变换器输出电压波形图

## 5 结论

通过对 LLC 谐振电路的增益特性进行深入分析, 利用模糊数学控制理论与 PID 控制相结合的控制思想, 在不需要得到精确输出电压数值的情况下, 设计了一种可

实现谐振电源输出电压稳定输出, 且具有自适应性及快速响应特性的控制器, 并基于 MATLAB/Simulink 分析模块进行了仿真与分析。模糊控制器在加入负载扰动后, 相较于传统的 PID 控制, 能实现快速的动态响应, 达到设定目标值的电压稳定输出; 但由于规则数目的增加本身对论域空间的利用率已有较大提升, 依靠对论域空间的变论域处理进一步提升其空间利用率的策略在实际仿真中输出效果并不突出, 故, 实际工程应用中应酌情使用变论域控制策略。最后, 基于 DSP 主控芯片设计了一款实验样机, 并对样机的开关网络驱动波形、输出波形等进行分析; 通过分析可得出, 变论域模糊 PID 控制 LLC 谐振转换器的输出响应较传统 PID 控制有明显的提升, 在抗干扰性能上也具有突出优势, 进一步验证了该种方案在 LLC 谐振电源动态特性提升上的可靠性及实用性。

### 参考文献

- [1] 刘志成. 通信电源用的半桥 LLC 谐振变换器研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019.
- [2] VERMA V, JAIN S, RAHEJA U. Storage-less PV fed telecom power supply using high gain boost and resonant power converter configurations[C]// 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems(ICPEICES), 2016: 1-7.
- [3] 杨自力. DC-DC 变换器的动态响应性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2007.
- [4] 姜龙飞, 高建龙. 谐振电容电压控制 LLC 谐振变换器分析与设计[J]. 电力电子技术, 2016, 50(9): 48-50.
- [5] 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.
- [6] 鲁静. LLC 谐振型变换器的最优轨迹控制研究[J]. 电子设计工程, 2018, 26(17): 131-134, 139.
- [7] 杜士祥, 张国胜, 胡海兵. 一种新颖的 LLC 变换器平均电流控制方法[J]. 电力电子技术, 2020, 54(4): 97-99, 106.
- [8] 刘志成, 赵阳, 徐铁锋, 等. 基于电荷控制策略的半桥 LLC 电路建模和仿真[J]. 湖北工业大学学报, 2019, 34(2): 10-13.
- [9] 华秀洁, 许建平, 高建龙. 电荷控制 LLC 谐振变换器分析与设计[J]. 电力电子技术, 2014, 48(4): 65-67.
- [10] 刘传洋, 孙佐, 刘景景. 基于 LLC 谐振变换器的 PFM 与 PWM 混合控制策略研究[J]. 上饶师范学院学报, 2018, 38(6): 24-28.
- [11] 宋璐, 卫亚博, 冯艳平. 基于模糊 PID 的温度控制系统的设 计与仿真[J]. 电子设计工程, 2020, 28(21): 51-55.
- [12] 马超. 基于 OPC 的 PCS7 主蒸汽温度模糊自适应 PID 控制系统的设计与实现[D]. 太原: 山西大学, 2020.
- [13] 郑征, 熙东, 陶海军. 基于模糊 PID 的车载充电 DC/DC 变换器控制策略研究[J]. 制造业自动化, 2019, 41(5):

(下转第 110 页)

表 1 不同温度的频率试验值与理论值对比

温度/℃	频率理论值/kHz	频率试验值/kHz	误差百分比/%
21	12.68	12.83	1.18
30	11.80	11.80	0
40	10.71	10.69	0.19
50	9.54	9.52	0.21
60	8.32	8.29	0.36
70	7.11	7.08	0.42
80	5.95	5.92	0.50

## 4 结论

本文提出了一种温度实时在线监测技术,利用 IGBT 模块内部封装的 NTC 热敏电阻来反映 IGBT 温度。该技术以压频变换为主要电路功能,将 NTC 热敏电阻转换为频率信号进行传输,具有抗电磁干扰能力强、传输距离远等优点。同时采用逻辑处理芯片对接收到的频率信号进行逻辑控制处理,并在上位机进行实时显示,从而能够有效直观地查看到 IGBT 的实时温度。搭建该监测技术的工程样机试验平台,试验结果表明,上传至逻辑处理芯片的频率信号与理论计算值相符,能够有效监测并显示 IGBT 的实时温度。

## 参考文献

- [1] 石巍,方太勋,谢晔源,等.CLLC 型模块化输入串联输出并联直流变压器[J].南方电网技术,2017,11(4):7-22.
- [2] 张中锋,谢晔源,石巍,等.ISOP 型直流变压器的谐振网络分析与设计[J].浙江电力,2019,38(4):2-7.
- [3] Wang Zhilong, Xiao Lan, Zhao Peng. Researches on combined input-series output-parallel systems composed of full-bridge DC transformers and converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014(33):6009-6009.
- [4] 涂春鸣,兰征,肖凡,等.模块化电力电子变压器的设计与实现[J].电工电能新技术,2017,36(5):42-50.
- [5] 于坤山,谢立军,金锐.IGBT 技术进展及其在柔性直流输电中的应用[J].电力系统自动化,2016,40(6):139-143.
- [6] 孙鹏飞,罗皓泽,董玉斐,等.基于关断延迟时间的大功

(上接第 106 页)

- 130-134.
- [14] 李洪兴.变论域自适应模糊控制器[J].中国科学 E 辑,1999,29(1):32-42.
  - [15] 吴振苇,李双刚,张丽,等.基于弹载的高功率密度 LLC 变换器设计[J].电子技术应用,2020,46(11):109-113.
  - [16] 谭兵文,李春文.几种变论域伸缩因子选择方法的比较研究[J].科学技术与工程,2013,13(4):908-911.
  - [17] 骆秀秀,杨超,余岱玲,等.Buck 变换器的变论域模糊自适应 PID 控制的研究[J].工业控制计算机,2016,29(2):48-52.
  - [18] 刘杰.智能控制与 MATLAB 实用技术[M].北京:科学出版社,2017.

率 IGBT 模块结温提取方法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(13):3366-3372.

- [7] 李玲玲,许亚惠,李志刚.基于电—热耦合模型的 IGBT 模块结温计算方法[J].电源学报,2016,14(6):23-28.
- [8] 刘宾礼,陈明,唐勇,等.IGBT 芯片测温方法与温度分布研究[J].武汉理工大学学报,2013,37(1):144-148.
- [9] 杜明星,李豹,唐吉林,等.IGBT 模块结温估计方法及其温度特性研究[J].电源学报,2016,14(6):17-22.
- [10] 唐波,刘任,吴卓,等.三相电压源逆变器内部 IGBT 模块温度的求解及评估[J].电工电能新技术,2017,36(2):50-58.
- [11] 张亚玲,李志刚,姚芳,等.一种 IGBT 热阻测试方法的研究[J].河北工业大学学报,2016,45(1):1-4.
- [12] 贾英杰,罗毅飞,肖飞,等.一种符合欧姆定律的 IGBT 等效电阻模型[J].电工技术学报,2020,35(2):311-317.
- [13] 罗毅飞,汪波,刘宾礼,等.基于电压对电流变化率的 IGBT 结温变化机理及监测方法[J].高电压技术,2017,43(1):38-43.
- [14] 李旭琼,张廷玖,骆颖,等.高温 NTC 热敏电阻材料的研究进展[J].电子元件与材料,2015,34(12):7-9.
- [15] 孙庆龙.NTC 热敏电阻温度特性研究[J].大学物理实验,2013,26(4):16-26.
- [16] 丁彦闯,牛天兰,马修真.用 LM331 实现模拟信号的远距离隔离传送[J].大连铁道学院学报,2001,22(3):82-95.

(收稿日期:2021-04-02)

## 作者简介:

王蓓蓓(1990-),通信作者,女,硕士,工程师,主要研究方向:开关电源、器件驱动及控制系统,E-mail:wangbeimevir@sina.com。

张良(1982-),男,本科,工程师,主要研究方向:开关电源、器件驱动及控制系统。

武丹(1982-),女,硕士,高级工程师,主要研究方向:嵌入式、器件驱动及控制系统。



扫码下载电子文档

- [19] 饶刚,王威.200W 全数字开关电源设计[J].电子技术应用,2019,45(9):123-128.

- [20] 王泽峰,杨得秋,张军明.基于 LLC 的隔离型 PFC 设计与控制[J].电工技术,2020(11):14-16,22.

(收稿日期:2021-04-13)

## 作者简介:

饶刚(1973-),男,硕士,副教授,主要研究方向:机械 CAD/CAM、电子技术。

严帅(1993-),通信作者,男,硕士研究生,主要研究方向:机械电子工程,E-mail:yanshuai19931212@163.com。

金彬(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:LED 光照与散热。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所