

## 功率变换的模糊型跨周调制模式

罗萍 熊富贵 李肇基 陈光禔  
(电子科技大学微电子与固体电子学院 成都 610054)

**摘要:** 该文提出了一种功率变换的模糊型跨周调制模式 (Fuzzy Pulse Skip Modulation, FPSM), 它是基于作者提出的功率变换跨周调制 (Pulse Skip Modulation, PSM) 机理的一种优化模式。PSM 是功率变换的一种新调制模式, 它具有效率高、响应速度快、鲁棒性强等特点。该文给出了 FPSM 输入输出变量的隶属函数、模糊控制规则和解析结果。分析表明 FPSM 除具 PSM 之优点外; 同时较 PSM 有效降低了变换器的输出电压纹波, 消除了音频噪音影响。

**关键词:** 跨周调制, 模糊型跨周调制, 输出电压纹波, 音频噪音

**中图分类号:** TN624 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)05-0838-03

## Fuzzy Pulse Skip Modulation in Power Converter

Luo Ping Xiong Fu-gui Li Zhao-ji Chen Guang-ji

(School of Microelectronics and Solid-State Electronics, UEST of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract** A novel modulation mode named Fuzzy Pulse Skip Modulation(FPSM) in power converter is proposed in this paper, which is based on Pulse Skip Modulation(PSM) mode proposed by authors recently. PSM is a novel modulation mode in power converter, which has high efficiency, quick response and strong robust qualities. This paper gives the membership function, fuzzy rule and analysis results of FPSM. It is shown that FPSM not only has high efficiency, quick response and strong robust characteristics, but also decreases the ripple of output voltage and eliminates audible noise through analysis and simulation.

**Key words** PSM, FPSM, Ripple of output voltage, Audible noise

### 1 引言

习用的 DC-DC 功率变换器的调制模式为恒频变宽 (Constant Frequency Variable Width, CFVW)的脉冲宽度调制 (PWM)模式和恒宽变频(Constant Width Variable Frequency, CWVF)的脉冲频率调制 (PFM) 模式<sup>[1,2]</sup>。PWM 模式原理简单, 电路易于实现, 但 PWM 模式具有轻负载时效率低等缺点。PFM 模式虽提高了轻负载下的效率, 但连续变化的工作频率给滤波实现带来困难。作者新近提出一种新的用于功率变换器的调制模式——跨周调制 (PSM)<sup>[3,4]</sup>。它基于恒频恒宽 (Constant Frequency Constant Width, CFCW)脉冲控制信号 (如图 1 所示), 在输出电压低于设定输出值时, 每个时钟周期都输出 CFCW 脉冲控制信号, 而当输出电压高于设定输出值时, 一部分控制周期将被跨过, 此时, 功率管一直处于关断状态。PSM 通过调节跨过的周期数来稳定输出电压的大小。PSM 控制模式的效率很高, 且几乎与负载无关, 从而使 PSM 具有轻负载效率高、响应速度快、鲁棒性强等

特点。但 PSM 变换器的输出电压纹波较大, 且因跨周的缘故, 可能使变换器实际开关频率进入音频范围。本文提出一种功率变换的模糊型跨周调制模式 (FPSM)。FPSM 将模糊控制和 PSM 模式有机结合形成一种优化的跨周调制模式。研究分析表明 FPSM 兼具效率高、响应速度快、鲁棒性强的特点, 同时又有效降低了输出电压纹波, 消除了音频噪音影响。

### 2 模糊型跨周调制模式

为进一步改善 PSM 模式的调制性能, 减小输出电压纹波以及防止 PSM 变换器的有效工作频率进入音频范围, 本文提出一种模糊型 PSM 模式 (FPSM)。FPSM 将模糊控制与 PSM 模式有机结合在一起。一方面, FPSM 保持了 PSM 的调节机理, 即随负载的不同, 调节作用在功率管上的控制信号的跨周数。另一方面, 借助模糊控制原理, 根据负载的不同适当对控制脉冲宽度进行微调, 使得轻载下脉冲宽度变窄, 跨周数减少, 以此防止功率管的有效工作频率进入音频

范围。脉冲宽度的减小使输出响应的超调减小, 同时因跨周数的减少, 使输出电压的纹波得到有效降低。FPSM 是一种以 PSM 调节为主, 以模糊控制为辅的 PSM 优化调制模式。

图 2 为 Buck 变换器的 FPSM 模式之结构框图。

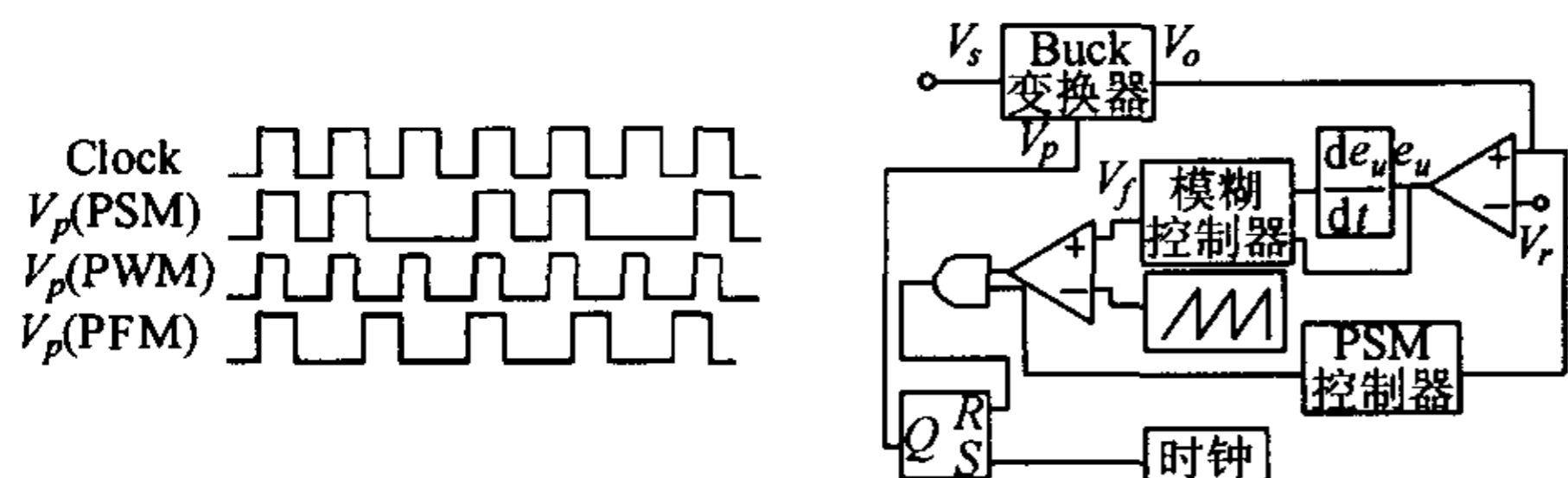


图 1 PSM 脉冲控制信号 图 2 Buck 变换器的 FPSM 调制模式

FPSM 模式将实际输出电压  $V_o$  与设定输出电压  $V_r$  之差  $e_u$  及其变化量  $de_u/dt$  作为模糊控制的输入变量, 模糊控制的输出变量为  $V_f$ 。对模糊控制器的输入输出变量进行模糊化, 定义模糊集:

$$e_u = \{\text{NB, NM, NS, NZ, ZO, PZ, PS, PM, PB}\}$$

$$de_u/dt = \{\text{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}\}$$

$$V_f = \{\text{NB, NM, NS, NZ, ZO, PZ, PS, PM, PB}\}$$

根据响应速度快、纹波小的需要, 输入变量  $e_u$ ,  $de_u/dt$  及输出变量  $V_f$  的隶属函数设计如图 3 所示。设  $V_r = 5\text{V}$ , 定义  $e_u$  的论域为  $[-5, 5]$ ,  $de_u/dt$  和  $V_f$  的论域均为  $[-1, 1]$ , 根据电路参数和仿真结果采用不同的加权因子对其加权, 并设计表 1 所示的 FPSM 模糊控制规则表。

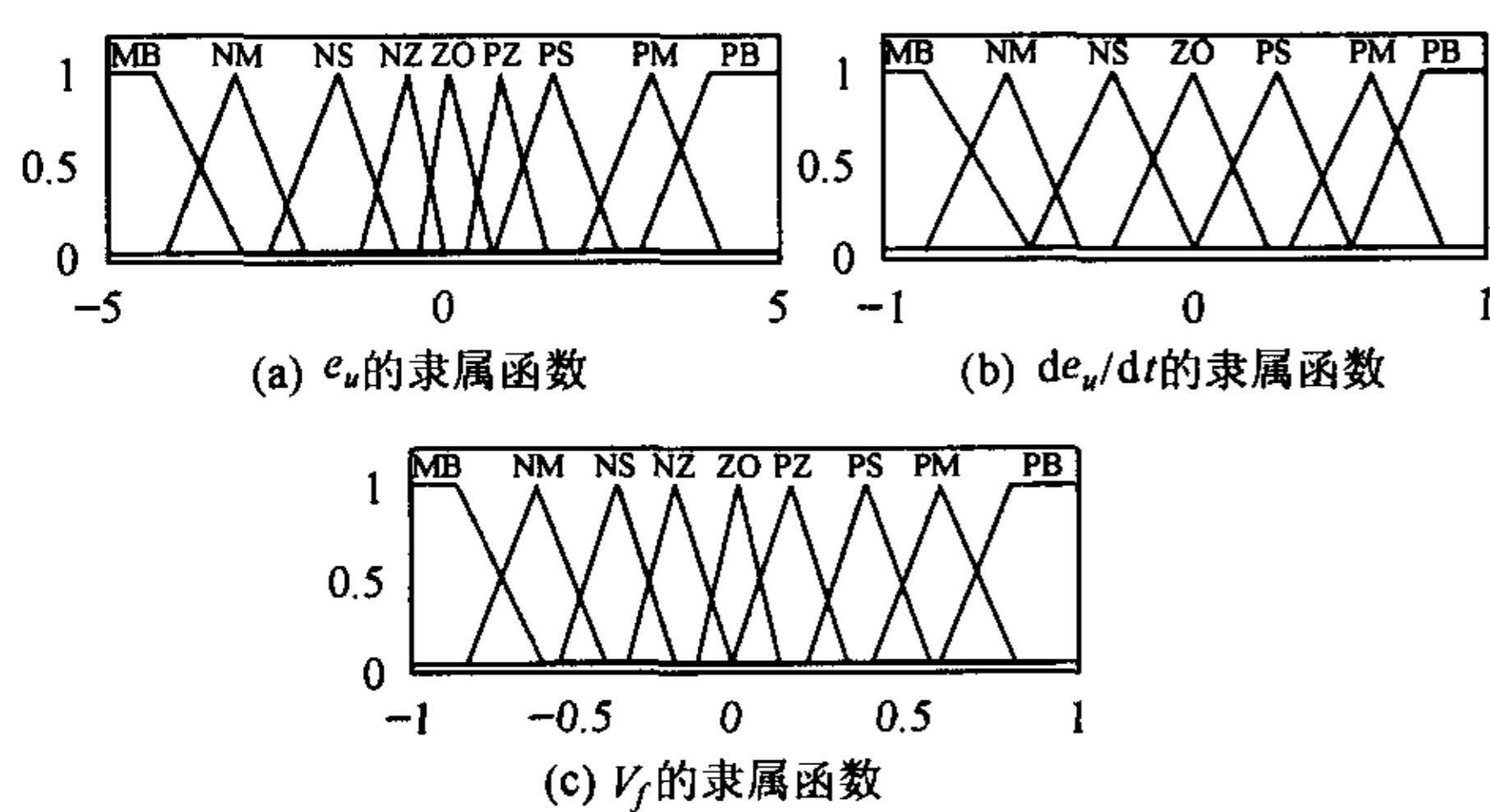


图 3 FPSM 的隶属函数

图 4 给出了不同负载下的 FPSM 脉冲控制信号  $V_p$  的波形。与基本 PSM 控制脉冲波形相比, FPSM 依然保持了负载越轻  $M$  越大, 即所跨过的周期数越多的特性。但由于模糊控制的参与, 轻负载下控制脉冲的宽度比  $D_{\text{max}}$  略有减小, 使得相同负载下, FPSM 变换器的跨周数比基本 PSM 变换器跨周数少, 从而使 FPSM 变换器的输出纹波得到减小。另一方面也确保了变换器的实际开关频率不会进入音频范围, 避免了音频干扰的引入。

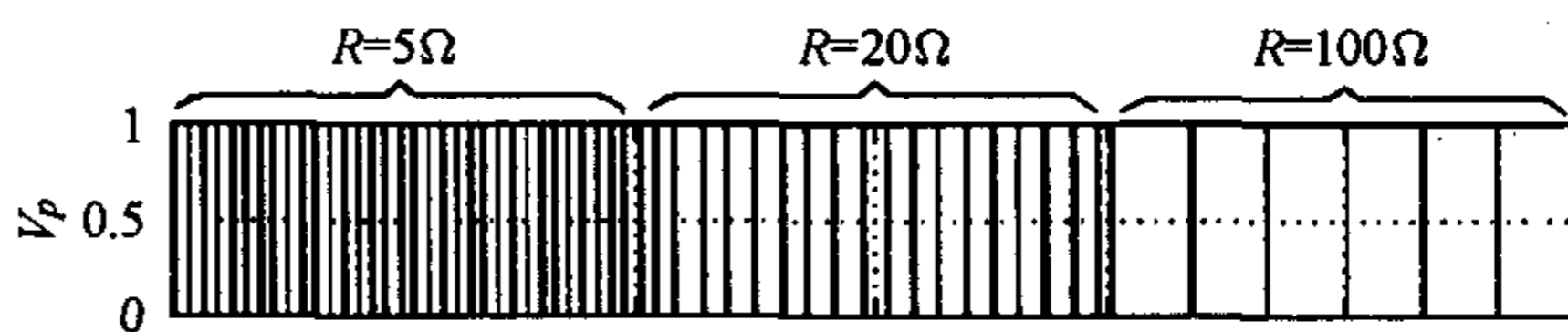


图 4 不同负载下, FPSM 的控制脉冲波形

利用 MATLAB 对 PWM, PSM 及 FPSM 变换器进行仿真, 仿真参数为  $L = 0.8\mu\text{H}$ ,  $C = 0.2\mu\text{F}$ ,  $R = 20\Omega$ ,  $V_s = 6.5\text{V}$ ,  $V_r = 5\text{V}$ ,  $f = 100\text{kHz}$ 。得到如图 5, 图 6 所示的输出电压响应曲线。

图 5 对应负载变化时, 不同调制模式的输出响应曲线。其中, 负载电阻初值为  $20\Omega$ , 在时间  $t = 1.5 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-3}\text{s}$  及  $t = 2.5 \times 10^{-3} \sim 3.5 \times 10^{-3}\text{s}$  期间, 负载分别发生上下波动, 电阻值变化为  $5\Omega$  和  $100\Omega$ 。仿真结果显示负载变化对 PSM 变换器的影响较大, 负载变重/变轻时, 呈锯齿波周期性变化的输出电压的波动周期变短/变长。同时, PSM 变换器输出电压的纹波略有减小/增加。负载变化对 FPSM 变换器的影响较小。当负载变化时, FPSM 控制信号的跨周数也相应变化, 但输出电压纹波变化不明显。

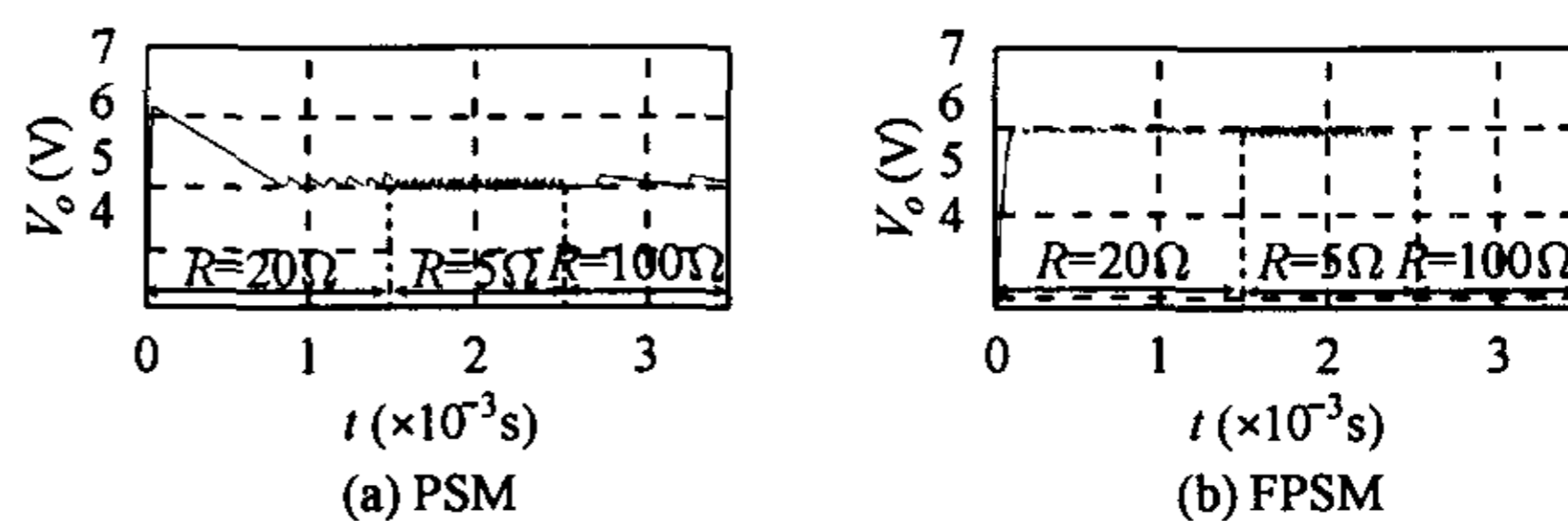


图 5 负载  $R=20\Omega, 5\Omega, 100\Omega$  时, 不同控制模式下的响应曲线

图 6 对应电源电压变化时, 不同调制模式的变换器输出响应曲线。其中, 电源电压初值为  $6.5\text{V}$ , 在时间  $t = 1.5 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-3}\text{s}$  及  $t = 2.5 \times 10^{-3} \sim 3.5 \times 10^{-3}\text{s}$  期间分别向下波动  $1\text{V}$ /向上波动  $3\text{V}$ 。图 6 显示, PSM 和 FPSM 均具良好电源调整率, 只是电源电压太高时, 输出电压的纹波也很大, 特别是 PSM 变换器, 其输出电压纹波可能大到用户不能接受的程度。而调整 FPSM 的模糊规则可以使 FPSM 变换器的输出电压纹波限制在用户要求的范围内。可见, FPSM 具有很强的鲁棒性, FPSM 通过略微牺牲变换器的效率, 就可以使得变换器各方面性能达到最优。

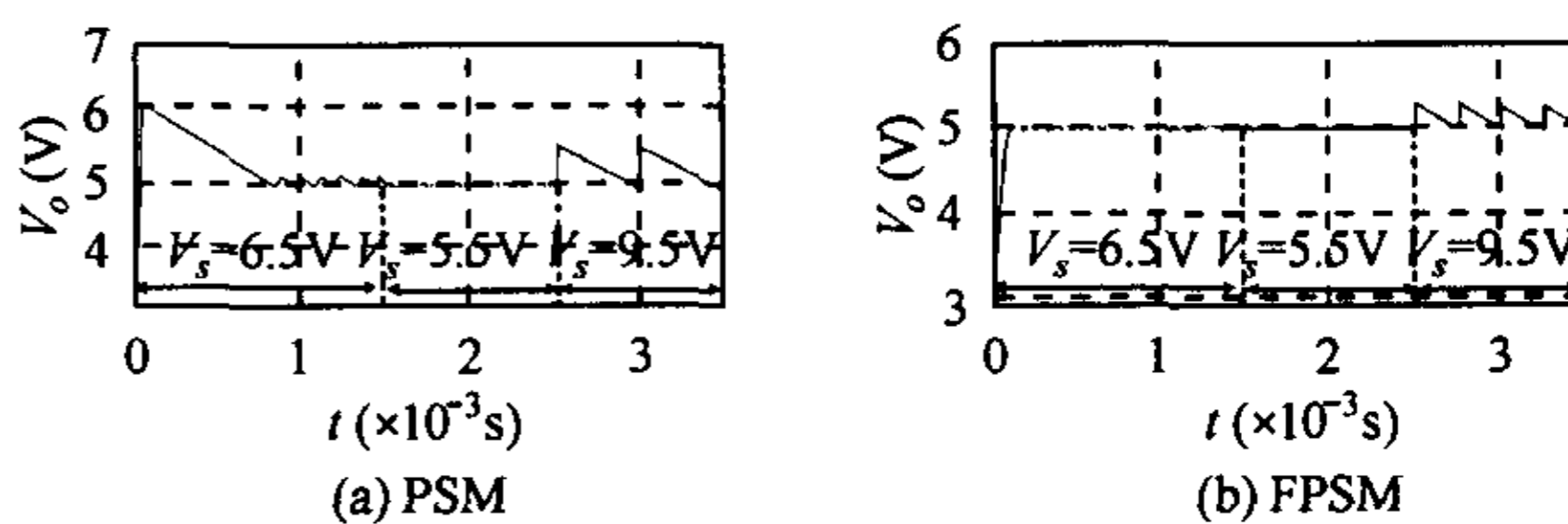


图 6 输入电压  $V_s=6.5\text{V}, 5.5\text{V}, 9.5\text{V}$  时, 不同控制模式下的响应曲线

表1 FPSM的模糊控制规则表

$e_u$ $de_u/dt$	NB	NM	NS	NZ	ZO	PZ	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PZ	ZO	ZO	NZ
NM	PB	PB	PB	PM	PM	PZ	NZ	NZ	NS
NS	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	NZ	NZ	NS
ZO	PB	PM	PM	PS	PS	NZ	NS	NS	NM
PS	PM	PM	PS	PS	PZ	NS	NS	NS	NM
PM	PM	PS	PZ	PZ	ZO	NM	NM	NM	NB
PB	PS	PS	PZ	ZO	NZ	NM	NB	NB	NB

### 3 结束语

FPSM 是一种优化的 PSM 调制模式。功率变换系统是强非线性系统，难于提取精确的数学模型。模糊控制基于专家知识进行智能控制，可通过离线仿真调试得到合适的模糊变量的隶属函数和模糊规则，从而得到良好的控制效果。分析仿真表明 FPSM 兼具效率高、响应速度快、鲁棒性强的特点；同时，由于轻负载下控制脉冲的宽度比  $D_{\max}$  略有减小，使得相同负载下，FPSM 变换器的跨周数比基本 PSM 变换器跨周数少，从而使 FPSM 变换器的输出纹波得到减小，消除了音频噪音影响。该 FPSM 特别适合于频率较高的 DC-DC 变换系统，开关频率较低的系统可通过减小比  $D_{\max}$  来保障实际工作频率不进入音频噪音范围。

### 参考文献

- [1] Hui S Y R, Sathikumar S, Sung K K. Novel random PWM schemes with weighted switching decision. Sixth International Conference on PEVSD (Power Electronics and Variable Speed Drives), Nottingham, UK, 23 - 25 September, 1996: 348 - 353.
- [2] Todo T, Selvaratam K, Mori T, Kuroe Y. Analysis of hybrid feedback systems with PFM mechanisms. *IEE Proc.-D: Control Theory Appl.*, 1999, 46(3): 259 - 264.
- [3] Luo Ping, Luo Luyang, Li Zhaoji, Chen Guangju. Skip cycle modulation in switching DC-DC converter. ICCAS (International Conference on Communications, Circuits and Systems), Chengdu, China, June 29 - July 1, 2002: 1716 - 1719.
- [4] 罗萍, 熊富贵, 李肇基, 陈光禔. 开关变换器的跨周期调制模式. *电子与信息学报*, 2004, 26(6): 984 - 988.
- [5] Correa J M, Hutto E D, Farret F A, Simoes M G. A fuzzy-controlled pulse density modulation strategy for a series resonant inverter with wide load range. 2003. PESC'03. IEEE 34<sup>th</sup> Annual Conference on Power Electronics Specialist, Acapulco, Mexico, 15 - 19 June, 2003, vol.4: 1650 - 1655.
- [6] Gildersleeve M, Pooya F H, Rincon-Mora G A. A comprehensive power analysis and a highly efficient, mode-hopping DC-DC converter. Proceeding, 2002 IEEE Asia-Pacific Conference on ASIC, Taiwan, 2002, 6 - 8 Aug., 2002: 153 - 156.
- [7] Chen Jun, Ngo K D T. Alternate forms of the PWM switch model in discontinuous conduction mode. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic systems*, 2001, 37(2): 754 - 758.
- [8] Wang Lixin. A course in fuzzy system and control. Prentice-Hall, Inc, 1997, Chapter 3 and Chapter 4.

罗萍：女，1968年生，副教授，在职博士，主要研究方向为智能功率集成电路与系统的设计与测试、电力电子技术及其自动化。

李肇基：男，1940年生，教授，博士生导师，主要研究方向为半导体功率器件、智能功率集成电路与功率电子学。

陈光禔：男，1939年生，教授，博士生导师，主要研究方向为现代测试理论与技术、数据域测试，集成电路测试、可测性设计、故障诊断专家系统及测试系统结构体系。