

# 脉冲密度调制串联谐振型塑料薄膜 表面处理电源的研制

刘勇, 何湘宁, 张仲超

(浙江大学电力电子技术研究所, 浙江省 杭州市 310027)

## DESIGN OF PULSE DENSITY MODULATED SERIES RESONANT INVERTER FOR PLASTIC FILM SURFACE TREATER

LIU Yong, HE Xiang-ning, ZHANG Zhong-chao

(Power Electronics Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** This paper presents a pulse density modulated (PDM) series resonant inverter developed for plastic film surface treater. The use of the PDM inverter enables the constant frequency and voltage. Moreover, it can achieve zero-voltage-switching (ZVS) in all the operating conditions and low turn-off loss at switching transition. The average switching frequency in the PDM control is lower than the resonant frequency except for full power, resulting in low loss. Simulation and experimental results are presented to illustrate the effectiveness of the density modulation control strategy.

**KEY WORDS:** pulse density modulation; series resonant inverter; dielectric barrier discharge

**摘要:** 该文介绍了一种采用脉冲密度调制(PDM)控制策略的串联谐振型塑料薄膜表面处理电源的研制。PDM控制策略的采用可以确保电源工作于定频和定压,并且可以方便地实现开关管的软化。除满功率情况外,开关管的平均开关频率都低于谐振频率,降低了开关损耗。给出的仿真和实验结果验证了这种脉冲密度调制策略的有效性。

**关键词:** 脉冲密度调制; 串联谐振电源; 介质阻挡放电

## 1 引言

塑料薄膜表面处理技术广泛应用于包装及印刷工业中。应用高压放电技术使放电电极间的空气电离,放电粒子冲击塑料薄膜表面,薄膜经过放电处理后,表面产生极性基团。同时强烈的离子冲击使表面粗化,从而增强对油墨及胶水的渗透力和粘合力<sup>[1-5]</sup>。

塑料薄膜表面处理电源的负载特性相当于电

极不平衡介质阻挡放电(DBD)的负载特性。介质阻挡放电为一特殊的,非线性变化的负载,这给放电电源的设计带来了很大的麻烦<sup>[6-8]</sup>。要使负载工作正常,选择合适的控制方案是很重要的。常用的控制方案包括直流调压调功(PAM)<sup>[9-10]</sup>、脉冲频率调制法(PFM)<sup>[11]</sup>、脉冲宽度调制法(PWM)<sup>[12-15]</sup>。它们普遍存在以下问题:①功率较低时放电不均匀。因为它们在调功过程中气隙上的电压幅值要发生变化,低功率时幅值较低,不能充分击穿气隙,放电不稳定。②工作频率会发生变化。塑料薄膜表面处理电源的频漂问题直接影响薄膜的处理质量,给电源的参数设计带来很大的困难。③调功过程为非线性调功,调功范围窄。

放电气隙的等效电容值会随着加在两端的电压幅值的变化而变化,从而发生谐振频率的漂移。常用的PWM、PAM、PFM在调功过程中气隙等效电容上的电压幅值都会发生变化,从而使气隙等效电容的容值发生变化,谐振频率随之发生变化,从而无法实现定频工作,为非线性调功。本文采用的脉冲密度调制(PDM)能较好的实现定频工作,为线性调功,并且可以方便地实现开关的软化,平均开关频率低,降低了开关损耗,为塑料薄膜表面处理电源控制技术较为理想的选择。

## 2 塑料薄膜表面处理系统

### 2.1 系统描述

塑料薄膜表面处理系统包括高频高压放电电源和电极装置,待处理的塑料薄膜通过电极装置的

间隙进行处理。电极装置见图 1 所示。

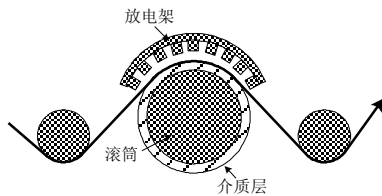


图 1 电极装置

Fig.1 Device of electrodes

表面包有绝缘介质的滚筒接地，长条形的放电架与滚筒面平行，接高压电源。放电电极一般为多刀型，能提高载流子数量，增加放电面积。滚筒长

度为 160cm，放电间隙为 3mm，介质层厚度为 30mm，采用这一厚度是为了确保在高压下不被击穿。高频高压放电电源主电路拓扑见图 2 所示，它包含三相不控整流电路和由两个 IGBT 模块组成的单相电压型 H 桥逆变器，每个模块为 1200V, 100A。无感电容  $C_s=0.02\mu\text{F}$  并联在 IGBT 的集电极和发射极之间，用来实现谐振电路的零电压开关，减小开关损耗。变比为 24: 270 的高频高压变压器连接在逆变器的交流端，通过变压器漏感和负载等效电容串联谐振来产生放电所需的高压。

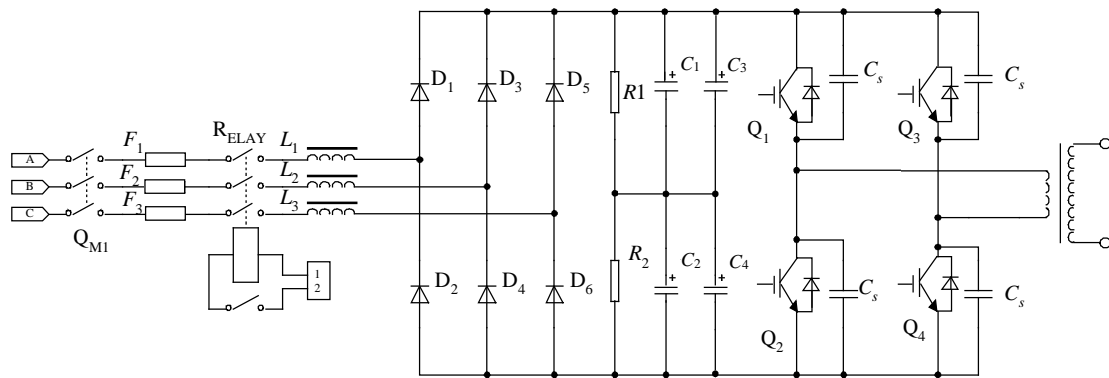


图 2 电源系统结构

Fig. 2 Power supply system configuration

### 2.2 负载等效电路分析

当气隙上的高频电压达到放电起始电压时，气隙中的电子从电场中获得了足够的能量，通过碰撞使周围的原子和分子电离，气隙中的气体被击穿。由于介质的存在，限制了放电电流的自由增长，因此也阻止了电极间火花和弧光的形成，气隙中发生介质阻挡放电。在放电期间气隙上的电压保持恒定，为放电维持电压  $V_z$ 。塑料薄膜处理电源的负载等效模型可以由多个非线性变化的电容电路并联来等效，见图 3 所示。

图中  $C_g$  和  $R_g$  为气隙等效电容和电阻， $C_d$  为介质等效电容， $L_s$  为高频高压变压器的漏感， $C_A$  为测量电容。其中负载等效电路的参数无法进行直接测量，但可以利用李萨如图形来进行估算。实验中得到的李萨如图形如图 4 所示。

塑料薄膜表面处理电源负载表现出很强的非线性电压和电流特性。当外加的放电电压低于放电起始电压时，气隙中没有微放电电流流过；当放电电压高于放电起始电压时，气隙中有大量的微放电电流流过。这表明常用于电压型串联谐振电路的调压，调频的方法获得较宽的调功范围有一定的困

难，在低功率时放电会出现不稳定的现象。

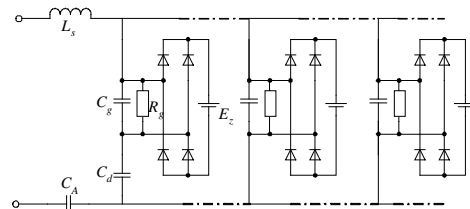


图 3 负载等效电路模型

Fig. 3 Equivalent electrical circuit model

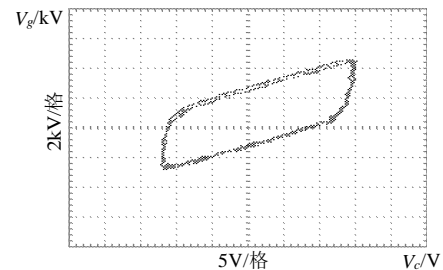


图 4 V-Q 李萨如图形

Fig. 4 V-Q lissajous figure

## 3 脉冲密度调制

### 3.1 原理分析

脉冲密度调制 (PDM) 是通过控制向负载馈送

能量的时间来控制输出功率的。对它的工作方式简单地加以说明：例如每个工作周期内包含 60 个脉冲周期，工作周期不变，改变工作周期中的脉冲数量来实现对输出功率的调节。在  $N$  个脉冲周期中逆变器向负载馈送能量，剩下的  $60-N$  个脉冲周期中负载两端的电压为零，逆变器不向负载提供能量。电压型串联谐振 PDM 逆变器的开关模式见图 5 所示，为了图形的简化，高频高压变压器和塑料薄膜表面处理负载用 LC 电路来表示。其中图 5(a)和图 5(f)逆变器有交流方波电压输出，电源向负载输出功率。图 5(c)和图 5(d)逆变器输出电压为零，电源不向负载输出功率。图 5(b)和图 5(e)中通过 IGBT 并联电容的充放电来实现对 IGBT 开关的软化。

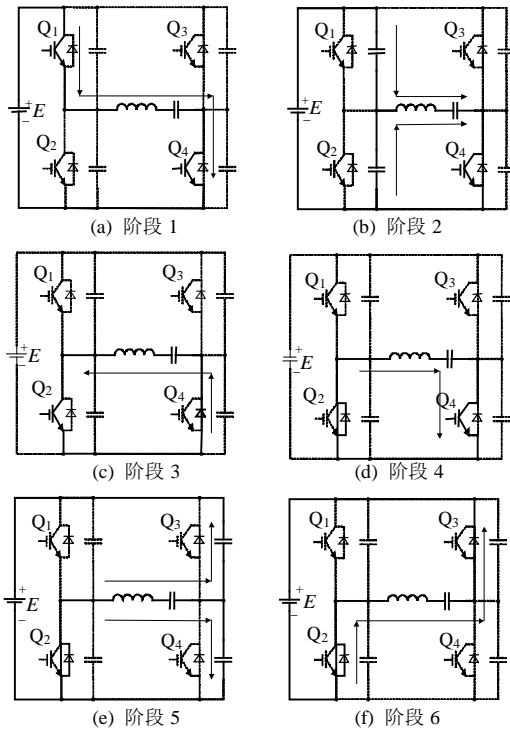


图 5 PDM 开关模式

Fig. 5 Switching modes in PDM inverter

### 3.2 控制电路

图 6 所示为 PDM 控制电路框图。图中鉴相器、低通滤波器 1、压控振荡器 (VCO) 组成了锁相环电路 (PLL)。电流检测电路的信号经过单稳态电路进行整形后输入 PLL 电路。电流检测电路信号较弱时 PLL 电路工作在他激状态，由他激频率给定确定电路的工作频率；电流幅值达到一定的限制值时，电子开关动作，PLL 电路转变为自激状态。实验中确保了它激到自激的转换过程在功率较小的情况下完成，系统工作稳定，不会产生较大的波动。为了确保安全，控制电路中还设计了对锁相环失锁的

保护。压控振荡器的输出经过二分频和延时后输入鉴相器。二分频可以使 PLL 的输出信号的占空比严格地达到 50%，延时电路保证负载的输出电流信号略滞后于输入的电压信号，电路工作在微感性的状态，为开关管的软化创造条件。二分频后的信号分为两路，一路经过分频器进行分频，一路作为同步电路的时钟信号。分频器的输出信号经过低通滤波器 2 进行滤波形成三角波，输入比较器和密度给定信号进行比较，确定脉冲密度的大小。同步电路的输出经过逻辑电路和死区形成电路后输入驱动电路，死区形成电路的输出信号  $V_f$ 、 $V_g$ 、 $V_h$ 、 $V_j$  分别对应主电路中的开关管  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$ 。

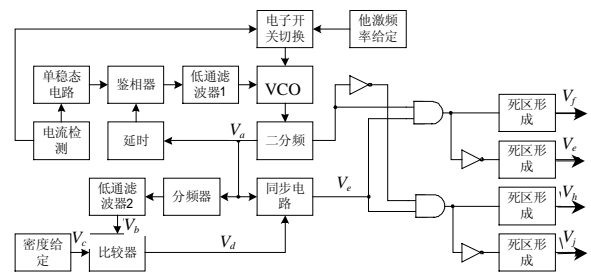


图 6 PDM 控制电路框图

Fig. 6 Block diagram of PDM control circuit

图 7 为对 PDM 控制电路信号的仿真结果。图 8 为变压器原边输入电压  $V_o$  和副边输出电流  $i_o$  的仿真波形。图中对应的脉冲密度为  $5/8$  时的情况，逆变器平均输出电压为最大输出电压的  $5/8$ 。比较器的输出经同步电路同步后可以确保在整个的谐振周期内不出现电流状态的突变，防止出现不完整的脉冲。图 7 中给出了一个桥臂上下管脉冲的驱动信号  $V_f$  和  $V_g$ ，由图中可见上桥臂的 IGBT 有处于常断的状态，下桥臂有处于常通的状态，这样就大大降低了开关管的平均开关频率，减小了开关损耗。谐振频率为 20kHz，而开关管此时实际的平均开关频率为 12.5kHz。由图 8 中可以看出逆变器输出电压 (变压器原边输入电压) 中不包含直流分量，可以避

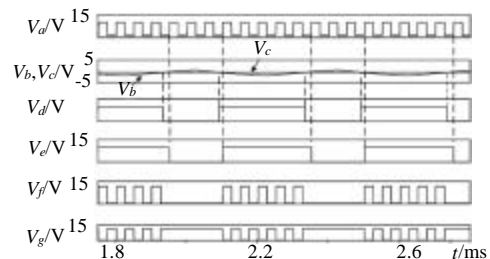


图 7 PDM 控制信号的仿真波形

Fig. 7 Simulated signal waveforms in the PDM control circuit

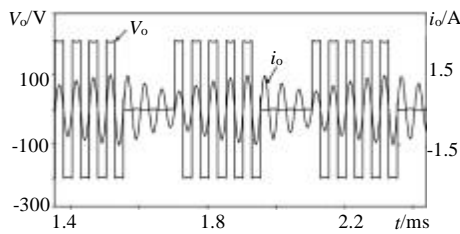


图 8 脉冲密度为 5/8 时的仿真波形  
Fig. 8 Simulated waveforms in case of PDM control (pulse density 5/8)

免高频高压变压器的磁饱和。为了获得较宽的调功范围实际应用中脉冲密度调节范围为: 1/60~1, 确保电源系统可以获得较宽的调功范围, 在低功率时平均的开关频率也大为降低。由于电路工作于微感性状态和其他逆变调功方案相比可方便地实现开关管地软化, 加之平均开关频率地降低, 可以获得相当低的开关损耗。

#### 4 实验结果

图 9~12 为塑料薄膜表面处理电源的实验波形, 其中  $V_o$  为逆变器输出电压(变压器原边输入电压),  $i_o$  为变压器副边输出电流。为了能更清楚的表示实验结果, 取脉冲密度调节范围为: 1/16~1, 而实际应用中采用的脉冲密度调节范围为: 1/60~1。固定的直流母线电压为 200V, 工作频率为 20kHz, 最大输出功率为 8.62kW。

图 9 为满功率情况的实验波形, 脉冲密度为 1, 逆变器输出电压波形中没有零电压的状态, 在所有的脉冲周期中逆变器输出功率给负载。图 10 和图 11 分别为脉冲密度为 10/16 和 4/16 的实验波形。其中零电压状态和交流方波电压状态交替出现, 在交流方波电压状态中逆变器输出功率给负载, 在零电压状态逆变器没有功率输出。图 10 和图 11 分别对应的平均开关频率为: 12.5kHz 和 5kHz, 可见采用 PDM 控制后, 在低功率情况下相对于其他控制方案, 开关管的平均开关频率明显降低。图 12 为脉冲密度为 1/16 的实验波形, 此时的输出功率达到了最小。逆变器在每 16 个脉冲周期中有一个脉冲周期对负载提供功率, 剩下的 15 个脉冲周期为零电压状态。

在整个的调功过程中, 负载谐振频率 20kHz 基本保持不变, 实现了定频调功。由于逆变器工作于微感性状态, 所以很方便地实现了对开关管的软化。

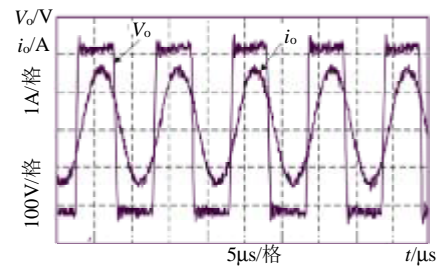


图 9 满功率情况的实验波形  
Fig. 9 Experiment waveforms in case of full power operation

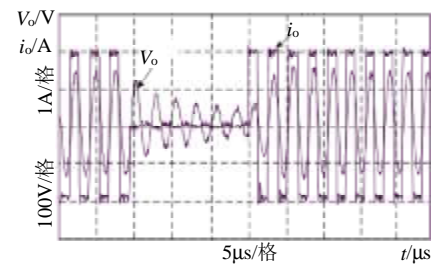


图 10 脉冲密度为 10/16 的实验波形  
Fig. 10 Experimental waveforms in case of pulse density 10/16

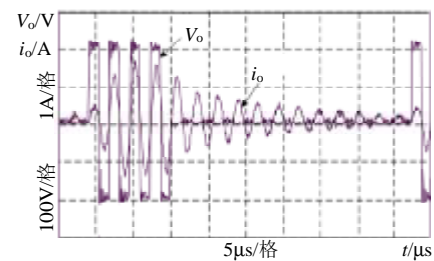


图 11 脉冲密度为 4/16 的实验波形  
Fig. 11 Experimental waveforms in case of pulse density 4/16

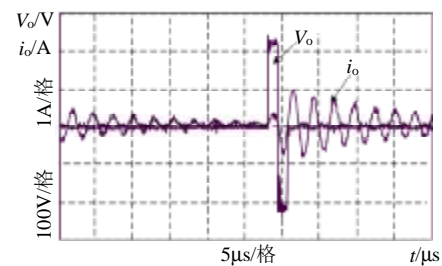


图 12 脉冲密度为 1/16 的实验波形  
Fig.12 experimental waveforms in case of pulse density 1/16

#### 5 结论

本文采用脉冲密度调制控制研制了一台用于塑料薄膜表面处理的高频高压放电电源, 基本克服了其他调功方案用于介质阻挡放电型负载的缺陷。实现了定频, 定压调功和开关管的软化, 降低了平均开关频率, 使开关损耗大为减少。并且扩大了调功范围, 在低功率时也可以获得稳定的放电。

## 参考文献

- [1] Senichi Masuda, Shunsuke Hosokawa, Ikuo Tochizawa. Surface treatment of plastic material by pulse corona induced plasma chemical process-PPCP[J]. IEEE Trans. IA. 1975, 30(2): 328-335.
- [2] Akagi H, Nabae A. A voltage-source inverter using IGBT's for a 50kHz 10kV corona surface treater[C]. IEEE/IAS Annual Meeting, Pittsburgh, PA, 1989. 1164-1169.
- [3] 方亮, 付海金. 离子表面处理聚乙烯中空间电荷分布[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 151-154.
- Fang Ling, Fu Haijin. Space charge distribution of polyethylene after surface treatment by plasma[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 151-154.
- [4] 温晓辉, 詹如娟. 电子回旋共振等离子体用于聚四氟乙烯表面改性[J]. 真空科学与技术, 2002, 22(5): 372-375.
- Wen Xiaohui, Zhan Rujuan. Surface modification of polytetrafluorethylene film with electron cyclotron resonance plasma [J]. Vacuum Science and Technology, 2002, 22(5): 372-375.
- [5] 陈杰榕. 低温等离子体处理聚酯(PET)表面润湿性与表面结构的研究[J]. 高等学校化学学报, 1997, 18(3): 466-471.
- Chen Jierong. Studies on the surface wettability and surface structure of polyester treated with low temperature plasma[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 1997, 18(3): 466-471.
- [6] 刘钟阳, 吴彦, 王宁会. DBD 型中高频臭氧发生器的动态负载特性[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 61-64.
- Liu Zhongyang, Wu Yan, Wang Ninghui. Dynamic load characteristics of a dbd medium/high frequency ozonizer[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 61-64.
- [7] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.
- [8] 罗毅, 方志介. 介质阻挡放电影响因素分析[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 81-83.
- Lou Yi, Fang Zhi. Analysis of influencing factors on dielectric barrier discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 81-83.
- [9] Dmowski A, Bugyi R, Szezyk P. A novel series-resonant dc/dc converter with full control of output voltage at no-load condition-computer simulation based design aspects[C]. IEEE/IAS Dearbom, MI, Annual Meeting. 1992. 924-928.
- [10] 李彦峰, 陶海敏. 介质阻挡放电负载电路中的频率跟踪技术[J]. 高压电压技术, 2002, 28(7): 13-14.
- Li yanfeng, Tao haimin. Frequency tracing technology in dielectric barrier discharge load circuit[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(7): 13-14.
- [11] Roy P P. Analysis of the series resonant converter using a frequency domain model [C]. Proc. IEEE PESC. Cambridge, MA, 1991. 1164-1169.
- [12] 许峰, 徐殿国, 柳玉秀. 一种新型的全桥零电压零电流开关 PWM 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 147-152.
- Xu Feng, Xu Dianguo, Liu Yuxiu. A Novel Zero-voltage and Zero-current-switching (ZVSZCS) Full Bridge PWM Converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 147-152.
- [13] 许春雨, 陈国呈. 张瑞斌三相软开关逆变器的 PWM 实现方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 23-27.
- Xu Chunyu, Chen Guocheng, Zhang Ruibin. A PWM realization method for three-phase soft-switching inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 23-27.
- [14] 张芝涛, 鲜于泽, 杨波. 介质阻挡强电离放电用 IGBT 逆变电源的研制[J]. 电力电子技术, 2001, 35(5): 10-12.
- Zhang zhitao, Xian yuze, Yang Bo. Development of IGBT inverter power supply used in strong ionization discharge of dielectric barrier[J]. Power Electronics, 2001, 35(5): 10-12.
- [15] 周林泉, 阮新波. 一种新颖的 ZCZVS PWM Boost 全桥变化器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 90-94.
- Zhou Linquan, Ruan Xinbo. A novel ZCZVS PWM boost full-bridge converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 90-94.

收稿日期: 2005-02-08。

作者简介:

刘勇(1975-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士研究生, 从事电力电子技术及其工业应用方面的研究;

何湘宁(1961-), 男, 湖南长沙人, 博士, 教授, 博士生导师, IEE Fellow, IEEE 高级会员, 从事电力电子技术及其工业应用方面的研究和工程设计工作;

张仲超(1942-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为中高频感应加热电源、大功率变流器、相移 SPWM 技术以及电力电子技术的应用。