

基于脉宽阶梯调制的开关电源的设计与仿真研究

李静, 张晓

(中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 脉冲阶梯调制技术(PSM)是将阶梯调制(SM)技术和脉宽调制(PWM)相结合的一种技术, 对于高电压大功率电源系统调制有重要的应用价值。基于 PSM 技术的开关电源输出电压为在直流电压的基础上叠加 PWM 波, 可以满足聚变装置辅助加热电源供电的需求。PSM 变换器电路简单、控制方便, 具有更高的输出电压、更大的输出功率、输出电压的连续可调、系统的高可靠性、高效率等众多优点。仿真结果表明了所设计的电源电路结构和电气参数的正确性。

关键词: 脉宽阶梯调制; 高压开关电源; 仿真

中图分类号: TM714

Research on Design and Simulation of PSM-based Switching Power Supply

Li Jing, Zhang Xiao

(School of Information and Electrical Engineering of CUMT, JiangSu XuZhou 221008)

Abstract: The pulse step modulation (PSM) technology is the combination of the pulse width modulation (PWM) and the step modulation (SM), which has important practical value for high-voltage and high-power electrical power supply system. Switching power supply based on PSM technology outputs the PWM wave superimposed on DC voltage and could meet the demand of the supplementary heating system of fusion. The converter based on PSM has the advantage of simple circuit topology, convenient control, higher and continuously tunable output voltage, larger power output, high system reliability and high efficiency. Simulation results confirm the correctness of the designed circuit structure and selection of electric parameters.

Keywords: PSM; high-voltage switching power supply; simulation

0 引言

PWM(Pulse Width Modulation)技术一般应用中低电压等级、中小功率的开关电源中, 其原理简单, 技术成熟。但 PWM 开关电源大多局限在固定电压的输出模式, 其输出电压可调节范围十分有限。若要求 PWM 变换器输出高电压, 必须采用开关管的串联, 从而增加系统的复杂性, 降低了系统的可靠性。仅仅采用脉冲阶梯调制技术(SM)的高压电源输出电压是离散的, 并不能真正的实现电压的连续可调, 因而在考虑电压精度时, 必然存在一定的缺陷。

脉冲阶梯调制(PSM)技术是将脉宽调制(PWM)技术与阶梯调制(SM)技术相结合^[1], 应用在高电压、大功率电源系统中的一种重要的调制技术。最早是由瑞士的 W. Schminke 于 1985 年在 Brown Boveri Rev.72 上提出的。与级联型多电平变换器和应用堆波技术的多电平变换器相比, 基于 PSM 技术的变换器电路简单、控制方便, 具有更高的输出电压、更大的输出功率、输出电压的连续可调、系统的高可靠性、高效率等众多优点^[2]。因此, PSM 技术在高功率广播发射机、加速电源、NBI (Neutral Beam Injection)和 ECRH (Electron Cyclotron Resonance

基金项目: 中国矿业大学中央高等院校基本科研业务费专项基金 (2010ZDP01A10)

作者简介: 李静, (1987-), 女, 硕士研究生在读, 主要研究方向: 电力电子在电力系统中的应用

通信联系人: 张晓, (1974-), 男, 副教授, 主要研究方向: 电力电子在电力系统中的应用, 谐波抑制与无功补偿。E-mail: 416810228@qq.com

Heating)^{[3][4]}系统中获得了广泛的应用,成为高电压大功率系统中一种重要的调制技术。目前,PSM 技术主要应用于直流电源系统中,其输出电压可以达到几十千伏至几百千伏,功率输出可以达到几百甚至上千千瓦。

1 PSM 开关电源的基本原理

45 基于 PSM 技术的高压电源的主电路拓扑结构与基于 SM 技术的高压电源具有相同的拓扑结构,如图 1 所示。该电源由若干个直流模块(见图 2)构成,每个模块上都串接一个 IGBT 开关器件,通过控制 IGBT 的开关状态即可控制各个模块的工作方式,从而控制哪些模块工作在 SM 方式或 PWM 方式下^[5],使输出电压稳定在所要求的电压水平。

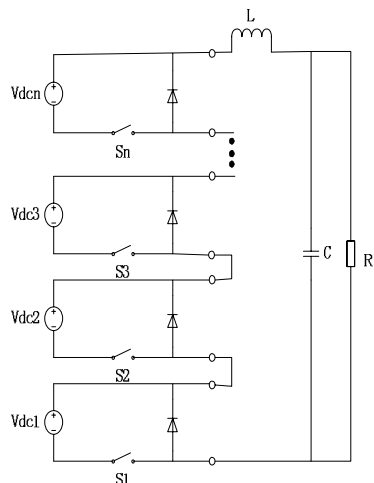


图 1. PSM/SM 电路原理图

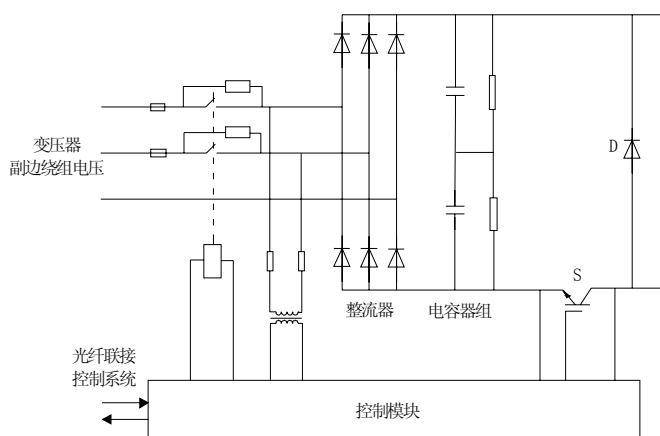


图 2. 模块拓扑结构图

先根据期望的输出电压计算出所需要的模块的个数,计算公式为: $V_D/U = m$ ($m < N$), 其中 V_D 为期望的输出电压值, U 为每个模块输出的直流电压, 将 #2—# $m+1$ 模块对应的开关 $S_2—S_{m+1}$ 闭合, 即工作在 SM 方式下, 控制 #1 模块工作在 PWM 方式下。

55 根据期望输出电压 V_D 与实际输出电压 U_o 的差值对工作在 PWM 方式下的模块进行反馈调节, 改变其占空比, 从而使输出电压稳定在 V_D , 输出电压可以实现从 $0—NU$ 之间的连续可调。在 PSM 方式下, 启动过程的输出电压如图 3 (a) 所示, 其中图 3 (b) 为进行局部放大之后的波形。

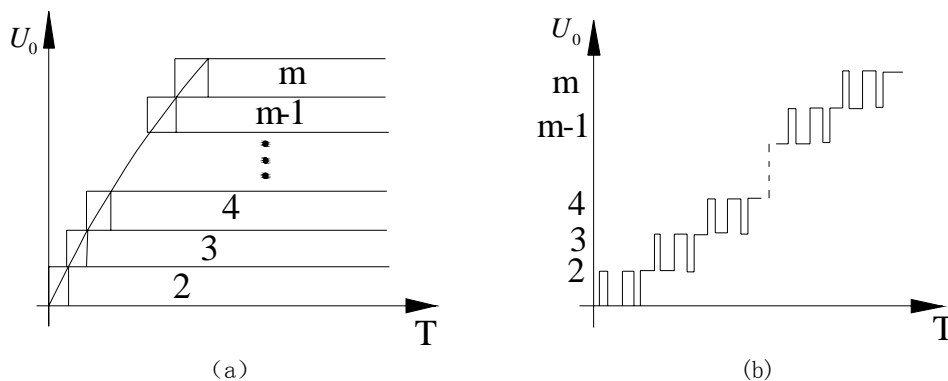


图3 输出电压波形

由以上分析可以明显的看出, 基于 PSM 技术的开关电源的输出电压为在直流电压的基础上叠加了 PWM 波, 与基于 SM 技术的开关电源相比, 输出电压精度高, 与基于 PWM 技术

的高压电源相比,纹波小,电路控制简单,元件的承受电压等级低,需要较小的滤波电感,有利于提高系统的动态稳定性。

2 基于 PSM 技术的开关电源的控制方法

基于 PSM 技术的开关电源系统中任意时刻都存在 n 个变量,即 PWM 信号的占空比和其余 $n-1$ 个开关管的开断状态,系统变量众多,因此需采用 DSP 或单片机进行变量控制,通过光纤传输控制信号^[6]。

基于 PSM 技术的开关电源软启动过程中,电源开始投入时只有 S1 工作在 PWM 模式,1#电源模块输出 PWM 波,随着启动过程的进行,脉宽逐渐加大,当脉宽加大到最大脉宽,脉宽寄存器出现溢出时,这时开通 S2,2#电源模块投入,脉宽寄存器清零,1#电源模块输出 PWM 波的占空比为 0,若输出电压未达到给定电压,1#电源模块的输出 PWM 波的占空比将从零再一次增大,达到最大占空比时,投入 3#电源模块,以此类推,直到输出电压与给定电压相等。

采用 DSP 或单片机作为控制芯片,可以对电源的软启动过程进行控制。同样可对电源由于负载突变或电网电压突变引起的输出电压的波动进行控制。由于控制器为多变量输出($n-1$ 路模拟量, $n-1$ 路开关量),控制器采用普通的 PI 调节器是不能满足要求的,因此必须重新对控制器进行设计。该控制器的设计思想是:以 PI 调节器为基础,将 PI 调节器的输出除以某一常数,其商可作为完全投入的电源模块的个数,余数部分可作为 PWM 的控制变量。控制原理框图如图 4 所示。其中, V_{ref} 为系统给定电压, V_f 为反馈电压, A 为常数。

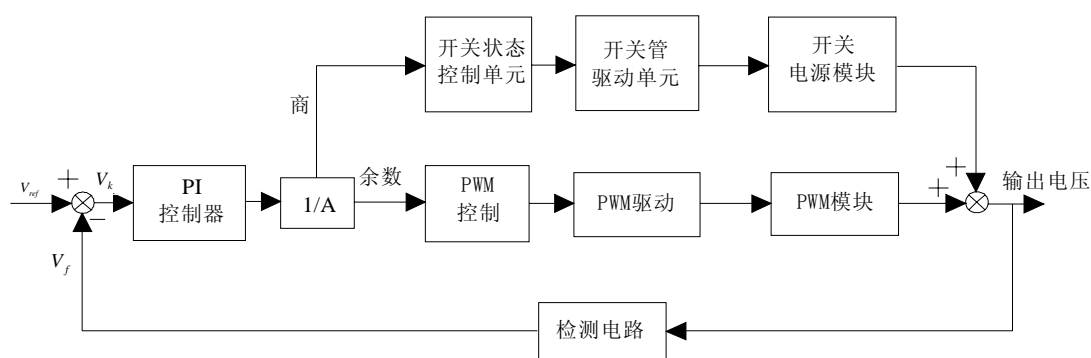


图4 控制原理图

3 仿真研究

本文对基于 PSM 技术的高压开关电源系统控制方法的仿真研究是在 MATLAB/SIMULINK 环境下,主要使用电力系统模块库(SimPowerSystems)和 SIMULINK 两个模块库进行。

3.1 直流电源模块

在本次仿真中,直流电源模块由三相交流电源、三相不控整流单元、滤波电容、IGBT 开关器件以及二极管构成,模块子系统外观如图 5 所示。

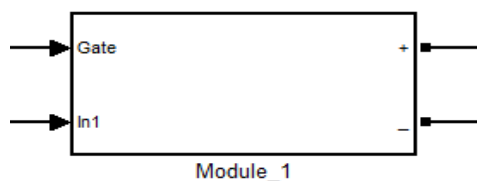


图5 模块子系统外观图

95

模块内部电路图如图 6 所示:

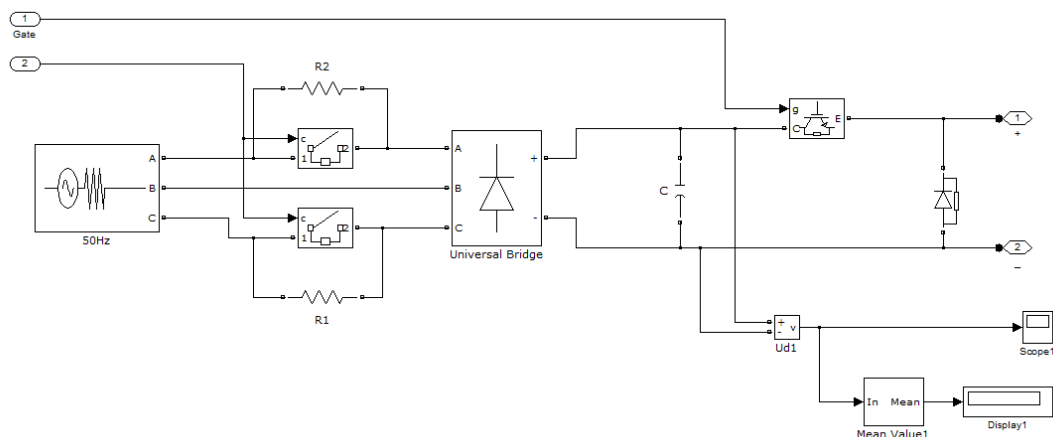


图6模块子系统内部电路图

100

模块设计输出电压为 1000V, 由三相不控整流的计算表达式可知:

$$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_i = 1000, \text{ 得出 } U_i = 740V$$

故在本次设计中, 三相交流电源的参数为 740V/50Hz; R_1 、 R_2 为软充电电阻, 分别串接在三相电源输出端口的 A、C 两相, 考虑到电容充电的时间以及对输出电压波形的影响, 经过仿真实验, 在本次设计中取 $R_1 = R_2 = 1\Omega$; 电容 C 为滤波电容, 参数设置为 $C=3.0$

105 mF;

三相不控整流桥以及二极管、IGBT 均采用默认参数; 控制电极 Gate 控制 IGBT 的闭合, In1 控制两个接触开关, 实现对软充电电阻进行短路; $Load = 15\Omega$, 对该单个模块进行仿真, 电路如图 7 所示:

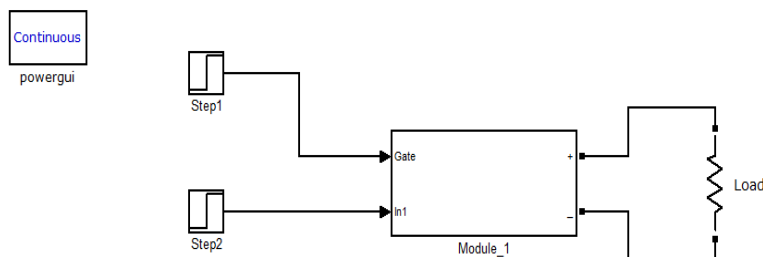


图7 单个模块输出仿真电路

110

Step1、Step2 为阶跃信号，Step time 均设置为 0.2s，即 0.2 秒之后将软充电电阻短路，同时加上负载。其输出电压波形如图 8 所示：

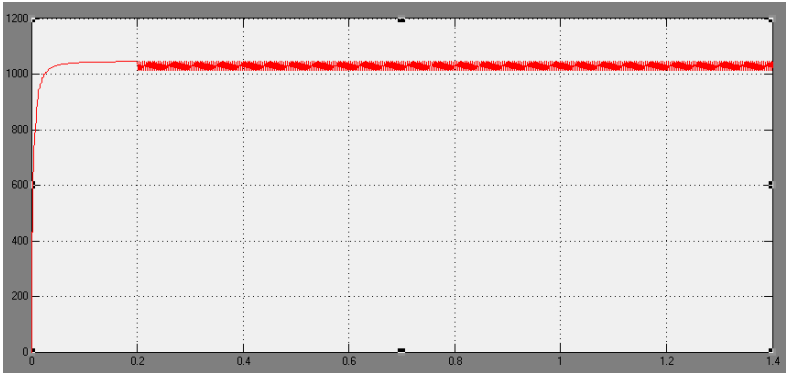


图8 单个模块输出电压波形

115

3.2 PWM 工作模块的设计与仿真

为简化仿真电路，在本次仿真中独立构造 PWM 模块，PWM 模块除包含前面单个直流电源模块外，最重要的是增加了反馈环节，模块外观子系统如图 9 所示：

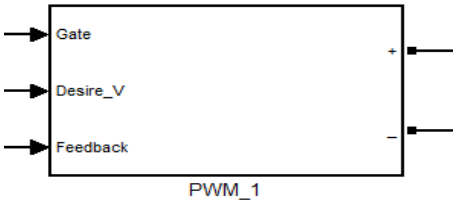


图9 PWM模块外观子系统

120

子系统内部电路图如图 10 所示：

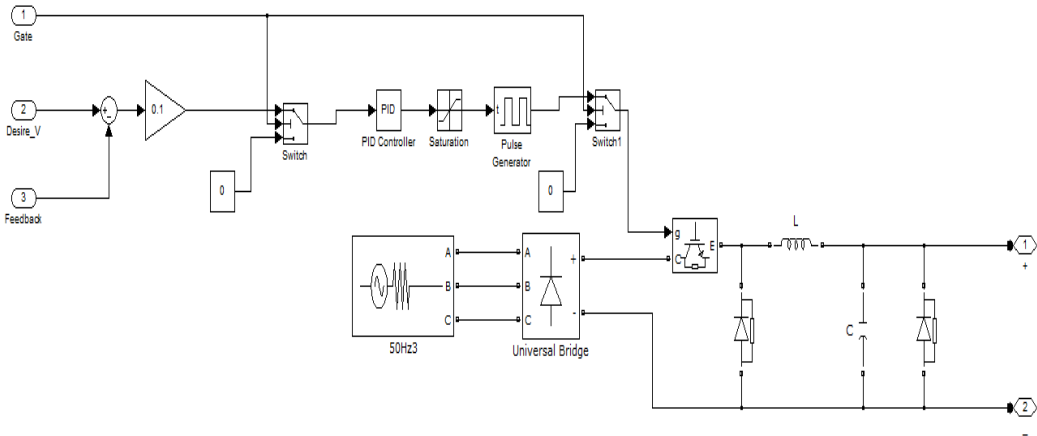


图10. 子系统内部电路图如图

125

Gate 端口作为 PWM 模块的使能端口，当 Gate=0 时，IGBT 处于关闭状态，模块输出为 0，当 Gate=1 时，电路工作在闭环 PWM 方式，即可等效为一个闭环的 Buck 电路。信号开关可以防止 PID 发生错误的积分计算，从而增大输出电压误差。

3.3 开关控制系统的设计与仿真

本次仿真电源系统使用 8 个直流电源系统模块、1 个 PWM 电源模块进行电路仿真，只

130

需要对 8 个直流电源模块的 IGBT 进行控制。控制算法如下：先根据要输出的直流电压经算出所需要使用的模块的个数，由于每个模块的额定输出电压为 1000V，则有 $m = \frac{V_{REF}}{1000}$ ，其中 V_{REF} 为所期望的输出电压。再将 m 与 “0” 进行比较，若 $m > 0$ 则第一个 IGBT 的控制信号输出为高电平，否则输出为低电平，同时执行 $m = m - 1$ 运算，若 $m > 0$ 则将下一个 IGBT 的控制信号输出为高电平，以此类推，直到运算到最后一个模块。开关控制电路外部框图及内部结构图分别如图 11 和图 12 所示。

135

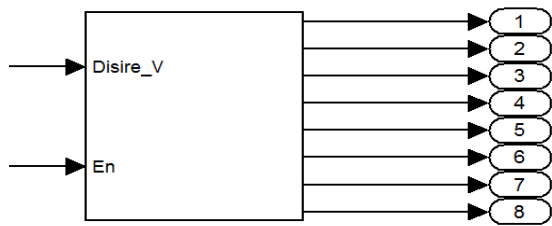


图11 开关控制电路外部框图

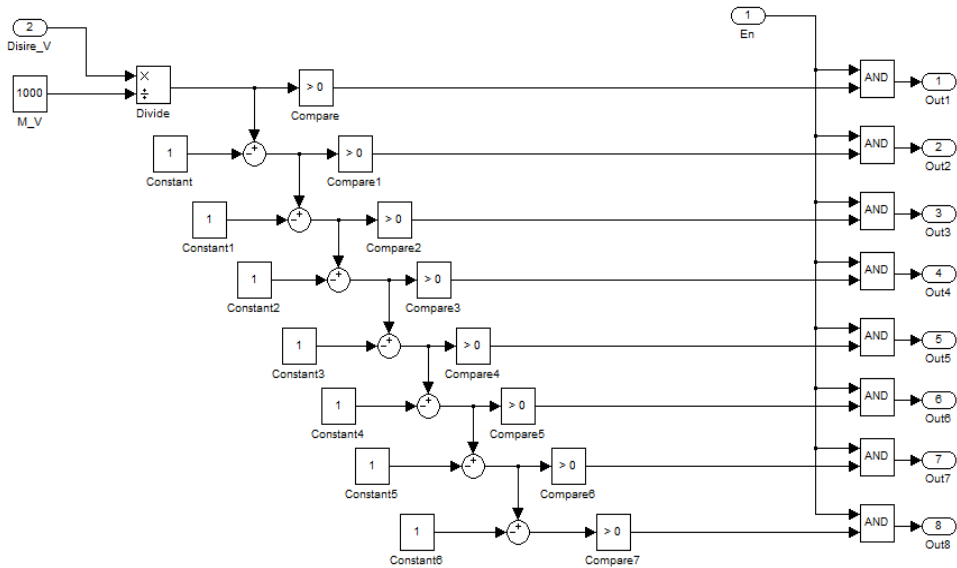


图12 开关控制系统内部结构电路

140

3.4 综合仿真

仿真电源系统由 8 个可工作在 SM 方式下的直流电源模块以及 1 个工作在 PWM 方式下的直流电源模块组成，理论上可输出 0-9KV 的任意电压波形。总的电路结构如图 13 所示。

145

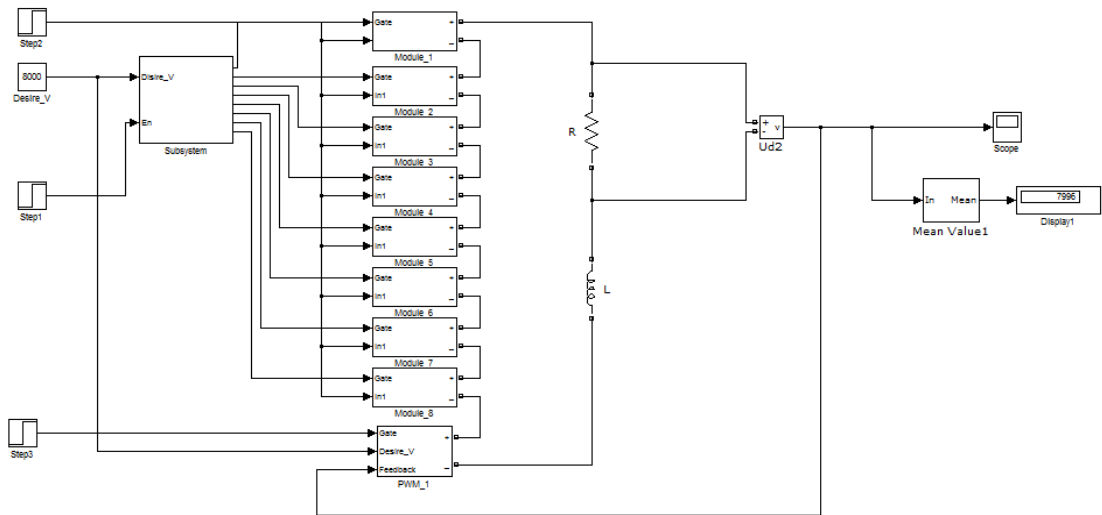


图13 电源系统电路图

输出电压波形如下图所示：

150

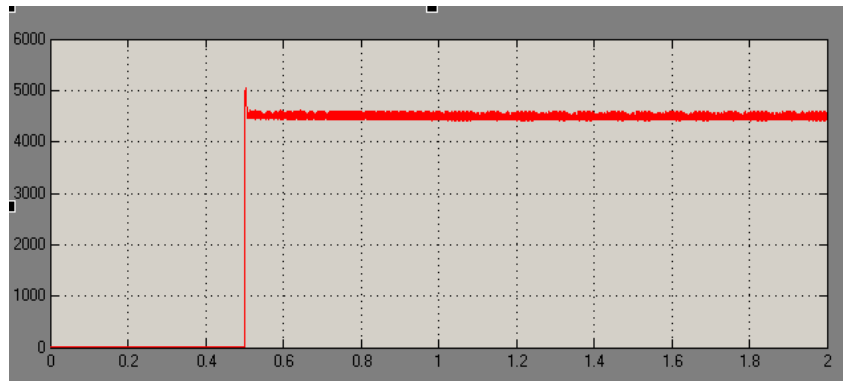


图14 Desire_V =4500V时的输出电压

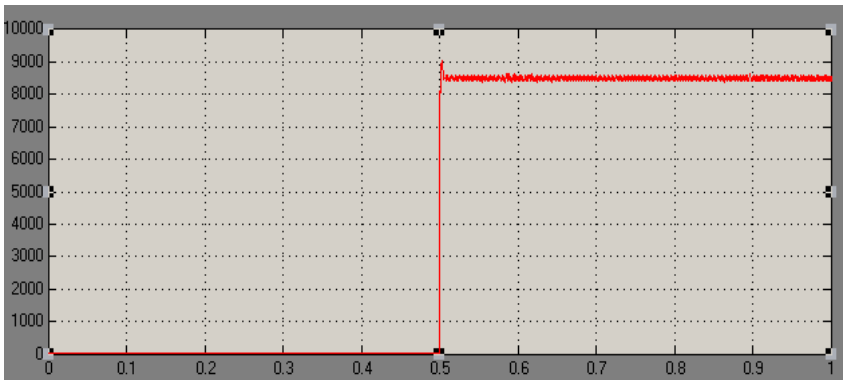


图15 Desire_V =8500V时的输出电压

155

从以上输出电压波形可以看出，随着输出电压等级的增加，即串联模块的数目越多，超调以及纹波系数都在降低，因此 PSM 高压电源技术在高压、大功率系统中有着很好的应用前景。

160 **4 结论**

本文介绍了脉冲阶梯调制技术（PSM）的基本原理，对基于 PSM 技术的高压电源模块的电路结构以及电源系统的拓扑结构进行详细的分析，并提出相应的控制策略。在 MATLAB

165 的仿真环境下,对基于 PSM 技术的电源系统进行了仿真,仿真实验结果表明了所设计的高压开关电源系统的正确性和可用性。PSM 变换器电路简单、控制方便、输出电压的连续可调、系统可靠性高,在一些领域达到了广泛的应用,具有相当的研究价值。

[参考文献] (References)

- 170 [1] 杨雷,傅鹏,刘小宁.采用脉冲阶梯调制技术的 50KV、100A 直流高压电源设计[J].高电压技术,2009 年,第 35 卷第 9 期.
- [2] 杜少武,张秀青,安芳.基于脉冲阶梯调制的级联型逆变器研究[J].现代电子技术,2008 年第 7 期.
- [3] 杜少武,张崇巍,丁同海.ECRH 负高压脉冲电源控制系统的设计[J].电工电能新技术,2004 年 1 月,23 卷.
- [4] 张明.J-TEXT 托卡马克装置脉冲电源系统的实现及运行分析[D].武汉:华中科技大学,2008
- 175 [5] 杨钰辉.基于 PSM 技术的高压开关电源研究[D].合肥:合肥工业大学,2006 年.
- [6] 郝欣.基于 PSM 高压开关电源控制策略研究[D].合肥:合肥工业的大学,2007