

文章编号: 1005-0523(2004)01-0051-04

# 开关电源系统的仿真研究

骆春敏

(华东交通大学 电气与工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**通过数学的方法,把小功率开关电源系统表示成线性传递函数和非线性控制模型,建立了一种开关电源全系统的仿真模型,提高了仿真速度.仿真结果与实验结果基本符合.

**关键词:**开关电源;传递函数;脉宽调制;MATLAB 仿真

中图分类号: TM44

文献标识码: A

## 1 引言

随着电力电子技术的不断进步和仿真应用工具的成熟,对于电源的仿真大多有现成的仿真模型,如 Pspice 和 EWB 可用来仿真电子线路.但是实际应用中发现它们在仿真含高频变压器的电源电路时,不仅速度慢而且偏差较大.另外, MATLAB 5.2 以上版本增加了 Power System Blockset 工具箱,它能用于电路仿真,但在用于反馈回路仿真时易出现代数环,在提供电力电子电路仿真工具的同时会使仿真速度大大降低.

本文针对以上仿真的不足,提出通过数学建模的方法把电源系统表示成线性传递函数或非线性

控制模型,输出整流部分可建立 Simulink 模型,达到全系统仿真的目的,并通过可靠的仿真实验与实际电路的实验结果,说明该模型的可靠性与可行性.

## 2 电路简介

以一实用多路输出开关电源(其中的一路输出 +5V)为例,图 1 是其主电路( $C_1=C_2=330\text{ }\mu\text{F}$ ,  $L_{51}=2.42\text{ }\mu\text{H}$ , 假负载  $R_d=1\text{ K}$ ),图 2 是其控制电路,它们都具有典型性.这是一个 PWM 闭环控制开关电源,主电路为 AC-DC 结构,两路反馈(电压和电流反馈)的 PWM 闭环控制电路是控制电路的主要部分.取其中的电压调整为例来分析,过载保护的基本原理相同,不一一列举.

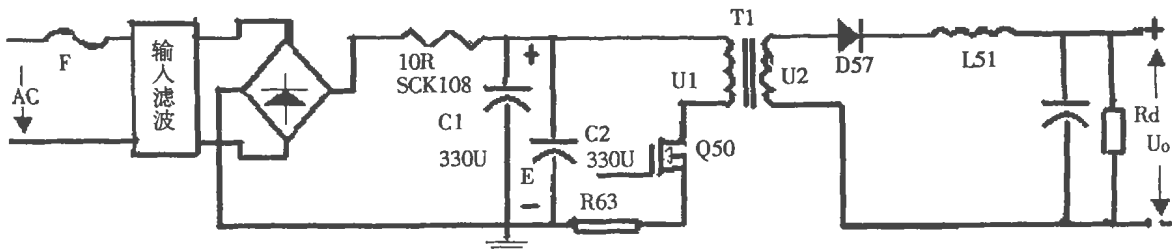


图 1 主电路原理图

注:反激式输出电压电流纹波大,在此用小型 LC 噪声滤波器取代昂贵的低电阻电容.

收稿日期: 2003-05-16

作者简介: 骆春敏(1979-),女,江西南城人,华东交通大学在读硕士研究生.

该开关电源的主要参数如下:

- 输入电压: 85~264 Vac 纹波: 50 mV
  - 输出电流电压: +5Vdc/2A, +13Vdc/1.6A, +38Vdc/5A
  - 稳压精度: ±2% 过流保护: 1.2 I<sub>max</sub>
- 本文主要研究该电源的简化模型.

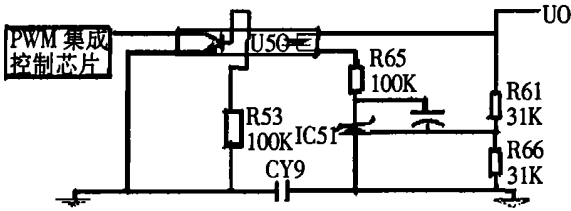


图2 控制回路原理图

### 3 模型的研究与建立

下面以电源的一路输出(+5V)为例,对主电路中的变压器部分、输入输出回路和控制回路逐一建立其模型,然后对整个系统建模,达到全系统仿真的目的(注:在满载工作条件下建立模型,故为CCM模式模型).

#### 3.1 主回路

若把MOSFET、变压器和二极管均看成理想开关器件,则由图1可得:

$$|U_2| = \frac{|U_1|}{n} = \frac{E}{n} \times \frac{d}{1-d} \quad (1)$$

DC-DC变换器的线性传递函数为:

$$A_1(S) = \frac{|U_2|}{E} = \frac{d}{n(1-d)} \quad (2)$$

式中: E 为整流后平均电压; U<sub>1</sub> 为一次侧电压; U<sub>2</sub> 为二次侧电压.

但实际情况下要考虑变压器的影响,图3是变压器的T型等效电路,根据图3,并由阻抗(电压)变换原则可得<sup>[1]</sup>

$$Z' = n^2 \times Z \quad (3)$$

$$U'_2 = n \times U_2 \quad (4)$$

式中: Z 表示变压器二次侧边阻抗; Z' 表示折算到此等效电路中的折合阻抗.

所以变压器的传递函数为:

$$B(S) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U'_2}{n} \times U_1 = \frac{C(S)}{n} \quad (5)$$

式中:

$$C(S) = \frac{U'_2}{U_1} = \frac{n^2 Z \times Z_m}{Z_m(Z'_2 + n^2 Z) + Z_1(Z'_2 + Z_m + n^2 Z)} \quad (6)$$

$$Z = \frac{SL + R_d}{1 + SLR_d} \quad (7)$$

因此,若考虑变压器的影响,则DC-DC变换器的传递函数为:

$$A_2(S) = \frac{|U_2|}{E} = B(S) \times \frac{d}{1-d} \quad (8)$$

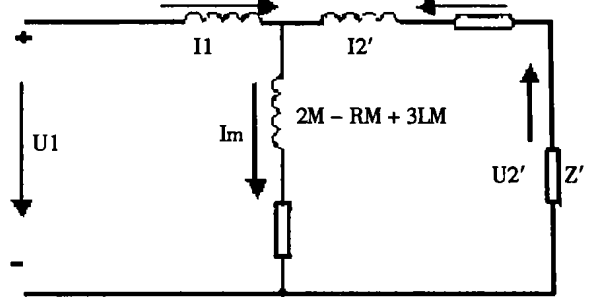


图3 变压器的T型等效

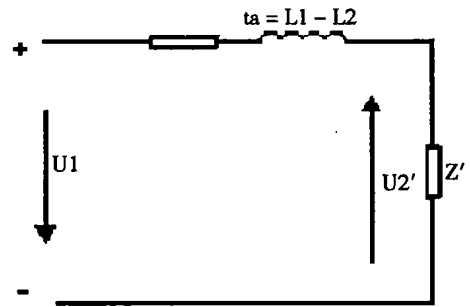


图4 变压器的近似

#### 3.2 输入回路

根据阻抗计算原则:保持其电路结构不变,而把它所带的负载全部折算到它的末端作为其等效负载,由图3有:

$$Z'' = R_1 + SL_1 + (R_m + SL_m) \parallel (Z' + R'_2 + SL'_2) \quad (9)$$

又根据T型等效电路的特殊情况: Z<sub>m</sub> 远大于 Z', 且 I<sub>m</sub> 非常小,电路可简化为图4,所以当电源趋于满载时有:

$$Z'' = n^2 Z \approx n^2 R'_d \quad (10)$$

#### 3.3 输出回路

为了简化电路,把输出回路等效为图5所示电路:

对其建模为单项半波整流滤波电路建模<sup>[3]</sup>. C<sub>63</sub>作用是储能,也相当于滤波电容,主要是L<sub>51</sub>和C<sub>64</sub>的滤波回路, R<sub>68</sub>为假负载.

当二极管D反向截止时,  $\frac{dU_o}{dt} = -\frac{U_o}{RC}$

当二极管D正向导通时,  $U_1 = U_2; I_o = \frac{U_o}{R}$

$$I_1 = \frac{1}{L} \int (U_1 - U_o) dt;$$

$$U_o = \frac{1}{C} \int (I_1 - I_o) dt$$

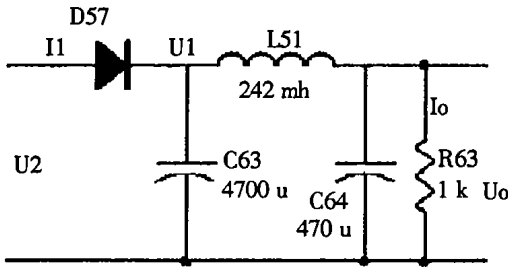


图 5 简化的输出回路

### 3.4 控制回路

当输出电压增大时, 取样电压与 IC<sub>51</sub> 的内部基准电压比较, 通过光电耦合器反应到 PWM 控制器, 从而调整输出电压, PWM 端调节范围为 1 V~5 V. 因其调节要在发生错误(或偏差)的下一个脉冲周期来时才能实现, 所以可用一个延时来表示这种滞后关系.

该电源的数学模型如图 6 所示.

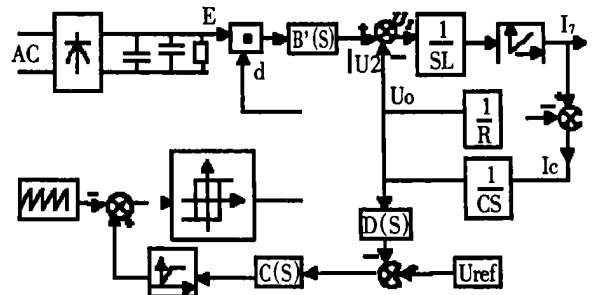


图 6 开关电源系统(取其中一路输出)的数学模型

## 4 仿真结果

对图 6 所示数学模型建立 Simulink 系统仿真模型(图 7), 并对其仿真, 对其中单个电阻、电感和电容元件, 可以用串联或并联的分支来定义, 如在串联分支中删除电容, 需要将其数值填写为 inf, 其详细情况可查阅参考文献[2]. 对此仿真模型设置仿真时间 0.05 s, 并选择变步长的 ode15 算法, 在输入电压为 264 V, 负载为满载情况下, 启动仿真可得其输出波形纹波(局部放大)如图 8, 该纹波的频率为 23.72 MHz; 得仿真稳态波形如图 9, 图 10 是对实际电路的试验结果(频率为 23.73 MHz). 可见仿真结果与实验结果基本一致, 说明这种模型是真实可靠的.

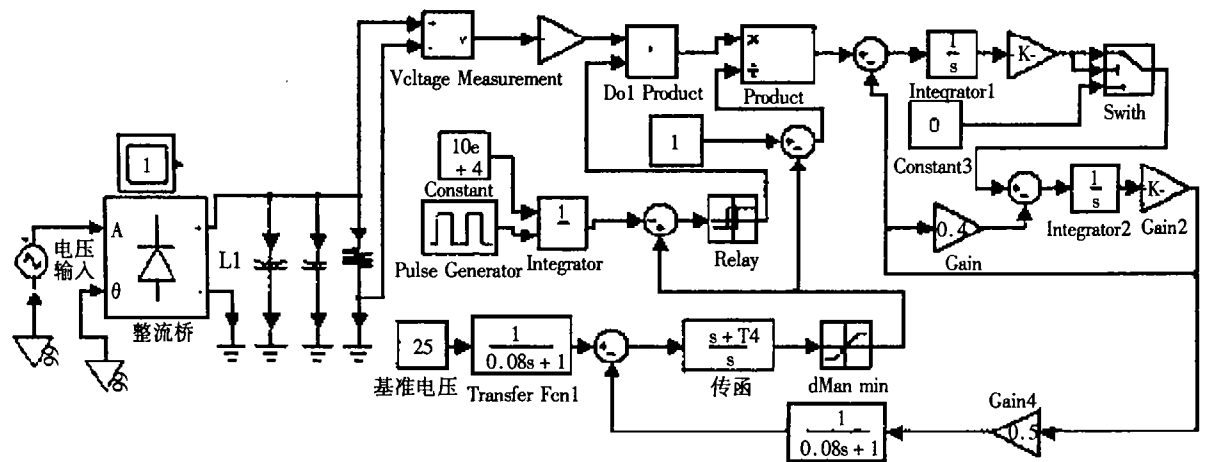


图 7 开关电源系统(输入 264 V, 输出 +5 V)的仿真模型(单端反激式模型)

## 5 误差分析

实际波形的纹波为 50 mV, 在仿真中趋近稳定时的纹波约为 30 mV, 频率误差为 10 kHz. 造成这些误差的原因是因为有些器件的参数选择可能趋

向理想, 如 MOSFET 未能考虑一些外界因素或其特性方面的参数难以设置, 在这方面模型建立有待改善, 但因在 50 kHz 开关频率的情况下, 纹波已很小, 所以该误差是允许的; 关于频率误差, 因为实际上频率在运行过程中就受外界的影响, 并与实际系统有关, 所以这种误差也是允许的.

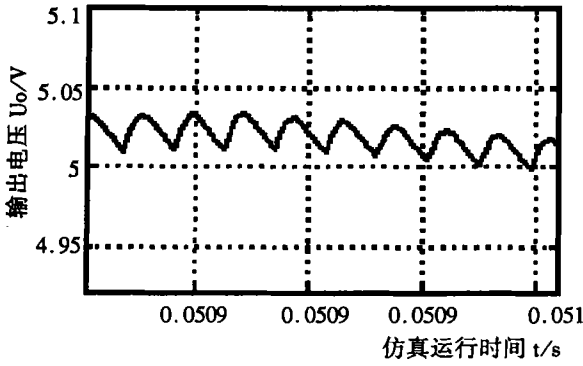


图8 满负荷条件下输出电压仿真纹波

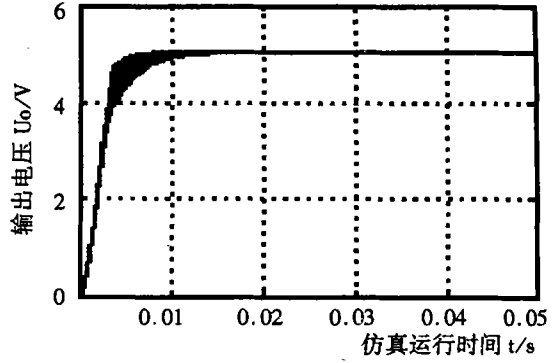


图9 稳态响应的仿真波形

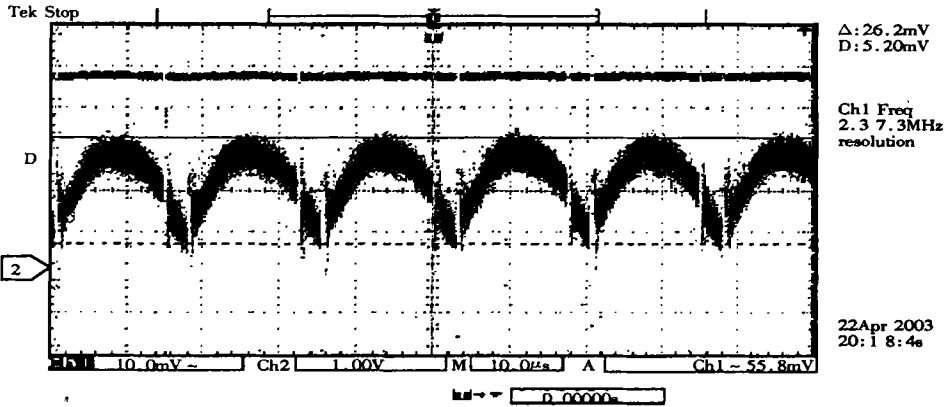


图10 满负荷条件下输出电压实验纹波(放大)

### 6 结论

本文给出了仿真环境下,用数学方法实现开关电源系统的建模,选择仿真时间为0.05秒,完成仿真只要2分钟左右,不仅避免了其它工具(如Pspice等)的极慢仿真速度,更提高了仿真的可靠性.仿真结果与实验结果表明,Simulink是控制系统仿真的一种功能完善、实现系统控制容易、构造模型简单

的强大的动态仿真工具.另外,对该模型进行适当的修改即可得到其它形式的开关电源模型.

### 参考文献:

- [1] 廖冬初.PWM控制逆变稳压源的非线性模型仿真[J].电工杂志,2000,(10).
- [2] 薛定宇,陈阳泉.基于MATLAB/Simulink的系统仿真技术与应用[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [3] 郑亚民,蒋保臣.基于MATLAB/Simulink的整流滤波电路的建模与仿真[J].电子科技,2002.

## Simulated Research of Switching Power-supply System

LUO Chun-min

(School of Electrical and Electronic Eng., East China Jiaotong Uni., Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In a mathematic method, switching power-supply system can be symbolized by linear transfer function and non-linear control model for an integral system simulation model. The model can quicken simulation. Simulation results based on the model agree well with experimental results.

**Key words:** switching power-supply; transfer function; PWM modulation; MATLAB; simulation