

基于 Saber 的开关电源设计与仿真

王红刚

(新乡市泰隆电气有限公司, 河南 新乡 453003)

摘 要: 使用 Saber 软件, 开环仿真了 DC/DC 开关电源, 输入电压波动时, 输出纹波电压较大, 不能满足设计要求. 采用小信号分析方法, 根据系统伯德图分析其传递函数的结构形式, 设计了闭环反馈网络. 将闭环反馈网络加入系统并仿真, 结果表明, 闭环反馈网络不仅使输出电压迅速上升, 而且减小了输出电压的纹波系数, 增强了输出电压的稳定性.

关键词: 开关电源; Saber; 闭环反馈补偿; 仿真; 传递函数

中图分类号: TP319

文献标志码: A

文章编号: 1674-3326(2012)04-0316-03

Design and Simulation of Switching Power Supply Based on Saber

WANG Hong-gang

(Xinxiang Tailong Electric Co. Ltd., Xinxiang 453003, China)

Abstract: DC/DC switching power supply is open-loop simulated with Saber software. When input voltage fluctuates, the ripple of output voltage is large and can not meet the design requirement. Adopting small signal analysis method, according to the Bode diagram of system, transfer function structure is deduced and closed loop feedback network is designed. The closed loop feedback network is added into system to simulate, and the result shows that closed loop feedback network not only makes output voltage rise quickly, but also reduce ripple coefficient of output voltage, improves stability of output voltage.

Key words: switching power supply; Saber; closed loop feedback compensation; simulation; transfer function

0 引言

近年来, 随着电子电路仿真技术应用领域的不断扩展, 对仿真技术也不断提出新的要求, 如增强仿真的可靠性和准确性, 提高仿真和建模效率等^[1]. 为满足这些要求, 相继推出了一系列的仿真软件^[2].

Saber 是全球最先进的, 也是唯一的多技术、多领域的系统仿真软件产品, 它已成为混合信号、混合技术设计和验证工具的业界标准, 可用于电子、电力电子、机电一体化、机械、光电、光学、控制等类型系统构成的混合系统仿真. 它可兼容模拟、数字、控制量的混合仿真, 便于在不同层面上分析和解决问题.

本文通过一个 DC/DC 闭环控制电路的仿真、闭环补偿电路的设计过程和 DC/DC 闭环控制电路的仿真结果, 系统描述采用 Saber 仿真软件设计与仿真电路的过程, 并详细分析了仿真结果.

1 仿真电路组成和工作原理

1.1 电路组成

Saber 将 DC/DC 功率变换电路简化为一个模型——平均模型电路, 在平均模型电路中, 用双管正激变换器替换功率转换电路的理想开关, 消除了与开关管有关的非线性后, 平均模型可在电路中分析小信号频率, 在使用瞬态分析时, 它可减少几秒钟的仿真时间^[3]. 其主要参数包括最大占空比、变压器匝数比、开通电压、控制电压的最大输出电压等. 反馈补偿网络 COMP10 主要参数由其电路模型确定, 本电路模型由 RC 电路和积分电路组成, 因此, 主要电路元件包括电阻(R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4)和电容(C_1 、 C_2). 为了在仿真过程中便于切换、控制输入或反馈, 采用三输入、单输出的选择开关, 通过改变仿真输入设置, 可选择任一路输入与输出连接. 设可变负载 PWLR 的阻值为 7.5Ω , 输出电压 15 V, 可计算电路输出功率 $P=30 \text{ W}$, 负载电

流 $I_L=2\text{ A}$. 滤波电感和输出电容组成的输出滤波器可稳定输出电压、减小输出电压纹波系数. 输入电压采用 150 VDC , 变压器匝数比为 3, 则占空比小于 0.5. 设置开关管频率为 200 kHz , 根据 DC/DC 开关电源设计公式计算电感 $L=0.53\text{ mH}$, 输出电容 $C=2.5\text{ }\mu\text{F}$.

从 Saber 模型库中找出上述元件模型, 放在原理图编辑窗口中, 根据上述计算参数, 分别输入各元件中.

1.2 电路工作原理

平均模型受控于 entlp 端输入的控制电压, 控制电压越高, 输出电压也越高. 为了输出 15 V 稳定电压, 要求控制电压按照输出电压的规律变化, 可按下式计算输出电压稳定后的控制电压: $V_{\text{out}}=[V_{\text{in}} V_c/(nV_{\text{ramp}})]-V_d$. 式中: $V_{\text{out}}=15\text{ V}$, $V_{\text{in}}=150\text{ V}$; $n=3$; $V_{\text{ramp}}=2.5\text{ V}$, $V_d=0.85\text{ V}$. 因此, 输出稳定后的控制电压 $V_c=V_{\text{ramp}} n(V_{\text{out}}+V_d)/V_{\text{in}}=2.5\times 3(15+0.85)/150=0.7925$. 如果电路不经

输出反馈, 直接加载控制电压, 即选择开关选择的输入为 in1, 则输出电压仿真波形如图 1 所示. 由图 1 可见, 经过 $250\text{ }\mu\text{s}$ 左右, 输出电压稳定于 15 V , 这与设计的指标一致. 因仿真时输入电压与控制电压稳定不变, 输出电压也稳定不变. 但实际电路会因输入电压的波动而导致输出电压变化^[4]. 由图 1 可见, 输入电压变化较大时, 开环控制输出电压纹波幅度较大, 其系数约为 $\sigma=(0.15/15)100\%=1\%$, 输出电压的上升时间约为 $250\text{ }\mu\text{s}$, 稳定后的电压约为 15.8 V , 与输入电压成正比, 不具有自动调整输出电压的功能.

2 传递函数的确定

在 Saber 菜单中, 选择 “List/Alter” 对话框, 再选择 “switch_vin_breakptl”, 点列表子项, 找 “input”, 点击 “编辑”, 在输入域中输入 “use2”, 点击 “OK” 按钮. 仿真时, 这就通过选择开关将交流电压源与平均模型连接起来了. 在交流分析页面中, 编辑下列各域(以下符号 “||” 为转行符):

Basic tab |Start Frequency: 0.1 |End Frequency: 100meg |Monitor Progress: 10 |Sample Point Density: 128 |Number of Points: 1000 ||Plot after analysis: Yes-Open only |Input/output tab |Plot File: ac |Data File: _ ||Initial Point File: tr1 ||.

将 tr1 文件输入初始点文件中, 以上一次暂态分析为交流分析的操作点, 设置结束点, 执行小信号频率分析指令, 得到从 0.1 到 100 MHz 的频率响应(图 3). 由图 3 可见, 系统传递函数有两个极点和一个零点. 补偿频率= $1/2$ (输出滤波器谐振频率)的两个零点, 以消除极点影响. 因补偿器是积分器, 在原点加入一个极点, 另一极点为 $1/4$ 开关频率; 频率阶跃处所有响应产生一个单极点突降^[5], 可消除串联电容等效电阻的影响.

3 反馈补偿器设计

为了使输入电压波动时输出电压稳定, 需将输出电压反馈, 组成负反馈系统^[6]. 本设计采用反馈补偿网

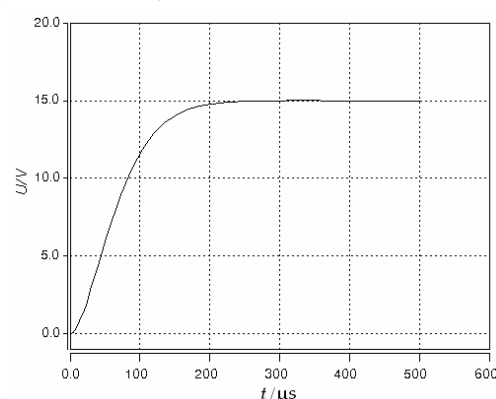
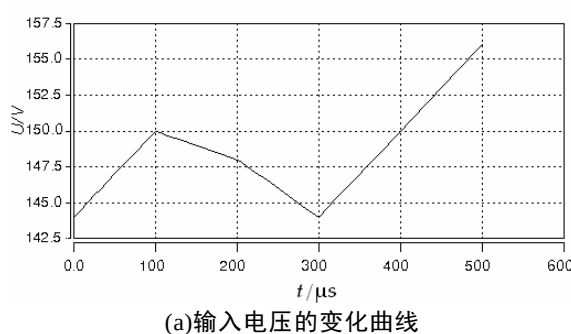
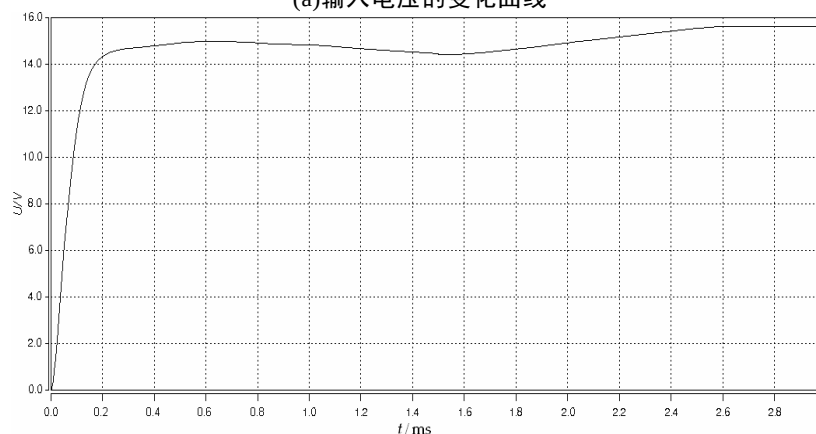


图 1 开环控制的电压输出
Fig. 1 Voltage output under open-loop control



(a)输入电压的变化曲线



(b)输出电压的变化曲线

图 2 输入变化时的输出电压

Fig. 2 Output voltage with variational input

络 COMP10(图 4). C_1 和 R_1 确定一个零点频率 f_{z_1} , C_2 和 R_2 确定另一个零点频率 f_{z_2} ; C_1 和 R_3 确定一个极点频率 f_{p_2} , 另一个极点频率 f_{p_1} 接近于 0 Hz.

3.1 元件值计算

根据输出滤波器的谐振频率, 计算补偿器期望零点频率. $f_{res} = 0.159/\sqrt{LC} = 0.159/\sqrt{0.53m \times 25\mu} =$

4.3 kHz , $f_{z_1} = f_{z_2} = (0.5)f_{res}$; 因此, $f_{z_1} = f_{z_2} =$

$0.5 \times 4.3 \text{ kHz} = 2.15 \text{ kHz}$. 已知开关频率

$f_{sw} = 200 \text{ kHz}$, 则极点频率 $f_{p_2} = 0.25 f_{sw} = 0.25 \times$

$200 \text{ kHz} = 50 \text{ kHz}$. 在图 3 分析交流产生的相位

和增益中, 50 kHz 处的增益为 -16.37 dB , 由于

还有一个极点频率 f_{p_1} , 因此, 在 50 kHz 处还

需要 3 dB 的增益, 才能将图 3 的交流频率下拉到 50 kHz , 故有

$R_2/R_3 = (16.37 + 3) \text{ dB} = 19.37 \text{ dB}$, $19.37 \text{ dB} = \lg^{-1}(19.37/20) = 9.3$. 假设

$R_2 = 50 \text{ k}\Omega$, 可算出 $R_3 = 50/9.3 = 5.38 \text{ k}\Omega$. 在 f_{z_1} 和 f_{z_2} 处要求的

增益为 $A_{v(2.15 \text{ kHz})} = (2.15/50) \times A_{v(50 \text{ kHz})}$, $A_{v(50 \text{ kHz})} = 9.3$. 因此, 可

算出 $A_{v(2.15 \text{ kHz})} = (2.15/50) \times 9.3 = 0.4$, 2.15 kHz 处的增益由

$R_2/(R_1 + R_3)$ 决定, 则有 $50/(5.38 + R_1) = 0.4$. 因此, 求出

$R_1 = 50/0.4 - 5.38 = 119.62 \text{ k}\Omega$. 频率为 $f_{z_1} = f_{z_2} = (2\pi R_1 C_1)^{-1} =$

$(2\pi R_2 C_2)^{-1} = 2.15 \text{ kHz}$, 相应的电容值分别为 $C_1 = 0.159/(f_{z_1} R_1) = (0.159/(2.15 \times 119.62 \times 10^3)) =$

618 pF ; $C_2 = 0.159/(R_2 f_{z_2}) =$

$0.159/(50 \times 2.15) = 1479 \text{ pF}$. R_4 与 R_1 、 R_3 构成了对 15 V 输出电压的分压电路, 运算放大器的参考电压为 5 V .

根据 $15R_4/[R_4 + (R_1 + R_3)] = 5$, 可计算出

$R_4 = 62.5 \text{ k}\Omega$.

3.2 闭环控制输出电压波形

根据参数计算结果, 设计了反

馈补偿电路. 仿真时, 将选择开关

设为 $\text{input} = \text{use3}$, 将反馈补偿网络

加入系统电路. 仿真设置同上, 输

出电压波形见图 5. 由图 5 可见,

输出电压纹波系数

$\sigma = (0.015/15) \times 100\% = 0.1\%$, 输出电

压的上升时间为 0 s , 稳定后的电

压为 15 V , 这说明闭环反馈网络

具有输出电压上升速度快、纹波系数小、稳定输出电压的作用.

4 结束语

通过开环仿真 DC/DC 开关电源, 发现输出与输入电压成比例, 不能满足设计要求; 对系统进行小信号分析, 给出控制输出的伯德图, 据此分析系统传递函数的结构形式, 根据传递函数设计闭环反馈网络, 求出反馈网络各元件参数值. 将反馈网络加入系统仿真, 结果表明, 设计的反馈网络不仅使输出电压迅速上升, 而且减小了输出电压的纹波系数, 增强了输出电压的稳定性. 因此, 采用 Saber 软件不仅便于设计与仿真电路, 而且可根据系统小信号分析结果得出系统传递函数, 并校正分析电路, 解决了求取实际系统传递函数难以进一步分析的关键问题.

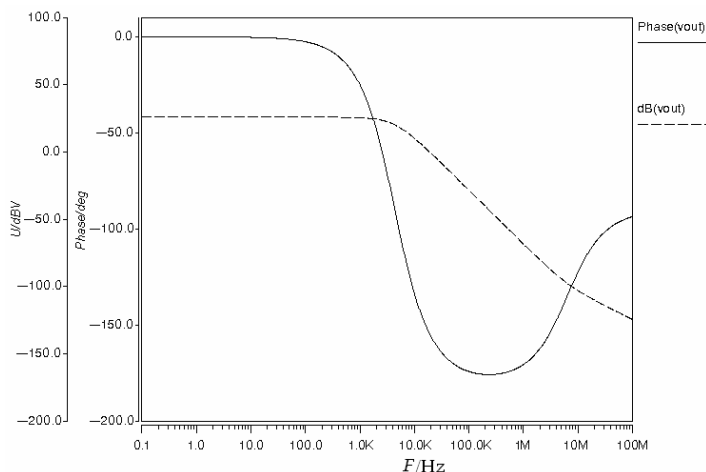


图 3 传递函数的波德图

Fig. 3 Bode diagram of transfer function

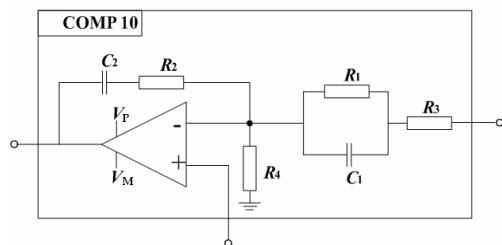


图 4 典型的反馈补偿网络

Fig. 4 Typical feedback compensating network

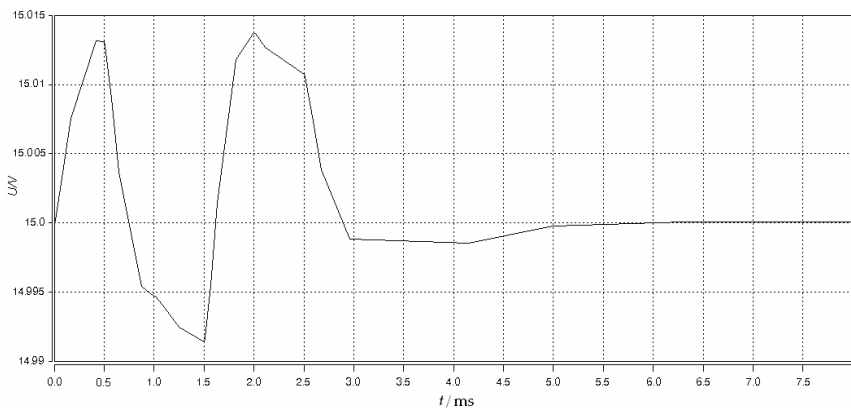


图 5 加入闭环反馈的输出电压波形

Fig. 5 Output voltage waveform under closed-loop feedback