

编者按 --

为满足广大科技工作者更新科技知识、继续教育和提高理论水平的需求,本刊开辟“电力电子知识讲座”专栏,邀请业界的资深教授执笔撰写有关电力传动控制、电源、系统应用等专题,以便向广大读者提供继续教育资源。读者对哪方面专题感兴趣,请向本刊编辑部提出,以便邀请相关专家供稿。也希望高校讲授电力电子及其专题的老师们积极提供电力电子专题讲座稿件。本刊将分期连续刊登,希望能受到读者的欢迎。

从本期开始,刊登专题讲座“开关电源系统的瞬态分析与综合”,是清华大学蔡宣三教授去年为工作在第一线的电力电子研究开发部门的工程师做专题培训讲演的讲稿。

众所周知,开关电源作为非线性闭环调节系统,学习掌握其瞬态分析与综合,有一定难度。高校电力电子教科书较少涉及开关电源的瞬态建模分析,由于课程学时少,为本科或研究生开设的电力电子专题课,一般来不及讲授这些内容。使大专院校毕业的研发工程师,在工作中遇到这类问题时,由于缺乏理论指导,常常束手无策,或照猫画虎,而不知其所以然。电源系统的瞬态建模分析与综合涉及电路理论、拉普拉斯变换、经典控制理论(自动调节原理)等基础知识,使有心自学者望而却步。

本专题讲座的特点是:紧密结合开关电源实际,穿插介绍有关的必要的预备知识,如传递函数、方块图、伯德曲线等,深入浅出,图文并茂。从物理和数学两方面分析复频域特性与时域特性的关系,直观而不抽象。在现场讲演时,受到工程技术人员欢迎。本刊在刊登前,请作者对原讲稿进行内容局部补充和文字修饰,将分期刊登,与读者共享。

PWM 开关稳压电源的瞬态分析与综合(一)

Transient Analysis and Synthesis of PWM Switching Voltage Regulators(1)

清华大学 蔡宣三

摘要: 开关稳压电源瞬态分析的核心问题是建立一个恰当模型。瞬态分析包括大信号分析、小信号分析和直流分析。系统瞬态分析和设计(综合)的传统方法是频域法,在复频域内研究分析开关电源的瞬态性能,如:稳定性、鲁棒性、快速性和对输入电压或负载的抗扰动性等。给出了电压型控制的开关电源单环系统的频域模型,以及系统的频域分析、设计(综合)方法。讨论了电压控制器(补偿网络)的参数选取及双环(电流型)控制的开关电源建模。

关键词: 开关电源 电压调节器 瞬态分析 系统综合 小信号 频域和时域 补偿网络 电压型和电流型控制 单环和双环

Abstract: The appropriate modeling is a central to the transient analysis of a switching regulator, including large signal analysis, small signal analysis and DC analysis. Traditionally, the frequency domain approach is often used for the transient analysis and control design (synthesis) of the switching regulators, that is: to investigate the transient behaviors of the switching voltage regulators in frequency domain, such as: stability, fastness, robustness, line and load rejections etc. The models in frequency domain of the single-loop (voltage-mode control) switching regulators and also the transient analysis and design approach of switching regulators are presented. The parameters selection of voltage controllers and modelling of the two loop (current mode control) SMPS are also discussed.

Key words: Switching-mode power supply(SMPS) Automatic voltage regulator(AVR) Transient analysis System synthesis Small signal Frequency & time domains compensator voltage-mode & current-mode control single-loop & two-loop.

1 PWM 开关电源瞬态分析

1.1 引言

开关型自动电压调节器(AVR)或开关稳压电源(SMPS),习惯称为开关电源。其瞬态分析方法有时域法和频域法两种。开关变换器的线性平均电路模型,是一

个线性时不变电路,描述了在小信号扰动下,开关变换器偏离额定稳态工作点的性能。小信号时域模型(线性状态方程)经过拉普拉斯变换后,可得到复频域(S域)模型, $S = \sigma + j\omega$,简称频域模型,可用以分析开关电源在频域中的性能。利用开关电源的时域或频域仿真模型,应

用仿真程序,可进行计算机仿真实验。在讨论频域分析与综合方法以前,先简略介绍什么是时域分析和闭环控制系统的时域性能指标。

开关稳压电源是以开关变换器为调节对象的电压自动调节闭环系统。被调量是直流输出电压。图1.1给出一个单环控制的AC-DC开关电源结构框图,交流输入端无隔离变压器的AC-DC开关电源又称离线式(off-line)开关电源。由图1.1可见,开关电源由两部分组成,即功率级电路和控制电路,前者包括开关和整流滤波电路,后者包括电压检测,误差放大,脉宽调制和驱动电路。

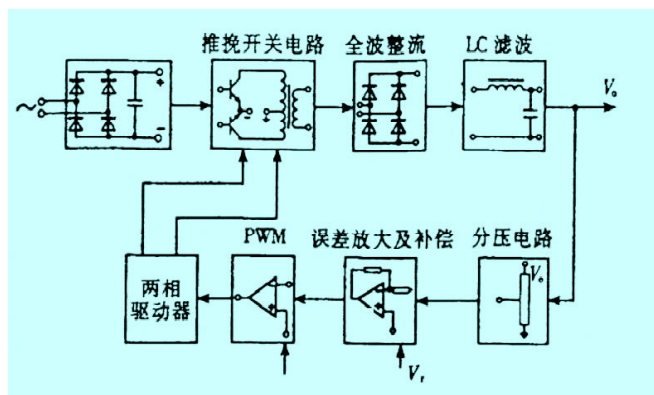


图 1.1 单环控制的 AC-DC 开关电源结构框图

开关电源的特点决定了其瞬态分析与系统综合的难度,表现在以下述三个方面:

(1) 强非线性—非线性表现在开关器件的周期性开和关,稳态占空比 D 有上、下限等。功率开关管导通和关断状态,使开关变换器形成若干线性时不变网络,因此开关变换器是分段线性电路。而且开关管从导通到关断,管子的等效电阻变化很大,因此它又属于时变电路。

(2) 离散性—开关电源的控制电路中有脉宽调制器(PWM),将放大后的误差信号模拟量(连续信号),调制为离散的脉冲(开关脉冲信号),通过驱动器控制功率开关管的通断。因此开关电源是一个离散系统。

(3) 病态—主电路(开关变换器)的惯性时间比控制电路大得多,描述系统方程的各个特征根实部相差很大,因此开关电源系统在数学上属于病态系统。这种情况增加了系统分析难度,数字仿真计算时间很长,算法也容易发散。

1.2 瞬态响应

图1.2给出一个DC/DC开关电源在输入电压瞬变和负载瞬变情况下的输出电压瞬态响应曲线。图中曲线1

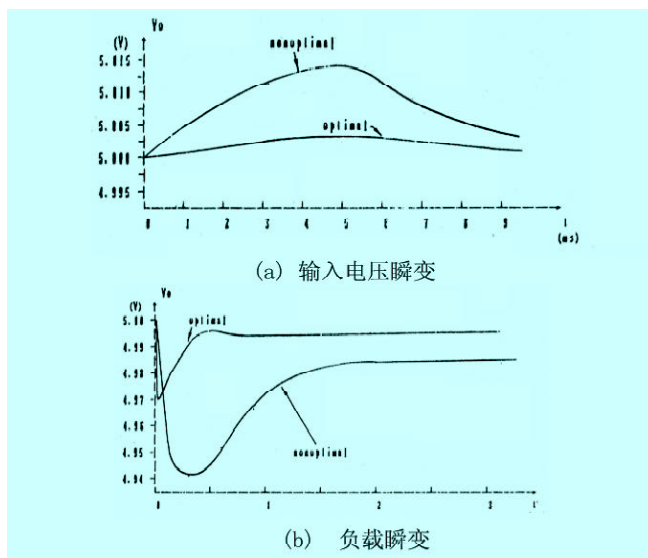


图 1.2 DC/DC 开关电源的输出电压瞬态响应

为小信号扰动下的瞬态响应,曲线2为大信号扰动下的瞬态响应。

正常情况,开关电源处于周期性稳态运行过程。稳态运行时,每个开关周期内电路的运行状态和性能特性均相同。开机或关机过程,相当于开关电源受外扰动作用而运行于瞬态过程中。此外,电网电压、负载、电路参数等的不确定性;由于温升、老化,使元件性能变化等;也均为开关电源的外扰动作用。此外, n 个模块并联的开关电源,若有一个冗余模块投入运行或切出,对其它模块也是一种外扰动作用。在外扰动作用下,开关电源运行工作点将偏离稳态值:从原稳定状态,经过一段过渡时间,进入另一个新的稳态。

开关电源的瞬态分析的主要内容是分析系统的稳定性(是否能稳定运行)、瞬态性能(如快速性、抗扰动性等)。并为控制电路设计做准备,以保证所设计的系统稳定性好、快速、抗扰动能力强。需要通过控制手段,使系统在受到外扰动作用下,输出电压能迅速稳定。如果控制不完善,将使瞬态过程调节品质差,如恢复时间很长,或瞬态超调严重。

控制电路的设计又称为综合,综合的主要任务是设计开关电源的电压控制器、电流控制器(又称校正补偿网络),选定控制器(补偿网络)的元件参数。

1.3 瞬态数学模型

开关电源瞬态分析的关键是建模(Modeling),即建立一个恰当的数学模型,要求模型简单、准确、应用方便、概念清晰。数学模型有三种,包括:稳态模型、小信号模型和大信号模型。

(1) 稳态模型——描述开关电源稳定运行状态，用作稳态分析。

(2) 大信号模型——描述大信号扰动下(包括开机和关机过程)开关电源瞬态性能的模型。它是非线性的，表明开关电源的瞬态响应与控制变量之间的非线性关系。由于扰动信号大，偏离系统额定工作点的偏移量很大。

(3) 小信号模型——根据非线性模型分析开关电源瞬态较困难，需要将非线性模型线性化处理。线性化方法是：设扰动信号小，在额定工作点将非线性状态方程用 Taylor 级数展开，舍弃二阶以上各项，使瞬态性能与控制变量之间近似呈线性关系，便可得到线性模型，并可在线性空间中分析开关电源中的瞬态过程性能，详见^{[2][3]}。

用小信号线性模型分析瞬态性能，称为小信号分析。如果线性模型是稳定的，则在小信号扰动下的开关电源是稳定的。为了便于数学分析，常假设小信号扰动为音频交流正弦，故工程上小信号分析又称为交流(AC)分析。相应地，稳态分析又可称为直流(DC)分析。

1.4 时域和频域数学模型

系统的时域分析或频域分析需要建立时域或频域数学模型。

1.4.1 时域数学模型

时域数学模型包括非线性或线性微分方程(状态方程)组、非线性或线性差分方程组等。阶次高的系统，时域模型仅适用于计算机仿真分析。

1.4.2 频域模型

线性时域模型经过拉普拉斯变换或 Z 变换后，由小信号时域模型变换为复频域(s 或 z 域)模型，一般用传递函数形式表示，用以在频域内分析系统的瞬态性能。

利用频域模型分析，最终目的是要检验系统的时域性能指标是否满足下述要求，即：稳定性、快速性、抗扰动性等。可进行计算机仿真实验。频域模型可用以做系统的仿真分析和设计。是传统的系统分析综合方法。

除了时域、频域数学模型外，还有时域、频域电路模型。频域电路模型是一个小信号线性平均电路，描述小信号扰动下开关变换器的等效电路。

1.5 稳态分析

稳态可看作瞬态过程中的一个特殊情况。假设占空比 D 不变，即开关电源稳定运行于某个额定工作点。通过稳态分析可以了解开关电源在额定工作点的运行情况。

稳态分析内容主要包括：计算直流电压增益 V_o/V_{in} = f(D)，外特性 $V_o=f(I_o)$ ，输出电压纹波 ΔV_o ，输入电流

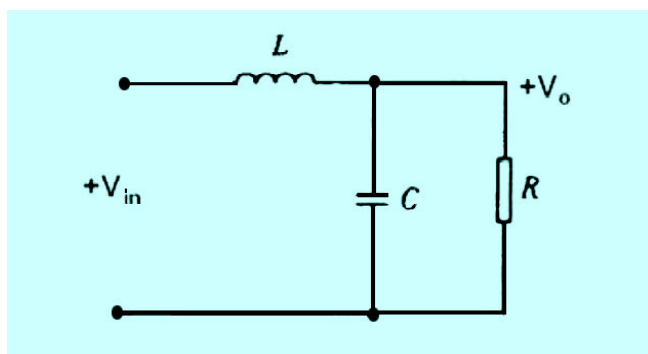


图2.1 二阶低通滤波电路

纹波 ΔI_{in} ，开关管的电压或电流应力，电感和电容的电压或电流，开关电源的损耗和效率等。

稳态分析也是功率开关器件、储能元件及变压器等设计的基础。

2 时域分析

本节简要回顾经典控制理论中有关时域分析的基本概念和方法。

2.1 二阶系统时域模型

为简便计，时域分析常以二阶时域模型为例。因为二阶系统时域响应，可用解析法求得，其结论有典型性，也可用以分析高阶系统。例如一个三阶系统可以分解为一阶系统和二阶系统；一个四阶系统可以分解为两个二阶系统等。

低通 LC 滤波电路，如图 2.1 是一个最简单的(开环)二阶系统例子。忽略电路中的寄生参数，二阶滤波器的时域模型为：

$$v_{in} = LC \frac{d^2 v_o}{dt^2} + \frac{L}{R} \frac{dv_o}{dt} + v_o \quad (2.1)$$

$$\text{或 } v_{in} = T^2 \frac{d^2 v_o}{dt^2} + 2\zeta T \frac{dv_o}{dt} + v_o,$$

$V_{in}(t)$ 为输入电压， $V_o(t)$ 为输出电压，

$$T = \sqrt{LC}, \text{ 阻尼比 } \zeta = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

2.2 二阶系统的时域响应

图 2.2 给出二阶系统在不同阻尼比情况下的单位阶跃响应 $y(t)$ 的典型曲线族。

根据阻尼比的大小，二阶系统的阶跃响应有三种典型情况，即：

(1) 过阻尼($\zeta > 1$)，系统阶跃响应无振荡、无超调，

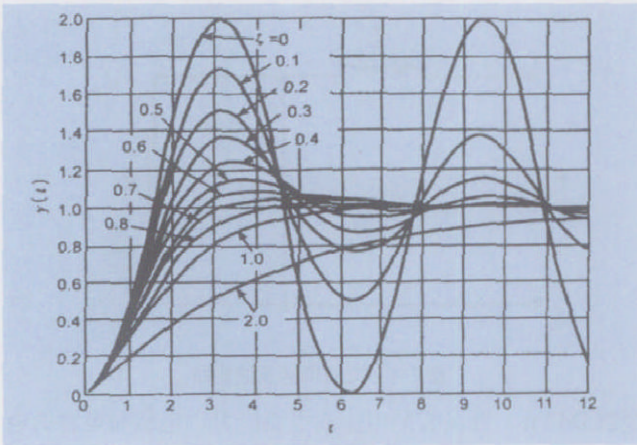


图 2.2 二阶系统的单位阶跃响应 y(t) 曲线族

稳定；

(2) 欠阻尼 ($\zeta < 1$)，系统阶跃响应呈阻尼振荡形式，有一定超调，稳定；

(3) 无阻尼 ($\zeta = 0$)，系统阶跃响应为等幅振荡，属于不稳定状态。

希望所设计的系统既能快速响应，又不会严重超调。当阻尼比 $\zeta < 0.4$ 时，系统瞬态响应的超调过大；当 $\zeta > 0.8$ 时，系统瞬态响应无超调，但响应太慢。设计时一般阻尼比取为： $0.4 < \zeta < 0.8$ ；

2.3 系统的时域性能指标

设输入为单位阶跃函数 $1(t)$ 时，系统输出终值(即稳态值)为 1，允许误差带(以下简称允差带)为 $\pm 2\%$ 或 $\pm 5\%$ 。稳定的系统响应在达到稳态以前，一般表现为阻尼振荡过程，如图 2.3 所示，标志系统瞬态响应特性的性能指标如下：

(1) 延迟时间 t_d ，输出响应第一次达到稳态值 $Y(=1)$ 的 10% 所需时间。

(2) 上升时间 t_r ，输出响应从稳态值的 10% 上升到 90% 所需时间。

(3) 峰值时间 t_p ，输出响应到达第一个峰值所需

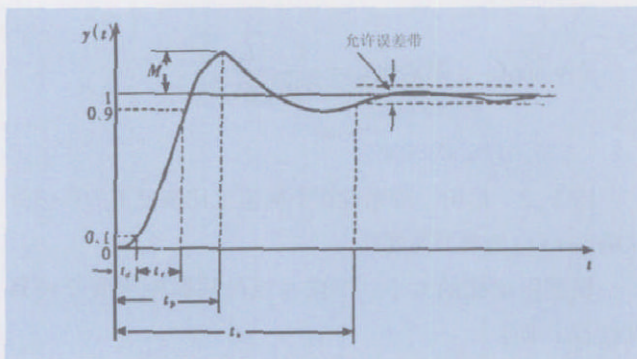


图 2.3 系统的单位阶跃响应 y(t)

时间。

(4) 最大超调量 M_p ，输出响应超出稳态值的最大值。

(5) 恢复时间(调整时间) t_s ，输出响应到达允差带、并永远保持在允差范围内所需时间。

$$M_p = \frac{y(t_p) - Y}{Y} \times 100\% \quad (2.2)$$

2.4 时域法综合系统的步骤

综合的主要任务是设计开关电源的电压、电流控制器，选定补偿网络元件参数。用时域法综合确定控制器(或补偿网络)参数的步骤如下：

- (1) 完成开关电源初步设计；
- (2) 测量样品的阶跃负载响应或阶跃输入响应；
- (3) 若瞬态响应不满足规定要求，修改控制器(补偿网络)参数，重复上述步骤，直到满意为止。

时域综合方法属于试探法，工程设计不方便。传统上开关电源的小信号分析与综合都采用频域法。

3 频域分析

本节简要回顾经典控制理论中有关频域分析的基本概念和方法。

3.1 概述

应用经典控制理论基本概念和方法可以在频域内对开关电源进行瞬态建模分析和综合。例如利用方块图、传递函数等复频域模型，可在复频域(s 域)内对开关电源做交流小信号分析。频域分析内容有：系统的零点极点分析、频率特性(传递函数)和频率响应分析等(系统对正弦输入的频域响应称为频率响应)。

在频域内综合较方便，但不直观。

3.2 传递函数

用传递函数表示系统或系统各部件的复频域数学模型，传递函数的定义是：

一个 n 阶线性定常系统(开环或闭环)，初始条件为零时，设输入函数的拉氏变换为 $X(s)$ ，输出函数的拉氏变换为 $Y(s)$ ，则其传递函数 $G(s)$ 为输出 $Y(s)$ 与输入 $X(s)$ 之比：

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n}, n \geq m \quad (3.1)$$

式中， $a_i (i = 0, 1, \dots, n-1, n)$ 、 $b_j (j = 0, 1, \dots, m-1, m)$ 均为常数。

(未完待续)