

78-87

开关电源两种控制模式的分析与比较

Analysis and Compare of Two Control Modes in Switching Power Supply

西安交通大学 王创社 乐开端 谭玉山 (西安 710049)

西安理工大学 杜忠 (西安 710048)

~~78-87~~
TM91 TN86

摘要:描述了开关电源电压型和电流型反馈控制模式,分析比较了其优缺点。对电流型控制模式的不足之处,通过分析给出了解决办法,并指出,为克服电压型控制模式的主要缺点可采取其它途径。最后给出不同应用电路反馈控制类型的选取原则。

Abstract: The paper describes two control modes for switching power supply, their advantages and disadvantages are analyzed and compared. Current mode is better, but has some disadvantages, the method to overcome them is presented. there are also some ways for overcoming the main disadvantages of voltage mode. In the end, some principles for choosing the control mode according to different applications are given.

叙词:电压控制 电流控制 变换器 开关电源

控制模式

Keywords: voltage control mode; current control mode; converter; switching power supply

1 前言

传统 PWM 开关稳压电源采用电压型控制模式,只对输出电压采样并作为反馈信号实现闭环控制,以稳定输出电压。在其控制过程中,电源电路中的电感电流未参与控制,是独立变量,开关变换器为二阶系统,有两个状态变量,即输出滤波电容的电压和输出滤波电感的电流。二阶系统是一个有条件的稳定系统,只有对控制电路进行精心设计和计算,满足一定条件,方能使闭环系统稳定工作。开关电源的电流均流经电感,将使滤波电容上的电压信号对电流信号产生 90°延迟。因此,仅用电压采样

的方法稳压,响应速度慢,稳定性差,甚至在大信号变动时产生振荡,从而损坏功率器件,以致在推挽和全桥等电路中引起变压器偏磁化饱和而产生电流尖峰,最终导致线路工作失常^[1]。

电流型控制器正是针对电压型控制器的缺点发展起来的。它增加了电流反馈环,电感电流不再是一个独立变量,从而使开关变换器成为一个一阶无条件的稳定系统,它只有单个极点和 90°相位滞后,因而很容易不受约束地得到大的开环增益和完善的小信号、大信号特性。

2 两种控制模式的基本原理

图 1 分别示出两种控制模式的基本原理。

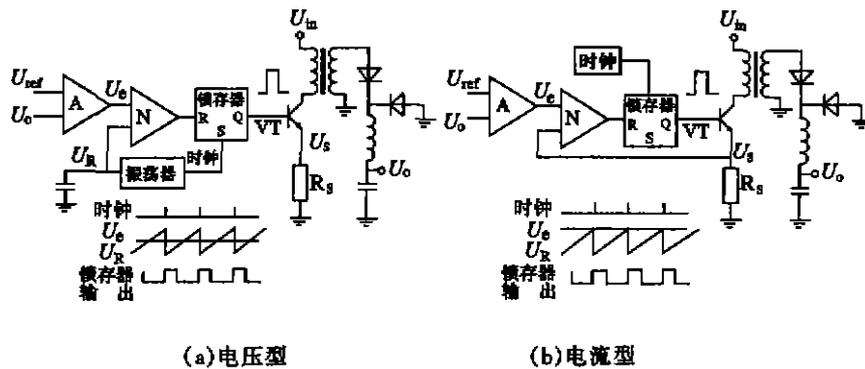


图 1 电压模式控制和电流模式控制

如图 1a, 电源输出电压 U_o 与参考电压 U_{ref} 经误差放大器 A 比较放大后, 又经 PWM

比较器 N 比较, 由锁存器输出占空比随误差电压信号 U_e 变化的一系列脉冲, 再驱动控制用

的开关晶体管 VT, 使输出电压 U_o 稳定。由图 1b 可见, 它是一个双环控制系统, 既保留了电压型控制器的输出电压反馈控制部分, 又增加了一个反馈环节, 它的电路工作原理是: U_o 与 U_{ref} 经 A 比较放大后, 得到 U_c , 由恒频时钟脉冲置位锁存器输出脉冲驱动 VT 管导通, 电源电路中因输出电感的作用使脉冲电流逐渐增大, 当电流在采样电阻 R_s 上的电流信号电压 U_s 幅度达到 U_c 电平时, 脉宽比较器的状态反转, 锁存器复位, 驱动撤除, 功率管关断, 电路逐个地检测和调节电流脉冲, 控制电源输出^[2]。

3 电流型控制与电压型控制的比较

电压型控制的优点是: ①单环反馈的设计和较易分析; ②锯齿波振幅较大, 对稳定的调制过程可提供较好的噪声裕量; ③低阻抗功率输出, 对多输出电源具有较好的交互调节特性。

电压型控制的缺点是: ①任何输入电压或输出负载的变化必须首先转化为输出电压的变化, 然后再经反馈环采样反馈控制调节。这意味着动态响应速度较慢; ②输出滤波器对控制环增加了两个极点, 这就需要增加一个零点补偿; ③由于环路增益随输入电压而变, 使得补偿变得更加复杂化。

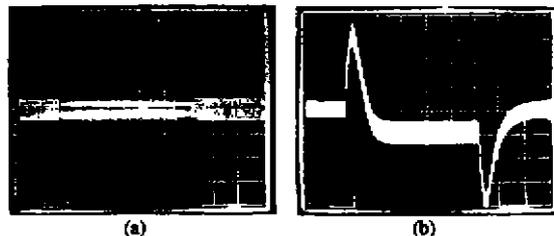
电流型控制的优点是: ①具有良好的线性调整率和快速的输入输出动态响应; ②消除了输出滤波电感带来的极点和系统的二阶特性, 使系统不存在有条件的环路稳定性问题, 具有最佳的大信号特性; ③固有的逐个脉冲电流限制, 简化了过载保护和短路保护, 在推挽电路和全桥电路中具有自动磁通平衡功能。多电源单元并联易于实现自动均流。

电流型控制的缺点是: ①需要双环控制, 增加了电路设计和分析的难度; ②因电流上升率不够大, 在没有斜坡补偿时, 当占空比大于 50% 时, 控制环变得不稳定, 抗干扰性能差; ③因控制信号来自输出电流, 功率级电路的谐振会给控制环带来噪声; ④因控制环控制电流, 使

负载调整率变差, 在多路输出时, 需要耦合电感实现交互调节。

采用简单斜坡补偿措施后, 电流控制型引起的绝大部分问题都能得到满意解决, 且不影响其优势的发挥^[3]。

图 2 示出功率级相同, 输入电压和输出负载分别阶跃变化时电流型控制和电压型控制的输出响应。图 3 分别示出两个功率级相同的变换器的开关电流波形。由图 3 可见, 电流型控制的两相开关电流几乎完全相同; 而电压型控制的两相开关电流则有明显的不同^[2]。



(a)

(b)

(a) 电流型控制输入阶跃变化

(b) 电压型控制输入阶跃变化

[(a)、(b): $t = 2\text{ms}/\text{格}$, 输出响应: $50\text{mV}/\text{格}$]

(c)

(d)

(c) 电流型控制负载阶跃变化

(d) 电压型控制负载阶跃变化

[(c)、(d): ($t = 0.2\text{ms}/\text{格}$, 输出响应: $50\text{mV}/\text{格}$)]

图 2 输入及负载阶跃变化时的输出响应



(a)

(b)

(a) 电流型 (b) 电压型

图 3 开关电流显示的磁通平衡情况

($t = 5\mu\text{s}/\text{格}$, 开关电流: $0.2\text{A}/\text{格}$)

4 电流型控制的斜坡补偿分析

在电感电流连续的情况下,电流型控制了电感电流的峰值,而BUCK系列(包括单端正激、推挽、全桥和半桥)电路中,负载电流即为电感电流的平均值。电感电流的峰值与平均电流值之间存在一定误差,该误差在输入电压最大时达到最大。这样, U_s 的变化便不能全面地反映 I_s 的变化,并且当占空比大于0.5时,因电感电流的下降率大于上升率,平坦的上升率使电感电流出现一个小的干扰而被放大,最终导致电路不稳定。不过这些问题可通过一定的斜坡补偿得以解决^[4]。斜坡补偿可使电感线圈的平均电流不再随输入电压和占空比的变化而变化,同时电路在任何占空比下亦变得稳定。为了得到令人满意的结果,补偿的斜率必须等于滤波电感电流下降斜率的1/2。由于采取了电流控制及斜坡补偿,变换器即使在外部电压环开路的情况下,也能得到很好的输入电压调整率。这是因为内部电流环能抑制滤波电感线圈的尖峰电流而与输入电压的变化无关。至于负载调整率,因电流控制型开关变换器能得到较高的闭环增益带宽乘积,因而可圆满解决电流控制内环因恒流特性而带来负载调整率较差的问题,使之达到与电压控制型一样好的负载调整率。

当电流控制用于BUCK系列变换器且电流连续时,因其固有的系统稳定性,很容易得到大的环路增益和完善的小信号动态特性。然而,传统的电压控制型开关变换器,若不加以补偿,将导致系统不稳定,因此必须在误差放大器补偿网络的谐振处提供至少一个零点,通常为两个零点。这就要求采用比电流控制更大的误差放大器增益带宽乘积,且具有毫秒级时间常数的大的补偿电容。这样,电压型控制才能得到与电流型控制相差不多的好的小信号动态特性。然而,在大信号条件下,若起动和负载有大的跳变时,为了使电压型控制得到好的小信号特性,必需采用大的补偿电容,这会使其大信号特性变得很差。相反,电流型控制无需大的补偿电容,因而不仅具有优异的小信号特性,也具

有良好的大信号特性。

在电流控制型变换器中,因内环直接检测电感电流峰值,自然形成了逐个电流脉冲检测电路。只要给定或限制参考电流信号,就能准确地限制流过开关管和变压器的最大电流。同时,当多台开关变换器并联运行时,可实现多台开关变换器之间的负载自动分配。然而,在传统的电压型变换器中,要进行负载的自动分配,必须另设一个负载分配电路。

在变压器耦合的推挽电路中,开关管的导通(或饱和)压降以及存储时间不同都会造成电压波形不对称,从而使变压器初级偏磁,该偏磁随时间的积累会引起变压器饱和。在电压型变换器中,虽然偏磁电流在线路中的压降会抵消一部分偏磁现象,但不足以全部克服,而电流型变换器却能自动解决磁通的不平衡。这是因为内部电流环能使电流脉冲宽度不同但幅值肯定相同,而这个脉宽的不同则可有效地抵消最初的电压波形不对称。在变压器耦合的半桥电路中,因变压器的初级与电压可浮动的电容性电压分配器相连,电流型控制所产生的电流脉冲峰值相同而宽度不同会造成安秒的不对称,这样电容分配器的电压分配点将向一个方向移动,移动结果又会造成伏秒不对称,再次调整会使安秒进一步不对称。于是恶性循环,直到电压分配器中点移向电源电压的一个极端。

电压型变换器则没有半桥失控问题。不过,在全桥电路中,由于没有可以浮动的电压分配器,电流型控制的优点又可充分得以体现。

在升压和反激电路中,当电感线圈电流连续时,负载电流等于整流二极管平均电流 I_D ,不等于电感线圈的平均电流。 I_D 是输入电压的直接函数,因此电流控制变换器的开环线性调整率很差,但可通过在电流环控制中增加一适当的输入电压前馈得以解决。

另外,在电感电流非连续的各种电路中,每个开关周期由连续时的两种状态变为三种状态,因此在连续运行时遇到的问题在非连续时不会出现。同样,在电流型控制中电感电流连续时的许多优点在非连续时也无法体现。不

过,在电流非连续的情况下,电流控制型电路亦可通过其固有的前馈特性得到很好的开环线性调整率,这也是电压控制型所不具备的优点。

5 结 论

由上述分析可见,电流型控制模式优于电压型控制模式,但电流型控制模式并非唯一选择。随着电力电子技术和集成电路技术的发展,电压型控制模式的主要缺点可通过采用高性能的集成控制器得以克服。例如,由输入电压变化带来的问题可通过电压前馈技术得以解决;减小补偿电容和减少电路延迟可通过采用BiCMOS技术提高集成控制器的高频特性,使输出滤波器的极点在正常控制环带宽之上得以实现,UCC3570就具有这种特性。就目前情况看,两种控制模式的电路拓扑都有其可行性,但就某一具体应用,可按下述考虑灵活选用^[5]。

优先考虑电流型控制模式的情况有:

- ①电源输出是一个电流源或输出电压很高;
- ②在给定开关频率下要求具有最快的动态响应;
- ③用于DC-DC变换器且输入电压经常有变化;
- ④在模块化应用中要求并联的负载均流特性好;
- ⑤在功率变换电路中,对变压器磁通平衡要求很高;
- ⑥要求用最少的元器件实现低成本应用。

优先考虑电压型控制模式(具有前馈)的情况有:

- ①要求较宽的输入电压范围且输出负载有可能变化;

- ②要求轻载负载电流太小,电流上升率低且不能实现稳定的PWM调节;

- ③在大功率且干扰大的应用场合,使得电流波形中的噪声难以处理;

- ④要求具有多输出电压且能较好地进行交互调节;

- ⑤在变压器次级使用可饱和电抗器进行辅助调节;

- ⑥在需要避免双环控制和斜坡补偿的应用场合。

按上述考虑,只要根据具体应用情况选择电流型控制或电压型控制模式,均可设计出品质优良的开关电源。

参 考 文 献

- 1 Pivit E, Saxarra J. On Dual Control Pulse Width Modulated for Stable Operation of Switched Power Supplies. *Wiss. Ber. AEG-Telefunken*, 1979, 52(5):243~249.
- 2 Holland B. A New Integrated Circuit for Current-mode Control. *Power Conversion 10 Proceedings*, 1983:C-2.
- 3 Brown A, Rensink L, Middlebrook R. Modeling and Analysis of Switching DC-DC Converters in Constant-frequency Current-programmed Mode. *PESC' 79 Record*, 1979:284~301.
- 4 Modeling Analysis and Compensation of the Current-mode Converter. *Unitrode Product and Applications Handbook*, 1995~1996(10):51~56.
- 5 Mannano R. Switching Power Supply Topology Voltage Mode vs. Current-mode. *Electronic Design*, 1994, 27.

收稿日期:1997-10-05

定稿日期:1998-02-25

作者简介

王创社:男,1966年3月生,博士生。主要从事各种开关电源的应用与研究。

乐开瑞:男,1966年1月生,博士生。主要从事光电检测及电力电子技术的研究工作。

谭玉山:男,1933年3月生,博士生导师。主要从事光机电检测等方面的研究工作。

社 志:男,1958年1月生,副教授。主要从事开关电源电磁兼容及测试等方面的应用与研究。