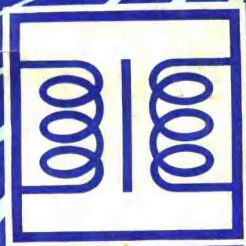


开关式稳压器的 设计技术

(日) 长谷川 彰 著

科学出版社



内 容 简 介

本书从开关电源的基本知识开始,介绍各种自激式和他激式开关稳压器的的工作原理、电路构成、设计方法以及使用中的关键问题。

全书共分六章,第一章为开关式稳压器的基础知识,第二章为电路构成及特点,第三章为开关式稳压器的设计方法,第四章为脉冲宽度调制电路和保护电路,第五章为线路实例,第六章为开关式稳压器的几个重要问题。全书取材新颖,分析深入浅出,概念性强。书中附有大量线路及设计实例,因此具有较高的实用价值。

本书除可供从事电源研制工作的技术人员阅读外,还可供仪表、计算机、自动控制、通信、电机电路等专业的大专院校师生以及具有电子线路基本知识的广大科技人员参考。

长谷川 彰 著

スイッチング・レギュレータ設計ノウハウ

CQ 出版社, 1985

开关式稳压器的设计技术

〔日〕长谷川 彰 著

施 仁 译

责任编辑 张建荣 杨 艳

科学出版社出版

北京东黄城根北街17号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1989年9月第一版 开本:850×1168 1/32

1989年9月第一次印刷 印张:6

印数:0001—2060 字数:156,000

ISBN7-03-001118-X/TN·64

定价 6.20元

前 言

开关式稳压器最初在仅有直流供电的移动设备中作为内部电源使用,后来用于以直流电源工作的交换机等局内通信设备,以及要求低电压、大电流的计算机电源等。

到了70年代,开关式稳压器的专用元器件进入市场,在节能和电路集成化浪潮的推动下,应用范围迅速扩大。特别是近年来,在不仅要求节能,还要求体积小、重量轻的办公自动化设备中,在所有有关方面都使用了开关式稳压器。

本书从入门知识开始,介绍开关式稳压器的技术关键。

本书第一章是为初学者准备的,主要介绍不含变压器的开关式稳压器的基本知识。本章中虽出现许多算式,但都很简单。对这些式子,因为主要的要求是理解而不是使用,所以并未对其形式作有碍于理解的简化。

第二章介绍开关式稳压器的工作方式,其中以使用磁放大器的电源电路为重点。为便于读者理解,对磁路的基础知识也作了一定的介绍。

第三章介绍开关式稳压器的具体设计方法,举了一些初学者在设计时容易出问题的例子进行说明。在认定变压器和扼流圈的设计总是离散场合,从本章中也可得到合理的设计方针。

第四章介绍脉冲宽度控制电路,主要介绍集成电路产品手册中未作说明的部分以及与脉冲宽度控制电路有关的附属电路。

第五章作为上面各章介绍的各种电路的应用实例,介绍目前实际使用的电路和数据。

第六章介绍开关式稳压器设计和使用中的几个关键问题,特别对至关重要的提高效率的方法作了说明。

开关式压器的发展很快,70年代典型的20kHz的开关频

率现已过时，在实用中，目前 50~120kHz 的频率已成为主流。今后，随着场效应管化以及非晶磁芯的磁放大器等新型器件和材料的发展，开关式稳压器必将得到进一步发展。

本书正是在考虑这些发展的前提下，介绍了开关式稳压器的基础和应用知识。笔者本着使开关式稳压器设计和使用人员在将来也能有所裨益的想法，进行了本书的编写工作。

在笔者所从事的工作中，即使在开关式稳压器方面范围也很广，其功率从几百毫瓦到几十千瓦，用途从通信机的高可靠性电源到办公自动化终端，以及军用等各种电源都在制造。

由于这样的理由，本书不能把目前用得最多的、供办公自动化用的大量生产的电源作为重点。可以预计，在今后的开关式稳压器中，小功率稳压器将进一步发展成以单片集成电路为主，中功率稳压器发展成混合集成电路，完全可能成为一种电路部件。即使在那种情况下，由于本书是以不能进行集成化的分立部分为主介绍的，所以仍可充分地加以利用。

鉴于目前开关式稳压器方面的实用书籍太少，本书是应 CQ 出版社编辑部的要求编写的。由于笔者负责的部门正在迅速扩大，工作较忙，加上自己努力不够，书中肯定有许多表达不充分和不妥当的地方。但笔者认为，本书对电源设计中一些最重要的问题，已尽可能作了说明。

本书是在承担计划和编辑工作的 CQ 出版社渡边哲良总编辑的出色努力下出版的，对此谨表示衷心的感谢。此外，本书中参考和引用了一些制造厂的数据，在此，谨对提供这些数据的各位同行表示谢意。

目 录

第一章 开关式稳压器的基础知识	(1)
1.1 开关式稳压器风行的原因	(1)
1.2 开关式稳压器对输入变化的稳压性能差吗?	(3)
1.3 让我们忘掉所谓反电动势的说法	(6)
1.4 如果对电容 C 有充放电电流, 那么对电感 L 就有充放电电压	(8)
1.5 首先让我们透彻理解无变压器的简单电路	(11)
1.5.1 降压型开关稳压器	(11)
1.5.2 升压型开关稳压器	(14)
1.5.3 反极性型开关稳压器	(16)
1.6 要注意电路形式相似, 但工作原理完全不同的电路	(18)
1.7 根据输入电压和输出功率决定电路类型	(21)
1.7.1 输入电压低的情况	(21)
1.7.2 输入电压高的情况	(24)
1.7.3 小功率的情况	(24)
第二章 开关式稳压器的电路构成及特征	(26)
2.1 要充分了解由电路结构决定的特征	(26)
2.2 自激式 DC-DC 变换器的优缺点	(27)
2.3 元器件少的振铃扼流圈变换器	(27)
2.4 RCC电路的稳压是靠控制 I_p 实现的	(33)
2.5 利用变压器饱和的 DC-DC 变换器	(36)
2.6 适合于磁放大器的 DC-DC 变换器	(41)
2.7 使用磁放大器的稳压电路及其特点	(44)
2.8 他激式开关电源及其特点	(55)
第三章 开关式稳压器的具体设计方法	(59)
3.1 按纹波电流决定滤波电容的容量	(59)
3.2 实用的输入滤波电容设计方法	(66)

3.3	高频变压器的最优设计	(70)
3.4	变压器设计的实例	(78)
3.4.1	设计实例 1 (顺向型)	(88)
3.4.2	设计实例 2 (桥式)	(91)
3.5	带磁芯电感线圈的最优设计方法	(93)
3.6	扼流圈的具体设计	(101)
附记1	开关电源的寿命决定于电解电容	(111)
附记2	不能给用户好处的过分高频化毫无意义	(112)
第四章	脉冲调宽电路和保护电路	(115)
4.1	脉冲宽度控制电路及控制集成块的用法	(115)
4.2	控制用辅助电源及起动电路	(126)
4.3	过电流及过电压保护电路	(131)
第五章	开关电源的线路实例	(138)
5.1	只用三个有源元件的磁放大器 DC-DC 变换器	(138)
5.2	使用电流控制型磁放大器的三输出电源	(142)
5.3	半桥式脉冲调宽开关电源	(146)
5.4	多回路电源的实例	(151)
附记1	开关电源不能仅以纹波或噪声电平判断优劣	(158)
附记2	冲击电流防止电路对瞬断并非完全有效	(159)
第六章	开关式稳压器的几个重要问题	(162)
6.1	效率70%意味着损耗是30%吗?	(162)
6.2	提高效率的关键	(164)
6.3	通过改进开关管的驱动方法提高效率	(168)
6.4	通过改进吸收回路来提高效率	(174)
6.5	可用集电极电压、电流波形判断逆变器工作是否正常	(176)
6.6	在使用场效应开关管时应注意的几点	(179)
附记1	开关电源的输入电流不能只根据输出电流与效率来计 算	(182)
附记2	正态噪声与共模噪声的不同点	(184)
参考文献		(186)

第一章 开关式稳压器的基础知识

1.1 开关式稳压器风行的原因

开关式稳压器与串联式稳压器相比，具有尺寸小、重量轻、效率高等优点。这些优点能满足轻薄短小和节能等要求，因而迅速获得广泛的应用。

开关式与串联式稳压器的特点比较如表 1-1 所示。开关式稳压器除尺寸小、重量轻之外，还能适应较宽的输入电压范围，可以在不改变抽头和电路参数下用于电源电压不同的国家。此外，对经常使用局内常备直流电源的通信设备，以及使用干电池或蓄电池等直流电源的移动设备和便携式装置内的 DC-DC 变换器来说，开关式稳压器是不可缺少的电源。

但另一方面，开关式稳压器也存在开关晶体管、整流二极管、变压器、扼流圈等产生噪声，影响其他电路工作的缺点。不过这种缺点可以通过改进电路形式，以及采取滤波、屏蔽等措施加以改善。

关于稳定度，理论上虽可以与串联式稳压器达到同一水平，但开关式稳压器中因纹波和噪声会影响稳定度，所以要提高稳定度必须设法避免其影响。不过对一般用途来说，是没有问题的。

关于可靠性，一般认为开关式稳压器电路元件多，可靠性不如串联式稳压器。但在通常的设计中，电解电容的寿命对稳压器可靠性有很大的影响，其寿命是随温度升高而降低的，因此在相同的尺寸下，效率高的开关式稳压器与串联式稳压器相比，因为温升低，可靠性有可能提高。当然也要注意，如果以为开关式稳压器的元件尺寸小，因而不顾内部功耗，过分地追求小型化，则由于温升太高，也可能制造出可靠性差的产品。

表1-1 开关式与串联式稳压器的比较

项 目	串联式稳压器	开关式稳压器
效 率	低(80~85%)	高(70~85%)
尺 寸	大(变压器和散热器尺寸)	小(1/4~1/10)
重 量	重(变压器和散热器重)	轻(1/4~1/10)
电 路	简单(变压、整流、稳压)	复杂(整流、开关脉冲控制、 变压、整流)
稳 定 度	高(0.001~0.1%)	一般(0.1~3%)
纹波(峰-峰值)	小(0.1~10mV)	大(10~200mV)
过渡响应速度	快(50 μ s~1ms)	一般(500 μ s~10ms)
输入电压适应性	输入电压大范围变化时效率 低,不可直流输入	输入电压可大范围变化,也可输 入直流,100V/200V可以通用
价格(注)	便宜	一般(价格差正在迅速减小)
可 靠 性	虽因元件数少,可靠性较高, 但温度上升使可靠性降低	因温升降低,可靠性可做到同 一水平
辐射干扰	无	有(可用滤波和屏蔽防止)
用 途	高精度电源,高速程控电源,10 W以下电源,实验用可变电源	各种机内电源,直流输入设备, 要求高效率和小尺寸的电源
安装方便性	因变压器重,不能装在印刷 板上	因元件小、轻,几百瓦电源也 可装在印刷板上

<注1>每瓦的价格随功率和同路数变化很大。

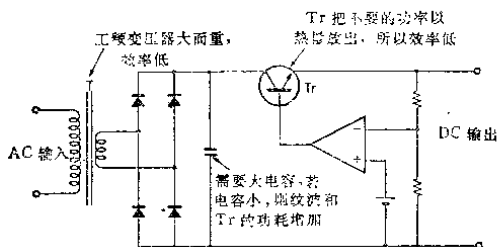
<注2>括弧内的数字是一般情况,有许多例外。

图1-1是串联式稳压器与开关式稳压器的电路比较。串联式稳压器因为把不需要的能量在串联晶体管 T_r 上以热的形式放掉,所以效率低,散热片的尺寸也大。此外,如图中所示,在加入变压器的场合,变压器对稳压器的重量和体积影响很大,同时使效率降低。

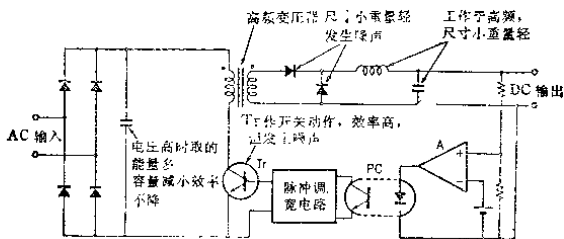
与此不同的是,在开关式稳压器中,因为开关晶体管 T_r 工作于开关方式,所以功率损耗少,加之使用高频变压器,可制成小尺寸、高效率的电源。

在图1-1(b)中,脉冲宽度控制电路经过光电耦合器接受反馈

放大器 A 的输出信号，其脉冲宽度是这样控制的：当稳压器的输出电压升高时，脉冲宽度变窄，反之，脉冲加宽，这样，我们可以通过控制脉冲宽度驱动开关晶体管 Tr ，把与脉冲宽度成比例的方波电压加到变压器上，使输出电压维持恒定。



(a) 串联式稳压器的原理图



(b) 开关式稳压器的原理图

图1-1 串联式与开关式稳压器的电路比较

1.2 开关式稳压器对输入变化的稳压性能差吗？

通常认为，开关式稳压器的稳定度没有串联式稳压器好。这是因为理论上说，串联式稳压器可将输入电压变化的影响抑制到

接近于零，而开关式稳压器的稳定度大约要差 10^3 倍。

在图 1-2 的串联式稳压电路中，当反馈放大器不工作时，输出电压变化 ΔV_o 与输入电压变化 ΔV_i 之比为 h_{rb} (这里 h_{rb} 是晶体管共基极接法时的输入反馈比，在 10^{-3} 以下)。因此，当反馈放大器加上负反馈工作时，输出的变化将变成 $1/(1+A)$ ，这里 A 是包括由电阻 R_1 、 R_2 组成的分压器衰减在内的反馈放大器的电压增益。

因此，输出对输入的电压变化率为*

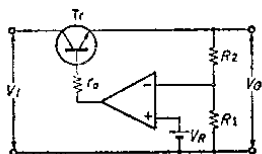
$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} \approx \frac{h_{rb}}{1+A} \quad (1-1)$$

式中，若取 $h_{rb} = 10^{-3}$ ， $A = 10^3$ ，则 $\Delta V_o / \Delta V_i = 10^{-6}$ ，也就是说，可以获得输入电压变化 10V 时，输出只变化 $10\mu\text{V}$ 的高稳定电源。

若用 h_{ie} 表示晶体管 Tr 共发射极接法时的输入电阻，用 h_{fe} 表示电流放大倍数，用 r_o 表示反馈放大器的输出电阻，则该稳压器的输出电阻 R_o 为

$$R_o \approx (h_{ie} + r_o) / (1 + h_{fe}) (1 + A) \quad (1-2)$$

式中，若取 $h_{ie} = 100\Omega$ ， $r_o = 100\Omega$ ， $h_{fe} = 200$ ， $A = 1000$ ，则可得输出电阻 $R_o = 1\text{m}\Omega$ 。



输出对输入的电压变化率

$$\Delta V_o / \Delta V_i \approx h_{rb} / (1 + A)$$

$$\text{输出电阻 } R_o \approx \frac{h_{ie} + r_o}{(1 + h_{fe}) (1 + A)}$$

其中 A 为包括电压取样电路分压比在内的放大器电压增益

图1-2 串联式稳压器的稳定度

下面再讨论开关式稳压器。如图 1-3 所示，为便于比较，讨论输出电压与输入电压相等的情况。当不考虑反馈放大器的作用

* 原书中称为输入变化率，因其含义不太清楚，故改译为输出对输入的电压变化率，此词在后面经常出现，请读者注意。——译者注

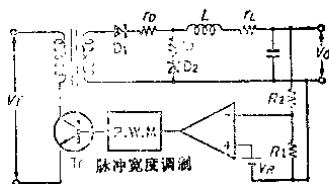
时, 输入电压的变化将原封不动地出现在输出端。其输出电阻等于扼流圈 L 的直流电阻 r_L 与整流器等效电阻 r_D 之和。

考虑反馈放大器的作用时, 输出对输入的电压变化率和输出电阻 R_o 分别为

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} \approx \frac{1}{1+A} \quad (1-3)$$

$$R_o \approx (r_D + r_L) / (1+A) \quad (1-4)$$

其中 A 为包含分压器 R_1 和 R_2 在内的放大器增益, 是脉冲宽度变化与电压变化之比。若 $A=1000$, 则 $\Delta V_o / \Delta V_i \approx 10^{-3}$ 。即输入电压变化 $10V$ 时, 输出变化 $10mV$, 此值比串联式稳压器大三个数量级。造成这种差别的原因是, 在串联式稳压器中因为有串联晶体管的作用, 即使不考虑反馈放大器的作用, 输入电压变化的影响也可减小 h_{re} 倍 (即 10^{-3} 以下)



输出对输入的电压变化率 $\Delta V_o / \Delta V_i \approx 1 / (1+A)$

输出电阻 $R_o \approx (r_D + r_L) / (1+A)$

(注) 这里设输入电压与输出电压之比为 1。

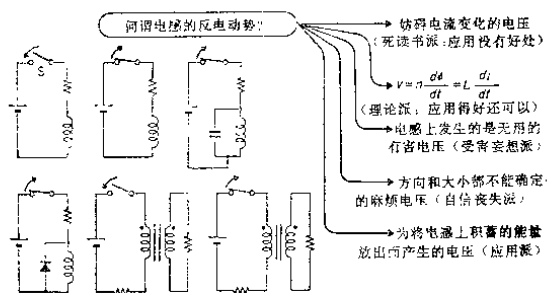
A 为脉冲宽度变化与输出电压变化之比。

图 1-3 开关式稳压器的稳定性

开关式稳压器的输出电阻虽随二极管的额定电流而异, 但 r_D 一般为几十毫欧, r_L 也可做成同一数量级。在上式中, 若取 $r_D = 20m\Omega$, $r_L = 30m\Omega$, $A=1000$, 则输出电阻 $R_o = 50\mu\Omega$ 。也就是说, 实际上开关式稳压器的输出电阻可以做得比串联式稳压器还小。

1.3 让我们忘掉所谓反电动势的说法

在说明电感的作用时，有所谓反电动势的说法。从学生时代起我们就学到：“反电动势是在阻碍电感中电流变化的方向上产生的一种电压”，我们不能说这句话的意思本身是错误的，但作为说明电感作用的语言，它并非妥当。如图 1-4 所示，在电子技术人员中，许多人会无意地作嫌弃变压器和电感的发言，这对电感缺乏理解，又想一切都用反电动势来说明问题的场合尤其突出。



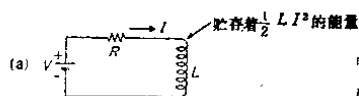
能用反电动势求得上面电路中的电压和电流吗？

图1-4 何谓反电动势？你的看法属于哪一种？

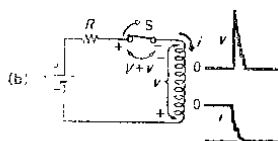
在分析电感的作用时，考虑以下原则是方便的（参阅图 1-5）：

- 1) 在电感中贮存着 $LI^2/2$ 的能量；
- 2) 因为能量不能瞬时突变，所以不能在瞬时内将电流切断或改变方向；
- 3) 当存在副边回路时，若切断原边回路，则在副边回路将出现电流，以相同的安匝数维持磁场不变；
- 4) 设电感两端的电压为 V ，则流过电感 L 的电流变化率为 V/L 。

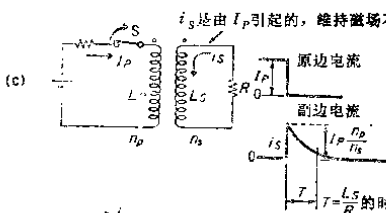
如果能领会以上各点，则即使不用反电动势的说法，也可以充分理解电感的性质。其中关键的概念是，贮存在电感中的能量



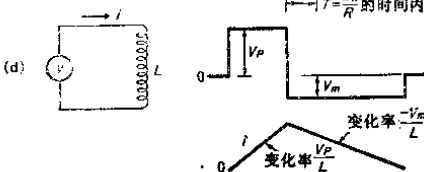
电感 L 中电流 I 流过时, 贮存着 $E = LI^2/2$ 的能量。



即使将开关 S 瞬时断开, 也不能将电流瞬间切断, 为维持电流和能量不突变, 在与 V 的同一方向上产生电压 v , 使开关 S 受到高电压, 发生电弧, 结果将能量消耗在电阻 R 和电弧上。



当原边电流为 I_p 时, 若开断 S , 则副边线圈中产生同一安匝数的电流, 因此副边电流 $i_s = I_p \cdot n_p / n_s$ 按时间常数 L_s / R 衰减, 能量在电阻 R 上以热量放出。



当电感上的端电压为 V 时, 电感的电流变化率为 V/L 。

图1-5 电感的性质

不能短时间改变大小和方向。据此, 可引伸出在电感中的安匝数大小和方向也不能在瞬时内突变的结论。利用这一原则, 即使对图 1-5(c) 那种带副边线圈的电路, 也可以准确地求得电流的方向和数值。

所谓反电动势的说法, 是一种想从电压来理解电感的语言。但电感与以电压方式贮存能量的电容不同, 电感是以电流的方式贮存能量的。因此对电感使用反电动势的说法, 相当于对电容使用所谓反电流的字眼。如果认为把流过电容的电流作为反电流来

说明，尽管自然但不易理解的话，那么我们就并不难理解，使用所谓反电动势的说法是不恰当的。

1.4 如果对电容 C 有充放电电流， 那么对电感 L 就有充放电电压

在给电容充电时，能量以电压形式被贮存起来。这一事实人们可以通过测定其端电压，或从短路放电火花的大小和声音真切地感受到。但对电感来说，当有电流流过时，虽然有电流形式的能量贮存，但把电感从回路取下的瞬间，能量会以电弧等形式完全消耗掉，不像电容中贮存的能量那样容易测量。

由于上述原因，电子技术人员对电感贮存的能量缺少实感，对电感的理解不深，甚至发生许多误解。但是要理解开关式稳压器，就绝不能忘记电感中贮存能量的概念。此外，如果能像认识到电容有充放电电流一样，认识到电感也有充放电电压，就能对电感的作用很好地理解。

当电容如图 1-6 (b) 所示，有电流 i 流过时，设时间为 t ，则电容两端的电压为

$$v = \int \frac{i}{C} dt \quad (1-5)$$

式中，若 i 为恒定电流 I ，则

$$v = \frac{I}{C} t \quad (1-6)$$

即电容两端的电压 v 与充电的电流及时间成正比，其变化波形如图 1-6 (b) 中所示。

下面再讨论电感的情况，在给电感 L 加上电压 v 时，电流为

$$i = \int \frac{v}{L} dt \quad (1-7)$$

若 v 为恒值电压 V ，则

$$i = \frac{V}{L} t \quad (1-8)$$

即电感中的电流 i 与电压及时间成正比，其变化过程如图 1-6(a) 中波形所示。

在以上的讨论中，都把电感和电容的内部电阻当作零而忽略不计。当存在内阻时，随着电流的增加，内阻 R 上的压降也要增大，于是电流的增长速率下降，结果使电感上的电压成为指数函数。

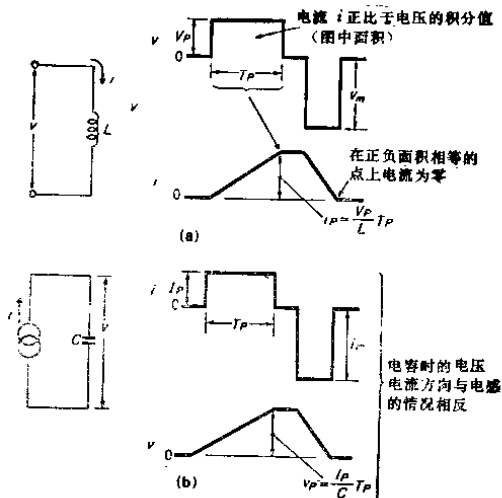


图1-6 线圈和电容的电压、电流比较

数。

在分析开关式稳压器的工作时，忽略内部电阻在实用上是完全允许的。因为在开关式稳压器中，为提高效率，总是将内阻 R 降得很低，所以忽略内阻的影响，在实用上已可得到足够的精度。

式(1-6)和式(1-8)表明，电容两端的电压正比于其电流积分值，电感中的电流正比于其两端电压积分值。当电容两端的电压为 V 时，电容中贮存的能量为

$$E_c = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1-9)$$

同理，当电感中流过电流 I 时，贮存的能量为

$$E_L = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1-10)$$

因此，如果与电容中称为充放电电流相对应，对电感应称为充放电电压，于是可把电感的动作和电容的动作一样理解。

作为一个实例，请参看图 1-7 的整流电路，当开关 S 开断时，计算其过渡响应。如果要求精确的过渡响应，必须求解二阶微分方程，或进行其他同等的运算，不过实用上可通过下面的方法简单地求取近似值。

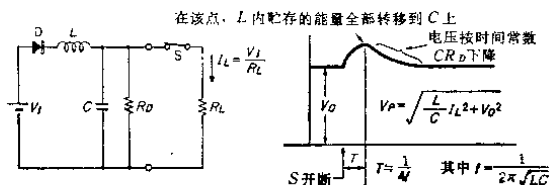


图1-7 整流电路的过渡响应

首先，设开关闭合时电容 C 上的电压为 V_0 ，电感 L 中流过的电流为 I_L ，则 L 、 C 中贮存的能量分别为 $LI_L^2/2$ 和 $CV_0^2/2$ 。若这里空载电阻 R_0 比负载电阻大得多，则当开关 S 打开的瞬间，负载电流 I_L 将被开断，于是该电流向电容 C 充电，把电感中贮存的能量转移到电容上，成为电压能量。因此，当电感 L 中的能量全部转移到电容 C 上时，电容的端电压将达到最大值 V_p 。

设开关 S 开断前一瞬间的能量等于电容 C 上电压达到 V_p 时的能量，则

$$\frac{1}{2} CV_p^2 = \frac{1}{2} CV_0^2 + \frac{1}{2} LI_L^2 \quad (1-11)$$

由此可求得

$$V_p = \sqrt{\frac{L}{C} I_L^2 + V_0^2} \quad (1-12)$$

在电容 C 上的电压达到最大值后, 由于二极管 D 的作用, C 上的能量不会再回到电感 L 上, 而是消耗在空载电阻 R_0 上. 其结果是, 电容 C 上的电压经 L, C 谐振频率的 $1/4$ 周期达到最大值后, 以电容 C 与空载电阻 R_0 的时间常数 $R_0 C$ 呈指数下降.

1.5 首先让我们透彻理解无变压器的 简单电路

开关式稳压器的电路类型要比串联式稳压器多得多, 甚至达到了令人难以分类的程度.

在开关式稳压器中, 最简单的一种电路形式是不带变压器的非隔离型电源. 在这种电路中, 输入与输出电路的一部分是共同的, 所以输入输出间不能绝缘, 应用范围受到一定的限制. 但因这种电路不含变压器, 工作原理比较容易理解. 在图 1-8 至图 1-10 的电路图中, 给出了各处的电压和电流波形, 如果能理解这些图的意思, 那么电路的说明将是很容易的 (在以后的说明中, 忽略二极管和开关管的正向压降, 并设输出端电容很大, 所以输出电压的纹波与输出电压本身相比可以忽略不计).

1.5.1 降压型开关稳压器

如图 1-8 所示, 这种电路因为不用变压器, 所以输入输出电路在直流上是连通的, 可用于输入输出不需要隔离的场合. 在该图中, 输入输出电路的负端是公共端, 但只要改用反极性的晶体管, 就可组成正端是公共端的电路. 由于这种电路不含变压器, 所以也不会出现变压器漏感等引起的麻烦, 可制成小尺寸、高效率的电源.