

## 漏电感对正激和反激式开关电源的影响及设计方法

Http://www.big-bit.com 2004年07月28日 10:40

## 漏电感对正激和反激式开关电源的影响及设计方法

The influence and design methods of leakage inductance on forward and flyback switching power supply

## 1引言

漏电感在开关电源主回路中一定存在，尤其在变压器、电感器等中都是不可避免的。过去在讨论中一般把它略而不计，设计中更无从考虑。现在随着开关电源的单机容量和整机容量的日益提高，这个参数影响到开关电源主要的参数，例如，40A/5V输出的开关电源，电压损失竟达20%，还影响到开关电源的重量和效率。因此，漏电感问题讨论、研究已摆到日程上了。加上脉冲电压 $V_S(t)$ 到变压器线圈就产生电流，沿着铁心磁径产生闭合的主磁通 $\Phi(t)$ 和部分路径在铁心附近的空气中闭合的漏磁通 $\Phi_{leak}(t)$ 。 $\Phi(t)$ 和 $\Phi_{leak}(t)$ 将在线圈分别产生感应电动势 $e(t)$ 和 $e_{leak}(t)$ ，两者之和加上电阻压降与外加电压相平衡，遵从KVL方程。过去，一般书刊略去 $e_{leak}(t)$ ，KVL方程简化为 $V_S(t) = L \frac{di(t)}{dt} + i(t)R$ 。

## 2反激式变换器的漏电感

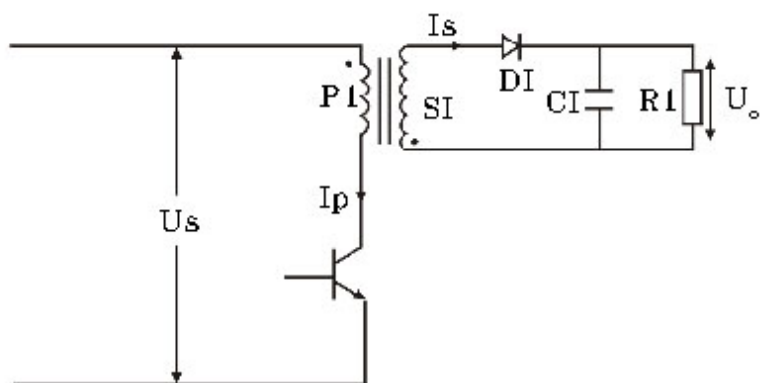


图1 反激式线路图

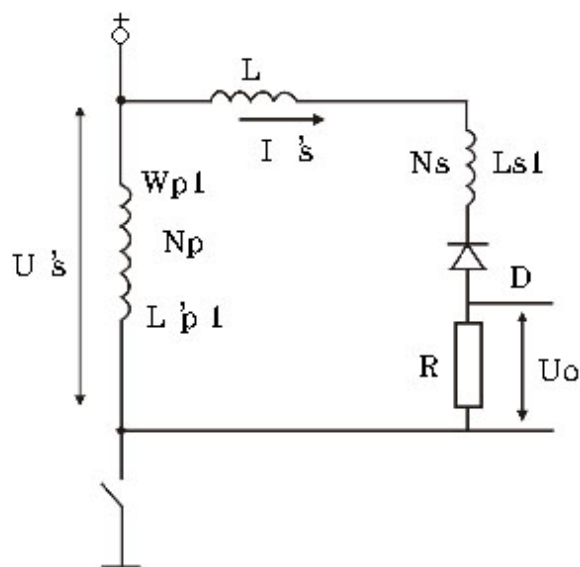


图2 反激式等效电路

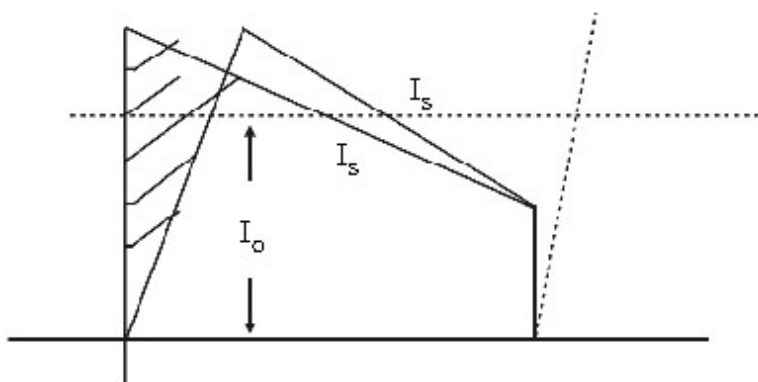


图3 反激式电路电流波形

反激式变换器线路如图一所示。反激工作原理可参见文献[1]。它的变压器是一定需加气隙的，这样才能使整个线路工作得到良性循环。其等效电路如图二所示（折算到副边绕组）。

WP1表示反激式变换器的变压器空气隙中储存的能量，该绕组电感LP1折算到副边绕组电感L'P1很小（ $L'P1 = LP1/n^2$ ）可以略

去。L 表示NP与NS间的漏电感；LS1、LP1分别表示副、原绕组的电感；L 的作用很明显是延缓了副边电压电流的建立，其电流波形见图三，引起的电压的损失（或效率的损失）如阴影部分所示。

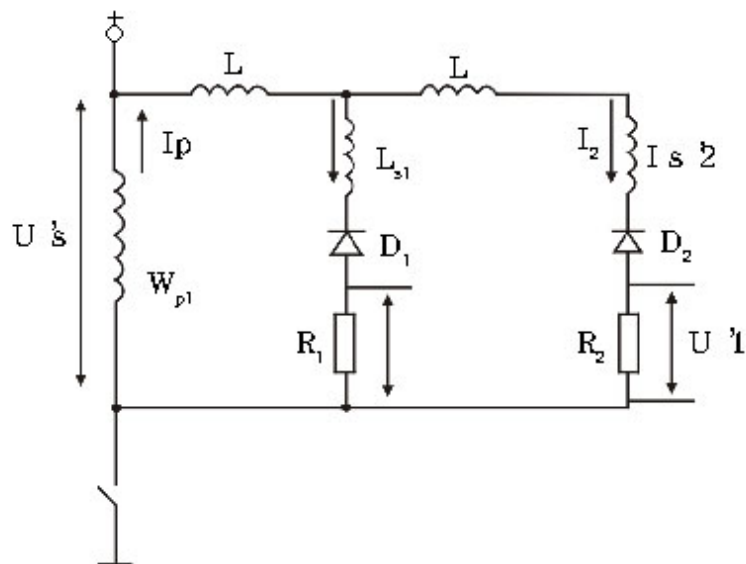


图4 有双电压输出电路

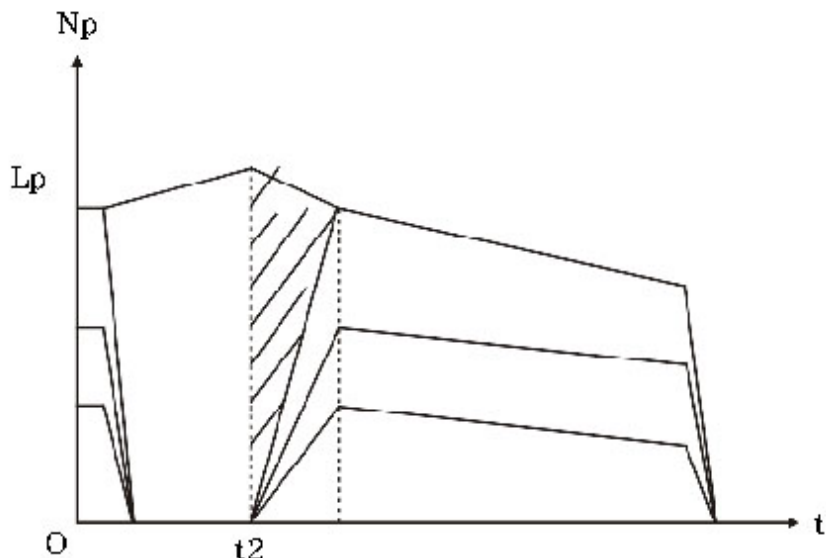


图5 电流建立过程

如是副边双电压输出，存在另一绕组S2、D2和R2时，则其等效电路如图四所示。这时把原边和第二个副边绕组均折算至副边的第一个绕组。

L 1表示LP与LS间的漏电感；L 2表示副边第一绕组与第二绕组间的漏电感；LS1、L'S2为副边第一、二绕组电感；L'S2、U'S、L 2为折算值，此时V0=V1'。两组输出电压的大小，决定于R1、R2及LS1、L 2+L'S2等四个方面，设t2时开关晶体管从导通转为截止，能量WP1转移至LS1、L'S2，电流延缓增长情形将如图五所示。

这时瞬时值  $\hat{I}_P = \hat{I}_1 + \hat{I}_2$ ，并按下式进行电流分配：

$$I_1 = \frac{I_P (L_{\sigma 2} + L'_{S2})}{L_{S1} + L_{\sigma 2} + L'_{S2}} \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{I_P L_{S1}}{L_{S1} + L_{\sigma 2} + L'_{S2}} \quad (2)$$

如果设计时， $I_1$ 为主输出电流，要求稳压精度高， $I_2$ 输出功率小，稳压精度次之，那么参数选择 $I_1$ 为闭环调节量。当 $I_1 / I_2$ 发生变化时，按 $I_1$ 情况要求稳定电压 $V_1$ 而进行调整，调整后 $V_1$ 的稳压是不成问题的，但是 $V_2$ 稳压精度将作出牺牲。电压损失值可计算如下[2]：

$$\Delta V = \frac{2\Delta I_b (L_{\sigma 2} + L'_{S2})}{T(1-D)^2} \quad (3)$$

式中：
$$1 - D = \frac{V_S}{V_S + V_0}$$

### 3正激式变换器的漏电感

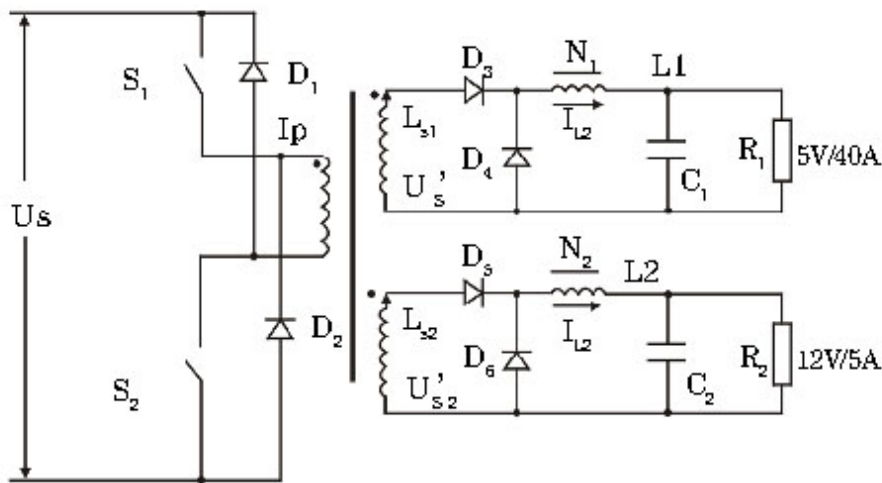
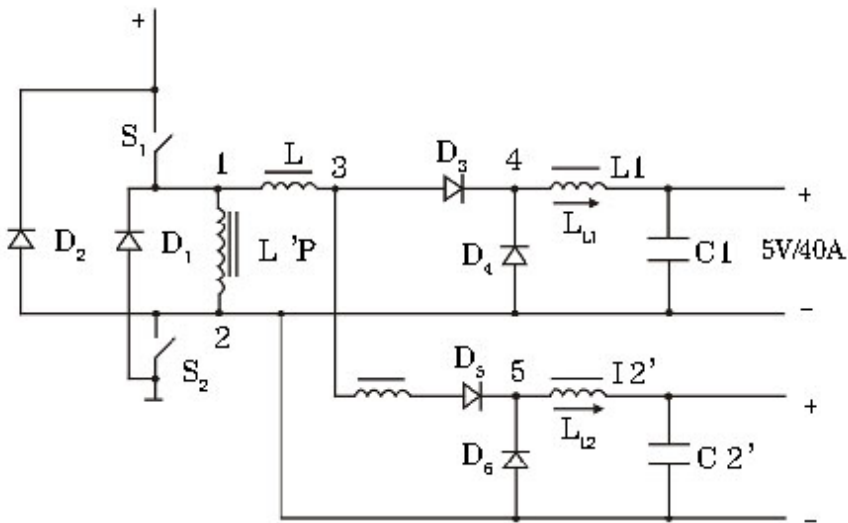


图6 双电压输出正激式变换器线路图

双晶体管正激式变换器主电路如图六所示。工作原理可参见文献[1]。如果副边双输出电压，假设为如文献[1]指出： $V_S'$ 的建立， $D_3$ 的导通，受制于变压器和副边电路的漏电感。设 $S_1$ 、 $S_2$ 关断期间，原来 $D_4$ 导通， $I_{L1}$ 续流状态。从这一状态转变为 $S_1$ 、 $S_2$ 导通时， $D_3$ 电流建立，相应 $D_4$ 电流的减少，经过 $i_{D3}$ 、 $i_{D4}$ 二者相等阶段至 $i_{D3} = I_{L1}$ 时， $D_4$ 完全关断， $D_3$ 开始输出能量到负载。第二个副绕组也有相似过程。这种输送能量的延迟，随漏感而定，一般在 $0.5 \mu S$ 到若干 $\mu S$ 内就建立。但是在低电压大电流传递时，漏感影响电流的建立非常明显，甚至占了全导通期间的相当比例。如果变压器设计太差，漏感值太大，会导致不能输送所需电源功率。因为在关断期间大部分原边绕组储能反馈回电源 $V_S$ 中，形成能量在开关管、二极管间流动，产生毫无意义的能量损耗。这种开关工作正常，开关电源带不起负载现象的根本原因就是设计问题和变压器漏电感问题。



图七 双电压输出正激式变换器的等效电路图

正激式变换器等效电路如图七所示（列方程时，忽略二极管的压降），电路是等效到主输出绕组5V上。

$L_1$ 表示原边绕组与副边主输出绕组间的漏电感； $L'P$ 表示原边绕组折算到副边主输出绕组间的漏电感； $L_2$ 为主输出绕组与12V输出绕组间的漏电感；折算时均以5V的 $N1$ 为匝数为基准。

### 3.1漏电感对一个输出电压时影响

在 $S1$ 、 $S2$ 闭合时， $L'P$ 上加上 $V_S'$ 电压，经耦合，使 $L_1$ 、 $L_2$ 上电流上升，由于 $L_1$ 的漏感作用，使 $I_{L1}$ 延缓上升，但 $i_{D3}+i_{D4}=I_{L1}$ ，电流 $I_{L1}$ 线性上升所需时间 $t_1$ 可依下式计算：

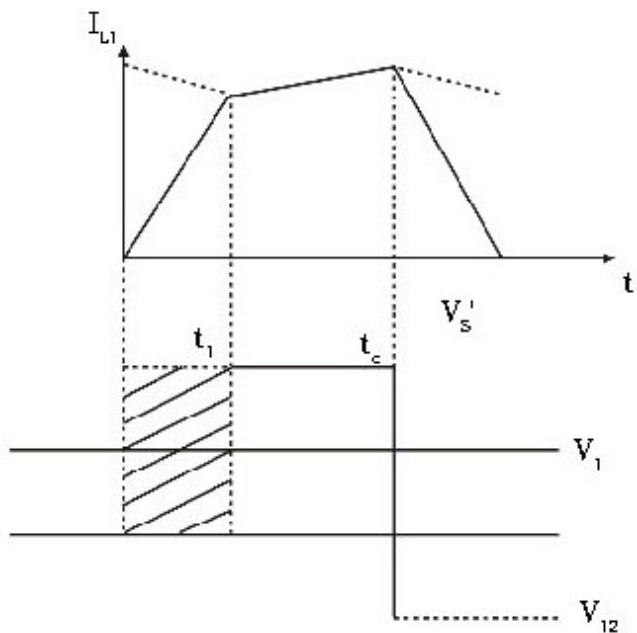


图8 漏电感对一个输出电压的影响

$$t_1 = \frac{I_{L1} L'_{\sigma 1}}{V_S'} \quad (4)$$

在 $t_1$ 初期，虽然 $V_{12} = V_S'$ ，但在漏电感引起延迟对应的伏-秒值 $V_S' t_1$ 即为输出电压的损失，在一个周期平均值定义为电压损失  $V_1$ ：（如图八阴影部分所示）

$$\Delta V_1 = \frac{V_S' t_1}{T} = \frac{I_{L1} L_{\sigma 1}'}{T} \quad (5)$$

由式(5)可知损失电压与 $I_{L1}$ 成正比。

从能量的反馈过程来看,  $t_c$ 是由于漏电感作用时使电流延缓下降, 在电流下降中,  $L_{L1}$ 、 $LP'$ 上的电压反向,  $L_{L1}$ 上能量耦合至 $LP'$ 并经 $D1$ 、 $D2$ 反馈回电压源 $V_S'$ , 这样就把储存在漏电感 $L_{L1}$ 和励磁电感 $LP'$ 的储能送回到输入端。例如, 设计一个开关频率为50kHz的开关电源, 采用EC-52型号的铁心, 用AWG#19线在线架上绕4层作为原边绕组, 用AWG#18线8条并联绕6圈作为副绕组。制作中没有用三明治绕法, 线圈布置是先绕原边绕组, 在作0.01mm绝缘处理后, 再绕副边绕组。

测得 $L_{L1}'$ 为 $0.5 \mu\text{H}$ , 此时, 引起电压损失为:

$$\Delta V_1 = \frac{I_{L1} L_{\sigma 1}'}{T} = \frac{40 \times 0.5 \times 10^{-6}}{50 \times 10^3} = \frac{20 \times 10^{-6}}{20 \times 10^{-6}} = 1.0 \quad (\text{V})$$

漏电感储存的能量为:

$$P = \frac{W}{T} = \frac{1}{2} L_{\sigma}' I_{L1}^2 f = \frac{1}{2} \times 0.5 \times 10^{-6} \times 40^2 \times 50 \times 10^3 = 20 \quad (\text{W})$$

如果线圈采用三明治绕法, 实测漏电感从 $0.5 \mu\text{H}$ 降为 $0.2 \mu\text{H}$ , 下降60%, 相应的电压损失为:

$$\Delta V_1 = \frac{I_{L1} L_{\sigma 1}'}{T} = \frac{40 \times 0.2 \times 10^{-6}}{50 \times 10^3} = \frac{8 \times 10^{-6}}{20 \times 10^{-6}} = 0.4$$

漏电感储存的能量为:

$$P = \frac{W}{T} = \frac{1}{2} L_{\sigma}' I_{L1}^2 f = \frac{1}{2} \times 0.2 \times 10^{-6} \times 40^2 \times 50 \times 10^3 = 8 \quad (\text{W})$$

由此可知漏电感减少后得益匪浅。

### 3.2 漏电感对有多个输出电压时的影响

如有二个输出绕组, 分别输出5V/40A和12V/5A, 相对于前面情况, 加了一个 $L_{L2}$ , 同样起着电流建立和消退的延缓作用。由于主输出绕组 $D3$ 、 $D4$ 在 $0 \sim t_1$ 时段的同时导通, 使3、2两端电压为0, 即经 $t_1$ 时间后, 再经历漏电感 $L_{L2}$ 的延迟作用, 才开始完全由 $D5$ 供电流给 $IL2'$ 建立 $ID5$ 。

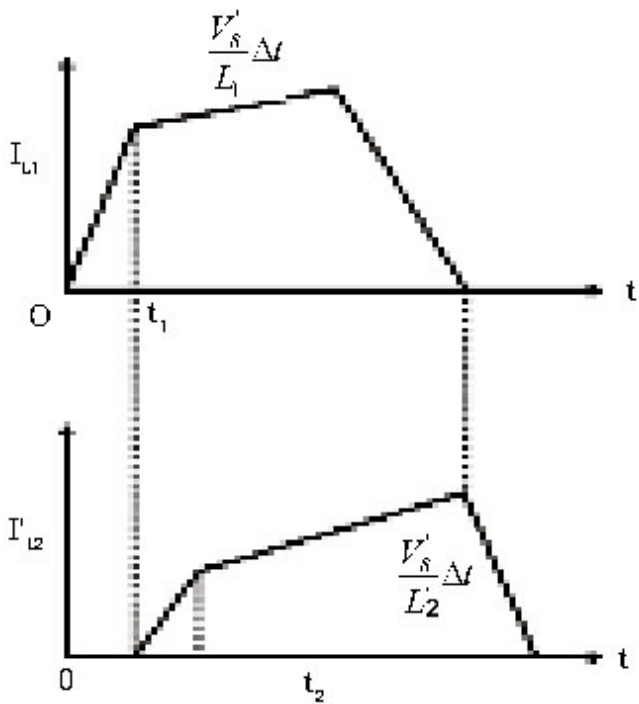


图9 漏电感对有多个输出电压时的影响

由于D5、D6同时导通，电流 $I_{L2}'$ 在 $t_2$ 以后才按  $\frac{V'_2}{L'_2} \Delta t$  规律上升。在  $t_2 \sim t_1$  期间， $V_{32}$  已上升到一定值，电流 $I_{L2}'$  开始增加，此增加电流一样是通过 $L_1$ ，所以对12V/5A绕组而言，受 $L_1 + L_2'$ 的左右。

$$t_2 - t_1 = \frac{(L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2}) I'_{L2}}{V'_S}$$

电压损失为：

$$\Delta V'_{12} = \frac{V_{32}(t_2 - t_1)}{T} = \frac{L'_{\sigma 2}}{L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2}} V'_S \frac{(L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2}) I'_{L2}}{V'_S} = \frac{L'_{\sigma 2} I'_{L2}}{T} \quad (v)$$

例如，在前例的基础上，再绕14.4圈（实绕 $N_2=15$ ）可得到12V电压，把12V/5A的参数折算至主绕组上。

$$n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{14.4}{4} = 2.4$$

$$V_2' = \frac{V_2}{n} = \frac{1.2}{2.4} = 5 \text{ (V)}$$

$$I_{2L}' = 5 \times 2.4 = 12 \text{ (A)}$$

$$\text{测得 } L_{\sigma 2} = 2.5 \mu\text{H}, L_{\sigma 2}' = \frac{2.5 \mu\text{H}}{2.4^2} = 0.434 \mu\text{H}$$

$$\text{电压损失计算得: } \Delta V_2' = \frac{0.434 \times 10^{-6} \times 12}{20 \times 10^{-6}} = 0.26 \text{ (V)}$$

实际电压损失:  $V_2=0.63\text{(V)}$

#### 4小结

本文指出漏电感存在的普遍现实, 以及它对开关电源参数的影响。根据漏电感的计算公式可知漏电感与几何尺寸等有关, 可以找到如何尽量减少漏电感的途径, 诸如改变导线直径, 圆线改为扁线、铜条或编织线以及改变线筒的高度和宽度等, 应该指出, 文中未论及的副边绕组电流构成的回路面积也会影响漏电感, 因此回路面积应尽可能小。采用双线并绕, 三明治绕法可有效降低漏电感, 但这要在工艺上允许并存在可行性。本文推出了电压损失的计算公式, 作为主输出绕组电压损失可以通过电压环闭路, 调整占空比得到补偿。这样实质上是缩小了占空比有效值, 即漏电感引起占空比损失。多于双输出电压的开关电源, 可以仿照进行分析, 但本文未对动态交互电压损失进行分析, 这是仍可进行的工作。

#### 参考文献:

[ 1 ] 张占松 蔡宣三《开关电源的原理与设计》电子工业出版社 1998.

[ 2 ] 谢沐田《高低频变压器设计》金华科技图书股份有限公司 1996.

[ 3 ] K.H.Billings et.al, 《Handbook of Switchmode Power Supplies》New York MC Graw-Hill Publishing Company 1989

新闻出处: 国际电子变压器2004年8月刊

文章作者: 李秀华 刘冰茹

#### 相关新闻