

LLC 谐振变换器与不对称半桥变换器的对比

[日期：2005-9-4] 来源：电源技术应用 作者：范洪峰 杨益平 吕征宇]

摘要 :介绍了 LLC 谐振变换器和不对称半桥变换器两种不同类型的软开关拓扑。分析了它们的工作原理，分别对它们的控制方法，副边整流管的电压应力和副边的开通等进行了比较，分析结果表明，LLC 谐振变换器更适合高频化和高效率的要求。

关键词：LLC 谐振变换器；不对称半桥变换器；电压应力

引言

随着开关电源的发展，软开关技术得到了广泛的发展和应用，已研究出了不少高效率的电路拓扑，主要为谐振型的软开关拓扑和 PWM 型的软开关拓扑。近几年来，随着半导体器件制造技术的发展，开关管的导通电阻，寄生电容和反向恢复时间越来越小了，这为谐振变换器的发展提供了又一次机遇。对于谐振变换器来说，如果设计得当，能实现软开关变换，从而使得开关电源具有较高的效率。

1 两种变换器的工作原理

1.1 不对称半桥变换器

图 1 和图 2 分别给出了传统的不对称半桥变换器的电路图和工作波形。图 1 中包括两个互补控制的功率 MOSFET (S1 和 S2)，其中 S1 的占空比为 D ，S2 的占空比为 $(1 - D)$ ；隔直电容 C_b ，其上电压作为 S2 开通时的电源；中心抽头变压器 T_r ，其原边匝数为 N_p ，副边匝数分别为 N_{s1} 和 N_{s2} ；半桥全波整流二极管 D1 和 D2；输出滤波电感 L_d ，电容 C_f 。不对称半桥 (AHB) 变换器的稳态工作原理如下。

图 1

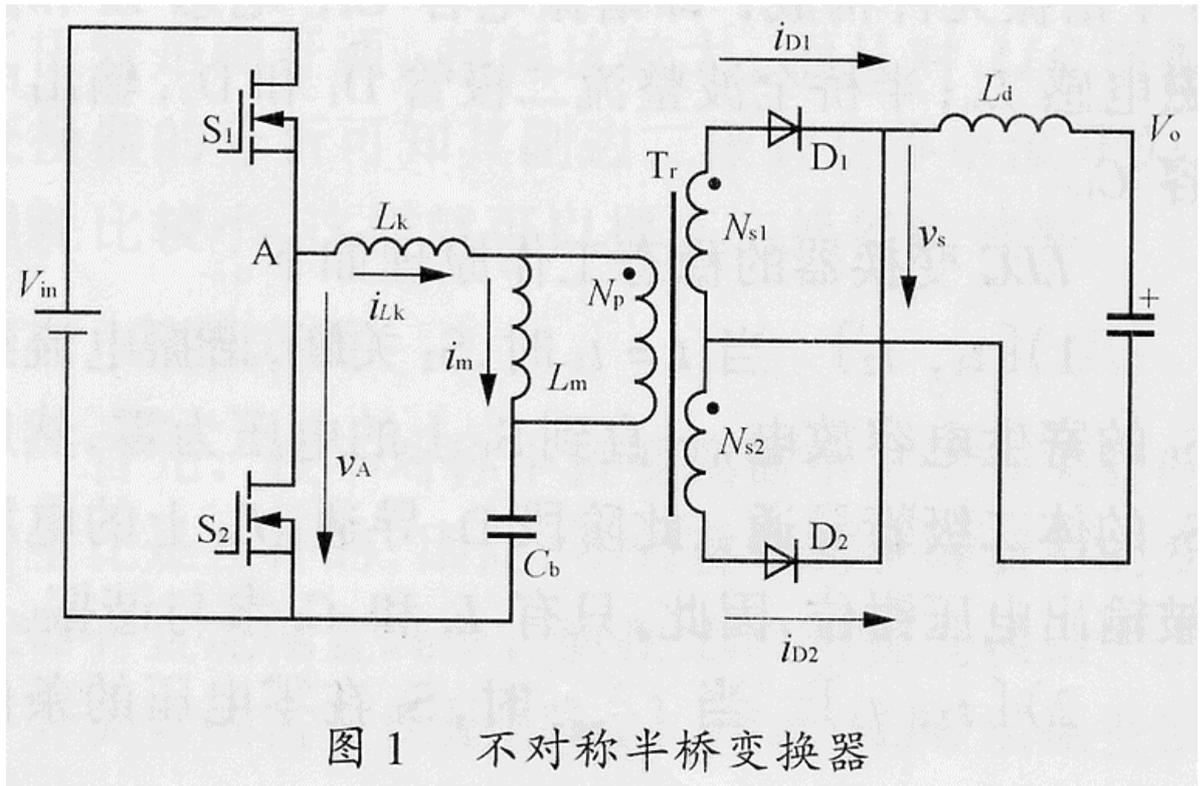


图 1 不对称半桥变换器

1) 当 \$S_1\$ 导通 \$S_2\$ 关断时，变压器原边承受正向电压，副边 \$N_{s1}\$ 工作；二极管 \$D_1\$ 导通，二极管 \$D_2\$ 截止；

2) 当 \$S_2\$ 导通 \$S_1\$ 关断时，隔直电容 \$C_b\$ 上的电压加在变压器的原边，副边 \$N_{s2}\$ 工作，二极管 \$D_1\$ 截止。

图 2 中 \$n_1=N_p/N_{s1}\$，\$n_2=N_p/N_{s2}\$，且 \$n_1=n_2=n\$。通过对电路的分析，可以得到传统不对称半桥变换器占空比 \$D\$ 的计算公式

$$D = \frac{V_{in} - \sqrt{V_{in}^2 - 2V_o V_{in} n}}{2V_{in}} \quad (1)$$

1.2 LLC 谐振变换器

图 3 和图 4 分别给出了 LLC 谐振变换器的电路图和工作波形。图 3 中包括两个功率 MOSFET (\$S_1\$ 和 \$S_2\$)，其占空比都为 0.5；谐振电容 \$C_s\$，副边匝数相等的中心抽头变压器 \$Tr\$，\$Tr\$ 的漏感 \$L_s\$，激磁电感 \$L_m\$，\$L_m\$ 在某个时间段也是一个谐振电感，因此，在 LLC 谐振变换器中的谐振元件主要由以上 3 个谐振元件构成，即谐振电容 \$C_s\$，电感 \$L_s\$ 和激磁电感 \$L_m\$；半桥全波整流二极管 \$D_1\$ 和 \$D_2\$，输出电容 \$C_f\$。

图 2

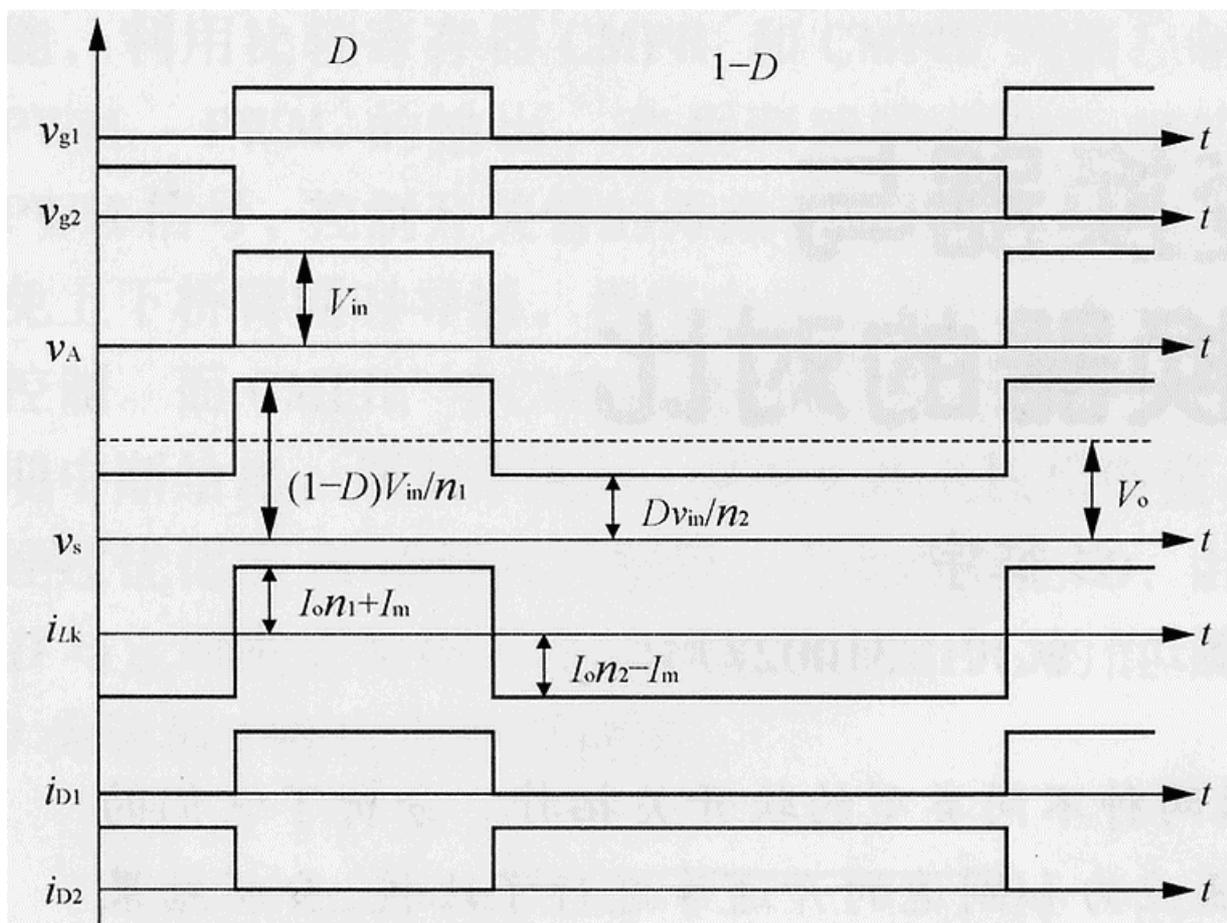


图 2 不对称半桥变换器的工作原理

LLC 变换器的稳态工作原理如下。

1) $[t_1, t_2]$ 当 $t=t_1$ 时, S2 关断, 谐振电流给 S1 的寄生电容放电, 一直到 S1 上的电压为零, 然后 S1 的体二极管导通。此阶段 D1 导通, L_m 上的电压被输出电压钳位, 因此, 只有 L_s 和 C_s 参与谐振。

2) $[t_2, t_3]$ 当 $t=t_2$ 时, S1 在零电压的条件下导通, 变压器原边承受正向电压; D1 继续导通, S2 及 D2 截止。此时 C_s 和 L_s 参与谐振, 而 L_m 不参与谐振。

3) $[t_3, t_4]$ 当 $t=t_3$ 时, S1 仍然导通, 而 D1 与 D2 处于关断状态, Tr 副边与电路脱开, 此时 L_m , L_s 和 C_s 一起参与谐振。实际电路中 L_m L_s , 因此, 在这个阶段可以认为激磁电流和谐振电流都保持不变。

4) $[t_4, t_5]$ 当 $t=t_4$ 时, S1 关断, 谐振电流给 S2 的寄生电容放电, 一直到 S2 上的电压为零, 然后 S2 的体二极管导通。此阶段 D2 导通, L_m 上的电压被输出电压钳位, 因此, 只有 L_s 和 C_s 参与谐振。

图 3、4

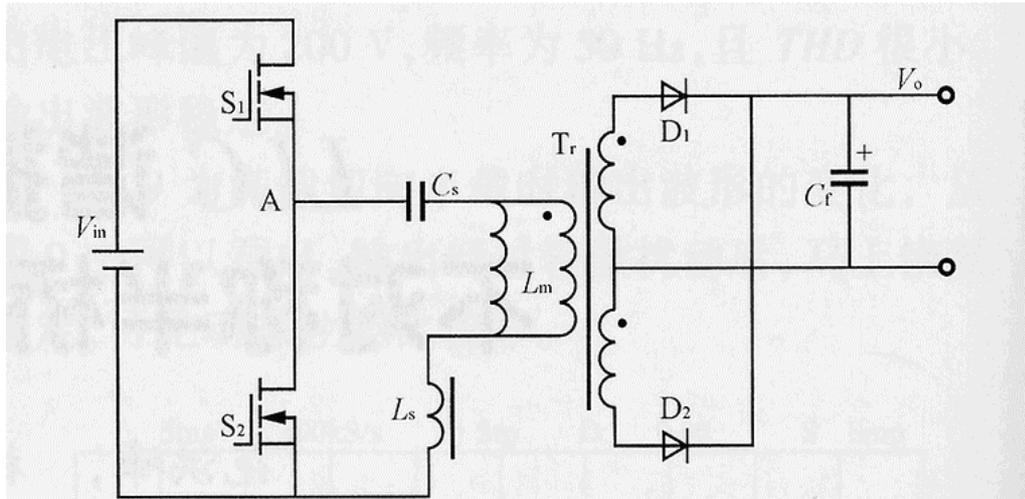


图3 LLC 谐振变换器

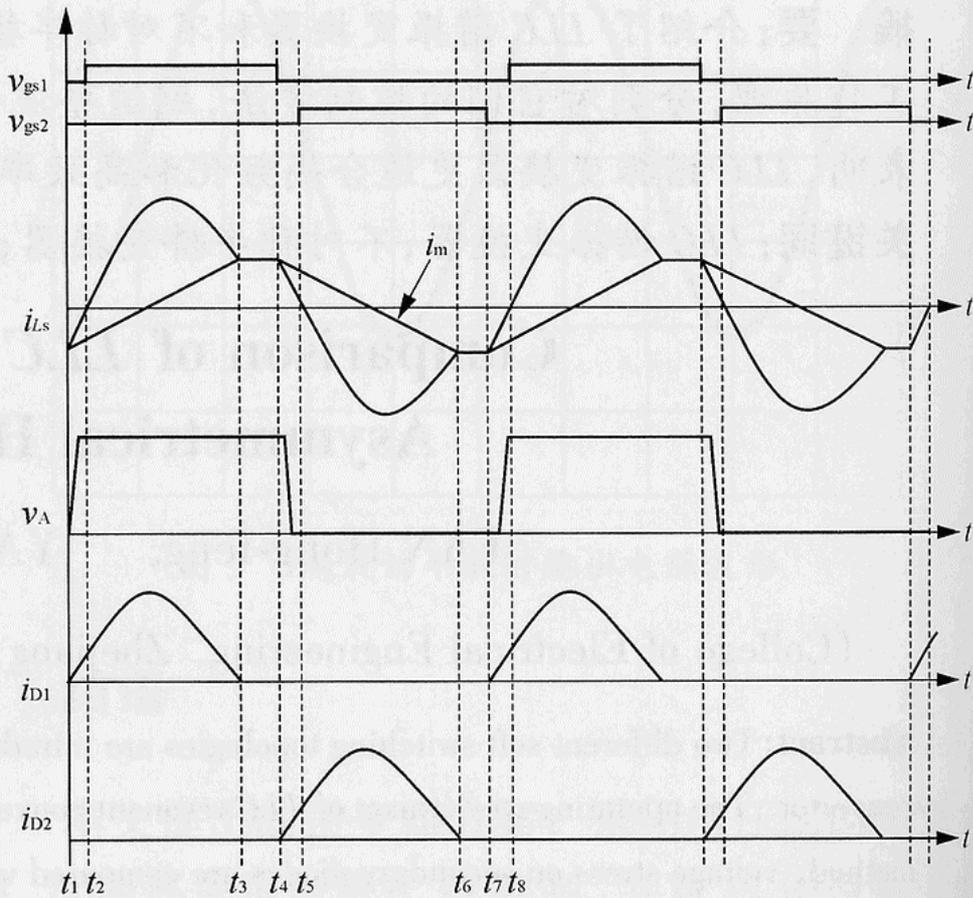


图4 LLC 谐振变换器的工作原理

5) $[t_5, t_6]$ 当 $t=t_5$ 时, S_2 在零电压的条件下导通, T_r 原边承受反向

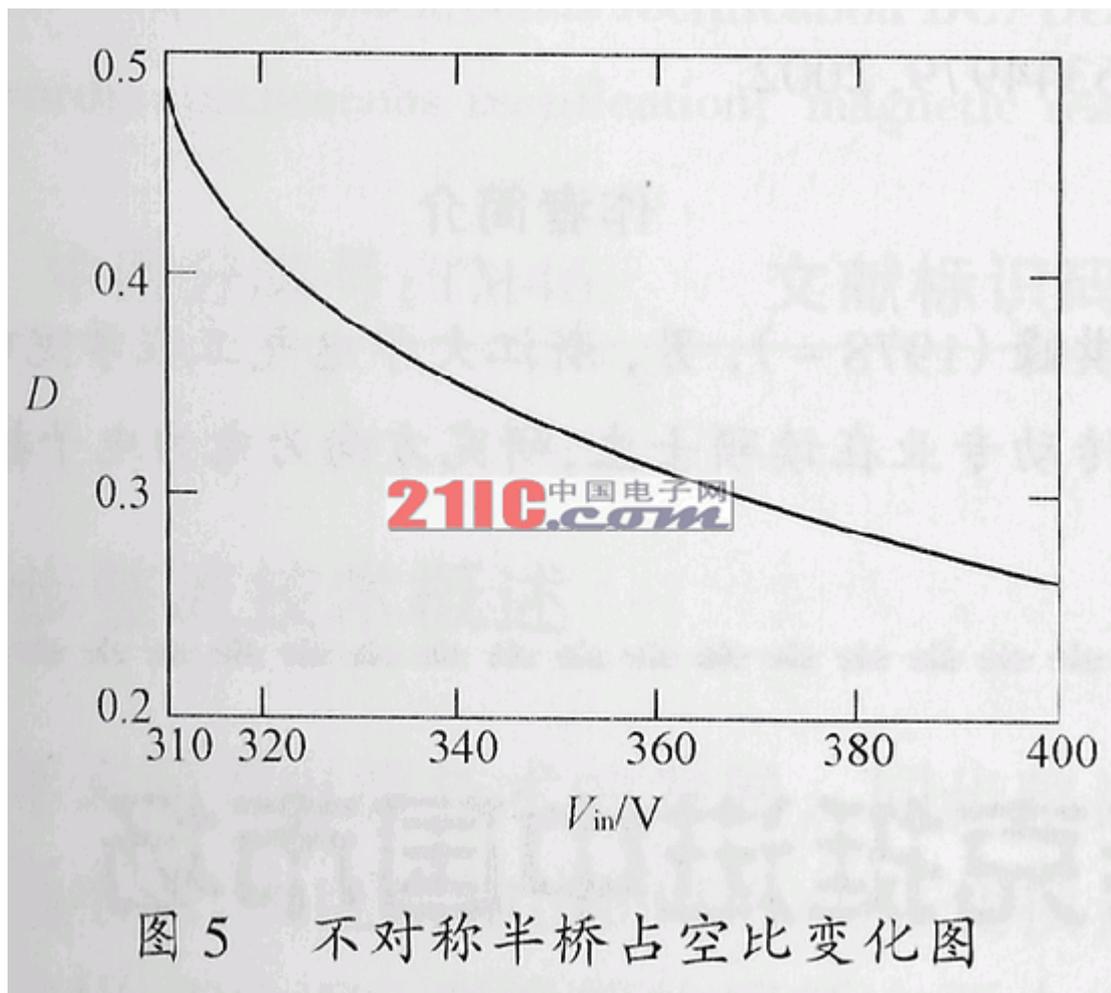
电压；D2 继续导通，而 S1 和 D1 截止。此时仅 Cs 和 Ls 参与谐振，Lm 上的电压被输出电压箝位，而不参与谐振。

6) [t6, t7] 当 t=t6 时，S2 仍然导通，而 D1 和 D2 处于关断状态，Tr 副边与电路脱开，此时 Lm, Ls 和 Cs 一起参与谐振。实际电路中 Lm ≫ Ls，因此，在这个阶段可以认为激磁电流和谐振电流都保持不变。

通过上面的详细分析，对这两类软开关型变换器的工作原理及其特性有了一定的了解，下面将对它们之间的差异进行比较，进一步加深对它们的认识。

2 两种变换器差异的对比

虽然不对称半桥变换器和 LLC 谐振变换器都是软开关型变换器，但是，两者有本质的区别。不对称半桥变换器是 PWM 型的，而 LLC 谐振变换器是谐振型的，因此，它们在控制方法、副边整流管的电压应力、原边的电流应力等方面有很大的差异，下面将对这些差异进行详细分析。



2.1 控制方法的对比

不对称半桥变换器通过调节开关管的占空比来调节输出电压，图 5 给出了在不同的输入电压下的占空比变化情况，从图 5 可以看出当输入电压变化范围比较大时，开关管的占空比变化范围也比较大，因此，不对称半桥变换器的掉电维持时间特性比较差。

与不对称半桥变换器相比，LLC 谐振变换器是通过调节开关频率来调节输出电压的，也就是在不同的输入电压下它的占空比保持不变，因此，与不对称半桥相比，它的掉电维持时间特性比较好，可以广泛地应用在对掉电维持时间要求比较高的场合。

2.2 副边整流管电压应力的对比

通过对不对称半桥变换器工作原理的分析，可以得到副边二极管上的电压应力的计算方法如式（2）及式（3）所示，这样当输入电压变化时，就可以了解副边二极管电压的变化情况。图 6 给出了输出电压为 48V 时副边整流管上电压变化情况。当输入电压比较高时，D2 上的电压比较高，因此，D2 必须选用耐压等级比较高的二极管，这样就会增加电路的损耗。

$$V_{D1} = \frac{V_o}{1-D} \quad (2)$$

$$V_{D2} = \frac{V_o}{D} \quad (3)$$

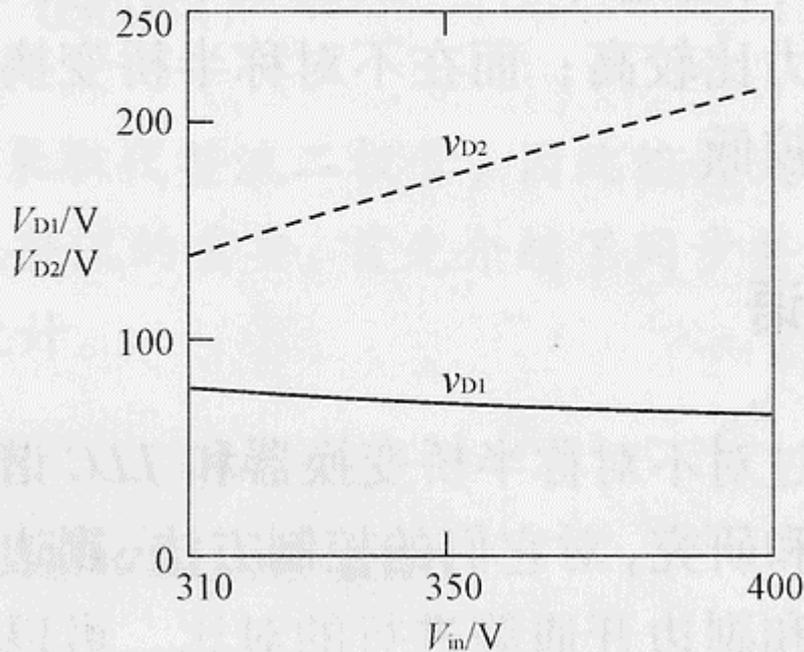


图 6 不对称半桥中副边二级管电压应力图

相同条件下, LLC 谐振变换器中副边二极管上的电压应力比不对称半桥变换器小很多, 因为, 在 LLC 谐振变换器中副边二极管上的电压应力是输出电压的 2 倍, 如图 7 所示。因此, 在 LLC 谐振变换器中可以选择耐压比较低的二极管, 从而可以提高电路的效率。

2.3 副边二极管的开通对比

从对不对称半桥变换器的分析可知其副边二极管是硬开通, 损耗比较大; 而从对 LLC 谐振变换器的分析可知其副边二极管是零电流开关, 损耗比较小, 这样就可以提高变换器的效率。

2.4 其他方面

首先, 在不对称半桥变换器中上下开关管的占空比是互补的, 因此, 不对称半桥变换器中的变压器有直流偏置现象; 而在 LLC 谐振变换器中上

下开关管的占空比是相等的，因此，LLC 谐振变换器中的变压器没有直流偏置现象。

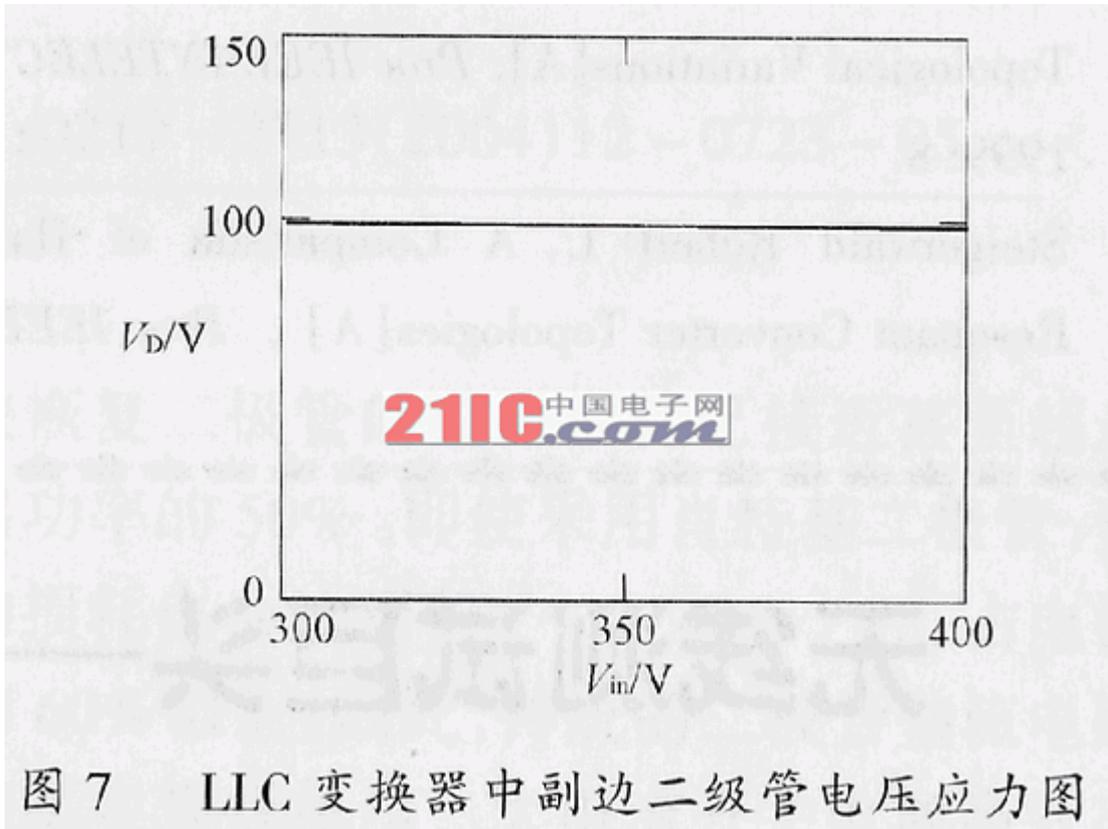


图 7 LLC 变换器中副边二级管电压应力图

其次，LLC 谐振变换器是通过调开关管的工作频率来调节输出电压，因此，对于 LLC 谐振变换器来说，要实现同步整流控制比较复杂；而不对称半桥变换器是通过调开关管的占空比来调节输出电压，因此，对于不对称半桥变换器来说，要实现同步整流控制比较简单。

另外，通过对 LLC 谐振变换器的分析，可知其电流应力比较高；而在不对称半桥变换器中电流应力比较低。

3 结语

通过对不对称半桥变换器和 LLC 谐振变换器的分析和研究，对它们的控制方法，副边整流管电压应力和副边开通等进行的对比，可以知道 LLC 谐振变换器更能适合电源对高频和高效的发展需求。