

的。但是，即使使用先进的拓扑结构，为了达到高功率密度，磁件设计仍然是关键问题。随着开关频率的提高，磁件和线圈的损耗已成为总损耗的主要部分。减少磁件损耗和尺寸的方法很多。现在磁件集成是在应用中广泛讨论的方法<sup>[21][22][23][24]</sup>。

使用磁件集成技术，能把几个磁件集成在一个磁芯上，共用一个磁径。通过磁集成，能减少总的磁件数量。共用一个磁径，可减少磁通纹波。因此，使用磁件集成技术，能够设计出高效、高功能密度磁件。如<sup>[23]</sup>中的前置 DC/DC 变换器，把一个倍流整流器的所有磁件集成到一个磁芯。下面讨论了几个用于 LLC 谐振变换器的集成磁件的设计，提出一个广泛使用的集成磁件通用模型，它能用于不同线圈和气隙结构研究。在这个通用模型基础上，研究和比较了几个用于 LLC 谐振变换器的集成磁件设计，分析了每种设计的优点和缺点。在为谐振变换器设计集成磁件结构过程中，得到了一个四线圈集成磁件结构，并且该结构也能被推广用于不同拓扑结构的磁件集成中。在此变换器中，有三个磁件。磁件集成后，一、减少了元件数量；二、消除了磁通纹波，减少了磁芯损耗，从而提高了功率密度。

#### 4.2.2 LLC 谐振变换器设计例子

LLC 谐振变换器结构与第一节相同，如图 4—2 所示，变换器规格：

输入电压范围  $V_{in}$  : 300~400V

输出电压范围  $V_o$  : 48V

输出功率范围  $P_o$  : 1KW

变换器参数：

变压器匝数比：4:1:1

谐振电感：14uH

谐振电容：0.047uF

励磁电感：60uH

开关频率范围：150kHz-200kHz

磁件结构如图 4—11 所示。可看出该结构和实际考虑励磁电感和原、副

边漏感的双绕组变压器等效模型结构相似。变压器原边泄漏电感能被用作  $L_r$ ，励磁电感可用作  $L_m$ 。但在实际中存在以下问题：第一，漏感控制非常困难。 $L_r$  值对于 LLC 谐振变换器是非常关键的因素，它将决定工作点状态。第二，变压器的漏感不仅存在于变压器的原边，而且存在于变压器的副边，如图 4—12 所示，当把它们转换到同一边时，具有相同的值。副边漏感的存在是不希望的。

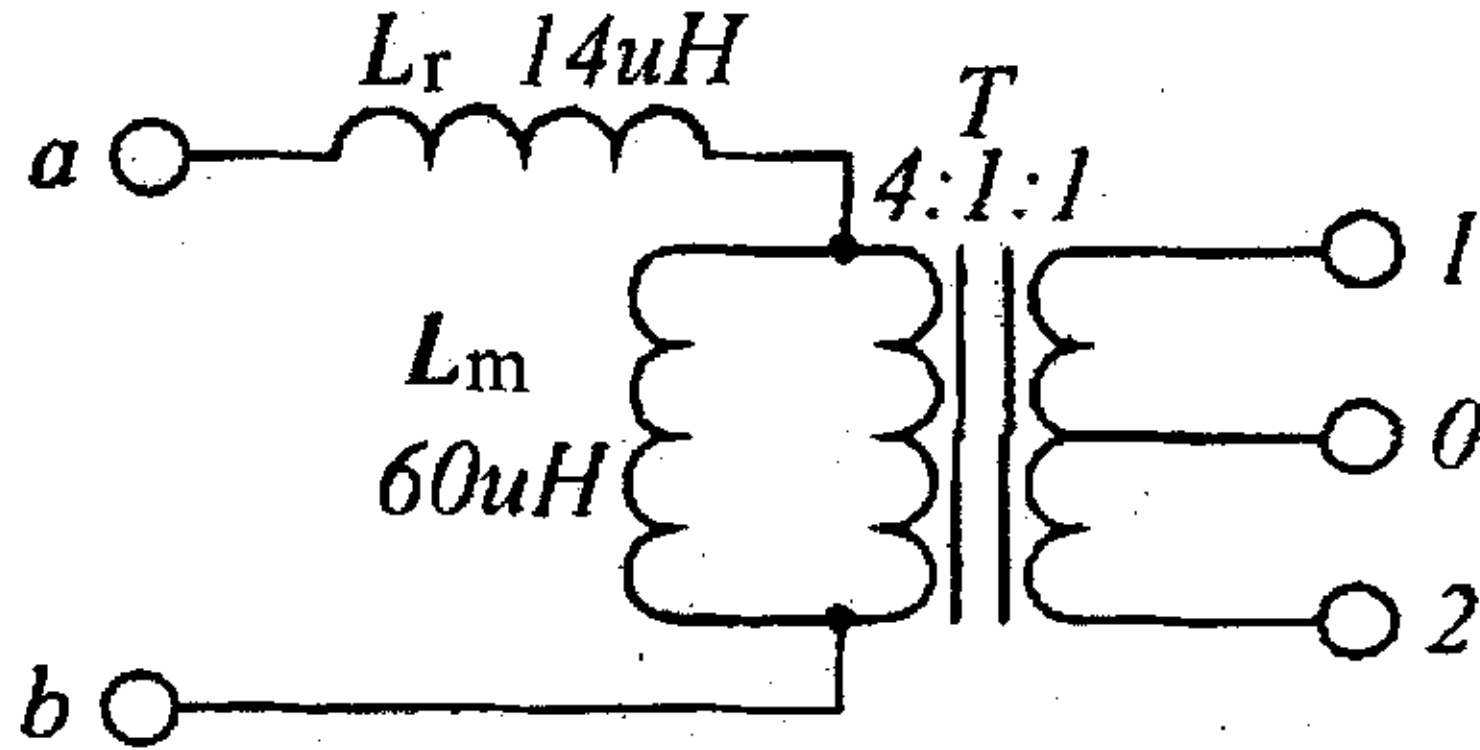


图 4—11 LLC 谐振电路的磁件结构

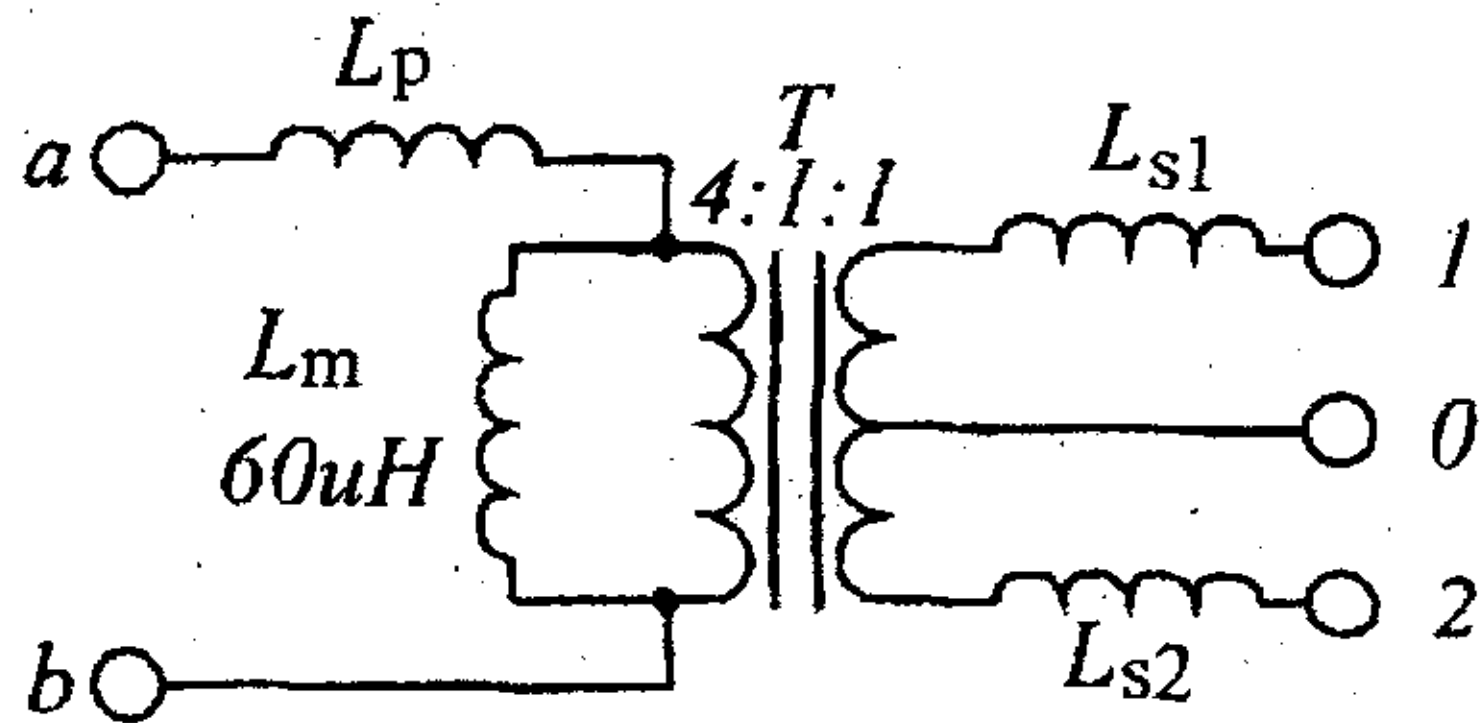
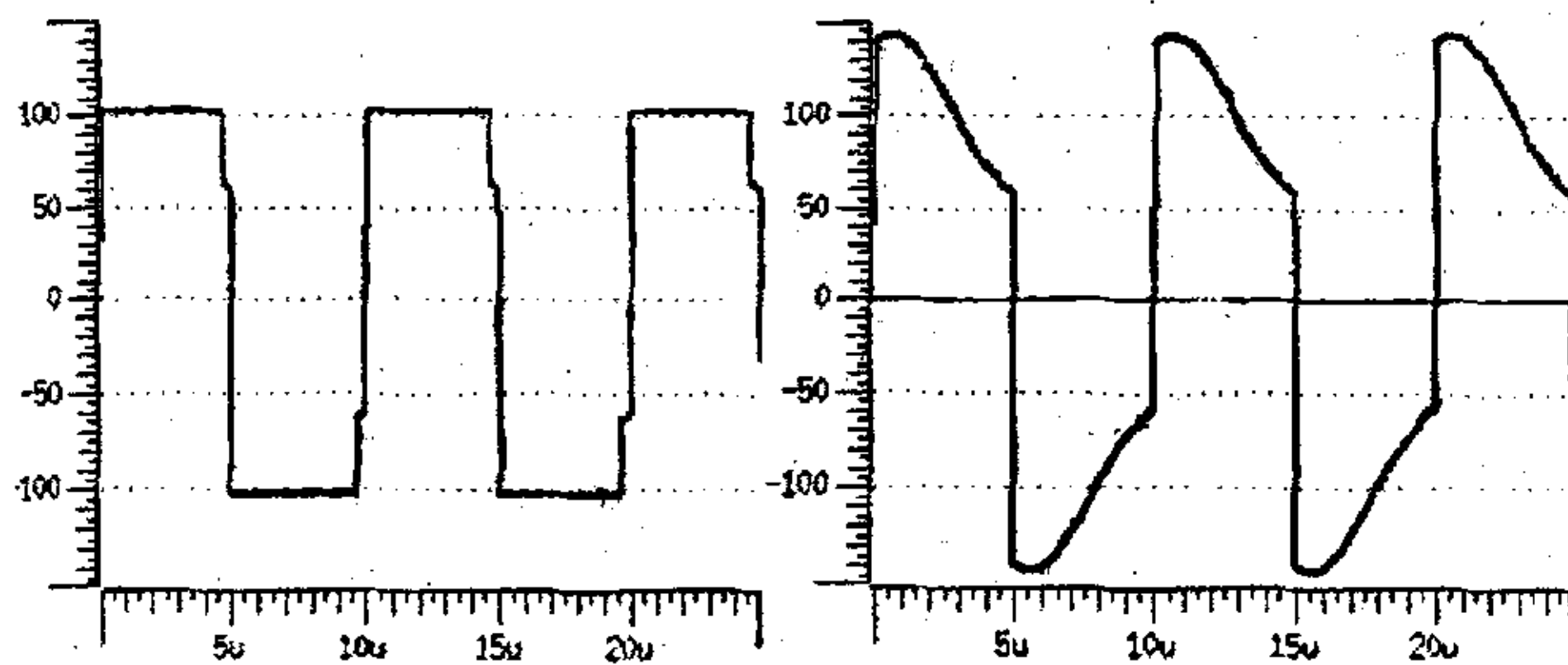


图 4—12 考虑励磁电感和原、副边漏感的双绕组变压器等效模型结构



(a) 使用图 4—11 磁件结构

(b) 使用图 4—12 磁件结构

图 4—13 输出端二极管电压应力的仿真波形

当副边存在漏感时，副边整流二极管的电压应力增加，在设计时就应该选用电压变化率较大的二极管，这将增加导通损耗。图 4—13 分别显示了使用图 4—11、图 4—12 磁件结构时副边二极管的仿真波形<sup>[19]</sup>。可看到副边有漏感时二极管的电压应力是非常高的。当所有谐振电感都在原边时，磁件结构中的  $L_r$ ， $L_m$  的值应该被准确的计算。

#### 4.2.3 LLC 谐振变换器的集成磁件

##### ① LLC 谐振变换器分立磁件的计算

为了研究磁件集成，先设计出分立磁件作为参考是非常必要的。下边提出了分立磁件的设计过程，并显示了相应的仿真结果，这些可用来与集成磁件相比较。在 LLC 谐振变换器中，谐振电感  $L_r$  中有纯交流电流通过，因此电感和变压器都能使用软磁铁氧体磁芯。

图 4—14 显示了 LLC 谐振变换器分立磁件的设计，谐振电感和隔离变压器都使用双 U 型磁芯，图 4—15 显示了磁芯磁通密度的仿真结果，每一个 U 型铁芯的横截面积为  $116.5\text{mm}^2$ ，设计结果如下所示： $N_1=12$ ， $N_p : N_s : N_s=16:4:4$ ， $gap1=1.45\text{mm}$ ， $gap2=0.5\text{mm}$ <sup>[19]</sup>。

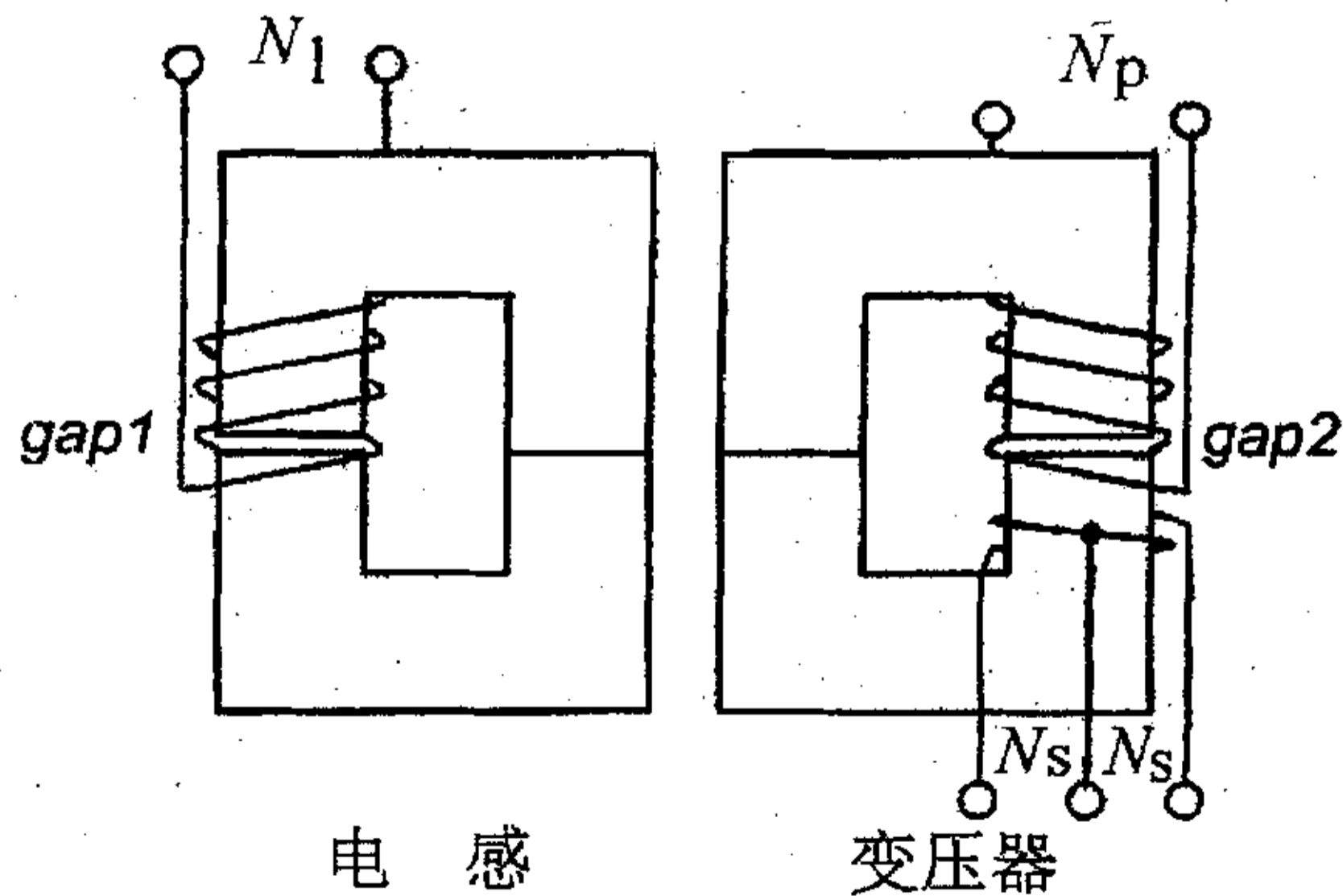


图 4—14 LLC 谐振电路分立磁件的设计