

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>。

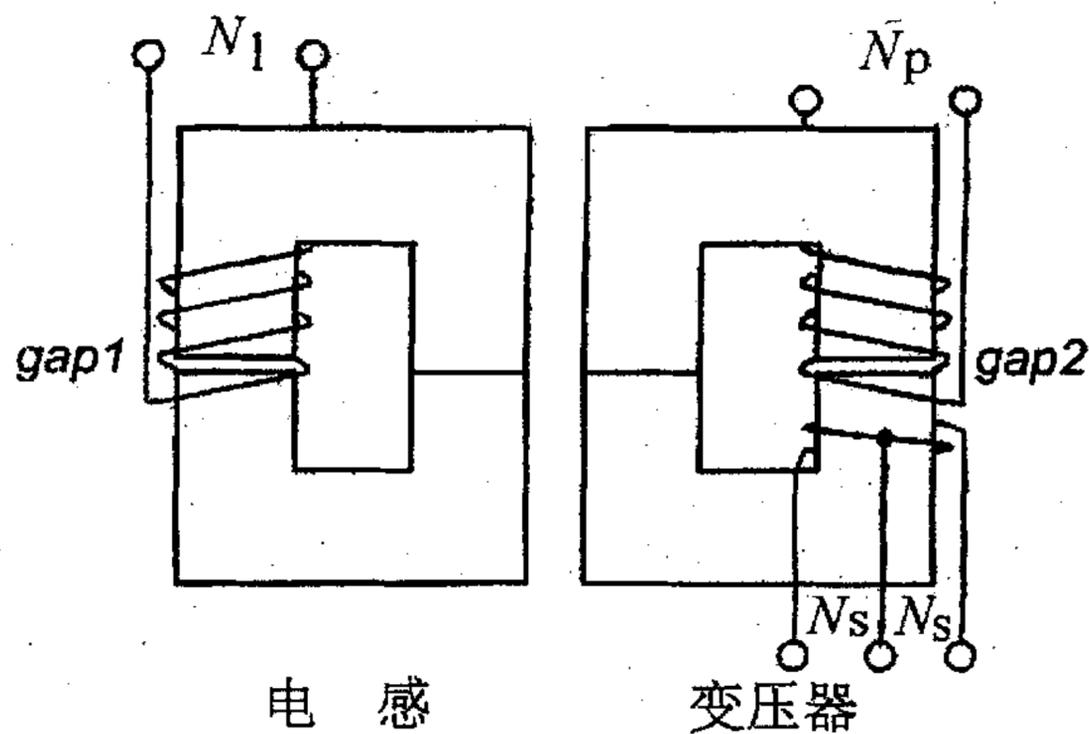


图 4—14 LLC 谐振电路分立磁件的设计

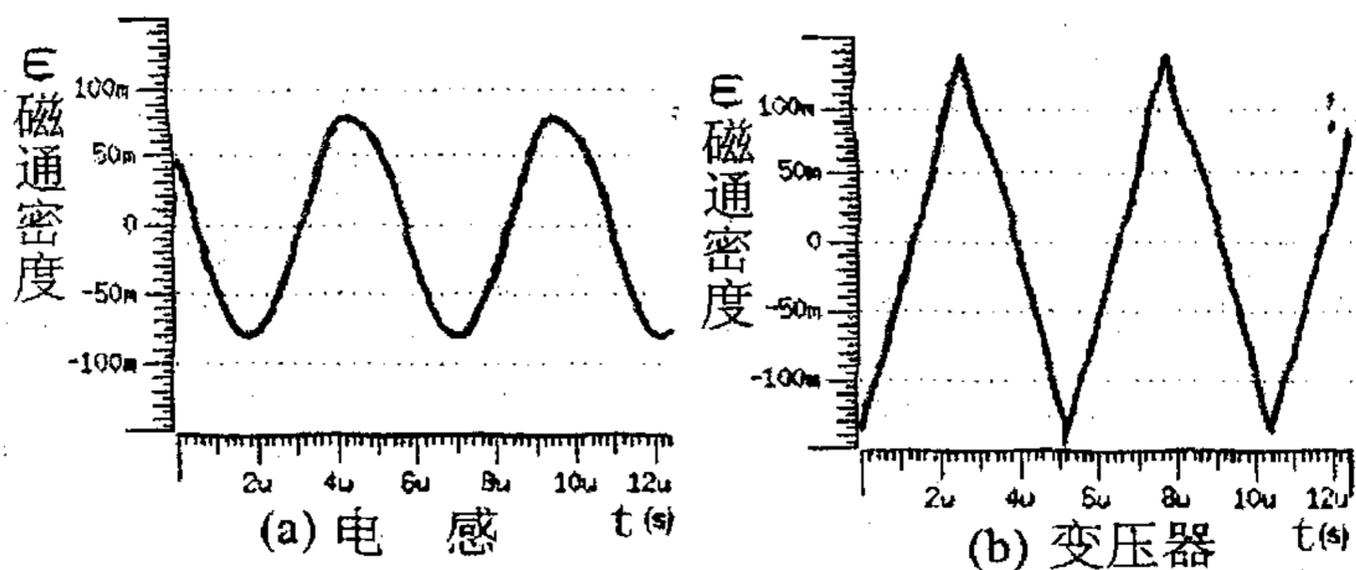


图 4—15 磁通密度的仿真结果

② 集成磁件通用结构的提出

以前对功率变换器的集成磁件曾经作了大量的调查研究，复习一下这些论文，能够发现这些磁件大部分使用 EE 磁芯结构，不同之处是线圈的布置和气隙的安排。

本文使用了一个带有 4 个线圈的 EE 形磁芯的通用电路模型结构，如图 4—16 所示。每个磁柱上都开有气隙。这是一个非常通用的结构，许多 PWM 变换器集成磁件的设计都使用这个结构，只是对气隙和线圈安排做一些相应的变化<sup>[22][23]</sup>。

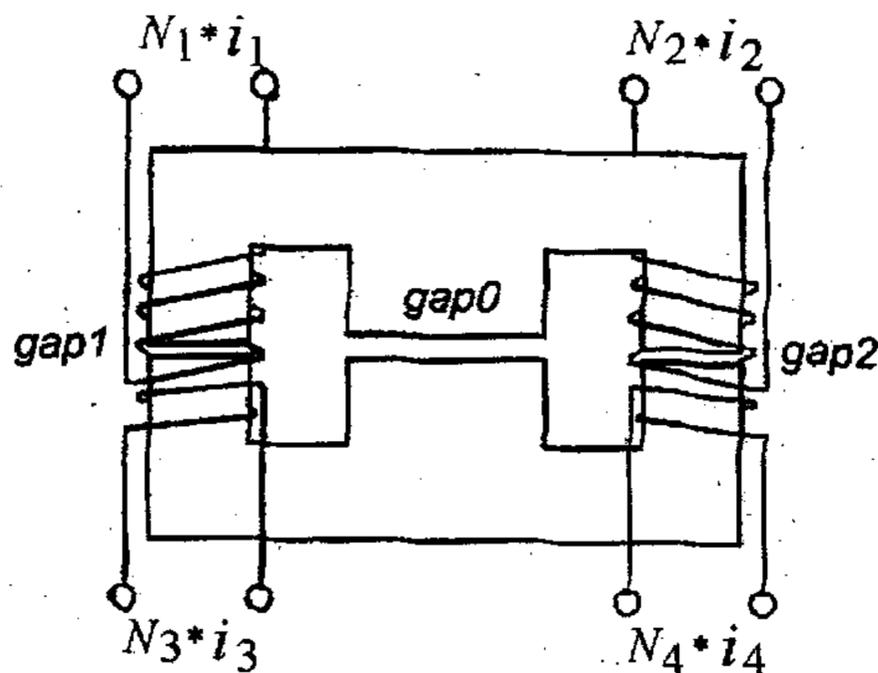


图 4—16 集成磁件的通用结构

LLC 谐振变换器也选用这个结构，原因如下：

要把两个磁件集成到一起，通常需要三条磁径。LLC 谐振变换器尽管有三个磁件，但是  $L_m$  和变压器  $T$  能用一个带气隙的变压器产生。因此进行磁

件集成时只需考虑两个磁件：串联谐振电感  $L_r$  和隔离变压器。因此 EE 磁芯结构的选取是非常合理的。

在对偶原理<sup>[3]</sup>的基础上可推导出所需要的模型，并获得实际磁件结构的电路模型。模型中的所有元件参数与实际磁件结构的参数相对应。图 4—16 磁件结构的磁路模型如图 4—17 所示。图 4—18 为等效电路模型，包括两组理想变压器和三个电感。

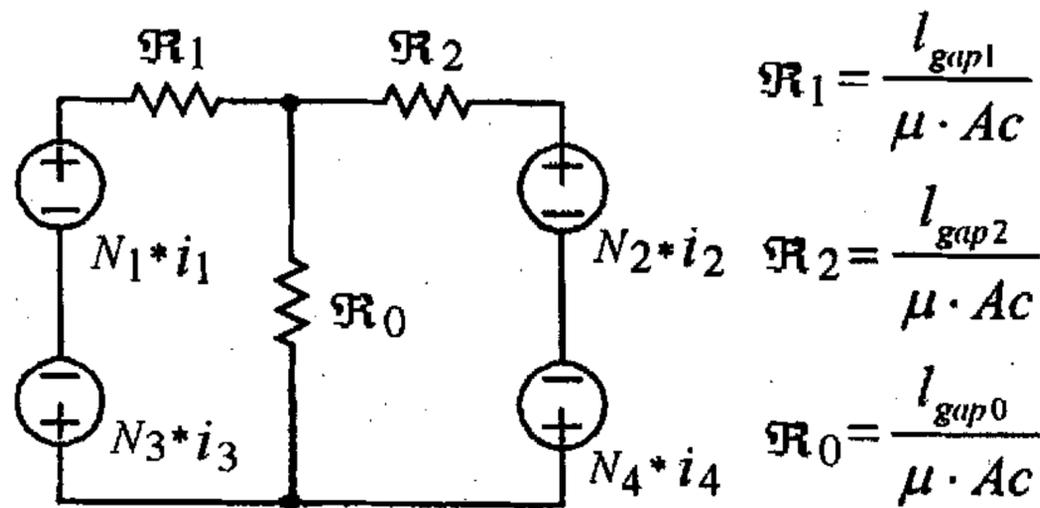


图 4—17 通用集成磁件结构的磁路模型

向实际变压器结构那样，两个理想变压器的线圈匝数比是相同的。三个电感对应三个气隙，可以把它们都折算到一个线圈  $N_1$ 。需要的话，也可以把它们折算到别的线圈。图 4—18 给出了每个电感的值。

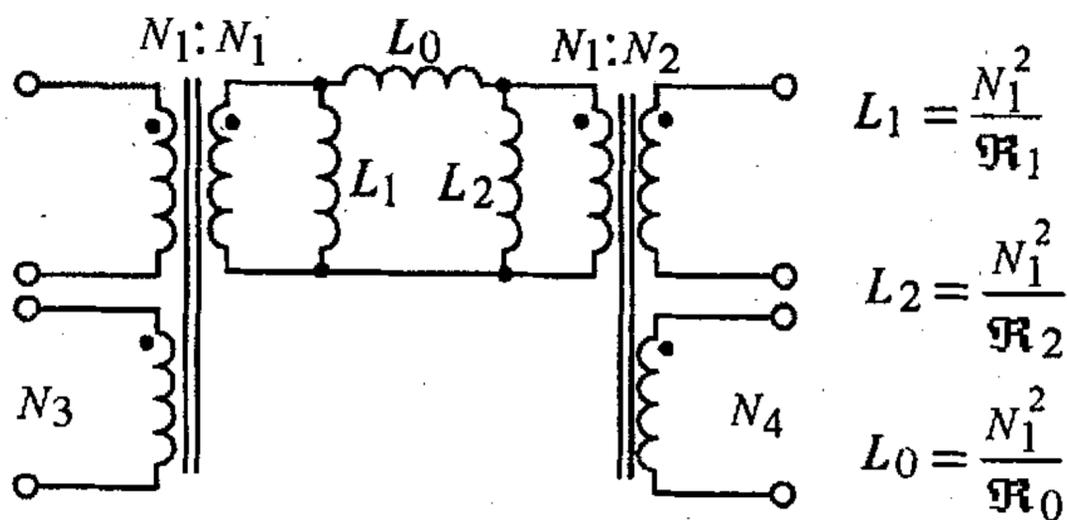


图 4—18 通用集成磁件的电路模型

在这个模型的基础上，可以研究更多的集成磁件结构。

### ③ LLC 谐振变换器集成磁件设计 A

如图 4—19 所示，从分立磁件设计出发，通过把两个磁件绕制在一个 EE 磁芯，实现它们的集成。

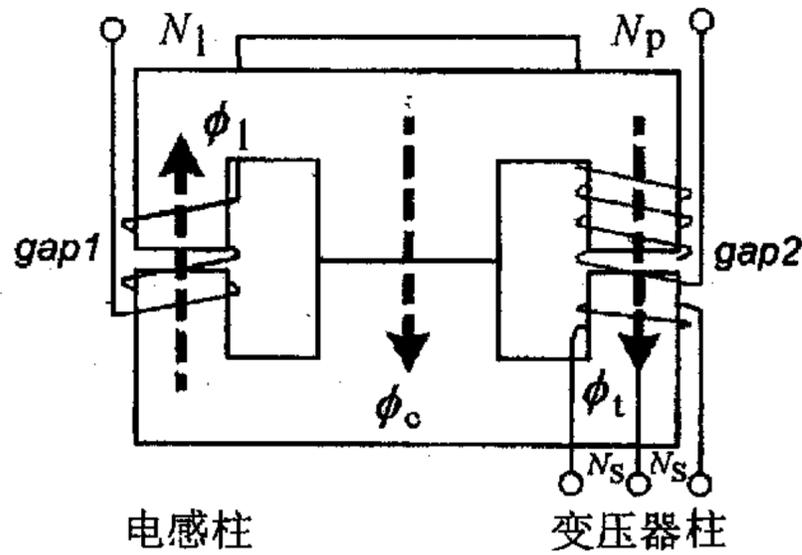


图 4—19 集成磁件设计 A 结构

使用 E42/21/20 磁芯，横截面为  $233\text{mm}^2$ ，外磁柱的横截面和分立磁件设计相同。线圈匝数  $N_1$ 、 $N_p$  和  $N_s$  也和分立设计相同。在这个设计中，电感和变压器互相解耦，分立磁件设计过程仍可使用。仿真结果如图 4—20 所示<sup>[19]</sup>。

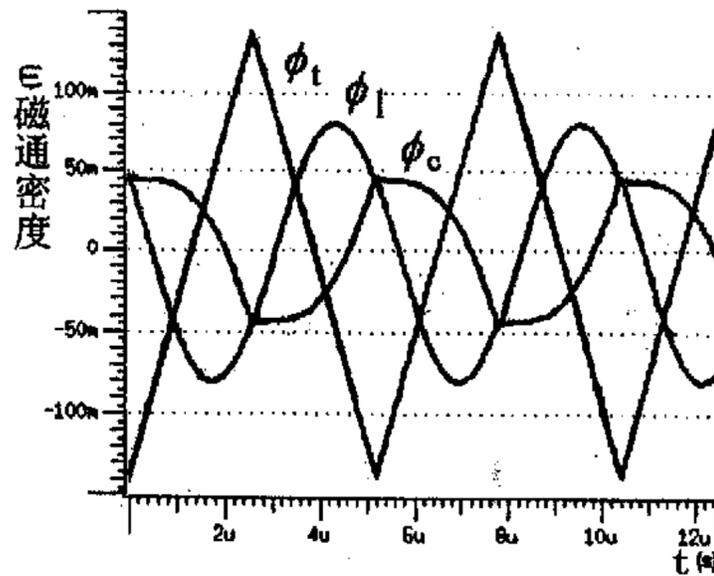


图 4—20 设计 A 磁通密度仿真结果

从仿真结果可以看到，电感和变压器的磁通密度和分立设计相同，但中柱的磁通密度比分立设计时小的多，从而大大减小了中柱的磁损耗。

该结构的缺点在气隙部分。在该结构中使用了两个 E 型磁芯，两个外柱有气隙，而中柱没有磁芯。这种结构有些缺点：一、磁芯结构是不标准的，标准磁芯结构通常在中柱上有气隙，或者三个柱上都没有磁芯。二、结构的机械稳定性不好。

一个理想的磁芯结构应使中柱气隙大于等于外柱气隙。

#### ④ LLC 谐振变换器集成磁件设计 B

由上边的讨论可知，结构 A 的气隙设计是很难实现的，下面研究三个柱有相同气隙的结构。线圈结构如图 4—21 所示。

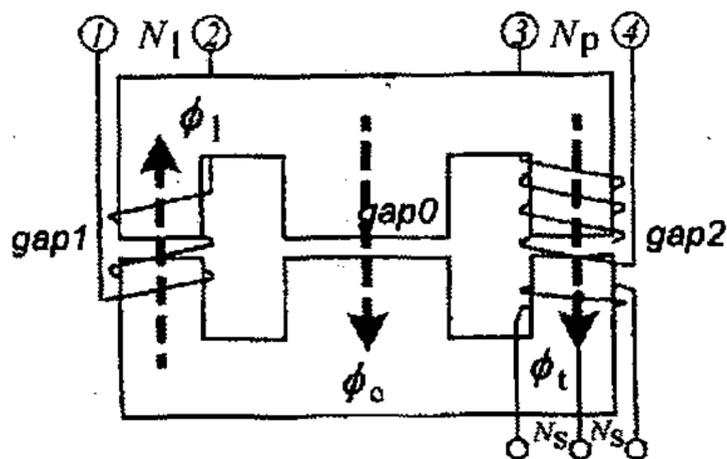


图 4—21 集成磁件设计 B 结构

与上文提到的通用结构相比较，设计 B 在左柱上只有一个线圈。简化通用模型，可获得磁件 B 的电路模型，如图 4—22 所示。

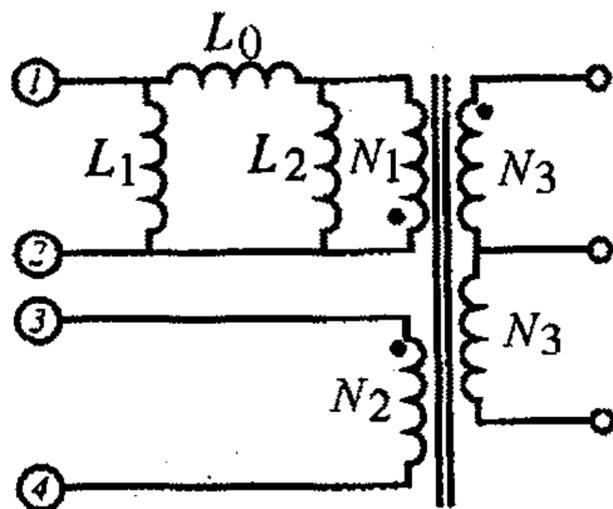


图 4—22 集成磁件结构 B 的电路模型

该电路结构的原边绕组有几种可能的连接方法。图 4—23 是其中的一种。把  $N_1$  有点标记的一端与  $N_2$  无点标记的一端相连。

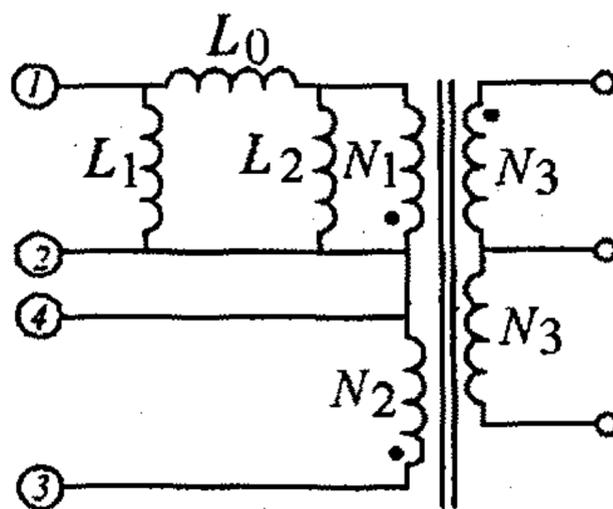


图 4—23  $N_1$ 、 $N_2$  异名端相连的电路模型

这个电路有两种工作模式，如图 4—24 所示。现分别推导它们的等效电路。

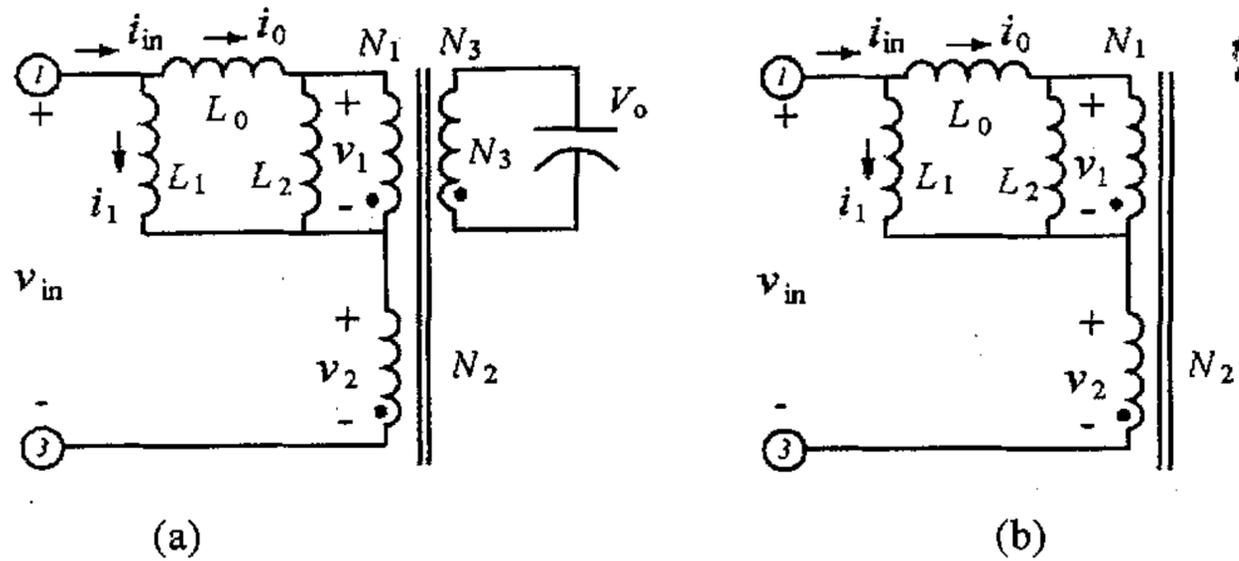


图 4—24 LLC 谐振变换电路的两种工作模式

对模式(a), 可推出下面的等式:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{N_2}{N_1} v_1 = v_{in} \tag{4-4}$$

$$L_0 \frac{di_0}{dt} + v_1 + \frac{N_2}{N_1} v_1 = v_{in} \tag{4-5}$$

$$v_1 = \frac{N_1}{N_3} V_o \tag{4-6}$$

$$i_0 + i_1 = i_{in} \tag{4-7}$$

从(4—4)到(4—7), 输入电压、输入电流和输出电压之间的关系如下式:

$$v_{in} = \frac{L_1 \cdot L_0}{L_1 + L_0} \frac{di_{in}}{dt} + V_o \frac{1}{N_3} (N_2 + N_1 \frac{L_1}{L_1 + L_0}) \tag{4-8}$$

根据(4—8)可得出该模型的等效电路, 如图 4—25 所示。

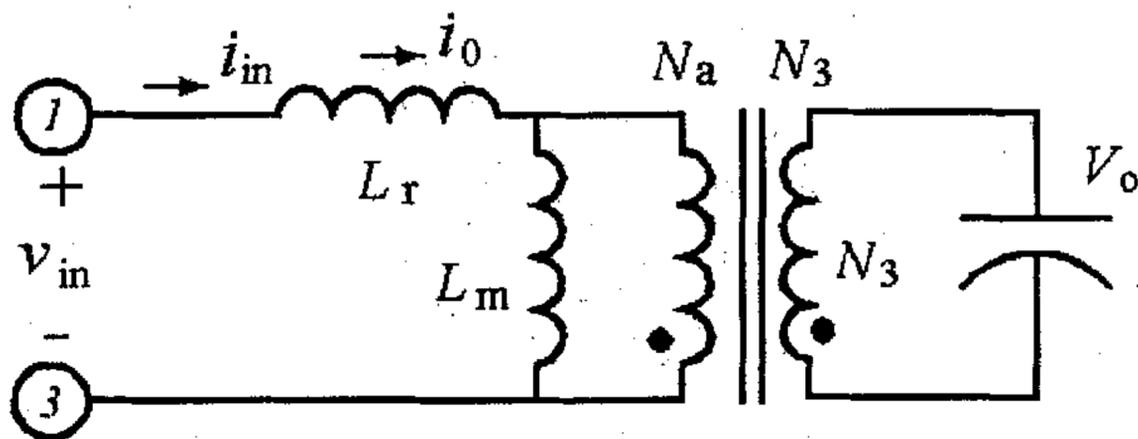


图 4—25 模式(a)的等效电路

电路中  $L_r$ ,  $L_m$  和  $N_a$  由下面的等式给出。

$$L_r = \frac{L_1 \cdot L_0}{L_1 + L_0} \quad (4-9)$$

$$N_a = N_2 + N_1 \frac{L_1}{L_1 + L_0} \quad (4-10)$$

分析工作模式(b)可得出  $L_m$ ，与模式(a)分析过程相同可得出模式(b)的一组方程，这儿不再列出。从这一组方程可得出  $L_m$  的表达式：

$$L_m = L_2 \cdot \frac{N_a^2}{N_1^2} \cdot \frac{L_1 + L_0}{L_1 + L_2 + L_0} \quad (4-11)$$

使用如图 4—26 所示连接方法，与上边的推导过程相同，同理可得  $N_1$ 、 $N_2$  同名端相连时的  $L_r$ 、 $N_a$  和  $L_m$  的表达式。(4—12)~(4—13)分别给出了这些值。

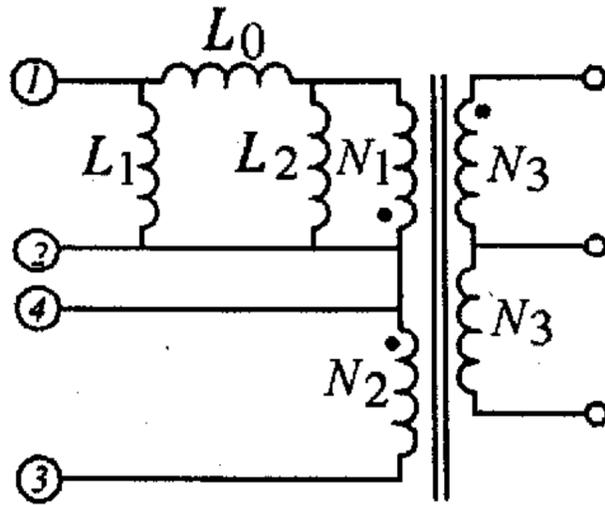


图 4—26  $N_1$ 、 $N_2$  同名端相连的电路模型

$$L_r = \frac{L_1 \cdot L_0}{L_1 + L_0} \quad (4-12)$$

$$N_a = N_2 - N_1 \frac{L_1}{L_1 + L_0} \quad (4-13)$$

$$L_m = L_2 \cdot \frac{N_a^2}{N_1^2} \cdot \frac{L_1 + L_0}{L_1 + L_2 + L_0} \quad (4-14)$$

使用上述方法，可设计出集成磁件结构。例如，设计图 4—23 所示结构的集成磁件。为了得到与分立设计相同的值，可使： $L_r=14\mu\text{H}$ ， $L_m=60\mu\text{H}$ ，绕组匝数比=16：4，集成磁件的设计结果为： $N_1=9$ ， $N_p=13$ ， $N_s=4$ ，每个磁柱的气隙为  $0.56\text{mm}^{[19]}$ 。

仿真得出每个柱的磁通密度如图 4—27 所示<sup>[19]</sup>。从仿真结果可以发现：

中柱的磁通密度大大减小，所以集成磁件可大大减小磁心损耗。还有，该结构中每个柱的气隙是相同的，因此更适合机械加工，有更好的机械稳定性。

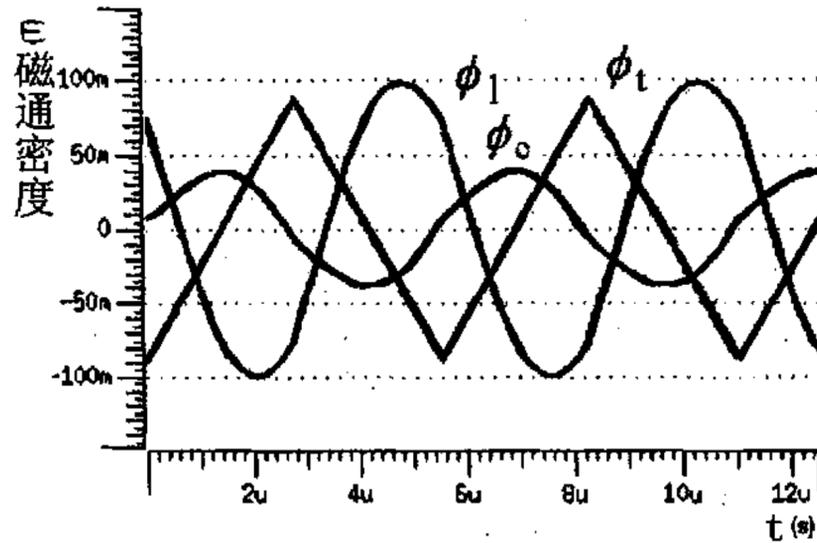


图 4—27 三个柱的磁通密度

#### 4.2.4 设计结果

通过上边的讨论可知，集成磁件结构 B 提供了更好的电特性（由于 E 型磁心中柱上的磁通纹波被抵消），而且在三个柱上有同样长度的气隙，使磁件有更好的可制造加工性和机械稳定性。为了验证这个设计结果，设计和测试了集成磁件 B 的一个样机<sup>[19]</sup>。参数是：

$L_r=14\mu\text{H}$ ,  $L_m=60\mu\text{H}$ , 匝数比=16: 4,  $N_1=9$ ,  $N_p=13$ ,  $N_s=4$ , 每个磁柱气隙为 0.56mm。变换器规格为：

输入电压范围：300—400V

输出电压：48V

输出功率：1000W

开关频率范围：140kHz—200kHz

#### 4.3 结论

本章介绍了一种 LLC 谐振变换电路，讨论了电路的工作模式，利用仿真产生了变换电路的直流工作特性。此电路在高输入电压下能达到很高的效率，因为副边没有滤波电感，变换电路的开关损耗和导通损耗都比 PWM 变换电