

开关电源中线圈的邻近效应的研究

Proximity effect of coil in SMPS

张国权¹, 徐月朗², 程毅²

(1. 武汉大学动力机械学院; 2. 台达电子东莞有限公司)

摘要: 本文分析邻近效应产生的基本原理, 并对其进行了定量分析。通过分析提出, 邻近效应产生的大小随着线圈层数的增加而按指数规律递增。最后分析了邻近效应和交/直流阻抗比的关系。

关键词: 邻近效应, 线圈层数, 交/直流阻抗比

中图分类号: TM55 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517(2010)04-3-96

1 引言

在开关电源电磁元件中, 一般不可能没有线圈。线圈中的可变磁场感应产生了涡流, 从而导致了集肤效应和邻近效应。集肤效应是由绕线的自感产生的涡流引起的, 而邻近效应是由绕线的互感产生的涡流引起的。集肤效应使电流只流经绕线外层极薄的部分, 这部分的厚度与频率的平方根成反比。因此, 频率越高, 绕线损失的固态面积就越多, 增加了交流阻抗从而增大了铜损。邻近效应引起的铜损比集肤效应大得多。多层绕组的邻近效应损耗是相当大的, 部分原因是感应的涡流迫使静电流只流经铜线截面的一小部分, 增加了铜线的阻抗。最严重的是邻近效应感应的涡流是原来流经绕组或绕组层的净电流幅值的很多倍, 下面将作定量分析。

相邻导线流过电流时会产生可变磁场, 从而形成邻近效应, 如果是属于线圈层间的邻近效应, 则其危害性更大。邻近效应比集肤效应更严重, 因为集肤效应只是将绕线导电面积限制在表面的一小部分, 增加了铜损。它没有改变电流幅值, 只是改变了绕线表面的电流密度。但相对来看, 邻近效应中的涡流是由相邻线圈层电流的可变磁场引起的, 且涡流的大小随线圈层数的增加按指数规律递增。

2 邻近效应产生的原理

邻近效应的形成如图 1 所示。在两个平行导体中分别有电流流过, 电流方向相反 (AA' 和 BB')。为了简化分析,

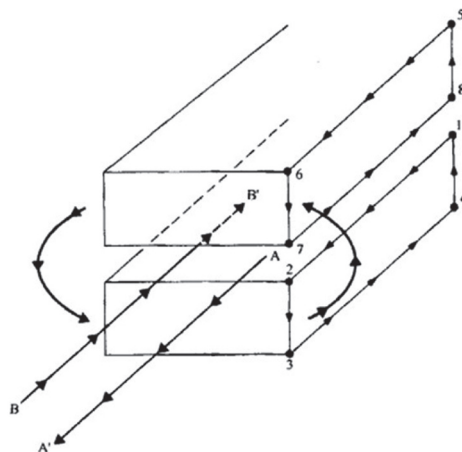


图 1 邻近效应形成原理图

假设图中的两个导体的横截面为很窄的矩形, 距离较近, 且导体可能是两个圆导线也可能是变压器线圈中两个紧密相邻的导线层。

位于下面的导体被包围在磁场中, 磁力线从其侧面 1234 穿出后进入上面导体的侧面, 然后从对面穿出, 最后又往下回到下面导体。根据弗莱明右手定则, 磁场的方向是进入上面导体侧面 5678 的方向。根据法拉第定律, 穿过平面 5678 的可变磁场将在位于该平面的任何导体上感应出电压。由楞次定律可得, 感应电压的方向应为此电压产生的电流形成的磁场能抵消原来产生该感生电流的磁场。因此, 平面 5678 上的电流方向应是逆时针的。在平面的下层, 电流方向 (7 到 8) 与上导体的主电流方向 (B 到 B') 相同, 有增强主电流的趋势; 而在平面的上层, 电

流的方向（5到6）与主电流相反，有减弱主电流的趋势，这个现象会发生在任何经过导体且与平面 5678 平行的平面上。

这样导致的后果是，沿着上导体的下表面有涡流径向流过，方向是从7到8，然后它会沿着导体上表面返回。但在上表面，涡流被主电流抵消了。下导体的情形与此相似，在下导体的上表面有涡流径向流过，该涡流增强了上表面流过的主电流，但在导体的下表面，由于涡流与主电流方向相反，涡流被主电流抵消了。

因此，两个导体上的电流被限制在两者接触面表层的一小部分上，与集肤效应一样，表层的厚度与频率有关。

3 邻近效应的定量分析

电流平行流过变压器每层线圈绕组的每根绕线。这些电流可以被看成是流过一块很薄的矩形薄片，薄片的厚度等于绕线的直径，宽度等于骨架的宽度。因此感应涡流流过整个绕组，与相邻导体的临近效应一样，这些涡流将被限制在线圈层间接触面的表面上。涡流的大小会随着层数的增加而按指数规律递增，因此，临近效应比集肤效应要严重的多。

如果两导体相距 w 很近（图2），邻近效应使得电流在相邻内侧表面流通，磁场集中在两导线间，导线的外侧，既没有电流，也没有磁场—合成磁场为零，没有磁场地方不存储能量，能量主要存储在导线之间。如果宽度 $b \gg w$ ，单位长度上的电感为

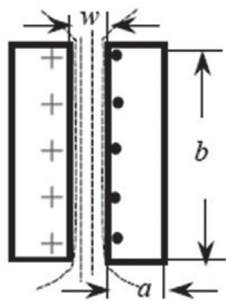


图2 临近效应示意图

$$L = N^2 \mu_0 \frac{w \times l}{b \times l} = 4\pi \frac{w}{b} (\text{nH/cm}) \quad (1)$$

式中 $N=1$ —匝数；

l —导电带料的长度 (cm)；

b —带料的宽度 (cm)；

w —导线间距离 (cm)。

若忽略外磁场的能量，单位长度两导线间存储的能量为：

$$W_m = \frac{\mu_0}{2} H^2 V / l = \frac{\mu_0}{2} \left(\frac{I}{b} \right)^2 b w = \frac{\mu_0 w}{2b} I^2 \quad (2)$$

式中 I —为导电带料流过的电流；

H —导线之间的磁场强度。

可见，如果导线宽度越窄 (b 变小)，存储能量越大。

根据式 (2) 比较图3几种导线的排列可以看到，由于邻近效应，电流集中在导线之间穿透深度的边缘上， b 越小，表面间的磁场强度越强。如两导线距离 w 相同、两导线电流数值相等，图3(a) 导线宽度比图3(c) 宽，根据式 (2) 可见，导线间存储的能量与导线的宽度成反比。所以图3(c) 比图3(a) 存储更多的能量，导线电感也更大。邻近效应使图3(c) 导线有效截面积减少最为严重，损耗最大。为减少分布电感，图3(a) 最好，图3(b) 次之，图3(c) 最差。因此，在布置印刷电路板导线时，流过高频电流的导线与回流导线上下层最好。平行靠近放置在同一层最差，即使导线很宽，实际上仅在导线靠近的边缘有高频电流流通，损耗很大，而且层的厚度不应当超过穿透深度。

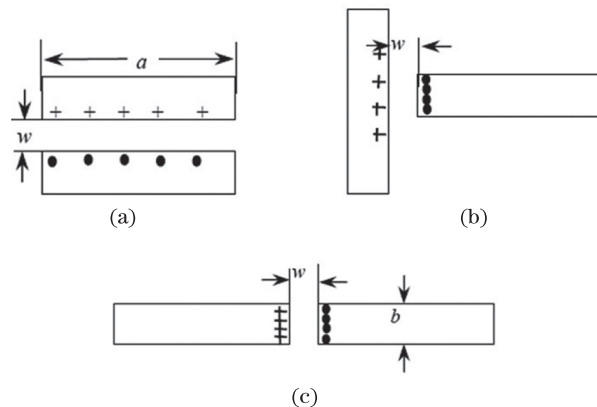


图3 矩形导线不同放置

4 邻近效应与线圈层数的关系

以 EE 型磁芯为例阐述邻近效应与线圈层数的关系。如图4所示，磁芯为 EE 型，其初级绕组有3层。每层都可当作独立的薄片，流过的电流 $I = NT(t)$ 。其中， N 是每层

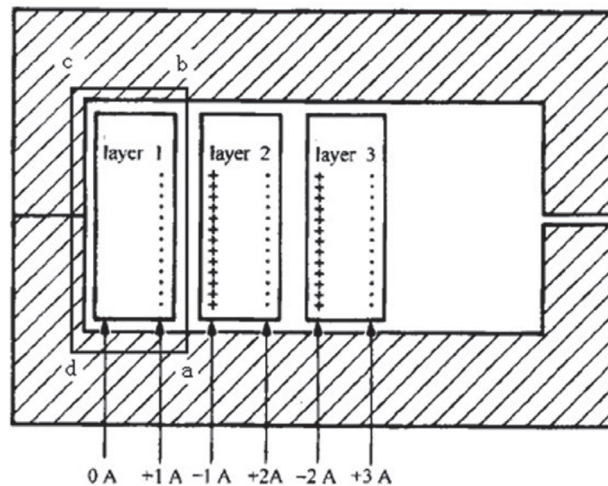


图4 多层线圈表面涡流

绕组的匝数, $I(t)$ 为每匝流过的电流。

沿着图 4 中的 abcd 环进行线性积分, 可得到路径 bcda 上的磁阻 (磁场阻抗的模拟值)。这个阻值很低, 相当于具有高磁导率的铁氧体材料沿着该途径的磁阻。因此, 所有的磁场强度都处于路径 ab 上。路径 ab 位于薄片 1 和薄片 2 之间。薄片 1 左侧面的磁场强度为零。由于表面磁场强度的存在导致了表层电流的产生, 所以薄片 1 上所有电流 I 都只流过薄片右侧面, 方向如图中 + 号所示 (也可从图中的原点看出), 而左侧面没有电流流过。

现在来看薄片 2 上的电流。邻近效应将产生涡流, 涡流流过薄片的左侧面和右侧面, 厚度等于该频率下的集肤效应, 但是这个厚度不会超过薄片 1 右侧面的集肤深度, 也不会超过薄片 2 左侧面的集肤深度。

沿着薄片 12 的中心线构成的闭环对 $H d_i$ 进行积分。由于该平面上的磁场强度为零, 所以根据安培定则, 该平面上包围的电流也为零。既然流过薄片 1 右侧面的电流为 1A, 那么流过薄片 2 左侧面的电流必定也为 1A, 方向以“-”表示。

同样, 薄片 3 左侧面的电流为 -2A, 右侧面的电流为 +3A。

因此, 从以上分析可以推断出, 邻近效应产生的涡流的大小随着线圈层数的增加而按指数规律递增。

5 Dowell 曲线中的邻近效应和交 / 直流阻抗比

我们知道, Dowell 分析邻近效应比较经典, 下面我们分析 Dowell 曲线, 它描述了交 / 直流阻抗比与系数 $h\sqrt{F_1}/\Delta$ 的关系。式中, h 为圆导线的有效高度, $h=0.866d$; Δ 为集肤深度, F_1 为铜层系数, $F_1=N_1 d/w$ (N_1 为每层匝数, w 为绕组层宽度, d 为绕组直径)。对于薄片来说, $F_1=1$ 。

图中给出了一系列不同 p 值下的比值, p 是指各部分所含的线圈层数。这里的部分定义为低频磁通势 ($\oint H d_i=0.4\pi\cdot 3.14\cdot N I$) 从零变化到峰值之间的区域。

假设初级和次级都为多层绕组, 初级位于骨架最里面, 次级位于其上。现在向外移动其他层 (最低层的初级不动), 则磁通势会线性增加。由于这个线性积分值与绕组层离最低层初级的距离成正比, 所以距离越远, 其包围的匝数越多。因此在初 / 次级表面, $\oint H d_i$ 已经达到最大值, 并开始线性下降。在传统的变压器中, 次级安匝数往往与初级安匝数同步, 但方向相反。即如果初级电流是流进的, 则次级电流必定是流出的。当对最后一层次级进行线性积分时, $\oint H d_i$ 已经降为零。即次级所有安匝数抵消了初级安匝数。

因此, 部分就是指磁场强度从零到峰值的区域。此时, 磁通势从零到峰值区域内的绕组层数仅为 1, 对同样的 $h\sqrt{F_1}/\Delta$ 值, 每部分 R_{ac}/R_{dc} 的比值仅为 4。即无论是初级还是次级, 其交流阻抗只有直流阻抗的 4 倍。

在选择初级线径或者次级铜片厚度时。图 5 是很有价值的。这里的电流密度不是先前的 500 圆密耳有效值安培。因为先前的值通常会导致高频时, h/Δ 值很大, 从图 5 可以看出, 即 R_{ac}/R_{dc} 很大。

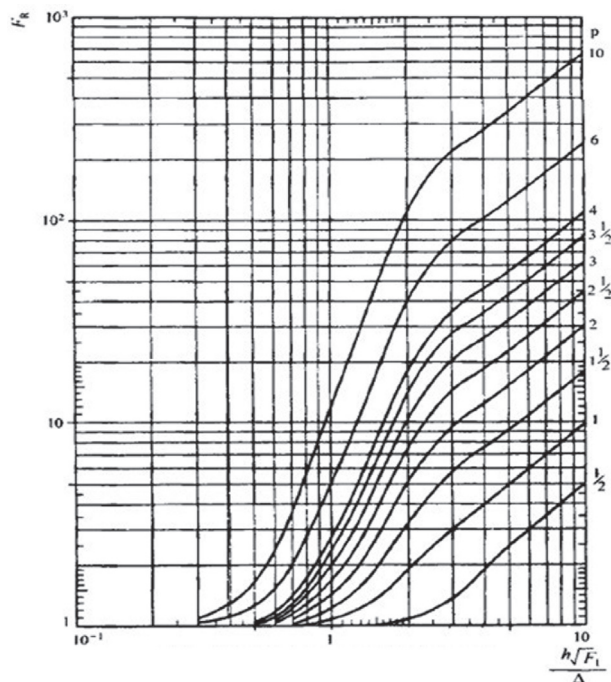


图 5 邻近效应产生的交/直流阻抗比

经常选择直径较小的绕线或厚度较小的铜片, 以使 $h\sqrt{F_1}/\Delta$ 不超过预定范围。这样会增加 R_{dc} 值, 但由于 R_{ac}/R_{dc} 减小了, R_{ac} 也会减小, 从而减小了铜损。

值得注意的是, 在反激电路中, 初级电流和次级电流不是同步的。因此, 将初 / 次级级绕组交错排列时不会产生邻近效应, 只需根据“500 圆密耳每有效值安培”规则采用更少的层数并应用质量更好的绕线就可以了。因为虽然此时直流阻抗增加了, 但从图 5 可见, R_{ac}/R_{dc} 减小了。

参考文献

- [1] P.Dowell, "Effects of Eddy Currents in Transformer Windings," Proceedings IEE (U.K.), 113(8): 1387-1394, 1966
- [2] Abraham I.Pressman Switching Power Supply Design (Secind Edition) China 2006
- [3] 赵修科, 开关电源中的磁性元件 2006-8