

采用Spice仿真解决磁绕组邻近损耗难题

Ray Ridley 博士¹, 冯文飞 编译

¹ 美国 Ridley Engineering 公司

本文将介绍如何使用 Spice 软件为磁绕组提供邻近损耗的结果。邻近损耗方程用于解决一组频率问题，因而产生了一个仿真电路，以预测正确的交流损耗，而不考虑电流波形。

1 电感绕组的交流电阻计算

图 1 为负载点 (POL) 应用的降压转换器。这些转换器几乎可以应用于所有的电子产品领域，而效率是一个重要问题。由于硅解决方案是采用单个封装，因此影响设计人员自由选择效率的最重要的部件就是输出电感。正如我们将在后面看到的那样，电感器的高频铜损耗可以使效率下降超过 2%。因此，理解这种效应的建模和分析是非常重要的。

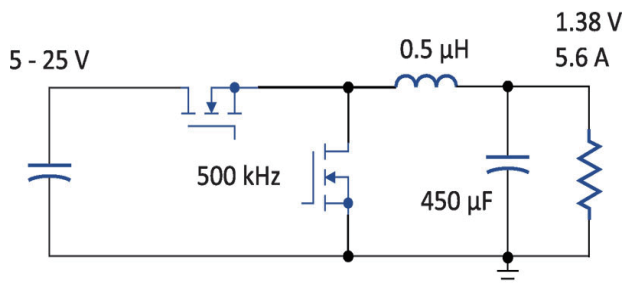


图 1 负载点应用降压转换器样本

众所周知，铜的电阻是随频率而增加的。每个功率电子工程师都听说过高频电流在导体表面流动的趋肤深度的概念。然而，趋肤效应只是分析的开始。我们需要使用更多相关的邻近效应步骤来解释多层绕组或者非直线导体。

在过去 20 年的教学研讨会上，我们发现不到 1% 的电

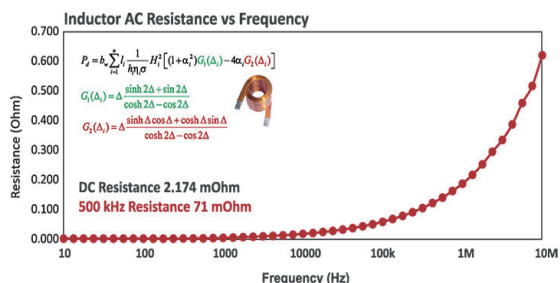


图 2 使用 Dowell 方程计算交流电阻的电感绕组结构

源工程师会采用邻近效应对其设计进行计算。这归因于这个步骤的复杂性。图 2 显示了降压转换器电路的电感器的绕组结构以及 Dowell 方程 (用于计算频率增加的电阻)。从图中可以看出，电阻随频率的增加迅速增加。因此，在估计磁绕组的损耗时，我们必须考虑到这一点。

使用 Dowell 方程的解决方案不是一个简单的步骤。幸运的是，POWER 4-5-6 电源设计软件可以为给定的绕组结构自动执行这种计算，因而所有工程师都可以轻松使用。您可以绘制绕组的交流电阻，而无需了解方程本身。

一旦获得了交流电阻，传统的方法就是观察电流波形并提取开关频率谐波。这样会出现一个直流项——基本频率等于纹波频率——然后出现开关频率的奇次谐波。谐波的幅度将根据电流波形的形状而变化。

2 等效电路模型和 Spice 网络

计算每个波形的谐波，并将各种交流电阻应用于每个谐波，对于转换器的每个工作点来说都是一个繁琐的过程。另一种方法是为增加的绕组电阻生成一个等效电路模型。然后，您可以在 Spice 中使用此模型来生成复杂分析。

降压转换器电感器的绕组由铁氧体磁芯周围的 5 圈螺旋铜箔组成。图 3 显示了电感绕组的电路模型。一系列 R-L 组件仿真了电阻跟随频率的增加情况。在直流时，所

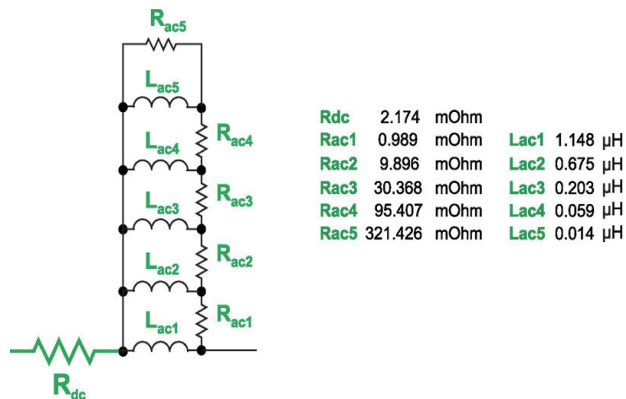


图 3 用于交流电阻建模的电感-电阻网络，数值可从电感绕组结构由电源 4-5-6 自动生成

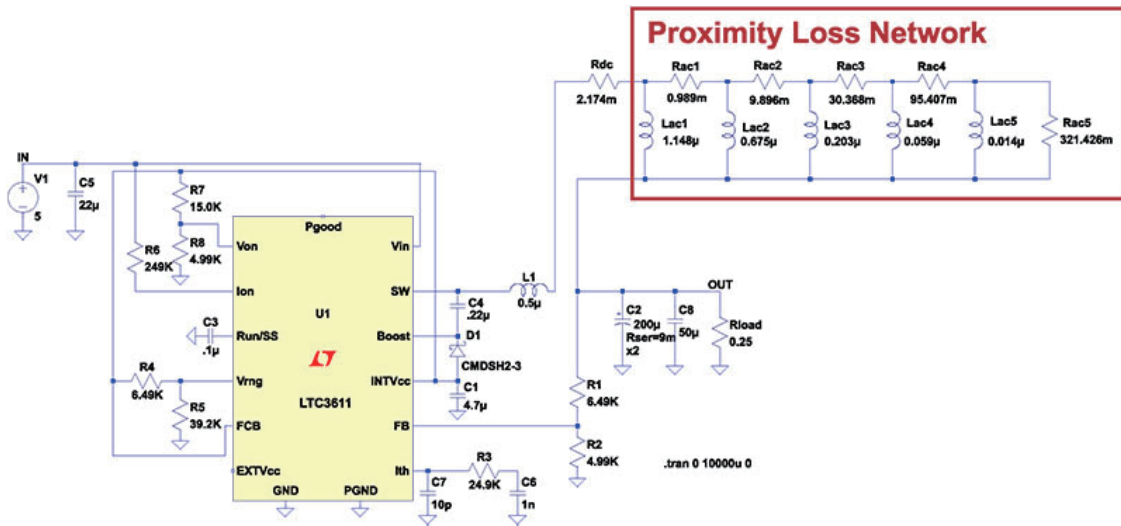


图 4 包含邻近损耗网络的 Spice 原理图

有的电感都是短路的，电流只流经电阻器 Rdc。这等于绕组的直流电阻。随着频率上升，更多的电流将通过交流电阻分流，从而增加了功耗。

图 4 显示了并入到完整降压转换器 Spice 模型中的邻近损耗电路。请注意，这里使用的控制芯片 LTC3611 是一款可变频控制器。其工作频率可以随着线路和负载而变化。然而，一旦有了电路模型，频率的变化将自动与邻近损耗网络适应，从而在绕组中产生正确的损耗。

3 邻近损耗 Spice 仿真

图 4 所示的 Spice 电路运行 10 ms，以确保所有波形处于稳态，而所有由初始启动波形引起的直流偏移为零。令人惊讶的是，邻近损耗网络的复杂性对仿真时间没有很大的影响。采用邻近损耗网络，仿真 10 ms 操作的时间约为 5 分钟。不采用这个网络，仿真时间约为 3 分钟。

图 5 为使用 5 V 输入工作电压的降压转换器的仿真电

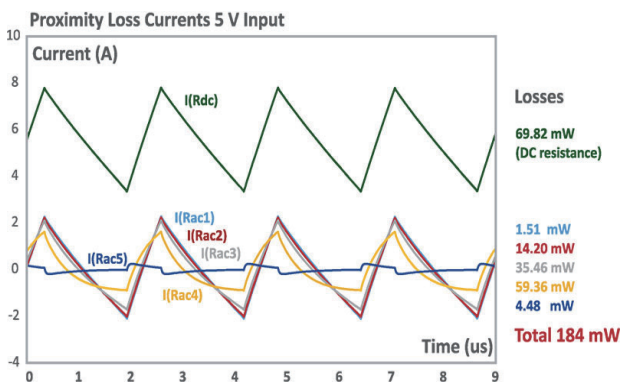


图 5 流过输入电压为 5 V 的交流电阻的仿真电流

流。只有通过 Rdc 的电流（以绿色显示）具有 DC 偏移，而该电流等于电感电流。通过获取流经该电阻的电流均方根值，并将其乘以 Rdc 值，就可计算常规损耗。

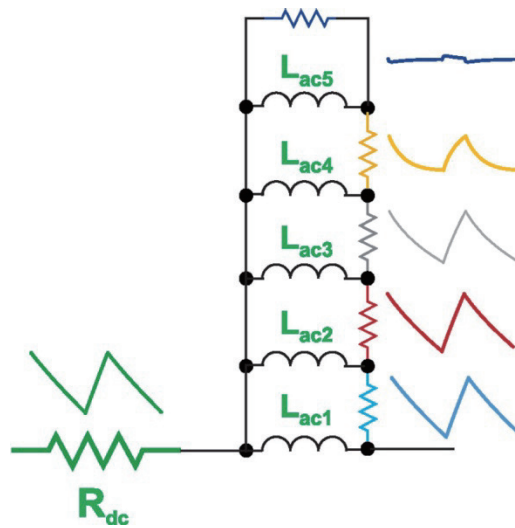


图 6 紧邻每个交流电阻的所示仿真电流

图 6 为紧邻每个交流电阻的各个电流，以表明电流在哪里流动。

通过前三个 AC 电阻的纹波频率几乎没有衰减，如浅蓝色、红色和灰色波形所示。由于邻近效应，这三个都会导致绕组产生额外损耗。金色波形也有很大的幅度，电阻器 Rac4 给出了最大的额外损耗，因为该电阻是高值。少量的电流也流过最终的交流电阻 Rac5，但不会带来很大的损耗。

下转 143 页