

将电磁感应加热应用的 IGBT 功率损耗降至最低

安森美半导体 Alan Ball

近年来，人们使用的电器产品数量不断增多，致使每个家庭内的总能耗稳步上升，不仅大多数西方国家是这样，新兴国家亦是如此。与这些能耗相关的成本也已经增加，因为燃料资源变得更为紧缺，公用事业公司因此而涨价。为了将从电网获得的功率提升至最高，并因此使电费账单支出受控及减少碳排放，付出更多努力来为室内环境开发更高能效的电器就至关重要了。

电磁感应加热炉具(以下简称“电磁炉”)使用电磁产生的热能来烹调，其能效比我们熟悉的标准家用电热锅

高得多。此外，由于是通过感应而非传导来产生热量，其安全性也被证实更高，因为任何人体部位位于炊具表面都不会被烧伤。

电磁感应加热的原理

图1描绘了电磁感应加热应用使用的典型准谐振反激拓扑结构。电磁能量产生并使用感应方式来传递至锅具。然后在锅具中转变为热能，因而给锅具加热。触发加热过程的感应涉及到使用二极管等未受控的开关器件来对相对低频的交流线路输入电压进行整流。在20~35kHz之间的频率对整

流电压进行开关，提供高频磁通量。锅具充当耗散能量的磁心，将磁场转换为热能。产生及传递此热能的主要组件就是锅具、电感、谐振电容及绝缘门双极晶体管(IGBT)。

当要产生将热能传递给锅具所要求的磁场时，电感绕组的几何尺寸极为重要。电感绕组为螺旋形，并在水平面彼此缠绕。这种配置增加了磁通量的表面积，并使加热过程具有更高能效。通过使用以相等间距布设在电感绕组周围的矩形铁氧体磁棒，进一步增强了锅具上这些磁通线的稠密度。多个小型导体的使用将趋肤效应(skin effect)减至最小，并减小了线圈中的感抗(IR)损耗。如图1所示， L_R 是空心电感，并没有跟传统铁磁心电感相同类型的损耗。锅具必须采用磁性材料制造，使其能够充当磁心。在电磁炉的开关频率范围内，锅具的厚度极大地影响磁心的能效，而涡电流损耗很大。这些损耗将磁场转变为热能，在锅具中产生大量的热并烹调食物。

阻断电压约为1,200 V的IGBT广泛应用于单端感应加热应用。IGBT

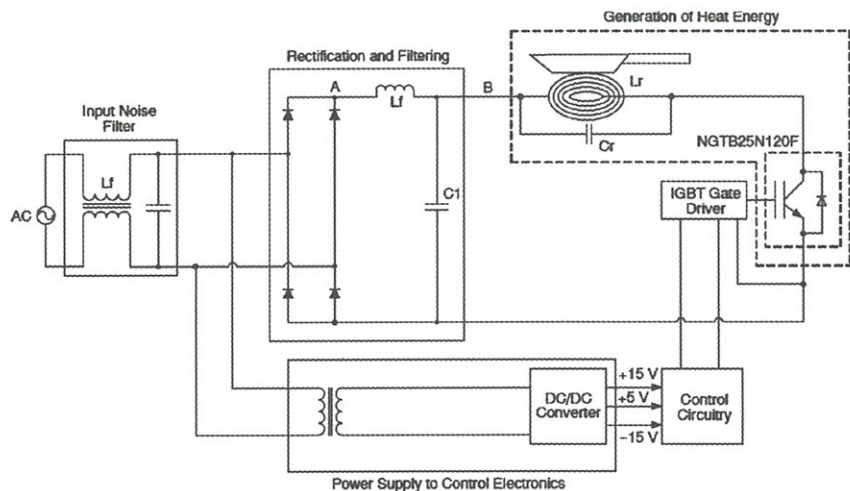


图1 电磁炉的单端拓扑结构框图

在关闭期间仍承受着高电压,且带有残余电流,滋生不小的开关损耗。在IGBT导通状态期间,由其饱和电压及负载电流和结温(T_j)导致的损耗是总体功率损耗的组成部分。这些损耗降低了应用的总能效。理解这些损耗的成因并开发可靠及相对快速的方法来测量损耗很重要,在为电磁炉设计探索优化的IGBT设计时尤为如此。

在此应用中IGBT的总功率损耗包含导通损耗、导电损耗、关闭损耗及二极管损耗。二极管损耗在总功率损耗中所占比例可以忽略不计,而如果使用了零电压开关(ZVS)技术,可以大幅降低导通损耗。然而,并非在电磁炉所有工作功率等级条件下都能实现ZVS。由于储能电路(tank circuit)的一端连接至整流输入电压,零态开关仅在谐振储能电路使其电压到达0V的功率等级时出现。在某些轻载条件下,储能电路电压在IGBT的集电极不会到达0V,因此未实现零态开关,导通功率损耗将增加。

导电损耗

由于总功率损耗的最主要构成部分通常是导电及关闭损耗,我们现在就来更详细地逐个审视这些损耗。IGBT平均耗散的功率的数学表达式如下所示:

$$P_{Ave} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} [V_{CE}(t) \times I_{CE}(t)] dt \quad (1)$$

对于导电损耗而言,此等式可以改写为如下等式:

$$P_{Ave} = V_{CE(sat)}(t, I_{CE}, T_j) \times I_{CE} \times D \quad (2)$$

由此可见,导电损耗取决于负载电流、 $V_{CE(sat)}$ 及占空比。饱和电压 $V_{CE(sat)}$ 的值并不恒定,而是随着时间变化。导电损耗还取决于负载电流及IGBT的 T_j 值。此电磁炉应用中,控制电路以与烹调功率需求成直接比例的方式改变占空比。相应地,烹调功率等级最高时导电损耗就处在最大值,因为等式2中的所有参数在此功率等级时都呈现出其最大值。

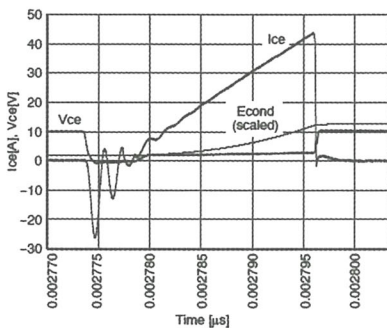


图2 $V_{CE(sat)}$ 及 I_{CE} 的变化曲线

图2显示了 $T_j=67^\circ\text{C}$ 条件下 $V_{CE(sat)}$ 及 I_{CE} 在选定开关周期内的变化。图2中的数据是从在市场上购得的电磁炉获得的,它使用一个钳位电路来测量 $V_{CE(sat)}$ 。当IGBT关闭时,此电路在10V时钳位 V_{CE} ,使示波器能够使用每小格低电压值(volt/div)的设置,这样才能精确地测量 V_{CE} 。

关闭损耗

从图3中可以清晰地看到电磁炉的关闭损耗波形。影响这些损耗的因素包括IGBT残余电流、 V_{CE} 歪曲率及开关频率。残余电流来自于IGBT关闭后漂移区留下的少量载流子。影响这些少量电荷载流子结合率的因素包括掺杂深度、缓冲层厚度及使用的掺杂技术。开关频率由所要求的炊具功率等级及应用的开关控制算法决定。重要的是在设计及开发过程的每一个阶段确认目标应用中的IGBT性能。性能的确认可以通过测量应用中IGBT损耗来实现。

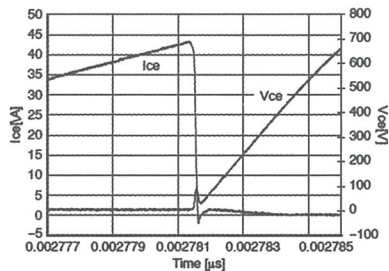


图3 关闭损耗测量结果

电磁炉已经被证明拥有比传统电热锅高出约25%的能效。在软开关电磁炉应用中,当寻求为系统指定IGBT时,导电损耗及关闭损耗是要考虑的最重要损耗。精确地测量这些损耗,能够帮助在系统开发过程期间提供必要的数据来评估IGBT性能,因而确保将能效等级提升至最高。

EPC