

准谐振和谐振转换：两种提高电源效率的技术

作者：飞兆半导体欧洲分公司功率转换及工业系统部门市场开发经理 Jon Harper

引言/摘要

全球对能源成本上涨、环保和能源可持续性的关注正在推动欧盟、美国加州等地的相关机构相继推出降低电子设备能耗的规范。交流输入电源，不论是独立式的还是集成在电子设备中的，都会造成一定的能源浪费。首先，电源的效率不可能是 100% 的，部分能量在电源大负载工作时被浪费掉。其次，当负载未被使用时，连接交流线的电源会以待机功耗的形式消耗能量。

近年来，对电源效率等级的要求日趋严格。最近，80% 以上的效率已成为了基本标准。新倡议的能效标准更是要求效率达到 87% 及以上。此外，只在满负载下测量效率的老办法已被淘汰。目前的新标准涉及了额定负载的 25%、50%、75% 和 100% 这四个点的四点平均水平。同样地，最大允许待机功耗也越来越受到限制，欧盟提议所有设备的待机功耗均应低于 500mW，对于我们将讨论的电视机，则小于 200mW。

除专家级的高效率电源设计领域之外，电子设备中所用的功率范围从 1W 到 500W 的交流输入电源，一直以来主要采用两种拓扑：标准 (或硬开关) 反激式 (flyback) 拓扑，和双开关正激拓扑。这两种拓扑都很易于理解，而它们存在的问题，以及如何予以避免，业界都已有充分的认识。

不过，随着对效率的要求不断提高，这两种拓扑将逐渐为三种新的拓扑所取代：准谐振反激式拓扑、LLC 谐振转换器拓扑和不对称半桥拓扑。准谐振反激式拓扑已被成功用于最低功率级到 200W 以上的范围。在 70W-100W 范围，LLC 谐振转换器比准谐振反激式拓扑更有效。而在这两个功率级之上，不对称半桥转换器也很有效。

工作原理

准谐振和谐振拓扑都能够降低电路中的导通开关损耗。图 1 对比了连续传导模式 (CCM) 反激式、准谐振反激式和 LLC 谐振转换器的导通开关波形。

所有情况下的开关损耗都由下式表示：

$$P_{TurnOnLoss} = \frac{1}{2} V_{DS} I_D \cdot t_{ON} \cdot f_{SW} + \frac{1}{2} C_{OSSeff} V_{DS}^2 \cdot f_{SW}$$

这里， $P_{TurnOnLoss}$ 为开关损耗； I_D 为漏极电流； V_{DS} 是开关上的电压； C_{OSSeff} 是等效输出电容值(包括杂散电容效应)； t_{ON} 是导通时间，而 f_{SW} 是开关频率。

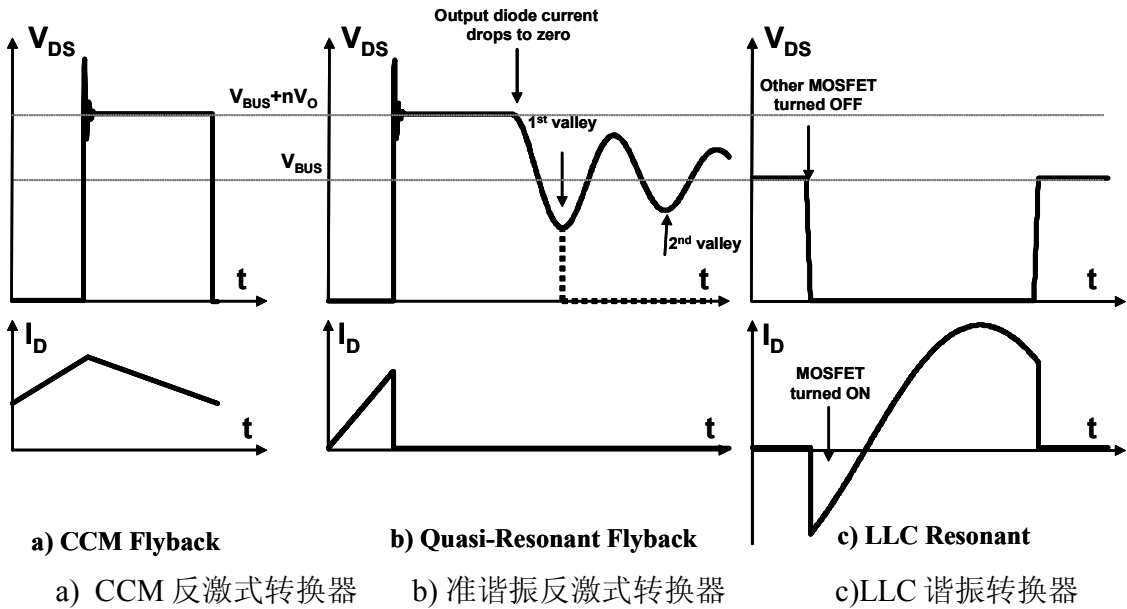


图 1 CCM 反激式、准谐振反激式和 LLC 谐振转换器的开关波形比较

CCM 反激式转换器的开关损耗最高。对于输入电压范围很宽的设计， V_{DS} 在 500V – 600V 左右，是输入电压 V_{DC} 与反射输出电压 V_{RO} 之和。进入不连续传导模式 (DCM) 时，漏电流降为零，开关损耗的第一项也随之降为零。在准谐振转换器中，若在电压波形的第一个 (或后一个) 波谷时导通，可进一步降低损耗。图中虚线所示为准谐振转换器在第一个谷底导通时的漏极波形。

如果准谐振反激式转换器的匝数比为 20，输出电压为 5V，则 V_{RO} 等于 100V，因此对于 375V 的总线电压，开关将在 275V 时导通。若有效输出电容 C_{OSSeff} 为 73 pF，开关频率 f_{SW} 为 66 kHz，则损耗为 0.18W：

$$P_{TurnOnLossmin} = \frac{1}{2} C_{OSSeff} \cdot (V_{DC} - V_{RO})^2 \cdot f_{SW}$$

对于标准 CCM 反激式转换器，开关与漏极电压振铃不同步。在最坏的情况下，漏极电压大于 V_{DC}

$$P_{TurnOnLossmax} = \frac{1}{2} C_{OSSeff} \cdot (V_{DC} + V_{RO})^2 \cdot f_{SW}$$

那么损耗将为 0.54W。故对于非连续模式反激式转换器，功耗在 0.18W 和 0.54W 之间波动，具体取决于时序。影响时序的因素有输入电压和输出电流，两者的优化组合可提高效率，反之会降低效

率。对非连续模式反激式转换器，这常表现为满负载效率曲线的异常变化。这时，输入电压改变而输出电流(及电压)恒定。效率曲线随开关点前移而显示出波动。初级端电感的批次差异也会显示出变化，从而改变效率。

谐振转换器采用了一种不同的技术来降低开关损耗。让我们回头再看看导通损耗公式，由式中可见，如果 V_{DS} 设为零，就根本没有损耗，这个原理被称为零电压开关 (ZVS)，用于谐振转换器，尤其是 LLC 谐振转换器，如图 1 所示。

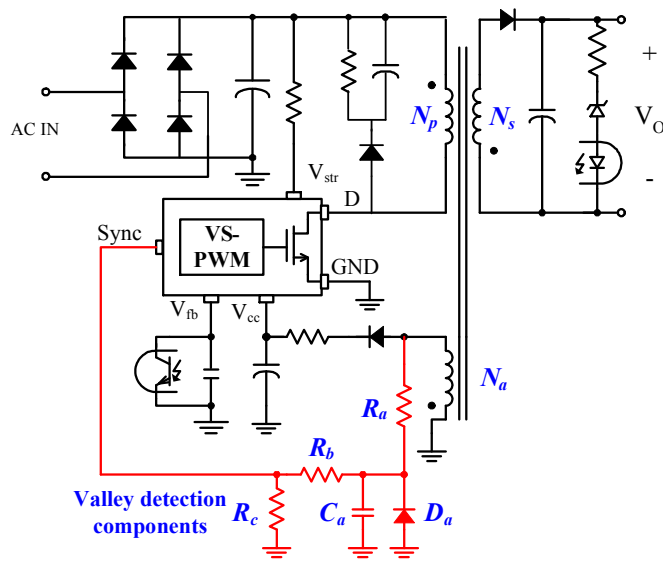
$$P_{TurnOnLoss} = \frac{1}{2} V_{DS} I_D \cdot t_{ON} \cdot f_{SW} + \frac{1}{2} C_{OSSeff} V_{DS}^2 \cdot f_{SW}$$

通过让电流反向流经开关，可实现零电压开关。当开关电流反向时，体 (body) (或外部反向并联) 二极管把电压钳位在一个低值，例如 1V，这远低于前面提到的反激式转换器的 400V。

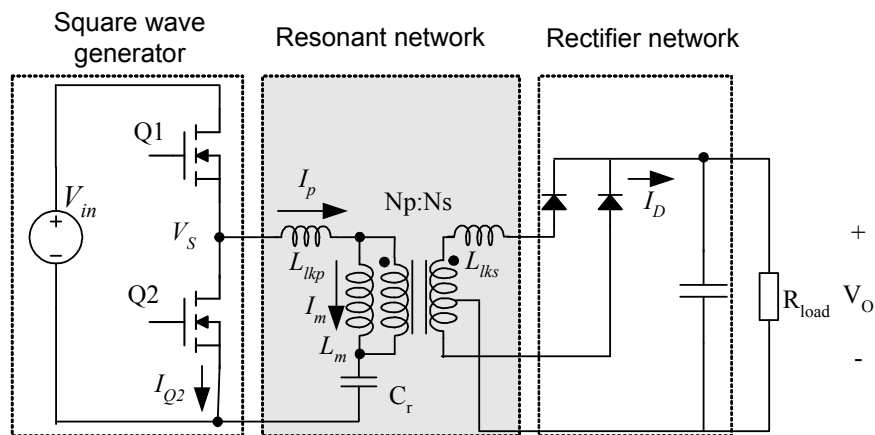
谐振转换器利用一个谐振电路来产生延时。两个 MOSFET 产生方波，并加载在谐振电路上。通过选择合适的谐振电路，并把工作点设置在谐振点之上，流入谐振电路的电流可以非常接近正弦波，因为高阶分量一般都大为衰减。正弦电流波形滞后于电压波形，因而当电压波形达到其过零点时，电流仍为负，从而实现零电压开关。

结构

图 2 所示分别为准谐振转换器的电路示意图及 LLC 谐振转换器的模块示意图。准谐振转换器的电路示意图看起来非常类似于反激式转换器，只是它带有一个帮助确定电压谷底时序的检测电路。



a) Quasi-Resonant Converter



b) LLC Resonant Converter

图 2: 准谐振反激式转换器的电路图及 LLC 谐振转换器的模块示意图

LLC 谐振转换器的模块示意图与双开关正激转换器截然不同。其之所以名曰“LLC”，是因为谐振电路的工作由 3 个组件来完成：变压器的磁化电感 (L_m)、变压器的漏电感 (L_{lk}) 和谐振电容 (C_r)。对大漏电感的需求意味着必须一个额外的电感，或者是变压器的线圈需以增加漏电感的方式进行缠绕，以使其增大。LLC 谐振转换器在初级端有一个半桥结构，但与双开关正激转换器不同的是，它不需要任何二极管。此外，还带有一个双开关正激转换器所没有的谐振电容，以及两个输出二极管与中心抽头变压器的输出相连。这些配置把谐振电路的交流输出整流为直流级，双开关正激应用所需的大输出电感在这里就不再需要了。

对于给定的功率级，准谐振反激式变压器的尺寸是最大的，因为它先把所有能量存储在初级侧，然后再将之转移到次级侧。双开关正激转换器则不然，它是在开关导通时把能量从初级侧转移到次级侧。和反激式转换器一样，双开关正激转换器也只使用一个磁极方向。LLC 转换器却使用两个方

向，所以在其它条件相同的情况下，对于给定的功率级，它的尺寸更小，无需考虑额外的漏电感或者是在变压器中包含的漏电感。

频率和增益

准谐振和 LLC 谐振开关的优势都包括了降低导通损耗，但缺点是频率随负载减小而增大。两种转换器的关断损耗都随频率的增大而变得严重。

$$P_{TurnOffLoss} = \frac{1}{2} V_{DS} I_D \cdot t_{OFF} \cdot f_{SW}$$

这里， t_{OFF} 是关断时间，在轻载时上述效应会降低效率。飞兆半导体的准谐振 FPST[™] 功率开关产品系列，比如 FSQ0165RN，采用了一种特殊技术“频率钳位” (frequency clamp) 来弥补准谐振控制器固有的这种缺陷。控制器只需等待最短时间，对应最大频率，然后开关在下一个波谷时导通，这种方法可以提高轻载下的效率。FPST[™] FSFR2100 LLC 谐振转换器和包括 FSQ0165RN 在内的产品系列都具有突发模式功能，可降低极轻负载下的功耗。对于 FSFR2100，如果系统需要，建议加入一个采用了 FSQ510 这类器件的辅助电源，以保持低待机功耗。

LLC 谐振转换器的另一个局限性是它的增益动态范围非常有限。图 3 所示为一个 LLC 转换器的增益特性与频率及负载的关系。这种拓扑之所以广受欢迎是由于其频率随负载变化的改变较小，在 100kHz 的谐振频率上限，频率不随负载变化而改变。不过，它的增益动态范围很小，在 1.0 到 1.4 之间，如果 1.2 的增益代表一个 220VAC 输入电压的系统获得所需输出电压的增益，则动态范围允许 189VAC 到 264VAC 的输入电压范围。因此，这种拓扑不太可能适用于常见的输入电压范围，但只要通过精心设计来实现保持时间 (hold-up time) 的条件，就可以用于欧洲的输入范围。LLC 谐振转换器通常与功率因数校正级一起使用，后者可为 LLC 转换器提供调节良好的输入电压。

通过增大漏电感与磁化电感的比值，可以增加增益动态范围，但代价是轻载效率因磁化电流变大而降低。实际上，这是通过采用第二个电感来实现的，因为如果漏电感太大的话，要获得可重复的漏/磁化电感比值是有实际限制的。

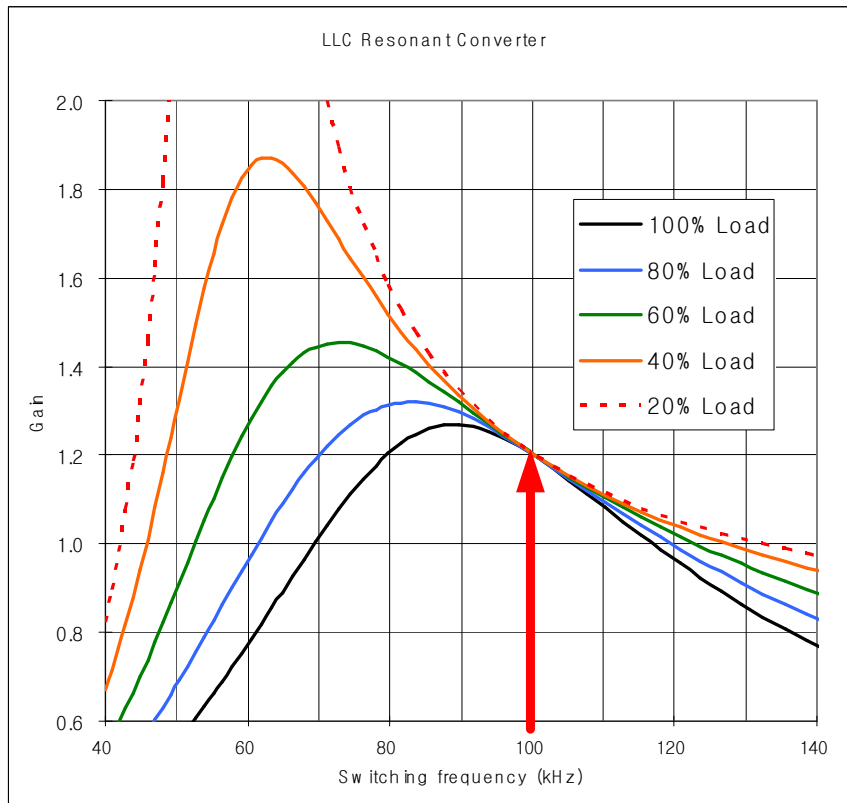


图 3: LLC 谐振转换器增益曲线示例

应用

准谐振反激式和 LLC 谐振转换器在嵌入式交流输入电源中的应用越来越广泛。

准谐振转换器的实际工作范围上从超低功率级到 100W 左右。对于集成式解决方案，7W/12V 电源的满负载效率约为 81%；而对采用了带外部 MOSFET 的准谐振转换器的 70W/22V 电源，满负载效率则超过了 88%。前者的待机功耗远低于 150mW，后者的则小于 350mW。采用较低的输出电压，效率必然会迅速降到上述水平之下。一个 5W/5V 的电源将在输出二极管上消耗至少 10% 的额定输出功率。

准谐振拓扑还有一个好处是 EMI 远小于硬开关应用的，其频率将随 400V 输入电容上的纹波而变化，导致自然的频谱扩展。此外，由于开关行为在较低电压时发生，开关噪声减小，故共模 EMI 噪声也相应减小。

LLC 谐振转换器的实际工作范围从 70W 左右到 500W 以上，带有一个 PFC 前端的 FSR2100 已用于实现 200W 到 420W 的电源。对于高达 200W 的应用，一般无需使用 FSR2100 上的散热器，但通常建议在输出端使用一些肖特基二极管，而这些往往需要散热器。此外，也可以采用同步整流方法，这时因为采用了 MOSFET (虽然 MOSFET 的控制信号不易产生)，因此无需散热器。对于采用

了肖特基二极管的应用，典型的峰值效率依照输入电压、输出电压和输出功率情况，大约在 90%到 95%之间。