

## Technical Article

## 跳出 LLC 串联谐振转换器的思维定式



Sheng-Yang Yu

十几年来，电源行业广泛采用了图 1 中所示的电感器-电感器-电容器 (LLC) 串联谐振转换器 (LLC-SRC) 作为低成本、高效率的隔离式功率级，其中包含两个谐振电感器（两个“L”： $L_m$  和  $L_r$ ）和一个谐振电容器（一个“C”： $C_r$ ）。LLC-SRC 器件具有软开关特性，没有复杂的控制方案。得益于软开关特性，该器件支持使用额定电压较低的元件，并可提高效率。该器件采用简单的控制方案，即具有 50% 固定占空比的变频调制方案，与相移全桥转换器等其他软开关拓扑的控制器相比，所需的控制器成本更低。

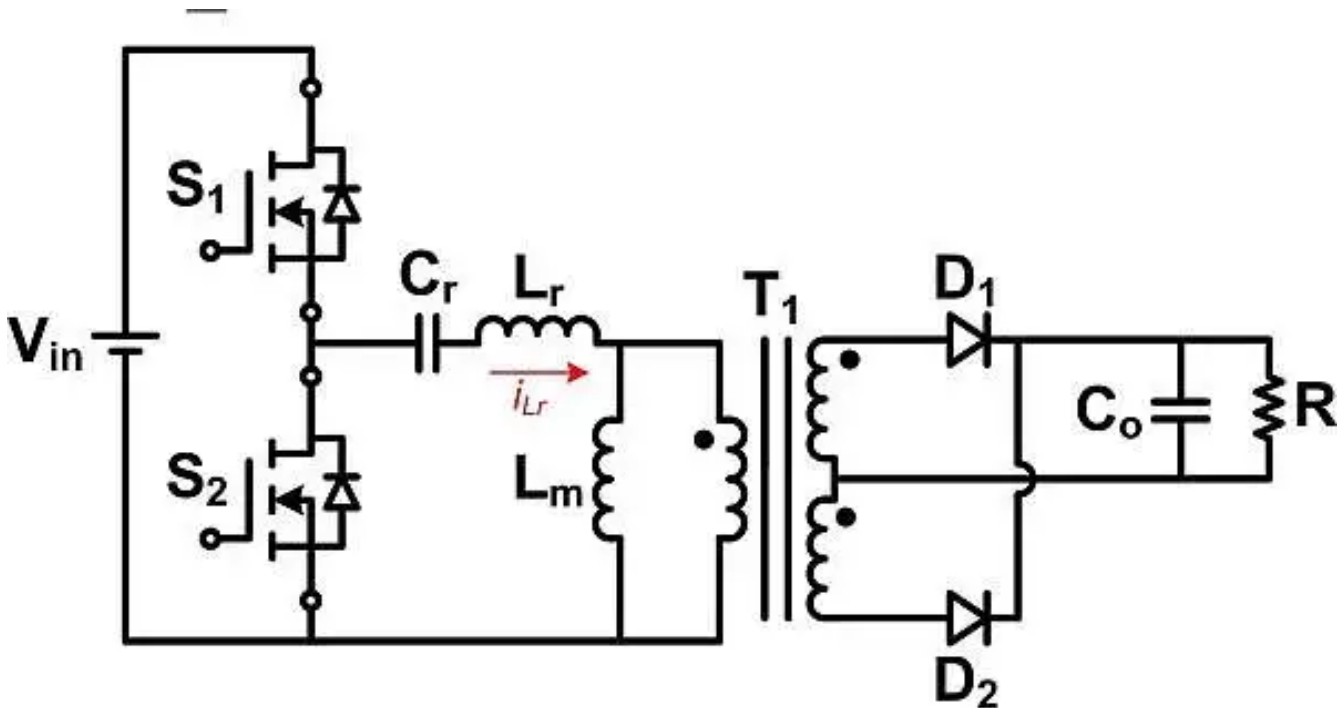


图 1. LLC-SRC

尽管 LLC-SRC 的效率可以比硬开关反激式和正激式转换器高很多，但如果要实现最佳的效率，仍然存在一些设计挑战。首先，在 LLC-SRC 设计中，为了实现足够宽的可控范围，两个谐振电感器之比 ( $L_m/L_r$ ) 可能必须小于 10。同时，需要  $L_m$  具有较大的电感，以便降低循环电流，因此需要保持高  $L_r$  电感以确保谐振电感比值低。

值得注意的是，串联谐振电感器  $L_r$  中的电流完全是交流电，没有任何直流分量，这意味着磁通密度变化很大（即  $\Delta B$  很高）。高  $\Delta B$  意味着与交流相关的电感器损耗也很高。如果电感器绕在铁氧体磁芯上，磁芯空气间隙附近的边缘效应会产生较高的绕组损耗。

$L_r$  电感高，则意味着电感器匝数较多、交流绕组损耗较大。因此，许多 LLC-SRC 设计都对谐振电感器采用铁粉磁芯，在绕组损耗和磁芯损耗之间进行权衡。然而，高  $\Delta B$  会在谐振电感器上产生相当大的损耗：高绕组损耗或高磁芯损耗。

LLC-SRC 设计的第二个挑战是如何合理优化同步整流器 (SR) 控制。LLC-SRC 整流器电流传导时序取决于负载条件和开关频率。最有前景的 LLC-SRC SR 控制方法是检测 SR 场效应晶体管 (FET) 漏源电压 ( $V_{DS}$ )，并在  $V_{DS}$  低于或高于特定电平时开启和关闭 SR。 $V_{DS}$  检测方法需要毫伏级的精度，因此只能在集成电路中实现。自驱动或其

他低成本 SR 控制方案不适用于 LLC-SRC，因为此类器件采用带电容负载的电流馈入型输出配置。因此，LLC-SRC SR 控制器电路的成本通常高于其他拓扑的成本。

为了解决这两个挑战（高电感器损耗和 SR 控制），同时保持谐振转换器所能提供的大部分优势，请考虑使用改良版 CLL 多谐振转换器 (CLL-MRC)，如图 2 所示。

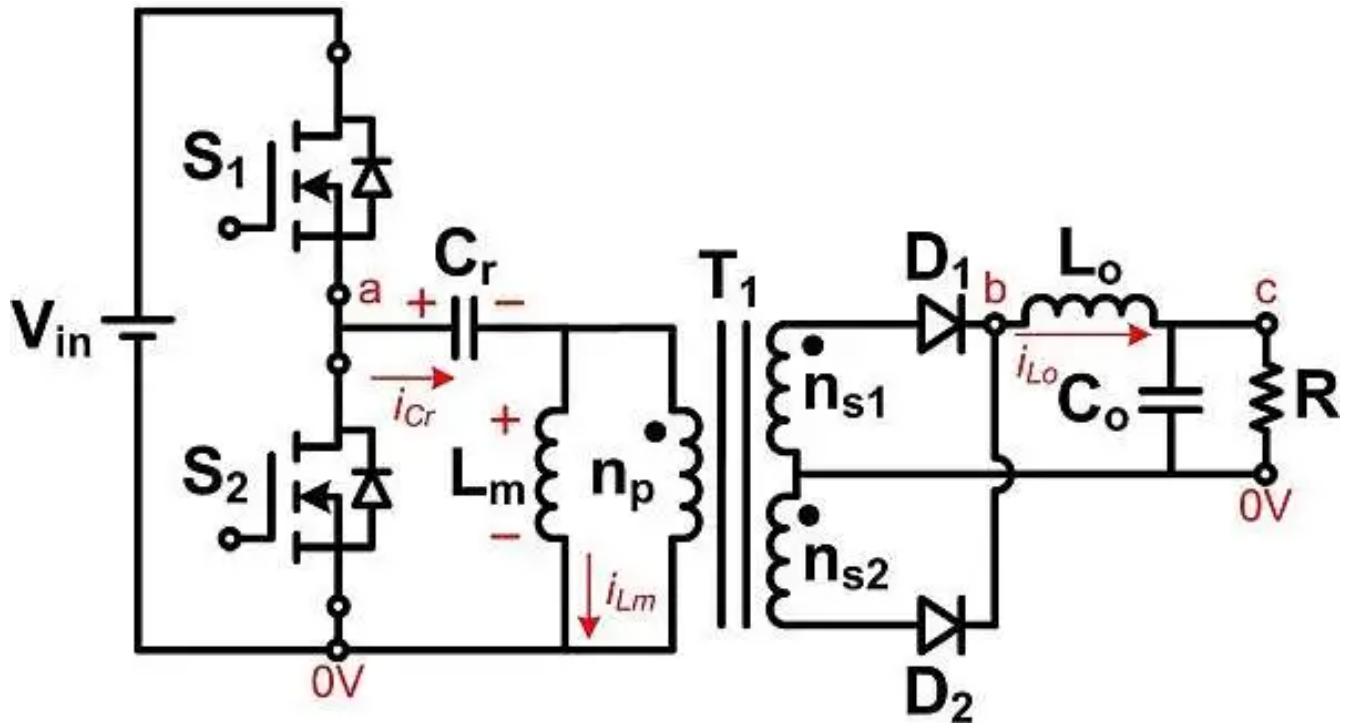


图 2. 改良版 CLL-MRC

与所有三个谐振元件（一个电容器和两个电感器）都位于输入侧的 CLL-MRC 不同，改良版 CLL-MRC 将一个电感器从输入侧移动到输出侧，并将电感器放置在整流器  $L_o$  之后，如图 2 所示。这种修改允许谐振电感器上含有直流电流，这意味着  $\Delta B$  更小，磁损耗也可能更低。

图 3 展示了改良版 CLL-MRC 的工作原理，其中  $f_{sw}$  是转换器开关频率，而  $f_{r1} = \{2\pi [C_r (L_{r1} // L_{r2})]\}^{-0.5}$  是两个谐振频率的其中之一。当  $f_{sw}$  低于  $f_{r1}$  时，输出绕组电流在开关周期结束前下降到零，这一点与 LLC-SRC 中的输出绕组电流类似。现在，输出端有一个电感器。一组简单的电容器和电阻器即可检测输出电感器电压。每次出现较大的电压变化率 ( $dV/dt$ ) 时，便是开启或关闭 SR 的时机。因此，SR 控制方案的成本低于  $V_{DS}$  检测方案。

当  $f_{sw}$  高于  $f_{r1}$  时，输出电感器电流会处于连续导通模式。换言之，与 LLC-SRC 相比， $\Delta B$  减小，电感器交流损耗可能大幅减小，转换器效率可能提高。

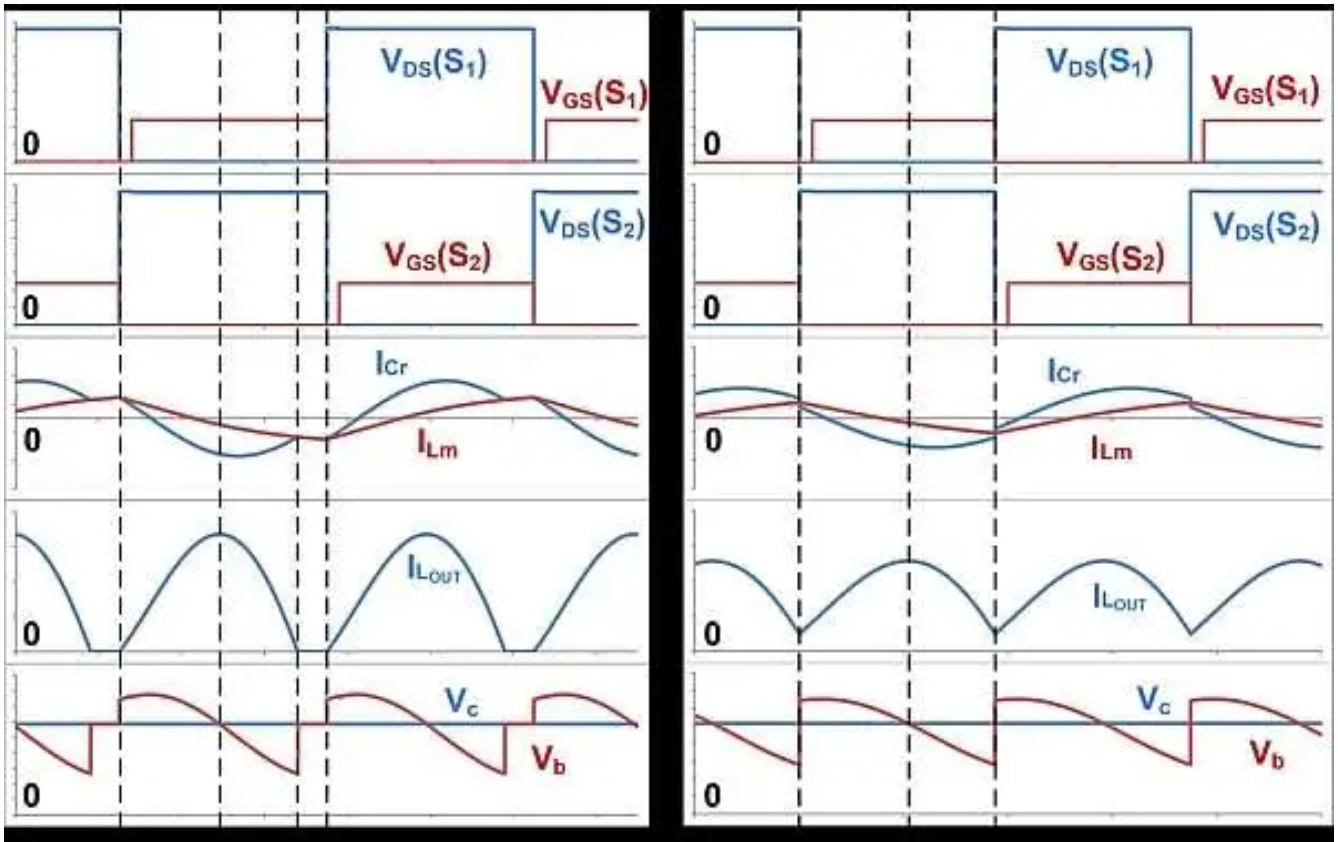


图 3. 改良版 CLL-MRC 的重要波形： $f_{sw} < f_{r1}$  (左)， $f_{sw} > f_{r1}$  (右)

为了验证这些性能假设，我构建了一个 LLC-SRC 和另一个具有完全相同元件和参数的改良版 CLL-MRC 功率级。两者唯一的区别是  $72 \mu\text{H}$  电感器用作 LLC-SRC 谐振电感器， $1 \mu\text{H}$  电感器用作改良版 CLL-MRC 输出电感器。

图 4 显示了两个功率级的效率测量结果。当输入电压较低时， $f_{sw}$  小于  $f_{r1}$ ，因此改良版 CLL-MRC 中的  $L_o$  电流仍处于不连续导通模式，并具有较大的  $\Delta B$ 。因此，在这种运行条件下，改良版 CLL-MRC 没有效率优势。

当输入电压升高时， $f_{sw}$  大于  $f_{r1}$ ， $L_o$  电流处于连续导通模式。使用  $430\text{V}$  输入时，改良版 CLL-MRC 的效率比 LLC-SRC 高 1%。这一比较表明，如果将改良版 CLL-MRC 设计为始终在高于  $f_{r1}$  的频率下运行，则其在整个范围内的效率性能可能优于 LLC-SRC。

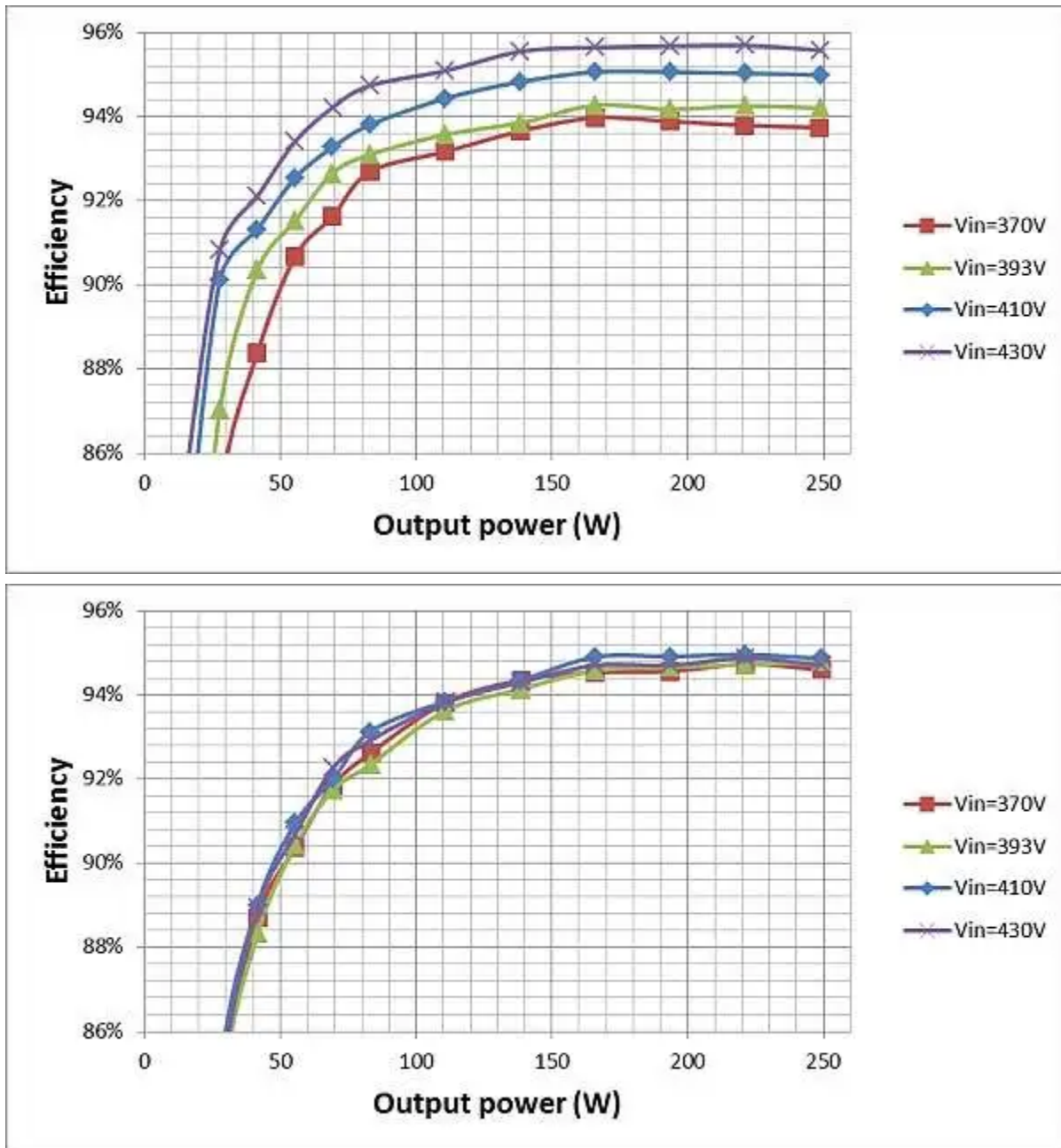


图 4. 不同输入电压电平下的转换器效率：改良版 CLL-MRC（顶部），LLC-SRC（底部）

LLC-SRC 确实是出色的拓扑，可提供许多吸引人的特性。但根据应用的不同，其可能并不是最佳解决方案。为了实现更高的效率和更低的电路成本，有时需要跳出思维定式。

#### 其他资源

- 阅读德州仪器 (TI) 电源设计研讨会的以下文章：
  - “设计 LLC 谐振半桥电源转换器”。
  - “谐振转换器拓扑结构综述”。
  - “同步整流器的控制和设计挑战”。
- 查看 [400V 直流输入转 28V/9A 输出、紧凑型高效 CLL 谐振转换器参考设计](#)。

#### 相关文章

- [LLC resonant topology lowers switching losses, boosts efficiency](#)

- [High efficiency resonant mode implementation using digital control](#)
- [Design considerations when selecting half bridge resonant LLC converters and primary side MOSFETs](#)
- [Using quasi-resonant and resonant converters](#)
- [Power Tips #77: Designing a CCM flyback converter](#)

之前发布在 [EDN.com](#) 上。

## 重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司