

# 基于 LCC 拓扑的 2 相输入 300W AC-DC LED 电源

意法半导体

Akshat JAIN, Fabrizio DI FRANCO

近年来，谐振变换器的热度越来越高，被广泛用于计算机服务器、电信设备、灯具和消费电子等各种应用场景。谐振变换器可以很容易地实现高效率，其固有的较宽的软开关范围很容易实现高频开关，这是一个关键的吸引人的特性。本文着重介绍一个以半桥LCC谐振变换数字控制和同步整流为特性的300W电源。

图1所示的STEVAL-LLL009V1是一个数控300W电源。原边组件包括PFC级和DC-DC功率级(半桥LCC谐振变换器)，副边组件包括同步整流电路和STM32F334微控制器，其中STM32F334微控制器对DC-DC功率级(半桥LCC谐振变换器)和输出同步整流进行数字控制，而功率因数校正(PFC)级基于L6562ATD临界模式PFC控制器。

评估套件的工作模式可以按照需要设为恒定电压 (CV) 模式或恒定电流 (CC)。板载快速保护电路提供所有的必备的保护功能，并且具有很高的可靠性。在270-480V交流输入和整个负载范围内，对评估套件进行了性能测评，试验结果证明，电能质量参数在IEC 61000-3-2通用交流电源谐波标准的可接受范围内。

## 前言

本文提出的解决方案采用数字变换控制方法，而不是基于模拟IC的标准设计。数控方法的主要优点是设置灵活，可以在任何给定条件下即时调整参数和工作点，无需更改任何硬件，而模拟控制只能在特定范围内调整。数字控制方法只用一颗芯片就能实现调光方法(模拟或数字)、调光控制(0-10V，无线通信)、调光分辨率、温度监控、各种保护、通信连接等高级功能，因而系统成本更划算，实现起来也比模拟方法更容易。此外，在噪声较高的工况下，数控方法可保证电源具有更高的稳定性：数控电源不易受元器件公差、温度变化、电压漂移等因素的影响。

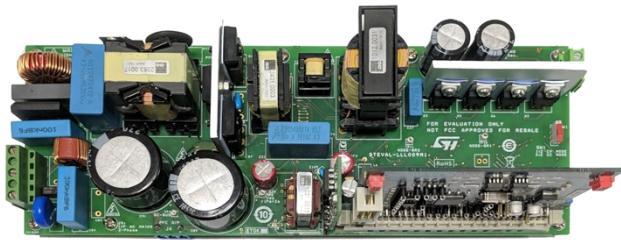


图1: STEVAL-LLL009V1 评估套件

## 系统概述

STEVAL-LLL009V1评估套件有恒定电压 (CV) 和恒定电流 (CC) 两种模式，恒压模式 (CV) 可将270V-480V交流电输入转为48 V恒定电压、最大电流6.25 A的直流电输出；恒流模

式(CC)可以输出36V-48V的6.25 A直流电流。通过拨动主电源板上的开关SW1，可以将评估套件设为CV模式或CC模式。DC-DC功率级叫做原边电源层，而微控制器级叫做副边电源层，微控制器向电隔离半桥栅极驱动器STGAP2DM发送控制信号，驱动DC-DC功率级MOSFET开关管。

图2是STEVAL-LLL009V1评估套件的框图，该评估套件嵌入了原副边需要的拓扑电路和元器件。

评估板提供一个0-10V的输入，用于控制LED的亮度。仅当评估套件在恒流(CC)模式下运行时，调光控制0-10V输入才适用。STEVAL-LLL009V1评估套件实现了模拟调光方法，电流分辨率为1%。

评估板上还插接了一个有隔离放大器的子板，用于检测PFC的输出电压，该输出电压也是DC-DC功率级的输入电压。

PFC级基于MDmesh™ K5功率MOSFET；为实现高效率，LCC变换器的半桥采用MDmesh™ DK5功率MOSFET。副边同步整流 (SR) 电路采用STripFET™ F7功率MOSFET，以减少通态损耗。

评估套件配备了完善的安全保护功能，例如，开路保护、短路保护、谐振电流保护、DC-DC功率级输入欠压保护和过压保护。

基于VIPer267KDTR的离线反激变换器向原副边电路供电，包括控制板、栅极驱动器IC和信号调理电路。

实验结果表明，在宽输入电压和宽负载条件下，评估板取得了较高的电源能效，功率因数接近一，较低的THD%失真率，这归功于意法半导体的功率器件的出色性能，以及使用STM32F334 32位微控制器实现的控制策略。

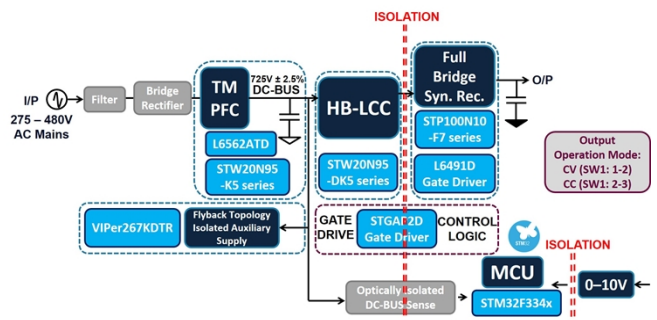


图2: STEVAL-LLL009V1 评估套件框图

## 谐振变换器

DC-DC功率级将PFC输出电压变为所需的输出电压。DC-DC功率变换级有多种拓扑可用，例如，LLC谐振变换器。每种拓扑都有其各自的优缺点。充电器和LED照明之类的应用可能要求电隔离的DC-DC功率级处理较宽的输入或输出电压。考虑到这些要求，在STEVAL-LLL009V1的DC-DC功率级中实现了半桥LCC谐振拓扑，如图3所示。

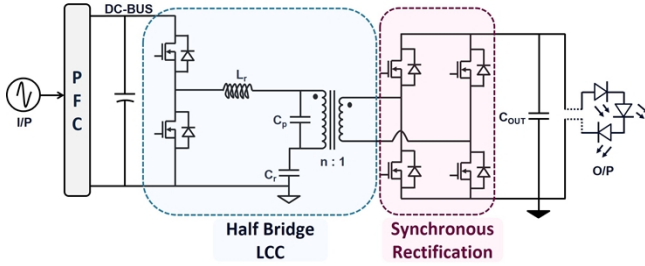


图3: 具有同步整流功能的半桥LCC谐振变换器

在STEVAL-LLL009V1中，并联电容器 $C_p$ 连接到变压器的副边，因此，同步整流的寄生电容和变压器的漏感成为谐振回路的一部分。

PFC输出电压为大容量的Bulk电容器充电，以生成稳定的DC-BUS电流。半桥配置MOSFET开关在GND和DC-BUS之间产生一个方波电压波形，并施加到由电容器 $C_r$ 、电容器 $C_p$ （位于副边）、电感器 $L_r$ 和隔离变压器组成的LCC谐振回路。

以50%的PWM占空比和适当的死区时间驱动LCC谐振变换器的半桥高压MOSFET开关。因为近似正弦谐振的储能电流始终滞后于电压波形（电感区域），所以MOSFET输出电容在下次导通之前的死区时间内有时间放电，并实现零电压开关（ZVS）操作，如图4所示。PWM开关频率控制器用于调节谐振回路的电压升高幅度，并将变换器的电压保持在电感区域内，使开关管在整个工作范围内保持ZVS操作，并减少开关损耗。

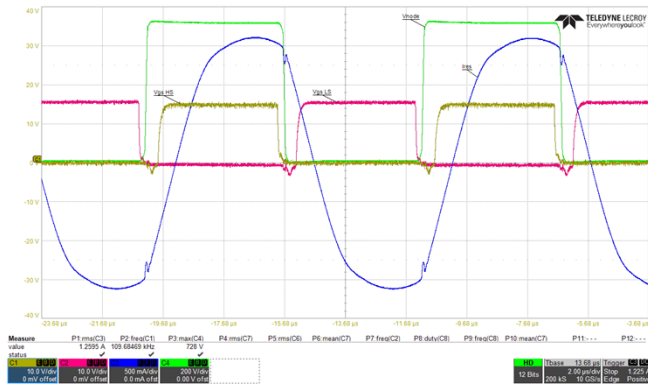


图4: 在100%负载时HB-LCC级波形

表1: LCC与LLC谐振变换器对比

谐振变换器	LCC变换器	LLC变换器
-------	--------	--------

$f_{r1}$	$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_r\left(\frac{C_r C_p}{C_r + C_p}\right)}}$	$\frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_m)C_r}}$
$f_{r2}$	$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$	$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$
理想开关区域	$f_{operation} > f_{r2}$	$f_{r1} < f_{operation} < f_{r2}$
主要特性	LCC频率波动小，在低负载工况下，可能不需要Burst Mode跳周期模式	LLC的RMS电流比LCC小 LLC的能效比LCC高
框图		

我们用基本谐波分析(FHA)法分析了评估套件半桥LCC谐振变换器的增益。

根据使用FHA方法得出的增益计算公式以及为STEVAL-LLL009V1评估套件半桥LCC谐振转换器选择的LCC参数，我们得出增益与归一化频率的关系曲线，如图5所示。

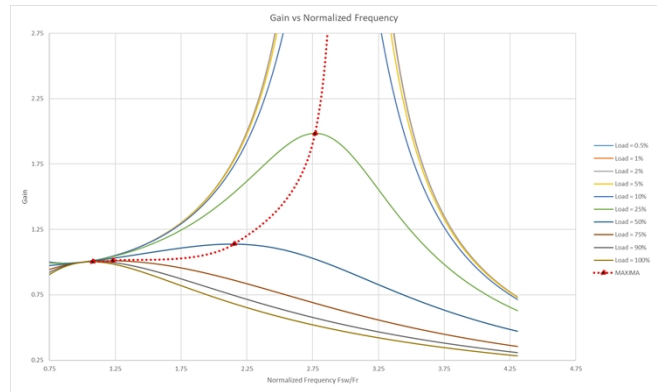


图5: HB LCC 变换器-增益与归一化频率

### 同步整流(SR)

在图3所示的变压器副边，输入电压波形由全桥配置的同步整流器整流，并由输出电容器滤除干扰信号，使波形平滑。同步整流级由STM32F334微控制器进行数字控制。

驱动同步整流MOSFET开关管需要检测同步整流(SR)端点电压( $V_{DS\_SR1}$ 和 $V_{DS\_SR2}$ )。下面讨论MOSFET  $V_{DS}$  (漏源电压)的检测和控制算法。

漏源电压检测网络由快速二极管和上拉电阻组成，上拉电阻连接微控制器(MCU)的电源电压，如图6所示。当SR MOSFET漏极电压高于MCU  $V_{CC}$ 时，给二极管施加反向偏压，检测电压上拉至 $V_{CC}$ 。当漏极电压低于 $V_{CC}$ 时，给二极管施加正向偏压，检测电压等于该电压与正向导通的二极管的压降之和。上拉电阻限制加正偏压期间的电流。

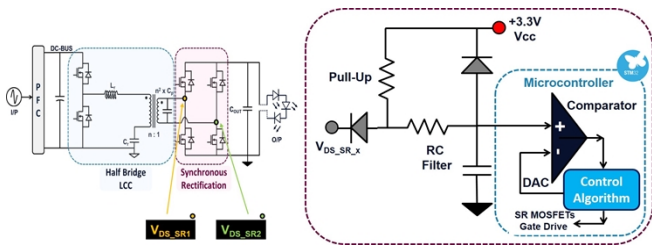


图6：同步整流  $V_{DS}$  检测方法

首先，同步整流MOSFET的体二极管开始导通， $V_{DS}$ 检测电路测量到 $V_{DS}$ 漏源电压值，如果漏源电压( $V_{DS}$ )低于设定阈值(通过MCU DAC外设置的 $V_{threshold\_ON-OFF}$ )，比较器输出(下降沿)触发MCU TIMER外设的不可重复触发单脉冲模式，如图7所示。

MCU TIMER外设向相应的同步整流栅极驱动器发送最小持续时间是 $T_{ON\ min}$ 的脉冲信号。

当漏源电压( $V_{DS}$ )高于设定阈值(通过MCU DAC外设置的 $V_{threshold\_ON-OFF}$ )时，比较器输出(上升沿)重置MCU TIMER外设，并停止向相应的同步整流栅极驱动器发送脉冲，如图所示。图7。

MCU持续监视DC-DC功率级(HB-LCC)频率和输出电流。如果频率高于设置阈值及滞后值或者输出电流低于设置阈值及滞后值，则微控制器(MCU)关闭同步整流级栅极驱动器，在此阶段，MOSFET的体二极管进行整流。当频率低于设置阈值及滞后值或者输出电流高于设置阈值及滞后值时，则微控制器(MCU)开启同步整流级栅极驱动器。

根据DC-DC功率级(HB-LCC)的工作频率，可在MCU中的查找表中调整阈值( $V_{threshold\_ON-OFF}$ )。

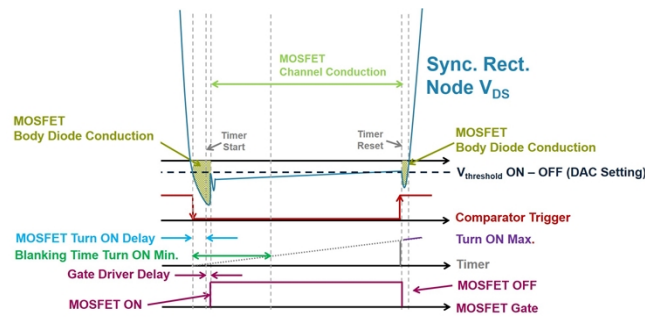


图7：同步整流数字控制算法

## 实验结果

我们计算了STEVAL-LLL009V1在不同负载下的总能效、功率因数(PF)和总谐波失真(THD)。当负载为100%时，能效高于93.5%。图8、9、10和11分别描述了评估套件恒压(CV)和恒流(CC)模式的性能。

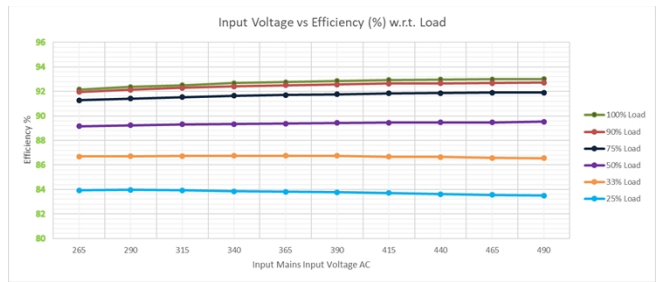


图8：恒压配置：在不同负载下输入电压与能效的关系

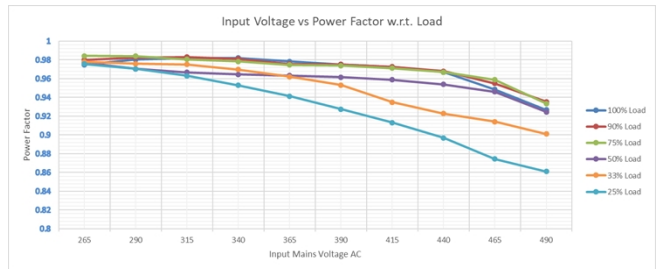


图9：恒压配置：在不同负载下输入电压与功率因数的关系

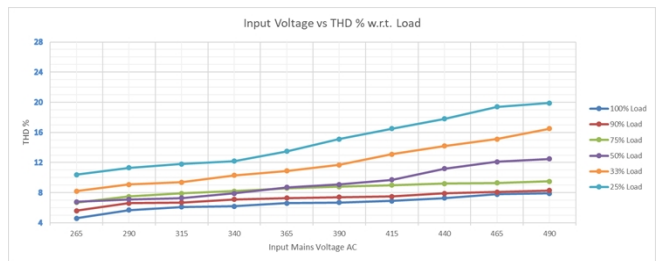


图10：恒压配置：在不同负载下输入电压与总谐波失真的关系

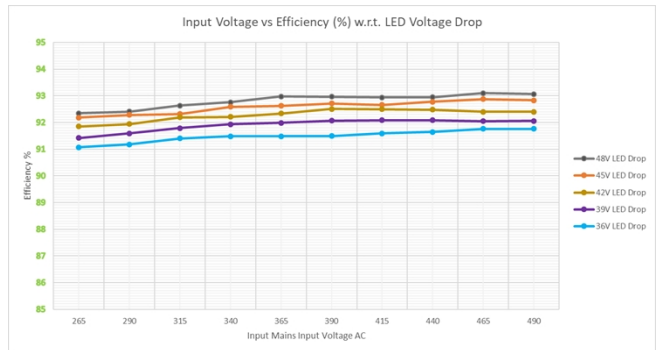


图11：恒流配置：在不同LED压降下输入电压与能效的关系

本文提出的数控电源在恒压(CV)和恒流(CC)两种模式下都能提供300W的输出功率。实验结果表明，在宽输入电压和宽负载条件下，评估板取得了较高的电源能效，功率因数接近1，THD%失真率较低，这归功于意法半导体的功率器件的出色性能，以及使用STM32F334 32位微控制器实现的控制策略。

有关更多详细信息，请联系意法半导体销售办事处。