

# 微逆变器前级用单开关谐振式 DC/DC 变换器的研究

黄志刚 王坤

(深圳市智芯驱动技术有限公司 广东深圳 518000)

**摘要:** 自微逆变器投入市场, 应用规模大幅拓展后, 相关人员逐渐在其应用中发现诸多问题, 这些问题的存在无法发挥微逆变器价值, 对此, 相关人员开始将前级用单开关谐振式 DC/DC 变换器作为研究重点。本文以其概述为基础, 指明这类变换器的电路运行原则、启动方式以及设计要点, 最后提出其在实际应用中的模型, 以供参考。

**关键词:** 微逆变器; 前级用单开关; 谐振式变换器

**引言:** DC/DC 转换器正朝着小型化和易用化方向发展, 这意味着它们必须在更高频率下工作。变压器开关损耗是这个发展方向的难点。软交换技术的应用很好地解决这个问题。其核心是最大限度地降低开关损耗, 降低电源器件在关断时的性能, 保护开关的安全, 最终提高变换器的工作效率。允许电源工作在 ZVS 零电压开关 (zerovoltageswitching) 或 ZCS 零电流开关 (zerocurrentswitching) 模式。

## 一、微逆变器前级用单开关谐振式 DC/DC 变换器概述

用于光电微逆变器系统的 DC/DC 变换器的替代拓扑结构主要包括反掺杂、全桥 Boost 变换器、双桥半桥 Boost 变换器和全桥 LLC 谐振变换器。反激式转换器的简单结构和低成本使其成为低功率应用的首选拓扑。交错式反激式转换器扩展电源拓扑的应用范围。全桥 Boost 逆变器设计简单, 成本低, 可提供较大的升压比和较大的稳压范围, 可靠性高, 广泛应用于中大功率场合。然而, 由于变压器漏电敏感, 开关中存在高压问题。同时, 由于填充因子超过 0.5, 需要额外增加 I21 发射电路。双 L 桥升压转换器。具有输入电流质地小, 变压器利用率高等特点。与全桥 Boost 逆变器相比, 双桥半桥逆变器更适用于低压、大电流输入, 如之前的燃料电池控制器。双 L 半桥升压转换器的问题是由于电压峰值和变压器泄漏敏感性导致的刚性开关而导致效率低下。LLC 谐振转换器是一种在工业中广泛使用的拓扑结构。初级开关可实现满载范围内的零电压开关 (ZVS), 次级二极管也可实现零电流开关 (ZC), 具有转换效率高、操作方便等优点, 适用于大低压电流输入。目前国内对外对高压 LLC 谐振变换器的研究较少。LLC 谐振器作为中小型 DC/DC 变换器的最佳拓扑结构, 在效率特性和输入适应性方面具有突出的优势。

## 二、微逆变器前级用单开关谐振式 DC/DC 变换器设计

### 1. 电路运行原则

电压端子为全桥电压结构, 低压  $U_{bat}$  为全桥电压结构。两端整流, 二极管与逆变单元的开关管并联。电压互感器两侧的匝数分别为  $N_1$  和  $N_2$ , 相邻匝数为  $N_1: N_2=N$ ;  $LR_1$  和  $LR_2$  为变压器两端等效漏感或外接串联谐振电感之和; 电感  $L$  位于锂电池末端, 当局部方向在输出端时, 电感起到滤波器的作用, 对纹波进行平滑处理。当局部方向在输入上时, 它充当 Boost 传感器;  $C_1$  和  $C_2$  是两端的滤波器。全桥软移相开关的基本原理是同一桥杆内的上下开关不能同时接通。因此, 两根管子的驱动信号存在死区, 驱动波形相差 180 度。同时, 尽管前壁和后壁对于管状驱动信号具有相同的脉冲宽度, 但它们之间存在电导差异, 称为相移角。通过调整相移角而不是驱动信号脉冲宽度, 可以改变输出电压。详情如下图所示:

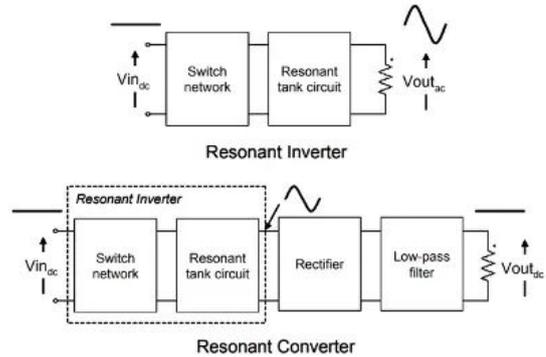


图 1: 谐振式转换器的示意图

由 K1、K3 管组成的桥杆是桥的先导杆, 其动作比 K2、K4 延迟桥杆早一步。K1、K4 开关管上有 D1、D4 反并联二极管, 用于吸收  $C_1$ 、 $C_4$  并联电容。当开关管关断时,  $C_1$ 、 $C_4$  可设置两端电压, 实现零电压开关。当开关导通时, 并联电容与  $LR_1$  发生谐振, 使开关两端的电压变为零, 从而实现零电压连接。电路的占空比分为 12 个时区, 后半周期波形对称。因此, 只需要分析前六个时区, 推导出脂肪循环的工作情况即可。

### 2. 启动方式

软启动模式可以有效限制启动过程中的过大电流, 提高系统性能, 防止输出值过载。当双向全桥转换器在充电模式 (降压方向) 下工作时, 如果使用双极性控制模式, 开关的填充率应从零逐渐增加到所需值。若采用移相控制方式, 初始移相角应按如下设置, 然后根据控制方案调整移相角稳定在目标值附近。当双向全桥变压器处于放电操作模式 (升压方向) 时, 由于高侧电容器上的能量不足, 启动阶段两端的电压尚未设置。在电路启动初期, 要避免同时打开所有四个开关, 因为这会导致低压侧的锂电池电压加到 L 形电感的两端, 从而增加电感器的电流。当两条管线处于导线状态时, 由于高压侧电压未设置, 变压器转换到低压侧的  $UBUS/N$  电压小于  $UBUAT$ , L 型感应电流继续增加, 因此无法实现磁复位。因此, 为了限制过大的启动电流, 需要采用软启动方式来解决这个问题。对于放电操作模式 (升压方向), 反向感应启动电路不需要复杂的控制。

主要是通过反向电感器, 在启动时通过二极管将能量转移到另一侧, 并逐渐在输出端建立电压。因此选用软启动电路, 通过反相电感产生次级初始电压。次级侧电压主要由电感  $L$  的反应绕组设定, 虚线框内的反扫描电路元件主要包括反扫描电感及其次级绕组、滤波电容、二极管等。反向电感系数为  $1: N$ 。放电工作模式为软启动时, 低压侧管的 PWM 信号 (K5K8 和

K6K7) 分为一组, 填充因子相同, 两组相位差不同。D 的占有率从 0 到 1 变化。当  $d < 0.5$  开始逐渐增加时, 转换器开始软化。当输出电压达到  $d > 0.5$  时, 开始进入正常放电工作模式。

### 3. 设计要点

基于典型的 Buck-Boost 充放电原理和模块化设计理念, 开发由独立模块、充电模块、放电模块和辅助电源模块组成的双向 DC/DC 转换系统。当电池放电时, 转换器处于升压模式; 当电池充电时, 转换器工作在降压模式。Buck-Boost 转换器结构简单, 开关少, 损耗低, 驱动控制电路简单, 电池侧 LCL 滤波输出, 可有效降低电池侧纹波电压和纹波电流。

(1) 放电电路设计。外部电池放电电路的实现主要是基于 Boost 升压电路。电池充电一段时间后, 可以拨动开关, 电池放电到外部电路。放电电路采用 SG3525 芯片, 可以作为设备开关的 DC/DC 开关, 也可以作为 PWM 控制器。该芯片产生 0~50% 的可调节空载率, 以控制 FET 的开启和关闭时间。反馈接 SG3525 芯片统一端, 逆变插头接参考电压。采样电压经 LM358 升压后接反馈端。当反馈端接收到高电平信号时, SG3525 输出低电平, 接线圈控制场效应管开关状态, 保证输出稳定。

(2) 单片电路设计。单片机电路设计采用 C8051F350 单片机作为控制器。C8051F350 是一款速度快、功能强大、成本低、功耗低的高性能 16 位单片机。C8051F350 系统具有内部重启、看门狗定时器、VDD 监视器和时钟发生器, 它们彼此独立工作。电机通过液晶屏显示充电电路中的电压和电流, 并通过主机的控制按钮设置期望的充电电压和电流。因此, 使用独立的系统可以使用户的工作更加方便和直观。

(3) 辅助电源设计。辅助电源主要是为芯片提供一定的工作电压。它通常由一个基于 MC34063 的升压电路组成。当插头 5 的电压值低于内部参考电压 (1.25V) 时, 比较器的输出为导通 T1 开关的跳变电压。在电感放电能量的过程中, 电感两端的电动势极性与电源的极性相同, 相当于两个电源连续接通, 负载处得到的电压超过电源电压。开关频率称为芯片工作频率。只要这个频率相对于恒定负载时间足够高, 就可以在负载上获得连续的直流电压。

### 三、微逆变器前级用单开关谐振式 DC/DC 变换器应用分析

#### 1. 谐振式 DC/DC 转换器的应用

当今市场上有多种类型的 DC/DC 转换器, 谐振转换器是 DC/DC 转换器拓扑中的一种。谐振电路通过控制开关频率提供恒定的输出电压。谐振转换器常用于高压应用, 以平滑波形、提高功率比并减少由高频功率开关 (如 MOSFET 和 IGBT) 引起的开关损耗。值得注意的是, 谐振转换器通常使用 LLC 电路, 因为它们可以在工作范围内实现零电压 (ZVS) 和零电流 (ZCS) 开关, 保持高开关频率, 减少电池占用空间, 并减少电磁干扰 (EMI) 谐振转换器安装在谐振逆变器上, 谐振逆变器使用开关网络将输入的直流电压转换为正弦波, 然后附加到谐振电路。如下图所示:

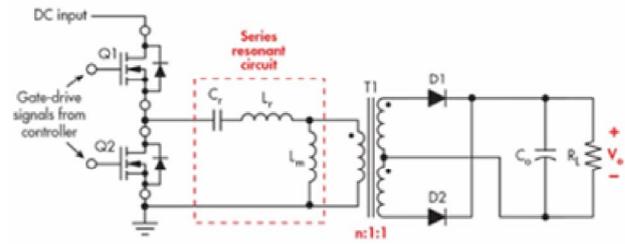


图 2: LLC 谐振式 DC/DC 转换器

该谐振电路由一个 CR 谐振电容器、一个 LR 谐振电感器和一个 LM 磁电感组成。LLC 电路选择性地吸收特定正弦波谐振频率下的最大功率, 并通过磁共振释放正弦波电压以滤除任何高次谐波。该交流波形由变压器放大或降低、整流和滤波以产生转换后的直流输出电压。为 DC/DC 转换器选择合适的 CR 谐振电容器时要考虑的一个重要参数是电容器的均方根电流 (RMS)。这会影响到电容器的可靠性、电压结构和转换器的整体性能 (取决于谐振电路的拓扑结构)。热输出还受均方根电流和其他内部损耗的影响。

### 2. 模型应用

测试时, 选取未充满电的充电电池作为测试对象。当 S1、S3 开关接通, S2 断开时, 转换器处于充电模式, 红灯亮, 屏幕显示当前电压和脉冲电流; 放电时, 白炽灯是带负载放电。当 S2、S3 接通, S1 闭合时, 白炽灯点亮。一段时间后, 通过测量电池两端的电压, 显示当前的放电电压和电流值。经测试, 该模型基本可以完成 DC/DC 双向转换。

结束语: 总而言之, 微型逆变器的前端使用单谐振开关 DC/DC 转换器, 通过数字和抗感应程序的组合, 实现软启动。开发基于 TMS320F28335 的数字控制系统, 测试软开关和软启动的效果。实验表明, 带反馈电感的软启动方式有效地简化启动过程。采用软开关技术跨桥移相, 有效降低功耗, 提高系统效率。

### 参考文献:

- [1] 王锐, 王春芳, 陈道炼. 微逆变器前级用单开关谐振式 DC/DC 变换器的研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(12): 40-46.
- [2] 鲁静, 同向前, 张嘉翔. L-LLC 谐振型双向 DC-DC 变换器的复合最优轨迹控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2020(S01): 60-69.
- [3] 王强, 李兵, 王天施, 刘晓琴. 新型单相软开关 AC-DC-AC 变换器[J]. 电子学报, 2020, 48(3): 616-620.
- [4] 冯唯真, 盛义发, 李佩文, 邹霖, 邹贤政. 双向全桥 CLLC 谐振式 DC-DC 变换器的研究[J]. 汽车电器, 2022(5): 49-51.
- [5] 吴学智, 祁静静, 刘京斗, 杨安娜, 吕格格. 谐振开关电容 DC/DC 变换器拓扑研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 655-666.

作者简介: 黄志刚 (1984 年 4 月) 男, 汉族, 湖北武汉, 本科, 高级工程师, 研究方向: 运动控制驱动方案的技术开发。

作者简介: 王坤 (1985 年 11 月) 女, 汉族, 深圳宝安, 本科, 高级工程师, 研究方向: 运动控制驱动方案的技术开发。