

半桥 LLC 谐振变换器的建模及仿真研究*

吴张勇, 陈小鹏, 于建阁, 齐立鹏

(浙江师范大学 数理与信息工程学院, 浙江 金华 321004)

摘要: 介绍了半桥型 LLC 谐振变换器拓扑的工作原理, 通过基波等效模型分析了电路的直流增益特性, 利用 Matlab 软件绘出了其直流增益曲线, 并以此为依据讨论了各参数对 LLC 谐振变换器的影响, 以 24 V/192 W 电源为例计算出了 LLC 谐振变换器的变压器匝比、谐振电感、谐振电容和励磁电感等参数。最后用 Saber 软件进行仿真, 通过更改一些参数的方法验证了所述理论的正确性。

关键词: LLC 谐振变换器; 建模分析; 高功率密度; Saber 仿真

中图分类号: N945.12

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)22-0075-03

Modeling and simulation analysis of half-bridge LLC resonant converter

Wu Zhangyong, Chen Xiaopeng, Yu Jian'ge, Qi Lipeng

(College of Mathematics, Physics and Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: Introduction was made to the working principle of topology for the half-bridge LLC resonant converter in this paper, through fundamental analysis of the circuit equivalent model of the DC gained characteristics and used of Matlab software plots the DC gained curve, and as a basis for discussion of the various parameters on the impact of LLC resonant converter, for example to 24 V/192 W calculated the LLC resonant converter transformer turns ratio, resonant inductor, resonant capacitor and the magnetizing inductance and other parameters. Finally, we used the Saber simulation software, verified the correctness of the theoretical analysis by changing the parameters.

Key words: LLC resonant converter; modeling and analysis; high power density; Saber simulation

从技术上看, 几十年来电力电子技术水平不断提高的主要标志是高频化、高效率和高功率密度等^[1]。为了增加功率密度, 必须实现高频化, 即提高开关频率, 但又要同时提高变换器的效率, 就必须减小开关损耗, 谐振变换器正是由于其开关损耗小等优点得到了广泛的应用。LLC 谐振变换器理论上可实现初级开关管零电压开通(ZVS), 且关断电流较小, 次级整流管可实现零电流开断(ZCS)的特点^[2], 它既吸取串联谐振变换器谐振槽路电流随负载轻重而变化、轻载时效率较高的优点, 又兼具并联谐振变换器在空载下也能稳定工作的特点。因此, LLC 谐振变换器是一种比较理想的谐振变换器拓扑, 对其进行研究具有重要的理论意义和实用价值^[3]。

1 原理概述

半桥 LLC 谐振变换器拓扑结构如图 1 所示, 谐振回

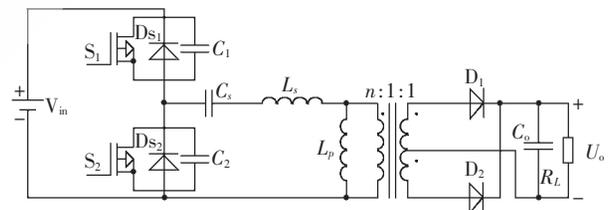


图 1 半桥 LLC 谐振变换器拓扑结构

路由谐振电感 L_s (串联电感)、励磁电感 L_p (并联电感) 以及一个谐振电容 C_s 串联组成, 变换器由该三元件组成, 也由此而得名。

LLC 谐振变换器有两个谐振频率, 一个是由 L_s 和 C_s 串联谐振 f_s 决定, 此时并联电感 L_p 上的电压被输出电压箝位, 不参与谐振; 另一个由 C_s 、 L_s 和 L_p 三者的并联谐振 f_p 决定。即: $f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}}$, $f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_s + L_p) C_s}}$

* 基金项目: 浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)(2011R404024)

技术与方法 Technique and Method

半桥 LLC 谐振变换器在一个周期内可以分为 6 个工作模式,其中 i_{L_s} 为串联谐振电流, i_{L_p} 为并联电感电流。

工作模式 1 ($t_0 \sim t_1$): t_0 时刻, 谐振电感电流 i_{L_s} 给开关管 S_1 的寄生电容放电, S_1 的漏源电压开始下降, 当降到零时, S_1 的体二极管 D_{S1} 开始导通, 为 S_1 的零电压开通提供了条件。此模式下整流二极管 D_1 导通, 并联电感 L_p 上的电压被变压器钳位在 n 倍输出电压上, 其中 n 为变换器匝比, 因此只有 L_s 和 C_s 参与谐振。

工作模式 2 ($t_1 \sim t_2$): t_1 时刻, S_1 零电压开通。此时 L_p 仍不参与谐振, 其上的电流 i_{L_p} 线性上升, 在 t_2 时刻达到了峰值, i_{L_s} 按正弦波规律增加。次级二极管仍是 D_1 导通, 流过 D_1 的电流是 i_{L_s} 和 i_{L_p} 之差。 t_2 时刻, $i_{L_s} = i_{L_p}$, D_1 电流为 0, 副边二极管零电流关断。

工作模式 3 ($t_2 \sim t_3$): t_2 时刻 D_1 关断后, 输出侧与谐振网络完全分开, 输出电感给负载供电。此模式下 L_p 也以并联谐振频率参与谐振, $i_{L_s} = i_{L_p}$, 到 t_3 时刻 S_1 以较小的电流关断。

下半个工作周期和上面的工作过程相似, 只是方向相反。从上面的分析可看出开关管 S_1 和 S_2 都实现了零电压开通, 次级整流二极管都实现了零电流关断, 开关损耗很小, 具有极高的效率。

2 等效模型的建立和分析

上面的分析都是纯理论的, 要实现真正的软开关^[4], 达到最低开关损耗, 需要建立等效模型, 分析设计各参数才能获得。由于开关管是上下互补导通的, 所以在谐振网络的左边得到一方波电压, 而从变压器副边折算到也同样为一方波电压, 由此用基波等效模型来研究 LLC 谐振变换器的输入输出特性。图 2 为 LLC 谐振变换器的基波等效电路。

其中, R_x 与实际负载的关系为:

$$R_x = n^2 \frac{8}{\pi^2} R_L$$

式中 $\frac{8}{\pi^2}$ 为正弦波流经电阻上产生的功率与方波产生的功率的关系比。由等效电路得交流基波的电压增益:

$$G_a = \frac{U_o}{U_{in}} = \frac{Z_{\parallel}}{Z_L + Z_C + Z_{\parallel}} \quad (1)$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{1}{K} \left(1 - \frac{f_s^2}{f^2}\right) + j \left(\frac{f}{f_s} - 1\right) \frac{\pi}{8n^2} \frac{1}{2\pi f R_L C_s}}$$

式(1)中, f_s 为串联谐振频率, f 为开关频率, n 为变压器匝比, K 定义为 $K = \frac{L_p}{L_s}$ 。将 Q 定义为串联谐振的品质因数:

$Q = \frac{1}{R_x} \sqrt{\frac{L_s}{C_s}}$, 通过对谐振槽路的输入电压进行傅里叶变换^[5]得到其基波分量:

$$V_{inHA}(t) = \frac{2}{\pi} V_{in} \sin(2\pi f t) \quad (2)$$

由式(2)可得输入方波电压基波有效值:

$$U_{in} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{in} \quad (3)$$

同理可得输出方波电压基波有效值:

$$U_o = n \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_o \quad (4)$$

所以直流增益:

$$G_d = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{2n} |G_a|$$

$$= \frac{1}{2n} \left| \frac{1}{1 + \frac{1}{K} \left(1 - \frac{f_s^2}{f^2}\right) + j \left(\frac{f}{f_s} - 1\right) \frac{\pi}{8n^2} \frac{1}{2\pi f R_L C_s}} \right| \quad (5)$$

变换上面式子可得直流增益表达式:

$$G_d = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{2n} \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{K} - \frac{f_s^2}{Kf^2}\right) + \left(\frac{f}{f_s} - \frac{f_s}{f}\right)^2 Q^2}} \quad (6)$$

从式(6)可看出影响直流增益的参数有比例系数 K 、串联谐振品质因数 Q 、变压器匝比 n 等, 由于各参数之间关系复杂, 相互影响, 所以本文在分析时先固定其他几个, 只变动一个参数来观察其对变换器的影响。

2.1 品质因数 Q 对变换器的影响

固定 K 和 n 值, 分析 Q 值对变换器的影响。图 3 是用 Matlab 软件给出的在 $K=3$ 、 $n=31$ 时不同 Q 值下直流增益 G_d 随归一化频率 $f_n = f/f_s$ 的变化曲线。从图中可看出, Q 值越大增益曲线的最大增益越小, 即在变压器空载时, 增益最大, 要使输出电压恒定, 必须增加开关频率; 在满载时, 增益最小, 需要减小开关频率来维持输出稳定。由于开关频率在 f_p 和 f_s 之间时谐振网络呈感性, 有利于开关管的零电压开通和二极管的零电流关断, 所以设计一个在满载情况下满足变换器增益要求的 Q 值即可满足其他情况的要求。

2.2 比例系数 K 对变换器的影响

同理, 图 4 是 $Q=0.3$, $n=31$ 时不同 K 值下直流增益 G_d 随归一化频率的变化曲线。分析图 4 可知, 随着 K 的

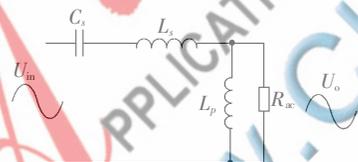


图 2 LLC 谐振变换器基波等效电路

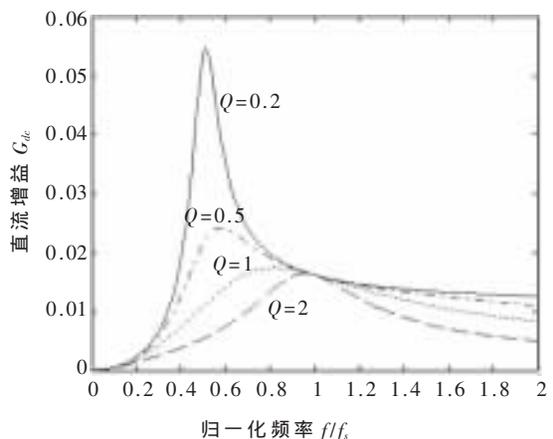


图 3 $K=3$, $n=31$ 时变换器的直流增益曲线

技术与方法 Technique and Method

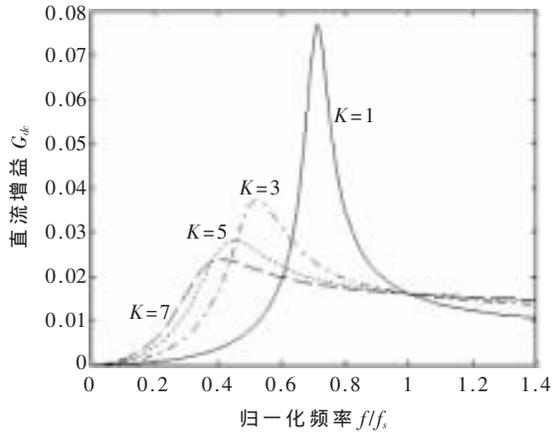


图4 $Q=0.3, n=31$ 时变换器的直流增益曲线

增大,最大增益逐渐减小。如果 K 取值较大,当输入电压较低时,可能无法达到需要保持的输出电压;再者,若串联谐振频率已确定,工作频率将随着拐点频率的减小而变宽,这样对磁性元件是不利的,应避免 K 值过大。但是 K 取值较小时,并联谐振电感 L_p 也较小,此时其上的电流较大,损耗 $P=\frac{1}{2}L_p i^2$ 也较大,所以 K 也应避免取得过小,应折中选取,一般取 3~7 比较合适。

2.3 匝比 n 对变换器的影响

从式(6)和图3可以看出,在 $f=f_s$ 时,无论 Q 值为多少,变换器的直流增益都等于 $\frac{1}{2n}$ 。所以,当设计的 n 满足变换器的最小增益为 $\frac{1}{2n}$ 时,变换器将工作在所希望的 $f_p < f < f_s$ 区域;当设计的 n 使 $\frac{1}{2n}$ 大于变换器的最小增益时,变换器有一部分工作在 $f > f_s$ 区域,此时整流二极管不能零电流关断;当设计的 n 使得 $\frac{1}{2n}$ 小于变换器的最小增益时,变换器将一直工作在 $f > f_s$ 区域内。一般将输入电压的最高频率固定在 f_s ,所以通常取 $n = \frac{U_{inmax}}{2U_o}$ 。

3 参数选取及仿真验证

本文以 192 W 的电源为例,设计的输入电压 V_{in} 为 400 V,输出为 24 V/8 A。根据上面的理论分析和实际经验,本文取 K 和 Q 的值分别为 5 和 0.4,变压器匝比为 36:4:4,此时经计算得出 $C_s=20$ nF, $L_s=127$ μ H, $L_p=635$ μ H,开关频率设为 99 kHz,用 Saber 软件^[6]画出了其仿真电路,图5为其正常工作满载时的仿真结果,其中 V_{ds} 为开关管漏源两级电压, V_{os} 为栅源两级电压, i_{L_s} 、 i_{L_p} 分别为谐振电感和励磁电感两端电流, i_{D_1} 、 i_{D_2} 为次级二极管电流。从图5可看出开关管能零电压开通和零电流关断,实现了真正的软开关。当改变 K 的取值,取 $K=10(L_p=260$ μ H)时,仿真结果如图6所示,此时开关管零电压开关和零电流关断不明了,次级二极管电流也有了一定畸变,此时不能得到真正的软开关,仿真结果与上面的分析相符。

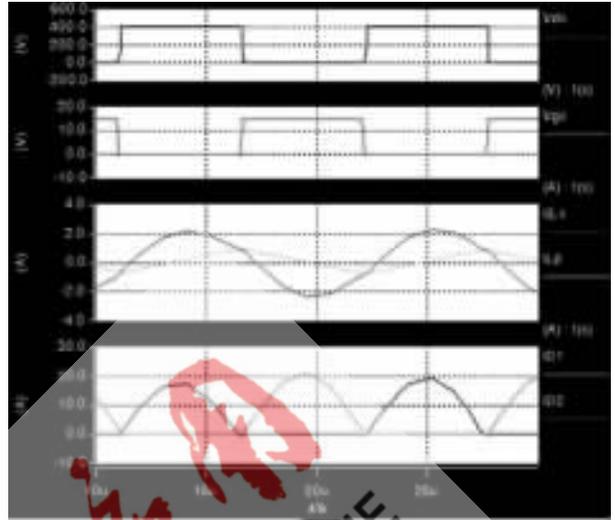


图5 满载正常工作时仿真波形

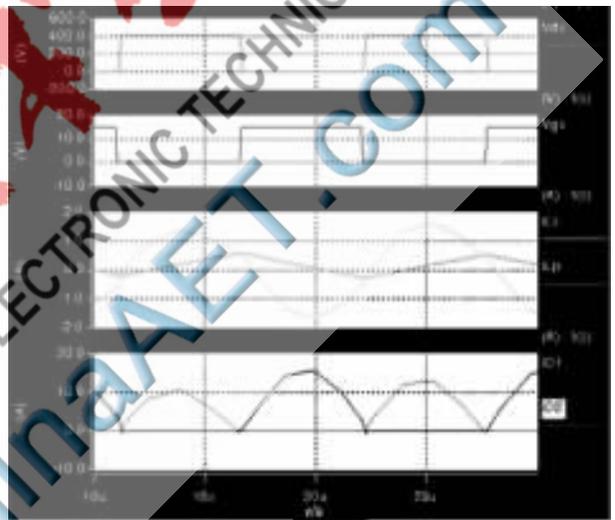


图6 更改 K 值后的仿真波形

实验证明,通过对变换器建立基波等效模型并分析各参数对变换器的影响,从而选取合适的变换器参数,能有效优化变换器工作性能,使半桥 LLC 谐振变换器开关器件实现零电压开通和零电流关断,将开关损耗降到最低。

参考文献

- [1] 朱建华,罗方林.功率谐振变换器及其发展方向[J].电能新技术,2004,23(1):55-59.
- [2] 陈伟,王志强.半桥 LLC 谐振变换器稳态建模及分析[J].通信电源技术,2008,25(4):17-19.
- [3] YANG B, LEE F C, ZHANG A J, et al. LLC resonant converter for front end DC/DC conversion[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2002, 2:1108-1112.
- [4] 王增福,李昶,魏永明.软开关电源原理与应用(第一版)[M].北京:电子工业出版社,2006:4-8.
- [5] 郑君里,应启珩,杨为理.信号与系统(第二版)[M].北京:

技术与方法 Technique and Method

高等教育出版社, 2009: 88-157.

- [6] 黄志武, 秦惠. SABER 仿真在 LLC 谐振变换器开发与设计中应用[J]. 通信电源技术, 2008, 25(2): 74-77.

(收稿日期: 2011-07-20)

吴张勇, 男, 1988 年生, 浙江师范大学学生, 主要研究方向: 电子信息工程。

于建阁, 男, 1989 年生, 浙江师范大学学生, 主要研究方向: 电子信息工程。

作者简介:

