

# 串联谐振三电平 Boost 电路的研究

刘国宏<sup>1</sup>, 丁喜波<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨理工大学 测控技术与仪器黑龙江省高校重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 根据燃料电池的特性, 三电平 Boost 电路广泛应用于电动汽车燃料电池升压系统, 但仍存在着开关损耗大的缺点。为减小开关损耗, 提高系统整体效率, 提升能源利用率, 对各个工作阶段进行分析, 在三电平 Boost 电路的基础上增加了谐振腔, 对软开关特性进行研究。通过仿真实验, 对硬开关三电平 Boost 电路和带有谐振腔软开关技术的三电平 Boost 电路进行对比, 结果显示软开关技术能够有效减小开关损耗, 对提高系统效率有着重大意义, 同时对其他软开关谐振电路的研究有着一定的借鉴推广作用。

**关键词:** 燃料电池; 三电平 Boost 电路; 软开关; 谐振; 开关损耗

**中图分类号:** TM912.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd19214

## Design of Soft Switching Technology for Electric Vehicle Fuel Cell Booster System

LIU Guohong<sup>1</sup>, DING Xibo<sup>1,2</sup>

(1. College of Measurement & Control Technology and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, Heilongjiang, China; 2. Higher Educational Key Laboratory for Measuring & Control Technology and Instrumentation of Heilongjiang Province, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

**Abstract:** According to characteristics of fuel cell, three level Boost circuit is widely used in fuel cell electric vehicle system, but it is equipped with disadvantage of large switching loss. To reduce switching loss, improve overall efficiency of system, improve utilization of energy, every stage of work was analyzed, resonant cavity was added on basis of three level Boost circuit and soft switching characteristics were studied. Through simulation experiment, hard switch three level Boost circuit and three level Boost circuit with resonant cavity soft switching technology were compared, result shows that the soft switching technology can reduce switching loss effectively. It is of great significance to improve the efficiency of system. At the same time, it is a great reference in research of other soft switching resonant circuits.

**Key words:** fuel cell; three level Boost circuit; soft switching; resonant; switching loss

能源问题是当今世界广泛关注的问题, 同时“十三五规划”对燃料电池车寄予厚望。燃料电池以其功率密度大、污染小、稳定性高的特点被广泛应用, 特别是在电动汽车中推动了一轮新的革命。燃料电池有其自身的特点: 输出电压低且变化范围大, 输出电流大, 特性软, 供电系统由燃料电池堆、蓄电池、高增益升压变换器构成<sup>[1-2]</sup>。

在电动汽车的燃料电池部分, 需要增加高增益升压电路才能给后级电路供电。传统的 Boost

升压电路受到开关应力的影响, 不适用于高输出电压场合。而三电平 Boost 电路开关变换器的开关应力比 Boost 电路减小了 50%, 较适用于电动汽车燃料电池系统<sup>[3]</sup>。但是随着开关频率的增大, 开关损耗急剧增大, 而且高频噪声也更加严重。因此, 软开关技术的应用在电动汽车燃料电池升压系统中极其重要, 本文基于传统三电平 Boost 电路, 增加了谐振电感和谐振电容, 对软开关技术进行研究<sup>[4]</sup>。

## 1 基本控制模式

三电平Boost变换器有4种工作情况,以电感电流连续,占空比 $D < 0.5$ 为例进行分析。假设开关管、二极管、电感、电容均为理想原件,均压电容 $C_1$ 与 $C_2$ 相等且足够大,能均分电源电压 $U_i$ ,输出电压纹波可以忽略不计。三电平Boost电路的原理图如图1所示,其工作过程分为4种模式<sup>[4]</sup>。

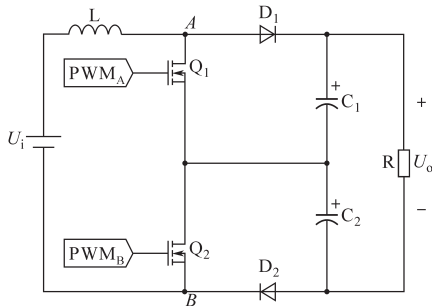


图1 三电平Boost电路原理图

Fig.1 Diagram of three level Boost circuit

模式1:  $Q_1$ 和 $D_2$ 同时导通, $D_1$ 和 $Q_2$ 截止, $A$ 与 $B$ 之间电压等于 $\frac{1}{2}U_o$ , $Q_2$ 两端电压等于 $A$ 与 $B$ 之间电压。

模式2:  $D_1$ 和 $D_2$ 导通, $Q_1$ 和 $Q_2$ 关断, $A$ 与 $B$ 之间电压等于 $U_o$ , $Q_1$ 与 $Q_2$ 之间电压均等于 $\frac{1}{2}U_o$ 。

模式3:  $Q_2$ 和 $D_1$ 同时导通, $D_2$ 和 $Q_1$ 截止,与模式1类似。

模式4: 再次出现 $D_1$ 和 $D_2$ 导通, $Q_1$ 和 $Q_2$ 关断,与模式2相同。

由于均压电容的钳位作用以及电感电流不能瞬变,在开关管 $Q_1$ 和 $Q_2$ 开通和关断的过程中均是硬开关,在输出功率高的场合存在着较大的开关损耗。变换器中每只开关管的电压应力为输出电压的一半,若仍采用原来的开关方式,则仅可以达到降低开关应力的目的,所以有必要采取新的开关方案来对其控制,以期实现软开关,减小开关损耗。

## 2 软开关的实现

为了实现软开关技术<sup>[5]</sup>,在原有的电路基础上加入谐振腔,其中包括谐振电感 $L_r$ 和谐振电容 $C_r$ ,并且在开关管 $Q_1$ 和 $Q_2$ 两端并联充放电电容和反并联二极管, $Q_1$ 和 $Q_2$ 驱动信号相差 $180^\circ$ ,电路原理图如图2所示。假设电路中所有元器件均为理想原件,电容 $C_{r1} = C_{r2}$ ,电感 $L_r \ll L$ 。

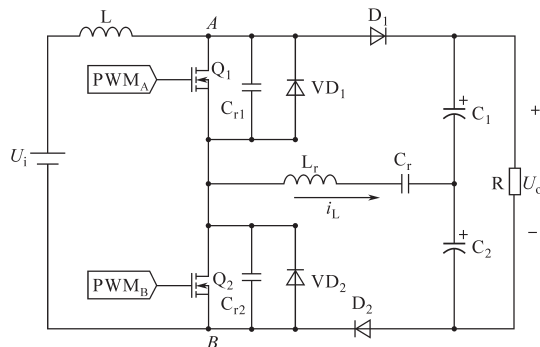


图2 谐振三电平Boost电路原理图

Fig.2 Diagram of resonant three-level Boost circuit

1)  $Q_1$ 导通阶段。 $Q_1$ 与 $D_2$ 同时导通, $D_1$ 与 $Q_2$ 截止,电源 $U_i$ 给电感 $L$ 充电,电容 $C_{r1}$ 两端电压为零,电容 $C_{r2}$ 两端电压与 $Q_2$ 两端电压相等。由于 $L \gg L_r$ ,因此电感 $L_r$ 电流开始由反向线性增大,并且开始反向。

### 2) $Q_1$ 关断阶段

$Q_1$ 开始关断,但是由于 $C_{r1}$ 电容钳位作用, $Q_1$ 实现零电压关断。 $D_1$ 与 $D_2$ 同时导通,并且 $C_{r1}$ 开始缓慢充电, $C_{r2}$ 开始缓慢放电,流过谐振电感 $L_r$ 的电流继续增大。

3) 谐振阶段。电容 $C_{r1}$ 充电完成后,电容 $C_{r2}$ 也放电完成,反并联二极管 $VD_2$ 自然导通,流过谐振电感 $L_r$ 的电流达到最大值,同时二极管 $D_2$ 关断。

4)  $Q_2$ 导通阶段。 $Q_2$ 逐步导通,但是由于反并联二极管的作用, $Q_2$ 实现零电压导通。同时 $Q_2$ 导通过程中, $C_{r2}$ 与电感 $L_r$ 发生谐振,所以流过 $Q_2$ 的电流也谐振增加。 $Q_2$ 开通后,流过谐振电感 $L_r$ 开始减小。

5)  $Q_2$ 关断阶段。 $Q_2$ 开始关断,但是由于 $C_{r2}$ 电容钳位作用, $Q_2$ 实现零电压关断。 $D_1$ 与 $D_2$ 再次同时导通,并且 $C_{r2}$ 开始缓慢充电, $C_{r1}$ 开始缓慢放电,流过谐振电感 $L_r$ 的电流继续减小并且反向。

6) 谐振阶段。当 $Q_2$ 完全关断后,电容 $C_{r2}$ 充电完成,电容 $C_{r1}$ 也放电完成,流过谐振电感 $L_r$ 的电流达到反向最大值。电容 $C_{r1}$ 放电完成后,反并联二极管 $VD_1$ 自然导通,同时二极管 $D_1$ 关断, $Q_1$ 开始零电压导通,导通过程中 $C_{r1}$ 与电感 $L_r$ 发生谐振,流过 $Q_1$ 的电流也谐振增加。 $Q_1$ 导通后,再次回到第一阶段。

## 3 实验验证

为验证设计的电路是否能够实现软开关技术,设计如图3所示的电路图进行仿真。利用

SG3525芯片产生2路相位相差 $180^\circ$ ,占空比为0.4的驱动波形,电感 $L=100\mu\text{H}$ ,谐振电感 $L_r=8\mu\text{H}$ ,谐振隔直电容 $C_r=1\mu\text{F}$ ,电容 $C_{r1}=C_{r2}=0.1\mu\text{F}$ ,滤波电容 $C_1=C_2=470\mu\text{F}$ ,对主电路的开关管进行仿真对比。

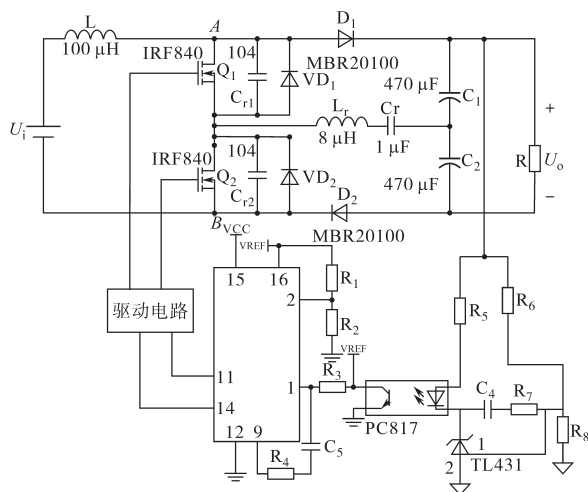


图3 测试电路图

Fig.3 Diagram of test circuit

原来不加谐振电路的开关管 $Q_1$ 两端电压和电流的波形如图4所示,通过图4可以看出 $Q_1$ 的开通和关断均是硬开关过程,两端电压和电流存在重叠部分,有较大的开关损耗。

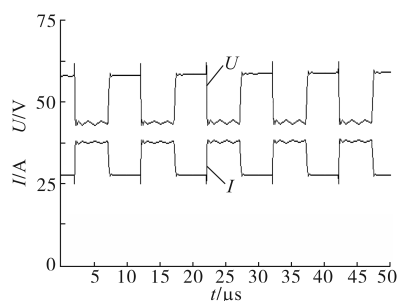


图4 无谐振电路波形图

Fig.4 Diagram of non resonant circuit waveforms

增加谐振电路后,开关管 $Q_1$ 两端电压和电流波形及其放大后的波形如图5所示。由图5可以看出, $Q_1$ 能够实现零电压开通和零电压关断,并且开关管的电流呈现谐振现象,能够实现软开关技术。

通过图4和图5的对比,增加了谐振电路后开关管能够实现软开关技术,达到减小开关损耗的目的。实验验证设计的谐振腔能够有效实现软开关技术,在燃料电池三电平Boost变换器中对消除硬开关、提高系统整体的效率有着重大意义。

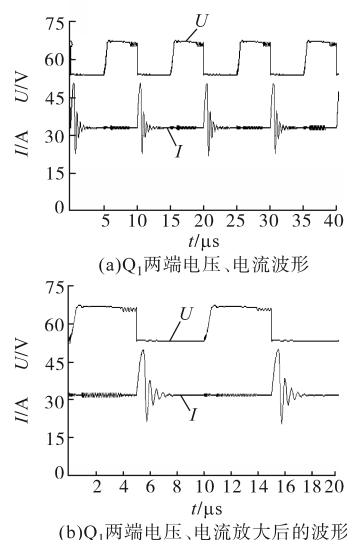


图5 带谐振电路波形图

Fig.3 Diagram of waveforms with resonance circuit

## 4 结论

根据燃料电池的特性,分析了电动汽车燃料电池三电平Boost变换器开关管存在着硬开关过程,在输出电压高、输出电流大的情况下开关损耗较大,不利于系统整体效率的提升。设计了带有谐振腔的三电平Boost电路,通过仿真实验进行对比验证,带有谐振腔的三电平Boost电路能够有效实现软开关技术,减小开关损耗,提高系统整体效率。同时,设计的谐振腔在其他带有软开关技术的电路中具有一定的推广借鉴意义。

## 参考文献

- [1] 陆治国,马召鼎,邓文东.一种适用于燃料电池系统的DC/DC变换器[J].电力电子技术,2010,44(9):14-15.
- [2] 阮新波.三电平直流变换器及其软开关技术[M].北京:科学出版社,2006.
- [3] 冯海兵,于月森,戚文艳.三电平Boost变换器软开关技术的研究[J].电源学报,2012,10(2):84-89,94.
- [4] 陈剑飞.多电平Boost变换器拓扑结构及其控制策略研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [5] Roberto M Finzi Neto, Fernando L Tofoli. A Soft Switching ZCS-ZVS Double Two-switch Forward Converter[J]. Electrical Engineering, 2018, 100(2): 1229-1241.

收稿日期:2018-06-25

修改稿日期:2018-11-15