

# 基于 LLC 的大功率智能充电器研究

杨帆,姜燕

(武汉工程大学电气信息学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:**阐述半桥 LLC 谐振电路的工作原理和特点,并且用 MATLAB 对 LLC 谐振进行了仿真,分析了其工作区域.在此基础上,运用 NCP1653 提供 PFC 电路, NCP1396(压控震荡器)为电路提供保护功能,单片机芯片 S3F84K4 通过编程为电路提供智能控制,设计了一款大功率智能充电器.通过测试,该款充电器能很好的实现充电功能.

**关键词:** LLC; 谐振; 智能充电器; 功率

**中图分类号:** TP 212

**文献标识码:** A

## 0 引言

充电器与人们的日常生活密切相关,充电器充电性能的好坏与被充电电池的使用寿命、充电效率等息息相关.由于外界温度变化,电网电压波动,因而大大降低了充电器充电性能的稳定性,这就需要有一种能自我调节的系统,遇到外界干扰能实时做出回应,保证充电的稳定性,不损坏被充电的电池.智能控制在此能提供一种很好的解决方案<sup>[1]</sup>.电源行业已经开始在其产品中运用智能控制,通过单片机的编程对过压、过流情况做出判断,为电池提供保护. LLC 谐振变换器在充电器的运用也是越来越多, LLC 谐振变换器的拓扑本身具有一些优越的性能,可以实现原边开关管在全负载下的零电压软开关(ZVS(Zero Voltage Switch)),副边整流二极管电压应力低,因此高输出电压的情况下可以实现较高的效率等.这使得 LLC 谐振变换器特别适合高输出电压的应用场合.今后电源的发展方向是用单片机来完成所有功能,包括:脉宽调控、反馈、过压过流保护等等<sup>[2]</sup>.

下面介绍的就是一款应比亚迪公司(BYD)的要求,设计出的一种基于单片机的智能充电器.该充电器对充电过程进行智能控制,系统中的管理电路还具有保护功能,可防止电池的过充和过放对电池造成损坏.

## 1 LLC 谐振变换器

本充电器设计中要考虑整流滤波、能量转换,电路保护、软件设计等.而 LLC 谐振变换器是能

量转换中最重要的部分,关系到充电器性能的好坏.下面着重介绍其基本结构、数学模型及时序分析.

### 1.1 LLC 谐振变换器的基本结构

图 1 所示为 LLC 谐振变换器的原理图.串联谐振电感  $L_r$ 、串联谐振电容  $C_r$  和并联谐振电感  $L_m$ ,构成 LLC 谐振网络, $C_r$  也起到隔直作用<sup>[3]</sup>.在变压器次级,整流二极管直接连接到输出电容  $C_o$  上.

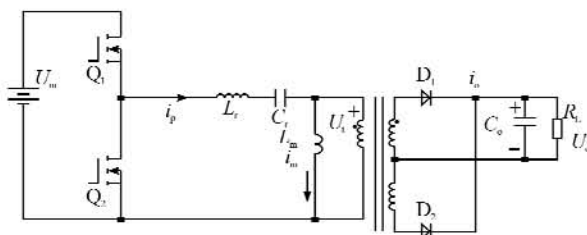


图 1 LLC 谐振变换器的原理图

Fig. 1 Principle picture of resonant converter about LLC

当发生谐振时, LC 的本征谐振频率为

$$f_1 = 1/(2\pi \sqrt{L_r C_r}) \quad (1)$$

当  $L_r$ ,  $C_r$  和  $L_m$  发生谐振时, LLC 本征谐振频率为

$$f_2 = 1/(2\pi \sqrt{(L_m \parallel L_r) C_r}) \quad (2)$$

由式(1)、(2)可知  $f_1 > f_2$ , 当负载  $R_L$  变化时, 可以调节开关( $Q_1$ 、 $Q_2$ )频率在  $f_1$  和  $f_2$  间变化, 使品质因数达到最大. 利用这种特性, 可以方便地实现脉冲频率模式 PFM(Pulse Frequency Model), 品质因数表示如下:

$$Q = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R_L} \quad (3)$$

LLC谐振网络需要两个磁性元件  $L_r$  和  $L_m$ 。然而,考虑到高频变压器实际结构,可以把磁性元件  $L_r$  和  $L_m$  集成在一个变压器内,利用变压器的漏感作为  $L_r$ ,利用变压器的磁化电感作为  $L_m$ ,这样一来,可以大大减少磁性元件数目。在设计时,只要重点设计变压器的漏感与变压器磁化电感即可。因此,为增加漏感,需要在变压器中加入适当的气隙,并且控制变压器原、副边的绕线方式可以提高品质因素。

### 1.2 LLC的数学模型分析

通过上述分析,由图1的LLC谐振变换器的原理图得其LLC等效模型如图2所示。

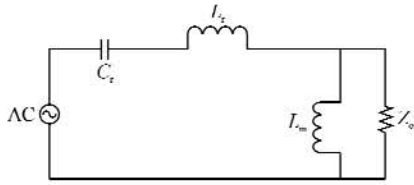


图2 LLC原理图的等效模型图

Fig. 2 Equivalent model of LLC principle picture

电压传递函数为

$$M(S) = \frac{L_m Z_o C_r S^2}{L_r C_r L_m S^3 + (L_r C_r Z_o + L_m C_r Z_o) S^2 + L_m S + Z_o}$$

$$= \frac{n^2 \left(\frac{s}{\omega_o}\right)^2}{\left(\frac{\pi^2}{8}\right) Q \left(\frac{s}{\omega_o}\right)^3 + (1+\lambda) n^2 \left(\frac{s}{\omega_o}\right)^2 + \left(\frac{\pi^2}{8}\right) Q \left(\frac{s}{\omega_o}\right) + n^2 \lambda}$$

(4)

其中:  $Z_o = \frac{8}{n^2} n^2 R_L$ ,  $\lambda = \frac{L_r}{L_m}$ ,  $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} Q$  为品质因数。

数。

利用MATLAB对该模型进行仿真,可以初步分析出其工作特性如图3所示。其中  $f_s$  为启动频率(Start Frequency)  $f_r$  为谐振频率(Resonant Frequency)。

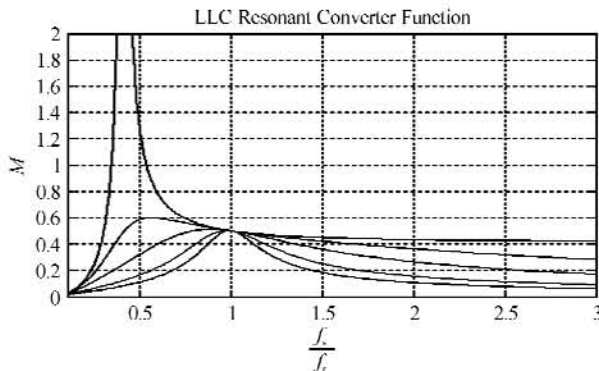


图3 LLC谐振工作特性

Fig. 3 Operational factor about LLC resonant

从图3中可以看到,在整个频率范围内,既有降

压的工作区域( $M < 1$ ),也有升压的工作区域( $M > 1$ ),此LLC谐振有着较大的应用范围。在轻负载时,工作频率逐渐升高,工作在降压区域内;而在重负载时,工作频率逐渐降低,工作在升压区域内。由图3可知,串联谐振的工作区域应该为  $f_s/f_r > 1$ ,才能工作在ZVS的状态。在不同负载下,为获得ZVS的工作条件,只要使之工作在  $f_s/f_r > 1$  的右侧即可。而LLC谐振不仅仅局限于  $f_s/f_r > 1$  的区域,在某些负载下可以工作在  $f_s/f_r < 1$  区域。同样可以获得零电压转换的工作状况。并且与串联谐振相比,在不同负载时的频率变化范围更小。

### 1.3 LLC谐振变换器的时序分析

LLC谐振变换器由两个主开关管  $Q_1$  和  $Q_2$  构成,其驱动信号是占空比固定为0.5的互补驱动信号。为了保证原边功率MOS管的ZVS,副边二极管的ZCS(Zero Current Switch)都可以实现,工作频率在  $f_2 < f \leq f_1$  时,其工作波形图如图4所示。从图中可以看出LLC变换器工作在半个周期内可以分为三个工作模式<sup>[4]</sup>。

模式1( $t_0-t_1$ ):两个开关管( $Q_1$ 、 $Q_2$ )都截止,  $Q_1$  的反向二极管导通续流,  $L_r$  上的电流逐渐减小,变压器产生感生电流,向负载供电。反向二极管的导通将  $Q_1$  两端的电压钳位在零。

模式2( $t_1-t_2$ ):  $L_r$  上的电流在  $t_1$  时刻减小到零,  $Q_1$  在此时刻导通,  $L_r$  上的电流反向增大,达到峰值后减小。  $L_m$  上的电流先减小,然后反向增加。可以看出,  $t_1$  时刻由于  $Q_1$  的反向二极管的钳位作用,  $Q_1$  的导通电压为零。此阶段只有  $L_r$  和  $C_r$  进行谐振。

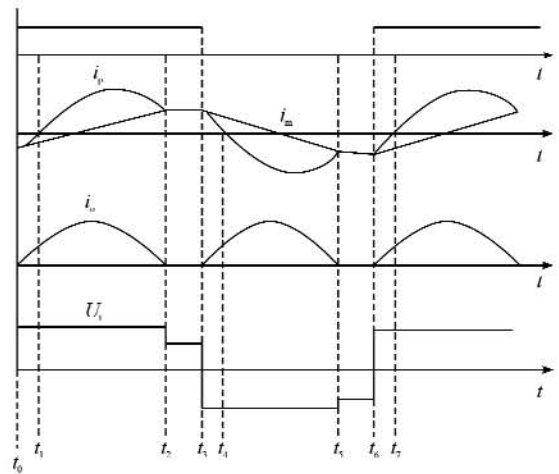


图4 工作时序波形图

Fig. 4 Wave form pursues job sequence

模式3( $t_2-t_3$ ):  $L_m$  上的电流在  $t_2$  时刻与  $L_r$  上的电流相等,此时流过变压器的电流为零,负载

与变压器被隔离开。 $Q_1$ 在此时刻关断, $Q_2$ 的反向二极管导通续流。此阶段  $L_m$  也加入到谐振部分,与  $L_r$  和  $C_r$  串联组成谐振回路。

在下半个周期中,电路的工作与上半个周期刚刚相似,只是方向相反。整个周期的电路工作波形:在上半个周期中,开关管  $Q_1$  为零电压导通,而  $Q_1$  在  $t_3$  时刻的关断电流  $i_m$  很小;在下半个周期中,开关管  $Q_2$  为零电压导通,而  $Q_2$  在  $t_6$  时刻的关

断电流  $i_m$  很小,所以  $Q_1$ 、 $Q_2$  工作时的开关损耗很小。

## 2 充电器硬件设计

经过上面的分析,设计中采用电流、电压负反馈的方法来达到恒流、恒压充电的目的,充电器硬件原理框图如图 5 所示。

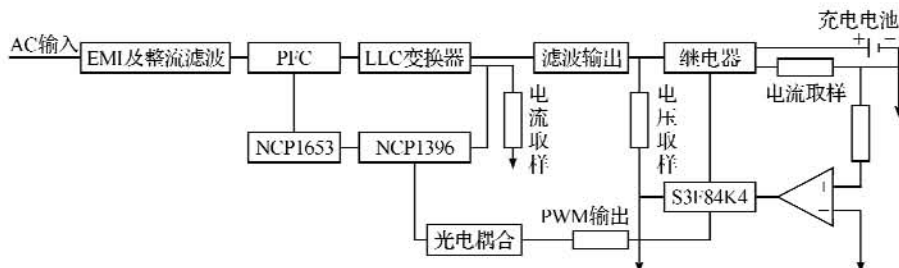


图 5 充电器的硬件原理框图

Fig. 5 The charger hardware principle block diagram

交流电经过滤波整流后,流向 NCP1653,由其提供 PFC(Power Factor Correction)操作,NCP1653 是一款连续导通型(CCM)的功率因数校正(PFC)升压式的上升控制电路,它的外围元器件数量很少,有效地减少了升压电感的体积,减小了功率 MOS 管的电流应力,从而降低了成本,且极大地简化了 CCM 型的 PFC 的操作,它还集成了高可靠的保护功能。NCP1396 电路为整个硬件电路提供保护(包括有反馈环路失效侦测、快速与低速事件输入,以及可以避免在低输入电压下工作的电源电压过低侦测等),NCP1396 的独特架构包括一个 500 kHz 的压

控振荡器,由于在谐振电路结构中避开谐振尖峰相当重要,因此为了将转换器安排在正确的工作区,NCP1396 内置了可调整且精确的最低开关频率,通过专有高电压技术支持,应用 S3F84K4 单片机实现智能充电器控制。

## 3 软件设计

为满足充电要求,该充电器软件设计除了完成充放电控制外,还具有过流保护、过压保护、过温保护、短路报警等功能模块<sup>[5]</sup>。主程序流程图如图 6 所示。

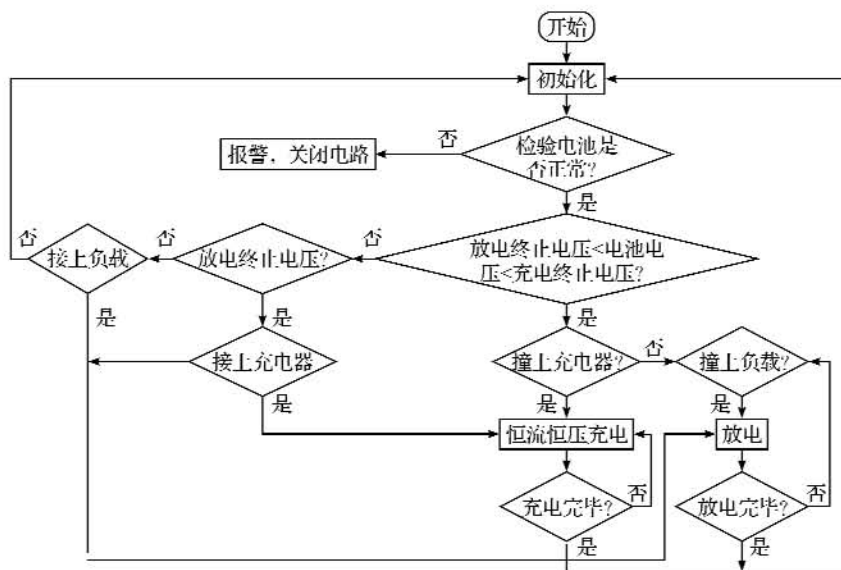


图 6 主程序流程图

Fig. 6 Master routine flow chart

程序开始执行后,首先进行初始化并检测电

入下一步。否则报警并关闭电路。如果电池电压在充电终止电压和放电终止电压之间,说明电池既

可充电也可放电,此时电路将判断接上充电机还是接上负载,以进行相应的充电和放电。如果两者都没有接则循环检测过程。若电池电压已经达到充电终止电压,则等待负载的接入进行放电;同样若电池电压已经达到放电终止电压,则等待充电器的接入以进行充电。在整个过程中,该电路将始终实时检测电池信息,若有异常情况发生,则立即利用中断信号终止正在进行的充电或者放电过程,关断充放电回路,同时进行报警并提示报警原因。

## 1 测试结果

本充电器的各项指标如下:

- (1)输入电流:50/60 Hz.
- (2)AC/DC 输出电压 48 V, AC/DC 输出电流:5.0 A.
- (3)恒流充电电流:4.5 A.
- (4)恒压充电电压:45 V(AC).
- (5)环境温度:—5~45 °C.

经分析,按上述设计和分析结果,最后选定 LLC 的参数  $C_r=0.043\ 055\ \mu\text{F}$ ,  $L_r=72.636\ 09\ \mu\text{H}$ ,  $L_m=435.816\ 5\ \mu\text{H}$ .

本智能充电器经测试,充电保护措施可靠,充电状态准确,充电时间约为 6 h,如果需要进一步缩短充电时间,只需在初始化时设定更大的充电电流即可。因为采用 PWM 控制器,所以,充电效率可以达到 92% 以上,最低时在 85% 左右<sup>[6]</sup>。根据实际需要,要想达到理想的充电效率,对充器件做

进一步的精确要求。

## 5 结 语

在智能充电器控制系统设计过程中,主要侧重点是保证充电器对充电电池电压的精确控制,设计中元器件的选型也都是围绕着重来完成。经过实验电路的实际测试,由电源变压器、整流电路、滤波电路及稳压电路构成 AC/DC 变换电路。在 NCP1653、NCP1396 与 S3F84K4 的配合控制下可实现很高的系统精度。

参考文献:

- [1] 赵振华. 橡胶硫化温度的模糊控制[J]. 武汉工程大学学报, 2008, 30(4): 93-95.
- [2] Yang Bo, Lee F C, Matthew Concannon. Over Current Protection Methods for LLC Resonant Converter[J]. IEEE Applied Power Electronics Conf and Exposition, 2003, (2): 605-609.
- [3] Yang Bo, Lee F C, Zhang A J, et al. LLC resonant converter for front end DC/DC conversion[A]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. Dallas, USA: 2002, 1108-1112.
- [4] 杨宁, 胡学军. 单片机与控制技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [5] 吴成明. 可充电电池及其充电器的发展方向[J]. 浙江农村技术师范专科学校学报, 1998, (1): 55-59.
- [6] 杨帆, 刘畅. 基于 D-S 证据理论的多传感器目标识别应用[J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(1): 73-75.

# The research of high-power intelligent charger based on LLC

YANG Fan, JIANG Yan

(School of Electrical and Information, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, 430074, China)

**Abstract:** The paper described the principle of work and feature about half bridge LLC resonant circuit, then simulated LLC resonant with Matlab. The authors analyzed its work area. On this basis, the paper provided PFC circuit by using NCP1653, NCP1396 (voltage-controlled shaker) provided circuit with protection function, single chip S3F84K4 provided circuit with intelligent control through programming, designed a kind of high efficiency intelligence battery charger. Through test, the Charger better achieve its functions.

**Key words:** LLC; resonant; intelligent battery charger; power

本文编辑:陈晓革