基于电荷控制方式的 CCM 反激 PFC 电路的设计

Design of CCM Flyback PFC Circuit Employing Charge Control

王俊　豆飞进　穆新华　南京航空航天大学航空电源重点实验室(南京 210016)

Wang Jun　Doufei-Jin　Muxin-hua

The Aeronautics Power Supply Center of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics(210016)

摘　要:介绍了电荷控制方式的 CCM 反激 PFC 电路的工作原理,研究了它的一些基本特性,并给出了电路设计步骤,研制了一台 200W 样机.实验结果表明该电路方案简单,成本低,输入功率因数高,适用于中小功率应用.具有良好的应用前景.

叙　词:电荷控制　反激变换器　PFC

Abstract: In this paper, Charge control is applied to a flyback converter for the purpose of power factor correction(PFC). The properties of charge control related to flyback PFC application are studied. The design guidelines are presented and a 200W prototype circuit was built. The experiment results show its simplicity and low cost as well as good prospects of application.

Keywords: Charge control　Flyback　PFC

1　引言

由于用户对电能质量要求的提高,市场对具有 PFC 功能的 AC/DC 电源的需求激增。目前,PFC 电路中较常用的为 BOOST 和 FLYBACK 两种变换器,在大功率应用中 BOOST 变换器依靠现有的控制方式能控制升压电感的平均电流跟踪正弦参考电压,为首选拓扑;在中小功率应用中,反激拓扑以其简单灵活的特点较 BOOST 电路更具优势,它解决了隔离和软启动及短路保护问题,并且输出电压可低于输入电压。反激 PFC 的难点在于如何控制输入电流使变换器工作在电流连续状态,并在同样的器件定额下,使 CCM 反激比 DCM 反激能输出更大的功率。反激变换器工作在 DCM 时,定占空比便可获得单位功率因数。但 DCM 模式有如下缺点:EMI 滤波器过大;开关应力大:管子导通损耗大。

应用电荷控制方式能准确控制输入的平均电流,使反激变换器工作于电流连续模式并获得单位功率因数。

2　电荷控制的基本原理

所谓电荷控制就是在一个开关周期内对流过主开关管电流的检测信号积分,得到表征输入总电荷量的电压信号,通过控制这一电压去控制输入的总电荷量即控制输入的平均电流。应用于反激 PFC 的电荷控制的基本原理图及关键波形如图(1)所示:

主开关 S_1 在每个开关周期开始时闭和,与此同时,S_2 断开,开关电流 I_s 被检测并给电容 C_t 充电,当电容电压增至 V_c 时,S_1 断开,同时闭和 S_2 对 C_t 放电,电压 V_t 表征了一个开关周期内流过主开关的总电荷量,定频工作时,V_t 与开关电流的平均值成比例,因此,当 V_c 为工频输入电压参考信号时,那么输入的平均电流便严格的跟踪输入参考的电压信号,即实现了功率因数校正功能。

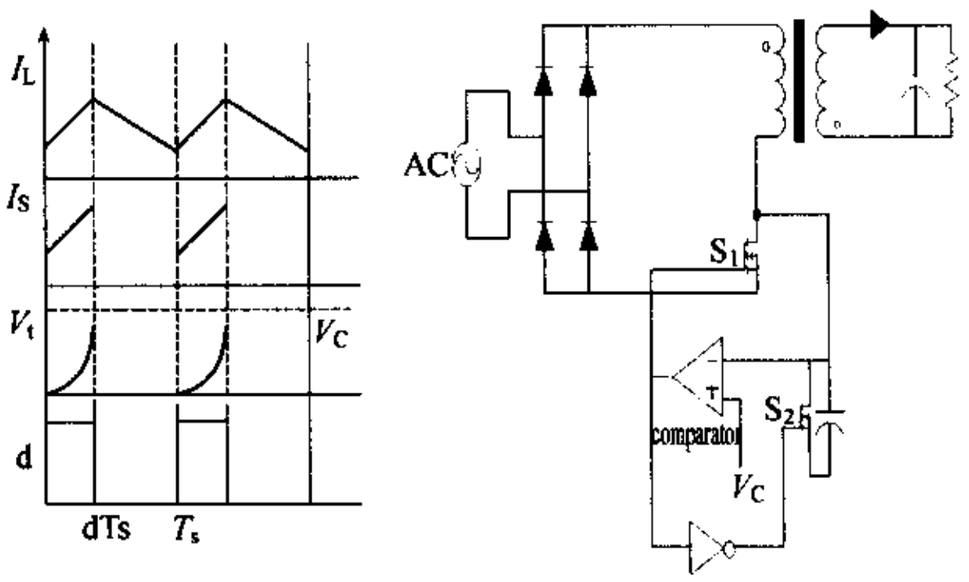


图 1　电荷控制的基本原理图及关键波形

3　功率电路和控制电路的参数设计

基于电荷控制方式,设计制作了一台 200w 的反激 PFC 变换器,其完整的电路图及参数如图 2 所示。

下面将介绍其参数的设计方法。

变换器的输入输出指标

输入电压:90VAC – 260VAC

输出电压:48VDC

最大输出功率:200W

开关频率:100KHz

3.1　功率电路参数设计

功率部分主要是设计反激变压器,根据给定参数设计匝比和激磁电感,以及开关管峰值电流的最大值。

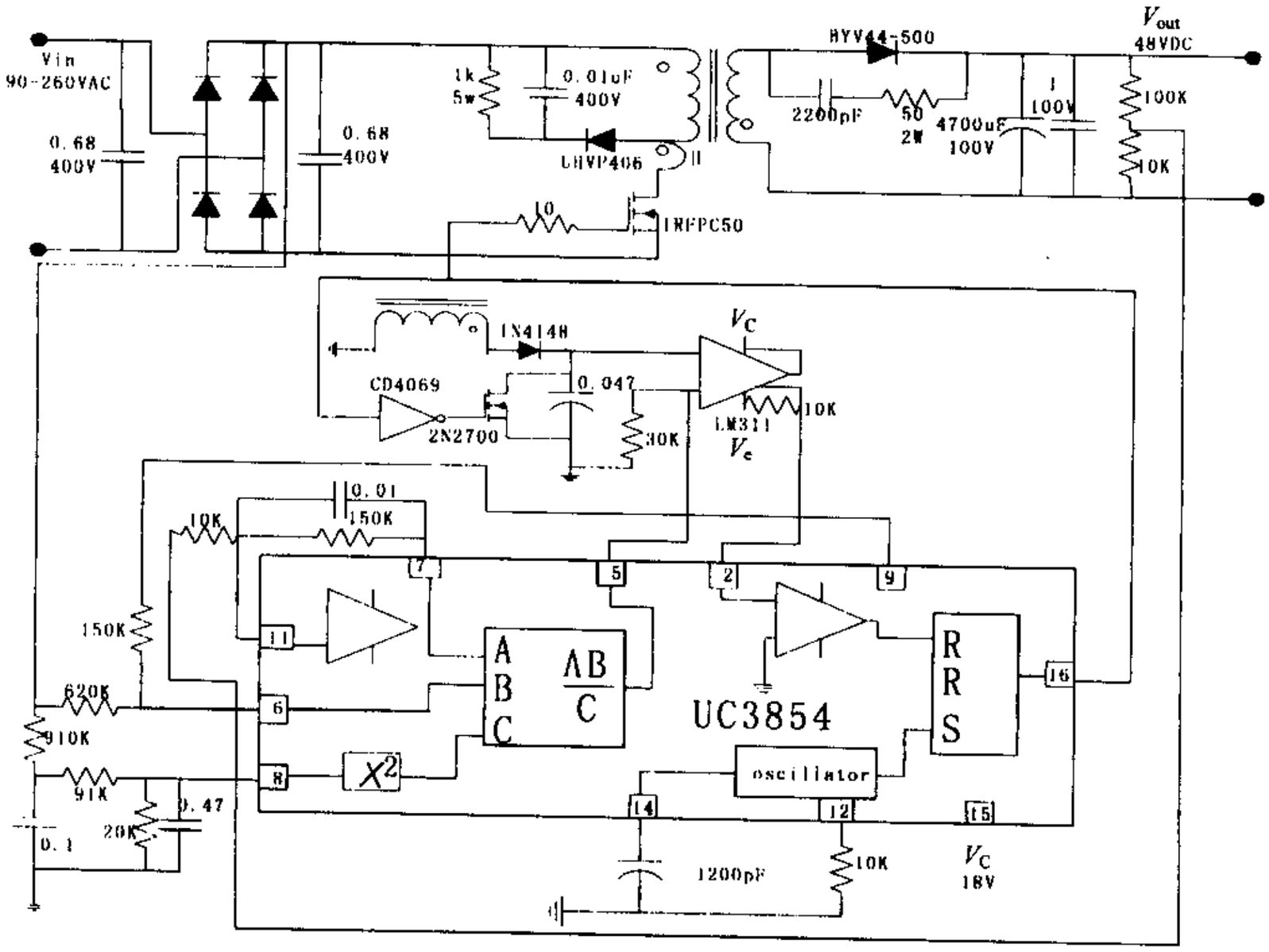


图 2　完整的电路图及参数

① 变压器变比由主开关管和整流管的最大电压应力确定：

$V_{DS} = V_{IP,MAX} + NV_O$，$V_D = V_O + \frac{V_{IP,MAX}}{N}$ VDS 为主开关管的电压应力，V_D 为整流管的电压应力，对于给定的输入输出电压选定 N = 3，以便使整流管使用肖特基管，对应的 V_{DS} = 512V，V_D = 170V。

② 变比 N 确定以后，便由下式确定最小占空比的范围：

$$D_{MIN}^{H} = \frac{V_O}{V_O + \frac{V_{IP,MAX}^{L}}{N}} = 0.53$$

$$D_{MIN}^{L} = \frac{V_O}{V_O + \frac{V_{IP,MAX}^{H}}{N}} = 0.28$$

输入电压最低时，对恒功率负载，输入电流峰值最大，且为 $I_{IP,MAX}$；

$$I_{IP,MAX} = \frac{\sqrt{2}P_O}{V_{IN,MIN}\eta} = 3.7A$$ η 为变换器效率，P_O 为输出功率，$V_{IN,MIN}$ 为输入电压有效值的最小值，若输入电流纹波峰峰值按输入电流的 20% 计算，则所需激磁电感量由下式确定，

$$\frac{V_{IP,MIN}}{L} D_{MIN}^{H} T_S = 20\% \frac{I_{IP,MAX}}{D_{MIN}^{H}}, L = 418\mu H$$

③ 相应最大开关电流为 $I_{S,MAX}$，

$$I_{S,MAX} = \frac{I_{IP,MAX}}{D_{MIN}^{H}} + \frac{V_{IP,MIN}}{2L} D_{MIN}^{H} T_S = 7.7A$$

3.2　箝位电路设计

箝位电路一般有 RCD 箝位和有源箝位两种方式，RCD 电路简单，但缺点是降低了变换器的效率，而有源箝位电路复杂，并且由于反向回流电流降低了输入功率因数，但其效率较高，综合考虑整个变换器的成本和效率以及电路复杂程度，这里选用一般的箝位电路 RCD 箝位。

经测量变压器漏感为 $L_r = 6\mu H$，箝位电路中的电容电压最低为 V_{RESET}，其中 $V_{RESET} = N_{VO} = 144V$，取其波动电压的最大值为 $\Delta V = 100V$，则电容 C 的容值由下式计算：

$$C = \frac{L_r I_{SP,MAX}^2}{(V_{RESET} + \Delta Vr)^2 - V_{RESET}^2} \approx 0.01\mu F$$

吸收电阻按以下经验公式计算：

$$RC = 0.4T \frac{V_{RESET} + \Delta V}{\Delta V}, R \approx 1K\Omega$$

吸收功率最大为 $P = \frac{1}{2} L_r I_{SP,MAX}^2 \approx 5W$

3.3　控制电路设计

控制电路采用 PFC 专用芯片 UC3854 和适当外围电路。在这里我们选用 UC3854 的一部分功能，UC3854 的乘法器输出电压作为电荷量的给定信号，积分电容上的电压 Vt 与乘法器输出电压经 LM311 比较得出翻转信号，将此信号送给 UC3854 的过流保护端子 2 脚，便得到对应的占空比输出，这里不使用其电流环上的误差放大器，UC3854 的输出经反向后驱动积分电容上并联的

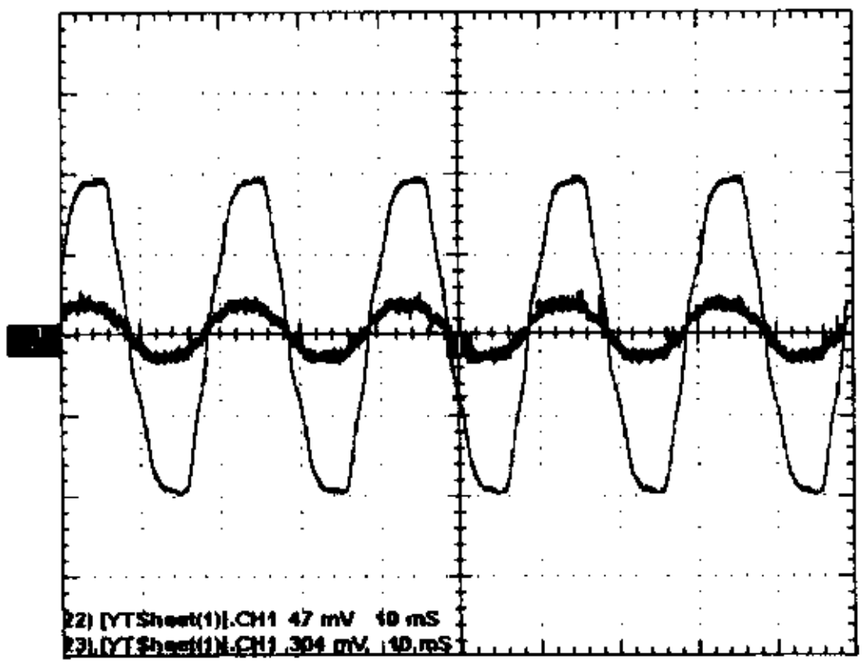


图 3　输入电流(22)与电压(23)波形

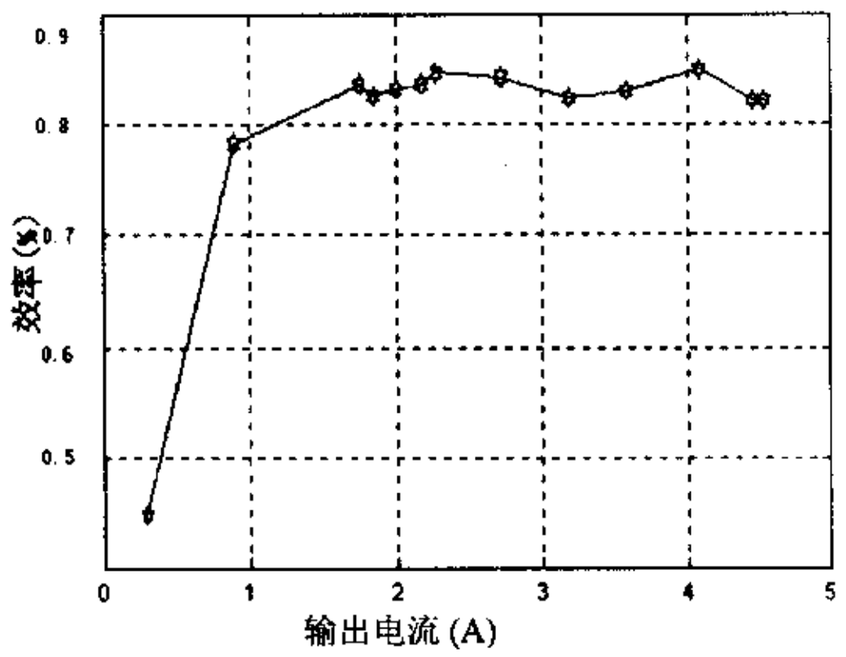


图 4　效率随出电流变化关系图

开关管保证主开关管断开时,将积分电容上的电荷放掉,从而实现了对主开关管电流的准确积分,其中积分电容 Ct 的值需满足下式:

$$\frac{\frac{1}{Ct}\int_0^{DTs} isdt}{N'} \leqslant V_{CMAX}$$

$N' = 100$ 为电流互感器匝比,V_{CMAX} 为乘法器输出的最大电压,这里取 $C_t = 68nF$。

控制电路中其他参数设计均与 BOOSTPFC 中的控制参数设计方法相同,在不在赘述。

4　电荷控制的反激 PFC 电路的实验结果

本文试制了一台样机,图 3 为市电输入电压满载时的输入电压和电流波形。效率随输出电流变化的特征曲线如图 4 所示,当输入电压较高时,半载至满载时,都能使效率保持在 80% 以上,功率因数半载时达 0.990,满载时达到 0.992。

5　总结

本文介绍了电荷控制的基本原理,并将电荷控制方式应用于 CCM 反激功率因数校正电路中,并给出了电路设计方法,CCM 反激 PFC 有如下特点:

+ 功率电路简单
+ 输出电压可以低于输入电压
+ 可以解决隔离、软启动和短路保护的问题
- 输出功率因管子的电压、电流应力过大而受到限制

变压器漏感能量是引起管子电压应力过大的主要因素,解决漏感能量的循环与吸收问题是提高 CCM 反激 PFC 功率与效率的关键。

参考文献

[1] W. Tang, Y. M. Jiang, G. Hua, F. C. Lee, "Power factor correction with flyback converter employing charge control," VPES Power Electron. Sem. Proc, pp91-96, 1992.

[2] 张占松,蔡宣三。开关电源的原理与设计[M]。北京:电子工业出版社,1999

作者简介

王俊,男,湖北荆州人,硕士研究生,研究方向为电源技术和功率变换技术。

(上接第 257 页)

作者简介

谢仁践,男,硕士研究生,专业方向为电力电子技术及其应用,研究方向为单级 PFC 电路的研究。

张波,男,博士,教授,博导。从事电力电子技术的研究,目前研究方向为 PFC 电路的研究。

谢仁践,张波,广州市华南理工大学电力学院 2000 级研究生。