

# 荧光灯镇流器谐振环的频域分析与设计

## Analysis and Design of Electronic Ballast's Resonant Circuit

(上海交通大学)熊鹰 徐迪 孙康  
Xiong, Ying Xu, Di Sun, Kang

**摘要:**电子镇流器与荧光灯的匹配是一个重要又复杂的问题。要使照明系统工作于最佳状态,镇流器谐振电路的设计至关重要。本文将电子镇流器谐振电路的设计进行理论分析,给出设计方法,并通过仿真和实验验证其合理性。

**关键词:**电子镇流器;谐振电路;频域分析;仿真

**中图分类号:**TM92 **文献标识码:**A

**Abstract:**It's difficult but crucial for electronic ballast to match the fluorescent lamps. The design of the ballast's resonant circuit is one of the key points to make sure the lighting system working at the best state. Some analysis based on frequency domain theory for resonant circuit is presented in this paper, and also gives a design method. Results of simulation and experiment show the effectiveness of this method.

**Key words:**Electronic Ballast, Resonant circuit, Frequency domain analysis, Simulation

### 引言

荧光灯电子镇流器是以荧光灯为负载的具有特殊性能的交-直-交(AC-DC-AC)变换器,为了使由电子镇流器和荧光灯组成的照明系统工作于最佳状态,电子镇流器的设计必须以荧光灯负载的灯特性为依据。研究表明,为了提高荧光灯光效,延长灯寿命,在荧光灯灯丝预热、点火和正常工作各个状态,施加在灯两端的高频交流电压的频率和幅值也应该根据荧光灯的工作状态不同而相应发生变化。镇流器电路中的直流-交流逆变电路和谐振电路的工作状态直接决定荧光灯的工作状态,而荧光灯在不同的工作状态其等效电路模型也不相同,因此,对电子镇流器的逆变电路和谐振电路进行理论分析有重大意义。

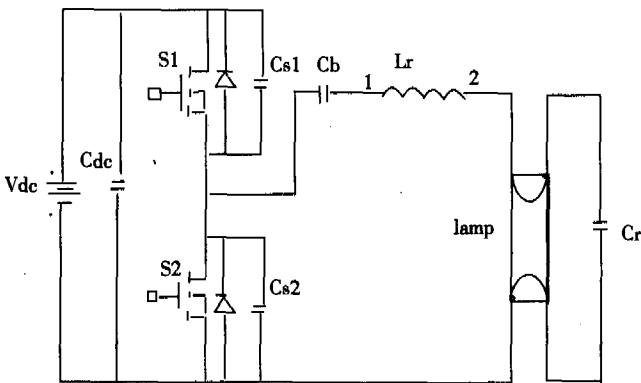


图1 镇流器D类串并联谐振转换器

### 1 镇流器逆变谐振电路简介

常用于镇流器的逆变拓扑结构有很多种,根据输

入电压,负载功率以及成本考虑而可以选择反激(Fly-back)、推挽(Push-Pull)和半桥(Half bridge)等拓扑结构,国内常用的是半桥拓扑结构。谐振电路包括串联谐振、并联谐振以及串并联谐振电路,整流器电路中常用的是串并联谐振电路。半桥拓扑的逆变电路和串并联谐振电路可以组成镇流器电路中常用的D类串并联谐振转换器,如图1所示:

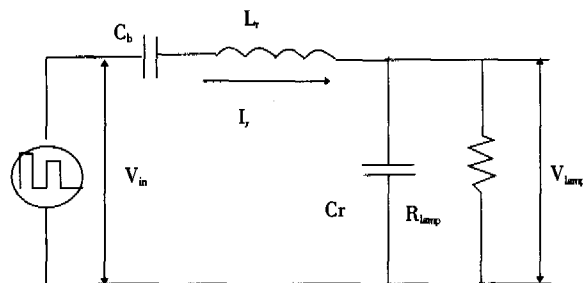


图2 镇流器谐振电路简化电路

图中Vdc是由前级整流模块以及功率因数校正(PFC)模块提供的直流电压,通常为400v。经过开关管S1、S2接近50%占空比的轮流导通,为LCR谐振电路提供接近方波的输入电压。Cb为隔直电容,在谐振回路的计算中可以忽略不计。Lr、Cr为谐振电感和谐振电容,它们是在设计中要得到的主要参数。在预热阶段,荧光灯灯管两端的等效电阻很大,只有很小的灯丝电阻和Lr、Cr发生串联谐振,谐振电路可以在灯管两端形成很高的点火电压。荧光灯点燃后,进入正常运行阶段,灯管内电弧等效电阻Rlamp在几百欧姆左右,灯丝电阻可以忽略不计。Rlamp和Lr、Cr发生串并联谐振,在灯管两端施加40KHz左右的高频正弦

熊鹰:硕士研究生

电压。谐振电路等效简化电路如图2所示。

## 2 谐振电路频域分析

以下几个参数为给定或者已知:

(1)镇流器满功率工作角频率  $\omega_s$ ; (2)逆变桥直流输入电压  $V_d$ ; (3)荧光灯标称功率  $P_{lamp}$ ; (4)荧光灯额定工作电压  $V_{lamp}$ ;

待求参数包括:

(1)谐振环参数  $L_r, C_r$ ; (2)谐振环转折频率  $\omega_0$ ; (3)谐振电路品质因数  $Q_L$ ;

根据图2所示的简化等效电路,可以得到

$$\frac{V_{lamp}}{V_{in}} = \frac{R_{lamp} // C_r}{L_r + R_{lamp} // C_r} \quad (1) = \frac{\frac{R_{lamp}}{1 + j\omega_s C_r R_{lamp}}}{j\omega_s L_r + \frac{R_{lamp}}{1 + j\omega_s C_r R_{lamp}}} \quad (2)$$

$$= \frac{1}{1 - \omega_s^2 L_r C_r + j \frac{\omega_s L_r}{R_{lamp}}} \quad (3)$$

则灯管两端电压的有效值和谐振环输入电压有效值之比为:

$$\left| \frac{V_{lamp}}{V_{in}} \right| = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega_s^2 L_r C_r)^2 + \left( \frac{\omega_s L_r}{R_{lamp}} \right)^2}} \quad (4)$$

由谐振环的转折频率  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$  (5)及谐振电路

的品质因数  $Q_L = \frac{R_{lamp}}{\sqrt{L_r / C_r}}$  (6)

可得  $\left| \frac{V_{lamp}}{V_{in}} \right| = \frac{1}{\sqrt{\left[ 1 - \left( \frac{\omega_s}{\omega_0} \right)^2 \right]^2 + \left( \frac{\omega_s}{\omega_0} \right)^2 \frac{1}{Q_L^2}}} \quad (7)$

给定不同的品质因数,则可以得到不同的频率比与电压比的关系,如图3所示:

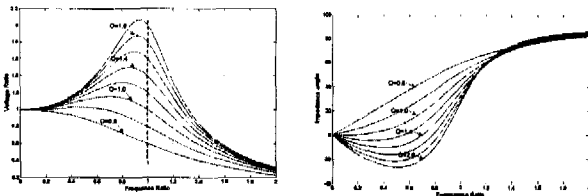


图3 电压比、频率比和品质因数的关系      图4 阻抗角与频率比和品质因数的关系

根据基波近似理论, 逆变桥输出方波的有效值为:  $V_{in} = 0.45 V_d$  (8)

将(8)式带入(7)式,则可以得到两个未知参数  $\omega_0$  与  $Q_L$  的关系,当其中一个给定以后,另外一个也就相应被确定。另外,联立(5)、(6)两式,可以得到另外两个未知参数的关系。

$$\begin{cases} \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \\ Q_L = \frac{R_{lamp}}{\sqrt{L_r / C_r}} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} L_r = \frac{R_{lamp}}{\omega_0^2 Q_L} \\ C_r = \frac{Q_L}{R_{lamp} \omega_0} \end{cases} \quad (9)$$

这样,由(7)和(9)可以得到四个未知量的三个关系,只要给定其中任何一个,就可以得到其他三个。理论上给定这四个参数的任何一个都可以,但实际操作时我们通常给定  $\omega_0$ , 给定  $\omega_0$  的原则为:在保证镇流器工作在感性负载和逆变桥实现软开关的前提下,尽量减小谐振电感电流以及尽量提高谐振回路的无功。电感电流可以表示为:

$$\dot{I}_r = I_{lamp} + I_{C_r} = \frac{\dot{V}_{lamp}}{R_{lamp}} + j\omega C_r \dot{V}_{lamp} = I e^{-j\varphi} \quad (10)$$

假设  $\dot{V}_{in}$  的相位角为零,  $-\varphi$  是  $\dot{I}_r$  的相位角,则谐振电路的阻抗角为  $\varphi$ , 可以得到谐振电路的阻抗角和频率比与品质因数的关系,如图4所示。为了实现开关器件的软开关,要求镇流器谐振电路工作在感性负载区域,即电压相位超前电流相位,因此  $\varphi$  要大于零。

推导电感电流的有效值如下:

$$|\dot{I}_r| = I_r = \left| \frac{P_o}{V_{lamp}} \right| \sqrt{1 + (\omega_s C_r R_{lamp})^2} I_r = \frac{P_o}{V_{lamp}} \sqrt{1 + \left( \frac{\omega_s}{\omega_0} \right)^2} Q_L^2 \quad (11)$$

谐振电路的阻抗角表达式如下:

$$\begin{aligned} \dot{I}_r &= I_{lamp} + I_{C_r} = \frac{\dot{V}_{lamp}}{R_{lamp}} (1 + j\omega_s C_r R_{lamp}) \\ &= \frac{R_{lamp} + j(\omega_s C_r R_{lamp}^2 - \omega_s^3 C_r^2 R_{lamp}^2 L_r - \omega_s L_r)}{(R_{lamp} - \omega_s^2 C_r R_{lamp} L_r)^2 + \omega_s^2 L_r^2} \dot{V}_{in} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{-\omega_s C_r R_{lamp} + \omega_s^3 C_r^2 R_{lamp} L_r + \frac{\omega_s L_r}{R_{lamp}}}{R_{lamp} - \omega_s^2 C_r R_{lamp} L_r} \right)$$

$$= \tan^{-1} \left\{ Q_L \left( \frac{\omega_s}{\omega_0} \right) \left[ \left( \frac{\omega_s}{\omega_0} \right)^2 + \frac{1}{Q_L^2} - 1 \right] \right\}$$

当镇流器负载为感性负载时, 即阻抗角为正是, 开关器件可能实现软开通,但不能实现软关断。如图1所示,假设当前开关管 S1 导通,S2 关断,则两个开关管中间点的电压为  $V_d$ ,S1 寄生电容  $C_{s1}$  上的电压为 0,S2 寄生电容  $C_{s2}$  被充满电, 电压为  $V_d$ , 若此时 S1 门极信号由高电平突变为 0, 则 S1 开始关断, $C_{s1}$  开始充电,同时  $C_{s2}$  开始放电,二者的电流和即为电感电流,当  $C_{s1}$  被充电到  $V_d$ , $C_{s2}$  放电到 0 时,S2 的体二极管开始导通续流, 此时 S2 两端的电压被钳位在  $-0.7V$ ,若在二极管续流期间施加 S2 的门极信号,则 S2 可以实现零电压开通, 由于谐振电流近似为正弦电流,当二极管电流逐渐减小直到续流结束,开关管可以实现自然换流, 则二极管可以实现零电流关断,而 Mosfet 可以实现零电流开通。这里就要求死区时间的设定与寄生电容充放电以及体二极管续流适当配合,可用式子定量表示如下:

$$\int_{\frac{T}{2} - t_d}^{\frac{T}{2} + t_d} i_r(t) dt \geq 2C_s V_d \quad (13)$$

其中  $i_r(t) = \sqrt{2} I_r \sin(\omega t - \varphi)$  且要求  $t_d \leq \varphi / \omega_s$  (14)

### 3 仿真与实验

以 T8/38w 荧光灯为负载,其灯参数如表 1 所示:

表 1

Plamp(W)	Vlamp(V)	Ilamp(A)	Frenquency(kHz)	Rlamp(ohm)
33.5	96	0.35	48	275

将表 1 中的参数带入式(7)、(11)可得电感电流有效值和频率比的关系如图 5 所示;将上表中的参数带入式(7)、(12)可得谐振电路阻抗角与频率比的关系如图 6 所示:

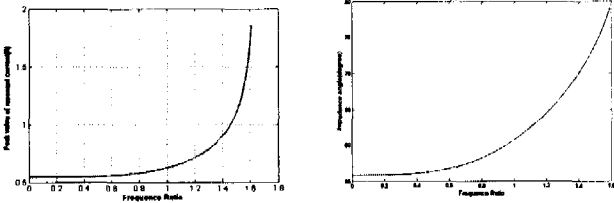


图 5 电感电流与频率比的关系 图 6 阻抗角和频率比的关系

图 5、图 6 可以用来指导  $\omega_0$  或者  $Q_L$  的选取,将(11)(12)式推导出的电感电流有效值及相位角带入(13)(14)式验算,频率比在 1.05-1.6 的范围内,(13)(14)式均能成立,考虑到减小电感电流,可以取频率比为 1.1,则可计算出  $L_r=2mH, C_r=9.3nF$ 。 $C_s$  为所选 Mosfet 的 DS 极之间的电容(包括 Mosfet 输出电容和并联在开关管 DS 之间的电容,这里 Mosfet 的输出电容为 49pF,并联电容为 400pF,取  $C_s=450pF$ ,选取  $t_d=1.5\mu s$ 。采用 Pspice 仿真验证以上参数,波形(已经调整为便于观测的比例)如图 7 所示;实验波形如图 8 所示:

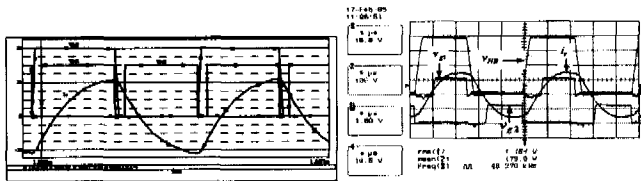


图 7 仿真电流电压波形 图 8 实验电流电压波形

### 4 结语

仿真和实验结果表明以上理论和设计方法是可行和有效的,为镇流器的设计提供了一种新的设计方法,具有一定的实际指导意义。

参考文献:

[1]L.C. Gomes de Freitas ; E.E.A.Coelho, "A Single-Stage PFC Converter Applied as an Electronic Ballast for Fluorescent Lamps" IEEE Transactions on Power Electronics 2004  
 [2]R.N.do prado, A.R.Seidel, F.E.Bisogno, "A design method for electronic ballast for fluorescent lamps" IEEE Transactions on Power Electronics 2000  
 [3]赵建强,姚素芬. 光电自动跟踪控制系统的智能 Fuzzy-PI 控制[J]微计算机信息,2005,7:83-85  
 [4]R.L.Steigerwald. "A comparison of half-bridge resonant converter topologies". IEEE Transactions on Power Electronics 1993

作者简介:熊鹰,汉,性别:男,1981 年 9 月生,上海交

通大学电子信息与电气工程学院硕士研究生二年级在读,专业为电工理论与新技术,目前在飞利浦照明电子有限公司上海全球研发中心(实习,研究方向为电力电子技术在照明电子中的应用。Email:xiongying1981@sju.edu.cn;葛万来,汉,男,1963 年 10 月生,上海交通大学电路理论硕士毕业,1986 年至今在上海交通大学电工与电子技术教研组从事电路、电机、电子技术与电工学教学工作。研究方向:电力电子。

(200240 上海交通大学电子信息与电气工程学院)熊鹰 徐迪 孙康

通讯地址:

(200240 上海交通大学闵行校区 B0303193 班)熊鹰

(投稿日期:2005.8.26) (修稿日期:2005.9.6)

(接 106 页)大学出版社,2003.10,125~195.

[5]金元郁,庞中华,崔红. 多变量广义预测控制的快速算法[J]微计算机信息,2005,3:38-40

[6]S3C44BOX-RISC-MICROPROCESSOR.-SamsungElectronics 用户手册[S].2002.9

作者简介:李红岩(1980-)籍贯:山东东阿 男,工学硕士,研究领域为:控制理论与控制工程. 智能控制;侯媛彬(1953-)籍贯:陕西 女,博士,博士生导师。研究领域为:控制理论与控制工程,智能控制。王秀(1965-),籍贯:河北 男,博士,研究员。研究领域为:精细农业智能信息系统集成技术。尹慧敏(1982-),籍贯:山西 长治 女,工学硕士,研究领域为:信号与信息处理。

**Author brief introduction:**Li, Hongyan(1980-) Native Place:Dong' E of Shandong Province, Male, Master, Research field: control theory and control engineering, intelligent control.Hou,Yuan Bin (1953-)Native Place: Shanxi Province, Female, Tutor of doctor, Research field: control theory and control engineering,intelligent control. Wang, Xiu (1965-) Native Place:Hebei Province, Male, Researcher, Research field: integrated technology of intelligent information system in Precision agriculture;Yin, Huimin (1965-) Native Place: Shanxi Province, Female, Master, Research field: Signal and Information Processing.

(100089 北京国家农业信息化工程技术研究中心)李红岩 王 秀

(710054 陕西西安 西安科技大学电气与控制工程学院)李红岩 侯媛彬 尹慧敏

(Xi' an University of Science and Technology, School of Electric and control Engineering. Xi' an 710054,China) Li,Hongyan Wang,Xiu

(National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture. Beijing 100089, China) Li,Hongyan Hou,Yuanbin Yin,Huimin

(投稿日期:2005.8.26) (修稿日期:2005.9.6)

技术创新