

无极灯电子镇流器的频域分析与设计

李 莺, 罗 毅

(四川理工学院 电子与信息工程系, 四川 自贡 643000)

摘要: 对电感双磁环耦合无极灯的电路模型进行了研究, 分析了无极灯电子镇流器的等效简化电路。基于简化电路, 详细探讨了无极灯电子镇流器谐振环的频域特性, 以及基于频域特性的谐振环设计思想。并比较了有极灯和无极灯电子镇流器在主要频域特性之间的差别和内在联系, 给出了一种能有效地应用于无极灯电子镇流器的频域分析和设计的思路, 即指定死区电角度和谐振电流相位角、反推谐振环参数。

关键词: 无极灯; 电子镇流器; 谐振; 频域

中图分类号: TM 923.61

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)12-0081-04

0 引言

无极灯具有高光效、高显色性、无频闪和长寿命的优良特性, 是一种具有良好发展前景的新型气体放电光源^[1-6]。在无极灯电子镇流器照明系统中, 电子镇流器的分析和设计至关重要。有电极荧光灯电子镇流器的分析和设计是基于镇流器谐振环的频域基波近似分析, 从中得到谐振环的谐振频率公式、阻抗角公式、输出电压和电流公式。有电极荧光灯电子镇流器的基本设计原理是: 指定谐振环的品质因数 Q_1 , 反推谐振环参数 L_r 和 C_r 。但是, 有极灯电子镇流器中 Q_1 的定义在无极灯镇流器中没有具体的物理含义, 并且在无极灯电子镇流器中, 由于无极灯的激励线圈电感 L_c 的介入, 频域分析公式中将多一个未知数 L_c , 因此不能通过指定 Q_1 来设计无极灯镇流器谐振环参数。为此, 笔者对无极灯电子镇流器的分

析与设计思路和方法进行深入探讨。

1 无极灯电子镇流器的电路模型

1.1 电感耦合无极灯的基本通用模型

为无极灯电子镇流器电路建立一个等效电路模型非常必要, 因为电子镇流器谐振环的频域分析和设计都是基于等效电路模型开展的。由于无极荧光灯的驱动原理不同于传统的有极荧光灯, 所以无极灯电子镇流器系统的等效电路模型也有别于有极灯的电子镇流器。图 1 给出电感耦合式无极灯的一般通用模型。模型参数中, k 为变压器耦合系数; N_c 为无极灯激励电感线圈匝数; R_c 和 L_c 为激励电感线圈电阻和电感值; R_{lamp} 为无极灯放电环等离子体等效电阻; R_{eq} 、 L_{eq} 为无极灯参数影射到激励线圈后总的等效电阻和电感值。

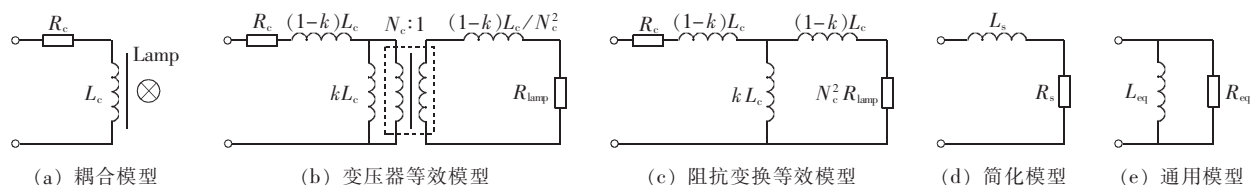


图 1 电感耦合无极灯的一般通用模型

Fig.1 Generalized model of inductance-coupled electrodeless lamp

1.2 双磁环电感耦合无极灯电子镇流器电路模型

目前, 在所有类型的电感耦合无极灯中, 双磁环电感耦合结构的无极灯在较低的频率范围工作, 可以避免兆赫兹以上工作频率范围内的许多技术难点, 所以具有广阔的市场前景, 其简化电路如图 2(a)所示, 它的通用电路仿真程序 SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) 模型在图 2(b)给出, 其中 L_r 和 C_r 为谐振电感和谐振电容, C_b 为隔直电容, u_{bb} 是逆变桥输出方波电压, u_{lc} 和 i_{lc} 是激励电感电压和电流。在进行电子镇流器谐振环参数设计

时, 一般都是采用频域分析和设计方法, 例如感性负载电路中的基波分析法。但是, 图 2(b)所示的 SPICE 模型并不适合于对电子镇流器谐振环电路进行频率分析和设计。

将图 1(e)所示的电感耦合无极灯的通用模型代入图 2(a)中, 可以得到图 3(a)所示的双激励电感耦合无极灯电子镇流器的整体等效模型, 其中 2 个激励电感用 2 个等效变压器来代替, 并且这 2 个变压器的原边相并联, 副边同无极灯的等效电阻 R_{lamp} 一起串联。利用变压器的串并联运算, 可以将图 3(a)中的 2 个变压器转换为图 3(b)中的单个变压器。最

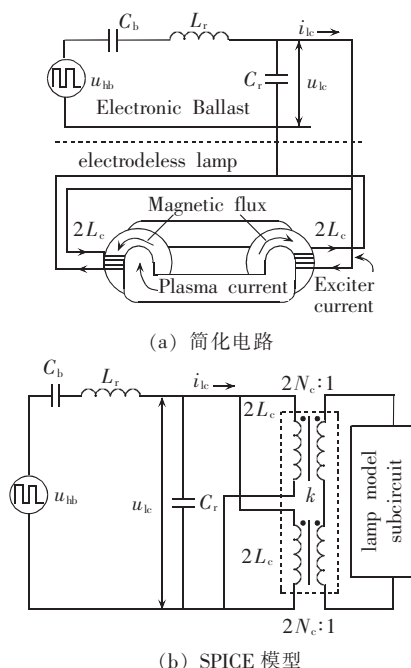


图 2 双激励电感耦合无极灯电子镇流器等效简化电路

Fig.2 Equivalent simplified circuit of electronic ballast for inductance-coupled double-ring electrodeless lamp

后,再利用变压器原副边中阻抗互换关系,将图 3(b)中变压器副边的 R_{lamp} 映射到变压器原边,从而得到图 3(c)的最终简化电路模型。图 3(c)同传统有极灯电子镇流器简化频域分析图基本相同,但由于在无极灯中引入了激励电感线圈,所以在图 3(c)所示的谐振电路中,多了一个元件 L_c 。由于 L_c 的引入,

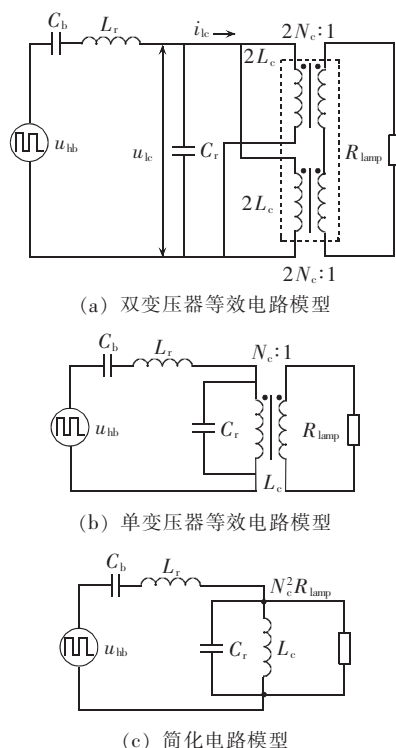


图 3 双激励电感耦合无极灯电子镇流器整体电路模型

Fig.3 Overall circuit model of electronic ballast for inductance-coupled double-ring electrodeless lamp

无极灯电子镇流器的频域分析和设计同有极灯电子镇流器有很大的不同。

2 无极灯电子镇流器的频域分析

电感耦合无极灯电子镇流器等效简化电路如图 4 所示。

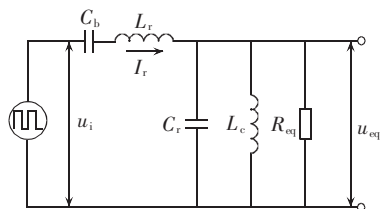


图 4 电感耦合无极灯电子镇流器等效简化电路

Fig.4 Equivalent simplified circuit of electronic ballast for inductance-coupled electrodeless lamp

利用频域中的基波近似分析方法^[7-15],可以研究图 4 中谐振电路参数同谐振频率点分布、谐振电流相位角、谐振环输出电压等之间的关系,从而作为无极灯电子镇流器谐振电路设计的理论依据。因隔直电容 C_b 在谐振回路的计算中可以忽略不计,故谐振电路的阻抗函数可以由式(1)表达。

$$Z_i = j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C_r + 1/(j\omega L_c) + 1/R_{eq}} \quad (1)$$

当阻抗函数为纯电阻时的工作频率就是谐振频率,可以由式(2)表示:

$$\omega = \omega_0 \times \sqrt{\left(\frac{L_r}{L_c}\right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{1}{Q_i^2}\right) + \sqrt{\left(1 - \frac{1}{Q_i^2}\right)^2 - 4\left(\frac{L_r}{L_c}\right)\frac{1}{Q_i^2}} \right]} \quad (2)$$

其中,谐振环的转折频率 ω_0 和谐振电路品质因数 Q_1 由式(3)表示:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}, \quad Q_1 = \frac{R_{eq}}{\sqrt{L_r / C_r}} \quad (3)$$

在有电极荧光灯电子镇流器中, ω_0 和 Q_1 分别是谐振环自然转折频率和品质因数。对于无极灯电子镇流器,由于 L_c 的参与,谐振环结构发生变化。在式(2)中,当 $L_c \gg L_r$ 时,可得:

$$\omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - 1/Q_i^2} \quad (4)$$

这是传统有电极荧光灯镇流器谐振环的基本公式。如果 $R_{eq} = \infty$, 则 $Q_1 = \infty$, 由此可得:

$$\omega_r = \omega_0 \sqrt{1 + L_r / L_c} \quad (5)$$

式(5)表明,在无极灯电子镇流器中,由于激励电感的存在,谐振环的自然转折频率从 ω_0 转变为 $\omega_0 \sqrt{1 + L_r / L_c}$ 。在图 4 中,谐振环的阻抗角可以用式(6)表示:

$$\varphi = \arctan \left[Q_1 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \left[\left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \frac{1}{Q_i^2} - 1 + \frac{L_r}{L_c} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \left(1 + \frac{L_r}{L_c} \right) - 2 \frac{L_r}{L_c} \right] \right] \quad (6)$$

当 $L_c \gg L_r$ 时,式(6)可以简化为式(7),显而易见,这是传统的有电极荧光灯电子镇流器谐振环阻抗角的基本公式。

$$\varphi = \arctan \left[Q_1 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \left[\left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \frac{1}{Q_i^2} - 1 \right] \right] \quad (7)$$

在设计镇流器谐振环参数和选择镇流器工作频率区间时,可以利用谐振环阻抗角公式,并结合式(2)确定谐振环的负载特性。在镇流器串联谐振电路中,谐振环的谐振频率点是谐振环负载特性发生变化的临界点,即“电容性负载”和“电感性负载”的分界点。众所周知,当工作频率大于谐振频率时,谐振环负载呈电感性,而当工作频率小于谐振频率时,谐振环负载呈电容性。但是,如果谐振频率不存在时(为虚数),例如在式(2)中,当下面的 2 个因子小于零时,则式(2)无解,表明谐振环的谐振频率不存在(为虚数)。

$$\begin{aligned} S_1 &= \left(1 - \frac{1}{Q_1}\right)^2 - 4\left(\frac{L_r}{L_c}\right)\frac{1}{Q_1^2} \\ S_2 &= \left(\frac{L_r}{L_c}\right) + \frac{1}{2}\left[\left(1 - \frac{1}{Q_1^2}\right) + \sqrt{\left(1 - \frac{1}{Q_1^2}\right)^2 - 4\left(\frac{L_r}{L_c}\right)\frac{1}{Q_1^2}}\right] \end{aligned} \quad (8)$$

此时,可利用式(6)判断谐振环的负载特性。当 $\varphi < 0$ 时,表明 I_r 相位超前 u_i 相位,谐振环承受电容性负载,而当 $\varphi < 0$ 并且开关死区选择适当,则谐振环将可能承受电感性负载。设 $L_r = 244 \mu\text{H}$, $L_c = 700 \mu\text{H}$, $C_r = 2.7 \text{ nF}$, 则当 $R_{eq} < 520 \Omega$ 时,式(2)无解,从而谐振环的谐振频率不存在,所以无法通过工作频率和谐振频率间的关系来分析谐振环的负载特性。此时,要判定负载特性,则需要借助谐振电流相位角超前或者滞后 u_i 的关系。

无极灯激励电感上的电压,可以用式(9)表达。

$$u_{lc} = \frac{u_i}{\sqrt{\left[1 + \frac{L_r}{L_c} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \frac{1}{Q_1^2}}} \quad (9)$$

当 $L_c \gg L_r$ 时,式(9)可以简化为式(10),这是传统的有电极荧光灯电子镇流器谐振环输出电压的基本公式。

$$u_{eq} = \frac{u_i}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \frac{1}{Q_1^2}}} \quad (10)$$

在式(9)中,如果 $\omega = \omega_0 \sqrt{1 + L_r/L_c}$, 且 $R_{eq} = \infty$, 则 $u_{eq} = \infty$, 这种状态对应于点火阶段的情形。在点火阶段,在传统的有极荧光灯中,灯管在被点亮之前,灯管所对应的等效电阻很大,可以认为开路。在无极灯被点亮之前,影射到激励电感线圈上的电阻不能认为是开路,而是一个较小的数值。正是由于无极灯在点火阶段的影射电阻 R_{eq} 比较小,通过式(9)可以看出,点火电压也大幅下降,从而增大了无极灯点火的难度。为此,在无极灯中采用 2 个激励线圈,不仅可以改善灯管内涡旋电场的分布,也可以改善点火状况。

3 无极灯电子镇流器的频域设计

为了抑制逆变桥开关噪声,提高镇流器工作的可靠性和电路效率,镇流器谐振环电路应该工作在电感性区间。在设计镇流器谐振电路参数和选择镇

流器工作频率区间时,可以利用谐振环阻抗角公式和谐振频率公式确定谐振环的负载特性。如果谐振频率 ω_r 存在,则可以直接通过比较 ω_r 和工作频率 ω_s 之间的位置来判断负载特性。当 $\omega_s > \omega_r$ 时,谐振电路呈电感性;而当 $\omega_s < \omega_r$ 时,谐振电路呈电容性。如果 ω_r 不存在,可以利用谐振环阻抗角公式,当阻抗角 $\varphi < 0$ 时,谐振电路承受电容性负载;而当 $\varphi > 0$ 并且开关死区选择适当,则谐振电路承受电感性负载。根据式(4),对于有电极荧光灯电子镇流器而言,当 $Q_1 > 1$ 时, ω_r 存在。当 $Q_1 < 1$ 时, ω_r 虽然不存在,但根据式(7)可知,在所有的频率点上, φ 总是大于 0,从而在所有的频率段,谐振环电路都承受电感性负载。对于无极灯镇流器而言, ω_r 和 φ 的表达式(2)和(6)很复杂,不能直接看出 ω_r 是否存在,或者 φ 是否大于 0,因为 φ 的正负由 3 个因子决定,即 ω_s/ω_0 , L_r/L_c 和 Q_1 。所以,设计得到的谐振环参数是否合理,应该代入阻抗角式(6)中加以计算检验。

在无极灯电子镇流器照明电路中,影响电路使用寿命的最关键元件是镇流器逆变桥直流输入稳压电解电容。为了减小该电解电容中的纹波电流,延长其寿命,必须尽量减小电子镇流器回路的环流损耗。同时为了减小开关噪声,抑制传导和辐射噪声,必须确保镇流器逆变桥中流过足够的无功电流。基于这 2 个考虑,基本的设计思想可以这样表述:在确保激励电感线圈不饱和、镇流器逆变桥开关软开通的前提下,尽量减小谐振环回路的无功功率,下面介绍设计的基本步骤。

3.1 设计激励电感和线圈

根据无极灯激励电感线圈的工作原理和无极灯的功率等级,应该首先设计激励电感线圈。在无极灯点火阶段,激励电感承受最大的电压;当无极灯稳定工作时,激励电感传递无极灯的功率。因而在点火阶段,激励电感磁芯中的磁感应强度最大,但决定磁芯温度高低的主要因素是无极灯稳定工作时激励电感磁芯中的磁感应强度。为了避免激励电感磁芯饱和,防止磁芯过热,应该限定激励线圈磁芯中的磁感应强度。为了增强无极灯放电环同激励线圈的耦合,激励电感磁芯可以采用没有气隙的环状结构。而在灯的点火阶段,镇流器谐振输出电压需要高达 1500 V 左右,无极灯才能被点亮。根据无极灯管径 D_{lamp} 和功率 P_{lamp} 、点火电压(如 1500 V)、工作频率 ω_s 等,来决定磁芯材料、横截面积、激励线圈匝数 N_c ,从而激励电感值 L_c 也就相应被确定下来了。根据无极灯和激励电感线圈间的变压器耦合模型,激励线圈的匝数 N_c 、无极灯等效电阻 R_{lamp} ,可以确定无极灯影射到激励电感原边的等效电阻 R_{eq} 。

3.2 计算无极灯满功率工作时激励电感电压

忽略激励电感中的损耗,根据无极灯功率 P_{lamp} 、无极灯影射到激励电感原边的等效电阻 R_{eq} ,可以得到无极灯满功率工作时激励电感电压 u_{lc} 。

$$u_{lc} = \sqrt{P_{lamp} R_{eq}} \quad (11)$$

3.3 设计开关死区时间

为了避免逆变桥桥臂的直通和实现桥臂开关的软开通,适当设定开关死区时间,从而可以确定死区

内所占的电角度。例如:开关周期为 $4\ \mu\text{s}$,死区时间为 $200\ \text{ns}$,则死区所占的电角 $\varphi_d=18^\circ$ 。

3.4 指定谐振电流相位角

指定谐振电流相角 φ 一定的裕度,例如大于死区所对应的角度并超过 20° ,从而阻抗角为 40° 。 φ 不能太大,否则回路无功太大,不利于延长电解电容的寿命。但同时, φ 也不能太小,否则谐振环容易进入容性区间。

3.5 计算谐振环参数 L_r 和 C_r

结合式(6)和(9),利用数学软件(如:Matlab)联立求解 L_r 和 C_r ,可以得到谐振环参数。

4 结语

探讨了电感双磁环耦合无极灯的电路模型,分析了无极灯电子镇流器的等效简化电路。由于无极灯激励电感的引入以及无极灯的工作特性,无极灯电子镇流器的频域特性同传统的有极灯电子镇流器有较大的区别。因此,基于该简化电路以及傅里叶级数分解和基波分析方法,详细探讨了无极灯电子镇流器谐振环的频域特性,以及基于频域特性的谐振环设计思路,并比较了有极灯和无极灯电子镇流器在主要频域特性之间的差别和内在联系。整个分析和设计思路可以概括为:指定死区电角度和谐振电流相位角、反推谐振环参数,这种思路可以有效地用于无极灯电子镇流器的频域分析和设计。

参考文献:

- [1] 路秋生. 高频交流电子镇流技术与应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2004.
- [2] 陈传虞. 电子节能灯与电子镇流器[M]. 北京:人民邮电出版社,2004.
- [3] 毛兴武,祝大卫. 电子镇流器原理与制作[M]. 北京:人民邮电出版社,2002.
- [4] 石守东,张亮,沈猛. HID 电子镇流器的分析与设计[J]. 照明工程学报,2006,17(3):24-27.
SHI Shou-dong,ZHANG Liang,SHEN Meng. Design and analysis of HID ballast[J]. China Illuminating Engineering Journal,2006,17(3):24-27.
- [5] 陈秀才,陶炎焱. 一种高性能电子镇流器的设计[J]. 山西电子技术,2006(5):9-11.
CHEN Shou-cai,TAO Yan-yan. Design of a high performance

- electronic ballast[J]. Shanxi Electronic Technology,2006(5):9-11.
- [6] 吴德明. 关于电子镇流器的两个理论问题[J]. 重庆职业技术学院学报,2006,15(1):46-47.
WU De-ming. Two theoretical questions about electronic ballast[J]. Journal of Chongqing Vocational & Technical Institute,2006,15(1):46-47.
- [7] 姜铁峰,陈敏,钱照明. 一种新型可调光无声谐振超高频电子镇流器[J]. 电力电子技术,2003,39(6):75-77.
JIANG Yi-feng,CHEN Min,QIAN Zhao-ming. Novel dimmable UHF electronic ballast without acoustic resonance[J]. Power Electronics,2003,39(6):75-77.
- [8] 任文华. 用于无电极荧光灯的高频电子镇流器的研究[J]. 照明工程学报,1999,10(1):12-18.
REN Wen-hua. A study of high frequency electronic ballast as electrodeless fluorescent lamp[J]. China Illuminating Engineering Journal,1999,10(1):12-18.
- [9] EUGEN S,VALENTIN T. A new approach to the evaluation of the discharge parameters of the electrodeless fluorescent lamps[J]. Plasma Sources Science and Technology,2004,13(5):515-521.
- [10] CAO X H. Design orientated model and application of electronic ballasts for two toroidal ferrite coupled electrodeless lamps[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2005,20(1):1803-1875.
- [11] NERONE L R. A mathematical model of the class D converter for compact fluorescent ballasts[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,1995,10(6):708-715.
- [12] 熊鹰,徐迪,孙康. 荧光灯镇流器谐振环的频域分析与设计[J]. 微计算机信息,2006,22(4):221-223.
XIONG Ying,XU Di,SUN Kang. Analysis and design of electronic ballast's resonant circuit[J]. Control & Automation,2006,22(4):221-223.
- [13] 方宇,谢勇. 电子镇流器中谐振逆变器建模方法研究[J]. 电力电子技术,2006,40(5):98-100.
FANG Yu,XIE Yong. Modeling method for resonant inverter applied to electronic ballast[J]. Power Electronics,2006,40(5):98-100.
- [14] JOHN S,VALERY G. The development of low frequency,high output electrodeless fluorescent lamps [J]. Journal of the Illuminating Engineering Society,1999(1):142-146.
- [15] LOO K H,STONE D A,TOZER R C,et al. Dynamic conductance model of fluorescent lamp for electronic ballast design simulation [J]. IEEE Trans on Power Electronics,2005,20(5):1178-1185.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

李 莺(1975-),女,四川自贡人,讲师,主要从事嵌入式系统与电气传动的研究;

罗 毅(1973-),男,四川南部人,讲师,主要从事电子技术与智能控制的研究(E-mail:luoyi0607@sia.com)。

Frequency-domain analysis and design of electronic ballasts for electrodeless lamp

LI Ying,LUO Yi

(Sichuan University of Science & Engineering,Zigong 643000,China)

Abstract: The circuit model of inductance-coupled double-ring electrodeless lamp is researched and its equivalent simplified circuit is analyzed,based on which the frequency-domain characteristics and design of its resonant ring are discussed in detail. The differences of major frequency-domain characteristics and the interior relationships between electrode and electrodeless lamps are compared. The thoughts of frequency-domain analysis and electronic ballasts design for electrodeless lamp are given:setting the dead-band electrical angle and resonant current angel,with which the parameters of resonant ring can be deduced.

Key words: electrodeless lamp; electronic ballast; resonance; frequency domain