

高频无极灯谐振电路的建模和仿真分析

王博 董威

(西安工业大学光电工程学院 西安 710021)

摘要: 无极灯是一种新型的节能电光源,主要由高频发生器、耦合器和泡体构成,其中高频发生器的稳定工作对于无极灯来说具有重要意义,而高频发生器当中谐振电路参数的匹配好坏直接影响到无极灯能否正常点亮且能稳定工作。文中主要研究高频发生器当中谐振电路的工作状态以及谐振参数发生变化时谐振点如何偏移。首先对谐振电路进行阻抗分析;然后建立数学模型,通过 MATLAB 仿真得出谐振曲线;最后分析了无极灯稳定工作和启动阶段谐振参数的变化对谐振电路频域特性的影响。

关键词: 高频无极灯;谐振电路;高频发生器

中图分类号: TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Modeling and simulation analysis of resonant circuit of high frequency electrodeless lamp

Wang Bo Dong Wei

(College of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Electrodeless lamp is a new type of energy-saving electric light source, mainly consists of high frequency generator, coupler and soaked body, of which the stability of the high frequency generator work is of great significance for energy-saving lamps, and resonant circuit parameters of high frequency generator matching good or bad will directly affect the electrodeless lamp can light up normal and stable work. In this paper, we study the resonance circuit of high frequency generator working condition and the resonant point how to offset when the resonance parameter changes. First, analysis the impedance characteristics of resonant circuit, then set up the mathematical model, and obtain the resonance curves through MATLAB. Finally analysis how the change parameter affect the frequency domain feature when electrodeless lamp stable work and start-up phase.

Keywords: high frequency electrodeless lamp; resonant circuit; high frequency generator

1 引言

车牌自动识别技术在智能交通系统中具有重要应用。高频等离子体放电无极灯简称无极灯。作为一种新型气体放电光源,由于没有电极,所以相对于传统光源具有很多优点。比如寿命长、光效好、高显色性、没有闪频等^[1-3]。所以无极灯已经广泛应用于生活和工业生产当中。

对于无极灯的研究,国内外都集中在高频发生器发展,主要是对高频变换器的研究为主,使得高频发生器的控制方式和工作效率得到了一定的提高^[4]。然而在无极灯高频发生器系统当中,逆变谐振电路的分析和设计至关重要,其中谐振参数的匹配好坏直接影响到无极灯能否正常点亮且稳定工

作。由于高频发生器中的有大量的高频功率器件,其中就包括磁性材料等。这些器件在正常工作状态下会受到外界因素以及内部环境的影响。比如温度、电磁干扰等,在这种情况下对于谐振参数的匹配就显得极为重要。该文就通过对高频发生器当中谐振电路进行阻抗分析,建立了谐振电路输入输出端的数学模型,最后通过 MATLAB 进行仿真分析,得出了谐振参数的变化如何影响谐振状态。

2 高频发生器工作过程

无极灯主要由高频发生器、功率耦合器和泡体 3 部分组成。它是通过高频发生器激发功率耦合器产生电磁场以感应的方式耦合到泡体内,使泡体内部的气体雪崩电离,形成等

收稿日期:2015-01

离子体。等离子体受激原子返回基态时产生紫外线。泡体内壁的荧光粉受到紫外线激发产生可见光^[5]。

无极灯高频发生器的结构。如图1所示,主要由4部分构成:EMI滤波电路、半桥整流电路、功率因数校正电路和高频逆变谐振电路^[6-7]。

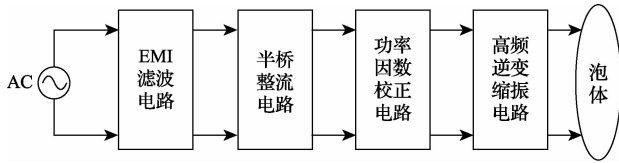


图1 无极灯高频发生器结构

高频发生电路的工作过程描述如下:输入端接入220 V,50 Hz的市电,经过EMI电磁滤波电路。滤波电路可以防止高频发生电路的高频干扰进入电网而污染电网,还可以防止电路的电磁噪声影响后续电路进而影响整个无极灯工作的稳定性。整流电路将市电变为直流电接入功率因数校正电路,一般功率大于75 W的电路必须加入有源功率因数校正电路来提高功率因数。接着功率因数校正电路输出的400 V直流电,接入高频逆变谐振电路产生2.56 MHz的高频高压信号激发耦合器产生高频电磁场激发泡体发光。

3 谐振电路工作原理

谐振电路通过连接方式可以分为串联谐振和并联谐振电路。而高频无极灯的谐振回路为串联谐振方式。下面本文通过一种基本的串联谐振电路说明谐振电路时如何工作。当谐振输入频率处于谐振频率的时候,输出电容两端的电压与输入两端电压的比值成为谐振回路的品质因数,在谐振点出产生高压击穿泡体内部的惰性气体,使得无极灯被点亮。

如图2所示为谐振电路的基本形式,根据谐振电路的工作原理以及工作状态得到当输入电压频率达到谐振自然频率时,谐振频率、电感两端的电压以及电容两端的电压分别为:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

$$U_C = U_L = \frac{\omega_0 LU}{R} = \frac{U}{\omega_0 CR} = QU \quad (2)$$

当 $Q \gg 1$ 时,谐振输出两端会瞬间产生高压激发无极灯点亮,高频无极灯的启辉到点亮就是利用谐振电路这一原理来实现的。

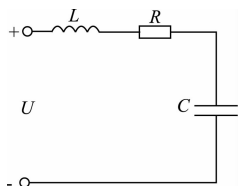


图2 串联谐振电路

$$U_L(\omega) = \omega LI(\omega) = \frac{\omega LU}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (3)$$

可以得出 U_L 和 U_C 的频率特性图3所示,从图中可以看出,在初始阶段,输入电压都加在电容两端。随着工作频率 ω 的增加,整个回路的容性阻抗加强,在频率达到 ω_1 时,回路的容抗达到最大。随着电路频率的增加到谐振电路的谐振频率 ω_0 处时,整个回路处于阻性状态,电压值达到最大。随着工作频率的继续增加,回路的阻抗由容性状态转变为感性,当频率达到 ω_2 时,整个回路的感抗值达到最大,随着工作频率的继续增加,输出电压完全加载在谐振电感上^[8-10]。

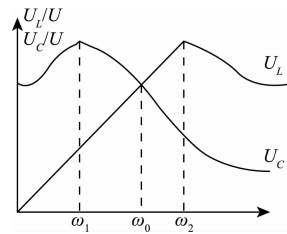


图3 串联谐振电路中 U_L 和 U_C 的频率特性

4 高频无极灯谐振电路的建模和仿真

谐振电路的输入端为逆变电路输出的高频方波信号。而负载部分主要由功率耦合器和泡体构成,通过对负载部分进行分析建模其可以等效为电感 L 和 R 的并联模型^[11]。最终得到无极灯在稳定工作状态下的等效电路模型如图4所示。

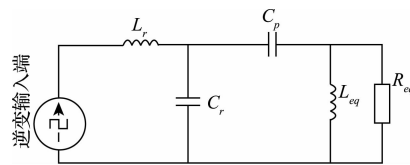


图4 高频无极灯谐振电路等效电路

从图4可以看出,整个耦合器谐振电路的等效电路主要包括4个储能元件。其中 L_r 和 C_r 为谐振电路的谐振电感和谐振电容, C_p 为隔直电容, L_{eq} 和 R_{eq} 为无极灯耦合器和灯泡的等效模型。对图4进行阻抗分析。

其中泡体以及耦合器的阻抗为:

$$z_1 = \frac{1}{\frac{1}{L_{eq}s} + \frac{1}{R_{eq}}} = \frac{L_{eq}R_{eq}s}{L_{eq}s + R_{eq}} \quad (4)$$

泡体和隔直电容串联的等效阻抗为:

$$z_2 = z_1 + \frac{1}{C_p s} = \frac{L_{eq}C_p R_{eq}s^2 + L_{eq}s + R_{eq}}{L_{eq}C_p s^2 + R_{eq}C_p s} \quad (5)$$

z_2 与谐振电容并联的等效阻抗为:

$$z_3 = \frac{1}{\frac{1}{z_2} + \frac{1}{C_p s}} =$$

$$\frac{L_{eq}C_pC_rR_{eq}s^3 + L_{eq}C_r s^2 + C_rR_{eq}s}{L_{eq}C_pC_r s^3 + (L_{eq} + C_r)C_pR_{eq}s^2 + L_{eq}s + R_{eq}} \quad (6)$$

得出整个谐振回路的等效阻抗为:

$$z_4 = L_r s + z_3 =$$

$$\frac{L_{eq}L_rC_rC_p s^4}{L_{eq}C_rC_p s^3 + (L_r + C_r)C_pR_{eq}s^2 + L_{eq}s + R_{eq}} +$$

$$\frac{(L_rL_{eq}C_pR_{eq} + L_rC_rC_pR_{eq} + L_{eq}C_pC_rR_{eq})s^3}{L_{eq}C_rC_p s^3 + (L_r + C_r)C_pR_{eq}s^2 + L_{eq}s + R_{eq}} + \frac{(L_r + C_r)L_{eq}s^2 + (L_r + C_r)R_{eq}s}{L_{eq}C_rC_p s^3 + (L_r + C_r)C_pR_{eq}s^2 + L_{eq}s + R_{eq}} \quad (7)$$

所以就得到了负载(耦合器)两端的电压相对于逆变电路输出电压的传递函数:

$$H(s) = \frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{z_3}{z_4} \frac{z_1}{z_2} = \frac{s^2}{L_rC_r s^4 + (\frac{L_r}{R_{eq}} + \frac{L_rC_r}{C_pR_{eq}})s^3 + (1 + \frac{L_r}{L_{eq}} + \frac{L_rC_r}{C_pR_{eq}})s^2 + \frac{1}{C_pR_{eq}}s + \frac{1}{L_rC_p}} \quad (8)$$

通过对谐振回路的阻抗分析得出了等两端的电压相 对于高频发生电路输出的频域特性:

$$\frac{V_{lamp}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + \frac{L_r}{L_{eq}} + \frac{C_pL_r}{C_pL_{eq}} - C_rL_r\omega^2 - \frac{1}{C_pL_r\omega^2} + j(\frac{L_r\omega}{R_{eq}} + \frac{C_rL_r\omega}{C_pR_{eq}} - \frac{1}{C_pR_{eq}\omega})} \quad (9)$$

通过上式得出幅频特性为:

$$\left| \frac{V_{lamp}}{V_{in}} \right| = \frac{1}{\sqrt{(1 + \frac{L_r}{L_{eq}} + \frac{C_pL_r}{C_pL_{eq}} - C_rL_r\omega^2 - \frac{1}{C_pL_r\omega^2})^2 + (\frac{L_r\omega}{R_{eq}} + \frac{C_rL_r\omega}{C_pR_{eq}} - \frac{1}{C_pR_{eq}\omega})^2}} \quad (10)$$

通过实验测得 $L_{eq} = 14.7 \mu\text{H}$, $R_{eq} = 386 \Omega$, L_r 为谐振电感, C_r 为谐振电容, C_p 为隔直电容, 分别取 $14 \mu\text{H}$, 500 pF , 820 pF , 代入上式得。通过 MATLAB 得出在无极灯点亮之后泡体两端电压对输入电压的幅频特性曲线如图 5 所示。

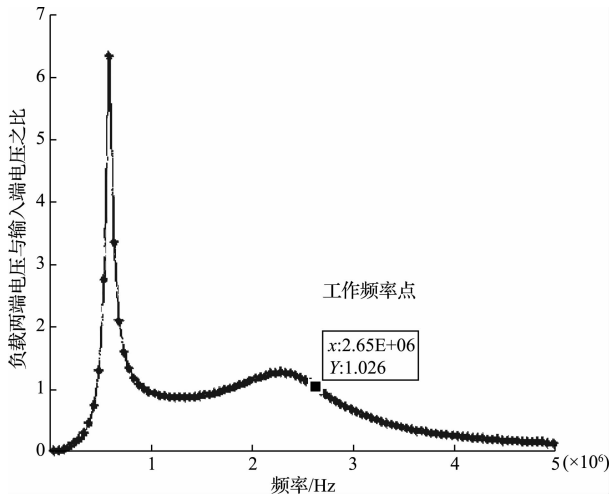


图 5 负载两端和谐振输入电压比值的幅频特性

图 6 为当谐振电感 L_r 变化时负载两端的电压和输入端电压的比值, 由图 5 可以看出, 当 L_r 增加时, 工作频率处的电压逐渐减小, 自然谐振频率也随着减小。

图 7 为谐振电容变化时负载两端的电压和输入端电压的比值, 由图上可以看出, 谐振电容变化时自然谐振频率逐渐减小, 但是幅度不是特别大, 工作频率处的电压时有一个很小的增大幅度后再减小的。

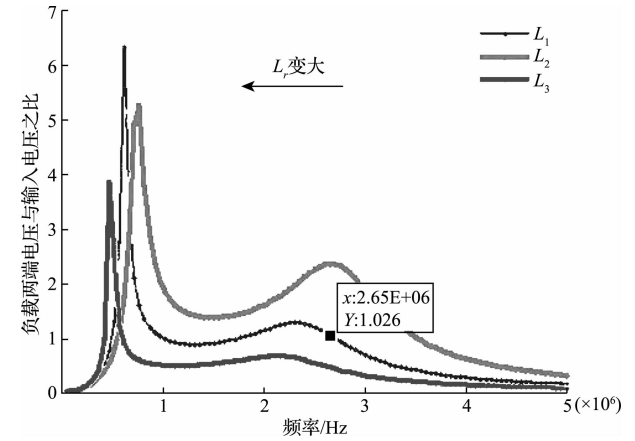


图 6 谐振电感变化时的幅频特性曲线

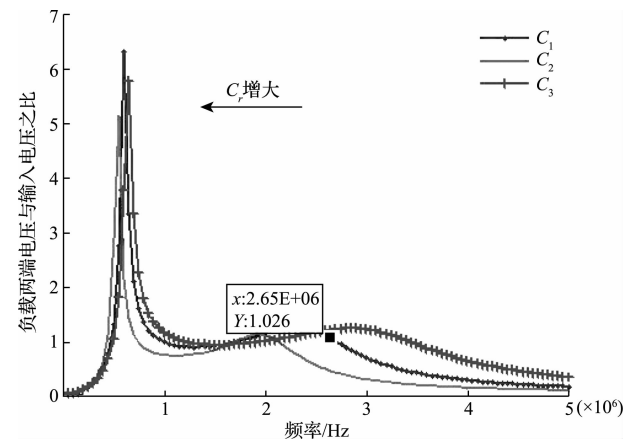


图 7 谐振电容变化时的幅频特性曲线

因为无极灯在点亮的过程当中会产生一个谐振高压, 所以还需要研究谐振参数对无极灯启辉过程当中的影响。在无极灯启辉阶段可以把泡体等效负载 R_{eq} 等效为无穷大。通过仿真得出图 8 和 9。

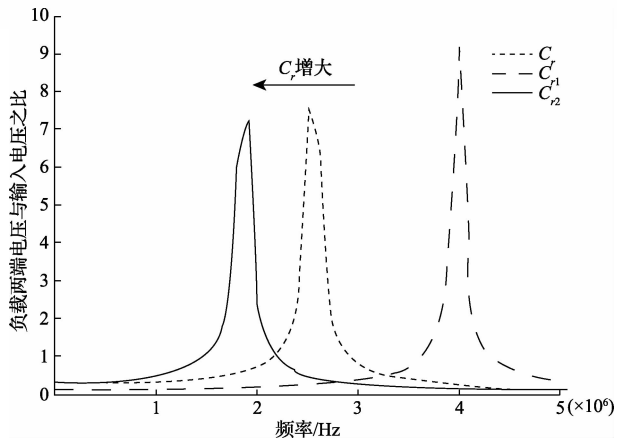


图 8 启辉时谐振电容变化的幅频特性

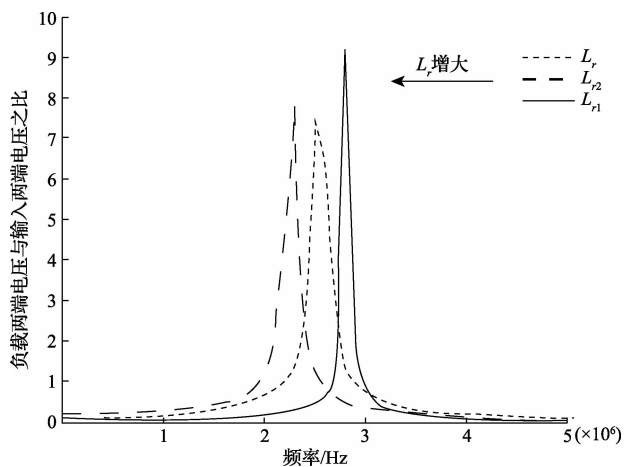


图 9 启辉时谐振电感变化的幅频特性

由仿真分析的结果可以看出, 当 C_r 增加时, 自然谐振点减小, 工作频率处的电压先增加后减小。相对于 C_r 的增加, 当 L_r 增加时, 谐振点偏移幅度较小, 工作频率处的电压增加, 对已无极灯来说容易点亮。

5 结论

通过对无极灯谐振电路进行建模和仿真分析, 可以看

出当谐振电感 L_r 增加时, 工作频率处的电压逐渐减小, 自然谐振频率也随着减小。当谐振电容 C_r 增加时, 工作频率处的电压在有一个很小的增大幅度后再减小的, 自然谐振也减小。当无极灯在启辉阶段当 C_r 增加时, 自然谐振点减小, 工作频率处的电压先增加后减小。相对于 C_r 的增加, 当 L_r 增加时, 谐振点偏移幅度较小, 工作频率处的电压增加, 对无极灯来说容易点亮。因为谐振器件在无极灯工作当中存在着各种不同的影响因素, 比如温度、误差等。所以通过本文的分析可以为谐振参数匹配提供一定的依据。

参考文献

- [1] 丁万霞. 高频无极灯的技术现状与应用研究[J]. 中国西部科技, 2010, 27(9): 18.
- [2] 陈鹏, 朱月华, 黄如喜. 高频无极灯耦合效率的分析[J]. 南京师范大学学报, 2010, 10(2): 27-29.
- [3] 胡邦南, 刘德玉. 汽车 HID 前灯电子镇流器的智能控制方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 61-62.
- [4] 邵明松, 黄松岭, 赵伟. 无极灯系统的建模与分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 13-15.
- [5] 杨一平, 郭玉萍. 高频无极灯高频电源的研[J]. 照明工程学报, 2010, 21(1): 82-85.
- [6] 乜福力, 朱维涛. 新型高强度气体放电灯镇流器应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 2572-2573.
- [7] 花有清, 苏红富, 刘鲁平. 电子镇流器中半桥逆变电路负载特性分析[J]. 金华职业技术学院报, 2012, 12(3): 50-51.
- [8] 吴凌燕. 基于 Multisim11 的串联谐振电路特性研究[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(8): 84-85.
- [9] 刘竹琴. LRC 串联谐振电路中 Q 与 R 关系的实验研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(4): 9-11.
- [10] 邱彬. 串并联谐振电路在电子镇流器中的应用研究[J]. 制造业自动化, 2011, 33(5): 142-143.
- [11] 俞炜平, 林国庆. 无极灯电子镇流器的关键技术研究[J]. 电工电气, 2012(5): 27-28.

作者简介

王博, 1990 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为精密仪器及机械。