

整流滤波电容的设计与选用方法研究

董振旗, 赵巍辉, 刘耀辉, 刘 鹏

(第二炮兵工程大学 陕西 西安 710025)

摘要: 整流滤波电路是直流稳压电源设备中常用电路, 其中滤波电容的设计选取, 直接影响到纹波电压的大小, 关系到输出直流电压的质量。本文通过在设定条件下, 依据整流滤波电路原理, 阐述了纹波电压产生的过程, 给出了一种滤波电容设计与选取计算方法, 建立了电容选取的计算模型, 描绘出了纹波电压、负载电阻与滤波电容之间关系曲线, 并通过实验验证其科学性, 有利于滤波电容的设计与选用。

关键词: 整流电路; 滤波电路; 滤波电容; 纹波电压

中图分类号: TN7

文献标识码: A

文章编号: 1674-6236(2012)14-0056-03

Research on the design and selection method of rectifier filter circuit

DONG Zhen-qi, ZHAO Wei-hui, LIU Yao-hui, LIU Peng

(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: Rectifier filter circuit is widely used in the DC equipment. Among the circuit, the selection of the filter capacitor is important to the quality of ripple voltage and the output DC voltage. According to the principle of the rectifier filter circuit, the process of ripple voltage is illustrated, and the design and calculation approach of capacitor is given, then the capacitance selected calculation model of capacitance selection is built up, finally the relationship curve between the ripple voltage, resistor and filter capacitor is depicted. The experiment verifies that this method is scientific and suitable for the design and selection of filter capacitor.

Key words: rectifier circuit; filter circuit; filter capacitor; ripple voltage

整流滤波电路是直流稳压电源设备原理电路的重要组成部分, 具有把交流电压转换成直流电压的功能作用。在整流滤波电路中有两部分电路组成, 如图 1 所示: 一是整流电路, 其作用是把正弦波交流电压 (如市电 220 V/50 Hz) 转变成单向的脉动电压; 二是滤波电路, 是将单向脉动电压通过滤波形成直流电压^[1]。整流滤波电路输出的直流电压, 是直流稳压电源设备实现稳压输出的前提。如果整流滤波电路输出的直流电压不能满足稳压电路输出的要求, 将导致直流稳压电源设备不能稳压输出。所以, 滤波电路的设计, 特别是滤波电容的设计与选用显得更加重要。

整流滤波用的电解电容的选取似乎早有定论。即应根据允许的纹波电压来选取容值; 对于有维持时间要求的系统, 单相整流时一般取 $1 \sim 2 \mu\text{F/W}^{[2]}$ 。对于滤波电容 C 的选取, 使用经验公式 $RC \geq (3.5)T/2$, 并认为滤波电容 C 越大越好^[3]。实验证明这些说法, 对于直流稳压电源设备中整流滤波电容的设计与选取是不科学的。因为, 滤波电容的容量大小直接影响整流滤波电路输出的纹波电压, 应根据对纹波电压的要求及其直流稳压电源设备输出直流电压指标进行具体的设计与选取。

在图 1 的滤波电路中, 滤波电容 C , 具有隔直流、通交流

的作用, 即滤波作用。把整流后的电压中多次谐波滤除, 输出“纯净”的直流电压。因此, 电容 C 的设计选择, 直接关系到滤波电路输出直流电压的质量。文中结合稳压电路的要求, 针对整流滤波电路, 就滤波电容 C 的设计与选取展开了分析与研究。

1 滤波电容的设计

整流滤波电路的原理如图 1 所示, 主要有 $D_1 \sim D_4$ 二极管、滤波电容 C 和负载电阻 R_{L} 组成。如果负载电阻 R_{L} 等效为电源设备的稳压电路, 就对滤波电路提出指标要求。在整流电路输出电压、功率保证的情况下, 主要是对纹波电压的要求。纹波电压是指滤波电路、稳压电路输出直流电压含有的波动电压^[4], 如图 2 所示。如果滤波电路输出的纹波电压过大, 将导致稳压电路输出纹波电压增大, 甚至难以稳压。纹波电压是由整流输出的单相脉动电压对滤波电容 C 的充电、放电过程产生的; 在负载 R_{L} 不变的条件下, 电容 C 的大小决定着纹波电压的高低。可见, 电容 C 的设计, 应依据纹波电压的要求来设计。

1.1 滤波电容充电、放电过程

针对图 1 滤波电路, 用示波器测试的波形图分析 C 的充电、放电过程更为直观。当 K 断开时, 全波整流电路输出的电

收稿日期: 2012-04-23

稿件编号: 201204176

作者简介: 董振旗 (1958—), 男, 山东兖州人, 高级实验师。研究方向: 装备使用与管理, 实验室建设与管理。

-56-

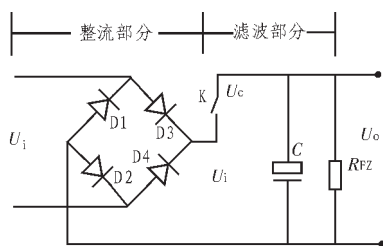


图1 整流滤波电路原理

Fig. 1 Principle of rectifier filter circuit

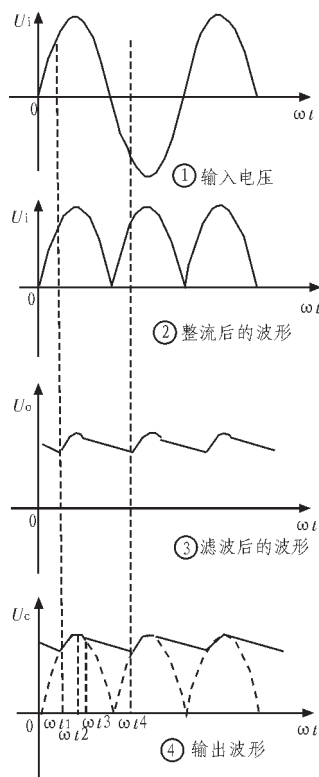


图2 整流滤波波形图

Fig. 2 Rectifier filter graph

压波形,即为滤波电路的输入电压 u_i ,如图2所示,是把输入的正弦波电压 U_i (有效值)图2的①转变成频率为100 Hz的单向脉动电压,如图2的②。当K接通时,滤波电路输出的直流电压为 U_o ,并叠加有纹波电压 ΔU ,如图2的③。如果图2中的②和③重叠后,在示波器上就会出现图2中的④波形图。从图2的④中就可分析出电容 C 的充电与放电过程。

图2的④,为图1电路处于稳态时输出的 U_c 电压波形, ΔU 是纹波电压,其幅度决定于 C 和负载 R_{LZ} 的大小。如图2所示,当处在 $0 \sim t_1$, $U_o = U_i > U_c$, C 处于放电过程, $D_1 \sim D_4$ 均处于截止状态;在 $t_1 \sim t_2$, $u_i \geq U_o = U_c$, C 处于充电过程, D_2, D_3 处于导通状态, D_1, D_4 处于截止状态;在 $t_2 \sim t_3$, $u_i \leq U_o = U_c$, C 随 u_i 规律放电,仍存在 D_2, D_3 处于导通状态, D_1, D_4 处于截止状态;在 $t_3 \sim t_4$, $u_i < U_o = U_c$, C 处于放电过程, $D_1 \sim D_4$ 处于截止状态。从 t_4 后开始,其过程同 $t_1 \sim t_4$ 。可以看出从 $t_1 \sim t_3$ 期间,是电容 C 充电过程,纹波电压的变化规律和 u_i ($u_i = U_o = U_c$)相同;在 $t_3 \sim t_4$ 期间, U_c 按指数规律下降,时间常数为 $\tau = R_{LZ}C$ 。

1.2 滤波电容的计算方法与模型

从电容 C 充放电过程可以看出,在 $t_1 \sim t_2$ 期间,是电容 C 充电过程,纹波电压 ΔU 的变化规律和 u_i 基本相同。在 $t_3 \sim t_4$ 期间,纯粹是电容 C 放电过程。其计算模型为^[5]:

$$U_c = U e^{-\frac{t}{R_{LZ}C}} \quad (1)$$

结合图1整流滤波电路,依据图2的④滤波电容充电、放电原理,运用(1)计算模型,对 C 的进行计算,其计算方法如下:

如图2的④波形,在 $t_1 \sim t_2$ 过程中, ΔU 的变化规律和 u_i 基本相同,符合正弦变化规律,其电容 C 充电两端的电压为:

$$U_c = \sqrt{2} U_i \sin \omega t \quad (t_1 < t < t_2) \quad (2)$$

设纹波电压幅度为,则 t_1 为:

$$U_c = \sqrt{2} U_i \sin 2\pi f t_1 = U_m - \Delta U$$

$$t_1 = \frac{\arcsin\left(\frac{U_m - \Delta U}{\sqrt{2} U_i}\right)}{2\pi f} \quad (3)$$

$$t_2 = \frac{\arcsin\left(\frac{U_m}{\sqrt{2} U_i}\right)}{2\pi f} \quad (4)$$

则充电时间为 $t_c = t_2 - t_1$:

$$t_c = \frac{1}{2\pi f} \left(\arcsin\left(\frac{U_m}{\sqrt{2} U_i}\right) - \arcsin\left(\frac{U_m - \Delta U}{\sqrt{2} U_i}\right) \right) \quad (5)$$

因为 U_i 经全波整流后,变成了单相脉冲,频率为100 Hz,周期为 $T/2 = 0.01\text{s}$ ($T = 1/50$);如图2的④波形,纹波电压 ΔU 在 $t_1 \sim t_4$ 为一个波形周期,所以 t_1 与 t_4 时刻的 U_c 值相同。

从波形中分析出,在 $t_2 \sim t_3$ 期间内,对 C 的充电、放电过程同时进行,由于 $t_3 - t_2$ 小小于 $t_4 - t_2$,所以,可近似为 $t_2 \sim t_4$ 为放电过程,有模型(1)得到(5):

$$U_c = U_m \cdot e^{-\frac{t_4 - t_2}{\tau}} \quad (6)$$

则放电时间 $t_f = t_4 - t_2$ 为:

$$U_c = U_m - \Delta U = U_m \cdot e^{-\frac{t_f}{R_{LZ}C}}$$

$$t_f = \frac{T}{2} - t_c = \frac{1}{2f} - \frac{1}{2\pi f} \left(\arcsin\left(\frac{U_m}{\sqrt{2} U_i}\right) - \arcsin\left(\frac{U_m - \Delta U}{\sqrt{2} U_i}\right) \right) \quad (7)$$

由于 $f = 50\text{ Hz}$,由此知滤波电容 C 、负载 R_{LZ} 、 ΔU 三者之间的变化关系为:

$$U_m - \Delta U = U_m \exp \left(-\frac{\left(\frac{1}{2f} - \frac{1}{2\pi f} \left(\arcsin\left(\frac{U_m}{\sqrt{2} U_i}\right) - \arcsin\left(\frac{U_m - \Delta U}{\sqrt{2} U_i}\right) \right) \right)}{R_{LZ}C} \right)$$

即滤波电容 C 的关系公式为:

$$C = -\frac{\frac{1}{2f} - \frac{1}{2\pi f} \left(\arcsin\left(\frac{U_m}{\sqrt{2} U_i}\right) - \arcsin\left(\frac{U_m - \Delta U}{\sqrt{2} U_i}\right) \right)}{R_{LZ} \ln \frac{U_m - \Delta U}{U_m}} \quad (8)$$

1.3 滤波电容的仿真计算

设: $U_i = 15\text{ V}$, $f = 50\text{ Hz}$, $\omega = 2\pi f$ 。

运用 Matlab 运算工具^[5-6],对关系式(7)和(8)进行运算,得到图3曲线。

当纹波电压 ΔU 一定时,即选定 ΔU 分别为 U_c 10%、 U_c 20%、 U_c 30% 时,在分别取 R_{FZ} 为不同值,得到一系列滤波电容 C 值,如图 3①所示。

当滤波电容 C 一定时,即选定 C 分别为 3 500 μF 、3 000 μF 、2 500 μF ,在分别取不同的,即不同的纹波电压参数,得到一系列负载 R_{FZ} 的值,如图 3②所示。

当负载功率一定时,即分别取 R_{FZ} 为 20 Ω 、15 Ω 、10 Ω ,

分别取不同的 ΔU ,即不同的纹波电压参数,同样得到一系列滤波电容 C 值,如图 3③所示。

通过图 3 可以看出,在 R_{FZ} 、 C 与 ΔU 之间,如果知道 2 个参数就可以查到第 3 个参数值。比如: ΔU 为 U_c 的 20%、 R_{FZ} 为 15 Ω 时,从图 3①中就可以查到 C 为 2 300 μF ;如果 R_{FZ} 为 20 Ω 、 C 为 3 500 μF 时,从图 3②中就可以查到 ΔU 为 1.8 V;如果要求 ΔU 为 1.5 V、选 C 为 4 700 μF 时,则 R_{FZ} 在 20 Ω 左右。

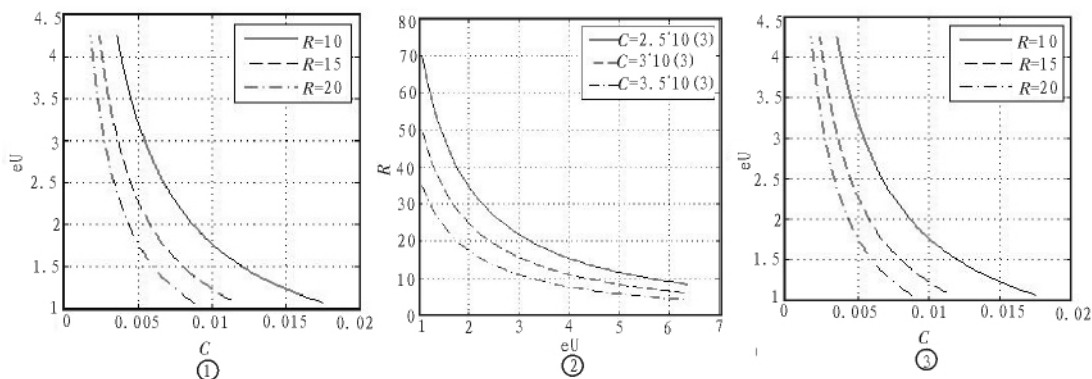


图 3 滤波电容 C 、负载 R_{FZ} 、 ΔU 三者关系曲线(注: $eU = \Delta U$)

Fig. 3 The curve of filter capacitor C , resistance R_{FZ} and ΔU (Note: $eU = \Delta U$)

2 滤波电容设计计算的实验验证

结合图 1 所示电路原理,按照图 3 查出的相关参数进行实验验证,以证明所建立模型的正确性。实验验证数据如表 1 所示。

表 1 实验验证数据
Tab.1 Experiment validation data

给定条件	选取参数	曲线求得参数	实验验证数据
$U_i = 15 \text{ V}$ 室温条件下	ΔU 为 U_c 的 20%、 R_{FZ} 为 15 Ω 时	C 为 2 300 μF	当 C 为 2 200 μF 时, ΔU 为 U_c 19%
	ΔU 为 U_c 的 10%、 R_{FZ} 为 20 Ω 时	C 为 4 000 μF	当 C 为 4 100 μF 时, ΔU 为 U_c 10%
	ΔU 为 U_c 的 25%、 R_{FZ} 为 15 Ω 时	C 为 1 900 μF	当 C 为 2 000 μF 时, ΔU 为 U_c 24%
	ΔU 为 U_c 的 15%、 R_{FZ} 为 20 Ω 时	C 为 3 600 μF	当 C 为 3 800 μF 时, ΔU 为 U_c 15%

可见,在选定的参数情况下,通过图 3 查找曲线相应参数值,进行电路实验验证,所得出的数据与之相符,说明所建立的模型(8)与运算所绘出的滤波电容 C 、负载 R_{FZ} 、 ΔU 三者关系曲线具有科学性,能够进行整流滤波电路中 C 的设计与选取。

3 结束语

在电源设备的整流滤波电路中,滤波电容 C 的选取,一般依据输出直流电压、负载 R_{FZ} 大小及对纹波电压 ΔU 的要求进行设计的。本文依据整流滤波电路原理和滤波电容的作用,分析了纹波电压产生的过程,说明了纹波电压 ΔU 与 R_{FZ} 、

C 的关系,建立了 U_c 与 R_{FZ} 、 C 和的模型,给出了相应关系曲线图;在输入电压 U_i 一定的条件下,可以查出与 R_{FZ} 、 C 的值,并通过仿真计算和实验验证,证明了上述建立的模型、仿真关系曲线的科学性,有利于在滤波电容 C 设计与选取。

参考文献:

- [1] 金霞,张磊. 整流滤波电路的计算机仿真[J]. 科技向导,2010(4):10-11.
- [2] 徐立刚,陈乾. 单相整流滤波电容纹波电流的数学模型与分析[J]. 电力电子技术,2009(3):52-53.
- [3] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 4版.北京:机械工业出版社,2004.
- [4] 皇金锋. 单相桥式整流滤波电容的设计 [J]. 电器开关,2007(3):39-40.
- [5] 尹淑萍. 基于 MATLAB 的单相整流滤波电路仿真与分析[J]. 河南科技,2010(10):79-80.
- [6] 张德丰. MATLAB神经网络应用设计[M]. 北京:机械工业出版社,2009.