

# 电力电子装置滤波电容容量的设计方法

张舟云, 王晓东, 徐国卿, 沈祥林

(同济大学, 上海 200331)

摘要: 由于工作在高频电力电子装置中的滤波电容等效容量会随着工作频率的增加而减小, 而由滤波电容的等效电阻和纹波电流产生的发热量会随之增加。因此, 合理选择高频电力电子装置的滤波电容容量是电力电子装置设计的一个必要环节。提出了根据纹波电流大小设计电力电子装置的滤波电容容量的一般方法, 针对滤波电容中纹波电流与开关频率的关系, 纹波电流与电容发热量的关系以及纹波电流对电容器寿命的影响, 给出了详细的计算公式。这种滤波电容容量的选择方法对于通用变频器、大功率开关电源等应用场合具有一定的实用参考价值。

关键词: 滤波电容器 / 纹波电流; 发热; 寿命; 电力电子装置

中图分类号: TN713 文献标识码: A 文章编号: 1000-100X(2005)01-0070-03

## Design of Filter Capacitance used in Power Electronic System

ZHANG Zhou-yun, WANG Xiao-dong, XU Guo-qing, SHEN Xiang-lin

(Tongji University, Shanghai 200331, China)

**Abstract:** The filter capacitors placed in power electronic arrangement need working at high frequency. Due to working at high frequency, the equivalent capacity of the filter capacitors reduces as the switching frequency increasing, meanwhile the heat radiation caused by the equality resistance and the ripple current increases. Thus, how to select the capacity of the filter capacitors is one of the necessary process for designing power and electric device. This paper presents a usual design method of filter capacitors according to the ripple current, and gives special calculating formulas in view of the influences of ripple current on switching frequency, heat radiation and life-span of filter capacitors. The design method of filter capacitors is referential to the same thing in the universal inverter and high power switch power supply.

**Key words:** filter capacitor / ripple current; heat radiation; life-span; power electronic system

## 1 引言

随着电力电子器件和微电子技术的迅速发展, 以电力电子器件为主开关器件的电力电子装置在电力传动、电源变换等领域的应用越来越广泛。滤波电容是电力电子装置功率回路中的一个极为重要的元件, 整流电源运用滤波电容作为整流环节, 电压控制型逆变器采用滤波电容作为滤波和储能环节, 因而滤波电容容量的选择直接影响到整台电力电子装置的性能。电力电子装置中的滤波电容通常采用电解电容。由于电解电容等效电感和等效电阻的存在, 使得电解电容工作在高频状态下的等效容量迅速下降, 严重时将影响电力电子装置的性能。同时, 高频下电解电容的纹波电流在等效电阻作用下的发热和对电解电容寿命的影响变得不容忽视。文中提出一种根据纹波电流等级来选择电解电容容量的方法, 同时对如何计算其高频工况下的发热量和纹波电流对电解电容寿命的影响作了详细分析, 对于电力电子装置的设计和应用具有工程参考价值。

## 2 电解电容的等效电路和等效容量

### 2.1 电解电容的等效电路分析

电解电容器的实际等效电路和计算等效电路<sup>[1, 2]</sup>分别如图 1a, 1b 所示。为计算方便, 将图 1a 中电解电容实际等效电路等效为图 1b 中的计算等效电路。

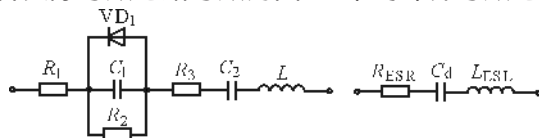


图 1 电解电容器实际等效电路和计算等效电路

- 图中
- $R_1$ ——电解电容电极和正端引出端子等效电阻
  - $R_2$ ——阳极氧化膜的绝缘电阻
  - $R_3$ ——损坏的阳极氧化膜的绝缘电阻
  - $C_1, C_2$ ——阳极和阴极箔容量
  - $L$ ——电极及引出端子等所引起的等效电感量
  - $D_1$ ——具有单向导电性能的阳极氧化膜

电解电容等效电阻  $R_{ESR}$  由电容器的电极引脚电阻、电容器极化损耗、电离损耗的等效电阻串联构成; 电解电容的等效寄生电感  $L_{ESL}$  由电容器引脚电感和电容两个电极板上的等效电感串联而成; 电解电容的等效容量由  $C_d$  由  $C_1$  和  $C_2$  串联而成。

$R_{ESR}$  随温度的升高而增大, 随工作频率的上升而减小, 直至达到一个由电解液和电解纸引起的与

定稿日期: 2004-06-08

作者简介: 张舟云(1977-), 男, 江西进贤人, 博士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

频率无关的最小稳定值。 $R_{ESR}$  在纹波电流作用下产生损耗,直接影响电解电容的发热量。在低频下  $L_{ESR}$  对  $C_d$  的影响很小,然而高频下对电容的影响不可忽略,严重时会导致电容与电感产生串联谐振。由于  $R_{ESR}$  和  $L_{ESR}$  的存在,使得电容器呈现出非理想特性。一般来说,电解电容在高频下特性较差,其转折频率点  $f(f_0=1/[2\pi\sqrt{L_{ESR}C_d}]$ ) 仅为几十千赫,频率特性较好的高频电解电容仅能达到上百千赫。电解电容的阻抗可表示为:

$$Z=R_{ESR}+j2\pi fL_{ESR}+\frac{1}{j2\pi fC_d} \quad (1)$$

式中  $Z$ ——电解电容阻抗

由于  $R_{ESR}$  和  $L_{ESR}$  的存在,使得电解电容阻抗在频率达到一定值时,其阻抗的模值在一定频率下会出现最小值。

### 2.2 高频时电解电容的等效容量计算

按交流频率为 120Hz 时测量电解电容容量,实际容量与标称容量通常存在一定的误差,允许误差通常为  $\pm 5\% \sim \pm 20\%$ 。图 2 示出江海铝电解电容 CD139 系列的相关等效参数。用等效阻抗表示的  $C_d$  计算如下:

$$C_d=1/(2\pi f)|Z| \quad (2)$$

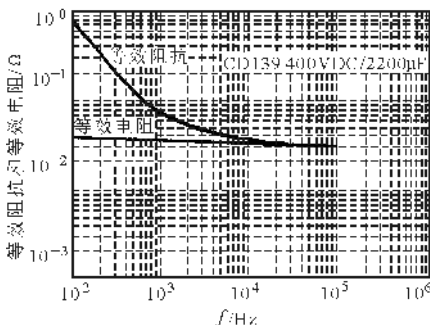


图 2 江海 CD139 系列铝电解电容典型参数

当开关频率为 120Hz 时,由图 2 查得相应的等效阻抗为  $0.7\Omega$ ,对应的等效容量为  $2210\mu F$ 。手册中给出 120Hz 时的标称容量为  $2200\mu F$ ,其误差为  $-0.5\%$ ,即未超过标称容量范围,因而可以依据式(2)计算  $C_d$ ,不同工作频率下的  $C_d$  表 1 所示。

表 1 不同工作频率下的  $C_d$

工作频率/kHz	1	5	10	20	100
等效阻抗/ $\Omega$	0.075	0.040	0.035	0.033	0.031
等效容量/ $\mu F$	2122	796	455	241	51

由表 1 可知,当电解电容的工作频率  $f > 1\text{kHz}$  时,其等效容量迅速下降;当  $f=10\sim 20\text{kHz}$  (采用 IGBT 或 IPM 功率模块的工作频率)时  $C_d$  下降到原

来的  $1/5 \sim 1/9$ ;当  $f=100\text{kHz}$  (VDMOS 或 MOSFET 模块的工作频率)以上时  $C_d$  下降为原来的  $1/44$  以上。因而,正确设计滤波电容容量是电力电子装置设计过程中的一个十分必要的环节。

## 3 电力电子装置滤波电容容量设计

### 3.1 电解电容中纹波电流对电解电容发热量影响

随着器件的开关动作,电解电容直接向电力电子装置提供能量。当电解电容电压低于直流母线电压时,由直流母线电压对电解电容充电。因而,在电力电子装置工作过程中,电解电容始终处于充放电状态,电容电流  $i_{Cd}$  为一个交流分量  $\Delta i_{Cd}$  和一个直流分量  $I_d$  的合成电流。图 3 示出电压型逆变器中的滤波电容电流的理论波形。

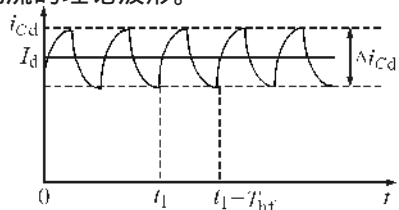


图 3 滤波电容电流理论波形

图中  $\Delta i_{Cd}$ ——纹波电流交流分量

$T_H$ ——滤波电容高频工作状态下的周期

纹波电流幅值指与纹波电流面积相同的正弦波电流的有效值。电解电容的纹波电流是引起电解电容损耗和发热的主要因素。电解电容所允许的纹波电流值与电容器允许的最高温度、工作温度及纹波电流频率相关,电解电容允许的纹波电流随温度的升高而降低。由发热引起的温升计算公式<sup>[2]</sup>如下:

$$\Delta T = \frac{\Delta I_C^2 R_{ESR}}{AH} \quad (3)$$

式中  $\Delta T$ ——电解电容中心温升,通常情况下  $\Delta T \leq 5^\circ C$

$\Delta I_C^2$ ——纹波电流有效值,单位 A

$A$ ——电容器表面积,单位  $\text{cm}^2$

$H$ ——电容器的散热系数,对于铝电解电容,

常取  $H=1.5\sim 2.0 \times 10^{-3} \text{W/cm}^2$

当纹波电流造成的  $\Delta T$  较大时,可考虑采用金属电容支架,将电容的热量传输给散热器,在一定程度上可以缓解电容发热对系统的影响。

### 3.2 纹波电流对电解电容寿命的影响

因内部等效电阻的作用,在叠加纹波电流时,发热损耗将影响电容器寿命。根据阿雷尼厄斯法则<sup>[1]</sup>,温度每上升  $10^\circ C$ ,电解电容器的寿命缩短  $1/2$ 。考虑纹波电流和环境温度时,电解电容寿命计算如下:

$$L=L_0 \times 2^{\frac{(T_0-T)}{10}} K \left[1 - \left(\frac{\Delta T}{I_0}\right)^2\right]^{\frac{\Delta T}{10}} \quad (4)$$

式中  $T$ ——电解电容工作温度

$T_0$ ——电解电容的最高工作温度

$\Delta T_0$ ——最高温度下电解电容中心允许温升

$L$ ——温度为  $T$  时的电解电容寿命

$L_0$ ——工作在最高温度下的电解电容寿命

$K$ ——纹波电流对电解电容的寿命系数

$I_0$ ——最高温度下对应的额定纹波电流有效值

$I$ ——温度为  $T$  时的纹波电流有效值

根据经验, 式(4)中取  $\Delta T_0 = 1 \sim 2^\circ\text{C}$ , 取值随电解电容直径增加而增大; 当  $K=2$  时, 对应工作电流在纹波电流允许范围之内; 当  $K=4$  时对应工作电流超过电解电容限定纹波电流的范围之内。根据式(4)推算出的电解电容使用寿命适合环境温度超过  $40^\circ\text{C}$  的最高工作温度范围, 但由于电解电容的加工工艺和老化等因素, 实际推算的最长使用寿命一般不超过 15 年<sup>[2]</sup>。

### 3.3 根据纹波电流限制的电解电容容量

电力电子装置滤波电容容量选择主要考虑以下三方面因素<sup>[3,4,5]</sup>: ①电容值能满足期望的纹波电压; ②电容的额定电压; ③电容的额定纹波电流。基于对纹波电流与电解电容发热量和寿命关系的分析, 纹波电流对于电力电子装置滤波电容容量的选取起到关键的约束作用。因此, 提出一种根据纹波电流最大允许值计算电力电子装置滤波电容容量的方法:

$$C_d \geq \frac{1}{2\pi f} \frac{k_1 k_2 \Delta I_{\alpha(p-p)}}{2\sqrt{2} \Delta U_{\alpha(p-p)}} \quad (5)$$

式中  $\Delta U_{\alpha(p-p)}$ ——滤波电容的设计纹波电压峰值,

$\Delta I_{\alpha(p-p)}$ ——电容上的最大纹波电流值

$f$ ——滤波电容的工作频率

$k_1$ ——工作频率增加时纹波电流系数

$k_2$ ——相对于最高工作温度的纹波电流系数

式(5)中  $\Delta U_{\alpha(p-p)}$  为输入直流母线电压的 0.5%;  $\Delta I_{\alpha(p-p)}$  通常随电解电容容量的增加和表面积的增加而增大; 当滤波电容  $f > 10\text{kHz}$  时, 通常  $k=1.4$ ; 对于最高工作温度为  $105^\circ\text{C}$  的电解电容, 当正常工作温度为  $80^\circ\text{C}$  时  $k_2=2.0$ 。

## 4 应用实例

根据最大纹波电流设计电力电子装置滤波电容容量的方法已应用于车用电机驱动器的滤波电容设计, 相关设计参数为:  $U_{d(p-p)}=0.3\text{V}$ ,  $\Delta I_{\alpha(p-p)}=24.6\text{A}$ ,  $f=16\text{kHz}$ ,  $T_0=105^\circ\text{C}$ 。由此, 根据式(5)计算得到的滤波电容容量计算值应不小于  $807\mu\text{F}$ 。由表 1 知  $f=16\text{kHz}$  时的等效容量为  $f=120\text{Hz}$  时的标称容量的  $1/7 \sim 1/8$  倍, 即为  $(7 \sim 8) \times 807 = 5649 \sim 6449\mu\text{F}$ , 取为

$6600\mu\text{F}$ 。由于直流母线电压为  $312\text{V}$ , 滤波电容的额定电压应不小于  $1.5 \times 312 = 468\text{V}$ , 取为  $500\text{V}$ 。因而, 选用 3 只  $2200\mu\text{F}/500\text{V}$  电解电容并联, 其纹波电流有效值为  $8.7\text{A}$ , 直径为  $6.4\text{cm}$ , 长为  $11.5\text{cm}$ , 计算得到表面积  $A=295.5\text{cm}^2$ , 铝电解电容导热系数  $H=1.5 \sim 2.0 \times 10^{-3}\text{W}/\text{cm}^2$ , 每只电解电容等效电阻  $R_{\text{ESR}}=0.03\Omega$ 。由式(3)可计算得到滤波电容的温升  $\Delta T=1.3 \sim 1.7^\circ\text{C}$ 。根据 CD139 电容等效电阻为  $0.03\Omega$ , 电容容量为  $6600\mu\text{F}$ , 忽略电源内阻抗和接触阻抗, 可得到电容时间常数为  $198\mu\text{s}$ ; 由于  $f=16\text{kHz}$ , 假定  $D=0.95$ , 则有充电时间为  $59.4\mu\text{s}$ , 纹波电压为输入电压的 0.5%, 即  $0.5\% \times 312 = 1.6\text{V}$ , 因而最大电流纹波为  $13.9\text{A}$ , 对应纹波电流有效值  $I=2.6/2\sqrt{2}=4.9\text{A}$ 。在  $T=80^\circ\text{C}$ ,  $T_0=85^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T=2^\circ\text{C}$ ,  $L_0=3000\text{h}$ ,  $K=4$ ,  $I_0=8.7\text{A}$  条件下, 根据式(4)计算得到  $L=5124\text{h}$ 。表 2 示出滤波电容参数计算值与设计值的比较。

表 2 滤波电容参数设计值与计算之比较

比较内容	$I_0 / \text{A}$	$\Delta T_0 / ^\circ\text{C}$	$L / \text{h}$
设计值	8.7	2	3000
计算值	4.9	1.3~1.7	5124

通过上述比较可知, 用文中提出的计算方法选取的滤波电容电流纹波、发热量以及电容寿命均在允许范围之内, 由此验证了该方法的合理性。

## 5 结论

文中详细分析了对滤波电容中纹波电流与开关频率的关系, 纹波电流与电容发热量的关系以及纹波电流对电容器寿命的影响, 给出了相应的计算公式。依照上述滤波电容容量的选取方法, 设计了功率回路中的滤波电容, 已在车用电机驱动器中得到应用。应用结果表明, 该滤波电容具有发热量小、纹波电压低、可靠性高等优点。所提出的滤波电容的一般设计方法对通用变频器、电机驱动器、大功率开关电源等电力电子装置和系统都有一定的实用价值。

### 参考文献

- [1] 杨旭. 开关电源技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 江海(中). 江海电解电容使用手册[Z], 2003.
- [3] 韩安荣. 通用变频器及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] 王仁祥. 通用变频器选型与维修技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [5] (美) Marty Brown. 开关电源设计指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.