

也谈工频整流电容滤波电路中电容器选择

赵修科

在小功率变换器中，为降低成本，采用交流输入桥式整流电容滤波。只有在电源电压大于电容电压时整流管才导通，因此整流管电流波形如图 3-11 脉冲电流，整流管导通时间与电容大小有关。假设交流电网的输出电阻（包括整流器压降）为零，在导通期间电容上电压与输入电网电压完全相同，在达到交流电压峰值时整流器电流为零。滤波输出提供变换器电源，即使在最低输入电压 $U_{i\min}$ ，保证额定功率 P_o 输出。根据能量守恒定律，在半周期内输出能量 $P_o/2f$ 等于电容从谷点电压 U_v 充电到电网峰值电压 U_p 存储的能量

$$\frac{P_o}{2f} = \frac{1}{2}C(U_p^2 - U_v^2)$$

式中 f —电网频率 (Hz)，中国和欧洲为 50Hz，美国为 60Hz。C—滤波电容量 (F)。即

$$C = \frac{P_o}{f(U_p^2 - U_v^2)} = \frac{P_o}{fU_p^2(1-k^2)} = \frac{\alpha P_o}{U_{i\min}^2} \quad (3-23)$$

式中 $k = U_v/U_p$ —谷—峰比， $U_p = \sqrt{2}U_{i\min}$ ，因为即使在最低频率时，变换器还要输出最大功率。

$$\alpha = \frac{1}{2f(1-k^2)} \quad (3-24)$$

不同的 k 对应的 α 如表 3-13 所示。

电容的交流分量有效值可从以下关系得到。假定电流脉冲为矩形波，电流脉冲在导通时间 t 内给电容补充的电荷应当等于电容电压从峰值 U_p 放电到最低电压 U_v 失去的电荷量

$$I_{cp}t = C(U_p - U_v)$$

脉冲宽度

$$t = \frac{\cos^{-1}k}{2\pi f} \quad (3-25a)$$

电流占空比

$$D = \frac{t}{T/2} = 2ft = \frac{\cos^{-1}k}{\pi} \quad (3-25b)$$

电流脉冲峰值

$$I_{cp} = \frac{\sqrt{2}CU_{i\min}(1-k)}{t} = \beta CU_{i\min} \quad (3-26)$$

式中 $\beta = \sqrt{2}(1-k)/t$ 。

电容的交流电流有效值为

$$I_{ac} = I_{cp}\sqrt{2ft - (2ft)^2} = CU_{i\min}\beta\sqrt{D - D^2} = \gamma CU_{i\min} \quad (3-27)$$

式中 $\gamma = \beta\sqrt{D - D^2}$ 。

输出直流电压近似为

$$U_o \approx \frac{U_p + U_v}{2} = 0.707(1+k)U_i = \delta U_i$$

式中 $\delta = (1+k)/\sqrt{2}$ 。对于 50Hz 和 60Hz，以上式中 α 、 β 、 γ 和 δ 如表 3-13 所示。

在小功率变换器中，在最低输入电压下也要保证输出功率，因此以最低输入电压选择电容量。但是，选择了电容以后，最高输入电压下，电流脉冲幅值增加，宽度减少，电容电流有效值增加，因此，要检查高压时电容电流的有效值。

在以上讨论中，忽略了交流电源的内阻和电容 ESR 对输出电压波形的影响，忽略了输入电路中限流电阻、保险丝和整流器压降，实际输出电压比计算值要低，尤其是当由变压器降压小功率整流电路时，电源内阻，整流器压降不可不考虑。

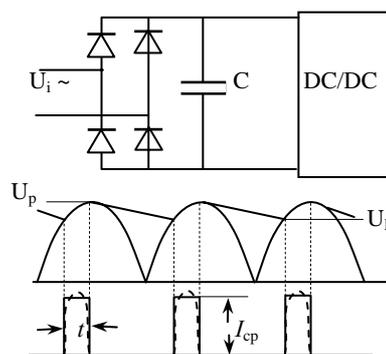


图 3-11 输入滤波电容选择

表 3-13 电容选择系数表

k		0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65
α	50Hz	0.1026	0.0526	0.0360	0.0278	0.0229	0.0196	0.0173
	60Hz	0.0855	0.0439	0.0300	0.0231	0.0190	0.0163	0.0144
β (1/s)	50Hz	70	98.2	120	138	154	168	180
	60Hz	84	118	144	165	186	201	216
γ	50Hz	21.1	34.5	45.8	55.7	64.8	73.0	80.4
	60Hz	25.3	41.4	55.0	66.0	77.8	87.6	96.5
δ		1.38	1.34	1.31	1.27	1.24	1.20	1.17

为了说明以上关系的应用，我们举例予以说明：输出功率为 20W，变换器效率为 85%，变换器由 220V±20%/50Hz 交流电源供电，经桥式整流，电容滤波，给 DC/DC 变换器供电，变换器允许输入纹波电压峰峰值为 35V，选择输入滤波电容。

选择电容量

最小输入电压为 $220V \times 0.8 = 176V$ ，变换器的输入功率为 $P_i = P_o / \eta = 20 / 0.85 = 23.5W$ 。最低电压峰值 $U_{pmin} = 1.412 \times 0.8 \times 220 = 249V$ ， $k = (U_p - 35) / U_p = (249 - 35) / 249 = 0.86$ ， $k=0.85$ 相近，从表 3-13 查得 $\alpha = 0.036$ ，根据式 (3-21) 得到

$$C = \frac{\alpha P_o}{U_{imin}^2} = \frac{0.036 \times 23.5}{176^2} = 27 \times 10^{-6} F = 27 \mu F$$

电容承受最高电压为 $U_{max} = 1.2 \times 220 \times 1.414 = 373V$ ，选择 450V。选择 $30 \mu F / 450V$ 。

如果负载是恒定输出功率的变换器，当最高输入电压时的电流有效值不会增大，仍可按表 3-13 参数计算。

从表 3-13 看到 $\alpha = 0.0360$ ，取 $\gamma = 45.8$ ，电容电流有效值为

$$I_{ac} = \gamma C U_{imin} = 45.8 \times 30 \times 10^{-6} \times 176 \approx 0.242 A$$

由表查的 $k=0.85$ 时 $\delta = 1.31$ ，直流输出电压为

$$U_o \approx \delta U_i = 1.31 \times 176 = 230 V$$

如果滤波电容后接断续模式反激变换器，开关频率 50kHz，占空比 $D_{max} = 0.3$ ，初级电感为 2mH，初级峰值电流为 0.69A，交流分量有效值为 0.192A。交流分量为电容充放电电流，电容器总的交流电流有效值为

$$I_{AC} = \sqrt{I_{ac}^2 + I_{sw}^2} = \sqrt{0.242^2 + 0.192^2} = 0.31 A \quad (3-28)$$

检查所选择的 $30 \mu F / 400V$ 铝电解电容交流纹波电流是否大于上式计算值。

温度是影响电解电容寿命的主要因素，最高温度降低 $10^\circ C$ ，寿命增加 1 倍。有效值电流在 ESR 损耗导致电解电容温升，如果电容上限温度为 $105^\circ C$ ，寿命 2000 小时，环境温度 $40^\circ C$ ，设计寿命 5 年，在最高平均温度要降低 $45^\circ C$ 才能达到这个要求，即允许最高平均温度 $60^\circ C$ ，电解电容的允许温升为 $60^\circ C - 40^\circ C = 20^\circ C$ ，电解电容的对流系数为 $D_v = 0.93 mW / ^\circ C / cm^2$ ，热导（热阻倒数） $G_T = D_v A_s (cm^2) = 0.93 As (mW / ^\circ C)$ ，如果选定电容，外表面面积和 ESR 就已知，由允许温升和热导就可以求得允许的电容电流。

电解电容允许高频电流比低频大，即式(3-28)根号中第二项应除以一个大于 1 的系数。如果不考虑高频效应，计算是保守的。其次，随着温度升高，铝电解电容 ESR 随温度升高而降低，即高温允许更大的电流有效值，但应注意实际允许温升和温度应与 ESR（电流有效值）相对应。如果设计保证寿命最高允许温度为 $60^\circ C$ ，而使用的 ESR 是 $85^\circ C$ 的值，而允许的电流有效值刚满足要求，但 $60^\circ C$ 时的 ESR 比 $85^\circ C$ 时大，实际温度将超过 $60^\circ C$ ，寿命就可能达不到预期要求。

摘自《开关电源工程设计》2008 年 5 月 7 日