

## PFC 电感计算

通常 Boost 功率电路的 PFC 有三种工作模式：连续、临界连续和断续模式。控制方式是输入电流跟踪输入电压。连续模式有峰值电流控制，平均电流控制和滞环控制等。

连续模式的基本关系：

### 1. 确定输出电压 $U_o$

输入电网电压一般都有一定的变化范围 ( $U_{in} \pm \Delta\%$ )，为了输入电流很好地跟踪输入电压，Boost 级的输出电压应当高于输入最高电压的峰值，但因为功率耐压由输出电压决定，输出电压一般是输入最高峰值电压的 1.05~1.1 倍。例如，输入电压 220V，50Hz 交流电，变化范围是额定值的 20% ( $\Delta=20$ )，最高峰值电压是  $220 \times 1.2 \times 1.414 = 373.45V$ 。输出电压可以选择 390~410V。

### 2. 决定最大输入电流

电感应当在最大电流时避免饱和。最大交流输入电流发生在输入电压最低，同时输出功率最大时

$$I_{i\max} = \frac{P_o}{U_{i\min}\eta} \quad (1)$$

其中： $P_o = U_o I_o$ ； $U_{i\min} = U_{in}(100 - \Delta)\%$  — 最低输入电压； $\eta$  — Boost 级效率，通常在 95% 以上。

### 3. 决定工作频率

由功率器件，效率和功率等级等因素决定。例如输出功率 1.5kW，功率管为 MOSFET，开关频率 70~100kHz。

### 4. 决定最低输入电压峰值时最大占空度

因为连续模式 Boost 变换器输出  $U_o$  与输入  $U_{in}$  关系为  $U_o = U_i / (1 - D)$ ，所以

$$D_{p\max} = \frac{U_o - \sqrt{2}U_{i\min}}{U_o} \quad (2)$$

从上式可见，如果  $U_o$  选取较低，在最高输入电压峰值时对应的占空度非常小，由于功率开关的开关时间限制（否则降低开关频率），可能输入电流不能跟踪输入电压，造成输入电流的 THD 加大。

### 5. 求需要的电感量

为保证电流连续，Boost 电感应当大于

$$L = \frac{\sqrt{2}U_{i\min} D_{p\max}}{\Delta f} \quad (3)$$

其中： $\Delta I = 2k\sqrt{2}I_{i\max}$ ,  $k=0.15\sim 0.2$ 。

### 6. 利用 AP 法选择磁芯尺寸

根据电磁感应定律，磁芯有效截面积

$$A_e = \frac{\sqrt{2}U_{i\min} T_{on\max}}{N\Delta B} = \frac{\sqrt{2}U_{i\min} D_{p\max}}{fN\Delta B} \quad (4)$$

如果电感是线性的，有

$$\frac{\Delta I}{\sqrt{2}I_{i\max}} = \frac{\Delta B}{B} = 2k \quad (5a)$$

因为 Boost 电感直流分量很大，磁芯损耗小于铜损耗，饱和磁通密度限制最大值。为保证在最大输入电流时磁芯不饱和，应当有

$$B + \frac{\Delta B}{2} = B(1+k) < B_{s(100^\circ)} \quad (5b)$$

磁芯窗口面积

$$A_w = \frac{I_{i\max} N}{jk_w}$$

因此，面积乘积

$$AP = A_e A_w = \frac{\sqrt{2}U_{i\min} D_{p\max}}{fN\Delta B} \cdot \frac{I_{i\max} N}{jk_w} = \frac{\sqrt{2}U_{i\min} I_{i\max} D_{p\max}}{2kk_w jfB} \quad (6)$$

其中  $k_w=0.3\sim 0.5$  窗口填充系数，也称为窗口利用系数。 $B < B/(1+k)$ 。由此选择磁芯。

输出功率在 1kW 以上，一般采用气隙磁芯。因环形磁粉芯价格高，且加工困难，成本高。但是气隙磁芯在气隙附近边缘磁通穿过线圈，造成附加损耗，这在工艺上应当注意的。

## 7. 计算匝数

$$N = \frac{L\Delta I}{\Delta BA_e} \quad (7)$$

## 8. 计算导线尺寸（略）

临界连续 Boost 电感设计

### 1. 临界连续特征

Boost 功率开关零电流导通，电感电流线性上升。当峰值电流达到跟踪的参考电流（正弦波）时开关关断，电感电流线性下降。当电感电流下降到零时，开关再次导通。如果完全跟踪正弦波，根据电磁感应定律有

$$\sqrt{2}U_i \sin \omega t = L \frac{\sqrt{2}I_i \sin \omega t}{T_{on}}$$

即

$$U_i = L \frac{I_i}{T_{on}} \quad (8)$$

或

$$T_{on} = \frac{LI_i}{U_i} = L \frac{P_i}{U_i^2} = L\eta \frac{P_o}{U_i^2} \quad (9)$$

其中： $U_i$ 、 $I_i$  为输入电压和电流有效值。在一定输入电压和输入功率时， $T_{on}$  是常数。当输出功率和电感一定时，导通时间  $T_{on}$  与输入电压  $U_i$  的平方成反比。

### 2. 确定输出电压

电感的导通伏秒应当等于截止时伏秒:

$$U_{ip} T_{on} = (U_o - U_{ip}) T_{oF}$$

则

$$T_{oF} = \frac{U_{ip}}{U_o - U_{ip}} T_{on} \quad (10)$$

开关周期为

$$T = T_{of} + T_{on} = \left( \frac{U_{ip}}{U_o - U_{ip}} + 1 \right) T_{on} = \frac{U_o}{U_o - U_{ip}} T_{on} = \frac{T_{on}}{1 - U_{ip}/U_o} \quad (11)$$

可见, 输出电压  $U_o$  一定大于输入电压  $U_{ip}$ , 如果输出电压接近输入电压, 在输入电压峰值附近截止时间远大于导通时间, 开关周期很长, 即频率很低。

如果首先决定最低输入电压 ( $U_{imin}$ ) 对应的导通时间为  $T_{onL}$ , 最高输入电压 ( $U_{imax}$ ) 的导通时间为

$$T_{onh} = T_{onL} \left( \frac{U_{imax}}{U_{imin}} \right)^2 \quad (12)$$

根据式 (11) 和 (12) 可以得到开关周期 (频率) 与不同电压比的关系。

例如, 假定导通时间为  $10 \mu s$ ,  $1.414 U_{imin}/U_o = 0.65$ , 如果输入电压在  $\pm 20\%$  范围变化, 最低输入电压为  $220 \times 0.8$ , 输出电压为  $U_o = 1.414 \times 220 \times 0.8 / 0.65 = 383V$ 。周期为  $10/0.35 = 28.57 \mu s$ , 频率为  $35kHz$ 。在  $15^\circ$  时, 周期为  $12 \mu s$ , 相当于开关频率为  $83kHz$ 。在最高输入电压时, 由式 (12) 得到最高电压导通时间  $T_{onh} = (0.8/1.2)^2 \times T_{onL} = 4.444 \mu s$ , 在峰值时的开关周期为  $T = T_{onh} / (1 - 1.414 \times 1.2 \times 220 / 383) = 176 \mu s$ , 相当于开关频率为  $5.66kHz$ 。

如果我们。输出电压提高到  $410V$ , 最低输入电压时开关周期为  $25.45 \mu s$ , 开关频率为  $39.3kHz$ 。  $15^\circ$  时为  $11.864 \mu s$ , 开关周期为  $84.5kHz$ 。输入最高电压峰值时, 周期为  $49.2 \mu s$ , 开关频率为  $20.3kHz$ 。频率变化范围大为减少。即使在输入电压过零处, 截止时间趋近零, 开关频率约为  $100kHz$ 。最高频率约为最低频率只有 5 倍。而在  $383V$  输出电压时, 却为 18 倍。

通过以上计算可以看到, 提高输出电压, 开关频率变化范围小, 有利于输出滤波。但是功率管和整流二极管要更高的电压定额, 导通损耗和开关损耗增加。因此,  $220V \pm 20\%$  交流输入, 一般选择输出电压为  $410V$  左右。  $110V \pm 20\%$  交流输入, 输出电压选择  $210V$ 。

### 3. 最大峰值电流

最大输入电流

$$I_{imax} = \frac{P_o}{U_{imin} \eta}$$

电感中最大峰值电流是峰值电流的 1 倍

$$I_{pmax} = 2\sqrt{2} I_{imax} = \frac{2\sqrt{2} P_o}{U_{imin} \eta} \quad (13)$$

### 4. 决定电感量

为避免音频噪声, 在输入电压范围内, 开关频率应在  $20kHz$  以上。从以上分析可知, 在最高输入电压峰值时, 开关频率最低。故假定在最高输入电压峰值的开关周期为  $50 \mu s$ 。

由式 (11) 求得

$$T_{onh} = T \left( 1 - \sqrt{2} U_{i\max} / U_o \right) \quad (14)$$

由式 (12) 得到最低输入电压导通时间

$$T_{onL} = T_{onh} (U_{i\max} / U_{i\min})^2$$

根据式 (8) 得到

$$L = \frac{U_i T_{onL}}{I_i} \quad (15)$$

## 5. 选择磁芯

因为导通时间随输入电压平方成反比, 因此应当在最低电压下选择磁芯尺寸, 只要在最低输入电压峰值时避免饱和。

$$\sqrt{2} U_{i\min} T_{onL} = N A_e B_m \quad (16)$$

其中:  $N$ —电感线圈匝数;  $A_e$ —磁芯有效截面积;  $B_m < B_s(100)$ —最大磁通密度, 为减少损耗, 选择饱和磁感应的 70%。

整个窗口铜的截面积

$$A_w k_w = \frac{I_{i\max}}{j} N \quad \text{或} \quad N = \frac{A_w k_w j}{I_{i\max}} \quad (17)$$

将式 (17) 代入 (16), 整理得到

$$AP = A_e A_w = \frac{\sqrt{2} U_{i\min} I_{i\max} T_{onL}}{B_m j k_w} = \frac{\sqrt{2} P_o T_{onL}}{B j k_w} \quad (18)$$

用 AP 法选择磁芯尺寸。

## 6. 计算线圈匝数

$$N = \frac{2\sqrt{2} L I_{i\max}}{B_m A_e}$$

## 7. 线圈导线截面积

$$A_{cu} = \frac{I_{i\max}}{j}$$

例: 输入 220V ± 20%, 输出功率 200W, 采用临界连续。假定效率为 0.95。

解: 输入最大电流为

$$I_{i\max} = \frac{P_o}{\eta U_{i\min}} = \frac{200}{0.95 \times 0.8 \times 220} = 1.2 \text{ A}$$

峰值电流

$$I_p = 2\sqrt{2} I_{i\max} = 3.38 \text{ A}$$

设输出电压为 410V, 最高输入电压时最低频率为 20kHz。即周期为 50 μs, 因此, 导通时间为

$$T_{onh} = T \left( 1 - \sqrt{2} U_{i\max} / U_o \right) = 50 \left( 1 - \sqrt{2} \times 1.2 \times 220 / 410 \right) = 4.47 \text{ μs}$$

输入最低电压峰值时的导通时间

$$T_{onL} = T_{onh} \left( \frac{U_{i\max}}{U_{i\min}} \right)^2 = 4.47 \times \left( \frac{264}{176} \right)^2 = 10.1 \mu s$$

开关周期为

$$T = \frac{T_{on}}{1 - U_{ip}/U_o} = \frac{10.1}{1 - \sqrt{2} \times 0.8 \times 220/410} = 25.7 \mu s$$

因此，需要的电感量（式（15））

$$L = \frac{U_i T_{onL}}{I_i} = \frac{176}{1.2} \times 10.1 \times 10^{-6} = 1.48 \text{ mH}$$

如果采用磁粉芯，选用铁硅铝磁芯。\$L^2=1.48 \times 3.38^2 \times 10^{-3}=16.9\text{mJ}\$,选择 77439。有效磁导率为 60，其电感系数 \$A\_L=135\text{nH}\$，电感 1.48mH 需要的匝数为

$$N = \sqrt{\frac{1480}{0.135}} = 104.7 \text{ 匝 取 } N=105 \text{ 匝}$$

77439 的平均磁路长度 \$l=10.74\text{cm}\$，磁场强度 (Oe) 为

$$H = \frac{0.4\pi NI}{l} = \frac{0.4\pi \times 105 \times 1.2 \times 1.414}{10.74} = 21 \text{ Oe}$$

由图得到磁导率为 60，\$H=21\text{Oe}\$，磁导率下降到 90%，为了在给定峰值电流时保持给定电感量，需增加匝数为

$$N = 105 \times \sqrt{\frac{1}{0.9}} = 110.6 \text{ 匝，选取 } 111 \text{ 匝。}$$

此时磁场强度 \$H=111 \times 21/105=22.2\text{Oe}\$，\$\mu\$ 下降到 0.88,此时电感量

$$L = N^2 A_L = 0.135 \times 0.88 \times 111^2 = 1464 \mu \text{ H} = 1.464\text{mH}$$

满足设计要求。最高电压时开关频率提高大约 1%。应当注意到这里使用的是平均电流，实际峰值电流大一倍，最大磁场强度大一倍，从图上得到磁导率下降到 80%，磁场强度从零到最大，平均磁导率为 \$(0.8+1)/2=0.9\$，接近 0.88。

选取电流密度 \$j=5\text{A/mm}^2\$，导线尺寸为

$$d = 1.13 \sqrt{\frac{I}{j}} = 1.13 \sqrt{\frac{1.2}{4}} = 0.619 \text{ mm}$$

选择 \$d=0.63\text{mm}, d^2=0.70\text{mm}^2\$, 截面积 \$A\_{cu}=0.312\text{mm}^2\$。

核算窗口利用系数。\$A\_w=4.27\text{cm}^2\$, 则

$$k_w = \frac{N \times A_{cu}}{A_w} = \frac{111 \times 0.312 \times 10^{-2}}{4.27} = 0.08$$

77439 铁硅铝粉芯外径 \$OD=47.6\text{mm}\$, 内径 \$ID=23.3\text{mm}\$。考虑第一层

$$N_{ml} = (\pi (ID - 0.5d^2 - 0.05)/1.05d^2) - 1 = 96.9 \quad \text{实际 } 96 \text{ 匝。}$$

第二层只要 15 匝

