

PFC 电路电感计算和效率计算-V1.0

1 计算电感量:

最小 AC 输入电压来 V_{ac_min} , 缺省值=90

PFC 输出电压 V_{bus} , 缺省值 = 400 V

输出功率 P_{out} , 范围 150~2000W, 计算时需要输入具体数值

输入功率 $P_{in}=1.05 \cdot P_{out}$

最低开关频率 $f_{min} = 50 \sim 70$ kHz, 大功率时可以适当降低工作频率

电流纹波 $\Delta_{ripple} = \frac{\Delta I_{max}}{I_{in_pk}}$, 400W 以下缺省值是 2.0, 400W 以上缺省值是 0.2

PFC 电感量: $L_{pfc} = (V_{ac_min}^2 (V_{bus} - 1.4 \cdot V_{ac_min})) / (\Delta_{ripple} \cdot P_{in} \cdot V_{bus} \cdot f_{min})$,

2. 计算电流

最大输入有效值电流: $I_{in_rms_max} = 1.05 \cdot P_{out} / V_{ac_in}$

峰值输入电流: $I_{in_pk} = 1.4 \cdot I_{in_rms_max}$

最大平均输入电流: $I_{in_avg} = 2 \cdot I_{in_pk} / 3.14$

纹波电流由下式计算: $\Delta I_{max} = \Delta_{ripple} \cdot I_{in_pk}$ $\Delta_{ripple} \cdot I_{(in_pk)} = \Delta_{ripple} \cdot I_{(in_pk)}$

电感峰值电流: $I_{L_pk} = I_{in_pk} \cdot (1 + 0.5 \cdot \Delta_{ripple})$

电感有效值电流: $I_{L_rms} \approx I_{in_rms_max}$

MOSFET 的电流近似等于流经电感的电流, 因为导通时间远大于截至时间

3. 计算 AP 值, 选取磁芯或磁环。

K_u 为窗口系数, 磁环电感 $K_u = 0.35$, 磁芯电感 $K_u = 0.6$

K_j 为电流密度 $K_j = 600$, 其单位是 $\frac{A}{cm^2}$

PFC 的电感量 L 由前面算得。

峰值电感电流 I_{L_pk} 由前面算得。

B_{max} 为峰值磁通密度, 对于 100~400W 输出功率, 我们用 PC95 磁芯, 其 $B_{max}=0.3$;

对于 400~3000W, 用 HighFlux 磁环, 其 $B_{max}=1.35$

电感的 AP 值计算公式如下:

$$AP = A_e \cdot A_w = L \cdot I_{L_pk} \cdot I_{L_rms} \cdot 10^4 / (K_u \cdot B_{max} \cdot J), \quad \text{单位 } cm^4$$

4. 计算匝数、线径、直流电阻

最小匝数 $N \geq L_{pfc} \cdot I_{max} / (A_e \cdot B_{max})$,

A_e 是磁芯截面积, B_{max} 对 PC40 取 0.3, 对 NPS 取 0.9, 对 NPN 取 1.2, I_{max} 是最大电流。

核算实际磁通摆幅: $\Delta B_{max} = L_{pfc} \cdot \Delta I_{max} / (N \cdot A_e)$, ΔB_{max} 是磁通变化量, ΔI_{max} 是电感的纹波电流。

根据预设电流密度 J 计算出需要的铜线截面积 $S = I_{L_rms} / J$ 。

选取实际线径 ϕ , (400W 以内功率采用多线并绕来减少趋肤效应), 算出真实截面积 S 。

根据平均每匝长度 MLT 和匝数 N 以及截面积 S 计算绕组直流电阻: $R_{dc} = 2.0 \times 10^{-8} \cdot MLT \cdot N / S$

5. 计算电感损耗

铜损公式： $P_{cu} = I_{rms}^2 \times R_{dc} \times F_r$ ，交流/直流电阻比 F_r 默认值取 1.2

磁损公式 (Core loss) $P_{core} = K \cdot f_s^a \cdot B_{ac}^b \cdot V_e$

f_s 是频率， B 是磁感应强度的变化量， V_e 是磁芯有效体积

f_s 单位是 kHz, B_{ac} 单位是 mT, V_e 单位是 cm^3 , P_{core} 单位是 mW

K 、 a 、 b 是常数，具体要查看厂家手册(由损耗曲线推算):

对于 Sendust 铁硅铝磁环 (黑或蓝色)，美磁 u60 是 $K=2.5 \times 10^{-4}$ 、 $a=1.28$ 、 $\beta=1.78$ (有直流成分时性价比高)

东睦 u75 是 $K=2.6 \times 10^{-4}$ 、 $a=1.20$ 、 $\beta=2.0$ (有直流成分时性价比高)

对于 HighFlux 高磁通磁环 (绿色)，东睦 u60 是 $K=1.5 \times 10^{-4}$ 、 $a=1.28$ 、 $\beta=2.0$ (直流电流太大时选用)

对于 PC95 或类似变压器磁芯，多数厂家是 $K=2.4 \times 10^{-6}$ 、 $a=1.22$ 、 $b=2.55$ (价格低损耗低，临界模式时首选)

6. 常用 PFC 电感磁环磁芯的主要物理参数 (A_e , V_e , A_p , AL , B_{max} , 每匝长度 MLT) 如下表 1:

磁环型号	材质	损耗/cm3 50kHz0.1T	主要尺寸 (mm)	饱和磁通 $B_{max}(T)$	AL 值 (nH/n ²)	磁芯面积 $A_e (cm^2)$	窗口面积 $A_w (cm^2)$	AP 值 cm^4	磁芯体积 $V_e(cm^3)$	每匝长度 MLT (m)
PQ2625	PC95	20mW	26*25, W=19	0.35	5200	1.18	0.8	0.94	6.53	0.065
PQ3225	PC95	200mW	32*25, W=22	0.35	5500	1.61	1.17	1.89	9.76	0.079
KH130060A	HighFlux	200mW	34*19 T=11	1.5	61	0.67	2.92	1.95	5.48	0.041
KH130060A-2P	HighFlux	200mW	34*19 T=22	1.5	122	1.35	2.92	3.9	11.0	0.065
KH158060A	HighFlux	200mW	41*22 T=18	1.5	122	1.5	3.80	5.70	15.0	0.063
KH158060A-2P	HighFlux	200mW	41*22 T=36	1.5	244	3.0	3.80	11.4	30.0	0.103

7. 150~2000W 常规 PFC 开关管和续流二极管损耗计算表 (表 2)

- $L = ((V_{ac_min}^2) \cdot (V_{pfc} - 1.4 \cdot V_{ac_min})) / (\Delta_{ripple} \cdot 1.05 \cdot P_{out} \cdot V_{pfc} \cdot f_s)$,
- $I_{L_rms} = 1.05 \cdot P_{out} / V_{ac_min}$
- $I_{L_pk} = I_{pk} \cdot (1 + 0.5 \cdot \Delta_{ripple})$, $I_{pk} = 1.4 \cdot I_{L_rms}$
- $AP = L \cdot I_{L_pk} \cdot I_{L_rms} \cdot 10^4 / (K_u \cdot B_{max} \cdot J)$, $J=600$
- 对于 PQ 开头的磁芯 $N = L \cdot I_{L_pk} / (A_e \cdot B_{max} \cdot 0.8 \cdot 100)$, 对于 KH 磁环, $N = (1000 \cdot L / AL)^{0.5}$, L 单位用 μH , A_e 单位用 cm^2 .
- $S \geq I_{rms} / 6$, 单位是 mm^2
- $R_{dc} = 0.01 \cdot 2.1 \cdot ML \cdot N / S$, 单位是 Ω
- 若 $\Delta_{ripple} < 1.0$ 时 $B_{ac} = 10 \cdot L \cdot \Delta_{ripple} \cdot I_{L_pk} / (N \cdot A_e)$, 单位 mT; 若 $\Delta_{ripple} > 1.0$, 则 $B_{ac} = 10 \cdot L \cdot I_{L_pk} / (N \cdot A_e)$, 单位 mT
- $P_{cu} = I_{rms}^2 \cdot R_{dc} \cdot 1.2$
- $P_{core} = K \cdot f_s^a \cdot B_{ac}^b \cdot V_e$, 对于 PQ 磁芯 $K=1.6 \times 10^{-9}$ 、 $a=1.22$ 、 $b=2.55$, 对于 KH 磁环 $K=1.5 \times 10^{-7}$ 、 $a=1.28$ 、 $\beta=2.0$
注意, 这里的 B_{ac} 单位要用 mT, V_e 单位要用 cm^3
- PFC 开关管导通损耗 $P_{pfc_on} = I_{L_rms}^2 \cdot R_{ds_on}$
- PFC 开关管开关损耗 $P_{pfc_rs_ff} = 0.5 \cdot V_{pfc} \cdot I_{peak} \cdot (tr + tf) \cdot f_s + 0.5 \cdot C_{oss} \cdot V_{pfc} \cdot V_{pfc} \cdot f_s$
- PFC 二极管损耗: $P_{pfc_dio} = 0.5 \cdot I_{L_rms} \cdot 1.2$
- PFC 电路效率: $Eff_{pfc} = P_{out} / (P_{out} + P_{cu} + P_{core} + P_{pfc_on} + P_{pfc_rsff} + P_{pfc_dio})$

名称	Pout	200W	300W	400W	600W	800W	1200W	1500W	2000W
交流输入电压	Vac_min	90	90	90	90	90	90	90	90
PFC 输出电压	Vpfc	400	400	400	400	400	400	400	400
PFC 满载频率	Fs	60k	60k	60k	60k	60k	60k	60k	60k
推荐电感材料		铁氧体	铁氧体	铁氧体	高磁通	高磁通	高磁通	高磁通	高磁通
推荐电感规格		PQ2625	PQ3225	PQ3225	KH13006 0A	KH130060A	KH158060A -H	KH158060A -H	KH158060A -H-2P
电感磁芯面积	Ae	1.18	1.61	1.61	0.67	0.67	1.5	1.5	3.0
电感窗口面积	Aw	0.8	1.17	1.17	2.92	2.92	3.8	3.8	3.8
电感磁芯体积	Ve	6.53	9.76	9.76	5.48	5.48	15	15	30
电感窗口系数	Ku	0.55	0.55	0.55	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
最大磁通量	Bmax(T)	0.3T	0.3T	0.3T	1.35T	1.35T	1.35T	1.35T	1.35T
电感 AL 值	AL	5200	5500	5500	61	61	122	122	244
电感每匝长度	ML	0.065	0.079	0.079	0.041	0.041	0.063	0.063	0.103
电感纹波系数	Δ_{ripple}	2	2	2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
电感量	L (μ H)	220.18	146.79	110.09	489.29	366.96	244.64	195.71	146.79
电感最大电流	I _{L_pk}	6.53	9.8	13.07	11.27	15.03	22.54	28.17	37.57
电感有效电流	I _{L_rms}	2.33	3.5	4.67	7	9.33	14	17.5	23.33
电感最小 AP	AP_min	0.339	0.5086	0.6781	1.3615	1.8154	2.7231	3.4039	4.5385
电感最小匝数	N	51	37	37	90	78	45	40	25
铜线面积	S(mm ²)	0.3889	0.5833	0.7778	1.1667	1.5556	2.3333	2.9167	3.8889
最大磁摆幅	Bac(mT)	0.179	0.1052	0.0789	0.0664	0.0432	0.0255	0.0181	0.0139
绕组直流电阻	Rdc(m Ω)	239.03	241.48	241.48	274.34	316.55	245.08	275.71	220.57
电感铜损	Pcu	1.1695	1.5469	2.0625	3.9055	4.513	6.0011	6.6679	9.0846
电感磁损	Pcore	1.7924	2.7496	2.7496	11.681	15.5518	25.5167	32.2945	41.337
开关管型号		ZN65C 1R120	SRC60R0 90BS	ZN65C 1R075	ZN65C 1R075	SRC60R0 90BS	SRC60R0 68BS	SRC60R0 40BST	SRC60R0 30BS
开关管导通电阻	Rds_on	0.12	0.09	0.075	0.075	0.09	0.068	0.04	0.03
开关管上升时间	tr	7ns	28ns	7ns	7ns	28ns	6ns	22ns	30ns
开关管下降时间	tf	10ns	7ns	10ns	10ns	7ns	4ns	13ns	12ns
开关管输出电容	Coss	47pF	136pF	47pF	47pF	136pF	171pF	137pF	136pF
开关管导通损耗	Ppfc_on	0.6533	1.1025	1.6333	3.675	7.84	13.328	12.25	16.3333
开关管开关损耗	Ppfc_rsff	1.5584	4.7688	2.8912	2.5247	6.964	3.5256	12.4911	19.5864
续流二极管损耗	Ppfc_dio	1.398	2.1	2.802	4.2	5.598	8.4	10.5	13.998
PFC 电路效率 @AC90V 满载	Eff_pfc	96.82%	96.07%	97.05%	95.85%	95.19%	95.48%	95.29%	95.22%