已知参数：

最低输入电压	$Vinmin := 56V$
额定输入电压	$Vinnom := 58V$
最高输入电压	$Vinmax := 60V$
预期谐振频率	$fr := 100 \times 10^{3}Hz$
输出最小电压	$Vomin := 41V$
输出额定电压	$Vonom := 50V$
输出最高电压	$Vomax := 59V$
额定输出电流	$Io := 1.2A$
整流管压降	$VF := 0.7V$

假设额定输入电压对应额定输出电压

理论匝比为

$$n := \frac{Vinnom}{2 \times (Vonom + VF)} = 0.572$$

在3种不同的输出电压下LLC主回来增益为Gmin , Gnom , Gmax

$$Gmin := \frac{2 \times n \times (Vomin + VF)}{Vinmax} \qquad Gnom := \frac{2 \times n \times (Vonom + VF)}{Vinnom} \qquad Gmax := \frac{2 \times n \times (Vomax + VF)}{Vinmin}$$

$$Gmin = 0.795 \qquad Gnom = 1 \qquad Gmax = 1.22$$

主变的电感量Lm和谐振电感Ls的比值k，k值一般选择在3 – 10，目前选取k值为5

$k := 5$

LLC主回路的增益特性

$$G(f , Q) := \frac{k \times \left(\frac{f}{fr}\right)^{2}}{\sqrt{\left[(1 + k) \times \left(\frac{f}{fr}\right)^{2} - 1\right]^{2} + Q^{2} \times k^{2} \times \left(\frac{f}{fr}\right)^{2} \times \left(\frac{f^{2}}{fr^{2}} - 1\right)^{2}}}$$

在最高输出电压条件下，LLC回路最大增益可允许的最大Q值Qmax和对应的最小工作频率

$$Qmax := 0.65 \times \frac{1}{k \times Gmax} \times \left(k + \frac{Gmax^2}{Gmax^2 - 1} \right)^{0.5} \qquad fmin := \frac{fr}{\sqrt{1 + k \times \left(1 - \frac{1}{Gmax^2} \right)}}$$

$$Qmax = 0.302 \qquad fmin = 6.157 \times 10^4 \times Hz$$

三种不同输出电压下输出阻抗这算到原边的AC阻抗为

$$Re\_Vomin := \frac{Vomin}{Io} \times \frac{8}{\pi^2} \times n^2 = 9.061\,\Omega$$

$$Re\_Vonom := \frac{Vonom}{Io} \times \frac{8}{\pi^2} \times n^2 = 11.05\,\Omega$$

$$Re\_Vomax := \frac{Vomax}{Io} \times \frac{8}{\pi^2} \times n^2 = 13.039\,\Omega$$

$$Ls1 := Qmax \times \frac{Re\_Vomax}{2 \times \pi \times fr} \qquad Cr1 := \frac{1}{4 \times \pi^2 \times Ls1 \times fr^2} \qquad Lm1 := k \times Ls1$$

$$Ls1 = 6.277 \times \mu H \qquad Cr1 = 403.545 \times nF \qquad Lm1 = 31.385 \times \mu H$$

选取电容为400nF，谐振电感选取6．3μH

$$Cr := 400nF \qquad Ls := 6.3\mu H \qquad Lm := 31.4\mu H$$

$$fr\_actual := \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{Ls \times Cr}}$$

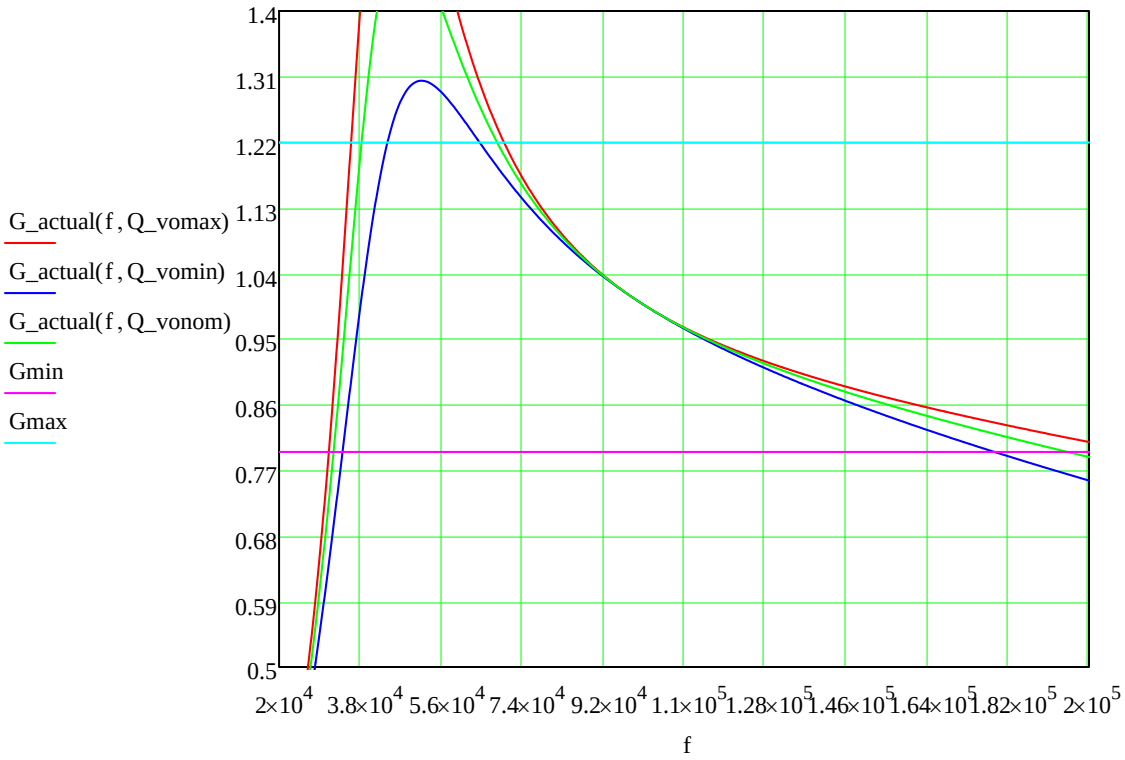
$$fr\_actual = 1.003 \times 10^5\,s^{-1}$$

$$k\_actual := \frac{Lm}{Ls} = 4.984$$

$$Q\_vomax := \frac{2 \times \pi \times fr\_actual \times Ls}{Re\_Vomax} \qquad Q\_vomin := \frac{2 \times \pi \times fr\_actual \times Ls}{Re\_Vomin} \qquad Q\_vonom := \frac{2 \times \pi \times fr\_actual \times Ls}{Re\_Vonom}$$

$$Q\_vomax = 0.304 \qquad Q\_vomin = 0.438 \qquad Q\_vonom = 0.359$$

$$G\_actual(f, Q) := \frac{k\_actual \times \left(\frac{f}{fr\_actual} \right)^2}{\sqrt{\left[(1 + k\_actual) \times \left(\frac{f}{fr\_actual} \right)^2 - 1 \right]^2 + Q^2 \times k\_actual^2 \times \left(\frac{f}{fr\_actual} \right)^2 \times \left(\frac{f^2}{fr\_actual^2} - 1 \right)^2}}$$



$f\_vomax := root(G\_actual(f, Q\_vomax) - Gmax, f, 50000Hz, 90000Hz) = 6.999 \times 10^4 \times Hz$

$f\_vonom := root(G\_actual(f, Q\_vonom) - Gnom, f, 50000Hz, 150000Hz) = 1.003 \times 10^5 \times Hz$

$f\_vomin := root(G\_actual(f, Q\_vomin) - Gmin, f, 50000Hz, 300000Hz) = 1.789 \times 10^5 \times Hz$

变压器计算

磁芯选取PQ2625

$Ae := 118mm^2$ $Bmax := 0.2T$ $\Delta B := 2 \times Bmax = 0.4T$

$$Ns1 := \frac{Vomax}{2 \times f\_vomax \times Ae \times \Delta B} = 8.93$$

选取副边匝数为9匝

$Ns := 9$

$Np1 := Ns \times n = 5.148$

选取原边匝数为5匝

$Np := 5$

$n\_actual := \frac{Np}{Ns} = 0.556$

原边RMS电流： $Ioe := \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \times \frac{Io}{n\_actual} = 2.399\ A$

频率最小时励磁电流： $I_m := \frac{2 \times \sqrt{2}}{\pi} \times \frac{n\_actual \times Vonom}{2 \times \pi \times f\_vomax \times Lm} = 1.811\ A$

谐振电流：$Ir := \sqrt{Ioe^2 + I_m^2} = 3.006\ A$

变压器原边电流： $Ip := Ir = 3.006\ A$

副边总RMS电流：$Ioe\_s := Ioe \times n\_actual = 1.333\ A$

流过每个绕组的RMS电流为：$Irect := \frac{\sqrt{2}}{2} \times Ioe\_s = 0.942\ A$

电流密度： $j := 5\frac{A}{mm^2}$

所需原边绕组导线截面积为 $Sp := \frac{Ip}{j} = 6.012 \times 10^{-7} m^2$

可选择多股线0. 15*10*2*2 则原边导线截面积为 $S\_actual := \pi \times \left(\frac{0.15mm}{2}\right)^2 \times 40 = 7.069 \times 10^{-7} m^2$

副边需要的导线面积为： $S\_s := \frac{Irect}{j} = 1.885 \times 10^{-7} m^2$

可选择多股线0. 15*15 $S\_actual\_2 := \pi \times \left(\frac{0.15mm}{2}\right)^2 \times 15 = 2.651 \times 10^{-7} m^2$

窗口面积核算： $Aw1 := Np \times S\_actual + Ns \times S\_actual\_2 = 5.92 \times mm^2$

PQ2625的窗口面积： $Aw := 84.5mm^2$

谐振电感磁芯选择EE13： $Ae\_L := 17.1mm^2$

谐振电感的Bmax取值：$Bmax\_L := 0.2T$

$$N\_L := \frac{Ls \times Ir}{Bmax\_L \times Ae\_L} = 5.537$$

$$I_{max} := \frac{2 \times Bmax\_L \times Ae\_L \times 6}{Ls} = 6.514\ A$$

匝数取整数为： $N\_L\_actual := 6$

谐振电感需要的导线截面积为 $S\_L := \frac{Ir}{j} = 6.012 \times 10^{-7} m^2$

可选择多股线 0.15mm*40 $S\_L\_actual := \pi \times \left(\frac{0.15mm}{2}\right)^2 \times 40 = 7.069 \times 10^{-7} m^2$

窗口面积核算：$Aw\_L := N\_L\_actual \times S\_L\_actual = 4.241 \times mm^2$

磁芯的窗口面积为： $Aw\_L\_actual := 33.35mm^2$

MOS选取安森美的FDP150N10A

$Rds := 0.015\Omega \quad Coer := 436pF \quad Coss := 355pF$

流过每个MOS的电流为 $Imos := \frac{Ir}{\sqrt{2}} = 2.126\,A$

MOS管功耗： $Pmos := Imos^2 \times Rds = 0.068\,W$

ZVS设计：

频率最大时励磁电流有效值为：

$$Imnom := \frac{2\times\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{n\_actual \times Vomin}{2\times\pi\times f\_vomin \times Lm} = 0.544\,A$$

$Impk := \sqrt{2} \times Imnom = 0.77\,A$

$E\_L := \frac{1}{2} \times (Lm + Ls) \times Impk^2 = 1.117 \times 10^{-5}\,J$

$E\_C := \frac{1}{2} \times (2 \times Coer)\, Vinnom^2 = 1.467 \times 10^{-6}\,J$

$E\_L \geq E\_C$

$t\_dead \geq 16 \times Coss \times f\_vonom \times Lm$

$16 \times 355pF \times 178.9 \times 10^3 Hz \times 31.4\mu H = 31.907 \times ns$

死区时间大于32ns即可实现ZVS。

次级整流管电压、电流、损耗计算：

$VD\_max := 2 \times Vomax = 118\,V$

$ID\_avg := \frac{Io}{2} = 0.6\,A$

$PD\_loss := VF \times ID\_avg = 0.42\,W$

谐振电容的电流有效值与最大电压值：

$Icr\_rms := Ir = 3.006\,A$

$$Vcr := \frac{Vinmax}{2} + \sqrt{2} \times \frac{Icr\_rms}{2\pi\times f\_vonom \times Cr} = 45.643\,V$$

输出电容参数计算：

$Ico := \sqrt{Ioe\_s^2 - Io^2} = 0.58\,A$

$Vo\_pk := 0.01 \times Vomax = 0.59\,V$

$Ioe\_s\_pk := \sqrt{2} \times Ioe\_s = 1.885\,A$

$$ESR := \frac{Vo\_pk}{Ioe\_s\_pk} = 0.313\,\Omega$$

输出电解电容选取江海的ECR1JGC181M1J100030,其100kHz时的参数如下：

$ESR\_C := 0.085\Omega \quad I\_C := 1.02A$

可用2个该电容并联使用。

变压器损耗计算：

铜电阻系数： $k\_copper := 0.01724 \times 10^{-3}\Omega \times mm$

PQ2020绕线时其最小周长为：$C\_min := 12mm \times \pi = 0.038\,m$

$$C\_max := 22.5mm \times \pi = 0.071\,m$$

$$C\_avg := \frac{(C\_min + C\_max)}{2} = 0.054\,m$$

原边绕线长度约为：$L1 := Np \times C\_avg = 0.271\,m$

原边导线电阻：$R\_copper := k\_copper \times \frac{L1}{S\_actual} = 6.609 \times 10^{-3}\,\Omega$

原边铜损为： $P\_loss\_copper := Ir^2 \times R\_copper = 0.06\,W$

副边绕线长度约为： $L2 := Ns \times C\_avg = 0.488\,m$

副边导线电阻：$R\_copper1 := k\_copper \times \frac{L2}{S\_actual\_2} = 0.032\,\Omega$

副边铜损为： $P\_loss\_copper1 := Irect^2 \times R\_copper1 = 0.028\,W$

变压器总铜损为（副边具有中心抽头，需要乘以2）：

$$P\_loss\_copper2 := P\_loss\_copper + 2 \times P\_loss\_copper1 = 0.116\,W$$

变压器的铁损可以根据PC95磁芯的损耗曲线来计算，

$Bm := 0.2T$ 频率为100kHz 温度为80℃ 单位磁芯损耗：

$$Pv := 300\,\frac{kW}{m^3}$$

PQ2625体积：$Ve := 6530mm^3$

则铁损：$P\_loss\_fe := Pv \times Ve = 1.959\,W$

则变压器总损耗：$P\_loss\_T := P\_loss\_copper2 + P\_loss\_fe = 2.075\,W$

谐振电感损耗计算：

电感绕线一周的周长约为：$L\_L := (2.75 + 6.15)mm \times 2 \times 1.2 \times Ns = 0.192\,m$

则电感导线电阻为$R_L := k_copper \times \frac{L_L}{S_actual} = 4.689 \times 10^{-3}\,\Omega$

谐振电感铜损为：$P\_loss\_copper\_L := Ir^2 \times R\_L = 0.042\,W$

磁芯EE13的体积：　　$Ve\_L := 517mm^3$

则铁损：$P\_loss\_fe\_L := Pv \times Ve\_L = 0.155\,W$

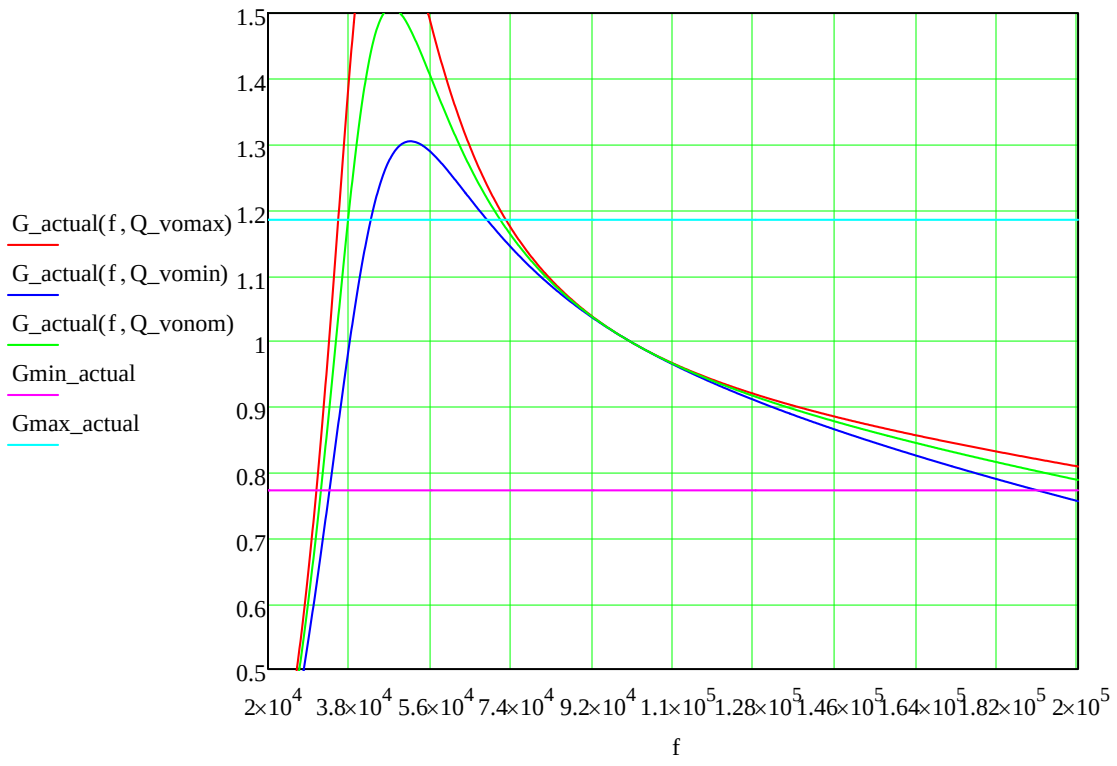
则谐振电感的损耗为$P_loss_L := P_loss_copper_L + P_loss_fe_L = 0.197\,W$

在3种不同的输出电压下LLC主回来增益为Gmin,Gnom,Gmax

$$Gmin\_actual := \frac{2 \times n\_actual \times (Vomin + VF)}{Vinmax} \qquad Gnom\_actual := \frac{2 \times n\_actual \times (Vonom + VF)}{Vinnom} \qquad Gmax\_actual :=$$

$$Gmin\_actual = 0.772 \qquad Gnom\_actual = 0.971 \qquad Gmax\_actual =$$

$$G\_actual(f, Q) := \frac{k\_actual \times \left(\frac{f}{fr\_actual}\right)^2}{\sqrt{\left[(1 + k\_actual) \times \left(\frac{f}{fr\_actual}\right)^2 - 1\right]^2 + Q^2 \times k\_actual^2 \times \left(\frac{f}{fr\_actual}\right)^2 \times \left(\frac{f^2}{fr\_actual^2} - 1\right)^2}}$$



$$f\_vomax := root(G\_actual(f, Q\_vomax) - Gmax\_actual, f, 50000Hz, 90000Hz) = 7.286 \times 10^4 \times Hz$$

$f\_vonom := \text{root}(G\_actual(f, Q\_vonom) - Gnom\_actual, f, 50000\,Hz, 150000\,Hz) = 1.081 \times 10^{5} \times Hz$

$f\_vomin := \text{root}(G\_actual(f, Q\_vomin) - Gmin\_actual, f, 50000\,Hz, 300000\,Hz) = 1.91 \times 10^{5} \times Hz$

$$= \frac{2 \times n\_actual \times (Vomax + VF)}{Vinmin}$$

$$= 1.185$$