

做反激式 LED 驱动前. 先了解下电磁方面几个重要的定义.

$B \rightarrow$ 指磁感应强度.

$H \rightarrow$ 指磁场强度

$\mu \rightarrow$ 指磁导率.

B 与 H 两者的关系 $\rightarrow B = \mu H$

代入得

(安培环路定律: $Hl = NI$)

磁场强度和电流 I 匝数 N 及周长 l 有关.

$$B = \frac{\mu NI}{l}$$

$\phi = BAe \rightarrow$ 指一圈的磁通量. (代入得) $\phi = \frac{\mu NI}{l} Ae.$

所以 ϕ 与 N 成正比.

N 圈的磁通量 $\rightarrow \psi$ 为磁通链 $\rightarrow \psi = NBAe = Nd\phi$

① 法拉第电磁感应定律:

感应电动势 V 的大小取决于线圈匝数 N 和穿过线圈的时变磁感应强度 dB

$$V = \frac{d\psi}{dt} = \frac{Nd\phi}{dt} = \frac{NAedB}{dt}$$

即变化的磁场产生变化的电场.

$$\Rightarrow \text{匝数 } N = \frac{Vdt}{AedB} \quad \star$$

② 电感定义:

时变电流 dI 流过线圈时引起线圈中磁通变化会产生电感 L

$$L = \frac{Nd\phi}{dI}$$

因 ϕ 与 N 成正比, 所以 L 与 N^2 成正比 $\rightarrow L = A_L N^2$

自感系数

$$\hookrightarrow LdI = Nd\phi$$

因 $V = \frac{Nd\phi}{dt}$ 所以 $Vdt = Nd\phi \Rightarrow LdI = Vdt \Rightarrow \frac{V}{L} = \frac{dI}{dt} \quad \star$

$$V = \frac{LdI}{dt} \quad \star$$

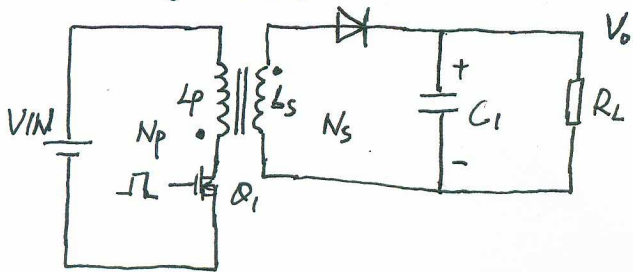
$$\frac{Nd\phi}{dt} = \frac{LdI}{dt} \Rightarrow \frac{NAedB}{dt} = \frac{LdI}{dt}$$

$$\Downarrow L = \frac{Vdt}{dI} \quad \star$$

$$\Rightarrow N = \frac{LdI}{AedB} \quad \star$$

或 $N = \frac{Vdt}{AedB} \quad \star$

反激式线路原理



变压器基本特性:

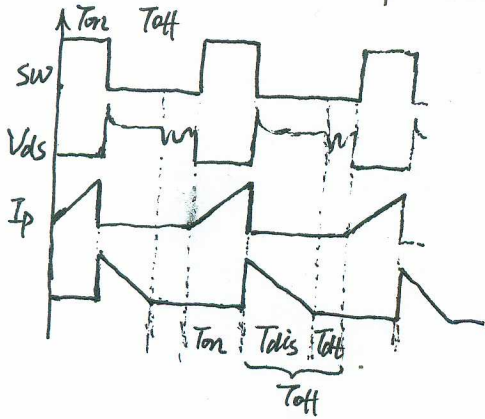
匝比 $N_p = N_p / N_s$

$I_p N_p = I_s N_s \Rightarrow \frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$

$\frac{1}{2} L_p I_p^2 = \frac{1}{2} L_s I_s^2 \Rightarrow \frac{L_p}{L_s} = \frac{N_p^2}{N_s^2}$

$V_{or} = \frac{N_p}{N_s} V_0 = N_p V_0$

DCM 模式时 (即断续状态):



T_{on} : MOS 导通时间

T_{dis} : 变压器复位时间

----- 漏感时间

T_{dt} : 变压器空闲时间
死区时间

T_{off} : MOS 关断时间 $T_{off} = T_{dis} + T_{dt}$

T : 周期 $T = T_{on} + T_{dis} + T_{dt}$

此 I_{in} 指 T_{on} 期间内流过输入电感

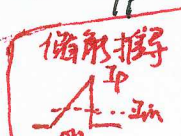
设定: 导通占空比 $D = T_{on} / T$

过程分析

① MOS 导通期间 即 T_{on} 期间

$\frac{V_{in-min}}{L_p} = \frac{I_{pp}}{T_{on-max}} \Rightarrow I_{pp} = \frac{V_{in-min} \cdot T_{on-max}}{L_p}$

变压器储能, 原边电流线性上升



一周期内变压器储能为 $\Rightarrow Z = \frac{1}{2} L_p I_{pp}^2$

一周期内输入功率为 $\Rightarrow P_{in} = \frac{1}{2} L_p I_{pp}^2 / T = \frac{1}{2} L_p I_{pp}^2 f_s = \frac{1}{2} L_p \left(\frac{V_{in-min} T_{on-max}}{L_p} \right)^2 f_s$

$L_p = \frac{2 P_{in} T}{I_{pp}^2} = \frac{2 P_{in}}{I_{pp}^2 f_s} = \frac{V_{in-min}^2 T_{on-max}^2}{2 L_p T} = \frac{V_{in-min}^2 D_{max}^2 T^2}{2 L_p T} = \frac{V_{in-min}^2 D_{max}^2 T}{2 L_p}$

$= \frac{V_{in-min}^2 T_{on-max}^2}{2 P_{in} T} = \frac{V_{in-min}^2 T_{on-max}^2 f_s}{2 P_{in}} = \frac{V_{in-min}^2 D_{max}^2 T}{2 P_{in}} = \frac{V_{in-min}^2 D_{max}^2}{2 L_p f_s}$

$L_p = \frac{2 P_0}{I_{pp}^2 f_s \eta} = \frac{V_{in-min}^2 D_{max}^2 T \eta}{2 P_0} = \frac{V_{in-min}^2 D_{max}^2 \eta}{2 V_0 I_0 f_s}$

代入得 $P_{in} = \frac{P_0}{\eta} = \frac{V_0 I_0}{\eta} \Rightarrow L_p = \frac{2 V_0 I_0}{I_{pp}^2 f_s \eta}$

② MOS 管关断期间 即 $T_{off} = T_{dis} + T_{dt}$ 期间

变压器释放能量, 原边电流线性下降 折算到原边为 $\Rightarrow \frac{V_{or}}{L_p} = \frac{I_{pp}}{T_{dis}}$

$\Rightarrow T_{dis} = \frac{L_p I_{pp}}{V_{or}} = \frac{L_p I_{pp} N_s}{N_p V_0} = \frac{L_p I_{pp}}{N_p V_0}$

根据能量守恒, 伏秒数相等 得

$\frac{V_{in-min} T_{on-max}}{L_p} = \frac{N_p V_0 T_{dis}}{L_p} \Rightarrow V_{in-min} T_{on-max} = N_p V_0 T_{dis}$

$V_{in-min} D_{max} = N_p V_0 D_{dis}$ 得 $= N_p V_0 \frac{T_{on-max}}{T}$

$\frac{V_0}{L_s} = \frac{I_{sp}}{T_{dis}} \Rightarrow I_s = \frac{I_p N_p}{N_s}$
 $L_s = \frac{L_p N_s^2}{N_p^2}$
 $V_{or} = \frac{N_p}{N_s} V_0$

设 $D_{dis} = \frac{T_{dis}}{T}$ 为复位占空比
 $\Rightarrow V_{in-min} \frac{T_{on-max}}{T} = N_p V_0 \frac{T_{dis}}{T}$

反激线路的原理清楚以后. 下面就是根据不同的已知参数. 选择不同的公式. 灵活运用. 灵活计算.

以PT4223为例. 设计GUIO的方案如下:

PT4223工作于DCM模式. $\frac{T_{dis}}{T} = 0.45$ 由IC内部设定. 即 $D_{dis} = 0.45$.

一般IC工作频率典型值是65kHz. 则 $f_s = 65\text{kHz}$. $T = \frac{1}{65 \times 10^3} = 15.4\mu\text{s}$ (可以选其他值)

由 $N_p I_{pp} = N_s I_{sp}$ $I_o = \frac{I_{sp}}{2} \cdot D_{dis}$ ← 调整一个周期的输出电流 I_o

所以 $I_o = \frac{N_p I_{pp}}{N_s \cdot 2} \cdot D_{dis} = \frac{N_{ps} I_{pp} \cdot 0.45}{2} \Rightarrow I_o$ 只与匝比 N_{ps} 和初级峰值电流 I_{pp} 有关

$$\begin{aligned} \text{由 } P_o &= \frac{1}{2} L_p I_{pp}^2 f_s \eta \Rightarrow f_s = \frac{2P_o}{L_p I_{pp}^2 \eta} = \frac{2V_o I_o}{L_p \left(\frac{2I_o}{0.45 N_{ps}}\right)^2 \eta} \\ \Rightarrow f_s &= \frac{2V_o I_o (0.45)^2 N_{ps}^2}{4I_o^2 L_p \eta} = \frac{0.10125 V_o N_{ps}^2}{L_p I_o \eta} \end{aligned}$$

$I_{pp} = \frac{2I_o}{0.45 N_{ps}}$

一般效率 η 为一固定值. 所以工作频率只与 V_o . I_o 和 L_p 有关. I_o 变化会反映到 f_s 的变化. 当负载变化时 (即 V_o 变化) f_s 会变化以维持 I_o 的恒定. 当 L_p 变化时 f_s 会变化以维持 I_o 的恒定. 因此. PT4223的工作模式可以达到很高的电流精度.

GUIO方案设计:

规格: 输入 85~265VAC. 输出 10.5V 320mA.

① 设定纹波电压为60V. 计算输入电压.

最低输入电压 $V_{in-min} = 85 \times 1.414 - 60 = 60.2\text{V}$.

最高输入电压 $V_{in-max} = 265 \times 1.414 = 374.7\text{V}$.

② 选定工作频率. $f_s = 65\text{kHz}$. 则周期 $T = \frac{1}{f_s} = 15.4\mu\text{s}$. $T = T_{on} + T_{dis} + T_{off}$

$T_{dis} = 0.45 T = 0.45 \times 15.4\mu\text{s} = 6.93\mu\text{s}$.

建议 $T_{off} \geq 20\% T = 3.08\mu\text{s}$. ← 要 $T_{off} \geq 1.5 \cdot 2\pi \sqrt{L_p C_{ds}}$. IC内部检测机制

$\Rightarrow T_{on-max} \leq T - T_{dis} - T_{off} \leq 5.39\mu\text{s}$. $\Rightarrow D_{max} = \frac{T_{on-max}}{T} = 35\%$ ← 确定最大占空比

③ 确定匝比 N_{ps} .

由 $V_{in-min} T_{on-max} = N_{ps} V_o T_{dis} \Rightarrow N_{ps} = \frac{V_{in-min} T_{on-max}}{V_o T_{dis}} = \frac{60 \times 5.39}{10.5 \times 6.93} = 4.44$ 匝

④ 计算采样电阻 R_{cs} . (MOS管下管电阻)

$R_{cs} = \frac{0.5\text{V}}{I_{pp}}$ (取 $I_{pp} = \frac{2I_o}{0.45 N_{ps}}$) $\Rightarrow R_{cs} = \frac{0.5 \cdot 0.45 N_{ps}}{2I_o} = \frac{0.1125 \cdot N_{ps}}{I_o} = \frac{0.1125 \times 4.44}{0.32}$

$I_{pp} = \frac{0.5}{R_{cs}}$ (R_{cs} 选 1.5R) $\rightarrow I_{pp} = 0.33\text{A}$ = 1.56R

⑤ 验证一下参数 (为计算更精确)

$$N_{ps} = \frac{R_{cs} \cdot I_o}{0.1125} = \frac{1.5 \times 0.32}{0.1125} = 4.27 \text{ 匝} \quad | \quad I_{pp} = \frac{2 \times 0.32}{0.45 \times 4.27} = 0.333 \text{ A}$$

⑥ 计算 L_p 的值.

$$L_p = \frac{2P_o}{I_{pp}^2 f_s \eta} = \frac{2V_o I_o}{I_{pp}^2 f_s \eta} = \frac{2 \times 10.5 \text{ V} \times 0.32 \text{ A}}{0.33 \text{ A}^2 \times 65 \times 10^3 \text{ Hz} \times \eta} \text{ (H)} = \frac{949.4 \text{ uH}}{\eta} = \frac{949.4 \text{ uH}}{0.9} = 964 \text{ uH}$$

效率 η 选 0.9 的话 \swarrow

另一种算法 $L_p = \frac{V_{in-min} \cdot T_{on-max}}{I_{pp}} = \frac{60 \text{ V} \cdot 5.39 \text{ us}}{0.33 \text{ A}} = 980 \text{ uH}$

两种算法均可以, 但数值还是有些差异. (累加向不大) 我们选第一种算法. 选 960 uH

⑦ 确定初、次级匝数 N_p 和 N_s .

选 EPC13 的磁芯, $A_e = 12.5 \text{ mm}^2$

$$N_p = \frac{L_p I_{pp}}{A_e B_m} = \frac{0.96 \text{ mH} \times 330 \text{ mA}}{12.5 \text{ mm}^2 \times 0.25 \text{ T}} = 101 \text{ 匝}$$

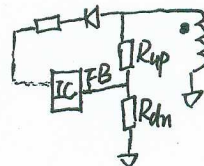
$$N_s = \frac{N_p}{N_{ps}} = \frac{101}{4.27} = 23 \text{ 匝}$$

确定辅助绕组匝数 N_a . 设辅助绕组输出电压 $V_a = 12 \text{ V}$. (建议)

$$\frac{N_a}{N_s} = \frac{12 \text{ V}}{10.5 \text{ V}} \Rightarrow N_a = \frac{12 \times 23}{10.5} = 26.29 \text{ 匝} \quad \text{选 } 26 \text{ 匝}$$

⑧ 选择 IC 辅助绕组两分压电阻 R_{up} 和 R_{dn} .

MOS 导通时, 在输入 20V AC 状态下, 流经 R_{up} 的电流需 1mA 以帮助侦测.



$$\Rightarrow R_{up} = \frac{V_{in} \frac{N_a}{N_p}}{1 \text{ mA}} = \frac{20 \times 1.414 \times 26}{1 \text{ mA} \times 101} = 80.08 \text{ k}\Omega \quad \text{选 } 82 \text{ k}\Omega$$

下拉电阻 R_{dn} 根据过压保护点计算. IC VFB 保护电压 V_{FB_ovp} 为 2.5V.

我们选择 V_o 的 ovp 电压 $V_{o_ovp} = 15 \text{ V}$. 而 $V_{FB_ovp} = 2.5 \text{ V}$

$$\frac{V_{FB_ovp}}{V_{o_ovp} \frac{N_a}{N_s}} = \frac{R_{up}}{R_{up} + R_{dn}} \Rightarrow R_{dn} = \frac{V_{FB_ovp} R_{up}}{\frac{N_a}{N_s} V_{o_ovp} - V_{FB_ovp}}$$

如更精确, 则选 $V_{o_ovp} + V_{ol} = 15.7 \text{ V}$

$$= \frac{2.5 \times 82}{\frac{26}{23} \times 15 - 2.5} = 14.18 \text{ k}\Omega \quad \text{选 } 15 \text{ k}\Omega$$

⑨ 线径选择. \rightarrow 需根据电流有效值计算.

I_{prms} 为初级电流有效值 (原边电流有效值)

I_{srms} 为次级电流有效值 (副边电流有效值)

参考 $\Rightarrow I_{prms} = \frac{I_{PP}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{T_{on}}{T}} = \frac{330mA}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{5.39}{15.4}} = \frac{330mA}{\sqrt{3}} \sqrt{0.35} = 112mA$

$I_{srms} = \frac{I_{SP}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{T_{dis}}{T}} = \frac{1422mA}{\sqrt{3}} \sqrt{0.45} = 550mA$ $I_{SP} = \frac{2I_o}{0.45} = \frac{2 \times 320mA}{0.45} = 1422mA$

验证 $I_{prms} = \frac{I_{srms} \cdot N_s}{N_p} = 129mA \leftarrow$ 以此为佳.

初级线径选择以 $5A/mm^2$ 来计算. 则.

初级面积 $S_p = \frac{0.129A}{5A/mm^2} = 0.0258 mm^2$.

$\pi(\frac{d}{2})^2 = 0.0258 mm^2 \Rightarrow d^2 = 0.033$

可选 0.19 或 $0.2 mm$ 的线

$d = 0.182 mm$

次级线径选择以 $7A \sim 8A/mm^2$

次级面积 $S_s = \frac{0.55A}{7A/mm^2} = 0.079 mm^2$.

$\pi(\frac{d}{2})^2 = 0.079 mm^2 \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4S_s}{\pi}} = \sqrt{0.1} = 0.31 mm$

辅助绕组线径. 因流经电流较小. 一般选 $0.1 \sim 0.2 mm$ 之间的线即可.

可选择 $0.15 mm$ 的线径或更粗一些. 线径太细容易断.