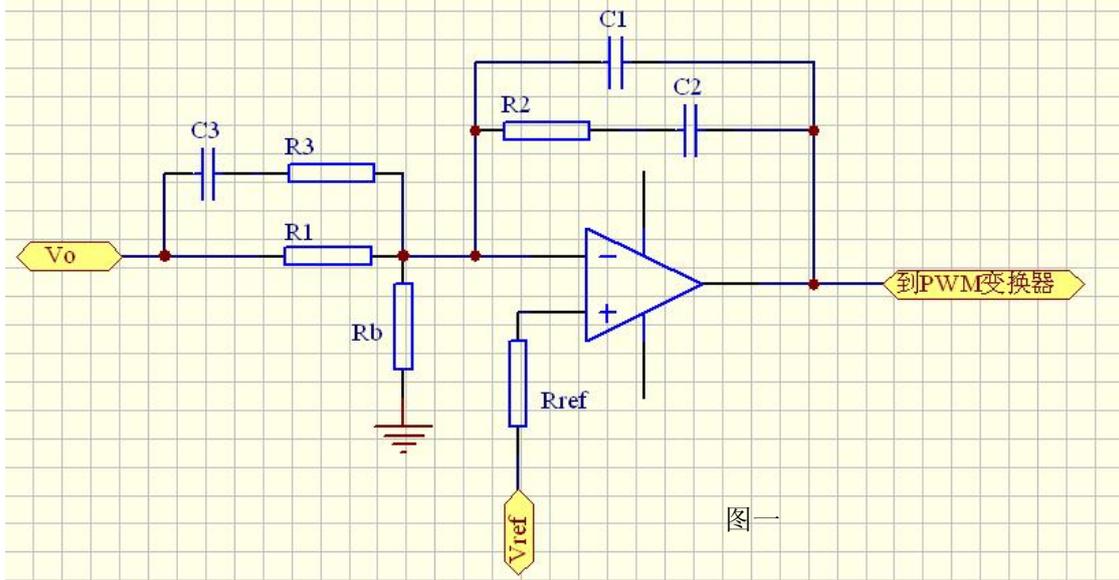


# 我的读书札记之二

——电压反馈型 ccm 反激电路的控制回路设计

By morning

1、电压反馈型的 ccm 反激电路控制回路，多采用三极点二零点的方式进行回路补偿设计，其补偿网络如图一所示：



图一

其传递函数表示如下：

$$\frac{K(1 + \frac{s}{fz1})(1 + \frac{s}{fz2})}{s(1 + \frac{s}{fp1})(1 + \frac{s}{fp2})} \quad (1)$$

其中需满足：

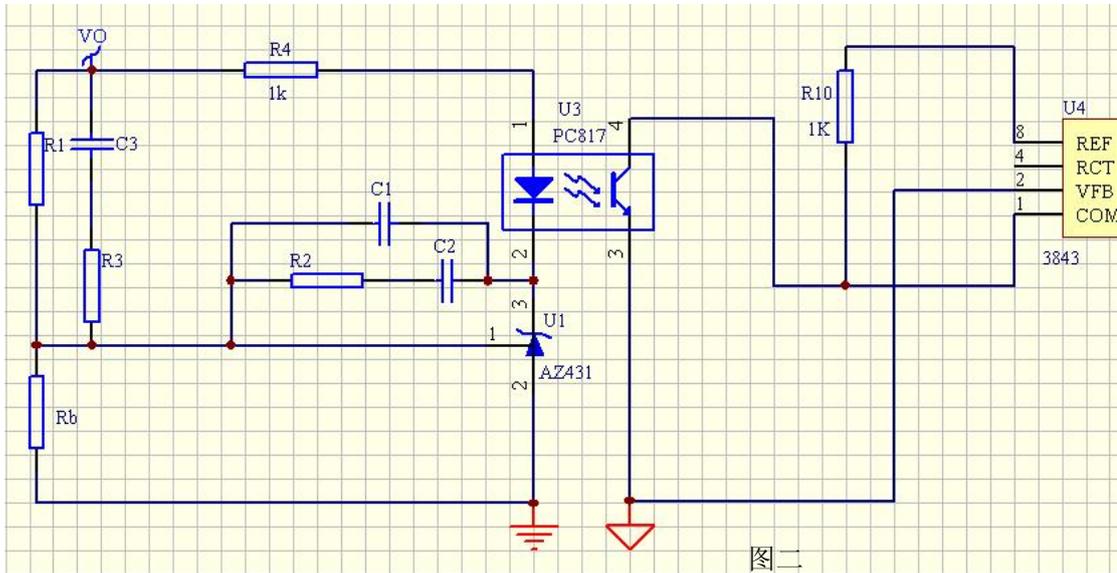
$$\begin{aligned} R1 &\gg R3 \\ C2 &\gg C1 \\ C2 &\gg C3 \end{aligned} \quad (2)$$

有：

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{R1(C1 + C2)} \approx \frac{1}{R1C2} \\ fz1 &= \frac{1}{2\pi R2C2} \\ fz2 &= \frac{1}{2\pi(R1 + R3)C3} \approx \frac{1}{2\pi R1C3} \\ fp1 &= \frac{1}{2\pi R3C3} \\ fp2 &= \frac{C1 + C2}{2\pi R2C1C2} \approx \frac{1}{2\pi R2C1} \end{aligned} \quad (3)$$

补偿网络在直流增益处放置了一个极点，用来提升低频增益，减小静态误差。提供了一对零点，来抵消双重极点引起的相位滞后。fp1 用来抵消输出电解电容引起的零点，fp2 设置于高于穿越频率，用来加速高频衰减。

把该补偿网络带入常见的 pc817+TL431 的反馈环节，则反馈网络见图二：



图二

## 2、设计实例：

输入：85Vac~265Vac      整流后直流：100V~375V  
 输出：19V/6Ω (max)      初级电感：460uH      初级匝数：60Ts      次级匝数：10Ts  
 输出电解电容：3\*1000uF      ESR：30mΩ      振荡波幅度：2.5V

假设选定的 PC817 的 CTR 为：1      R4, R10 同为：1K

如果 CTR 不为 1, R4, R10 都不相等，则需要在补偿网络上乘上： $\frac{R10}{R4} * CTR$ 。这里取 R4, R10 等于 1k 是为了方便计算，不一定能很好的工作。

ccm 反激电路的开环传递函数（不含补偿网络）第一章已经求得，现重写如下：

$$G_{vd}(s) = G_{d0} \frac{\left(1 - \frac{s}{\omega_z}\right)}{\left(1 + \frac{s}{Q\omega_0} + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2\right)} \quad (4)$$

其中：

$$G_{d0} = \frac{V_g n + V}{D'} = \frac{\frac{D'V}{D} + V}{D'} = \frac{V}{DD'}$$

$$\omega_z = \frac{D'(V_g n + V)}{LIn} = \frac{D'^2 R}{DLn^2} \quad (\text{RHP})$$

$$\omega_0 = \frac{D'}{\sqrt{LC}\pi}$$

$$Q = \frac{D'R}{\pi} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (5)$$

则该电路的开环传递函数（包含反馈为  $G_c(s) = -1$  基本反馈网络）为：

$$\frac{1}{Vm} * H(s) * G_c(s) * G_{vd}(s) * \left(1 + \frac{s}{f_{ESR}}\right) \quad (6)$$

其中  $H(s)$  为电压采样环节的传递函数。AZ431 的参考电压为 2.5V，所以得：

$$H(s) = \frac{2.5}{19} \quad (7)$$

把已知条件带入（5）可得：

$$f_{ESR} = \frac{1}{2\pi(R_{ESR}/3)C} = 5.3kHz$$

$$f_{p0} = \frac{W_0}{2\pi} = 564HZ$$

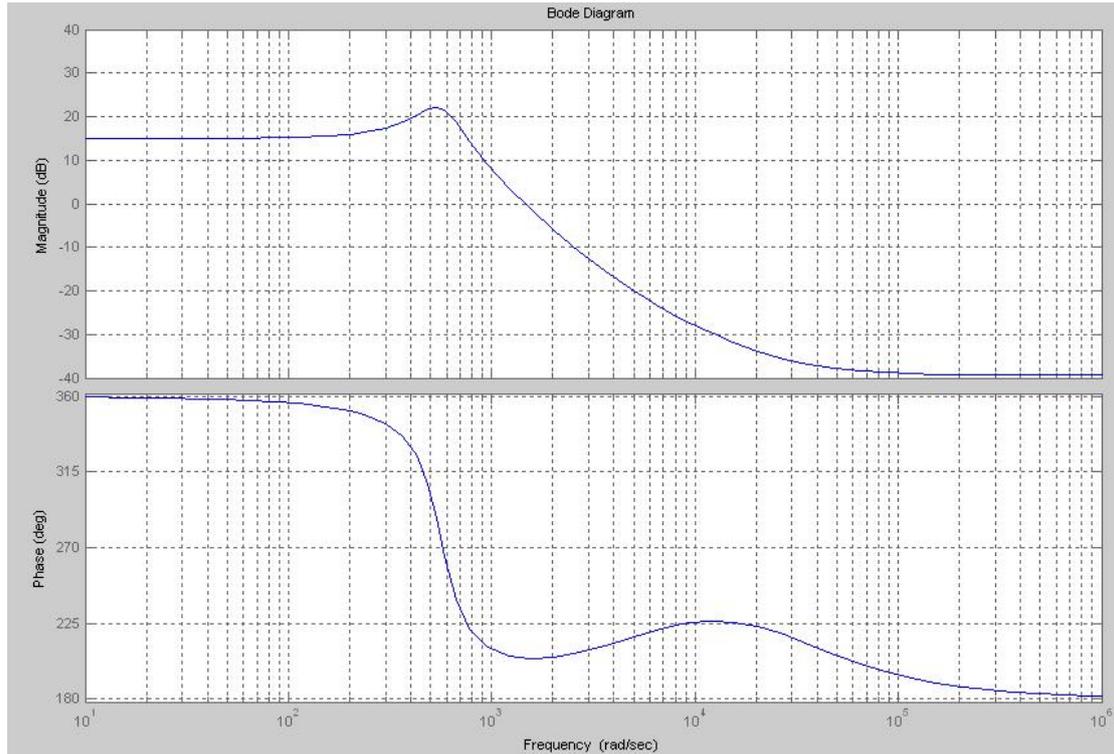
$$f_{z0} = \frac{W_{z0}}{2\pi} = 31kHz$$

$$Q = 2.235 \quad (8)$$

（8）和（7）带入（6）可得最坏情况的  $T(s)$ ：

$$T(s) = 5.58 * \frac{\left(1 + \frac{s}{5.3k}\right)\left(1 - \frac{s}{31k}\right)}{\left(1 + \frac{s}{1260} + \left(\frac{s}{564}\right)^2\right)} \quad (9)$$

使用 matlab 对（9）做仿真，可以得到 bode 图如三所示：



图三

其相位余量为：24.2 度 小于一般工程要求的 45 度，所以需要进行校正。

为避免 RHP 零点的影响令：

$$f_c = \frac{1}{6} f_{z0} = 6.2 \text{KHz}$$

$$f_{z1} = f_{z2} = \frac{1}{2} f_{p0} = \frac{564}{2} = 282 \text{HZ}$$

$$f_{p1} = f_{ESR} = 5.3 \text{kHz}$$

$$f_{p2} = 1.5 f_c = 1.5 * 6.2 \text{k} = 9.3 \text{kHz} \quad (10)$$

在  $f_c$  处控制器的对数幅频特性有：

$$|G_2|_{dB} = 20 \log \frac{f_c}{f_{p0}} - 20 \log |A_{dc}| = 20 \log \frac{6.2 \text{k}}{564} - 20 \log 5.58 = 5.9 \text{dB} \quad (11)$$

$G_2$  为控制器第二个平台的增益

由 (11) 可得相应的幅度增益为：

$$A_2 = 10^{G_2/20} \approx 1.97 \quad (12)$$

$$|G_1|_{dB} = G_2 - 20 \log \frac{f_{p1}}{f_{z2}} = 5.9 - 20 \log \frac{5.3k}{282} = -19.58dB \quad (13)$$

$G_1$  为控制器第一个平台的增益

由 (13) 可得相应的幅度增益为:

$$A_1 = 10^{G_1/20} \approx 0.105 \quad (14)$$

设定分压网络  $R_1$ ,  $R_b$  流过的稳态电流为 1mA, TL431 的  $V_{ref} = 2.5V$

所以:

$$R_b = \frac{2.5}{1mA} = 2.5K\Omega \quad (15)$$

$$R_1 = \frac{19 - 2.5}{1mA} = 16.5K\Omega \quad (16)$$

在第一平台幅度近似表达为:

$$A_1 \approx \frac{R_2}{R_1} \quad (17)$$

从 (17) 可以求得:

$$R_2 = 1.73K\Omega \quad (18)$$

第二平台幅度近似表达式为:

$$A_2 = \frac{R_2}{R_3} \quad (19)$$

从 (19) 可以求得:

$$R_3 = 878\Omega \quad \text{取 } 870\Omega \quad (20)$$

把 (16) (18) (20) (10) 带入 (3) 可以求得:

$$C_2 = \frac{1}{2\pi R_2 f_{z1}} = \frac{1}{2\pi * 1.73 * 10^3 * 282} = 0.326\mu F \quad \text{取 } 0.33\mu F \quad (21)$$

$$C_3 = \frac{1}{2\pi R_1 f_{z2}} = \frac{1}{2\pi * 16.5 * 10^3 * 282} = 0.034\mu F \quad \text{取 } 0.033\mu F \quad (22)$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi R_2 f_{p2}} = \frac{1}{2\pi * 1.73 * 10^3 * 9.3 * 10^3} \approx 0.01\mu F \quad (23)$$

$$K = \frac{1}{R_1 C_2} = \frac{1}{16.5 * 10^3 * 0.33 * 10^{-6}} = 183.7 \quad (24)$$

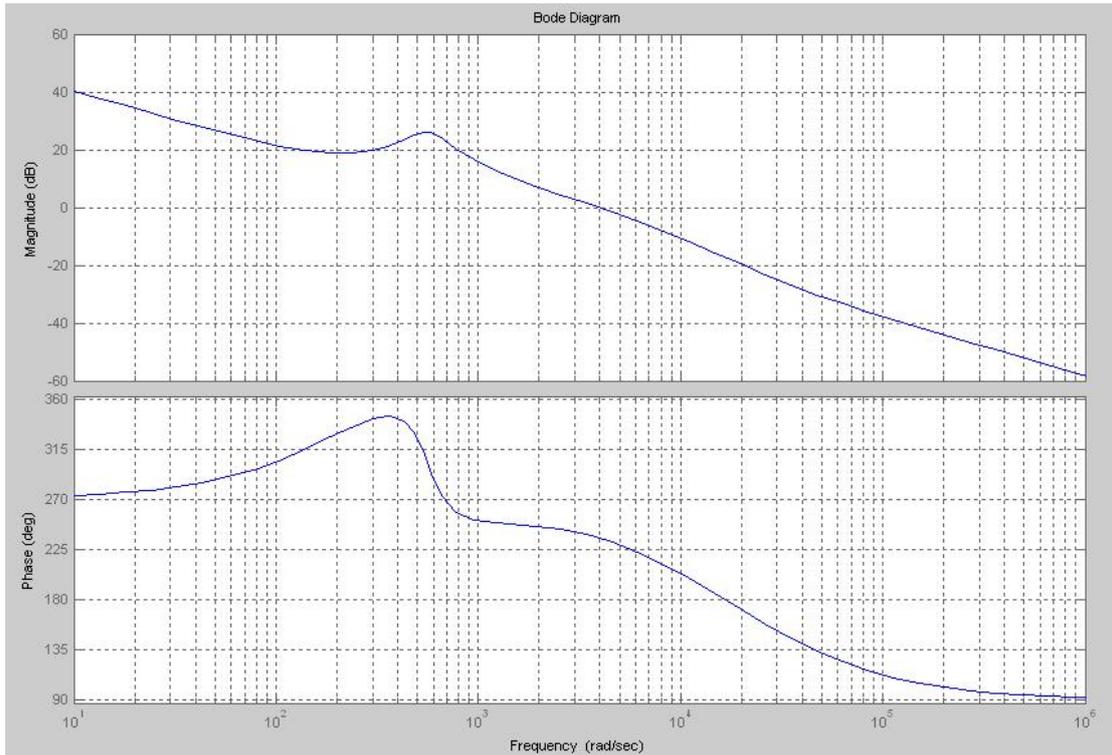
把 (21) ~ (24) 带入 (1) 可得控制器的传递函数为:

$$Gc(s) = 183.7 * \frac{(1 + \frac{s}{282})^2}{s(1 + \frac{s}{5300})(1 + \frac{s}{9300})} \quad (25)$$

校正后的开环传递函数为：

$$Tc(s) = T(s)Gc(s) = 1025 * \frac{(1 + \frac{s}{5300})(1 - \frac{s}{31000})(1 + \frac{s}{282})^2}{s(1 + \frac{s}{1260} + (\frac{s}{564})^2)(1 + \frac{s}{5300})(1 + \frac{s}{9300})} \quad (26)$$

使用 matlab 仿真，其 Bode 图如图四所示：



图四

相位余量为：55.6 度 大于 工程要求 45 度。

参考文献：

- 1、Robert W. Erickson ,Dragan Maksimovic. Fundamentals of Power Electronics
- 2、Cmg 反激电源的控制环路设计
- 3、胡寿松编. 自动控制原理. 北京：国防工业出版社，1994