

下面给大家分析一下耦合信号链路部分关键器件的选择。

一：高压端 LC 选频电路的选择：

如果大家从 TI 网站上下载 TIPLCV3 EVM，对于高压信号输入端是如下图 1 的信号。

其中 J24 和 J22 是一组跳线，用来选择高压电容和电感的搭配，用于针对不同的频段进行选频。

例如 Prime 协议是 CENELEC A 频段，G3 是 FCC 频段等。

下面就以 CENELEC A 频段为例，给大家介绍一下选频的电路结构。

Prime 选择 A 频段，根据 EN50065-1 标准的定义，A 频段为 3kHz 到 95kHz，通常低于 40kHz 的频段会有如下问题：

1. 对于发射电路来说，特别是位于在变压器旁边的 Base Node 来说，负载阻抗系数有时候会小于 1 欧姆。
 2. 色噪声，其经常出现在电力线干扰中的背景噪声之中，电力线上有各种各样具有低能量的噪声，这些噪声以指数方式在低频段累加，就构成了在低频段的经常在电力线的背景噪声中出现的色噪声。
 3. 电表端由于用户的消费行为也会在低频段对信道特性有比较大的影响，例如，各种各样的家用电器导致了显著的和不可预知的随时间变化的传递函数特性和噪声情况的变化。
- 因此，Prime 协议选择的频带为 47.363kHz 以上的 CENELEC A 频段，即 47.363kHz 到 95kHz。

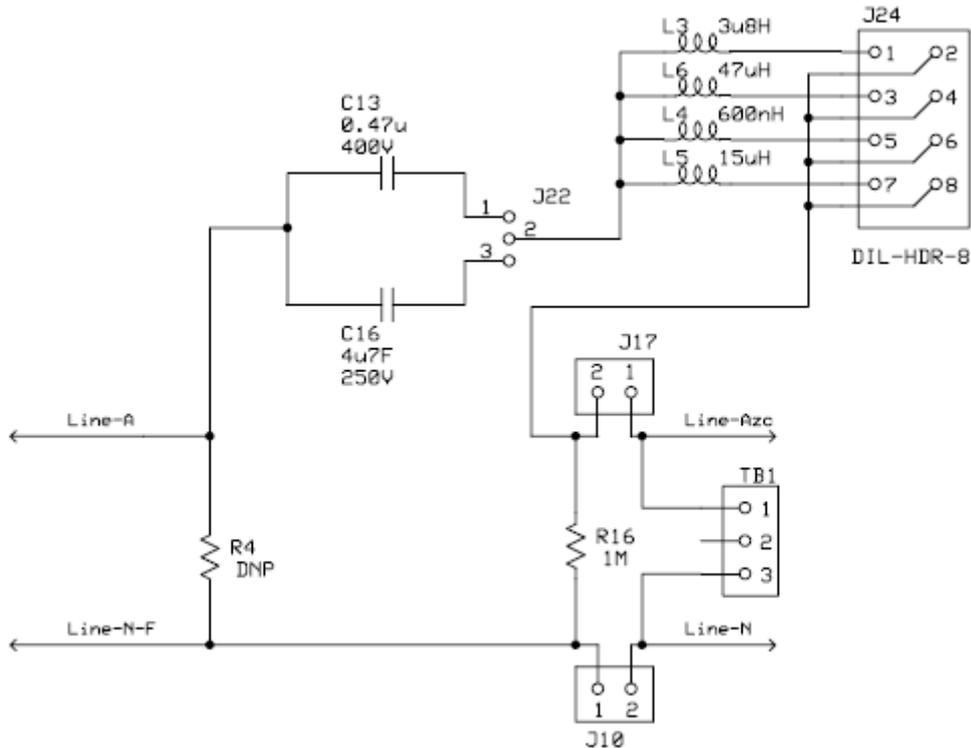


图 1 TI PLCV3 EVM 频段选择电路

上图 1 中，TB1 为高压 220V/110V AC 端子，经过一 LC 串联谐振电路，进入到耦合变压器。

上述线路耦合电路主要有两方面的作用：

- 1) 阻挡 50Hz 或者 60Hz 的工频信号，防止其损坏低压端电路
- 2) 从 AC 线路上耦合 OFDM 信号或者把调制的 OFDM 信号耦合到 AC 线路上

针对 LC 串联谐振电路的典型模型，R 表示线圈 L 的损耗电阻。该电路的交流阻抗为

$Z=R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})$ ，当回路发生谐振时， $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ ，故回路的谐振频率为：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx 60\text{KHz}$$

此时 LC 串联电路谐振回路的阻抗最小且 $Z_0=R$ ；

信号电压一定时，回路的电流最大且 $I_0=V_s/R$ ；电感或电容两端的电压最大，且是信号电压的 Q 倍。Q 的定义为：

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC}$$

Q 叫回路的品质因数。

针对上述串联谐振选频电路的幅频特性、通频带和选择性讨论如下：

1. 幅频特性：

由上图知，该电路的电流

$$\begin{aligned} i &= \frac{\dot{V}_s}{Z} = \frac{\dot{V}_s}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \\ &= \frac{\dot{V}_s}{R} \frac{1}{1 + jQ(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f})} \\ &= \frac{\dot{I}_0}{1 + jQ(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f})} \end{aligned}$$

为方便起见，通常用电流的相对比值（称归一化）来表示串联回路电流的幅频特性：

$$a = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f})^2}}$$

利用上式可画出下图的幅频特性曲线（即谐振曲线）。

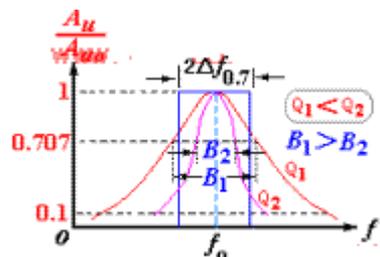


图 2 串联（电压）谐振幅频特性曲线

从曲线看出：Q 值愈大，曲线愈尖锐，回路的选择性愈好。

2. 通频带

在谐振频率附近, $f = f_0 \approx 2f$

$$\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} = \frac{(f + f_0)(f - f_0)}{f_0 f} \approx \frac{2(f - f_0)}{f_0} = \frac{2\Delta f}{f_0}$$

上式代入式 $a = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)^2}}$ 可得

$$a = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \cdot \left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)^2}}$$

满足 $a \geq \frac{1}{\sqrt{2}}$ (即 0.707) 的频率认为可以通过回路, 通过回路的频率范围称通频带, 通频带的宽度用 B 表示,

$$\text{因 } Q \cdot \frac{2\Delta f}{f_0} = 1 \text{ 则 } B = 2\Delta f = \frac{f_0}{Q}$$

由此可见: Q 值越低, 通频带越宽, Q 值越高, 通频带越窄。

3. LC 串联谐振电路回路的选择性

回路的选择性通常用谐振曲线的矩形系数 K_r 来表示, K_r 定义为 a 下降到 0.1 时的频宽 $B_{0.1}$ 与 a 下降到 0.7 时频宽 $B_{0.7}$ 的比值, 即

$$K_r = \frac{B_{0.1}}{B_{0.7}}$$

R、L、C 串联回路的矩形系数为:

$$K_r = \frac{B_{0.1}}{B_{0.7}} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}} = \frac{\sqrt{10^2 - 1} \frac{f_0}{Q}}{\frac{f_0}{Q}} = \sqrt{10^2 - 1} = 9.96$$

理想矩形系数 $K_r=1$, 而 LC 串联回路谐振曲线矩形系数较大, 因此选择性较差。

二: 低压端 TVS 管的选择 (发送链路分析)

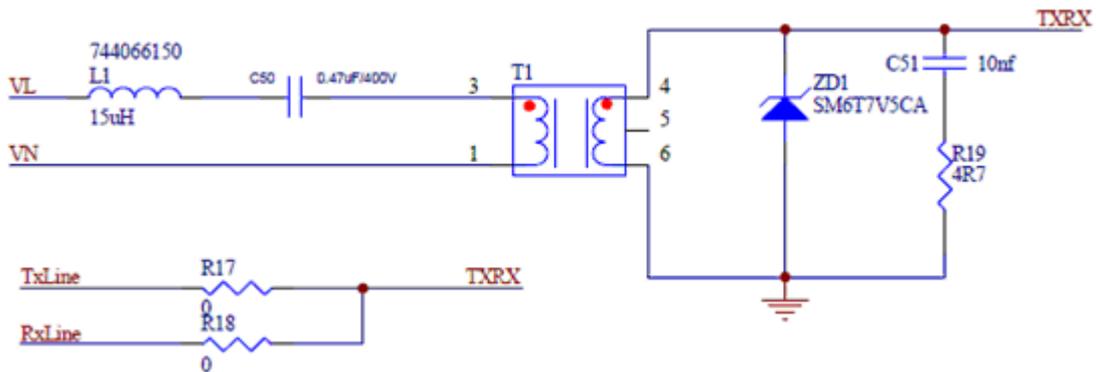


图 3 信号耦合电路

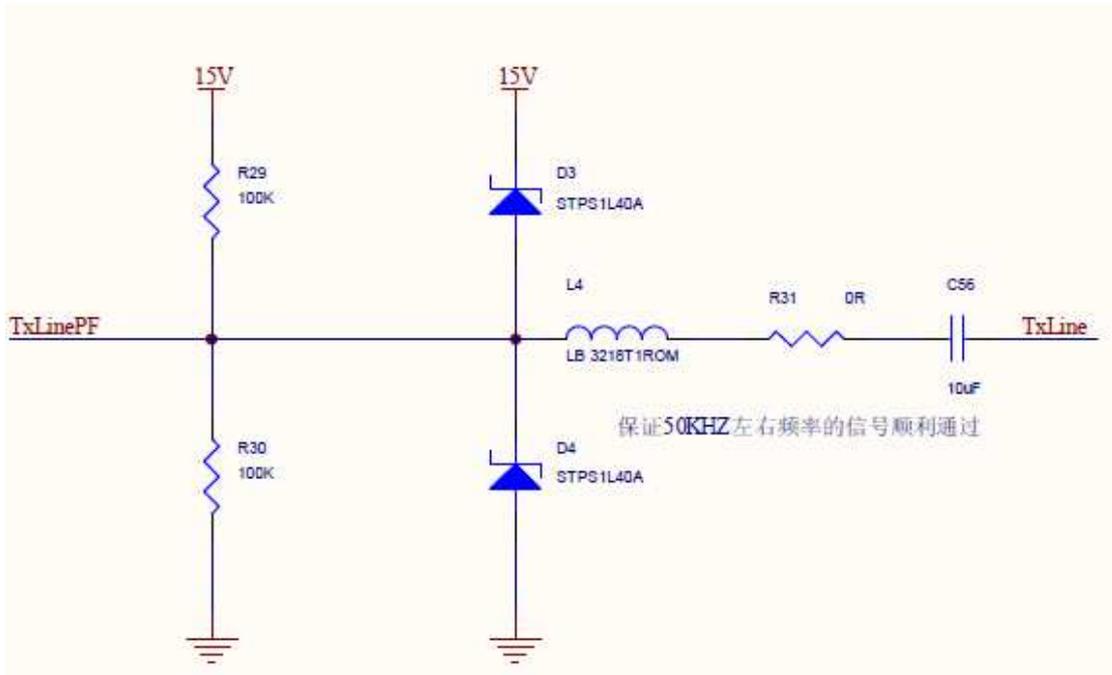


图 4 发送信号链路

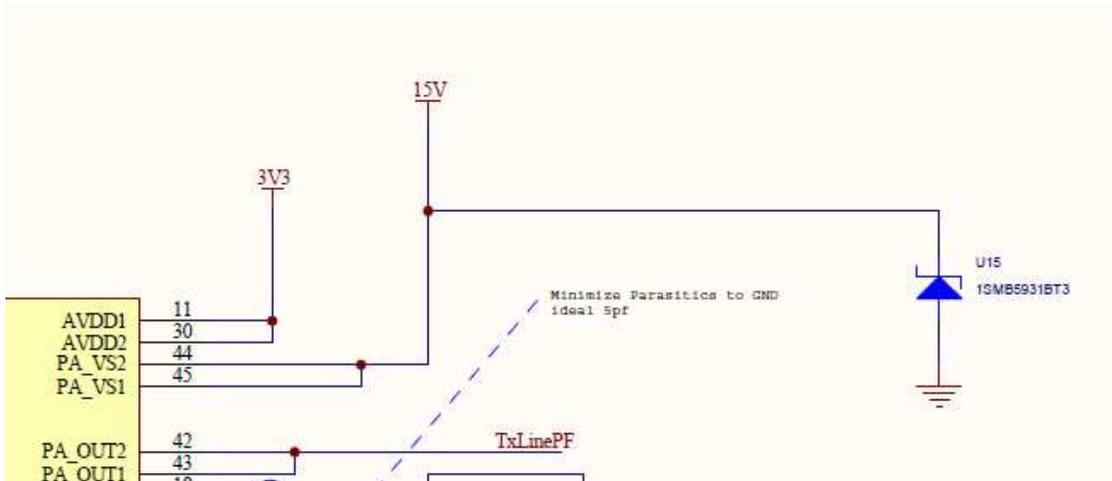


图 5 AFE031 PA 端子与稳压管

由于电力线通信经常会面临严酷的噪声干扰，这些噪声或者浪涌可能来自于照明系统，电容器组合的切换，感应开关或者其他电网错误情况。如果不加保护，这些都有可能损伤高精密电子元器件。下图即为一个典型的保护电路，由金属氧化物压敏电阻 (MOV-metal-oxide varistors)，TVS 管，肖特基二极管，齐纳稳压管等组成。

经过耦合变压器之后，ZD1 为 TVS 管。

此 TVS 管的选择，应该根据功放 (AFE031 中) 的供电来进行选择。有一点明确的是，ZD1 应该选择其击穿电压约为功放 (AFE031) 供电电压的一半。如果 AFE031 为 15V 供电，则 ZD1 的击穿电压应选择 7V5，如上图 3 所示。下图 6 为 AFE031 的数据手册中关于 AFE031 保护电路的推荐电路。

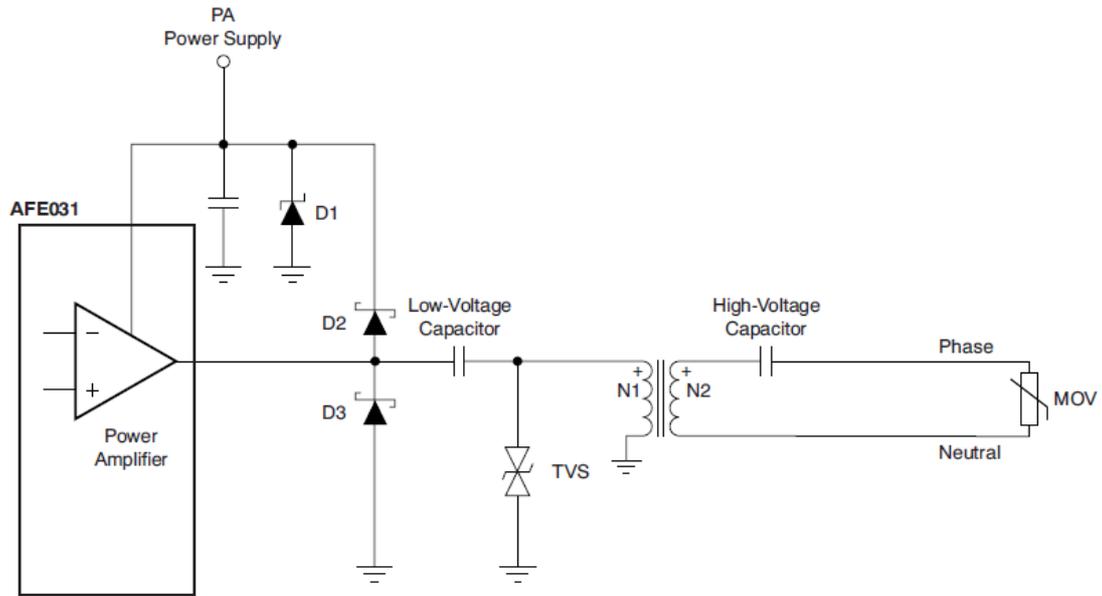


图 6 AFE031 瞬态过压典型保护电路

其中 D1 为齐纳管，D2, D3 为肖特基管。TVS 管击穿电压的选择原理如下：

在稳态的情况下，低压电容（原理图中为 C56）会被充电到约为 AFE031 供电电压一半的电平。当有电压浪涌在电力线上出现时，TVS 管就会将此浪涌钳位到其击穿电压（具体钳位电压还要取决于此浪涌中能量的多少以及 TVS 管能量），此电压加上前面提到的低压电容充电电压，会叠加到 PA 的输出。如果叠加到 PA 输出上的电压超过了 PA 的供电电压，则 AFE031 就会被烧坏。

这其中有一个折中的选择，如果 TVS 管选用的击穿电压小，则会更好地起到保护浪涌的目的，但这也带来了如下的问题：

- 1) 在输出阻抗 (Line impedance) 比较高的情况下，发送信号可能存在比较大的失真。
- 2) 更高的电流功耗。

上图中推荐型号如下：

COMPONENT	240 VAC, 50 Hz		
	DESCRIPTION	MANUFACTURER	MFR PART NO (OR EQUIVALENT)
D1	Zener diode	Diodes, Inc.	1SMB59xxB ⁽¹⁾
D2, D3	Schottky diode	Diodes, Inc.	1N5819HW
TVS	Transient voltage suppressor	Diodec Semiconductor	P6SMBJxxC ⁽²⁾
MOV	Varistor	LittleFuse	TMOV20RP300E
HV Cap	High-voltage capacitor	Illinois Capacitor, Inc	474MKP275KA ⁽³⁾

三：接收链路分析

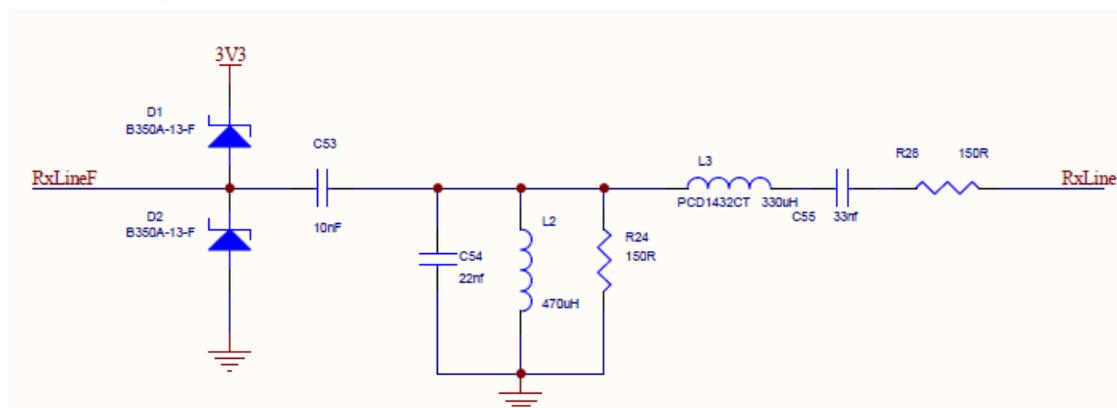


图 7 接收信号链路

从上图 7 可以看出，接收链路分别用了一组电流谐振电路和电压谐振电路构成，中心频率位于 50Khz 左右进行选频。