
示波器的 FFT 功能简介 – 在开关转换器的设计、评估与侦错应用

FFT Function on Oscilloscopes – for Design, Evaluation, or Debug of Switching Converters

摘要

随着科技的进步，现今的示波器除了能观察信号的时域波形之外，还能经由内建的快速傅立叶变换（Fast Fourier Transform; FFT）功能观察信号的频谱。本文将介绍如何在示波器上设定快速傅立叶变换功能，并将此功能有效地应用于开关转换器的设计与侦错上。

目录

一. 前言	2
二. FFT 介绍与示波器的功能限制	2
三. 范例	6
四. 对 EMI 的影响	12
五. 结论	12
六. 参考文献	13

一. 前言

现今在开关转换器的设计、评估及除错的过程中，若需使用到频域的量测，通常都会使用专用的仪器，如使用网络分析仪（Network Analyzer）量测转换器之环路增益（loop gain）和使用 EMI 接收机（EMI Receiver）量测转换器是否符合电磁干扰的相关法规等。

近年来随着示波器功能的提升，快速傅立叶变换（Fast Fourier Transform; FFT）已是示波器的标准配备，使得电源工程师可以在一台示波器上同时观察讯号的时域波形及频域成份。藉由频域上分析电路的电压和电流波形，掌握突波（spike）的频率分布，可使电源工程师在解决 EMI 问题时，能针对特定频率去做改善。除此之外，透过示波器之 FFT 功能来观测电解电容的电流频谱，分离不同频率下的电容电流大小，也有助于预估电容之寿命。

本文将介绍何谓 FFT 及如何在示波器上设定 FFT 功能，并将以标准波形作操作示范。最后，将示范如何将 FFT 功能应用于电源供应器的设计与侦错上。本文中之示范操作皆使用 Rohde & Schwarz 公司的 RTE 1054 示波器，并搭配其所附之软件 RTO Scan。

二. FFT 介绍与示波器的功能限制

众所皆知，傅立叶分析可以对时域信号做频率拆解，其中离散的傅立叶分析可依据时域信号是否具有周期性，而分成离散时间傅立叶变换（Discrete Time Fourier Transform; DTFT）和离散傅立叶变换（Discrete Fourier Transform; DFT），由于 DTFT 转换出来的频域函数是连续频谱，这代表非周期性的时域信号需要由无穷多组不同频率的弦波组成，而 DFT 转换出来的频域函数则为离散频谱，可视为对 DTFT 出来的频谱作等间隔取样。在实际应用上，微处理器的内存有限，只能处理有限的数量，所以微处理器在进行傅立叶变换时只能采用 DFT 的方式。而 FFT 则是能够有效降低 DFT 运算复杂度和运算时间的一种算法，至今被广泛的使用在各科学领域及示波器上。

本章节会介绍在示波器设定上会用到的名词、对应关系和设定上的限制，并以标准波形（正弦波与方波）使为操作范例。

1. 示波器的 FFT 功能与限制

图 1 为 RTE 1054 示波器 FFT 设定的用户接口，红框内的参数为一般示波器在使用 FFT 功能时需要设定的参数。其中，中心频率（Center frequency）、频率跨距（Frequency span）、起始频率（Start frequency）和终止频率（Stop frequency）之间有连动关系，因此只需设定中心频率和频率跨距。为兼顾 FFT 频谱的分辨率和振幅量测，将 Window type 设定为 Hamming，而其余参数设定则将一一说明其功能。

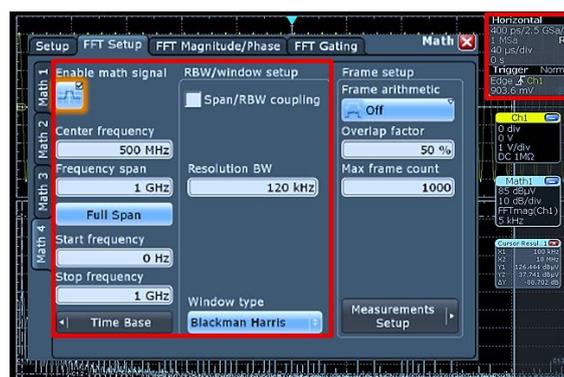


图 1、RTE 1054 示波器 FFT 设定接口

A. 解析带宽（Resolution Bandwidth; Resolution BW; RBW）

解析带宽为 FFT 频谱之最小频率间隔 (Δf)，及决定 FFT 频谱的分辨率，模拟于时域波形中的取样周期 (sampling time; Δt)；解析带宽越窄表示频谱的分辨率越高。而解析带宽与示波器时域波形的纪录长度，或称「撷取时间」(capture time) 为倒数关系，所以调整示波器的撷取时间会改变解析带宽。

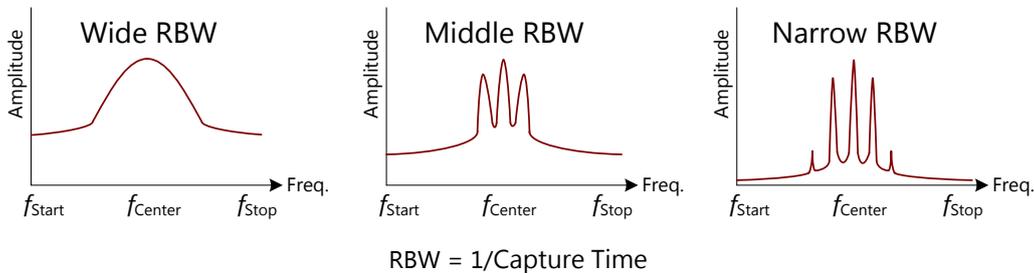


图 2、FFT 解析带宽示意图

B. 撷取时间（Capture time）

如上所述，撷取时间为示波器时域波形的纪录长度，即示波器屏幕上显示波形的时间总和，其值为时间档位 (Time/div) 乘上示波器横轴格数，且与解析带宽为倒数关系。

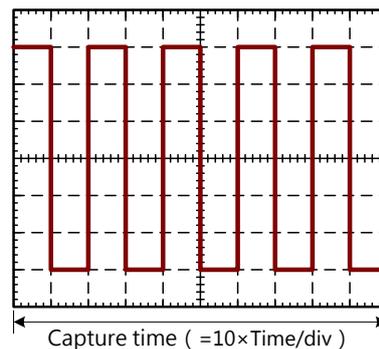


图 3、示波器撷取时间示意图

C. 中心频率（Center frequency; f_{Center} ）、起始频率（Start frequency; f_{Start} ）及终止频率（Stop frequency; f_{Stop} ）

中心频率为 FFT 频谱中横轴所显示的中间频率值；中心频率、起始频率及终止频率关系可参考图 4 及式 (1)。终止频率的设定需考虑到稍后介绍的取样率，简言之，需小于取样率的一半。

$$f_{Center} = \frac{f_{Start} + f_{Stop}}{2} \quad (1)$$

D. 频率跨距（Frequency span）

频率跨距为 FFT 频谱显示的范围，也就是频谱中横轴所显示之终止频率 (f_{Stop}) 和起始频率 (f_{Start}) 的差值，如图 4 所示。

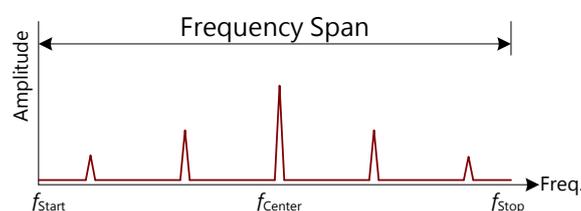


图 4、FFT 频率跨距示意图

E. 取样率 (Sampling rate; f_{Sampling})

取样率和示波器之时域波形分辨率有关，如图 5 所示。取样率为取样周期 (Δt) 的倒数；取样率越高，取样周期即越小，示波器上所呈现的波形分辨率就越高。在使用示波器 FFT 功能时，必须注意奈奎斯特取样定理 (Nyquist Sampling Theorem)，即取样率需大于两倍的终止频率。

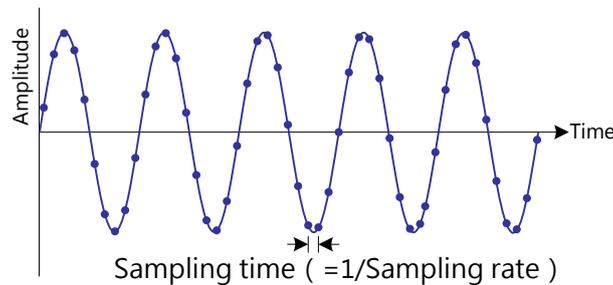


图 5、示波器取样率示意图

了解上述名词之间的对应关系后，可以发现如果想要获得一个分辨率较高的 FFT 频谱，必须将示波器时间档位 (Time/div) 调大，以增加屏幕摄取时间，取得较窄的解析带宽。然而每一台示波器皆有最大取样点数 (sampling point) 之限制，例如本文中所使用的 RTE 1054 示波器之最大取样点数为 40 MSa。

摄取时间的增加会造成取样点数增加，但若已达示波器之最大取样点数，由取样点数=摄取时间 \times 取样率的关系式，得知取样率则被迫降低。而当取样率被降低时，因为需符合 Nyquist Sampling Theorem，可能会影响到 FFT 频谱之终止频率，进而影响到 FFT 频谱的中心频率和频率跨距的大小，使用上须特别注意这些设定。

举例来说，若要在一个最大取样点数为 1 MSa 的示波器上观察解析带宽为 1 kHz 的 FFT 频谱，由式 (2) 至 (4) 可计算出示波器的摄取时间至少要 1 ms，取样率只能到 1 GSa/s，而 FFT 频谱上的终止频率最高就只能到 500 MHz。如果想要观察 500 MHz 以上的频率，就只能加大解析带宽或是使用拥有更大的最大取样点数的示波器。

$$\text{Capture time} = \frac{1}{\text{RBW}} = 1 \text{ ms (} 100 \text{ } \mu\text{s/div) } \quad (2)$$

$$\text{Sampling rate} = \frac{\text{Sampling point}}{\text{Capture time}} = 1 \text{ GSa/s} \quad (3)$$

$$\text{Stop frequency} \leq \frac{\text{Sampling rate}}{2} = 500 \text{ MHz} \quad (4)$$

2. 标准波形的 FFT 范例

标准波形 FFT 实验皆使用 Tektronix AFG3021B 波形产生器产生频率 100 kHz、峰至峰值 400 mV 之正弦波和方波作观察。从正弦波的 FFT 频谱，可以厘清示波器纵轴单位是采用波形电压的峰值、平均值或方均根值做计算；而方波的 FFT 频谱则用来观察不同的上升、下降时间对波形在频域的影响。

A. 正弦波

使用示波器观察正弦波 FFT 频谱，假设频谱之解析带宽为 5 kHz，频谱范围设定在 10 kHz 到 30 MHz。首先，根据解析带宽可以推算出示波器的摄取时间为 200 μs ，因此示波器的时间档位至少要 20 $\mu\text{s/div}$ 。由频谱范围可以观察到频率跨距约为 30 MHz，中心频率约为 15 MHz，为满足 Nyquist Sampling Theorem，取样率至少要 60 MSa/s。图 6 为正弦波之 FFT 频谱，从图上可以观察到主要频率成份确实是在 100 kHz，其幅值为

$$\text{Amplitude at 100 kHz} = 20\log\left(\frac{200 \text{ mV}}{1 \mu\text{V}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}\right) = 103 \text{ dB}\mu\text{V} \quad (5)$$

由上述计算可得知示波器频谱上所示之纵轴幅值是采用信号之方均根值做计算。

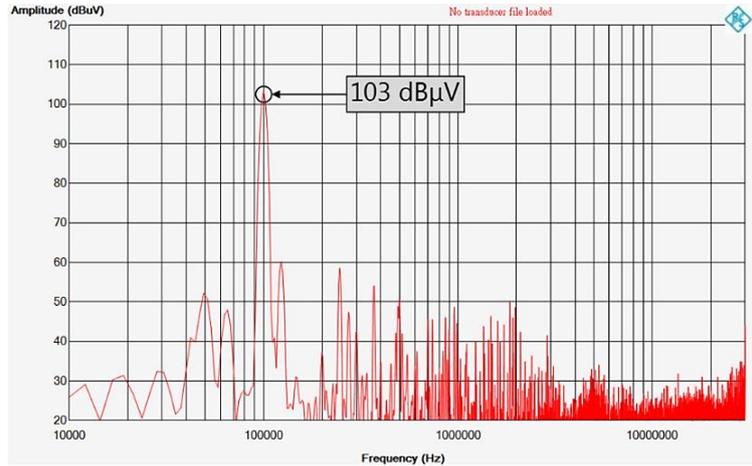


图 6、正弦波频谱

B. 方波

固定示波器 FFT 设定，由波形产生器产生一工作周期 50% 的方波，并将方波之上升时间 (tr) 及下降时间 (tf) 设定至波形产生器之最小值 (18ns)。图 7 为此方波之 FFT 频谱，可以观察到方波之频谱包络 (spectral envelope) 线在中低频时，以 -20 dB/dec 的斜率衰减；当频率大于转折频率 (fc) 时，则会以 -40B/dec 的斜率降低。其转折频率之计算公式为

$$f_c = \text{Max}\left(\frac{1}{\pi \cdot t_r}, \frac{1}{\pi \cdot t_f}\right) \quad (6)$$

将方波之上升、下降时间代入上述公式，可以计算出上升、下降时间为 18 ns 的方波转折频率 (fc1) 为 17.7 MHz。

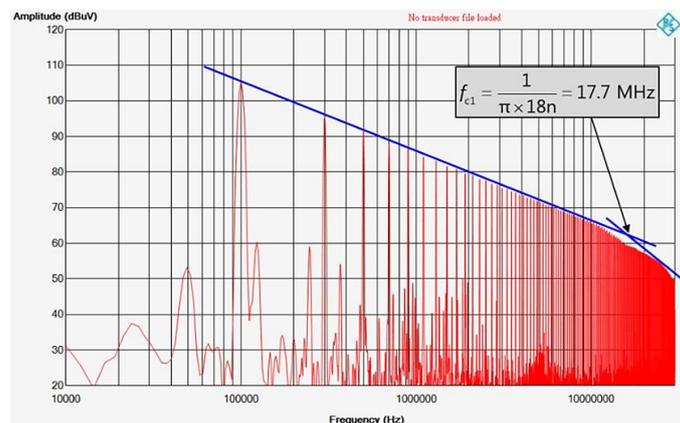


图 7、上升及下降时间为 18 NS 之方波频谱

如果将上升及下降时间增加至 100 ns，透过转折频率的公式可以计算出新的转折频率 (f_{c2}) 降低至 3.18 MHz，图 8 为上升及下降时间为 100 ns 之方波频谱。

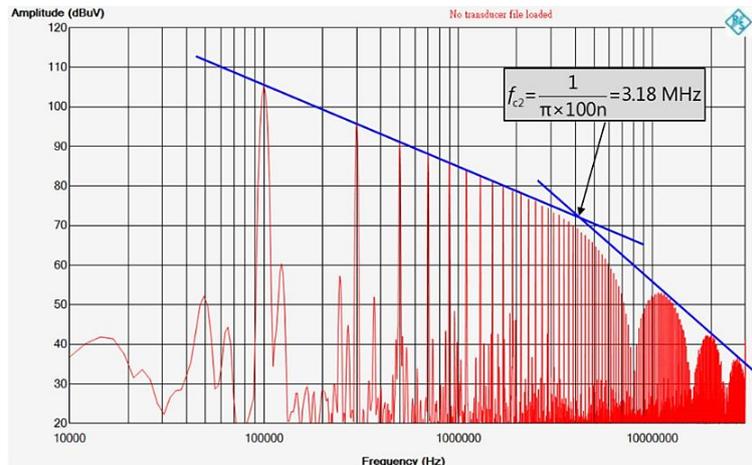


图 8、上升及下降时间为 100 NS 之方波频谱

比对图 7 和图 8 两张方波 FFT 频谱，可以发现如果方波的上升、下降时间越长，转折频率会越低，高频成份就会衰减越多，这也从频域的观点说明了加大开关转换器的 MOSFET 闸极驱动电阻 (gate resistor; R_g) 可使 EMI 滤波器比较容易设计，因 MOSFET 的驱动信号的斜率变缓，以上图来看，转折频率因而降低，能让电路上的高频噪声被衰减得更多。

三. 范例

本章以交流转直流返驰式转换器搭配立锜科技之控制芯片 RT7736 为范例，其输入电压为 90 - 265 V_{ac}、输出电压为 12 V、输出功率为 24 W 的，针对转换器之 MOSFET 电压、输出二极管电压、输出电压涟波、输出电容电流及输入电容电流波形做 FFT 频谱分析，并从频率域的角度观察各波形特性。返驰式转换器常会在变压器一次侧和输出二极管分别并联 RCD 电压箝位电路 (voltage clamp circuit) 和 RC 缓振电路 (snubber circuit)，如图 9 所示。由于传导电磁干扰 (conducted EMI) 法规所规范之最高频率为 30 MHz，因此将示波器的 FFT 频谱范围设定为 10 kHz 到 30 MHz，取样率为 100 MSa/s，解析带宽为 1 kHz。

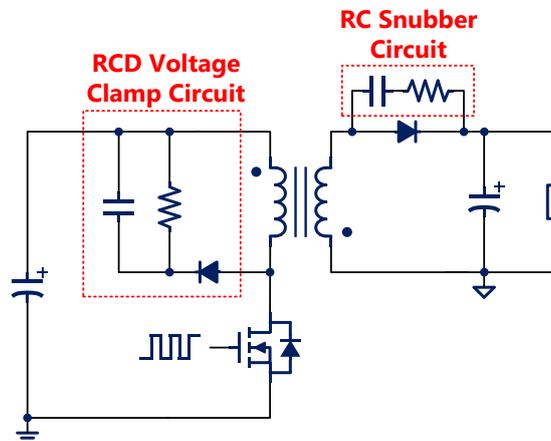


图 9、返驰式转换器示意图

1. MOSFET 之电压

由于 RT7736 内建智能抖频 (SmartJitter™) 功能, 开关频率有 $\pm 6\%$ 的变动范围, 使其频率成份扩散成柱状, 而非在单一频率上。图 10 为满载时 MOSFET 电压波形的 FFT 频谱, 从 65 kHz 附近开始出现开关频率及其谐波的低频成份。在满载时, 变压器的激磁电感 (magnetizing inductance) 工作在连续导通模式 (continuous conduction mode; CCM), MOSFET 电压可近似为一方波, 因此在中低频的地方, 幅值以 -20 dB/dec 的斜率衰减。在 5 MHz 附近, 幅值出现抬升, 则是因为在 MOSFET 关闭瞬间, 漏电感电流在 MOSFET 上产生之高频电压突尖 (voltage spike)。

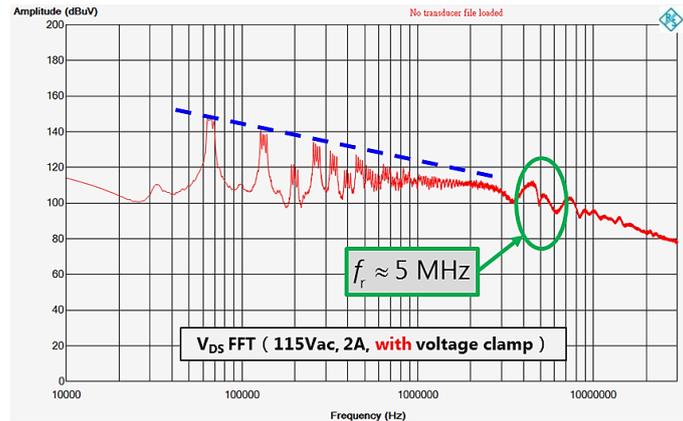


图 10、满载时 MOSFET 电压波形之 FFT 频谱

当负载减轻时, 开关频率逐渐降低, 激磁电感的操作模式从连续导通模式转成不连续导通模式 (discontinuous conduction mode; DCM), 由图 11 可以发现在输出电流降到 0.5 A 时, 开关频率只有 26 kHz, 由于在 DCM 操作的关系, 激磁电感和汲极电容产生的振铃 (ringing) 变化亦会反映在 MOSFET 电压波形上, 因此在频谱上也能看到在振铃频率 (f_{DCM}) 附近的幅值也出现抬升。

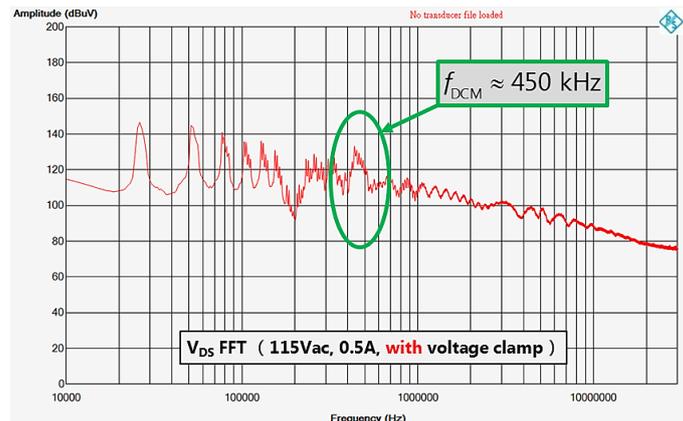


图 11、轻载时 MOSFET 电压波形之 FFT 频谱

图 12 为轻载时未加 RCD 电压箝位电路的 MOSFET 电压频谱, 由于移除 RCD 电压箝位电路后, 漏电感电流在 MOSFET 关闭瞬间少了一条宣泄的路径, 漏电感电流全部都流进 MOSFET 的输出电容 (C_{OSS}), 因而产生更高的电压突尖。比对图 11 和图 12 可以观察到 RCD 电压箝位电路主要作用在电压突尖的频率 (5 MHz) 附近, 衰减了 10 dB, 在中低频段则无明显变化。

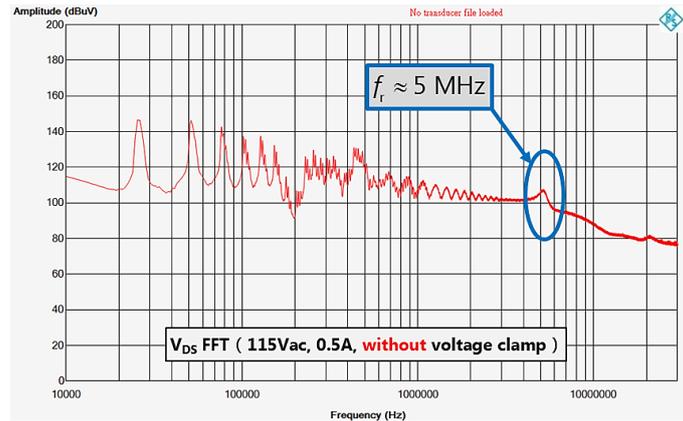


图 12、轻载时未加 RCD 电压箝位电路的 MOSFET 波形电压之 FFT 频谱

2. 输出二极管之电压

通常输出二极管两端会并联一组 RC 缓振电路，其目的是为了吸收在 MOSFET 导通瞬间，因输出二极管的逆向回复电流（reverse recovery current）产生的高频电压尖峰。在设计缓振电路时，需要先知道电压尖峰的频率，以往是使用示波器将时域波形展开并用光标功能进行读值。本文则提供另一种方法：从波形 FFT 频谱找出电压尖峰之频率。图 13 为满载时未加装 RC 缓振电路的输出二极管电压频谱，图中显示电压尖峰的频率为 21 MHz，由此可以设计对应之 RC 缓振电路了。

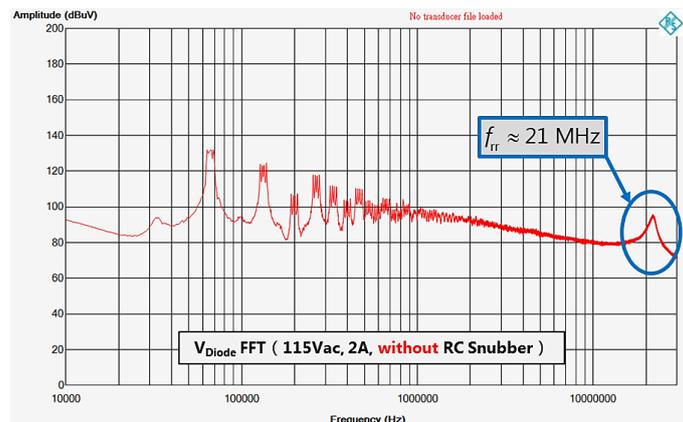


图 13、满载时未加装 RC 缓振电路的输出二极管电压波形之 FFT 频谱

图 14 为加装 RC 缓振电路后的输出二极管电压频谱；比对两张 FFT 频谱，可以看到 RC 缓振电路的抑制效果。由于此时输出二极管电压波形和操作在 CCM 的 MOSFET 电压相似，从图 14 可以看到在中低频段时，输出二极管电压频谱一样是呈现 -20 dB/dec 的衰减斜率，在高频时，则是以 -40 dB/dec 的衰减斜率。

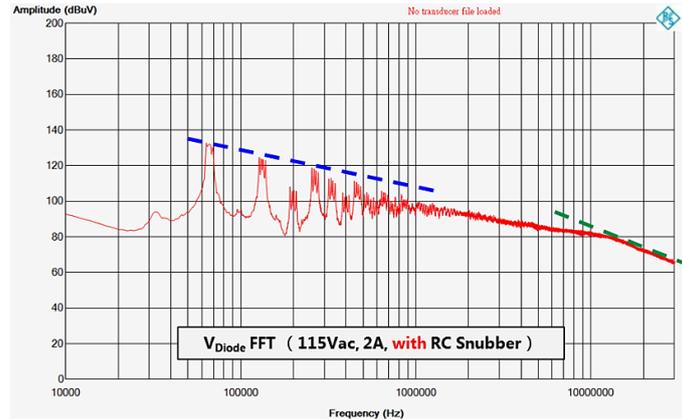


图 14、满载时加装 RC 缓振电路的输出二极管电压波形之 FFT 频谱

3. 输入电容之电流

在实际应用上，铝质电解电容（aluminum electrolytic capacitor）经常被用于输入电容和输出电容，其寿命与环境及电气特性有密切的关系。常见的液态铝质电解电容寿命估算式为

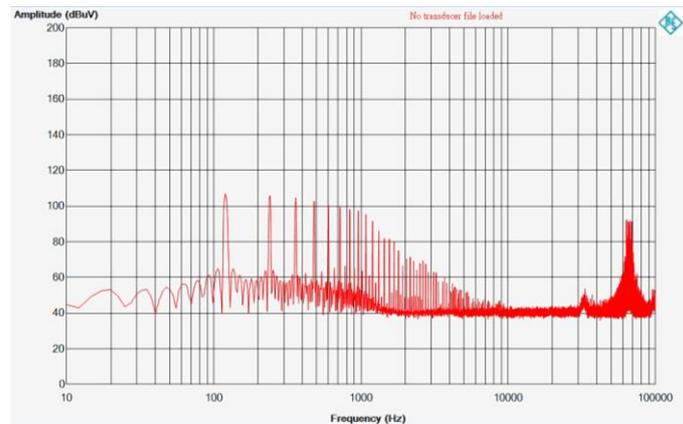
$$L_X = L_O \cdot K_{Temp} \cdot K_{Voltage} \cdot 2 \frac{5 - 5 \cdot \left(\frac{I_{C_rms}}{I_{Rated}} \right)^2}{5} \quad (7)$$

其中， L_X 为待估算之电容寿命， L_O 为厂商提供之保证寿命， K_{Temp} 为周温修正系数， $K_{Voltage}$ 为电压修正系数， I_{C_rms} 为流进电容之涟波电流（RMS）， I_{Rated} 为额定最大容许电流（RMS）。从估算式可以观察到在预估电解电容的寿命时，需要计算涟波电流（ripple current）的方均根值。

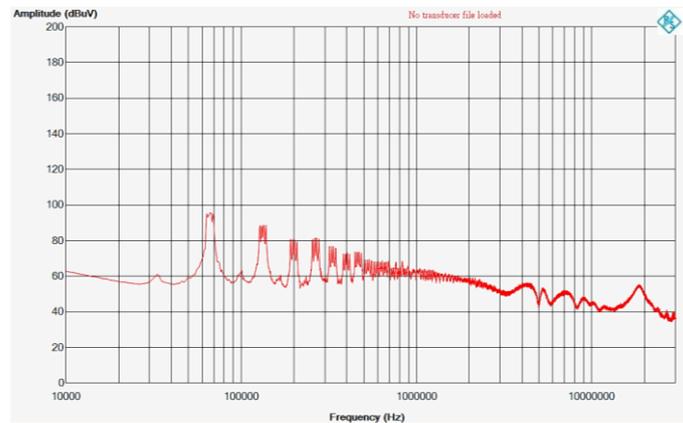
由于电解电容的等效串联电阻（equivalent series resistor; ESR）会随着涟波电流的频率改变，不同频率下的涟波电流耐受度皆不相同，为了获得较准确的寿命估算，在计算时不会使用示波器直接量测时域波形的方均根值，而是将电流波形做 FFT 分析，把不同频率下的电流成份等效至 120 Hz 下去作计算，其等效之电容涟波电流为

$$I_{C_rms} = \sqrt{\left(\frac{I_{120}}{k_{120}} \right)^2 + \left(\frac{I_{240}}{k_{240}} \right)^2 + \left(\frac{I_{360}}{k_{360}} \right)^2 + \dots + \left(\frac{I_{65k}}{k_{65k}} \right)^2 + \left(\frac{I_{130k}}{k_{130k}} \right)^2 + \dots} \quad (8)$$

图 15 和图 16 分别为输入电容电流波形之 FFT 频谱与 RUBYCON 提供之铝质电解电容涟波电流系数修正表。



(a)



(b)

图 15、满载时输入电容电流波形之 FFT 频谱 (A) 10 HZ - 100 KHZ
(B) 10 KHZ - 30 MHZ

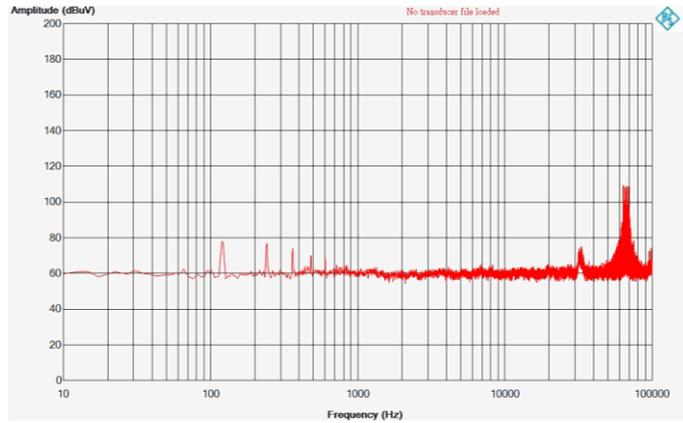
◆MULTIPLIER FOR RIPPLE CURRENT

Frequency (Hz)	60(50)	120	500	1k	10k \leq
Coefficient $k_{freq.}$	0.80	1.00	1.25	1.40	1.50

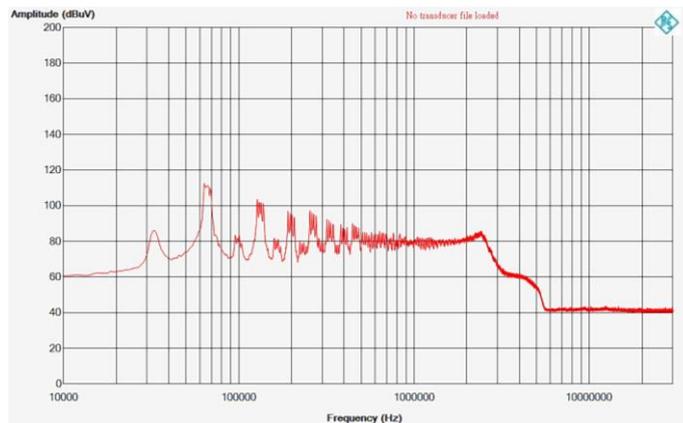
图 16、RUBYCON 提供之 400 V 铝质电解电容涟波电流系数修正表

4. 输出电容之电流

图 17 为满载时输出电容电流波形之 FFT 频谱，其寿命估算方式与输入电容相同。比对输入和输出电容的电流的频谱，可以观察到经过一个交流转直流的转换器之后，电容电流的主要成份从低频的市电频率转变成高频的开关频率。



(A)



(B)

图 17、满载时输出电容电流波形之 FFT 频谱 (A) 10 HZ - 100 KHZ
(B) 10 KHZ - 30 MHZ

四. 对 EMI 的影响

在上一章介绍了交流转直流返驰式转换器的许多组件上电压或电流波形频谱，也在频域上看到 MOSFET 的 RCD 电压箝位电路和输出二极管的 RC 缓振电路的功效。本章将探讨 RCD 电压箝位电路对于 MOSFET 电压频谱上抑制之幅值，在 EMI 频谱上是否会有相同的效果。

由于传导 EMI 的法规限制，在进行 FFT 频谱与 EMI 频谱比对前，需先将示波器的设定调整成与 EMI 接收机相同，因此将 FFT 频谱范围设为 150 kHz 至 30 MHz，解析带宽为 9 kHz，示波器撷取时间为 20 ms，取样率设定在 100 MSa/s。图 18 及图 19 分别为加装 RCD 电压箝位电路前后之 MOSFET 电压频谱比较图和 EMI 频谱比较图，其量测条件皆为输入电压为 115 Vac、输出电流为 2 A，可以很明显的观察到缓振电路在 FFT 频谱上 5 MHz 附近衰减约 10 dB，此衰减量同样会呈现在 EMI 频谱上。

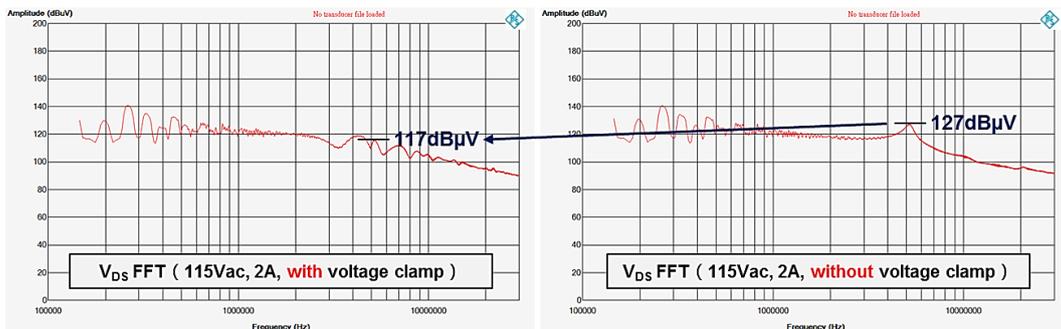


图 18、加装 RCD 电压箝位电路前后之 MOSFET 电压 FFT 频谱比较图

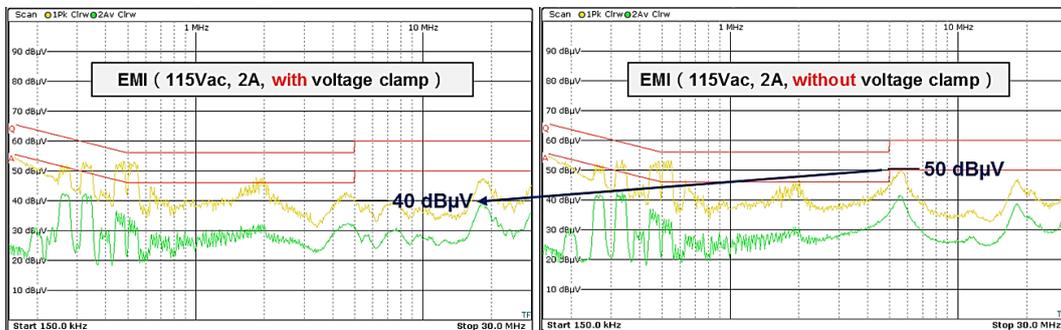


图 19、加装 RCD 电压箝位电路前后之 EMI 频谱比较图

由这个实验结果可以得知抑制电路上的电压突尖和电流突尖 (current spike) 确实能有效降低特定频率的 EMI 噪声。往后若想进行特定频率的 EMI 侦错时，可试着用示波器的 FFT 功能以快速掌握电路上突波的频率，而能更有效地解决问题。

五. 结论

本文讨论了 FFT 功能在示波器上的设定及限制，也使用了标准波形进行示波器的操作示范，经由标准波形的实验厘清了频谱的坐标单位。此外透过返驰式转换器的量测实例，了解到了电解电容寿命的估算方式和电压箝位电路及缓振电路在 EMI 议题上关联及重要性，同时证实了示波器的 FFT 功能应用于电源转换器的设计与侦错是可行的。

六. 参考文献

- [1] “R&S® RTE Digital Oscilloscope Specifications,” Rohde & Schwarz
- [2] “R&S® RTE Digital Oscilloscope Scope of the art,” Rohde & Schwarz
- [3] “Analyze EMI problems with the R&S® RTO/RTE,” Rohde & Schwarz
- [4] “Bandwidth of Digital Waveforms,” Clayton R. Paul, 2009
- [5] “RT7736 SmartJitter™ PWM Flyback Controller,” Richtek, 2014
- [6] “Life of Aluminum Electrolytic Capacitor,” Rubycon
- [7] “Performance of Aluminum Electrolytic Capacitor,” Rubycon
- [8] “Radial Lead Aluminum Electrolytic Capacitors WXA Series,” Rubycon

相关资源

立锜科技电子报

[订阅立锜科技电子报](#)

Richtek Technology Corporation

14F, No. 8, Tai Yuen 1st Street, Chupei City

Hsinchu, Taiwan, R.O.C.

Tel: 886-3-5526789

Richtek products are sold by description only. Richtek reserves the right to change the circuitry and/or specifications without notice at any time. Customers should obtain the latest relevant information and data sheets before placing orders and should verify that such information is current and complete. Richtek cannot assume responsibility for use of any circuitry other than circuitry entirely embodied in a Richtek product. Information furnished by Richtek is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Richtek or its subsidiaries for its use; nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Richtek or its subsidiaries.