

un condensateur n'est pas toujours capacitif!

René Kalbitz (Würth Elektronik eiSos)

Les condensateurs sont par définition des composants capacitifs. Ce qui semble pure lapalissade n'est pourtant vrai que sous certaines conditions et plages de fréquences. Cet article montre comment le spectre d'impédance de divers types de condensateurs permet d'anticiper leur comportement, capacitif ou non.

Les ingénieurs se servent souvent des paramètres S pour représenter les propriétés électriques d'un condensateur en fonction de la fréquence. L'étude de ces spectres fournit des informations sur la nature électrochimique, physique et technique du composant. Pour être pertinentes, les caractéristiques recherchées doivent être dépouillées des effets parasites et des artefacts de mesure toujours présents. Puisqu'il n'est pas toujours possible d'inclure toutes les données dans une fiche

technique, le concepteur doit parfois s'appuyer sur de tels spectres pour sélectionner un composant adapté à son circuit. Afin de faciliter sa tâche, Würth Elektronik eiSos a créé REDEXPERT [1], un outil en ligne qui fournit les spectres de nombreux composants ainsi que différentes mesures d'intérêt. Cet article explique comment déduire certaines propriétés électriques de ces spectres.

Circuit équivalent

Le circuit de la **figure 1** sert à modéliser le spectre d'impédance de tout type de condensateur, de la pastille céramique multicouche au supercondensateur.

C_S représente la capacité d'un condensateur idéal. Un condensateur réel subit des pertes qui « ralentissent » sa charge. Ces pertes sont représentées par la résistance-série équivalente (ESR, toutes les abréviations de cet article sont en anglais). La résistance de la charge et celle des fils de connexion contribuent également à la résistance ESR.

La capacité d'un condensateur idéal est définie par l'équation différentielle

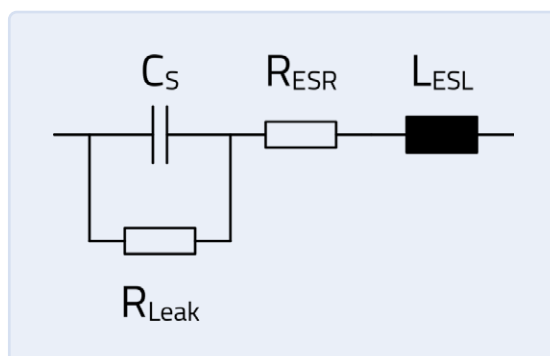
$$C_S = \frac{dQ}{dV}$$

où dQ est la variation de charge à la surface du condensateur, et dV la variation de tension aux bornes du condensateur.

Tout courant alternatif parcourant un conducteur métallique induit un champ magnétique qui s'oppose à ce courant. Dans le modèle considéré (dit L-C-R, ou standard), cette propriété est représentée par l'inductance-série équivalente (ESL), L_{ESL} sur la **figure 1**.

C_S , R_{ESR} , et L_{ESL} permettent de décrire la majorité des spectres. Dans l'approche la plus simplifiée, suffisante

Figure 1. Modèle standard d'un condensateur : capacité C_S , résistance-série équivalente R_{ESR} , inductance-série équivalente L_{ESL} , et résistance de fuite R_{Leak} .



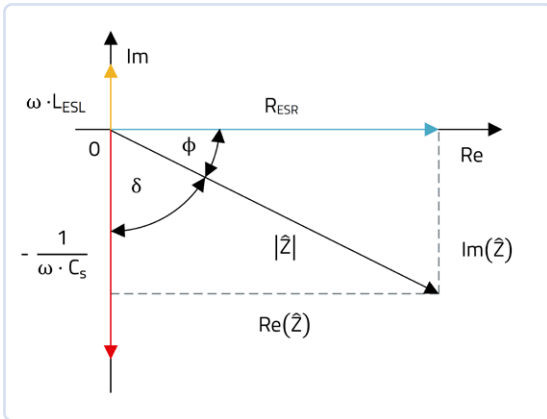


Figure 2. Représentation vectorielle de l'impédance dans le plan complexe. R_{Leak} est négligée par souci de simplicité.

en ingénierie électrique, ces trois paramètres ne varient pas avec la fréquence, autrement dit sont des constantes.

La perte de charge dans le temps, c.-à-d. le courant de fuite, peut être décrite avec une bonne approximation par la résistance ohmique idéale R_{Leak} . La valeur de R_{Leak} est d'ordinaire bien supérieure à R_{ESR} , et peut donc être ignorée ($R_{Leak} \rightarrow \infty$). Son effet n'apparaît sur le spectre qu'à des fréquences très basses, sous 1 Hz [2].

Spectres d'impédance et de capacité

Avant d'aborder les spectres, explicitons leur contexte théorique. Le circuit ci-dessus peut être décrit par diverses grandeurs à valeurs complexes qui dépendent de la fréquence : l'impédance $\hat{Z}$, la capacité $\hat{C}$, le paramètre de diffusion $\hat{S}$ (paramètre S), ou encore la permittivité $\hat{\epsilon}$. L'impédance peut s'écrire $\hat{Z} = \text{Re}(\hat{Z}) + i \times \text{Im}(\hat{Z})$, où $\text{Re}(\hat{Z})$ est la partie réelle et $\text{Im}(\hat{Z})$ la partie imaginaire ; ou, sous forme polaire :

$$\hat{Z} = |\hat{Z}| \cdot e^{i\phi}$$

où $|\hat{Z}|$ est le module et ϕ l'argument. Dans le plan complexe (fig. 2), ϕ mesure l'angle entre $\text{Re}(\hat{Z})$ (abscisse) et le vecteur complexe $\hat{Z}$. Physiquement, $|\hat{Z}|$ est le rapport entre la tension et l'intensité, tandis que ϕ représente le déphasage entre la tension et le courant à une fréquence donnée. L'angle de déphasage ϕ et l'angle de perte sont reliés par :

$$\arctan\left(\frac{\text{Re}(\hat{Z})}{|\text{Im}(\hat{Z})|}\right) = \delta = \frac{\pi}{2} - \phi$$

En électricité, on utilise aussi couramment l'amplitude $|\hat{Z}|$ et sa résistance-série équivalente $R_{ESR} = \text{Re}(\hat{Z})$. Sur la figure 2, la résistance-série équivalente du modèle standard (celui de la fig. 1) correspond à la partie réelle de l'impédance. La figure 2 permet également de

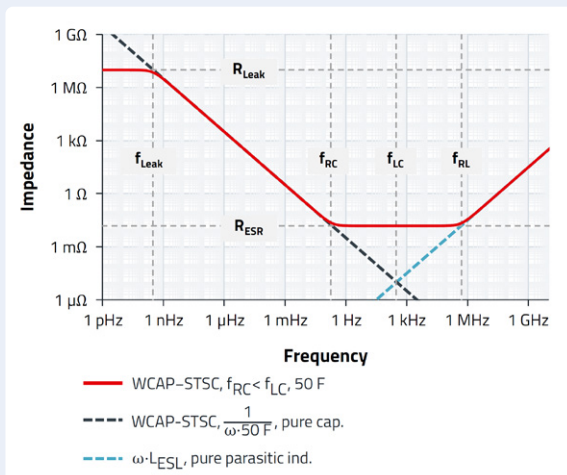
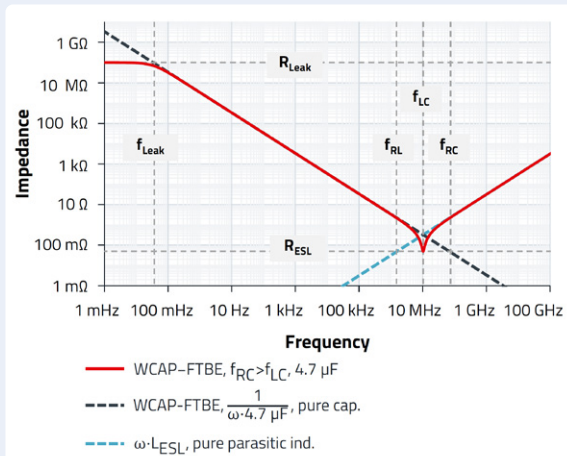
visualiser la relation entre l'amplitude complexe $|\hat{Z}|$ et les autres paramètres du modèle (à l'exception de R_{Leak}). L'expression mathématique de ces paramètres est donnée en annexe du lien [2].

L'impédance peut aussi servir à exprimer la capacité complexe :

$$\hat{C} = \frac{1}{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \hat{Z}} = \text{Re}(\hat{C}) + i \cdot \text{Im}(\hat{C})$$

L'ensemble des grandeurs précédentes – comme $\text{Re}(\hat{Z})$, $\text{Im}(\hat{Z})$, $|\hat{Z}|$ ou l'angle de perte δ – peut être mesuré à l'aide d'analyseurs de réseau ou d'impédance. Tout composant électronique (pas juste les condensateurs) peut être caractérisé par un jeu de variables dépendantes de la fréquence, telles que $\text{Re}(\hat{Z})$ et $\text{Im}(\hat{Z})$ ou $\text{Re}(\hat{C})$ et $\text{Im}(\hat{C})$. Ce n'est toutefois qu'au travers de circuits équivalents comme celui de la figure 1 qu'il est possible d'interpréter les

Figure 3. Spectres d'impédance $|\hat{Z}|$ pour WCAP-FTBE (haut) et WCAP-STSC (bas) calculés d'après le modèle standard.



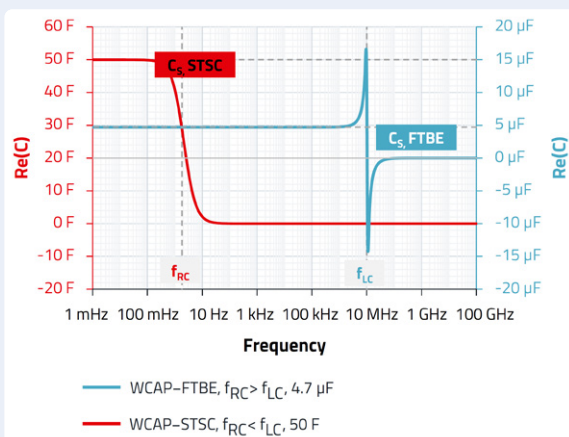


Figure 4. Spectre de capacité $Re(\hat{C})$ calculé d'après le modèle standard. L'ordonnée rouge de gauche est pour WCAP-STSC (courbe rouge), l'ordonnée bleue de droite est pour WCAP-FTBE (courbe bleue).

valeurs mesurées. L'ajustement de C_S , R_{ESR} , L_{ESL} et R_{Leak} permet de calculer la réponse fréquentielle basique de n'importe quel condensateur. Les figures 3 et 4 montrent les spectres d'impédance et de capacité de condensateurs de 4,7 µF et 50 F obtenus avec cette technique. Les angles de perte et de déphasage correspondants sont indiqués à l'annexe du lien [2]. Les paramètres de ces deux exemples sont les suivants :

- Supercondensateur (WCAP-STSC) : $C_S = 50 \text{ F}$, $R_{ESR} = 15 \text{ m}\Omega$, $L_{ESL} = 5 \text{ nH}$ et $R_{Leak} = 10 \text{ M}\Omega$,
- Condensateur à film (WCAP-FTBE) : $C_S = 4,7 \text{ }\mu\text{F}$, $R_{ESR} = 5 \text{ m}\Omega$, $L_{ESL} = 5 \text{ nH}$ et $R_{Leak} = 10 \text{ M}\Omega$.

Ces deux condensateurs, WCAP-FTBE (4,7 µF) et WCAP-STSC (50 F), appartiennent à la famille de condensateurs de Würth Elektronik eiSos. Sur les graphiques, C_S , R_{ESR} , L_{ESL} et R_{Leak} sont supposés constants et indépendants de la fréquence (tableau 1).

Les parties les plus significatives d'un spectre sont décrites par quatre fréquences propres :

Fréquence propre f_{RC} de l'élément R_{ESR} -C :

$$f_{RC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{ESR} \cdot C_S}$$

Paramètres électriques	WCAP-FTBE	WCAP-STSC
C_S	4,7 µF	50 F
R_{ESR}	5 mΩ	15 mΩ
L_{ESL}	5 nH	5 nH
R_{Leak}	10 MΩ	10 MΩ

Tableau 1. Paramètres utilisés pour le calcul des spectres

Fréquence propre f_{LC} de l'élément L-C :

$$f_{LC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{ESL} \cdot C_S}}$$

Fréquence propre f_{Leak} de l'élément R_{Leak} -C :

$$f_{Leak} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{Leak} \cdot C_S}$$

Fréquence propre f_{RL} de l'élément R_{ESR} -L :

$$f_{RL} = \frac{R_{ESR}}{2 \cdot \pi \cdot L_{ESL}}$$

Les figures 3 et 4 montrent deux cas de figure majeurs :

Oscillation de Lorentz : $f_{RC} > f_{LC}$ pour $C_S = 4,7 \text{ }\mu\text{F}$ (courbe bleue) ;

Relaxation de Debye : $f_{RC} < f_{LC}$ pour $C_S = 50 \text{ F}$ (courbe rouge).

Sur la figure 3, les pointillés noirs et bleus indiquent les parties purement capacitives et inductives. f_{RC} , la fréquence propre de l'élément RC, est la fréquence à laquelle le condensateur peut être chargé et déchargé. L'inverse de cette fréquence correspond en gros à la durée d'une charge effectuée sous une tension idéale constante. Au-dessus de f_{RC} , le condensateur n'est plus complètement chargé (relativement à la tension maximale du signal).

Sur le spectre de capacité du supercondensateur, f_{RC} correspond à un point d'inflexion et le haut de la courbe forme un épaulement (fig. 4). Pour des fréquences inférieures à f_{RC} , la capacité peut être déduite de la courbe. Après le point f_{RC} , le spectre d'impédance de la figure 3 inférieure montre un plateau au point R_{ESR} .

La fréquence propre f_{LC} de l'élément LC est la fréquence pour laquelle le couplage de l'inductance parasite et de la capacité déclenche un phénomène de résonance lorsque $f_{RC} > f_{LC}$ (fig. 3 supérieure). Sous f_{RC} (pour des fréquences inférieures), le condensateur a un comportement capacitif, c.-à-d. peut stocker une charge électrique ; sa réponse est inductive au-dessus de f_{RC} . La résonance au point f_{LC} se traduit par un minimum étroit sur le spectre d'impédance de WCAP-FTBE (fig. 3 supérieure). La valeur R_{ESR} correspond à ce minimum. En pratique, un condensateur ne doit pas être utilisé à f_{LC} ou au-dessus de cette valeur.

Le spectre de capacité du condensateur FTBE de 4,7 nF montre un pôle (fig. 4). Cette singularité reflète

une réponse physique, pas seulement un artefact de mesure : le système de mesure, composé du condensateur et de l'inductance parasite, se comporte comme un circuit résonnant, c.-à-d. comme un oscillateur (cf. [2] pour les détails).

f_{Leak} est la fréquence propre de l'élément $R_{Leak}-C$. En deçà de cette fréquence, le condensateur se comporte comme une résistance valant R_{Leak} . Cet effet est à peine visible sur le spectre, hormis pour des fréquences bien inférieures à 1 Hz ou avec une petite valeur de R_{Leak} .

La fréquence propre f_{RL} de l'élément $R_{ESR}-L$ est la fréquence au-dessus de laquelle le condensateur se comporte comme une inductance de valeur L_{ESL} (fig. 3 inférieure). Les cas où $f_{RC} < f_{LC}$ marquent le début de l'augmentation de l'impédance aux hautes fréquences.

Les deux exemples présentés ici montrent qu'un modèle relativement simple permet de décrire le comportement de condensateurs de grandes et petites capacités. Les spectres calculés fournissent toutes les caractéristiques que fourniraient des spectres mesurés. Les mesures apportent bien sûr plus d'informations, mais le modèle L-C-R permet de déterminer des paramètres utiles aussi bien à un travail d'ingénierie qu'à une inter-

prétation basique des spectres. Les fréquences propres mentionnées ici forment à cet égard un bon outil d'analyse puisqu'elles « pointent du doigt » les parties utiles d'un spectre mesuré. La note d'application ANP109 [2] examine plus en profondeur les spectres mesurés de quatre types de condensateurs :

- supercondensateur *WCAP-STSC*
- électrolytique à l'aluminium *WCAP-AIGB*
- condensateur à film *WCAP-FTBE*
- pastille céramique multicouche *WCAP-CSGP* ◀

VF : Hervé Moreau — 230318-04



À propos de l'auteur

René Kalbitz a étudié la physique aux universités de Potsdam (Allemagne) et de Southampton (Royaume-Uni). Sa thèse de doctorat porte sur les semi-conducteurs et les isolants organiques. Il a poursuivi ses travaux de recherche à l'Institut Fraunhofer de Recherche Appliquée sur les Polymères. Il a rejoint Würth Elektronik en 2018 comme chef de produit pour les supercondensateurs, et supervise les projets de recherche et de développement dans le domaine des condensateurs.



LIENS

[1] Simulateur en ligne REDEXPERT : <https://redexpert.we-online.com/redexpert/>

[2] René Kalbitz, « Impedance spectra of different capacitor technologies », Würth Elektronik AppNote ANP109 : <https://www.we-online.com/en/support/knowledge/application-notes?d=anp109-impedance-spectra-of-different-capacitor-technologies>