

Condensatoren gedragen zich niet altijd capacitief!

Dr. René Kalbitz (Würth Elektronik eiSos)

Condensatoren gedragen zich capacitief, althans in de theorie van ideale componenten. Dit geldt echter alleen onder bepaalde bedrijfsomstandigheden, en het hangt ook af van het frequentiebereik. Dit artikel belicht de impedantiespectra van verschillende condensatortechnologieën en laat zien wanneer capacitief gedrag te verwachten is en wanneer niet.

Impedantie- en capaciteitsspectra (of S-parameters) zijn gangbare weergaven van de frequentie-afhankelijke elektrische eigenschappen van condensatoren. De interpretatie van dergelijke spectra levert een schat aan elektrochemisch, fysisch en technisch relevante informatie op. Deze moet worden gescheiden van meetartefacten die altijd aanwezig zijn en van parasitaire effecten. Aangezien het niet altijd mogelijk is alle gegevens in de datasheet in kaart te brengen, moeten ingenieurs soms

afgaan op gemeten spectra om de juiste component voor hun eigen schakelingontwerp te selecteren. Om de best mogelijke gegevensbasis te creëren, heeft Würth Elektronik de online tool REDEXPERT [1] geïmplementeerd, waarin niet alleen spectra maar ook andere metingen beschikbaar worden gesteld. Dit artikel beschrijft de kenmerken van dergelijke spectra en bespreekt hoe daaruit elektrische basiseigenschappen kunnen worden afgeleid.

Vervangingsschema voor condensatoren

Met de in **figuur 1** getoonde schakeling is het mogelijk frequentie-afhankelijke impedantiespectra te modelleren voor alle soorten condensatoren, van meerlaagse keramische chipcondensatoren (MLCC) tot supercondensatoren (SC).

C_S staat voor de zuivere capaciteit, die in geen enkele elektrische component op zichzelf bestaat. Elke echte condensator heeft verliezen die het laadproces 'vertragen'. Dit verschijnsel wordt beschreven door de zuiver ohmse equivalente serieweerstand (ESR). De weerstand van de belasting en de draden dragen ook bij tot de ESR. De zuivere verliesvrije capaciteit C_S wordt gedefinieerd door de afgeleide

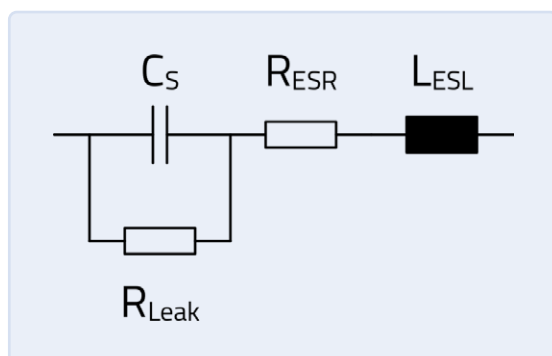
$$C_S = \frac{dQ}{dV}$$

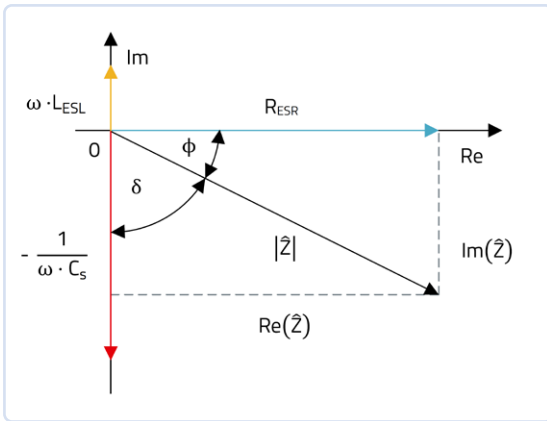
waarbij dQ de ladingsverandering op het condensatoroppervlak is en dV de spanningsverandering over de condensator.

Elke wisselstroom in een metalen geleider induceert een magnetisch veld dat de stroom tegenwerkt. In het beschouwde model (ook LCR-model of standaardmodel genoemd) wordt deze eigenschap beschreven door de equivalente serie-inductantie (ESL), in figuur 1 weergegeven door L_{ESL} .

C_S , R_{ESR} en L_{ESL} zijn de belangrijkste parameters die

Figuur 1. Standaard vervangingsschema voor condensatoren, met capaciteit C_S , equivalente serieweerstand R_{ESR} , equivalente serie-inductantie L_{ESL} en lekweerstand R_{Leak} .





Figuur 2. Vectordiagram van de impedantie in het complexe vlak. R_{Leak} wordt omwille van de eenvoud verwaarloosd.

nodig zijn om de meeste spectra te beschrijven. In de eenvoudigste benadering zijn zij constanten en veranderen zij niet met de frequentie, hetgeen voldoende nauwkeurig is voor de elektrotechniek.

Het ladingsverlies op lange termijn, dat wil zeggen de lekstroom, wordt bij goede benadering beschreven door de zuivere ohmse weerstand R_{Leak} . Gewoonlijk is R_{Leak} orden van grootte groter dan R_{ESR} en kan vaak worden verwaarloosd, dat wil zeggen $R_{Leak} \rightarrow \infty$. Het effect ervan is alleen zichtbaar bij zeer lage frequenties, ver beneden 1 Hz [2].

Impedantie- en capaciteitsspectra

Hieronder worden veelgebruikte termen en grootheden gedefinieerd, zoals capaciteit en impedantie. De bovenstaande schakeling kan worden beschreven als een frequentie-afhankelijke complexe impedantie $\hat{Z}$, capaciteit $\hat{C}$, verstrooiingsparameter (S-parameter) $\hat{S}$, diëlektrische constante ϵ of elke andere meetbare complexe elektrische grootheid. Impedantie $\hat{Z} = \text{Re}(\hat{Z}) + i \times \text{Im}(\hat{Z})$ is een complexe grootheid, met $\text{Re}(\hat{Z})$ en $\text{Im}(\hat{Z})$ als respectievelijk het reële en imaginaire deel. Impedantie wordt vaak uitgedrukt door de absolute waarde $|\hat{Z}|$ en de fasehoek ϕ :

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

In een complex vlak zoals in **figuur 2** beschrijft ϕ de hoek tussen $\text{Re}(\hat{Z})$ (abscis) en de complexe vector $\hat{Z}$. Natuurkundig gezien vertegenwoordigt $|\hat{Z}|$ de verhouding tussen de spanningsamplitude en de stroomamplitude, terwijl ϕ het faseverschil tussen spanning en stroom bij een bepaalde frequentie aangeeft. De fasehoek ϕ is als volgt gerelateerd aan de verlieshoek:

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

In de elektrotechniek is het ook gebruikelijk om de absolute waarde $|\hat{Z}|$ en de equivalente serie weerstand $R_{ESR} = \text{Re}(\hat{Z})$ te gebruiken. In het voorbeeld van figuur 1 is de equivalente serie weerstand het reële deel van de impedantie. Om het verband tussen het model en de complexe magnitude $|\hat{Z}|$ grafisch weer te geven, zijn alle

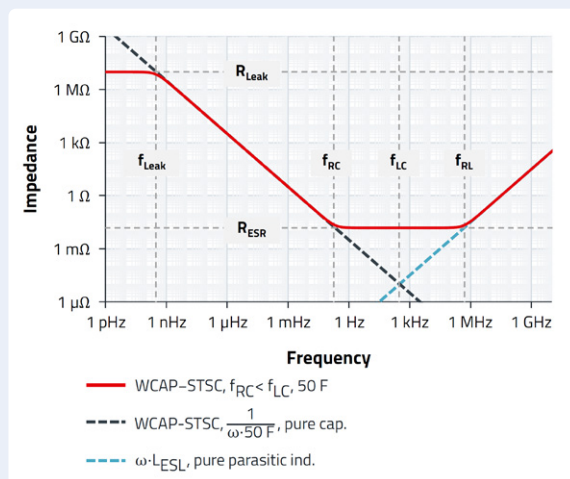
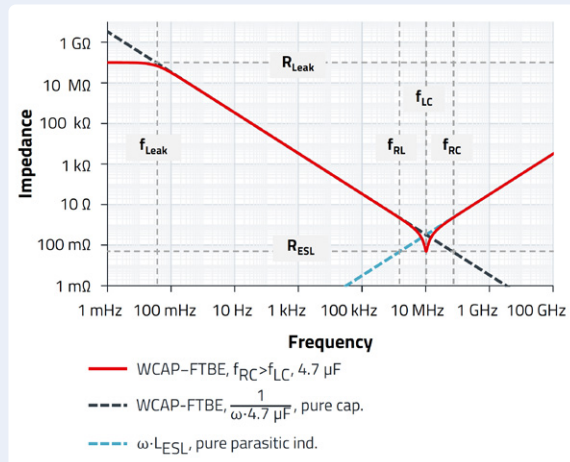
modelparameters (behalve R_{Leak}) ook in figuur 2 aangegeven (de wiskundige beschrijving staat in de appendix van [2]).

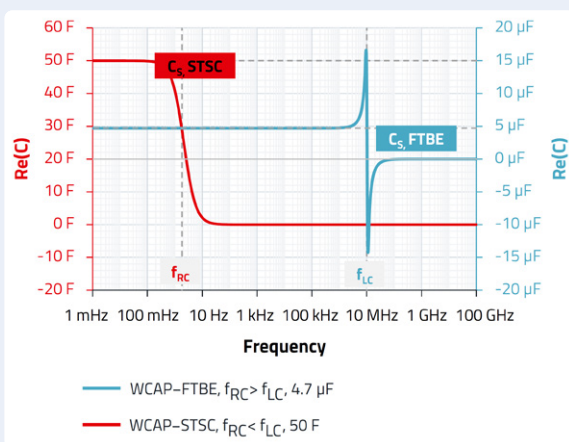
De impedantie kan ook worden herschreven als complexe capaciteit

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

Al deze waarden, zoals $\text{Re}(\hat{Z})$, $\text{Im}(\hat{Z})$, $|\hat{Z}|$ of verlieshoek δ , kunnen worden gemeten met impedantie- of netwerk-analysatoren. Elke elektronische component (niet alleen een condensator) kan worden gekarakteriseerd door een reeks frequentie-afhankelijke waarden, zoals $\text{Re}(\hat{Z})$ en $\text{Im}(\hat{Z})$ of $\text{Re}(\hat{C})$ en $\text{Im}(\hat{C})$. Meetresultaten kunnen echter alleen worden geïnterpreteerd aan de hand van vervangingsschema's zoals die van figuur 1. Door aanpassing van C_s , R_{ESR} , L_{ESL} en R_{Leak} kan voor alle condensatoren de basis-frequentierespons worden berekend.

Figuur 3. Impedantiespectra $|\hat{Z}|$ voor filmcondensator WCAP-FTBE (boven) en supercondensator WCAP-STSC (onder) zoals berekend volgens het standaardmodel.





▲
Figuur 4.
Capaciteitsspectra
Re(C), zoals berekend
met het standaardmodel.
De grafiek voor
supercondensator
WCAP-STSC (rood) komt
overeen met de linker
verticale as en de plot
voor filmcondensator
WCAP-FTBE (blauw)
komt overeen met de
rechter verticale as.

Dit wordt als voorbeeld getoond voor de impedantie- en capaciteitsspectra van een condensator van 4,7 μF en een condensator van 50 F in respectievelijk **figuur 3** en **figuur 4**. De bijbehorende fase- en verlieshoeken zijn weergegeven in de appendix van [2]. De parameters voor de twee voorbeelden luiden als volgt:

- supercondensator (WCAP-STSC) met $C_S = 50 \text{ F}$, $R_{ESR} = 15 \text{ m}\Omega$, $L_{ESL} = 5 \text{ nH}$ en $R_{Leak} = 10 \text{ M}\Omega$
- filmcondensator (WCAP-FTBE) met $C_S = 4,7 \text{ }\mu\text{F}$, $R_{ESR} = 5 \text{ m}\Omega$, $L_{ESL} = 5 \text{ nH}$ en $R_{Leak} = 10 \text{ M}\Omega$

De parameters werden zo gekozen dat ze overeen komen met bestaande Würth Elektronik producten, die te vinden zijn onder de productnamen voor filmcondensatoren WCAP-FTBE (4,7 μF) en supercondensatoren WCAP-STSC (50 F). In deze grafieken werden C_S , R_{ESR} , L_{ESL} , en R_{Leak} constant en onafhankelijk van de frequentie verondersteld (**tabel 1**).

Over het algemeen worden de meest prominente delen in de spectra beschreven door vier karakteristieke frequenties:

Karakteristieke frequentie f_{RC} van het R_{ESR} -C element:

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

Elektrische parameters	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

Tabel 1. Elektrische parameters gebruikt voor de berekening van de spectra.

Karakteristieke frequentie f_{LC} van het L-C element:

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

Karakteristieke frequentie f_{Leak} van het R_{Leak} -C element:

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

Karakteristieke frequentie f_{RL} van het R_{ESR} -L element:

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

Figuur 3 en figuur 4 tonen twee belangrijke situaties:

- Lorentz-oscillatie: $f_{RC} > f_{LC}$ zoals in het geval van $C_S = 4,7 \text{ }\mu\text{F}$ (blauwe curve)
- Debye-relaxatie: $f_{RC} < f_{LC}$ zoals in het geval van $C_S = 50 \text{ F}$ (rode curve)

De zwarte en blauwe stippellijnen in beide grafieken van figuur 3 geven het zuiver capacitieve en inductieve deel aan. f_{RC} , de karakteristieke frequentie van het RC-element, is de frequentie waarmee de condensator kan worden opgeladen en ontladen. Het omgekeerde van de frequentie is in feite de laadtijd bij een ideale constante laadspanning. Boven deze frequentie is de condensator niet meer volledig opgeladen (ten opzichte van de maximale spanning van het signaal).

Bij f_{RC} vertoont het capaciteitsspectrum (figuur 4) van de supercondensator een 'schouder'. Onder deze frequentie kan de capaciteitswaarde uit het diagram worden afgeleid. Boven f_{RC} vertoont het impedantiespectrum in figuur 3 (hieronder) een plateau bij R_{ESR} .

De karakteristieke frequentie van het LC-element f_{LC} is de frequentie waarbij de koppeling van parasitaire inductantie en capaciteit leidt tot resonant gedrag wanneer $f_{RC} > f_{LC}$, zoals weergegeven in figuur 3 (boven). Onder deze frequentie gedraagt de condensator zich capacitief, dat wil zeggen dat hij elektrische lading kan opslaan; boven deze frequentie gedraagt de condensator zich inductief. De eigenresonantie leidt tot een scherp minimum in het impedantiespectrum (WCAP-FTBE), zoals weergegeven in figuur 3 (boven). De R_{ESR} -waarde kan worden afgelezen uit het minimum van het impedantiespectrum. Condensatoren horen in toepassingen niet worden gebruikt bij f_{LC} of daarboven.

Het capaciteitsspectrum van de 4,7μF-condensator FTBE in figuur 4 vertoont één pool. Dit is een echt fysisch verschijnsel en niet slechts een meetartefact. Het meetsysteem, dat bestaat uit de condensator en de parasitaire spoel, gedraagt zich als een oscillator of resonantiekering.



De fysische processen worden in detail uitgelegd in de application note ANP109 [2].

f_{Leak} is de karakteristieke frequentie van het R_{Leak} -C element. Onder deze frequentie gedraagt de condensator zich als een weerstand met de waarde R_{Leak} . Normaal is dit effect nauwelijks zichtbaar in de spectra. Het vereist ofwel metingen bij frequenties onder 1 Hz ofwel een vrij lage waarde van R_{Leak} .

De karakteristieke frequentie f_{RL} van het R_{ESR} -L element is de frequentie waarboven de condensator zich als een spoel met de waarde L_{ESL} gedraagt (figuur 3 onder). Wanneer $f_{\text{RC}} < f_{\text{LC}}$ markeert dit het begin van de toename van de impedantie bij hoge frequenties.

De twee hier besproken voorbeelden illustreren dat een betrekkelijk eenvoudig model kan worden gebruikt om het gedrag van condensatoren met grote en kleine capaciteit te beschrijven. De berekende spectra vertonen in principe alle kenmerken die ook in de gemeten spectra te vinden zijn. Zeker, deze laatste bevatten meer informatie die een uitbreiding van het model vereist; niettemin stelt het LCR-model ons in staat de parameters te bepalen die van belang zijn voor de techniek en de basisinterpretatie van de spectra. De hier gepresenteerde karakteristieke frequenties vormen in dit verband een belangrijk analytisch hulpmiddel, dat kan worden opgevat als quasi-oriëntatiepunten voor de interpretatie van de

gemeten spectra. Een meer gedetailleerde beschouwing van gemeten spectra van verschillende typen condensatoren wordt gegeven in Application Note ANP109 [2]. De overwegingen omvatten de volgende soorten condensatoren:

- supercondensatoren WCAP-STSC
- aluminium elektrolytische condensatoren WCAP-AIGB
- filmcondensatoren WCAP-FTBE
- meerlaags keramische chipcondensatoren WCAP-CSGP

230318-03



Over de auteur

Dr. René Kalbitz studeerde natuurkunde aan de Universiteit van Potsdam en aan de Universiteit van Southampton (VK). Na het behalen van zijn diploma deed hij onderzoek en promoveerde hij op organische halfgeleiders en isolatoren aan de Universiteit van Potsdam. Hij deed verdere ervaring op in toegepast onderzoek aan het Fraunhofer-instituut voor toegepast polymeeronderzoek. Hij kwam in 2018 bij Würth Elektronik in dienst als productmanager voor supercondensatoren en houdt toezicht op onderzoeks- en ontwikkelingsprojecten op het gebied van condensatoren.



WEBLINKS

[1] REDEXPERT online-simulator: <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>