

Impedansspektroskopi

September 22, 2025

1 Introduktion

Som I lærte i måleteknisk forløb, er man nødt til at tænke sig om når man måler spænding og strøm i et kredsløb som indeholder kapacitive eller reaktive komponenter. I denne øvelse skal vi dels se på hvilke krav dette stiller til ens målehardware, og dels se et eksempel på en type måling som kan bruges til at karakterisere et sådant system.

1.1 Udstyr og dataopsamling

PC, dataopsamlingskort NI-6251, NI SC-2345, Keysight 33500B funktionsgenerator, kabler samt et oscilloscop.

Dataopsamlingen implementeres i Python - dette er dog en øvelse i impedansspektroskopi, ikke i Python, og I får derfor udleveret programmet som vil være tilgængeligt på computerne, og kan også findes på Github:

<https://github.com/nanomade/Exercises10870/tree/main/ImpedanceSpectroscopy>

2 Eksperimentel opstilling

Kredsløbet vi arbejder med i dagens øvelse er skitseret i figur 1. Det består af en ohmsk modstand, R_{serie} , i serie med en parallelkobling af endnu en ohmsk modstand, $R_{||}$ parallelkoblet med en kapacitor, $C_{||}$.

2.1 Opgave

Bestem den totale elektriske modstand gennem kredsen for henholdsvis en DC strøm og for en AC strøm ved uendelig frekvens.

2.2 Øvelse

Byg kredsen vist i figur 1 - denne kreds kommer til at indeholde en del ledninger og bliver nemt vanskelig at overskue, tag derfor nogle Post-It's og sæt label på komponenterne - det vil gøre jeres liv meget lettere i løbet af øvelsen.

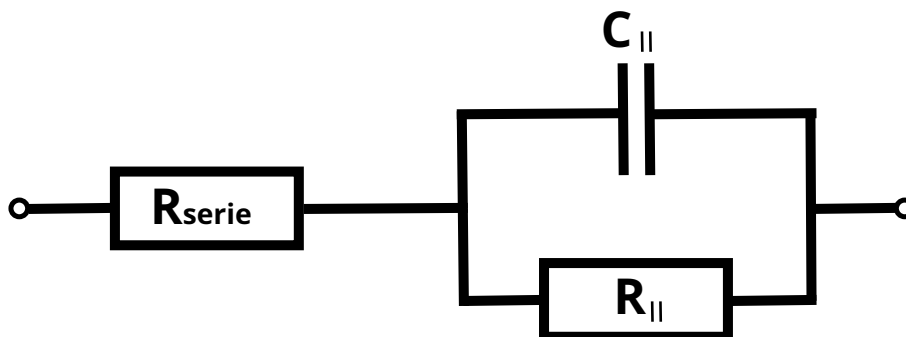


Figure 1: Det ønskede kredsløb. Her tegnet i ren form uden hverken måleinstrumenter eller signalkilde.

Mål med modstandsfunktionen på et multimeter den samlede DC modstand for et par forskellige værdier af komponenterne. Passer resultatet med hvad I kom frem til i opgave 2.1?

3 Impedans og overføringsfunktion

3.1 Opgave

Opstil et udtryk for impedansen Z af systemet i figur 1.

3.2 Hvordan måler vi både spænding og strøm?

Impedansen Z for et system er pr definition forholdet mellem spændingsforskellen $u(t)$ over systemet og strømstyrken $i(t)$ gennem systemet. For en kompleks impedans som her, vil $u(t)$ ikke være i fase med $i(t)$. Dette giver et praktisk måleteknisk problem, for at karakterisere både spænding og strøm over kredsen, er vi nødt til at måle begge størrelser med en tidsopløsning som er tilstrækkeligt god til at vi kan måle både deres størrelse og fase. I praksis gøres dette lettest ved at måle strømmen via en spændingsmåling over en kendt modstand, R_{shunt} , i en måling som er synkroniseret med spændingsmålingen over den impedans, Z , som vi ønsker at karakterisere. Da R_{shunt} er rent ohmsk, kan man bestemme strømstyrken gennem systemet ved at måle spændingen u_{shunt} over formodstanden og finde i via $i = \frac{u_{shunt}}{R_{shunt}}$.

3.3 Opgave

Gør rede for at overføringsfunktionen, altså spændingen over Z i forhold til spændingen fra signalkilden, med formodstand indsat bliver

$$H(\omega) = \frac{U_Z}{U_{tot}} = \frac{Z}{R_{shunt} + Z}$$

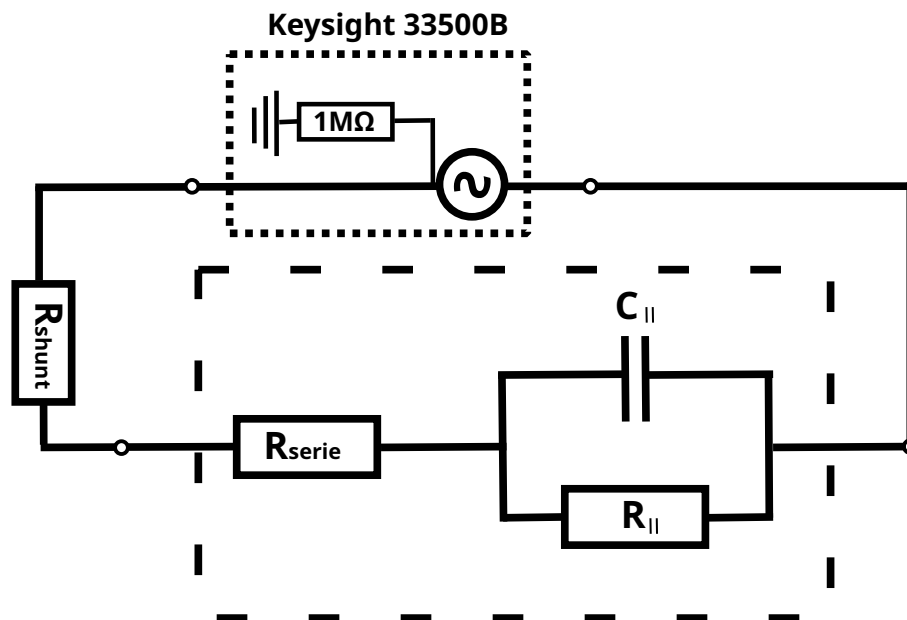


Figure 2: Vi har nu tilføjet en ekstra modstand og en signalkilde til kredsen. Bemærk at signalkildens nul er internt forbundet gennem $1\text{ M}\Omega$ til jord .

3.4 Opgave

Vis at den numeriske værdi af impedansens imaginærdel topper ved vinkelfrekvensen

$$\omega_{top} = \frac{1}{R_{||}C_{||}}$$

4 Signalkilde og strømmåling

Som vi lige kom frem til, har vi brug for en ekstra komponent, R_{shunt} , i kredsen - desuden får vi jo også brug for en signalkilde. Udvid derfor kredsen som vist i fig 2.

4.1 Øvelse

Tegn på diagrammet hvor og hvordan I foreslår at måle spænding og strøm og forbind til den sorte boks. U_{shunt} forbindes til porten '9V' på den sorte boks og U_Z forbindes til porten 'H'. Indstil frekvensgeneratoren til en peak-to-peak spænding på 2 V.

4.2 Dataopsamling

I er nu klar til at afprøve opstillingen. Vi starter med at lave nogle få manuelle målinger, hvor I benytter Python-programmet til at måle ved nogle bestemte frekvenser - dette gøres med metoden `test_a_frequency()`, som tager et enkelt argument, nemlig den ønskede frekvens. Brug et par minutter på at kigge programmet igennem, I behøver på ingen måde forstå det i detaljer, men prøv om I kan regne ud hvordan det overordnet fungerer.

4.3 Øvelse

Foretag cirka tre manuelle målinger, en ved 'lav' frekvens, en ved 'høj' frekvens og en ind imellem. Får I værdier som giver mening i forhold til jeres allerede udførte DC måling og i forhold til jeres forudsigelse om værdien ved uendelig frekvens?

Et konstruktivt forslag er starte med at teste med værdierne $C_{parallel} = \mu 1F$, $R_{parallel} = 500\Omega$, $R_{serie} = 1000\Omega$ og $R_{shunt} = 1000\Omega$. I kan frit prøve med andre værdier, men vær dog opmærksom på at opstillingen ikke har et overvældende imponerende dynamikområde. Desuden antager den udleverede Python kode $R_{shunt} = 1000\Omega$ og I skal derfor rette i koden hvis I vælger en anden værdi her.

4.4 Øvelse

Gentag en af de ovennævnte målinger, men prøv denne gang at visualisere signalet ved at forbinde oscilloskopet. Bemærk at jeres oscilloskop har en indre modstand på $1M\Omega$ og at yderterminalen er forbundet til jord. Dette har betydelig praktisk betydning for hvor nemt det er at anvende i denne type opgave, især hvis I ønsker at se på spændingen over Z og over R_{shunt} på samme tid. Prøv jer lidt frem og skitser hvordan I tænker opgaven bedst løses.

5 Impedansspektroskopi

Vi er nu klar til at foretage et sweep over hele frekvensspektret - dette kaldes impedansspektroskopi og finder anvendelse i mange sammenhænge lige fra måling af fedtprocent i kroppen til karakterisering af elektrokemiske opstillinger. Det viser sig nemlig, at man i praksis støder på en impedans af samme type som figur 1 og en opstilling som den I har bygget er en forholds nem måde at karakterisere den på.

5.1 Øvelse

Foretag et sweep med `perform_a_sweep()` funktionen. Programmet vil nu foretage målinger ved en række forskellige frekvenser og gemme resultatet i

en csv-fil. Indholdet af denne fil kan i plotte i plot.py (eller i jeres yndlings-plotteprogram) - hvis opstillingen fungerer som tiltænkt skulle I gerne få en kurve med form som en halvcirkel.

5.2 Opgave

Kig på kurven og forstå hvordan den er opstået. Kan I genkende nogle af værdierne fra opgaverne ovenfor?

5.3 Opgave

Prøv at ændre nogle af komponentværdierne (pas dog som nævnt på med R_{shunt}) og se hvordan dynamikområdet er for målingen - med andre ord, hvor meget kan I ændre på værdierne og stadig få meningsfyldte resultater. Hvilke dele af målingen går galt når I kommer ud i områder hvor I ikke kan måle pålideligt? Har I et bud på hvad man kunne gøre for at rette op det?

5.4 Ekstra opgave

Prøv, ud fra hvad I kom frem til i opgave 5.3 at rette måleopstillingen så I kan måle et kredsløb I ikke kunne før - er det muligt at få et spektrum af jeres egen krop hvis I holder elektroderne i hænderne?