

Institutt for fysikk 2011 **TFY4155/FY1003 Elektromagnetisme**
Notat 5: Kompleks impedans

Lærebøkene Young & Friedman (kap. 31) og Lillestøl, Hunderi og Lien (Kap 27) bruker ikke kompleks notasjon for AC-kretser, kun sinus-cosinus-notasjon. Men begge presenterer fasediagram for harmoniske signal, så de er ganske nær kompleks notasjon. Her følger en kort oppsummering av det som er presentert i forelesning om kompleks notasjon ifb. med harmoniske signal, også kalt AC-signal. A.Mikkelsen 21. mars 2011.

Den komplekse størrelsen

$$e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t \quad (1)$$

kan representeres med en vektor i kompleksplanet. Kompleksplanet har realdel som abscisse (x -akse) og imaginærdel som ordinat (y -akse). Vektoren for (1) har lengde lik 1 og roterer rundt med vinkelfart ω . Realdelen varierer da som en cos-funksjon og imaginærdelen som en sin-funksjon som gitt i (1). Istedenfor $V(t) = V_0 \cos \omega t$ osv. kan vi da enkelt bruke følgende uttrykk for harmonisk varierende signal:

$$V(t) = V_0 e^{i\omega t} \quad (2)$$

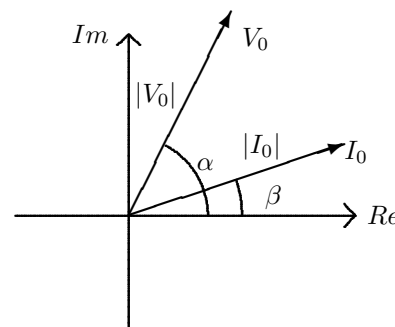
$$I(t) = I_0 e^{i\omega t}. \quad (3)$$

Her må vi tillate amplitudene V_0 og I_0 å være komplekse størrelser,

$$V_0 = |V_0| e^{i\alpha}, \quad (4)$$

$$I_0 = |I_0| e^{i\beta}. \quad (5)$$

Viserne for V_0 og I_0 framkommer i figuren til høyre. Viserne for $V(t)$ og $I(t)$ roterer rundt med vinkelfart ω , og posisjonen ved $t = 0$ er vist med henholdsvis V_0 og I_0 i figuren.



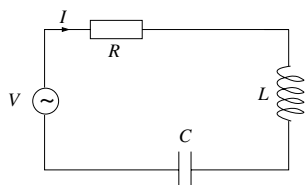
Kretsens impedans Z blir uavhengig av tida og er en kompleks størrelse:

$$Z = \frac{V(t)}{I(t)} = \frac{V_0}{I_0} = \frac{|V_0|}{|I_0|} e^{i(\alpha-\beta)} = |Z| e^{i\phi}. \quad (6)$$

Dvs. den komplekse impedansen har innebygd informasjon om både forholdet mellom strømmens og spenningsens amplitude $|Z| = |V_0|/|I_0|$, og faseforskyvningen $\phi = \alpha - \beta$ mellom påtrykt spenning og resulterende strøm! Smart! Vi velger ofte $\alpha = 0$.

Regneteknisk: Poenget er at den deriverte av eksponentialfunksjonen er eksponentialfunksjonen selv. Dermed vil alle ledd i ligningen(e) som følger når vi anvender Kirchhoffs regler, ha *samme* tidsavhengige faktor $e^{i\omega t}$, som dermed kan forkortes uten videre. Vi slipper å styre og herje med å skrive om trigonometriske funksjoner for å bestemme $|Z|$ og ϕ .

Eksempel: RLC-krets med vekselspenningskilde $V(t) = V_0 e^{i\omega t}$:



For RLC-kretsen er spenningen over de ulike komponenter:

$$V_R(t) = RI(t) \Rightarrow \underline{Z_R = \frac{V_R}{I} = R}$$

$$V_L(t) = L\dot{I}(t) \stackrel{(3)}{=} Li\omega I(t) \Rightarrow \underline{Z_L = \frac{V_L}{I} = i\omega L}$$

$$V_C = Q_C/C \Rightarrow \underline{Z_C = \frac{V_C}{I} = 1/i\omega C}.$$

Siste uttrykk har vi fått ved bl.a. derivasjon:

$$\dot{V}_C = \dot{Q}_C/C = I/C \stackrel{(2)}{\Rightarrow} i\omega V_C = I/C \Rightarrow Z_C = \frac{V_C}{I} = 1/i\omega C.$$

Kirchhoffs spenningslov for kretsen gir

$$V(t) = V_R(t) + V_L(t) + V_C = (R + i\omega L + 1/i\omega C)I(t) = ZI(t)$$

hvor den komplekse impedansen er

$$Z = Z_R + Z_L + Z_C = R + i\omega L + 1/i\omega C = R + i(\omega L - 1/\omega C) \quad (7)$$

$$\text{med } |Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} \quad \text{og} \quad \phi = \arg Z = \arctan\left(\frac{\omega L - 1/\omega C}{R}\right). \quad (8)$$

(forts.)

Strømmens komplekse amplitude er

$$I_0 = \frac{V_0}{Z} = \frac{V_0}{R + i\omega L + 1/i\omega C}, \quad (9)$$

$$\text{eller } I_0 = \frac{|V_0|e^{i\alpha}}{|Z|e^{i\phi}} = \frac{|V_0|}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} e^{i(\alpha-\phi)} = |I_0|e^{i\beta} \quad (10)$$

Oppsummert:

Impedans for motstand R : $Z_R = R$

Impedans for induktans L : $Z_L = i\omega L = e^{i\pi/2}\omega L$

Impedans for kapasitans C : $Z_C = 1/i\omega C = e^{-i\pi/2}/\omega C$.

Strøm gjennom induktans ($I = V_L/Z_L$) er altså faseforskjøvet $\pi/2$ etter spenningen og $|I_0| \rightarrow 0$ når $\omega \rightarrow \infty$.

Strøm gjennom kapasitans ($I = V_C/Z_C$) er faseforskjøvet $\pi/2$ foran spenningen og $|I_0| \rightarrow 0$ når $\omega \rightarrow 0$.

Disse uttrykkene kan du selv overbevise deg om ved å se på tre kretser hver for seg, med en spenningskilde $V_0 e^{i\omega t}$ koblet til hhv. en motstand, en induktans og en kapasitans.

Seriekopling: Merk at den komplekse impedansen (7) ganske enkelt er en sum av enkeltimpedansene Z_R , Z_L og Z_C . Dvs: Samme regel for seriekobling av komplekse impedanser i AC-kretser som for seriekoblede resistanser i DC-kretser!

Parallellkopling: Da er det nok ingen overraskelse at vi også har samme regel for parallellkopling av komplekse impedanser i AC-kretser som for parallellkopling av vanlige resistanser i DC-kretser. Eksempel: Total impedans i en krets med en R , L og C koblet i parallell er gitt ved

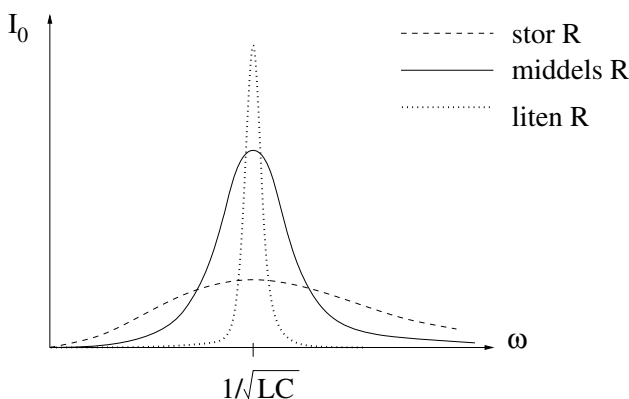
$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_C} = \frac{1}{R} + \frac{1}{i\omega L} + i\omega C$$

MERKNAD: Idet vi slår på spenningen $V(t)$ (med en bryter) får vi et "innsvingningsforløp" som ikke er harmonisk. Vi er normalt ikke interessert i dette, og betrakter derfor kun den harmoniske løsningen. Som kjent er en løsning av en diff.likningen, som Kirchoff 2 er, sammensatt av av en partikulær og en homogen løsning. Vi er her bare interessert i den partikulære løsningen med $V(t) = V_0 e^{i\omega t}$ som pådrag. Dvs. vi betrakter kun "tvungne" svingninger, dvs. svingninger med samme (vinkel-)frekvens som påtrykt spenning.

Resonans i RLC-kretsen

RLC-kretsen beskrevet over gir resonans ved en bestemt frekvens ω_0 for pådraget. Denne frekvensen er bestemt av at strømamplituden $|I_0|$ blir veldig stor, som vi finner fra likn. (10):

$$R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2 = \text{minimum} \Rightarrow \omega = \sqrt{1/LC} = \omega_0 \quad (11)$$



Figuren viser hvordan $|I_0|$ varierer med ω for hhv. stor, middels og liten verdi for resistansen R . Ved $\omega = \omega_0$ får vi maksimal amplitude på strømmen med $|I_0| = |V_0|/R$. Vi har da *resonans*. Frekvensen til den påtrykte spenningen "matcher" da den elektriske kretsens "naturlige frekvens" ω_0 .

For riktig lave frekvenser ($\omega \ll \omega_0$) representerer kondensatoren et brudd i en tilnærmet likestrømkrets. Da er det ikke urimelig at $I_0 \rightarrow 0$. For riktig høye frekvenser ($\omega \gg \omega_0$) blir indusert motspenning i induktansen L stor selv uten strøm av betydning. Da er det heller ikke urimelig at $I_0 \rightarrow 0$ i denne grensen.