5.2 INDUKSJON

Induksjon oppstår når f.eks en spole beveger seg i forhold til en permanentmagnet. Det blir da indusert spenning og strøm.

INDUKSJON - LENZ` LOV

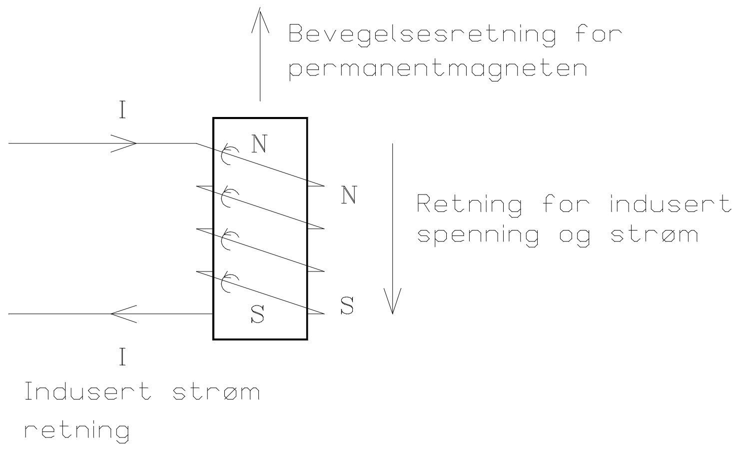
Figur 5.2.1 viser at en indusert spenning med sin retning alltid er motsatt rettet i forhold til bevegelsesretningen til permanentmagneten som er årsaken til induksjonen.

Det var en fysiker med navn Lenz som oppdaget dette forhold.

Lenz` lov lyder:

Den induserte strøm og spenning er alltid motsatt rettet i en spole i forhold til en permanentmagnets bevegelsesretning.

Figur 5.2.1



Når en permanentmagnet føres gjennom en spole oppstår det en fluksendring. Spolen vil få samme polaritet som permanentmagneten fordi spolen i utgangspunktet var nøytral. I følge Lenz` lov vil den induserte strøm og spenning bli motsatt rettet i forhold til bevegelsesretningen.

Den induserte strømmen kan vi finne ved hjelp av korketrekkerregelen som sier: når en skrur en korketrekker innover i strømmens retning, markeres feltlinjene den veien vi vrir korketrekkeren. Det kan også benyttes høyrehåndsregelen for å finne den induserte strøms retning.

Den induserte strøm og spenning vil variere med tiden permanentmagneten beveger seg i spolen. Se inn- og utkopling lengre bak i dette kapittel (kapitel 5.2).

FARADAYS INDUKSJONSLOV

I kapittel spenningsstøt for en vinding (kapittel 5.1) er formel 5.1.2 vist:

$$\boxed{N \cdot \Phi = E_{mid} \cdot t} \qquad 5.1.2$$

Ved å flytte E_{mid} alene på venstre side av likhetstegnet får vi formelen på denne formen:

$$\boxed{E_{mid} = \frac{N \cdot \Phi}{t}} \qquad 5.1.2$$

Hvis figur 5.2.1 er en krets hvor en skal finne midlere indusert spenning må det oppstå en fluksendring når permanentmagneten føres gjennom spolen. Dette kan uttrykkes med eksempelet under.

Fluksendring:

$$\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$$

Φ	fluksendring som fører til indusert spenning (Wb)
Φ_1	fluksen før permanentmagneten føres gjennom spolen (Wb)
Φ_2	fluksen etter at spolen har blitt ført gjennom spolen og før den forandrer retning (Wb)

Dette gir $\mathbf{\Phi_2 > \Phi_1}$ som gjør fluksendringen $\mathbf{\Phi}$ positiv.

Fluksendring og bevegelsesendring er lik, men Lenz lov sier at den induserte spenningen må være negativ i forhold til fluksendringen. Dette gir:

$$-E_{mid} = \frac{N \cdot \Phi}{t}$$

ved å multiplisere med minus 1 på begge sider i likningen får vi:

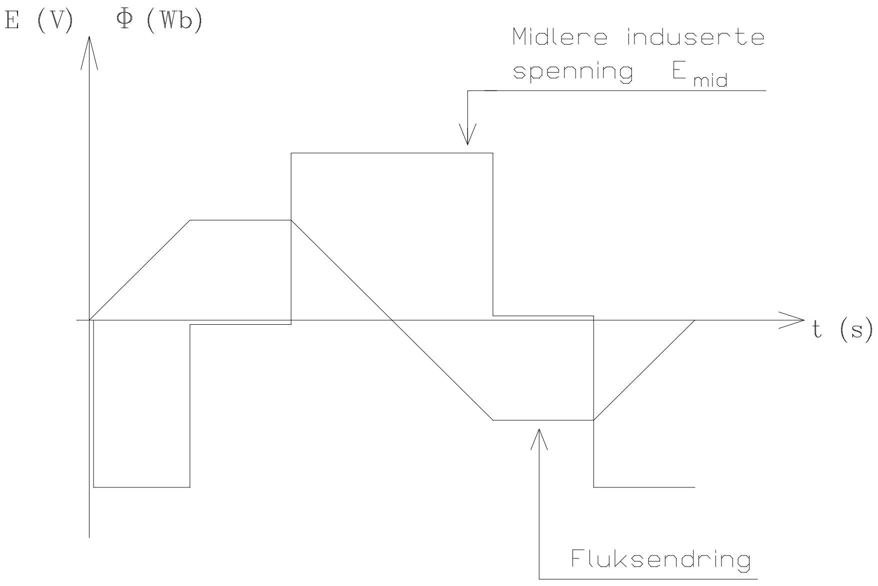
$$\boxed{E_{mid} = -\frac{N \cdot \Phi}{t}} \qquad 5.2.1$$

E	midlere kildespenning (V)
N	antall vindinger
Φ	magnetisk fluks (Wb)
t	tiden fluksendringen varer (s)

Faradays induksjonslov:
Når en spenning blir tilført en spole vil det alltid oppstå en fluksendring med motsatt polaritet.

Forholdet fluksendring og indusert spenning vises med hver sine kurver i et diagram, slik som figur 5.2.2 viser:

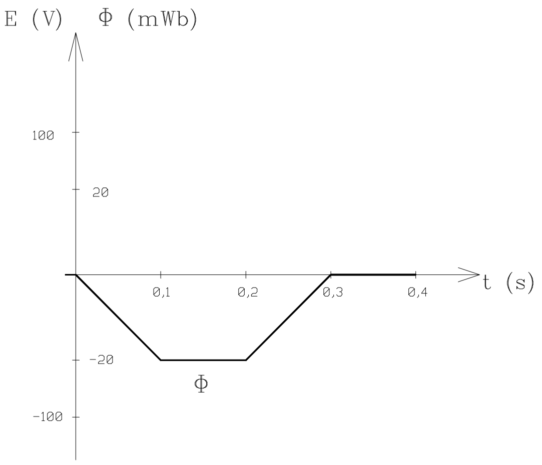
Figur 5.2.2



Den midlere induserte spenningen E_{mid} kan settes linjer så lenge det er en middel spenning. Det bli bare indusert spenning hvis det samtidig er en fluksendring. Fluksendring har vi når en permanentmagnet beveges gjennom en spole. Når permanentmagneten er i ro er det ingen fluksendring og heller ingen indusert spenning.

Eksempel 5.2.1

En spole har 500 vindinger. Beregn den induserte spenningen og tegn kurve for indusert spenning inn i diagrammet.



Løsning:

$$\Phi_A = \Phi_2 - \Phi_1 = -20 \cdot 10^{-3} Wb - 0 = \underline{-20 mWb}$$

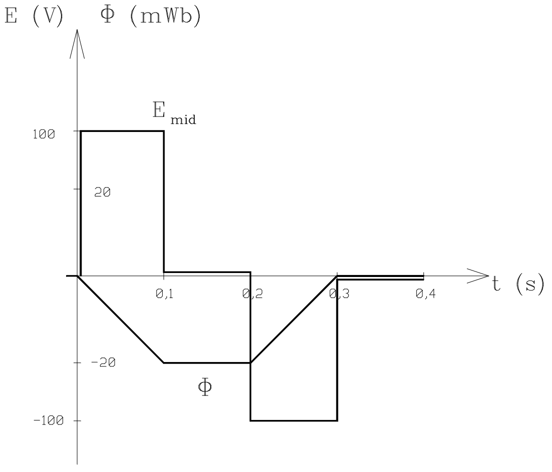
$$t_A = t_1 - t_0 = 0{,}1s - 0 = \underline{0{,}1s}$$

$$E_{mid_A} = -\frac{N \cdot \Phi}{t} = -\frac{500 \cdot (-20 \cdot 10^{-3} Wb)}{0{,}1s} = \underline{\underline{100V}}$$

$$\Phi_B = \Phi_4 - \Phi_3 = 0 - (-20 \cdot 10^{-3} Wb) = \underline{20 mWb}$$

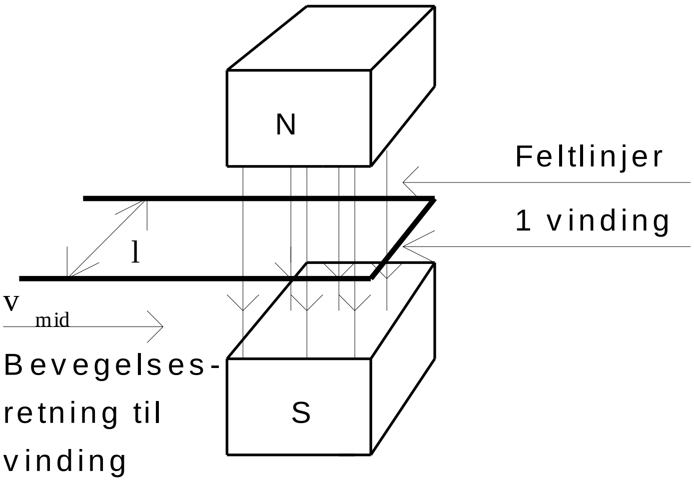
$$t_B = t_3 - t_4 = 0{,}3s - 0{,}2s = \underline{0{,}1s}$$

$$E_{mid_B} = -\frac{N \cdot \Phi}{t} = -\frac{500 \cdot 20 \cdot 10^{-3} Wb}{0{,}1s} = \underline{\underline{-\,100V}}$$



EN VINDING SOM BEVEGER SEG HORISONTALT I ET MAGNET FELT

Figur 5.2.3



Vindingen med lengden **l** beveger seg 90^{o} på feltlinjene og med en hastighet $\mathbf{v_{mid}}$ i et homogent felt. I løpet av tiden t tilbakelegger vindingen en strekning s. Gjennomsnittshastigheten til vindingen blir da:

$$V_{mid} = \frac{s}{t}$$

Fluksendringen i vindingen er arealet vindingen har tilbakelagt når den har beveget seg i det homogene feltet multiplisert med flukstettheten. Dette er fra tidligere kjent gjennom formel 5.1.7:

$$\Phi = B \cdot A \qquad 5.1.7$$

Vi kan sette inn for arealet:

$$\Phi = B \cdot A = B \cdot l \cdot s$$

Setter vi hastigheten vindingen beveger seg med i stede for strekningen får vi formelen:

$$\Phi = B \cdot l \cdot s = B \cdot l \cdot v_{mid} \cdot t$$

Faradays lov sier:

$$E_{mid} = -\frac{N \cdot \Phi}{t}$$

Da det er bare en vinding som beveger seg i det homogene feltet blir kombinasjon av formlene:

$$E_{mid} = -\frac{\Phi}{t} = -B \cdot l \cdot \frac{v_{mid}}{t} \cdot t$$

For en vinding som beveger seg i feltet kan vi nå stryke tiden på begge sider av likhetstegnet og vi får da uttrykket:

$$\boxed{E_{mid} = -B \cdot l \cdot v_{mid}} \qquad 5.2.2$$

E	midlere kildespenning (V)
B	flukstetthet (T)
l	lengde av leder som krysser feltlinjene ved bevegelse (m)
v_{mid}	gjennomsnittshastighet (m/s)

Formelen 5.2.2 gjelder bare for en vinding som beveger seg 90° gjennom et homogent felt.

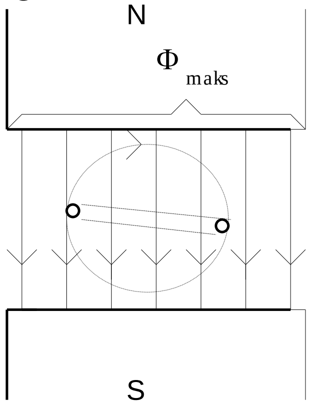
Skal en finne øyeblikksverdien (momentanverdien) for den induserte spenningen til en vinding som beveger seg i et magnetisk felt som i figur 5.1.2 må en vite hastigheten i øyeblikket:

$$\boxed{e = -B \cdot l \cdot v} \qquad 5.2.2.A$$

e	øyeblikksverdien (momentanverdien) til den induserte spenningen (V)
v	hastigheten til vindingen i det øyeblikk en skal finne den induserte spenningen (m/s)

EN VINDING SOM ROTERER I ET MAGNET FELT

Figur 5.2.4



Fra kapittel 5.1 vet vi at den magnetiske fluksen øker med økende flukstetthet og areal.

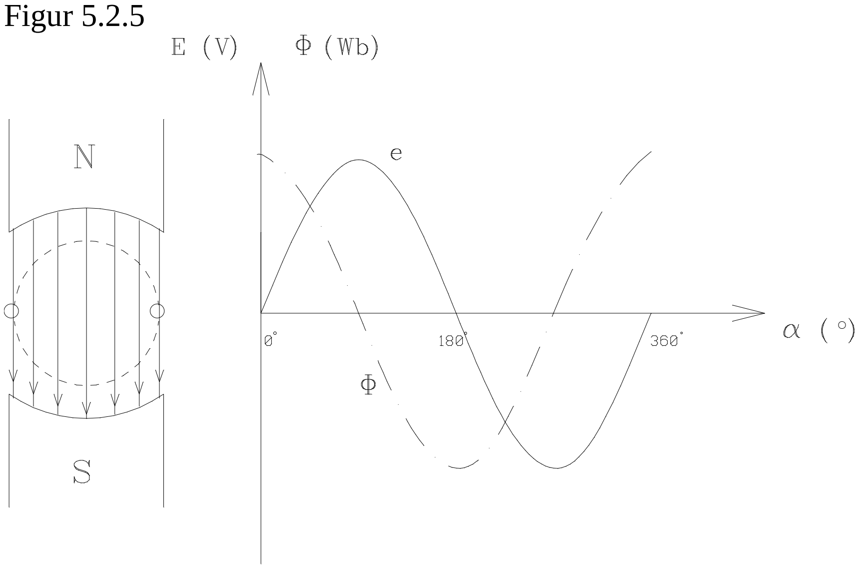
$$\Phi = B \cdot A \qquad 5.1.7$$

Det vil si at når vindingen er midt mellom nordpol og sydpol omslutter vindingen det største arealet. Dessuten ser vi av figur 5.2.4 at det er flest feltlinjer som krysser vindingens areal i den stilling vindingen er tegnet.

Når vindingen er dreid slik at den ene lederen i vindingen ligger nærmest nordpolen og den andre nærmest sydpolen blir den induserte spenningen maksimal. Hvis vindingen beveges slik at lederne i vindingen er like langt fra nordpol som sydpol er lederne i ferd med å skifte polaritet til den induserte spenningen.

Vi ser nå at den magnetiske fluksen er 90° forskjøvet i forhold til den induserte spenningen. Dette er også vist i figur 5.2.5.

Figur 5.2.5



Vindingen i figur 5.2.5 er tegnet i tidsøyeblikket ved 0° når den induserte spenningen er null og den magnetiske fluksen er maksimal.

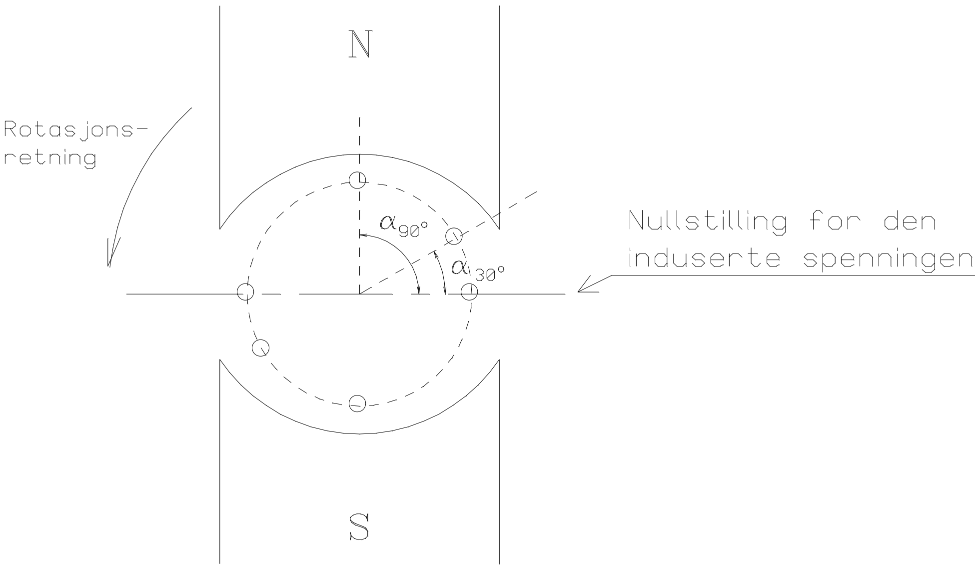
Vi ser nå at den induserte spenningen ligger 90° etter den magnetiske fluksen når vi tenker oss at sinuskurvene beveger seg mot øyet.

Figur 5.2.6

Vi har nå funnet ut at maksimal indusert spenning får vi når lederne til en vinding ligger nærmest hver sin pol. Vi kan i denne posisjon finne maksimal indusert spenning hvis vi vet hastigheten viklingen roterer med (periferihastigheten), vindingens lengde og flukstettheten. Vi benytter da formel 5.2.2.

$$\boxed{E_{maks} = -B \cdot l \cdot v} \qquad 5.2.2$$

Figur 5.2.7



Figur 5.2.7 viser tre stillinger til en roterende vinding i et magnetisk felt. De tre stillingene som kalles vinkelen **α** er 0°, 30° og 90° når X-aksen (horisontalplanet) settes til 0°.

Formelen for øyeblikksverdien av spenningen er:

$$\boxed{e = E_{maks} \cdot \sin\alpha} \qquad 5.2.3$$

Riktigheten til formel 5.2.3 kan vises med følgende eksempel, se også figur 5.2.7:

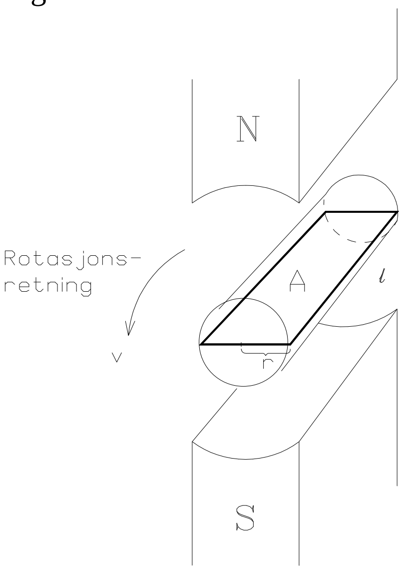
$$e_{0°} = E_{maks} \cdot \sin\alpha_{0°} = E_{maks} \cdot 0 = 0$$

$$e_{30°} = E_{maks} \cdot \sin\alpha_{30°} = E_{maks} \cdot 0{,}5 = \frac{E_{maks}}{2}$$

$$e_{90°} = E_{maks} \cdot \sin\alpha_{90°} = E_{maks} \cdot 1 = E_{maks}$$

FORHOLDET MAKSIMAL FLUKS OG MAKSIMAL INDUSERT SPENNING

Figur 5.2.8



Figur 5.2.8 viser tredimensjonalt en vinding som roterer i et magnetfelt. Maksimal spenning for vindingen har vi funnet tidligere i formel

$$E_{maks} = -B \cdot l \cdot v \qquad 5.2.2$$

Vi behøver ikke å ta hensyn til Lenz lov når maksimal spenning og maksimal fluks skal finnes. Skal den induserte spenningen finnes for begge lederne i en vinding blir formelen:

$$\text{I} \qquad E_{maks} = B \cdot l \cdot v \cdot 2$$

Vindingen roterer med periferihastigheten. Fra fysikken har vi følgende uttrykk for periferihastigheten:

$$\text{II} \qquad v = \omega \cdot r$$

Vinkelfrekvensen **ω** er antall radianer vindingen passerer pr sekund og frekvensen **f** er antall perioder av en kurve pr sekund. Ved 50 Hz har vi 50 sinuskurver i sekundet eller sagt på en annen måte: vindingen roterer 50 ganger pr sekund. Se kapittel 6.1 vedrørende vinkelfrekvens og frekvens

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \qquad 6.1.7 \qquad\qquad f = \frac{1}{T} \qquad 6.1.8$$

v	periferihastighet (m/s)
r	radius (m)
ω	vinkelhastigheten (s^{-1})
f	Frekvens (Hz)
T	tiden for en periode (s)

Setter vi formel II inn i I får vi:

III=I+II $E_{maks} = B \cdot l \cdot \omega \cdot r \cdot 2$

Arealet en hel vinding omslutter er:

IV $A = l \cdot r \cdot 2$

Formelen for flukstetthet fra kapittel 5.1 lyder:

V $\Phi_{maks} = B \cdot A$ 5.1.7

Setter vi formel IV inn i V får vi uttrykket:

VI $\Phi = B \cdot A = B \cdot l \cdot r \cdot 2$

Setter vi flukstettheten opp mot hverandre i formel III og VI får vi:

VII $\frac{E_{maks}}{l \cdot \omega \cdot r \cdot 2} = \frac{\Phi_{maks}}{l \cdot r \cdot 2} \qquad | \cdot (2 \cdot r \cdot l)$

Rydder vi opp i formelen VII får vi uttrykket for maksimal spenning og maksimal fluks for en vinding:

$$E_{maksV} = \omega \cdot \Phi_{maks}$$

Indusert spenning i en roterende spole:

$$\boxed{E_{maks} = \omega \cdot \Phi_{maks} \cdot N} \qquad 5.2.4$$

e øyeblikksverdien av den induserte spenningen (V)
E_{maksV} maksimal indusert spenning i en vinding (V)
E_{maks} maksimal indusert spenning i en roterende spole (V)
α vinkelen vindingen har rotert fra 0 V indusert spenning
ϕ_{maks} maksimal magnetisk fluks (Wb)
ω vinkelhastigheten (s^{-1})
N antall vindinger i spolen

Eksempel 5.2.2

En spole med 200 vindinger roterer i et magnetfelt med en vinkelhastighet på 314 s^{-1}
Feltstyrken er $300 \cdot 10^3$ A/m. Spolen har en lengde på 20 cm og en radius på 3 cm.

a) Finn den maksimale induserte spenningen i spolen.
b) Hva blir øyeblikksverdien av den induserte spenningen etter 15° og 60°?

Løsning:

a) Flukstettheten:
(Velger permittiviteten for vakuum, da vindingen roterer i luft)

$$B = \mu_0 \cdot H = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} H/m \cdot 300 \cdot 10^3 A/m = \underline{377 \cdot 10^{-3} T}$$

Magnetisk fluks:

$$\Phi_{maks} = B \cdot A = B \cdot l \cdot r \cdot 2 = 377 \cdot 10^{-3} T \cdot 0{,}2m \cdot 0{,}03m \cdot 2 = \underline{4{,}52 \cdot 10^{-3} Wb}$$

Maksimal indusert spenning:

$$E_{maks} = \omega \cdot \Phi_{maks} \cdot N = 314 s^{-1} \cdot 4{,}52 \cdot 10^{-3} Wb \cdot 200 = \underline{\underline{284V}}$$

b) Øyeblikksverdi av indusert spenning:

$$e_{15°} = E_{maks} \cdot \sin\alpha_{15°} = 284V \cdot \sin 15° = \underline{\underline{73{,}5V}}$$

$$e_{60°} = E_{maks} \cdot \sin\alpha_{60°} = 284V \cdot \sin 60° = \underline{\underline{246V}}$$

SELVINDUKSJONSSPENNING

Selvinduksjonsspenning skyldes strømendring og fluksendring i en spole. I kapittel 5.1 under selvinduktans er det oppgitt en formel for selvinduktansen, formel 5.1.10.A:

$$L = \frac{E_{mid} \cdot t}{I} = \frac{N \cdot \Phi}{I} \qquad 5.1.10.A$$

Formelen 5.1.10.A kan settes på følgende måte:

I $\quad N \cdot \Phi = L \cdot I$

Faradays induksjonslov lyder:

II $\quad E_{mid} = -\frac{N \cdot \Phi}{t}$

Vi kan sette likning I inn i likning II:

I+II $\quad E_{mid} = -\frac{L \cdot I}{t}$

Denne spenningen kalles *midlere selvinduksjonsspenningen* **È$_{mid}$** vist med formel 5.2.5:

$$\boxed{E`_{mid} = -L\frac{I}{t}} \qquad 5.2.5$$

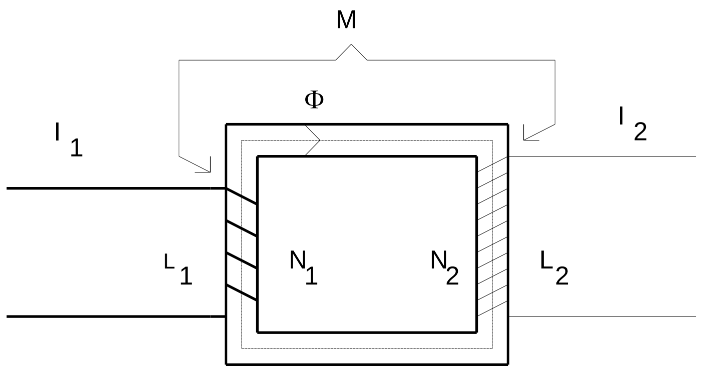
$E`_{mid}$	midlere selvinduksjonsspenning (V)
L	selvinduktansen (H)
I	strømendring (A)
t	tiden strømendringen varer (s)

GJENSIDIG SELVINDUKSJON

Når to spoler er viklet rundt en magnetisk krets av f.eks dynamoblikk vil det bli indusert en spenning i sekundærviklingen, hvis det samtidig skjer en strømendring i primærviklingen. Energien som blir tilført metallkretsen er lik den energien som blir transportert via feltlinjene i metallkretsen og som videre blir indusert i sekundærviklingen. Det vil alltid oppstå små lekkfelt der spolen er viklet rundt metallkretsen, hvis vi ser bort fra lekkfeltene vil primærspolen ha samme fluks som sekundærspolen.

Figur 5.2.9 viser en tofaset transformator. Primærspolen er alltid den spolen som blir tilført energi og sekundærspolen er alltid den spolen som avgir energi.

Figur 5.2.9



Faradays induksjonslov, formel 5.2.1 gir oss indusert spenning i spole 2 (sekundærsiden):

I $$E_{mid\,2} = -\frac{N_2 \cdot \Phi}{t}$$ 5.2.1

Selvinduktansen i spole 1 (primærsiden) kan vi finne ved hjelp av formel 5.1.10.A:

II $$L_1 = \frac{N_1 \cdot \Phi}{I_1}$$ 5.1.10.A

Fluksen **Φ** i metallkretsen må være lik for begge spolene da feltlinjene passerer begge spolene. Setter vi formel II inn i formel I får vi følgende uttrykk:

I+II $$E_{mid\,2} = -\frac{N_2 \cdot \Phi}{t} = -\frac{N_2 \cdot \frac{L_1 \cdot I_1}{N_1}}{t} = -\frac{L_1 \cdot N_2}{N_1} \cdot \frac{I_1}{t}$$

For en krets lik figur 5.2.9 er selvinduktansen og vindingene i de to spolene konstante ledd. Vi kan derfor trekke ut de konstante ledd i likningen over. Dette uttrykk kalles gjensidig selvinduktans **M**.

III $$M = \frac{L_1 \cdot N_2}{N_1}$$

Vi kan også finne et annet uttrykk for den gjensidige selvinduktansen. Uttrykket er forholdet mellom selvinduktansen til spole 1 og spole 2, formlene er hentet fra formel 5.1.11:

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{\frac{\mu \cdot N_2^2 \cdot A}{l}}{\frac{\mu \cdot N_1^2 \cdot A}{l}}$$

Av uttrykket over ser vi at vi har fellesverdier over- og under hovedbrøkstrek. Disse felles verdier som kan forkortes bort er permeabiliteten, arealet av kjernen og midlere feltlinjeveg. Uttrykket blir da:

IV $$\frac{L_2}{L_1} = \frac{N_2^2}{N_1^2}$$

Setter vi formel IV inn i formel III får vi uttrykket:

III+IV $$M = L_1 \cdot \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$$

Vi kan rydde opp i uttrykket for å få det på en enklere form:

$$M = \sqrt{\frac{L_1^2 \cdot L_2}{L_1}} = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

Formelen over er et uttrykk for gjensidig induktans når det ikke er tap i kretsen. Fordi vi alltid har et lekkfelt i en spole kan det settes inn faktor **k** for lekkfeltet.

Konstanten **k** må være mellom 0 og 1.

Løs kopling er når to luftspoler er plassert slik at feltene virker mot hverandre **k≅0**.

Fast kopling er når to spoler er plassert slik at feltene går samme veg som f.eks figur 5.2.9 **k<=1**.

Den gjensidig induktans uttrykkes da med formelen:

$$\boxed{M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}} \qquad 5.2.6$$

eller etter formel III med faktoren **k**:

$$\boxed{M = k \cdot \frac{L_1 \cdot N_2}{N_1}} \qquad 5.2.6.A$$

M	gjensidig selvinduktans (H)
k	koplingsfaktoren
L_1	selvinduktansen i spole 1 (H)
L_2	selvinduktansen i spole 2 (H)

k ≈ 1 for to spoler med felles kjerne
k ≈ 0 for to luftspoler som står loddrett på hverandre

GJENSIDIG INDUKSJONSSPENNING

Fra foregående kapittel har vi formlene:

I $$E_{mid\,2} = -\frac{N_2 \cdot \Phi}{t} = -\frac{N_2 \cdot \frac{L_1 \cdot I_1}{N_1}}{t} = -\frac{L_1 \cdot N_2}{N_1} \cdot \frac{I_1}{t}$$

og:

II $$M = \frac{L_1 \cdot N_2}{N_1}$$

Setter vi formel II inn i formel I får vi uttrykket for gjensidig induksjonsspenning på sekundærsiden:

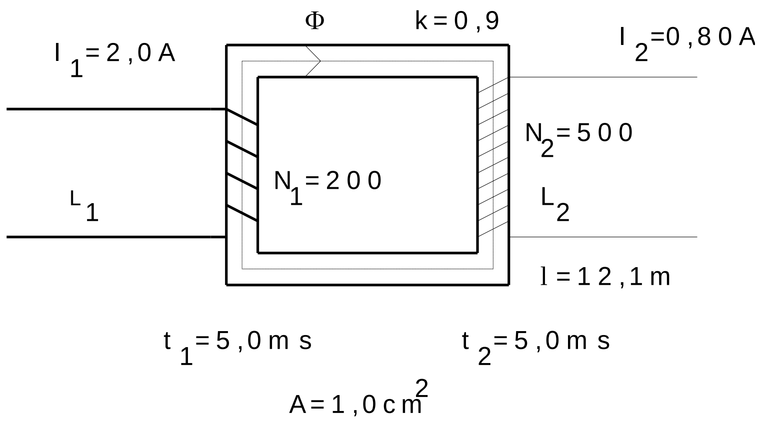
$$E`_{mid\,2} = -M \cdot \frac{I_1}{t_1} \qquad 5.2.7$$

Selvinduksjonsspenningen på primærsiden:

$$\boxed{E`_{mid\,1} = -M \cdot \frac{I_2}{t_2}} \qquad 5.2.7.A$$

$E`_{mid2}$ midlere gjensidig selvinduksjonsspenning i spole 2 (V)
$E`_{mid1}$ midlere gjensidig selvinduksjonsspenning i spole 1 (V)
M gjensidig selvinduksjon (H)
I_1 strømmen i spole 1
I_2 strømmen i spole 2
t_1 tiden strømendringen varer i spole 1 (s)
t_2 tiden strømendringen varer i spole 2 (s)

Eksempel 5.2.3



a) Finn selvinduktansen i spole 1 og spole 2 når μ_r=3300.
b) Hva blir gjensidig selvinduksjon for kretsen?
c) Beregn gjensidig induksjonsspenning i spole 2.

Løsning:

a) Selvinduktansen i spole 1:

$$L_1 = \frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot N_1^2 \cdot A}{l} = \frac{3300 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} H/m \cdot 200^2 \cdot 1{,}0 \cdot 10^{-4} m^2}{0{,}121 m} = \underline{137 \cdot 10^{-3} H} = \underline{\underline{137 mH}}$$

Selvinduktansen i spole 2:

$$L_2 = \frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot N_2^2 \cdot A}{l} = \frac{3300 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} H/m \cdot 500^2 \cdot 1{,}0 \cdot 10^{-4} m^2}{0{,}121 m} = \underline{857 \cdot 10^{-3} H} = \underline{\underline{857 mH}}$$

b) Gjensidig selvinduksjon i kretsen:

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} = 0{,}9 \cdot \sqrt{137 \cdot 10^{-3} H \cdot 857 \cdot 10^{-3} H} = \underline{308 \cdot 10^{-3} H} = \underline{\underline{308 mH}}$$

c) Gjensidig induksjonsspenning i spole 2:

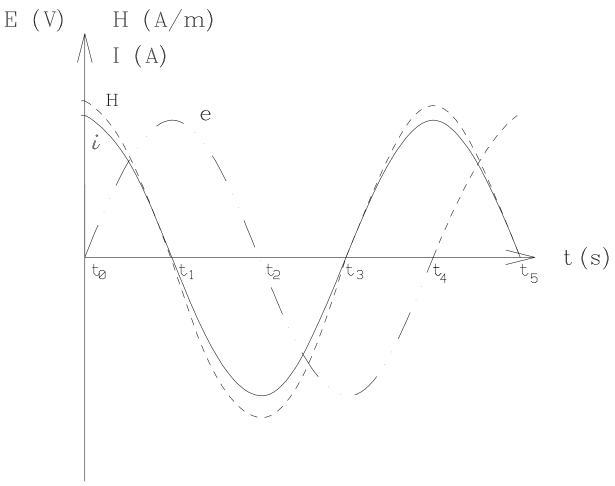
$$E`_{mid2} = -M \cdot \frac{I_1}{t_1} = -308 \cdot 10^{-3} H \cdot \frac{2{,}0 A}{5{,}0 \cdot 10^{-3} s} = \underline{\underline{-123{,}2 V}}$$

JERNTAP - HYSTERESETAP - VIRVELSTRØMSTAP

Når det flyter en vekselstrøm gjennom en spole viklet rundt en kjerne av ferromagnetisk materiale endrer strømmen seg med fluksendringen og med feltstyrken. Dette kommer fram av formelen 5.1.4:

$$H = \frac{I \cdot N}{l}$$

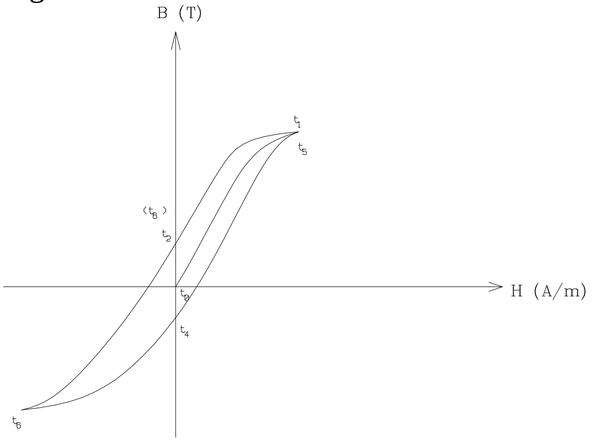
Figur 5.2.10



I punkt t_0 blir strømmen til spolen slått på. Mellom t_0 og t_1 får vi magnetiseringskurven lik figur 5.1.18 for en ferromagnetisk kjerne. Når strømmen beveger seg mellom t_1 og t_2 i figur 5.2.10 vil det være restmagnetisme i det ferromagnetiske matriale. Dette skyldes ettervirkning pga spinn og rotasjonene i atomkjernen. Denne restmagnetismen kalles remanent magnetisme. Strømmen og feltstyrken får sin nullgjennomgang samtidig mens fluksttetheten ikke har nådd sitt nullnivå.

På grunn av remanensen som oppstår i en ferromagnetisk kjerne får vi en kurve lik figur 5.2.11, denne kalles hysteresekurve. Hystereskurven, figur 5.2.11 er et resultat av forholdene for feltstyrken i figur 5.1.10. Ved å følge tidsintervallene for begge kurvene ser en sammenhengen mellom kurvene.

Figur 5.2.11



På grunn av denne tregheten i ommagnetiseringen får vi hysteresekurven som danner et areal. Arealet representerer hysterestapet. Det er viktig å velge ferromagnetiske materialer som har en smalest mulig hysteresekurve for å begrense hysteresetapet. Hysteresetapet $\mathbf{P_h}$ måles i watt.

Virvelstrømstap er strømmer som går på tvers av fluksretningen inne i det ferromagnetiske materialet og hindrer feltlinjene å bevege seg gjennom kjernen. Strømmene kalles Fucaults strømmer eller virvelstrømmer.

For å begrense virvelstrømstapene kan en legge lagvis tynne ferromagnetiske plater som er lakket (isolert) på alle sider. Denne lagvise oppbygningen kalles laminering og tykkelsen til platene er vanligvis ikke tykkere enn 0,5mm. Lengden av platene må være i retning av ønsket feltlinjeveg.

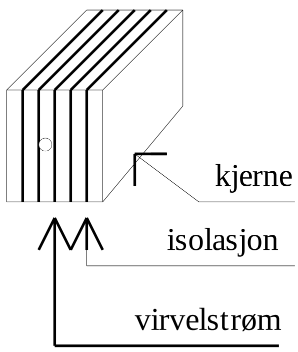
I tillegg til virvelstrømmene er det også viktig at det ferromagnetiske materiale har høyest mulig resistivitet. Ved å tilsette inntil 4 % silisium i det ferromagnetiske stålet øker resistiviteten. Dynamoblikk med 4 % silisium er derfor godt egnet til ferromagnetisk materiale.

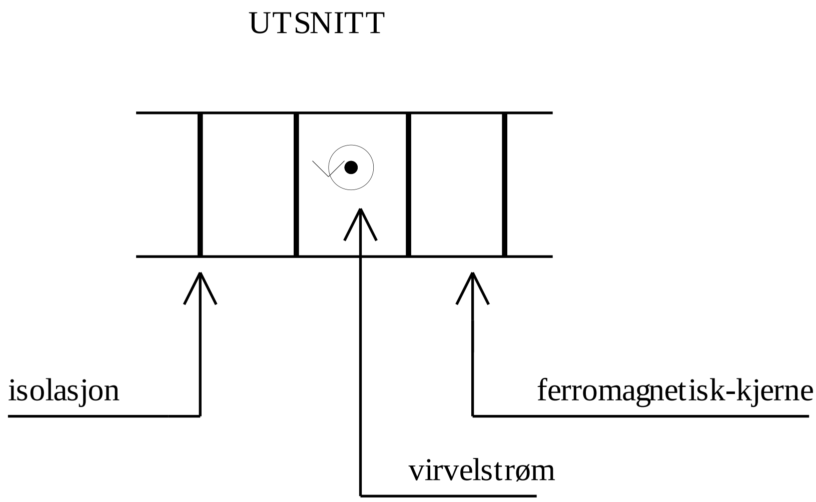
Summen av virvelstrømmene er $\mathbf{I_f}$ og det ferromagnetiske stoffet har en resistans **R**. Virvelstrømstapet blir da:

$$P_v = I_f^{\,2} \cdot R$$

P_v	virvelstrømstap (W)
I_f	summen av alle virvelstrømmene i kjernen (A)
R	kjernens resistans (Ω)

Figur 5.2.13





Jerntapene er summen av hysteresetap og virvelstrømstap i en ferromagnetisk kjerne. Formelen for jerntapet blir da:

$$\boxed{P_{Fe} = P_h + P_v} \qquad 5.2.8$$

Virvelstrømstapet og hysteresetapet omsettes til varme i kjernen. Det er vanlig å oppgi jerntapet og ikke virvelstrømstapet og hysteresetapet da disse er vanskelig å måle.

Ferromagnetisk materiale kan uttrykkes med tapssifferet **V** for materialet. Definisjonen for tapssifferet er antall watt pr kilo stål når flukstettheten er B=1T, frekvensen er 50 Hz og platetykkelsen er 0,5 mm.

Tapssifferet er i størrelsesorden 1,0 til 3,6 W/kg ved 1,0T. Tapssifferet er avhengig av silisiuminnholdet i stålet.

Jerntapet blir da etter definisjon av tapssifferet:

$$\boxed{P_{Fe} = V \cdot B^2 \cdot m} \qquad 5.2.9$$

P_{Fe}	jerntap (W)
P_h	hysteresetap (W)
P_v	virvelstrømstap (W)
V	tapstallet for kjernen (W/kg)
B	flukstettheten (T)
m	massen (kg)

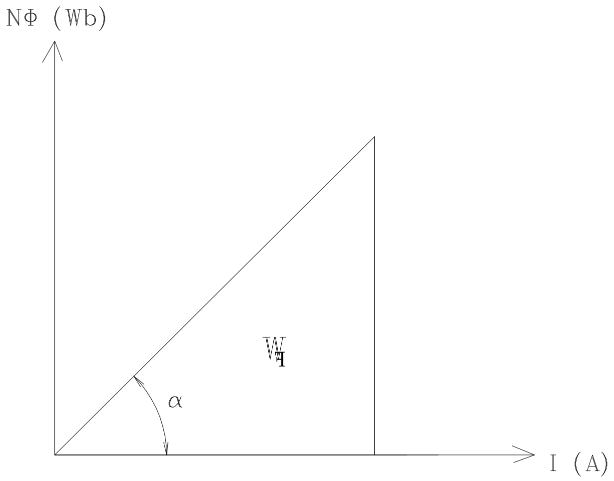
MAGNETISK FELTENERGI

Spolen blir tilført en elektrisk energi som omdannes til varmeenergi og magnetisk feltenergi. Magnetisk feltenergi er den energien som må til for å danne et magnetisk felt.

$$W_{tilf} = W_t + W_F \qquad 5.2.10$$

W_{tilf}	tilført energi til spolen (J)
W_t	varmeenergi fra spolen (J)
W_F	magnetisk feltenergi (J)

Figur 5.3.13.A



Magnetisk feltenergi er den energien som blir dannet av arealet mellom strømaksen og kurven $N \cdot \Phi = f(I)$.

dette gir oss formelen:

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{I}$$

formelen over snudd på formen:

I $$L \cdot I = N \cdot \Phi$$

For å finne arealet av trekanten fra figur 5.3.13.A får vi formelen:

II $$W_F = \frac{I \cdot N \cdot \Phi}{2}$$

Kombinerer vi formlene I og II får vi:

$$\boxed{W_F = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2} \qquad 5.2.10.A$$

W_F	magnetisk feltenergi (J)
L	selvinduktansen (H)
I	strømmen (A)

Eksempel 5.2.4

Tapssifferet til en laminert kjerne med en spole er 1,5 W/kg dynamoblikk ved 1,0 T. Spolen blir påtrykt en vekselspenning med frekvensen 50 Hz. Kjernens vekt er 150 kg og dynamoblikkets platetykkelese er 0,5 mm.

a) Finn jerntapet til kretsen ved en flukstetthet på 1,5 T.
b) Hysteresetapet er 70 % av jerntapet. Hva blir hysteresetapet og virvelstrømstapet i watt?
c) Beregn den magnetiske feltenergien når spolens selvinduktans er 300 mH og strømmen i viklingen er 70 A.

Løsning:

a) Jerntapet:

$$P_{Fe} = V \cdot B^2 \cdot m = 1{,}5 W/kg \cdot (1{,}5 T)^2 \cdot 150 kg = \underline{\underline{506{,}3 W}}$$

b) Hysteresetap og virvelstrømstap:

$$P_{Fe} = P_h + P_v$$

$$P_h = \frac{P_{Fe} \cdot P_h\%}{100\%} = \frac{506{,}3 W \cdot 70\%}{100\%} = \underline{\underline{354{,}4 W}}$$

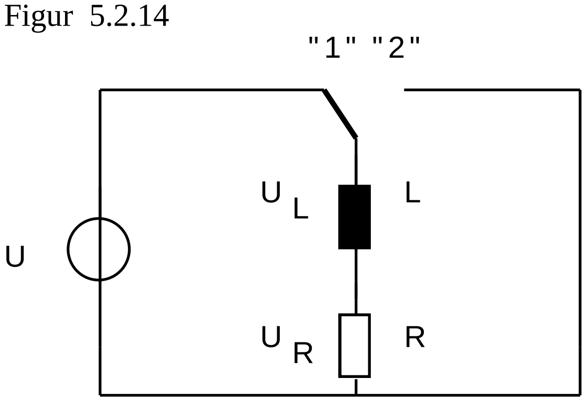
$$P_v = \frac{P_{Fe} \cdot P_v\%}{100\%} = \frac{506{,}3 W \cdot 30\%}{100\%} = \underline{\underline{151{,}9 W}}$$

d) Magnetisk feltenergi:

$$W_F = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 = \frac{1}{2} \cdot 300 \cdot 10^{-3} H \cdot (70 A)^2 = \underline{\underline{735 J}}$$

INN -OG UTKOPLING AV EN RL-KRETS

Figur 5.2.14



Når bryteren står i stilling "1" blir spolen tilført energi fra spenningskilden. Spenningen over spolen minker slik neste kurve viser - figur 5.2.12. Spenningen over resistansen øker i takt med strømmen når spenningen over kondensatoren minker.

Strømmen begynner i null fordi det blir indusert en spenning i spolen. Selvinduksjonsspenningen er motsatt rettet av strømmen pga Lenz`lov. Dette ser vi av formelen for selvinduksjon, formel 5.2.5:

$$E`_{mid} = -L\frac{I}{t}$$

Tiden t er den tiden det tar å tilføre energi til spolen. Strømmen vil da øke mens selvinduksjonsspenningen vil avta.

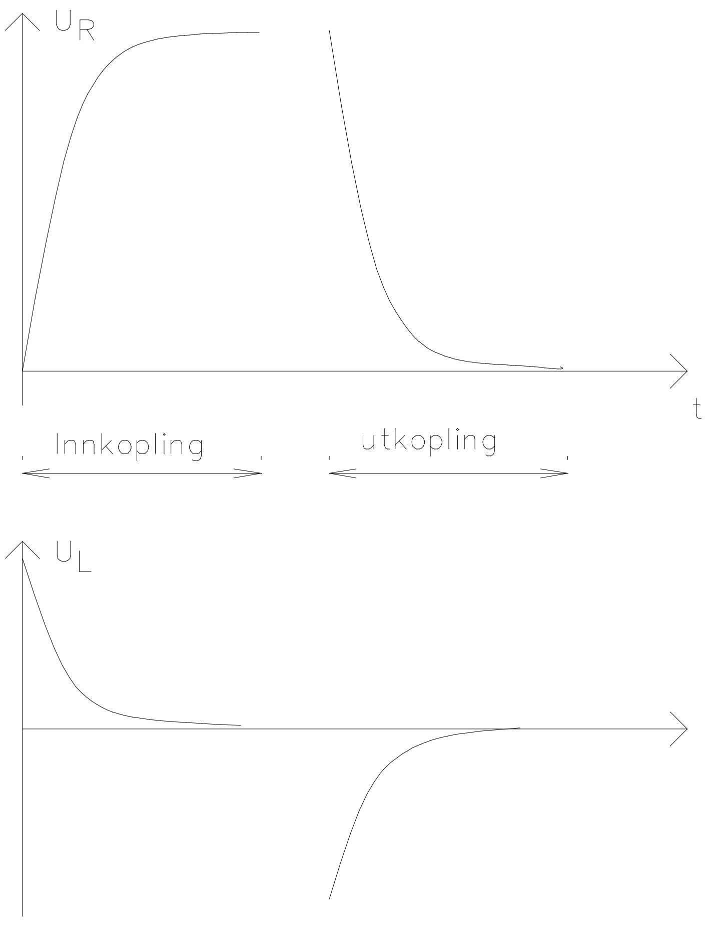
Spolen i figur 5.2.14 har en liten resistans R_s. Denne resistansen skyldes den resistansen vi har i lederen til spolen. Vi ser ofte bort fra resistansen når den er liten i forhold til resistansen R.

INNKOPLING

Kirchhoffs 2. lov opprettholder balansen for kretsen dvs at påtrykt spenning er lik summen delspenningene over spolen og resistansen. Delspenningene vil variere med tiden for tilføring av energi til kretsen.

$$\boxed{U = u_L + u_r} \quad 5.2.11$$

Figur 5.2.15



Spenningen over spolen ved inn -og utkopling av spenningskilden

Tidskonstanten:

$$\boxed{\tau = \frac{L}{R}} \quad 5.2.10$$

For å finne øyeblikksverdiene av strøm og spenning ved innkopling av kretsen i figur 5.2. er lik den utledningen for å finne de samme verdiene som for oppladning av en kondensator.

Øyeblikksverdi av strømmen gjennom spolen ved innkopling:

$$\boxed{i = I \cdot (1 - e^{\frac{-t}{\tau}})} \qquad 5.2.12$$

Øyeblikksverdi av spenningen over spolen ved innkopling:

$$\boxed{u_L = U \cdot e^{\frac{-t}{\tau}}} \qquad 5.2.13$$

UTKOPLING

Når bryteren føres over i stilling ″2″ opptrer spolen som en svært liten spenningskilde som avgir energi til spolen. dette gir oss spenningsforholdene:

$$\boxed{u_R + u_L = 0} \qquad 5.2.14$$

Øyeblikksverdien av strømmen ved utkopling (kortslutning):

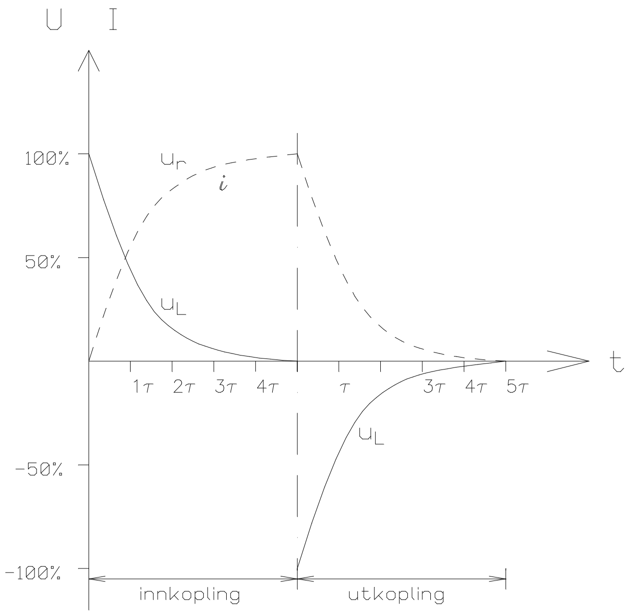
$$\boxed{i = I \cdot e^{\frac{-t}{\tau}}} \qquad 5.2.15$$

Øyeblikksverdien av spenningen over spolen ved utkopling (kortslutning):

$$\boxed{u_L = -U \cdot e^{\frac{-t}{\tau}}} \qquad 5.2.16$$

FORHOLD τ OG U_L VED INN -OG UTKOPLING AV RL-KRETS

Figur 5.2.16



Spenningen over resistansen $\mathbf{u_r}$ og strømmen i kretsen $\mathbf{i_c}$ følger samme prosentvise kurve under inn -og utkopling.

Når spenningen over resistansen har nådd 100 % er den lik påtrykt spenning fra spenningskilden. Spenningen over spolen er da null og det er ingen fluksendring i spolen.

Tidskonstanten $\boldsymbol{\tau}$ er lik verdien av selvinduktansen **L** dividert på resistansen. Det regnes vanligvis $\mathbf{5\tau}$ før en spole er helt innkoplet eller utkoplet. Tabell 5.2.1 viser sammen med figur 5.2.16 hvor fort en spole i serie med en resistans endrer energi ved inn -og utkopling.

	INNKOPLING			UTKOPLING		
t	u_L (%)	u_r (%)	i_L (%)	u_L (%)	u_r (%)	i_L (%)
τ	36,8	63,2	63,2	-36,8	36,8	36,8
2τ	13,5	86,5	86,5	-13,5	13,5	13,5
3τ	5,0	95,0	95,0	-5,0	5,0	5,0
4τ	1,8	98,2	98,2	-1,8	1,8	1,8
5τ	0,7	99,3	99,3	-0,7	0,7	0,7

Eksempel 5.2.5
En spole på 50 mH er seriekoplet med en resistans på 10 Ω. Kretsen blir tilført en likespenning på 110 V.
a) Hva blir tidskonstanten for RL-kretsen?
b) Finn spenningen over spolen 7,0 ms etter at spenningen har blitt tilkoplet kretsen.
c) Hva blir strømmen gjennom spolen 7,0 ms etter at spenningen har blitt tilkoplet kretsen?
d) Hvor lang tid tar det før spenningen over spolen er 50 V ved innkopling?

Løsning:

a) Tidskonstanten:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{50 \cdot 10^{-3} H}{10\Omega} = \underline{5{,}0 \cdot 10^{-3} s} = \underline{\underline{5{,}0 ms}}$$

b) Spenningen over spolen 7 ms etter innkopling:

$$u_L = U \cdot e^{\frac{-t}{\tau}} = 110V \cdot e^{\frac{-7{,}0 \cdot 10^{-3} s}{5{,}0 \cdot 10^{-3} s}} = \underline{\underline{27{,}1V}}$$

c) Maksimal strøm:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{110V}{10\Omega} = \underline{11{,}0A}$$

Strømmen i kretsen 7 ms etter innkopling:

$$i = I \cdot (1 - e^{\frac{-t}{\tau}}) = 11{,}0A \cdot (1 - e^{\frac{-7{,}0 \cdot 10^{-3} s}{5{,}0 \cdot 10^{-3} s}}) = \underline{\underline{8{,}29A}}$$

d) Tiden det tar før U_L=50V:

$$u_L = U \cdot e^{\frac{-t}{\tau}}$$

$$50V = 110V \cdot e^{\frac{-t}{5{,}0 \cdot 10^{-3} s}}$$

$$\frac{50V}{110V} = e^{\frac{-t}{5{,}0 \cdot 10^{-3} s}}$$

$$\ln 0{,}445 = \frac{-t}{5{,}0 \cdot 10^{-3} s}$$

$$t = \underline{3{,}94 \cdot 10^{-3} s} = \underline{\underline{3{,}94 ms}}$$