

L3 (kap 6)

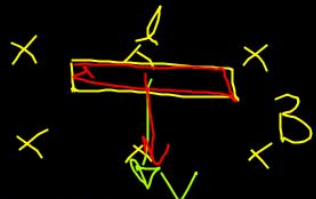
- Läs på egen hand kap 6.6, 6.7, 6.8 (lärobok s. 113-117)

⇒ 13⁰⁵ - 13²⁰

13²⁰ • Genomgång av innehåll.

- Räkna uppgifter (kommande lektion)

$$\Phi = B \cdot A$$



$$e = B \cdot l \cdot v$$

$$e = \frac{d\Phi}{dt}$$

SAMMANFATTNING

Om en strömslinga med arean A är vinkelrät mot ett magnetfält med flödestätheten B , erhålls det magnetiska flödet Φ genom slingan av:

$$\Phi = BA$$

Enhet för magnetiskt flöde: 1 Wb (weber).

Induktion

a) När en ledare skär flödeslinjer i ett magnetfält, induceras en ems e över ledaren:

$$e = l v B$$

Här är l ledarens längd, v den relativa hastigheten mellan ledaren och magnetfältet och B den magnetiska flödestätheten. Sambandet förutsätter att flödestätheten, ledaren och hastigheten är vinkelräta mot varandra.

b) När det magnetiska flödet genom en krets eller genom en slinga ändras, induceras en ems e :

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ eller } e = \frac{d\Phi}{dt}$$

där $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ är flödesändringen per tidsenhet och $\frac{d\Phi}{dt}$ är tidsderivatan av flödet som funktion av tiden.

Om flödet genom en spole med N varv ändras, är den inducerade spänningen över spolen:

$$e = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ eller } e = N \frac{d\Phi}{dt}$$

Lenz lag: den ems som induceras, strävar att driva en ström i en sådan riktning att orsaken till induktionen motverkas.

Självinduktion uppkommer i en spole, när strömmen genom spolen ändras. Den inducerade spänningen är proportionell mot strömändringen per tidsenhet eller mot tidsderivatan av strömmen:

$$e = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \text{ eller } e = L \frac{di}{dt}$$

L är spolens induktans, vars värde beror på spolens utformning. Enhet för induktans: 1 H (henry).

Självinduktionens fördröjer strömlängderna i en spole.

$L = \text{induktans}$

$$e = L \frac{di}{dt}$$



$$e = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

6 Virvelströmmar

Om flödet genom en sluten krets ändras, induceras en ström i den. Men vad händer om flödet genom en metallskiva förändras? Skivan kan ju ses som ett obegränsat antal slutna kretsar. Fig. 7a visar två pendlar, den ena med uppsågade spår. Båda är av aluminiumplåt och alltså omagnetiska. Vi hänger upp pendlarna och låter båda svänga in mellan polerna på en stark magnet. Den ena bromsas då in tvärt medan den andra, den med spår, svänger flera gånger fram och tillbaka innan den stannar, fig. 7b. Förklaringen är denna: När pendelskivorna rör sig in i magnetfältet, ökar flödet genom dem snabbt och kraftigt. Då induceras virvelströmmar. Enligt Lenz lag har de sådan riktning att deras orsak – pendelrörelsen – motverkas, fig. 7c. I den uppsågade skivan hindras många virvelströmmar, och bromseffekten blir därför avsevärt mindre. Denna typ av magnetbroms utnyttjas i Gröna Lunds åkattraktion "Fritt fall", fig. 8. Där faller tivolibesökarna nerför ett 80 meter högt torn och bromsas in med hjälp av kraftiga permanentmagneter som inducerar virvelströmmar i metallskenor längs banan. Jämför pendelns inbromsning i fig. 7b.

TÄNK TILL! 4
Hur skulle aluminiumskivan ha påverkats om den i sin helhet rört sig genom ett homogent magnetfält?



Fig. 7a. Omagnetiska pendlar.
b. Pendeln utan spår har tvärtstannat. Den andra fortsätter att svänga, eftersom spåren minskar framkomligheten för virvelströmmar och därmed bromseffekten.



c. Aluminiumskivan passerar magnetfältet. Kretsen till vänster är på väg in i fältet mellan magnetens poler. Den till höger är på väg ut ur det. Virvelströmmarna har sådana riktningar att flödesändringarna i respektive kretsar motverkas. I magnetfältet rör sig alltså virvelströmmarna uppåt. Enligt högerhandsregeln uppkommer då en vänsterriktad, d.v.s. bromsande, kraft.

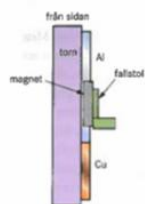


Fig. 8. Magnetbromsen vid fritt fall.

FRITT FALL MED MAGNETBROMS

Meterlånga magneter är fästa i den fallande korgen. De är av materialet NdFeB och ger så starkt magnetfält att montörer får se upp så att deras verktyg inte sugs fast och blir omöjliga att få loss. De åkande befinner sig dock en halvmetr från magneterna, och där är flödestätheten betydligt mindre. Under inbromsningen i nedre delen av fallet löper magneterna på var sin sida om en platt metallskena och på en centimeters avstånd från den (fig. 8). Skenans övre del är av aluminium, den undre av koppar. Inbromsningen börjar när magneterna når skenan, och bromskraften ökar när de passerar från aluminiumskenan in över koppardelen. Denna ökning motverkas dock av att hastigheten minskar, eftersom flödesändringen per tidsenhet då minskar. Den sista meters inbromsning görs därför med en mekanisk broms.

I växelströmsapparater (motorer, generatorer, transformatorer etc.) utsätts metalldelar ofta för varierande magnetfält. Virvelströmmar alstras då och orsakar ofta oönskad värmeutveckling. Värme utvecklas dels på grund av resistansen i metallen och dels på grund av ständiga ommagnetiseringar av järndelar. Energiförlusterna kan minskas om man bygger upp metalldelarna av tunna plåtar, isolerade från varandra med lack eller papper. Detta får samma verkan som spårerna i aluminiumskivan i fig. 7a.

Virvelströmmar kan även vara till nytta. Ett område där man utnyttjar värmeutvecklingen från virvelströmmar är upphettning med hjälp av induktion. Metoden har länge använts inom industrin för att värma metallsmältor. Moderna spisar med induktionshällar använder sig också av detta, fig. 9. Här är det främst ommagnetiseringar som orsakar värmeutvecklingen, se kapitel 5, avsnitt 12. Därför ska kokkärlen ha botten av magnetiserbart (ferromagnetiskt) material, t.ex. järn. Fäster en permanent magnet på kärlets botten så fungerar det bra. En fördel med induktionshällar är att själva spisen inte blir varm. Det är bara kokkärlet och dess innehåll som värms upp. En annan fördel är att om maten kokar över bränner den inte fast på en het spisplatta.

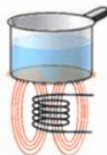
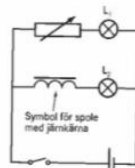


Fig. 9.

TÄNK TILL! 5

- Vad består det magnetiska materialet NdFeB av?
- Varför ökar bromskraften när magneterna vid "fritt fall" når skenans koppardel?

Fig. 10. När kretsen sluts, tänds L_1 före L_2 . Den inducerade spänningen i spolen motverkar strömköningen.

Självinduktion: En strömändring i en spole orsakar en flödesändring. Då induceras en spänning som fördröjer strömändringen.

7 Självinduktion och induktans

För att en spänning ska induceras i en spole krävs att det magnetiska flödet genom spolvarven ändras. När spolen ingår i en sluten krets, kan flödesändringen åstadkommas genom ändring av spolens eget fält. Man ändrar helt enkelt strömmen i spolen. Fenomenet kallas då *självinduktion*.

I parallellkretsen i fig. 10 har likadana lampor kopplats i serie med en spole i ena grenen och en resistor i den andra. Resistorn och spolen har samma resistans. När kretsen sluts lyser lampan L_1 upp genast, men det dröjer flera sekunder innan lampan L_2 lyser lika starkt. Det beror på att strömökningen enligt Lenz lag bromsas av den ems som induceras i spolen.

När strömmen genom en spole med resistansen R ändras, har vi alltså att göra med två olika spänningar. Dels spänningen $u_R = R \cdot i$ över spolens resistans, dels en inducerad spänning ϵ . För att redogöra för båda kan man rita spolen som i fig. 11, där också totala spänningen u över spolen markerats. I fig. 11a visas spänningarna när strömmen ökas, i fig. b när den minskas. Då har den inducerade spänningen omkastad polaritet.

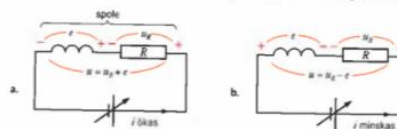


Fig. 11. Strömändringar i spolar sker endast "motvilligt" på grund av självinduktionen.

Induktans

Hur beräknar man den inducerade spänningen i en solenoid direkt ur strömändringen? Från kapitel 5 hämtar vi sambandet $B = \mu_0 \frac{N}{l} i$ för

flödestätheten i en solenoid. Flödet genom en solenoid med tvärsnittsarean A blir:

$$\Phi = B \cdot A = \mu_0 \frac{N}{l} i \cdot A = \mu_0 \frac{N^2}{l} \cdot A i$$

Vi låter strömmen ändras från i_1 till i_2 mellan tiderna t_1 och t_2 . På samma tid ändras flödet från

$$\Phi_1 = \mu_0 \frac{N^2}{l} \cdot A i_1 \quad \text{till} \quad \Phi_2 = \mu_0 \frac{N^2}{l} \cdot A i_2$$

Det ger:

$$\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1} = \mu_0 \frac{N^2 \cdot A}{l} \cdot \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1} \quad \text{eller} \quad \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \mu_0 \frac{N^2 \cdot A}{l} \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Vid självinduktion i en spole är den inducerade spänningen

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

Momentanvärdet ges av

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

L är spolens induktans. Enhet: 1 H.



Fig. 12. När strömmen bryts, tvingas strömmen att minska mycket snabbt, och en stor inducerad spänning uppträder över spolen.

ÖVNING 6.22–6.24

Vi får:

$$e = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \mu_0 \frac{N^2 \cdot A}{l} \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

För en given solenoid är uttrycket $\mu_0 \frac{N^2 \cdot A}{l}$ en konstant och kallas solenoidens induktans L .

Känner man solenoidens induktans kan man alltså beräkna den inducerade spänningen ur strömändringen enligt:

$$e = L \frac{di}{dt}$$

Skriver vi om till $L = e \frac{dt}{di}$ ser vi att enheten för induktans är Vs/A som i SI-systemet kallas henry (H).

Söker vi en inducerad momentanspänning ersätter vi som vanligt differenskvoten med en derivata och får:

$$e = L \frac{di}{dt}$$

Anm.: Om solenoiden förses med järnkärna som i fig. 10 blir den elektromagnet. Flödet genom den och därmed induktans blir betydligt större och kan inte beräknas enligt ovan.

KONTROLL 5

Strömmen i en spole ökar linjärt från noll till 0,75 A på 2,5 s. Då induceras spänningen 3,0 mV i spolen. Beräkna spolens induktans.

Brytning av induktiv krets

När kretsen fig. 12 sluts kan den inducerade spänningen i spolen aldrig överstiga värdet av spänningen U hos spänningskällan. I så fall skulle strömmen börja gå åt andra hållet. Men vad händer när kretsen bryts? Strömmen tvingas mycket snabbt ner till noll. Det betyder att Δi i sambandet $e = L \frac{di}{dt}$ blir mycket litet.

Den inducerade spänningen kan då bli mycket större än den pålagda spänningen U – så stor att det slår en gnista tvärs över strömställaren. Principen används exempelvis i tändspolen i äldre bilmotorer för att få en gnista att slå mellan elektroderna i tändstiften. Vid brytning av starka strömmar i induktiva kretsar med stor induktans måste man vara försiktig för att undvika brandfara.

Självinduktion förekommer i alla kretsar när strömmen ändras, men induktansen är oftast så liten att induktionen kan försummas.

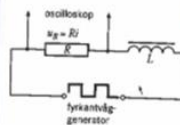


Fig. 13. Spänningskällan levererar en spänning som växlar periodiskt mellan värdet U och 0. På oscilloskopet kan man studera hur strömmen i kretsen ändras vid in- och urkoppling av U .

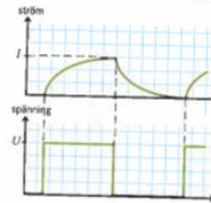
Fig. 14. Strömkurvas utseende i samband med att spänningen i kretsen i fig. 13 växlar mellan U och noll.

8 In- och urkoppling i en krets med induktans

Som du sett bromsas strömändringen när spänningen kopplas på i en krets som har induktans. Med oscilloskop eller mät dator kan vi studera förloppet.

Kretsen i fig. 13 innehåller en spole och ett motstånd. De är kopplade till en spänningskälla som växlar mellan en konstant spänning U och noll. Kretsen är sluten även när spänningen är noll.

Ett oscilloskop eller en mät dator registrerar spänningen över motståndet. Enligt Ohms lag är den i varje ögonblick proportionell mot strömmen. På skärmen kan vi alltså se hur strömmen varierar med tiden.



Strömkurvas utseende visas i fig. 14. I samma tidskala visas hur den pålagda spänningen varierar. När spänningen U kopplas in, växer strömmen först hastigt men sedan allt långsammare mot sitt fulla värde I . När spänningen plötsligt blir noll, avtar strömmen på motsvarande sätt.

En närmare analys, som visar att ström kurvorna är exponentiellt växande respektive avtagande, kan göras så här:

När den konstanta spänningen U kopplats in får vi med en potentialvändring i varje ögonblick $U = Ri + L \frac{di}{dt}$. Jämför kretsen i fig. 11a.

När spänningen sedan försvunnit får vi i stället $0 = Ri + L \frac{di}{dt}$. Jämför kretsen i fig. 11b där strömmen avtar. Dessa båda differentialekvationer har

lösningarna $i = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{L/R}})$ resp. $i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{L/R}}$. Derivering med avseende på tiden bekräftar sambanden.

ÖVNING 6.25–6.30

9 Växelströmgeneratorn

I en generator som alstrar växelström drivs en slinga runt i ett magnetfält, se fig. 15.

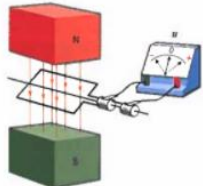


Fig. 15. I en roterande slinga i ett magnetfält induceras en växelspanning.

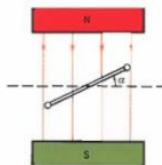


Fig. 16. Figuren visar slingan i fig. 15, sedd från en kortsida. Vinkelhastigheten ω är konstant och vid tiden t är vinkeln $\alpha = \omega t$.

Energikällan kan vara av olika slag, t.ex. ett vattenhjul, en ångturbin eller en vindturbin. Eftersom flödet genom slingan ständigt ändras, induceras en spänning i den. Slingans ändpunkter är anslutna till var sin metallring. Via kontakter som släpar mot ringarna kan man "ta ut" spänningen.

Vi ansluter släpkontakterna till en känslig voltmeter för likspänning och låter slingan rotera ganska långsamt. Voltmeters visare pendlar då fram och tillbaka kring sitt jämviktsläge. Den inducerade spänningen är tydligen en *växelspänning*.

Vi ska undersöka hur man kan beskriva en sådan växelspanning matematiskt. Vi antar att slingan roterar med konstant varvtal och att magnetfältet är homogent, fig. 16. Vi räknar tiden från ett läge när slingan är vinkelrät mot flödeslinjerna.

Vid tiden t har slingan vridit sig vinkeln $\alpha = \omega t$, där ω är slingans vinkelhastighet. Om slingans area är A och flödestätheten B , är det magnetiska flödet genom slingan vid tidpunkten t enligt avsnitt 4:

$$\Phi = BA \cos \alpha$$

Enligt induktionslagen är momentanvärdet av den inducerade spänningen lika med tidsderivatan av flödet $\Phi = BA \cos \omega t$. Vi får:

$$\epsilon = \frac{d\Phi}{dt} = -BA\omega \sin \omega t \quad (\omega \text{ är inre derivata})$$

Generatorns polspänning är alltså sinusformad. Minustecknet har inget praktiskt intresse eftersom den inducerade spänningen ständigt växlar polaritet. Det största värde spänningen antar är $BA\omega$. Vi inför beteckningen \hat{u} (uttal: u-topp eller u-tak) för det värdet. Generatorspänningen kan då skrivas:

$$u = \hat{u} \sin \omega t$$

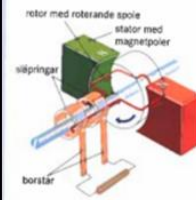


Fig. 17. Principen för en enkel växelströmgenerator.

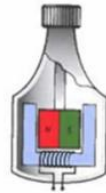


Fig. 18. Cykelgenerator. Ett roterande magnetfält inducerar spänning i de fasta lindningarna.

Genom att utnyttja induktionen i generatorer kan elektrisk energi alstras. Den vanligaste typen av generator är den som visas i fig. 17. Statorn, magneterna, skapar ett fixt magnetfält och rotorn är en roterande spole med många slingor.

I t.ex. vattenkraftverk används en generatortyp där spänningen i stället induceras i lindningar på statorn av ett magnetfält som roterar med rotorn. På den sitter då elektromagneter som matas med ström från släpningar.

I mindre generatorer kan elektromagneterna ersättas av permanentmagneter, fig. 18.

Ju fler poler generatorn har, desto lägre varvtal har den vid en viss frekvens hos växelspanningen. En fyrpolig generator ger nätfrekvensen 50 Hz vid varvtalet 1 500 varv/minut. Elgeneratorer i vattenkraftverk anpassas till vattenfallets höjd. Ju högre vattenfall, desto högre varvtal. Eftersom svenska vattenfall i allmänhet har ganska liten fallhöjd, brukar man använda mångpoliga generatorer.

De största generatorerna finns i kärnkraftverk. Där drivs generatorn, som ofta är tvåpolig, av ångturbiner. Effekten kan uppgå till ca 1 000 MW, och verkningsgraden kan bli upp till 98 %, fig. 19.

TÄNK TILL!
Kan du se någon fördel med att spänningen induceras i statorn i stället för i rotorn när växelströmgenerator ger hög spänning?



Fig. 19. Generatorer i vattenkraftverk.

10 Transformatorn och elektrisk energioverföring

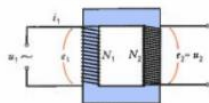


Fig. 20. Transformator med primärsidan ansluten till en spänningskälla och med sekundärsidan öppen.

En transformator är en elektrisk apparat som kan förändra växelspanningars toppvärdet. I sitt enklaste utförande består en transformator av en järnkärna med två skilda spolar, en *primärspole* med N_1 varv och en *sekundärspole* med N_2 varv, fig. 20.

Järnkärnan är konstruerad av tunna plåtar, isolerade från varandra så att energiförlusterna på grund av virvelströmmar och ommagnetiseringsringar blir så små som möjligt. När primärspolen ansluts till en växelspanning, orsakar strömmen i_1 ett magnetiskt flöde Φ i järnkärnan. Praktiskt taget hela flödet följer järnkärnan runt och passerar därmed också genom sekundärspolen. Eftersom flödet varierar i takt med strömmen i_1 , induceras spänningar i båda spolarna:

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{och} \quad e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Division led för led ger:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Resistansen i primärspolen är vanligen så liten att den kan försummas. Den inducerade spänningen e_1 får då i varje ögonblick samma belopp som spänningskällans spänning u_1 . Spänningen u_2 över sekundärspolen är den inducerade spänningen e_2 . Eftersom en växelspanning liksom en växelström varierar hela tiden, använder man vid beräkningar ett slags medelvärden U , resp. I som kallas effektivvärden. (Heureka 1 Lärobok, kapitel 7).

Vi övergår till effektivvärden och får:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{eller} \quad U_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_1$$

Genom lämpligt val av spolarnas varvantal kan en spänning U_1 ändras, transformeras, till en spänning U_2 . Exempelvis kan nätspänningen 230 volt transformeras ner till några få volt (och vid behov likriktas) med en s.k. adapter till elektronikapparater.

Det visar sig att transformatorn kan arbeta praktiskt taget utan effektförlust. Då gäller sambandet

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

där I_2 är strömmen genom en komponent på sekundärsidan, fig. 21. Transformerar man ner spänningen och kortsluter sekundärspolen med

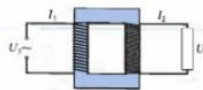


Fig. 21. Transformator med en belastning på sekundärsidan.

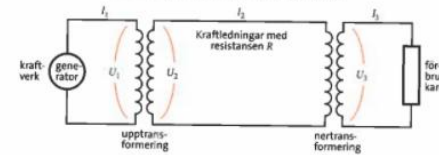


Fig. 22.

två metallstycken, kan strömmen I_2 bli så stark att värmeutvecklingen räcker till att smälta ihop dem. Det är principen för ett svetsaggregat, fig. 22.

Omvänt kan man enligt sambandet $U_1 I_1 = U_2 I_2$ ta ut en given effekt vid en lägre sekundärström I_2 om utspänningen U_2 är hög. Detta utnyttjar man vid överföring av elektrisk energi från kraftverken till förbrukarna. Energiförlusterna i ledningarna minskar vid lågt värde på I_2 , fig. 23. Redan en fördubbling av U_2 innebär i princip att I_2 halveras och att förlusterna $R^2 I_2^2$ i ledningarna minskar till en fjärdedel.

Fig. 23. Principen för överföring av elenergi.



Det finns dock en övre gräns för spänningen U_2 . Ju större den blir, desto besvärligare problem får man med överslag och andra urladdningar på grund av de höga fältstyrkor som bildas intill ledarna. Den högsta spänning som används vid överföring av elenergi i Sverige är 400 kV. På andra håll i världen förekommer dock avsevärt högre överföringsspänningar. Innan den elektriska energin levereras till förbrukaren transformeras spänningen ner igen till en driftspänning, som ofta är 400 V eller 230 V.

KONTROLL 6

Nätspänningen 230 V ska transformeras ner till 9,0 V. Primärspolen har 1000 trådvarv. Beräkna antalet varv i sekundärspolen.

**Virvelströmmar,
Självinduktion och
brytning av
induktiv krets.
Demonstration.**

Vi arbetar med
uppgifterna:

Jag visar ur lärobok:
6:22, Kontroll 5,
Kontroll 6

Ni gör: 6:23, 6:25,
6:27, 6.31 (Fördj:
6.24, 6:26, 6.28,
6.29, 6.30)

Stora läroboken

Kapitel 6.7 - 6.10. Ger oss formler för att räkna på induktans L i spole. Hur strömmen i A ändras med tiden t s kan vi beskriva med hjälp av lösningen till differentialekvationen: $Ri - L \frac{di}{dt} = 0$ (Tänk Ma5).

Alternativ E: Lösningar till uppgift: 6.14, 6.15, 6.16, 6.17 + Blandade uppgifter

lilla "övningsboken"

