

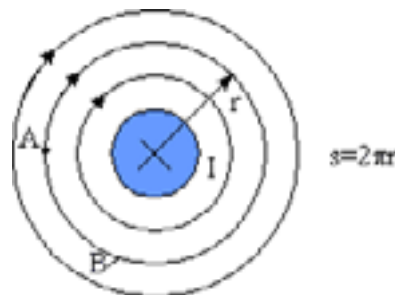
8 SÄHKÖMAGNETISMI

8.1 Yleistä

Magneettisuus on eräs luonnon ilmiö, joka on tunnettu jo kauan, ja varmasti jokaisella on omia kokemuksia magneeteista ja magneettisuudesta. Uudempi havainto (1820, Christian Ørstedt) sen sijaan on, että sähkö- ja magneetti-ilmiöt riippuvat toisistaan. Ørstedtin havainto oli, että virrallinen johdin muodostaa aina ympärilleen magneettikentän, jonka suuruus ja suunta riippuvat virran suuruudesta ja suunnasta. Syntyvän magneettikentän suunta voidaan muistaa ns. oikean käden säännön avulla siten, että jos oikean käden peukalo osoittaa virran suuntaan, näyttävät muut sormet magneettikentän suunnan. Magneettikenttien teorian hallinta puolestaan on välttämätöntä sähkökoneiden (moottorit ja muuntajat) toiminnan ja ominaisuuksien ymmärtämiseksi.

8.2 Magneettikenttien perusteita

Johtimessa kulkevan virran I ja magneettivuon tiheyden B välillä on yksinkertainen riippuvuus. Kuvassa 8.1 on esitetty virrallisen johtimen ympärille muodostuva magneettikenttä.



Kuva 8.1 Suoran virrallisen johtimen magneettikenttä (A on tarkastelupiste). /1/

Sähkömagnetismi voidaan esittää tiivistetysti Maxwellin yhtälöiden (Ampèren laki, Faradayn laki, laki magneettikentän lähteettömyydestä ja Gaussin laki) ja väliaineet kentiin sitovien yhtälöiden avulla. Ne opetetaan muilla kursseilla, joten seuraavassa esitetään vain kyseisistä yhtälöistä johtamalla saatavia yksinkertaistettuja yhtälöitä.

Ampèren laista saadaan

$$(8.1) \quad B_s = \mu I$$

missä

B on magneettivuon tiheys etäisyydellä r johtimesta

s on r-säteisen ympyrän kehän pituus

μ on väliaineen permeabiliteetti

Vastaavasti käämille, jossa on N kierrosta voidaan yhtälö 8.1 kirjoittaa muotoon

$$(8.2) \quad B_s = \mu IN$$

Yhtälön 8.2 perusteella voidaan todeta, että magneettivuon tiheyteen vaikuttavat käämin läpi kulkeva virta, käämin johdinkierrosten lukumäärä ja väliaineen permeabiliteetti.

Virran I ja johdinkierrosten lukumäärän tuloa nimitetään magnetomotoriseksi voimaksi F_m .

$$(8.3) \quad F_m = NI$$

Magnetomotorinen voima (mmv) kehittää magneettivuon Φ , ja on verrattavissa sähkömotoriseen voimaan (smv) E. Käämin sisälle muodostuvan magneettivuon suunnan selvittämiseksi voidaan soveltaa oikean käden sääntöä: oikean käden sormet näyttävät virran suunnan, jolloin peukalo näyttää vuon suunnan.

Yhtälö 8.2 voidaan merkitä uuteen muotoon yhtälön 8.3 avulla:

$$(8.4) \quad B = \frac{\mu NI}{s} = \mu \frac{F_m}{s}$$

Magneettivuon tiheyttä ja magneettikentän voimakkuutta yhdistää väliaineessa yhtälö

$$(8.5) \quad B = \mu H$$

Näiden perusteella havaitaan, että magneettikentän voimakkuus H on magnetomotorinen voima pituusyksikköä kohti.

$$(8.6) \quad H = \frac{F_m}{s}$$

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

Kun lisäksi tiedetään, että $B = \mu H$, voidaan yhtälö 8.4 edelleen kirjoittaa:

$$(8.7) \quad \Phi = \frac{\mu A}{s} F_m$$

Eli yhtälö 8.7 kertoo, kuinka suuren magneettivuon Φ magnetomotorinen voima F_m saa aikaan magneettiipiirissä, jonka pituus on s , magneettiipiirin poikkipinta-ala A ja permeabiliteetti μ . Kerrointa $\mu A/s$ nimitetään magneettiseksi johtavuudeksi eli permeanssiksi ja sen tunnuksena käytetään usein kirjainta Λ . Permeanssin käänteisarvo on magneettivastus eli reluktanssi R_m . Yhtälö 8.7 voidaan nyt kirjoittaa muotoon:

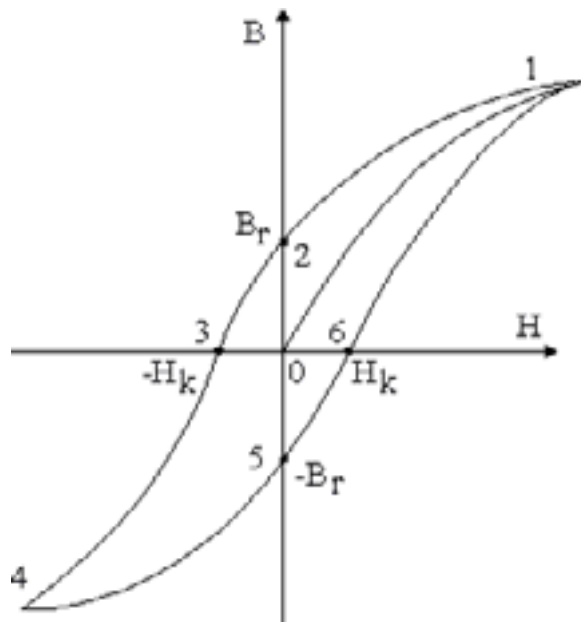
$$(8.8) \quad F_m = R_m \Phi$$

Yhtälö on muodollisesti sama, kuin sähködynamiikan Ohmin laki mistä syystä sitä voidaan kutsua magneettiipiirien Ohmin laiksi.

8.3 Raudan magneettiset ominaisuudet

Rauta on hyvin magneettinen materiaali, joka kuuluu ferromagneettisten aineiden joukkoon. Ferromagneettisilla aineilla magneettiset alkeisalueet eli domainit pyrkivät suuntautumaan ulkoisen magneettikentän mukaisesti. Ferromagneettisilla aineilla permeabiliteetti on suuri, jolloin niiden reluktanssi on pieni. Näin saadaan aikaan suuria vuontiheyksiä käyttämällä pieniä mmv:a ja kentänvoimakkuuden arvoja.

Ferromagneettisilla aineilla permeabiliteetti ei ole vakio vaan riippuu suuresti magneettivuon tiheydestä. Näin on myös raudalla. Aineiden magneettisia ominaisuuksia kuvataan magnetoimiskäyrästä. Hystereesi-ilmiö aiheutuu domainialueiden välisestä kitkasta. Hystereesi-ilmiöstä aiheutuu hystereesihäviöitä, joiden suuruus on verrannollinen hystereesisilmukan pinta-alaan. Kun raudassa vaikuttavaa magneettikentän voimakkuutta kasvatetaan, magneettivuon tiheys kasvaa kuvan 8.2 mukaisesti.



Kuva 8.2 Hystereesikäyrä. /1/

Kun kentän voimakkuutta pienennetään pisteestä 1 lähtien, huomataan, että vuon tiheys ei pienene alkuperäisen käyrän mukaan. Kentän voimakkuuden pienentyessä nollaan materiaali jää kuitenkin magneettiseksi ja rautaan jää remanenssivuo B_r . Kuvassa 8.2 tätä arvoa kuvaa piste 2. Jotta vuon tiheys saataisiin nollassa, on materiaalia magnetoitava negatiiviseen suuntaan. Vuon tiheys on nolla pisteessä 3, magneettikentän voimakkuuden arvolla $-H_k$, jota kutsutaan koersitiivikentän voimakkuudeksi. Kun kentän voimakkuutta kasvatetaan edelleen negatiiviseen suuntaan, vuon tiheys kasvaa myös negatiiviseen suuntaan. Pisteessä 4 on saavutettu pistettä 1 vastaava negatiivinen vuon tiheys. Kun kentän voimakkuutta pienennetään jälleen arvoon nolla, tullaan pisteeseen 5, jossa aineeseen jää vuon tiheys $-B_r$. Pisteeseen 2 verrattuna se on kuitenkin nyt negatiivinen. Tämä negatiivinen remanenssivuon tiheys saadaan häviämään lisäämällä kentän voimakkuutta positiiviseen suuntaan, jolloin tullaan pisteeseen 6. Kun kentän voimakkuutta lisätään edelleen, päädytään taas pisteeseen 1. Tämän perusteella voidaan todeta, että magneettivuon tiheyden riippuvuus magneettikentän voimakkuudesta ei seuraa origosta lähtevää alkuperäistä käyrää. Uutta silmukkamaista käyrää kutsutaan hystereesikäyräksi. Nollasta lähtevää alkuperäistä käyrää kutsutaan neitsytkäyräksi. /1/

Ilmiötä havainnollistaa yhtälö

$$(8.9) \quad B = \mu(H + M)$$

mistä nähdään, että B on nolla, kun magnetoituminen M on $-H_k$.

8.4 Sähkömagneettinen induktio

8.4.1 Sähkömotorinen voima (smv)

Englantilainen fyysikko Faraday havaitsi tutkimuksissaan vuonna 1831, että magneettikentässä liikkuvaan johtimeen syntyy jännite, ja jos virtapiiri suljetaan, piiriin syntyy virta. Ilmiötä kutsutaan sähkömagneettiseksi induktioksi.

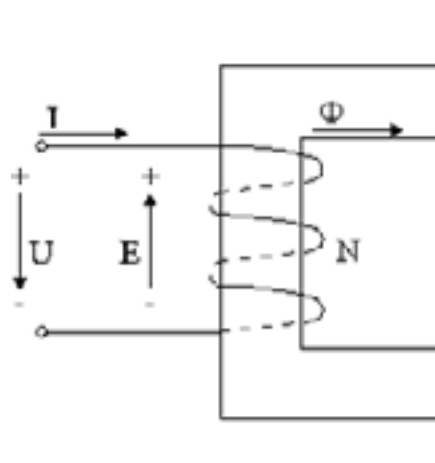
Kun johdinta, jonka pituus on l liikutetaan magneettikentässä B nopeudella v , syntyy johtimeen sähkömotorinen voima

$$(8.10) \quad E = Blv$$

Kun suljettu silmukka, jossa on N johdinkierrosta liikkuu magneettikentässä, silmukan läpi kulkevan magneettivuon Φ arvo muuttuu. Tämän seurauksena silmukkaan syntyy Faradayn induktiolain mukaan smv E . Jos silmukan virtapiiri on suljettu, syntyy virta, joka on suunnaltaan sellainen, että se pyrkii estämään magneettivuon muuttumisen. Tätä ilmiötä kutsutaan Lenzin laiksi. Syntyvän smv:n suuruus saadaan yhtälöstä 8.11, jossa Lenzin lain mukainen suunnanmääritys esitetään miinusmerkin avulla.

$$(8.11) \quad E = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

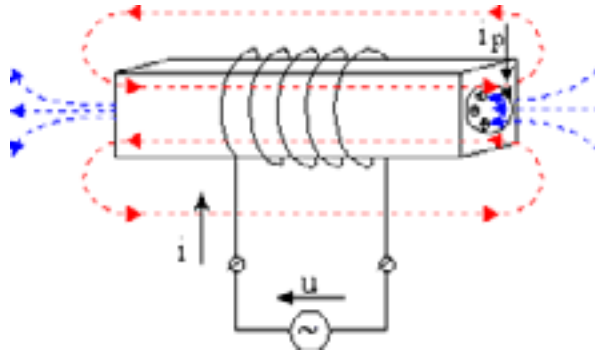
Asia on havainnollistettu kuvassa 8.3.



Kuva 8.3 Muuttuvan magneettivuon indusoima jännite. /2/

8.4.2 Pyörrevirrat

Vaihtuvan magneettikentän kehittämä smv ei rajoitu ainoastaan johdinsilmukkaan, vaan se muodostuu kaikkialle, missä vaihteleva vuo lävistää johdemateriaalin. Esimerkkinä kuvassa 8.4 on johtavaa materiaalia oleva tanko, jota ympäröi käämi. Käämin avulla kehitetään vaihteleva magneettikenttä. Tällöin magneettikentässä olevaan kappaleeseen muodostuu virrantiheys, joka voidaan kuvata virtasilmukoiden avulla. Ilmiötä kutsutaan pyörrevirroiksi. Pyörrevirtojen kulkiessa kappaleessa niistä aiheutuu häviöitä, jotka lämmittävät kappaletta.



Kuva 8.4 Pyörrevirtojen syntyminen. /1/

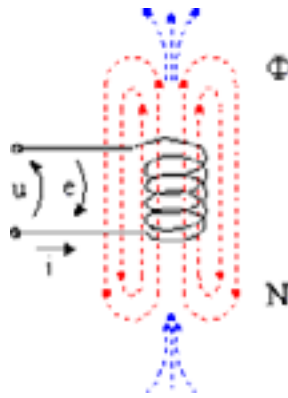
Pyörrevirtoja voidaan käyttää hyväksi kuumennus- ja sulatuslaitteissa. Sähkökoneisiin pyörrevirrat aiheuttavat haitallisia lisähäviöitä. Niitä voidaan pienentää tekemällä magneettiipiiri ohuista, toisistaan eristetyistä levyistä ja lisäämällä rautaan piitä, jolloin raudan resistiivisyys kasvaa. Pyörrevirrat aiheuttavat johtimiin virran epätasaisen jakautumisen poikkipinnassa. Virran tiheys on johtimen reunoilla suurempi kuin sen keskellä. Tätä ilmiötä kutsutaan nimellä virran ahto.

8.4.3 Itseinduktio

Itseinduktio on sähköilmiö, jossa käämin oman virran vaihtelu synnyttää eli indusoi käämiin sähkömotorisen voiman (kuva 8.5).

Yhtälön 8.11 perusteella saadaan:

$$(8.12) \quad e = -\frac{N^2}{R_m} \frac{di}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$



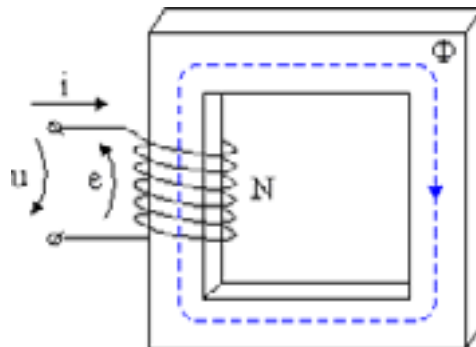
Kuva 8.5 Ilmasydämisen käämin itseinduktio /1/

Käämin induktanssi ei ole vakio, jos magneettipiiri sisältää ferromagneettisia aineita (kuva 8.6). Tällöin induktanssi riippuu virran i arvosta. Käämiin indusoituva smv on nyt

$$(8.13) \quad e = -\frac{d(Li)}{dt} = -L \frac{di}{dt} - i \frac{dL}{dt} = -L \frac{di}{dt} - i \frac{dL}{di} \frac{di}{dt} = -(L + i \frac{dL}{di}) \frac{di}{dt}$$

$$L + i \frac{dL}{di}$$

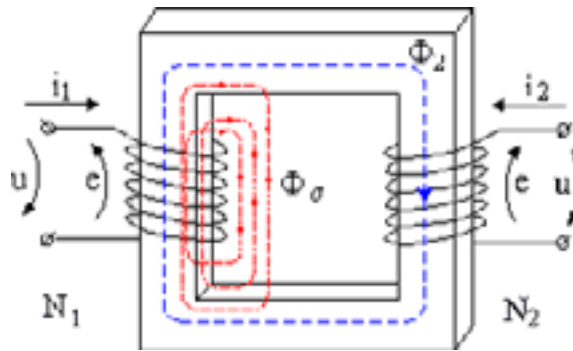
Kaavassa 8.13 itseinduktanssi on



Kuva 8.6 Rautasydämisen käämin itseinduktio. /1/

8.4.4 Keskinäisinduktio

Vaihtosähköpiirit liittyvät toisiinsa galvaanisen yhteyden lisäksi myös keskinäisinduktanssien kautta. Keskinäisinduktanssi, jota merkitään M :llä vaikuttaa kahden käämin välillä silloin, kun magneettikentän magneettivuosta osa kulkee kummankin käämin kautta. Kuvassa 8.7 on esitetty kahden käämin keskinäinen magneettinen yhteys.



Kuva 8.7 Kahden käämin keskinäinen magneettinen yhteys. /1/

Ajallisesti vaihtelevan virran i_1 vaikutuksesta käämiin 1 syntyy käämivuo

$$(8.14) \quad \Psi_1 = N_1 \Phi_1 = L_1 i_1$$

missä Ψ_1 on käämin 1 käämivuo ja käämiin 2 käämivuo

$$(8.15) \quad \Psi_{12} = N_2 \Phi_1 = M i_1$$

missä M on keskinäisinduktanssi.

Jaettaessa yhtälö 8.14 yhtälöllä 8.15 saadaan

$$(8.16) \quad \frac{\Psi_1}{\Psi_{12}} = \frac{N_1 \Phi_1}{N_2 \Phi_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{L_1 i_1}{M i_1} = \frac{L_1}{M}$$

Jos käämiin 2 syötetään ajallisesti vaihteleva virta i_2 , joka synnyttää magneettipiiriin saman suuruisen vuon kuin i_1 , eli $\Phi_2 = \Phi_1$, saadaan vastaava lauseke

$$(8.17) \quad \frac{\Psi_1}{\Psi_{21}} = \frac{N_2 \Phi_2}{N_1 \Phi_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{L_2 i_2}{M i_2} = \frac{L_2}{M}$$

Kahden viimeisen yhtälön perusteella saadaan

$$(8.18) \quad M^2 = L_1 L_2$$

eli keskinäisinduktanssi

$$(8.19) \quad M = \sqrt{L_1 L_2} = \frac{N_1 N_2}{R_m}$$

Tämä yhtälö pätee vain, jos hajavuota ei esiinny. Todellisuudessa käämien välillä syntyy kuitenkin aina hajavuo Φ_σ , jolloin $M^2 = L_1L_2$. Hajavuon mittana käytetään yhtälön 8.20 mukaista magneetti-piirin hajakerrointa

$$(8.20) \quad \sigma = \frac{L_1L_2 - M^2}{L_1L_2} = 1 - \frac{M^2}{L_1L_2}$$

Käämien keskinäisen magneettisen kytkennän kiinteyttä voidaan ilmaista myös yhtälön 8.21 mukaisella kytkentäkertoimella k .

$$(8.21) \quad k = \frac{M}{\sqrt{L_1L_2}} = \sqrt{1 - \sigma}$$

LÄHTEET

/1/ Aura L.&Tonteri A.J., Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, WSOY 1995, 446 s.

/2/ Nousiainen K., Sähköenergiatekniikka, luentomoniste, TTKK 1994, 218 s.