

# FYSP1082 / 3 VAIHTOVIRTAKOMPONENTIT

## Työn tavoitteet

- Havainnollistaa vaihtovirtapiirien toimintaa
- Syventää ymmärtämystä aiheeseen liittyvästä fysiikasta

## 1 Johdanto

Tasavirta oli 1900-luvun alussa kilpaileva järjestelmä vaihtovirralle. Esim. Edison suosi tasavirtajärjestelmiä, kun taas Westinghouse edisti vaihtosähkön käyttöä. Kuten tiedämme, Westinghousen tekniikka voitti lopulta käytännöllisyytensä vuoksi. Esimerkiksi vaihtovirran ja -jännitteen muuntaminen ja kuljettaminen on helpompaa kuin tasavirran.

Vaihtovirtapiirien komponenteilla on jännitteen ja virran muuttumisesta johtuvia uusia ominaisuuksia, joita ei tasavirtapiireissä havaita. Nämä ovat luoneet pohjan nykyelektronikalle ja signaalinkäsittelylle.

Tässä työssä perehdytään näihin komponentteihin ja ominaisuuksiin. Aiheeseen liittyviä käsitteitä ovat impedanssi, reaktanssi ja vaihesiirto. Työssä määritetään kokeellisesti kelan induktanssi ja sisäinen resistanssi, kondensaattorin kapasitanssi sekä havainnollistetaan LCR-piirin ominaisuuksia.

Kurssikirjat ([1] ja [2]) sisältävät kattavat paketit vaihtovirtapiirien teoriasta, joten tämä työohje sisältää aiheesta vain lyhyen tiivistelmän.

Työohjeen luettuasi sinun tulisi tietää:

- Mitä sähköisiä komponentteja työn laitteistoon kuuluu?
- Mitä (tässä työssä) tarkoittaa resonanssi?

## 2 Teoreettista taustaa

### 2.1 Vaihtovirta

Tyypillisin vaihtovirran muoto on sinimuotoinen aalto, jolle pätevät lausekkeet

$$i = I(t) = I \cos(\omega t) \quad (1)$$

ja

$$v = V(t) = V \cos(\omega t). \quad (2)$$

Pienet kirjaimet viittaavat vaihtovirtaan ja aikariippuvuuteen. Vaihtojännitteitä ja -virtoja käsiteltäessä muistetaan ero taajuuden ja kulmataajuuden välillä. Samoin on otettava huomioon huippu- ja tehollisarvojen eroavaisuudet.

### 2.2 Vaihtovirtapiiri ja sen komponentit

Tässä työssä tutkitaan vastuksen, kelan ja kondensaattorin käyttäytymistä ja ominaisuuksia vaihtovirtapiirissä (ks. kuva 1). Näistä komponenteista vastus käyttäytyy kuten tasavirtaa käytettäessä, mutta kondensaattori ja kela saavat uusia ominaisuuksia. Tasavirtapiirissä kela käyttäytyy kuten oikosulku ja kondensaattori avoimen piirin tavoin. Vaihtovirtapiirissä puolestaan molemmat komponentit vastustavat virran kulkua vaihtovirran taajuudesta riippuvalla rajallisella määrällä.

Vaihtovirtapiirin virran kulkua vastustava ominaisuus on nimeltään impedanssi, jota merkitään yleensä  $Z$ -kirjaimella. Impedanssi riippuu vaihtovirran taajuudesta ja koostuu kelan ja kondensaattorin reaktansseista  $X_L$ ,  $X_C$  sekä vastuksen resistanssista  $R$ . Toisin kuin tasavirtapiirin tapauksessa, vaihtovirtapiirin virranvastustuskykyä eli impedanssia ei voi laskea yksinkertaisesti summaamalla sarjaan kytkettyjen komponenttien reaktansseja  $X_L$  ja  $X_C$  sekä resistanssia  $R$  suoraan yhteen. Oikea laskutapa voidaan johtaa lähtemällä liikkeelle siitä havainnosta, että jännitehäviöllä LCR-piirissä pätee yhtälö

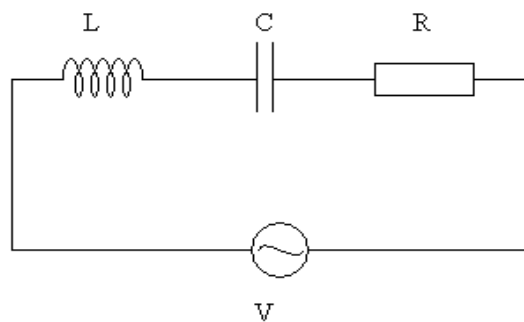
$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2}, \quad (3)$$

missä  $V_R$  on vastuksen yli tapahtuva jännitehäviö,  $V_L$  kelan yli tapahtuva jännitehäviö ja vastaavasti  $V_C$  kondensaattorin yli tapahtuva jännitehäviö. Kuvan 2 osoitin-diagrammiesitys havainnollistaa tätä vaihtovirtapiirin ominaisuutta.

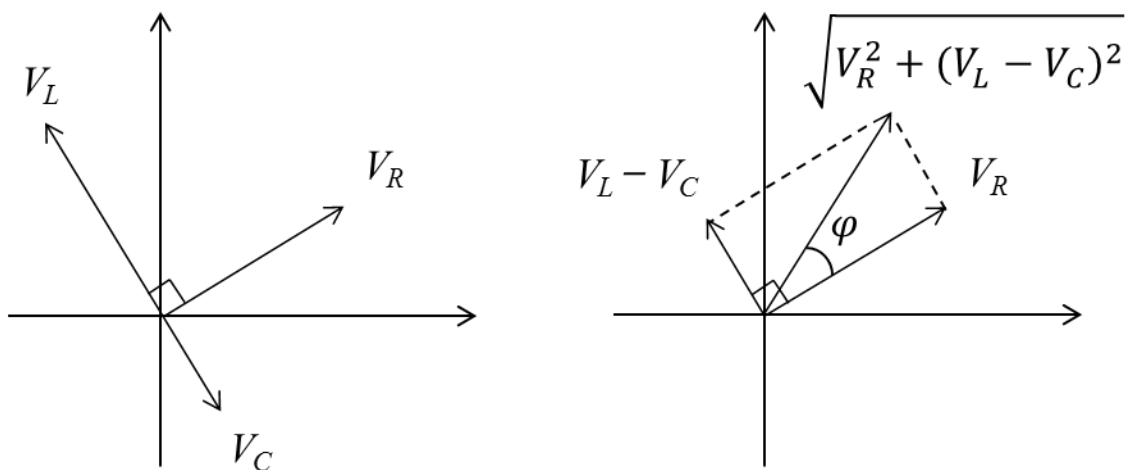
Käyttämällä kapasitiivisen ja induktiivisen reaktanssin määritelmiä (ks. [1]) ja yhtälöitä

$V = ZI$  ja  $V_R = RI$ , saadaan piirin impedanssille esitys

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (4)$$



**Kuva 1:** LCR-piirin kytkentäkaavio



**Kuva 2:** Vaihtovirtapiirissä tapahtuvien jännitehäviöiden summaamista havainnollistava osoitindiagrammiesitys

### 2.3 Vaihe-ero ja resonanssitaajuus LCR-sarjapiirissä

Kapasitanssia ja induktanssia sisältäviin piireihin syntyy virran ja jännitteen välille vaihe-ero  $\varphi$ , jonka suuruus saadaan määritettyä yhtälön

$$\tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R}$$

avulla (ks. kuva 2). Taajuutta, jolla vaihe-eron suuruus on nolla, kutsutaan resonanssitaajuudeksi. Tällöin kelan ja kondensaattorin vaikutukset piirissä kumoavat toisensa ja jännitehäviötä tapahtuu pelkästään vastuksessa. Reaktansseilla pätee yhtäsuuruus

$$X_L = X_C \text{ eli } \omega L = \frac{1}{\omega C}$$

ja tästä yhtälöstä voidaan edelleen ratkaista virtapiirin resonanssitaajuus.

## 3 Mittauslaitteisto ja mittaukset

Työssä tarvittava laitteisto:

- säädettävä dekadivastus
- kela,  $L \sim 200$  mH
- kondensaattori,  $C \sim 1$   $\mu$ F
- oskilloskooppi
- pulssigeneraattori
- yleismittareita
- 1,5 V paristo

Mittaukset suoritetaan käyttämällä yleismittareita ja oskilloskooppia. Vastuksina käytetään valkoisiin laatikoihin valmiiksi asennettuja vastuksia ja säätövastuksena dekadivastusta. Vastuksista on syytä ottaa huomioon, millaista tyyppiä ne ovat.

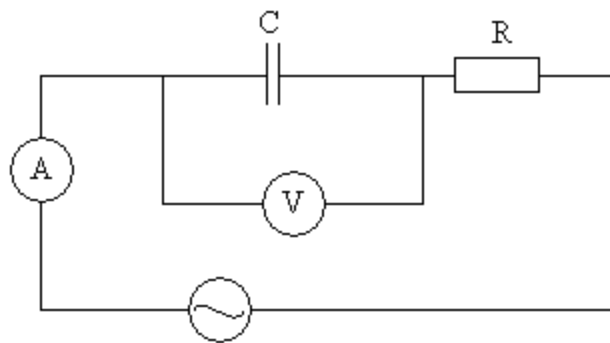
Kiertolankavastuksilla (esim. Helipot) on induktanssia, mikä aiheuttaa mittaustuloksiin virhettä. Yleismittareista on huomattava, että niillä kannattaa mitata vain alle 1 kilohertsin taajuuksia johtuen mittarin näytteenottotaajuudesta. Toisaalta alle kilohertsin taajuus asettaa vaatimuksia mittauksissa käytettäville keloille ja kondensaattoreille. Näistä syistä johtuen on pidettävä huolta, että  $C \leq 50 \mu\text{F}$  ja  $L \geq 50 \text{ mH}$ .

Mittareista kannattaa muistaa, että oskilloskoopin avulla saadaan jännitteen amplitudi, josta tehollisarvo on laskettavissa. Yleismittarit on puolestaan kalibroitu näyttämään suoraan tehollisarvoja sinimuotoiselle vaihtojännitteelle ja -virralle.

Tehtävä 1. Kapasitanssin määrittämistä varten kytke kondensaattori ja dekadivastus sarjaan vaihtojännitelähteen kanssa kuvan 3 mukaisesti. Valitse jokin taajuus 50 – 200 Hz väliltä ja mittaa kondensaattorin yli 7–10 kpl eri virran arvoja vastaavat jännitteiden arvot. Käytä alle 10 mA virtoja. Virtaa voit säätää dekadivastuksella.

Tehtävä 2. Määritä kelan sisäinen resistanssi  $R_L$ . Kytke säädettävä dekadivastus, kela ja paristo sarjaan. Mittaa kelan napojen välinen jännite useilla virran arvoilla.

Tehtävä 3. Määritä kelan impedanssi  $Z_L$  induktanssin  $L$  määrittystä varten. Vaihda pariston paikalle vaihtojännitelähde ja toista edellinen mittaus. Muuta virtaa vastusta säätämällä ja pidä taajuus vakiona (välillä 50 – 200 Hz). Virran tehollisarvon tulee olla alle 10 mA. Mitä tapahtuu, jos virta on huomattavasti suurempi?



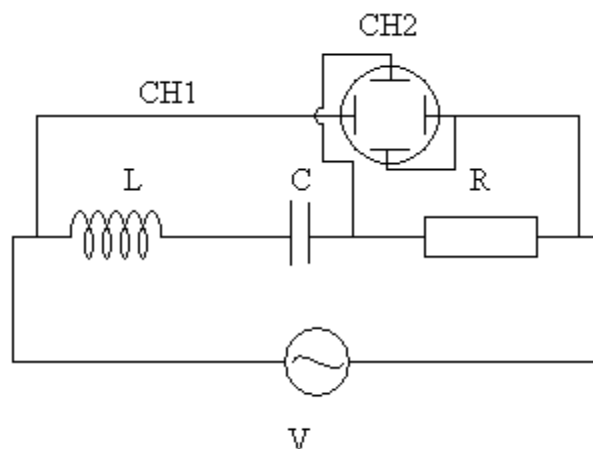
**Kuva 3:** KytKentä kapasitanssin määrittäksessä

Tehtävä 4. Kytke kela, kondensaattori ja vastus sarjaan, ja säädä signaaligeneraattorin taajuus 250 Hz:n arvoon. Tämän jälkeen mittaa jännitteet kaikkien komponenttien yllä erikseen ( $V_R$ ,  $V_L$  ja  $V_C$ ) ja sen jälkeen koko piirin jännitehäviö ( $V$ ).

Tehtävä 5. Tehtävänä on määrittää sarjaan kytketyn LCR-piirin resonanssitaajuus oskilloskooppia ja yleismittareita käyttämällä. Kytke vastus, kela ja kondensaattori sarjaan signaaligeneraattorin kanssa ja etsi resonanssitaajuus oskilloskoopin avulla seuraavasti:

Tee kuvan 4 mukainen kytkentä ja aseta oskilloskooppi XY -moodiin. Kuvaruudulle pitäisi muodostua ellipsi, joka kiertyy ja venyy taajuutta muutettaessa. Resonanssitaajuudella tämä ellipsi muuttuu nousevan tai laskevan suoran muotoiseksi. Mieti, miksi suora voi olla sekä laskeva että nouseva. Kelan resistanssin vaikutuksesta suoraan aiheutuu hystereesistä, joka vääntää ellipsiä ja suoraa S-kirjaimen muotoon. Tällöin etsi taajuutta muuttamalla tilanne, jolloin ellipsi on ohuimmillaan (vinon S-kirjaimen muotoinen)  $\Rightarrow$  *resonanssitaajuus*. Mittaa yleismittarilla jännitteet kelan ja kondensaattorin yli todetaksesi, että niiden arvot ovat likimain yhtä suuret.

Resonanssitaajuuden voi määrittää oskilloskoopilla myös normaalitilassa tarkastelemalla yhtäaikaaisesti molempia kanavia. Resonanssitaajuudella aallot ovat amplitudiltaan yhtä suuret ja päällekkäiset.



**Kuva 4:** Mittaukseen 5 liittyvä kytkentäkaavio resonanssitaajuuden määrittämistä varten

HUOM! Tehtäviä 4 ja 5 varten kannattaa tarvittaessa kerrata Oskilloskoopin käyttö -työn sisältö.

## 4 Mittaustulosten käsittely

Määritä mittaustulosten avulla graafisesti kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi, kelan sisäinen resistanssi ja kelan impedanssi. Laske tulosten avulla kelan induktanssi ja kondensaattorin kapasitanssi virheineen. Kuinka taajuuden kasvattamisen pitäisi teoriassa muuttaa kelan ja kondensaattorin jännitehäviöiden amplitudeja?

Laske LCR-piirin komponenttien jännitehäviöiden suora sekä neliöllinen summa, ja vertaa niitä kokeelliseen arvoon. Kumpi on LCR-piirissä suurempi, kapasitiivinen vai induktiivinen reaktanssi, kun virran taajuus on resonanssitaajuuden alapuolella? Onko piirin jännite virtaa edellä vai päinvastoin? Kuinka suuri on vaihe-ero?

Laske teoreettinen resonanssitaajuuden arvo kokeellisesti määrittämälläsi kapasitanssin ja induktanssin arvoilla ja vertaa sitä oskilloskoopilla määritettyyn resonanssitaajuuden arvoon. Kuinka resonanssitaajuus muuttuisi, jos kondensaattorin kapasitanssi olisi suurempi? Perustele päätelmäsi.

## Lähteet

- [1] H. D. Young and R.A. Freedman. *University Physics with modern physics, 11<sup>th</sup> edition*. Addison Wesley Longman, 2003
- [2] R. D. Knight. *Physics for Scientists and Engineers, A Strategic Approach, Third Edition*. Pearson Education Limited. 2013