

5. Transformator

1. Ključni pojmovi

Indukcija, samoindukcija, međuvodička indukcija, magnetski tok, zavojnica, opterećeni i neopterećeni transformator

2. Teorijski uvod

Transformator se sastoji od dviju zavojnica sa zajedničkom jezgrom od feromagnetskog materijala (najčešće željeza). Jezgra služi za prijenos magnetskog toka iz jedne zavojnice u drugu, a sastavljena je od niza pločica međusobno električno izoliranih kako bi se izbjegle vrtložne struje u samoj jezgri. Jezgra prolazi kroz obje zavojnice i zatvara puni krug. Time se osigurava da gotovo sav magnetski tok induciran u jednoj od zavojnica prolazi kroz jezgru i ne izlazi iz nje. Idealnim transformatorom nazivamo transformator u kojem nema rasipanja magnetskog toka, tj. sav magnetski tok prolazi kroz feromagnetsku jezgru i jednak je kroz obje zavojnice, a nema ni gubitaka u jezgri. Također smatramo da je omski otpor u žicama zanemariv. Na jednu zavojnicu (primar) dovodi se izmjenični napon koji inducira izmjeničnu struju kroz tu zavojnicu, a time i promjenjiv magnetski tok. Taj magnetski tok uzrokuje elektromotornu silu u drugoj zavojnici (sekundaru).

a) Idealni transformator u praznom hodu (neopterećeni transformator)

Razmotrimo najprije slučaj idealnog transformatora u tzv. praznom hodu. To je slučaj u kojem zavojnica sekundara ima otvorene krajeve (slika 1a), pa sekundarom ne teče struja. Pod rješavanjem problema transformatora smatramo nalaženje električnih veličina u primaru i sekundaru kao rezultat dovođenja izmjeničnog napona U_1 na krajeve primara. Faze ostalih struja i napona definirat ćemo u odnosu prema U_1 . Koristit ćemo se kompleksnim prikazom izmjeničnih veličina.¹ Možemo pisati $U_1 = U_{1m} e^{i\omega t}$, tako da u $t = 0$ napon U_1 , bude postavljen duž realne osi (slika 1b). Ako je L_1 samoindukcija primara namotanoga oko jezgre transformatora njegova impedancija je u slučaju idealnog transformatora čisto imaginarna, $Z_1 = i\omega L_1$. Zbog dovedenog napona U_1 kroz primar će poteći slaba struja:

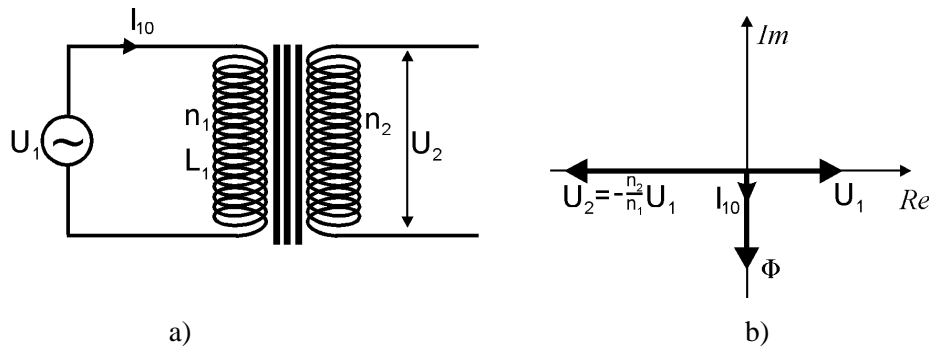
$$I_{10} = \frac{U_1}{i\omega L_1} = I_{10m} e^{i(\omega t - \pi/2)} \quad (1)$$

koja zaostaje za naponom za $\pi/2$. U slici 1b struja je prikazana vektorom duž negativne imaginarne osi. Struja I_{10} inducira magnetski tok Φ kroz presjek feromagnetske jezgre prema relaciji

$$n_1 \Phi = L_1 I_{10}, \quad (2)$$

jer ukupni tok kroz zavojnicu uzima u obzir i broj zavoja n_1 . Tok Φ u fazi je sa strujom I_{10} (slika 1b). Ova relacija vrijedi u praznome hodu kad je $I_2 = 0$, tj. jedino struja I_{10} stvara tok Φ . Drugi Kirchoffov zakon na strujnu petlju primara daje odnos napona i toka:

¹ vidi "Udžbenik fizike Sveučilišta u Berkeleyu" - Svezak II, str. 182. Opširnije razmatranje kompleksnog prikaza izmjeničnih veličina možete pronaći u priručniku M. Požek i A. Dulčić: Fizički praktikum I i II, str. 71-73.



Slika 1. Idealni transformator u praznom hodu

$$U_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt} = i\omega n_1 \Phi. \quad (3)$$

Preostaje nam još da odredimo napon U_2 na krajevima sekundara. Prema pretpostavci o idealnom transformatoru, isti tok Φ prolazi i kroz presjek zavojnice sekundara. Ona ima n_2 zavoja pa će se na njezinim krajevima inducirati elektromotorna sila

$$U_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt} = -i\omega n_2 \Phi = -\frac{n_2}{n_1} U_1, \quad (4)$$

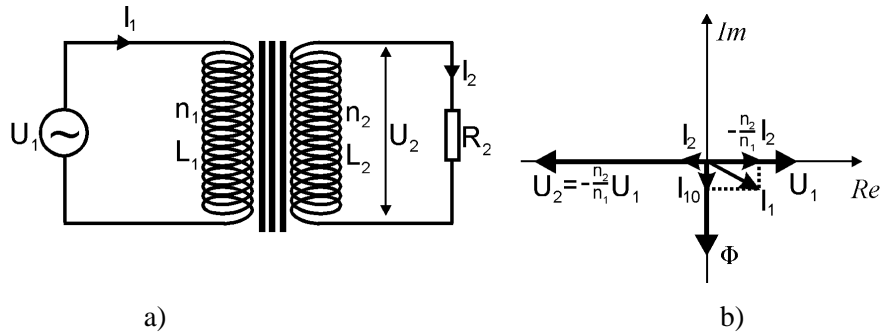
gdje je iskorištena jednačba (3). Omjer n_2/n_1 nazivamo omjerom transformacije. Uočimo da je napon na sekundaru suprotan u fazi od napona na primaru. Taj je predznak zapravo dogovoran jer ovisi o tome koji smjer magnetskog toka kroz zavojnice uzimamo kao pozitivan te o smjeru namatanja zavojnica. Zamjenom krajeva zavojnica moguće je postići i da su naponi U_1 i U_2 u fazi. U daljnjem tekstu ostat ćemo pri konvenciji kao u jednačbi (4) pa je U_2 prikazan kao na slici 1b.

b) Idealni transformator s omskim otporom u krugu sekundara (opterećeni transformator)

Drugi slučaj vrijedan razmatranja jest idealan transformator s omskim otporom spojenim na sekundar (slika 2a). Očito je da će u krugu sekundara poteći neka struja I_2 kao posljedica induciranog napona U_2 . Ta je struja u fazi s naponom U_2 . Opet postavljamo da je napon U_1 zadan i tražimo ostale veličine u primaru i sekundaru. Označimo s I_1 struju koja teče primarom. Obratimo pozornost na magnetski tok Φ u novim okolnostima. Za razliku od praznoga hoda kada je samo struja primara uzrokovala nastanak magnetskoga toka $\Phi = (L_1/n_1)I_{10}$ prema jednačbi (2), sada imamo dvije struje I_1 i I_2 koje daju doprinose stvarajući ukupni tok Φ kroz presjek jezgre

$$\Phi = \frac{L_1}{n_1} I_1 + \frac{L_2}{n_2} I_2. \quad (5)$$

Jednostavno zbrajanje doprinosa vrijedi zbog pretpostavke da nema rasipanja magnetskog toka, tj. da cjelokupan tok što ga stvara jedna zavojnica prolazi i kroz presjek druge zavojnice. Drugim riječima, tok Φ isti je kroz poprečni presjek jezgre na bilo kojemu mjestu.



Slika 2. Idealni transformator s omskim otporom u krugu sekundara

Sada možemo primijeniti drugi Kirchoffov zakon na strujne petlje primara i sekundara. Za strujni krug primara i dalje vrijedi relacija (3). Iz nje vidimo da dovedeni napon U_1 jednoznačno određuje ukupni tok Φ koji se stoga ne razlikuje od toka u praznome hodu (slike 1b i 2b). No budući da je sada $I_2 \neq 0$, mora se i struja u primaru promijeniti na takav način da tok Φ ostane isti. Za strujni krug sekundara drugi Kirchoffov zakon glasi

$$U_2 = R_2 I_2, \quad (6)$$

gdje je U_2 i sada dan jednadžbom (4). Iz toga slijedi da je struja u sekundaru

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = -\frac{n_2}{n_1} \frac{U_1}{R_2}. \quad (7)$$

Vidimo da je I_2 u fazi s U_2 (slika 2b). Preostaje nam da odredimo struju I_1 . Uvrstimo jednadžbu (5) u (3) pa dobivamo

$$U_1 = n_1 \left(\frac{L_1}{n_1} i\omega I_1 + \frac{L_2}{n_2} i\omega I_2 \right). \quad (8)$$

Struja I_2 već je određena relacijom (7) pa lako odredimo struju primara

$$I_1 = \frac{U_1}{i\omega L_1} \left(1 + \frac{i\omega L_2}{R_2} \right). \quad (9)$$

Za $R_2 = \infty$ (otvoren krug sekundara) relacija (9) svodi se na relaciju (1), tj. I_1 postaje struja praznog hoda I_{10} . Tada je to jedina struja koja stvara tok i mora biti u fazi s njim (slika 1b). Međutim, za konačan R_2 jednadžba (9) kazuje da struja I_1 ima dodatan član koji joj mijenja iznos i fazu (slika 2b). To možemo razumjeti na sljedeći način. Kada sekundarom teče struja I_2 kroz omski (realni) otpor, ona stvara tok $(L_2/n_2)I_2$ prema jednadžbi (5), koji je u fazi s njom, a to znači u fazi s U_2 (slika 2b). Da bi ukupan tok Φ ostao neizmijenjen, mora se struja I_1 promijeniti tako da poprimi komponentu u protufazi sa strujom I_2 kako bi se doprinos struje I_2 ukupnome toku poništio. To se može kvantitativno utvrditi ako jednadžbu (9) napišemo u obliku

$$I_1 = I_{10} + \frac{L_2 U_1}{L_1 R_2} = I_{10} - \frac{n_2}{n_1} I_2, \quad (10)$$

gdje su iskorištene jednadžbe (1) i (7) te činjenica da samoindukcija ovisi o kvadratu broja zavoja, tj. $L_2/L_1 = n_2^2/n_1^2$. Valja naglasiti da ova jednadžba ne predstavlja nekakav zbroj struja u čvoru jer nikakva spoja nema između primara i sekundara. Cjelokupna struja I_1 teče samo kroz primar. Drugi član na desnoj strani jednadžbe (10) predstavlja tek promjenu struje u primaru kada sekundarom teče struja I_2 . To je prikazano na slici 2b. Struje I_{10} i I_2 međusobno su okomite u kompleksnoj ravnini pa između struja I_1 i I_2 uvijek postoji razlika faza.

Napomenimo da mjerni instrumenti za izmjeničnu struju mjere efektivne vrijednosti fizikalnih veličina

$$U_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} |U| \quad ; \quad I_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} |I|. \quad (11)$$

Dakle, očitavanjem vrijednosti na ampermetru, možemo odrediti amplitudu struje, ali ne i njezinu fazu. Stoga relacija (10) ne vrijedi za očitane vrijednosti struja, nego moramo upotrijebiti relaciju

$$I_{1eff} = \sqrt{I_{10eff}^2 + \left(\frac{n_2}{n_1} I_{2eff}\right)^2} \quad (12)$$

koja vrijedi prema Pitagorinu poučku jer su struje I_{10} i I_2 okomite u kompleksnoj ravnini.

Obično je transformator građen tako da je samoindukcija zavojnice primara velika. Tada zanemarujemo struju praznog hoda u jednadžbi (10) pa praktično vrijedi

$$I_1 \approx -\frac{n_2}{n_1} I_2. \quad (13)$$

Ako je taj uvjet ispunjen, onda relacija (13) vrijedi i za efektivne vrijednosti struja I_1 i I_2 .

c) Realni transformator

U praksi je nemoguće postići da u transformatoru nema gubitaka. Najvažniji izvori gubitaka jesu omski otpor u zavojnici i vrtložne struje u feromagnetskoj jezgri. Ti se gubici mogu opisati uvođenjem omskog otpora u seriju primarnoga strujnog kruga. Zbog njih će već struja praznoga hoda imati komponentu u fazi s naponom na primaru. Snaga koja se tako troši naziva se jalova snaga.

Dodatnu složenost proučavanju realnog transformatora unosi činjenica da feromagnetski materijali pokazuju histerezu. Kao posljedica toga, magnetska indukcija B (gustoća magnetskog toka) u jezgri kasni u fazi za magnetskim poljem H koje je pak u fazi sa strujom I_{10} . Stoga je fazni kut između struje I_{10} i napona U_2 veći od $\pi/2$.

Prilikom konstrukcije transformatora uvijek se nastoji maksimalno smanjiti gubitke što se postiže izradom jezgre od tankih, međusobno izoliranih listića kako bi se vrtložne struje smanjile na zanemarivu mjeru, te odabirom takva poprečnog presjeka žice od koje je načinjena zavojnica da omski otpor u žici bude zanemariv. Stoga najčešće možemo s velikom točnosti primjenjivati relacije izvedene za idealni transformator.

3. Mjerni uređaj i mjerenje

Mjerni uređaj, prikazan na slici 3, sastoji se od transformatora, izvora izmjeničnog napona, promjenjivog otpornika (reostata) i tri univerzalna instrumenta koji se mogu koristiti kao voltmetri ili ampermetri za izmjeničnu struju. U sklopu uređaja nalazi se i preklopnik koji omogućuje naizmjenično mjerenje napona na primaru i sekundaru (Slika 3b). Shematski prikaz mjernog uređaja dan je na slici 4.

Transformator se sastoji od dviju zavojnica postavljenih na zajedničku feromagnetsku jezgru. Jezgra je građena tako da je njezin gornji dio pomičan pa je zavojnice primara i sekundara moguće odvojiti od jezgre. Svaka zavojnica ima 140 zavoja, s time da je moguće odabrati priključke tako da broj zavoja bude bilo koji višekratnik broja 14 (Slika 3c).

Izvor izmjeničnog napona daje napone efektivne vrijednosti 2 V, 4 V, 6 V, 8 V, 10 V, 12 V ili 14 V, a frekvencija je identična frekvenciji gradske mreže, tj. $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}$. Promjenjivom otporniku s klizačem može se kontinuirano mijenjati otpor od 0 do 100Ω .



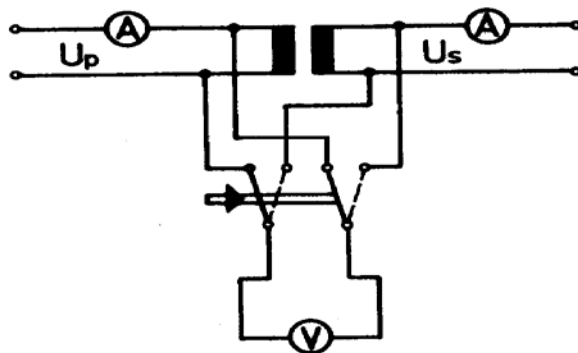
Slika 3a. Elementi mjernog postava



Slika 3b. Preklopnik za naizmjenično mjerenje napona



Slika 3c. Transformator



Slika 4. Shema mjernog uređaja

4. Zadaci

- a) Spojite shemu kao na slici 4 i dovedite izmjenični napon $U_1 = 2\text{ V}$ na primar. Neka broj zavoja bude maksimalan ($n_1 = 140$). Strujni krug sekundara ostavite otvorenim. Izmjerite struju praznog hoda I_{10} i napon U_1 te odredite samoindukciju zavojnice primara kada je u njoj feromagnetska jezgra.

b) Rastavite jezgru transformatora i skinite zavojnicu s nje. Izmjerite struju i napon na zavojnici kao u zadatku a) te izračunajte samoindukciju zavojnice bez jezgre.

Oprez! Ampermetar treba postaviti na najmanje osjetljivo područje jer će poteći jaka struja.
- Odaberite napon na primaru $U_1 = 2\text{ V}$ i odaberite neki broj zavoja primara n_1 . Mijenjajte broj zavoja sekundara n_2 i promatrajte napon na sekundaru U_2 u praznom hodu. Nacrtajte graf $U_2 - n_2$ i provjerite relaciju (4).
- U ovom zadatku podatke i grafove obradite s pomoću programskog paketa *Mathematica*:

(Grupa A) Odaberite $n_1 = 70$ i $n_2 = 140$ te izmjerite struju praznoga hoda $I_{10\text{eff}}$. Tada u strujni krug sekundara uključite promjenjivi otpornik R_2 . Mijenjajući R_2 promatrajte kako se mijenjaju $I_{1\text{eff}}$ i $I_{2\text{eff}}$. Nacrtajte graf ovisnosti $I_{1\text{eff}}$ o $I_{2\text{eff}}$ i u isti graf ucrtajte pravac dan relacijom (13). Procijenite može li se njihov odnos aproksimirati tom relacijom. Nacrtajte graf ovisnosti $I_{1\text{eff}}^2$ o $I_{2\text{eff}}^2$ i odredite pravac koji najbolje opisuje mjerene točke. Objasnite značenje odsječka na ordinati.

(Grupa B) Odaberite $n_1 = 140$ i $n_2 = 70$ te izmjerite struju praznoga hoda $I_{10\text{eff}}$. Tada u strujni krug sekundara uključite promjenjivi otpornik R_2 . Mijenjajući R_2 promatrajte kako se mijenjaju $I_{1\text{eff}}$ i $I_{2\text{eff}}$. Nacrtajte graf ovisnosti $I_{1\text{eff}}$ o $I_{2\text{eff}}$ i u isti graf ucrtajte pravac dan relacijom (13). Procijenite može li se njihov odnos aproksimirati tom relacijom. Nacrtajte graf ovisnosti $I_{1\text{eff}}^2$ o $I_{2\text{eff}}^2$ i odredite pravac koji najbolje opisuje mjerene točke. Objasnite značenje odsječka na ordinati.