



## Mérési útmutató

### A transzformátor működésének vizsgálata

Az Elektrotechnika tárgy laboratóriumi gyakorlatok 3. sz. méréséhez

#### 1. A mérési gyakorlat céljai:

A transzformátor működésének kísérleti vizsgálata, helyettesítő képének meghatározása. A transzformátor menetszámátételének kísérleti meghatározása, üresjárási mérés, rövidzárási mérés és terhelési mérés. Transzformátor üresjárási áram – és a hiszterézis görbe tanulmányozása a tápfeszültség függvényében digitális oszcilloszkópon.

#### 2. A mérés fontosabb eszközei:

Egyfázisú transzformátor	1 darab
Ellenállás dekád 1-11 ohm tartományban	1 darab
Digitális multiméter	3 darab
Digitális kézi multiméter	1 darab
DC tápegység, 0 – 40V, 0 – 2A	1 darab
Toroid trafó/AC tápegység 0 – 25 V	1 darab

#### 3. Fogalomtár:

**Indukált feszültség:** A transzformátor változó mágneses tere által indukált feszültség. Kifejezhető a következő képlettel:

$$U_{i_{eff}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{2}} \cdot \hat{B}_o \cdot A_o \cdot N = 4,44 \cdot f \cdot \hat{B}_o \cdot A_o \cdot N \quad (1)$$

ahol  $B_o$  az oszlopindukció csúcértéke,  $A_o$  az oszlopkeresztmetszet,  $f$  a frekvencia  $N$  pedig a primer vagy a szekunder menetszám. Az indukált feszültség effektív értékét kapjuk meg feltételezve a szinuszos jelalakot.

**Kapocsfeszültség:** A transzformátor primer illetve szekunder kapcsain mérhető feszültség. Az **indukált feszültségtől** eltérhet a terhelési állapot függvényében.

**Névleges** érték: Az az érték, amelyet a transzformátor tervezésekor célként kijelöltek. Beszélhetünk névleges feszültségről, amely meghatározza a menetek számát vagy a szigetelés vastagságát. A névleges áram megadja azt az áramterhelést, amelyet a transzformátor túlmelegedés nélkül tartósan elviselni képes. A névleges áram és névleges feszültség együtt határozza meg a transzformátor névleges teljesítményét.

**Üresjárási állapot:** A transzformátor szekunder oldala üresen jár, arra terhelést nem kötünk. Ilyenkor a szekunder áram értéke nulla, a szekunder **kapocsfeszültség** megegyezik az **indukált feszültséggel**.

**Üresjárási áram:** **Üresjárási állapotban**, a primer tekercsekben folyó áram. Kielégíti az oszlopindukció gerjesztésigényét, ez fedezi a vasvesztéseket. Telítődő vasmag esetében az **üresjárási áram** jelalakja a szinuszostól jelentősen eltér. Ezt a jelalakot a mérés végén oszcilloszkópon is megfigyelhetik.

**Rövidzárási állapot:** A transzformátor szekunder oldalát rövidre zárjuk, így a szekunder **kapocsfeszültség** értéke nulla.

**Rövidzárási feszültség:** **Rövidzárási állapotban** a primer oldalon **névleges** áramot eredményező feszültség értéke.

**Drop:** a **Rövidzárási feszültségnek** a névleges feszültséghez viszonyított százalékos értéke:

$$u_z = \frac{U_{zn}}{U_n} \cdot 100\% \quad (2)$$

A drop segítségével kiszámítható a névleges feszültség esetén kialakuló zárlati áram állandósult értéke:

$$I_z = I_n \frac{100\%}{u_z} \quad (3)$$

Kisebbszámú transzformátorok dropja 4-6%, ami azt jelenti, hogy zárlat esetén állandósult állapotban 16-25-szeres áramértékek is folyhatnak a transzformátorban. Emiatt nagyteljesítményű transzformátoroknál a drop értékét 8-12% körüli értékre választják (mértezik), hogy a zárlati áramok megfelelően csökkenjenek.

**Menetszám áttétel:** Transzformátor primer és szekunder menetszámának viszonya. Az **indukált feszültségek** arányával is kifejezhető (1) felhasználásával:

$$\frac{U_{1\text{eff}}}{U_{2\text{eff}}} = \frac{N_1}{N_2} = n \quad (4)$$

Üresjárási állapotban a primer és szekunder **kapocsfeszültségek** arányaként mérhető. Mérésekor figyelembe kell venni az **üresjárási áram** okozta hibát. Ez a hiba akkor minimális, ha a menetszám áttétel mérésére alkalmazott primer **kapocsfeszültség** a **névleges** feszültség 0,3-0,5-szöröse.

Megmutatható, hogy az áramátétel:

$$\frac{I_{1\text{eff}}}{I_{2\text{eff}}} \approx \frac{1}{n}$$

**Kapcsolási csoport:** Háromfázisú transzformátoroknál megadott jelölés. Megmutatja az azonos fázisok primer és szekunder feszültségei között fennálló fáziskülönbséget. Órajelnek is nevezik, mivel a fáziskülönbségek mindig 30° egész számú többszörösei így reprezentálhatók úgy, mintha a megfelelő feszültségfázorok az óra nagy- ill. kismutatói volnának. Mindezek alapján a Dy5-ös kapcsolási csoport egy a nagyobb feszültségű oldalon delta, a kisebb feszültségű oldalon csillagba kötött transzformátort jelöl. Azonos fázisoknál a nagyobb és kisebb feszültségek között fázistolás 150° (5 óra).

**Vasveszteség:** Transzformátor vasmagjában keletkező veszteség. A mágneses hiszterézis és az örvényáramok következtében keletkező hőmennyiséget mutatja. Az örvényáramveszteség csökkentése érdekében a vasmagot lemezelik. A lemezeket, speciális anyagot használva, hidegen hengerelve készítik. Az **Üresjárási állapotban** felvett teljesítmény közelítőleg megegyezik a vasveszteséggel.

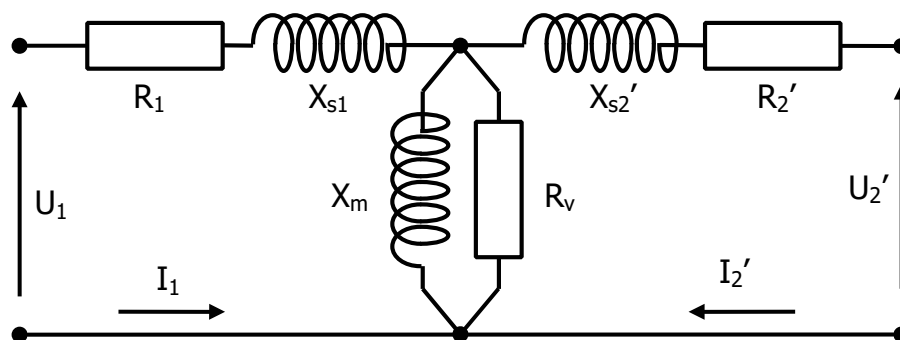
**Tekercselési veszteség:** A transzformátor tekercseiben keletkező veszteség. A vezetékanyag ellenállásán keletkező hőmennyiséget mutatja. Mértéke függ a frekvenciától, mivel a behatolási mélység befolyásolja a vezetésben résztvevő huzalkeresztmetszetet. Minimalizálása érdekében a huzal méreteit illeszteni kell a behatolási mélységhez. A **rövidzárási állapotban** felvett teljesítmény közelítőleg megegyezik a tekercselési veszteséggel.

**Főmező:** Transzformátor mágneses terének azon része, amely kapcsolódik mind a primer, mind a szekunder tekercsrel. A főmező biztosítja az energiaátalakítást.

**Szórt tér:** Transzformátor mágneses terének azon része, amely vagy csak a primer vagy csak a szekunder tekercsrel kapcsolódik, az energiaátalakításban nem vesz részt.

**Mágneses kör:** Azon tér-részek, amelyeken keresztül a transzformátor mágneses tere záródik. Főbb elemei az oszlopok illetve a járom, valamint a szórási tér. A mágneses kör elemeinek ismeretében a primer és szekunder áramok segítségével a transzformátor fluxusai számíthatók.

**Helyettesítő kapcsolás:** A transzformátor villamos jellemzőinek számításához használható áramkör, amelyben koncentrált paraméterű elemeket szokás figyelembe venni.



1. ábra: Transzformátor helyettesítő kapcsolása

**Elemei:**

- **Tekercsellenállások:** a primer és szekunder (kis- és nagyfeszültségű) tekercsek ohmos ellenállásai ( $R_1$ ,  $R_2$ )
- **Szórási reaktancia:** a primer illetve szekunder tekercsek szórási fluxusát leképező induktivitásokkal számított reaktanciák ( $X_{s1}$ ,  $X_{s2}$ ).
- **Főmező reaktancia:** a mindkét tekercsrel kapcsolódó **főmező**. A főmező reaktancia értéke jelentősen függ a transzformátor vasmagjának telítési állapotától ( $X_m$ ).
- **Vasveszteségi ellenállás:** Fiktív ellenállás, amelyen keletkező wattos veszteség megegyezik a vasveszteséggel ( $R_v$ ).

A szekunder oldalon található mennyiségek vesszős jelzése jelöli, hogy a helyettesítő kapcsolást a primer oldalra **redukáltuk**.

**Redukálás:** ahhoz, hogy a helyettesítő kép egy galvanikusan összefüggő áramkör legyen, a szekunder oldali mennyiségeket át kell alakítani (redukálni) a primerre az alábbi összefüggések szerint. Így a primer és szekunder oldali mennyiségek közötti, a menetszám-áttétellel arányos transzformáció kiküszöbölhető a helyettesítő vázlatban:

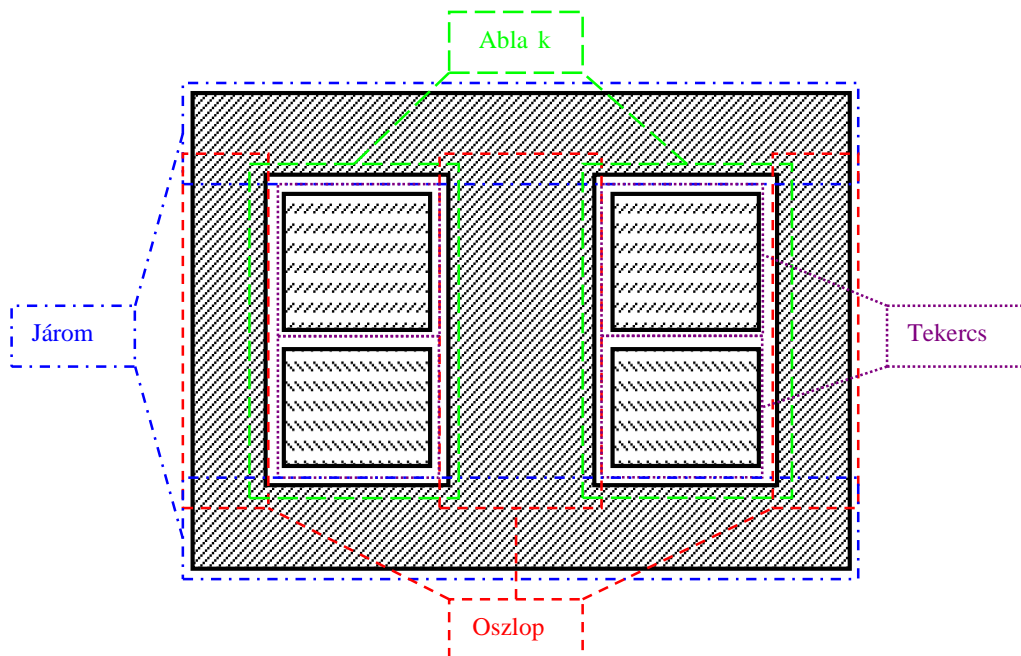
$$U_2' = n \cdot U_2; I_2' = \frac{I_2}{n}; R_2' = n^2 \cdot R_2; X_{s2}' = n^2 \cdot X_{s2}$$

**Relatív értékek:** A transzformátor paramétereinek százalékos kifejezése. A viszonyítási alapok mindig a megfelelő **névleges** értékek. Tehát a **rövidzárási feszültség relatív** értékének meghatározásához a kapocsfeszültség **névleges** értékére kell viszonyítani, míg a **vasvesztés relatív** értékének meghatározásához a **névleges** teljesítményre. A **helyettesítő kapcsolásban** szereplő koncentrált paraméterek **relatív** értékének meghatározásakor a viszonyítási alap a **névleges** impedancia, ami a **névleges** feszültség és a **névleges** áram hányadosa. A **relatív értékeket** általában kisbetűvel jelöljük.

#### 4. A transzformátor

A transzformátor olyan villamos gép, amely adott áramú és feszültségű teljesítményt más áramú és feszültségű teljesítménnyé alakít a mágneses tér közbeiktatásával, adott frekvencia mellett, néha a fázisszám is változik. Mivel az energia átvitelére alkalmazott közeg a mágneses tér, a transzformátor általában a galvanikus leválasztást is lehetővé teszi.

A transzformátorok aktív részei: a tekercsek és a vasmag. Ezen alkatrészek elhelyezésének számos variációja létezik, az alábbi ábrán a mérésünkben szereplő egyfázisú transzformátor keresztmetszetét mutatjuk be. Az ábrán feltüntetjük az alkatrészek hagyományos elnevezéseit.



2. ábra: Transzformátor metszete



**3. ábra: A gyakorlatban használt transzformátorok konstrukció, méret, feszültség- és teljesítmény szempontjából nagyon sokfélék lehetnek.**

*A transzformátor villamos paramétereinek mérése:*

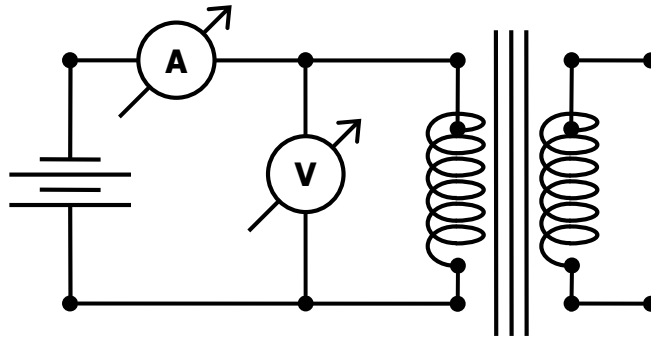
A transzformátor helyettesítő kapcsolási vázlatában szereplő elemek értékének megállapításához a következő méréseket végezzük el:

- Ellenállásmérés
- Áttételmérés, kapcsolási csoport ellenőrzése
- Üresjárási mérés
- Rövidzárási mérés
- Terhelési mérés

A mérések végeztével ismert lesz a transzformátor tekercs DC, illetve AC ellenállása, áttétele. Meghatározzuk a szórási, illetve a főmező reaktanciákat, továbbá a tekercselési- és a vasveszteségeket.

*A) Ellenállásmérés:*

A transzformátor primer illetve szekunder tekercseinek ellenállását mérjük meg egyenáramú ellenállásmérés segítségével. A 4. ábra alapján állítsuk össze a kapcsolást és mért feszültség, és áram arányából határozzuk meg a két tekercs ellenállását.



4. ábra: DC ellenállásmérés

B) Áttételmérés:

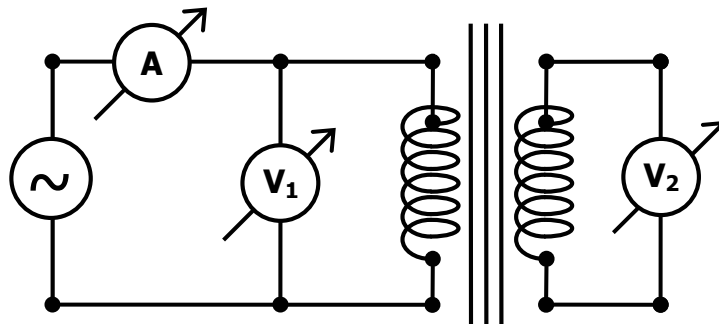
Transzformátor *menetszámának áttételét üresjárási* mérés segítségével állapíthatjuk meg. A *menetszám áttétel* mérésekor azt a tényt használjuk ki, hogy az áttétel meghatározható a primer és szekunder *indukált feszültségek* arányaként. *Üresjárási állapotban* a szekunder oldalon nem folyik áram, ezért az itt mért feszültség megegyezik az *indukált feszültséggel*. A primer oldalon folyó *üresjárási áram* a primer tekercs ellenállásán és *szórási* induktivitásán feszültséget ejt (lásd 1. ábra), emiatt a primer oldalon mért *kapocsfeszültség* eltér az *indukált feszültségtől*. Ez a jelenség a *menetszám áttétel* mérésében hibát okoz. A mért érték korrigálásra szorul a következő képlet alapján:

$$n = n_{\text{mért}} \cdot \left( 1 - \frac{I_{01}}{U_1} \cdot X_{s0} \right) \quad (5)$$

Ahol  $n_{\text{mért}}$  a mért *menetszám áttétel*,  $I_{01}$  az *üresjárási áram*,  $U_1$  a primer *kapocsfeszültség*,  $X_{s0}$  pedig az *üresjárási állapotban* fellépő primer *szórási reaktancia*.

Amennyiben nem áll rendelkezésünkre  $X_{s0}$  értéke, a korrekciót nem tehetjük meg. Ennek ellenére a mérés elvégezhető úgy, hogy a mérési hiba minimális legyen.  $I_{01}/U_1$  viszony a feszültség függvénye és értéke minimális, ha  $U_1$  értéke a *névleges feszültség* 30-50%-a. Így a hiba minimalizálható ugyanis a többi érték a hiba képletében konstans.

Mindezek ismeretében állítsuk össze a 5. ábrán látható kapcsolást és mérjük meg a transzformátor menetszám áttételét. Ügyeljünk, hogy a primer *kapocsfeszültség* ne haladja meg a *névleges feszültség* 50%-át és jegyezzük fel az *üresjárási áram* értékét is.



5. ábra: Áttétel mérése

Kiegészítő feladat:

A rövidzárási mérés végeztével - az  $X_s$  **szórási reaktancia** ismeretében - korrigáljuk a **menetszám áttétel** mérésének adatát. Használjuk a következő közelítő összefüggést a korrigáláshoz szükséges  $X_{s0}$  meghatározására:

$$X_{s0} = \frac{X_s}{2}$$

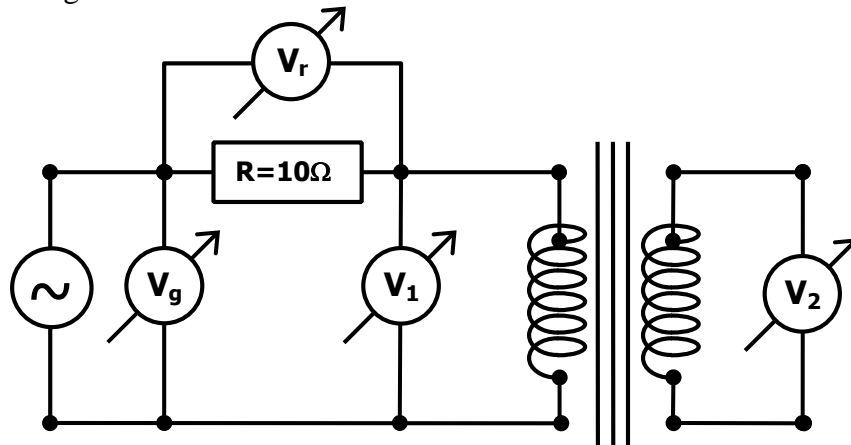
### C) Üresjárási mérés:

A transzformátor üresjárási mérésének legfontosabb célja a transzformátor **üresjárási áramának** és **vasveszteségének** meghatározása. Ezeken kívül meghatározható még a **helyettesítő kapcsolásban** szereplő **főmező-reaktancia** és **vasveszteségi ellenállás** értéke is.

Üresjárási mérés során a változó a primer kapocsfeszültség, ennek függvényében kell a mért és számolt mennyiségeket ábrázolni. Primer feszültségtől jelentős mértékben függ az **üresjárási áram**, a **vasveszteségi ellenállás** és a **főmező reaktancia**.

Az  $I_{01}=f(U_1)$  görbe a transzformátor vasmagjának mágnesezési görbéje. Amíg a vasmag nincs telítésközel állapothoz, a fenti összefüggés lineáris jellegű. A telítés hatása jól megfigyelhető a **főmező reaktancia** nagymértékű változásán.

Állítsuk össze a 6. ábrán látható kapcsolást. Végezzük el az üresjárási mérést a primer **kapocsfeszültség** változtatásával. Célszerű a mérést fentről lefelé végezni, a kiindulópont a transzformátor **névleges** feszültségének 125%-a legyen. Jegyezzük fel a műszerek adatait minden mérési pontban. A szekunder feszültség értékének feljegyzése azért szükséges, hogy a vasveszteséget meghatározhassuk.



6. ábra: Üresjárási mérés

A mérés végeztével a következő értékeket kell kiszámolni (ezeket a számításokat elvégzi a jegyzőkönyv készítését támogató Excel táblázat!) minden mérési pontban:

$$U_{i1} = n \cdot U_2 \quad (6)$$

ahol  $n$  a **menetszám áttétel**,  $U_2$  a szekunder **kapocsfeszültség**,  $U_{i1}$  pedig a primer **indukált feszültség**.

$$I_{01} = \frac{U_r}{R} \quad (7)$$

ahol  $U_r$  a mérőellenálláson eső feszültség,  $R$  a mérőellenállás értéke,  $I_{01}$  pedig a primer áram.

$$\cos \varphi = \frac{U_g^2 - U_1^2 - U_r^2}{2 \cdot U_r \cdot U_1} \quad (8)$$

ahol  $U_g$  a generátor feszültsége,  $U_1$  a primer **kapocsfeszültség**,  $\cos \varphi$  pedig az áram és feszültség fázistolásának teljesítmény tényezője.

$$S = U_1 \cdot I_{01} \quad P_{ii} = U_1 \cdot I_{01} \cdot \cos \varphi \quad P_{vas} = U_{i1} \cdot I_{01} \cdot \cos \varphi \quad (9)$$

ahol  $S$  a felvett látszólagos teljesítmény,  $P_{vas}$  a **vasveszteség**,  $P_{ii}$  az üresjárási veszteség,  $I_{01}$  a primer **üresjárási áram**,  $U_1$  pedig a primer **kapocsfeszültség**.

$$R_v = \frac{U_{i1}^2}{P_{vas}} \quad (10)$$

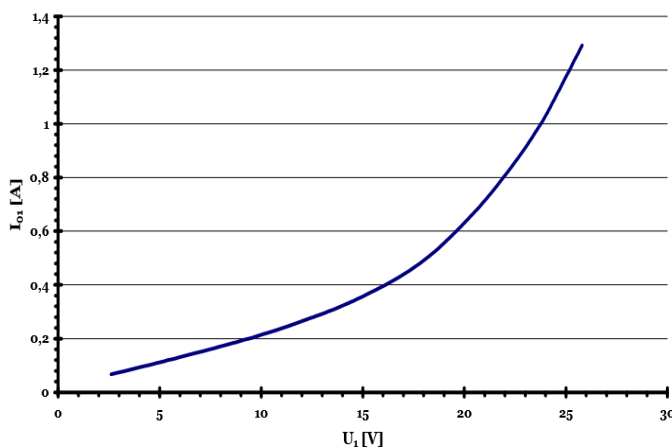
ahol  $R_v$  a **vasveszteségi ellenállás**.

$$X_m = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{I_{01}}{U_{i1}}\right)^2 - \left(\frac{1}{R_v}\right)^2}} \quad (11)$$

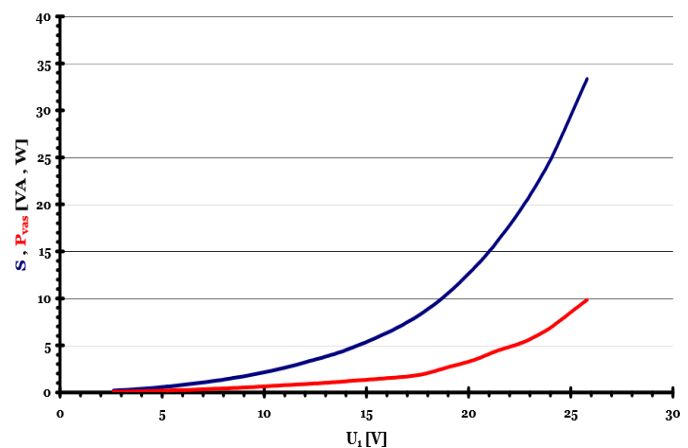
$X_m$  a **főmező reaktancia**

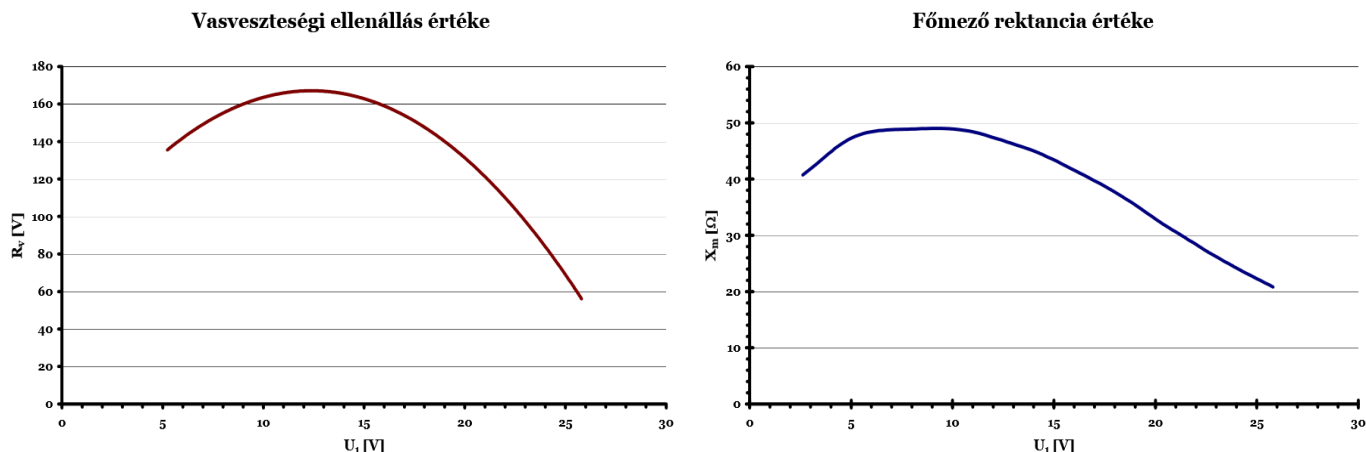
A mért és számolt értékeket ábrázoljuk grafikonon a primer **kapocsfeszültség** függvényében. Határozzuk meg a főbb paraméterek **relatív** értékét a **kapocsfeszültség névleges** pontjában (**üresjárási áram**, **vasveszteség**, **vasveszteségi ellenállás** és **főmező reaktancia**).

Üresjárási feszültség - áram jellegörbe



Üresjárásban felvett teljesítmény és vasveszteség





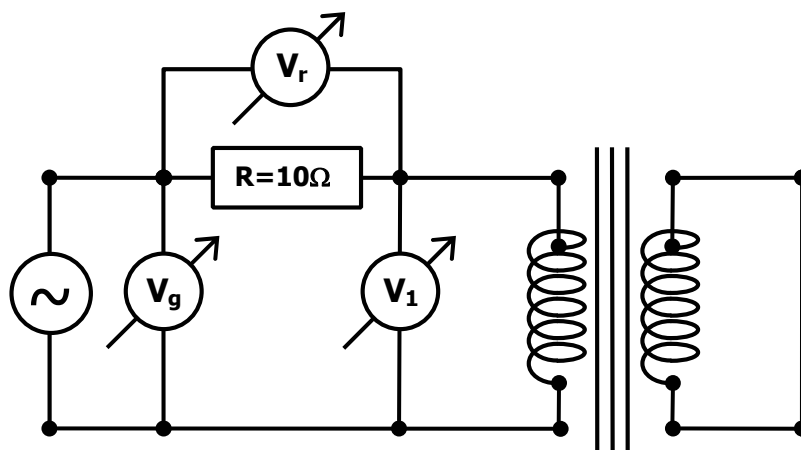
7. ábra: Üresjárási állapot jellemző görbéi

#### D) Rövidzárási mérés:

A transzformátorok rövidzárási mérésének legfontosabb célja a **rövidzárási feszültség**, más néven a **drop**, illetve a **tekercselési veszteség** meghatározása. Ezen kívül meghatározható még a **helyettesítő kapcsolásban** szereplő **szórási reaktanciák** összege is.

Rövidzárási mérés során a szabad paraméter a primer áram, ennek függvényében kell a mért és számolt mennyiségeket ábrázolni. A primer áram néveleges értékéig a **rövidzárási feszültség** lineárisan nő, ami azt mutatja, hogy a **tekercselési ellenállások** valamint a **szórási reaktanciák** nem függenek az áram értékétől.

Állítsuk össze a rövidzárási mérést a 8. ábra alapján. Végezzük el a mérést a generátor feszültségének növelésével. Olvassuk le a primer áram és feszültség értékét minden mérési pontban. Ügyeljünk arra, hogy a primer áram ne haladja meg a **névleges** értéket. A mérést célszerű minél gyorsabban elvégezni, hogy a tekercsek hőmérséklete ne változzon jelentősen.



8. ábra: Rövidzárási mérés

A mérés végeztével számoljuk ki és ábrázoljuk a primer áram függvényében a következő értékeket (**Figyelem! Ezeket a számításokat elvégzi a jegyzőkönyv készítését támogató Excel táblázat!**):

$$I_1 = \frac{U_r}{R} \quad (12)$$

ahol  $U_r$  a mérőellenálláson eső feszültség,  $R$  a mérőellenállás értéke,  $I_1$  pedig a primer áram.

$$\cos \varphi = \frac{U_g^2 - U_1^2 - U_r^2}{2 \cdot U_r \cdot U_1} \quad (13)$$

ahol  $U_g$  a generátor feszültsége,  $U_1$  a primer **kapocsfeszültség**,  $\cos \varphi$  pedig az áram és feszültség fázistolásának teljesítmény tényezője.

$$S_z = U_1 \cdot I_1 \quad P_z = S_z \cdot \cos \varphi \quad Q_z = \sqrt{S_z^2 - P_z^2} \quad (14)$$

ahol  $S_z$  a zárlati állapotban felvett látszólagos teljesítmény,  $Q_z$  a zárlati állapotban felvett meddő teljesítmény,  $P_z$  a zárlat során felvett hatásos teljesítmény.

$$R_{AC} = R_1 + R'_2 = \frac{P_z}{I_1^2} \quad (15)$$

ahol  $R_1$  a primer tekercselés *váltakozóáramú ellenállása*,  $R'_2$  a szekunder tekercselés primer oldalra redukált *váltakozóáramú ellenállása*.

$$X_s = X_{s1} + X'_{s2} = \frac{Q_z}{I_1^2} \quad (16)$$

ahol  $X_{s1}$  a primer tekercselés *szórási reaktanciája*,  $X'_2$  a szekunder tekercselés primer oldalra redukált *szórási reaktanciája*.  $X_s$  pedig az eredő szórás.

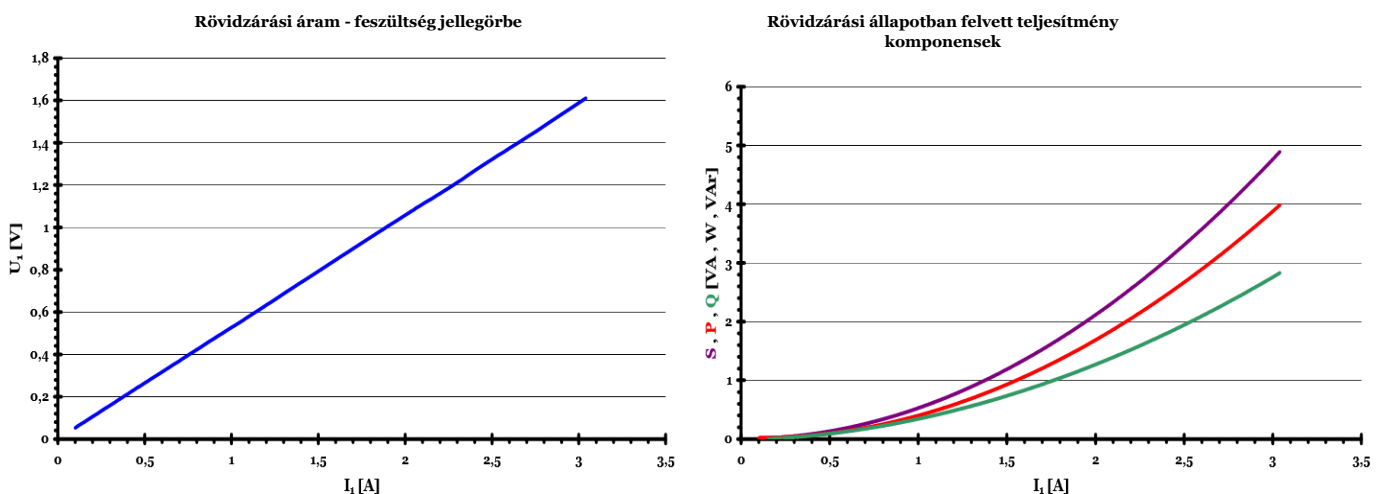
$$\varepsilon = \frac{U_{z1}}{U_{1n}} \cdot 100\% \quad (17)$$

ahol  $U_{z1}$  a primer **rövidzárási feszültség**,  $U_{1n}$  a primer **névleges** feszültség,  $\varepsilon$  pedig a **drop**.

Határozzuk meg a főbb paraméterek **relatív** értékét a rövidzárási áram **névleges** pontjában (*tekercselési veszteség, szórási reaktancia és tekercsellenállások*).

*Kiegészítő feladat:*

Adjuk meg, hogy az egyenáramú esethez képest a tekercselési ellenállások hány százalékkal növekedtek.

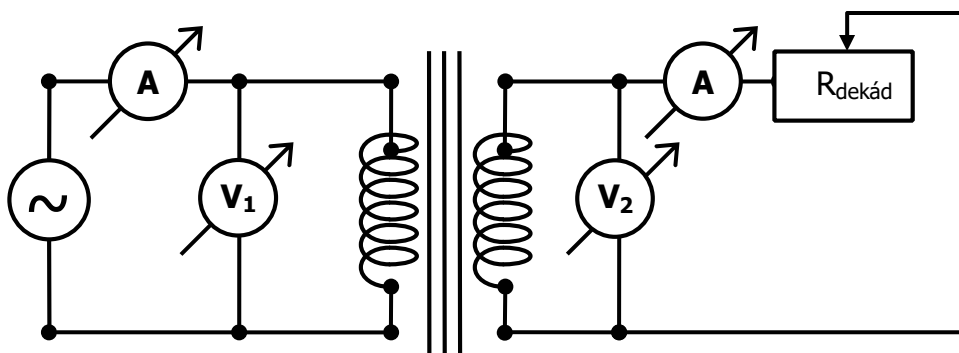


9. ábra: Rövidzárási állapot jellemző görbéi

### E) Terhelési mérés:

Az energiaátviteli célra használt transzformátor fontos jellemzője, hogy állandó bemeneti feszültség esetén mennyire változik a kimeneti feszültség a terhelő áram függvényében. Ezt az  $U_2=f(I_2)$  összefüggés szemlélteti. A mérés ezenkívül használható az energia tvitel hatásfokának megállapítására is.

Állítsuk össze a 10. ábrán látható kapcsolást. Végezzük el a mérést a terhelés fokozatos növelésével. A terhelő áramot jelen esetben a dekád ellenállás értékének csökkentésével tudjuk növelni. A primer **kapocsfeszültség** értékét válasszuk a transzformátor **névleges** értékére és ellenőrizzük (korrigáljuk) a mérés során folyamatosan a toroid tápegység szabályozásával.

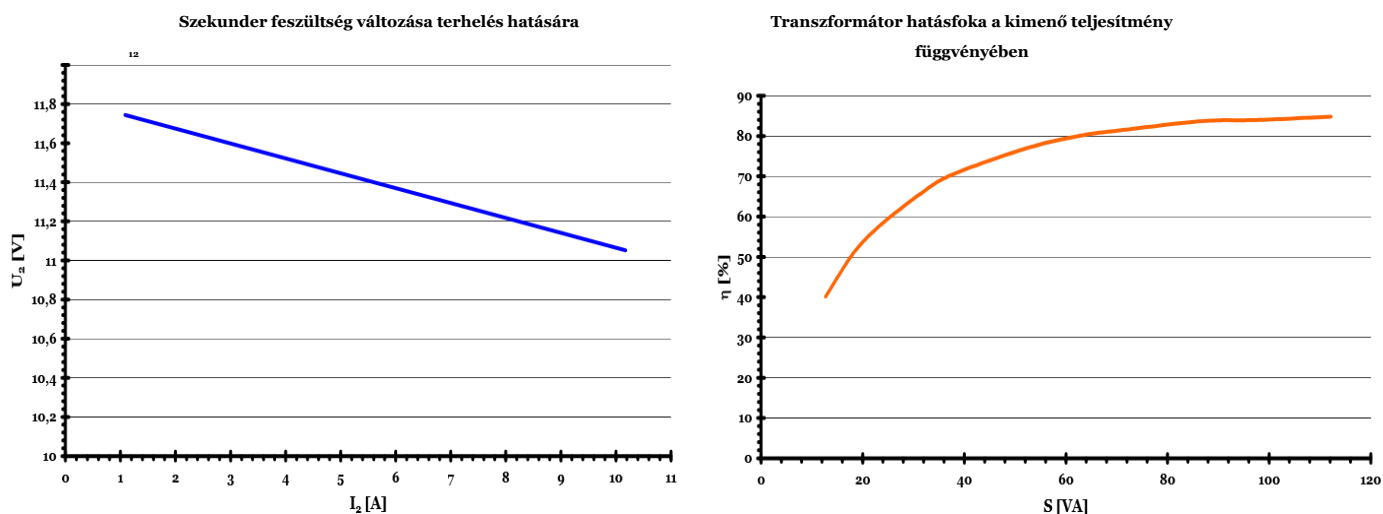


10. ábra: Terhelési mérés

A mérés végeztével ábrázoljuk az  $U_2=f(I_2)$  összefüggést grafikonon. Határozzuk meg és ábrázoljuk a leadott teljesítmény függvényében a hatásfokot az alábbi képlet alapján ( $\cos\phi_2=1$  esetére):

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_v + P_t} \approx \frac{S_2}{S_1} = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1} \cdot 100\% \quad (18)$$

ahol  $U_2$  a szekunder **kapocsfeszültség**,  $U_1$  a primer **kapocsfeszültség**,  $I_2$  a szekunder áram,  $I_1$  pedig a primer áram.  $\eta$  pedig a hatásfok.



11. ábra: Terhelési állapot jellemző görbéi

## 5. Felkészülést segítő kérdések

1. Transzformátor esetén mi a szórási és a főmező fluxus fogalma?
2. Definiálja a menetszám-, a feszültség- és az áramátvitel fogalmát!
3. Hogyan és miért függ a feszültség-átvitel értéke a primer feszültségtől?
4. Hogyan változik a szekunder feszültség a terhelő áram hatására, ha a primer feszültség és a frekvencia állandó?
5. Mi a drop fogalma?
6. Rajzolja fel a transzformátor térelméleti helyettesítő képét!

Készítette:  
Horváth Dániel  
Villamos Energetika Tanszék  
2006  
Átdolgozta:  
Prikler László  
Villamos Energetika Tanszék  
2015