

11. tétel

Ismertesse a transzformátorok működési elvét! Értelmezze az üresjárási állapothoz tartozó villamos jellemzőket!

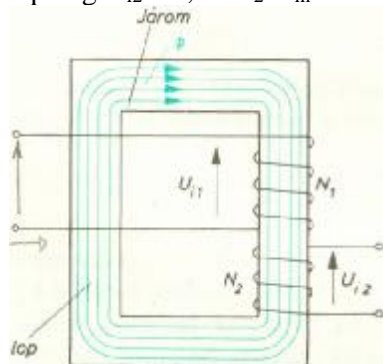
A villamos energiát erőművekben váltakozó áramú generátorok termelik. A villamos fogyasztók általában az erőművektől távol vannak, tehát a termelt energiát nagyobb távolságra kell szállítani. A generátorok 10,5...22 kV-os feszültségre készülnek. A gazdaságos energiaátviteli feszültség ennél általában nagyobb. Magyarországon nagyobb átviteli távolságok esetén 120, 220 kV, a nemzetközi együttműködési rendszerben 400 kV. A fogyasztók szigetelési nehézségek és életbiztonsági okokból ilyen nagy feszültségre nem készülhetnek. Nagy motorok feszültsége 3,6 és 10 kV, de a 150 kW alatti teljesítményű motorok feszültsége általában csak 400 V, a háztartási fogyasztóké 230 V, és munkavédelmi szempontból gyakran alkalmazunk ennél kisebb feszültséget is. Ezért az erőműveknél a villamos energia feszültségét meg kell növelni, az energiaátvitel ezen a megnövelt feszültségen történik, a fogyasztóknál pedig a feszültséget csökkenteni kell. A feszültség gazdaságosan transzformátorral változtatható meg. A transzformátor mozgó alkatrészt nem tartalmaz, a nyugalmi elektromágneses indukció alapján működik és csak váltakozó feszültségre használható. Nem alkalmas a frekvencia megváltoztatására, de -- különleges esetekben és különleges szerkezettel - használható fázisszám változtatásra.

A transzformátorok működési elve

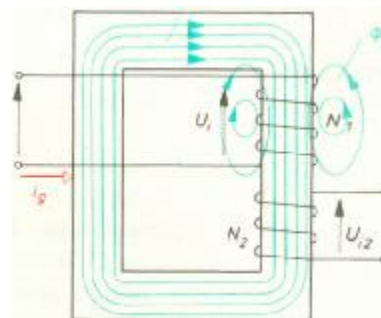
A transzformátor jól mágnesezhető vasanyagból készült lemezelt, zárt vasmagból és tekercsekből áll. A vasmagnak az a része, amelyen a tekercsek vannak, az oszlop, a többi részének elnevezése: járom. Az N_1 menetszámú primer tekercs a hálózatról teljesítményt vesz, az N_2 menetszámú szekunder tekercs teljesítményt szolgáltat.

A két tekercs szerepe felcserélhető, ezért sok esetben a tekercseket feszültségeik szerint különböztetjük meg: kisebb és nagyobb feszültségű tekercsről beszélünk.

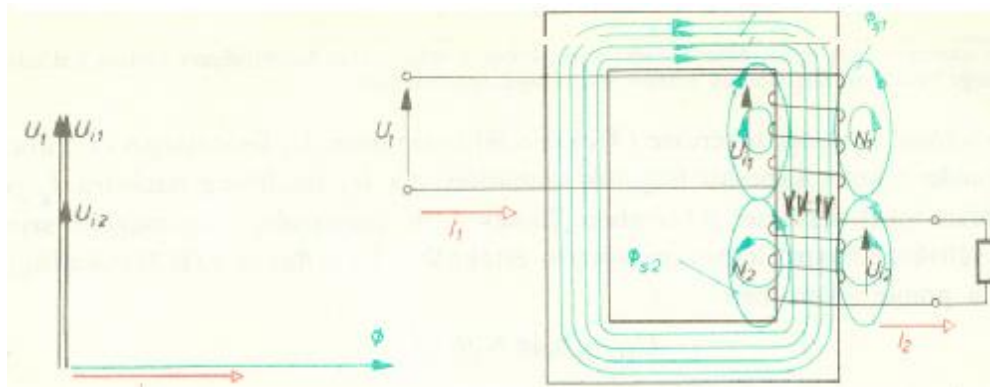
Kapcsoljunk a primer tekercsre, f frekvenciájú szinuszos U_1 feszültséget. A szekunder tekercs kapcsait hagyjuk szabadon. Az U_1 feszültség hatására I_g gerjesztő áram folyik a primer tekercsben. Ennek $I_g N_1$ gerjesztése a vasmagban szinuszosan váltakozó fluxust létesít, maximális értéke Φ_m . Ez a fluxus a primer tekercsben $U_{11} = 4,44 N_1 \Phi_m f$ a szekunder tekercsben pedig $U_{12} = 4,44 N_2 \Phi_m f$ feszültséget indukál.



Transzformátor vasmag primer és szekunder tekercssel



Transzformátor üresjárása



A fluxus és az indukált feszültségek fázishelyzete

A transzformátor terhelése

A két indukált feszültség hányadosa a transzformátor áttétele:

$$a = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{4,44 N_1 \Phi_m f}{4,44 N_2 \Phi_m f} = \frac{N_1}{N_2}$$

Tehát az indukált feszültségek arányosak a menetszámokkal; az áttétel vagy az indukált feszültségek, vagy a menetszámok hányadosaként számítható.

Háromfázisú transzformátoroknál meg kell egymástól különböztetni a feszültség és a menetszám áttételt, mert a kettő nem mindig egyenlő.

A fluxus az I_g árammal fázisban van, az indukált feszültségek a fluxushoz képest 90° -ot sietnek. A primer tekercsben indukált U_{i1} feszültség tart egyensúlyt a rákapcsolt U_1 feszültséggel. Ezért e két feszültség azonos nagyságú és fázishelyzetű. (A későbbiekben látni fogjuk, hogy ez csak megközelítőleg igaz. A fluxus nincs pontosan fázisban az I_g árammal és az U_{i1} sem pontosan azonos U_1 -gyel.)

A fluxust nemcsak a vasmag vezeti, hanem kis mértékben a levegő is. A fluxusnak a vasmagon, tehát mindkét tekercsen át záródó része a főfluxus (Φ), csak a primer tekercs körül záródó része a primer szórt fluxus (Φ_{s1}).

Eddig a szekunder tekercsre nem kapcsolunk fogyasztót, a transzformátort nem terheljük. Ilyenkor beszélünk üresjárásról. Üresjárásban a primer szórt fluxus elhanyagolhatóan kicsi.

Kapcsoljunk a szekunder tekercsre fogyasztót, például rezisztenciát, azaz terheljük a transzformátort. A fogyasztón az U_{i2} feszültség I_2 áramot hajt át. Az I_2 áram $I_2 N_2$ gerjesztése a főfluxust megváltoztatja. A megváltozott főfluxus miatt megváltozik az U_{i1} feszültség is. Az U_1 és U_{i1} közötti feszültségkülönbség a primer tekercs I_g áramát I_1 -re változtatja, tehát a primer gerjesztés is $I_g N_1$ -ről $I_1 N_1$ -re változik. Az $I_1 N_1$ gerjesztés a fluxust közel az eredeti értékre állítja vissza és ezáltal U_{i1} is alig változik. Ha tehát a transzformátort fogyasztóval terheljük, akkor nem csak a szekunder tekercsekben indul meg áram, hanem megváltozik a primer áram is, úgy, hogy a főfluxus és az indukált feszültség közel állandó marad.

A terhelt transzformátorban tehát két gerjesztés van: $I_1 N_1$ és $I_2 N_2$. A két gerjesztés együtt ugyanazt a Φ fluxust hozza létre, mint üresjárásban az $I_g N_1$ gerjesztés. A két gerjesztés ellentétes irányú. Különbségük ugyanakkor kell legyen, mint az üresjárási gerjesztés:

$$I_1 N_1 - I_2 N_2 = I_g N_1$$

Ez a gerjesztések egyensúlyának törvénye.

I_g gyakran I_1 és I_2 -höz képest elhanyagolhatóan kicsi, nagy transzformátoroknál alig 0,5%-a a primer névleges áramnak, ezért $I_1 N_1 - I_2 N_2 \approx 0$, azaz $I_1 N_1 \approx I_2 N_2$.

Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

(Itt már eltekinthetünk az áram vektoros jelölésétől, mert ha két vektor egyenlő, akkor abszolút értékeik is egyenlők.)

Az utóbbi összefüggésből

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

A transzformátorban tehát az áramerősségek a menetszámokkal fordítottan arányosak. Ez azt jelenti, hogy a nagyobb feszültségű tekercsben kisebb az áram, a kisebb feszültségűben nagyobb.

A terhelt transzformátorban már nemcsak az I_1 áram hoz létre szórt fluxust, hanem I_2 is. Ez a szekunder szórt fluxus (Φ), mely csak a szekunder tekercs körül záródik.

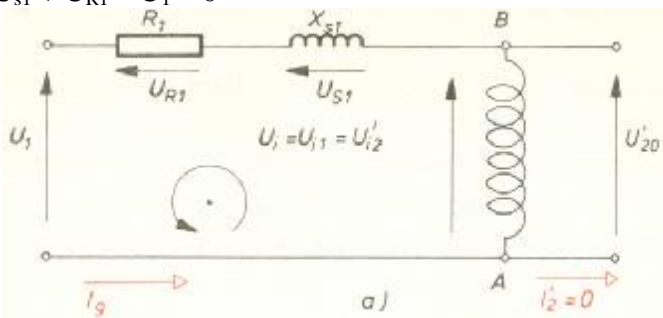
Üresen jár a transzformátor, ha szekunder oldala nincs terhelve: I_2 , vagy $I_2' = 0$. Ilyenkor a transzformátor a primer oldalon csak a gerjesztő áramot (I_g) veszi fel a hálózatról. Ezért ezt az áramot szokás üresjárású áramnak is nevezni. Az üresjárású áramnak két szerepe van és e két szerepnek megfelelően fel is bontható két összetevőre.

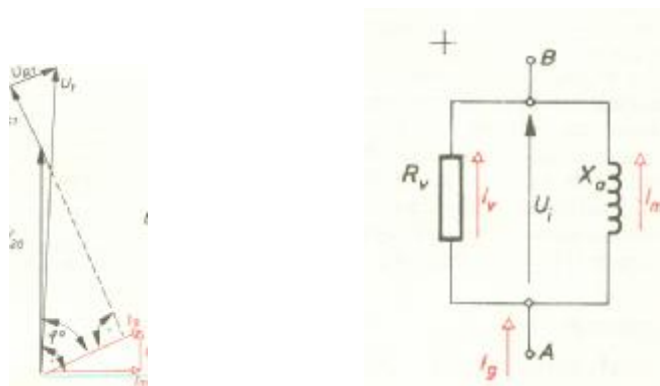
A fluxussal fázisban van az üresjárású áram I_m mágnesező összetevője. tulajdonképpen a fluxust csak ez gerjeszti, tehát ez az összetevő van fázisban a fluxussal. A fluxus és azzal együtt az I_m mágnesező áram az indukált feszültséghez képest 90° -ot késik. A mágnesező áramnak tehát hatásos összetevője nincs, tiszta meddő áram, hatásos teljesítmény felvételt nem jelent.

Üresjárásban a transzformátor szekunder oldalán nem folyik áram, tehát ott nem jön létre feszültségesés. Ezért az üresjárású helyettesítő kapcsolás felrajzolásánál a szekunder rezisztenciát és szórási reaktanciát elhagyhatjuk. Mindebből az is következik, hogy üresjárásban $U_2' = U_{i2}' = U_i$. Ezt az üresjárásban jelentkező redukált feszültséget jelöljük U_{20}' -val. A primer oldalon folyó I_g áram két feszültségesést létesít:

$$U_{s1} = I_g X_{s1} \quad U_{R1} = I_g R_1$$

A vektorábra felrajzolását tulajdonképpen már az üresjárású áram két összetevőjének ismertetésénél megkezdjük. Most folytassuk a feszültségvektorok megrajzolásával. A bejelölt körüljárású irány szerint, írjuk fel a feszültségekre a huroktörvényt (természetesen vektorosan): $U_i + U_{s1} + U_{R1} - U_1 = 0$





Üresjárás helyettesítő kapcsolás, vektorábra és az áthidaló ág felbontása

Átrendezve: $U_i + U_{s1} + U_{R1} = U_1$.

Az U_i indukált feszültség a fluxushoz képest 90° -ot siet. Az U_{s1} szórás feszültségesést az I_g áram induktív reaktancián hozza létre, tehát U_{s1} az I_g -hez képest siet 90° -ot. Vektorát úgy rajzoljuk U_i végpontjához, hogy az U_i és U_{s1} vektorainak nyílfolyama folytonos legyen. Az U_{R1} feszültségesést szintén az I_g áram létesíti, de rezisztencián, tehát U_{R1} az I_g árammal fázisban van. Ennek vektorát U_{s1} vektorának végpontjához kell úgy megrajzolni, hogy nyílfolyamuk folytonos legyen. Az U_i indukált feszültség valamint az U_{s1} és U_{R1} feszültségesések vektoros eredője a transzformátorra kapcsolt U_1 feszültség. Az U_1 vektorát tehát U_i kezdőpontja és U_{R1} végpontja közé kell megrajzolni úgy, hogy nyílfolyama a másik három feszültség nyílfolyamával ütköző legyen. Láthatjuk, hogy az U_1 feszültséggel nemcsak az indukált feszültség tart egyensúlyt, hanem az indukált feszültség és két feszültségesés vektoros összege.

Az I_g üresjárás áram kis egységeknél a transzformátor névleges áramának 5-..10 %-a, nagyoknál 0,5...1%-a. I_g és U_1 közötti szöveget φ_0 -al jelöljük. A teljesítménytényező üresjárásban $\cos \varphi_0 \approx 0,1$. A kis I_g miatt U_{s1} és U_{R1} is kicsi, tehát $U_1 \approx U_i$, ábránkon csak a láthatóság kedvéért rajzoltuk U_{s1} -et és U_{R1} -et nagyra.

Az üresjárás áram két összetevőjének megfelelően a helyettesítő kapcsolás áthidaló ága megrajzolható. Ezen az ábrán az X_a induktív reaktanciát és az R_v rezisztenciát kapcsoltuk párhuzamosan. Mindkettőn az U_i indukált feszültség hajtja át az áramot. Az induktív reaktancián az I_m áram folyik, mert ez késik U_i -hez képest 90° -ot, a rezisztencián I_v folyik át, mert ez az áram van U_i -vel fázisban. X_a az ideális tekercs induktív reaktanciája. Az R_v rezisztenciával a vasvesztést vesszük figyelembe, hiszen R_v -n I_v folyik. X_a és R_v kiszámítása a következő összefüggésekkel lehetséges:

$$X_a = \frac{U_i}{I_m} \quad R_v = \frac{U_i}{I_v}$$

A transzformátor vasmagjában létrejövő vasvesztést (átmágnesezési és örvényáram veszteség) a váltakozó Φ fluxus létesíti. Az átágnesezési veszteséget szilícium ötvözéssel, az örvényáram veszteséget szintén szilícium ötvözéssel és lemezeléssel csökkentjük. A transzformátor lemezek 2,7. . .4,5~ Si tartalmúak. Vastagságuk 0,35 vagy 0,5 mm. Ezzel elérhető, hogy v_{10} veszteségi számuk 0,6.. -1,45 W/kp.

Említettük már, hogy a Φ fluxus a transzformátorban közel állandó marad, terheléskor közel ugyanannyi, mint üresjárásban. Ez azt jelenti, hogy a transzformátor vasvesztése sem változik számottevően.

Üresjárásban a tekercsvesztés $I_g^2 R_1$. Ez az üresjárás tekercsvesztés nagyon kicsi, elhanyagolható, mert I_g csak néhány százaléka a névleges áramnak. Ha tehát üresjárásban megmérjük wattmérővel egy transzformátor teljesítmény felvételét, akkor az igen jó
Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

Villamos gépek tantárgy tételei

közelítéssel a vasvesztéssel egyezik meg. Ezért a vasvesztést szokás üresjárási veszteségnek ($P_{\dot{u}}$) is nevezni. Üresjárásban a vasvesztés wattmérővel megmérhető. A mért veszteség a $P_v = P_{\dot{u}} = U_1 I_g \cos \varphi_0$ összefüggéssel is felírható. Ebből U_1 és I_g ismeretében

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_v}{U_1 I_g}.$$

Az ...ábra szerint $I_g \cos \varphi_0 = I_v$, azaz $P = U_1 I_v$, vagy mivel $U_1 \approx U_i$, írható, hogy $P_v = U_i I_v$. Ez nem más, mint az áthidaló ág R_v rezisztenciáján hővé alakuló teljesítmény, tehát

$$P_v = I_v^2 R_v$$

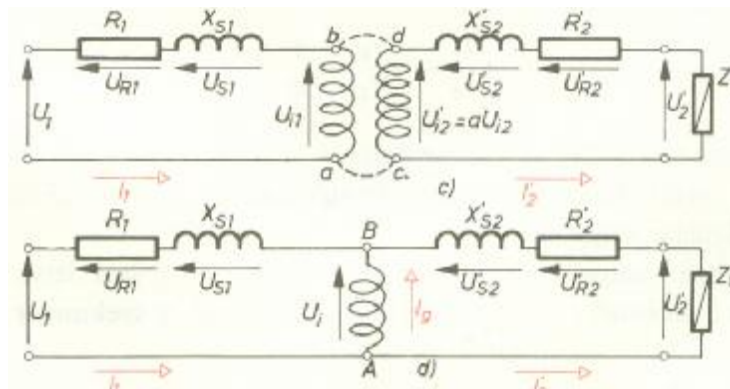
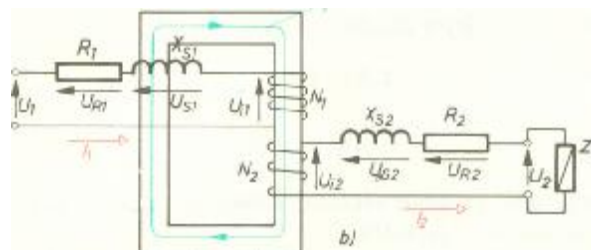
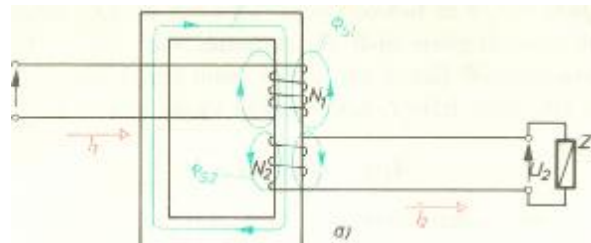
Az R_v rezisztenciával tehát valóban a vasvesztést vettük figyelembe.

21. tétel

Hogyan származtatható a transzformátor helyettesítő kapcsolási vázlata? Mit jelentenek a kapcsolásban szereplő redukált mennyiségek?

A következőkben a transzformátorban lejátszódó jelenségek könnyebb megértése érdekében - a transzformátort rezisztenciákból és induktív reaktanciákból álló olyan kapcsolással helyettesítjük, amely a feszültségek és az áramok szempontjából úgy viselkedik mint a transzformátor.

Az 1.5a ábrán megrajzoltunk egy Z_t impedanciával terhelt transzformátort. Az ábrából világos, hogy a Φ főfluxust a primer és szekunder gerjesztések (I_1N_1 és I_2N_2) különbsége létesíti, míg a Φ_{s1} és Φ_{s2} szórt fluxusokat csak külön a primer és a szekunder gerjesztés. A fluxusok a tekercsekben feszültségeket indukálnak. A főfluxus mindkét tekercsben indukál feszültséget, ezeket U_{i1} és U_{i2} -vel jelöljük. A primer szórt fluxus csak a primer, a szekunder szórt fluxus csak a szekunder tekercsben indukál feszültséget. Ezeket U_{s1} és U_{s2} -vel jelöljük és szórási feszültségeknek nevezzük.



A transzformátor helyettesítő kapcsolásának származtatása

Villamos gépek tantárgy tételei

A szórás feszültségek arányosak a szórt fluxusokkal, azok a gerjesztésekkel, azaz az I_1 és I_2 áramokkal, tehát a szórás feszültségek arányosak az I_1 és I_2 áramokkal.

Az indukált feszültség mindig 90° -ot siet az indukáló fluxushoz képest. A fluxus fázisban van a fluxust létesítő gerjesztéssel, ill. árammal. Ebből következik, hogy a szórás feszültségek 90° -ot sietnek az áramokhoz képest.

Induktív reaktancián létrejövő feszültségesés is arányos az árammal és az áramhoz képest 90° -ot siet. Az indukzív reaktancia tehát az áramkörben ugyanazt a hatást fejt ki, mint a transzformátorban a szórt fluxus. Ezért a szórt fluxusok hatását a primer tekercsben X_{s1} , a szekunder tekercsben X_{s2} szórás reaktanciával helyettesíthetjük. Tehát:

$$U_{s1} = I_1 X_{s1} \quad \text{és} \quad U_{s2} = I_2 X_{s2}$$

Összefoglalva, a szórt fluxusok hatása azért helyettesíthető indukzív reaktanciákkal, mert a szórt fluxusok által indukált feszültségek ugyan úgy arányosak az áramokkal és 90° -ot sietnek azokhoz képest, mint ahogyan az indukzív reaktancián létrejövő feszültségesés is arányos az árammal és hozzá képest 90° -ot siet.

Mindkét tekercsnek van rezisztenciája is. Ezeket R_1 és R_2 -vel jelöljük. A tekercsekben folyó áramok ezeken feszültségeséseket létesítenek:

$$U_{R1} = I_1 R_1 \quad U_{R2} = I_2 R_2$$

Az ábrán a primer és szekunder áramkörben külön megrajzoltuk a szórásból és ohmos ellenállástól mentes „ideális” tekercseket és ezekkel sorba kapcsolva tüntettük fel a tekercsek szórás reaktanciáit és rezisztenciáit. Az ábrán feltüntettük az indukált feszültségeket, a szórás feszültségeket vagy indukzív feszültségeséseket és a rezisztanciákon létrejövő feszültségeséseket. Ezen az ábrán már nem szerepelnek a szórt fluxusok, hiszen azok hatását a két indukzív reaktanciával vettük figyelembe.

A következő lépésben elméletileg alakítsuk át transzformátorunkat a = 1 áttételűvé (azonos primer és szekunder menetszámúvá) úgy, hogy az áttételt leszámítva a transzformátorunk lényegében ne változzon meg, tehát maradjon változatlan a teljesítménye és maradjanak változatlanok a teljesítményvesztései. Ezzel az átalakítással járó számítást *redukálásnak* nevezzük. Általában a szekunder tekercs menetszámát szokás a primer menetszámmal egyenlővé tenni, azaz a szekunder mennyiségeket redukáljuk a primer oldalra.

Ismerve az $a = N_1/N_2$ összefüggést, megállapíthatjuk, hogy az N_2 menetszámot a-val kell szorozni, hogy egyenlő legyen N_1 -gyel. Az $aN_2 =$ szorzatot jelöljük N_2' -vel és nevezzük redukált szekunder menetszámnak. A redukált mennyiségeket vesszővel fogjuk jelölni.

$$N_1 = aN_2 = N_2'$$

Ha a-szorosra növeljük a szekunder menetszámot, akkor a-szorosára növekszik a szekunder-indukált feszültség is. Tehát a redukált szekunder indukált feszültség:

$$U'_{i2} = aU_{i2}$$

Az áttétel $a = U_{i1}/U_{i2}$ összefüggése értelmében $aU_{i2} = U_{i1}$, tehát $U'_{i2} = U_{i1}$ és mindkettőt röviden U_i -vel jelöljük:

$$U'_{i2} = U_{i1} = U_i$$

Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

Villamos gépek tantárgy tételei

Ha a szekunder indukált feszültség a-szorosra növekszik, akkor a-szorosra növekszik a transzformátor szekunder feszültsége is, tehát:

$$U'_2 = aU_2$$

A transzformátor teljesítménye $\cos \varphi = 1$ esetén $U_2 I_2$. Ha U_2 a-szorosára növekszik, akkor a teljesítmény változatlanóságának érdekében I_2 -t a-ad részére kell csökkenteni:

$$I'_2 = \frac{I_2}{a}$$

Igy $U_2 I_2$ valóban egyenlő $U'_2 I'_2 = aU_2 \frac{I_2}{a}$ -val.

A transzformátor tekercsvesztése $I_2^2 R_2$, redukálás után az $I_2'^2 R'_2$ képlettel számítható, ahol R_2 a redukált szekunder rezisztencia. Ezt kell meghatároznunk. A teljesítményvesztések változatlanok maradnak redukálás közben, tehát

$$I_2^2 R_2 = I_2'^2 R'_2. \text{ Ebből } R'_2 = R_2 \frac{I_2^2}{I_2'^2}. \text{ Figyelembe véve, hogy } I_2' = \frac{I_2}{a}$$

$$R'_2 = R_2 \frac{I_2^2}{\frac{I_2^2}{a^2}} = a^2 R_2.$$

Az X_{s2} reaktancián létrejövő meddő teljesítmény redukálás előtt: $I_2^2 X_{s2}$, redukálás után: $I_2'^2 X'_{s2}$. R_2 levezetésének gondolatmenetét követve $X'_{s2} = a^2 X_{s2}$.

Az előzőek alapján a redukált terhelő impedancia: $Z'_t = a^2 Z_t$.

Redukálással $a = 1$ áttételű transzformátorhoz jutunk. Mindkét tekercsében azonos feszültség indukálódik. Szekunder feszültsége a tényleges transzformátor szekunder feszültségének a-szorosa, szekunder árama a tényleges szekunder áram a-ad része. Szekunder ellenállásai a tényleges szekunder ellenállások a^2 -szeresei.

Az ábrán ezt az $a = 1$ áttételű transzformátort rajzoltuk meg. Az egyszerűség kedvéért itt a vasmagot már nem tüntettük fel. Ebben az ábrában természetesen

$$U_{R2} = I_2' R'_2 \quad \text{és} \quad U_{s2} = I_2' X'_{s2}.$$

Az ábra a és b pontjai között ugyanaz a feszültség indukálódik, mint a c és d pontok között. Ezért az a és c, valamint a b és d pontok egymással összeköthetők (szaggatott vonal). A két ideális tekercs menetszám azonossága miatt nemcsak a tekercsek végei köthetők össze, hanem menetenként is egyesíthetők. Így a két tekercsből egy lesz és a helyettesítő kapcsolás két külön áramköréből is egyetlen vegyes kapcsolás. Az ideális tekercs a helyettesítő kapcsolás áthidaló ága.

Üresjárásban a transzformátor szekunder kapcsaira nincs fogyasztó kapcsolva, $I_2 = 0$. Ilyenkor $I_1 = I_g$ és ez teljes egészében az ideális tekercsen, azaz az áthidaló ágon folyik át. Úgy is felfogható, hogy az áthidaló ágon I_g -t az U_i feszültség hajtja át. A transzformátor terhelésekor a gerjesztések egyensúlya miatt a Φ főfluxus és ezzel együtt az U_i feszültség lényegesen nem változik. A helyettesítő kapcsolás áthidaló ágán tehát mindig közel U_i a feszültség. Ebből az következik, hogy az áthidaló ágon nemcsak üresjárásban, hanem terheléskor is közel ugyanakkora I_g áram folyik. Írjuk fel a csomóponti törvényt az ábra A pontjára

$$I_1 - I_2' - I_g = 0 \quad \text{azaz} \quad I_1 - I_2' = I_g$$

Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

Villamos gépek tantárgy tételei

Szorozzuk meg mindkét oldalt N_1 -gyel: $\mathbf{I}_1 N_1 - \mathbf{I}_2' N_1 = \mathbf{I}_g N_1$ és vegyük figyelembe, hogy

$$\mathbf{I}_2' = \frac{\mathbf{I}_2}{a} = \mathbf{I}_2 \frac{N_2}{N_1} : \quad \mathbf{I}_1 N_1 - \mathbf{I}_2 \frac{N_2}{N_1} N_1 = \mathbf{I}_g N_1$$

A második tagban N_1 -gyel egyszerűsítve gerjesztések egyensúlyának törvénye. $\mathbf{I}_1 N_1 - \mathbf{I}_2 N_2 = \mathbf{I}_g N_1$. Ez pedig nem más, mint a

A következőkben a transzformátorban lejátszódó jelenségek magyarázatára a helyettesítő kapcsolást fel fogjuk használni.

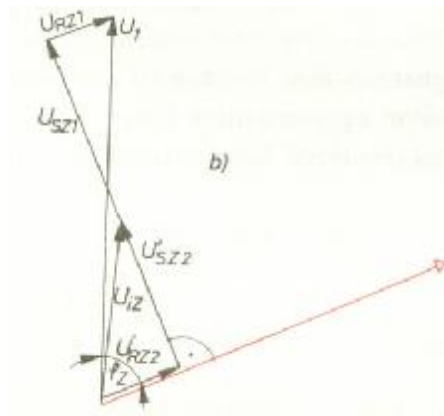
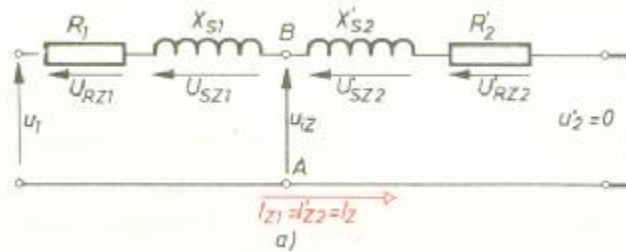
29. tétel

Ismertesse a transzformátor rövidzárási áramának meghatározási módját az egyszerűsített helyettesítő vázlat alapján! Értelmezze a zárlati üzemmódhoz kapcsolódó további villamos jellemzőket!

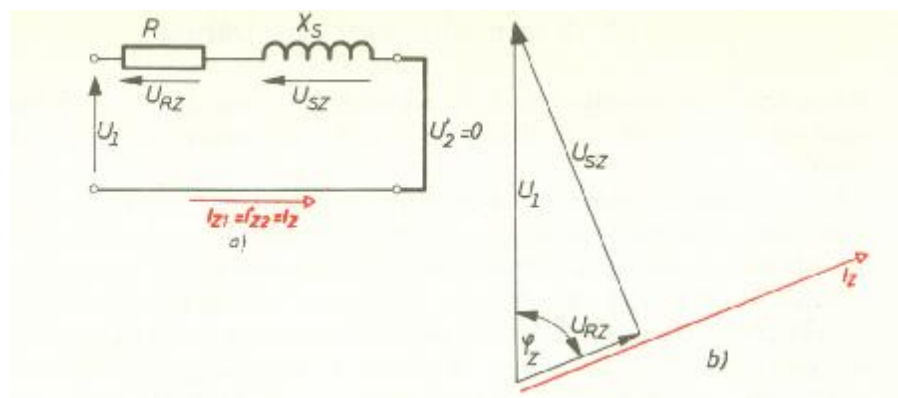
Rövidrezárjuk a transzformátort, ha szekunder kapcsait gyakorlatilag ellenállásmentes vezetővel kötjük össze. Ilyenkor a primer és szekunder oldalon nagy áramok folynak.

Rövidzárási vektorábra. A rövidzárási helyettesítő kapcsolásban nincs áthidaló ág, ezért a primer és a redukált szekunder rövidzárási áram azonos, egyszerűen I_z -vel jelöljük. Az ábrában alkalmazott jelölésekben szereplő z betű a rövidrezárt állapotra utal. Rövidrezárásban nincs szekunder feszültség ($U_2' = 0$), tehát a létrejövő feszültségesések vektoros összege az U_1 feszültséggel egyenlő. U_{SZ2} és U_{RZ2} vektoros összege adja az U_{iZ} feszültséget. Ez a transzformátorban rövidzárársban indukált feszültség. Az ábrából látható, hogy ilyenkor az indukált feszültség kis értékű, kb. a primer feszültség fele. Kis értékű a transzformátor fluxusa is. Ez egyrészt azt jelenti, hogy rövidzárársban nem érvényes a fluxus állandóságának az elve, másrészt a kis fluxust egész kis gerjesztő áram képes létrehozni, mely a nagy I_z áram mellett elhanyagolható. Helyes volt tehát, hogy olyan helyettesítő kapcsolást választottunk a rövidzárási állapot vizsgálatára, melyben I_g , azaz az áthidaló ág nem is szerepel.

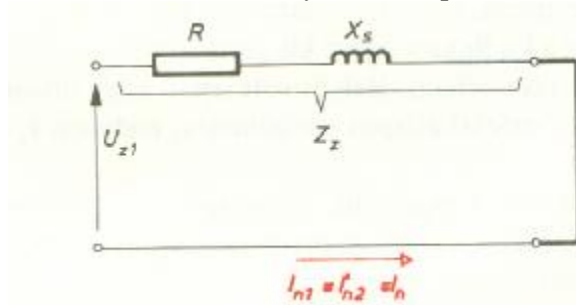
Még egyszerűbb vektorábrát kapunk, ha az egyszerűsített helyettesítő kapcsolást vesszük alapul. A transzformátorban létrejövő U_{RZ} és U_{SZ} feszültségesések összege az U_1 primer feszültség



Rövidzárási a) helyettesítő kapcsolás és b) vektorábra



Egyszerűsített rövidzárási a) helyettesítő kapcsolás és b) vektorábra



A rövidzárási mérés helyettesítő kapcsolása

Zárjuk rövidre egy transzformátor kisebb feszültségű oldalát. Kapcsoljunk a nagyobb feszültségű oldalra 0-tól folyamatosan növelhető feszültséget és azt növeljük addig, míg elérjük, hogy a transzformátoron éppen a névleges áram (I_n) folyik. (A nagyobb feszültségű oldalon I_{n1} , a kisebb feszültségűn I_{n2} .) Jelöljük ezt a feszültséget U_{z1} -gyel. Ez a transzformátor nagyobb feszültségű oldaláról mért névleges rövidzárási feszültsége. Tehát a névleges rövidzárási feszültség a rövidrezárt transzformátoron a névleges áramot hajtja át. A rövidzárási feszültség meghatározását rövidzárási mérésnek nevezzük.

A rövidrezárt transzformátor egyszerűsített helyettesítő kapcsolásában szereplő rezisztanciából és szórási reaktanciából kiszámítható a transzformátor úgynevezett rövidzárási impedanciája:

$$Z_z = \sqrt{R^2 + X_s^2}$$

Ennek felhasználásával $U_{z1} = I_{n1} Z_z$ vagy $I_{n1} = \frac{U_{z1}}{Z_z}$

A százalékokban megadott névleges rövidzárási feszültség (ϵ) azt mutatja meg, hogy a névleges rövidzárási feszültség hány százaléka a névleges feszültségnek.

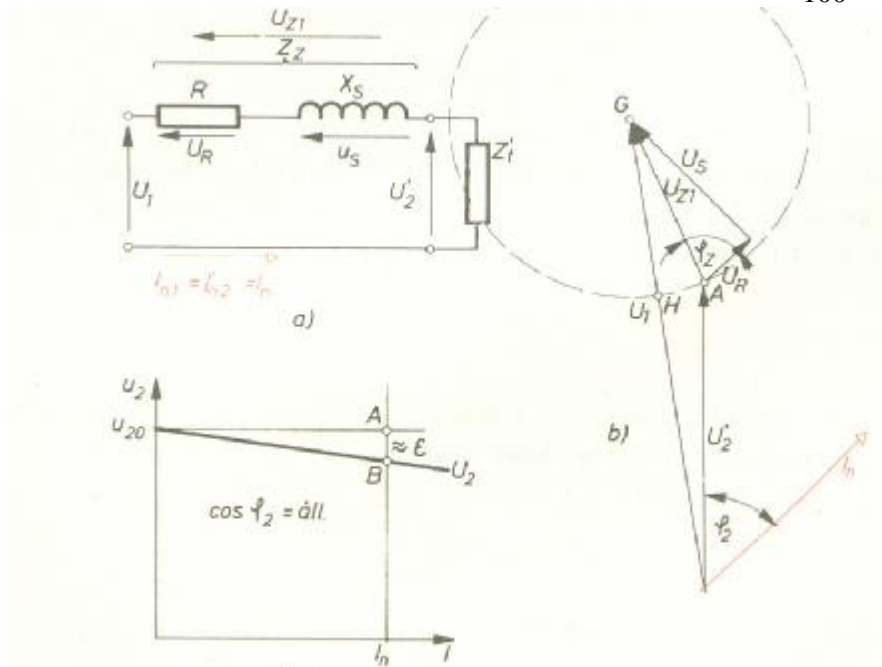
A névleges primer feszültséget U_{n1} -el jelölve:

$$\epsilon = \frac{U_{z1}}{U_{n1}} = \frac{U_{z1}}{U_{n1}} 100 \quad \text{azaz} \quad U_{z1} = \frac{\epsilon U_{n1}}{100}$$

A transzformátorok százalékban megadott névleges rövidzárási feszültsége 4,5...12%. (A nagyobb érték a nagy transzformátoroknál szokásos felső határt jelenti.)

Az ábrán egy terhelte transzformátor egyszerűsített kapcsolását és vektorábráját láthatjuk. Figyelembe vettük, hogy $Z_z = \sqrt{R^2 + X_s^2}$ és feltételeztük, hogy a transzformátort a névleges árammal terheljük. A Z_z -n létrejövő $I_{n1}Z_z$ feszültségesés, éppen az U_{z1} rövidzárási feszültséggel egyenlő. Az U_{z1} általában nem adja meg, hogy U_2 mennyivel különbözik U_1 -től, mert általában nem esnek egy vonalra. Mivel I_n fázishelyzete változhat, lehetséges olyan terhelés, amikor az A pont H-ba kerül. Ekkor kapjuk meg a névleges terhelésnél fellépő minimális U_2 illetve U_2 feszültséget. Az U_2 feszültség tehát névleges terhelésnél nem lehet kisebb mint

$$U_2' = U_1 - U_{z1} \quad \text{illetve} \quad U_2' = U_1 - \frac{\varepsilon U_{n1}}{100}$$



A transzformátor névleges terhelésének a) helyettesítő kapcsolása, b) vektorábrája, c) terhelési jelleggörbe

Ez azt jelenti, hogy a transzformátor szekunder feszültségének csökkenése függ a névleges rövidzárási feszültségtől. Nagyobb ε -ú transzformátor szekunder feszültsége a terhelés hatására jobban csökken.

A névleges rövidzárási feszültség meghatározható úgy is, hogy a nagyobb feszültségű oldalt zárjuk rövidre és a kisebb feszültségű oldalra kapcsolt feszültséget növeljük addig, míg elérjük, hogy a transzformátor tekercseiben a névleges áram folyik. Ezt a feszültséget U_{z2} -vel jelöljük. Természetesen

$$U_{z2} = \frac{U_{z1}}{a}$$

U_{z2} százalékos értéke az U_{n2} segítségével számítható ki:

$$\varepsilon = \frac{U_{z2}}{U_{n2}} \cdot 100.$$

Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

Ez a százalékos érték számszerűleg megegyezik a nagyobb feszültségű oldal felől mért adattal.

A rövidzárási áram. Kapcsoljuk a transzformátor primer oldalát névleges feszültségre és zárjuk rövidre a szekunder oldalt. Ilyenkor mind a primer, mind a szekunder oldalon a rövidzárási áram (I_{z1} illetve I_{z2}) folyik.

Az ... ábra alapján a primer oldali rövidzárási áram

$$I_{z1} = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + X_s^2}} = \frac{U_1}{Z_z}$$

A szekunder oldali: $I_{z2} = I_{z1}a$

Meghatározható a rövidzárási áram is. Az Z_z rövidzárási impedancián az U_{z1} rövidzárási feszültség az I_{n1} áramot hajtja át. Ugyanezen az impedancián az U_{n1} feszültség arányosan nagyobb áramot, az I_{z1} rövidzárási áramot indítja. Érvényes tehát a következő aránypár:

$$\frac{U_{n1}}{U_{z1}} = \frac{I_{z1}}{I_{n1}},$$

azaz ahányszor nagyobb a névleges feszültség a rövidzárási feszültségnél, annyiszor nagyobb a rövidzárási áram a névleges áramnál.

Az előbbi összefüggésből

$$I_{z1} = I_{n1} \frac{U_{n1}}{U_{z1}}$$

Figyelembe véve az összefüggést

$$I_{z1} = I_{n1} \frac{U_{n1}}{\frac{\epsilon U_{n1}}{100}}$$

Egyszerűsítve:

$$I_{z1} = I_{n1} \frac{100}{\epsilon}$$

A rövidzárási áram tehát a névleges áram $\frac{100}{\epsilon}$ - szorosa. 4,6.. .12 %-os névleges, rövidzárási feszültség esetén a rövidzárási áram kb. a névleges 22...9-szerese. A szekunder rövidzárási áram ugyanígy számítható

$$I_{z2} = I_{n2} \frac{100}{\epsilon}:$$

Hirtelen rövidzárási esetén az átmeneti rövidzárási csúcsáram az előzőekben kiszámított effektív áramnak kb. 2,5-szerese. Ez a csúcsáram fokozatosan csökken $\sqrt{2}I_{z1}$ illetve $\sqrt{2}I_{z2}$ - re.

A transzformátor tekercsvesztése a primer és szekunder áramokból, valamint a primer és szekunder tekercsek rezisztenciáiból számítható ki:

$$P_t = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$

Figyelembe véve, hogy a szekunder tekercsvesztés a redukált mennyiségekkel is kifejezhető, valamint azt, hogy $I_2' \approx I_1$:

Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

Villamos gépek tantárgy tételei

$$P_t = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_1^2 (R_1 + R_2) = I_1^2 R$$

Bármelyik összefüggést is tekintjük, megállapíthatjuk, hogy a tekercsveszteség az áram, azaz a terhelés négyzetével arányos. Névleges terhelésnél:

$$P_{tn} = I_{n1}^2 R_1 + I_{n2}^2 R_2 = I_{n1}^2 R$$

Más terheléseknél a tekercsveszteség számítására a névleges terhelésre megadott tekercsveszteséget számítjuk át négyzetesen.

Például 3/4 terhelésnél a tekercsveszteség $\frac{9}{16} P_{tn}$,

1/2 terhelésnél a tekercsveszteség $\frac{1}{4} P_{tn}$

1/4 terhelésnél a tekercsveszteség $\frac{1}{16} P_{tn}$

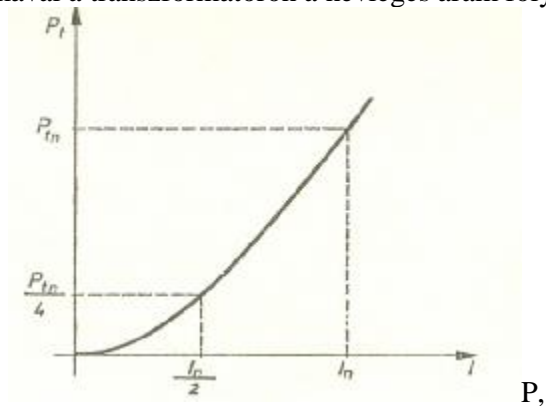
1/10 terhelésnél a tekercsveszteség $\frac{1}{100} P_{tn}$,

vagy 50 %-os terhelésnél a tekercsveszteség $0,5^2 P_{tn} = 0,25 P_{tn}$

32%-os terhelésnél a tekercsveszteség $0,32^2 P_{tn} = 0,102 P_{tn}$ stb.

Amint látjuk, a terhelés csökkenésével a tekercsveszteség rohamosan csökken. Változását a terhelő áram függvényében az ábra mutatja (másodfokú parabola).

A tekercsveszteség nemcsak kiszámítható, hanem meg is mérhető. Tudjuk már, hogy a rövidzárási mérés alkalmával a transzformátoron a névleges áram folyik, tehát benne éppen



A tekercsveszteség a terhelő áram függvényében

a névleges tekercsveszteség (P_{tn}) keletkezik. A vasveszteség ilyenkor nagyon kis érték, mert a kis rövidzárási feszültséggel még kisebb (kb. fele akkora) indukált feszültség tart egyensúlyt. Az ábra alapján ez belátható. A kis feszültség indukálásához a vasmagban csak kis fluxus, azaz kis mágneses indukció alakul ki. A korábbi összefüggések szerint a vasveszteség a mágneses indukció négyzetével arányos. Kis mágneses indukciónak a négyzete oly kicsi, hogy a vasveszteség elhanyagolható. Rövidzáráásban hasznosított teljesítmény nincs. Mindebből az derül ki, hogy a rövidzárási mérés alkalmával a transzformátor által felvett teljesítmény éppen a tekercsveszteség. Ezért ezt rövidzárási veszteségnek is szokás nevezni. A tekercsveszteség vagy rövidzárási veszteség tehát a rövidzárási méréskor wattmérővel megmérhető.

Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

14. tétel

Az egyszerűsített helyettesítő kapcsolási vázlat alapján vezesse le a transzformátor terheléstől függő feszültségváltozását meghatározó összefüggéseket! Milyen tényezőktől függ a feszültségváltozás mértéke?

A transzformátort terheljük, ha primer tekercsét a névleges primer feszültségre kapcsoljuk és a szekunder kapcsaira fogyasztót, azaz valamilyen impedanciát kapcsolunk, mely lehet tiszta rezisztencia, de általában induktív vagy kapacitív jellegű. Ilyenkor a szekunder indukált feszültség hatására a szekunder oldalon is áram indul meg ($I_2 \neq 0$ vagy $I_2' \neq 0$) és - mint azt már láttuk a transzformátor működési elvénél - a primer oldali áram is megnövekszik.

A transzformátor terhelését a helyettesítő kapcsolás alapján vizsgáljuk.

A feszültségeket a primer I_1 és a redukált szekunder I_2 áramok létesítik.

$$\begin{aligned} U_{S1} &= I_1 X_{S1} & U_{R1} &= I_1 R_1 \\ U_{S2} &= I_2' X_{S2} & U_{R2} &= I_2' R_2 \end{aligned}$$

A terhelési vektorábra alapján szemléletes képet kapunk arról hogyan változik a transzformátor U_2 szekunder feszültsége, ha az I_2 szekunder terhelő áramot változtatjuk.

A vektorábra felrajzolását a Φ főfluxus vektorral kezdjük. Ezzel van fázisban az üresjárási áram mágnesező (I_m) összetevője, ehhez képest siet 90° -ot a veszteségi (I_v) összetevő. E két összetevő eredője az üresjárási áram (I_g). A fluxushoz képest 90° -ot siet az U_i indukált feszültség. A helyettesítő kapcsolásban ez a feszültség az A és B pontok között jelentkezik és tulajdonképpen ez hajtja az I_2' áramot a terhelő impedancián és a transzformátor szekunder tekercsének ellenállásain át.

Az I_2' terhelő áram nagyságát és fázishelyzetét elsősorban a transzformátor terhelése (Z_t) szabja meg, de kis mértékben befolyásolják a szekunder tekercs ellenállásai is. I_2' vektorát tehát szabadon rajzolhatjuk meg, hiszen nem írtuk elő, hogy Z_t mekkora és milyen fázishelyzetű. I_2' t mégis célszerű úgy felvenni, hogy U_i -hez késsen, mert Z_t rendszerint induktív jellegű.

Az A pontra felírt csomóponti törvény szerint $I_1 = I_g + I_2'$.

Ez azt jelenti, hogy a primer I_1 áram a szekunder I_2' terhelőáram és az üresjárási áram vektoros összege. I_1 szerkesztése érdekében I_2' -t önmagával párhuzamosan annyira toljuk el, hogy kezdőpontja I_g végpontjához illeszkedjék. I_g kezdőpontja I_2' végpontja közé az I_1 primer áram megrajzolható.

A felvett körüljárási iránynak megfelelően írjuk fel a primer áramkörre a huroktörvényt és fejezzük ki belőle U_1 -et:

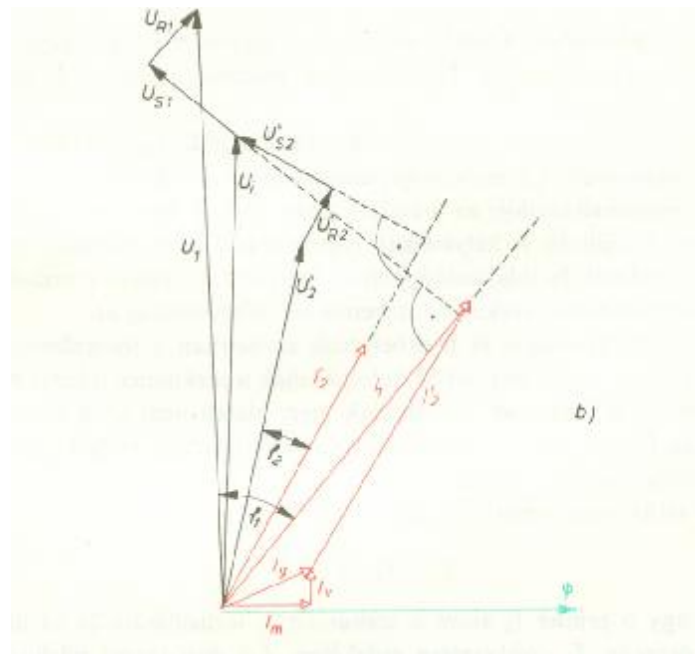
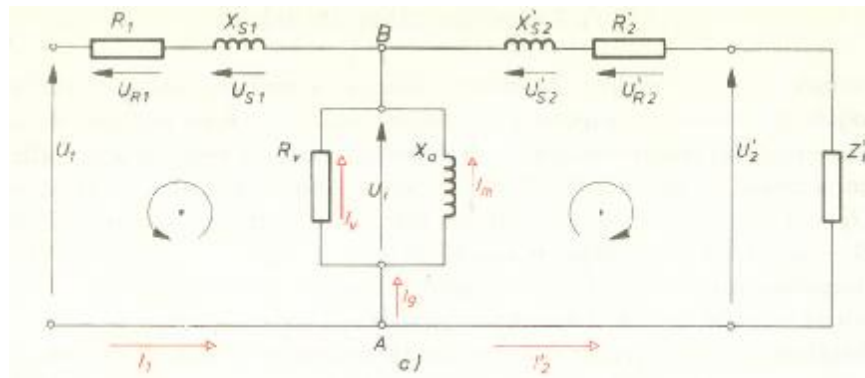
$$U_i + U_{S1} + U_{R1} - U_1 = 0 \quad \text{és} \quad U_1 = U_i + U_{S1} + U_{R1}.$$

U_1 tehát az indukált feszültség és a két primer feszültségesés összege. U_{S1} 90° -ot siet I_1 -hez képest, mert I_1 hozza létre induktív reaktancián. U_i végpontjához rajzoljuk folytonos nyíliránnyal. U_{R1} , fázisban van az I_1 árammal, mert az hozza létre rezisztencián. U_{S1} végpontjához rajzoljuk folytonos nyíliránnyal. Az eredő U_1 feszültséget azaz a primer oldalt tápláló hálózat feszültségét, U_i kezdőpontja és U_{R1} , végpont között kapjuk meg. Nyíliránya az előző feszültségek nyílfolyamával ütköző.

Írjuk fel a huroktörvényt a szekunder áramkörre is és fejezzük ki belőle U_2 -t:

$$U_i - U_{S2}' - U_{R2}' - U_2' = 0 \quad \text{és} \quad U_i = U_{S2}' + U_{R2}' + U_2'$$

Villamos gépek tantárgy tételei



Terhelési helyettesítő kapcsolás (a) és vektorábra (b)

U_i tehát a redukált szekunder feszültség és a két redukált szekunder feszültségesés vektoros összege. Figyeljük meg, hogy a primer áramkörben U_1 a szekunder áram körben viszont nem U_2 , hanem U_i az eredő feszültség, mert a primer áramot U_1 a szekunder áramot viszont U_i létesíti.

Az U_{S2} feszültségesés vektora I_2 -höz 90° -ot siet. U_i végpontjához rajzoljuk ütköző nyíliránnyal (a nyílirány azért ütköző, mert U_i az eredő feszültség). U_{R2} vektora I_2 -vel fázisban van. U_{S2} kezdőpontjához rajzoljuk folytonos nyíliránnyal. U_i kezdőpontja és U_{R2} kezdőpontja közé megrajzolható az U_2 redukált szekunder feszültség. Nyíliránya U_{R2} -vel folytonos.

Ugyanolyan vektorsokszöveget kaptunk a szekunder oldalra is, mint a primer oldalra. A primer oldalon U_i , U_{S1} ; és U_{R1} nyíliránya folytonos és ezek összege U_1 . A szekunder oldalon U_2 , U_{R2} U_{S2} alkot folytonos nyílirányt és ezek összege U_i .

A primer fázisszög φ_1 , U_1 és I_1 között mérhető. A szekunder φ_2 fázisszöget U_2 és I_2 között mérhetjük.

Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

A terhelést változtatva, változik I_2' nagysága és fázishelyzete. Ezzel együtt változik I_1 is. A vektorábrából látszik, hogy $I_1 \approx I_2'$ de nem lehet egymással pontosan egyenlő I_g miatt. $I_2' = \frac{I_2}{a}$ helyettesítésével és rendezéssel

$$\frac{I_1}{I_2'} \approx \frac{1}{a}$$

Ezt az összefüggést már láttuk a transzformátor működési elvénél is, de itt megállapíthatjuk, hogy az áramok hányadosa csak akkor lenne pontosan egyenlő az áttétel reciprokával, ha az üresjárási áram zérus lenne.

Az I_g annál inkább elhanyagolható, mennél nagyobb I_1 és I_2' .

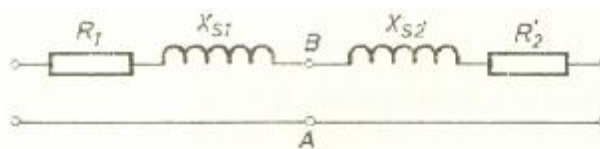
Ha I_2' és I_1 változik (pl. növekszik), akkor változik (növekszik) U_{R1} , U_{S1} , U_{S2}' és U_{R2}' is. Feltételezve, hogy a primer oldalt tápláló hálózat U_1 feszültsége állandó marad, U_i -nek és U_2' -nek kell megváltoznia (csökkennie). Már a transzformátor üresjárásánál említettük, hogy az vektorábra csak közelítés. Nemcsak az indukált feszültség tart egyensúlyt a transzformátor primer oldalára kapcsolt feszültségekkel, hanem az indukált feszültség és két feszültségesés. Ebből következik, hogy az indukált feszültség és vele együtt a Φ főfluxus nem pontosan állandó. Az vektorábra arányai torzítottak. A feszültségesések egyenként csak egy-két százaléka az U_i vagy U_2' feszültségeknek, tehát U_i vagy Φ változása is csak néhány százalékos lehet és ezért Φ és vele együtt a vasvesztés állandónak tekinthető.

Vizsgáljuk meg részletesebben, hogy üresjárásból indulva, milyen fizikai folyamat játszódik le a transzformátorban indukív jellegű terhelés növekedésekor! Üresjárásban van a transzformátor vasnagjában egy bizonyos fluxus. Ez létesíti az U_i feszültséget, az üresjárási áram létrehozza az U_{S1} és U_{R1} feszültségeséseket. Ezek tartanak egyensúlyt U_1 -gyel. A szekunder oldalt terhelve az I_2' áram olyan fluxust létesít, mely a Φ főfluxust csökkenti. Ezzel csökken az U_i indukált feszültség is, tehát U_{S1} és U_{R1} -nek növekedniük kell. Mivel ezek arányosak az I_1 árammal, csak úgy növekedhetnek, ha I_1 is növekszik. I_1 növekedésének csak részben kell kiegyensúlyoznia az I_2' áram főfluxust csökkentő hatását, mert a megnőtt U_{S1} és U_{R1} kisebb U_i esetén is biztosítja az U_1 kapocsfeszültséggel való egyensúlytartást. Végeredményben tehát a terhelés növekedésével a fluxusnak kis mértékben csökkennie kell, hogy létrejöhessen az az áram, mely a fluxust fenntartja.

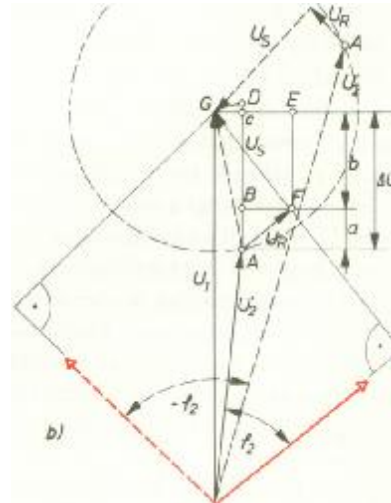
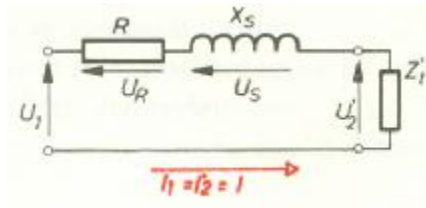
Ne tévesszük szem elől, hogy az ...ábrát redukált szekunder oldalú, tehát $a = 1$ áttételű transzformátorra rajzoltuk meg. Ha $a \neq 1$, akkor

$$U_2' = \frac{U_2}{a} \quad \text{és} \quad I_2 = I_2' a$$

A vektorábrából az is kitűnik, hogy ha U_1 állandó is, a terhelés változtatásával U_2' változni fog.



Az egyszerűsített helyettesítő kapcsolása származtatása



A transzformátor terhelésének a) egyszerűsített helyettesítő kapcsolása és b) egyszerűsített vektorábrája

Egyszerűsített helyettesítő kapcsolás és egyszerűsített vektorábra. Nagyobb terhelések esetén I_g elhanyagolható I_1 és I_2 mellett. Ha I_g elhanyagolható, akkor az áthidaló ágat kiemelhetjük és a transzformátort az ábra kapcsolásával helyettesíthetjük.

Ebben a kapcsolatban a rezisztenciák és induktív reaktanciák egyszerűen sorba vannak kötve, tehát külön-külön összegezhetők. Így kapjuk a transzformátor rezisztenciáját és szórási reaktanciáját:

$$R = R_1 + R_2 \quad \text{és} \quad X_S = X_{S1} + X_{S2}'$$

Ennek alapján rajzoltuk meg a transzformátor egyszerűsített helyettesítő kapcsolását. Ebbe az ábrába is berajzoltuk a Z_t' terhelő impedanciát.

Mivel nincs áthidaló ág, azon nem folyik áram, ezért $I_1 = I_2$. Ezt az áramot az I -vel jelöljük. Ez hozza létre az

$$U_R = IR \quad \text{és} \quad U_S = IX_S$$

feszültségeséseket. A transzformátor üresjárásban van, ha Z_t' -t a szekunder kapcsokról lekapcsoljuk. Ilyenkor nem folyik áram, nem jön létre a két feszültségesés, tehát a redukált szekunder feszültség megegyezik a primer feszültséggel. Ezt az üresjárásban jelentkező redukált szekunder feszültséget U_{20} -val jelöljük.

$$U_{20} = U_1$$

A terhelési vektorábra falrajzolásakor induljunk ki az U_2' feszültségből. Induktív terhelést feltételezve I késszen U_2' -höz képest φ_2 szöggel. U_R vektora I -vel fázisban van, U_S 90° -ot siet és mindkettő hozzáadódik U_2' -höz. Az eredő feszültség az U_1 primer feszültség, amely azonos U_{20} -val. Az üresjárási redukált szekunder feszültség tehát a terhelés hatására $U_1 = U_{20}$ -ról U_2 -re csökken. A csökkenés mértéke a transzformátor névleges terhelésekor sem több a feszültség 5. . 8 %-ánál, tehát a vektorábra arányai torzak.

A terheléstől függő feszültségváltozás. A feszültségcsökkenés (ΔU) nagyságát megkapjuk, ha U_1 vektorát U_2' hatásvonalába forgatjuk. A feszültségcsökkenés az AD távolság. Ezt a távolságot matematikailag meghatározni nehézkes. Nem követünk el nagy hibát, ha U_1 -et nem ráforgatjuk U_2' hatásvonalára, hanem U_1 végpontját csak merőlegesen U_2' hatásvonalára vetítjük. Ezzel $\Delta U = AC$.

Az F pontból húzzunk merőlegest U_2' hatásvonalára. A merőleges és a hatásvonal metszéspontja B . Az ABF derékszögű háromszög A -nál levő szöge φ_2 , mert az eredeti φ_2 -vel egyállású szög. Ennek alapján az $AB = a$ távolság:

Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

Villamos gépek tantárgy tételei

$$a = U_R \cos \varphi_2$$

Húzzunk az F pontból U_2' hatásvonalával párhuzamos egyenest. Ennek és az U_1 végpontját U_2' hatásvonalára vetítő egyenesnek metszéspontja az E pont. Az EFG derékszögű háromszög G-nél lévő szöge szintén φ_2 mert szárjai az eredeti φ_2 száraira merőlegesek. Ennek alapján az FE = b távolság

$$B = U_S \sin \varphi_2$$

Az ábra alapján $\Delta U = a + b$, tehát

$$\Delta U = U_R \cos \varphi_2 + U_S \sin \varphi_2$$

U_R és U_S helyettesítésével:

$$\Delta U = IR \cos \varphi_2 + IX_S \sin \varphi_2$$

Tiszta rezisztencia terhelésnél $\varphi_2 = 0$, $\sin \varphi_2 = 0$ és $\Delta U = IR \cos \varphi_2$

Ugyanígy számítható ΔU , ha φ_2 kicsi, azaz $\sin \varphi_2 \approx 0$. Az U_1 primer feszültség és ΔU ismeretében U_2' kiszámítható

$$U_2' = U_1 - \Delta U$$

Ebből a tényleges U_2 feszültség

$$U_2 = \frac{U_2'}{a}$$

Az ábra szemléletesen mutatja U_2' vagy U_2 változását a terhelés függvényében. Ha a terhelés változatlan φ_2 , fázisszög mellett nő vagy csökken, akkor U_S és U_R is nő vagy csökken, tehát U_2 kisebb vagy nagyobb lesz. Üresjárásban U_2 eléri U_1 értékét. Ha változatlan I áramerősség mellett φ_2 változik, akkor U_S és U_R is elfordul, hiszen U_S mindig merőleges I -re, U_R pedig párhuzamos I -vel. Tulajdonképpen az AFC háromszög fordul el úgy, hogy AF oldala párhuzamos maradjon I -vel. Ez azt jelenti, hogy az A pont olyan körön mozog, melynek G a középpontja. A szaggatott vonallal megrajzolt kör alapján megállapíthatjuk, hogy előfordulhat olyan fázisszögű terhelés, amelynél $U_2 > U_1$, tehát a szekunder feszültség nem üresjárás értéke alá csökken, hanem megnövekszik. A szaggatott vonallal rajzolt vektorábra szerint ez elég nagy fázisszögű kapacitív terhelésnél fordulhat elő.

Kapacitív terhelésnél φ_2 előjele negatívra változik. Ettől $IR \cos \varphi_2$, előjele nem változik, de $IX_S \sin \varphi_2$ előjele negatív lesz. Ez azt jelenti, hogy kapacitív terhelésnél

$$\Delta U = IR \cos \varphi_2 - IX_S \sin \varphi_2,$$

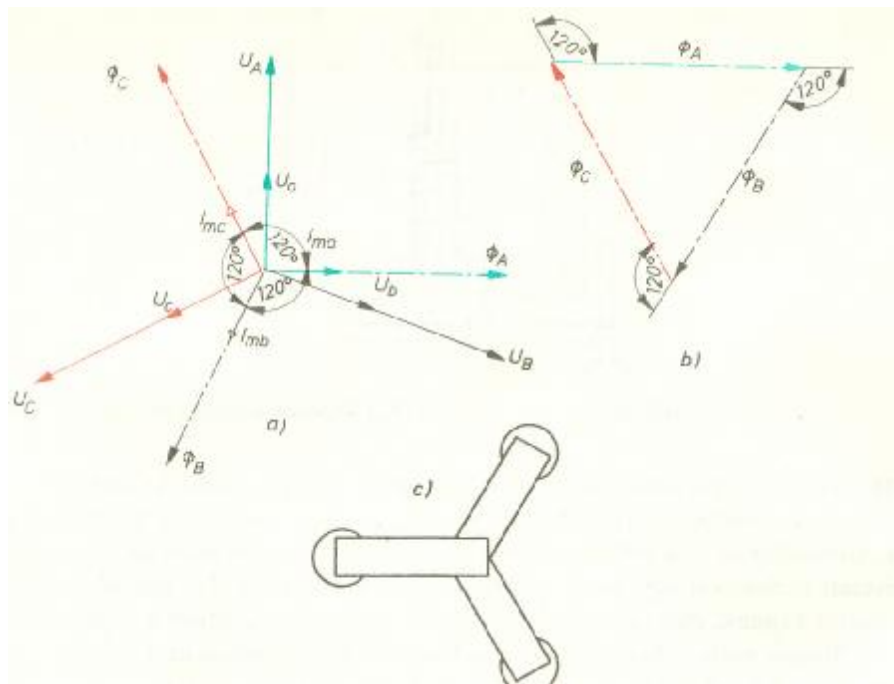
Ha a φ_2 fázisszög elég nagy, azaz nagy a terhelés kapacitív összetevője, ΔU előjele negatív, ami azt jelenti, hogy a szekunder feszültség terhelés hatására nem csökken, hanem növekszik.

Nagy kapacitív összetevőjű terhelést jelent például egy üresen járó kábel vagy a fázisjavító kondenzátorok, ha azokat más terhelés nélkül kapcsolják a transzformátorra. Az ilyenkor fellépő feszültségnövekedés fokozza a transzformátor szigetelésének igénybevételét.

6. tétel

Ismertesse a háromfázisú transzformátorok szerkezetét, a tekercsek elkötésének változatait és a fázisforgatást! Milyen transzformátorok kapcsolhatók párhuzamosan? Hogyan oszlik meg a teljesítmény a párhuzamosan kapcsolt transzformátorok között?

Három fázis feszültségeinek megváltoztatására felhasználhatunk 3 db egyfázisú transzformátort. A nagyobb feszültségű tekercsek A, B és C jelzésű kezdeteit rendre a nagyobb feszültségű hálózat L1, L2 és L3 fázisaival kötjük össze. A három tekercs végeit egy közös pontba, az úgynevezett csillagpontba kötjük. Ha a nagyobb feszültségű hálózatnak van nulla vezetője, akkor ez a csillagpont a nulla vezetővel összeköthető (szaggatott vonal). Így a három nagyobb feszültségű tekercsre az U_A , U_B és U_C fázis feszültségeket kapcsoltuk. A kisebb feszültségű tekercsek U_a , U_b és U_c feszültségei



A háromfázisú transzformátor származtatása: a) vektorábra, b) a fluxusok összegzése, c) a vasmagok egyesítése

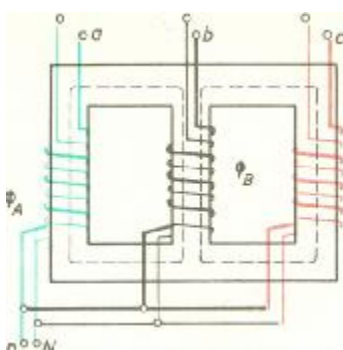
a nagyobb feszültségekkel közel fázisban vannak. A vektorábrát - az egyszerűség kedvéért - így is rajzoltuk meg. Ha a kisebb feszültségű tekercsek a, b és c kezdeteit a kisebb feszültségű hálózat L1, L2 és L3 fázisaival kötjük össze, a végeket pedig csillagpontba kötjük, akkor az U_a , U_b és U_c kisebb feszültségek a kisebb feszültségű hálózat fázis feszültségei lesznek. Ha ennek a hálózatnak van nulla vezetője, akkor a kisebb feszültségű csillagpont azzal összeköthető (szaggatott vonal).

Három egyfázisú transzformátor alkalmazása általában nem gazdaságos. A következő gondolatmenet alapján a háromfázisú transzformátort egy egységben lehet megépíteni.

Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

Az vektorábrába a feszültségeken kívül megrajzoltuk a három egyfázisú: transzformátor I_{mA} , I_{mB} és I_{mC} mágnesező áramait valamint a három vastestben e mágnesező áramok által létesített Φ_A , Φ_B és Φ_C fluxusokat. A mágnesező áramok és fluxusok az egyes transzformátorok nagy és kis feszültségeihez képest rendre közel 90° -ot késnek. Ez azt jelenti, hogy a három azonos felépítésű transzformátorban fellépő három azonos nagyságú fluxus vektora egymással ugyanúgy 120° -os szöget zár be, mint a feszültségeik. Összegezzük ezeket a fluxus vektorokat! Az ábra, szerint összegük zérus! Ezt a tényt használjuk; fel a továbbiakban.

Helyezzük el a három egyfázisú transzformátort úgy, hogy azok az oszlopok, amelyeken nincs tekercs, egy függőlegesbe essenek. Gondolatban - a valóságban ez már lehetetlen - toljuk össze az egy egyenesbe helyezett oszlopokat úgy, hogy a három oszlop egybe essen. Így egy négy oszlopos alakzatot kapunk, melynek középső oszlopán nincs tekercs. Mivel a középső oszlop eredő fluxusa nulla, elhagyható és a megmaradt három oszlop az ábra szerint egy síkban helyezhető el.



Háromfázisú csillag/csillag (Yy) kapcsolású transzformátor

A három oszlopon lévő tekercs mágnesező árama általában nem azonos, az üresjárású áramok nem szimmetrikusak. A középső oszlopon lévő tekercs üresjárású árama kisebb, mert a középső tekercs mágneses köre rövidebb. Ennek fluxusa a két szélső oszlopon át záródik, míg egy szélső tekercs fluxusának a túlsó szélső oszlopon át is záródnia kell.

Az ábrán a tekercseket már a szokásos elrendezéshez hasonlóan rajzoltuk meg. Különbözően a tekercsek nemcsak csillagba, hanem háromszögbe és zeg-zug kapcsolásba is köthetők, de erről részletesen majd a későbbiekben lesz szó.

Igen nagy teljesítményű háromfázisú transzformátorokat a szállíthatóság miatt három egyfázisú egységből állítanak össze. Ennek a megoldásnak az is előnye, hogy egyetlen egyfázisú egységgel a tartalék is megoldható. Nem két háromfázisú transzformátorra van szükség (egy üzemi transzformátor és egy tartalék transzformátor), hanem csak 4 db egyfázisú egységre.

Tudjuk, hogy a transzformátorok kisebb feszültségeinek fázishelyezete különböző lehet. Bonyolítja a helyzetet, hogy ugyanaz a három tekercs két féle módon köthető csillagba (csillagpont lent vagy fent), négy féle módon háromszögbe (a tekercsek összekötő vezetékai dőlhetnek jobbra vagy balra és mindkét esetben lehetnek a hozzávezetések a tekercsek felső vagy alsó végén) és végül a háromszor két tekercs szintén négy féle módon köthető zeg-zugba (az összekötő vezeték itt is jobbra vagy balra dőlhetnek és a hozzávezetések is lehetnek fent vagy lent).

E sok féle változat miatt a transzformátorok kapcsolásait szabványosítani kellett. A nagyobb feszültségű oldalt N oldalnak, a kisebb feszültségűt k oldalnak nevezzük. A csoportosítás a k oldal feszültségeinek fázishelyezete alapján történik.

Vizsgáljunk meg először egy egyfázisú transzformátort. N oldali alsó kapcsát E-vel, a felsőt F-fel jelöljük. A k oldali kapcsokat ugyanilyen sorrendben jelöljük e-vel és f-fel. Ha az
Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

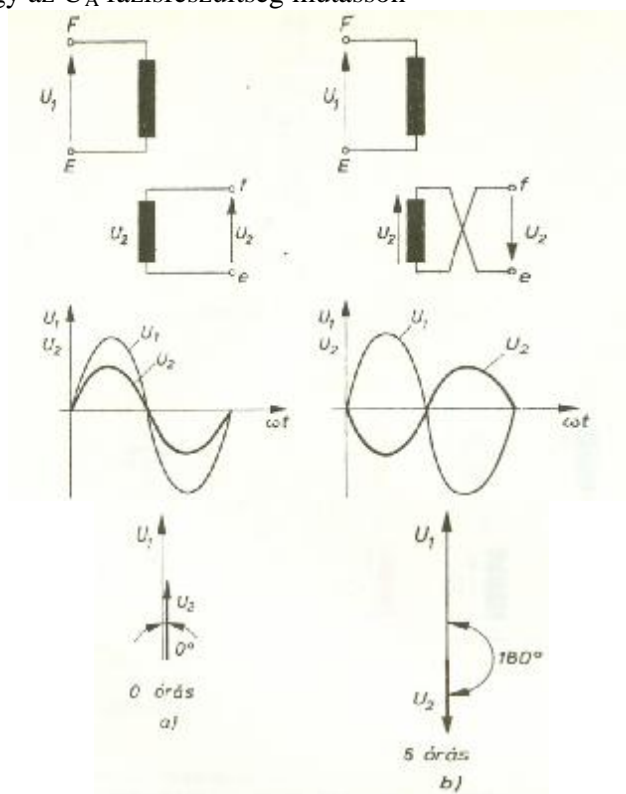
U_1 nagyobb feszültség vonatkozási iránya E-től F- felé, tehát felfelé mutat, akkor az U_2 kisebb feszültség is a tekercsben felfelé mutató lesz.

Az ábrán a kisebb feszültségű tekercs alsó kivezetését kötöttük az e kapcshoz, felső kivezetését az f-hez, így az U_2 feszültség nem csak a tekercsben, hanem a kapcsok között is felfelé, e-től f felé mutat. U_1 és U_2 tehát fázisban van, az N és k oldal fáziseltolása 0° . Ezt szemléltetjük az ábrán szinusz görbékkel és vektorábrával.

A b ábrán a kisebb feszültségű tekercs kivezetéseit felcseréltük az a ábrához képest. Felső kivezetését kötöttük e-hez és az alsót az f-hez. A tekercsben változatlanul felfelé mutató U_2 feszültség a kapcsok között lefelé, f-től e-felé mutat. U_1 és U_2 ellenfázisba kerül, a fáziseltolás, azaz a fázisfordítás szöge 180° . Ezt rajzoltuk meg szinuszgörbékkel és vektorábrával is.

Az a és b ábrák vektorábrái olyanok, mint egy óra két mutatója, a nagyobb feszültségű vektor a nagy mutató, a kisebb feszültségű a kis mutató. Ezért az a ábra transzformátorát 0 órásnak, a b ábráét 6 órásnak nevezzük. Egyfázisú transzformátor csak 0 vagy 6 órás lehet. Három fázis esetén azonban -mint a későbbiekben látni fogjuk bármilyen órászámú transzformátor megvalósítható, tehát az U_2 feszültség fázishelyzete U_1 -hez képest 30° -onként változhat- Az U_1 vektort mindig az óra 12-es számára mutatón rajzoljuk. Az ábra egy 5 órás transzformátor vektorábrája az óra számlapjára helyezve. A fázisfordítás szöge $5 \times 30^\circ$ - azaz 150° .

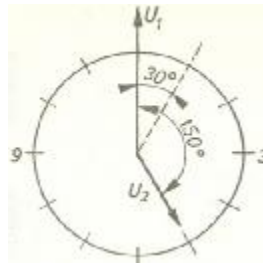
Csillag/csillag kapcsolású transzformátor. Az N és k oldalon a hozzávezetések egyformán fent, a csillagpontok lent vannak. A feszültségek vonatkozási irányait megrajzolhatjuk akár a csillagpontból kifelé mutatón, akár a csillagpont felé mutatón. Célszerűbb azonban az ábra szerinti kifelé mutató vonatkozási irányokat felvenni, mert ellenkező esetben a csillag kapcsolás vektorábráját is -szokatlan módon, a középpont felé mutató nyílrányokkal kellene megrajzolni. A vonatkozási irányok megrajzolása után rajzoljuk meg a nagyfeszültségű oldal vektorábráját úgy, hogy az U_A fázisfeszültség mutasson



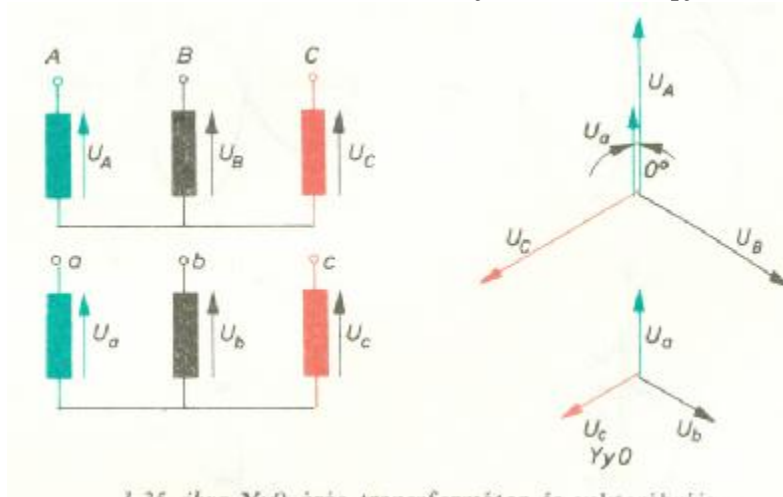
Egyfázisú a) 0 órás és b) 6 órás transzformátor

Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

felfelé - azaz az óra számlapjának 12-es számára - és természetesen vegyük figyelembe, hogy U_B és U_C késik U_A -hoz képest 120, ill. 240°-ot. (Ne feledjük: a vektorábra forgásiránya az óra járásával ellentétes.) A kisműködésű oldal fázisfeszültségeinek vonatkozási irányai a nagyfeszültségek vonatkozási irányjaival megegyeznek. Ez azt jelenti, hogy a kisműködésű vektorábrában U_a , U_b és U_c vektorai rendre fázisban vannak az U_A , U_B és U_C nagyfeszültségek vektorokkal. U_a tehát szintén 12 órára mutat, akárcsak U_A . A szemléletesség kedvéért akár át is helyezhetjük U_a -t a nagyfeszültségek vektorábrába. Mindkét azonos elnevezése (A és a) fázisvektor tehát azonos irányba mutat (12 órára), ezért a transzformátor 0 óras. Az N és k oldalak közötti fázisszög 0°. A kapcsolási jele Yy0. Az első nagy betű az N oldal kapcsolását, a második kis betű a k oldal kapcsolását jelenti. E két betűt követő óraszámot 30°-kal megszorozva kapjuk a fázisfordítás szögét. A k oldalon kivezetett csillagpont esetén a szabványos jel: Yy0.



5 óras transzformátor vektorábrája az óra számlapján



Yy0 óras transzformátor és vektorábrája

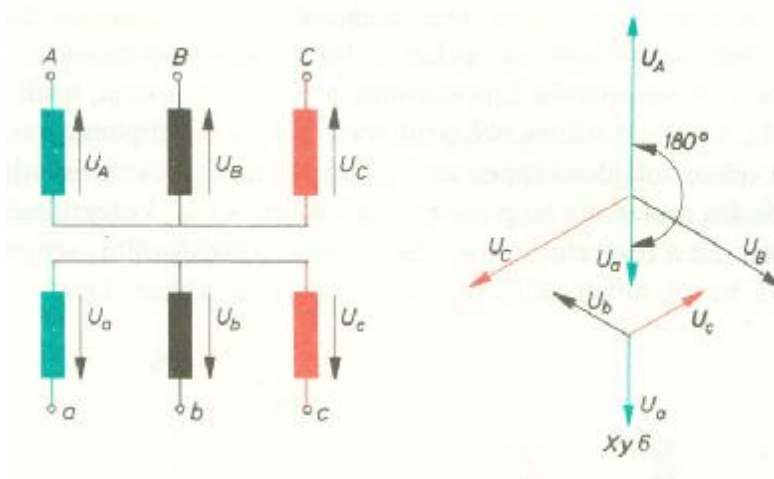
Csillag/csillag kapcsolású transzformátor, de itt a kisműködésű oldal minden fázistekercsének kezdetét és végét a korábbi ábrához képest felcseréltük. Ezért kerültek a kisműködésű oldalon a kapcsok alulra és a csillagpont felülre. A fázisfeszültségek vonatkozási irányait az N és k oldalon most is a csillagpontból kifelé mutatón vettük fel. Ez azt jelenti, hogy az N és k oldal vonatkozási irányai ellentétesek, tehát a vektorábrában U_a , U_b és U_c rendre ellenfázisban van U_A , U_B és U_C -vel. A nagyfeszültségek vektorábrát most is úgy rajzoltuk meg, hogy U_A a 12 órára mutasson. Láthatjuk, hogy U_a vízszint 6 órára mutat. Ez a transzformátor tehát 6 óras, a fázisfordítás szöge 180°. Kapcsolási jele: Yy6.

Az eddig tárgyalt egy- és háromfázisú transzformátorok alapján megállapíthatjuk, hogy azonos oszlopon lévő két tekercsben a feszültségek egymáshoz viszonyítva csak fázisban vagy ellenfázisban lehetnek.

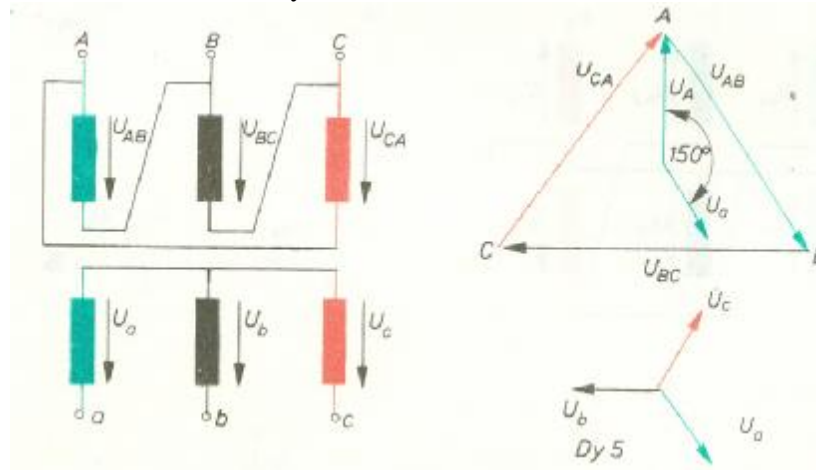
Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

Villamos gépek tantárgy tételei

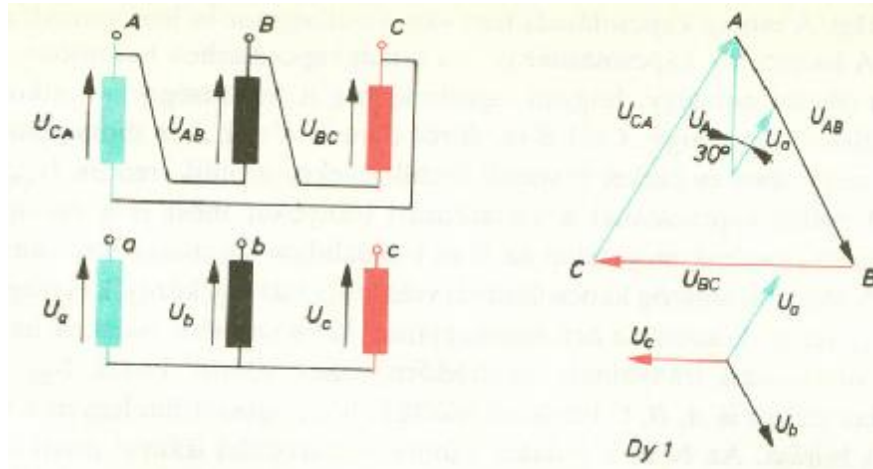
Háromszög/csillag kapcsolású transzformátor. A háromszög kapcsolás ún. „jobbra dőlő” (a tekercseket összekötő vezetékek jobbra dőlnek) felső hozzávetésekkel. A csillag kapcsolásnál fent van a csillagpont és lent vannak a hozzávetések. A háromszög kapcsolásnál is-a csillagkapcsoláshoz hasonlóan - tulajdonképpen teljesen mindegy, hogyan rajzoljuk meg a feszültségek vonatkozási irányait, de célszerű úgy, hogy A-ról B-re, B-ről C-re és C-ről A-ra mutassanak, tehát A, B és C sorrendben és ezeket a vonali feszültségeket jelöljük rendre U_{AB} , U_{BC} és U_{CA} -val. A csillag kapcsolásnál a vonatkozási irányokat most is a csillagpontból kifelé mutatón rajzoltuk meg, tehát az N és k oldalakon a vonatkozási irányok azonosak. Az N oldal háromszög kapcsolásánál vektorábráját úgy kezdjük el megrajzolni, hogy az U_{AB} vektor kezdete az óra számlapjának 12-es számára essen. A háromszög kapcsolás vonatkozási irányainak megfelelően ehhez adódik hozzá U_{BC} és U_{CA} . A vektorábra sarkait is A, B, C betűkkel jelöltük, hogy egyszerűbb legyen a vektorok jelöléseinek beírása. Az N és k oldalak azonos vonatkozási irányai miatt a k oldal U_a , U_b és U_c fázisfeszültségei fázisban vannak az N oldal U_{AB} , U_{BC} és U_{CA} vonali feszültségeivel. A transzformátorok óra-



Yy 6 órás transzformátor

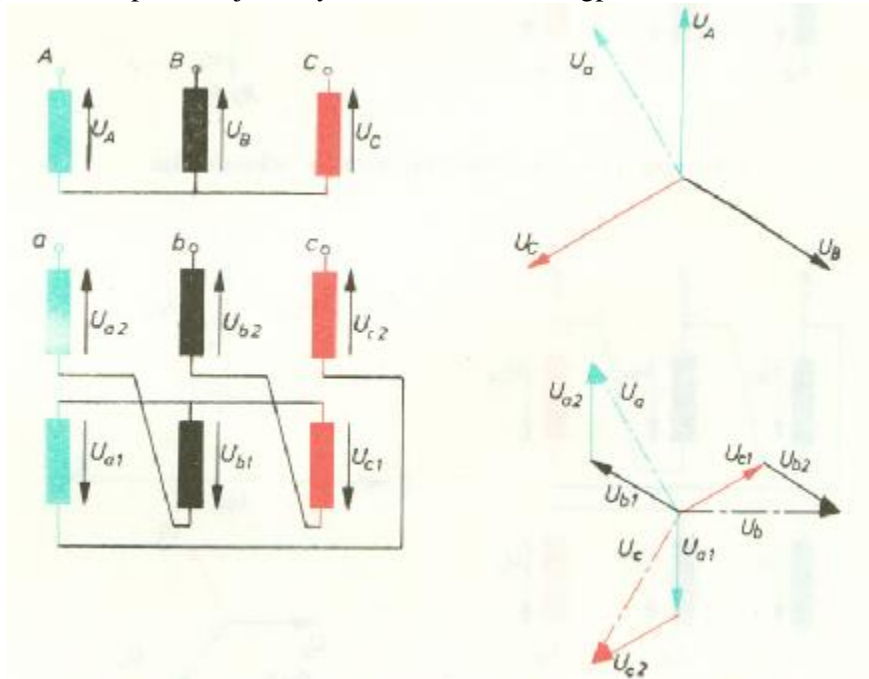


Dy 5 órás transzformátor



Dy1 órás transzformátor és vektorábrája

számának megállapításánál fázisfeszültség vektorokat kell összehasonlítani még akkor is, ha az adott kapcsolásban fázisfeszültség nem is mérhető. A háromszög kapcsolásnak nincs csillagpontja, tehát fázisfeszültség nem mérhető, de a vektorábra súlypontjából az U_{AB} kezdőpontjához, tehát az A ponthoz húzott vektor tulajdonképpen az U_A fázisfeszültség vektor és láthatjuk, hogy az óra 12-es számára mutatva a nagymutatót jelképezi. Az U_a kisfeszültségű fázisvektor 5 órára mutat. Ez a transzformátor tehát 5 órás, a fázisfordítás szöge 150° . Kapcsolási jele: Dy5, ha a k oldali csillagpont ki van vezetve, akkor: Dy₀5.



Yz11 órás transzformátor és vektorábrája

Állapítsuk meg, hogy mennyi a fázisfordítás szöge a feltüntetett háromszög/csillag kapcsolású transzformátornak. Tartsuk be itt is azt a rendszert, amit már az előző ábránál követtünk: a háromszög kapcsolásban a feszültségek vonatkozási irányai mutassanak A-ról B-re, B-ről C-re és C-ről A-ra. Ezen az ábrán - a balra dőlő háromszög kapcsolás miatt - az U_{AB}

Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

feszültség nem a bal oldali tekercsen mutat lefelé, mint az előző ábrán, hanem a középső tekercsen felfelé. A nagyobb feszültségű vektorábra változatlan, mert A, B és C sarkait ugyanúgy jelöltük. A kisebb feszültségek vonatkozási irányai a nagyobb feszültségekkel egyirányúak, tehát U_a , U_b és U_c rendre fázisban van U_{CA} , U_{AB} és U_{BC} -vel. U_a segítségével megállapíthatjuk, hogy ez a transzformátor 1 órás, a fázisfordítás szöge tehát 30° . Szabványos jele: Dyl.

Csillag/zeg-zug kapcsolású transzformátor.

Az eddigiek szerint a feszültségek vonatkozási irányait a csillagpontból kifelé mutatón vesszük fel. Ez azt eredményezi, hogy a kisebb feszültségű oldalon az U_{a1} , U_{b1} és U_{c1} feszültségek vonatkozási irányai lefelé, az U_{a2} , U_{b2} és U_{c2} feszültségeké viszont felfelé mutatnak. U_A , U_B és U_C vonatkozási irányai felfelé mutatóak, tehát U_{a1} , U_{b1} és U_{c1} rendre ellenfázisban, U_{a2} , U_{b2} és U_{c2} viszont rendre fázisban van U_A , U_B és U_C vet. Az N oldal vektorábrájának megrajzolása után a k oldal vektorábrájából először csak a csillagponthoz közelebb eső (1-es jelzésű) feszültségek vektorait rajzoljuk meg (figyelembe véve természetesen, hogy ezek a nagyobb feszültségekkel ellenfázisban vannak). Ezután U_{a1} -hez a zeg-zug kapcsolat bekötési rajzának megfelelően - adjuk hozzá U_{c2} -t (vigyázva arra, hogy U_{c2} fázisban van U-vel). U_{a1} és U_{c2} eredője lesz az U_c fázisfeszültség. U_{b1} -hez az U_{a2} -t kell hozzáadnunk, az eredő U_a és végül az U_b eredőt az U_{c1} és U_{b2} összege adja. U_A és U_a fázishelyzeteit összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy ez a transzformátor 11 órás, a fázisfordítás szöge tehát 330° vagy -30° . Szabványos jele: Yzll vagy Yz_o11.

Ez ismert összefüggés: párhuzamos kapcsolásban a kisebb impedancián nagyobb, a nagyobb impedancián kisebb áram folyik.

Transzformátorok párhuzamos kapcsolása és párhuzamos üzeme

Két vagy: több transzformátor akkor üzemel párhuzamosan, ha mind a primer, mind a szekunder kapcsikat külön-külön azonos gyűjtősínre kapcsoljuk. Két egyfázisú transzformátor párhuzamos üzemét mutatják az ábrák. A b ábra szekunder oldalán a nulla vezetőt szaggatott vonallal rajzoltuk meg, mert lehetséges párhuzamos üzem nulla vezető nélkül is.

Transzformátorok párhuzamos kapcsolására két esetben van szükség:

1. Ha egy transzformátor teljesítményénél nagyobb teljesítményt kell a primer oldalról a szekunder oldalra átvinni.

2. Ha karbantartás vagy javítás miatt egyik transzformátor helyett másikat kell bekapcsolni, de úgy, hogy a fogyasztónál ne legyen feszültség kimaradás. Ilyenkor az első transzformátorral párhuzamosan kapcsoljuk a másodikat, majd az elsőt kikapcsoljuk.

A transzformátorok tartós párhuzamos üzemeltetésének két alapfeltétele van:

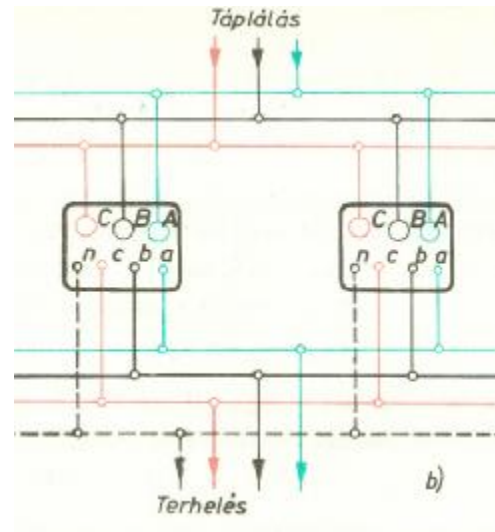
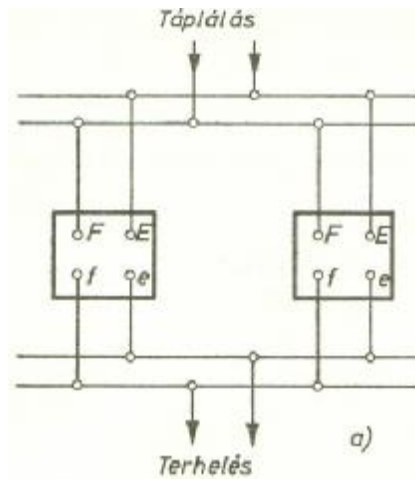
1. A párhuzamosan kapcsolt transzformátorok között ne folyjon kiegyenlítő áram.

2. A transzformátorok névleges teljesítményeik arányában terhelődjenek.

Vizsgáljuk meg, hogy milyen részfeltételekkel lehet kielégíteni az 1. alapfeltételt! Tartsuk szem előtt az ábrát, amely két párhuzamosan kapcsolt egyfázisú transzformátort mutat. Az ábra úgy is felfogható, hogy azon két háromfázisú transzformátor egy-egy fázisa látható. U_{2I} és U_{2II} a két transzformátor szekunder feszültsége. Szaggatott vonallal jelöltük az I_{2k} szekunder oldali kiegyenlítő áram útját. A Z impedanciába vontuk össze a kiegyenlítő áram útjában lévő összes impedanciákat. Ezen $I_{2k}Z$ feszültségesés jön létre. A vektoros huroktörvény:

$$U_{2I} - I_{2k}Z + U_{2II} = 0$$

Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.



Ebből a kiegyenlítő áram:

$$I_{2k} = \frac{U_{2I} - U_{2II}}{Z}$$

Akkor nem folyik kiegyenlítő áram, ha $U_{2I} = U_{2II}$

A vektoros egyenlőség mindig azt jelenti, hogy a vektorok nagysága és fázishelyzete is azonos. Párhuzamosan járó transzformátorok szekunder feszültségeinek nagysága akkor azonos, ha azonos a transzformátorok áttétele. A feszültségek akkor vannak fázisban, ha azonos a transzformátorok fázisfordítási szöge és a kivezetéseket azonos sorrendben kötjük a hálózatokhoz (a fázisokat nem cseréljük össze).

Tehát a párhuzamos kapcsolás 1. alapfeltétele a következő három részfeltétellel elégíthető ki:

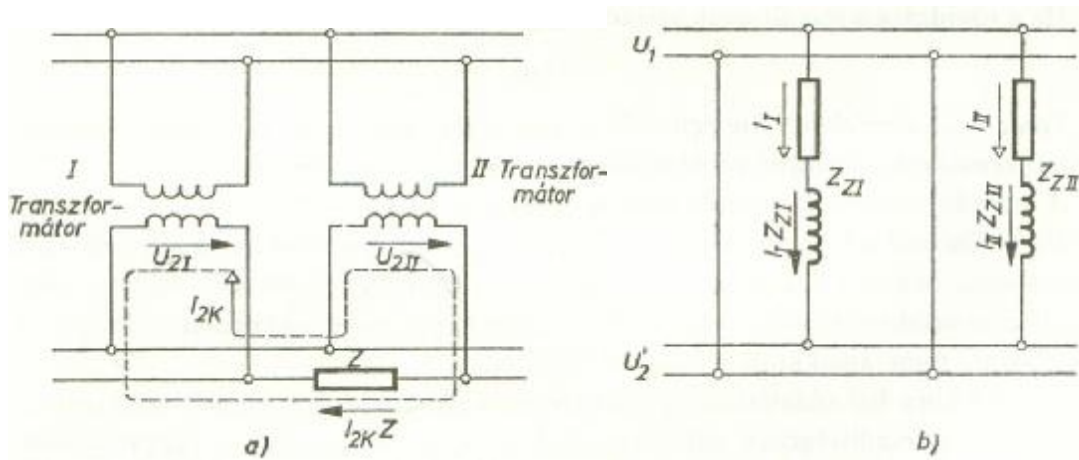
- Azonos áttétel
- Azonos fázisfordítási szög
- Azonos fázissorrend.

A szabvány szerint az áttételek között különbség maximálisan $\pm 0,5\%$ lehet. Vizsgáljuk meg részletesebben a 2. alapfeltételt. Tartsuk szem előtt az ábrát, mely a két párhuzamosan kapcsolt transzformátor egyszerűsített helyettesítő kapcsolását mutatja. Az I_I és I_{II} áramok a Z_{zI} és Z_{zII} rövidzárási impedanciákon azonos feszültségeséseket hoznak létre, hiszen a szekunder hálózaton csak egyféle U_2 feszültség lehetséges, tehát

$$I_I Z_I = I_{II} Z_{II}$$

Ebből

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{Z_{zII}}{Z_{zI}}$$



Párhuzamosan kapcsolt transzformátorok a) kiegyenlítő árama, b) helyettesítő kapcsolása

Ez ismert összefüggés: párhuzamos kapcsolásban a kisebb impedancián nagyobb, a nagyobb impedancián kisebb áram folyik.

Az a követelmény, hogy a transzformátorok névleges teljesítményeik arányában terhelődjenek, tehát az I_I/I_{II} arány egyenlő kell legyen a névleges áramok I_{nI}/I_{nII} arányával:

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{Z_{zII}}{Z_{zI}} = \frac{I_{nI}}{I_{nII}}$$

Ez ismert összefüggés: párhuzamos kapcsolásban a kisebb impedancián nagyobb, a nagyobb impedancián kisebb áram folyik.

Az a követelmény, hogy a transzformátorok névleges teljesítményeik arányában terhelődjenek, tehát az I_I/I_{II} arány egyenlő kell legyen a névleges áramok I_{nI}/I_{nII} arányával:

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{Z_{zII}}{Z_{zI}} = \frac{I_{nI}}{I_{nII}}$$

A második egyenlőség felhasználásával: $I_{nI} Z_{zI} = I_{nII} Z_{zII}$

A névleges áramok és a rövidzárási impedanciák szorzatai viszont a transzformátorok rövidzárási feszültségei, tehát $U_{zI} = U_{zII}$

Ha a rövidzárási feszültségek azonosak, akkor azok százalékos értékei is azonosak:

$$\varepsilon_I = \varepsilon_{II}$$

Tehát a 2. alapfeltétel kielégítéséhez az szükséges, hogy a párhuzamosan kapcsolt transzformátorok névleges rövidzárási feszültségei azonosak legyenek.

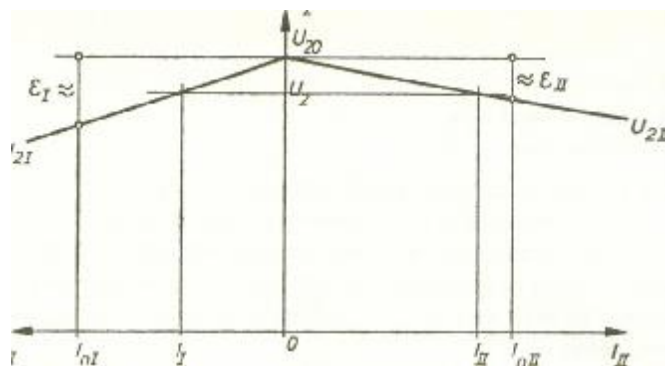
A szabvány szerint az eltérés nem lehet nagyobb, mint $\pm 10\%$.

Ha különböző névleges rövidzárási feszültségű transzformátorokat kapcsolunk párhuzamosan, akkor a kisebb névleges rövidzárási feszültségű terhelődik jobban, mert ennél a transzformátornál csak nagyobb áram képes ugyanakkora feszültségesést létrehozni, mint amekkora a másikon létrejön.

Az bal oldalán az ε_I százalékos névleges rövidzárási feszültségű transzformátor U_2 feszültségének változását rajzoltuk meg a ferhelő áram függvényében. Ugyanezt' rajzoltuk meg az ábra jobb oldalán is az ε_{II} , százalékos névleges rövidzárási feszültségű transzformátorra vonatkozóan. Ha a transzformátorok párhuzamosan járnak, akkor mindkettő
Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

Villamos gépek tantárgy tételei

U_2 feszültsége azonos. Az U_2 -nél húzott vízszintes kimetszi a két jelleggörbéből az I_I és I_{II} terhelő áramokat. Az ábra szemléletesen mutatja, hogy valóban a kisebb ε -ú transzformátor terhelődik jobban



Párhuzamosan kapcsolt transzformátorok terhelés-eloszlása

25. tétel

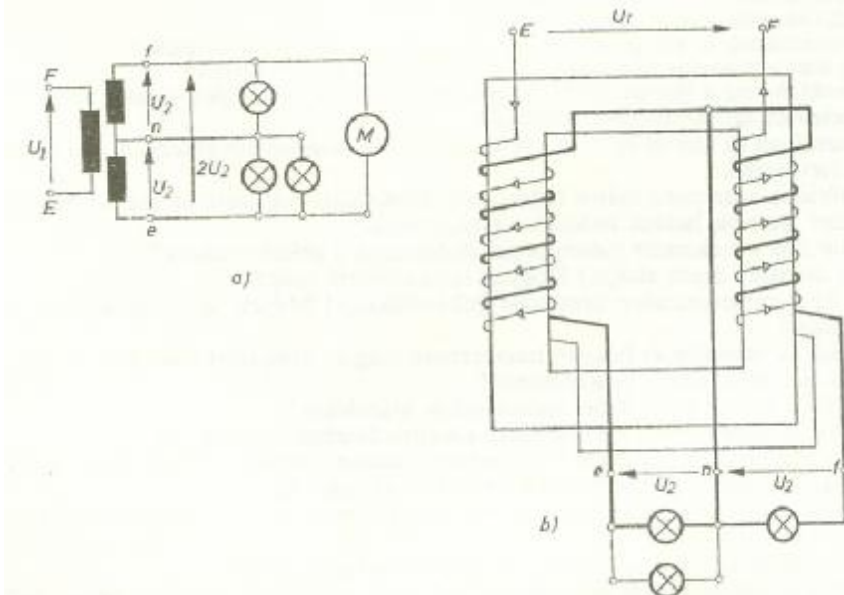
Milyen következményekkel jár a transzformátorok üzemi jellemzőire az egyenlőtlen terhelés? Milyen kialakításúak az aszimmetrikusan is terhelhető egy- és háromfázisú transzformátorok?

Egyfázisú nullavezetős transzformátor egyenlőtlen terhelése

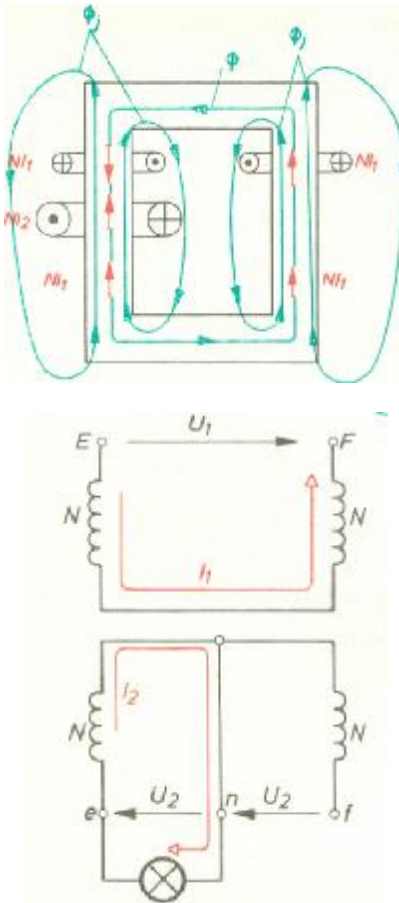
Egyfázisú háromvezetős hálózatok táplálására egyfázisú nullavezetős transzformátorokat alkalmazunk. Ezek primer és szekunder tekercsei a két oszlopon megoszthatók. A könnyebb ábrázolhatóság érdekében a szekunder tekercsek kezdeteit és végeit felcseréltük. Ennek következtében a szekunder kivezetések közötti feszültségirányok a korábbihoz képest ellenkezőre változnak. A két fél tekercs sorba kötését mind a primer, mind a szekunder oldalon igen gondosan úgy kell elvégezni, hogy ha az egyik fél tekercs lefelé mutató fluxust létesít, akkor a másik fél tekercs fluxusa felfelé mutató legyen, hogy a fluxus a vasmagban körbe tudjon záródni. Figyeljük meg a primer féltekercsek kapcsolását! Ha az áram az E kapcspon folyik be, akkor a baloldali fél tekercsen felülről nézve az óramutató járásával megegyező irányban folyik, tehát fluxusa lefelé mutat. A jobb oldali primer fél tekercsen ugyanez az áram felülről nézve az óramutató járásával ellentétes irányú, fluxusa felfelé mutat. A fluxus tehát valóban a vasban körben záródik. Hasonló megfontolással kell sorba kötni a szekunder fél tekercseket is.

Egyenlőtlen a terhelés, ha a nulla vezető és az egyik szélső vezető között nagyobb (az ábrán n és e között), a nulla vezető és a másik szélső vezető között pedig kisebb a terhelés. Az ábrán annak a szélsőséges terhelési állapotnak a hatását fogjuk vizsgálni, amikor a nulla vezető és egyik szélső vezető között van, a nulla és a másik szélső vezető között nincs terhelés.

Az ábra transzformátora olyan, hogy mind a négy féltekercse N menetszámú, tehát az áttétel $a = 1$. Minden transzformátor ilyené tehető, ha a szekunder mennyiségeket redukáljuk a primer oldalra. Az ábrán külön rajzoltuk meg a vasmagot és külön a primer valamint a szekunder fél tekercseket. A valóságban természetesen a tekercsek a vasmagon vannak.



Egyfázisú nullavezetős transzformátor a) kapcsolási vázlata, b) elvi elrendezése



Egyfázisú nullavezetős transzformátor szélsőségesen egyenlőtlen terhelésének hatása

Mindenek előtt tisztázzuk az irányokat! Azt már az előzőekben említettük, hogy az U_2 szekunder feszültségek iránya azért ellentétes U_1 -gyel, mert a szekunder fél tekercsek kezdetét és végét a primer tekercsekhez képest felcseréltük. A bal oldali U_2 feszültség a fogyasztón és a bal oldali szekunder fél tekercsen a bejelölt irányú I_2 áramot hajtja át, hiszen az U_2 feszültség iránya azt jelenti, hogy a fogyasztón az áramot n-ből e felé hajtja. Ha egy transzformátor szekunder oldalát terheljük, akkor a primer oldalon is nagyobb áram folyik, mint az üresjárási áram. Ezt a primer I_1 áramot a primer U_1 feszültség hajtja a primer tekercsen, mint fogyasztón át, E-ből F-be. Világosan láthatjuk, hogy az I_1 és I_2 áramok irányai a tekercsekben ellentétesek. Ez előző tanulmányainkkal teljesen megegyezik: a szekunder gerjesztés (NI_2), a primer gerjesztést (NI_1) lerontani igyekszik. Figyeljük meg, hogy míg a szekunder áram csak egy fél szekunder tekercsen folyik át, addig a primer áram kénytelen mindkét primer fél tekercsen átfolyani.

Az nyilvánvaló, hogy $U_2 = \frac{U_1}{2}$, hiszen az $a = 1$ áttétel miatt a primer és szekunder feszültségek egymással közel egyenlők, da U_2 csak egy fél szekunder feszültséget jelent. A gerjesztések egyensúlya szerint a primer és a szekunder oldali gerjesztések különbsége az üresjárási gerjesztéssel egyenlő. Itt vegyük figyelembe, hogy a primer áram két fél tekercset, a szekunder viszont csak egy fél tekercset gerjeszt:

$$2NI_1 - NI_2 = 2NI_g.$$

Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

Az üresjárási gerjesztést elhanyagolva: $2NI_1 - NI_2 = 0$. Ebből $I_2 = 2I_1$, azaz a szekunder áram kétszerese a primer áramnak.

A gerjesztéseket rárajzoltuk a vasmagra kétféle módon is. A primer $2NI_1$ gerjesztés megoszlik a két fél tekercsre. A két fél tekercset egy-egy menettel jelöltük a két oszlopon kétszer NI_1 gerjesztéssel és ellentétes áramirányokkal, hiszen az egyik tekercsben az áram lefelé, a másikban felfelé folyik. A szekunder NI_2 gerjesztés csak a bal oldali oszlopon van. Ezt is egy menettel ábrázoltuk. Az áram iránya az ugyanezen az oszlopon lévő primer tekercs áramirányával ellentétes. Mivel $NI_2 = 2NI_1$, ezért a szekunder tekercset helyettesítő menetet kétszeresre rajzoltuk. A gerjesztések nagyságát és irányát a vasmagba rajzolt nyilakkal is ábrázoltuk. A nyíl irányát az áram irányából állapítottuk meg a jobbcsavar szabály szerint. A nyíl hossza a gerjesztés nagyságával arányos. Ezért egy egységnyi NI_1 , de két egységnyi NI_2 nyilának hossza. A menetekbe rajzolt nyilak a tekercsek gerjesztéseit jelentik. A két oszlopra rajzolt alsó két nyíl az oszlopok gerjesztéseinek az eredője.

A bal oldali oszlopon NI_1 , azaz egy egységnyi gerjesztés mutat lefelé; NI_2 azaz két egységnyi gerjesztés mutat felfelé. Ezen az oszlopon tehát az eredő gerjesztés felfelé mutat és egy egységnyi, azaz NI_1 .

A jobb oldali oszlopon csak egy egységnyi felfelé mutató gerjesztés van. Itt ez maga az eredő gerjesztés is. Az eredő tehát: felfelé mutató NI_1 gerjesztés.

Megállapíthatjuk tehát, hogy mindkét oszlopon azonos irányban felfelé mutat az eredő gerjesztés. Ezek a gerjesztések nincsenek kiegyenlítve, és mindkét oszlopban felfelé mutató fluxust, úgynevezett járulékos fluxust (Φ_j) létesítenek. Ezek a fluxusok csak a vasmagon kívül képesek záródni.

A vasmagba berajzoltuk Φ főfluxust is. Igaz, hogy az előzőekben a $2NI_g$ üresjárási gerjesztést elhanyagoltuk, de azért az a főfluxust létrehozta. Mivel I_g iránya I_1 irányával egyezne meg, a főfluxus is olyan irányú, mintha az NI_1 gerjesztések létesítenék. A terhelt oszlopon a járulékos fluxus a főfluxussal ellentétes irányú. Két fluxus ugyanabban az oszlopban nem jöhet létre, tehát itt a járulékos fluxus a főfluxust lerontja. A lecsökkent főfluxus miatt csökken a terhelt oszlop U_2 szekunder feszültsége (jobban, mint ahogyan azt várnánk). A terheletlen oszlopon a fő- és járulékos fluxusok azonos irányúak. A főfluxus megnövekszik, növekszik tehát a terheletlen oszlop szekunder feszültsége is. .

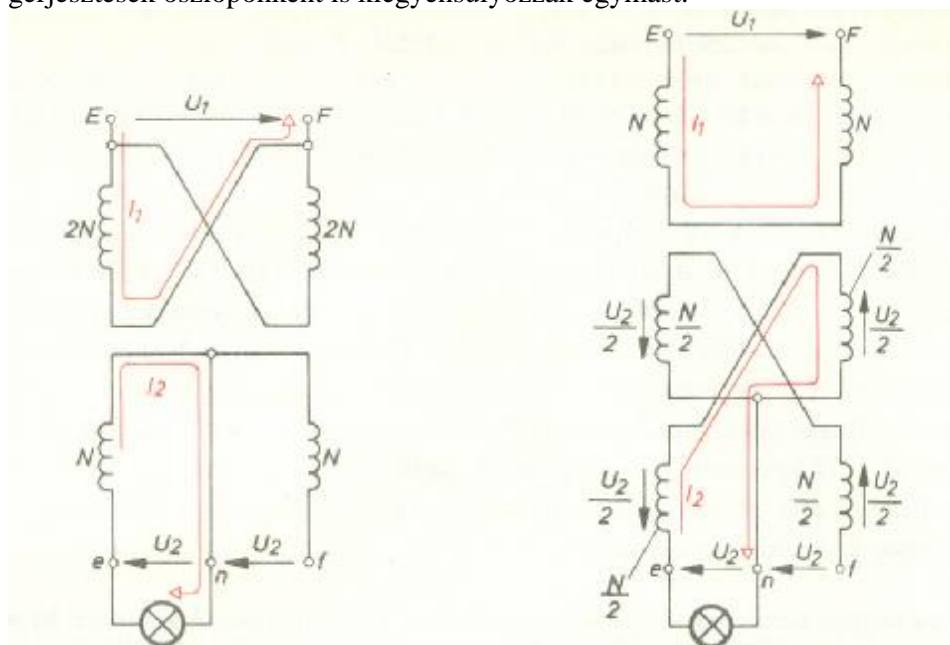
Az ábrán megrajzolt szélsőségesen egyenlőtlen terhelés előfordulhat, de ritkán. Általában a két fél szekunder tekercs különbözően van terhelve. Ilyenkor is oszloponként egyirányú kiegyenlítetlen gerjesztések jönnek létre, melyek, járulékos fluxusokat létesítenek. A jobban terhelt oszlopon a járulékos fluxus a főfluxust csökkenti, itt csökken a szekunder feszültség. A kevésbé terhelt oszlopon a járulékos fluxus a főfluxust megnöveli, itt U_2 növekszik. Az ide kapcsolt fogyasztók a megnövekedett feszültség miatt tönkremehetnek. A vasmagból kilépő járulékos fluxusok a környezetben levő vas alkatrészekben át záródhatnak, és azokban nagy vasvesztést létesíthetnek. Ez abban nyilvánul meg, hogy ezek a vas alkatrészek erőteljesen felmelegsznek, valamint megnövekszik a transzformátor üresjárási árama és romlik a hatásfoka, hiszen a primer hálózat szempontjából olyan a helyzet, mintha magának a transzformátornak növekedett volna meg a vasvesztése.

A tárgyalt transzformátorokat tehát nullavezetős hálózatok táplálására ne alkalmazzuk!

Nullavezetős egyfázisú hálózatok táplálására a következő megoldások alkalmasak:

1. A primer oldal két fél tekercsét párhuzamosan kötjük. Ha a szekunder oldalon csak az egyik fél tekercset terheljük, akkor a primer oldalon is csak az egyik tekercsen folyik áram, mert a párhuzamos kapcsolás miatt ilyen áramút kialakulhat. A két áram gerjesztése egymást nemcsak az egész transzformátorban, hanem oszloponként is kiegyensúlyozza. Természetesen, ha a szekunder oldalon mindkét fél tekercset terheljük, akkor a primer oldalon

is mindkét tekercsben folyik áram, de mindegyik primer tekercsben éppen annyi, hogy a gerjesztések oszloponként is kiegyensúlyozzák egymást.



Egyfázisú nullavezetős
transzformátor a primer oldalon
párhuzamos tekercsekkel

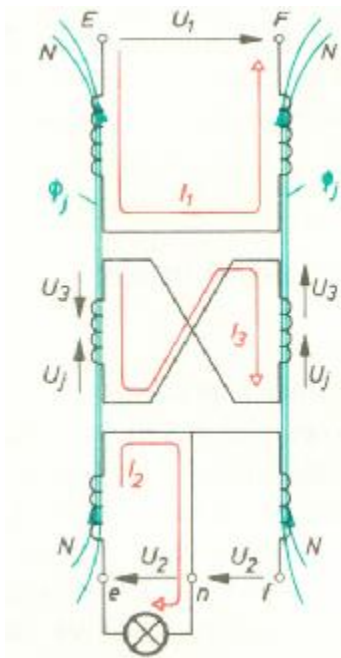
..... Egyfázisú nullavezetős
transzformátor a szekunder oldalon
kevert kapcsolással

A két primer tekercs külön-külön U_1 feszültségre kapcsolódik. A soros kapcsoláshoz képest ezért kétszeres menetszámmal kell készüljenek. Mivel a párhuzamosan kapcsolt tekercseken a primer oldal névleges áramának csak maximálisan fele-fele folyhat át, ezért a tekercsek vezetőjének a keresztmetszete a soros kapcsolásnál alkalmazott keresztmetszetnek kb. a fele lehet. A kétszeres menetszám miatti kétszeres hossz, de fél keresztmetszet egymást súlyban kiegyenlíti. A tekercs mégis drágább, mert a kisebb keresztmetszetű tekercselési anyag kilogrammonkénti ára több.

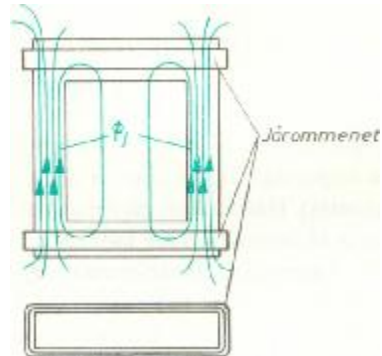
2. A szekunder oldalon az ábra szerinti „kevert kapcsolást” alkalmazzuk. Ebben a kapcsolásban az $N/2$ menetszámú negyed tekercsekben az ábrán bejelölt irányú $U_2/2$ feszültségek indukálódnak. n és e , illetve f és n között két-két ilyen feszültség összeadódik. Ha a szekunder oldalra egyenlőtlen terhelést kapcsolunk, például csak az a és e pontok közé kötünk be fogyasztót, akkor az I_2 áram az egyik oszlopon felfelé, a másikon lefelé mutató gerjesztést létesít. A primer áram mindkét primer fél tekercsen átfolyik, az egyik oszlopot lefelé, a másikat felfelé gerjeszti, tehát a primer és szekunder gerjesztések nem csak az egész transzformátorban, hanem oszloponként is egyensúlyban vannak.

A szekunder tekercsbe beépített tekercselési anyag nem több mint a soros kapcsolásnál.

3. Alkalmazhatjuk a soros primer és szekunder kapcsolású transzformátort úgynevezett „kiegyenlítő tekercseléssel”. A terciér, azaz harmadik tekercselés két fél tekercsét kereszt kapcsolással sorba kötjük és rövidre zárjuk. A főfluxus által indukált U_3 feszültségek a körben egymás hatását lerontják. Az egyenlőtlen terhelés hatására kialakuló egyirányú járulékos fluxusok azonos irányú U_j feszültségei összeadódnak és az I_3 áramot létesítik. Ennek iránya Lenc törvénye értelmében olyan, hogy az őt létesítő okot, azaz a járulékos fluxust igyekszik lerontani. Ezt a megoldást ritkán alkalmazzák, mert a kiegyenlítő tekercs miatt drága.

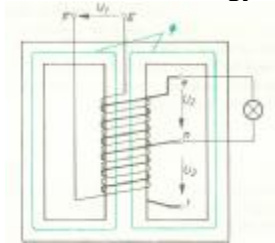


Egyfázisú nullavezetős transzformátor kiegyenlítő tekercssel



Egyfázisú transzformátor járommenettel

.....



Egyfázisú köpenytípusú transzformátor

4. Olcsóbb, de nem tökéletes megoldás a járommenetek alkalmazása. A primer és szekunder fél tekercsokat egyszerűen sorba kötjük. Az egyenlőtlen terhelés hatására kialakuló egyirányú járulékos fluxusok a járommentekben olyan feszültségeket indukálnak, melyek árama a járulékos fluxust csökkenteni igyekszik. A járommenetes transzformátor névleges teljesítményének csak 10. . . 15 %-ig terhelhető egyenlőtlenül.

5. A köpenytípusú transzformátornál minden tekercs azonos oszlopon helyezkedik el. Ezen az oszlopon a gerjesztések mindig egyensúlyt tartanak, tehát egyenlőtlen terhelés esetén sem jön létre járulékos fluxus. A köpenytípusú transzformátor különleges tekercskapcsolás nélkül egyenlőtlenül terhelhető (természetesen, ha a szekunder oldalának van nulla kivezetése). A leggyakrabban ezt a megoldást alkalmazzuk.

A-háromfázisú nullavezetős transzformátorok egyenlőtlen terhelése

A legegyszerűbb háromfázisú transzformátor csillag/csillag kapcsolású. Ennek a kapcsolásnak a primer és a szekunder oldalon egyaránt van nulla kivezetése (csillagpontja). Három fázis esetén akkor beszélünk egyenlőtlen terhelésről, ha a nulla vezető és a fázisvezetők közé különböző ellenállású fogyasztókat kapcsolunk. A csillag/csillag kapcsolású transzformátor ilyen egyenlőtlen terhelésre nem alkalmas.

Itt is külön rajzoltuk meg a vasmagot, valamint külön a primer és szekunder tekercsüket, melyek menetszáma azonosan N , az áttétel tehát $a = 1$. A könnyebb rajzolhatóság érdekében a

Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

Villamos gépek tantárgy tételei

szekunder tekercsek kezdeteit és végeit itt is felcseréltük. Ezen az ábrán a szekunder csillagpont felülre került. Ezért a szekunder fázisfeszültségek iránya is ellentétes lett. Most is szélsőségesen egyenlőtlen terhelésből induljunk ki, ami három fázis esetén azt jelenti, hogy fogyasztó csak a nulla vezető és az egyik fázis vezető közé van kapcsolva (az ábrán az n és b közé), a másik két fázis terheletlen. Az U_b feszültség iránya miatt az I_2 áram az ábrán bejelölt irányú.

A terhelt fázisnak megfelelő primer tekercsben folyó áramot I_B -vel jelöltük. Ez I_2 -vel ellentétes irányban folyik. Belátható, hogy a csillagpontból az A és C jelű fázistekercseken fele-fele arányban folyik tovább. Tehát

$$I_A = I_C = \frac{I_B}{2}$$

Tekintsük a transzformátor bal oldali és középső oszlopát egy egyfázisú transzformátornak. Az üresjárású gerjesztés elhanyagolása esetén a primer és szekunder gerjesztések különbsége zérus. Tehát, mivel a primer gerjesztés $NI_A + NI_B$:

$$NI_A + NI_B - NI_2 = 0$$

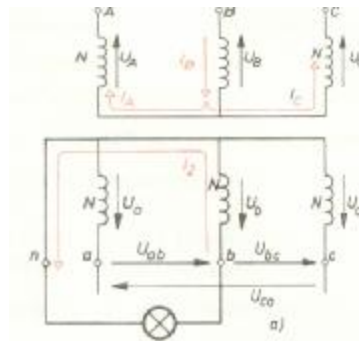
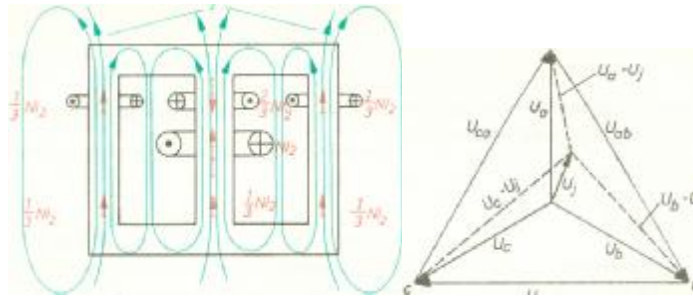
Az előzőek alapján
$$N \frac{I_B}{2} + NI_B - NI_2 = 0$$

Ebből
$$\frac{3}{2} NI_B = NI_2 \quad \text{és} \quad I_B = \frac{2}{3} I_2,$$

továbbá
$$I_A = I_C = \frac{1}{3} I_2.$$

Az I_B áram gerjesztése $NI_B = \frac{2}{3} NI_2$, az I_A és I_C áramok gerjesztései

$NI_A = NI_C = \frac{1}{3} NI_2$ és végül a szekunder áram gerjesztése: NI_2 .



Háromfázisú Y/y kapcsolású transzformátor a) egyenlőtlen terhelése és b) az egyenlőtlen terhelés vektorábrája

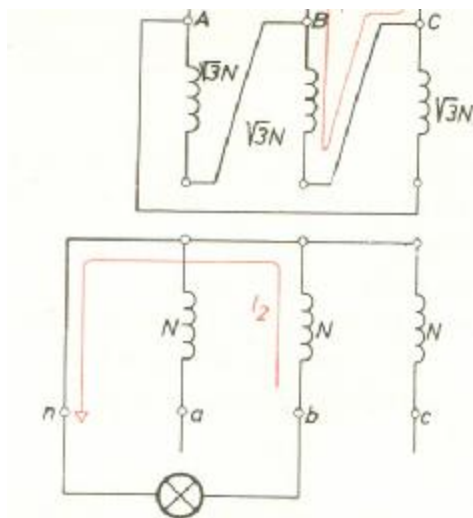
Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

Összefoglalva megállapíthatjuk tehát: a terhelt oszlopon lévő primer' tekercs gerjesztése a szekunder gerjesztés $2/3$ -a, a terheletlen oszlopokon lévő primer gerjesztés a szekundernek $1/3$ -a.

A gerjesztéseket a vasmagon kétféle módon is jelöltük. Egyrészt egy-egy menettel, melynek nagysága arányos a gerjesztésekkel, másrészt a menetekbe rajzolt nyilakkal. Szekunder gerjesztés csak a terhelt oszlopon van, nagy keresztmetszetű menettel és három egység hosszúságú nyíllal ábrázoltuk. Ezen az oszlopon a primer gerjesztés a szekunderrel ellentétes irányú, nagysága a szekunder $2/3$ -a, ezért kisebb keresztmetszetű menettel és két egység hosszúságú nyíllal ábrázoltuk. A terheletlen oszlopokon csak primer gerjesztések vannak, nagyságuk a szekunder gerjesztés $1/3$ -a, irányuk a szekunder gerjesztéssel megegyező, ezért a legkisebb keresztmetszetű menetekkel és egy egység hosszúságú nyilakkal ábrázoltuk.

Az eredő kiegyenlítetlen gerjesztéseket a nyilak összegezésével kapjuk. Ezeket az oszlopok alsó részére rajzoltuk meg. A terhelt oszlopon NI_2 gerjesztés mutat felfelé, $\frac{2}{3} NI_2$ lefelé, tehát a kiegyenlítetlen gerjesztés $\frac{1}{3} NI_2$, mely felfelé mutat. A terheletlen oszlopokon csak primer gerjesztések vannak. Ezek maguk a kiegyenlítetlen gerjesztések is, mindkét terheletlen oszlopon $\frac{1}{3} NI_2$, felfelé mutatók. A kiegyenlítetlen gerjesztés tehát mindhárom oszlopon egy irányú. Ezek egyirányú járulékos fluxusokat létesítenek, melyek egyirányú, azonos nagyságú járulékos feszültségeket (U_j) indukálnak mindhárom szekunder tekercsben. Ezek mindhárom tekercs feszültségéből egyformán kivonódnak.

Az ábrán megrajzoltuk az U_a , U_b és U_c szekunder feszültségek vektorait. Mind a háromból egyszerre úgy vonhatjuk ki U_j -t, ha a csillagpontba rajzoljuk meg. Iránya a terhelés jellegétől (ohmos, induktív, kapacitív) függ. Az ábrába szaggatott vonallal bejelöltük a szekunder oldalon egyenlőtlen terheléskor jelentkező $U_a - U_j$, $U_b - U_j$ és $U_c - U_j$ fázisfeszültségeket. Láthatjuk, hogy van olyan fázisfeszültség, melynek nagysága csökken, van olyan, amely növekszik, végeredményben a feszültség-csillag eltorzul, de figyeljük meg, hogy az U_{ab} , U_{bc} és U_{ca} vonali feszültségek nem változnak meg. A jelenséget csillagpont eltolódásnak is nevezzük. Ha a megnövekedett feszültségű fázisra is fogyasztót kapcsolunk (persze úgy, hogy a terhelés továbbra is egyenlőtlen maradjon), akkor az a nagy feszültség miatt tönkre mehet.



.... ábra Háromfázisú nullavezető transzformátor

Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

a primer oldalon háromszögbe kapcsolva

Összefoglalva tehát a Y/y kapcsolású háromfázisú nullavezetős transzformátor egyenlőtlen terhelésre nem alkalmas, mert a mindhárom oszlopban létrejövő kiegyenlített gerjesztés mindhárom oszlopban egyirányú járulékos fluxust létesít. Ez feszültséget indukál, mely mindhárom szekunder fázisfeszültséget megváltoztatja: csökkenti vagy növeli. A megnövekedett fázisfeszültség a fogyasztót veszélyezteti. A járulékos fluxusok a vasmagon kívül záródnak és az ott lévő vas alkatrészekben vasvesztéseket okozhatnak. Ennek elkerülésére szolgáló megoldások:

1. A primer oldalt háromszögbe kapcsoljuk Ha szekunder oldalon csak az egyik fázist terheljük, akkor a primer oldalon is csak az egyik tekercsen folyik áram, mert a háromszögkapcsolás miatt ilyen áramút kialakulhat. A két áram gerjesztése egymást a terhelt oszlopon kiegyensúlyozza. Ha a szekunder oldalon a másik két fázist is terheljük, akkor a primer oldalon is mind a három tekercsben folyik áram, de mindegyik tekercsben akkora, hogy a gerjesztések mindhárom oszlopon kiegyensúlyozzák egymást. Így nem jön létre járulékos fluxus, nem indukálódik járulékos feszültség, azaz nincs csillagpont eltolódás. A háromszög/csillag kapcsolású transzformátor tehát alkalmas egyenlőtlen terhelésre. Mivel a tekercsek a csillag kapcsoláshoz képest $\sqrt{3}$ -szor nagyobb feszültségre kapcsolódnak, ezért a menetszámot is $\sqrt{3}$ -szorosára kell növelni.

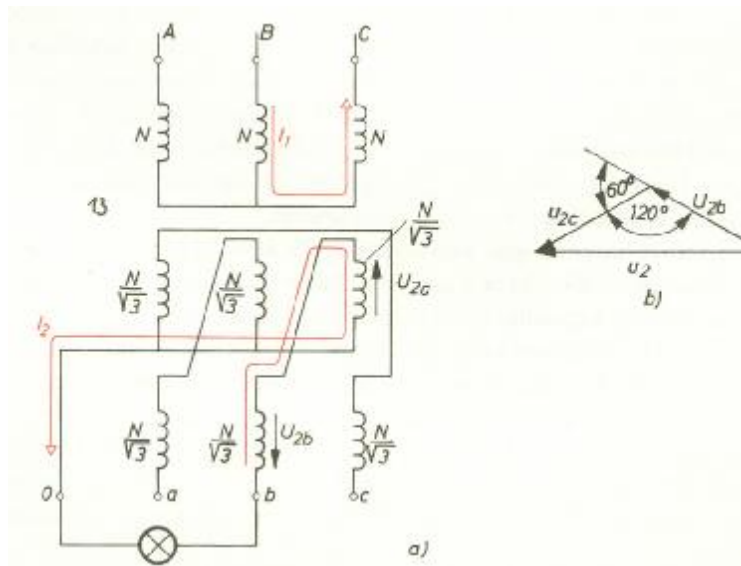
2. A szekunder oldalon zeg-zug kapcsolást alkalmazunk Ha szekunder oldalon csak az egyik fázist terheljük, akkor a szekunder áram két oszlopot gerjeszt (az ábrán a másodikat és a harmadikat) Az egyik oszlopon a szekunder gerjesztés felfelé, a másikon lefelé mutat. A primer áram e két szekunder gerjesztés kiegyensúlyozására csak azon a két primer tekercsen folyik, melynek oszlopai a szekunder oldalon gerjesztve vannak. Iránya mindkét tekercsben a szekunder árammal ellentétes. Az oszloponként kiegyenlített gerjesztések miatt ez a kapcsolás is alkalmas egyenlőtlen terhelésre.

A zeg-zug kapcsolásban minden fázisfeszültség két azonos nagyságú, de egymással 60° -os szöget bezáró feszültség összegeként adódik. A két feszültség fázishelyzete azért 60° , mert mindig különböző oszlopokon lévő tekercsek kapcsolódnak sorba, bennük 120° -ra eltolt fluxusok indukálnak feszültséget, de a tekercsek kezdetének és végének felcserélése miatt az eredő fáziseltolás $180^\circ - 120^\circ = 60^\circ$. Egy 120° -os csúcsszögű, egyenlőszárú háromszög alapja a szárak hosszának $\sqrt{3}$ -szorosa Ez azt jelenti, hogy a szár az alap $\frac{1}{\sqrt{3}}$ -szorosa, tehát a csillag

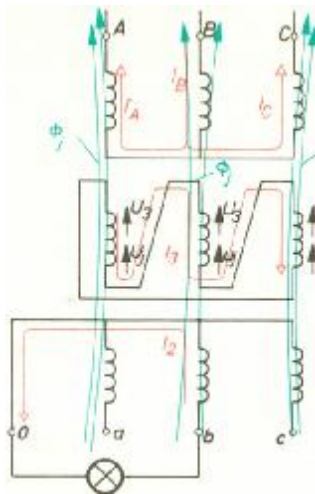
kapcsoláshoz viszonyítva a tekercsekben $\frac{1}{\sqrt{3}}$ -szoros feszültségnek kell indukálnia, tehát a

menetszám is $\frac{N}{\sqrt{3}}$.

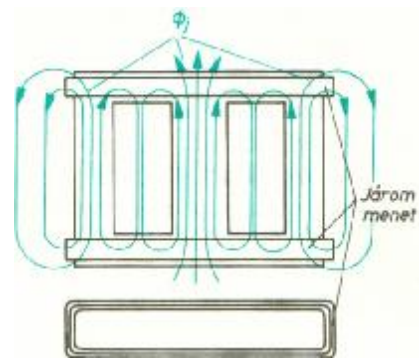
3. Egyenlőtlen terhelésre alkalmazhatjuk a csillag/csillag kapcsolású transzformátort háromszögbe kapcsolt kiegyenlítő tekercseléssel. (... ábra) A főfluxusok által indukált U_3 feszültségek fázisban 120° -ra helyezkednek el, a háromszög kapcsolás miatt összeadódnak, de összegük zérus, tehát ezek nem indítanak áramot. Az egyenlőtlen terhelés hatására kialakuló egyirányú járulékos fluxusok azonos irányú U_j feszültségei összeadódnak és az I_3 áramot létesítik. Ennek iránya olyan, hogy a járulékos fluxust igyekszik lerontani.



Háromfázisú nullavezetős transzformátor a) a szekunder oldalon zeg-zug kapcsolással, b) a sorba kapcsolt feszültségek vektorábrája zeg-zug kapcsolásban



Háromfázisú Y/y kapcsolású transzformátor kiegyenlítő tekercessel



Háromfázisú transzformátor járommenettel

4. Három fázis esetén is alkalmazhatunk járommenetes transzformátort. A primer és szekunder oldalt egyszerűen csillagba kötjük. Az egyenlőtlen terhelés hatására kialakuló egyirányú járulékos fluxusok végeredményben itt is olyan áramot hoznak létre a járommenetben, mely a járulékos fluxust csökkenteni igyekszik. Nem tökéletes megoldás, mert egyenlőtlenül csak egy fázis teljesítményének 20.. 30 %-val terhelhető.

Egyenlőtlen terhelésre se a csillag/csillag kapcsolású három darab egyfázisú transzformátor, se a csillag/csillag kapcsolású háromfázisú köpenyvasmagú transzformátor nem alkalmas, mert ezeknél a megoldásoknál a járulékos fluxusok magában a vasmagban ki tudnak alakulni.

Felhasznált irodalom: Magyar István: Villamos gépek I.

Villamos gépek

A villamos gépek működésének alapelvei

A villamos gépekben - generátorokban, motorokban és transzformátorokban egyaránt - feszültség indukálódik. A generátorban indukált feszültségről tápláljuk a fogyasztókat, a motorban indukált feszültség egyensúlyt tart a motort tápláló hálózat feszültségével.

A villamos gépek - a transzformátor kivételével - mozgó, leggyakrabban forgó alkatrészeket tartalmaznak. E mozgás erő, illetve nyomaték hatására létesül. A villamos motorok ezt a nyomatékot maguk létesítik, a generátorokat hajtógép forgatja nyomatéka segítségével.

A következőkben megismerkedünk a villamos gépekben indukált feszültségekkel és a létrejövő nyomatékokkal.

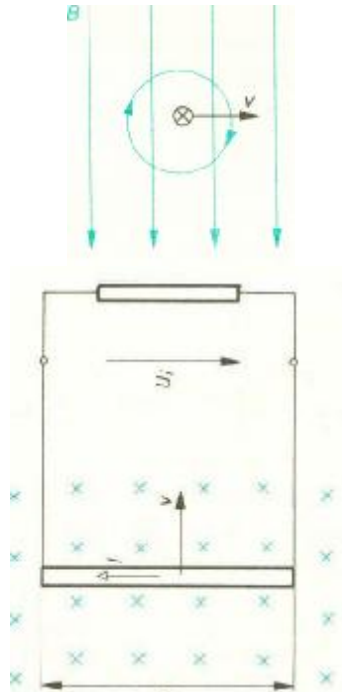
Az indukált feszültség

A villamos gépekben a mozgási és a nyugalmi elektromágneses indukció írtján indukálódik feszültség.

Ha a mágneses térben mozgó vezető indukcióvonalakat metsz, akkor benne feszültség indukálódik. Ez a jelenség a mozgási elektromágneses indukció. Ha l m hatásos hosszúságú vezető B Vs/m² mágneses indukciójú térben az indukcióvonalakra merőlegesen v m/s sebességgel mozog, akkor az indukált feszültség voltokban

$$U_i = Blv.$$

Az 1 ábra a mágneses tér indukcióvonalait és a mozgó vezetőket két nézetben mutatja. A kereszttek távolodó irányú indukcióvonalakat jelentenek, az alsó ábra a felső felülnézete.



Ha a mozgó vezető két végére - mint az ábrán látható fogyasztót kapcsolunk, vagy rövidre zárjuk, akkor áram indul meg. Az áramirány *Lenc törvénye* segítségével állapítható meg: *az indukált feszültség által létesített áram olyan irányú, hogy hatásával gátolja az indukáló okot.* Az indukáló ok a vezető mozgása. Az áram maga körül olyan irányú

Villamos gépek

indukcióvonalakat kell létesítsen, amelyek az eredeti tér indukcióvonalait a mozgás irányában (az ábrán a vezető jobb oldalán) sűrítik. Az indukcióvonalak iránya tehát az óramutató járásával kell megegyezzen. Ilyen irányú indukcióvonalakat távolodó irányú áram hoz létre. Ezt tüntettük fel az 1. ábrán. Ebből már következik az indukált feszültség iránya. A feszültség irányát kétféleképpen változtathatjuk meg: az indukcióvonalak vagy a mozgás irányának megváltoztatásával. Mindkettő egyidejű megváltoztatása esetén az indukált feszültség iránya nem változik.

Forgó villamos gépekben nem egyetlen vezeték mozog egyenes pályán, hanem tekercs forog.

Ha egy tekercsben változik a mágneses indukcióvonalak száma (a mágneses fluxus), akkor a tekercsben feszültség indukálódik. Ez a jelenség a nyugalmi elektromágneses indukció. Ha egy menetben Δt idő alatt $\Delta\Phi$ a fluxusváltozás, akkor az indukált feszültség voltokban:

$$U_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

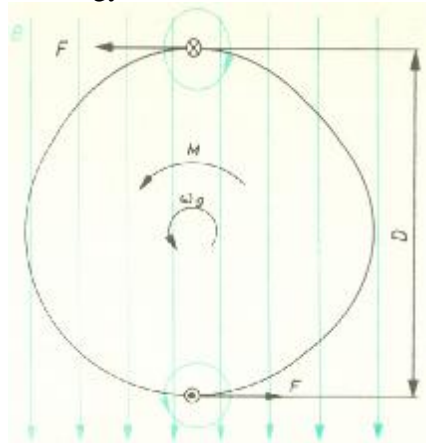
Ha a fluxusváltozás N menetszámú tekercsben játszódik le, akkor az indukált feszültség:

$$U_i = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

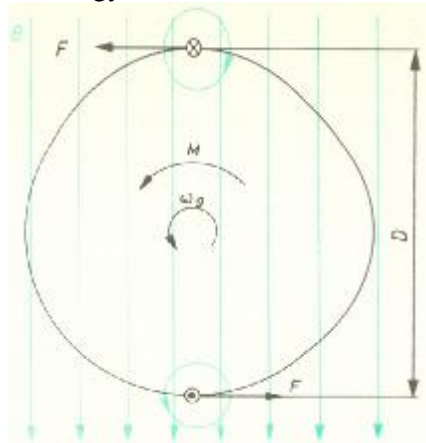
A tekercsben lejátszódó fluxusváltozás az idő függvényében gyakran szinuszos. Az indukált feszültség a fluxushoz képest 90° -ot siet.

A nyomaték

A villamos forgógépek nyomatékát mágneses mező és áramot vivő vezeték hozzák létre. A mágneses mezőt a gép álló- vagy forgórésze létesítheti, az áramot vivő vezeték - ennek megfelelően - lehet a forgórészen vagy az állórészen.



Villamos gépek nyomatékának keletkezése

A nyomaték létrejöttének egyszerűsített ábrázolását láthatjuk a  ábrán. A gép állórésze B Vs/m² mágneses indukciójú homogén mágneses teret létesít. A forgórészen két l m hatásos hosszúságú vezeték van. Az I A áramerősség a két vezetékben ellentétes irányban folyik. Az indukcióvonalak sűrűsödése alapján megállapítható a vezetékekre ható erők iránya. Nagyságuk N -ban:

Villamos gépek

$$F = BI l.$$

A két erő erőpárt alkot, tehát nyomatékot létesít. Ha a két vezető távolsága D akkor a nyomaték Nm -ben:

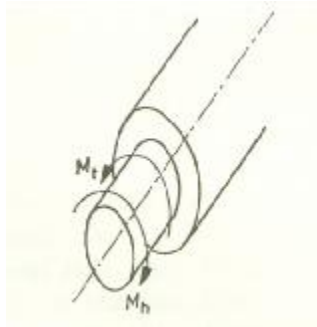
$$M = FD$$

A gép szögsebességét ω -val jelölve, a teljesítmény W -ban:

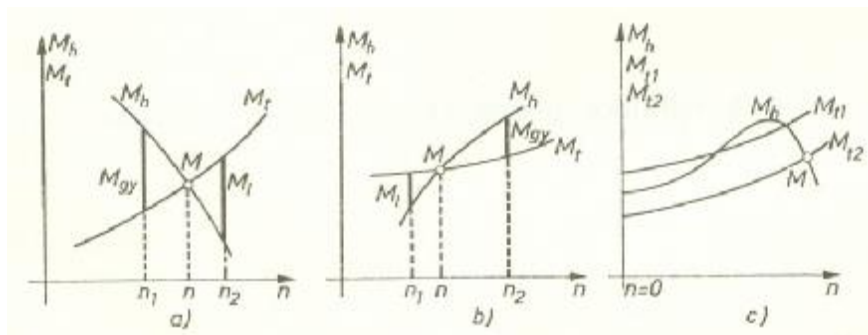
$$P = M\omega$$

A villamos forgógépek kifejthetnek *hajtó nyomatékot* (M_h), de jelenthetnek *terhelő nyomatékot* is (M_t). Ha a gép hajtó nyomatékot fejt ki, akkor általában hat a tengelyére ellentétes irányi! terhelő nyomaték is. Ha a villamos gép jelenti a terhelő nyomatékot, akkor hajtó nyomatékkal kell a tengelyét forgatni. A gép tengelyére tehát mindenképpen két ellentétes irányú nyomaték hat (...ábra). Ha $M_h = M_t$ akkor a gép áll vagy állandó fordulatszámmal forog. Ha $M_h > M_t$ akkor a gép gyorsul, ha $M_h < M_t$ akkor a gép nem indul meg, ill. ha már forog, akkor a nagyobb terhelő nyomaték hatására lassul.

A forgó villamos gépek működési elvétől függően különbözőképpen változhat a gépek nyomatéka a fordulatszám függvényében. Ugyanígy különböző lehet a villamos gépeket hajtó vagy terhelő nyomaték fordulatszám függése is.



A hajtó- és a terhelő nyomaték



Munkapontok: a) stabilis, b) labilis, c) M_{t1} nyomatékkal a motor nem tud megindulni, M_{t2} -vel az M munkapont alakul ki

A ...-a ábrán megrajzoltuk egy gép tengelyére ható hajtó és terhelő nyomaték $M_h = f(n)$ és $M_t = f(n)$ függvényét. Bár mindkét nyomaték metszékeit a vízszintes tengely fölé rajzoltuk, hogy világosan lássuk egymáshoz viszonyított nagyságukat, azért tudjuk, hogy a két nyomaték ellentétes irányú.

Ha $n_1 < n$ fordulatszámmal jár a gép, akkor $M_h = M_t$, a gépre

$$M_{gy} = M_h - M_t$$

gyorsító nyomaték hat, mely a gép fordulatszámát n -ig növeli, ahol $M_h = M_b$, azaz gyorsító nyomaték nincs ($M_{gy} = 0$), a gép fordulatszáma ebben az úgynevezett munkapontban (M) állandósul. Ha a gép fordulatszáma $n_2 > n$, akkor $M_h < M_b$, a gépre

$$M_l = M_h - M_t$$

lassító nyomaték hat (M_t és M_{gy} ellentétes előjelű és irányú), mely a gép fordulatszámát n -ig csökkenti. Tehát minden körülmények között a gép az M munkapontban üzemel, onnan valamilyen hatással kimozdítva és a hatást megszüntetve, oda megint visszatér. *Ez a stabilis munkapont. Stabilis a munkapont, ha a munkaponthoz tartozó fordulatszámnál kisebb fordulatszámon $M_h > M_t$ nagyobb fordulatszámon $M_h < M_t$.*

Nem stabilis, úgynevezett *labilis munkapontot* mutat a b ábra. $n_1 < n$ fordulatszámon $M_h < M_t$ lassító nyomaték lép fel, mely a gép fordulatszámát csökkenti. Ha a nyomatéki görbék kisebb fordulatszámon már nem találkoznak, akkor a gép megáll $n_2 > n$ fordulatszámon $M_h > M_t$, gyorsító nyomaték lép fel, mely a gép fordulatszámát növeli és ha a nyomatéki görbék nagyobb fordulatszámokon már nem találkoznak, akkor a fordulatszám --- ha valamilyen biztonsági berendezés ebben nem gátolná meg, vagy a gép nem hibásodna meg -- minden határon túl növekedne. Ezt a jelenséget nevezzük *megszaladásnak*. Labilis munkaponttal a gép nem tartható üzemben, mert bármilyen kis külső hatásra a gép kimozdulhat a munkapontból és máris bekövetkezik az előbb leírt egyik vagy másik jelenség.

A c ábrán $n = 0$ fordulatszámon, azaz álló állapotban $M_{t1} > M_h$ a gép nem tud megindulni. Ha a terhelő nyomatékot álló állapotban M_{t2} -re csökkentjük, akkor a gép megindul és az M stabilis munkapontig felgyorsul.

A villamos gépek veszteségei és hatásfoka

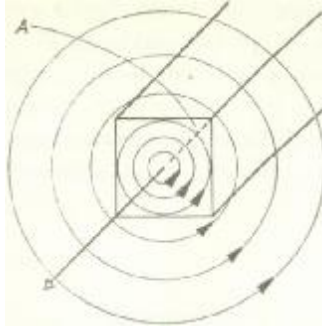
Minden gépben, tehát a villamos gépekben is keletkeznek veszteségek. Ezek miatt a gép hasznosított teljesítménye (P_h) mindig kisebb a gépbe bevezetett (P_b) teljesítménynél.

Tekercsveszteség a gép tekercseiben jön létre:

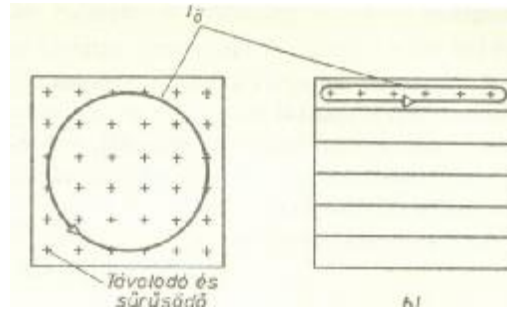
$$P_t = I^2 R,$$

ha R ellenállású tekercsen áramerősség folyik. Ha a gépben több tekercs van, akkor külön-külön ki kell számítani mindegyikben a tekercsveszteségeket és összegezni kell azokat. Szokás a tekercsveszteséget rézveszteségnek is nevezni.

Járulékos tekercsveszteség akkor jön létre, ha a tekercs vezetőiben váltakozó áram folyik (B.8 ábra). Ez a vezető belsejében és a vezető körül váltakozó mágneses teret létesít, melynek indukcióvonalai periódusonként kétszer irányt változtatnak. A vezető belsejét több váltakozó indukcióvonal veszi körül mint a széleket, ezért a vezető belsejében nagyobb az önindukciós feszültség s Lenc törvénye értelmében ez ott jobban akadályozza az áram folyását mint a



Járálekos tekercsveszteség
Kialakulása



Az örvényáram veszteség kialakulása és
csökkentése lemezeléssel

széleken. Ez azt jelenti, hogy a vezető belsejének nagyobb az induktív reaktanciája, az áram a vezető belsejéből a felület felé szorul: a széleken nagyobb az áramsűrűség mint középén. Olyan a helyzet mintha az áram nem folyna a vezető teljes A keresztmetszetén, tehát mintha a vezető ellenállás megnövekedne. Az I^2R összefüggés értelmében ez veszteségnövekedést jelent. A járálekos tekercsveszteség főleg akkor számottevő, ha a négyzet keresztmetszetű vezető nagyobbik mérete a 10 mm-t meghaladja és a frekvencia több mint 50 Hz.

Vasvesztés a gép olyan vas alkatrészeiben jön létre, amelyekben a mágneses indukció változik. Két részből áll: átmágnesezési és örvényáram veszteségből.

A vasat úgy tekinthetjük, hogy az elemi mágnesekből vagy elemi köráramokból áll. Ezek tengelyei igyekeznek beállni az indukcióvonalak irányába. A váltakozó indukcióvonalak irányának követése belső súrlódással jár, ez hőt fejleszt. Ezt nevezzük *átmágnesezési* vagy *hiszterézisvesztésnek*. Arányos a vas súlyával, a frekvenciával, a mágneses indukció maximumának négyzetével és függ a vas minőségétől. Nagyobb mennyiségű vasban természetesen több veszteség jön létre. A hiszterézis veszteség azért arányos a frekvenciával, mert nagyobb frekvencia esetén a vasban az elemi mágnesek másodpercenként a frekvenciával arányosan többször súrlódnak egymáson. A mágneses indukció négyzetétől való függést mérésekkel bizonyították. A hiszterézis veszteség szilícium ötvözéssel csökkenthető.

A váltakozó mágneses indukció nemcsak a tekercsek vezetőiben, hanem a gépek vas testében is indukál feszültséget és ez a vastestben - mint egy rövidrezárt menetben - áramot (ún, örvényáramot) indít, mely hőt fejleszt. Ez az örvényáramvesztés. Tömör vastest metszete látható aábrán, ahol megrajzoltuk az indukcióvonalakat és az I_0 örvényáramot.

Az örvényáramvesztés csökkentése a vas lemezelésével és szilícium ötvözéssel történik. A lemezzavastagság 0,35 vagy 0,5 mm. A lemezeket egymástól vékony lakk vagy keramikus réteggel szigeteljük. Síkjuk az indukcióvonalakkal párhuzamos, hogy a lemezek közötti szigetelés ne okozzon mágneses ellenállás növekedést. A szilícium ötvözés 0,2...4,5%-os.

A vas lemezelésével nő a vas $R = \rho l/A$ ellenállása, hiszen nő az örvényáramok útja, mert az mindegyik lemezben folyik és csökken A , a lemez keresztmetszete. A szilícium ötvözés növeli a vas fajlagos ellenállását, tehát ez is növeli a vas ellenállását.

Az örvényáramvesztés arányos a vas súlyával, valamint a frekvenciának, a vas méretének és a mágneses indukció maximumának négyzetével. Függ a vas minőségétől is. Nagyobb súlyú vasban természetesen több örvényáram veszteség keletkezik. A vasban indukált feszültség annál nagyobb, mennél nagyobb a frekvencia, mert nagyobb frekvencián gyorsabban váltakoznak az indukcióvonalak; annál nagyobb, mennél nagyobb a vas mérete, mert nagyobb a vas hatásos hossza; annál nagyobb, mennél nagyobb az indukció.

Villamos gépek

A vasvesztés számítása érdekében a vasanyagokra megadják a v_{10} *vesztési számot*. Ez a szám megmutatja, hogy 50 Hz frekvenciával szinuszosan váltakozó 1 Vs/m^2 - maximális értékű mágneses indukció esetén hány W vesztés jön létre 1 kp vasban. Különböző vastagságú, szilíciumtartalmú és különböző technológiával készült vaslemezek vesztési száma pl. 3,6; 2,3; 1,1 ; 0,7 W; kg.

Járulékos vasvesztés azokban a vas gépalkatrészekben jön létre, ahol a mágneses indukció a gép névleges frekvenciájánál nagyobb frekvenciával váltakozik. A gép névleges frekvenciája az a frekvencia, amire a gép készült.

A kefék átmeneti vesztését nem a kefe és az alatta futó felület közötti átmeneti ellenállásból számítjuk, mert az változik, hanem az átmeneti ellenálláson létrejövő és egy adott gépnél nagyjából állandó $U = 0,4 \dots 1 \text{ V}$ feszültségből a

$$P_{\text{kefe}} = I U_{\text{kefe}}$$

képlet alapján, ahol I a kefén átfolyó áram.

Forgó villamos gépekben hőt fejleszt, tehát vesztéséget létesít a csapágy- és légsúrlódás. Ez a **súrlódási** vesztés. Légsúrlódást nemcsak a forgórész létesít, hanem a forgórészre, vagy külön szerelt szellőzők is.

A gép hatásfoka

$$\eta = \frac{P_h}{P_b}$$

A generátor villamos teljesítményt hasznosít, a bevezetett teljesítmény mechanikai: $P_h = P_{\text{vill}}$, $P_b = P_{\text{mech}}$. A villamos teljesítmény könnyen mérhető műszerekkel, a mechanikai teljesítmény mérése viszont nehézkes. Könnyebb számítással vagy méréssel meghatározni a vesztések összegét (P_v). A $P_b = P_h + P_v$ összefüggést $P_{\text{mech}} = P_{\text{vill}} + P_v$ alakban alkalmazva

$$\alpha = \frac{P_{\text{vill}}}{P_{\text{vill}} + P_v}$$

A számlálót és a nevezőt P_{vill} - el végigosztva a gyakorlatban használatos

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{P_v}{P_{\text{vill}}}}$$

összefüggést kapjuk a generátor hatásfokára.

A motor mechanikai teljesítményt hasznosít, a bevezetett teljesítmény villamos: $P_h = P_{\text{mech}}$, $P_b = P_{\text{vill}}$. Itt is olyan hatásfok képletet igyekszünk nyerni, amelyikben nem szerepel a mechanikai teljesítmény. A $P_h = P_b - P_v$ összefüggést $P_{\text{mech}} = P_{\text{vill}} - P_v$ alakban alkalmazva

$$\eta = \frac{P_{\text{vill}} - P_v}{P_{\text{vill}}}$$

P_{vill} -al egyszerűsítve a gyakorlatban használatos $\eta = 1 - \frac{P_v}{P_{\text{vill}}}$ összefüggést kapjuk a motor hatásfokára.

Átalakítók esetében mind a bevezetett, mind a hasznosított teljesítmény villamos:

Villamos gépek

$$\eta = \frac{P_{\text{h vill}}}{P_{\text{b vill}}}$$

$P_{\text{h vill}}$ és $P_{\text{b vill}}$ egymáshoz nagyon közelálló érték. Bármelyik meghatározásánál elkövetett kis hiba már nagy mértékben befolyásolja a kiszámított hatásfok pontosságát. Ezért csak az egyik villamos teljesítményt határozzák meg közvetlenül, a másikat a veszteségek segítségével. Ha pl. a $P_{\text{h vill}}$ -t határozzák meg közvetlenül, akkor $P_{\text{b vill}} = P_{\text{h vill}} + P_v$, és ebből a hatásfok

$$\eta = \frac{P_{\text{h vill}}}{P_{\text{h vill}} + P_v} = \frac{1}{1 + \frac{P_v}{P_{\text{h vill}}}}$$

A fellépő veszteségek hatására a gép melegszik, hűtésről kell gondoskodni. A veszteségek rontják a gép hatásfokát. Csökkenteni lehetne a gép melegedését, esetleg hűtésről se kellene gondoskodni és a hatásfok is javulna, ha olyan gépeket készítenének, amelyekben kevés a veszteség. A tekercsveszteség kis ellenállású, tehát nagy keresztmetszetű vezetővel csökkenthető. A vasveszteség csökkentése B_m csökkentésével érhető el, de ennek érdekében nagy vaskeresztmetszetet kell alkalmazni, hogy a szükséges fluxus kialakulhasson. Mindez azt mutatja, hogy a kis veszteségű gép nagy méretű lesz és ezért lesz drága. Általában gazdaságosabb kisebb, de veszteségesebb gépeket készíteni és levegő, hidrogén, olaj vagy víz hűtéssel (esetleg többféle hűtés kombinációjával) gondoskodni arról, hogy a gép alkatrészei sehol se lépjenek túl a szabvány által előírt megengedett hőmérsékletet. Ez a hőmérséklet a géptől, egyes alkatrészeitől és az alkalmazott szigetelőanyagtól függően elérheti, sőt meg is haladhatja a 100 °C-ot.

A melegedés hatására a szigetelőanyagok fokozatosan tönkremennek, öregsznek. Ez befolyásolja a gép élettartamát, de még akkor is gazdaságosabb nagyobb veszteségű gépet készíteni, ha a gépet 10-15 évenként át kell tekercselni.