

Elektrotechnika

BME-VIK villamosmérnök BSc, 3. félév

Tárgykód: BME-VIVEA201

6 kredit

A BME-VET tárgyi honlapon lévő diasorokat, illetve a wiki.sch.bme.hu oldalon fent lévő segédanyagokat ollóztam össze az „Ellenőrző kérdések” alapján. A cél a zárthelyikre való készülés volt.

Az EMC, illetve a FAM részek jegyzetét az előadáson elhangzottak, illetve a Wikipedia vonatkozó szócikkei alapján írtam.

A dokumentum a tárgy 2010-'11/1. félévi kurzusa során készült, a kurzuson leadott anyagot fedi le – ez a tárgyi tematika magja (~85-90%-a); az anyag leadásának sorrendje, illetve a kiegészítő, kisebb anyagrészek (épületinformatika, stb.) mennyisége kurzusonként változhat.

A dokumentum végén a mérési útmutatók találhatók.

(A helyszínek a 2010-'11 őszén aktuális helyszínek, a tanszék költözésével változhatnak!)

A dokumentum tehát kb. mindent tartalmaz, ami a tárgy teljesítéséhez szükséges - nyomtatásra és lefűzésre kész állapotban. Hozott anyagból dolgoztam, melynek hibáit igyekeztem kijavítani – de apróbb hibák azért még maradhattak...

Jó készülést,

Dave

BME-VIK villany BSc, 2009/V7 tankör

A) Az elektrotechnika alapjai

A1) Bevezetés

1. Történeti áttekintés. A villamosság, mint jel- és energiahordozó.
2. Áramnemek, többfázisú rendszerek. A többfázisú rendszerek előnyei, a háromfázisú rendszerek tárgyalása.

A2) A villamosenergia-átalakítás általános elvei és törvényei

1. A villamos energiaátalakítás folyamata. Az elektromechanikai energiaátalakítás közege.
2. Az elektromechanikai energiaátalakítás törvényei.
3. A villamos energia-átalakítók osztályozása.
4. A villamos gépekkel kapcsolatos általános feladatok.
5. Az elektromechanikai rendszerek felépítése.

B) A közvetlen energiátalakítók és a szupravezetők alkalmazásai

B1) Szupravezetők és alkalmazásaik

1. A szupravezetés felfedezése és jelentős Nobel-díjasai.
2. Elméletek a fémek ellenásával kapcsolatban.
3. Az ellenállás eltűnése és a kritikus paraméterek.
4. Szupravezető anyagok: elemek, vegyületek és ötvözetek.
5. A Meissner-effektus.
6. II. típusú szupravezetők kritikus felülete.
7. A szupravezetők osztályozása.
8. A lebegtetési kísérletek tapasztalatai.
9. Fluxusörvények II. típusú szupravezetőkben
10. Pinning II. típusú szupravezetőkben.
11. A lebegtetési kísérlet magyarázata. ZFc és FC hűtés.
12. Alacsony hőmérséklet előállítása. Fajlagos hűtőteljesítmény.
13. Szupravezetős alkalmazások osztályozása.
14. Szupravezetők elektrotechnikai alkalmazásainak előnyei és hátrányai.
15. A szupravezetők elektrotechnikai (large scale) alkalmazásainak áttekintése.
16. A teljesen szupravezetős kiserőmű koncepciója.

C) Gyakorlati áramkör-számítási technikák és konvenciók: egy- és háromfázisú hálózatok számítása

1. Az egyfázisú rendszerek áramai és feszültségei. A pozitív irányrendszer fogyasztói és generátoros teljesítményre: a feszültségek és áramok pozitív irányai.
2. Hurokegyenletek alkalmazása. Ohmos és induktív fogyasztó komplex impedanciája, árama és teljesítménye.
3. Egyfázisú rendszer teljesítmény-fogalmak. Különböző típusú fogyasztók feszültség-áram fázora és teljesítménye.
4. Generátoros és fogyasztói teljesítmény előjelek értelmezése. Teljesítmény-mérő bekötése a fogyasztói pozitív irány szerint. Generátor, távvezeték és fogyasztó rendszer áramai és teljesítménye.
5. Szimmetrikus háromfázisú rendszer jellemzése, áram- és feszültségviszonyai; vonali és fázismennyiségek, csillag és delta kapcsolás.
6. Szimmetrikus háromfázisú rendszer teljesítmény összefüggései; a meddő teljesítmény értelmezése.

D) Villamosenergia-átalakítók gyakorlati számítási módszerei

D1) A háromfázisú vektorok módszere : Definíció. Fizikai bevezetés. Háromfázisú tekercselés térvektora. Térvektor szerkesztése háromfázisú szimmetrikus állapotban. Követelmények a fázismennyiségek időbeli változására vonatkozóan. A háromfázisú vektor mint transzformáció: pillanatértékek képzése.

A1) Bevezetés

1. Történeti áttekintés. A villamosság, mint jel- és energiahordozó.

Történet Mo-n:

Jedlik Ányos (Villamdelejes forgony, dinamó elv)

1880: Ganz Gyár Elektrotechnika Osztály

Bláthy Ottó, Déry Miksa, Zipernowsky Károly ->1885: TRAFÓ + a párhuzamos kapcsolás elve

1892: Bláthy tervezte Tivoli-i vízturbinás erőmű

Kandó Kálmán -> 1932 Fázisváltós V60 mozdony

Verebély László

Áramnemek: egyen- (AC), váltakozó (DC) áram

Jellemzők: frekvencia(f), periódusidő(T), amplitudó (I,U),energiatartalom(E,P)

Feszültség rendszerek: egyenfesz (villamos), vált fesz (o. hálózat), 3f (o. elosztó hálózat), egyfázis (lakóépületek)

Feszültség szintek:

Törpe: $U < 50 \text{ V}$

Kis: $50 < U < 1 \text{ kV}$

Közép: $1 \text{ kV} < U < 100 \text{ kV}$

Nagy: $100 \text{ kV} < U$

Feszültség nagysága: $U_{\pm 10\%}$ a mérések 95%-ában Frekvencia: $50\text{Hz} \pm 1\%$ az év 99.5%-ában

1. **Áramnemek, többfázisú rendszerek. A többfázisú rendszerek előnyei, a háromfázisú rendszerek tárgyalása.**

A villamos energia termelése, átvitele, elosztása és felhasználása szinte kizárólag váltakozó

áramú, háromfázisú rendszerben történik. Ez alól csak a nagytávolságú, nagyfeszültségű,

egyenáramú átvitel és a kis teljesítményű egyedi fogyasztók képeznek kivételt. Különleges, nem háromfázisú nagy fogyasztót jelentenek a váltakozó áramú villamos nagyvasutak is.

A háromfázisú rendszer mellett szól mindenekelőtt az, hogy a térben 120 fokos irányokban

elhelyezkedő, három tekercsből álló viszonylag egyszerű rendszerben - forgó mágneses mező

hatására létrehozható az időben 120 fokkal eltolt háromfázisú elektromotoros-erő rendszer (szinkron generátor) - az időben 120 fokkal eltolt fázisáramok forgó mágneses mezőt eredményeznek, ami az egyszerű (aszinkron) motor alapja.

A háromfázisú rendszer előnyei teljes mértékben akkor jelentkeznek, ha a rendszer szimmetrikus.

Ilyen előny az átvitelnél pl. az, hogy nem kell visszavezetés (negyedik ú.n. nullavezető), illetve ha van visszavezető (földelt csillagpontú rendszereknél ennek tekinthető a föld is), abban nem folyik áram és ezért veszteség sem keletkezik.

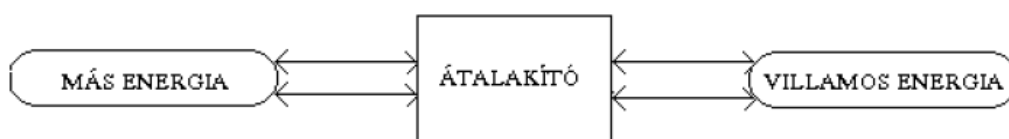
További előny, hogy három a legkisebb olyan fázisszám, ahol a fázisonkénti teljesítmények összege (pillanatértékben is) időben állandó. (Ezt az értéket röviden háromfázisú teljesítménynek hívjuk)

A háromfázisú teljesítmény állandóságának jelentősége: Állandó nyomaték hat a generátorokra, állandó nyomatékkal dolgozhatnak a villamos gépek stb.

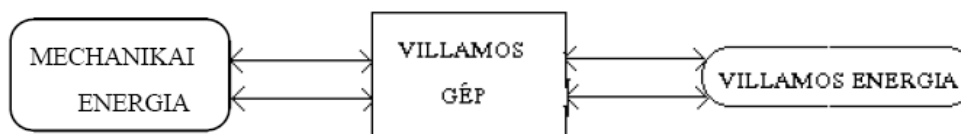
A2) A villamos energia-átalakítás általános elvei és törvényei

1. A villamos energiaátalakítás folyamata. Az elektromechanikai energiaátalakítás közege.

1. A villamos energiaátalakítás folyamata



Szűkebb értelemben



A nyilak kétirányúak, mert az energiaátalakítás **mindkét irányban** megvalósítható **egyetlen** energiaátalakító segítségével

2. Helyes-e a „villamos gép” elnevezés?

Az elnevezés a villamos gép kapcsai felől nézve helyes, amennyiben a kapcsokon villamos energia, illetve villamos teljesítmény jelenik meg.

A villamos gépek „munkaközege” azonban általában a mágneses tér. A mágneses terek alkalmazásának okát számpélda segítségével világítjuk meg.

A gyakorlatban viszonylag könnyen előállítható $B=1\text{ T}$ indukciójú mágneses tér energiasűrűsége, w_m :

$$w_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} = 4 \cdot 10^5 \text{ J/m}^3$$

Ha azonban villamos térben kívánunk energiát tárolni, akkor az elérhető energiasűrűség lényegesen kisebb. A gyakorlatban viszonylag könnyen előállítható villamos tér térerősségét 30 kV/cm értékűre választva az elektrosztatikus tér energiasűrűsége, w_e :

$$w_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 \quad \varepsilon_0 = 8,885 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

$$w_e = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{1}{2} \cdot (3 \cdot 10^6)^2 = \frac{1}{2} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 9 \cdot 10^{12} \cong 40 \text{ J/m}^3$$

Tehát, a gyakorlati megvalósíthatóságot figyelembe véve, mágneses térben közel négy nagyságrenddel több energia tárolható, min villamos térben.

2. Az elektromechanikai energiaátalakítás törvényei.

1. TÖRVÉNY

A villamos gépekben az energiaáramlás iránya megfordítható. Egy és ugyanazon gép, például forgógép, motorként és generátorként is üzemelhet. Ezt nevezzük a villamos gép motoros, illetve generátoros üzemének vagy üzemállapotának.

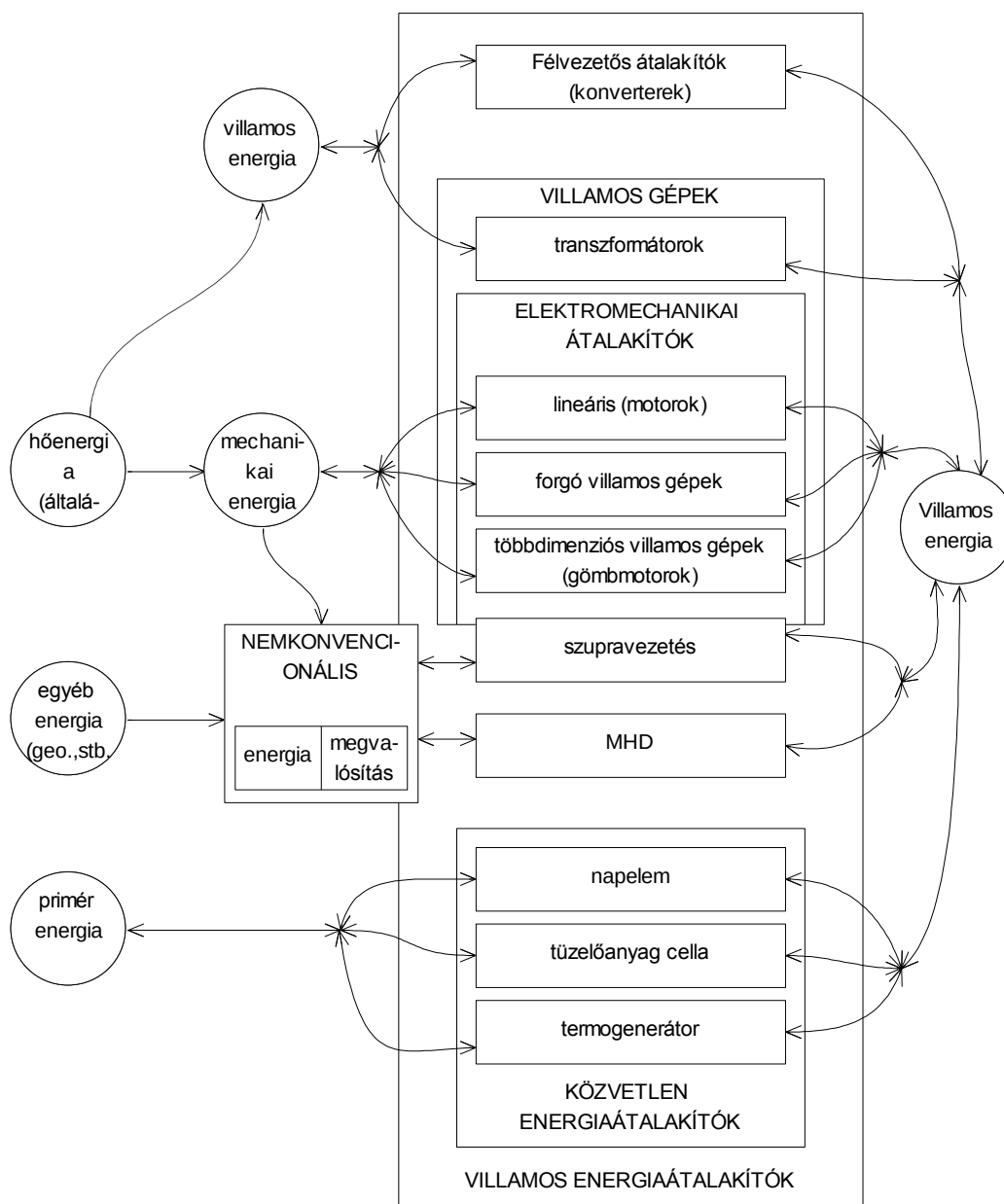
2. TÖRVÉNY

Az energiaátalakítás hatásfoka elvileg elérheti a 100%-os hatásfokot. A gyakorlatban a 100% hatásfok nem valósítható meg, de nagyon megközelíthető. Például nagy teljesítményű transzformátorok és erőművi generátorok hatásfoka elérheti, sőt egyes esetekben meg is haladhatja a 99,5 % értéket.

3. TÖRVÉNY

Az átalakító működése két, egymáshoz képest nyugalomban lévő: mágneses vagy villamos mező kölcsönhatásán alapszik. A gyakorlatban túlnyomó többségben a mágneses térek kölcsönhatásán alapuló villamos energia-átalakítók terjedtek el.

3. A villamos energia-átalakítók osztályozása.



4. A villamos gépekkel kapcsolatos általános feladatok.

Transzformátorok:

Önálló vizsgálati probléma, mert a transzformátor villamos energiát alakít át villamos energiává.

Elektromechanikai átalakítók.

A fő kérdés: a forgó mozgás létrehozása.

2.1. Forgó mozgás létesítése lehetséges:

- mechanikai forgatással;
- álló tekercsrendszerrel.

2.2. A működési elv megvalósításához tartozó gépi konstrukció lényeges (alap) elemeinek megismerése.

2.3. A megvalósított gép üzeme.

A) Tranziens állapot—ezzel nem fogunk foglalkozni.

B) Állandósult állapot figyelmünket a villamos gépek állandósult állapotbeli viselkedésére koncentráljuk.

A fő kérdések:

1. Kérdés:

Elérhető-e az állandósult állapot? - Erre a kérdésre a villamos gépek indítási lehetőségeinek és módozatainak vizsgálata ad választ.

2. Kérdés:

Fennmarad-e az állandósult állapot? - Erre a kérdésre a villamos gépek stabilitásvizsgálata ad választ.

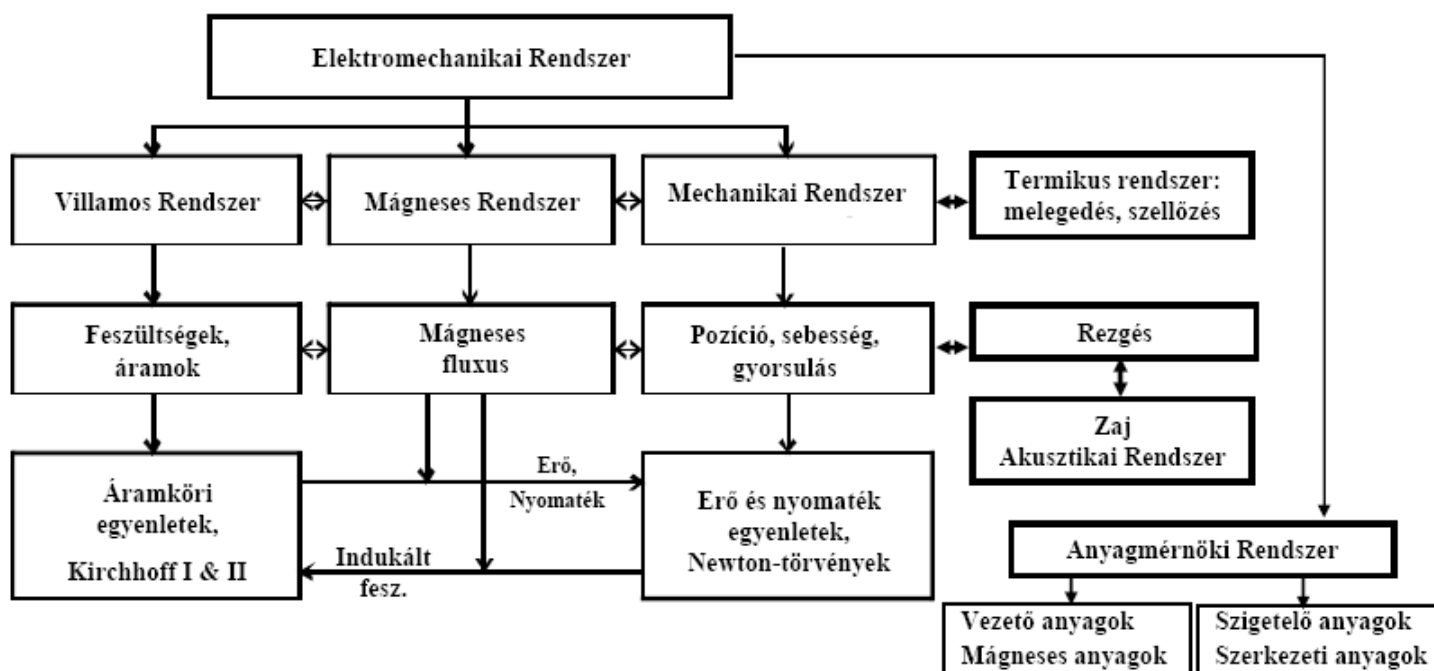
3. Kérdés:

Mi történik, ha a felépítés és/vagy a táplálás szándékosan vagy valamilyen hiba miatt aszimmetrikus?
- Erre a kérdésre a villamos gépek aszimmetrikus üzemviszonyainak vizsgálata ad választ. Szándékos aszimmetriára példa a háztartásokban széleskörűen alkalmazott egyfázisú villamos forgógép.

4. Kérdés:

Mi történik a táplálás/terhelés változásakor? - Erre a kérdésre a villamos gépek tranziens (villamos változás) és dinamikus (mechanikai változás) üzemviszonyainak vizsgálata ad választ.

5. Az elektromechanikai rendszerek felépítése.



B2) Szupravezetők és alkalmazásaik

1. A szupravezetés felfedezése és jelentős Nobel-díjasai.

Kamerlingh Onnes fedezte fel 1911-ben a folyékony He-on végzett első kísérletei során. Közel tiszta Hg-on végzett mérései: ellenállása 4.2K-en közel zérusra csökkent. 1,5K ig hűtve megállapította, hogy ezer milliomod részére csökkent az ellenállás az eredetinek. 1912-ben rájött, hogy a normál (rezisztív) állapot nagy áramsűrűségek és mágneses indukciók esetén visszaáll még ilyen alacsony hőmérsékleten is. 1913-ban kapott N díjat.

Szupravezetők BCS nevű elméletének kidolgozásáért: 1972 Bardeen és Cooper és Schrieffer

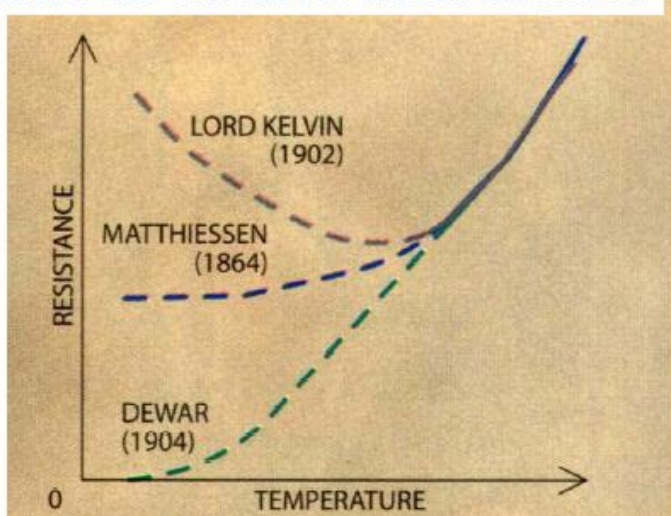
Josephson effekt: alagút effektus szupra és félvezetőkben: 1973 Josephson, Giaever, Esaki

Kerámia alapú anyagok szupravezető tulajdonságainak felismeréséért: 1978 Bendorz és Müller

Szupravezetés Fenomenologikus elmélete (Abrikoszov örvények a 2. típusú sz. vezetők belsejében, a m. tér behatol: 2003 Abrikoszov

2. Elméletek a fémek ellenállásával kapcsolatban.

Elméletek a fémek ellenállásáról



3. Az ellenállás eltűnése és a kritikus paraméterek.

Az ellenállás eltűnését Kamerlingh Onnes fedezte fel 1911-ben a folyékony He-on végzett első kísérletei során. Közel tiszta Hg-on végzett mérései: ellenállása 4.2K-en közel zérusra csökkent. 1,5K ig hűtve megállapította, hogy ezer milliomod részére csökkent az ellenállás (az ellenállás eltűnt) az eredetinek. 1912-ben rájött, hogy a normál (rezisztív) állapot nagy áramsűrűségek és mágneses indukciók esetén visszaáll még ilyen alacsony hőmérsékleten is. 1913-ban kapott N díjat.

A szupravezető állapotot meghatározó tényezőket nevezzük kritikus paramétereknek: kritikus áramsűrűség, mágneses térerősség és hőmérséklet. Ha ezeket ábrázoljuk 3 dim. koordináta-rendszerben (kapunk egy felületet), akkor az anyag sz. v. állapotban van, ha kritikus paraméterei által meghatározott pont, a felület alatt helyezkedik el.

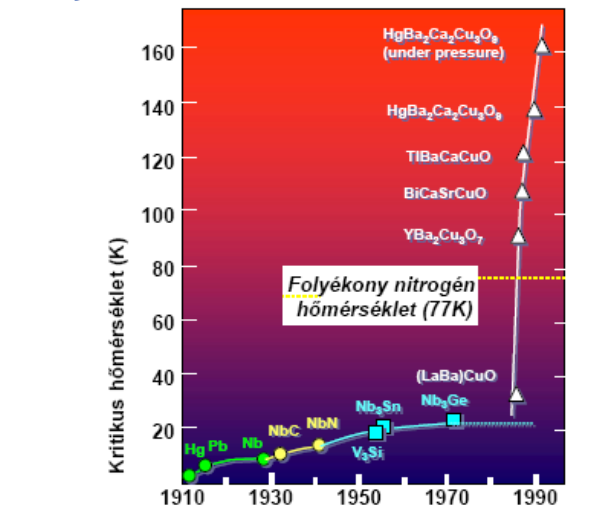
Péda: HTS szupravezetők (93-94K, 100-110K) kritikus áramsűrűsége alacsony (OK en 10^5 és 10^6 on A/cm^2 között van), de OK-en a kritikus mágneses térerősség 100T-nál nagyobb. Ezt ábrázolhatjuk is, és megkapjuk az előbbi felületet.

Plusz: 0 ellenállás mérése: áramot hozunk létre a sz. vezető gyűrűben, és az így indukálódott mágneses indukciót mérjük. Tudjuk, hogy B arányos I -vel, valamint, hogy $i(t) = i_0 \cdot e^{-t/\tau}$, ahol $\tau = L/R$. 2 évig tartó mérés szerint a fajlagos ellenállás 10^{-25} ohmméternél is kisebb.

4. Szupravezető anyagok: elemek, vegyületek és ötvözetek.

Szupravezető elemek: Kritikus hőmérséklet és indukció általában kis érték (0-8K es tartomány). A legjobban vezető fémek általában NEM szupravezetők (Cu, Ag, Au: réz, ezüst, arany) és a mágneses anyagok is lehetnek szupravezetők. Pl: Fe 20GPa-on 1K es átmeneti hőmérséklettel rendelkezik. Az egyik legjobb sz. vezető elem a NióBium, de 9K-es atm. Hőmérséklete és 0.2T-ás kritikus térerőssége közel sem mondható jónak. A nióbbium és a vanádium szupravezető 2-es típusúak.

Szupravezető ötvözetek és oxidok



1911-1930: Hg,Pb(ólom),Nb(nióbium) : elemi sz. vezetők

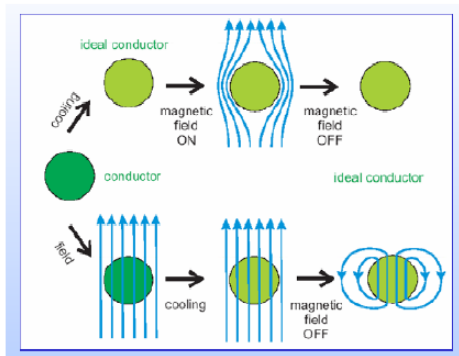
1930-1970 es évek eleje: Nióbbium vegyületek (Nb₃ Sn és Ge): 2-es típusúak.

Nagy áttörés: magas hőmérsékletű sz. vezetők: CuO alapú kerámiák: később Hg,Ba,Ca kerül még a vegyületbe. Fontos: ezek már hűthetőek a 77K forráspontú folyékony nitrogénnel, mely nagy mennyiségben (kb kóla ár) könnyen hozzáférhető, valamint ezen a hőmérséklettartományon a hűtés hatásfoka optimális, szemben az eddigiekkel, melyek jóformán csak folyékony He-al voltak hűthetőek.

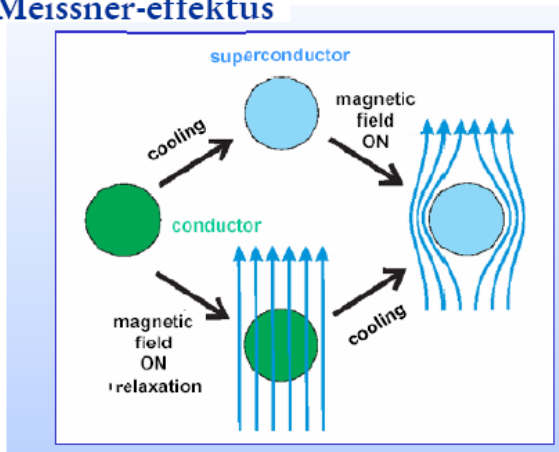
5. A Meissner-effektus.

1933-ban Meissner és Oschenfeld felfedezte (állandó mágnes és szupravezető közötti kölcsönhatást vizsgáltak) az ideális vezető és a szupravezetők közötti különbséget:

Az ideális vezető viselkedése



A Meissner-effektus



Tehát: A szupravezető a minta belsejéből a TELJES fluxust kizorítja! (Néhány atom vastagságú az a felületi réteg, melyen az indukció lecsökken 0-ra. $\leftrightarrow$ Az ideális vezetőben fenntartják az ellenteret a keletkezett áramok, befagyott mágneses tér jön létre.

6. II. típusú szupravezetők kritikus felülete.

Az ellenállás eltűnését Kamerlingh Onnes fedezte fel 1911-ben a folyékony He-on végzett első kísérletei során. Közel tiszta Hg-on végzett mérései: ellenállása 4.2K-en közel zérusra csökkent. 1,5K ig hűtve megállapította, hogy ezer milliomod részére csökkent az ellenállás (az ellenállás eltűnt) az eredetinek. 1912-ben rájött, hogy a normál (rezisztív) állapot nagy áramsűrűségek és mágneses indukciók esetén visszaáll még ilyen alacsony hőmérsékleten is. 1913-ban kapott N díjat.

A szupravezető állapotot meghatározó tényezőket nevezzük kritikus paramétereknek: kritikus áramsűrűség, mágneses térerősség és hőmérséklet. Ha ezeket ábrázoljuk 3 dim. koordináta-rendszerben (kapunk egy felületet, ez a kritikus felület), akkor az anyag sz. v. állapotban van, ha kritikus paraméterei által meghatározott pont, a kritikus felület alatt helyezkedik el.

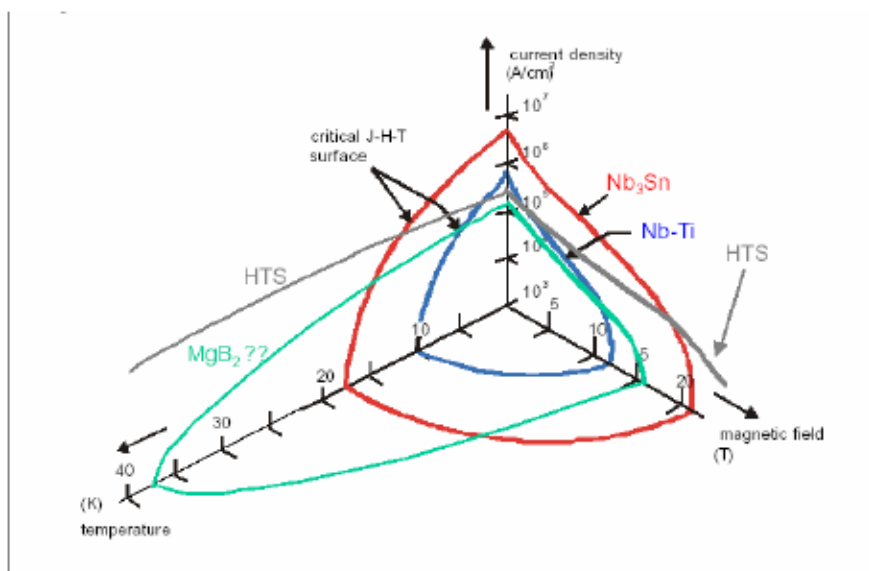
2. típusúak:

Alacsony hőmérsékletű sz. vezetők (10-18K). Pl: Nb-Ti (Nióbium Titán) Héliummal hűthető.

Középhőmérsékletű sz. vezetők (35-38K). Pl: MgB₂ (Magnézium Diborid) Neonnal és hidrogénnel hűthető.

HTS szupravezetők (93-94K, 100-110K) kritikus áramsűrűsége alacsony (10^5 és 10^6 A/cm² között van), de 0K-en a kritikus mágneses térerősség 100T-nál nagyobb. Ezt ábrázolhatjuk is, és megkapjuk az előbbi felületet. Nitrogénnel hűthető.

II. Típusú szupravezetők kritikus felülete



7. A szupravezetők osztályozása.

A szupravezetőköt osztályozhatjuk típus és faj szerint, utóbbi a fizikában fordul elő. Most típus szerint osztályozunk:

Az I. típusúnál a mágneses indukcióvonalak nem hatolnak bele az anyagba, a II. típusúnál a széleibe bele tud hatolni.

Az I. és II. típusú szupravezetők közötti különbség a mágneses tulajdonságokban mutatkozik meg. Valamely B_{kr1} (alsó kritikus indukció) értékéig a II. típusúak is diamágnesesek és érvényes rájuk a Meissner-effektus. A külső mágneses teret tovább növelve azonban az anyag nem veszti el szupravezető tulajdonságát: a mágneses tér behatol a szupravezetőbe, amely ún. kevert állapotba kerül. Ez az állapot mindaddig fennmarad, amíg a mágneses indukció el nem éri a B_{kr2} -vel jelölt (felső kritikus indukció) értékét, ahol a szupravezető - normális vezetési állapotba megy át.

Szupravezetők osztályozása #1

AHS	KHS	MHS	SzHS
Fémes Példák: NbTi, Nb ₃ Sn	Fémes Példa: MgB ₂	Kerámia Példák: YBCO, BSCCO	???
$T_{c, max} = 23,2$ K	$T_{c, max} = 39$ K	$T_{c, max} = 138$ K	Nincs elméleti korlát (USO)
Elméleti: < 30 K Gyakorlati $T_{c, határ} < 77$ K	$T_c \approx 40$ K	Elméleti: > 30 K Gyakorlati $T_{c, határ} > 77$ K	Hűtés nélkül (?)

Szupravezetők osztályozása #2

Típus	Állapot	Feltétel	Megjegyzés
I. típus	Meissner állapot	$B < B_c$	London-féle behatolási mélység
	Normál állapot	$B_c < B$	
II. Típus	Meissner állapot	$B < B_{c1}$	Ideális: pinning-mentes
	Kevert állapot	$B_{c1} < B < B_{c2}$	Nemideális: pinningelt
	Normál állapot	$B_{c2} < B$	

A kritikus áramsűrűségnek az indukciótól való függését a pinningelés nagyban befolyásolja. Rögzítőcentrumok (pinning-center) lehetnek a rácsszimmetriák, pl. a diszlokációk, a szemcsehatárok.

8. A lebegtetési kísérletek tapasztalatai.

YBCO lebegtető NdFeB állandó mágnes.

1. Mágneses tér mentes hűtés: Tapasztalat: Passzív stabilis lebegtetés valósítható meg a sz. vezetővel: az állandó mágnes az érezhető taszítás fellépésekor hozzányomom a szupravezetőhöz „közel”: ezzel az indukcióvonalakat belekényszerítem a sz. vezetőbe, melyek ez után benne maradnak (pinning centrumok keletkeznek: odatűzési pontjai az indukciónak).
2. Mágneses térben hűtöm le (fluxusbefagyasztás): az erővonalak belefagynak a sz. vezetőbe, az áll. mágnes felemelve a sz. vezető ahhoz fog függeszkedni.
3. Felmelegedés vizsgálata: Tapasztalat: Az anyag folyamatosan veszíti el sz. vezető tulajdonságát, a mágnes lassan leereszkedik, míg végül hozzáér a normál állapotú sz. vezetőhöz.

Minden alkalommal tapasztalat: a lebegtetett, magárahagyott mágnes ide-oda forog, erre a mai napig nincs pontos magyarázat.

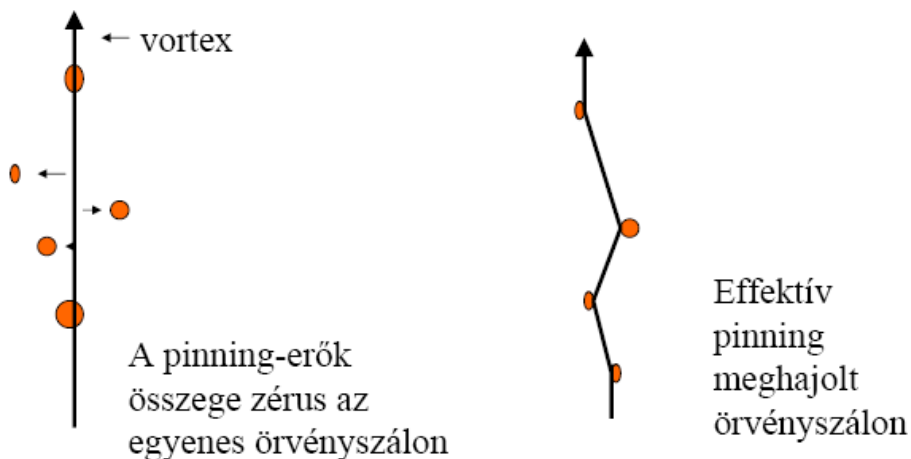
9. Fluxusörvények II. típusú szupravezetőkben

A fluxus-kvantum: A mágneses tér a szupravezetőbe ún. fluxus-örvények (fluxusszálak, örvények) formájában hatol be. Minden egyes fluxus-szál ugyanakkora fluxust tartalmaz, az ún. fluxus-kvantumot, amelynek értéke $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ Vs}$, ahol h a Planck-állandó, e az elektron töltése.

10. Pinning II. típusú szupravezetőkben.

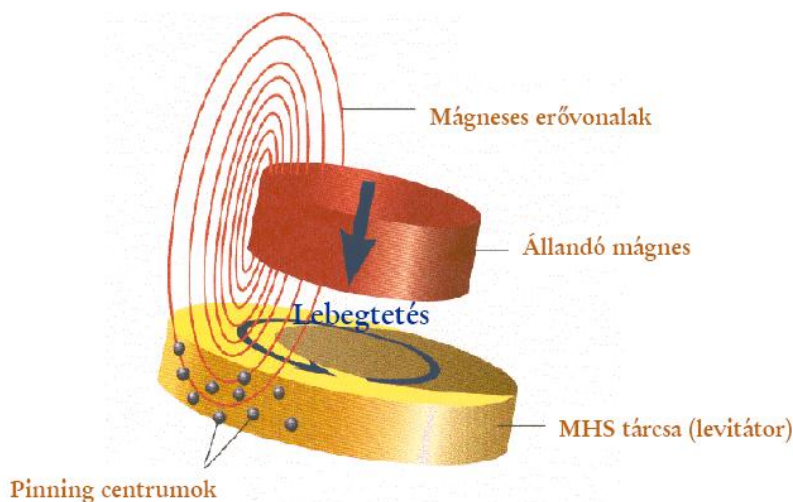
Inhomogén, nemideális II. típusú szupravezető anyagban a fluxusszálak rögzítődnek az inhomogenitásokon. Az inhomogenitások neve „pinning-centrum”, a fluxus-szálak rögzítődése ezeken a pinning-centrumokon „pinning” néven ismert. HTS-nél pinning-centrum létrehozása: nem szupravezető anyagot „keverek” a szupravezető mágneses terébe.

A véletlenszerű pinning problémája kollektív pinning véletlen pontszerű pinning-centrumokon



11. A lebegtetési kísérlet magyarázata. ZFc és FC hűtés.

Lebegtetési kísérlet magyarázata



Tipikus alkalmazott MHS-k: YBCO lebegtető, NdFeB állandó mágnes, Nb-Ti, MgB_2

1. **ZFC = Zero Field Cooled = Mágneses tér mentes hűtés:** Tapasztalat: Passzív stabilis lebegtetés valósítható meg a sz. vezetővel: az állandó mágnes az érezhető taszítás fellépésekor hozzányomom a szupravezetőhöz „közel”: ezzel az indukcióvonalakat belekényszerítem a sz. vezetőbe, melyek ez után benne maradnak (pinning centrumok keletkeznek: odatűzési pontjai az indukciónak).

2. **FC = Field Cooled = Mágneses térben hűtöm le** (fluxusbefagyasztás): az erővonalak belefagynak a sz. vezetőbe, az áll. mágnes felemelve a sz. vezető ahhoz fog függeszkedni.

3. **Felmelegedés vizsgálata: (S→N átmenet folyamata)** Tapasztalat: Az anyag folyamatosan veszíti el sz. vezető tulajdonságát, a mágnes lassan leereszkedik, míg végül hozzáér a normál állapotú sz. vezetőhöz.

Minden alkalommal tapasztalat: a lebegtetett, magárahagyott mágnes ide-oda forog, erre a mai napig nincs pontos magyarázat.

12. Alacsony hőmérséklet előállítása. Fajlagos hűtőtéljesítmény.

Forráspontok: (K)

Helium	4.22
Hydrogen	20.39
Neon	27.09
Nitrogen	77.39

Oxygen

90,18

Szobahőmérséklet „előállítása” kb. 290 K: 1x (egyszeres költség)

77K: 2.9x

30 K: 10x

4 K: 70x

A baloldali táblázatot érdemes megjegyezni. (by Vajda)

A hűtés hatásfoka (fajlagos hűtőteljesítmény)

1 W teljesítmény (alacsony hőmérsékleten) elszállításához szükséges hűtőteljesítmény			Tipikus	
Hűtőgép hatásfoka	$\eta = 100 \%$	$\eta = 20 \%$		
T_{low}, K				
77.3	2.8	14	4,2 K	1000 W
75	2.9	14.5	25 K	125 W
70	3.2	16		
65	3.5	17.5		
40	6.3	31.5	77 K	6-10 W
4.2	68.8	344		

13. Szupravezetős alkalmazások osztályozása.

1. Az előállított mágneses tér nagysága alapján

☐ **Nagy mágneses terű** (high field, *HF*), > 1 T alkalmazások, úgymint generátorok, motorok, fúziós erőművek, magnetohidrodinamika (MHD) és mágneses energiatárolás;

☐ **Kis mágneses terű** (low field, *LF*), < 1 T alkalmazások, úgymint erősáramú kábelek, transzformátorok, áramkorlátozók.

2. Az áramnem alapján

☐ **Egyenáramú** (DC) alkalmazások, úgymint gerjesztő tekercsek, egyenáramú kábelek, homopoláris gépek;

☐ **Váltakozóáramú** (AC) alkalmazások, úgymint váltakozóáramú kábelek, armaturetekercselések, transzformátorok, áramkorlátozók, stb..

3. Az alkalmazások jellege alapján

☐ **Versenyző alkalmazások**, amelyeknek létezik “hagyományos”, nem- szupravezetős megoldása (alternatívája, variánsa), a szupravezetős megoldás a hagyományos alternatívánál jobb műszaki paraméterekkel (tipikus példák a nagyobb hatásfok, kisebb méret és súly) és versenyképes árral kell rendelkezzen; versenyző alkalmazásokra példák a generátorok, transzformátorok, kábelek.

☐ **Résekbe illeszkedő alkalmazások**, amelyeknek – legalábbis az ipari gyakorlatban – nem létezik hagyományos, nemszupravezetős alternatívája. A szupravezetős megoldás olyan rést tölt be, amely hagyományos módon lényegében nem megoldott. Résekbe illeszkedő megoldásokra példák a mágneses energiatároló, a stabilis passzív mágneses csapágyazás, illetve az ilyen csapágyazású energiatároló lendkerék, az áramkorlátozó, továbbá az igen nagy mágneses terek előállítás.

14. Szupravezetők elektrotechnikai alkalmazásainak előnyei és hátrányai.

A szupravezetők előnyei

☐ Nagy áramok veszteségmentes vezetése

☐ Nagy hatásfok (csökkentett CO₂ emisszió)

☐ AC Veszteségek minimalizálhatók

☐ Kis méret és súly

☐ Nagyon nagy áramsűrűségek csökkentik a méretet és súlyt

☐ Alacsony hőmérsékletű üzem

☐ Környezeti szigetelés

- ☐ Olajmentes - környezetkímélő
- ☐ Állandó hőmérséklet – nagyobb élettartam
- ☐ Új, növelt funkciójú eszközök lehetősége

Hátrányok:

- ☐ Komplex technológia
- ☐ Az MHS gyártása ma még korlátozott
- ☐ Költséges
- ☐ Az eszközök megbízhatósága még nem kellően bizonyított

15. A szupravezetők elektrotechnikai (large scale) alkalmazásainak áttekintése.

1. Egyenáramú: Vezető veszteségének kiküszöbölése, gépek és berendezések súlyának csökkentése.

Vezetés: HTS kerámia alapúak ugyan, de 20-30mm-es görbületi sugarukkal jól alakíthatók.

- szupravezetős elektromágnesekben való alkalmazások
- szinkron generátoroknál és motoroknál (generátoroknál több 100MW tól jelentkezik az előny)

2. Váltakozó áramú:

- súly-és méretcsökkentés, ill. az egységteljesítmény növelése a hatásfok növelésével
- energiaátviteli transzformátorok tekercselésében (sima anyaggal: 99%- os hatásfok. 100MW esetén ez sok, a sz. vezetők ezt a veszteséget is csökkentik.
- részecskegyorsítók, fúziós reaktorok tekercseiben, elektromágneses lengéscsillapítókban
- váltakozóáramú kábeleken
- zárlati áramkorlátozó

Még: Szupravezető és állandó mágnes kölcsönhatásával érhető el stabilis passzív(nem kell külső energiát befektetni) lebegtetés (emberlebegtető). Szupravezető csapágy.

Lebegtetett járművek: mágneses szupravezető vonatok.

Vákuumban lendkerék: villamos kinetikus energiaátalakító.

16. A teljesen szupravezetős kiserőmű koncepciója.

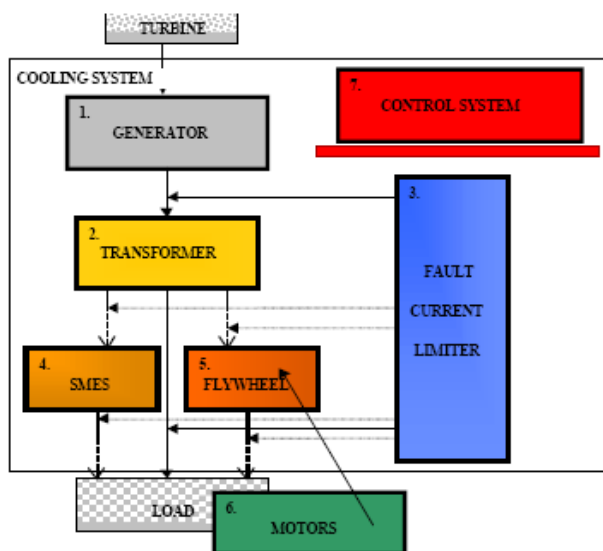
Megújuló energiaforrásokat használ fel általában: az energiatárolás és kis helyigény igényében.

Fontos a környezetvédelem: kis hely, kevés felhasznált anyag, kis szennyezés.

A koncepció: a cél az hogy tervezzünk, és megépítsünk, és teszteljünk egy "teljesen szupravezetős erőműkomplexumot" amit egy szupravezető mini erőmű modellel valósítunk meg a 10 kWos teljesítménytartományban.

A rendszer tartalmaz: szupravezetős generátort, transzformátort, szupravezetős induktív áramkorlátozót, motort és energiatároló eszközöket.

Az egész szupravezetős erőmű(rendszer) jobban illeszthető a villamos hálózatba mint az egyéni szupravezetős eszközök.



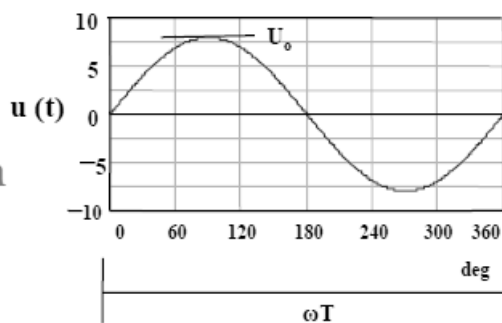
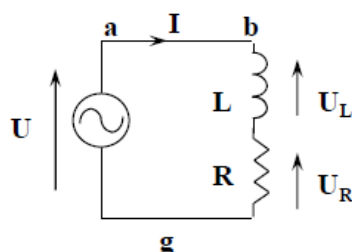
C) GYAKORLATI ÁRAMKÖR-SZÁMÍTÁSI TECHNIKÁK ÉS KONVENCIÓK: EGY- ÉS HÁROMFÁZISÚ HÁLÓZATOK SZÁMÍTÁSA

1. Az egyfázisú rendszerek áramai és feszültségei. A pozitív irányrendszer fogyasztói és generátoros teljesítményre: a feszültségek és áramok pozitív irányai.

- **Egyfázisú hálózatok komponensei:**

- Feszültség- és áramforrások
- Impedanciák (ellenállás, induktivitás, and kapacitás)
- A komponensek sorosan vagy párhuzamosan vannak kapcsolva

Az ábrán egy egyszerű hálózat látható, amelyben egy feszültségforrás (generátor) sorosan kapcsolt ellenállást és induktivitást táplál.



- **A feszültségforrás szinuszos forrásfeszültséget hoz létre**

$$u(t) = \sqrt{2} U_{eff} \sin(\omega t)$$

ahol: U_{eff} a feszültség effektív értéke (V)

ω a szinuszosan változó feszültség körfrekvenciája (rad/sec)

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \text{ rad/sec} \quad f = \frac{1}{T} \text{ Hz}$$

f a frekvencia (60 Hz pl. az USA-ban, 50 Hz Európában).

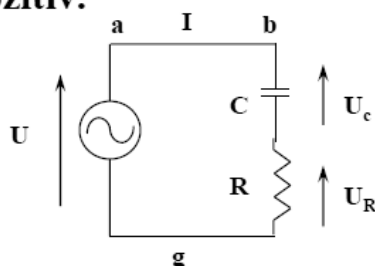
T a periódusidő (s).

- **A feszültség csúcs- vagy maximális értéke:** $U_0 = \sqrt{2} U_{eff}$

Az effektív érték számítása:

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

A feszültség irányát a g-től az a-ba mutató vektor jelöli. Ez azt jelenti, hogy a pozitív félperiódusban az „a” pont potenciálja nagyobb, mint a „g” ponté: a feszültség-emelkedés pozitív.



- Az áram is szinuszos (lineáris esetben)

$$i(t) = \sqrt{2} I_{eff} \sin(\omega t - \varphi)$$

ahol: I_{eff} az áram effektív értéke.

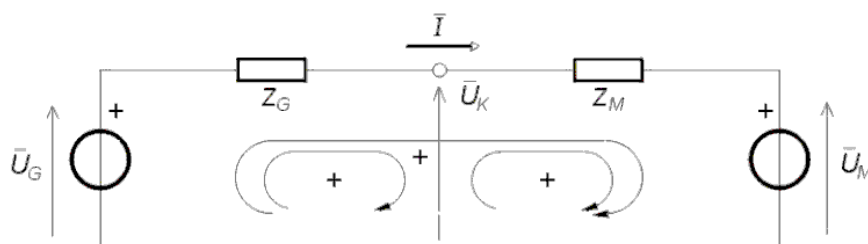
φ az áram és a feszültség közötti fázisszög.

- Az áram effektív értékét az általánosított Ohm-törvény alapján számíthatjuk:

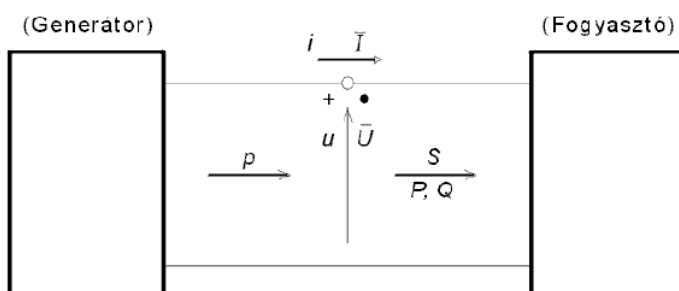
$$I_{eff} = \frac{U_{eff}}{Z}$$

ahol: Z az impedancia

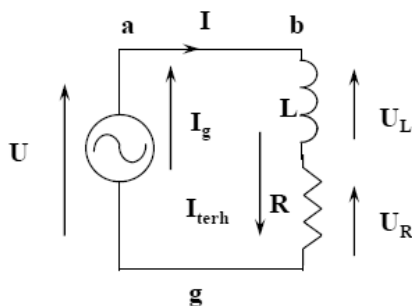
Pozitív irányrendszer
feszültségre, áramra, hurokra



Pozitív irányrendszer fogyasztói és generátoros teljesítményre



- A generátor árama a pozitív félperiódusban a „g”-től az „a”-ba folyik.
- A generátor feszültsége és árama azonos irányú.
- A terhelés árama a pozitív félperiódusban „b”-től „g”-be folyik .
- A terhelés árama és feszültsége (referencia irány szerint) ellentétes irányú: a feszültség-esés negatív.



2. Hurokegyenletek alkalmazása. Ohmos és induktív fogyasztó komplex impedanciája, árama és teljesítménye.

Kirchoff feszültségtörvénye: $\sum u_k = 0$ a hurok feszültségeire = A feszültségek (fázorok) összege bármely hurokban zérus.

A hurok által kijelölt képtpólus feszültségét +-nak tekintjük, ha iránya a hurok irányával megegyező és negatívnak ha irányuk ellenkező.

Impedanciák: mértékegységük $\Omega = \text{Ohm}$

-ellenállás R

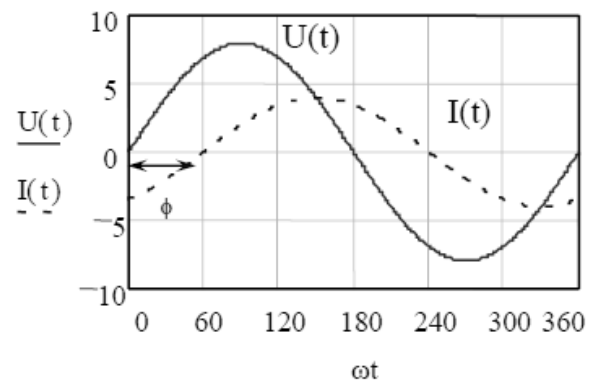
-induktív reaktanciái (tekercs): $X_L = j\omega L$

-kapacitív reaktancia (kondenzátor) : $X_C = 1/j\omega C$

Ohmos teljesítmény: $P = U \cdot I = R \cdot I^2$

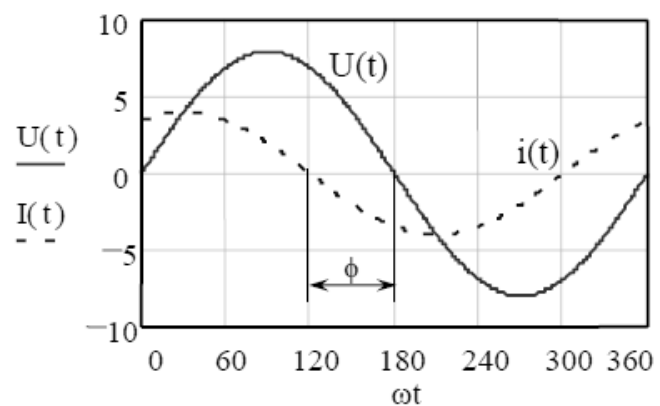
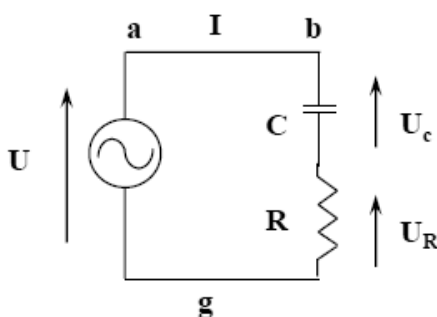
Induktív hálózat

- Az áram és feszültség közötti ϕ fázisszög negatív.
- Az áram (szaggatott vonal) késik a feszültséghez viszonyítva.
- $U_L = L \cdot (I_L)'$
- $P = 1/2 \cdot L \cdot I^2$



Kapacitív hálózat

- Az áram és feszültség közötti fázisszög pozitív.
- Az áram (szaggatott vonal) siet a feszültséghez képest.
- $I_C = C \cdot (U_C)'$
- $P = 1/2 \cdot C \cdot U^2$



Sorba kapcsolt ellenállás és reaktancia impedanciák eredője:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\varphi = \operatorname{atan}\left(\frac{X}{R}\right)$$

Fázisszög:

3. Egyfázisú rendszer teljesítmény-fogalmai. Különböző típusú fogyasztók feszültség-áram fazora és teljesítménye.

Teljesítmények számítása.

A pillanatnyi teljesítmény a feszültség és áram pillanatértékeinek (időfüggvényeinek) szorzata.

$$p(t) = u(t) \times i(t) = \sqrt{2} U \sin(\omega t) \times \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi)$$

ahol:

$$u(t) = \sqrt{2} U \sin(\omega t) \qquad i(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi)$$

- A hatásos teljesítmény $P = UI \cos(\varphi)$

A pillanatnyi teljesítmény átlagértéke a hatásos teljesítmény.

Ezt a teljesítményt szolgáltatja a generátor a fogyasztónak.

- Meddő teljesítmény.

A meddő teljesítmény átlagértéke zérus, mivel ez lüktető (oszilláló) teljesítmény.

$$Q = UI \sin(\varphi)$$

a) A pozitív félperiódusban a meddő teljesítmény a generátortól a fogyasztó felé áramlik.

b) A negatív félperiódusban a meddő teljesítmény a fogyasztó felől a generátor felé áramlik.

- Látszólagos teljesítmény

A rendszer vagy egyes komponensei (generátor, transzformátor stb) teherbíró képességét jellemzi.

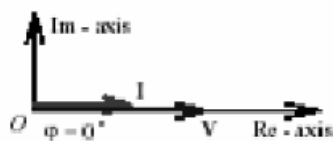
A pillanatnyi teljesítmény időfüggvénye

- Kétszeres frekvenciával oszcillál
- A görbe eltolódott, a pozitív terület nagyobb, mint a negatív.
- Az átlagos átvitt teljesítmény:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

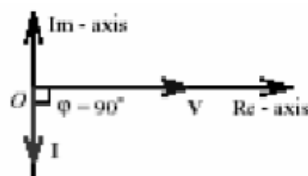
Az impedanciák ($\Omega = \text{Ohm}$):

– a) Ellenállás (R)



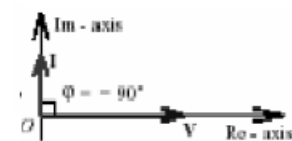
– b) Induktív reaktancia

$$X_L = \omega L$$

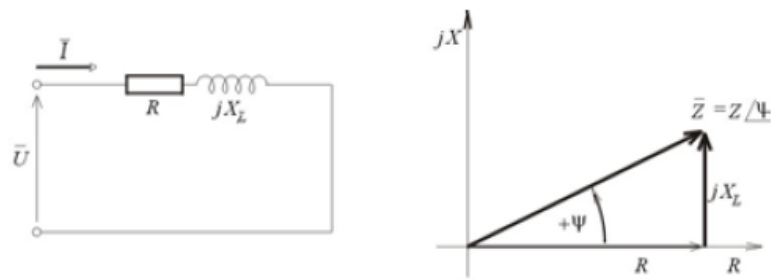


– c) Kapacitív reaktancia

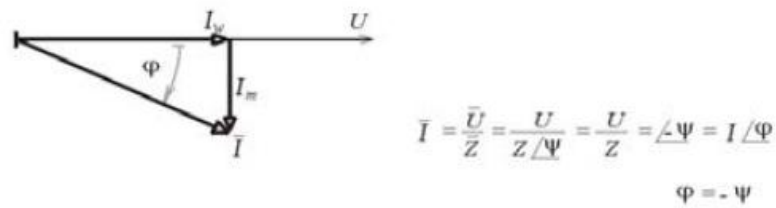
$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$



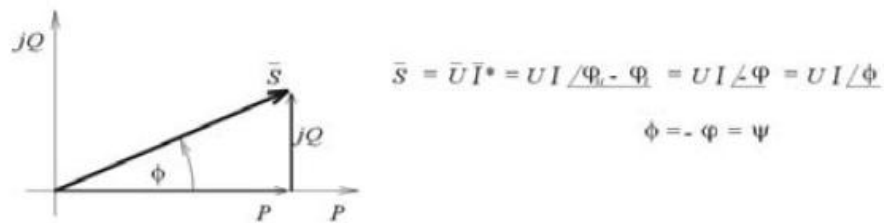
A tipikus ohmos és induktív fogyasztó (motor) komplex impedanciája, árama és teljesítménye:



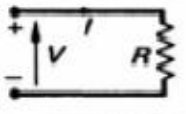
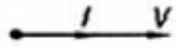
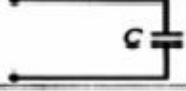
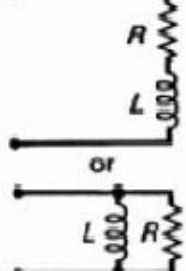
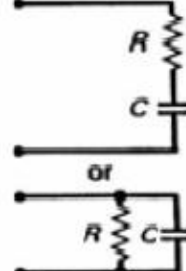
a, impedancia (ψ szög és X_L reaktancia pozitív)



b, áram (ψ szöge és I_m meddő komponense pozitív)



c, teljesítmény (Q meddő teljesítmény és ϕ szög pozitív)

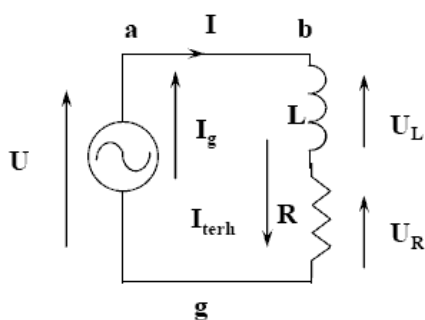
Load type	Phasor relation	Phase angle	Power absorbed by load	
			P	Q
		$\phi = 0$	$P > 0$	$Q = 0$
		$\phi = +90^\circ$	$P = 0$	$Q > 0$
		$\phi = -90^\circ$	$P = 0$	$Q < 0$
		$0 < \phi < +90^\circ$	$P > 0$	$Q > 0$
		$-90 < \phi < 0$	$P > 0$	$Q < 0$

4. Generátoros és fogyasztói teljesítmény előjelek értelmezése. Teljesítmény-mérő bekötése a fogyasztói pozitív irány szerint. Generátor, távvezeték és fogyasztó rendszer áramai és teljesítménye.

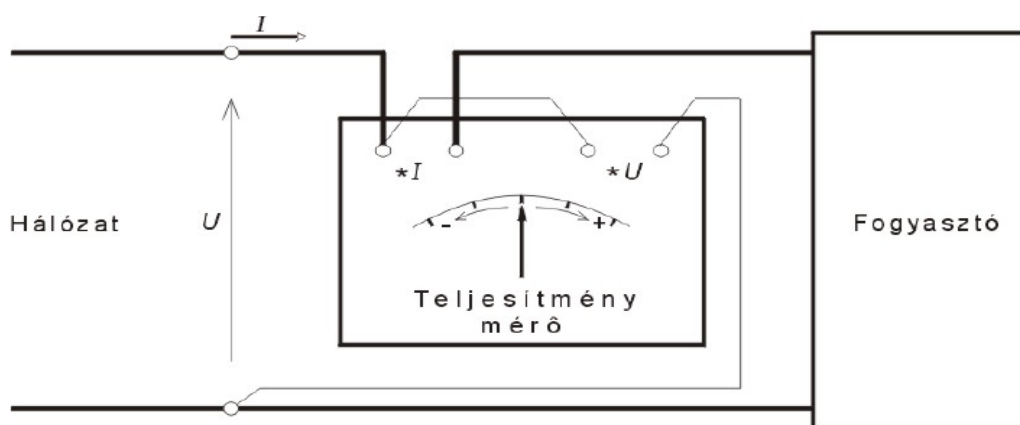
Generátoros és fogyasztói teljesítmény előjelek értelmezése:

Generátoros		Fogyasztói	
Hatásos	Meddő	Hatásos	Meddő
+P szolgáltatás	+Q szolgáltatás (kapacitív)	+P fogyasztás	+Q nyelés (induktív)
-P vételezés	-Q nyelés (induktív)	-P visszatáplálás	-Q visszatáplálás (kapacitív)

- A generátor árama a pozitív félperiódusban a „g”-től az „a”-ba folyik.
- A generátor feszültsége és árama azonos irányú.
- A terhelés árama a pozitív félperiódusban „b”-től „g”-be folyik .
- A terhelés árama és feszültsége (referencia irány szerint) ellentétes irányú: a feszültség- és negatív.

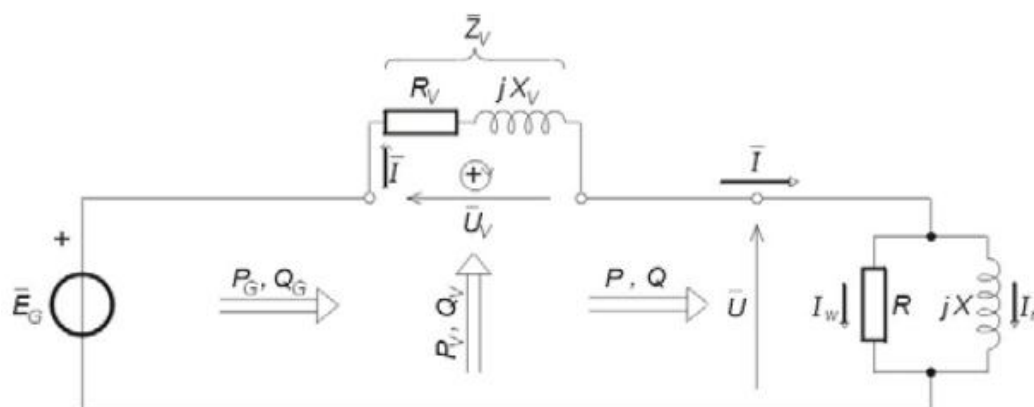


Teljesítmény mérő bekötése a fogyasztói pozitív irány szerint:



A helyettesítő (ekvivalens) egyfázisú kapcsolás egy generátort (esetleg generátorokat) tartalmaz, amely(ek) a fogyasztót egy impedancián (a távvezeték impedanciája) keresztül táplál(nak).

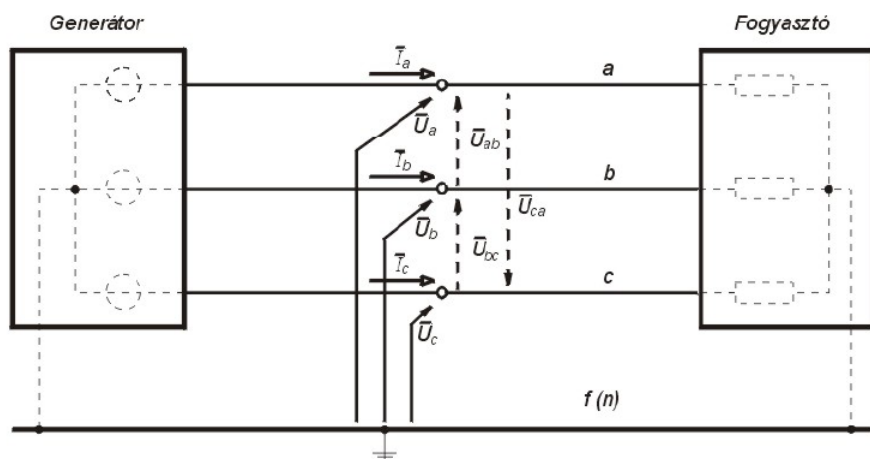




áramköri helyettesítés

5. Szimmetrikus háromfázisú rendszer jellemzése, áram- és feszültségviszonyai; vonali és fázismennyiségek, csillag és delta kapcsolás.

A villamos energia termelése, átvitele, elosztása és felhasználása szinte kizárólag váltakozó áramú, háromfázisú rendszerben történik. Ez alól csak a nagytávolságú, nagyfeszültségű, egyenáramú átvitel és a kisteljesítményű egyedi fogyasztók képeznek kivételt. Különleges, nem háromfázisú nagy fogyasztót jelentenek a váltakozó áramú villamos nagyvasutak is. A háromfázisú rendszer mellett szól mindenekelőtt az, hogy a térben 120 fokos irányokban elhelyezkedő, három tekercsből álló viszonylag egyszerű rendszerben - forgó mágneses mező hatására létrehozható az időben 120 fokkal eltolt háromfázisú elektromotoros-erő rendszer (szinkron generátor) - az időben 120 fokkal eltolt fázisáramok forgó mágneses mezőt eredményeznek, ami az egyszerű (aszinkron) motor alapja. A háromfázisú rendszer előnyei teljes mértékben akkor jelentkeznek, ha a rendszer szimmetrikus. Ilyen előny az átvitelnél pl. az, hogy nem kell visszavezetés (negyedik ú.n. nullavezető), illetve ha van visszavezető (földelt csillagpontú rendszereknél ennek tekinthető a föld is), abban nem folyik áram és ezért veszteség sem keletkezik. További előny az időben (pillanatértékben is) állandó teljesítmény (lásd alábbi b) pontot). A fenti előnyök kihasználására arra törekednek, hogy maga az energiarendszer és annak terhelése is gyakorlatilag szimmetrikus legyen.



a, feszültségek és áramok

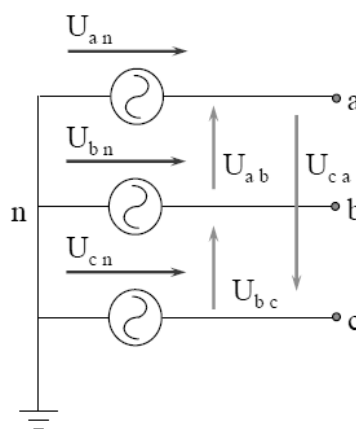
Csillag- vagy Y-kapcsolású rendszer

- A csillagpont földelt
- A fázisfeszültségek abszolút (effektív) értékei egyenlők.
- A feszültségek között fázisszög azonos: 120-120 fok.

$$U_{an} = |U| \angle 0^\circ = U$$

$$U_{bn} = |U| \angle -120^\circ = |U| e^{-j 120 \text{ deg}}$$

$$U_{cn} = |U| \angle -240^\circ = |U| e^{-j 240 \text{ deg}}$$



Csillag (Y) kapcsolású rendszer

- A vonali feszültségek a fázisfeszültségek (fázor) különbségei

$$U_{ab} = U_{an} - U_{bn} = \sqrt{3} U$$

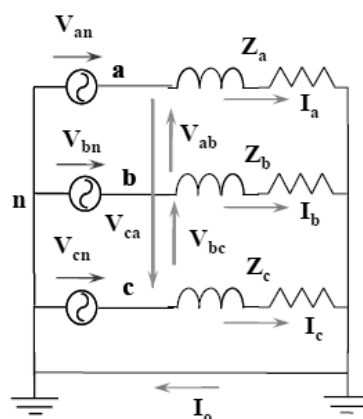
$$U_{bc} = U_{bn} - U_{cn} = \sqrt{3} U$$

$$U_{ca} = U_{cn} - U_{an} = \sqrt{3} U$$

Csillagkapcsolású rendszer terheléssel

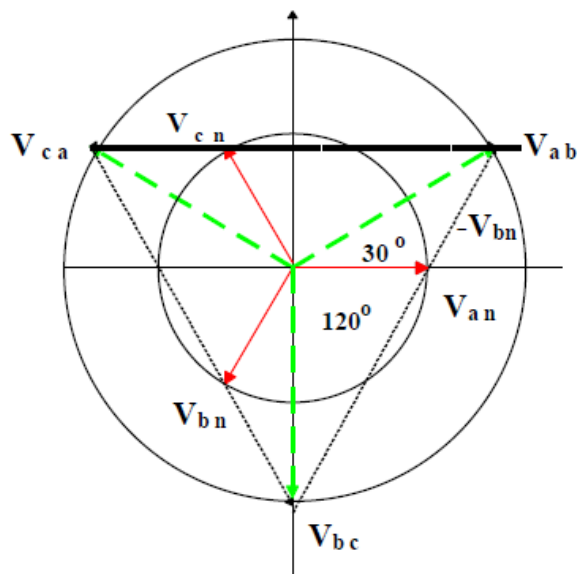
- A terhelés impedanciái: Z_a, Z_b, Z_c
 - Minden fázisfeszültség a megfelelő impedancián áramot hajt át.
 - A fázisáramok kifejezései:
- $$I_a = \frac{U_{an}}{Z_a} \quad \text{és} \quad I_b = \frac{U_{bn}}{Z_b} \quad \text{és} \quad I_c = \frac{U_{cn}}{Z_c}$$
- A negyedik (nulla) vezető ([föld]visszavezetési) árama

$$I_0 = I_a + I_b + I_c$$

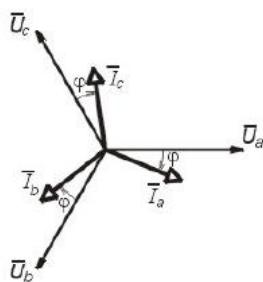


Csillag (Y) kapcsolású rendszer

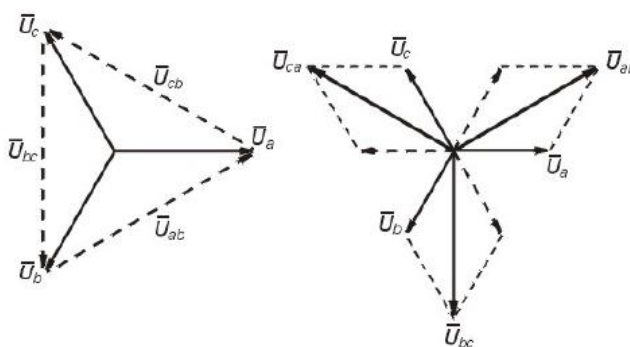
- Fazorábrát használunk a feszültségek megjelenítésére és számítására
- Az Y-kapcsolásban megjelennek a
 - **fázis- és a**
 - **vonali feszültségek.**
- A fázisfeszültségek egymáshoz képest 120-120 fokkal vannak eltolva.
- Hasonlóképpen a vonali feszültségek is egymáshoz képest 120-120 fokkal vannak eltolva.
- A vonali feszültsége 30 fokkal siet a fázisfeszültséghez képest.
- A vonali feszültség nagysága (effektív értéke) $\sqrt{3}$ -szorosa a fázisfeszültségnek.



Delta (háromszög) kapcsolású fogyasztó



c, áram és fázis feszültség fazorok



d, fázis és vonali feszültség fazorok

Delta- vagy háromszög kapcsolású rendszer

A vonali áramok:

$$I_a = I_{ab} - I_{ca}$$

$$I_b = I_{bc} - I_{ab}$$

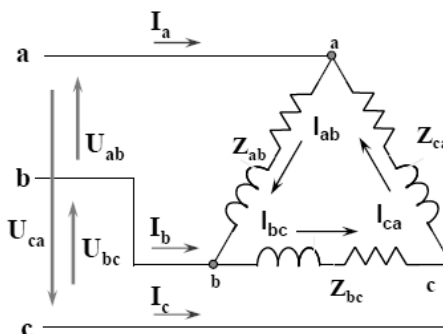
$$I_c = I_{ca} - I_{bc}$$

- Kiegyenlített esetben:

$$I_a = \sqrt{3} I_{ab} e^{-j30^\circ}$$

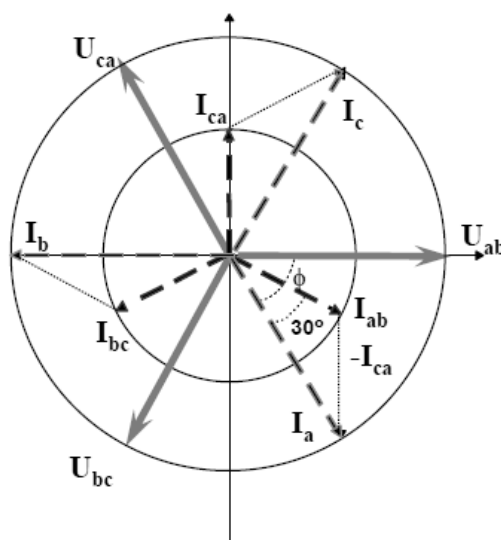
vagy

$$I_{\text{vonali}} = \sqrt{3} I_{\text{fázis}} e^{-j30^\circ}$$



Delta-kapcsolású rendszer

- Fázorábrát használunk az áramok és feszültségek megjelenítésére és számítására.
- Egyféle feszültségünk van: a vonali (a fázisfeszültség ezzel megegyezik).
- Kétféle áramunk van:
 - Fázisáram és
 - Vonali áram
- A vonali feszültségek közötti fázisszög 120-120 fok.
- A fázisáramok 30 fokkal sietnek a vonali áramok előtt.
- A vonali áramok nagysága (effektív értéke) $\sqrt{3}$ -szorosa a fázisáramoknak.



6. Szimmetrikus háromfázisú rendszer teljesítmény összefüggései; a meddő teljesítmény értelmezése.

A teljesítmények számítása

- A háromfázisú teljesítmény a fázisok teljesítményeinek összege

$$P = P_a + P_b + P_c$$

- Kiegyenlített terhelés esetén:

$$P = 3 P_{\text{fázis}} = 3 U_{\text{fázis}} I_{\text{fázis}} \cos(\varphi)$$

- Y-kapcsolású rendszerben: $U_{\text{fázis}} = U_{\text{fn}}$, $I_{\text{fázis}} = I_v$, $U_v = \sqrt{3} U_{\text{fn}}$

$$P = 3 U_{\text{fázis}} I_{\text{fázis}} \cos(\varphi) = \sqrt{3} U_v I_v \cos(\varphi)$$

- Delta kapcsolású rendszerben: $I_v = \sqrt{3} I_{\text{fázis}}$, $U_v = U_{\text{fázis}}$

$$P = 3 U_{\text{fázis}} I_{\text{fázis}} \cos(\varphi) = \sqrt{3} U_v I_v \cos(\varphi)$$

Teljesítmények számítása

- Csillag kapcsolású rendszerben:

$$S_{3_fázis} = 3 U_{\text{fázis}} I_{\text{fázis}}^* = 3 \overline{U_{an}} \overline{I_a}^* \quad P_{3_fázis} = \operatorname{Re}(S_{3_fázis})$$

- Delta kapcsolású rendszerben:

$$S_{3_fázis} = 3 U_{\text{fázis}} I_{\text{fázis}}^* = 3 \overline{U_{ab}} \overline{I_{ab}}^* \quad P_{3_fázis} = \operatorname{Re}(S_{3_fázis})$$

Gyakorta használjuk a viszonylagos egységeket, illetve azok rendszerét a mennyiségek abszolút értékei helyett. A viszonylagos egység, melyet százalékokban vagy p.u.-ban (tizedes számokkal) szokás megadni, bármely mennyiség (áram, feszültség, impedancia, teljesítmény) aránya egy választott (általában a névleges) bázismennyiséghez.

$$S_{pu} = \frac{S_{\text{valóságos}}}{S_{\text{alap}}} \quad U_{pu} = \frac{U_{\text{valóságos}}}{U_{\text{alap}}}$$

$$I_{pu} = \frac{I_{\text{valóságos}}}{I_{\text{alap}}} \quad Z_{pu} = \frac{Z_{\text{valóságos}}}{Z_{\text{alap}}}$$

A viszonylagos egységek használata egyszerűsíti a számításokat, például a transzformátorok kiiktathatóak a vizsgált hálózathoz.

A vetítési alap a névleges feszültség és a névleges látszólagos teljesítmény. Ezekkel az impedancia alapértéke:

$$S_{\text{névleges}} = I_{\text{névleges}} U_{\text{névleges}}$$

D1)A háromfázisú vektorok módszere

1. **Definíció. Fizikai bevezetés. Háromfázisú tekercselés térvektora. Térvektor szerkesztése háromfázisú szimmetrikus állapotban. Követelmények a fázismennyiségek időbeli változására vonatkozóan.**

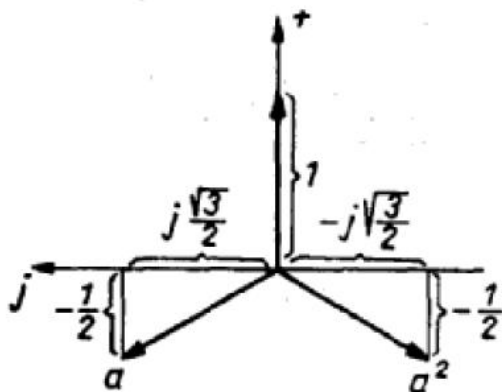
Definíció

Az eredő háromfázisú áramvektor definíciószerűen:

$$i = i_{\text{valós}} + j i_{\text{képzetes}} = \frac{2}{3} \left[i_a + \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) i_b + \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) i_c \right]$$

Az i_b ill. i_c áramok szorzói a , ill. a^2 (lásd ábra), és így a háromfázisú áramvektor definíciós egyenlete:

$$i = \frac{2}{3} (i_a + a i_b + a^2 i_c)$$



1. ábra:

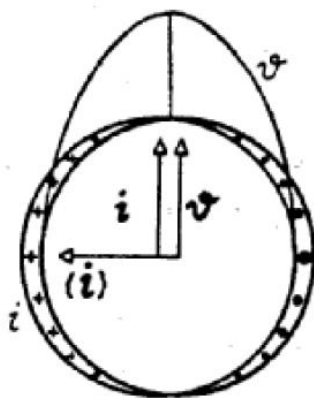
A háromfázisú egységvektorok komplex alakja

A definíció ebben az eredeti fogalmazásban tiszta matematikai műveletet, koordináta transzformációt jelent. A villamos forgógépekben azonban a háromfázisú vektoroknak szemléletes fizikai értelmezést is tulajdoníthatunk, ami gépeink belső viszonyainak kitűnő áttekintésére és pl.

gép-áramirányító rendszer egyedülálló vizsgálatára, valamint más sajátos előnyökre vezet, amelyek következtében a módszer világszerte kezd elterjedni.

A következőkben bemutatásra kerülő fizikai értelmezés, ill. fizikai bevezetés az alapja a vektoroknak a szűkebb, a villamos gépek elméletében használatos másik nevének, a térvektor elnevezésnek. A háromfázisú vektor név tehát az általánosabb. A térvektor elnevezést és értelmezést előbbi szűkebb területre vonatkozó alfajának tekinthetjük. Szokásos még a Park-vektor, újabban Ráczevektor, eredővektor, és a félreérthető „szimmetrikus összetevők pillanatértéke” elnevezés is.

A fizikai bevezetés



2. ábra:

Szinuszos áram- és gerjesztéseloszlás térvektora

A gerjesztési görbe felrajzolásakor látjuk, hogy a légrés mentén az egyre táguló görbék által körülfogott áramok összege a gerjesztés. Az ábrán a kerület mentén folytonosan és szinuszosan eloszlónak képzelt áramok - áramréteg - esetében a gerjesztési görbe is térbeli szinusz alakú görbe. Ezt a térbeli gerjesztéseloszlást a pozitív maximum helyén rajzolt, a maximummal arányos nagyságú θ gerjesztési térvektorral jellemezhetjük. Mivel a kerület menti szinuszos árameloszlás legnagyobb értéke és a gerjesztés csak egy állandó tényezővel, a hatásos menetszámmal tér el egymástól, az árameloszlást is jellemezhetjük egy-egy pillanatban egy, a maximális áramérték helye helyett a maximális gerjesztés helyén rajzolt *i* áramtérvektorral. A mező is arányos θ -val, így a *b* indukció jellemzése hasonlóan történhet.

Egy fázistekercs áramának tetszőlegesen kiragadott pillanatértékéhez tehát a tekercs tengelyének irányában elhelyezkedő rögzített helyzetű, a pillanatérték nagyságával és előjelével megszabott hosszúságú és értelmű áram fázistérvektor tartozik. Az egyes fázistekercsek tengelyeit a 0° , 120° , ill. 240° térbeli szöggel elforgatott egységvektorok, tehát $\mathbf{1}$, $\mathbf{a}$ és $\mathbf{a}^2$ jelölik ki. Tetszőlegesen kiragadott pillanatban a három fázistekercs áramainak össze tartozó pillanatértékeihez tartozó áram

fázistérvektorait a tekercsek tengelyeiben, tehát az $1, a, a^2$ irányokban - értelemre helyesen - felrajzolva és vektorosan összegezve a háromfázisú tekercselés térvektorát nyerjük.

Így a háromfázisú eredőáram

$$1i_a + ai_b + a^2i_c$$

az a háromfázisú eredőgerjesztés az

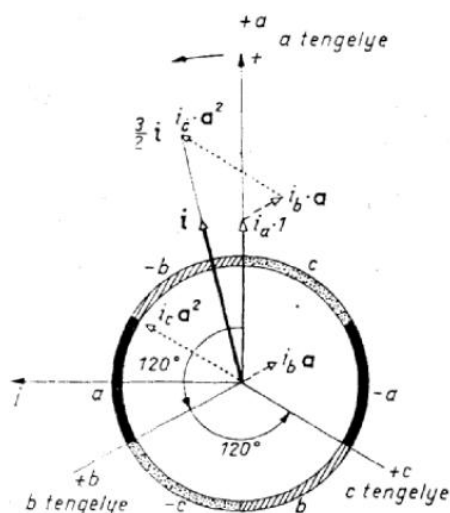
$$1\mathcal{G}_a + a\mathcal{G}_b + a^2\mathcal{G}_c$$

kifejezéssel írható le.

Az összegzést a következő ábrán látjuk. Az eredő áramtérvektort - alább látható okokból célszerűen nem a három fázisvektor összegével hanem annak $2/3$ részével jellemezzük

$$i = \frac{2}{3}(i_a + ai_b + a^2i_c)$$

Ez az áram háromfázisú vektora, Park-vektora vagy térvektora. A három fázisáramot egyetlen mennyiségben összefoglalva jellemeztük.

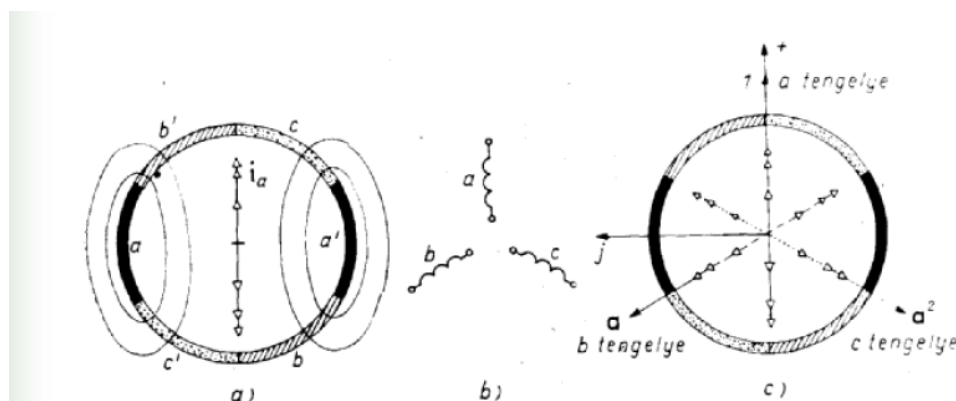


3. ábra: A szimmetrikus állandósult állapot háromfázisú vektorának szerkesztése

A Park-vektort a fázisáramok tetszőleges összetartozó pillanatértékeire egy adott kiragadott időpontra definiáltuk és rajzoltuk fel. Az tehát az áramok tetszőleges időbeli változásakor alkalmazható. A fázisvektorok összegzésének feltétele a kerület menti szinuszos változás volt. Az eredő térvektorok alkalmazásának feltétele így definíciójuk értelmében - a szimmetrikus felépítésű háromfázisú tekercselés mellett az egyes mennyiségek szinuszos kerület menti eloszlása. A térvektor értelmezésének megkönnyítésére rajzoljuk fel néhány jellegzetes esetre az eredő háromfázisú vektor változását, végpontjainak geometriai helyét. Ezt úgy követhetjük a legkényelmesebben, ha az

áramok időbeli változásának egymást elég sűrűn követő pillanataiban megszerkesztjük az eredővektort.

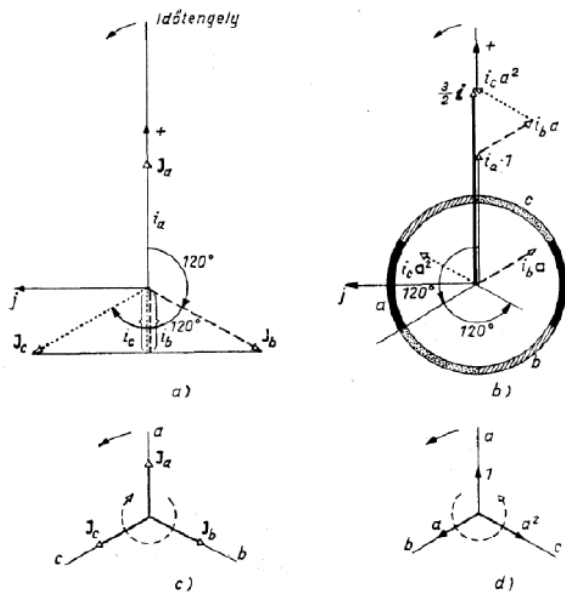
Tegyük ezt először az időben állandósult szimmetrikus esetben, amikor az áramok szinuszos szimmetrikus három fázisú rendszert alkotnak. Az egyes tekercseket időben változó nagyságú és irányú áramokkal táplálva azok mezeje külön-külön a térben helyben marad, mindig szinuszos térbeli eloszlású, de nagysága és iránya az áram pillanatértékeivel együtt változik. Így az egyes fázisok gerjesztés-, ill. árameloszlásai a kerület mentén rögzített helyen maradnak és így rögzített helyen marad az azokat jellemző térvektor is. Csúpan e vektorok hossza, ill. értelme változik. A következő ábrán θ a, ill. i_a vektorokat láthatjuk, ha a b és c fázistekercs árammentes és csak az a tekercsben folyik áram. A c ábrán az egyes fázisok áramvektorainak változását látjuk, ha azokat nem összegezzük.



4. ábra:

Háromfázisú tekercselés fázistekercseinek lüktetőmezői

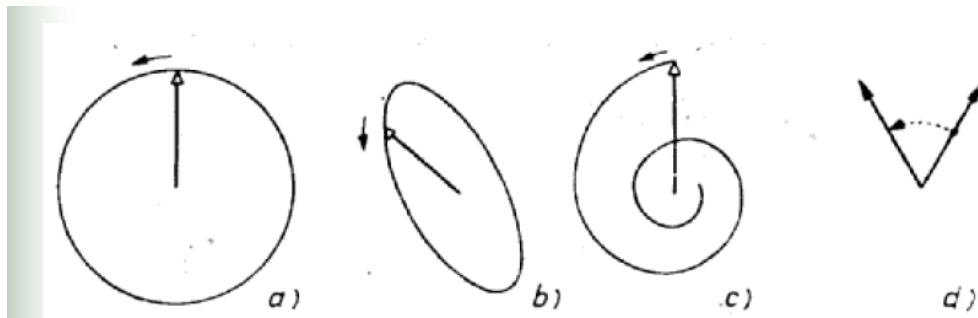
A háromfázisú tekercselés eredőgerjesztését az áramok tetszőleges időbeli váltakozásakor tetszőleges időpontban megkaphatjuk, ha a fázisok gerjesztéseit a kérdéses időpontban összegezzük. Az eredővektor végpontja által leírt görbét pontról pontra szerkeszthetjük meg, ha ezt az összegezést - célszerűen választott egymást követő időpontokban - elvégezzük. Válasszuk elsőnek azt a pillanatot, amikor pl. az a fázis árama éppen maximum. Az i_a -t jellemző térbeli áramvektort az a tekercs tengelyében, pozitív irányban, maximális értékkel kell felrajzolnunk (b ábra). Az i_b áram pillanatértéke ekkor feleakkora és negatív előjelű. Vektorát tehát fél maximum nagyságban a b tekercs tengelyére negatív irányban kell felrajzolni. Ugyanez vonatkozik a c tekercs térvektorának felrajzolására is. A tekercsek térbeli sorrendje itt is a forgásiránnyal egyező, míg az egymást követő idővektorok egymáshoz viszonyítva késnek, és így az időbeli ábrán a fázisok áramai egymást a forgásiránnyal ellentétes irányban követik (c, d ábrák).



5. ábra
A háromfázisú
áramvektor
szerkesztése
szimmetrikus
állandósult állapot

A szimmetrikus állandósult állapotban az eredővektor állandó nagyságú, így végpontja kört ír le és eközben a vektor szögsebessége is állandó. Ezt később igazoljuk majd. Az eredővektor akkor is megszerkeszthető, ha a tápláló áramrendszer pl. aszimmetrikus. Az előzővel megegyezően kiragadott pillanatban ekkor az eredő vektor általában nem esik az a tekercs tengelyébe (3. ábra), és a vektor végpontja nem kört, hanem ellipszist szélso esetben egyenest - ír le (6 a, b ábrák). A három fázisáramot a Park-vektorral összefoglalva jellemeztük. Az eredő áramvektor minden pillanatban az eredőgerjesztés irányába mutat, ezért úgy képzelhető, hogy a három, térben 120° -ra eltolts gerjesztést az eredő irányába eső tengelyű, $3/2$ - ed effektív menetszámú, egyetlen, képzelt, forgó tekercs helyettesítettük, amelynek gerjesztése a térben ugyancsak szinuszos eloszlású. A hatásos menetszám az elosztottal egyenértékű koncentrikus tekercs menetszáma.

A Park-vektor azonban nemcsak időben szinuszos - állandósult - aszimmetrikus esetben alkalmazható. Definíciójakor - mind a matematikai, mind a fizikai bevezetéskor - csak a tekercsek térbeli szimmetriáját és a térbeli, gyakorlatilag szinuszos eloszlást kötöttük ki - valamint egyelőre a zérus sorrendű áram hiányát -, de az egyes fázisáramok időbeli változására semminemű kikötést nem tettünk. Azok tehát tetszőleges időbeli változásúak lehetnek, így szinuszosak, periodikusak felharmonikusokkal, tranziensek, sőt lehetnek egyenáramok vagy bármilyen más időbeli lefolyásúak. A Park-vektor - ebben a még nem legáltalánosabb megfogalmazásban - a forgó tér vagy gerjesztés általánosabb alakja. A forgó vektor nagysága és sebessége is változhat itt - ekkor a 6c ábra zsugorodó vektorát nyerjük - sőt még ugrása is lehetnek (d ábra), mint pl. vezérelt félvezető kapcsolóknál.



6. ábra. A háromfázisú áramvektor végpontjának pályája állandósult szimmetriku
(a), aszimmetrikus
(b), tranziens
(c) esetben.

A háromfázisú vektor ugrásokat is végezhet
kapcsolások hatására (d)

2. A háromfázisú vektor mint transzformáció: pillanatértékek képzése, zérussorrendű mennyiségek kezelése.

A Park-vektor *vetületei* a fázistengelyekre a fázismennyiségek pillanatértékeit adják előjelre helyesen.

Így az

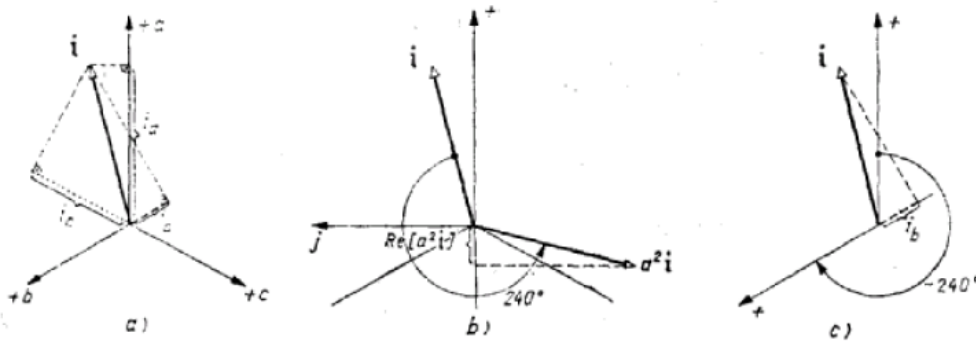
$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad i_a + i_b + i_c = 0$$

összefüggésekkel (8. ábra):

$$\operatorname{Re}[i] = \operatorname{Re}\left[\frac{2}{3}(i_a + ai_b + a^2i_c)\right] = \frac{2}{3}\left(i_a - \frac{i_b}{2} - \frac{i_c}{2}\right) = i_a$$

és hasonlóan:

$$\operatorname{Re}[a^2i] = i_b \quad \operatorname{Re}[ai] = i_c$$



8. ábra. A fázismennyiségek pillanatértékeinek szerkesztése

a térvektor vetítésével (a).

Az i fázisáram szerkesztése az áramvektor (b),

ill. a koordináta-rendszer (c) elforgatásával

Utóbbiakról egyszerű behelyettesítéssel vagy oly módon is meggyőződhetünk, ha meggondoljuk, hogy pl. az i_b vetületképzés céljából a^2 -nek megfelelően, vagy a vektort (5b ábra) vagy az egész koordináta-rendszert ellenkező irányban 240° -kal elforgatjuk (5c ábra).

A térvektor síkvektor, amelyet két adat (pl. a két komponense vagy a nagysága és fázisszöge) meghatároz.

Ez a három fázisáramot azáltal determinálja, hogy mint láttuk, azok nem függetlenek, hanem az

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

egyenlet köti őket össze.

Ha most elhagyjuk ezt az eddigi kikötésünket, és feltesszük, hogy zérus sorrendű áram is folyik, akkor a fázisáramok pillanatértékei

$$i_a = i_a' + i_0 \quad i_b = i_b' + i_0 \quad i_c = i_c' + i_0$$

és mivel az előbbieket szerint, így

$$i_a + i_b + i_c = 3i_0$$

A térvektor a zérus sorrendű áramot nem tartalmazza, mert az

$$i = \frac{2}{3}(i_a + ai_b + a^2 i_c) = \frac{2}{3}[(i_a' + i_0) + a(i_b' + i_0) + a^2(i_c' + i_0)] =$$

$$\frac{2}{3}[i_a' + ai_b' + a^2 i_c' + i_0(1 + a + a^2)] = \frac{2}{3}(i_a' + ai_b' + a^2 i_c')$$

összefüggés szerint abból kiesik.

A zérus sorrendű áramot tehát külön kell figyelembe venni.

A térvektorra vezető koordinátatranszformáció egyenletei tehát az összetevésekor - a fázismennyiségekből a vektormennyiségek irányában -

$$\left. \begin{aligned} \frac{2}{3} \left(i_a - \frac{1}{2} i_b - \frac{1}{2} i_c \right) \\ j \frac{2}{3} \left(0 + \frac{\sqrt{3}}{2} i_b - \frac{\sqrt{3}}{2} i_c \right) \end{aligned} \right\} \frac{2}{3} (i_a + ai_b + a^2 i_c) = i \quad abc \rightarrow i$$

$$\frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c) = i_0$$

ill. a felbontáskor — a vektorból a fázismennyiségekbe

$$i_a = \operatorname{Re}[i] + i_0$$

$$i_b = \operatorname{Re}[a^2 i] + i_0 \quad i \rightarrow abc$$

$$i_c = \operatorname{Re}[ai] + i_0$$

3. *Szimmetrikus állandósult állapot: az idővektor és a térvektor kapcsolata pozitív és negatív sorrendű áramrendszerek esetében.*

Az állandósult pozitív sorrendű szimmetrikus állapotban az áramvektor kifejezése definíciója alapján

$$i = \frac{2}{3} [I_+ \cos(\omega t + \varphi_+) + a I_+ \cos(\omega t + \varphi_+ - 120^\circ) + a^2 I_+ \cos(\omega t + \varphi_+ - 120^\circ)]$$

A fázisáramok itt egyenlő nagyságú, egymástól időben egyező szögekkel eltolt és a választott fázissorrenddel megegyező sorrendű, tehát tiszta pozitív sorrendű szimmetrikus áramrendszert alkotnak, így a következőben + indexet alkalmazunk.

A koszinusz függvényeket exponenciális alakba átírva - amely pl. a második fázisra

$$\cos(\omega t + \varphi_+ - 120^\circ) = \frac{e^{j\omega t} e^{j\varphi} a^2 + e^{-j\omega t} e^{-j\varphi} a}{2}$$

alakú -, majd a szorzásokat elvégezve és $e^{j\omega t}$ ill. $e^{-j\omega t}$ szerint rendezve:

$$i = \frac{1}{3} I_+ [e^{j\omega t} e^{j\varphi} (1 + a^3 + a^3) + e^{-j\omega t} e^{-j\varphi} (1 + a^2 + a^4)]$$

Mivel $1 + a^3 + a^3 = 3$ és $1 + a^2 + a^4 = 0$

$$i = I_+ e^{j\varphi} e^{j\omega t} = I_{a+} e^{j\omega t} = \hat{I}_{a+} \quad i = I_{a+} e^{j\omega t} = \hat{I}_{a+}$$

A szimmetrikus állandósult állapotban tehát a térvektor megegyezik a komplex idővektorral, ha tetszik, az „a” fázis komplexorává fajul el.

A vektor állandó szögsebességgel forog, és végpontja kört ír le. Vetületei egy megfelelő időtengelyre az áram szinuszosan változó pillanatértékeit szolgáltatják.

Ilyenkor a térvektorok ábrái és a szokásos időbeli vektorábrák megegyeznek, és így azokat egymás helyett lehet rajzolni, ill. az egyikből a másik nyerhető.

Ez a „felcserélhetőség” azonban csak ebben a speciális üzemállapotban érvényes.

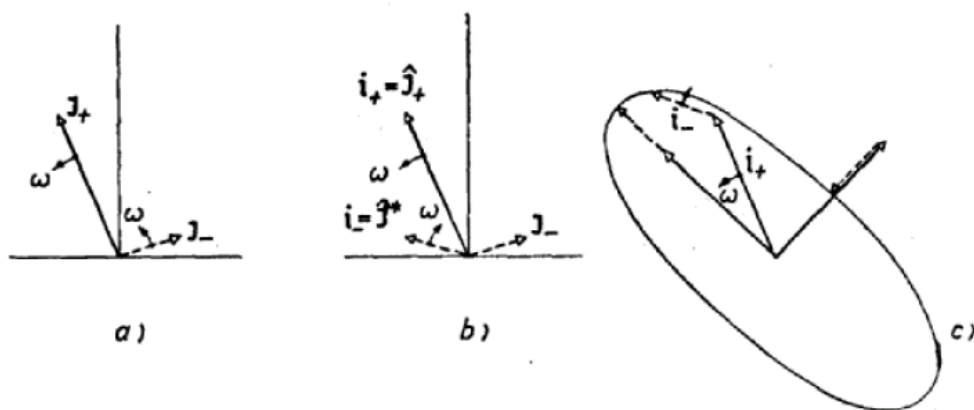
Tiszta negatív sorrendű szimmetrikus állandósult háromfázisú áramrendszer esetén a kifejezésben az ellenkező fázissorrendnek megfelelően a^2 és a helyet cserélnek, és így ebben az esetben az

$$i = I_- e^{-j\varphi} e^{-j\omega t} = I_{a-}^* e^{-j\omega t} = \hat{I}_{a-}^*$$

$$i = I_{a-}^* e^{-j\omega t} = \hat{I}_{a-}^*$$

összefüggésre jutunk. Negatív sorrendű szimmetrikus áramrendszer esetén a térvektor az a fázis negatív sorrendű idővektorának konjugáltjával egyenlő.

A térvektor így I_a^* amplitúdóval a választott forgásiránnyal ellentétes irányban állandó szögsebességgel szinkron forog körbe.



9. ábra.

(a) A szimmetrikus áramösszetevők idővektorai,
 (b) térvektorai,
 és (c) az eredőáram térvektor végpontjának ellipszis pályája

Hangsúlyoznunk kell, hogy a pozitív, ill. negatív sorrendű mennyiségek *idővektorai* a komplex időszámsíkon egyformán pozitív irányban, tehát egyezően forognak (9a ábra), és csak a *térvektorok* komplex térszámsíkján forog a negatív sorrendű térvektor a konjugált képzés következtében a pozitív sorrendű térvektorral ellenkező, negatív irányban (9b ábra)..

Állandósult aszimmetrikus szinuszos - zérus sorrendű összetevőt nem tartalmazó - üzemiállapotban az eredő térvektor a pozitív és a negatív sorrendű térvektorok összege: A két szembeforgó vektor eredőjének végpontja ellipszist ír le (9c ábra), amelynek nagy tengelye $i_+ + i_-$ a pozitív és negatív sorrendű áramvektorok amplitúdóinak összege, kistengelye pedig $i_+ - i_-$ a pozitív és negatív sorrendű áramamplitúdók különbsége. Ha a pozitív és negatív sorrendű összetevő egyenlő nagy, az ellipszis egyenessé), tehát a mező tiszta lüktetőmezővé fajul el, ha pedig i_+ vagy i_- zérus, akkor kört, tehát tiszta körforgó mezőt kapunk.

D1) A háromfázisú vektorok módszere

3. Szimmetrikus állandósult állapot: az idővektor és a térvektor kapcsolata pozitív és negatív sorrendű áramrendszerek esetében.

E) A transzformátorok működése

E1) Bevezetés

1. Példák vasmagos és vasmentes tekercsekre. A transzformátorok jellegzetességei és alkalmazásai.
2. Növekedési törvények.

E2) Egyfázisú transzformátorok

1. Működési elv, a vasmag, a vasveszteség, a tekercselés.
2. Fő- és szórt fluxus, az indukált feszültség számítása.
3. Az ideális transzformátor, a fogyasztói pozitív irányrendszer, feszültség-egyenletek, viszonylagos egységek.
4. Mágneses Ohm-törvény, feszültség-kényszer, a gerjesztések egyensúlyának törvénye, áram-áttétel.
5. Gerjesztés- és teljesítményinvariancia, redukálási szabályok, az impedancia-elemek nagyságrendjei.
6. A térelméleti helyettesítő kapcsolás, egyszerűsített helyettesítő kapcsolások.
7. Fázorábra: üresjárási és terhelési állapot.
8. Feszültség- és áramtranszformátor.
9. A transzformátor feszültségváltozása. A transzformátor rövidzárási állapota. A drop fogalma.

E3) Háromfázisú transzformátorok

1. Származtatás, működési elv, az üresjárási áram aszimmetriája.
2. Aszimmetrikus terhelés, kiegyenlített gerjesztés, a feszültség-rendszer aszimmetriája.
3. Háromfázisú transzformátorok kapcsolásai, órajel, kapcsolási csoport.

F) Az elektromechanikai átalakítók mágneses tere (Forgó mozgás létesítése)

1. A nyomaték-képzés elve, forgó mező létrehozásának célja
2. A váltakozóáramú tekercselések elve
3. Az indukcióvektor értelmezése, körforgó mező

H1) Elektromágneses kompatibilitás (EMC)

H3) Feszültség alatti munkavégzés (FAM)

1. feszültség szintek
2. munkamódszerek
3. közép feszültségű szabadvezetéken végzett FAM tevékenységek
4. közép feszültségű alállomásokon végzett FAM tevékenységek
5. személyi védőeszközök, céljaik

D1) A háromfázisú vektorok módszere - 3. Szimmetrikus állandósult állapot:

Az állandósult pozitív sorrendű szimmetrikus állapotban az áramvektor kifejezése definíciója alapján

$$i = \frac{2}{3} [I_+ \cos(\omega t + \varphi_+) + a I_+ \cos(\omega t + \varphi_+ - 120^\circ) + a^2 I_+ \cos(\omega t + \varphi_+ - 120^\circ)]$$

A fázisáramok itt egyenlő nagyságú, egymástól időben egyező szögekkel eltolt és a választott fázissorrenddel megegyező sorrendű, tehát tiszta pozitív sorrendű szimmetrikus áramrendszert alkotnak, így a következőben + indexet alkalmazunk.

A koszinusz függvényeket exponenciális alakba átírva - amely pl. a második fázisra

$$\cos(\omega t + \varphi_+ - 120^\circ) = \frac{e^{j\omega t} e^{j\varphi_+} a^2 + e^{-j\omega t} e^{-j\varphi_+} a}{2}$$

alakú -, majd a szorzásokat elvégezve és $e^{j\omega t}$ ill. $e^{-j\omega t}$ szerint rendezve:

$$i = \frac{1}{3} I_+ [e^{j\omega t} e^{j\varphi_+} (1 + a^3 + a^3) + e^{-j\omega t} e^{-j\varphi_+} (1 + a^2 + a^4)]$$

Mivel $1 + a^3 + a^3 = 3$ és $1 + a^2 + a^4 = 0$

$$i = I_+ e^{j\varphi_+} e^{j\omega t} = I_{a+} e^{j\omega t} = \hat{I}_{a+} \quad i = I_{a+} e^{j\omega t} = \hat{I}_{a+}$$

A szimmetrikus állandósult állapotban tehát a térvektor megegyezik a komplex idővektorral, ha tetszik, az „a” fázis komplexorává fajul el.

A vektor állandó szögsebességgel forog, és végpontja kört ír le. Vetületei egy megfelelő időtengelyre az áram szinuszosan változó pillanatértékeit szolgáltatják.

Ilyenkor a térvektorok ábrái és a szokásos időbeli vektorábrák megegyeznek, és így azokat egymás helyett lehet rajzolni, ill. az egyikből a másik nyerhető.

Ez a „felcserélhetőség” azonban csak ebben a speciális üzemállapotban érvényes.

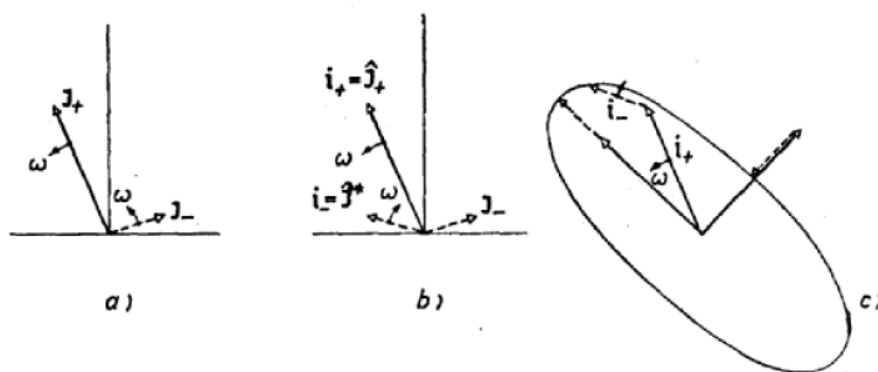
Tiszta negatív sorrendű szimmetrikus állandósult háromfázisú áramrendszer esetén a kifejezésben az ellenkező fázissorrendnek megfelelően a^2 és a helyet cserélnek, és így ebben az esetben az

$$i = I_- e^{-j\varphi} e^{-j\omega t} = I_{a-}^* e^{-j\omega t} = \hat{I}_{a-}^*$$

$$i = I_{a-}^* e^{-j\omega t} = \hat{I}_{a-}^*$$

összefüggésre jutunk. Negatív sorrendű szimmetrikus áramrendszer esetén a térvektor az a fázis negatív sorrendű idővektorának konjugáltjával egyenlő.

A térvektor így I_a^* amplitúdóval a választott forgásiránnyal ellentétes irányban állandó szögsebességgel szinkron forog körbe.



9. ábra.

(a) A szimmetrikus áramösszetevők idővektorai,

(b) térvektorai,

és (c) az eredőáram térvektor végpontjának ellipszis pályája

Hangsúlyoznunk kell, hogy a pozitív, ill. negatív sorrendű mennyiségek *idővektorai* a komplex időszámsíkon egyformán pozitív irányban, tehát egyezően forognak (9a ábra), és csak a *térvektorok* komplex térszámsíkján forog a negatív sorrendű térvektor a konjugált képzés következtében a pozitív sorrendű térvektorral ellenkező, negatív irányban (9b ábra).

E) A transzformátorok működése

E1) Bevezetés - 1. Példák vasmagos és vasmentes tekercsekre. A transzformátorok jellegzetességei és alkalmazásai.

Transzformátor: adott áramú és feszültségű teljesítményt más áramú és feszültségű teljesítménnyé alakít, adott frekvencia mellett. Néha a fázisszám is változik.

Mi a figyelmünket az energiaátviteli transzformátorokra koncentráljuk.

A transzformátorok alkalmazásának oka: a termelés–szállítás–felhasználás feszültség-és áramsztíjtje más és más:

Termelés: generátorok feszültség-sztíjtje 10 kV nagyságrendű. Ez a szttíjt várhatóan növelhető például szupravezető generátorok kifejlesztésével és alkalmazásával.

Szállítás: a szállítási veszteségek csökkentése az áramerősség csökkentésével érhető el. Ehhez azonban a feszültségsztíjt növelése szükséges.

Felhasználás: a fogyasztó védelme viszonylag kis feszültségek alkalmazását engedi meg.

Jellegzetességeik

Az energiaátviteli transzformátorok feszültség-transzformátorok, azaz feszültségkényszer hatása alatt üzemelnek.

Fázisszám: háromfázisú rendszerek terjedtek el. Az egységeket vagy három egyfázisú, vagy egy háromfázisú transzformátorból alakítják ki.

Növekedési törvények: tendenciaszerű összefüggés van érvényben a transzformátorok egységteljesítménye és méretei között.

2. Növekedési törvények.

$$S \sim U \quad \times \quad I \sim L^4$$

$$\Phi = \textcircled{B} \textcircled{A} \quad I = \textcircled{J} \textcircled{A}$$

○ IGÉNYBEVÉTEL

□ GEOMETRIA

A transzformátorok mágneses és villamos igénybevételei, a mágneses fluxus és a villamos áramerősség a geometriai méretekkel (L) négyzetesen változnak, így a transzformátor névleges teljesítménye (S) a geometriai méretek negyedik hatványával arányos.

A teljesítménnyel a lineáris méretek csak

$$L \sim \sqrt[4]{S}$$

arányban nőnek.

A G súly és a villamos gépek azzal arányos $\dot{A}$ ára arányos a köbtartalommal, tehát:

$$G \sim \dot{A} \sim L^3 \sim S^{\frac{3}{4}}$$

A térfogat azonban a méretek harmadik hatványával arányos:

$$V \sim L^3$$

Ezért a fajlagos mutató, a , az egységteljesítmény-súly és az egységteljesítmény-ár

$$a = \frac{V}{S} \sim \frac{1}{L} = \frac{1}{\sqrt[4]{S}}$$

növekvő egységteljesítménnyel csökken.

A viszonylagos ellenállás számszerűen a százalékos tekercsveszteséggel egyenlő:

$$R = \rho \frac{l}{A} \sim \frac{1}{L} \quad \text{miatt}$$

$$r = \frac{R}{Z_n} = R \cdot \frac{I_n}{U_n} = \frac{R \cdot I_n^2}{U_n I_n} \sim \frac{1}{L} \cdot \frac{(L^2)^2}{L^4} \sim \frac{1}{L}$$

azaz

$$r \sim \frac{1}{\sqrt[4]{S}}$$

A reaktancia a mágneses vezetéssel arányos, így a szórási reaktancia viszonylagos értéke nő a teljesítménnyel.

$$\Lambda = \mu \frac{A}{l} \sim L \quad \text{miatt}$$

$$x_s = \frac{X_s}{Z_n} = X_s \cdot \frac{I_n}{U_n} = \frac{X_s \cdot I_n^2}{U_n I_n} \sim L \cdot \frac{(L^2)^2}{L^4} \sim L$$

azaz

$$x_s \sim \sqrt[4]{S}$$

Legyen két transzformátor névleges teljesítményeinek aránya:

$$S_{n1}/S_{n2} = 10$$

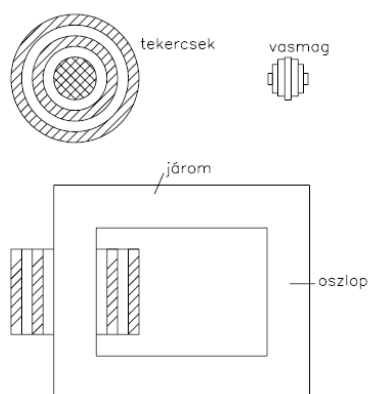
Ekkor:

$$\frac{a_1}{a_2} = \sqrt[4]{\frac{S_{n2}}{S_{n1}}} = \frac{1}{\sqrt[4]{10}} = 0,56$$

Azaz a nagyobb, esetünkben tízszeres teljesítményű transzformátor fajlagos ára 44%-kal kisebb.

E2) Egyfázisú transzformátorok - 1. Működési elv, a vasmag, a vasveszteség, a tekercselés.

A transzformátorok aktív részei: a tekercsek és a vasmag. A transzformátor sematikus rajza látható az alábbi ábrán.



A vasmag az alábbi feladatokat látja el:

1. Elősegíti, hogy a szükséges mágneses indukciót minél kisebb gerjesztő (mágnesező) áram hozza létre.
2. Elősegíti a mágneses fluxus előírt útvonalra történő terelését.
3. A vasveszteség csökkentése érdekében lemezelte.
4. A kör keresztmetszet minél jobb közelítése érdekében lépcsőzött.

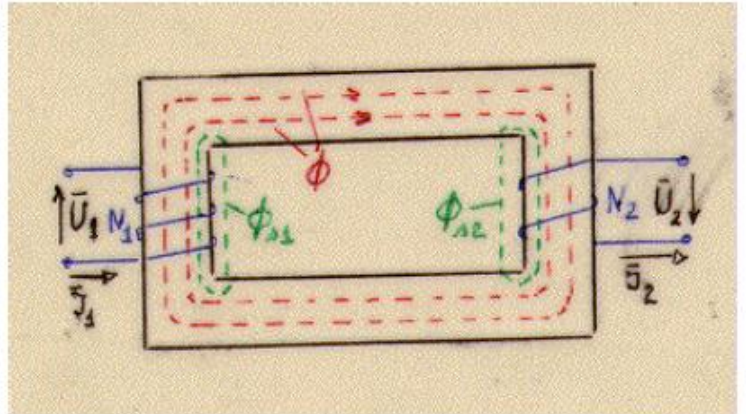
A tekercselés:

1. A legegyszerűbb az ábrán is látható hengeres tekercselés.
2. A tekercsek egymásba vannak tolva a két tekercs közötti szoros csatolás végett.
3. Kívül van a nagyfeszültségű, belül a kisfeszültségű tekercs, így könnyebb a szigetelés megoldása.

2. Fő- és szórt fluxus, az indukált feszültség számítása.

A vasmagban haladó mindkét tekercssel kapcsolódó hasznos fluxus létesíti az energiaátvitelt, ezért azt főfluxusnak - vagy mágnesező fluxusnak - nevezzük és Φ_m -vel jelöljük. Értéke jelentősen függ a trafó vasmagjának telítési állapotától.

A vas permeabilitása a levegőének kb. 1000-szerese $\rightarrow$ a főfluxus sokkal nagyobb, mint a levegőben záródó néhány százalékot kitevő szórt fluxus, a primer tekercs Φ_{s1} szórtfluxusa. A szórt tér az energiaátalakításban nem vesz részt. Az energiaátviteli trafónál a szórást csökkenteni törekszünk.



A transzformátor feszültség-egyenlete:

$$\overline{U}_{i1m} = N_1 \frac{d\overline{\Phi}_m}{dt}, \quad \overline{U}_{i2m} = N_2 \frac{d\overline{\Phi}_m}{dt}$$

A főfluxus teljes időfüggvénye:

$$\overline{\Phi}_m = \overline{\Phi} e^{j\omega t} = \Phi_m e^{j\varphi_\Phi} e^{j\omega t}$$

Ezzel:

$$\overline{U}_{i1m} = j\omega N_1 \overline{\Phi}_m e^{j\omega t}, \quad \overline{U}_{i2m} = j\omega N_2 \overline{\Phi}_m e^{j\omega t}$$

névleges teljesítménye, S , a geometriai méretek negyedik hatványával arányos.

Az időfüggvények elhagyásával állandósult állapotban az indukált feszültség fazora kifejezhető a hálózati körfrekvencia, $\omega=2\pi f$, ahol f a hálózati frekvencia, a primer és szekunder menetszámok, N_1 és N_2 , valamint a főfluxus csúcsértéke, Φ_m segítségével:

$$\overline{U}_{1i,\max} = j\omega N_1 \overline{\Phi}_m, \quad \overline{U}_{2i,\max} = j\omega N_2 \overline{\Phi}_m$$

$$\frac{U_{1i}}{U_{2i}} = \frac{N_1}{N_2} = n = \text{menetszám - áttétel}$$

$\neq$ feszültség - áttétel

Az indukált feszültség effektív értékét az alábbi összefüggés szerint számíthatjuk:

$$U_{i,eff} = 4,44 f N_1 \Phi_m$$

$$U_{i,eff} = \frac{U_{i,max}}{\sqrt{2}} \quad \text{csak ha szinuszos!}$$

Fenti képletet az oszlopindukcióval kifejezve kapjuk:

$$U_{i,eff} = 4,44 f N B_o A_v$$

B_o az oszlopindukció csúcsértéke, $A_v = k_g k_v A_o$

A_v a vaskeresztmetszet, k_g a geomteriai, k_v pedig a vaskitöltési tényezőt

A_o a vasmag köré írható kör keresztmetszete.

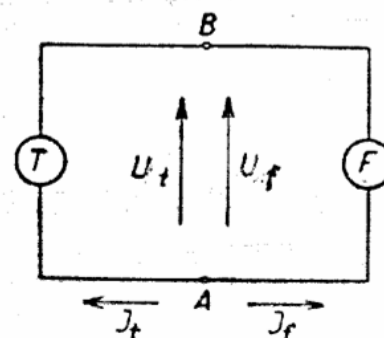
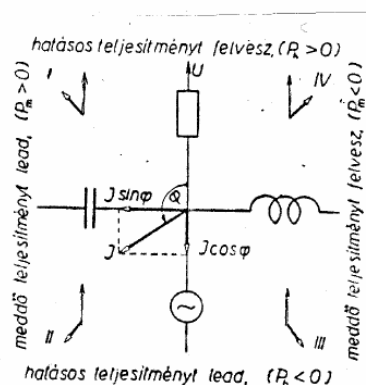
3. Az ideális transzformátor, a fogyasztói pozitív irányrendszer, feszültség-egyenletek, viszonylagos egységek.

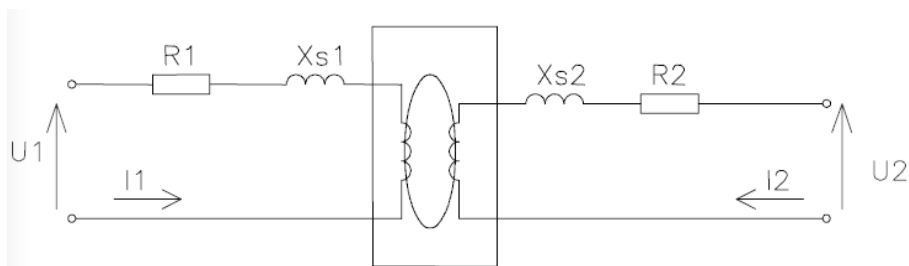
Az egyenletek felírásához pozitív irányrendszer választása is szükséges. Mi az ún. **fogyasztói pozitív** irányrendszert használjuk, amelyben a felvett teljesítmények előjele pozitív.

Az ábra szimbolikus T termelő és F fogyasztó kétpólusa mindegyikében mind az áram, mind a feszültség pozitív irányát egyformán A-tól B felé választjuk.

A választott irányrendszerrel

- a felvett hatásos teljesítmény pozitív előjelű, a leadott negatív.
- a kondenzátor "leadott" meddő teljesítménye pozitív,
- az induktivitás "felvett" meddő teljesítménye negatív előjelű.





A komplex effektív értékekkel kifejezve a transzformátor feszültség-egyenlete:

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= R_1 \bar{I}_1 + jX_{s,1} \bar{I}_1 + \bar{U}_{1,i} \\ \bar{U}_2 &= R_2 \bar{I}_2 + jX_{s,2} \bar{I}_2 + \bar{U}_{2,i}\end{aligned}$$

Az egyenletek jól mutatják a fogyasztói pozitív irányrendszer választásának előnyét: az egyenletek szimmetrikusak, ugyanolyan alakúak mindkét tekercsre.

Az egyes komponensek nagyságrendjét sokszor *relatív egységekben*, százalékosan, p.u. szokás megadni.

Ehhez szükséges a *névleges impedancia* fogalma:

$$Z_{1,n} \Big|_{\text{fázis!}} = \frac{U_{1,n}}{I_{1,n}} \Big|_{\text{fázis!}}$$

A feszültség-egyenletet átírjuk relatív egységekbe, amelyeket kisbetűkkel jelöljük:

$$\frac{U_1}{U_{1,n}} = \frac{R_1 I_1}{U_{1,n}} + j \frac{X_{s,1} I_1}{U_{1,n}} + \frac{U_{1,i}}{U_{1,n}}$$

Hasonló átalakításokkal kapjuk a feszültség-egyenlet viszonylagos egységekben kifejezett alakját:

$$\bar{u}_1 = r_1 \bar{i}_1 + j x_{s,1} \bar{i}_1 + \bar{u}_{i,1}$$

$$\bar{u}_2 = r_2 \bar{i}_2 + j x_{s,2} \bar{i}_2 + \bar{u}_{i,2}$$

Mivel

$$u_1 = 1$$

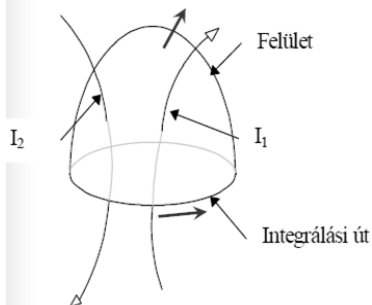
$$r_1 \approx r_2 \approx 1 \dots 2\%, \text{ ennek oka : } p_{t,1} \approx p_{t,2}$$

$$x_{s,1} \approx x_{s,2} \approx 2 \dots 5\%, \text{ elméletileg általában nem választhatóak szét}$$

$$\text{így: } u_{i,1} \approx u_1 = 1$$

4. Mágneses Ohm-törvény, feszültség-kényszer, a gerjesztések egyensúlyának törvénye, áram-átvitel.

A mágneses Ohm-törvény



Fluxus = Mágneses
vezetőképesség $\times$
Gerjesztés

$$\Phi = \Lambda \Theta$$

$$\Theta = \sum_k I_k,$$

A tekercsfluxus:

$$\Psi = N \Phi$$

Ezekkel: $\bar{\Psi}_{m,1} = N_1 \bar{\Phi}_{m,1} = N_1 \Lambda_m \bar{\Theta}$

ahol $\bar{\Theta} = N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_2$

a primer és szekunder tekercs gerjesztéseinek
fazorösszege!

Mit tudunk Θ -ról?

A transzformátor feszültségkényszer alatt dolgozik. ezért:

$$U_1 = \text{áll} \Rightarrow U_i \approx \text{áll} \Rightarrow \Phi \approx \text{áll} \Rightarrow B \approx \text{áll} \Rightarrow \Theta \approx \text{áll}$$

$$\uparrow \quad \quad \uparrow \quad \quad \uparrow$$

$$r, x \approx 0 \quad U \propto \Phi \quad \Phi \propto B \times A$$

Tehát: A feszültség-kényszer miatt a transzformátor

eredő gerjesztése a terhelési állapottól közel

függetlenül $\bar{\Theta}_{eredő} \approx \text{áll} = N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_2$

Vagyis: Bármelyik áram „kicserélhető”, helyettesíthető,

ha a helyettesítő tekercs menetszámát úgy

választjuk meg, hogy:

$$N_i I_i = N'_i I'_i$$

Használjuk fel, hogy $\frac{U_{1,i}}{U_{2,i}} = n$

A feszültségkényszer miatt:

$$\overline{\Theta}_{eredő} \cong \overline{áll} \Rightarrow \overline{I}_{m,1} \approx \overline{áll}$$

Vagyis az eredő gerjesztés (a vasvesztés elhanyagolásával) a primer mágnesező gerjesztéssel egyezik meg.

$$\text{Így: } \overline{I}_{m,1} = \overline{I}_1 + \overline{I}_2' \cong \overline{áll}$$

A vasvesztést is figyelembe véve:

$$\overline{\Theta}_1 + \overline{\Theta}_2 \approx \overline{áll} = \overline{\Theta}_{1,ij} \Rightarrow \approx 0$$

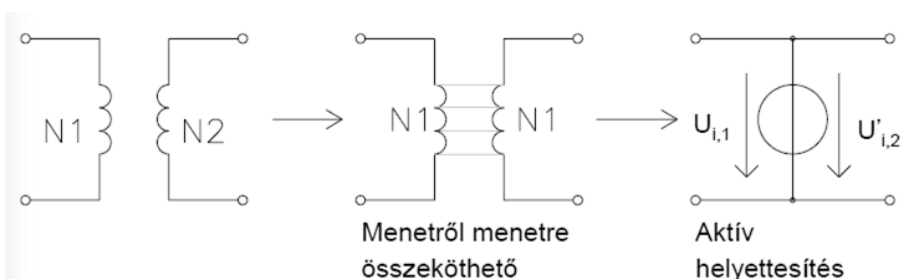
$$\overline{I}_1 + \overline{I}_2' \approx \overline{áll} = \overline{I}_{1,ij} \Rightarrow \approx 0$$

Ez a gerjesztések egyensúlyának törvénye.

A transzformátor - primer oldali - mágnesező árama az üresen járó - nyitott szekunderű - transzformátor vasmagjában ugyanakkora főfluxust hoz létre, mint terheléskor a primer és szekunder tekercsek - azok gerjesztései - együtt.

5. Gerjesztés- és teljesítményinvariancia, redukálási szabályok, az impedancia-elemek nagyságrendjei.

A redukálás ahhoz kell, hogy a helyettesítő kép egy áramkör legyen, a szekunder oldali mennyiségeket át kell alakítani (redukálni) a primerre az alábbi összefüggések alapján:



1. Következtetés: az ideális transzformátor kiküszöbölését a **gerjesztések invarianciája** = változatlansága mellett oldottuk meg.

Ezzel a változtatással azonban a paraméterek is módosulnak.

2. Következtetés: energiaátviteli transzformátort vizsgálunk, ezért célszerű az a választás a paraméterek változására, hogy a *teljesítmény is invariáns* legyen.

Ez teljesül:

$$S_2 = U_2 I_2 = (n U_2') \left(\frac{I_2}{n} \right) = U_2' \cdot I_2'$$

Hasonlóan: $P_{t,2} = R_2 I_2^2 = R_2 \left(\frac{I_2}{n} \right)^2 n^2 = n^2 R_2 (I_2')^2 = R_2' (I_2')^2$

Láthatóan:

$$R_2' = n^2 R_2$$

$$X_s' = n^2 X_s$$

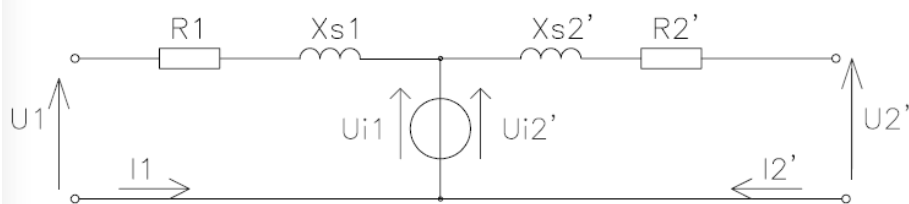
Általában:

$$Z_2' = n^2 Z_2$$

Az új változókkal a feszültség-egyenlet:

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= R_1 \bar{I}_1 + jX_{s,1} \bar{I}_1 + \bar{U}_{i,1} \\ \bar{U}_2' &= R_2' \bar{I}_2' + jX_{s,2}' \bar{I}_2' + \bar{U}_{i,2}' \end{aligned} \quad \bar{U}_{i,1} = \bar{U}_{i,2}'$$

Vagyis az „aktív” helyettesítő kapcsolás:



Az impedancia elemek nagyságrendje

Az üresjárási áram viszonylagos értéke nagyságrendben:

$$I_{1,0} \approx 0,1 \cdot I_{1,n} \quad \text{alapján} \quad i_{1,0} \approx 0,1 = 10\%$$

$$x_{1,m} \approx \frac{u_1}{i_{1,0}} \approx 10 = 1000\%$$

$$p_{vas} = \frac{u_{1,i}^2}{r_v} \approx 0,01 \Rightarrow r_v \approx 100 = 10000\%$$

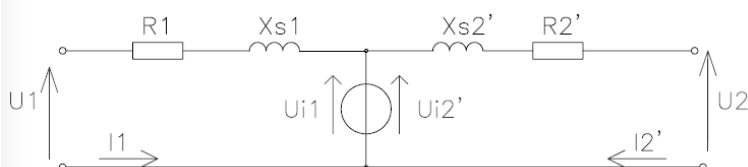
6. A térelméleti helyettesítő kapcsolás, egyszerűsített helyettesítő kapcsolások.

Az egyik fő hiányosság, hogy $X_{s,1}$ és $X'_{s,2}$ külön, szétválasztva szerepel, noha a szórások általában nem választhatók szét külön primer és külön szekunder szórásokra.

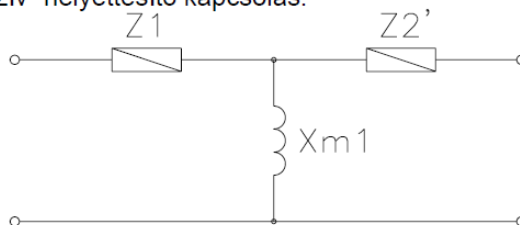
Az új változókkal a feszültség-egyenlet:

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= R_1 \bar{I}_1 + jX_{s,1} \bar{I}_1 + \bar{U}_{i,1} \\ \bar{U}'_2 &= R'_2 \bar{I}'_2 + jX'_{s,2} \bar{I}'_2 + \bar{U}'_{i,2}\end{aligned} \quad \bar{U}_{i,1} = \bar{U}'_{i,2}$$

Vagyis az „aktív” helyettesítő kapcsolás:



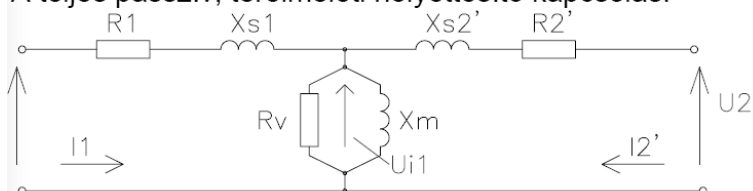
A „passzív” helyettesítő kapcsolás:



Ez a kapcsolás még nem teljes, mert vasvesztés is keletkezik. A vasvesztések közel arányosak az oszlopindukció, és ezzel az indukált feszültség négyzetével:

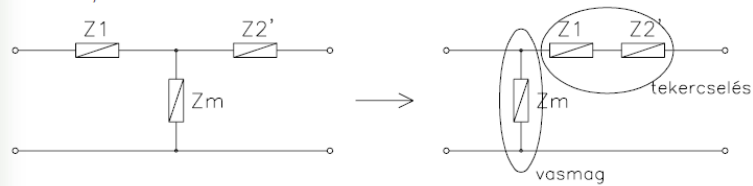
$$P_{vas} \propto B_{o,m}^2 \propto U_i^2$$

A teljes passzív, térelméleti helyettesítő kapcsolás:



Egyszerűsített helyettesítő kapcsolások:

a) $U_{1,i} \approx U_1$



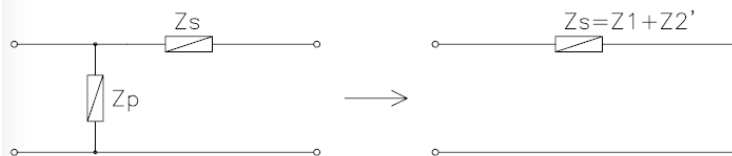
Különválasztva szerepelnek a vasmagra és a tekercselésre jellemző áramköri elemek.

Ezek mérése is igen egyszerű:

Vasmag: üresjárás

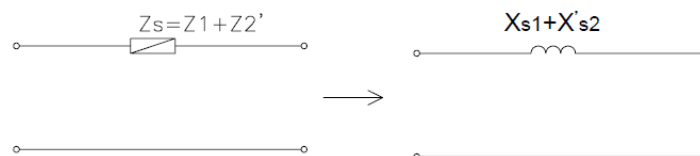
Tekercselés: rövidzáras

b) $Z_p \gg Z_1, Z_2$

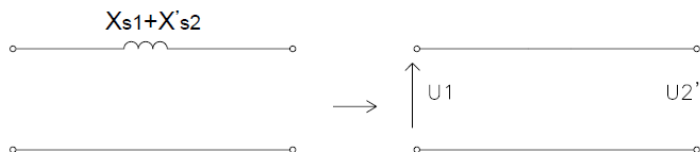


Az üresjárási áram és a vasveszteség az üzem számításakor sokszor elhanyagolható; ha nem fontos a hatásfok számítása, ezt az egyszerűsítést szokás választani.

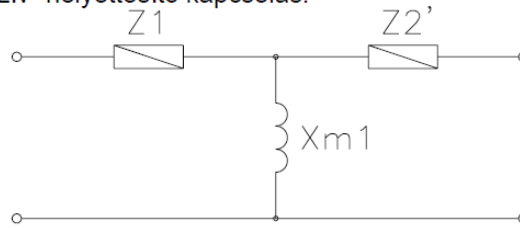
c) $R_1, R_2' < X_{s,1}, X_{s,2}'$



d) Ideális, veszteség- és szórásmentes transzformátor:



A „passzív” helyettesítő kapcsolás:



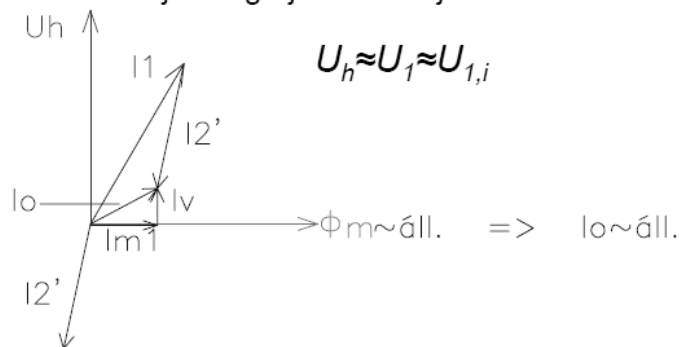
Ez a kapcsolat még nem teljes, mert vasvesztés is keletkezik. A vasvesztések közel arányosak az oszlopindukció, és ezzel az indukált feszültség négyzetével:

$$P_{vas} \propto B_{o,m}^2 \propto U_i^2$$

7. Fazorábra: üresjárási és terhelési állapot.

Az állandó $U_{1,i}$ indukálásához állandó Φ_m főfluxus szükséges, annak létesítéséhez pedig állandó $I_{1,o}$ üresjárási áram ill. állandó $\Theta_{1,o} = N_1 I_{1,o}$ üresjárási gerjesztés.

Az $U_h = \text{áll}$ hálózati feszültségkényszer tehát a transzformátor állandó üresjárási gerjesztését írja elő.

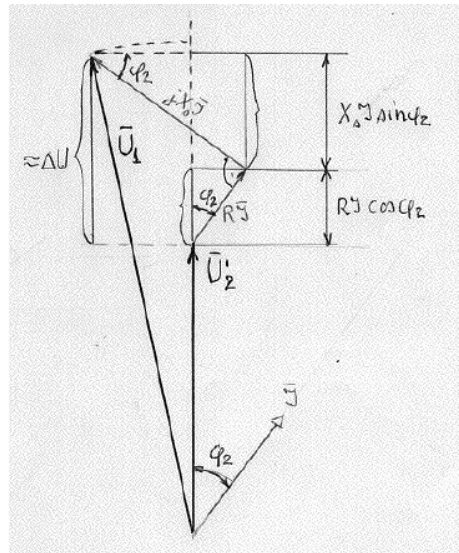


A transzformátor feszültségváltozása
- ami induktív terheléskor
feszültségesés - a transzformátor
szekunder kapocsfeszültségének
megváltozása a terhelés hatására,
azaz az üresjárási $U_{2,0}$ és
terhelési U_2 szekunder ka-
pocsfeszültségek nagyságainak
különbsége az üresjárási értékre
vonatkoztatva:

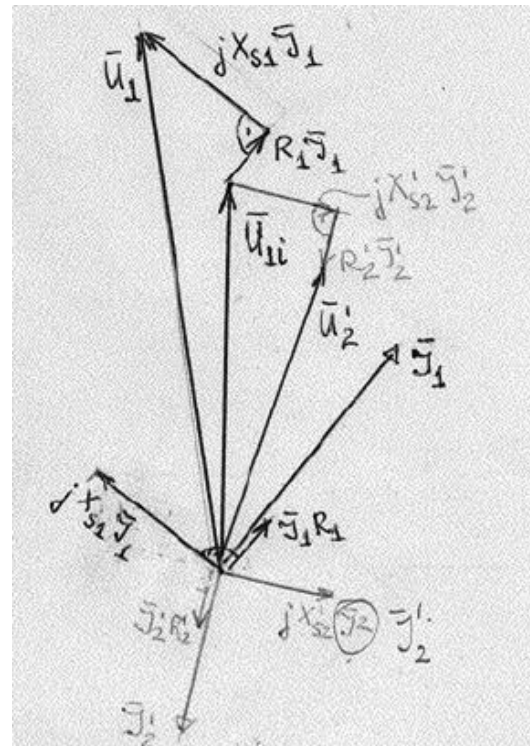
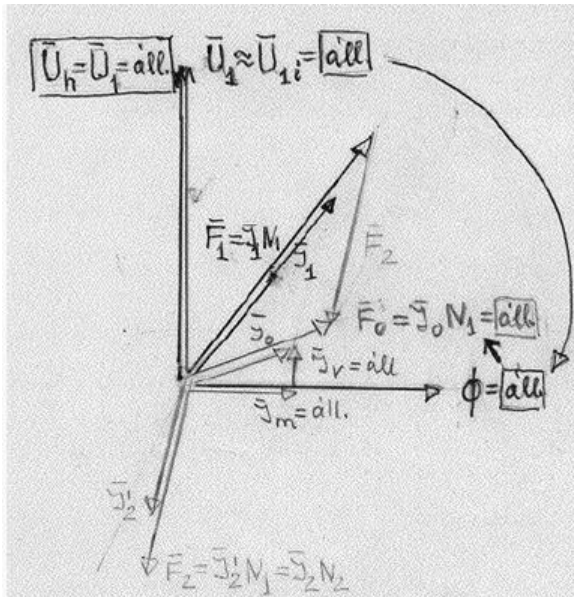
$$\frac{\Delta U}{U_{2,0}} = \frac{U_{2,0} - U_2}{U_{2,0}}$$

A szekunder feszültségeket a primerre
redukálva a névleges értékkel

$$\frac{\Delta U}{U_{1,n}} = \frac{U_{1,n} - U'_2}{U_{1,n}}$$



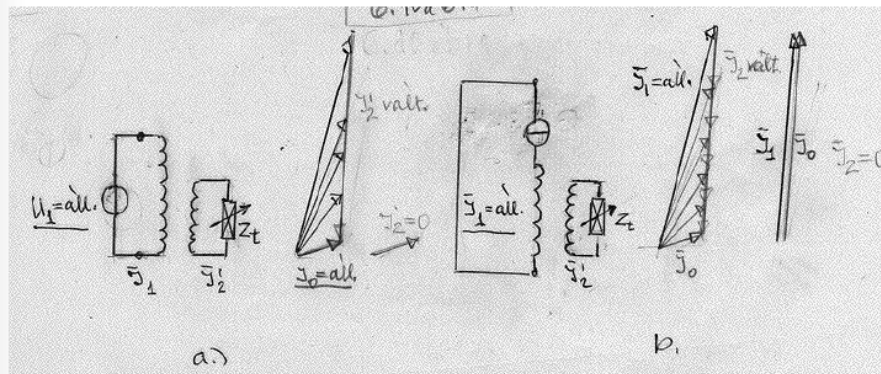
Üresjárási állapot (a méretarányok torzák)



Terhelési állapot

8. Feszültség- és áramtranszformátor

Az ábrákon (a) feszültség- ill. (b) áramtranszformátor kapcsolását valamint I_2' és I_1 terhelésfüggő változását rajzoltuk fel Z_t állandó fázisszögét feltételezve.



Az **első** esetben az $\bar{I}_0 = \text{áll}$ kényszer következtében a két áram változása a gerjesztések egyensúlya törvény szerint "összehangolt".

A **második** esetben az $\bar{I}_1 = \text{áll}$ kényszer következtében $\bar{I}_2' = 0$ -hoz $\bar{I}_1 = \bar{I}_0$ azaz pl. ≈ 20 -szoros üresjárási áram és az ahhoz tartozó - a telítést figyelembe véve is - nagy fluxus tartozik, káros hatásaival.

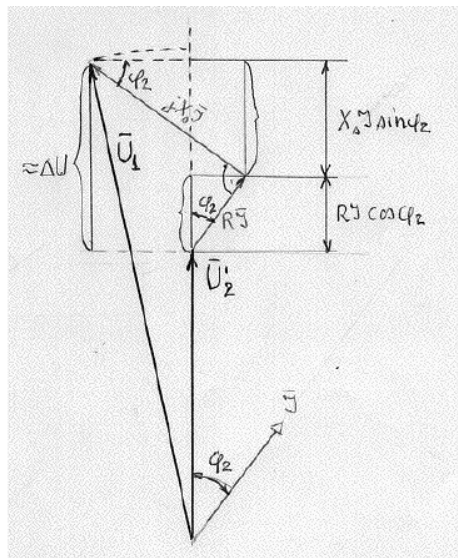
9. A transzformátor feszültségváltozása, rövidzárási állapota. A drop fogalma.

A transzformátor feszültségváltozása - ami induktív terheléskor feszültségesés - a transzformátor szekunder kapocsfeszültségének megváltozása a terhelés hatására, azaz az üresjárási $U_{2,0}$ és terhelési U_2 szekunder kapocsfeszültségek nagyságainak különbsége az üresjárási értékre vonatkoztatva:

$$\frac{\Delta U}{U_{2,0}} = \frac{U_{2,0} - U_2}{U_{2,0}}$$

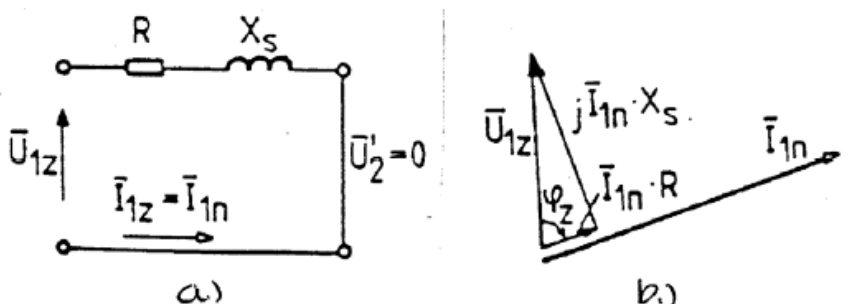
A szekunder feszültségeket a primerre redukálva a névleges értékkel

$$\frac{\Delta U}{U_{1,n}} = \frac{U_{1,n} - U_2'}{U_{1,n}}$$



Megkülönböztetjük az **üzemi** és a **mérési rövidzárast**. Előbbinél a névleges primer feszültségre kapcsolt transzformátor szekunderjének rövidzárásakor, ha a transzformátor névleges feszültségesése 5%, akkor 20-szoros állandósult áram keletkezik 400-szoros erő- és hőhatással. Ezt még megelőzi egy nagyobb átmeneti áramcsúcs. Az üzemi rövidzárlattal nem foglalkozunk. A zárlati mérés segítségével a transzformátorok egyik alapvető jellemzője, a **drop** határozható meg.

A mérési rövidzárlathoz tartozó helyettesítő kapcsolás a) és a vektorábra b):



Mérési rövidzárlatkor az a) ábra szerint a rövidrezárt transzformátor primer feszültségét addig növeljük, míg abban a névleges áram folyik. Ennek a feszültségnek a névleges értékre vonatkoztatott - rendszerint százalékban megadott - értéket nevezzük a transzformátor rövidzárlási feszültségének vagy dropjának:

$$\frac{\bar{U}_{1,z}}{U_{1,n}} = \frac{\bar{I}_{1,n} R}{U_{1,n}} + j \frac{\bar{I}_{1,n} X_s}{U_{1,n}}$$

A bevezetett jelölésekkel: $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_R + j \varepsilon_X$

$$|\bar{\varepsilon}| = \varepsilon = \sqrt{\varepsilon_R^2 + \varepsilon_X^2} = \text{DROP}$$

Az ε -nal jelölt drop tehát nem más, mint a transzformátor rövidzárlási feszültségese százalékos (viszonylagos) értékben megadva. Szokásos nagysága a transzformátor terhelésétől függően 5–15%; nagyobb névleges teljesítményhez általában nagyobb drop tartozik a zárlati áramok korlátozása érdekében.

A drop a transzformátor fontos jellemzője. Megszabja a rövidzárlati áram nagyságát, az előbbiek szerint a feszültségese és a transzformátorok párhuzamos kapcsolásakor is szerepe van.

E3) Háromfázisú transzformátorok

1. Származtatás, működési elv, az üresjárási áram aszimmetriája.

Háromfázisú transzformátort legegyszerűbben úgy nyerünk, ha 3 darab egyfázisú transzformátor primer és szekunder tekercseit láncoljuk, pl. csillagba vagy háromszögbe kapcsoljuk. Hiba esetén ilyenkor elég egy egyfázisú transzformátort cserélni; nagy teljesítménynél a szállíthatóság írhatja elő a három különálló gépet. A háromfázisú egység ezért olcsóbb Európában, nálunk is többnyire ezt alkalmazzák.

A használatos magtípus

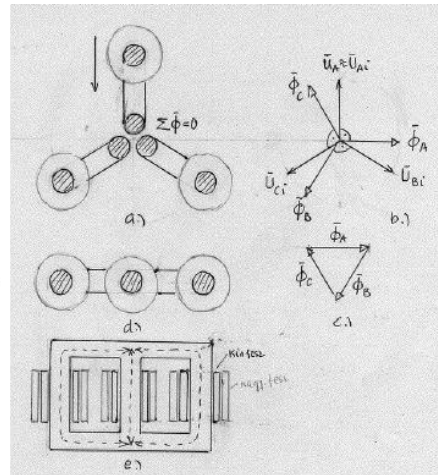
leszármaztatásához helyezzünk el három lánctípusú egyfázisú egységet szimmetrikusan, a).

A b) ábrán a hálózat szimmetrikus háromfázisú feszültségrendszerét, az azzal gyakorlatilag egyező indukált feszültségrendszert és az utóbbihoz 90°-kal késő fluxus-rendszert rajzoltunk.

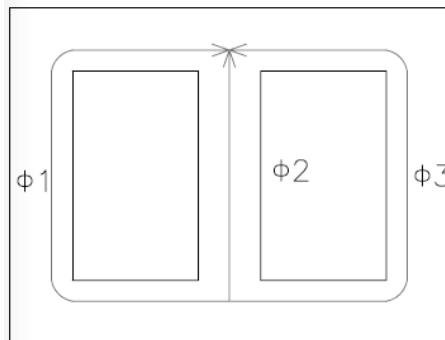
A c) ábrán látható, hogy $\sum \bar{\Phi}_k = 0$

Az a) ábra középső oszlopa így fluxusmentes és elhagyható.

Az egyik oszlopot a másik kettő közé betolva a d) és e) ábrákon a használatos aszimmetrikus magtípusú háromfázisú transzformátort látjuk.



A középső oszlop rövidebb mágnesútja annak kisebb üresjárási áramát igényli, így az a háromfázisú üresjárási áramrendszer aszimmetriáját idézi elő.



A feszültség - kényszer miatt

$$\bar{\Phi}_1 = \bar{\Phi}_2 = \bar{\Phi}_3$$

A mágnesezési úthosszak :

$$l_2 < l_1 \text{ és } l_3$$

így :

$$\bar{\Theta}_2 < \bar{\Theta}_1 \text{ és } \bar{\Theta}_3$$

Ennek hatásait a továbbiakban elhanyagoljuk.

2. Aszimmetrikus terhelés, kiegyenlítetlen gerjesztés, a feszültség-rendszer aszimmetriája

A háromfázisú transzformátorok fázistekercseit csillagba vagy deltába, esetleg - csak a szekunder oldalon és kizárólag négyvezetékes kommunális fogyasztóknál - zeg-zugba kapcsolják.

A kapocsjelölések cseréjével elméletileg 1296 változat lehetséges, de a gyakorlatban csak néhányat alkalmaznak. Problémát elsősorban az egyfázisú kommunális fogyasztók (lakások, irodák, stb.) okoznak.

A kivezetett csillagponttal ún. négyvezetékes rendszert nyerünk, az egyes fogyasztókat a nullvezeték és egy fáziskapocs közé kapcsolják. A fázisokat az egyes utcák, házak között osztják el. Az egyes fázisok fogyasztói csoportjai azonban nem egyformán terhelik a hálózatot, így aszimmetrikus terheléseloszlás jön létre, amely problémák forrása lehet.

A csillag-csillag kapcsolásában tételezzük fel az aszimmetria szélső, legrosszabb és legáttekinthetőbb esetét, amikor csak egy fázisban van terhelés. (A másik kettőben mindenki nyaral.)

Látható, hogy a B és C fázisokban csak a primer oldalon folyik áram. Így az üresjárású gerjesztés elhanyagolásával $N_1 \bar{I}_1 = -N_2 \bar{I}_2$ -ből nyerhető kifejezésben $N_2 \bar{I}_2 = 0$, így ezeken az oszlopokon $N_1(\bar{I}_1 / 2)$ kiegyenlítő gerjesztés jelenik meg.

Kimutatható, hogy ilyen kiegyenlítő gerjesztés jelenik meg az A oszlopon is és mindhárom oszlop kiegyenlítő gerjesztése azonos fázisú. Az azonos fázisú gerjesztések három azonos irányú Φ_0 fluxust (un. zérusrendű fluxusokat) hoznak létre és azok három 90° -ra siető egyfázisú feszültséget indukálnak.

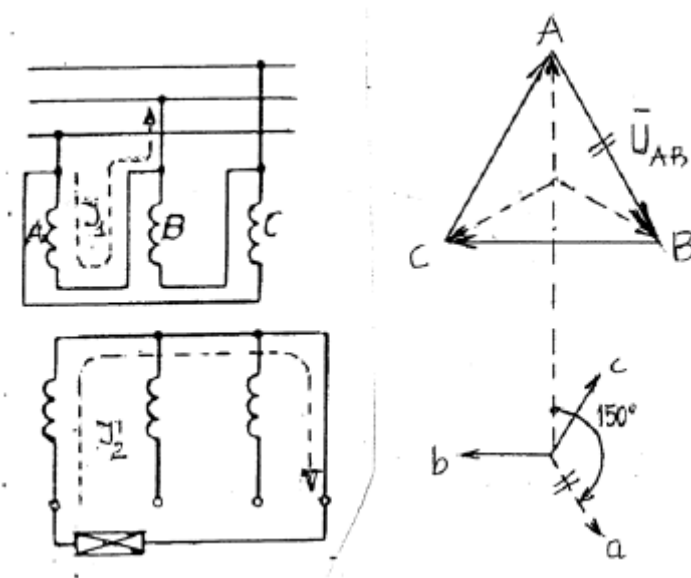
Ezeket az egyfázisú feszültségeket a transzformátor $\bar{U}_a, \bar{U}_b, \bar{U}_c$ szimmetrikus szekunder feszültség rendszeréhez hozzáadva (lásd ábra) teljesen aszimmetrikus $\bar{U}'_a, \bar{U}'_b, \bar{U}'_c$ kapocsfeszültség-rendszert nyerünk, ami a fogyasztók szempontjából megengedhetetlen (pl. megnövelt feszültségnél az égők kiégnek, a csökkentnél alig világítanak).

3. Háromfázisú transzformátorok kapcsolásai, órajel, kapcsolási csoport.

Delta-csillag kapcsolás

Az ábrán látható, hogy a primer fázisáram úgy folyik vissza a hálózatba, hogy másik fázistekercsen nem megy keresztül. Így kiegyenlítő oszlopgerjesztések nem keletkeznek. A primer oldali delta kapcsolás tehát megoldotta a problémánkat.

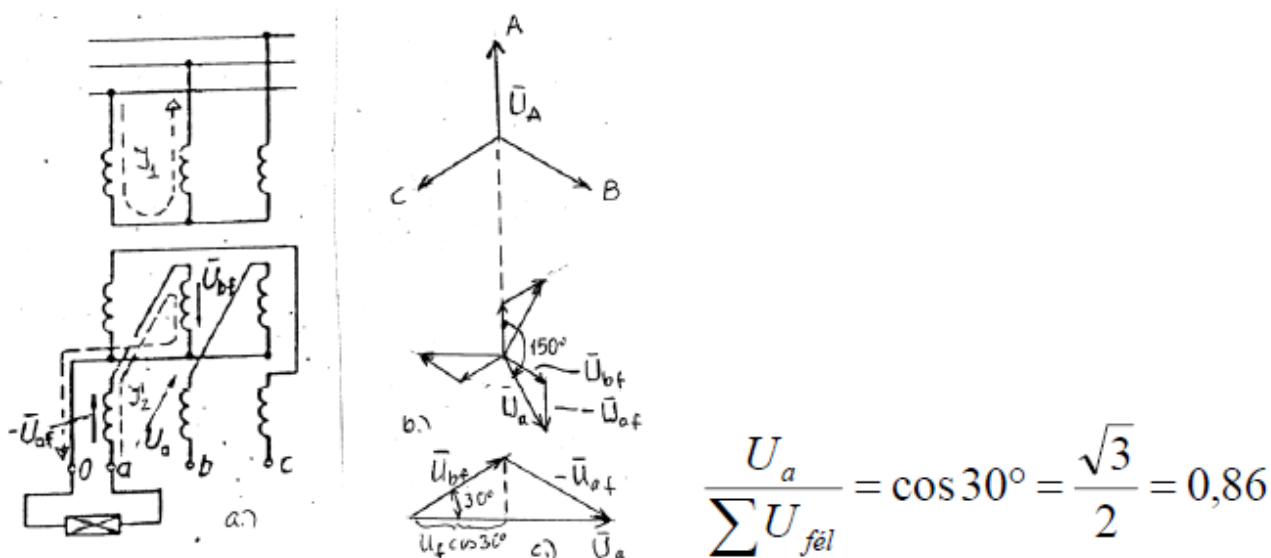
A primer delta kis teljesítmény és nagy primer feszültség esetén előnytelen, mert sokmenetű primer tekercset kell készíteni drága, vékony vezetőből, drága technológiával. Ilyenkor pl. a szekunder oldali zeg-zug kapcsolás lehet a megoldás, bár a hálózati mérnökök, ha lehet, ezt kerülik.



Csillag-zug-zug kapcsolás

Minden szekunder tekercset két féltekercsre osztunk és azokat az ábra szerint kapcsoljuk össze úgy, hogy eltérő oszlopokon elhelyezkedő féltekercsek képezzenek egy fázist - emiatt mindkét oszlopon kiegyenlített gerjesztéseket találunk.

A szekunder fázistekercsek kihasználását a féltekercs-feszültségek közötti 60 fokos fáziseltolás rontja, az eredő feszültségek és a részfeszültségek összegének (ez szabja meg a menetszámot) aránya ugyanis a c) - vízszintesen rajzolt – ábrából leolvashatóan:



A bemutatott kapcsolásoknál a primer és szekunder fázisfeszültségek között fázisszög eltérés van. A szimmetria viszonyokból kitűnik, hogy e fáziseltolás csak 30° többszöröse lehet, ezért az órászámlappal jellemzik.

A szögnek megfelelő óra az ún. jelölőszám. Így egy kapcsolás jele a primer kapcsolás nagybetűjéből, a szekunder kisbetűjéből és a jelölőszámból áll. A kis o index a csillagpont kivezetést, a nulla (negyedik) vezetékét jelöli. A bemutatott kapcsolások sorrendjében ezek rendre: Yy00, Dy05, Yz05

A gyakorlatban elsősorban a 0 és 5 órajelű kapcsolásokat (részben a velük ellenfázisban levő 6 és 11-eseket) alkalmazzák.

Párhuzamosan csak olyan transzformátorokat lehet kapcsolni, amelyeknek a szekunder feszültségrendszere azonos nagyságú és fázishelyzetű fázisfeszültségekből áll.

F) Az elektromechanikai átalakítók mágneses tere (Forgó mozgás létesítése)**1. A nyomaték-képzés elve, forgó mező létrehozásának célja**

BME VET

Definíció

A következőkben az elektromechanikai átalakítók működésével fogunk megismerkedni.

Látni fogjuk, hogy a villamos gépekben a mágneses teret a forgó (haladó) mozgás létesítésére használjuk.

Ezért ebben a fejezetben azokat az ismereteket foglaljuk össze, amelyek a mágneses tér és a forgó mozgás kapcsolatát mutatják be.

Vajda István: Forgó mozgás létesítése
2
Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

Nyomaték létesítése

Két állandó mágnes vagy gerjesztett tekercs egymásra hatása azonos pólusszám esetén, lásd ábra.

Az elrendezés HETEROPOLÁRIS (váltakozó pólusú).

A két mágnes közötti nyomaték

$$M \propto \sin \alpha$$

arányos a mágnesek tengelyei közötti szög szinuszával.

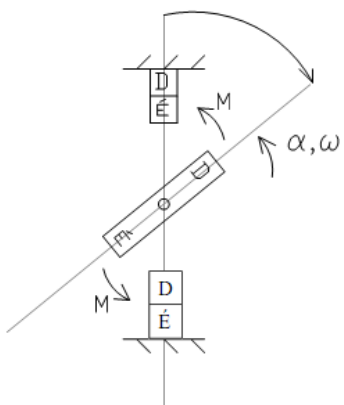
Vajda István: Forgó mozgás létesítése
3
Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

Nyomaték létesítése

Következtetés:
 $M = \text{áll}$ eléréséhez $\alpha = \text{áll}$ szükséges.
 Ez úgy érhető el, hogy mindkét mágnes: vagy *áll*, vagy azonos szögsebességgel *forog*.
 Ez utóbbi esetet úgy is szoktuk jellemezni, hogy a mágnesek *relatív nyugalomban* vannak.

A SZOKÁSOS MEGOLDÁS:
 az egyik (álló vagy forgó) tekercsrendszer áramait $\Rightarrow$ mágneses terét a másik (forgó vagy álló) tekercsrendszer hozza létre



4

Vajda István: Forgó mozgás létesítése Elektronika, BME VIK, 2010 ősz

2. A váltakozóáramú tekercselések elve

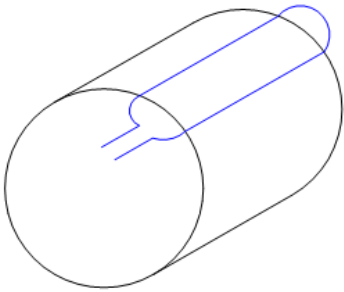
BME VET

Váltakozó áramú tekercselés

A váltakozóáramú tekercselések mindig **heteropoláris** felépítésűek.
 A tekercsek elhelyezése:

A tekercsoldalakat a hengeres álló- vagy forgórész palástfelületén helyezzük el.

A tekercsoldalakat a henger egyik homlokoldalán tekercsfejek segítségével kötjük össze így jönnek létre a menetek, illetve a sokmenetű tekercsek.



5

Vajda István: Forgó mozgás létesítése Elektronika, BME VIK, 2010 ősz

Váltakozó áramú tekercselés

A tekercsek szimbolikus jelölése:



A tekercsek tengelye egybeesik a tekercsek mágneses tengelyével, azaz a tekercsekben folyó áramok által létesített mágneses tér (indukció) térbeli irányával.

Az áramok és az általuk létesített mágneses tér irányát a *jobbcsavar szabály* segítségével határozhatjuk meg.

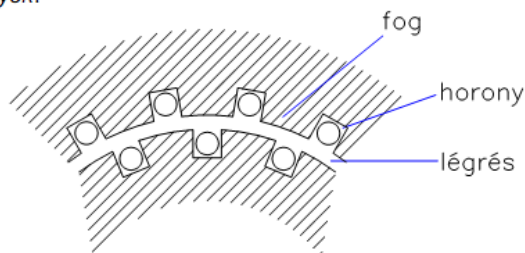
Vajda István: Forgó mozgás létesítése

6

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Váltakozó áramú tekercselés

A tekercsoldalak rögzítésére szolgálnak a *fogak* és a *horonyok*:



A tekercsek hornyokban történő elhelyezéssel csökkenthető az álló- és a forgórész közötti *légrés*.

Vajda István: Forgó mozgás létesítése

7

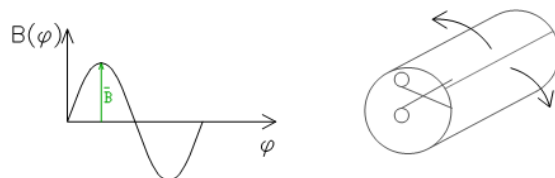
Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

3. Az indukcióvektor értelmezése, körforgó mező

BME VET

Az indukcióvektor értelmezése

Mindig arra törekszünk, hogy villamos gépeinkben a térbeli indukcióeloszlás, valamint a feszültségek és áramok időbeli jelalakja a legjobban közelítse a szinuszfüggvényt.



A szinuszoság követelménye abból az ismert villamosságtani törvényszerűségből származik, hogy a **többfázisú, szinuszos, kiegyenlített rendszerek villamos teljesítménye állandó**.

Vajda István: Forgó mozgás létesítése

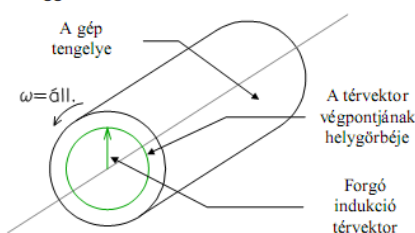
8

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

Az indukcióvektor értelmezése

Hogyan jellemezhető az indukció-vektorral a kerület mentén egyenletes sebességgel haladó hullám?



Következtetés: Ha a mágneses tér (indukció) kerület menti eloszlása szinuszos, valamint a többfázisú áramok időbeli változása (időfüggvénye) is szinuszos, akkor a villamos gép kapcsain leadott többfázisú villamos teljesítmény, illetve a villamos gép tengelyén leadott nyomaték (mechanikai teljesítmény) az időben **állandó**.

Vajda István: Forgó mozgás létesítése

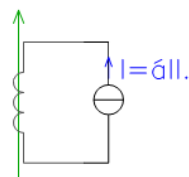
9

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

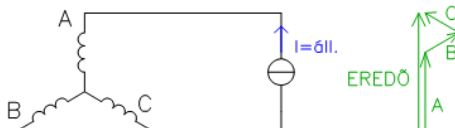
Mezőtípusok: állandó mező

- a) Egy tekercs egyenárammal gerjesztve.



- b) Több tekercs, térben háromfázisúan elhelyezve és egyenárammal gerjesztve.

$B_{eredő} = 1,5 \times B_A$,
ez is állandó



Vajda István: Forgó mozgás létesítése

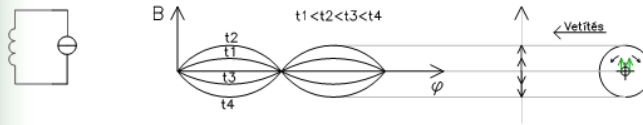
10

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

Mezőtípusok: lüktető mező

Egy tekercs, egyfázisú váltakozóárammal gerjesztve.



A lüktetőmező *térbeli állóhullám*, lineáris esetben összetehető két forgó mezőből.

FERRARIS TÉTELE: a lüktető mező felbontható két, egymással ellentétes irányban, azonos szögsebességgel forgó mezőre, amelyek amplitúdója (hossza) a lüktető mező amplitúdójának fele.

11

Vajda István: Forgó mozgás leírása

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

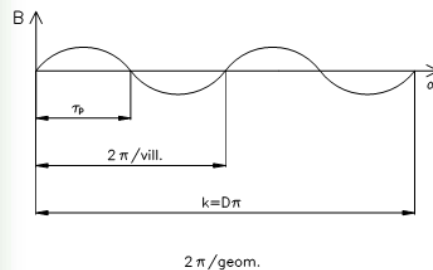
Mezőtípusok: forgó mező

A forgómező létrehozásához:

Többfázisú tekercsrendszer

Többfázisú áram- (gerjesztés-) rendszer

} SZÜKSÉGES



$$\tau_p = \frac{D\pi}{2p}$$

pólusosztás

$$\alpha_v = p \cdot \alpha_g$$

a villamos és a geometriai szög kapcsolata

12

Vajda István: Forgó mozgás leírása

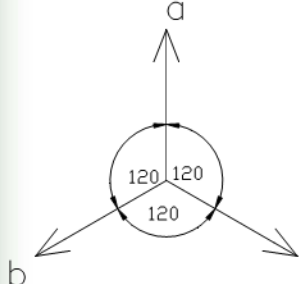
Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

Mezőtípusok: forgó mező

TEKERCEK TENGELEI

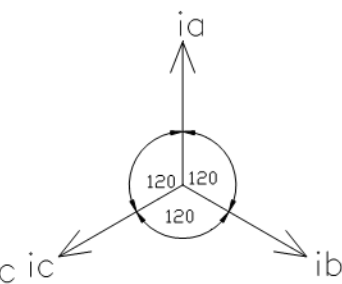
A TÉRBEN



A TÉRBEN
„ELŐRE”

A TEKERCEK ÁRAMAI

AZ IDŐBEN



AZ IDŐBEN
„HÁTRA”

13

Vajda István: Forgó mozgás leírása

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A forgó mező matematikai leírása

Az i -ik fázis indukcióhullámának kifejezése:

$$B_i = B_i(x, t) = B_i(t) \times T_i(x)$$

ahol $B_i(t)$ az időfüggvény, $T_i(x)$ a térbeli eloszlást leíró függvény.

Térbeli eloszlás

$$T_a(x) = \cos\left(\frac{x}{\tau_p} \pi - 0 \times \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$T_b(x) = \cos\left(\frac{x}{\tau_p} \pi - 1 \times \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$T_c(x) = \cos\left(\frac{x}{\tau_p} \pi - 2 \times \frac{2\pi}{3}\right)$$

14

Vajda István: Forgó mozgás leírása

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A forgó mező matematikai leírása

Időfüggvények: $B_a(t) = B_m \cos\left(\omega_1 t - 0 \times \frac{2\pi}{3}\right)$

$$B_b(t) = B_m \cos\left(\omega_1 t - 1 \times \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$B_c(t) = B_m \cos\left(\omega_1 t - 2 \times \frac{2\pi}{3}\right)$$

EULER tétele

$$\cos \alpha = \frac{e^{j\alpha} + e^{-j\alpha}}{2}$$

A koszinusz függvényeket exponenciális alakba átírva pl. a második, b fázisra:

$$\cos\left(\omega_1 t - 2 \times \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{e^{j\omega_1 t} e^{-j\frac{4\pi}{3}} + e^{-j\omega_1 t} e^{j\frac{4\pi}{3}}}{2}$$

15

Vajda István: Forgó mozgás leírása

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A forgó mező matematikai leírása

A részletszámításokat elhagyva:

$$B_{\text{ered.}}(x, t) = B_a(x, t) + B_b(x, t) + B_c(x, t)$$

HÁROM FÁZIS ESETÉN:

$$B_{\text{ered.}}(x, t) \Big|_3 = \frac{3}{2} B_m \cos\left(\omega_1 t - \frac{x}{\tau_p} \pi\right)$$

Tetszőleges m FÁZIS ESETÉN

$$B_{\text{ered.}}(x, t) \Big|_m = \frac{m}{2} B_m \cos\left(\omega_1 t - \frac{x}{\tau_p} \pi\right)$$

Az eredő mező amplitúdója általánosságban:

$$B_{e, \max} = \frac{m}{2} B_{1f, \max}$$

16

Vajda István: Forgó mozgás leírása

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A forgó mező tulajdonságai

I. Kerület mentén állandó szögsebességgel haladó hullám.

Ha $\omega_f = \text{áll}$, akkor a maximum-hely:

$$\begin{aligned}\omega_1 t &= \frac{x}{\tau_p} \pi & \omega_1 & \text{a hálózati körfrekvencia} \\ x &= R \omega_0 t & \omega_0 & \text{a mező szögsebessége} \\ \tau_p &= \frac{2R\pi}{2p} = \frac{R\pi}{p} & R & \text{a forgó- vagy állórész} \\ & & & \text{(légrés közepes) sugara} \\ \omega_1 t &= \frac{R \omega_0 t}{\frac{R\pi}{p}} \pi & \omega_1 &= p \omega_0 \\ & & \omega_0 &= \frac{\omega_1}{p} \quad \omega_0 = \text{szinkron szögsebesség}\end{aligned}$$

Vajda István: Forgó mező leírása

17

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A forgó mező tulajdonságai

II ω_0 nem függ a fázisszámtól

Az „m” és „n” fázisú rendszerek ekvivalensek, ha

$$\frac{m}{2} B_{m,\max} = \frac{n}{2} B_{n,\max}$$

$$\text{LINEÁRIS ESETBEN} \quad m N_m I_m = n N_n I_n$$

Ebből m/n állórész/forgórész fázisszám esetén:

$$\begin{aligned}n_U &= \frac{N_m}{N_n} \left(\frac{\xi_m}{\xi_n} \right) \rightarrow U'_2 = n_U U_2 \\ n_I &= \frac{m}{n} \frac{N_m}{N_n} \left(\frac{\xi_m}{\xi_n} \right) \rightarrow I'_2 = \frac{I_2}{n_I}\end{aligned}$$

ξ a tekercselési tényező
(lásd később)

Vajda István: Forgó mező leírása

18

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A forgó mező tulajdonságai

III. A nyomatékképzés feltétele az álló és a forgórész pólusszám egyezése.

A két mezőnek, B_{st} és B_{rot} relatív nyugalomban kell lennie:

$$\omega_{0,st} = \omega_{0,r}$$



$$p_{st} = p_{rot}$$

Ez a nyomatékképzés szükséges feltétele „gerjesztett” tekercszrendszerekben.

$$\omega_{st}|_B = \omega_{rot}|_B + \omega_{mech} \quad \text{Ez az ún. frekvenciafeltétel}$$

Ahol $\omega_{st}|_B$ a státor illetve $\omega_{rot}|_B$ a rotor mező szögsebessége a státorhoz illetve a rotorhoz képest.

Vajda István: Forgó mező leírása

19

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

H1) Elektromágneses kompatibilitás (EMC)

Mivel foglalkozik?

- 1) Erőterek biológiai hatásai (rák, szaporodás/fejlődés, neurobiológiai hatások)
- 2) Elektromágneses kompatibilitás

Feszültség → elektromos erőter

Áram → mágneses erőter

LFI: kisfrekvenciás hatások (0-2000 Hz)

Tipikus példák: generátor és fogyasztó közötti tér, háztartási fogyasztók terei

A távvezeték rossz antenna, $\frac{1}{2}$ hullámhossz = 3000 km (@ 50 Hz) → nincs ekkora kiterjedésük!

A kisfrekvenciás mágneses erőterek jellemző értékei:

távvezeték alatt (fejmagasság): 3,5 μ T

vasúti vontatásnál (peronon): 35 μ T

transzformátor felett 1 m-rel: 1-90 μ T

háztartási gépeknél, 1cm-re: 10-2500 μ T

Határtérték: 100 μ T emberre

1.26 μ T gépekre (pl. monitor)

5-10 T-nál már vannak pozitív kísérletek (főleg rákkeltést vizsgálják)

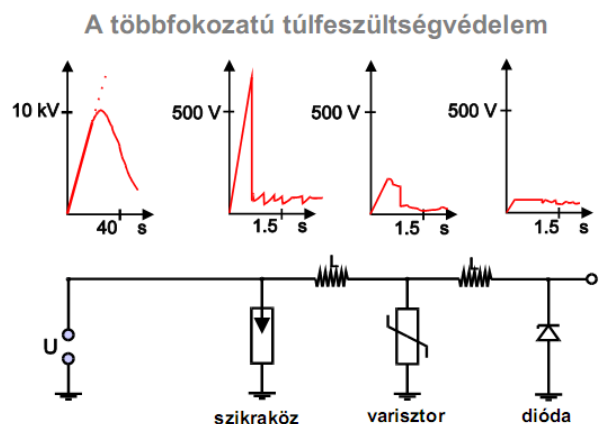
EMP: elektromágneses impulzusok

Villám: óriási áram (40-100+ kA), kis idő (ms) → nem hatol be a szervezetbe, nagy a gradiens

Villámcsapás hatásai:

- bőr és támasztószövetek károsodása (villámrajzolat, égési sérülések)
- kontrakcióból eredő sérülések nincsenek
- olvasztó/gyújtó hatás, dinamikus erőhatás, túlfeszültség
- közvetlen, életveszélyes áramütés

Nyílt terepen ne kiemelkedő terep-/műtárgyak (fa, kilátó, stb.) alá álljunk, hanem azoktól 5-10 méter távolságra helyezkedjünk el, minél közelebb a földhöz (ülő-/fekvő pozíció)!



Villámvédelem: emberi élet és vagyontárgyak védelme a villámcsapás káros hatásai ellen

Gazdaságossági kérdés: csak azt védjük, ami emberi életre káros, vagy villámcsapás esetén az eszköz javítása többbe kerül, mint a villámvédelem kiépítése

Primer (külső) védelem: villámhárító (ne csapjon be a villám)

Szekunder (belső) védelem: másodlagos hatás (elektromágneses villámimpulzus) ellen. Az

Alkalmazott védelmek zónánként:

Közvetlen villámcsapásnak kitett helyen (antenna, távvezeték): földelés direkt/szikraközön keresztül

Nincs közvetlen villámcsapás, de az e.m. erőter csillapítatlanul létrejön (földkábel): varisztorral

Az e.m. erőter csillapítva lehet, az áram korlátozva van: szupresszor dióda

További zónák: még kisebb megengedhető áramerősség/e.m. erőter: egyéni megoldások

Villámcsapás közvetlen veszélye:

- látás- és hallászavarok (erős fény és hanghatás) → még ha eszméleténél is van, akkor is nekünk kell elvezetni a helyszínről (nem hordoz töltést, nyugodtan hozzá lehet érni!)
- áramjegy (be- és kilépési ponton faág alakú égési seb)
- csonttörés: csak ha leesett valahonnan
- kisagyi bénulás = halál!
- **tüdő-/szívbénulás → azonnali újraélesztés+gyors orvosi segítség** a 10-20%-os túlélési esélyt 50-60%-ra növeli!

ESD: elektrosztatikus erőterek és kisülések hatásai

Elektrosztatikus feltöltődés:



Elektrosztatikus szikrakisülések → félvezető eszközök tipikus roncsolódásának oka

Kisülés energiája	Emberi testre gyakorolt hatás
$W_{ki} < 10^{-3} \text{ J}$	Nem érzékelhető
$10^{-3} \text{ J} < W_{ki} < 0,05 \text{ J}$	Szúró érzés
$0,05 \text{ J} < W_{ki} < 1 \text{ J}$	Ütő érzés
$1 \text{ J} < W_{ki} < 10 \text{ J}$	Égető érzés
$10 \text{ J} < W_{ki} < 50$	Izomgörcs
$50 \text{ J} < W_{ki}$	Halál

RFI: rádiófrekvenciás erőterek hatásai

(orvosi diagnosztikai eszközök, távközlő eszközök: rádiótelefon, stb.)

H3) Feszültség alatti munkavégzés (FAM) és munkabiztonság

Időbeni kialakulás: FAM csak váratlan üzemzavar esetén → tervezett FAM

Előnyök:

- zavartalan ellátás = üzenet az ügyfeleknek/fogyasztóknak
- korszerűbb technológia, anyagok, szerszámok és gépek + szakképzettebb, gyakorlottabb emberek = kevesebb baleset

Magyarországon 25 éves múlttal rendelkezik a FAM.

FAM: üzemi szabályzat enged bizonyos meghatározott munkavégzéseket feszültség alatt is.

Olyan villamos szerelési tevékenység speciális eszközökkel és kötött technológiával, melyet csak komplex nemzeti előírás alapján lehet végezni. A szabályzat mindenkire hatályos.

FAM-tevékenységhez összefoglaló dokumentáció és FAM-engedély szükséges!

<1000 V → kiefeszültség 1000V-35kV → közepfeszültség 35 kV< → nagyfeszültség

Munkamódszerek:

- távolból végzett munka (szigetelő rudakkal)
- érintéssel végzett munka (elektrotechnikai gumikesztyű)
- az előző 2 kombinációja
- potenciálon végzett munka

Kiefeszültségen végzett nemzetközi technológiák: kábel/szabadvezeték munkák, mérés+felügyeleti eszközök létesítése

Közepfeszültségen végzett nemzetközi technológiák

- *Szabadvezetéken*: zsírozás, tisztítás, idegen tárgy eltávolítás, sodrony javítás, szigetelő elemek javítása, felsővezeték csere/létesítés, madárvédők telepítése, ideiglenes kapcsolók/alállomások létesítése, oszlop elemeinek cseréje
- *Alállomásban*: tisztítás, olaj utántöltés trafóba+kábelbe, megszakítók oltóanyagának töltése, biztonsági távolságok mérése

Eszközök előkészítése FAM-ra: felépítés+állapot, ellenőrzés, különleges rendelkezések, környezeti viszonyok megfeleltetése

Zivatar közeledtekor a FAM-munkát abba kell hagyni, a munkaterület pedig elhagyni.

Elmaradó hálózatfejlesztés+rendszerközi torlódások = **üzemzavarok** = túlfokozott reakció
Kiváltó okok főként az extrém éghajlati terhelés, + a berendezések meghibásodása (~ Σ 75%).

Üzemzavar kialakulása:

1-2 üzemzavart elbír a robosztus rendszer, de többet nem

Egy elem meghibásodik → terhelés újraelosztás, túlterhelődések kaszkád jelleggel → összeomlás

F1) Villamos gépek mágneses mezői

1. Állandó, lüktető és forgó mezők.
2. Forgó mező létrehozása többfázisú tekercsrendszerrel.
3. A forgómező tulajdonságai.
4. Szinuszos mezőeloszlás létrehozása.
5. Indukált feszültség számítása.
6. A tekercselési tényező.

F2) A frekvencia-feltétel és alkalmazása

1. A frekvencia-feltétel kifejezése és fizikai tartalma.
2. Gépajták a frekvencia feltétel alapján: szinkron/aszinkron/egyenáramú gépek

G) Az alapvető elektromechanikai átalakítók működési elvei (frekvencia-feltételből)

G1) Szinkron gépek

1. Háromfázisú szinkron gép felépítése és működési elve.
2. Állandósult nyomaték kialakulásának feltétele. A szinkron fordulatszám.
3. Hengeres forgórészű szinkron gép helyettesítő kapcsolásának származtatása.
4. Pólusfeszültség, armatúrafeszültség és szinkron reaktancia.

G2) Aszinkron gépek

1. Háromfázisú aszinkron gép felépítése és működésének elve.
2. Állandósult nyomaték kialakulásának feltétele.
3. Csúszógyűrűs és kalickás forgórész. A szlip és a szlipfrekvencia fogalma.
4. Helyettesítő kapcsolat, redukálás
5. Energiamérleg
6. Légrésteljesítmény, nyomaték számítása

G3) Egyenáramú gépek

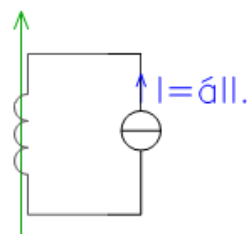
1. Egyenáramú gép felépítése és működési elve.
2. Elektronikus kommutáció elve.
3. Kommutátor felépítése és működése, a mágneskör részei.
4. Indukált feszültség és nyomaték számítása.
5. Helyettesítő kapcsolat származtatása, a legfontosabb üzemi karakterisztikák.
6. Kapcsolási módok, a legfontosabb üzemi karakterisztikák.
7. Külső gerjesztésű egyenáramú motor jelleggörbéi

F1) Villamos gépek mágneses mezői**1-2. Állandó, lüktető és forgó mezők; forgó mező létrehozása**

BME VET

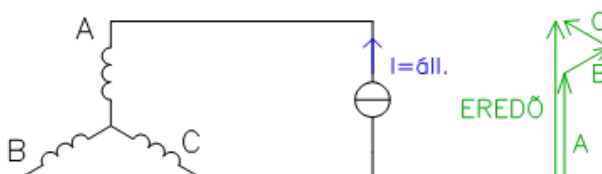
Mezőtípusok: állandó mező

- a) Egy tekercs egyenárammal gerjesztve.



- b) Több tekercs, térben háromfázisúan elhelyezve és egyenárammal gerjesztve.

$B_{\text{eredő}} = 1,5 \times B_A$,
ez is állandó



Vajda István: Forgó mozgás létesítése

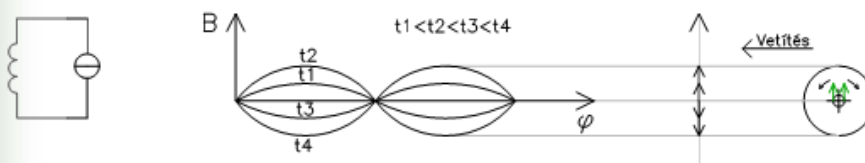
10

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

Mezőtípusok: lüktető mező

Egy tekercs, egyfázisú váltakozóárammal gerjesztve.



A lüktetőmező *térbeli állóhullám*, lineáris esetben összetehető két forgó mezőből.

FERRARIS TÉTELE: a lüktető mező felbontható két, egymással ellentétes irányban, azonos szögsebességgel forgó mezőre, amelyek amplitúdója (hossza) a lüktető mező amplitúdójának fele.

Vajda István: Forgó mozgás létesítése

11

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

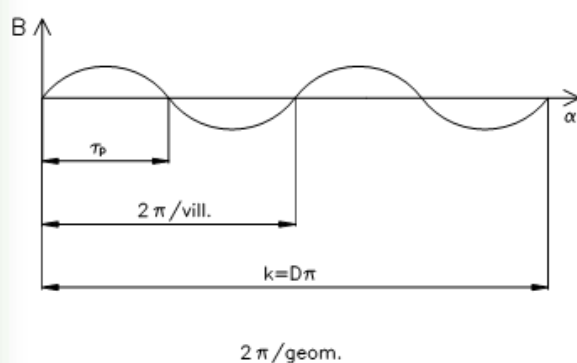
Mezőtípusok: forgó mező

A forgómező létrehozásához:

Többfázisú tekercsrendszer

Többfázisú áram- (gerjesztés-) rendszer

} SZÜKSÉGES



$$\tau_p = \frac{D\pi}{2p}$$

pólusosztás

$$\alpha_v = p \cdot \alpha_g$$

a villamos és a geometriai szög kapcsolata

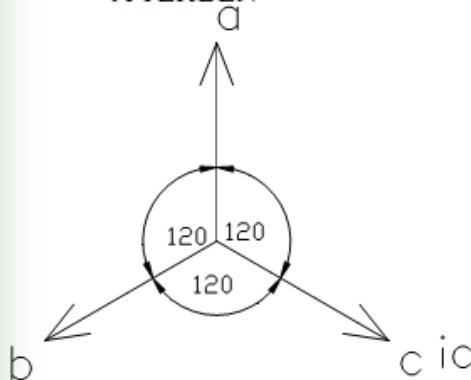
Vajda István: Forgó mozgás létesítése

12

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

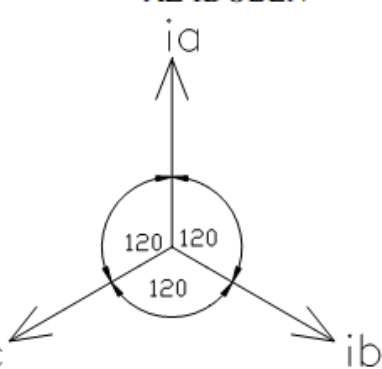
Mezőtípusok: forgó mező

TEKERECSEK TENGELYEI
A TÉRBEN



A TÉRBEN
„ELŐRE”

A TEKERECSEK ÁRAMAI
AZ IDŐBEN



AZ IDŐBEN
„HÁTRA”

Vajda István: Forgó mozgás létesítése

13

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

3. A forgómező tulajdonságai.

BME VET

A forgó mező tulajdonságai

I. Kerület mentén állandó szögsebességgel haladó hullám.

Ha $\omega_1 = \text{áll}$, akkor a maximum-hely:

$$\omega_1 t = \frac{x}{\tau_p} \pi$$

$$x = R \omega_0 t$$

$$\tau_p = \frac{2R\pi}{2p} = \frac{R\pi}{p}$$

$$\omega_1 t = \frac{R \omega_0 t}{\frac{R\pi}{p}} \pi$$

 ω_1 a hálózati körfrekvencia ω_0 a mező szögsebessége R a forgó- vagy állórész (légrés közepes) sugara

$$\omega_1 = p \omega_0$$

$$\omega_0 = \frac{\omega_1}{p}$$

 $\omega_0 = \text{szinkron szögsebesség}$

Vajda István: Forgó mozgás leírása

17

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

A forgó mező tulajdonságai

II ω_0 nem függ a fázisszámtól

Az „m” és „n” fázisú rendszerek ekvivalensek, ha

$$\frac{m}{2} B_{m,\max} = \frac{n}{2} B_{n,\max}$$

$$\text{LINEÁRIS ESETBEN} \quad m N_m I_m = n N_n I_n$$

Ebből m/n állórész/forgórész fázisszám esetén:

$$n_U = \frac{N_m}{N_n} \left(\frac{\xi_m}{\xi_n} \right) \rightarrow U_2' = n_U U_2$$

 ξ a tekercselési tényező

$$n_I = \frac{m N_m}{n N_n} \left(\frac{\xi_m}{\xi_n} \right) \rightarrow I_2' = \frac{I_2}{n_I}$$

(lásd később)

Vajda István: Forgó mozgás leírása

18

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A forgó mező tulajdonságai

III. A nyomatékképzés feltétele az álló és a forgórész pólusszám egyezése.

A két mezőnek, B_{st} és B_{rot} relatív nyugalomban kell lennie:

$$\omega_{0,st} = \omega_{0,r}$$



$$p_{st} = p_{rot}$$

Ez a nyomatékképzés szükséges feltétele „gerjesztett” tekercsrendszerekben.

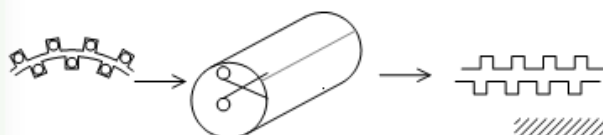
$$\omega_{st}|_B = \omega_{rot}|_B + \omega_{mech} \quad \text{Ez az ún. frekvenciafeltétel}$$

Ahol $\omega_{st}|_B$ a státor illetve $\omega_{rot}|_B$ a rotor mező szögsebessége a státorhoz illetve a rotorhoz képest.

4. Szinuszos mezőeloszlás létrehozása.

Szinuszos mezőeloszlás létrehozása

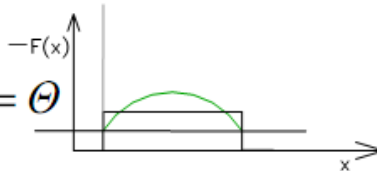
A számítás egyszerűsítése érdekében a hengeres álló- és forgórészt egy képzeletbeli ollóval a hengerpalást-felület egyik alkotója mentén felvágjuk, és a síkban kiterítjük.



Alkalmazzuk a gerjesztési törvényt!

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j}$$

$$\sum_i U_{mag,i} = \oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum_k I_k = \Theta$$

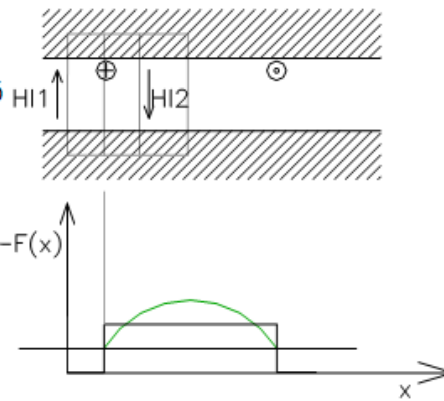


Szinuszos mezőeloszlás létrehozása

Alkalmazzuk a gerjesztési törvényt!

$$\sum_i U_{mag,i} = \oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum_n H_n l_n = \sum_k I_k = \Theta(x)$$

A légrésen, valamint az álló- és forgórész-vastesten át záródó integrálási útvonalakat felvéve, és elhanyagolva a vastestre eső mágneses feszültségeket ($\mu_{vas} = \infty$ közelítés), kapjuk a gerjesztés kerület menti eloszlását., esetünkben egy ún. lépcsős görbét.



Vajda István: Forgó mozgás létesítése

22

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Szinuszos mezőeloszlás létrehozása

A lépcsős görbe Fourier-sora adja meg a gerjesztéseloszlás, valamint – lineáris esetben – a légrésindukció–eloszlás alapharmonikusát és felharmonikusait.

$$B_1 = \frac{4}{\pi} B_m$$

az alapharmonikus indukció,

$$q = \frac{Z}{2pm}$$

a fázisonkénti és pólusonkénti horonyszám.

Vajda István: Forgó mozgás létesítése

23

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Szinuszos mezőeloszlás létrehozása

Mi történik $q > 1$ választás esetén?

MEZŐ

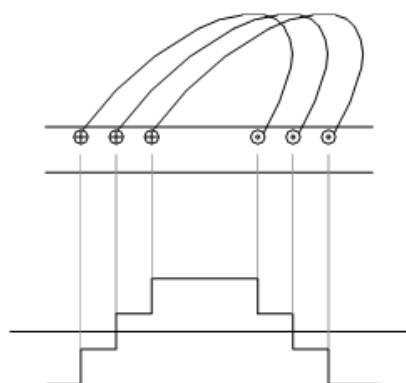
Szinuszosabb térbeli eloszlás

Előnyös

INDUKÁLT FESZÜLTÉG:

Kisebb, mert az egyes tekercsoldalakban fázisban eltoltt feszültségek indukálódnak, amelyek vektorösszege kisebb, mint a részfeszültségek abszolút értékeinek összege (a fázisfeszültség nagysága).

Hátrányos

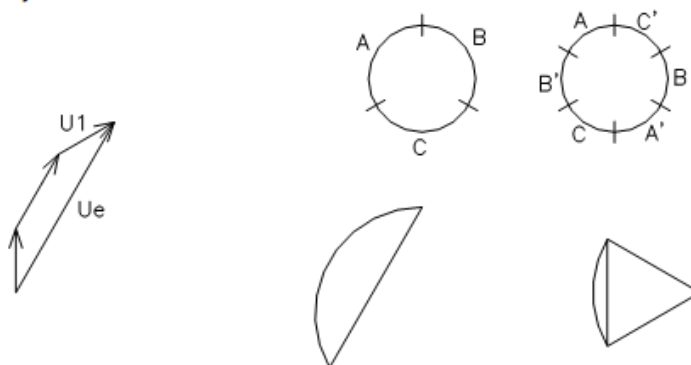


5. Indukált feszültség számítása. A tekercselési tényező.

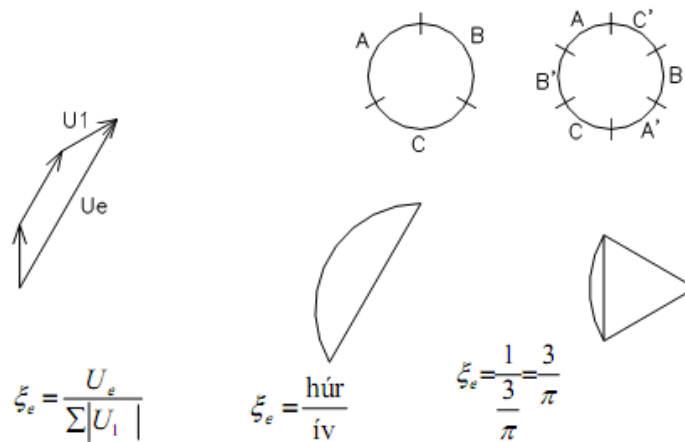
A tekercselési tényező

A bal oldali ábra mutatja az eredő indukált feszültség szerkesztését $q=3$ esetén.

A középső és a jobb oldali ábra $q=\infty$ feltételezéssel készült. A középső ábrán a fázissáv szélessége 120° (nem szokásos), míg a jobb oldali ábrán a fázissáv a szokásos 60° .



A tekercselési tényező



Tehát a tekercselési tényező megmutatja, hogy a tekercselés elosztottsága következtében milyen mértékben csökken az (alapharmonikus) indukált feszültség.

Vajda István: Forgó mozgás létesítése

26

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Az indukált feszültség számítása

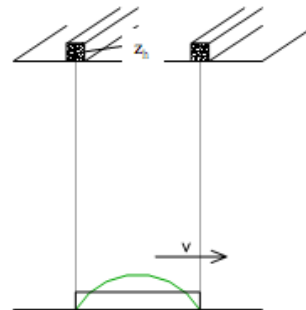
$$N_1 = \frac{z_1}{2} \quad \begin{array}{l} N_1 = \text{menetszám/fázis} \\ z_1 = \text{összes sorbakötött vezetős szám/fázis,} \\ z_h = z_1 / Z \end{array}$$

$$u_i(t) = b(x) l_i \cdot v \cdot z_1$$

$$U_{i,eff} = \frac{U_{i,max}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} B_{max} \cdot l_i \cdot v \cdot z_1$$

$$B_{köz} = \frac{2}{\pi} B_{max} \quad \text{szinuszos esetben!}$$

$$v = R \omega_0 = \frac{p \tau_p}{\pi} \cdot \omega_0 = \frac{\tau_p}{\pi} \omega_0 p = \frac{\tau_p}{\pi} \cdot \omega_1$$



$$U_{i,eff} = \frac{U_{i,max}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\pi}{2} B_{köz} \right) \cdot l_i \cdot \left(\frac{\tau_p}{\pi} \cdot 2\pi f_1 \right) (2N_1) = \frac{4\pi}{2\sqrt{2}} f_1 N_1 B_{köz} l_i \tau_p = 4,44 f_1 N_1 \Phi_{max}$$

Ha $q \neq 1$

$$U_{i,eff} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \xi_1 \cdot \Phi_{max}$$

Vajda István: Forgó mozgás létesítése

27

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

F2) A frekvencia-feltétel és alkalmazása**1. A frekvencia-feltétel kifejezése és fizikai tartalma.**

BME VET

A forgó mező tulajdonságai

III. A nyomatékképzés feltétele az álló és a forgórész pólusszám egyezése.

A két mezőnek, B_{st} és B_{rot} relatív nyugalomban kell lennie:

$$\omega_{0,st} = \omega_{0,r}$$

$$\Downarrow$$

$$p_{st} = p_{rot}$$

Ez a nyomatékképzés szükséges feltétele „gerjesztett” tekercsrendszerekben.

$$\omega_{st}|_B = \omega_{rot}|_B + \omega_{mech} \quad \text{Ez az ún. frekvenciafeltétel}$$

Ahol $\omega_{st}|_B$ a státor illetve $\omega_{rot}|_B$ a rotor mező szögsebessége a státorhoz illetve a rotorhoz képest.

Vajda István: Forgó mozgás leírása
19
Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

2. Gépfajták származtatása a frekvencia feltétel alapján

BME VET

Gépfajták származtatása #1: $\omega_r=0$

Ha $\omega_r=0$, akkor a forgórészt egyenárammal tápláljuk.

Ezzel: $\omega_m = \omega_s$

A γ szög mindig a terhelőnyomaték nagyságának megfelelően áll be.

A gép **átlagos nyomatékot egyetlen fordulatszám**on, az állórészmező fordulatszámán, az ún. szinkron fordulatszámra képes csak kifejteni.

Innen a neve: **szinkrongép**. Az álló- és forgórész, mint láttuk korábban, helyet is cserélhet.

Vajda István:Elektromechanikai átalakítók működése

2

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

Gépfajták származtatása #2: $\omega_r=\text{var}$

Az ún. indukciós gépek forgórészében indukált rotoráramok körfrekvenciája az ω_s szögsebességgel forgó állórészmező és az ω_m szögsebességgel forgó forgórész közötti szögsebesség-különbségnek megfelelően

$$\omega_s - \omega_m$$

ami pontosan kielégíti a frekvenciafeltételt.

Az indukciós gép tehát a frekvenciafeltételt minden mechanikai fordulatszámra kielégíti, és véges rotoellenállással átlagos nyomaték képzésére képes a szinkron fordulatot kivéve.

ω_m és ω_s relatív értékeiktől függően lehet motor, generátor vagy fék.

Vajda István:Elektromechanikai átalakítók működése

3

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Gépfajták származtatása #2: $\omega_r = \text{var}$

Az indukciós motorok állórészére - egyes áramirányítós hajtásoktól eltekintve - a hálózati feszültséget kényszerítjük.

Az indukálás révén a forgórészre is feszültségkényszer hat, amely terhelésfüggő.

Mivel az álló- és forgórész-tekerceslések általában szimmetrikus felépítésűek, és normális körülmények között a feszültségrendszer is az,

az álló- és forgórészáramok is szimmetrikus áramrendszereket alkotnak.

Gépfajták származtatása #2: $\omega_r = \text{var}$

A nyomatékképzéshez normális felépítésű indukciós motornál még **véges forgórész-ellenállás szükséges**. Ezt még a következőképpen is érzékeltethetjük.

A **forgórész áramok időbeli fázisát** és így az árameloszlás térbeli helyzetét az indukált feszültség, ill. az indukáló fluxushoz képest **a forgórész ellenállás/reaktancia viszonya szabja meg**.

A **reaktancia nagysága arányos a forgórész frekvenciával (és így a szlippel)**. Az áramkiszorítás elhanyagolásával az ellenállás független a szlippetől.

A térben szinuszos indukcióeloszlás és ugyancsak szinuszos árameloszlás kölcsönös térbeli helyzetétől függ az egyes forgórészvezetőkre ható erők nagysága és iránya.

Gépfajták származtatása #2: $\omega_r = \text{var}$

Ha a forgórész impedancia tisztán reaktív - tehát az ellenállás zérus -, akkor az egyes vezetőkre ható ellentétes irányú erők éppen kiegyenlítik egymást és **az eredőnyomaték zérus**.

Tisztán ohmos forgórész esetén az erők mind egyirányban hatnak, és **a nyomaték maximális**.

A valóságos esetekben, amikor a forgórésznek ellenállása és - szlipfüggő - reaktanciája is van, a kettő arányától függően (ez az arány a szliptől függ) alakul az eredőnyomaték nagysága az egyes vezetőkre ható nyomatékok összegeként.

Gépfajták származtatása #3: $\omega_s = 0$

Az egyenáramú gépben az **álló- és forgórész egyenáramú táplálásával a frekvenciafeltételt nem lehet kielégíteni**. Ezt hidaljuk át a kommutátorral, amely a $0 \rightarrow \omega_r$ frekvencia átalakítást minden fordulatszámon elvégzi és így az $\omega_s = 0$ -hoz tartozó

$$\omega_m = -\omega_r$$

frekvenciafeltétel kielégítését **minden fordulatszámon** biztosítja.

A **kommutátor frekvenciaátalakító marad akkor is, ha a kékéket váltakozóárammal tápláljuk**, ekkor, a frekvenciaváltozás változatlanul egyenlő a kommutátor forgási sebességével. Az

$$\omega_s = \omega_1$$

$$\omega_r = \omega_1 - \omega_m$$

frekvenciákkal **a frekvenciafeltétel automatikusan kielégül minden mechanikai fordulaton**.

Ez az alapja a váltakozóáramú kommutátoros gépek működésének.

G1) Szinkron gépek**1. Háromfázisú szinkron gép felépítése és működési elve.**

BME VET

Gépfajták származtatása #1: $\omega_r=0$

Ha $\omega_r=0$, akkor a forgórészt egyenárammal tápláljuk.

Ezzel:

$$\omega_m = \omega_s$$

A γ szög mindig a terhelőnyomaték nagyságának megfelelően áll be.

A gép **átlagos nyomatékot egyetlen fordulatszámon**, az állórészmező fordulatszáman, az ún. szinkron fordulatszámon képes csak kifejteni.

Innen a neve: **szinkrongép**. Az álló- és forgórész, mint láttuk korábban, helyet is cserélhet.

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

10

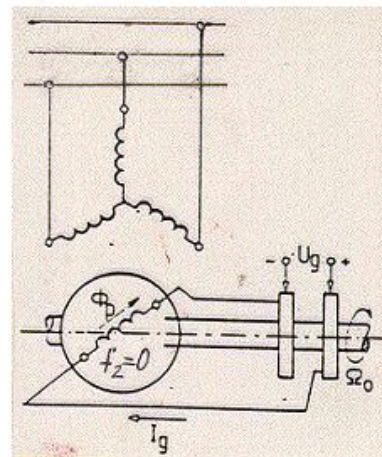
Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

A szinkron gép: működési elv

Láttuk, hogy váltakozóáramú gépeink működésének alapja két szinkron forgó forgómező, képletesen két összetapadt, együttfutó pólusrendszer. Tengelyeik között - a terhelő nyomaték hatására - szögeltérés, szögelfordulás előáll, de állandósult állapotban fordulatszám-eltérés nem lehetséges.

A szinkron gép állórészének a hálózatra kötött háromfázisú tekercselése a légrésben szinkron fordulatszámú forgómezőt hoz létre.



Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

11

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A szinkron gép: működési elv

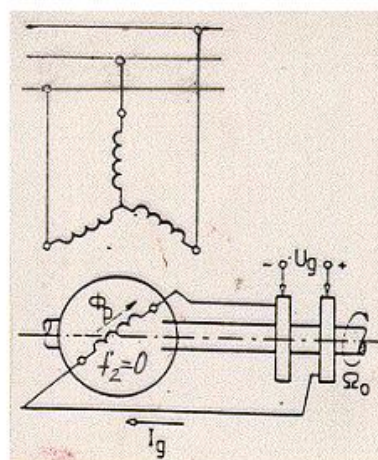
Az egyetlen forgórész tekercset egyenárammal tápláljuk. (lehet állandó mágneses.)

A forgórész mező így a forgórészhez képest áll, nyugalomban van (állandó mező), ahhoz rögzített, "hozzá van ragasztva":

$$f_r = 0 \rightarrow n_r = 0$$

Ebből következik, hogy a forgórésznek az állórész mezővel együtt, azzal szinkron kell forognia

$$n = n_s = n_0 = n_1$$



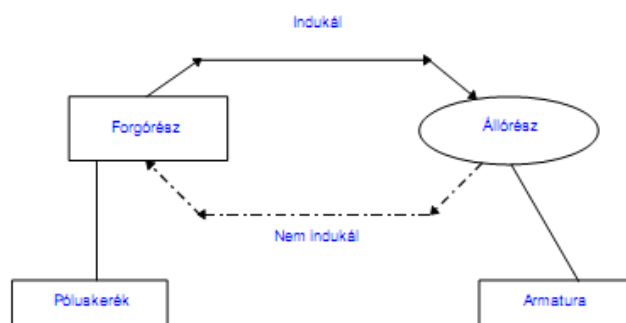
Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

12

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A szinkron gép: működési elv

A szinkron gép állandósult, szimmetrikus állapotban
UNILATERÁLIS = *indukálás csak egy irányban van*: a forgórész indukál az állórészbe.



Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

13

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A szinkron gép: működési elv

A gép tehát csak egyetlen fordulatszámmal, az n_0 szinkron fordulatszámmal képes forogni. Ha fordulatszáma ettől eltér, tehát "kiesik" a szinkronizmusból, akkor üzemképtelenné válik.

Minden **relatív fordulattétel** alatt a teljes, zérus középtértékű nyomatékgörbét befutva **csak lengő nyomaték** keletkezik és **a gép a hálózatra nézve gyakorlatilag rövidzárlatot jelent.**

A forgórész mező a forgó mező "legegyszerűbb" alakja, nevezhetnénk „forgatott forgó mezőnek”, mechanikailag forgatott mezőnek, miután egy állandó mező mechanikai forgatásával jött létre.

Az elmondottakból következik, hogy **a szinkron gép nem tud indulni.** A **generátort** a hajtó gép - pl. a turbina - forgatja névleges fordulatra, a **motort** kalickával indukciós motorként vagy a tápláló inverter nulláról növekvő frekvenciájával kell a szinkron fordulathoz közelítenie.

A szinkron fordulathoz elérésékor mind a generátort, mind a motort - mint később látjuk - megfelelő módon kell a hálózatra kapcsolni, **szinkronizálni** kell. **DEMO!!!!!!**

14

Vajda István:Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A szinkron gép: működési elv

A szinkron gép **lengőképes**, lengésre hajlamos **rendszer**. Az indukció vonalak rugalmas gumiszalagokként viselkednek. Az aszinkron gép lengését a kalicka - a rövidrezárt szekunder - indukált áramai fékezik. Hasonló hatások szinkron gépben is fellépnek. **DEMO!!!!!!**

Ugyanakkor mivel a forgórész áramok révén "saját" mágneses tere van - azt nem a hálózatról felvett áramkomponensnek kell létesíteni - a szinkron gép **képes meddő** - kapacitív meddő - **teljesítményt szolgáltatni**, azaz úgy viselkedni mint egy kondenzátor telep.

Szokásos a rögzített pólusokkal ellátott forgórészt **póluskeréknek**, mezejét **pólusmezőnek** nevezni.

Az állórész háromfázisú tekercselésének neve **armatúra tekercselés**, mezeje az **armatúra mező**. Armatúra tekercselésnek azt nevezzük, amelyben állandósult szimmetrikus állapotban feszültség indukálódik.

A később megismerendő indukciós gépnél mindkét oldal ilyen így ott ez a megnevezés nem használatos.

15

Vajda István:Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A szinkron gép: működési elv

Bár az armatura- és a pólusmező a szinkron gép légrésében egyetlen **eredő** mezővé tevődik össze és csak ez mérhető, **azonban a két részmező** - az azokat létesítő áramok - **itt egymástól függetlenül változtathatnak célszerű a szinkron gépnél a két részmezőben gondolkodni.**

A szinkron gép elsősorban mint **áramszolgáltató nagy generátor** fontos. Míg az indukciós motor "hajtja a világ iparát", **belátható időn belül a villamos energia döntő részét továbbra is szinkron generátorok szolgáltatják.** A következőkben ezért általában a szinkron gép generátoros állandósult állapotát fogjuk vizsgálni.

A hajtógép gőz-, víz vagy gázturbina. A nagy **gőzturbinás generátorok 2-4 pólusúak**, a **vízturbinások gyakran nagy pólusszámúak, lassú fordulatszámúak.**

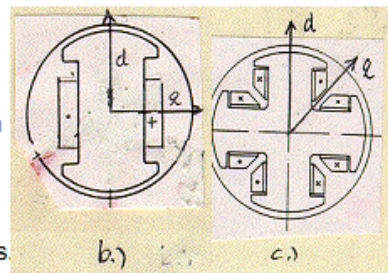
A szinkron gép: felépítés

Az **állórész** tekercselés háromfázisú, elveikben ugyanolyan, mint az indukciós gépeké.

Miután a vas igénybevétele a fogak telítődése miatt nem növelhető, a nagy gépek áramsűrűségét, **a kerületi áramot kell növelni**, amihez erőteljes hűtés: lég-, hidrogén- ill. vízűtés szükséges. Az állórész lemezelt.

A **forgórész** két alaptípusa a **hengeres** és a **kiálló pólusú** változat az utóbbi az ábrán **két és négy pólusú** változatban (b és c.).

Szimmetrikus állandósult állapotban a forgórész **együtt** fut az állórész mezővel így abban indukálás, átmágnesezés nincs. Így, főleg a nagy röperő ellen, **a hengeres változat lehet tömör.**



3. Hengeres forgórészű szinkron gép helyettesítő kapcsolásának származtatása.**4. Pólusfeszültség, armatúrafeszültség és szinkron reaktancia.**

BME VET

Szinkron gép helyettesítő kapcsolása

A mágneses tér „modellje”: *kétmezős elmélet*, mert a két mező többé-kevésbé függetlenül változtatható.

A **pólusfeszültség** az ismert módon:

$$U_p = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_1 \xi_1 N_1 \Phi_{p, \max}$$

ez „aktív” (feszültségforrás).

Az **armatúra-feszültség**:

$$U_a = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_1 \underbrace{\xi_1 N_1 \Phi_a}_{\Psi_a}$$

ez indukált feszültség, de feszültségesésként vesszük figyelembe

Az armatura reaktancia

A **transzformátorhoz hasonlóan**: aktív: U_i
 passzív: X_m

$$U_a = 2\pi f_1 \times \frac{\Psi_a}{\sqrt{2}} \times \left(\frac{I_a}{I_a} \right) = 2\pi f_1 \times \underbrace{\frac{\Psi_a}{\sqrt{2} \times I_a}}_{L_a} \times I_a = \underbrace{2\pi f_1 L_a}_{X_a} I_{a(\text{eff})}$$

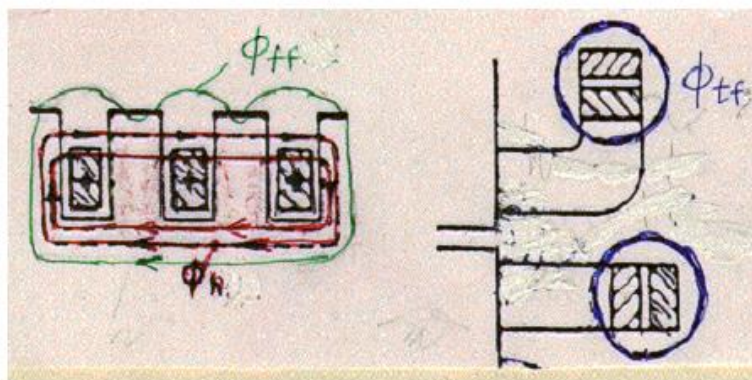
azaz $\bar{U}_a = jX_a \bar{I}_a$,
 ahol X_a az *armatura-reaktancia*.

Ehhez járulnak a szórások, amelyekkel a feszültség-egyenlet:

$$\bar{U}_k = \bar{U}_p + jX_a \bar{I}_a + jX_s \bar{I}_a + R_a \bar{I}_a$$

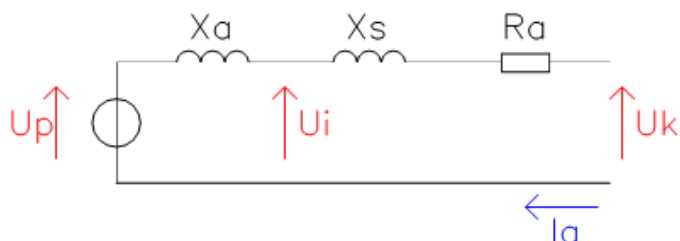
Itt is a fogyasztói pozitív irányrendszer van érvényben.

A szórási fluxus komponensei



Helyettesítő kapcsolás

A feszültség-egyenlethez tartozó helyettesítő kapcsolás:



Megjegyzések:

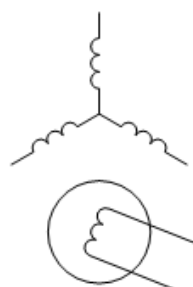
1. A vasvesztést elhanyagolva: állandósult szimmetrikus állapotban csak az állórészben keletkezik vasvesztés.
Nagy gépeknél: $\eta \rightarrow 100\%$ így $P_{\text{vas}} \approx 0$, $P_{\text{mech}} \approx 0$
2. **A növekedési törvények** miatt, ha P nő, r_a csökken, $R_a \approx 0$ a szokásos elhanyagolás
3. A gépben egyetlen mező van, ez hozza létre az indukált feszültséget.
4. $X_d = X_a + X_s$ SZINKRON REAKTANCIA

22

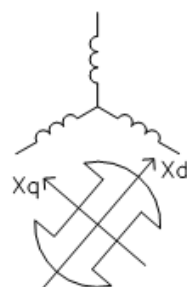
Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Helyettesítő kapcsolás



Hengeres forgórészű
Minden irányban
azonos



Kiálló pólusú
Az eltérő irányokban
eltérő

mágneses ellenállás

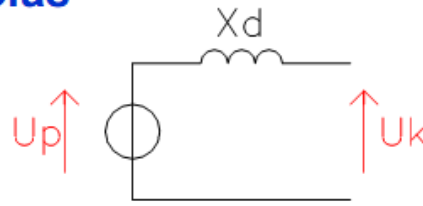
23

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

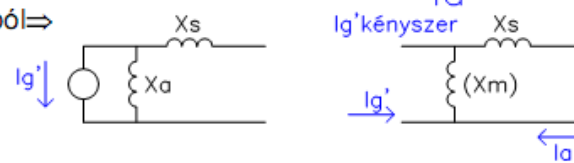
Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Helyettesítő kapcsolás

A hengeres forgórészű szinkron gép egyszerűsített helyettesítő kapcsolása:



Thevenin kapcsolásból $\Rightarrow$ Norton kapcsolás kapható az ismert átalakítással:



A helyettesítő kapcsolás szemléletesen mutatja, hogy (a transzformátorok és az aszinkron gépek esetétől eltérően) szinkron gépek esetén **nem** a gerjesztések egyensúlya törvénye vezérli a működést.

G2) Aszinkron gépek

1. Háromfázisú aszinkron gép felépítése és működésének elve.
2. Állandósult nyomaték kialakulásának feltétele.
3. Csúszógyűrűs és kalickás forgórész. A szlip és a szlipfrekvencia fogalma.

BME VET

Gépfajták származtatása #2: $\omega_r = \text{var}$

Az ún. indukciós gépek forgórészében indukált rotoráramok körfrekvenciája az ω_s szögsebességgel forgó állórészmező és az ω_m szögsebességgel forgó forgórész közötti szögsebesség-különbségnek megfelelően

$$\omega_s - \omega_m$$

ami pontosan kielégíti a frekvenciafeltételt.

Az indukciós gép tehát a frekvenciafeltételt minden mechanikai fordulatszámra kielégíti, és véges rotoellenállással átlagos nyomaték képzésére képes a szinkron fordulatot kivéve.

ω_m és ω_s relatív értékeiktől függően lehet motor, generátor vagy fék.

Vajda István:Elektromechanikai átalakítók működése

29

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

Gépfajták származtatása #2: $\omega_r = \text{var}$

Az indukciós motorok állórészére - egyes áramirányítós hajtásoktól eltekintve - a hálózati feszültséget kényszerítjük.

Az indukálás révén a forgórészre is feszültségkényszer hat, amely terhelésfüggő.

Mivel az álló- és forgórész-tekerceslések általában szimmetrikus felépítésűek, és normális körülmények között a feszültségrendszer is az,

az álló- és forgórészáramok is szimmetrikus áramrendszereket alkotnak.

Vajda István:Elektromechanikai átalakítók működése

30

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

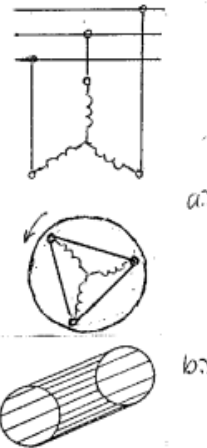
A háromfázisú aszinkron (indukciós) gép

Úgy mondják, hogy az indukciós motor hajtja a világ iparát. **Széleskörű alkalmazásának okai: egyszerűsége, robusztussága (ma egyre fontosabb) és olcsósága.** Így az ipar mellett pl. a nagyvasúti vontatásban is széleskörűen alkalmazzák.

A gép felépítésének alapelve az *a* ábrán látható. A **háromfázisú állórész** üzemben a hálózatra (a tápláló áramirányítóra) van kötve. A forgórész **tekercselt** (háromfázisú) vagy **kalickás** (*b* ábra). Üzem közben a forgórész mindig **rövidrezárt**. A tekercselt forgórész kapcsait indításkor külső ellenállások beiktatására csúszógyűrűkön kivezetik; e változat neve ezért: **csúszógyűrűs gép**.

A mókuskalicka alakú - rudakból és azokat két végükön összekötő, rövidrezáró gyűrűkből álló - **sokfázisú** $m_1 \neq m_2$ **kalickás** forgórész vizsgálatokra háromfázisú - rövidrezárt - tekercseléssel helyettesíthető.

Így $m_1 = m_2$!



Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

31

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

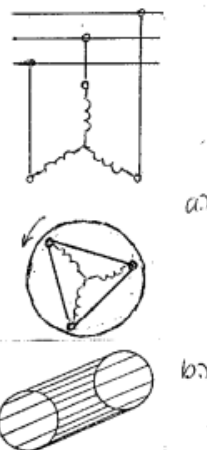
A háromfázisú aszinkron (indukciós) gép

A motor feladata a **forgatás**. A forgómezőnek a forgórészszel - itt a forgórész áramokkal - **nyomatékot** kell létesíteni. Az aszinkron gép forgórészébe - galvanikusan - nem vezetünk áramot, ez a **rövidzáras** miatt nem is lehetséges. Hogyan jön hát létre a nyomaték?

Induljunk ki a forgórész nyugvó állapotából. Az állórész forgó mezeje a forgórész vezetőiben **indukálással** áramokat hoz létre. **Innen a gép egyik neve.** Az indukált forgórész áramok a forgómezővel Biot-Savart törvénye szerint kerületi erőket, **összességükben a forgórész nyomatékot (az indító nyomatékot) hozzák létre.**

A forgórész felgyorsul, majd a gép és a terhelés nyomatékainak egyensúlyánál beáll az állandósult egyensúlyi állapot. **Szinkron forgás nem lehetséges**, mert ekkor nincs forgórész indukálás.

A gép tehát **csak aszinkron üzemre képes**, innen ered a másik neve.



Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

32

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

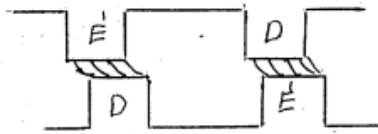
A háromfázisú aszinkron (indukciós) gép

A **forgórész áramok** is létrehoznak egy forgó mezőt. A két mező a légrésben eredő mezővé egyesül, de **a nyomatékképzés szemléletes képét nyerjük ha azt két összetapadt pólusrendszer hatásának tekintjük.**

Az ábrán a két pólusrendszert állandó mágnesekkel érzékeltettük. Állandó nyomaték csak azok együttfutásakor, azonos fordulatszámok esetén lehetséges.

A terhelő nyomaték hatására közöttük szögelfordulás keletkezik - az erővonalak megnyúlnak - de fordulatszám-eltérés nem lehetséges, mert akkor csak zérus középértékű ún. lüktető nyomaték keletkezik.

E kép alapján az együttforgás feltétele az álló- és forgórész pólusszámok egyezése is.



33

Vajda István:Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

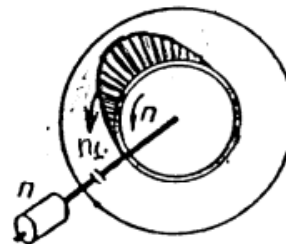
A háromfázisú aszinkron (indukciós) gép

Ha a forgórészt egy **segédgéppel** az állórész mezőjétől **eltérő n fordulatszámmal** forgatjuk, akkor a forgórész nyitott kapcsain más frekvenciájú feszültségrendszert nyerünk, így a gép **frekvenciaváltó**.

Forgassuk a forgórészt először a mezővel **egyirányban**, de kisebb $n < n_1$ fordulatszámmal.

A mező indukcióvonalai ekkor a forgórészvezetőket az $n_2 = n_1 - n$ **lemaradási**, vagy **csúszási**, angolból átvett szóval **szlip fordulatszám** szerint metszik.

A forgórész vezetők ezzel a fordulatszámmal „látják” a mezőt elhaladni.



34

Vajda István:Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A háromfázisú aszinkron (indukciós) gép

Ennek n_1 -re vonatkoztatott, **viszonylagos** értékét nevezik csuszamlásnak vagy **szlipnek**

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} = s$$

A forgórész- és állórész frekvenciák aránya:

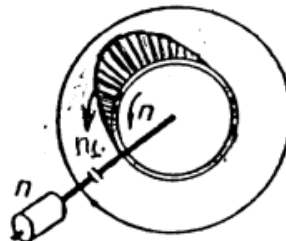
$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{n_2 p_2}{n_1 p_1} = \frac{n_2}{n_1} = s$$

mivel tudjuk, hogy az állórész és forgórész pólusszámának egyenlőnek kell lennie:

$$p_1 = p_2 = p$$

$$\text{Így: } f_2 = s f_1 \quad n_2 = s n_1$$

a **szlipfrekvencia**



A háromfázisú aszinkron (indukciós) gép

A gép $f_1 \rightarrow f_2$ **frekvenciaváltó**. Példaként néhány szlipértékre - n értékre - felírjuk a frekvenciát. Negatív n a mezővel ellentétes irányú forgatást jelent.

$n = 0$	$s = 1$	$f_2 = 50 \text{ Hz } (=f_1)$	Álló helyzet
$n = 0,5 n_1$	$s = 0,5$	$f_2 = 25 \text{ Hz}$	Félfordulat
$n = 0,95 n_1$	$s = 0,05 = 5\%$	$f_2 = 2,5 \text{ Hz}$	Motoros üzem
$n = n_1$	$s = 0$	$f_2 = 0$	Szinkron forgatás
$n = 1,05 n_1$	$s = -0,05 = -5\%$	$f_2 = 2,5 \text{ Hz}$	Generátoros üzem
$n = -n_1$	$s = 2$	$f_2 = 100 \text{ Hz}$	Szinkron forgatás a mezővel ellentétesen

A háromfázisú aszinkron (indukciós) gép

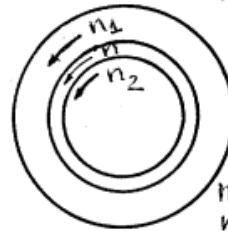
A mezők együttforgását most, a szemléletes kép és a következők érdekében, vizsgáljuk meg számszerűen is.

Legyen az egyszerűség kedvéért kétpólusú gépünk $p=1$ - így

$\omega_s = \omega_1 / p = \omega_1$ - és dolgozzunk az ω -kal arányos n fordulatszámokkal.

Az állórész mező fordulatszáma

$$n_1 = \frac{f_1}{p} = \frac{50 \text{ s}^{-1}}{1} = 3000 / \text{min}$$



$$\begin{aligned} n_1 &= 3000 / \text{min} \\ n &= 2940 / \text{min} \\ n_2 &= 60 / \text{min} \end{aligned}$$

37

Vajda István:Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A háromfázisú aszinkron (indukciós) gép

Az indukálás feltétele, hogy a forgórész - mechanikai - fordulatszáma ennél pl. kisebb legyen: $n < n_1$

Ha feltesszük, hogy a szlip $s=2\%$, akkor a forgórész fordulatszáma:

$$n = n_1 - n_2 = n_1 - sn_1 = n_1(1 - s) = 2940 / \text{min}$$

A forgórész **fordulatszám lemaradása** - a mezőhöz képest -

$$n_2 = sn_1 = 60 / \text{min}$$

A forgórész vezetői ezzel a fordulatszámmal "látják" forogni a mezőt.

38

Vajda István:Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A háromfázisú aszinkron (indukciós) gép

Így a forgórészben indukált áramok frekvenciája:

$$f_2 = n_2 p = 60 / \text{min} = 1 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ Hz}$$

$$(f_2 = s f_1 = 0,02 \cdot 50 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ s}^{-1})$$

A háromfázisú forgórész f_2 frekvenciájú áramrendszere a **forgórészhez képest**:

$$n_2 = \frac{f_2}{p} = \frac{1 \text{ Hz}}{1} = 60 / \text{min}$$

fordulatszámú forgómezőt hoz létre.

De a **forgórész is forog** n fordulatszámmal, így a **forgórészmező fordulatszáma az állórészhez képest**

$$n + n_2 = 2940 / \text{min} + 60 / \text{min} = 3000 / \text{min} = n_1$$

39

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A háromfázisú aszinkron (indukciós) gép

Lemaradáskor ugyanis a forgórész áramok fázissorrendje azonos az állórész áramokéval, így az általuk létesített forgórész forgómező forgásiránya is egyező az állórész mezőével.

Vagyis **a forgórész mezeje együtt, szinkron forog az állórész mezővel**. Két összetapadt pólusrendszer keletkezik, ami - mint láttuk - szükségszerű.

Magyarázata ennek, hogy **a forgórész frekvencia nagyságát éppen annak lemaradása szabja meg**.

A két mező tehát mindig együtt, egyező sebességgel forog, de kölcsönös helyzetük változik a szükséges nyomatékkal, a terheléssel.

40

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

4. Helyettesítő kapcsolás, redukálás

BME VET

Aszinkron gépek

A forgórészen indukált feszültség:

$$\frac{U_{li}}{U_{2i}} = \frac{N_1 \xi_1}{N_2 \xi_2} = n_U$$

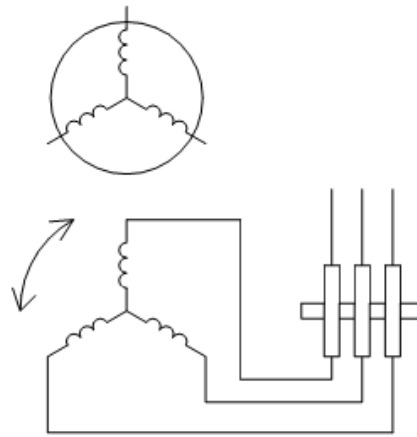
Forgó transzformátor $\Rightarrow$ Érvényes a gerjesztések egyensúlyának törvénye:

$$\overline{\Theta}_1 + \overline{\Theta}_2 = \overline{\Theta}_m \approx \overline{\Theta}_0$$

Az álló- és forgórész **fázisszám**, m_s és m_r **eltérő** is lehet.

Az alapharmonikusra vonatkozó gerjesztés-egyenlet:

$$\frac{m_1}{2} \xi_1 N_1 \bar{I}_1 + \frac{m_2}{2} \xi_2 N_2 \bar{I}_2 = \frac{m_1}{2} \xi_1 N_1 \bar{I}_{1,0}$$



42

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

Aszinkron gépek

A gerjesztések egyensúlyának törvényéből:

$$\frac{m_1}{2} \xi_1 N_1 \bar{I}_1 + \frac{m_2}{2} \xi_2 N_2 \bar{I}_2 = \frac{m_1}{2} \xi_1 N_1 \bar{I}_{1,0}$$

$$\bar{I}_1 + \frac{m_2 N_2 \xi_2}{m_1 N_1 \xi_1} \bar{I}_2 = \bar{I}_{m_1} \quad n_I = \frac{m_1 N_1 \xi_1}{m_2 N_2 \xi_2}$$

Az impedanciák redukálása:

$$Z' = n_Z \times Z,$$

$$\text{ahol } n_Z = n_U \times n_I = \frac{m_1 (\xi_1 N_1)^2}{m_2 (\xi_2 N_2)^2}$$

43

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Aszinkron gépek helyettesítő kapcsolása

Célunk, hogy a helyettesítés kapcsolás nyugvó áramkör legyen, tehát valamilyen módon "ki kell iktatni a forgást".

A forgórész indukált feszültsége:

$$U_{i,2} = 4,44 f_2 \xi_2 N_2 \Phi_m = s 4,44 \underbrace{f_1 \xi_2 N_2 \Phi_m}_{U_{i,2} \text{ álló helyzetben}}$$

$$U_{i,2}(s) = s U_{i,2}(f_1)$$

$$R_2 = \text{áll}$$

$$X_{s,2} = 2 \pi f_2 L_{s2} = s X_{s,2}(f_1)$$

Jelölés: $U_{i,2}(f_1) = U_{i,2}$
 $X_{s,2}(f_1) = X_{s,2}$

ha elhanyagoljuk a
skin-effektust

Aszinkron gépek helyettesítő kapcsolása

A feszültségegyenlet a szokásos alakban:

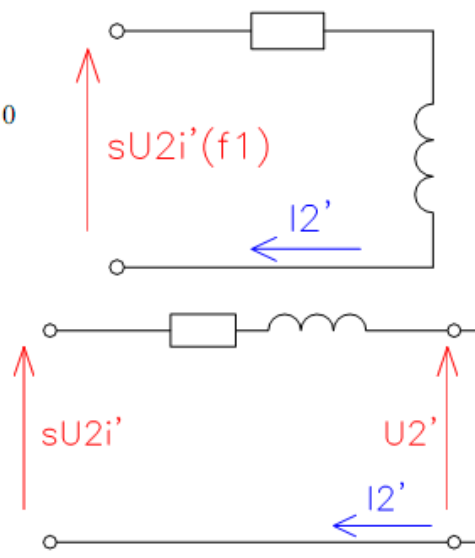
$$\vec{U}_2'(s) = s \vec{U}_{2i}' + R_2' \vec{I}_2' + j s X_{s2}' \vec{I}_2' = 0$$

A forgórész-mező az állórész-mezővel **MINDEN FORDULATSZÁMON EGYÜTT FOROG** a forgórész-áramok az állórészről nézve **MINDIG 50 Hz frekvenciájúnak látszanak**.

Más szóval az aszinkron gép "elvégzi" az

$$f_2 \rightarrow f_1 = \frac{f_2}{s}$$

frekvenciatranszformációt.



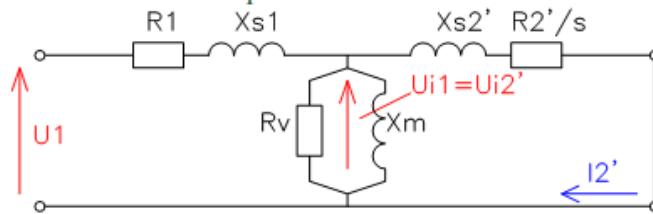
Aszinkron gépek helyettesítő kapcsolása

$$\bar{U}'_{i,2} + \frac{R_2}{s} \bar{I}_2' + jX_{s2} \bar{I}_2' = 0 \quad \bar{U}'_{i,2} = \bar{U}_{i,1}$$

Most már összeköthető a primer és a szekunder oldal
a helyettesítő kapcsolásban, ahol:

$$\frac{R_2'}{s} = R_2' + R_2' \frac{1-s}{s} = R_2' + R_m'$$

R_m' a „mechanikai ellenállás”,
a tengelyen leadott teljesítményt, R_2'
forgórész tekercsvesztését
képviseli



46

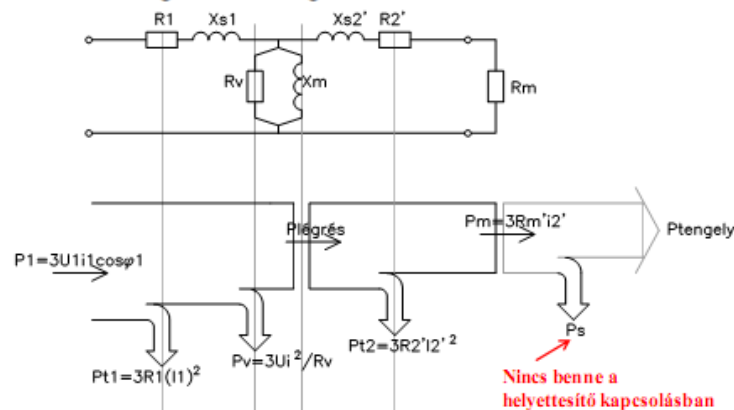
Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

5. Energiamérleg

Aszinkron gépek energiamérlege

$f_2 \approx 0$ miatt $P_{vas,2} \approx 0$, vagyis normál üzemi viszonyok között a forgórész vasvesztését sokszor elhanyagoljuk. Vigyázzunk: ez nem mindig tehető meg!



47

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

6. Légrésteljesítmény, nyomaték számítása

BME VET

Aszinkron gépek nyomatéka

A légrésen átadott teljesítmény (légrésteljesítmény):

$$P_l = 3(R_2' / s) I_2'^2$$

$$P_m = (1 - s) P_l \Rightarrow$$

$$P_m = (1 - s) P_l$$

$P_{l,2} = 0$ esetén nincs P_l
és nincs M

A nyomaték a tengelyen:

$$M = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{(1-s) P_l}{(1-s) \Omega_0} = \frac{P_l}{\omega_1 / p} = p \frac{P_l}{\omega_1} = \frac{3}{\Omega_0} \frac{R_2'}{s} I_2'^2$$

Vajda István:Elektromechanikai átalakítók működése

48

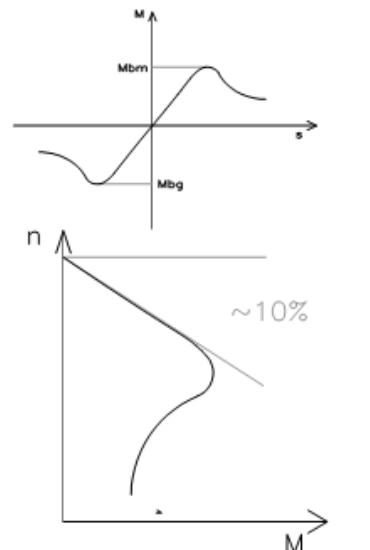
Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

Aszinkron gépek nyomatéka

A gép által kifejtett legnagyobb nyomatékot **billenő nyomatéknak** nevezzük. Ideális esetben a billenő nyomaték motoros és generátoros üzemben azonos. A mindig keletkező veszteségek miatt a generátoros billenő nyomaték nagyobb, mint a motoros.

Az alsó ábrán újra felrajzoltuk a mechanikai jelleggörbét, annak megszokott alakjában, de kissé torzítva, nagyobb meredekséggel. Az ábra jól mutatja, hogy az üzemi tartományban az aszinkron gép fordulatszám-tartó: **üresjárástól (szinkron fordulatszám-tól) a névleges terhelésig a gép fordulatszáma csupán néhány százalékkal csökken.**



Vajda István:Elektromechanikai átalakítók működése

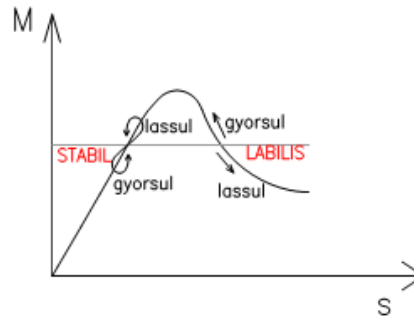
49

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Aszinkron gépek stabilitása

A jobb oldali ábra a *statikusan stabilis* és *labilis* tartományokat mutatja. A stabilitásvizsgálat teljesen hasonló a szinkron gépeknél bemutatottal.

Az ábráról leolvasható, hogy az aszinkron gép **statikusan stabilis**, ha a szlip **nem nagyobb a billenőnyomatékhoz tartozó billenőszlipnél**, és statikusan **labilis**, ha a szlip nagyobb, mint a billenőszlip.



G3) Egyenáramú gépek

Gépfajták származtatása #3: $\omega_s = 0$

Az egyenáramú gépben az **álló- és forgórész egyenáramú táplálásával a frekvenciafeltételt nem lehet kielégíteni**. Ezt hidaljuk át a kommutátorral, amely a $0 \rightarrow \omega_r$ frekvencia átalakítást minden fordulatszámon elvégzi és így az $\omega_s = 0$ -hoz tartozó

$$\omega_m = -\omega_r$$

frekvenciafeltétel kielégítését **minden fordulatszámon** biztosítja.

A **kommutátor frekvenciaátalakító marad akkor is, ha a kékét váltakozóárammal tápláljuk**, ekkor, a frekvenciaváltozás változatlanul egyenlő a kommutátor forgási sebességével. Az

$$\omega_s = \omega_1$$

$$\omega_r = \omega_1 - \omega_m$$

frekvenciákkal **a frekvenciafeltétel automatikusan kielégül minden mechanikai fordulaton**.

Ez az alapja a váltakozóáramú kommutátoros gépek működésének.

1. Egyenáramú gép felépítése és működési elve.
2. Elektronikus kommutáció elve.
3. Kommutátor felépítése és működése, a mágneskör részei.

BME VET

Az egyenáramú gép mint rendszer

Az egyenáramú gép valójában nem gép, hanem szinkron gépből, mechanikai áramirányítóból és vezérlésből álló **rendszer**. Ebből következően **belülről a legbonyolultabb fizikájú, ám „kívülről” a legegyszerűbb viselkedésű** gép.

Bennünket **a külső viselkedés érdekel**, de ennek kellő megértéséhez **a belső fizika fő vonásait is át kell tekintenünk**.

Célunkat **két lépésben** érjük el. Először a rendszer alap gondolatát vizsgáljuk a szinkron gépből kiindulva, majd a **felépítést követjük** lépésről-lépésre fő vonásaiban.

54

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

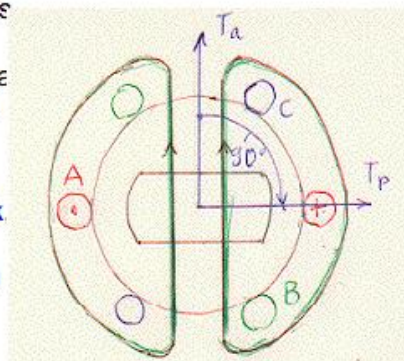
Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

Az egyenáramú gép mint rendszer

Az ún. **önvezérelt** szinkron gépben a maximális nyomatékot - és más előnyöket - szolgáltató **90° -os** szöget az armatura - és a pólustengely között úgy érjük el, hogy **mérjük a forgórész helyzetét és az állórész változóáramait úgy szabályozzuk** hogy forgó mezejük tengelye mindig **90° -kal** - motor üzembn - siessen a pólustengely előtt.

Az ábrán éppen az A fázisban van árammaximum. A forgórész állandó mágneses. **T_a** az armatura mező, **T_p** a pólusmező tengelye.



55

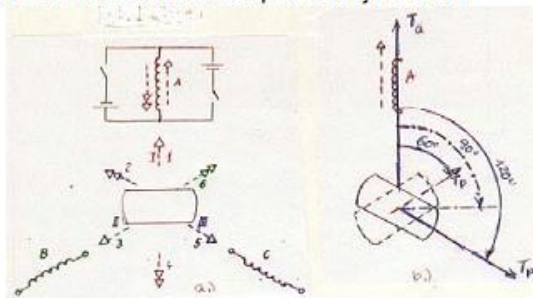
Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Az egyenáramú gép mint rendszer

Ha az armatura fázistekercseket az ábra szerint a háromfázisú váltakozó áramrendszer helyett - az északi és déli pólusoknak és 60° -os "ugrásoknak" megfelelő - kétirányú **egyenárammal** tápláljuk, akkor a működtető fázist - az ábrán az A-t - a forgórész 120° -al elmaradt helyzetében be- és 60° -osnál kikapcsolva (b. ábra) középpértékként a 90° -ot nyerjük (a. ábra).

Az ábrában csak az A fázis táplálását jeleztük.

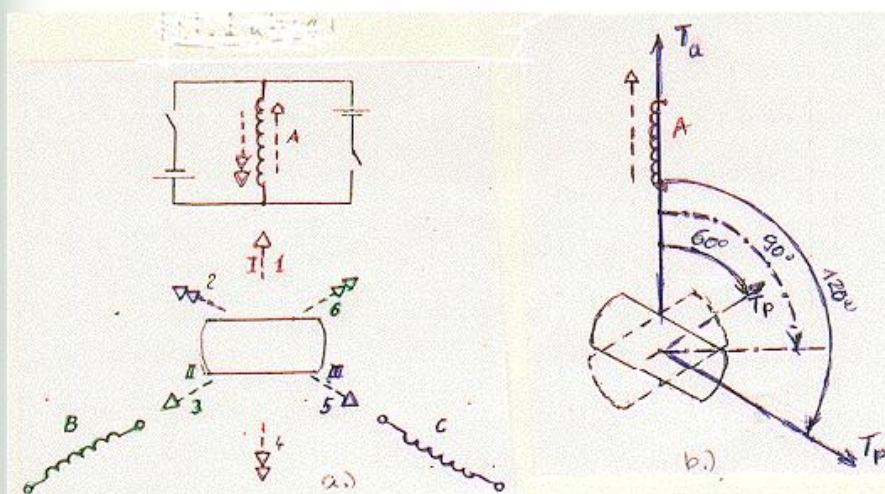


Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

56

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Az egyenáramú gép mint rendszer



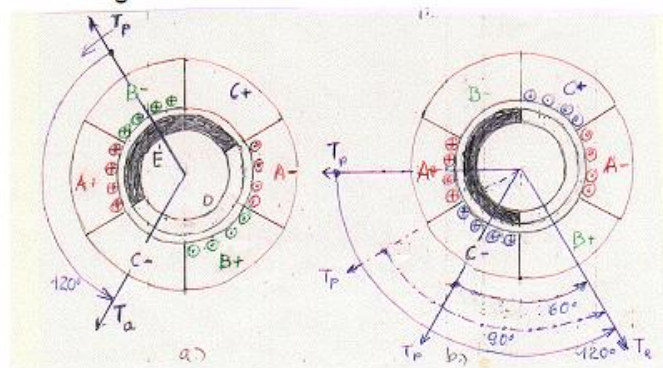
Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

57

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Az egyenáramú gép mint rendszer

A gyakorlati megoldás majd az egyenáramú gépek mai modern félvezetős áramirányítós un. **kefenélküli** változatánál lesz érdekes és azzal a kapcsolatsból eredő **lűktető nyomatékösszetevő** iktatható ki a hasznos nyomaték pedig állandósága mellett növelhető.



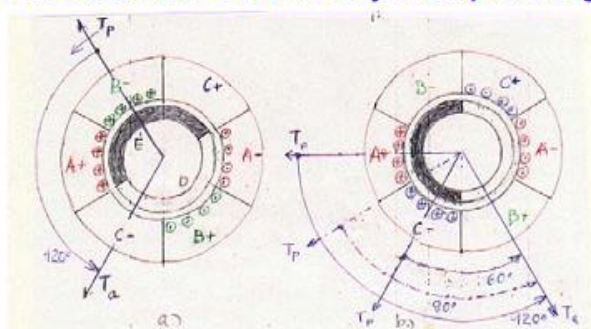
Vajda István:Elektromechanikai átalakítók működése

58

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Az egyenáramú gép mint rendszer

Az állórészen egyszerre mindig két fázist táplálunk. Az a ábrán azt a pillanatot látjuk amikor az A és -B fázisok (-B ellenkező áramirányt jelöl) táplálása elkezdődött. A két fázis **120°-os kerületi sávot fog át. A 180°-os pólusívű mágnesnek mindig 120°-os része áll szemben az állórész áramokkal egészen a b. ábrán következő újabb kapcsolásig.**



Vajda István:Elektromechanikai átalakítók működése

59

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

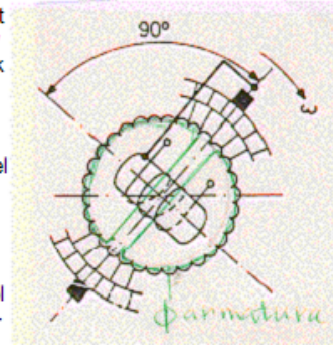
Az egyenáramú gép mint rendszer

E kis gyakorlati előkészítő oldalút után **térjünk vissza a klasszikus kommutátoros egyenáramú gép alapgondolatának kialakításához.**

Az **állandó nyomatékot** - egyúttal a teljes kerület kihasználásával nagy nyomatékot - itt **a nagy fázisszámmal érjük el.** A nagy fázisszámnak más kényszerítő okát is meg fogjuk ismerni.

A korábbi ábra három fázisával szemben készítsünk nagy fázisszámú armatura tekercselést pl. lemezel vasgyűrűre tekercsel toroid alakjában, ahol a menetek sorbakötött fázisokat jelentenek, és azt tápláljuk külső mechanikai áramirányító, kommutátor segítségével, egyenárammal.

A kommutátor egymástól szigetelt réz szeletekből áll (lásd ábra később) és minden fázis végét - két tekercs összekötését - egy szelethez kötjük. **Minden tekercs más helyzetű, így mindegyik tekercs egy fázis.**



Vajda István:Elektromechanikai átalakítók működése

60

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

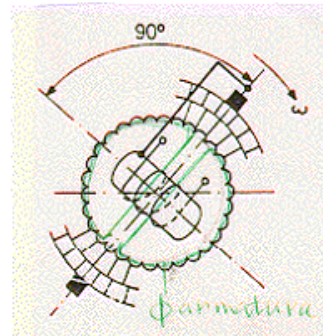
Az egyenáramú gép mint rendszer

A kommutátort olyan **külső forgó kefépárral** tápláljuk egyenárammal, amelyet, az ábrán láthatóan, **a forgórész tengelyére merőlegesen rögzítünk.**

Az ábrán a kommutátornak csak egy részét rajzoltuk fel. **A kefépár jelöli ki az állórész, az armatura mezejének tengelyét.**

Forgatása révén a mező is forog és magával viszi a 90° -os helyzetben rögzített póluskereket.

Ezen az ábrán és a továbbiakban egyenárammal gerjesztett pólusokat rajzoltunk. A pólusrendszer lehet gerjesztett és állandó mágneses is.



Vajda István:Elektromechanikai átalakítók működése

61

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

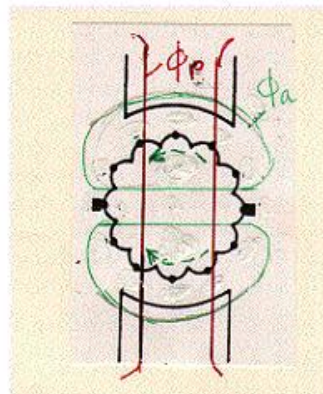
Az egyenáramú gép mint rendszer

A külső kommutátoros, forgókefés gép bonyolult felépítésű, nagyméretű berendezés lenne.

Ezért gépünket "kifordítjuk", az állórészen helyezzük el a pólusokat, a forgórészen a sokfázisú armaturát a kommutátorral és a nyugvó kefékkel.

A nagy fázisszám a hozzá tartozó nagy kommutátor szeletszámmal a kis 20~30V-os szeletfeszültség miatt is szükséges.

Az ábrában a jobb áttekinthetőség érdekében magát a kommutátort nem rajzoltuk fel (!!!), a nyugvó kefék közvetlenül az aktív vezetőkkel "érintkeznek".

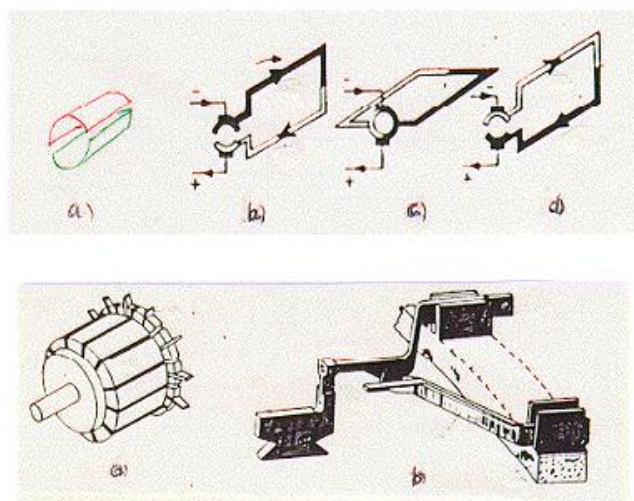


62

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

A kommutátor



63

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Az egyenáramú gép mint rendszer

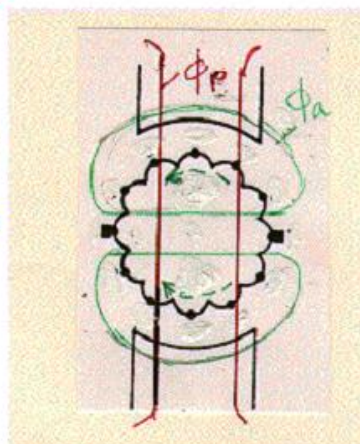
Ily módon **a két merőleges, eddig forgó mező áll, nyugalomban van.**

A forgó armatúrához - a kommutátorhoz - most nyugvó keferendszer illeszkedik.

Az armatura mező mindig be szeretne forogni az állórész pólusrendszerének a tengelyébe, de ezt a kommutátor nem engedi; a mezőt mindig annyival "forgatja vissza" amennyire a vezetők előre forogtak.

Az ilyen **nyugvó mezőt létesítő forgó tekercset** szokás „**állstacionárius**” - **pszeudostacionárius** - tekercsnek nevezni.

Előnyeit rövidesen látjuk, titkait, a gép felépítését lépésről-lépésre követve igyekezzünk majd kifürkészni.



Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

64

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

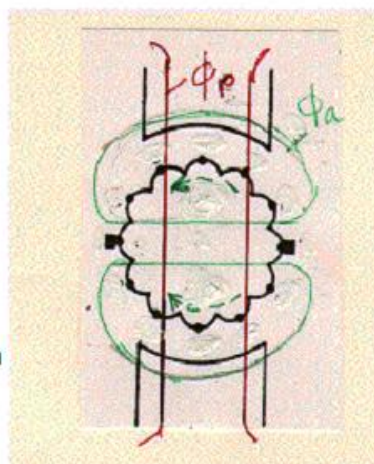
Az egyenáramú gép mint rendszer

Az egyenáramú gép tehát **valóban nem gép hanem rendszer:**

Kifordított szinkron gép + mechanikai áramirányító + vezérlés (a kefék helyzetével).

A sokfázisú **armatura tekercselésben** - a sorbakötött fázistekercsekben - **váltakozó áram** folyik, hiszen az ábra felső ágában a körbejáráshoz képest az egyik, az alsóban a másik irányban folyik az áram,

így a körbeforgó fázistekercsekben is, **amelynek frekvenciáját mindig az adott fordulatszám szabja meg.**



Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

65

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Az egyenáramú gép mint rendszer

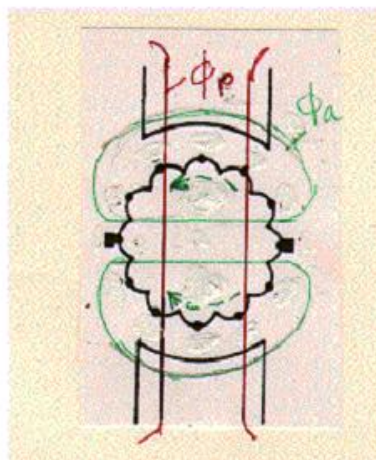
A kommutátor tehát frekvencia átalakító (frekvenciaváltó):

generátor üzemben a változó armatura frekvenciából mindig $f=0$ frekvenciát alakít, míg

motor üzemben mint váltóirányító az egyenáram nulla frekvenciáját mindig az **adott fordulatszámnak megfelelő frekvenciává** változtatja.

A gépnek így minden fordulatszáma „szinkron fordulatszám” (annak minden fordulatszám megfelelő, "jó"):

az egyenáramú motor fordulatszámát így széles határok között folytonosan és egyszerűen lehet változtatni, szabályozni.

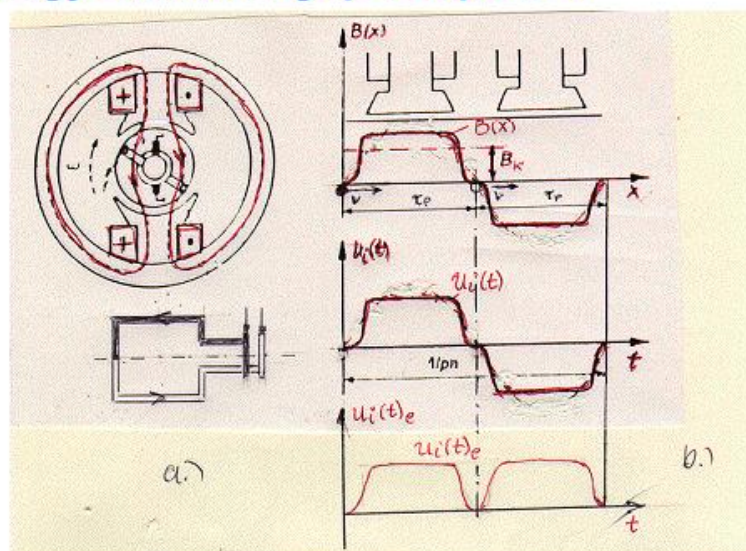


Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

66

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Az egyenáramú gép felépítése



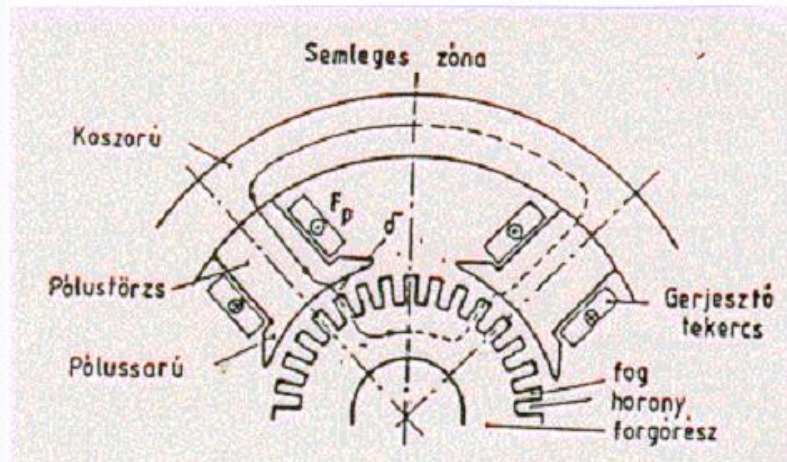
Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

67

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

Az egyenáramú gép felépítése



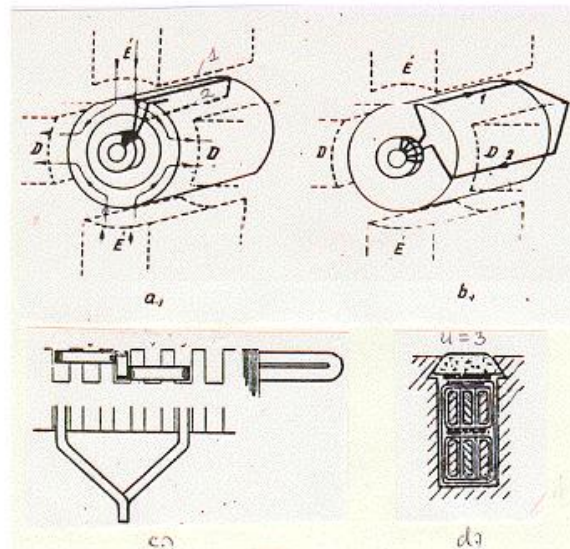
68

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

Az egyenáramú gép felépítése

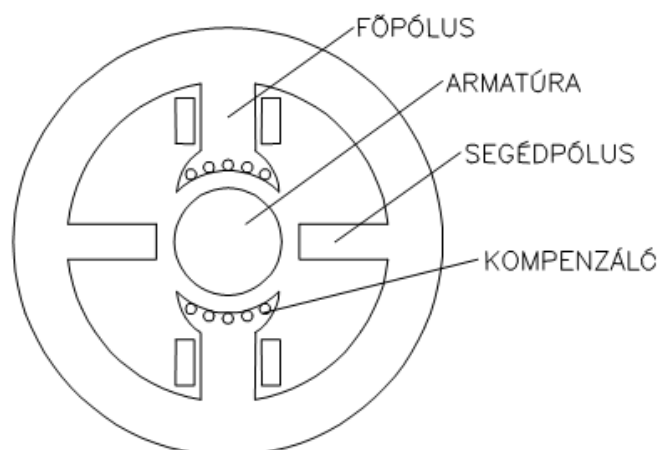


69

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Az egyenáramú gép felépítése



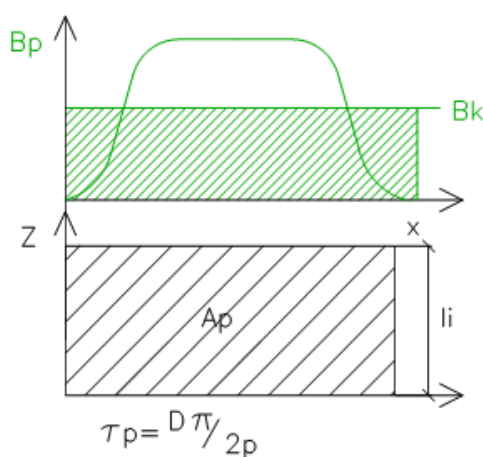
Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

72

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

4. Indukált feszültség és nyomaték számítása.

Az indukált feszültség számítása



Az ábra felső részén a pólusmező térbeli eloszlása, az alsó részén pedig a pólus méretei láthatók az armatura felületén.

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

73

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Az indukált feszültség számítása

$$U_{il(\text{vezető})} = B_k l_i v \quad v = D \pi n$$

v: az armatura kerületi sebessége

$$z_{\text{soros}} = \frac{z}{2a}$$

z: az összes sorbakötött vezető száma
2a: a párhuzamos ágak száma

$$U_i = \frac{z}{2a} B_k \underbrace{l_i D \pi}_{A_p \times 2p} n = D \pi \cdot l_i = A_p (2p)$$

$$= \frac{p}{a} z \Phi_a \cdot n = k_U \cdot \Phi_a \cdot n$$

$$U_i = k_U \cdot \Phi_a(I_g) \cdot n = \frac{k_U}{2\pi} \cdot \Phi_a(I_g) \cdot \omega$$

A nyomaték számítása

A tekercsoldalra ható erő:

$$F_l = B_k \cdot l_i \cdot I_{\text{ág}}$$

Az erőkar a sugár. Az összes vezetőre ható nyomatékot úgy kapjuk meg, hogy az egyetlen tekercsoldalra ható nyomatékot megszorozzuk a sorba kötött tekercsoldalak számával:

$$M = z \cdot \frac{D}{2} \cdot F_l = z \cdot \frac{D}{2} \cdot B_k \cdot l_i \cdot \frac{I_a}{2a} = z \cdot \frac{D \pi l_i}{2\pi} \cdot B_k \cdot \frac{I_a}{2a} =$$

$$= \frac{z}{2\pi} \cdot \frac{1}{2a} \cdot A_p (2p) \cdot B_k \cdot I_a = \frac{z}{2\pi} \cdot \frac{p}{a} \cdot \Phi_a \cdot I_a$$

$$M = k_M \cdot \Phi_a(I_g) \cdot I_a$$

5-6-7. Helyettesítő kapcsolás származtatása, kapcsolási módok, a legfontosabb üzemi karakt.-k

BME VET

Helyettesítő kapcsolása

$$U_i = k \cdot \Phi_a \cdot \omega \quad M = k \cdot \Phi_a \cdot I_a$$

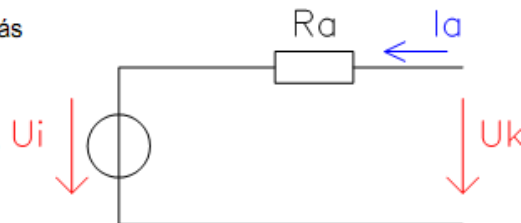
A gép működése viszonylag bonyolult, a helyettesítő kapcsolás azonban nagyon egyszerű:

a belső feszültségforrás az indukált feszültség, a belső ellenállás pedig az armatúrában keletkező veszteségeket képviselő ellenállás.

A motoros és a generátoros üzemre vonatkozó feszültség egyenletek egyszerűek és hasonlóak:

Motoros üzemállapotban a kapcsolófeszültség nagyobb, mint az indukált feszültség, míg

Generátoros üzemállapotban fordított a helyzet.



$$U_k = U_i + R_a \cdot I_a \quad \frac{G}{M}$$

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

76

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

BME VET

Kapcsolási módok

Külső gerjesztés esetén a gerjesztő tekercset független áramforrás táplálja.

Párhuzamos vagy sönt gerjesztés esetén a gerjesztő tekercs az armatúra tekercsével párhuzamosan,

Soros gerjesztés esetén az armatúra tekercsével sorosan kapcsolva.

Vegyes gerjesztés esetén a gép sönt és soros tekercsével egyaránt el van látva. A nagyobb gerjesztést a soros tekercs adja.

A sönttekercs gerjesztése a soros tekercs gerjesztésével megegyezhet (**kompaund gerjesztés**),

de lehet azzal ellentétes is (**antikompaund gerjesztés**).



KÜLSŐ

PÁRHUZAMOS

SOROS

VEGYES

Vajda István: Elektromechanikai átalakítók működése

77

Elektrotechnika, BME VIK, 2010 ősz

Egyenáramú motorok jelleggörbéi

Az egyenáramú motorokat még mai is nagyon széles körben alkalmazzák rendkívül kedvező és egyszerű szabályozási tulajdonságaik miatt. Az alábbi motoros jelleggörbéket szokás használni:

- a) $n(I_a)$ sebességi jelleggörbe;
- b) $M(I_a)$ nyomatéki jelleggörbe.
- c) $n(M)$ mechanikai jelleggörbe.

A már megismert feszültség egyenletek alapján az egyes jelleggörbék egyszerűen származtathatók.

Külső gerjesztésű egyenáramú motorok

- a) Sebességi jelleggörbe

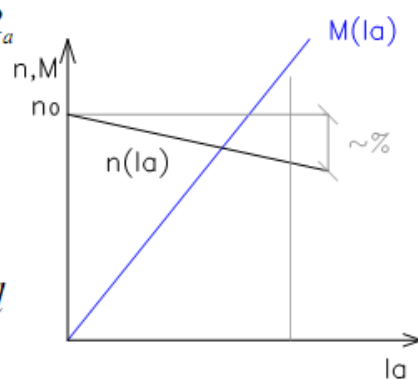
$$U_k = U_i + R_a \cdot I_a = k_u \Phi_a \cdot n + I_a R_a$$

$$n = \frac{U_k - I_a R_a}{k_u \Phi_a} = \frac{U_k}{k_u \Phi_a} - \frac{R_a}{k_u \Phi_a} I_a = n_0 - \Delta n(I_a)$$

$$n_0 = \frac{U_k}{k_u \Phi_a}$$

- b) Nyomatéki jelleggörbe

$$M = k_M \Phi_a I_a \quad \Phi_a = \text{állandó}$$



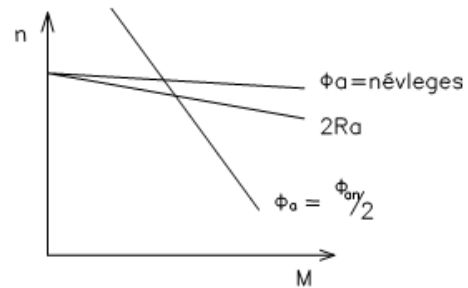
Külső gerjesztésű egyenáramú motorok

c) Mechanikai jelleggörbe

$$n = \frac{U_k - R_a I_a}{k_U \Phi_a} \quad I_a = \frac{M}{k_M \Phi_a}$$

$$n = \frac{U_k}{k_U \Phi_a} - \frac{R_a}{k_U k_M \Phi_a^2} M$$

$$\omega = \frac{U_k}{k \Phi_a} - \frac{R_a}{(k \Phi_a)^2} M$$



Elektrotechnika – Mérési útmutatók

Tárgykód: VIVEA201

Követelmény: 4/0/1/f

Kredit: 6

Elektrotechnika – Laboratóriumi mérések

Kurzus:

Időpont:

Csoport:

Mérőcsoport:

Mérések

1. Nagyfeszültségű kisülések és átütési szilárdság (Nagyfeszültségű labor, V1 1.emelet)

Időpont:

Mérés eredménye:

2. Érintésvédelem (V1.414)

Időpont:

Mérés eredménye:

3. Transzformátorok (V1.401)

Időpont:

Mérés eredménye:

4. Villamos gépek (V1.401)

Időpont:

Mérés eredménye:

5. Nemkonvencionális energiaátalakítók (V1.401)

Időpont:

Mérés eredménye:

A mérések szabályai

1. A csoportok általában 4-5 főből állnak. Egy-egy mérésvezető egyidejűleg két, azonos mérésen dolgozó mérőcsoportot felügyel.
2. A mérőcsoport első mérésének alkalmával a diákokkal ismertetni kell a laborszabályzatot. A szabályzat tudomásul vételét a hallgatók az összesítő lapon aláírásukkal igazolják.
3. A mérés írásbeli v. szóbeli ellenőrzéssel ("beugró") indul. Az ellenőrzés anyaga a mérési útmutató. A mérés csak az ellenőrzés sikeres teljesítésével kezdhető el.
4. A jegyzőkönyvet a mérőcsoportok a mérés alatt folyamatosan töltik ki.
5. Minden mérési gyakorlat osztályzattal zárul, a laboratóriumi munka és a jegyzőkönyv alapján. A mérési osztályzatokat egyénenként kell megállapítani. A jegyet a diákok jelenlétében kell adni, a mérési helyeken megtalálható összesítő lapra, az adott mérés befejezésekor.
6. A csoport közös jegyzőkönyvet készít. A csoportvezetők egyéni mérési feladatokat is adhatnak.
7. A jegyzőkönyvet a hallgatók a 3., 4. és 5. mérés esetén számítógéppel készítik el. A mérés végeztével a jegyzőkönyvet saját adathordozón elvihetik.

Az öt sikeres (legalább 2-es) mérés eredményeiből átlagot számítunk egy tizedes jegyre kerekítve, majd ebből is százalékot képzünk. A mérési jegyek átlaga a tantárgy osztályzatának 33%-át adja.



BME Villamos Energetika Tanszék
Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoport
Nagyfeszültségű Laboratórium

Mérési útmutató

Az Elektrotechnika tárgy laboratóriumi gyakorlatok 1. méréséhez

Nagyfeszültségű kisülések vizsgálata

1. A mérés célja

Atmoszférikus levegőben kialakuló kisülés kialakulási feltételeinek vizsgálata. Az átütési feszültség meghatározása különböző elektródelrendezések esetén, nagy váltakozó feszültség és nagyfeszültségű impulzus alkalmazásakor.

2. Rövid elméleti áttekintés

A nagyfeszültségű technika egyik legfontosabb szigetelőanyaga az atmoszférikus levegő. (Gondoljunk a nagyfeszültségű távvezetésekre vagy a szabadtéri alállomásokra.) Mint minden szigetelőanyag, így a levegő is csak bizonyos villamos igénybevételt visel el, vagyis van egy olyan kritikus térerősség érték, amely felett elveszti szigetelőképességét, „átüt”. Ezt a kritikus *térerősséget* nevezzük *villamos szilárdságnak*.

A gyakorlatban a levegő, mint szigetelőanyag, eltérő potenciálú elektródok között helyezkedik el. Azt a feszültséget, amelyet az elektródok közé kapcsolva a levegő elveszti szigetelőképességét, átütési feszültségnek nevezzük. Homogén erőterben adott elektródtávolság (d) mellett az átütési feszültség ($U_{\text{ü}}$) és a villamos szilárdság (E_{sz}) között az

$$U_{\text{ü}} = E_{\text{sz}}d \quad (1)$$

egyszerű összefüggés áll fenn. Enyhén inhomogén erőterek esetén, bár a térerősség nagysága a levegő különböző pontján más és más, a legnagyobb E_{max} a legkisebb E_{min} térerősség aránya ($E_{\text{max}}/E_{\text{min}}$) alig haladja meg az 1-et, így (1) összefüggés jó közelítést ad. Erősen inhomogén erőterekben, ahol $E_{\text{max}}/E_{\text{min}}$ a 10-es értéket is meghaladja, (1) már nem alkalmazható. Erősen inhomogén erőterek esetén egy bizonyos feszültség szint elérésekor a nagy térerősségű helyeken a levegő már elveszíti szigetelőképességét (ún. koronakisülés alakul ki), noha a teljes elektródközben még nem jön létre átütés.

A villamos szilárdság meghatározásakor az elektródok közötti feszültséget folyamatosan növeljük, amíg az átütés be nem következik. A nagy térerősség hatására felgyorsuló elektronok ugyanis *ütközési ionozás* útján újabb és újabb töltéshordozókat hoznak létre, így alakul ki az ún. *elektronlavina*. Az elektronlavina megindulásának alapfeltétele egy ún. *startelektron* keletkezése, amit fotoionozás, kozmikus háttérsugárzás stb. hozhat létre. Az ütközési ionozás hatásosságát döntően befolyásolja az elektronok átlagos szabad úthossza, vagyis az a távolság, amelyen a villamos térerősség az elektront gyorsítja, neki mozgási energiát ad. Az ütközés pillanatában akkor keletkezhet új töltéshordozó, ha az elektron mozgási energiája már meghaladja az adott molekula ionizációs energiáját. Az elektronlavinából alakul ki a halvány fényszálakat formáló pamatos kisülés, majd ha a pamatok árama meghalad egy kritikus értéket (hőionozási határáram), a kisülés jellege megváltozik, a töltéshordozók létrehozásában már a hőionozás is részt vesz és kialakul az átütési csatorna. A teljes átütési folyamatot tehát az határozza meg, hogy van-e startelektron, majd ezt követően a különböző ionozási folyamatok képesek-e hirtelen nagy mennyiségű töltéshordozó létrehozására.

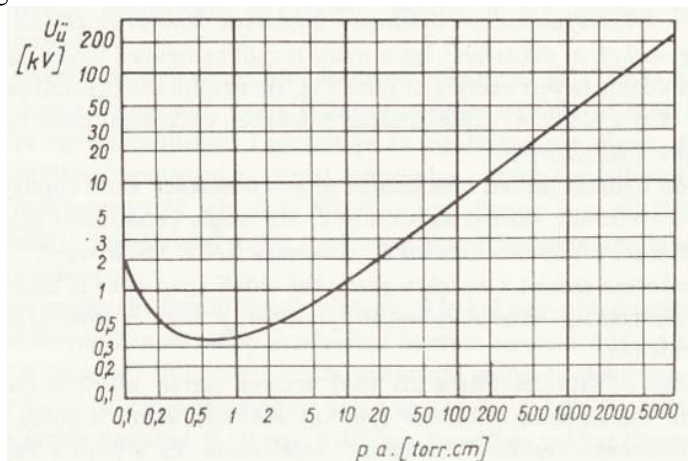
Az átütést követően - elegendően nagy tápteljesítmény esetén - villamos ív jön létre, amelyet jó vezetőképesség és nagy áram jellemez, a töltéshordozók pedig az ívcsatornában *hő ill. fotoionozás* révén jönnek létre. Ilyenkor az elektródokra kapcsolt nagyfeszültségű próbatranszformátor feszültsége az ív hatására hirtelen lecsökken.

A villamos szilárdság értékét több tényező befolyásolja. Ezek az alábbiak:

- az alkalmazott feszültség fajtája (egyen-, váltakozó- vagy lököfeszültség /feszültség impulzus/)
- a levegő nyomása, hőmérséklete, páratartalma.
- az elektródok távolsága
- az elektródok alakja
- az elektródok polaritása
- az igénybevétel időtartama (ill. a feszültségváltozás sebessége)

A feszültség fajtája és a feszültségváltozás sebessége azért befolyásolja a villamos szilárdság értékét, mert az átütési csatorna kialakulásához szükség van bizonyos időre (ún. átütés késés). Ennek a késleltetésnek két összetevője van: a startelektron létrejöttéhez szükséges idő (várakozási idő) és az ebből kiinduló, az átütési csatornát létre hozó folyamatok kifejlődéséhez szükséges idő (kialakulási idő). Ha tehát egy gyors felfutási meredekségű impulzust alkalmazunk, ahol rövid idő alatt nagymértékben változik a feszültség, nagyobb villamos szilárdság értéket fogunk kapni, mert az átütés késés alatt tovább tud növekedni a feszültség, mint lassú feszültségnövelés esetén.

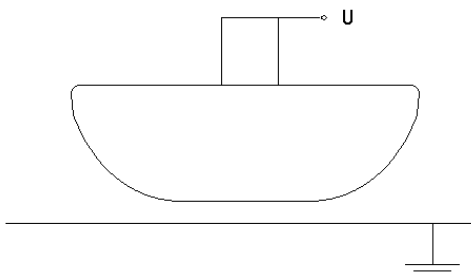
A nyomás hatását az ún. Paschen-törvény (1. ábra) írja le, amelynek érdekessége, hogy adott elektródelrendezés esetén van egy olyan nyomásérték, ahol az átütési feszültség minimális (levegőre 327 V), ettől kisebb és nagyobb értékek esetén az átütési feszültség nő. Tehát normál levegőben e minimális értéknél kisebb feszültségen nem jön létre átütés, akármilyen kicsi az elektródtávolság. Ennek magyarázata, hogy nagyon kicsi elektródtávolság vagy nagyon ritka gáz esetén nem jön létre elegendő számú ütközés, ami az elektronok számának növekedését eredményezhetné. A Paschen-görbe függőleges tengelyén az átütési feszültség (U_a), vízszintes tengelyén a nyomás és az elektródtávolság szorzata ($p \cdot a$) van. Ez utóbbi azt jelenti, hogy a nyomást és az elektródtávolságot fordított arányban változtatva azonos görbét kapunk. A nyomás és a hőmérséklet egymással szintén összefügg, mindkettő az elektronok átlagos szabad úthosszában változása révén fejt ki hatását. Állandó nyomáson a hőmérsékletet növelve nő az átlagos szabad úthossz, ezáltal az ionozás hatásossága, így az átütési feszültség csökken. A páratartalom növekedése ugyanakkor az ionozás hatásosságát rontja, ezért a villamos szilárdságot növeli!



1. ábra Paschen-görbe levegőre

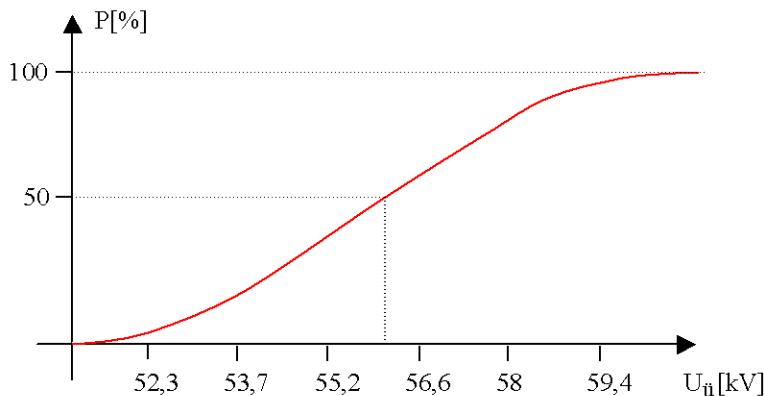
Adott alakú elektródok esetén az elektródköz növelésével az átütési feszültség nő, a villamos szilárdság viszont csökken. Ez szintén leolvasható a Paschen-görbe emelkedő szakaszáról: azonos nyomáson kétszeres elektródtávolsághoz kétszeresnél kisebb átütő feszültség tartozik, tehát az (1) képletet alkalmazva kisebb villamos szilárdság adódik.

Homogén térerősséget elvben két, végtelen hosszú sík lemez között hozhatunk létre. Véges kiterjedésű párhuzamos lemezek esetén azonban a lemezek széléinél a térerősség megnövekszik. Emiatt a 2. ábra szerinti, ún. Rogowski-elektrodot használjuk, ami biztosítja a fenti hatás kiküszöbölését. Enyhén inhomogén erőteret gömb-sík v. gömb-gömb elrendezés esetén kaphatunk, míg erősen inhomogén erőteret csúcs-sík elrendezés esetén alakíthatunk ki.



2. ábra Rogowski-elektroda – sík elrendezés

Ha az átütési feszültség meghatározásakor egy adott elektródelrendezésnél egymás után több mérést is elvégzünk, azt tapasztaljuk, hogy a kapott átütési feszültségértékek egymástól kis mértékben eltérnek. Ezt a tényt statisztikailag úgy kezelhetjük, hogy egy adott feszültségértékhez egy ún. átütési valószínűséget rendelünk, ami megadja, hogy a próbálkozások hány %-ában várható átütés az adott feszültség szintig. Ha a kapott eredményeket a feszültség függvényében ábrázoljuk, a 3. ábra látható ún. „S” görbéhez jutunk. A gyakorlatban általában a 0%, 50% és 100% átütési valószínűséghez tartozó feszültségértéket szokták megadni.



3. ábra: Az S-görbe

A mérés célja az 50%-os átütési valószínűséghez tartozó feszültség- ill. térerősségérték meghatározása lesz, különböző alakú elektródelrendezés esetén.

3. Ellenőrző kérdések

A mérés megkezdésének előfeltétele a laboratórium biztonsági szabályainak ismerete, amiket az útmutató melléklete (A Nagyfeszültségű Laboratórium működési rendje) tartalmaz. Az ebben foglaltakat számon kérő ún. biztonságtechnikai teszt a beugró szerves részét képezi! A mérést megkezdni életvédelmi okokból csak a biztonságtechnikai teszt hibátlan kitöltését követően engedélyezett!

A mérés megkezdéséhez szükséges ismeretanyagra vonatkozó mintakérdések:

Mi a villamos szilárdság?

Mit értünk enyhén és erősen inhomogén villamos erőtér alatt?

Milyen tényezők befolyásolják a villamos szilárdságot?

Hogyan jön létre a villamos átütés levegőben?

Miért alkalmazunk Rogowski-elektrodát?

Mi az „S” görbe és hogyan lehet meghatározni?

Rajzolja fel a Paschen-görbét! Milyen fizikai mennyiségeket jelölnek a tengelyek?

Hogyan keletkeznek töltéshordozók az elektronlavinában és az ívsatornában?

Gondolkodtatónak:

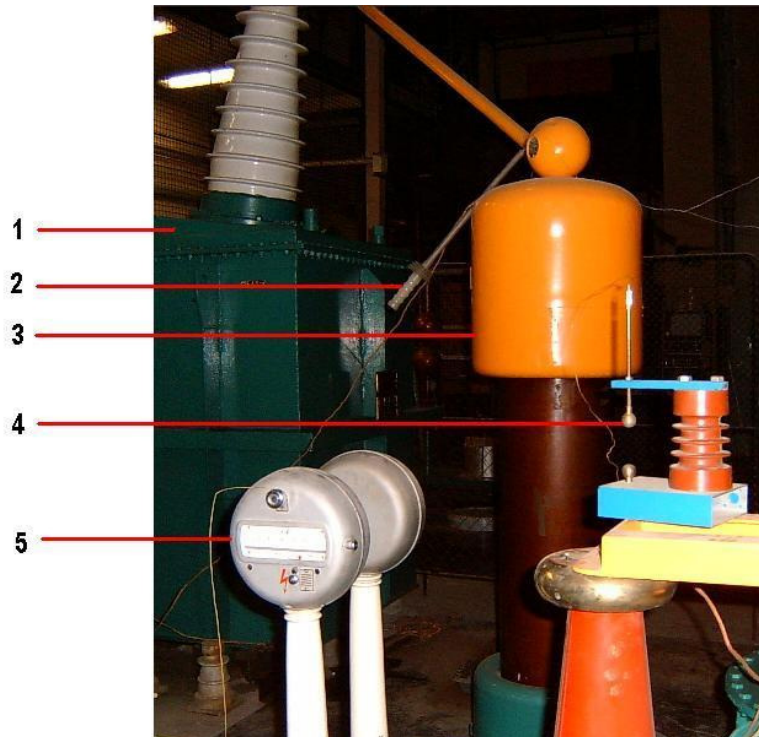
Két, egymással párhuzamos, sík fémlemez közötti potenciálkülönbség 200 V. Milyen közel kell őket tenni egymáshoz, hogy átütés jöjjön létre? (A levegő villamos szilárdságát vegyük 20 kV/cm értékűnek!)

Az Országos Kék Túra útvonalán Úrkút közelében gyalogolva áthaladunk egy 400 kV-os távvezeték alatt. A földtől mintegy 14 méternyire lévő („belógó”) távvezetéken jól hallható koronakisülés jellegzetes hangja. Miért nem alakul át a koronakisülés teljes átütéssé?

Miért nő az átütési szilárdság a páratartalom növelésével?

A mérés során használt eszközök, berendezések ismertetése

A 250 kV-os mérőtranszformátor kezelése



4. ábra: MÉRÉSI ELRENDEZÉS VÁLTAKOZÓ FESZÜLTSGŰ ÁTÜTÉSVIZSGÁLATHOZ
1: PRÓBATRANSZFORMÁTOR, 2: FÖLDELŐRÚD, 3: KAPACITÍV OSZTÓ, 4: PRÓBATEST
5: ELEKTROSTATIKUS VOLTMÉRŐ

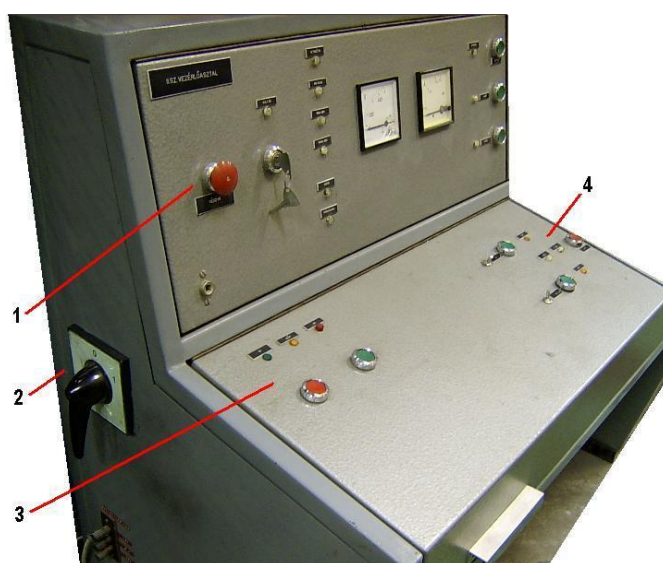
A mérési elrendezés vázlatos képét a 4. ábra mutatja. A próbatranszformátor bemenetére változtatható feszültséget kapcsolunk, amelynek értékét a 4. ábrán látható vezérlőpultról tudjuk állítani. Ennek hatására a transzformátor kimenetén 0 és 250 kV közötti feszültség jelenik meg.

A feszültséget kétféleképpen mérhetjük. Egyik lehetőség a kapacitív osztó alkalmazása, amely egy nagyfeszültségű és egy kisfeszültségű kondenzátorból áll. A kisfeszültségű kondenzátoron a teljes feszültséggel arányos, de közvetlenül oszcilloszkópra csatlakoztatható nagyságú jelet kapunk. Az osztásarány a berendezés kapocstáblájáról olvasható le.

A másik lehetőség az elektrosztatikus voltmérő használata. Ez alapelveit tekintve egy olyan kondenzátor, amelynek egyik lemezét följük, másik lemezét pedig a mérendő feszültségre kötjük. A feszültség hatására a kondenzátor fegyverzetein ellentétes előjelű töltések halmozódnak fel, amelyek egymásra elektrosztatikus vonzóerőt fejtenek ki. Az egyik fegyverzet közepén egy torziós szátra fűzött fém lapka található, amelyet az előbbi erő elmozdít, és elmozdulása arányos lesz a kondenzátor belsejében lévő térerősséggel. Homogén erőterben ez a térerősség egyenesen arányos a feszültséggel, így az eszköz alkalmas a feszültség mérésére. A méréshatárváltás egyszerű, hiszen csak a lemezek távolságát kell megváltoztatni ahhoz, hogy ugyanakkora térerősséghez nagyobb feszültség tartozzék.

Felhívjuk rá a figyelmet, hogy az elektrosztatikus voltmérő effektív értéket mutat. Az átütési folyamatoknál a feszültség csúcserőértékét szeretnénk meghatározni, ezért az elektrosztatikus voltmérővel mért értékeket szinuszos feszültség esetén $\sqrt{2}$ -vel szorozni kell.

Külön felhívjuk a figyelmet a földelőrúdra, minden mérés befejezése után a rudat vissza kell helyezni a transzformátor kivezetésére. Ezen kívül a nagyfeszültségű tér ajtaját nyitva kell hagyni. Az ajtót ugyanis reteszeléssel látták el, ami annyit jelent, hogy egy kapcsoló csak az ajtó csukott állapotában engedélyezi a mérőpult bekapcsolását.



5. ábra: A 250kV-os transzformátor vezérlőpultja
1: Vészleállító nyomógomb, 2: kézi kapcsoló, 3: mágneskapcsoló nyomógombjai
4: feszültségszabályzó nyomógombok



6. ábra: az egyfázisú próbatranszformátor vezérlőpultjának kezelőszervei

Ennek megfelelően minden mérés (vagy mérési sorozat) megkezdése előtt a földelő rudat el kell távolítani a transzformátor nagyfeszültségű kivezetéséről és a nagyfeszültségű mérőtér ajtaját be kell csukni.

A nagyfeszültségű próbatranszformátor bekapcsolásához két kapcsolási folyamat szükséges. Először a 5. ábra „2”-es számmal jelölt kézi kapcsolót kell „1” állásba fordítani, majd a vezérlőpulton található nyomógombok közül a mágneskapcsolóhoz tartozó zöld gombot kell megnyomni, hogy a mérőhely feszültség alá kerüljön. (Ld. 6. ábra bal oldali képét.)

A feszültség felszabályozását - bekapcsolás után - manuálisan, a „FEL” feliratú nyomógomb folyamatos nyomva tartásával végezzük. Ekkor a labor alatti pincében elhelyezett indukciós szabályzó egyenletes sebességgel növeli a transzformátor feszültségét.

Adott feszültség elérésekor átütés keletkezik, ekkor a pultot a mágneskapcsoló piros nyomógombjával (6. ábra bal oldali kép) kell kikapcsolni. Kikapcsolás után az indukciós szabályzó automatikusan leszabályoz mindaddig, amíg el nem éri az alsó véghelyzetet. Ezt az „AVH” feliratú lámpa jelzi, újabb bekapcsolást csak akkor lehet végezni, ha a lámpa már világít.

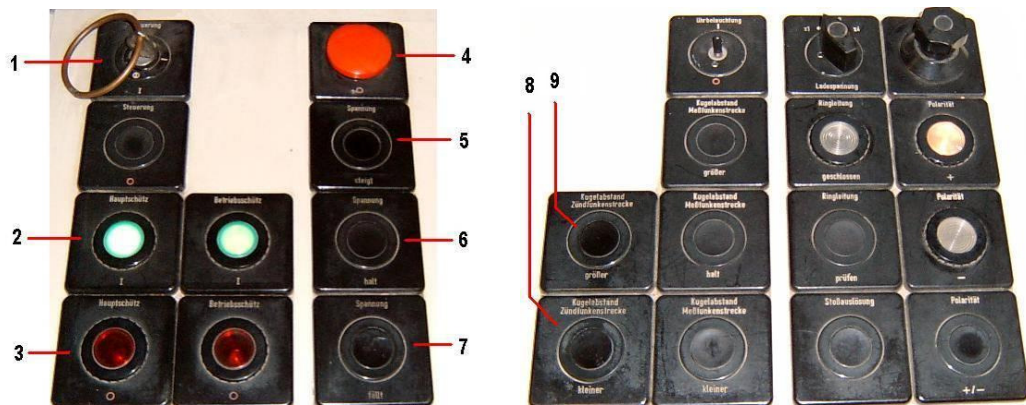
Ha valaki bármilyen rendellenességet vagy veszélyhelyzetet észlel, a teljes vezérlőpultot valamint a próbatranszformátort a piros vészleállító nyomógomb azonnali megnyomásával kapcsolja ki!

A TUR típusú lökésgerjesztő kezelése



7. ábra: lökésgerjesztő berendezés. 1: kompenzált lökőfeszültség osztó; 2: szikraköz

A mérés második részéhez szükséges nagyfeszültségű impulzusok előállításához a 7. ábra látható berendezést használjuk. A nagyfeszültségű impulzusokat olyan feszültségosztó segítségével csökkentjük az oszcilloszkóp számára megfelelő nagyságúra, amely alakhú jelátvitelt biztosít (kompenzálja a szórt kapacitások hatását). A lökésgerjesztő berendezést az 8. ábra bemutatott mérőpulttól vezérelhetjük.



8. ábra: a TUR típusú lökésgerjesztő vezérlőpultjának kezelőszervei

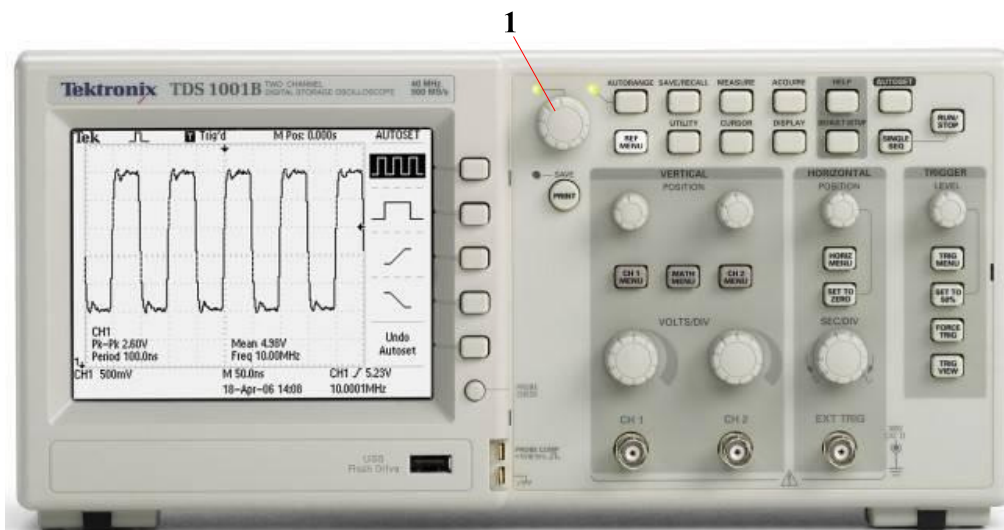
- 1: kulcsos kapcsoló (CSAK a mérésvezető használhatja!);
- 2: fő- és készenléti mágneskapcsoló „be” nyomógombjai (Hauptschutz, Betriebshutz);
- 3: fő- és készenléti mágneskapcsoló „ki” nyomógombjai;
- 4: vészgomb;
- 5: tápfeszültség felszabályozó gombja (Spannung steigt)
- 6: tápfeszültség leszabályozást megállító nyomógomb (halt);
- 7: tápfeszültség leszabályozó nyomógomb (Spannung fällt);
- 8: szikraközt csökkentő nyomógomb (Kugelabstand kleiner);
- 9: szikraközt növelő nyomógomb (Kugelanstand größer)

A mérési sorozat megkezdése előtt eltávolítjuk a földelőrudat a lökésgerjesztő kimenetéről, majd a nagyfeszültségű mérőteret elhagyva bezárjuk annak ajtaját.

Méréskor célunk annak megállapítása, hogy egy adott feszültség szinten milyen valószínűséggel következik be az átütés. Így tehát először be kell állítanunk a kívánt kimenő csúcsfeszültséghez tartozó gömbszikraköz-távolságot. Ezt a 8. ábra 8 és 9 gombjaival tehetjük meg. Az aktuális gömbtávolság egy, a mérőpultba épített numerikus kijelzőn jelenik meg, illetve villamosan visszamért jele egy digitális multiméterről olvasható le.

Ezt követően az impulzusok gyakoriságát állítjuk be, amit a tápláló feszültség változtatásával tehetünk meg. A zölden világító nyomógombok megnyomása után a lökésgerjesztő feszültségét a 8. ábra 5. sz. gombjával növeljük mindaddig, amíg a lökésgerjesztő belső szikraközei át nem ütnek. Ekkor megvizsgáljuk, hogy két átütés között mennyi idő telik el. Ha ez az idő 2-3 másodpercnél kisebb, a feszültséget a 8. ábra 7. számú nyomógombja segítségével csökkenteni kezdjük. Mivel a berendezés a feszültséget a gomb megnyomása után folyamatosan csökkenti, a leszabályozást a 6. számú „halt” gombbal meg kell állítani.

A lökésgerjesztő működtetésével előállított impulzus időfüggvényét tárolós oszcilloszkópon jelenítjük meg. Az oszcilloszkóp beállításait a mérés elején a mérésvezető határozza meg, a hallgatók feladata az impulzus csúcsértékének meghatározása. Ehhez a mérésvezető az oszcilloszkópot „Measure” állásba állítja, majd az egyik kurzort az impulzus nullvonalára mozgatja. A hallgatók a másik kurzort az impulzus csúcsához mozgatják a 9. ábra 1-es számú gombjának segítségével. Az aktuális érték V-ban jelenik meg az oszcilloszkóp képernyőjén. Tekintettel arra, hogy a mért érték egy 1:1000 osztó leosztott feszültségjele, így a V-ban kapott érték a valóságban kV-ot jelent. Így a kívánt szikraköz távolsághoz tartozó tényleges csúcsfeszültség érték meghatározható.



9. ábra: Tektronix oszcilloszkóp

A megfelelő impulzusgyakoriság beállítása után a hallgatók feljegyzik, hogy 20 impulzusból hány db. okozott átütést az adott elektródelrendezésben.

Elvégzendő mérések

Váltakozó feszültségű mérések

Alapfeladatok:

1. Határozzák meg a levegő átütési szilárdságát nagy váltakozó feszültség esetén homogén erőterben (Rogowski elektród) Ehhez mérjék meg 20 egymás utáni alkalommal, hogy 0-ról egyenletesen felszabályozott teszt-feszültség esetén mekkora feszültségnél történt átütés. A mért értékeket táblázatos formában tüntessék fel, majd határozzák meg az értékekhez tartozó „S” görbét, abból pedig az 50%-os valószínűséghez tartozó feszültségértéket. Végül adják meg a villamos szilárdság értékét.
2. Határozzák meg az előzővel egyenlő elektródtávolságú gömb-sík elrendezés esetén az átütési feszültséget és hasonlítsák össze az 1. feladatban mért értékkel

Kiegészítő feladatok

3. Számítsa ki a legnagyobb térerősséget 2. pont elektródelrendezésére!
4. Határozza meg az előzőekkel egyenlő elektródtávolságú csúcs-sík elrendezés átütési feszültségét!

Mérések lököimpulzussal

Alapfeladatok:

5. Határozza meg a levegő átütési szilárdságát nagyfeszültségű impulzus esetén homogén erőterben (Rogowski elektród) Ehhez állítsák be a mérésvezető által meghatározott elektródtávolságokat a lökésgerjesztő szikraközeire vonatkozóan, és minden szikraköz-méret esetén adják meg, hogy 20 impulzusból hány esetben történt átütés. Szerkesszék meg a mérési adatokhoz tartozó „S” görbét, abból pedig az 50%-os valószínűséghez tartozó feszültségértéket. Végül adják meg a villamos szilárdság értékét.
6. Határozza meg az előzővel egyenlő elektródtávolságú gömb-sík elrendezés esetén az átütési feszültséget és hasonlítsa össze az 1. feladatban mért értékkel

Kiegészítő feladatok

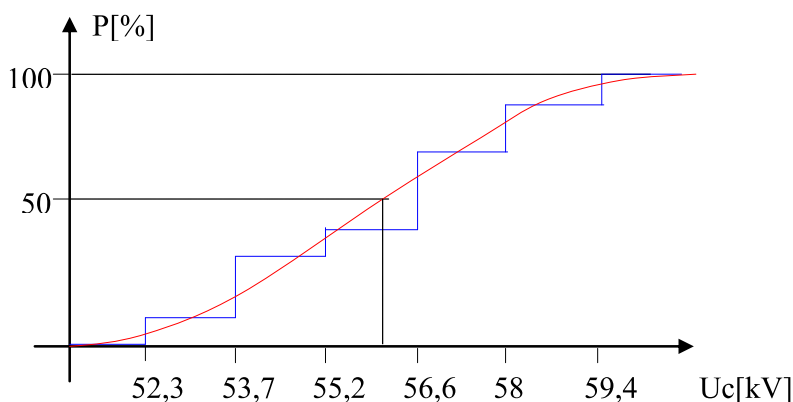
7. Számítsa ki a legnagyobb térerősséget 2. pont elektródelrendezésére!
8. Határozza meg az előzőekkel egyenlő elektródtávolságú csúcs-sík elrendezés átütési feszültségét!

Az „S” görbék szerkesztése

Mérési eredmények váltakozó feszültség esetén (Minta)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U[kV]	37	40	41	38	41	40	42	38	40	39
U _c [kV]	52,3	56,6	58	53,7	58	56,6	59,4	53,7	56,6	55,2

Váltakozó feszültségnél az effektív értéket mértük, ezért a csúcserték $U_c = \sqrt{2} \cdot U$.



10. ábra: „S” görbe szerkesztése váltakozó feszültség esetén

Minden feszültség szinten elvégezve a fenti számítást egy lépcsős görbéhez jutunk (10. ábra kék vonal). Ha megnövelnénk a mérések számát, akkor a lépcsők egyre finomabbak lennének, mígnem a pirossal jelzett görbét, az „S” görbét kapnánk, ezt kell a mérési eredményekből megszerkeszteni.

Az „S”-görbéről leolvasható, hogy $U_{c50\%} \approx 56,1$ kV.

$d = 5$ cm-es gömbszikraköz távolság mellett a villamos szilárdság értéke
 $E \approx U_{c50\%} / d = 56,1 \text{ kV} / 5 \text{ cm} = 11.22 \text{ kV/cm}$

Mérési eredmények lökőfeszültség esetén (Minta)

“-“ jelentése: nem történt átütés az adott feszültségimpulzusnál

„✓” jelentése: átütés történt

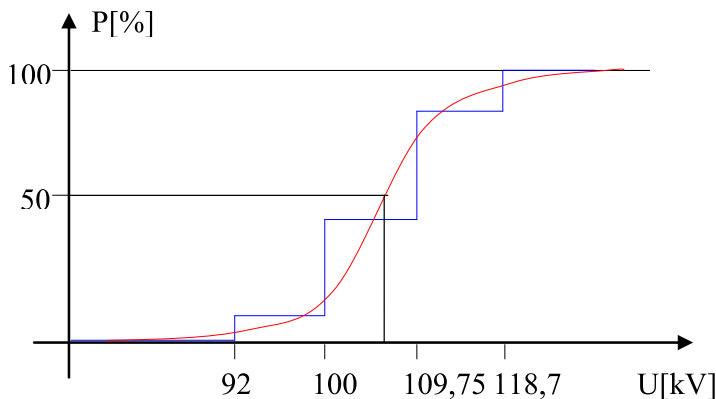
D: a lökésgerjesztő belső szikraközeinek távolsága.

D[mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-
10	✓	✓	-	-	-	✓	-	-	✓	-
11	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	✓
12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

A következő táblázat az adott „D” értékeknél fellépő feszültségcsúcsokat, illetve az egyes feszültség szintekhez tartozó relatív gyakoriság értékeket tartalmazza. (Ha N az összes próbálkozások száma és n a sikeres átütések száma, $P=n/N$).

D[mm]	U[kV]	P[%]
9	92	10
10	100	40
11	109,75	80
12	118,7	100

Így az “S” görbe:



11. ábra: „S” görbe meghatározása lökőfeszültség esetén

Az “S”-görbéről leolvasható, hogy $U_{50\%} \approx 107 \text{ kV}$.

$d = 5$ cm-es gömbszikraköz távolság mellett a villamos szilárdság értéke

$$E \approx U_{50\%} / d = 107 \text{ kV} / 5 \text{ cm} = 21,4 \text{ kV/cm}$$



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék
Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoport

BME-VIK-VET-NFCS-MŰSZ-001 sz.
Minőségügyi Munkautasítás
A Nagyfeszültségű Laboratórium működési rendje
Kivonat

Készítette: Németh Bálint

Változat: 00

Jóváhagyta és kiadta: Dr. Berta István csoportvezető

Kelt: Budapest, 2007. szeptember 1.

1. FOGALMAK MEGHATÁROZÁSA

Ez a fejezet azoknak a fogalmaknak a meghatározását tartalmazza, amelyeknek az egyértelmű, félre nem érthető és egységes használata a Nagyfeszültségű Laboratórium működésének fontos biztonsági követelménye.

átívelési (átütési) távolság: két, különböző feszültségű rész, vagy egy feszültség alatt álló és egy földelt rész közötti azon legkisebb távolság, amely szükséges ahhoz, hogy ne következzen be villamos átívelés (átütés) az előforduló legnagyobb villamos igénybevétel esetén sem (fizikai összetevő)

ergonómiai összetevő: az átívelési (átütési) távolsághoz hozzáadandó azon többlet távolság, amely azt veszi figyelembe, hogy a munkavégző hibát véthet a mozgásban és a távolság megítélésében

feszültség alatti állapot:

fizikailag: az üzemi villamos berendezésnek az az állapota, amikor az a villamos energia tápforrásával vezetői kapcsolatban áll, vagy feszültség alatti üzemi villamos berendezéssel induktív és/vagy kapacitív csatolásban van, és rajta a földhöz képest villamos feszültség mérhető

jogilag: az üzemi villamos berendezésnek az az állapota, amikor nem teljesülnek rajta maradéktalanul a feszültségmentesítés szabványos feltételei

feszültség alatti munkavégzés: minden olyan munkavégzés, melynek során a munkavégző személy testével, testrészével, szerszámával, védő- vagy segédeszközével, illetve munkagépével feszültség alatti részt érint, vagy a veszélyes övezetbe hatol. Ilyennek számít az is, ha a munkavégző személy a szokásos körütekintés mellett nem tudja elkerülni feszültség alatti rész érintését, vagy a veszélyes övezetbe való behatolást.

feszültség közeli munkavégzés: minden olyan munkavégzés, melynek során a munkavégző személy testével, testrészével, szerszámával, védő- vagy segédeszközével, illetve munkagépével a közelítési övezetbe hatol, vagy abban tartózkodik, és csak fokozott figyelemmel tudja elkerülni a veszélyes övezetbe való behatolást

feszültségmentes állapot:

fizikailag: az üzemi villamos berendezésnek az az állapota, amikor a földhöz képesti villamos feszültsége nulla vagy közel nulla

jogilag: az üzemi villamos berendezésnek az az állapota, amikor vezetői kapcsolata minden villamosenergia-tápforrással meg van szakítva, és maradéktalanul teljesülnek rajta a feszültségmentesítés szabványos feltételei

feszültségmentes munkavégzés:

- a munkavégzés az MSZ 1585:2001 szabvány szerint feszültségmentesített berendezésen történik,
- a munkavégző személy testének, testrészének, szerszámának, védő- vagy segédeszközének, illetve munkagépének a feszültség alatt álló szomszédos berendezések

közelítési övezetébe való behatolása műszaki eszközökkel, pl. ideiglenes elhatároló védőszerkezettel megbízhatóan meg van akadályozva, a munkavégzés a feszültség alatt álló berendezés közelítési övezetétől olyan távolságra zajlik, hogy az abba való behatolás kizárt.

feszültségmentesítés: az MSZ 1585:2001 szabvány szerinti azon folyamat, melynek során az üzemszerűen feszültség alatt álló üzemi villamos berendezést olyan állapotba hozzák, hogy rajta (érintésével, közelében, azaz veszélyes övezetében) a villamos áramütés veszélye nélkül, biztonságosan lehet munkát végezni. A feszültségmentesítés szabvány szerint a következő munkafolyamatok egymásutánjából áll:

1. **Teljes leválasztás:** a villamos berendezésnek azt a részét, amelyen munkavégzés folyik, le kell választani az összes tápforrásról.
2. **Biztosítás visszakapcsolás ellen:** a villamos berendezésnek a munkavégzés céljából történő leválasztására használt összes kapcsolóeszközt biztosítani kell a visszakapcsolás ellen, célszerűen a működtető mechanizmus reteszelésével. Távműködtetésű kapcsolóeszközök alkalmazása esetén a visszakapcsolást helyi működtetésű eszközökkel kell megakadályozni. A leválasztásnál használt jelző- és reteszelőrendszernek megbízhatónak kell lennie.
3. **A villamos berendezés feszültségmentes állapotának ellenőrzése:** a feszültségmentes állapotot a villamos berendezés minden pólusán ellenőrizni kell a munkavégzés helyén vagy annak közelében. Az ellenőrzés magában foglalja például a szerkezetekbe épített feszültségkémlő eszközök és/vagy különálló kémlő eszközök használatát.
4. **Földelés és rövidre zárás:** minden nagyfeszültségű és meghatározott kisfeszültségű villamos berendezés esetében a munkavégzés helyén minden olyan részt, amelyen munka folyik földelni kell és rövidre kell zární. A földelő- és rövidre záró szerkezeteket vagy eszközöket először a földelési ponthoz kell csatlakoztatni és csak aztán a földelendő alkatrészhez. A földelő- és rövidre záró szerkezetek vagy eszközök lehetőleg legyenek a munkavégzés helyéről láthatóak.
5. **A közeli, feszültség alatt álló részek elleni védelem:** A feszültségmentesített rész körülhatárolása mindig úgy történjék, hogy még a határvonal érintése se legyen feszültség alatti tevékenységnek tekinthető. (Pl. ha egy szabadvezeték közbelső szakaszát feszültségmentesítik, akkor a határ nem lehet a nyitott oszlopkapcsolók vagy bontott szakaszbiztosítók oszlopán, hanem annál csak beljebb.)

feszültség nélküli állapot: az üzemi villamos berendezésnek az az állapota, amikor vezetői kapcsolata minden villamosenergia-tápforrással meg van szakítva, következésképp nem áll az üzemi feszültséghez hasonló értékű földhöz képesti villamos feszültség alatt, de nem teljesülnek rajta maradéktalanul a feszültségmentesítés szabványos feltételei

földelés: az üzemi villamos berendezés meghatározott pontját vagy részét a föld potenciáljára hozó vezetői összeköttetés

hallgató: a BME bármely karának bármely szakára beiratkozott és ott ténylegesen tanulmányokat folytató, valamint a BME VIK által szervezett doktori (PhD) képzésben,

illetve az MTI felnőttképzésében részt vevő személy. A Nagyfeszültségű Laboratórium működése szempontjából a hallgatók alábbi csoportjait különböztetjük meg:

– **Az NFL-ben kutatási munkát nem végző hallgató:**

- *tantervi tantárgy oktatásának keretében hallgatói mérésen részt vevő hallgató*
- *MTI-hallgató:* az a hallgató, aki a Mérnöktovábbképző Intézet által szervezett tanfolyamon az NFCS által oktatott olyan tantárgyat tanul, amelynek keretében az NFL-ben kell mérésen résztvennie.

– **Az NFL-ben kutatási munkát végző hallgató:**

- *önálló laboratóriumos (önálló laborozó) hallgató:* az a hallgató, aki a tantervben szereplő „Önálló laboratórium” című gyakorlati tantárgyat az NFCS-nél veszi fel,
- *TDK-zó hallgató:* az a hallgató, aki tudományos diákköri kutatómunkáját az NFCS-nél végzi,
- *szakdolgozat készítő hallgató:* az a hallgató, aki a „Szakdolgozat” című tantárgyat az NFCS-nél veszi fel,
- *diplomatervező hallgató:* az a hallgató, aki a „Diplomatervezés” című gyakorlati tantárgyat az NFCS-nél veszi fel,
- *PhD hallgató:* az a hallgató, aki a BME VIK által szervezett doktori (PhD) képzésben az NFCS-n folytatja tanulmányait.

Hallgatói mérés: az NFL berendezéseivel végzett olyan művelet(sor), amely a nagyfeszültségen végbemenő jelenségeket mutatja be és teszi tanulmányozhatóvá. Fajtái:

- *Egyszerűsített bemutató mérés:* a hallgatók egy bemutató program alapján a nagyfeszültségen végbemenő jelenségeket közvetlenül és/vagy multimédiás eszközökkel tanulmányozzák; ennek során kizárólag az NFL I. emeleti galériájának kijelölt helyén tartózkodhatnak, és az NFL berendezésein kapcsolási műveletet nem hajthatnak végre.
- *Bemutató mérés:* a hallgatók egy bemutató program alapján a nagyfeszültségen végbemenő jelenségeket közvetlenül és/vagy multimédiás eszközökkel tanulmányozzák; ennek során kizárólag az NFL I. emeleti galériáján és földszinti kezelőfolyosóján tartózkodhatnak, és az NFL berendezésein kapcsolási műveletet nem hajthatnak végre.
- *Egyszerűsített laboratóriumi mérés:* a hallgató(k) egy mérési program alapján a nagyfeszültségen végbemenő jelenségekkel kapcsolatos méréseket végez(nek); ennek során kizárólag az NFL I. emeleti galériáján és földszinti kezelőfolyosóján tartózkodhat(nak), és előre kidolgozott és a mérésvezető által jóváhagyott kapcsolási sorrend alapján az NFL berendezésein kapcsolási művelete(ke)t is végrehajthatnak.
- *Laboratóriumi mérés:* a hallgató(k) egy mérési program alapján a nagyfeszültségen végbemenő jelenségekkel kapcsolatos méréseket végez(nek); ennek során az NFL emeleti galériáján, földszinti kezelőfolyosóján és mérőterének a feszültség alatt álló berendezések közelítési övezetén kívüli részén tartózkodhat(nak), és előre kidolgozott és a mérésvezető által jóváhagyott kapcsolási sorrend alapján az NFL berendezésein kapcsolási művelete(ke)t is végrehajthat(nak).

kapcsolási művelet: primer kapcsolókészülék (megszakító, szakaszoló, szakaszoló kapcsoló, földelő szakaszoló, primer biztosító, transzformátor fokozatkapcsoló), szekunder kapcsolókészülék (kisautomata, biztosító, élesítő-bénító kapcsoló, választókapcsoló, üzemmódkapcsoló, nullbontó, irányítástechnikai gyűjtő-leválasztó

sorozatkapocs stb.) kapcsolási állapotának megváltoztatása, tokozott kapcsolóberendezés kocsizható megszakítójának ki-, bekocsizása, szinkron állapot ellenőrzése, a terhelés/feszültség meglétének/hiányának ellenőrzése, munkahelyi földelő, földelő-rövidrezáró felhelyezése, eltávolítása, tiltó táblák, szimbólumok elhelyezése, megjelenítése, eltávolítása

kapcsolási sorrend: kapcsolási műveletek olyan egymásutánja, amellyel a kapcsolóberendezés(rész) szabályosan (árampálya tilos vagy szükségtelen, illetve arra nem alkalmas kapcsolókészülékkel történő megszakítása, illetve feszültség alatt álló rész leföldelése nélkül) vihető át a kiindulási kapcsolási állapotból az elérni kívánt kapcsolási állapotba

közelítési övezet: a veszélyes övezetet körülvevő azon térség, amelyben dolgozva a munkavégző elővigyázata szükséges ahhoz, hogy testével, testrészével, szerszámaival, védő- vagy segédeszközével, illetve munkagépével ne hatoljon a veszélyes övezetbe

közreműködő: a Nagyfeszültségű Laboratóriumban folyó kutatási-mérési-vizsgálati tevékenységben részt vevő, nem az NFCS állományába tartozó és nem hallgató státuszú személy, aki önálló munkavégzésre nem jogosult

látogató: a Nagyfeszültségű Laboratórium berendezéseit és az ott folyó oktatási, illetve kutatási-mérési-vizsgálati tevékenységet megtekintő, tanulmányozó, nem hallgató státuszú személy, akinek számára az NFCS esetenként kijelölt munkatársa egyszerűsített bemutató mérést vagy bemutató mérést tart(hat)

munkahelyi földelés: az üzemi villamos berendezés üzemszerűen feszültség alatt álló, de munkavégzés céljából feszültségmentesítendő, vagy már feszültségmentesített részének földelése beépített készülékkel (pl. földelőszakaszolóval vagy szakaszoló földelőkésével), illetve hordozható földelőeszközzel a munkahelyen annak érdekében, hogy a munkahelyre veszélyes feszültség semmiképpen se hatolhasson

rendellenesség: a Nagyfeszültségű Laboratórium üzemi villamos és nem-villamos berendezéseiben bekövetkező olyan üzemi hiba (nem tervezett állapotváltozás), melynek következtében az adott berendezés vagy annak meghatározott része közvetlenül nem válik üzemképtelenné, de elhárításának elmaradása üzemzavarhoz vezethet

üzemi földelés: az üzemi villamos berendezés áramköre meghatározott pontjának (pl. a háromfázisú váltakozó áramú rendszer csillagpontjának) állandó jellegű, de szükség esetén (pl. mérési célból) bontható földelése, amely az üzemi villamos berendezés helyes működéséhez szükséges

üzemzavar: a Nagyfeszültségű Laboratórium üzemi villamos és nemvillamos berendezéseiben bekövetkező olyan üzemi hiba (nem tervezett állapotváltozás), melynek következtében az adott berendezés vagy annak meghatározott része, de esetleg a Nagyfeszültségű Laboratórium egésze az elhárítás idejéig üzemképtelen állapotba kerül
veszélyes övezet: a feszültség alatt álló csupasz (szigetelő burkolat nélküli) rész körüli olyan térség, amelyben a villamos veszély kiküszöbölését szolgáló szigetelés nincs meg

az e térségbe védelmi intézkedések nélkül behatoló személy vagy eszköz és a feszültség alatt álló csupasz rész között. A veszélyes övezet külső határa egyenlő a munkavégzés legkisebb védőtávolságával.

2. A Nagyfeszültségű Laboratóriumba való belépés és az ott-tartózkodás rendje

A Nagyfeszültségű Laboratóriumba az NFCS munkatársai, az oktatási és kutatási-mérési-vizsgálati tevékenységben részt vevő, nem az NFCS állományába tartozó személyek (a közreműködők), látogatók, hatósági ellenőrző személyek és hallgatók a következő táblázat szerint léphetnek be és ott tartózkodhatnak:

	NFL mérőtér	Fsz-i kezelőfolyosó	Emeleti galéria	Darukezelő pult	Szabadtéri alállomás
Az NFCS főberendezés önálló kezelésére feljogosított munkatársai	kn	kn	kn	–	kn
Az NFCS főberendezés önálló kezelésére és darukezelésre feljogosított munkatársai	kn	kn	kn	kn	kn
Az NFCS kezelési feljogosítás nélküli munkatársai	k	kn	kn	–	–
Közreműködők	k	k	k	k	k
Látogatók	–	k	k	–	–
Hatósági ellenőrző személyek	k	k	k	k	k
Kutatási tevékenységet nem végző hallgatók	–	k	k	–	–
Kutatási tevékenységet végző hallgatók	k	kn	kn	–	–
PhD hallgatók	kn	kn	kn	–	k

kn: korlátozás nélkül

k: kíséreléssel

– : belépés és ott-tartózkodás nincs engedélyezve

NFL mérőtér az éppen feszültség alatt álló főberendezések közelítési övezetén kívüli térrész értendő, amelyben nem áll fenn az ott tartózkodót érő villamos átütés-átívelés veszélye.

3. A Nagyfeszültségű Laboratórium főberendezéseinek kezelése

A Nagyfeszültségű Laboratórium főberendezéseit a következő táblázat szerint önállóan kezelhetik azok a személyek, akik számára a Nagyfeszültségű Laboratóriumba való belépés és az ott-tartózkodás az 5.5 pont táblázata szerint van engedélyezve:

	10 és 6 kV-os kapcsolóberendezés	600 kV-os próbatranszformátor	300 kV-os próbatranszformátor	250 kV-os próbatranszformátor	1 MV-os lökőgenerátor	750 kV-os lökőgenerátor	Mérőszoba
Az NFCS főberendezés (beleértve a 10 és 6 kV-os kapcsolóberendezést is) önálló kezelésére feljogosított munkatársai	kn	kn	kn	kn	kn	kn	kn
Az NFCS főberendezés önálló kezelésére feljogosított munkatársai	–	kn	kn	kn	kn	kn	kn
Az NFCS kezelési feljogosítás nélküli munkatársai	–	k	k	k	k	k	k
Közreműködők	–	–	–	–	–	–	–
Látogatók	–	–	–	–	–	–	–
Hatósági ellenőrző személyek	–	–	–	–	–	–	–
Kutatási tevékenységet végző hallgatók	–	–	k	k	–	k	k
Kutatási tevékenységet végző hallgatók	–	k	k	k	k	k	k
PhD hallgatók	–	kn	kn	kn	kn	kn	kn
Szakmai képzésben résztvevő	–	–	–	–	–	–	–

kn: korlátozás nélkül

k: kísérővel

– : az adott főberendezés kezelése nincs engedélyezve

Külön kiemelendők azonban a következő műveletek:

- **Tilos a feszültségforrás nagyfeszültségű kapcsának földelését megszüntetni mindaddig, míg a próbaáramkör (a kísérleti eszköz, illetve a próbatárgy, a nagyfeszültségű hozzávezetés és a földelő elvezetés) nincs véglegesen és szilárdan, nem kívánt átütéstől-átíveléstől mentesen összerakva.**
- **Tilos a kísérlet-mérés-vizsgálat befejezése és a feszültségforrás nulla kimenő nagyfeszültségre való leszabályozása után a feszültségforrás nagyfeszültségű pontját és a próbaáramkört a veszélyes közelségen belül megközelíteni mindaddig, míg az újbóli feszültség alá kerülés (fölszabályozás) nincs megakadályozva, és nem történt meg a feszültségforrás és a próbaáramkör kisütése, majd földelés- rövidrezárása. Különösen ügyelni kell a nagykapacitású elemek kisütésekor fellépő fény- és hangjelenségre.**

4. További szabályok a Nagyfeszültségű Laboratóriumban

- A Nagyfeszültségű Laboratóriumban csak az a személy dolgozhat, aki azt a laboratóriumi szabályzatot ismeri és előírásainak betartására írásban kötelezte magát.

– Csak az a hallgató vehet részt a mérési gyakorlatokon, aki a mérések anyagát megfelelően elsajátította és a felkészültségéről minden mérési gyakorlat elején szóban vagy írásban számot ad.

- A Laboratóriumban életveszélyes feszültséggel, illetve árammal kell a mérések alatt dolgozni, ezért fokozott figyelemmel és körültekintéssel szabad csak tevénykedni.
- Elkerített nagyfeszültségű vizsgálótérbe csak annak feszültségmentesített állapotában szabad bemenni a mérésvezető engedélyével.
- A nagyfeszültséget csak akkor szabad bekapcsolni, ha a vizsgálótérben senki nem tartózkodik.
- A méréseket általában a hallgatók állítják össze, de a feszültséget a mérőkörre csak a mérésvezető engedélyével szabad rákapcsolni.
- A mérési gyakorlat megkezdése előtt a mérőcsoport minden tagja jól jegyezze meg, hogy baleset vagy veszélyhelyzet esetén mely kapcsolókkal lehet a vizsgálóteret vagy mérőkört feszültségmentesíteni.
- Ha a bekapcsolás után bármilyen rendellenes jelenség lépne fel, a vizsgálóteret vagy a mérőkört azonnal feszültségmentesíteni kell. A hibás mérőköri elrendezést csak a mérésvezető útmutatásával szabad megváltoztatni.
- A kapcsolásokon változtatásokat csak feszültségmentes és leföldelt állapotban szabad végezni. Biztosítani és ellenőrizni kell az összekötések megfelelő csatlakozását.
- Üzemszerűen feszültség alatt nem álló, de megérintható fémszerelvényeket földelni kell.

- A vizsgálótérben lévő, de a mérésben nem használt nagy kapacitású eszközöket, kondenzátorok kapcsait rövidrezárni és földelni kell.
- Tilos az érintésvédelmi és biztonságtechnikai berendezéseket hatástalanítani.
- A mérőműszerek vagy berendezési tárgyak gondatlan használatából eredő károkért a kár okozója, illetve a mérőcsoport anyagilag felelős.
- Az esetleg fellobbanó villamos tűz oltására csak a laboratóriumban rendszeresített tűzoltó készülékeket szabad használni.
- Ittas vagy gyógyszer hatása miatt kábult személy a Laboratóriumban nem tartózkodhat. A Laboratórium egész területén dohányozni tilos!
- Beültetett szívritmus szabályozó (pacemaker), nagyothalló készülékkel, inzulinadagolóval stb. a Laboratóriumba belépni tilos.



Mérési útmutató.

Érintésvédelmi mérésekhez.

A mérések egy része csak feszültség alatti hálózaton történhet.

A hálózati feszültséget csak a mérésvezető engedélyével szabad bekapcsolni.

Mérés közben a hálózati elrendezés módosítása tilos!

A mérés befejeztével a hálózati feszültséget ki kell kapcsolni.

Mérés közben ügyeljünk társaink biztonságára is.

1. A mérés célkitűzése, hogy a hallgató a kisfeszültségű közmű (áramszolgáltatói) elosztóhálózatról ellátott fogyasztóknál szokásos érintésvédelmi rendszereket és módokat megismerje, egy lakóházat leképező modellhálózaton annak üzemkészségét vizsgálja, az érintésvédelmi hibákat megtalálja, és a hibaelhárításának módját kialakítsa.

2. Bevezetés, általános ismeretek összefoglalása.

2.1. Az áram élettani hatása.

Áramütés akkor következik be, ha az ember (állat) teste áramkörbe kerül, az emberi (állati) testen áram halad át. Az áramütés veszélyessége függ

a.) az áram erősségétől, a hatás erősen személyfüggő, 50 Hz-es frekvenciájú váltakozó áram esetén általában 1 mA az érzékelési küszöb, 10-15 mA az „elengedési áramerősség” (az áramütött nem tudja a megszorított tárgyat elengedni), 20 mA felett már légzési és szívműködési zavarok jelentkezhetnek;

b.) a behatás időtartamától, egy szívperiódusnál (a szívverés frekvenciája percenként 60 - 120, tehát egy szívperiódus 0,5-1 sec.-ig tart) hosszabb idő alatt a szív leállhat vagy szívkamraremegés (fibrilláció) állhat be; de néhány másodperc alatt a bőr megéghet, ellenállása lecsökkenhet, és ezért a szervezeten átfolyó áramerőssége megnövekedhet;

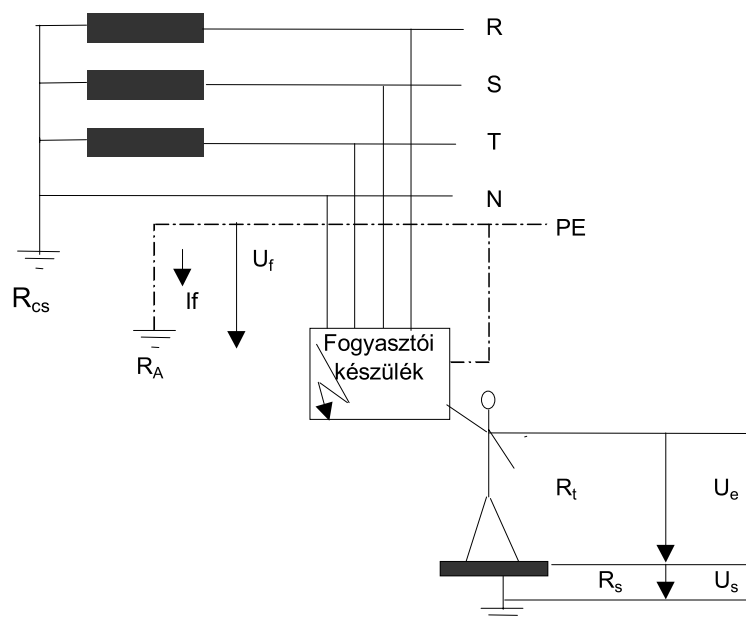
c.) az áram útjától, milyen életfontosságú szerven (szív, agy, tüdő) folyik át az áram;

d.) a frekvenciától, az egyenáram némileg kevésbé veszélyes (nagyobb egyenáram kelt hasonló hatást, mint a kisebb váltakozó áram, és nem okoz szívkamra remegést sem), 1000 Hz-nél nagyobb frekvenciájú áram inkább éget, mint más élettani hatást okoz;

e.) az áramkörbe került személy egyéni adottságaitól és aktuális állapotától: pl. testsúly, fizikai erőnlét, érzékenység, bőr finomsága és állapota (izzadt, nedves), izgalmi állapot, ittaság stb.

Az áramütés áramerőssége - természetesen - az Ohm-törvénynek megfelelően a testre jutó U_e érintési feszültség és a test ellenállásának hányadosa.

Az emberi test belsejének villamos ellenállását átlagosan 300-500 Ω -ra, a száraz, ép állapotú bőr ellenállását 20-100 $k\Omega/cm^2$ -re vehetjük (a bőr ellenállása néhány másodperces behatás esetén néhány Ω -ra lecsökkenhet!). Nagyon durva közelítésként, elsősorban elvi számításoknál a szokásos helyzetben lévő ember testének teljes ellenállását 1 $k\Omega$ -mal szokás számítani. Ha az áramütés áramútja a kézzel érintett feszültség alatti részből kiindulva az ember lábán és a talajon át záródik, akkor az áramkör ellenállásában szerepel az úgynevezett „talpponti ellenállás”, ami a cipő és a padlózat ellenállásából áll (1. ábra.). (Természetesen, ha az áramkör nem az ember talppontján, hanem egy földpotenciálon lévő fémrésznek az egyidejű érintések a másik kézen, vagy más csupasz testrészen át záródik, akkor ez akár nulla is lehet.).



1. ábra.

ahol R, S, T fázisvezetők, N a nullavezető, PE védővezető
 R_{cs} a rendszer csillagpontjánál a földelési ellenállás
 R_A védővezető földelésének ellenállása
 U_f a hiba feszültség, I_f hiba áram, $U_f = I_f \cdot R_A$
 R_t a test ellenállása,
 R_s a cipő, a padlózat ellenállása, U_s az erre eső feszültség
 U_e érintési feszültség, általában $U_e \leq U_f$

2.2. Az áramütés fellépésének műszaki körülményei.

Az áramkörbe kerülés kisfeszültségen azt jelenti, hogy az ember két különböző testrészével két különböző potenciálon lévő részt érint. (1000 V-nál nagyobb feszültségen - amit a biztonságtechnikában nemzetközileg egységesen nagyfeszültségnek neveznek, az áramszolgáltatók 35 kV-ig középfeszültségnek, és csupán az ezt meghaladót nevezik nagyfeszültségnek - ehhez nem szükséges a feszültség alatti részt megérinteni, elegendő azt a levegőn át „átívelési távolság” - ra megközelíteni, s így a levegőn át fellépő villamos íven keresztül is záródhat az áramkör.)

Az áramütéses balesetek egy része úgy következik be, hogy az ember (közvetlenül, vagy szerszámon, segédeszközön keresztül) általában a kezével üzemszerűen feszültség alatt álló (szabványos elnevezéssel: „aktív”) részt érint, ugyanakkor nem szigetelő talajon áll, vagy más testrészével földpotenciálon lévő fémrészhez ér. Ezt a nemzetközi szabványok „közvetlen érintés”-nek, s az ezek megakadályozására szolgáló intézkedéseket „közvetlen érintés elleni védelem” - nek (újabban „alapvédelem”-nek, vagy „áramütés elleni védelemnek normál üzemben”-nek nevezi, a régi magyar szakkifejezés *érintés elleni védelem* volt). Ennek megoldásai valóban az érintést kívánják megakadályozni az aktív részek szigetelésével, burkolatba zárásával vagy megfelelő (érinthető távolságon kívüli) elhelyezésével.

Az áramütéses balesetek nagy része azonban úgy következik be, hogy a balesetes a villamos szerkezet olyan részét (úgynevezett „test”-ét) érinti meg, amely üzemszerűen feszültségmentes, de hiba (testzárlat) következtében feszültség alá kerül (1. ábra.). Ezt a nemzetközi szabványok „közvetett érintés”-nek, s az ezek megakadályozására tett intézkedéseket „közvetett érintés elleni védelem”-nek (újabban nagyon nem szerencsés elnevezéssel „hibavédelem”-nek) nevezi. A magyar (és német) szakmai köznyelv ezt továbbra is a korábbi, csaknem százéves elnevezéssel „érintésvédelem”-nek hívja.

Az érintésvédelmi módok nem a testek érintését kívánják megakadályozni, hanem azt, hogy az érinthető testek tartósan (hosszabb ideig) veszélyes érintési feszültség alá kerüljenek. Ennek főbb megoldásai:

- a.) Védelem a táplálás önműködő lekapcsolásával (ezeket az érintésvédelmi módokat korábban- nagyon jellemzően- védővezetős érintésvédelmi módoknak nevezték)
- b.) A villamos szerkezet elszigetelésével (kettős vagy megerősített szigetelésű szerkezet alkalmazása)
- c.) Biztonsági törpefeszültségű táplálással (ez általában 50 V-nál nem nagyobb váltakozó- vagy 120 V-nál nem nagyobb egyenfeszültséget jelent, de egyes különösen veszélyes alkalmazásoknál ennek felét, negyedét, sőt nyolcadát is előírhatják a rájuk vonatkozó előírások).

A - nemzetközi, európai és magyar - szabványok más érintésvédelmi módokat (a környezet elszigetelése, védőelválasztás, földelőtlen helyi egyenpotenciálra hozás, az állandósult érintési áram és kisütési energia korlátozása, feszültség-védőkapcsolás) is elismernek, ezeket azonban különlegességük és csak erősen korlátozott alkalmazási területük miatt nem említjük.

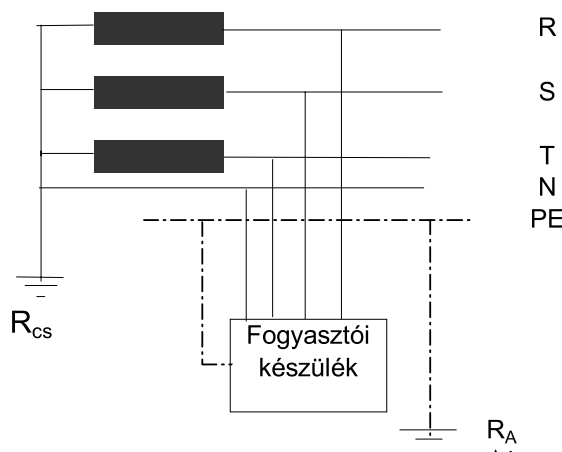
Szükséges megemlíteni, hogy a villamos balesetek nagy része nem áramütéses, hanem égési baleset, amit a berendezéseken fellépő villamos ív okoz!

2.3. A védővezetős érintésvédelmi módok.

A védővezetős érintésvédelmi módok közös jellemzője, hogy ezek alkalmazásánál a villamos berendezés testét (az olyan vezetőanyagú - általában fém - érinthető részét, amely üzemszerűen nem áll feszültség alatt, de hiba esetén feszültség alá kerülhet) földelt védővezetővel (ezt az angol „protecting earthing” elnevezés alapján nemzetközileg PE betűjellel, és a védővezető szigetelését zöld/sárga színezéssel jelölik) kötik össze, és a tápláló áramkört annak túláram védelme, vagy az abba beiktatott áram-védőkapcsolás által rövid idő alatt önműködően kikapcsolják, ha a védővezető testzárlat következtében veszélyes nagyságú érintési feszültségre kerül.

2.3.1. Védőföldelés közvetlenül földelt rendszerben, (TT rendszer).

A közműhálózati kisfeszültségű rendszereket (Európában mindenütt) a tápláló transzformátor csillagponti kivezetésénél - üzemi okokból - közvetlenül (impedancia beiktatása nélkül) leföldelik. Ezt mutatja a kétbetűs rendszerjelölés első T betűje (T=terra, földelés). Ha a fogyasztó-berendezések testjeit védővezetőn át ugyancsak földelik (2. ábra), akkor ezt a földelést mutatja a jelölés második T betűje.



2. ábra. A TT rendszer.

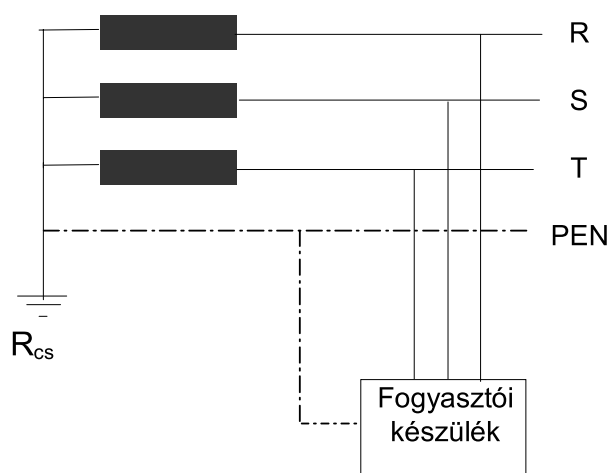
Ha a készülék testzárlatos lesz, akkor a fázisvezetőn, a hibahelyen, az R_A védőföldelésén, és a rendszer R_{cs} csillagponti földelésén át testzárlati áram lép fel. Ha ennek a testzárlatnak az áramerőssége kicsi, akkor ez a védőföldelés R_A ellenállásán aránylag kis (a megengedhető $U_L = 50$ V-nál kisebb) feszültségemelkedést okoz. Ha az áramerősség nagy, úgy - az előírt rövid időn belül - a túláram védelem kioldja azt (az ehhez tartozó áramerősséget jelöljük I_a -val). A méretezési képlet:

$$R_A \cdot I_a \leq 50 \text{ V}$$

Ha a túláramvédelem kioldóárama - a rajta keresztül folyó üzemi áram miatt - nem választható az előző összefüggést kielégítő kis értékre, akkor az érintésvédelmi kioldást áram-védőkapcsolóval (lásd 2.3.3. pont) lehet megoldani.

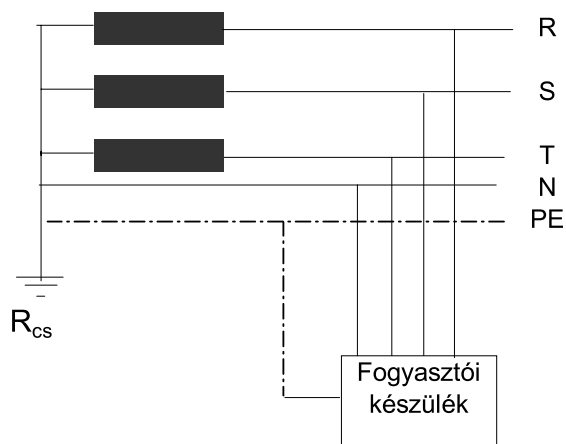
2.3.2. Nullázás (TN-rendszer)

Ha a közvetlenül földelt közműhálózatot üzemeltető áramszolgáltató ehhez hozzájárul, akkor a nullavezetőt védővezetőként is szabad felhasználni, ez a nullázás, nemzetközi jelölése TN-rendszer. (Hazánkban az áramszolgáltatói hálózatok több mint, 90%-a nullázott). Ebben a kétbetűs jelölésben, a második betű a testhez kötött nullavezetőt jelöli. Elvben ennek három megoldása van. Az első szerint sehol sem építenek ki külön védővezetőt, az egyfázisú üzemi áramok vezetésére szolgáló nullavezetőt (jelölése N=neutral) kötik minden fogyasztó készülék testére (3. ábra). Ebben az esetben a rendszer jelölése TN-C (a C=common jelzi, hogy a védővezető és a nullavezető mindenütt közös). Ez a lehetőség bizonyos esetekben csupán elvi, mert 10 mm²-nél kisebb keresztmetszetű vezetékeknél a közösítést - a közös vezető megszakadásának veszélye miatt - a szabvány tiltja. Azt a vezeték szakaszt, amely egyszerre tölti be a védővezető (PE) és az üzemi nullavezető (N) szerepét a két jelölés - PE és N - egybeírásával PEN vezetőnek (nullával egyesített védővezető) nevezik.



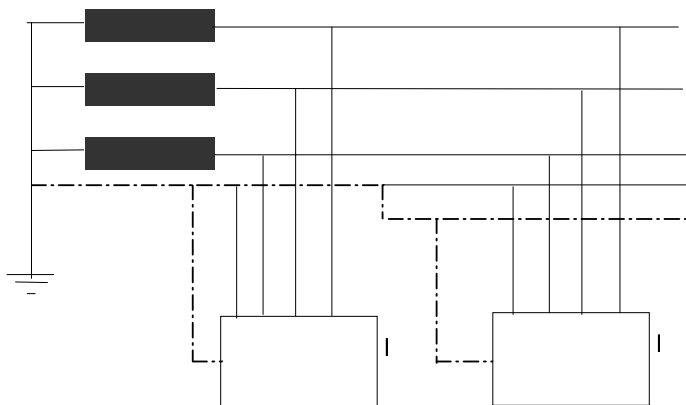
3. ábra. A TN-C rendszer).

A második lehetőség az, hogy a védővezetőt mindjárt a tápláló transzformátortól kezdve külön választják az egyfázisú üzemi áramokat vezető nullavezetőtől (4. ábra). Ezt a megoldást TN-S (S=separated, elkülönített) betűcsoporttal jelölik. Ez a megoldás is kizárólag elvi jelentőségű, mert az áramszolgáltató sehol a világon nem vállalja, hogy az elosztóhálózatán kiépítse a védővezető céljára szolgáló ötödik vezetőt.



4. ábra. A TN-S rendszer

A harmadik megoldás a leggyakoribb: egy darabig közös az üzemi nullavezető és a védővezető (ez tehát a PEN vezető), majd egy ponton szétválnak (5. ábra). Ilyen megoldású rendszert TN-C-S betűcsoporttal jelölik. Azt, hogy a két vezető szétválasztása hol történjen (áramszolgáltatói csatlakozópontnál, az épületbe való becsatlakozásnál, a fogyasztásmérőnél, vagy csupán a 10 mm²-nél kisebb keresztmetszetű vezetékek csatlakozásánál) a helyi viszonyok és körülmények döntenek el. A szétválasztott szakaszon a védővezetőt (PE) nullázóvezetőnek nevezik.



5. ábra. TN-C-S rendszer.

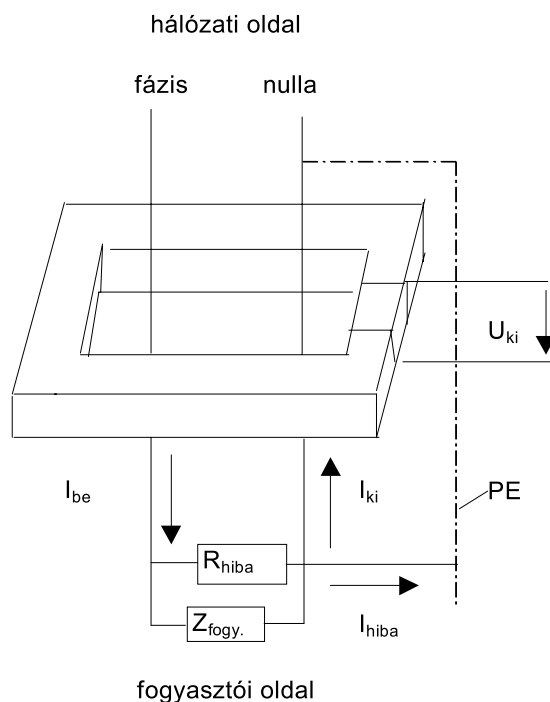
A TN rendszerű hálózaton fellépő testzárlati áram gyakorlatilag nem halad a talajon át, szinte teljesen fémes úton (a fázisvezetőn, a nullázóvezetőn és a PEN-vezetőn át) záródik. Ennek megfelelően a földhöz képest ennek hatására fellépő feszültségemelkedést nem lehet számítani, itt a méretezés csak azt veszi számításba, hogy a fázisfeszültség (U_o) a zárlati kör impedanciáján (amit „*hurok impedancia*”-nak, vagy egyszerűen „*hurokellenállás*”-nak neveznek és Z_s -el jelölnék) át tud-e hajtani olyan nagyságú áramot, ami a túláramvédelmet az előírt időn belül működteti:

$$Z_s \cdot I_a \leq U_o$$

Áram-védőkapcsolás (2.3.3. pont) a nullázott hálózaton is alkalmazható, de csak azokon a szakaszokon, ahol az üzemi vezető és a nullavezető már szét van választva (tehát a PEN - vezető szakaszán nem!).

2.3.3. Áram-védőkapcsoló (magyar rövidítése: ÁVK, angol: RCD = residual current device, német: FI)

A áram-védőkapcsoló a védővezetős érintésvédelmi módoknál (főként a TN és TT rendszereknél) érintésvédelmi kikapcsolásra a túláramvédelem helyett igen előnyösen alkalmazott (ma a legmodernebbnek tekintett) kikapcsoló szerv. (Bizonyos megfontolások mellett az IT-rendszerben sem kizárt az alkalmazása). Tehát nem külön érintésvédelmi mód, hanem csupán a védővezetős érintésvédelmi módok kikapcsoló szerve. Való igaz, hogy érzékenysége következtében gyakran a fázisvezetőt közvetlenül érintő ember testén áthaladó áram hatására (védővezető nélkül) is kikapcsol, de egyetlen nemzeti vagy nemzetközi szabvány sem fogadja el védővezető alkalmazása nélkül kellő biztonságú védelemnek.



6. ábra. Az ÁVK elvi felépítése, egyfázisú kialakításban

Az áram-védőkapcsolás kifejezetten csak érintésvédelmi megoldás (túláramvédelmet nem lát el!). Lényege, hogy a védett áramkör valamennyi üzemi áramot vivő vezetőjét egy közös különbözeti áramváltó „ablakán” vezetik át, míg a védővezetőt ezt megkerülve építik ki. (6. ábra). Minden áramot vezető körül mágnes tér alakul ki. Ha a fogyasztóhoz menő és onnan visszajövő üzemi áramok összege zérus, vagyis testzárlat mentes állapotban, a különbözeti áramváltó ablakában nem lesz gerjesztés, a vasmagban nem keletkezik fluxus, az áramváltó kioldó tekercsében áram nem fog folyni. Ha viszont az áramvédő-kapcsolóval védett fogyasztói hálózaton testzárlat lép fel, akkor ennek árama a védővezetőn záródik, mely nem haladhat át a különbözeti áramváltó ablakán, így az ott a befolyó és kifolyó áramok összege nem lesz zérus, az áramváltó áttételének megfelelő nagyságú áram, ha meghaladja az áram-védőkapcsoló névleges különbözeti áramát, meghúz és kikapcsol.

Lényeges, hogy a védővezetőt nem szabad a különbözeti áramváltón átvezetni, ha a fogyasztó egyfázisú, vagy egy fázisról üzemelő berendezése is van, akkor az üzemi nullavezetőt (N) nullázás esetén is át kell vezetni az „ablakon”, de csupán az áramváltó előtti szakaszon lehet közös a védővezetővel (PEN-vezető), és az N-vezető az áramváltó utáni szakaszon nem földelhető. Ezek figyelmen kívül hagyása esetében az áramvédő-kapcsoló működése teljesen bizonytalanná válik, testzárlat esetén sem kapcsol ki biztosan, viszont testzárlat nélküli esetben is (egy másik fogyasztó egyfázisú áramának hatására) bekövetkezhet leoldás.

Az áram-védőkapcsoló nagy előnye, hogy az ezt megszólaltató áram (ΔI) értéke teljesen független az áramkör üzemi áramerősségétől, így akár 100 A üzemi áram esetében is választható néhány mA-re. A szokásos névleges érzékenység 30 mA, de (különösen, ha több ilyen kapcsoló sorba kötése esetén a táppontban szelektív áram-védőkapcsolót alkalmaznak), akár 300 mA is lehet. Korábban az érzékenységet minden határon túl növelni akarták, de kiderült, hogy a védett hálózat, illetve szerkezet szivárgó árama (különösen benedvesedés esetén) a túlérzékeny kapcsolót feleslegesen kikapcsolta. Ezért ma már 10 mA-es érzékenységű áram-védőkapcsolót csak dugaszolóaljzattal egybeépítve, egyetlen kéziszerszám táplálására alkalmaznak, és a hazai körülmények között a szabadtéri berendezések védelmére a 100 mA-es érzékenység tűnik a legmegfelelőbbnek.

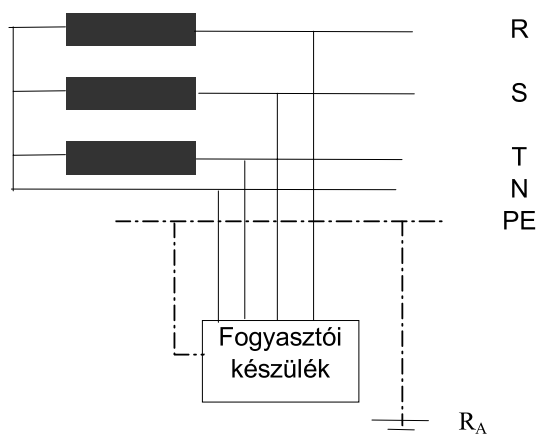
Az áram-védőkapcsolót ellátják egy próbagommbal. Ennek megnyomása egy ellenálláson keresztül a különbözeti áramváltót megkerülő áramot hoz létre, és ezzel ellenőrzik a kapcsoló működőképességét. Ezzel azonban csak a kapcsolót lehet ellenőrizni, de a védővezető folytonosságát (és így a kapcsolás hatásosságát) nem.

2.3.4. Védőföldelés közvetlenül nem földelt rendszerben (IT-rendszer).

A közvetlenül földelt nullavezetőjű (TT- TN-rendszerű) hálózatok földzárlat esetén nem tarthatók üzemben. Ezért olyan helyen, ahol az ellátás folytonossága elengedhetetlen, a váratlan kikapcsolás életveszélyt, vagy igen nagy anyagi kárt okozna (pl. kórházi műtők, földalatti bányahálózatok, kohók, egyes vegyi üzemek), a nullavezetőt nem (vagy csak nagy ellenálláson át) földelik. Érintésvédelemre ez esetben is szükség van, mert egyrészt földzárlat (testzárlat) esetén a vezetékhálózat és a fogyasztókészülékek földhöz viszonyított kapacitásán átfolyó „földzárlati áram” emberre veszélyes nagyságú lehet, másrészt kettős (két helyen, és eltérő fázisokban fellépő) földzárlat esetében a testzárlatos szerkezetek esetében veszélyes feszültség lépne fel. Ezért ezen rendszerekben is kötelező a földelt védővezető kiépítése. (Az IT jelölés a táptranzformátor szigetelt (I=isolated, szigetelt), vagy nagy impedancián keresztül földelt (amit esetleg csak a hálózat és a szerkezetek földkapacitása képvisel)

csillagpontjára utal, míg a második helyen álló T betű a testek védőföldelését jelenti.). Ilyen, IT rendszer látható a 7. ábrán. Ennek méretezési képlete az első földzárlatra:

$$R_A \cdot I_d \leq U_L$$



7. ábra. IT rendszer.

Itt az első földzárlat nem okoz kioldást, ezért a képletben nem a kioldóáram, hanem a hálózat adottságaiból (elsősorban földkapacitásából) kiadódó „földzárlati áram” szerepel. A második földzárlatra is méretezni kell, de ez bonyolultabb, ezért itt nem tárgyaljuk.

3. Kérdések:

1. Mit értünk érintésvédelem (közvetett érintés elleni védelem) alatt?
2. Mik az önműködő kikapcsoláson alapuló (védővezetős) érintésvédelmi módok?
3. Mi a különbség a TN és a TT rendszer között?
4. Mi a különbség a TN-C, TN-S és a TN-C-S rendszerek között, és hol alkalmazzák ezeket?
5. Mi a hurokellenállás (hurokimpedancia)?
6. Ismertesse az áram-védőkapcsolás elvét!
7. Áram-védőkapcsolás esetén hol szabad a nullavezetőt leföldelni, vagy a védővezetővel összekötni?
8. Mi az előnye az IT-rendszernek?
9. Mit nevezünk érintési feszültségnek, és mi befolyásolja a nagyságát?

4. A mérési feladatok.

A vizsgálatokat annak feltételezésével végezzük, hogy a modellezett családi ház most épült és a használatba vétel előtt ellenőrizni kell az elektromos hálózatot és a nagyobb berendezéseket abból a célból, hogy biztonságosan feszültség alá helyezhető ill. használatba vehető.

1. Ellenőrizze a védővezető folytonosságát!
2. Mérjen szigetelési ellenállást a különböző fogyasztói készülékeken.
3. Mérje meg a fázisvezető és a nullavezető, a fázisvezető és a védővezető, valamint a nullavezető és a védővezető közötti szigetelési ellenállást.
4. Mérje meg az áram-védőkapcsolók kioldási áramát és lekapcsolási idejét.
5. Határozza meg a hurokimpedanciák nagyságát a TN-rendszerű hálózat különböző részein!

Nem érintésvédelmi célú mérések:

6. Ellenőrizze a háromfázisú aljzaton a fázissorrendet.
7. Határozza meg a tápfeszültség felharmonikus tartalmát.

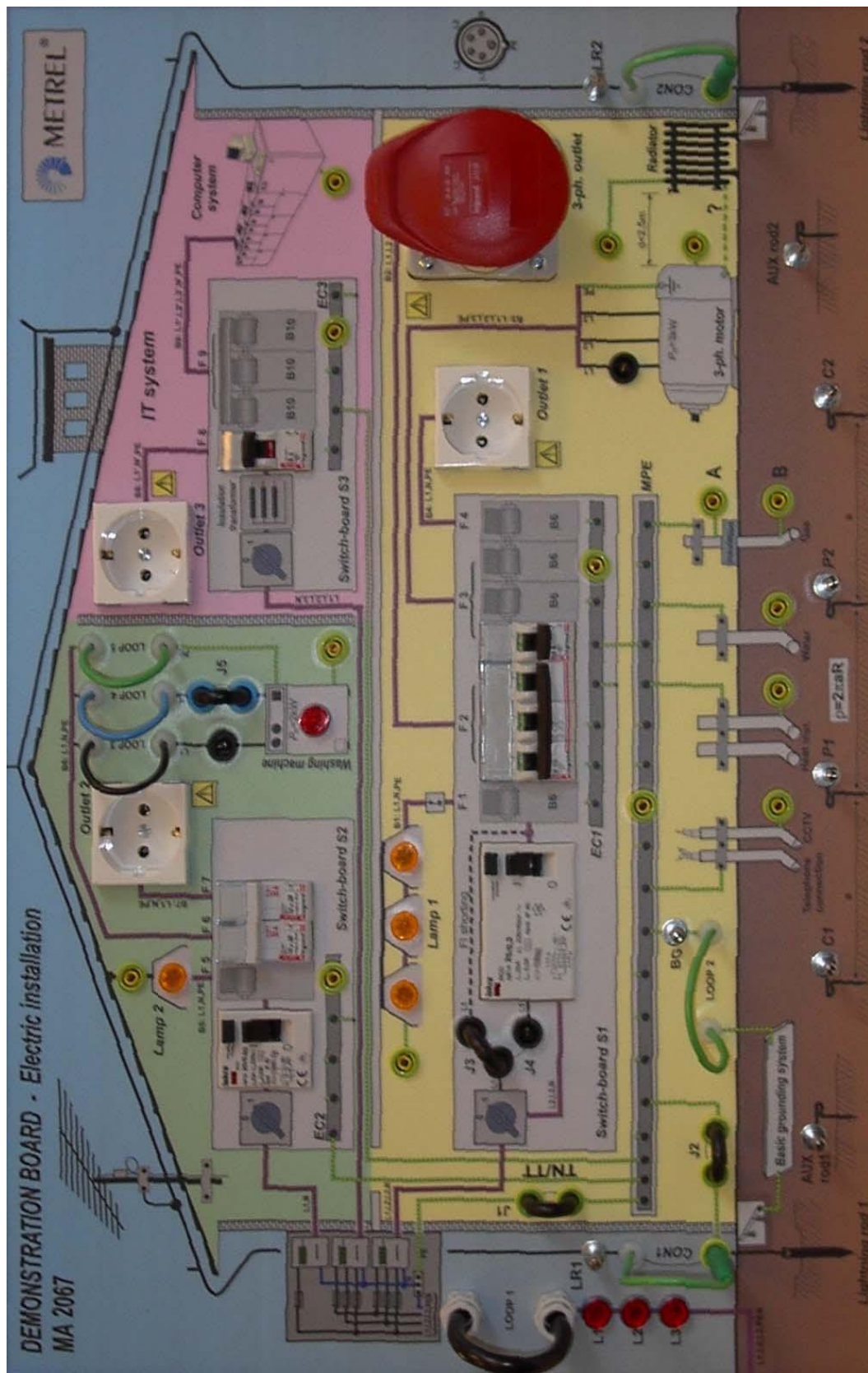
5. A mérésről készített jegyzőkönyvnek tartalmazni kell:

1. az egyes mérések alkalmával kapott számszerű eredményeket, a szigetelési ellenállás mérésekor az alkalmazott vizsgálat feszültség nagyságát is.
2. az észlelt hibák leírását,
3. a hibák elhárításának módját.

6. A vizsgálat céljaira szolgáló modell rövid ismertetése.

A vizsgálatokat a Ljubljana-i Műszaki Egyetem által kifejlesztett és a METREL cég által az európai érintésvédelmi előírásoknak megfelelően kialakított modellen végezzük, amely a 8. ábrán látható. A modell alapkiképzése háromfázisú ellátás vizsgálatára szolgál, de megfelelő tartozékkal egyfázisú ellátás vizsgálatára is átalakítható. Jelen vizsgálat keretében az egy fázisról történő ellátási helyzetet vizsgáljuk. Lehetőség van TT, TN és IT ellátási és érintés védelmi módozatok vizsgálatára. Ezek közül vizsgálatunknál a TN és TT rendszer vizsgáljuk.

A modell egy kommunális fogyasztónál előforduló ellátási elemeket és fogyasztói készülékeket, berendezéseket tartalmaz. A kisfeszültségű elosztóhálózat különböző áramköreinél, elemeinél, készülékeinél, valamint a dugaszoló aljzatainál határozhatjuk meg az érintés védelem hatásosságát. Alkalmas a modell a földelési rendszerek vizsgálatára is, ezen belül egyedi földelések, földelő hálók, valamint a fajlagos földelési ellenállás is mérhető. Áramvédő kapcsolás működése is szimulálható.



8. ábra.

7. A vizsgálat céljaira szolgáló műszer.

A méréseknél alkalmazott **EUROTEST 61557** kombinált üzemi mérőműszert szintén a szlovéniai **METREL** cég gyártja. A műszer érintésvédelmi méréseknél teljesíti az MSZ EN 61557 szabvány sorozat előírásait. A beépített mikroprocesszor következtében mindenféle érintésvédelmi mérés nagy biztonsággal, szinte automatikusan elvégezhető. Lehetőséget biztosít nagymennyiségű mérési adat tárolására, és az adatok számítógépes feldolgozására és értékelésére is.

A műszerhez részletes, magyar nyelvű használati utasítás tartozik. A mérések összeállításánál használjuk a megfelelő leírásokat.

Az alkalmazandó műszer homloklapját és a homloklapon lévő gombok és kapcsolók funkcióit a 9. ábrán és a következőkben mutatjuk be.

A homlokfal közepén egy **háttérvilágítással rendelkező folyadékkristályos** kijelző van.

A kapcsolók funkciói:

ON/OFF jelű működtető gomb a készülék be és kikapcsolására szolgál. Amennyiben 10 percig nem használjuk a készüléket, az úgy automatikusan kikapcsol.

HELP jelű működtető gomb, amennyiben a készülék működéséről kívánunk információt, a sugó menü adja meg a csatlakoztatás módját, illetve adatokat hívhatunk elő.

Háttérfény működtető gombbal a kijelző háttérfényét kapcsolhatjuk, ha a készüléket 20 másodpercig nem használjuk, a kijelző háttérfénye automatikusan kikapcsol

SAVE működtető gombbal az eredményeket tárolhatjuk

RCL (recall) működtető gombbal az tárolt eredményeket hívhatjuk elő.

SETUP működtető gombbal a kontrasztot, az időt és dátumot, egyes paramétereket állíthatunk be, illetve a memóriát törölhetjük.

START működtető gomb, az egyes beállított méréseket indítja.

ESC működtető gombbal, a folyó művelet megszakítható.

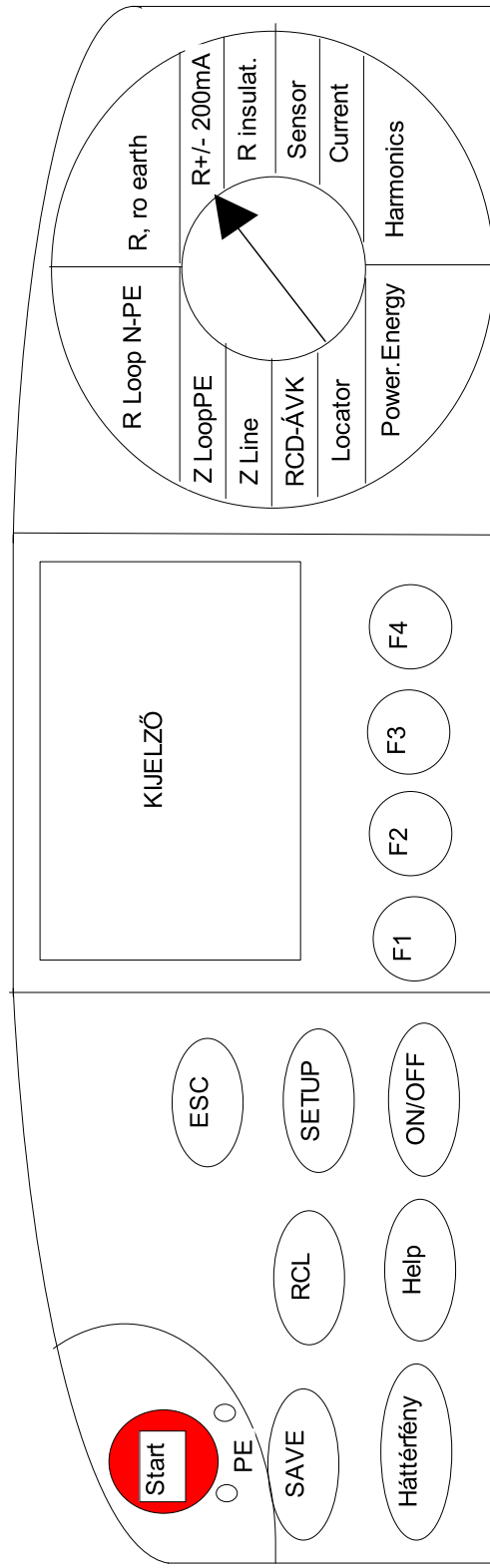
START működtető gomb, az egyes beállított méréseket indítja.

ESC működtető gombbal, a folyó művelet megszakítható.

A homlokfal jobb oldalán lévő forgó átkapcsolóval az egyes mérési funkciók közül választhatunk. Ezek a következők:

R, ρ_{earth} állásban a fajlagos földellenállás és a földelési ellenállás határozható meg.

R+/-200mA continuity állásban a védővezető folytonossága ellenőrizhető.



9. ábra.

EUROTEST 61557 kombinált műszer.

R_{insulation} (RISO) állásban a szigetelési ellenállás mérése végezhető.

Sensor állásban a megvilágítás mérhető (az erre szolgáló külön mérő fejjel).

Current állásban megfelelő lakatfogóval szivárgási és terhelő áram mérése végezhető.

Harmonics állásban a feszültség ill. az áram (megfelelő lakat fogóval) eredő felharmonikus tartalma és 21.-ik összetevőig az egyedi egyes felharmonikusok tartalma mérhető.

Power, Energy állásban a teljesítmény, a teljesítménytényező ($\cos\phi$), és a fogyasztás (vill. energia) mérhető.

Locator állásban háromfázisú hálózaton a forgásirány, a fázissorrend ellenőrizhető.

RCD (residual current device) beállításban az áramvédő kapcsoló (ÁVK) FI relé működése vizsgálható, (leoldási idő, érintési feszültség, hurok ellenállás, földelési ellenállás).

Z_{Line} állásban a fázis-fázis, vagy fázis-nulla vezetők impedanciája és a várható rövidzárási áram határozható meg.

Z_{Loop} állásban a fázis-védővezető hurok impedanciája, a várható rövidzárási áram és az érintési feszültség határozható meg.

R_{LOOP N-PE} állásban a nullavezető (N)-védővezető (PE) hurok hurokellenállása és a várható rövidzárási áram határozható meg.

8. A mérések során figyelembe veendő szempontok:

8.1 A védővezető folytonosságának ellenőrzése

- A mérés csak feszültség mentesített (kikapcsolt) hálózaton végezhető el.
- Válasszuk ki a az ellenállás maximális értékét. Indokoljuk meg a választást.

8.2. Szigetelési ellenállás mérése

- A mérés csak feszültség mentesített (kikapcsolt) hálózaton végezhető el.
- A terheléseket le kell kapcsolni mert a párhuzamosan kapcsolódó terhelések a mérést megzavarhatják.
- Válasszuk ki a mérési feszültség értékét. Indokoljuk meg a választást.

Kommunális hálózaton a szigetelési ellenállás 0,5 MOhm-nál nagyobb legyen.

8.3 Hurok impedanciák és várható rövidzárási áram mérése

- Gondoljuk át az áram-védőkapcsoló működésének hatását a mérés elvégzése során.
- Értékeljük a várható rövidzárási áram nagyságát. (Mi ennek a mérésnek a célja?)

9. Biztosítók jellemző adatai:

9.1 gG típus

A g jelölés zárlat és túlterhelés elleni védelemre egyaránt alkalmazható biztosítóra utal, míg a G általános típusú biztosítót jelöl. A táblázatban az I_a kiolvadási áram és a megengedhető max. hurok ellenállás értéke látható 0,4 sec és 5 sec-os kiolvadási idő mellett

olv. biztosító I_n névl. árama	kiolv. idő <0,4 sec	kiolv. idő <0,4 sec	kiolv. idő <5 sec	kiolv. idő <5 sec
	I_a A	Z_s ohm	I_a A	Z_s ohm
2	16	13,7	9,2	23,9
4	32	6,8	18,5	11,8
6	47	4,6	28	7,8
10	82	2,6	46,5	4,7
16	110	2	65	3,3
20	147	1,4	85	2,5
25	183	1,2	110	2
32	275	0,8	150	1,2
40	320	0,6	190	1,1
50	470	0,4	250	0,8
63	550	0,4	320	0,6
80	840	0,2	425	0,5
100	1020	0,2	580	0,3
125	1450	0,1	715	0,3

9.2 gL típus

A g jelölés ugyanaz, mint előbb, az L a vezetékek védelmére szolgáló biztosító típusra utal.

olv. biztosító I_n névl. árama	kiolv. idő <0,2 sec	kiolv. idő <0,2 sec	kiolv. idő <5 sec	kiolv. idő <5 sec
	I_a A	Z_s ohm	I_a A	Z_s ohm
2	20	11	9,21	23,9
4	40	5,5	19,2	11,5
6	60	3,7	28	7,9
10	100	2,2	47	4,7
16	148	1,5	72	3,1
20	191	1,2	88	2,5
25	270	0,8	120	1,8
32	332	0,7	156	1,4
35	367	0,6	173	1,3
40	410	0,5	200	1,1
50	578	0,4	260	0,8
63	750	0,3	351	0,6
80	-	-	452	0,5
100	-	-	573	0,4
125	-	-	751	0,3
160	-	-	995	0,2

9.3 Automatikus biztosító

	B típusú	B típusú	C típusú	C típusú	K típusú	K típusú
túláram véd. I_n névl. árama	$I_a = 5 \cdot I_n$ A	Z_s ohm (0,2 sec)	$I_a = 10 \cdot I_n$ A	Z_s ohm (0,2 sec)	$I_a = 15 \cdot I_n$ A	Z_s ohm (0,2 sec)
2	10	22	20	11	30	7,3
4	20	11	40	5,5	60	3,7
6	30	7,3	60	3,65	90	2,4
10	50	4,4	100	2,2	150	1,5
16	80	2,8	160	1,4	240	0,9
20	100	2,2	200	1,1	300	0,7
25	125	1,8	250	0,9	375	0,6
32	160	1,4	320	0,7	480	0,5
35	175	1,3	350	0,65	525	0,4
40	200	1,1	400	0,55	600	0,37
50	250	0,9	500	0,45	750	0,29
63	315	0,7	630	0,35	945	0,23



Mérési útmutató

A transzformátor működésének vizsgálata

Az Elektrotechnika tárgy laboratóriumi gyakorlatok 3. sz. méréséhez

1. A mérési gyakorlat céljai:

A transzformátor működésének kísérleti vizsgálata, helyettesítő képének meghatározása. A transzformátor menetszámáttételének kísérleti meghatározása, üresjárási mérés, rövidzárási mérés és terhelési mérés. A háromfázisú transzformátor kapcsolási típusai, a kiegyenlítetttség vizsgálata.

2. A mérés fontosabb eszközei:

Egyfázisú transzformátor	1 darab
Háromfázisú transzformátor	1 darab
Digitális multiméter	4 darab

3. Fogalomtár:

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

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

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

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

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

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

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

Üresjárási áram: *Üresjárási állapotban*, a primer tekercsekben folyó áram. Kielégíti az oszlopindukció gerjesztésigényét, ez fedezi a vasvesztést. Telítődő vasmag esetében az *üresjárási áram* jelalakja a szinuszosztól jelentősen eltér.

Rövidzárási feszültség: *Rövidzárási állapotban* a primer oldalon a *névleges* áramhoz tartozó feszültség.

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

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

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

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

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

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

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

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

Megmutatható, hogy az áramáttétel:

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

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

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

Tekercselési veszteség: A transzformátor tekercseiben keletkező veszteség. A vezetékhanyag ellenállásán keletkező hőmenynyiséget mutatja. Mértéke függ a frekvenciától, mivel a

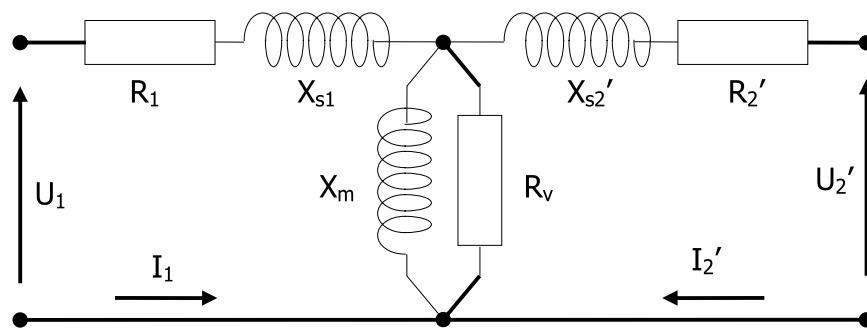
behatolási mélység befolyásolja a vezetésben résztvevő huzalkeresztmetszetet. Minimalizálása érdekében a huzal méreteit illeszteni kell a behatolási mélységhez. A **rövidzárási állapotban** felvett teljesítmény közelítőleg megegyezik a tekercselési veszteséggel.

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

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

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

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



1. ábra: Transzformátor helyettesítő kapcsolása

Elemei:

- **Tekercsellenállások:** a primer és szekunder (kis- és nagyfeszültségű) tekercsek ohmos ellenállásai
- **Szórtási reaktancia:** a primer illetve szekunder tekercsek szórtási fluxusát leképező induktivitásokkal számított reaktanciák.
- **Főmező reaktancia:** a mindkét tekercsel kapcsolódó **főmező**. A főmező reaktancia értéke jelentősen függ a transzformátor vasmagjának telítési állapotától.
- **Vasveszteségi ellenállás:** Fiktív ellenállás, amelyen keletkező wattos veszteség megegyezik a vasveszteséggel.

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

Redukálás: ahhoz, hogy a helyettesítő kép egy áramkör legyen, a szekunder oldali mennyiségeket át kell alakítani (redukálni) a primerre az alábbi összefüggések szerint:

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

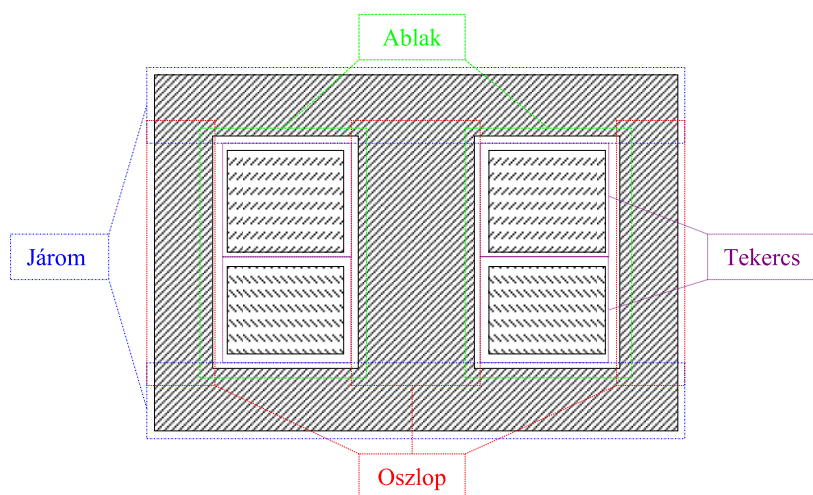
Relatív értékek: A transzformátor paramétereinek százalékos kifejezése. A viszonyítási alapok mindig a megfelelő **névleges** értékek. Tehát a **rövidzárási feszültség relatív** értékének meghatározásához a kapocsfeszültség **névleges** értékére kell viszonyítani, míg a **vasveszteség relatív** értékének meghatározásához a **névleges** teljesítményre. A **helyet-**

tesítő kapcsolásban szereplő koncentrált paraméterek *relatív* értékének meghatározásakor a viszonyítási alap a *névleges* impedancia, ami a *névleges* feszültség és a *névleges* áram hányadosa. A *relatív értékeket* általában kisbetűvel jelöljük.

4. A transzformátor

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

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



2. ábra: Transzformátor metszete

A transzformátor mérése:

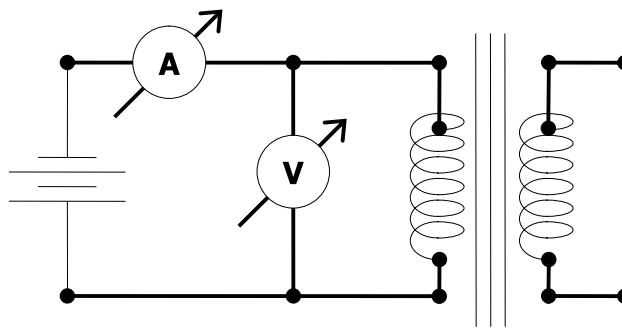
A transzformátor helyettesítő kapcsolási vázlatában szereplő elemek értékének megállapításához a következő méréseket végezzük el:

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

A mérések végeztével ismert lesz a transzformátor DC, illetve AC ellenállása, áttétele valamint - háromfázisú transzformátor esetén - a kapcsolási csoportja. Meghatározzuk a szórási, illetve a fővező reaktanciákat, továbbá a tekercselési- és a vasveszteségeket.

Ellenállásmérés:

A transzformátor primer illetve szekunder tekercseinek ellenállását mérjük meg egyenáramú ellenállásmérés segítségével. A 3. ábra alapján állítsuk össze a kapcsolást és mért feszültség, és áram arányából határozzuk meg a két tekercs ellenállását.



3. ábra: DC ellenállásmérés

Áttételmérés:

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

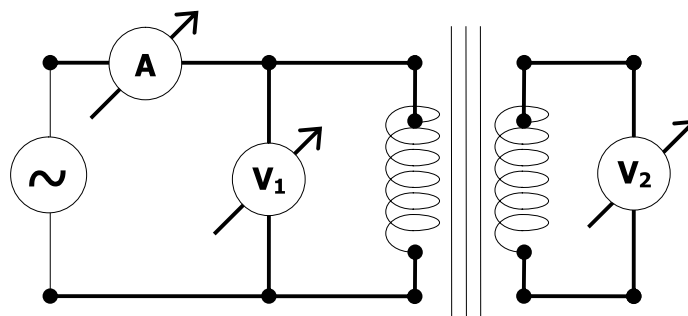
Ez a jelenség a **menetszám áttétel** mérésében hibát okoz. A mért érték korrigálásra szorul a következő képlet alapján:

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

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

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

Mindezek ismeretében állítsuk össze a 4. ábrán látható kapcsolást és mérjük meg a transzformátor menetszám áttételét. Ügyeljünk, hogy a primer **kapocsfeszültség** ne haladja meg a **névleges feszültség** 50%-át és jegyezzük fel az **üresjárási áram** értékét is.



4. ábra: Áttétel mérése

Kiegészítő feladat:

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

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

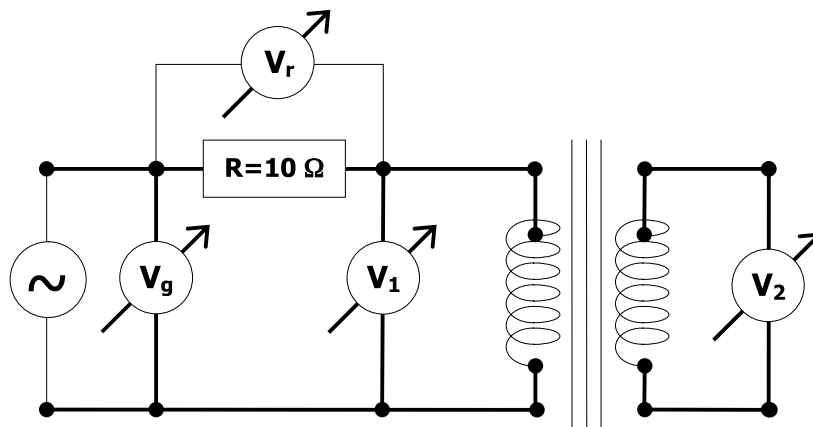
Üresjárási mérés:

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

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

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

Állítsuk össze a 4. ábrán látható kapcsolást. Végezzük el az üresjárási mérést a primer **kapocsfeszültség** változtatásával. Célszerű a mérést fentről lefelé végezni, a kiindulópont a transzformátor **névleges** feszültségének 120%-a legyen. Jegyezzük fel a műszerek adatait minden mérési pontban. A szekunder feszültség értékének feljegyzése azért szükséges, hogy a vasvesztés meghatározhassuk.



5. ábra: Üresjárási mérés

A mérés végeztével a következő értékeket kell kiszámolni minden mérési pontban:

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

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

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

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

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

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

$$S = U_1 \cdot I_{01} \quad P_{\text{ü}} = U_1 \cdot I_{01} \cdot \cos \phi \quad P_{\text{vas}} = U_{i1} \cdot I_{01} \cdot \cos \phi \quad (9)$$

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

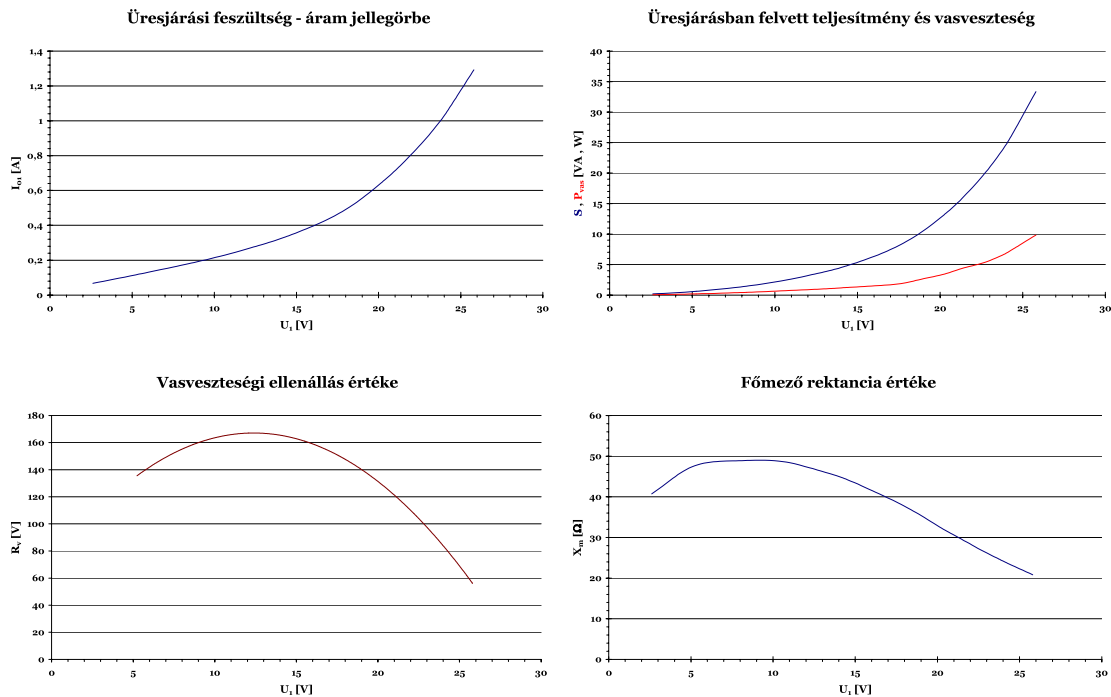
$$R_v = \frac{U_{i1}^2}{P_{\text{vas}}} \quad (10)$$

ahol R_v a **vasveszteségi ellenállás**.

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

X_m a **főmező reaktancia**.

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



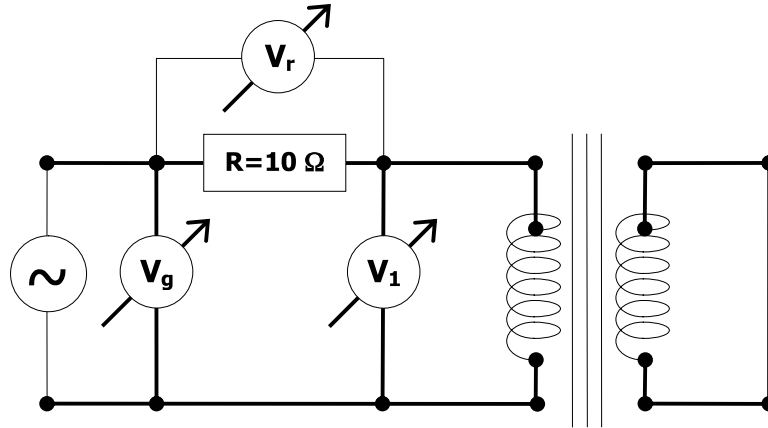
6. ábra: Üresjárási állapot jellemző görbéi

Rövidzárási mérés:

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

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

Állítsuk össze a rövidzárási mérést a 7. ábra alapján. Végezzük el a mérést a generátor feszültségének növelésével. Olvassuk le a primer áram és feszültség értékét minden mérési pontban. Ügyeljünk arra, hogy a primer áram ne haladja meg a **névleges** értéket. A mérést célszerű minél gyorsabban elvégezni, hogy a tekercsek hőmérséklete ne változzon jelentősen.



7. ábra: Rövidzárási mérés

A mérés végeztével számoljuk ki és ábrázoljuk a primer áram függvényében a következő értékeket:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ahol X_{s1} a primer tekercselés **szórási reaktanciája**, X'_{s2} a szekunder tekercselés primer oldalra redukált **szórási reaktanciája**. X_s pedig az eredő szórás.

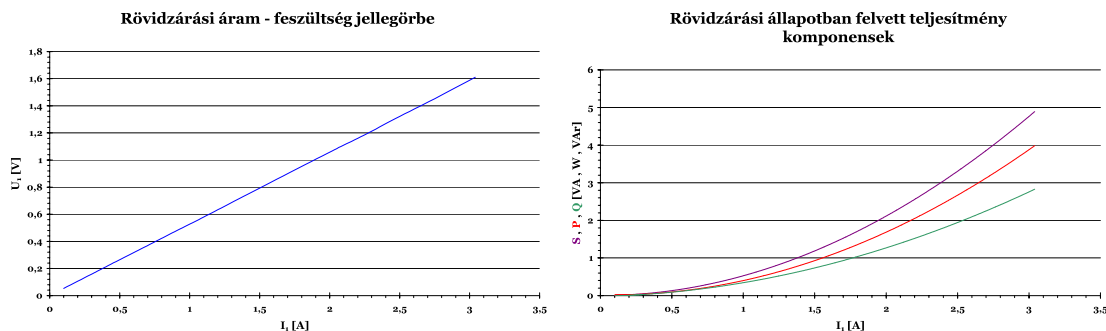
$$\varepsilon = \frac{U_{z1}}{U_{1n}} \cdot 100\% \quad (17)$$

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

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

Kiegészítő feladat:

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

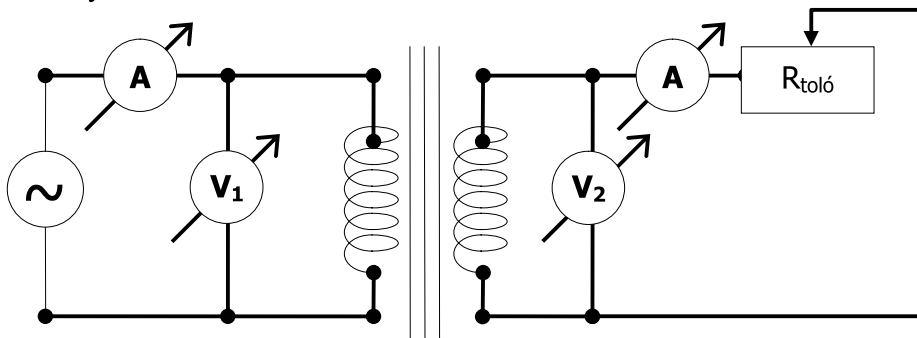


8. ábra: Rövidzárási állapot jellemző görbéi

Terhelési mérés:

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

Állítsuk össze a 9. ábrán látható kapcsolást. Végezzük el a mérést a terhelés fokozatos növelésével. A terhelést jelen esetben a tolóellenállás értékének csökkentésével tudjuk növelni. A primer *kapocsfeszültség* értékét válasszuk a transzformátor *névleges* értékére és ellenőrizzük a mérés során folyamatosan.

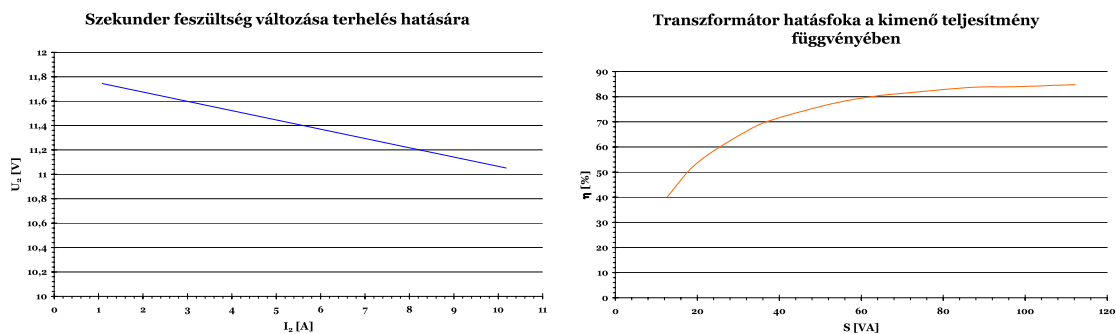


9. ábra: Terhelési mérés

A mérés végeztével ábrázoljuk az $U_2=f(I_2)$ összefüggést grafikonon. Határozzuk meg és ábrázoljuk a leadott teljesítmény függvényében a hatásfokot az alábbi képlet alapján ($\cos\varphi_2=1$ esetére):

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

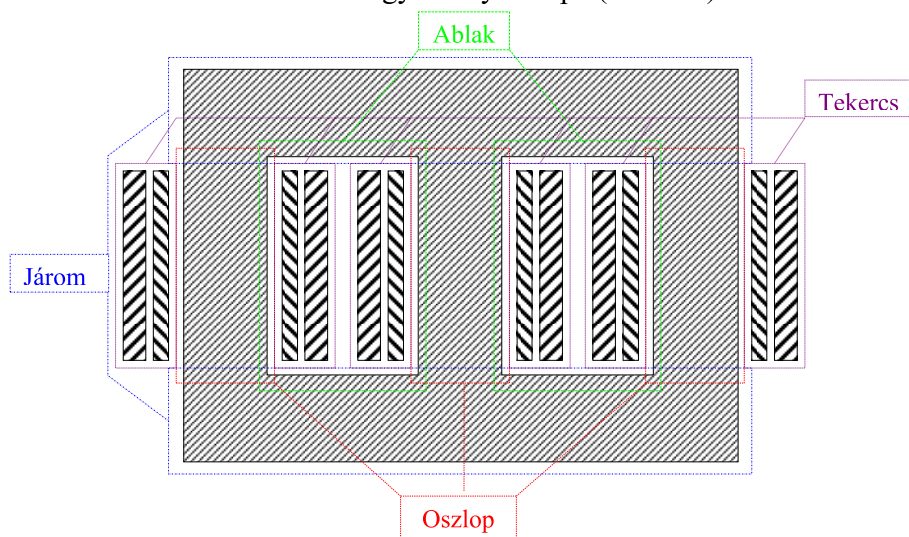
ahol U_2 a szekunder *kapocsfeszültség*, U_1 a primer *kapocsfeszültség*, I_2 a szekunder áram, I_1 pedig a primer áram. η pedig a hatásfok.



10. ábra: Terhelési állapot jellemző görbéi

5. A Háromfázisú transzformátor

Háromfázisú rendszerek energiaátviteli transzformátorainak felépítése levezethető három egy-fázisú transzformátor összevonásával. Az így keletkező rendszer középső oszlopának fluxusa a vektoriális összegzés miatt nulla, emiatt a középső oszlop az eszközből elhanyagolható. Így kialakul a háromfázisú transzformátor hagyományos képe (11. ábra).



11. ábra: Háromfázisú transzformátor metszete

Az elrendezésből eredően a középső oszlopon elhelyezkedő tekercseknek a **mágneses kör** rövidebb záródási útvonala miatt kisebb a gerjesztés-igényük. Szimmetrikus háromfázisú feszültséggel táplált transzformátor esetében tehát még **üresjárási állapotban** sem egyenlő a három fázisban folyó áramok effektív értéke.

A kiegyenlítetlenség a terhelés változásával tovább nőhet. Jó példák erre a lakossági áramszolgáltatás hálózati transzformátorai, ahol egy-egy fázis terhelése a lakossági igények szerint erősen különböző lehet. A fázisok terhelésének kiegyenlítésére különböző **kapcsolási csoportokat** szokás alkalmazni. Delta és zeg-zug kapcsolások alkalmazásával a fázisok kiegyenlítése növelhető.

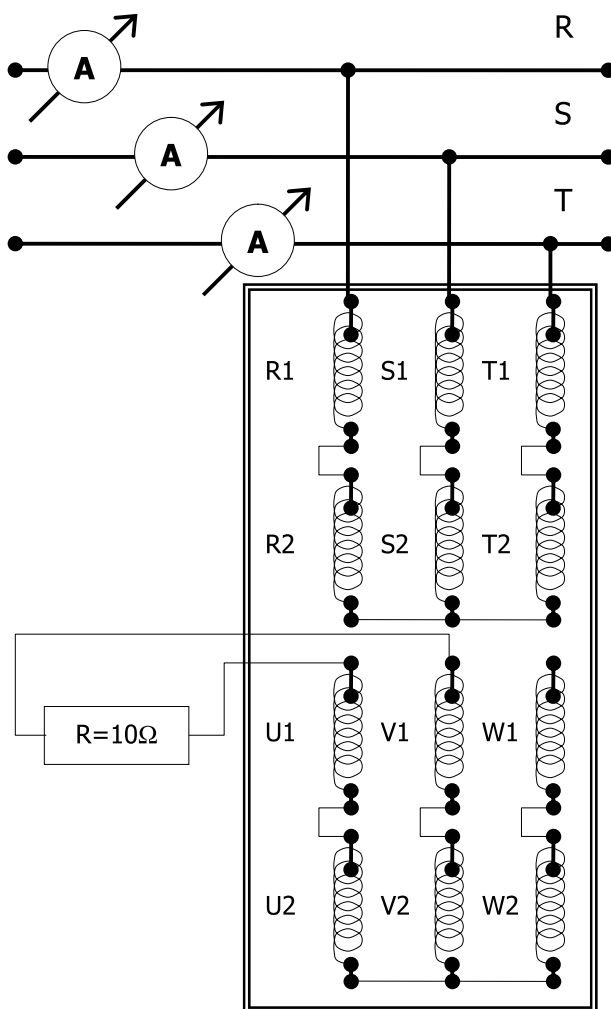
A **kapcsolási csoportok** jelölésénél három karaktert alkalmazunk, ebből kettő betű egy pedig szám. Az Y jelölés csillag kapcsolást jelent, a D deltát, míg a Z zeg-zug kapcsolást. A betűk mérete jelöli, hogy a transzformátor nagyobb vagy kisebb feszültségű oldalán helyezték el az adott kapcsolást. A jelölés végén található szám az **óraszám** a megfelelő primer és szekunder

feszültségek vektorai közötti fáziseltérést jelöli. A fáziseltérés 30° egész számú többszöröse lehet csak. Ha például a nagyfeszültségű tekercs feszültségfázora a képzeletbeli óralapon a 12 órára mutat, akkor a kisfeszültségű tekercs feszültségfázora valamelyik egész órára fog mutatni. Ezek alapján egy **Yz5**-ös transzformátor a nagyobb feszültségű oldalon, csillagba, kisebb feszültségű oldalon zég-zugba van kötve és a megfelelő fázis nagyobb és kisebb feszültsége közötti fázistolás mértéke 150° ($5 \times 30^\circ$).

Kiegyenlítettég vizsgálata:

Vizsgáljunk meg három kapcsolási csoportot a kiegyenlítettégük szempontjából. Kezdjük egy Yy0-ás transzformátorral, amely kapcsolási csoport igen érzékeny a kiegyenlítettlen terhelésre.

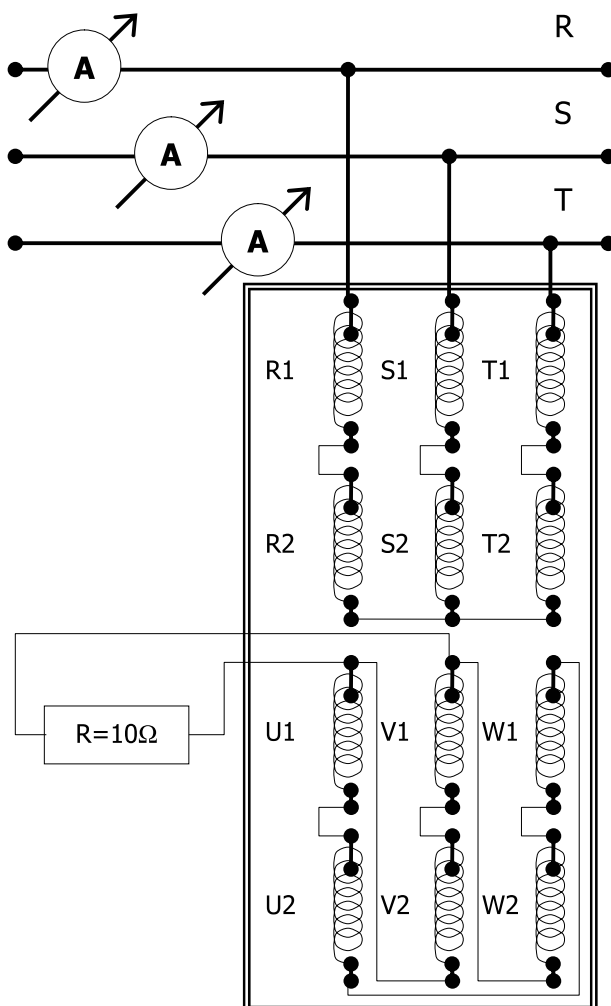
Állítsuk össze a kapcsolást a 12. ábra alapján. Jegyezzük fel az ampermérők értékét **üresjárási állapotban** és az ábrán feltüntetett terhelési állapotban is, amikor a szekunder oldal egyik vonalát terheljük. Ezzel egyúttal a csillagpont-eltolódást is mérni tudjuk.



12. ábra: Yy0 kapcsolási csoport

A következő vizsgált kapcsolási csoport legyen a Yd11-es transzformátor. Ez a kapcsolási csoport már kiegyenlített.

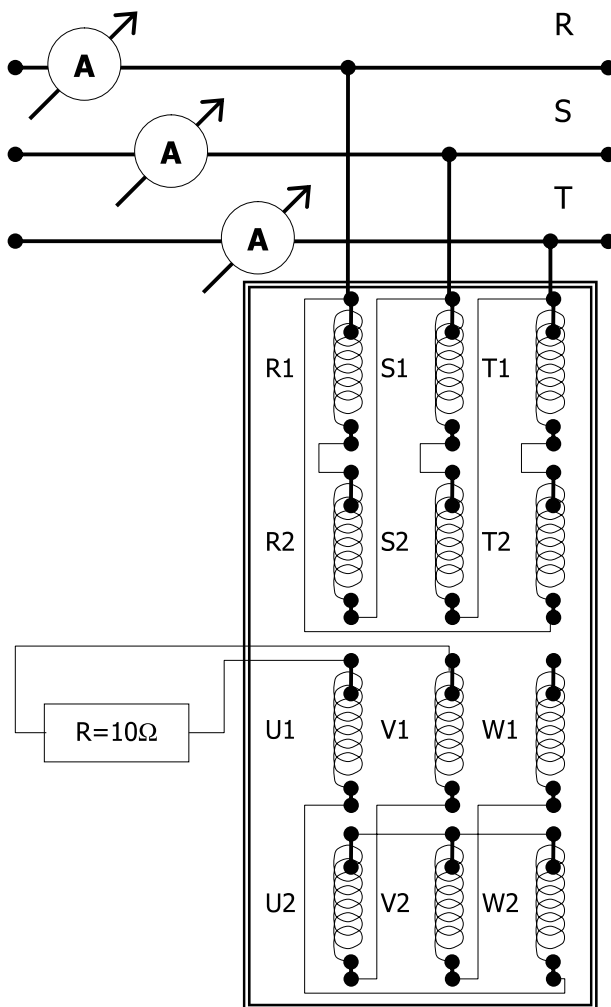
Állítsuk össze a kapcsolást a 13. ábra alapján. Jegyezzük fel az ampermérők értékét **üresjárási állapotban** és az ábrán feltüntetett terhelési állapotban is, amikor a szekunder oldal egyik vonalát terheljük.



13. ábra: Yd11 kapcsolási csoport

A következő vizsgált kapcsolási csoport legyen a Dz0-ás transzformátor. Ez a kapcsolási csoport már kiegyenlített.

Állítsuk össze a kapcsolást a 14. ábra alapján. Jegyezzük fel az ampermérők értékét **üresjárási állapotban** és az ábrán feltüntetett terhelési állapotban is, amikor a szekunder oldal egyik vonalát terheljük.



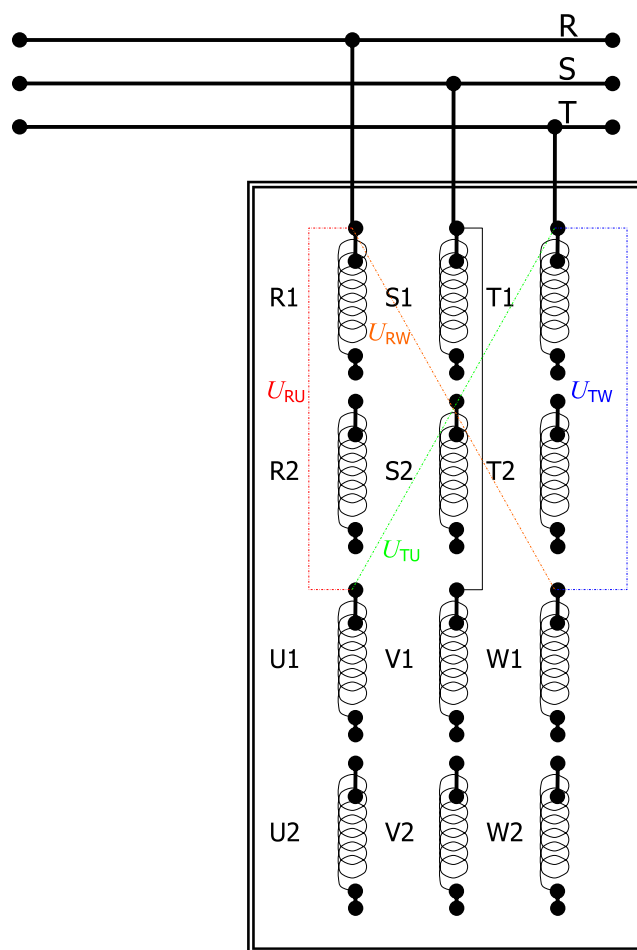
14. ábra: Dz0 kapcsolási csoport

A mérés végeztével hasonlítsuk össze az egyes kapcsolási csoportok fázisáramai közötti eltéréseket. Készítsünk táblázatot a fázisáram értékekről a középérték százalékában.

Kapcsolási csoport megállapítása:

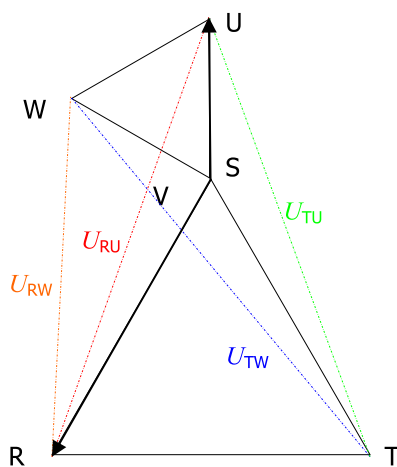
Ismeretlen háromfázisú transzformátor kapcsolási csoportja megállapítható a feszültségháromszögek mérésével. Miután a mérésvezető összeállított egy kapcsolási csoportot, határozzuk meg azt a 15. ábrán jelölt mérési pontok feszültségeinek megállapításával.

Kapcsolási csoport feszültség méréssel történő megállapításához az S-jelű primer és a V-jelű szekunder kábeleket összekötjük (folyamatos vonal a 15. ábrán) és a transzformátor primer oldalára háromfázisú feszültséget kapcsolunk. Voltmérővel mérjük a primer és szekunder vonali feszültségek mellett a pontvonallal jelölt feszültségeket is. Ezekből a feszültséglépték felvétele után a primer és szekunder oldal feszültségháromszögei felrajzolhatók.



15. ábra: Kapcsolási csoport megállapítása feszültségek mérésével

Elsőnek a primer oldal R-S-T háromszögét rajzoljuk fel. A szekunder oldal U-V-W háromszögének egyik pontja már ismert, mert S és V közös pontok. Az U pont az R pontból rajzolt URU sugarú körnek és a T pontból rajzolt UTU sugarú körnek a metszéspontjában van. A W pont az R pontból URW sugárral, a T pontból UTW sugárral rajzolt kör metszéspontjában van. Alábbi példánkban a szerkesztés menete követhető.



16. ábra: Kapcsolási csoport szerkesztése a mért feszültségekből. A példa egy 5 órás kapcsolást mutat

5. Felkészülést segítő kérdések

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

Készítette:
Horváth Dániel
Villamos Energetika Tanszék
2006



Mérési útmutató

A villamos forgógépek működési alapjainak vizsgálata

Az Elektrotechnika tárgy laboratóriumi gyakorlatok 4. sz. méréséhez

1. A mérési gyakorlat céljai:

az elektromechanikai energiaátalakítás elvének megismerése és tanulmányozása, a váltakozó áramú villamos gépek működésének alapjául szolgáló forgó elektromágneses tér előállítása, egyenáramú és aszinkron gépek alapvető jellemzőinek és karakterisztikáinak megismerése.

2. A mérés fontosabb eszközei:

a forgó mágneses tér méréséhez:

- háromfázisú váltakozó áramú tápforrás 3x17,3/10 és 3x40/23 V~ feszültség kimenettel
- 3 db vasmagos szolenoid tekercs (12 Ω, 35 mH)
- forgó nyíl
- forgó tárcsa

az egyenáramú gép méréséhez:

- FGE-ND egyenáramú forgógép mérőegységgel
- PC Labview mérő szoftverrel

az aszinkron gép méréséhez:

- FGV1-ND egyfázisú, rövidrezárt forgórészű motor mérőegységgel
- PC Labview mérő szoftverrel

3. Fogalomtár

Mezőtípusok: álló, lüktető, forgó, elliptikus mezők állíthatók elő álló tekercsrendszerrel. Villamos forgógépek esetén forgó mágneses mező létrehozására törekszünk.

Armatúra: A villamos gép azon része, amelyben állandósult állapotban a feszültség indukálódik.

Gerjesztés: Az egyenáramú gép működéséhez szükséges mágneses teret hozza létre. Hagyományosan egy egyenárammal táplált tekercs, kisebb gépeknél lehet állandómágnes is.

Belső feszültség: Egyenáramú gépeknél az **armatúrában** indukált feszültség. Állandósult állapotban kifejezhető a következő képlet segítségével:

$$U_b = k \cdot \Phi \cdot \omega \quad (1)$$

ahol k egy a gépre jellemző állandó Φ a **gerjesztés** által armatúratekercseléssel kapcsolódó fluxus, ω a forgórész szögsebessége.

Kapocsfeszültség: a villamos gép kapcsaira kötött feszültség.

Indítónyomaték: az álló forgórészre ható nyomaték, melynek hatására a forgórész indulásra képes, és felgyorsul egy adott állandósult fordulatszámig. .

Fordulatszám: A forgógép tengelyének fordulatszáma.

Szinkron fordulatszám: (általában) az állórész mágneses mezejének fordulatszáma,

$$n_0 = \frac{f_1}{p}$$

ahol n_0 a szinkron fordulatszám, f_1 a hálózat frekvenciája és p a póluspárszám..

Szlip: aszinkron gépek esetében a forgórész fordulatszáma és az állórész mágneses mezejének fordulatszáma közti különbség

$$s = \frac{n_s - n_t}{n_s}$$

ahol s a szlip, n_s a szinkron fordulatszám n_t pedig a tengely fordulatszáma.

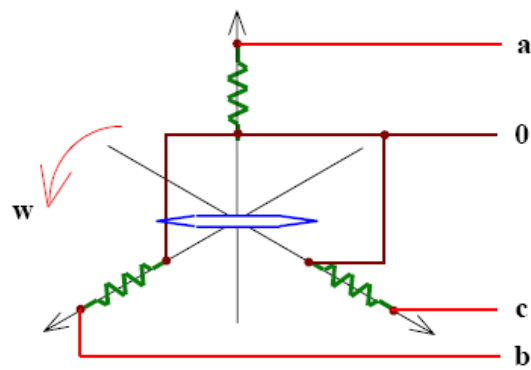
4. Forgó mágneses mező létrehozása álló tekercsrendszerrel

Elméleti áttekintés

Váltakozó árammal táplált tekercs lüktető mágneses teret hoz létre, aminek intenzitása és polaritása időben az áramnak megfelelően – időben szinuszosan – alakul. Ha térben egymáshoz képest 120° -ra elfordított 3 tekercset időben 120° -al – a periódus idő $1/3$ -ával – eltolt árammal táplálunk, akkor a térben és időben is eltolt 3 lüktető mező eredőjeként egy egyenletes szögsebességgel forgó mágneses teret – mágneses pólusrendszert – kapunk. Tetszőleges két tekercs táplálásának felcserélése – a fázissorrend változtatása – az eredő mező forgásirányának változásához vezet. Hasonló forgó mezőt kapunk, ha térben 90° -al elfordított 2 tekercset időben 90° -kal – a periódus idő $1/4$ -ével – eltolt árammal táplálunk. Ferromágneses anyagból készült lemezt mágneses térbe helyezve az igyekszik beállni a fluxusvonalak irányába. Ha a fluxusvonalak – a mágneses tér – iránya változik, a ferromágneses lemez követi ezt a változást, jelen esetben forgó mozgást végez. Amennyiben változó fluxus halad át vezető anyagból készült lemezen, abban – az indukció törvény értelmében – feszültség indukálódik és áram folyik (függetlenül attól, hogy a lemez ferromágneses vagy nem). Az áramút alakjáról ezt örvényáramnak nevezik. Lenz törvénye alapján az örvényáram által létrehozott fluxus az őt kiváltó ok, a fluxusváltozás hatását igyekszik csökkenteni. Ha egy alumínium tárcsát (Ferraris-tárcsa) forgó mágneses térbe helyezünk, az örvényáramok és a forgó mező kölcsönhatásának eredményeként a tárcsa forgásba jön – így mérsékelve az áram kialakulásának okát. Ha a tárcsa együtt forog a mezővel, akkor nem lenne a lemezben fluxusváltozás és nem lenne indukált feszültség sem. Viszont nyomaték sem alakulna ki, ami forgásban tartaná a tárcsát. Állandó mágneses térben forgó tárcsánál hasonló jelenséget tapasztalunk: a mozgó vezető metszi az álló mágneses tér erővonalait, benne feszültség indukálódik és a létrejövő örvényáramok a létrehozó okot – a forgást – igyekeznek megszüntetni, vagyis fékezik a mozgást, forgást.

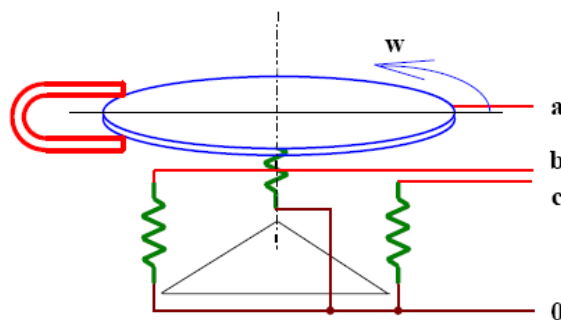
Feladatok

1. Állítsuk össze az 1. ábra szerinti tekercs-elrendezést és kapcsoljuk a 3 fázisú tápegységre. A kapott forgó mezőt ellenőrizzük a forgó nyíllal.
2. Irányváltó kapcsoló segítségével igazoljuk a fázissorrend és a forgásirány kapcsolatát.



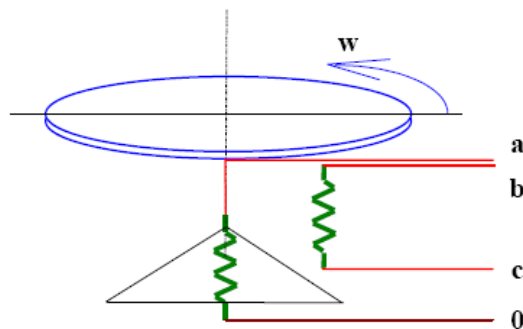
1. ábra: Forgó mező létrehozása

3. Állítsuk össze a 2. ábra szerinti tekercs-elrendezést és kapcsoljuk a 3 fázisú tápegységre. A kapott forgó mezőt ellenőrizzük a forgó tárcsával.



2. ábra: Ferraris-tárcsa forgó mezőben

4. Irányváltó kapcsoló segítségével igazoljuk a fázissorrend és a forgásirány kapcsolatát.
5. Vizsgáljuk meg az állandó mágnes fékező hatását.



3. ábra: Forgó mező létrehozása 2 fázisú táplálással

6. Állítsuk össze a 3. ábra szerinti 2 fázisú tekercs-elrendezést és tápláljuk 2 fázisú feszültségről. Az egyik tekercset az a-0, a másikat a b-c pontokról táplálva a két tekercs árama között 90° -os fázistolást biztosítunk. Mivel az egyik tekercset az a-0 fázis feszültségére, a másikat pedig a 3 - szoros b-c vonali feszültségre kapcsoltuk, az így létrejövő mező nem lesz szimmetrikus.

Szorgalmi feladat

Függőlegesen tartott műanyag csőbe ejtsünk be egy kis állandó mágnes (a másik végénél kézbe érkezzon, mert az anyaga rideg, könnyen szét törhet). Ismételjük meg a kísérletet a közel azonos méretű alumínium csővel is. Magyarázzuk meg a tapasztalt különbséget.

5. Az egyenáramú gép

A vizsgált gép állandómágneses gerjesztésű, tehát a gerjesztés változtatására nincs lehetőség. A gép tengelykapcsolatban áll egy örvényáramú fékkel (terhelés), amelyre egy fordulatszám-mérőt is elhelyeztünk.

Alapegyenletek:

Az egyenáramú gépek viselkedését könnyen átláthatjuk alapegyenleteik áttekintésével. Jól megépített egyenáramú gépek U_b belső feszültsége és nyomatéka egyenesen arányos az ω szögsebességgel és az I árammal:

$$U_b = k \cdot \Phi_a \cdot \omega \quad (2)$$

$$M = k \cdot \Phi_a \cdot I_a \quad (3)$$

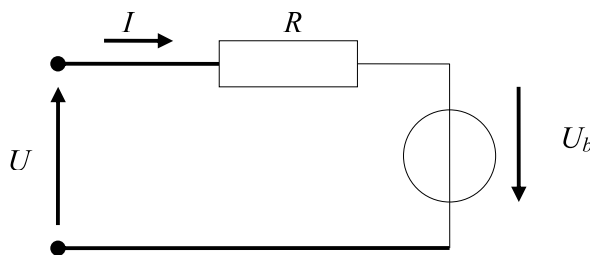
ahol k a gépre jellemző állandó és Φ_a az állórész által létrehozott fluxus. Φ_a értéke a vizsgált gép esetében állandónak tekinthető, mivel az állórészen elhelyezett mágnesek állandó gerjesztést biztosítanak.

A belső feszültség értéke a kapocsfeszültségtől eltérő. U_b az indukált feszültség, amelyet az állórész fluxusa hoz létre a forgórész tekercseiben, míg az U kapocsfeszültség értékét kívülről - a kommutátoron keresztül - kényszerítjük a gépre. A két mennyiség közti összefüggés motoros üzemi állapotban:

$$U_k = U_b + R_a \cdot I_a \quad (4)$$

ahol R_a az armatúra-ellenállás, amely a forgórész tekercseinek, az esetleges soros gerjesztőtekercsek és a segédpólusok tekercseinek, valamint a kefeátmeneti ellenállás eredője (összege). Állandó mágneses gépek esetén nincs gerjesztőtekercs és segédpólus tekercs.

Az összefüggés szemléltethető az egyenáramú gép helyettesítő képének megrajzolásával is:



4. ábra: Egyenáramú gép helyettesítő kapcsolása

Az (1) (2) és (3) egyenlet felhasználásával kifejezhető az egyenáramú motor mechanikai szögsebesség a terhelőnyomaték függvényében:

$$\omega = \frac{U_k - R_a \cdot I_a}{k \cdot \Phi_a} = \frac{U_k}{k \cdot \Phi_a} - \frac{R_a \cdot M}{(k \cdot \Phi_a)^2} \quad (5)$$

ahol U_k a kapocsfeszültség, R_a az armatúraellenállás, I_a az armatúraáram és Φ_a az armatúrafluxus.

Indítás, forgásirány váltás

Megfigyelhető a (4) egyenletben, hogy a fordulatszám a feszültségtől lineárisan függ. A kapocsfeszültség változtatásával a fordulatszám arányosan nőni vagy csökkenni fog. A forgásirány megváltoztatható a feszültség vagy a fluxus előjelének megváltoztatásával. Mivel a vizsgált gép állandómágneses gerjesztésű, ezért itt a fluxus előjelét (irányát) nem tudjuk megváltoztatni, a gép forgásirányát a kapocsfeszültség előjelének megváltoztatásával tudjuk megoldani. Hagyományos gerjesztőtekercses gépek esetében a forgásirány megváltoztatható a gerjesztő áram irányának megváltoztatásával is.

Az egyenáramú gépek álló állapotból indíthatók. Az indítónyomaték feltétele a gerjesztés (jelen esetben ezt az állandómágnese adják) és az armatúraáram megléte, mint ahogy az a (3) összefüggésből látszik.

Állandó kapocsfeszültség és gerjesztés esetén az egyenáramú gép fordulatszáma a terhelés hatására csökken. Mint ahogy az (5) összefüggésben megfigyelhető, adott M terhelőnyomaték hatására az üresjárási értékhez képest csökken a fordulatszám. (A csökkenés mértéke az armatúra ellenállásával arányos és a gépállandó négyzetével fordítottan arányos.)

Korábban említettük, hogy állandó gerjesztés mellett az egyenáramú gép fordulatszáma a kapocsfeszültséggel lineárisan arányos, annak értékével könnyen szabályozható. Ezen tulajdonsága rendkívül előnyössé tette, a bonyolult és érzékeny konstrukció ellenére is, mivel megvalósítható volt vele sok, fordulatszám szabályozást igénylő feladat (gondoljunk például a villamosokra és a trolibuszokra).

Egyenáramú gép mérése:

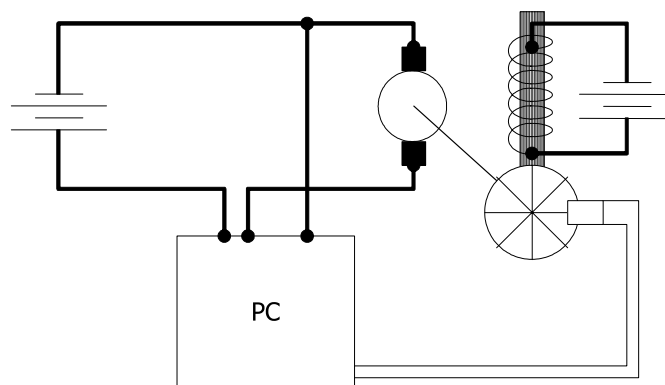
Az egyenáramú gép viselkedésének megismeréséhez a következő méréseket végezzük el:

- Üresjárási mérés a feszültség változtatásával
- Terhelési mérés állandó feszültségen

A méréseket egy számítógépes adatgyűjtő egység segítségével végezzük el, amellyel az egyenáramú gép kapocsfeszültségét, armatúraáramát és fordulatszámát mérjük. A mérések során rögzített adatokat a LabView szoftverrel értékeljük ki és jelenítjük meg.

Üresjárási fordulatszám-feszültség jelleggörbe:

Állítsa össze a mérést a következő kapcsolási rajz alapján:



Kapcsoljon feszültséget a gép kapcsaira. A számítógép monitorán megfigyelhető a kapocsfeszültség, az armatúraáram és a fordulatszám értéke. Változtassa meg a forgásirányt a kapocsfeszültség segítségével. Tetszőleges forgásirány mellett vegye fel a fordulatszám-kapocsfeszültség jelleggörbét a feszültség egyenletes növelésével.

Fordulatszám-armatúraáram jelleggörbe:

Mivel a mérőállomás nem képes közvetlenül a terhelőnyomaték mérésére, ezért a nyomatékkal közvetlenül arányos mennyiséget mérünk: a gép armatúraáramát. Állítsunk be egy fix feszültséget az egyenáramú gép kapcsaira, és a mérés során időről-időre győződjünk meg annak állandóságáról. Szükség esetén korrigáljuk.

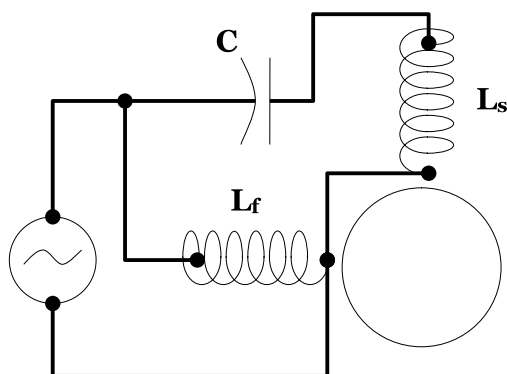
Az örvényáramú fék áramát növelve a gép terhelőnyomatéka nő. Mivel az örvényáramú fék terhelőnyomatéka függ a féktárcsa fordulatszámától is, ezért célszerű minél magasabb fordulatszámról indítani a mérést.

Vegye fel a terhelési jelleggörbét a terhelés egyenletes növelésével.

6. Egyfázisú aszinkron gép kondenzátoros segédfázissal

Áttekintés

Váltakozóáramú gépeknél a forgó mozgást minden esetben forgó mágneses mező hozza létre. Egyfázisú feszültségforrás által egy tekercsrendszerben csak lüktető mágneses mező hozható létre, ezért szükség van a tekercsrendszer egyik elemében folyó áram fázisszögének megváltoztatására. Így létrehozható egy közel körforgó mágneses mező. A vizsgált gépben ezt az alábbi úton oldották meg:



A segédfázis (L_s) áramának fázisszögét az ábrán látható kondenzátor módosítja (megközelítően 90° -kal eltolja) a főfázis áramához képest, létrehozva a forgómezőhöz szükséges fázistolást.

A létrejövő forgómező a forgórészen elhelyezett rövidrezárt kalickában feszültséget indukál, aminek hatására áramok indulnak meg a forgórészen. Az állórész és forgórész áramai által létrehozott mágneses terek kölcsönhatásának következtében forgatónyomaték keletkezik, ami a forgórészt felgyorsítja.

A forgás irányát a fázissorrend határozza meg. A forgásirány-váltáshoz a fő- és segédfázistekercsek áramainak fázissorrendjét kell megváltoztatni. Ez a vizsgált egyfázisú gép esetében annyit jelent, hogy a gép fő- és segédfázisa által létrehozott fluxus időbeli követési sorrendjét kell megváltoztatnunk egymáshoz képest. Legkönnyebben ez úgy oldható meg, ha valamelyik fázis tekercseinek kapcsait fordítva kötjük be.

Váltakozóáramú gépek fordulatszámát a gerjesztő feszültségnek nem a nagysága, hanem a frekvenciája szabja meg. Aszinkron gépek esetében a forgórészben folyó áramok fenntartásához szükséges, hogy fennmaradjon a forgórészben indukált feszültség. Emiatt az aszinkron gép fordulatszáma soha nem érheti el az úgynevezett szinkron fordulatszámot, az állórész mágneses mezejének fordulatszámát, mivel együttforgás esetén nincs erővonalmetszés és így nincs indukált feszültség sem. A forgórész és az állórész mágneses mezejének fordulatszáma közti különbséget nevezik szlipnek:

$$s = \frac{n_s - n_t}{n_s} \quad (6)$$

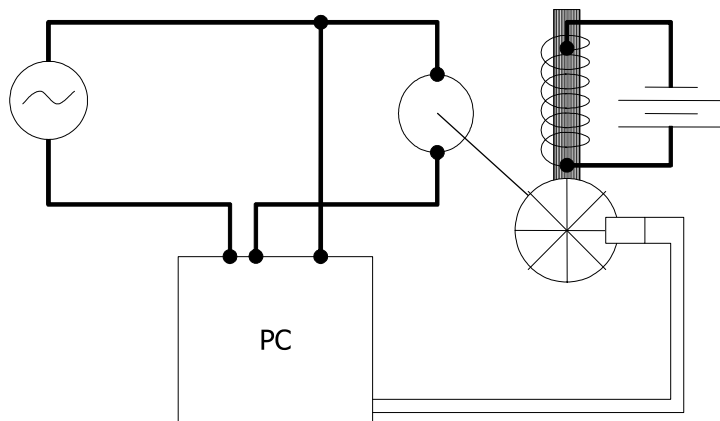
ahol s a szlip, n_s a szinkron fordulatszám n_t pedig a tengely fordulatszáma.

A szlip relatív mérőszám. Azt fejezi ki, hogy a tengely fordulatszáma hány százalékban késik (vagy siet) a szinkron fordulatszámhoz képest. Minél nagyobb a szlip, egységnyi idő alatt annál több erővonalmetszés történik a forgórészen, tehát annál nagyobb a forgórészáram és a leadott teljesítmény a gép üzemszerű működési tartományában.

A mérés során megfigyelhető lesz, hogy a szlip a leadott teljesítmény függvényében változik, ami azt jelenti, hogy a tengely fordulatszáma is változik, bár a változás csak igen kis mértékű.

Terhelési jelleggörbe:

Állítsuk össze a mérést az alábbi ábra alapján:



Kössük a gépet a villamos hálózatra. A számítógép képernyőjén megfigyelhető a kapocsfeszültség és az állórészáram effektív értéke, a látszólagos és a hatásos teljesítmény, valamint a

$\cos\phi$ és a szlip értéke. Az egyenáramú tápegység feszültségének növelésével a gép terhelése nő. Ábrázoljuk a terhelési jelleggörbét a szlip függvényében.

Figyeljünk meg továbbá, hogy a felvett hatásos teljesítmény növelésével a $\cos\phi$ értéke miképp változik.

7. Felkészülést segítő kérdések

1. Milyen feltételek mellett alakul ki forgó mágneses mező?
2. Mi az örvényáram?
3. Írja fel az egyenáramú motor alapegyenleteit!
4. Hogyan fordítható meg egy egyenáramú gép forgásiránya?
5. Mi az összefüggés az egyenáram gép kapocsfeszültsége és fordulatszáma között?
6. Hogyan függ a fordulatszám a terhelőnyomatéktól? Mik a kapcsolódó paraméterek?
7. Mi az aszinkron gépek működési elve?
8. Mit nevezünk szlipnek?
9. Hogyan hozható létre forgómező egyfázisú táplálás esetén?
10. Foroghat-e egy aszinkron gép szinkron fordulatszámon? Miért?

Készítette:

Dr. Kádár István és Horváth Dániel

Villamos Energetika Tanszék

2006



Mérési útmutató

Nemhagyományos villamos energiaátalakítók

Az Elektrotechnika tárgy laboratóriumi gyakorlatok 5. sz. méréséhez

1. A mérés célja

A napelem és az üzemanyagcella működésének megismerése, főbb elektromos karakterisztikáinak felvétele

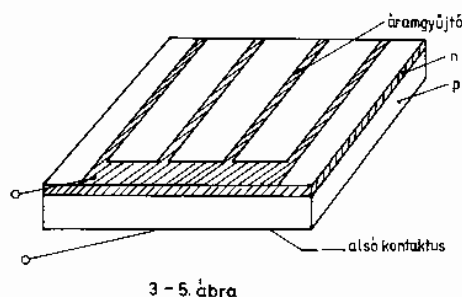
2. Elméleti háttér

2.1. A napelem működése

A fényvillamos energiaátalakítók a fénysugárzást alkotó fotonok energiáját alakítják át közvetlenül villamos energiává (napelemek), ill. a villamos energiát alakítják át közvetlenül fényenergiává (pl. fotódiódák).

Az időben állandó feszültség (melyet a továbbiakban fotofeszültségnek fogunk nevezni) annak következtében jön létre, hogy a beeső fotonok többlet töltéshordozókat keltenek. E töltéshordozók a kristályban kialakult belső lokális villamos tér hatására elmozdulnak, ill. felhalmozódnak, így az anyagban tértöltés, ennek hatására pedig fotofeszültség keletkezik. A fényvillamos generátorok gyakorlati alkalmazása felé vezető úton meghatározó jelentőségű volt a fényvillamos jelenség felfedezése p-n átmenetekben.

A félvezető technika ugrásszerű fejlődése az ötvenes évek fordulóján indult meg. A jelenleg gyártott fényvillamos generátorok hatásfoka 10-15% körüli, teljesítményük pedig néhányszor 10 kW értéket is elérhet. A fényvillamos generátor felépítésbeli jellegzetességei az 1. ábrán láthatók.



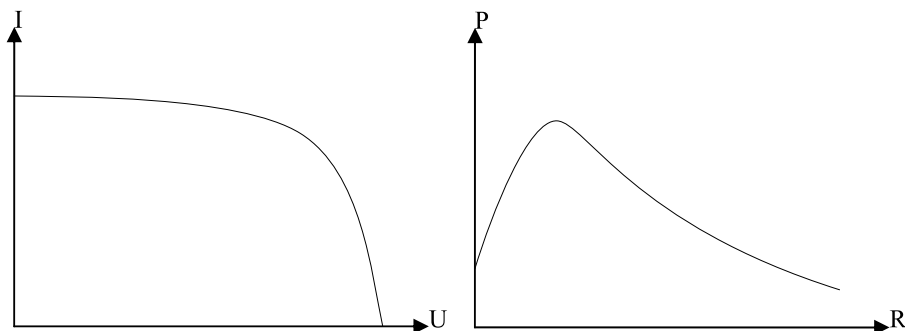
1. ábra: Fényvillamos generátor felépítése

A fényvillamos generátorok már ma is versenyképesek számos más, relatíve kis teljesítményű energiaforrással. A szakemberek megítélése szerint a fényvillamos generátorok üzemeltetési költsége kisebb lesz a diesel-vagy benzin agregátorokénál, melyek a távolfekvő települések energiaforrása napjainkban. Emellett számos más lehetőség is kínálkozik gazdaságos felhasználásukra, így például a vízszivattyúzás, az öntözés, a falvak villamosítása elsősorban a fejlődő országokban.

A napelem U - I karakterisztikája

A napelem árama és feszültsége, valamint leadott teljesítménye a terhelés függvényében változik (2. ábra), ezért felhasználása során fontos a terhelés optimális megválasztása. A maximális teljesítmény akkor vehető ki, ha a terhelő ellenállás értéke megegyezik a napelem belső ellenállásával.

A napelem árama, feszültsége, belső ellenállása, és így a kivehető teljesítmény is nagymértékben függ a megvilágítási intenzitástól. A naperőművekben a napelemek optimális kihasználása érdekében a napelemeket folyamatosan optimális szögbe forgatják és teljesítmény optimalizáló elektronikát alkalmaznak.

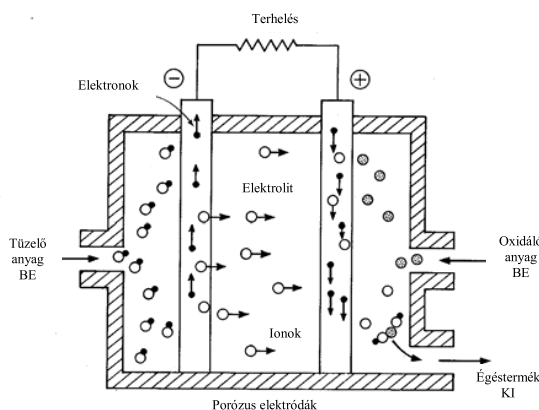


2. ábra: A napelemre jellemző $I(U)$ és $P(R)$ karakterisztika

2.2. Az üzemanyagcella működése

Egy robbanómotor hengerében az égő anyagot, pl. a hidrogént és az égést tápláló anyagot: az oxigént közvetlen módon összekeverjük és ennek következményeképpen az égő anyag elektronjai közvetlenül mennek át az oxigén atomokhoz, ill. molekulákhoz. A keletkező nagysebességű molekulák rendezetlen mozgásából, ill. impulzusából fedezi a motor dugattyúja a lineáris mozgást. Az egész rendszer átalakítási hatásfokát az a termodinamikai elv szabja meg, amelynél a rendszer kezdő és végállapotának rendezetlenségi foka legkedvezőbb esetben azonos maradhat, de általában nő (Carnot-hatásfok).

Mi történik a tüzelőanyag elemében? A 3. ábrának megfelelően olyan elrendezést alakítunk ki, amelynél az égő anyag és az oxidáló anyag molekuláit nem engedjük keveredni. A katalizátort tartalmazó anódnak olyan tulajdonsága van, hogy a hidrogén molekulákról, illetve atomokról az elektronokat leválasztva, azokat egy külső, fémes villamosan vezető körbe tereli, a hidrogén ionokat pedig az elektrolitba juttatja. Az elektronok a külső villamos ellenálláson át eljutnak a katód oldalra, ahol az ott képződő oxigén ionok elektron hiányát betöltik és az elektroliton át eljuttatott hidrogén ionokat igénybe véve, neutrális vízmolekulákat képeznek.



3. ábra: Tüzelőanyag elem vázlatos felépítése és működése

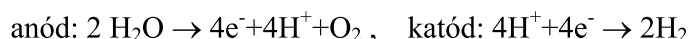
Amíg a termodinamikai égetésnél a hidrogén égési hőjének alig 25-30%-át nyerhetjük ki mechanikai munkaként, addig a tüzelőanyag elemében a hidrogén kémiai energiájának 80%-át is megkaphatjuk villamos energia formájában. Láthatjuk, hogy a hidrogén két fajta égetési módszere között hatások szempontjából alapvető különbség van.

Igen sokféle tüzelőanyag elemet valósítottak meg, mely tényből nyilvánvaló az is, hogy egyik típusnak sincsenek elsőprő műszaki vagy gazdasági előnyei a másik felett.

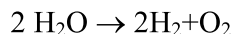
A mérésben hidrogéngáz üzemanyagú, környezeti hőfokon működő, protoncserélő membránnal készült (ún. PEM) üzemanyagcellát használunk.

Az elektrolízis és az üzemanyagcella hatásfoka

Az elektrolízis folyamán az anódon és a katódon a következő folyamat játszódik le:



azaz együttesen:



Az üzemanyagcellában az égés folyamán ellentétes reakció játszódik le.

Az elektrolízis hatásfoka az elektromos és a kémiai energiák hányadosa:

$$\eta = W_{\text{H}_2} / W_{\text{el}}$$

ahol

$$W_{\text{H}_2} = n \cdot H_0, \quad n = p \cdot V / R \cdot T$$

ahol H_0 a hidrogén kalorikus tartalma (266,1 kJ/mol), $R=8,31$ J/(mol K), és

$$W_{\text{el}} = U \cdot I \cdot t$$

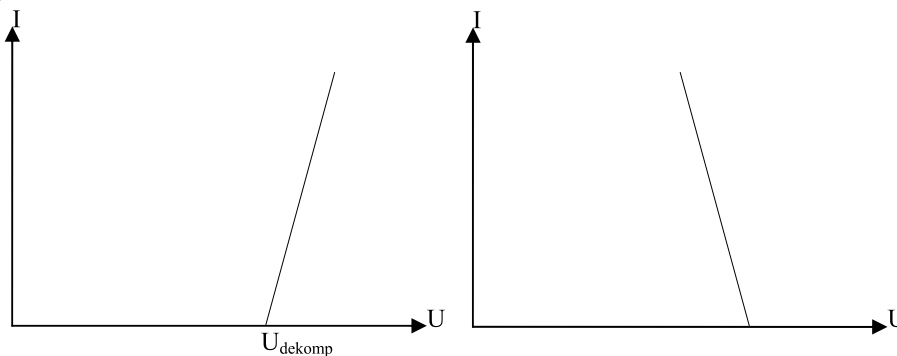
azaz a hatásfok:

$$\eta = H_0 \cdot p \cdot V / R \cdot T \cdot U \cdot I \cdot t$$

Az elektrolízis és az üzemanyagcella U-I karakterisztikája

Az elektrolízis akkor indul meg, amikor az elektródák között az ún. dekompozíciós feszültség megjelenik (4. ábra). A dekompozíciós feszültség hőmérsékletfüggő, értéke 1.2-1.6 V körüli szobahőmérsékleten.

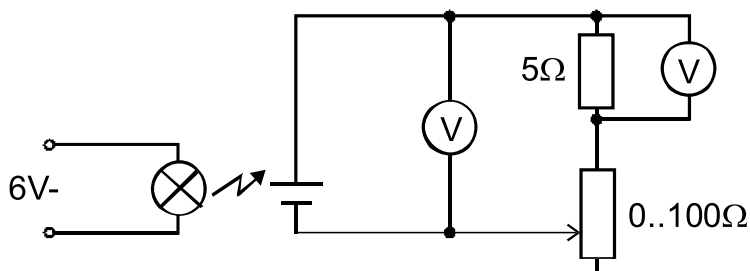
Az üzemanyagcella U-I karakterisztikája az üresjárás környékétől eltekintve lineáris (4. ábra). Ha a mérés során a karakterisztika nem lineáris, az a hidrogén- v. oxigéngáz nem megfelelő mennyiségére utal.



4. ábra: Az elektrolízis és az üzemanyagcella $I(U)$ karakterisztikája

3. A mérés ismertetése

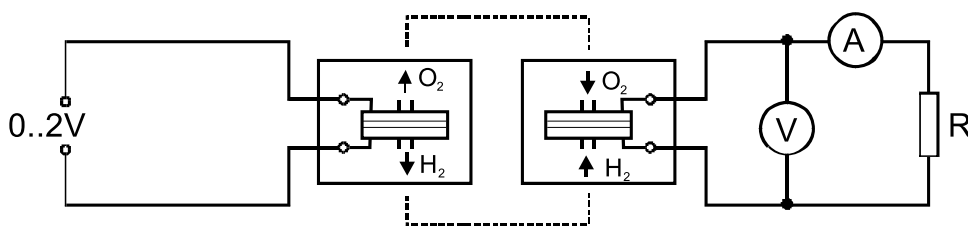
3.1. Napelem mérés kapcsolási rajza



A világítótestet kb. 2 cm-re helyezzük el a napelemtől.

Az áramkörben folyó áramot az 5Ω -os ellenálláson feszültségmérővel mérjük ($I=U/R$). A két mért feszültséget a számítógépes adatgyűjtő Analog1 és Analog2 (U_1 és U_2) bemenetére kötjük.

3.2. Üzemanyagcella mérés kapcsolási rajza



Az üzemanyagcella működéséhez szükséges gázokat elektrolízissel állítjuk elő és gumicsövekkel vezetjük az üzemanyagcellába.

Felhasznált fontosabb műszerek:

- Számítógépes adatgyűjtő rendszer (COBRA)
- Kézi multiméter

4. Elvégzendő mérések

4.1. Napelem U-I és P-R karakterisztikája

Mérje meg a napelem U-I karakterisztikáját!

Megjegyzés:

Az Analog1 jel mérési tartománya legyen 10V, az Analog2-é 0.1V, a mintavétel 200ms. Indítsa el a mérést (Start measurement). Csökkentse a potenciométer ellenállását minimálisra. Az izzó feszültségét annyira állítsa, hogy az Analog2 jel ne csorduljon túl (kb. 4V, 1.4 A). A túlsordulást a mérő szoftver pirosan jelzi.

Indítsa el a mérést és folyamatosan növelje a potenciométer ellenállását kb. 1 perc hosszan.

A mérés végeztével az Analysis/Channel Modification menüben számítsa át a mért feszültséget árammá ($I:=U_2/5$). A Measurement/Channel Manager menüben állítsa be a grafikon x tengelyének a mért feszültséget és y tengelyének a mért áramot.

Számítsa ki a napelem $P(R)$ karakterisztikáját!

Megjegyzés:

Az Analysis/Channel Modification menüben szorozza össze az U és I értékeket ($P:=U*I$), ezáltal megkapja P -t. Ugyanebben a menüben ossza el U és I értékét ($R:=U/I$), ezáltal megkapja R -t. Rajzoltassa ki a kapott görbét.

Értékelés:

Mekkora feszültséghez és áramhoz tartozik a maximális teljesítmény?

Van-e lényeges eltérés a mért és az elméleti görbék jellege között?

4.2. Üzemanyagcella U - I karakterisztikája

Vegye fel az üzemanyagcella U - I karakterisztikáját!

Megjegyzés:

1. A gumicsöveket az elektrolizáló egység felső kivezetéséhez kösse, másik végüket tegye egy desztillált vízzel félig töltött edénybe. A tartályokat töltsen tele desztillált vízzel. A töltés alatt emelje fel a gumicsöveket, hogy azokba is kerüljön egy kis víz. Zárja le a tartályokat.
2. Kapcsoljon 2A-t az elektrolizáló egységre. Amikor a gumicsövekből kifolyt a víz, a végüket nyomja össze és csatlakoztassa az üzemanyagcella felső kivezetéseihez. Vigyázzon, hogy a csőben ne maradjon víz, mert az elzárhatja a gáz útját.
3. Néhány percre üresjárásban hagyja, hogy megfelelő mennyiségű gáz keletkezzen. Mérje meg az áramot és a feszültséget. Az árammérő 10A-es tartományát használja.
4. Különböző ellenállásokkal (0,5-20 Ω) mérje meg az áramot és a feszültséget. A méréseket néhány percre végezze, hogy az üzemanyagcella stabil állapotba kerüljön. Az üzemanyagcellát rövidre zárni tilos!
5. Ábrázolja az U - I értékeket.

Értékelés:

Mekkora az üzemanyagcella üresjárási feszültsége?

Van-e lényeges eltérés a mért és az elméleti görbe jellege között?

Mekkora terhelő ellenállás kell a maximális teljesítmény kivételéhez?

4.3. Az elektrolízis U - I karakterisztikája

Vegye fel az elektrolízis U - I karakterisztikáját!

Megjegyzés:

1. Kapcsolja ki a tápegységet, kösse be az áram- és voltmérőt.
2. Az üzemanyagcelláról húzza le a gumicsövet.
3. A tápegységen állítson be 2 V tápfeszültséget és 2 A áramkorlátot. Kb. 1 perc után az elektrolízis folyamat stabilá válik.
4. Csökkentse a feszültséget és várjon kb. fél percre, hogy az elektrolízis folyamat stabilizálódjon. Folyamatosan csökkentve a feszültséget vegyen fel 6-8 értéket.
5. Ábrázolja az U - I értékeket.

Értékelés:

Mekkora az elektrolízis dekompozíciós feszültsége?

Van-e lényeges eltérés a mért és az elméleti görbe jellege között?

4.4. Kiegészítő mérések

A napelem U - I és P karakterisztikája kisebb lámpa intenzitással (különböző távolságokon)

5. Felkészülést segítő kérdések

Mi a napelem működési elve?

Ismertesse a napelem szerkezeti felépítését!

Mi az üzemanyagcella működési elve?

Ismertesse az üzemanyagcella szerkezeti felépítését!

Mi a különbség az üzemanyagcella és a robbanómotor működése között?

Hogyan számítható egy elektrolízis ill. üzemanyagcella egység hatásfoka?

Mit nevezünk az elektrolízis dekompozíciós feszültségének?

Hogyan méri meg egy áramforrás U-I karakterisztikáját?

Mekkora terhelő ellenállásnál lesz egy áramforrás leadott teljesítménye maximális?

Hogyan mérhető egy áramforrás belső ellenállása?

6. Gondolkodtató kérdések

Mitől függ egy napelem hatásfoka?

Hogyan növelhető egy napelem hatásfoka?

Működik-e a napelem „visszafelé” (azaz képes-e feszültség hatására fényt kibocsátani)?

Milyen mérési bizonytalanságokat lát az üzemanyagcella jelleggörgejének mérésénél?

Miért nincs még üzemanyagcellás repülőgép?

Készítette:

Dr. Farkas László

Villamos Energetika Tanszék

2004