

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.

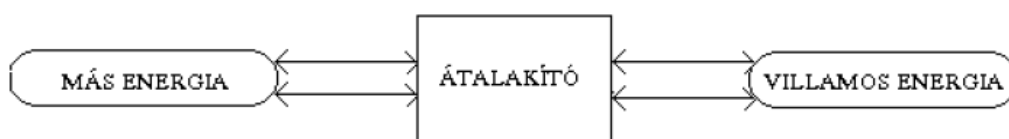
További előny, hogy három a legkisebb olyan fázisszám, ahol a fázisonkénti teljesítmények összege (pillanatértékben is) időben állandó. (Ezt az értéket röviden háromfázisú teljesítménynek hívjuk)

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

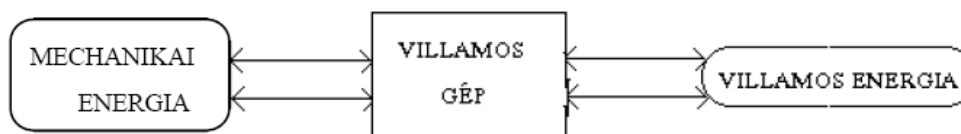
A2) A villamos energia-átalakítás általános elvei és törvényei

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.

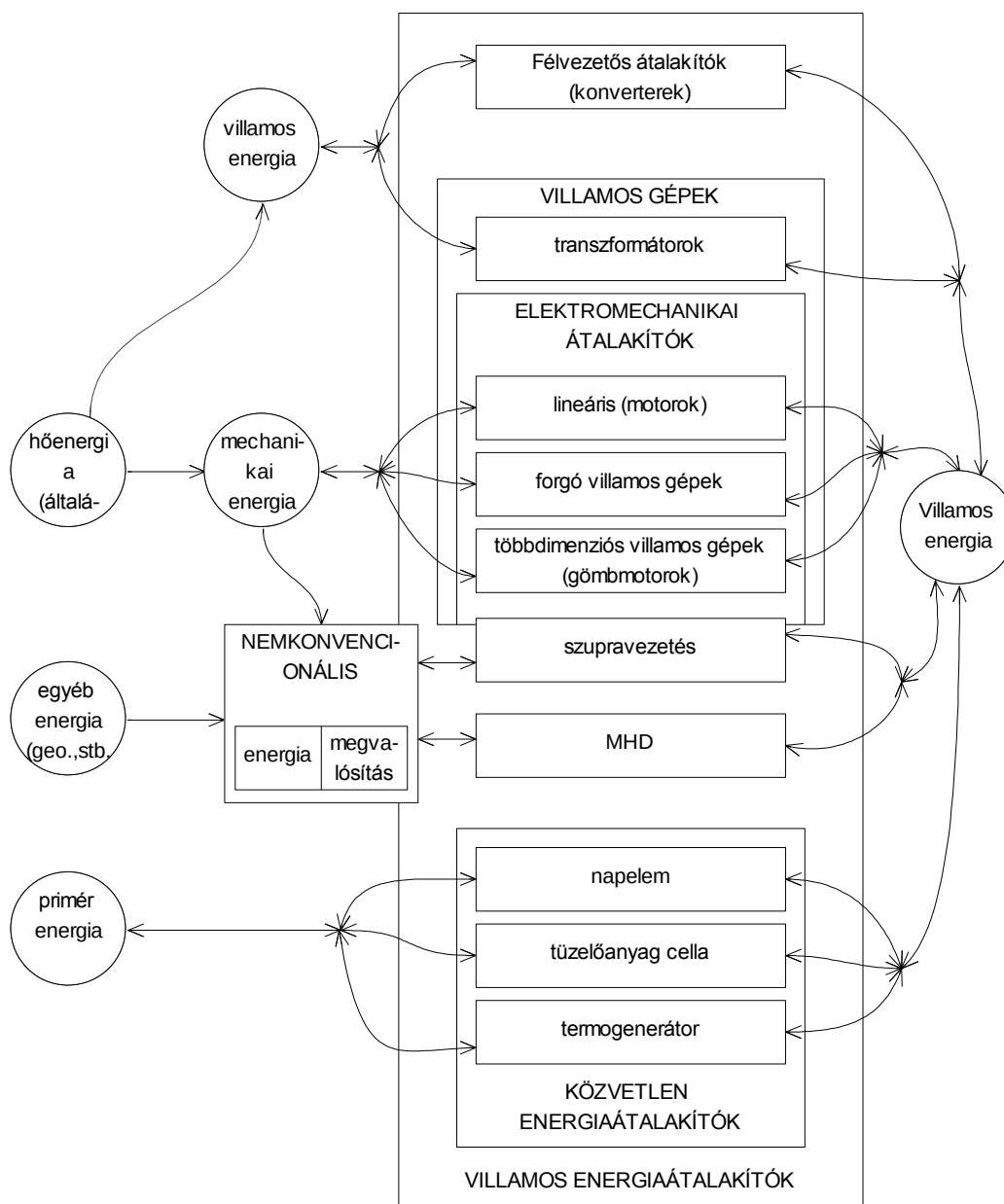
2. TÖRVÉNY

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.

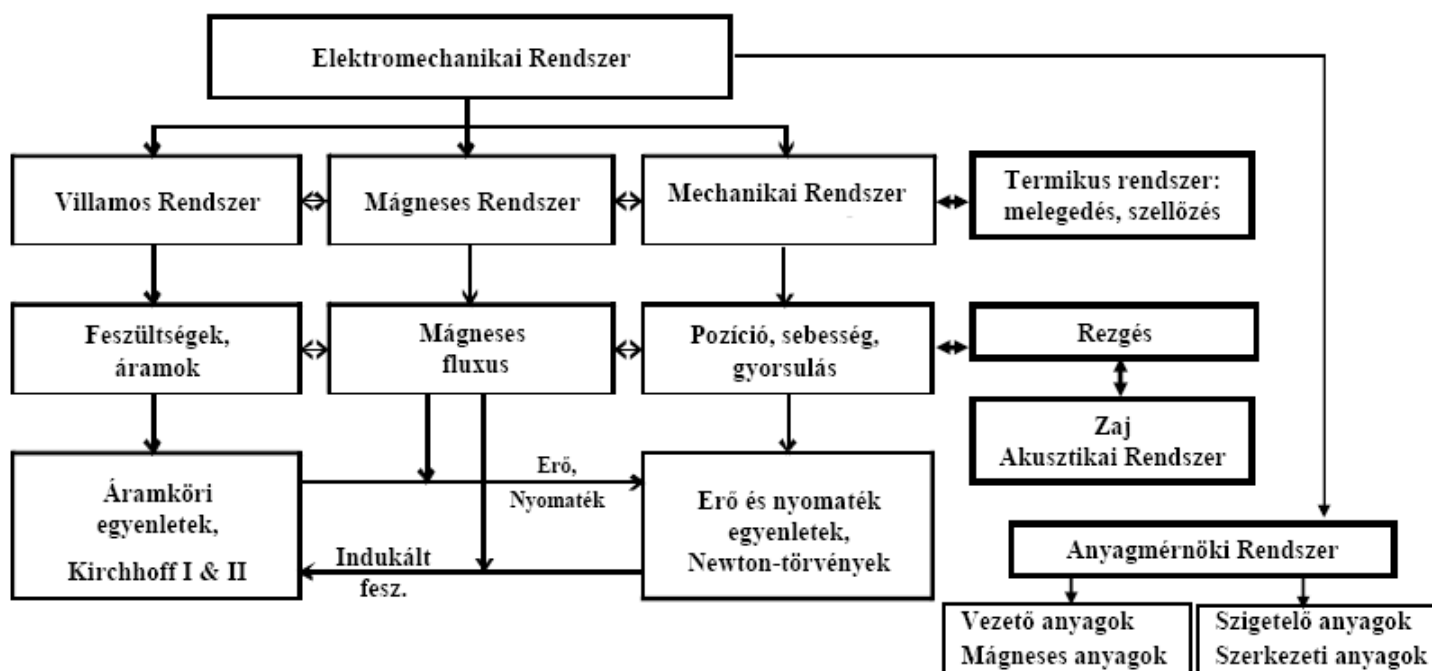
3. Kérdés:

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

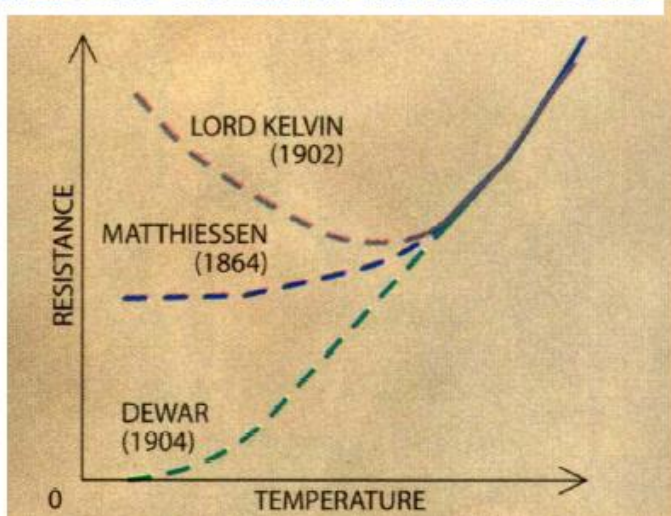
Josephson effekt: alagút effektus szupra és félvezetőkben: 1973 Josephson, Giaever, Esaki

Kerámia alapú anyagok szupravezető tulajdonságainak felismeréséért: 1978 Bednorz 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.

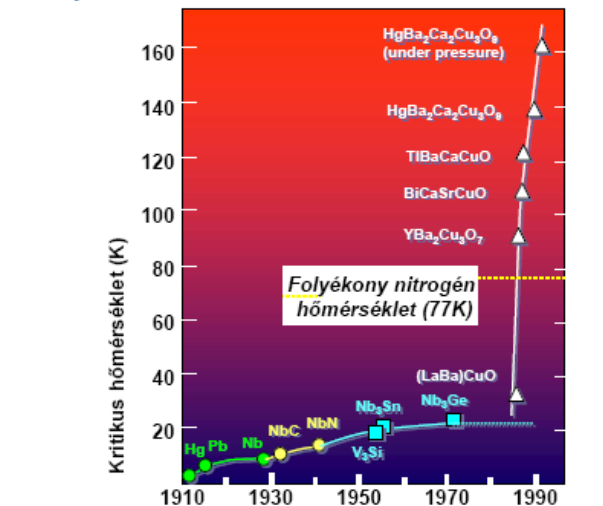
Péda: HTS szupravezetők (93-94K, 100-110K) kritikus áramsűrűsége alacsony (OK en 10^5 és 10^6 on A/cm^2 között van), de OK-en a kritikus mágneses térerősség 100T-nál nagyobb. Ezt ábrázolhatjuk is, és megkapjuk az előbbi felületet.

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 és 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 Nióbbium, de 9K-es atm. Hőmérséklete és 0.2T-es 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

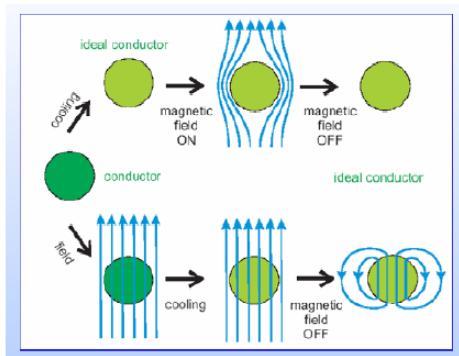
1930-1970 es évek eleje: Nióbbium vegyületek (Nb₃ Sn és Ge): 2-es típusúak.

Nagy áttörés: magas hőmérsékletű sz. vezetők: CuO alapú kerámiák: később Hg,Ba,Ca kerül még a vegyületbe. Fontos: ezek már hűthetők 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 hűthetők.

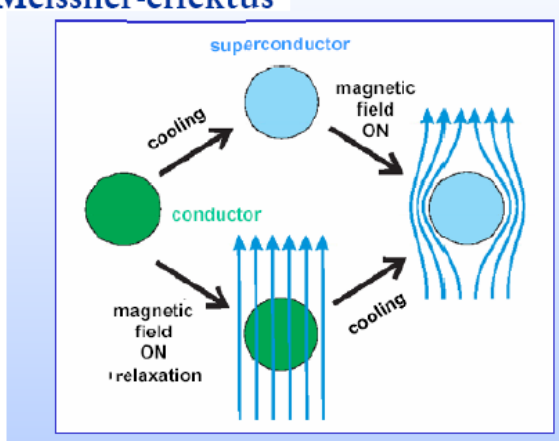
5. A Meissner-effektus.

1933-ban Meissner és Oschenfeld felfedezte (állandó mágnes és szupravezető közötti kölcsönhatást vizsgáltak) az ideális vezetők 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.

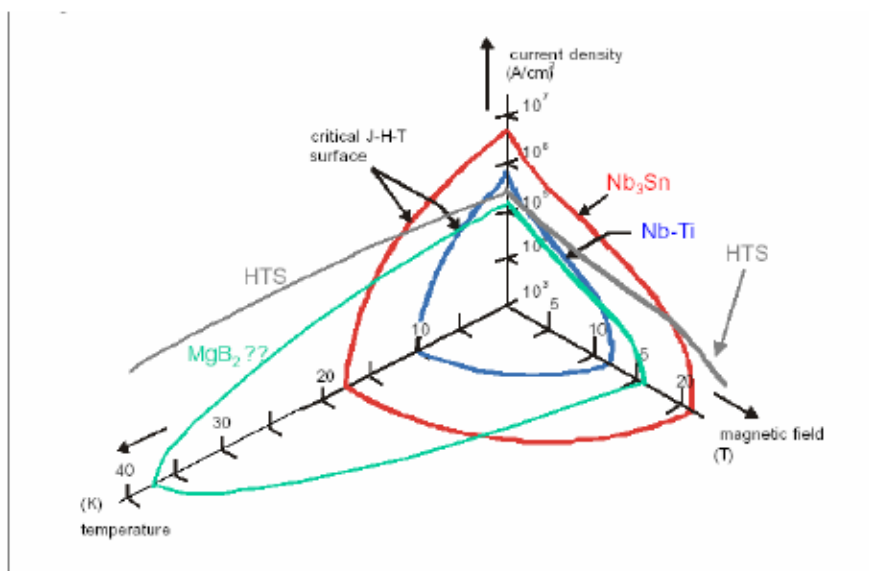
2. típusúak:

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

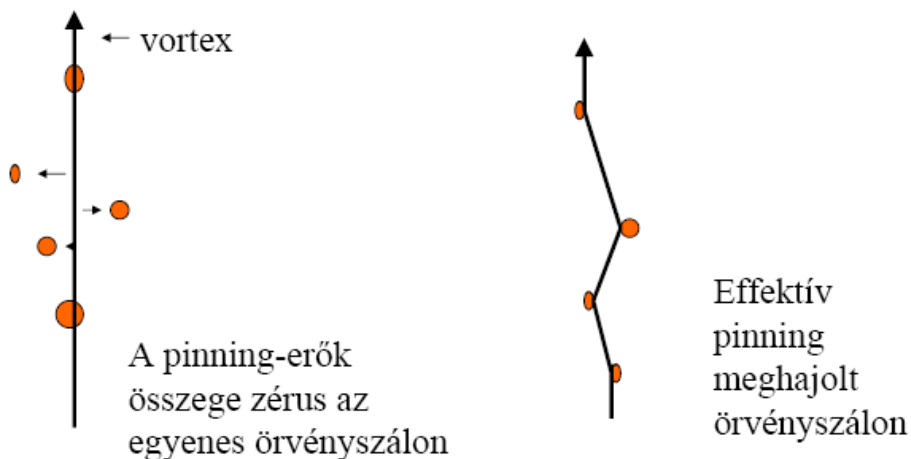
A fluxus-kvantum: A mágneses tér a szupravezetőbe ún. fluxus-örvények (fluxusszálak, örvények) formájában hatol be. Minden egyes fluxus-szál ugyanakkora fluxust tartalmaz, az ún. fluxus-kvantumot, amelynek értéke $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ Vs}$, ahol h a Planck-állandó, e az elektron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

10. Pinning II. típusú szupravezetőkben.

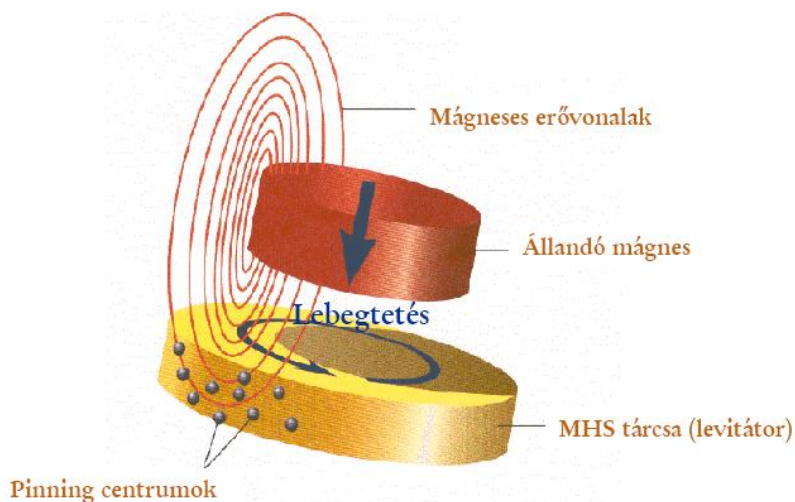
Inhomogén, nemideális II. típusú szupravezető anyagban a fluxusszálak rögzítődnek az inhomogenitásokon. Az inhomogenitások neve „pinning-centrum”, a fluxus-szálak rögzítődése ezeken a pinning-centrumokon „pinning” néven ismert. HTS-nél pinning-centrum létrehozása: nem szupravezető anyagot „keverek” a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

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 hűtőtéljesítmény)

1 W teljesítmény (alacsony hőmérsékleten) elszállításához szükséges hűtőtéljesítmény			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.

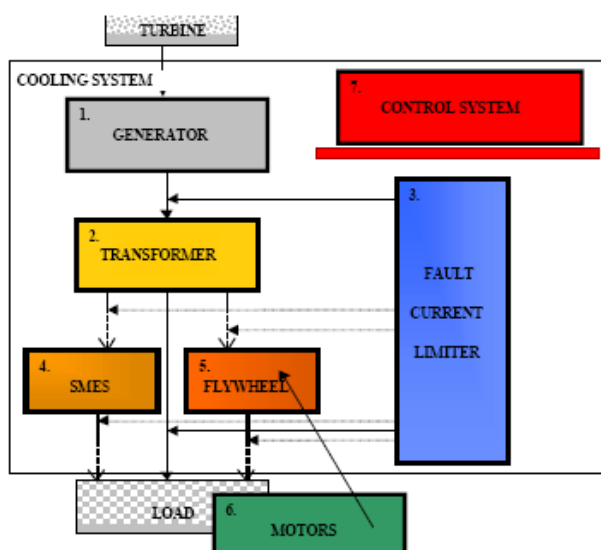
Megújuló energiaforrásokat használ fel általában: az energiatárolás és kis helyigény igényében.

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.



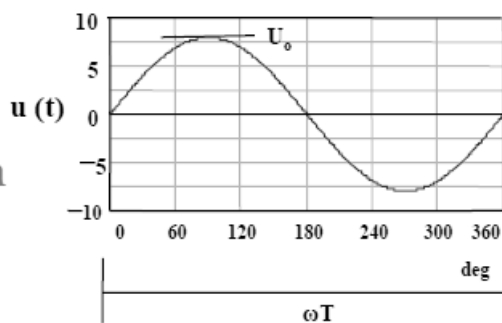
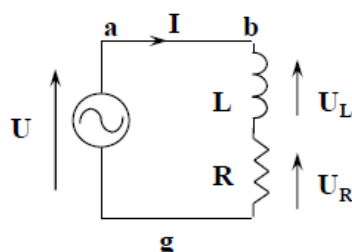
C) GYAKORLATI ÁRAMKÖR-SZÁMÍTÁSI TECHNIKÁK ÉS KONVENCIÓK: EGY- ÉS HÁROMFÁZISÚ HÁLÓZATOK SZÁMÍTÁSA

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).

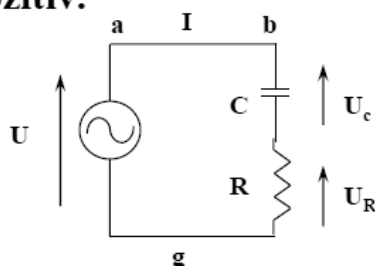
T a periódusidő (s).

- **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.

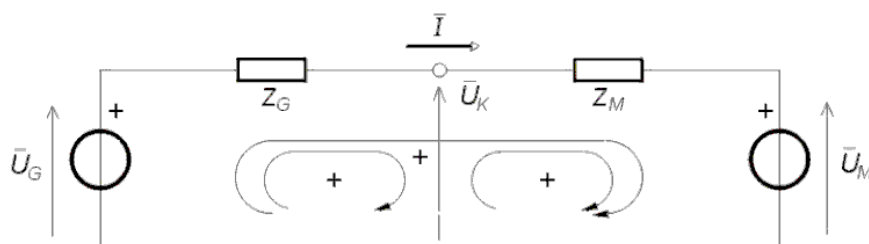
φ az áram és a feszültség közötti fázisszög.

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

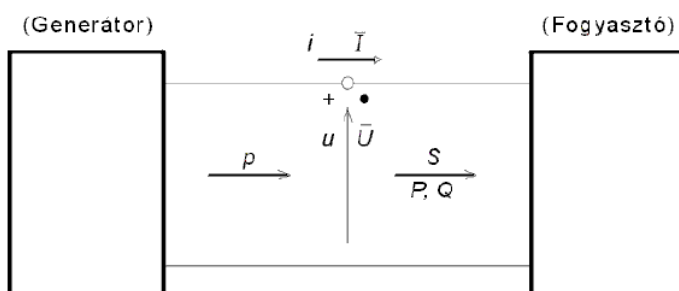
$$I_{eff} = \frac{U_{eff}}{Z}$$

ahol: Z az impedancia

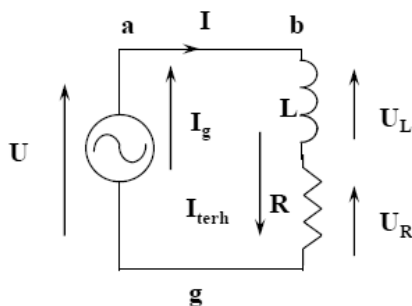
Pozitív irányrendszer
feszültségre, áramra, hurokra



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

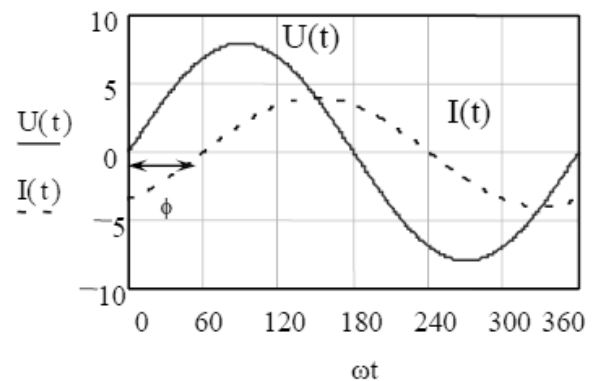
-induktív reaktanciái (tekercs): $X_L = j\omega L$

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

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

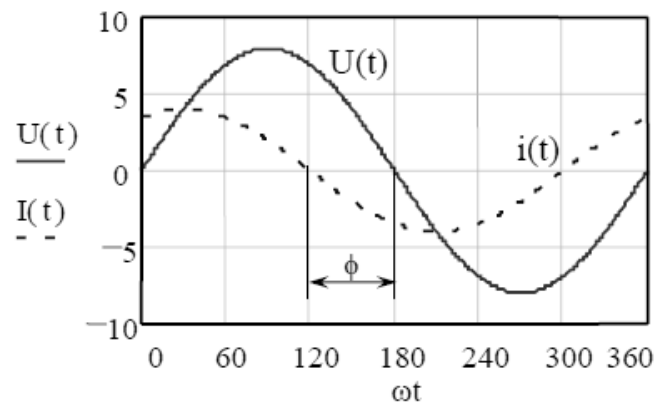
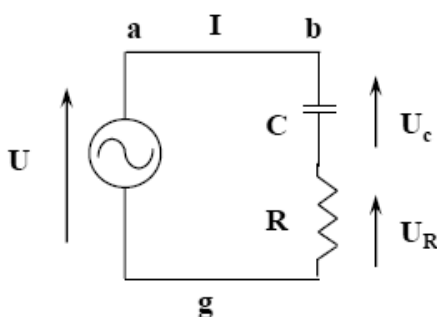
Induktív hálózat

- 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-fogalmak. 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.

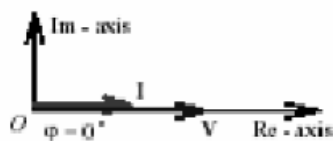
A pillanatnyi teljesítmény időfüggvénye

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

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

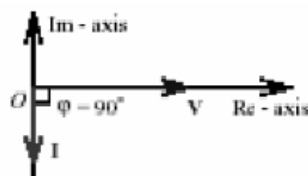
Az impedanciák ($\Omega = \text{Ohm}$):

– a) Ellenállás (R)



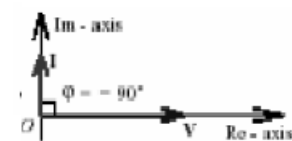
– b) Induktív reaktancia

$$X_L = \omega L$$

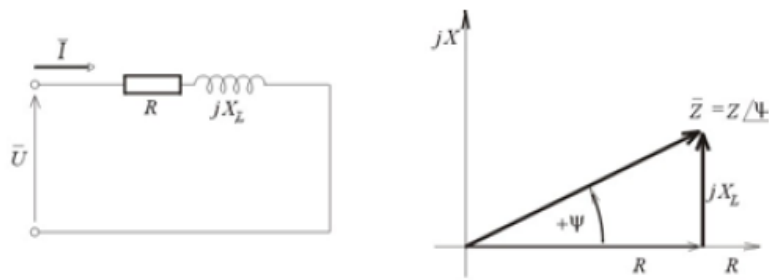


– c) Kapacitív reaktancia

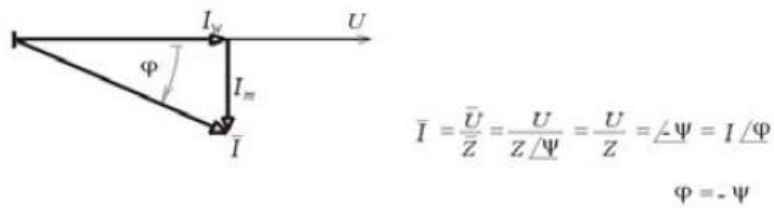
$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$



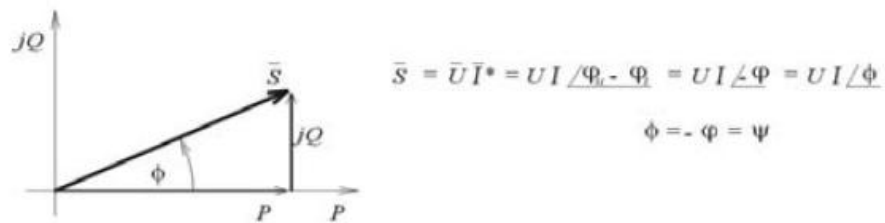
A tipikus ohmos és induktív fogyasztó (motor) komplex impedanciája, árama és teljesítménye:



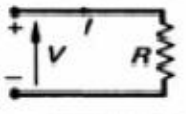
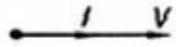
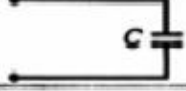
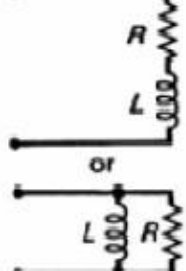
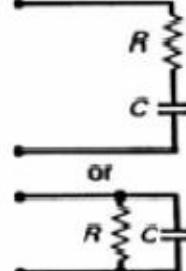
a, impedancia (ψ szög és X_L reaktancia pozitív)



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



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

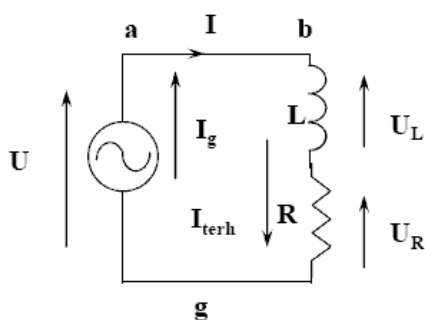
Load type	Phasor relation	Phase angle	Power absorbed by load	
			P	Q
		$\phi = 0$	$P > 0$	$Q = 0$
		$\phi = +90^\circ$	$P = 0$	$Q > 0$
		$\phi = -90^\circ$	$P = 0$	$Q < 0$
		$0 < \phi < +90^\circ$	$P > 0$	$Q > 0$
		$-90 < \phi < 0$	$P > 0$	$Q < 0$

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

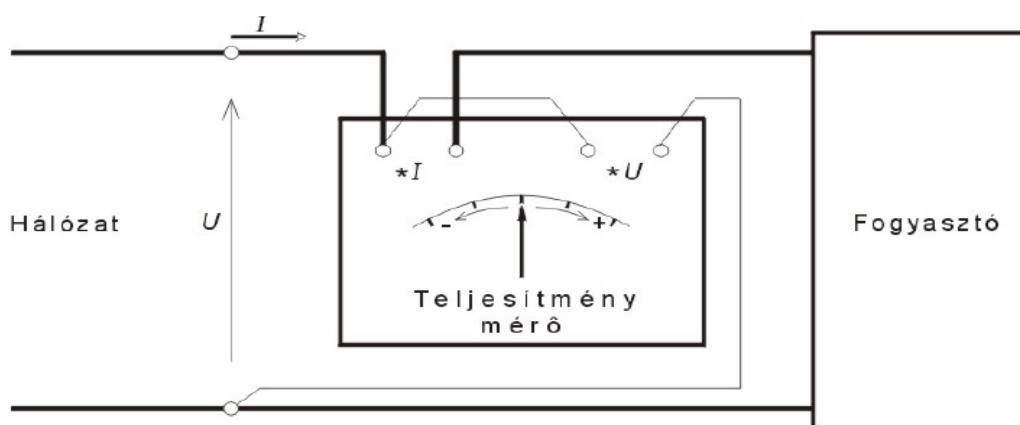
Generátoros és fogyasztói teljesítmény előjelek értelmezése:

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.



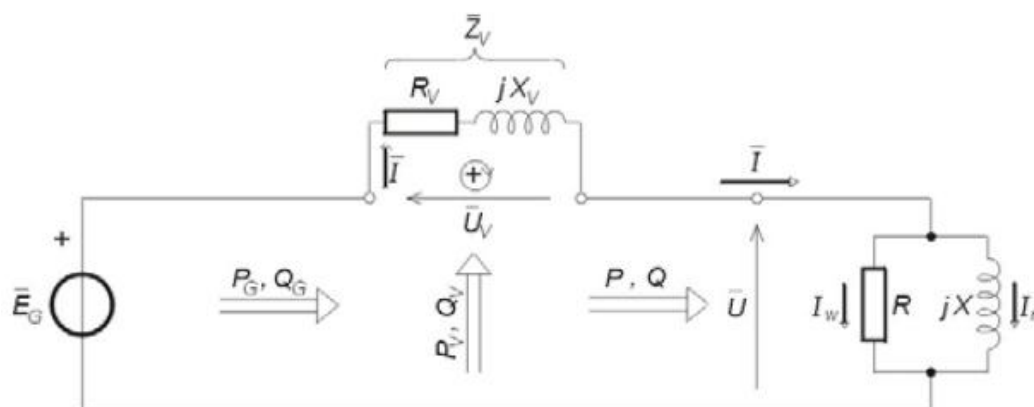
Teljesítmény mérő bekötése a fogyasztói pozitív irány szerint:



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



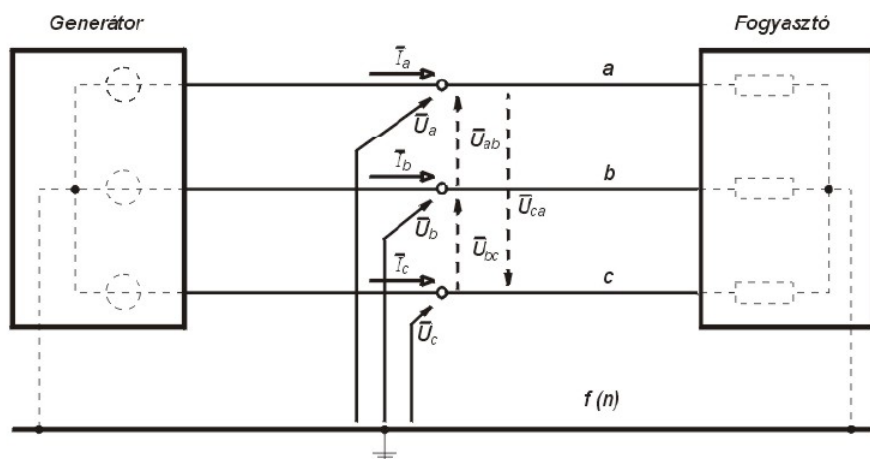
egyvonalas ábra



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

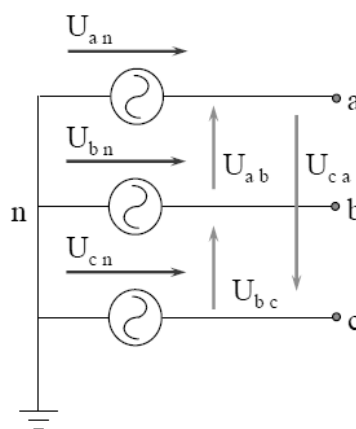
Csillag- vagy Y-kapcsolású rendszer

- A csillagpont földelt
- A fázisfeszültségek abszolút (effektív) értékei egyenlőek.
- 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

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

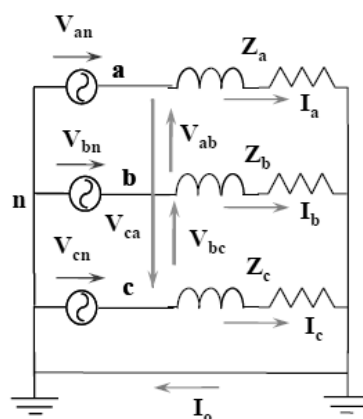
$$U_{bc} = U_{bn} - U_{cn} = \sqrt{3} U$$

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

Csillagkapcsolású rendszer terheléssel

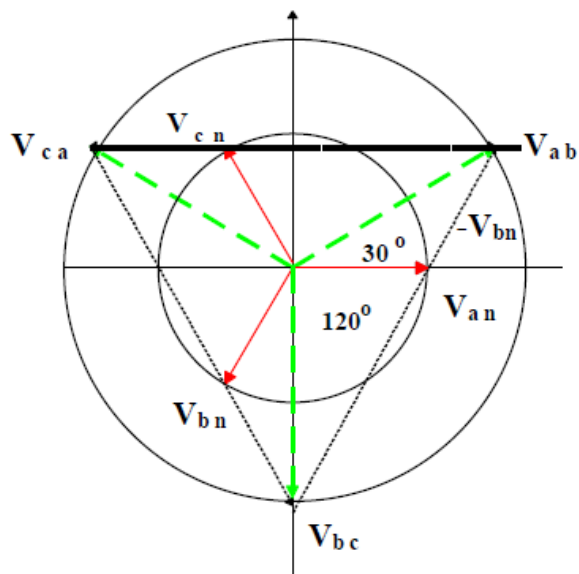
- A terhelés impedanciái: Z_a, Z_b, Z_c
 - Minden fázisfeszültség a megfelelő impedancián áramot hajt át.
 - A fázisáramok kifejezései:
- $$I_a = \frac{U_{an}}{Z_a} \quad \text{és} \quad I_b = \frac{U_{bn}}{Z_b} \quad \text{és} \quad I_c = \frac{U_{cn}}{Z_c}$$
- A negyedik (nulla)vezető ([föld]visszavezetési)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

$$I_0 = I_a + I_b + I_c$$

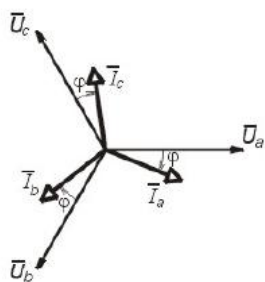


Csillag (Y) kapcsolású rendszer

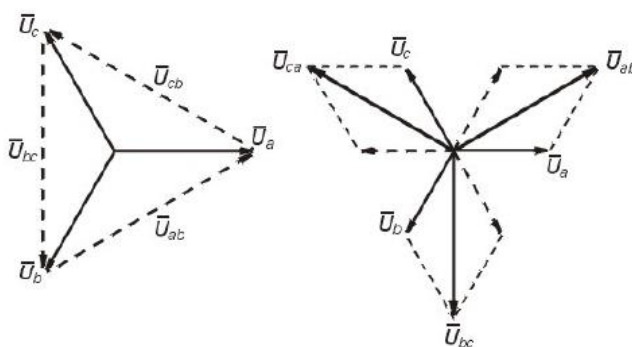
- Fazorábrát használunk a feszültségek megjelenítésére és számítására
- Az Y-kapcsolásban megjelennek a
 - **fázis- és a**
 - **vonali feszültségek.**
- A fázisfeszültségek egymáshoz képest 120-120 fokkal vannak eltolva.
- Hasonlóképpen a vonali feszültségek is egymáshoz képest 120-120 fokkal vannak 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:

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

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

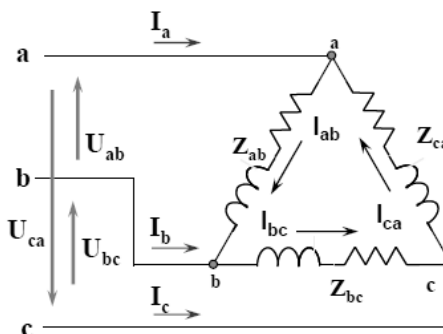
$$I_c = I_{ca} - I_{bc}$$

- Kiegyenlített esetben:

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

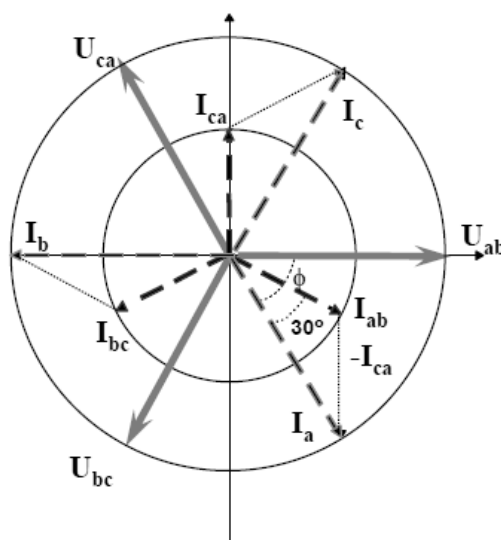
vagy

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



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) $\sqrt{3}$ -szorososa 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.**

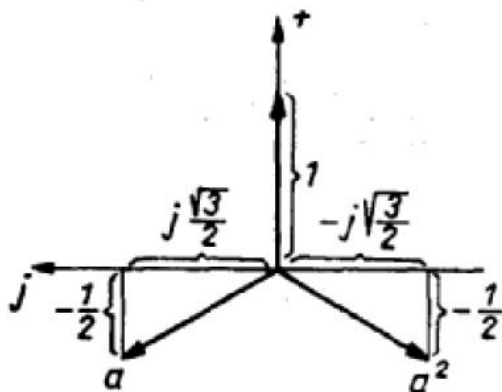
Definíció

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:

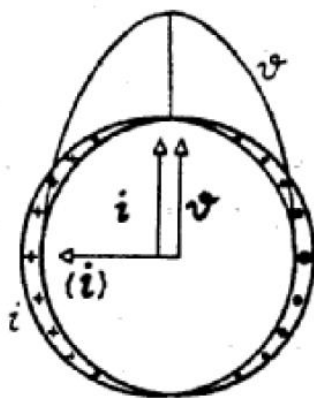
A háromfázisú egységvektorok komplex alakja

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 1 , a és 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

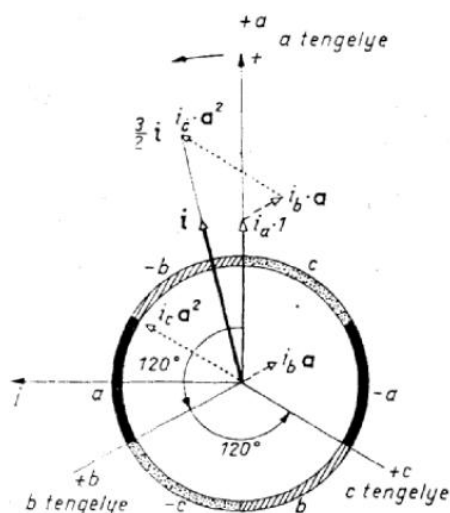
$$1\mathcal{G}_a + a\mathcal{G}_b + a^2\mathcal{G}_c$$

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.

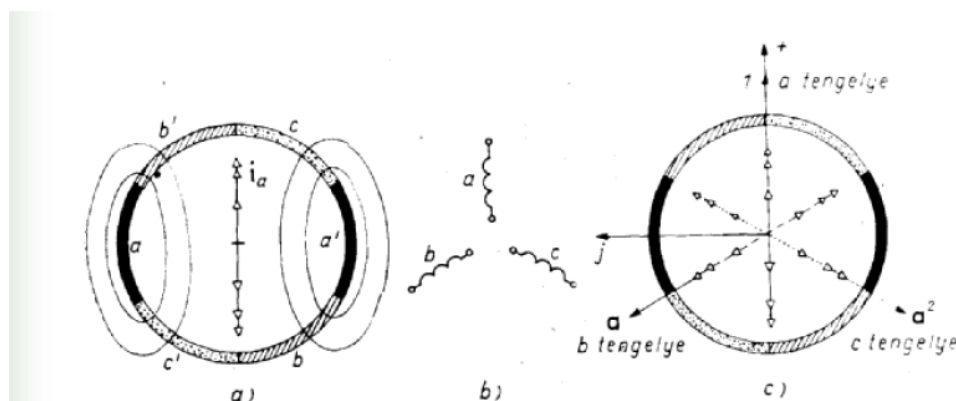


3. ábra: A szimmetrikus állandósult állapot háromfázisú vektorának szerkesztése

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.

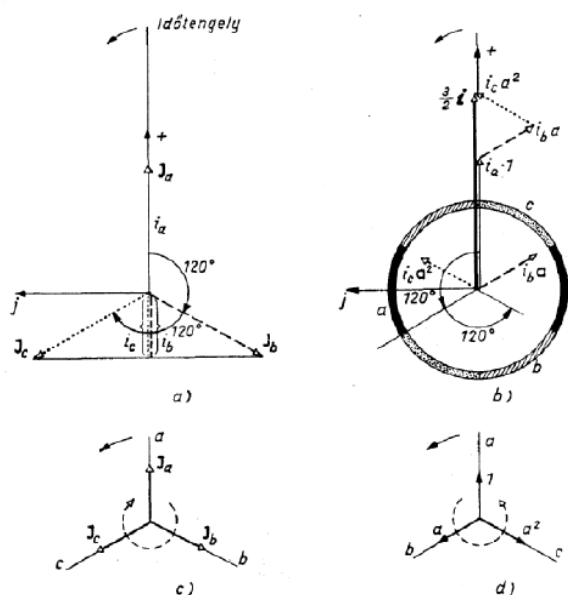
Tegyük ezt először az időben állandósult szimmetrikus esetben, amikor az áramok szinuszos szimmetrikus három fázisú rendszert alkotnak. Az egyes tekercseket időben változó nagyságú és irányú áramokkal táplálva azok mezeje külön-külön a térben helyben marad, mindig szinuszos térbeli eloszlású, de nagysága 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. Csúpn 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

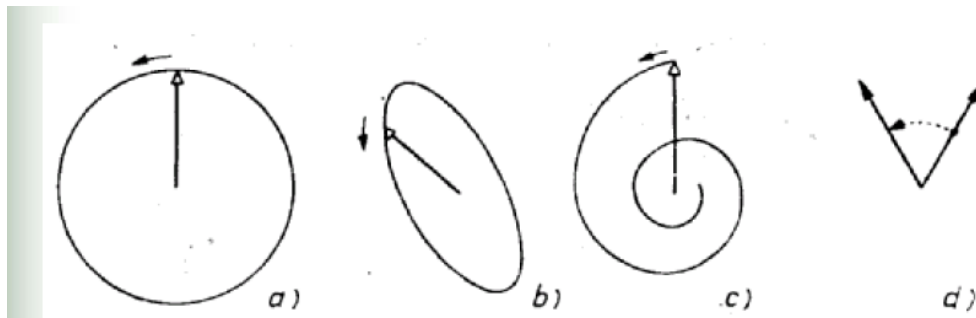
A háromfázisú tekercselés eredőgerjesztését az áramok tetszőleges időbeli váltakozásakor tetszőleges időpontban megkaphatjuk, ha a fázisok gerjesztéseit a kérdéses időpontban összegezzük. Az eredővektor végpontja által leírt görbét pontról pontra szerkeszthetjük meg, ha ezt az összegezést - célszerűen 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, képzel, 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

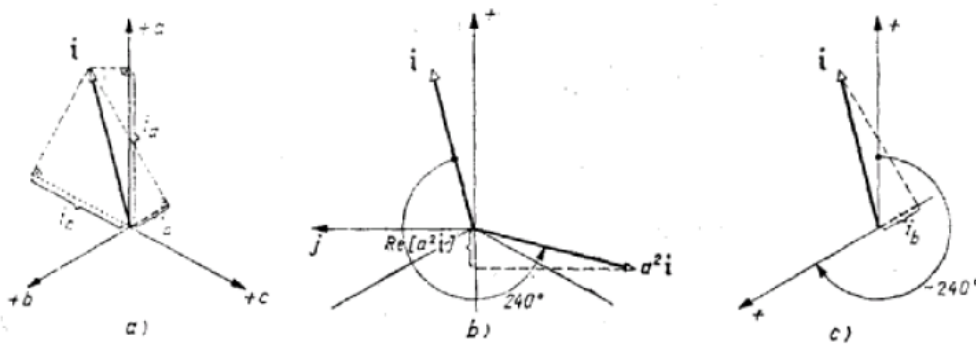
$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad i_a + i_b + i_c = 0$$

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

$$\dot{i}_a + \dot{i}_b + \dot{i}_c = 0$$

egyenlet köti őket össze.

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

$$\dot{i}_a = \dot{i}_a' + \dot{i}_0 \quad \dot{i}_b = \dot{i}_b' + \dot{i}_0 \quad \dot{i}_c = \dot{i}_c' + \dot{i}_0$$

és mivel az előbbiek szerint, így

$$\dot{i}_a + \dot{i}_b + \dot{i}_c = 3\dot{i}_0$$

A térvektor a zérus sorrendű áramot nem tartalmazza, mert az

$$i = \frac{2}{3}(\dot{i}_a + a\dot{i}_b + a^2\dot{i}_c) = \frac{2}{3}[(\dot{i}_a' + \dot{i}_0) + a(\dot{i}_b' + \dot{i}_0) + a^2(\dot{i}_c' + \dot{i}_0)] =$$

$$\frac{2}{3}[\dot{i}_a' + a\dot{i}_b' + a^2\dot{i}_c' + \dot{i}_0(1 + a + a^2)] = \frac{2}{3}(\dot{i}_a' + a\dot{i}_b' + a^2\dot{i}_c')$$

összefüggés szerint abból kiesik.

A zérus sorrendű áramot tehát külön kell figyelembe venni.

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

$$\left. \begin{aligned} \frac{2}{3} \left(\dot{i}_a - \frac{1}{2}\dot{i}_b - \frac{1}{2}\dot{i}_c \right) \\ j \frac{2}{3} \left(0 + \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{i}_b - \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{i}_c \right) \end{aligned} \right\} \frac{2}{3}(\dot{i}_a + a\dot{i}_b + a^2\dot{i}_c) = i \quad abc \rightarrow i$$

$$\frac{1}{3}(\dot{i}_a + \dot{i}_b + \dot{i}_c) = \dot{i}_0$$

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 üzemiállapotban érvényes.

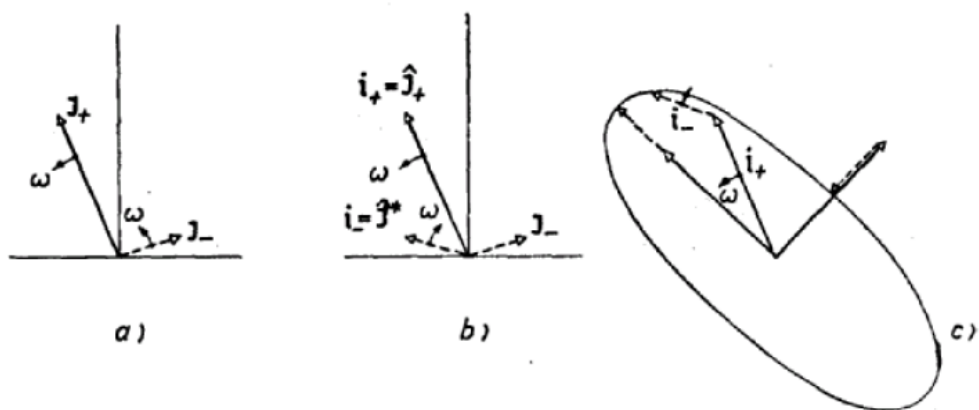
Tiszta negatív sorrendű szimmetrikus állandósult háromfázisú áramrendszer esetén a kifejezésben az ellenkező fázissorrendnek megfelelően a^2 és a helyet cserélnek, és így ebben az esetben az

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

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

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.