

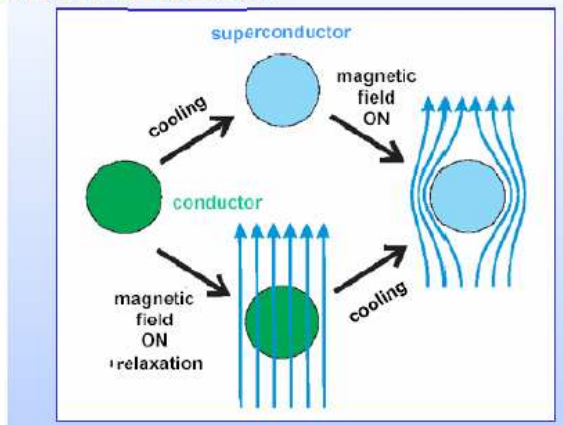
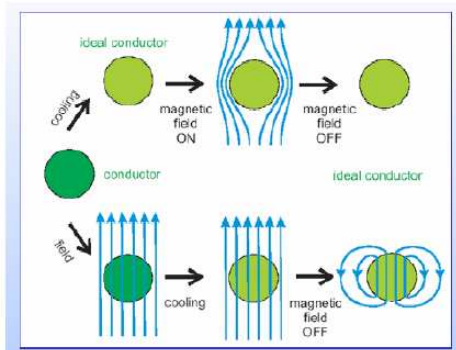
Elektrotechnika 2. ZH - 2009

A Meissner-effektus.

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

A Meissner-effektus

Az ideális vezető viselkedése

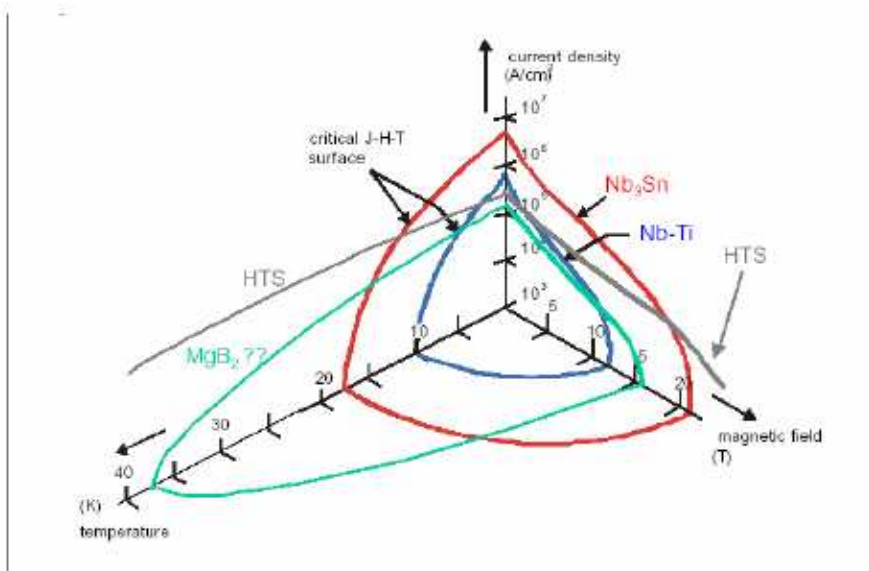


Tehát: A szupravezető a minta belsejéből a TELJES fluxust kiszorítja! (Néhány atom vastagságú az a felületi réteg, melyen az indukció lecsökken 0-ra. \leftrightarrow Az ideális vezetőben fenntartják az ellentert a keletkezett áramok, befagyott mágneses tér jön létre.

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. koordináarendszerben (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 (Nióbbium 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 (OK en 10^5 és 10^6 on 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



- **A szupravezetők osztályozása.**

A szupravezetőket 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 Bkr1 (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 Bkr2 -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 ≈ 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 Nemideális: pinningelt
	Kevert állapot	$B_{c1} < B < B_{c2}$	
	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.

- **A lebegtetési kísérletek tapasztalatai.**

YBCO lebegtető NdBFe állandó mágnes.

1. Mágneses tér mentes hűtés: Tapasztalat: Passzív stabilis lebegtetés valósítható meg a sz. vezetőkkel: az állandó mágnes az érezhető taszítás fellépésekor hozzányomom a szupravezetőhöz „közel”: ezzel az indukcióvonalakat belékényszerítem 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.

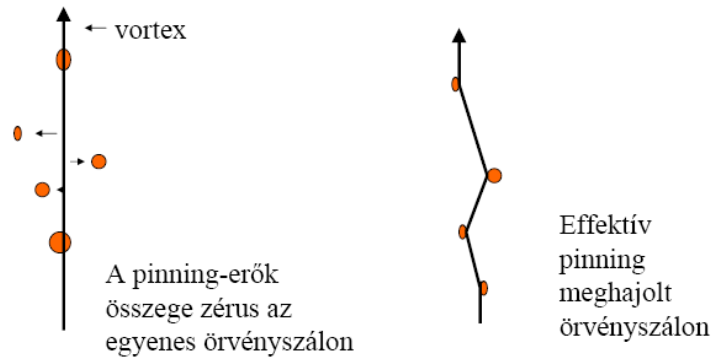
- **Fluxusörvények II. típusú szupravezetőkben**

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 $\phi_0 = h/2e = 2.07 \cdot 10^{-15}$ Vs, ahol h a Planck-állandó, e az elektron töltése.

- **Pinning II. típusú szupravezetőkben.**

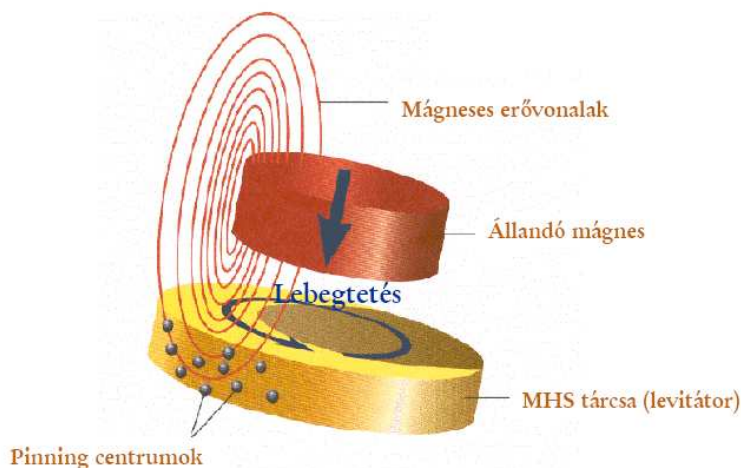
Inhomogén, nemideális II. típusú szupravezető anyagban a fluxusszálak rögzítődnek az inhomogenitásokon. Az inhomogenitások neve „pinning-centrum”, a fluxus-szálak rögzítődése ezeken a pinning-centrumokon „pinning” néven ismert. HTS-nél pinning-centrum létrehozása: nem szupravezető anyagot „keverek” a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

A véletlenszerű pinning problémája kollektív pinning véletlen pontszerű pinning-centrumokon



- **A lebegtetési kísérlet magyarázata. ZFc és FC hűtés.**

Lebegtetési kísérlet magyarázata



- Tipikus alkalmazott MHS-k: YBCO lebegtető, NdBFe állandó mágnes, Nb-Ti, MgB2
- 1. ZFC = Zero Field Cooled= Mágneses tér mentes hűtés: Tapasztalat: Passzív stabilis lebegtetés valósítható meg a sz. vezetőekkel: az állandó mágneset 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. mágneset 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.

- **Szupravezetők elektrotechnikai alkalmazásainak előnyei és hátrányai.**

A szupravezetők előnyei

- Nagy áramok veszteségmentes vezetése
- Nagy hatásfok (csökkent 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

- **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 görbületesugarúkkal 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.

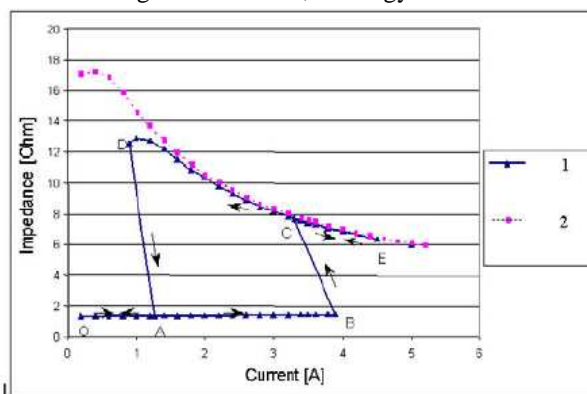
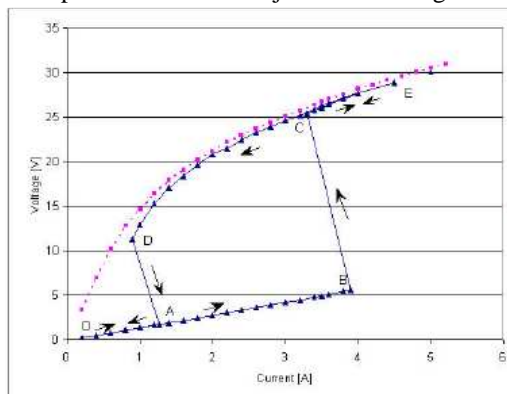
Lebegtetett járművek: mágneses szupravezető vonatok.

Vákuumban lendkerék: villamos kinetikus energiaátalakító.

- **A szupravezetős induktív zárlati áramkorlátozók működési elve.**

Ez gyakorlatilag egy transzformátor, melynek szekunder tekercse szupravezetőből készült.

Zárlat (vagy csak túl nagy teljesítmény) esetén ha az áramsűrűség meghaladja az adott hőmérséklethez és mágneses térerősséghez tartozó kritikus értéket a szekunder tekercsben, a szupravezető normál állapotú, nagy ellenállású lesz, melegedés indul meg, aminek következtében a szekunder tekercsben NEM fog tovább nőni az áram, a szekunder tekercs zárlati állapotba megy át. Ha csökken a terhelés, vagy megszűnik a zárlat, akkor az így létrejött, már kritikus értékek alatti paraméterek miatt újra működni fog a transzformátor. Ha a melegedés kicsi volt, akkor gyorsan vissza tud állni.

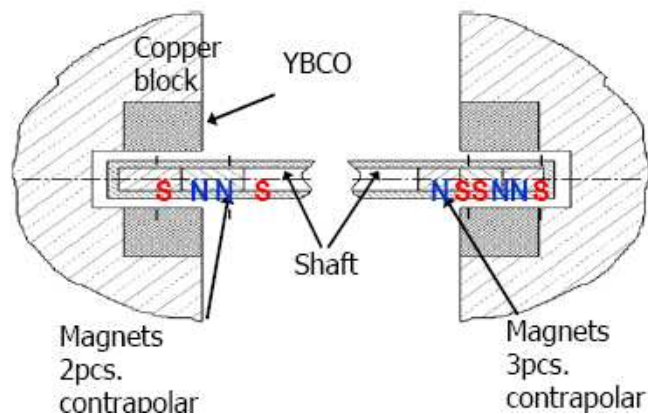


1 – with HTS ring
2 – w/o HTS ring

Előnyök: rezisztív, magától visszaáll a teljesítmény csökkenése és lehülés után eredeti, szupravezető állapotba.

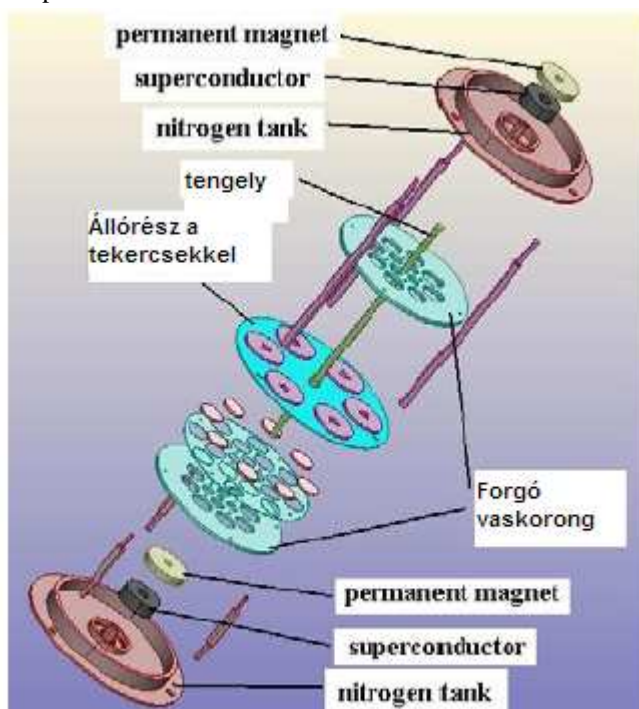
- **Szupravezetős mágneses csapágyak működési elve.**
Horizontális mágneses csapágy (a képen) ->

Előny: forgás közben NINCS mechanikai súrlódás (mechanikai veszteségmentes megoldás), aminek következtében minimális a forgás során az energiavesztés. Tengely: Alumíniumból, Benne pl: NdFeB (Neódímium Vas Bór) állandó mágnes. Másik: Talpcsapágy (pl lendkerékben. Alól sz. vezető felől mágnes.)



- **Szupravezetős lendkerékes rendszerek felépítésének elve.**

Cél: Rövid idejű (~10s) villamos energiátárolás. Megvalósítás: Lendkerék talpcsapággal.
Első példa:



Max 11,000 rpm

Előadáson példa: alól és felől 1-1 szupravezető „talpcsapágy”, alul felül nitrogéntartállyal, Forgórész vaskorong.

Második példa:



Mérési eredmény: 15 óra alatt csökken kb. 9000-ről 6000-re.

Előny: egy mágneses csapágy, nincs tengely, nincs rés a közepén, egy forgó rész 2 helyett, egyszerűbb megvalósítás. Szerintem: driving magnet: Hajtómágnes.

Mindkét koncepció igény szerint vákuumba helyezhető a hatásfok növelése miatt.

- **A teljesen szupravezetős kísérőmű 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.

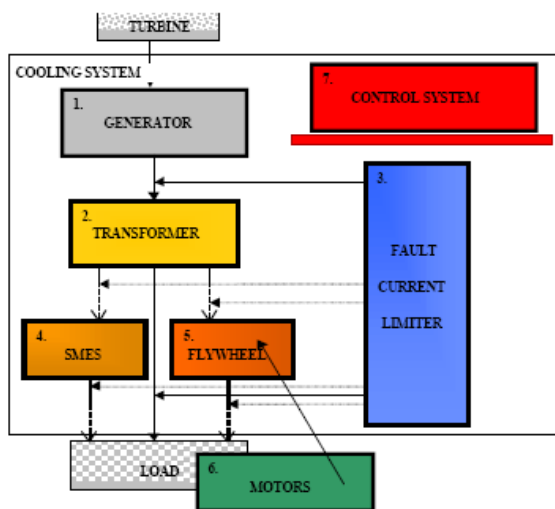
A rendszer tartalmaz: szupravezetős generátort, transzformátort, szupravezetős induktív áramkorlátozót, motort és energiatároló eszközöket.

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

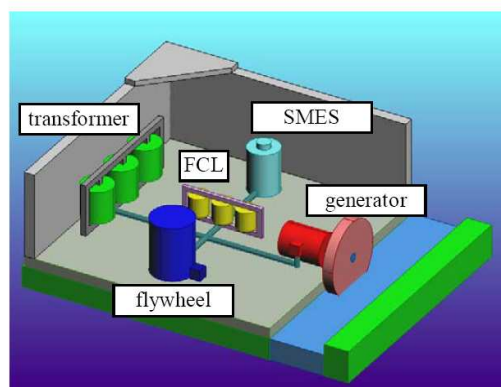
SMES: mágneses energiatároló

Fault Current Limiter: szabályzó

Flywheel: lendkerék



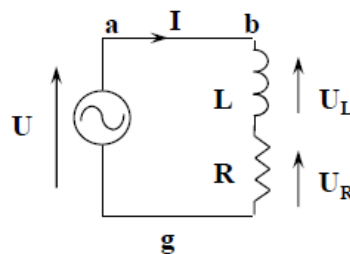
A teljesen szupravezetős kísérőmű látványterve



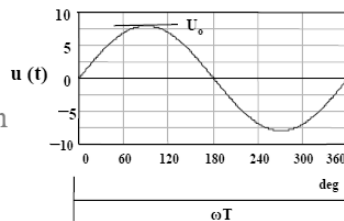
- **Az egyfázisú rendszerek áramai és feszültségei. A pozitív irányrendszer fogyasztói és generátoros teljesítményre: a feszültségek és áramok pozitív irányai.**

- **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)

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

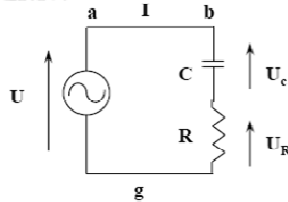
f a frekvencia (60 Hz pl. az USA-ban, 50 Hz Európában).

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.

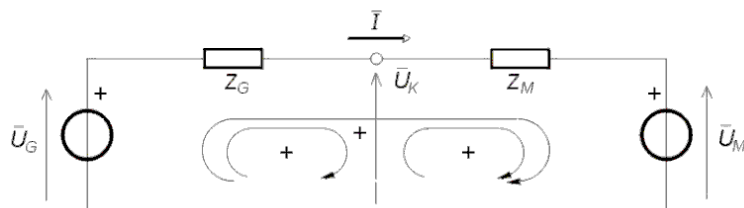
φ az áram és a feszültség közötti fázisszög.

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

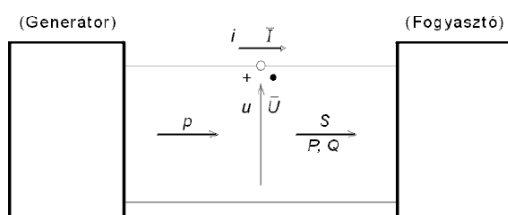
$$I_{eff} = \frac{U_{eff}}{Z}$$

ahol: Z az impedancia

Pozitív irányrendszer feszültségre, áramra, hurokra



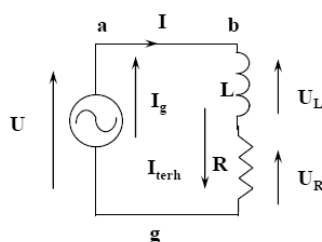
Pozitív irányrendszer fogyasztói és generátoros teljesítményre



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

- A generátor feszültsége és árama azonos irányú.

- A terhelés árama a pozitív félperiódusban „b”-től „g”-be folyik .



• 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 $\Omega=Ohm$

-ellenállás R

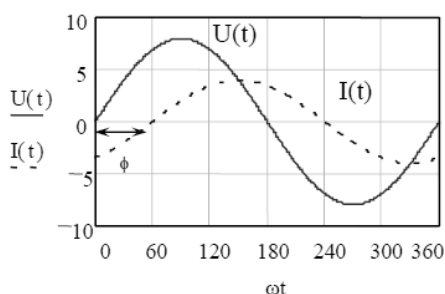
-induktív reaktanci (tekercs): $X_L=j\omega L$

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

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

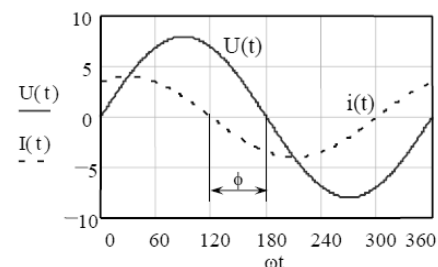
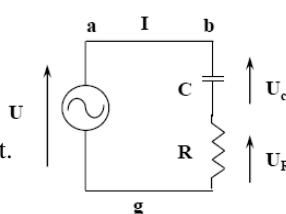
Induktív hálózat

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

Fázisszög: $\varphi = \text{atan}\left(\frac{X}{R}\right)$

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

Telesítmények 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:

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

- 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.

- Látzólagos teljesítmény**

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

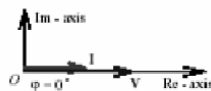
A pillanatnyi teljesítmény időfüggvénye

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

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

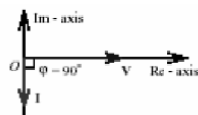
Az impedanciák ($\Omega = \text{Ohm}$):

- a) Ellenállás (R)



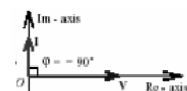
- b) Induktív reaktancia

$$X_L = \omega L$$

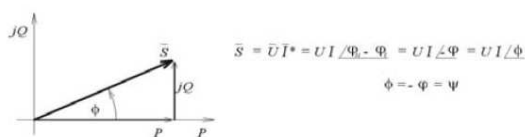
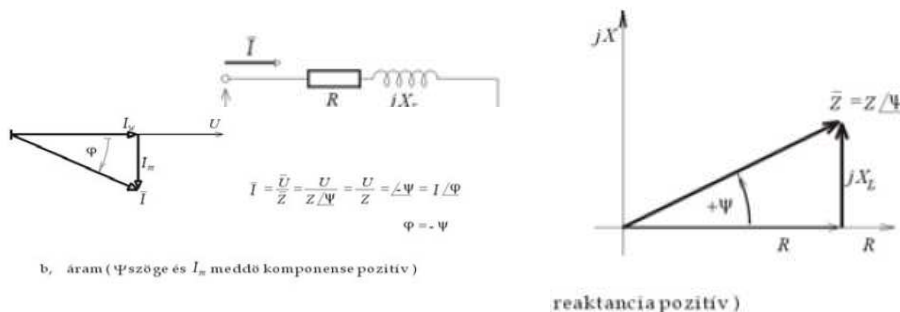


- c) Kapacitív reaktancia

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



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



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

- 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:

$$S_{3_fázis} = 3 U_{\text{fázis}} \mathbf{I}_{\text{fázis}}^* = 3 \bar{U}_{an} \bar{I}_a^* \quad P_{3_fázis} = \text{Re}(S_{3_fázis})$$

- Delta kapcsolású rendszerben:

$$S_{3_fázis} = 3 U_{\text{fázis}} \mathbf{I}_{\text{fázis}}^* = 3 \bar{U}_{ab} \bar{I}_{ab}^* \quad P_{3_fázis} = \text{Re}(S_{3_fázis})$$

- 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:

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