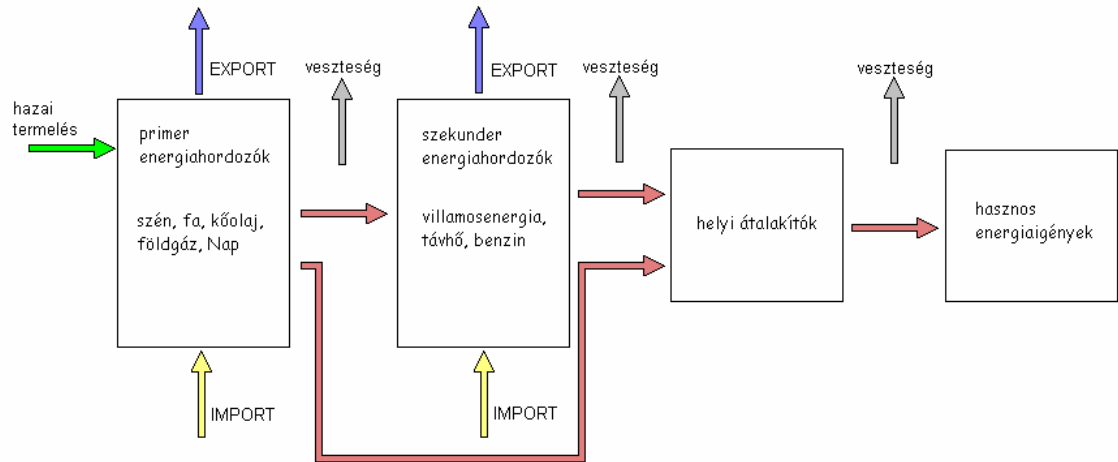


# VILLAMOS ENERGETIKA

## I. RÉSZ

1. *Ismertesse blokkvázlatban az energiaszolgáltatás rendszerét!  
Adja meg a villamos energia sajátosságait, valamint a villamosenergia-felhasználás részaránya és a társadalmi fejlettség közötti kapcsolatot!*



### A VILLAMOS ENERGIA SAJÁTÓSÁGAI

- Termelése, előállítása nagy veszteségekkel jár.
- Számottevő, de lokális környezetszennyezés.
- Nagy egységekben az erőművek hatásfoka javul.
- Az energia könnyen és jó hatásfokkal szállítható.
- Kitűnően elosztható.
- Állandóan rendelkezésre áll.
- A helyi hasznosítás kedvező feltételekkel megy végbe.

### A VILLAMOSENERGIA-FELHASZNÁLÁS RÉSZARÁNYA ÉS A TÁRSADALMI FEJLETTSÉG

A világ energiafelhasználását tekintve megállapítható, hogy a fejlett ipari régióban élő 30% népesség az összes energia mintegy 80%-át használja fel. Ez 2020-ban előreláthatólag 45-55% lesz. Jelenleg a világ termelésének 36%-át az USA állítja elő.

2. *Ismertesse a primer hajtóeszközöket és azok főbb jellemzőinek alakulását!  
Mi vezetett a nagy egységteljesítményű generátorok és a nagy hálózatok kialakulásához?*

*Természeti hajtóerők*

- Az első energiaforrás az izomerő volt, ami 0.1 kW teljesítményre képes.
- A vízenergiát hasznosító első vízimalom 3.7 kW-ot tudott leadni. Később felfedezték a vízturbinát, ami kiszorította a vízkereket. Ezekkel már generátorokat hajtottak.
- A 7.5 kW teljesítményű szélkerék Európa iparosodott országaiban és az USA-ban terjedt el. Több millió példányt gyártottak.

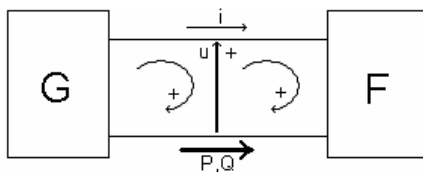
*Primer hajtógépek*

- Gőzgép: James Watt, 2,5%, 100 kW → 25%, 3 MW -os hatásfokot értek el.
- Gőzturbina: 75 kW → 1 MW → 1.5 GW egységteljesítmény. 43%-os hatásfok.
- Belső égésű motor
- Gázturbina: repülőgépek hajtása, turbókompresszor.  
1.5 – 15 MW –os gyorsan indítható szükség áramforrások.  
150 MW csúcsteljesítményű generátorok.

Az energiatermelés területileg sokkal jobban koncentráldott, mint a felhasználás. A jobb termelési hatásfok érdekében nagyobb egységteljesítményű generátorokat alkalmaztak. A termelés és fogyasztás közötti távolságok nőttek. Ezek előnyös tényezők, amelyeket csak a villamos energia alkalmazásával lehetett elérni.

3. Egy egyfázisú áramkör szinuszosan változó feszültségére és a feszültséghez képest  $\varphi$  szöggel eltolt áramra adja meg
- a teljesítmény időfüggvényt és annak értelmezését
  - a komplex teljesítményt és annak összetevőit

TELJESÍTMÉNY



$$u(t) = U_m \cos(\omega t) = \sqrt{2}U \cos(\omega t)$$

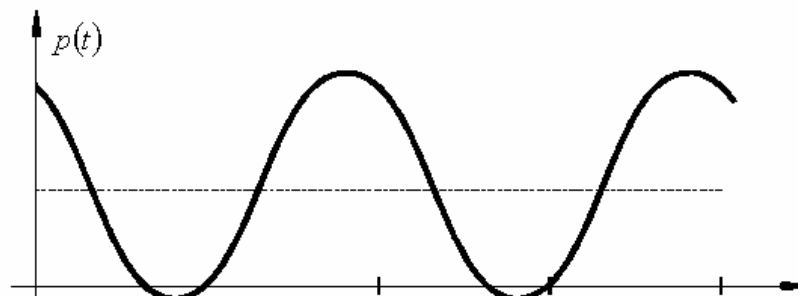
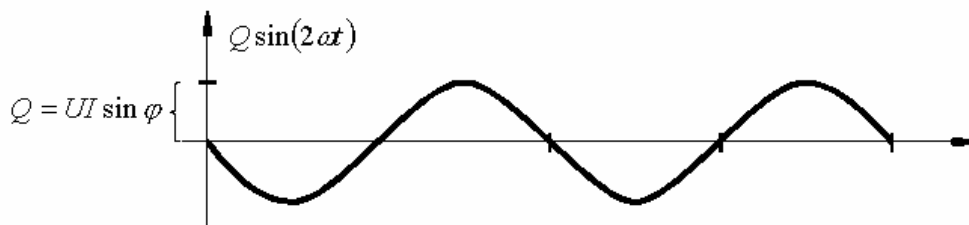
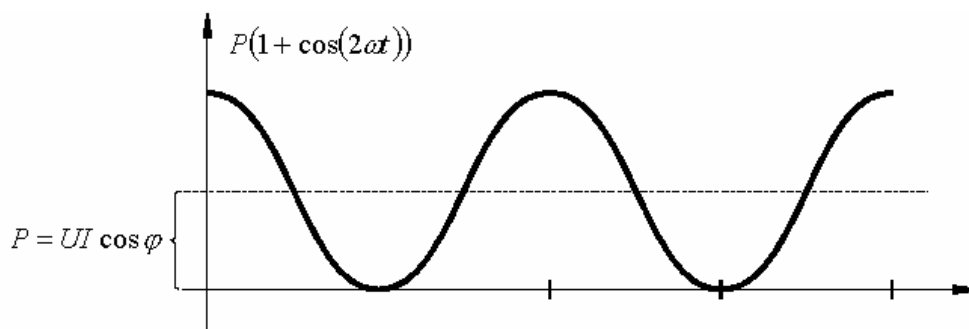
$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi) = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \varphi)$$

$$\varphi = \varphi_i - \varphi_u$$

$$p(t) = u(t)i(t) = UI \cos(1 + \cos(2\omega t)) - UI \sin \varphi \sin(2\omega t) = P(1 + \cos(2\omega t)) + Q \sin(2\omega t)$$

$$P = UI \cos \varphi$$

$$Q = UI \sin \varphi$$



KOMPLEX TELJESÍTMÉNY

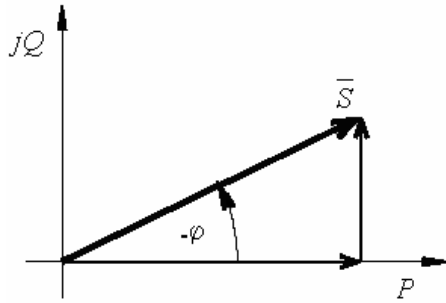
$$\bar{u}(t) = U_m e^{j\omega t}$$

$$\bar{i}(t) = I_m e^{(j\omega t + \varphi)}$$

$$\bar{U} = U$$

$$\bar{I} = I e^{\varphi}$$

$$\bar{S} = P + jQ = \bar{U}\bar{I}^* = U e^{j\omega t} I e^{-j\omega t - j\varphi} = UI e^{-j\varphi}$$

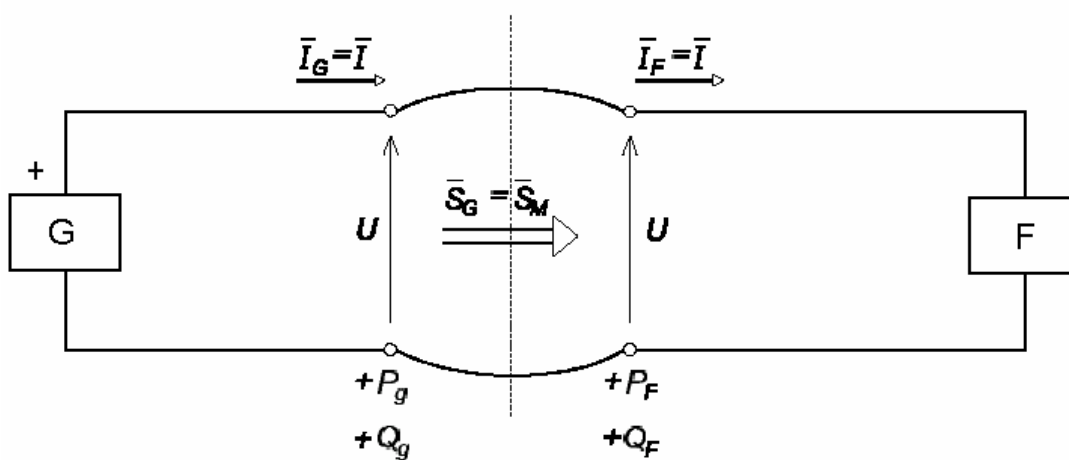


$$P = \Re\{\bar{S}\}$$

$$Q = \Im\{\bar{S}\}$$

4. *Értelmezze táblázatosan összefoglalva a határos és meddő teljesítmény előjelét generátoros és fogyasztói pozitív irányrendszerben!*

Generátoros		Fogyasztói	
határos	meddő	határos	meddő
+ P termelés (betáplálás)	+Q kapacitív (szolgáltatás)	+P fogyasztás (felvétel)	+Q induktív (nyelés)
-P fogyasztás (vételezés)	-Q induktív (nyelés)	-P termelés (visszatáplálás)	-Q kapacitív (szolgáltatás)



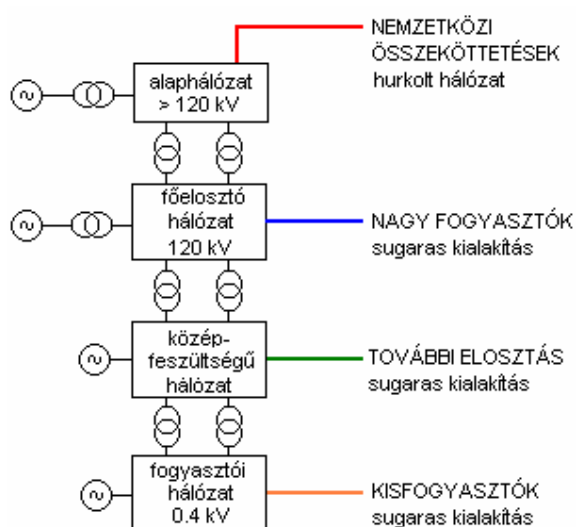
5. *Ismertesse a villamosenergia-hálózat*
- *feladatkörök szerinti felosztását*
  - *a jellegzetes feszültszinteket*
  - *feszültszintenként a hálózat kialakítását*

FELADATKÖRÖK

FESZÜLTÉS SZINTEK

- alaphálózat 750 kV, 400 kV [1000 MVA]
- főelosztó hálózat 120 kV [100 MVA]
- közepfeszültségű 10 kV, 20 kV [10 MVA]
- ipari feszültségű 6 kV
- kisfeszültségű 230 V, 400 V [0.1 MVA]

HÁLÓZAT KIALAKÍTÁSA



6. Adja meg a háromfázisú szimmetrikus összetevők módszerének:
- a „ $T$ ” transzformációs mátrixát az „ $a$ ” forgató vektoralapján
  - a fázismennyiségek és a szimmetrikus összetevők közötti kapcsolatot
  - a szimmetrikus összetevők és a fázismennyiségek közötti kapcsolatot
  - a fázis impedancia és a szimmetrikus összetevő impedancia mátrixok közötti kapcsolatot

TRANSZFORMÁCIÓS MÁTRIX

$$\bar{a} = e^{j120^\circ}$$

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^{-2} & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^{-2} \end{bmatrix} \quad [T]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^{-2} \\ 1 & \bar{a}^{-2} & \bar{a} \end{bmatrix}$$

FÁZIS  $\leftrightarrow$  SZIMMETRIKUS

$$\bar{I}_f = \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} \quad \bar{I}_s = \begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$\bar{I}_s = [T]^{-1} \cdot \bar{I}_f$$

$$\bar{I}_f = [T] \cdot \bar{I}_s$$

FÁZIS- ÉS SZIMMETRIKUS IMPEDANCIA

$$[Z_{ff}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad [Z_{ss}] = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \bar{U} = [Z] \cdot \bar{I}$$

$$\Delta \bar{U}_f = [Z_{ff}] \cdot \bar{I}_f$$

$$\Delta \bar{U}_s = [Z_{ss}] \cdot \bar{I}_s$$

$$\Delta \bar{U}_s = [T]^{-1} \cdot \Delta \bar{U}_f$$

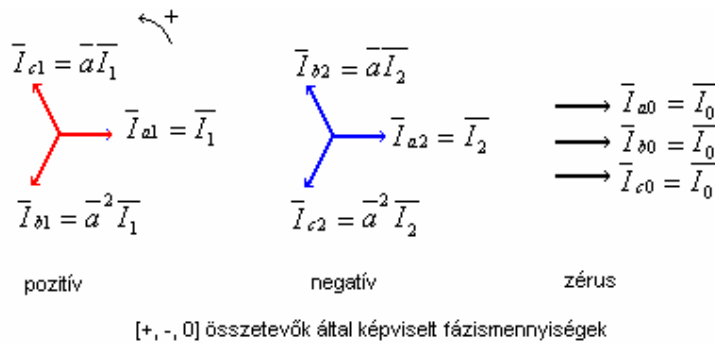
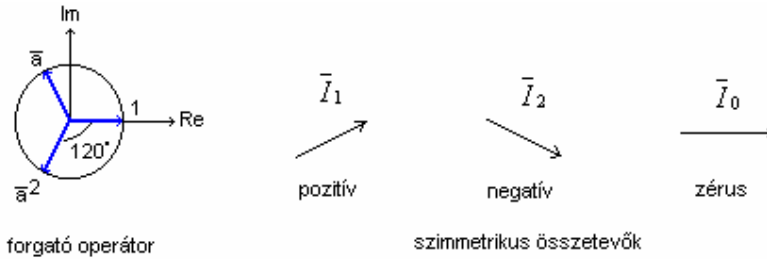
$$\bar{I}_f = [T] \cdot \bar{I}_s$$

$$\Delta \bar{U}_s = [T]^{-1} \cdot [Z_{ff}] \cdot [T] \cdot \bar{I}_s$$

$$[Z_{ss}] = [T]^{-1} \cdot [Z_{ff}] \cdot [T]$$

7. *Fazorábrán szemléltesse a pozitív, negatív és zérus sorrendű összetevők által képviselt fázismennyiségeket!*  
*Adja meg az  $I_a=100 e^{j90^\circ}$   $I_b=I_c=0$  áramrendszer pozitív, negatív és zérus sorrendű összetevőinek fazorát!*  
*Határozza meg annak az aszimmetrikus feszültségrendszernek a fázisfeszültségeit, melynek az alább megadottak a szimmetrikus összetevői:  $U_0=-100V$   $U_1=100V$   $U_2=0V$*

POZITÍV, NEGATÍV ÉS ZÉRUS SORRENDŰ ÖSSZETEVŐK ÁLTAL KÉPVISELT FÁZISMENNYISÉGEK



ADOTT ÁRAMRENDSZER POZITÍV, NEGATÍV ÉS ZÉRUS SORRENDŰ ÖSSZETEVŐINEK FAZORA

$$\bar{I}_f = \begin{bmatrix} 100 e^{j90^\circ} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [A] \quad \bar{I}_s = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^{-2} \\ 1 & \bar{a}^{-2} & \bar{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 100 e^{j90^\circ} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [A] = \begin{bmatrix} 33.3 e^{j90^\circ} \\ 33.3 e^{j90^\circ} \\ 33.3 e^{j90^\circ} \end{bmatrix} [A]$$

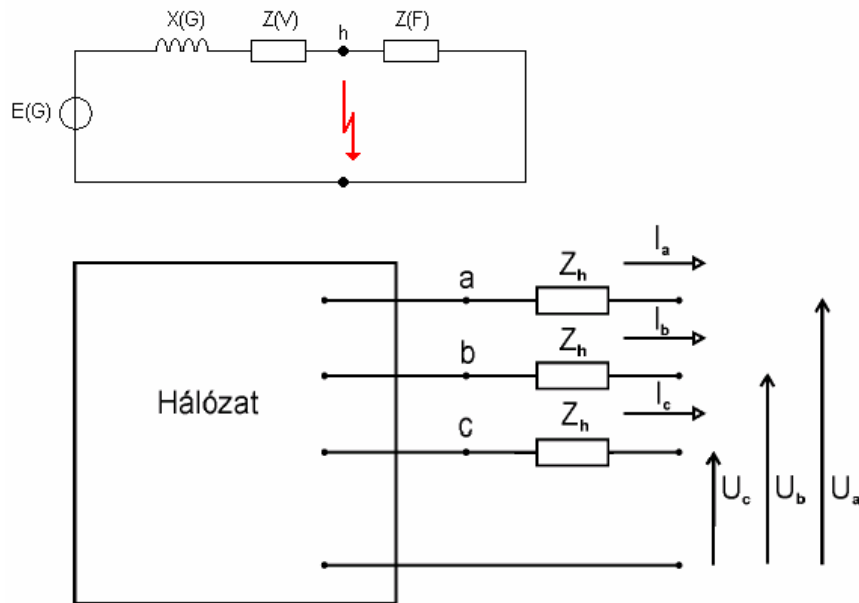
ADOTT ASZIMMETRIKUS FESZÜLTÉSRENDSZER FÁZISFESZÜLTSÉGEI

$$\bar{U}_s = \begin{bmatrix} -100 \\ 100 \\ 0 \end{bmatrix} [V] \quad \bar{U}_f = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^{-2} & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^{-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -100 \\ 100 \\ 0 \end{bmatrix} [V] = \begin{bmatrix} 0 \\ -100 + 100 e^{j240^\circ} \\ -100 + 100 e^{j120^\circ} \end{bmatrix} [V]$$

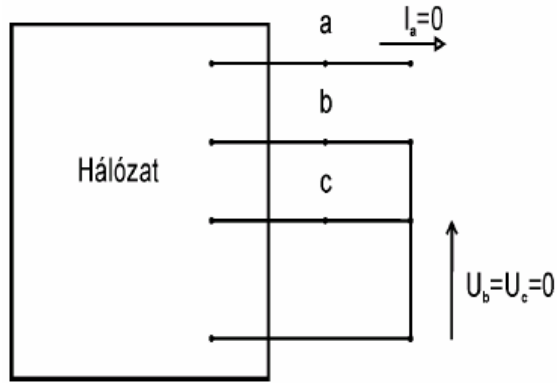


8. Származtassa le a szimmetrikus összetevők módszerének felhasználásával a kétfázisú földzárlat számítására szolgáló modellt (a sorrendi hálózatok kapcsolódását).

ÁLTALÁNOS ZÁRLATSZÁMÍTÁSI MODELL ÉS LÉPÉSEI



1. A hibahelyi fázisegyenletek felírása
2. Transzformálás szimmetrikus összetevőkre
3. Az összetevő hálózatok összekapcsolása
4. Feszültség- és árameloszlás szimmetrikus összetevőkkel
5. Inverz transzformáció fázismennyiségekre



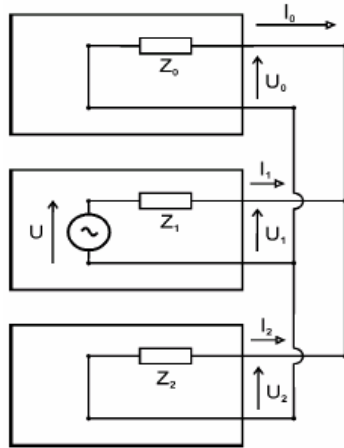
1. A HIBAHELYI FÁZISEGyenLETEK FELÍRÁSA

$$I_a = 0 \quad U_b = 0 \quad U_c = 0$$

2. TRANSZFORMÁLÁS SZIMMETRIKUS ÖSSZETEVŐKRE

$$U_s = T^{-1}U_f = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{U_a}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

3. AZ ÖSSZETEVŐ HÁLÓZATOK ÖSSZEKAPCSOLÁSA



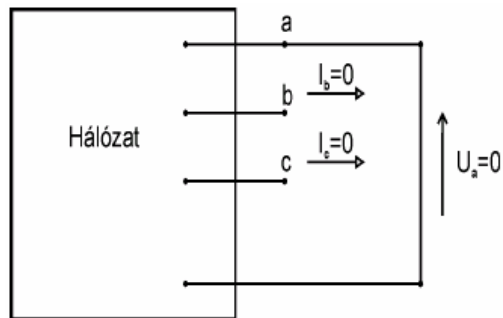
4. Feszültség- és Árameloszlás Szimmetrikus Összetevőkkel

$$I_1 = \frac{U}{Z_1 + \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_2}} \quad I_0 = -I_1 \frac{Z_2}{Z_0 + Z_2} \quad I_2 = -I_1 \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

5. INVERZ TRANSZFORMÁCIÓ Fázismennyiségekre

$$I_f = T I_s$$

9. Származtassa le a szimmetrikus összetevők módszerének felhasználásával a egyfázisú földzárlat számítására szolgáló modellt.



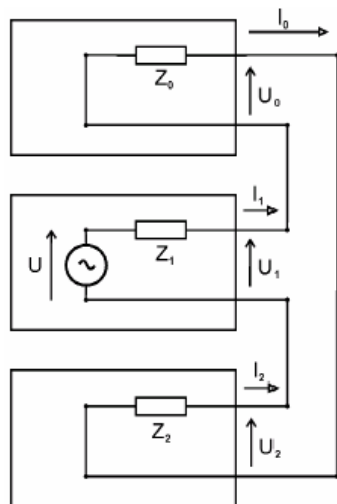
1. A HIBAHELYI FÁZISEGYENLETEK FELÍRÁSA

$$U_a = 0 \quad I_b = 0 \quad I_c = 0$$

2. TRANSZFORMÁLÁS SZIMMETRIKUS ÖSSZETEVŐKRE

$$I_s = T^{-1}I_f = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{I_a}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

3. AZ ÖSSZETEVŐ HÁLÓZATOK ÖSSZEKAPCSOLÁSA



4. FESZÜLTÉG- ÉS ÁRAMELOSZLÁS SZIMMETRIKUS ÖSSZETEVŐKKEL

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{U}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$$

5. INVERZ TRANSZFORMÁCIÓ FÁZISMENNYISÉGEKRE

$$I_f = TI_s$$

10. Adja meg a szimmetrikusnak tekintett háromfázisú rendszer fázisimpedancia mátrixának elemeivel ( $Z_0, Z_k$ ) a szimmetrikus összetevőkkel szembeni sorrendi impedanciákat ( $Z_0, Z_1, Z_2$ )!  
Adja meg annak a szimmetrikus távvezetéknek a zérus, pozitív és negatív sorrendű impedanciáját, amelynek

- fázis-föld impedanciája:  $Z_0=0.15+j0.6 \text{ Ohm/km}$
- a fázisok közötti földvisszavezetések kölcsönös impedanciája:  $Z_k=0.05+j0.3 \text{ Ohm/km}$

#### A SORRENDI IMPEDANCIÁK

A fázisimpedancia mátrix főátlóbeli elemei a *fázisimpedanciák*, a többi elem a *kölcsönös impedancia*. Szimmetrikus esetben a fázisimpedanciát *önimpedanciának* is szokás nevezni. (A hálózat törekszik a szimmetriára.) Ez egy ciklikus mátrix, ami mindig igaz a villamos hálózatokra. A forgó gépek kivételével a szimmetria is teljesül, tehát  $Z_n=Z_m$ .

$$[Z_{ff}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} Z_\vartheta & Z_n & Z_m \\ Z_m & Z_\vartheta & Z_n \\ Z_n & Z_m & Z_\vartheta \end{bmatrix}$$

$$[Z_{ss}] = \begin{bmatrix} Z_\vartheta + Z_n + Z_m & & \\ & Z_\vartheta + \bar{a}^2 Z_n + \bar{a} Z_m & \\ & & Z_\vartheta + \bar{a} Z_n + \bar{a}^2 Z_m \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} Z_\vartheta + 2Z_k & & \\ & Z_\vartheta + Z_k(\bar{a}^2 + \bar{a}) & \\ & & Z_\vartheta + Z_k(\bar{a} + \bar{a}^2) \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} Z_\vartheta + 2Z_k & & \\ & Z_\vartheta - Z_k & \\ & & Z_\vartheta - Z_k \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} Z_0 &= Z_\vartheta + 2Z_k && \text{zérus} \\ Z_1 &= Z_\vartheta - Z_k && \text{pozitív} \\ Z_2 &= Z_\vartheta - Z_k && \text{negatív} \end{aligned}$$

#### PÉLDA

$$\left. \begin{aligned} Z_\vartheta &= (0.15 + j0.6) \Omega/\text{km} \\ Z_k &= (0.05 + j0.3) \Omega/\text{km} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} Z_0 &= (0.25 + j1.2) \Omega/\text{km} && \text{zérus} \\ Z_1 &= Z_2 = (0.1 + j0.3) \Omega/\text{km} && \text{pozitív, negatív} \end{aligned}$$

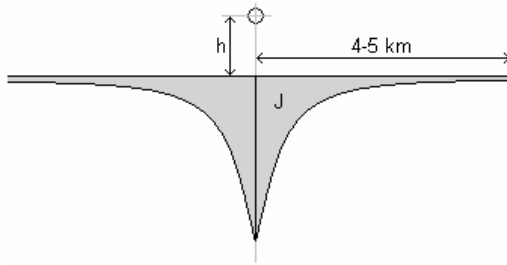
11. Adja meg egy vezető-föld hurokra váltakozó áram esetén:

- a földben az árameloszlás minőségi képét
- a Carson-Clem helyettesítés értelmezését

$$R_f = 0.00099 \cdot f \quad D_f = 659 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

- a hurok impedancia értékét
  - frekvencia 50 Hz
  - a föld fajlagos ellenállása 50 Ohm/m
  - a vezető ellenállása 0.1 Ohm/km, sugara 6.59mm

AZ ÁRAMELOSZLÁS MINŐSÉGI KÉPE



A CARSON-CLEM HELYETTESÍTÉS ÉRTELMEZÉSE

Carson vizsgálatai két elrendezésre vonatkoznak. Az egyik egy vezetőből és a földből alkotott hurok hosszegységenkénti önimpedanciája. A másik pedig egy-egy vezető-föld hurok között fellépő kölcsönös impedancia.

Alapvetően végtelen hosszú vezetőből és végtelen térfogatú földből indulunk ki.

- I. A fázisvezető-föld hurok impedanciája a föld, valamint a fázisvezető ohmos ellenállásából és a hurok reaktanciájából tevődik össze.

A vezető-föld hurok önimpedanciája:

$$Z_{\bar{o}} = R_V + 0.00099 f + j0.0029 f \lg \frac{D_e}{r_v^*} \quad [\Omega/km]$$

$R_V$  a vezető ellenállása  $[\Omega/km]$

$f$  frekvencia

$r_v^*$  a vezető redukált sugara  $[cm]$

$D_e$  a fázisvezető és a földvisszavezetést helyettesítő fiktív vezető távolsága  $[cm]$

$$D_e = 6.59 \sqrt{\frac{\sigma}{f}} \cdot 10^4 \quad [cm]$$

$\sigma$  a föld fajlagos ellenállása  $[\Omega / m]$

Ha a vezetőknek a föld feletti magassága  $h$ , akkor ezt  $D_e$ -hez még hozzá kell adni. Mivel ez a gyakorlatban 1% hibát okozhat, nem vesszük figyelembe. Az áram igen nagy százaléka 4-5 km – en belül folyik vissza, ami 50 Hz-es hálózati frekvencia esetén is több  $km^2$ -es keresztmetszetet jelent. A föld impedanciájának ohmos része nem függ annak fajlagos ellenállásától, kizárólag a frekvenciától. Ezen impedancia induktív része viszont rossz vezetőképességű talaj esetén nagyobb.

II. Két vezető-föld hurok kölcsönös impedanciája:

$$Z_K = 0.00099 f + j0.0029 f \lg \frac{D_e}{D_{ab}} \quad \left[ \frac{\Omega}{km} \right]$$

$D_{ab}$  a két párhuzamos vezető egymástól mért távolsága

Az egyszerűsített *Carson-Clem képlet* nem érvényes tetszőleges frekvenciákra, maximum 5 kHz helyettesíthető be. Tágabb körű vizsgálati esetekben a komplex tükrözési módszer alkalmazható.

PÉLDA

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$\sigma = 50 \Omega/m$$

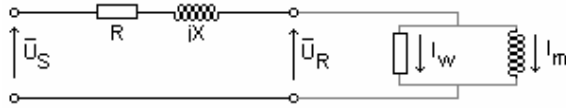
$$R_V = 0.1 \Omega/km$$

$$r_v^* = 6.59 \text{ mm}$$

$$D_e = 6.59 \sqrt{\frac{50}{50}} \cdot 10^4 = 65900 \text{ cm}$$

$$Z_O = 0.1 + 0.00099 \cdot 50 + j0.0029 \cdot 50 \lg \frac{65900}{6.59 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{0.1495 + 1.015j}} \quad [\Omega/km]$$

12. Jellemezze a fázorábra alapján egy  $I=I_w+jI_m$  árammal terhelt  $Z=R+jX$  soros impedanciával jellemzett távvezeték esetére a komplex feszültségesést, valamint annak hossz- és keresztirányú összetevőit! Milyen kapcsolat van az átvitt hatásos és meddő teljesítmény, valamint a feszültségesés komponensek között?



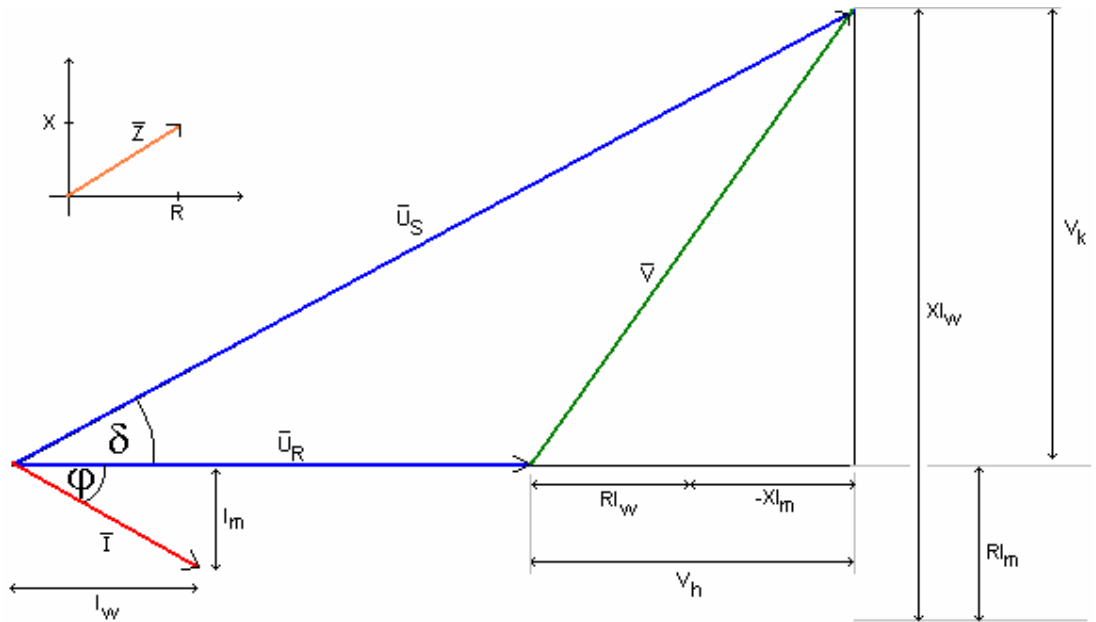
$$\bar{I} = Ie^{j\varphi} \quad \text{terhelőáram}$$

$$\bar{V} = \bar{U}_S - \bar{U}_R \quad \text{feszültségesés}$$

$$\bar{V} = \bar{Z}\bar{I} = (R + jX)(I_w + jI_m) = (RI_w - XI_m) + j(RI_m + XI_w)$$

$$V_h \quad \text{hosszirányú összetevő}$$

$$V_k \quad \text{keresztirányú összetevő}$$



$\varphi$  és  $I_m$  negatív, mert a terhelés induktív jellegű.

$$V_h = |U_S| \cos \delta - |U_R|$$

$$V_k = |U_S| \sin \delta$$

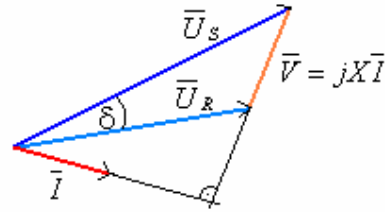
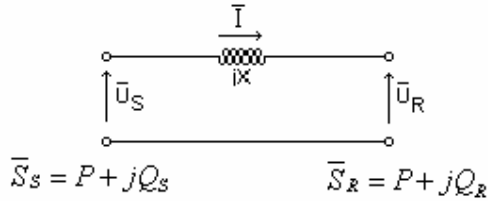
Általában  $\delta \rightarrow 0$  ezért  $V \approx V_h$

Kis  $R/X$  arányoknál  $R$  elhanyagolható. A hosszirányú feszültségesést a meddő, a terhelési szög pedig a hatásos teljesítmény áramlás befolyásolja.

Hálózatoknál jellemző, hogy a mérhető feszültségesés közel egyenlő a hosszirányú feszültségeséssel.

13. Adja meg a  $Z=jX$  soros impedanciával jellemzett vezetékre adott végponti feszültségek esetén:
- $S$  és  $R$  végpontjára a hatásos- és meddőteljesítmény összefüggéseket
  - a szinkron stabilitás korlátját
  - hogyan tudja befolyásolni a meddőteljesítmény-áramlást?

HATÁSOS- ÉS MEDDŐTELJESÍTMÉNY ÖSSZEFÜGGÉSEK



$$\bar{I} = \frac{\bar{U}_S - \bar{U}_R}{jX}$$

referencia: $U_S$	$\bar{U}_S = U_S$
	$\bar{U}_R = U_R e^{-j\delta}$

$$\bar{I}^* = \left( \frac{U_S - U_R e^{-j\delta}}{jX} \right)^* = \frac{U_R \sin \delta}{X} + j \frac{U_S - U_R \cos \delta}{X}$$

$$\bar{S}_S = \bar{U}_S \bar{I}^* = \frac{U_S U_R}{X} \sin \delta + j \frac{U_S (U_S - U_R \cos \delta)}{X}$$

$$P_S = \frac{U_S U_R}{X} \sin \delta$$

$$Q_S = \frac{U_S (U_S - U_R \cos \delta)}{X}$$

referencia: $U_R$	$\bar{U}_S = U_S e^{j\delta}$
	$\bar{U}_R = U_R$

$$\bar{I}^* = \left( \frac{U_S e^{j\delta} - U_R}{jX} \right)^* = \frac{U_S \sin \delta}{X} + j \frac{U_S \cos \delta - U_R}{X}$$

$$\bar{S}_R = \bar{U}_R \bar{I}^* = \frac{U_S U_R}{X} \sin \delta + j \frac{U_R (U_S \cos \delta - U_R)}{X}$$

$$P_R = \frac{U_S U_R}{X} \sin \delta$$

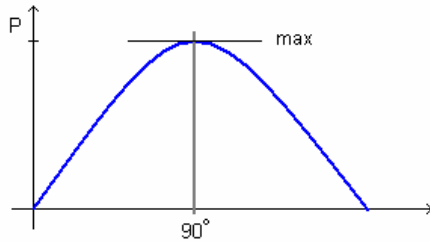
$$Q_R = \frac{U_R (U_S \cos \delta - U_R)}{X}$$



#### A SZINKRON STABILITÁS KORLÁTJA

$$P = \frac{U_S U_R}{X} \sin \delta$$

Ebből az összefüggésből látszik, hogy az átvitt teljesítménnyel a terhelési szög nő. Maximuma 90 foknál van, illetve ezen értéknél kisebb szögekre stabilis munkapont tartományban van.



#### MEDDŐTELJESÍTMÉNY ÁRAMLÁS

A meddőteljesítmény irányát és nagyságát alapjában véve a végpontok közötti feszültség különbség szabja meg. A nagyobb feszültségű végponttól a kisebb feszültségű végpont felé áramlik.

$$Q_S - Q_R = \frac{(\bar{U}_S - \bar{U}_R)^2}{X} = \frac{V^2}{X} = XI^2$$

14. Egy villamosenergia-rendszerben a hatásos ( $P$ ) teljesítmények egyensúlya általános érvényű.

- Adja meg a dinamikus energetikai egyensúly matematikai leírását!
- Értelmezze a (fiktív) rendszerfrekvenciát!
- Miért kell folyamatosan szabályozni az erőművek hatásos teljesítményét?

#### DINAMIKUS ENERGETIKAI EGYENSÚLY

$$P_G = P_M - T \frac{d\omega}{dt} = P_F + P_V$$

$P_G$ : a generátor által leadott villamos teljesítmény

$P_M$ : a turbina leadott mechanikai teljesítménye

$T$ : a rendszer forrásoldali összperdülete

$\omega$ : a rendszer átlagos körfrekvenciája

$P_F$ : összfogyasztás

$P_V$ : összveszteség

Látható, hogy  $\omega$  addig változik, amíg  $P_M = P_F + P_V$  be nem következik.

#### FIKTÍV RENDSZERFREKVENCIA

Az átlagos rendszerfrekvenciát úgy értelmezzük, hogy átmeneti állapotokban a rendszer egyes pontjain mérhető frekvencia ezen átlagérték körül viszonylag kis amplitúdóval ingadozik.

Állandósult állapotban a rendszer a fiktív frekvenciához tart és stabilizálja azt.

$$\omega = \sum (\omega_i * T_i) / T, \text{ ahol } T = \sum (T_i), \text{ és } \omega_i \text{ és } T_i \text{ az } i\text{-edik gép körfrekvenciája ill. perdülete.}$$

#### HATÁSOSTELJESÍTMÉNY SZABÁLYOZÁS

A fogyasztói teljesítmény igény folyamatosan változik, de a véletlenszerű változások a nagy számú fogyasztó miatt kiegyenlítődnek.

Az összfogyasztás előre jól megbecsülhető.

~~Azért kell az erőművek hatásos teljesítményét folyamatosan szabályozni, mert a dinamikus energetikai egyensúlyt kifejező összefüggésnek mindig teljesülnie kell  $\rightarrow$  a megtermelt energia nem tárolható~~

Mi akármit csinálunk, a fenti mindig teljesül, mert az nem más, mint az energiamegmaradás törvénye.

(Ezért tehát nem kell izzadni.)

A kérdés csak az, hogy ez az egyensúly milyen frekvencián teljesül.

Azért kell szabályozni, hogy a rendszerfrekvencia (közel) állandó és (közel) névleges legyen.

Ha ui. ( $P_F + P_V$ ) változik, és  $P_M$  nem, akkor nyilván  $\omega$  fog változni.

15. Egy villamosenergia-rendszerben a meddő ( $Q$ ) teljesítmények egyensúlya általános érvényű.
- Adja meg a meddőteljesítmények egyensúlyának matematikai leírását!
  - Értelmezze egy távvezeték természetes teljesítményét!
  - Miért szükséges a folyamatos feszültség szabályozás?

#### MEDDŐTELJESÍTMÉNY EGYENSÚLY

A fogyasztók többsége nemcsak hatásos, hanem meddő teljesítményt is igényel, ezért ezt is elő kell állítani és a fogyasztóhoz eljuttatni.

$$Q_G = Q_F - Q_C + Q_H$$

$Q_G$ : generátor által leadott meddő teljesítmény

$Q_F$ : fogyasztók által felvett meddő teljesítmény

$Q_C$ : helyi meddőforrásokban (kondenzátorokban) előállított meddő teljesítmény

$Q_H$ : a teljes hálózat meddőegyenlegének induktív fogyasztása

#### TERMÉSZETES TELJESÍTMÉNY

Egy távvezeték természetes teljesítménye:  $P_{\text{természetes}} = \frac{U_{\text{fázis}}^2}{Z_0}$

$U_{\text{fázis}}$ : fázisfeszültség

$Z_0$ : hullámellenállás

Ha a vezetéken éppen a természetes teljesítménnyel egyenlő hatásos teljesítmény áramlik, akkor a teljes vezeték meddő mérlege zérus.

$$Q_{\text{ind}} \langle \text{fogyasztott} \rangle \equiv Q_{\text{kap}} \langle \text{termelt} \rangle$$

$$Q_{\text{kap}} = \omega C U^2$$

$$Q_{\text{ind}} = \omega L I^2$$

#### FOLYAMATOS FESZÜLTÉGSZABÁLYOZÁS

A feszültség és a meddőteljesítmény szoros kapcsolatban áll egymással. A meddő teljesítmény mindig a magasabb potenciálú helyről az alacsonyabb potenciálú felé áramlik.

→ a potenciálkülönbség meddő-áramlást eredményez

Alapvetően feszültség szabályozási és meddő-kompenzációs feladat.

#### feszültség szabályozása

FORRÁSOLDAL generátor

HÁLÓZATI OLDAL transzformátorokkal és meddő forrásokkal szabályozható

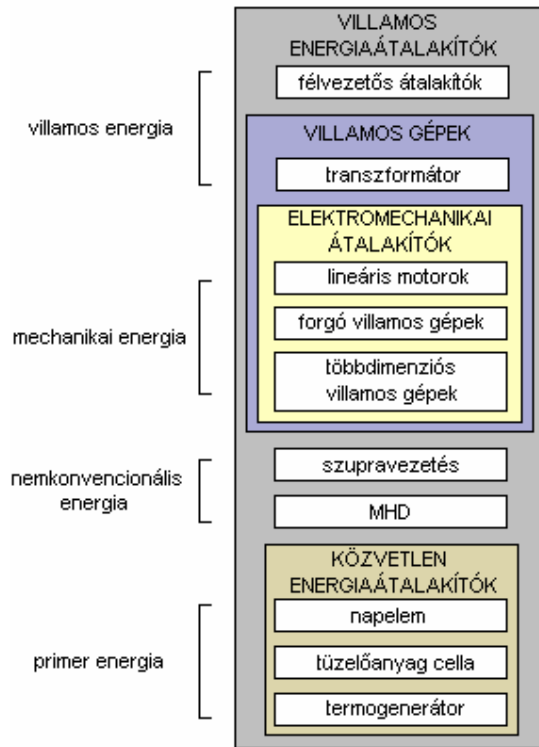
A rendszer feszültségviszonyait alapvetően a generátorokkal állíthatjuk. Másodlagos szabályozókkal csak korrekció végezhető.

# VILLAMOS ENERGETIKA

## II. RÉSZ

16. *A villamos energiaátalakítók osztályozása.  
A villamos gépek működésének alapelvei.*

### A VILLAMOS ENERGIÁÁTALAKÍTÓK



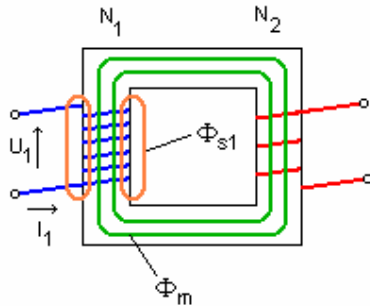
### A VILLAMOS GÉPEK ALAPELVEI

1. A villamos gépekben az energiaáramlás iránya megfordítható.  
MOTOR  $\leftarrow \rightarrow$  GENERÁTOR  
Ezt nevezzük a villamos gépek motoros illetve generátoros üzemének.
2. Az energiaátalakítás hatásfoka elvileg elérheti a 100% hatásfokot.  
A gyakorlatban ez nem megvalósítható, de jól megközelíthető.  
Nagy transzformátorok, erőművi generátorok hatásfoka meghaladhatja a 99.5%-ot.
3. Az átalakító működése két, egymáshoz képest nyugalomban lévő MÁGNESES vagy VILLAMOS mező kölcsönhatásán alapszik.  
A gyakorlatban a mágneses terek kölcsönhatásán alapuló villamos energia-átalakítók terjedtek el.

17. Az energiaátviteli transzformátorok működési elve, az indukált feszültség számítása.  
A gerjesztések egyensúlyának törvénye.

#### A TRANSZFORMÁTOR MŰKÖDÉSI ELVE

- A transzformátor adott áramú és feszültségű teljesítményt más áramú és feszültségű teljesítménnyé alakít át adott frekvencia mellett
- Működése a kölcsönös indukció elvén alapul



$N_1, N_2$  : menetszámok

$\Phi_m$  : főfluxus, mágnesezőfluxus → a vasmagon záródik

$\Phi_s$  : szórt fluxus → a tekercs meneteivel záródik

Az áramforrásra kapcsolt tekercset **primer** (nagyfeszültségű) tekercsnek, a másikat **szekunder** (kisfeszültségű) tekercsnek nevezzük.

#### VASMAG

1. Segíti, hogy a szükséges mágneses indukciót minél kisebb gerjesztő áram hozza létre.
2. Segíti a mágneses fluxus előírt útvonalra való terelését.
3. A vasvesztés csökkentése érdekében lemezel.
4. A kör-keresztmetszet közelítése miatt lépcsőzött.

#### TEKERCS

1. Legegyszerűbb a hengeres tekercselés.
2. Gyakran a tekercsek egymásba vannak tolva a jobb csatolás végett.
3. külső tekercs: *nagyfeszültségű* , belső tekercs: *kisfeszültségű*

### AZ INDUKÁLT FESZÜLTÉG SZÁMÍTÁSA

$\omega = 2\pi f$  : hálózati körfrekvencia

$N_1, N_2$  : menetszámok

$\Phi_m$  : főfluxus csúcérték

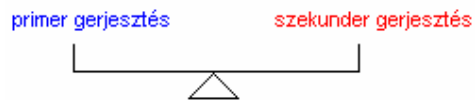
$U_i$  : indukált feszültség

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

$$\frac{\bar{U}_{1i}}{\bar{U}_{2i}} = \frac{N_1}{N_2} = n : \text{menetszám-áttétel} \neq \text{feszültség-áttétel}$$

szinuszos esetben  $\rightarrow U_{i,eff} = \frac{U_{i,max}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \Phi_m = 4.44 f N_1 \Phi_m$

### A GERJESZTÉSEK EGYENSÚLYÁNAK TÖRVÉNYE



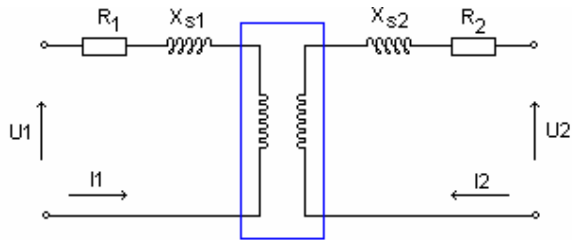
A transzformátor feszültségkényszer alatt dolgozik.

$$U_1 = áll \Rightarrow U_i \approx áll \Rightarrow \Phi \approx áll$$

$$\Phi_1 = N_1 I_1 \cong N_2 I_2 = \Phi_2 \quad \text{Majdnem minden üzemállapotban!}$$

18. *A gerjesztés- és a teljesítmény-invariancia elve és alkalmazása.  
A transzformátor teljes és egyszerűsített helyettesítő kapcsolásai.*

AZ IDEÁLIS TRANSZFORMÁTOR



Az egyenletek felírásához *fogyasztói pozitív irányrendszer* választása szükséges.  
(A felvett teljesítmény előjele pozitív.)  
Ennek előnye, hogy az egyenletek szimmetrikusak és ugyanolyan alakúak mindkét tekercsre.

AZ IDEÁLIS TRANSZFORMÁTOR FESZÜLTÉG-EGYENLETE

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + jX_{s1} \bar{I}_1 + \bar{U}_{1i}$$

$$\bar{U}_2 = R_2 \bar{I}_2 + jX_{s2} \bar{I}_2 + \bar{U}_{2i}$$

### INVARIANCIA ELVE ÉS ALKALMAZÁSA

A transzformátor feszültségkényszer alatt dolgozik.

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

Az eredő gerjesztés a terhelési állapottól közel függetlenül:  $\Phi = N_1 I_1 + N_2 I_2$

Bármelyik áram helyettesíthető, ha az új tekercs menetszámát úgy választjuk meg, hogy:  $N_i I_i = N'_i I'_i$

Használjuk fel a menetszámáttételt:

$$n = \frac{U_{1i}}{U_{2i}}$$

$$N_2 I_2 = N_1 \frac{N_2}{N_1} I_2 = N_1 \frac{1}{n} I_2 = N_1 \left( \frac{I_2}{n} \right) = N_1 I'_2 \Rightarrow I'_2 = \frac{I_2}{n}$$

#### *KÖVETKEZMÉNY*

$N_2$  menetszámú tekercs helyettesíthető  $N_1$  menetszámúval úgy, hogy az eredeti és a helyettesítő tekercs gerjesztései azonosak.

#### *KÖVETKEZTETÉSEK*

1. Az ideális transzformátor kiküszöbölését a gerjesztések invarianciája (változatlansága) mellett oldottuk meg.  
Ezzel a változtatással azonban a paraméterek is módosulnak.
2. Mivel energiaátviteli transzformátort vizsgálunk, célszerű a paramétereket úgy változtatni, hogy a teljesítmény is invariáns legyen.

$$S_2 = U_2 I_2 = (n U_2) \left( \frac{I_2}{n} \right) = U'_2 I'_2$$

$$S_2 = Z_2 I_2^2 = Z_2 \left( \frac{I_2}{n} \right)^2 n^2 = n^2 Z_2 (I'_2)^2 = Z'_2 (I'_2)^2$$

$$Z'_2 = n^2 Z_2$$

$$R'_2 = n^2 R_2$$

$$X'_S = n^2 X_S$$

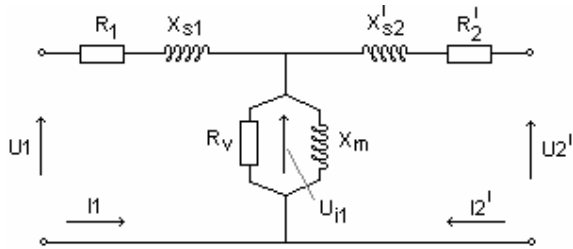
#### *AZ ÚJ VÁLTOZÓKKAL A FESZÜLTÉG-EGYENLET*

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= R_1 \bar{I}_1 + jX_{s1} \bar{I}_1 + \bar{U}_{1i} & \bar{U}_{1i} &= \bar{U}'_{2i} \\ \bar{U}'_2 &= R'_2 \bar{I}'_2 + jX_{s2} \bar{I}'_2 + \bar{U}'_{2i} \end{aligned}$$



TELJES ÉS EGYSZERŰSÍTETT HELYETTESÍTŐ KAPCSOLÁSOK

TELJES PASSZÍV HELYETTESÍTÉS



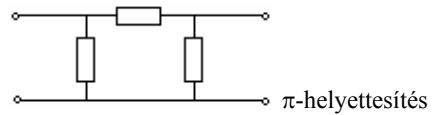
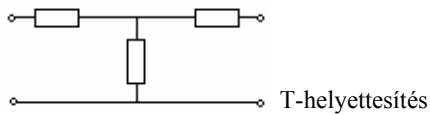
Egy többfázisú transzformátor egyfázisúra vonatkoztatott, állandósult és szimmetrikus állapotra vonatkozó térelméleti kapcsolási rajza.

- $R_{1,2}$  : tekercs ellenállás
- $R_v$  : vasveszteség
- $X_{s1,s2}$  : szórási reaktancia
- $X_m$  : főmező-reaktancia

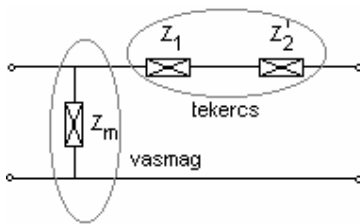
A helyettesítés tulajdonságai:

1. TÉRELMÉLETI
2. GERJESZTÉS INVARIÁNS
3. TELJESÍTMÉNY INVARIÁNS
4. érvényes a GERJESZTÉSEK EGYENSÚLYÁNAK TÖRVÉNYE

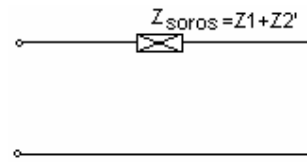
EGYSZERŰSÍTETT HELYETTESÍTÉSEK



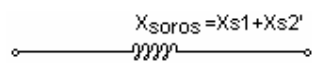
$U_i \approx U_{i1}$



$Z_{PÁRH} \gg Z_{SOROS}$

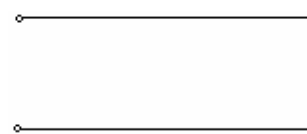


$R_{SOROS} \ll X_{SOROS}$



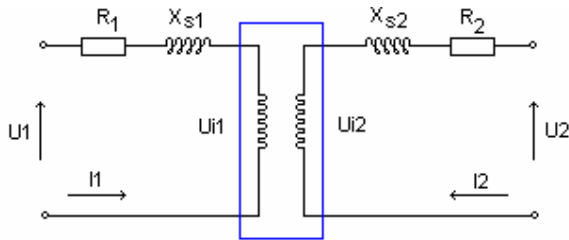
$R_{tekercs} \rightarrow 0$

$X_{szórási} \rightarrow 0$



19. A transzformátor helyettesítő kapcsolásában szereplő paraméterek értelmezése.  
A paraméterek redukálása és szokásos nagyságrendjei.

A PARAMÉTEREK ÉRTELMEZÉSE



$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= R_1 \bar{I}_1 + jX_{s1} \bar{I}_1 + \bar{U}_{1i} \\ \bar{U}_2 &= R_2 \bar{I}_2 + jX_{s2} \bar{I}_2 + \bar{U}_{2i} \end{aligned}$$

$R_{1,2}$  : a tekercs ohmikus ellenállása  
 $X_{s1,s2}$  : a tekercs szórási reaktanciája

A szórt fluxusok és a tekercsek ohmikus ellenállásán eső feszültségek a tekercsekben folyó áramokkal arányosak. A szórt fluxusok 90 fokot sietnek az áramhoz képest.  
Ennek megfelelően hatásuk modellezhető sorbakötött ellenállással és induktív reaktanciával.

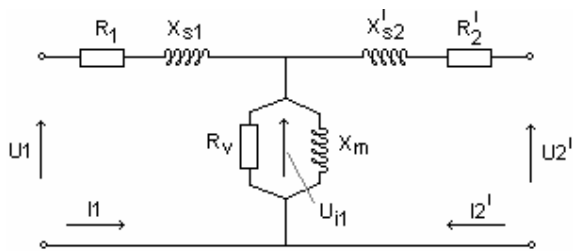
A PARAMÉTEREK REDUKÁLÁSA

Az ideális transzformátor kiküszöböléséhez egy olyan módszert kell választanunk, amellyel mindkét oldali indukált feszültség egyenlő lesz.  
Ezzel a lépéssel a feszültségeket egyenlővé tehetjük, vagyis a transzformátor áttételét 1:1-re választjuk, így az „nem transzformál”.  
Tehát az egyik oldali paramétereket redukálnunk kell úgy, hogy azzal az 1:1 transzformátor áttétellel érjük el.

Az arányossági tényező nem más, mint a transzformátor áttétele:  $n$

A gerjesztés- és teljesítmény-invariancia alkalmazásával a paraméterek a következők lesznek:

$$\begin{aligned} Z_2' &= n^2 Z_2 & U_2' &= U_2 n \\ R_2' &= n^2 R_2 & I_2' &= \frac{I_2}{n} \\ X_s' &= n^2 X_s & \bar{U}_{1i} &= \bar{U}_{2i}' \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= R_1 \bar{I}_1 + jX_{s1} \bar{I}_1 + \bar{U}_{1i} \\ \bar{U}_2' &= R_2' \bar{I}_2' + jX_{s2}' \bar{I}_2' + \bar{U}_{2i}' \end{aligned}$$

$R_v$  : vasvesztesség  
 $X_m$  : főmező-reaktancia

A vasvesztességet jelképező ellenálláson és a főmező-reaktancián folyó áram az azon megjelenő indukált feszültséggel arányos. Ezért jellemzi az itt „elfolyó áram” a vesztességet, amit a párhuzamos elemnél veszünk figyelembe.

#### A PARAMÉTEREK NAGYSÁGRENDJEI

Az egyes komponensek nagyságrendjét általában *relatív egységekben*, százalékosan szokás megadni. Ehhez szükséges a *névleges impedancia* fogalma:

$$Z_n = \frac{U_n}{I_n}$$

A feszültségegyenlet átírása relatív egységekbe:

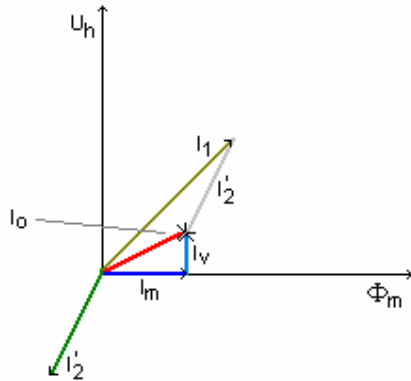
$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + jX_{s1} \bar{I}_1 + \bar{U}_{1i} \quad \Rightarrow \quad \frac{U_1}{U_{1n}} = \frac{R_1 I_1}{U_{1n}} + j \frac{X_{s1} I_1}{U_{1n}} + \frac{U_{1i}}{U_{1n}}$$
$$u_1 = \underbrace{r_1 i_1}_{1\%} + \underbrace{jx_{s1} i_1}_{2\%} + \underbrace{u_{1i}}_{97\%} \quad u_1 \cong u_{1i}$$

$$R_1 : X_{s1} : X_m : R_\gamma = 1 : 2 : 1000 : 10000$$

20. *A transzformátor terhelési fazorábrája.  
Üresjárási, terhelési és rövidzárási állapot.  
A százalékos feszültségesés (drop) fogalma.*

FAZORÁBRA

FESZÜLTÉGKÉNYSZER :  $U_{\text{hálózat}} = \text{állandó} = U_1 \Rightarrow U_{i1} \cong \text{állandó}$

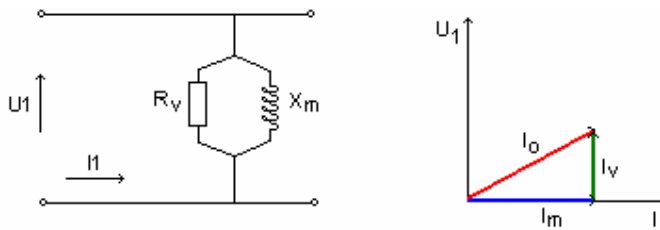


$\Phi_m \cong \text{állandó} \Rightarrow I_0 \cong \text{állandó}$

A feszültségkényszer eredményeképpen a gerjesztés állandó értékhez közeli lesz, ami a mindig változatlan párhuzamos tagokon konstans áramot hajt át. Ez az üresjárási áram, ami minden üzemállapotban jelen van.

ÜRESJÁRÁSI, TERHELÉSI ÉS RÖVIDZÁRÁSI ÁLLAPOT

ÜRESJÁRÁS

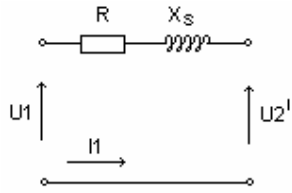


Mivel a vasvesztés és fővező-reaktancia értékei sokkal nagyobbak, mint a soros elemek, ezért a soros R és X elhanyagolható. Ezért nem tüntetjük fel az ábrán.  
A transzformátoron csak az  $I_0$  üresjárási áram folyik.

TERHELÉS

A fogyasztó számára az egyik legfontosabb kérdés, hogy különböző terheléseknél milyen szekunderfeszültség-változásra számíthat.

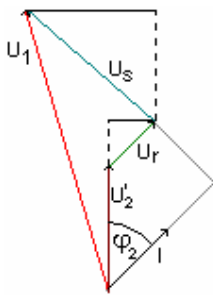
Névteljeshez közeli terhelésnél a következő egyszerűsítés alkalmazható:



$$R = R_1 + R_2'$$

$$X_S = X_{S1} + X_{S2}'$$

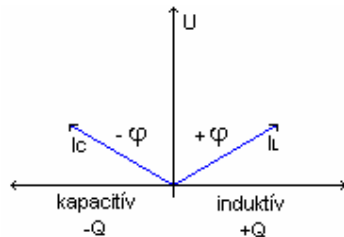
$$I = I_1 = -I_2'$$



$$\Delta \bar{U} = \bar{U}_1 - \bar{U}_2$$

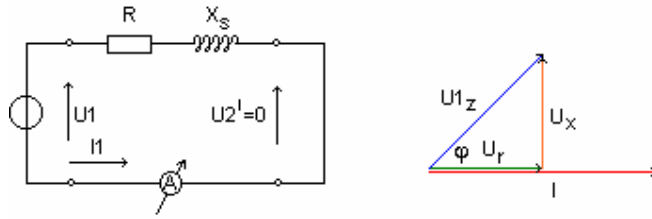
$$|\Delta \bar{U}| = IR \cos \varphi_2 + IX_S \sin \varphi_2$$

Megállapíthatjuk, hogy a feszültségváltozás függ a terheléstől (I) és annak jellegétől ( $\varphi$ ). Kapacitív terhelésnél a feszültség nőhet is.



### RÖVIDZÁR

A mérési rövidzárlathoz tartozó helyettesítő kapcsolás és vektorábra:



$$U_{1z} = I_{1n} R_1 + j I_{1n} X_S$$

A primer feszültséget addig növeljük, míg a szekunder tekercsben névleges áram folyik.  
A névleges áramnak megfelelő feszültséget a transzformátor rövidzárási feszültségének nevezzük.

### DROP

Az  $\varepsilon$ -nal jelölt drop nem más, mint a transzformátor rövidzárási feszültségese százalékos (viszonylagos) értékben megadva.

Szokásos nagysága a transzformátor terhelésétől függően 5...15%.

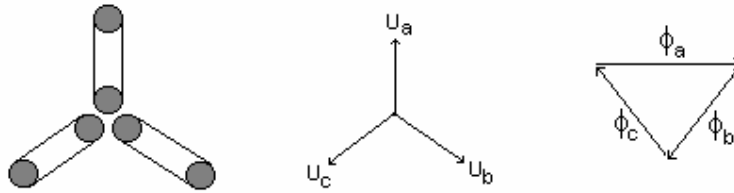
$$|\varepsilon| = \sqrt{\varepsilon_R^2 + \varepsilon_X^2} = \left| \frac{\bar{U}_{rz}}{\bar{U}_n} \right| = DROP$$

$$\varepsilon_R + j\varepsilon_X = \frac{\bar{U}_{rz}}{\bar{U}_n} = \frac{\bar{Z}_{rz}}{\bar{Z}_n} = \frac{R_{rz}}{R_n} + j \frac{X_{rz}}{X_n}$$

21. *Háromfázisú transzformátorok felépítése, a tekercsek kapcsolása, óraszám, párhuzamos kapcsolás.*

FELÉPÍTÉS, MŰKÖDÉSI ELV

A háromfázisú transzformátort három egyfázisú transzformátorból származtatjuk.

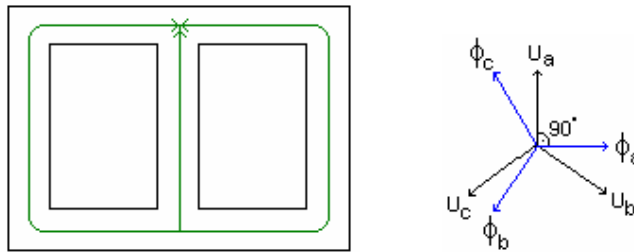


Az elrendezés teljesen szimmetrikus, így a fluxusok vektorösszege zérus.

→ A KÖZÉPSŐ OSZLOP ELHAGYHATÓ

$$\sum \Phi = 0$$

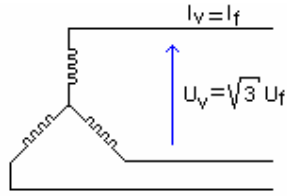
Magtípusú transzformátor sematikus rajza:



A háromfázisú feszültségrendszerhez képest 90 fokkal késik a fluxusrendszer.

## KAPCSOLÁSOK

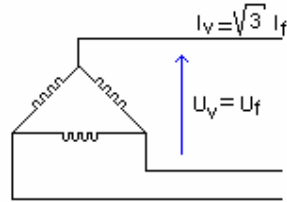
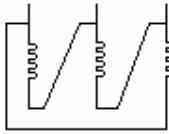
### CSILLAGKAPCSOLÁS



$$U_v = \sqrt{3} U_f$$
$$I_v = I_f$$

$$P_Y = 3 \frac{U_Y}{\sqrt{3}} I_Y \cos \varphi$$

### DELTA KAPCSOLÁS

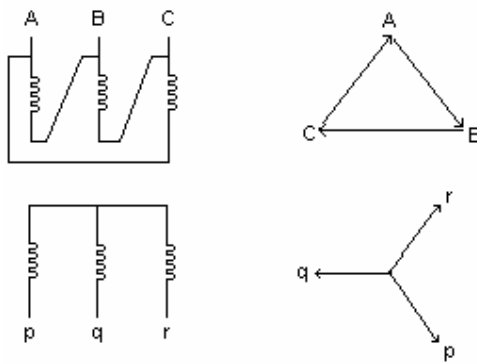


$$U_v = U_f$$
$$I_v = \sqrt{3} I_f$$

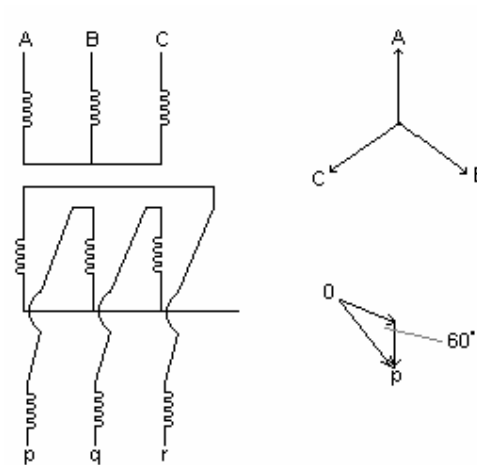
$$P_\Delta = 3 U_\Delta \frac{I_\Delta}{\sqrt{3}} \cos \varphi$$



### DELTA - CSILLAG KAPCSOLÁS



### CSILLAG - ZEG-ZUG KAPCSOLÁS



A delta-csillag és a zeg-zug kapcsolás csökkenti a terhelés aszimmetriájából származó káros következményeket.

### ÓRASZÁM

A megfelelő primer és szekunder feszültségek vektorai közötti fáziseltérést jelöli az *óraszám*. A fáziseltérés csak 30 fok egész számú többszöröse lehet.

### *PÉLDA*

A zeg-zug kapcsolás nagyfeszültségű „A” tekercsének feszültségvektora 12 órára mutat. A kisfeszültségű tekercsek ekkor egész órára fognak mutatni. A fenti ábráról leolvasható, hogy a „p” tekercs 5 órára mutat.

$$5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$$

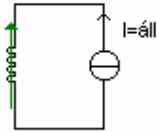
### PÁRHUZAMOS KAPCSOLÁS

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

22. Villamos gépek mágneses mezői: állandó, lüktető és forgó mezők.  
 Szinuszos térbeli mezőeloszlás létrehozása, a gerjesztési görbe szerkesztése.  
 Az indukcióvektor értelmezése.

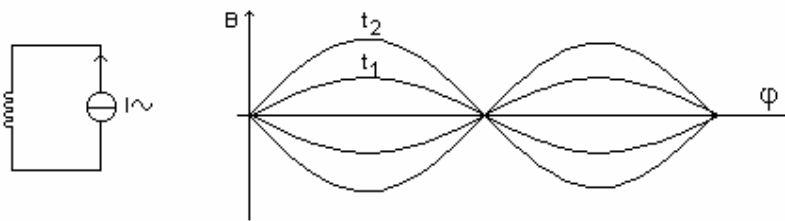
MEZŐTÍPUSOK

ÁLLANDÓ MEZŐ



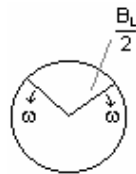
Egy tekercs egyenárammal gerjesztve.

LÜKTETŐ MEZŐ



Egy tekercs egyfázisú váltakozó árammal gerjesztve.  
 A lüktető mező térbeli állóhullám.

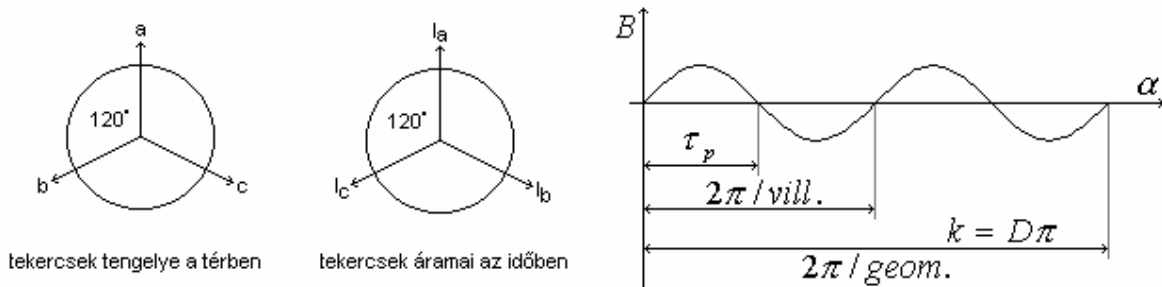
FERRARIS-TÉTEL: A lüktető mező felbontható két, egymással ellentétes irányban, azonos szögsebességgel forgó mezőre, amelyek amplitúdója a lüktető mező amplitúdójának a fele.



$$\left. \begin{aligned} B_+ &= \frac{1}{2} e^{j\omega t} \\ B_- &= \frac{1}{2} e^{-j\omega t} \end{aligned} \right\} B = B_+ + B_- = \cos(\omega t)$$

FORGÓ MEZŐ

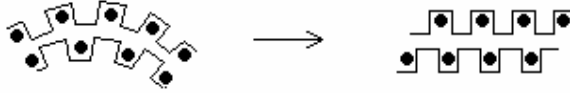
A forgó mező létrehozásához többfázisú tekercsrendszer és többfázisú áramrendszer szükséges.



$$\tau_p = \frac{D\pi}{2p} : \text{pólusosztás} \quad \alpha_v = p\alpha_g : \text{villamos és geometriai szög kapcsolata}$$

## SZÍNUSZOS MEZŐELOSZLÁS LÉTREHOZÁSA, GERJESZTÉSE GÖRBE SZERKESZTÉSE

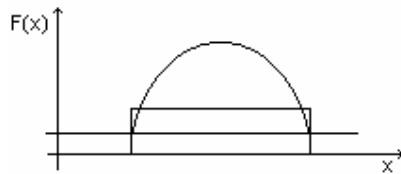
A számítás egyszerűsítése érdekében a hengeres álló- és forgórészt síkban kiterítjük.



Alkalmazzuk a gerjesztési törvényt:

A légréseken, valamint az álló- és forgórész-vastesten át záródó integrálási útvonalakat felvéve kapjuk a gerjesztés kerület menti eloszlását, az úgynevezett *lépcsős görbét*.

A lépcsős görbe Fourier-sora adja meg a gerjesztéseloszlás alapharmonikusát és felharmonikusait.

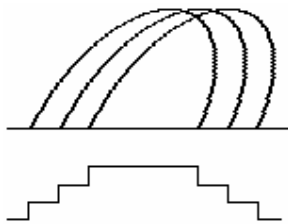


$$\text{alapharmonikus indukció: } B_1 = \frac{4}{\pi} B_m$$

$$\text{fázisonkénti és pólusonkénti horonyszám: } q = \frac{Z}{2pm}$$

Z: vezetők száma  
p: póluspárok száma  
m: fázisok száma

Mi történik  $q > 1$  választása esetén?



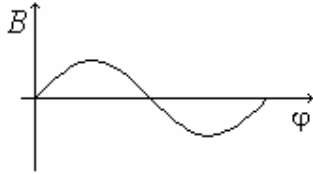
A mező szempontjából előnyös, mivel a térbeli eloszlás szinuszosabb lesz.

Az indukált feszültség viszont kisebb, mert az egyes tekercsoldalakban fázisban eltolt feszültségek indukálódnak, amelyek vektorösszege kisebb, mint a részfeszültségek abszolút értékeinek az összege.

### AZ INDUKCIÓVEKTOR ÉRTELMEZÉSE

*A többfázisú, szinuszos, kiegyenlített rendszerek villamos teljesítménye állandó.*

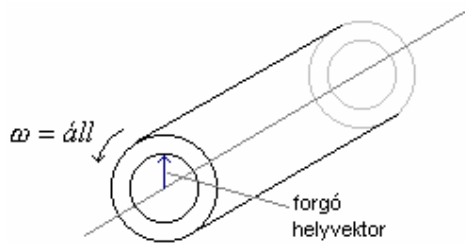
→ Mindig arra törekszünk, hogy villamos gépeinkben a térbeli indukcióeloszlás, valamint a feszültségek és áramok időbeli jelalakja a legjobban közelítse a szinuszfüggvényt.



$$B(\varphi) = B_m \sin(p\varphi)$$

$p$  = indukcióhullámok száma a kerület mentén = pólusszám

### *A KERÜLET MENTÉN HALADÓ HULLÁM*

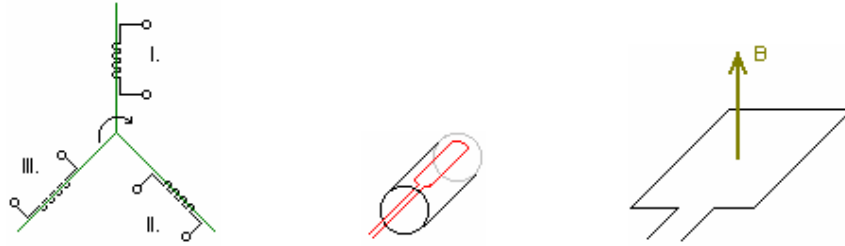


Ha a mágneses tér kerület menti eloszlása szinuszos, valamint a többfázisú áramok időbeli változása is szinuszos, akkor a villamos gép kapcsain leadott többfázisú villamos teljesítmény, illetve a villamos gép tengelyén leadott nyomaték az időben állandó.

23. *Forgó mező létrehozása többfázisú tekercsrendszerrel.  
A körforgó mező amplitúdója és szögsebessége.*

FORGÓ MEZŐ LÉTREHOZÁSA

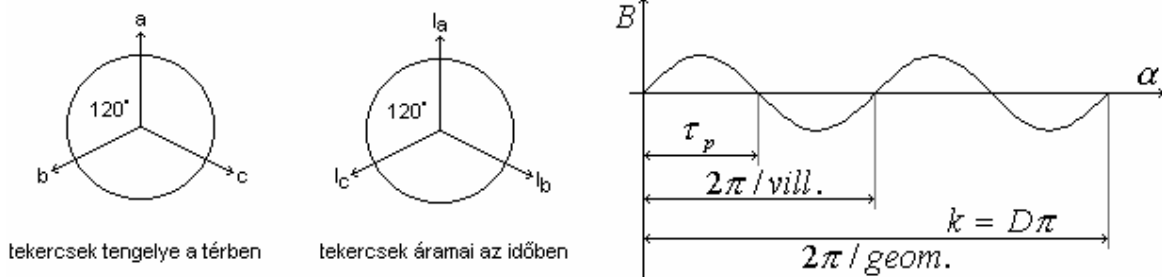
A forgó mező létrehozásához többfázisú tekercsrendszer és többfázisú áramrendszer szükséges.



A tekercsoldalakat a hengeres álló- vagy forgórész palástfelületén helyezzük el. A tekercsek tengelye egybeesik a tekercsek mágneses tengelyével.

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

A többfázisú tekercsrendszer tekercsei által egyenként, fázisban eltolva keltett szinuszos mágneses mező eredője egy állandó értékű, állandó sebességgel forgó mágneses mező.



$$\tau_p = \frac{D\pi}{2p} : \text{pólusosztás} \quad \alpha_v = p\alpha_g : \text{villamos és geometriai szög kapcsolata}$$

## FORGÓ MEZŐ AMPLITÚDÓJA ÉS SZÖGSEBESSÉGE

### FORGÓ MEZŐ MATEMATIKAI LEÍRÁSA

Az i-edik fázis indukcióhullámának kifejezése:

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

$B_i(t)$ : időfüggvény

$T_i(x)$ : térbeli eloszlást leíró függvény

$$T_{[a,b,c]}(x) = \cos\left(\frac{x}{\tau_p} \pi - [0,1,2] \times \frac{2\pi}{3}\right) \quad \text{térbeli eloszlás}$$

$$B_{[a,b,c]}(t) = B_m \cos\left(\omega t - [0,1,2] \times \frac{2\pi}{3}\right) \quad \text{időfüggvény}$$

$$B_{eredő}(x_1 t)_m = \frac{m}{2} B_m \cos\left(\omega_1 t - \frac{x}{\tau_p} \pi\right) \quad \text{az eredő mező}$$

$$B_{eredő, \max} = \frac{m}{2} B_{1f, \max} \quad \text{maximum érték}$$

### FORGÓ MEZŐ SZÖGSEBESSÉGE

I. A kerület mentén állandó szögsebességgel haladó hullám.

$\omega_1$ : hálózati körfrekvencia

$\omega_0 = \frac{\omega_1}{p}$ : szinkron körfrekvencia

II. A szinkron körfrekvencia ( $\omega_0$ ) nem függ a fázisszámtól.

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

$$\frac{m}{2} B_{m1, \max} = \frac{n}{2} B_{n1, \max}$$

III. A nyomatékképzés feltétele az álló és forgó rész pólusszám egyezése.

A két mezőnek relatív nyugalomban kell lennie.

$$B_{státor} \cdot B_{rotor} \Rightarrow \omega_{0, státor} = \omega_{0, rotor}$$

24. *Forgógépek nyomatékképzésének feltétele: a frekvencia-feltétel.  
Az egyes géptípusok származtatása.*

FREKVENCIA-FELTÉTEL

A nyomatékképzés feltétele az álló és a forgórész pólusszám egyezése.

A két mezőnek relatív nyugalomban kell lennie:

$$\omega_{0, \text{státor}} = \omega_{0, \text{rotor}}$$

↓

$$P_{\text{státor}} = P_{\text{rotor}}$$

Ez a nyomatékképzés szükséges feltétele.

$$\omega_{\text{státor}}|_B = \omega_{\text{rotor}}|_B + \omega_{\text{mech}}$$

Ez a frekvencia-feltétel.

$\omega_{\text{státor}}|_B$  : a státor mező szögsebessége a státorhoz képest

$\omega_{\text{rotor}}|_B$  : a rotor mező szögsebessége a rotorhoz képest

AZ EGYES GÉPTÍPUSOK SZÁRMAZTATÁSA

*SZINKRON GÉPEK*

A frekvencia-feltétel alapján:  $f_2 = 0 \Rightarrow \omega_0 = 0$  (egyenáramú gerjesztés)

Csak  $n = n_0$  fordulatszámon képes működni, mert ekkor fejt ki állandósult nyomatékot.

Ez a szinkron állapot.

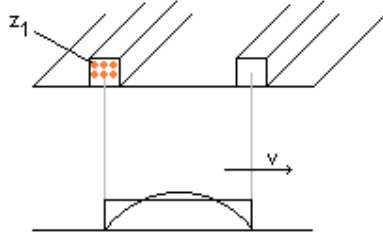
*ASZINKRON GÉPEK*

A működés feltétele:  $M_{\text{villamos}} = M_{\text{terhelés}}$

Ez szinkron fordulatszámon nem teljesülhet, hiszen ekkor nincs „erővonalmetszés”, csak a szinkrontól eltérő fordulatszámokon. Tehát a forgórész nem foroghat szinkronban a mágneses térrel, viszont a forgórészmező az állórészmezővel mindig együtt forog. Ezért nevezzük ezeket a gépeket aszinkron gépeknek.

25. *Elosztott és koncentrált tekercselések.  
Váltakozóáramú tekercselés indukált feszültsége.  
Tekercselési tényezők.*

AZ INDUKÁLT FESZÜLTÉG SZÁMÍTÁSA



$$N_1 = \frac{z_1}{2}$$

$$U_1(t) = b(x) \cdot l_1 \cdot v \cdot z_1$$

$$U_{1eff} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} b_{max} \cdot l_1 \cdot v \cdot z_1$$

$$b_{köz} = \frac{2}{\pi} b_{max}$$

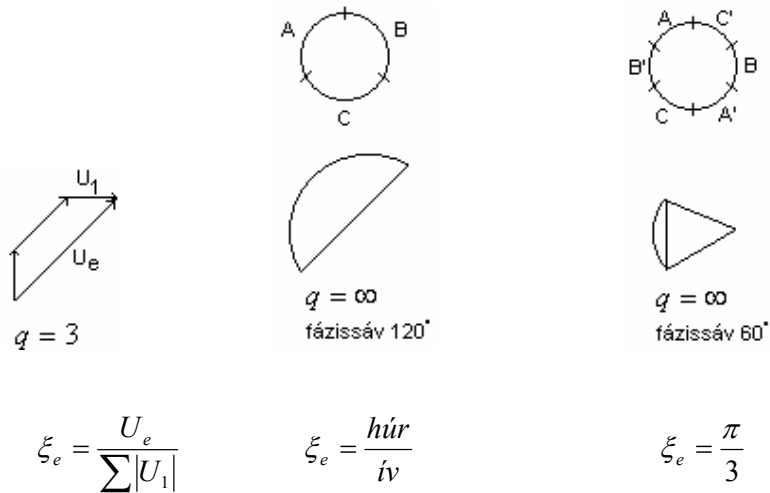
$$v = \frac{\tau_p}{\pi} \omega_1$$

- $N$  : menetszám  
 $z_1$  : hornyonkénti vezetős szám  
 $l_1$  : vezető hossza  
 $v$  : kerületi sebesség

Ha  $q = 1$        $U_{1eff} = 4.44 f_1 N_1 \Phi_{max}$   
 Ha  $q \neq 1$        $U_{1eff} = 4.44 f_1 N_1 \xi_1 \Phi_{max}$

A TEKERCSELÉSI TÉNYEZŐ

A tekercselési tényező megmutatja, hogy a tekercselés elosztottsága következtében milyen mértékben csökken az indukált feszültség.





26. *A mágneses hiszterézis és a mágneses reluktancia jelenségei és felhasználásuk a hiszterézis- és reluktancia-motorokban.*

#### HISZTERÉZIS MOTOR

A hiszterézis veszteség jelenségén alapuló szinkron motor.

Állórésze háromfázisú vagy segédfázisos egyfázisú. A forgórészen tekercselés nincs, annak belső magján nagy hiszterézishurokkal rendelkező gyűrű helyezkedik el.

A motor aszinkron gépként fut fel, miközben a mágneses mező a gyűrűt felmágnesezi. Ezzel a motor szinkron állapotba kerül azáltal, hogy a forgórész mező megáll.

Szinkron üzemben a gép mint állandó mágneses forgórészű szinkron gép működik.

#### RELUKTANCIA MOTOR

Kiálló pólusú, gerjesztetlen forgórészű szinkron gép.

Állórésze háromfázisú vagy segédfázisos egyfázisú. A kalickás forgórészt kiképzett pólusokkal látják el úgy, hogy a pólusosztás felének megfelelő részeken a légrést a fogak kimarásával megnövelik.

A forgórész hornyait és a bemarások helyét alumíniummal kiöntik.

#### *aszinkron indítás*

A forgómező hatására a rövidrezárt kalicka segítségével a motor nyomatékot fejt ki és gyorsulni kezd.

#### *szinkronizmusba ugrás*

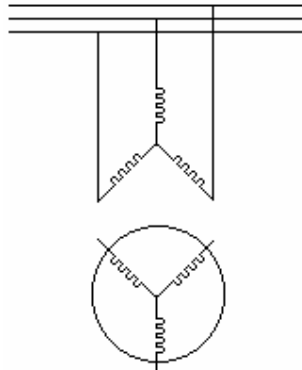
Ha eléri a közel szinkron fordulatszámot, akkor a forgó állórészmező és a forgórész között olyan nyomatékkölcsönhatások jönnek létre, amelyek hatására a motor beugorhat a szinkronizmusba.

#### *állandósult szinkron üzem*

A szinkron forgó állórészmezőben a forgórész úgy helyezkedik el, hogy a forgó gerjesztés a mágneses tér legnagyobb értékével marad szemközt.

27. *Háromfázisú aszinkron gép felépítése és működési elve.  
Csúszógyűrűs és kalickás forgórész.  
Az állandósult nyomaték kialakulása.  
A szlip és a szlipfrekvencia fogalma.*

HÁROMFÁZISÚ ASZINKRON GÉP FELÉPÍTÉSE ÉS MŰKÖDÉSI ELVE



A motor feladata a forgatás, ezért a forgó mezőnek a forgórészszel nyomatékot kell létesíteni. Az aszinkron gép forgórészébe nem vezetünk áramot – ez a rövidre zárás miatt nem is lehetséges. Az állórész forgó mezeje a forgórész vezetőiben áramokat kelt. Az indukált forgórész áramok a forgó mezővel – Biot-Savart törvénye szerint – kerületi erőket (indító nyomatékot) hoznak létre. A forgórész felgyorsul, majd beáll az egyensúlyi állapot. Szinkron forgás nem lehetséges, mert ekkor nincs forgórész indukálás. Innen ered az aszinkron elnevezés.

A működés feltétele:  $M_{vill} = M_{terh}$

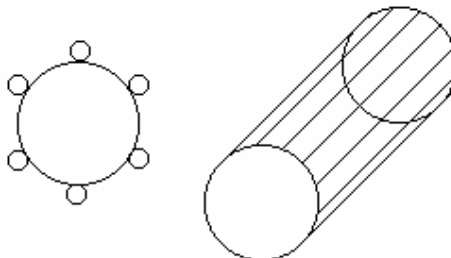
Ez szinkron fordulatszámon nem teljesülhet, hiszen ekkor nincs erővonalmetszés, csak szinkrontól eltérő fordulatszámon. Ezért nevezzük ezeket a gépeket aszinkron gépeknek.

CSÚSZÓGYŰRŰS ÉS KALICKÁS FORGÓRÉS

A háromfázisú állórész üzemben a hálózatra van kötve. A forgórész tekercselt vagy kalickás. Üzem közben a forgórész mindig rövidrezárt.

A tekercselt forgórész kapcsait indításkor külső ellenállások beiktatására csúszógyűrűkön kivezetik. Innen ered a csúszógyűrűs elnevezés.

A kalicka rudakból és azokat a végükön rövidrezáró gyűrűkből áll.



### AZ ÁLLANDÓSULT NYOMATÉK KIALAKULÁSA

A forgórész áramok is létrehoznak egy forgó mezőt. A két mező a légrésben eredő mezővé egyesül, de célszerűbb és a nyomatékképzés szempontjából szemléletesebb, ha két összetapadt pólusrendszer hatásának tekintjük.

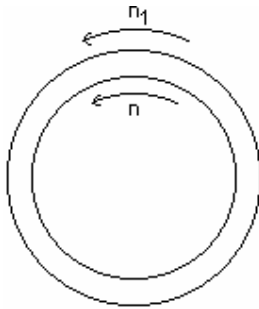
A két pólusrendszert állandó mágnesekkel érzékeltehetjük. Állandó nyomaték csak azok együttfutásakor, azonos fordulatszámon lehetséges.

Az együttforgás feltétele az álló- és forgórész pólusszámok egyezése is.

A terhelő nyomaték hatására közöttük szögelfordulás keletkezik.

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

### A SZLIP ÉS A SZLIPFREKVENCIA FOGALMA



$n_1$  állórészmező fordulatszáma

$n$  forgórész fordulatszáma

$n_2 = n_1 - n$  forgórészmező fordulatszáma a forgórészhez képest

$\frac{n_2}{n_1} = s$  szlip

$\frac{f_2}{f_1} = \frac{n_2 p}{n_1 p} = \frac{n_2}{n_1} = s \Rightarrow f_2 = s f_1$  szlipfrekvencia

Tehát a forgórész-feszültség frekvenciáját a szlip, magyarul csúszás határozza meg. Ezért a forgómennyiségek frekvenciáját szlipfrekvenciának is szokás nevezni.

28. *Háromfázisú aszinkron gép helyettesítő kapcsolása.  
A mechanikai teljesítmény reprezentálása.  
Üresjárási és rövidzárási állapot.*

HÁROMFÁZISÚ ASZINKRON GÉP HELYETTESÍTŐ KAPCSOLÁSA

Célunk, hogy a helyettesítő kapcsolás „nyugvó” áramkör legyen → *ki kell iktatni a forgást*

A forgórészen indukált feszültség és az impedancia paraméterek:

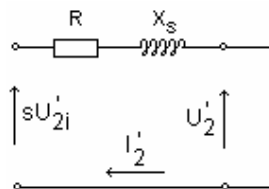
$$U_{i2,szlip} = sU_{i2,nyugvó}$$

$$R_2 = \text{állandó}$$

$$X_{s2,szlip} = sX_{s2,nyugvó}$$

A forgó részre vonatkozó feszültségegyenlet, redukált paraméterekkel:

$$U_2'(s) = sU_{i2}' + R_2'I_2' + jsX_{s2}'I_2' = 0$$



*A forgórészmező az állórészmezővel minden fordulatszámom együtt forog.*

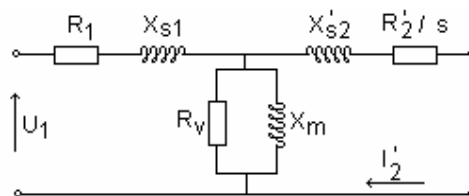
➔ A forgórészáramok az állórészről nézve mindig 50 Hz frekvenciájúnak látszanak.

Más szóval az aszinkron gép elvégzi az  $f_2 \rightarrow f_1 = \frac{f_2}{s}$  frekvenciatranszformációt.

$$U_{i2}' + \frac{R_2'}{s}I_2' + jX_{s2}'I_2' = 0$$

$$U_{i2}' = U_{i1}$$

Már összeköthető a primer és a szekunder oldali helyettesítő kapcsolás:

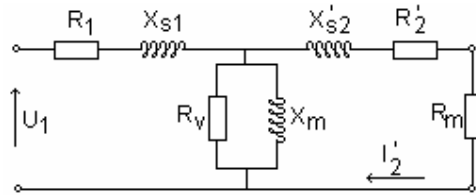


A MECHANIKAI TELJESÍTMÉNY REPREZENTÁLÁSA

Az  $\frac{R_2'}{s}$  a forgórész fiktív ellenállása.

Ebből kifejezhető a valós *tekerccellenállás* és a *mechanikai ellenállás*.

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

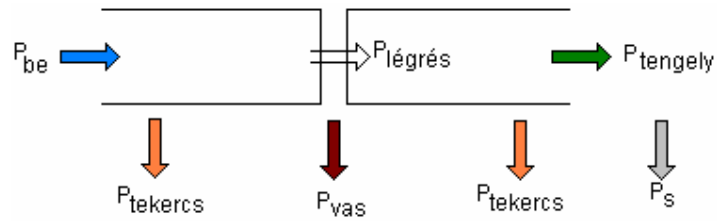


A mechanikai ellenállás egy olyan külső ellenállás, amelynek a Joule-hője a gép tengelyén leadott mechanikai teljesítményét képviseli.

29. *A háromfázisú aszinkron gép teljesítménymérlege.  
A légrésteljesítmény fogalma és felosztása.*

A HÁROMFÁZISÚ ASZINKRON GÉP TELJESÍTMÉNYMÉRLEGE

A teljesítménymérleg a hatásos teljesítmény útját adja meg a primer kapcsoktól a tengelyen leadott teljesítményig.



$$P_{be} = 3U_1 I_1 \cos \varphi$$

$$P_{tekercs,1} = 3R_1 (I_1)^2$$

$$P_{tekercs,2} = 3R_2' (I_2')^2$$

$$P_{vas} = 3 \frac{(U_i)^2}{R_v}$$

$$P_{tengely} = 3R_m' (I_2')^2$$

A LÉGRÉSTELJESÍTMÉNY FOGALMA ÉS FELOSZTÁSA

A gép fontos jellemzője a forgórészbe átmenő légrésteljesítmény.

$$P_{légrés} = 3(I_2')^2 \frac{R_2'}{s}$$

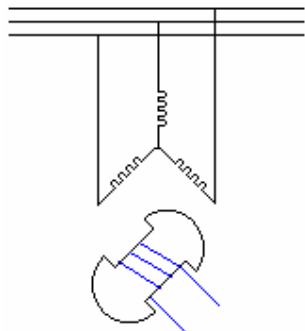
Ez nagyobb részben a mechanikai teljesítménnyé, más részben forgórész tekercsveszteséggé alakul.

$$P_{tengely} = (1 - s)P_{légrés}$$

$$P_{tekercs} = sP_{légrés}$$

30. *A hengeres forgórészű szinkron gép felépítése és működési elve.  
Az állandósult nyomaték és kialakulásának feltétele.  
A szinkron fordulatszám.*

A HENGERES FORGÓRÉSŰ SZINKRON GÉP FELÉPÍTÉSE ÉS MŰKÖDÉSI ELVE



állórész: ARMATURA  
forgórész: PÓLUSKERÉK

A pólustekercset egyenárammal gerjesztjük, ezért a motor csak egy adott fordulatszámon működik. Ezen az  $n_0$  fordulatszámon képes állandósult nyomatékot kifejteni. Ez a **szinkron** állapot.

*MEGJEGYZÉSEK*

- Önállóan indulni nem képes.
- Ha kiesik a szinkronizmusból, zárlati állapotba kerül.
- Lengésekre hajlamos.
- A gerjesztő áramot független áramforrás biztosítja → meddőt képes szolgáltatni

## AZ ÁLLANDÓSULT NYOMATÉK ÉS KIALAKULÁSÁNAK FELTÉTELE

Állandósult nyomatókót csak  $n_0$  fordulatszám, azaz szinkron állapotban képes kifejteni a gép.

Tegyük fel, hogy  $\sum P_{vesztés} = 0$ , tehát  $P_{mech} \cong P_{hálózat}$

$$\text{teljesítmény: } P_{mech} \cong 3U_k I_a \cos \varphi = 3U_k \frac{U_p}{X_d} \sin \beta$$

$\beta$  terhelési szög  
 $\beta > 0$  motoros üzemállapot  
 $\beta < 0$  generátoros üzemállapot

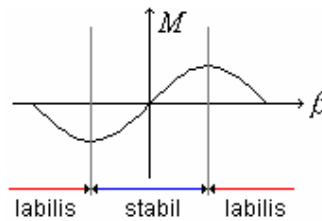
$$\text{nyomatók: } M = \frac{P_{mech}}{\Omega} \quad \Omega : \text{ a forgórész mechanikai fordulatszám}$$

### A SZINKRON GÉP STABILITÁSA

A munkapont **stabilis**, ha kis kitérést követően a gép visszatér eredeti állapotába.

A munkapont **labilis**, ha kis kitérést követően a gép nem tér vissza eredeti állapotába.

A **statikus stabilitás** lassú változások esetén, a **dinamikus stabilitás** gyors változások esetén követelmény.



### A SZINKRON FORDULATSZÁM

A szinkron gép állórészének a hálózatra kötött háromfázisú tekercselése szinkron fordulatszámú mezőt hoz létre. A forgórész egyenárammal tápláljuk.

A forgó mező így a forgórészhez képest áll, nyugalomban van. Ebből következik, hogy a forgórésznek az állórész mezővel szinkron kell forognia.

A gép tehát csak egyetlen fordulatszámmal, a **szinkron fordulatszámmal** képes forogni.

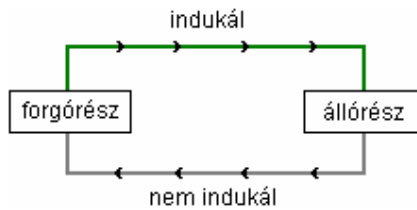
Ha ettől eltér, akkor kiesik a szinkronizmusból – üzembételeenné válik.



31. *Hengeres forgórészű szinkron gép helyettesítő kapcsolásának származtatása. A pólusfeszültség, az armaturafeszültség és a szinkron reaktancia.*

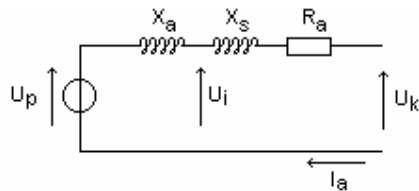
HENGERES FORGÓRÉSŰ SZINKRON GÉP HELYETTESÍTŐ KAPCSOLÁSÁNAK SZÁRMAZTATÁSA

A gép állandósult, szimmetrikus állapotban UNILATERÁLIS, vagyis indukálás csak egy irányban történik.



ARMATURA: A gép azon része, amelyben állandó és szimmetrikus állapotban feszültség indukálódik. E feszültség neve *pólusfeszültség*, mivel a forgó rész (póluskerék) forgása révén jön létre az indukció az armaturetekercsben.

A helyettesítő kapcsolás:



$$U_k = U_p + jX_a I_a + jX_s I_a + R_a I_a$$

- $U_k$  kapocsfeszültség
- $U_p$  pólusfeszültség
- $X_a$  armatura-reaktancia
- $X_s$  szórási reaktancia
- $R_a$  armatura veszteség

## A PÓLUSFESZÜLTÉS, AZ ARMATURAFESZÜLTÉS ÉS A SZINKRON REAKTANCIA

### *PÓLUSFESZÜLTÉS*

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

Az állórészben – mint nyugvó áramkörben – a forgó résznek egyetlen hatása van, a pólusfeszültség indukálása, amely ideális feszültségforrásként jelenik meg. Üresjárásban az armatúrában csak ez a feszültség van jelen.

### *ARMATURAFESZÜLTÉS*

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

Terheléskor az állórész áramok által létesített armatúramező is megjelenik. Az így létrejövő önindukációs feszültséget  $\Phi_a$  armatúra fluxussal is jellemezhetjük.

Az így indukált feszültséget célszerű nem aktív, hanem passzív elemként, vagyis feszültségeseként figyelembe venni.

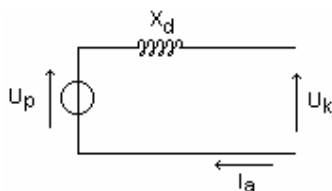
$$U_a = jX_a I_a$$

### *SZINKRON REAKTANCIA*

Állandósult, szinkron állapotban a vasvesztéseket elhanyagolhatjuk és a helyettesítő kapcsolásban az armatúra- és szórási reaktanciákat összevonhatjuk. (Nagy gépeknél  $\eta \rightarrow 100\%$ )

$$X_d = X_a + X_s$$

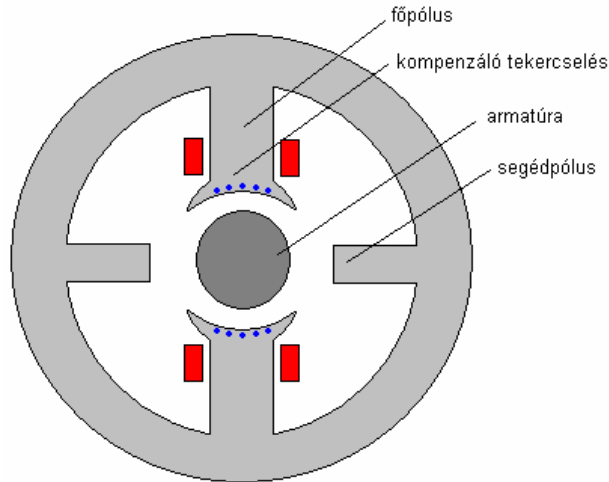
Az egyszerűsített helyettesítő kapcsolás:



$$U_k = U_p + jX_d I_a$$

32. *Az egyenáramú gép felépítése és működése.  
Fő- és segédpólus-tekercek, armatúra és kompenzáló tekercselés és ezek szerepe.*

AZ EGYENÁRAMÚ GÉP FELÉPÍTÉSE ÉS MŰKÖDÉSE



Az egyenáramú gép a többi forgó villamos géphez hasonlóan állórészből és forgórészből áll. A gép főfluxusát az állórészen elhelyezett és egyenárammal táplált **gerjesztőtekercek** létesítik. A henger alakú forgórész kerülete mentén hornyokat találunk, amelyeken tekercselés van. Ezt kommutátoros- vagy **armatúratekercselésnek** nevezzük. A *kommutáció* az armatúraáram irányának megváltozása a kefe alatt. Minden kommutátorszelethez két különböző tekercs egy-egy leágazása csatlakozik, így a tekercsek a kommutátort érintve kapcsolódnak sorba. A kommutátortekercselés lehet *hurkos* és *hullámos*.

Hurkos tekercselés: az egymás mellett lévő tekercseket kapcsoljuk sorba.  
Hullámos tekercselés: olyan tekercseket kötünk sorba, amelyek póluspár távolságra vannak.

Terheléskor az armatúrán áthaladó áram is mágnesez, befolyásolja a pólusok főfluxusát. Ezt nevezzük armatúra visszahatásnak.

- csökken a gép fluxusa
- eltolódik a semleges zóna

Ahhoz, hogy a kommutáció zavartalan legyen, a keféket el kell tolni új semleges vonalba. A kefeeltolás helyett **segédpólusokat** alkalmaznak. Erősen igénybevett gépeknél **kompenzáló tekercselés** is van.

33. Az egyenáramú gép indukált feszültségének és nyomatékának számítása.

AZ INDUKÁLT FESZÜLTÉG

$U_i$	indukált feszültség
$B$	indukció
$l$	vezető hossza
$v$	armatúra kerületi sebessége
$A$	hatásos felület
$z_{soros}$	sorbakötött vezetők száma

$$U_{i(1vezető)} = Blv \quad v = D\pi n$$

$$U_i = z_{soros} Bl(D\pi n) \quad D\pi l = A \cdot 2p$$

$$U_i = z_{soros} \cdot B(lD\pi)n = z_{soros} B \cdot A \cdot 2p \cdot n$$

$$U_i = k_U \cdot \Phi_a \cdot n$$

Tehát az indukált feszültség egyenesen arányos az armatúrafluxussal és a fordulatszámmal.

A NYOMATÉK

A nyomaték kiszámítása a következő törvényen alapul:  $F = B \cdot l \cdot I$

Ez egyetlen tekercsoldalra ható erő. Ha ezt megszorozzuk a sorbakötött tekercsoldalak számával, megkapjuk az eredő nyomatékot.

A fenti képletből is látszik, hogy a nyomaték arányos az armatúrafluxussal és az armatúraárammal.

$$M = k_M \cdot \Phi_a \cdot I_a$$

# VILLAMOS ENERGETIKA

## III. RÉSZ

34. *Melyek a villamos erőterre jellemző mennyiségek?  
Mi a különbség a homogén és az inhomogén erőterek között?  
Mi az átütés, átívelés, részleges kisülés és a treeing?*

### Jellemző mennyiségek

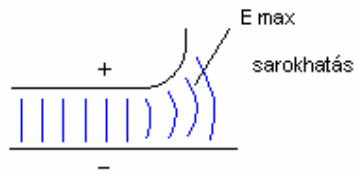
E térerősség  
U feszültség  
Q töltés

### Homogén, inhomogén erőterek

**homogenitás:** a legnagyobb és a legkisebb térerősség viszonya  $E_{\max} / E_{\min}$

= 1 homogén  
< 10 enyhén inhomogén  
> 10 erősen inhomogén

A szigetelőanyag átütési szilárdságát mindig úgy kell méretezni, hogy  $E_{sz} > E_{\max}$



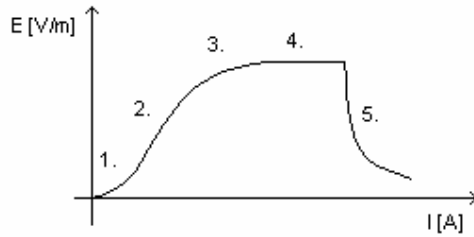
### Átütés, átívelés, részleges kisülés és a treeing

Ha a térerősség átlépi a szigetelőanyag villamos szilárdságát, akkor szigetelőképesége megszűnik, vezetési folyamatok játszódnak le.

- átütés:** az ív a szigetelőanyag belsejében jön létre  
**átívelés:** az ív a szigetelőanyag határfelületén jön létre  
**részleges kisülés:** csak az elektródok környezetében szűnik meg a szigetelőképeség, de a villamos ív nem tud kialakulni  
*korona kisülés:* Az elektródból elindul egy elektron lavina, de nem jut el a másik oldalra. A lavina csak  $r$  távolságig jut el, vagyis a kritikus  $E_{kr}$  térerősség határig.  
**treeing:** az átütési csatornák egy csúcsból, élből, zárványból indulnak ki, kifejlődésük során többszörösen elágazódnak

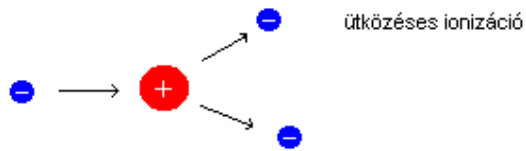
35. Sorolja fel a levegőben kialakuló átütési folyamatokat.  
 Rajzolja fel az I-U karakterisztikát homogén villamos erőtér esetében.  
 Mutassa be az elektronlavina, a pamos kisülés, a csatornakisülés és az ív jelenségeket.

Átütési folyamatok, I-U karakterisztika



1. arányos szakasz
2. telítési szakasz
3. elektron lavina
4. önfenntartó kisülés
5. villamos ív

Elektron lavina

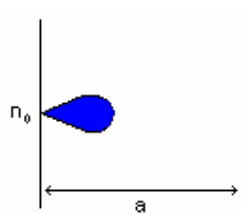


$W_e$ : elektron energiája  
 $W_i$ : ionizációs energia

$W_e < W_i$  → nem ionizál  
 $W_e \gg W_i$  → ionizál

$x_i$ : ionizációs út  
 $\lambda$ : szabad úthossz  
 $\alpha$ : 1cm úton okozott ionizációk száma (Townsend-tényező)



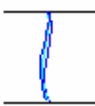
$$w_i = Eqx_i \quad P(x \geq x_i) = e^{-\frac{x_i}{\lambda}}$$



$$\alpha = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x_i}{\lambda}}$$

$$n(x) = n_0 e^{\alpha x}$$

$n_0$ : startelektron

<b>pamatos kisülés (streamer)</b>	<b>csatornakisülés (leader)</b>	<b>ív (arc)</b>
Elektron csomagok szakadnak le egymás után.	Miután a lavina eléggé megközelítette az elektródot, szemben megindul egy csatorna.	A két elektród között kialakul a jól vezető ionizált csatorna. Folyamatos a töltésáramlás.
		

szekunder folyamatok

növelő

- katódemisszió
  - fotoemisszió
  - fotoionozás
- katódba ütköző pozitív töltések  
katódba ütköző fotonok  
a foton a szigetelő molekuláiból vált ki elektront

csökkentő

- abszorpció
- diffúzió
- rekombináció

36. *Mi a különbség a gázokban, folyadékokban, illetve szilárd anyagokban kialakuló vezetési folyamatok között?  
Mi a vezetési folyamat hatása a szigetelésre?*

Vezetési folyamatok

- gázok :**
- elektronos, +/- ionos vezetés
  - $E=10V/m \rightarrow j=10^{-15} \dots 10^{-16} A/cm^2$
  - a töltéshordozók állandóan jelen vannak a külső ionizáló hatások következtében (környezeti sugárzások, hő)
  - túlszaporodásuknak a rekombináció szab határt

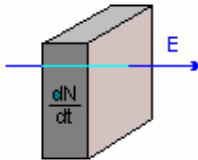
- folyadékok :**
- +/- ionos vezetés, szennyeződés
  - a töltéshordozók állandóan jelen vannak a külső ionizáló hatások következtében (környezeti sugárzások, hő)
  - túlszaporodásuknak a rekombináció szab határt

$$\gamma < 10^{-6} \frac{1}{\Omega cm}$$

- szilárd anyagok :**
- +/- ionos vezetés
  - az ionos vezetés erősen függ a hőmérséklettől
  - elektronos vezetés csak kristályos anyagokban játszik szerepet, de csak igen nagy térerősségeknél

- $\gamma$ :** fajlagos térfogati vezetés  
 **$\sigma$ :** fajlagos térfogati ellenállás  
**A,B:** konstans  
**T:** hőmérséklet

$$\gamma = A e^{-\frac{B}{T}} \quad \gamma = \frac{1}{\sigma} \quad J = q \frac{dN}{dt} \sigma$$



Vezetési folyamat hatása a szigetelésre

A átfolyó áram hosszú idő alatt az anyag öregedéséhez vezet. Ez egy irreverzibilis anyagszerkezet-változás. Az öregedésen azt értjük, hogy az adott eszköz idővel elveszíti szerepét, egyre kevésbé felel meg az előírásoknak. Így ez esetben a szigetelőanyag villamos szilárdságának csökkenéséről beszélünk. Ezen kívül meg kell említeni a mechanikai jellemzők változását is.

- Jellemző tényezők:
- oxidáció
  - csatornaképződés
  - polimer óriásmolekulák széttörése
  - mechanikai hatások



37. *Melyek a polarizációs folyamatok jellemzői?  
Milyen következményekkel jár a polarizáció egyen-, illetve váltakozó erőter esetében?*

Polarizációs folyamatok

Külső erőter hatására a szigetelőben lévő töltések eltolódnak nyugalmi helyzetükből. Dipólusok alakulnak ki.

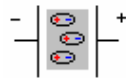
A anyag egy makroszkopikus dipólussá válik.

Az erőter megszűntével a töltések véges idő alatt visszarendeződnek, így a polarizáció reverzibilis folyamat.

Egy időben több fajta polarizációs folyamat is lejátszódhat. Ezek összességére jellemző a polarizációs spektrum.



$$Q_0 = UC_0$$



$$Q_{VALÓDI} = Q_{SZABAD} + Q_{KÖTÖTT}$$

$$D_0 = E\varepsilon_0$$

$$D = E\varepsilon_0\varepsilon_r = D_0 + D_{POLARIZÁCIÓS}$$

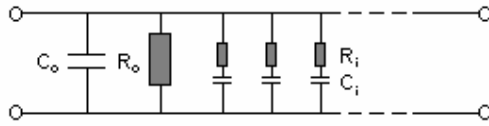
$\varepsilon_0$  : vákuum

$\varepsilon_r$  : szigetelő

polarizáció	időállandó ( $\tau$ [sec])
elektron eltolódási	$10^{-14} \dots 10^{-16}$
ion eltolódási	$10^{-12} \dots 10^{-13}$
hőmérsékleti	$10^{-2} \dots 10^{-4}$
hőmérsékleti orientációs	$10^{-8}$
rugalmas orientációs	$10^{-12}$

## Polarizáció következményei

A szigetelőanyagot a vezetési és polarizációs szempontból vett helyettesítő kapcsolásával jól jellemezhetjük.



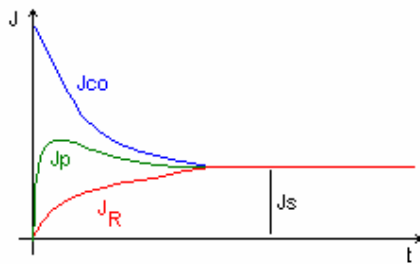
$R_0$  : szigetelési ellenállás  
 $C_0$  : geometriai kapacitás  
 $R_i, C_i$  : polarizáció jellemzői

*Egyen erőter* esetén a kapacitások feltöltődnek, így a be- és kikapcsolási transziens kivételével nem játszanak szerepet.

Kikapcsoláskor gyakran számításba kell vennünk a polarizációkat jellemző feltöltött kapacitásokat az ellenállásokkal együtt. A hosszú időállandók komoly gondot jelenthetnek.

Rövidre záráskor  $C_0$  kisül, viszont megszakításkor  $C_i$ -k visszatöltenek  $C_0$ -ba.

## bekapcsolási transziensek



$$J = \gamma E + \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t}$$

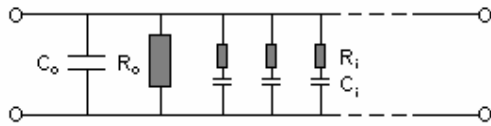
$J_{co}$  geometriai kapacitáson folyó áram  
 $J_p$  polarizációkat jellemző RC tagokon folyó áram  
 $J_R$  szigetelési ellenálláson folyó áram  
 $J_s$  stacionárius áram (csak  $R_0$ -on folyik áram)

## kikapcsolás



*Váltakozó erőter* esetén az elektromágneses mező T periódusidővel váltakozva hat az anyagban lévő dipólusokra. Ezek folyamatos át-polarizálása veszteségként jelentkezik, amelyet a helyettesítő kapcsolatban  $R_i$ -k jellemeznek.

38. *A szigetelőanyagokban fellépő villamos folyamatoknak milyen helyettesítő kapcsolását ismeri? Melyek a kapcsolások érvényességi korlátai?*



$R_0$  : szigetelési ellenállás  
 $C_0$  : geometriai kapacitás  
 $R_i, C_i$  : polarizáció jellemzői

A fenti helyettesítő kapcsolat nagyon jól alkalmazható szigetelőanyagok vizsgálatakor.  
 A kapacitív és rezisztív elemek értékeit és számát a szigetelő geometriája és anyagszerkezete határozza meg.  
 Minden egyes előforduló polarizáció típust egy megadott ellenállással , kapacitással és időállandóval jellemezhetünk.

$$\tau_i = R_i C_i$$

A kapcsolat széles időállandó határok között helyesen képezi le a szigetelésen kialakuló dielektromos folyamatokat.  
 A helyettesítő kapcsolat megfelelő, de csak azon tartományban, ahol a térerő az arányos ill. telítési szakaszt nem haladja meg. Ezen a térerőn túllépve már más modellt kell alkalmaznunk.

39. *Milyen igénybevételek okozzák a szigetelőanyagok öregedését?  
Mi a villamos élettartam görbe?  
Miért veszi jobban igénybe a próbafeszültség a szigetelőanyagot, mint az üzemi feszültség?*

#### igénybevételek, öregedés

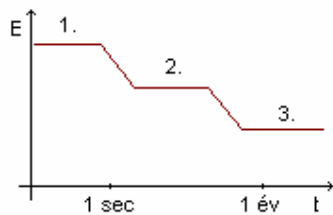
A szigetelőanyag öregedésén első sorban a villamos szilárdság csökkenését értjük. Emellett nem elhanyagolhatóak a mechanikai paraméterek sem. Ezek romlását főképp hő és villamos igénybevételek okozzák. Az öregedés a szigetelőanyag lassú, irreverzibilis anyagszerkezet változása.

fontosabb tényezők:

- oxidáció
- polimer óriásmolekulák széttörése
- depolimerizáció
- átütési csatornák képződése

#### villamos élettartam görbe

A villamos élettartam görbe megadja az egyes előforduló térerősségekhez tartozó, villamos/mechanikai tulajdonságok megadott romlásához vezető átlagos időtartamot.



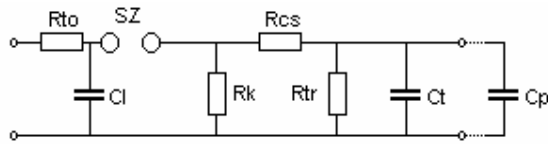
1. villamos átütés
2. hő-villamos átütés
3. öregedés, üzemi igénybevétel

#### próbfeszültség

A szigetelőanyagokat általában kétszeres névleges feszültséggel, magas hőmérsékleten tesztelik. Mivel  $E_{\max} = f(U, \text{geometria})$ , az üzemi feszültség kétszerese megnöveli az vezetési folyamatok valószínűségét.

A magas hőmérsékletet a szerkezetváltozási folyamatok gyorsítása céljából alkalmazzák.

40. Rajzolja fel az egyfokozatú lökésgerjesztő kapcsolási rajzát és mutassa be a működését!



$R_{to}$	töltő ellenállás
$R_{tr}$	terhelő ellenállás
$R_k$	kisütő ellenállás
$R_{cs}$	csillapító ellenállás
$C_1$	lökő kondenzátor
$C_t$	terhelő kondenzátor
$C_p$	próbatest
SZ	szikraköz

Az áramkör bemeneti kapcsaira feszültséget kapcsolva a  $C_1$  lökő kondenzátor az  $R_{to}$  töltő ellenálláson keresztül feltöltődik. A szikraköz feszültsége egyenlő a lökő kondenzátor feszültségével és az alábbi függvény szerint változik:

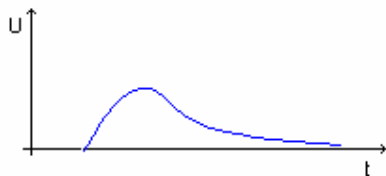
$$U_0 = U_t \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_t C_L}} \right)$$

Az átütési feszültség elérése után a szikraköz rövidzárként viselkedik és az áramkört rákapcsolja a  $C_1$  lökő kondenzátorra.

Ekkor először  $R_{cs}$  csillapító ellenálláson keresztül feltöltődik a  $C_t$  terhelő kondenzátor és a vele párhuzamosan kapcsolt  $C_p$  próbatest.

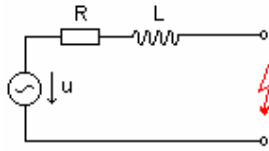
Ezután  $R_k, R_{tr}$  ellenállásokon kisülnek a kondenzátorok. A kisütés lassabb, mert  $R_k, R_{tr} \gg R_{cs}$ .

A feszültség-hullám az alábbi jellegű:



41. Milyen villamos tranzien্স jelenségek lépnek fel a villamos kapcsolókészülékek bekapcsolásakor?

A kapcsolókészülékek bekapcsolásakor villamos, hő és mechanikai tranzien্স folyamatok zajlanak le.

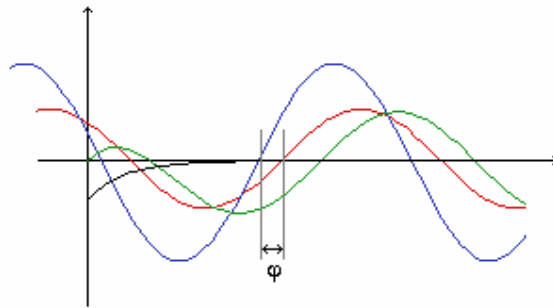


A fenti áramkörben az R és L tag a villamos hálózat értékeinek eredőjeként fogható fel.

$$u(t) = U_m \cos(\omega t)$$

$$i_{st}(t) = I_{st.m} \cos(\omega t - \varphi) \quad \omega = 2\pi f$$

A stacioner áram  $\varphi$  fázisszöggel késik a feszültséghez képest.



- feszültség
- stacioner áram
- tranzien্স áram
- eredő bekapcsolás utáni áram

Bekapcsoláskor a véges értékű stacioner áram folya a hálózaton, viszont az induktivitás miatt egy tranzien্স összetevő lép fel.

A tranzien্স áram kezdeti értéke épp egyenlő a pillanatnyi stacioner áram értékével. Eredőjük ekkor zérus.

$$i(t) = i_{st}(t) + i_{tr}(t)$$

$$i(0) = 0 \Rightarrow i_{tr}(0) = -i_{st}(0) \quad i_{tr}(t) = i_{tr}(0)e^{-\frac{t}{LR}}$$

- Ha a zárlati áram a stacioner áram nullátmenetében jön létre, akkor nem lép fel tranzien্স összetevő.
- Ha a zárlati áram a hálózati feszültség nullátmenetében jön létre, akkor  $I_m$  a lehetséges legnagyobb értéket éri el.

42. *Ismertesse a villamos kapcsolókészülékek bekapcsolásakor fellépő mechanikai és melegedési tranzienseket!*

Árammentes esetben a villamos berendezés hőmérséklete egyenlő a környezeti hőmérséklettel.

$$\mathcal{G} = \mathcal{G}_k$$

Üzemi állapotban az áram hatására hőmérséklete növekszik.

$$\mathcal{G} = \mathcal{G}_k + \tau$$

Az  $I_n$  névleges áram hatására a berendezés  $\tau_n$  névleges hőmérsékletemelkedéssel reagál.

$$I_n \Rightarrow \tau_n$$

Az  $R$  ellenállású vezetõn folyó  $i(t)$  áram  $dt$  idõ alatt  $P dt = i(t)^2 R dt$  hõenergiát hoz létre. Ennek egy része a vezetõ, más része a környezet hõmérsékletét nõveli.

$$P dt = cV d\mathcal{G} + \alpha S (\mathcal{G} - \mathcal{G}_k) dt$$

$V$ : vezetõ térfogata

$S$ : hõátadó felülete

A tranziens áramösszetevõt elhanyagolhatjuk, mert a melegedési idõállandó nagyságrendekkel nagyobb a villamos idõállandónál.

A hõtermelést a stacioner áram effektív értékével számolhatjuk.

$$P = I^2 R$$

*A melegedés idõfüggvénye:*

$$\tau = \tau_{stac} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) \quad \tau_{stac} = \frac{I^2 R}{\alpha S} \quad T_m = \frac{cV}{\alpha S}$$

$\tau_{stac}$ : állandósult melegedés

$T_m$ : melegedési idõállandó

Az áram nemcsak termikus, hanem mechanikai igénybevételeket is okoz. Ezek együtt, egymás hatását erõsítve lépnek fel. A mechanikai igénybevétel akkor történik, amikor a hõmérséklet növekedésével a vezetõ szilárdsága lecsökken.

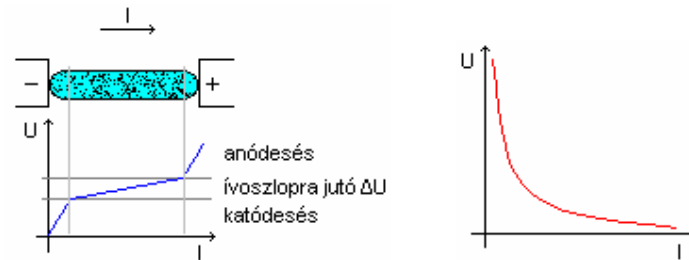
Mechanikai erõt általában az áramok által gerjesztett mágneses mezõ hoz létre kapcsolókészülékekben.

43. Ismertesse a villamos kapcsolókészülékek kikapcsolásakor fellépő villamos ív karakterisztikáit!

Az igen kisfeszültségű kapcsolókészülékek kivételével kikapcsoláskor mindig fellép a villamos ív. Az ív nagyhőmérsékletű, vezetőképes ionizált gáz (plazma).

jellemzői:

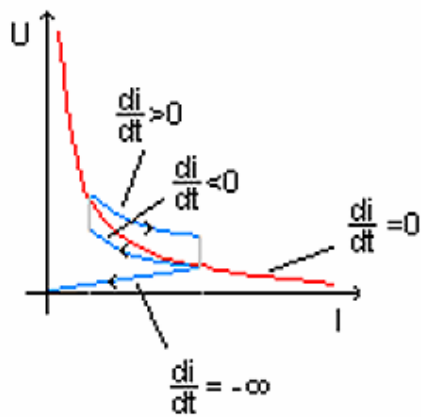
- ohmos jellegű
- nemlineáris
- növekvő áramhoz csökkenő feszültségértékek tartoznak  $\Rightarrow$  nagyobb áram, nagyobb hőfejlődés, ezért jobb vezetőképeség



Változó feszültségű táplálás és a kikapcsolási ív paramétereinek változása miatt az íven átfolyó áram változik.

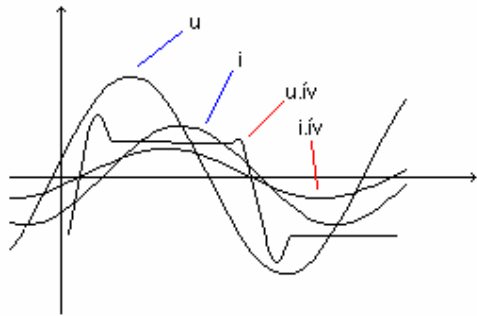
Ebben az esetben *dinamikus karakterisztikák* jellemzik az ívet.

$$\frac{di}{dt} \neq 0$$





44. Ismertesse a kisfeszültségű villamos kapcsolókészülékekben az ív megszakításának folyamatát!



A váltakozó áramú ív a feszültség és az áram közös nulla átmeneteiben kialszik, majd polaritásváltás után újragyullad.

Jellegzetes alakja a nemlinearitásból adódik.

A váltakozó áramú ív esetében a nullátmenet utáni újragyulladás megakadályozásáról kell gondoskodnunk.

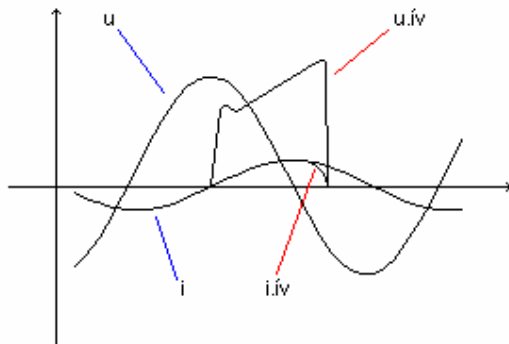
Nullátmenet után az ívsatorna gyorsan hűl és regenerálódik, így az újragyújtáshoz szükséges feszültség igen gyorsan nő.

Ha az áramnullátmenet után az érintkezők közötti feszültség nem éri el az újragyújtáshoz szükséges feszültséget, akkor a megszakítás sikeres.

Az ív erősen igénybe veszi a kapcsolókészüléket, akár annak tönkremenetelét is okozhatja.

Sikeresebb megszakítás érdekében dejon-lemezes osztókamrát alkalmaznak.

A kamrában az ív kialakulásakor annak megnő a feszültsége, ezért az ívkarakterisztika miatt lecsökken az áram.



45. *Ismertesse a villamos energiának hőenergiává történő átalakítása alapelveit közvetlen és közvetett technológiai eljárások során!*

közvetlen ellenálláshevítés

- a hő a betét belsejében keletkezik
- nagy teljesítményt használnak
- hatásos ellenállás növelése céljából hosszú betéteket hevítenek
- problémát jelent a kontakt veszteség
- az áram változtatására fokozattranszformátort használnak

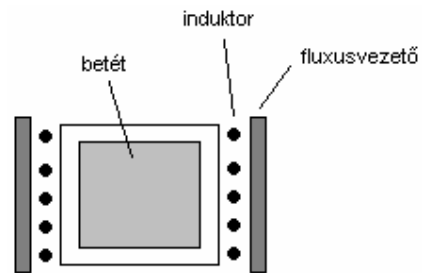
közvetett ellenálláshevítés

- a hő kívülről hatol a betétbe
- hátránya, hogy nem egyenletes a felmelegedés → minél kisebb hőmérsékletkülönbségekre kell törekedni

46. *Ismertesse az indukciós hevítést!*

A közvetlen indukciós hevítés lényege, hogy a betétet az annak belsejében indukált örvényáramok Joule-hője melegíti.

Az örvényáramokat az induktorban folyó váltakozó áram által keltett mágneses tér hozza létre.



Az induktorban folyó áramok és a betétben indukált örvényáramok eloszlása nem egyenletes. A keletkező Joule-hő is az árameloszlástól függ. Az eloszlás jellegét az induktor-betét rendszer geometriája, anyaga és az áram frekvenciája határozza meg.

47. Adja meg az EMC definícióját, mutassa be egy egyszerű ábrán a kompatibilitási, az emissziós, és az immunitási szinteket!

A villamos berendezéseknek a környezeti EM hatásokon kívül egymás EM terében is az előírt követelmények szerint kell tudni üzemelni.

**EMC** Electromagnetic Compatibility

Egy készüléknek az a képessége, hogy az elektromágneses környezetében megfelelően tud üzemelni anélkül, hogy elviselhetetlen zavarokat okozna más eszközökben.  
Immunitása nagy, emissziója kicsi.

#### **emissziós szint**

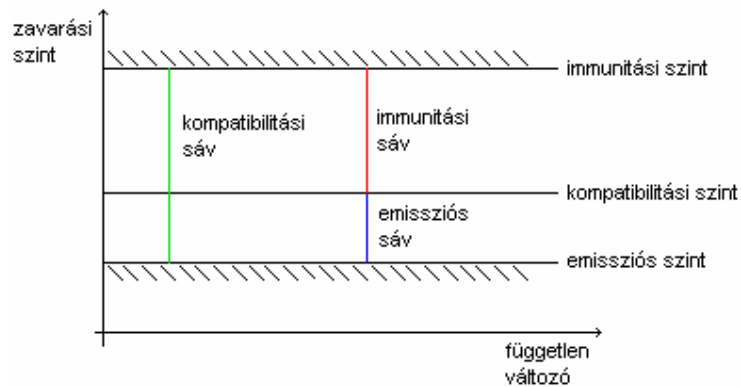
Maximálisan megengedhető zavarkibocsátási szint.

#### **immunitási szint**

A zavarás azon maximális értéke, amely mellett a készülék működési minősége megfelelő marad.

#### **kompatibilitási szint**

Az emissziós és az immunitási határértékek között elhelyezkedő sáv.



48. *Ismertesse a villámcsapás kialakulásának fázisait, írja le a külső villámvédelem alapelvét és egyszerű ábrán mutassa be a tárgyak vonzási terét!*

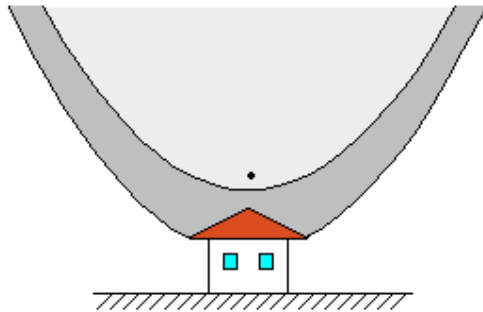
villám kialakulásának fázisai

- a villámok nagy részét a felhőből a föld felé tartó előkiszülés vezeti be.
- akár pozitív, akár negatív felhőből eredhet
- 50 méteres ugrásokkal halad, véletlenszerű pályán
- a becsapás helye kis magasságban dől el
- a földből felfelé megindul egy ellenkiszülés
- a két kiszülés találkozásakor kialakul az ioncsatorna, amelyben megtörténik a főkiszülés
- átmérő 5-10 cm, hőfok 20-30k °C

külső villámvédelme alapelve

- a villámcsapások felfogása és károkozás nélküli levezetése
- kedvező kiindulási pont az ellenkiszülés számára
- csökkenti a védendő tárgyat érő villámcsapás valószínűségét, tehát a kockázatot

vonzási tér



**orientációs pont**

A lefelé haladó villám itt dönti el, hogy hova csap.

**forgási paraboloid**

Ennek belsejében vannak azok a pontok, ahonnan a villám a védendő tárgyba csap.

49. *Magyarázza meg a belső villámvédelem szükségességét, ismertesse a legfontosabb csatolási módokat és a zónás védelem alapelvét!*

belső védelem szükségessége

A villám másodlagos hatásai révén gyakran okoz károkat a villamos berendezésekben. Ezen másodlagos tényezők kiküszöbölése a belső védelem célja.

csatolási módok

**vezetési csatolás**

A földbe lefolyó villámáram útjába eső  $R_F$  földelési ellenálláson  $U_F$  feszültség keletkezik.

**induktív csatolás**

A villámáram mágneses erőteret hoz létre, amely újabb áramokat indukál a környezetében lévő vezetékekben.

**kapacitív csatolás**

Ez a csatolási mód nem okoz számottevő veszélyt.

zónás védelem

A tere villámvédelmi zónákra osztják – Lightning Protection Zone

**LPZ-0** a teljes villámárammal kell számolni, általában tetőterek, antennák

**LPZ-1** 5-10kA, az épület teljes belső tere

**LPZ-2** a villamos berendezések belső tere, ahol a feszültség nem haladhatja meg a szigetelés villamos szilárdságát

Az egyes zónákra megfelelő túlfeszültség védelmi eszközöket kell beiktatni, így alakul ki a többlépcsős védelem.

50. *Mi az ESD?  
Miért és hogyan lehet védekezni az iparban előforduló elektrosztatikus feltöltődés káros hatásai ellen?*

### **ESD**

- Electrostatic Discharge/Damage (elektrosztatikus kisülés/roncsolódás)
- az EMC zavarok kb. 1 GHz-es tartományába eső része

#### védekezés ESD ellen

Az ESD a villamos, de különösen az elektronikus berendezéseket veszélyezteti. A korszerű félvezető határrétegeinek átütése már 100V feszültségnél megtörténhet. Néhány  $\mu\text{J}$  energia is kárt okozhat.

- szerszámok, hordozók és dolgozó személyzet földelése
- megfelelő csomagolás
- nem feltöltődő műanyagok használata
- levegő ionozása
- árnyékolás
- túlfeszültség-korlátozók
- antisztatikus zónák a gyártósoron

51. *Magyarázza el, hogyan működik az elektrosztatikus leválasztó!*

Az elektrosztatikus porleválasztóban a lebegő részecskéket szállító gáz a két elektród között halad át. Középen koronaelektrodok vannak, amelyen negatív feszültséggel koronakisülést hoznak létre.

A kisülés ionokat juttat a térbe és ezek egy része a leválasztandó részecskékre rakódik. Az ionok jelentős része viszont a szemközi elektródon elvész.

A turbulens áramlás a részecskéket az elektród közelébe viszi és ott már az elektródra tudnak tapadni.

A külső feszültség tehát csak az ionok létrehozására kell, állandó jelenléte növeli az elektródra főlegesen jutó ionok számát.

Ezért a korszerű leválasztókban csak rövid időre kapcsolják a feszültséget az elektródra, így feszültségmentes időszakban az ionok jobban tapadnak a részecskékre, mert sebességük lecsökken.

A leválasztáshoz szükséges teret maga a feltöltött por hozza létre.

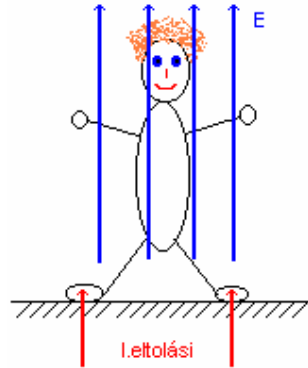
Impulzus gerjesztéssel a leválasztás hatásfoka javul és energia is megtakarítható.



52. *Ismertesse az erőkterek biológiai hatásait!  
Milyen esetekre határozzák meg a villamos és mágneses térerősségek megengedett értékeit?*

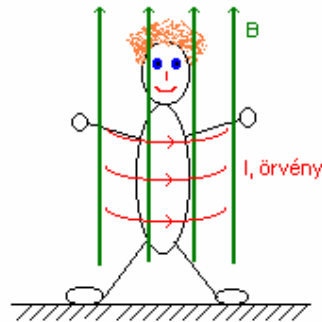
**villamos erőtér**

- a kis frekvenciás villamos erőtér eltolási áramot kelt a szervezetben
- nyugalmi állapotban az agyban  $100 \text{ nA/cm}^2$  sűrűségű bioáram keletkezik
- a nyugalmi áram eléréséhez  $40 \text{ kV/m}$  villamos térerősség szükséges



**mágneses erőtér**

- a váltakozó mágneses erőtér örvényáramot kelt a szervezetben
- a nyugalmi áram eléréséhez  $400 \mu\text{T}$  térerősség szükséges



Erőtér hatása	Megengedett térerősség értékek	
	E [kV/m]	B [ $\mu\text{T}$ ]
Lakossági, napi 24 óra	5	100
Lakossági, napi 2 óra	10	1000
Munkahelyi, teljes munkaidő	10	500
Munkahelyi, átmeneti	30	500

53. Foglalja össze a villamos áram élettani hatásait és az élettani hatásokat befolyásoló tényezőket!  
Hasonlítsa össze az ipari áramütés, a villámcsapás és az elektrosztatikus kisülések élettani hatásait!

a villamos áram élettani hatásai

az áram hatása	áramérték [mA]
érzetküszöb	0.5 ... 1
erős rázásérzés	6 ... 15
izomgörcs	20 ... 25
szabálytalan szív működés	25 ... 80
szívkamralebegés	80 ... 100
agyhalál	100 ...

Az adatok 50-100 Hz frekvenciára érvényes átlagértékek.

Nagyobb (1000 Hz feletti) frekvenciákon egyre inkább érvényesül a skin-hatás, amely enyhébb hatással van a szervezetre, mivel a bőr felületén folyik az áram.

Egyenáram csak 4-5-szörös értékkel tudja előidézni a táblázatban megadottakat. Veszélytelenebbnek tűnhet, viszont számolni kell az elektrolízissel és az ívképzéssel.

Az áram veszélyességét annak időtartama is befolyásolja.

Kellemetlen érzés 0.25 Ws, halálos 50 Ws energia.

Az ember ellenállását egységesen 1000  $\Omega$ -mal, orvosi kezelőhelyeken ennél lényegesen kisebb értékkel vesszük figyelembe.

élettani hatásokat befolyásoló tényezők

- az áram nagysága
- az áram időtartama
- az áram útja
- az áram frekvenciája
- test ellenállása
- az egyén fizikai és lelki állapota