

4. Mekkora önindukciós feszültség keletkezik egy 12 mH induktivitású tekercsben, ha bekapcsolásakor az áramerősség 10 ms idő alatt egyenletes sebességgel 100 mA-re nő? (0,12 V)

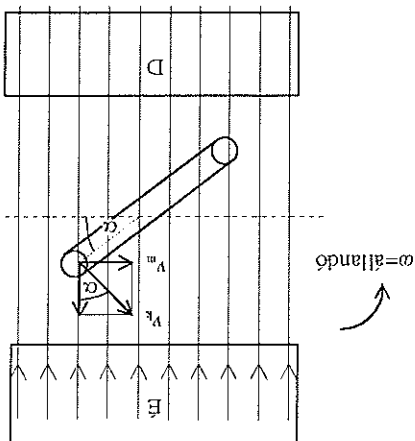
Ellenőrző kérdések

1. Mit fogalmaz meg *Faraday indukció-törvénye*?
2. Mikor beszélünk mozgási indukcióról?
3. Mikor nem indukálódik feszültség egy mágneses térben mozgó tekercsben?
4. Mit mond ki *Lenz törvénye*?
5. Hogyan határozható meg az indukált áram iránya a jobbkez-szabály segítségével?
6. Mikor beszélünk önindukcióról?
7. Hogyan értelmezzük az önindukciós tényezőt?
8. Mitől függ egy tekercs induktivitása?
9. Mi a kölcsönös indukció?
10. Hogyan határozható meg az indukál táram iránya nyugalmi indukció esetén?

6. VÁLTAKOZÓ ÁRAMÚ KÖRÖK

Váltakozó feszültségről és áramról akkor beszélünk, ha irányuk ismétlődően, periodikusan változik. A gyakorlatban legtöbbször a szinusz függvény szerint változó feszültséget és áramot használnak. Az erőművekben, ipari méretekben előállított feszültség is ilyen.

Ha a 6.1. ábra szerint, a mágnes pólusai közötti homogén mágneses térben egy tengely körül tekercset forgatunk állandó szögsebességgel, a tekercsben szinuszos váltakozó feszültség indukálódik.



6.1. ábra. A szinuszos feszültség keletkezése

Mivel a tekercs állandó szögsebességgel forog, ezáltal a tekercs oldali v_k kerületi sebessége is állandó. A tekercs elfordulását az α szöggel jellemezzük.

Az indukált feszültség pillanatnyi értékét a homogén mágneses tér B indukciója, a tekercs oldali mágneses térben lévő l hossza és a kerületi sebességnek az erővonalakra merőleges komponense által az 5.1. alfejezetben megismert, az indukált feszültségre vonatkozó összefüggéssel tudjuk meghatározni:

$$u = B \cdot l \cdot v_m \cdot \sin \alpha$$

A v_m sebességkomponenst kifejezhetjük az állandó kerületi sebességgel és a kercsoldalra megrajzolt vektorok között is meg adva $\alpha = \omega t$ szöggel:

$$v_m = v_k \cdot \sin \alpha = v_k \cdot \sin \omega t.$$

Ezzel az indukált feszültség: $u = B \cdot l \cdot v_k \cdot \sin \omega t.$

A feszültség legnagyobb értékét $\omega t = 90^\circ = \frac{\pi}{2}$ szögnél kapjuk: $u_{\max} = B \cdot l \cdot v_k.$

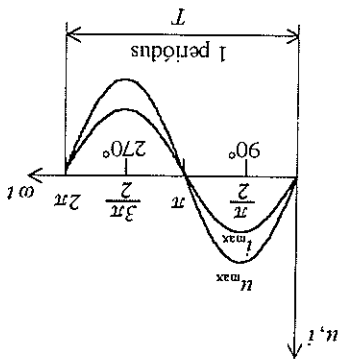
Igy az indukált feszültség pillanatértékének általános alakja:

$$u = u_{\max} \cdot \sin \omega t.$$

Ehhez hasonlóan az áram:

$$i = i_{\max} \cdot \sin \omega t.$$

Tehát a forgó tekercsben a feszültség, ill. az áram időben szinuszfüggvény szerint változik. A feszültséget és az áramot a 6.2. ábra szemlélteti.



6.2. ábra. Szinuszos feszültség és áram

6.2. A váltakozó feszültség és áram jellemzői

Periódus: a változás azon tartománya, amelyen belül a mennyiség minden lehetséges értékét egyszer felveszi, a változás irányát is figyelembe véve. Egy periódus 360° , ill. 2π szögtartományt jelent.

Periódusidő: 1 periódus lefolyásának T ideje.

Frekvencia: az 1 másodperc alatt lejárfó periódusok száma, mértékegysége a hertz, jele Hz.

A frekvencia a periódusidő reciproka: $f = \frac{1}{T}.$

Mértékegysége: $1 \text{ Hz} = 1 \frac{1}{\text{s}}.$

Körfrekvencia: a szinuszos változás szögsebessége, amelyet az

$$\omega = \frac{T}{2\pi} = 2\pi \cdot f$$

összefüggéssel definiálunk. Mértékegysége: 1/s.

A feszültség és az áram $u = u_{\max} \cdot \sin \omega t$ és $i = i_{\max} \cdot \sin \omega t$ általános kifejezésében is a körfrekvencia szerepel, amely ott megegyezik a mechanikai szögsebességgel.

Effektív érték: a váltakozó feszültséget és áramot a munka, ill. teljesítmény szempontjából jellemző átlagérték. Jele U és I .

Bizonyítható, hogy szinuszos változás esetén az effektív érték a max. értékből a következő összefüggésekkel számítható:

$$U = \frac{\sqrt{2}}{2} u_{\max} \text{ és } I = \frac{\sqrt{2}}{2} i_{\max}.$$

A váltakozó áramú hálózatokat, berendezéseket, fogyasztókat általában az effektív értékekkel jellemzik, az adatlaplákon ezeket tüntetik fel. A hálózati 230 V is effektív érték.

Elektrolitikus középérték: a váltakozó feszültségnek és áramnak a töltésáramlás szempontjából jellemző átlagértéke.

A szinuszos feszültség és áram elektrolitikus középértéke egy periódusra vonatkozóan nulla, mert a két félperiódusban ugyanakkora töltés áramlik, csak ellentétes irányban. Ezért pl. váltakozó árammal nem lehet galvanizálni.

Az elektrolitikus középértéknek a váltakozó mennyiségek egyenirányított formája esetén van jelentősége. (Egyenirányítás alatt azt értjük, ha valamilyen eszközzel, pl. félvezető diódákkal, az egyik vagy mindkét félperiódusban, az áramkörben egyirányú áramot hozunk létre.)

A 6.3. ábra sima egyenáramot, valamint egy- és kétüteműen egyenirányított szinuszos áramot szemléltet.

Felsőbb matematikai módszerekkel bizonyíthatóan az elektrolitikus középértékek együtemű egyenirányítás esetén:

$$I_k = \frac{i_{\max}}{2} = 0,318 \cdot i_{\max}, \quad U_k = \frac{u_{\max}}{2} = 0,318 \cdot u_{\max},$$

kétütemű egyenirányítás esetén:

$$I_k = 2 \cdot \frac{i_{\max}}{\pi} = 0,636 \cdot i_{\max}, \quad U_k = 2 \cdot \frac{u_{\max}}{\pi} = 0,636 \cdot u_{\max}.$$

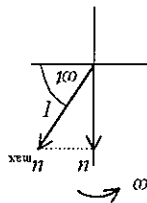
6.3. A váltakozó feszültség és áram ábrázolási módjai

6.3.1. Ábrázolás szinuszgörbékkel

A módszert a 6.2. ábra kapcsán már láttuk. Előnye, hogy egy vagy több periódus megrajzolása esetén valamennyi pillanatérték megállapítható. Hátránya, hogy nehezen rajzolható meg és több görbe esetén kevésbé áttekinthető. Az áramirányító technikában használják általánosan.

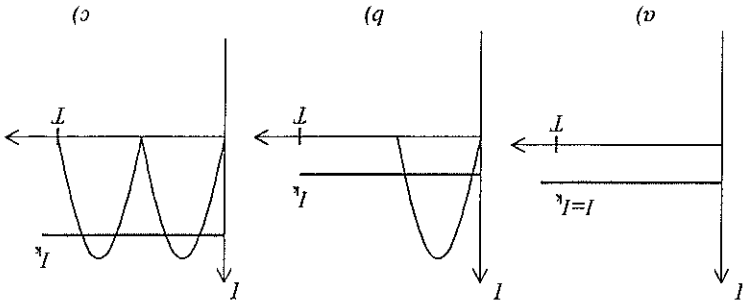
6.3.2. Ábrázolás forgó vektorokkal

Ha az ábrázolandó mennyiség max. értékével arányos hosszúságú vektor az ω körirrekenciával egyenlő szögsebességgel forog egy derékszögű koordináta-rendszerben az óramutató járásával ellentétes irányba és szögelfordulását a vízszintes tengely pozitív irányától számitjuk, akkor a függőleges tengelyre képzett vetülete az ábrázolt mennyiség pillanatértékét adja meg (6.4. ábra).



6.4. ábra. A forgó vektoros ábrázolás elve

6.3. ábra. Elektrolitikus középérték



6.4. A fázis, a fáziskülönbség, a fázisszög fogalma és ábrázolása

Az ábra szerint a függőleges tengelyre vett vetület: $u = u_{\max} \cdot \sin \omega t$, megegyezően az indukált feszültség pillanatértékének általános alakjával.

Mivel az effektív érték egyeneseen arányos a max. értékkel, ezért a vektorábrákat az effektív értékekkel is megrajzolhatjuk.

A vektoros ábrázolás előnye a könnyű megrajzolhatóság. A mennyiségekkel végzett műveletek, elsősorban az összeadás és kivonás, a vektorokra érvenyes szabályok szerint végezhetők.

Mivel a vektorok háromszögeket, paralelogrammákat alkotnak, így az ezekre érvenyes összefüggések is felhasználhatók a számítások során.

A vektoros ábrázolás hátránya, hogy mindig csak egy pillanatértéket mutat.

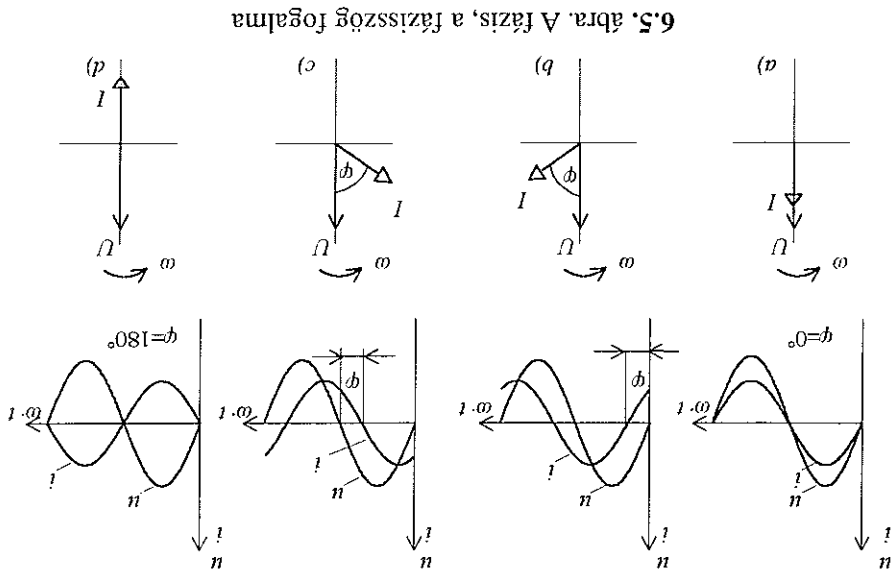
A fázis kifejezésen a váltakozó mennyiségek pillanatnyi változási állapotát értjük.

Ha két mennyiség azonos fázisú, akkor pl. a pozitív irányú nullaátmenetiek és a max. értékeik azonos időpillanatban vannak.

Ha pl. a pozitív vagy negatív irányú nullaátmenetiek nem azonos időpillanatban vannak, akkor a mennyiségek közötti fáziskülönbségről, fáziseltolódásról beszélünk. A fáziskülönbséget a **fázisszöggel** jellemezzük és φ -vel jelöljük.

A 6.5. ábra a feszültség és áram közötti négy különböző fázishelyzeteit ábrázol szinuszcörbékkel és alattiuk vektorokkal is:

- a 6.5.a) ábrában U és I azonos fázisú, $\varphi = 0^\circ$; a vektorok azonos irányúak,
- a 6.5.b) ábrában az U -hoz képest I fázisban késik φ szöggel, mert az áram pozitív irányú nullaátmenete a feszültségéhez képest későbbi időpontban következik; a vektorábrában az I vektora φ szöggel lemarad a forgásban az U vektorához viszonyítva,
- a 6.5.c) ábrában U -hoz képest az I fázisban siet, mert az áram negatív irányú nullaátmenete megelőzi a feszültségét; az áram vektora a forgás irányában megelőzi a feszültség vektorát;
- a 6.5.d) ábra esetén a feszültség maximumának pillanatában az áram negatív maximumon van, tehát a $\varphi = 180^\circ$, ezt ellentézesi helyzetnek nevezzük. A vektorok ebben az esetben ellentétes irányúak.



Az ábrázolás során valamelyik célszerűen megválasztott mennyiséget alaphelyzetnek vesszük és a többi ehhez képest fázishelyesen rajzoljuk meg.

6.5. Ellenállás, kondenzátor és tekercs viselkedése váltakozó áramú körben

6.5.1. Ellenállás váltakozó áramú körben

Ha egy ellenállásra szinuszos váltakozó feszültséget kapcsolunk, az áram pillanatértékét *Ohm törvénye* szerint határozhatjuk meg:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{u_{\max}}{R} \cdot \sin \omega t = i_{\max} \cdot \sin \omega t.$$

Az áram maximumát a feszültség maximuma hozza létre, azaz a feszültség és az áram azonos fázisu, a fáziszög $\varphi = 0^\circ$. Így a két mennyiség időfüggvénye formailag azonos:

$$u = u_{\max} \cdot \sin \omega t, \quad i = i_{\max} \cdot \sin \omega t.$$

Ha az $i_{\max} = \frac{u_{\max}}{R}$ egyenlőség mindkét oldalát osztjuk $\sqrt{2}$ -vel, az áram effektív

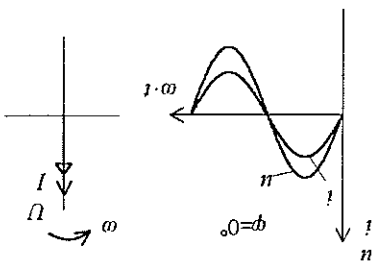
értékéhez jutunk:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Ohm törvénye tehát az effektív értékekre is igaz.

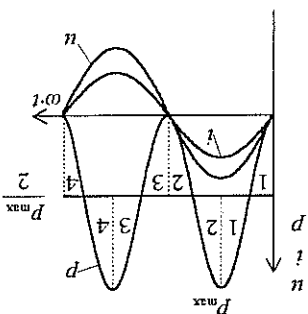
Az ellenállás feszültségét és áramát fázishelyesen a 6.6. ábra szemlélteti.

Az ellenállás teljesítményét és munkáját az effektív értékekkel határozhatjuk meg. Erdemes ezt nyomon követni a 6.7. ábrán.



6.6. ábra. Ellenállás feszültsége

és árama



6.7. ábra. Ellenállás teljesítménye

$A p = u \cdot i$ pillanatnyi teljesítmény görbéje alatti terület a feszültség és áram munka-jával arányos. Fontos észrevenni, hogy a teljes periódus alatt pozitív a teljesítmény, tehát a villamos munkát az ellenállás elfogyasztja, azaz hővé alakítja.

A görbe alatti területet – a 6.7. ábrában a számozás alapján nyomon követhető – $\frac{P_{\max}}{2}$ átlagos teljesítménynek megfelelő magasságú téglalapppá alakítjuk, amely-

nek területe a munkával arányos. A munkát egy periódusra kiszámíthatjuk, felhasználva az effektív értékeket: $W = \frac{P_{\max}}{2} \cdot T = \frac{U_{\max} \cdot I_{\max}}{2} \cdot T = U \cdot I \cdot T$.

A teljesítmény: $P = \frac{W}{T} = \frac{U \cdot I \cdot T}{T} = U \cdot I$,

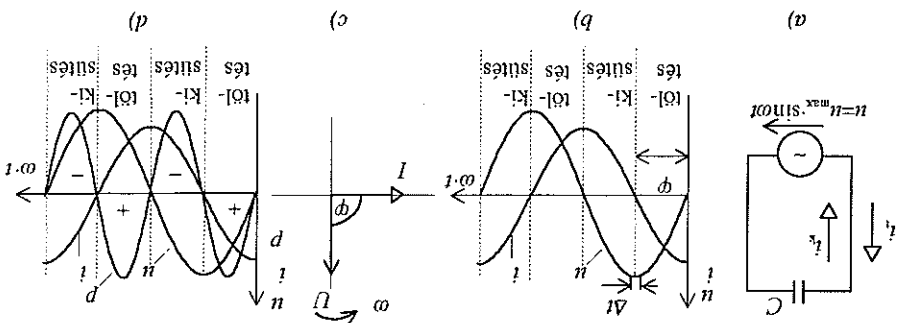
az effektív értékek értelmezésének megfelelően.

6.5.2. Kondenzátor váltakozó áramú körben

Ha egy ideális kondenzátorra (amelynél a fegyverzetek közötti ellenállás végtelen nagy) szinuszos váltakozó feszültséget kapcsolunk, a lejátszódó folyamatot a 6.8. ábra alapján vizsgálhatjuk.

A folyamatot a feszültség pozitív nulla-átmenetének pillanatában kezdve, a kondenzátor pillanatnyi q töltése egyenesen arányos a feszültséggel, az arányossági té-

$$q = C \cdot u.$$



6.8. ábra. Kondenzátor váltakozó áramú körben

A feszültség Δu megváltozása $\Delta q = C \cdot \Delta u$ töltésváltozást eredményez. A töltés változása villamos áramot hoz létre, amely a kondenzátorhoz csatlakozó vezetőkben folyik. Az áram pillanatnyi erősséget megkapjuk, ha a töltésváltozást elosztjuk a változás idejével:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = C \cdot \frac{\Delta u}{\Delta t},$$

tehát az áram pillanatértéke egyeneseen arányos a feszültségváltozás sebességével. A 6.8.b) ábrában a feszültség első negyedperiódusában a kondenzátor $u^{\max}$ értékre felöltődik. Az $u^{\max}$ igen kis Δt intervallumban a feszültség nem változik: $\Delta u = 0$, így az előző összefüggés értelmében ekkor az i_t töltő-áramerősség is nulla. Nyilván az i_t áramerősség akkor lesz a legnagyobb, amikor feszültségváltozás sebessége max., ez pedig a feszültség nulla-átmeneténél van.

A csúcserők után az energiatartás feszültsége csökkenni kezd, ezt követi a kondenzátor töltésének csökkenése, tehát a kondenzátor kislül. Az i_t kislülő áram a töltőárammal ellentétes irányú, mint ahogy azt a 6.8.a) és 6.8.b) ábra is szemlélteti.

A harmadik negyedperiódusban a kondenzátor ismét feltöltődik, de ellenétes polaritással. Végül a negyedik negyedperiódusban újabb kislülés következik. A kondenzátor tehát a feszültség egy periódusa alatt kétszer feltöltődik és kétszer kislül.

Bizonyítható, hogy a leírt folyamatban az áramerősség változása koszinuszfüggvényi követ:

$$i = i_{\max} \cdot \cos \omega t = i_{\max} \cdot \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Az áramerősség tehát a feszültséghez képest fázisban 90° -ot szel.

Ez a 6.8.b) és 6.8.c) ábrán látható.

A 6.8.d) ábra felülnézi a kondenzátor teljesítményfüggvényét is, amely kétszeres frekvenciájú szinuszgörbe. A görbe alatti terület a villamos munkával arányos. Vegyük észre, hogy a töltéshez pozitív, a kislüléshez negatív terület tartozik és a két terület abszolút értéke egyenlő. Ez azt jelenti, hogy a kondenzátor a töltéskor fel-

velt energiát kisüléskor visszatáplálja az áramkörbe. Így a kondenzátor által felhasznált munka nulla. Ebből következően:

$$P = \frac{t}{W} = 0,$$

tehát a kondenzátor teljesítménye is nulla. A kondenzátor és az áramkör közötti időoda áramló energiát a

$$\tilde{Q} = U \cdot I$$

összefüggéssel leírható, ún. *meddő teljesítménnyel* jellemezzük. (A $\tilde{Q}$ itt nem töltési jelöl!) A meddő teljesítményt mértekegységgel is megkülönböztetjük, amelyet I var-ként értelmezzünk. (Ejtsd: volt amper reaktív!)

Kondenzátor esetén is értelmezzük az áramkorlátozó hatást, hasonlóan az ellenálláshoz, a **feszültség és az áramerősség effektív értékének** hányadosaként:

$$X_C = \frac{U}{I}.$$

Ezt a hányadost **kapacitív ellenállásnak, kapacitív reaktanciának** nevezzük.

A kapacitív ellenállás mértékegysége is az Ω .

A kapacitív ellenállás bizonyíthatóan fordítottan arányos a frekvenciával és a kondenzátor kapacitásával:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}.$$

Ebből az összefüggésből következik, hogy a kondenzátor kis frekvencián nagy – esetleg végtelennek tekinthető – ellenállást képvisel, nagy frekvencián kis értékt – esetleg nullának tekinthető – ellenállást jelent.

6.5.3. Tekeres váltakozó áramú körben

Ha egy ideális tekercsben (a tekercs ellenállása nulla) váltakozó áram folyik, akkor váltakozó mágneses fluxus keletkezik, amely a tekercsben öm indukciós feszültséget kelt.

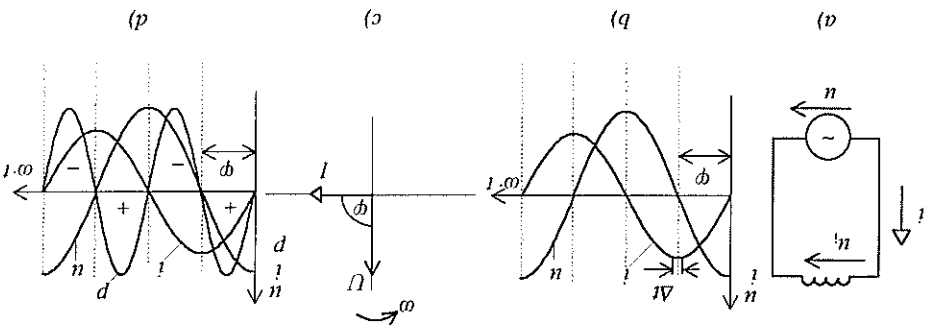
A jelenséget a 6.9. ábra segítségével értelmezhetjük.

Folyók a tekercsben $i = i_{\max} \cdot \sin \omega t$ függvénynek megfelelő áram, ahogy azt a 6.9.b) ábra mutatja. Az áram változása:

$$u_i = L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

pillanatértékű feszültséget indukál, amely *Kirchhoff huroktörvényéből* következően egyenlő a tekercsre kapcsolt feszültség pillanatértékével. A feszültség változását a

következők alapján határozhatjuk meg. Az áram változását a periódus kezdetétől követjük. Ha az áram max. értékének egy igen kicsi Δt környezetét vizsgáljuk, akkor ott a Δt áramváltozás nullának tekinthető. Ebből következik, amikor az i indukált feszültség is nulla. A feszültség akkor lesz max., amikor az áramváltozás sebessége a legnagyobb, tehát az áram pozitív irányú nullátmeneténél pillanatában.



6.9. ábra. Tekercs váltakozó áramú körben

A második negyedperiódusban az áramváltozás iránya ellentétes lesz, ennek hatására az indukált feszültség is polaritást vált. A gondolatmenetet folytatva bizonyítható, hogy a szinuszfüggvényt követő áramváltozás koszinuszgörbe szerint változó feszültséget indukál, amely egyenlő a tekercsre kapcsolt feszültséggel:

$$u = u_1 = n \cdot \frac{d\Phi}{dt} = n \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Ideális tekercs esetén az áramhoz képest a feszültség $\phi = 90^\circ$ -os fázisszöggel siet vagy megfordítva, a feszültséghez képest az áram $\phi = 90^\circ$ -os fázisszöggel késik.

Ez látható a 6.9.b) ábrán. A vektoros ábrázolás esetén az áram vektora a forgással ellentétesen lemarad 90° -kal, a 6.9.c) ábrán látható módon.

Az ideális tekercs teljesítményviszonyait a 6.9.d) ábra szemlélteti. Az ábra elemzése a kondenzátorral megállapítottakkal egyező eredményre vezet: az ideális tekercs körében a felvett és az önindukció következtében az áramkörbe visszasikerülő energia egyenlő, így a tekercs munkáját jellemző p pillanatnyi teljesítmények középértéke nulla. A körben ide-oda áramló energiát a

$$Q = U \cdot I$$

meddőteljesítménnyel jellemezzük, a kondenzátorral egyezően.

Tekercs esetén a pozitív munkaterület a mágneses teret felépítő munkát jelenti, a tekercs ekkor mágneses energiát tárol. A negatív munkaterület az önindukció folytán a mágneses energiává alakuló és az áramkörbe vissza-

kerülő munkát jelenti.

A tekercsnek is van áramkörtároló hatása, amely az önindukció következménye. Az áramkörtároló hatást a feszültség és az áramerősség **effektív értékeinek** hányadosaként értelmezzük és **induktív ellenállásnak**, **induktív reaktanciának** nevezzük:

$$X_L = \frac{U}{I}.$$

Az induktív ellenállás mértékegysége is az Ω .

Bizonyítható, hogy az induktív ellenállás egyenesen arányos a frekvenciával és a tekercs induktivitásával:

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L.$$

A tekercs kis frekvencián kis ellenállást – esetleg véglegesen nullának tekinthető – képvisel, nagy frekvencián nagy ellenállást – esetleg véglegesen tekinthető értéket – jelent.

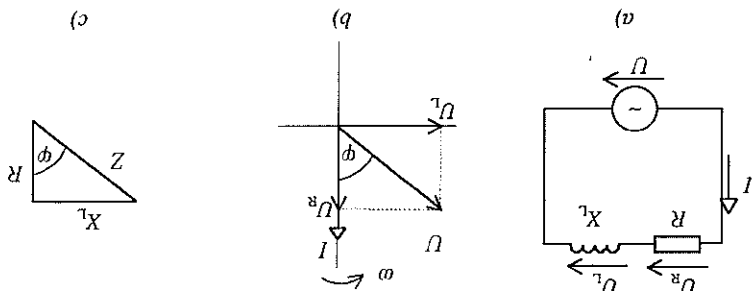
6.6. Összetett váltakozó áramú körök

Az összetett váltakozó áramú köröket is *Kirchhoff törvényeinek* felhasználásával vizsgálhatjuk, figyelembe véve, hogy a váltakozó áramú körök feszültségei és áramai vektorok. Ezért a csomóponti és a huroktörvény is vektorosan érvényes:

$$\sum \underline{I} = 0 \quad \text{és} \quad \sum \underline{U} = 0.$$

6.6.1. Ellenállás és tekercs soros kapcsolása (soros RL -kör)

A 6.10. ábrán látható a kapcsolás. A bejelölt mennyiségek effektív értékek. A soros kapcsolás miatt az elemeken azonos áram folyik, ezért a vektordiagramban az áramot tekintjük alapvektornak. Az ellenállás feszültségése az árammal mindig azonos fázisú, a tekercs feszültségése az áramhoz képest mindig 90° -ot siet.



6.10. ábra. Ellenállás és tekercs soros kapcsolása

Az energiaforrás U feszültsége a huroktörvény szerint U_R és U_L vektoros összege. A vektorábra derékszögű háromszögére alkalmazva *Pitagorasz* tételét, írható:

$$U^2 = U_R^2 + U_L^2, \\ U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}.$$

A kör áramkorlátozó hatását, amelyet *látszólagos ellenállásnak*, idegen szóval *impedanciának* nevezünk a

$$Z = \frac{U}{I}$$

összefüggéssel határozzuk meg. Ez lényegileg az áramkör eredő ellenállása.

Az impedancia kapcsolatát az ellenállással és az induktív reaktanciával a $U^2 = U_R^2 + U_L^2$ összefüggésnek az áram négyzetével végzett osztásával kaphatjuk:

$$\frac{U^2}{I^2} = \frac{U_R^2}{I^2} + \frac{U_L^2}{I^2},$$

átalakítva:

$$\left(\frac{U}{I}\right)^2 = \left(\frac{U_R}{I}\right)^2 + \left(\frac{U_L}{I}\right)^2,$$

ebből következően :

$$Z^2 = R^2 + X_L^2,$$

gyökvonás után:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}.$$

Eszerint a kifejezés szerint az ellenállások is a feszültségek által meghatározott derékszögű háromszöghöz hasonló háromszöggel, az ún. ellenállás-háromszöggel ábrázolható, ahogy az a **6.10.c)** ábrán látható.

Az áramkör fázisviszonyait a **6.10.** ábrában is feltüntetett φ fázisszöggel jellemzőhetjük, amely általánosságban az áramkörre kapcsolt feszültség és a hatására folyó áram közötti fázisszöget jelenti. A fázisszög a tárgyalt áramkörben 0 és 90° közötti értékű. Az ilyen áramköröket *induktív jellegűeknek* mondjuk. A fázisszög koszinuszát *fázistényezőnek*, vagy másképpen *teljesítmény-tényezőnek* nevezzük.

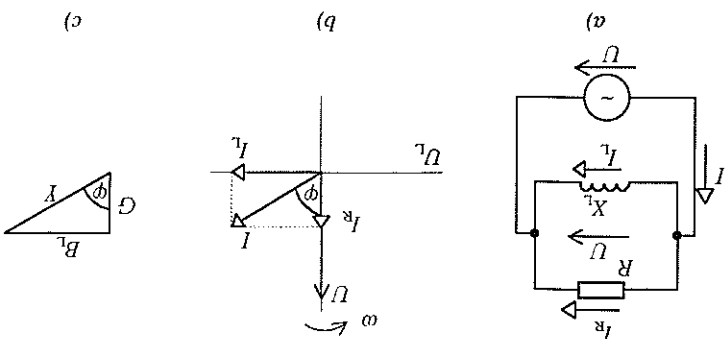
A **6.10.** ábra alapján:

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{Z}{Z}.$$

6.6.2. Ellenállás és tekercs párhuzamos kapcsolása (párhuzamos RL -kör)

Az ellenálláson és a tekercsen azonos a feszültség, ahogy az a **6.11.a)** ábrán látható, így a feszültség a **6.11.b)** ábra alapvektora. Az ellenállás árama a feszültséggel azonos fázisú, az ideális tekercs árama a feszültséghöz képest 90°-ot késik.

6.11. ábra. Ellenállás és tekercs párhuzamos kapcsolása



Az energiatartás árama a csomóponti törvény szerint az ellenállás és a tekercs áramának vektoros összege. A 6.11.b) ábra alapján:

$$I^2 = I_R^2 + I_L^2 \text{ és ebből: } I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}.$$

Az áramkör impedanciája: $Z = \frac{U}{I}$,

amelyet kifejezhetünk az ellenállással és az induktív reaktanciával, ha az $I^2 = I_R^2 + I_L^2$ összefüggés áramait *Ohm törvénye* által a feszültséggel és az ellenállásokkal helyettesítjük:

$$\left(\frac{U}{Z}\right)^2 = \left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{X_L}\right)^2,$$

egyszerűsítés után:

$$\left(\frac{1}{Z}\right)^2 = \left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_L}\right)^2.$$

A zárójelben lévő törték vezetőképességek:

$$\frac{1}{R} = G \quad \text{az ellenállás vezetőképessége,}$$

$$\frac{1}{X_L} = B_L \quad \text{az induktív vezetőképesség, másképpen induktív szuszeptancia,}$$

$$\frac{1}{Z} = Y \quad \text{az eredő vezetőképesség, másképpen admittancia.}$$

A vezetőképességek felhasználásával az előző kifejezés:

$$Y^2 = G^2 + B_L^2.$$

A vezetőképességek összefüggésének *Pitagorasz tétele* alapján megfigyelhető egy derékszögű háromszög, amely az áramok által alkotott háromszöghöz hasonló

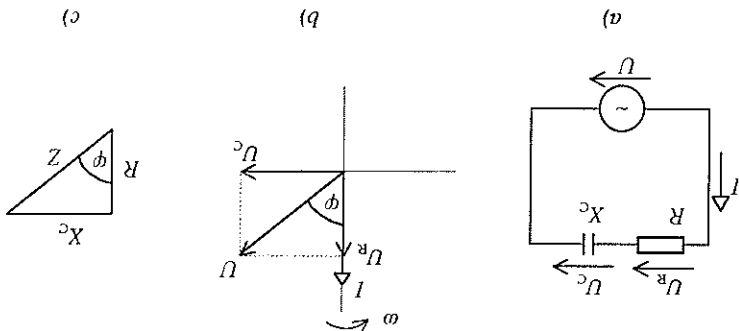
(6.11.c) ábra).

A fázisfenyvezőt a 6.11.b) és c) ábra alapján írhatjuk fel:

$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{Y}{Z} = \frac{R}{Z}.$$

6.6.3. Ellenállás és kondenzátor soros kapcsolása (soros RC-kör)

Az áramkört a 6.12.a) ábra szemlélteti.



6.12. ábra. Ellenállás és kondenzátor soros kapcsolása

Az áramkör vektordiagramjában (6.12.b) ábra) az U_c feszültség 90° -ot késik az áram-erősséghez képest. Ennek megfelelően az áramkör kapacitív jellegű. Az ellenállás és a kondenzátor feszültségének vektoros összege egyenlő az erőforrás feszültségével. A vektorok összegére itt is felírható *Pitagorasz tétele*.

Az összefüggések levezetése a soros *RL*-kapcsoláshoz hasonló.

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2},$$

$$Z = \frac{U}{I},$$

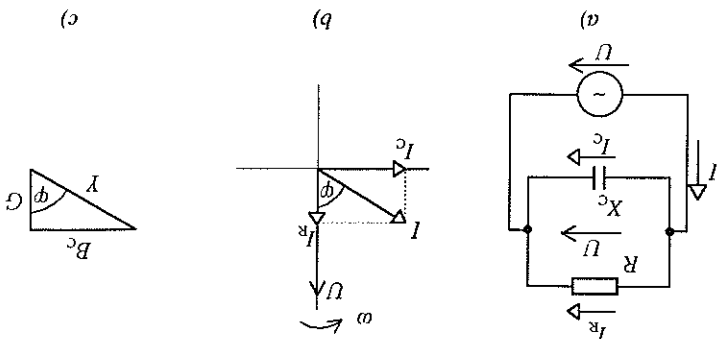
$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2},$$

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{R}{Z},$$

Az áramkör ellenállás-háromszögét a 6.12.c) ábra szemlélteti.

6.6.4. Ellenállás és kondenzátor párhuzamos kapcsolása (párhuzamos RC-kör)

A kapcsolást a 6.13.a) ábra szemlélteti.



6.13. ábra. Ellenállás és kondenzátor párhuzamos kapcsolása

Ez az áramkör a párhuzamos RL -kapcsolással mutat hasonlóságot. A párhuzamos RC -kör vektordiagramjában (6.13.b) ábra) az I_C kapacitív áram 90° -ot szel az U feszültséghez képest, ezért ez a kör is kapacitív jellegű. Az ellenállás és a kondenzátor áramának vektoros összege egyenlő az energiátör-
 tas áramával. A vektorok összegére itt is felírható *Pitagorasz tétele*.
 Az összefüggések levezetése a párhuzamos RL -kapcsolás esetéhez hasonló.

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2},$$

$$\left(\frac{1}{Z}\right)^2 = \left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C}\right)^2.$$

Az $\frac{1}{X_C} = B_C$ kifejezés a **kapacitív vezetőképesség**, másképpen kapacitív szusz-

ceptancia.

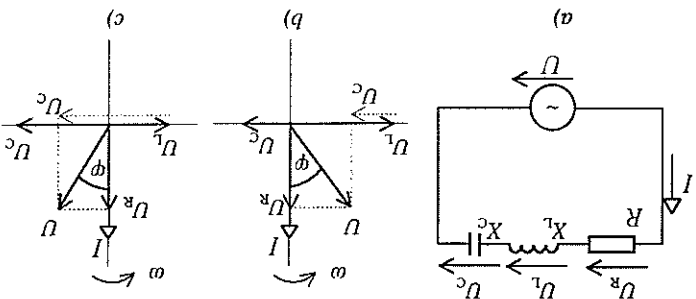
$$Y^2 = G^2 + B_C^2.$$

A vezetőképességek háromszöge a 6.13.c) ábrán látható.

$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{Y}{Z} = \frac{R}{Z}.$$

6.6.5. Ellenállás, tekercs és kondenzátor soros kapcsolása (soros RLC-kör)

A 6.14. ábrán látható a soros RLC-kör (soros rezgőkör) kapcsolása.



6.14. ábra. Ellenállás, tekercs és kondenzátor soros kapcsolása

A 6.14.b) ábrában az alapvektor az I áramerősség, amellyel az ellenállás U_R feszültsége azonos fázisú. A tekercs U_L feszültsége 90° -ot siet, a kondenzátor U_C feszültsége pedig 90° -ot késik az áramhoz képest. Így az U_L és az U_C feszültség ellenfázisú. A három feszültséges vektoros összege egyenlő az energiaforrás U feszültségével. A vektoros összeadást az U_L és az U_C feszültségekkel kezdjük. A vektóra alap-

ján a feszültségek összefüggése: $U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2$.

A 6.14.b) ábra induktív jellegű áramkört jellemez, mert az U feszültség siet az I áramerősséghez képest. Az ábra alapján látható, hogy ez akkor jön létre, ha az U_L nagyobb az U_C feszültségnél. Mivel a tekercs és a kondenzátor áramerőssége egyenlő, az $U_L = I \cdot X_L$ akkor lesz nagyobb, mint az $U_C = I \cdot X_C$, ha X_L nagyobb, mint X_C .

Ha az U_C nagyobb, mint U_L , akkor az áramkör kapacitív jellegű. Ez akkor valószínűleg, ha az X_C kapacitív ellenállás nagyobb, mint az X_L induktív ellenállás. A kapacitív jellegű vektordiagramot a 6.14.c) ábra szemlélteti.

Az áramkör impedanciáját kifejezhetjük, ha az előző, a feszültségek összefüggésére vonatkozó képletet elosztjuk az áramerősség négyzetével:

$$\frac{U^2}{I^2} = \frac{U_R^2}{I^2} + \frac{U_L^2 - U_C^2}{I^2}.$$

A kifejezést átalakítva:

$$\left(\frac{U}{I}\right)^2 = \left(\frac{U_R}{I}\right)^2 + \left(\frac{U_L}{I} - \frac{U_C}{I}\right)^2.$$

A zárójelken belül az impedanciát, az ellenállást és a reaktanciákat kapjuk:

$$Z^2 = R^2 + (X_L - X_C)^2.$$

Négyzetgyökvonás után az impedancia kifejezése:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Az áramkör fázistényezője a vektorábrák alapján:

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{I \cdot R}{I \cdot Z} = \frac{R}{Z}.$$

Speciális eset, amikor az X_L induktív és az X_C kapacitív reaktancia egyenlő.

Ekkor az áramkör impedanciája:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2} = R,$$

a fázistényező pedig:

$$\cos \varphi = \frac{R}{R} = 1 \rightarrow \varphi = 0^\circ.$$

Ez azt jelenti, hogy az áramkörre kapcsolt U feszültség és a hatására folyó I erős-ségű áram azonos fázisú. Az áramkör tehát úgy viselkedik, mintha csak az R ellen-

állást tartalmazná.

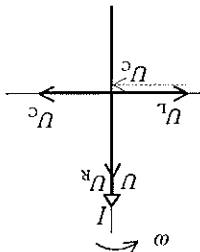
Mivel a reaktanciák egyenlőségéből következően az $U_L = I \cdot X_L$ és $U_C = I \cdot X_C$ fe-szültségek is egyenlők, belátható, hogy az energiaforrás U feszültsége az ellenl-

lás U_R feszültségével azonos:

$$U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2 = U_R^2, \text{ tehát } U = U_R.$$

A leírt jelenséget **feszültségrezonanciának** nevezzük.

A rezonanciára vonatkozó vektorábrát a 6.15. ábra szemlélteti.



6.15. ábra. A soros RLC-áramkör vektorábrája feszültségrezonancia esetén

A rezonancia esetén a legkisebb az áramkör Z impedanciája, ebből következően egy adott U feszültségben a legnagyobb az I áramerősség. Ha az áramkörben az R ellenl-lás jóval kisebb az X_L és X_C reaktanciáknál, akkor a rezonanciához közeli állapotban valamint rezonancián az $U_L = I \cdot X_L$ és $U_C = I \cdot X_C$ feszültségek sokszorosai lehetnek az áramkörre kapcsolt U feszültségnek. A soros RLC-áramkörben az U feszültség kis értékei esetén is veszélyes értékű U_L és U_C feszültségek jöhetnek létre.

A rezonancia létrejötiének részletesebb összefüggéseit az $X_L = X_C$ egyenlőség kifejtéséből kaphatjuk:

$$\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot L} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

Egy adott f_0 frekvencián, és adott kapacitás esetén a rezonanciához tartozó induk-

tivitás értéke:

$$L = \frac{4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot C}{1}$$

ha a kapacitást kell meghatározni, akkor a

$$C = \frac{4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot L}{1}$$

kifejezésre jutunk.

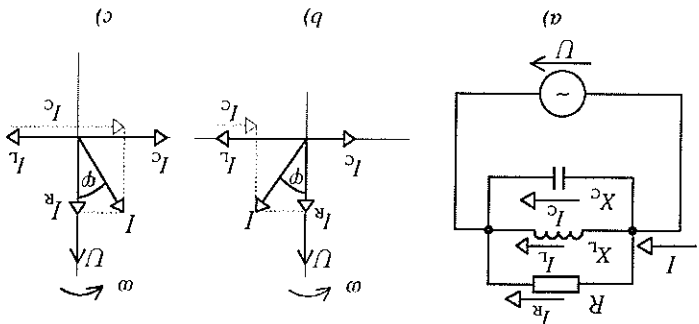
Egy adott induktivitás és kapacitás esetén a rezonancia az

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

frekvencián jön létre. Az f_0 frekvenciát szokás **rezonanciafrekvenciának** nevezni, a rá vonatkozó összefüggést pedig – első megfogalmazójáról – **Thomson-képletnek**.

6.6.6. Ellenállás, tekercs és kondenzátor párhuzamos kapcsolása (párhuzamos RLC-kör)

A párhuzamos RLC-kör (párhuzamos rezgőkör) kapcsolását a 6.16.a) ábra mutatja.



6.16. ábra. Ellenállás, tekercs és kondenzátor vegyes kapcsolása

Az áramköri elemek közös feszültségével azonos fázisú az ellenállás I_R erősségű árama, a tekercs I_L árama 90° -ot késik, a kondenzátor I_C árama 90° -ot siet. Ennek alapján megrajzolható az áramkör vektorábrája.

A 6.16.b) ábra induktív jellegű ($I_C < I_L$), a 6.16.c) ábra kapacitív jellegű ($I_C > I_L$) áramkör vektorábráját szemlélteti.

Az $I_C = \frac{X_C}{U}$ és az $I_L = \frac{X_L}{U}$ kifejezések összevetéséből induktív jellegű áramkör

$$\text{esetén az } \frac{X_C}{U} > \frac{X_L}{U}, \quad \frac{X_C}{1} > \frac{X_L}{1}, \quad X_C > X_L$$

egyenlőtlenségre jutunk. Tehát akkor lesz induktív jellegű az áramkör, ha a kapacitív ellenállás nagyobb az induktív ellenállásnál.

Könnyű belátni, hogy kapacitív jellegű akkor lesz az áramkör, ha az egyenlőtlenség fordított, azaz

$$X_C < X_L.$$

A vektorábrák alapján – a *Pitagorasz-tétel* felhasználásával – az áramerősségek közötti összefüggés:

$$I^2 = I_R^2 + (I_L - I_C)^2.$$

Ohm törvényével kifejezve az áramokat az

$$\left(\frac{U}{Z}\right)^2 = \left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{X_L} - \frac{U}{X_C}\right)^2,$$

összerűgésre jutunk, amelyet az U feszültséggel elosztva megkapjuk az impedancia képletét:

$$\left(\frac{Z}{1}\right)^2 = \left(\frac{R}{1}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2,$$

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R}{1}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}}.$$

Egyszerűbb kifejezésre jutunk a zárójelben lévő vezetésekkel:

$$Y^2 = G^2 + (B_L - B_C)^2,$$

$$Z = \frac{1}{Y}.$$

Az áramkör fázisistenyezője a 6.16. ábra vektorai alapján:

$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{\frac{U}{R}}{\frac{Z}{1}}.$$

Ha az áramkör reaktanciái egyenlők, akkor a B_L induktív és a B_C kapacitív vezető-képességek is egyenlők. Ebből következően az admittancia értéke ekkor a legkisebb és az ellenállás vezetőképességével egyenlő:

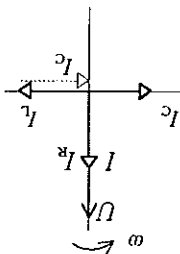
$$Y^2 = G^2 + (B_L - B_C)^2, Y = G,$$

az impedancia értéke pedig ekkor a legnagyobb:

$$Z = \frac{1}{Y} = R.$$

Ezt az esetet **áramrezonanciának** nevezzük.

Áramrezonancia esetén a reaktanciák egyenlőségéből következően az I_C és az I_L áramerősségek is egyenlők, de ellentézesek, ahogy az a 6.17. ábrán látható.



6.17. ábra. A párhuzamos RLC-áramkör vektordiagramja áramrezonancia esetén

Az energiafelforrást terhelő I áramerősség rezonancián a legkisebb és egyenlő az ellenállás I_R erősségű áramával.

Az áramkör fázistényezője rezonancián:

$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{I_R}{I_R} = 1$$

Mivel a rezonancia feltétele megegyezik a soros RLC-áramkörével ($X_L = X_C$), ezért a soros kör rezonancia-összetűgéseit ill is érvényesek:

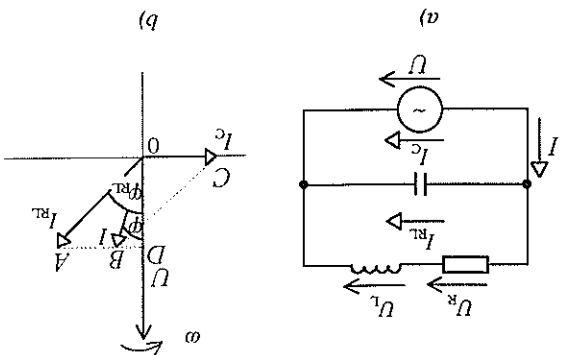
$$L = \frac{4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot C}{1},$$

$$C = \frac{4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot L}{1},$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}.$$

6.6.7. Ellenállás, tekercs és kondenzátor vegyes kapcsolása

A lehetséges sokféle kapcsolás közül vizsgáljuk meg a 6.18. ábra szerinti áramkört!



6.18. ábra. Ellenállás, tekercs és kondenzátor vegyes kapcsolása

Rajzoljuk meg a vektordiagramot! Alapvektornak a feszültséget tekintjük, mert az energiatartás feszültsége közös a párhuzamos ágakon. Az áramkör felső ága induktív jellegű, ezért az I_{RL} áramerősség φ_{RL} szöggel késik a feszültséghez képest, a kondenzátor I_C árama pedig 90° -ot szel. Az energiatartás I árama a csomóponti törvényből következően az I_{RL} és az I_C vektoros összege, amely $\varphi < \varphi_{RL}$ szöggel késik a feszültséghez képest.

A vektordiagramon található derékszögű és általános háromszögekre érvényes matematikai összefüggések alapján, kellő számú adat ismeretében, az áramkör jellemzői meghatározhatók.

A vektordiagramból kitűnik, hogy ha egy induktív jellegű fogyasztóval párhuzamosan kapcsolunk egy alkalmas kapacitású kondenzátort, akkor az energiatartás áramerőssége csökken (I kisebb, mint I_{RL} és φ kisebb, mint φ_{RL}). Ezt az eljárást **fázisjavításnak** nevezzük és a gyakorlatban fontos módszere az energiagazdálkodásnak.

Peldaképpen határozzuk meg azokat az összefüggéseket, amelyekkel kiszámítható a fázisjavításhoz szükséges kondenzátor kapacitását!

Ha a φ_{RL} fázisszöveget, φ -re akarjuk csökkenteni, akkor a 6.18.b) ábrából megállapíthatóan a kondenzátor áramának az A-B távolsággal kell egyenlőnek lennie:

$$I_C = AB = AD - BD.$$

A vektordiagram alapján írható:

$$AD = I_{RL} \cdot \sin \varphi_{RL}, \quad BD = I \cdot \sin \varphi, \quad I \cdot \cos \varphi = I_{RL} \cdot \cos \varphi_{RL},$$

$$\text{ez utóbbi összefüggésből:} \quad I = I_{RL} \cdot \frac{\cos \varphi_{RL}}{\cos \varphi}.$$

Behelyettesítés után:

$$I_C = I_{RL} \cdot \sin \varphi_{RL} - I \cdot \sin \varphi = I_{RL} \sin \varphi_{RL} - I_{RL} \cdot \frac{\cos \varphi_{RL}}{\cos \varphi} \cdot \sin \varphi.$$

A kiemelést és átalakítást elvégezve:

$$I_C = I_{RL} \cdot (\sin \varphi_{RL} - \cos \varphi_{RL} \cdot \operatorname{tg} \varphi).$$

Ha a $\varphi = 0$ állapotot akarjuk létrehozni, az I áram ekkor a legkisebb, egyszerűbb összefüggést kapunk:

$$I_C = I_{RL} \cdot \sin \varphi_{RL}.$$

A kondenzátor áramának ismeretében a 6.5.2. pontban megismert kifejezésekkel a szükséges kapacitás kiszámítható:

$$X_C = \frac{I_C}{I} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}{1} \rightarrow C = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C}{1}$$

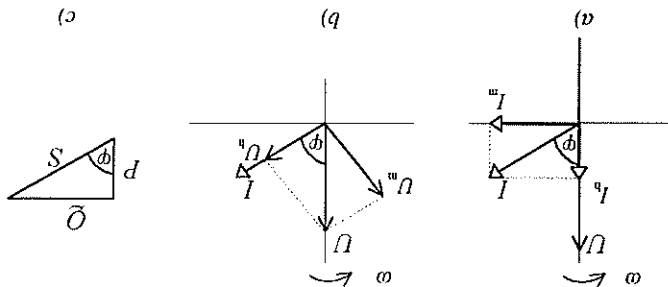
6.7. A váltakozó áramú körök teljesítménye és munkája

A 6.5.1. pontban láttuk, hogy az ellenállások teljesítményét az effektív értékekkel a korábban megismert $P = U \cdot I$ kifejezéssel számíthatjuk. Ellenállás esetén, mint láttuk, a fázisszög $\varphi = 0^\circ$.

Ideális tekercs és kondenzátor esetén, amikor a fázisszög $\varphi = 90^\circ$, a $P = U \cdot I$ teljesítmény nulla (l. a 6.5.2. és 6.5.3. pontot).

Az előző megállapítások alapján meghatározhatjuk a teljesítményt olyan áramkörre is, amelyben a fázisszög 0 és 90° közé esik.

A 6.19.a) ábra I áramát felbonthatjuk két komponensre: a feszültséggel azonos fázisú I_h hatásos összetevőre és a feszültségre merőleges I_m meddő összetevőre.



6.19. ábra. A váltakozó áramú teljesítmény meghatározása

A teljesítményt az I_h komponenssel számíthatjuk, mert az a feszültséggel azonos fázisú, tehát nulla fázisszögű: $P = U \cdot I_h$.

6.8. A váltakozó áramú körök mennyiségeinek mérése

A I_b összetevő az ábra szerint: $I_b = I \cdot \cos \varphi$.
 Ezt felhasználva, a teljesítmény: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$.
 Könnyű belátni a 6.19.b) ábra alapján, hogy ugyanerre az eredményre jutunk, ha a feszültséget bontjuk az árammal azonos fázisú és arra merőleges komponensre.
 Az előző képlet által kifejezett teljesítményt **hatásos teljesítménynek** nevezzük és mértékegysége a watt. Az összefüggés alapján nevezzük a $\cos \varphi$ -t teljesítménytényezőnek.
 A tekercs és kondenzátor kapcsán értelmezett **meddő teljesítményt** is meghatározhatjuk a 6.19.a) ábrából: $\tilde{Q} = U \cdot I_m$, $I_m = I \cdot \sin \varphi$,
 ez utóbbi behelyettesítésével: $\tilde{Q} = U \cdot I \cdot \sin \varphi$.
 A meddő teljesítmény mértékegysége a var (volt amper reaktív).
 A váltakozó áramú körökben értelmezzük a **látszólagos teljesítmény** fogalmát is: $S = U \cdot I$.
 A látszólagos teljesítmény mértékegysége a VA.
 A $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$, a $\tilde{Q} = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ és az $S = U \cdot I$ kifejezések összevetése alapján belátható, hogy:
 $P = S \cdot \cos \varphi$, $\tilde{Q} = S \cdot \sin \varphi$.
 A két összefüggést négyzetre emelve és összeadva:
 $P^2 + \tilde{Q}^2 = S^2 \cdot \cos^2 \varphi + S^2 \cdot \sin^2 \varphi = S^2 \cdot (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)$,
 mivel $\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1$, végeredményként írható:
 $S^2 = P^2 + \tilde{Q}^2$.
 Ez formailag *Pitagorasz tétele*, így a teljesítmények közötti összefüggés egy derékszögű háromszöggel ábrázolható. Ez látható a 6.19.c) ábrán. A $P = S \cdot \cos \varphi$ egyenlőséget tekintve beláthatjuk, hogy ebben a háromszögben a P és S oldal közötti szög φ -vel egyenlő, így ez a háromszög hasonló a 6.19.a) és b) ábra áramai, ill. feszültségei által alkotott háromszögekkel.
 A váltakozó áramú körök munkáját a hatásos teljesítmény és az idő szorzataiból kapjuk:

$$W = P \cdot t.$$

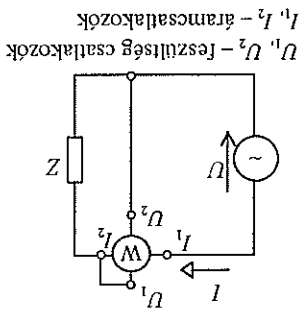
A feszültség és az áramerősség mérése az egyenáramú köröknel alkalmasozott – 2.9., 2.10. és 2.11. ábra szerint – kapcsolások alapján mérhető.

A mérőműszereknek alkalmazásnak kell lenniük változó mennyiségek mérésére.

A hatásos teljesítményt ún. teljesítménymérővel mérhetjük.

A teljesítménymérő olyan műszer, amely érzékel a fogyasztó feszültségét, és áramerősségét és az $U \cdot I \cdot \cos \varphi$ szorzatnak megfelelő értéket mutatja.

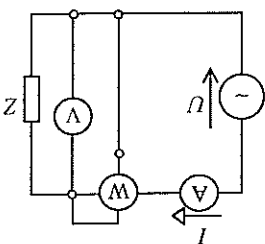
A teljesítménymérő négy kapocsal rendelkezik, ezek közül kettő az áram mérésére való és sorosan kell az áramkörbe iktatni, mint az áramerősségmérőt. A másik két kapocs a feszültséget érzékeli és párhuzamosan kell kapcsolni, mint a feszültségmérőt. Ezt szemlélteti a 6.20. ábra.



6.20. ábra. A teljesítménymérő

kapcsolása

6.21. ábra. Feszültség, áramerősség



Há a 6.21. ábra szerinti kapcsolást alkalmazzuk, akkor a hatásos teljesítmény mellett a látszólagos és meddő teljesítmény, valamint a teljesítménytényező is meghatározható:

$$S = U \cdot I, \\ S^2 = P^2 + \tilde{Q}^2, \quad \tilde{Q} = \sqrt{S^2 - P^2}, \\ P = U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad \cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}.$$

6.9. Példák, feladatok

Példák

1. Mekkora az 50 Hz-es hálózati periódusideje és körfrekvenciája?

A periódusidő: $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50 \text{ Hz}} = 0,02 \text{ s} = 20 \text{ ms}.$

A körfrekvencia: $\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} = 314 \frac{1}{\text{s}}.$

2. Mekkora a 230 V effektív értékű hálózati feszültség max. értéke, az egy- és két-ütemű egyenirányított középértéke?

A max. érték: $u_{\max} = \sqrt{2} \cdot U = \sqrt{2} \cdot 230 \text{ V} \approx 325 \text{ V}.$

Az együtemű középérték: $U_{k1} = \frac{u_{\max}}{\pi} = \frac{325 \text{ V}}{\pi} \approx 104 \text{ V}.$

A kétütemű középérték:

$$U_{k2} = 2 \cdot \frac{u_{\max}}{\pi} = 2 \cdot U_{k1} \approx 2 \cdot 104 \text{ V} = 208 \text{ V}.$$

3. Egy 0,5 H induktivitású tekercset a 230 V-os, 50 Hz-es hálózatra kapcsolunk. Mekkora a tekercs induktív ellenállása és mekkora erősségű áram folyik a tekercsben?

Az induktív ellenállás:

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L = 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,5 \text{ H} = 157 \Omega.$$

Az áramerősség:

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{230 \text{ V}}{157 \Omega} = 1,46 \text{ A}.$$

4. Mekkora kapacitását az a kondenzátor, amelyik 230 V-os, 50 Hz-es hálózatról 50 mA erősségű áramot vesz fel?

A kondenzátor kapacitív ellenállása:

$$X_C = \frac{I}{U} = \frac{0,05 \text{ A}}{230 \text{ V}} = 4600 \Omega = 4,6 \text{ k}\Omega.$$

A kapacitás az $X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$ összefüggésből:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 4600 \Omega} = 6,92 \cdot 10^{-7} \text{ F} \approx 0,7 \mu\text{F}.$$

5. Egy egyfázisú motor a 230 V-os, 50 Hz-es hálózatról 2,5 A erősségű áramot vesz fel, a motor fázistényezője 0,7, hatásfoka 75%.

Mekkora reakcianciájú tekercs és ellenállás soros kapcsolásával helyettesíthető a motor? Mekkora a gép által felvett látszólagos, hatásos és meddő teljesítmény, valamint a leadott teljesítmény?

Mekkora kapacitású kondenzátort kell a motorral párhuzamosan kapcsolni, hogy a hálózaton terhelő áramerősség a legkisebb legyen?

A motor impedanciája: $Z = \frac{U}{I} = \frac{230 \text{ V}}{2,5 \text{ A}} = 92 \, \Omega$.

A helyettesítő soros kapcsolás ellenállása:

$$R = Z \cdot \cos \varphi = 92 \, \Omega \cdot 0,7 = 64,4 \, \Omega.$$

A soros kapcsolású tekercs induktív ellenállásait a $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ összefüggésből kifejezve számíthatjuk:

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{92^2 - 64,4^2} \, \Omega = 65,7 \, \Omega.$$

A felvett látszólagos teljesítmény:

$$S = U \cdot I = 230 \text{ V} \cdot 2,5 \text{ A} = 575 \text{ V} \cdot \text{A}.$$

A felvett hatásos teljesítmény:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 575 \text{ V} \cdot \text{A} \cdot 0,7 = 402,5 \text{ W}.$$

A meddő teljesítmény felvétel:

$$\tilde{Q} = U \cdot I \cdot \sin \varphi = S \cdot \sin \varphi = 575 \text{ V} \cdot \text{A} \cdot 0,714 \approx 410 \text{ var}.$$

A motor leadott teljesítménye a hatások általános értelmezéséből:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100, \quad P_2 = \frac{P_1 \cdot \eta}{100} = \frac{402,5 \text{ W} \cdot 75\%}{100} \approx 302 \text{ W}.$$

A 6.18.b) ábrából látható, hogy az energiatárolást terhelő áram akkor a legkisebb, ha $\varphi = 0^\circ$. A szükséges kondenzátor árama ekkor:

$$I_C = I_{RL} \cdot \sin \varphi_{RL} = 2,5 \text{ A} \cdot 0,714 = 1,785 \text{ A}.$$

Ezzel a kapacitív ellenállás:

$$X_C = \frac{U}{I_C} = \frac{230 \text{ V}}{1,785 \text{ A}} = 128,9 \, \Omega.$$

A szükséges kapacitás:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 128,9 \, \Omega} = 24,6 \cdot 10^{-6} \text{ F} \approx 25 \, \mu\text{F}.$$

6. Egy 230 V-os, 50 Hz frekvenciájú hálózatra csatlakozó soros kapcsolású RLC -kör ellenállása $100 \, \Omega$, a tekercs induktivitása $0,5 \text{ H}$. Mekkora kapacitású kondenzátor van az áramkörben, ha éppen rezonancia van? Mekkora az áramerősség és a feszültség az áramkör elemein?

A rezonanciához tartozó kapacitás:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}, \quad C = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot L} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 50^2 \text{ Hz}^2 \cdot 0,5 \text{ H}} \approx 20 \, \mu\text{F}.$$

Az áramerősség rezonancia esetén:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R} = \frac{230 \text{ V}}{100 \Omega} = 2,3 \text{ A}.$$

Az ellenállás feszültsége rezonancián megegyezik a hálózat feszültségével:

$$U_R = U = 230 \text{ V}.$$

A reaktanciák feszültségének meghatározásához szükség van a reaktanciák értékre:

$$X_C = X_L = 2\pi \cdot f_0 \cdot L = 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,5 \text{ H} \approx 157 \Omega.$$

A reaktanciák feszültségese:

$$U_C = U_L = I \cdot X_L = 2,3 \text{ A} \cdot 157 \Omega \approx 361 \text{ V},$$

tehát nagyobb, mint a hálózati feszültség!

7. Egy párhuzamos kapcsolású RLC -körben lévő tekercs induktivitása 50 mH , a kondenzátor kapacitása 5 nF . Mekkora a kör rezonanciafrekvenciája?

A rezonanciafrekvencia:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{5 \cdot 10^{-2} \text{ H} \cdot 5 \cdot 10^{-9} \text{ F}}} \approx 10 \text{ kHz}.$$

Feladatok

1. Egy szinuszos váltakozó feszültség periódusideje 10 ms , max. értéke 150 V . A periódus kezdetétől mennyi idő múlva lesz a feszültség pillanatértéke 100 V ? $(1,16 \text{ ms})$
2. Mennyi töltés halad át a vezető keresztmetszetén az $1,5 \text{ A}$ max. értékű, kétüteműen egyenirányított szinuszos áram hatására egy h alatt? $(3437,7 \text{ C})$
3. Mekkora annak az ideális tekercsnek az induktivitása, amely a 230 V -os, 50 Hz -es hálózatról 2 A erősségű áramot vesz fel? $(0,366 \text{ H})$
4. Mekkora annak a tekercsnek az induktivitása, amelynek az egyenárammal mért ellenállása 50Ω és 100 V -os, 100 Hz -es energiatáforrásból $0,5 \text{ A}$ -es áramot vesz fel? $(0,308 \text{ H})$

5. Egy $100\ \Omega$ -os ellenállással sorba kötünk egy $20\ \mu\text{F}$ -os kondenzátort, amelyeket a $230\ \text{V}$ -os, $50\ \text{Hz}$ frekvenciájú hálózatra kapcsolunk.

Mekkora lesz a kapcsolás impedanciája és fázistényezője?

Mekkora a látszólagos, a hatásos és a meddő teljesítmény felvétele az áramkörnek? ($Z \approx 188\ \Omega$; $\cos\varphi = 0,532$; $S = 281,4\ \text{V}\cdot\text{A}$; $P = 149,7\ \text{W}$; $Q = 238,3\ \text{var}$.)

6. Egy $230\ \text{V}$ -os, $50\ \text{Hz}$ frekvenciájú, $2,5\ \text{A}$ áramerősségű, $0,7$ fázistényezőjű és 75% hatásfokú motor mekkora induktív reaktancia és ellenállás párhuzamos kapcsolásával helyettesíthető?

Mekkora kapacitási kondenzátor párhuzamos kapcsolásával javítható $0,9$ -re az áramkör fázistényezője és ekkor milyen erősségű áram terheli a hálózatot? ($R = 131,4\ \Omega$; $X_L = 128,8\ \Omega$; $C = 12,97\ \mu\text{F}$; $I = 1,94\ \text{A}$.)

Ellenőrző kérdések

- Hogyan értelmezzük a váltakozó feszültség frekvenciáját, körfrekvenciáját?
- Mi az effektív érték, az elektrolitikus középérték, és hogyan számíthatók szinuszos feszültség, áram esetén?
- Mit jelent a feszültség és áram közötti fáziseltolódás, mi a fázisszög értelmezése?
- Mi jellemzi az ellenállást váltakozó feszültségű táplálás esetén?
- Hogyan viselkedik egy kondenzátor váltakozó feszültség hatására?
- Mit értünk kapacitív ellenálláson és hogyan számítható?
- Milyen fázisviszonyok jellemzik az ideális tekercset?
- Hogyan értelmezzük az induktív ellenállást, hogyan számítható?
- Mit értünk impedancián és hogyan számítható soros, ill. párhuzamos áramkörök esetén?
- Mit értünk feszültség- és áramrezonancián?
- Hogyan értelmezzük a hatásos, meddő és látszólagos teljesítményt?

7. HÁROMFÁZISÚ FESZÜLTSGRENDSZER

Háromfázisú feszültségrendszert három különböző fázishelyezettű feszültség alkot. A gyakorlatban az ún. szimmetrikus rendszert használják. Szimmetrikus rendszerben a három feszültség effektív értéke egyenlő és a közöttük lévő fáziseltolás is egyforma, tehát 120° .

A háromfázisú feszültségrendszer gyakorlati jelentősége nagyon nagy. Az ipari méretű villamosenergia-termelés az erőművekben és az energiacsatornákban a háromfázisú rendszerben megy végbe. A fogyasztói berendezések jelentős része is háromfázisú feszültségről működik. Ennek okai:

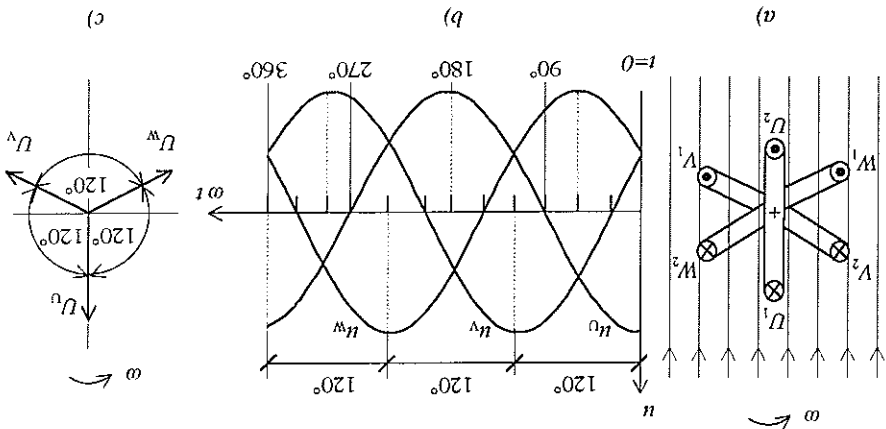
- háromfázisú rendszerben lehet a leggazdaságosabban előállítani a villamos energiát,
- háromfázisú távvezetőkkel összehasonlítva kisebb vezető-keresztmetszetre van szükség, mint egyfázisú esetben, tehát az energia szállítása így gazdaságosabb,
- a háromfázisú motorok a leggyakoribb szerkezetűek, így a legüzembiztosabbak és a legolcsóbbak.

7.1. A szimmetrikus háromfázisú feszültség előállítása

Ha a 7.1.a) ábrának megfelelően mágneses térben három, egymáshoz képest rögzített és szimmetrikusan elfordított síkú, egyforma geometriai méretű és menetszámmú tekercset forgatunk állandó szögsebességgel, akkor azokban szimmetrikus háromfázisú feszültség indukálódik.

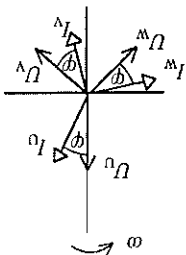
A tekercsek kezdőpontjai (U_1, V_1, W_1) a kerület mentén 120° -ra vannak. (A tekercsek végpontjait U_2, V_2 és W_2 jelöli.) Ez biztosítja, hogy a feszültségek között 120° -os fáziseltolás keletkezik. Ezt a következő módon láthatjuk be. Az U_1-U_2 jelet tekercsben – rövidebb az U fázisban – a 7.1.a) ábrán rajzolt pillanatban pozitív max. feszültség indukálódik. A V fázistekercs 120° -os elfordulás után kerül az U fázis ábrázolt helyzetébe, tehát benne a feszültség 120° -os elfordulás után lesz pozitív maximum. Ez egyben a két feszültség közötti 120° -os fáziseltolást jelenti. A

V fázis feszültsége 120° -ot késik az U fázis feszültségéhez képest. Azonos gondolatmenet szerint látható be, hogy a W fázis feszültsége 120° -ot késik a V fázis feszültségéhez viszonyítva. A keletkező feszültségeket szemlélteti a 7.1.b) és c) ábra, az a) ábra helyzetét tekintve a $t = 0$ időpillanatoknak.



7.1. ábra. Szimmetrikus háromfázisú feszültség előállítása és ábrázolása

A feszültségek közötti 120° -os eltolás nem tévesztendő össze az áramkör korábban értelmezett, a feszültség és az áramerősség közötti φ fázisszögével. A 7.2. ábrán egy szimmetrikus háromfázisú rendszer φ fáziseltolását feszültségei és áramai láthatók.



7.2. ábra. Szimmetrikus háromfázisú feszültségek és áramok közötti fáziseltérés

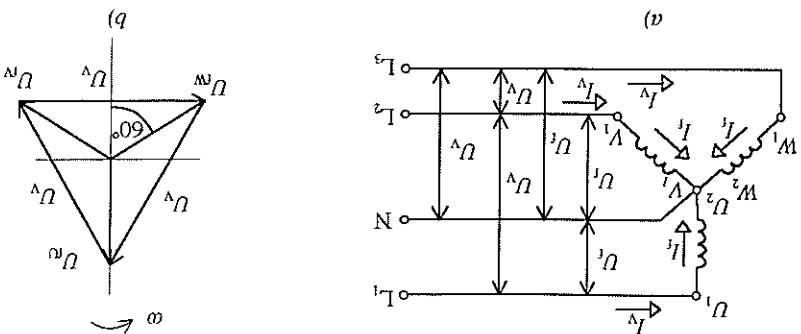
7.2. A háromfázisú rendszer kapcsolásai

Há a háromfázisú rendszer feszültségeit egymástól függetlenül akarnánk a három-fázisú fogyasztókra kapcsolni, túl sok, összesen hat vezetőre lenne szükség. Ezért a fázisokat összekapcsolják, ezzel csökkenteni lehet a vezetékek számát.

Csillagkapcsolás

A kapcsolás szabálya: a fázisok végpontjait (U_2 , V_2 , W_2) kell összekötni. Ezt a közös pontot szokás **csillagpontnak** vagy **nullapontnak** nevezni.

A kapcsolás az elnevezését a szokásos ábrázolási mód után kapta (7.3. ábra).



7.3. ábra. Háromfázisú csillagkapcsolás

Az ábrából láthatóan a lehetséges kivezetések száma hatról négyre csökken. Az L_1 , L_2 és L_3 jelzésű vezetők (rég jelzésük R, S, T) **fázisvezetőknek**, az N jelzésű vezetőt **nullavezetőknek** nevezzük.

A fázisvezetők és a nullavezető együttes száma miatt szokás négyvezetős rendszer-ről is beszélni.

A kapcsolatban kétféle feszültséget értelmezzünk:

- a nulla- és fázisvezetők közötti U_l jelű **fázisfeszültséget**, amely tulajdonképpen a fázisok kezdő- és végpontja közötti feszültség;

- a fázisvezetők közötti U_v jelű **vonali feszültséget**, amely egyben a fázisok végpontjai közötti feszültséget is jelent.

A vonali feszültség, a 7.3.a) ábra alapján behatárolható, két fázisfeszültség különbsége. A különbséget vektorosan kell képezni, amint azt a 7.3.b) ábra szemlélteti.

A vektorábrából közvetlenül látható, hogy a vonali feszültség nagyobb a fázisfeszültségnél. A 7.3.b) ábrában lévő 60° -os derékszögű háromszögből következik az

összetűzés:

$$\sin 60^\circ = \frac{\frac{U_v}{2}}{\frac{U_l}{\sqrt{3}}} = \frac{U_v}{2 \cdot \frac{U_l}{\sqrt{3}}} = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

A kifejezés utolsó egyenlősége alapján: $\frac{U_v}{U_l} = \sqrt{3}$,

ebből az általánosan érvényes összefüggés: $U_v = \sqrt{3} \cdot U_l$.

A 7.3.b) ábrából az is látszik, hogy a vonali feszültségek is 120° -os fáziseltolásban vannak egymástól, és nem azonos fázisúak a fázisfeszültségekkel. Így csillagkapcsolásban hat különböző fázisú feszültséget találunk.

Ha pl. egy villamos hálózat kapcsolószerkevényén a $3 \cdot 400/230$ V feliratot látjuk, akkor ezt úgy kell értelmezni, hogy a vonali feszültség 400 V, a fázisfeszültség 230 V, és mindkettő három viszonylatban mérhető.

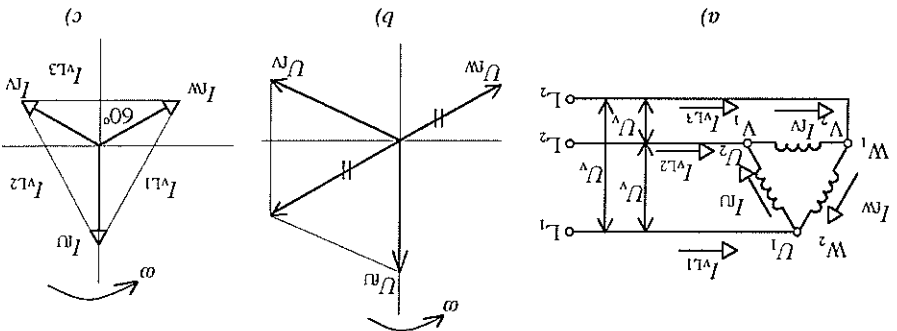
Csillagkapcsolásban értelmezzük az I_V vonali áramot, amely a fázisvezetőkben folyik és az I_f fázisáramot, amely a fázis kezdő és végpontja között folyik. A 7.3.a) ábrát tekintve belátható, hogy a két áram egyenlő: $I_V = I_f$.

Szimmetrikus feszültségrendszerben a fázisfeszültségek és szimmetrikus terhelés esetén a fázisáramok összege minden időpillanatban nulla, ezért a nullavezetőkben nem folyik áram.

Delta- (háromszög-) kapcsolás

A kapcsolás az elnevezését a szokásos ábrázolási alakjáról kapta.

A kapcsolás szabálya: az egyik fázis végét a másik kezdetével kötik össze és így tovább. Ezáltal egy zárt soros kapcsoláshoz jutunk (7.4. ábra).



7.4. ábra. Háromfázisú delta-kapcsolás

Zártan mégsem keletkezik, mert a 7.4.b) ábra alapján belátható, hogy a fázisok feszültségeinek összege minden időpillanatban nulla.

A lehetséges csatlakozási pontok száma három, így legfeljebb három csatlakozó-vezeték szükséges.

Delta-kapcsolás esetén is értelmezzük a vonali és fázisfeszültséget, ill. áramot.

A 7.4.a) ábrában bejelölt vonali feszültségekről egyszerűen belátható, hogy azok a fázisfeszültségekkel egyelők, hiszen a fázisvezetők a fázisok kezdő-és végpontjai-ra csatlakoznak. Ennek alapján általában igaz, hogy delta-kapcsolás esetén a vonali és fázisfeszültség egyenlő: $U_V = U_f$.

Ha *Kirchhoff I. törvényét* alkalmazzuk a 7.3.a) ábra felső csomópontjára, természetesen vektorosan, akkor felírható: $\vec{I}_{fw} + \vec{I}_{VL1} = \vec{I}_{rv}$. Kifejezve a vonali áramot: $\vec{I}_{VL1} = \vec{I}_{rv} - \vec{I}_{fw}$. A vektorok kivonásának szabálya szerint a vonali I_{VL1} áram a 7.4.c) ábrán feltüntetett elvegyenlő. Az ábrában bejelölt 60° -os derékszögű háromszög alapján a csillagkapcsolás feszültségénél alkalmazott gondolatmenetet követve, általánosságban felírható a delta-kapcsolás áramai közötti összefüggés:

$$I_v = \sqrt{3} \cdot I_r.$$

7.3. A háromfázisú rendszer teljesítménye

A háromfázisú fogyasztó egy fázisának hatásos teljesítménye:

$$P_f = U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi.$$

Szimmetrikus rendszer esetében a fázisok teljesítményei egyenlők, így a háromfázisú hatásos teljesítmény: $P_{3f} = 3 \cdot P_f = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi$.

Célserű a teljesítményt a vonali mennyiségekkel kifejezni, mert a fogyasztók, be- és rendezések adatait leggyakrabban vonali mennyiségekkel tüntetik fel.

Csillagkapcsolás esetén az ismert összefüggésekből:

$$U_f = \frac{U_v}{\sqrt{3}}, \quad I_f = I_v.$$

Ezeket behelyettesítve és egyszerűsítve:

$$P_{3f} = 3 \cdot \frac{U_v}{\sqrt{3}} \cdot I_v \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_v \cdot I_v \cdot \cos \varphi.$$

Delta-kapcsolás esetén:

$$U_f = U_v, \quad I_f = \frac{\sqrt{3}}{I_v}.$$

Ismét visszahelyettesítve és egyszerűsítve:

$$P_{3f} = 3 \cdot U_v \cdot \frac{I_v}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_v \cdot I_v \cdot \cos \varphi.$$

Megállapítható, hogy a háromfázisú hatásos teljesítmény a vonali mennyiségekkel, a kapcsolástól függetlenül: $P = \sqrt{3} \cdot U_v \cdot I_v \cdot \cos \varphi$.

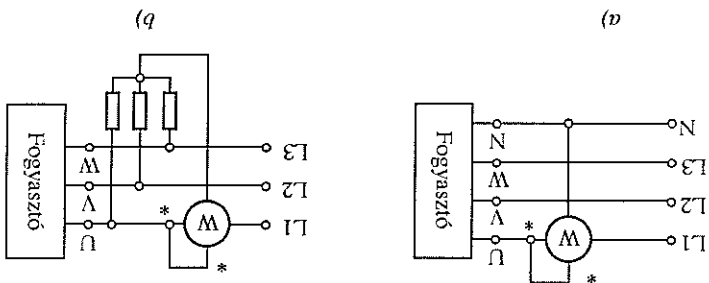
A háromfázisú áramkörök meddő és látszólagos teljesítményét az előzővel azonos gondolatmenet szerint határozzuk meg.

7.4. A háromfázisú teljesítmény mérése

Szimmetrikus feszültségű és terhelésű háromfázisú áramkör teljesítményét mérni lehet egy teljesítménymérővel, amely egy fázis teljesítményét adja. A teljesítménymérő által mutatott érték háromszorosra lesz a háromfázisú teljesítmény:

$$P = 3 \cdot P_{\text{f}}.$$

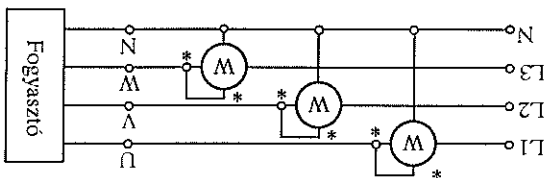
A lehetséges kapcsolások vázlatai a 7.5. ábrán láthatók.



7.5. ábra. Háromfázisú teljesítmény mérése egy teljesítménymérővel
a) négyvezeték; b) háromvezeték rendszer esetén

A teljesítménymérő áramtekercsét az egyik fázissal sorba kell kötni. A feszültségtekercs jelölt végét az áramtekercs jelölt végével kell összekötni, a másik végét négyvezeték rendszer esetén az N jelű nullavezetőhöz kell csatlakoztatni. Háromvezeték rendszer esetén három egyelő értékű, csillagkapcsolású ellenállás csillagpontjához kell csatlakoztatni a feszültségtekercs másik végét.

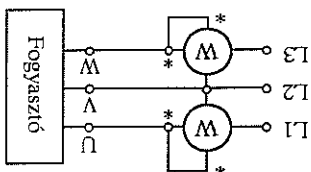
7.6. ábra. Teljesítmény mérése aszimmetrikus, négyvezeték rendszerben



Négyvezetékes aszimmetrikus rendszer esetén minden fázis teljesítményét külön kell mérni a 7.6. ábra kapcsolása szerint. A három teljesítménymérő műszer által mutatott teljesítmények összege adja a háromfázisú teljesítményt:

$$P = P_1 + P_2 + P_3.$$

Háromvezetékes rendszerben a leggyakrabban az ún. két teljesítménymérő módszerrel – más néven *Aron-kapcsolással* – méri a teljesítményt, ami egyaránt alkalmazható szimmetrikus és aszimmetrikus rendszerben. A módszer kapcsolási vázlatát a 7.7. ábra szemlélteti.



7.7. ábra. Háromvezetékes rendszer teljesítményének mérése két teljesítménymérővel

Bizonyítható, hogy a háromfázisú teljesítmény a két teljesítménymérő által mutatott érték összege:

$$P = P_1 + P_2.$$

A kisebbik teljesítmény lehet pozitív és negatív előjelű, ill. nullaértékű is, az áramkör fázisátényezőjének függvényében:

ha $\cos \varphi > 0,5$, akkor $P_2 > 0$;

ha $\cos \varphi = 0,5$, akkor $P_2 = 0$;

ha $\cos \varphi < 0,5$, akkor $P_2 < 0$.

Az előjel biztos megállapítása érdekében célszerű két azonos típusú teljesítménymérőt alkalmazni és azokat azonos módon beiktatni a kapcsolásba.

A kisebbik teljesítmény negatív előjelet úgy észleljük, hogy a műszer mutatója a skála nulla pontjától balra tér ki. Ha a műszeren van polaritásváltó-kapcsoló, akkor annak átkapcsolásával a kitérés helyes irányba állítható át. Ebből következik, hogy a két műszer helyes kitérése esetén: ha a két polaritásváltó-kapcsoló azonos állású, akkor a P_2 pozitív, ha ellenkező állásúak, akkor P_2 negatív.

Ha a műszeren nincs polaritásváltó-kapcsoló, akkor – feszültségmérés állapotban – a helytelen kitérést műszer áramtekercsének csatlakozásait fel kell cserélni.

7.5. Forgó mágneses tér

Forgó mágneses térrel akkor beszélünk, ha a mágneses tér polusai körpályán mozognak.

Forgó mágneses teret előállíthatunk:

- permanens vagy elektromágnes tengely körüli mechanikus forgatásával,
 - egyenlő több fázisú, térben álló tekercseleltre kapcsolt többfázisú árammal.
- A gyakorlat számára a két- és háromfázisú tekercselelssel, ill. árammal előállított forgó mágneses térnek van jelentősége.

7.5.1. Kétfázisú forgó mágneses tér

Kétfázisú tekercsek mágneses tengelyei merőlegesen egymásra, ill. a két fázis árama között 90° -os fáziseltolás van (7.8. ábra).

A 7.8.a) ábrán kétfázisú áram időfüggvénye látható. A 7.8.b) ábra kétfázisú tekercseket mutat. A pozitív áramok a tekercsek kezdőpontján (U_1 és V_1) a papír síkjába befelé folynak, a negatív áramok a kezdőpontokon kifelé folynak. Ezek alapján vizsgáljuk meg néhány időpillanatban a kialakuló mágneses teret!

A t_1 pillanatban az I_U áram pozitív max., $I_V = 0$. Ennek megfelelő a mágneses tér iránya (vastag nyíl), amely kijelöli a mágneses tér északi és déli pólusának helyét a 7.8.b) ábrában.

A t_2 időpontban a két áram egyenlő és pozitív. A 7.8.c) ábra szemlélteti a létrehozott mágneses teret. Az eredő mágneses tér iránya, tehát az északi és a déli pólus a 7.8.b) ábrában látható irányhoz képest 45° -ot elfordult az óramutató járásával egyező irányba.

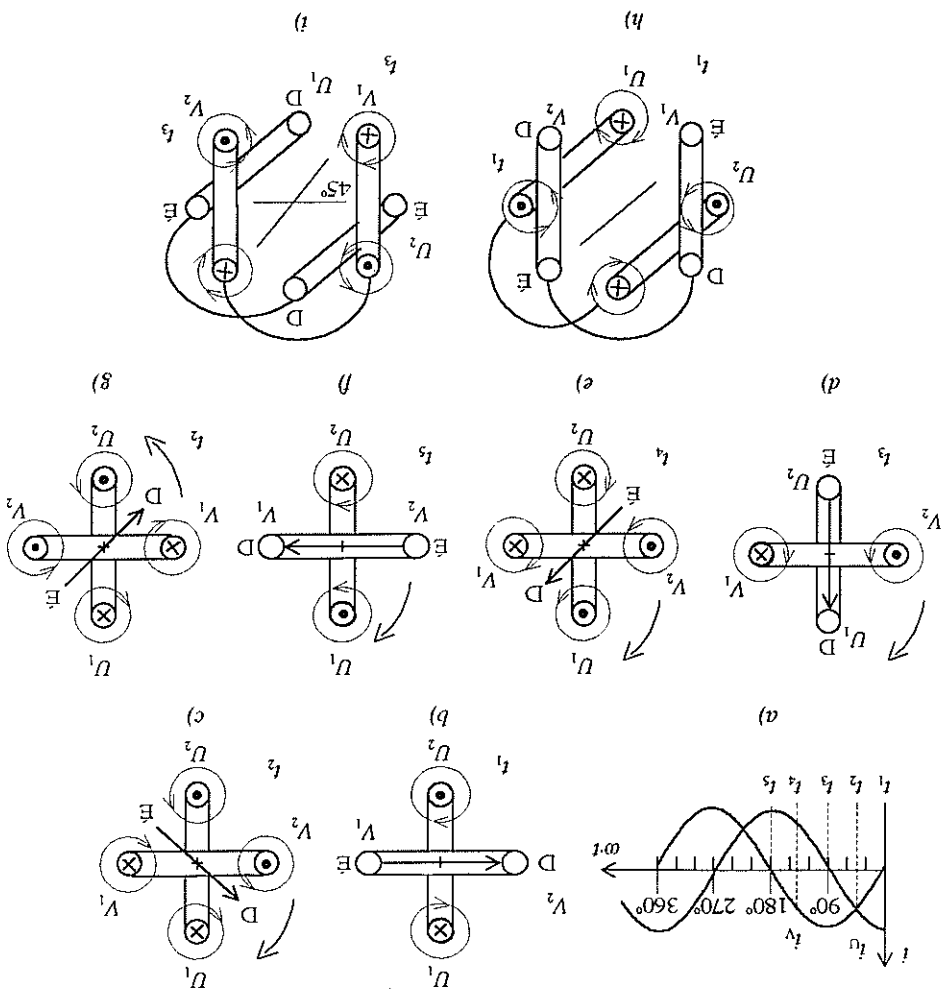
A t_3 , t_4 és a t_5 pillanatok áramai által létrehozott mágneses terék és irányaik a 7.8.d), e) és f) ábrákon láthatók. A t_5 pillanattig egy fél periódus zajlott le, ezalatt a mágneses tér 180° -ot, azaz egy fél fordulatot tett meg. Ebből következik, hogy minden periódus alatt egy fordulatot tesznek meg a mágneses pólusok.

A mágneses tér forgásiiránya megváltozik, ha valamelyik fázis tekercs kezdő- és végpontját felcseréljük. A 7.8.g) ábra a t_2 időpontban, a V_1 és V_2 végek felcserélése után ábrázolja a mágneses teret. Látható, hogy a 7.8.c) ábrához viszonyítva elentétes irányba fordultak el a mágneses pólusok.

A 7.8.h) és i) ábra két póluspárti mágneses teret ábrázol a t_1 és t_2 időpontban. A fázis tekercsek ebben az esetben két részből állnak, amelyek sorbakapcsolhatók. A tekercsoldalak a kerület mentén egyenletes osztásban helyezkednek el és a fázisok tekercsoldalai felváltva következnek. A fázisok kezdőpontjai ilyenkor a kerület mentén 45° -ra vannak egymástól.

A 7.8.h) és i) ábra összevetéséből megállapítható, hogy a pólusok most 45° -ot fordultak el, tehát fele akkora, mint az egy póluspárti elrendezés esetén, amely a

7.8.b) és d) ábrákból látható. Alkalanosan is igaz, hogy a pólusok szögelfordulása azonos idő alatt, fordítottan arányos a póluspárk számával.



7.8. ábra. Kétfázisú forgó mágneses tér

Az előző gondolatmenet alapján a mágneses tér fordulatszámát is felírhatjuk.

A másodpercenkénti fordulatok száma: $n = \frac{f}{p}$,

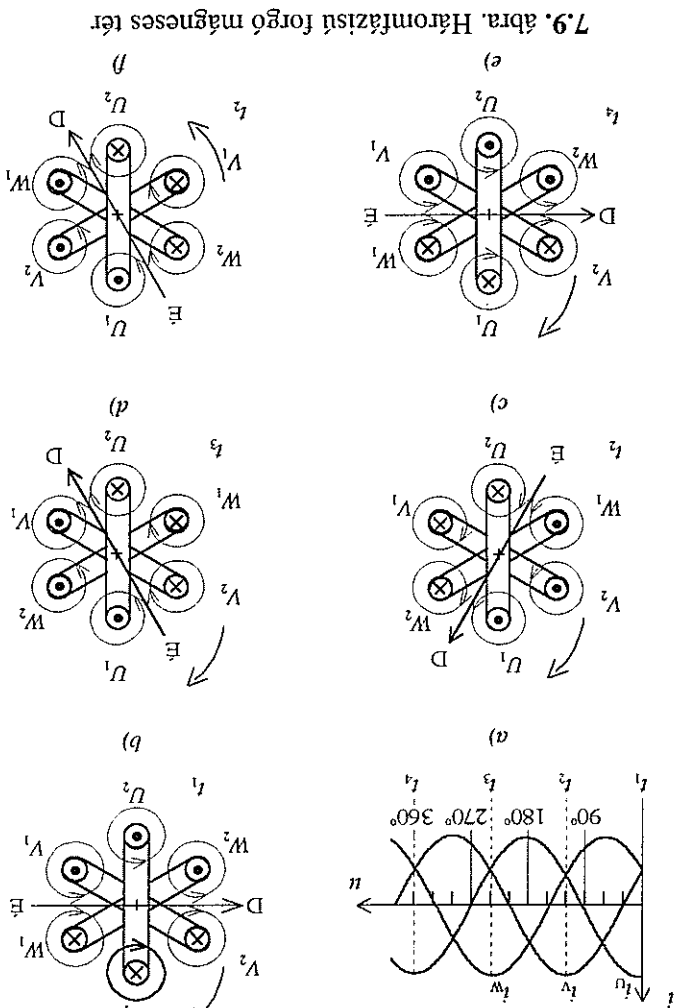
a percenkénti fordulatszám pedig: $n = 60 \cdot \frac{f}{p}$.

A mágneses tér fordulatszáma tehát egyenesen arányos a gerjesztő áram frekvenciájával és fordítottan arányos a p póluspárok számával.

Az előző összefüggésekkel számított fordulatszámot szokás szinkronfordulatszámnak is nevezni.

7.5.2. Háromfázisú forgó mágneses tér

A 7.9. ábrán nyomon követhetjük a háromfázisú forgó mágneses tereket, a kétfázisú esetben alkalmazott módszerrel.



7.9. ábra. Háromfázisú forgó mágneses tér

A t_1 , t_2 , t_3 és t_4 időpillanatokban látható áramirányok esete megegyezik 7.9.b), c), d), e) ábra szemlélteti a mágneses tér változó irányát. A 7.9.a) ábra említett pillanatai 120°-onként következnek egymás után és láthatóan ezalatt 120°-ot fordulnak el a mágneses pólusok. Háromfázisú esetben is egy periódus alatt egy fordulatot tesz meg a mágneses tér, ha a tekercsek egy póluspártú teret létesítenek. Több póluspárral szintén a kétfázisú esetben megismert szabály érvényes. A fordulatszámot itt is az $n = \frac{f}{T}$, ill. az $n = 60 \cdot \frac{p}{T}$ összefüggésekkel számíthatjuk.

A háromfázisú mágneses tér forgásirányát leiszólegesen két fázis felcserélésével változtathatjuk meg. A 7.9.f) ábrában a V és W fázis felcserélését láthatjuk, a t_2 időpont áramirányaival. Megfigyelhető, hogy a 7.9.c) ábrához képest – amely ugyan csak a t_2 pillanatra vonatkozik – ellentétes irányba fordultak el a pólusok. A gyakorlatban a legtöbbszor a háromfázisú forgó mágneses térrel találkozunk, mivel a villamosenergia-rendszer is háromfázisú.

7.6. Példák, feladatok

Példák

1. Egy háromfázisú ellenállás-fűtést, delta-kapcsolású kismence vonali feszültségre 400 V, teljesítménye 10 kW.

Mekkora a kismence vonali és fázisáramja?

Mekkora a kismence fázisonkénti ellenállása?

Mekkora lesz a kismence teljesítménye csillagkapcsolásban?

A vonali áramot a háromfázisú teljesítményből számíthatjuk, figyelembe véve, hogy ellenállás esetén a fázisszög nulla:

$$I_v = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_v \cdot \cos \varphi} = \frac{10\,000 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 1} = 14,43 \text{ A}.$$

A delta-kapcsolás fázisáramja:

$$I_f = \frac{I_v}{\sqrt{3}} = \frac{14,43 \text{ A}}{\sqrt{3}} = 8,33 \text{ A}.$$

A fázisellenállást a fázisfeszültség és fázisáram ismeretében *Ohm törvénye* alapján számíthatjuk, figyelembe véve, hogy delta-kapcsolás esetén a fázisfeszültség megegyezik a vonali feszültséggel:

$$R_f = \frac{U_f}{I_f} = \frac{8,33 \text{ V}}{400 \text{ A}} = 48 \, \Omega.$$

Csillagkapcsolásban a fázisfeszültség:

$$U_f = \frac{\sqrt{3}}{400 \text{ V}} \approx 230 \text{ V}.$$

Ezzel a csillagkapcsolás fázisáram, amely egyenlő a vonali árammal:

$$I_f = I_v = \frac{U_f}{R_f} = \frac{230 \text{ V}}{48 \, \Omega} = 4,79 \text{ A}.$$

A csillagkapcsolás teljesítménye:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_v \cdot I_v \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 4,79 \text{ A} \cdot 1 = 3318 \text{ W} \approx 3,3 \text{ kW}.$$

2. Egy háromfázisú motor 400 V feszültségről 15 A erősségű áram mellett 8800 W teljesítményt vesz fel. A motor hatásfoka 85%.

Mekkora a motor teljesítményfogyó?

Mekkora a motor által felvett látszólagos és meddő teljesítmény, valamint a motor mechanikai teljesítménye?

A teljesítményfogyó a:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{8800 \text{ W}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_v \cdot I_v}{8800 \text{ W}} \approx 0,85.$$

A felvett látszólagos teljesítmény:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_v \cdot I_v = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 15 \text{ A} = 10\,392 \text{ V} \cdot \text{A} \approx 10,4 \text{ kV} \cdot \text{A}.$$

A felvett meddő teljesítmény:

$$Q = S \cdot \sin \varphi = 10,4 \text{ kV} \cdot \text{A} \cdot 0,526 = 5,47 \text{ kvar}.$$

A leadott teljesítmény a hatásfok $\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100$ összefüggése alapján:

$$P_2 = \frac{100}{P_1 \cdot \eta} = \frac{100}{8800 \text{ W} \cdot 85\%} = 7480 \text{ W} \approx 7,5 \text{ kW}.$$

Feladatok

1. Egy háromfázisú motor adatai: $U = 400 \text{ V}$, $I = 0,9 \text{ A}$, $\cos \varphi = 0,7$, $P_2 = 0,37 \text{ kW}$ (leadott teljesítmény). Mekkora a motor hatásfoka? (84,8%)

2. Egy 400 V vonali feszültségről működő kemence fázisonkénti ellenállása 19,2 Ω . Mekkora áramerősséggel terheli a kemence a hálózatot csillag- és delta-kapcsolásban? Mekkora a kemence teljesítménye a kétféle kapcsolásban?
- ($I_Y \approx 12$ A, $I_\Delta \approx 36$ A, $P_Y \approx 8,33$ kW, $P_\Delta = 25$ kW)

Ellenőrző kérdések

1. Mi jellemzi a szimmetrikus háromfázisú feszültségrendszert?
2. Mi a csillagkapcsolás szabálya, hány vezeték csatlakozását teszi lehetővé?
3. Mi a vonali, a fázisfeszültség és áram értelmezése, milyen összefüggés van közöttük csillagkapcsolás esetén?
4. Hogyan kell a delta-kapcsolást kialakítani? Milyen összefüggés van ekkor a vonali és fázismennyiségek között?
5. Hogyan számítható a háromfázisú fogyasztó hatásos, meddő és látszólagos teljesítménye?
6. Hogyan mérhető a háromfázisú teljesítmény?
7. Mit értünk forgó mágneses térrel és hogyan állítható elő?
8. Hogyan számítható a mágneses tér fordulatszám?
9. Milyen módszerrel változtatható meg a háromfázisú mágneses tér forgásiiránya?

8. VILLAMOS GÉPEK

A villamos gépek energiatálatalkítók.
Legfontosabb fajta:

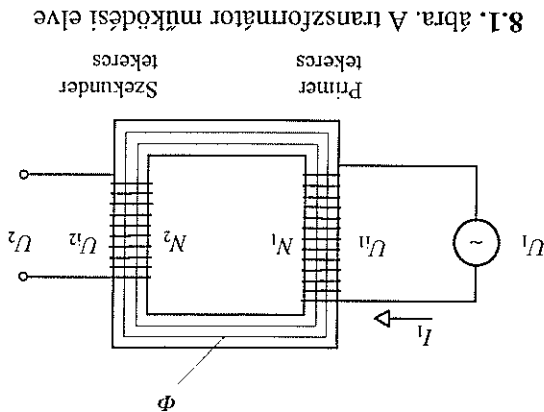
- a **transzformátorok**, amelyek a változó feszültség értékének megváltoztatására alkalmasak,
- a **generátorok**, amelyek mechanikai energiából egyen- vagy változó áramú villamos energiát állítanak elő,
- a **motorok**, amelyek egyen- vagy változó áramú villamos energiából mechanikai energiát hoznak létre.

8.1. Transzformátorok

A transzformátorok lehetnek egy- és háromfázisúak.

8.1.1. Egyfázisú transzformátorok

A transzformátor működési elve a kölcsönös indukció. A működést a 8.1. ábra alapján követhetjük, amely a transzformátor elvi felépítését mutatja.



8.1. ábra. A transzformátor működési elve

Az N_1 menetszámu primer és N_2 menetszámu szekunder tekercsek zárt vasmagon helyezkednek el. A primer tekercsre kapcsolott U_1 váltokozó feszültség hatására I_1 erősségű áram folyik, amely a vasmagban váltokozó fluxust gerjeszt. Ez a fluxus keresztülhalad a szekunder tekercsen és benne U_2 feszültséget indukál. A fluxus ugyanakkor a primer tekercsen is átmegy, és az önindukció elvén abban is feszültséget hoz létre. Az ábrán ezt a feszültséget U_{11} jelöli.

A feszültségek viszonyát a *Faraday-féle* indukcióitörvény szerint határozhatjuk meg. A primer tekercsre kapcsolott U_1 feszültség – ideálisnak tételezve fel a tekercset – egyenlő a benne keletkező U_{11} önindukciós feszültséggel:

$$U_1 = N_1 \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Nyitott szekunder kapcsolatoknál $U_{12} = U_2$ -vel, ezért írható:

$$U_2 = N_2 \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Az első egyenletet osztva a másodikkal és egyszerűsítve, a transzformátor egyik legjellemzőbb összefüggését kapjuk:

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2} = a.$$

A transzformátor primer és szekunder feszültségeinek aránya egyenlő a menetszámok arányával.

Ezt az a hányadosot a transzformátor áttételenek nevezzük. Ha az előző összefüggésből kifejezzük az U_2 feszültséget:

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_1,$$

akkor közvetlenül látható, hogy a primerre kapcsolt feszültséget elvileg tetszőleges értékre megváltoztathatjuk a menetszámok arányának alkalmas megválasztásával.

8.1.2. Az egyfázisú transzformátorok szerkezete

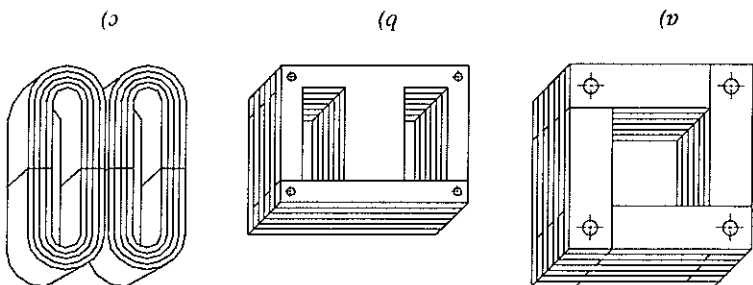
Mint a működési elvből látható, a transzformátoroknak két fő szerkezeti része van:

- a vasmag,
- a tekercselés (primer és szekunder tekercs).

A vasmag

A transzformátorok vasmagja kis széntartalmú, 3–4% szilíciummal ötvözött, egy-venyáramok csökkentése érdekében. A lemezek vastagsága 0,35–0,5 mm.

A vasmag szokásos alakját a 8.2. ábrán láthatjuk.



8.2. ábra. Egyfázisú transzformátorok jellegzetes vasmagjai!

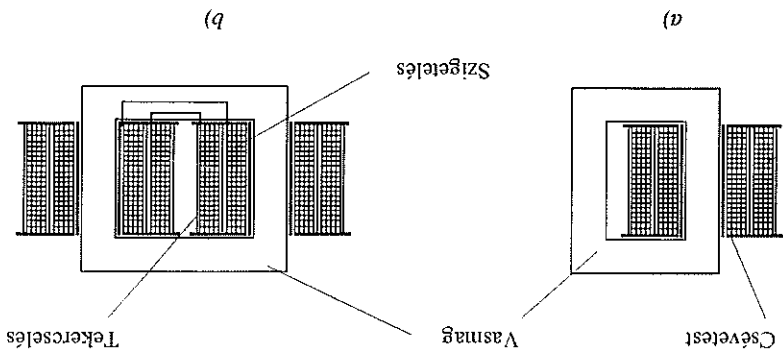
(a) lánoszem típusú; (b) köpeny típusú; (c) köpeny típusú, lemezből tekercseli

A vasmag lemezeit szigetelt száru csavarokkal fogják össze, ill. a tekercselt vasmag részzeit bilincsekkel rögzítik egymáshoz.

Az egyfázisú transzformátorok tekercselése

A tekercselés anyaga elektrolit-réz. A tekercselőhuzal szigetelése leggyakrabban műanyagbázisú lak. Az ilyen vezetőt szokás zománccszigetelésű huzalnak is nevezni. A nagyteljesítményű, ún. olajtanszformátorok huzalszigetelése papír.

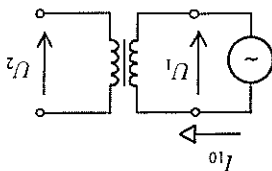
A kistelesítményű transzformátorok tekercseit előre gyártott csévelestre, rendezett sorokba, géppel tekercselik. A tekercs vázlatos felépítése és elhelyezkedése a 8.3. ábrán látható, lánoszem és köpeny típusú transzformátor esetén.



8.3. ábra. Lánoszem és köpeny típusú transzformátor tekercselése

8.1.3. Az egyfázisú transzformátor üzemiállapotai

A transzformátor a szekunder oldalról nézve energiatárolás. Ezért az energiatárolással sokkal megegyező üzemiállapotok jellemzik a transzformátorokat is. A transzformátorok üresjárása azt jelenti, hogy a transzformátor primer tekercsére a váltakozó feszültségű hálózatra csatlakozik, a szekunder tekercs áramkörre nyitott, ahogy azt a 8.4. ábra szemlélteti, a transzformátor szabványos rajzi jelképpel.



8.4. ábra. A transzformátor üresjárati kapcsolási vázlat

Üresjárati üzemiállapotban – mivel a szekunder oldalon nincs zárt áramkör – a szekunder áram nulla. A primer oldali, üresjárati I_{10} (ejtsd: I egy null) áram az I_1 névleges értékénél jóval kisebb, annak mintegy 3–15%-a. Az üresjárati fáziseltérés is kicsi, $\cos \varphi_{10} \approx 0,1$ értékű, mivel a transzformátor mint vasmagos tekercs, erősen inaktív jellegű.

Leadott teljesítmény üresjárásban nincs, azaz $P_2 = 0$. Ebből következően a transzformátor által felvett teljesítmény mind veszteség. Ez a veszteség egyrészt a primer tekercsben alakul hővé, ezt tekercsvesztésnek nevezzük, másrészt a vasmag histerézis- és örvényáram-vesztését fedezi, ezeket együttesen vasvesztésnek nevezzük. Ezek szerint az üresjárásban felvett teljesítmény:

$$P_{10} = P_{\text{tek}} + P_{\text{vas}}$$

Mivel az üresjárati áram csak töredéke a névlegesnek, ezért az üresjárati tekercsvesztés elhanyagolható a vasvesztés mellett. Ennek alapján az üresjárásban felvett teljesítmény gyakorlatilag a vasvesztéssel egyenlő:

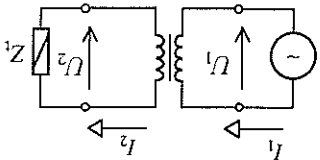
$$P_{10} \approx P_{\text{vas}}$$

Üresjárásban a szekunder tekercsen nincs feszültség, mivel az áram nulla, a szekunder kapcsolatokon a feszültség egyenlő a tekercsben indukált feszültséggel.

A transzformátorok terhelése

A transzformátor terhelési üzemiállapotában a primer tekercs a hálózatra csatlakozik, a szekunder oldali pedig fogyaszon keresztül zárt áramkört képez, a 8.5. ábra szerint. A Z_1 terhelőimpedancián keresztül $I_2 > 0$ áramot hoz létre az U_2 kapocsfeszültség. Az I_2 áram *Lenz törvénye* szerint csökkenti a fluxusváltozást. Erre a primer oldal az I_1 áramerősség növekedésével válaszol, fenntartva az eredeti

Fluxusváltozást, ami az $U_1 \approx U_{II}$ fennmaradásához szükséges. Így a transzformátor I_1 áramfelvétele az I_2 terhelőárammal arányosan változik.



8.5. ábra. A transzformátor terhelési kapcsolási vázlata

A jelenség az energiamegmaradás elvéből is következik. A szekunder oldal mint energiaforrás teljesítményt szolgáltat a fogyasztónak. Ez csak úgy lehetséges, ha a primer oldal teljesítmény-felvétele is megnövekszik. Mivel az U_1 állandó, a teljesítmény csak az áramerősség növekedése miatt nőhet.

A veszteségek viszonylagosan kis értéke miatt az energiamegmaradás elvéből következően:

$$S_1 \approx S_2,$$

a látszólagos teljesítmény értelmezése szerint: $U_1 \cdot I_1 \approx U_2 \cdot I_2$.

Átvendözve, a transzformátor fontos összefüggésére jutunk:

$$\frac{U_1}{I_1} \approx \frac{U_2}{I_2}.$$

Egy meghatározott teljesítmény átvitelékor a transzformátor áramai fordítottan arányosak a feszültségekkel.

Ez a törvényszerűség indokolja a transzformátor jelentőségét a nagy távolságú energiatávitelben. A távvezetetek 100 kV nagyságrendű feszültségen viszonylag kis áramerősséggel működnek, elfogadható vezeték keresztmetszet alkalmazása mellett. A terhelő transzformátor fázistényezője – teljesítménytényezője – a terhelés jellegétől függ. Alapvetően igaz, hogy terheléskor nagyobb, mint üresjáráshoz. Ha pl. iz- zólámpákat vagy ellenállás-fűtési hőfejlesztő készülékeket táplál a transzformátor, akkor a $\cos \varphi_1 \approx 1$ jellemző.

A transzformátor U_2 szekunder kapocsfeszültsége a terhelés hatására – állandó primer feszültség mellett is – megváltozik. A változást a transzformátor belső impedanciája okozza. A feszültségváltozás, az üresjárási és névleges áramú terhelés között (névleges áram: amire a transzformátor méretezték), ellenállás és induktív jellegű terhelés esetén néhány százalékos csökkenést jelent. Kapacitív terhelés esetén hasonló mértékű feszültségemelkedés jöhet létre.

Terhelés hatására a transzformátorban keletkező veszteség megnövekszik. A primer és szekunder tekercsek vesztesége nő az áramok növekedése miatt. A vasvesztéség gyakorlatilag állandó marad, mivel a fluxus állandó.

A tekercsveszteségeket az áramerősségek és a tekercsek ellenállása ismeretében számíthatjuk:

$$P_{\text{tek}} = I_1^2 \cdot R_{1\text{tek}} \text{ és } P_{2\text{tek}} = I_2^2 \cdot R_{2\text{tek}}.$$

Az összes veszteségre írható: $P_v = P_{\text{vas}} + P_{\text{tek}} + P_{2\text{tek}}.$

A transzformátor hatásfoka:

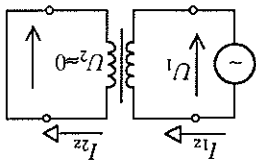
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_2 + P_v} \cdot 100 = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + P_v} \cdot 100.$$

A hatásfok értéke a névleges teljesítménytől függően 70–99%. Az alsó határ az 1–10 V·A nagyságrendekre, a felső határ az 1–10 MV·A nagyságrendek felett jellemző.

A transzformátorok rövidzárási üzemiállapota

Rövidzárási üzemiállapotban a transzformátor primer tekercse a hálózatra csatlakozik, a szekunder pedig fogyasztó nélkül képez zárt áramkört, azaz a terhelőimpedancia $Z_L = 0$.

A rövidzárási vázlat a 8.6. ábrán látható.



8.6. ábra. A transzformátor terhelési kapcsolási vázlat

Mivel a terhelőimpedancia nulla, a szekunder kör áramerősségét csak a tekercsek impedanciája és a rövidrezárt vezeték ellenállása korlátozza. Ezért a transzformátor rövidzárási áramerőssége – mint minden energiatforrás zárlatkor – a névlegesnél sokkal nagyobb. Ez egyült jár a primer áram megnövekedésével is. Energiaátviteli transzformátoroknál a rövidzárási áram 10–30-szorosa a névlegesnek. Mivel a tekercsveszteség az áram négyzetével arányos, a rövidzárási 100–900-szoros tekercsveszteséget okoz, ami nagyon rövid idő alatt tönkretenné a transzformátort. Ezért a transzformátorokat olvadóbiztosítóval vagy relés védelemmel kell ellátni.

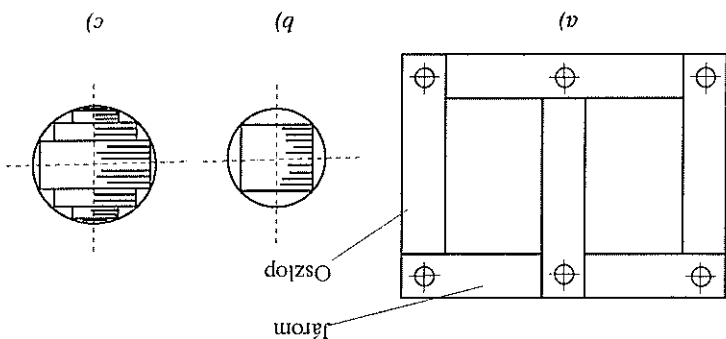
A 8.6. ábra szerint is belátható, hogy rövidzárási állapotban a szekunder feszültség $U_2 \approx 0$.

8.1.4. Háromfázisú transzformátorok

A háromfázisú hálózatok feszültségének változtatására háromfázisú transzformátorokat alkalmaznak.

A háromfázisú transzformátor szerkezete

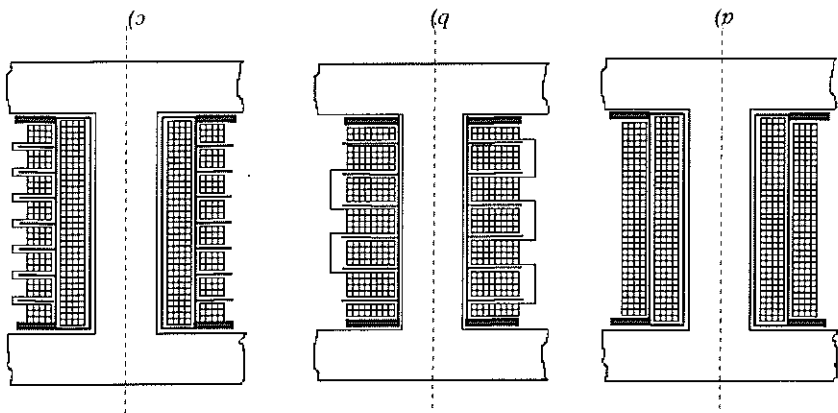
A 8.7. ábrán a leggyakrabban előforduló vasmagalakot láthatjuk, amelyet három- oszlopos, kétablakos vasmagnak szokás nevezni. Az oszlopokat összekötő vasrész a *három*.



8.7. ábra. A háromfázisú transzformátor vasmagja

Az oszlopokon helyezkednek el a tekercsek, általában egy oszlopon az egy fázis- hoz tartozó primer és szekunder tekercs, de ettől eltérő elrendezés is előfordul az ún. zezzug kapcsolás esetén.

A vasmagot téglalap alakú, egymástól elszigetelt lemezekből építik fel, úgyelve ar- ra, hogy az egymásra kerülő rétegek állapóják az illesztéseket. Az oszlopok ke- reszmetiséte kisebb teljesítmények esetén négyzet (8.7.b) ábra), nagyobb transz- formátoroknál néhány lemezszélességgel a körkeresztmetszetet közelítik, hogy jobban kitöltsse a tekercsek belsejét (8.7.c) ábra).



8.8. ábra. Háromfázisú transzformátor egy fázisának tekercselrendezései
a) hengeres; b) tárcsás; c) vegyes tekercselés

Tekercselés

Anyaga egyező az egyfázisú transzformátorral leírattal.

A 8.8. ábrán három jellegzetes tekercskialakítás egy-egy fázisának vázlatát láthatjuk.

Hűtési rendszerek

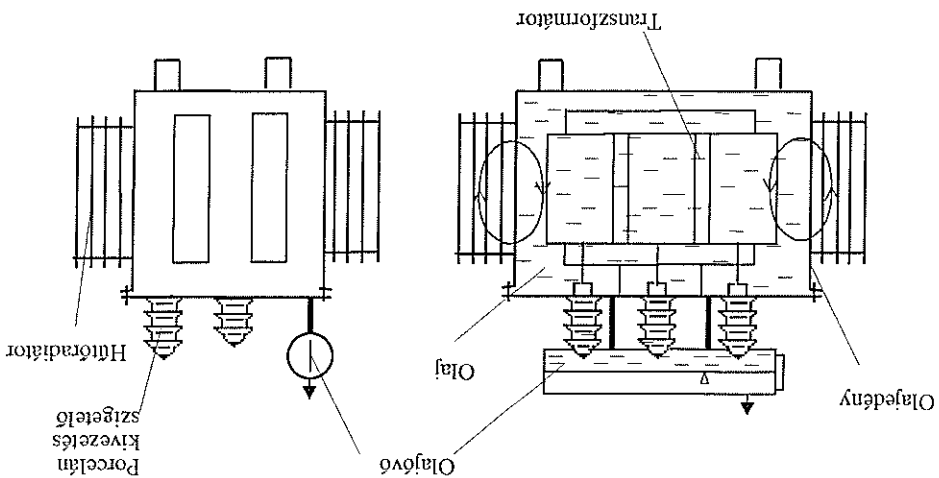
Száraztranszformátorok

A száraztranszformátor levegő veszi körül, amely a transzformátor természetes vagy mesterséges áramlással hűti. Ilyen kivételben kb. 50 kVA teljesítményig és 10 kV feszültségig beltéri üzemeltésre készítenek transzformátorokat.

Olajtranszformátorok

A száraztranszformátoroknál megjelölt teljesítmény- és feszültséghatár felett hűtés és szigetelési nehézségek jelentkeznek. Ilyenkor a transzformátort olajba merítve üzemeltetik.

Az olajtranszformátor vázlatos felépítését a 8.9. ábra szemlélteti.



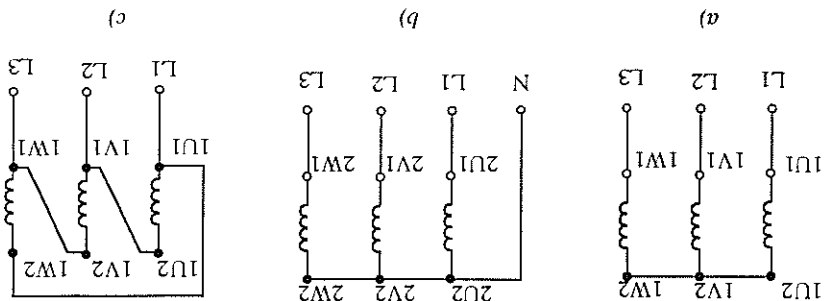
Az olajtranszformátor fő részei:

- transzformátorolaj: nagyviszkozitású ásványolaj. Az olaj feladata a szigetelés és a hűtés,
- olajedény: acéllemezről hegesztett tartály, hűtő radiátorokkal,
- olajvó vagy konzervátor: csőön keresztül az edény legmagasabb pontjával összekötött, olajjal félig felt tartály. Rendeltetése: tágulóedényként funkcionál, olajtartálékok képez.

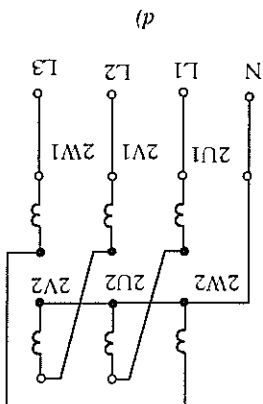
Az olajtanszformátorok szabadteáren is mőködtehetők, mert a vázolt szerkezet megvédi a transzformátort az időjárási viszonytaságoktól.

A háromfázisú transzformátorok mőködése

A háromfázisú transzformátor minden fázisában az egyfázisú transzformátornál megismert jelenségek zajlanak, egymáshoz képest 120° -os fáziseltolásban. A mőködési viszonyok vizsgálatakor így elegendő egyetlen fázist tekinteni.



8.10. ábra. Háromfázisú transzformátor kapcsolásai
a) csillagkapcsolás; *b)* csillagkapcsolás nullavezetővel;
c) delta-kapcsolás; *d)* zezug kapcsolás



A háromfázisú transzformátorok kapcsolásai

A háromfázisú transzformátor primer és szekunder tekercseinél a már ismert csillag- és delta- kapcsoláson kívül még az ún. zezug kapcsolást is alkalmazzzák. A kapcsolások vázlatait a 8.10 ábra szemlélteti.

Egy transzformátoron belül különözö lehet a primer, ill. a szekunder tekercsek kapcsolása. A kapcsolást betűkkel jelezzzük, a nagyobb feszültségű, a kisebbű a kisebb feszültségű oldal kapcsolását jelöli.

Csillagkapcsolás

Jelzése: Y vagy y, kivezetett csillagpont esetén Y_0 vagy y_0 (ejtsd: y null). A csillagpont általában csak a szekunder oldalán szokás kivézetni, amikor a transzformátor négyvezetékes hálózatot táplál.

Delta-kapcsolás

Jelzése: D vagy d .

Zegzug kapcsolás

Jelzése: Z vagy z.

A zegzug kapcsolás lényegében egy speciális csillagkapcsolás, amelyet szinte ki- zárólag a fogyasztói hálózatot tápláló transzformátorok szekunder oldalán alkalmaznak. Az alkalmazás célja az aszimmetrikus terhelés hátrányos következményeinek mérésükése.

A szekunder tekercseket minden oszlopon két egyforma feltekercsre osztva készí- tik. A tekercsrészek közötti pontjaikkal három csillagba kapcsolnak, majd mind- egyik feltekercsrel sorba kötnék egy másik oszlopon lévő, fordított kezdettel. A csillagpontot is kivезítik.

A háromfázisú transzformátor veszteségei és hatásfoka

A háromfázisú transzformátor veszteségei és hatásfoka az egyfázisú esetében kö- vetelt gondolatmenet alapján határozhatók meg.

A vasvesztés igen jó közelítéssel az üresjárási teljesítményfelvétellel azonos. A tekercsvesztéseket az áramfelvételtől és a tekercsek ellenállásából számíthatjuk. A tekercsvesztések: $P_{1\text{ek}} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_{1\text{f}}$ és $P_{2\text{ek}} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_{2\text{f}}$.

A háromfázisú transzformátor hatásfoka:

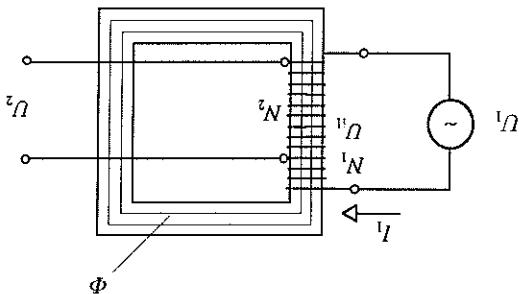
$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_v} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + P_v} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 + \frac{P_v}{\cos \varphi_2}}{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2} \cdot 100.$$

A hatásfok tehát függ a terhelés fázisétényezőjétől is. Ha kis $\cos \varphi_2$ mellett terheljük a transzformátort, akkor viszonylag kisebb lesz a hatásfoka. Ezért is indokolt a 6.6.7. pontban említett fázisjavítás a szekunder oldalán.

8.1.5. Takarékkapcsolású transzformátor

A transzformátorok primer tekercsében önindukciós feszültség keletkezik. Ha a primer tekercsen készítettünk egy megcsapolást, akkor a tekercs egyik vége és a meg- csapolás között az önindukciós feszültségnek a közrefogott menetszámmal arányos

részt kapjuk. Így egy olyan transzformátorhoz jutunk, amelyiknek nincs külön primer és szekunder tekercse. Az ilyen elven működő transzformátorokat nevezzük **takarékkapcsolásúnak** (8.11. ábra).



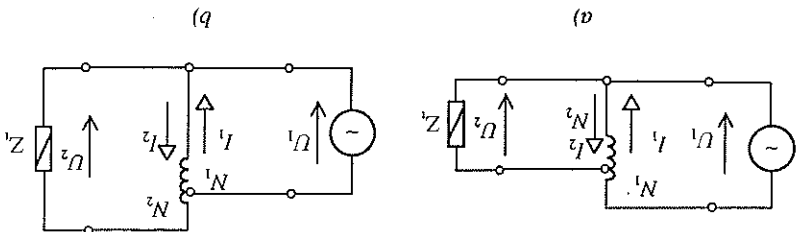
8.11. ábra. Takarékkapcsolású transzformátor működési elve

A takarékkapcsolású transzformátorra is érvényes a feszültségek arányára vonatkozó összefüggés, miszerint:

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2} = a.$$

Nem csak feszültség csökkenítésére, hanem növelésére is alkalmas ez a megoldás. Ha a kisebb menetszámu tekercsrészt tápláljuk, a létrejövő változó fluxus a teljes tekercsben indukál feszültséget.

A 8.12. ábrán a takarékkapcsolású transzformátor áramköri vázlatát látjuk. A 8.12.a) ábra a feszültségcsökkenítő, a b) pedig a feszültségnövelő-megoldást mutatja. A bejelölt feszültség- és áramirányokból látható, hogy a közös tekercsrészen mindkét kapcsolásban a primer és szekunder áram különbsége folyik. Ezért ezt a tekercsrészt a két áram különbségére lehet mértelezni, azaz kisebb keresztmetszetű vezetőlől készíthető. A tekercselési anyag megtakarítása mellett a vasmag is kevesebb anyagból készülhet (ennek körülményeit itt nem tárgyaljuk), mint a két különálló tekercssel bíró transzformátor, azonos teljesítmény esetén. Az anyagmegtakarítás olcsóbb, könnyebb, kisebb helyigényű transzformátort eredményez.



8.12. ábra. A takarékkapcsolású transzformátor kapcsolási vázlatai
a) feszültségcsökkenítő; b) feszültségnövelő kapcsolás

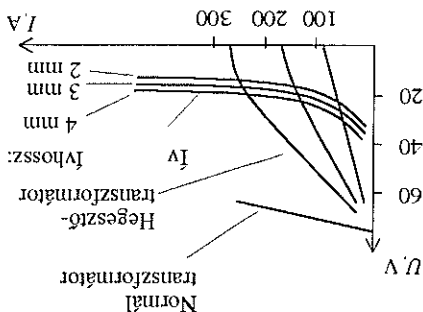
A takarékkapcsolású transzformátornak hátrányos tulajdonságai is vannak. Ilyen hogy a primer és szekunder oldal között fémes kapcsolat van. Ezért ahol a transzformátornak érintésvédelmi funkciót is el kell látni ott nem alkalmazható (pl. csengő-transzformátorként, törpefeszültséget előállító ún. biztonsági transzformátorként stb.).

További hátrány, hogy szekunder oldali zárlat esetén a közös tekercsész kiiktatódik az áramkörből. Így a zárlati áram nagyobb, mint a külön tekercsekkel készült transzformátore.

A takarékkapcsolású transzformátor ott alkalmazható, ahol a felsorolt hátrányoknak nincs jelentősége. Alkalmazzák, pl. motorok indításánál, méréseknél ún. toroid transzformátorként.

8.1.6. Ivhegesztő transzformátorok

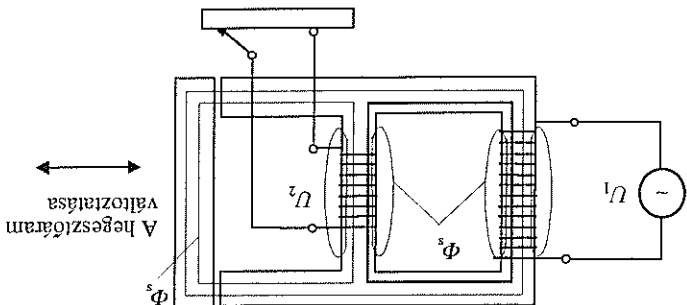
A villamos iv ionizált gázokban, elsősorban levegőben folyó áram, amely több ezer °C hőmérsékletet eredményez. Így alkalmas fémek helyi megolvasztására és összehegesztésére.



8.13. ábra. A villamos iv és hegesztőtranszformátor jelleggörbéi

A villamos iv gyújtásához kb. 60–70 V feszültség szükséges, míg fenntartásához 20–25 V elég. Az iv feszültség-áram jelleggörbéjét a 8.13. ábrán láthatjuk, amely hiperbolajellegű. A hegesztésre alkalmas transzformátor feszültsége ennek megfelelően üresjáratában 60–70 V és a terhelés hatására 20–25 V-ra csökken.

A transzformátor feszültségessége a terhelőáram hatására a nagy szórási reakción jön létre. A nagy szórási reakciónál a megnövelt szót mágneses fluxus okozza. A szót fluxus növelése érdekében a primer és szekunder tekercseket külön oszlopon helyezik el, és egy harmadik oszlopot is kialakítanak. A hegesztőáram változtatása érdekében a transzformátor szórási reakcióját a harmadik oszlop helyzetével tudjuk befolyásolni (8.14. ábra).



8.14. ábra. A hegesztőtranszformátor elvi felépítése

A mozgatható oszlop távollátásával csökken a Φ_s szórt fluxus, ezért csökken a feszültség, növekszik a hegesztőáram. Az oszlop közelítésével a változás fordított irányú. A mozgatószerszék mellett általában amperben kalibrált skálát találunk, amellyel a hegesztőáram beállítható.

8.2. Szinkrongépek

A szinkrongépek – generátorok és motorok – olyan váltakozó áramú villamos gépek, amelyeknek az álló- és forgórészében létrejött mágneses terek azonos fordulatszámmal együtt mozognak, szinkronban vannak. (A *szinkron* görög szó egyidejűséget jelent.)

A gyakorlati számáira igen nagy jelentőségűek a generátorok, mert az ipari méretű villamosenergia-termelés kizárólagosan szinkrongenerátorokkal történik.

8.2.1. Szinkrongenerátorok

A szinkrongenerátorok működési elve a mozgási indukció, amelyet úgy valósítanak meg, hogy térben álló tekercsek belsejében mágneset forgatnak. Ennek a megoldásnak az az előnye, hogy a keletkező villamos energiát nem kell mozgó érintkezőkön keresztül elvezetni a generátorból.

Szinkrongenerátorokat néhány kVA-tól 1000 MVA nagyságrendig készítenek. Magyarországon 2000-ben a legnagyobb üzemelő gép 440 MVA teljesítményű. A szinkrongép fő szerkezeti egységei az **állóréz** és a **forgórész**.

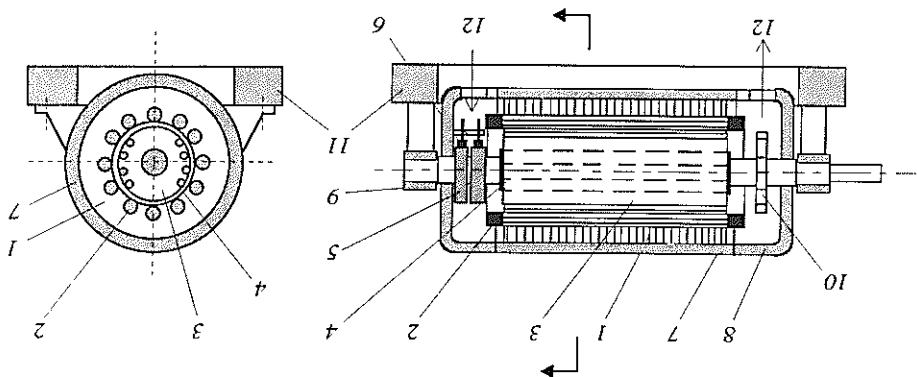
Az állórész legfontosabb alkotóelemei a **ház**, a **vasmág** és a **tekercselés**. A ház kis és közepes teljesítményű gépek esetén öntöttvas, nagyobb gépeknél hegesztett acélszerkezet.

A vasmag cső alakú, egymástól elszigetelt, ún. dinamólemezről készül. (A dinamólemez 2–3% szilíciummal ötvözött, 0,35–0,5 mm vastag lágyvas lemez.) A vasmag belső palástja mentén egyenletes osztással hornyolt. A hornyok száma nagyjából gépeknel százazas nagyságrendű is lehet. A hornyokba kerül a tekercselés.

A tekercselés szigetelt rézvezetékkel készül, általában háromfázisú, ritkán egyfázisú. A forgórész egyenárammal gerjesztett elektromágnes. Alakja szerint lehet **hengeres és kiálló pólusú**.

A hengeres forgórész vasmagja henger alakú, közepes teljesítményig lemezelt, nagy teljesítmények esetén tömör acélhengerből kiunkált. A hengerpalást egy részen kialakított hornyokban helyezik el a **gerjesztőtekercselést**, amely szigetelt rézvezetékkel készül.

A hengeres forgórészű gép vázlatos szerkezete látható a 8.15. ábrán.

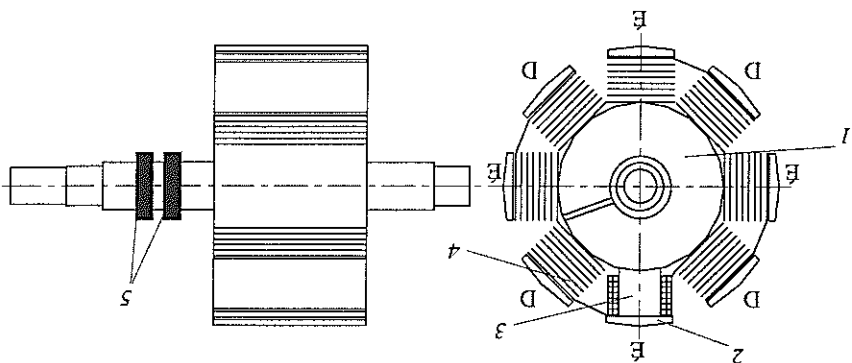


8.15. ábra. Szinkrongép vázlatos szerkezete
1 állórészvasmág; 2 állórész-tekercselés; 3 forgórészvasmág; 4 gerjesztőtekercs;
5 csuszogytű; 6 szénkefék; 7 állórészház; 8 pajzs; 9 bakcsapágy; 10 szellőző lapátok;
11 gépalap; 12 hűtőlevegő be- és kilépése

A gerjesztőtekercs két vége a tengelyre szerelt ún. **csuszogytűkhöz** csatlakozik. A csuszogytűk egymástól és a tengelytől elszigetelt, bronzból készült mozgó érintkezők. Összeszerelt gépnél a csuszogytűk palástjára csatlakoznak a rendszerint réztartalmú – **szénkefék**, amelyekken keresztül vezetik be a gerjesztő egyenáramot.

A kiálló pólusú forgórész elvi vázlata a 8.16. ábrán látható.

A tengelyen elhelyezkedő acélkoszorúra szerelik fel a pólusokat, amelyek törzsén helyezkednek a gerjesztőtekercsek. A pólusok tekercseit általában sorba kapcsolják úgy, hogy a pólusok polaritása váltakozva északi-déli legyen. A póluspárok száma legáltalában három. A gerjesztőtekercsek kivételesei itt is csuszogytűkhöz csatlakoznak.



8.16. ábra. Szinkron gép kiálló pólusú forgórészének vázlata
1 forgórészcszoszorú; 2 pólussarú; 3 pólustörzs; 4 gerjesztítőkercs; 5 csúszógyűrű;

A háromfázisú szinkrongenerátor működése

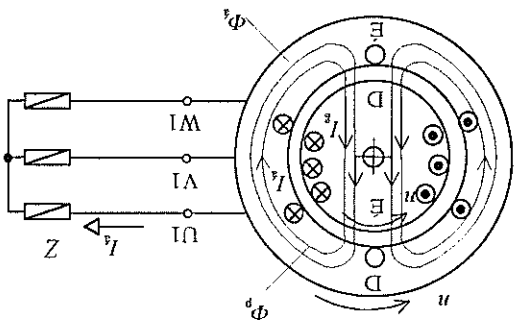
A szinkrongenerátor működésének vizsgálatához tekintünk meg a 8.17. ábrát.

A generátor forgórészét gerjesztve létrejön a Φ_p pólusfluxus, és ha valamilyen erő- géppel – pl. gőz- vagy vízturbínával – a forgórész n fordulatszámmal meghajtjuk, a mozgási indukció elvén az állórész tekercseiben háromfázisú, szinuszos váltakozó feszültség keletkezik, amely egyenesen arányos a pólusok Φ_p fluxusával és a gép n fordulatszámmal:

$$U_i = c \cdot \Phi_p \cdot n.$$

(Az összefüggés a mozgási indukció $U_i = B \cdot l \cdot v$ kifejezéséből származik, a c egy adott gépre jellemző állandó.)

Az indukált feszültség egyenesen arányos a pólusfluxus értékével és a fordulatszámmal.



8.17. ábra. A szinkrongenerátor működési elve

Mivel a hálózati frekvenciájának állandó értékűnek (50 Hz) kell lenni, ezért a generátort állandó fordulatszámmal kell forgatni. Ezt a fordulatszámot szink-

fordulatszámnak nevezzük és a fordulatszám ismert kifejezéséből számíthatjuk ki:

$$n = \frac{f}{\frac{1}{s}} \quad \text{és} \quad n = 60 \cdot \frac{f}{\frac{1}{\text{min}}}$$

Terheléskor a generátor állórész-tekercesében hátfeszültség keletkezik, amely forgó mágneses tereket (Φ_g) a forgórészszel azonos irányba, azzal egyező fordulatszámmal mozog. Innen származik a gép *szinkron* elnevezése.

8.2.2. Szinkromotorok

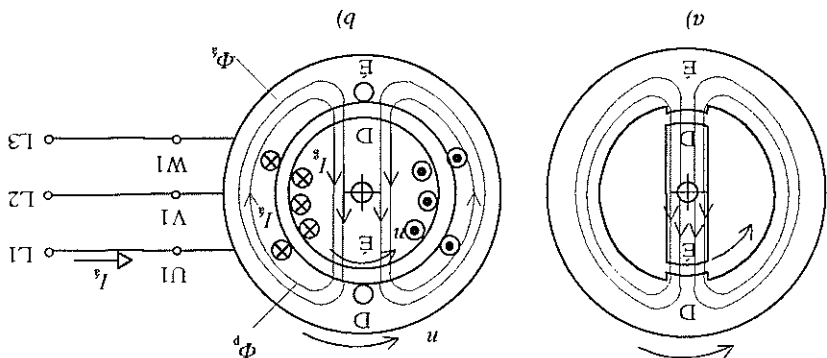
A szinkromotorok szerkezete megegyezik a generátorokéval.

A szinkromotor működése

A szinkromotorok működési elve (8.18. ábra) a mágneses pólusok kölcsönhatásán alapzik.

A 8.18.a) ábra két permanens mágneset mutat. A két mágnes csapágyszáma egymástól független. A mágnesek az ellenértékes pólusok közötti vonzóhatás miatt az ábra szerinti helyzetet veszik fel. Ha a külső mágneset elforgatjuk, akkor a belső mágnes a pólusok közötti vonzóhatás miatt követi a külső mágneset. Ez az elrendezés a szinkromotor működési modellje.

A 8.18.b) ábra a valóságos gép vázlatát szemlélteti. Az állórész tekercseire kapcsolt háromfázisú árammal hozzuk létre a forgó mágneses tereket, amelynek pólusai vonzóhatást fejtenek ki a gerjesztett forgórész ellenértékes pólusaira, és így jön létre a motor forgása. A gép forgásiirányát – a 7.4.2. pontban leírtak szerint – az állórészhez csatlakozó teljesítmény két fázis felcserélésével lehet megváltoztatni.



8.18. ábra. A szinkromotor működési elve
a) működési modell; b) valóságos elrendezés vázlata

A működési elvből következően a motor fordulatszáma megegyezik az állórész mágneses térének fordulatszámával, amelyet a már ismert

$$n = \frac{f}{p} \quad \frac{1}{s} \quad \text{ill.} \quad \text{az} \quad n = 60 \cdot \frac{f}{p} \quad \frac{1}{\text{min}}$$

összefüggésekből számíthatunk.

A szinkronmotor fontos jellemzője, hogy fordulatszáma – a terhelőnyomatók értékétől függetlenül – állandó.

Szinkronmotort ott alkalmaznak, ahol állandó fordulatszámú hajtásra van szükség. Szinkronmotortal **fázisjavítás** is végezhető, ezáltal nincs szükség külön fázisjavító berendezésre.

8.3. Aszinkrongépek

Az aszinkrongépek – másik nevükön indukciósgepek – lehetnek generátorok és motorok.

A gyakorlat számára a motorok a jelentősebbek. A működő motorok legnagyobb részét az aszinkrongépek teszik ki. Ennek oka az egyszerű szerkezet, az ebből következő üzembiztonság, kis karbantartási igény és a viszonylagos olcsóság.

Aszinkronmotorokat 1 W-tól 1 MW teljesítmény-nagyságrendig készítenek.

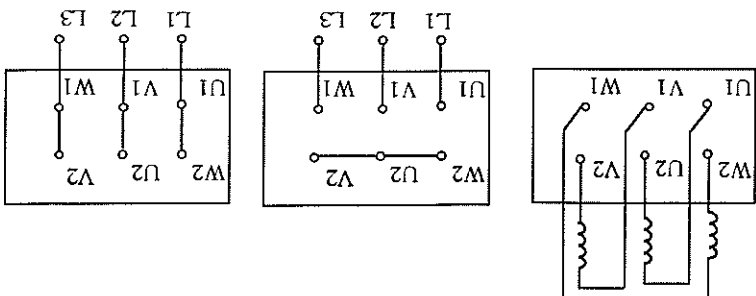
8.3.1. Háromfázisú aszinkronmotorok

A háromfázisú aszinkronmotorok szerkezete

Az állórész szerkezete elvben megegyezik a szinkrongép állórészével.

A ház kis teljesítmények (1–2 kW) esetén leggyakrabban alumíniumöntvény, nagyobb gépeknél öntöttvas, ill. hegesztett acélszerkezet.

A háromfázisú tekercselésnek általában mind a hat végét kivezetik a kapocsházba. A motor tekercseit a kivezetéseknél kell – az adatlábláról leolvasható módon – csillagba vagy deltába kapcsolni, a gyárilag mellékelt összekötősinkekkel. A kapcsolási rajzok elrendezését és a kivezetések összekötését a 8.19. ábra szemlélteti.

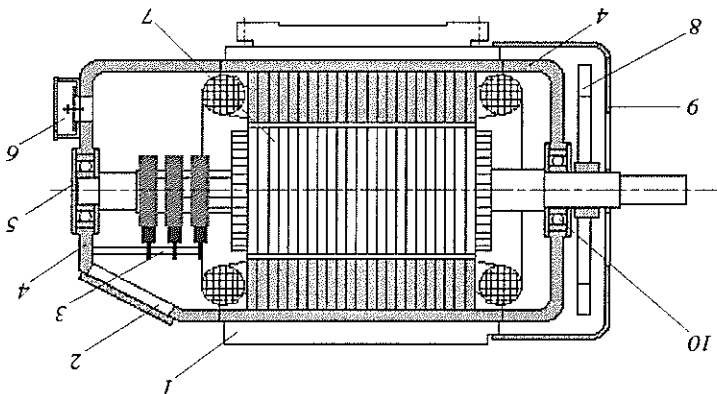


8.19. ábra. Háromfázisú motor kapcsolási ábrája
a) a háromfázisú tekercs kapcsolástervezése; *b)* a kivezetések csillagkapcsolása; *c)* a kivezetések delta-kapcsolása

A **forgórész** két változatát különböztetjük meg: a **csúszógyűrűs** (más néven **tekercsel**) és a **kalicák** (más néven **rövidrezárt**) forgórész.

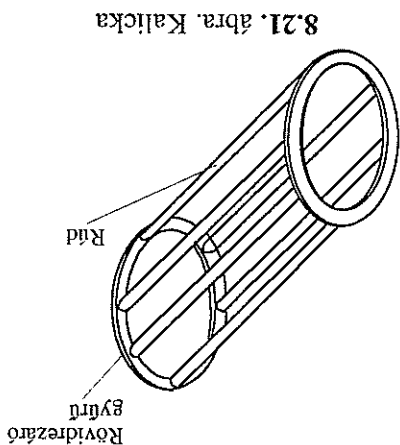
A két típus szerkezetében közös a tengelyen lévő, dinamólemezből készült hengeres vasmag, teljes kerületén, egyenletes osztású hornyokkal.

Cúszógyűrűs forgórész esetén a vasmag hornyaiban szigetelt rézvezetékkel készült, háromfázisú tekercselés van. A háromfázisú tekercs csillag- vagy delta-kapcsolását a tekercselésen belül készítik el. A tekercselés három kivezetése a tengelyre szerez, a tengelyről és egymástól is elszigetelt, három bronz csúszógyűrűhöz csatlakozik. A csúszógyűrűs motor vázlatos felépítése a **8.20. ábrán** látható.



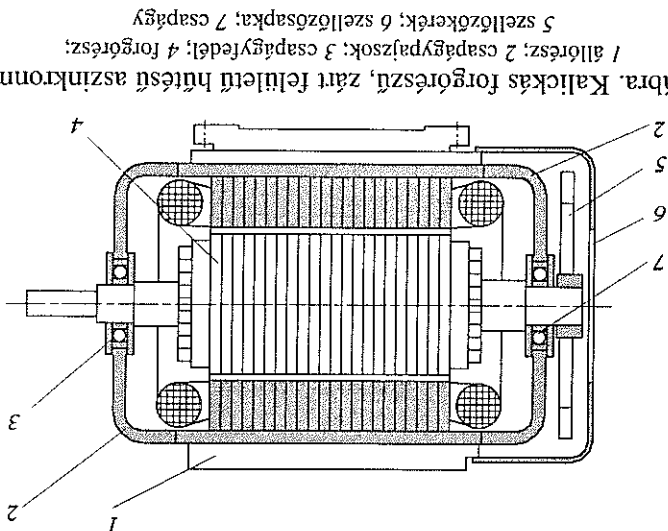
8.20. ábra. Cúszógyűrűs forgórészű, zárt felületi hűtésű aszinkronmotor
1 állórész; *2* kezeletlenített, *3* kezeletlenített; *4* csapágy; *5* csapágyfedél; *6* forgórész-kapocsház; *7* forgórész; *8* szellőzőkerek; *9* szellőzősapka; *10* csapágy

Kalickás forgórész esetén a vasmag hornyába egy-egy szigetetlen, viszonylag nagy keresztmetszetű vezető (rúd) kerül. A rudak a vasmag két végén ún. rövidrezáró gyűrűkhez csatlakoznak. Az így kialakított szerkezetet nevezzük kalickának. A kalicka – vasmag nélküli – vázlatát a 8.21. ábra szemlélteti.



8.21. ábra. Kalicka

Egy kalickás gép metszete látható a 8.22. ábrán.

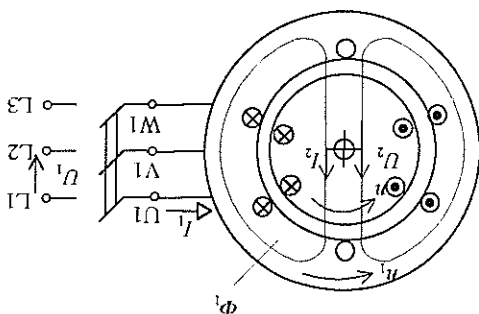


8.22. ábra. Kalickás forgórészű, zárt felületű hűtési aszinkronmotor
1 állórész; 2 csapágyfajzók; 3 csapágyfedél; 4 forgórész;
5 szellőzőkerék; 6 szellőzősapka; 7 csapágy

Kalickás forgórészű gépeket 100 kW teljesítmény-nagyságrendig készítenek. A kalickás gépek olcsóbbak és üzembiztosabbak a csúszógyűrűs motoroknál.

A háromfázisú aszinkronmotorok működése

Az aszinkronmotor működési elvét a 8.23. ábra alapján értelmezhetjük.



8.23. ábra. Az aszinkronmotor működési elve

Az állórészre kapcsolt U_1 feszültség hatására folyó I_1 háromfázisú áram forgó mágneses teret létesít, amely a fázissorrend által meghatározott irányba, n_1 szinkronfordulatszámmal forog:

$$n_1 = \frac{f}{1} \cdot \frac{d}{1}, \quad \frac{s}{1}, \quad n_1 = 60 \cdot \frac{f}{1} \cdot \frac{d}{1} \cdot \frac{1}{\min}.$$

A forgó mágneses tér – a mozgási indukció alapján – a forgórész vezetőibe U_2 feszültséget indukál. Ha a forgórész zárt áramkörű (kalitkás gépkezelés) a forgórész kivezetéseit ellenállásokon keresztül összekötjük, az indukált feszültség I_2 áramot létesít. Ebből adódik az indukciós motor elnevezés.

Az indukált áram az állórész Φ_1 fluxusával erőhatást, nyomatékot hoz létre, amely az állórész mágneses térével egyező irányba hat. A nyomaték következtében a gép forgórésze forgásba jön. (A nyomaték keletkezése és a forgórész mozgásiránya *Lenz törvénye* alapján értelmezhető: az indukált áram úgy csökkenti az indukáló hatást, hogy a forgórész a mágneses tér irányába mozgatra csökkenti a forgórészhez viszonyított fluxusváltozás sebességét.)

A nyomaték hatására a motor fordulatszáma szükség szerint kisebb a szinkronfordulatszámmal: $n < n_1$.

Ha a fordulatszám elérné a szinkronfordulatszám értékét, megszűnne az indukáló hatás és így a nyomaték is, tehát a forgórész lassulna.

Az aszinkronmotor egyik legjellemzőbb tulajdonsága, hogy csak szinkronnal kisebb fordulatszámmal képes üzemelni.

Ebből adódik a gép aszinkron elnevezése.

A szinkronfordulatszámtól való elérést a **szlippel** jellemezzük (slip: angol kifejezés, csúszást jelent):

$$s = \frac{n_1}{n - n_1} \cdot 100.$$

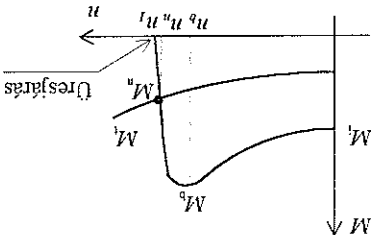
A szlip megmutatja, hogy a motor tényleges fordulatszáma hány százalékkal tér el a szinkronfordulatszámától.

Az általánosan használt motorok szlipje névleges terhelésen 1–10% értékű. A nagyobb teljesítményű gépek szlipje közeli az alsó értékhez, az 1–100 W nagyságrendűeké pedig a 10%-hoz. A szlip jellemző átlagértéke 4% körül.

A háromfázisú aszinkronmotorok forgásirányát az állórészhez csatlakozó, felszölgés két fázisvezető felcserélésével lehet megváltoztatni.

A nyomaték–fordulatszám jellegzőgörbe

Közepes motor tipikus nyomaték–fordulatszám jellegzőgörbéje látható a 8.24. ábrán.



8.24. ábra. Aszinkronmotor nyomaték–fordulatszám jellegzőgörbéje

A jellegzőgörbe jellegzetes pontjai és a motorok tulajdonságai a jellegzőgörbe tükrében a következők:

- **Indítónyomaték (M_i)** A motor akkor tud forgásba lépni, ha az indítónyomaték nagyobb az M_i terhelőnyomatéknál, ahogy az az ábrán látható.

- **Billenőnyomaték (M_b)** A motor gyorsulása közben a nyomaték a billenőnyomatékig nő. A billenőnyomatékhoz tartozó szlip kb. 15–20%, tehát ekkor az n_b fordulatszám a szinkronértéknek kb. 80–85%-a.

- **Névleges nyomaték (M_n)** A billenőnyomaték utáni gyorsulás folyamán a nyomaték meredeken csökken. A névleges nyomaték ennek a meredek szakasznak kb. a közepén található. Tehát

$$M_n \approx \frac{M_b}{2}.$$

A motor addig gyorsul, amíg a nyomaték egyenlő nem lesz a terhelés nyomatékával (a két jellegzőgörbe metszéspontja).

Há a gép üresjáratában van, akkor felgyorsul az n_1 szinkronfordulatszám közelében. A nyomatéki görbe a szinkronfordulatszámon metszi a vízszintes tengelyt. Stabíl motoros üzemet az üresjáratási pont és a billenőnyomaték között lehet megvalósítani. Ha a terhelés meghaladja a billenőnyomatékot, akkor a motor hirtelen megáll, a névlegest többszörösen meghaladó (a névlegesnek mintegy 4–8-szorosa) hálózati áramfelvétellel kísérteleben. Ez a nagy áram, ha tartósan fennmarad, veszélyeztet a motor épségét.

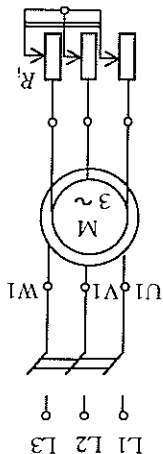
A háromfázisú aszinkronmotorok indítása

A csúszóglyűrűs motorok indítása a csúszóglyűrűk közé kapcsolt R_1 indító-ellenállásokkal történik. Az indító-ellenállások beiktatása csökkenti a hálózati áramfelvételt és növeli az indítónyomatékot. Az elvi kapcsolást a 8.25. ábra szemlélteti.

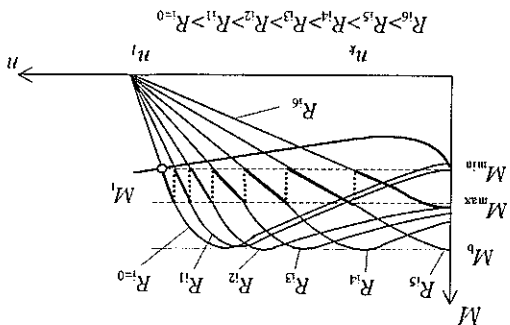
Há a motort úgy indítanánk, hogy a forgórész tekercselését a csúszóglyűrűk kivételével seinek közvetlen összekötésével zárnánk, a gép hálózati áramfelvétele a névleges érték többszöröse lenne, az indítónyomaték ennek ellenére kisebb volna a szükségesnél. Az ellenállás beiktatása az M_b billenőnyomatékot kisebb fordulatszámok felé tolja, miközben a billenőnyomaték nem változik.

Az indítás folyamata a következő:

- az R_1 indító-ellenállást a legnagyobb értékre kell állítani, a motor állórészét a hálózatra kell kapcsolni,
- az indító-ellenállást, a gyorsulás ütemében, fokozatosan ki kell iktatni a forgórész rövidrezárásáig.



8.25. ábra. Csúszóglyűrűs aszinkronmotor indítása



8.26. ábra. Csúszóglyűrűs aszinkronmotor indítási folyamata

Az indítás folyamatában a gép nyomatéka a 8.26. ábrában látható, tűrészfogszertű görbe mentén változik.

A csúszógűrűrs aszinkronmotort akkor célszerű alkalmazni, ha viszonylag nagy indítónyomatékra van szükség, és ezt viszonylag kis értékű hálózati áramterhelés mellett kell megvalósítani. Az indítás folyamatában az áram és nyomatéki viszonyok jól befolyásolhatók.

Kalickás forgórezű motorok indítása

Közvetlen (direkt) indítás esetén a gép állórészét egyszerűen rákapcsolják a hálózatra. A közvetlenül indítható motor nagyságát, az áramlökés szempontjából, a hálózat terhelhetősége határozza meg.

A *csillag-delta indítás* a motor tekercseire jutó feszültséget csökkenti. Lényege, hogy az *üzemszerűen delta-kapcsolású* motor állórészét az indítás idejére csillagba kötik. Miután a motor felgyorsult az üzemi fordulatszámra, az állórész tekercseit deltába kapcsolják. Ezzel helyreáll az üzemi állapot.

Csillagkapcsolásban az áramerősség a delta-kapcsolás áramerősségének harmadrésze:

$$I_y = \frac{I_\Delta}{3}.$$

Az áramcsökkenés arányában a motor nyomatéka is kisebb lesz:

$$M_y = \frac{M_\Delta}{3}.$$

A *transzformátoros indítás* lényege, hogy az indítás időtartamára egy transzformátortal lecsökkenti a motor állórészére jutó feszültséget, majd miután a gép felgyorsult, a teljes hálózati feszültségre kapcsolják.

Az indítás céljára jól használható takarékkapcsolású transzformátor.

Indítás vezérelhető felvezetőszekcióval, amikor a motort a feszültséget tirisztorokkal csökkentik, majd az indítási folyamatban, egy ill. több fokozatban vagy folyamatosan, a teljes értékre növelik.

*Előét–impedancia indítás*kor a motor állórészének minden fázisával sorosan kapcsolnak egyforma impedanciákat. Ezáltal a gép áramkörének növekszik az impedanciaja, ami korlátozza a motor áramerősséget. A felgyorsulás végén az előét-impedanciát kikapcsolják. Impedanciaként ellenállást vagy induktív reaktanciát (ún. *főtékercezt*) szokás alkalmazni.

8.3.2. Egyfázisú aszinkronmotorok

Olyan helyeken, ahol nem áll rendelkezésre a háromfázisú hálózat, de az aszinkronmotor kedvező tulajdonságai (egyszerű, üzembiztos szerkezet, kis karbantartási igény) jól használhatók, egyfázisú gépet alkalmaznak. Jellemzően felhasználsi területük a háztartásokban található, villamos hajtású berendezések köre (mosógépek, centrifugák, kompresszoros hűtőgépek, szivattyúk, fűtők sfb.).

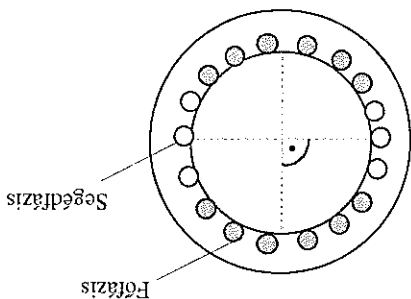
Az egyfázisú aszinkronmotorok teljesítménye általában nem nagyobb 1,5–2 kW-nál.

Az egyfázisú aszinkronmotorok szerkezete

A kis teljesítményre való tekintettel az egyfázisú gépek egykalicás forgórészrel készülnek. Az állórész-tekercselés kivételével szerkezetiileg megegyeznek a háromfázisú motorokkal.

Az állórész tekercselése kétfázisú. A két tekercs egyikét **főfázisnak**, a másikat **segédfázisnak** nevezik. A tekercsek elvi elrendezést a 8.27. ábra szemlélteti.

A gépeket általában egy vagy két póluspártu kivitelben készítik.



8.27. ábra. Egyfázisú motor állórésze, kétpólusú tekercseléssel

Az egyfázisú aszinkronmotorok működése

Ha a motort csak a főfázisával kapcsoljuk az egyfázisú hálózatra, az állórészben nem forog, hanem lüktető – pulzáló – mágneses tér keletkezik, mint egy transzformátorban.

Ez a lüktető mágneses tér a forgórész kalicájában indukál ugyan áramot, de ez az áram indítónyomatókat nem eredményez. Így a motor nem jön forgásba, bár nagy áramot vesz fel, mint egy rövidrezárt transzformátor.

A jelenséget *Lenz törvénye* alapján értelmezhetjük: mivel nem forog mágneses tér indukálta a kalicákban folyó áramot, így az indukáló hatás sem csökken a forgás hatására, tehát ilyen hatás nem is keletkezik.

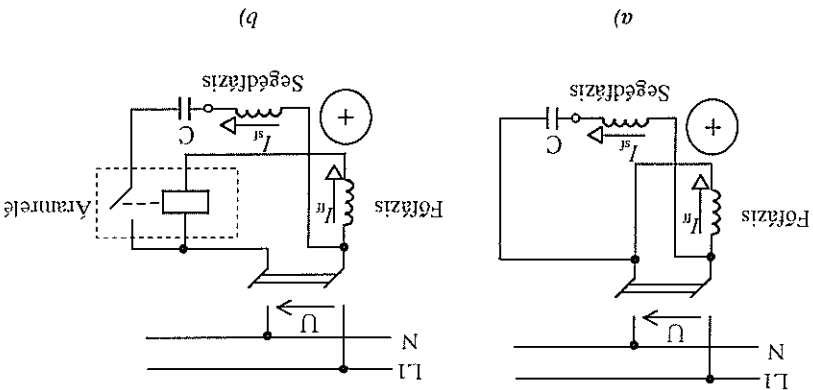
Ha a főfázissával a hálózatra kapcsolt gép tengelyét, külső erővel, impulusszerűen felgyorsítjuk, a motor nyomatékot fejti ki, és mint egy háromfázisú gép, a szinkronfordulatszám közelébe felgyorsul. Ezt követően motorként képes működni.

A segédfázissal kétfázisú forgó mágneses tér jön létre, és így már álló helyzetben is keletkezik nyomaték.

A segédfázissal kondenzátort kapcsolnak sorba, hogy áramát a főfázis áramához viszonyítva fázisban eltolják. A fő- és segédfázist párhuzamosan kapcsolják az egyfázisú hálózatra. A gép elvi kapcsolási vázlata a 8.28.a) ábrán látható.

A 8.28.b) ábra az ún. áramrelés indítás kapcsolását mutatja. A hálózatrakapcsolásakor a főfázis nagy áramerősségének hatására a relé bekapcsolja a segédfázist, ekkor a motor forogni kezd. A névleges fordulatszám közelében a főfázis árama jelentősen lecsökken, a relé kikapcsolja a segédfázist, a gép a továbbiakban csak a főfázissal üzemel.

Az egyfázisú motor forgásirányát a segédfázis kapacitásainak felcserélésével lehet megváltoztatni.



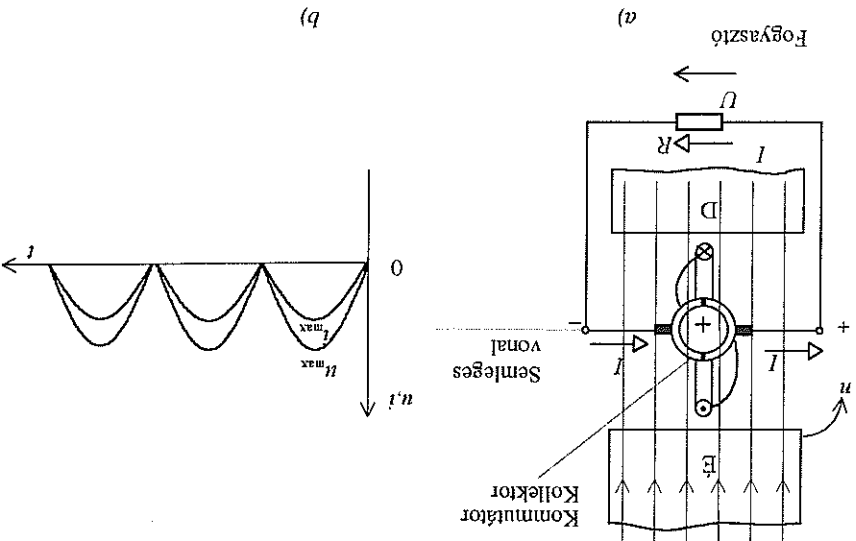
8.28. ábra. Egyfázisú aszinkronmotor elvi kapcsolása

8.4. Egyenáramú gépek

Az egyenáramú gépek – generátorok és motorok – olyan forgó gépek, amelyek mechanikai energiából egyenáramú villamos energiát, ill. egyenáramú villamos energiából mechanikai munkát állítanak elő, mágneses tér közvetítésével.

8.4.1. Az egyenáramú gépek működési elve

Az egyenáramú generátorok működési elve a mozgási indukción alapul: ha mágnes pólusai között tekercset forgatunk, akkor a tekercsben feszültség keletkezik. Az indukált feszültség váltakozó feszültség, amelyet a gép mechanikusan egyenirányít. A generátor elvi felépítését a 8.29.a) ábra szemlélteti.



8.29. ábra. Az egyenáramú generátor működési elve
a) az elvi szerkezet; b) a keletkező egyenirányított feszültség

A mágnes pólusai között forgó tekercs végei két, egymástól elszigetelt, réz félgyűrűhöz csatlakoznak. Ezt az alkatrészt **kommutátornak** vagy másképpen **kollektornak** nevezzük. A kommutátor egyült forog a tekercsrel. A kommutátor felületére, mint forgó érintkezőhöz, a mágneses erővonalakra merőlegesen, az ún. **szemleges vonalban**, szénkefék csatlakoznak, amelyekken keresztül vezetnek el a villam

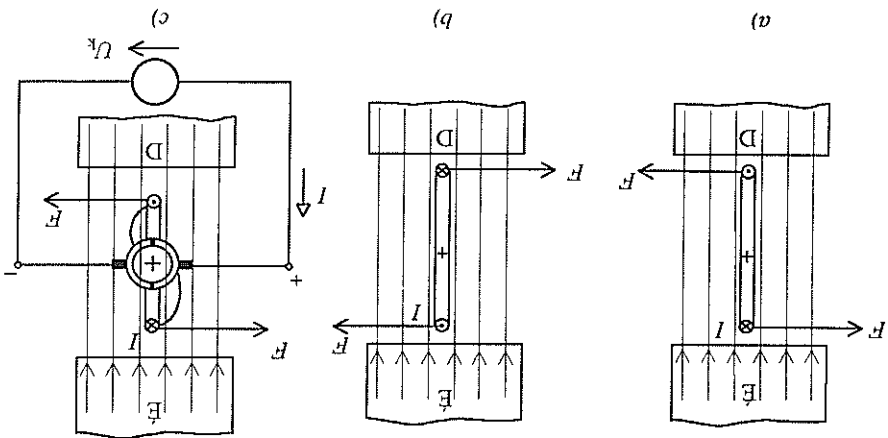
mos energiát.

A kommutátor végzi az egyenirányítást is. A tekercs forgása közben, a 8.29.a) ábra szerinti bal oldali kefe – a kommutátoron keresztül – mindig a felső tekercsoldalhoz, a jobb oldali pedig az alsó tekercsoldalhoz csatlakozik. Így annak ellenére, hogy a tekercsben váltakozó áram folyik, a keféken kívüli áramkörti részen már egyirányú, azaz egyenáram jön létre, ill. a fogyasztó sarkain egyenfeszültség keletkezik. A mozgási indukció szabályai szerint keletkező áram iránya és a feszültség polaritása a 8.29.b) ábra szerinti. Belátható, hogy a polaritás ellenőrzése változik, ha a forgásirányt vagy a mágneses pólusokat felcseréljük. (Ha mindkettőt egyszerre tör

ténik, a feszültség polaritása nem változik!)

A tekercsben indukálódott és a kommutátorral egyenirányított feszültség, valamint áram időfüggvényét – feltételezve, hogy a tekercsben szinuszos feszültség jön létre – a 8.29.b) ábra szemlélteti.

A valóságos gépekben a forgórész kerülete mentén, egymáshoz képest elforgatva, sok tekercselemet helyeznek el, amelyek sokszegmensű kommutátorhoz csatlakoznak. A kétféltől a tekercselemekben indukálódott, fázisban eltolított feszültségek összege vehető le. Ezért a gyakorlatban működő gépek teljesen sima egyenfeszültséget szolgáltatnak.



8.30. ábra. Az egyenáramú motor működési elve

Az egyenáramú motorok működési elve a mágnes pólusai között elhelyezkedő, csapágyazott tengelyre szerelt, árammal átjárt tekercsre ható erőn alapszik. Az elrendezés vázlata a 8.30. ábrán látható. Ha a 8.30.a) ábrában jelölt áram I áram folyik a tekercsben, a bejelölt irányú F erőkből álló erőpár keletkezik, aminek hatására a tekercs elfordul. Ha változatlanul marad az áramirány, akkor a 8.30.b) ábra szerinti helyzetben az erőhatás ellenétes irányúvá válna. Így folyamatos forgás nem jöhet létre. Ahhoz, hogy a forgatónyomomatek iránya változatlan legyen, a tekercsben folyó áramnak félfordulatonként ellenétes irányúra kell változnia.

Belátható a 8.30.c) ábra alapján, hogy ha a tekercsbe kommutátoron keresztül vezetjük az áramot, amelyhez a semleges vonalban csatlakozznak a kéfék, akkor az áram iránya félfordulatonként megváltozik.

Mivel a kommutátor együt forgó a tekercsrel, ezért a felül lévő tekercsoldal mindig az energiatartás pozitív pólusához, az alsó tekercsoldal pedig mindig a negatív pólushoz csatlakozik. Így a tekercsben váltakozó irányú áram folyik. A kommutátor tehát motor esetén egyenáramból váltakozó áramot állít elő, azaz váltóirányítóként működik.

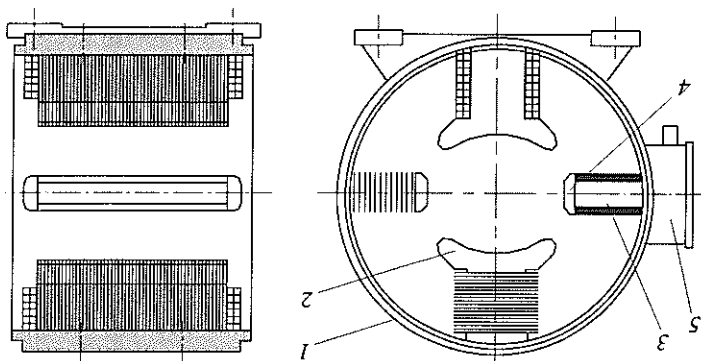
A valóságos motorok forgórészében – a generátorokkal egyezően – a kerület mentén sok tekercselemet helyeznek el, így a forgórésznek nem lesz holtpontja, és a kétféle nem zárják rövidre az energiaforrást. (A 8.30.c) ábra szerint akkor alakul ki holtpont, amikor a tekercs síkja merőleges az erővonalakra. Ekkor a kétféle összekötik a két félgyűrűt, tehát zárlatot okoznak.)

A motor forgásteránnya ellenlétesre változik, ha a mágnes pólusai felcserélődnek, vagy az U_k kapocsfeszültség polaritása ellenlétes lesz. Ekkor ugyanis a tekercsok daltak áramiránnya, és így az erőhatás is megfordul. Ha a pólusok és a feszültség polaritása egyeztetve változik, a forgásteránny változatlan marad.

8.4.2. Az egyenáramú gépek szerkezete

A működési elvekből látható, hogy a generátorok és a motorok elvi szerkezete azonos. A valóságos szerkezetük is egyforma.

Az állórész felépítése – vázlatosan – a 8.31. ábrán látható.



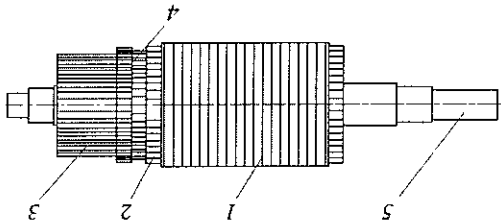
8.31. ábra. Egyenáramú gép állórésze, gerjesztett pólusokkal
1 állórészhez; 2 főpólus gerjesztőtekercscsel; 3 segédpólus gerjesztőtekercscsel; 4 pólussar; 5 kapocsához

Az öntöttvasból vagy öntött acélból, esetleg hengerített acéllemezéből készült ház belső palástjára csavarozzák a főpólusokat és a segédpólusokat (Segédpólusokat általában néhány 100 W teljesítményig nem készítenek. A segédpólus feladata a keféssziktázás megszűntetése.)

A póluspárok száma 1, 2, 3 vagy 4. A póluspárok száma a teljesítménnyel növekszik. A segédpólusok a főpólusok közötti szögfelezőben helyezkednek el. A fő- és segédpólusokon szigetelt rézvezeték készült gerjesztőtekercs van.

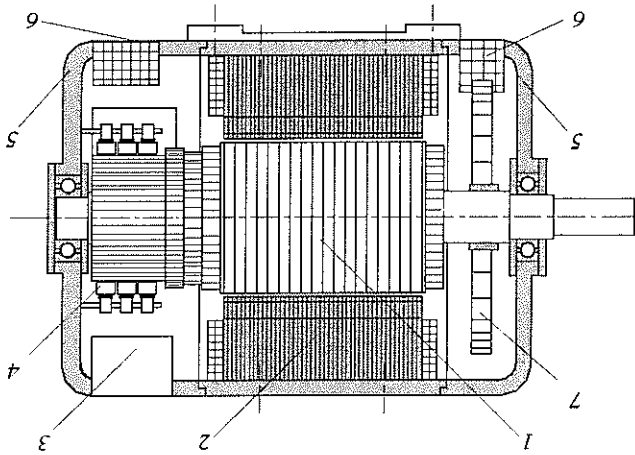
Néhány kW teljesítményig – motorok esetén – készítenek gépeket permanens mágnesű főpólusokkal is.

A **forgrész** (másképpen **armatúra**) tengelyen hengeres, szigetelt dinamólemezekből felépített vastest helyezkedik el. A vastest palástja mentén, egyenletes oszlással, hornyokat sajtolnak. A hornyokban van a szigetelt rézvezetékkel készült tekercselés. A tengelyre rögzítik a kommutátor, amely sok, egymástól és a tengelytől elszigetelt szegmensből áll. A szegmensnek száma kis gépeknél is tízes nagyságrendű, nagy gépek esetén százaz nagyságrendű is lehet. A forgrészt a 8.32. ábra szemlélteti.



8.32. ábra. Egyenáramú gép forgrésze
1 vasmag; 2 tekercselés; 3 kommutátor; 4 a tekercselemek végei; 5 tengely

Egy összeszerelt gép vázlatát látható a 8.33. ábrán.



8.33. ábra. Az egyenáramú gép felépítése
1 forgrész; 2 állórész; 3 zárható kezelőnyílás; 4 kefésszerkezet; 5 csapágypajzs; 6 szellőzőnyílás ráccsal; 7 ventilátorkerék

8.4.3. Az egyenáramú generátorok működési jellemzői

A generátorok fajtái:

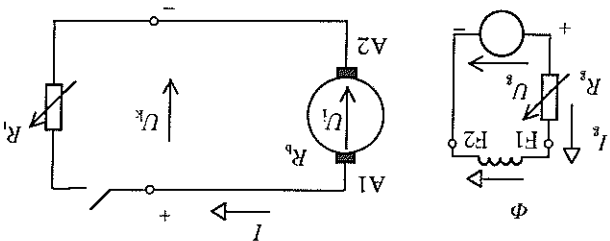
- **permanens mágnesű generátorok:** a főlópusok állandó mágnesből készülnek,
- **gerjesztett főlópusú generátorok:**
 - **külső gerjesztésű generátorok** főlópusait a generátorról független energiaforrásból gerjesztik,
 - **öngerjesztésű generátorok** főlópusait a gép saját forgórészéről táplálják:
 - **parhuzamos gerjesztésű:** a főlópusok gerjesztőtekercse a forgórész-szel parhuzamosan kapcsol,
 - **soros gerjesztésű:** a főlópusok tekercse a forgórész-szel soros kapcsolású,
 - **vegyes gerjesztésű:** minden főlópuson van egy parhuzamosan és egy sorosan kapcsolt tekercs.

Egy külső gerjesztésű generátor áramköri vázlatát a 8.34. ábra szemlélteti.

A generátor forgórészében feszültség indukálódik a forgatás és a mágneses tér hatására. A feszültség értékét a szinkrongenerátornál megismert összefüggéssel jellemezhetjük:

$$U_i = c \cdot \Phi \cdot n.$$

8.34. ábra. Külső gerjesztésű generátor áramköri vázlat



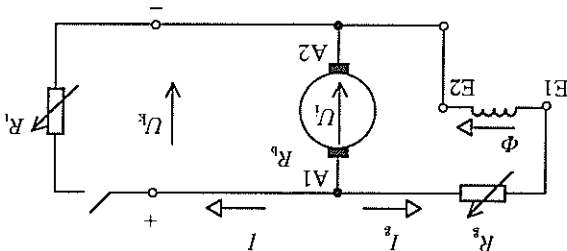
Az indukált feszültség egyenesen arányos a főlópusok fluxusával és a generátor fordulatszámával.

Ha terheljük a generátort, a forgórészben áram folyik, amely a forgórész R_p belső ellenállásán feszültségcsökést létesít. Ennek hatására a generátor kapocsfeszültsége kisebb lesz az indukált feszültségénél:

$$U_k = U_i - I \cdot R_p.$$

A forgórész belső ellenállása általában kicsi, 0,001–1 Ω nagyságrendű, így a forgórész feszültségcsökése – üresjárás és névleges terhelés között – néhány százaléka az indukált feszültségnek.

A parhuzamos gerjesztésű generátor áramkörű vizsgálata a 8.35. ábra mutatja.



8.35. Párhuzamos gerjesztésű generátor áramköri vázlata

A parhuzamos gerjesztési generátor az öngerjesztés elvén, az ún. **dinamó**elv szerint működik, amelynek alapja a főolások vasmagjában kialakított remanens fluxus. A dinamóelv lényege: a forgatás hatására a remanens fluxus a forgórészben feszültséget indukál (remanens feszültség), amely a gerjesztő-körben I_g erősségű áramot hoz létre. Ez a gerjesztőáram növeli a remanens fluxust, amely nagyobb feszültséget indukál, ami miatt nő a gerjesztőáram. Így egy önmagát erősítő folyamatban a gép felgerjed.

gép felgerjed.
Az indukált feszültség végső értékét a gerjesztőkör összes ellenállása (az R_g gerjesztő-ellenállás és a gerjesztőtekercs R_{gt} ellenállásának összege) határozza meg. A gép feszültségét az R_g gerjesztő-ellenállással lehet változtatni.

A soros gerjesztésű generátor csak kivételes esetben használják, mert a kapocs-
gép feszültségét az R_g gerjesztő-ellenállással lehet változtatni.

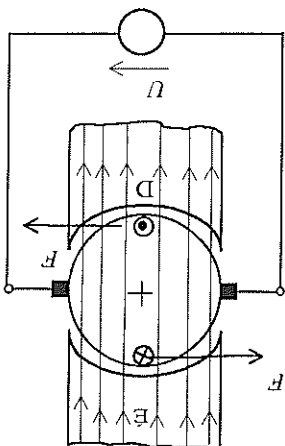
A vegyes gerjesztésű generátor működése lényegileg a párhuzamos gerjesztésűvel egyező. A soros gerjesztőtekercs a terhelés feszültségcsökkenő hatását egyenlíti ki, ha a két tekercs azonos irányban mágnesezi a pólusokat. Ellenlétes irányú gerjesztés esetén a soros tekercs nagymértékű feszültségcsökkenést eredményez.

8.4.4. Egyenáramú motorok

Az egyenáramú motorok nyomatléka

Az egyenáramú motor nyomatékát a 8.36. ábra alapján értelmezhetjük.

8.36. ábra. Az egyenáramú motor nyomatéka



A forgórész I erősségű árama a B indukciójú mágneses térben, l hatásos vezetőhossz esetén az $F = B \cdot I \cdot l$ és a $\Phi = B \cdot A$ összefüggés szerint, a d átmérőjű forgórészen

$$M_m = F \cdot d = B \cdot I \cdot l \cdot d = \frac{\Phi}{A} \cdot I \cdot l \cdot d$$

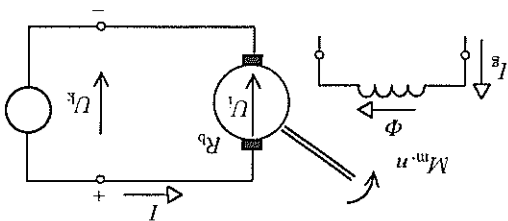
nyomatékot eredményez.

A kifejezésben szereplő A , l és d mennyiségek egy adott gép esetén állandók, így egy k konstansba foglalhatók. Ezzel felírhatjuk az egyenáramú motorokat jellemző szokásos nyomatéki összefüggést:

$$M_m = k \cdot \Phi \cdot I.$$

Az egyenáramú motorok nyomatéka egyenesen arányos a főpólusok mágneses fluxusával és a forgórész áramerősségével.

Az egyenáramú motorok feszültség, áram és fordulatszám viszonyai a 8.37. ábra áramköri vázlatára alapján vizsgálhatók.



8.37. ábra. Az egyenáramú motor áramköri vázlatára

A gép forgórészére csatlakozó energiaforrás U_k kapcsolófeszültsége I erősségű áramot létesít, amely a főpólusok Φ fluxusával nyomatékot hoz létre. A nyomaték hatására a motor n fordulatszámmal kezd forogni.