

3. SZINKRON GÉPEK.

A Földön előállított villamos energia több mint 99 %-át mechanikai energia átalakításából nyerjük. A forgómozgás energiáját villamos energiává alakító gépeket generátoroknak nevezzük. A forgógépekkel előállított villamos energia több mint 99 %-a szinkron generátorokból ered. A szinkron gépeket nem csak villamos energia előállítására használhatjuk: motorként a villamos energiát forgó mozgást végző mechanikai energiává alakíthatjuk velük. E rövid bevezető alapján fogalmat alkothatunk a szinkron gépek jelentőségéről és szerepéről életünkben.

3.1. MŰKÖDÉSI ELV.

A generátorok (áramfejlesztők) működése a mozgási indukció jelenségének felismerésén alapszik. Ha egy vezetőkerettel kapcsolódó mágneses erővonalak száma megváltozik, a vezetőkeretben feszültség indukálódik. A fluxus változását mozgási indukció esetén a mágneses tér és a vezetőkeret viszonylagos elmozdulása okozza.

A szinkron generátoroknál a vezetőkeret az állórészen van, és a forgórészhez rögzített mágneses teret forgatjuk. A forgó mágneses tér az álló vezetőkeretben az energiaszállítási szempontból kedvező váltakozó feszültséget indukál. Ha feltételezzük, hogy a mágneses tér eloszlása a kerület mentén szinuszos, a tekercsekben indukált feszültség időbeli változása is szinuszos alakú lesz.

Az ω szögsebességgel forgó, szinuszos eloszlású fluxus az álló, N menetszámú tekercsben feszültséget indukál, amelynek pillanatértéke:

$$u_i = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = N \cdot \frac{\Phi_{\max} \cdot \sin \omega t}{dt} = N \cdot \Phi_{\max} \cdot \omega \cdot \cos \omega t. \quad (3.1)$$

A villamos energia visszaalakítása mozgási energiává (forgó mozgássá), legkedvezőbbben háromfázisú árammal lehetséges (lásd aszinkron motorok), ezért az energiaátviteli szempontból is kedvező, háromfázisú váltakozó áramú rendszerek terjedtek el. A szimmetrikus háromfázisú feszültséget három szimmetrikusan elhelyezett tekercsrendszerrel hozzuk létre a szinkron generátorokban. A három tekercsrendszert U , V , W betűkkel jelöljük (3.1a ábra).

A térben eltoltt tekercsekkel a forgó mágneses tér időben eltolódva kapcsolódik:

$$\Phi_U = \Phi_{\max} \cdot \sin \omega t, \quad \Phi_V = \Phi_{\max} \cdot \sin (\omega t - 120^\circ), \quad \Phi_W = \Phi_{\max} \cdot \sin (\omega t - 240^\circ),$$

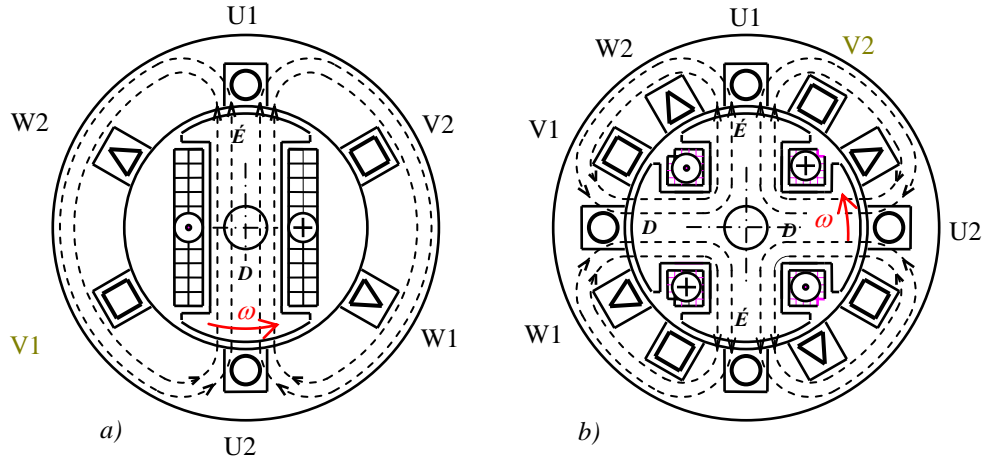
így az egyes fázisokban – ennek megfelelően – az indukált feszültségek maximuma időben eltolva követik egymást:

$$u_{iU} = N \cdot \Phi_{\max} \cdot \omega \cdot \cos \omega t, \quad (3.2a)$$

$$u_{iV} = N \cdot \Phi_{\max} \cdot \omega \cdot \cos (\omega t - 120^\circ), \quad (3.2b)$$

$$u_{iW} = N \cdot \Phi_{\max} \cdot \omega \cdot \cos (\omega t - 240^\circ). \quad (3.2c)$$

A kerület mentén azonban nem csak egy északi-déli póluspárt hozhatunk létre, hanem többet is. A 3.1b ábrán két póluspárt láthatunk. Figyeljük meg, hogy az egyes fázisok tekercseinek kezdetei ($U1$; $V1$; $W1$) az a) ábra szimmetrikus 120° - 120° -ához képest geometriailag 60° - 60° -ra változtak. Ez logikus is, hiszen a négypólusú gépnél a tekercs (egy körülfordulás alatt) kétszer kapcsolódik az északi, és kétszer a déli pólussal, azaz a feszültség hullám két periódust ír le.



3.1. ábra Szinkron gép elvi felépítése

a) kétpólusú és b) négypólusú kivitelben

Megállapíthatjuk, hogyha egy körülfordulás alatt p póluspárú mező kapcsolódik a vezetőkerettel, akkor abban

$$f = p \cdot n \quad (3.3)$$

frekvenciájú feszültség fog indukálódni, ahol f Hz-ben a frekvencia, n 1/s-ban a fordulatszám, és p a póluspárok száma. Ezzel összhangban egy villamos gép esetén a villamos szögben mért elfordulás p -szerese a geometriai elfordulásnak:

$$\alpha_v = p \cdot \alpha_g. \quad (3.4)$$

3.1.1. Az indukált feszültség

Az állórészen elhelyezett tekercselésben a forgórész által létesített teret forgatva, szinuszos lefolyású feszültséget kívánunk létrehozni, amelynek maximális értéke az előzőek szerint: $U_{\max} = \omega \cdot N \cdot \Phi_{\max} = 2\pi \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{\max}$.

A gyakorlat számára az indukált feszültség effektív értéke a fontos, ez szinuszos változásnál:

$$U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{\max} = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{\max}. \quad (3.5)$$

A fenti összefüggés azonban csak akkor írná le pontosan az adott fázisban indukált feszültséget, ha egy fázisban csupán egyetlen, N menetszámú vezetőkeret lenne.

A gyakorlatban azonban a háromfázisú tekercselést nem a 3.1. ábrán látható 6 horonyban, hanem a hely jobb kihasználása érdekében a kerület mentén elosztva, több ($p \cdot 6$ számú) horonyban helyezik el.

Az egy fázishoz és egy pólushoz tartozó hornyok számát q -val jelöljük:

$$q = \frac{Z}{m \cdot 2p}, \quad (3.6)$$

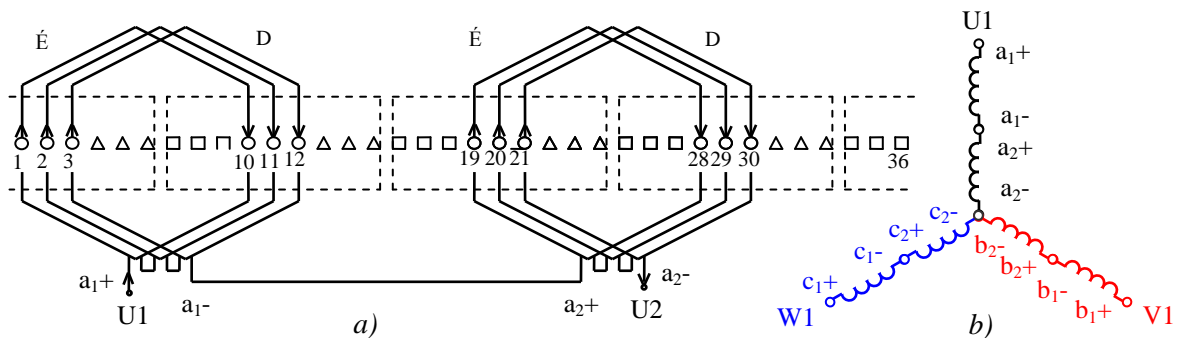
ahol Z az összes hornyok-, m a fázisok-, $2p$ a pólusok száma.

A q váltakozó áramú tekercselések csoportosításának egyik legfontosabb fogalma. A különböző hornyokban elhelyezett tekercsoldalokban, amelyek egymással sorba vannak kötve, az indukált feszültség vektorai nem lesznek ugyanabban a fázishelyzetben a tekercsoldalak térbeli eltolódása miatt. Emiatt az eredő feszültség, amit az egy pólushoz és egy fázishoz tartozó tekercsoldalak sorbakapcsolásával nyerünk, nem az egyes tekercsoldalokban indukált feszültségek algebrai, hanem vektoros összege lesz.

A kérdést egy konkrét példán keresztül világíthatjuk meg a legjobban (3.2. ábra). Helyezzünk el egy háromfázisú ($m=3$), négypólusú ($2p=4$) tekercselést egy $Z=36$ horonyszámú állórészben. Ekkor a fázisonkénti és pólusonkénti horonyszám $q = \frac{Z}{m \cdot 2p} = \frac{36}{3 \cdot 4} = 3$ lesz. Egy fázishoz és egy pólushoz tehát három tekercs tartozik, amelyeknek egyik oldala az északi, másik oldala a déli pólus alatt helyezkedik el. Egy tekercs két oldala pólusosztásnyira (τ_p) van egymástól.

A pólusosztás hornyokban mérve $\tau_p = Z/2p = 36/4 = 9$ horony. (Ha pl. a tekercs egyik oldalát az *első* horonyban helyezük el, akkor olyan széles tekercselemet kell készítenünk, hogy a másik oldalát a *tizedik* ($1+q=10$.) horonyba helyezhessük.)

A fázis három sorbakötött tekercselemét sorba-, vagy párhuzamosan (a 3.2b ábrán felrajzolt soros kötés a gyakoribb), illetve csillagba-, vagy deltába köthetjük a másik póluspár alatt elhelyezett másik három tekercselemmel. Ezek természetesen két pólusosztásnyira lesznek az elsőktől, vagyis az első tekercsoldal a $1+2 \cdot \tau_p = 1+18=19$. horonyba kerül. A soros kapcsolással a fázistekercs feszültségét-, a párhuzamos kötéssel az áramterhelhetőségét növelhetjük.



3.2. ábra Négypólusú, háromfázisú tekercselés

a) egy fázis kiterített tekercselési vázlata; b) a háromfázisú tekercselés soros csillag kapcsolása

A 32a ábrán a tekercselés egy fázisának síkba kiterített vázlata látható. Az 1. és a 2. horonyban lévő tekercsoldalokban indukált feszültségek fázisszög-elterése megfelel annak az időkülönbségnek, ami eltelik, amíg pl. a fluxus maximuma az 1. horonytól a 2. horony

főle ér, vagyis a forgórész egy *horonyosztásnyit* fordul el. Az elfordulást természetesen villamos szögben kell értelmeznünk.

Egy horonyosztás $\alpha_g = \frac{360^\circ}{Z} = 10^\circ$ geometriai fok, amely villamos fokra átszámítva $\alpha_v = p \cdot \alpha_g = 2 \cdot 10^\circ = 20^\circ$ villamos szögnek felel meg. Két szomszédos tekercsoldalban indukált feszültség között tehát 20° fáziseltérés lesz.

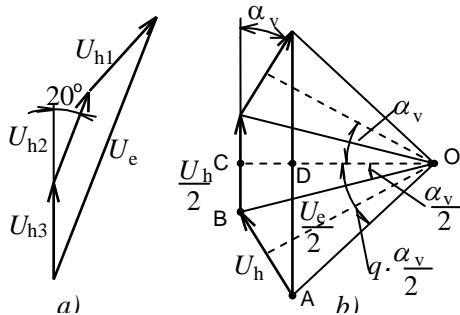
A 3.3a ábrán lerajzoltuk, hogy mekkora lesz az eredő feszültség, ha az 1., 2. és 3. horony tekercsoldalaiban indukált feszültségeket a soros kapcsolás miatt vektorosan összegezzük. A 3.3b ábrán általános esetre is érvényes összefüggést láthatunk az eredő feszültség (U_e) és az egyes tekercsoldalakban indukált feszültségek (U_h) között. Láthatóan a vektoros összegzésből adódó eredő feszültség kisebb, mint az egyes tekercsoldalakban indukálódó feszültségek algebrai összege.

Az indukált feszültség számításánál ezt a csökkenést a ξ_e elosztási tényezővel (más néven *sávtényezővel*) vesszük figyelembe. Vizsgáljuk meg az 3.3b ábra segítségével, hogy milyen arányú feszültségsökkenés következik be a vektoros összegzés miatt!

$$\text{Az OCB háromszögből: } \sin \frac{\alpha_{\text{vill.}}}{2} = \frac{\frac{U_h}{2}}{\overline{OB}}, \text{ és az ODA háromszögből: } \sin \left(q \cdot \frac{\alpha_{\text{vill.}}}{2} \right) = \frac{\frac{U_e}{2}}{\overline{OA}}.$$

Mivel $\overline{OA} = \overline{OB}$, a vektoros és az algebrai összeg aránya:

$$\xi_e = \frac{U_e}{q \cdot U_h} = \frac{\sin \left(q \cdot \frac{\alpha_v}{2} \right)}{q \cdot \sin \frac{\alpha_v}{2}}. \quad (3.7)$$



3.3. ábra Magyarázó ábra az elosztási tényező számításához

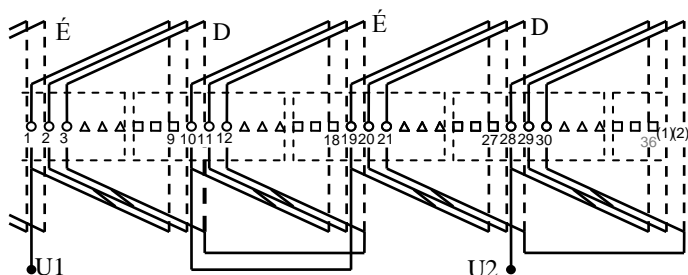
A 3.2. ábrán bemutatott tekercselés esetén egy horonyba egy réteg kerül. Felismerték azonban azt, hogy kisebbek lesznek a tekercsfejek, és könnyebb is kialakítani őket, ha a vezetőket nem egy kötegben visszük a másik pólushoz, hanem két részre osztva, jobbra, és balra kanyarodva. Az ilyen tekercselést

kétréteges tekercselésnek nevezzük.

A kétréteges tekercselés lehetőséget ad egy további anyagmegtakarítással járó tekercselési mód alkalmazására, ez a *lépésrövidítéses* tekercselés. Nevét onnan kapta, hogy a tekercs két oldalát nem pontosan a pólusosztásnak megfelelő, villamosan 180° -ra helyezzük el az állórész hornyaiban, hanem annál közelebb. A lépésrövidítés mértékét az $\frac{S}{\tau_p}$

aránnyal jellemezzük, ahol S a tényleges lépés, τ_p pedig a pólusosztás, mindkettő hornyokban mérve. A lépésrövidítéses tekercselés azzal a következménnyel is jár, hogy a tekercsről levehető feszültség nem a tekercs két oldalában indukálódott feszültség algebrai összege lesz, hanem a fáziseltérés miatt itt is vektoros összegzést kell alkalmazni.

Világítsuk meg a felmerülő problémát ismét egy konkrét példán keresztül! Maradjunk az előző példa kiinduló adatainál, vagyis $m = 3$; $2p = 4$; $Z = 36$. A fázisonkénti és pólusonkénti horonyszám nem változik, $q = 3$. A pólusosztás értéke is változatlan, $\tau_p = 9$ horony, mivel ugyanúgy 4 pólus helyezkedik el a kerület mentén. Változhat viszont a



3.4. ábra Lépésrövidítéses tekercselés egy fázisa

tekercsoldalak távolsága, mert most nem pontosan 180° -ra, átmérősen kívánunk lépni, hanem kevesebbet. Vizsgáljuk meg mennyivel!

Léphetünk a 9 helyett 8, 7, vagy 6 hornyot. Többet nem érdemes rövidíteni, mert nagyon leromlik az eredő feszültség és az algebrai összeg

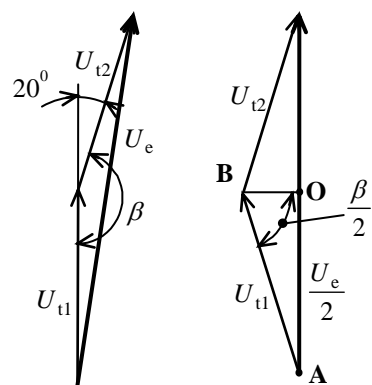
aránya. A lépésrövidítés mértéke: $\frac{S}{\tau_p}$ tehát $\frac{8}{9}$, $\frac{7}{9}$, $\frac{6}{9}$ lehet. Alkalmazzunk egy szerénynek mondható $S/\tau_p = 8/9$ -es lépésrövidítést, és tekintsük meg a 3.4. ábrán, hogy nézne ki az állórész tekercselés síkba kiterítve, egy fázis berakása után!

Szembeötlő különbség, hogy $2 \cdot 3$ tekercs helyett $4 \cdot 3$ van, és más a tekercsfejek és az átkötések alakja is. Lényegi különbség azonban az, hogy egy horonyban két réteg van: egy hosszabb szaggatott és egy rövidebb folytonos vonallal rajzolt. Ez a jelölési rendszer pont ennek az ábrázolhatósága érdekében terjedt el, a hosszú szaggatott vonal a horony alján, a rövid folytonos, a horony felső rétegében elhelyezkedő tekercsoldalt jelképezi. Lényegi különbség még, hogy az egyrétegű tekercselésnél a tekercs szélességét az első és a tizedik (1.-10.) horony távolsága határozta meg, addig ennél a tekercselési módnál pedig az első és a kilencedik (1.-9.) adja a tekercsszélességet.

Bár nincs még berajzolva a másik két fázis, azt már most is lehet látni, hogy lesznek olyan hornyok, melyekben a felső réteg az egyik fázishoz, az alsó réteg pedig egy másik fázishoz fog tartozni. Ez némi többletköltséget és munkát okoz, ugyanis nemcsak a tekercsfejekben, hanem ezekben a hornyokban is gondoskodni kell a fázisok közötti szigetelésről.

Most vizsgáljuk meg, hogy milyen arányú feszültségcsökkenést okoz a fáziseltérésekből adódó vektoriális összegzés! Ebben a példában a tekercs két oldalában indukált feszültségek fáziseltérése egy horonyosztásnak megfelelő villamos fok, mivel $\tau_p - S = 9 - 8 = 1$ horony a különbség a tényleges lépés, és az átmérős lépés között.

A 3.5. ábrán felrajzoltuk az 1. és a 9. horonyban lévő tekercsoldalakban indukált feszültségvektorokat, és mellette egy általános következtetést lehetővé tevő ábrát. A két tekercsoldalban indukált feszültségek közötti β szög éppen olyan arányban tér el a 180° -tól, mint amilyen arányban a tényleges S lépés az átmérős τ_p -tól:



3.5. ábra Magyarázó ábra a hűrtényező számításához

$$\frac{\beta}{180^\circ} = \frac{S}{\tau_p} \text{ azaz } \frac{\beta}{2} = \frac{S}{\tau_p} \cdot 90^\circ, \text{ és az AOB háromszögből: } \sin \frac{\beta}{2} = \frac{U_e}{U_t}.$$

A lépésrövidítés miatt bekövetkező feszültségcsökkenést ξ_h *húrtényezővel* vesszük figyelembe:

$$\xi_h = \frac{U_e}{2 \cdot U_t} = \frac{U_t}{U_t} \cdot \sin \frac{\beta}{2} = \sin \left(\frac{S}{\tau_p} \cdot 90^\circ \right). \quad (3.8)$$

Az indukált feszültségek számításánál a vektoros összegzések miatt bekövetkező feszültségcsökkenést egységesen az *eredő tekercselési tényezővel* vesszük figyelembe, ami az *eloszlási- és a húrtényező szorzata*:

$$\xi = \xi_e \cdot \xi_h. \quad (3.9)$$

Összegezve megállapíthatjuk, hogy egy n fordulatszámmal forgó, Φ_{\max} amplitúdójú, szinuszos eloszlású mágneses mező a p póluspárú és hornyokban elosztott N menetszámú tekercselésben

$$U_i = 4,44 \cdot p \cdot n \cdot N \cdot \xi \cdot \Phi_{\max} \quad (3.10)$$

effektív értékű feszültséget indukál.

A tekercselési tényezőnek az eredő feszültségre gyakorolt csökkentő hatásán kívül még egy igen fontos szerepe van a forgógépekben.

Mint azt a későbbiekben látni fogjuk, nem mindig sikerül tisztán szinuszos eloszlású mágneses teret létrehozni a légrésben. A szinusztól eltérő alakú periodikus függvényeket azonban felfoghatjuk különböző frekvenciájú szinuszos függvények összegeként. A többszörös frekvenciákon jelentkező szinusz görbéket (amelyek az ideális szinusztól való eltérést reprezentálják), *felharmonikusoknak* nevezzük. Mivel ezek energiaátviteli- és átalakítási szempontból is haszontalanok és károsak, ezért törekszünk arra, hogy az indukált feszültség alakja minél jobban megközelítse az ideális szinuszt.

A fluxusban jelenlévő felharmonikusok azonban ugyanúgy feszültséget indukálnak a tekercsoldalakban, mint az alapharmonikus. A tekercselési tényező ezeknek a felharmonikus feszültségeknek az eredőjét is csökkenti a kapcsolatokon.

Nézzük meg milyen mértékben! A tényezők meghatározásakor láthattuk, hogy nagyságuk a hornyok közötti villamos szög nagyságától függ.

Az $f = p \cdot n$ összefüggésből következik, hogy egy adott fordulatszám esetén a frekvencia növekedése úgy jelentkezik, mintha a póluspárok száma növekedett volna. Egy ν -szeres frekvencián a szomszédos tekercsoldalakban indukált feszültségek fáziseltérése (az $\alpha_\nu = p \cdot \alpha_g$ hasonlóság alapján): $(\alpha_\nu)_\nu = \nu \cdot \alpha_\nu$ lesz. A tekercselési tényezőket a ν -edik felharmonikusra tehát egyszerűen felírhatjuk, ha a villamos szöget megszorozzuk ν -vel.

Az eloszlási tényező $\nu \cdot f$ frekvencián:

$$\xi_{ev} = \frac{\sin \left(q \cdot \nu \cdot \frac{\alpha_\nu}{2} \right)}{q \cdot \sin \left(\nu \cdot \frac{\alpha_\nu}{2} \right)}, \quad (3.12)$$

a hűrtényező pedig:

$$\xi_{hv} = \sin\left(\frac{S}{\tau_p} \cdot \nu \cdot 90^\circ\right). \quad (3.13)$$

(3.12) és (3.13) alapján valamely rendszámú felharmonikus esetén a tekercselési adatok (q és S/τ_p) megfelelő megválasztásával (tekercselési tényezőjének csökkentésével) elérhetjük, hogy az adott harmonikus csökkenjen (esetleg el is tűnjön) a kapocsfeszültségből. Nem szabad azonban elfelejtenünk arról, hogy a tekercselési adatok változása a számunkra fontos alapharmonikust is csökkentheti.

3.1.2. Az armatúra mágneses tere

Eddigi tárgyalásunk alapján energiaátalakítónkkal előállítottunk a lehetőségekhez mérten közel szinuszos alakú, háromfázisú váltakozó feszültséget. A következőkben vizsgáljuk meg, mi történik egy szinkron gépben, ha ezt a váltakozó feszültségű villamos energiát hasznosítani akarjuk.

A jól tervezett váltakozóáramú tekercselések alapvető feladata, hogy szimmetrikus terhelés esetén a szinkron- és az aszinkron- gépekben forgómezőt hozzanak létre. A forgómező egy $2p$ pólusszámú szinuszos indukciós hullám, ami változatlan amplitúdóval és $n_0 = 60 \cdot f_1 / p$ szinkron fordulatszámmal forog körbe a kerület mentén.

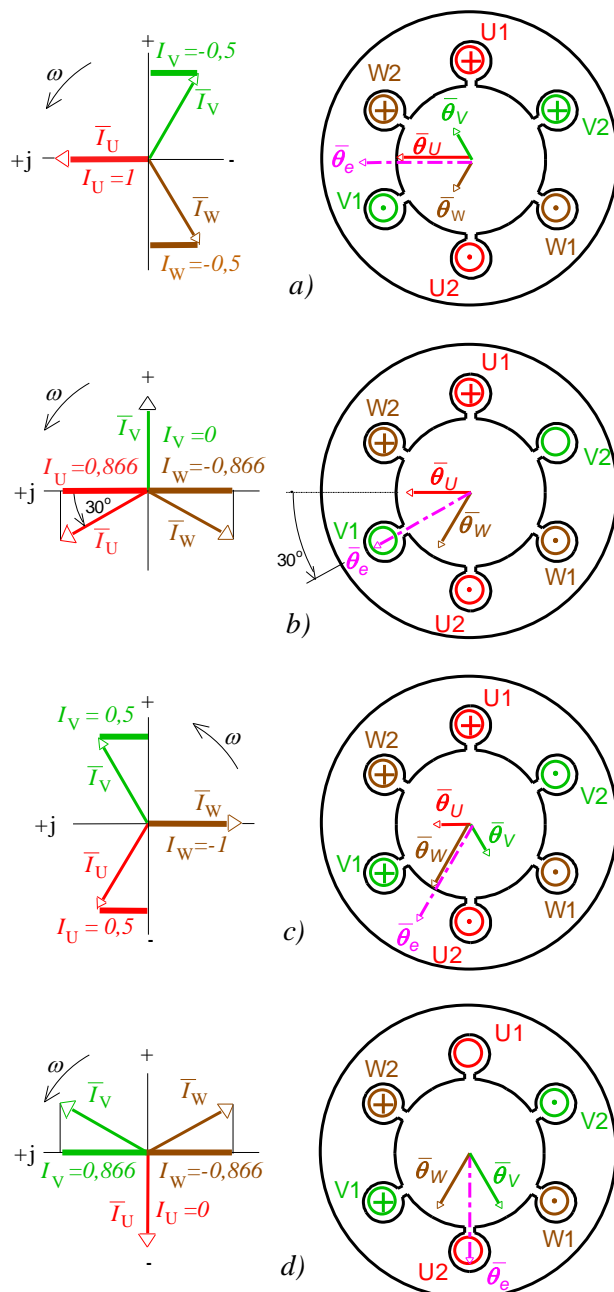
A forgómezőt a szimmetria-feltételeket kielégítő, hornyokba elosztott, egy-, vagy több rétegű, többfázisú tekercselésekkel hozhatunk létre.

A forgómező kialakulásához az szükséges, hogy az egyes fázistekercsek villamos szögben mért térbeli eltolásának ugyanakkorának kell lennie, mint a tekercsekre kapcsolt feszültségek időbeli eltolásának.

Háromfázisú gépek esetén ez konkrétan azt jelenti, hogy például az egyforma fázistekercseknek villamos szögben mérve 120° -ra kell lenniük egymástól.

A 3.6. ábrán az előbbi feltételek szerint elkészített tekercselésre szimmetrikus háromfázisú feszültséget kapcsoltunk. Az ábrák bal oldali része a tekercsekre kapcsolt feszültségek hatására kialakuló áramvektorok pillanatnyi időbeli helyzetét, és vastag vonallal kiemelve a képzetes tengelyre eső vetületét (vagyis az adott időpontbeli értéket és irányokat) mutatja. Az ábrák jobb oldali részén a tekercseket jelképező körökben megjelöltük az adott pillanatban folyó áram irányát. Az egyes tekercsek által létrehozott, a tekercs tengelyének irányába mutató gerjesztésvektorok értelmét a jobbsavár szabály szerint a tekercsekben folyó áramok irányából, értéküket pedig a pillanatértékekből határoztuk meg. Végül az egyes fázisok gerjesztésének vektoros összegzésével meghatároztuk a három fázis eredő gerjesztésvektorát az adott időpillanatban.

A 3.6a ábrán az U fázisban folyó áram értéke maximális, az egyszerűség érdekében ezt az értéket tekintjük egységnyinek. Ez az áram az U fázistekercs kezdetén (U1) befolyva egységnyi gerjesztést hoz létre a jobbsavár szabálynak megfelelően, az U tekercs tengelyének irányában. A V fázisban folyó áram pillanatértékét az \bar{I}_V vektor vízszintes vetülete mutatja, mely jelen esetben $-0,5$ értékű ($\cos 120^\circ = -0,5$). A negatív előjel miatt az áram a V fázistekercs kezdetén (V1) kifelé fog folyni (mintha V2 tekercsvégén vezetnénk



3.6. ábra Forgómező létrehozása

el a vektorcsillag forgásának megfelelően.

3.6c ábrán további $t_1 = 0,00167$ s elteltével rögzítettük a vektorcsillagot. Ebben az időpillanatban az U fázistekercs gerjesztése lecsökkent 0,5 egységre ($\cos 60^\circ = 0,5$), a V fázistekercs az a) állapothoz képest ellenkező előjelűre változott. Az \bar{I}_W áramvektor vízszintes tengelyre eső vetülete negatív maximum (-1). Az eredő gerjesztés nagysága most is 1,5 egységre, de iránya tovább fordult a b) állapothoz képest 30° -kal. A 3.7d ábra szerkesztésének ellenőrzését az olvasóra bizzuk.

Ennél az egyszerű tekercselésű kétpólusú gépnél megfigyelhetjük, hogy a gerjesztésvektor térbeli elfordulásának szöge megegyezik a váltakozó áramot jelképező vektor-

be az áramot). A gerjesztés irányát most is a jobbszavar szabály segítségével határozhatjuk meg, a jelölt irányba mutat, a vektor hossza 0,5 egység. A W fázisban a V fázishoz hasonló a helyzet, ebben a pillanatban a W fázistekercs végén (W2) folyik be az áram, és a kezdetén (W1) folyik ki. Az eredő gerjesztés iránya ebben az időpillanatban vízszintesen balra fog mutatni és hosszúsága 1,5 egységre lesz.

A 3.6b ábrán t_1 idő elteltével rögzítettük a forgó vektorcsillagot. A vektorcsillag $2\pi/12 = 30^\circ$ szöggel fordult el, $f = 50$ Hz esetén ez

$$t_1 = \alpha_1 \cdot \frac{1}{\omega_o} = \frac{2\pi}{12} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot 50} = \frac{1}{600} = 0,00167 \text{ s}$$

időnek felel meg. Ebben az időpillanatban az U fázis időbeli pillanatértéke $\cos 30^\circ = \sqrt{3}/2 = 0,866$, az V fázisban éppen nullátmenet van, a W fázis árama pedig $\cos 150^\circ = -0,866$ értékű. Az előző állapothoz képest a gerjesztések iránya nem változott, csak a nagyságuk. Az U fázistekercs gerjesztése lecsökkent 0,866-ra, a V fázisé nullára, a W fázistekercs pedig -0,866-ra nőtt.

Az eredő gerjesztés nagysága $\Theta_e = 2 \cdot 0,866 \cdot \cos 30^\circ = 1,5$; iránya pedig a vízszintes tengelytől 30° -ot fordult

csillag időbeli elfordulási szögével, az eredő gerjesztésvektor (és egyben a fluxusvektor) iránya minden esetben az U fázis (az \vec{I}_U áramvektor) irányába mutat. A mező forgásiránya a tekercselésre kapcsolt feszültségrendszer fázissorrendjétől függ.

A forgómező keletkezésének megértését olyan fontosnak tarjuk, hogy ezzel kapcsolatban Dr. Kádár István egy videofilmes animációt is készített számunkra (**forgo_2.avi**).

A bal oldali ábra a háromfázisú, szimmetrikus, szinuszos függvény szerint váltakozó áramrendszer fázisait mutatja. Az egyes fázisáramok pillanatértékei a megfelelő fázisok szinuszos függvény szerint váltakozó valós vetületei adják. Az „a” (lila) fázis áramának kezdeti fázisszöge nulla, a „b” (kék) és a „c” (zöld) fázis áramának kezdeti fázisszöge (-120°), illetve ($+120^\circ$). Ennek megfelelően a $t = 0$ időpontban $i_a = 0$, $i_b = -0,886 \cdot I_{\max}$ és $i_c = +0,886 \cdot I_{\max}$ ahol I_{\max} az áram amplitúdója.

Ezek az áramok gerjesztik a jobb oldali ábra térben szimmetrikusan elhelyezett gerjesztő tekercseit. A három tekercs a szinuszos függvény szerint váltakozó áram hatására egy-egy időben lüktető mező-komponenst hoz létre. Ezek a mező-komponensek térben egymáshoz képest 120° -ra eltolva a tekercsek elrendezése miatt, időbeli lüktetésük pedig szintén 120° -kal eltolva a gerjesztő áramok fáziseltolása miatt.

Amennyiben a gerjesztés (és a mágneses tér) térbeli eloszlását szinuszosnak tekinthetjük, vagy szinuszosnak közelíthetjük, akkor az egyes fázistekercsek által létrehozott mező-komponenseket az egyes fázistekercsek tengelyének irányába mutató térbeli fázisokkal szemléltethetjük. A térbeli fázisokat összegezve kapjuk az eredő gerjesztést vagy mágneses teret képviselő eredő fázist (piros), amelynek hossza állandó, az egyes lüktető mező-komponensek amplitúdójának $1,5$ -szöröse.

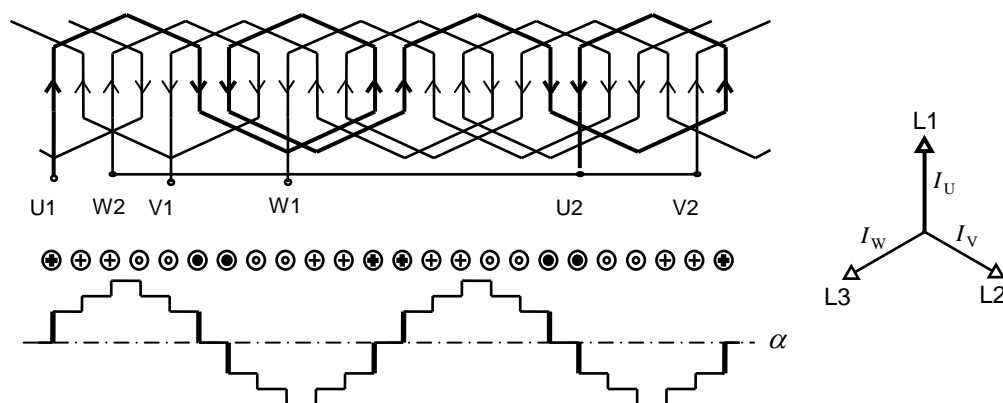
Az állórészen elhelyezett, térben szimmetrikusan eltolva tekercseket időben szimmetrikusan eltolva áramokkal táplálva tehát a légrésben egyenletes szögsebességgel forgó térben szinuszos eloszlású mágneses mezőt kapunk.

Az animáció első szakaszában a tápfrekvencia egységnyi ($f = 1$), a második és a harmadik szakaszban $0,25$ értékű ($f = 1/4$), vagyis a frekvencia szögsebesség változtató hatását tanulmányozhatjuk. Az animáció első és a második szakaszában az egyes tekercsek táplálása a pozitív sorrendnek megfelelően $a \rightarrow U$, $b \rightarrow V$, $c \rightarrow W$ (az óramutató járásával megegyező), míg a harmadik szakaszban a szimulált fázissorrend-csere ($a \rightarrow U$, $c \rightarrow V$, $b \rightarrow W$) miatt a mező forgásiránya megfordul.

A 3.7. ábrán felrajzoltunk egy egyszerű háromfázisú tekercselést, és mellé egy adott időpillanatban a fázisáramokat jelképező vektorcsillagot, valamint az adott időpillanatnak megfelelően berajzoltuk az egyes hornyokban folyó áramirányokat, a hornyok alatt pedig az áram pillanatértékétől függő gerjesztési ugrásokat.

Mint látható, az áramok által létrehozott gerjesztés egy lépcsőzetes (lépcsős) görbe. A lépcsőzést finomíthatjuk a fázisonkénti- és pólusonkénti horonyszámok (q) növelésével. Amennyiben forgó vektorral akarjuk jellemezni az armatúraáram mágneses terét, ezt csak szinuszos változású mennyiségekkel tehetjük meg, ezért szükséges a lépcsős görbe Fourier-sorba fejtése.

Bennünket a szinkron gépeknél tulajdonképpen csak az alapharmonikus érdekel, mert a felharmonikusok fordulatszáma eltér a forgórész mező fordulatszámától, így hasznos nyomatékot sem hoznak létre, és helyes méretezés esetén lényegileg nem befolyásolják az



3.7. ábra Háromfázisú tekercselés által létrehozott mágneses tér

indukált feszültséget létrehozó, szinkron fordulatszámú mezőt. Az alapharmonikus ismerete viszont lényeges, mert az megváltoztatja, torzítja a pólusok által létrehozott forgómezőt, hatása jelentős az indukált feszültségre.

Fourier-analízist alkalmazva, szimmetrikus háromfázisú tekercselési rendszer- és áramok esetén az armatúraáram által létrehozott gerjesztés alapharmonikusának maximális értéke:

$$\Theta_a = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot I_a \cdot \frac{N}{p} \cdot \xi = 1,35 \cdot I_a \cdot \frac{N}{p} \cdot \xi, \quad (3.13)$$

amelyben I_a az egy fázisban folyó áram effektív értéke, N a fázis menetszáma, p a póluspárok száma és ξ a tekercselési tényező.

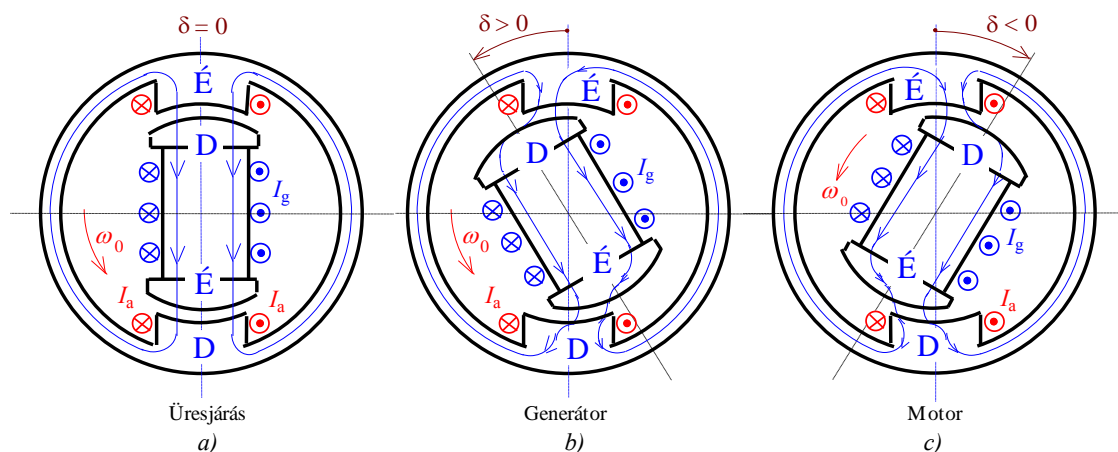
3.1.3. A terhelési szög fogalma

A szinkron fordulatszámmal forgó mágneses teret a forgórész és az armatúraáram együttesen hozza létre. Ez az eredő mező metszi az állórész-tekercselés vezetőit, és azokban feszültséget indukál. Tulajdonképpen ez az indukált feszültség jelenik meg a kapsokon generátoros üzemben, ill. ez tart egyensúlyt a külső feszültségforrással motoros üzemben.

Az üresjáráshoz közeli üzemállapotban, a forgórész gerjesztése segíti létrehozni azt a teret, amely az indukált feszültséget előidézi. Motoros üzemállapotban előállíthatunk a forgórész gerjesztéssel olyan erősségű mágneses teret, amely közel akkora indukált feszültséget hoz létre mint az armatúrára kapcsolt külső feszültség. Ekkor az állórész tekercselésben csak akkora áram folyik, amely a felmágnesezett forgórész forgatásához szükséges veszteségeket fedezi.

Mivel az egyenárammal gerjesztett forgórész szintén mágnes, a két mágnes úgy tapad össze, hogy az állórész északi pólusa alá a forgórész déli pólusa kerül és fordítva. Terheletlen állapotban a két mágnesrendszer mágneses tengelyei jó közelítéssel egybeesnek (3.8a ábra), ekkor azt mondjuk, hogy a δ -val jelölt terhelési szög közel zérus: $\delta \approx 0$. Az

ábrába berajzoltuk a rugalmas gumiszalagnak képzelhető mágneses erővonalakat is, amelyek ekkor megnyúlás nélküliek.



3.8. ábra A szinkron gép üzemmódjai és terhelési szöge

A motorként üzemelő gépet terhelve ezek a rugalmas gumiszalagok (erővonalak) megnyúlnak és a forgórész mágneses tengelye forgásirányban lemarad a forgómező mágneses tengelyéhez képest (3.8c ábra). A terhelési szög most $\delta < 0$, de lényeges kihangsúlyozni, hogy állandósult állapotban (a lemaradástól eltekintve) a forgórész változatlanul az n_0 szinkron fordulatszámmal forog. A szinkron gép addig marad szinkron gép, amíg az erővonalak el nem szakadnak és a forgórész körbe nem fordul az állórész mezőhöz képest. Ez a szétszakadás hengeres forgórészű gép esetén $\delta = -90^\circ$ terhelési szögnél következik be, amikor is a gép kiesik szinkronizmusból és zárlatba kerül (stabilitási határ). Energiaátalakítónk motoros üzemállapotban a tengelyen leadott mechanikai teljesítményért az armatúra kapcsain felvett villamos teljesítményt igényel.

Generátoros üzemen a terhelőáram mágneses terének visszahúzó, fékező hatása jelentkezik a forgórész tengelyén. Ha továbbra is azonos fordulatszámmal kívánjuk forgatni a póluskereket, (márpedig ezt kell tennünk, ha állandó feszültségű és frekvenciájú villamosenergiát akarunk előállítani), akkor le kell győzni ezt a fékező hatást és nagyobb nyomatékot kifejtve kell forgatni a tengelyt. A $P = M \cdot \omega$ összefüggés alapján nő a gépbe bevezetett teljesítmény, de ez természetes is, hiszen az energiaátalakítótól villamos teljesítményt igényeltünk.

A generátorként üzemelő gép armatúra kapcsaira, mint feszültségforrásra fogyasztót kapcsolva a zárt áramkörben váltakozó áram fog folyni. A zárt áramkörben meginduló áram nemcsak a terhelésen, hanem az őt létrehozó tekercselésen is átfolyik. Azt már tudjuk, hogy árammal átjárt tekercs mágneses teret hoz létre, sőt Lenz törvényéből azt is, hogy az indukált feszültség által létrehozott áram iránya olyan, hogy az a létrehozó változást gátolni igyekszik. Vagyis a terhelő áram olyan mágneses teret hoz létre az állórészben, amely a póluskerék forgását próbálja akadályozni, a póluskeréktől lemaradva, visszafogni. A terhelési szög ekkor pozitív: $\delta > 0$.

Természetesen a terhelést most is csak bizonyos határig növelhetjük, lesz egy maximális terhelési szög, amíg a mágneseket összehúzó erő növekszik. Ezt a szöget túllépve

lesz ugyan még a mágneseket együttforgásra készítő erő, de ez már csökkenni fog. A maximális nyomatékhoz tartozó terhelési szöget itt is *stabilitási határnak* nevezzük. A stabilitási határ hengeres forgórészű generátorok esetén: $\delta = +90^\circ$.

A motoros üzemmódra való áttérés eddigi tárgyalásának van egy szépséghibája. A külső feszültségforrás által létrehozott forgó mágneses térnek és a forgórész mágneses terének összekapcsolódásakor felmerülő problémákról nem esett szó.

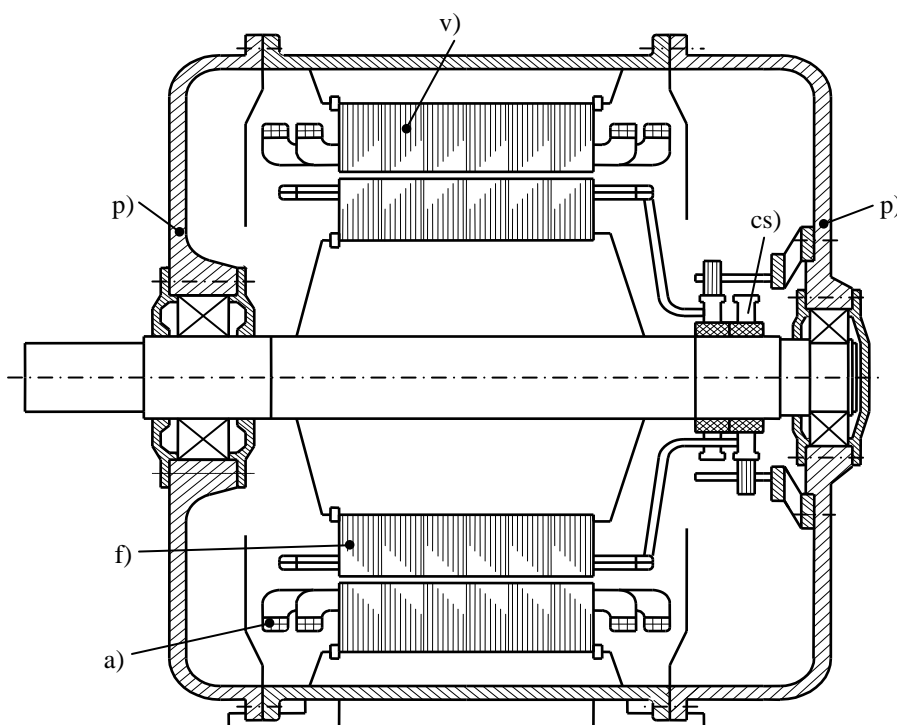
Ha a forgórész álló helyzetében kapcsoljuk az armatúrára a háromfázisú feszültséget, a forgó mágneses tér olyan rövid idő alatt létrejön, hogy a forgórész ennyi idő alatt képtelen felgyorsulni a forgómező fordulatszámára, nem tud kialakulni az előzőekben leírt motoros üzemállapot. A szinkron motornak nincs indító nyomatéka, önmagától elindulni nem tud. A forgórész tehetetlensége miatt a két mágneses tér összekapcsolása mindaddig gyorsítási nehézségeket jelent, amíg a forgórész fordulatszáma különbözik a forgómező fordulatszámától. (A két tér összekapcsolásának módját, lehetőségeit a 3.5.1. fejezetben tárgyaljuk.)

3.2. SZERKEZETI FELÉPÍTÉS

A működési elv megismerése után nézzük meg, hogy a gyakorlatban hogyan valósítják meg a szinkron gép működéséhez szükséges feltételeket.

A 3.9. ábrán egy szinkron gép vázlatos hosszmetsetét láthatjuk, amelyen megkülönböztethetjük a főbb szerkezeti egységeket:

- f) Forgórész a gerjesztő tekercseléssel, amely létrehozza az energiaátalakításhoz szükséges mágneses teret.



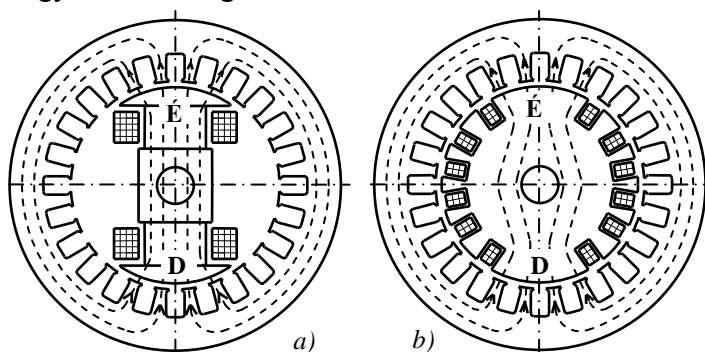
3.9. ábra Pajzscsapágyas szinkron gép hosszmetsete

- cs) Csúszógyűrűk, amelyeken keresztül biztosítjuk az elektromágnesként szolgáló forgórész áramellátását.
- a) Armatúratekercselési rendszer, amelyben a forgó mágneses tér váltakozó feszültséget indukál.
- v) Lemezelt állórész vastest, mely jó mágneses vezetésével elősegíti az armatúratekercselés mágneses térrel való kapcsolódását.
- p) Pajzsok, amelyek hordozzák a forgórész tengely csapágyazását, lehetővé téve a forgórész forgását.

Ezen rövid áttekintés után vizsgáljuk meg részletesebben az egyes egységeket.

3.2.1. Forgórész

A hagyományos szinkron gépekben a mágneses teret elektromágneses úton hozzuk létre. Nemcsak azért, mert megfelelő erősségű mágneses teret viszonylag olcsón jelenleg csak így tudunk előállítani, hanem azért is, mert a szinkron gép üzemelése során szükséges, hogy a tér erősségét változtassuk.

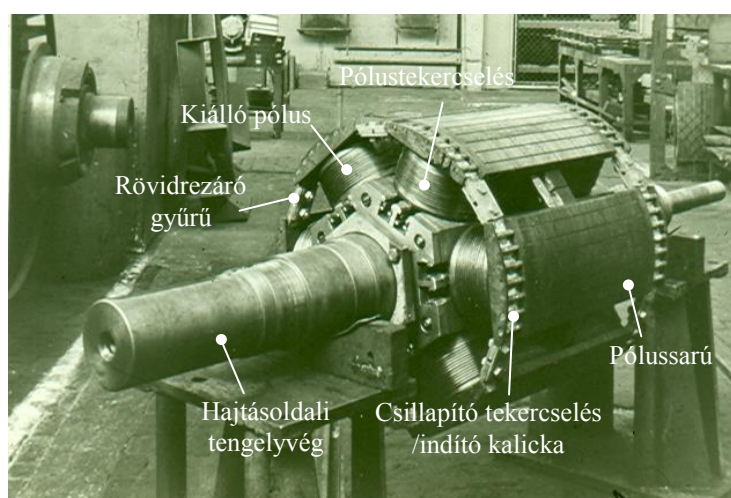


3.10. ábra Kiállópólusú és hengeres forgórészű szinkron gép

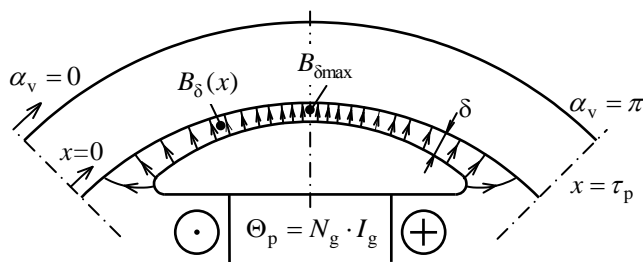
Kétféle szerkezeti megoldás is született a mágneses tér létrehozására:

a) Kiálló pólusú gépeknél acélból kiképzett pólustörzsekre helyezik fel a gerjesztő tekercseket, és pólussarukon keresztül vezetik be az erővonalakat az állórészbe (3.10a ábra). A mágneses kör felépítéséhez szükséges térerősség

(gerjesztés) igen jelentős hányadát igényli a légrés, ezért ennél a megoldásnál a szinuszos eloszlású légrésindukciót a pólussarú geometriai kialakításával biztosítják.



3.1. fénykép Kiálló pólusú szinkron gép forgórésze



3.11. ábra Erővonalak eloszlása nem állandó légrés esetén a pólussaru alatt

A 3.11. ábrán felvázoltuk az erővonalak eloszlását a változó hosszúságú légrésben. Ideális esetben az indukció a kerület mentén, egy pólusosztás alatt fél szinuszhullámot írna le:

$$B_{\delta} = B_{\delta\max} \cdot \sin \alpha_v.$$

Az \square szöget kifejezhetjük a

semleges zónától mért távolsággal is, az $\frac{x}{\alpha_v} = \frac{\tau_p}{\pi}$ arány segítségével. Ekkor a légrésindukció a pólussaru alatt a $B_{\delta}(x) = B_{\delta\max} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} \cdot x\right)$ szerint változik a távolság függvényében.

A gerjesztés a légrés hosszától függő térerősséget hoz létre a légrésben: $U_{m\delta} = H_{\delta} \cdot \delta$. Ha a gerjesztési mágneses körben eltekintünk a vasra jutó mágneses feszültségtől, akkor ezt egyenlőnek vehetjük a pólusgerjesztéssel:

$$N_g \cdot I_g = \Theta_p = U_{m\delta} + U_{mvas} \approx H_{\delta} \cdot \delta, \text{ ami alapján írható: } \delta_{\text{közép}} = \mu_0 \cdot \frac{\Theta_p}{B_{\delta\max}}.$$

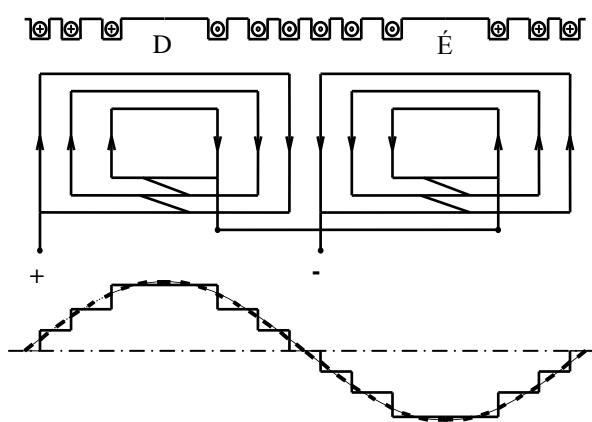
Ezek alapján a légrés adott x helyén uralkodó $H_{\delta}(x)$ térerősség, és az ott létrehozott indukció $B_{\delta}(x)$ között felírható, hogy

$$\delta(x) = \frac{\Theta_p}{H_{\delta}(x)} = \frac{\delta_{\text{közép}}}{\sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} \cdot x\right)} = \mu_0 \cdot \frac{\Theta_p}{B_{\delta\max} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} \cdot x\right)}, \quad (3.14)$$

vagyis a szinuszos légrésindukció-eloszláshoz a (3.14) összefüggés szerint kellene változnia a légrésnek egy pólusosztáson belül a pólussaru alatt. Ennek megvalósítása a gyakorlatban jelentős nehézségekbe ütközne (különösen a semleges vonalak közelében), ezért a pólussaru alakját legtöbb esetben körívvel közelítik.

b) Hengeres forgórészű gépeknél a gerjesztő tekercselést a hengeres vastestben kialakított hornyokban helyezik el (3.10b ábra). A légrés tehát állandó, a hornyok elhelyezkedése és a bennük lévő menetek száma viszont olyan, hogy a kialakuló mágneses tér eredője a kerület mentén minél jobban megközelítse a szinuszos eloszlást.

A kialakuló mágneses teret szemléletesen mutatja a síkba kiterített gerjesztési ábra (3.12. ábra). A gerjesztési ábrán meg-



3.12. ábra Hengeres forgórészű szinkron gép gerjesztési görbéje a légrésben

figyelhetjük a nem egyenletesen elosztott hornyokat, és a gerjesztési lépcsőket. Láthatjuk, hogy a mágneses tér eloszlása jelentősen eltér az ideális szinusz alaktól, a lépcsős görbe szinusz hullámokra való felbontásakor (*Fourier*-sorba fejtés) jelentős felharmonikus tartalomra számíthatunk. Ezek a térbeli felharmonikus gerjesztések (fluxusok) együtt forognak a forgórészszel, és az alapharmonikussal együtt indukálják a feszültséget az armatúratekercselésben. A gerjesztési görbébe szaggatott vonallal bejelöltük a görbe alapharmonikusát.

Hengeres forgórészű gépnél nem mindig hanyagolható el a mágneskörben a vasanyagra (főként a fogakra) jutó mágneses feszültség a légrészhez képest, ezért itt csak közelítőleg írható fel analitikai összefüggés a pólusgerjesztés és a létrehozott légrésindukció között. Amennyiben elhanyagoljuk a vasanyag felmágnesezéséhez szükséges gerjesztést, a széles fog feletti maximális légrésindukció a gerjesztési törvényből adódóan:

$$B_{\delta \max} = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot N_g \cdot I_g. \quad (3.15)$$

(N_g alatt a forgórészen pólusonként a hornyokban elosztott gerjesztő menetek számát értjük.)

A forgórész vastest felépítéséhez mágnesesen lágy, kis széntartalmú (0,1 % C) acélt használnak. Hengeres forgórészű turbógenerátorokra a tömör vastest jellemző, amelybe a gerjesztőtekercselés elhelyezésére szolgáló hornyokat forgácsolással készítik el. Kiálló pólusú gépeknél a forgórész agyat és a rászertelt pólustörzset kovácsolással és forgácsolással állítják elő. A pólussarút, amely a szinuszos légrésindukciót biztosítja, lemezekből sajtolással készítik. Találkozhatunk – főleg kisebb gépeknél – lemezekből felépített vastestekkel is, ha a sajtolts lemezcsoport gazdaságosabban állítható elő, mint a kovácsolással és forgácsolással készített tömör forgórész.

A szinkron gépek forgórészén az egyenáramú gerjesztő tekercselésen kívül legtöbb esetben található egy rövidrezárt tekercselés is. A rudakból és a rudakat rövidrezáró gyűrűkből álló tekercselés elhelyezésének több célja lehet:

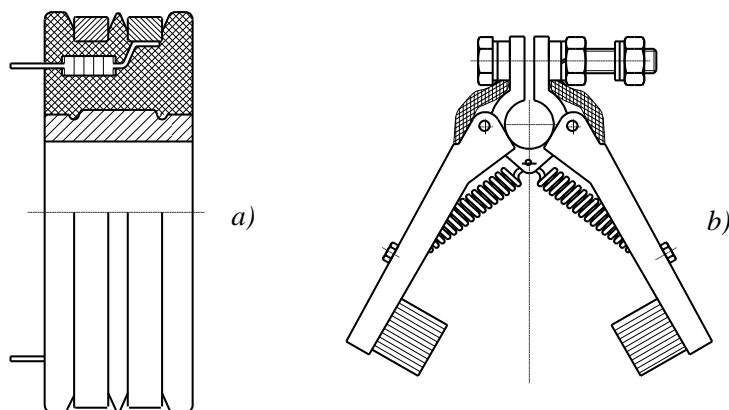
- ✚ A hirtelen terhelésváltozásból adódó lengések csillapítása. Az e célból készített tekercselést *csillapító tekercselésnek*, vagy *csillapító rudazatnak* nevezik.
- ✚ Mivel a szinkron gépek nem rendelkeznek indító nyomatékkal, a szinkron gépek egyik lehetséges indítási módja az aszinkron motorként történő felfuttatás. Az ilyen lehetőséget biztosító tekercselést *indító kalickáknak* nevezik.

A rövidrezárt tekercselést a forgórész palásthoz közeleső, egyenletesen elosztott hornyokban (kiálló pólusú gépek esetén a pólussarúban) helyezik el, az indítókalickákat viszonylag keskenyebb- és mélyebb hornyokban, mint a csillapító rudazatot.

A forgórészén szembeutó még a két csúszógyűrű, amelyeken keresztül történik a gerjesztőtekercsek egyenárammal való ellátása.

A 3.13a ábrán bemutatott csúszógyűrűk anyaga bronz (vörösöntvény). A keféken történő áram átvezetések az átmeneti ellenállásából és a kefék súrlódásából keletkező veszteségi hő melegíti a csúszógyűrűt, amit palástján sugárzással és hőátadással kell a

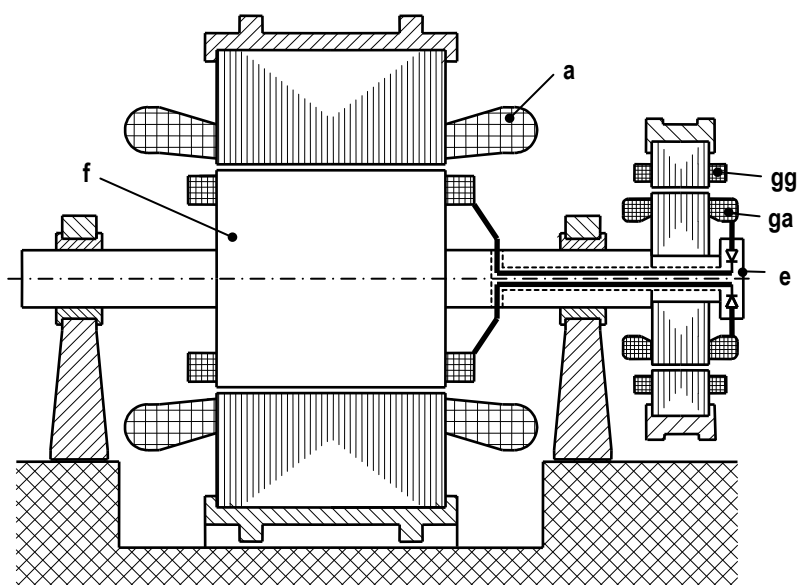
belső légtérnek átadnia. Hőelvezetés a tengely felé jelentéktelen a mechanikai rögzítést biztosító szigetelő anyag miatt.



3.13. ábra Szinkron gép csúszógyűrűje és kefetartója szénkefével

port kevernek. A 70...95 % rézpor tartalmú keféket *bronzkeféknek* nevezik. Az összekevert grafit- és rézport nagy nyomáson és hőmérsékleten táblákba sajtolják, melyekből darabolják a szabványos méretű szénkeféket.

Egy csúszógyűrűhöz több szénkefe is csatlakozhat, melyek párhuzamosan kapcsolva vezetik a forgórész áramát. A kefetartó feladata, hogy a kefék teljes érintkező felületükkel felfeküdjenek a csúszófelületre, és közel egyenlő nyomással biztosítsa az egyenletes árameloszlást a párhuzamosan kapcsolt kefék között. A kefetartónak megfelelően merevnek kell lennie, hogy a mechanikai rezgésekkel ne kerüljön rezonanciába, és a kefék kopása ellenére mindenkor biztosítsa a szükséges kefenyomást.



a szinkron gép armatúrája; **f** szinkron gép forgórésze, **ga** gerjesztőgép armatúrája, **gg** gerjesztőgép gerjesztőtekerceselése, **e** egyenirányító híd

3.14. ábra Forgódíódás szinkron gép vázlata bakcsapágyazással

Itt említjük meg, bár nem közvetlenül a forgórészen helyezkedik el a *3.13b ábrán* látható kefetartó. A kefetartón lévő szénkeféken keresztül történik a gerjesztőáram bevezetése a gerjesztőtekerceselésbe. A kereskedelmi forgalomban kapható szénkefék alapanyaga elektrogrfit, amelyhez a fajlagos ellenállás csökkentése érdekében réz-

Egyes szinkron gépeknél a gerjesztőtekerceselés egyenárammal való ellátását a szinkron gép tengelyére épített, a szinkron géppel szerves egységet képező egyenáramú generátor biztosítja. Ezt az egyenáramú gépet úgy méretezik, hogy a szinkron gép terhelés nélküli indításakor alkalmas legyen motorüzemben a forgórész szinkron fordulatszámra történő felpörgetésére, és ezáltal lehetőség legyen a szinkron gép hálózatra kapcsolására.

A karbantartás igényes és meghibásodásra érzékeny mechanikus csatlakozások (szénkefék) mellőzése érdekében készítenek olyan szinkron gépeket is, amelyeknek gerjesztőteli teljesítményét mechanikus hozzávezetés nélkül, a forgórészen állítják elő. A gerjesztőgép ebben az esetben egy „kifordított” szinkron generátor, amelynek armatúrája a gerjesztendő szinkron gép tengelyén van.

A gerjesztőgép armatúrájában indukált feszültséget az állórészen elhelyezett gerjesztéssel szabályozhatjuk. Mivel a szinkron gép gerjesztése egyenáramot igényel, a gerjesztőgép váltakozó feszültségét egyenirányítani kell. Az egyenirányító híd természetesen a forgórészen van, innen származik a forgódíódás szinkron gép elnevezés, amelynek vázlatos elrendezését a 3.14. ábrán láthatjuk. (A vázlat az ábrázolhatóság érdekében nem méretarányos.)

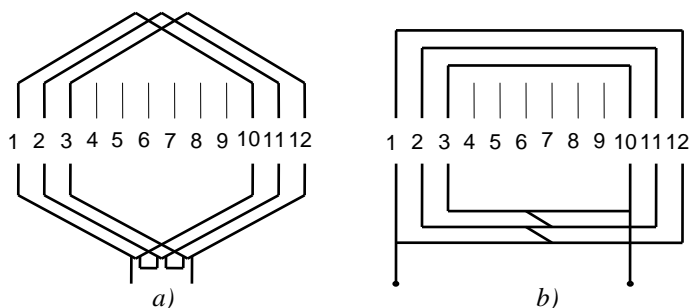
3.2.2. Állórész

Az állórészen található a tekercselési rendszer, amelyben mozgási indukció útján a villamos teljesítmény létrejön, és az állórész vastest, amely hordozza a tekercselést.

A mágneses tér könnyebb vezetése, és a veszteségek csökkentése érdekében a vastest *dinamólemez*ből készü, ezért állórész *lemeztest*nek is nevezik. A lemezek szigetelése régebben kivágás utáni lakkozással történt, ennek legnagyobb hibája az egyenlőtlen rétegvastagság volt (3...20 μm). A vegyipar fejlődésével újra előtérbe került a lemezek lakkozása, de most már műgyanta bázisú hőálló lakkal, amelyet megmunkálás előtt hordanak fel a lemez mindkét oldalára egyenletesen vékony rétegben.

Forgógépekben a mágneses térnek nemcsak a nagysága és előjele változik, hanem az iránya is, ezért az alkalmazott vasanyagnak minden irányban egyformán jól mágnesezhetőnek kell lennie. A hidegalakítás a szemcseszerkezet rendezése miatt ezt nem biztosítja, ezért a kedvező mágneses tulajdonságokat hőkezeléssel, újrakristályosítással állítják be.

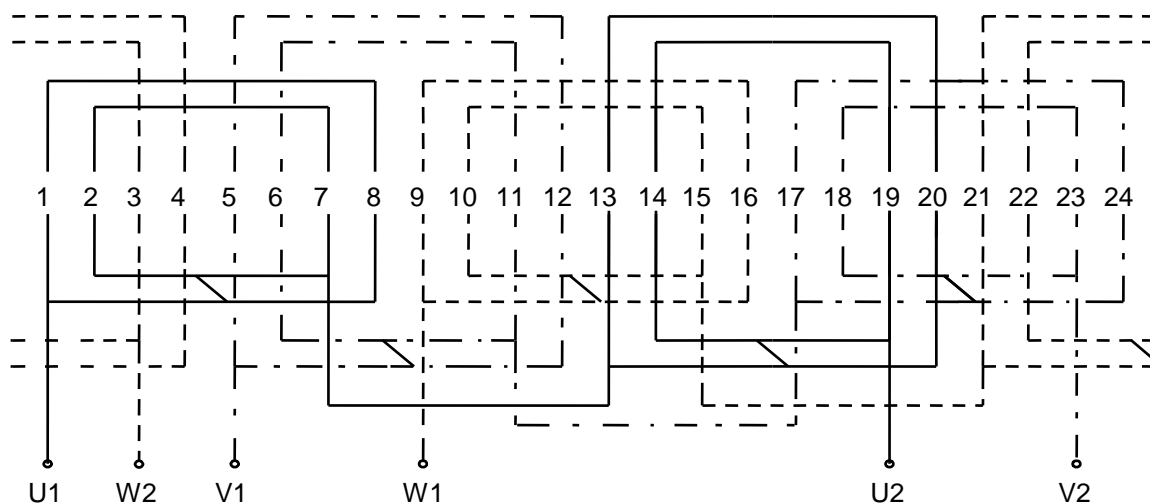
A lemeztestet felépítő lemezeket sajtológépeken, kivágó szerszámmal készítik, nagyobb gépeknél (1000 mm átmérő fölött) szegmensekből rakják össze a kör alakzatot. A rendezett lemezeket összeszorítják (10...12 bar), és különböző eljárással (pántozás, hegesztés, ragasztás) egymáshoz rögzítik őket. Nagyteljesítményű gépeknél a lemezeket közvetlenül az állórészházba rakják, itt történik rendezésük, összeszorításuk és rögzítésük is. A hűtés javítására szellőző-réseket alakítanak ki a lemezcsomagban, ilyenkor a vastestet kb. 50...70 mm vastag *pakettekből* építik fel.



3.15. ábra Azonos alakú és koncentrikus tekercskialakítások

és koncentrikus tekercselésről.

Az állórészen kialakított hornyokban található az armatúratekercselést. Az előző fejezetben már megismertedtünk az egy- és kétréteges, ill. az átmérős és lépésrövidítéses tekercseléssel. A tekercsoldalok és tekercsfejek kialakítása szempontjából beszélhetünk *azonos alakú* (egyenlő szélességű)



$$m=3; Z=24; 2p=4; q=2$$

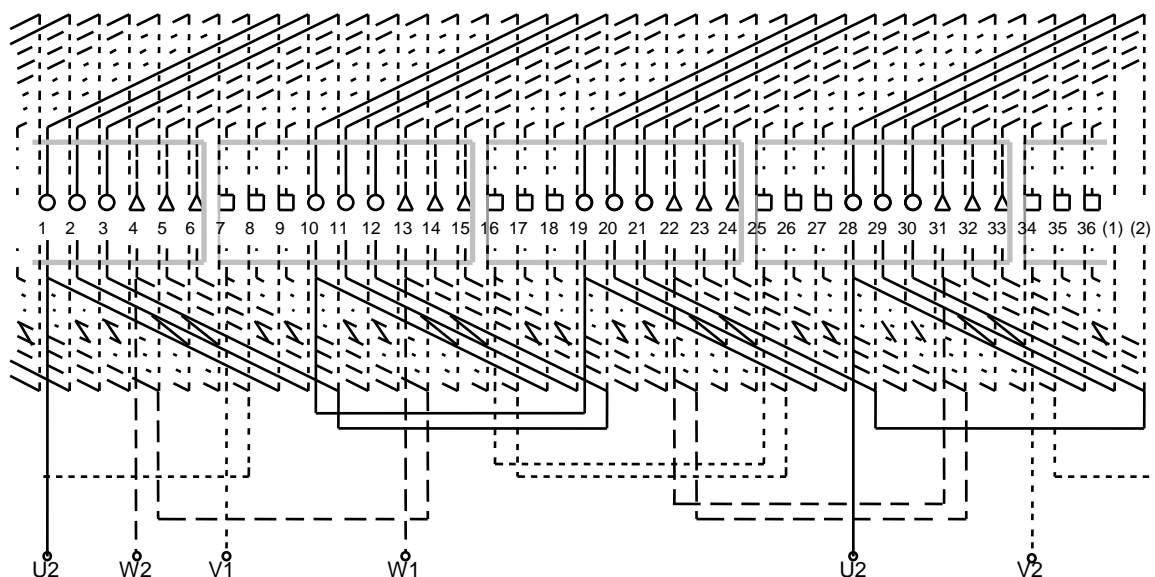
3.16. ábra Kétsíkú tekercsfej elrendezés háromfázisú tekercselésnél

A 3.2. ábrán közölt tekercselés részletét láthatjuk az 3.15a ábrán azonos-alakú, illetve a 3.15b ábrán koncentrikus tekercskialakítással. A két módzat egymással azonos értékű, az egyes tekercsoldalokban indukált, eltérő fázisszögű feszültségek a soros kötés miatt azonos módon adódnak össze, a tekercselési tényező mindkét megoldásnál azonos módon számítható. Létüket kizárólag technológiai okok indokolják.

A tekercsfejek kialakítása szempontjából megkülönböztethetünk egy-, két- és három-síkú tekercselést attól függően, hogy a tekercsoldalakat összekötő tekercs-fejek egy-, két-, vagy három síkban helyezkednek el.

Többfázisú tekercselések esetén egysíkú tekercselésről nem beszélhetünk, mert több fázishoz tartozó tekercsfejeket egy síkban elhelyezni nem tudunk. Koncentrikus kétsíkú tekercselés látható a 3.16. ábrán.

A kétsíkú tekercsfej elrendezést előszeretettel alkalmazzák, csaknem minden horony-, pólus- és fázisszám kombinációnál megvalósítható torzított tekercsfej kialakítás nélkül.



$$m=3; Z=36; 2p=4; q=3; S/\tau_p=8/9.$$

3.17. ábra Azonos alakú tekercsekből készített kétréteges tekercselés

Szimmetrikus háromsíkú tekercsfej elrendezést csak hárommal osztható pólusszámú háromfázisú tekercseléseknél hozhatunk létre.

Az említett korlátok miatt elterjedten használják az azonos alakú tekercsekből készített *koszorú* tekercselést (3.17. ábra).

A szinkron generátorok fázistekercseit a háromszöghkapcsolásban kialakuló felharmónikus köráramok miatt általában csillagkapcsolásba kötik.

3.2.3. Csapágyazás



A csapágyazás biztosítja a forgórész forgását, az állórészhez viszonyított helyzetét, a kerület mentén az állandó légrést.

A csapágyakra ható erők származnak:

- a) a forgórész súlyából.
- b) A tengelyvégen a nyomaték előfordulhat *erő erőkar* formában is, ennek az erőnek a reakció ereje jelentkezik a csapágyaknál.
- c) A forgórész gondos kiegyensúlyozásának ellenére is mindig marad valamekkora különbség a tehetetlenségi főtengely és a forgási tengely között. A forgáskor emiatt fellépő centrifugális erővel szintén a csapágyakban ébredő reakció erőnek kell egyensúlyt tartania.
- d) A légrés aszimmetriája miatt mágneses húzóerő lép fel az állórész- és a forgórész között. Mágneses húzást okozhat az állórész és forgórész horonyszámának kedvezőtlen megválasztása is.
- e) A szellőzési- és légellenállási aszimmetriából származó erők is a csapágyakat terhelik.
- f) Egyéb, a gépet kívülről érő statikus- és dinamikus erőhatások.

A csapágyakban fellépő erők felbonthatók radiális- (sugárirányú), és axiális- (tengelyirányú) erőkre. Alapvető szempont villamos gépek csapágyainak tervezésénél, hogy az axiális terheléseket csak az egyik csapágy veheti fel. A másik csapágyak a forgórész hőtágulása okozta befeszülés elkerülése érdekében axiális terhelésre érzéketlennek kell lennie.

Csapágyazás szempontjából ismerünk *pajzscsapágyas* és *bakcsapágyas* gépeket.

-  Az általánosan elterjedt pajzscsapágyas kivitelnél az állórész lemeztestet befogadó állórészházhoz peremekkel illeszkedő pajzsok csatlakoznak, amelyekben vannak a csapágyak elhelyezve (3.9. ábra). Szerelésnél a forgórészt *befűzik* az állórész furatba.
-  Bakcsapágyazást (3.14. ábra) nagyméretű, nagyteljesítményű gépeknél használnak, ahol a pajzscsapágyas kivitel összeszerelése, és az összeszerelt kivitel szállítása jelentős technikai nehézségeket okozna. Ezeknél a szállítás alkatrész-egységeként történik, és a gép összeszerelését a felhasználás helyén végzik. Az állórész két félre van bontva, önálló tekercseléssel és kivezető kapcsokkal. A csapágyház szintén osztott, így a daru először az állórész alsó felét és a csapágy-bakokat emeli a helyére. Ezek helyzetbe állítása és rögzítése után következik a forgórész *beemelése*, majd az állórész felső részének helyére illesztése.

A csapágyak közül elterjedtebbek a gördülő csapágyak, amelyek lehetnek mélyhornyú golyóscsapágyak (az axiális terhelést is felveszik), és görgős csapágyak. Csúszócsapágyakat nagyteljesítményű (MVA nagyságrendű, bakcsapágyas), és viszonylag kisfordulatszámú (hidrogenerátor) gépeknél alkalmaznak.

3.2.4. Hűtés

A gép működése során keletkezett veszteségek hővé alakulnak. A hő természetes úton történő eltávozása a gépből nem elégséges, mert a kialakuló hőlépcső nagysága meghaladná az alkalmazott szigetelőanyagok hőállóságát, nagyobb teljesítményű gépek építése lehetetlen volna. Létkérdés tehát a keletkezett hő mesterséges elszállítása, a hűtés.

Szinkron gépeknél teljesítmény nagyságtól függően gáznemű és folyékony hűtőközeget alkalmaznak.

Gáznemű hűtőközegként elsősorban levegőt használnak, amelyet a környező légtérből beszívva a gépbe és onnan kifűjva a felmelegedett levegőt, szállítják el a keletkezett hőt. A környezeti levegő estleges szennyezettsége, vagy hőmérséklete, valamint a kifűjt meleg levegő indokoltá tette nagyobb gépeknél külső légtér igénybevételét. A légszennyezési nehézségek kiküszöbölésére fejlesztették ki a kéthűtőkörös rendszert. A gép belső légterében felmelegedett levegőt egy hőcserélőbe vezetik, ahol egy másik hűtőközegnek (pl. víz) átadja a veszteségi meleget, és lehűlve visszaáramlik a gépbe.

A teljesítmény növekedésével azonban szükségessé vált a levegőnél intenzívebb hűtőközeg alkalmazása. Ilyen gáznemű anyag a hidrogén. Fajhője 14-szer nagyobb a levegőnél, hővezető képessége 7-szer jobb. A hőátadáskor keletkező hőlépcső $2/3$ -a a levegőének. A hőtani előnyök mellett még egy probléma megoldása is indokolta alkalmazását. A forgórész átmérő növekedésével egyre nagyobb mértékű lett a légsúrlódás. Mivel a hidrogén sűrűsége $1/14$ -e a levegőének, a légsúrlódási veszteségek is ilyen arányban csökkenthetők.

A teljesítmény és gépnagyság növekedése a konstruktőrökben felvetette forgógépeknél is a folyadékűtés gondolatát. (Transzformátoroknál ez időben már alkalmazták az olajhűtést.) A világon elsőként Kandó alkalmazott sikerrel folyadékűtést forgógépénél. A fázisváltóban az állórészt olajjal, a forgórész vezetőket vízzel hűtötte.

A gázzal szemben a folyadéknak az az előnye, hogy jelentősen nagyobb a hőátvevő, valamint a hőszállító képessége, és a keringtetéséhez is kisebb energia szükséges. Bevezetése azonban seregnyi konstrukciós probléma megoldását követelte a mérnököktől. Kezdetben olajat áramoltattak az állórész üreges vezetőiben, később áttértek a sokkal hatékonyabb desztillált vízre. (Köztudott, hogy a legnagyobb fajhőjű anyag a víz.)

Természetesen gépnagyságtól függően, alkalmazzák az ismertetett hűtési rendszerek kombinációit is, pl. az állórészvezetőket vízzel, a forgórészt hidrogénnel hűtik.

3.3. ÁLLANDÓSULT ÜZEMÁLLAPOTOK

A szinkron gépek működésének megértéséhez, az egyes változó tényezők hatásának vizsgálatához jelentős segítséget nyújt a vektorábrák használata. A vektorábrák szinuszosan változó mennyiségek összehasonlítására, időbeni fáziseltolódásuk érzékeltetésére alkalmasak. A vektorok hossza az amplitúdóval, vagy az effektív értékkel arányos, a komplex

számsíkon egymáshoz viszonyított szöghelyzetük pedig az időbeni fáziseltérésüket fejezi ki az $\alpha = \omega \cdot t$ összefüggés szerint.

A vektorábrák felrajzolásához egy jól kezelhető kapcsolási vázlatra van szükség, amelynek elemei helyettesítik a gép működését befolyásoló fizikai mennyiségeket. Ezen az ún. *helyettesítő kapcsolási vázlaton* a eligazodás érdekében gyakorta pozitív irányokat veszünk fel.

3.3.1. Helyettesítő vázlat

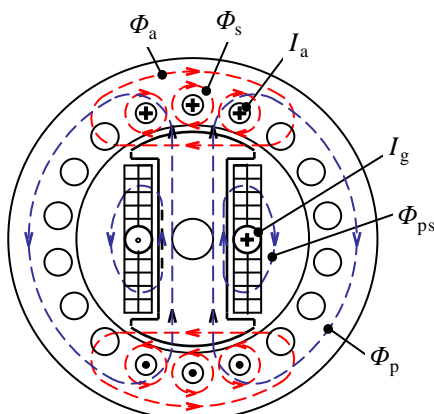
A működési elv tárgyalásakor láttuk, hogy a szinkron gép mágneses terét két gerjesztés vektorösszege hozza létre, nevezetesen a forgórészen elhelyezkedő pólustekercselés, és az állórészen elhelyezett, terhelőárammal átjárt armatúratekercselés:

$$\bar{\Theta} = \bar{\Theta}_p + \bar{\Theta}_a. \quad (3.16)$$

A gépben forgó fluxust – amely az armatúrában a feszültséget indukálja – ez az eredő gerjesztés hozza létre. Az eredő gerjesztés által létrehozott fluxust a nagy légrés miatt képzeletben felbonthatjuk két fluxus eredőjeként: a pólusgerjesztés által létrehozott *pólusfluxusra*, és az armatúragerjesztés által létrehozott *armatúrafluxusra*. Azonban a két

gerjesztés által létrehozott mágneses tér nem minden erővonala vesz részt az eredő tér kialakításában, lesznek olyan erővonalak, amelyek csak a létrehozó gerjesztőtekercselés egyes meneteivel kapcsolódnak. Ezeket *szórt fluxusoknak* nevezzük.

A különböző üzemállapotok könnyebb vizsgálata és leírása érdekében a 3.18. ábrán telítetlen gépet feltételezve vázlatosan bemutatjuk, hogy milyen fluxusokról beszélhetünk egy terhelt szinkron gépben.



3.18. ábra Terhelt szinkron gépben kialakuló fluxusok

$\bar{\Phi}_p$ pólusfluxus, a pólusgerjesztés által létrehozott

fluxus azon része, amely az armatúratekercseléssel is kapcsolódik, részt vesz az eredő mező kialakításában.

$\bar{\Phi}_{ps}$ a pólusgerjesztés által létrehozott fluxus azon része, amely csak a gerjesztőtekercs egyes meneteivel kapcsolódik, együtt forog a forgórészszel, de nem érve el az állórész vezetőket azokban feszültséget nem indukál. Röviden pólusszórásnak nevezzük.

$\bar{\Phi}_a$ armatúrafluxus, az armatúragerjesztés által létrehozott fluxus azon része, mely kapcsolódik magával a tekercseléssel, és a pólusfluxussal ($\bar{\Phi}_p$) együtt létrehozza az eredő forgómezőt.

$\bar{\Phi}_s$ az armatúragerjesztés által létrehozott fluxus azon része, mely csak egyes armatúra vezetőkkel kapcsolódik, nem vesz részt az eredő mező kialakításában. Nagysága és fázishelyzete a terhelőáramtól függ, röviden szórt fluxusnak hívjuk.

Telítetlen gépet feltételezve és az eredő fluxust szétválasztva összetevőire, az armatúrában indukált feszültséget is felfoghatjuk a részfluxusok indukálta feszültségek eredőjeként.

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_p + \bar{\Phi}_a \quad \text{alapján:} \quad \bar{U}_i = \bar{U}_p + \bar{U}_a.$$

\bar{U}_p pólusfeszültség, a pólusgerjesztéstől függ:

$$\bar{U}_p = N \cdot \xi \cdot \frac{d\Phi_p}{dt}. \quad (3.17)$$

A pólusfeszültség nagysága lemérhető, ha az armatúrában nem folyik áram, vagyis üresjárásban. A gerjesztési mágneses kör vasanyagának telítődése miatt analitikai összefüggés nem írható fel a gerjesztőáram és a pólusfeszültség között, az összefüggést az üresjárási jelleggörbéből olvashatjuk ki.

\bar{U}_a armatúrafeszültség, az armatúraáramtól függ, és a

$$\bar{U}_a = j \cdot \omega_0 \cdot L_a \cdot \bar{I}_a = j \cdot X_a \cdot \bar{I}_a, \quad \text{ahol } \omega_0 = 2\pi \cdot f, \quad (3.18)$$

a (3.18) összefüggésből származtatható, és a szinkron gép normális üzemében közvetlen módon nem mérhető feszültség. Nagyságát az armatúrareaktancia (X_a) és a terhelőáram (\bar{I}_a) ismeretében számítással határozhatjuk meg. Az armatúra reaktancia, pontosabban az armatúra induktivitás (L_a) az armatúra mágneses körének mágneses vezetőképességétől függ. Ezt viszont két tényező is befolyásolja:

- az armatúra mágneses körének permeabilitása, amely a vastelítődés miatt változik;
- a főként kiálló pólusú gépre jellemző mágneses aszimmetria miatt a mágneses vezetőképesség a gép belsejében irányfüggő, a pólusok irányában (d irány) kisebb a légrés, mint arra merőlegesen (q irány).

A felírtakból kitűnik, hogy a pólusfeszültség és az armatúrafeszültség mozgási indukció útján jön létre. \bar{U}_p az őt létrehozó $\bar{\Phi}_p$ fluxust, \bar{U}_a pedig az őt létrehozó \bar{I}_a armatúraáramot előzi meg 90° -kal.

A kapcsolokon mérhető feszültség azonban eltér az eredő mező által a tekercsben indukált \bar{U}_i feszültségtől. Az eltérést az armatúraáram okozza. Az előzőekben láthattuk, hogy a terhelőáram létrehozza a $\bar{\Phi}_s$ fluxust is, amely a váltakozó fluxus lévén (hiszen \bar{I}_a váltakozó áram) feszültséget indukál az armatúra egyes vezetőiben. Hasonlóan az \bar{U}_a feszültséghez, a szórási fluxusok által indukált feszültséget is felfoghatjuk önindukciós feszültségként, és

$$\bar{U}_s = j \cdot \omega_0 \cdot L_s \cdot \bar{I}_a = j \cdot X_s \cdot \bar{I}_a \quad (3.19)$$

alakban írhatjuk fel. \bar{U}_s feszültség (hasonlóan \bar{U}_a -hoz) 90° -kal siet az őt létrehozó \bar{I}_a -hoz képest. ($\bar{\Phi}_s$ fázisban van az őt gerjesztő árammal.)

Az armatúraáram a tekercselés ohmos ellenállásán átfolyva létrehoz egy ohmos jellegű feszültségesést is, amelynek nagysága:

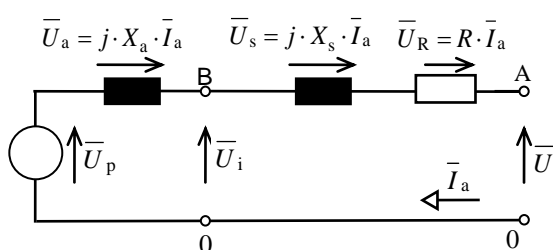
$$\bar{U}_R = R \cdot \bar{I}_a. \quad (3.20)$$

Az elmondottakat összegezve megállapíthatjuk, hogy a kapcsokon megjelenő feszültségvektor az

$$\bar{U} = \bar{U}_p + \bar{U}_a + \bar{U}_s + \bar{U}_R \quad (3.21)$$

feszültségvektorok eredőjeként fogható fel.

E gondolatmenetet folytatva felrajzolhatjuk a szinkron gépek helyettesítő kapcsolási vázlatát, amely nagymértékben segíti a különböző állandósult üzemállapotok leírását vektorábrákkal. A szinkron gép helyettesítő vázlatát, a benne szereplő vektorokat és azok pozitív irányainak felvételét a 3.19. ábrán láthatjuk.



3.19. ábra Szinkron gép helyettesítő vázlata a felvett pozitív áram és feszültség irányokkal

Mielőtt folytatnánk az egyes üzemállapotok további vizsgálatát a helyettesítő vázlat és a vektorábrák segítségével, nézzük meg egyszerűsíthetjük-e a helyettesítő vázlatot oly módon, hogy a jelenségek leírását minőségileg ne befolyásoljuk, viszont a kezelhetőséget egyszerűbbé tegyük.

Mivel az R ellenállás a szinkrongép $Z_n = U_n / I_n$ névleges impedanciájának 1...4

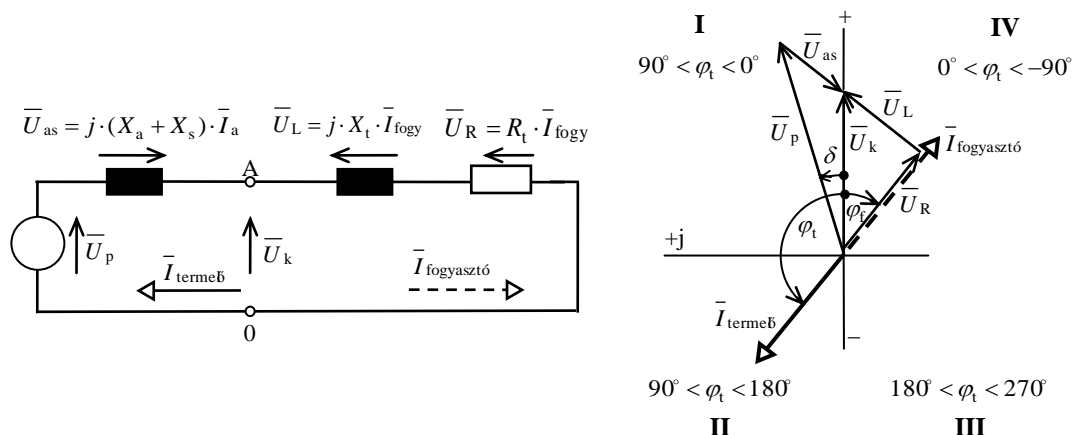
%-a, első egyszerűsítésként kínálkozik a tekercsellenállás elhanyagolása. A második egyszerűsítés az X_a és X_s reaktanciák összevonása egy közös X reaktanciába. A megengedhetőséget alátámasztja, hogy X_a és X_s hasonlóan befolyásolják a gép feszültségviszonyait. Az összevont $X = X_a + X_s$ reaktanciát *szinkron reaktanciának* nevezzük, és nagyságát mérésrel viszonylag egyszerűen meghatározhatjuk (lásd később: 3.4.3. pontot) Az egyszerűsítés miatt az U_i indukált feszültség ebben a helyettesítő vázlatban nem értelmezhető. Ilyen egyszerűsített helyettesítő vázlatot láthatunk a 3.20. ábrán.

3.3.2. Vektorábrák

Az elektrotechnikában (vagy villamosságban) definiáltuk, hogy a passzív elemen létrejövő feszültségesést a rajta átfolyó áram és az ellenállás szorzataként írhatjuk fel. (legyen az R , jX_L , vagy $-jX_C$.) Azt is tudjuk, hogy egy zárt körben a feszültségek előjelhelyes (vektoros) összege zérus. Ehhez azonban a feszültségforrások esetén az áram és feszültségirányoknak ellentétesnek kellett lenniük: termelői teljesítmény: $P < 0$, fogyasztói teljesítmény: $P > 0$.

Esetünkben, mivel nem tudjuk (nem akarjuk) eleve eldönteni, hogy motoros-, vagy generátoros (fogyasztói, vagy termelői) üzemállapotban fog üzemelni gépünk, a felvett pozitív irány a 3.19. ábrán logikus, megjegyezve azt a megállapodást, hogy valamely

fogyasztót ellátó áramforrás árama a fogyasztó áramával pontosan ellentétes, vektoriálisan 180° -ra helyezkedik el.



3.20. ábra Termelői és fogyasztói áramirányok összerendelése vektoros ábrázoláshoz

Szemléletessé téve az elmondottakat a 3.20. ábrán a szinkron gépet generátornak képzelve berajzoltunk az egyszerűsített helyettesítő vázlatba egy általa táplált $\bar{Z}_t = R_t + jX_t$ terhelő impedanciát is, és a rajta átfolyó árammal és feszültségeséssel egyetemben felrajzoltuk az impedancián átfolyó áram és a váltakozó feszültségforrás vektorábráját a komplex számsíkon. Az ábrából látható, hogy a hatásos teljesítményt meghatározó $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ szorzat az I. és IV. síknegyedben pozitív, a II. és III. síknegyedben negatív. Következésképpen a fogyasztói áram az I., vagy a IV. síknegyedben, az őt ellátó feszültségforrás árama a II., vagy a III. síknegyedben ábrázolható.

A villamos gépek működéséhez, az energiaátalakításhoz a villamos gépekben mágneses térre van szükség. A váltakozó áramú villamos gépek álló tekercs-rendszerükhöz képest váltakozó mágneses teret igényelnek, amelyek felépítéséhez többségükben ugyanazt a feszültségforrást használják, melyből az átalakítandó villamosenergiát nyerik. Tudjuk, hogy egy váltakozó mágneses teret létrehozó tekercsen az átfolyó áram (a keletkező veszteségekkel nem számolva) 90° -ot késik a tekercs kivezetésére kapcsolt feszültséghez képest. Az áram és feszültség pillanatértékeinek szorzatából számított teljesítmény ekkor negyedperiódusonként előjelet vált, a teljesítmény kétszeres frekvenciával leng a hálózat és a fogyasztó között. Az ilyen teljesítményáramlást meddőteljesítménynek nevezzük, és kiszámítására a $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ képletet használjuk.

Mivel a fogyasztók a hatásos villamos energia fogyasztása mellett energiaátalakítóik működtetéséhez váltakozó mágneses teret is létrehoznak, a fogyasztók árama (kivételes esetektől eltekintve,) a IV. síknegyedben van. Ezen fogyasztókat ellátó generátorok áramának természetesen a II. síknegyedben kell lenniük.

Jogos tehát a mindennapi szóhasználatban a fogyasztói jelző annak a meddőteljesítménynek a jellemzésére, amelynél az áram késik a feszültséghez képest. Ezzel ellenkező esetben, vagyis ha az áram siet a feszültséghez képest, akkor meddőteljesítményt termelünk.

Összefoglalva az eddig leírtakat a következő megállapításokat tehetjük az áramvektorok helyzetével és a teljesítményekkel kapcsolatban:

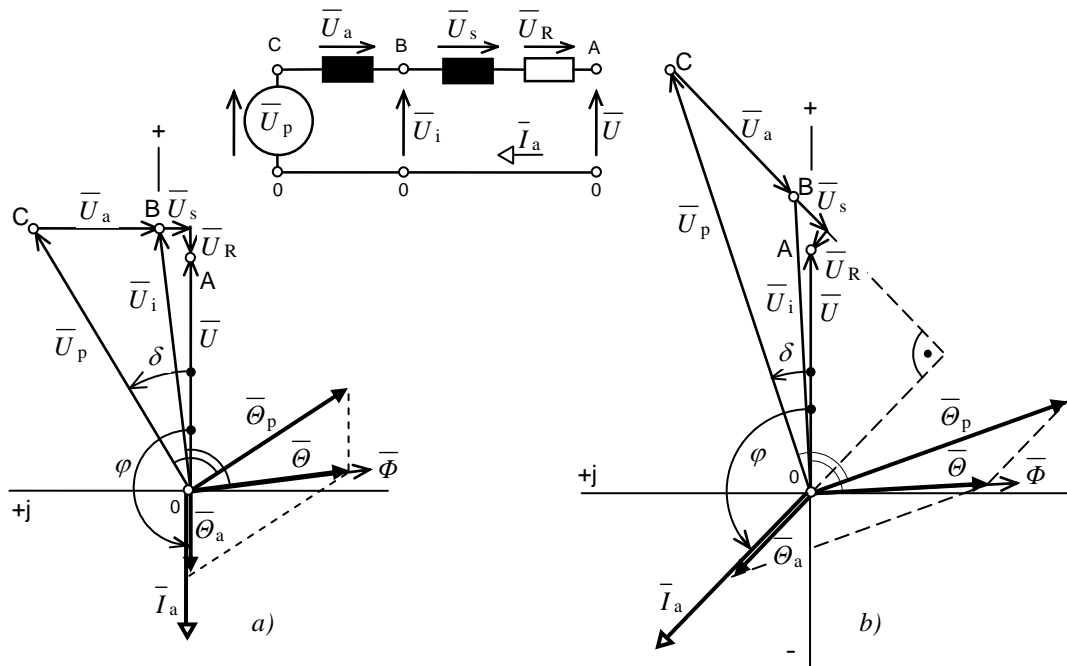
I. síknegyedben	hatásos fogyasztás	($P > 0$)	meddő leadás	($Q > 0$)
II. síknegyedben	hatásos termelés	($P < 0$)	meddő leadás	($Q > 0$)
III. síknegyedben	hatásos termelés	($P < 0$)	meddő felvétel	($Q < 0$)
IV. síknegyedben	hatásos fogyasztás	($P > 0$)	meddő felvétel	($Q < 0$)

Ezek után különböző üzemállapotokban vizsgáljuk meg a szinkron gép feszültség-, áram- és gerjesztési viszonyait a helyettesítő vázlat alapján felrajzolt vektorábrák segítségével. A vektorábrák felrajzolásánál állandó kapcsolófeszültséget és a póluskerék helyzetétől független armatúravisszahatást tételezünk fel (izotróp gép).

Az állandó kapcsolófeszültséget és frekvenciát az a hálózat biztosítja, melyre a gépet kapcsoltuk, amely a géphez viszonyítva olyan nagy, hogy tetszőleges mennyiségű hatásos, vagy meddő teljesítményt tud felvenni, vagy leadni. Az ilyen hálózatot *végteles hálózatnak* is szokták nevezni.

A 3.19. ábrán közölt helyettesítő vázlat alapján szerkesztett vektorábrákat mutatunk be a 3.21. ábrán. Az ábrákat a szemléletesség kedvéért kissé torzítottuk, ugyanis a helyettesítő vázlat egyes elemeinek egymáshoz viszonyított nagyságrendi aránya nagy generátorok esetén: $R : X_s : X_a = 1 : 10 : 100$. A szerkesztés megkönnyítése érdekében az ábrába berajzoltuk a helyettesítő vázlatot is, mivel az ott szereplő vektoroknak irányhelyesen kell szerepelniük a vektorábrában is.

A 3.21a ábrán egyszerűség kedvéért, a szinkron gép lásson el energiával egy tisztán ohmos jellegű fogyasztót. Ekkor a generátor kapcsolófeszültségével pontosan ellenfázisban lesz az árama, hiszen a fogyasztó a kapcsolófeszültséggel fázisban lévő áramot igényel.



3.21. ábra Hengeres forgórészű szinkron gép vektorábrája generátoros üzemben
a) ohmos; b) ohmos + induktív fogyasztó esetén

A szerkesztés következő lépéseként R ; X_s ; X_a ismeretében irányhelyesen megrajzolhatjuk az \overline{U}_R ; \overline{U}_s ; \overline{U}_a feszültségvektorokat.

- ✚ \overline{U}_R fázisban van az armatúraárammal ($\overline{U}_R = R \cdot \overline{I}_a$), és a nyíl hegye \overline{U} vektor hegyébe mutat.
- ✚ \overline{U}_s induktív feszültségesés 90° -kal előzi az őt létrehozó áramot ($\overline{U}_s = \overline{I}_a \cdot jX_s$), és a nyíl hegye \overline{U}_R talppontjába mutat.
- ✚ \overline{U}_a ugyanolyan helyzetű, mint \overline{U}_s ($\overline{U}_a = jX \cdot \overline{I}_a$), és a nyíl hegye \overline{U}_s talppontjába mutat.
- ✚ Az origónak megfelelő O pontból mutat \overline{U} az A pontba, \overline{U}_i a B pontba, valamint \overline{U}_p a C pontba.

Az eredő fluxus 90° -ot késik az általa indukált \overline{U}_i feszültséghez képest. Ebbe az irányba fog mutatni az armatúra- és pólusgerjesztés által létrehozott eredő gerjesztés is.

A 3.21b ábrán felrajzoltunk egy olyan generátoros üzemiállapotot, melynél a fogyasztó az előbb igényelt hatásos teljesítmény mellett a működtetéshez még ugyanakkora meddő teljesítményt is igényel (pl. egy aszinkron motoros fogyasztó, $\cos\varphi=0,7$ teljesítménytényezővel). Most a generátor árama a II. síknegyedben fog elhelyezkedni, a fogyasztó által igényelt meddő teljesítményt is le kell adnia. Az áramnak a valós tengely irányába eső vetülete nem változott (a hatásos teljesítmény változatlan), de ezt a $\cos\varphi=0,7$ teljesítménytényező miatt csak 1,4-szeres árammal tudja a gép szolgáltatni.

Nézzük meg, hogy a megnövekedett áram okozta kétszeres veszteségek mellett ($P_{\text{tek}} = I^2 \cdot R$), milyen egyéb következményekkel jár egy induktív fogyasztó teljesítménnyel történő ellátása.

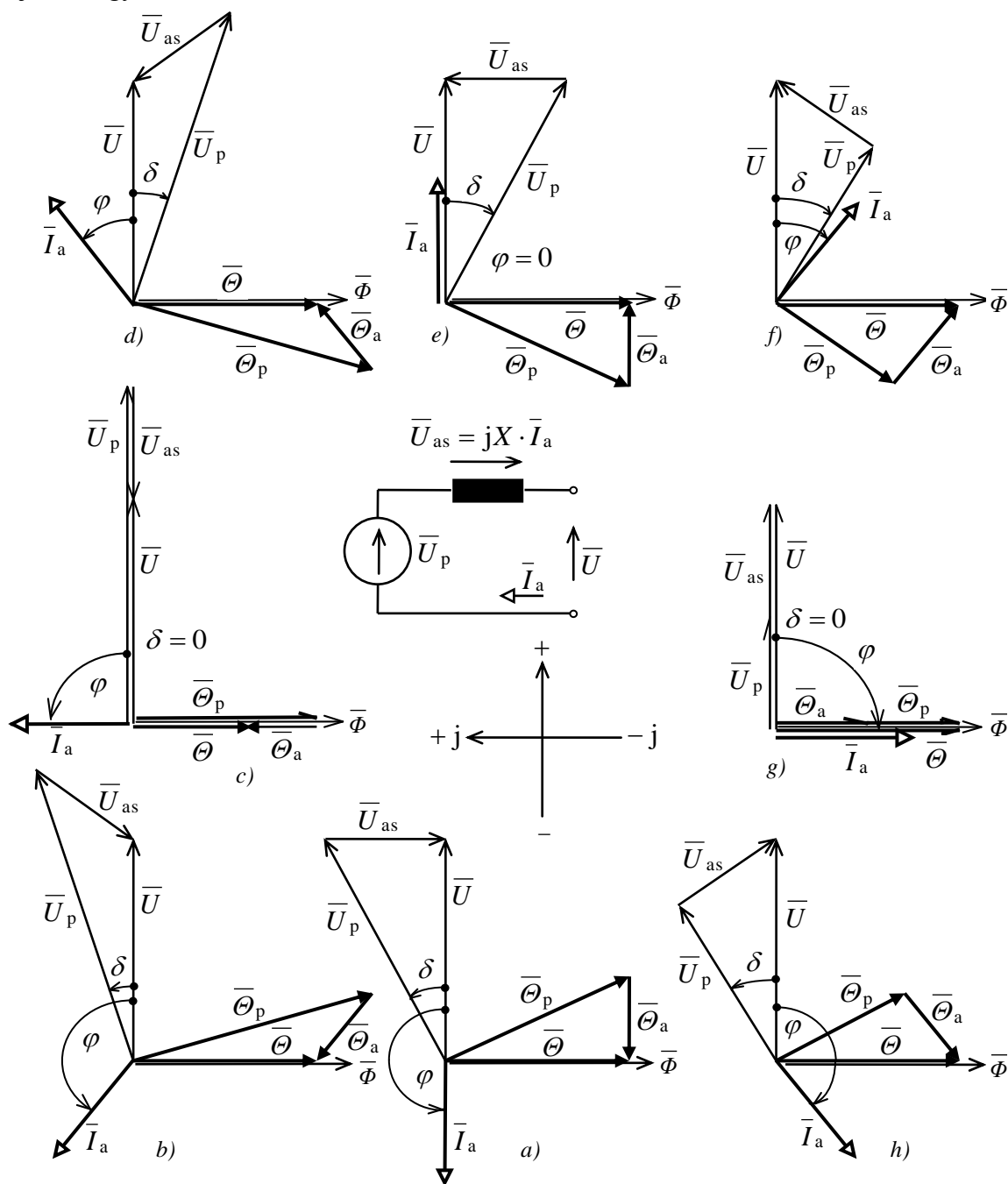
Az \overline{U}_R ; \overline{U}_s ; \overline{U}_a feszültségvektorok felrajzolása során a feszültségesések nagysága, de főként az irányuk arra enged következtetni, hogy az adott kapocsfeszültséget a feszültségesések miatt csak jóval nagyobb pólusfeszültséggel tudjuk biztosítani. Az indukált feszültség változása nem számottevő, az eredő fluxus és az eredő gerjesztés változása is csekély. Azonban az armatúragerjesztésnek jelentősen megnövekedett az eredő gerjesztéssel szembemutató komponense, ezért növelni kell a szinkron generátor pólusgerjesztését, hogy az eredő gerjesztést (és a fluxust) biztosítani tudjuk a gépben. A szinkron gépet túlgerjesztett üzemiállapotban kell működtetni.

A fogyasztónál a fogyasztásmérő által regisztrált, az erőműben előállított energiát a túlgerjesztett üzemiállapot miatt csak többlet veszteséggel tudják előállítani és szállítani. Érthető tehát, hogy megegyezés szerint a szolgáltatók a kis- (háztartási-) fogyasztók esetében nem, ezzel szemben az ipari nagyfogyasztók esetén ezzel kapcsolatos, „ $\cos\varphi$ felár címen” pótdíjat számolnak fel.

A különböző üzemiállapotok vizsgálatát folytassuk a 3.22. ábrán látható egyszerűsített helyettesítő vázlat alapján. Az ábrában összefoglaltuk a szinkron gép lehetséges üzemiállapotait állandó kapocsfeszültség és állandó abszolút értékű armatúraáram esetén. Megfigyelhetjük, hogy az állandó U kapocsfeszültség állandó nagyságú és irányú eredő Φ fluxust

igényel, amelyet a változó irányú armatúravisszahatás miatt hol több, hol kevesebb pólusgerjesztéssel hozhatunk létre.

Ezek után vegyük sorra az egyes üzemállapotokat, és elemezzük, hogy mivel jellemezhetjük az egyes eseteket!



3.22. ábra Vektorábrák különböző üzemállapotokban az egyszerűsített helyettesítő vázlat alapján

3.22a ábra: Generátoros üzemállapot, tiszta ohmos fogyasztót táplál a szinkron gép. Ideális körülmények között, a legkevesebb veszteséggel alakítja a mechanikai energiát villamos energiává. Az armatúrerjesztés merőleges az eredő gerjesztésre, a

pólusgerjesztés nagyobb ugyan az eredő gerjesztésnél, de ezt az üzemet még nem nevezzük túlgerjesztett üzemállapotnak. A szinkron gép az energiaátalakításhoz szükséges mágneses teret saját gerjesztésével állítja elő.

- 3.22b *ábra*: Generátoros üzemállapot, olyan fogyasztót látunk el villamos energiával, mely az energiaátalakításhoz szükséges meddőteljesítményt is a hálózattól igényli (pl. aszinkron motoros fogyasztó). Az eredő gerjesztéssel szembemutató armatúragerjesztés ($\bar{\Theta}_a$) összetevő miatt a gerjesztést jelentősen növelni kell, \bar{U}_{as} -nek van \bar{U} -val szembemutató összetevője. Az üzemet túlgerjesztett üzemállapotnak hívjuk.
- 3.22c *ábra*: A szinkron gép számottevő hatásos teljesítményt nem fogyaszt és nem termel. Az armatúraáram merőleges a kapocsfeszültségre, a hálózatra kapcsolt gép úgy viselkedik, mint egy kondenzátor, amelynek „kapacitását” (az armatúraáram nagyságát) a gép gerjesztésével változtathatjuk. Az ilyen állapotban üzemelő szinkron gépet *szinkron kompenzátornak* nevezzük. Ilyen gépeket használhatnak ipartelepeken az aszinkron motoros fogyasztók meddőigényének fedezésére, az eredő teljesítménytényező $\cos\varphi=1$ -re történő beállítására.
- 3.22d *ábra*. Motoros üzemállapot, a szinkron gép villamos energiát alakít mechanikai energiává. Az energiaátalakításhoz szükséges meddőteljesítményen kívül többletgerjesztéssel siettetni az áramot a feszültséghez képest, részt vehet az ipartelep meddőgazdálkodásában, helyettesítve egy szinkron kompenzátort. A gyakorlatban előforduló, túlgerjesztett üzemállapot. Az armatúragerjesztésnek ($\bar{\Theta}_a$ -nak) a főfluxussal ($\bar{\Phi}$ -vel) szembemutató komponense van.
- 3.22e *ábra*. Motoros üzemállapot, a teljesítménytényező $\cos\varphi=1$ -re szabályozva. A teljesítmény átalakítás minimális armatúraárammal, minimális armatúraköri veszteséggel történik.
- 3.22f *ábra*. Alulgerjesztett motoros üzemállapot, $\bar{\Theta}_a$ -nak $\bar{\Theta}$ irányába mutató komponense is van. Az energiaátalakításhoz szükséges mágneses tér felépítésében a hálózattól felvett meddőteljesítmény is részt vesz. Ipari gyakorlatban ritka, de nem kizárt üzemállapot.
- 3.22g *ábra*. Szinkron kompenzátor alulgerjesztett üzemállapotban. Ha meddőgazdálkodásnál kondenzátor telepeket is használnak, túlkompenzálás esetén a kondenzátor lekapcsolása helyett időszakosan járathatják alulgerjesztett állapotban a kompenzátort. Ipari előfordulása a felsoroltak közül a legritkább.
- 3.22h *ábra*. Alulgerjesztett generátoros üzemállapot. Ilyen lenne a generátor árama, ha ellenállásból és kondenzátorból álló fogyasztókat táplálna. Ritkán előforduló üzemállapot (kábelvizsgáló gép az óramutató járásával ellentétes irányban).

A vektorábrákba berajzoltuk a kapocsfeszültség és armatúraáram közötti φ fázisszöget a bevezetőben leírt, az óra járásával ellentétes iránynak megfelelően. Bejelöltük a kapocsfeszültség (\bar{U}) és a pólusfeszültség (\bar{U}_p) közötti δ terhelési szöget is. Hasonlóan a fázisszöghöz, a terhelési szöget is előjellel értelmezzük. Motoros üzemben – a d), e) és f) ábrán – a δ terhelési szög negatív-; generátoros üzemben az – a), b) és h) ábrán – pedig pozitív előjelű.

3.3.3. A szinkron gép nyomatéka

Eddigi tárgyalásunk során nem hangsúlyoztuk, most azonban meg kell említenünk: a terhelő áram mágneses terének hatása nem mindig független a póluskerék armatúragerjesztéshez viszonyított helyzetétől. Ha a gép belsejében a mágneses vezetőképesség változik a forgórész helyzetétől függően, adott gerjesztés a jobb vezetőképesség irányában nyilvánvalóan erősebb mágneses teret hoz létre. Hengeres forgórészű gépeknél a mágneses vezetőképesség változása nem számottevő, kiálló pólusú gépeknél viszont a pólusok irányában jobb a mágneses vezetés, mint arra merőlegesen.

Ezek szerint, vektorábráink hengeres pólusú gépekre voltak érvényesek. Kiálló pólusú gépeknél az \bar{U}_a armatúrafeszültség már nemcsak az \bar{I}_a armatúraáramtól fog függeni, hanem az $X_a = \omega \cdot L_a$ változása miatt, a póluskerék adott üzemállapotra jellemző viszonylagos helyzetétől is. A továbbiakban ezért először a hengeres forgórészű gépek árammunkadiagramjáról és nyomatékáról tárgyalunk a már megismert helyettesítő vázlat alapján, majd rátérünk a kiálló pólus okozta eltérések ismertetésére.

3.3.3.1. Hengeres forgórészű gépek.

A szinkron gépek árammunka-diagramján az armatúra áramvektor végpontjainak helyét értjük a komplex számsíkon. Mivel az armatúraáram nagyságát és feszültséghez viszonyított helyzetét számos jellemző befolyásolja, ezért valamely jellemző hatásának vizsgálatakor a többi állandó értéken kell tartani. Legyenek ezek jelen esetben a fordulatszám (frekvencia), a kapocsfeszültség és a pólusfeszültség (gerjesztés).

Az egyszerűsített helyettesítő vázlat alapján felírható huroktörvény:

$$\bar{U}_p + \bar{I}_a \cdot jX - \bar{U} = 0. \quad (3.22)$$

A (3.22) kifejezést jX -el osztva:

$$\frac{\bar{U}_p}{jX} + \bar{I}_a = \frac{\bar{U}}{jX}. \quad (3.23)$$

Rendezve az egyenletet az

$$\bar{I}_k = \frac{\bar{U}}{jX} = -j \frac{\bar{U}}{X} = \frac{\bar{U}_p}{jX} + \bar{I}_a = \bar{I}_p + \bar{I}_a \quad (3.24)$$

áramot nevezzük *kapocsáramnak*, az \bar{I}_p áramösszetevő neve pedig *pólusáram*, amely a pólusgerjesztéssel arányos:

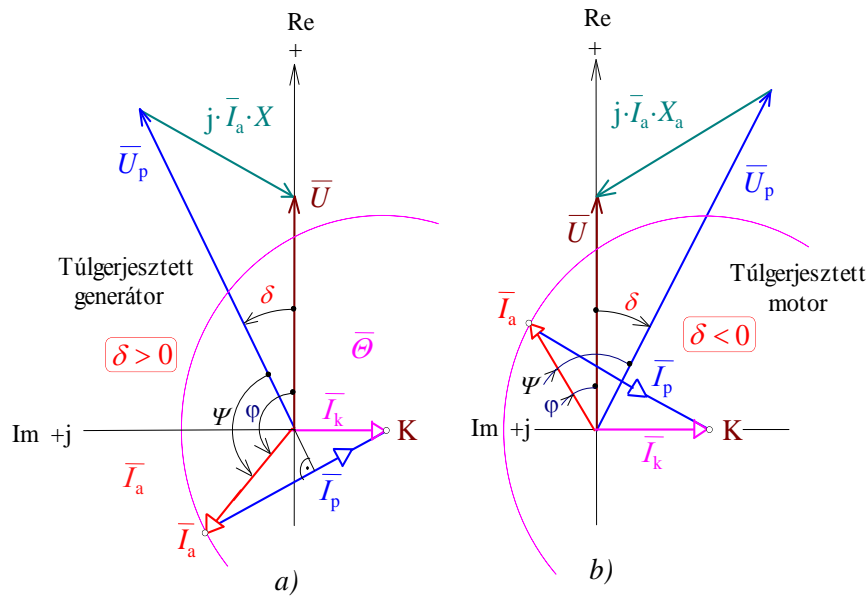
$$\bar{I}_p = \frac{\bar{U}_p}{jX} = -j \cdot \frac{\bar{U}_p}{X} \quad (3.25)$$

Az \bar{I}_k kapocsáram az eredő gerjesztést jelképezi, nevezetesen azt, hogy az eredő gerjesztés a pólusgerjesztés és az armatúra gerjesztés összege: $\bar{\Theta} = \bar{\Theta}_p + \bar{\Theta}_a$.

Végül az armatúra árama a kapocsáram és a pólusáram különbségeként számítható:

$$\bar{I}_a = -j \frac{\bar{U}}{X} - j \frac{\bar{U}_p}{X} = -j \frac{\bar{U}}{X} - \left(-j \frac{\bar{U}_p}{X} \right) = \bar{I}_k - \bar{I}_p \quad (3.26)$$

Állandó kapocsfeszültséghez állandó eredő fluxus tartozik, a gép telítettsége lényegileg nem változik, ezért a szinkron reaktancia is állandónak tekinthető, és a továbbiakban jelölése legyen X . Következésképpen az \bar{I}_k kapocsáram is egy terheléstől független vektor, mely \bar{U} -hoz képest 90° -ot késik, és végpontja az origótól $\frac{U}{X}$ távolságra lesz a képzetes tengelyen. Kiindulási feltételünk volt a gerjesztés állandósága is, ezért a pólusfeszültség és a pólusáram ($\bar{I}_p = -j \cdot \frac{\bar{U}_p}{X}$) nagysága is terheléstől független, csak iránya változik a terheléstől függően. Mivel I_p állandó, \bar{I}_a csúcsa a változó terhelés hatására egy körön fog mozogni, melynek középpontja K , és sugara I_p értékű (3.23. ábra).



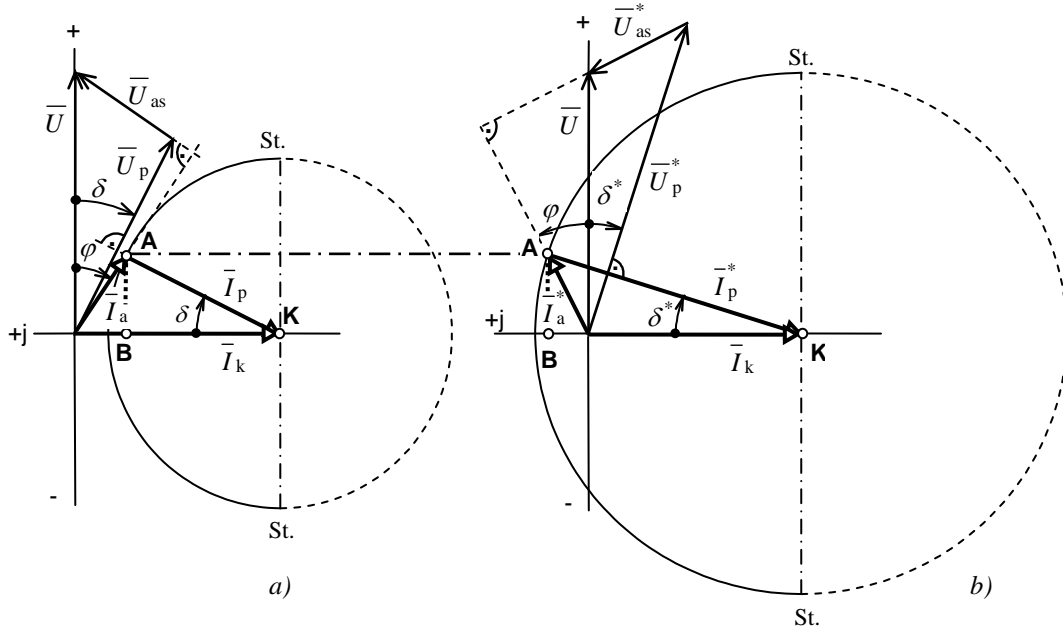
3.23. ábra Szinkron gép árammunka-diagramja az egyszerűsített helyettesítő vázlat alapján
a) generátoros; b) motoros üzemállapotban

A 3.23a ábrán egy alulgerjesztett motoros üzemállapothoz tartozó vektorábrát és az előzőek alapján meghatározott kört, majd a 3.23b ábrán ugyanekkora gerjesztéshez ($U_p = \text{áll.}$) tartozó generátoros állapotot láthatunk.

Mivel a veszteségeket elhanyagoltuk, a felvett, a leadott és a belső teljesítmények azonosnak tekinthetők, és egyféle hatásos teljesítményről beszélhetünk, mely háromfázisú gépnél $P = 3 \cdot U \cdot I_a \cdot \cos \varphi$ alakban írható fel. A két ábrából látható, hogy a teljesítmény változást az $I_a \cdot \cos \varphi = \overline{AB}$ szakasz fejezi ki, vagyis a kördiagram valamely pontjának a távolsága a képzetes tengelytől, arányos a gép hatásos teljesítményével.

A fordulatszám (frekvencia) állandó lévén a $M = P / \omega_0$ összefüggés alapján ezek a szakaszok arányosak lesznek a gép nyomatékával is.

A következőkben vizsgáljuk meg mi történik, ha a 3.23a ábrán üzemelő szinkron motor gerjesztését változatlan hatásos teljesítménye (terhelőnyomatéka) mellett megnöveljük úgy, hogy pólusfeszültsége $U_p^* = 1,5 \cdot U_p$ -re emelkedjen. Ekkor a megnövekedett pólusfe-



3.24. ábra Az árammunka-diagram módosulása a gerjesztés megváltoztatásakor
a) alulgerjesztett-; b) túlgerjesztett üzemállapot

szűtségnak megfelelően az armatúraáram végpontja átkerül egy 1,5-ször nagyobb sugarú körre, melynek középpontja az eredeti helyen maradt. (Az állandó kapcsolófeszültség miatt a gép eredő fluxusa nem változik meg, az X szinkron reaktancia és így \bar{I}_k áramvektor is változatlanul tekinthető.) A változatlan hatásos teljesítmény (nyomaték) miatt az áramvektor végpontja a képzetes tengellyel párhuzamos egyenesen, az új körrel való metszéspontban lesz (3.24. ábra).

Az armatúraáram hatásvonalára merőleges lesz \bar{U}_{as}^* hatásvonala ($\bar{U}_{as} = j \cdot X \cdot \bar{I}_a$), és az \bar{I}_p^* sugárra \bar{U}_p^* hatásvonala. A feszültségvektorok közé berajzolva a terhelési szöget, azt tapasztaljuk, hogy a megnövelt gerjesztés hatására (változatlan nyomaték mellett), a δ terhelési szög lecsökkent δ^* -ra.

A nyomaték és a terhelési szög közti összefüggést könnyen felírhatjuk, ha felismerjük, hogy a merőleges szárú szögek miatt az \bar{I}_k és az \bar{I}_p vektorok között szintén δ terhelési szög van. Mint azt az előzőekben láttuk, \bar{I}_a valós tengelyre eső vetülete ($\overline{AB} = \bar{I}_a \cdot \cos \varphi$) arányos a nyomatékkal. Ezt a vetületet kifejezhetjük a pólusárammal is ($\overline{AB} = \bar{I}_p \cdot \sin \delta$), bár a vetület ellentétes irányú, ezért $\bar{I}_a \cdot \cos \varphi = -\bar{I}_p \cdot \sin \delta = -\frac{\bar{U}_p}{X} \cdot \sin \delta$. Ekkor

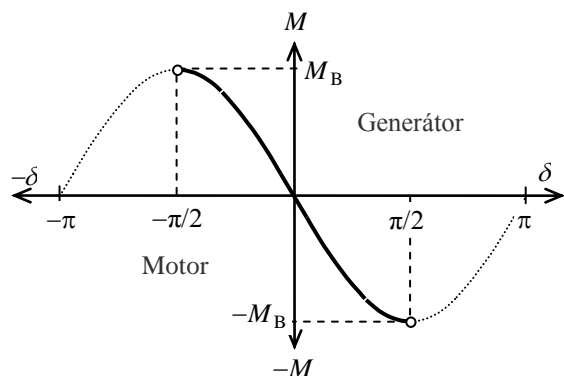
$$M = \frac{P}{\omega_0} = \frac{m}{2\pi \cdot n_0} \cdot U \cdot I_a \cdot \cos \varphi \quad \text{alapján:} \quad (3.27)$$

$$M = -\frac{m}{2\pi \cdot n_0} \cdot U \cdot \frac{U_p}{X} \cdot \sin \delta. \quad (3.28)$$

Nyomaték egyenletünk előjelhelyes eredményt ad mind motoros, mind generátoros üzemre, mivel a δ terhelési szög pozitív irányát úgy vettük fel, hogy motoros üzemben δ

negatív. Mivel $\sin(-\delta) = -\sin \delta$, a motoros nyomaték pozitív előjelű lesz, összhangban a 3.20. ábrán közölt fogyasztói teljesítménnyel.

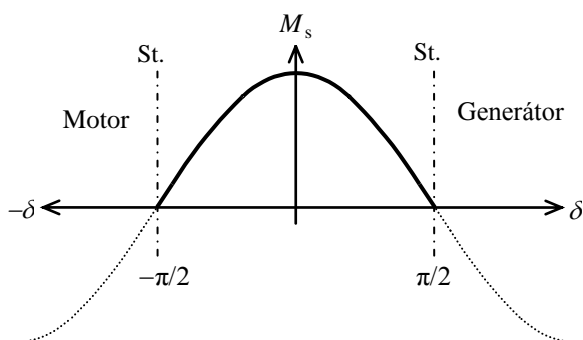
Ha a kapocsfeszültség és a pólusfeszültség (gerjesztés) állandó, a szinkron gép nyomatéka a 3.25. ábrának megfelelő szinusz görbe szerint változik a terhelési szög függvényében. A nyomatéknak a pozitív (motoros) és negatív (generátoros) tartományban is van



3.25. ábra Szinkron gép nyomatékának változása a terhelési szög függvényében

üzemben, minél kisebb a két mágneses tér elszakadásának veszélye, vagyis egységnyi nyomatékváltozás minél kisebb terhelési szög változást eredményez. A gép stabilitását a nyomatéki görbe δ szerinti differenciálhányadosa írja le negatív előjellel, jelölésére használják a szinkronozó „nyomaték” elnevezést is:

$$M_s = -\frac{dM}{d\delta} = \frac{m}{2\pi \cdot n_0} \cdot \frac{U \cdot U_p}{X} \cdot \cos \delta. \quad (3.30)$$



3.26. ábra Szinkronozó nyomaték változása a terhelési szög függvényében

egy maximális értéke. Ezt a maximális nyomatékot *billenőnyomatéknak* nevezzük, értéke:

$$M_B = \frac{m}{2\pi \cdot n_0} \cdot \frac{U \cdot U_p}{X}. \quad (3.29)$$

Ennél nagyobb nyomaték megjelenése a gép tengelyén a két együttforgó mágneses tér szétszakadását eredményezi, a gép *kiesik a szinkronizmusból*.

Nyilvánvaló, hogy a gép annál biztosabban, annál *stabilabban* dolgozik szinkron

A szinkronozó nyomatékot a terhelési szög függvényében a 3.26. ábrán vizsgálva láthatjuk, hogy maximális értéke $\delta = 0^\circ$ -nál van, és $\delta = \pm 90^\circ$ -nál lecsökken nullára, vagyis megszűnik a két rendszer együttforgását biztosító erő. Ezért a $\delta = \pm 90^\circ$ -os szöget *stabilitási határnak* nevezzük, a szinkron gép csak $-90^\circ < \delta < 90^\circ$ villamos szögek közötti tartományban üzemelhet.

A szinkron gép árammunka diagramja (kördiagramja) tehát csak a $-90^\circ < \delta < 90^\circ$ tartományban, az *St-St* szakaszon belül értelmezhető.

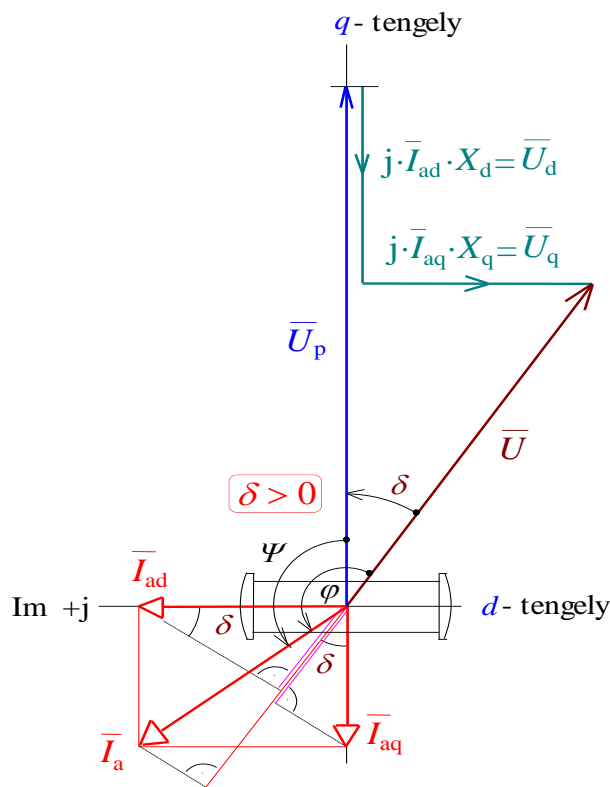
3.3.3.2. Kiálló pólusú gépek.

Kiálló pólusú gép belsejében a mágneses vezetőképeség a pólusok irányában jobb, mint arra merőlegesen. E mágneses aszimmetria miatt a gép belsejében, a póluskerék helyzetétől függően kétféle irányról kell beszélnünk. A póluskerék hossz tengelyével megegyező irányt *hossziránynak* (d), az arra merőlegest *keresztiránynak* (q) nevezzük. Az arma-

túraáram által létrehozott gerjesztés a különböző mágneses vezetőképességek miatt különböző erősségű mágneses teret hoz létre hossz és keresztirányban. A különböző hatás miatt az armatúragerjesztést (áramot) célszerű felbontanunk egy hossztengetly irányába eső, és egy arra merőleges összetevőre.

$$\bar{\Theta}_a = \bar{\Theta}_d + \bar{\Theta}_q \quad \text{illetve,} \quad \bar{I}_a = \bar{I}_{ad} + \bar{I}_{aq}. \quad (3.31)$$

Az eddig egységesen kezelt X szinkron reaktanciát felbontva X_d hosszirányú, és X_q keresztirányú szinkron reaktanciára, lehetőség nyílik arra, hogy az armatúra mágneses tere által indukált \bar{U}_a feszültséget is felbontsuk két összetevőre, nevezetesen: $\bar{U}_d = j \cdot X_d \cdot \bar{I}_{ad}$ hosszirányú, és $\bar{U}_q = j \cdot X_q \cdot \bar{I}_{aq}$ keresztirányú armatúra feszültségre. Ez az armatúra feszültség hossz és keresztirányú összetevője.



3.27. ábra Kiálló pólusú szinkron gép terhelési vektorábrája

Az \bar{U}_d feszültségesést tehát az armatúraáram \bar{I}_{ad} hosszirányú összetevője hozza létre az X_d hosszirányú szinkron reaktancián, míg az \bar{U}_q feszültségesést az armatúraáram \bar{I}_{aq} keresztirányú összetevője az X_q keresztirányú szinkron reaktancián.

A vektorábra szerkesztésénél (eltérően az eddigiektől) az \bar{U}_p pólusfeszültség vektor irányából indulunk ki, ezt vesszük fel a valós tengely irányában. Mivel a pólusfeszültség 90° -al siet a létrehozó pólusfluxushoz képest, ez egyben a q -tengely, valamint a d -tengely irányát is kijelöli a vektorábrában. Ahhoz, hogy a vektorábrában felbonthassuk az armatúraáramot hossz- és keresztirányú összetevőkre, tudnunk kell az \bar{I}_a armatúraáram helyzetét a póluskerék helyzetéhez viszonyítva. Ez a δ terhelési- és φ fázis szög (a $\cos \varphi$ teljesítményténye-

ző) ismeretében megtehető, mivel a δ terhelési segítségével kijelölhető az \bar{U} kapocsfeszültség-, a φ szög ismeretében pedig az \bar{I}_a armatúraáram-vektor hatásvonala is (3.27. ábra). Az \bar{I}_a áramvektor irányát a vektor \bar{I}_{ad} hossz- és \bar{I}_{aq} keresztirányú összetevőkre bontható.

A vektorábra alapján írható:

$$U_q = U \cdot \sin \delta = I_{aq} \cdot X_q \quad \text{és} \quad U \cdot \cos \delta = U_p - I_{ad} \cdot X_d$$

Ezekből a hossz- és keresztirányú armatúraáram-komponensek:

$$I_{ad} = \frac{U_p - U \cdot \cos \delta}{X_d} \quad \text{és} \quad I_{aq} = \frac{U \cdot \sin \delta}{X_q}$$

Ezekkel ideális esetben a teljesítmény:

$$P_{\text{mechanikai}} = M \cdot \omega = P_{\text{villamos}} = -m \cdot U \cdot I_a \cdot \cos \varphi = -m \cdot U \cdot (I_{ad} \cdot \sin \delta + I_{aq} \cdot \cos \delta).$$

I_{ad} -t és I_{aq} -t behelyettesítve a nyomaték:

$$M = \frac{P_m}{\omega_0} = -\frac{m}{2\pi \cdot n_0} \cdot \left(\frac{U \cdot U_p}{X_d} \cdot \sin \delta + \frac{U^2}{2} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \cdot \sin 2\delta \right). \quad (3.32)$$

A keresztirányú szinkron reaktancia a hosszirányútól nagymértékben különbözhet a forgórész fajtájától függően:

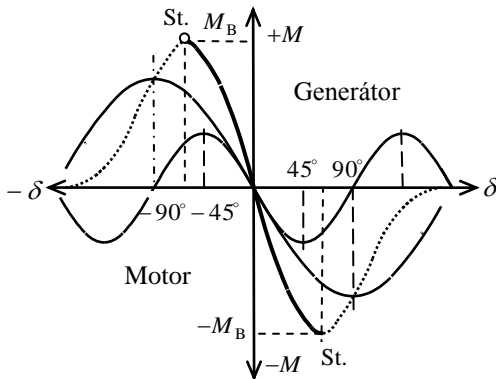
Hengeres forgórészű gépnél	$X_q = 0,9 \dots 1 \cdot X_d$
Kiálló pólusú gépnél	$X_q = 0,5 \dots 0,7 \cdot X_d$

Összehasonlítva a kiálló pólusú gép nyomatékegyenletét a hengeres forgórészű gép (3.28) egyenletével, azt tapasztaljuk, hogy a nyomatéknak lesz egy második összetevője is, amely a kapocsfeszültség négyzetétől, és a hossz- és keresztirányú szinkron reaktanciák különbségétől függ. Ezt a második összetevőt, amely a terhelési szög kétszeresének szinuszával változik ($\sin 2\delta$), *reluktancia nyomatéknak* nevezzük.

Felrajzolva a terhelési szög és a nyomaték közti összefüggést a 3.28. ábrán, szemléletesen láthatjuk, milyen változást eredményezett a reluktancia nyomaték figyelembe vétele. Megnőtt a gép billenőnyomatéka, a stabilitási határ 90° -nál kisebb tartományba tolódott, és a jelleggörbe a szinuszosnál meredekebb. A gép adott nyomaték változásra kisebb terhelési szög változással reagál.

A stabilitás növekedése kifejezésre jut, ha δ szerint differenciáljuk a nyomatékegyenletet:

$$M_s = -\frac{dM}{d\delta} = \frac{m}{2\pi \cdot n_0} \cdot \left(\frac{U \cdot U_p}{X_d} \cdot \cos \delta + U^2 \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \cdot \cos 2\delta \right). \quad (3.33)$$



3.28. ábra Kiálló pólusú szinkron gép nyomatéka

Láthatjuk, hogy a szinkronozó nyomaték megnövekedett a különböző hossz és keresztirányú mágneses vezetőképességtől függő mértékben.

Összefoglalva a szinkron gép nyomatékáról eddig elmondottakat megállapíthatjuk, hogy a szinkron gép tengelyén fellépő nyomaték villamos szempontból két összetevőre bontható.

Az egyik összetevő egyenesen arányos a gép kapocsfeszültségének és pólusfeszültsé-

gének szorzatával, és fordítottn a hosszirányú szinkron reaktanciájával, nagysága a terhelés hatására kialakuló terhelési szög szinusztól függ.

A másik összetevő a kapocsfeszültség négyzetével, és a hossz és keresztirányú szinkron reaktanciák különbözőségével arányos, és nagysága a terhelés hatására kialakuló terhelési szög kétszeresének szinuszával változik. E második összetevő a pólus gerjesztésétől független, a hossz és keresztirányú mágneses vezetőképességek különbözőségéből ered.

Azoknál a gépeknél, melyeknél a hossz- és keresztirányú mágneses vezetőképesség különbözősége kicsi (hengeres forgórészű gépek), a második összetevőt az egyszerűbb kezelhetőség érdekében elhanyagolhatjuk. Ezek a gépek terhelési szögükkel, stabilitásukkal érzékenyen reagálnak a gerjesztésre, alulgerjesztett állapotban könnyen labilissá válnak.

Azoknál a gépeknél, melyeknél a hossz és keresztirányú mágneses vezetőképesség különbözősége miatt, a hossz és keresztirányú szinkron reaktanciák különbsége számottevő (kiállópólusú gépek), a második összetevő hatása a terhelési szög-re nem elhanyagolható. Stabilitásuk nagyobb, adott nyomatékugrásra kisebb terhelési szög változással reagálnak. Bizonyos határig gerjesztés nélkül is járathatók.

Készítenek szinkron gépeket motoros üzemre olyan forgórészekkel, melyeknél a hossz és keresztirányú mágneses vezetőképesség oly mértékben különbözik egymástól, hogy a gépek gerjesztés nélkül üzemeltethetők. Ezeket *reluktancia motoroknak* nevezzük, mivel működésük a reluktancia nyomaték létén alapszik.

3.4. SZINKRON GÉPEK JELLEGGÖRBÉI

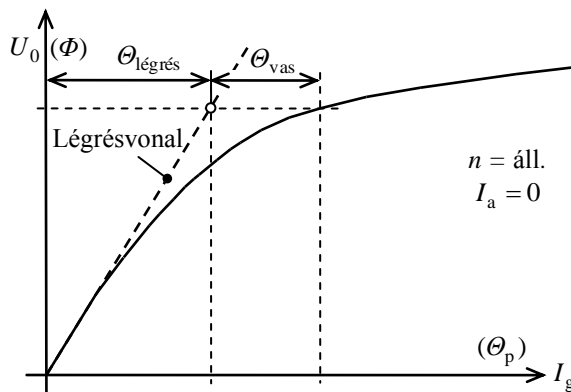
A jelleggörbék két fizikai jellemző közötti kapcsolatot írják le, bemutatják, hogy egyik üzemi jellemzőnek változásától hogyan függ egy másik jellemző megváltozása. A jelleggörbék általában méréssel vesszük fel, de egy gép tervezésekor számítással is megszerkeszthetünk bizonyos jelleggörbéket. A méréssel felvett jelleggörbék mindig pontosabban tükrözik a valóságos viszonyokat, mivel a számítások során a matematikai kezelhetőség céljából sokszor élünk valamilyen közelítéssel vagy elhanyagolással.

Minden gépnek több, egymásra hatással lévő fizikai jellemzője van. Két jellemző egymástól való függőségét csak úgy tudjuk vizsgálni, a köztük lévő kapcsolatot pontosan leírni, ha a többi jellemzőt valamilyen állandó értéken tartjuk. A jelleggörbék felvétele során tehát nagyon fontos tudnunk azt, hogy mely jellemzőket kell állandó értéken tartanunk ahhoz, hogy a két vizsgált jellemző egymástól való függősége konkrét és igaz legyen.

A jelleggörbék ábrázolásánál, dokumentálásánál is okvetlenül fel kell tüntetnünk azt, hogy a két fizikai jellemző változásának leírása milyen értékű (konkrét mérés esetén számszerű!) paraméterek mellett igaz.

3.4.1. Üresjárási jelleggörbe

Az üresjárási jelleggörbe a kapocsfeszültség változását mutatja a gerjesztőáram függvényében. A jelleggörbét a szinkron gép generátoros üzemében szokás felvenni. Az üresjárásban üzemelő generátor armatúraárama nulla, a gépben keletkező veszteségeket a hajtómotor fedezi. Ezek: a vasvesztesség, valamint a súrlódási és szellőzési veszteség.



3.29. ábra Szinkron gép üresjárási jelleggörbéje

A jelleggörbe felvétele során a fordulatszámot állandó értéken tartjuk. Számszerű értékét az $n_0, 1/\text{min} = 60 \cdot f / p$ összefüggés határozza meg.

Mivel üresjárásban a kapocsfeszültség egyenlő a pólusfeszültséggel, és az állandó fordulatszám miatt az armatúrában indukálódó feszültség egyenesen arányos a gép fluxusával, az üresjárási jelleggörbe tulajdonképpen a gép mágnesezési görbéje. Ezt a gép tervezésekor ki is számítják. Az I_g gerjesztőáram más léptékben a Θ_p pólusgerjesztés (ami most egyenlő az eredő gerjesztéssel), U_0 pedig más léptékben egyenlő a gép eredő fluxusával.

A jelleggörbe kezdeti szakaszán kis gerjesztéseknél a fluxus is kevés a gépben, a vas felmágnesezéséhez igen csekély gerjesztés szükséges. A pólusgerjesztés itt csaknem egészében a légrés felmágnesezésére fordítódik. A légrésben létrehozott fluxus egyenesen arányos a gerjesztőárammal ($\Phi = B \cdot A$ és $B = \mu_0 \cdot H$, valamint $H \cdot l = N \cdot I$), így a jelleggörbe kezdeti szakaszához húzott érintő valamilyen Φ fluxushoz tartozó pontja megadja a légrés felmágnesezéséhez szükséges gerjesztés nagyságát. Az érintőt ezért a gép *légrésvonalának* is nevezzük.

A légrésvonal és az üresjárási jelleggörbe közti vízszintes metszések hossza a vastest felmágnesezéséhez szükséges gerjesztés nagyságáról tájékoztat. A jelleggörbéből láthatjuk, hogy a vas telítődése miatt nagyobb fluxusokhoz egyre nagyobb gerjesztésre van szükség.

A névleges üresjárási feszültségre való gerjesztésnek kb. 80 %-a fordítódik a légrés felmágnesezésére, névleges terheléskor azonban az összes gerjesztés szükséglet az armatúravisszahatás miatt felmehet az üresjárási gerjesztés 2...3-szorosára is.

3.4.2. Rövidzárási jelleggörbe

A rövidzárási jelleggörbe az armatúraáram változását ábrázolja a gerjesztőáram függvényében rövidrezárt armatúra kapcsok és állandó fordulatszám mellett.

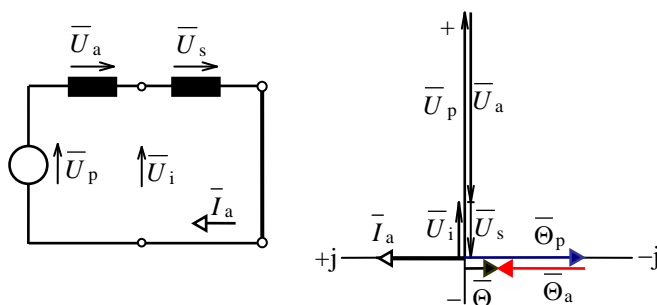
A jelleggörbe méréssel történő felvételekor a gépet generátoros üzemmódban járattuk, kapcsait ampermérőkön keresztül zárjuk rövidre. A gerjesztést nulláról fokozatosan növelve, mérjük a gerjesztő- és az armatúraáramot.

Mivel a gép armatúraárama nulla, a helyettesítő vázlat (3.19. ábra) alapján láthatjuk, hogy a pólusfeszültség, az indukált feszültség és a kapocsfeszültség egyenlő értékű, a pólusfeszültség közvetlenül mérhető a gép kapcsain. A zérus értékű armatúraáramból az is következik, hogy nincs armatúragerjesztés, a gép eredő fluxusa egyenlő a gerjesztőáram által létrehozott pólusfluxussal.

A jelleggörbe felvétele során a fordulatszámot állandó értéken tartjuk.

A szinkron gép rövidzárási üzemállapotának vizsgálatához hagyjuk el a helyettesítő vázlatból a tekercselés ellenállását jelképező R tagot. A 3.30. ábrából láthatjuk, hogy ekkor a gép pólusfeszültsége a saját armatúra és szórási reaktanciájából álló szinkron reaktanciájára dolgozik.

A vektorábra felrajzolásához induljunk ki az \bar{U}_p pólusfeszültségből. A valós tengely irányában felrajzolt pólusfeszültséggel \bar{U}_a és \bar{U}_s összege ellenfázisban van, mivel közöttük nincs fáziseltérés \bar{U}_p talppontjába jutunk. A kapocsfeszültség zérus, ezért \bar{U}_i indukált feszültség egyenlő \bar{U}_s szórási feszültséggel, csak ellenkező irányú. Az armatúraáram 90° -ot késik az \bar{U}_a



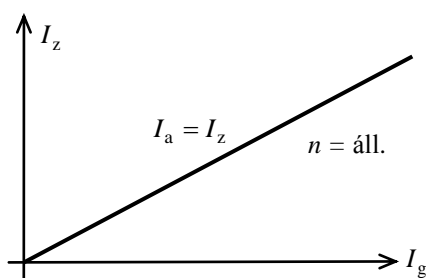
3.30. ábra A szinkron gép helyettesítő vázlata és vektorábrája rövidzárási állapotban

és \bar{U}_s vektorokhoz képest, ugyanis az $\bar{U}_a = jX_a \cdot \bar{I}_a$ és $\bar{U}_s = jX_s \cdot \bar{I}_a$ egyenletekből

$$\bar{I}_a = \frac{\bar{U}_a}{jX_a} = -j \cdot \frac{\bar{U}_a}{X_a} \text{ és } \bar{I}_a = \frac{\bar{U}_s}{jX_s} = -j \cdot \frac{\bar{U}_s}{X_s}, \text{ és egy vektor } -j\text{-vel történő szorzása } 90^\circ\text{-os}$$

viisszaforogatást jelent. Ezek alapján \bar{I}_a -t a $+j$ tengely irányába kell felrajzolnunk, mivel \bar{U}_a és \bar{U}_s a negatív valóstengely irányába mutat. (A generátor meddőt termel saját induktivitására.)

Az armatúraáram irányának ismeretében felrajzolhatjuk $\bar{\Theta}_a$ armatúragerjesztés vektorát is. A kis \bar{U}_i indukált feszültséget létrehozó $\bar{\Theta}$ eredő gerjesztést $\bar{\Theta}_p$ pólusgerjesztésnek kell létrehoznia $\bar{\Theta}_a$ ellenében, tehát a pólusgerjesztés a $-j$ tengely irányába mutat. Ez összhangban van \bar{U}_p pólusfeszültség irányával is, hiszen tudjuk hogy egy gerjesztés ill. a vele fázisban lévő fluxus által indukált feszültség 90° -ot siet az őt létrehozó fluxushoz képest.



3.31. ábra Rövidzárási jelleggörbe

Az armatúragerjesztés és a pólusgerjesztés közelítőleg kiegyenlíti egymást, a csekély eredő gerjesztés okozta fluxustól nem kerül telítésbe a gép mágneses köre. Ebben az esetben gerjesztőáram által létrehozott pólusgerjesztés tehát egyenes arányban lesz a pólusfluxussal, a pólusfluxus pedig az általa indukált pólusfeszültséggel. Mivel az armatúraáramot a pólusfeszültség hozza létre az $X_a + X_s$ reaktancián, nyilvánvaló az egyenes

arányosság a gerjesztőáram és az armatúraáram között (3.31. ábra).

Mágneses telítési jelenséggel csak igen nagy áramoknál kellene számolnunk, amikor az armatúratekercselés szórási reaktanciáján és ohmos ellenállásán létrejövő feszülteség miatt jelentősebben megnőne az indukált feszültség. A zárlati áram kb. kétszerese a névleges áramnak, és a szórási reaktancia gerjesztés-szabályozótól függően külsőgerjesztésben minimum 10 %-a a szinkron reaktanciának, így a névleges feszültséghez tartozó

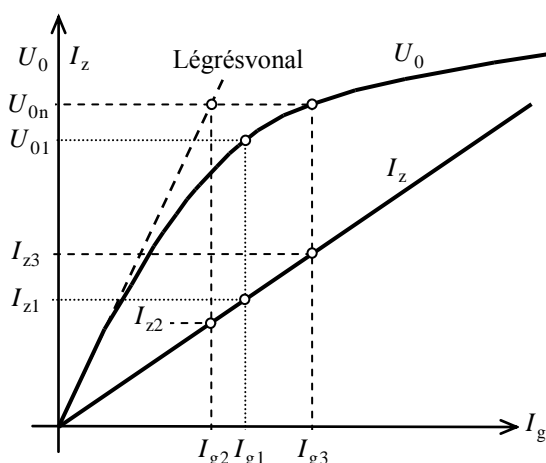
gerjesztés esetén is csak 10...20 %-nyi névleges fluxus lenne állandósult állapotban a gépben.

3.4.3. A szinkron reaktancia meghatározása

Mint láttuk a szinkron gépek különböző üzemállapotainak vizsgálatára jól használhatjuk a helyettesítő vázlatokat. Vizsgáljuk meg, hogyan számíthatjuk ki az egyszerűsített helyettesítő vázlat $X = X_a + X_s$ szinkron reaktanciának nevezett elemét. A rövidzárási üzemállapot vizsgálatakor láthattuk a 3.30. vektorábrán, hogy az armatúragerjesztés pontosan a pólusgerjesztés irányában alakul ki, tehát itt X pontosabb elnevezése X_d *hosszirányú* szinkron reaktancia (lásd még a 3.27. ábrát).

Az üresjárási és rövidzárási jelleggörbék alapján ezt a hosszirányú szinkron reaktanciát határozhatjuk meg. Egy adott gerjesztéshez tartozó pólusfeszültség az üresjárási görbéből leolvasható. Ennél a gerjesztésnél ez a pólusfeszültség indítja meg a rövidzárási áramot az armatúra körben, az összetartozó pólusfeszültség és armatúraáram hányadosa megadja $X_d = X_a + X_s$ értékét.

A 3.32. ábrán egy koordináta rendszerben ábrázoltuk az üresjárási és a rövidzárási jelleggörbét. Jelöljük ki egy I_{g1} gerjesztőáramot a vízszintes tengelyen. Ehhez a gerjesztőáramhoz a rövidzárási jelleggörbéből tartozik egy I_{z1} rövidzárási áram, az üresjárási jelleggörbéből pedig egy U_{01} üresjárási feszültség, ami megegyezik a pólusfeszültséggel. U_{01} és I_{z1} hányadosa megadja a kiválasztott munkaponthoz tartozó hosszirányú szinkron reaktancia értékét.



3.32. ábra Hosszirányú szinkron reaktancia meghatározása az üresjárási és rövidzárási jelleggörbéből

A gép mágnesesen telítetlen állapotában, a légrésegyeneshez tartozó *telítetlen szinkron reaktancia* értéke a 3.32. ábra jelöléseivel:

$$X_{d \text{ telítetlen}} = \frac{U_{0n}}{I_{z2}}, \quad (3.34)$$

az I_{g2} gerjesztőáramhoz tartozó pontok alapján.

A névleges telítési állapothoz tartozó reaktanciát *telített szinkron reaktanciának* nevezük, és az I_{g3} -hoz tartozó pontok alapján:

$$X_{d \text{ telített}} = \frac{U_{0n}}{I_{z3}}. \quad (3.35)$$

A képletekben szereplő U_{0n} névleges üresjárási feszültség a gép fázisfeszültsége, I_z pedig a rövidzárási fázisáram, mivel a helyettesítő vázlatot egy szimmetrikus többfázisú gép egy fázisára vonatkoztatjuk.

Szokásos még a szinkron reaktancia relatív értékben történő megadása is, amin a gép névleges impedanciájához viszonyított értékét értjük. A gép névleges impedanciája:

$$Z_n = \frac{U_{nf}}{I_{nf}}. \quad (3.36)$$

A szinkron reaktancia százalékos relatív értéke:

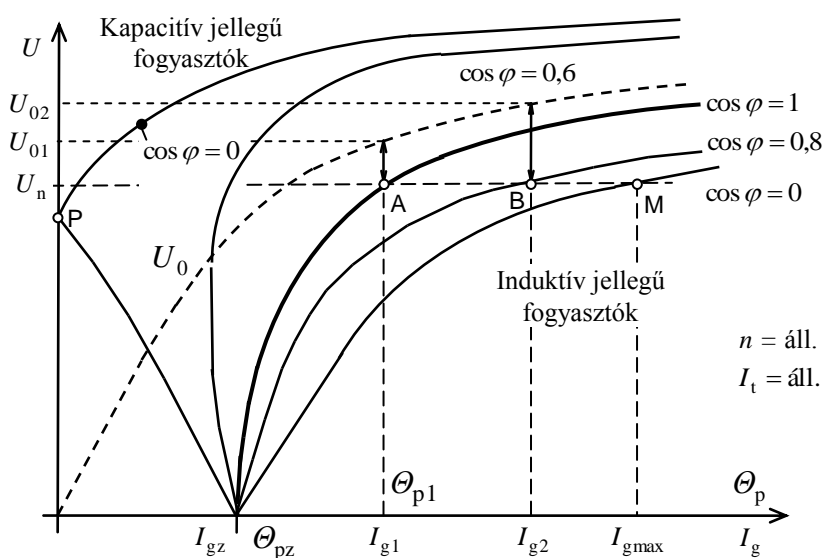
$$X_d^*, \% = \frac{X_d}{Z_n} \cdot 100. \quad (3.37)$$

3.4.4. Terhelési jelleggörbék

Az önmagában járó szinkron generátor terhelési jelleggörbéi azt mutatják meg, hogyan változik a generátor kapocsfeszültsége a gerjesztés függvényében állandó értékű frekvencia és $\cos \varphi$ mellett, ha az armatúraáramot állandó (pl.: névleges) értéken kívánjuk tartani.

Egyedül (szigetüzemben) járó szinkron generátor esetén a gerjesztés változtatásával változtathatjuk a gép kapocsfeszültségét. Az armatúraáram fázisszögét a kapocsfeszültséghez képest ($\cos \varphi$ -t) a kapcsokra kötött terhelés jellege (ohmos, induktív esetleg kapacitív arány) határozza meg.

A 3.33. ábrán láthatjuk a szinkron generátor terhelési jelleggörbéit. A különböző $\cos \varphi$ -hez tartozó jelleggörbék a Θ_{pz} névleges rövidzárási áramot létrehozó gerjesztési pontból indulnak ki. Méréssel történő felvételénél is innen indulunk, a mérőműszereken keresztül rövidrezárt generátor armatúraáramát a gerjesztés növelésével a névleges értékig emeljük.



3.33. ábra Szinkron generátor terhelési jelleggörbéi

Először a $\cos \varphi = 0$, tisztán induktív jellegű terheléshez tartozó görbét szokták felvenni. A rövidzárási helyére változtatható értékű induktív ellenállást (pl.: üresen járó indukciós szabályozót) kötnek. A reaktancia értékét nulláról (vagy minimumról) növelve az armatúra-

raáram csökkenni fog. A gerjesztés növelésével újra beállítva az állandó armatúraáramot, leolvasható az összetartozó gerjesztőáram és kapocsfeszültség érték. A további pontok felvétele hasonlóan, a reaktancia növelését követő gerjesztőáram utánállítással történik.

A $\cos \varphi = 1$ -hez tartozó tisztán ohmos terhelési jelleggörbét a rövidzárast követő változtatható terhelőellenállás bekötésével vehetjük fel. A görbe felvételénél itt is $R_t = 0$ ellenállásról indulunk, és az ellenállás fokozatos növelésével és gerjesztőáram utánállítással kapjuk meg a jelleggörbe pontjait.

A $\cos \varphi = 1$ -hez tartozó jelleggörbén megjelöltük az **A** pontot, amikor a generátor névleges terheléssel üzemel. A terhelést megszüntetve a generátor kapocsfeszültsége Θ_{p1} gerjesztés által meghatározott U_{01} üresjárási feszültségre emelkedik. E ΔU_1 feszültségemelkedés mértéke ha bizonyos határt meghalad, az veszélyes lehet a generátor üzemére, ezért szabványelőírások korlátozzák megengedhető mértékét.

A feszültségemelkedés százalékos értékét az

$$\varepsilon, \% = \frac{U_{01} - U_n}{U_n} \cdot 100 \quad (3.38)$$

összefüggés segítségével számíthatjuk.

Induktív terhelésre dolgozó szinkron gép feszültségemelkedése nagyobb, mint a tisztán wattos terhelésűé, ezért a magyar szabvány a névleges áramhoz és $\cos \varphi = 0,8$ (induktív) teljesítménytényezőhöz (**B** pont) tartozó százalékos feszültségemelkedés maximális értékére 50 %-ot ír elő.

Lényeges pont még a $\cos \varphi = 0$ (ind.) jelleggörbén bejelölt **M** pont, melyhez az $I_{g \max}$ gerjesztés tartozik. Ekkora gerjesztés ugyanis elegendő bármilyen jellegű terhelés esetén is a névleges kapocsfeszültség biztosításához.

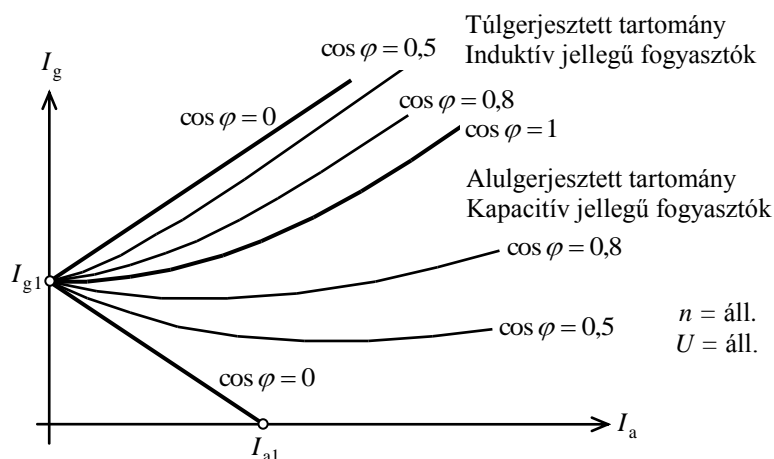
Kapacitív terheléshez tartozó jelleggörbék a kiinduló Θ_{pz} ponttól balra dőlnek, felvételükhöz a gerjesztést először csökkenteni kellene. Méréssel történő felvételük nehézkes, gyakorlati jelentőségük sem indokolja hiányukat. Érdekessége a jelleggörbének a **P** pont, melyben a generátor gerjesztés nélkül üzemel, a gép felgerjedését a kapcsolókra kötött kondenzátor egységek biztosítják.

3.4.5. Szabályozási jelleggörbék

A szabályozási jelleggörbék arról tájékoztatnak, hogy miképpen kell változtatni egy szinkron generátor gerjesztését ahhoz, hogy teljesítménytényezője a terhelő áramtól függetlenül állandó legyen, miközben állandó értéken tartjuk a gép fordulatszámát és kapocsfeszültségét.

A szabályozási jelleggörbéket méréssel a legegyszerűbben úgy vehetjük fel, hogy a szinkron gépet merev hálózatra kapcsoljuk, így az állandó kapocsfeszültség és az állandó fordulatszám automatikusan biztosított. Bár a szabályozási jelleggörbéket főként önmagában (idegen szóval aggregátor üzemben) járó szinkron generátoroknál használjuk, az így

felvett görbék értékét nem csökkenti az a körülmény, hogy a kiindulási paramétereket a merev hálózat biztosítja.



3.34. ábra Szinkron generátor szabályozási jelleggörbéi

A jelleggörbék felvételénél célszerű a szinkron gépet motoros üzemben járatni oly módon, hogy a hajtógép nyomatékának változtatásával a szinkron gép teljesítményét (és ezáltal armatúraáramát) a kívánt határok között változtathassuk. Az állandó teljesítménytényezőt a szinkron gép gerjesztő áramának változtatásával állítjuk be.

A 3.34. ábrán bemutatott szabályozási jelleggörbékéből látható, hogy induktív jellegű terhelések esetén állandó kapocsfeszültség tartásához a gerjesztő áramot monoton növelni kell az armatúraáram függvényében. Kapacitív jellegű terhelések esetén először csökkenteni, majd növelni kell a gerjesztést állandó kapocsfeszültség biztosításához.

A szabályozási jelleggörbékre korábban elsősorban az önmagukban járó szinkron áramfejlesztők (aggregátorok) esetén volt szükség. Jelenleg a szerepük csökken, mert a sziget üzemben működő generátorok feszültségének állandó értéken tartását korszerű elektronikus szabályozókkal oldják meg.

3.4.6. Hálózatra kapcsolt gép jelleggörbéi

Merev hálózatra kapcsolt szinkron gép viselkedése lényegesen eltér az önmagában járó generátorétól. Az önálló ún. sziget üzemben dolgozó szinkron generátor feszültségét a gép gerjesztése, a terhelőáram nagysága és jellege (induktív, ohmos, kapacitív arány) együttesen határozza meg. Az előállított feszültség frekvenciája a hajtó gép fordulatszámától függ.

A merev hálózatra kapcsolt szinkron gép feszültségének nagyságát és frekvenciáját a hálózat állandó értéken tartja. A gép generátoros, vagy motoros üzemállapota a tengelyére ható nyomaték irányától függ.

- ✚ Ha a gép tengelyét a forgatás irányába gyorsítani akarjuk, vagyis külső nyomatékot, mechanikai teljesítményt közlünk (a nyomaték és a fordulatszám azonos irányú), a hálózat frekvenciája a gyorsítást megakadályozza, a gép a gyorsító nyomatékkal ellentétes irányú nyomatékot fejt ki. A közölt mechanikai teljesítményt a szinkron gép villamos teljesítménnyé alakítja át, generátoros üzemben $P = m \cdot U \cdot I_a \cdot \cos \varphi$ villamos teljesítményt szolgáltat a hálózatnak. ($\varphi \geq 90^\circ$, így $\cos \varphi$ negatív szám, termelői teljesítményről van szó.)

- Ha a gép forgását gátoljuk valamilyen külső fékező nyomatékkal, a szinkron gép a hálózatról villamos energiát vesz fel, hogy a fékező mechanikai teljesítményt fedezze, és motoros üzemben megtartsa a pólusszáma és a hálózati frekvencia által meghatározott fordulatszámot. Ekkor a gép a hálózatról

$$P = m \cdot U \cdot I_a \cdot \cos \varphi$$

nagyságú teljesítmény vesz fel ($\varphi \leq 90^\circ$).

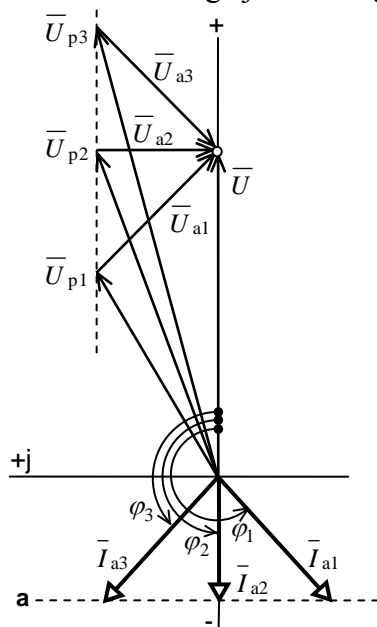
A gép tengelyén a nyomaték megváltozása az armatúraáram wattos összetevőjének ($I_a \cdot \cos \varphi$) változását okozza. A hálózatra kapcsolt szinkron gép hatásos teljesítménye kizárólag a gép nyomatékától függ (ω_0 állandó).

A szinkron gép gerjesztésének, pólusfluxusának változtatására megváltozik a gép pólusfeszültsége. A hálózat viszont a kapocsfeszültséget állandó értéken tartja, ami csak úgy lehetséges, hogy az \bar{U}_a armatúrafeszültség változik meg a szükséges mértékben. Az állandó kapocsfeszültség miatt az eredő fluxus a gépben nem változik, így a szinkron reaktanciát közelítőleg állandónak tekinthetjük.

Következésképpen az $\bar{U}_a = \bar{I}_a \cdot jX_a$ feszültség változása csak az \bar{I}_a armatúraáram változásának hatására következhet be. Mivel az armatúraáram wattos összetevőjét a szinkron gép nyomatéka határozza meg, ha az nem változik, akkor az armatúraáram meddő komponensének kell megváltoznia.

Összegezve megállapíthatjuk, hogy a hálózatra kapcsolt szinkron gép gerjesztésének változtatásával az átalakított villamos teljesítmény teljesítménytényezőjét ($\cos \varphi$ -t) módosíthatjuk.

A 3.35. ábrán állandó szinkron reaktancia feltételezésével megrajzoltuk az armatúraáram változását a gerjesztés megváltozásának hatására. Az armatúraáram vektor végpontja az



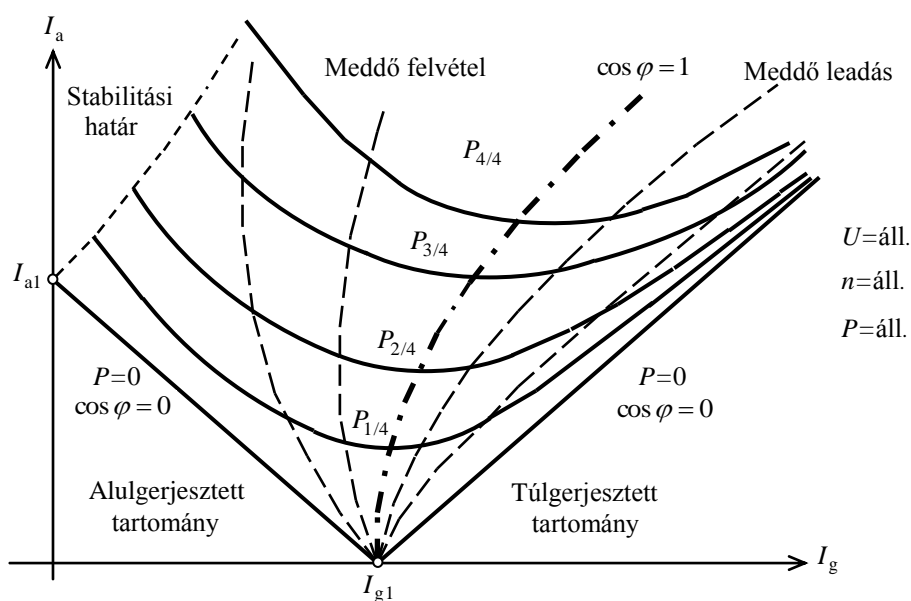
3.35. ábra Hálózatra kapcsolt szinkron gép armatúraáramának változása a gerjesztés változásakor, állandó nyomaték esetén

állandó nyomaték (teljesítmény) miatt a képzetes tengellyel párhuzamos **a** egyenesen mozog.

Ha a vektorábrán közölt feltételek mellett, állandó nyomatékkal forgatjuk a szinkron gépet, és figyeljük a gerjesztőáram változására bekövetkező armatúraáram változást, a 3.36. ábrán bemutatott terhelési jelleggörbék adódnak.

A görbék jellegzetes alakjukról a „V-görbe” elnevezést kapták. A görbék különböző állandó teljesítmények mellett ábrázolják az armatúraáram változását a gerjesztés függvényében. A legalsó „görbe”, amelynél a teljesítmény nulla (amiből következik, hogy $\cos \varphi = 0$), elméletileg szimmetrikus hajlásszögű egyenes az I_{g1} pontra vonatkozóan. Az I_{g1} és I_{a1} pontok megegyeznek a szabályozási görbe azonos nevű pontjaival (3.33. ábra), könnyű felfedezni, hogy a névadó „V görbe”

egyben szabályozási görbe is (a $\cos \varphi = \text{áll.}$, éppen nulla).



3.36. ábra Szinkron gép „V” görbéi.

A jelleggörbék közé berajzoltuk a $\cos \varphi = 1$ -hez tartozó armatúraáramok helyét. Itt helyezkedik el valamely állandó teljesítményhez tartozó V görbe legalsó pontja, ennél a pontnál minimális az armatúraáram az adott teljesítményű V görbe esetén.

A $\cos \varphi = 1$ görbétől balra eső alulgerjesztett tartományban a szinkron gép meddő teljesítményt vesz fel, a jobbra eső túlgerjesztett tartományban meddő teljesítményt ad le.

3.5. ÁTMENETI ÜZEMÁLLAPOTOK

3.5.1. A szinkron gép indítása

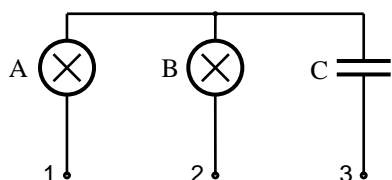
A szinkron gépek leggyakoribb üzemmódja esetén több szinkron gépek egymással párhuzamosan kapcsolva üzemel. Az egyes erőművek generátorai által táplált országos hálózatok gyakran nemzetközi kooperációban dolgoznak, így akkora teljesítményű hálózatok jönnek létre, melyek feszültségét és frekvenciáját a rákapcsolt egyes szinkron gép nem befolyásolhatja.

Ahhoz, hogy a szinkron gép kapcsait áramlökés nélkül összeköthessük a hálózat kapcsaival, a szinkron gép armatúrájában indukált feszültségnek meg kell egyeznie a hálózati feszültséggel. Ez különösen nagyobb teljesítményű gépeknél fontos, mivel legkedvezőtlenebb esetben a zárlati áram csúcsertékénél kétszer nagyobb áramlökés is felléphet.

A két feszültség azonosságának biztosítását szinkronozásnak nevezzük. Vizsgáljuk meg, milyen feltételek mellett lehet a szinkron gépet a hálózattal áramlökés nélkül összekapcsolni!

a) Fázissorrend azonosság

Elengedhetetlen követelmény, hogy háromfázisú rendszereknél az összekötésre kerülő kapcsokon a feszültség maximumok ugyanolyan időrendi sorrendben kövessék egymást. Nem egyező fázissorrendnél ugyanis a hálózat egy ellenkező irányú forgómezőt hozna létre az armatúrában, ami a normális működést lehetetlenné tenné.



3.37. ábra Optikai fázissorrend-mutató elvi vázlata

A fázissorrend ellenőrzésének egyik eszköze a 3.37. ábrán bemutatott optikai fázissorrend mutató. Az izzólámpák (A és B), valamint a C kondenzátor megfelelő megválasztásával elérhető, hogy szimmetrikus háromfázisú táplálásnál attól függően világít erősebben, vagy gyengébben az A vagy a B izzólámpa, hogy milyen sorrendben kapcsoltuk a háromfázisú feszültséget az 1, 2 és 3 kapcsokra. A fázissorrend akkor lesz megfelelő, ha az összekötésre kerülő kapcsokat azonos sorrendben a készülék 1, 2, 3 pontjaira kapcsolva ugyanaz az izzó világít.

A fázissorrend azonosságának ellenőrzése kis aszinkronmotorral, forgó fázissorrend mutatóval is történhet. Helytelen fázissorrend esetén rendszerint csak az összekötendő kapcsok sorrendjét cserélhetjük meg valamelyik oldalon.

b) Frekvencia azonosság

A szinkron gépet egy változtatható fordulatszámú segédgéppel (laboratóriumban rendszerint külsőgerjesztésű egyenáramú motorral) a hálózat frekvenciája és a gép pólus-száma által meghatározott szinkron fordulatszámra pörgetjük fel. Fontos a fordulatszám finom szabályozhatóságának biztosítása, ami egyenáramú motor esetén gerjesztés-szabályozással könnyen megvalósítható. Kis fordulatszám tartományon belül ugyanis az egyenáramú motor gerjesztőáramának csökkentésével a fordulatszámot növelhetjük, ill. a gerjesztés növelésével lassíthatjuk a gépet.

A frekvencia azonosságot a felgerjesztett szinkron gép frekvenciájának, vagy fordulatszámának mérésével ellenőrizzük.

c) A feszültségek nagyságának azonossága

A hálózat és a szinkron gép feszültségének effektív értékét egy-egy lágyvasas voltmérővel ellenőrizhetjük. Készítenek külön erre a célra kettős mérőrendszerű voltmérőt is, melynek kitérése a középállásból attól függően történik, hogy melyik feszültség nagyobb. Ha a szinkron gép feszültsége szinkron fordulatszámon nem egyezik meg a hálózat feszültségével, akkor a szinkron gép gerjesztésének változtatásával állítják be a feszültségazonosságot.

d) Fázishelyzet azonosság

Az eddig tárgyalt feltételek szükségesek, de nem elégségesek az árammentes összekapcsoláshoz. A két azonos feszültségrendszer együttforgása mellett szükséges a fázishelyzetek megegyezése is. A fázishelyzet azonosságát leggyakrabban vegyes kapcsolású izzólámpákkal ellenőrizzük. A 3.38. ábrán látható vegyes kapcsolású lámpák jelöléseit

áramkörét ellenálláson keresztül zárni. Felfutás után hirtelen gerjesztéslökéssel a szinkronozó nyomaték berántja a közel szinkron fordulattal forgó gépet szinkronizmusba.

3.5.2. Szinkron generátorok rövidzárlata

Rövidzárlatról akkor beszélünk, ha a generátor kapcsain nem a terhelő impedancia fokozatos csökkenésével, hanem minden átmenet nélkül, hirtelen csökken a kapcsolófeszültség nullára a terhelő impedancia nulla értéke miatt.

A rövidzárlási jelleggörbék tárgyalásánál már megemlítettük, hogy állandósult állapotban a rövidzárlási áram értéke $I_{az} = \frac{U_p}{X_d}$. Ha a zárlatot megelőző időben a generátornak

akkora gerjesztése volt, hogy a pólusfeszültség megegyezett a névleges feszültséggel, akkor $X_d = 0,9...2,5 \cdot Z_n$ miatt az állandósult rövidzárlási áram a névleges áram nagyságrendjébe esik.

A rövidzárlatot követő áramlökések azonban az átmeneti jelenségek miatt, a névleges áram 15...20-szorosát is elérhetik. Mivel a tekercselést igénybevevő erőhatások az árammal négyzetesen növekednek, ezért a nagyteljesítményű generátorok tekercsfejeinek zárlatbiztos mechanikai rögzítése igen fontos feladat.

A zárlati jelenségek pontos vizsgálata meglehetősen bonyolult és komoly matematikai felkészültséget igényel, ezért a zárlat nyomán kialakuló folyamatok fizikai magyarázata lesz elsődleges célunk.



3.5.2.1. A fluxusállandóság elve

Tételezzük fel, hogy a zárlat előtt a generátor üresen járt, kapcsolófeszültsége a pólusfeszültséggel volt egyenlő. Mivel valamely tekercsben indukálódó feszültséget a tekercsfluxus időbeni változása hozza létre, írhatjuk, hogy $u = i_a \cdot R + \frac{d\Psi}{dt}$.

A zárlat bekövetkezésekor a U kapcsolófeszültség nulla lesz, ezért az armatúrával kapcsolódó eredő tekercsfluxus sem változhat. Az eredő fluxust felfoghatjuk a pólusgerjesztés által létesített pólusfluxus és az armatúragerjesztés által létesített armatúrafluxus eredőjeként. Azonban e tekercsekkel kapcsolódó fluxusok sem változhatnak pillanatszerűen, így ezeknek is állandó értéken kell maradniuk.

Ez a fluxusállandóság elve és egyúttal a zárlati áramok számításának alapja is. A jelenleg elhanyagolt, de a valóságban figyelmen kívül nem hagyható csillapítások és veszteségek miatt a tekercsfluxusok természetesen nem maradnak az idők végezetéig állandó értéken, de az első áramlökés időpontjáig nem csökkennek számottevő mértékben. Így a biztonság irányában tévedünk, ha a lecsengést első közelítésben nem vesszük figyelembe.

A további tárgyalás egyszerűsítése érdekében egyenlőre vizsgáljunk csak egy fázist az armatúratekercselésből. Két szélsőséges esetet fogunk vizsgálni:

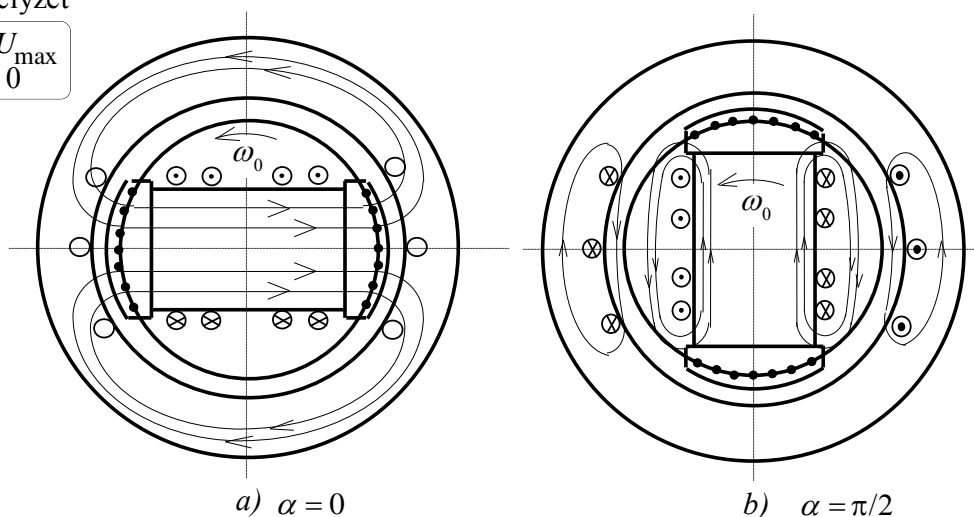
-  az I. főhelyzetet, amikor a zárlat pillanatában a feszültség maximális értékű;
-  a II. főhelyzetet, amikor a zárlat a feszültség nullátmenetkor következik be.

a) I. főhelyzetben bekövetkező zárlat

$\alpha = 0$ helyzet. Ha a zárlat pillanatában a kapocsfeszültség maximális értékű, akkor az armatúra- és a gerjesztőtekercselés mágneses tengelye merőleges egymásra, vagyis az armatúratekercselés fluxusa nulla (3.39a ábra). Feltételezésünk szerint a zárlatot megelőző időben a generátor terheletlenül járt, ezért az armatúratekercselésben nem folyik áram. A gerjesztőáram egyenlő az üresjárású feszültség fenntartásához szükséges gerjesztőárammal.

I. főhelyzet

$$\begin{matrix} U = U_{\max} \\ \Phi = 0 \end{matrix}$$



3.39. ábra Fluxuseloszlás maximális feszültségnél bekövetkező zárlat esetén (csillapító tekercseléssel rendelkező gép)

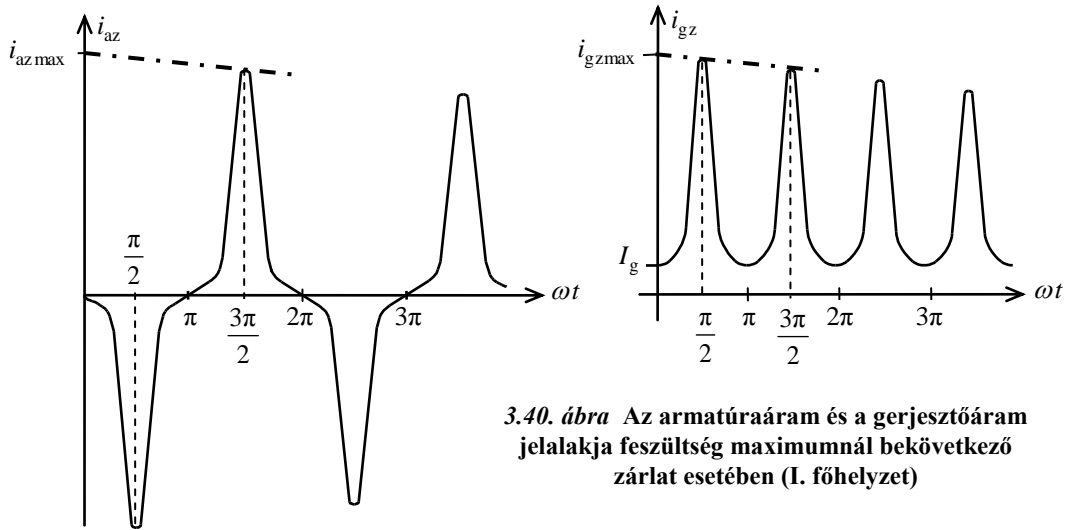
A fluxusállandóság elve szerint mindkét tekercselés fluxusának változatlan nagyságúnak és a tekercseléshez képest változatlan irányúnak kell lennie. A rövidzárlatot követően az armatúraáram i_{az} és a gerjesztőáram i_{gz} pillanatértéke úgy alakul, hogy ez a feltétel teljesüljön.

Amint a forgórész egy kissé továbbfordul, kezd növekedni a pólusgerjesztésnek az armatúratekercselés irányába eső összetevője. Ahhoz, hogy az armatúrával kapcsolódó fluxus továbbra is nulla maradjon, az armatúrában olyan áramnak kell fellépnie, mely a pólusgerjesztéssel ellentétes irányú. De az armatúragerjesztés a gerjesztő tekercselés fluxusát is csökkenteni akarja, ezért a gerjesztőáramnak is nőnie kell.

$\alpha = \pi/2$ helyzet. Negyed fordulattal később (3.39b ábra) a két tekercselés mágneses tengelye közös, az armatúra ellentétes irányban gerjeszt, mint a pólustekercselés. Továbbá a létrejövő armatúragerjesztés a fluxusállandóság elve miatt nem befolyásolhatja a pólusfluxust sem, azért pólusgerjesztés nagy része (körülbelül 80 %-a) és armatúragerjesztés kisebb része (körülbelül 20 %-a) szórású utakra kényszerül. Így az eredő fluxuskapcsolódás a tekercsekkel nem változott, a gerjesztőtekercssel továbbra is 100 %, az armatúrával nulla fluxus kapcsolódik.

Mivel az armatúrafluxus és a pólusfluxus legnagyobb része szórású utakon záródik, létrehozásukhoz jóval nagyobb áramokra van szükség, mint normális üzemi körülmények között.

A forgórész továbbfordulásával mindkét áram csökkenni fog, mert a pólusgerjesztés tengelye egyre inkább eltér az armatúratekerceslés tengelyétől.



3.40. ábra Az armatúraáram és a gerjesztőáram jelalakja feszültség maximumnál bekövetkező zárlat esetében (I. főhelyzet)

Az armatúra- és a gerjesztőáram időfüggvényét feszültség maximumnál bekövetkező zárlat esetében a 3.40. ábrán láthatjuk. A maximális értékek $\frac{\pi}{2} + k \cdot \pi$ értékeknél következnek be, és exponenciálisan csökkennek. A zárlati áram elméleti csúcserőértékét meghatározhatjuk, ha ismerjük az armatúratekerceslés L_a és gerjesztőtekerceslés L_g öninduktivitását, valamint a két tekerceslés M_{ag} kölcsönös induktivitását. Bevezetve az ún. szórási tényezőt:

$$\sigma = 1 - \frac{M_{ag}^2}{L_a \cdot L_g}, \quad (3.39)$$

a zárlati áramok csúcserőértékei az I. főhelyzetben bekövetkező zárlatok esetén:

$$i_{az \max} = \frac{\sqrt{2}}{\sigma} \cdot I_{az}, \quad (3.40)$$

ahol $I_{az} = \frac{U}{X_d}$ állandósult zárlati áram effektív értéke, és I_g gerjesztő áramnál:

$$i_{gz \max} = \frac{1}{\sigma} \cdot I_g. \quad (3.41)$$

b) II. főhelyzetben bekövetkező zárlat (3.41. ábra).

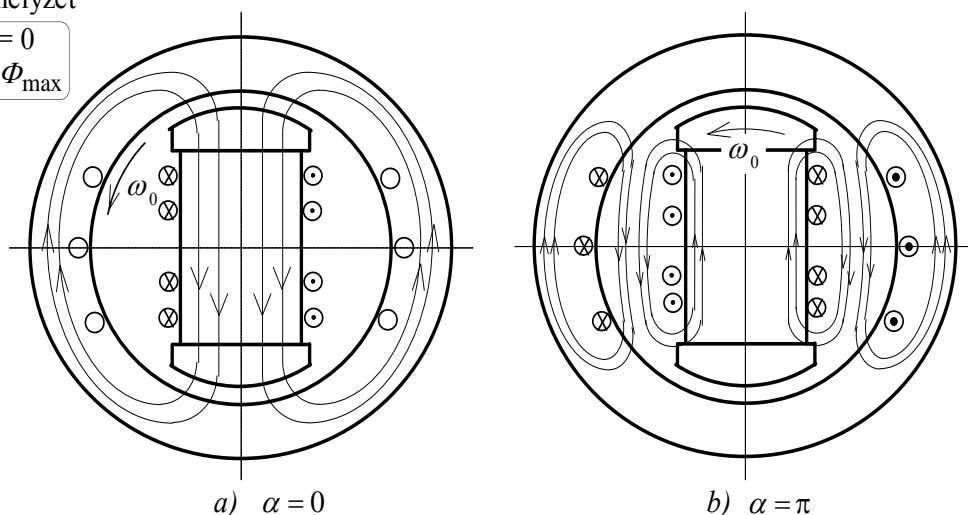
$\alpha = 0$ helyzet. Ha a zárlat pillanatában a kapocsfeszültség nulla, akkor az armatúra tekerceslés fluxuskapcsolódása maximális, tehát a gerjesztőtekerceslés és az armatúratekerceslés mágneses tengelye közös. Ezt a helyzetet mutatja a 3.41a ábra. Az armatúratekerceslés zárlat előtt árammentes, a gerjesztő tekerceslésben a névleges feszültség létrehozásához szükséges áram folyik.

Ha a forgórész az $\alpha = 0$ helyzetből továbbfordul, csökken a pólusgerjesztésnek az armatúratekercselés tengelyébe eső összetevője. Ekkor olyan áram jelenik meg az armatúrában, amelyik segíti fenntartani az eredetileg vele kapcsolódó fluxust. De az armatúragerjesztés növelné a gerjesztő tekercseléssel kapcsolódó erővonalak számát, ezért a gerjesztőáram átmenetileg csökken. Az elfordulás növekedésekor az armatúra- és a pólusgerjesztés mindinkább egymás ellen hat, ezért minkét áramnak rohamosan növekednie kell.

II. főhelyzet

$$U = 0$$

$$\Phi = \Phi_{\max}$$



3.41. ábra Fluxuselozslások a feszültség nullátmenetnél bekövetkező zárlat esetén
(csillapító tekercselés nélküli gép)

$\alpha = \pi$ helyzet. Fél fordulat múlva a gerjesztések elérik legnagyobb értéküket, és azonos hatásvonalon szembemutatnak egymással. Ahhoz, hogy a fluxusállandóság elve szerint az egyes tekercsekkel kapcsolódó fluxusok az eredeti állapotukhoz képest ne változzanak, a tekercselések fluxusai a szórási utakra szorulnak ki. Az eredeti fluxusoknak a szórási utakon történő fenntartásához rendkívül nagy áramokra van szükség.

Az armatúra- és a gerjesztőáram időfüggvényét a feszültség nullátmenetekor bekövetkező zárlat esetében a 3.42. ábrán láthatjuk. A maximális értékek $\pi + k \cdot \pi$ értékeknél következnek be, és exponenciálisan csökkennek. A 3.42. ábrán figyelembe vettük a valóságban mindig fellépő csillapítást, és ennek megfelelően vázoltuk a zárlatot követő áramjelalakok időbeni változását.

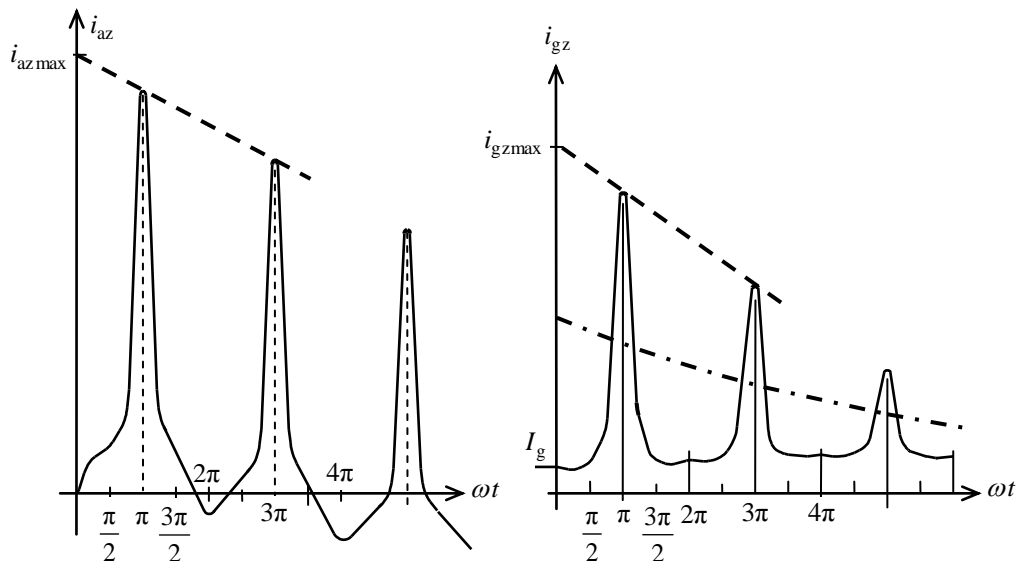
A zárlati áram elméleti csúcserőértéke most:

$$i_{az \max} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\sigma} \cdot I_{az}, \quad (3.42)$$

vagyis kétszer akkora, mint feszültség maximumkor bekövetkező zárlatnál volt.

A gerjesztő tekercsben zárlatkor fellépő áramcsúcs is közel duplája lesz az I. főhelyzet belinek:

$$i_{gz\max} = \frac{2-\sigma}{\sigma} \cdot I_g \quad (3.43)$$

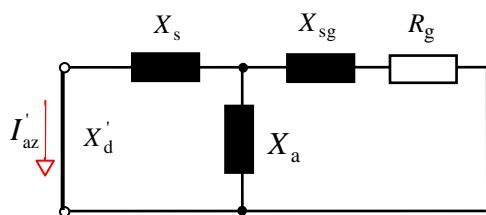


3.42. ábra Az armatúraáram és a gerjesztőáram jelalakja feszültség nullátmenetnél bekövetkező zárlat esetén (II. főhelyzet)

3.5.2.2. A zárlatot követő tranziens folyamatok

A zárlat bekövetkezése után fellépő zárlati áramok egyen- és váltakozó áramú összetevői exponenciálisan csökkennek a generátor különböző reaktanciái és ohmos ellenállásai által meghatározott időállandók szerint.

Az időállandókat a gyakorlatban a rövidzárlattal együtt járó folyamatok kísérleti vizsgálatai alapján szokták meghatározni. Ezeknél a vizsgálatoknál a generátoron mesterséges zárlatokat idéznek elő, és oszcillográffal felrajzoltatják az armatúra- és gerjesztőáram időbeli változását. Az oszcillogramokból az időállandók, és az első zárlati áramlökések nagyságára mértékadó reaktanciák viszonylag egyszerű módon meghatározhatók. A váltakozó áramú összetevő időbeli lefolyását szinuszosnak tekintjük.



3.43. ábra A tranziens helyettesítő vázlat zárlatkor (ha nincs csillapító tekercselés)

A csillapító tekercselés nélküli szinkron gép tranziens üzemre érvényes rövidzárlati vázlatát a 3.43. ábra mutatja, ahol X_a a főmező reaktanciája, X_s a főmező-, $X_{sg} \ll X_a$ a gerjesztő tekercselés szórási reaktanciája, R_g a gerjesztő tekercselés ellenállása.

A maximális rövidzárlati áram számításakor a biztonság irányában tévedünk, ha a számításakor a gerjesztő tekercselés R_g ellenállását elhanyagoljuk. Ebben az esetben a hosszirányú (a maximális zárlati áram kialakulásának pillanatában az armatúra gerjesztés d -irányú) *tranziens reaktancia* értéke:

$$X_d' = X_s + \frac{X_{sg} \cdot X_a}{X_{sg} + X_a} \cong X_s + X_{sg} . \quad (3.44)$$

A szinkron gép működési elvéből következik, hogy az állórész egyenáramú összetevője a gerjesztő tekercselésben váltakozóáramú, váltakozóáramú összetevője pedig egyenáramú összetevőt hoz létre. Megfordítva: a gerjesztő tekercselés egyenáramú összetevője az armatúra tekercselésben váltakozó áramú, váltakozó áramú összetevője pedig egyenáramú összetevőt eredményez. Ebből következik, hogy a gerjesztőtekercselés egyenáramú – és ezzel együtt az armatúratekercselés váltakozóáramú – összetevőjének csillapodását a gerjesztőtekercselés (és amennyiben van) a csillapítótekercselés együttesen határozzák meg. A csillapításra jellemző T_d' időállandó számításakor azonban a gerjesztő tekercs ellenállását már nem hanyagolhatjuk el:

$$T_d' = \frac{L_g}{R_g} \cdot \frac{L_d'}{L_d} = \frac{X_g}{\omega \cdot R_g} \cdot \frac{X_d'}{X_d} . \quad (3.45)$$

Az armatúraáram egyenáramú tranziens összetevője csillapodásának időállandója:

$$T_a' = \frac{L_d'}{R_a} = \frac{X_d'}{\omega \cdot R_a} . \quad (3.46)$$

Szinkron motorok esetén az indítás megkönnyítése, illetve a lengések csillapítása érdekében a forgórészen (a főpólus saruban) rövidre zárt „indító kalickákat” helyeznek el azért, hogy aszinkron motorként indítva legyen indítónyomatékuk. Ilyen módon elérhetik, hogy a gép forgórészét a szinkron fordulatszám közelébe felpörgetve a feszültség rákapcsolásával „szinkronba rántsák” a gépet. Generátorok esetén ún. „csillapító rudazatot” alkalmaznak, amelynek ellenállása kisebb, mint az indító kalickáké, és a szinkron gép dinamikus terheléséből adódó lengéseket hivatottak csillapítani.

Ha a gépnek van csillapító tekercselése (itt kell megjegyezni, hogy a tömör forgórész is csillapító tekercselésként viselkedik) akkor a gerjesztések még jobban kiszorulnak, szórási utakra kerülnek. Ebben az esetben még nagyobb, de gyorsan lecsengő „szubtranzien”

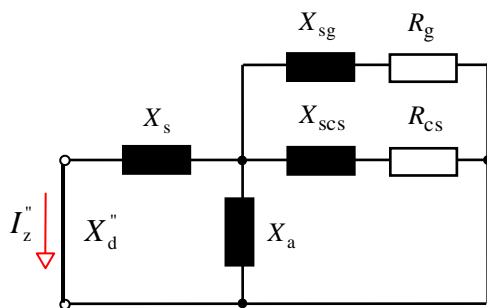
áramok jöhetnek létre, és a helyettesítő vázlat (3.44. ábra) is megváltozik.

A szubtranzien reaktancia értéke:

$$X_d'' \cong X_s + \frac{X_{sg} \cdot X_{scsill.}}{X_{sg} + X_{scsill.}} . \quad (3.47)$$

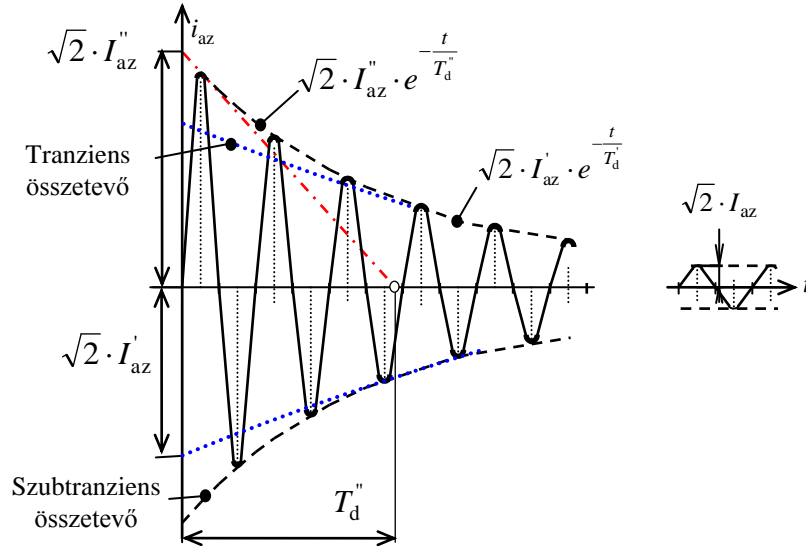
A szubtranzien időállandó:

$$T_d'' = \frac{L_g}{R_g} \cdot \frac{L_d''}{L_d} = \frac{X_g}{\omega \cdot R_g} \cdot \frac{X_d''}{X_d} . \quad (3.48)$$



3.44. ábra A szubtranzien helyettesítő vázlat zárlatkor (van csillapító tekercselés)

A 3.45. ábrán egy csillapító tekercseléssel rendelkező generátor feszültség maximumkor bekövetkező zárlatának oszcillogramját látjuk. A zárlat pillanatában rövidzárlati áram értéke nulla, mert az áram 90° -al késik a feszültséghez képest. Ezért ebben az esetben az armatúra tekercselésben nem lép fel egyenáramú összetevő. A csillapító tekercselés miatt viszont fellép a váltakozóáramú, gyors lecsengésű I_{az}'' szubtranzien্স összetevő, amely később a I_{az}' tranzien্স összetevőbe, majd végül az állandósult



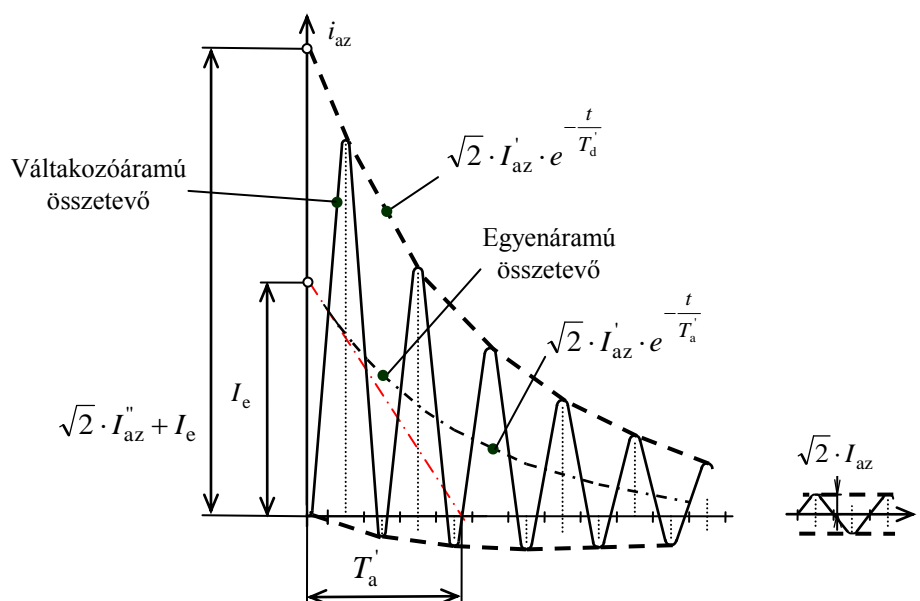
3.45. ábra Csillapító tekercseléssel rendelkező szinkron generátor feszültség maximumkor (I. főhelyzetben) bekövetkező zárlatának oszcillogramja

rövidzárlati áramba megy át. Az exponenciális csökkenések időállandója sorban T_d'' , majd T_d' . Az ábrán az áram burkológörbe nulla időpillanatig történő meghosszabbításával meghatározhatjuk a váltakozóáramú összetevő csúcsertékét ($\sqrt{2} \cdot I_{az}''$), és a burkológörbéhez húzott érintővel a T_d'' szubtranzien্স időállandót.

A 3.46. ábrán egy csillapító tekercselés nélküli generátor feszültség nullátmenetkor bekövetkező zárlatának oszcillogramját tekinthetjük meg. Mivel a zárlat pillanatában az áram a 90° -os eltolás miatt éppen maximális értékű, az áram csúcsertékeivel azonos egyenáramú összetevőnek kell fellépnie. Mivel nincs csillapító tekercselés, szubtranzien্স áram nem lép fel. Az armatúraáram egyenáramú összetevője az armatúrakör tranzien্স-, időállandójával csökken exponenciálisan. Az oszcillogramból láthatóan a zárlati áram burkológörbéjének mindenkor pillanatértéke egy egyenáramú-, és egy váltakozóáramú tranzien্স összetevőből adódik össze,

$$I_e \cdot e^{-\frac{t}{T_a'}} + \sqrt{2} \cdot I_{az}' \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}}, \quad (3.49)$$

amely végül az állandósult rövidzárlati áramba megy át. Az oszcillogram alapján az egyenáramú összetevő T_a' időállandóját az áram burkológörbe középvonalához I_e pontban húzott érintő időtengellyel való metszésponjtja adja.



3.46. ábra Feszültség nullátmenetkor (II. főhelyzetben) bekövetkezett zárlat oszcillogramja csillapító tekercselés nélküli gép esetén

Természetesen a tranziens, illetve a szubtranzienst reakanciák az oszcillogramokból közvetlenül is meghatározhatók:

$$X'_d = \frac{U}{I'_{az}}, \quad \text{illetve} \quad X''_d = \frac{U}{I''_{az}}. \quad (3.50)$$

Végül összefoglalva a tranziens állapotok jellemzésére szolgáló reakanciák és időállandók tájékoztató értékei:

✚ Tranziens szakaszban (csillapítótekercselés nélküli gépeknél):

Hengeres forgórésznel: $X'_d = 0,1 \dots 0,2 \cdot X_d$.

Kiálló pólusnál: $X'_d = 0,2 \dots 0,3 \cdot X_d$.
 $X'_q \cong X_q$.

Időállandó: $T'_d = 0,3 \dots 0,5 \text{ sec.}$

✚ Szubtranzienst szakaszban (csillapítótekercseléssel rendelkező gépeknél):

Hengeres forgórésznel: $X''_d = 0,075 \dots 0,12 \cdot X_d$.

Kiálló pólusnál: $X''_d = 0,15 \dots 0,25 \cdot X_d$.

Időállandó: $T''_d = 0,02 \dots 0,08 \text{ sec.}$

3.5.2.3. Aszimmetrikus zárlatok

A szinkron gépek üzemében leggyakrabban nem a szimmetrikus háromfázisú zárlat, hanem a két fázis közötti kétsarkú, vagy a fázis és föld közötti egysarkú, egyfázisú zárlat következik be.

Egyfázisú zárlat esetén az állórész áramkörében egyfázisú zárlati áram jelenik meg, ami térben álló, lüktető mágneses teret hoz létre. Ez a lüktető mező helyettesíthető két egymással szemben forgó, fele amplitúdójú forgómezővel.

A legkedvezőtlenebb esetben, ha a zárlat feszültség nullátmenetnél következik be, az áram csak úgy indulhat nulláról, ha a zárlat pillanatában fellép egy egyenáramú összetevő. Az egyenáram gerjesztette álló mező a forgórész tekercselésében 50 Hz frekvenciájú váltakozó áramot hoz létre.

Az egyfázisú áram lüktető mezejének azzal az összetevőjével, mely együtt forog a forgórészszel a gerjesztőáram megnövekedett egyenáramú összetevője tart egyensúlyt. A lüktető mező szembeforgó összetevője kétszeres frekvenciájú, tehát 100 Hz-es váltakozó áramú összetevőt indukál nem csak a gerjesztő tekercselésben, hanem a forgórészen fellelhető összes zárt vezető keretben.

A leírtakból látható, hogy az egyfázisú zárlat jobban igénybe veszi a forgórészt, mint a szimmetrikus háromfázisú zárlat.

A lüktető mezőnek az a komponense, amelyik szembeforog a póluskerékkel, létrehoz egy zárlati áramot az állórészben is. Ennek a zárlati áramnak a számítására vezették be az ún. *negatív sorrendű* reaktanciát. A negatív sorrendű rendszer szembeforogva a forgórészszel hol hosszirányban, hol keresztirányban kapcsolódik a póluskerékkel, ezért a negatív sorrendű reaktancia a hossz és keresztirányú tranziens reaktanciák középértéke lesz:

$$X_2 = \frac{X_d' + X_q'}{2}. \quad (3.51)$$

Kétsarkú zárlat esetén az áramkör reaktanciája a tranziens és a negatív sorrendű reaktancia összege ($X_d' + X_2$) lesz. Mivel a helyettesítő vázlat reaktanciáit egy fázisra szokás megadni, kétsarkú zárlat esetén a zárlati áramkörben a reaktanciák kétszerese szerepel, a zárlati áramot megindító feszültség azonban nem a fázisfeszültség, hanem annak $\sqrt{3}$ -szorosa, vagyis a vonali feszültség lesz.

Ezek alapján a zárlati áramcsúcs közelítő értéke II. főhelyzetben bekövetkező kétsarkú zárlat esetén:

$$i_{\text{azmax}}' \approx 2 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U}{2 \cdot (X_d' + X_2)} = 2,4 \cdot \frac{U}{X_d' + X_2}. \quad (3.52)$$

A csillapítótekercselés hatása a negatív sorrendű reaktanciára hasonló, mint a szubtranziens reaktanciára, de függ a rudazat elrendezésétől is. Ha összekötött rudazat van az egyes pólusok között akkor $X_q'' \approx X_d''$, ha nem akkor $X_q'' = 2...3 \cdot X_d''$.

Csillapítótekercseléssel rendelkező gépek negatív sorrendű reaktanciája:

$$X_2 = \frac{X_d'' + X_q''}{2}. \quad (3.53)$$

3.5.3. A szinkron gép lengései

A szinkron gép üzeme során előfordul, hogy terhelési állapota megváltozik, terhelési szöge a megváltozott nyomatéknak megfelelő új értéket vesz fel. Ez a változás azonban nem következhet be ugrásszerűen, ahogy a terhelésváltozás bekövetkezik a gépben. A valóságban a szinkron gép forgórésze és a vele együttforgó tömegek, valamint az armatúra-tekerceselés által létrehozott forgó mágneses tér egy rugalmas, lengésre hajlamos rendszert képez.

Tételezzük fel, hogy egy szinkron motor állandósult üzemben M_0 nyomatékot szolgáltat δ_0 terhelési szög mellett. Növekedjen meg a nyomatékigény ugrásszerűen ΔM -mel. A bekövetkezett terhelőnyomaték többlet átmenetileg lassítani fogja a forgórészt. A lassulás azonban a forgórész és a vele összeköttetésben lévő forgó tömegek tehetetlensége miatt nem szűnik meg az új egyensúlyi állapotnak megfelelő δ_1 terhelési szög elérésekor, hanem azon túllendül α szöggel.

Mivel a motor által kifejtett M_2 nyomaték most nagyobb, mint az $M_1 = M_0 + \Delta M$ terhelőnyomaték, a forgó rendszer gyorsulni fog, a terhelési szög lecsökken, és a forgórész ismét túllendül az egyensúlyt jelentő δ_1 terhelési szögön. Ez a lengési folyamat az **A** pont körül addig tart, amíg a villamos és mechanikai veszteségek fel nem emésztik a terhelő- és motornyomaték különbség okozta teljesítménylengést.

Ugyanilyen folyamat játszódik le természetesen a merev hálózatra kapcsolt szinkron generátor terhelési állapotának megváltozásakor is. A helyzet csak rosszabbodik, ha a terhelésváltozás periódikusan ismétlődik. (Pl.: dugattyús szivattyú meghajtása, vagy Diesel-motorral hajtott szinkron generátor.)

Az eddigiekből is látható, hogy a szinkron gépek lengéseinek vizsgálata meglehetősen bonyolult feladat. További vizsgálatainkhoz ezért kénytelenek leszünk egyszerűsítő közelítésekre. Továbbra is csak hengeres forgórészű gépeket vizsgálunk, és feltételezzük hogy a lengések közben a gép belső nyomatéka a statikus $M = f(\delta)$ jelleggörbe szerint változik; a nyomatékváltozás amplitúdója olyan kicsi, hogy a szinuszgörbe adott munkapontjához húzott érintővel helyettesíthető; a villamos és mechanikai szög egyenlősége érdekében kétpólusú gépekkel foglalkozunk.

A szinkron gép mozgásegyenletének felírásához vizsgáljuk meg milyen nyomatékok hatnak a gép forgórészére az egyensúlyi helyzettől különböző állapotban.

A 3.47a ábra jelöléseit használva, tételezzük fel, hogy gépünk túllendült és éppen a **B** pontban üzemel. Mivel a motor által szolgáltatott M_2 nyomaték nagyobb mint az M_1 terhelőnyomaték, a gép forgórészére $M = M_2 - M_1$ gyorsító nyomaték hat. Kiindulási feltételeink szerint felírhatjuk

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{M}{\alpha} \quad \text{alapján, hogy} \quad M = \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta.$$

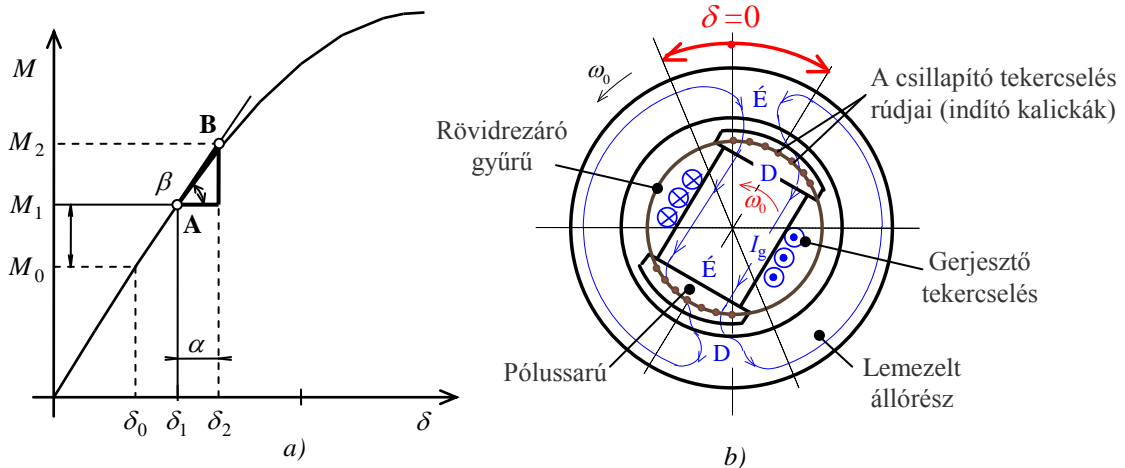
Ugyanakkor tudjuk, hogy:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta M}{\Delta \delta} = \frac{dM}{d\delta} = M_s$$

a szinkronozó nyomatékkal egyenlő. A gyorsító nyomaték tehát az egyensúlyi helyzethez tartozó szinkronozó nyomaték, és az attól való terhelési szög eltérés (α) szorzata lesz:

$$M = M_s \cdot \alpha. \quad (3.52)$$

Miközben a forgórész egyensúlyi szöghelyzetéből a hirtelen nyomaték-változás hatására kimozdul, szögsebessége különbözni fog a forgómező szögsebességétől. A viszonylagos elmozdulás miatt az eredő fluxus erővonalai metszik a forgórészen fellelhető összes zárt vezetőkeretet, és azokban feszültséget indukálnak. Az indukált feszültségek nagysága a relatív szögsebességtől függ, így az általuk megindított örvényáramok is, melyek természetüknél fogva gátolják a mozgást.



3.47. ábra A szinkron gép lengései

a) magyarázat a szinkron gép lengéseihez; b) a csillapító tekercselés/indító kalickák

Hogy minél hatásosabban kialakulhassanak ezeket a gyors állapotváltozásokat akadályozó áramok, egyes gépeknél rézrudakból külön rövidrezárt tekercselést készítenek a csillapítás növelése érdekében (csillapító tekercselés, 3.47b ábra, illetve a 3.1. fénykép). Ez a kalickás tekercselés ugyanúgy működik, mint egy rövidrezárt forgórészű aszinkron motor kalickás forgórész tekercselése. Így ez a tekercselés megfelelő méretezés esetén felhasználható az indítónyomaték nélküli szinkron gép aszinkron motorként történő indítására (indító kalickák). Az indító kalickák segítségével a gép forgórésze a szinkron fordulatszám közelébe gyorsítható és megfelelő feltételek esetén durván szinkronozható is.

Tovább növelhetik a csillapítást a tömör szerkezeti kialakításokban kialakuló örvényáramok hatására kialakuló nyomatékok, amelyek az eredő fluxus nagyságán kívül függenek az állapotváltozás sebességétől, vagyis a relatív szögsebességtől (ω_r). Állandó kapcsolófeszültséget feltételezve, az eredő fluxust a szerkezeti kialakításból adódó k állandóval összevonva, a csillapító nyomatékot felírhatjuk a következő alakban:

$$M_{cs} = k \cdot \omega_r = k \cdot \frac{d\alpha}{dt} \quad (3.53)$$

A forgórész és vele kapcsolatban lévő forgó tömegek gyorsításához ill. lassításához szükséges bizonyos nagyságú dinamikai nyomaték. A dinamikai nyomatékokat a forgó tömegek forgórészre redukált tehetetlenségi nyomatéka (J) és a szöggyorsulás (ε) szorzata határozza meg:

$$M_d = J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = J \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} \quad (3.54)$$

Ezek után felírhatjuk, hogy a terhelőnyomaték és a szinkron gép villamos nyomatékának különbségéből keletkező nyomaték a forgó tömegek gyorsítására (lassítására), és a keletkező csillapító nyomaték fedezésére fordítódik:

$$M_{vill} - M_{terh} = M_s \cdot \alpha = M_d + M_{cs} . \quad (3.55)$$

Az egyes nyomatékokat behelyettesítve, és az egyenletet rendezve kapjuk a forgórész relatív mozgását leíró differenciál egyenletet:

$$J \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} + k \cdot \frac{d\alpha}{dt} - M_s \cdot \alpha = 0 . \quad (3.56)$$

Az egyenletben szereplő állandók értékétől függően a forgórész periódikusan csillapodó lengéssel közelíti meg az új stabilis állapotot. A levezetett egyenlet egyetlen, hirtelen terhelésváltozás hatására bekövetkező lengéseket írja le. Ezt a szinkron gép önlengésének nevezik.

Nagyobb jelentőségük van az ún. gerjesztett lengéseknek. Gerjesztett lengésről akkor beszélünk, ha a gépre ható nyomaték nem állandó, hanem egy bizonyos érték körül periódikusan ismétlődik. A gerjesztett lengések általában állandósulnak. Nagyteljesítményű szinkron gép állandósult lengése a táphálózatot is nagyon zavarhatja, ugyanis a lengő gép áramfelvétele is periódikusan változik, és a létrejövő hálózati feszültségesés (vagy emelkedés) a hálózatra kapcsolt egyéb fogyasztó működését (pl.: izzólámpák) igen kedvezőtlenül befolyásolhatja.

Súlyosbodik a helyzet, ha a gerjesztőnyomaték frekvenciája megegyezik, (vagy egész-számú többszöröse) a gép önlengési frekvenciájával. Ilyenkor a lengések amplitúdója fokozatosan növekszik, rezonancia lép fel, és a gép kiesik a szinkronizmusból.

3.6. KÜLÖNLEGES SZINKRON GÉPEK

3.6.1. Körmspólusú generátor

A közlekedési eszközök és a félvezető technika fejlődésével igény jelentkezett a járművek villamos energia ellátásának korszerűsítésére. Az erre a célra korábban használt egyenáramú generátoroknak (töltődinamóknak) ugyanis két jelentős hátrányuk volt:

- ✚ a kommutátoros, tekercselt forgórész korlátozta a fordulatszám növelését, és ezzel a teljesítményegységre eső súly csökkentését,
- ✚ a kommutátor és a keferendszer állandó gondozást igényelt.

E hátrányokat küszöböli ki a 3.48. ábrán vázolt körmspólusú generátor. Elnevezését a hosszmetset alsó felén látható forgórészről kapta. A forgórészen egy hengeres gerjesztő-tekercs van, melyet csúszógyűrűkön keresztül egyenárammal táplálunk. A gerjesztőtekercs tengelyirányban létrehozott mágneses terét a forgórészre jobb és baloldaltól felprésselt **D** és **É** jelű körms acél gyűrűk vezeték a lemezelt állórészbe. A baloldali gyűrű körmei alkotják az északi pólusokat, a jobboldali a délieket. Az északi és déli pólusok tehát mágnesesen párhuzamosan vannak kapcsolva.

A gerjesztés által létrehozott erővonalak az északi körmsből a gépben sugárirányban kilépnek, és megkerülve az állórész hornyokban lévő armatúratekercselést, újból sugárirányban térnek vissza a déli körmskhöz. (Az északi és déli körms között akkora légrést kell hagynunk, hogy a mágneses ellenállás az állórész felé jóval kevesebb legyen, és az erővonalak a leírt útvonalat válasszák.)

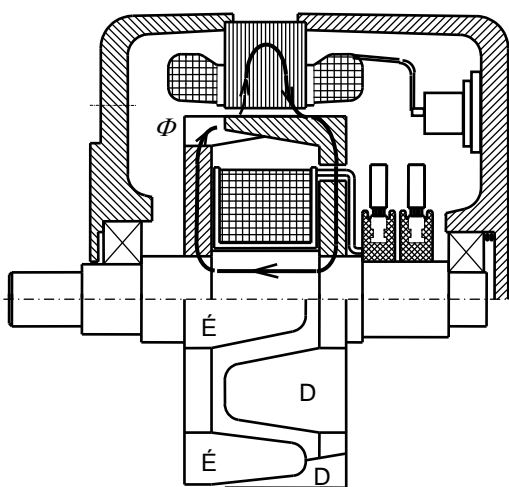
Az ábrán vázolt gépnél 6 északi és 6 déli körms hozza létre a 12 pólusú mágneses teret. A forgórészt forgásba hozva, ez a 12 pólusú mágneses tér metszi az állórészen lévő rendszerint háromfázisú tekercselést, és abban feszültséget indukál.

Az indukált feszültség effektív értéke:

$$U_i = 4.44 \cdot f \cdot N \cdot \xi \cdot \Phi_{\max},$$

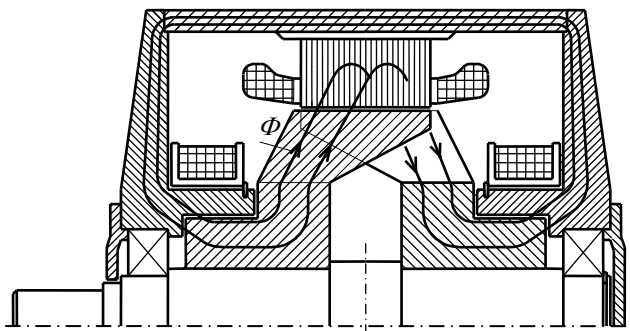
tehát függ a generátor fordulatszámától. Gépjár-

művekben, ahol a hajtómotor fordulatszáma tág határok között változik, ugyanúgy szükség van gerjesztésszabályozóra, mint az egyenáramú töltődinamóknál. A szinkron gép szinkron reaktanciája függ a frekvenciától: $X_d = X_a + X_s = 2\pi \cdot f \cdot (L_a + L_s)$. Ez egy frekvenciával lineárisan növekvő reaktancia sorbakapcsolását jelenti a fogyasztóval, ami a gerjesztésszabályozás kérdését csak igénytelen esetben (pl.: kerékpár világítás állandómágnesű forgórészsel) oldja meg.



3.48. ábra Gépjárművekben használt körmspólusú generátor

Az egyszerű felépítésű forgórész lehetővé teszi a járműgenerátorok magas üzemi fordulatszámát, ami jó súlyegységre eső teljesítményhasznosítást, és az előállított több száz Hz-es háromfázisú váltakozó feszültség egyenirányítása után viszonylag sima egyenfeszültséget eredményez.



3.49. ábra Vasúti, kefenélküli körmospólusú generátor

Az átlagos járműgenerátoroknál nagyobb teljesítményű, igényesebb körmospólusú generátorokat készíthetik csúszógyűrű nélküli kivitelben is. Ezeknél az axiális mágneses teret az acél pajzsokon elhelyezett két gerjesztőtekercs hozza létre, és a mágneses tér armatúratekercseléssel való kapcsolódását itt is körmös-pólusú gyűrűk biztosítják.

A mágneses tér záródása ezeknél a gépeknél az armatúra vastesten kívül, a jó mágneses vezetőképességű (acél) állórészházban történik. (A gép tengelyének viszont antimágneses anyagból kell készülnie, különben mágnesesen söntölné a körmös pólusokat.)

3.6.2 Kefenélküli, forgódiódás szinkrongenerátor

A villamos energia hagyományos előállításakor az erőművekben a gőzturbina által hajtott háromfázisú főgenerátor tengelyén helyezkedett el egy egyenáramú öngerjesztésű segédgenerátor. Ez a segédgenerátor szolgáltatta az egész gépcsoport számára az egyenáramú energiát, például a szinkron generátor gerjesztőáramát.

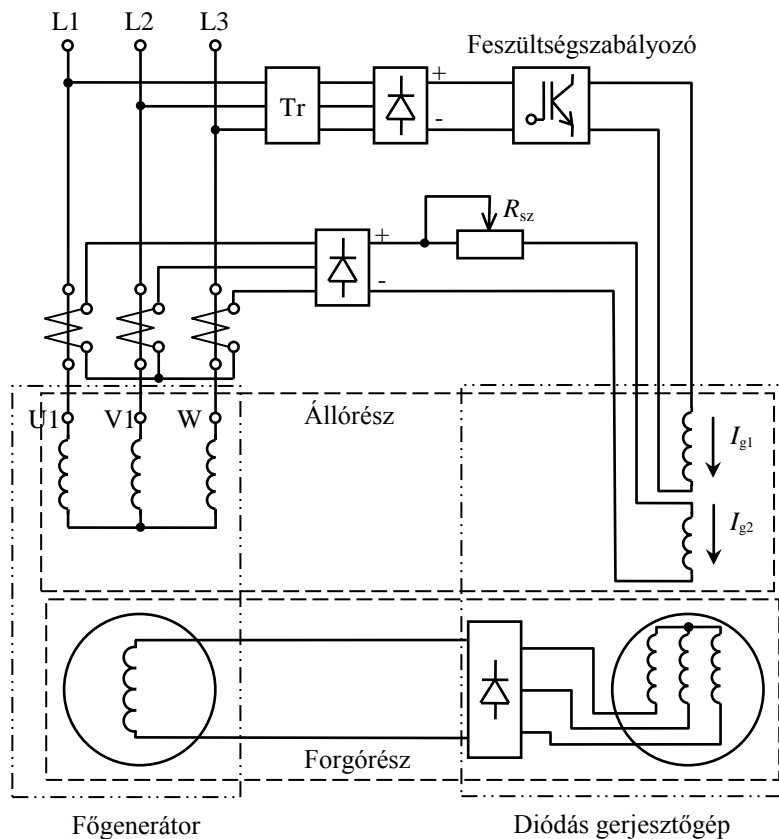
Az egyenáramú gépnél a kommutátor, a szinkron gépnél a csúszógyűrűk és mindkét gépnél a kefék folyamatos felügyeletet igényeltek, a gépcsoport megbízhatóságát csökkentették. A megoldást a teljesítményelektronika fejlődése tette lehetővé a nagyteljesítményű félvezető elemek megjelenésével.

Az egyenáramú generátor helyére egy kifordított, kis teljesítményű szinkron generátor került, melynél az állórészen helyezkednek el a gerjesztőtekercsek, és a forgórész váltakozó áramú tekercseléséhez egy háromfázisú diódás híd csatlakozik.

A hídkapcsolás egyenáramú kimenete a főgenerátor gerjesztőtekercselését táplálja.

A diódás híd a főgenerátor gerjesztőtekercselésével azaz a forgórészrel együtt forog és egy tárcsán helyezkedik el. A gerjesztőgép állórésze általában kiképzett pólusú, melyeken többféle gerjesztőtekercs helyezhető el. Maga a gerjesztőgép egy forgógépes erősítőnek is felfogható (1:10), mert egészen kis gerjesztőáramokkal jelentősen tudjuk változtatni a főgenerátor gerjesztőkörü jellemzőit.

A 3.50. ábrán láthatjuk a diódás szinkron generátor egy kapcsolási rajzát. A gerjesztőgép állórészen itt két egyenáramú tekercselés helyezkedik el. Az egyik tekercset a főgenerátor kapcsairól leválasztó transzformátoron, egyenirányítón keresztül tápláljuk egy feszültségszabályozó közbeiktatásával. Ez a kapcsolás így öngerjesztésű, mert a gépcsoport forgásakor a remanens indukció az állórészben feszültséget indukál, melyet egyenirányítva, és visszavezetve a gerjesztőgéphez a főgenerátor felgerjed. A tranzisztoros feszültségsza-



3.50. ábra Diódás szinkron generátor kapcsolási vázlata

bályozóval be lehet állítani az üresjárási feszültséget, amelynek értéke a fordulatszámtól, és a terheléstől is közelítőleg független lesz.

A gerjesztőgép állórészén elhelyezkedő másik tekercset a főgenerátor állórész áramával arányos egyenárammal gerjeszthetjük. Ezzel egy kompaundálást végzünk, így a generátor dinamikus tulajdonságait javíthatjuk, a szabályozó működését segíthetjük. A kompaundált generátor kapocsfeszültsége a terhelésváltozást követő tranzien folyamatok során hamarabb állandósul, a feszültség letörések pedig kisebbek lesznek.

Az ismertetett kétvástestű szinkron generátor szerkezeti elrendezése a 3.14. ábrán látható.

3.6.3. Reluktancia motorok

Az ipari gyakorlatban gyakran adódhat olyan feladat, amikor két vagy több motornak pontosan megegyező fordulatszámmal kell járnia. Az ilyen feladat többféleképpen is megoldható, de néhány kW teljesítményig a legegyszerűbb és legolcsóbb megoldás reluktancia motorok alkalmazása.

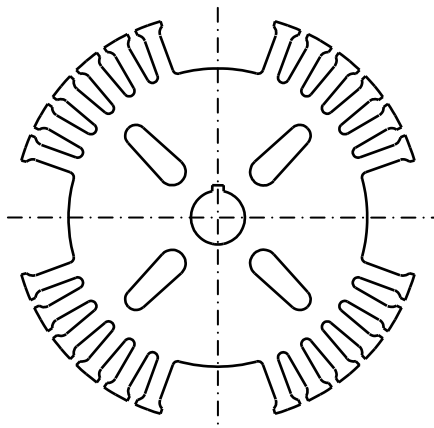
A reluktancia motor tulajdonképpen egy gerjesztés nélküli, kiállópólusú szinkron gép. A kiállópólusú szinkron gép nyomatékának tárgyalásakor ismertük meg a reluktancia nyomaték fogalmát, melynek nagysága az X_d hosszirányú és X_q keresztirányú szinkron reaktanciák különbözőségétől függ:

$$M_r = -\frac{m}{\omega_0} \cdot \frac{U^2}{2} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \cdot \sin 2\delta.$$

Ennek a nyomatéknak a hasznosításán alapszik a reluktancia motor működése.

A szinkron gépek motoros üzemmódban való használatának van egy meglehetősen nehézsége: a szinkron gépnek nincs indítónyomatéka, önmagától nem tud felgyorsulni a forgórész álló helyzetből, az armatúra által létrehozott forgó mágneses tér fordulatszámára.

A szinkron motorok egyik indítási módjánál a forgórészt indító kalickával látják el, és az armatúrát hálózatra kapcsolva a forgó mágneses tér a forgórészt aszinkron motorként a



3.51. ábra Reluktancia motor forgórészének lemezrajza

szinkron fordulatszám közelébe pörgeti, majd gerjesztéslökéssel a gép szinkronizmusba ugratható.

Ez adta a gondolatot, hogy egy rövidrezárt forgórésztű aszinkron motor forgórészét úgy alakítsák ki, hogy a forgómező pólusszámának megfelelően mágnesesen aszimmetrikus legyen, és a létrejövő reluktancia nyomaték a forgórészt felpörgés után szinkronba ugrassa. A felpörgésnek és szinkronba ugrásnak természetesen háttart szab a motort indításakor a terhelő nyomaték és a felgyorsítandó rendszer tehetetlenségi nyomatéka, ezért a reluktancia motorok névleges teljesítménye kb. feleakkora, mint a vele azonos nagyságú aszinkron motoroké.

A reluktancia motor állórésze tehát megegyezik egy szinkron (vagy aszinkron) gép állórészével, lemezelt vastestében rendszerint háromfázisú tekercselés van, mely forgó mágneses teret hoz létre.

Forgórésze azonban úgy van kialakítva, hogy helyet kapjon rajta az aszinkron gépekre jellemző kalickarendszer, ugyanakkor jelentős különbség legyen a hossz és keresztirányú mágneses vezetés között a minél nagyobb reluktancia hatás elérése érdekében.

A 3.51. ábrán egy négypólusú reluktanciamotor forgórészének lemezrajzát láthatjuk. A pólusközökben a lemez annyira ki lett mélyítve, hogy itt kalickarudak nem helyezhetők el. A kis hornyokban lévő rudakat a lemezttest végein teljesen körbefutó rövidrezáró gyűrűk kötik össze, hogy létrejöhessen a felpörgést előidéző aszinkron nyomaték. A reluktancia hatás fokozására a pólusok középvonalában sugárirányú nyílásokat sajtoltak, így is növelve a hossz és keresztirányú mágneses vezetés közti különbséget.

A reluktanciamotor átlagos légrésmérete a kerület mentén jóval nagyobb a keresztirányú légrés megnövelése miatt, mint az azonos nagyságú aszinkron motoré. Ezért felfutás alatt nagyobb a mágnesező árama, rosszabb $\cos\varphi$ -vel dolgozik mint az aszinkron motor. Szinkron üzemben sem javul a helyzet, mivel nincs gerjesztőtekercse a gépnek, és állandóan alulgerjesztett üzemállapotban van.

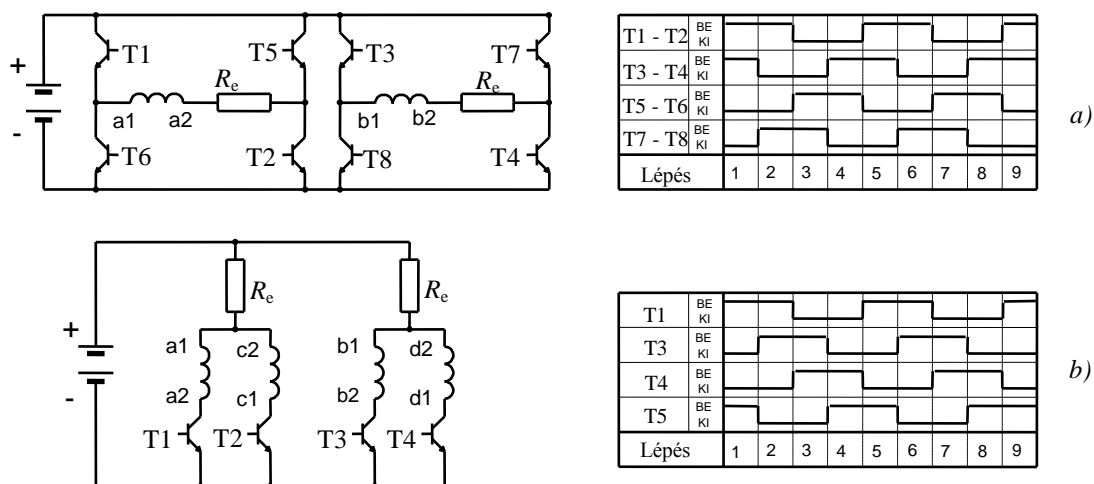
Emiatt a reluktanciamotor hatásfoka és súlyegységre eső teljesítmény kihasználása kb. fele az aszinkron motorénak, ezért csak 5 kW alatti teljesítmény tartományban használatosak. A kisebb teljesítmény miatt egyre kevésbé hanyagolhatók el a veszteségek, nő a különbség a tengelyen leadott mechanikai teljesítmény és a hálózathoz felvett villamos teljesítmény között, így a tengelyen kifejtett nyomaték kisebb lesz az elméletileg kiszámított villamos reluktancia nyomatéknál, és a maximális terhelési szög az elméleti $\delta_{\max} = 45^\circ$ helyett csak $\delta_{\max} = 30...35^\circ$ lesz.

A leírt negatívumok ellenére mégis szívesen alkalmazzák egyszerű felépítése és olcsósága miatt olyan villamos hajtásoknál, ahol több motor együttfutása, vagy állandó fordulatszám a követelmény.

A frekvenciaváltós inverterek elterjedésével együtt a reluktancia motorok felhasználási köre is bővül, mivel több motor együttes, azonos mértékű fordulatszám változtatására nyílik lehetőség (pl.: csomagolástechnika, papír- és textilipar).

3.6.4. Léptetőmotorok

A léptetőmotorok felépítésüket tekintve a szinkron motorokhoz állnak legközelebb. Eltérés azonban, hogy amíg a szinkron gépeknél az állórészen elhelyezett tekercse-lés forgómezőt hoz létre, addig a léptető motoroknál a fázisok idővezérelt ki-be kapcsolása diszkrét helyzeteket felvevő „léptetett” mezőt és forgórész pozíciókat okoz. Ennek előnye, hogy a lépések számolásával egy tűréshatáron belüli információval rendelkezünk a forgórész helyzetéről. A léptetőmotorok ezzel a módszerrel lehetővé teszik a visszacsatolás nélküli pozicionálást.



3.52. ábra Kétfázisú léptetőmotor

a) bipoláris- és b) unipoláris vezérlése

A léptetőmotorok állórésze mindig kiálló pólusú, ezeken a pólusokon helyezik el az egyenárammal gerjesztett „fázistekercseket”. A léptetőmotorok általában két-, öt-, és újabban háromfázisúak. A forgórész *aktív*, vagy *passzív* attól függően, hogy gerjesztjük-e vagy sem. Ha aktív, akkor a gerjesztést állandómágnes adja. A passzív forgórészű motorok mindig kiálló pólusúak (azaz eltérés van a d és q irányú reaktanciájuk között), amiért szokásos a *reluktancia-forgórészű léptetőmotor* elnevezés.

Egy kétfázisú motor lehetséges vezérlési módjaihoz tartozó kapcsolásokat és a vezérlés idődiagramját táblázatos formában a 3.52. ábrán mutatjuk be.

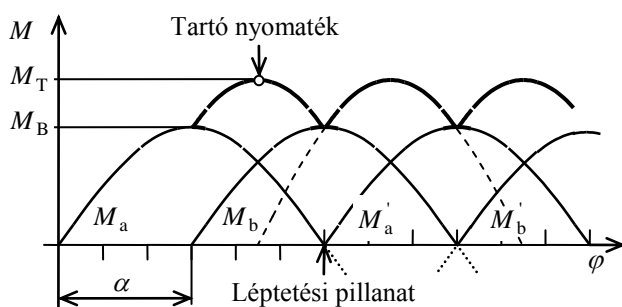
Bipoláris vezérlésnél minden időpillanatban mindkét fázistekercs be van kapcsolva, a tranzistoros kapcsolókból kialakított híd a tekercsek kapcsaira kapcsolt feszültség polaritását (és ezzel együtt a fázistekercsek áramirányát is) cserélgeti. *Unipoláris vezérlésnél* ezzel szemben a tekercseket vagy ki-, vagy bekapcsoljuk, a polaritás változatlan. Bipoláris vezérlésnél több kapcsoló elem alkalmazása árán jobb a tekercsek kihasználtsága szemben az unipoláris vezérléssel, ahol egy adott időpillanatban a tekercselés fele inaktív. Az ebből adódó eredő gerjesztéscsökkenés természetesen kisebb fluxust és kisebb nyomatékot jelent.

A 3.53. ábrán vázlatos keresztmetszetével ábrázolt kétfázisú (a fázistekercsek *a*-val és *b*-vel jelöltek) léptetőmotort bipolárisan vezéreljük. A forgórész aktív, fogainak (mágneses pólusainak) számát Z_r -vel jelölve: $Z_r = 2$. A 3.52a ábrán megadott 1 lépésnél a T1-T2 és T3-T4 tranzisztorok bekapcsolásával az állórészen a megadott mágneses pólusok alakulnak ki, melyek eredője az I-el jelölt irányba mutat, ezért a forgórész a megadott módon áll be.

Az ezt követő léptetéskor (T3-T4 ki-, T7-T8 bekapcsolásával) a *b* fázisban az áramirány megcserélődik, és így az új eredő gerjesztés irányának megfelelően a forgórész a II helyzetbe áll be és így tovább. A léptetések végigkövetve a forgórész sorra az $I \Rightarrow II \Rightarrow III \Rightarrow IV \Rightarrow I \dots$ helyzeteket veszi fel, vagyis 90° -onként lépked. A valóságos léptetőmotorokban a lépésszöget a forgórész fogszámának növelésével csökkentik. Bizonyítható ugyanis, hogy a léptetőmotor egész-lépésszögét az

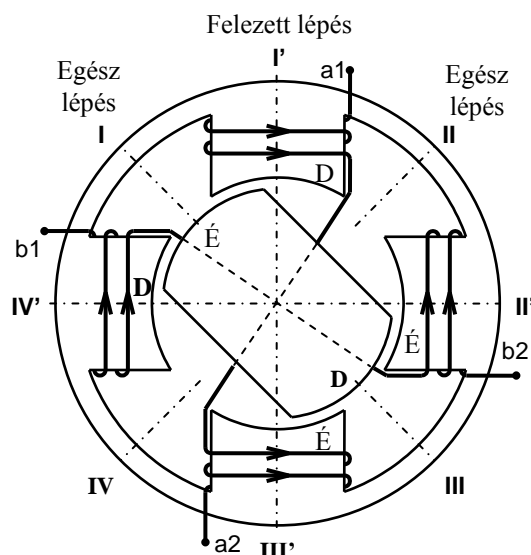
$$\alpha = \frac{360^\circ}{Z_r \cdot m} \quad (3.57)$$

összefüggésből számíthatjuk, amelyben Z_r a forgórész fogainak száma, m pedig a fázisszám (ebben a konkrét esetben $m = 2$ és $Z_r = 2$, vagyis $\alpha = 90^\circ$).



3.54. ábra. Kétfázisú léptetőmotor statikus nyomatéki görbéi

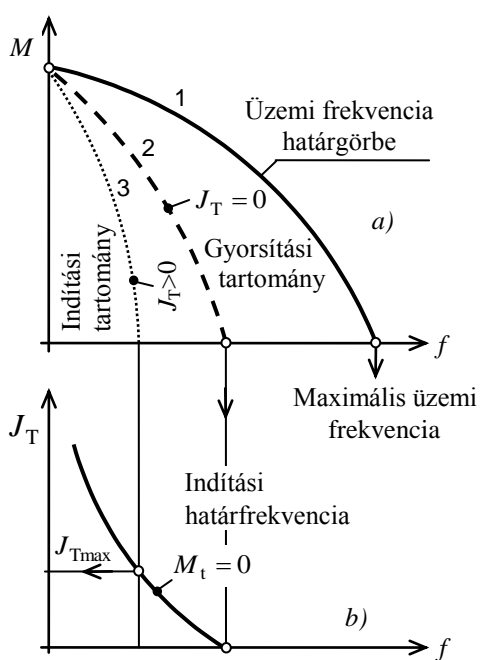
fordítani a gerjesztés irányát, ez a léptetés pillanata. Az ábrába vastagabb vonallal berajzoltuk az eredő nyomatéki görbét. Látható, hogy a nyomaték $M_B \sqrt{2} \cdot M_B$ között változik, legnagyobb értéke az M_T tartónyomaték. Minél több fázist alkalmazunk, annál simább lesz az eredő nyomaték és nagyobb a tartónyomaték. A jelenleg igen gyakran alkalmazott ötfázisú léptetőmotoroknál a nyomaték $3,08 \cdot M_B$ és $3,24 \cdot M_B$ között ingadozik. Itt kell megjegyezni, hogy az aktív forgórészű léptetőmotoroknak az állórész kiálló pólusú kialakítása miatt gerjesztetlen állapotban is van (a gerjesztettnél jóval kisebb) öntartó nyomatéka, ami a reluktancia hatásból ered.



3.53. ábra Kétfázisú, bipolárisan vezérelt motor léptetési helyzetei

A léptetőmotor lépésszögét egészlépéses üzemben a 3.66 összefüggésből számíthatjuk. A felbontás növelésére gyakran alkalmazott módszer az ún. *lépésfelezés*. Mint már szó volt róla, egészlépéses bipoláris vezérlésnél a forgórész az $I \Rightarrow II \Rightarrow III \Rightarrow IV$ helyzeteket veheti fel (3.53. ábra). I-ből II-be úgy jut, hogy a b fázisban megcseréljük az áramirányt. Ha ezzel szemben közbelső lépésként T3-T4 kikapcsolásával először csak megszüntetjük a b tekercs áramát, akkor a forgórész az egyedül gerjesztett a fázis mágneses tengelyébe, az I' irányba áll be, vagyis a lépésszög az eredeti (egész lépéses) érték fele: 45° lesz. (A lépésfelezéses és az egészlépéses üzem kombinálásával a forgórész által elfoglalható helyzetek rendre: $I \Rightarrow I' \Rightarrow II \Rightarrow II' \Rightarrow III \Rightarrow III' \Rightarrow IV \Rightarrow IV' \Rightarrow I$.)

Természetesen a gép nyomatéka is kisebb a fluxus (az eredő gerjesztés) csökkenése miatt. Ezt az elvet továbbfejlesztve jutunk az ún. *mikrosztep* eljáráshoz, amelynél a fázisok gerjesztésének egymáshoz képesti finom szabályozásával az eredő gerjesztés (és ezzel a forgórész) egy lépésen belüli tetszőleges helyzetét beállíthatjuk.



3.55. ábra Kétfázisú léptetőmotor
 a) dinamikus nyomatéki görbéi- és
 b) a terhelés megengedhető tehetetlenségi
 nyomatéka a léptetőfrekvencia függvényében

A léptetőmotorok dinamikus viselkedése szempontjából legfontosabb jelleg-görbéket a 3.55. ábrán a léptetési frekvencia függvényében rajzoltuk fel. A 3.55a ábrán a nyomaték jelleg-görbéket mutatja. Az 1-el jelölt *üzemi frekvencia határgörbén* kívüli tartományban a motor nem képes lépéstévesztés nélkül üzemelni. A 2-vel, ill. a 3-mal jelölt nyomatéki görbék az 1 üzemi frekvencia határgörbén belüli tartományt két részre bontják: az *indítási*-, ill. a *gyorsítási* tartományra. Az indítási tartományon belül a motor bárhol képes végrehajtani egy indítási, ill. leállítási parancsot. A gyorsítási tartományban ezzel szemben a frekvencianövelést már csak korlátozásokkal végezhetjük, ha el akarjuk kerülni a lépéstévesztést. A 2-es görbe esetén a motor csak saját tehetetlenségi nyomatékát gyorsítja, az így elérhető legnagyobb frekvencia az *indítási határfrekvencia*. Ha a motor a terhelés tehetetlenségi nyomatékát is gyorsítja, az indítási tartomány

szűkül (pl. a 3-as jelű görbével határolt terület). A gyárak $M_T = 0$ terhelőnyomatékot feltételezve a léptetőfrekvencia függvényében megadják, hogy mekkora lehet az a maximális tehetetlenségi nyomaték, amellyel a motor saját tehetetlensége még megnövelhető (3.55b ábra).

Mint az a nyomatéki jelleg-görbékből látható, a motor nyomatéka a frekvencia függvényében csökken. Ez két okra vezethető vissza:

- ✚ A gerjesztőtekercs a menetszámból adódóan viszonylag nagy induktivitással, vagyis villamos időállandóval rendelkezik. A léptetési frekvencia növekedésekor viszont csökken az az idő, ami alatt a fázistekercs állandósult gerjesztőárama kialakulhat. Így

elérünk egy akkora frekvenciához, amikor a nyomaték képzéséhez szükséges fluxus már nem tud kialakulni, a frekvencia további növekedésekor a nyomaték csökken. Ezt a hatást mérsékelhetjük az időállandó lecsökkentésével, (a tekercsrel R_e ellenállást kötünk sorba, mint azt a 3.52. ábrán láthatjuk), áramgenerátoros táplálással, (a tekercs áramát ISZM modulációval szabályozzuk) és forszírozással, (egy kezdeti rövid időszakban jóval nagyobb feszültséget kapcsolunk a tekercsre).

- ✚ Az aktív forgórészű motorok pólusfluxusa indukált feszültséget hoz létre a gerjesztett állórész fázistekercsben, a két feszültség kivonódik egymásból, és a kialakuló állandósult áram értéke csökken. Mivel az indukált feszültség a fordulatszámmal nő, a nyomaték csökken. Ez a hatás a gerjesztetlen reluktancia-forgórészű motoroknál jóval kisebb, így azok nagyobb határfrekvenciáig üzemeltethetők. Az aktív forgórészű motorok határfrekvenciája ≤ 1 kHz, míg a reluktancia forgórészűeké kb. 2,5 kHz.

Az aktív forgórészű motorokkal elérhető nyomaték nagyobb (≈ 15 Nm), mint a reluktancia forgórészűeké (≈ 2 Nm). Hátrány viszont, hogy a villamos gerjesztés jelentős lemágnesezést okoz, és a lépések alatt a mágnes munkapontja számottevően változik. Ezt küszöbölik ki az ún. *hibrid léptetőmotorok* melyeknél a fázistekercsek kereszt- (a tengelyre merőleges) irányú, a forgórész mágnesek pedig axiális irányú fluxust hoznak létre. Ezzel a megoldással egyesíthetők az aktív- ill. a reluktancia forgórészű motorok előnyei. A hibrid léptetőmotorok határfrekvenciája 1500...2500 Hz, nyomatéka nagy, lépésszöge kicsi. Hibrid léptetőmotorok lépésszögének nagyságrendje: $3,75...0,36^\circ$.

A kisebb fázisszámú léptetőmotoroknál a lépésszög csökkentésére használják az ún. *multistack* eljárást, amelynek lényege, hogy több, teljesen azonos felépítésű (de nagyobb lépésszögű) motort rakunk egymás mellé az egységek számától függő szöggel (technológiailag) elfordítva. Szokásos lépésszögek: $22,5^\circ$; 18° ; 15° ; 9° ; 6° .

A léptetőmotorok alkalmazása (különösen a számítástechnikában) széleskörű. A teljesség igénye nélkül néhány fontosabb terület: adatrögzítők fejmozgató motorjai, X-Y írók; nyomtatók; regisztráló készülékek; robotok; CNC megmunkáló gépek stb.

3.7. SZINKRON GÉP SZÁMPÉLDÁK

3.7.1. Számpélda. Egy szinkron gép adattábla adatai: névleges teljesítmény: $S_n = 7$ kVA ; névleges feszültség: $U = 3 \times 400$ V ; névleges áram: $I_n = 10$ A .

Az armatúra Y kapcsolású, a frekvencia 50 Hz, a fordulatszám $n = 1500$ 1/min. A gép gerjesztő árama $\cos \varphi = 1$ teljesítménytényezőnél $I_g = 1,3$ A.

Feladatok:

- a) Vizsgáljuk meg, hogyan változik a szinkrongép szinkron reaktanciája a telítettség függvényében!

Az üresjárási mérés adatai:

I_g, A	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,0	1,5
U_{of}, V	90	165	200	220	231	260	290	340

A rövidzárási mérés adatai:

I_g, A	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7
I_{az}, A	2,0	4,0	6,0	8,0	10	14

- b) Az üresjárási és rövidzárási mérésnél meghatározták a névleges pontokhoz tartozó teljesítményfelvételeket: $P_{0n} = 450 \text{ W}$ és $P_{zn} = 650 \text{ W}$. Az ellenállás-mérés adatai 20°C hőmérsékletű gépen: $R_a = 1,3 \Omega$ és $R_g = 70 \Omega$.

Számítsuk ki a közölt adatok alapján a 75°C -ra vonatkoztatott gép névleges hatásfokát generátoros üzemállapotban, $\cos \varphi = 1$ -nél, ha tudjuk hogy a járulékos tekercsveszteség 16 %-a az armatúra rézvesztésének! Határozzuk meg a motor I_{an} névleges armatúraáramát!

- c) Válasszuk szét, és határozzuk meg az egyes veszteségeket névleges terhelésnél!
d) Hányszorosára emelkedik a generátor kapocsfeszültsége, ha a névleges terhelést hirtelen lekapcsoljuk az armatúráról?

Megoldás

a) A mérési adatok olyan részletesek, hogy a feladat megoldásához nem szükséges felrajzolni a jelleggörbét, az egyszerűsített helyettesítő vázlatban szereplő hosszirányú szinkron reaktancia az $X_d = \frac{U_{of}}{I_{az}}$ összefüggésből közvetlenül számítható.

A rövidzárási és a gerjesztőáram közti kapcsolat lineáris, a hiányzó rövidzárási áramok egyszerű arányossággal számíthatók:

$$I_g = 1,0 \text{ A} \rightarrow I_{az} = 20 \text{ A}; \text{ és } I_g = 1,5 \text{ A} \rightarrow I_{az} = 30 \text{ A}.$$

A reaktanciák a fázisfeszültség függvényében:

U_{of}, V	90	165	200	220	231	260	290	340
X_d, Ω	45	41,2	33,3	27,5	23,1	18,6	14,5	11,3

Névleges telítettségi állapotban, vagyis $U_{nf} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V}$ kapocsfeszültségnél:

$$X_{d \text{ telített}} = 23,1 \Omega.$$

b) Először számítsuk át a 20°C -os tekercsellenállásokat 75°C -ra! Az általunk használt hőmérséklet-tartományban a réz fajlagos ellenállása -235°C -on nullára csökken, ezért

felhasználva az $\frac{R_{75}}{235 + 75} = \frac{R_{20}}{235 + 20}$ arányosságot:

$$R_{a75} = 1,3 \cdot \frac{235 + 75}{235 + 20} = 1,58 \Omega, \text{ és } R_{g75} = 70 \cdot \frac{235 + 75}{235 + 20} = 85,1 \Omega.$$

Üresjárásban a szinkrongép által felvett teljesítmény: $P_{0n} = P_{vas} + P_{surl} = 450 \text{ W}$.

A rövidzárási felvett teljesítmény: $P_{zn} = P_{atek} + P_{jár} + P_{surl} = 650 \text{ W}$.

A gerjesztőkör vesztesége: $P_{gerj} = I_g^2 \cdot R_g = 1,3^2 \cdot 85,1 = 144 \text{ W}$.

A szinkron gép összes veszteségét azonban nem kaphatjuk meg a veszteségek automatikus összegzéséből, mert a P_{surl} ekkor kétszer szerepelne. Ezért az armatúra tekercsveszteségét a rendelkezésre álló egyéb adatokból kell számítanunk:

$$P_{atek} = 3 \cdot I_a^2 \cdot R_a = 3 \cdot 10^2 \cdot 1,58 = 474 \text{ W}, \text{ és } P_{jár} = 0,16 \cdot P_{a\text{ réz}} = 0,16 \cdot 474 = 76 \text{ W},$$

vagyis az armatúra összes tekercsvesztesége: $\Sigma P_{atek} = P_{atek} + P_{jár} = 474 + 76 = 550 \text{ W}$.

A szinkron gép összes vesztesége 75 °C-on:

$$\Sigma P_{veszt} = P_{vas} + P_{surl} + \Sigma P_{atek} + P_{gerj} = 450 + 550 + 144 = 1144 \text{ W}.$$

A hatásfokot generátoros üzemben kell megállapítanunk, tehát a névleges villamos teljesítményt a gépnek le kell adnia. Ehhez a veszteségekkel több mechanikai- és villamos teljesítményt (mert gerjesztés is kell az energiaátalakításhoz) kell felvenni a generátornak:

$$\eta_{n\acute{e}vl} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_n}{P_n + \Sigma P_{veszt}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10 + 1144} = 0,858 \text{ azaz } 85,8\%.$$

c) Az előző példa megoldása után az eredmények csaknem a kezünkben vannak, egyedül az üresjárási teljesítményt kell szétválasztanunk vas- és súrlódási veszteségre. Mivel a rövidzárási teljesítmény is tartalmazza a súrlódási veszteséget, és egyéb adatból kiszámítottuk az armatúra tekercsveszteségét, kézenfekvő lehetőség, hogy a súrlódási veszteséget a rövidzárási mérés eredményéből számítsuk:

$$P_{surl} = P_{zn} - \Sigma P_{atek} = 650 - 550 = 100 \text{ W}.$$

Ezek után a vasveszteség: $P_{vas} = P_{zn} - P_{surl} = 450 - 100 = 350 \text{ W}$.

Az armatúra egyenáramú ellenállásából számított tekercsveszteség: $P_{atek} = 474 \text{ W}$, a járulékos tekercsveszteség: $P_{jár} = 76 \text{ W}$, a gerjesztési veszteség: $P_{gerj} = 144 \text{ W}$.

d) Ha egy terhelt generátorról hirtelen lekapcsoljuk a terhelést (vagyis az armatúraáramát nullára csökkentjük), akkor kapocsfeszültsége a gerjesztésszabályozás működésbe lépéséig a terhelési gerjesztéshez tartozó pólusfeszültség nagyságára emelkedik. (Üresjárásban a kapocsfeszültség megegyezik a pólusfeszültséggel.)

A kérdés megválaszolásához tehát meg kell határoznunk a névleges terheléssel működő generátor pólusfeszültségét. A meglévő adatok birtokában az egyszerűsített helyettesítő vázlat kínálta közelítéseket kell igénybe vennünk.

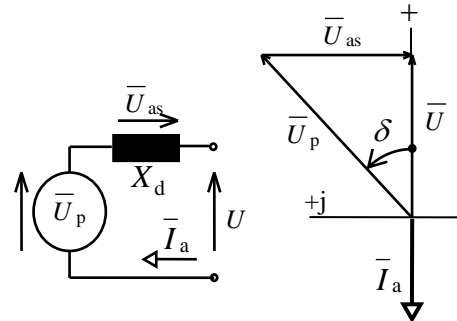
Az a) pontban kiszámítottuk a névleges feszültségre gerjesztett gép szinkron reaktanciáját ($X_d = 23,1 \Omega$), így felrajzolhatjuk az egyszerűsített helyettesítő vázlatot, és annak alapján a névleges terhelésű generátor feszültség vektorábráját.

Hogy méretarányossá tehesük rajzunkat, először a helyettesítő vázlatban szereplő feszültségvektorok abszolút értékét célszerű kiszámítanunk:

$$U = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V},$$

mert a helyettesítő vázlat és a vektorábra fázismennyiségekre vonatkozik.

Névleges terhelésnél a generátor tekercseléseiben a névleges áramok folynak., ezért az armatúraáram $I_a = 10 \text{ A}$, a gerjesztőáram pedig $I_g = 1,3 \text{ A}$ lesz. Mivel a feladat kiírásában ehhez a gerjesztőáramhoz $\cos \varphi = 1$ tartozott, ha a kapocsfeszültséget a pozitív valós tengely irányába vesszük fel, akkor a generátor armatúraárama vele pontosan ellenfázisban, a negatív valós tengely irányába mutat.



3.56. ábra Helyettesítő vázlat és feszültség vektorábra

Az armatúra feszültségese:

$$\bar{U}_{as} = \bar{I}_a \cdot jX_d.$$

Mivel egy vektor j -vel történő szorzása 90° -os forgatást jelent a forgóvektorok pozitív forgásirányába, az \bar{U}_{as} feszültség-vektor a $-j$ tengely irányába mutat, és nagysága:

$$U_{as} = I_a \cdot X_d = 10 \cdot 23,1 = 231 \text{ V}.$$

A vektorábra alapján láthatjuk, hogy a feszültségvektorok egy egyenlőszárú derékszögű háromszöget alkotnak, amelynek átlója \bar{U}_p , a bennünket éppen érdeklő pólusfeszültség. A feszültségemelkedés:

$$\varepsilon = \frac{U_p}{U} = \frac{\sqrt{2} \cdot 231}{231} = \sqrt{2} \text{ -szeres.}$$

3.7.2. Számpélda. A 3.7.1. számpéldában adott szinkron gépünket a továbbiakban motoros üzemben járattuk (pl.: egy füstgáz ventilátort hajtunk vele), amelynek nyomatékigénye 1500 1/min fordulaton $M_t = 25 \text{ Nm}$.

Különbség az előző példához képest, hogy a tápfeszültség a motoros üzemeltetés helyén $3 \times 380 \text{ V}$ -ra módosult. (A gépben keletkező veszteségektől eltekintünk, és az egyszerűsített helyettesítő vázlatot használjuk.)

Feladatok:

- Mekkora gerjesztőáramot igényel a szinkron motor, ha $\cos \varphi = 1$ teljesítménytényezőt kívánunk beállítani?
- Elvileg milyen minimális I_g -vel járathatjuk a szinkron motort ebben a terhelési állapotban?
- Névleges gerjesztéssel ($I_{gn} = 1,3 \text{ A}$) üzemeltetve a motort, mekkora meddő teljesítményt táplálhatunk a hálózatba, és milyen jellemzők mellett?

Megoldás

a) A válaszadáshoz meg kell határoznunk a gép pólusfeszültségét ebben az üzemi állapotban, majd ennek ismeretében az üresjárási jelleggöréből kell kiolvasnunk a pólusfeszültséghez tartozó gerjesztőáramot.

A megváltozott tápfeszültség miatt változik a gép eredő fluxusa, telítettsége, ezért a helyettesítő vázlat használata előtt ki kell számítanunk az ehhez a telítettséghez tartozó szinkron reaktanciát. Felhasználva az 3.8.1a számpélda adatait, a szinkron reaktancia esetünkben:

$$X_d = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 8,0} = 27,5 \, \Omega \text{ lesz. } (U_0 = 220\text{V} \rightarrow I_g = 0,4\text{A} \rightarrow I_{az} = 8,0\text{A}.)$$

Az $M \cdot \omega_0 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$ összefüggés alapján, mivel $\cos \varphi = 1$, $P_{veszt} = 0$, $P_2 = P_1$, és $M_{teng} = M_{vill} = 25 \text{ Nm}$, ezért:

$$I_w = \frac{M \cdot \omega_0}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{25 \cdot 2\pi}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 1} \cdot \frac{1500}{60} = 6 \text{ A,}$$

amelyben I_w az armatúraáram wattos összetevője.

A pólusfeszültség meghatározásához most használjuk a szinkron gép árammunkadiagramját, pontosabban az árammunkadiagramban használt áramvektorokat.

Az árammunkadiagram tárgyalásakor (3.3.3. fejezet) láttuk, hogy a kapocsáram vektor felfogható két áramvektor eredőjeként, $\bar{I}_k = \bar{I}_p + \bar{I}_a$, ahol

$$\text{a kapocsáram: } \bar{I}_k = -j \cdot \frac{\bar{U}}{X_d} = -j \cdot \frac{220}{27,5} = -j \cdot 8 \text{ A,}$$

$$\text{a pólusáram pedig: } \bar{I}_p = -j \cdot \frac{\bar{U}_p}{X_d} = -j \cdot \frac{\bar{U}_p}{27,5} \text{ A.}$$

A pólusáram ismeretében meghatározható \bar{U}_p pólusfeszültség abszolút értéke is.

Vázzuk fel az áram-munkadiagramot (3.56a ábra)! Az armatúraáram vektora a $\cos \varphi = 1$ teljesítménytényező miatt a kapocsfeszültséggel fázisban, a pozitív valós tengely irányába mutat, és 6 egységnyi. A kapocsáram vektor a meghatározásában szereplő $-j$ miatt a negatív képzetes tengely irányába mutat, és 8 egységnyi. A két áramvektor végpontját köti össze az \bar{I}_p pólusáram, amelynek nagysága az így létrejövő derékszögű háromszögből:

$$I_p = \sqrt{I_a^2 + I_k^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10 \text{ A.}$$

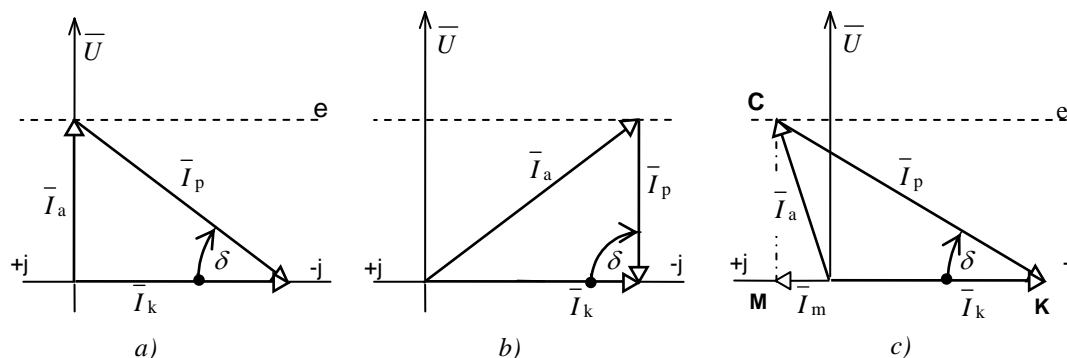
A pólusfeszültség értéke: $U_p = I_p \cdot X_d = 10 \cdot 27,5 = 275 \text{ V}$ lesz.

Az üresjárási jelleggörbe $U_0 = 260\text{V} \rightarrow I_g = 0,7\text{A}$, és $U_0 = 290\text{V} \rightarrow I_g = 1,0\text{A}$ pontjai közötti lineáris interpolációval:

$$I_g = 0,7 + (290 - 275) \cdot \frac{1,0 - 0,7}{290 - 260} = 0,85 \text{ A.}$$

b) A terhelési szög maximális értéke hengeres pólusú gépeknél elvileg 90° . A 3.57b ábrán láthatjuk az elvi megoldást. A kapocsáram a változatlan kapocsfeszültség, az armatúraáram wattos összetevője az állandó nyomaték miatt nem változik. Az armatúra áramvektor

végpontja a képzetes tengellyel párhuzamos \mathbf{e} egyenesen mozog, amíg el nem éri a $\delta_v = 90^\circ$ -ot.



3.57. ábra Szinkron motor áram vektorábrája állandó terhelés esetén

Megint egy derékszögű háromszögünk van, amelynek a befogója most \bar{I}_p , és nagysága egyenlő az armatúraáram wattos összetevőjével: $I_p = I_w = 6 \text{ A}$. Ebből következően a pólusfeszültség nagysága: $U_p = I_p \cdot X_d = 6 \cdot 27,5 = 165 \text{ V}$.

Ehhez a pólusfeszültséghez tartozó gerjesztőáramot az üresjárási mérési pontokból közvetlenül megkapjuk:

$$U_0 = 165 \text{ V} \rightarrow I_g = 0,2 \text{ A}.$$

c) Az eddigi gondolatmenetet folytatva rajzoltuk fel a 4.56c ábrát. Most a pólusfeszültséget meghatározva a gerjesztőáramból, az $I_p = \frac{U_p}{X_d}$ pólusárammal metszhetjük ki az új üzemi pontot a nyomaték által meghatározott egyenesen.

Az armatúraáram képzetes tengelyre eső vetülete a meddő áram, amit a túlgerjesztett motor a hálózatba táplál. (Az a kérdés alapján számítás nélkül tudjuk, hogy a motor túlgerjesztett üzemi állapotba kerül, mivel ott $\cos \varphi = 1$ -hez $I_g = 0,85 \text{ A}$ tartozott.)

Az $I_g = 1,3 \text{ A}$ -hez tartozó pólusfeszültséget ismét egy lineáris interpolációval számíthatjuk ki az üresjárási pontokból,

$$I_g = 1,0 \text{ A} \rightarrow U_0 = 290 \text{ V} \quad \text{és} \quad I_g = 1,5 \text{ A} \rightarrow U_0 = 340 \text{ V} \quad \text{alapján:}$$

$$U_p = 290 + (1,3 - 1,0) \cdot \frac{340 - 290}{1,5 - 1,0} = 320 \text{ V} \quad \text{az } I_g = 1,3 \text{ A-hez tartozó pólusfeszültség.}$$

$$\text{A pólusáram } I_p = \frac{U_p}{X_d} = \frac{320}{27,5} = 11,63 \text{ A} \text{ nagyságú.}$$

A meddőáram kiszámításához használjuk a CMK derékszögű háromszöget:

$$\overline{CM} = I_w = 6 \text{ A}; \quad \overline{KC} = I_p = 11,63 \text{ A}; \quad \text{és} \quad \overline{MK} = I_m + I_k = I_m + 8 \text{ A}.$$

$$11,63^2 = 6^2 + (I_m + 8)^2 \quad \text{alapján} \quad I_m = \sqrt{11,63^2 - 6^2} - 8 = 2 \text{ A}.$$

$$\text{A hálózatba táplált meddő teljesítmény: } Q = 3 \cdot U_f \cdot I_m = 3 \cdot 220 \cdot 2 = 1320 \text{ Var.}$$

A motor armatúraárama: $I_a = \sqrt{I_w^2 + I_m^2} = \sqrt{6^2 + 2^2} = 6,32 \text{ A}$,

a teljesítménytényező: $\cos \varphi = \frac{I_w}{I_a} = \frac{6}{6,32} = 0,949$.

A terhelési szög villamos fokban mérve: $\sin \delta_v = \frac{I_w}{I_p} = \frac{6}{11,63} = 0,516 \rightarrow \delta_v = 31^\circ$.

A valóságos (mechanikai) terhelési szög az $\alpha_v = p \cdot \alpha_g$ alapján:

$$\delta_g = \frac{\delta_v}{p} = \frac{31^\circ}{2} = 15,5^\circ,$$

mert $f = 50 \text{ Hz}$, és $n = 1500 \text{ 1/min}$ miatt a gép $2p = 4$ pólusú.

3.7.3. Számpélda. Egy 220V-os fázisfeszültségű, háromfázisú, 6 pólusú, 50 Hz-es szinkron gép generátoros üzemben 30 A-t táplál a hálózatba $\cos \varphi = 1$ teljesítménytényező mellett. Változatlan gerjesztés mellett, megszüntetve a generátor hajtónyomatékát a hálózati ampermérő 10 A-t mutat.

(A példa megoldásánál a veszteségektől eltekintünk, a hengeres forgórészű gépre érvényes egyszerűsített helyettesítő vázlatot használjuk.)

Feladatok:

- A rendelkezésre álló adatok alapján rajzoljuk meg a terhelt üzemállapot feszültség vektorábráját és áram-munkadiagramját, valamint határozzuk meg az egyszerűsített helyettesítő vázlatban szerepeltethető szinkron reaktanciát!
- Elméletileg mekkora maximális teljesítmény táplálható a hálózatba ilyen gerjesztés mellett, és milyen teljesítménytényezővel?
- Mekkora teljesítmény táplálható a hálózatba ekkora gerjesztéssel $\delta_v = 60^\circ$ -os terhelési szög mellett?

Megoldás

a) Ha felrajzoljuk az áram vektorábrát (az áram-munkadiagramot), láthatóvá válik a példa megoldási menete.

A változatlan gerjesztés miatt az armatúra áramvektor végpontja egy körön mozog, melynek két pontját ismerjük: az $I_a = 30 \text{ A}$ -t $\cos \varphi = 1$ -nél, és $I_a = 10 \text{ A}$ -t $\cos \varphi = 0$ -nál. Tudjuk még, hogy a kör középpontja valahol a képzetes tengelyen van $-j$ irányában. (Ebből adódik, hogy a 10A-es meddő áram csak a $+j$ tengely irányába mutathat.)

A 3.58a ábrán felrajzoltunk egy x sugarú kört, mely az eddigi feltételeknek eleget tesz. Az ábrából már világosan látszik a \mathbf{K} középpont helye: távolsága az origótól ($x-10$) A, vagyis ekkora a kapocsáram.

x értéke számítható a \mathbf{KOA} derékszögű háromszögből:

$$\text{a } 30^2 + (x-10)^2 = x^2 \text{ egyenletből, } 900 + x^2 - 20x + 100 = x^2 \text{ alapján}$$

$$x = \frac{1000}{20} = 50 \text{ A (ez a pólusáram értéke is).}$$

A kapocsáram tehát: $I_k = \frac{220}{X_d} = 50 - 10 = 40$ A, amiből következik, hogy a szinkron reaktancia értéke: $X_d = \frac{220}{40} = 5,5 \Omega$.

Ezzel az armatúrafeszültség nagysága: $U_{as} = I_d \cdot X_d = 30 \cdot 5,5 = 165$ V.

b) A 3.58b ábrán felrajzoltuk az $I_p = 50$ A-es pólusáramnak megfelelő kört, és az elméleti stabilitási határon ($\delta_v = 90^\circ$) üzemelő gép armatúraáram vektorát.

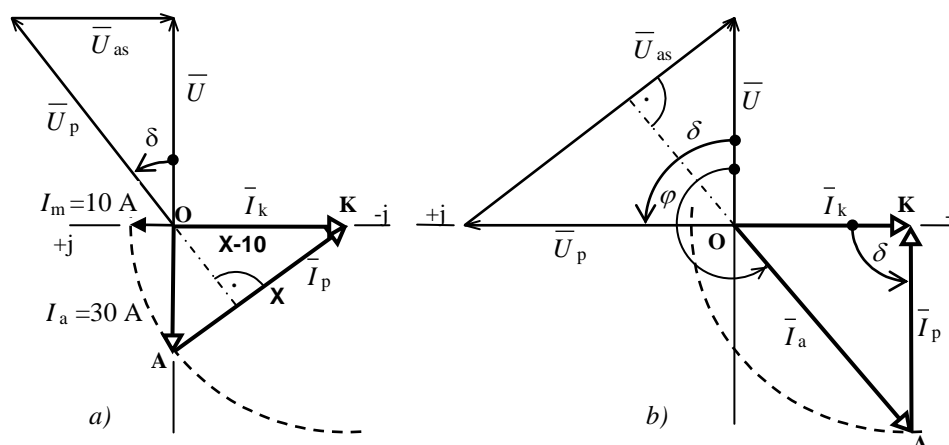
Az armatúraáram wattos összetevője most egyenlő a pólusárammal $I_w = I_p = 50$ A.

A betáplálható maximális teljesítmény: $P_{\max} = 3 \cdot U \cdot I_w = 3 \cdot 220 \cdot 50 = 33\,000$ W = 33 kW.

Az armatúraáram nagysága: $I_a = \sqrt{40^2 + 50^2} = 64$ A.

A teljesítménytényező értéke: $\cos \varphi = \frac{I_w}{I_a} = \frac{50}{64} = 0,78$ (induktív).

A φ szög a pozitív irányok figyelembevételével $180^\circ + \arccos \varphi = 219^\circ$.



3.58. ábra Szinkron gép áram-munkadiagramja és feszültség vektorábrája

c) A feladat megoldható lenne az előző gondolatmenet folytatásával, az árammunkadiagramon új üzemelési pont kijelölésével is.

A változatosság kedvéért oldjuk meg ezt a feladatot egy nagyon rövid, közvetlen módszerrel, az eddig kiszámolt részeredmények birtokában.

A szinkron gép villamos nyomatéka $M = \frac{m}{\omega_0} \cdot \frac{U \cdot U_p}{X_d} \cdot \sin \delta$. Az egyenletből minden

adat ismert, így: $P = M \cdot \omega_0 = 3 \cdot 220 \cdot 50 \cdot \sin 60^\circ = 28\,578$ W = 28,58 kW.

Más szóval, ha ismert a maximális teljesítmény, amely $\delta_v = 90^\circ$ -hoz tartozik, bármilyen más terhelési szöghöz kiszámíthatjuk az átvihető teljesítményt, ha a maximális teljesítményt $\sin \delta$ -val megszorozzuk: $P = P_{\max} \cdot \sin 60^\circ = 33 \cdot 0,866 = 28,58$ kW.

3.7.4. Számpélda. Egy 6,3 kV fázisfeszültségű, hengeres forgórészű szinkron generátor tengelykapcsolójára jelet festettek, majd az 50 Hz-es hálózatra kapcsolták, és az üresen járó gép tengelyén lévő jelet stroboszkóppal megvilágították. Az 1000 1/min fordulatszámmal forgó jel ekkor állni látszott, helyzetét megjelölték a pajzshoz rögzített skálán.

Ezután a turbinazsilippel és gerjesztés-szabályozással $P = 7560$ kW teljesítményt és $\cos\varphi = 1$ teljesítménytényezőt állítottak be és mérték a virtuális jel elmozdulását a skálán. A geometriai terhelési szög 15° volt. (A feladat megoldása során az egyszerűsített helyettesítő vázlatot használjuk.)

Feladatok:

- Mekkora szinkron reaktanciát helyettesíthetünk az egyszerűsített helyettesítő vázlatba?
- Változatlan gerjesztés mellett mekkora hatásos és meddő teljesítményt táplálhat a generátor a hálózatba $\cos\varphi = 0,8$ teljesítménytényezővel?
- Ha változatlan gerjesztés mellett $\delta_v = 60^\circ$ terhelési szöggel engedjük üzemelni a generátort, mekkora teljesítményt táplálhatunk a hálózatba, és milyen teljesítménytényezővel?

Megoldás

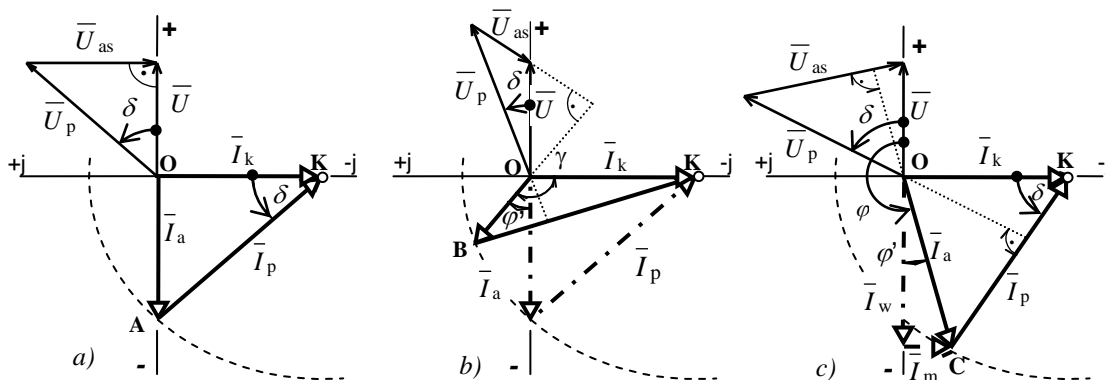
a) A $\cos\varphi = 1$ -re szabályozott szinkron generátor feszültség vektorábrájában az armatúra feszültség merőleges a kapocsfeszültségre, és a pólusfeszültséggel derékszögű háromszöget alkot. A pólusfeszültség és kapocsfeszültség közti szög a villamos terhelési szög. A mért adatok alapján $\delta_v = p \cdot \delta_g = 3 \cdot 15^\circ = 45^\circ$, mert

$$n = \frac{f}{p} \cdot 60 \quad \text{alapján} \quad p = \frac{50}{1000} \cdot 60 = 3.$$

A 3.59a ábrán alapján felírhatjuk hogy: $\tan\delta = \frac{U_{as}}{U}$, amiből:

$$U_{as} = U \cdot \tan\delta = 6300 \cdot \tan 45^\circ = 6300 \text{ V}.$$

Az armatúrafeszültség nagysága felírható az $U_{as} = I_a \cdot X_d$ alakban is, ahol $I_a = \frac{P}{3 \cdot U} = \frac{7560}{3 \cdot 6,3} = 400 \text{ A}.$



3.59. ábra Hengeres forgórészű szinkron gép feszültség vektorábrája és árammunkadiagramja

Következésképpen:
$$X_d = \frac{U_{as}}{I_a} = \frac{6300}{400} = 15,75 \text{ } \Omega.$$

b) A feladat megoldásához célszerű felrajzolni a szinkron gép árammunka-diagramját ebben az üzemállapotban is (3.59b ábra).

Mivel a feladat kiírásában a hálózatba történő meddő táplálás szerepel, az armatúraáramnak a II. negyedben kell lennie, a +j irányába mutató összetevővel kell rendelkeznie.

Az általános háromszögben (KOB) szereplő áramok kA-ben:

\overline{KO} befogó:
$$I_k = \frac{U}{X_d} = \frac{6,3}{15,75} = 0,4 \text{ kA},$$

\overline{KB} átfogó:
$$I_p = (I_p) = \sqrt{(I_a)^2 + I_k^2} = \sqrt{0,4^2 + 0,4^2} = \sqrt{2} \cdot 0,4 \text{ kA}.$$

A KOB háromszögben a befogók által bezárt szög: $\gamma = 90^\circ + \arccos 0,8 = 126,87^\circ.$

A háromszögre a koszinus-tételt felírva:
$$I_a^2 + I_k^2 - 2 \cdot I_a \cdot I_k \cdot \cos \gamma = I_p^2.$$

Behelyettesítve:
$$I_a^2 + 0,4^2 - 2 \cdot I_a \cdot 0,4 \cdot \cos 126,87 = \sqrt{2} \cdot (0,4)^2.$$

Az egyenlet nullára rendezve:
$$I_a^2 + 0,48 \cdot I_a - 0,16 = 0 \quad \text{és}$$

I_a -ra megoldva:
$$I_a = \frac{-0,48 \pm \sqrt{0,48^2 + 4 \cdot 0,16}}{2} = 0,226 \text{ kA}.$$

A hálózatba táplált hatásos teljesítmény:

$$P = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = 3 \cdot 6,3 \cdot 0,226 \cdot 0,8 = 3,417 \text{ MW}.$$

A hálózatba táplált meddő teljesítmény:

$$Q = 3 \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi = 3 \cdot 6,3 \cdot 0,226 \cdot 0,6 = 2,562 \text{ MVar}.$$

c) Az üzemállapothoz tartozó armatúraáram végpontot az árammunka-diagramon a megengedett terhelési szög alapján jelölhetjük ki. Generátorunk a 3.59c ábrán bejelölt C pontban fog üzemelni. Az armatúraáram wattos összetevője a C pont távolsága a képzetes tengelytől:

$$I_w = I_p \cdot \sin \delta = \sqrt{2} \cdot 0,4 \cdot \sin 60^\circ = 0,49 \text{ kA}.$$

A hálózatba táplált hatásos teljesítmény:

$$P = 3 \cdot U \cdot I_w = 3 \cdot 6,3 \cdot 0,49 = 9,261 \text{ MW}.$$

A meddő összetevőt kiszámíthatjuk, ha a kapocsáramból kivonjuk a pólusáram képzetes tengelyre eső vetületét:

$$I_m = I_k - I_p \cdot \cos \delta = 0,4 - \sqrt{2} \cdot 0,4 \cdot \cos 60^\circ = 0,117 \text{ kA}.$$

Mivel a meddő összetevő a képzetes tengely -j irányába mutat, generátor ebben az üzemállapotban a teljesítmény-átalakításhoz a hálózatból meddő teljesítményt vesz fel. A generátor armatúraárama ebben az üzemállapotban:

$$I_a = \sqrt{I_w^2 + I_m^2} = \sqrt{0,49^2 + 0,117^2} = 0,504 \text{ kA}.$$

A generátoros üzemmódra jellemző negatív előjelet a teljesítménytényező elől hallgatólagosan elhagyva: $\operatorname{tg} \varphi' = \frac{I_w}{I_m} = \frac{0,117}{0,49} = 0,2387 \rightarrow \varphi' = 13,43^\circ$, ehhez $\cos \varphi' = 0,972$ (ind.) teljesítménytényező tartozik.

A pozitív irányok figyelembevételével a kapocsfeszültség és armatúraáram vektorok közti szög: $\varphi = 180^\circ + \varphi' = 193,4^\circ$.

3.7.5. Számpélda. Egy $U_f = 6 \text{ kV}$ fázisfeszültségű, $S_n = 7200 \text{ kVA}$ -es háromfázisú szinkron generátor névleges terheléssel, $\cos \varphi = 0,8$ túlgerjesztett állapotban üzemel.

Feladatok:

- A leírt üzemállapotban terhelés leszakadás esetén a megengedett feszültség-emelkedés $\varepsilon = 150\%$. Mekkora szinkron reaktanciájú géppel teljesíthető ez a feltétel?
- Mekkora lenne a feszültségemelkedés, ha gerjesztés-szabályozással $\cos \varphi = 1$ teljesítménytényezőt állítanánk be névleges terhelés mellett, és üzemzavar miatt a generátor leszakadna a hálózatról?
- Maximálisan mekkora meddő teljesítményt tudunk a hálózatba táplálni a gép túlterhelése nélkül? (A generátor maximális gerjesztése az $U_{p \max}$ -hoz tartozó lehet.)

Megoldás

a) A kívánt feltétel akkor teljesíthető, ha a leírt üzemállapotban a pólusfeszültség nem haladja meg a kapocsfeszültség 1,5-szörösét, vagyis $U_{p \max} = 9 \text{ kV}$. A 3.60a ábrán felrajzoltuk az üzemállapothoz tartozó vektorábrát. A zárt háromszöget alkotó feszültségvektorok közül \bar{U}_{as} ismeretlen, ezt meghatározva I_a ismeretében meghatározható X_d értéke. (Ha X_d értéke ennél nagyobb, akkor U_p is nagyobb lesz $1,5 \cdot U_a$ -nál.)

Az U csúcspontban lévő γ szög nagyságát \bar{I}_a armatúraáram iránya határozza meg: $\gamma = 90^\circ + \varphi$. Az **UFO** háromszögre felírva a koszinusz tételt:

$$U^2 + U_{as}^2 - 2 \cdot U \cdot U_{as} \cdot \cos(90^\circ + \varphi') = U_p^2,$$

mivel $\cos(90^\circ + \varphi) = -\sin \varphi$, és $\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6$.

Az egyenletbe behelyettesítve:

$$6^2 + U_{as}^2 - 2 \cdot 6 \cdot U_{as} \cdot (-0,6) = 9^2, \text{ és nullára rendezve: } U_{as}^2 + 7,2 \cdot U_{as} - 45 = 0.$$

Ebből:

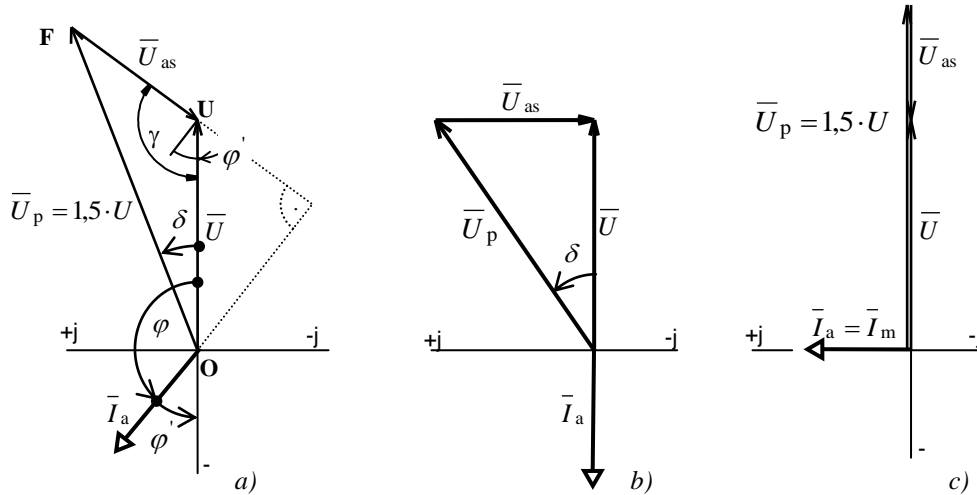
$$U_{as} = \frac{-7,2 \pm \sqrt{7,2^2 + 4 \cdot 45}}{2} = 4 \text{ kV}.$$

Az armatúraáram értéke névleges terhelésnél:

$$I_a = \frac{S_n}{3 \cdot U_{fn}} = \frac{7200}{3 \cdot 6} = 400 \text{ A}.$$

A szinkron reaktancia maximális értéke tehát:

$$X_d = \frac{U_{as}}{I_a} = \frac{4000}{400} = 10 \Omega.$$



3.60. ábra Hengeres pólusú szinkron gép feszültség vektorábrái különböző terheléseknél

b) A gerjesztésszabályozás miatt megváltozik a gép pólusfeszültsége, a változatlan kapocsfeszültség miatt azonban a generátor eredő fluxusa nem változik, X_d értékét továbbra is 10Ω -nak tekinthetjük. A $\cos \varphi = 1$ teljesítménytényező miatt a feszültségvektorok most derékszögű háromszöget alkotnak (3.60b ábra).

Az armatúraáram nagysága a feladat a) pontja szerint névleges terhelésnél: $I_a = 400 \text{ A}$, így az armatúrafeszültség nagysága:

$$U_{as} = I_a \cdot X_d = 400 \cdot 10 = 4000 \text{ V} = 4 \text{ kV}.$$

A pólusfeszültség nagysága a derékszögű háromszögből:

$$U_p = \sqrt{U_{as}^2 + U^2} = \sqrt{4^2 + 6^2} = 7,2 \text{ kV}.$$

A várható feszültségemelkedés:

$$\varepsilon = \frac{U_p}{U_n} = \frac{7,2}{6} = 1,2 \text{ szerez lesz}.$$

c) A generátorral nem tudunk a névleges armatúraáramnak (400 A) megfelelő meddő teljesítményt a hálózatba táplálni, mert ekkor a gerjesztés túlterhelésbe kerülne. Mivel a pólusfeszültség maximális értéke $U_{p \max} = 1,5 \cdot U$ lehet, a 3.60c ábra alapján az armatúra feszültség nagysága: $U_{as} = 0,5 \cdot U$.

Ezzel az $U_{as} = I_a \cdot X_d$ -ből következően a maximális meddő armatúraáram:

$$I_a = \frac{0,5 \cdot U}{X_d} = \frac{0,5 \cdot 6000}{10} = 300 \text{ A lehet.}$$

Ekkor a hálózatba táplált meddő teljesítmény:

$$Q = 3 \cdot U \cdot I_m = 3 \cdot 6 \cdot 300 = 5400 \text{ kVAr lesz.}$$

3.7.7. Tekercselési példa. Tervezzünk egyréteges, egész horonyszámú háromfázisú tekercselést $Z = 24$ hornyú állórészbe!

Feladatok:

- Hányféle pólusszámra készíthető tekercselés a fenti feltételekkel?
- Rajzoljuk meg a háromféle pólusszámra a tekercselés U fázisának a tekercselési vázlatát, és jelöljük ki azokat a hornyokat, melyekbe a V és W fázisok kezdetei kerülnek!
- Ha egyréteges tekercselés helyett kétréteges tekercselést készítünk, mekkora léprövidítést alkalmazhatunk az egyes pólusszámokon?
- Rajzoljuk meg a $2p = 4$ tekercselés $\frac{S}{\tau_p} = \frac{5}{6}$ -os léprövidítésű változatának egy fázisának tekercselési vázlatát!
- Mekkora lesz a tekercselési tényező értéke a d) feladatban megrajzolt tekercselésnél?

Megoldás

- a) Egész horonyszámú tekercselésnél az egy fázisra és egy pólusra jutó horonyszám:

$$q = \frac{Z}{2p \cdot m} = \text{egész szám.}$$

Behelyettesítve a kiinduló adatokat, és átrendezve az egyenletet: $2p \cdot q = \frac{24}{3} = 8$.

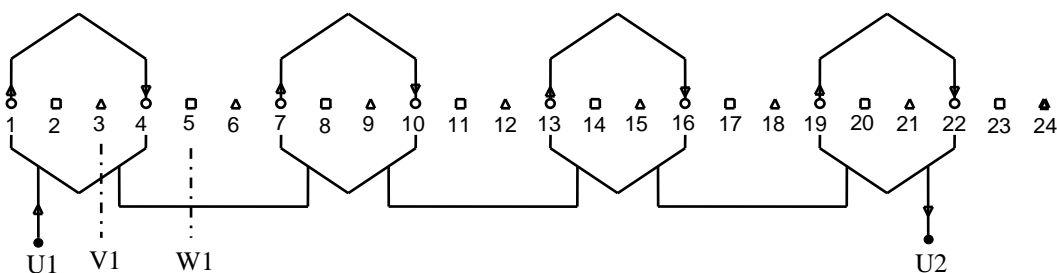
A pólusok száma ($2p$) csakis páros szám lehet, ezért 8-at páros és egész szám szorzatára kell bontanunk. Ez háromféle képen lehetséges: $8 \cdot 1$, $4 \cdot 2$ és $2 \cdot 4$.

A megvalósítható pólusszámok tehát:

1.	$2p = 8$	ekkor	$q = 1$,
2.	$2p = 4$	ekkor	$q = 2$,
3.	$2p = 2$	ekkor	$q = 4$.

- b) A pólusszámtól függően változik egy horonyosztás villamos szöge: $\alpha_v = p \cdot \alpha_g$. Mivel egy horonyosztás geometriai szöge $\alpha_g = \frac{360^\circ}{Z} = \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$, a pólusszámtól függően egy horonyosztás villamos szöge:

$2p$	8	4	2
α_v	60°	30°	15°



3.61. ábra. Nyolcpólusú háromfázisú tekercselés egy fázisa $Z=24$ horonyban

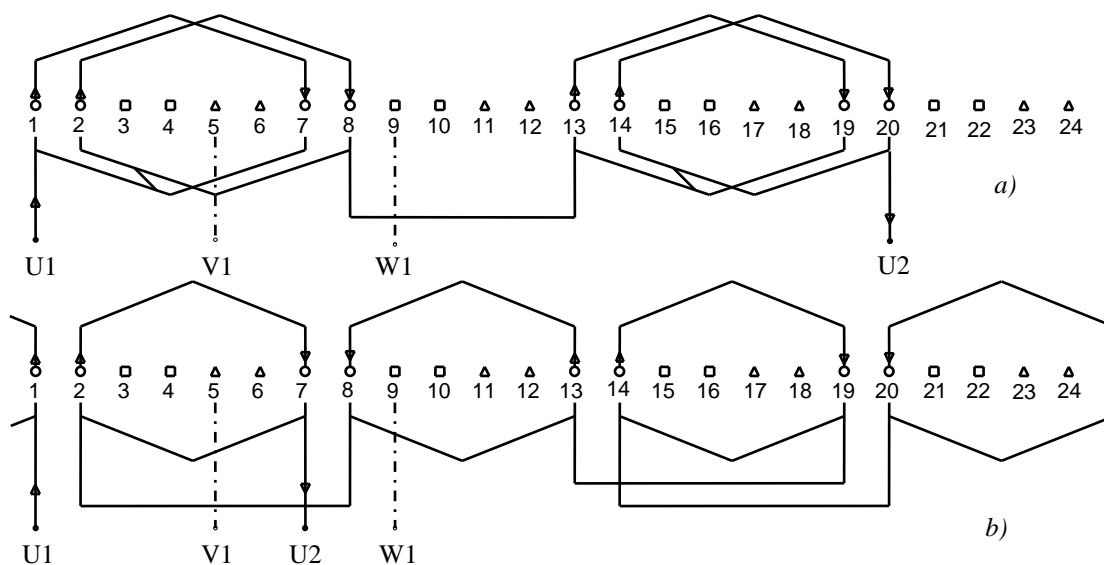
Egyréteges tekercselésnél a tekercsek szélessége villamos 180° , azaz pólus-osztásnyi, horonyokban mérve:

$2p$	8	4	2
τ_p (horony)	3	6	12

A 3.61. ábrán $2p = 8$ pólusú tekercselést jelöltünk ki $q = 1$ -nek megfelelően. A tekercsek szélessége horonyokban mérve: $y_h = 3$, ha az első tekercs egyik oldala az 1. horonyba kerül, akkor a másik oldalának a 4. horonyba kell kerülnie.

Háromfázisú tekercselésnél forgómező létrehozásához a tekercselések kezdeteinek villamosan 120° -ra kell lenniük egymástól, megfelelően az egyes fázisok időbeli eltolódásának. Az U fázist az 1. horonyban kezdtük, a V fázis kezdetét innen villamos 120° -ra kell elhelyezni, ami $\frac{120^\circ}{60^\circ} = 2$ horonnak felel meg, vagyis a 3. horonyba. A W fázis kezdetét pedig innen további 2 horonyra, az 5. horonyba kell helyezni.

A 3.62. ábrán $2p=4$ pólusú tekercselést jelöltünk ki $q=2$ -nek megfelelően. A tekercsek szélessége horonyokban mérve most $y_h = 6$ lesz, ha az első tekercs egyik oldala az 1. horonyba kerül, akkor a másik oldalát a 7. horonyban kell elhelyezni.

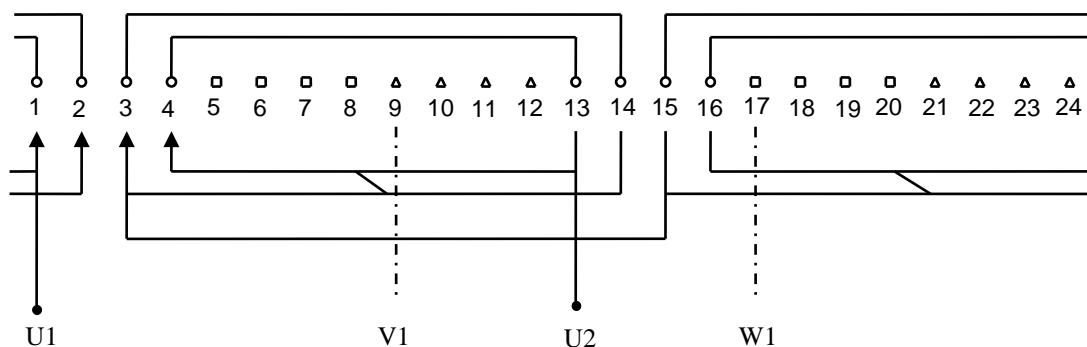


3.62. ábra. Négypólusú háromfázisú tekercselés egy fázisa $Z=24$ horonyban

Az U fázist az 1. horonyban kezdtük, a V fázis kezdetét innen villamos 120° -ra kell elhelyezni, ami most 4 horonynak felel meg, vagyis az 5. horonyba. A W fázis kezdetét pedig innen további 4 horonyra, a 9. horonyba kell helyezni.

Az a) és b) változat villamos szempontból egyenrangú, azonban a b) változatban kisebb tekercsfejekkel, kevesebb anyag felhasználásával érjük el ugyanazt az eredményt, tehát ez az előnyben részesített megoldás.

A 3.63. ábrán a $2p=2$ pólusú tekercselés egy fázisának vázlata látható. Az U fázishoz tartozó hornyok kijelölése után gazdaságosan kialakítható tekercsfejekkel helyeztük el a tekercsoldalakat a hornyokban. Az elméletileg 12 horonyszélességű tekercsek helyett átlagosan 10 horonyszélességű tekercseket alkalmaztunk.



3.63. ábra Kétpólusú, háromfázisú tekercselés egy fázisa $Z=24$ horonyban

c) A lépésrövidítés mértékét az $\frac{S}{\tau_p}$ arány fejezi ki, ahol S a tényleges lépés, τ_p pedig a pólusosztás, mindkettő hornyokban mérve, ezért mindkettő egész szám.

Egy tekercselés lépésrövidítésének megválasztásához a tört nevezőjéből kell kiindulnunk, τ_p -t kell először meghatároznunk. Ehhez választhatunk azután nála kisebb, egész számú S tényleges lépést.

$2p=8$ pólusú esetben $\tau_p = 3$, ennél kisebb egész szám a 2 és az 1. Mivel a lépésrövidítés maximális értéke gyakorlatilag $\frac{2}{3}$, ezért csak $\frac{S}{\tau_p} = \frac{2}{3}$ -os lépésrövidítést alkalmazhatunk ebben a variációban.

$2p = 4$ pólusú tekercselésnél $\tau_p = 6$ horony, a tényleges lépés az átmérős helyett $S=5$ vagy $S=4$. A megvalósítható lépésrövidítések tehát $\frac{S}{\tau_p} = \frac{5}{6}$, vagy $\frac{S}{\tau_p} = \frac{4}{6} = \frac{2}{3}$ lehetnek.

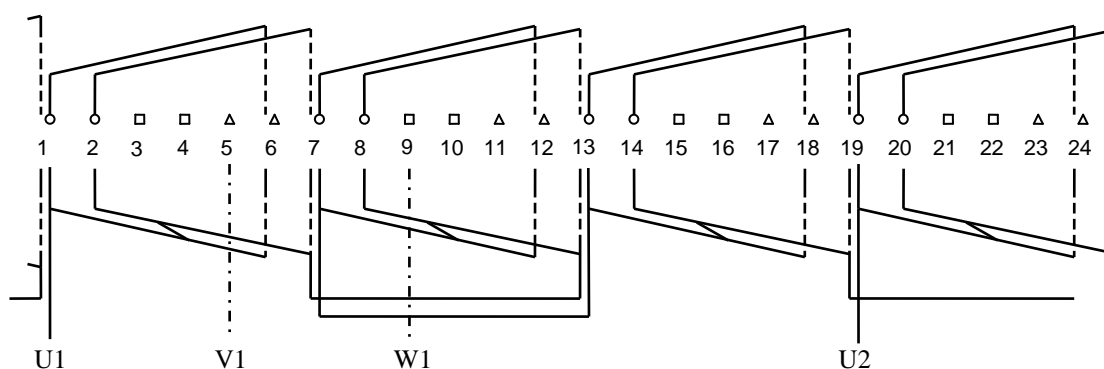
Kétpólusú tekercselésnél $\tau_p = 12$ miatt már bővebb választékra számíthatunk. A tényleges lépés itt $S=8$ -ig csökkenhet, ekkor érjük el a kritikus $\frac{S}{\tau_p} = \frac{8}{12} = \frac{2}{3}$ határt.

A $2p=2$ pólusszámú tekercselésnél tehát a megvalósítható lépésrövidítések:

$$\frac{S}{\tau_p} = \frac{11}{12}, \quad \frac{S}{\tau_p} = \frac{10}{12} = \frac{5}{6}, \quad \frac{S}{\tau_p} = \frac{9}{12} = \frac{3}{4}, \quad \frac{S}{\tau_p} = \frac{9}{12} = \frac{3}{4}.$$

d) A $q = \frac{Z}{2p \cdot m} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2$ horonynak megfelelően kijelölhetjük az egyes fázisokhoz

tartozó hornyokat. Ezekbe a hornyokba kerül a tekercsek egyik oldala, a kétréteges tekercselés felső rétege. A tekercsek másik oldala, az alsó réteg az S tényleges lépésnek megfelelő távolságba, 5 horonnyal távolabb. Ha az első tekercs kezdő tekercsoldalát az 1. horonyba helyezzük, akkor a másik oldalát a 6. horonyba kell lerakni. Így lesznek olyan hornyok, amelyekben különböző fázisokhoz tartozó tekercsoldalak lesznek, ez a körülmény a kétréteges lépésrövidítéses tekercselés velejárója.



3.64. ábra. Négypólusú lépésrövidítéses tekercselés egy fázisának tekercselési vázlata

e) Kétrétegű, lépésrövidítéses tekercselésnél a tekercselési tényezőt az elosztási tényező és a hűrtényező szorzatából határozzuk meg: $\xi = \xi_e \cdot \xi_h$. A két tényező értékét a 3.1.1. fejezetben közölt összefüggések segítségével is kiszámíthatjuk, a gyakorlatban kényelmesebb módon, a szakkönyvekben közölt táblázatokból olvassuk ki azokat.

v	q						
	1	2	3	4	5	6	∞
1	1,000	0,966	0,960	0,958	0,957	0,957	0,955
3	1,000	0,707	0,667	0,653	0,646	0,644	0,637
5	1,000	0,259	0,217	0,204	0,200	0,198	0,191
7	1,000	-0,259	-0,178	-0,157	-0,150	-0,145	-0,136

Egész horonyszámú háromfázisú tekercselések elosztási tényezői

ν	S/τ_p					
	8/9	5/6	4/5	7/9	3/4	2/3
1	0,985	0,966	0,951	0,940	0,924	0,866
3	0,866	0,707	0,588	0,500	0,382	0,000
5	0,642	0,259	0,000	-0,174	-0,382	-0,866
7	0,342	-0,259	-0,588	-0,766	-0,924	-0,866

Lépésrövidítéses háromfázisú tekercselések hűrtényezői

Mivel a $d)$ feladatban $q = 2$, az alapharmonikusra vonatkozó eloszlási tényező az első táblázat alapján: $\xi_e = 0,966$. A lépésrövidítés $\frac{S}{\tau_p} = \frac{5}{6}$, a második táblázatból kiolvashatjuk a hűrtényező értékét: $\xi_h = 0,966$.

Az eredő tekercselési tényező ez esetben: $\xi = \xi_e \cdot \xi_h = 0,966 \cdot 0,966 = 0,933$ az alapharmonikusra vonatkozóan.

3.7.8. Tekercselési példa. Vizsgáljuk meg, hogyan változnának a különböző pólusszámú tekercselések fázisonkénti menetszámai a 3.7.7. példában szereplő $Z = 24$ hornyos állórészben, ha azonos légrésindukcióval azonos indukált feszültséget szeretnénk létrehozni! (A példa elméleti jellegű, a gyakorlatban a különböző pólusszámra készülő gépek állórész lemezelakja nem azonos.)

Megoldás

Jelöljük a különböző pólusszámú variációkat (2) , (4) és (8) indexekkel!

Így feltételezésünk szerint: $D_{(2)} = D_{(4)} = D_{(8)} = D_a$ és $l_{i(2)} = l_{i(4)} = l_{i(8)} = l_i$.

Eltérő lesz azonban a különböző pólusszámú tekercselések pólusosztása:

$$\tau_{p(2)} = \frac{D_a \cdot \pi}{2} ; \quad \tau_{p(4)} = \frac{D_a \cdot \pi}{4} \text{ és } \tau_{p(8)} = \frac{D_a \cdot \pi}{8} .$$

Ennek következtében változni fog a különböző pólusszámú gépek fluxusa is a $\Phi_{\max} = B_{\delta\max} \cdot \alpha_i \cdot \tau_p \cdot l_i$ összefüggésnek megfelelően.

Mivel az állórészben indukált feszültség nagyságát az $U_i = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \xi \cdot \Phi_{\max}$ összefüggés alapján számíthatjuk ki, különböző pólusszámokon a tekercselések menetszámának, tekercselési tényezőjének és fluxusának szorzata állandó értékű lesz:

$$N_{(8)} \cdot \xi_{(8)} \cdot \tau_{p(8)} = N_{(4)} \cdot \xi_{(4)} \cdot \tau_{p(4)} = N_{(2)} \cdot \xi_{(2)} \cdot \tau_{p(2)}.$$

A különböző pólusszámú tekercselések tekercselési tényezői: $\xi_{(8)} = 1$, $\xi_{(4)} = 0,966$ és $\xi_{(2)} = 0,958$, nem követünk el számottevő hibát, ha a tekercselési tényező változásától eltekintünk.

Ekkor a különböző pólusszámú tekercselések menetszámának arányai:

$$\frac{N_{(8)}}{N_{(2)}} = \frac{\tau_{p(2)}}{\tau_{p(8)}} = \frac{D_a \cdot \pi}{2} \cdot \frac{8}{D_a \cdot \pi} = 4, \quad \text{azaz} \quad N_{(8)} = 4 \cdot N_{(2)} \quad \text{és}$$

$$\frac{N_{(4)}}{N_{(2)}} = \frac{\tau_{p(2)}}{\tau_{p(4)}} = \frac{D_a \cdot \pi}{2} \cdot \frac{4}{D_a \cdot \pi} = 2, \quad \text{azaz} \quad N_{(4)} = 2 \cdot N_{(2)}.$$

A példa gondolatmenete alapján láthatjuk, hogy azonos geometriai kialakítás mellett a pólusszám növelésével a menetszámot közel arányosan növelni kell. Ez azt jelenti, hogy a tekercselés azonos áramterhelését (áramsűrűséget) feltételezve, az egységnyi motortérfogattal átalakítható teljesítmény a fordulatszám csökkenésével (a pólusszám növekedésével), arányosan csökken.

3.8. ELLENŐRZŐ KÉRDÉSEK

1. Definiálja a forgómező kialakulásának feltételeit!
2. Mitől függ a forgómező szinkron fordulatszáma?
3. Hogyan fordítható meg a forgómező forgásiránya?
4. Magyarázza el a tekercselési tényező fogalmát!
5. Milyen tekercselési tényezőket ismer? Hogyan számítható az eredő tekercselési tényező?
6. Rajzolja meg egy $Z = 24$ hornyú, négypólusú, háromfázisú egyréteges tekercselés egy fázisát. Jelölje be a többi fázis kezdetét!
7. Rajzolja meg egy $Z = 24$ hornyú, négypólusú, háromfázisú kétréteges 5/6-os lépésrövidítésű tekercselés egy fázisát. Jelölje be a többi fázis kezdetét!
8. Rajzolja fel a 7. feladatban megadott tekercselés gerjesztési görbáját abban a pillanatban, amikor az U-fázistekercsben folyó áram pozitív és maximális értékű!
9. Ismertesse röviden a szinkrongép szerkezeti felépítését!
10. Milyen lehet a szinkron gép forgórész kialakítása?
11. Definiálja a terhelési szög fogalmát!
12. Miért alkalmazzuk a szinkron gépet erőművi termelő generátorként?
13. Mikor mondjuk, hogy egy szinkron gép túlgerjesztett, ill. alulgerjesztett?
14. Mi határozza meg a szinkron gép eredő fluxusát?
15. Rajzolja fel a szinkron gép helyettesítő kapcsolási vázlatát! Adja meg az egyes elemek értékét relatív egységben!

16. Rajzolja fel egy túlgerjesztett szinkron generátor feszültség- és áram-vektorábráját az egyszerűsített helyettesítő vázlat alapján!
17. Rajzolja fel egy túlgerjesztett szinkron motor feszültség- és áram-vektorábráját az egyszerűsített helyettesítő vázlat alapján!
18. Milyen helygörbén mozog egy hengeres szinkron gép áram-munkadiagramja?
19. Mitől függ az áram-munkadiagram sugara hengeres szinkron gép esetén?
20. A hengeres szinkron gép áram-vektordiagramjában hol található meg a terhelési szög?
21. Mitől függ a hengeres szinkron gép nyomatéka?
22. Hol van a hengeres szinkron gép stabilitási határa?
23. Mitől függ a kiálló pólusú szinkron gép nyomatéka?
24. Mitől függ a reluktanciamotorok nyomatéka?
25. Rajzolja fel a hengeres szinkron gép nyomatéki jelleggörbéjét!
26. Rajzolja fel a kiálló pólusú szinkron gép nyomatéki jelleggörbéjét!
27. Adja meg a szinkronozó nyomaték definícióját! Mitől függ a hengeres szinkron gép szinkronozó nyomatéka?
28. Mitől függ a szinkron gép armatúra-visszahatásának nagysága?
29. Milyen irányú az armatúra-visszahatás tisztán hatásos-, ill. reaktív terhelés esetén?
30. Milyen irányú az armatúra-visszahatás rövidzársban?
31. Mi alapján, és hogyan tudjuk meghatározni az armatúra-visszahatás irányát általános terhelési esetben?
32. Rajzolja fel a szinkron gép üresjárási jelleggörbéjét! Rajzolja fel az üresjáráásban mérhető veszteségi jelleggörbét és indokolja jellegét!
33. Rajzolja fel a szinkron gép rövidzárási jelleggörbéjét! Rajzolja fel az rövidzársban mérhető veszteségi jelleggörbét és indokolja jellegét!
34. Rajzolja fel a szinkron gép szinkron reaktanciájának változását a gerjesztőáram függvényében!
35. Hogyan számítjuk ki a szinkron reaktancia viszonylagos értékét?
36. Rajzolja fel az önálló üzemben működő szinkron gép belső terhelési jelleggörbéit!
37. Rajzolja fel a hálózatra szinkronizált szinkron gép szabályozási jelleggörbéit!
38. Rajzolja fel a hálózatra szinkronizált szinkron gép "V"-görbéit! Indokolja a görbék alakját!
39. A szinkronizálás helyes sorrendjében ismertesse a szinkronizálási feltételeket!
40. Ismertesse a vegyes lámpakapcsolás felépítését! Mikor lép fel frekvencia-azonosság, ill. fázishelyzet-azonosság?
41. Miért nem rendelkezik a szinkrongép indító nyomatékkal közvetlen indításkor?
42. Milyen módszereket ismer a szinkron motorok indítására?
43. Ismertesse az indítókalickával rendelkező szinkron motor indítását!
44. Ismertesse a szinkron motor frekvenciaváltóval történő indítását!
45. A szinkronizálás helyes sorrendjében ismertesse a szinkronizálási feltételeket!
46. Ismertesse a vegyes lámpakapcsolás felépítését! Mikor lép fel frekvencia-azonosság, ill. fázishelyzet-azonosság?

47. Milyen módszereket ismer a szinkron motorok indítására?
48. Ismertesse az indítókalickával rendelkező szinkron motor indítását!
49. Ismertesse a szinkron motor frekvenciaváltóval történő indítását!
50. Ismertesse a fluxusállandóság elvét!
51. Milyen fázishelyzetben következik be a zárlat, ha az armatúrában nem lép fel egyenáram? Rajzolja fel az armatúraáram időfüggvényét!
52. Milyen fázishelyzetben következik be a zárlat, ha az armatúrában maximális egyen-áram lép fel? Rajzolja fel az armatúraáram időfüggvényét!
53. Miért és hogyan növelhető a körmőspólusú generátorral a gép armatúrájában indukálódó feszültség frekvenciája?
54. Milyen fluxusú gép a körmőspólusú generátor?
55. Rajzolja fel egy körmőspólusú generátor szerkezeti vázlatát!
56. Rajzolja fel egy kefenélküli körmőspólusú generátor szerkezeti vázlatát!
57. Mitől függ a reluktancianyomaték nagysága?
58. Rajzolja egy reluktanciamotor forgórészének vázlatát!
59. Milyen forgórész kialakítású egy reluktanciamotor forgórésze?
60. Milyen léptetőmotor vezérléseket ismer?
61. Milyen módszereket ismer a léptetési frekvencia növelésére?
62. Rajzolja fel a léptetőmotorok nyomaték-léptetőfrekvencia jelleggörbéit!
63. Definiálja az indítási tartomány fogalmát!
64. Definiálja a tartónyomaték fogalmát!