

A LEGFONTOSABB VILLAMOS GÉPEK MŰKÖDÉSÉNEK ALAPJAI

1. Bevezetés	1
2. A mechanikusan forgatott mező. A mezőgörbe alakja	4
3 Váltakozóáramú tekercselések	8
3.1 A sávtényező	8
3.2. A tekercselések kialakítása	12
3.3. A lépésrövidítés	14
4. Villamos gépek mágneses mezői	16
5. Villamos gépek mezőinek leírása	19

1. Bevezetés

A villamos forgógépek az *elektromechanikai átalakítók* egyik fontos családját képezik. Így általánosabb nevüknek megfelelően villamos energiát alakítanak mechanikaivá vagy fordítva. A villamos forgógépeket kiegészítik, és gyakran segédberendezéseiket képezik a transzformátorok és az áramirányítók, amelyek villamos energiát más jellemzőkkel bíró villamos energiává alakítanak.

A villamos energia döntő többségét *közvetett* módon, többszöri energiaátalakítással nyerjük. Az elmúlt években sok kutatási és fejlesztési munkát fordítottak — főleg az űrkutatással kapcsolatban — a *közvetlen energiaátalakításra*, amikor is például a napenergiából, kémiai energiából egyetlen lépésben közvetlenül nyerünk különböző célokra villamos energiát.

Jelenlegi ismereteink szerint belátható időn belül gyártó, szállító, háztartási stb. gépeinket és járműveink egy — valószínűleg növekvő — hányadát villamos motorok fogják hajtani, és az energia szállítása és elosztása is döntő módon villamos marad, ami a villamos energia termelésének, szállításának és felhasználásának minden területén a fenti gépek egyre növekvő mennyiségét igényli majd. A környezet védelem és az energiaválság valószínűleg újabb lökést ad az erősáramú iparágak fejlődésének.

A világ villamosenergia-termelése kb. 8-10 évenként megkétszereződik. Ez azt jelenti, hogy meglevő erősáramú gépeinket és berendezéseinket kb. 6-8 évenként újra kell termelnünk.

Használatos villamos gépeink *elektromágneses* átalakítók: az energiaátalakítás *közege a mágneses tér*. Ennek oka, hogy jelenlegi technikai eszközeinkkel az egységnyi térfogatban

felhalmozható mágneses energia a villamos megfelelőjénél sokkal nagyobb. Levegőben létre lehet hozni $B=1\text{ T}$ indukciót, amelyhez $w_m=40*10^4\text{ J/m}^3$ energiasűrűség tartozik, míg a levegőben az elég nagy $E=3*10^4\text{ V/cm}$ villamos térerősségnek csak $w_v= 40\text{ J/m}^3$ energiasűrűség felel meg. A mágneses térben létesíthető energiasűrűség így a villamos térének kb. 10^4 -szerese, és ahhoz, hogy a kettő egyenlő legyen, a villamos térerősséget $E=3*10^6\text{ V/cm}$ értékre kellene növelni. Ez a jelenlegi technikai lehetőségeinket követő gyakorlat azonban nem elvi elhatárolás és olyan átalakítók is lehetségesek és ismeretesek - ha széles körűen nem is használatosak - amelyekben az átalakítás közege a villamos tér.

A villamos forgógépek a kis elmozdulású ún. *inkrementális* elektromechanikai átalakítókkal, például relékkel, hangszórókkal stb. ellentétben folytonos mozgásúak, forognak.

A *generátor* mechanikai energiát alakít át villamossá, a motor villamos *energiát* vesz fel és mechanikait ad le.

A mechanikai-villamos, *generátoros* energiaátalakítás azáltal jön létre, hogy a mágneses térben mechanikusan mozgatott tekercsekben *feszültség indukálódik*. A tekercsek áramkörei - terhelt állapotban - a kapcsaikra kötött fogyasztókkal zártak, és így az indukált feszültség áramot indít. Ha a feszültség és áram pillanatértékeinek szorzatával jellemzett teljesítmény-pillanatértékeknek zérustól eltérő középértékük van, akkor a gép a fogyasztónak folyamatosan hatásos villamos energiát szolgáltat. Az áramot vivő vezetőkre a mágneses térben erő hat. Az így keletkező villamos *nyomaték* tart egyensúlyt a mechanikaival, ha a mechanikai veszteségeket elhanyagoljuk.

A *motor* tekercsein a villamos energiaforrás hajt át áramot. Az alapjelenség ebben az esetben az áram és a mágneses tér kölcsönhatásából származó villamos, hajtó *nyomatékképzés*. A mágneses térben forgó vezetőkben itt is indukálódik *feszültség*, amely a feszültségeésektől eltekintve egyensúlyt tart a tápláló feszültséggel.

A szokásos felépítésű villamos gépek *állórészből* (sztátorból) és *forgórészből* (rotorból) állnak.

Az áramot vivő vezetőkre kifejtendő erőhatásokhoz és a feszültség indukálásához adott helyre terelt, megfelelő *nagyságú és eloszlású mágneses térre* van szükségünk. Villamos gépeink tekercsei ezért rendszerint vastestben helyezkednek el, amely a mechanikai erőhatást is felveszi. Az álló- és forgórész-vastesteket a *légrés* választja el. Ha a fluxus a vastestben változik az időben, akkor a veszteségek csökkentése érdekében a vastestet lemezekből készítik. A fejlesztés alatt álló mélyhűtött - szupravezetős - gépekben a vastest az egyik vagy mindkét oldalon elmaradhat. Szervomotorokban készítenek, és nagy gépekben kísérleteznek a vastesten kívül elhelyezett tekercsekkel is.

A legegyszerűbb működésű villamos gép a később ismertetendő homopoláris gép. Ebben a vezetők állandó nagyságú és irányú mágneses térben állandó sebességgel mozognak, és így mind az indukált feszültség, mind a nyomaték pillanatértékei az időben állandók. Villamosenergia-rendszereink viszont a váltakozó áramú motorok előnyös tulajdonságai és a feszültség egyszerű transzformálása következtében *váltakozó áramúak*.

A következőkben először az *indukált feszültséggel* foglalkozunk, a nyomatékképzést azután tárgyaljuk.

Váltakozófeszültséget úgy nyerünk, ha tekercseink váltakozó irányú - váltakozó északi és déli pólusokat alkotó - mágneses térben mozognak. Csak a tekercsek és a tér relatív mozgása lényeges. Így mozoghat a forgórészen elhelyezett tekercs az állórész nyugvó pólusrendszerében, vagy az állórészen elhelyezett nyugvó tekercsek előtt foroghatnak el a forgórész váltakozó északi-déli pólusai. A gyakorlatban nagyobb gépekben az utóbbi elrendezés szokásos, mert a nagyfeszültségű nagy állórész-teljesítményt könnyebb az állórész nyugvó kapcsain be-, illetve kivezetni, míg a forgórésztekercsekhez csúszógyűrűkön keresztül kell csatlakozni.

Előnyös tulajdonságai miatt időben szinuszos lefolyású indukált feszültségre törekszünk. Ilyet a mágneses mező térben szinuszos vagy ahhoz közelálló eloszlásával és a tekercselés megfelelő kialakításával érhetünk el, a mozgó vezetők állandó sebessége esetén.

Az elmondottak szerint a *váltakozóáramú* generátorok szokásos felépítése vázlatosan a következő. A forgórészen elhelyezett, egyenárammal táplált tekercsekkel a gép légrésében a kerület mentén szinuszos indukció eloszlást kell létrehozni. Ez a mező a forgórészhez képest nyugalomban van. A forgórész mechanikai forgatásával ez a szinuszos térbeli eloszlású mező elforog az állórész nyugvó vezetői előtt, és azokban időben szinuszos váltakozófeszültséget indukál.

A következőkben először megvizsgáljuk, hogyan lehet a forgórészen a kívánt térben szinuszos vagy ahhoz közelálló mezőeloszlást létrehozni, majd az ezáltal az állórész-tekercsekben indukált feszültségekkel és az állórésztekercsek szokásos kialakításának alapelveivel foglalkozunk.

2. A mechanikusan forgatott mező. A mezőgörbe alakja

Kiálló pólusú, kétpólusú egyfázisú elemi szinkrongenerátor vázlatos keresztmetszetét látjuk az 1a ábrán. Az állórészen egyetlen, az 1—1' vezetőkből álló, egyemenetű tekercs helyezkedik el. Kapcsai egyelőre legyenek nyitottak.

A légrés adott helyén az indukció nagyságát a közrefogott gerjesztés és az út mágneses ellenállása szabja meg. A kívánt *szinuszos* térbeli mezőeloszlás elérésére így két lehetőség adódik, állandó gerjesztés és változó légrés vagy állandó légrés és változó közrefogott gerjesztés. A kiálló pólusú változatban minden erővonal a *teljes* pólusgerjesztést körülfogja (1.a és d ábrát), így a légrésnek kell kb. a kívánt indukcióeloszlásnak megfelelően változnia, a szélek felé nőnie.

Az a ábra erővonalain nyilakkal megjelöltük annak vasban és levegőben haladó szakaszait. Ha a vas szakaszokra eső U_{mvas} mágneses feszültségeket az $U_{m\delta}$ légrésre esők mellett elhanyagoljuk, akkor a gerjesztési törvény szerint a közrefogott teljes v_p pólusgerjesztés egyenlő a két $\delta(x)$ légrésre eső mágneses feszültséggel. Így, ha $h(x)$ a mágneses térerősség a légrésben a vizsgált helyen, akkor

$$\mathcal{G}_p = h(x)2\delta(x)$$

és így az indukció:

$$b(x) = \mu_0 \frac{\mathcal{G}_p}{2\delta(x)} = \frac{k}{\delta(x)} \quad k=\text{állandó}$$

A szinuszos indukcióeloszláshoz szükséges $\delta(x)$ változó légrést a gyakorlatban közelítőleg úgy alakítják ki, hogy a pólusfelületet az állórésztől eltérő középpontú körívvel készítik.

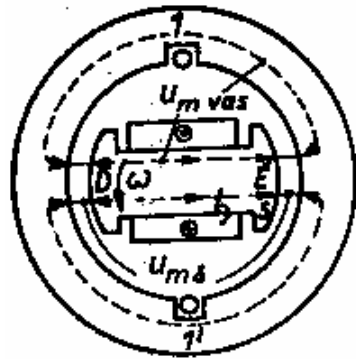
Állandó fordulatszám, tehát állandó v kerületi sebesség és így állandó ω szögsebesség esetén az egyemenetű állórésztekercs két, a papír síkjára merőleges l hatásos hosszúságú vezetőjében a

$$b(x) = B \sin x$$

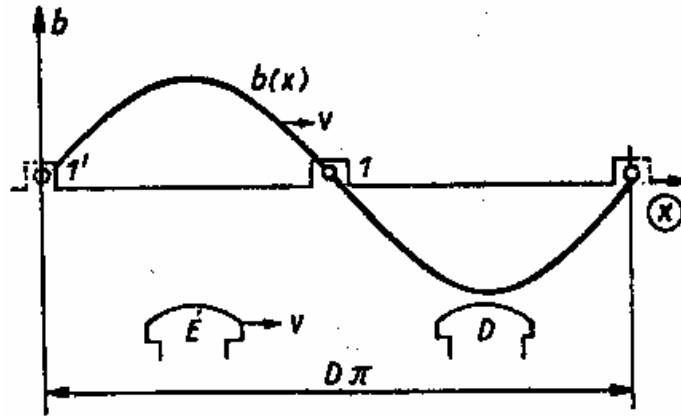
szinuszos *térbeli* indukcióeloszlás az $x = \omega t$ összefüggésnek megfelelően

$$u_1(t) = 2b(x)lv = B \sin \omega t * 2lv$$

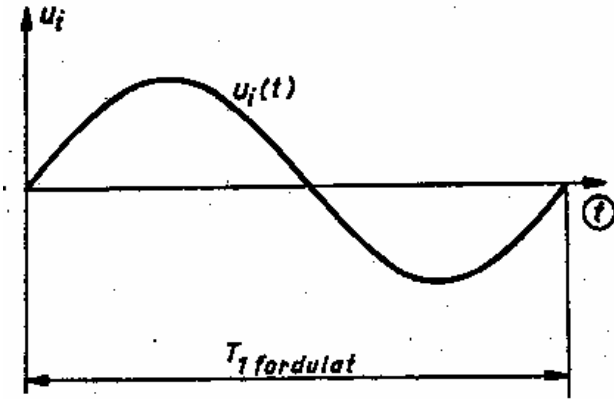
időben szinuszosan változó feszültséget indukál. A *térben* szinuszos eloszlású egyenletes sebességgel haladó mezőt az álló vezető *időben* szinuszosan változóan „látja”.



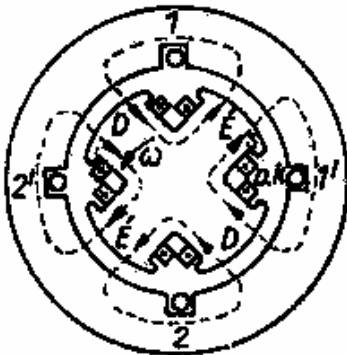
a)



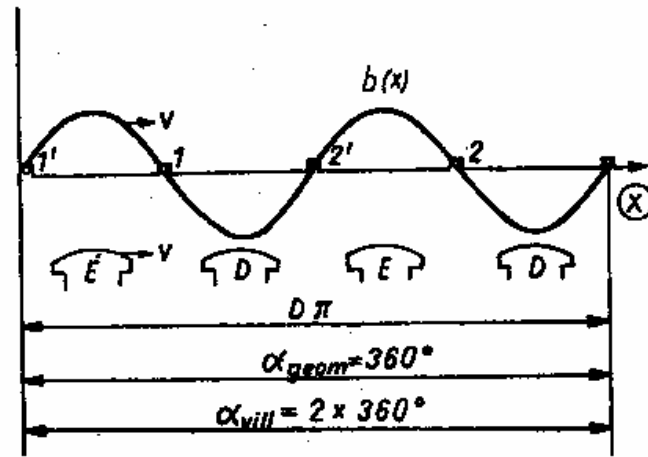
b)



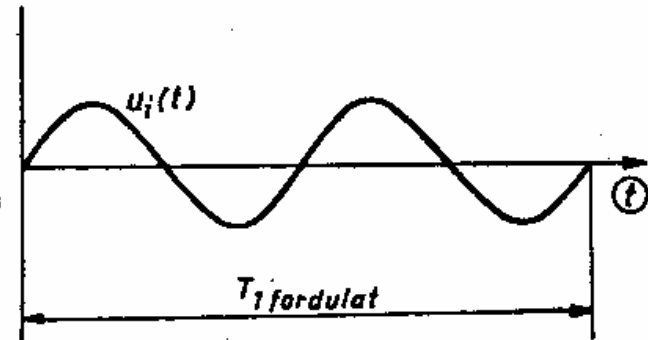
c)



d)



e)



f)

1. ábra: Kétpólusú (a) és négy-pólusú (d) kiálló forgórészű gép szinuszos mezőgörbéi (b,e) és indukált feszültségei (c,f)

Ez összefüggés különösen jól érzékelhető az 1b ábra kiterített vázlatán, ahol az egy alkotójánál felvágott hengerpalástot síkban kiterítettük és a papír síkjára merőlegesen helyeztük el. Miközben a $b(x)$ indukcióhullám elhalad a vizsgált állórész vezető előtt, annak $u_i(t)$ indukált feszültsége a mezőgörbe térbeli eloszlását időben lemásolja (c ábra).

Az ábrákból láthatóan a forgórész egy körülfordulása alatt egy állórészhorony előtt a forgórész térbeli indukcióeloszlásának egy teljes hulláma halad el, így ezalatt az indukált feszültség egy teljes időbeli periódusa játszódik le. Azaz egy fordulatnak egy periódus, másodpercenként egy fordulatnak így egy Hz frekvencia felel meg. Az Európában az energiaelosztásban használatos $f=50$ Hz hálózati frekvencia létrehozásához tehát a kétpólusú gép másodpercenként 50 fordulatszáma, azaz percenként

$$n_1 = 50 \text{ ford/s} * 60 \text{ s/min} = 3000 \text{ ford/min}$$

szükséges. Ezt a fordulatszámot a kétpólusú szinkrongenerátor *szinkron fordulatszámának* nevezzük.

Többpólusú - pl. a d ábrán négypólusú, két póluspárú - generátor állórész furatának kerülete geometriai szögben mérve ugyanúgy 360° , mint a kétpólusúé. Ugyanakkor két teljes pólus, tehát a légrésindukció-eloszlás egy teljes hulláma a fél kerületen helyezkedik el (e ábra). *Villamos szögben* - az indukcióhullám szögében - mérve tehát a fél állórészfurat kerülete 360° , a teljes kerület így $2 \times 360^\circ$.

Az α_v villamos szög az α_g geometriainak póluspárszám-szorosa, p-szerese:

$$\alpha_v = p \alpha_g \quad (1)$$

Itt p a póluspárok száma; a pólusok száma tehát $2p$.

Előbbi 1 és 1' jelű vezetőkből álló menetünk két oldala most a kerület negyedrészt fogja át. A vezetők jó kihasználása azt kívánja, hogy a tekercsek két oldalában indukálódó feszültségek éppen ellenfázisban vagy közel ellenfázisban legyenek. A két tekercsoldal feszültségei ekkor nem vektorosan, hanem algebrailag vagy közel algebrailag adódnak össze, és így a legnagyobb eredő tekercsfeszültséget kapjuk. Ehhez az szükséges, hogy a két tekercsoldal villamos szögben mérve 180° távolságban helyezkedjen el. A gyakorlatban ettől - elsősorban a felharmonikusok csökkentése céljából, egyenáramú gépekben a kommutáció javítása érdekében - gyakran eltérnek, és 180° -nál kisebb szélességű tekercseket készítenek.

A négypólusú gép állórészvezetőjében egy körülfordulás alatt két feszültség-hullám, általában p feszültség-hullám indukálódik (f ábra).

Az előbbi gondolatmenetet folytatva tehát ez esetben az $f=50$ Hz hálózati frekvenciájú feszültség létrehozásához másodpercenként csak $50/2$, percenként $3000/2$, általában:

$$n_1 = \frac{f}{p} \quad (2)$$

fordulatszám szükséges.

A kétpólusú szinkrongép szinkron fordulatszáma tehát másodpercenként 50, azaz percenként 3000, a négypólusúé percenként 1500, a hatpólusúé 1000.

Valamely vezetőhöz képest n relatív fordulatszámmal forgó p póluspárszámú mező az elmondottak szerint a vezetőben

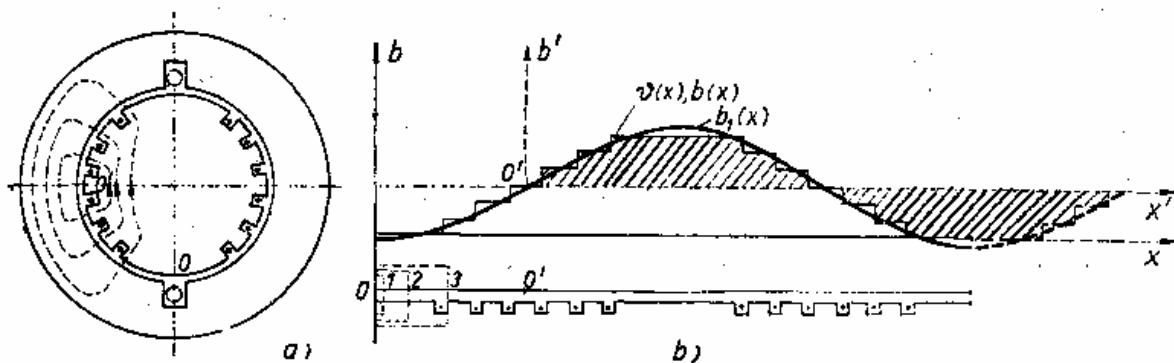
$$f = np \quad (2a)$$

frekvenciájú feszültséget indukál. Ez az összefüggés akkor is igaz, ha a tekercs és az indukáló mező is - eltérő fordulatszámmal - forog, és pedig függetlenül a mező létrejöttének módjától.

Többpólusú gépeket a nagyobb frekvencia, kisebb fordulatszám vagy a kerület jobb kihasználása céljából építenek.

Az 1d ábrából is jól látható, hogy a kiálló pólusú gépek ún. pólusközei lényegében nagy hornyok.

A *hengeres forgórészű* gép légrése állandó, de a pólusgerjesztés hornyokban elosztott, így az egyes erővonalak - erővonalcsoportok - más-más gerjesztést fognak közre (2a ábra). A v gerjesztés változik a kerület mentén. Az indukció a vasra eső mágneses feszültségek elhanyagolása esetén, mint láttuk, arányos a gerjesztéssel, így az indukcióeloszlási görbe megegyező alakú - a lépték megfelelő megválasztásakor egybeesik - a gerjesztési görbével.



2. ábra: Hengeres forgórészű gép gerjesztési görbéjének szerkesztése

A *gerjesztési görbe* felrajzolásának módját az 2b ábrán mutatjuk be. A görbe rajzolását a kerület tetszés szerinti helyén kezdhetjük. E helyen, az ábrán a kerület 0-val jelzett pontjában a légrést magába foglaló „zérus szélességű” hurkot rajzolunk, majd ennek bal oldalát rögzítve a hurkot jobbfelé tágítjuk, és eközben meghatározzuk a közrefogott gerjesztés változását. Ahol áramokat - gerjesztést - találunk, annak értékét függőlegesen felmérjük. Így az ordináta mindenütt az addig körülfogott áramok összegét, az árameloszlás integrálgörbéjét, a gerjesztés nagyságát méri. Az egyes hornyok gerjesztését rendszeren a középvonalba koncentrálnva képzeljük. A gerjesztési görbe így lépcsős görbe. Az álló- vagy forgórészbe, ill. abból kilépő fluxusok egyenlők, így a gerjesztési vagy indukciógörbe e fluxusokat mérő félhullámainak területei is egyenlők. A kerület x_1 és x_2 pontjai közötti A palástfelület fluxusa φ_A .

$$\varphi_A = \int_A B dA = l \int_{x_1}^{x_2} b_x dx = l A_{x_0, x_2}$$

ahol l a forgórész hossza, b_x az indukció az x helyen, és A_{x_1, x_2} az indukciógörbe alatti terület x_1 és x_2 között.

E helyen célszerű definiálni, hogy a továbbiakban a villamos gépekben fluxuson pólusosztás szélességű, átmérős, tekercs által körülfogott legnagyobb fluxust értünk. E fluxus térvektorainak iránya megállapodás szerint a tekercs tengelyével esik egybe e helyzetben. A tekercs más helyzeteiben kapcsolódását e fluxussal - szinuszos eloszlás esetén - vetítéssel nyerhetjük.

Egy teljes hullám felrajzolása után a *középvonalat* a fentieknek megfelelően kell berajzolni. Az x kezdeti vízszintesnél kezdtük el a rajzolást. A középvonalat x' -vel jelöltük, és a görbét jobbfelé szaggatott vonallal kiegészítettük. A lépcsős görbe gyakorlati célokra jól

közelíti a szinuszos eloszlást, és annak b_1 alapharmonikusával szokás számítani. Az állórész-tekerceselés megfelelő kialakításával elérhető, hogy az indukált feszültség időgörbéje sokkal közelebb álljon az ideális szinuszgörbéhez - kevesebb felharmonikust tartalmazzon - mint az indukáló térbeli indukcióeloszlási görbe.

A kiálló pólusú gépben tehát minden pólusfluxusvonal azonos gerjesztést fog közre, de a légrés változó, hengeresben a légrés állandó, a körülfogott gerjesztés pedig változik - ugrásokkal. A térbeli indukcióelosztás mindkét esetben valamelyest eltér a kívánt szinusztól. Az indukált feszültség időbeli változása az elosztott állórész-tekerceselés - és szerkesztési fogások - következtében a szinuszgörbét mégis jól közelíti.

3. Váltakozóáramú tekerceselések

3.1 A sávtényező

Az *1a* ábrán rajzolt egyetlen állórésztekerccsel nagyon rosszul használnánk ki az állórész területét. Az *2b* ábrával kapcsolatban mondottakból az is kitűnik hogy állandó légrést feltételezve egyetlen állórésztekeres árama négyszög alakú, a szinusztól nagyon eltérő nagy felharmonikus tartalmú, állórész mezőgörbét hoz létre.

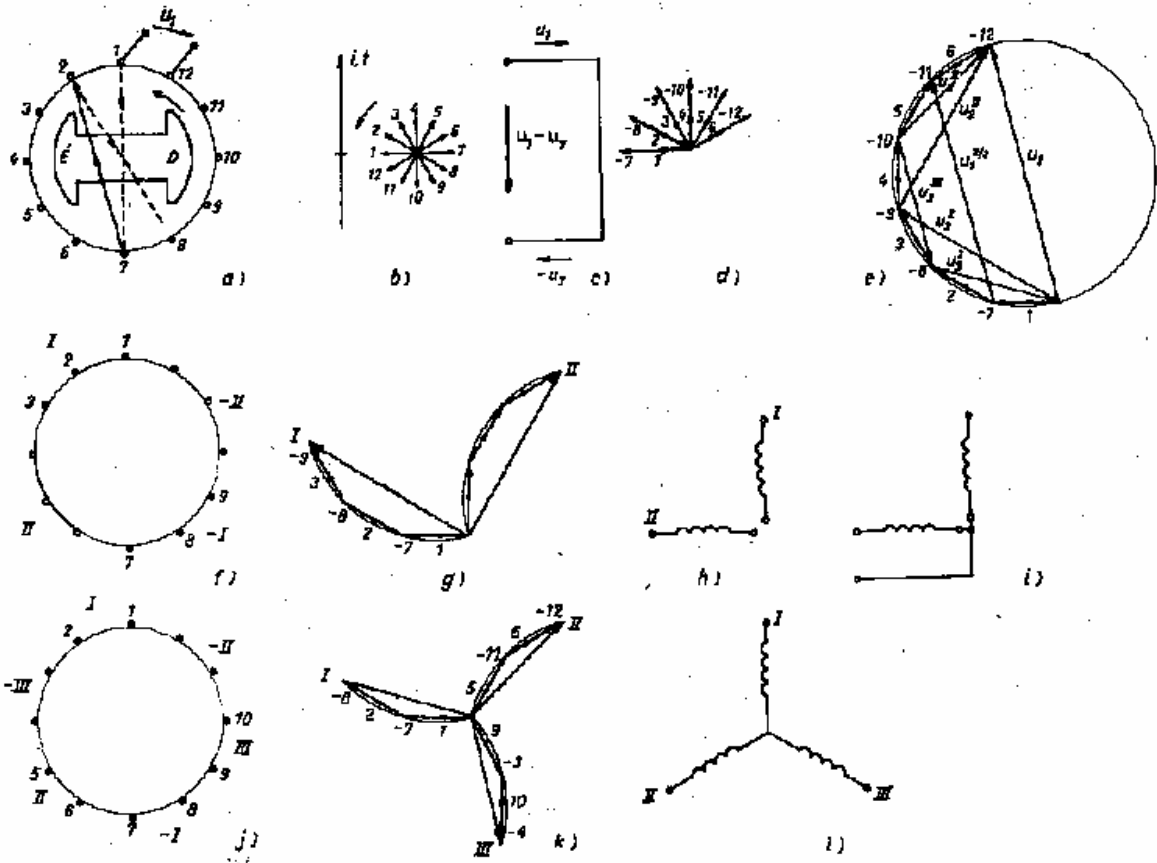
Az állórészkerület jobb kihasználása céljából próbaképpen helyezzünk el vezetőket a teljes kerületen (*3a* ábra). Szemben fekvő vezetőkből képezzünk meneteket - vagy többmenetes tekerceseket -, és valamennyi menetet vagy tekerceset kössük sorba, mondjuk az 1 és 12 vezetők között. Így *egyfázisú* tekerceselést kapunk.

Az egyes vezetőkben szinuszos feszültségeket indukál a póluskerék mezeje, így azok diagramvektorokkal, fázorokkal jellemezhetők. A kiragadott pillanatban az 1 vezetőben indukált feszültség pillanatértéke zérus - és negatív félhulláma következik - így függőleges időtengelyt választva annak vektorát vízszintesen és balfelé mutatóan kell felrajzolni (*b* ábra). A 2 vezető 1-hez képest a kerület mentén $360^\circ/12=30^\circ$ -kal a forgásirányban eltolva helyezkedik el. A póluskerék mezejének azonos helyei ennek megfelelően időben 30° -kal később érik el azt, így indukált feszültsége a 30° -os térbeli előreforgatásnak megfelelően időben 30° -kal késik, így azonos nagyságú vektorát 1-hez képest 30° -kal hátraforgatva kell felrajzolni.

Ha az összes feszültségvektort felrajzoljuk, akkor a vezetők *3b* feszültség csillagát kapjuk. A szemben fekvő vezetők meneteket képeznek, amelyeknek feszültségei összeadódnak. Az 1 és 7 vezetőkől alkotott menet kapcsain így az 1 és 7 feszültségek összege mérhető (*c* ábra). A *d* ábrán az egyes menetek feszültség csillagát látjuk. Ha most az 1—7, 2—8.. 6—12 meneteket sorbakötjük, akkor azok feszültségvektorait egymás után kell fűzni. Így a teljes tekerceselés eredő feszültsége, amelyet az 1 és 12 vezetőkhez csatlakozó kapcsokon mérhetünk, az *e* vektorsokszög $U_1=U_e$ eredője lesz.

A vektoros összegezés következtében az U_1 eredő feszültségvektor jelentősen kisebb a részfeszültségek algebrai összegénél, ΣU -nál. A kettő hányadosa az eloszlási (elosztási) vagy *sáv tekerceselési tényező*:

$$\xi_e = \frac{U_e}{\Sigma U} \quad (3)$$



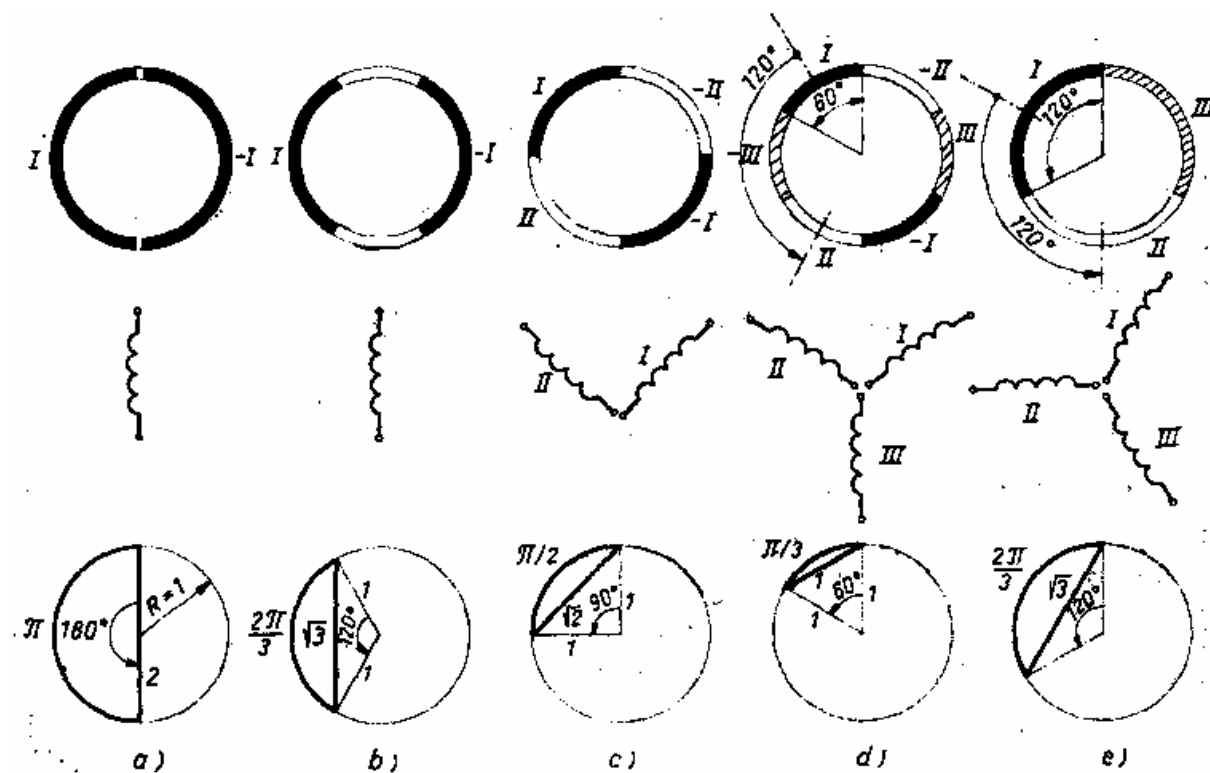
3. ábra: Váltakozóáramú tekercselések indukált feszültsége. Egyfázisú tekercselés (a) feszültségcsillaga (b,d) és feszültségszöge (e). Két (f-i) és háromfázisú (j-l) tekercselés fázisfeszültségei.

Az 3e ábra sokszöge jól közelíthető a köré írt körrel - ez a közelítés a hornyok számának növekedésével egyre javul - és ekkor az eloszlási tekercselési tényező jó közelítéssel az egység sugarú kör húrjának és ívének viszonya:

$$\xi_e \approx \frac{\text{húr}}{\text{ív}} \quad (3a)$$

Ez a kifejezés pontosan végtelen számú horonyra igaz.

Az 4. ábra felső sorának vázlatos rajzain az ún. *fázissávokat*, a kerületnek olyan íveit jelöltük, amelyeken azonos fázishoz tartozó hornyok helyezkednek el. Az egyes fázisokat fekete, fehér és vonalkázott jelzéssel különböztettük meg. A második sorban a fázistekercsek jelképes jelölései a tekercsek tengelyirányában helyezkednek el. A harmadik sorban az egység sugarú, végtelen horonyszámra érvényes feszültség „sokszögrészeket” és azok eredőit látjuk.



4. ábra. Különböző fázisszámú váltakozó áramú tekercselések sávtényezői

A teljesen betekercselt kerületű egyfázisú tekercselés eloszlási tényezője az 4a ábrából a fenti közelítéssel:

$$\xi_{e1} = \frac{2}{\pi} = 0,637$$

Ez a megoldás mind a kerületet, mind a beépített vezetőket rosszul használja ki. A vezetők jobb kihasználása érdekében ezért egyfázisú gépekben csak a kerület kétharmadát tekercselik be. A tekercselési tényező ekkor az 4b ábra szerint:

$$\xi_{e1,2/3} = \frac{2\sqrt{3}/2}{2\pi/3} = 0,828$$

Az 2b ábrával összevetve látható, hogy a szokásos kétharmados betekerceselés trapéz alakú, a teljesen betekerceselt megoldás háromszög alakú mezőgörbére vezetne. A Fourier-analízisből ismeretes, hogy a háromszög görbe felharmonikus tartalma valamivel nagyobb, mint a trapéz görbéé. Ezen felül az 1/3 szélességű trapéz görbéből a gyakran kellemetlen háromszoros harmonikusok hiányoznak

A vezetők és a kerület kihasználtságát egyaránt javíthatjuk, ha a vezetők közül, azok megfelelő csoportosításával és összekötésével több tekercset képezünk, azaz többfázisú tekercselést alakítunk ki. A következő pontban látjuk, hogy a többfázisú tekercselés más szempontból is előnyösebb az egyfázisúnál.

Ha a kerület két-két szemben fekvő egynegyedén elhelyezkedő vezetőket k össze egy tekercsre (3f ábra), akkor az eredő feszültségek közötti fázisszög 90° (g ábra). Ezt a tekercselést - mint később látjuk, nem egészen helyesen - *kétfázisú* tekercselésnek hívják.

Tekerceselési tényezője az 4c ábrából

$$\xi_{e2} = \frac{\sqrt{2}}{\pi/2} = 0,9$$

az előzőnél lényegesen jobb.

Ha a kerületet hat részre osztjuk és két-két szemben fekvő 60° -os kerületi sáv vezetőiből alkotunk egy-egy tekercset, akkor a háromfázisú tekercselés szokásos alakját kapjuk (3j és k ábrák).

Sávtényezője az 4d ábrából:

$$\xi_{e3} = \frac{1}{\pi/3} = 0,955$$

A fázisszám további növelésével a tekercselési tényező már alig javul, viszont a kivezetések száma nő. A háromfázisú tekercselésnek csillag- (3l ábra) vagy három szögkapcsolásban általában három kivezetése van (5h, i, j, k ábrák). A csillag kapcsolat zérus pontját csak világítási hálózatokban vagy speciális célokra szokás kivezetni. A kétfázisú rendszernek láncolatlan alakban négy, láncolt alakban három kivezetése van (3h és i ábrák). A „csillagponti” vezeték keresztmetszete szimmetrikus tápláláskor $\sqrt{2}$ -szöröse a fázisvezetőknek, és aszimmetria esetén azt esetleg még növelni kell.

Az egyes fázisok vezetőit mindegyik esetben két szemben fekvő szimmetrikus sávban helyeztük el. A tekercselések úgy is elkészíthetők, hogy a két fázissáv egymás mellett helyezkedjék el. Erre egyes esetekben szükség is van. A tekercselési tényező ekkor lényegesen romlik, amint azt az 4e ábra háromfázisú tekercselrendezéséből látjuk. Ezt a megszokott előbbi ún. 60° -os tekercseléssel szemben 120° -os tekercselésnek nevezik. Ekkor a kétharmados betekerceselésű egyfázisú tekercseléssel egyező sávtényezőre jutunk:

$$\xi_{e3120^\circ} = 0,828$$

A különböző fázisszámú gépek kihasználtságát még egyszerűbben és szemléletesebben hasonlíthatjuk össze, ha azok látszólagos teljesítményeit vetjük össze azonos fajlagos igénybevételek esetén. A vezetőkben folyó I_{eff} áram és egy vezetőben indukált feszültség, tehát a légrésindukció nagysága legyen minden esetben azonos.

Összehasonlítási alapként válasszuk a teljesen betekerrelt egyfázisú gép látszólagos teljesítményét. A részleges betekerrelés ugyanis csak a tekercselési anyag kihasználását javítja, a gépét nem.

Az egyfázisú gép látszólagos teljesítménye, ha U_{1eff} a feszültségsokszög köré írható kör átmérőjének, tehát az indukálódó feszültség maximális értékének (3e ábra) $1/\sqrt{2}$ -szerese:

$$P_1 = U_{1eff} I_{eff}$$

A kétfázisú gép fázisfeszültsége $U_{2eff} = U_{1eff}/\sqrt{2}$, így teljesítménye

$$P_2 = 2U_{2eff} I_{eff} = 2 \frac{U_{1eff}}{\sqrt{2}} I_{eff} = \sqrt{2} P_1 = 1,41 P_1$$

A háromfázisú 60° -os sáv szélességű gép fázisfeszültsége éppen a feszültségkör sugara $U_{3eff} = U_{1eff}/\sqrt{2}$. Így

$$P_3 = 3U_{3eff} I_{eff} = 3 \frac{U_{1eff}}{2} I_{eff} = 1,5 P_1$$

Az m fázisszámú tekercselés fázisfeszültsége nagy fázisszámnál a félkörív m -ed része:

$U_{meff} = \frac{1}{m} \frac{\pi}{2} U_{1eff}$. A látszólagos teljesítmény így

$$P_m = m \frac{1}{m} \frac{\pi}{2} U_{1eff} I_{eff} = \frac{\pi}{2} P_1 = 1,57 P_1$$

Az azonos gépnagyságból kihozható látszólagos teljesítmények viszonya tehát

$$P_1 : P_2 : P_3 : P_m = 1 : 1,41 : 1,5 : 1,57.$$

A kétfázisú tekercselés tehát a gép kihasználását 41%-kal növelte meg. A háromfázisú tekercselés ehhez képest még 9%-kal növeli a gépteljesítményt a hozzávezetések számának növelése nélkül, éspedig egyenlő keresztmetszetekkel a kétfázisú tekercselés eltérő keresztmetszetű harmadik vezetőjével szemben, amely konstrukciós és védelmi nehézségeket okoz. A fázisszám további növelése a gép kihasználását alig növeli, a hozzávezetések számát viszont igen. A háromfázisú tekercselés ezért kivételes megoldásoktól és az ún. kalickás tekercselésektől eltekintve szinte kizárólagos. A kétfázisú tekercselés jelentősége egyenleteinek kisebb száma és a tekercselés sajátos szimmetriája miatt elméleti vizsgálatokra nagy.

3.2. A tekercselések kialakítása

Az elmondottak alapján a *váltakozóáramú tekercselések* kialakításának alapelveit is könnyen követhetjük. Az egyszerűbb szemléltetés érdekében az előbbiekkal szemben forgórész-tekercseléseket vizsgálunk.

Induljunk ki ismét olyan hengeres forgórészből, amelynek egyetlen egy- vagy többmenetes tekercse van. A tekercs legyen átmérős, ami azt jelenti, hogy a tekercs két oldala villamosan

180°-ra helyezkedik el, azaz kétpólusú gépen az átmérőn. Négypólusú gépben a tekercs szélessége éppen pólusosztásnyi, azaz egynegyed kerületnyi.

A gép jobb kihasználása és jobb mezőgörbe elérése céljából - mint láttuk - több tekercset kell elhelyezni. Ezek elhelyezésére két lehetőség van: 1. Radiális irányban: így jutunk a *koncentrált* tekercselésre. 2. A kerület mentén: így kapjuk az *elosztott* tekercselést. A koncentrált tekercselés mezőgörbáját - mint bemutattuk - a légrés kialakításával kell javítani. Az elosztott tekercselést a koncentráltból képzeletben úgy is származtathatjuk, hogy az előbbi meneteit a kerület mentén egymás mellé kiterítjük.

Tegyük most fel, hogy háromfázisú négypólusú tekercselést kell kialakítani. Az egy fázissávban elhelyezkedő hornyok számát válasszuk kettőre! Ekkor a kerületet a négy pólusnak megfelelően négy részre kell osztani, és minden negyed kerületen a három fázisnak megfelelően hat-hat hornyot kell elhelyezni. Az 1. fázishoz tartozó két szomszédos pólus alatt elhelyezkedő négy vezetőt az 5a ábrán látjuk. Egy kiragadott pillanatban az áramok irányai a berajzoltak. A vezetők összekötésének módjával, tehát a homlokfelület előtt elhelyezkedő, a hornyokban fekvő vezetőket összekötő vezető szakaszoknak, az ún. *tekercsfejeknek* sokféle kialakításával itt nem foglalkozunk, de azok alakja a horonyban fekvő vezetők áram eloszlási képe szempontjából közömbös is. A horonyban elhelyezkedő vezetőket a tekercsfejekkel úgy kell összekötni, úgy kell azokból tekercseket alkotni, hogy a vezetők feszültségei folytonos nyílfoltyamban adódjanak össze.

Erre két lehetőség van. Az *a* ábra szerinti összekötéskor *koncentrikus*, a *b* ábrán *egyenlő szélességű* tekercseket kapunk. A *c-f* kiterített ábrákon egy, ill. többmenetű tekercseket látunk.

Két-két összetartozó fázissáv vezetői így egy tekercscsoportot alkotnak. Egy tekercscsoporton belül a tekercseket az egyenlőtlen árameloszlás elkerülésére ritkán kötik párhuzamosan.

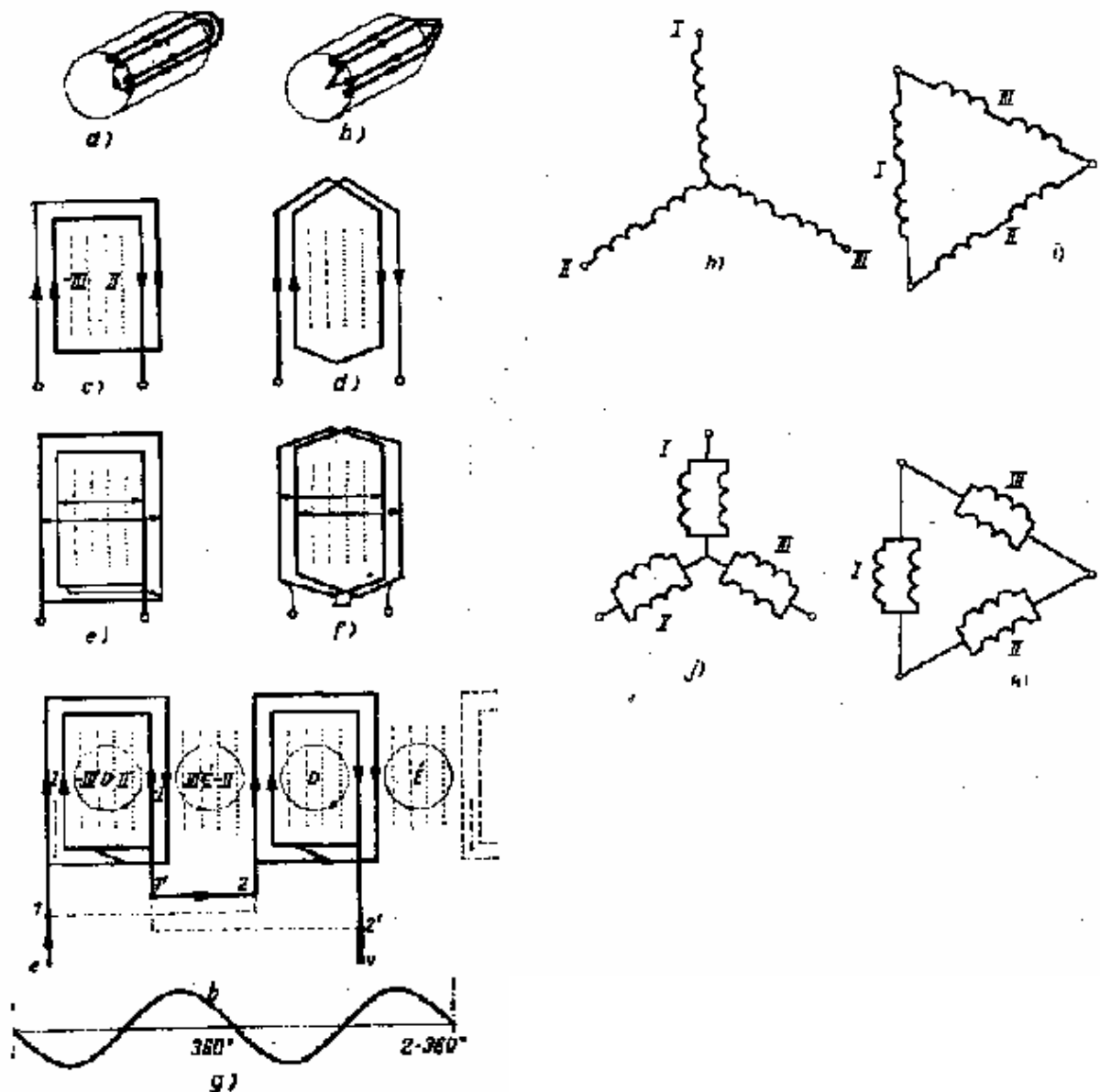
Kétpólusú gépben egy fázishoz egy tekercscsoport, többpólusú gépben annyi tekercscsoport tartozik, amennyi a póluspárok száma. Különleges tekercselésekben egy-egy fázissávot is több tekercscsoportra bonthatnak. A normális többpólusú kivitelben a teljes fázistekercselés kialakításakor az egy fázishoz tartozó tekercs csoportokat köthetjük sorba, párhuzamosan vagy vegyesen. A *g* ábrán a soros kapcsolást kihúzott, a párhuzamos kapcsolást szaggatott vonallal jelöltük. Az ábrába be nem rajzolt - csak a hornyokkal jelzett - másik két fázis tekercscsoportjainak kialakítása és azok összekötése hasonló módon történik.

Több sorba kapcsolt tekercscsoportot szokás a tekercselés ágának nevezni. Ekkor a fázisokat a kívánt módon összekötött ágakból képezik, vagy maga a fázis egy ág.

Az egyes fázisokat ezután általában *csillagba* vagy *háromszögbe* kapcsolják. Kivételesen ezek kombinációja is előfordul. A *h,i,j,k* ábrákon soros csillag-, soros háromszög-, párhuzamos csillag- és párhuzamos háromszögkapcsolást látunk. Itt az egyes tekercsjelek az egyes tekercscsoportokat vagy ágakat jelképezik.

Az 5. ábra, és az előzőekben elmondottak egyúttal a háromfázisú tekercselések tervezésének főbb lépéseit is érzékeltetik.

A vezetőkől - tekercsoldalaktól - tekercseket, a tekercsekből tekercs csoportokat, majd ezekből a tekercselés ágait képezik. Az ágakból alakítják ki az egyes fázisokat, majd a fázisok láncolásával a teljes háromfázisú tekercselést.



5. ábra. Váltakozóáramú tekercselés kialakításának lépései

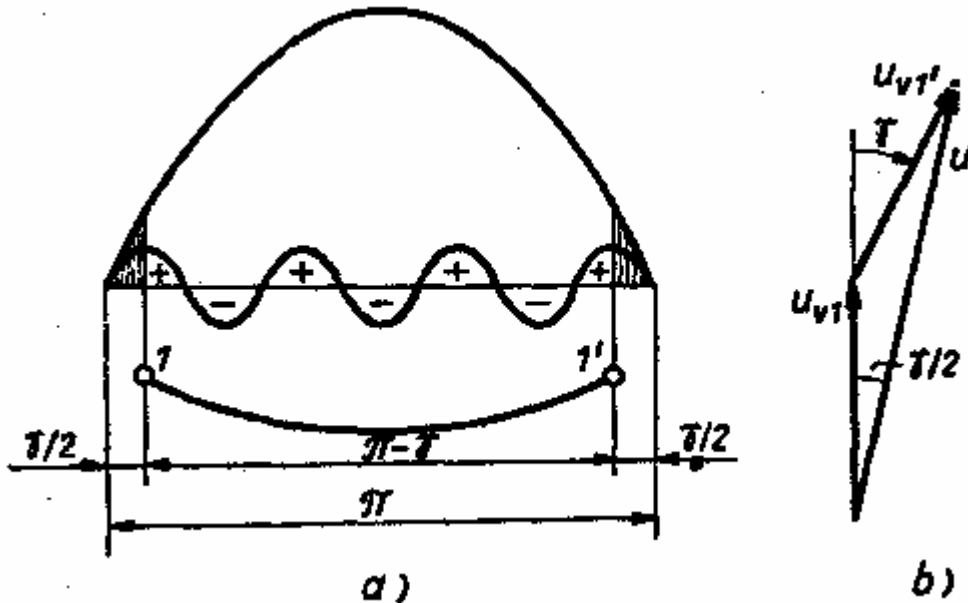
3.3. A lépésrövidítés

Az eddigiekben feltettük, hogy tekercseink átmérősek, vagyis egy tekercs két oldala villamosan 180° -ra helyezkedik el. A térbeli felharmonikusok okozta mellékhatások csökkentésének egyik eszköze az ún. *lépésrövidítés*. Ekkor a tekercs két oldala 180° -nál kisebb távolságra helyezkedik el. Az 6. ábra egyheted pólusosztással rövidített tekercse által a hetedik felharmonikus térbeli indukció görbéből közrefogott pozitív és negatív félhullámok területei egyenlők. A tekercs hetedik harmonikus 1 tehát zérus, és így ez a harmonikus a tekercsben nem indukál feszültséget.

Ugyanakkor az alapharmonikus fluxusból is elvesz a vonalkázott területtel jellemzett hányad. A két tekercs indukált feszültségeinek vektorai 180° -nál kisebb szöget zárnak be. A tekercselés kihasználtsága ez a félhullámok csökkentésének ára - az ún. *lépésrövidítési* vagy *húrozási tekercselési* tényezővel a tekercs eredő feszültségének (b ábra) és a két összetevő tekercsoldal feszültségösszegének egyenél kisebb viszonyzámával, a

$$\xi_h = \frac{U}{2U_v} = \frac{2U_v \cos \gamma/2}{2U_v} = \cos(\gamma/2) \quad (4)$$

arányban csökken.



6. ábra. Lépésrövidítéses tekercs (a) és feszültség vektorábrája (b)

A ξ_e elosztási és ξ_h lépésrövidítési tekercselési tényezők szorzata a

$$\xi = \xi_e \xi_h \quad (4a)$$

eredő tekercselési tényező mutatja, hogy a vezetők kerületmenti eloszlásának és a tekercsek húrozásának következtében mennyivel csökken az indukált feszültség vektorainak eredője az egyes vezetőkben indukált feszültségek algebrai összegéhez képest.

Ha tehát egy átmérős menetben U_N feszültség indukálódik, s N' a tekercselés meneteinek száma, akkor a teljes fázisfeszültség:

$$U = \xi N' U_N$$

Az

$$N = \xi N'$$

szorzatot *effektív* vagy *hatásos menetszámnak* hívják, és a továbbiakban - külön megjelölés nélkül - megállapodásszerűen menetszámon mindig ezt fogjuk érteni.

Az egyes vezetőkben, ill. menetekben folyó áramok mágneses teret hoznak létre. Ha a mezőeloszlásoknak vagy gerjesztéseloszlásoknak csak a szinuszos alapharmonikusait vesszük figyelembe, akkor ezek a térbeli szinuszos eloszlások ugyan úgy vektorokkal ábrázolhatók és ugyanúgy vektorosan összegeezhetők, mint az időben szinuszosan változó feszültségek. Az elmondottak tehát a tekercsek által létesített gerjesztésekre, ill. lineáris esetben az indukcióeloszlásokra is közvetlenül alkalmazhatók, és a tekercselési tényezőkkel az eredő gerjesztések vagy mezők az összetevőkből ugyanígy számíthatók.

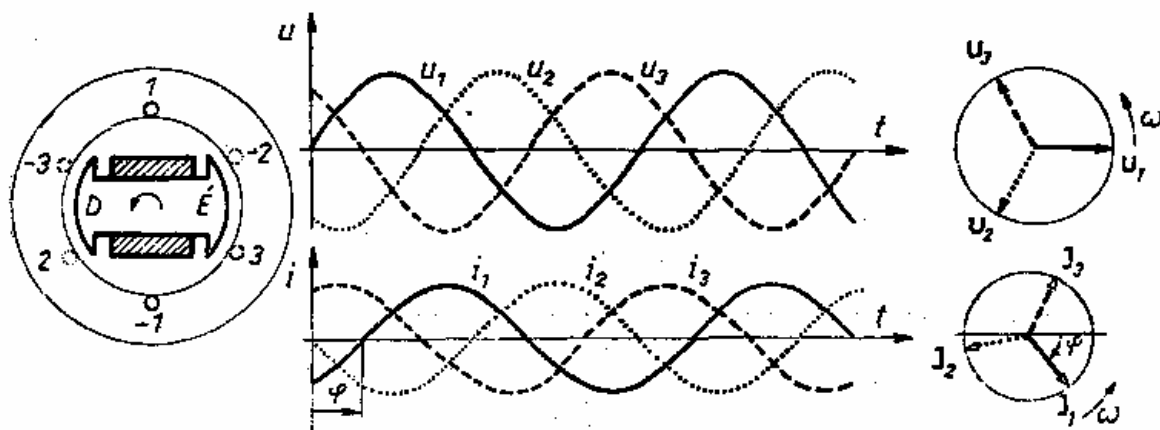
4. Villamos gépek mágneses mezői

Az egyenárammal gerjesztett póluskerék mágneses mezeje, mint azt az 2. pontban láttuk, a póluskerék vastestéhez van rögzítve. A mező eloszlása a forgórészhez viszonyítva változatlan. Az ilyen változatlan alakú és nagyságú, a vizsgált koordináta-rendszerhez képest változatlan helyzetű, tehát térben és időben változatlan mezőt *állandó mezőnek* nevezzük.

A forgórész forgatásával annak rögzített, állandó nagyságú szinuszos mezeje vele forog, és így mechanikailag forgatott mezőt kapunk. Egy ilyen változatlan nagyságú és változatlan - szinuszos - alakú, állandó szögsebességű mezőt körforgó mezőnek, röviden *forgómezőnek* hívunk. Csak a mező és a vizsgált tekercselés, a vizsgált koordináta-rendszer - jelen esetben az állórész - relatív sebességének van fontossága. Így a póluskerék és annak mezeje állhat is, ha ahhoz képest az állórész-tekercselés forog.

A következőkben megmutatjuk, hogy ilyen forgómezőt *villamosan* is létre lehet hozni többfázisú tekercselésben folyó többfázisú áramrendszerrel.

Ilyen többfázisú áramrendszert kaphatunk például a póluskerék mezeje által az állórész háromfázisú tekercselésében indukált feszültségekkel is. Vizsgáljuk tehát az *állórész-tekercselés áramainak mezejét*.



7. ábra. Háromfázisú tekercsrendszer feszültségei és árama

Az állandó szögsebességgel forgatott, térben szinuszos eloszlású póluskerék forgómező egyes indukcióértékei a 120° -os villamos térbeli szögeltolásnak megfelelően, 120° -os időbeli eltéréssel érik el az állórész egyes fázistekercseit (7. ábra). Ennek megfelelően az egyes fázisok egymáshoz 120° -kal időben eltolt egyenlő amplitúdójú indukált feszültségei - u_1, u_2, u_3 - szimmetrikus háromfázisú feszültségrendszert képeznek. Ennek idő- és vektorábráját látjuk az ábra felső részén. Ha a három állórész tekercs kapcsaira azonos Z impedanciákat kötünk, az egyenlő nagyságú fázisáramok a saját indukált feszültségeikhez képest a tekercs és a terhelés induktív feltételezett - eredő impedanciájával megszabott azonos szögekkel késnek. Ennek megfelelően i_1, i_2 és i_3 szimmetrikus háromfázisú áramrendszert képeznek (7. ábra alsó része).

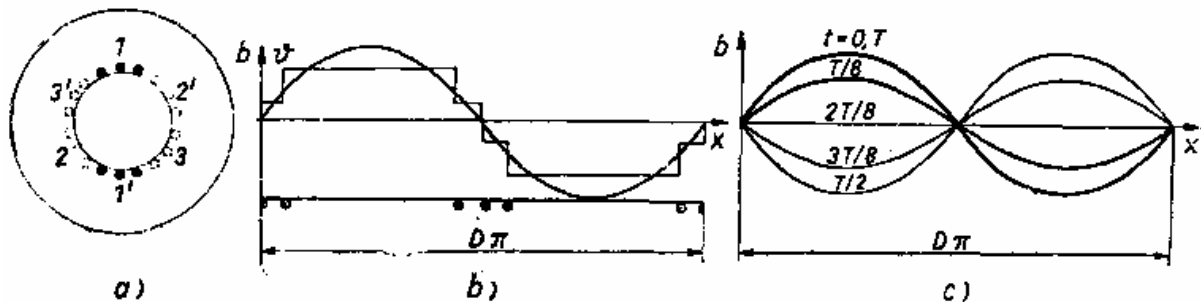
Az állórész szimmetrikus felépítésű háromfázisú tekercselésében tehát szimmetrikus háromfázisú áramrendszer folyik. A következőkben megmutatjuk, hogy minden szimmetrikus többfázisú tekercselésben folyó ugyanolyan fázisszámú *szimmetrikus áramrendszer* állandó

nagyságú, alakú és állandó szögsebességű, tehát körforgó mezőt hoz létre. A tekercsrendszer és az áramrendszer szimmetriája azt jelenti, hogy a tekercsek közötti térbeli villamos szögek és az áramok közötti időbeli szögek külön-külön és egymással is egyenlők, és az egyforma tekercsekben egyenlő nagyságú áramok folynak.

Az állórész áramok által létesített forgómező bemutatását célszerűen több lépésben közelítjük meg, és a közben nyert részeredményeink is fontosak lesznek.

Eközben és a villamos gépek belső fizikai viszonyainak vizsgálatakor, a tér és időbeli viszonyokat egymástól élesen elkülönítve kell vizsgálni, ugyanakkor ezek eredő hatásait együtt, egybefonódva kell látni. A mozgóképszerű jelenségekből e célból egymást követő, megfelelően kiragadott, „befagyasztott” időpontokat fogunk vizsgálni.

1. Egy fázistekercs árama egy kiragadott pillanatban a légrésben szinuszos térbeli indukcióeloszlást hoz létre. Egy fázishoz i_1 mint láttuk, rendszerint nem egy horony tartozik. Az előbbi forgórész-mezőgörbéhez hasonlóan rajzolt állórész lépcsőgörbét (8b ábra) jól közelíti a szinuszos alapharmonikus. Később majd látjuk, hogy a felharmonikusok hatásai rendszeresen elhanyagolhatók, és azokat csak bizonyos mellékjelenségek szempontjából kell figyelembe venni.



8. ábra. Lükttetőmező

2. Egy fázis térbeli *mezőeloszlása* tehát (a fentebbi közelítéssel) minden pillanatban a fázistekercs tengelyévet egybeeső maximum helyű szinuszgörbe, amelynek a kerület egyes pontjaihoz tartozó értékei az időben, a létrehozó áram időbeli változását követve, szinuszosan változnak (c ábra). Egy ilyen mezőt, amely nagyságát periodikusan változtatja, de eközben alakja és helye - a létrehozó tekercshez képest - változatlan marad, *váltakozó, lükttető, pulzáló* vagy *állómezőnek* nevezünk.

3. Egy fázis mezeje tehát váltakozó mező. Ennek ismeretében most szerkesszük meg néhány tetszőleges, de célszerűen választott időpontban a háromfázisú tekercselés eredő mezőgörbéjét.

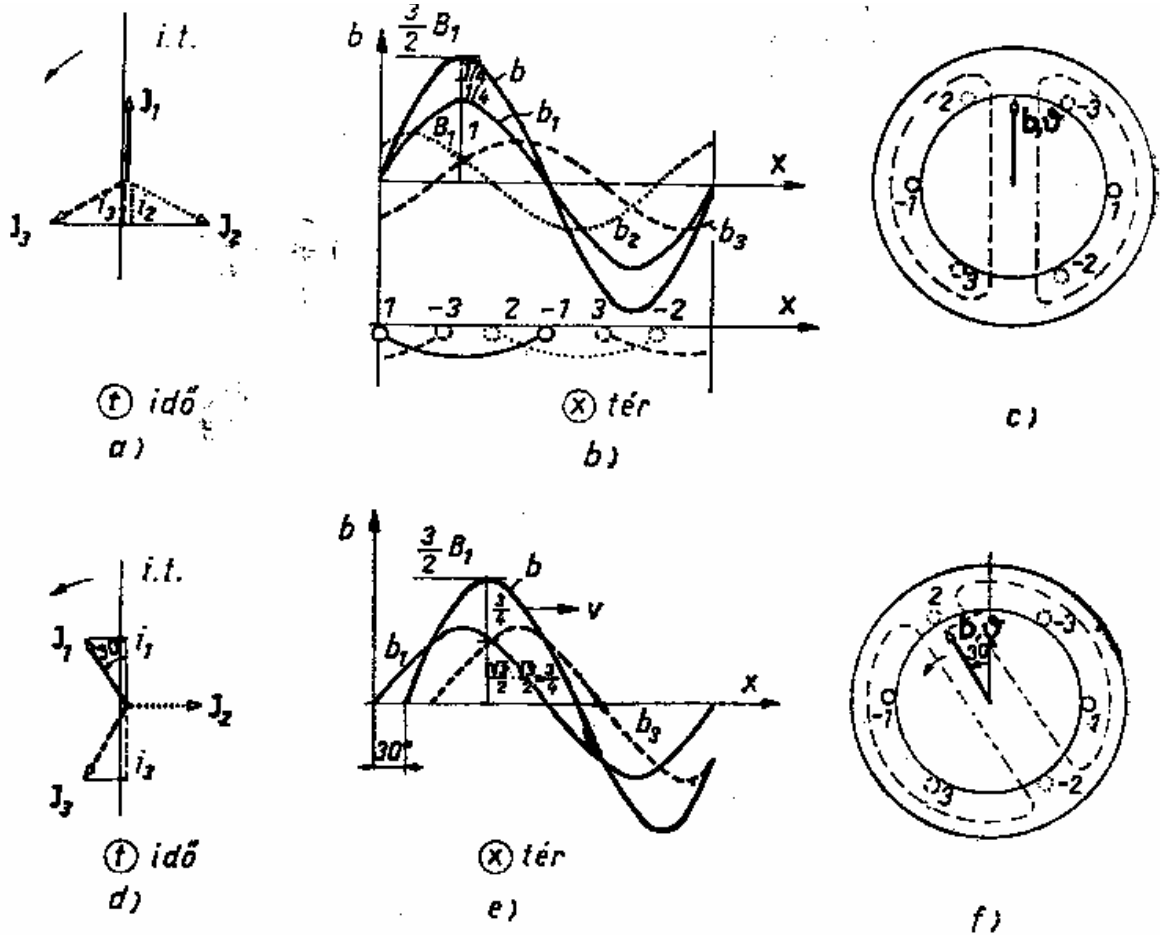
I. Legyen az első kiragadott időpontban az 1 fázistekercs árama éppen maximális; $i_1 = i_{max} = I_1$. Az ehhez tartozó idő vektorábrát az 9a ábrán látjuk. A következőkben álljon az i t időtengely, és forogjanak a vektorok.

A kiragadott pillanatban az 1 fázis áramának pozitív maximuma van. Az 1 fázis tekercs b_1 lükttető mezejének amplitúdója így éppen maximális és első félhullámát az ábrán felfelé rajzoltuk (b ábra).

A 2 fázistekercsben folyó áram pillanatértéke a vektorábrából láthatóan negatív és feleakkora, mint az 1 fázisé. A 2 fázistekercs önmagában - a másik két tekercs árammentességét feltételezve - tehát e pillanatban olyan a tekercssel egybeeső tengelyű szinuszos térbeli mezőeloszlást hozna létre, amelynek első félhulláma negatív és fél amplitúdójú. Első félhulláma tehát az első fázis első félhullámához

képest térben 120° -kal - forgásirányban - el van tolvá és ahhoz képest időben is 120° -kal késik. A második fázisnak ezt az első lefelé elhelyezkedő b_2 félhullámát felrajzoltuk, majd az ábrát jobbra és balra kiegészítettük.

A 3 fázis első b_3 indukció-félhulláma térben újabb 120° -kal van eltolva forgásirányban, és azt az időbeli 120° -os, ill. az első fázishoz képest 240° -os késésnek megfelelően, az időbeli vektorábrából láthatóan lefelé, negatív irányban kell felrajzolni fél amplitúddal. A görbe „első” félhullámát itt is kiegészítettük a teljes kerületre.



9. ábra. Forgómező létrehozása háromfázisú tekercseléssel

Az egyes fázisok mezőeloszlásának összegezésével megkapjuk az eredő hullámot a választott időpontban. Ez térben egybeesik az 1 fázis mezőgörbéjével (b ábra), így tengelye az 1 tekercs tengelyével (c ábra) és amplitúdója annak $m/2=3/2=1,5$, tehát másfélszerese. itt m a fázisok száma. Az 1,5-szörös amplitúdó az ábrából láthatóan úgy adódik, hogy a 120° os térbeli és 120° -os időbeli eltolódásból a hullám maximumának helyén a 2 és 3 fázismezők egyaránt $\sin 30^\circ \sin 30^\circ = 1/2 \times 1/2 = 1/4$ értékkel járulnak hozzá az eredő csúcsértékhez.

II. Szerkesszük meg most az eredő mezőgörbét pl. 30° -nak megfelelő idővel későbbben (d ábra)! E pillanatban a 2 fázistekercs árama és így mezeje is zérus. Az e ábrában a szerkesztés menete az előbbivel megegyezik.

Az eredő mezőgörbe amplitúdója változatlan. A 30° -os időbeli forgatásnak megfelelően mind az 1, mind a 3 fázis mezejének amplitúdója a $\cos 30^\circ = \sqrt{3}/2$ -szeres

értéküre változott - csökkent, ill. nőtt - és az eredő amplitúdójának helye a fázisok amplitúdóinak helyéhez képest ugyancsak 30° térbeli szöggel el van tolva forgásirányban előre, ill. hátra. Így egy fázis amplitúdójához viszonyítva az eredő maximumának szorzószáma most is $2\cos 30^\circ \cos 30^\circ = j\sqrt{3}/2\sqrt{3}/2 = 1,5$, mint előbb.

Az eredő amplitúdó *nagysága* tehát nem változott, de *helye* az időbeli 30° -os eltolásnak megfelelően a *térben* 30 villamos fokkal eltolódott, és pedig a későbbi időpontnak megfelelően most a 2 fázistekercs felé, (*e* és *f* ábra) előre, jobbfelé.

A szerkesztést más időpontokban megismételve azt találjuk, hogy eredőül változatlan nagyságú és alakú, a térben, a kerület mentén egyenletes sebességgel haladó *forgómezőt* nyerünk. Ez a görbe az indukcióvonalak eredő sűrűségének eloszlását jellemzi a légrésben, és az eredmény értelmében ez a változatlan sűrűség eloszlás egyenletes sebességgel halad körbe.

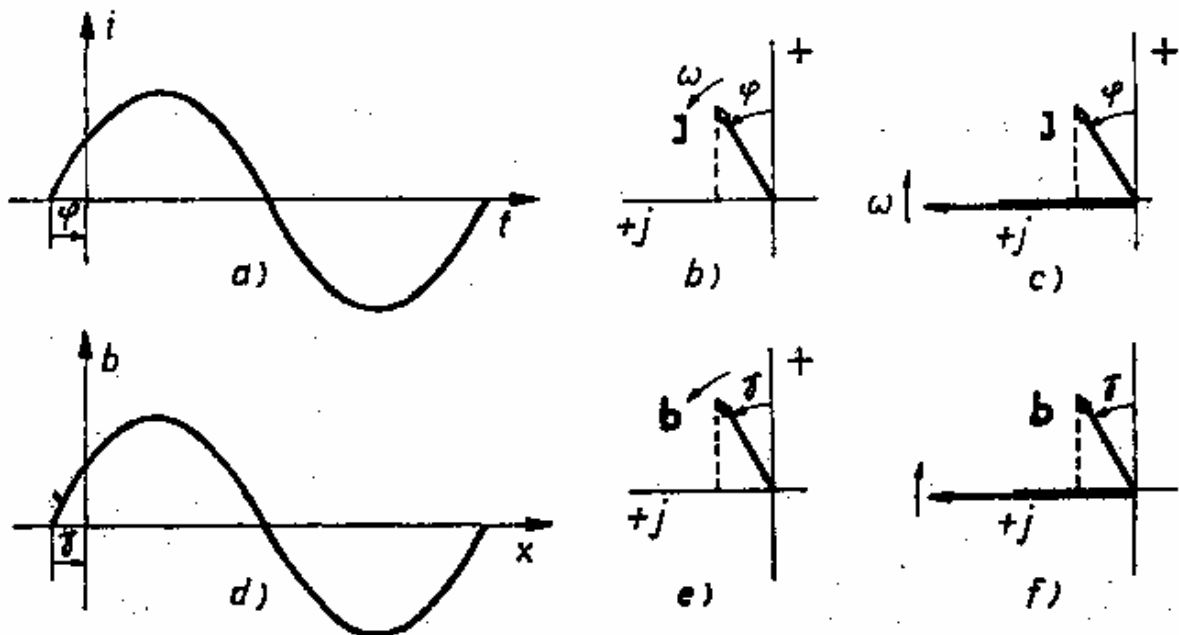
A szerkesztés megismétlésével igazolhatjuk, hogy az áramvektorok ellenkező sorrendjének, *fordított fázissorrendnek* az eredő mező *ellenkező irányú forgása* felel meg. Az állórész háromfázisú tekercselése tehát szintén forgómezőt hoz létre. Ilyen mezőt hoz létre minden szimmetrikus felépítésű többfázisú tekercselés, amelyben szimmetrikus többfázisú áramrendszer folyik. A forgómező attól függetlenül létre jön, hogy honnan származik a tekercselés áramrendszere, indukció révén vagy külső áramforrásokból.

5. Villamos gépek mezőinek leírása

Állandósult, időben szinuszos változású I amplitúdójú φ kezdő fázisszögű áram

$$i = I \sin(\omega t + \varphi)$$

időfüggvényét (10a ábra) ismert módon φ kezdő helyzettel felrajzolt, ω szögsebességgel forgatott síkvektornak az imaginárius tengelyre vetítésével kaphatjuk (b ábra). Kényelmesebb a vetületeket úgy nyerni, hogy a vektor áll, és a vetítési tengely, az ún. időtengely forog ellenkező irányban ω szögsebességgel (c ábra).



10. ábra. Időben és térben szinuszos változású mennyiségek függvénygörbéi és vektora

Teljesen egyenértékű a fenti időfüggvény

$$I = \text{Im}[Ie^{j\varphi} e^{j\omega t}]$$

alakú kifejezése.

Az imaginárius rész képzését megállapodás szerint el szokás hagyni, és a fenti pillanatértékeket kifejező szinuszos időfüggvény helyett az

$$\hat{I} = Ie^{j\varphi} e^{j\omega t}$$

ún. teljes időfüggvényt vagy komplexort írni. Egy feladatban valamennyi mennyiség azonos frekvenciájú, ezért az $e^{j\omega t}$ ún. időtényezőt, amely egyenleteink minden tagjában szerepel, ugyancsak el szokás hagyni, ami megfelel annak, hogy a vektorok állnak, és az időtengely forog.

Az álló vektorokat így a komplex számsíkon az

$$I = Ie^{j\varphi}$$

komplex számmal, az ún. redukált jelképpel vagy fázorral szokás szimbolikusan jellemezni, és a szorzó időtényezőt, valamint az Im képzést csak hozzágondolni.

Teljesen megegyező módon ábrázolható és írható le valamely *térben* szinuszosan változó indukciójú hullám, egy *állandó* hullám is. Zérus értékét y kezdő szöggel jelölve a térfüggvény (d ábra)

$$b = B \sin(x_1 + y)$$

amelyet a y kezdeti helyzetű, B amplitúdójú indukcióvektor x_1 szög szerinti elforgatásakor a szinuszfüggvény választásának megfelelően a képzetes tengelyre vetített vetületekkel nyerhetünk (e ábra). Itt is célszerű, ha a vektor áll, és a vetítési tengely, a tértengely „forog” ellenkező irányban (f ábra). Itt $x_1 = x/\tau\pi$ a kerület egyes pontjait megjelölő szög. Kétpólusú gépben ez a hely tényleges szöge. A vektort a hely sugarára kell vetíteni. τ a pólusosztás, a kerület egy pólushoz tartozó része.

A

$$b = \text{Im}[Be^{jy} e^{jx_1}]$$

kifejezésből itt is elhagyhatjuk az Im képzést és az e^{jx_1} tényezőt, és így a

$$B_a = Be^{jy} \quad (5)$$

redukált jelképpel, térfázorral dolgozhatunk.

A komplex koordináta-rendszert a gép keresztmetszetében középpontjával egybeeső kezdőponttal is elhelyezhetjük. Ekkor egy térben és időben állandó szinuszos indukciójú hullámot, állandó mezőt (II . ábra), egy rögzített helyzetű és állandó nagyságú vektor jellemez. A vektort a különböző tengelyekre - sugarakra vetítve a kerület kérdéses pontjának indukcióértékét kapjuk. Ez megfelel a tértengely forgatásának. Az ábrázolás nagyon szemléletes.

Váltakozó vagy állómezőt úgy kapunk, ha az állandó mező vektorának helye rögzített marad, ($12a$ ábra), de nagysága - és ezzel a térbeli szinuszos eloszlás minden egyes értéke a gerjesztőáram időbeli változásának megfelelően időben szinuszosan váltakozik (b ábra). A vektor kifejezése ekkor adott koordináta-rendszerben:

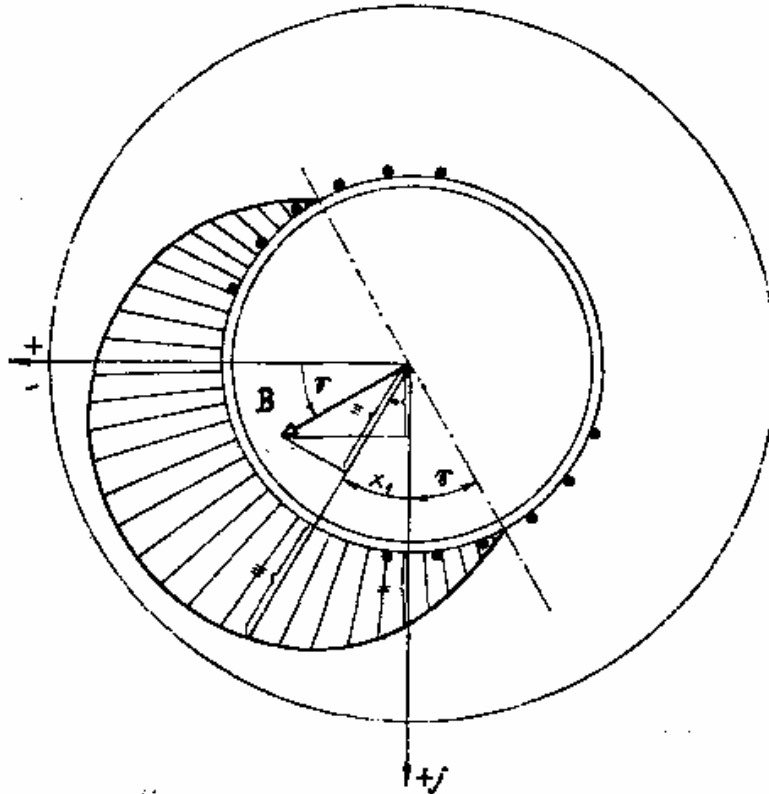
$$B_v = Be^{jy} \cos \omega t \quad (1-6)$$

és így származtatásának megfelelően az indukcióeloszlás matematikai kifejezésének alakja:

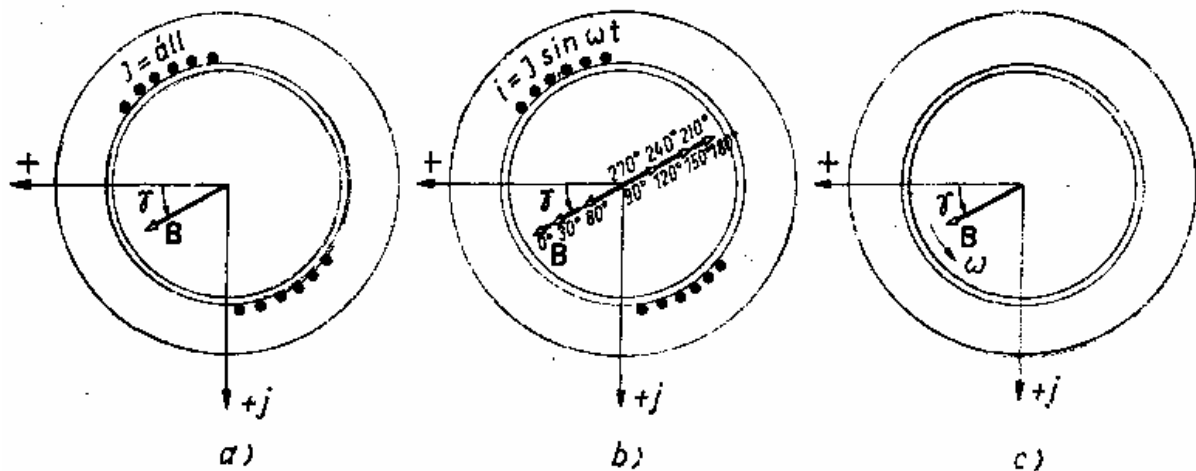
$$b(x,t) = B \sin(x_1 + y) \cos \omega t$$

Az állandó mezőből *forgómezőt* oly módon kapunk, ha azt egyenletes sebességgel forgó egységvektorral $e^{j\omega t}$ -vel megszorozzuk:

$$B_f = B e^{j\omega t} e^{j\omega t} \quad (7)$$



11. ábra. Állandó mező és vektora



12. ábra. Állandó (a), lüktető (b) és forgómező (c) vektoros ábrázolása

Ez a kifejezés olyan mezőt ír le, amely változatlan nagyságú, változatlan - szinuszos - alakú és a kerületen a vizsgált álló- vagy forgórész-vastesthez képest egyenletes sebességgel körbefut. A vektor vetületei a különböző irányokban egy rögzített t -áll. időpontban a mezőeloszlás kerületi alakját adják, $x_1 = \text{áll. rögzített helyen}$ pedig az időbeli változást.

Ellenkező irányban körbeforgó forgómezőt ír le az (1—7) kifejezés, ha ω előjele ellentétes.

Ha a gerjesztő többfázisú áramrendszer áramának φ fázisszögét is figyelembe kívánjuk venni, akkor a forgómező teljes jelképe, „térkomplexora”

$$\hat{B}_f = B e^{j\varphi} e^{jy} e^{jx_1} e^{j\omega t} \quad (7a)$$

és a forgómezőt leíró függvényt ennek imaginárius része adja.

A következőkben nézzük meg, hogy a forgómező - az egyszerűség kedvéért kezdő fázisszögek nélküli - kifejezése

$$B_f = B e^{j(x_1 + \omega t)} \quad (7b)$$

valóban forgómezőt ír-e le, és ismerkedjünk meg annak tulajdonságaival. A forgómező fenti vektorából annak tér-idő-függvénye:

$$b_f(x, t) = B \sin(x_1 + \omega t)$$

E kifejezés a légrésben változatlan eloszlású és állandó sebességű, állandó nagyságú mezőt, körforgó mezőt ír le. A t -áll. kiragadott időpontokban rögzített szinuszos térbeli eloszlást kapunk, valamely x -áll. kiragadott helyen pedig az elhaladó indukcióértékek az időben szinuszos periodikus változást eredményeznek.

Tetszőleges kiragadott indukcióértéket figyelemmel kísérve, azt különböző egymást követő időpontokban változatlan nagyságban a kerület különböző helyein találjuk. A hullám tehát valóban halad, és alakja változatlan. A vizsgált indukció érték megfigyelésével annak, és így a hullámnak a sebességét is megállapíthatjuk.

Vizsgáljuk például a maximális érték (az amplitúdó) vándorlását. Ehhez a szinuszfüggvény 1 értéke és ahhoz az

$$x_1 + \omega t = \frac{\pi}{2} + 2\pi k \quad k=0,1,2,\dots$$

argumentum tartozik. A csúcserőértéket tehát - zérus kezdő fázisszöget és a negatív előjelet választva - a $t=0$ pillanatban - $k=0$ -val - a kerület $\pi/2$, a $t=T/4$ idő pontban a π helyen találjuk. Az amplitúdó tehát negyed periódusidő alatt $\pi/2$ szöggel vándorolt el pozitív irányban, a sietőtől a késő áramot vivő tekercs irányában.

A fenti kifejezést az idő szerint differenciálva

$$\frac{dx_1}{dt} + \omega = 0$$

ahonnan

$$\frac{dx_1}{dt} = -\omega$$

A hullám térbeli szögsebessége egyenlő az áram időbeli szögsebességével. Ha a gép többpólusú, akkor a térbeli szögsebesség a póluspárok p számának megfelelően csökken: $\omega_f = \omega/p$. Térbeli ábráinkban az egyes fázistekercseket sorra a felvett pozitív irányban, az időbeli vektorábrában az egyes vektorokat azzal ellentétes irányban rajzoltuk fel.

A térbeli szögsebességhez és az áramok időbeli szögsebességéhez tartozó szögek így ellenkező előjelűek. Ezzel a választással pozitív sorrendű áramrendszerrel pozitív irányban forgó mezőt nyerünk.

Az x_l szög helyébe az x távolságot behozva

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\tau}{\pi} \omega = 2\tau f$$

Ez a kerületi sebesség megegyezik a póluskerék sebességével. A $2p$ pólusszámú, τ pólusosztású, n fordulatszámú pólusmező kerületi sebessége ugyanis:

$$v = 2p \pi n$$

ide (1-2)-ből $n=f/p$ -t helyettesítve:

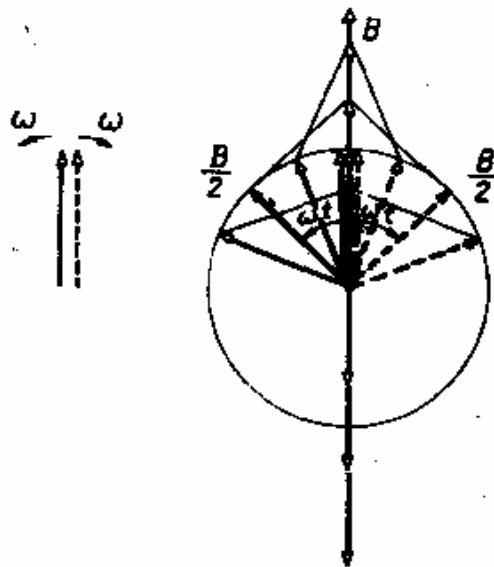
$$v = 2\tau f$$

A póluskerék és a háromfázisú tekercselés forgómezői tehát egyező sebességgel, együtt forognak.

Két egyenlő nagyságú, ellenkező irányban azonos szögsebességgel forgó vektor eredője

$$Be^{j\omega t} + Be^{-j\omega t} = 2B \cos(\omega t) \quad (8)$$

lűktetőmező. Az eredővektor minden időpontban változatlan helyzetű szinuszos térbeli eloszlást jellemez, amelynek amplitúdói azonban nagyságukat az időben koszinuszfüggvény szerint változtatják (vö. 8c ábrával). Ezt az eredményt az 13. ábrán is szemléltetjük. Fordítva: **bármely lűktetőmező két feleakkora nagyságú azonos szögsebességgel ellentétes irányban forgó körforgómezőre bontható** (Ferraris tétele).

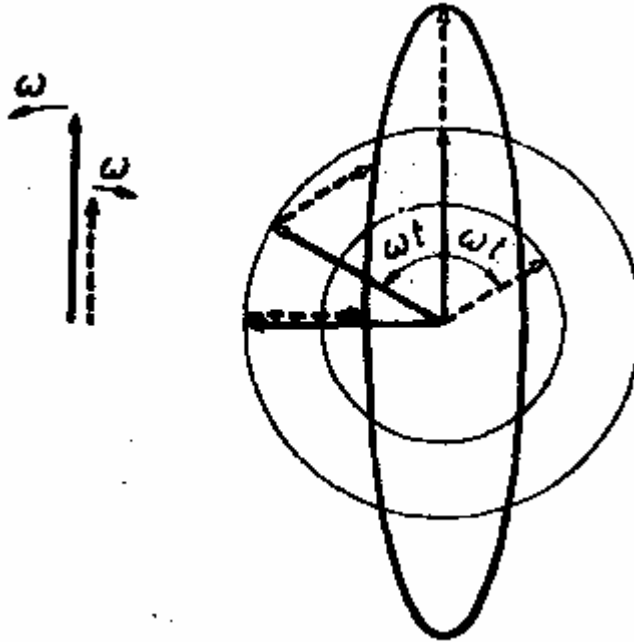


13. ábra. Lűktetőmező két egyenlő nagy, ellenkező irányban egyező sebességgel forgó körforgómezőből tehető össze

Ha a két azonos szögsebességgel ellenkező irányban forgó vektor eltérő nagyságú, akkor a

$$B_1 e^{j\omega t} + B_2 e^{-j\omega t} = B_1 \cos(\omega t + j \sin \omega t) + B_2 \cos(\omega t - j \sin \omega t) = (B_1 + B_2) \cos \omega t + j(B_1 - B_2) \sin \omega t \quad (8a)$$

összefüggés szerint az eredővektor végpontja olyan ellipszis mentén mozog, amelynek nagytengelye a B_1 és B_2 kiindulási vektorok szögfelezőjének irányába mutat, és nagysága B_1+B_2 , kistengelye pedig erre merőleges és B_1-B_2 hosszúságú. Az ilyen mezőt *elliptikus mezőnek* nevezzük. Ha a $t=0$ időpontot az 1.13. ábrához hasonlóan úgy választjuk; hogy ekkor a B_1 és B_2 vektorok éppen egybeessenek - kezdő fázisszögeik tehát zérus értékűek -, akkor az ellipszis az 14. ábrán látható módon alakul:



14. ábra. Két eltérő nagyságú forgómező eredője elliptikus mező

Igazolható, hogy ekkor érvényes a Kepler-törvény: a vektor egyenlő idő alatt azonos területeket söpör végig.

Az elliptikus mező (8a) kifejezését a

$$(B_1 - B_2) \cos \omega t + 2B_2 \cos \omega t + j(B_1 - B_2) \sin \omega t$$

alakban is írhatjuk, és ekkor az első és harmadik tag összevonásával nyert

$$(B_1 - B_2)e^{j\omega t} + 2B_2 \cos \omega t \quad (8b)$$

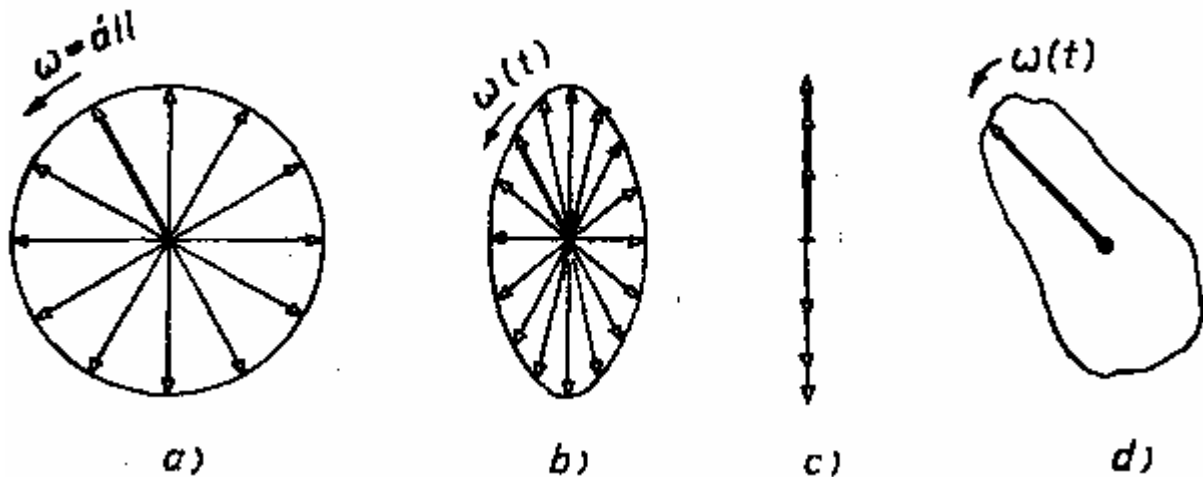
összefüggés azt mondja, hogy elliptikus mezőre jutunk egy forgó- és egy lüktetőmező összegezésével is.

Szimmetrikus felépítésű tekercselés szimmetrikus többfázisú áramrendszere mint láttuk, körforgó mezőt hoz létre. A körforgó mező teljesen szimmetrikus üzemiállapotot jellemez. Az áramrendszer vagy a tekercselés aszimmetriája az eredő mezőt elliptikussá teszi.

A körforgó mező mellett ekkor megjelenik egy lüktető mezőösszetevő is. A tiszta lüktetőmező az aszimmetria szélső esete. Ekkor a legnagyobb az ellenkező irányban forgó, kellemetlen mellékhatásokat okozó mező. Ha ugyanis a forgórész egyik részforgómezővel együtt, azzal szinkron forog - a mezőt ilyenkor veleforgó mezőnek nevezzük - akkor a másik, az ún. ellenforgó vagy inverz mező relatív sebessége a forgórészhez képest a szinkron szögsebesség kétszerese. Ennek megfelelően a forgórészben 100 Hz frekvenciájú feszültségek

indukálódnak mind a tekercselésben, mind a vastestben, veszteségeket, a nyomaték csökkenését, lüktető nyomaték összetevőt és más kellemetlen mellékjelenségeket okozva. Az elmondottakból az is következik, hogy a lüktető összetevő megjelenése a forgómezőben a részleges aszimmetria jele.

Az elliptikus mező tehát a körforgó mező és a lüktetőmező közötti, közbenső részleges aszimmetriát jellemez. A fokozatos átmenetet a körforgó és a lüktető mező között az 15. ábra érzékelteti. A *d* ábra teljesen általános forgómezőt ábrázol.



15. ábra. A körforgó mező (a) és a lüktető- vagy váltakozómező (c) az elliptikus mező (b) teljesen szimmetrikus, ill. teljesen aszimmetrikus szélső alakjai. Általános forgómező (d)

Azt, hogy az áramrendszer vagy a tekercselés aszimmetriája elliptikus mezőre vezet, egyszerűen érzékeltethetjük a forgómező bevezetésének másik szokásos módjával. Az egyszerűbb áttekintés érdekében kétfázisú tekercselést választunk, de az olvasó ennek alapján a háromfázisú esetre is megismételheti az alábbiakat.

Az egyes fázistekercsek lüktetőmezőit a Ferraris-tétel szerint fele-fele nagyságú, ellenkező irányú, azonos szögsebességű forgómezőkre bontjuk és az így nyert vektorokat - a kétfázisú tekercselés esetében négyet - összegezzük.

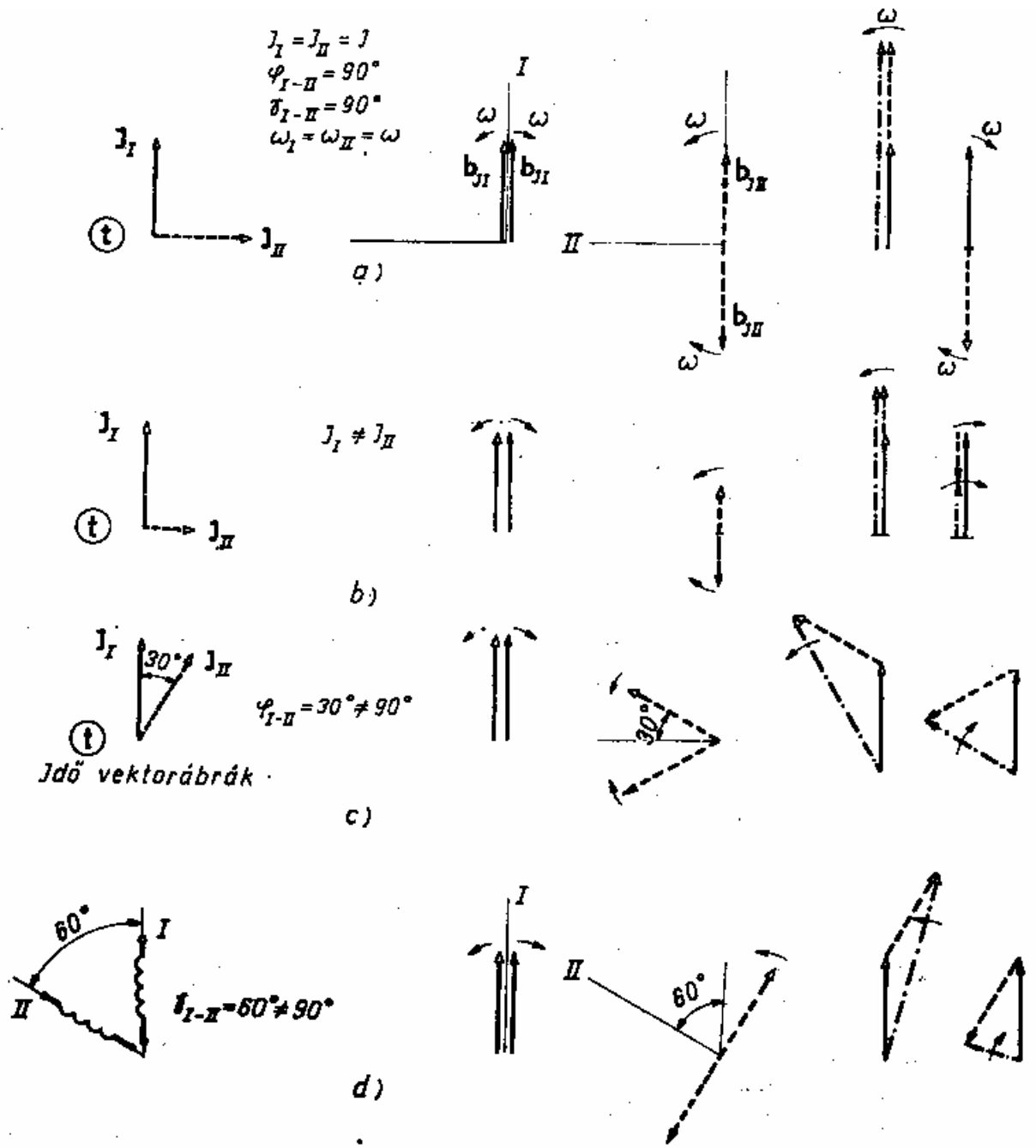
Az 16. ábrán a pozitív irányban forgó vektorokat üres, az ellene forgókat tömör nyílhegygel láttuk el, az I. s II. fázisokat pedig kihúzott, ill. szaggatott vonallal különböztettük meg. Az eredővektorokat pontvonallal rajzoltuk.

Az *a* ábrából azonnal leolvasható, hogy ha a tekercselés és az áramok is szimmetrikusak, akkor az ellene forgó mezők eredője zérus, a vele forgó részmezők pedig állandó sebességű, tehát körforgó mezővé összegződnek.

A választott pillanatban ugyanis az I. fázisban éppen pozitív árammaximum van, és így a két összetevő forgómezőt egybeesően kell felrajzolni. Ugyanakkor a II. fázis forgómezőinek vektorai a 90° -os időbeli késésnek megfelelően saját tekercsükhöz képest 90° -kal korábbi helyzetben, 90° -kal visszaforgatva helyezkednek el.

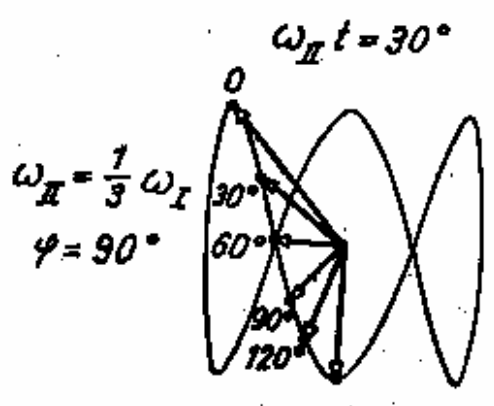
A *b* ábrán az áramok nagyságának eltérését, a *c*-ben a 90° -tól eltérő fáziseltolás, a *d*-n a két tekercs közötti 90° -tól eltérő térbeli szög hatását mutattuk be. Mindegyik aszimmetrikus esetben találunk zérustól eltérő nagyságú ellene forgó eredőmezőt, így valamennyi példa elliptikus mezőre vezet.

Az 17. ábrában a két tekercs áramának frekvenciája nem egyenlő. A választott esetben $\omega_{II} = \omega_I/3$ és a szögeltérés ω_{II} -re vonatkoztatva 90° . A mezővektor végpontja az ismert Lissajous-görbe mentén halad.



16. ábra. Kétfázisú tekercselés mezői

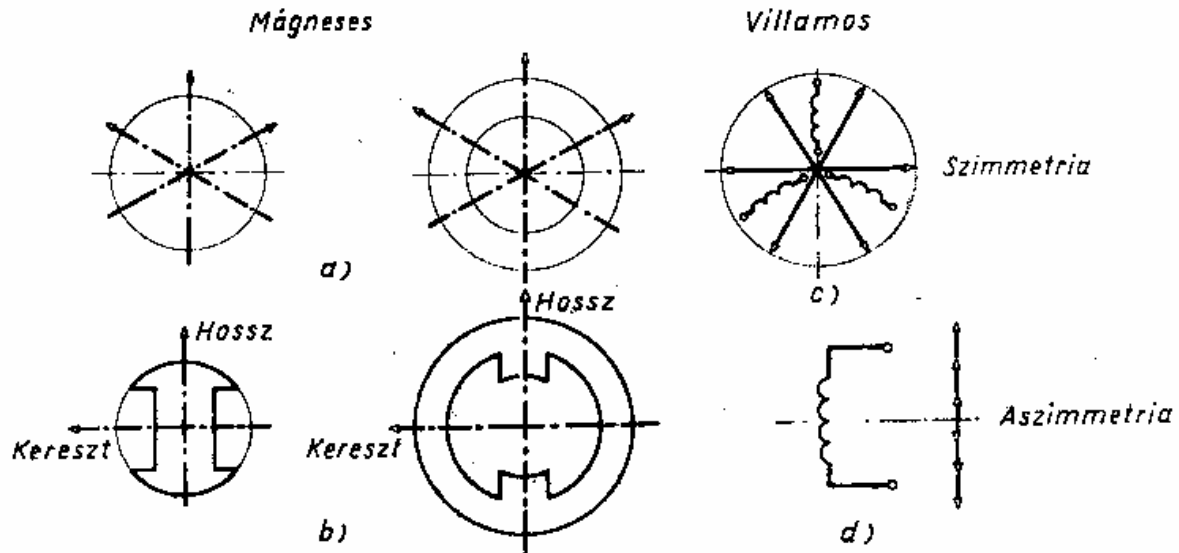
a) a kétfázisú áramrendszer teljesen szimmetrikus, b) az áramok nagysága, c) kölcsönös fázisszögük és d) a két tekercs térbeli szöge eltér a szimmetrikustól



17. ábra. A kétfázisú rendszer áramainak frekvenciája eltérő

A mezők vizsgálatából kitűnik, hogy az egyetlen tekercsből álló egyfázisú tekercselés a mágnesesen aszimmetrikus kiálló pólusú állórészhez, ill. forgórészhez hasonlóan a villamosan aszimmetrikus többfázisú tekercselés szélső esete.

Mágnesesen aszimmetrikusnak tekintjük a hengeres forgó- vagy állórészt, amelynek minden tengelye szimmetriatengely (18a ábra). A kiálló pólusú forgó-, vagy állórésznek csak két szimmetriatengelye van (ezeket hossz- és keresztiránynak nevezzük); az ilyen felépítést mágnesesen aszimmetrikusnak tekintjük (b ábra).



18. ábra. A mágneses és villamos szimmetria, ill. aszimmetria értelmezése villamos gépekben

Két teljesen egyforma, térben merőleges vagy három azonos, 120—120 fokkal eltolt tekercs szimmetrikus két, ill. háromfázisú tekercselést alkot. Ilyen tekercselést szimmetrikus két vagy háromfázisú áramrendszerrel táplálva - mint azt a háromfázisú esetre bemutattuk - szimmetrikus körforgó mezőt, tehát állandó nagyságú szinuszos eloszlású, egyenletes sebességgel körforgó mezőt nyerünk. E mezőnek vagy vektorral jellemzett ábrázolásának (18c ábra) minden tengelye szimmetria tengely. Ha valamelyik tekercs pl. kisebb menetszámú, az elrendezés már aszimmetrikus. A tekercselés ekkor nem szimmetrikus, elliptikus mezőt hoz létre, szimmetrikus áramrendszerrel is. A két egyforma, egymáshoz térben 90°-kal eltolt tekercsből álló kétfázisú tekercselés egyik fázisának - vagy a háromfázisú tekercselés két fázistekercsének - menetszámát fokozatosan csökkentve zérus menetszámmal előáll az egyfázisú tekercselés szélső aszimmetriája. Az elliptikus mező ekkor lüktető mezővé torzul (18d ábra).

A mindkét oldalon egyfázisú, tehát villamosan mindkét oldalon aszimmetrikus gépek elméleti vizsgálatának nehézségeire később még röviden rámutatunk. A mind két oldalon mágnesesen aszimmetrikus gépek vizsgálata hasonló nehézségekkel jár.

E nehézségek következtében egységes elméletünket csak olyan gépekre alkalmazzuk, amelyek legalább az egyik oldalon mágnesesen szimmetrikusak, azaz hengeresek, és villamosan is szimmetrikusak, azaz szimmetrikus felépítésű többfázisú tekercseléssel rendelkeznek. A gyakorlatban alkalmazott legtöbb villamos gép ilyen, vagy ilyen felépítésű modellel közelíthető.