

3. Fejezet

Egyenáramú gépek

TARTALOMJEGYZÉK

3. EGYENÁRAMÚ GÉPEK	1
3.1. Az egyenáramú gép mint rendszer	3
3.2. Az egyenáramú gép felépítése	6
3.2.1. A kommutátoros armatura tekercselések	6
3.2.2. A pólusrendszer	13
3.2.3. Az indukált feszültség és a nyomaték	14
3.3. Az egyenáramú gép belső viselkedése	16
3.3.1. Az armatura visszahatás	16
3.4. Az egyenáramú gép külső viselkedése	20
3.4.1. Gerjesztési módok	20
3.4.2. Az egyenáramú generátorok jelleggörbéi	21
3.4.2.1. Külső gerjesztésű generátor	21
3.4.2.2. A párhuzamos gerjesztésű generátor	23
3.4.2.3. A vegyes gerjesztésű generátor	26
3.4.3. Egyenáramú motorok jelleggörbéi	26
3.4.3.1. A külső és a párhuzamos gerjesztésű motor	27
3.4.3.2. A soros-gerjesztésű-motor	28
3.4.3.3. A vegyes gerjesztésű motor	28
3.4.4. Egyenáramú motorok üzeme	29
3.4.4.1. Indítás	29
3.4.4.2. Fordulatszám változtatás	30
3.4.4.3. Féküzem	32
3.4.5. Teljesítménymérleg	33

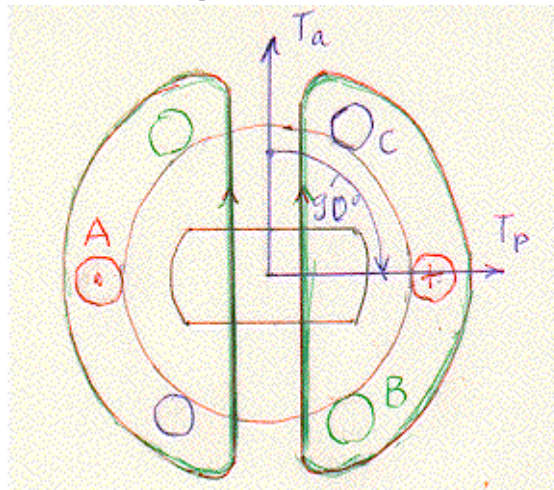
Az egyenáramú gép valójában nem gép, hanem szinkron gépből, mechanikai áramirányítóból és vezérlésből álló rendszer. Ebből következően belülről a legbonyolultabb fizikájú, kívülről a legegyszerűbb viselkedésű gép.

Bennünket a külső viselkedés érdekel, de ennek kellő megértéséhez a belső fizika fő vonásait is át kell tekintenünk. Célunkat két lépésben érjük el. Először a rendszer alapgondolatát vizsgáljuk a szinkron gépből kiindulva, majd a felépítést követjük lépésről-lépésre fő vonásaiban.

|| **Kitérő:**

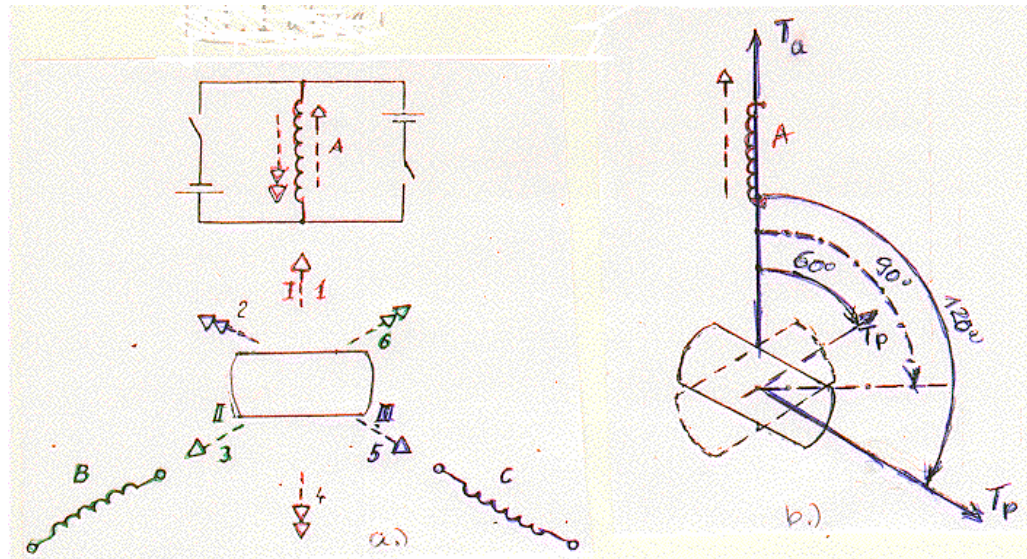
3.1. Az egyenáramú gép mint rendszer

Az ún. önvezérelt szinkron gépben a maximális nyomatékot - és más előnyöket - szolgáltató 90°-os szöget az armatura - és a pólustengely között úgy érjük el, hogy mérjük a forgórész helyzetét és az állórész v.á. áramait úgy szabályozzuk, hogy forgó mezejük tengelye mindig 90°-kal - motor üzemben - siessen a pólustengely előtt. A 3.1. ábrán éppen az A fázisban van árammaximum. A forgórész állandó mágneses. T_a az armatura mező T_p a pólusmező tengelye.



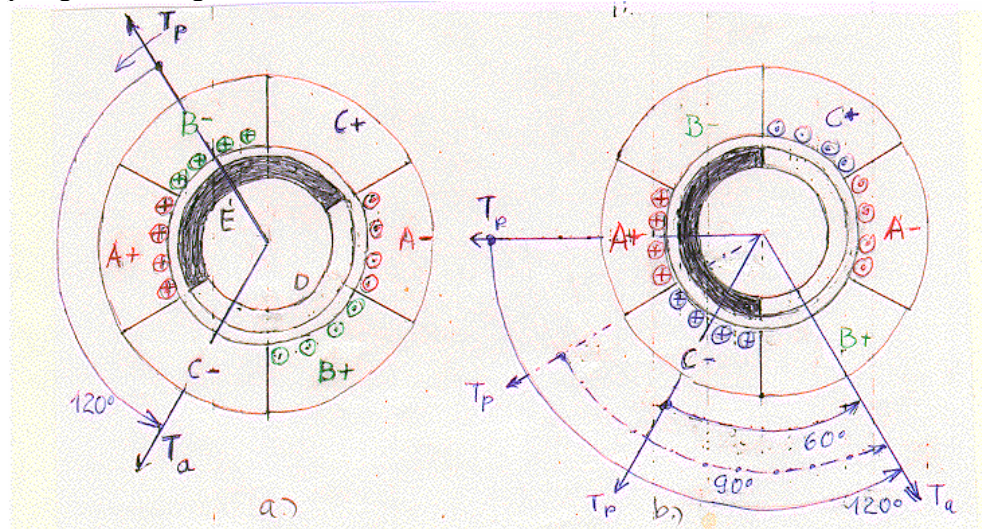
3.1 ábra

Ha az armatura fázistekercseket a 3.2. ábra szerint a háromfázisú v.á. áramrendszer helyett - az északi és déli pólusoknak és 60°-os "ugrásoknak" megfelelő - kétirányú egyenárammal tápláljuk, akkor a működtető fázist - az ábrán az A-t - a forgórész 120°-al elmaradt helyzetében be - és 60°-osnál kikapcsolva (b. ábra) középpértékként a 90°-ot nyerjük (a. ábra). Az ábrában csak az A fázis táplálását jeleztük.



3.2 ábra

A 3.3. ábra gyakorlati megoldása majd az egyenáramú gépek mai modern félvezetős áramirányítás un. kefenélküli változatánál lesz érdekes és azzal a kapcsolattól eredő lúktető nyomatékösszetevő iktatható ki a hasznos nyomaték pedig állandósága mellett növelhető.



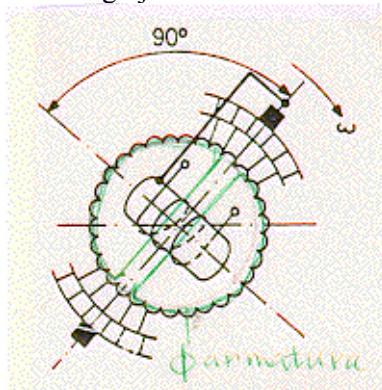
3.3 ábra

Az állórészen egyszerre mindig két fázist táplálunk. Az a./ ábrán azt a pillanatot látjuk amikor az A és -B fázisok (-B ellenkező áramirányt jelöl) táplálása elkezdődött. A két fázis 120°-os kerületi sávot fog át. A 180°-os pólusívű mágnesnek mindig 120°-os része áll szemben az állórész áramokkal egészen a b. ábrán következő újabb kapcsolásig.

E kis gyakorlati előkészítő oldalút után térjünk vissza a klasszikus kommutátoros egyenáramú gép alapgondolatának kialakításához.

Az állandó nyomatékot - egyúttal a teljes kerület kihasználásával nagy nyomatékot - itt a nagy fázisszámmal érjük el. A nagy fázisszámnak más kényszerítő okát is meg fogjuk ismerni. A 3.2. ábra három fázisával szemben készítsünk nagy

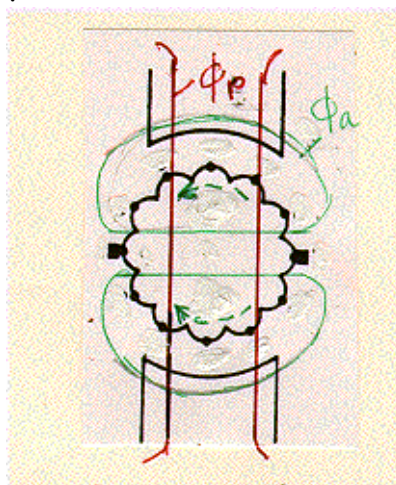
fázisszámú armatura tekercselést - pl. a 3.8a. ábra szerint lemezelt vasgyűrűre tekercselt toroid alakjában, ahol a menetek sorbakötött fázisokat jelentenek - és azt tápláljuk külső mechanikai áramirányító, kommutátor segítségével, egyenárammal. A kommutátor egymástól szigetelt réz szeletekből áll (3.4. ábra) és minden fázis végét - két tekercs összekötését - egy szelethez kötjük. Minden tekercs más helyzetű így mindegyik tekercs egy fázis. A kommutátort olyan külső forgó kefépárral tápláljuk egyenárammal, amelyet, az ábrán láthatóan, a forgórész tengelyére merőlegesen rögzítünk. Az ábrán a kommutátornak csak egy részét rajzoltuk fel. A kefépár jelöli ki az állórész, az armatura mezejének tengelyét. Forgatása révén a mező is forog és magával viszi a 90° -os helyzetben rögzített póluskereket. Ezen az ábrán és a továbbiakban egyenárammal gerjesztett pólusokat rajzoltunk. A pólusrendszer lehet gerjesztett és állandó mágneses is.



3.4 ábra

A külső kommutátoros, forgókefés gép bonyolult felépítésű, nagyméretű berendezés lenne.

Ezért gépünket "kifordítjuk", az állórészen helyezük el a pólusokat, a forgórészen a sokfázisú armaturát a kommutátorral és a nyugvó kefékkel. (A nagy fázisszám a hozzá tartozó nagy kommutátor szelettszámmal a kis 20~30V-os szeletfeszültség miatt is szükséges.) A 3.5. ábrában a jobb áttekinthetőség érdekében magát a kommutátort (l. 3.3. ábrát) nem rajzoltuk fel, a nyugvó kefék közvetlenül az aktív vezetőkkel "érintkeznek".



3.5 ábra

Ily módon a két merőleges eddig forgó mező áll, nyugalomban van. A forgó armatúrához - a kommutátorhoz - most nyugvó keferendszer illeszkedik.

Az armatura mező mindig be szeretne forogni az állórész pólusrendszerének a tengelyébe, de ezt a kommutátor nem engedi; a mezőt mindig annyival "forgatja vissza" amennyire a vezetők előre forogtak. Az ilyen nyugvó mezőt létesítő forgó tekercset szokás "álstacionárius" - pszeudostacionárius - tekercsnek nevezni.

Előnyeit mindjárt látjuk, titkait, a gép felépítését lépésről-lépésre követve igyekszünk majd kifürkészni.

Az egyenáramú gép tehát valóban nem gép hanem rendszer: kifordított szinkron gép + mechanikai áramirányító + vezérlés (a kefék helyzetével). A sokfázisú armatura tekercselésben - a sorbakötött fázistekercsekben - váltakozó áram folyik, hiszen a 3.5. ábra felső ágában a körbejáráshoz képest az egyik, az alsóban a másik irányban folyik az áram (így a körbeforgó fázistekercsekben is), amelynek frekvenciáját mindig az adott fordulatszám szabja meg. A kommutátor tehát frekvencia átalakító (frekvenciaváltó): generátor üzemben a változó armatura frekvenciából mindig $f=0$ frekvenciát alakít, míg motor üzemben mint váltóirányító az egyenáram nulla frekvenciáját mindig az adott fordulatszámnak megfelelő frekvenciává változtatja. A gépnek így minden fordulatszáma "szinkron fordulatszám" (annak minden fordulatszám megfelelő, "jó"): az egyenáramú motor fordulatszámát így széles határok között folytonosan és egyszerűen lehet változtatni, szabályozni.

A két mező merőleges helyzete következtében a gép mindig maximális nyomatékkal működik. Stabilitási probléma a mező tengelyek rögzítése következtében sem itt - sem a félvezetős kefenélküli változatban - nincs.

A merőleges mezőtengelyek miatt a pólusmező és az armatúramező - a v.á. gépekkel szemben - szétcsatoltak, azok áramait egymástól függetlenül - egymás befolyásolása nélkül (a merőleges helyzet következtében nem indukálnak egymásba) - így nagyon egyszerűen lehet szabályozni. Ez a váltakozó áramú gépek legújabb, legkiválóbb "mezőorientált szabályozásának" is a gondolati alapja.

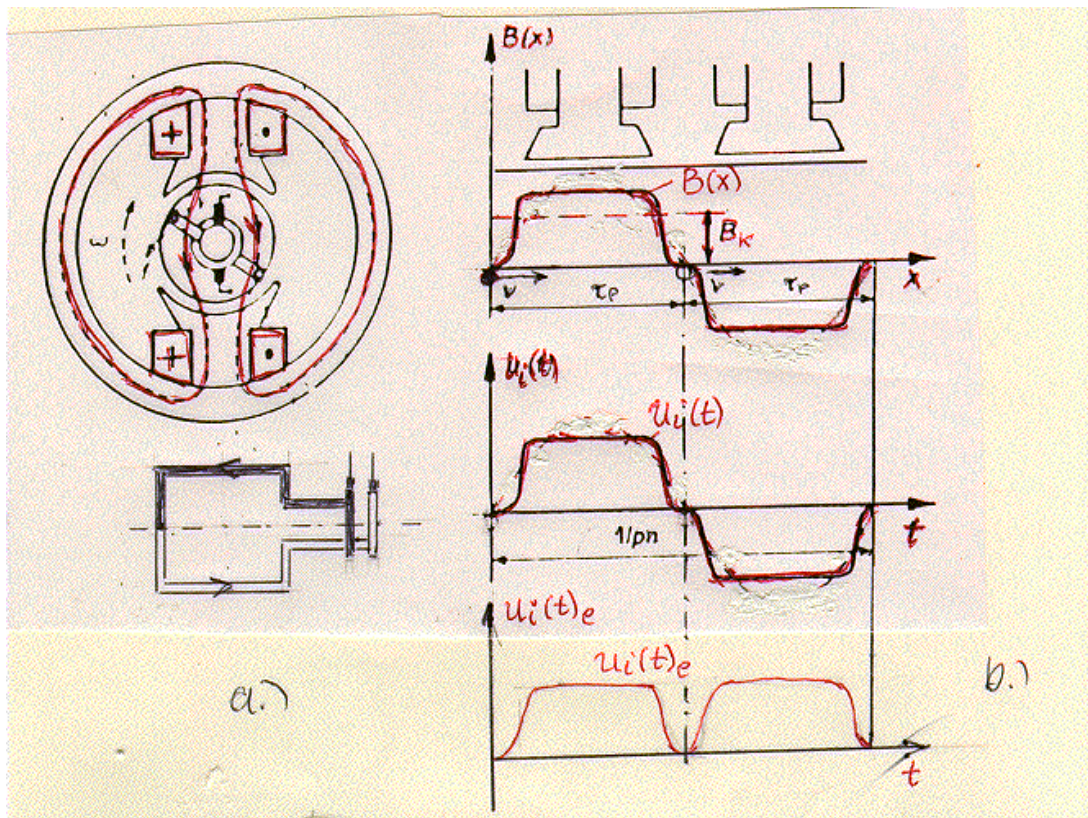
Az egyenáramú gép öslelkét bemutató eme kitérő után kövessük az egyenáramú gép használatos alakjának működését és felépítését együtt, lépésről-lépésre haladva.

3.2. Az egyenáramú gép felépítése

3.2.1. A kommutátoros armatura tekercselések

Alakítsuk ki először az eá. armaturatekercseléseket fokozatosan, lépésről-lépésre az elemekből kiindulva.

1./ Elemi egytekercses modell. Első kiindulási egyszerű, elemi modellünk legyen kétpólusú gép egyetlen egymenetű forgó armatura tekercseléssel (3.6.a. ábra). Az armaturatekercs végeit vezessük ki először csúszógyűrűkön.



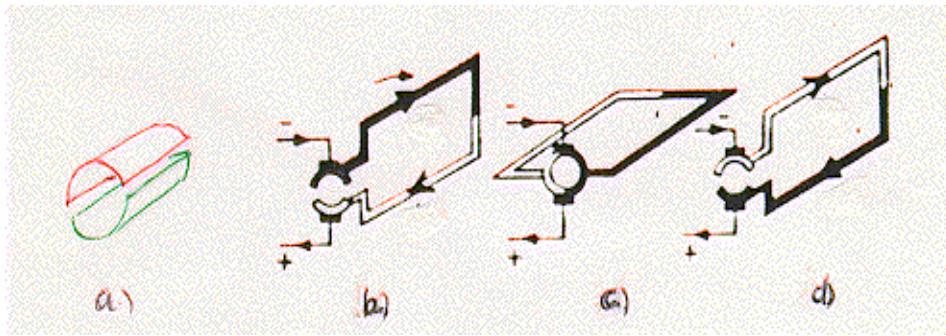
3.6 ábra

A b. kiterített vázlatban felrajzoltuk a pólusmező $B(x)$ légrésindukció eloszlását, amelyet a pólusok gerjesztő tekercseinek áramai hoznak létre a légrésben. A mozgási indukció

$$u_i(t) = B(2x) | v = B(2x) c \quad (3-1)$$

kifejezése szerint az armatura vezetőben indukált feszültség $u_i(t)$ időbeli változása - mint már többször láttuk - lemásolja az indukció $B(x)$ térbeli eloszlását. Tehát váltakozó feszültséget nyerünk. (Gépeink ugyanis észak-déli váltakozó pólusúak, "heteropólusúak".) Az ábrából is láthatóan - ez sem újdonság - a két tekercsoldal feszültsége a pólusosztásnyi távolság -180° -miatt összeadódik.

Egyirányú - egyen - feszültségre van szükségünk. Ezt a 3.7.a. ábra szerinti kétszeletes - kétoldalt felvágott rézcsődarabból alkotott - elemi kommutátorral érhetjük el. A kefékről már láthatóan egyirányú feszültséget (l. a 3.6.b. ábra egyenirányított feszültség görbéjét) vehetünk le. Figyeljük meg, hogy az irányváltáskor, a kommutáció alatt (3.7.c. ábra) kefék a tekercset rövid időre rövidre zárják.



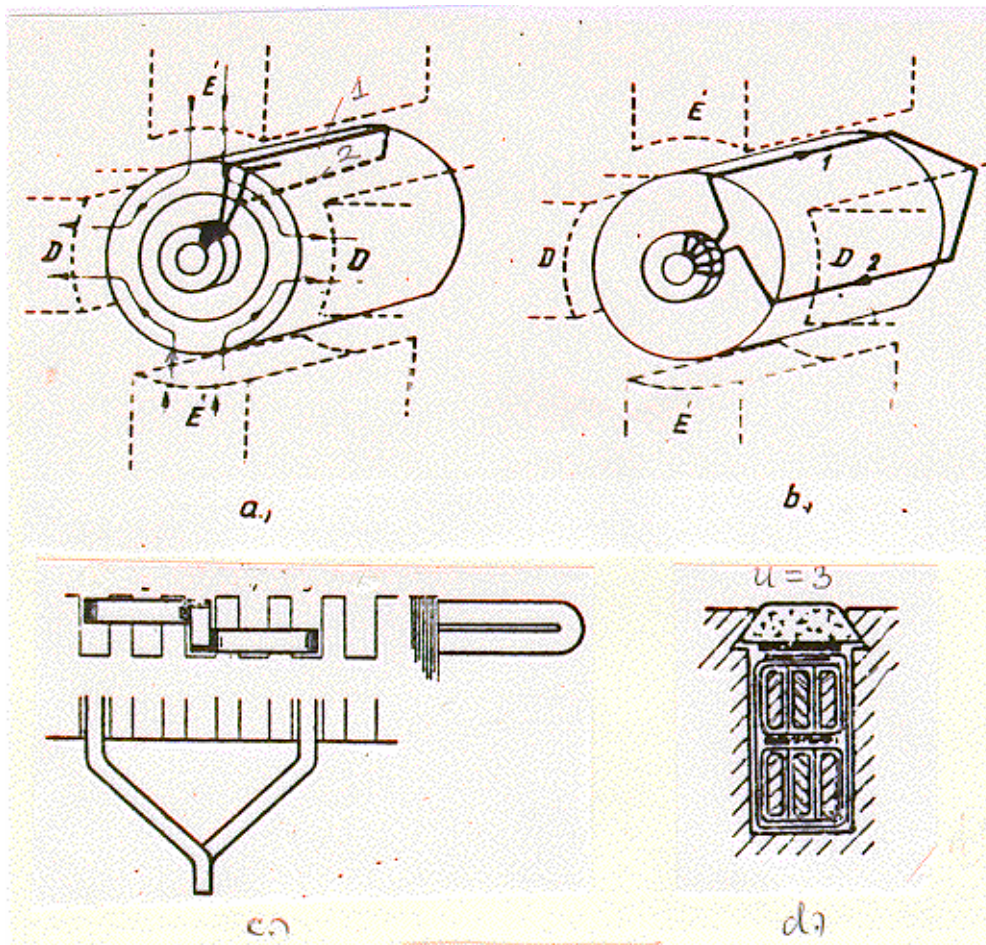
3.7 ábra

2./ Dobtekerccselések

Egyenáramú tekercsünk rosszul használja ki az armatura kerületét és emiatt gépünk armatura feszültsége (és árama is) kicsi - emellett lüktető. Előbbi több sorba kötött menettel, tekercsel, utóbbit több párhuzamosan kapcsolt armatura résszel, un. párhuzamos ággal lehet növelni. A forgórész jobb kihasználására - és így módon a feszültség és az áram növelésére - tekercseljük be az armatura egész kerületét. Hogyan tegyük ezt?

Már a v.á. gépeinknél is láttuk, hogy gépeink tekercselései az állórész belső vagy a forgórész külső hengerfelületén (hornyokban) helyezkednek el; utóbbiakat ezért dobtekerccseléseknek nevezik.

Származtassuk le egyenáramú gépünk armaturájának dobtekerccselését az egyenáramú gépek hőskorában használt gyűrű tekercselésből. Ez a 3.8.a. ábrán láthatóan vasmagos toroid volt. A belső vezető áthúzása - abban feszültség nem indukálódott - bonyolult gyártást igényelt. Ezért a belső vezetőt is kihozzuk a felületre. A b. ábrán a négy-pólusú gép dobtekerccselését láthatjuk. A kihozott vezetőnek kb. pólusosztásnyira kell elhelyezkednie a másik tekercsoldaltól, hogy a két összeadó tekercsoldal-feszültség a legnagyobb eredőt adja. Az eá. armatura tekercselések általában kétrétegesek. A c. ábrán látható módon az egyik tekercsoldal a horonyban felül a másik alul helyezkedik el. Az oldal nézetben az alsó tekercsfél oldalt be szokás forgatni a másik alá az egyszerű ábrázolás érdekében.

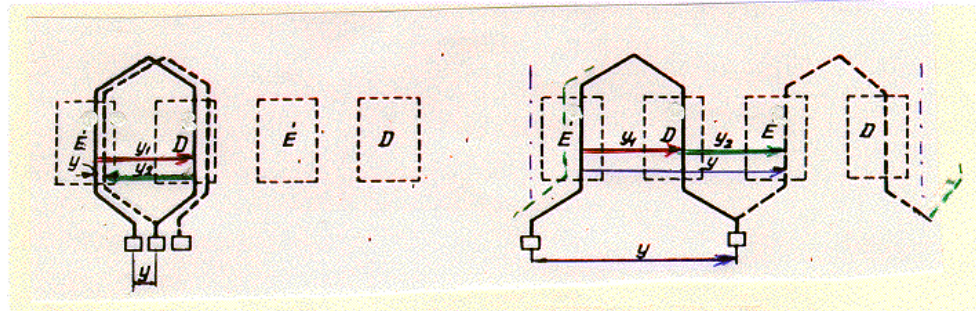


3.8 ábra

Kitérő:

3./ Az alaptípusok. Változatlanul vizsgáljunk négypólusú gépet. Már tudjuk, hogy a tekercsoldalak feszültségei akkor adódnak össze, ha a másik tekercsoldal ellenkező pólus alatt van és az eredő maximális, ha a távolság pólusosztásnyi.

A két alaptípus kialakítására a 3.8. ábra négypólusú gépének kitérített pólusvázlatát a 3.9. ábrában kétszer rajzoltuk fel. Mindkettőben rajzoljunk fel egy tekercsoldalt egy pl. az első északi pólus alatt. A másikat ettől kb. pólusosztásra kell elhelyeznünk - egy pólusosztásnyit kell "lépnünk" - az ábrán így a szomszédos déli pólus alatt. Eddig a két ábra megegyezik.



3.9 ábra

A következő - második - lépéssel újra északi pólus alá kell lépnünk. Erre azonban kétféle lehetőségünk van. A baloldali ábrán visszalépünk a kiindulási tekercsoldalunk mellé, a másikban továblépünk a következő északi pólus alá.

Alakjuk miatt a baloldali alaptípust hurkos a jobboldalit hullámos tekercselésnek hívják.

A tekercsvégeket mindkét esetben egy-egy kommutátor szelethez kötik.

4./ Tekercselési lépések

Az előbbieken két tekercselési lépés követte egymást. Ezeket kétféle módon szokás mérni. Van horony lépés és tekercsoldal lépés. Az eá. armatura tekercseléseknél a horonyban az alsó és a felső rétegben is több tekercsoldal helyezkedik el (l. 3.8.d. ábrát). Ezek számát - rétegenként - u-val jelöljük.

Nézzük most a két alaptípus tekercselési lépéseit.

Hurkos tekercselés. Az első tekercselési lépés, horonyosztásban mérve, ha Z az összes hornyok száma

$$y_{h1} \approx \frac{Z}{2p} \quad \text{és} \quad y_{h1} < \frac{Z}{2p} \quad (3-2)$$

A tekercseket a kommutáció javítása érdekében a pólusosztásnál kicsit rövidebbre készítik, húrozzák.

Az első tekercselési lépés tekercsoldalban mérve így

$$y_1 = uy_{h1} \quad (3-3)$$

A második lépés - miután a kiindulási tekercsoldal mellé lépünk vissza

$$y_2 = y_1 - 1 \quad (3-4)$$

és az eredő tekercselési lépés

$$y = y_1 - y_2 = 1 \quad (3-5)$$

Hullámos tekercselés. Az eredő lépés közel két pólusosztásnyi. Ezt p-szer - ábránkon kétszer - megtéve visszajutunk a kiindulási tekercsoldalhoz. De egyszeri körüljárás után még nem kívánjuk zárni a tekercselést. Ezért a kiindulási tekercsoldal mellé, célszerűen az attól balra fekvő tekercsoldalhoz érkezünk (attól jobbra jutva a tekercsfejek kereszteznék egymást). Mivel minden tekercsoldalt egy kommutátor szelethez kötünk a tekercsoldalak száma egyező a kommutátorszeletek K számával $uZ=K$. Feltételünk így a $py=K$ -val jellemzett záródás helyett a

$$py = K - 1$$

alakban írható, így az eredő lépés nagysága

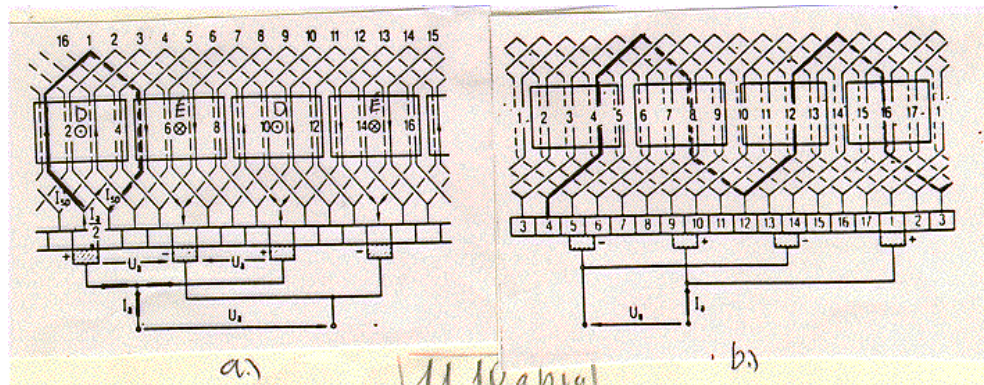
$$y = \frac{K-1}{p} = \frac{uZ-1}{p} \quad (3-6)$$

Az y_1 első tekercselési lépés ugyanaz mint a hurkosnál, így az

$$y = y_1 + y_2 \quad (3-7)$$

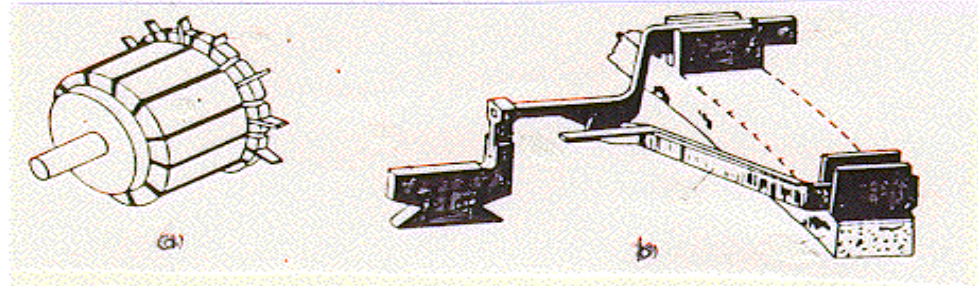
kapcsolatból y_2 meghatározható.

Teljes tekercseléseket a 3.10. ábrán látunk.



3.10 ábra

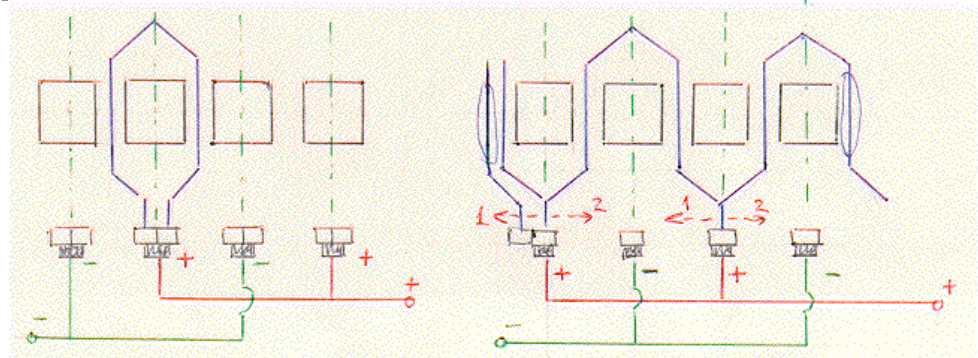
5./ A kommutátor felépítését a 3.3. ábrán érzékeltettük. Az a./ ábrán kis gép teljes kommutátora a b./-n nagyobb gép kommutátorának egy szelete látható.



3.11 ábra

6./ A kefék helye. A keféket a pólusok közötti ún. semleges zónában elhelyezkedő (folyamatosan cserélődő) tekercsoldalok kommutátor szeleteihez kell elhelyezni, hogy egyrészt egy pozitív és egy negatív kefe között a legnagyobb feszültséget nyerjük, másrészt azért, hogy a rövidrezárt kommutáló menetekben ne indukálódjék feszültség, azok indukciómentes helyen mozogjanak. Utóbbira még visszatérünk.

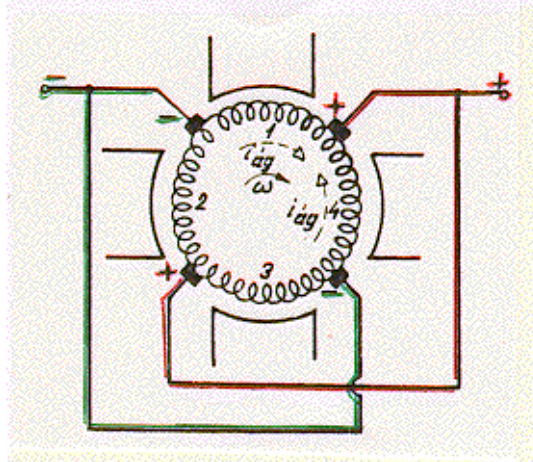
A kefék elhelyezését a 3.12.a., b. ábrákon tüntettük fel, ahol az is látható, hogy a tekercsféjek felpólusosztásnyi elhúzása miatt a kefék látszólag a pólustengelyeknél helyezkednek el.



3.12 ábra

A pozitív és a negatív kefék összekötésével nyerjük az armatura pozitív és negatív kapcsait.

7./ A párhuzamos ágak. A 3.13. ábrában négypólusú hurkos tekercselést vázlatosan rajzoltunk fel és a keféket a kommutáló tekercsekhez illesztettük.



3.13 ábra

Az ábrán könnyen követhető, hogy az armatura pozitív sarkától a negatívhoz négy úton juthatunk el, azaz hurkos tekercselés esetén

$$2a = 2p$$

ahol $2a$ a párhuzamos ágak száma, a azok fele.

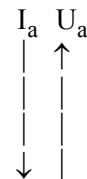
Hullámos tekercselésnél kissé nehezebb a párhuzamos utak követése. A 3.12.b. ábrából látható, hogy pl. a pozitív kefék mentén úgy járhatjuk körül a kerületet, hogy negatív keféket nem érintünk. Kiindulási pontunk - tekercsoldalunk - mellé érve a körüljárásokat addig ismételtük míg a teljes tekercselést bejártuk. Minden körüljárással egy szelettel jutunk közelebb a negatív kefékhez. Ily módon a pólusok számától függetlenül a pozitív keféktől a negatívokhoz - a körüljárásokat balra avagy jobbra folytatva - csak két úton juthatunk. Célszerű, ha a 3.10.b. ábrán követjük a két párhuzamos utat.

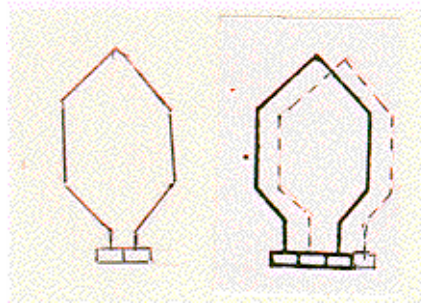
$$2a = 2$$

8./ Feszültség és áram. Az előbbiekből látható, hogy a hurkos tekercselés több párhuzamos ágával (ha, mint rendszerint, $2p > 2$) nagyobb áramra a hullámos több sorbakötött vezetőjével (a kevesebb párhuzamos ág következtében) nagyobb feszültségre alkalmas.

9./ Többjártú tekercselések. A 3.14.a. ábra hurkos tekercselésénél egy szeletet a b. ábra szerint mindig kihagyva a szabadon maradt szeletekben második hurkos tekercselés készíthető. Ily módon ún. többjártú tekercselést nyerünk. Pl. $2p=8$ esetén a párhuzamos ágak száma

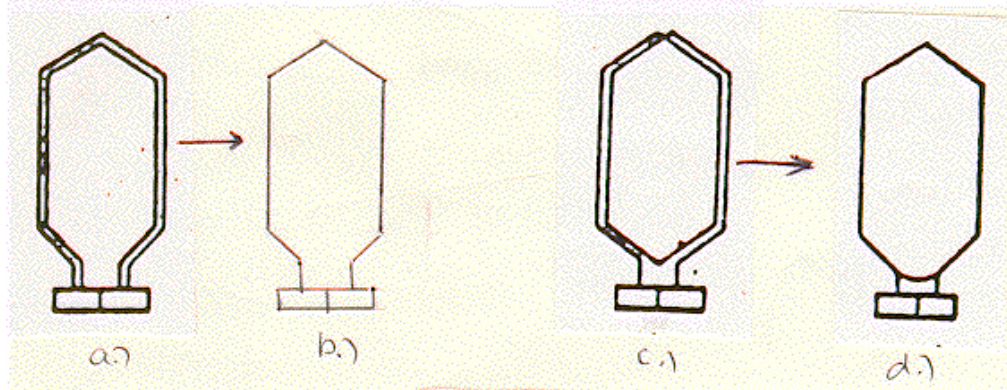
Egyjártú hullámos:	$2a = 2$
Kétjártú hullámos:	$2a = 4$
Egyjártú hurkos:	$2a = 2p = 8$
Kétjártú hurkos:	$2a = 4p = 16$





3.14 ábra

10./ Műhelyrajz. Egy tekercsnek lehet több párhuzamos szála (3.15a. ábra), vagy készülhet több menetből (c. ábra). Műhelyrajzi jelölésük a b. ill. d. ábrán látható. A párhuzamos vezeték ill. a menetek számát a műhelyrajzra ráírják.

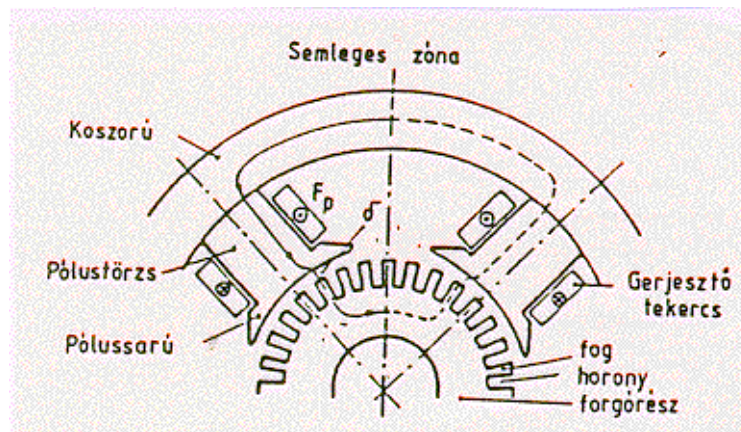


3.15 ábra

- 3./ Összefoglalás. Az eá. armatura tekercselések
- felépítése: kétréteges, zárt dobtekercselés, rendszerint nyitott hornyokkal (a kész tekercseket berakják).
 - típusai: hurkos, hullámos, többjártatú; (a nagy teljesítményeken, legfeljebb kettő)
 - megjegyzés: hurkos változatnál a belső áramok ellen az egyenpotenciálú pontokat - részben - un. kiegyenlítő kötésekkel kötik össze.
 - Üzemtanilag csak a metszeti áramkép érdekes (l. pl. a 3.18. és 3.21. ábrákat).

3.2.2. A pólusrendszer

A 3.16. ábrán többpólusú eá. gép két pólusnyi vázlatos metszeti képét látjuk. Az ábrába beírtuk az armatura, a pólusok és az azokat összekötő állórész koszorú főbb részeinek neveit. Berajzoltuk a mágneses kör egy közepes indukcióvonalát. A mágneses körrel - röviden - a 3.4.1. pontban foglalkozunk.

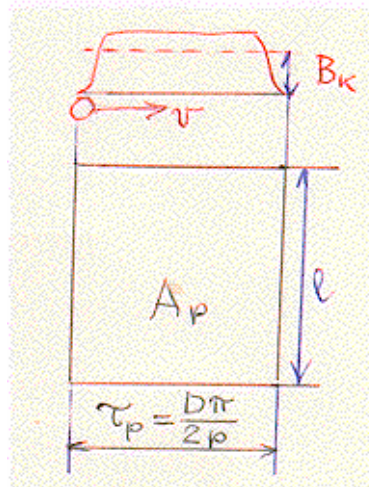


3.16 ábra

3.2.3. Az indukált feszültség és a nyomaték

Az indukált feszültség. A pólusok gerjesztő tekercseinek áramai - vagy az állandó mágnesek - a légrésben létrehozzák a $B(x)$ indukcióeloszlást. A v - állandónak feltételezett - sebességgel mozgó armatura vezetők metszik a $B(x)$ mező indukció vonalait. Az armatura egy vezetőjében, tekercsoldalában indukált feszültség középértéke (l. 3.17. ábra)

$$u_{i1} = B_k l v \quad (v = D\pi n) \quad (3-8)$$



3.17 ábra

Az armatura tekercselés párhuzamos ágai a gép pozitív és negatív kapcsai közötti párhuzamos áramutakat jelentik. Számuk ismerete az indukált feszültség és a nyomaték meghatározásához szükséges. A 3.13. ábra érzékelteti, hogy a 3.8.a. ábra gyűrűs tekercselésénél a pozitív kapocstól - a pozitív keféktől - a negatív sarokhoz - negatív kefékhez - ugyanannyi úton juthatunk el, amennyi a pólusok száma.

Igazolás nélkül állítjuk - a "Kiegészítés"-ben megtalálható - hogy az un. hurkos tekercselés esetén a párhuzamos ágak száma ugyanennyi

$$2a = 2p \quad (3-9)$$

míg az un. hullámos tekercseléseknél mindig kettő

$$2a = 2 \quad (3-10)$$

Egy pozitív és egy negatív kefe közötti párhuzamos ág sorbakötött tekercseiben indukált feszültség, egyben a gép kapcsain mérhető indukált feszültség. Ha az armatura összes vezetőinek száma z és így a sorbakötött vezetők

$$z_{\text{soros}} = \frac{z}{2a} \quad (3-11)$$

akkor az armatura indukált feszültségének a középértéke az egyenfeszültség

$$U_i = \frac{z}{2a} B_k \overbrace{\ell D \pi m}^{A_p 2p} = \frac{z}{2a} \overbrace{B_k A_p}^{\phi_p = \phi} 2pn = \frac{p}{a} z n \phi \quad (3-12)$$

és így

$$U_i = k_u n \phi \quad (3-13)$$

ahol k_u gépállandó.

A nyomaték

Az egy armatura vezetőre ható erő

$$F_1 = B_k l i_a \quad (3-14)$$

ahol i_a az ágáram. A teljes nyomaték így $i'_a = I_a / 2a$ -val

$$M = z \frac{D}{2} F_1 = z \frac{D}{2} B_k l i'_a = \frac{z}{2\pi} \overbrace{D \pi B_k \ell}^{2p\phi} \frac{I_a}{2a} = \frac{k_m}{a 2\pi} \phi I_a \quad (3-15)$$

és így a k_m - nyomatéki - gépállandóval

$$M = k_m \phi I_a \quad (3-16)$$

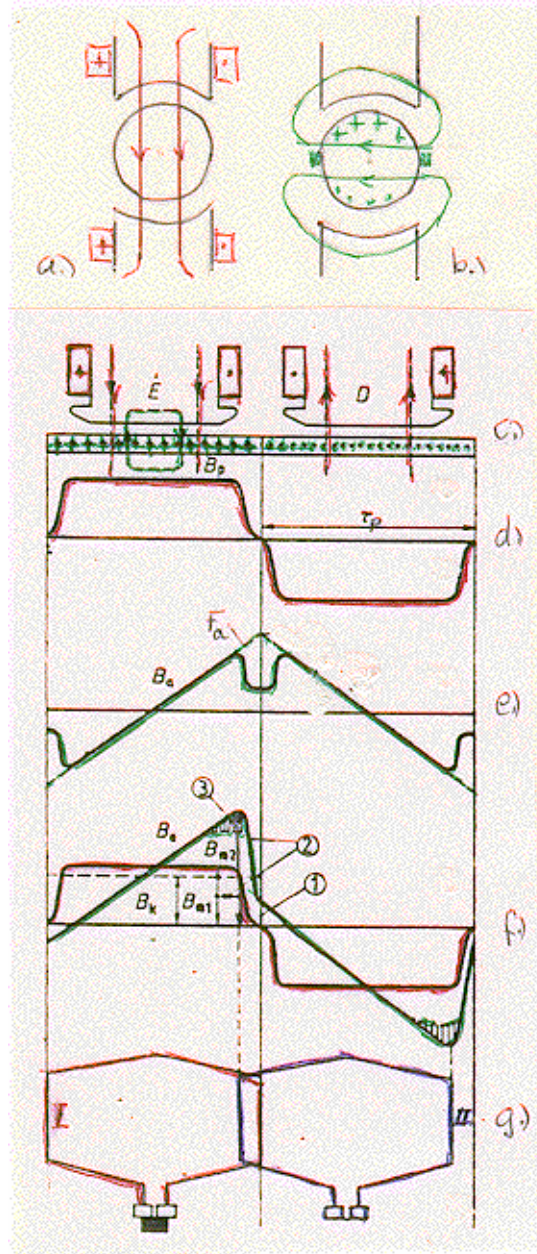
A k_u és k_m gépállandók összevetéséből látható, hogy $k_m = k_u / 2\pi$, így az $n = \omega / 2\pi$ kapcsolattal az indukált feszültség kifejezésének másik alakja

$$U_i = k_m \omega \phi \quad (3-13a)$$

3.3. Az egyenáramú gép belső viselkedése

3.3.1. Az armatura visszahatás

Üresjáráskor csak a pólusmező a "hosszmező" (a d hossz tengely, pólustengely irányába eső mező) jelenik meg (3.18.a. ábra). Terheléskor az armatura áramok létrehozzák az előbbire merőleges q irányú - a pólussaruban záródó - armaturamezőt a keresztmezőt (3.18.b. ábra).



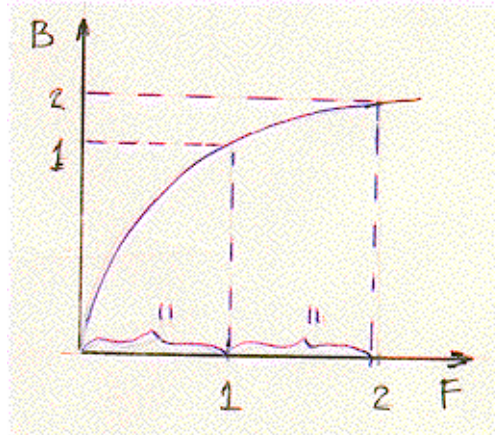
3.18 ábra

Az eredő mezőt a c. ábra kiterített vázlata alatt (v.ö. 7.1. ábrával kapcsolatban mondottakkal) szerkesszük meg szuperpozícióval!

Üresjáráskor kialakul a d. ábrán látható pólusmező.

Most tételezzük fel, hogy csak az armatúrában folyik áram. Először rajzoljuk fel az $F_a(x)$ armatura gerjesztés görbáját, ahol $F_a(x)$ a gerjesztés értéke a kiterített légrés x helyén (e. ábra). A szimmetria miatt kezdjük a pólusközépen! (Emlékezzünk a 7.1.b. ábra szerkesztésére!) A $B_a(x)$ indukciógörbe - mezőgörbe - a pólusközökben a nagy légrés nagy mágneses ellenállása miatt letörnek (lásd ugyancsak az e. ábrán).

Most bűnözünk! Csak gerjesztéseket lenne szabad összeadni indukciókat nem! A 3.19. ábra mágnesezési görbájén látjuk, hogy a nemlinearitás miatt kétszeres gerjesztéshez nem tartozik kétszeres indukció. Mi az f. ábrán - a szemléletes és egyszerű kép érdekében - mégis összeadjuk a pólusmező és az armaturamező görbéket, azután a vastelítés hatásának megfelelően korrigálunk. A telítés következtében a görbék csúcsai alacsonyabban haladnak. Ez az indukció csökkenés a gép mágnesezési görbéje segítségével megszerkeszthető.



3.19 ábra

Az eredő légrésindukció görbéből három - számokkal bejelölt - fontos eredmény olvasható le:

1./ Az indukciómentes zóna - az un. semleges zóna - helye eltolódott. (Ez az eltolódás armaturamezőfüggő, terhelésfüggő).

2./ Az indukció maximális értéke az üresjárási állapothoz képest megnőtt, annak ellenére, hogy - a telítés csökkentő hatásától eltekintünk - a gép fluxusa, a görbe alatti terület - a B_k közepes indukció - változatlan (ugyanannyi területet adtunk hozzá, mint amennyit levontunk).

3./ A telítés miatt - a területvesztés révén - a gép fluxusa csökkent.

A g. ábrán berajzolt két tekercs, a későbbiekben az alábbiak következtében, ugyancsak érdekes, fontos lesz:

a./ A kefével rövidrezárt (bal oldali) tekercs az üresjárástól eltérően nem indukciómentes térben mozog.

b./ A jobbra rajzolt tekercs az armaturamező hatására az üresjárási értékhez képest megnőtt indukciójú helyen mozog.

Az armatura visszahatás nevet mind az egész jelenségre - az armaturamező megjelenésére - mind a 3. szerinti mezőcsökkenésre is szokás alkalmazni.

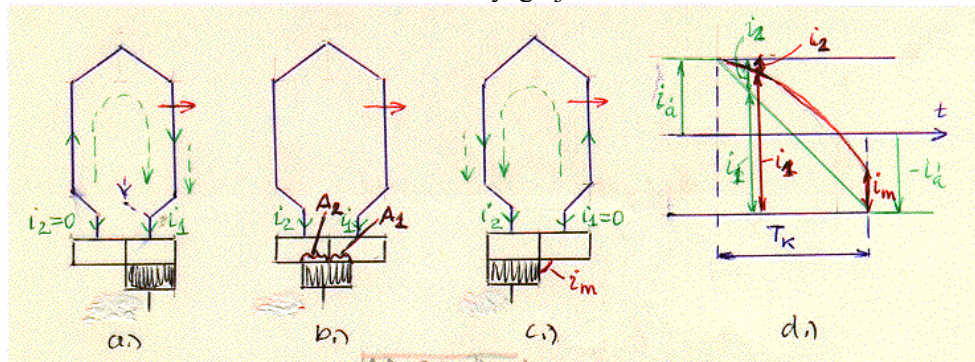
Kitérő:

3.3.2. A kommutáció és a szeletfeszültség

A kommutáció a kommutáló tekercs áramirányváltása. Amikor egy tekercs az egyik armaturaágból a másikba megy át (másik pólus alá) áramiránya megfordul. A kefe eközben rövidrezárja (l. 3.7.c. ábra).

A kommutáció az eá. gép legkritikusabb pontja, Achilles sarka. A bonyolult folyamatok közül csak a legfontosabbakat, azoknak is csak az alapijelenségeit vizsgáljuk nagyon leegyszerűsítve.

Így egyrészt feltételezzük, hogy a kefeszélesség egyenlő egy kommutátor szeletével (l. 3.20. ábra) másrészt - első lépésként - a rövidrezárt körben egyetlen ellenállás a kefeátmeneti ellenállás - a kefe és a kommutátor közötti ellenállás - mellett mindent elhanyagolunk és feltesszük, hogy az az érintkezési felülettel arányos. Tehát mind a rövidrezárt tekercs öninduktivitását, és a külső mező indukálását mind a többi ellenállást elhanyagoljuk.



3.20 ábra

Ez a lineáris (l. 3.20d. ábra) vagy ellenállásos kommutáció az ideális és a kívánatos állapot. Ekkor ugyanis a kefének az egyes kommutátor szeletekkel érintkező részfelületei (b. ábra) és az azokon átfolyó részáramok (d. ábra) arányosak így a kefe áramsűrűsége (i_1 / A_1 ill. i_2 / A_2) a kefe egész szélességében állandó. Ez fontos feltétel, mert a kefe a gép kritikusán igénybevett része.

A kommutáció az ideális esethez képest két főből késik:

1./ A kommutáló tekercset körülvevő szórt fluxus az árammal együtt ellenkező irányúra változik. Ez a kétszeres fluxusváltozás az áramváltozást akadályozó, késleltető önindukciós feszültséget indukál.

2./ Az armatura mező révén a semleges zónában (l. 3.18.d. ábra) megjelenő indukció mozgási indukálás révén ugyancsak az áramváltozást késleltető feszültséget indukál a kommutáló tekercsben.

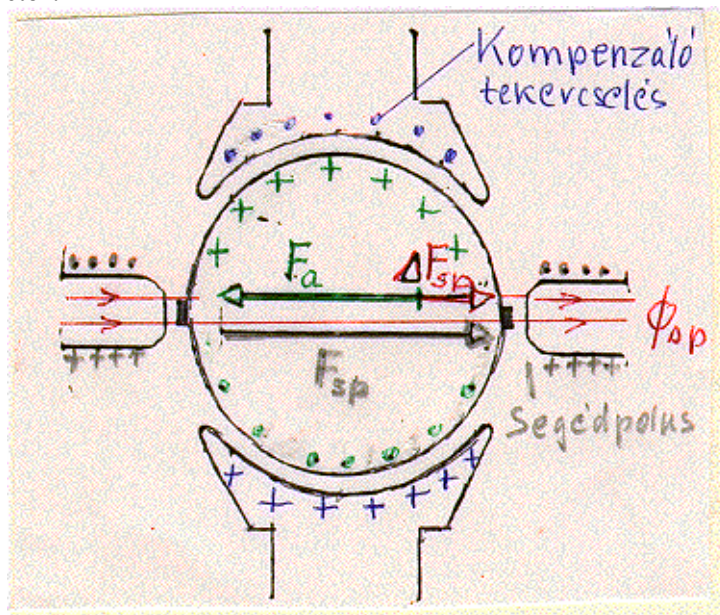
A kommutációnak - késleltetett áramváltozásnak (l. 3.20.d. ábra) - két káros hatása van.

1./ A kefe áramsűrűsége egyenlőtlené válik, a lefutó kefeoldal felizzik.

2./ Az un. maradék áram - i_m a d. ábrán - a lefutó kefeélen ívet húz. Ez leégeti a kommutátor szeleteket és mivel az egyenáramú ív hajlamos a fennmaradásra az egymást követő kis ívek két kefe között teljes zárlatot un. körtüzet okozhatnak.

3.3.3. A segédpólus és a kompenzáló tekercselés

Az un. segédpólus orvosság mind a semleges zónában megjelenő armatura mező, mind az önindukciós feszültség ellen, így azzal a kommutáció "rendbetehető".



3.21 ábra

Nevének megfelelően az a semleges zónában elhelyezett - tehát az armatura tengellyel egyirányú pólusokon lévő segéd tekercselés (l. 3.21. ábra), amelynek

1./ a gerjesztése az armatura gerjesztéssel szembeolgozva egyenlőség esetén megszünteti annak mezejét

2./ gerjesztését megnövelve a maradék eredő gerjesztés által a semleges zónában létesített mező mozgási indukált feszültsége - megfelelő mértékű esetén - "legyőzi" a kommutáló tekercs önindukciós feszültségét.

A segédpólus kétféle hatásával jó közelítéssel visszaállítható az ideális, lineáris kommutáció. Az armatura mező a terheléssel, az armatura árammal, arányos így hatásainak közömbösítésére a segédpólus tekercsekben is az armatura áramot kell vezetni, azt az armatúrával sorba kell kapcsolni.

A segédpólus működését legegyszerűbben tervezése fő lépéseinek követésével érzékeltethetjük.

Ha csak az armatura mező letörése lenne a célunk ezt az

$$1./ F_{sp} \approx F_a \quad (3-17)$$

feltétellel teljesítenénk. A segédpólus gerjesztését ehhez képest ΔF_{sp} értékkel

$$2./ F_{sp} = F_a + \Delta F_{sp} \quad (3-18)$$

növeljük meg, hogy az eredő ΔF_{sp} gerjesztés (l. 3.21. ábra) a segédpólus légrésében az önindukciós feszültséggel egyező - azzal ellentétes - mozgási feszültséget indukáljon. Azaz

$$3./ \quad F_{sp} \rightarrow B_{sp}(x) \rightarrow U_{sp}(t) = B_{sp}(x) | vz = U_{\ddot{o}i}(t) \quad (3-19)$$

A $kB_{sp}(x) \approx U_{\ddot{o}i}(t)$ teljesítése nehéz, de már közelítő kielégítése is megfelelő; z az armáryra kommutáló vezetőinek száma.

Az armatura mező - közel - teljes megszüntetésére szolgál a pólussarukban (hornyokban) elhelyezett az armatúrával sorbakapcsolt kompenzáló tekercselés, amely az armatura tekercseléssel bifiláris tekercset alkot (l. 3.21. ábra).

Célja a nagy szeletfeszültségek kiiktatása. A kommutátornak ugyanis nem a kommutáció az egyetlen kényes pontja. A szeletek között a megengedhető (a 0,5-1,5mm szélességű szigetelést igénybevevő) maximális feszültség, a maximális szeletfeszültség kb. 35V.

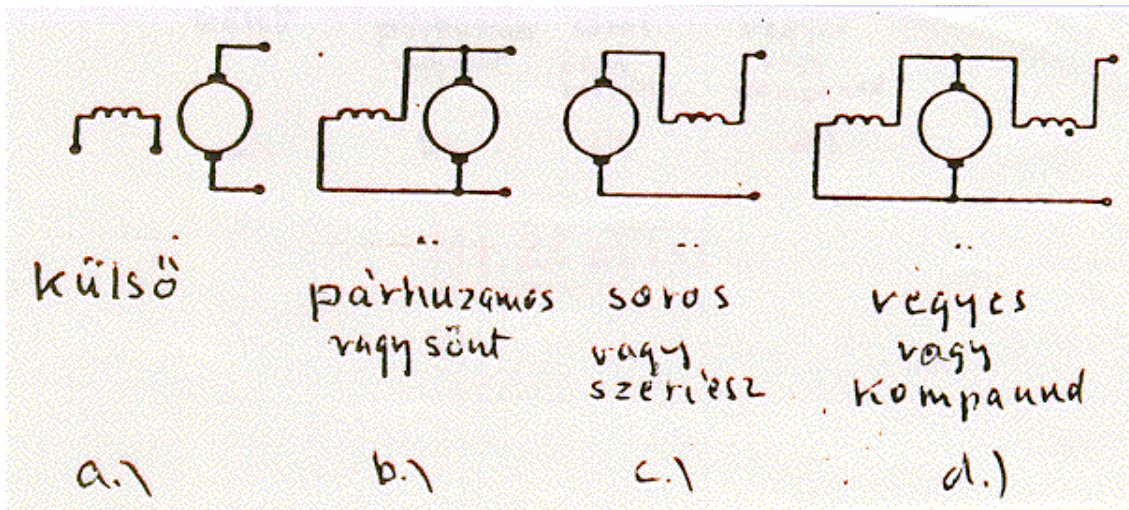
A 3.19.g. ábrán láttuk, hogy az armatura visszahatás a maximális indukciót és azzal a maximális szeletfeszültséget ($u_{szm} = 2B_m | vz$) úgy növelte meg, hogy közben a fluxus, így a gép kihasználtsága nem nőtt; a maximális szeletfeszültség adott, így a gép kihasználhatósága csökkent. További problémát okoznak a terheléslökések.

A kompenzáló tekercs általános alkalmazását magas ára korlátozza. Alkalmazásának néhány példája: Terheléslökések. Szabályozott eá. hajtások. Nincs elegendő hely a segédpólusnak (a kompenzáló tekercselés átveszi az armatura gerjesztés ellensúlyozásának feladatát). Mezőgyengítéses üzem. Ebben az esetben a maximális indukció valamelyest csökken de mint majd látjuk a v kerületi sebesség ennél nagyobb mértékben növekszik.

3.4. Az egyenáramú gép külső viselkedése

3.4.1. Gerjesztési módok

Eddig egyenáramú gépünk armatúra- és gerjesztő (pólus) áramköre egymástól független volt. Az ilyen külső gerjesztésű (3.22. ábra) gépek mellett gerjesztésű tekercsük kapcsolása szerint az egyenáramú gépek lehetnek sönt vagy párhuzamos, soros vagy főáramkörű (szériesz) és vegyes (kompaund) gerjesztésűek. Veszteségük csökkentése érdekében a sönt tekercsek kis áramú nagy menetszámú kis keresztmetszetű tekercsek, az armatura áramot vivő soros tekercsek nagy keresztmetszetűek és kevés menetszámúak.



3.22 ábra

3.4.2. Az egyenáramú generátorok jelleggörbéi

Az egyenáramú generátorok helyett ma félvezetős egyenirányítókat, rendszerint hídkapcsolásokat használnak. Ugyanakkor a motorok üzem közben - pl. lejtőn lefelé haladó villamos - gyakran mennek át generátoros állapotba. Ez indokolja e vizsgálatot.

A mágneses kör vastelítése - nemlinearitása - miatt a grafikus leírás a célszerű - és szemléletes.

3.4.2.1. Külső gerjesztésű generátor

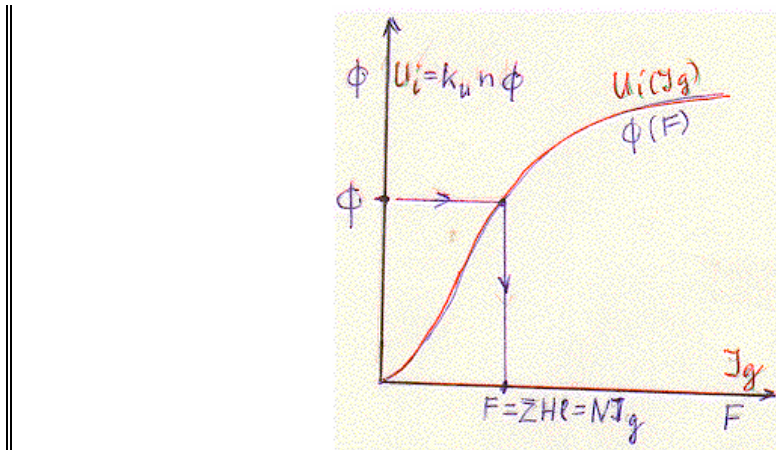
Háromféle jelleggörbét szokás megkülönböztetni:

- a./ Üresjárási: $U_0(I_g)$ $I_a = 0$ $n = \text{áll. (hajtógép)}$
 b./ Terhelési: $U_k(I_g)$ $I_a = \text{áll.}$ $n = \text{áll. (hajtógép)}$
 c./ Külső: $U_k(I_a)$ $I_g = \text{áll.}$ $n = \text{áll. (hajtógép)}$

Az üresjárási jelleggörbe.

Kitérő:

Gépeink mágneses körét (közelítőleg) állandó keresztmetszetű szakaszokra bontjuk. (Ilyen pl. a 3.16. ábrán az állórész koszorú vagy a pólustörzs.) Felvesszünk ϕ értékeket. A $B=\phi/A$ indukciókhoz a szakasz vasanyagának a mágnesezési görbéjéből kivesszük a H értéket. A $\Sigma Hl = F$ szolgáltatja a választott ϕ -hez tartozó F -et. Elegendő számú ponttal felrajzolható a gép mágnesezési görbéje (3.23.a. ábra).



3.23 ábra

A gép $\phi(F)$ mágnesezési görbéjéből az $I_g = F / N_p$ és $U_i = k_u n \phi$ (3-23) kapcsolatokkal nyerjük az

$$U_o = U_i = f(I_g) \quad (3-20)$$

üresjárási jelleggörbét.

A terhelési jelleggörbe.

Terheléskor az U_k kapcsolófeszültség az U_o üresjárási feszültséghez képest két okból csökken:

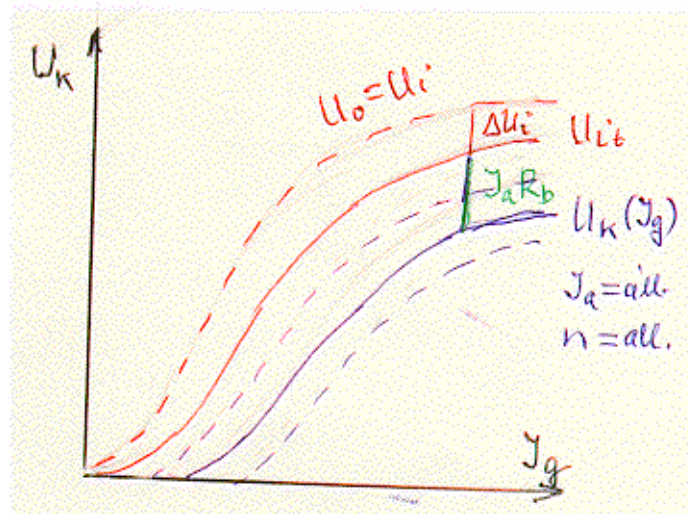
1./ Az armatura visszahatás fluxuscsökkenő hatása (3.18.d. ábrán 3.) miatt terheléskor az U_{it} indukált feszültség az $U_i = U_o$ üresjárási értékhez képest csökken (l. 3.24. ábra)

$$U_{it} = U_o - \Delta U_i \quad (3-21)$$

2./ Az armaturakör R_b ellenállásán létrejövő

$$I_a R_b \quad (3-22)$$

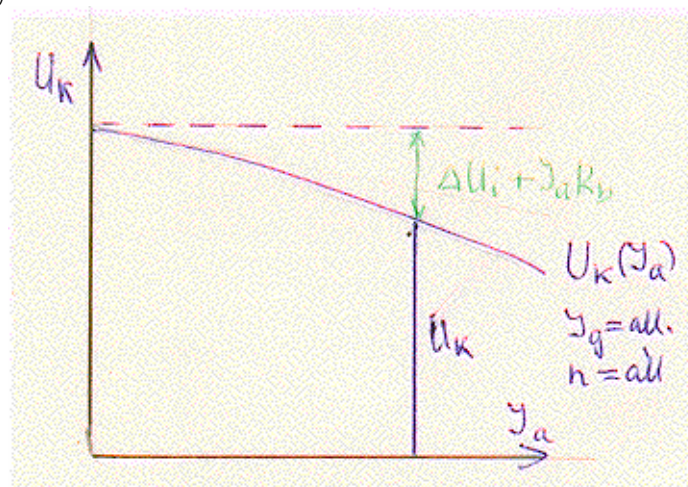
feszültségcsökkenés révén. Az ábrába még egy kisebb és egy nagyobb $I_a = \text{áll.}$ armatura áramhoz tartozó terhelési jelleggörbét is berajzoltunk (szaggatottan).



3.24 ábra

A külső jelleggörbe

Az eddigiek alapján az $U_k(I_a)$ $I_g = \text{áll.}$ külső jelleggörbét a 3.25. ábrán rajzoltuk fel. $I_a R_b$ R_b állandósága esetén lineárisan nő a $\Delta U_i(I_a)$ nagy áramoknál nagyobb.



3.25 ábra

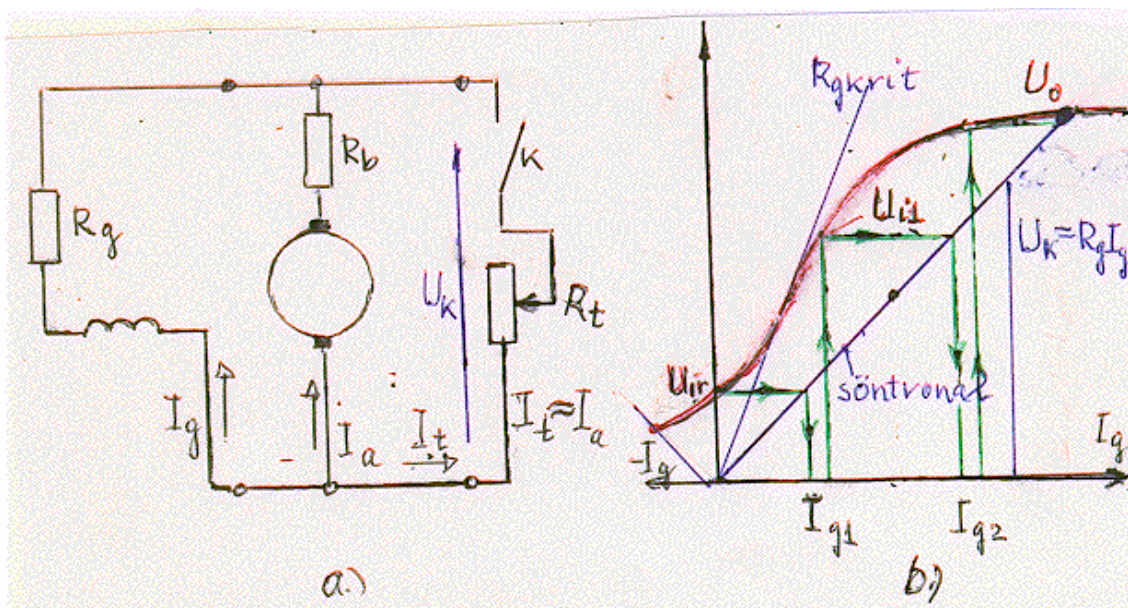
3.4.2.2. A párhuzamos gerjesztésű generátor

Kitérő:

A kommutátor mellett a söntgenerátor öngerjedése az un. dinamó elv volt az elektrotechnika diadalútjának egyik elindítója.

A dinamó elvet elsőként Jedlik Ányos találta fel. Nagyon örült ennek és gépét betette a polcra magyar módra. Werner von Siemens aki 6 évvel később ismerte fel gyárat alapított, amelyben ma kb. 300.000 ember dolgozik és termelési értékének nagyságrendje összemérhető nemzeti jövedelmünkkel.

A dinamó elv azt jelenti, hogy a mellékáramkörű dinamó maga látja el magát gerjesztő árammal. A 3.26.a. ábrán kiemelve rajzoltuk az ellenállásokat.



3.26 ábra

A felgerjedés. Az armaturát a hajtógéppel forgatjuk. Ha a gép szűz, nincs előléte, azaz mágneses köre még nem volt mágnesezve, akkor nincs I_g gerjesztő árama, így nincs ϕ fluxus tehát nincs U_i - ami I_g -t létrehozná.

A gép csak akkor gerjed fel, ha - előző mágnesezéséből visszamaradva - van remanens fluxusa. A b. ábrán csak a folyamat elvét - lépéseit - látjuk nem pontos leírását.

A gerjesztő tekercs R_g ellenállásának $I_g R_g$ feszültségese - a gerjesztő körben más feszültség nem lévén - egyúttal a gerjesztő tekercs kapocsfeszültsége, amelyet I_g függvényében az $U_k = I_g R_g$ ferde egyenes az un söntvonal ábrázol (b. ábra). A gerjesztő körben általában külső ellenállás is be van iktatva.

A generátor terheletlen, armatura kapcsolai nyitottak. A remanens fluxus által indukált kis U_{ir} feszültség a gerjesztő tekercsen az I_{g1} áramot hajtja át (b. ábra). Ehhez az üresjárási görbén az U_{i1} feszültség tartozik, amely a gerjesztő kör I_{g2} áramát létesíti. Így jutunk el az üresjárási jelleggörbe és a söntvonal metszéspontjáig. Gépünk felgerjedt.

Nem gerjed fel az üresen járó generátor ha:

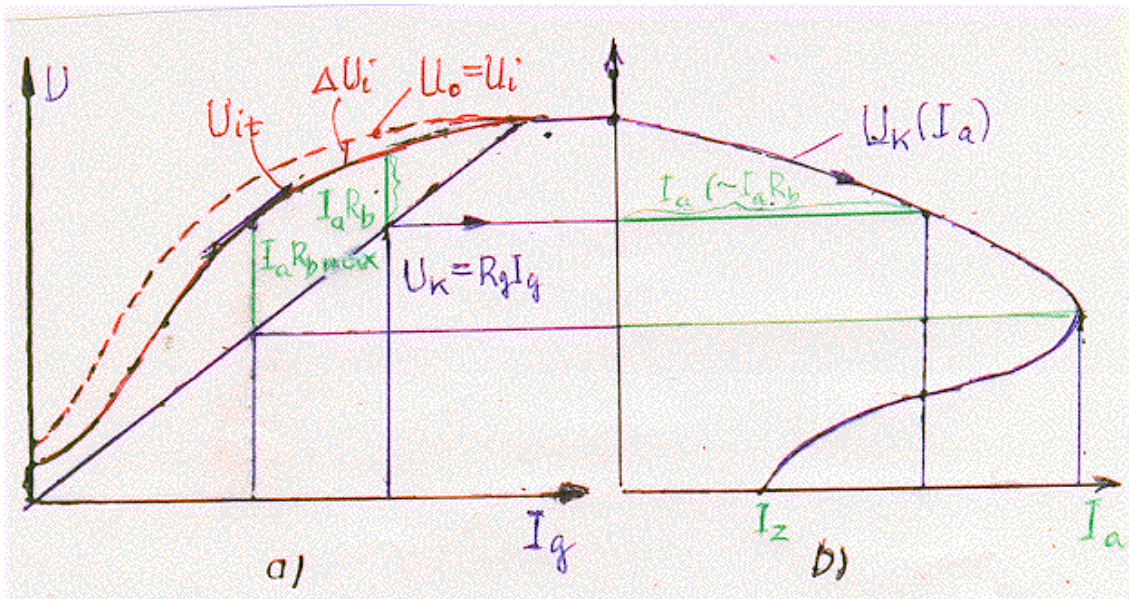
a./ $B_{remanens} = 0$

b./ $R_g > R_{gkrit}$. A gerjesztő kör kritikus ellenállása az, amelyhez az üresjárási görbét érintő söntvonal tartozik (lásd a b. ábrán).

c./ Ún. öngyilkos kapcsolás esetén. Pl. ha a gerjesztő tekercs kapcsai fordítva vannak bekötve, akkor a gép az ábrán rajzolt módon "balra" legerjed. Ekkor ugyanis az ellenkező irányú ($-I_g$) gerjesztés a mágnesezési (hiszterézis) görbe leszálló ágán a ϕ_r érték alá viszi a gép fluxusát.

A terhelési és a külső karakterisztika

A terhelési jelleggörbe ugyanolyan mint a külső gerjesztésű generátoré a külső karakterisztika a 3.27. ábrán látható nagyon érdekes "visszaforduló" alakú.



3.27 ábra

Kitérő:

Kövessük az érdekes külső jelleggörbe kialakulását. A 3.27.a. ábrában felrajzoltuk az $U_0 = U_i$ üresjáráskor indukált feszültséget. Terheléskor (3-21) szerint a fluxuscsökkenés miatt az indukált feszültség is csökken. A csökkent U_{it} görbét berajzoltuk. Az $R_g I_g$ söntvonal egyúttal a gerjesztő tekercs kapocsfeszültsége is, az pedig azonos az armatura - egyúttal a gép - kapocsfeszültségével. Az armatura U_{it} indukált feszültsége és U_k kapocsfeszültsége közötti metszések tehát az armaturakör R_b ellenállásán létrejövő $R_b I_a$ ohmos feszültségvesztést mérik és mivel R_b állandó az I_a armatura áram nagyságát is jellemzik.

A gép terhelését, I_t terhelő áramát a terhelés R_t ellenállásának csökkentésével lehet növelni. Az I_g gerjesztő áram I_a 1-2%-a, így $I_t \approx I_a$ és I_t helyett I_a használható.

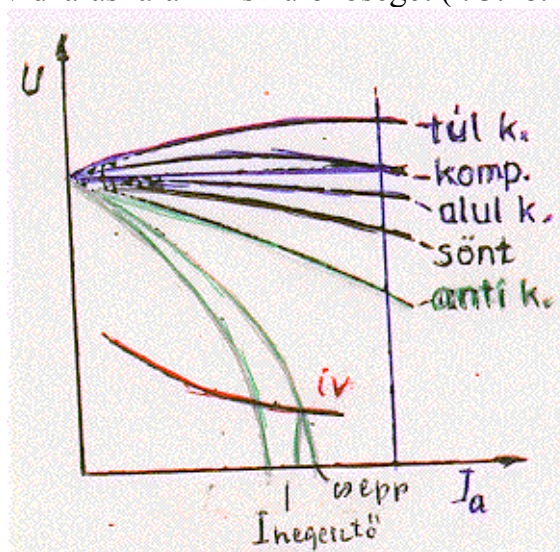
A terhelés, így az armatura áram növelésével $I_a R_b$ nő ezáltal az U_k kapocsfeszültség csökken és $U_k = I_g R_g$ révén csökken I_g .

Mi lesz I_g ily módon létrejött csökkenésének a hatása I_a -ra? Az a./ ábrából is látható, hogy a kezdeti szakaszon I_g csökkenésével a mágnesezési görbét követő U_{it} esése lassúbb mint a lineáris söntvonalé, így különbségük az $I_a R_b$ metszék és ezzel I_a nő. Egy $U_k(I_a)$ pontot a b. ábrán - I_a megfelelő léptékével - megszerkesztettünk. Ott ahol az $U_{it}(I_g)$ görbe érintője a söntvonalal párhuzamos elértük $I_a R_b$ így I_a legnagyobb értékét. Ezután az U_{it} görbe meredekebben esik mint a sönt egyenes, ezáltal $I_a R_b$ csökken és így az $U_k(I_a)$ külső jelleggörbe visszakanyarodik egészen a kis I_z állandósult rövidzárási értékhez.

Megjegyzés: Ezt a generátort sem szabad rövidrezárni, mert I_2 -t nagy transziens áramcsúcs előzi meg.

3.4.2.3. A vegyes gerjesztésű generátor

"Kompaundálás" esetén a soros tekercs gerjesztése erősíti a külső - vagy sönt - gerjesztést így kompenzálni lehet a 3.25. ábra külső karakterisztikájának esését - esetleg más feszültségeséseket is (3.28. ábra). Antikompaundálással, a soros tekercs ellengerjesztésével erősen eső külső jelleggörbét lehet elérni így hegesztő generátornál stabilis üzemi pontot és az üzemi áram és a csepp leesésével előálló rövidzárási áram kis különbségét (l. 3.28. ábra).



3.28 ábra

3.4.3. Egyenáramú motorok jelleggörbéi

Az egyenáramú gép armatura körének (3-13) felhasználásával nyert

$$U_k = U_i + I_a R_b = k_u n \phi + I_a R_b \quad (3-23)$$

feszültségegyenletéből az n fordulatszám:

$$n = \frac{U_k}{k_u \phi} - \frac{R_b}{k_u \phi} I_a \quad (3-24)$$

fontos kifejezését nyerjük.

A nyomaték kifejezését (3-16)-tal már ismerjük

$$M = k_m \phi I_a \quad (3-25)$$

Három jelleggörbét szokás vizsgálni ill. felhasználni

- a./ Sebességi jelleggörbe $n(I_a)$
- b./ Mechanikai jelleggörbe $n(M)$
- c./ Nyomatéki jelleggörbe $M(I_a)$

A mechanikai és sebességi jelleggörbék hasonlóak, így a továbbiakban a valamivel egyszerűbb sebességit vizsgáljuk.

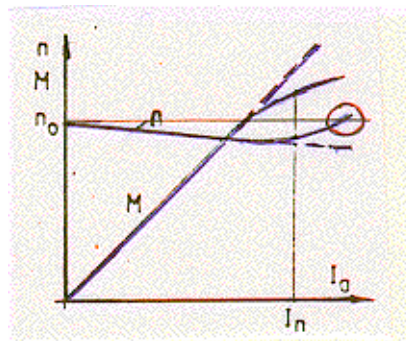
3.4.3.1. A külső és a párhuzamos gerjesztésű motor

A külső és a sönt motorok jelleggörbéit az $I_g = \text{áll.}$ - állandó mágneses gépnél $\phi = \text{áll.}$ - feltétellel szokás vizsgálni, így a két gép viselkedése egyforma.

Az $I_g = \text{áll.}$, $U_K = \text{áll.}$ és $R_b = \text{áll.}$ feltételekkel a sebességi és a nyomatéki jelleggörbék kifejezései

$$\begin{aligned} n(I_a) &= n_0 - bI_a \\ \underline{M(I_a)} &= cI_a \end{aligned} \quad (3-26ab)$$

az n_0 üresjárási pontból, illetve a kezdőpontból induló egyeneseket jellemeznek rajzuk a 3.29. ábrán látható. n_0 az üresjárási fordulatszám és a terheléssel a fordulatszám csak kevéssé csökken. Az ilyen fordulatszám-tartó motorokat - mint pl. az indukciós motor - ezért sönt jellegűeknek hívják. Az armatura visszahatás fluxuscsoökkentő hatása miatt nagy terheléskor a nyomaték görbe kissé elhajlik a (szaggatottan rajzolt) ferde egyenestől - M csökken - a fordulatszám pedig megnő. A sönt motor tehát - hibás konstrukció pl. kis légrés esetén - terheléskor szaladhat meg.



3.29 ábra

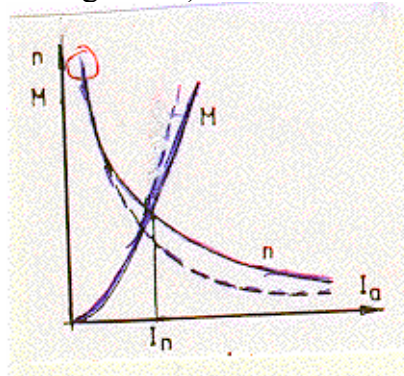
3.4.3.2. A soros-gerjesztésű-motor

Az armatura és a gerjesztés soros kapcsolása (l. 3.22. ábra) révén $I_a = I_g$ így, közelítésként ϕ és I_g lineáris kapcsolatát feltételezve, a $k_u \phi = k'_u I_g = k'_u I_a$ és $k_m \phi = k'_m I_a$ összefüggésekkel (3-24) és (3-25) alakja, a soros gép sebességi ill. nyomatéki jelleggörbéje

$$n = \frac{U_k}{k'_u I_a} - \frac{R_b}{k'_u} = \frac{a}{I_a} - b \quad (3-26ab)$$

$$M = k'_m I_a^2$$

A sebességi jelleggörbe tehát b-vel lefelé tolt (a nyíllal ezt jeleztük) hiperbola, a nyomatéki négyzetes parabola (3.30. ábra szaggatott görbék). A görbék a telítés fluxuscsökkenő hatására itt is kissé módosulnak. (A nyomaték csökken a fordulatszám nő. Teljes vonalú görbék.)

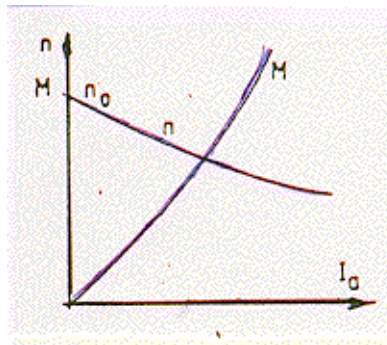


3.30 ábra

A fordulatszámukat ejtő motorokat innen soros jellegűeknek nevezik. A soros motor kis terhelésnél szalad meg - nő a fordulatszáma elméletileg végtelenre, a gyakorlatban nagy értékre - ezért terheletlenül nem járatható.

3.4.3.3. A vegyes gerjesztésű motor

A kompaundálás - a soros gerjesztés - nagyságától függő a sönt és a soros jelleg közötti karakterisztikát nyerünk (3.31. ábra), így pl. gépünk nem szalad meg. Motornál az antikompaundálásnak nincs értelme. Néhány menetes, olcsó, un. stabilizáló soros tekercsel elérhető a 3.29. ábra sebességi jelleggörbék "felhajlásának" megszüntetése. Szabályozott hajtásokban ez a szabályozással is elérhető.



3.31 ábra

3.4.4. Egyenáramú motorok üzeme

Motorainknak indulni, állandó vagy változó fordulatszámmal hajtani - üzemelni - és leállni ehhez gyakran fékezni, - olykor forgásirányt változtatni, reverzálni - kell tudni. E három üzemmód fő vonásait a külső gerjesztésű - legszélesebbkörűen alkalmazott gép példáján mutatjuk be.

3.4.4.1. Indítás

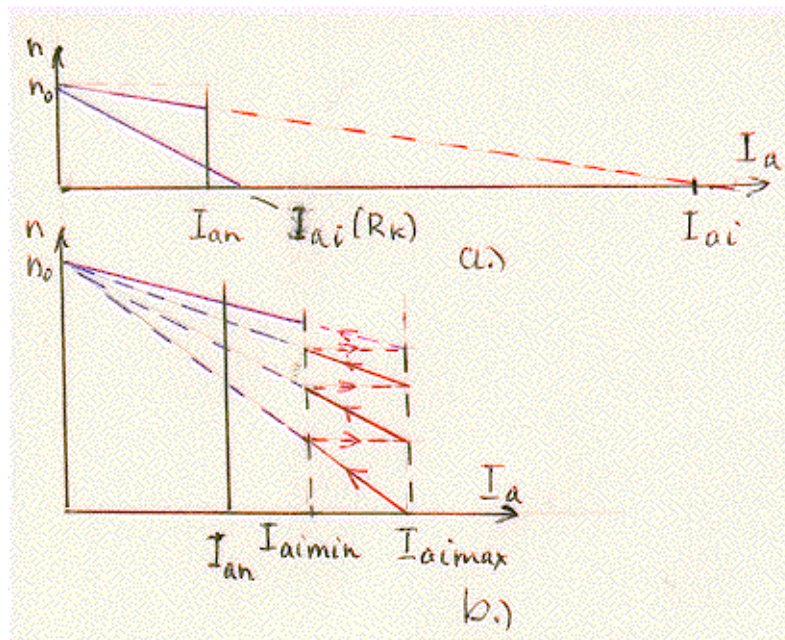
Az indítás pillanatában az armatura még nem forog, abban nem indukálódik feszültség. Így a teljes kapocsfeszültséget az R_b belső ellenállás feszültsége emészti fel:

$$U_K = \underbrace{0}_{\sim 5\%U_n} + \underbrace{I_a R_b}_{20 \times I_n} = \underbrace{I_a}_{20 \times I_n} R_b \quad (3-28)$$

Az indítási áram így pl. a névleges 20-szorosa lenne - az ábrán kisebb - (l. 3.32.a. ábra) az armatura károsodását okozva. Csökkentésére az armatura elé indító ellenállást kapcsolnak

$$U_k = I_{ai} (R_b + R_K) \quad (3-29)$$

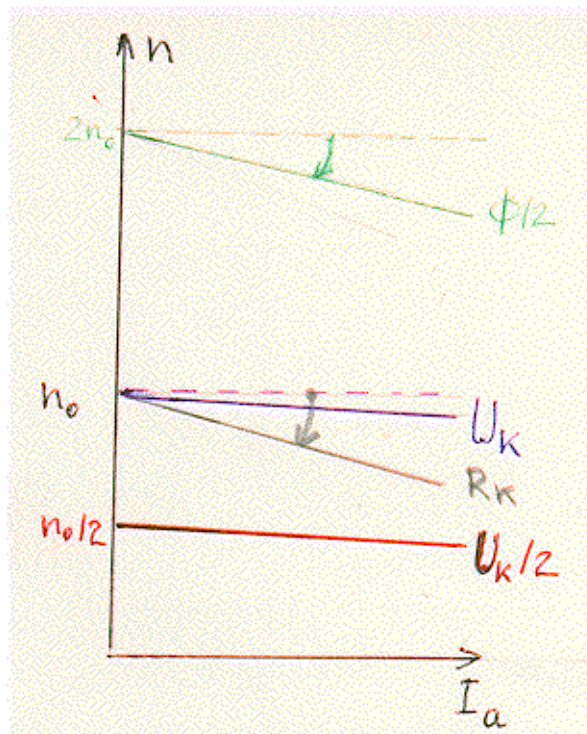
amelyet a forgórész felgyorsulásával növekvő indukált feszültséggel fokozatosan (l. 3.32.b. ábra) kiiktatnak a fokozatokat úgy választva, hogy az áram egy maximális és egy minimális érték között változzon. Az átkapcsolások rövid ideje alatt a fordulatszám nem változik.



3.32 ábra

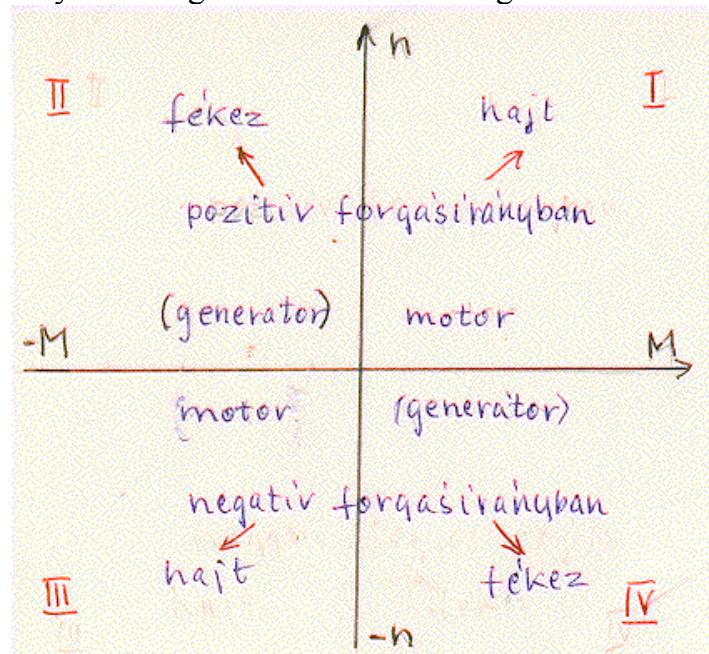
3.4.4.2. Fordulatszám változtatás

A (3-24) képlet szerint a fordulatszámot az U_k kapocsfeszültség a ϕ fluxus változtatásával és R_k külső ellenállás beiktatásával az armatura körbe lehet módosítani (3.33. ábra). A tápláló feszültség változtatásával - vezérelt egyenirányítóval - a fordulatszám széles határok között folytonosan változtatható. A gép telítődése miatt a fluxus nem növelhető csak csökkenthető. Ezzel a mezőgyengítéses eljárással a fordulatszám tartomány jelentősen növelhető. E két kiváló szabályozási lehetőség teszi - és tette - az egyenáramú gépet a fordulatszám szabályozás fontos eszközévé. A külső ellenállás beiktatása az armatura körbe megnöveli a veszteségeket.



3.33 ábra

A 3.34. ábra az üzemi tartományokat mutatja. Meg szokás különböztetni egy-, két- és négyzetes üzemet. Utóbbinál a hajtás mindkét forgásirányban képes motor és féküzemre. A forgásirányt vagy a gerjesztőáram vagy az armaturaáram irányának megfordításával lehet megváltoztatni.

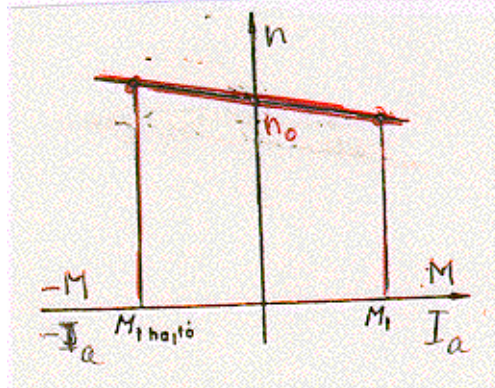


3.34 ábra

3.4.4.3. Féküzem

Háromféle fékezési módot, generátoros, ellenállásos és ellenáramú fékezést lehet megkülönböztetni.

Generátoros féküzem. Lejtőn haladó vonat, vagy süllyesztett teher a hajtó motort az n_0 üresjárási fordulatszám fölé forgatva a gép generátoros állapotba megy át (3.35.ábra). A termelt villamos energiát a tápforrásba - hálózatba - táplálják vissza. Fékezés csak n_0 fordulatszám felett lehetséges.



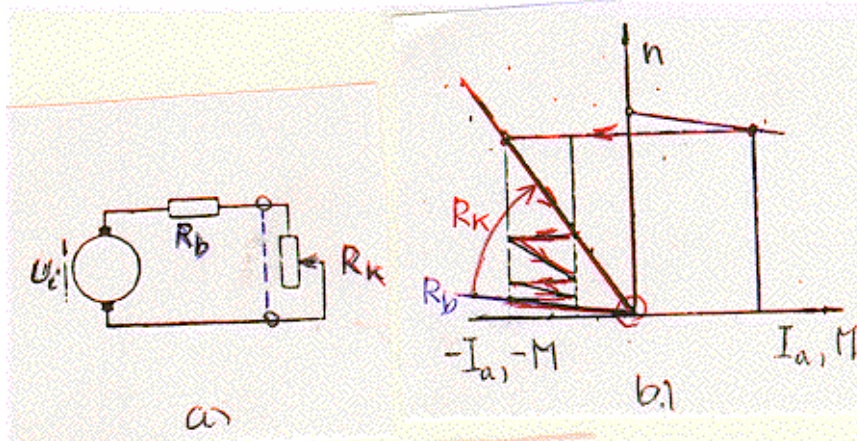
3.35 ábra

Ellenállásos - vagy dinamikus - féküzem.

A motort a tápforrásról lekapcsolva és külső ellenállás nélkül rövidre zárva (3.36.a. ábra) az $U_k=0$, $R_K=0$ értékekkel az

$$n = -\frac{R_b}{k_u \phi} I_a \quad (3-30)$$

sebességi jelleggörbe hajlásszöge nagyon kicsi (3.36.b. ábra).



3.36 ábra

Az R_K külső ellenállással megnövelve

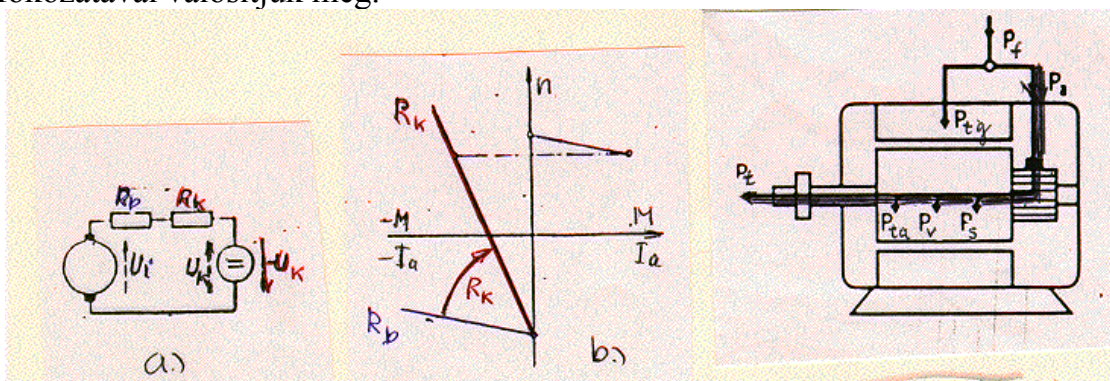
$$n = -\frac{R_b + R_K}{k_u \phi} I_a \quad (3-31)$$

azt kellő meredekségűre hozhatjuk (3.36.b. ábra). Az álló helyzetben nincs villamos fékező nyomaték így a megálláshoz mechanikai fékre lehet szükség.

Ellenáramú fékezésnél a gép kapocsfeszültségét megfordítjuk (3.37.a. ábra). A jelleggörbe meredekségét itt is külső ellenállás beiktatásával kell megfelelő mértékre növelni. Egyenlete

$$n = -\frac{U_k}{k_u\phi} - \frac{R_b + R_K}{k_u\phi} I_a = -n_o - cI_a \quad (3-32)$$

A 3.37.b. ábrán a féküzemű sebességi jelleggörbének mind az $R_K=0$, mind az R_K -hoz tartozó egyenesét felrajzoltuk. A megoldásnak $n=0$ -nál is van fékező nyomatéka. A gyakorlatban a fékezés leállásokat is - az indításkor látott 3.32.b. ábrához hasonlóan a 3.36. ábrán is jelzett módon - az R_K külső ellenállás több fokozatával valósítjuk meg.



3.37 ábra

3.38 ábra

3.4.5. Teljesítménymérleg

Mintegy összefoglalásként vizsgáljuk meg az eá. gép teljesítménydiagramját, teljesítménymérlegét motorüzemben.

A gép teljes egyenletrendszeré állandósult állapotban

$$U_g = R_g I_g \quad \phi = f(I_g I_a) \quad (3-33ab)$$

$$U_a = U_i + R_b I_a \quad U_i = k_m \omega \phi \quad (3-34ab)$$

$$M = k_m \omega I_a \quad (3-35)$$

ahol a 33-as egyenletek a gerjesztő - a 34-esek az armaturakört jellemzik. A (3-33b) kapcsolatot a gép nemlineáris mágnesezési görbéje szabja meg és az armatura visszahatás is befolyásolja.

A motor belső teljesítmény-áramlását a 3.38. ábrán látjuk. A gép P_f felvett villamos teljesítménye a motorban P_t hasznos (mechanikai) tengelyteljesítménnyé és veszteségekké alakul. A veszteségi teljesítmény az armatura - P_{ta} és a gerjesztő tekercs $P_{tg} = I_g^2 R_g$ tekercsveszteségéből, a P_v

vasvesztéséből és a P_s - lég- és csap- súrlódási veszteségekből tevődik össze. A vasvesztés az armatura hiszterézis és örvényáram veszteségek képezik. Az állórészben vasvesztés az áramirányítós táplálás egyenáramának v.á. összetevője okozhat.

Villamos-mechanikai energiaátalakítás csak az armatúrában történik. A teljes

$$P_a \equiv U_a I_a = U_i I_a + R_b I_a^2 = P_b + P_{ta} \quad (3-36)$$

felvett armatura teljesítmény a 3.37. ábra teljesítménydiagramjából láthatóan a

$$P_a = (P_t + P_v + P_s) + P_{ta} = P_b + P_{ta} \quad (3-37ab)$$

módon oszlik el, $P_b = U_i I_a$ a belső teljesítmény, amelyet az $M \equiv M_b$ "belső" nyomatékkal a

$$P_b = M_b \omega = k_m \phi \omega I_a \quad (3-38ab)$$

alakba írhatunk.

Az M_t hasznos tengelynyomaték a súrlódási és vasvesztések miatt kisebb M_b -nél:

$$M_t = \frac{P_t}{\omega} = M_b - \frac{P_s + P_v}{\omega} \quad (3-39)$$

A hatásfok a P_t leadott és a P_f felvett teljesítmények aránya

$$\eta = \frac{P_t}{P_f} = \frac{P_f - \Sigma P_{veszt}}{P_f} = 1 - \frac{\Sigma P_{veszt}}{P_f} \quad (3-40abc)$$

ahol ΣP_{veszt} a veszteségek összege. A villamos gépek hatásfoka a gépnagyságtól függő érték (v.ö. Növekedési törvények). Egyenáramú gépek esetében pl. 10-1000kW között kb. $\eta=81-91\%$.