

Miskolci Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Főiskolai Szintű Villamosmérnöki Szak

Villamos energetika
c. tantárgy előadás anyaga.
Oktatási segédlet

dr. Dálnoki Antal
főisk. docens

2000

A villamos energetika tárgya.

A villamos energetika a villamosenergia termelésével, szállításával és felhasználásával foglalkozó tudományág. Egy ország, egy régió gazdasági potenciálja jól megítélhető az energia felhasználására vonatkozó jellemzők alapján. A villamos energiának az összes energia-felhasználásból való részesedése alapján következtetni lehet a technológia fejlettségére és a lakosság illetve háztartások komfort-szintjére. A villamos energia felhasználás részesedése az energiamérlegben 1-2 % az elmaradott régiókban, amíg a fejlett országok esetében ez 15-30 %-ot tesz ki. A villamos energia részesedése az egész világra vonatkozóan kb. 30 %, Magyarországon kb. 29 %. Ez jól mutatja, hogy a villamos energia előnyös tulajdonságai miatt egyre nagyobb területeket hódít el a többi energia fajtától. Ezek az előnyös tulajdonságok a következők:

1. Óriási egységekben (1000 MW nagyságrendben) állítható elő, és az erőművek hatásfoka is egyre javul.
2. Könnyen, jó hatásfokkal áttanszformálható és nagy távolságra gazdaságosan szállítható.
3. Könnyen elosztható és lényegesen eltérő teljesítményű fogyasztók egy helyről táplálhatók.
4. Állandóan rendelkezésre áll és felhasználása könnyen automatizálható.
5. A villamos vontatásban jó hatásfokkal alkalmazható és a földalatti villamos vontatásban más energia felhasználása szinte elképzelhetetlen. Lehetővé tette a villamos autók kifejlesztését.
6. Univerzális jellege miatt egyre több környezetbarát technológia alkalmazását teszi lehetővé.

Energiahordozók.

Primer energiahordozóknak nevezzük azokat az anyagokat, amelyek a természetben előforduló alakjukban kerülnek felhasználásra. (Pl. kőszén, kőolaj, földgáz) **Szekunder energiahordozók** azok az anyagok, amelyeket átalakítás után használnak fel. (Pl. koks, pakura, kerozin, gőz, PB-gáz). **Megújuló energia források** azok az energiahordozók, amelyek a természetben mindig rendelkezésre állnak és sohasem merülnek ki, megújulnak. (Pl. tengervíz, szél, napsugárzás) Mivel a természetben előforduló energiahordozók kimerülőben vannak, már több évtizede intenzív kutatások folynak a megújuló energiaforrások villamos energiává való átalakítására. A kutatások arra is kiterjednek, hogy az energiahordozókból közvetlen villamos energiát állítsanak elő.

Az energiahordozók három csoportba sorolhatók:

1. Szilárd	2. Folyékony	3. Légnemű
Rádióaktív anyag(U_{235}) (Tőzeg) Lignit Barnaszén Kőszén Antracit	Kőolaj Folyó víz Pakura Gázolaj (Petróleum) Benzin (Kerozin)	Földgáz (PB-gáz) (Hidrogén) Gőz
Biomassza	Tengervíz Termálvíz	Biogáz Szél

Az előbbi csoportokba nem sorolható be a: Napenergia (Napsugárzás).
A zárójelben szereplő anyagokból villamosenergiát nem állítanak elő.

Villamosenergia-rendszer.

Egy ország villamosenergia-rendszerét a villamos energiát előállító erőművek, az ezekhez csatlakozó különböző feszültség szintű elosztó-hálózatok ill. villamos állomások, alállomások és az alállomásokra csatlakozó fogyasztók alkotják.

Nagy mennyiségű (GWh) villamos energiát villamos erőművekben állítanak elő. Alapvetően két típusa van: **Hőerőmű** és **Vízierőmű**. A villamos erőművek üzemeltethetők **alaperőműként** és **csúcserőműként**. Az alaperőművek állandóan üzemelnek, a csúcserőműveket azonban csak a terhelési csúcsok idején helyezik üzembe.

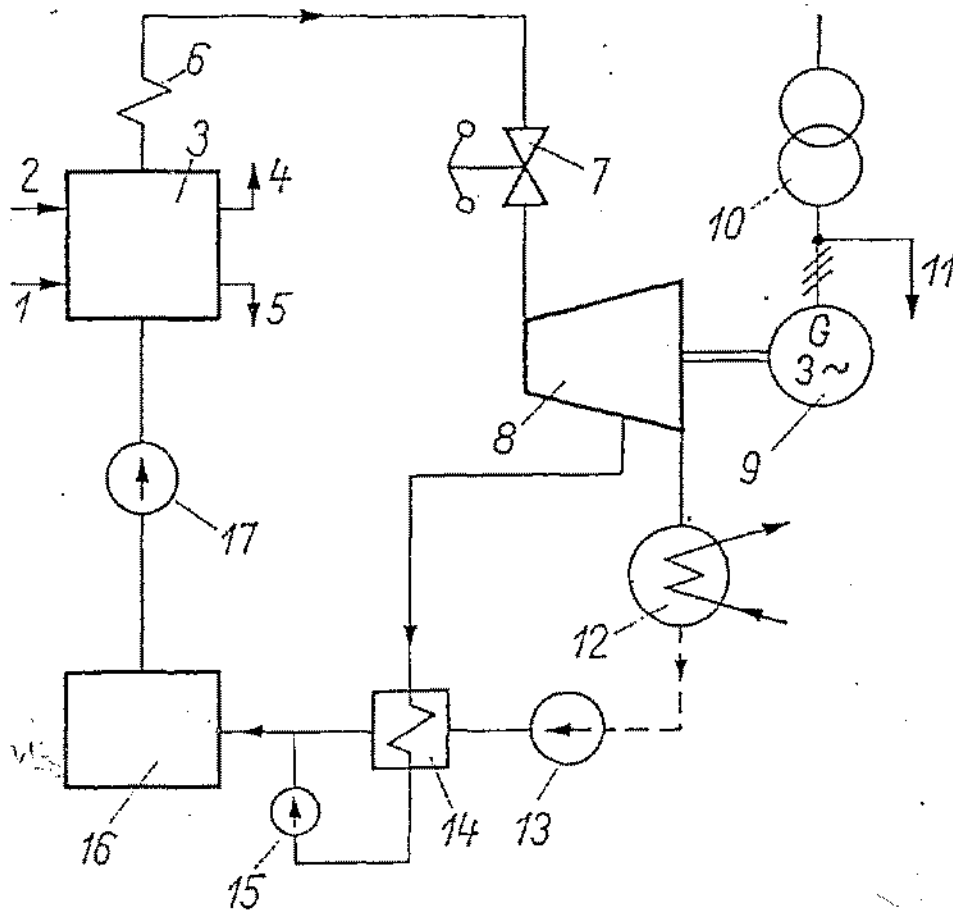
A felhasznált hajtóanyag ill. fűtőanyag alapján a hőerőművek tovább csoportosíthatók az alábbiak szerint:

1. Gőzturbinás (Fűtőanyag: szén, kőolaj, földgáz)
2. Gázturbinás (Fűtőanyag: gázolaj)
3. Dieselmotoros (Fűtőanyag: gázolaj)
4. Atomerőmű (Fűtőanyag: urán 235-ös izotópja)

A vízierőművekben különböző vízturbinák (Fransis, Kaplan, Pelton) kerülnek alkalmazásra. Külön csoportosításuk nem szokásos.

Alaperőműként a gőzturbinás, az atomerőmű és a vízierőmű üzemel, a gázturbinás és a Dieselmotoros erőműveket csak csúcserőműként használják.

A villamosenergiát az erőművekben váltakozó áramú, háromfázisú szinkron generátorokkal állítják elő.



1. ábra. Gőzerőmű hősémája.

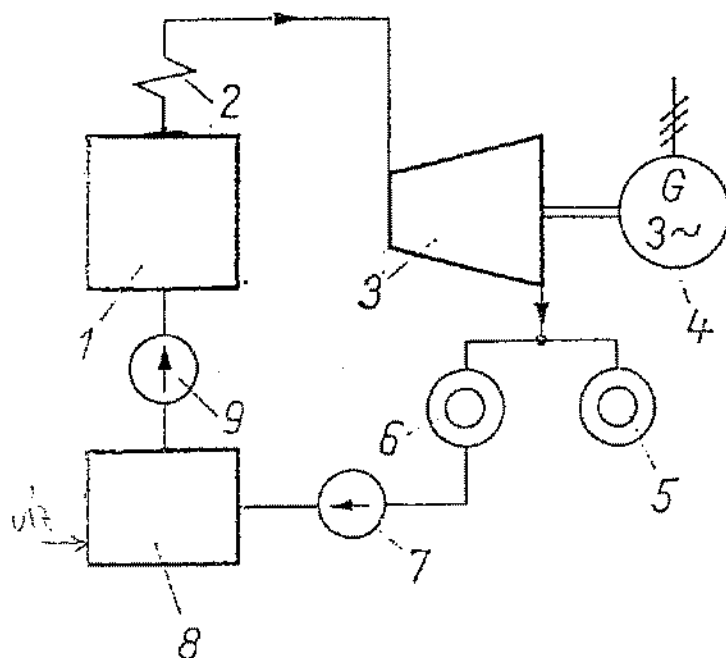
1 - tüzelőanyag; 2 - levegő; 3 - kazán; 4 - füstgáz; 5 - salak és hamu; 6 - túlhevítő; 7 - fordulatszám-szabályozó és elzáró; 8 - turbina; 9 - generátor; 10 - transzformátor; 11 - leágazás a segédüzemek részére; 12 - kondenzátor; 13 - átemelő szivattyú; 14 - tápvíz-előmelegítő; 15 - tápszivattyú; 16 - tápvíztartály; 17 - tápszivattyú.

A kazánban(3) szenet, fűtőolajat vagy földgázt (1) égetnek el, amelynek hője a kazán csővezetékeiben áramló vizet felmelegíti és a távozó gőzt egy túlhevítőn(6) átvezetve nagynyomású és nagy-hőmérsékletű gőzzé alakítják. Ezzel a gőzzel hajtják a gőzturbinát(8), amely a szinkron generátorral(9) van tengelykapcsolatban. A beáramló gőzt egy fordulatszám-szabályozó szelep(7) szabályozza olymódon, hogy a szelep pörgettyűje a turbina tengelyével van összekötve. Ha a turbina fordulatszáma csökken, akkor nyitja a szelepet, ha a fordulatszám nő, akkor zárja. Így biztosítható a turbina állandó fordulatszáma. A turbínából távozó gőzt egy vízzel hűtött kondenzátorban(12) vízzé alakítják és egy átemelő szivattyúval(13) egy tápvíz-előmelegítőn(14) keresztül visszajuttatják a tápvíztartályba(16). Az előmelegítést a turbínából megcsapolt gőzzel végzik.

A kazánból távozó füstgáz nagy mennyiségű széndioxidot tartalmaz, és a levegő nedvesség tartalmával keveredve savas esőt idézhet elő, amely környezetvédelmi szempontból kedvezőtlen. A füstgáz megfelelő kezeléséről gondoskodni kell, hogy a környezet szennyezése elkerülhető legyen.

A turbinából távozó gőz vagy kondenzvíz fűtésre még felhasználható.

A fogyasztók egy része az elhasználadott (lecsökkent hőértékű) vizet visszaszolgáltatja a rendszerbe(6), másik része azonban elvész. A tápvíz tartályba(16, 8) tehát a vizet pótolni kell. Mivel a fogyasztók rendszerében is van nyomás, így a turbina kimenő oldalán ellennyomás alakul ki. Egy ilyen ellennyomású erőmű hősémája látható a 2. ábrán.



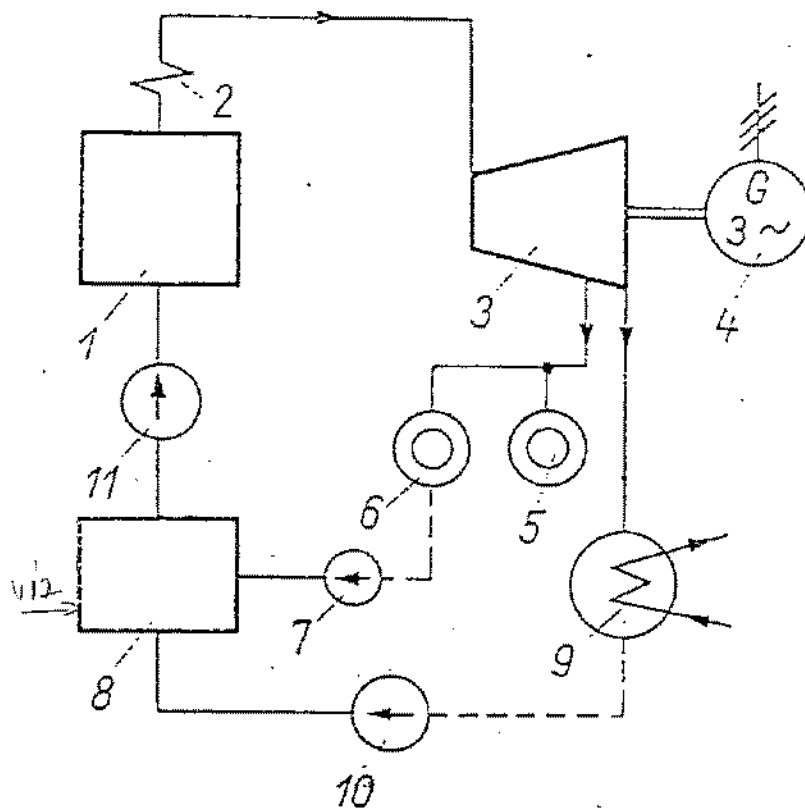
2. ábra. Ellennyomású erőmű hősémája.

1 - kazán; 2 - túlhevítő; 3 - turbina; 4 - generátor; 5 - a kondenzvizet felhasználó fogyasztó; 6 - a kondenzvizet visszaszolgáltató fogyasztó; 7 - átemelő szivattyú; 8 - tápvíz tartály; 9 - tápvíz szivattyú.

Ha az ipari üzemben gőzre van szükség, akkor a turbinát megcsapolják és a szükséges mennyiséget innen nyerik. Egy ilyen elvételes erőműre mutat példát a 3. ábra.

A hőerőművek folyamatosan üzemelnek, tehát alaperőműként ezeket használják. Hatásfokuk 30 % körül van, de a technika fejlődésével javul. A villamosenergia-igény egyenlőtlenül jelentkezik, egy délelőtti csúcs (9-12 óra között), valamint egy délutáni (18-21 óra között).

Ezekben az időszakokban szükség lehet többlet villamosenergiára. A jelentkező igények kielégítése céljából csúcserőműveket helyeznek üzembe. Csúcserőműként csak olyan erőművek jöhetnek számításba, amelyek gyorsan üzembehelyezhetők és ha már nincs rájuk szükség, gyorsan le is állíthatók. Erre a célra alkalmazhatók a Diesel-motoros és a gázturbinás erőművek. A Diesel-motoros meghajtású szinkron generátor előnyösen ott alkalmazható, ahol villamosenergia nem áll rendelkezésre a közelben.

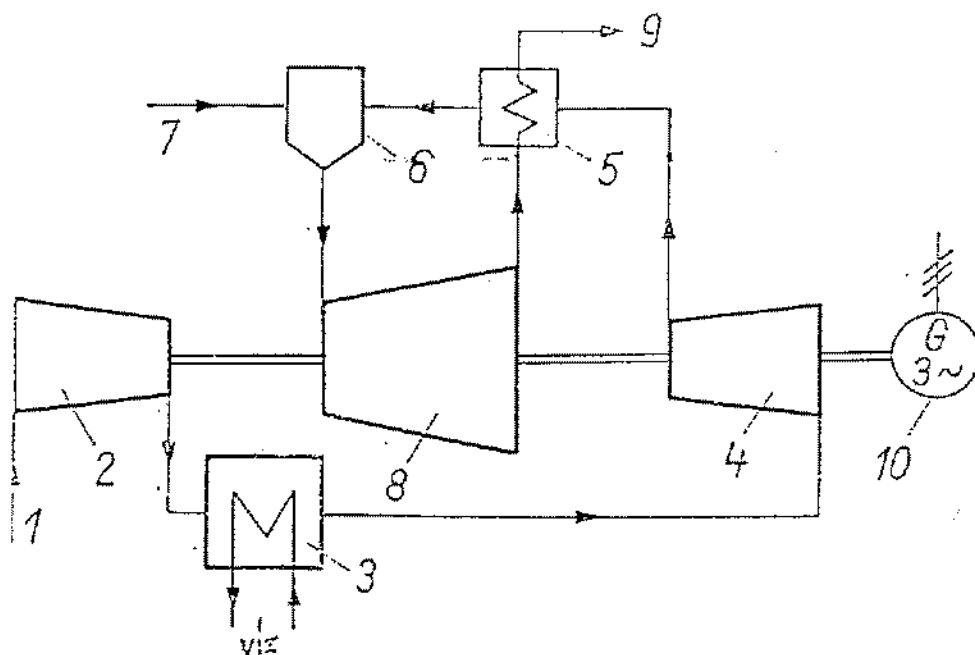


3. Ipari elvételes erőmű hősémája.

1 - kazán; 2 - túlhevítő; 3 - turbina; 4 - generátor; 5 - a kondenzvizet felhasználó fogyasztó; 6 - a kondenzvizet visszaszolgáltató fogyasztó; 7 - átemelő szivattyú; 8 - tápvíz-tartály; 9 - kondenzátor; 10 - átemelő szivattyú.

A Diesel-motorral hajtott szinkron generátor tulajdonképpen nem is erőmű, csupán egy villamosenergiát termelő egység. A gázturbinás erőműveket kizárólag csúcserőműként üzemeltetik viszonylag rossz hatásfokuk miatt. A gázturbinás erőműre mutat példát a 4. ábra.

Az égéshez felhasznált levegőt kétfokozatú kompresszorral(2, 4) állítják elő. A fokozatok között a felmelegedett levegőt vissza kell hűteni, amelyre egy hőcserő(3) szolgál. A visszahűtést általában vízzel végzik. A nagynyomású levegőt felmelegítve(5) juttatják az égéskamrába(6), ahol a bevezetett gáz-olajjal(7) keveredve elég és a keletkezett gázt a gázturbinába(8) vezetik. A levegő előmelegítésére(5) a távozó füstgázt(9) használják fel. A gázturbina hajtja a kompresszorokat és a szinkron generátort is.



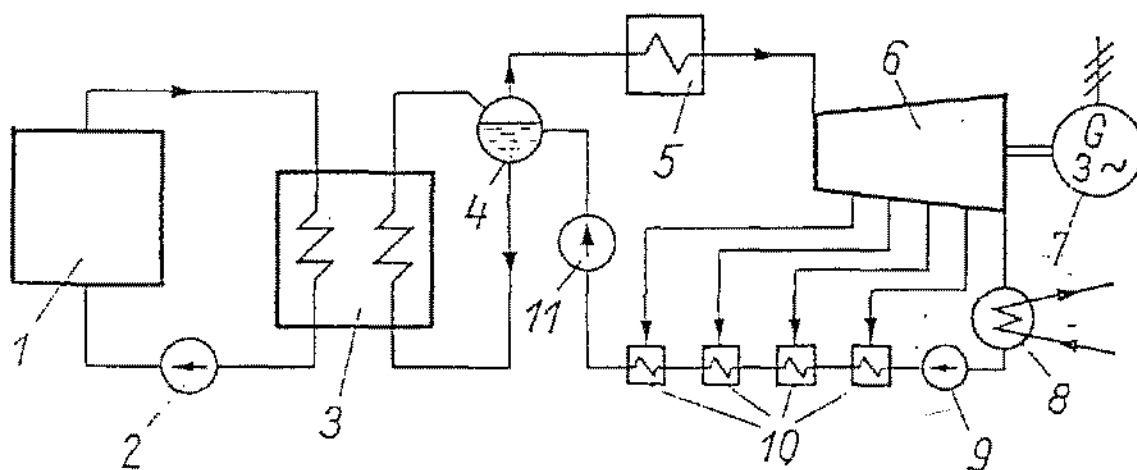
4. ábra. Gázturbinás erőmű hősémája.

1 - levegő; 2 - a kompresszor első fokozata; 3 - levegőhűtő; 4 - a kompresszor második fokozata; 5 - füstgáz-levegő hőcserélő; 6 - égéskamra; 7 - gázolaj; 8 - gázturbina; 9 - távozó füstgáz; 10 - generátor.

Alaperőműként üzemelő másik hőerőmű fajta az atomerőmű. Ez is tulajdonképpen egy gőzturbinás erőmű, csupán a gőz előállítása egy atomreaktorban termelt hővel valósul meg. Az atomerőmű hősémája az 5. ábrán látható. Magyarországon Pakson működik atomerőmű.

Az atomreaktornak(1) két típusa lehetséges: a fúziós és a hasadási. A fúziós reaktorokban atomokat egyesítenek, amíg a hasadási reaktorban radioaktív sugárzás folytán atommaghasadás jön létre. A maghasadás következtében új anyagok keletkeznek. Mindkét folyamat nagy hőmérséklettel jár, amit gőz előállítására használnak fel. Európában csak hasadási atomreaktorok működnek, amelyek fűtőanyaga a dúsított urán 235-ös izotópjá. Az urán radioaktív anyag,

amely a környezetre veszélyes rádióaktív sugárzást bocsát ki. A kritikus mennyiség fölött láncreakció indul be, amely jelentős hőfejlődéssel jár és az urán plutóniummá alakul. A plutónium maga is rádióaktív és tovább bomlik. A keletkezett anyagok felezési ideje különböző. Az anyagok bomlása addig folytatódik, amíg a végén ólom keletkezik, amelyik már nem rádióaktív. A plutónium már nem alkalmas fűtőanyagnak. Ilyenkor azt mondjuk, hogy a reaktor kiégett, fűtőanyaggal kell újratölteni. A kiégett uránt gondosan kell valahol tárolni, mert még rádióaktív sugárzó anyagokat tartalmaz. Végleges megsemmisítése ma még nem lehetséges. Kanadában intenzív kísérletek folynak a keletkezett plutónium tüzelőanyagként való újrahasznosítására. Dúsított uránnal keverik és így ismét felhasználható tüzelőanyagot nyernek. Az új termék neve: mox.



5. ábra. Atomerőmű hősémája.

1 - atomreaktor; 2 - cirkulációs szivattyú; 3 - hőcserélő; 4 - gőztartály; 5 - túl-hevítő; 6 - gőzturbina; 7 - generátor; 8 - kondenzátor; 9 - átemelő szivattyú; 10 - előmelegítők; 11 - tápszivattyú.

Az atomreaktor(1) egy hengeres vasbetonból készült és a rádióaktív sugárzás miatt megfelelően védett "tartály". A betét henger alakú furatokkal ellátott test, amelybe a tüzelőanyagként használt uránt elhelyezik. A furatokba grafit rudak vannak, amelyekkel a láncreakció sebességét lehet szabályozni, ill. a reaktort le lehet állítani. A reaktorban keletkező hőmennyiséget a cirkulációs szivattyúval(2) keringésben tartott nagy mennyiségű víz veszi át, amely a hőcserélőben(3) egy másik, ugyancsak keringésben lévő víznek adja át. Ebből a vízből a gőztartályban(4) telített gőz keletkezik, amely túlhevítés(5) után a gőzturbinába(6) kerül. A gőzturbina fáradt gőzét a kondenzátorban(8) lecsapatják, és a kondenzvizet az átemelő szivattyú(9) juttatja vissza előmelegítőkön(10) keresztül a gőztartályba(4).

A túlhevítést a turbina különböző hőmérsékletű gőzével végzik, amit a turbinán kialakított megcsapolásokból nyernek.

A nagyteljesítményű vízerőművek is alaperőműként üzemelnek. Hazánkban a folyók duzzasztásából adódó víz helyzeti energiáját kihasználó vízerőművek üzemelnek. Legjelentősebbek a tiszalöki és a kiskörei vízerőművek.

A vízerőműveket nem szokás csoportosítani, mivel ezek csak az alkalmazott vízturbina típusaiban (Francis, Kaplan, Pelton) különböznek.

Földünkön az energiahordozók korlátozott mennyiségben állnak rendelkezésre, ezért intenzív kutatások folynak világszerte a megújuló energiaforrások villamos energiává való átalakítására. Nagyobb mennyiségű villamos energia szélerőművekkel állítható elő, ahol erre megfelelő környezeti adottságok vannak (tengerpart, hegyoldalak). Kis mennyiségű villamos energia a Nap sugárzási energiájából, biomasszából, biogázból, termálvízből is előállítható.

A villamos energia szállítása.

A megtermelt villamosenergiát a fogyasztási helyre vagy annak közelébe kell szállítani. Mivel az átvitendő teljesítmény a megtermeltével azonos, ezért a szállítást a lehető legnagyobb feszültségen kell végezni, mert ilyenkor az áram a legkisebb lesz. A vezetőn folyó áram a vezetékot melegíti (Joule-hő), vagyis villamos veszteség keletkezik. Ezt a veszteséget a lehető legkisebbre kell csökkenteni.

A villamosenergiát erőművekben termelik szinkron generátorokkal, általában 10 kV-os névleges feszültségen. Ezt a feszültséget feltranszformálják 120 kV-os vagy 400 kV-os feszültség szintre és távvezetéseken szállítják a fogyasztási hely közelébe. Itt villamos állomásokon letranszformálják a továbbszállítás feszültség szintjére (középfeszültség), majd alállomásokon a fogyasztó feszültség szintjére (kisfeszültség). Ezek alkotják a villamos elosztóhálózatot.

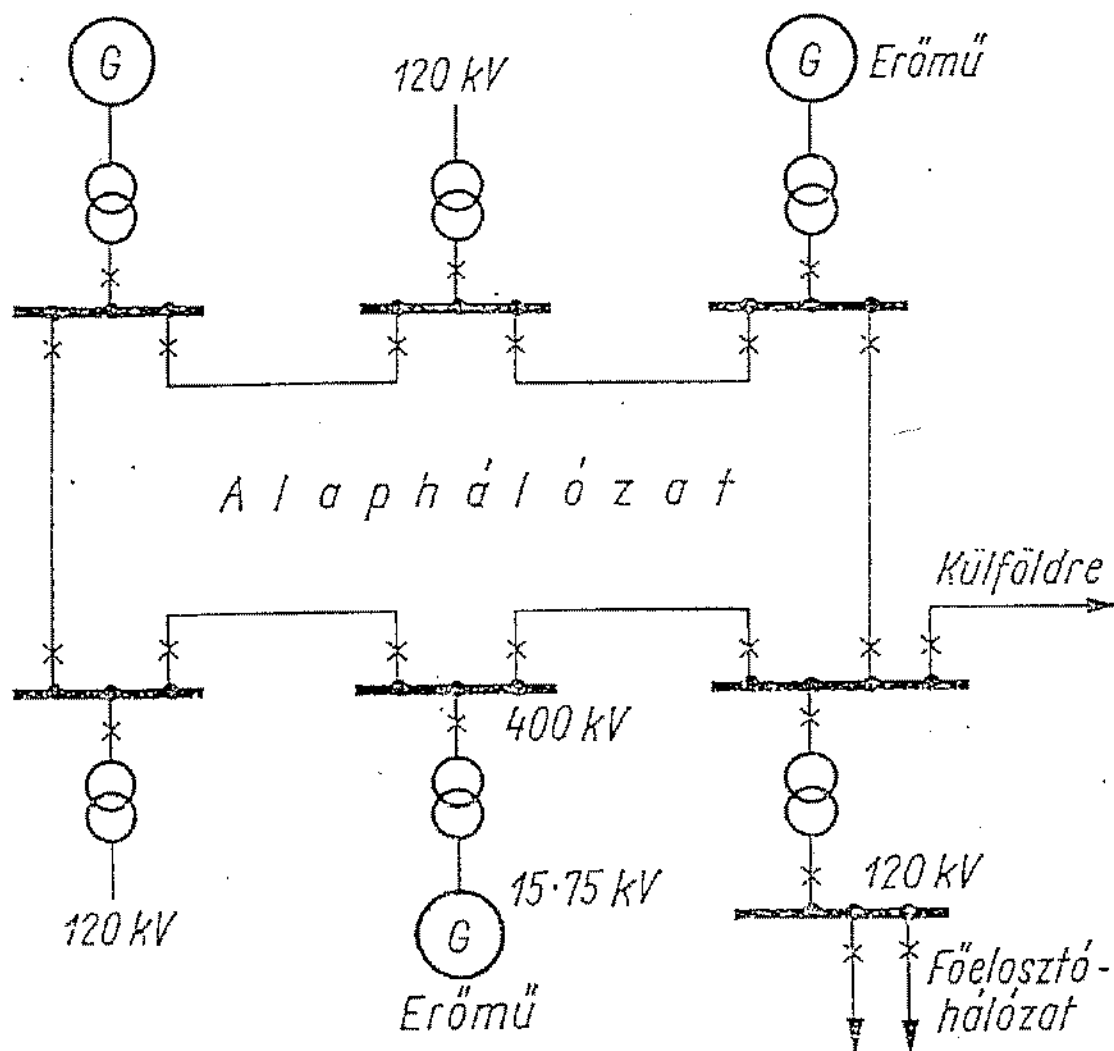
Az erősáramú technikában használatos feszültség szintek:

1. Nagyfeszültség a 100 kV-nál nagyobb feszültség.
2. Középfeszültség 1-100 kV közötti feszültség.
3. Kisfeszültség az 1000 V alatti feszültség.

Magyarországon a nagy- és kisfeszültségű rendszerek közvetlen földeltek, amíg a középfeszültségű rendszer szigetelt vagy a földzárlat jelzés céljából nagy impedancián keresztül (ellenállás vagy reaktancia) földelt.

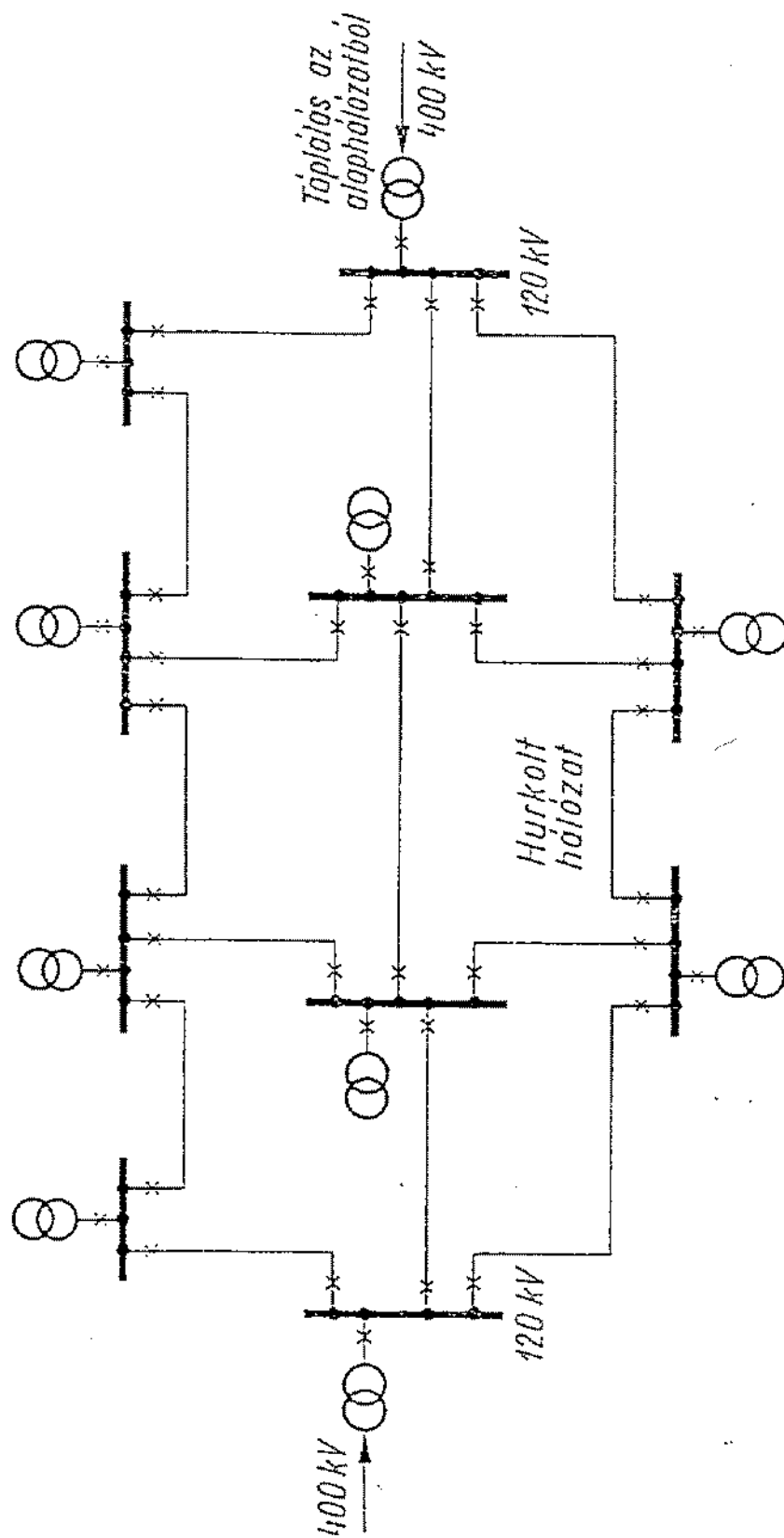
Hálózati rendszerek.

Alaphálózat az a hálózat, amelyre az alaperőművek és a nemzetközi kooperációs távvezetékek csatlakoznak és biztosítják a főelosztóhálózat villamosenergia-ellátását. Magyarországon az alaphálózat névleges feszültsége 400 kV. (A névleges feszültség a fázisvezetők között mérhető [volali] feszültség.) Ehhez a hálózathoz tartozik egy 750 kV-os távvezeték is, amely Albertirsa és Vinyica (Ukrajna) között létesült. Az alaphálózat részét képezi néhány 220 kV-os távvezeték is. Az alaphálózat egy körvezeték, amelyre az alaperőművek és a nemzetközi összeköttetések csatlakoznak a 6. ábra szerint.



6. ábra. Alaphálózat.

Az országos főelosztó-hálózat névleges feszültsége 120 kV. Ezen a feszültségszinten látják el az Áramszolgáltatók a nagy teljesítménnyel üzelő fogyasztókat (iparvállalatok, nagyvárosok, régiók).



7. ábra. Húrkolt hálózat

A hálózat kialakítása hurkolt, ami azt jelenti, hogy az egyes villamos állomások egymással többoldaluan vannak összekötve. A hálózat kialakítását a 7. ábra mutatja. Ezzel a megoldással biztosítható a nagyfogyasztók biztonságos energiaellátása, hiszen egy-egy állomás több betáplálással rendelkezik, így a villamosenergia folyamatosan rendelkezésre áll.

Az országos főelosztó-hálózatra közép feszültségű állomások (35 kV, 20 kV, 10 kV) csatlakoznak, amelyek a kisebb teljesítménnyel üzemelő fogyasztókat (kisüzemek, mezőgazdasági ágazatok, városok, falvak) látják el villamosenergiával. A közép feszültségű állomásokból fővezeték-rendszer továbbítja a villamosenergiát a kisfogyasztókhoz. Az energiaellátás különböző hálózatokon keresztül történik, amelyek kialakítása lehet körhálózat, gyűrűshálózat, sugaras hálózat, célvezeték. A fővezeték-rendszer kialakítására mutat példát a 8. ábra. Ezekre a hálózatokra csatlakoznak azok az alállomások, amelyek a kisfogyasztókat látják el villamos energiával. Hazánkban a kisfogyasztói elosztóhálózat névleges feszültsége 0,4 kV. Egyfázisú fogyasztóknál (háztartások) 230 V. Az ipari fogyasztók üzemének villamosenergia-ellátását a vállalaton belül telepített villamos alállomások biztosítják. Ezek általában közép feszültségre készülnek és a környezetükben működő üzemeket látják el villamos energiával.

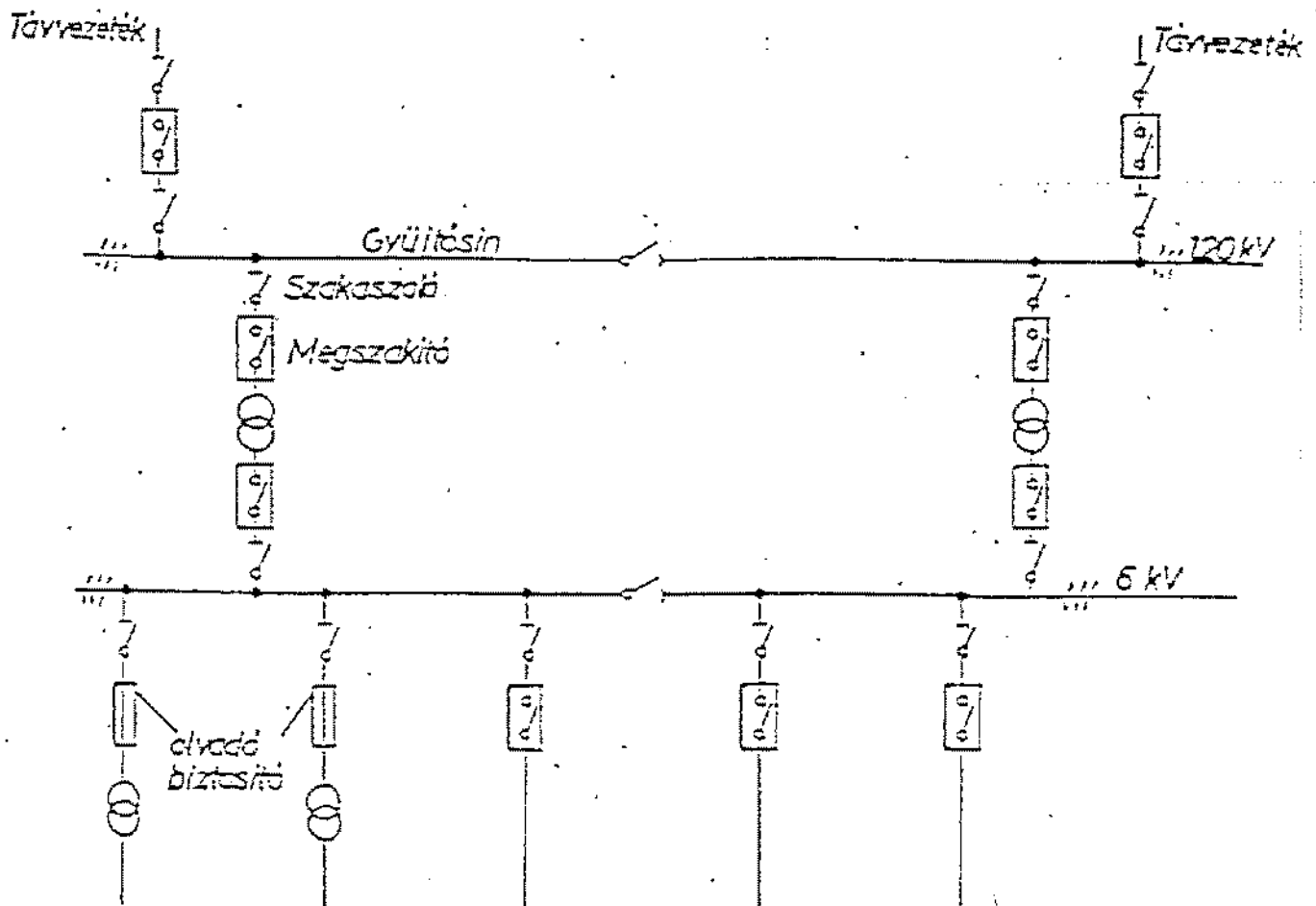
A villamosenergia-ellátás készülékei.

A 8. ábrán látható egy ipari nagyüzem villamosenergia fogadó-állomásának egyvonalas kapcsolási rajza a fontosabb kapcsolóelemek feltüntetésével. Ipari üzemekben a korábban említett közép feszültségeken kívül 6 kV-os és 3 kV-os feszültségszintek is megtalálhatók.

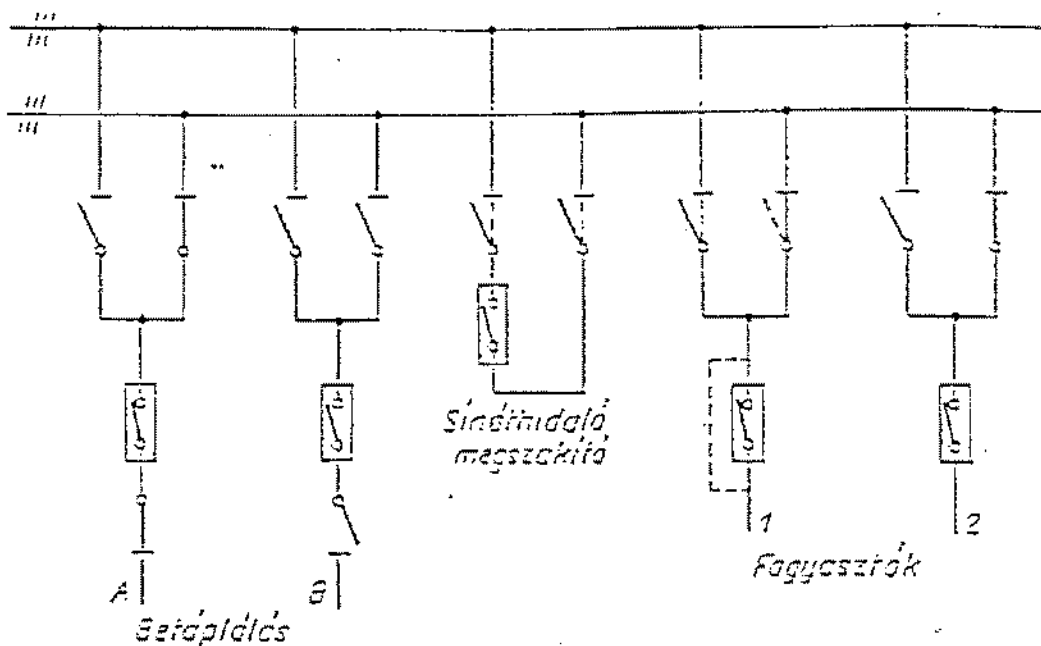
Olyan üzemben, ahol folyamatosan működő berendezések vannak, a villamosenergia kiesése jelentős anyagi kárt okozna, ezért ezek energiaellátását is folyamatosan kell biztosítani. Ez kettős gyűjtősin alkalmazásával megvalósítható. Erre mutat példát a 9. ábra. Ilyen esetben mindig beépítenek egy sín-áthidalót is, hogy a fogyasztók ne maradjanak villamosenergia nélkül az egyik ellátórendszer esetleges meghibásodása esetén sem.

Ezzel a megoldással az is megvalósítható, hogy ha az egyik fontos fogyasztó főkapcsolója (megszakítója) meghibásodik, akkor ez kiváltható a sínáthidaló megszakítójával. (A 9. ábrán az "1" jelű megszakító.) Ebben az esetben a többi fogyasztót a másik gyűjtősinről kell ellátni. Kettős gyűjtősin alkalmazása esetén kettős betáplálást kell megvalósítani (a 10. ábrán A és B jelű betáplálás).

Kiseb jelentőségű fogyasztókat egyes gyűjtősinről táplálják be, mert a kettős gyűjtősin megvalósítása jelentős többletkiadással járna.



8. ábra. Ipari nagyüzem villamos alállomásának egyvonalas kapcsolási rajza, osztott egyes gyűjtősínes megoldással.



9. ábra. Kettős gyűjtősín egyvonalas kapcsolási rajza.

A gyűjtősínek több áramkör közös vezetékszakaszai, amelyek a betápláló és leágazó (fogyasztó) vezetékeket kötik össze. A gyűjtősínek általában szigeteltlen réz vagy alumínium rudak, amelyek keresztmetszete kör, négyszög, L vagy U alakú. Szabadtéri berendezéseknél réz vagy aludur sodronyokat alkalmaznak. Az energiaellátás biztonsága miatt gyakran osztott kivitelben (lásd 8. ábra) készítik. Belsőtéri alállomásokban szigetelőkre erősítve szerelik fel és az egyes fázisokat szabvány szerint színezik (L1: zöld, L2: sárga, L3: piros). A gyűjtősíneket melegeedésre és a zárlatok esetén fellépő dinamikus erőkre méretezni kell. A gyűjtősínek erősségét azok háromfázisú, szimmetrikus zárlati teljesítményével (MVA) jellemzik.

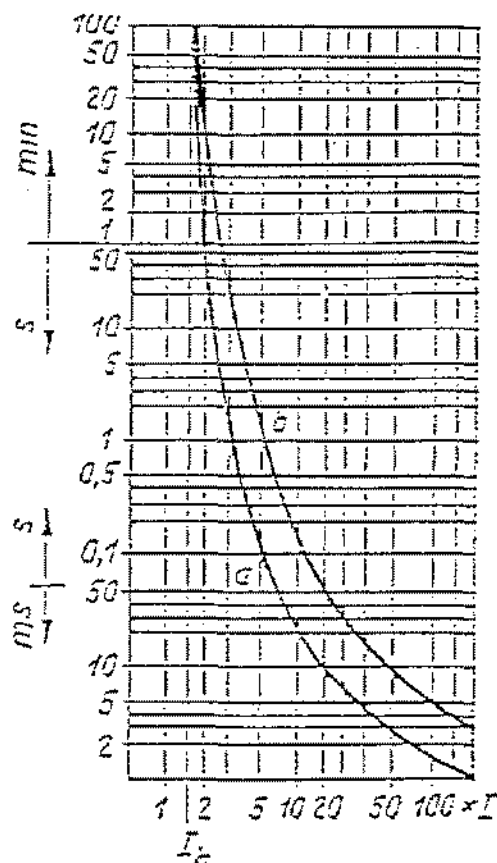
A szakaszoló olyan kapcsolókészülék, amelyet terhelés alatt (ha rajta áram folyik) működtetni nem szabad, mert nincs ellátva ívöltő berendezéssel. Feladata az áram útjának kijelölése és az egyes vezetékszakaszoknak, leágazásoknak, készülékeknek vagy gépeknek a hálózatról való szemmel látható leválasztása (feszültségmentesítés). A szakaszolók jellemző értékei: névleges feszültség és áram. A névleges feszültség annak a hálózatnak a névleges feszültségével egyezik meg, amelyben a szakaszolót alkalmazzák; névleges árama pedig az az áramerősség, amely a szakaszolón tartósan átfolyhat túlmelegedés nélkül.

A megszakító vagy teljesítménykapcsoló olyan kapcsolókészülék, amely el van látva ívöltő berendezéssel, ezért még zárlati áram megszakítására is alkalmas. Ez tulajdonképpen az egyes villamos berendezések, leágazások főkapcsolója. A kiépített védelmi rendszer is ezt a kapcsolót működteti. Jellemzői: névleges feszültség és áram, megszakítóképesség(kA) és zárlati teljesítmény.

A névleges feszültség annak a hálózatnak a névleges feszültségével egyezik meg, amelyben a megszakítót alkalmazzák; névleges árama pedig az az áramerősség, amely a megszakítón tartósan átfolyhat túlmelegedés nélkül. Megszakító-képesség az a legnagyobb áramerősség(kA), amelyet a teljesítmény-kapcsoló megszakítani képes. Ha a zárlati áram ennél nagyobb, a megszakító felrobban. A zárlati teljesítmény a névleges feszültség és a megszakítóképesség szorzata. A zárlati teljesítmény MVA nagyságrendű. Zárlat esetén a névlegestől kisebb feszültség lép fel, ezért a megszakító ezt a teljesítményt biztonságosan meg tudja szakítani. A jellemző értékeket általában a teljesítménykapcsoló típus jelzésében is feltüntetik.

A kontaktorok vagy egyszerűen csak kapcsolók olyan kapcsolókészülékek, amelyek üzemszerű terhelés ki- és bekapcsolására alkalmasak, de zárlati áramot nem képesek megszakítani.

Az olvadóbiztosítók az áramkör olyan könnyen cserélhető vezető részei, amelyek túláram okozta hő hatására kiolvadnak és megszakítják az áramkört. Az olvadóbiztosítónak három fő alkatrésze van:



10. ábra. Gyors a) és lomha b) kiolvadású biztosító jelleggörbéje.

Az olvadószál, amely ezüst, réz, ólom, wolfram vagy ezek ötvözetéből készül; a burkolat, amely az olvadószálat veszi körül és üres vagy olyan töltetet tartalmaz, amely az ív kioltását elősegíti; az aljzat, amely az áramkörrel létesít fémes kapcsolatot és biztosítja a könnyű cserélhetőséget. A biztosítókat névleges áramuk, határáramuk, kiolvadási jelleggörbéjük és megszakítóképesességük jellemzi. Nagyfeszültségű hálózaton nem használnak biztosítókat. Középfeszültségű hálózatokon az oltócsöves biztosítókat alkalmazzák. A középfeszültségű biztosítók zárt, hengeres kivitelűek és gyakran a szakaszolókkal összeépítve kerülnek megvalósításra. Kisfeszültségen lehetnek normál (DO típusú) és lomha (NOL típusú) kiolvadásúak. Működési önidejük kb. 0,3-0,5 s, a lomha biztosítóké kb. 1 s. Vannak gyors és szupergyors biztosítók is, ezeket félvezetők és hálózatok védelmére használják. Működési önidejük kisebb, mint 0,2 s. A biztosító névleges árama az az áram, amelyre a biztosító készül és amely üzemszerűen, tartósan átfolyhat rajta. Határáram az, amellyel a biztosító még terhelhető anélkül, hogy hosszabb idő alatt is kiolvadna (2 órán túl olvad ki). Ez a névleges áram kb 1,1-1,5 szöröse. A megszakítóképeség az a kA-ben kifejezett áram, amelyet a biztosító még képes megszakítani anélkül, hogy szétrobbanna.

Zárlatkorlátozó fojtótekerics kerül beépítésre olyan alállomásokban, ahol szükség van a kialakuló zárlati áramok csökkentésére (fojtására). A fojtótekerics a gyűjtősínekbe, leágazásokba sorosan kell bekötni.

Túlfeszültség-levezetőket alkalmaznak az állomásba becsatlakozó távvezetéseknél annak érdekében, hogy a távvezetéken elsősorban villámcsapásból eredő lökőhullámokat a földbe vezessék és megakadályozzák, hogy annak jelentősebb része a berendezésekre kerüljön veszélyeztetve azok működését. Ezek szikraközökből és feszültségfüggő ellenállások soros kapcsolásából kerülnek kialakításra, amelyek egy porcelán szigetelőbe vannak elhelyezve.

Védelmi relét alkalmaznak a hálózatokon és a berendezésekben fellépő hibák jelzésére ill. lekapcsolásra. A relék nyitó érintkezője a főkapcsoló működtető áramkörébe van kötve, amely hiba esetén bontja az áramkört és a főkapcsoló lekapcsolja a hibás berendezést vagy hálózatot. A védelmi relék mechanikus vagy elektronikus kivitelben készülnek. A leggyakrabban alkalmazott relé típusok a következők lehetnek:

Független késleltetésű túláram relé [I_L], zárlati áramok ellen véd. Ha a kialakuló zárlati áram a beállított értéknél nagyobb, a relé az áramtól független idő múlva működik.

Áramtól függő késleltetésű túláram relé [I/t], szintén zárlati áramok ellen véd, de működési ideje függ a kialakuló zárlati áram nagyságától. Nagyobb áramra rövidebb, amíg kisebb áramra hosszabb idő múlva működik.

Túlterhelés (hő)védelem [I^2] kerül kiépítésre a berendezések tartós túlterhelésének megakadályozása érdekében.

Feszültség csökkenési relé [U] alkalmaznak olyan berendezések esetén, ha azok feszültségre érzékenyek, vagy ha nem kapcsolhatók be a feszültség jelenléte nélkül.

Különbözeti védelmet [ΔI] építenek ki transzformátorok ill. generátorok menetzárlatának érzékelésére.

Impedancia védelem [Z] szolgál a hálózatok hibáinak jelzésére ill. lekapcsolására.

Frekvencia védelem [f] működik olyan esetben, ha a frekvencia a névleges érték alá csökkenne. Generátorok kicsatlakozásaihoz ill. kooperációs távvezetékek összeköttetéseihez építik be. Beállítása: 47 Hz.

Transzformátorok menetzárlatának védelmére még ma is használják a Buchholz-relét, amelyet a konzervátor összekötő csővezetékébe építenek be. Ez egy mechanikus relé, amely a felszálló olajgőzben elbillen és zár egy érintkezőt, amelynek hatására a transzformátor megszakítója kikapcsol.

Áram-védőkapcsolást (hibaáram-relé) használnak kisfeszültségű vagy közép-feszültségű fogyasztók földzárlatának kikapcsolására.

Hálózatok üzemi földelése.

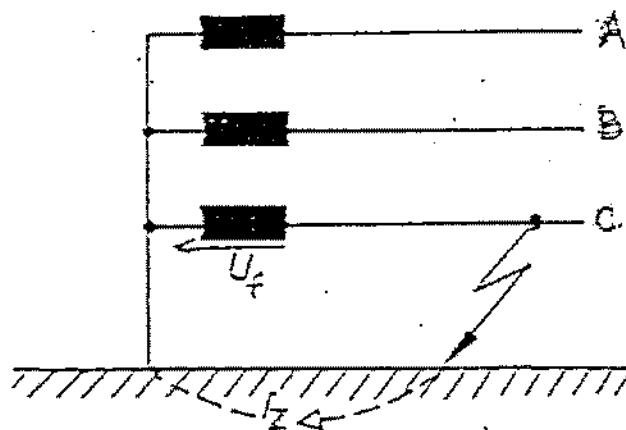
Magyarországon a nagy- és kisfeszültségű hálózatok közvetlen földeltek, a középfeszültségű hálózatok pedig szigeteltek, vagy nagy impedancián (ellenállás vagy induktivitás[Petersen-tekercs]) keresztül földeltek. Az üzemi földelés célja a csillagpont potenciáljának rögzítése.

Ha az egyik fázis földzárlatba kerül közvetlen földelt rendszerben (lásd a 11. ábrán a C fázis), akkor a fázisfeszültség a földön keresztül a csillagpont felé zárlati áramot (I_z) hajt, amelynek hatása igen romboló lehet, ezért olyan védelmet kell kialakítani, amely rövid időn belül lekapcsol.

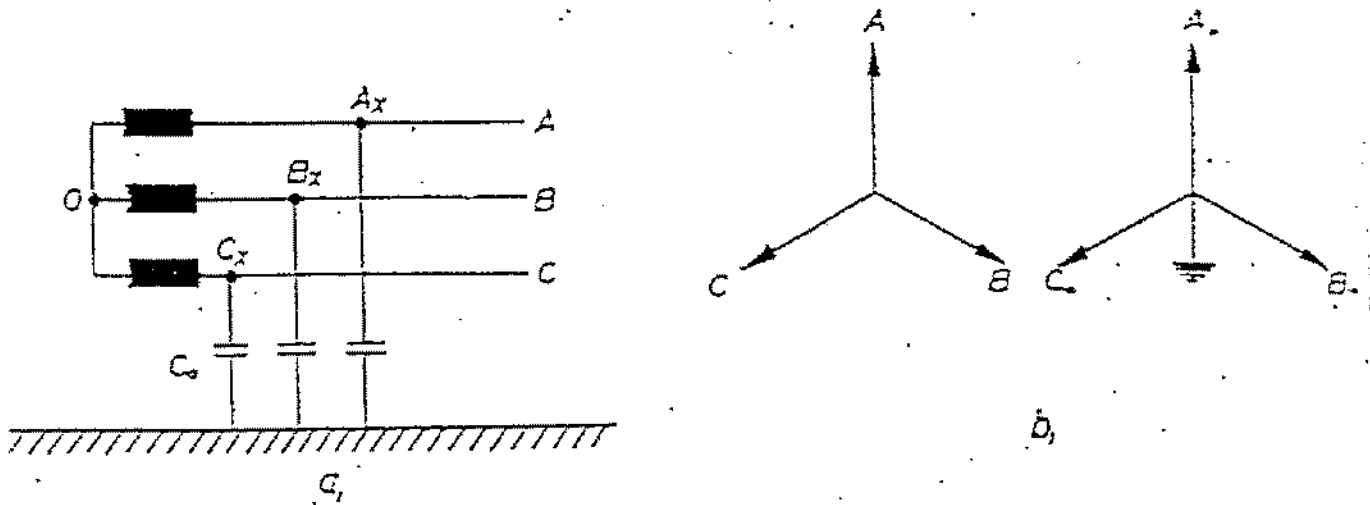
Földeletlen (szigetelt) rendszert ábrázol a 12. ábra. Nálunk a középfeszültségű hálózatok (35, 20, 10, 6 és 3 kV) ilyenek. A fázisvezető és a föld kondenzátort képez, amely egy C_0 kapacitással jellemezhető. Hibátlan esetben a rendszer és a kondenzátorok feszültsége szimmetrikus (12. b) ábra). Földzárlat esetén (13. ábra) a C fázis feszültsége a hibahelyen 0 V, a másik két fázis feszültsége vonali értékre emelkedik és I_f hibaáram alakul ki, amely az ép fázisok földkapacitásán keresztül záródik. Az áram nagysága a következő képlettel számítható:

$$I_f = 3 \cdot U_f \cdot \omega \cdot C_0$$

- ahol - U_f [V] a fázisfeszültség értéke,
- ω [s⁻¹] a hálózati körfrekvencia,
- C_0 [F] az ép fázisok földkapacitása.

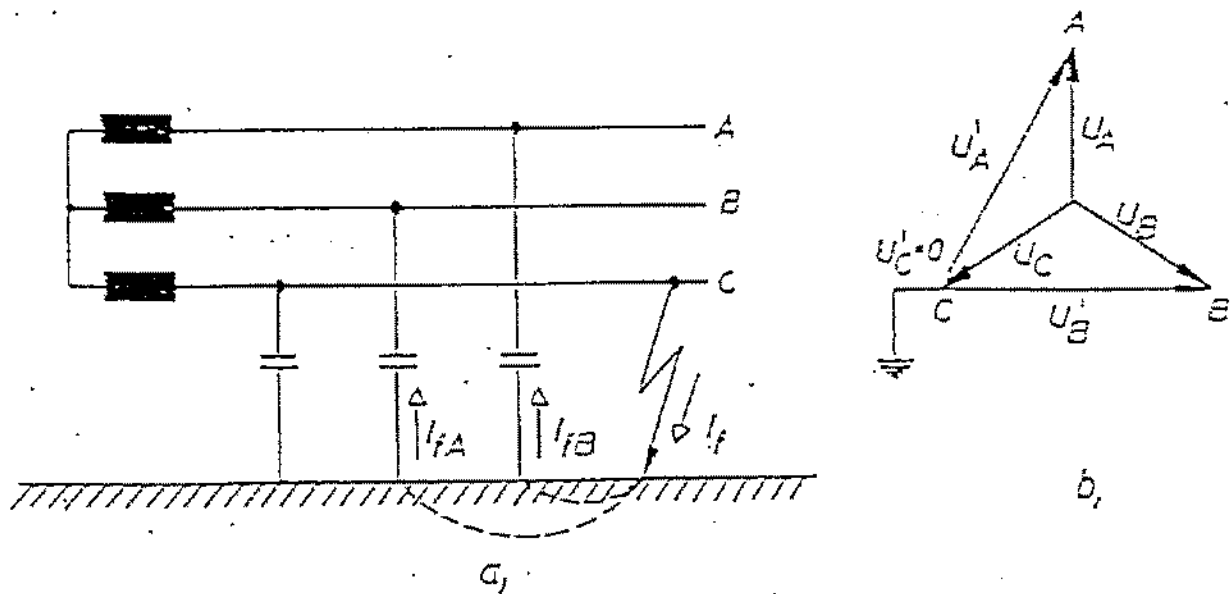


11. ábra. Közvetlen földelt háromfázisú rendszer.

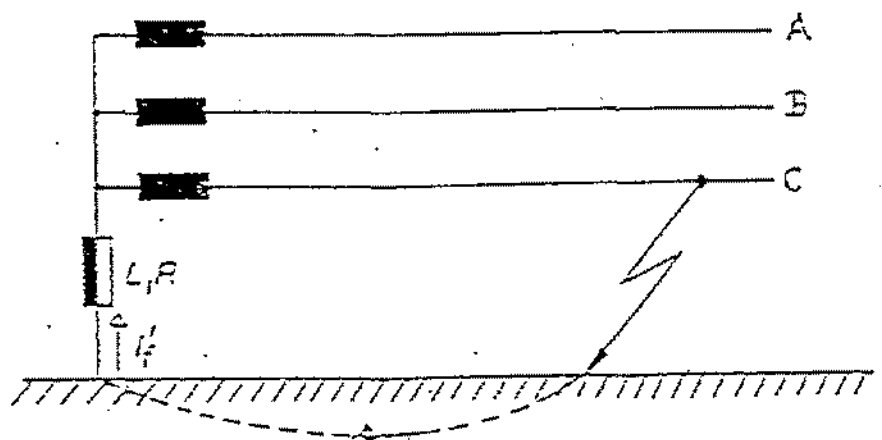


12. ábra. Földeletlen (szigetelt) rendszer hibátlan esetben.

A 14. ábra egy nagyértékű impedancián (ellenállás vagy induktivitás) keresztül (közvetve) földelt rendszert ábrázol. A közvetett földelés célja éppen a földzárlat jelzésére szolgál. A hibaáram ezen az impedancián feszültségesést hoz létre, amely a földzárlat jelzésére felhasználható. Az induktivitást (Petersen-tekercset) szabadvezetékek esetén alkalmazzák a távvezeték kapacitív áramának kompenzálása céljából. Egyébb esetben nagy értékű ellenállást (néhány száz ohm) használnak.



13. ábra. Földeletlen (szigetelt) rendszer földzárlat esetén.



14. ábra. Közvetve földelt hálózat.

Az egyes hálózatokon különféle zárlatfajták alakulhatnak ki: Háromfázisú szimmetrikus zárlat (3F) esetén a három fázis vezetője fémesen összeér. Ha a földdel is összeköttetésben van, akkor háromfázisú földzárlatról van szó (3FN). Fáziszárlat lép fel ha két fázis fémesen összeér (2F), ha a földdel is összeköttetésbe kerül, akkor kétfázisú földzárlat (2FN) alakul ki. Egyfázisú földzárlat (FN) jön létre, ha egy fázis a földdel kerül közvetlen kapcsolatba. Szigetelt hálózaton ennek a földzárlatnak a jele: (Ff). Ha ezen a hálózaton két fázis és a föld is kapcsolatba kerül, akkor kétfázisú földzárlat alakul ki (2Ff).

A villamos energia felhasználása (Fogyasztók).

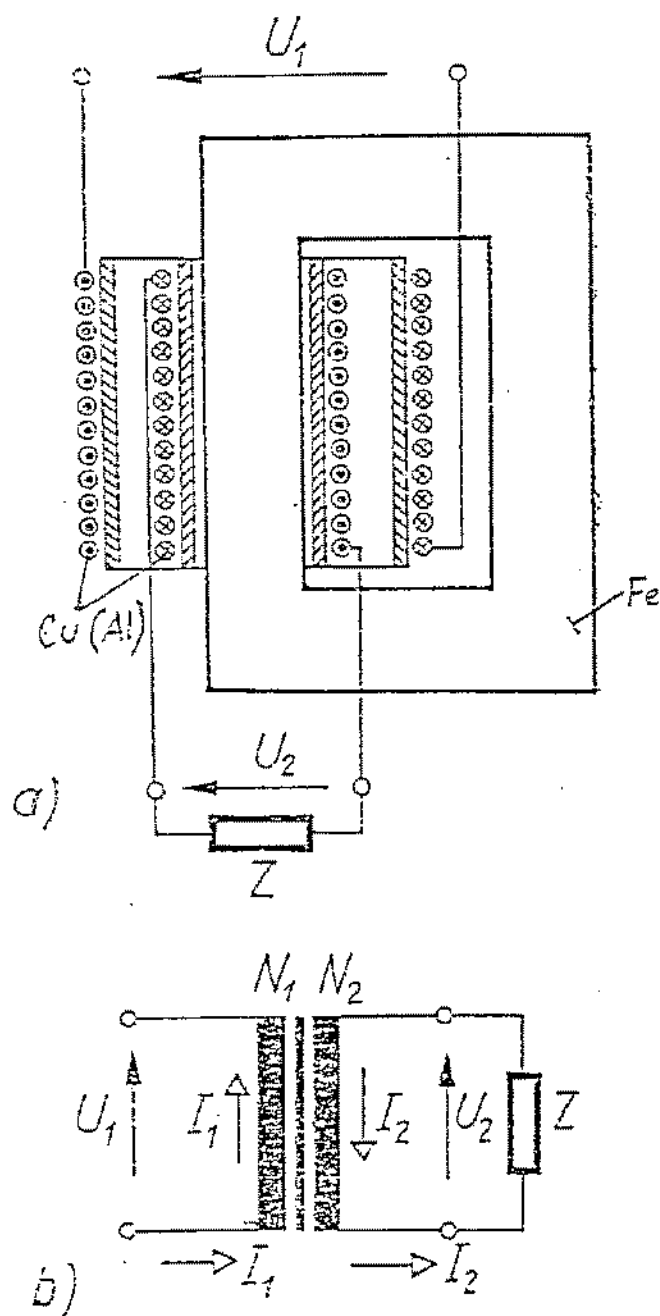
A villamosenergia felhasználása rendkívül sokrétű. Döntő többségét energiaátalakítókban használják fel. Ezek a villamos energiát valamilyen más fajta energiává (mechanikai, kémiai, hő, fény) alakítják át. A legjelentősebb energiaátalakítók a villamos gépek.

Transzformátorok.

A transzformátor olyan villamosenergia-átalakító, amely villamos energiát más jellemzőkkel rendelkező villamos energiává alakít át. Ezek a jellemzők: a feszültség, az áram, az impedancia, a frekvencia.

Azok a transzformátorok, amelyek a villamosenergiát feltranszformálják a szállítás feszültség-szintjére, ill. letranszformálják a fogyasztók feszültség-szintjére azok az erőátviteli transzformátorok. Vannak különleges transzformátorok is (takarékkapcsolású, mérőváltók, frekvenciaváltó, hegesztő, ívkemenőce, egyenirányítók tápláló, illesztő). A transzformátor szerkezetileg egy zárt, lemezezt vasmagból és azon legalább két egymásra helyezett tekercsből áll. A vasmag szilícium

ötvöztetésű lágyvas (dinamó lemez), a tekercsek általában rézből, ritkábban alumíniumból készülnek. A villamos gépek azon szerkezeti részeit, amelyekben vasvesztés (örvényáramú és hiszterézis) keletkezik, lemezelve készülnek a vasvesztés csökkentése érdekében. A szilícium ötvöztetés növeli a vas fajlagos ellenállását, a lemezelés növeli az örvényáramú pályák ellenállását. A vasvesztést a vasban jelenlévő váltakozó fluxus (indukció) okozza.



15. ábra. Transzformátor: a) elvi elrendezése; b) jelképi jelölése.

A zárt vasmagnak azt a részét, amelyen a tekercsek helyezkednek el oszlopnak nevezzük, az oszlopokat összekötő vasrész a járom. A vasmaghoz közelebb mindig a kisfeszültségű tekercs kerül elhelyezésre és erre teszik szigetelés közbeiktatásával a nagyfeszültségű tekercset. Így kevesebb szigetelő anyagra van szükség, mivel a vasmag általában földpotenciálon van. A transzformátor elvi elrendezését és jelképi jelölését a 15. ábra szemlélteti. A transzformátornak azt a tekercsét, amelyik a hálózatra csatlakozik primer(1), azt amelyikre a fogyasztó csatlakozik szekunder(2) tekercsnek nevezzük. Működési elve a nyugalmi és kölcsönös indukció. Emiatt csak váltakozó áram és feszültség transzformálható, az egyen nem. A transzformátor jellegzetes üzemállapotai: az üresjárás, a terhelés és a rövidzáras. Üresjárásban van a transzformátor, ha primer tekercse a hálózatra csatlakozik és szekunder tekercsére nem kapcsolunk fogyasztót. Ekkor a transzformátor a hálózatból egy I_0 gerjesztő áramot vesz fel, amely a névleges áramának legfeljebb 10 %-a. Ez az áram hozza létre a vasmagban a főfluxust. Főfluxusnak azt a fluxust nevezzük, amely mindkét tekercssel kapcsolódik. Szórt fluxus az a fluxus, amelyik csak az egyik tekercssel kapcsolódik.

A főfluxus mindkét tekercsben feszültséget indukál, amelynek effektív értéke a következő képletekkel számítható:

$$U_{1i} = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_{0 \max}$$

$$U_{2i} = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_{0 \max}$$

Az indukált feszültségek a tekercsben indukálódnak, tehát háromfázisú transzformátorok esetén fázisértékek. Az indukált feszültségek viszonya a menetszám áttételt adja eredményül:

$$a_N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1i}}{U_{2i}}$$

Háromfázisú transzformátorok esetén használatos a feszültség áttétel is, amely a névleges, tehát a vonali feszültségek áttétele:

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

A transzformátor oszlopain a gerjesztéseknek egyensúlyban kell lenniük és eredőjük az alapgerjesztés:

$$\Theta = N_1 \cdot (I_1 - I_0) = I_2 \cdot N_2$$

Ha a gerjesztő áramot elhanyagoljuk, -ekkor legfeljebb 10% hibát követünk el- a menetszám áttétel az áramokkal is kifejezhető:

$$a_N \approx \frac{I_2}{I_1}$$

A transzformátor teljesítményeit felírva és a fenti képleteket is figyelembe véve, valamint a transzformátor veszteségeit is elhanyagolva a következő összefüggésekre jutunk:

$$S_1 = U_1 \cdot I_1$$

$$S_2 = U_2 \cdot I_2 = \frac{U_1}{a_N} \cdot a_N \cdot I_1 = S_1$$

Megállapítható tehát, hogy a transzformátor feszültséget és áramot átalakít, teljesítményt azonban nem. A primer oldali látszólagos teljesítmény gyakorlatilag megegyezik a szekunder oldali látszólagos teljesítménnyel.

A transzformátoroknak egy további fontos jellemzője a *drop*. Ez egy olyan rövidzárási feszültségnek (dropfeszültség) a viszonya a névlegeshez, amely a rövidrezárt transzformátoron éppen a névleges áramot hajtja:

$$\epsilon = \frac{U_{1zn}}{U_{1n}} \cdot 100[\%]$$

A drop jellemzi a transzformátor saját (rövidzárási) impedanciáját. A nagyobb dropú transzformátor saját impedanciája is nagyobb, egy kisebb dropú pedig kisebb.

A transzformátorok terhelési állapota a terhelési tényezővel jellemezhető. Ez nem más, mint a transzformátor aktuális áramának viszonya a névlegeshez. Ha az áramokat a névleges feszültséggel megszorozzuk, akkor a látszólagos teljesítmények viszonyát kapjuk. A transzformátor terhelési állapota a teljesítmények viszonyával is

megadható:

$$k = \frac{I}{I_n} \cdot \frac{U_n}{U_n} = \frac{S}{S_n}$$

A transzformátor vasvesztesége nem függ a terheléstől, tekercsvesztesége azonban négyzetesen függ a tekercsen átfolyó áramtól, tehát a terhelési tényező négyzetével arányos. Így a hatásfok:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P_{\text{veszt}}}{P_1} = 1 - \frac{P_v + k^2 \cdot P_m}{k \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2}$$

A transzformátor egy igen jó hatásfokú villamos gép, amelynél egynegyed terhelés esetén is a hatásfok értéke 90 % körül van. A hatásfok görbéje a terhelési tényező függvényében igen lapos és a névleges terhelés környezetében 97–99 % között van. Természetesen létezik egy maximális értéke, amely szélsőérték számítással határozható meg, vagyis az η kifejezését a "k" terhelési tényező szerint deriválni kell és nullával kell egyenlővé tenni. Ebből a következő összefüggés adódik:

$$k_{\max} = \sqrt{\frac{P_v}{P_m}}$$

Mivel a vasveszteség kisebb, mint a névleges tekercsveszteség, a transzformátor maximális hatásfoka kb. 90 %-os terhelésnél van és ez nem függ a terhelés jellegétől sem. A hatásfok nagysága természetesen függ a terhelés jellegétől, hiszen a hatásfok képletében szerepel a teljesítménytényező értéke. Az is világos, hogy a legjobb hatásfok ohmos terhelés esetén adódik. Túlterhelés esetén a hatásfok ismét csökken. Nem célszerű tehát a transzformátort teljesen kiterhelve üzemeltetni.

Ha egy transzformátor nem képes a terhelést biztosítani, szükség lehet a transzformátorokat párhuzamosan kapcsolni. Két vagy több transzformátor akkor üzemel párhuzamosan, ha azoknak mind a primer, mind a szekunder oldaluk össze van kötve. Csak olyan transzformátorok köthetők párhuzamosan, amelyekre a következő feltételek teljesülnek:

1. Azonos a feszültségátvitelük.
2. Azonos a fázissorrendjük.
3. Azonos kapcsolási csoportba tartoznak.
4. Közel azonos a dropjuk (eltérés kb. 10% lehet).

A legjobb az lenne, ha a dropjuk is megegyezne, mert ilyenkor a transzformátorok névleges teljesítményük arányában vennék fel a terhelést, azonban szinte lehetetlen két tökéletesen egyforma transzformátort gyártani.

A háromfázisú transzformátorok primer oldalának kapcsolása Y (csillag) vagy D (delta) lehet, szekunder oldala lehet y (csillag), d (delta) vagy z (zeg-zug). A transzformátorok kapcsolásuktól függően fázist forgatnak, ami azt jelenti, hogy az egymásnak megfelelő primer és szekunder feszültségük nincs fázisban. Ezt a fázisforgatást órászámmal jellemzik. Egy óra 30 fokos fázisforgatásnak felel meg. A fázisforgatást jellemző órászámot a kapcsolást jellemző betűk után írják. Csillagkapcsolás esetén, ha a csillagpont ki van vezetve, akkor "n" index kerül. Pl.: Yy 6; Y_nd 5; Yz_n 11; Dy 7; Dd 0; stb. Azonos órászám jelent egy kapcsolási csoportot. A Yy kapcsolású transzformátor nem terhelhető aszimmetrikusan, mert ilyenkor kiegyenlítetlen gerjesztés alakul ki az oszlopokon, amelyek időben mindig azonos irányban lépnek fel és a járomban szóródnak. Ez jelentős csillagpont-eltolódást idéz elő, amelynek következtében aszimmetrikus fázisfeszültségek alakulnak ki. A zeg-zug kapcsolást azért fejlesztették ki, mert itt egy fázishoz tartozó tekercs két külön oszlopon van elhelyezve és így biztosítani lehet mindkét oszlopon az ellengerjesztés kialakulását. Természetesen a Dy és a Yd kapcsolású transzformátorok is terhelhetők aszimmetrikusan, hiszen ilyenkor a delta kapcsolás miatt elegendő az ellengerjesztésnek egyetlen oszlopon kialakulnia. A delta-átkötés miatt az áram nem folyik át a másik fázistekercsen, hanem az átkötésen folyik vissza a hálózat felé.

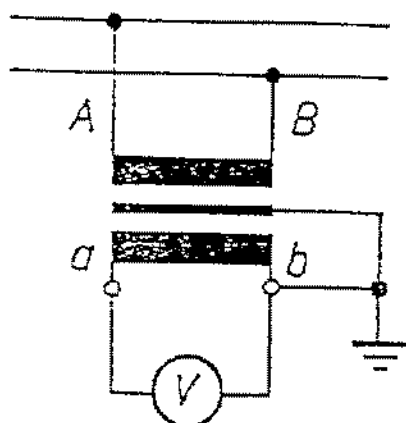
Mérőváltók.

A mérőváltók, különleges kivitelű egyfázisú transzformátorok, amelyek feladata egyrészt - a szokványos műszerekkel - mérhető feszültség és áram előállítása, másrészt - életvédelmi szempontból - a mérőkörök galvanikus leválasztása a nagyfeszültségű és nagyáramú rendszerről.

Feszültségváltó.

A feszültségváltó egy olyan egyfázisú transzformátor, amelynek primer tekercsét úgy kell bekötni az áramkörbe, mint a voltmérőt, tehát a fogyasztóval párhuzamosan, a szekunder oldalára pedig a V-mérő csatlakozik. Életvédelmi szempontból a szekunder tekercs egyik kapcsát a vasmaggal össze kell kötni és le kell földelni. A feszültségváltó esetében csak feszültségátvitelt definiálunk, amely a primer és a szekunder feszültség viszonya:

$$a_U = \frac{U_1}{U_2}$$



16. ábra. Feszültségváltó kapcsolási rajza.

A feszültségváltók szekunder feszültsége 100 V. A voltmérőt természetesen a mérendő nagyfeszültségre skálázzák a feszültségátvitel figyelembevételével. Mivel a voltmérő belső ellenállása nagy érték, a feszültségváltó üzem közben úgy működik, mint egy üresen járó transzformátor. A szekunder feszültség és a feszültségátvitel szorzata nem pontosan egyezik meg a primer feszültséggel, a gerjesztő áram által előidézett feszültségesés miatt, ezért minden feszültségváltónak van átviteli hibája:

$$h_U = \frac{a_U \cdot U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100[\%]$$

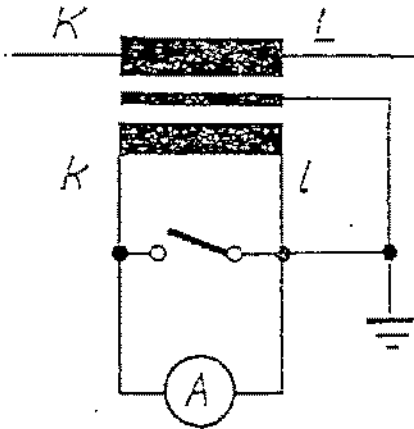
Ez az átviteli hiba (0.1–3) %. A gerjesztő áram által okozott feszültségesés miatt a primer és a szekunder feszültség nincs fázisban. Ez szöghibát eredményez. A szöghiba nagysága (4–40) perc.

Háromfázisú rendszerekben általában két feszültségváltót kötnek be ún. "V" kapcsolásban. Ekkor az egyik feszültségváltó primer tekercse az 1. és 2. fázis közé, a másiké a 2. és 3. fázis közé kerül bekötésre. A szekunder tekercsek közös pontját most is össze kell kötni a vasmaggal és le kell földelni. Ily módon a három pont között mind a három feszültség vonali értéke megmérhető. Feszültségváltók készülnek háromfázisú kivitelben is. Középfeszültségű szigetelt hálózatokon alkalmaznak öt oszlopos feszültségváltót is, az első és ötödik oszlopon ilyenkor csupán a földzárlat jelzésére szolgáló tekercs van elhelyezve.

Áramváltó.

Az áramváltó egy olyan egyfázisú transzformátor, amelynek primer tekercsét úgy kell bekötni az áramkörbe, mint az ampermérőt, tehát a fogyasztóval sorosan, a szekunder oldalára pedig az A-mérő csatlakozik. Életvédelmi szempontból a szekunder tekercs egyik kapcsát a vasmaggal össze kell kötni és le kell földelni. Az áramváltó esetében csak áram[átvételt deffiniálunk, amely a primer és a szekunder áramok viszonya:

$$a_I = \frac{I_1}{I_2}$$



17. ábra. Az áramváltó kapcsolási rajza.

Az áramváltó áramkörébe biztosítót tenni szigorúan tilos !

Az áramváltók szekunder árama általában 5 A, ritkábban főleg védelmi és szabályozási célokra 1 A. Az ampermérőt természetesen a mérendő nagy áramra skálázzák az áram[átvétel figyelembe[vételével. Mivel az ampermérő belső ellenállása kis érték, az áramváltó üzem közben úgy működik, mint egy rövidrezárt transzformátor. A szekunder áram és az áram[átvétel szorzata nem pontosan egyezik meg a primer árammal, a gerjesztő áram miatt, ezért minden áramváltónak van átvételi hibája:

$$h_I = \frac{a_I \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100[\%]$$

Ez az átvételi hiba (0.1–10) %. A gerjesztő áram miatt a primer és a szekunder áram nincs fázisban. Ez szöghibát eredményez.

A szöghiba nagysága (6-60) perc. Az áramváltók egyfázisú kivitelben készülnek. A primer tekercs gyakran a fázisvezetőbe épített síndarab, amelyre a szekunder tekercset ill. tekercseket elhelyezik. Az árammérés céljára és védelmi, szabályozási célra általában külön tekercs szolgál.

Problémát jelent az esetleg meghibásodott ampermérő cseréje. A csere előtt az áramváltó szekunder kapcsait rövidre kell zárni, hogy a rövidzár ne szűnjön meg a csere idejére sem, mert az üresen járó áramváltó szekunder tekercsének kapcsai között veszélyesen nagy feszültség indukálódik, és mivel megszűnik az ellengerjesztés, a primer áram pedig kényszerűen átfolyik a primer tekercsen, így a primer gerjesztés teljes egészében a vas mágnesezésére fordítódik. Rendkívül nagymennyiségű hő fejlődik a vasvesztesség ugrásszerű megnövekedése miatt, és így az áramváltó megolvad. Gyakorlatilag nem csak a vas és a réz, de még a porcelán is elolvadhat.

A szöghibának csak ott van jelentősége, ahol a mérés eredményében a szög is szerepel (pl. teljesítmény, teljesítménytényező).

A mérőváltók névleges teljesítményeit szabvány rögzíti. A feszültségváltók (15-1000) VA, az áramváltók pedig (5-180) VA teljesítmény határok között készülnek.

Aszinkron (indukciós) gépek.

Egyszerű felépítése miatt az ipari üzemekben a leggyakrabban alkalmazott géptípus. Ha mechanikai energiát villamos energiává alakít át akkor generátor, ha villamos energiát mechanikai energiává alakít át, akkor motor. Az aszinkron gépek kb. 99,99 %-a motorként üzemel. Generátorként való tartós üzemeltetése hazánkban nem fordul elő. Az aszinkron gépek 99 %-a háromfázisú.

Szerkezetiileg két fő részből áll: állórész és forgórész. Az állórész hornyolt, lemezelt, gyűrűalakú vastest, amelynek homyaiban vörösréz-ből készült váltakozó áramú tekercselés van elhelyezve. A váltakozó áramú tekercselés jellemzője, hogy fázisonként önálló tekercsekből áll, amelyekből megfelelő pólusszám kerül kialakításra. Az egyes fázisok tekercsei egymáshoz képest térben 120 fokra helyezkednek el a kerület mentén. Az állórész tekercsei vagy csillagba vagy deltába vannak elkötvé. A kis és közepes teljesítményű gépek állórésze általában deltába van kötve, mert ilyenkor háromszor akkora teljesítményt szolgáltat, mint csillag kapcsolás esetén. Igaz, a hálózatról háromszor akkora áramot is vesznek fel. A forgórész henger alakú, hornyolt, lemezelt vastest. A hornyokban vagy háromfázisú tekercselés foglal helyet, és ilyenkor a tekercsek csúszógyűrűkre vannak kivezetve (tekercselt forgórészű vagy csúszógyűrűs motor), amelyekre szénkefék csatlakoznak, vagy a

forgórész hornyai alumíniummal (ritkán vörösréz) vannak kiöntve (kalickás forgórészű motor) és a rudak a forgórész két végén két rövidrezáró gyűrűben végződnek.

A gép bordázott öntöttvas házban nyer elhelyezést, amelyet két öntöttvas pajzs zár le. A pajzsok közepén csapágyak tartják a tengelyt, amelynek általában csak a hajtás oldali vége van szabadon a terhelés csatlakoztatása érdekében. Nagyteljesítményű aszinkron gépek forgórésze mindkét oldalon külön épített csapágyházban vannak feltámasztva. Nagyon fontos, hogy az álló- és forgórész között a légrés a lehető legkisebb legyen. Mind a csúszógyűrűs, mind a kalickás forgórészű motor üzem közben rövidre van zárva. Csúszógyűrűs motornál a rövidrezárás egy külső karral végezhető el, amely a három rézgyűrűt alulról rövidrezárja, majd a keféket felemeli, hogy ne kopjanak feleslegesen. Működési elv szempontjából tehát a két fajta forgórészű motor azonosan viselkedik, mert mindkettő forgórésze rövidre van zárva.

Az aszinkron gép működési elve az indukció folytán fellépő erőhatás. Az állórész tekercseit a háromfázisú hálózatra kapcsolva fázisonként időben szinuszosan váltakozó áramok folynak, amelyek szinuszosan lüktető mágnesetert hoznak létre. Azonban egy időben, egy helyen csak egy mágnes tér lehetséges, így eredő mágnes tér alakul ki, amely egy forgó mágnes tér lesz. Általánosan igaz, hogy forgó mágnes tér kialakulásához térben eltolott tekercsek és fázisban eltoló áramok szükségesek. Ha a tekercsek térbeli eltolási szöge megegyezik az áramok fázisban való eltolási szögével, akkor állandó nagyságú, egyenletesen forgó mágnes tér keletkezik, ha ez nem teljesül, akkor a forgó mágnes tér nagysága nem lesz állandó és forgása sem lesz egyenletes. Ha a két esetet egy forgó vektorral jellemezzük, akkor azonos szögek esetén a forgó vektor végpontja egy kört ír le, amíg a második esetben egy ellipszist. Ez a forgó mágnes tér átjárja mind az állórészt, mind a forgórészt és mindkettőben feszültséget indukál. Vizsgáljuk először a lefoglott forgórészű motort.

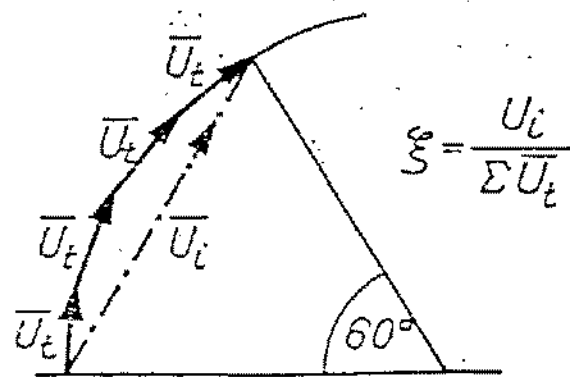
A lefoglott forgórészű motor úgy viselkedik, mint egy transzformátor, de itt a főfluxusnak egy forgó fluxus felel meg, és az indukált feszültség képletében egy tekercselési tényező is megjelenik:

$$U_i = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \xi \cdot \Phi_{0\max}$$

Az egyes fázisok tekercsei a kerület mentén egy íven helyezkednek el, kivezetve azonban csak a tekercsek végei vannak. A feszültség az egyes menetekben indukálódik, tehát a tekercselési tényező tulajdonképpen nem más, mint a húr és a körív viszonya, amely egynél kisebb szám.

Az indukciós gép menetszámváltétele tehát az alábbi képlettel adható meg:

$$a_N = \frac{N_1 \cdot \xi_1}{N_2 \cdot \xi_2} = \frac{U_{1i}}{U_{2i}}$$



18. ábra. A tekercselési tényező magyarázata.

Csúszógyűrűs motor esetén ha a forgórészt elfordítjuk, az állórész feszültségéhez képest más fázishelyzetű és nagyságú feszültség adódik (indukciós szabályozó). Kalickás motor erre alkalmatlan. Ez úgy működik lefogott forgórésszel, mint egy rövidrezárt transzformátor, csupán van légrése is.

Ha a forgórészt elengedjük, a forgó fluxus által a forgórészben indukálódó feszültség áramot indít (indukált áram), így a fluxus és az áram kölcsönhatásaként erő keletkezik (Lorenz-erő). Mivel az erő a vezetőkre hat és ezek a forgórész kerületén helyezkednek el, így nyomoték lép fel és a motor forgórésze forogni kezd. A forgórész fordulatszáma nem érheti el a forgófluxus fordulatszámát, mert ilyenkor megszűnne az erővonalmetszés és a gép működésképtelen lenne a forgórész indukált feszültségének hiánya miatt. A forgórész a forgó fluxustól elmarad, csúszik. A csúszás mértékét a *szlip* jellemzi:

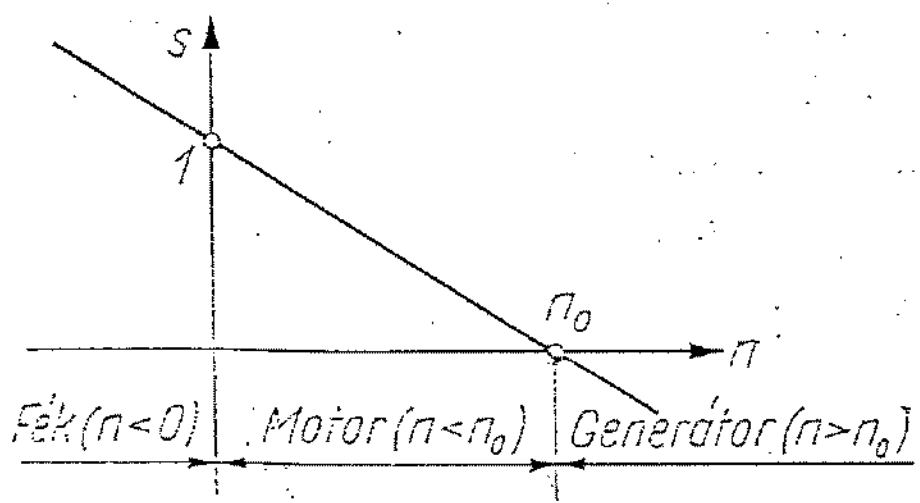
$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = 1 - \frac{n}{n_0}$$

Ahol n_0 - a forgó mágnes tér fordulatszáma; n - a motor fordulatszáma. A forgó mágnes tér fordulatszáma az u_n szinkron fordulatszám az alábbi képlettel számítható ki:

$$n_0 = \frac{f_1}{p}$$

Ahol f_1 - az állórész frekvenciája; p - a gép póluspárjainak száma.

Magyarországon és Európában a lehetséges legnagyobb szinkron fordulatszám percenként 3000, mivel a hálózati frekvencia 50 Hz, Amerikában a frekvencia 60 Hz, ezért a legnagyobb szinkron fordulatszám 3600 percenként. A 20. ábrán feltüntettük a szlip-fordulatszám függvényt és a hozzá tartozó aszinkron gép üzemállapotait. A negatív fordulatszám úgy értelmezhető, hogy a motort a terhelés a forgó mágnes térrel ellentétes irányba forgatja.



19. ábra. A szlip változása a fordulatszám függvényében.

Generátorként az indukciós gép csak akkor tud működni, ha van a gépben forgó mágnes tér (hálózatra csatlakozik) és fordulatszáma meghaladja a szinkron fordulatszámot. A gép önállóan nem szolgáltat villamos energiát, hiába forgatjuk a szinkron feletti fordulatszámmal. Az aszinkron gép egy olyan villamos gép, amely a forgó mágnes tér létrehozásához szükséges meddőteljesítményt minden esetben a hálózatról veszi fel, még generátorként is.

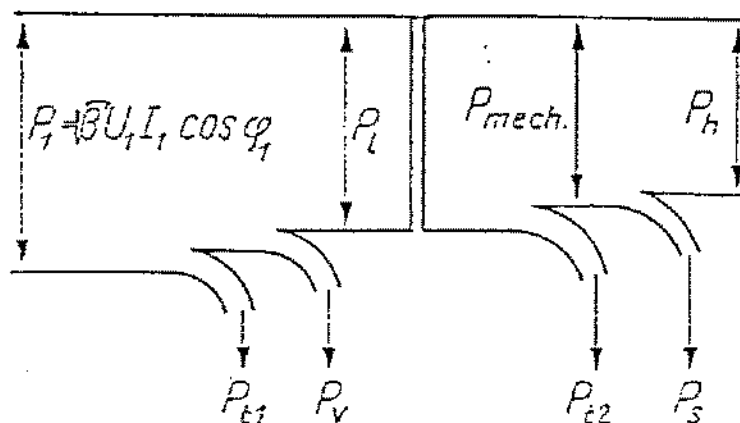
Az aszinkron motor hatásfokának meghatározásához a 20. ábrán felrajzoltuk a gép teljesítményszalagját.

A motor hálózatról felvett teljesítménye, az állórész(1) teljesítménye:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$$

Ahol a feszültség és az áram vonali értékek.

Ebből az állórész tekercsvesztése és vasvesztése hővé alakul. A két veszteség összege az állórész összes vesztesége:



20. ábra. Az aszinkron motor teljesítményszalagja.

$$P_{v1} = P_{t1} + P_v$$

A tekercsveszteség Joule képlettel számítható (fázis értékekkel):

$$P_{t1} = 3 \cdot I_{1f}^2 \cdot R_1$$

A vasveszteség szinkronjárásban mérhető meg, mert ilyenkor a légrés-teljesítmény nulla. Az aszinkron gép egyedül szinkron fordulatszámmal nem foroghat, tehát ilyenkor hajtani kell. Ekkor az állórész veszteségeit a hálózatról, a forgórész veszteségeit pedig a hajtó gépből veszi fel és a légrésen nem áramlik át energia. A vasveszteség tehát szinkronjárásban :

$$P_v = P_{10} - P_{t10}$$

A vasveszteség nagysága függ a fordulatszámtól, de ezt elhanyagoljuk, vagy legfeljebb közelítőleg a fordulatszámok arányában vesszük figyelembe. Ha a felvett teljesítményből levonjuk az állórész veszteségeit, a légrésteljesítményt kapjuk eredményül:

$$P_L = P_1 - P_{t1} - P_v = P_1 - P_{v1}$$

A légrésteljesítményből levonva a forgórész tekercsveszteségét, a mechanikai teljesítményt kapjuk, amely még villamos úton számítható:

$$P_{t2} = s \cdot P_L$$

$$P_{mech} = (1 - s) \cdot P_L$$

A mechanikai teljesítményből már csak mechanikai veszteség, a surlódási veszteség nem hasznosítható, így ennek levonása után a motor tengelyteljesítményét kapjuk, amely a motor névleges teljesítménye és ez szerepel a kapocstáblán is:

$$P_t = P_n = P_{\text{mech}} - P_s$$

Az aszinkron gép tengelynyomatéka az alábbi képlettel számítható:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega}$$

Ahol ω - az indukciós motor szögsebessége:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

Leggyakrabban elegendő a gép villamos nyomatékának kiszámítása:

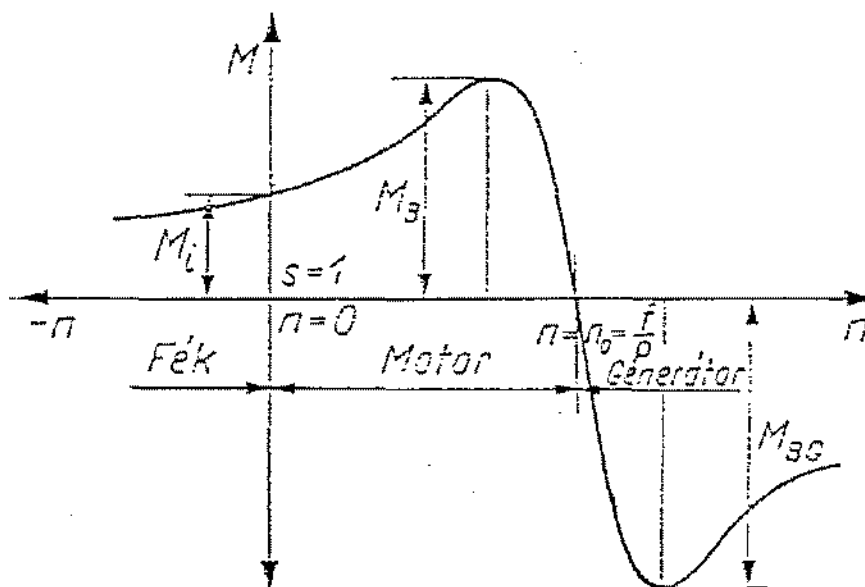
$$M_v = \frac{P_{\text{mech}}}{\omega} = \frac{(1-s) \cdot P_L}{(1-s) \cdot \omega_0} = \frac{P_L}{\omega_0}$$

Ahol az ω_0 - a szinkron szögsebesség.

Ha az aszinkron motor terhelése növekszik, azaz a gép tengelyét jobban fékezzük, a fordulatszám csökken és a motor a hálózathoz nagyobb áramot vesz fel. A szlip értéke is változni fog. Az aszinkron motor nyomatékát minden lehetséges fordulatszámhoz kiszámítva és függvényként ábrázolva nyerjük a mechanikai jelleggörbét $[M(n)]$, amelyet a 20. ábra szemléltet.

A mechanikai jelleggörbe a villamos gépek egyik legfontosabb jelleggörbéje, mert ez mutatja meg, hogy a gép hogyan viselkedik különböző üzemállapotokban. Az aszinkron gép mechanikai jelleggörbéjéből látható, hogy viszonylag kis indító nyomatékkal rendelkezik. Motoros féküzemben a nyomaték még az indító nyomatéknál is kisebb.

A gép üzemi szakasza a szinkron fordulatszám közelében van. Az üzemi (névleges) szlip értéke néhány %. Maximális nyomatékát billenő nyomatéknak nevezzük, mivel mind előtte, mind utána ettől csak kisebb nyomatékok fordulnak elő. A generátoros billenő nyomaték abszolút értéke nagyobb, mint a motoros billenő nyomaték, de a hozzájuk tartozó szlipek abszolút értéke megegyezik.



21. ábra. Az aszinkron gép mechanikai jeleggörbéje.

Az aszinkron motorok indítása problémát jelent. Egyrészt azért, mert viszonylag kicsi az indító nyomatéka, és ugyanakkor nagy az indító árama, hiszen ez zárlati áram, ugyanis a forgórész rövidre van zárva. Csúszógyűrűs motorok esetén ezen könnyű segíteni, mert a csúszógyűrűkre kívülről ellenállások köthetők, amelyek csökkentik az indító áram nagyságát és egyidejűleg növelik az indító nyomatékot. Megfelelően méretezett ellenállással az is megvalósítható, hogy a motor a billenő nyomatékával induljon. Felfutáskor az ellenállásokat kiiktatják. Kalickás gépeknél azonban ez nem lehetséges. Kis teljesítményű (1 kW teljesítményig) motorokat közvetlen hálózatra kapcsolással indítjuk, mert a fellépő áramlökést a hálózat minden további nélkül elviseli. Közepes- (1-100 kW) és nagyteljesítményű (100 kW felett) indukciós motorok már olyan nagy áramlökéssel indulnának, hogy ez nem engedhető meg. A motorok állórészének kapcsolása általában delta, mert ilyenkor háromszor akkora teljesítményt szolgáltatnak, mint csillag kapcsolásban. Indításkor a motort csillagba kapcsolják és a felfutást követően kapcsolják át deltába. Csillag-delta indításkor a motor indító árama harmada lesz a delta kapcsolásénak, de indító nyomatéka is harmadára csökken. Ha a terhelő nyomaték ettől nagyobb, a motor nem tud elindulni és leéghet. Ez rugalmas tengelykapcsoló alkalmazásával elkerülhető. A motor nyomatéka az állórész feszültségének négyzetével arányos, ezért úgy is indíthatunk, hogy egy általában takarékkapcsolású transzformátort kapcsolunk a hálózat és a motor közé. Kisfeszültségről indítva a motort a transzformátort fokozatosan kiiktatjuk. Ebben az esetben is mind az indító nyomaték, mind az indító áramlökés az áttétel négyzetének

arányában csökken. Ha a motor ellenpárhuzamosan kapcsolt tirisztorok közbeiktatásával csatlakozik a hálózatra, akkor megfelelő vezérléssel oldható meg az indítás.

Szakaszos üzem esetén, ahol gyakori az aszinkron motorok indítása és leállítása célszerű mélyhornyú vagy kétkalickás motorokat alkalmazni. Ezek speciális kivitelű motorok, amelyek indító nyomatéka nagyobb és indítási áramlökések kisebbek, mint a sorozatgyártású normál motoroké.

Az aszinkron motorok fordulatszámváltoztatása nem túl egyszerű. A motor fordulatszáma a következő képlettel számítható:

$$n = n_0 \cdot (1 - s) = \frac{f_1}{p} \cdot (1 - s)$$

A képletben szereplő bármelyik mennyiség változtatható.

Az állórész frekvenciájának változtatása úgy történhet, hogy a motor és a hálózat közé frekvenciaváltót iktatunk. Ilyenkor a frekvencia 0 Hz-től 50 Hz fölé is beállítható. Ebben az esetben külön indító berendezésre sincs szükség, mert a frekvencia kis értékre való állításával ez könnyen megvalósítható. A póluspár szám változtatása esetén csak 1:2 arányú fordulatszám változtatás valósítható meg Dahlander-kapcsolóval. Ekkor ugyanis a gép pólusszámát kell megváltoztatni, és több tekercset kell az állórészen elhelyezni. Nagyobb arány megvalósításához pedig nincs elég hely az állórészen. Ez szerszámgépek esetén szokásos megoldás.

A szlip változtatása csak csúszógyűrűs motoroknál lehetséges. Ebben az esetben megfelelően méretezett ellenállást iktatunk a forgórész körbe épp úgy, mint az indítás esetén. Ezek az ellenállások azonban nem kerülnek kiiktatásra, hanem állandóan benn vannak, hogy biztosítani tudják a szükséges fordulatszámot.

Üzemelés közben szükség lehet a motorok fékezésére. Haszonfékezés valósul meg, ha a motort a terhelés a szinkron fordulatszám fölé növeli. Ilyenkor a gép generátorként üzemel. A hálózatról veszi fel a meddőteljesítményt, ugyanakkor hatásos teljesítményt termel. Egyenáramú fékezéskor a motort lekapcsoljuk a hálózatról és bármelyik két állórész kapcsára egyenáramot kapcsolunk. Az egyenáram állandó nagyságú mágneset hoz létre, amelyben a forgórész forog. A forgórész vezetőiben forgási indukált feszültség keletkezik, amely Lenz-törvénye értelmében olyan áramot indít, amely az őt létrehozó változást akadályozni igyekszik, tehát a mozgást gátolja, fékezi. A harmadik fékezési mód az ellenáramú fékezés, amelyik tulajdonképpen a motoros féküzem. A motor a forgó mágnesetérrel ellentétes irányba forogva,

fékező nyomatékot fejt ki. Gyakorlatilag a forgó mágnes tér forgásirányát változtatják meg. A forgásirányváltoztatás vagy reverzálás úgy valósítható meg, hogy a motor kapcsain fáziscserét hajtunk végre, azaz az állórész tetszőleges két kapcsát felcseréljük. Ilyenkor a forgófluxus forgásiránya és a motor nyomatéka is ellentétes lesz. Ha a motor megállt, a hálózatról le kell kapcsolni, mert reverzálni fog.

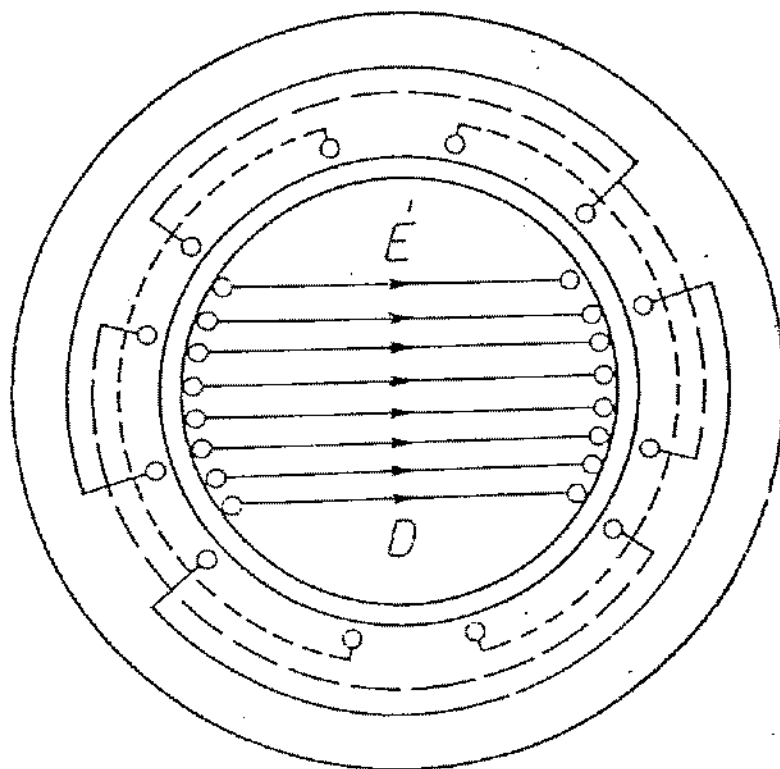
Szinkrongépek.

A villamosenergia-termelés legfontosabb gépe. Nagymennyiségű villamos energiát világszerte szinkrongépekkel állítanak elő. Ipari üzemekben olyan helyeken, ahol állandó fordulatszámú hajtásra van szükség, szinkronmotorokat alkalmaznak. Az összes szinkrongépet figyelembe véve generátorként üzemel a gépek kb. 90 %-a. Szerkezetileg két fő részből áll: az állórész és a forgórész. Az állórész az armatúra. **Armatúra a villamos gépek azon szerkezeti része, amelyikben a feszültség indukálódik.** A transzformátor esetében és az aszinkron gépeknél nem használatos az elnevezés mert feszültség mindkét tekercsben indukálódik, így az armatúra szó használata nem egyértelmű.

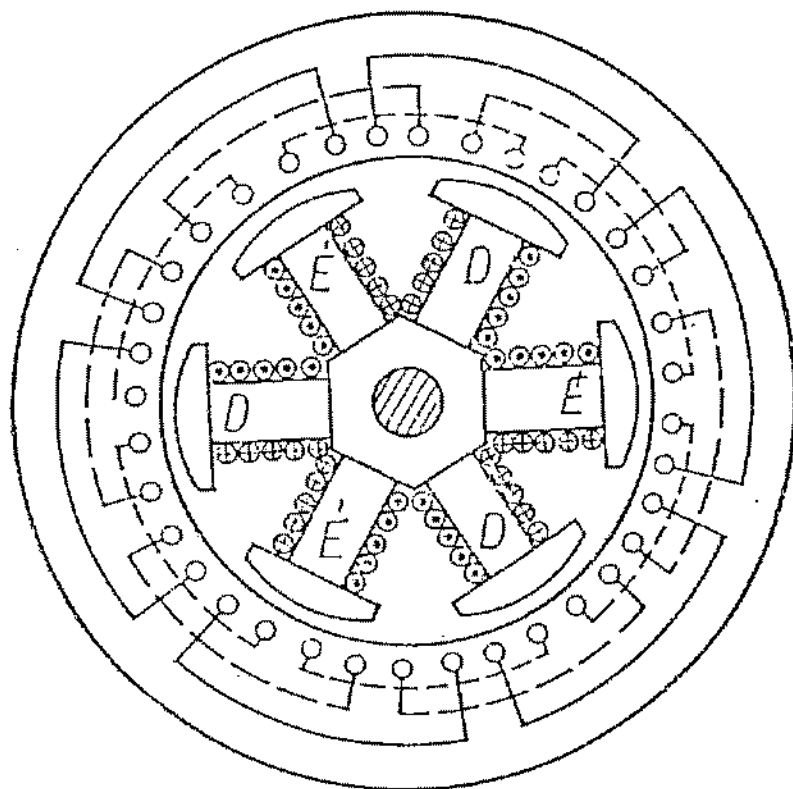
Az állórész megegyezik az aszinkron gépek állórészével, a forgórész vagy póluskerék tk. egy elektromágnes. Anyaga tömör lágyvas, amelyen pólusonként egy egyenárammal gerjesztett tekercs van elhelyezve. A forgórész lehet hengeres pólusú (23. ábra); vagy kiálló pólusú (24. ábra). A hengeres póluson a gerjesztő tekercset a henger tengelyének irányában tekercselik. A kiálló pólusokon önálló tekercsek foglalnak helyet. A tekercsekhez az egyenáram két csúszógyűrűn csatlakozik.

A forgórészre egyenáramot kapcsolva egy állandó nagyságú fluxus keletkezik, amelyet ha szinkron fordulatszámmal forgatunk, az állórész tekercsejében feszültséget indukál. A szinkrongépek állórészén háromfázisú tekercselés van, tehát a kapcsokon megjelenik a háromfázisú feszültség. Ha a tekercsekre egy háromfázisú fogyasztót kapcsolunk, áram indul meg és a gép ellátja villamos energiával. A szinkrongép tehát képes önállóan generátorként működni. Ha az állórészt (armatúrát) a hálózatra kapcsoljuk, a tekercsekben folyó áram forgófluxust hoz létre. A forgófluxusnak és a pólusfluxusnak együtt kell forognia (szinkronban). A két fluxus eredője hozza létre a gép indukált feszültségét. A szinkrongép indukált feszültsége, amely közelítőleg a kapocsfeszültséggel egyezik meg, mindig a pólusfluxus által indukált pólusfeszültség és az armatúraáram fluxusa által indukált armatúrafeszültség komplex (vektoros) összege:

$$\overline{U}_k \approx \overline{U}_i = \overline{U}_p + \overline{U}_a$$



22. ábra. Hengeres pólusú szinkrongép elvi vázlata.



23. ábra. Kiálló pólusú szinkrongép elvi vázlata.

A pólusfeszültség nagysága kizárólag a gerjesztőáramtól függ, az armatúrafeszültség nagysága pedig a mindenkori armatúraáramtól. Ideális üresjárásban ($I_a=0$) a pólusfeszültség megegyezik a kapocsfeszültséggel és azzal egyirányú. Ha a pólusfeszültséget megnöveljük, armatúraáramnak kell megindulnia, hogy a fenti feszültségegyensúly helyre álljon. Ez az áram tiszta kapacitív áram, és a szinkrongép meddőteljesítményt termel. A meddőteljesítményt termelő szinkrongépet túlgerjesztettnek nevezzük. Ha a pólusfeszültség kisebb, mint a kapocsfeszültség, az armatúraáram tiszta induktív áram lesz és a szinkrongép meddőteljesítményt fogyaszt. Ez az alúlgerjesztett szinkrongép. Ekkor a gép szinkron kompenzátorként üzemel. Ha a szinkrongépet terheljük, akkor az armatúraáram és ezzel együtt az armatúrafeszültség megnő. A pólusfeszültség és a kapocsfeszültség között egy "δ" szög lesz. Ezt nevezzük terhelési szögnek. Generátoros üzemben a pólusfeszültség mindig a kapocsfeszültség előtt jár (a terhelési szög negatív), motoros üzemben pedig mögötte van (a terhelési szög értéke pozitív).

Ha a terhelés induktív jellegű (meddőteljesítményt fogyaszt), a generátornak kapacitívnek kell lennie (meddőteljesítményt termel = túlgerjesztett). Ha a terhelés kapacitív (meddőteljesítményt termel), ezt a generátornak kell elfogyasztania, tehát a generátor induktív (meddőteljesítményt fogyaszt = alúlgerjesztett). A szinkron motor ugyanígy viselkedik, tehát túlgerjesztve meddőteljesítményt termel és alúlgerjesztve meddőt fogyaszt.

Ha a szinkrongép túlgerjesztett, akkor a pólusfeszültsége biztosan nagyobb, mint a kapocsfeszültsége, ha alúlgerjesztett, akkor a pólusfeszültsége biztosan kisebb, mint a kapocsfeszültsége.

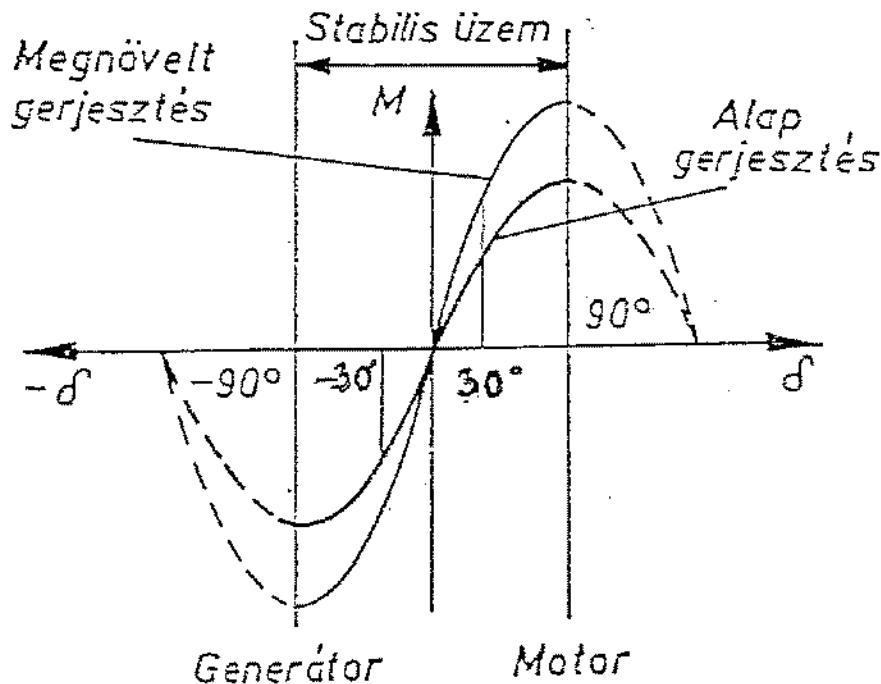
A szinkrongép legnagyobb nyomatéka az ún. billenő nyomaték az alábbi képlettel számítható:

$$M_B = \frac{3 \cdot U_p \cdot U_k}{X \cdot \omega_0}$$

Ahol a feszültségek fázisértékek, X – a szinkron reaktancia és ω_0 a szinkron szögsebesség. A szinkrongép mechanikai jelleggörbéje pedig:

$$M = M_B \cdot \sin \delta$$

A mechanikai jelleggörbét a 24. ábra szemlélteti. A szinkrongép stabilis üzeme az ábrán leolvasható, azonban a billenő nyomatékkal a gép biztonságosan nem üzemelhet, mert a legkisebb nyomatékváltozás hatására kiesik a szinkronból. Terhelési tartaléknak is kell lennie.



24. ábra. Hengeres pólusú szinkrongép mechanikai jelleggörbéje.

A terhelési szög a valóságos esetekben -30° és $+30^\circ$ közé esik. Ezekhez a szögekhez tulajdonképpen a billenőnyomaték fele tartozik.

Az erőművek szinkrongenerátorai az elosztóhálózaton párhuzamosan üzemelnek, illetve a szinkron motorokat is hálózatra kapcsolás előtt szinkronozni kell, mert a póluskerék fluxusának az armatúra fluxusával együtt kell forognia. A szinkrongépek párhuzamos kapcsolásának feltételei:

1. Azonos a kapocsfeszültség.
2. Azonos a feszültségvektorok iránya.
3. Azonos a fázissorrend.
4. Azonos a frekvencia.

A fenti feltételek ellenőrzésére szinkronozó berendezés szolgál.

Ha a szinkrongép terhelése növekszik, akkor fordulatszáma csökkenne, tehát a generátor hajtás oldalán be kell avatkozni (a turbina fordulatszámát növelni kell), hogy a fordulatszám állandó maradjon és a frekvencia ne csökkenjen, sőt a gerjesztést is megfelelő mértékben növelni kell, mert a teljesítménytényező értéke így maradhat változatlan. Ha a gerjesztés változatlan marad a szinkrongép induktívabb jellegű lesz. Az erőművekben szabályozó körök biztosítják a terhelés folyamatos követését. A generátorok és motorok megfelelő üzemeltetését védelmek biztosítják.

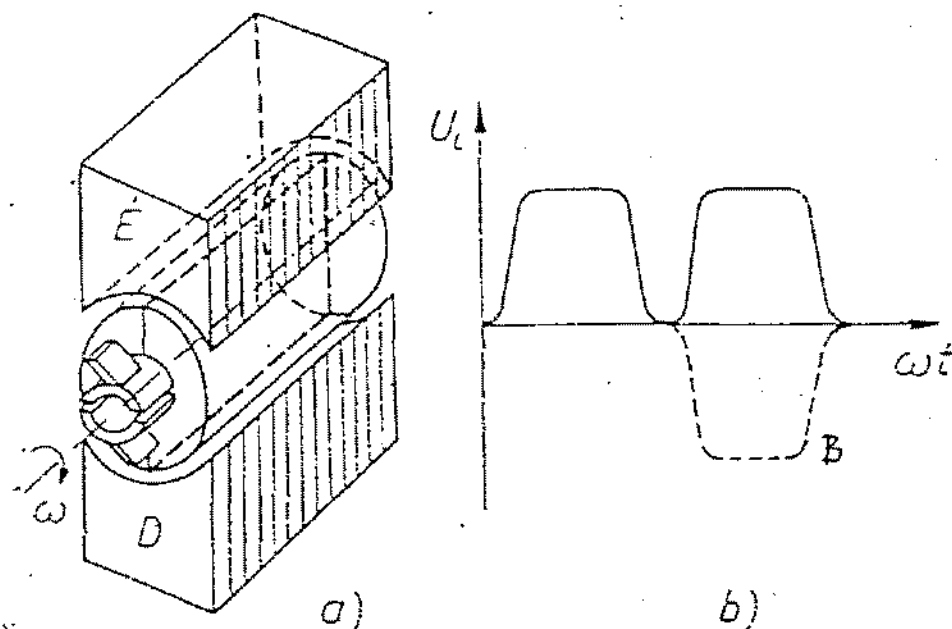
Egyenáramú gépek.

A szabályozott villamos hajtások egyik kedvelt géptípusa, mert fordulatszám változtatása lényegesen egyszerűbb, mint pl. az aszinkron motoroké. Ha mechanikai energiát villamos energiává alakít át akkor generátor, ha villamos energiát mechanikai energiává alakít át, akkor motor. Szerkezetileg két fő részből áll: állórész és forgórész. Itt a forgórész az armatúra. Az állórész egy síma, gyűrűalakú acélöntvénybe csavarokkal rögzített téglatest alakú, tömör lágyvas főpólusokból ill. kisebb keresztmetszetű segédpólusokból áll. A főpólusokon helyezkednek el a gép gerjesztő tekercsei, a segédpólusokon pedig néhány az armatúrával sorba kötött menet foglal helyet. A tekercsek vörösrézből készülnek. A gerjesztő tekercseket egyenárammal táplálják, és szerepe egy állandó nagyságú mágnes tér (főfluxus) előállítás. A gép forgórésze egy henger alakú, hornyolt, lemezelt vastest (dinamólemez), amelynek hornyaiban vörösrézről készült egyenáramú tekercselés van elhelyezve. Az egyenáramú tekercselés jellemzője, hogy önmagában zárt, egyetlen tekercs és két rétegben készül. A tekercs fejrészei a tengelyen elhelyezett vörösrézről készült kommutátor szeletekhez vannak lekötve. A kommutátoron szénkefék biztosítják a villamos csatlakozást a kapocstáblán kialakított gépkapcsokhoz. Az egyenáramú gép működési alapja a forgási indukció. Motor esetén az áram és a főpólusok állandó mágnes térének kölcsönhatásaként erőhatás (nyomaték) keletkezik.

A nyomaték generátor esetén fékező és a hajtással szemben hat, amíg motor esetén ez a hajtónyomaték, és ez forgatja a motort. Generátor esetén a gépet forgatjuk az állandó mágnes térben, így a forgórész vezetőiben feszültség indukálódik, amely tk. aktív, töltésszétválasztó erő. Az északi pólus alatt elhaladó vezetőben egyik irányú, a déli pólus alatt elhaladó vezetőben másik irányú feszültség indukálódik, így egy-egy vezetőben váltakozó feszültség keletkezik. A vezetők azonban a kommutátor szeletekhez csatlakoznak, amelyeken a kefék az egyes főpólusok között az ún. semleges vonalban vannak elhelyezve oly módon, hogy az egyik kefe mindig csak azokkal a vezetőkkel kerül kapcsolatba, amelyek pl. az északi pólus alatt haladnak el, a másik pedig azokkal, amelyek a déli pólus alatt haladnak el, a keféken tehát egyenfeszültség jelenik meg. A kommutátor a kefékkel tulajdonképpen egy mechanikus egyenirányító. Egyetlen vezető esetére ezt szemlélteti a 25. ábra. Az armatúrán azonban sok vezető van elhelyezve, amelyek indukált feszültsége a keféken összegződve jelenik meg, így a keféken gyakorlatilag teljesen síma egyenfeszültség van. Ez az egyenfeszültség:

$$U_1 = c \cdot \Phi \cdot n$$

Ahol a c – a gépállandó; a Φ – a pólusfluxus; az n – a gép fordulatszáma.



25. ábra. A kommutátor egyenirányítja a váltakozó feszültséget.

A gépállandóban az egyenáramú gép jellemzői szerepelnek:

$$c = N_a \cdot \frac{p}{a}$$

Ahol N_a – az armatúra vezetőinek száma; p – a póluspárok száma; a – a párhuzamos ágpa-
rrok száma. A két kefe az armatúra egyetlen tekercsét a legegyszerűbb esetben is két párhuzamos ágra bontja. Az $a=1$ -gyel.

Motor esetén a keféket az egyenáramú hálózatra kötjük, így az egyik kefén befolyik az egyenáram, majd a két párhuzamos ágon átfolyva a másik kefén kifolyik a hálózat felé. A pólusok alatt lévő vezetőkben folyó áram mágnes-
tere és a pólusok állandó mágnes-
tere kölcsönhatásaként (Lorenz-) erő lép fel, amely nyomatékot hoz létre és a gépet forgatja. A motoros forgásirány azonos gerjesztés esetén éppen ellentétes a generátoros forgásiránnyal.

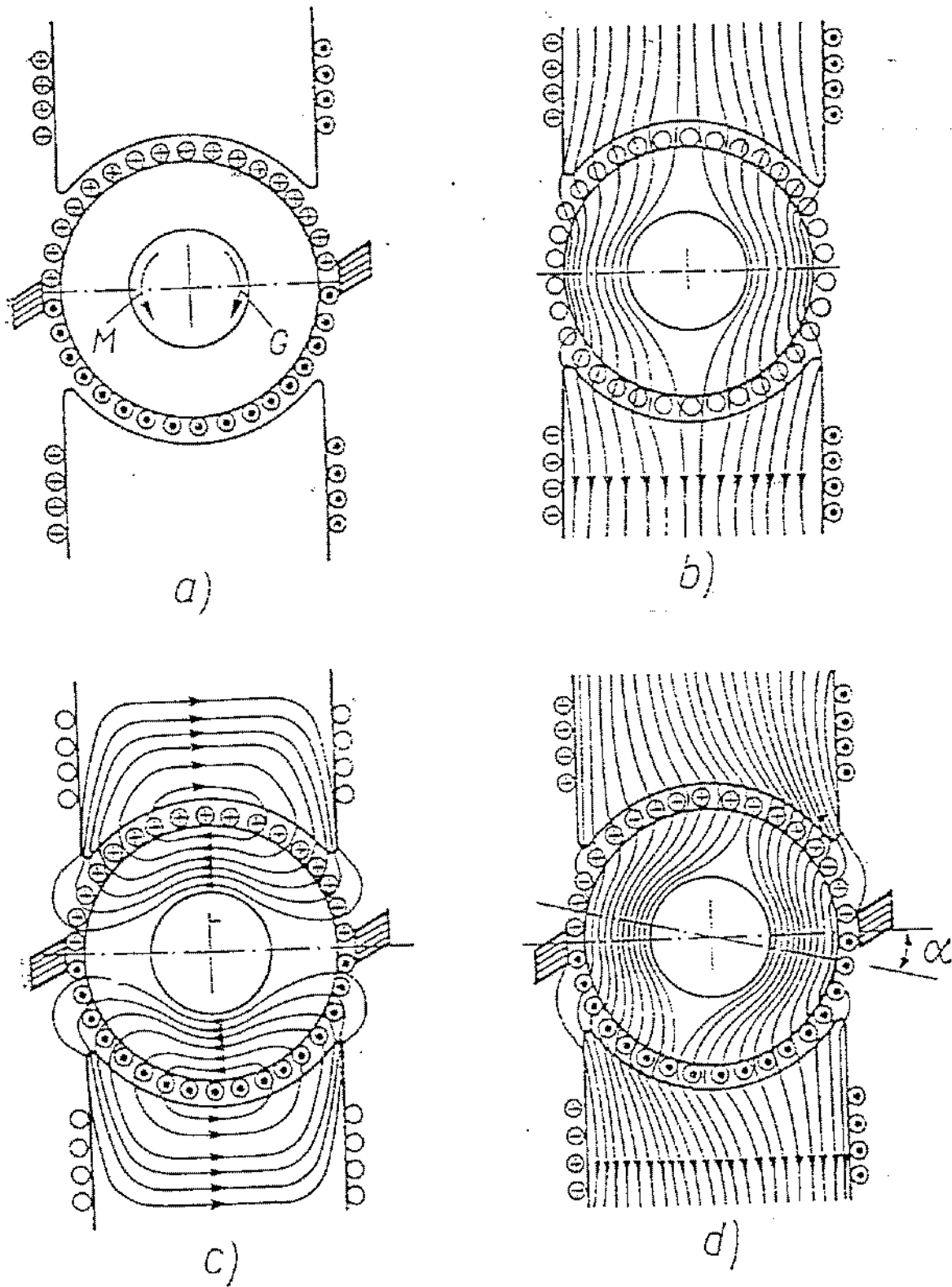
Működés közben a kefék lefutó éle szikrázik. A kefeszikrázásnak két villamos oka van: Az egyik a kommutáció, a másik az armatúra-
reakció. A semleges vonalon áthaladó vezetőkben az áram irányának ellentétesre kell változnia (kommutálnia kell). Mivel a kefe több kommutátor szeletet fog át és ezeket rövidre zárja, a rövidrezárt menetekben megy végbe az áramváltás, emiatt öndukciós feszültség keletkezik, amely az áramot fenn szeretné tartani.

A kefék alól éppen távozó kommutátor szeleten ív keletkezik, amely kedvezőtlen esetben körtűzhöz vezethet, ha az ívek a két kefe között ki tudnak alakulni. Így a gép működésképtelen lesz. A szikrázás mértéke az armatúraáram nagyságától és a gép fordulatszámától függ. Az önindukciós feszültség miatt a kommutáció késleltetve alakul ki. Közepes- és nagyteljesítményű gépek estén ezért a semleges vonalban segédpólusokat alakítanak ki, amelyek feladata olyan ellenirányú mágnesztér létrehozása, ami a kefeszikrázást megszünteti. A segédpólusok tekercsét az armatúra áramával kell gerjeszteni, ezért az armatúrával sorba kell kötni. Emiatt nagy keresztmetszetű és néhány menetű tekercs nyer elhelyezést a segédpóluson.

A kefeszikrázás másik villamos oka az armatúrareakció. Ha az armatúrában áram folyik, ez is létrehoz mágnessteret, amely a pólusok mágnessterére éppen merőlegesen helyezkedik el. Mivel egy időben, egy helyen csak egy mágnesztér létezik, eredő mágnesztér alakul ki. Ezt mutatja be a 26. ábra. A semleges vonal mindig a mágneses erővonalakra merőlegesen alakul ki, emiatt a semleges vonal α szöggel eltolódik. Ha a kefék a régi semleges vonalban maradnak, a kifutó kommutátorszelet áramot szakít meg és a kefe szikrázik. Megfelelő segédpólus méretezéssel ez is megszüntethető.

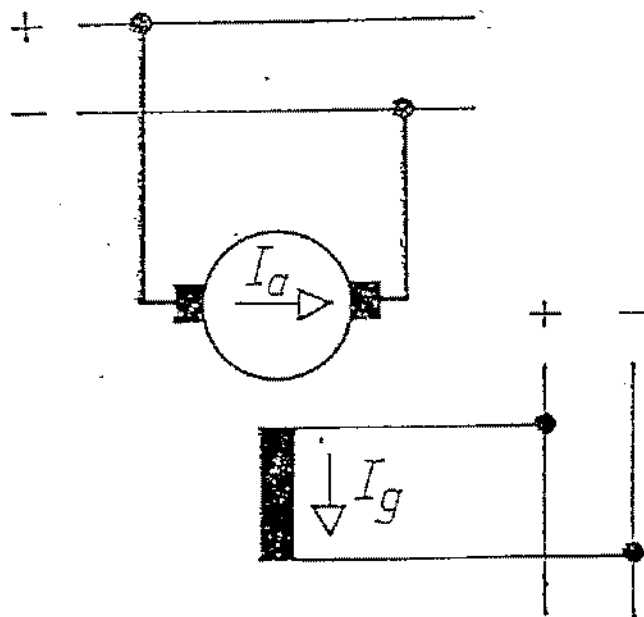
További problémát jelent, hogy a főpólusok egyik oldalán a mágneses erővonalsűrűség nagyon megnő és a vas betelítődéséhez vezet, amely csökkenti az eredő fluxus értékét. Emiatt az indukált feszültség csökken, de ennek gyakorlatilag a kapocsfeszültséggel kell egyensúlyt tartania és ezért a gép fordulatszáma kezd nőni, ami megszaladáshoz vezethet. A fluxustorzulás elkerülhető, ha a főpólusokba hornyokat képeznek ki és ezekbe kompenzáló tekercset helyeznek el, amelyet az armatúraárammal kell gerjeszteni. Ilyenkor a főpólust erősebbre kell méretezni. A megoldás drága, ezért csak nagyteljesítményű gépeknél alkalmazzák.

Az egyenáramú gépek gerjesztő tekercseinek kapcsolása lehet: külső, sönt, soros és vegyes. Külső gerjesztés (27. ábra.) esetén a gerjesztő tekercset egy külön egyenfeszültségre kapcsolják. Sönt gerjesztéskor (28. ábra) a gerjesztő tekercset párhuzamosan kapcsolják az armatúrával. A kétféle gerjesztés közös tulajdonsága, hogy a pólusfluxus gyakorlatilag állandó. Soros gerjesztés (29. ábra.) esetén a gerjesztő tekercs sorba van kötve az armatúrával, a gerjesztő áram arányos az armatúra áramával. Vegyes gerjesztés esetén két gerjesztő tekercs van a főpóluson (30. és 31. ábra.), amelyek közül az egyik sorba, a másik pedig párhuzamosan van kötve az armatúrával. Ha a két gerjesztés erősíti egymást, akkor kompaund, ha gyengítik egymást, antikompaud a gerjesztés.

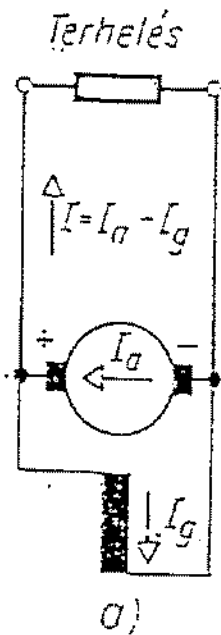


26. ábra. Az armatúrareakció hatása.

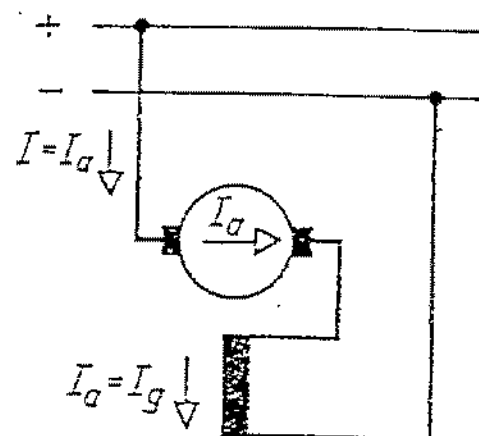
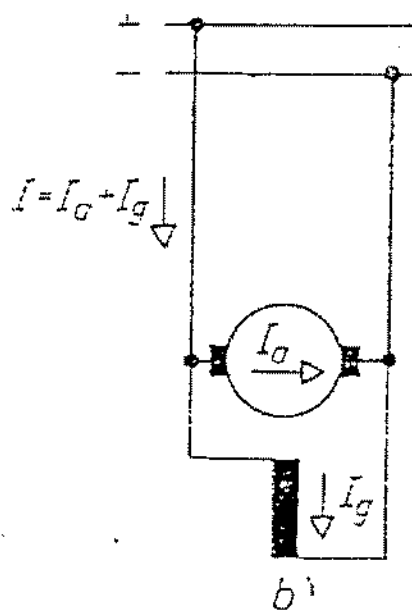
a) a főpólus- és az armatúraáram iránya; b) a főpólus mágnestere; c) az armatúraáram mágnestere; d) az eredő mágnes tér.



27. ábra. Külső gerjesztésű egyenáramú motor.

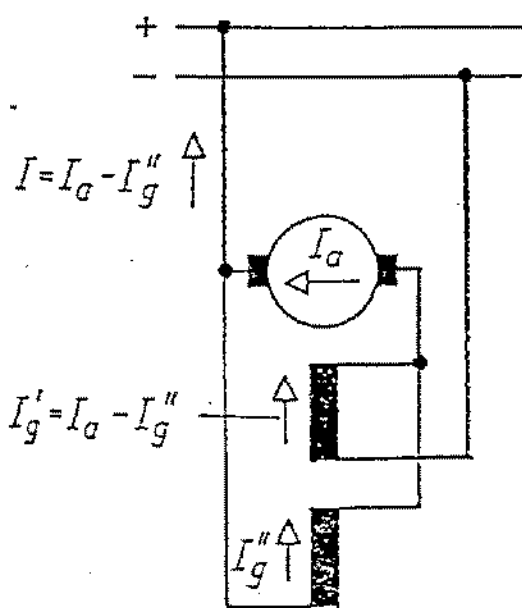


28. ábra. Sönt gerjesztésű
a) generátor és b) motor

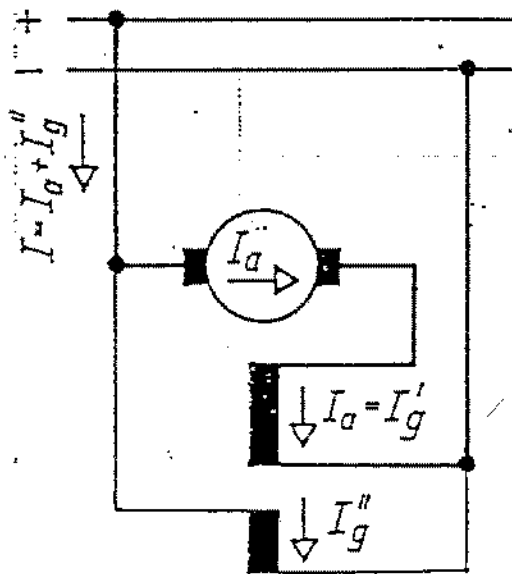


29. ábra. Soros gerjesztésű motor.

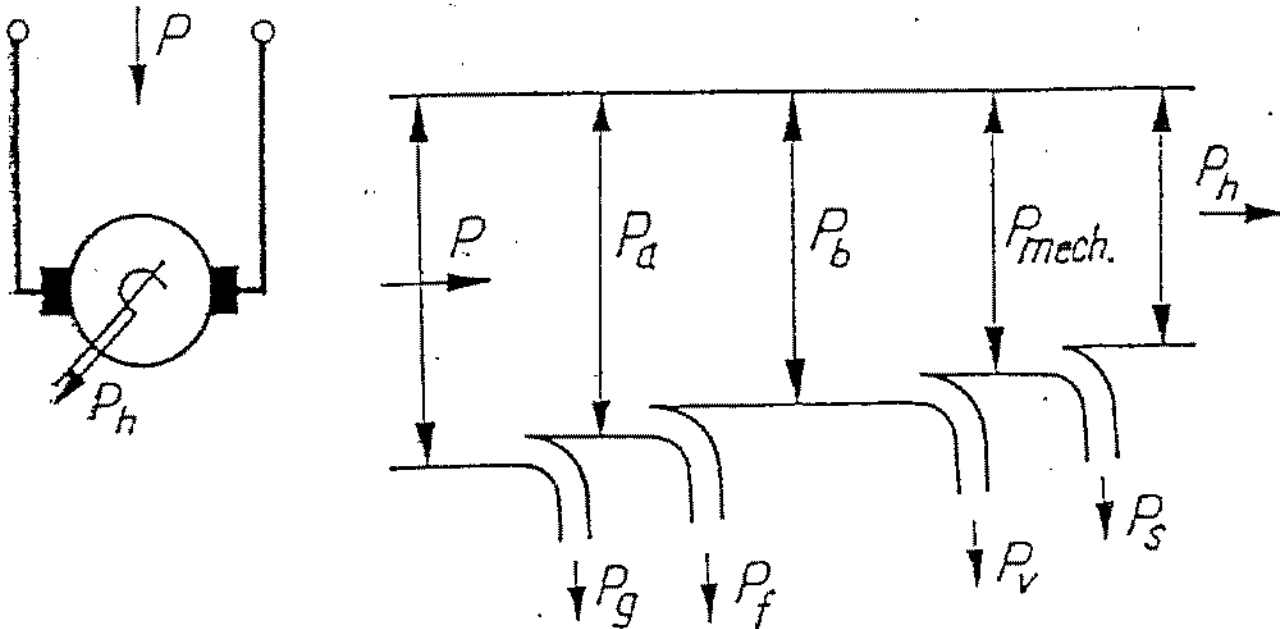
Az egyenáramú gép hatásfokának kiszámításához a teljesítményszalagot rajzoltuk meg a 32. ábrán egy motor esetére. A generátor teljesítményszalagja is hasonló, csupán irányítása fordított. A számítást egy sönt gerjesztésű motor példáján mutatjuk be.



30. ábra. Vegyes gerjesztésű generátor.



31. ábra. Vegyes gerjesztésű motor.



32. ábra. Egyenáramú gép teljesítményszalagja.

A motor hálózatról felvett teljesítménye:

$$P = U_k \cdot I$$

Ahol U_k - a gép kapocsfeszültsége; I - a hálózatról felvett árama.

A gerjesztéshez szükséges teljesítmény a mágnes tér előállításához szükséges, de a hatásfok szempontjából nem hasznosul:

$$P_g = U_k \cdot I_g = I_g^2 \cdot R_g = \frac{U_k^2}{R_g}$$

Ahol az I_g – gerjesztő áram, a következő összefüggésből számítható a gerjesztő ellenállás segítségével:

$$I_g = \frac{U_k}{R_g}$$

A megmaradó armatúrateljesítmény:

$$P_a = U_k \cdot I_a$$

Az armatúra árama Kirchhoff csomóponti törvénye alapján:

$$I_a = I - I_g$$

Az armatúra összellenállásán (armatúratekerccs+kefék+segédpólus+ kompenzálótekerccs) a teljesítmény egy része hővé alakul, amelyet főáramkörüi veszteségnek nevezünk:

$$P_{\text{v}} = I_a^2 \cdot R_a = \frac{(U_k - U_i)^2}{R_a}$$

Ennek levonása után a motor belső teljesítménye marad meg:

$$P_b = U_i \cdot I_a$$

Ha ebből levonjuk a vasvesztést, a mechanikai teljesítményt kapjuk:

$$P_{\text{mech}} = P_b - P_v$$

Ezt követően már csak a surlódási veszteséget kell levonnunk, hogy a hasznos teljesítményt, azaz a gép névleges teljesítményét kapjuk meg:

$$P_h = P_t = P_n = P_{\text{mech}} - P_s$$

A vas és surlódási veszteség értékét általában együttesen határozzuk meg üresjárásban. Amikor az egyenáramú gép nem ad le teljesítményt:

$$P_{(v+s)0} = P_0 - (P_g + P_{f0})$$

Ezt az üresjárási vas és surlódási veszteséget ezután csak a fordulatszámok arányában szoktuk módosítani:

$$P_{(v+s)} = P_{(v+s)0} \cdot \frac{n}{n_0}$$

A sönt gerjesztésű motor hatásfoka ezek után a szokásos képlettel számítható. Az egyenáramú gépek hatásfoka a viszonylag nagy légrés miatt 70–90 % közé esik. Az egyenáramú gép tengelynyomatéka az aszinkron motornál tárgyalt módon meghatározható. Gyakran azonban megelégszünk a villamos nyomaték meghatározásával, amely a belső teljesítményből adódik a legegyszerűbb formában:

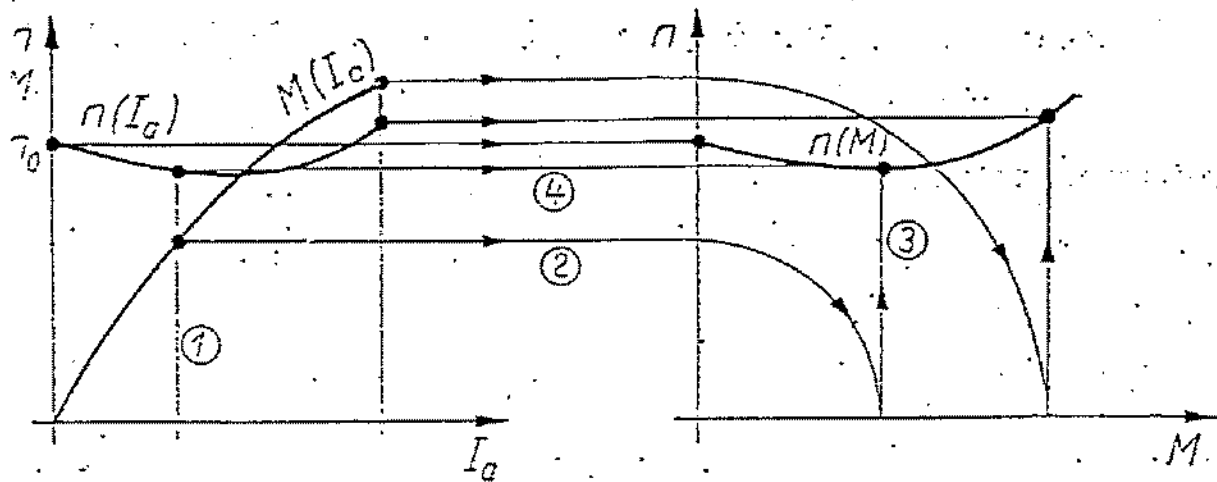
$$M_v = \frac{P_b}{\omega} = \frac{U_i \cdot I_a}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{c \cdot \Phi \cdot n \cdot I_a}{2 \cdot \pi \cdot n} = k \cdot \Phi \cdot I_a$$

Ahol a k – szintén gépállandó; a képletből látható, hogyan függ a „ c ” értékétől, Φ – a pólusfluxus értéke és I_a – az armatúra árama.

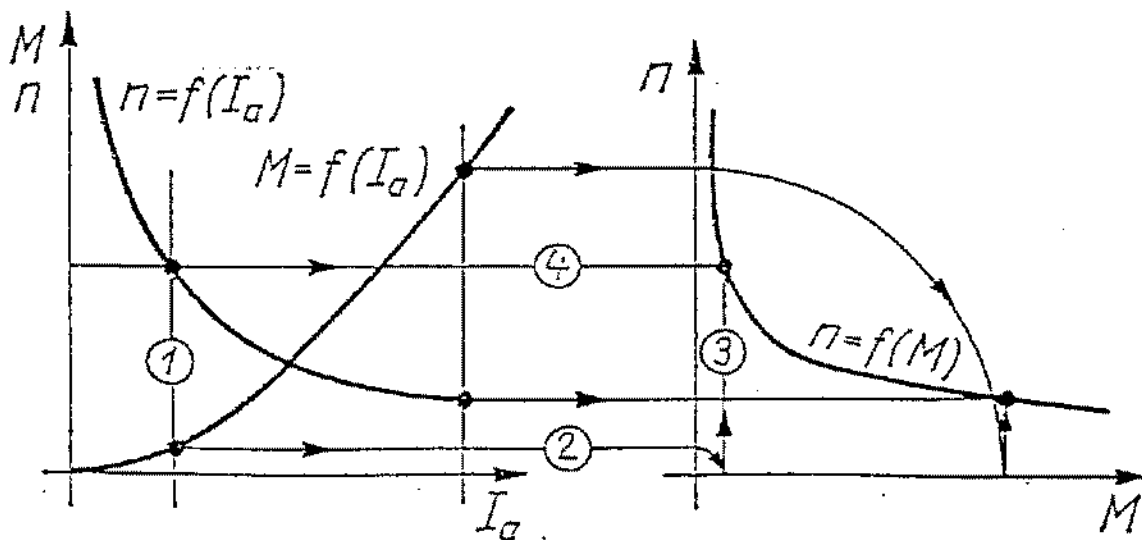
A különböző gerjesztésű egyenáramú motorok mechanikai jellegzőgörbéi számítással is meghatározhatók, de a következő ábráson szerkesztéssel mutatjuk be a sebességi $[n(I_a)]$ és a nyomatéki $[M(I_a)]$ jellegzőgörbék segítségével. A szerkesztés menete az ábrák számjelzései alapján követhető (33., 34. és 35. ábrák.).

A 33. ábrából látható, hogy a külső- és sönt gerjesztésű motor túlterhelve megszabad. Ennek magyarázatát már az előbbieken megadtuk. A 34. ábrából pedig az látható, hogy a soros gerjesztésű motor üresjárásban szalad meg, hiszen bekapcsoláskor a fluxus értéke gyakorlatilag nulla, így az indukált feszültség csak a fordulatszám ugrásszerű növekedése árán lehet közel olyan értékű, mint a kapocsfeszültség. A 35. ábra a vegyes gerjesztésű motor jellegzőgörbéjét mutatja, és jól látszik, hogy a sönt gerjesztés és a soros gerjesztés hátrányait sikerült kiküszöbölni.

A külső- és sönt gerjesztésű egyenáramú motort mechanikai jellegzőgörbéje alapján fordulatszám-tartónak ill. sebességtartónak nevezzük,



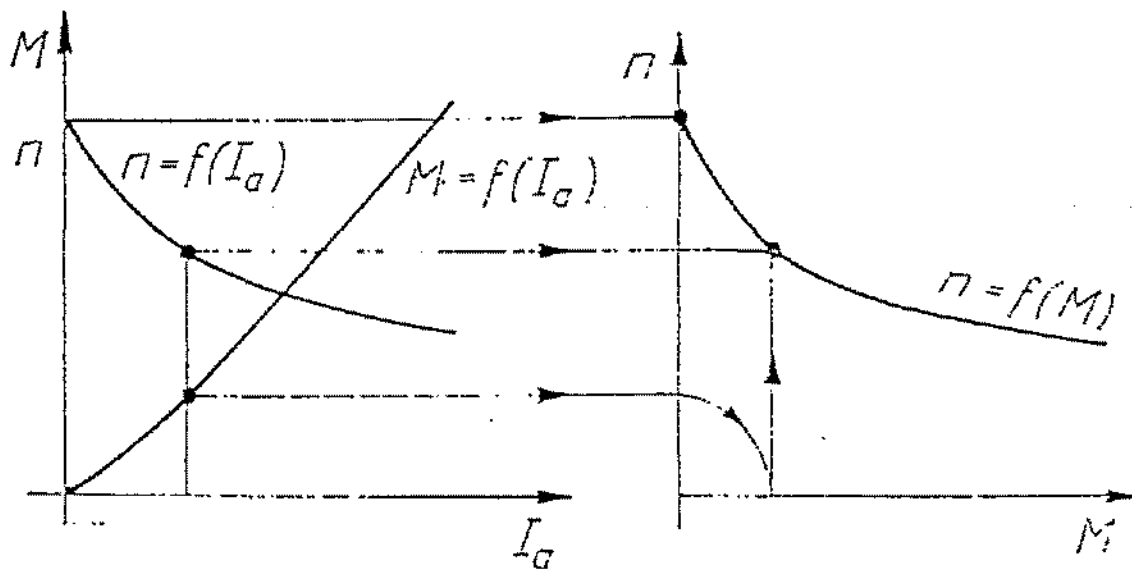
33. ábra. Külső és sönt gerjesztésű motor mechanikai jelleggörbéjének szerkesztése.



34. ábra. Soros motor mechanikai jelleggörbéjének szerkesztése.

mert a névleges nyomatékuk környezetében a fordulatszámuk alig változik. A soros gerjesztésű motort pedig nyomatéktartónak nevezzük, mivel jelleggörbéje közelítőleg egyenlőszárú hiperbola, amelyre az jellemző, hogy az ordináták szorzata állandó. A nyomaték és a fordulatszám szorzata pedig a teljesítmény. A vegyes gerjesztésű motor se nem fordulatszám-tartó, se nem nyomaték-tartó.

Sönt gerjesztésű motort alkalmaznak pl. a trolibusz hajtására, ahol fontos, hogy sebességével jól tudjon manipulálni, hiszen a közúti forgalomban vesz részt a többi járművel együtt. A soros gerjesztésű motor mivel teljesítmény-tartó, a villamos és a metró hajtására felel meg. Az egyenáramú-állomás terhelése közel állandó.



35. ábra. Vegyes gerjesztésű motor mechanikai jelleggörbéjének szerkesztése.

Az egyenáramú motorok indítása azért jelent problémát, mert induláskor a motor áll és nincs indukált feszültsége. A fellépő indítási áramlökés a motor kapocsfeszültségének és az armatúra ellenállásának hányadosa adja, amely a névleges áram 20-100 szorosa is lehet, ami nem engedhető meg. Az áramlökés oly módon csökkenthető, hogy az armatúra áramkörébe egy megfelelően méretezett ellenállást iktatunk. Ha az ellenállást úgy méretezzük, hogy az indítási áram ne legyen nagyobb, mint a névleges áram vagy annak legfeljebb 1,5 szerese, akkor lágy indításról van szó. Ha az indítási áramot a névleges áram 2-2,5 szeresében határozzuk meg, akkor kemény indításról beszélünk. Az indító ellenállást a motor áramköréből fokozatosan kiiktatjuk.

Az egyenáramú motorok fordulatszáma az alábbi képletben szereplő valamelyik mennyiség megváltoztatásával valósítható meg.

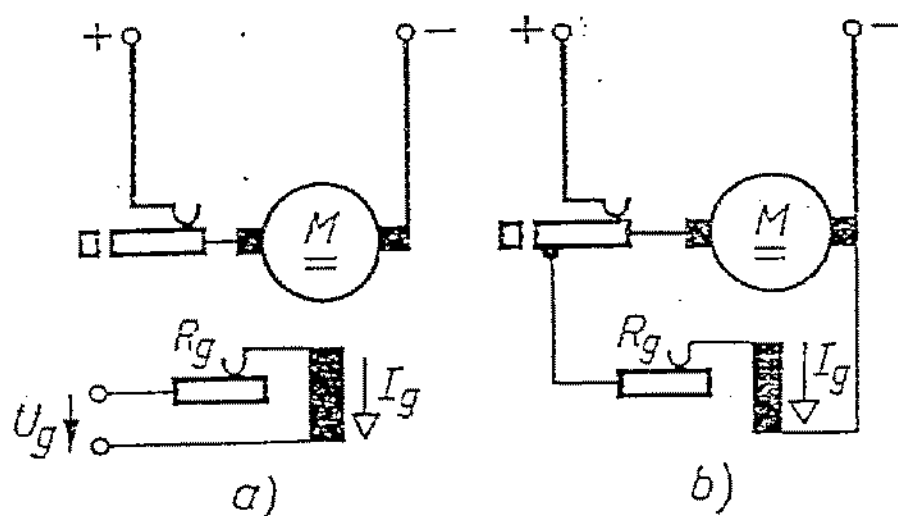
$$n = \frac{U_k - I_a \cdot R_a}{c \cdot \Phi}$$

A képletben az armatúra árama nem változtatható, mert ezt a terhelés határozza meg. A kapocsfeszültség változtatása akkor a legegyszerűbb, ha a motort tirisztoros egyenirányítóval táplájuk, így a gyújtásszög megfelelő beállításával tetszőleges fordulatszám állítható be. Ilyenkor természetesen külön beiktatott indítóellenállásra sincs szükség. Villamos vontatásnál, ha több motor áll rendelkezésre, akkor a motorok soros ill. párhuzamos kapcsolásával is elérhető néhány veszteségmentes fordulatszám fokozat. Az armatúra ellenállásának megváltoztatása az

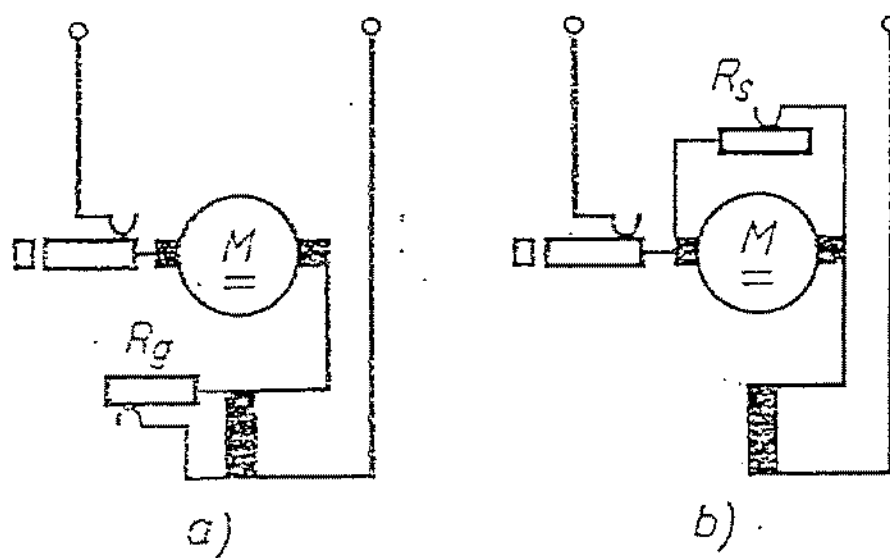
indításhoz hasonlóan az armatúra áramkörébe iktatott külső ellenállással valósítható meg, itt azonban az ellenállás állandóan üzemel és nem iktatjuk ki, mint az indítás esetében. Ekkor a fordulatszám csak csökkenthető és az ellenálláson jelentős teljesítmény alakul hővé. A fluxus változtatása a gerjesztőkörbe iktatott soros ellenállással oldható meg. Ebben az esetben a fluxus csökken, és ezáltal a fordulatszám növekszik. Ezt szokás mezőgyengítéses fordulatszám változtatásnak is nevezni. A gerjesztő áram lényegesen kisebb, mint az armatúraáram, így a hővé alakuló teljesítmény is sokkal kisebb. Erre mutat példát a 36. ábra. Soros gerjesztésű motor esetében az ellenállást párhuzamosan kell a gerjesztőtekercssel kötni. Az armatúrával párhuzamosan kötött ellenállással mód van a fluxus növelésére is. Ez mutatja a 37. ábra.

Az egyenáramú motorok fékezése többféleképpen valósítható meg. Hasznos fékezést végez a motor, ha fordulatszáma az üresjárási fordulatszám fölé nő. Ilyenkor a motor átmegy generátoros állapotba és mivel a generátoros nyomaték a hajtás ellen hat, fékezi a terhelést és villamos energiát táplál vissza a hálózatba. Soros motor esetén ez nem lehetséges, mert nincs határozott üresjárási fordulatszáma (elméletileg végtelen). Dinamikus fékezés úgy oldható meg, hogy a motort lekapcsoljuk a hálózatról és egy ellenállásra kötjük. Ilyenkor a terhelés hajtja a motort, amely ekkor generátoros állapotba kerül, és a termelt villamosenergia az ellenálláson hővé alakul. Ellenáramú fékezéskor a motor armatúrájának hálózatra csatlakozó kapcsait felcseréljük és az armatúra áramkörébe egy fékellenállást kötünk be egyidejűleg. A motor kapocsfeszültsége és indukált feszültsége sorba kötődik, emiatt a felvett áram amellett, hogy ellentétes lesz, kb. kétszerese az eredetinek. Ezért van szükség a fékellenállásra. Ilyenkor a gép a hálózatról villamos- a tengelyén pedig mechanikai energiát vesz fel, tehát se nem motor, se nem generátor. Ha a gép megállt, le kell kapcsolni a hálózatról, mert megindul ellentétes irányba.

Az egyenáramú motorok forgásirányváltása ill. reverzálása tulajdonképpen a hajtó nyomatékának irányváltását is jelenti, tehát a villamos nyomatékának képletében szereplő valamelyik mennyiséget kell ellentétes irányúra változtatni. A képletben a pólusfluxus és az armatúraáram szerepel. A reverzálás tehát úgy valósítható meg, hogy vagy a gerjesztő tekercs kapcsait, vagy az armatúra kapcsait kell felcserélni. Ha egyidejűleg mindkettőt felcseréljük, a motor forgásiránya nem fog megváltozni. Pl., ha a soros motor hálózatra csatlakozó kapcsait felcseréljük, nem változik meg a forgásiránya, mert egyidejűleg változott meg a gerjesztőáram és az armatúraáram iránya is.



36. ábra. a) Külső- és b) sönt gerjesztésű motor fluxusát a gerjesztőtekerccsel sorba kötött ellenállással csökkentjük.



37. ábra. Soros motor fluxusát a gerjesztőtekerccsel párhuzamosan kapcsolt ellenállással csökkenthetjük, az armatúrával párhuzamosan kapcsolt ellenállással növelhetjük.

Egyenirányítók.

Az egyenirányítók olyan villamosenergia-átalakítók, amelyek váltakozó áramú villamosenergiát egyenáramú villamosenergiává alakítanak. Az áramirányító olyan elem, amelynek villamosan vezető és nem vezető állapota van, vagy ilyen állapotba hozható, és nem tartalmaz mozgó alkatrészt. Ma már több száz ilyen elem létezik. Ilyenek a félvezetők. A félvezető a szilárd testek csoportjába tartozó, kristályos szerkezetű anyag, amelynek atomjai kovalens kötésben vannak. Vezetőképességüket tekintve a vezetők és a szigetelők között foglalnak helyet. Úgy is nevezhetnénk, hogy féligvezetők. A ma sorozatban gyártott félvezetők alpanyaga a szilícium és a germánium. A félvezető képesség javítása érdekében általában szennyeznek "p" ill. "n" típusú anyagokkal. Pl. ha a négy vegyértékű szilíciumot három vegyértékű (B, In, Ga) anyaggal szennyeznek (p-típusú), a kovalens kötésben egy ún. lyuk (elektronhiány) keletkezik, ha öt vegyértékű (Sb, P, As) anyaggal (n-típusú), akkor az ötödik elektron nem tud a kovalens kötésbe lépni.

A dióda egy hengeres szilícium egykristályból készült olyan félvezető, amelynek egyik oldaláról p-típusú, másik oldaláról n-típusú szennyezőt diffundálnak. A két szennyezés középen összeér, és egy p-n átmenet alakul ki. A kovalens kötésben nem lévő elektronok könnyen belépnek a lyukakba, így ionok keletkeznek. Ahonnan az elektron távozott, ott pozitív donorion, ahová belépett, ott negatív akceptorion keletkezett. Az ionok villamos teret létesítenek a kristály belsejében és tulajdonképpen ez alkotja a "p-n" átmenetet. A kristály két végét kivezetik. A "p" szennyezésű oldalhoz csatlakozó kivezetés az anód, az "n" szennyezésű oldalhoz csatlakozó a katód. Ha a diódára olyan feszültséget kapcsolunk, hogy az anódja pozitívabb lesz, mint a katódja (nyitóirányú igénybevétel), akkor a dióda kinyit és ha van zárt áramkör, áram folyik át a diódán az anódtól a katód felé. Ha a katód lesz pozitívabb az anódnál (záróirányú igénybevétel), akkor a dióda lezár, és gyakorlatilag nem folyik át rajta áram. Valóságos dióda esetén egy igen kis záróirányú áram (μA) folyik a katódtól az anód felé. Nyitóirányban tehát a dióda árammal, amíg záróirányban feszültséggel van igénybevéve. Záróirányban igénybevett félvezető az áttörési feszültség értékét túllépve tönkremegy. (A p-n átmenetben a villamos térerősség olyan nagy lesz, hogy elektronokat szakít ki a kovalens kötésből [téremisszió; Zener-effektus], ezt követően elektronsokszorozódás [láncreakció] is fellép: tönkremegy a kristályszerkezet.) Váltakozó feszültségre kapcsolva a diódát csak a pozitív félperiódust engedi át, azaz egyenirányít.

A tirisztor egy hengeres szilícium egykristályból készült olyan félvezető, amely négy szennyezett réteget tartalmaz, és három kivezetése van. Az anódtól a katód felé haladva: erősen szennyezett p-, gyengén

szennyezett széles n-, normál szennyezett keskeny p-, erősen szennyezett n-réteg. Így három p-n átmeneti réteg keletkezik. A harmadik kivezetés a keskeny p-rétegen van elhelyezve és neve vezérlő- vagy gyújtóelektród. A tirisztor akkor vezet, ha anódja pozitívabb, mint a katódja és van gyújtóimpulzus. A gyújtást egy külön berendezés (gyújtóegység) szolgáltatja. A gyújtás áramimpulzussal történik, mert a középső p-n átmeneti rétegnek a nyitóirányban igénybevett tirisztor esetén záróirányú az igénybevétele és ennek zárókéességét rontjuk le azáltal, hogy töltéseket injektálunk be a gyújtóelektródon keresztül, így ez is kinyit. Váltakozó feszültséget kapcsolva a tirisztorra a pozitív félhullámnak azt a részét engedi át, amelyet a gyújtás ráadásával szabtuk meg. Úgy mondjuk, hogy a tirisztor fázist hasít. Ha a katód pozitívabb, mint az anód, akkor a tirisztor záróirányban van igénybevéve és rajta gyakorlatilag áram nem folyik át. Az áttörési feszültség túllépése esetén a tirisztor is tönkemegy. A tirisztor tehát egy vezérelhető egyenirányító. A gyújtásszög értéke nulla is lehet, ekkor a tirisztor úgy viselkedik, mint a dióda.

A dióda és a tirisztor névleges árama, a févezetőn nyitóirányban megengedhető szinuszos félhullámú áram lineáris középértéke. Megengedett záróirányú feszültsége, a félvezető áttörési feszültség pillanatértékének kb. a fele. Ezek az adatok szerepelnek a katalógusokban.

A kapcsoláshoz szükséges félvezetőket úgy választjuk ki, hogy kiszámítjuk egy félvezető áramának lineáris középértékét (tirisztor esetén a nulla gyújtásszöghöz tartozóan), valamint a maximális záróirányú feszültség pillanatértékét, és ezeket hasonlítjuk össze a katalógusban szereplő adatokkal. Ez követően a félvezetőt melegeedésre ellenőrizni kell, és a hővé alakuló teljesítmény nem lehet nagyobb, mint a katalógusban szereplő disszipációs teljesítmény.

Az egyenirányító fázisszáma(F) a bemeneti váltakozó feszültség fázisszámával egyezik meg. Az útszám(U) egy vagy kettő lehet aszerint, hogy az egyenirányító bemeneti vezetőin egy periódus alatt az áram egy vagy két irányban folyik. Az ütemszám(P) attól függ, hogy egy hálózati periódusidő alatt az egyenirányított feszültségnek ill. áramnak hány pozitív csúcsa van. A fentiek alapján a fázisszám és az útszám szorzata az ütemszámot adja eredményül.

Az egyenirányítók bemenetén rendszerint transzfomátorra van szükség, ha azt szeretnénk, hogy az egyenirányított feszültség adott értékű legyen. Tirisztoros egyenirányítók esetén nem feltétlen szükséges transzformátor, hiszen megfelelő gyújtásszög beállítással a kívánt feszültség előállítható. Ilyenkor a tirisztoros egyenirányító közvetlenül a hálózatra csatlakozik. Ha a váltakozó feszültség és áram nagyságát szeretnénk változtatni, akkor fázisonként ellenpárhuzamos tirisztor kapcsolást alkalmazunk. Ilyenkor az egyik félvezető anódját a másik

katódjával kötjük össze kölcsönösen. A pozitív félperiódust az egyik, a negatív félperiódust a másik félvezető fogja vezetni. Ez a kapcsolás a váltakozó áramú szaggató, tehát nem egyenirányító kapcsolásról van szó. Az egyenirányítók esetében különböző középértékeket definiálunk:

Fizikailag a változó áram lineáris középértéke, egy olyan síma egyenárammal egyezik meg, amely egy bontócellában ugyanannyi idő alatt, ugyanannyi anyagot választ ki. A lineáris középérték tehát, kémiai egyenértékkel van definiálva. Matematikailag a függvénygörbe alatti előjel nélküli területtel számítható ki:

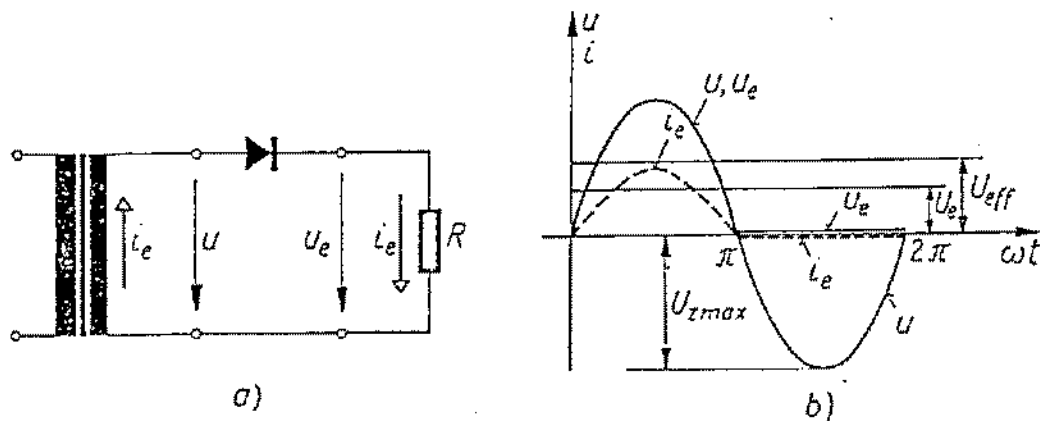
$$I_e = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot dt$$

Fizikailag a változó áram effektív középértéke, egy olyan síma egyenárammal egyezik meg, amely egy ellenálláson ugyanannyi idő alatt, ugyanannyi hőt termel. Az effektív középérték tehát, hőegyenértékkel van definiálva. Matematikailag a függvénygörbe négyzete alatti területtel számítható ki:

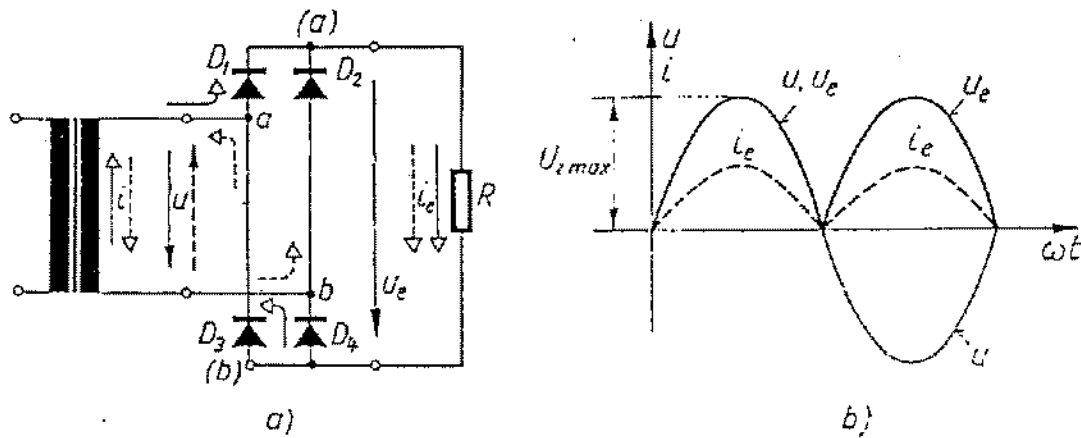
$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i(t)]^2 \cdot dt}$$

Az egyenirányított feszültség középértékei hasonló módon számíthatók. Az effektív középérték mindig nagyobb, mint a lineáris középérték, legfeljebb (nagyobb ütemszám esetén) azzal gyakorlatilag megegyezik. A félvezetőt záróirányban igénybevevő maximális feszültséget úgy határozzuk meg, hogy a felrajzolt időfüggvényből megállapítjuk az éppen nem vezető dióda vagy tirisztor anódjának és katódjának potenciál változását, és kikeressük a potenciálkülönbség maximális értékét (U_{zmax}).

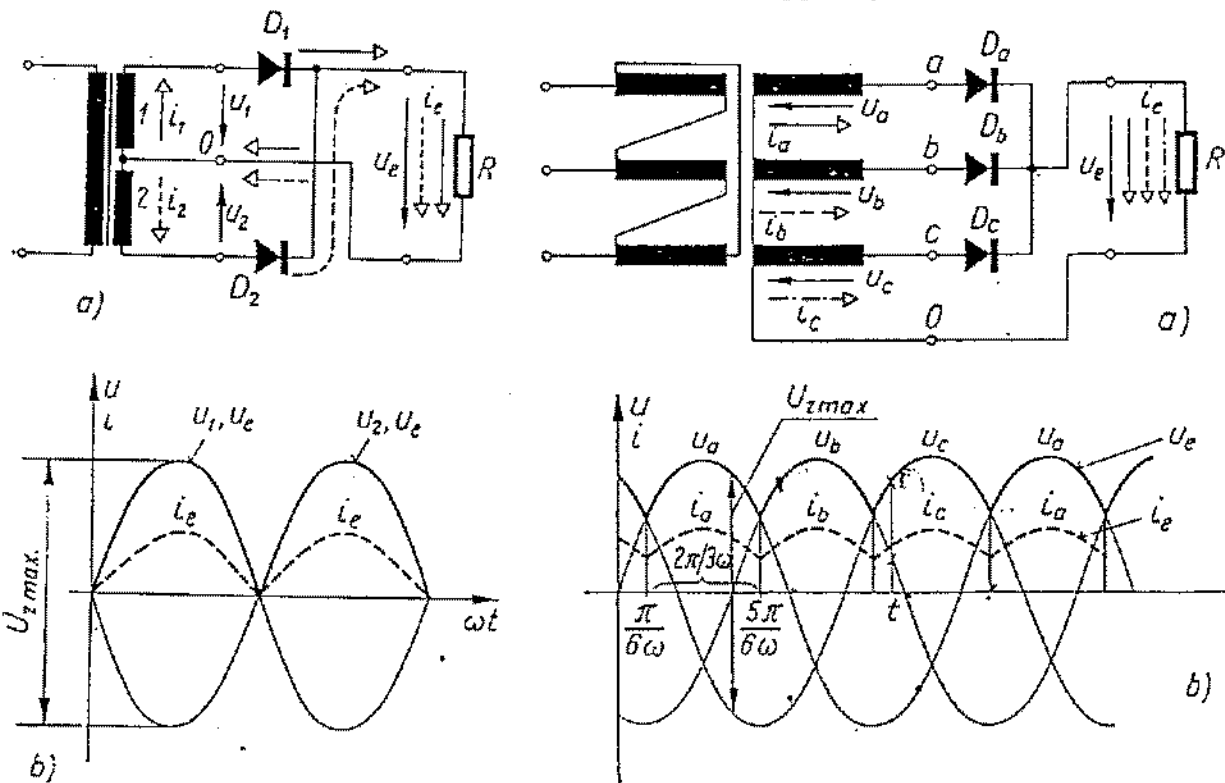
Az alábbiakban néhány egyenirányító kapcsolást mutatunk be.



38. ábra. 1F 1U diódás egyenirányító: a) kapcsolása; és b) időfüggvénye.



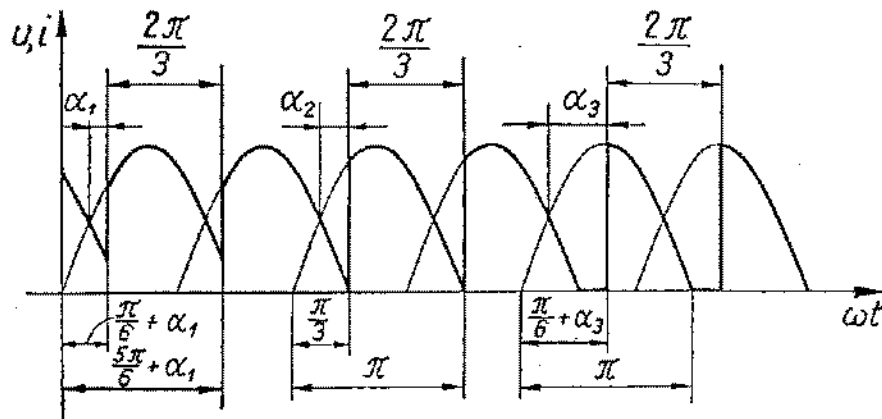
39. ábra. Ohmos terhelésű 1F 2U diódás egyenirányító (1 fázisú Grectz- vagy híd-): a) kapcsolása; és b) időfüggvénye.



40. ábra. 2F 1U diódás egyenirányító: a) kapcsolása; b) időfüggvénye.

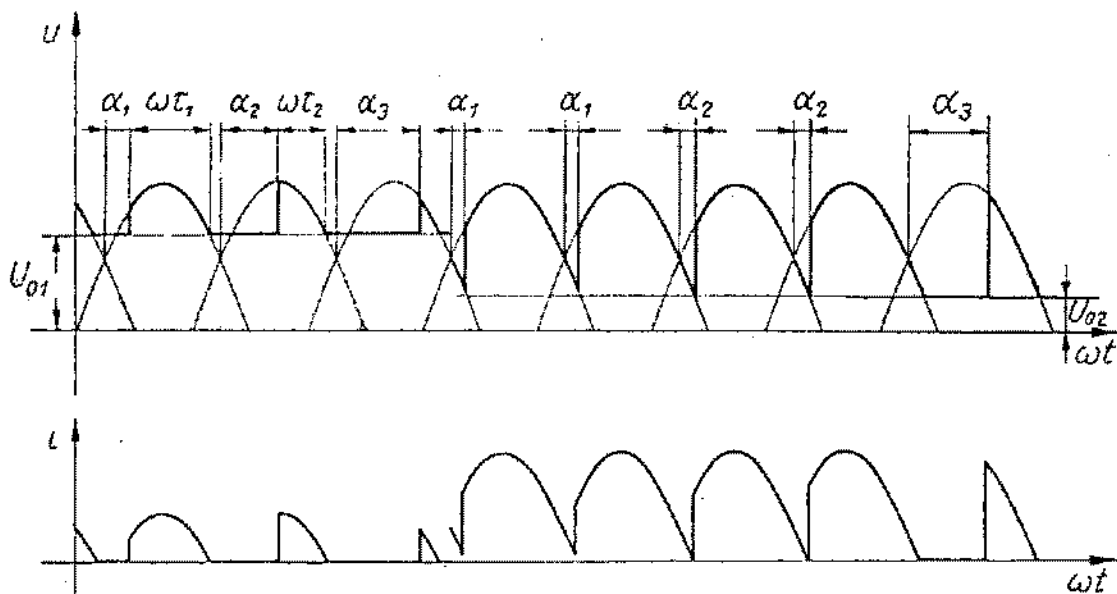
41. ábra. 3F 1U diódás egyenirányító a) kapcsolása; b) időfüggvénye.

Tirisztoros egyenirányítók esetén a gyújtásszöget mindig a természetes kommutációs ponttól kell számítani. Természetes kommutációs pont az a hely, ahol a diódás egyenirányítók a bemeneti feszültség alakulása folytán természetes módon átveszik egymástól a vezetést (kommutálnak). Ez a hely 3F 1U egyenirányító esetén 30° , azaz $\pi/6$ rad.



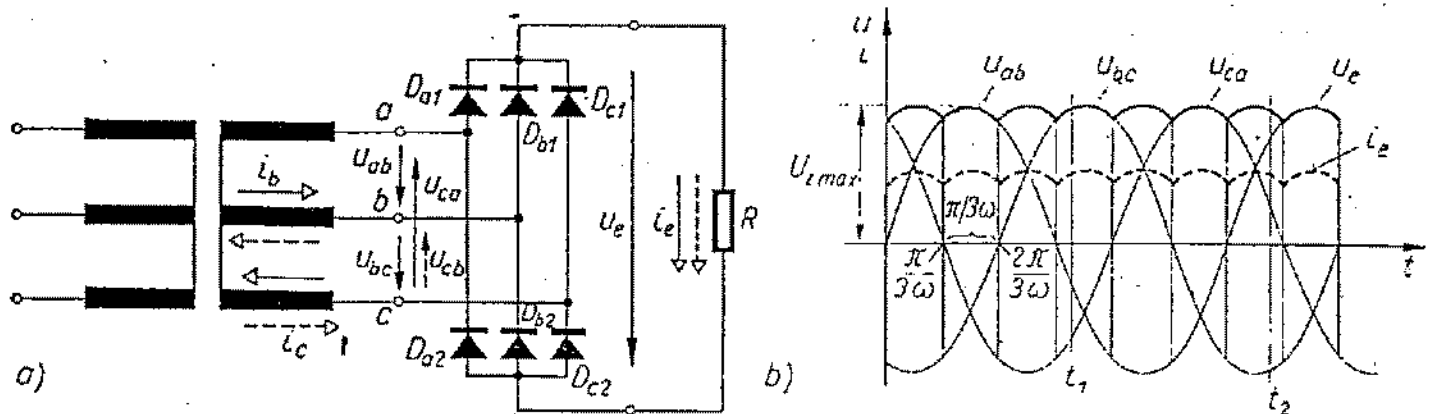
42. ábra. Ohmos ellenállás terhelésű 3F 1U tirisztoros egyenirányító időfüggvénye különböző gyújtásszögek esetén.

Az egyenirányított áram alakja (Ohm törvénye szerint) ugyan ilyen, csupán amplitúdója kisebb. Két különböző U_0 feszültségű akkumulátor töltésére mutat példát a 43. ábra, változó gyújtásszögek esetére.

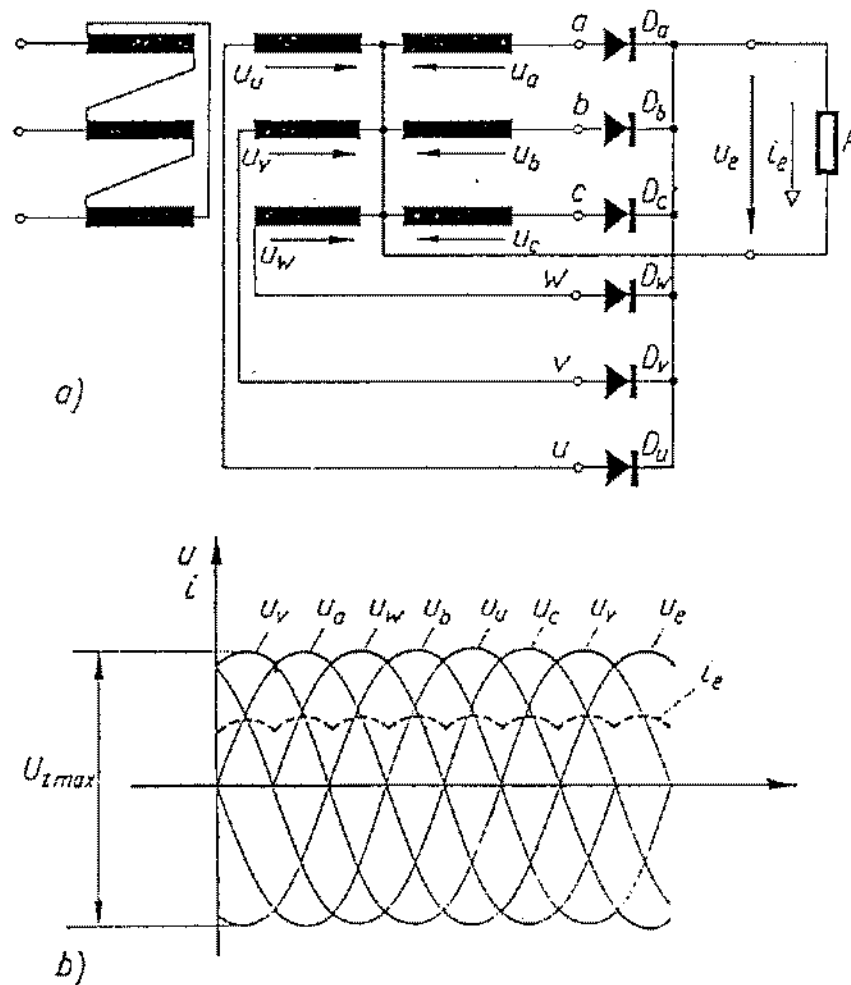


43. ábra. Az egyenirányított feszültség és áram időfüggvénye 3F 1U tirisztoros egyenirányító R- U_0 terhelése esetén változó gyújtásszögekre.

Az egyenirányítókat leggyakrabban az egyenáramú motorok gerjesztő tekercsének és armatúrájának táplálására használják. A gerjesztő tekercs esetében általában elegendő egyfázisú híd-kapcsolású egyenirányító alkalmazása, az armatúrát rendszerint hatütemű egyenirányítóval táplálják. Az ütemszám növelésével ugyanis mind a feszültség, mind pedig az áram sokkal simább lesz. Hatütemű kapcsolásokra és időfüggvényeikre mutat példát a 44. és a 45. ábra.

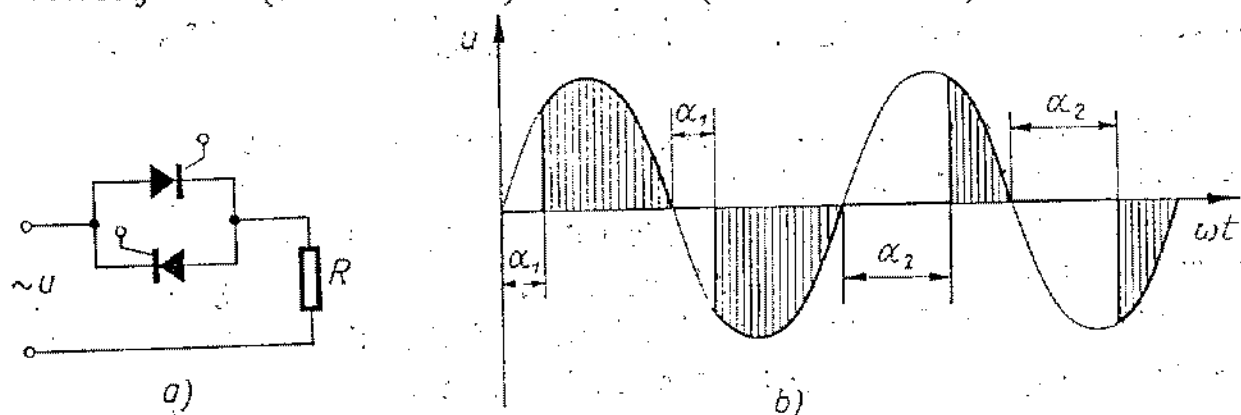


44. ábra. Ohmos terhelésű 3F 2U diódás egyenirányító: a) kapcsolása; és b) időfüggvénye.

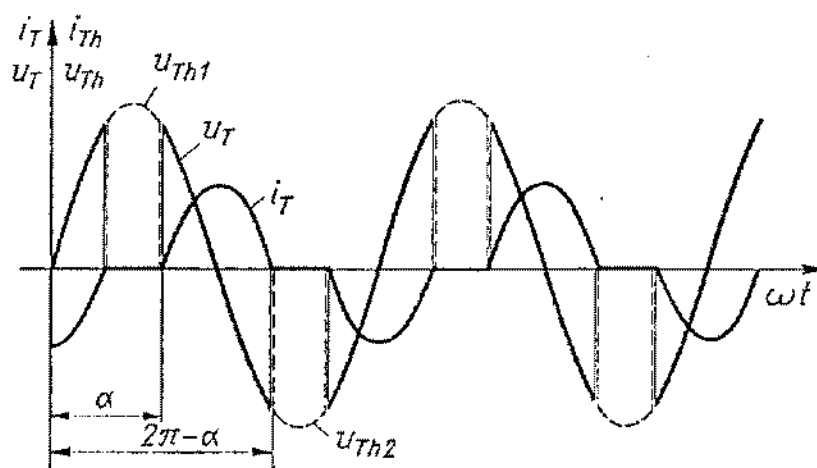


45. ábra. Ohmos terhelésű 6F 1U diódás egyenirányító: a) kapcsolása; és b) időfüggvénye.

Egyfázisú váltakozó áramú szaggató kapcsolást és időfüggvényeit ábrázolja a 46. (ohmos terhelés) és 47. ábra (induktív terhelés).



46. ábra. Ohmos terhelésű egyfázisú szaggató: a) kapcsolása; és b) időfüggvénye két különböző gyújtásszög esetén.



47. ábra. Induktív terhelésű egyfázisú szaggató időfüggvénye 120° azaz $2\pi/3$ rad gyújtásszög esetén.

Induktív terhelés esetén a félvezető a feszültség nullátmenete után is nyitva marad, mert az indukált feszültség negatívabban tartja a katódot, mint az anód potenciálja. Az áramirányítón azonban az áram csak azonos irányú maradhat. Az ellentétes irányú feszültség és áram negatív teljesítményt eredményez, ami azt jelenti, hogy a mágnesező (reaktív) energia a termelő felé áramlik. A félvezető tehát addig marad nyitva, amíg a felvett induktív energia egyenlő nem lesz a leadott induktív energiával. Ha a gyújtásszög egyenlő a fogyasztó fázisszögével az áramvezetés folyamatos lesz. Addig vezet az egyik tirisztor, amikor a másikat éppen gyújtjuk. Az időfüggvény ebben az esetben olyan, mintha nem is lenne félvezető az áramkörben. Ha a gyújtásszög kisebb, mint a fogyasztó fázisszöge, a kapcsolás átmegy egyenirányító üzembe.

Villamosenergia-gazdálkodás és – minőségi jellemzői.

Minden villamosenergia fogyasztónak az Áramszolgáltatóval szerződést kell kötnie. Jelenleg három féle energiaszolgáltatói formája van:

1. Egytarifás (kisfogyasztók, háztartások).
2. Kéttarifás (közepes fogyasztók: kisüzem, Kft, BT).
3. Teljesítménydíjas (ipari nagyfogyasztók).

Az egytarifás szerződés alapján a fogyasztó az elfogyasztott villamosenergiának megfelelő ún. áramdíjat fizet. A kéttarifás fogyasztók esetében külön nappali (6-18 óráig) és külön éjszakai (18-6 óráig) áramdíjat fizetnek. A teljesítménydíjas fogyasztóknak havi bontásban teljesítményt kell lekötönniük (külön a csúcsidőszakra és külön a nap többi időszakára), és ennek ára egy alapidíj ill. csúcsdíj, az elfogyasztott villamosenergia után pedig nappali és éjszakai áramdíjat kell fizetni. Ezen kívül az átlagos teljesítménytényező alapján pótdíjat kell fizetni az áramdíj százalékának megfelelően:

cosφ	0,98- 0,96	1,00- 0,98	0,98- 1,00	0,96- 0,98	0,94- 0,96	0,92- 0,94	0,90- 0,92	0,88- 0,90	0,86- 0,88
Felár	6 %	4 %	-5 %	-4 %	-3 %	-2 %	0 %	2 %	4 %

A negatív felár természetesen visszatérítést jelent. A teljesítménydíjat mindenképpen ki kell fizetni, akár kihasználják, akár nem. Ez azonban azt is jelenti, hogy az Áramszolgáltató garantálja ennek rendelkezésreállítását. Ha a fogyasztó csúcsidőszakban túllépi a lekötött teljesítményt a hónap folyamán akár egyszer is, tízszeres felárat kell fizetnie az áramdíj után.

A fogyasztók szinte mindegyike induktív jellegű. Működéséhez tehát meddőteljesítményre van szükség. Ha ezt az áramszolgáltatónak kell biztosítania, a hálózaton többlet veszteség jelentkezik. Ezért ösztönöz a meddőteljesítmény helyi kompenzálásának megvalósítására. A meddőteljesítmény kompenzálásának alapelve, hogy a berendezés számára szükséges mágnesező energiát a fogyasztóval párhuzamosan kapcsolt kondenzátorteleppel állítsuk elő. A kondenzátor az a passzív elem, amely meddőteljesítmény termelni képes. Kisfeszültségű fogyasztó esetén a kondenzátortelepet feltétlen deltába kell kapcsolni, mert ugyan olyan kapacitás esetén háromszor annyi meddőteljesítményt szolgáltat, mint csillag-kapcsolásban, igaz a vonali árama is háromszor akkora lesz. Ha azt szeretnénk, hogy a teljesítménytényező értéke 1 legyen, akkor a kondenzátor teljesítményének meg kell egyeznie a fogyasztó induktív teljesítményével. Ennek alapján meghatározható a szükséges kapacitás értéke.

$$Q_L = S \cdot \sin \varphi = 3 \cdot U_f^2 \cdot \omega \cdot C = Q_C$$

$$C = \frac{S \cdot \sin \varphi}{3 \cdot U_f^2 \cdot \omega} [F]$$

Iparvállalatoknál a kondenzátorteletet az elosztó gyűjtősínre kapcsolják, így csoportos kompenzáció valósul meg. Általában nem szokás $\cos \varphi = 1$ értékre kompenzálni, mert túl sok kondenzátorra van szükség és a fogyasztók kikapcsolása esetén túlkompenzálás léphet fel, amit az áramszolgáltató szintén büntet.

A villamosenergia is termék, ennek is vannak minőségi jellemzői, amelyeket szabvány rögzít. A villamosenergia minőségét a feszültségével jellemzik. Az MSZ EN 50 160 sz. szabvány a feszültségnek mintegy 14 jellemzőjét írja elő, amelynek biztosításáért az áramszolgáltató a felelős. A villamosenergia minőségét azonban elsősorban a nagyteljesítménnyel üzemelő fogyasztók rontják. Ezek a minőségi jellemzők az EMC (ElectroMagnetic Compatibility=elektromágneses összeférhetőség) tárgykörébe tartoznak. Az EMC egy berendezésnek vagy rendszernek az a tulajdonsága, hogy elektromágneses környezetben kielégítően működik anélkül, hogy bármilyen más számára elviselhetetlen zavart idézne elő. A zavar lehet: vezetett (vezetőn terjedő); csatolt (induktív vagy kapacitív); és sugárzott (elektromágneses nagyfrekvenciás). Az erősáramú berendezések esetében legjelentősebbek a vezetett, folyamatosan jelentkező zavarok.

A háromfázisú feszültség aszimmetriáját okozzák az egyfázisú ill. a háromfázisú nagyteljesítményű aszimmetrikus fogyasztók. Kis- és középfeszültségű hálózatok aszimmetriája nem lehet nagyobb, mint 5 %. Ez a negatív és pozitív sorrendű feszültségek viszonyának %-os értéke.

A feszültség amplitúdójának változása az izzólámpák fényerő változását (villódzás=flicker) idézi elő. Ezt elsősorban a gyors meddőtéljesítményváltozással üzemelő fogyasztók okozzák (pl. ívkemence, hegesztő berendezés). A flicker mérésére egy flicker-mérő vagy analízáló műszer szolgáltat adatokat, amely alapvetően 10 perces (rövid idejű: P_{st}) és 2 órás (hosszú idejű: P_{lt}) értékeket rögzít. Kis- és középfeszültségű hálózatok esetében mindkét érték legfeljebb 1 lehet.

A nemlineáris fogyasztók (pl. egyenirányítók) üzemeltetése a feszültség görbealakjának torzulását idézi elő. A torz feszültséggörbe Fourier-analizissal egy konstans és különböző frekvenciájú (felharmonikus) szinusz függvények összegeként írható fel. A felharmonikusok az alapharmonikus (50 Hz) egészszámú többszörösei. A felharmonikus analízis elvégzésére célműszerek állnak rendelkezésre. A műszer az egyes felharmonikusok alapharmonikusra vonatkozó súlyozott, relatív értékeit és a négyzetösszegükből képzett torzítási tényezőt jelzik ki. A megengedhető értékeket a fenti szabvány tartalmazza (pl. THD < 8 %).

A fogyasztók által okozott hálózati zavarokat elsősorban a zavart okozónak kell csökkentenie, bár jelenleg sem jogszabály, sem a tarifa szerződés még erre nem kötelezi. Nagyfeszültségű hálózatokra vonatkozóan sem hazai, sem nemzetközi szabványok ma még nem tartalmazznak előírásokat.

Nagy iparvállalatok zavarszűrő állomásokat létesítenek az okozott zavarok csökkentésére, különösen akkor, ha saját berendezéseik biztonságos üzemeltetése is veszélybe kerül. Az aszimmetria szimmetráló berendezéssel csökkenthető oly módon, hogy a zavarszűrést fázisonként alkítják ki, és ezt az aszimmetriának megfelelően vezérlik. A flickert úgy csökkentik, hogy olyan teljesítményű kondenzátortelepet építenek be, amely a maximális meddőteljesítmény-igénynek felel meg, és az éppen szükségtelen kapacitív meddőteljesítményt egy ellenpárhuzamosan kapcsolt tirisztorokkal vezérelt fojtótekerccsel nyeletik el. Ezzel biztosítható a feszültség amplitúdójának kis mértékű ingadozása. A felharmonikusok és a torzítási tényező oly módon csökkenthető, hogy a beépített kondenzátortelepet az előforduló felharmonikusokra hangolt soros szűrőkörökkel alakítják ki. A szűrőkör a rezonanciafrekvenciája alatt kapacitív, a rezonanciafrekvencián ohmos és felette induktív. Ily módon az egyes felharmonikusok számára a legkisebb ellenállást jelenti és elnyeli, tehát nem juthatnak ki a villamos elosztóhálózatra.

Felhasznált irodalom:

1. Szerk.: Gárdonyi J.: Erőművek és állomások villamos berendezése
Műszaki Könyvkiadó Bp. 1987
2. Uray V., Szabó Sz.: Elektrotechnika
Tankönyvkiadó Bp. 1981 44454
3. Szerk.: Tímár P. L.: Villamos energetika I., II., III.
BME és MEE kiadvány Bp. 1994
4. MSZ 1585, 1600, 1610; MSZ EN 2364; MSZ EN 50 160 szabványok.