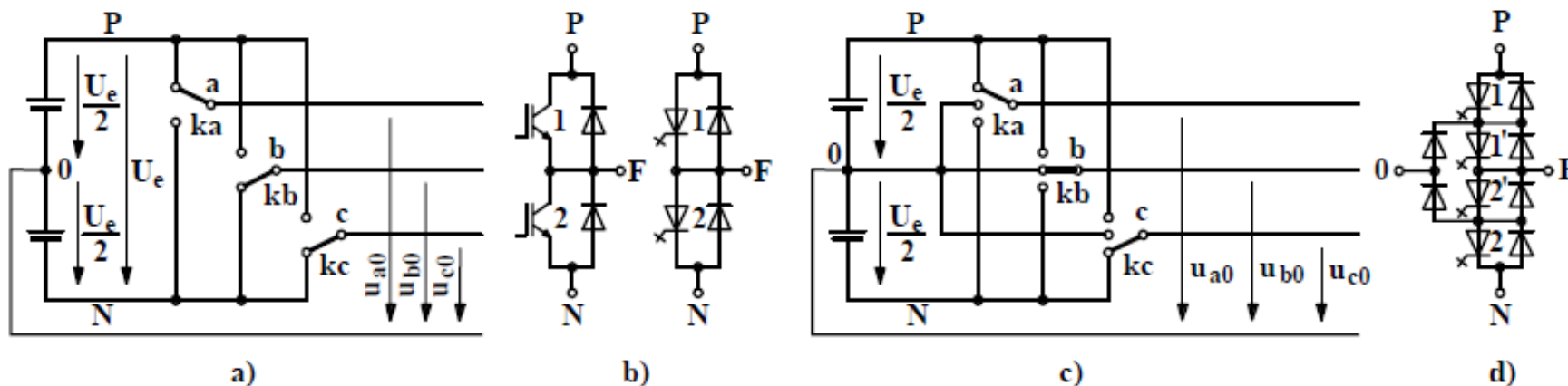


## Háromfázisú, kétszintű ISZM feszültséginverter (ismétlés)

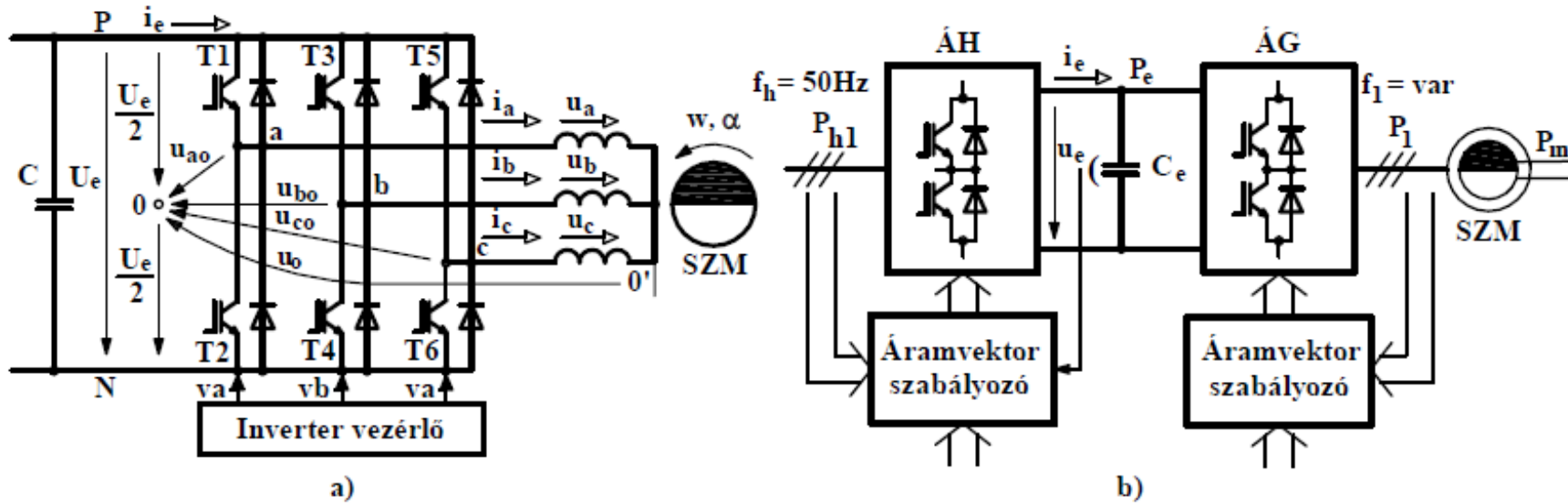
Villamos hajtásos gyakorlatban **kétszintű és háromszintű** feszültséginvertereket (voltage source inverter, VSI) alkalmaznak. Ezek  $U_e = \text{const.}$  egyenfeszültségből állítják elő a változtatható  $f_1$  frekvenciájú és  $u_1$  amplitúdójú háromfázisú feszültséget impulzusszélesség modulációt (ISZM-et) alkalmazva.



4.8. ábra: Feszültséginverterek. a. Kétszintű **elvi** kapcsolás, b. Kétszintű IGBT-s és GTO-s hídág, c. Háromszintű **elvi** kapcsolás, d. Háromszintű GTO-s hídág.

A 4.8.a. és c. ábrák az elvi kapcsolásokat, a b. és d. ábrák a valóságos hídágakat (F az adott fázis) mutatják. Ipari hajtásokban az  $U_e$  egyenfeszültséget az  $f_h = 50\text{Hz}$ -es háromfázisú hálózatra kapcsolt áramirányítóval állítják elő. **Kétszintűnél a 0 pont fiktív, háromszintűnél valóságos, terhelhető.** Ennek megfelelően az  $u_{a0}$ ,  $u_{b0}$ ,  $u_{c0}$  feszültségek kétszintűnél két értéket ( $+\frac{U_e}{2}$ ,  $-\frac{U_e}{2}$ ), háromszintűnél három értéket ( $+\frac{U_e}{2}$ ,  $0$ ,  $-\frac{U_e}{2}$ ) vehetnek fel. Az állásos kapcsolókkal létrehozható állapotok száma kétszintűnél:  $2^3 = 8$ , háromszintűnél:  $3^3 = 27$  (**általánosságban: szintszám<sup>fázisszám</sup>**). Mivel a kétszintű terjedt el széleskörűen, ezért a következőkben csak ezzel foglalkozunk.

Leggyakrabban IGBT-s kétszintű feszültséginvertert (4.9.a. ábra) alkalmaznak.



4.9. ábra: Feszültséginverteres hajtás. a. IGBT-s kétszintű feszültséginverter, b. Táplálás feszültséginverter kapcsolású ÁG és ÁH áramirányítókon keresztül.

**A fázisok hídágai ugyanolyanok mint a négynegyedes egyenáramú szaggatónál.** Ideális T1-T6 tranzisztorokat (IGBT-eket) és D1-D6 diódákat feltételezve az a,b,c fázisok vagy a P pozitív, vagy az N negatív sínhez kapcsolódnak. Egy hídágban vagy a felső, vagy az alsó tranzisztor kapcsolható be, az összegyűjtés P-N zárlatot okoz. A bekapcsolt tranzisztor, vagy az ellenpárhuzamos visszáram dióda vezet a fázisáram irányától függően. **Ez akkor igaz, ha teljesül az inverter vezérelhetőségét biztosító**

$$U_e > U_{vmax} \quad (4.13)$$

feszültség feltétel, **azaz az egyenfeszültség nagyobb mint az a,b,c pontok közötti vonali feszültség maximuma**. Ellenkező esetben a visszáram diódák időnként (amikor nyitóirányú a feszültségük) kinyitnak, akkor is ha nincs bekapcsolva a paralel tranzisztor.

A következőkben feltételezzük, hogy a kétszintű va, vb, vc vezérlő jelekkel mindhárom hídágban bekapcsolunk egy tranzisztort és teljesül a (4.13) feltétel. A 4.1. táblázat mutatja, hogy a lehetséges 8 állapotban az a,b,c fázisok hogyan csatlakoznak a P és N sínhez.

4.1. táblázat: A 8 kapcsolási állapot.

k	1	2	3	4	5	6	7P	7N
a	P	P	N	N	N	P	P	N
b	N	P	P	P	N	N	P	N
c	N	N	N	P	P	P	P	N

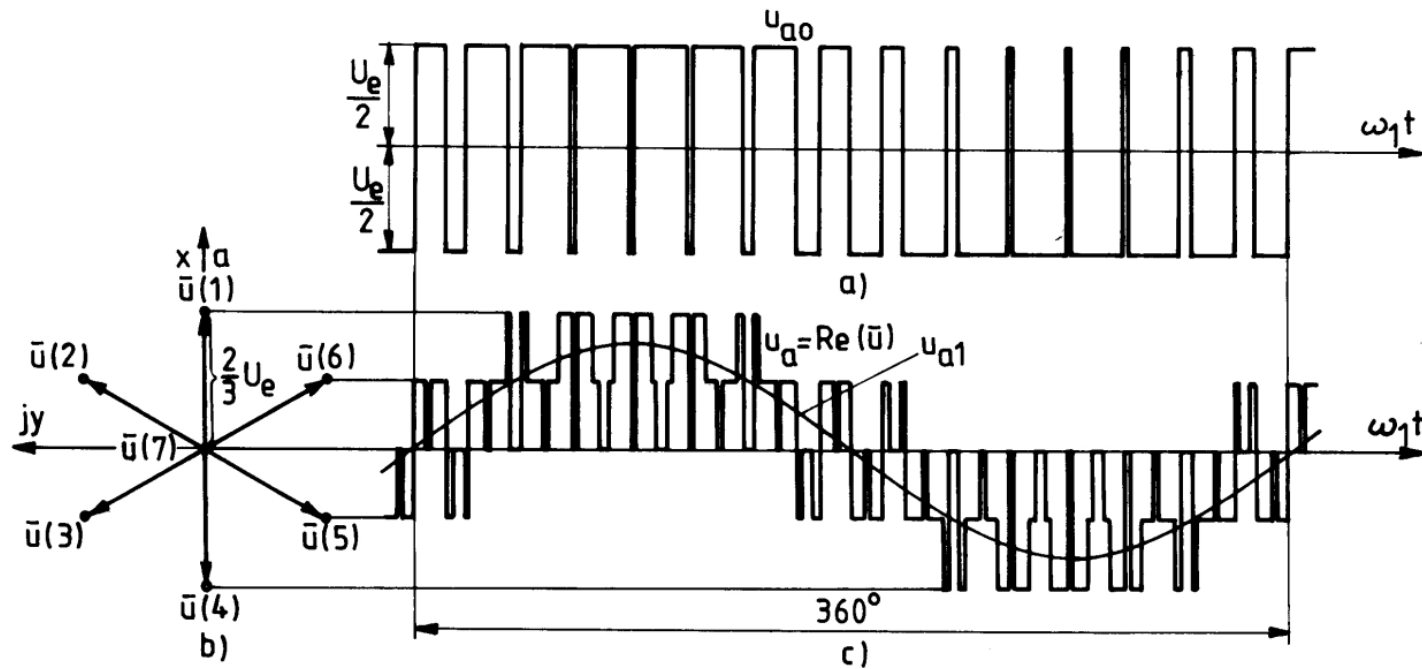
**A 8 állapothoz 7 különböző feszültségvektor tartozik az inverter kimenetén (az  $\bar{u} = 0$  kétféleképpen 7P-vel és 7N-nel hozható létre):**

$$k = 1, 2, \dots, 6: \quad \bar{u}(k) = \frac{2}{3} U_e e^{j(k-1)60^\circ}, \quad \bar{u}(7) = 0. \quad (4.14)$$

Eszerint a kétszintű feszültséginverter  $U_e = \text{const.}$  esetben egy **7 állásos vektoros beavatkozó szerv**. E 7 darab  $\bar{u}(k)$  vektor közötti ISZM kapcsolgatással állítható elő a kívánt  $\omega_1 = 2\pi f_1$  körfrekvenciájú és  $u_1$  amplitúdójú alapharmonikus feszültségvektor:

$$\bar{u}_1 = u_1 e^{j\omega_1 t}. \quad (4.15)$$

A 4.10. ábra mutat egy jellegzetes inverter feszültség képet.



4.10. ábra: ISZM feszültséginverter feszültségei.

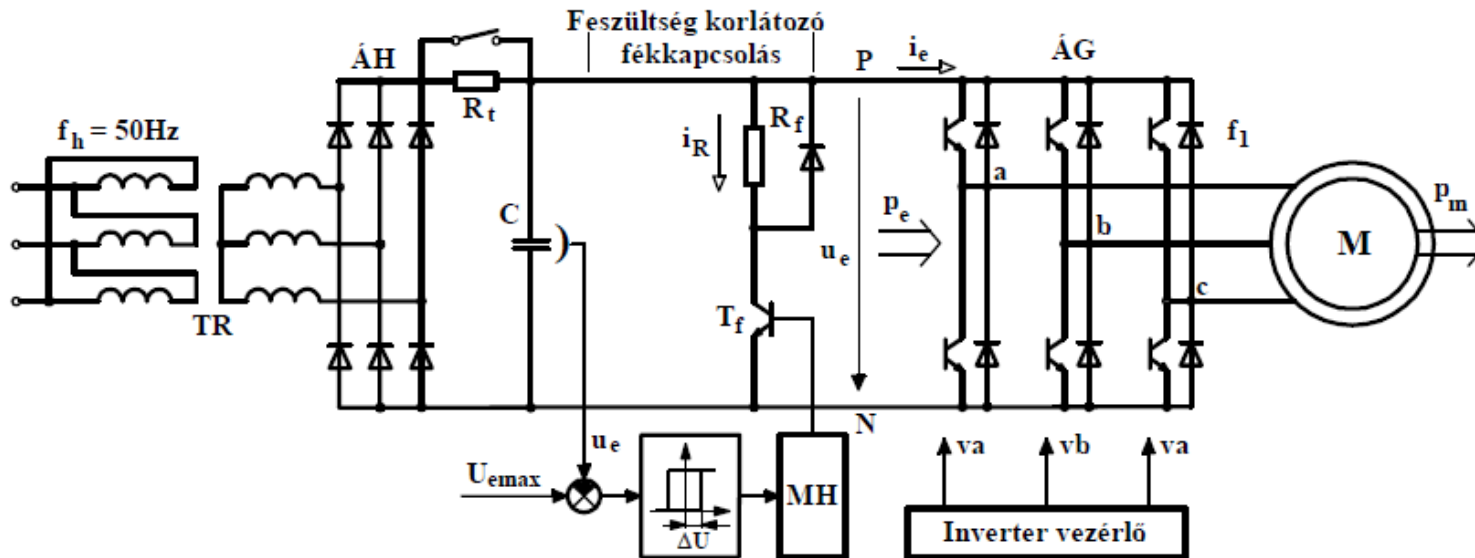
a. Fázisfeszültség a o ponthoz képest, b. Feszültségvektorok, c. Fázisfeszültség a csillagponthoz képest.

**Az energiaáramlás mindkét irányban lehetséges, ha az egyenáramú kör képes rá.** Ez közbülső egyenáramú körös megoldásban attól függ, hogy hogyan állítják elő az  $U_e = \text{const.}$  egyenfeszültséget. A legkorszerűbb 4.9.b. ábra szerinti változatban mind a villamos gép oldalán levő ÁG, mind a hálózat oldalán lévő ÁH áramirányító feszültséginverter kapcsolású. Ekkor mind a két irányban áramolhat a teljesítmény. A legegyszerűbb esetben ÁH diódás híd, amikor csak motoros üzem lehetséges. **Motoros hajtás üzemben az egyenáram középértéke  $I_{ek} > 0$ , generátoros fék üzemben  $I_{ek} < 0$ .** Veszteségmentes energiaátalakítási láncot feltételezve a teljesítmények középértéke a 4.9.b. ábra jelöléseivel:

$$P_m = M_k W = P_1 = \frac{3}{2} U_1 I_1 \cos \varphi_1 = P_e = U_e I_{ek} = P_{h1} = \frac{3}{2} U_{h1} I_{h1} \cos \varphi_{h1}.$$

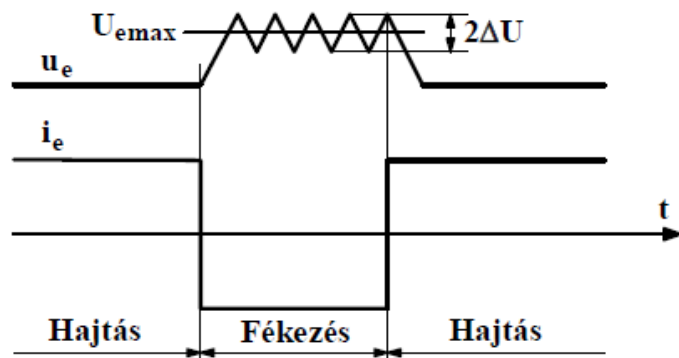
## Feszültséginverteres hajtások hálózati áramirányítói

Az ISZM feszültséginverterekhez az  $U_e$  egyenfeszültség közvetlenül csak néhány esetben, pl. akkumulátoros, napelemes, tüzelőanyagcellás és egyenáramú felsővezetékű járművekben áll rendelkezésre. Ipari hajtásokban az  $f_h=50\text{Hz}$ -es hálózat háromfázisú feszültségéből kell előállítani az **ÁH jelű AC/DC átalakítóval**. Ennek megfelelően az  $f_h$  állandó frekvenciájú hálózatra kapcsolt ÁH hálózatoldali áramirányító és az  $f_1$  változó frekvenciát előállító feszültséginverter (ÁG géppoldali áramirányító) közé beiktatunk egy ún. **közbülső egyenáramú kört**. A legegyszerűbb AC/DC átalakítóban az ÁH hálózati áramirányító diódás híd, amihez C simító kondenzátor csatlakozik (7.1. ábra feszültségkorlátozó nélkül). A C kezdeti feltöltődése után az  $R_t$  töltő ellenállás rövidre van zárva. Ennél a megoldásnál az  **$i_e$  egyenáram középértéke tartósan csak  $i_{ek} \geq 0$  és az egyenkori  $p_e$  teljesítmény középértéke csak  $p_{ek} = U_e i_{ek} \geq 0$  lehet**. Emiatt, ha M pl. állandómágneses szinkrongép, vagy kalickás aszinkrongép, akkor **csak hajtási  $p_m = m\omega > 0$  motoros üzem lehetséges**.



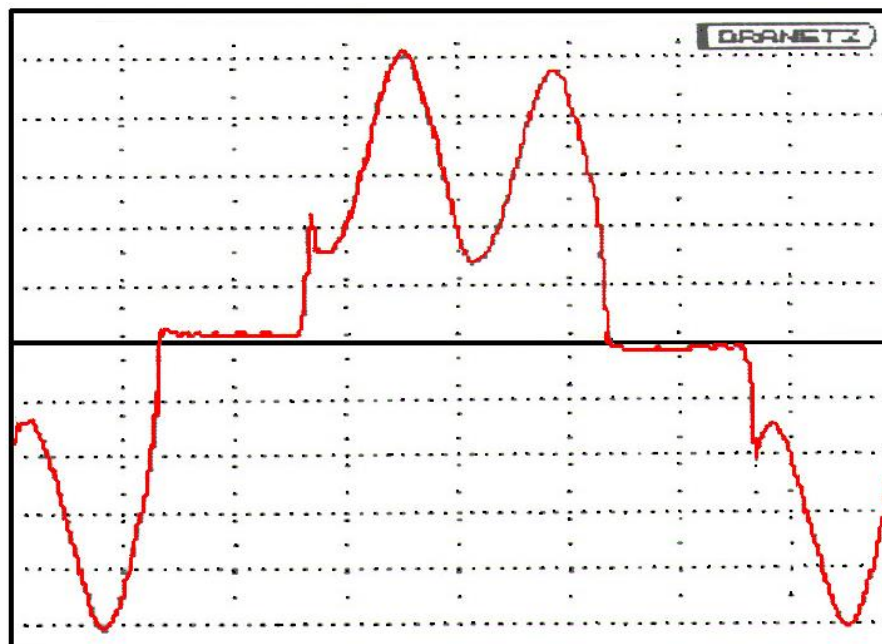
7.1. ábra: Diódás AC/DC átalakító ellenállásos feszültségkorlátozóval.

Szervo hajtásokban a **generátoros fékezés** ( $p_m < 0$ ,  $p_e < 0$ ,  $i_e < 0$ ) csak rövid ideig tartó tranziensek alatt lép fel. A 7.1. ábra kapcsolásában ilyenkor működésbe lép a **feszültségkorlátozó fékkapcsolás** és a fékezési energiát eldisszipálja az  $R_f$  fékellenálláson. Feszültség kétpontkorlátozást feltételezve a 7.2. ábra mutatja minőségileg az  $i_e$ -t és  $u_e$ -t egy fékezési folyamat alatt.



7.2. ábra:  
Egyenáram és egyenfeszültség fékezés  
alatt.

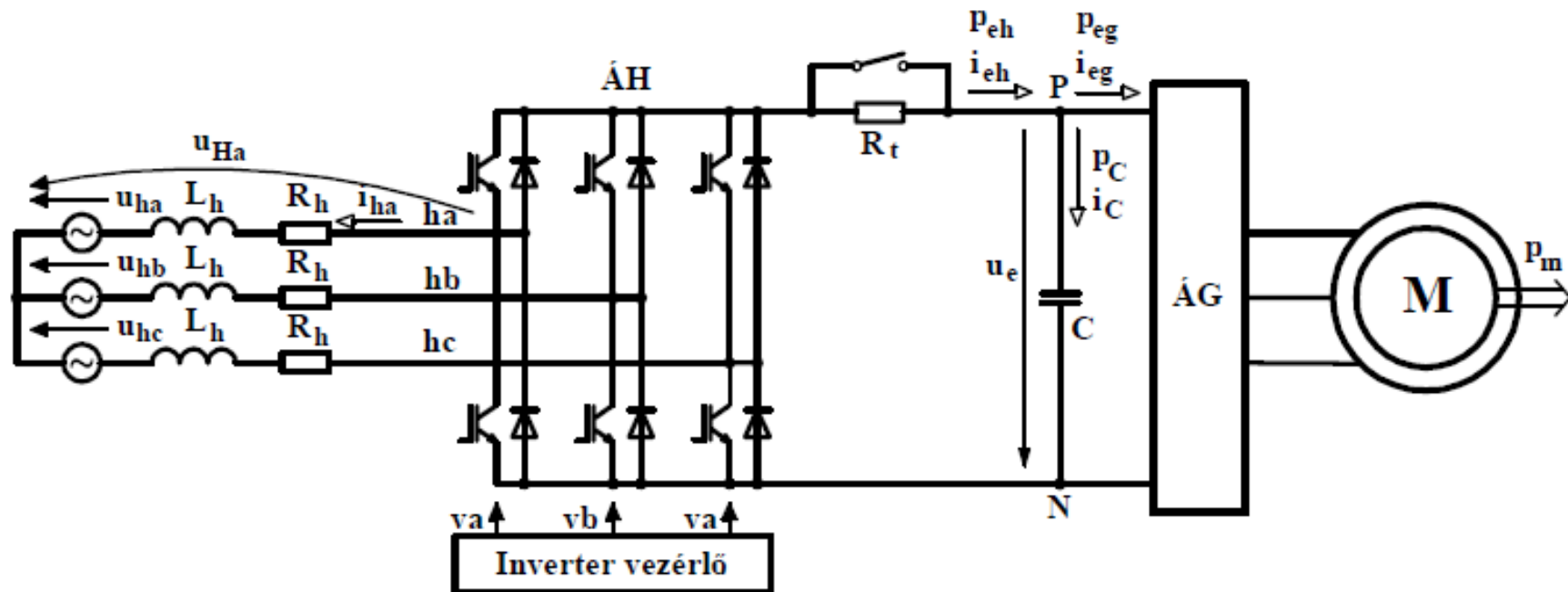
A 7.1. ábrában **a diódás híd csúcs egyenirányítóként működik**, ennek megfelelően **impulzusszerű áramokat vesz fel a táphálózathoz.**



Korszerű feszültséginverteres hajtásokban olyan ÁH áramirányítót alkalmaznak, amelyek **kétirányú energiaáramlásra és hálózatbarát üzemre képesek**. Hálózatbarát üzemnél **a fázisáramok szimmetrikusak, szinuszos alakúak és a feszültséghez képesti  $\varphi_{h1}$  fázisszögük beállítható**. Ezeket a feladatokat **feszültséginverter kapcsolású** ÁH hálózati áramirányítóval lehet biztosítani.

## Feszültséginverter kapcsolású hálózati áramirányító

A gyakorlatban egyre jobban elterjedő feszültséginverter kapcsolású ÁH hálózati áramirányító erősáramú kapcsolását mutatja a 7.3. ábra. Az ábrában az ÁG gépoldalt nem részleteztük ki. Az ÁH feszültséginverter **erősáramú szűrőkörön keresztül csatlakozik a hálózatra**. A legegyszerűbb szűrő egy háromfázisú fojtótekerecs, vagy egy hálózati transzformátor. A következőkben ezt tételezzük fel. Ennek megfelelően  $L_h$ -ban és  $R_h$ -ban benne van a szűrő induktivitása és ellenállása is. Üzem közben az  $R_t$  töltő ellenállás rövidre van zárva.



7.3. ábra: Feszültséginverter kapcsolású ÁH hálózati áramirányító kapcsolása.



**Veszteségmentes energiaáramlást feltételezve** állandósult állapotban a  $P_{h1}$  hálózati alapharmonikus teljesítmény megegyezik a  $P_{ek}$  közepek egyenköri teljesítménnyel és a motor (állandómágneses szinkron, vagy rövidrezárt aszinkron)  $P_m$  mechanikai teljesítményével.

$$P_{h1} = \frac{3}{2} U_h I_{h1} \cos \varphi_{h1} = P_e = U_e I_{ek} = P_m = M_k W. \quad (7.1)$$

$U_h$  a szinuszos hálózati fázisfeszültség csúcértéke,  $I_{h1}$  az alapharmonikus hálózati áram csúcértéke,  $U_e$  a sima egyenfeszültség,  $I_{ek}=I_{ehk}=I_{egk}$  az egyenáram középértéke,  $M_k$  a nyomaték középértéke  $W$  az állandó szögsebesség.

**$P_m > 0$  motoros hajtáskor**  $I_{ek} > 0$  az egyenáram középértéke és  $I_{h1p} = I_{h1} \cos \varphi_{h1} > 0$  a hálózati áram wattos összetevője.

**$P_m < 0$  generátoros fékezéskor**  $I_{ek} < 0$  és  $I_{h1p} < 0$ . Adott teljesítményhez akkor tartozik a **legkisebb  $I_{h1}$  hálózati áram**, ha  $\cos \varphi_{h1} = \pm 1$  a fázistényező.

Az ÁH-val megvalósítandó szabályozás **alapfeladata az  $u_e$  egyenfeszültség szabályozása**. A 7.3. ábrából felírható egyenköri  $i_c = i_{eh} - i_{eg}$  csomóponti áramegyenletet  $u_e$ -vel megszorozva egyenköri teljesítmény egyenletet kapunk:

$$p_c = u_e i_c = u_e C \frac{du_e}{dt} = p_{eh} - p_{eg} = u_e i_{eh} - u_e i_{eg}. \quad (7.2)$$

**Cél  $u_e = U_e = \text{const.}$** ,  $\frac{du_e}{dt} = 0$ ,  $i_c = 0$ ,  $p_c = 0$ , ami  $p_{eh} = p_{eg}$ -vel biztosítható ( $p_{eg}$  közelítőleg megegyezik a  $p_m = m_w$  mechanikai teljesítménnyel). Mivel mind a  $p_{eh}$  hálózatoldali, mind a  $p_{eg}$  gépoldali **egyenköri teljesítmény lüktet** így az egyenköri teljesítmény **egyensúly pontosan csak középértékekre biztosítható**:  $p_{ehk} = p_{egk}$ ,  $p_{ck} = 0$ . E szerint a cél megvalósítható **egyenfeszültség szabályozásnak alárendelt  $p_h$  hálózati teljesítmény szabályozással**. Ideális hálózatot feltételezve a  $p_h$  teljesítmény szabályozás  **visszavezethető  $\bar{i}_h$  hálózati áramvektor szabályozásra**.

## Áramvektor (Mezőorientált) szabályozás

Az áramvektor szabályozások mindig orientált szabályozásokat jelentenek: valamilyen kellően (a szabályozási követelményeknek, céloknak figyelembevételével) megválasztott vektorhoz orientáltan szabályozzák az áramvektort:

1. A gépoldalon a gép nyomatékképzését meghatározó mágneses mezőhöz (fluxusvektorhoz), **mindig a kényszerített fluxushoz**
2. a hálózatoldalon a hatásos teljesítményviszonyokat megszabó feszültségvektorhoz orientáltan szabályozzák az áramvektort.

Egy vektorhoz, adott irányhoz való orientálás azt jelenti, hogy az őhöz kötött koordinátarendszerben értelmezett **merőleges áramvektor-komponensek** szabályozásával avatkozunk be. A megfelelően orientált áramvektor két Descartes komponensének a szabályozásával két különböző mennyiség (pl. a gépoldalon a nyomaték és fluxus, a hálózatoldalon a hatásos és meddő teljesítmény) **szétcsatolt szabályozása** oldható meg (a merőlegesség függetlenséget, szétcsatolást eredményez). Ez a szétcsatolás az egyenáramú gép nyomaték és fluxus képzésében automatikusan, önmagától előáll. Váltakozóáramú gépekben és rendszerekben ezt mesterséges úton kell megoldani. A megvalósítás általában **tartalmaz koordináta transzformációt**, hiszen az alapjelek megadása az orientáló vektor koordinátarendszerében, az **ellenőrző jelek érzékelése** és a **beavatkozás** pedig vele nem megegyező koordinátarendszerben történik.

Tradicionalisan először ezt az elvet az aszinkrongépek jó dinamikájú szabályozására találták ki és széles körben kutatták és alkalmazták az utóbbi évtizedekben főként mezőorientált szabályozás elnevezéssel, de a vektoros szabályozás (vector control) elnevezés is elterjedt.

A szabályozás **jó dinamikája** indokolta azt, hogy a nagy dinamikai igényű váltakozóáramú szervó hajtásokban is főként ezt alkalmazzák. Azon a tradicionális háttéren alapulva, amelyet **Dr.Rácz István professzor** alapozott meg.

A megújuló energiaforrások nagyléptékű felhasználásának igénye teremtett újabb alkalmazási területet. A többségében váltakozóáramú hasznosítás mindenképp igényel **optimalizált teljesítményelektronikai átalakítást**, ami optimálisan szintén áramvektor szabályozással oldható meg.

## Hálózati áramirányító hálózatorientált áramvektor szabályozása

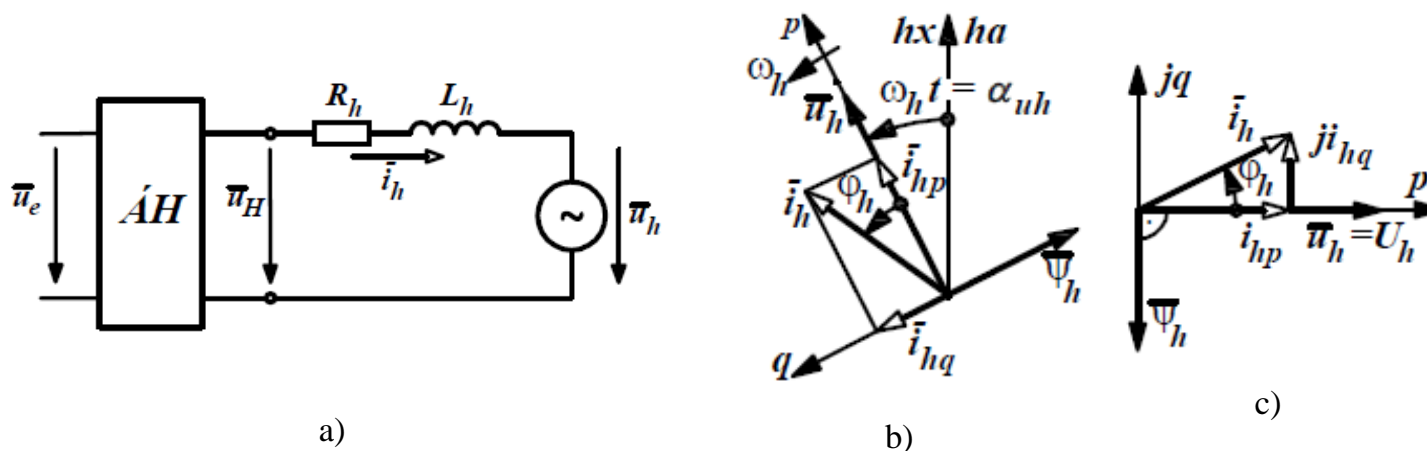
A 7.3. ábrában a hálózatot (beleértve a szűrőt is) ideális feszültségforrással és soros  $L_h$ - $R_h$  körrel helyettesítettük. Ebben az ideális esetben az

$$\bar{u}_h = U_h e^{j\alpha_{uh}} = U_h e^{j\omega_h t} \quad (7.3)$$

hálózati feszültségvektorhoz, illetve ennek az integráljaként kapott

$$\bar{\Psi}_h = \int \bar{u}_h dt = \bar{\Psi}_h e^{j\omega_h t} \quad (7.4)$$

**fiktív fluxusvektorhoz orientálják az ÁH áramirányító áramvektor szabályozását** ( $\omega_h = 2\pi f_h$ ,  $\bar{\Psi}_h = \frac{U_h}{j\omega_h}$ ).



7.4. ábra: Hálózati oldal. a. Park-vektoros helyettesítő vázlat, b. Vektorábra álló koordinátarendszerben, c. Vektorábra hálózati feszültségvektorhoz rögzített koordinátarendszerben.

A 7.4. ábra mutatja a Park-vektoros helyettesítő képet és az  $\bar{i}_h$  áramvektort álló és feszültségvektorhoz rögzített koordinátarendszerben. A 7.4.a. ábrában  $\bar{u}_h$  a feszültséginverter kapcsolású ÁH által kiadott feszültségvektor, ami a

(4.14) szerinti 7 diszkrét értéket vehet fel, ha teljesül a vezérelhetőség  $U_e > \sqrt{3}U_h$  feltétele. A 7.4.a. helyettesítő ábrát összevetve a motoros helyettesítő ábrákkal megállapítható, hogy **a hálózat vette át az állandómágneses szinkron és a rövidrezárt aszinkron motorok szerepét**. Feszültségvektorhoz rögzített koordinátarendszerben (7.4.c. ábra):

$$\bar{u}_h = U_h, \quad \bar{i}_h = i_{hp} + j i_{hq} = i_h e^{j\varphi_h}. \quad (7.5.a,b)$$

( $i_h = \sqrt{i_{hp}^2 + i_{hq}^2}$ ,  $\varphi_h = \arctg \frac{i_{hq}}{i_{hp}}$ ). Az  $i_{hp}$  hatásos és az  $i_{hq}$  meddő áramkomponensekkel számítható a hálózati

hatásos és meddő teljesítmény:

$$p_h = \frac{3}{2} U_h i_{hp} = \frac{3}{2} U_h i_h \cos \varphi_h, \quad q_h = \frac{3}{2} U_h i_{hq} = \frac{3}{2} U_h i_h \sin \varphi_h. \quad (7.6.a,b)$$

**A  $p_h \cong p_{eh}$  hatásos teljesítménnyel, illetve az  $i_{hp}$  áramkomponenssel szabályozható a közbülsőköri  $u_e$  egyenfeszültség.** Az  $i_{hq}=0$  esetben csak hatásos, az  $i_{hp}=0$  esetben csak meddő teljesítményáramlás van a hálózati oldalon.

A 7.4.a. ábra alapján felírt  $\bar{u}_H = R_h \bar{i}_h + L_h \frac{d\bar{i}_h}{dt} + \bar{u}_h$  feszültségegyenletből  $\bar{i}_h = \bar{i}_{ha} - \bar{\Delta i}_h$  helyettesítéssel kifejezhető a  $\bar{\Delta i}_h$  hálózati áramhiba vektor deriváltja ( $R_h \Delta i_h = 0$  közelítéssel élve):

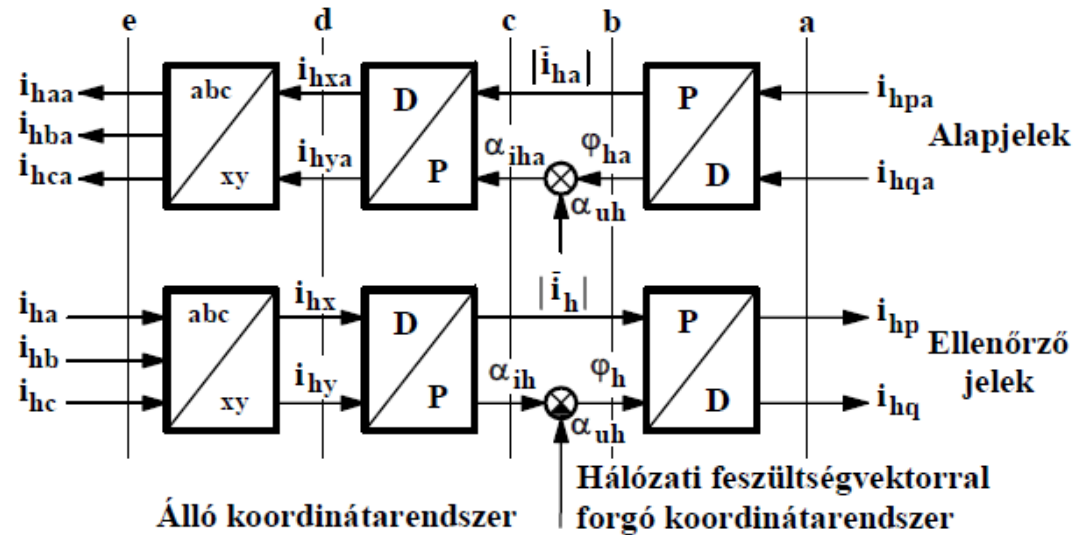
$$\left( \frac{d\bar{\Delta i}_h}{dt} \right)_k = \frac{\bar{e} - \bar{u}_H(k)}{L_h}, \quad \bar{e} = R_h \bar{i}_h + L_h \frac{d\bar{i}_{ha}}{dt} + \bar{u}_h. \quad (7.7.a,b)$$

**$\bar{e}$  egy fiktív feszültség vektor, ami a nulla áramhibához kellene. Az állásos szabályozó miatt ez pontosan nem adható ki, az áram lüktet az alapjel körül.**

Ezek az összefüggések **nagyon hasonlóak** a gépes összefüggésekhez. A jól működő áramvektor szabályozó a rendelkezésre álló **7 db  $\bar{u}_H(k)$  feszültségvektorból mindig az optimálisat választja.**

A háromfázisú szinkron és aszinkron gépek áramvektor szabályozásához hasonlóan most az áramalapjelek **pq** komponensekben, az ellenőrző jelek **abc** komponensekben állnak rendelkezésre. Az áramvektor szabályozáshoz **azonos típusú alap és ellenőrző jelek kellenek.** A lehetőségeket a 7.5. ábrán látható koordináta transzformációs lánc szemlélteti, ami **nagyon hasonló** a gépes ábrákhoz. **A hatásos és meddő áramkomponensek alapjelei a (7.6.a,b) összefüggések alapján a hatásos és a meddő teljesítmény alapjelekből számíthatók:**

$$i_{hpa} = \frac{2p_{ha}}{3U_h}, \quad i_{hqa} = \frac{2q_{ha}}{3U_h}. \quad (7.8.a,b)$$



7.5. ábra: Koordináta transzformációs lánc.

- a** metszet: hálózati feszültségvektorral forgó kr. Descartes koordináták,
- b** metszet: hálózati feszültségvektorral forgó kr. polár koordináták,
- c** metszet: álló kr. polár koordináták,
- d** metszet: álló kr. Descartes koordináták,
- e** metszet: álló kr. fázismennyiségek.

Az **a,b,c változatoknál** az  $i_{hp}$ ,  $i_{hq}$  és  $|\bar{I}_h|$  áramszabályozók és a  $\varphi_h$  és  $\alpha_{ih}$  szög szabályozók alap- és ellenőrző jelei **egyenáramú jellegű mennyiségek**.

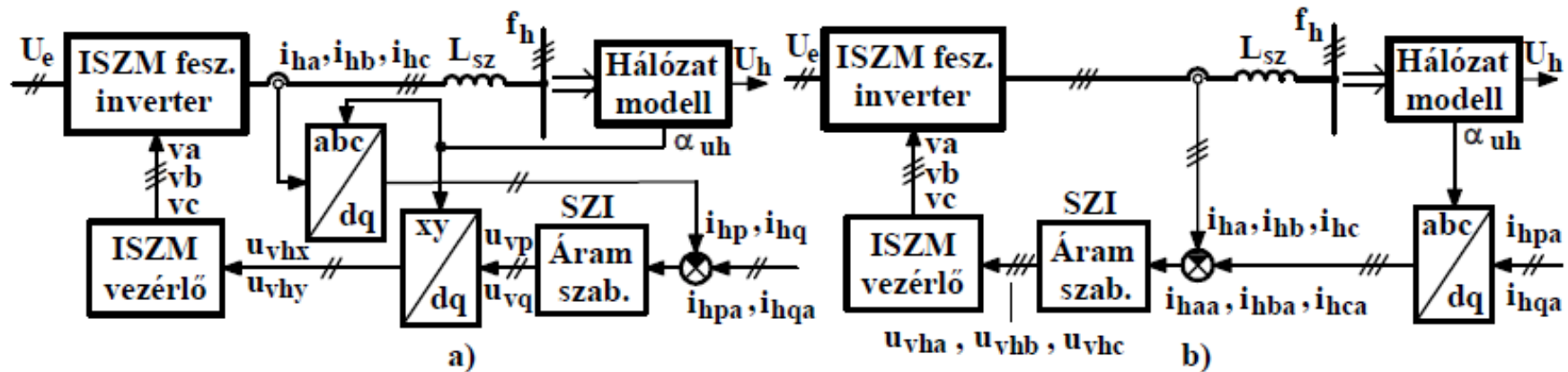
A **d, e változatoknál** az  $i_{hx}$ ,  $i_{hy}$ ,  $i_{ha}$ ,  $i_{hb}$ ,  $i_{hc}$  áramszabályozók alap- és ellenőrző jelei  **$f_1$  alapharmonikus frekvenciájúak** állandósult állapotban. Megállapítható, hogy **a koordináta transzformáció nem kerülhető el** és az álló kr. → hálózati feszültségvektor kr. illetve hálózati feszültségvektor kr. → álló kr. közötti transzformációhoz **ismerni kell a  $\bar{u}_h$  hálózati feszültségvektor  $\alpha_{uh}$  szögét**. A számításigényes koordináta transzformációk számát megszabja, hogy álló kr.-ben lehet érzékelni ( $i_{ha}$ ,  $i_{hb}$ ,  $i_{hc}$ ,  $\alpha_{uh}$ ) és ugyancsak álló kr.-ben lehet beavatkozni (az inverter a hálózathoz kapcsolódik), az alapjelek viszont közvetlenül hálózati feszültségvektor kr.-ben állnak rendelkezésre ( $i_{hpa}$ ,  $i_{hqa}$ ).

A koordináta transzformációs lánc **a,b,c,d,e** metszeteinek megfelelően kétféle koordinátarendszerben (kr.-ben) ötféle koordinátákkal lehetséges az áramvektor szabályozás. **A gyakorlatban az a, vagy az e metszetnek megfelelő változatot alkalmazzák:**

**a** metszet: hálózati feszültségvektorral forgó kr. Descartes koordináták,  
**e** metszet: álló kr. fázismennyiségek.

Az **a** változatnál az alapjelek, az **e** változatnál az ellenőrző jelek közvetlenül felhasználhatók. **Az a esetben kettő, az e esetben egy kr. transzformáció szükséges.**

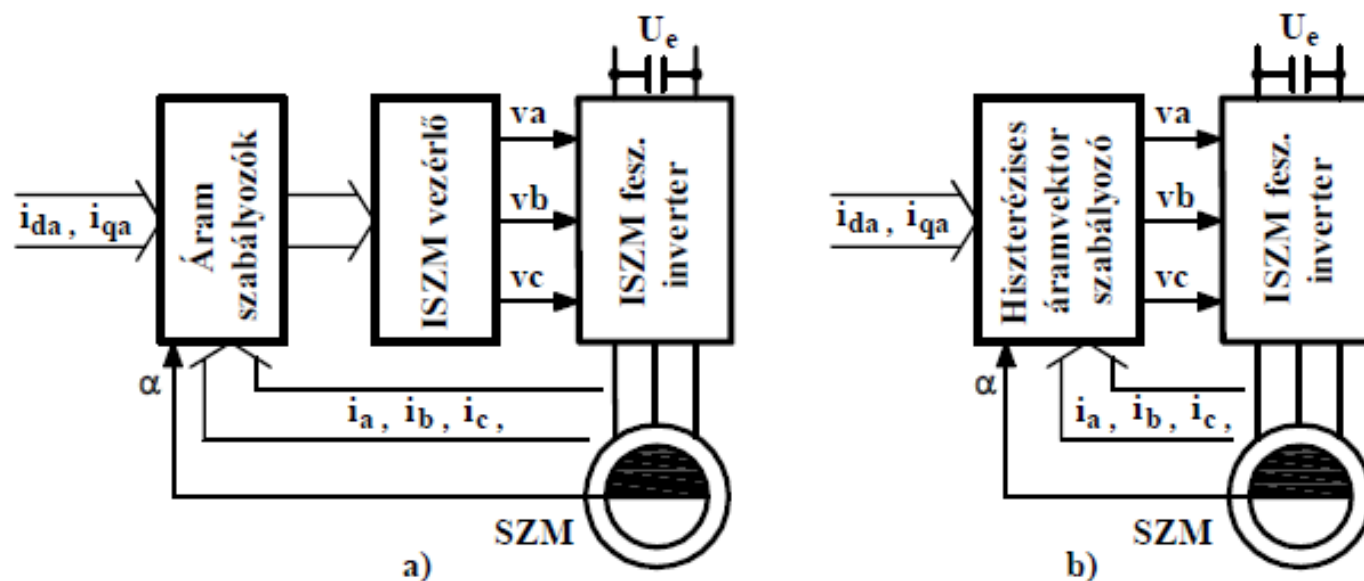
E két változatot szemlélteti a 7.6.ábra. **Új elem a hálózat modell**, ami a 7.4.a. ábra szerinti  $\bar{u}_h$  ideális hálózati feszültségvektor  $U_h$  amplitúdóját és  $\alpha_{uh}$  szögét állítja elő. A 7.6.a.,b. ábrákban szereplő  $L_{sz}$  az inverterhez közvetlenül csatlakozó szűrő (fojtótekerces, vagy transzformátor) induktivitása (ez teszi ki a 7.3. és a 7.4.a. ábrákban az  $L_h$  nagy részét).



7.6. ábra: Áramvektor szabályozás egyvonalas blokkvázlata. a. Hálózati feszültségvektorral forgó kr.-ben Descartes koordinátákkal (**a** változat), b. Álló kr.-ben fázismennyiségekkel (**e** változat).



**Kétféle áramvektor szabályozás létezik:** az ISZM vezérlős és a hiszterézises. Az ISZM vezérlős áramvektor szabályozásokban (4.11.a. ábra) az ISZM feszültséginverter rendelkezik egy **ISZM vezérlővel** és az áramszabályozó ezen keresztül, közvetetten avatkozik be. A hiszterézises áramvektor szabályozók (4.11.b. ábra) **közvetlenül vezérlik az ISZM feszültséginvertert**. (A következő ábrák a motoros változatokat mutatják, de a hálózatoldalón is ugyanez a helyzet.) A 4.7.ab. ábrákban ISZM vezérlős változatot tételeztünk fel.

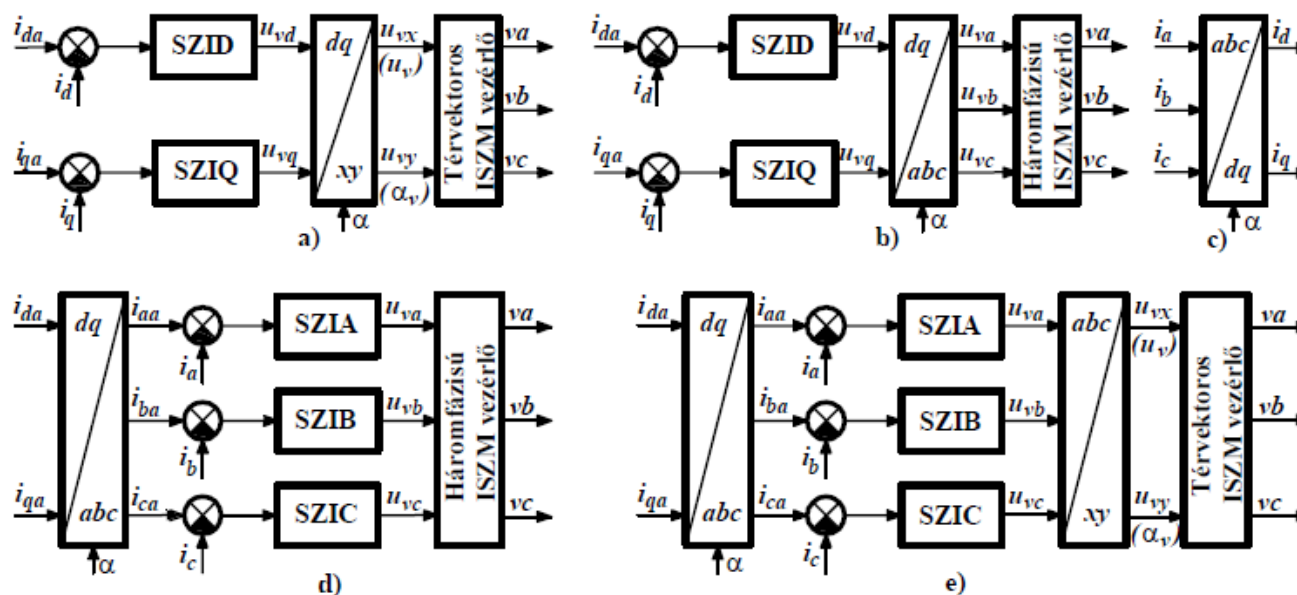


4.11. ábra: Áramvektor szabályozási módok. a. ISZM vezérlős, b. Hiszterézises.

A hálózati oldalon a 4.13. és a 4.16. ábrákhoz hasonló **ISZM vezérlős áramvektor szabályozások terjedtek el.**

## ISZM vezérlős áramvektor szabályozások

Az ISZM vezérlős áramvektor szabályozásnak (4.11.a. ábra) több változata létezik, attól függően, hogy **az  $\bar{i}$  áramvektor melyik koordináta-rendszerbeli komponensei a szabályozott jellemzők, és hogy milyen bemenő jelekkel működik az ISZM vezérlő.** Ha az SZI áramszabályozók a **dq** komponenseket szabályozzák, akkor a 4.12.a., b. ábráknak megfelelő két változat, ha az **abc** komponenseket (fázisáramokat) szabályozzák, akkor a 4.12.d., e. ábráknak megfelelő két változat lehetséges. **Az SZI áramszabályozók a gyakorlatban PI típusúak.** A c. ábra az  $i_d$  és  $i_q$  komponensek előállítását szemlélteti. A v indexű vezérlőjelek az a. és e. ábrákban **térvektoros ISZM vezérlőt** (space vector control-t), a b. és d. ábrákban **háromfázisú ISZM vezérlőt** (ISZM modulátort) működtetnek. Látható, hogy minden esetben szükség van koordináta-transzformációkra.



4.12. ábra: ISZM vezérlős áramvektor szabályozások blokkvázlatai.  
a,b,c. Szabályozók dq koordinátákban, d,e. Szabályozók abc koordinátákban.

**Áramvektor szabályozás dq komponensekkel, térvektoros ISZM vezérlővel** 4.12.a. ábra

(levezetés nem kell, csak az elv).

Az SZID és SZIQ általában PI típusú áramszabályozók  $u_{vd}$  és  $u_{vq}$  kimenő jeleiből kiadódó  $\bar{u}_v = u_v e^{j\alpha_v}$  vezérlőjel vektor arányos az ISZM feszültség inverter (a motor)  $\bar{u}_1$  alapharmonikus feszültség vektorával, ha elég nagy az  $f_{ISZM}$  (a kapcsolási frekvencia).

A tapasztalatok szerint, **ha  $f_{ISZM} > 20f_1$  akkor  $\bar{u}_1 = K_u \bar{u}_v$** . Szinkrongépről lévén szó  $f_1$  maximális értékét az  $n = n_1 = \frac{f_1}{p}$

összefüggés szerint a maximális fordulatszám szabja meg. A gyakorlatban  **$f_{imax} \leq 100\text{Hz}$** , így  **$f_{ISZM} \geq 2\text{kHz}$**  esetén mindig

élhetünk a fenti arányos közelítéssel. A

térvektoros ISZM vezérlő bemenő jele

az  $\bar{u}_v$  vezérlőjel vektor  $u_v$  amplitúdója

és  $\alpha_v$  szöge, kimenő jelei a kétszintű

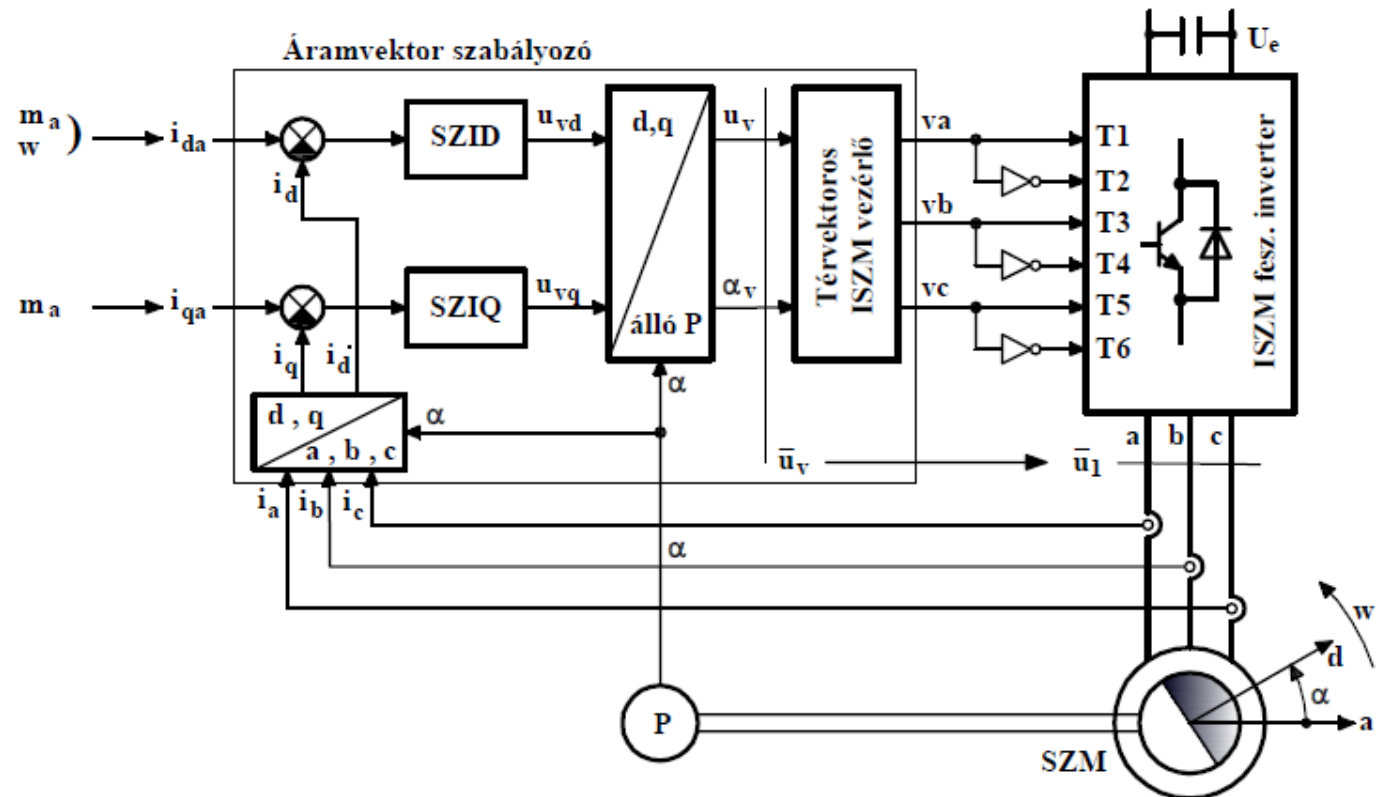
$v_a, v_b, v_c$  inverter vezérlőjelek. A

gyakorlatban a térvektoros ISZM

vezérlő mintavételes működésű és a

mintavételi frekvencia megegyezik az

$f_{ISZM}$  frekvenciával.

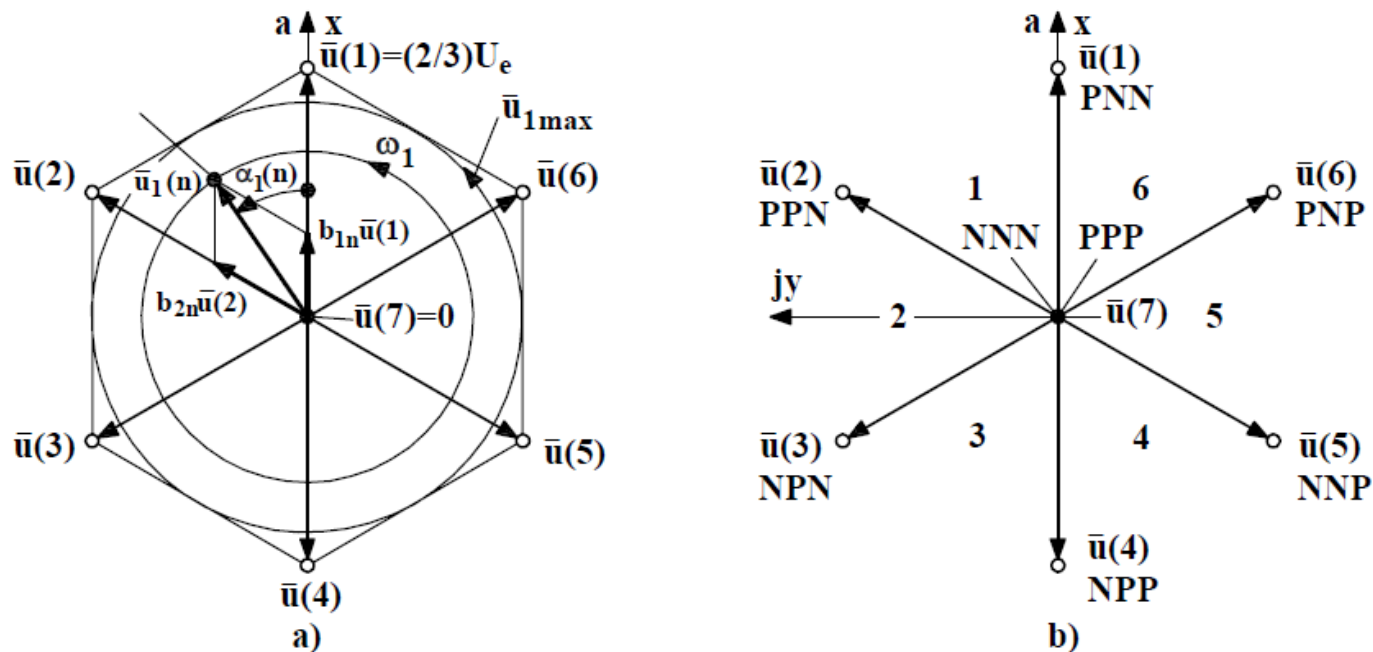


4.13. ábra: Áramvektor szabályozás dq komponensekkel, térvektoros ISZM vezérlővel.

Mintavételes térvektoros ISZM vezérlőt alkalmazva az n. mintavételi ciklusban  $\bar{u}_v(n) = u_v(n)e^{j\alpha_v(n)}$ -nel

$$K_u \bar{u}_v(n) = \bar{u}_1(n) = u_1(n)e^{j\alpha_1(n)}, \quad u_1(n) = K_u u_v(n), \quad \alpha_1(n) = \alpha_v(n) \quad (4.17.a,b,c)$$

**alapharmonikus feszültségvektort írunk elő.**  $K_u$  a térvektoros ISZM vezérlővel működtetett feszültséginverter **erősítési tényezője**. Az  $\bar{u}_1(n)$  vektor **a szomszédos 3 db  $\bar{u}(k)$  feszültségvektor (4.14.b. ábra) megfelelő idejű bekapcsolásával állítható elő**. A 4.14.a. ábrában berajzolt pillanatban  $\bar{u}_1(n)$  az 1 jelű 60°-os szektorba mutat.



4.14. ábra: Feszültségvektorok. a.  $\bar{u}_1(n)$  előállítás az 1 jelű szektorban, b. 60°-os szektorok.

Ekkor  $\bar{u}(1)$ ,  $\bar{u}(2)$  és  $\bar{u}(7)$  a három szomszédos vektor. Az  $\bar{u}_1(n)$  vektor **e három vektor idővel súlyozott súlypontjaként adódik:**

$$\bar{u}_1(n) = \frac{\tau_{1n}\bar{u}(1) + \tau_{2n}\bar{u}(2) + \tau_{7n}\bar{u}(7)}{\tau} = b_{1n}\bar{u}(1) + b_{2n}\bar{u}(2) + b_{7n}\bar{u}(7). \quad (4.18)$$

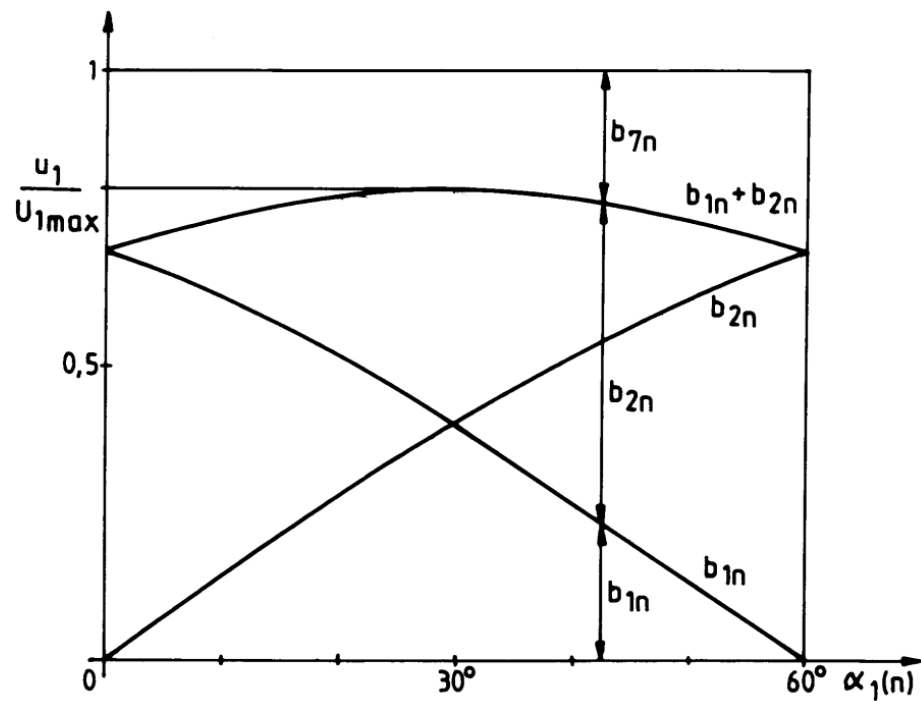
Itt  $\tau_{1n} + \tau_{2n} + \tau_{7n} = \tau = \text{const.}$  a mintavételi idő,  $b_{1n} + b_{2n} + b_{7n} = 1$  a relatív bekapcsolások összege. A  $b_{1n}$ ,  $b_{2n}$  és  $b_{7n}$  relatív bekapcsolások a 4.14.a. ábra alapján felírható geometriai összefüggésekből kiszámíthatók:

$$b_{1n} = \frac{u_1(n)}{U_{1\max}} \sin(60^\circ - \alpha_1(n)), \quad b_{2n} = \frac{u_1(n)}{U_{1\max}} \sin \alpha_1(n), \quad b_{7n} = 1 - b_{1n} - b_{2n}. \quad (4.19.a,b,c)$$

Itt  **$U_{1\max}$  az elérhető legnagyobb alapharmonikus csúcsérték**, ami a 4.14.a. ábra alapján:

$$U_{1\max} = \frac{2}{3} U_e \cos 30^\circ = \frac{1}{\sqrt{3}} U_e \cong 0,577 U_e. \quad (4.20)$$

A relatív bekapcsolások változását az 1 jelű szektorban a 4.15. ábra szemlélteti  $0.8U_{1\max}$  amplitúdójú  $\bar{u}_1$  alapharmonikus feszültség mellett. Az előírt  $u_1(n) = 0.8U_{1\max}$  amplitúdóval arányos a  $b_{1n}$  és a  $b_{2n}$ , az  **$\alpha_1(n)$  szögtől függ a  $\frac{b_{1n}}{b_{2n}}$  hányados.**



4.15. ábra:  
 Relatív bekapcsolások szögfüggése  
 az 1 szektorban  $\frac{u_1(n)}{U_{1max}} = 0,8$  mellett.

A három szomszédos vektor közötti kapcsolgatásra kétféle módszer alkalmazható (4.2.táblázat).

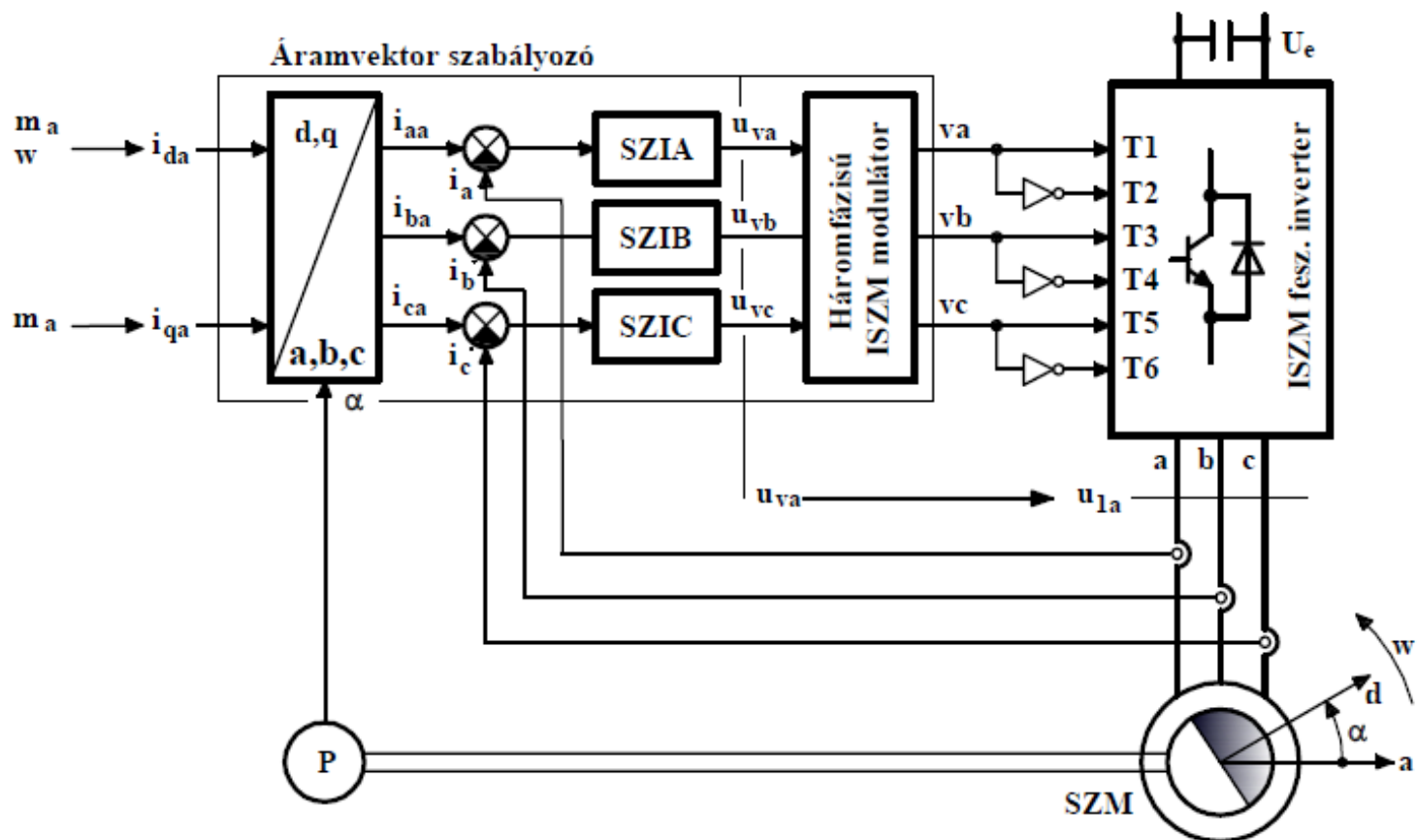
4.2. Táblázat: Kapcsolási módszerek az 1 jelű szektorban.

	I. módszer									II. módszer								
k	1	2	7	1	2	7	1	2	7	1	2	7P	2	1	7N	1	2	7P
mintavétel	n			n+1			n+2			n			n+1			n+2		

A I. módszernél minden mintavételi ciklusban **van 1 db. kettős kapcsolás** akár 7P-vel, akár 7N-nel állítjuk elő az  $\bar{u}(7) = 0$  feszültséget. Ezt szünteti meg a II. módszer az  $\bar{u}(1)$ ,  $\bar{u}(2)$ , 7P és 7N kapcsolási sorrendjének a váltogatásával. A 4.2. táblázatot és a 4.14.b. ábrát figyelembe véve megállapítható, hogy a I. módszerrel 4 db., a II. módszerrel 3 db. kapcsolás tartozik egy mintavételi ciklushoz. **Azaz a II. módszert alkalmazva  $\frac{3}{4}$  részére csökken a kapcsolási szám** és a vele arányos kapcsolási veszteség a I. módszerhez képest.

A térvektoros ISZM vezérlő működését az 1 jelű szektorban vizsgáltuk, de a többiben is hasonlóan működik.

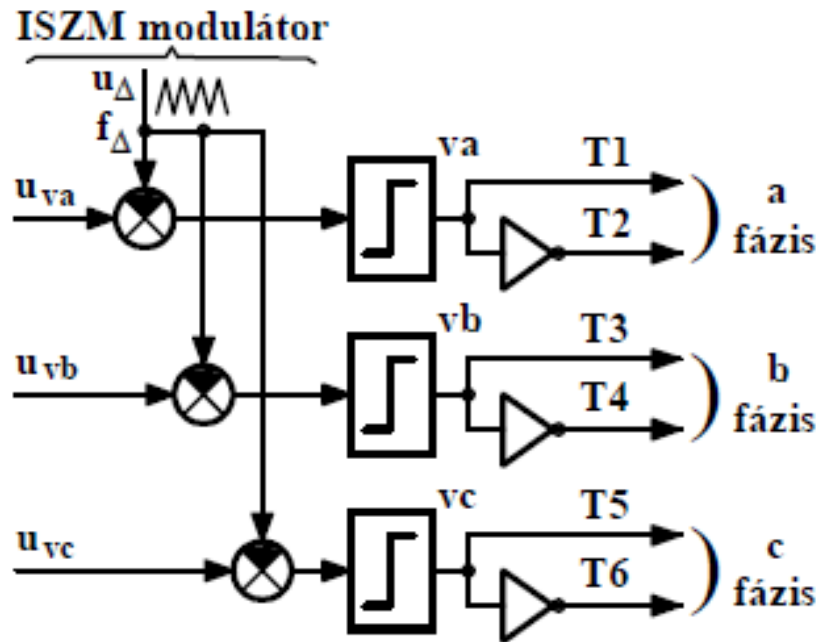
**Áramvektor szabályozás abc fázismennyiségekkel, háromfázisú ISZM modulátorral** (ismétlés, 4.12.d. ábra).



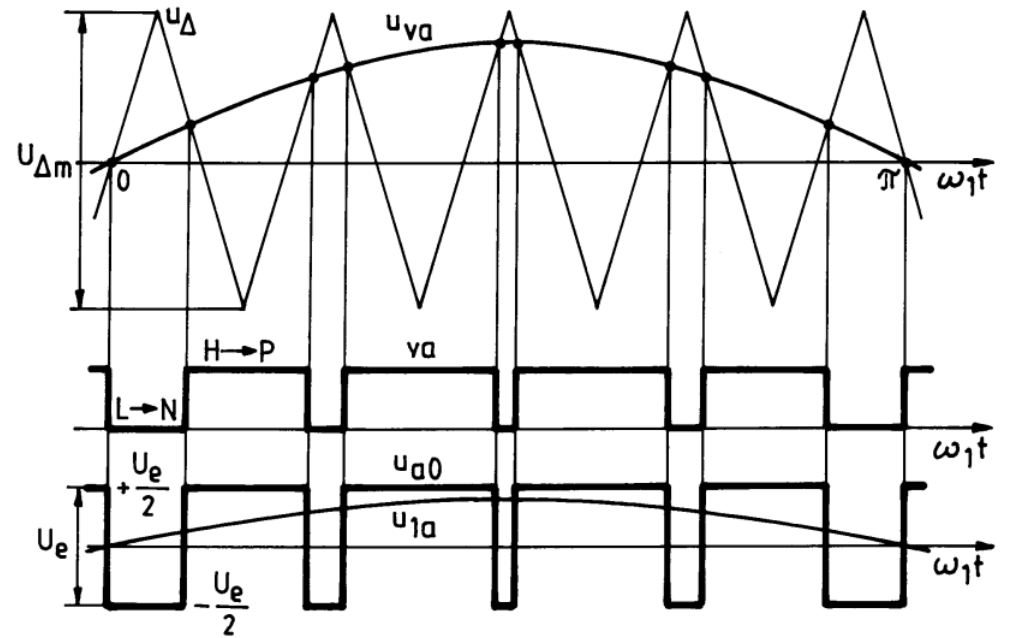
4.16. ábra: Áramvektor szabályozás abc fázismennyiségekkel, háromfázisú ISZM modulátorral.

A SZIA, SZIB és SZIC általában **PI típusú fázis áramszabályozók** kimenő jelei az  $u_{va}$ ,  $u_{vb}$  és  $u_{vc}$  fázis vezérlő jelek (moduláló jelek). Ezekből állítja elő a háromfázisú ISZM modulátor a kétszintű  $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$  inverter vezérlő jeleket. A háromfázisú ISZM modulátor **3 darab egyfázisú ISZM modulátorból áll**, de a modulátorok  $u_\Delta$  háromszög jele (vivő jele) közös (4.17.ábra).





4.17. ábra:  
Háromfázisú analóg ISZM modulátor.



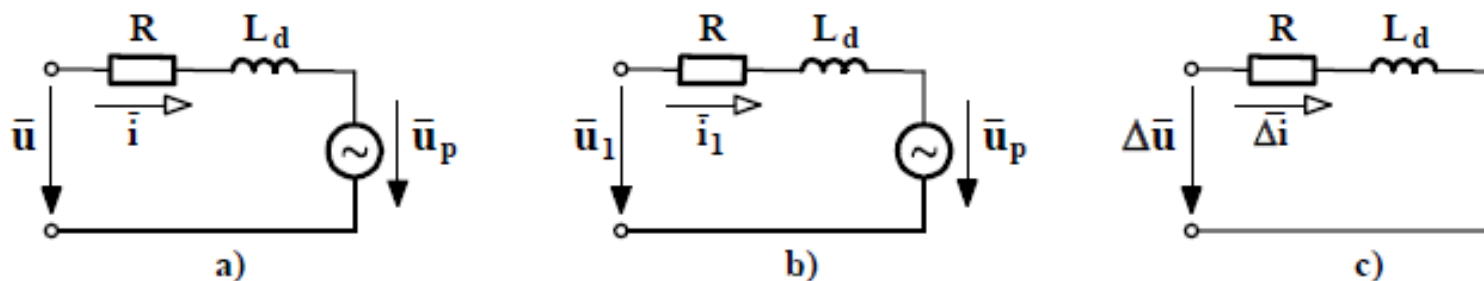
4.18. ábra:  
Analóg ISZM modulátor működése ( $f_{\Delta}/f_1=9$ ).

Analóg ISZM modulátor működését szemlélteti az **a** fázisra a 4.18. ábra. (A mai gyakorlatban számlálókkal megvalósított digitális ISZM modulátorokat alkalmaznak.) Amíg  $u_{va} > u_{\Delta}$ , addig va H szinten, az a fázis a P sínen van:  $u_{a0} = +\frac{U_e}{2}$ . Amikor  $u_{va} < u_{\Delta}$ , akkor va L szinten, az a fázis az N sínen van:  $u_{a0} = -\frac{U_e}{2}$ . Létezik  $\frac{f_{\Delta}}{f_1} = \text{const.}$  szinkron moduláció és  $f_{\Delta} = \text{const.}, \frac{f_{\Delta}}{f_1} = \text{var.}$  aszinkron moduláció. Bizonyítható, hogy állandósult üzemen az inverter kimenő kapocsfeszültségében az  $f_1$  frekvenciájú alapharmonikus mellett  **$f_{\Delta} \pm 2f_1, f_{\Delta} \pm 4f_1, \dots, 2f_{\Delta} \pm f_1, 2f_{\Delta} \pm 3f_1, \dots$  frekvenciájú felharmonikusok** (oldal sávok) is megjelennek.

A szinkron motor az  $L_d$  szinkron induktivitás következtében **nagyon jó szűrő az áramra és nyomatékra nézve**. Ezt szemlélteti a 4.2. ábra alapján felrajzolt 4.19. ábra. Ebben  $\Delta\bar{u}$  és  $\Delta\bar{i}$  a felharmonikusok eredője:

$$\Delta\bar{u} = \sum_{v \neq 1} \bar{u}_v = \sum_{v \neq 1} \bar{U}_v e^{jv\omega_1 t}, \quad \Delta\bar{i} = \sum_{v \neq 1} \bar{i}_v = \sum_{v \neq 1} \bar{I}_v e^{jv\omega_1 t}, \quad \bar{I}_v \approx \frac{\bar{U}_v}{jv\omega_1 L_d}. \quad (4.21.a,b,c)$$

Itt  $v$  a felharmonikusok rendszáma. Feltételeztük, hogy az  $\bar{u}_p$  pólusfeszültség (4.2) tisztán alapharmonikusból áll ( $\omega_1 = 2\pi f_1 = \omega_1 = \omega$ ). **Ha  $f_d \geq 2\text{kHz}$ , akkor jó közelítéssel elhanyagolható a  $\Delta\bar{i}$  áramlökletés és az általa okozott  $\Delta m$  nyomatéklökletés** (ez a 4.13. ábrabeli megoldásra is igaz, ha  $f_{ISZM} \geq 2\text{kHz}$ ). A kalickás aszinkrongép (5. fejezet) is jó szűrőként viselkedik ISZM feszültséginverteres tápláláskor.



4.19. ábra: Helyettesítő képek. a. Pillanatértékekre, b. Alapharmonikusokra, c. Felharmonikusokra.

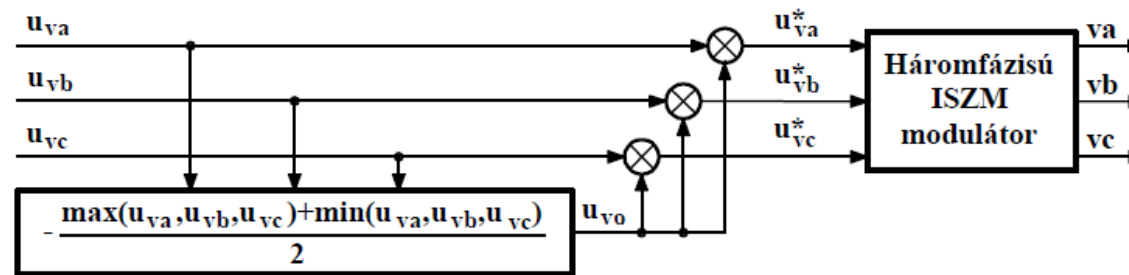
Mind szinkron, mind aszinkron modulációra jó közelítéssel igaz, hogy  **$f_d/f_1 > 20$**  esetben a háromfázisú ISZM modulátorral vezérelt feszültséginverter **arányos elemnek tekinthető**. Pl. az **a** fázisra:

$$u_{1a} = K_u u_{va}, \quad K_u = \frac{U_e}{U_{\Delta m}}. \quad (4.22.a,b)$$

A 4.18. ábra szerint  $u_{va}$  maximum  $U_{\Delta m}/2$  lehet, amiből következik a legnagyobb alapharmonikus csúcsérték:

$$U_{1\max} = \frac{U_e}{2}. \quad (4.23)$$

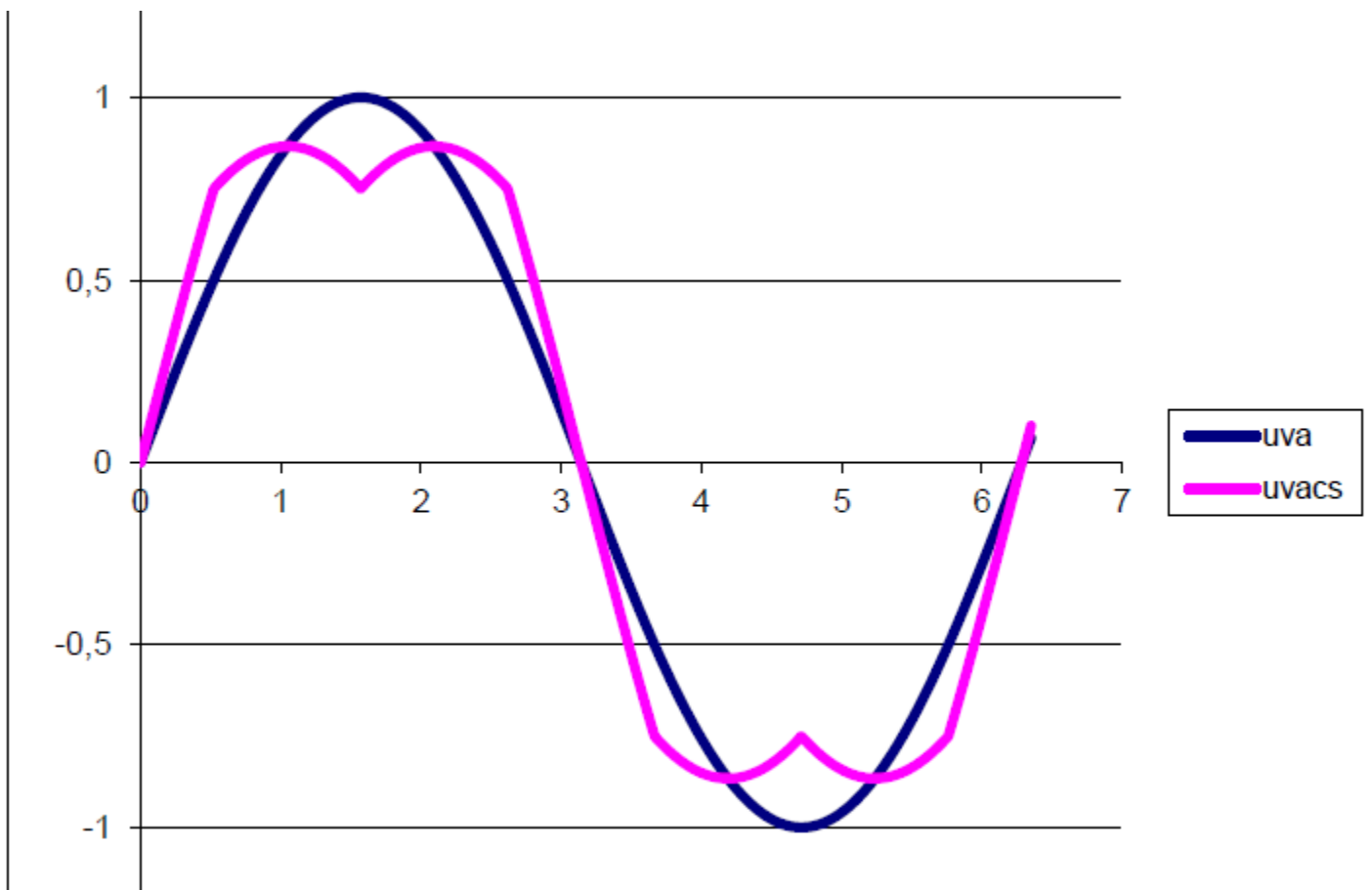
Ezt összevetve (4.20)-szal látható, hogy a térvektoroshoz képest kb. **15%-kal kisebb alapharmonikus feszültség kiadására képes** a háromfázisú ISZM vezérlős megoldás. Növelhető az inverter kihasználtsága, ha a 4.20. ábra szerint **módosított (csillagos) vezérlő jelekkel működtetjük** a háromfázisú ISZM modulátort.



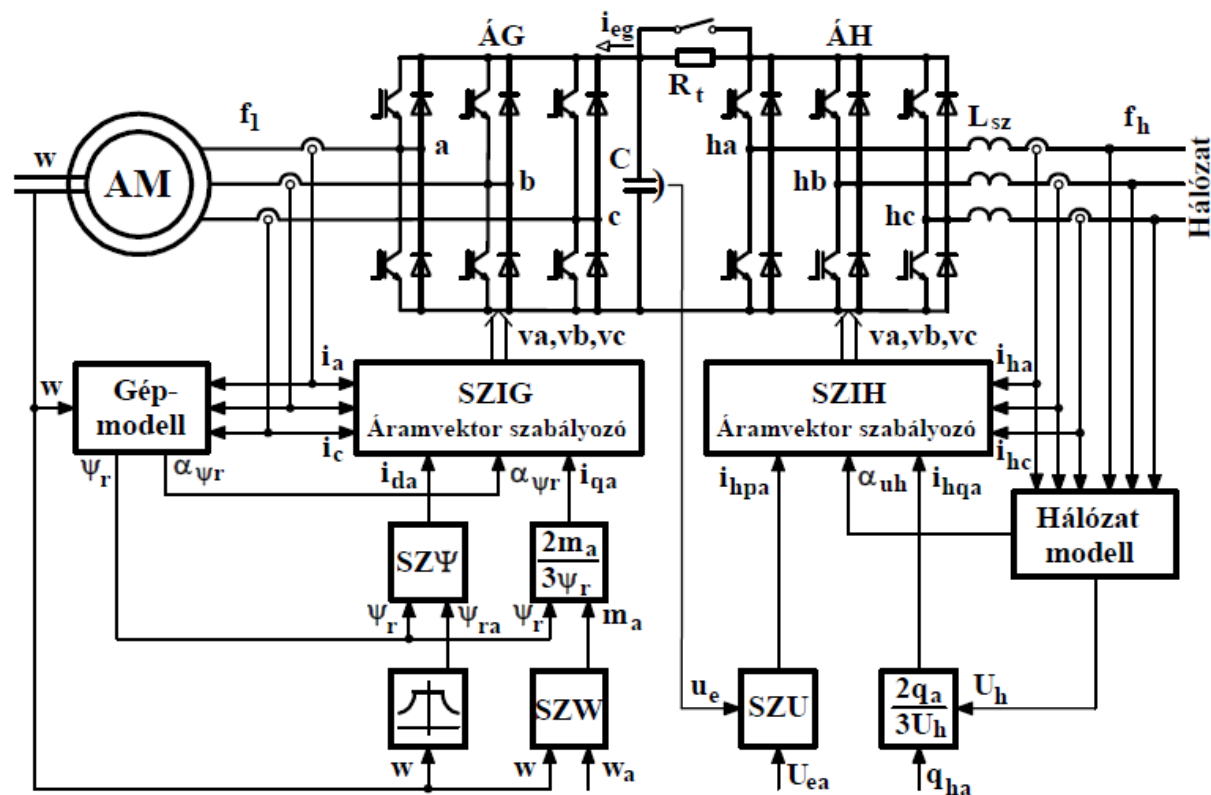
4.20. ábra: Vezérlőfeszültségek módosítása zérussorrendű komponenssel.

Ha az  $u_{v0}$  zérussorrendű módosító komponenszt az ábrába beírt algoritmussal számoljuk, akkor a feszültségerősítési tényező

$K_u = \frac{2U_e}{\sqrt{3}U_{\Delta m}}$  -re növekszik és így  $U_{1\max} = \frac{K_u U_{\Delta m}}{2} = \frac{U_e}{\sqrt{3}}$  **mint a térvektoros vezérlésnél.**



A feszültséginverteres áramirányítók gépoldalon és hálózatoldalon való egyidejű alkalmazását a 7.7. ábrán példaként egy kalickás aszinkron motoros hajtáson mutatjuk be. A gépoldalon az SZW szögsebesség szabályozónak alárendelt nyomaték szabályozás az 5.8.a. ábrának megfelelő. A hálózatoldalon az SZU egyenfeszültség szabályozó szolgáltatja  $i_{hpa}$  hatásos áramkomponens alapjelet,  $i_{hqa}$ -t a (7.8.b) összefüggés szerint a hálózat által igényelt  $q_{ha}$  meddő teljesítmény szabja meg. Az SZIG a géppoldal, az SZIH a hálózatoldal ISZM vezérlős áramvektor szabályozója (lásd a 4.13., 4.16. ábrákat).



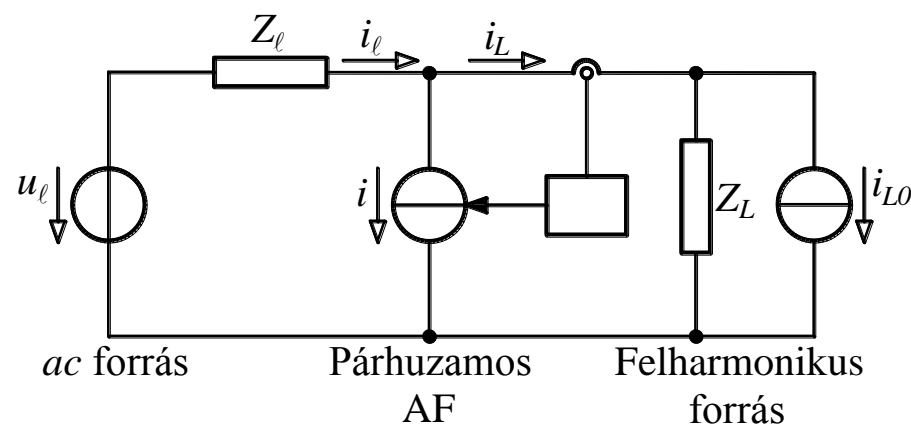
7.7. ábra: Korszerű feszültséginverteres kalickás aszinkron motoros hajtás.

## Bekapcsolási folyamat:

A C kondenzátor bekapcsolást követő **feltöltődése alatt ÁG tiltva van**. A kezdeti szakaszban **ÁH is tiltva van**. Ekkor az ÁH diódáiból álló **diódás híd tölti a C kondenzátort** az  $R_t$  töltőellenálláson keresztül,  $i_{eg}=0$ -t feltételezve az  $U_{hvc\acute{s}ucs} = \sqrt{3}U_h$  **vonali csúcsfeszültségig**. E töltési szakasz végén  $R_t$ -t rövidre zárják. **Engedélyezve** az SZU (általában PI típusú) egyenfeszültség szabályozónak alárendelt **SZIH hálózati áramvektor szabályozót** az  $u_e$  egyenfeszültség **megnő az  $u_{ea} > U_{hvc\acute{s}ucs}$  alapjelig**. Közben  $i_{hpa} > 0$  a C töltése miatt. Pl. 3x400V-os +10%-os hálózatonál  $U_{hvc\acute{s}ucs} = 1,1\sqrt{2} 400V \cong 622V$ . Ennek megfelelően ilyenkor szabályozott üzemben  $U_e = U_{ea} = 700 V$  körüli az egyenfeszültség. **C feltöltődése után a gépoldali szabályozók is engedélyezve lesznek**. Szabályozott üzemben ugyanaz a 7 féle  $\bar{u}(k)$  feszültségvektor (4.14) kapcsolható ÁH-val a hálózatoldali  $h_a, h_b, h_c$  kapcsokra, mint ÁG-vel a gép a,b,c kapcsaira. **Az inverterek vezérelhetőségének feltétele:  $U_e > U_{hvc\acute{s}ucs}$  és  $U_e > U_{gvc\acute{s}ucs}$**  ( $U_{gvc\acute{s}ucs}$  az aszinkron gépben indukálódó feszültség vonali csúcsértéke).

Itt említjük meg, hogy azok a szabályozott villamos hajtások, amelyek feszültséginverter kapcsolású hálózati áramirányítóval rendelkeznek (ilyenek a szélgenerátorok is) az alapfeladatokon kívül **hatásos teljesítményt nem igénylő járulékos feladatokra is képesek**. Ezek a meddő kompenzálás, az aszimmetria kompenzálás és a felharmonikus kompenzálás. Ráadásul a járulékos feladatokat a korszerű szélgenerátorok szélcsendes időben is el tudják látni. A járulékos feladatok az ÁH hálózati áramirányító és a C egyenköri kondenzátor méretezését befolyásolják.

Tegyük fel, hogy a hálózaton lévő egyéb fogyasztók áram felharmonikusokat, áram aszimmetriát és meddő teljesítmény igényt generálnak. Ezek jelenlétét érzékelve, a jó dinamikával áramvektor szabályozott, ugyanarra a hálózatra kapcsolódó hálózati áramirányítóval lehetőség van ezek kompenzálására **az érzékelttel ellentétes előjelű kompenzáló áramot injektálva a hálózatba**, módosítva az áramszabályozás  $i_{q\text{refo}}$  és  $i_{p\text{refo}}$  alapjeleit  $\Delta i_{q\text{ref}}$  és  $\Delta i_{p\text{ref}}$  értékekkel (a p-q hatásos-meddő koordináta rendszert használjuk). Ezt a típusú kompenzálást **áramforrás típusú felharmonikus forrás párhuzamos aktív szűrésének hívják**. Az alapelvet a 2.5.1. ábra mutatja.



2.5.1. ábra. Az áramforrás típusú felharmonikus forrás párhuzamos aktív szűrésének alapelve.

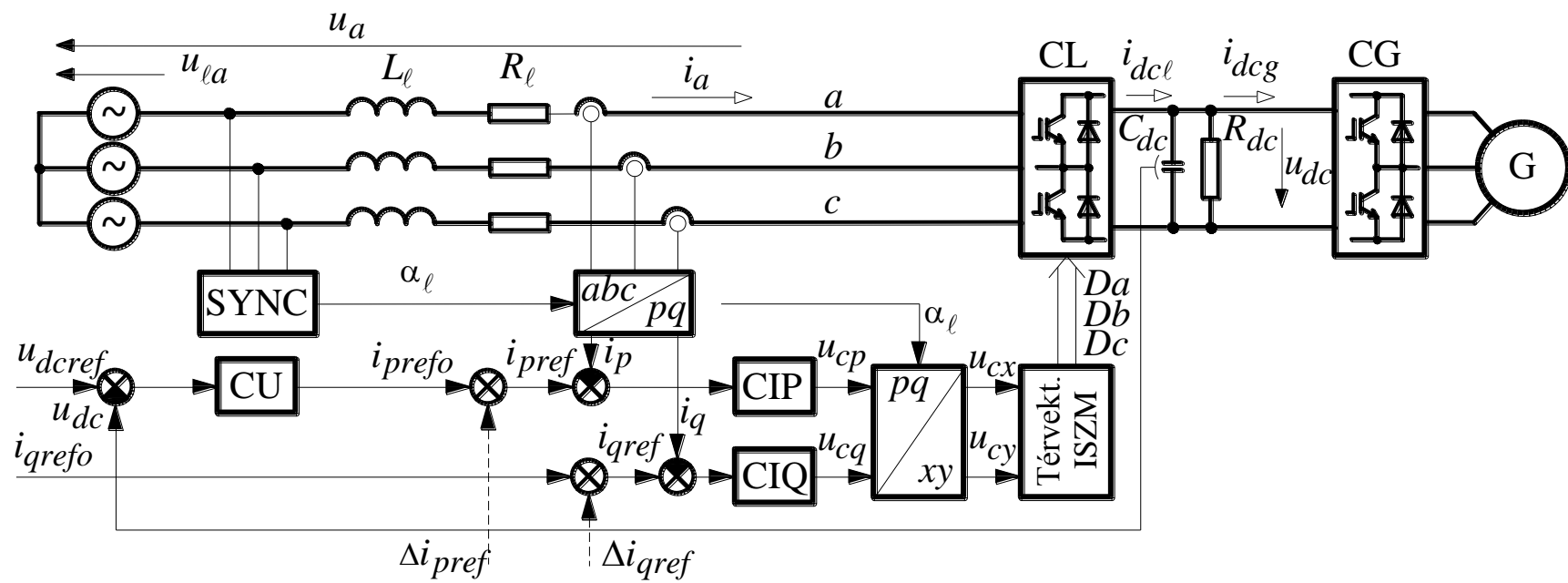
Ha az áramszabályozás **megfelelő sebességű**, az alapharmonikustól eltérő áramok kompenzálhatók. Természetesen ennek van egy felső frekvencia korlátja, de szerencsére az alacsonyabb rendszámú, nagyobb amplitúdójú felharmonikusok a kritikusabbak a hálózatszennyezés szempontjából. Az áramszabályozás paraméterei befolyásolják a kompenzálás minőségét.

A meddő teljesítmény kompenzálása hasonló elven történik. Bármelyik áramvektor szabályozási módszerrel a teljesítmények is szabályozhatók a nekik megfelelő áramkomponensekkel ( $i_q$ ,  $i_p$ ) közvetetten.

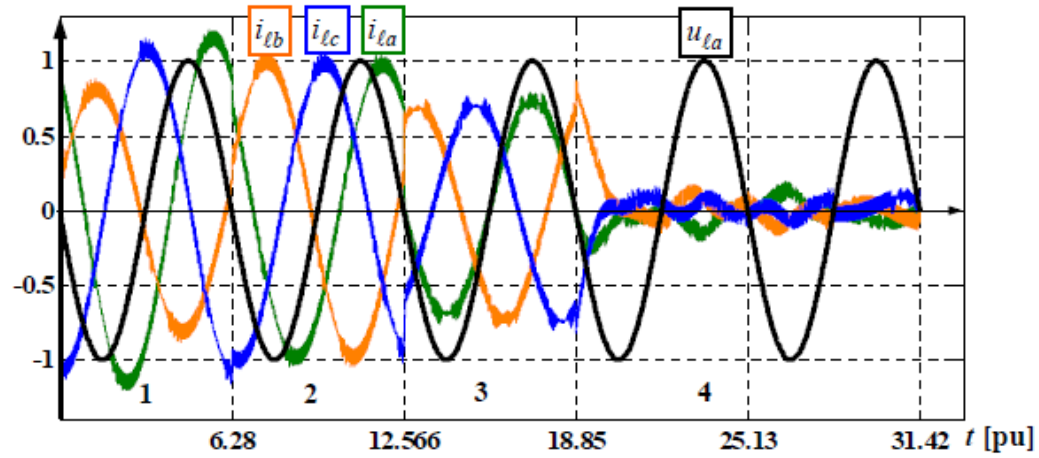
**Példaként aszimmetria és meddő teljesítmény kompenzálását szemléltetjük** a 12.13. ábrában relatív egységekben. Az 1 jelű periódusban a hálózatot terhelik az aszimmetrikus induktív jellegű fogyasztói áramok (20%-os a negatív sorrendű összetevő). A 2 jelű periódusban a szélgenerátor CL áramirányítója szimmetrizálja a hálózatot terhelő áramokat ( $\cos\varphi_1 \approx 0,7$ ). A 3 jelű periódusban ÁH kompenzálja a meddő teljesítményt, így a hálózatot jóval kisebb  $\cos\varphi_1 \approx 1$ -es áramok terhelik. A három fázis  $p = p_{1a} + p_{1b} + p_{1c}$  teljesítményének a középértéke végig állandó. A 4. periódustól a fogyasztók hatásos  $p$  teljesítményét is a szélgenerátor szolgáltatja, így a hálózat gyakorlatilag terheletlen.

Az aszimmetria kompenzálásakor x-y koordinátarendszerben (kr-ben) az ellipszisből kör, p-q kr-ben a kis körből pont lett. A meddő kompenzálásakor p-q kr-ben a p tengelyre ugrik a hálózati áramvektor.

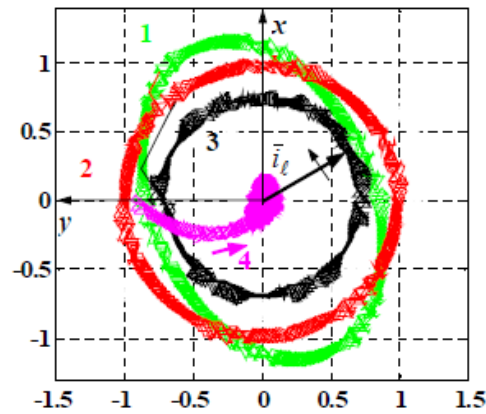




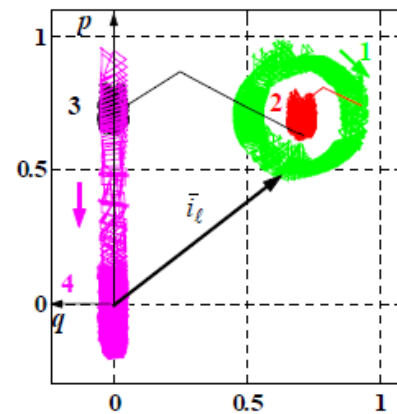
2.5.2. ábra. Áramvektor szabályozás forgó (p-q) koordináta rendszerben térvektoros ISZM-mel



a)



b)



c)

12.13. ábra: Aszimmetria és meddő teljesítmény kompenzálása.

a. Hálózat fázisáramai és az **a** fázisfeszültsége.

b. Hálózati áramvektor x-y koordinátarendszerben. c. Hálózati áramvektor d-q koordinátarendszerben.

## Kétoldalról táplált feszültséginverteres aszinkrongépes hajtások

A **háromfázisú tekercselt forgórészű, csúszógyűrűs aszinkrongép** (6.1.a. ábra) kétoldalról (az állórészen és a forgórészen) táplálható. Fordulatszama, szinuszos, szimmetrikus, állandósult üzemben a (6.1) képletnek megfelelően az állórész  $f_1$  és a forgórész  $f_r=f_2$  tápfrekvenciájával változtatható:

$$n = \frac{f_1 - f_2}{p}. \quad (6.1)$$

Az  $f_2$  pozitív előjelű, ha a fázissorrend az állórészen és a forgórészen megegyező, negatív ha ellentétes. A teljesítményeket az alábbi összefüggések mutatják:

$$P_1 = P_t + P_{vas} + P_\ell, \quad P_\ell = P_r + P_m, \quad P_r = P_{tr} + P_{vasr} + P_2. \quad (6.2.a,b,c)$$

$P_1$  az állórész kapocsteljesítmény,  $P_t$  az állórész tekercsveszteség,  $P_{vas}$  az állórész vasveszteség,  $P_\ell$  a légrésteljesítmény,  $P_r$  a forgórész körrelteljesítmény,  $P_m$  a mechanikai teljesítmény,  $P_{tr}$  a forgórész tekercsveszteség,  $P_{vasr}$  a forgórész vasveszteség,  $P_2$  a forgórész kapocsteljesítmény. **A veszteségeket elhanyagolva:**

$$P_1 = P_\ell, \quad P_\ell = P_r + P_m, \quad P_r = P_2. \quad (6.3.a,b,c)$$

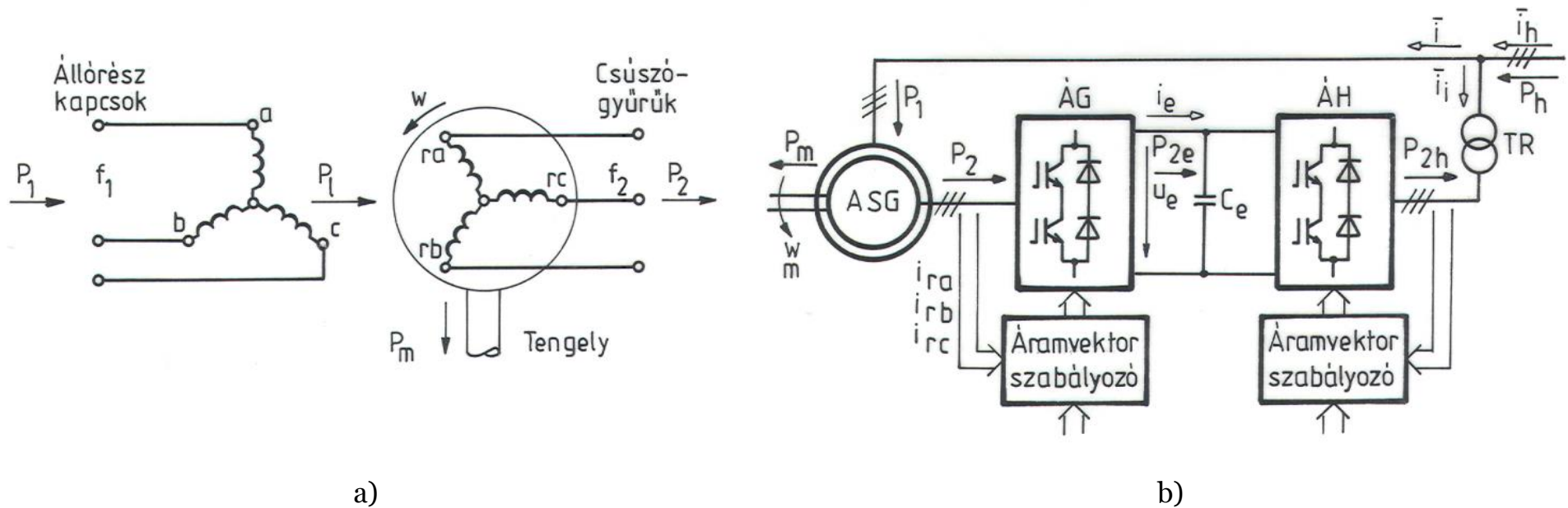
A teljesítmények a nyomatékkal és a szögsebességekkel is kifejezhetők:

$$P_\ell = MW_1, \quad P_m = MW = (1 - s)P_\ell, \quad P_r = MW_r = sP_\ell. \quad (6.4.a,b,c)$$

Itt  $W_1 = \frac{\omega_1}{p}$  a forgómező szögsebessége ( $\omega_1=2\pi f_1$  a körfrekvenciája),  $W$  a forgórész szögsebessége,

$W_r = W_1 - W = \frac{\omega_2}{p}$  a forgómező forgórészhez képesti szögsebessége ( $\omega_2=2\pi f_2$ ),  $s = \frac{W_r}{W_1}$  a szlip. A következőkben  $2p=2$

pólusszámot tételezünk fel, így a szögsebességek és a körfrekvenciák megegyeznek.



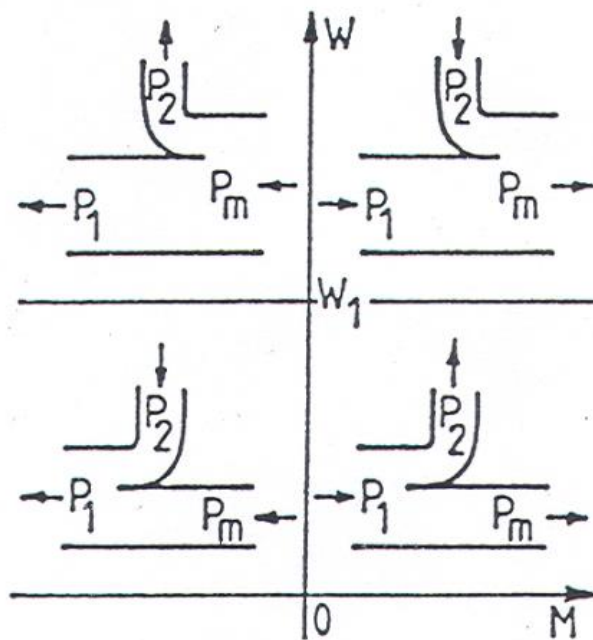
6.1. ábra: Kétoldalról táplált aszinkrongép. a. Csúszógyűrűs aszinkrongép. b. Feszültséginverteres táplálás.

A kétoldalról táplált gép korszerű változatában (6.1.b. ábra) **az állórészt közvetlenül a hálózatra kapcsolják** ( $f_1=f_h=50\text{Hz}$ ,  $W_1=2\pi f_1 \approx 314/\text{s}$ ), **a forgórészhez pedig egy közbülső egyenáramú körös feszültséginverter csatlakozik**. Mind az ÁG gépdali, mind az ÁH hálózatoldali áramirányító kétszintű feszültséginverter kapcsolású. A **vesztésektől eltekintve**, a 6.1.b. ábra jelöléseit alkalmazva:

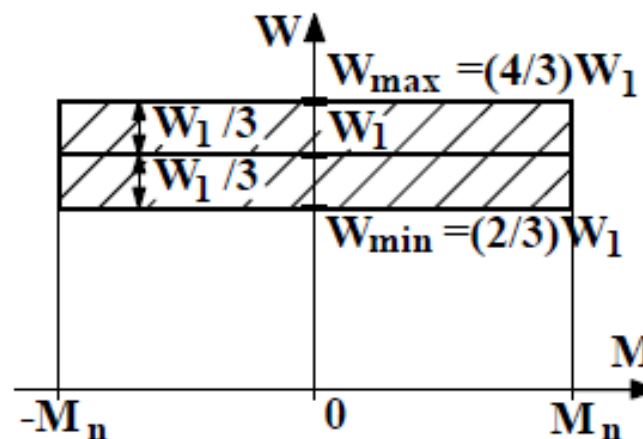
$$P_r = MW_r = P_2 = P_{2e} = U_e I_{ek} = P_{2h} ,$$

$$P_h = P_1 - P_{2h} = MW_1 - MW_r = MW = P_m . \quad (6.5.a,b)$$

A 6.2. ábra veszteségmentes esetre mutatja a **teljesítmények áramlását**. Látható, hogy a szinkron alatti hajtásnál és a szinkron feletti fékezésnél teljesítményt veszünk ki a forgórészből ( $P_2=P_r>0$ ), a szinkron feletti hajtásnál és a szinkron alatti fékezésnél teljesítményt adunk be a forgórészbe ( $P_2=P_r<0$ ). Megállapítható, hogy **a teljesítmény áramlási irányok  $W_r$  és  $M$  függvényei**. A 6.1.b. ábra szerinti megoldás **kétirányú teljesítmény áramlásra,  $P_2>0$ -ra és  $P_2<0$  képes**, mivel  $U_e=\text{const.}>0$ , de  $I_{ek}>0$  és  $I_{ek}<0$  is lehet.



6.2. ábra: Teljesítmények áramlása.



6.3. ábra: Szokásos üzemi tartomány.

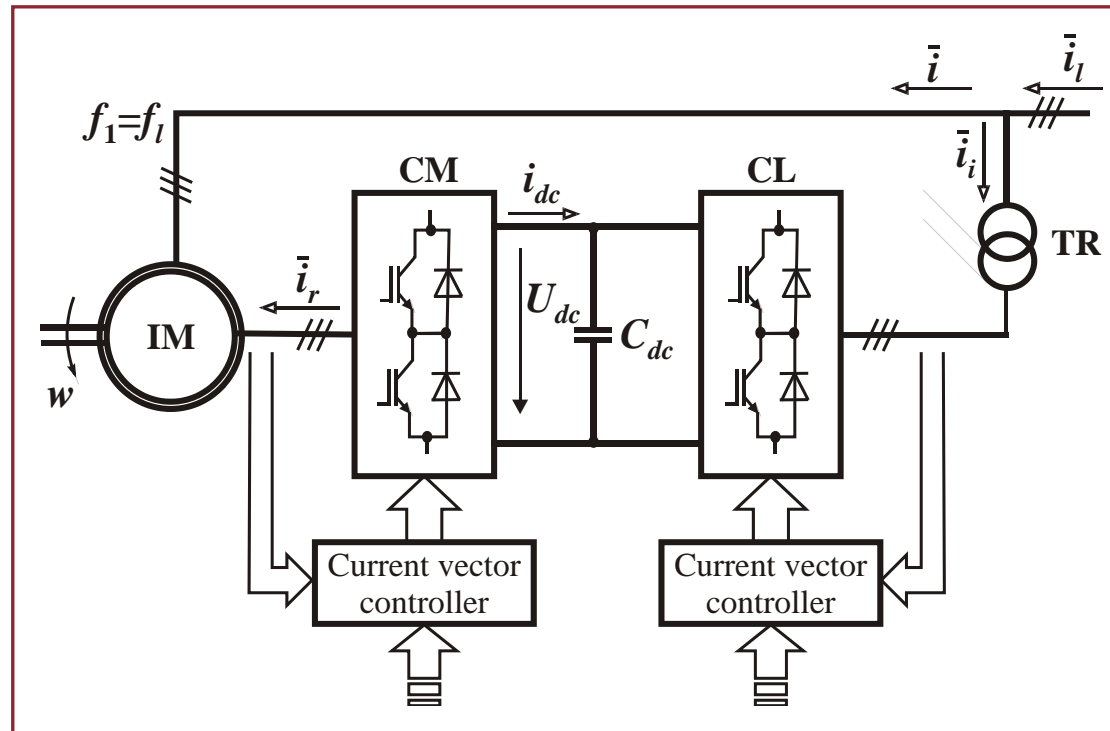
Ha ÁG diódás híd lenne, akkor csak  $P_2 > 0$  lenne lehetséges (ez a szinkron alatti kaszkád).

**Az ÁG és az ÁH áramirányítók csak a  $P_2 = P_r = MW_r$  forgórész körüli teljesítmény áramlik át.** Ezáltal a méretezési (típus) teljesítményük:

$$P_{\text{ÁItip}} = |M|_{\text{max}} |W_r|_{\text{max}} \cdot \quad (6.6)$$

$|M|_{\text{max}}$  és  $|W_r|_{\text{max}}$  nem biztos, hogy egyidejűleg lép fel.  $|M|_{\text{max}}$  az áramot,  $|W_r|_{\text{max}}$  a feszültséget szabja meg. Szokásos működési tartományt mutat a 6.3. ábra. Ekkor  $\frac{W_{\text{max}}}{W_{\text{min}}} = 2$ ,  $P_{\text{ÁItip}} = \frac{M_n W_1}{3} \cong \frac{P_n}{3}$ . Ilyenkor az ÁG és ÁH áramirányítókat az aszinkrongép  $P_n = M_n W_n \cong M_n W_1$  névleges teljesítményének **csak az 1/3-ára kell méretezni**, de  $W_{\text{min}} = \frac{2}{3} W_1$  alatt ÁG-t le kell választani a forgórészről a **nagy rotor indukált feszültség** miatt.

A 6.1.b. ábrában a feszültséginverteres ÁG áramirányító áramvektor szabályozásának megfelelően a forgórész áramgenerátorosan van táplálva. **Ideális hálózatot feltételezve az állórész viszont feszültséggenerátoros (közelítőleg fluxusgenerátoros) táplálást kap. Ebből kifolyólag mezőgyengítés ilyenkor nem lehetséges.**

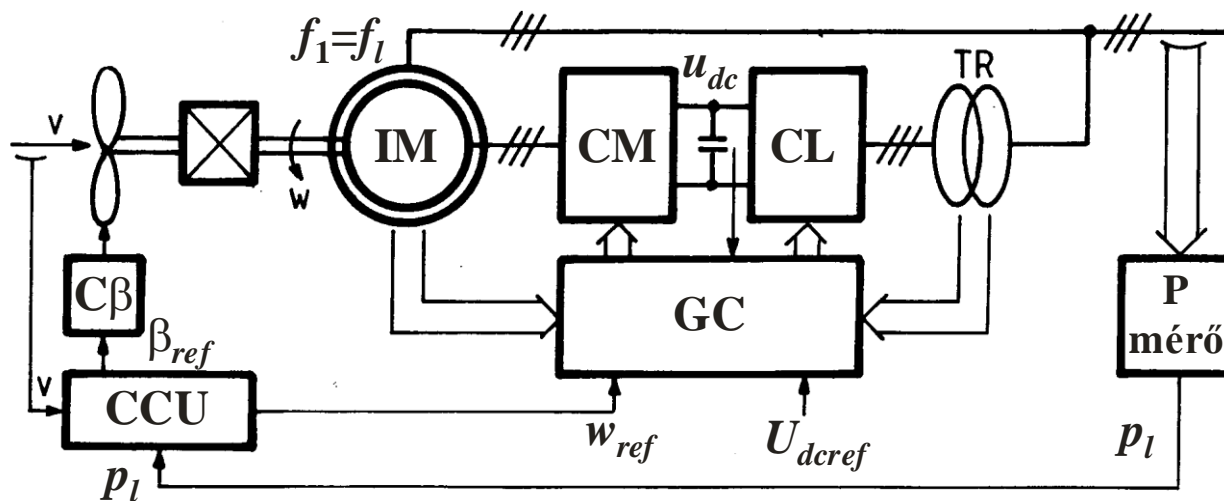


A kétoldalról táplált csúszógyűrűs aszinkron szélgenerátort **nagy teljesítményeken** gyakran alkalmazták, mert:

- A  $P_2 = sP_1$  teljesítmény áramlik át az áramirányítókon. ( $P_2$  a rotorköri teljesítmény,  $P_1$  a légrés teljesítmény)
- A sebesség változtatás szokásos tartománya  $\pm 33\%$  a szinkronpont körül  $\rightarrow$  az áramirányítók típusjelölése:  $P_n/3$ .
- CL áramvektor szabályozása szinuszos hálózati áramot, egységnyi teljesítmény tényezővel képes produkálni.
- CM áramvektor szabályozása egységnyi teljesítmény tényezőjű állórész áramot szolgáltat.
- Sőt, az eredő hálózati áram akár kapacitív is lehet.
- Mind motoros hajtás, mind generátoros fékezés is lehetséges.

Kétoldalról táplált generátorként a nagy teljesítményű változtatható fordulatszámú **széleróművekben** elsősorban háromfázisú csúszógyűrűs aszinkrongépeket, kísérleti jelleggel kefenélküli kétoldalról táplált háromfázisú gépeket alkalmaznak. A következőkben részletesen csak a csúszógyűrűs aszinkrongépes változatot tárgyaljuk, annak is elsősorban a mezőorientált áramvektor szabályozását.

A 2.4.1. ábrának megfelelően az állórészt közvetlenül a hálózatra kapcsolják ( $f_1=f_l=50\text{Hz}$ ), a forgórészt pedig frekvenciaváltón keresztül csatlakoztatják a hálózathoz. A szögsebesség változtatás szokásos tartománya  $\pm 33\%$  a szinkron szögsebességre vonatkoztatva. Ez a  $-1/3 \leq S \leq 1/3$  szliptartománynak megfelelően kb.  $(1/3)P_{név}$  típusjelzésű forgórész körüli frekvenciaváltót igényel, ami komoly előnyt jelent az egyoldalú tápláláshoz képest. Az üzemi fordulatszám tartományon belül motoros hajtás és generátoros fékezés egyaránt lehetséges, mivel a CM és CL áramirányítók kétirányú teljesítményáramlásra képesek.



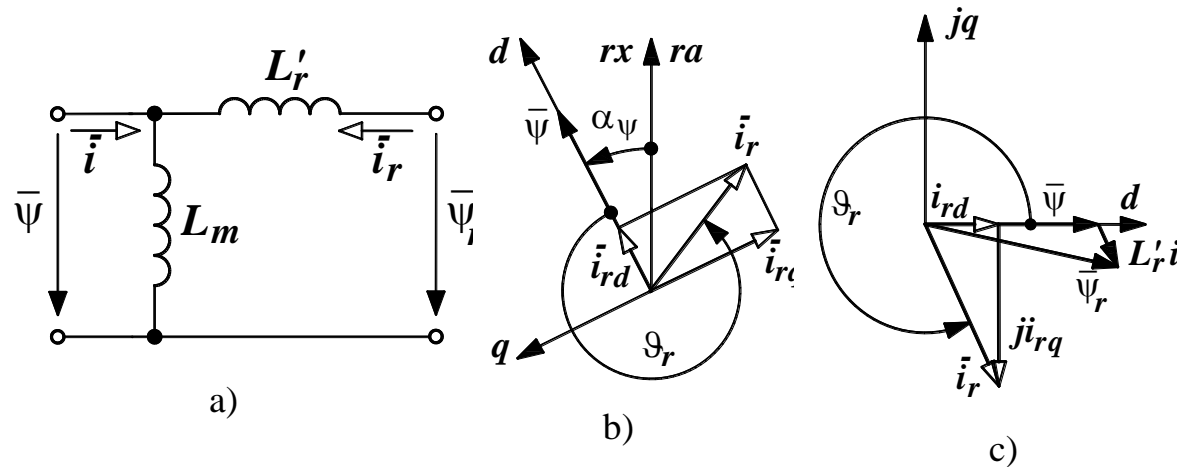
2.4.1. ábra. A kétoldalról táplált aszinkron szélgenerátor blokkvázlata.



Ideális  $\bar{u} = \bar{u}_\ell = \bar{U}_\ell e^{j\omega_\ell t}$  hálózati feszültséget ( $U_l = \text{const.}$  amplitúdót és  $\omega_l = \omega_l = 2\pi f_l = \text{const.}$  körfrekvenciát) feltételezve és **az állórész tekercs R ellenállását elhanyagolva** az állórész feszültséggenerátoros táplálása gyakorlatilag megszabja az állórész tekercs fluxusát is:

$$\bar{\psi} = \bar{\Psi} e^{j\omega_\ell t}, \quad \bar{\Psi} = \bar{U}_\ell / (j\omega_\ell). \quad (2.4.1a,b)$$

Erre tekintettel fluxusokra a 2.1.4a ábrán látható **helyettesítő vázlatot** célszerű alkalmazni a kétoldalról táplált gépre. A CM gépoldali feszültség inverterrel közvetlenül a forgórész  $\bar{i}_r$  árama, közvetetten az állórész  $\bar{i}$  árama szabályozható. A forgórész  $\bar{i}_r$  áramvektorát a  $\bar{\psi}$  **állórész fluxusvektor** mezőhöz orientáltan célszerű szabályozni **(ez van kényszerítve)**.



2.1.4. ábra. Csúszógyűrűs forgórészű, kétoldalról táplált aszinkrongép.  
a) Helyettesítő vázlat (redukált), b) Vektorábra forgórész koordinátarendszerben,  
c) Vektorábra mező koordinátarendszerben.

## Mezőorientált szabályozás (ismétlés)

Az áramvektor szabályozások mindig orientált szabályozásokat jelentenek: valamilyen kellően (a szabályozási követelményeknek, céloknak figyelembevételével) megválasztott vektorhoz orientáltan szabályozzák az áramvektort:

1. A gépoldalon a gép nyomatékképzését meghatározó mágneses mezőhöz (fluxusvektorhoz), **mindig a kényszerített fluxushoz**
2. a hálózatoldalon a hatásos teljesítményviszonyokat megszabó feszültségvektorhoz orientáltan szabályozzák az áramvektort.

Egy vektorhoz, adott irányhoz való orientálás azt jelenti, hogy az őhöz kötött koordinátarendszerben értelmezett **merőleges áramvektor-komponensek** szabályozásával avatkozunk be. A megfelelően orientált áramvektor két Descartes komponensének a szabályozásával két különböző mennyiség (pl. a gépoldalon a nyomaték és fluxus, a hálózatoldalon a hatásos és meddő teljesítmény) **szétcsatolt szabályozása** oldható meg (a merőlegesség függetlenséget, szétcsatolást eredményez). Ez a szétcsatolás az egyenáramú gép nyomaték és fluxus képzésében automatikusan, önmagától előáll. **Váltakozóáramú gépekben és rendszerekben ezt mesterséges úton kell megoldani.** A megvalósítás általában tartalmaz koordináta transzformációt, hiszen az alapjelek megadása az orientáló vektor koordinátarendszerében, az ellenőrző jelek érzékelése és a beavatkozás pedig vele nem megegyező koordinátarendszerben történik.

Tradicionalisan először ezt az elvet az aszinkrongépek jó dinamikájú szabályozására találták ki és széles körben kutatták és alkalmazták az utóbbi évtizedekben főként mezőorientált szabályozás elnevezéssel, de a vektoros szabályozás (vector control) elnevezés is elterjedt.

A szabályozás jó dinamikája indokolta azt, hogy a nagy dinamikai igényű váltakozóáramú szervó hajtásokban is főként ezt alkalmazzák. Azon a tradicionális háttéren alapulva, amelyet Dr.Rácz István professzor alapozott meg.

A megújuló energiaforrások nagyléptékű felhasználásának igénye teremtett újabb alkalmazási területet. A többségében váltakozóáramú hasznosítás mindenképp igényel optimalizált teljesítményelektronikai átalakítást, ami optimálisan szintén áramvektor szabályozással oldható meg.

## 2.4.1. Általános elméleti leírás

### 2.4.1.1. Vektorábrák, nyomatóképzés

Az állórészhez rögzített (x-y), a forgórészhez rögzített (rx-ry) és a  $\bar{\psi}$  fluxusvektorhoz rögzített (d-q) koordinátarendszerek kapcsolatát és a  $\bar{\psi}$ , a  $\bar{\psi}_r$ , az  $\bar{u}$ , az  $\bar{i}$  és az  $\bar{i}_r$  vektorokat mutatják a 2.4.2a és 2.4.2b ábrák (a vektorok generátoros üzemnek felelnek meg). **A  $\bar{\psi}$  fluxusvektorhoz rögzített mező (d-q) koordinátarendszerben** a fluxusok, az állórész feszültség és az áramok vektorai (**R=0-t feltételezve**):

( $\ell$  index a hálózatra- line- utal, h index is használatos)

$$\bar{\psi} = \Psi = U_\ell / \omega_\ell, \quad \bar{\psi}_r = \psi_{rd} + j\psi_{rq} = \psi_r e^{j\delta}, \quad \bar{u} = jU_\ell. \quad (2.4.2a-c)$$

$$\bar{i} = i_d + ji_q = ie^{j\vartheta}, \quad \bar{i}_r = i_{rd} + ji_{rq} = i_r e^{j\vartheta_r}. \quad (2.4.3a,b)$$

A valóságban a  $\bar{\psi}$  fluxusvektor  $\psi$  amplitúdója a fenti  $\Psi$ -től kismértékben eltér. A helyettesítő vázlat (2.1.4a ábra) alapján felírható  $\bar{i}_m = \bar{i} + \bar{i}_r = \psi / L_m$  csomóponti egyenletet és a  $\bar{\psi}_r = \bar{\psi} + L'_r \bar{i}_r$  fluxus egyenletet d-q komponensekre bontva:



**Megállapítható, hogy az állórész áram  $i_d$  és a rotor áram  $i_{rd}$  komponense a fluxusképzésben, az  $i_q$  és  $i_{rq}$  komponensek a nyomatékképzésben vesznek részt.** A d irányú áramkomponenseket **fluxusképző**, a q irányúakat **nyomatékképző** komponenseknek nevezik. A  $\vartheta$  és a  $\vartheta_r$  **nyomatékszögek** a  $\bar{\psi}$  fluxusvektor és az  $\bar{i}_d, \bar{i}_q$  áramvektorok között mérhetők. Felhasználva a  $\psi_{rq} = L'_r i_{rq} = \psi_r \sin \delta$  összefüggést a nyomaték a fluxusokkal is számítható:

$$m = -\psi_r \psi_r \sin \delta / L'_r \approx -\psi_r \psi_r \delta / L'_r. \quad (2.4.7)$$

Az üzemi tartományban elfogadható a közelítő alak is, mivel a  $\bar{\psi}$  és a  $\bar{\psi}_r$  fluxusok közötti  $\delta$  terhelési szög kicsi.

A mező koordinátarendszerbeli állórész feszültség egyenletnek  **$(\bar{u} = R\bar{i} + d\bar{\psi}/dt + j\omega_\psi \bar{\psi})$**  q komponens egyenlete  $u_q = U_\ell$  közelítéssel (ld. 2.4.2b ábra) a következő formában írható fel:

$$\psi = (U_\ell - R i_q) / \omega_\psi = (U_\ell + R i_{rq}) / \omega_\psi. \quad (2.4.8)$$

**Ebből látható, hogy a  $\psi$  fluxusra kissé hatnak a nyomatékképző  $i_q$  és  $i_{rq}$  áramkomponensek is (ha az ellenállást is figyelembe vesszük).**

### 2.4.1.2. Állandósult üzem alapharmonikusokkal

A következőkben a kétoldalról táplált gép tulajdonságait alapharmonikusokkal (1 indexek), állandósult üzemben vizsgáljuk. Ekkor d-q mező koordináta-rendszerben álló vektorokat kapunk. Az állórész  $\bar{\Psi}_1$  fluxusvektora és  $\bar{U}_1$  feszültségvektora  $R=0$  közelítéssel a (2.4.2a,c) összefüggéseknek megfelelően:  $\bar{\Psi}_1 = \Psi = U_\ell / \omega_\ell$ ,  $\bar{U}_1 = jU_\ell$ . Az állórész és a forgórész áramvektorok:

$$\bar{I}_1 = I_{1d} + jI_{1q} = I_1 e^{j\vartheta_1}, \quad \bar{I}_{r1} = I_{r1d} + jI_{r1q} = I_{r1} e^{j\vartheta_{r1}}. \quad (2.4.9a,b)$$

Az állórész áramvektort az  $\bar{I}_{m1} = \bar{I}_1 + \bar{I}_{r1} = \Psi / L_m$  csomóponti egyenletből kifejezve:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{m1} - \bar{I}_{r1} = \Psi / L_m - I_{r1} e^{j\vartheta_{r1}}. \quad (2.4.10)$$

A  $\Psi = \text{const.}$  és  $I_{r1} = \text{const.}$  feltételezéssel kapott  $\bar{I}_1$  **áramvektor diagram körpályát ír le**  $\vartheta_{r1}$  változtatásakor (2.4.3. ábra). A K jelű kör középpontját az  $\bar{I}_{m1} = \Psi / L_m$  mágnesező áramvektor határozza meg, sugara a forgórész áramvektor  $I_{r1}$  amplitúdója. A forgórész fluxusvektor  $\bar{\Psi}_{r1}$  komplex amplitúdója is körpályán mozog ugyanekkor:

$$\bar{\Psi}_{r1} = \bar{\Psi}_1 + L'_r \bar{I}_{r1} = \Psi + L'_r I_{r1} e^{j\vartheta_{r1}}. \quad (2.4.11)$$

A K' jelű kör középpontja  $\Psi$ , sugara  $L'_r I_{r1}$ . Az  $\bar{I}_1$  állórész áram K jelű áramvektor diagramja a hengeres forgórészű szinkrongép állandó gerjesztés melletti áramvektor diagramjához hasonló, **az  $I_{r1}$  forgórész áram veszi át a gerjesztőáram szerepét.**





Az **alapharmonikus nyomaték** (2.4.6)-hoz és (2.4.7)-hez hasonlóan számolható:

$$M_1 = \Psi I_{1q} = \Psi I_1 \sin \vartheta_1 = -\Psi I_{r1q} = -\Psi I_{r1} \sin \vartheta_{r1}, \quad (2.4.12)$$

$$M_1 = -\Psi \Psi_{r1} \sin \delta_1 / L'_r \approx -\Psi \Psi_{r1} \delta_1 / L'_r. \quad (2.4.13)$$

Az  $R=0$  közelítés következtében az aszinkrongép állórészoldali  $P_1 = P_l = M_1 \omega_1 = M_1 \omega_l$  hatásos és  $Q_1$  meddő kapaciteltjesítménye is felírható a d-q áramösszetevőkkel:

$$P_1 = U_l I_{1q} = -U_l I_{r1q}, \quad Q_1 = U_\ell I_{1d} = U_\ell^2 / X_m - U_\ell I_{r1d}. \quad (2.4.14a,b)$$

Itt  $X_m = \omega_l L_m$  a főmező reaktancia. **Fogyasztói pozitív irányokat használunk**: a fenti képletekben a motoros nyomaték és a hálózathoz felvett teljesítmények előjele pozitív.

Látható, hogy **a forgórész áram  $I_{r1q} = I_{r1} \sin \vartheta_{r1}$  képzetes komponensével az aszinkrongép  $M_1$  nyomatéka** és  $P_1$  teljesítménye, az  **$I_{r1d} = I_{r1} \cos \vartheta_{r1}$  valós komponensével a  $Q_1$  meddő teljesítménye** szabályozható. Emiatt  $I_{r1q}$ -t hatásos,  $I_{r1d}$ -t meddő komponensnek nevezik. Ezek a szabályozási feladatok az  $\bar{i}_r$  forgórész áramvektornak **a  $\bar{\psi}$  állórész fluxusvektorhoz (közelítőleg az  $\bar{u}_\ell$  hálózati feszültségvektorhoz) orientált áramvektor szabályozásával oldhatók meg.**

A (2.4.12) összefüggésből következik, hogy adott  $I_{r1}$  forgórész áram amplitúdóval  $\sin\vartheta_{r1}=\pm 1$ -nél ( $\vartheta_{r1}=\pm 90^\circ$  nyomatékszögnél) adódik **a legnagyobb abszolútértékű  $M_{\max}=\Psi I_{r1}$  nyomaték**. Ekkor a forgórészben a  $\bar{\psi}$  fluxus által indukált feszültség és az áram alapharmonikus fázisban, vagy ellenfázisban van, a fázisszög  $\varphi_{r1}=0^\circ$  vagy  $180^\circ$ . A 2.4.3. ábrában motoros üzemben MB, generátorosban GB jelöli ezt a pontot. A  $\bar{\psi}$  fluxusvektorhoz orientált áramvektor szabályozással a kétoldalról táplált aszinkrongép **akár az MB akár, a GB pontban is képes stabilisan üzemelni az önvezérlés következtében.**

**A névleges nyomaték kifejtése a rotor áramvektor szabályozásával különböző szempontok szerint optimalizált munkapontokban lehetséges:** Kétoldalról táplált üzemben a  $M_n$  névleges nyomaték az  $\bar{I}_{1n} = I_{1dn} + jI_{1qn}$  névleges állórész áramnak csak az  $I_{1qn}=-I_{r1qn}=M_n/\Psi$  képzetes, **hatásos komponensét írja elő.** Az  $I_{1dn}=\Psi/L_m-I_{r1dn}$  valós, meddő komponens  **$I_{r1dn}$ -nel változtatható** (2.4.4. ábra). Az állórész tekercs áramigénybevétele az  $M2', G2'$  ( $\cos\varphi_1=\pm 1$ ), a forgórész tekercs áramigénybevétele az  $M4', G4'$  ( $\cos\varphi_{r1}=\pm 1$ ) pontokban minimális. Az eredő  $P_{Cus}+P_{Cur}$  tekercsveszteség (rézveszteség) szempontjából optimalizált névleges pont az  $M2'$  és  $M4'$  ( $G2'$  és  $G4'$ ) pontok között (az  $M3'$  és  $G3'$  környékén) az  **$R/R_r$  ellenállásaránytól függő** helyen van. Megegyező  $R=R_r$  ellenállásoknál  $I_{1dn}=I_{r1dn}=(1/2)\Psi/L_m$  jelenti optimumot, amikor a mágnesező áram felét az állórész, felét a forgórész fedezi. **A kétoldalról táplált aszinkrongép méretezésekor figyelembe kell venni azt, hogy a névleges pontban mekkora  $\cos\varphi_{1m}$  fázistényezőt akarunk beállítani.**

A 2.4.1. ábrán látható kétoldalról táplált aszinkrongépnél mind a két feszültség inverter kapcsolású áramirányító **áramvektor szabályozással** rendelkezik.

A CL hálózati áramirányító áramvektor szabályozása lehetővé teszi, hogy a CL feszültség inverter hálózati árama **közelítőleg szinuszos legyen**  $\cos\varphi_{i1}=\pm 1$  fázistényezővel. Ha ezzel egyidejűleg a CM gépoldali áramirányítót  $\cos\varphi_1=\pm 1$  állórész áramot eredményező önvezérelt áramvektor szabályozással látjuk el, akkor **a hajtás eredő hálózati árama is  $\cos\varphi_{i1}=\pm 1$  fázistényezőjű és közelítőleg szinuszos alakú lesz.** Ennek megfelelően a kétoldalról táplált korszerű hajtások nem igényelnek plusz meddő kompenzációt, sőt az eredő hálózati áram **akár kapacitívá is tehető.**

## 1.1 Mezőorientált áramvektor szabályozás

**Az állórészen levő fluxuskényszer miatt most a  $\bar{\psi}$  állórész fluxusvektorhoz célszerű orientálni ÁG rotor áramvektor szabályozását.** Ugyan emiatt most a 6.4. fluxusos helyettesítő ábrát célszerű alkalmazni ( $L'_r$  a forgórész körüli tranziens induktivitás).

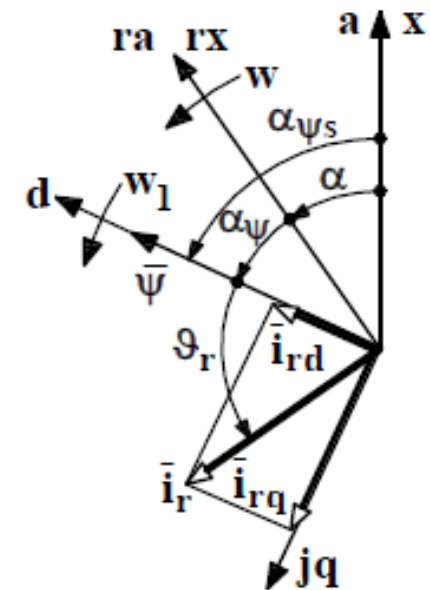
Az állórészre kapcsolt  $\bar{u} = \bar{u}_h$  és  $f_1=f_h=50\text{Hz}$  kényszer az  $\bar{u} = R\bar{i} + \frac{d\bar{\psi}}{dt}$  feszültségegyenleteknek (ez a  $w_k=0$ -val vett (3.6.a) egyenlet) megfelelően,  $R=0$  közelítéssel egyben fluxus kényszert is jelent:

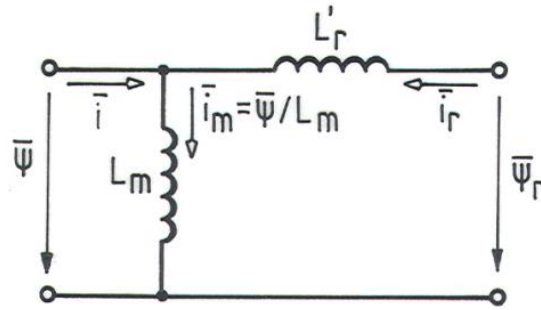
$$\bar{u} = \bar{u}_h = \bar{U}_1 e^{jW_1 t} . \quad (6.7)$$

$$\bar{\psi} = \psi e^{j\alpha_{\psi s}} \cong \int_0^t \bar{u} dt + \bar{\psi}_0 = \frac{\bar{U}_1}{jW_1} e^{jW_1 t} = \frac{\bar{u}}{jW_1} . \quad (6.8)$$

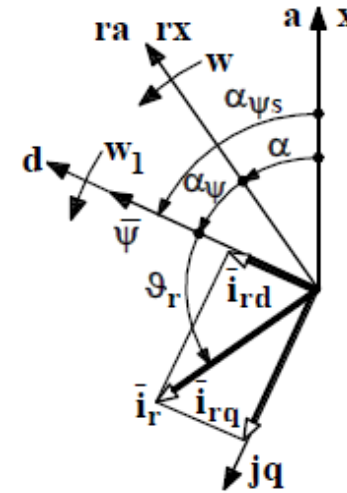
**A  $\bar{\psi}$  fluxus kényszer miatt** a mező koordinátarendszert a  $\bar{\psi}$  állórész fluxusvektorhoz rögzítjük (6.5. ábra). Ebben a mező koordinátarendszerben:

$$\begin{aligned} \bar{\psi} &= \psi \cong \frac{U_1}{W_1}, & \bar{i} &= i_d + j i_q = i e^{j\theta}, \\ \bar{i}_r &= i_{rd} + j i_{rq} = i_r e^{j\theta_r}. \end{aligned} \quad (6.9.a,b,c)$$





6.4. ábra: Fluxusos helyettesítő kép.



6.5. ábra: A  $\bar{\psi}$  állórész fluxusvektor és az  $\bar{i}_r$  rotoráramvektor mező koordinátarendszerben.

A 6.4. ábra alapján felírható  $\bar{i}_m = \frac{\bar{\psi}}{L_m} = \bar{i} + \bar{i}_r$  csomóponti egyenlet két komponense:

$$i_m = \frac{\psi}{L_m} = i_d + i_{rd} \cong \text{const.}, \quad i_q = -i_{rq}. \quad (6.10.a,b)$$

A 6.1.b. ábrában **közvetlenül az  $i_{rd}$  és  $i_{rq}$  rotoráram komponensek szabályozhatók, de ez közvetetten az állórész áram  $i_d$  és  $i_q$  komponenseinek a szabályozását is jelenti.** A (6.10.a) egyenletnek megfelelően a  $\psi = L_m(i_d + i_{rd})$  **fluxusképzési feladat megosztható az állórész és a forgórész  $i_d$  és  $i_{rd}$  fluxusképző áramkomponensei között.** A Park-vektoros

nyomatékképlet,  $\bar{i} = \frac{\bar{\psi}}{L_m} - \bar{i}_r$ -t figyelembe véve ( $p=1$ ):

$$\bar{m} = \frac{3}{2} \bar{\psi} \times \bar{i} = -\frac{3}{2} \bar{\psi} \times \bar{i}_r. \quad (6.12)$$

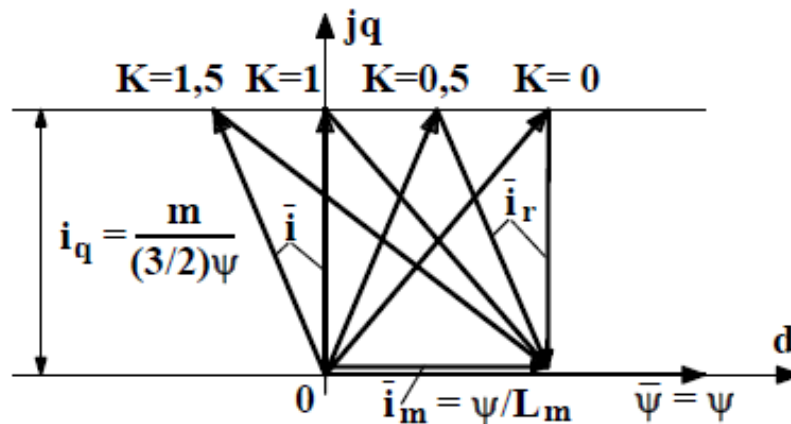
$$m = \frac{3}{2} \psi i_q = -\frac{3}{2} \psi i_{rq} . \quad (6.13)$$

A nyomatékot az  $i_q=-i_{rq}$  nyomatékképző komponensek szabják meg.  $R=0$  közelítésnél (6.8)-nak megfelelően  $\bar{u} \cong jW_1 \bar{\psi}$ . Emiatt közelítőleg az  $i_q$  komponens az állórészoldali p hatásos, a  $-i_d$  komponens az állórészoldali q meddő teljesítménnyel arányos:

$$p \cong \frac{3}{2} U_1 i_q = -\frac{3}{2} U_1 i_{rq} , \quad q \cong \frac{3}{2} U_1 i_d = \left( \frac{3}{2} U_1 \right) \left( \frac{\psi}{L_m} - i_{rd} \right) . \quad (6.14.a,b)$$

**Ebből látható, hogy hatásos teljesítmény kell a nyomatékképzéshez és meddő teljesítmény a fluxusképzéshez.**

(6.13)-ból következik, hogy a nyomaték csak az  $i_q=-i_{rq}$  komponenseket szabja meg. A d áramkomponensek a (6.10.a) szabályt betartva szabadon változtathatók. Ha  $i_{rd}=Ki_m$ , akkor  $i_d=(1-K)i_m$  kell, hogy legyen. A 6.6.ábra  $m=\text{const.}>0$ -nál, különböző K megosztási tényezőkre mutatja az áramvektorokat mező koordinátarendszerben,  $K=0$ -nál az állórész,  $K=1$ -nél a forgórész,  $K=0,5$ -nél fele-fele arányban képezik a  $\psi$  fluxust.  $K>1$ -nél túlgerjesztett,  $K<1$ -nél alulgerjesztett a kétoldalról táplált aszinkrongép. Ha  $R=R_r$ , akkor  $K=0,5$ -nél van minimuma a  $P_t+P_{tr}$  eredő tekercsveszteségnek.



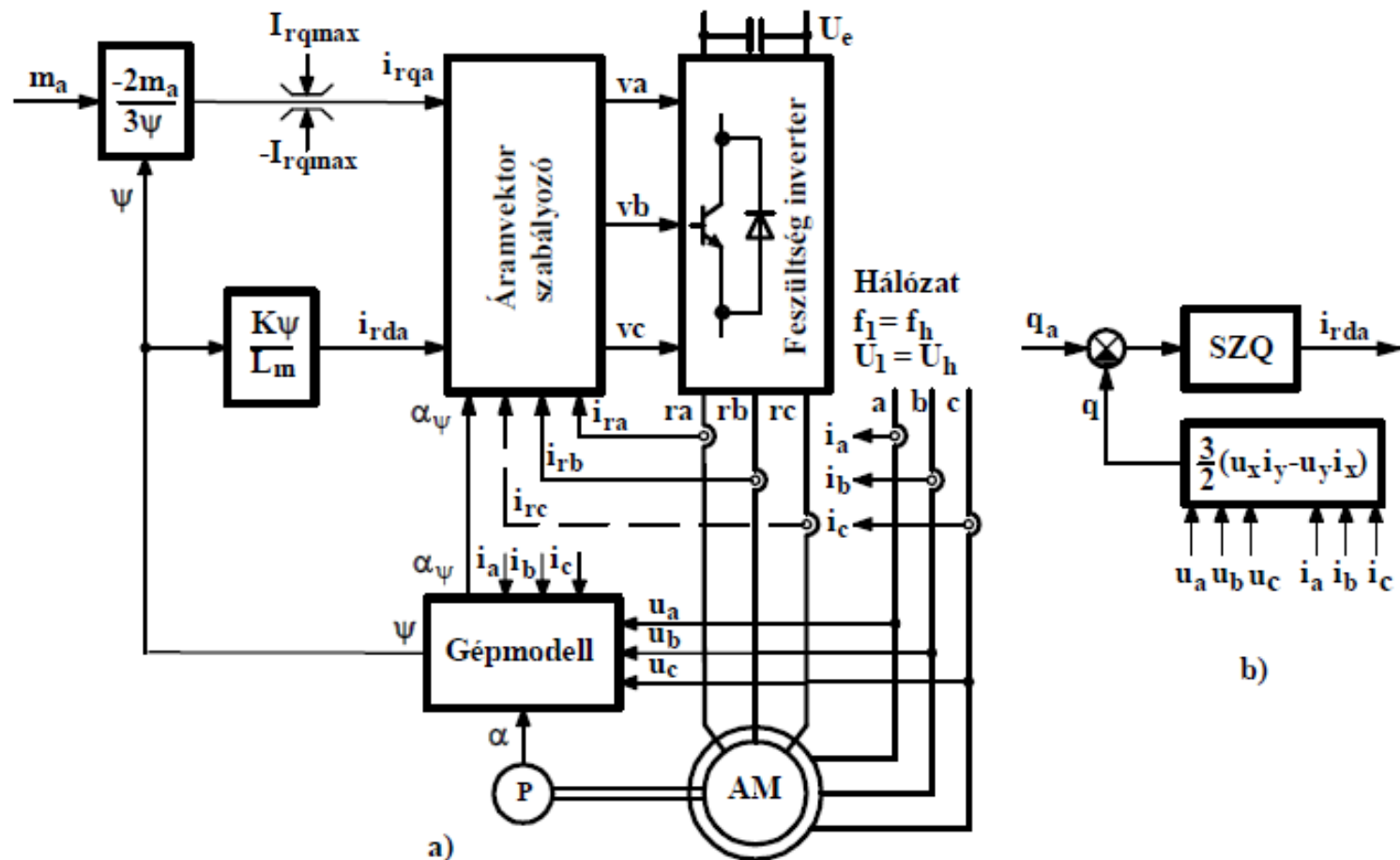
6.6. ábra:  
Áramvektorok mező  
koordinátarendszerben  $m=\text{const.}>0$ -nál.

A nyomatékot mezőorientáltan (állórészfluxus vektorhoz orientáltan) szabályozó hajtás blokkvázlatát a 6.7.a. ábra szemlélteti. Az  $m_a$  nyomaték alapjelből és a  $\psi$  fluxus amplitúdóból képezhetők a rotor áramkomponens alapjelek:

$$i_{rqa} = -\frac{2m_a}{3\psi}, \quad i_{rda} = \frac{K\psi}{L_m}. \quad (6.15.a,b)$$

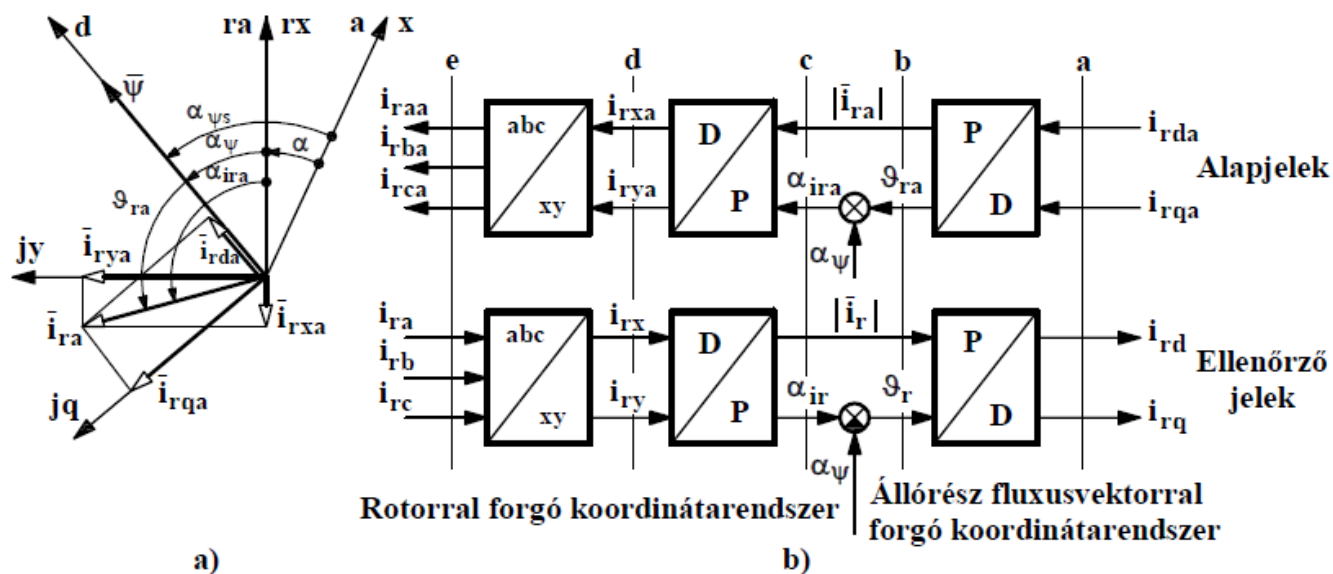
Az  $i_{rda}$  meghatározásához meg kell adni a  $K$  megosztási tényezőt és az  $L_m$  főmező inuktivitást.

A (6.14.b)-nek megfelelően  $i_{rda}$ -t egy meddő teljesítmény szabályozó is képezheti (6.7.b. ábra).



6.7. ábra: Mezőorientált nyomaték szabályozott hajtás.  
a.  $i_{rda}$  alapjelképzővel, b. SZQ meddő teljesítményszabályozóval

A rotoráram alapjelek  $\mathbf{dq}$  komponensekben, az ellenőrző jelek  $\mathbf{rarbrc}$  komponensekben állnak közvetlenül rendelkezésre. A rotor áramvektor szabályozáshoz **azonos típusúvá kell őket alakítani**. A lehetőségeket a 6.8.b. ábrán látható koordináta transzformációs lánc szemlélteti.



6.8. ábra: Rotor áramvektor koordináták. a. Rotor áramalapjel vektorábra. b. Koordináta transzformációs lánc a rotor áramra.

A koordináta transzformációs lánc **a,b,c,d,e** metszeteinek megfelelően kétféle koordinátarendszerben (kr.-ben) ötféle koordinátákkal lehetséges az áramvektor szabályozás:

**a** metszet: **állórészmezővel** forgó kr Descartes koordináták,

**b** metszet: **állórészmezővel** forgó kr. polár koordináták,

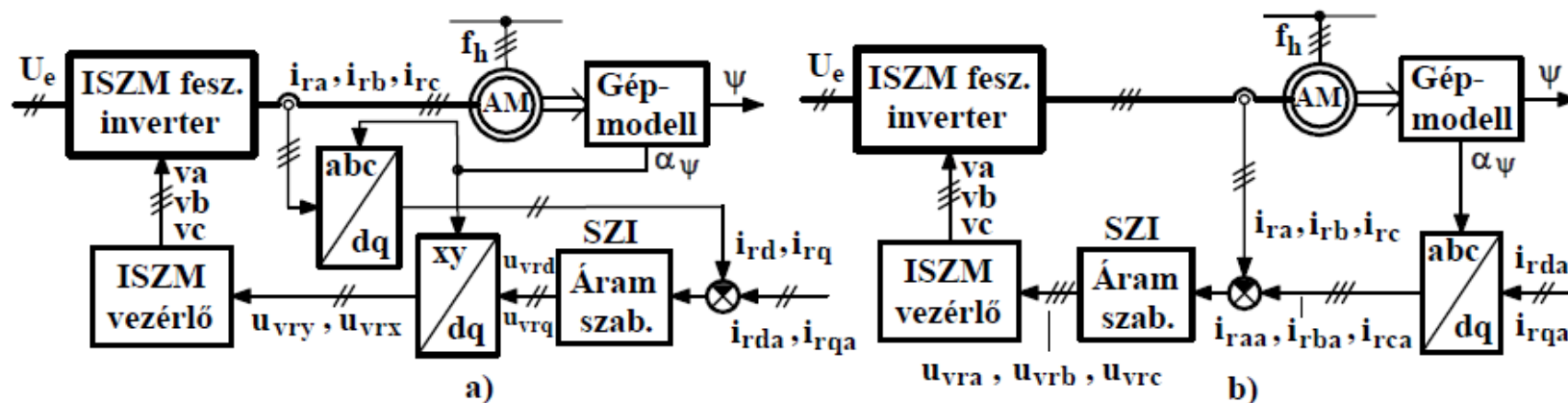
**c** metszet: **rotorral forgó kr.** polár koordináták,

**d** metszet: **rotorral** forgó kr. Descartes koordináták,

**e** metszet: **rotorral** forgó kr. fázismennyiségek.



Megállapítható, hogy **a koordináta transzformáció nem kerülhető el** és a rotor kr.  $\rightarrow$  állórészmező kr., illetve az állórészmező kr.  $\rightarrow$  rotor kr. közötti transzformációhoz **ismerni kell a  $\bar{\psi}$  állórészfluxus vektor rotorhoz képesti  $\alpha_\psi$  szögét**. A gyakorlatban az **a**, vagy az **e** metszetnek megfelelően történik az áramvektor szabályozás (6.9. ábra). Az **a** változatnál az  $i_{rda}$ ,  $i_{rqa}$  alapjelek, az **e** változatnál az  $i_{ra}$ ,  $i_{rb}$ ,  $i_{rc}$  ellenőrző jelek közvetlenül felhasználhatók. Az **a** esetben kettő, az **e**-ben egy koordináta transzformáció kell.



6.9. ábra: Rotoráramvektor szabályozás egyvonalas blokkvázlata. a. Állórészmező kr.-ben Descartes koordinátákkal (**a** változat), b. Rotor kr.-ben fázismennyiségekkel (**e** változat).

A 6.9.a.,b. ábrákat a 4.7.a.,b. és az 5.12.a.,b. ábrákkal összevetve látszik a **nagyfokú hasonlóság** a különböző típusú gépek mezőorientált áramvektor szabályozása között (itt most a többi nem szerepel)

Kétoldalról táplált aszinkron gépnél is alkalmazhatók az **ISZM vezérlős és hiszterézises áramvektor szabályozási módok**. A gyakorlatban itt is a 4.13. és 4.16. ábrákhoz hasonló ISZM vezérlős áramvektor szabályozások terjedtek el.

A 6.7. és 6.9.a.,b. ábrákban szereplő **gépmodellt** az alábbiak szerint kell felépíteni. A gépmodell feladata a  $\bar{\psi}$  állórész fluxusvektor  $\psi$  amplitúdójának és a rotor ra tengelyéhez képesti  $\alpha_\psi$  szögének az előállítását. A  $w_k=0$ -val vett állórész feszültségegyenlet:

$$\bar{u} = R\bar{i} + \frac{d\bar{\psi}}{dt} + jw_k\bar{\psi}$$

felhasználásával kiszámíthatók a  $\bar{\psi} = \psi e^{j\alpha_{\psi s}} = \psi_x + j\psi_y$  állórész fluxusvektor x-y komponensei, amplitúdója és szöge:

$$\psi_x = \int (u_x - Ri_x) dt, \quad \psi_y = \int (u_y - Ri_y) dt. \quad (6.16.a,b)$$

$$\psi = \sqrt{\psi_x^2 + \psi_y^2}, \quad \alpha_{\psi s} = \arctg \frac{\psi_y}{\psi_x}. \quad (6.17.a,b)$$

Forgórészrel együttforgó kr-ben a  $\bar{\psi}$  vektor szöge a 6.5.ábra alapján:

$$\alpha_\psi = \alpha_{\psi s} - \alpha. \quad (6.18)$$

Látható, hogy ehhez a számításhoz **szükség van a forgórész  $\alpha$  szögelfordulására**. Az 5.13.ábra jelöléseivel a fenti egyenletekkel dolgozó gépmodell esetében a mért értékek:  $u_a, u_b, u_c, i_a, i_b, i_c$  és  $\alpha$ , a gépparaméter:  $R$ , a számított mennyiségek:  $\psi$  és  $\alpha_\psi$ .

Az állórész modell képletei megegyeznek a (6.16.a,b) képletekkel. Az  $R$  ellenállás pontatlansága kis  $f_1$  frekvenciákon jelentős hibát okozhat. **Most ez nem áll fenn, mivel  $f_1=f_n=50\text{Hz}$ .**

## 2.4.2. A mezőorientált áramvektor szabályozások megvalósítása

A gyakorlatban alkalmazott változatokat mutatják a 2.4.5-6. ábrák. A szögsebesség szabályozásnak mind a két esetben nyomaték szabályozás van alárendelve, mivel az CW **szögsebesség szabályozó adja az  $m_{ref}$  nyomaték alapjelet**. Az  $m_{ref}$  alapjel (2.4.6) alapján meghatározza a forgórész áram nyomatékképző komponensének az alapjelét (relatív egységekben, a konstansok eltűnnek):

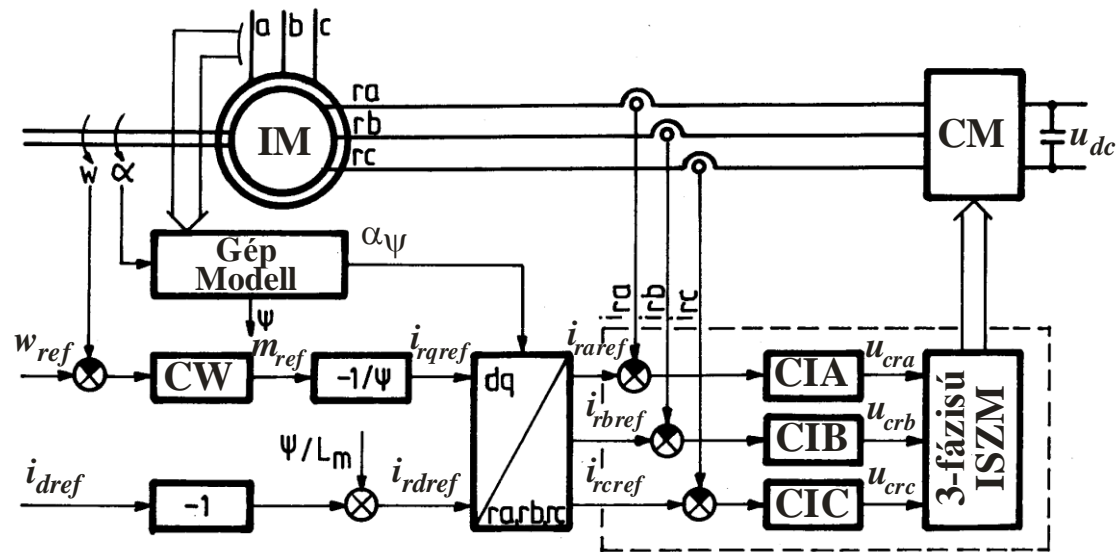
$$\dot{i}_{rqref} = -m_{ref} / \psi. \quad (2.4.15)$$

Az állórész fluxusvektor  $\psi$  (vagy  $\psi_s$ ) amplitúdóját **gépmodell** állítja elő. A szögsebesség alapjel mellett mindhárom esetben előírjuk az állórész áram fluxusképző komponensének az  $i_{dref}$  alapjelét, ami közvetlenül meghatározza az **állórész áram meddő komponensét**, közvetetten az állórész  $q = U_{id}$  meddő teljesítményét. Az  $i_{dref}$  alapjel (2.4.4a) szerint előírja a forgórész áram fluxusképző komponensének az alapjelét:

$$\dot{i}_{rdref} = \psi / L_m - \dot{i}_{dref}. \quad (2.4.16)$$

### 2.4.2.1. Mezőorientált áramvektor szabályozás fázisáramokkal

A 2.4.5. ábrában a (2.4.15, 2.4.16) szerint meghatározott  $i_{rqref}$  és  $i_{rdref}$  alapjelekből meghatározzák az  $i_{raref}$ ,  $i_{rbref}$ ,  $i_{rcref}$  rotor fázisáram alapjeleket és ezeket szabályozzák a CIA, CIB, CIC **fázisonkénti áramszabályozókkal**. A CM feszültség invertert az áramszabályozók  $u_{cra}$ ,  $u_{crb}$ ,  $u_{crc}$  kimenő (vezérlő, control) jeleinek megfelelően vezérli a **háromfázisú ISZM modulátor**. Az áramszabályozók beállításának könnyítése céljából az  $u_{cra}$ ,  $u_{crb}$ ,  $u_{crc}$  jelekben kikompenzáljuk a  $\bar{\psi}$  fluxus által a forgórész fázisokban indukált feszültségeket (ez nem szerepel a 2.4.5. ábrában). E szabályozás előnye a gyakorlatilag állandó kapcsolási frekvencia és az **egyetlen koordináta transzformáció**. A szaggatottan körülhatárolt rész három fázisonkénti robusztus áram kétpont szabályozóval is megoldható. Ekkor csak a  $\Delta I$  fázisáram toleranciasáv állítható, a kapcsolási frekvencia változó.



2.4.5. ábra. Mezőorientált áramvektor szabályozás fázisáramokkal.

### 2.4.2.3. Mezőorientált szabályozás d-q rotor áram komponensekkel

A 2.4.6. ábrában a mért  $i_{ra}$ ,  $i_{rb}$ ,  $i_{rc}$  rotor fázisáramokból koordináta transzformációval előállítják az  $i_{rd}$  és  $i_{rq}$  ellenőrző jeleket és **a rotor áram d-q komponenseit szabályozzák az CID és CIQ áramszabályozókkal**. Az áramszabályozók forgórész koordinátarendszerbe áttranszformált  $u_{crx}$ ,  $u_{cry}$  kimenő jelei működtetik a **térvektoros ISZM vezérlőt**. A forgórész feszültségegyenlet:

$$\bar{u}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega) \bar{\psi}_r$$

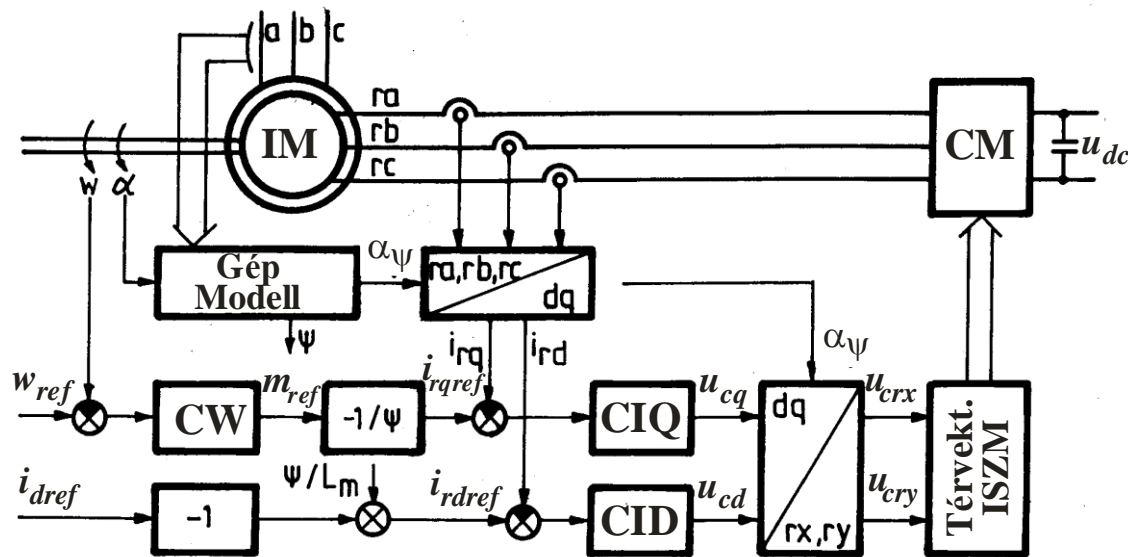
mező koordinátarendszerben:  $\omega_k = \omega_1$ ;  $\omega_\psi = \omega_k - \omega = \omega_1 - \omega = d\alpha_\psi/dt$ ; valamint:  $\bar{\psi}_r = \bar{\psi} + L'_r \bar{i}_r$

A komponens egyenletek:

$$u_{rd} = R_r i_{rd} + L'_r di_{rd}/dt + d\psi/dt - \omega_\psi L'_r i_{rq}, \quad (2.4.17a)$$

$$u_{rq} = R_r i_{rq} + L'_r di_{rq}/dt + \omega_\psi L'_r i_{rd} + \omega_\psi \psi \quad (2.4.17b)$$

látható, hogy **a szétcsatolás a d és q irányok között nem teljes mértékű**. A keresztbecsatolásokat és a  $\omega_\psi \psi$  aktív feszültséget célszerű kikompenzálni az  $u_{cd}$  és  $u_{cq}$  vezérlő jeleknél. A kompenzálások eredményeként az CID és CIQ áramszabályozók úgy állíthatók be **mintha passzív  $L'_r - R_r$  körök áramát kellene szabályozni** (a kompenzálások nem szerepelnek a 2.4.6. ábrában). E szabályozás előnye az állandó kapcsolási frekvencia, hátránya a kétszeres koordináta transzformáció.



2.4.6. ábra. Mezőorientált szabályozás d-q rotor áram komponensekkel és térvektoros ISZM-mel.

### 2.4.3. Az állórész fluxus lüktetése

Kétoldalról táplált aszinkrongép esetén az állórész fluxus amplitúdójának nem csillapodó, sőt erősödő lengése mutatkozik.

#### 2.4.3.1. A jelenség fizikai oka

##### **A kétoldalról táplálás kétoldali kényszert jelent:**

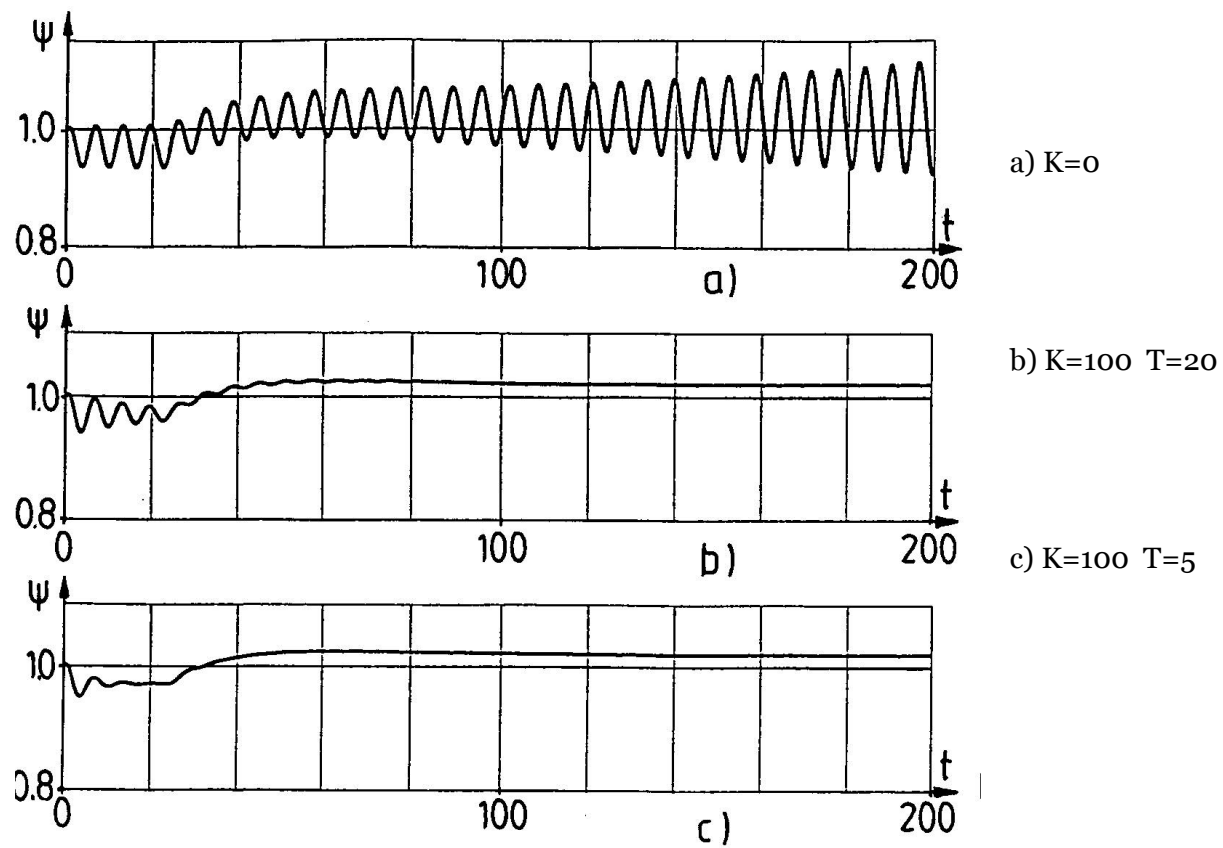
- Az állórészen az állandó hálózati feszültség jelent egy kényszert (ami közelítőleg fluxus kényszer is).
- A forgórészen a gyors áram szabályozások áramkényszert jelentenek (az állórész fluxust befolyásoló fluxus képző áramra is).

Fizikailag ez a kétoldali kényszer magyarázza az állórész fluxus amplitúdó nem csillapodó lüktetését.

Kalickás forgórészű aszinkrongépnél nincs kettős kényszer, ezért nem lüktet a szabályozott rotor fluxus amplitúdója. Ráadásul ott a rövidrezárt forgórész csillapító hatása is érvényesül. **Ez a csillapító hatás veszik el a forgórész áramgenerátoros táplálásával**, ami fizikailag szakadt forgórésszel egyenértékű.

#### 2.4.3.2. A jelenség hatásának csökkentésére javasolt módszerek

A 2.4.7. ábra a  $\bar{\psi}$  állórész fluxusvektor  $\psi$  amplitúdóját mutatja három esetre. A vizsgált folyamat motoros-generátoros átmenet (ld. a következő 2.4.4 fejezet). Mindegyik esetben  $i_{dref}=0$  lett beállítva, ennek következtében  $i_{rdref}=\psi/L_m$ , ekkor a teljes  $i_m=i_d+i_{rd}=\psi/L_m$  mágnesező áramot a forgórész fedezi. Az a) ábrát eredményező megoldásban gyors CID és CIQ áramszabályozókat alkalmaztunk. Megállapítható, hogy ilyenkor a  $\psi$  fluxusamplitúdó egyre növekvő amplitúdójú, jó közelítéssel  $f_l=50\text{Hz}$  frekvenciájú lengéseket végez.



2.4.7. ábra. Az állórész fluxus amplitúdójának lüktetése és a javasolt megoldás hatása.



A javasolt (a vizsgált lengéseket kiküszöbölő) módszerek a jelenség fizikai okának megértésén alapulnak: A fluxusra ható áramkényszer bizonyos mértékig csökkenthető **vagy az áram szabályozás lassításával, vagy a fluxusképző áram alapjelen keresztüli kompenzációval**. Ez a következő módszerekkel valósítható meg:

1. Az  $f_l=50\text{Hz}$  frekvenciához viszonyítva **lassú CIQ áramszabályozó** alkalmazása. Mivel ez, a keresztirányú CIQ szabályozó szabja meg a nyomatékot, így e megoldás alkalmazásakor romlanak a hajtás dinamikai tulajdonságai, de ez szélgenerátoroknál nem okoz komoly problémát, mert itt nincs igény jó dinamikájú hajtásra.
2. Megtartható a gyors CIQ áramszabályozó, ha a hosszirányú rotor áram alapjel

$$\dot{i}_{rdref} = \psi / L_m - \dot{i}_{dref} - s\psi K / (1 + sT) \quad (2.4.18)$$

összefüggés szerint az  $s\psi$  fluxus deriválttól is függ. A 2.4.7a ábrában  $K=0$ , a b)-ben  $K=100$ ,  $T=20$ , a c)-ben  $K=100$ ,  $T=5$ . A c) ábrában a  $\psi$  fluxusamplitúdó gyakorlatilag lengésmentes, de ilyenkor a tranziensek alatt az  $i_d$  és  $i_{rd}$  áramkomponensek nagymértékben eltérnek az  $i_{dref}=0$ -hoz tartozó  $i_{rd}=i_m=\psi/L_m$  és  $i_d=0$  ideálistól. Erre tekintettel a javasolt kompromisszumos beállítás a 2.4.7b ábrához tartozó  $K$  és  $T$  (a későbbi szimulációs vizsgálatok is ezt használják).

## 2.4.4. Szimulációs eredmények

A 2.4.6. ábra szerinti **térvektoros ISZM vezérlős áramvektor szabályozással** kapott eredményeket mutatjuk be  $U_{dc} = \text{const.}$  mellett. A főbb adatok **relatív egységekben**:

Hálózat:  $f_l = 50\text{Hz}$  ( $\omega_l = 314/\text{s}$ ),  $U_l = 1$ ; CM inverter:  $U_{dc} = 3$ ;

Csúszógyűrűs aszinkrongép:  $L_m = 2$ ,  $L'_r = 0,2$ ,

$R = R_r = 0,02$ ;

Gépcsoport:  $T_{stn} = 157$  (névleges indítási idő viszonylagos egységben, ami fizikai egységben  $T_{stn}/\omega_l = 0,5\text{s}$ );

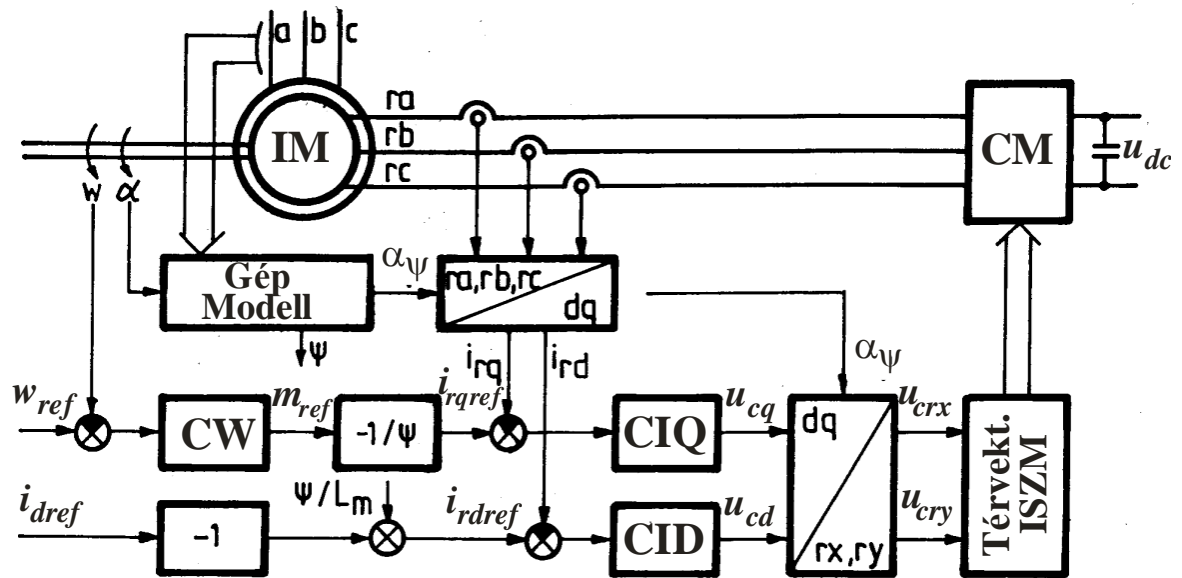
Szabályozó:  $w_{ref} = 1,111$ ,  $i_{dref} = 0$ ,  $i_{rq}$  korlátja:  $\pm 1,4$ .

A 2.4.7-10. ábrák a szélturbina-aszinkrongenerátor gépcsoport  $w_{ref} = 1,111$  szögsebesség alapjelre való felfutását mutatják.

Kezdőértékek:

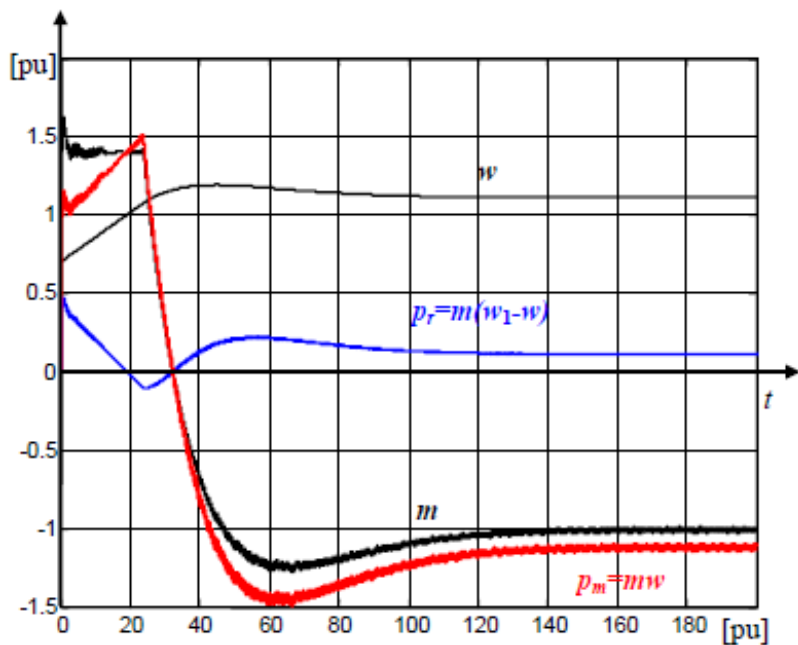
$w = 0,7$  kezdeti szögsebesség,

$\psi = 1$  kezdeti állórész fluxust és  $i_d = \psi/L_m = 0,5$ ,  $i_q = 0$ ,  $i_{rd} = 0$ ,  $i_{rq} = 0$  kezdeti áramkomponensek.

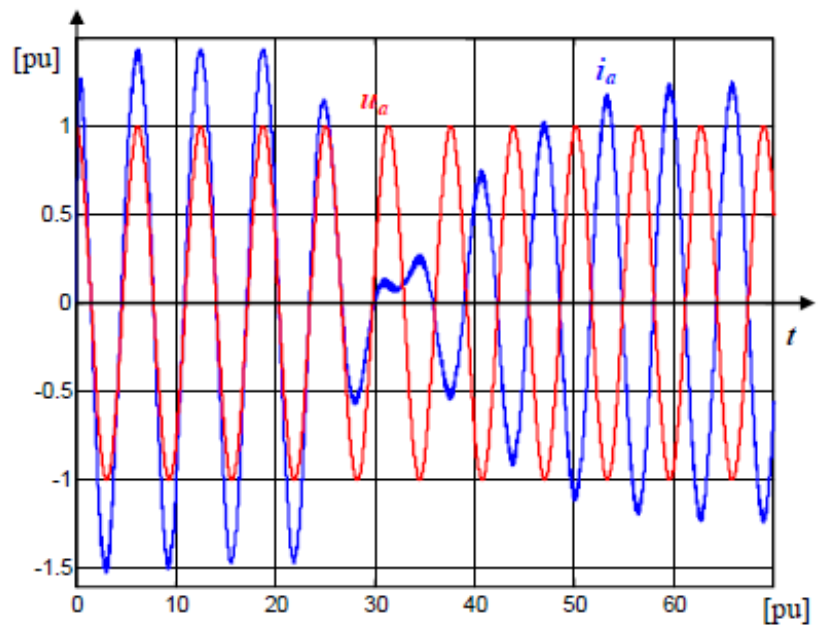


Az aszinkrongép **kezdetben motorként üzemel** ( $m > 0$ ,  $i_q > 0$ ,  $i_{rq} < 0$ ), majd **generátoros üzemre** ( $m < 0$ ,  $i_q < 0$ ,  $i_{rq} > 0$ ) tér át és kis túllendüléssel rááll a névleges ( $W=1,111$ ,  $M=-1$ ) pontra. A térvektoros szabályozás  $\tau=0,06$ pu mintavételi idővel (5,23kHz mintavételi frekvenciával) működik.

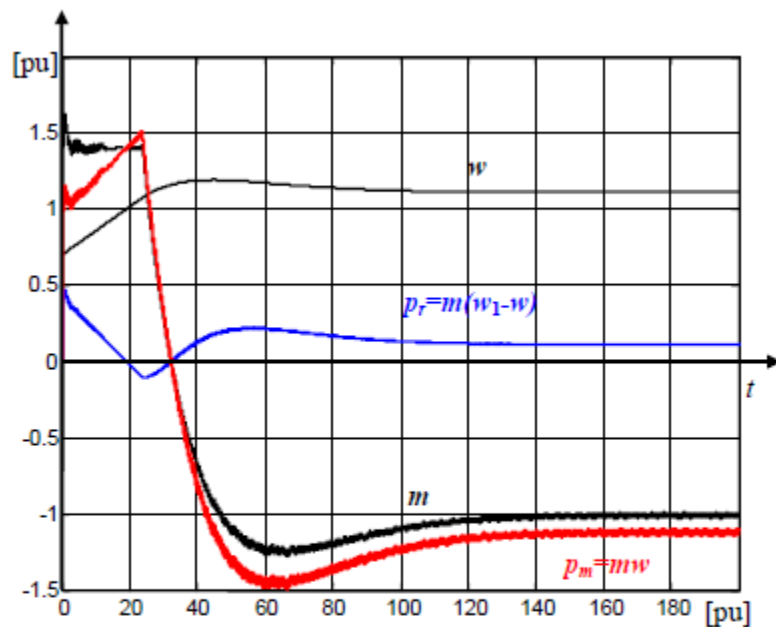
A már tárgyalt fluxus amplitúdót mutató 2.4.7. ábra b) verziója szerinti kompenzáló paramétereket használtam a folyamat vizsgálatakor, 2.4.7. ábra is erre a folyamatra lett felrajzolva. A  $\psi$  fluxus amplitúdót **motoros üzemben csökkenti, generátorosban növeli az ohmos feszültségesés** (2.4.7. ábra).



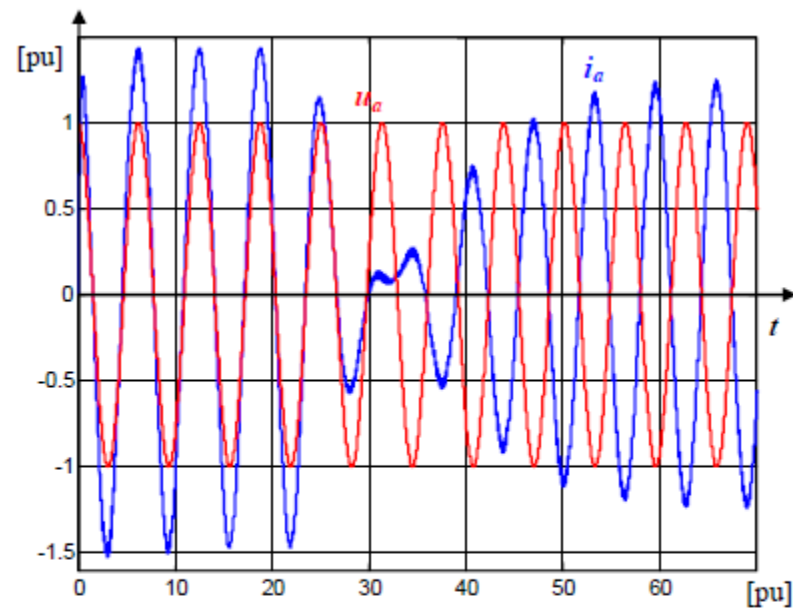
2.4.8. ábra. Nyomaték, szögsebesség, teljesítmények.



2.4.9. ábra. Az állórész fázisfeszültsége és árama.



2.4.8. ábra. Nyomaték, szögsebesség, teljesítmények.



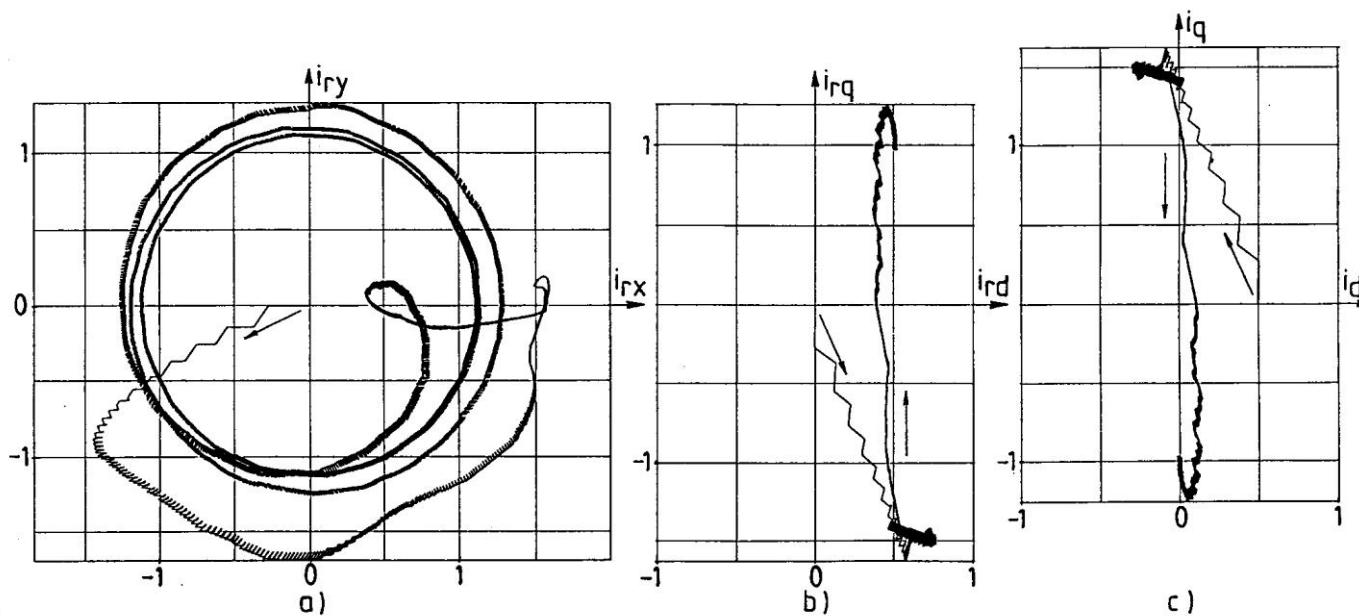
2.4.9. ábra. Az állórész fázisfeszültsége és árama.

A 2.4.8. ábrában megfigyelhető:

- a szinkron szögsebességen való átmenet ( $w=1$ -nél),
- a motoros-generátoros üzemmód váltás ( $m=0$ -nál),
- a  $p_m=mw$  mechanikai és a  $p_r=m(w_1-w)$  **rotorköri teljesítmény áramlási iránya**,
- $p_r$  kis értéke.
- Az  $i_a$  állórész fázisáram motoros üzemben fázisban, generátorosban ellenfázisban van az  $u_a=u_{la}$  fázisfeszültséggel (2.4.9. ábra).

A 2.4.10a ábrán látható:

- az  $\bar{i}_r$  rotor áramvektor **forgásirányának a megváltozása** a szinkron szögsebességen való átmenet miatt.
- A 2.4.10b-c ábrákon nyomon követhető az  $i_d$  és  $i_{rd}$  komponensekben **a fluxusképzésben bekövetkező szerepcseré az állórész és a forgórész között**, az  $i_q = -i_{rq}$  komponensekben pedig **a nyomaték előjelváltása**.
- A d irányban tapasztalható lüktetés **a fluxus-lüktetés kompenzálásának hatása**. Ennek elfogadható értéken tartása indokolta a 2.4.7b ábra szerinti kompenzációs paraméterek választását.



2.4.10. ábra. Forgórész (a,b) és állórész (c) áramvektorok.

### 1.4.1. A kefenélküli gerjesztés elve, megvalósítási lehetőségei

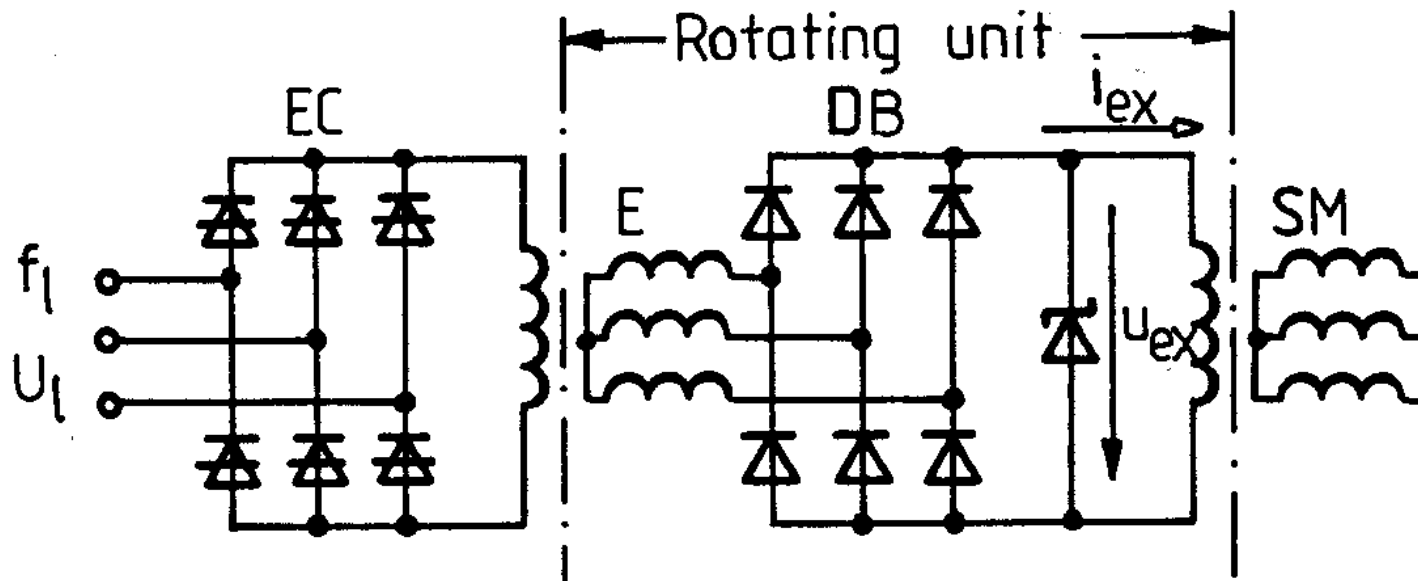
Az utóbbi időben a tekercselt forgórészű szinkrongépek nagy részét **kefenélküli gerjesztéssel** készítik.

A gyakorlatban az 1.4.1. és 1.4.2. ábrán látható kétféle megoldás terjedt el. Az 1.4.1. ábrán **kifordított szinkrongenerátor**, az 1.4.2. ábrán **forgótranszformátor** (tekercselt forgórészű aszinkrongép) az E gerjesztő-gép.

Az SM szinkrongépet mindkét esetben az E gerjesztő-gép **háromfázisú forgórészéhez** csatlakozó DB diódás egyenirányító gerjeszti (forgódiódás). Mivel a DB diódás híd együtt forog a szinkrongép forgórészével, így a gerjesztő-tekercsel közvetlenül, **csúszógyűrűk nélkül összeköthető**.

**Ez az un. kefenélküli, forgódiódás gerjesztés.** A diódás hídból adódóan mindkét kapcsolásra jellemző, hogy **forszírozni csak a gerjesztő-áram növekedését lehet ( $U_{ex}$  növelésével), csökkenését nem (a diódás híd miatt).**

Hálózati szinkrongéphez mindkét megoldás, fordulatszám szabályozott szinkrongéphez (pl. áramirányítós szinkronmotorhoz) az 1.4.2. ábra szerinti változat alkalmazható, **mivel álló állapotban csak ez képes gerjesztésre**. A következőkben a forgótranszformátoros változattal foglalkozunk.

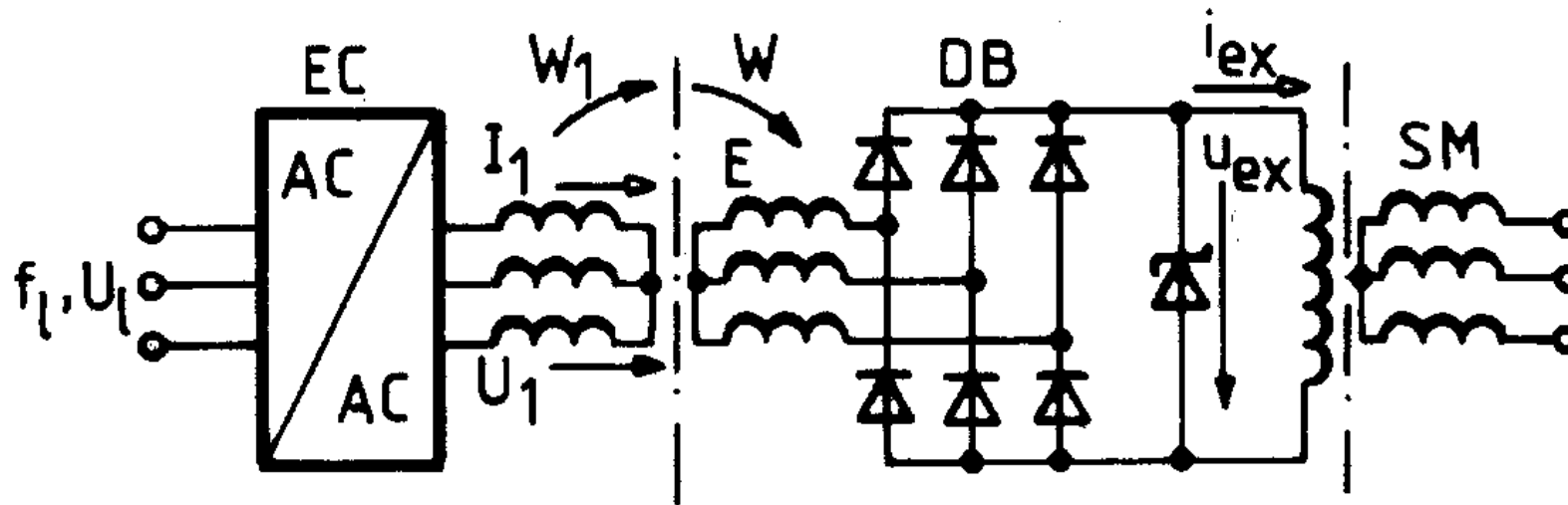


1.4.1. ábra. Forgódiódás szinkrongenerátor.

**E gerjesztő gép:**

**kifordított szinkrongenerátor:**

- gerjesztés az állórészen,
- 3 fázisú tekercselés a forgórészen.



1.4.2. ábra.  
Forgódíódás  
forgótranszformátor.

E gerjesztő gép: **forgótranszformátor** (tekercselt forgórészű aszinkrongép)

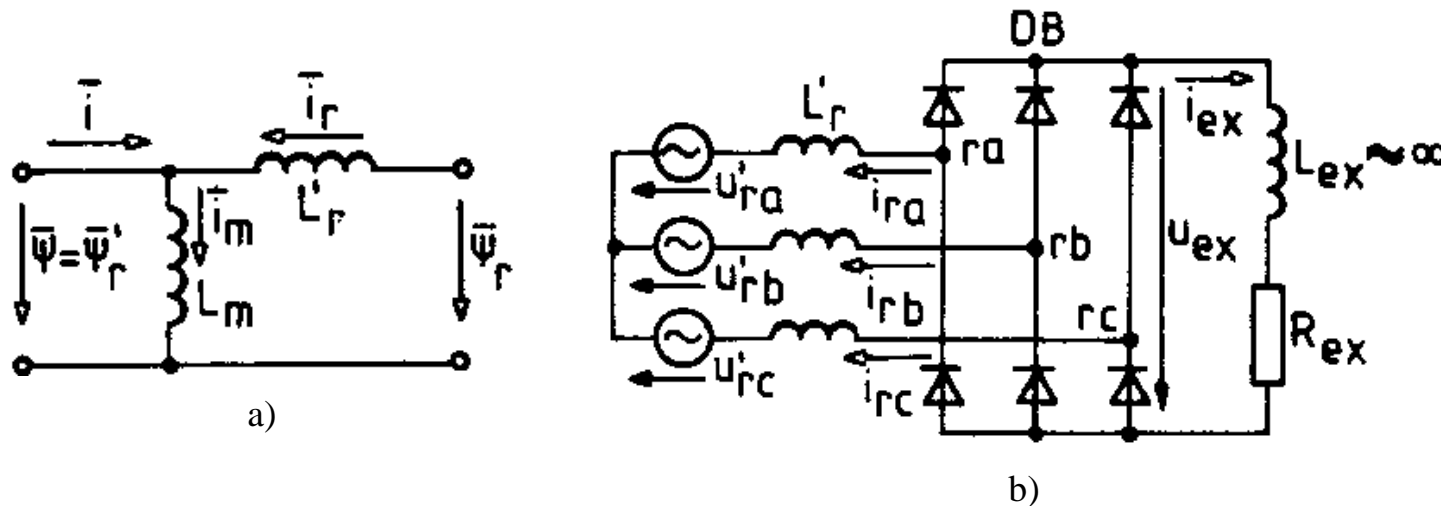
Az 1.4.2. ábrában a gerjesztő-gépet az EC jelű **háromfázisú szaggató** táplálja. A háromfázisú szaggató felépíthető tirisztor párokból (ld. Villamos gépek és alkalmazások), vagy IGBT tranzisztorokból. A gerjesztő-áramot a szaggató kimeneti feszültségének  **$U_1$  alapharmonikusa szabja meg**, ami tirisztoros szaggatónál  $f_l = 50\text{Hz}$  frekvenciájú gyújtásvezérléssel, tranzisztorosnál nagyfrekvenciás ISZM vezérléssel változtatható.



## A diódás híd összefüggései

- Az  $U_1$  feszültség egyben a gerjesztő-gép  $f_1=f_\ell$  frekvenciájú, illetve  $\omega_1=2\pi f_1$  körfrekvenciájú tápfeszültség alapharmonikusának amplitúdója. (A továbbiakban is, ha külön nem jelölöm, a mennyiségek alapharmonikusát amplitúdójukkal adom meg. A használt effektív értékek vektoros effektív értékek.)
- $W_1=\omega_1/p$  a mező szög-sebessége a  $p$  póluspárú gerjesztő-gépben,
- $W$  a szinkrongép és **a gerjesztő-gép forgórészének a közös szögsebessége**,  $S = (W_1 - W)/W_1$  a gerjesztő-gép szlipje.
- Az E gerjesztő-gép **állórész ellenállását elhanyagolva** a kapocsfeszültség megegyezik az indukált feszültséggel:  $U_1=U_{i1}=\omega_1\Psi_1$ . Ha az alapharmonikus állórész feszültség  $U_1$ =állandó, akkor az E gerjesztő-gépben  $\Psi_1=U_1/\omega_1$ =állandó az állórész tekercs-fluxus, illetve állandó a  $\Psi_r' = \acute{a}\Psi_1$  rotorköri tranziens tekercs-fluxus alapharmonikusa (á a forgótranszformátor áttétele álló állapotban). **Ez a fluxus a gerjesztő-gép háromfázisú forgórészében álló állapotban**  $U_{r0} = \omega_1\Psi_r' = \acute{a}U_{i1}$  **amplitúdójú és  $f_1$  frekvenciájú, forgó állapotban**  $U_r' = \omega_r\Psi_r' = S\acute{a}U_{i1} = SU_{r0}$  **amplitúdójú és  $\omega_r=S\omega_1$  körfrekvenciájú alapharmonikus feszültséget indukál.** A következőkben  $\acute{a}=1$ -gyel számolunk, ekkor a gerjesztő-gép rotorra redukált fluxusos, Park-vektoros helyettesítő vázlatát az 1.4.3a ábra mutatja. (itt is a forgórészre csatlakozunk az áramirányítókkal, ezért kell ez)

- A gerjesztő-gépben a **mezőt** az SM szinkrongép és **az E gerjesztő-gép közös W szögsebességével szemben célszerű forgatni, hogy  $S \geq 1$  legyen.** Ahhoz, hogy ez mindkét forgásiránynál teljesüljön, a forgásiránytól függően E állórészének a táplálásánál fázissorrendet kell váltani. Mivel egyszerre kell fázissorrendet váltani a szinkrongépben és a gerjesztő-gépben, így ezt egy **közös fázissorrend logika** vezérelheti. A gerjesztő-gép forgórészének **feszültség igénybevételére** tekintettel célszerű a maximális szlipet  $S_{\max} \approx 2$ -re korlátozni. Ha a szinkrongép  $f_\ell = 50\text{Hz}$ -nél nagyobb frekvenciával is üzemel, akkor szokás a gerjesztő-gépet a szinkrongépnél kisebb pólusszámúra választani (szinkron fordulatszáma nagyobb).



1.4.3. ábra. Forgótranszformátoros gerjesztő helyettesítő vázlatai:  
a) gerjesztőgép fluxusos helyettesítő vázlata, b) gerjesztő egység helyettesítő vázlata.

Nagyfrekvenciás IGBT-s szaggatót feltételezve **gyakorlatilag szinuszos a táplálás** és a forgórészben is szinuszos  $u'_{ra}, u'_{rb}, u'_{rc}$  fázisfeszültségek indukálódnak. Így állandósult üzemben a forgórészben indukálódó feszültségek Park-vektora körforgó:

$$\bar{u}'_r = U'_r e^{j\omega_r t} = S U_{ro} e^{jS\omega_1 t} \approx S \hat{a} U_1 e^{jS\omega_1 t}. \quad (1.4.1)$$

A gerjesztő-kör  **$L_{ex}$  induktivitását végtelen nagyra véve** sima a gerjesztő-áram:  $i_{ex}(t) = I_{ex}$ .

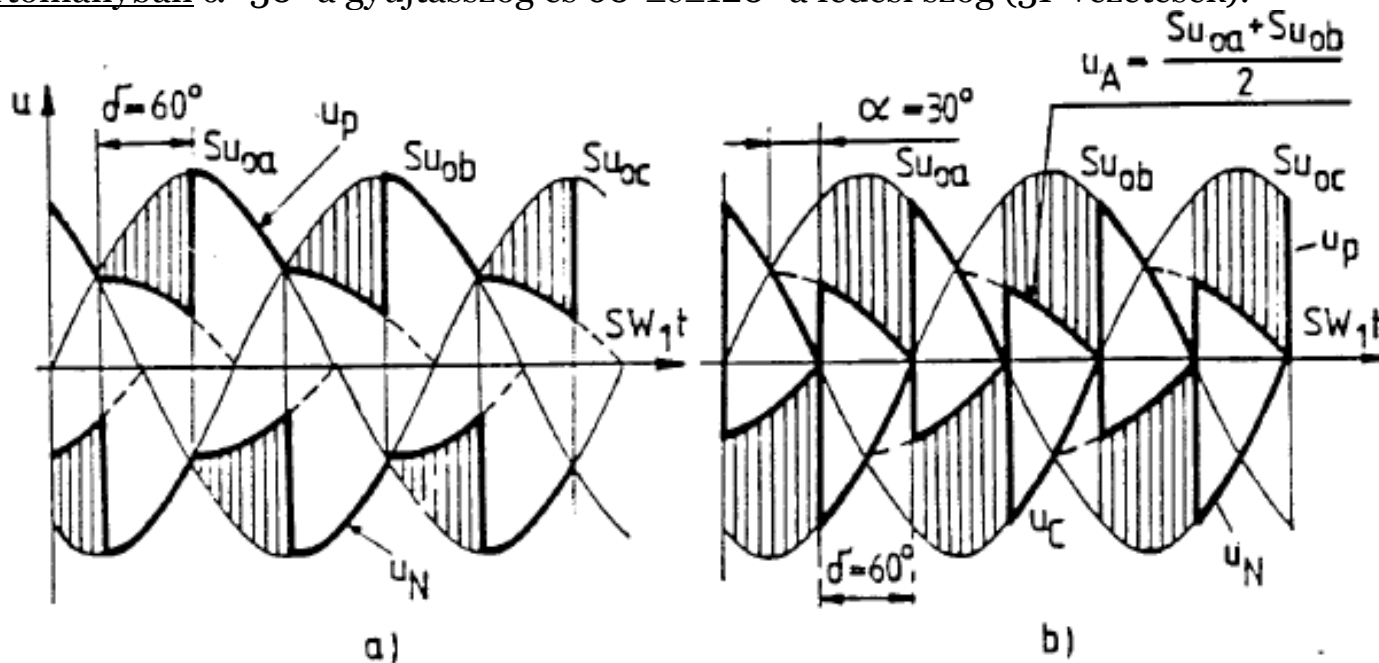
Az  $S \geq 1$  szlip miatt 50Hz-nél nagyobb az  $f_r = S f_1$  rotorköri frekvencia, és ezáltal a DB diódás híd kommutációja szempontjából E **rotor ellenállása elhanyagolható** az  $L'_r$  rotorköri tranziens induktivitás mellett. E közelítésekkel a forgótranszformátoros kefenélküli gerjesztőre a 1.4.3b helyettesítő ábrát kapjuk és erre állandósult állapotban alkalmazható a **klasszikus áramirányító elmélet** (ld. Villamos gépek és alkalmazások, „aramiranyitos.pdf”).

### A DB-vel táplált gerjesztő-kör alapösszefüggései:

Nagy a fedést meghatározó induktivitás ( $L_r'$ ), kicsi lehet a feszültség (S-től függ), nagy az áram, változik a frekvencia (csökkenhet, időben tovább tart a fedés): nagy lehet a fedés:

A DB hídkapcsolású diódás egyenirányítónak **három (I, II és III) üzemállapota, munkatartománya van.**

- Az I tartományban  $\alpha=0^\circ$  a gyújtásszög és  $0^\circ \leq \delta \leq 60^\circ$  a fedési szög,
- a II tartományban  $\delta=60^\circ$  fedési szög mellett  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$  szögű **látszólagos gyújtáskésleltetés alakul ki,**
- a III tartományban  $\alpha=30^\circ$  a gyújtásszög és  $60^\circ \leq \delta \leq 120^\circ$  a fedési szög (3F vezetések).



5.33. ábra Az egyenirányított csúszógyűrű feszültség  
a)  $\delta=60^\circ$ ;  $\alpha=0^\circ$                       b)  $\delta=60^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$

**Normális üzemben DB az I-es és esetleg a II-es tartományban dolgozik.** Az alábbiakban megadott összefüggések erre a két tartományra érvényesek. A gerjesztő-feszültség  $U_{ex}$  és a gerjesztő-áram  $I_{ex}$  középvértéke és az  $R_{ex}=U_{ex}/I_{ex}$  gerjesztő-köri ellenállás (ez a fedésből adódik):

$$U_{ex} = S U_{exo} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \delta)}{2}; \quad I_{ex} = \sqrt{3} I_z \frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + \delta)}{2}; \quad (1.4.2a,b)$$

$$U_{exo} = \frac{3}{\pi} \sqrt{3} U_{ro}; \quad I_z = \frac{U'_r}{\omega_r L'_r} = \frac{U_{ro}}{\omega_1 L'_r}; \quad (1.4.2c,d)$$

$$R_{ex} = S R_{exo} \operatorname{ctg} \frac{\delta}{2} \operatorname{ctg}(\alpha + \frac{\delta}{2}); \quad R_{exo} = \frac{3}{\pi} \omega_1 L'_r. \quad (1.4.2e,f)$$

- $U_{exo}$  az **állóállapotú üresjárású gerjesztő-feszültség**,
- $I_z$  a rotor ellenállást elhanyagoló **zárlati forgórész áram**,
- $\omega_1 L'_r$  a rotorköri tranziens reaktancia,
- $R_{exo}$  az álló gerjesztő-gép **fedésből adódó belső ellenállása**.

Adott  $\alpha$  gyújtásszögnél a gerjesztő-feszültség az  **$U_{ex}=S U_{exo} \cos \alpha - S R_{exo} I_{ex}$**  összefüggéssel is számítható.

Az  $I_{ex}$  gerjesztő-áram (1.4.2b,d) szerint folyamatosan az  **$U_1 \approx U_{ro}$  tápfeszültséggel, az EC jelű háromfázisú szaggatóval változtatható**. Adott tápfeszültségnél ( $U_{ro}=U_{i1} \approx U_1 = \text{const.}$ -nál) az  $I_{ex}$  gerjesztő-áram csak az  $\alpha$  és  $\delta$  szögektől függ. Ugyanekkor **az  $U_{ex}$  gerjesztő-feszültség és az  $R_{ex}$  ellenállás ezenkívül még az S szlippel is arányos**.

~~A későbbi vizsgálatokhoz és általánosításhoz a III munkatartomány összefüggéseit is felírom. Ebben a tartományban  $\alpha=30^\circ$ , a fedés két részből áll: egy  $0^\circ \leq \delta_s \leq 60^\circ$  szögű rövidzárási tartományból (mind az egyenkör, mind a három fázis rövidre van zárva), és egy  $60^\circ \geq \delta^* \geq 0^\circ$  szögű kétfázisú vezetéssel. A fedések átlapolódnak  $\delta_s$  szöggel,  $\delta_s + \delta^* = 60^\circ$ . A feszültség és áram összefüggései:~~

~~$$U_{\text{ex}} = \sqrt{3} U_{\text{exo}} \frac{1 - \cos \delta^*}{2}; \quad I_{\text{ex}} = I_z \frac{1 + \cos \delta^*}{2}. \quad (1.4.3a,b)$$~~

### 1.4.3. Kefenélküli forgódiódás gerjesztő optimalizálása ISZM szaggatós táplálásnál

A gerjesztő-gép közel szinuszos ISZM szaggatós táplálása miatt elegendő a diódás híd (DB) működését vizsgálni. Az előző fejezetben már felírtam a DB-vel táplált gerjesztő-kör alapösszefüggéseit (1.4.2; 1.4.3) a klasszikus áramirányító elmélet alapján. Ezek jelentik az optimalizálás kiinduló egyenleteit. A klasszikus és ismert áramirányító elmülethez képest az eltérést **a szliptől való függés megjelenése** okozza. Ez sem újdonság, hiszen ezt az okozza, hogy az áramirányító a gerjesztő-gép (aszinkrongép) forgórészére kapcsolódik. Ilyen konfiguráció van az áramirányítós kaszkád hajtásokban is. **Az újdonság az, hogy az egyenkör most egy szinkrongép gerjesztő-köréhez kapcsolódik.**

Ha a szlip hatását vizsgáljuk, megkülönböztethetünk **állandó és változó szlippel** működő kefenélküli gerjesztőt.

- A szlip akkor állandó, ha a gerjesztő-gép (és a vele tengelykapcsolatban lévő szinkrongép) fordulatszáma állandó. Ennek tipikus esete az, ha a szinkrongép hálózatra kapcsolódik.
- Változó szlip fordulatszám szabályozott (frekvenciaváltóról táplált) szinkrongépek esetén áll elő. A továbbiakban elsősorban változó szlipű üzemmelle foglalkozok, amiből kiadódik az állandó szlipű eset is.

Fordulatszám szabályozott szinkrongépek esetén is állandó lehet a szlip akkor, ha a gerjesztő-gépet frekvenciaváltó táplálja. Teljes (feszültség) kivezérlés közeli esetben (ide érdemes méretezni a táplálást) **a szaggatós változat járulékos veszteségei jelentősen kisebbek lehetnek**, ezért foglalkozunk a szaggatós változattal. A frekvenciaváltós változat előnye, hogy a szinkrongép forgásirányváltásakor szükséges fázissorrend váltás ekkor nem igényel külön áramkört, csupán vezérléssel megoldható.

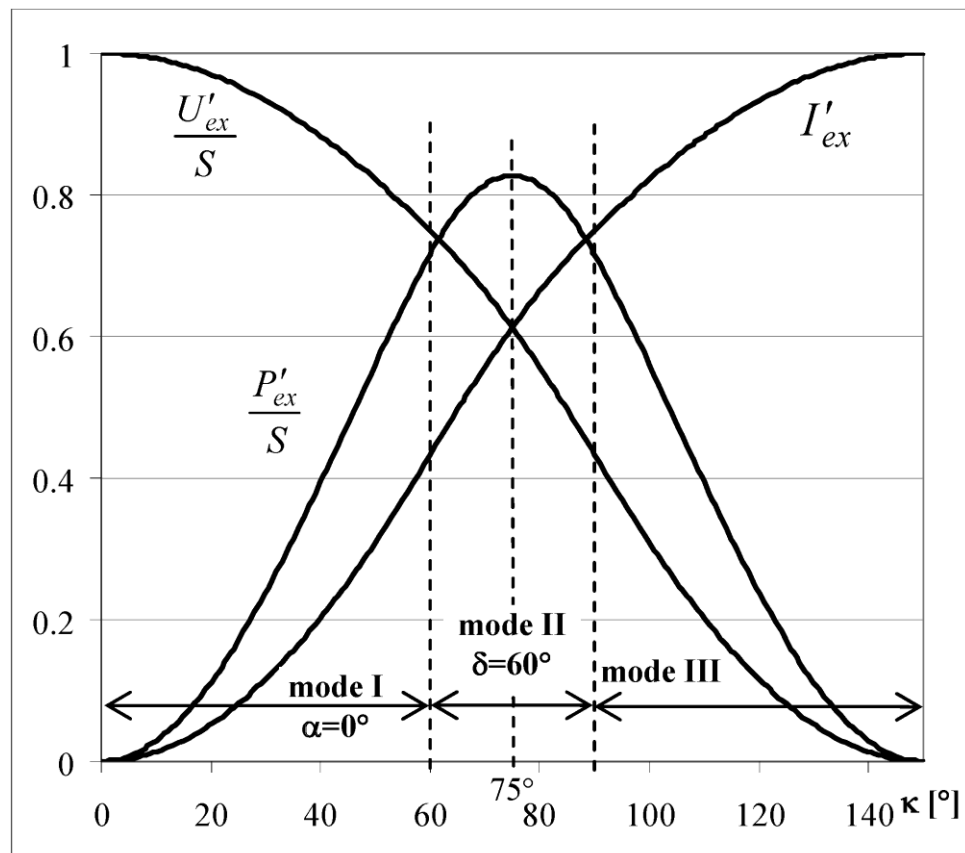
**A szlip változása gyakorlatilag a diódás híd tápláló feszültségének és frekvenciájának változását eredményezi.** A kidolgozott elvek általánosíthatók minden olyan esetre, amikor egy áramgenerátoros egyenkörű diódás híd változó és változtatható nagyságú és változó frekvenciájú feszültséggel van táplálva. Ilyen például a gerjesztett forgórészű diódás generátoroldali áramirányítós közbülső egyenáramú körös frekvenciaváltós szinkron szélgenerátor, illetve a dízel-elektromos mozdony diódás szinkron generátora (ennél viszonylag kicsi a fordulatszám változás).

*A szlip hatása a munkapontra:*

Az alapegyenleteket kiegészítjük az egyenköri (gerjesztő-köri) teljesítmény kifejezésével, mert az optimalizálás tárgya a **teljesítmény kihasználtság** lesz. A  $P_{ex}$  gerjesztő-teljesítmény állandósult állapotban a feszültség és az áram középértékéből számítható:

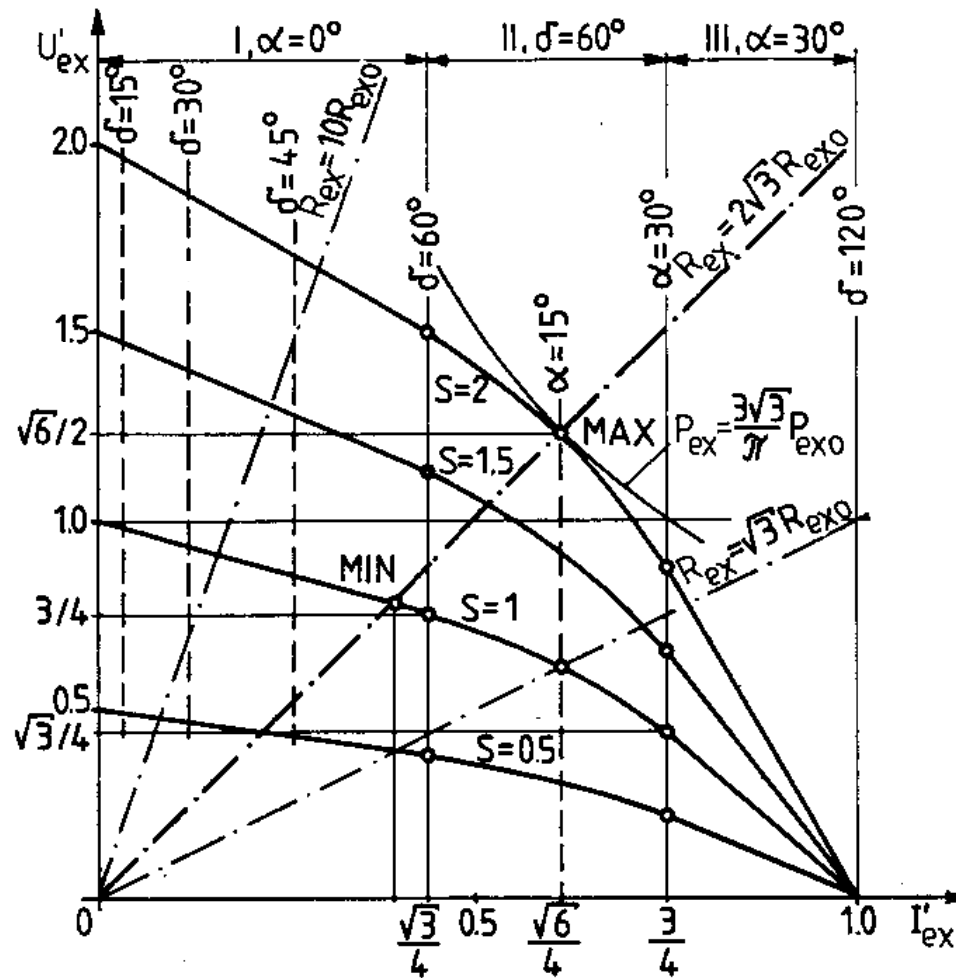
$$P_{ex} = U_{ex} I_{ex} = \frac{3}{\pi} S P_{exo} \sin \delta \sin(2\alpha + \delta); \quad P_{exo} = \frac{3}{4} \frac{U_{ro}^2}{\omega_1 L'_r}. \quad (1.4.19)$$





1.4.12. ábra. A normalizált gerjesztő-feszültség, a gerjesztő-áram és a gerjesztő-teljesítmény a  $\kappa$  **kialvási szög** függvényében.

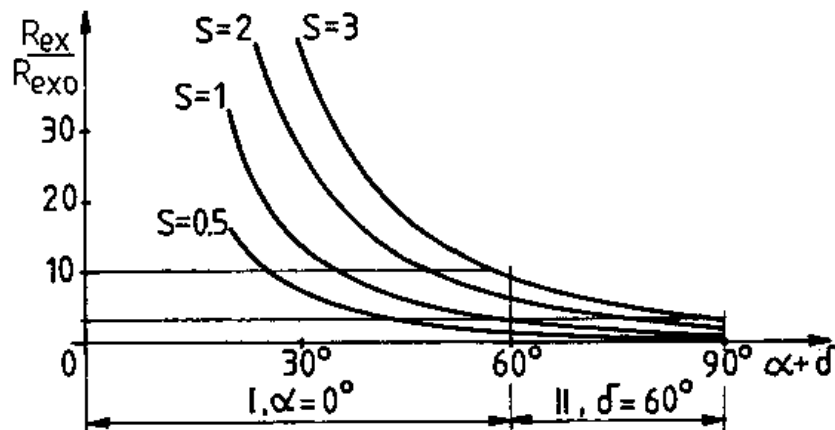
A gerjesztő-egység **normalizált**  $U'_{ex}/S$  gerjesztő-feszültségét,  $I'_{ex}$  gerjesztő-áramát és  $P'_{ex}/S$  gerjesztő-teljesítményét az  $\alpha+\delta$  **kialvási szög** függvényében az 1.4.12. ábra mutatja ( $U'_{ex} = U_{ex}/U_{exo}$ ,  $I'_{ex} = I_{ex}/I_z$ ,  $P'_{ex} = P_{ex}/P_{exo}$ ).



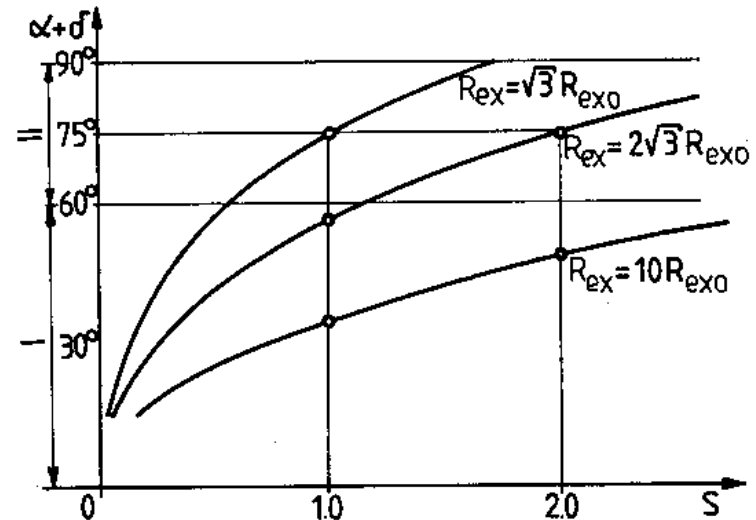
1.4.13. ábra. A gerjesztő egyenáramú oldali külső jelleggörbéje.

Az 1.4.13. ábrán az  $U'_{ex}(I'_{ex})$  egyenáramú oldali **külső jelleggörbéket** ábrázoltuk különböző  $S$  szlipekre. Az I és III munkatartományban lineáris, a II-ben nemlineáris a külső jelleggörbe. Az  $U'_{ex}(I'_{ex})$  egyenesek meredeksége az I tartományban  $-S/\sqrt{3}$ , a III tartományban  $-S\sqrt{3}$ .

Az ábrába berajzoltuk az  $R_{ex} = \sqrt{3}R_{exo}$ ,  $2\sqrt{3}R_{exo}$ ,  $10R_{exo}$  állandó gerjesztő-köri ellenállásokhoz tartozó egyeneseket is. Az (1.4.2) összefüggések alapján belátható, hogy az  $R_{ex} = S\sqrt{3}R_{exo} = \text{const.}$  egyenes az adott S-hez tartozó  $U'_{ex} (I'_{ex})$  jelleggörbét a  $\delta=60^\circ$ -os II tartományban metszi az  $\alpha=15^\circ$ -os ( $\alpha+\delta=75^\circ$ -os) pontban.



a) Gerjesztő-köri ellenállás a kialvási szög függvényében.



b) Kialvási szög a szlip függvényében.

1.4.14. ábra. A gerjesztő-köri ellenállás, a kialvási szög és a szlip kapcsolata.

A gerjesztő-köri ellenállás, a kialvási szög és a szlip kapcsolata az 1.4.14. ábrán látható. Az  $R_{ex}/R_{exo}$  viszonylagos gerjesztő-köri ellenállást az  $\alpha+\delta$  kialvási szög függvényében, állandó  $S$  szlipekre az a) ábra, az  $\alpha+\delta$  kialvási szöget az  $S$  szlip függvényében, állandó  $R_{ex}$  gerjesztő-köri ellenállásokra a b) ábra mutatja. Ezekből megállapítható, hogy **adott  $R_{ex}=\text{const.}$ -nál az  $S$  szlip egyértelműen megszabja az  $\alpha+\delta$  kialvási szöget**. E két mennyiség között monoton kapcsolat van, így a legnagyobb szlipnél a legnagyobb, a legkisebb szlipnél a legkisebb a kialvási szög. Változó szlip esetén az üzemi szlip tartományt  $1 \leq S \leq 2$ -re felvéve pl.  $R_{ex}=10R_{exo}$ -nál az üzem az I tartományban van és a fedési szög kb.  $35^\circ < \delta < 48^\circ$  között változik a szlip függvényében közel lineárisan. Ugyanilyen feltételekkel  $R_{ex} = 2\sqrt{3}R_{exo}$ -nál az üzem az I és a II tartományban van és a kialvási szög kb.  $56^\circ < \alpha+\delta < 75^\circ$  között változik a szlip függvényében közelítőleg ugyancsak lineárisan.

### Optimális üzem

Adott S szlipen és adott  $U_{r0} \approx U_1$  feszültségen a gerjesztő-teljesítmény a  $\delta=60^\circ$ -os fedési szögű II tartományban az  **$\alpha=15^\circ$  gyújtásszögnél ( $\kappa=\alpha+\delta=75^\circ$  kialvási szögnél) a legnagyobb, ideális:**

$$P_{\text{exi}} = \frac{3}{\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} SP_{\text{exo}} \approx 0.827 SP_{\text{exo}}. \quad (1.4.20)$$

Ez a maximum jól látható az 1.4.12. ábra teljesítmény görbájén is.

**Ehhez a ponthoz (1.4.2) alapján a szliptől függő ideális gerjesztő-köri ellenállás tartozik:**

$$R_{\text{exi}} = S\sqrt{3}R_{\text{exo}}. \quad (1.4.21)$$

Ezeknek az ellenállásoknak megfelelő görbék szerepelnek az 1.4.13. ábrán és az 1.4.14b ábrán is.

A gerjesztő-egység több szempont (pl. kihasználtság, veszteség, hatásfok, ...) alapján optimalizálható. A következőkben a gerjesztőgép kihasználtsága alapján optimalizálunk. **A gerjesztő-gépet akkor használjuk ki a legjobban, ha a  $P_{\text{ex}}$  teljesítmény egy szlipen megegyezik a gerjesztőből ideálisan kivehető (1.4.20) szerinti legnagyobb teljesítménnyel.**

### 1.4.3.1. Optimalizálás egy adott szlipre

Ha a gerjesztő-gép egy adott szlip-tartományban üzemel ( $S_{\min} \leq S \leq S_{\max}$ ), **csak egy adott szlipre érhető el optimum**. Jelöljük ezt  $S_i$ -vel.

Az optimum a gerjesztő paramétereinek megfelelő megválasztásával érhető el. (1.4.21) alapján **a gerjesztőköri ellenállást ideálisra kell választani**:

$$R_{\text{exi}} = S_i \sqrt{3} R_{\text{exo}} = R_{\text{ex}}. \quad (1.4.22)$$

Ez az (1.4.2f) összefüggés alapján meghatározza a szinkrongép  $R_{\text{ex}}$  gerjesztő-ellenállásának és a gerjesztő-gép  $\omega_1 L'_r$  rotorköri tranziens reaktanciájának az **optimális viszonyát**. Tulajdonképpen **illesztési szabályt ad** a gerjesztő-gép  $\omega_1 L'_r$  rotorköri tranziens reaktanciája és a szinkrongép gerjesztő-köri  $R_{\text{ex}}$  ellenállása között:

$$R_{\text{ex}} = S_i \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \omega_1 L'_r. \quad (1.4.23)$$

**Ez az illesztési szabály a szinkrongép gerjesztő-körének és a gerjesztő-gépnek a komplex tervezésével betartható.**

**Az optimalizált munkapont mennyiségei** ( $U_{\text{exi}}$ ,  $I_{\text{exi}}$ ,  $P_{\text{exi}}$ )  $\alpha=15^\circ$  és  $\kappa=\alpha+\delta=75^\circ$  helyettesítéssel kiszámolhatók. Ezek  $U'_r = S_i U_{\text{roi}} \approx S_i U_{1i}$  feszültségű táplálással alakulnak ki:

$$U_{\text{exi}} = S_i \frac{9\sqrt{2}}{4\pi} U_{\text{roi}}; \quad (1.4.24)$$

$$I_{\text{exi}} = \frac{\sqrt{6}}{4} \frac{U_{\text{roi}}}{\omega_1 L'_r}; \quad (1.4.25)$$

$$P_{\text{exi}} = S_i \frac{9\sqrt{3}}{8\pi} \frac{U_{\text{roi}}^2}{\omega_1 L'_r}. \quad (1.4.26)$$

*Működési viszonyok az ideálistól eltérő szlipű munkapontokban (innenől olvasmány)*

A rendszert úgy kell méretezni, hogy ezek az ideális mennyiségek legyenek a szinkrongép által igényelt (névleges) értékek. Tételezzük fel, hogy ezek az értékek függetlenek a szinkrongép szögsebességétől (vagyis a szliptől). Ez azt jelenti, hogy a gerjesztő-gépnek ezeket kell produkálnia bármely szögsebességen (ez így is van a gyakorlatban).

Hogy ezt a feltételt (igényt) kielégítsük,  $S_i$ -től különböző  $S$  szlipek esetén  $U_{roi}$ -től különböző  $U_{is} \approx U_{ros}$  gerjesztő-gépet tápláló feszültség szükséges: kisebb szliphez ( $S < S_i$ ) nagyobb feszültség, nagyobb szliphez ( $S > S_i$ ) kisebb feszültség szükséges, de nem arányosan a különböző fedési szögek miatt. Felhasználva (1.4.2), (1.4.3), (1.4.24) és 1.4.25) összefüggéseket, a tápláló feszültség szükséges módosításának mértéke kifejezhető:

Az I munkatartományban (levezethető, hogy itt:  $\frac{S_i}{S} > \sqrt{3}$ ):

$$\frac{U_{ros}}{U_{roi}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left( \frac{S_i}{S} \sqrt{3} + 1 \right). \quad (1.4.27a)$$

A tartomány végén (I-II határon):  $\frac{S_i}{S} = \sqrt{3}$ ,  $\frac{U_{ros}}{U_{roi}} = \sqrt{2} = \text{áll.}$

A II munkatartományban (levezethető, hogy itt:  $\frac{1}{\sqrt{3}} < \frac{S_i}{S} < \sqrt{3}$ ):

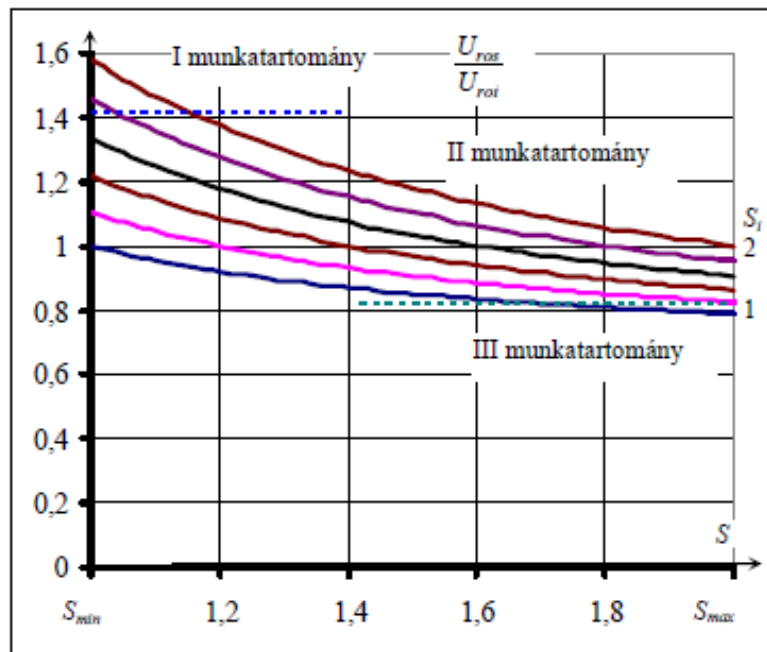
$$\frac{U_{ros}}{U_{roi}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left( \frac{S_i}{S} \right)^2 + 1}. \quad (1.4.27b)$$



A tartomány végén (II-III határon):  $\frac{S_i}{S} = \frac{1}{\sqrt{3}}$ ;  $\frac{U_{ros}}{U_{roi}} = \sqrt{\frac{2}{3}} = \text{áll.}$

A III munkatartományban ( $\frac{S_i}{S} < \frac{1}{\sqrt{3}}$ ):

$$\frac{U_{ros}}{U_{roi}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left( \sqrt{3} + \frac{S_i}{S} \right). \quad (1.4.27c)$$



1.4.15. ábra. A feszültségigény szlipfüggése.

Az összefüggés grafikus megjelenítése az 1.4.15. ábrán látható. Várható volt, de a képletből és az ábrából is egyértelműen látszik, hogy a megkívánt tápláló feszültség maximumát a minimális szlip határozza meg. Dinamikus üzemben ennél nagyobb is szükséges lehet, ha a gerjesztő-áram növelését forszírozni akarjuk. Az ábrán bejelöltem az egyes munkatartományokat is. Látszik, hogy a választott szlip-tartomány esetén csak kis mértékben nyúlnak túl a vizsgált esetek a működés szempontjából legfontosabb II munkatartományon. Főként a III munkatartomány kerülendő, oda éppen csak benyúlik az alsó ( $S_i=1$ -es) görbe. A szlip-tartomány megválasztási szempontja is lehet a III munkatartomány kizárása.

Az is megfigyelhető, hogy a függvények jellege, tendenciája az egyes munkatartományokban nem változik meg. A feszültségigény szempontjából az  $S_i=S_{\min}$  választás a legkedvezőbb, de ilyenkor a kisebb feszültség miatt a nagyobb áramok tartománya, a III munkatartomány is szerepet kap.

A szlip változása esetén a módosított tápláló feszültséggel a megkívánt gerjesztő-köri mennyiségeket biztosítani lehet, de a gerjesztő-gépet nem használjuk ki optimálisan.

Ennek egyik mennyiségi bizonyítéka, hogy a munkapontban a  $\kappa$  kialakítási szög nem az optimumra levezetett  $75^\circ$ -os értékű. A kialakítási szög összetevőinek kifejezése (1.4.2), (1.4.3), (1.4.24) és (1.4.25) összefüggések felhasználásával levezethető az ideálistól eltérő S szlipű munkapontra az egyes munkatartományokra:

Az I munkatartományban  $\alpha=0^\circ$ , a kialakítási szög  $\kappa=\delta$ :

$$\cos \delta = \frac{\frac{S_i}{S} \sqrt{3} + 1}{\frac{S_i}{S} \sqrt{3} - 1} . \quad (1.4.28a)$$

A II munkatartományban  $\delta=60^\circ$ , a kialvási szög  $\kappa=\alpha+\delta$ , az  $\alpha$  virtuális gyűjtáskésleltetési szög:

$$\cos \alpha = \frac{1 + \frac{S_i}{S} \sqrt{3}}{2 \cdot \sqrt{\left(\frac{S_i}{S}\right)^2 + 1}}. \quad (1.4.28b)$$

A III munkatartományban  $\alpha=30^\circ$ , a kialvási szög  $\kappa=\alpha+120^\circ-\delta^*$ , a  $\delta^*$  kétfázisú vezetési szög:

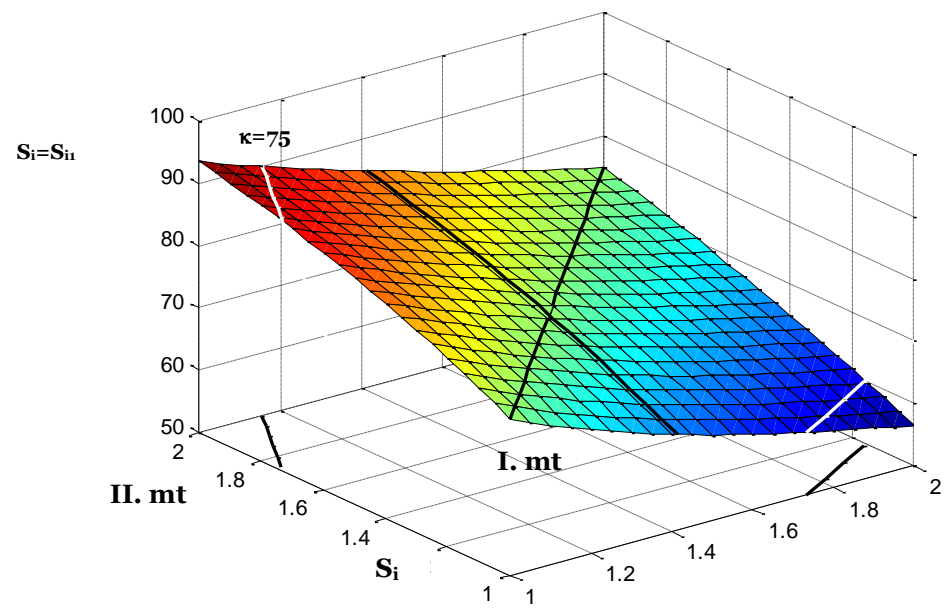
$$\cos \delta^* = \frac{\sqrt{3} - \frac{S_i}{S}}{\sqrt{3} + \frac{S_i}{S}}. \quad (1.4.28c)$$

Ellenőrizhető, hogy ezek csak  $S=S_i$  esetén adnak  $\kappa=75^\circ$ -os eredményt. Ez minőségileg jól látszik az 1.4.16. ábrán is, ahol 3 dimenzióban ábrázoltam az  $\kappa(S,S_i)$  függvényt az  $S_{\min} \leq S \leq S_{\max}$  tartományra ( $S_{\min}=1$ ;  $S_{\max}=2$ ). Látható, hogy kis  $S_i$  értékekre  $\kappa$   $90^\circ$  fölé is nőhet (III munkatartomány), amit célszerű elkerülni. Ez egy meghatározó szempont lehet  $S_i$  megválasztásakor az adott  $S_{\min} \leq S \leq S_{\max}$  szlip változási tartományon belül.

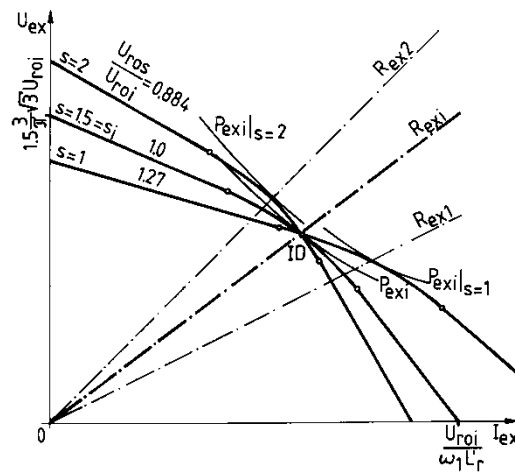
$\kappa$

III.

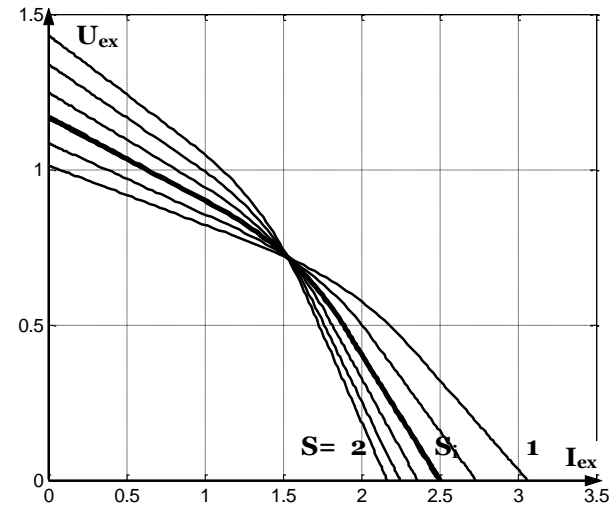
S



1.4.16. ábra. A  $\kappa(S, S_i)$  függvény 3 dimenzióban.



a) Minőségi ábra.



b) Mennyiségi ábra. ( $U_{roi}=0,5$ )  
 $S_i=S_{i1}$  és  $S=1; 1,2; 1,4; S_i; 1,6; 1,8; 2$ .

1.4.17. ábra. Csak egy szlipnél optimális a kihasználás.

Egy közvetlenebb bizonyítékot az optimumtól való eltérésre, valamint egy közvetlenebb  $S_i$  megválasztási szempontot várhatunk a célmennyiség, a maximális kinyerhető teljesítmény vizsgálatával. A viszonylagos mennyiségeket tartalmazó 1.4.13. ábrából ez nem látszik, mert a normalizálás miatt az ott ábrázolt görbék nem tartalmazzák az  $U_{ro}$ -tól való függést. Rajzoljuk fel az  $U_{ex}(I_{ex})$  függvényeket normalizálás nélkül (1.4.17. ábra).

Az 1.4.17a ábra a minőségi viszonyokat mutatja  $S_i=1,5$  és  $S=S_{min}=1; S=S_{max}=2$  értékekre. Minden szlip értékre a  $P_{exi}$  gerjesztési-teljesítményt kell leadni, ezért minden görbe az azonos teljesítményű ID ponton megy át. Az aktuális szliphez illesztett  $R_{ex1}$  és  $R_{ex2}$  egyenesek is be lettek rajzolva, amelyek a nekik megfelelő  $U_{ex}(I_{ex})$  görbéket az adott szlipen, adott feszültséggel elérhető maximális teljesítményű pontokban metszik ( $P_{exi}|_{s=1} > P_{exi}; P_{exi}|_{s=2} > P_{exi}$ ). De

természetesen az ellenállást csak egy adott szliphez illeszthetjük, és ez  $S_i$  ( $R_{ex}=R_{exi}$ ). Az 1.4.17b ábrán  $S=1; 1,2; 1,4; S_i; 1,6; 1,8; 2$  értékekre mennyiségileg is ki lettek számítva a görbék. (Itt  $U_{roi}=0,5$   $S_i=S_{i1}$  /ld. később/ értékekkel számoltam, ami nem okoz nagy feszültség igénybevételt  $S_{max}=2$ -nél sem és elég feszültség tartalékokat biztosít).

Kifejezhető, hogy az  $S_i$ -től különböző  $S$  szlipen mennyivel nagyobb teljesítmény ( $P_{exi|s}$ ) lenne elérhető az ID pont  $P_{exi}$  teljesítményénél:

Általánosan az (1.4.26) alapján:  $\frac{P_{exi|s}}{P_{exi}} = \frac{S}{S_i} \left( \frac{U_{ros}}{U_{roi}} \right)^2$ , majd felhasználva az (1.4.27) képleteket:

Az I munkatartományra:

$$\frac{P_{exi|s}}{P_{exi}} = \frac{1}{8} \left( 3 \frac{S_i}{S} + \frac{S}{S_i} + 2\sqrt{3} \right). \quad (1.4.29a)$$

A tartomány végén (I-II határon):  $\frac{S_i}{S} = \sqrt{3}$ ,  $\frac{P_{exi|s}}{P_{exi}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = \text{áll.}$

A II munkatartományra:

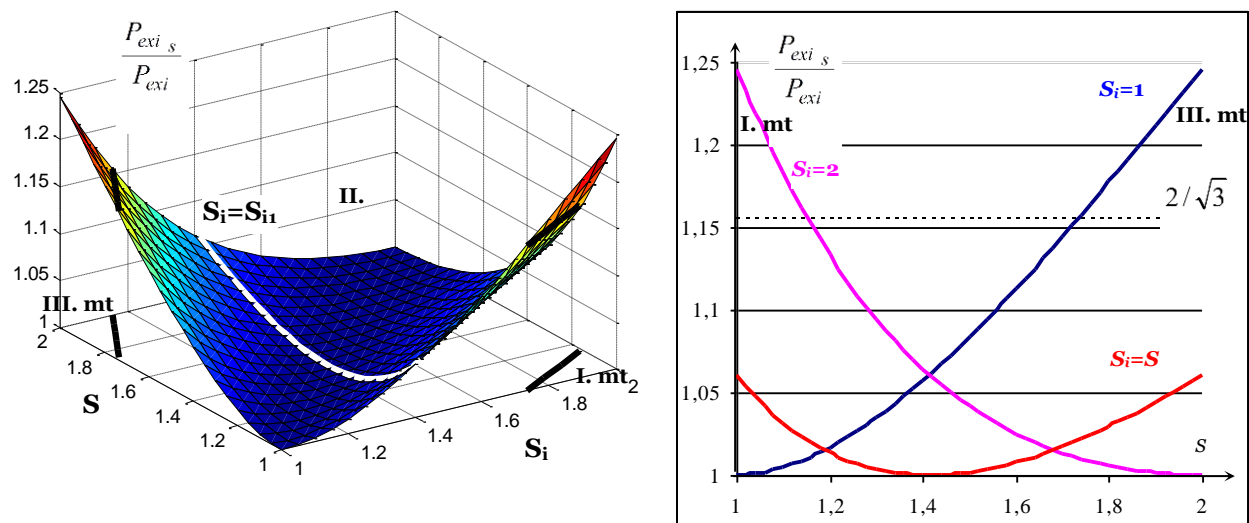
$$\frac{P_{exi|s}}{P_{exi}} = \frac{1}{2} \left( \frac{S_i}{S} + \frac{S}{S_i} \right). \quad (1.4.29b)$$

A tartomány végén (II-III határon):  $\frac{S_i}{S} = \frac{1}{\sqrt{3}}$ ;  $\frac{P_{exi|s}}{P_{exi}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = \text{áll.}$

A III munkatartományra:

$$\frac{P_{exi}|_s}{P_{exi}} = \frac{1}{8} \left( \frac{S_i}{S} + 3 \frac{S}{S_i} + 2\sqrt{3} \right). \quad (1.4.29c)$$

Látható, hogy a képletekben is és a tartomány határokon felvett értékekben is nagyfokú szimmetria van.



a) 3 dimenzióban.

b) Kiválasztott  $S_i$  értékekre.

1.4.18. ábra. A kihasználás nem optimális  $S_i$ -től különböző szlipek esetén.

$\frac{P_{exi}|_s}{P_{exi}}$  optimális (1 értékű)  $S=S_i$ -nél, és egynél nagyobb más szlip értékeknél. Grafikus megjelenítése ismét

szemléletes képet mutat (1.4.18. ábra). A jelleg a munkatartományokban nem változik.

### 1.4.3.2. Adott tartományra átlagosan optimális $S_i$ érték választása

Az 1.4.18. ábrából tátható, hogy  $S_i$ -t a tartomány valamelyik szélére választva, a másik szélén az ideális 1-től nagyon eltérő értéket kapunk  $\frac{P_{\text{exi}}|_s}{P_{\text{exi}}}$ -re,  $\frac{P_{\text{exi}}|_s}{P_{\text{exi}}}$  maximuma a tartomány valamelyik szélén van. Egy közbenső érték választása ( $S_{i1}$ ) csökkenti a maximumot, azt minimalizálni is lehet.

$\frac{P_{\text{exi}}|_s}{P_{\text{exi}}}$  legnagyobb értékének minimuma akkor következik be, ha értéke a tartomány két határán egyenlő:

$\frac{P_{\text{exi}}|_{S_{\text{max}}}}{P_{\text{exi}}} = \frac{P_{\text{exi}}|_{S_{\text{min}}}}{P_{\text{exi}}}$ . Az I és III munkatartomány marginális szerepéből kiindulva feltételezhető, hogy ekkor bármely szlipnél a II munkatartományban vagyunk. Ezekkel a kiindulásokkal levezethető az 1-től való eltérés minimuma szempontjából optimális ideális szlip:

$$S_{i1} = \sqrt{S_{\text{max}} S_{\text{min}}} . \quad (1.4.30)$$

$S_{i1}$ -nek megfelelő görbék az 1.4.16-18. ábrákon is jelölve vannak.

Bebizonyítható, hogy ekkor  $\frac{P_{\text{exi}}|_{S_{\text{max}}}}{P_{\text{exi}}}$  és  $\frac{P_{\text{exi}}|_{S_{\text{min}}}}{P_{\text{exi}}}$  összege és szorzata is minimális.

$\frac{P_{\text{exi}}|_{S_{\text{max}}}}{P_{\text{exi}}} = \frac{P_{\text{exi}}|_{S_{\text{min}}}}{P_{\text{exi}}} \approx 1,06$ , vagyis az optimális 1-es értéktől maximum 6% távolságra vagyunk. Az is látható, hogy az  $S_{i1}$

választása esetén a vizsgált szlip-tartományban végig a II munkatartományban vagyunk, tehát feltételezésünk helytálló volt.



Ha ténylegesen egy átlagos optimumot akarunk származtatni, akkor  $\frac{P_{\text{exi}}|_s}{P_{\text{exi}}}$  szlip tartományra vett integráljának (közéértékének) minimumát kell meghatározni:

$$\min \left( \int_{S_{\min}}^{S_{\max}} \frac{P_{\text{exi}}|_s}{P_{\text{exi}}} ds \right). \quad (1.4.31)$$

Levezethető, hogy az ehhez tartozó optimális szlip (ismét feltételezve a II munkatartományt):

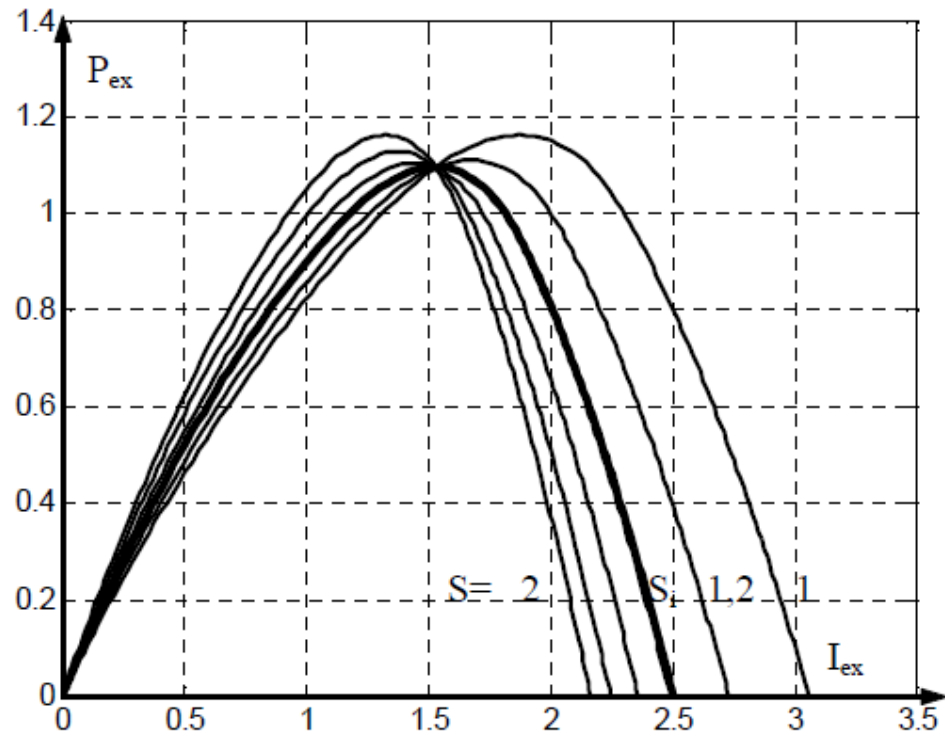
$$S_{i2} = \sqrt{\frac{S_{\max}^2 - S_{\min}^2}{2 \ln \frac{S_{\max}}{S_{\min}}}}. \quad (1.4.32)$$

Az eddigiekben is használt  $S_{\min}=1$  és  $S_{\max}=2$  értékekkel:  $S_{i1}=\sqrt{2}=1,4142$ ;  $S_{i2}=1,471$ . Az értékek nagyon közeliek egymáshoz.

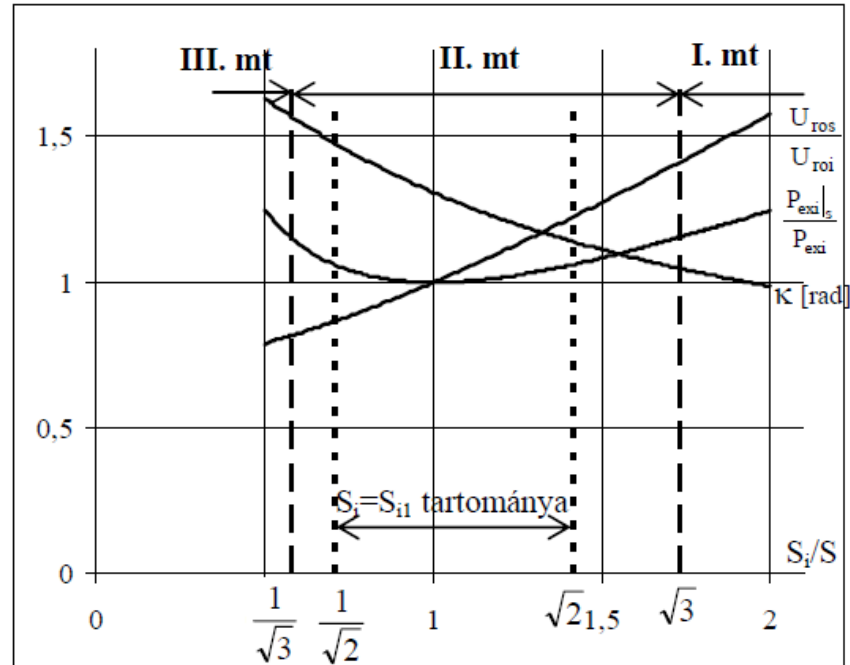
Érdekes, hogy  $S_i=S_{i1}$  esetén a szlip-tartomány határain a  $\kappa$  kialakítási szöggel egyenlő távolságra vagyunk a munkatartomány határoktól:  $S=1$ -nél:  $\kappa=60^\circ+5,27^\circ$ ;  $S=2$ -nél:  $\kappa=90^\circ-5,27^\circ$ .

Az optimumtól való eltérés kis értéke jól látszik az 1.4.19. ábrán is (az 1.4.17b ábra értékeivel lett kiszámítva).

Az összes vizsgált mennyiség képletében  $S_i/S$  szerepel. Egy összefoglaló ábrában ennek függvényében ábrázoltam őket a vizsgált  $S_{\min} \leq S \leq S_{\max}$  tartományra ( $S_{\min}=1$ ,  $S_{\max}=2$ , 1.4.20. ábra). Bejelöltem a munkatartomány határokat, és a meghatározott  $S_{i1}$  optimális szlip esetén érvényes tartományt. Látható, hogy ekkor végig a II munkatartományban működik a gerjesztő.



1.4.19. ábra.  $P_{ex}(I_{ex})$  görbék  $S_{i1}$  esetén  $S=1..2$  szlipekre.



1.4.20. ábra. A vizsgált mennyiségek  $S_i/S$  függvényében.

#### 1.4.4. A gerjesztés eredő hatásfokának meghatározása

**Meghatározhatjuk a gerjesztő-rendszer eredő hatásfokát befolyásoló tényezőket. Kiadódott, hogy a nagyobb szlip adja a nagyobb eredő hatásfokot. Ennek oka az, hogy nagyobb szlipnél a gerjesztési teljesítmény nagyobb része származik a lényegesen nagyobb teljesítményű és tipikusan sokkal jobb hatásfokú szinkrongépből.**

Ha elhanyagoljuk a gerjesztő-gépben a rotorkör belső veszteségét, akkor a  $P_{ex} > 0$  gerjesztő-teljesítmény megegyezik a  $P_r$  rotorköri teljesítménnyel és így kiszámítható a gerjesztő-gép  $P_a$  légrés és  $P_m$  mechanikai teljesítményéből is:

$$P_{\text{ex}} = P_r = P_a - P_m, \quad P_a = \frac{P_{\text{ex}}}{S}, \quad (1.4.33)$$

$$P_m = (1-S)P_a = \frac{1-S}{S}P_{\text{ex}}.$$

$$P_{\text{ex}} = -\frac{3}{2}SU_{r0}I_{r1} \cos \varphi_{r1}. \quad (1.4.34)$$

Ha  $S > 1$ , akkor  $P_a > 0$  és  $P_m < 0$ , így  $P_{\text{ex}}$  részben a légrésen, részben a tengelyen át fedeződik, a gerjesztő-gép tulajdonképpen ellenáramú féküzem van. A maximális fordulatszámhoz tartozó maximális szlipnél,  $S_{\text{max}}=2$  feltételezéssel  $P_{\text{ex}}$  fele-fele arányban fedeződik a hálózatról és a tengelyről.

Mivel a gerjesztési teljesítménynek két forrása van, mindkettőnek van hatása a gerjesztés eredő hatásfokára. Az E gerjesztő-gép és az EC gerjesztési áramirányító (szaggató) hatásfoka legyen  $\eta_E$ , a szinkrongép és táplálásának hatásfoka pedig  $\eta_{SM}$ . Mivel szinkrongép teljesítménye lényegesen nagyobb a gerjesztésénél, hatásfoka is sokkal jobb (pl.  $\eta_E=0,82$ ;  $\eta_{SM}=0,95$ ).

Ha a szaggató bemenő teljesítménye  $P_E$ , és a szinkrongép gerjesztésre használt bemenő teljesítménye  $P_{SM}$ , a következő összefüggések írhatók:

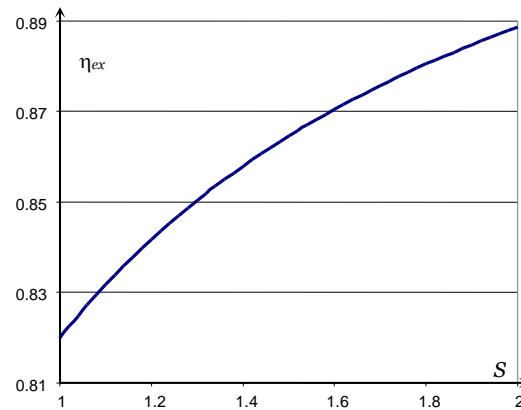
$$\eta_E P_E = P_a = \frac{P_{\text{ex}}}{S}. \quad (1.4.35)$$

$$\eta_{SM} P_{SM} = -P_m = -\frac{1-S}{S}P_{\text{ex}}. \quad (1.4.36)$$

Kifejezve a gerjesztés eredő hatásfokát, az szlipfüggőre adódik:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{P_{\text{ex}}}{P_E + P_{SM}} = \frac{S\eta_E\eta_{SM}}{\eta_{SM} + (S-1)\eta_E}. \quad (1.4.37)$$

A példaként megadott hatásfok értékekkel felrajzolhatjuk az  $\eta_{ex}(S)$  függvényt az 1.4.21. ábrán:



1.4.21. ábra. A gerjesztés eredő hatásfoka a szlip függvényében.

Minél nagyobb a szlip, annál nagyobb a hatásfok. Ez érthető, hiszen nagyobb szlipnél a gerjesztési teljesítmény nagyobb része származik a jobb hatásfokú szinkrongépből.

## 1. A különféle energiatárolási módok áttekintése és összehasonlítása

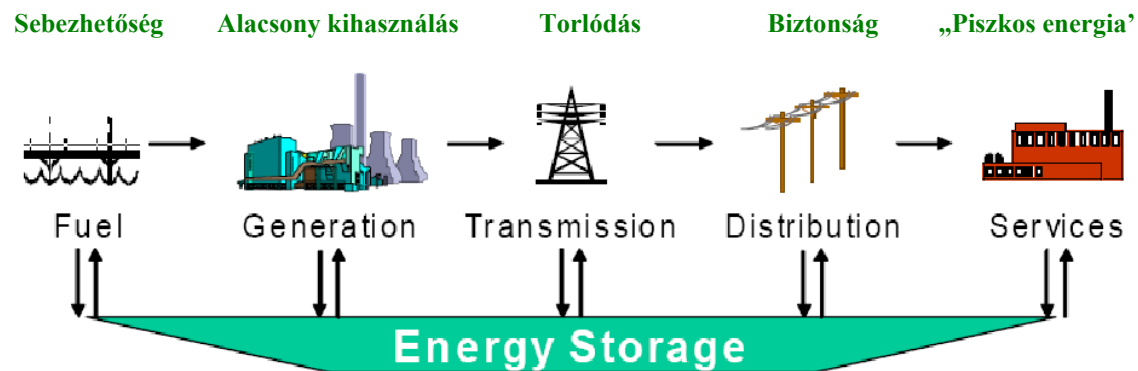
### 1.1. Motiváció

Az energiatárolás legnagyobb előnye, hogy lehetővé teszi **az energiatermelés és az energia fogyasztás szétcsatolását**. Ez a lehetőség nagyon jól jön az időszakosan változó intenzitással rendelkezésre álló megújuló energiaforrások alkalmazása esetén. **Különösen igaz ez a viszonylag gyorsan változható szélviszonyok miatt a szélenergiára**. Az energiarendszer irányítása megköveteli a teljesítmény egyensúlyt.

Így az energiatárolás nagyléptékű alkalmazása jelentős **támogatást és lökést adhat** a megújuló energiafajták, köztük a szélenergia szélesebb körű alkalmazásának.

Az energiatárolás alkalmazásának **számos egyéb kedvező hatása van**. Ha csak a műszaki szempontokat nézzük akkor is gyakorlatilag az energiarendszer minden elemét kedvezően érinti, ahogy az 1.1 ábrán is látszik. Ez alapján az energia tárolást az energiarendszer hatodik dimenziójának (elemének) is nevezik.

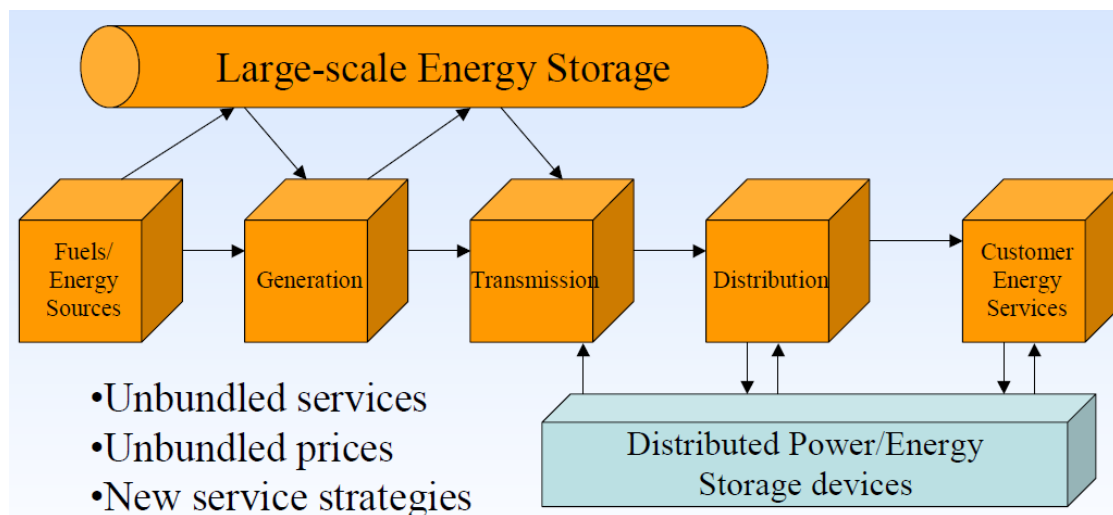
## KIHÍVÁSOK



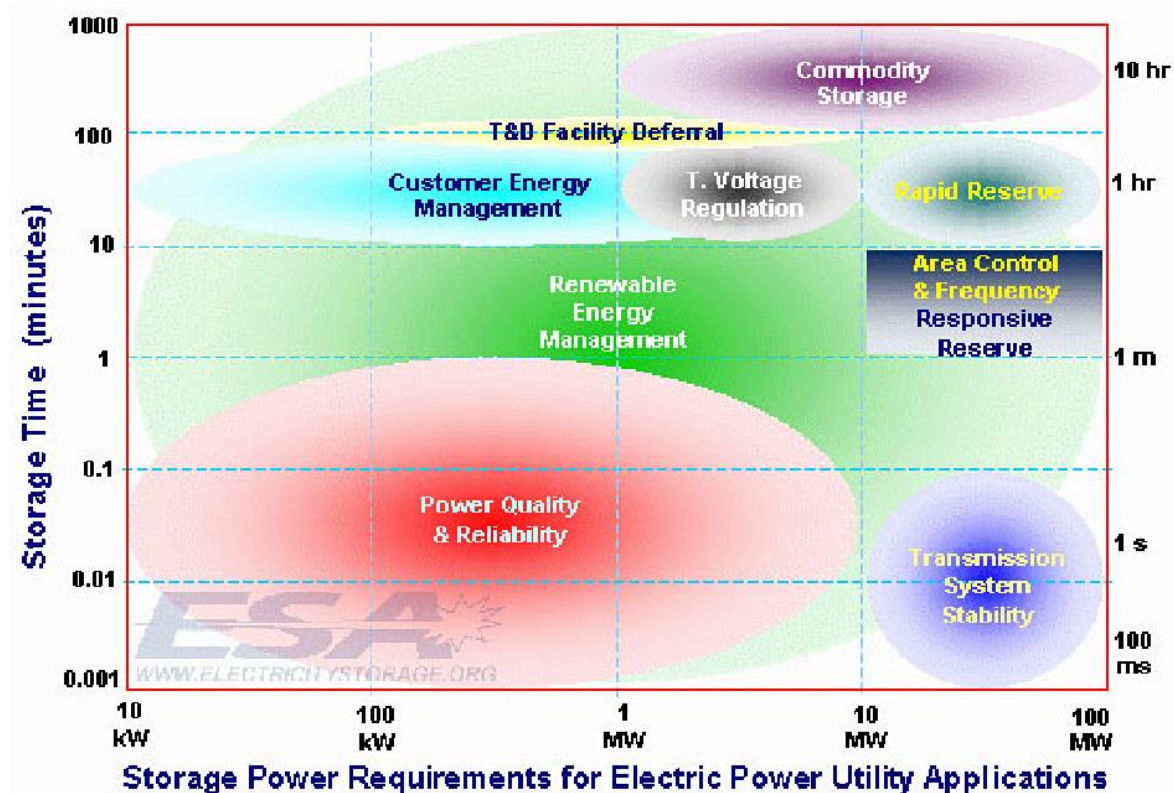
Korlátozott kockázat    Alapterhelés    Nagyobb kihasználtság    Stabilitás    Energia minőség

## ELŐNYÖK

1.1. ábra. Az energiatárolás műszaki járulékos előnyei.



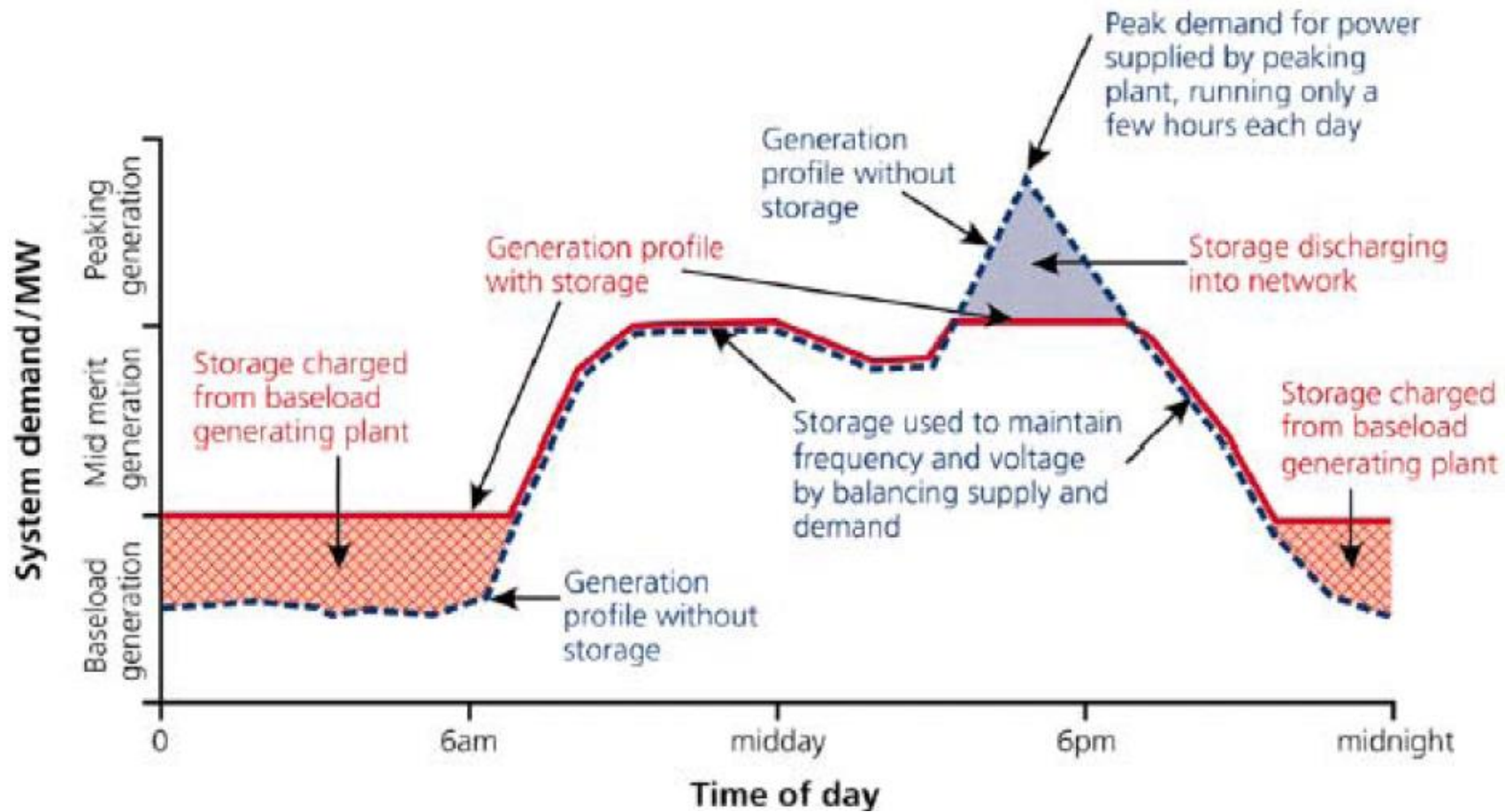
Az energiapiac liberalizálása miatt az energiatárolás a műszaki előnyök mellett **gazdasági előnnyel is jár**. A nem csúcsidőben megtermelt „olcsó” (amúgy is felesleges) energia felhasználása (értékesítése) időben eltolható arra az időszakra, amikor drágábban eladható (és szükség is van rá). Ugyanakkor terhelés kiegyenlítő hatásának köszönhetően az energiatárolók létesítése várhatóan **költségkímélő alternatívát jelenthet** új távvezetékek, állomások és erőművek telepítésével szemben.

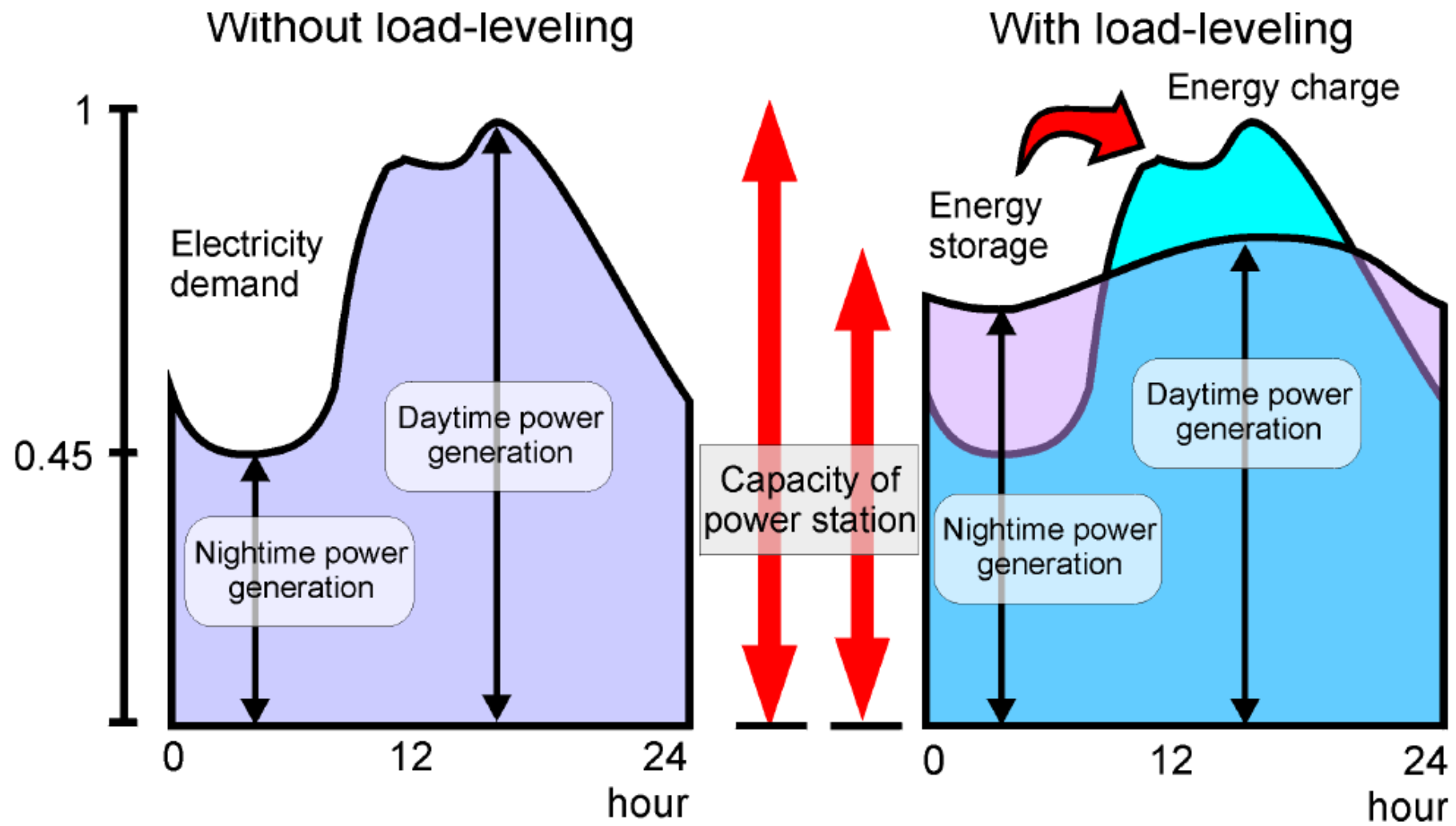


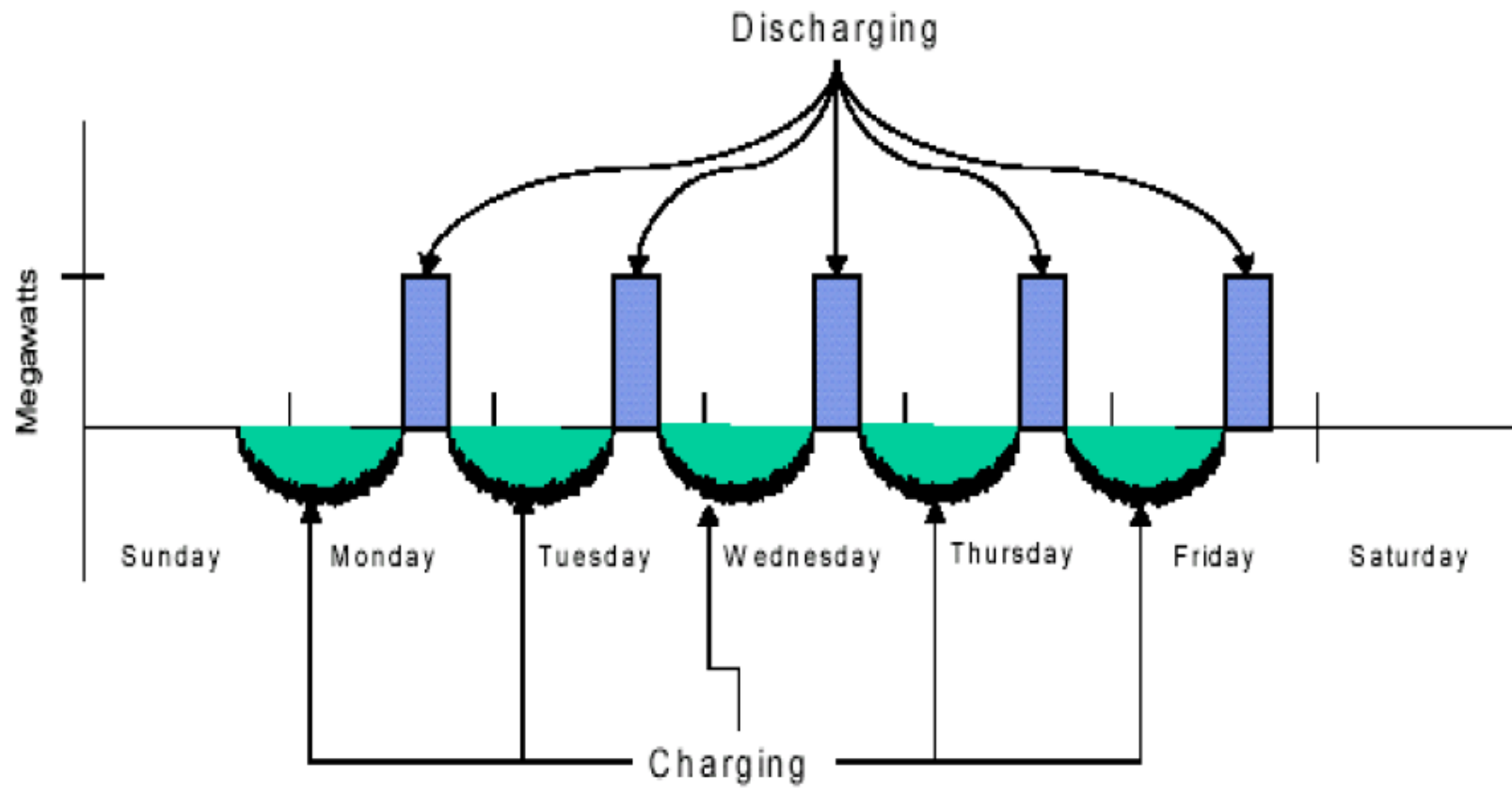
1.2. ábra. Az energiatárolás alkalmazásának területeit.



# Load Profile of a Large-Scale Energy Storage Facility







Csúcs ár érhető el.

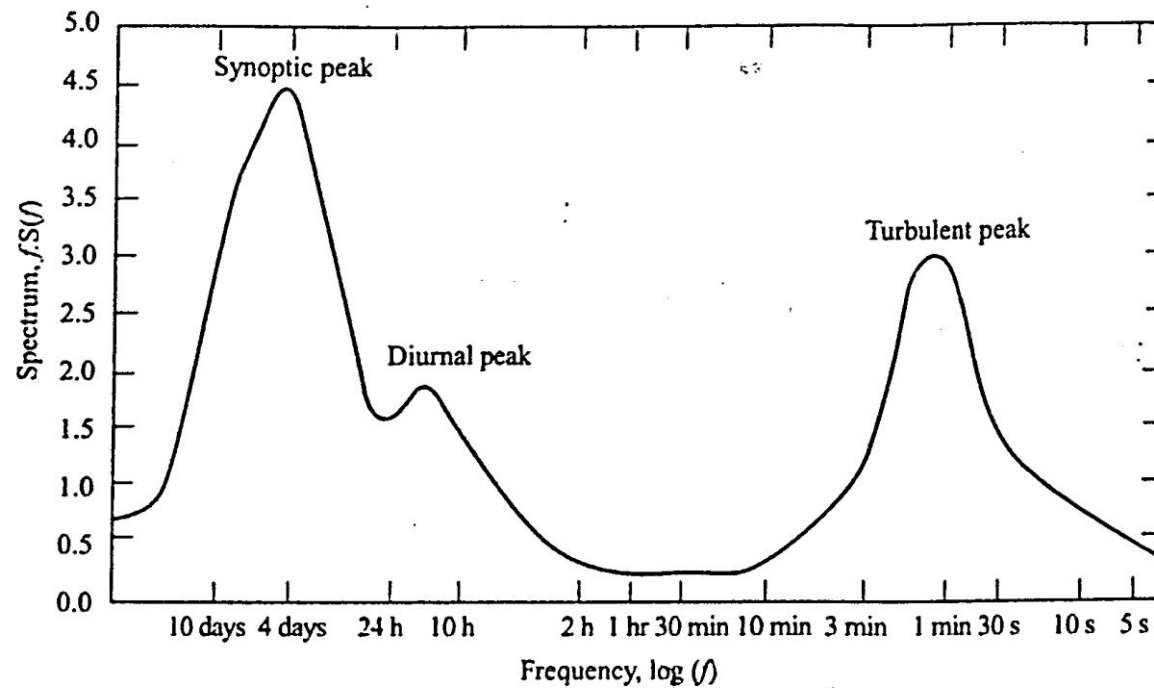
## 1.2. Az energiatárolással szembeni elvárások

- Alacsony költség: beruházás, működés, karbantartás
- Magas eredő hatásfok.
- Felügyelet-nélküliség.
- Üzembiztonság.
- Alacsony vagy nulla környezeti hatás.

A szélenergia sztochasztikus tulajdonságait figyelembe véve természetesen erre az energiafajtára specifikus energiatárolási elvárások is definiálhatók. A szélesség változás modellezésére általánosan használt **spektrumot** Van der Hoven alkotta meg (1.3. ábra). Az átfogás maximum pár nap lehet, hiszen előre jóslni annál jobban nem igen lehet. A szélesség pár napra vonatkozó változásai elsősorban az időjárási frontok vonulása miatt van (**synoptic peak**). A helyszíntől függően jelentős változások lehetnek napi szinten is (**diurnal peak**). Ez szintén elég jól jelezhető előre. A pár perc alatti pár másodpercig húzódó tartományban a változásokat **turbulenciának** hívják. Ennek jelentős hatása lehet az egyes **szélturbinák tervezésére** és teljesítményére, valamint a hálózat felé szolgáltatott **teljesítmény minőségére**, ami a fogyasztókra is hat. Az energia tárolás szempontjából a spektrum alapján lehet eldönteni, milyen időtartamot kell átfognia a **tárolási időnek**, valamint a gyors változások esetén milyen gyorsan kell tudni **reagálnia** az energiatároló töltésének és kisütésének.

A két részletesen vizsgált energiatárolási mód a spektrum alapján lett kiválasztva:

- A **pár napos** változások kiegyenlítésére a **hidrogén tárolási** technológia adhat megoldást.
- A **turbulencia** okozta gyors változások kiegyenlítése **lendkerékkel** oldható meg.



1.3. ábra. Szélspektrum Van der Hoven alapján.

### 1.3 Az energiatárolás Achilles sarkai (hátrányai)

Amíg az egyes energiatárolási módoknak vannak egyéni korlátai hiányosságai és előnyei, ugyanakkor mindnek van két támadható Achilles sarka, különösen megújuló energetikai alkalmazásuk esetén:

- Az energiatároló rendszer **jelentős beruházási költsége**. A rendszer három jól elkülöníthető alrendszerre osztható:
  - Töltési,
  - tárolási és
  - kisütési alrendszerek (ez tartalmazza a váltakozóáramú hálózathoz való illesztést is).

**Mindhárom alrendszernek jelentős beruházási költsége van.**

- Az energiatároló rendszer **hatásfoka** mindig kisebb 100%-nál. Ezzel értékes energiát, ráadásul „zöld” energiát veszünk el. A hatásfokot jelentősen rontja, hogy az energiatárolási módszerek többsége más energiafajtvá alakítja át a villamos energiát, amit majd visszanyeréskor vissza kell alakítani.

## 1.4. Összehasonlítási szempontok

- Az árat **fajlagosan** érdemes vizsgálni. Vagy teljesítményre, vagy energiára lehet vetíteni.
- A hatásfok szempontjából az **eredő hatásfok a legérdekesebb**. Célszerű azonban az energiatárolás-energiavisszanyerés folyamatának minden lépcsőjét elemezni a hatásfok szempontjából (kisütési hatásfok, tárolási hatásfok, veszteség, stb).
- A **tárolási időtartamot** a technológia megköti, az átfogandó spektrum pedig igényli.
- Az alkalmazhatósági **teljesítménytartomány** függ a tárolási technológiától.
- A rendszer méretének jellemzésére a **fajlagos értéket kifejező energiasűrűség** alkalmas.
- A megtérülés szempontjából a **rendszer élettartama** alapvető adat. Kétféle élettartamot lehet értelmezni: a **töltési kisütési ciklusok számát** illetve az években kifejezhető **élettartamot**.

## 1.5. Energia tárolási módok ismertetése

### 1.5.1. Kinetikai energia tárolás: Lendkerék (Fly Wheel)

#### Működési elv, mechanizmus:

A forgó tömegben tárolt energia a  $\Theta$  inerciával és az  $\omega$  szögsebesség négyzetével arányos:  $\Theta\omega^2/2$  'Töltése' felpörgetést jelent, 'kisütésekor' a forgási energia nyerhető vissza. Ezekhez a folyamatokhoz villamos gépet (nagy sebességű szinkron vagy aszinkron gépet, **egyszer motorként, egyszer generátorként** működve) és kétirányú energiaáramlást lehetővé tevő teljesítmény elektronikát használnak.

#### Előnyök:

- Elterjedt, főként a kisebb teljesítmény tartományban (1kW, 3h vagy 100kW, 30s).
- Nagy ciklusélettartam.
- Kis méret.
- Környezetkímélő.
- Kis karbantartási igény
- Alacsony megsemmisítési költség élettartam végén.





**Hátrányok:**

- Nagyobb teljesítményeken még fejlesztés alatt (250kW, 10-15min)
- A nagy energiájú forgó tömeget sokan veszélyesnek tartják

**Tőkeigénye:**

400-800\$/kW.

**Fejlesztési irányok:**

- Mivel a tárolt energia a **szögsebesség** négyzetével arányos, annak **növelésével** jelentős többlet érhető el. A hagyományos acél kerék helyett a nagy sebességet bíró **kompozit anyagok** alkalmazása a trend az inercia csökkenésének ellenére is. Ezzel a méret, a súly és az ár is csökkenthető, nagy teljesítmény sűrűséget eredményezve (60000/min fordulatig).
- A légsúrlódás csökkentése **vákuum** alkalmazásával.
- A csapágsúrlódás csökkentése **lebegtetett mágneses csapágy** alkalmazásával (szupravezetős is lehet).
- **Integrált lendkerék**, ahol a villamos gép forgórésze képezi az energiatárolót.
- Különféle tárolási technológiák integrálása (levegő sűrítés, hőtárolás, lendkerék).

**Hatásfok:**

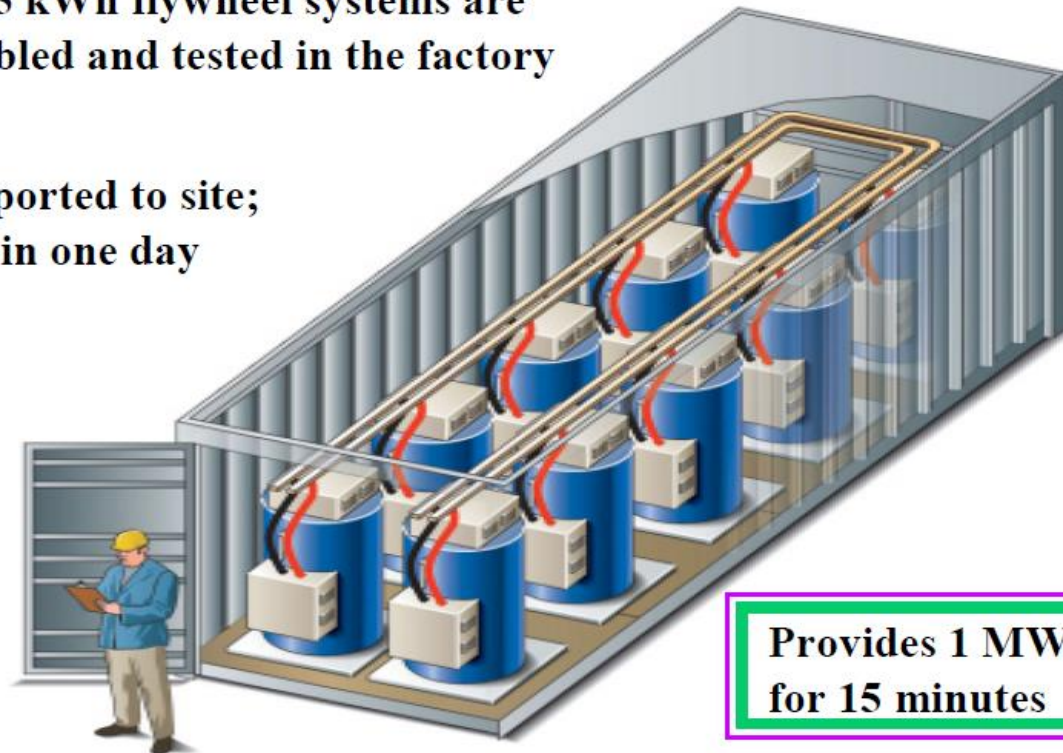
Az eredő AC-AC hatásfok 80-85% körül van (függ a csapágyveszteségtől, légsúrlódástól).

**Installálási példák:**

- USA, 1-MW vasúti hálózaton.
- Sorozat gyártmány: Beacon Energy, Többet összekombinálva MW-os tartomány érhető el.

**10 x 25 kWh flywheel systems are assembled and tested in the factory**

**Transported to site;  
set up in one day**



**Provides 1 MW  
for 15 minutes**

**Smart Energy Matrix**



*Beacon Power Corporation*



20 MW frequency regulation (Stephentown, NY, USA) July 2011

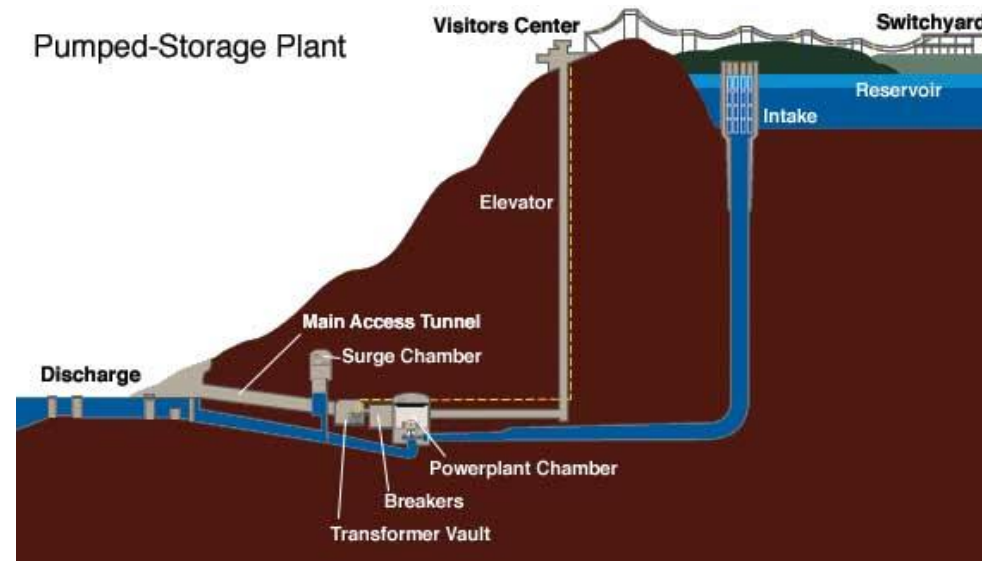
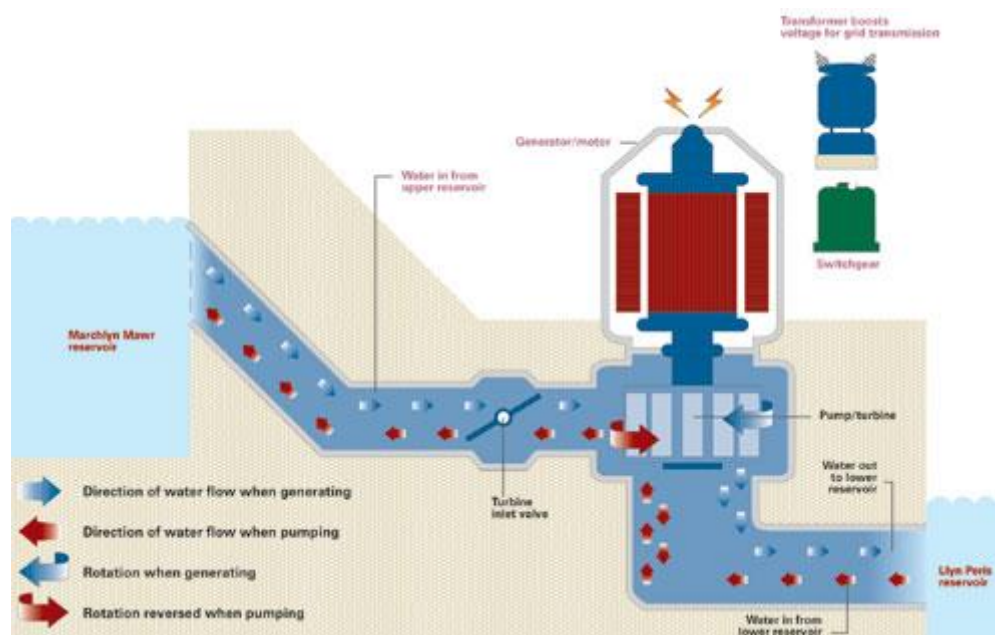
*Beacon Power Corporation*

## 1.5.2. Potenciális energia tárolása

### 1.5.2.1. Szivattyús tározók (Pumped Hydro)

#### Működési elv, mechanizmus:

Csúcsidőn kívüli fölösleges energiát vagy megújuló energiatípusból előállított villamos energiát felhasználva ez a tárolási technológia **vizet szivattyúz** egy magasabban (hegytetőn) lévő tárolóba. A tárolás a felpumpált vízmennyiség **potenciális energiájában** történik. Amikor az energiát használni akarjuk, ez a potenciális energia **turbinát hajtva visszanyerhető**.





Okinava, tengerrel kombinálva.

**Előnyök:**

- **Széles körben** használt (pl. 38 létező alkalmazás az USA-ban, akár 30-350MW teljesítménnyel), kiforrott és teljes egészében kidolgozott energiatárolási technológia.
- Széles teljesítmény és energia **spektrum**. A tárolási idő nem korlátozott (tipikusan maximum pár nap).

**Hátrányok:**

**Környezeti hatások** jelentősek. Nagy és speciális adottságokkal rendelkező terület szükséges a kialakításához mind a felső, mind az alsó tároló esetén. Ezért a környezetvédők részéről jelentős ellenállással kell számolni tervezett létesítése esetén, ami meggyúsíthatja, vagy legalábbis késlelteti megvalósítását (a kialakítás önmagában is nagyon időigényes). Földalatti tárolók kialakítása javíthat ezen a helyzeten. Ezért vizsgálják ezt a megvalósítási formát (EPRI, DOE). De az jelentősen megnöveli a beruházás költségeit, ezért még nem nyert sehol sem alkalmazást.

**Tőkeigénye:**

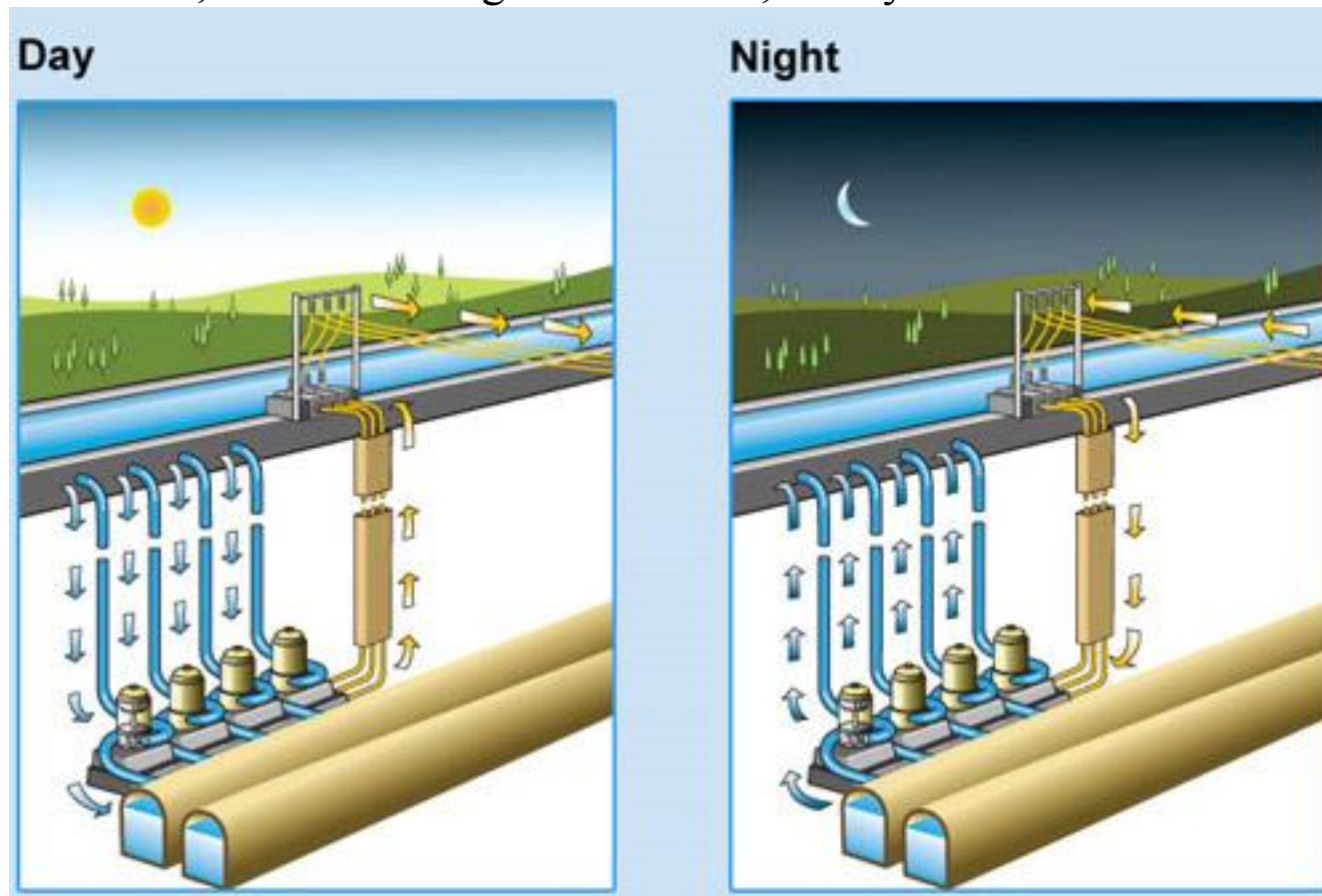
Az 1000-2000MW-os nagy teljesítmény tartományban szorítható le 1000\$/kW-os érték alá.

**Hatásfok:**

Az eredő (teljes ciklusra vonatkozó) hatásfok 70-80%. Tartományon belüli nagysága a rendszer méretétől, a cső átmérőjétől, a vízturbina típusától és a tárolók közötti szintkülönbségtől függ.

**Fejlesztési irányok:**

- Földalatti kialakítás, akár mesterséges csövekben, tartályokban is.



(RiverBankPower)

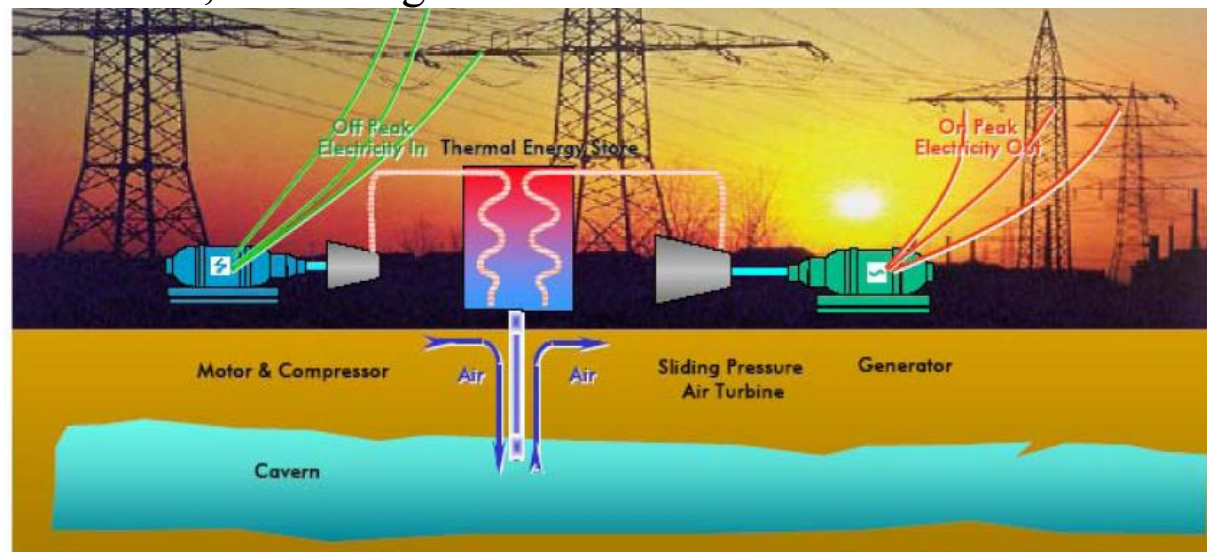
- Változtatható sebességű hajtások alkalmazása (ciklokonverter, kétoldalról táplált aszinkrongép).



### 1.5.2.2. Levegő sűrítés Compressed Air Energy Storage: CAES

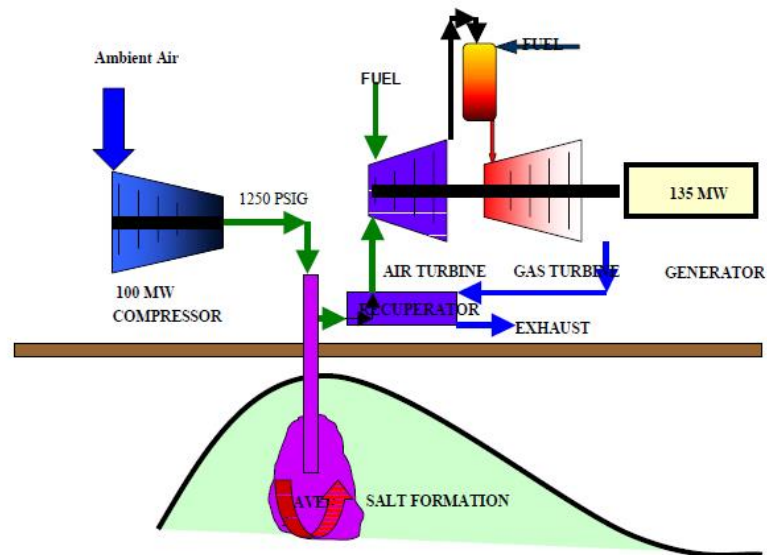
#### Működési elv, mechanizmus:

Csúcsidőn kívüli fölös energiát vagy megújuló energiafajtából előállított villamos energiát felhasználva ez a tárolási technológia **levegőt sűrít össze földalatti tárolóba** vagy csőrendszerbe. Az energiatárolás az összesűrített levegő **potenciális energiájában** tárolódik. Amikor az energiát használni akarjuk, a levegőt felmelegítve (bármilyen üzemanyaggal) és átvezetve expanziós turbinán **elektromos generátort hajtunk vele**. Energia-visszanyerésnél az ilyen erőművek az elsődleges energiahordozóból **harmadannyit égetnek el**, mint a hagyományos egyszerű ciklusú hőturbinák (és így harmadannyi szennyezőanyagot produkálnak). A sűrített levegő földalatti tárolására számos lehetőség kínálkozik: só vagy szikla-barlangok, porózus sziklák, kimerült gázmezők.



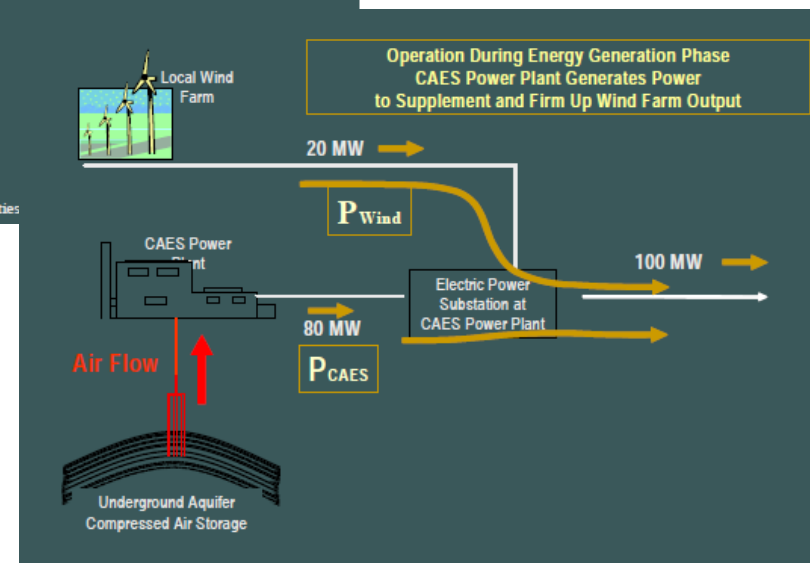
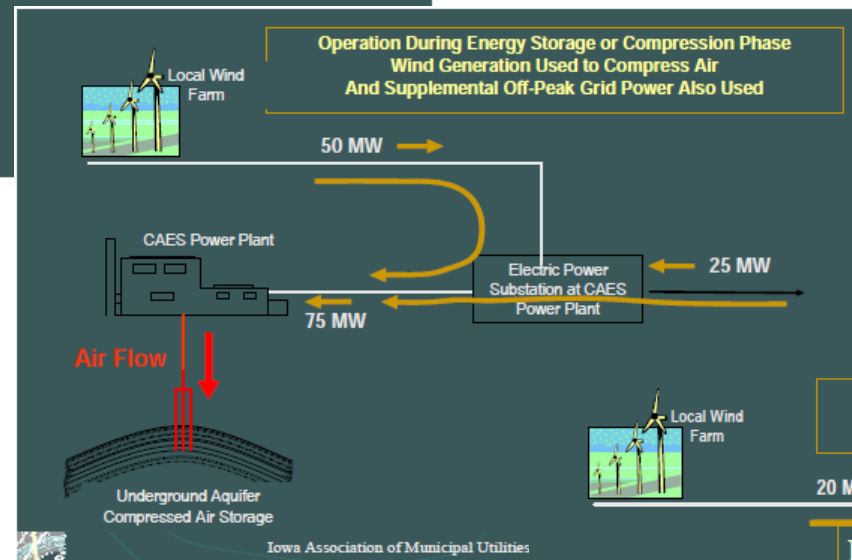
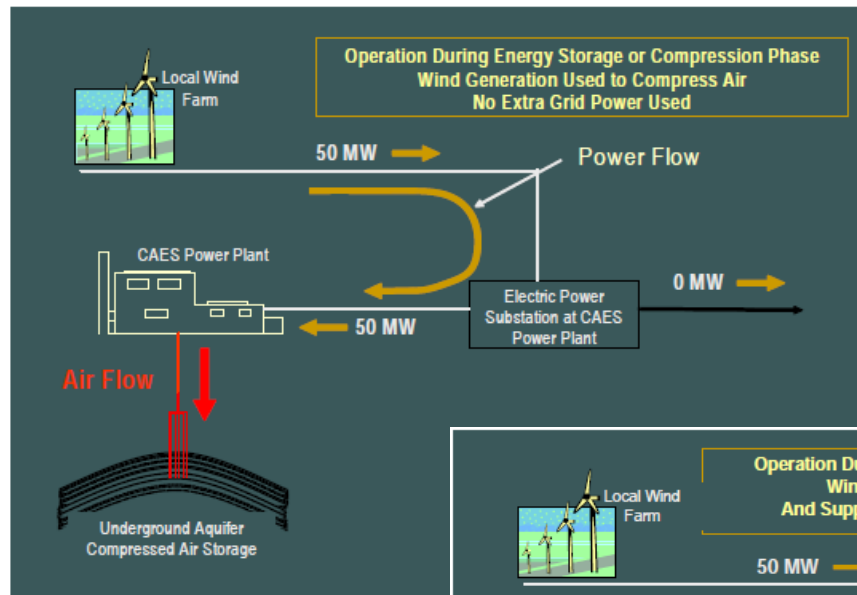
## Alabama Electric Cooperative - 110 MW Facility

### Schematic



### Előnyök:

- **Használt** (pl. Németországban 290MW-os egység működik 1978 óta, az USA  $\frac{3}{4}$ -ed része geológiailag alkalmas földalatti tárolók kialakítására), **kiforrott** és teljes egészében kidolgozott energiatárolási technológia, 'polcra levehető' egységekkel. Szélerőművel is integrálják (Iowa Stored Energy Plant USA 2005).
- **Széles teljesítmény és energia spektrum.** A tárolási idő nem korlátozott (tipikusan maximum pár nap).



### **Hátrányok:**

- **Nagy tőkeigény.** Pl. USA-ban 1991-ben épült rendszer 110MW 26 órás tároló 400\$/kW-os áron készült addig is gáztárolásra használt **kimerült olajmezőt** felhasználva.
- Viszonylag **hosszú kialakítási idő.** A fent említett rendszer 2,5 év alatt készült el.

### **Tőkeigénye:**

Ld. fent.

### **Fejlesztési irányok:**

- A technológia fejlesztése minél kevesebb elsődleges energiahordozó felhasználására (pl. veszteségi hő felhasználása).
- **Csőrendszer** használata földalatti tárolók helyett.
- Pneumatikus motor-generátor használata sűrítésre és energia visszanyerésre.
- Maximális hatásokra szabályozás.

### **Hatásfok:**

Az eredő (teljes ciklusra vonatkozó AC-AC) hatásfok körülbelül 85%.

### ***1.5.3. Mágneses energia tárolás: Szupravezetős mágneses energia tárolás (SMES)***

#### **Működési elv, mechanizmus:**

A csúcsidőn kívüli megtermelt energiát egyenárammá alakítják, majd beinjektálják egy **elektromágnes szupravezetős tekercsbe**, a tárolás a **mágneses mezőben** történik. A szupravezetőnek megfelelően alacsony hőfokon nulla ellenállása van, így a rendszer az energiát nagyon jó (98% körüli) hatásfokkal tárolja (a hűtési energia ebben az adatban nincs figyelembe véve). A tárolt  $Li^2/2$  energia az áram négyzetével arányos. Az elektromágnes lehet toroid és szolenoid kialakítású. A toroid kialakításnál kisebb a szórás, de a szupravezetős tekercs kialakításának ott nagyobbak a költségei.

#### **Előnyök:**

- Nagyon **gyors**, hálózati cikluson belüli átkapcsolás (17ms) lehetséges az energia betáplálás és az energia kivét között.
- Rövid idő alatt nagy energia szabadítható fel.
- **Kiforrott** technológia. Több 1-3MW-os 1-3s-os kisütési idejű egység működik 1998 óta főként teljesítmény minőség javítási és rendszerstabilizálási célra.

**Hátrányok:**

- Főként **rövid idejű tárolásra-kisütésre** alkalmas (pár másodperc). Hosszabb időre tervezésnél jelentős a méretnövekedés: 1MW, 1s→1m átmérő; 1000MW, 5 óra→1000m átmérő.

**Tőkeigénye:**

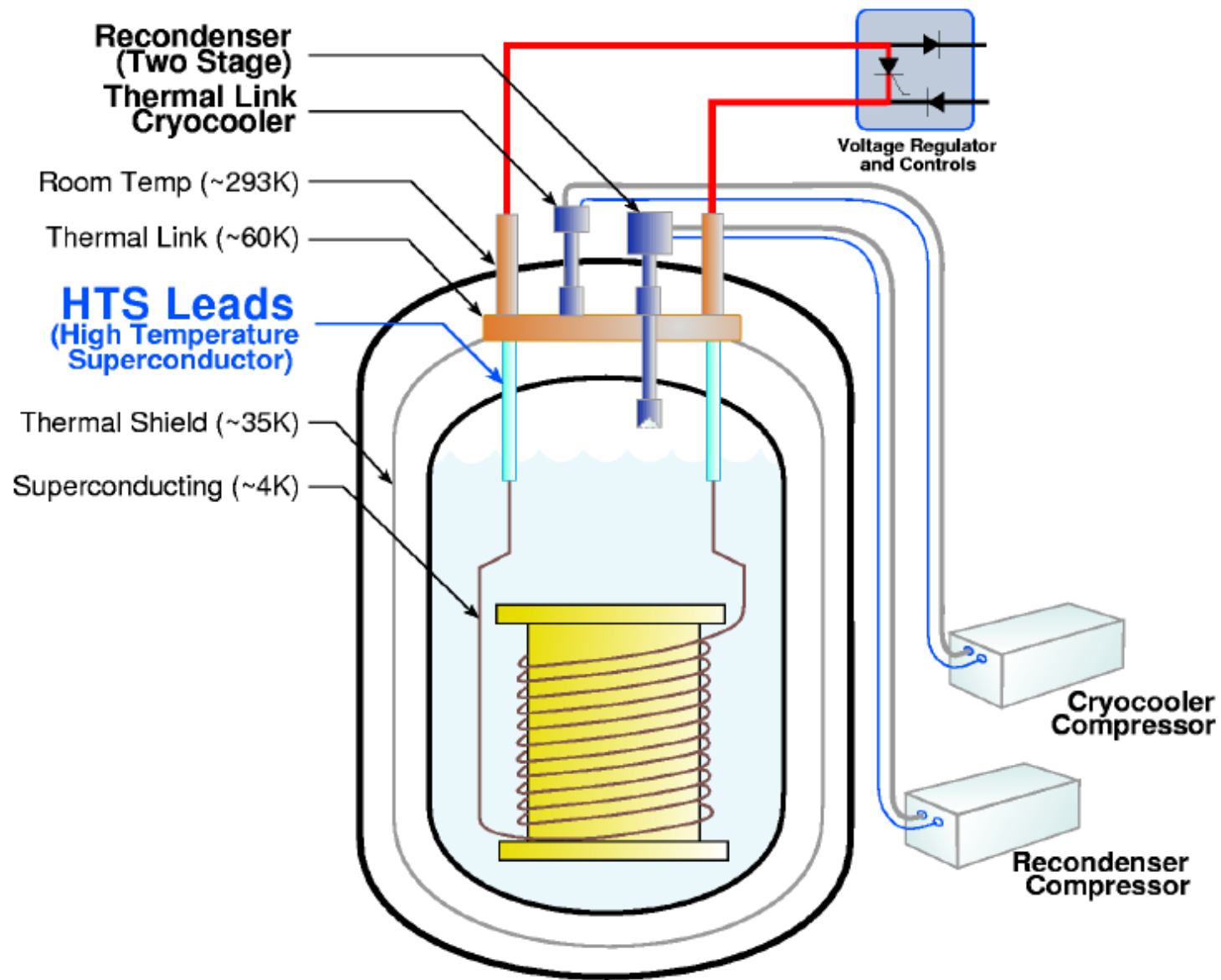
300\$/kW

**Fejlesztési irányok:**

- Magashőmérsékletű szupravezető anyagok használata.
- AC-DC-AC átalakítók új topológiái.

**Hatásfok:**

A fentemlített magas hatásfokot jelentősen csökkenti a hűtésre fordított energia: 21%.





**Gleisdorf, Austria**





### ***1.5.4. Akkumulátoros energiatárolás (Battery Energy Storage)***

#### **Működési elv, mechanizmus:**

Az energia tárolás **legrégebben ismert módja**, amely elektrokémia elven működik. Az elektródák folyékony, zselés vagy szilárd elektrolitban vannak és azzal elektrokémia reakcióba lépnek töltés és kisütés közben. A hagyományosnak mondható akkumulátor fajták a következők:

- Savas ólomakkumulátor (Lead Acid) (legrégebbi),
- Nickel-cadmium akkumulátor,
- Lithium Ion akkumulátor,
- Natrium-kén (Sodium Sulfur NaS) akkumulátor,
- Natrium-Nickel-Klorid (Sodium Nickel Chloride) akkumulátor.

A különféle típusok között **jelentős különbségek** vannak elsősorban

- az energiasűrűségben,
- ciklusok számában és a hatásfokban,
- karbantartás igényben (legkisebb a lithium ion esetén, bár töltésének erősen kontrolálni kell lennie),
- cellafeszültségben (lithium ionnál magas 3-4V, ez eredményezi a nagy energiasűrűségét),
- működési hőmérsékletben (NaS esetén ez magas, 300°C körüli), stb.

Főbb adatok az alábbi táblázatban láthatók:

	Lead acid	Nickel cadmium	Sodium sulphur	Lithium ion	Sodium nickel chloride
Achieved/demonstrated upper limit power	Multiple tens of MW	Tens of MW	MW scale	Tens of kW	Tens/low hundreds of kW
Specific energy (Wh/kg)	35 to 50	75	150 to 240	150 to 200	125
Specific power (W/kg)	75 to 300	150 to 300	90 to 230	200 to 315	130 to 160
Cycle life (cycles)	500 to 1500	2,500	2,500	1,000 to 10,000+	2,500+
Charge/discharge energy efficiency (%)	~80	~70	up to 90	~95	~90
Self discharge	2 to 5% per month	5 to 20% per month	#	~1% per month	#

# Although there is no self discharge reaction, there is a parasitic loss associated with maintaining the battery temperature.

# Example: NiCd Battery Storage, Alaska



**46 MW/15 min capacity**

**Előnyök:**

- A hagyományos elemek használata **kiforrott** és széles körben alkalmazott technológia, tartalmazva a környezetkímélő karbantartást, selejtezést, újrahasznosítást is. Ez a nagyteljesítményű egységekre is igaz: Southern California Edison Chino 12kV alállomásán 10MW, 4 órás savas ólomakkumulátor rendszer van üzemben 1988-óta. A világ legnagyobb akkumulátor telepe egy 48MWh-s NaS akkumulátorokkal (Tokyo Electric Power Ohito alállomás).
- **Gyors reagálási képesség** a töltésre (kevésbé a kisütésre).
- Moduláris, csendes, nem környezetszennyező, így közvetlenül a terhelés közelébe helyezhető.

**Hátrányok:**

- Érzékeny a hőmérsékletre.
- Érzékeny a mélykisütésre.
- Korlátozott töltési kisütési ciklusszám

**Tőkeigénye:**

Savas ólom akkumulátor: 200-300\$/kW

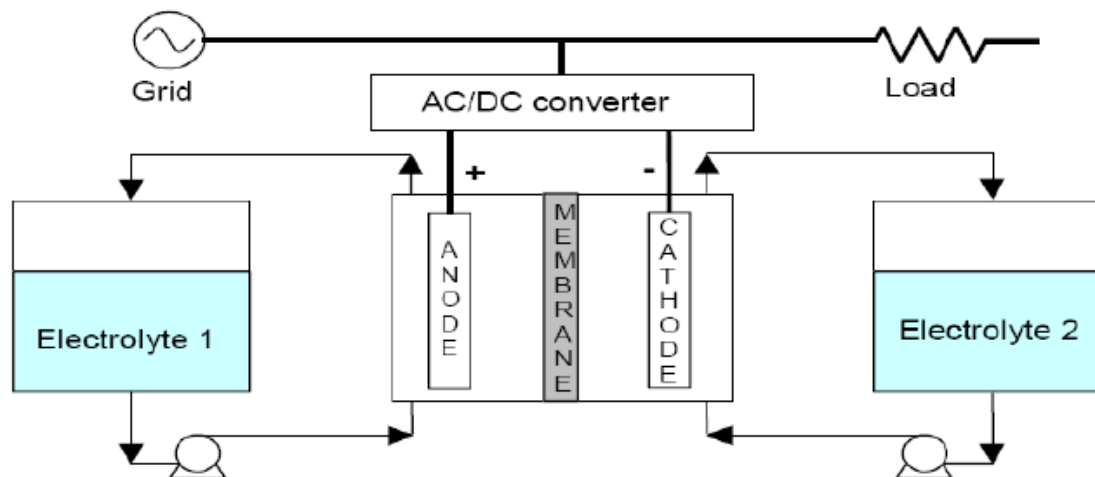
A többi újabb technológia drágább.

**Fejlesztési irányok:**

- Az akkumulátor cellák, **töltés-kisütés optimalizálása** a karbantartási igény csökkentése, az élettartam növelése érdekében.
- **Integrálása** egyéb energiatárolási módokkal. Például ultrakapacitással, úgy, hogy az egyik elektróda szén és ultrakapacitásként működik.
- Új technológiák alkalmazása: **Flow Batteries**. Mindegyik elektródához van egy külső elektrolit tartály. Az elektrolitot átáramoltatják az elektródák között, és itt jön létre az elektrokémiai reakció, az ioncsere egy ion cserélő membránon keresztül (1.4. ábra). Az alkalmazott technológiák a következők:
  - Natrium-Bromid (Sodium Bromid),
  - Natrium- Polisulfid (Sodium Polisulfid: Regenesys),
  - Vanadium Redox, Zink Bromid.

Tulajdonságaik a következő táblázatban láthatók:

	Vanadium	Zinc bromine	Regenesys™
Size range (MWh)	0.5 to 5	0.05 to 1	up to 120
Energy density (Wh/litre)	16 to 33	up to 60	
Cycle efficiency (%)	78 to 80	65 to 75	60 to 75
Cycle life (cycles)	> 12,000	> 2,000	
Unit design lifetime (years)	5 to 10	5 to 10	15



1.4. ábra. A Redox Flow Cell akkumulátor sematikus felépítése.

**Az elektródák tisztán csak az átáramló elektrolitok közti ion átvitelt szolgálják.** Így alapvetően nincs mélykisütési jelenség. Az energiatárolás az elektrolitban történik. Így a **teljesítmény és az energia egymástól függetlenül befolyásolható.** Egy adott teljesítményszintre (amit az elektródákat tartalmazó edény mérete határoz meg) a kapacitást csak a külső elektrolit tartály mérete határozza meg. Alkalmazásuk még viszonylag korlátozott számú, de tervben vannak extrém nagy kapacitású egységek is.

### **Hatásfok:**

Az AC-AC eredő hatásfok 60-80% között van a típustól és a töltési-kisütési ciklus gyakoriságától függően.

A Flow Battery-nél a hatásfok inkább 70% felett van:

Vanadium Redox: 75%

Zink bromide: 70%

### **Installálási példák:**

- Zinc Bromide 400kWh Battery, Advanced BESS - Host Detroit Edison (Sandia-Satcom-ZBB)
- VRB (Redox) 250 kW/520 kW/hr Battery (installed in 2000) VESS-Stellenbosch University, RSA. ESKOM Partner.
- Pacificorp - 250kW/2000kW/hr (8 hr) Mobile Unit (July 2002)
- Ni Cad-40 MW BESS - Largest Battery for Alaska. (GVEA)

### ***1.5.5. Hidrogén alapú energiatárolás (kémiai energia tárolás)***

#### **Működési elv, mechanizmus:**

Villamos energiából elektrolízis útján **hidrogén állítható elő**. Tartályban tárolható. A benne tárolt energia visszanyerése kétféle úton történhet: elégetve üzemanyagként használható motorokban, vagy üzemanyagcella üzemanyaga is lehet.

#### **Előnyök:**

- Nagyon **tiszta üzemanyag**, az energiatermelés mellékterméke a víz. Környezetbarát.
- **Nagy energiasűrűség.**
- A teljes teljesítményskála átfogható vele (pár kW-tól több MW-ig). (pl. Hunterson Hydrogen Project több tíz MW kapacitásra tervezi)
- A teljes energiaskála átfogható vele.
- A tárolási idő **több hónap** is lehet.
- A rendszer töltési sebessége, kisütési sebessége és tárolási kapacitása **egymástól függetlenül megválaszthatók.**
- Moduláris konstrukcióra alkalmas, lehetővé téve további modulok hozzáadását, a rendszer újrakonfigurálását.
- A hidrogén egyéb célokra is használható (pl. járművekben).
- Flexibilisen használható akár helyhez kötött, akár hordozható kivitelben. Maga az energiahordozó (tároló) is hordozható, szállítható.



**Hátrányok:**

- A hidrogén technológia egyes elemei még kidolgozásra várnak.
- Költséges.
- Alacsony nyomás alatti elektrolízissel az eredő hatásfok alacsony, 30-40% körüli.

**Tőkeigénye:**

Nagy tőkeigény elsősorban a még kidolgozatlan technológiák miatt.

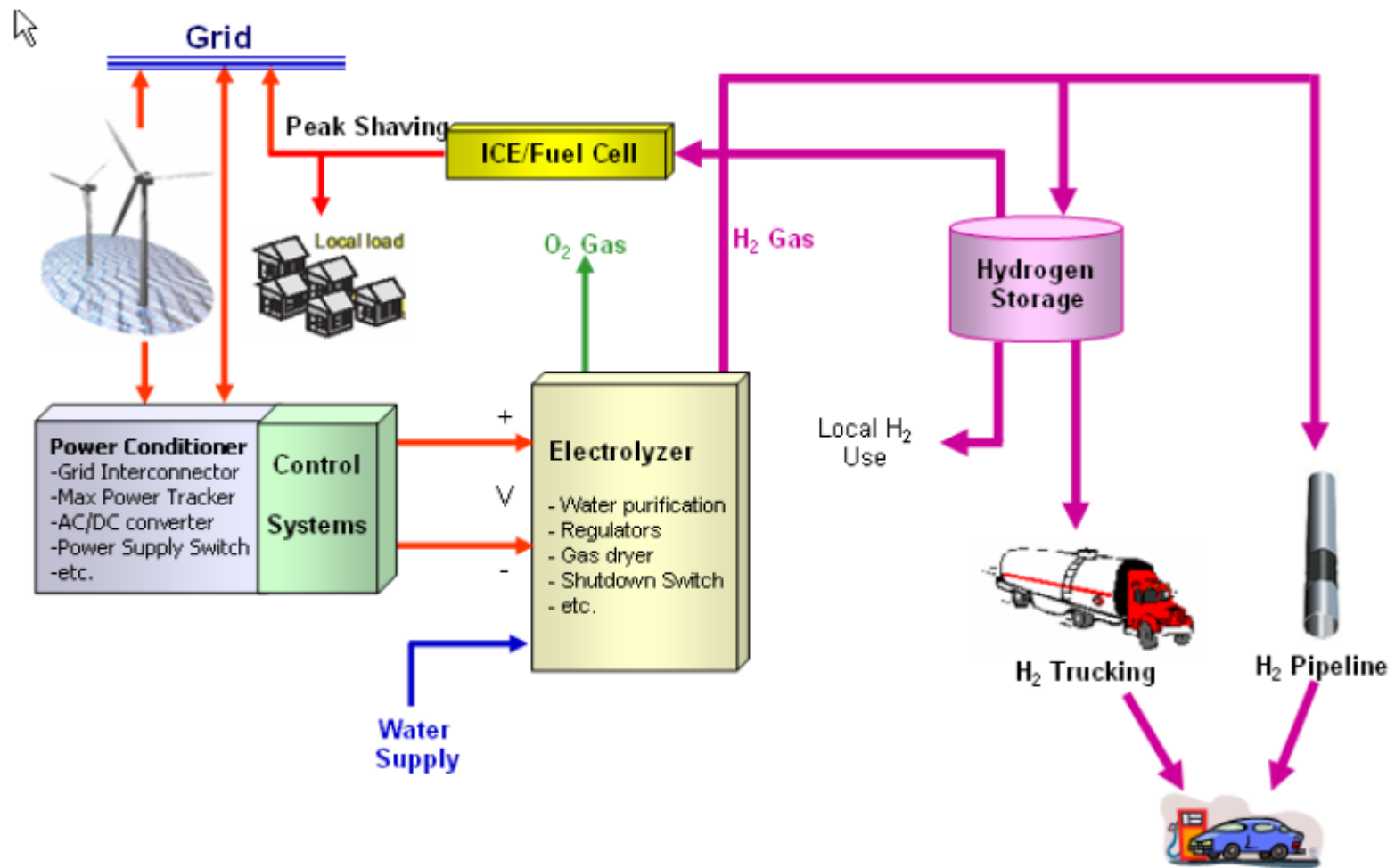
**Fejlesztési irányok:**

- Magas nyomású elektrolízis technológiájának kidolgozása.
- Az **üzamanyagcellák** fejlesztése, elsősorban a reverzibilis működés irányában.
- Megbízható, biztonságos (bár ezt néhányan megkérdőjelezzik), olcsó tároló rendszer. Tárolása történhet légnemű és folyékony halmazállapotban. Újfajta tárolási technológiák, anyagok is fejlesztés alatt állnak: metal hidridek alkalmazása csökkenti a méret és nyomás követelményeket; szénbázisú hidrogén tároló anyagok.

**Hatásfok:**

Alacsony nyomású elektrolízissel az eredő hatásfok alacsony, 30-40% körüli.

Magas nyomású elektrolízissel ezt 60-85% körül várják.



### ***1.5.6. Termikus energiatárolás***

Ebben az esetben az energiát **hő formájában** tároljuk, pl. ellenállásos melegítéssel hővé alakítva a villamos energiát. Ennek viszonylag alacsony a hatásfoka. Sokkal kedvezőbb eredmény érhető el, ha a primer energia közvetlenül alakítható át hővé (napenergia), ezért ezt a fajta energiatárolást **főként napenergia hasznosításnál** alkalmazzák. Ezért ezt itt részletesen nem tárgyaljuk.

A levegősűréssel szokták kombinálni, tárolva a sűrétskor keletkező hőt.

### 1.5.7. *Elektromos energiatárolás: Szuper kapacitás (ultrakapacitás, Electric Double Layer Capacitor: EDLC)*

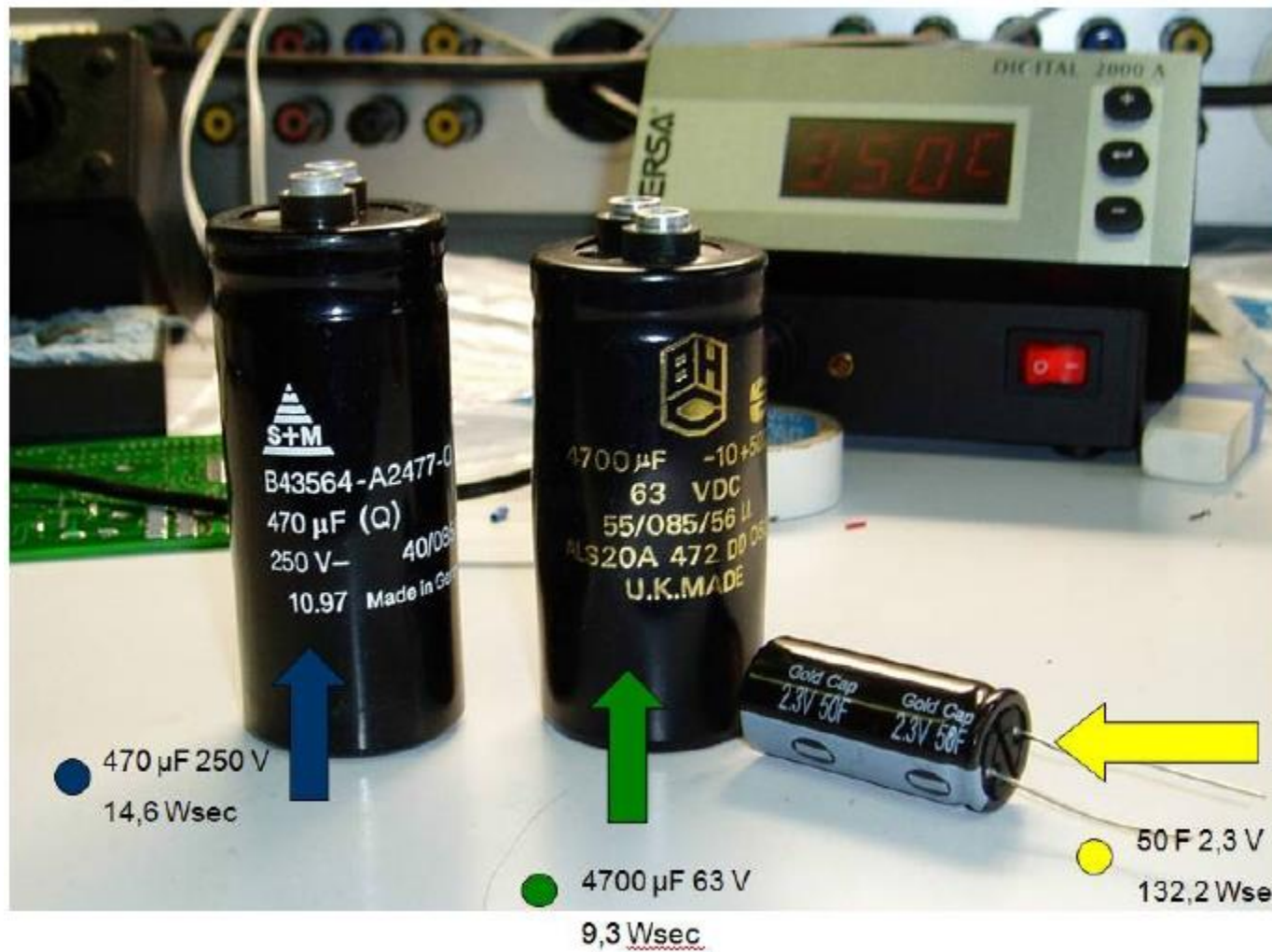
#### **Működési elv, mechanizmus:**

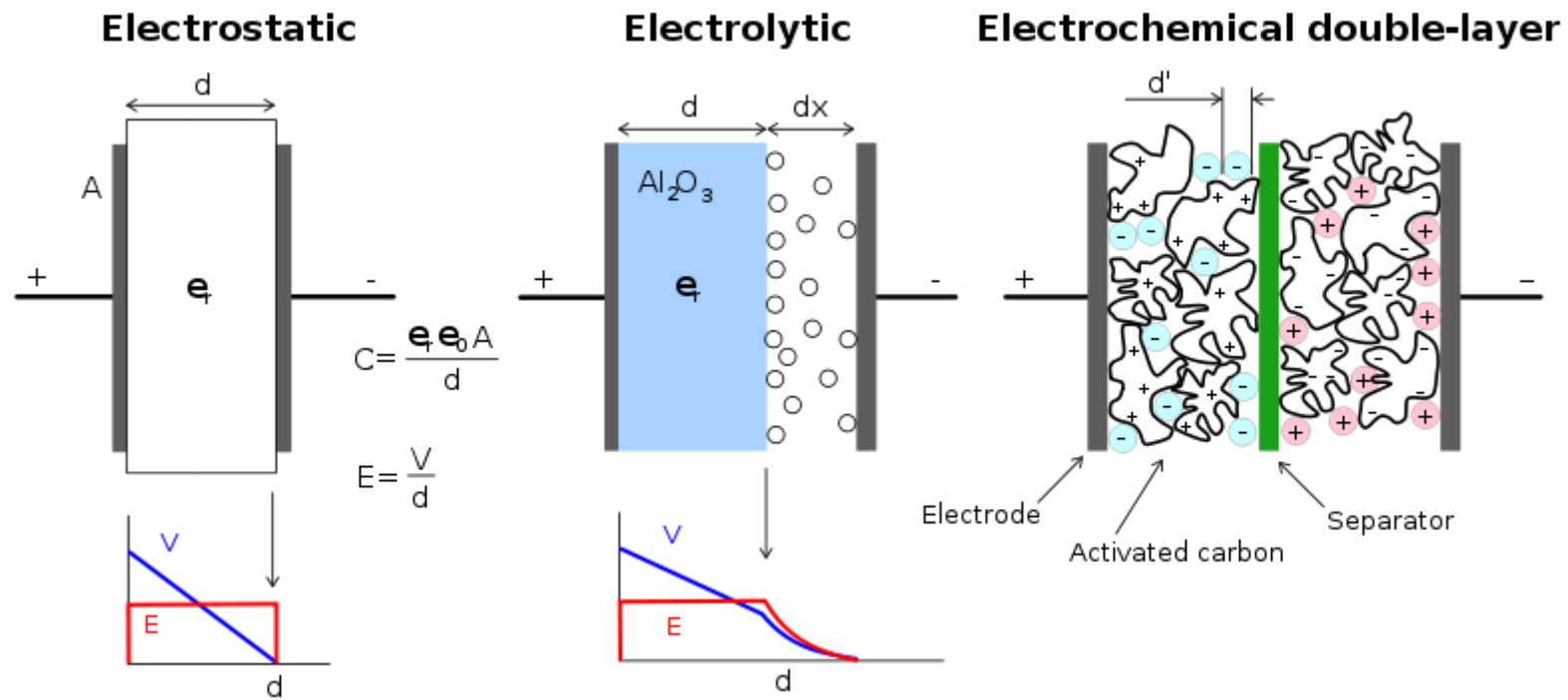
Ez az egyetlen módszer, amely **közvetlenül villamos energiát tárol**, kondenzátorban. A tárolt  $CU^2/2$  energia arányos a kondenzátor kapacitásával, az pedig a geometriai méretektől függ, **a felület nagyságával nő**. A hagyományos kondenzátorok használata energiatárolási célra nagyon nagy méretet eredményezne. Az ultrakapacitások speciális nagy felületű anyagból készülnek (az aktív szén felülete pl. **nagyon nagy**, akár  $2000\text{m}^2/\text{g}$  is lehet, az elektródatávolság pedig nagyon kicsi, kisebb  $1\text{nm}$ -nél). Így az energiatároló képessége a hagyományos kondenzátorokéhoz képest kb. két nagyságrenddel nagyobb.

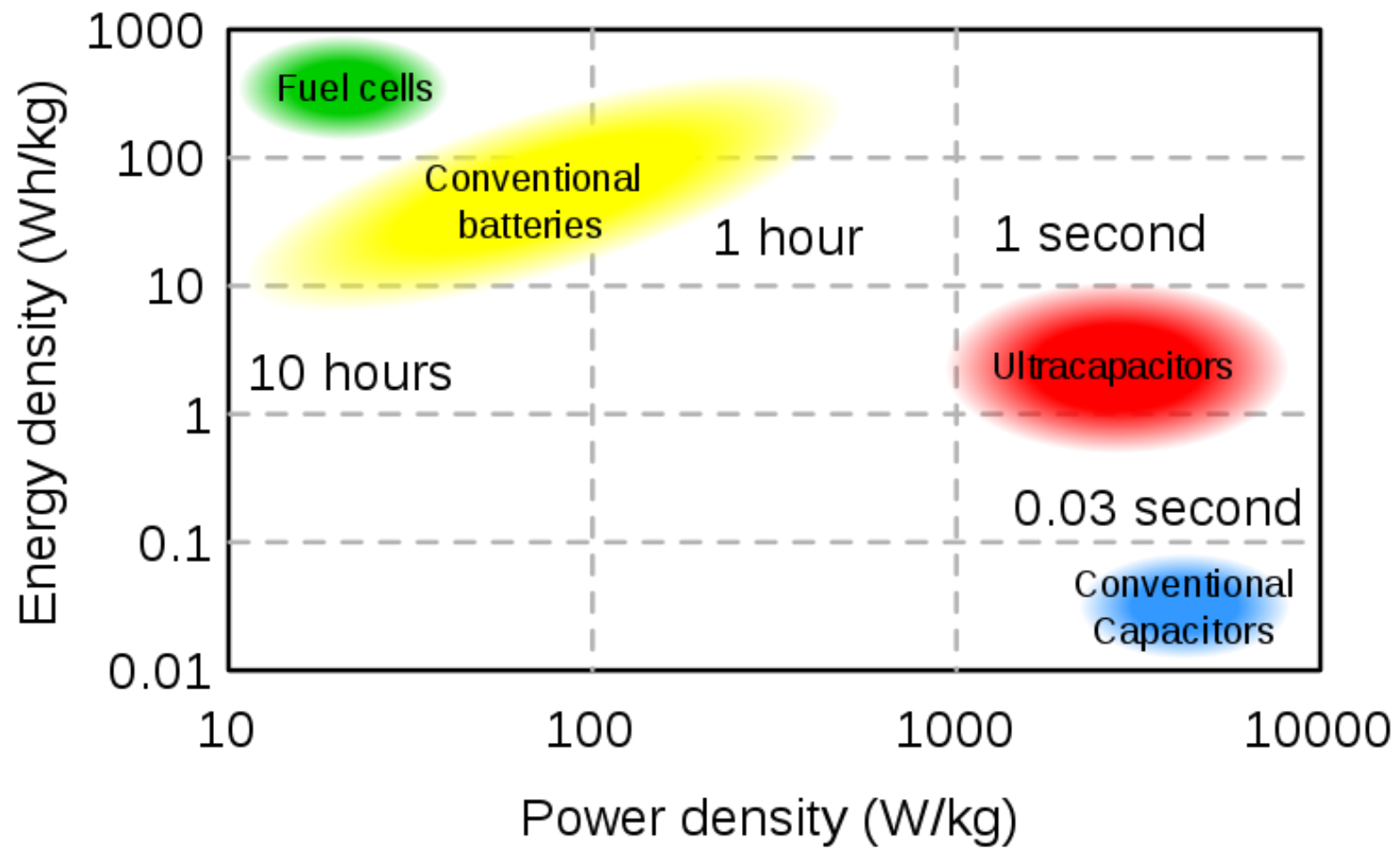
#### **Előnyök:**

- Kis méret.
- Jelentősen **gyorsabban tölthetők**, mint a hagyományos akkumulátorok.
- Az újratöltések száma csaknem végtelen, élettartama hosszú.
- Alacsony hőfokon is működőképes (akár  $-25\text{C}$  fokig).









### **Hátrányok:**

- Egy cella feszültsége **2V** környékén van. Soros kapcsolással növelhető az eredő feszültség, de a modulfeszültség biztonsági okokból most még 200-400V környékén van.
- Tárolási képesség viszonylag kicsi: kisebb mint 100kW.
- **Rövid idejű energiaszolgáltatásra** képes: 10s körül.

### **Tőkeigénye:**

Nincs adat.

### **Fejlesztési irányok:**

- Más energiatárolási módokkal való integrálás.
- Nagy feszültségű kialakítás fejlesztése.

### **Hatásfok:**

A közvetlen elektromos energiatárolás miatt magas az eredő hatásfok: 86%.



## 1.6. Az ismertetett energiatárolási módszerek összehasonlítása

### 1.6.1. Áttekintés

A közvetlen összehasonlítás végett táblázatosan foglaljuk össze az ismertetett módszerek tulajdonságait a rendelkezésre álló adatok alapján a forrás megjelölésével (néhol ellentmondások is vannak):

Típus	Lendkerék		Szivattyús tározó	Levegő sűrítés	SMES	Akkumulátor		Ultrakapacitás	Hirogén +üzemanyag-cella**
	Kis sebességű	Nagy sebességű				Hagyományos	Flow cell		
<b>Jellemző:</b>									
Ár (energiára vetített) \$/kWh	300 [4]	25000 [4]	10 [4]	3 [4]	500 [4]	200 [4]		82000 [4]	
Ár (teljesítményre vetítve) \$/kW	280 [4]	350 [4] 400-800 [5]	1000 [1] 600 [4]	400 [1] 425 [4]	300 [4] >300 [5]	250 [4] 500-100 [5]		300 [4]	
Kisütési hatásfok	90% [4]	93% [4]	87% [4]	79% [4]	95% [4]	85% [4]		95% [4]	
Eredő hatásfok		80-85% [1] 89 [3]	70-80% [1] 75 [2]	85 [1]	21% [5]	60-80% [3] 70-90 [4]	60-80% [3]	86 [3]	30-50* [3] 65-85%** [3]
Tárolási idő		20s-20min [3]	3min-3nap [3]	20min-3nap [3]	20s [3]	20s-8h [3]	20s-3nap [3]	20s [3]	3h-4hó [3]
Teljesítmény tartomány MW		0,001-0,25 [1]	300-350 [2] -1000 [4]	20-350 [1] 100-300 [2] >100 [4]	1-3 [1] 1-2 [2]	több 10 [1,4]	75 [3]	-0,1 [1,2]	60-85** [1] 75 ** [3] több 10** [4]
Energia sűrűség kWh/kg [10]		10				~28	~25	~15	
Ciklus élettartam (db)		>10000 [10]	>10000 [10]	>10000 [10]		500-pár1000 [4]	Pár 1000 [10]	>10000 [10]	
Élettartam (év)		>20 [5]			20-ig [5]	3-5 [5]			

## Worldwide installed storage capacity for electrical energy

Pumped Hydro

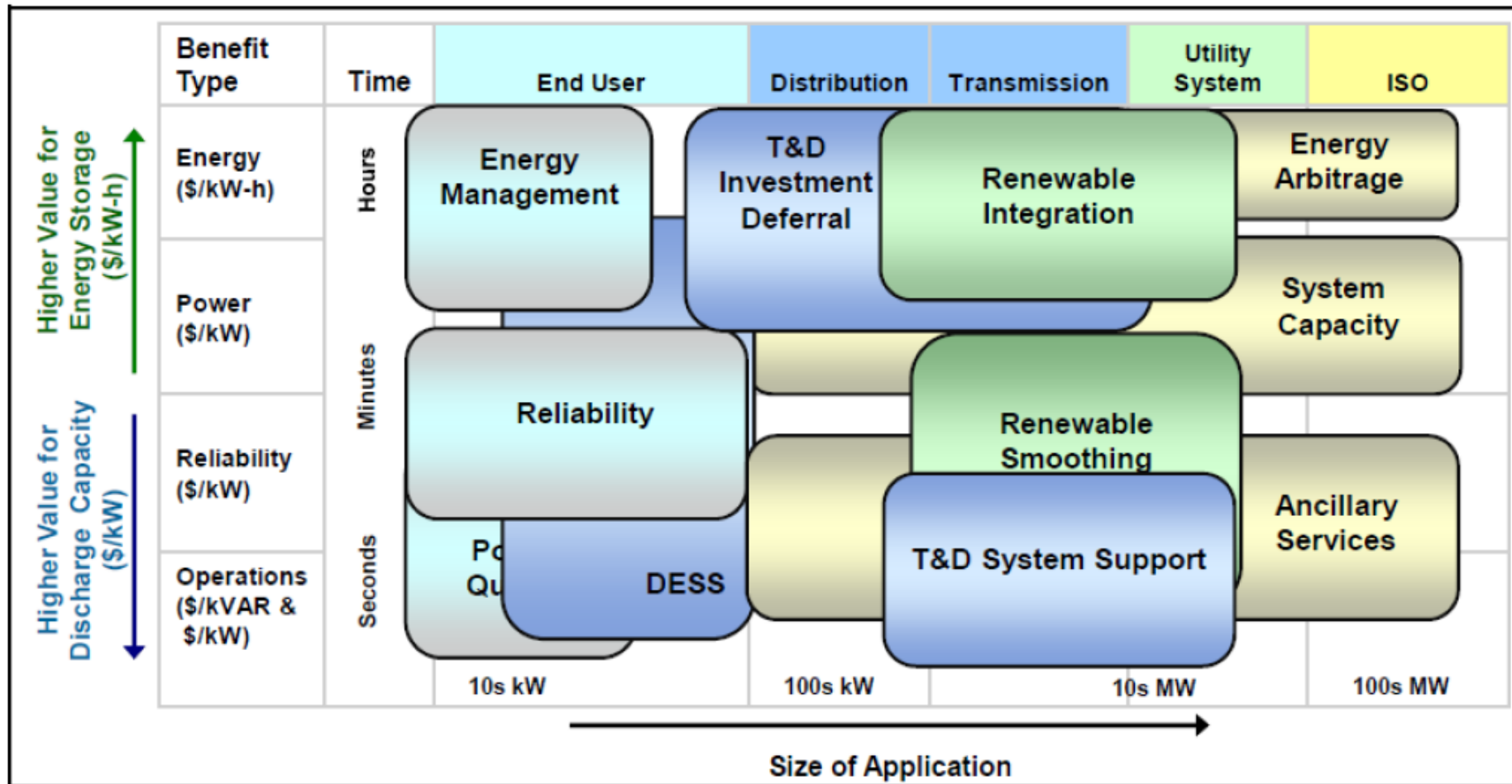
127,000 MW<sub>el</sub>

Over 99% of total storage capacity

- Compressed Air Energy Storage  
440 MW
- Sodium-Sulfur Battery  
316 MW
- Lead-Acid Battery  
~35 MW
- Nickel-Cadmium Battery  
27 MW
- Flywheels  
<25 MW
- Lithium-Ion Battery  
~20 MW
- Redox-Flow Battery  
<3 MW

Source: Fraunhofer Institute, EPRI

EPRI report, 2010

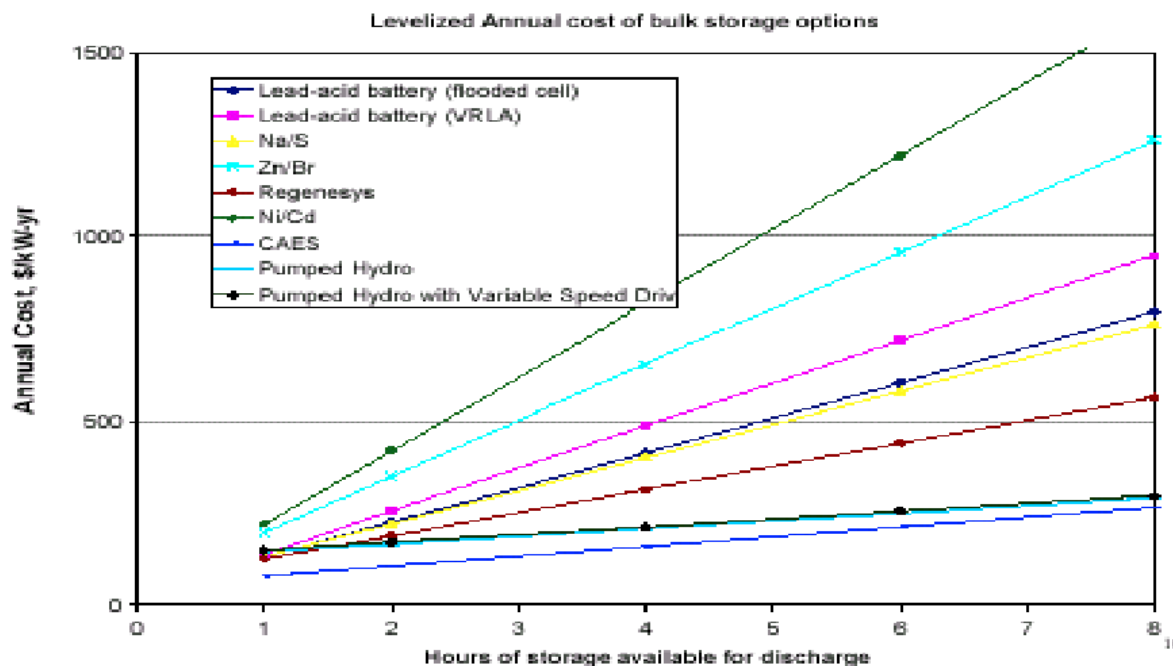


ISO = Independent System Operator  
 DESS = Distributed Energy Storage System

EPRI report, 2010

### 1.6.2. Ár összehasonlítás

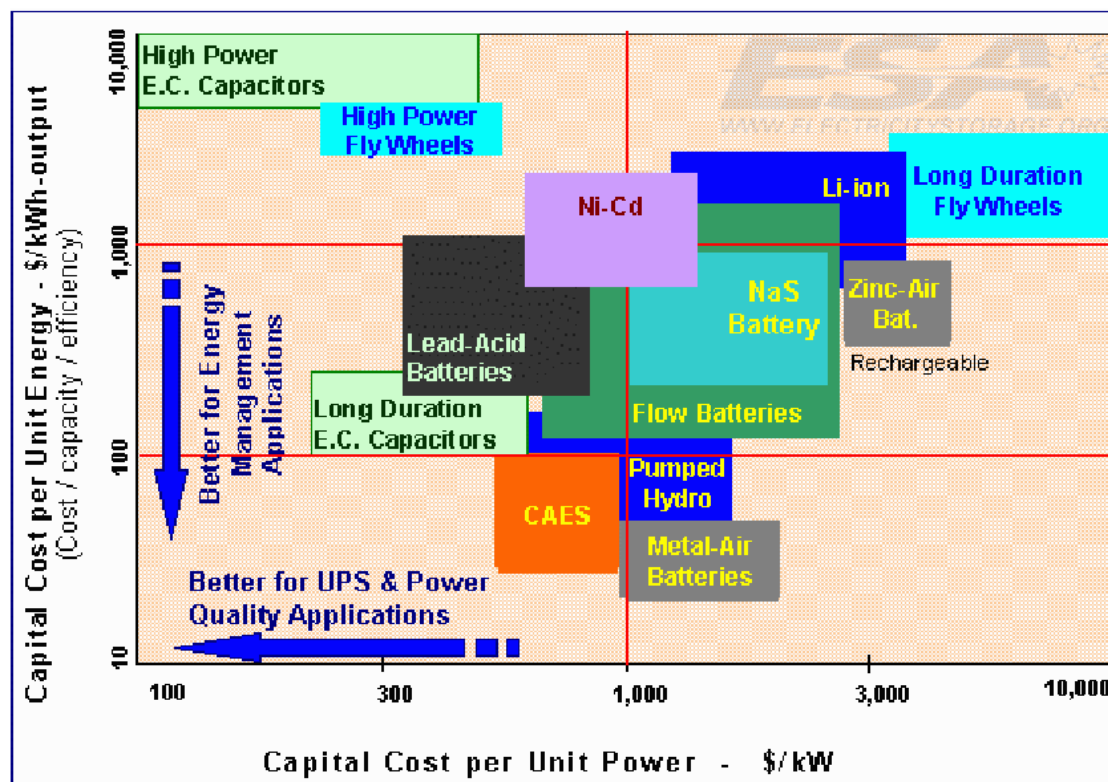
Csupán az installációs költségek figyelemvétele nem vesz figyelembe egyes változó költségekben lévő különbségeket, vagy a különféle technológiákkal kezelt energia mennyiségét. Ezért célszerű egy **egyenértékű éves költséget** definiálni, amely tartalmazza a **beruházási költség amortizációját, a működési és karbantartási költségeket, az üzemanyag költséget valamint az esetleges cserék költségeit.** Ezt mutatja az 1.5. ábra néhány energiatárolási módszerre:



1.5. ábra. Egyenértékű éves költségek összehasonlítása.

Az egyenértékű költségek alapján történő összehasonlítás szerint a **legolcsóbbak a levegősűrités és a vízszivattyúzás technológiái, míg a legdrágábbaknak a NiCd és a ZnBr akkumulátorok adódnak.**

Egy másdimenziójú összehasonlítás látható az 1.6. ábrán a **beruházási költségekre.** A levegősűrités technológiája itt is az olcsóbbak között van.

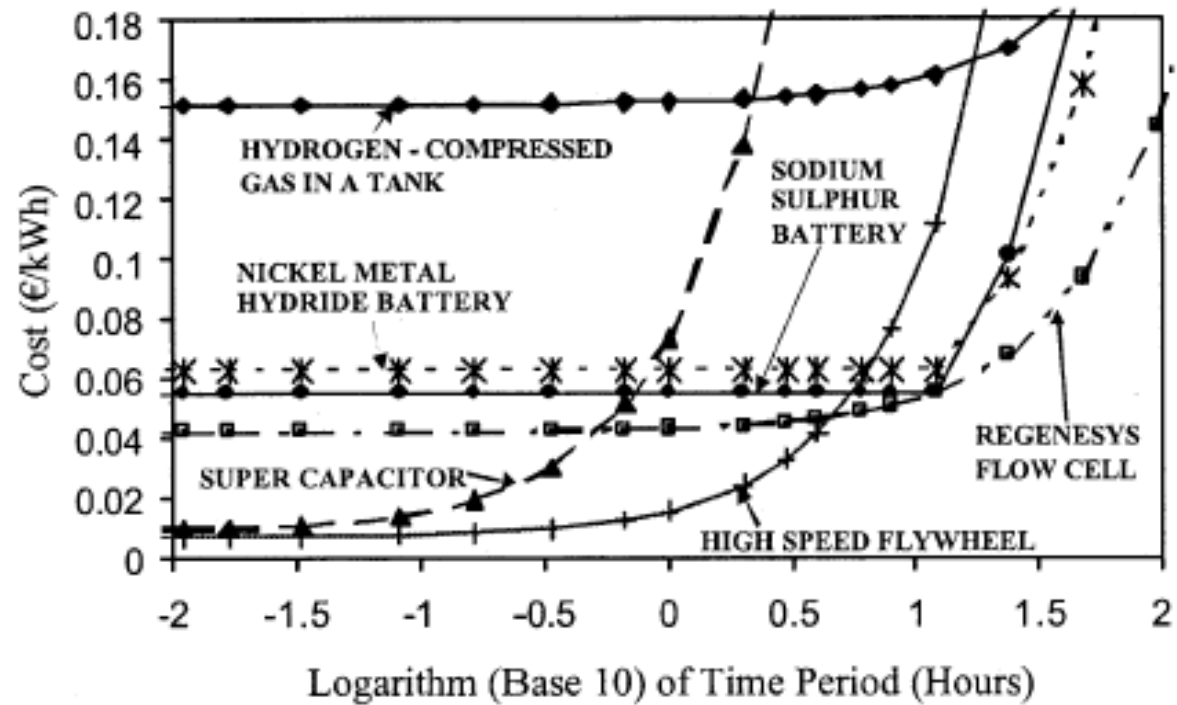


1.6. ábra. Beruházási költségek a fajlagos teljesítmény-energia síkon.

Megkönnyíti az összehasonlítást, ha az energiatárolás költségét fejezzük ki a különféle tárolási módokra **a visszanyert energiára vonatkoztatva**. A teljes éves költség és a hatásfok figyelembe van véve a számításoknál. A villamos veszteségek árát a tipikus Nagy Britanniai nagybani energiaárból számolták (0,05€/kWh).

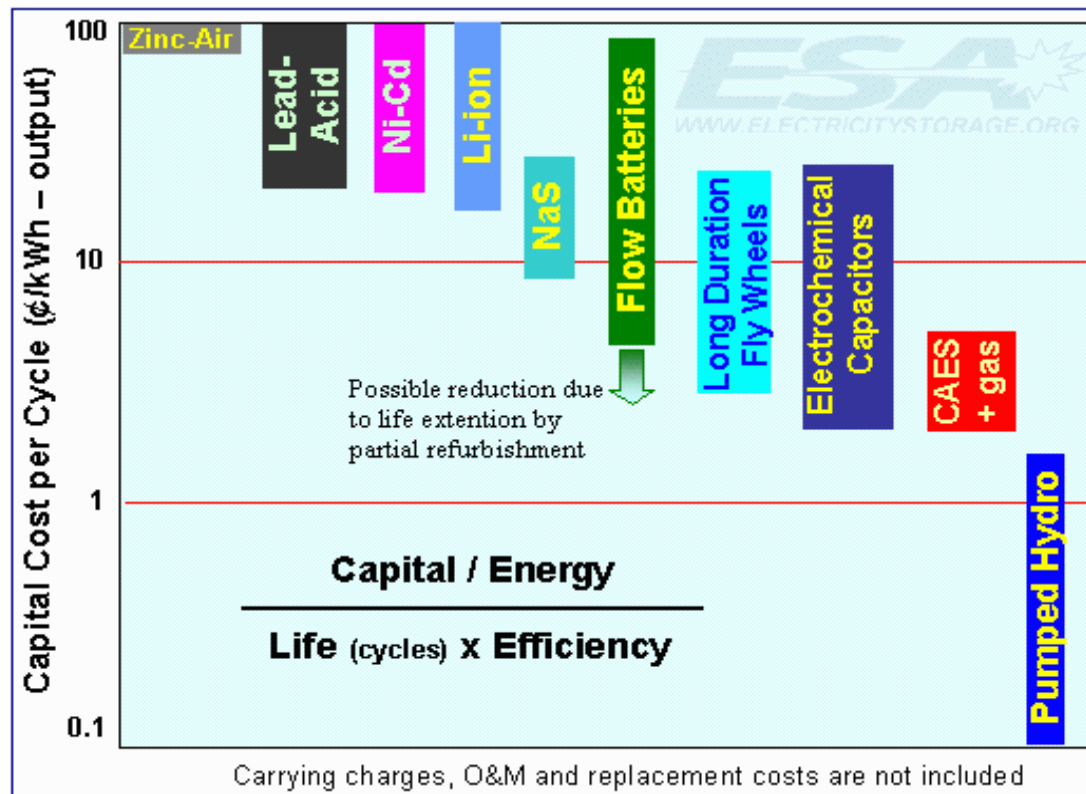
Csak a legolcsóbb technológiákat ábrázolták az 1.7. ábrán:

- A hidrogéntárolási technológiák közül csak egyet jelenítettek meg: a hidrogént elektrolízissel előállítva, tárolva nagynyomású tartályban és felhasználva **PEM** (Proton exchange membran) üzemanyagcellában.
- Az áttekinthetőség végett a savas ólomakkumulátort kihagyták az ábrából, mert költsége nagyon hasonló a sodium sulphur akkumulátoréhoz az 1 óra alatti időtartományban, felette pedig drágább, mint a két ábrázolt akkumulátor típus (sodium sulphur és nickel metal hidrid).
- Az egyes technológiák szempontjából a vízszintes szakaszok terjedelmét kell nézni, az határozza meg alkalmazhatóságukat adott időigény esetén. Utána költségeik jelentősen nőnek. Pl. a leghosszabb tárolási időre a hidrogén technológia és a Regenesys Flow Cell használható, míg legrövidebbre az ultrakapacitás.



1.7. ábra. Az energiatárolás költségeinek összehasonlítása.

Az összehasonlítás egyik legjobb szempontja lehet a **ciklusonkénti költség** gyakori ciklusok esetén. Ez van ábrázolva az 1.8. ábrán a ciklus élettartam és a hatásfok figyelembevételével. A szállítási, működési és karbantartási (Operation and Maintenance: O&M) és csere költségeket az adatok nem tartalmazzák. A **vízszivattyúzás és a CAES itt is az alacsonyabb költségek tartományában van, a NiCd pedig ilyen szempontból is drága.**

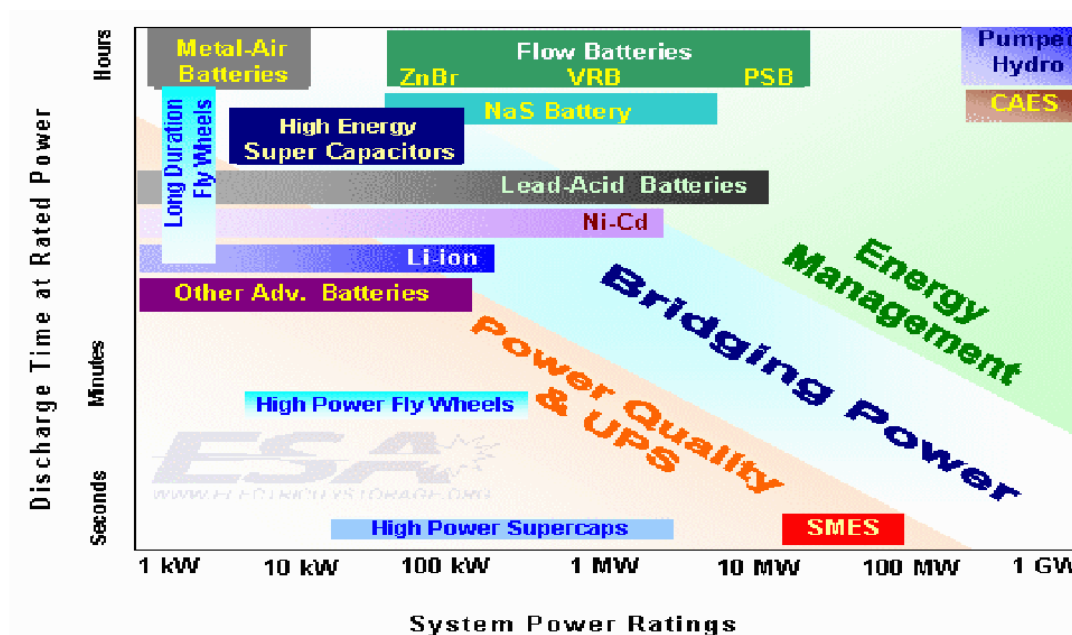


1.8. ábra. A különféle energiatárolási technológiák összehasonlítása a ciklusonkénti költségek alapján.



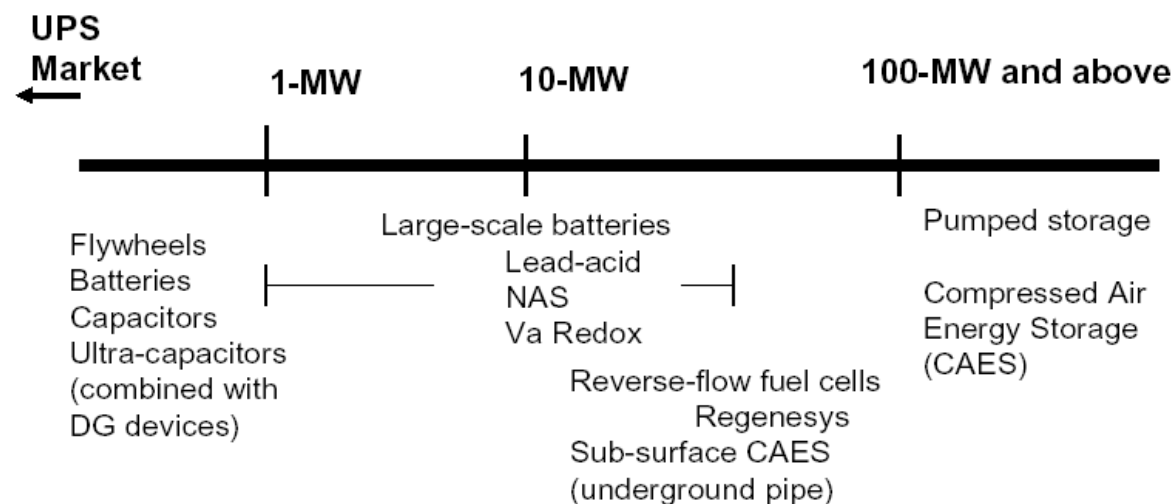
### 1.6.3. Műszaki paraméterek összehasonlítása

A különféle energiatárolási technológiák alkalmazási területet is tartalmazó spektruma látható az 1.9. ábrán teljesítmény és kisütési idő dimenziókban, visszatükrözve az előző megállapításokat:



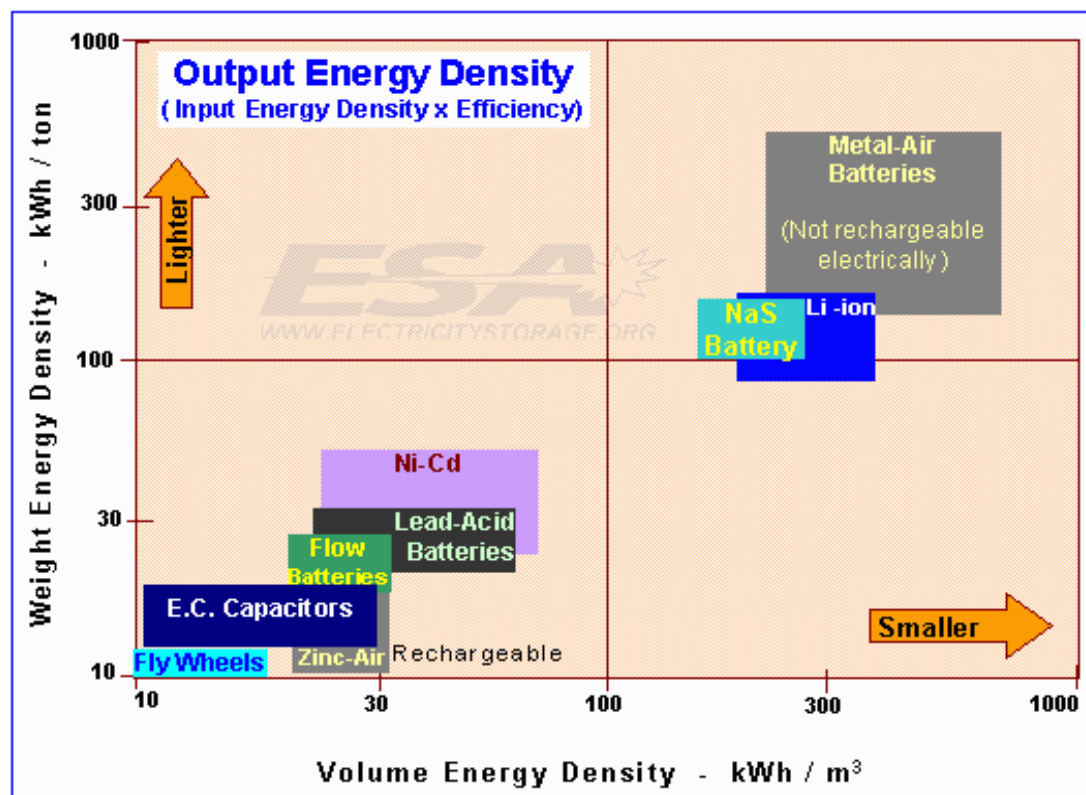
1.9. ábra. A különféle energiatárolási technológiák alkalmazási területére vetített spektruma a teljesítmény és kisütési idő dimenziókban.

Ennek egyik vetülete, a teljesítmény spektrum látható az 1.10. ábrán:



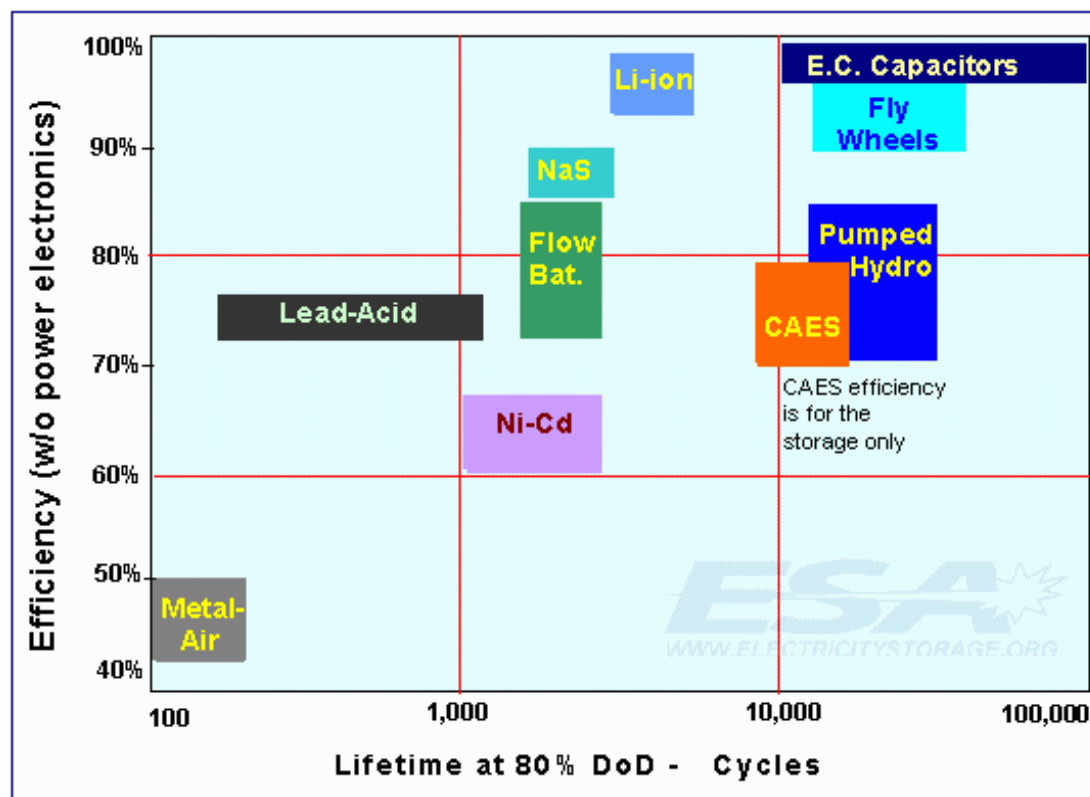
1.10. ábra. A különféle energiatárolási technológiák teljesítmény spektruma.

Az 1.11. ábrán a **fajlagos méret és súly dimenziókban** hasonlíthatjuk össze a különféle technológiákat. A fém-levegő (metal-air) akkumulátoroknak van a legnagyobb energiasűrűsége az ábra szerint. Azonban az villamosan újratölthető verziójának (Zinc-air) viszonylag kicsi ciklusélettartama és energiasűrűsége van és még csak fejlesztési stádiumban van. A lendkeréknek és az ultrakapacitásnak jelentős mérete és súlya van.



1.11. ábra. A különféle energiatárolási technológiák összehasonlítása a fajlagos súly és méret alapján.

A **hatásfok** és a **ciklus élettartam** két nagyon fontos paraméter. Mindkettő jelentősen befolyásolja a tárolás költségét: a kis hatásfok növeli a költséget, hiszen csak egy része használható fel az eltárolt energiának. Az alacsony ciklus élettartam szintén növeli a költséget, hiszen többször kell cserélni az egységeket. Az 1.12. ábrán ebben a két dimenzióban hasonlíthatjuk össze a különféle energiatárolási technológiákat. A jobb felső sarokban lévő tárolási technológiák (ultrakapacitás, lendkerék, vízszivattyúzás, levegősűrités) mutatkoznak a legkedvezőbbnek ebből a szempontból.



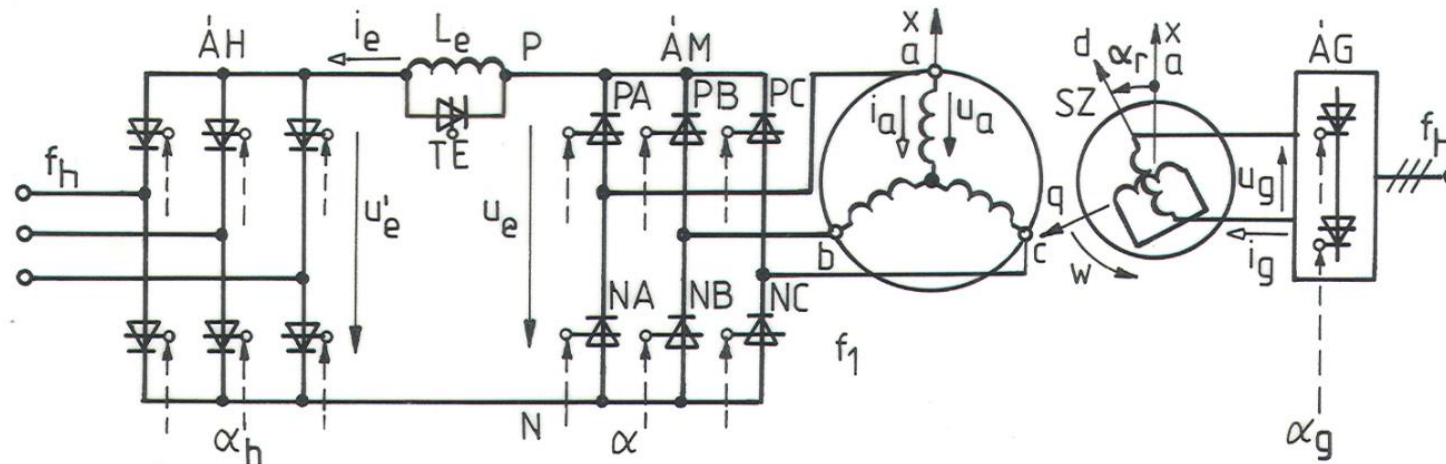
1.12. ábra. A különféle energiatárolási technológiák összehasonlítása a ciklus élettartam (80% kisütési mélység ciklusokra) és a hatásfok alapján.

**Irodalomjegyzék**

- [1] Robert B. Schainker: Executive Overview: Energy Storage Options For A Sustainable Energy Future, IEEE, Electric Power Research Institute (EPRI)
- [2] Juan Manuel Carrasco, Leopoldo Garcia Franquelo, Jan T. Bialasiewicz, Eduardo Galván, Ramón C. Portillo Guisado, Ángeles Martín Prats, José Ignacio León and Narciso Moreno-Alfonso: Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 53, NO. 4, AUGUST 2006. pp1002-1016.
- [3] John P. Barton and David G. Infield: Energy Storage and Its Use With Intermittent Renewable Energy, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 19, NO. 2, JUNE 2004. pp441-448.
- [4] Advanced Electricity Storage Technologies Programme. Energy Storage Technologies: A Review Paper, Dec. 2005, Dept. Environ. Heritage, Australian Greenhouse Office. [Online]. Available: <http://www.greenhouse.gov.au/renewable/aest/pubs/aest-review.pdf>
- [5] Robert Hebner and Joseph Beno: Flywheel Batteries Come Around Again, IEEE Spectrum, April 2002. pp46-51.
- [6] James A. McDowall: Opportunities for Electricity Storage in Distributed Generation and Renewables, IEEE, Saft America Inc.
- [7] The wind resource.
- [8] Energy Storage. Why so few pay attention (and what we can do about it) Presented at EESAT 2005, San Francisco by Jason Makansi, President, Pearl Street Inc.
- [9] <http://www.energystoragecouncil.org/>
- [10] <http://www.electricitystorage.org/>

## 1 Áramirányítós szinkronmotoros hajtás

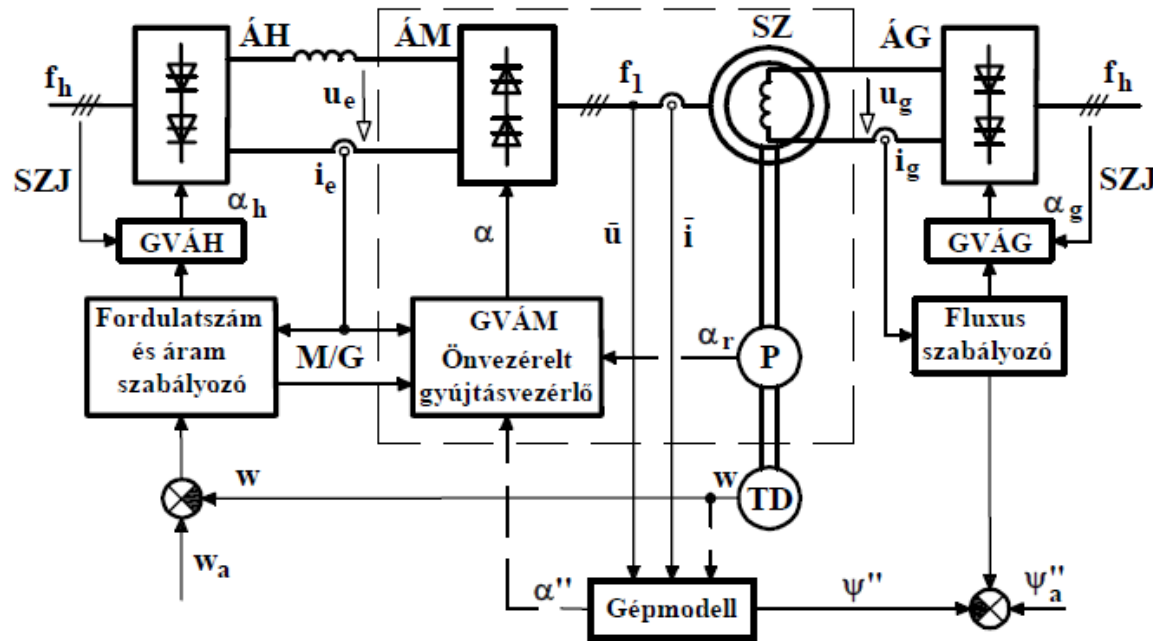
A 9.1.ábra szerinti áramirányítós szinkronmotorban (ÁSZM-ben) mind az ÁH hálózati, mind az ÁM motoroldali, mind az ÁG gerjesztőköri tirisztoros áramirányító **hálózati kommutációval üzemel**. Az ÁM tirisztorainak hálózati kommutációja csak addig lehetséges, amíg a **túlgerjesztett szinkrongép** képes biztosítani az ÁM áramirányító un. kommutációs meddő teljesítményét. Az ÁM áramirányítóban az SZ szinkrongép **szubtranzien্স feszültségei kommutálnak**, ezért ezt a kommutációt **gépi kommutációnak** is nevezik. Ez a táplálás az egyenköri  $L_e$  induktivitás miatt **áramgenerátoros jellegű**.



9.1. ábra: ÁSZM erősáramú kapcsolása.

Gyűjtésvezérléssel az ÁM áramirányító mind egyenirányító, mind inverter üzemre vezérelhető, így az egyirányú  $I_{ek} > 0$  egyenáramú középérték ellenére az ÁSZM motoros és generátoros üzemre egyaránt képes. A szinkrongép motoros üzemében ÁH egyenirányítóként, ÁM inverterként dolgozik és ilyenkor az egyenfeszültség középértéke  $U_{ek} < 0$ . Generátoros állapotban az

áramirányítók üzemmódot váltanak és ennek megfelelően  $U_{ek} > 0$  lesz. Az ÁM áramirányító tirisztorainak gyújtásában fázissorrendet cserélve mindkét forgásirányú hajtás és fékezés (**4/4-es üzem**) lehetséges.



9.2. ábra: Szabályozott ÁSZM blokkvázlata.

A 9.2. ábra fordulatszám és fluxus szabályozott ÁSZM hajtás blokkvázlatát mutatja. Az  $\alpha_h$  gyújtásszög a fordulatszám szabályozó, az  $\alpha_g$  gyújtásszög a fluxus (gerjesztés) szabályozó beavatkozó jele. Általában mindkét szabályozó alárendelt áramszabályozással rendelkezik. Az ÁM áramirányító  $\alpha$  gyújtásszögét az SZ szinkrongép jeleiről működtetett **önvezérelt gyújtásvezérlő** állítja be. Az önvezérlővel **optimalizálható a nyomatékképzés** motoros (M) és generátoros (G) üzemben.

Az ÁH hálózati és az ÁG gerjesztőköri áramirányítók egyenáramú kapcsolóiról nézve az önvezérelt ÁM áramirányítóról táplált szinkrongép (a szaggatottan körülhatárolt rész a 9.2. ábrában) **egyenáramú gépként viselkedik**. Igazi egyenáramú motoros hajtásban csak  $u_e$ -t és  $u_g$ -t lehet változtatni, a motoroldali áramirányító  $\alpha$  gyújtásszögének megfelelő kefehid helyzetet nem szokás állítani. Az ÁSZM-ben mindig **szükség van a gerjesztés szabályozására** a szinkrongép nagy armatúra visszahatása miatt.

Ideális,  $R_r=0$  ellenállású forgórész tekercset feltételezve véges  $i_g$  gerjesztő áramhoz  $\bar{u}_r = 0$  rotorfeszültség tartozik. Ezt figyelembe véve  $w_k=w$  kr.-ben a rotor feszültségegyenlet  $\bar{u}_r = \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} = 0$ , a rotor fluxusegyenlet  $\bar{\psi}_r = \bar{\psi}'' = L_m(\bar{i} + \bar{i}_r) = \bar{\Psi}''$ . Ez az un. **fluxusállandóság elve**: ellenállásmentes rövidrezárt tekercs nem engedi megváltoztatni a vele kapcsolódó fluxust. Eszerint munkapontonként állandó a forgórész tekercsel kapcsolódó  $\bar{\Psi}''$  szubtranzien fluxusvektor. Álló  $w_k=0$  kr.-ben a szubtranzien fluxusvektor, illetve az általa indukált szubtranzien feszültségvektor  $w = \frac{d\alpha_r}{dt} = \text{const.}$  szögsebességű munkapontot feltételezve (e fejezetben  $\alpha_r$ -rel jelöljük a rotor szögelfordulását):

$$\bar{\psi}'' = \bar{\Psi}'' e^{j\alpha_r}, \quad \bar{u}'' = \frac{d\bar{\psi}''}{dt} = j\omega\bar{\Psi}'' e^{j\alpha_r} = j\omega\bar{\psi}'' . \quad (9.1.a,b)$$

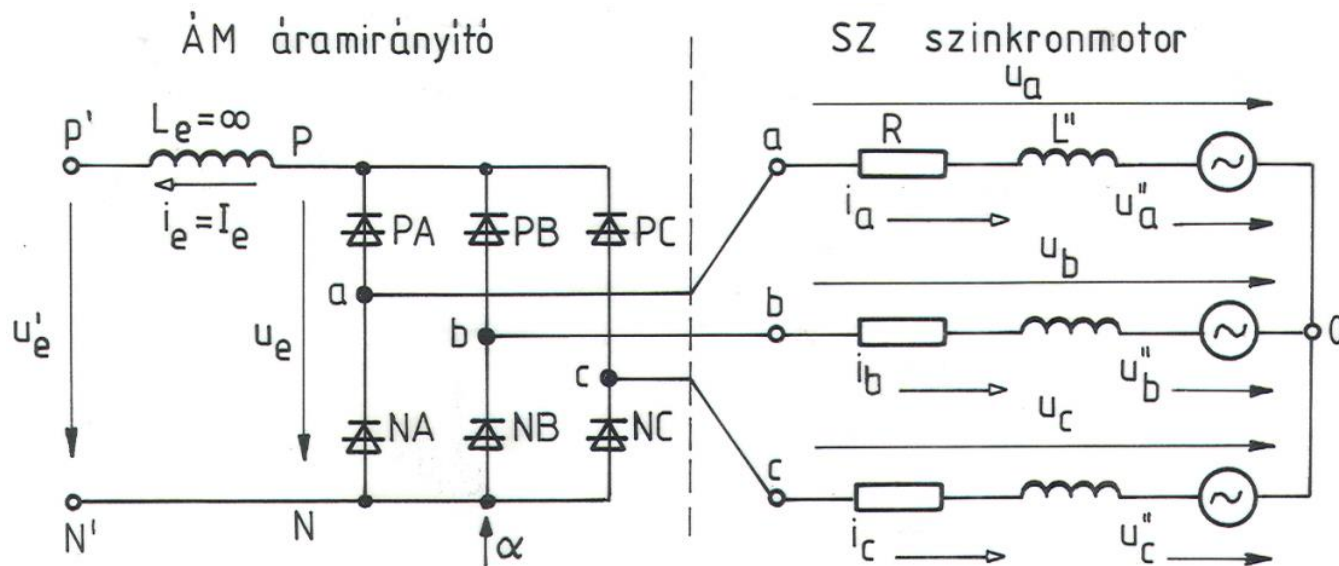
Ez azt jelenti, hogy állandósult üzemben  $\bar{\psi}''$  és  $\bar{u}''$  is  $W=W_1=2\pi f_1$  forgórész/alapharmonikus körfrekvenciával forog és amplitúdójuk  $\Psi''$  és  $U''$  állandó. Ha a  $t=0$  pillanatot  $u_a''$  pozitív maximumához vesszük, akkor

$$\bar{\psi}'' = -j\Psi'' e^{jWt}, \quad \bar{u}'' = U'' e^{jWt}, \quad U'' = W\Psi'' . \quad (9.2.a,b,c)$$

Az álló kr.-beli állórész feszültségegyenlet,  $\bar{\psi} = L\bar{i} + \bar{\psi}''$  figyelembe vételével:

$$\bar{u} = R\bar{i} + \frac{d\bar{\psi}}{dt} = R\bar{i} + L \frac{d\bar{i}}{dt} + \bar{u}'' . \quad (9.3)$$





9.3. ábra: ÁSZM motoroldali helyettesítő kapcsolása.

Ennek az egyenletnek az alapján felrajzolható az áramirányítós szinkron motorra a 9.3. helyettesítő ábra. Ezt az áramirányítós hajtással összevetve látható a nagyfokú hasonlóság  **$R \rightarrow R_t$ ,  $L'' \rightarrow L_t$ ,  $u_a'' \rightarrow u_{ta}$  megfeleltetéssel.**

Az ÁM motoroldali áramirányítóban a 6 darab tranzisztornak megfelelően  $6f_1$  változó alapharmonikus frekvenciával kommutáció megy végbe. Ideális tirisztorokat, sima  $i_e = I_e$  egyenáramot és  $R=0$  állórész ellenállást feltételezve alkalmazható a fedést figyelembe vevő **klasszikus hálózati kommutációs áramirányító elmélet** az állandósult állapotra (a fedést itt figyelembe kell venni, mert  $L''$  egy nagyságrenddel nagyobb, mint  $L_t$ ). Ez az egyenfeszültség és az egyenáram középértékére az alábbi összefüggéseket adja:

$$U_{ek} = K_u W \Psi'' (\cos \alpha + \cos \kappa), \quad I_e = K_i \frac{\Psi''}{L''} (\cos \alpha - \cos \kappa). \quad (9.4.a,b)$$

Itt  $K_u = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi}$ ,  $K_i = \frac{\sqrt{3}}{2}$ . Az  $\alpha$  gyújtásszöget, a  $\kappa$  **kialvási szöget** ( $\delta = \kappa - \alpha$  a fedési szög) és a  $\mu = 180^\circ - \kappa$  **kíméleti szöget** a szubtranzien feszültséghez kell viszonyítani. A 9.4. ábra az  $\bar{u}$  az kapcsolófeszültség,  $\bar{u}''$  szubtranzien feszültség (9.2.b) és az  $\bar{i}$  áram vektorokat mutatja inverter üzemben. Az NC tirisztor gyújtásával kezdődő  $60^\circ$ -os szakaszt megvastagítottuk. A (9.3) összefüggés alapján ( $R=0$  közelítéssel) az  $\bar{i}$  áramvektor sebessége:

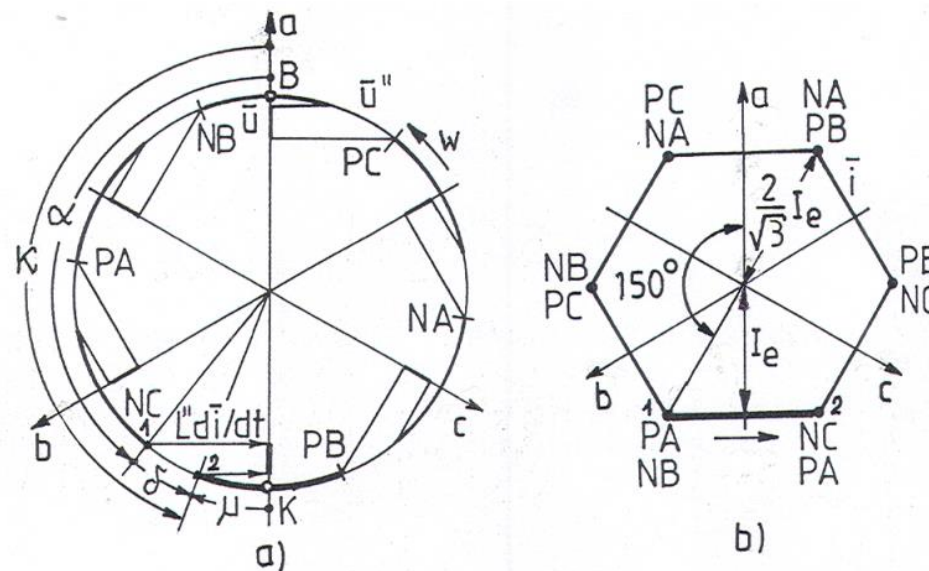
$$\frac{d\bar{i}}{dt} = \frac{\bar{u} - \bar{u}''}{L''} \quad (9.5)$$

Pl. ezzel a sebességgel megy át az NB  $\rightarrow$  NC kommutáció alatt az  $\bar{i}$  áramvektor az 1 jelű pontból a 2 jelű pontba. Az  $L'' \frac{d\bar{i}}{dt}$  sebesség vektort figyelembe véve bejelöltük az ábrában  $\bar{u}''$ -nél az **NC tirisztor** B begyújtási ( $\alpha = 0^\circ$ , természetes kommutációs pont, nullátmenet után  $30^\circ$ ) és K kialvási ( $\mu = 0^\circ$ ) határpontjait. Generátoros/egyenirányító üzem működhet az  $\alpha = \alpha_{\min} = 0^\circ$ -os begyújthatósági határon is. Motoros/inverter üzemben biztonsági okokból nem szabad elérni  $\kappa = \kappa_{\max} = 180^\circ$ -os kialvási határt, hanem **maximálisan csak kb.  $\kappa_{\text{meg}} = 160^\circ$ -os kialvási szög engedhető meg.**

9.4. ábra: Vektorpályák  $i_e = I_e$  és  $R=0$  közelítéssel.

a. Feszültségvektorok,  $\alpha = 140^\circ$ ,  $\delta = 20^\circ$ ,  $\kappa = 160^\circ$ ,  $\mu = 20^\circ$ ,

b. Áramvektor.



Állandósult állapotban a **veszteségeket elhanyagolva** a  $P_{mk}$  mechanikai teljesítmény középérték megegyezik a  $P_{\ell k}$  légrésteljesítmény és a  $P_{ek}$  egyenköri teljesítmény középértékével (motoros/inverter üzemben  $P_{mk} > 0$ ,  $P_{ek} < 0$ ):

$$P_{mk} = M_k W = P_{\ell k} = M_k W_1 = -P_{ek} = -U_{ek} I_e . \quad (9.6)$$

A (9.4) és (9.6) összefüggésekből kifejezhető a szögsebesség és a nyomaték középértéke:

$$W = W_1 = \frac{U_{ek}}{K_u \Psi'' (\cos \alpha + \cos \kappa)} , \quad M_k = \frac{-U_{ek} I_e}{W} = K_m \frac{\Psi''^2}{L''} (\cos 2\kappa - \cos 2\alpha) . \quad (9.7.a,b)$$

A **legnagyobb nyomatékot (optimális nyomatékképzés)** motoros üzemben a  $\kappa_{max}=180^\circ$ -os kialvási határon, generátoros üzemben az  $\alpha_{min}=0^\circ$ -os begyújtási határon képezi az ÁSZM. A nyomaték egyenleteket figyelembe véve:

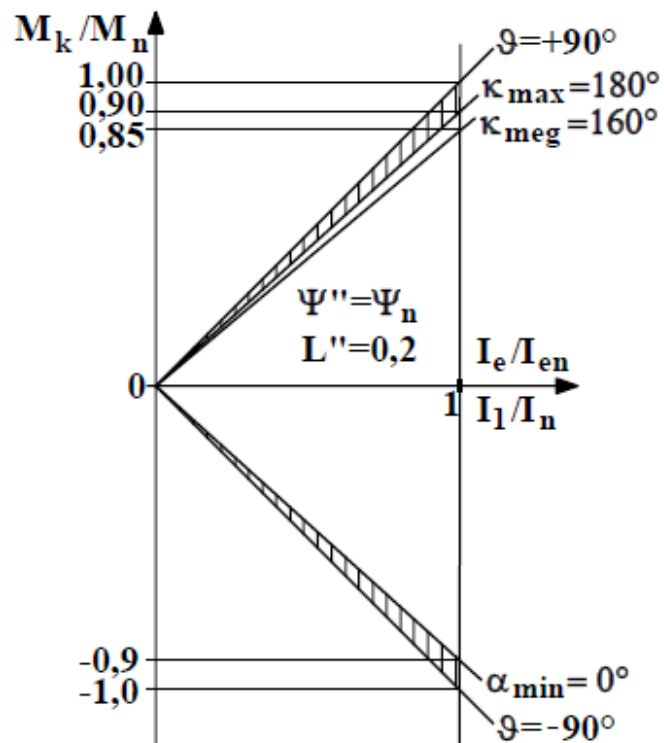
$$\bar{m} = \frac{3}{2} \bar{\Psi}'' \times \bar{I} , \quad m = \frac{3}{2} \Psi'' i \sin \vartheta , \quad M_k = \frac{3}{2} \Psi'' I_1 \sin \vartheta_1 \quad (9.8.a,b,c)$$

szerint is számítható. Az  $I_1$  alapharmonikus áram amplitúdó jó közelítéssel arányos az  $i_e=I_e$  egyenárammal:

$$I_1 \cong \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_e . \quad (9.9)$$

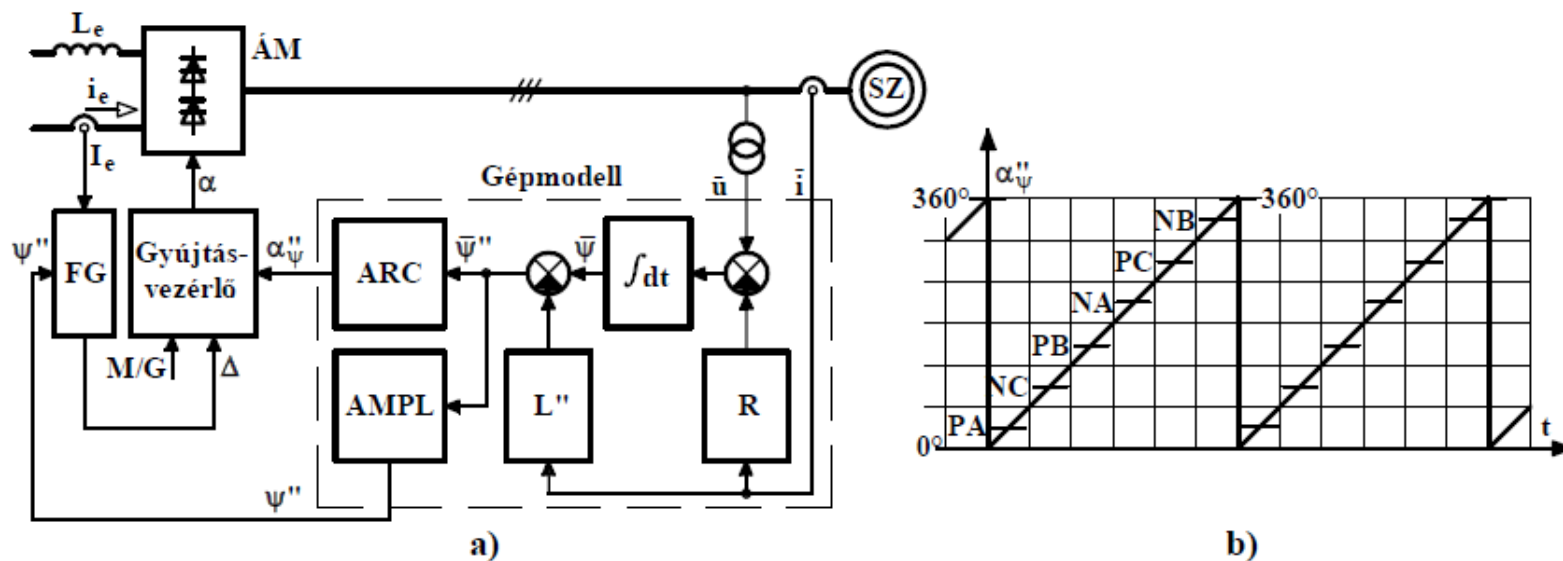
Adott  $\Psi''$  és  $I_1$  mellett a legnagyobb  $M_k$  érték  $\vartheta_1=\pm 90^\circ$  nyomatékszögnél van. A 9.5. ábra az  $M_n = \frac{3}{2} \Psi_n I_n$  névleges nyomatékra viszonyított  $\frac{M_k}{M_n}$ -t mutatja az  $\frac{I_1}{I_n} \cong \frac{I_e}{I_{en}}$  függvényében ( $I_{en} \cong \frac{\pi}{2\sqrt{3}} I_n$ ). Az ábrában ÁM gépi kommutációjából adódó  $\alpha_{min}=0^\circ$ -os és  $\kappa_{max}=180^\circ$ -os működési határok mellett berajzoltuk a biztonságos motoros/inverter üzemet eredményező  $\kappa_{meg}=160^\circ$ -os kialvási szöghöz tartozó nyomaték-áram jelleggörbét is. **Megállapítható, hogy a külső gerjesztésű egyenáramú motorhoz hasonlóan a nyomaték arányos az egyenárammal.** Motoros üzemben  $M_k=K_M I_e$ , generátorosban  $M_k=K_G I_e$ ,  $K_M > 0$ ,  $K_G < 0$ . A sraffozott részben csak **kényszer kommutációval** (feszültséginverteres, vagy áraminverteres táplálással) lehet üzemelni. Adott  $M_k$  nyomatékot a lehető legkisebb  $I_1$  árammal célszerű létrehozni.

Ehhez ÁSZM-nél kétállapotú **önvezérelt gyűjtésvezérlő** kell, amelyik motoros/inverter üzemben  $\kappa = \kappa_{\text{meg}}$ , generátoros/egyenirányító üzemben  $\alpha = \alpha_{\text{min}}$  üzemet biztosít. A gyakorlatban a tengely  $\alpha$  szöghelyzetéről és a  $\bar{\psi}'' = \psi'' e^{j\alpha''}$  szubtranzien fluxusvektor  $\alpha''_{\psi}$  szöghelyzetéről működtetett megoldások terjedtek el. Az **előbbi tengelyről való gyűjtésvezérlésnek, az utóbbit fluxusról való gyűjtésvezérlésnek nevezik.**



9.5. ábra:  
Nyomaték középérték az  
alapharmonikus áram függvényében.

A  $\bar{\psi}''$  subtransziens fluxusvektorról való gyújtásvezérlő **mezőorientált gyújtásvezérlést eredményez**. A 9.6.a. ábra a blokkvázlatot, a b. ábra a gyújtási szinteket mutatja  $w > 0$ -ra (a,b,c fázissorrendre). A  $\bar{\psi}'' = \bar{\psi}_r$  fluxusvektort **állórész gépmmodell** állítja elő, az  $\alpha''_{\psi}$  szöget az ARC egység, a  $\psi''$  amplitúdót az AMPL egység képezi. Az M/G motoros/generátoros jel ugratja a komparálási szinteket a  $\kappa_{meg}$  és az  $\alpha_{min}$  üzemeknek megfelelően. Motoros üzemben a  $\kappa = \kappa_{meg} = const.$  kialvási szöghöz a munkaponttól függő  $\alpha = \kappa_{meg} - \delta$  gyújtásszög tartozik. Emiatt ilyenkor az FG függvénygenerátor  $\Delta$  jele korrigálja a terhelőnyomatékkal arányos  $I_e$  egyenáram (pontosabban mezőgyengítés esetén  $\frac{I_e}{\psi''}$ ) függvényében a gyújtásokhoz tartozó komparálási szinteket. A  $\bar{\psi}'' = \psi'' e^{j\alpha''_{\psi}}$  subtransziens fluxusvektorról való gyújtásvezérlés az  $\bar{u}'' = j\omega\bar{\psi}'' = u'' e^{j\alpha''_u}$  subtransziens feszültség vektorról való gyújtásvezérléssel egyenértékű, mivel pl.  $w > 0$ -nál  $\alpha''_u = \alpha''_{\psi} + 90^\circ$ .



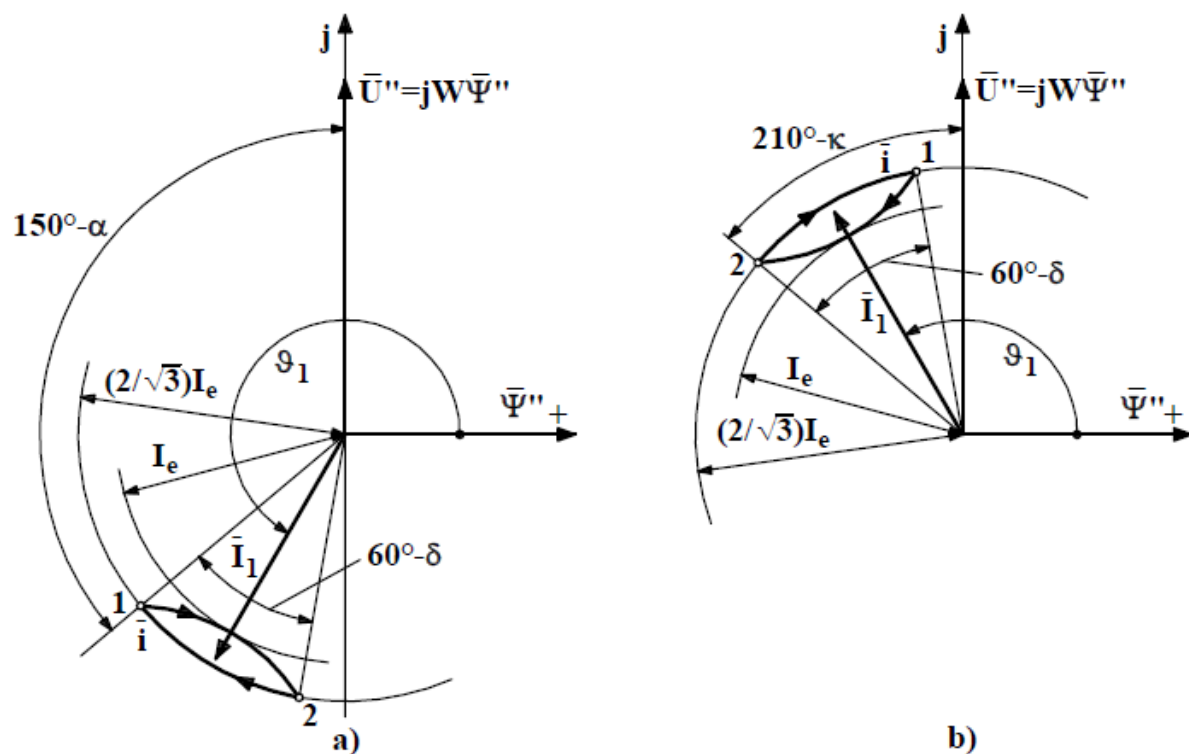
9.6. ábra: A  $\bar{\psi}''$  subtransziens fluxusvektorról való gyújtásvezérlés. a. Blokkvázlat, b. Gyújtási szintek  $w > 0$ -ra.

Célszerűbb a  $\bar{\psi}''$ -ről gyújtani, mert a  $\bar{\psi}''$  fluxusvektor **nyugodtabb pályát fut be** mint az  $\bar{u}'' = \frac{d\bar{\psi}''}{dt}$  feszültségvektor és  $\bar{\psi}''$ -nek a normál tartományban **állandó  $\bar{u}''$ -nek viszont w-vel arányos az amplitúdója**. A tengely  $\alpha$  szöghelyzetéről való gyújtásnál motoros/inverter üzemben nagyobb mértékű a komparálási szint függése a terheléstől és generátoros/egyenirányító üzemben is kell a  $\Delta$  korrekció.

9.7. ábra: Gépi kommutációs áramvektor pályák  $w > 0$ -nál.

a. Generátoros/egyenirányító üzem:  $\alpha = 20^\circ$ ,  
 $\delta = 20^\circ$ , b. Motoros/inverter üzem:  $\alpha = 140^\circ$ ,  
 $\delta = 20^\circ$ ,  $\kappa = 160^\circ$ .

A 9.7.ábra a mezőorientált gyújtásvezérléssel kapott gépi kommutációs  $\bar{i}$  áramvektorokat szemlélteti a  $\bar{\psi}''$  **fluxusvektorhoz rögzített mező koordinátarendszerben**, sima  $i_e = I_e$  egyenáramot feltételezve. A bejelölt amplitúdók és szögek a 9.4. ábrából következnek. A 9.4.a. és a 9.7.b. ábrák a  $\kappa = \kappa_{meg} = 160^\circ$ -os, kb. névleges  $I_1$  áramú motoros munkapontnak felelnek meg. Ekkor kb.  $\vartheta_1 = 120^\circ$ -os legjobb nyomatékszög érhető el.



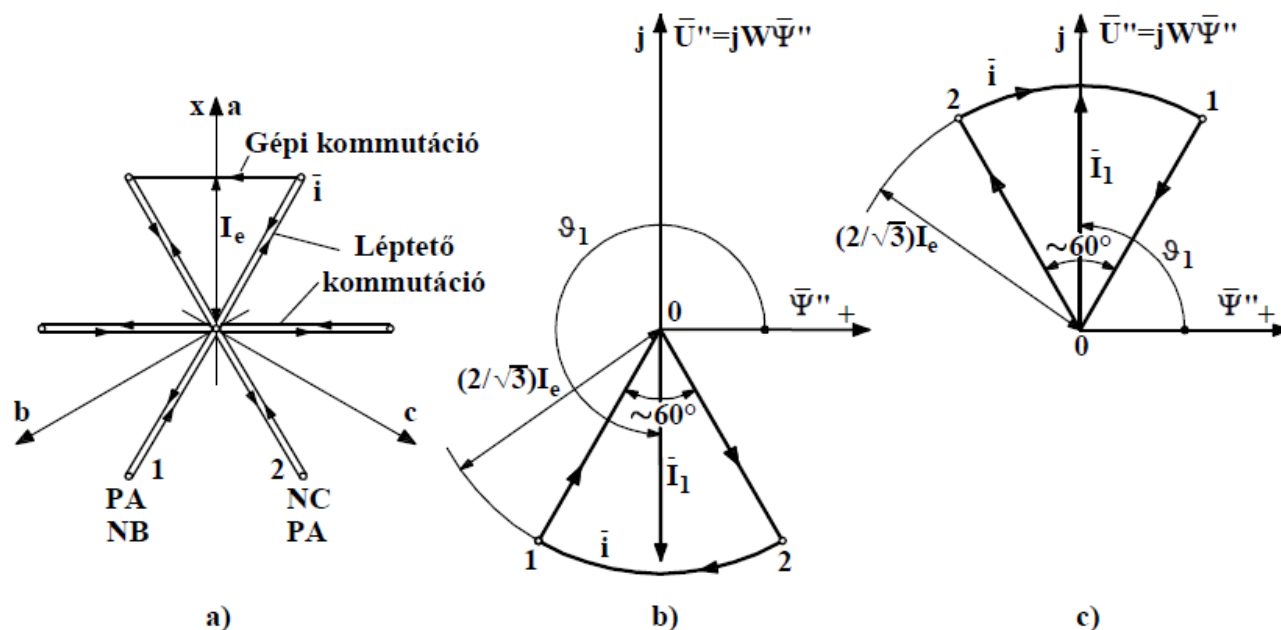
**Bizonyítható, hogy az  $R > WL$  tartományban nem lehetséges a biztonságos gépi kommutáció.** A biztonságos gépi kommutáció határának a szögsebessége:

$$W_h = W_{1h} = 2\pi f_{1h} = \frac{R}{L''}. \quad (9.10)$$

Szokásos gépparaméterekkel  $f_{1h} \approx 5 \text{ Hz}$  adódik. **A  $W < W_h$ ,  $f_1 < f_{1h}$  tartományban léptető üzemet alkalmaznak.** Mivel ekkor,  $\frac{f_h}{f_1} > \frac{50 \text{ Hz}}{5 \text{ Hz}} = 10$ , így ÁG két gyújtása között ÁH-ban legalább 10 gyújtás van. Ennek következtében ilyenkor az ÁH-val kommutálhatunk úgy, hogy 1/6 gépoldali periódusonként a kommutáció közben **o-ra szabályozzuk vele az  $\bar{i}$  áramvektort** (9.8.a. ábra). **Gyorsítható az  $\bar{i} = 0$ -t közbeiktató léptető kommutáció, ha a kommutáció alatt begyűjtjük az  $L_e$ -vel párhuzamos TE tirisztort** (9.1. ábra). Ezáltal az  $L_e$ -ben folyó  $i_e = I_e$  áram változatlan maradhat a léptető kommutáció alatt, csak a motor áramát kell megszüntetni, majd visszanovelni  $I_e$ -re. Léptető üzemben  $\bar{I}_1$  fázisszögére nincs korlát, így a nyomatékszög motoros üzemben  $\vartheta_1 = 90^\circ$ , generátorosban  $\vartheta_1 = 270^\circ$  ( $-90^\circ$ ) is lehet (9.8.b.,c. ábrák).

9.8. ábra: Léptető kommutációs áramvektor pályák  $w > 0$ -nál.

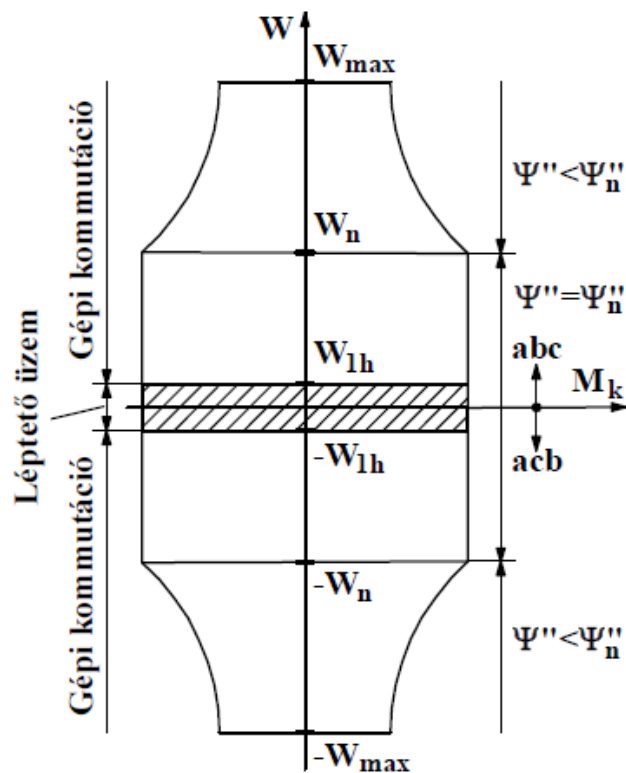
a. Álló koordinátarendszerben, b.,c. Mező koordinátarendszerben generátoros és motoros üzemben.



A  $W > W_n$ ,  $f_1 > f_{1n}$  tartományban **mezőgyengítést kell alkalmazni**. Ilyenkor közelítőleg:

$$\Psi'' \cong \frac{W_n}{W} \Psi_n'' = \frac{f_{1n}}{f_1} \Psi_n'' \quad (9.11)$$

szerint kell szabályozni a  $\bar{\Psi}''$  szubtransziens fluxusvektor amplitúdóját. A 9.9. ábra 4/4-es mezőgyengítéses tartományt feltételezve szemlélteti a  $W(M_k)$  síkon átfogható területet. A léptető kommutációs tartományban általában nincs tartós üzem.



9.9. ábra:  
Mezőgyengítéses üzemmél kibővített  
tartományok a  $W(M_k)$  síkon.



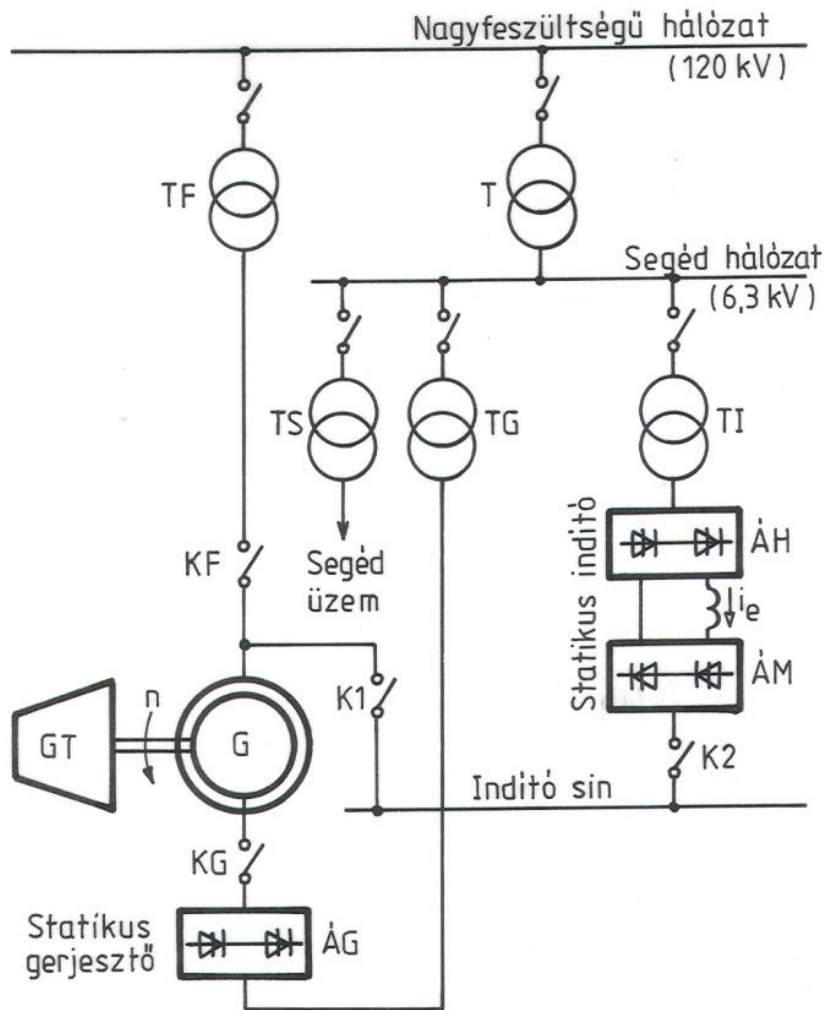
Itt említjük meg, hogy **ÁSZM kapcsolású a világ legnagyobb változtatható fordulatszámú hajtása**. A 101 MW-os hajtás a NASA által üzemeltetett szélcsatorna ventilátorát hajtja. Ez a gigantikus méretű szélcsatorna szuperszonikus légi járművek áramlástechnikai vizsgálataihoz szükséges.

Párhuzamos kondenzátorokkal eredőben kapacitívá tett kalickás aszinkron motor is képes hálózati kommutációs áramirányítóról üzemelni (9.1. ábra). Ez az un. kapacitívan kompenzált áramirányítós aszinkron gép csak szűk frekvencia tartományban tud üzemelni, emiatt csak ritkán alkalmazzák.

## 2.1 Gázturbinás szinkrongenerátor egység indítása

Villamos energia termelésére szolgáló gázturbinás szinkrongenerátor egységek széles alkalmazást nyernek, mert gazdaságos az üzemük, megbízhatók és kevés karbantartást igényelnek. A nagyteljesítményű (100-200 MW-os) egységeket gyakran alkalmaznak csúcserőművekben, mivel **gyorsan üzembe helyezhetők**. Ugyancsak gyakran alkalmaznak a gázturbinás egységet a gőzturbinás egységgel **kombinált ciklusban**, amikor a gázturbina magas hőmérsékletű kipufogó gázát még gőztermelésre használják. Az alkalmazott szinkrongenerátor általában turbogenerátor típusú és  $2p=2$  pólusú, így a névleges szinkron fordulatszáma  $f_{1n}=50\text{Hz}$ -en  $n_n = n_{1n} = \frac{60f_{1n}}{p} = 3000 \frac{1}{\text{min}}$ .

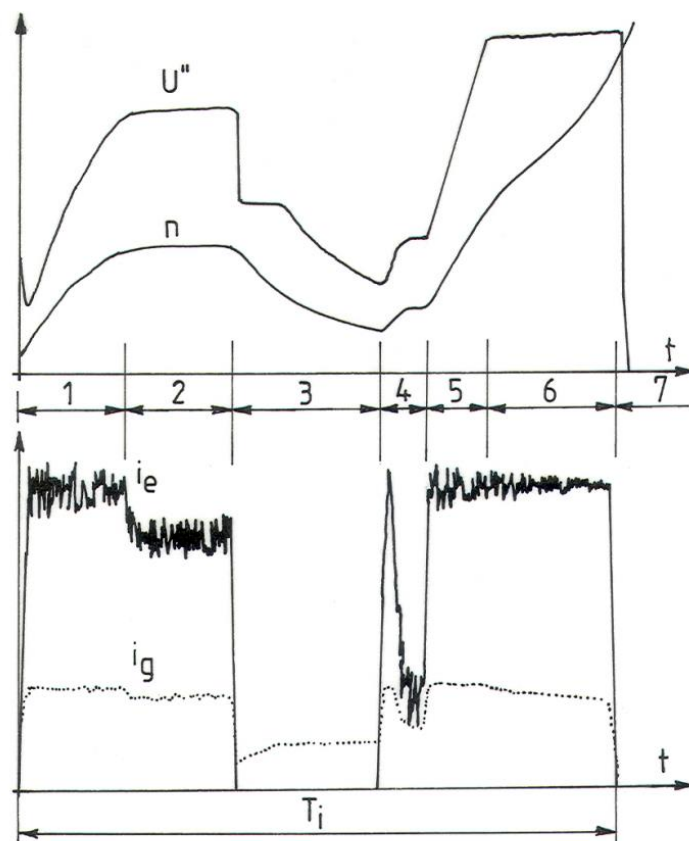
A gázturbina mint belsőégésű motor **nem képes önmagától elindulni**, az indításhoz indító berendezés szükséges. **Indító motorként** a gázturbinás egység szinkron generátorát célszerű alkalmazni, mivel ekkor nincs szükség külön indító villamos motorra. A szinkrongenerátort az indítás alatt általában a 9.1. és 9.2. ábrák kapcsolási vázlatának megfelelően **áramirányítás szinkronmotor (ÁSZM) kapcsolatban működtetik**. A gázturbina ÁSZM indítójának egyvonalas kapcsolási vázlata a 12.14. ábrán látható. Üzem közben a GT gázturbinával hajtott G generátor a KF főkapcsolón és a TF főtranszformátoron keresztül a nagyfeszültségű hálózatra csatlakozik. **Indítás alatt a K1 és K2 kapcsolókon keresztül az ÁM és ÁH áramirányítók által álló statikus indítóra kapcsolódik**. A gerjesztőtekercset az ÁG áramirányítóból álló **statikus gerjesztő** táplálja.



12.14. ábra:  
 Áramirányítós szinkron motoros indító  
 gázturbinához.

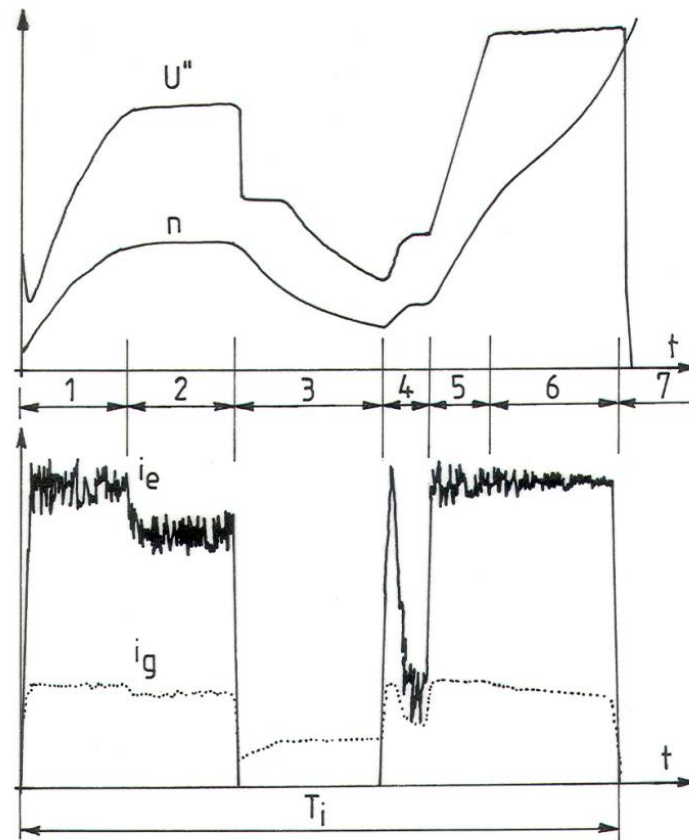
Az indítást az erőművi irányító kezdeményezi. A  $T_i=15-20$  min-ig tartó indítási folyamat fő jellemzőit az  $n$  fordulatszámot, a szubtranzien feszültség  $U''$  amplitúdóját, az  $i_e$  egyenáramot és az  $i_g$  gerjesztőáramot mutatja a 12.15. ábra. Az indítás az ábrába bejelölt alábbi fő szakaszból áll:

1. **Elindítás és felgyorsítás** kb.  $\frac{1}{3} n_n = 1000/\text{min}$  fordulatszámig.
2. Néhány perces  **$n=\text{const.}$  fordulatszámú üzem a gázturbina kiszellőztetése céljából**, majd a szakasz végén az  $i_e$  áram és a nyomaték megszüntetése.
3. Az ÁSZM  $i_e$  egyenáramának megszűnését követő **kipörgés (lassulás)**, amely alatt előkészítik a gázturbina begyújtását.



12.15. ábra:  
 ÁSZM fő jellemzői az indítási  
 folyamat alatt.

4. A kipörgést követően az  $i_e$  egyenáram újraindítása, gyorsítás, majd fordulaton tartás a gázturbina begyújtása alatt.
5. A gázturbina begyújtását követően további, állandó fluxus mellett gyorsítás az ÁSZM-mel és a gázturbinával.
6. A kb.  $\frac{1}{3}n_n$  fordulatszám feletti **mezőgyengítéses gyorsítás**, amikor  $U_1 \approx U'' \approx \text{const}$ . Az ÁSZM kapcsolású generátor kb.  $\frac{2}{3}n_n = 2000/\text{min}$  fordulatszámig vesz részt a gépcsoport gyorsításában.
7. Az ÁSZM  $i_e$  egyenáramának és  $i_g$  gerjesztő áramának megszüntetése után a turbina-generátor gépcsoportot **a gázturbina gyorsítja** tovább az  $n_n = 3000/\text{min}$  fordulatszámig.



12.15. ábra:  
 ÁSZM fő jellemzői az indítási  
 folyamat alatt.

Az 1. és 4. szakaszban az ÁSZM, az 5. és 6. szakaszban az ÁSZM és a gázturbina, a 7. szakaszban csak a gázturbina gyorsít.

A statikus indítót általában a szinkrongenerátor névleges teljesítményének **néhány százalékára** méretezik. A tipikus értékeket a 12.2. táblázat mutatja, 100%-nak véve a generátor névleges pontbeli értékeit.

12.2. táblázat: ÁSZM indító fő jellemzői.

	ÁSZM indító
Teljesítmény, $P_m$	2%
Nyomaték, $M$	5% (10%)
Feszültség, $U_1$	10%
Áram, $I_1$	20%

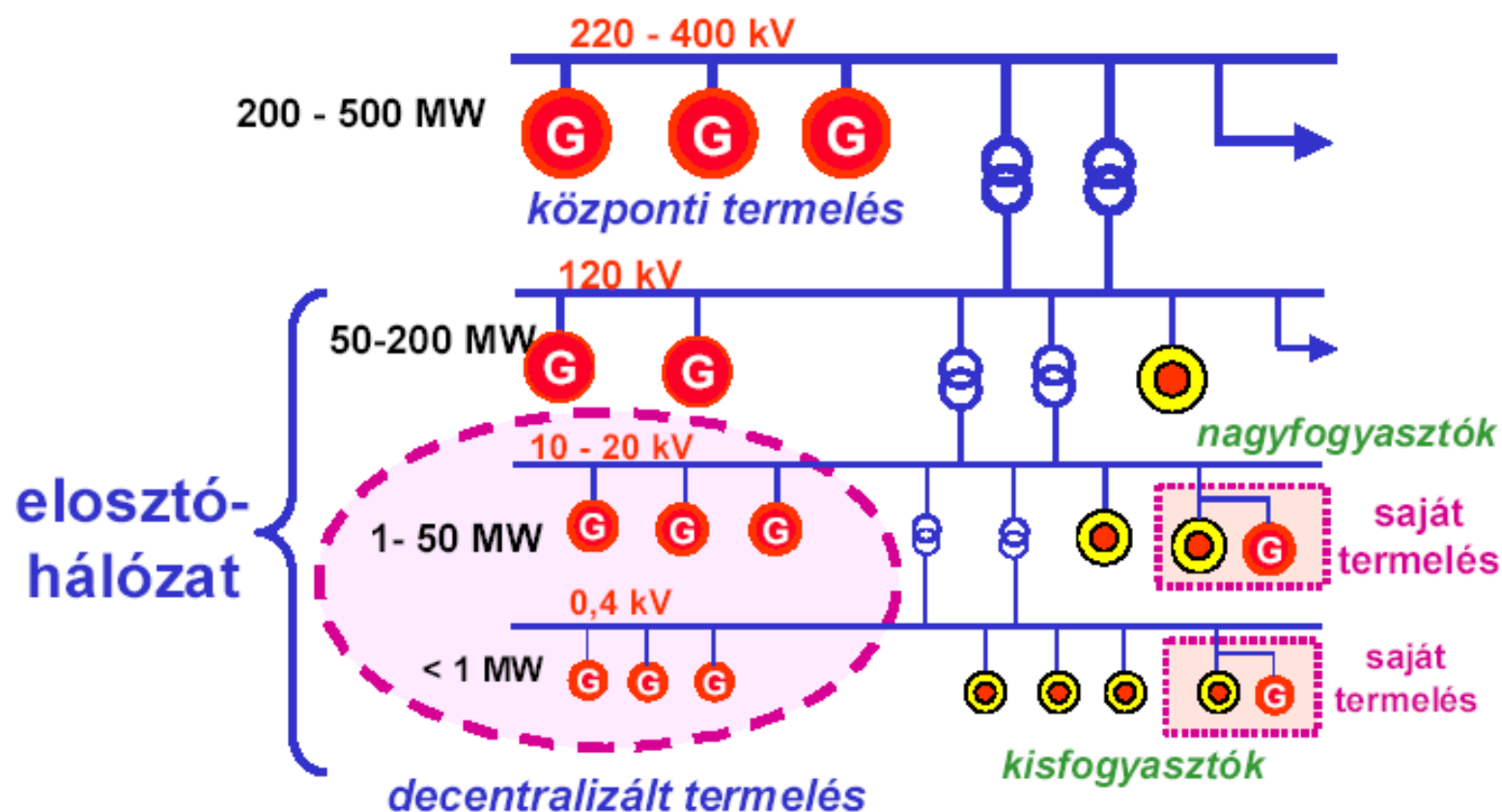
A nyomatéknál a zárójeles érték a maximális indító nyomaték, amely a nyugvó súrlódás miatt szükséges.

A 10%-os feszültségértékből következik, hogy **ÁSZM üzemben legfeljebb  $0,1n_n$  fordulatszám alatti tartományban lenne tartható névleges értéken a fluxus**. Emiatt a valóságban az indító csak a bekapcsolás utáni léptetőmotoros ( $n < 0,1n_n$ ) üzemben gyorsít közel névleges fluxussal és az ezt követő teljes indítási folyamat alatt **a névlegesnél jóval kisebb a fluxus**. A 10%-os nyomaték 20%-os áramot feltételezve 50%-os fluxussal hozható létre.

Nagy előnye az ÁSZM indítónak, hogy egyetlen statikus indítóval az indító sínen keresztül egy azonos egységekből álló gázturbinás erőmű **bármelyik egysége elindítható**.

**Hasonló a probléma a szivattyús tározós vízerőművek villamos gépének szivattyú üzemben való motoros indításakor**. A gyakorlatban ilyenkor is az ÁSZM kapcsolású indítást alkalmazzák a leggyakrabban.

# Központi és elosztott termelés



**elosztott vagy beágyazott (fogyasztóhoz közeli) termelés**

## 2./ Megújuló energiaforrások

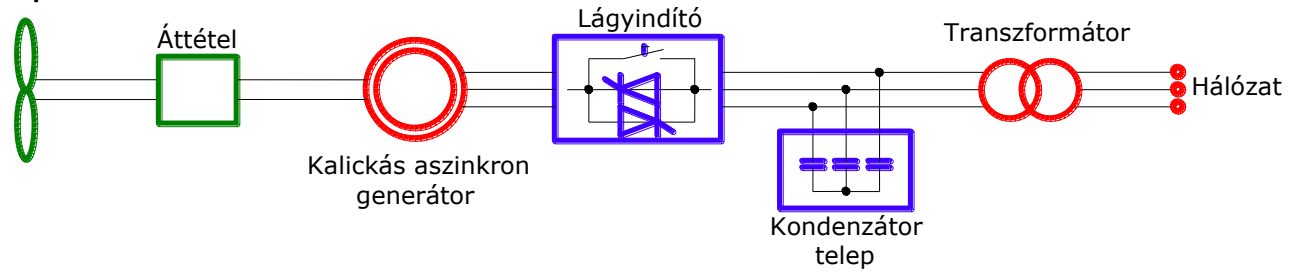
- **szélerőművek** (1MW-5MW),
- **fotoelektromos** rendszerek (1kW-100kW),
- **kis vízerőművek** (<10MW),
- geotermikus energiatermelés,
- biomassa erőművek

## Kényszermenetrendes erőművek

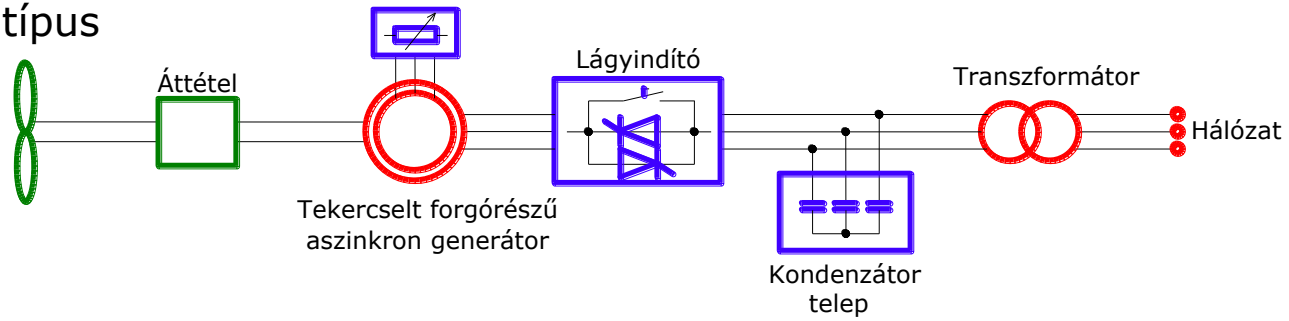
- az energiaforrás miatt: szél, nap, folyami erőmű,
- a hőigény miatt: pl. ellennyomásos kapcsolt hőerőmű



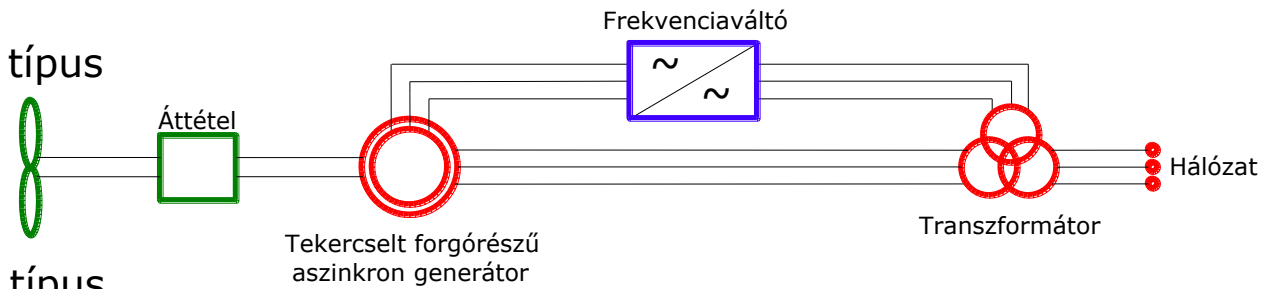
A típus



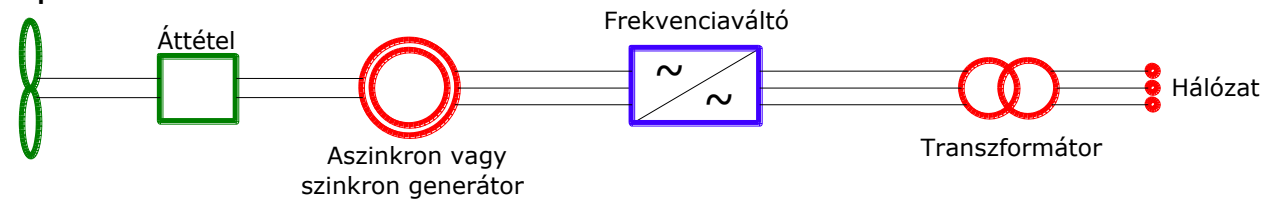
B típus

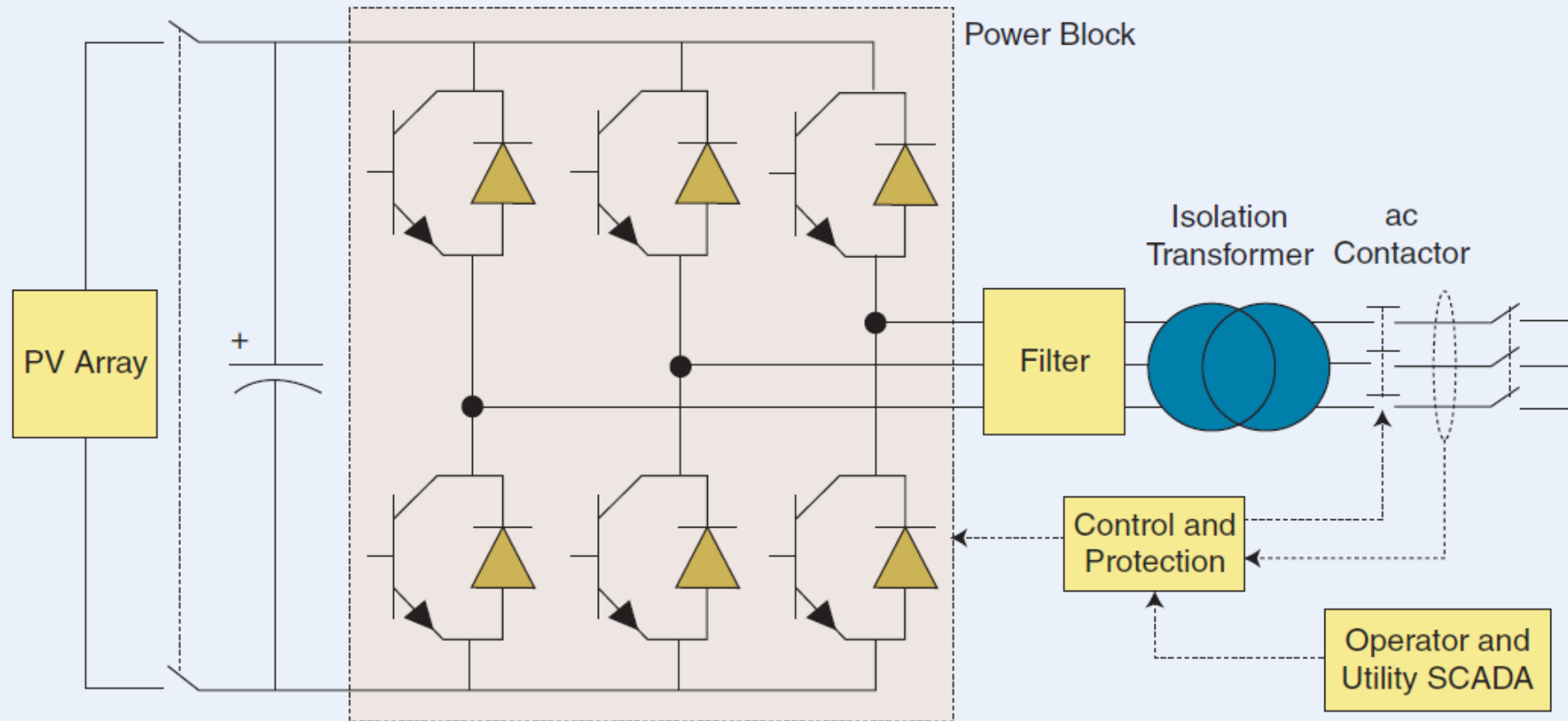


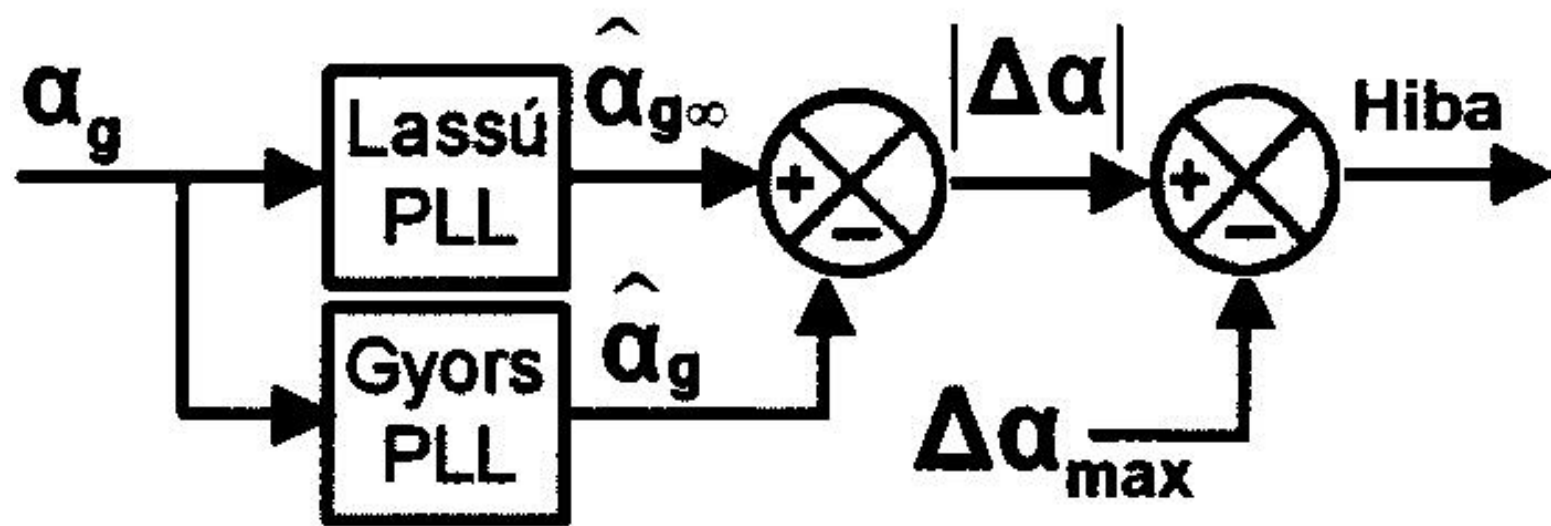
C típus



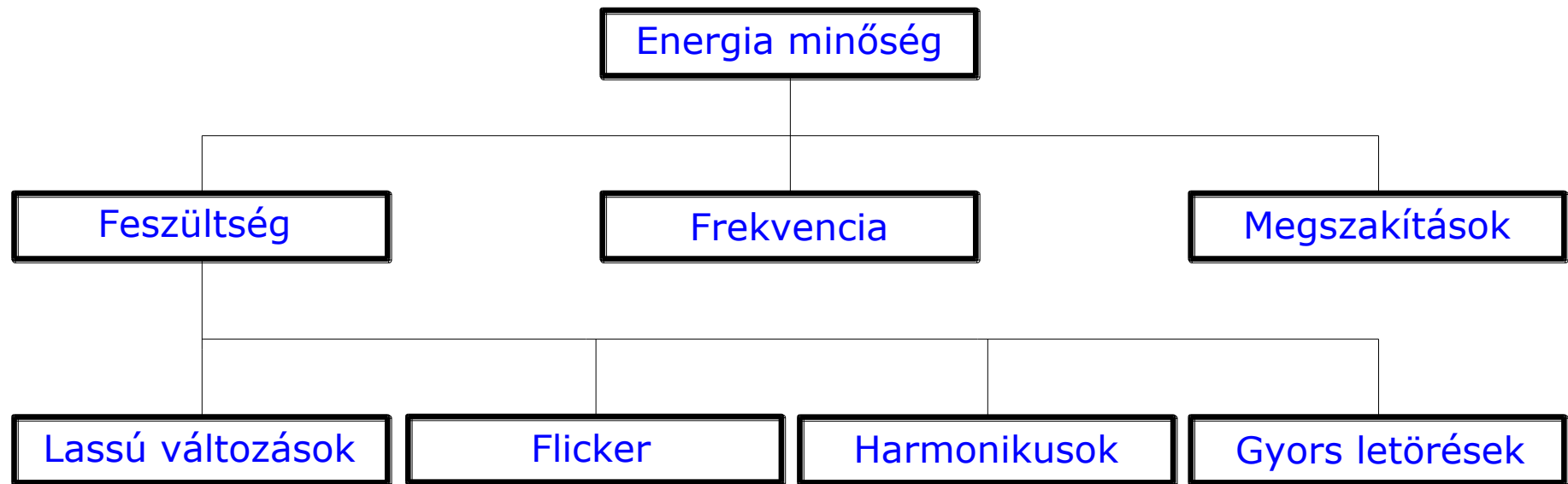
D típus



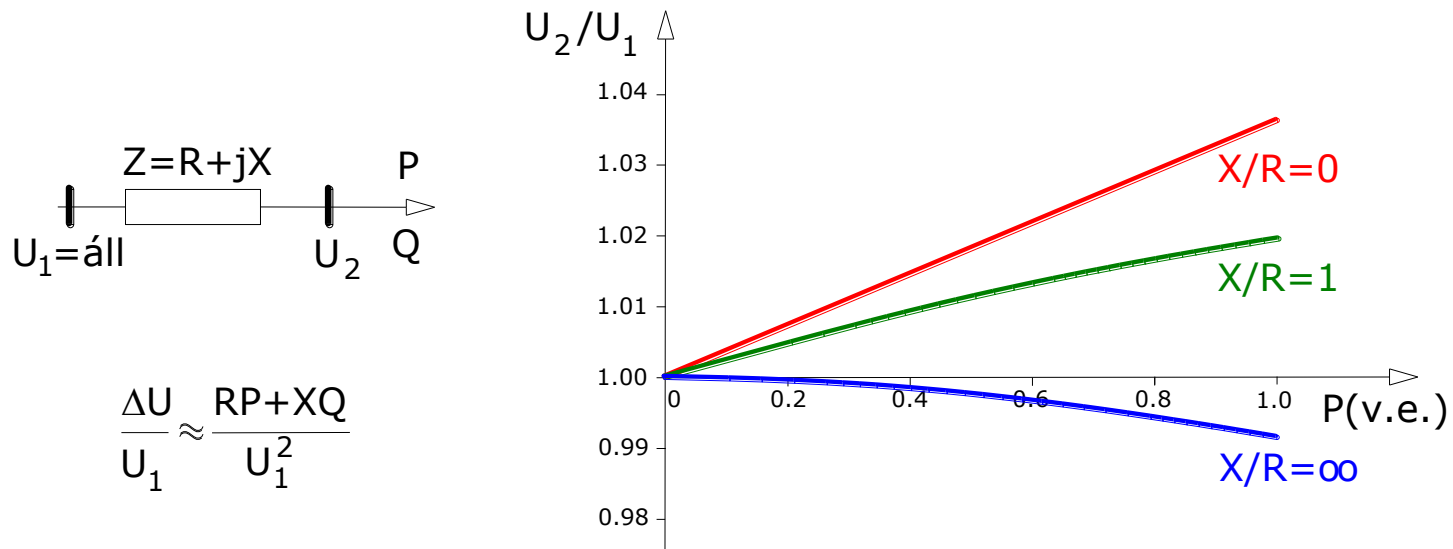




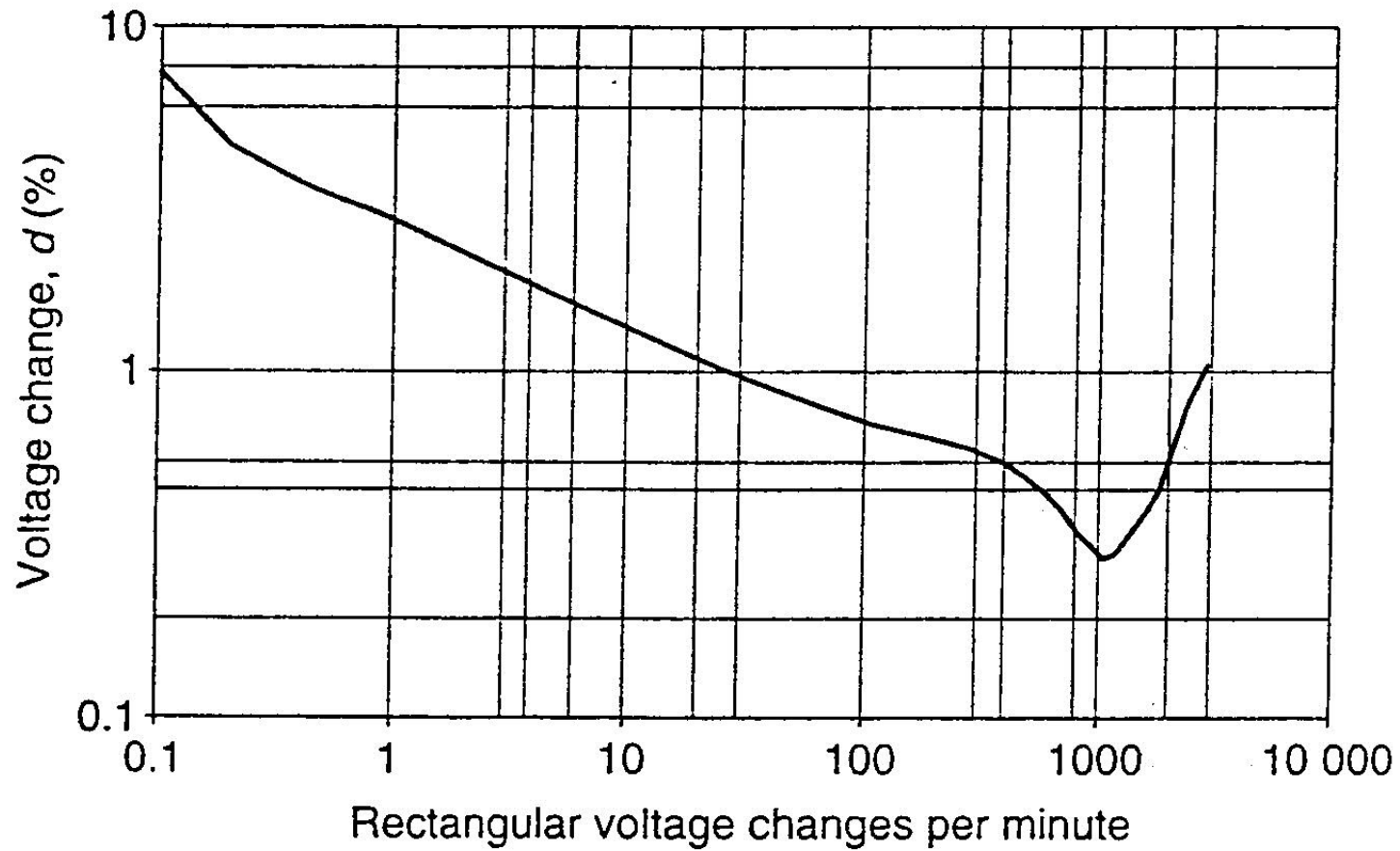
# Az energia minőségére ható tényezők



## Lassú feszültségváltozás, **sugaras hálózat**



**Hurkolt hálózat** esetén: teljesítményáramlás modell



2.8. ábra. Normalizált flickermérő válasz feszültség ingadozásra.

## Szélturbinák hatása a flickerre folyamatos üzemben

### Okai:

- a szélesebbesség változása (turbulencia),
- a torony árnyékoló hatása (lapátszám függő),
- a lapátszög szabályozás holtideje és véges működési sebessége.

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p (\lambda, \vartheta)$$

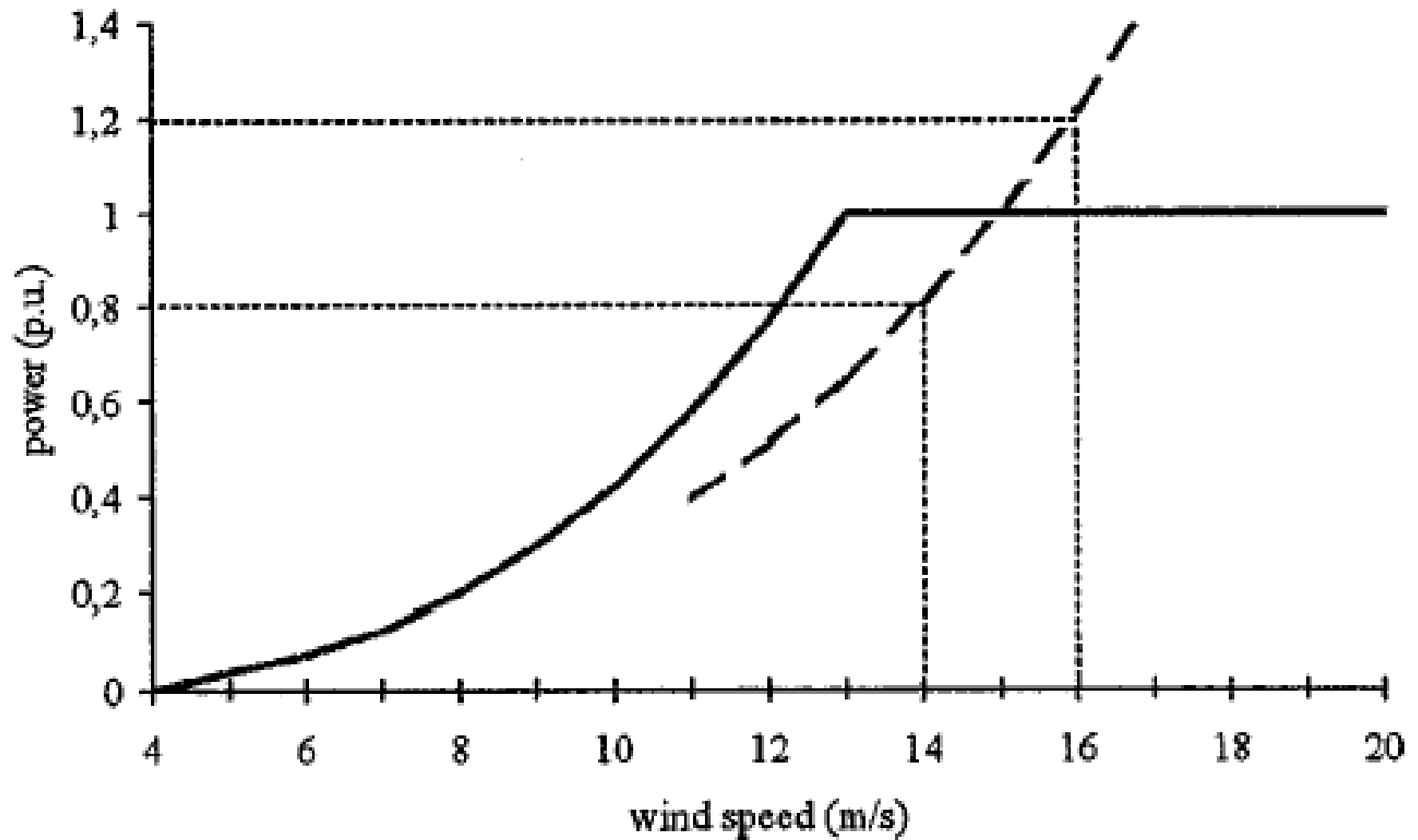


Fig. 2. Power as function of wind-speed from a pitch-controlled wind turbine.



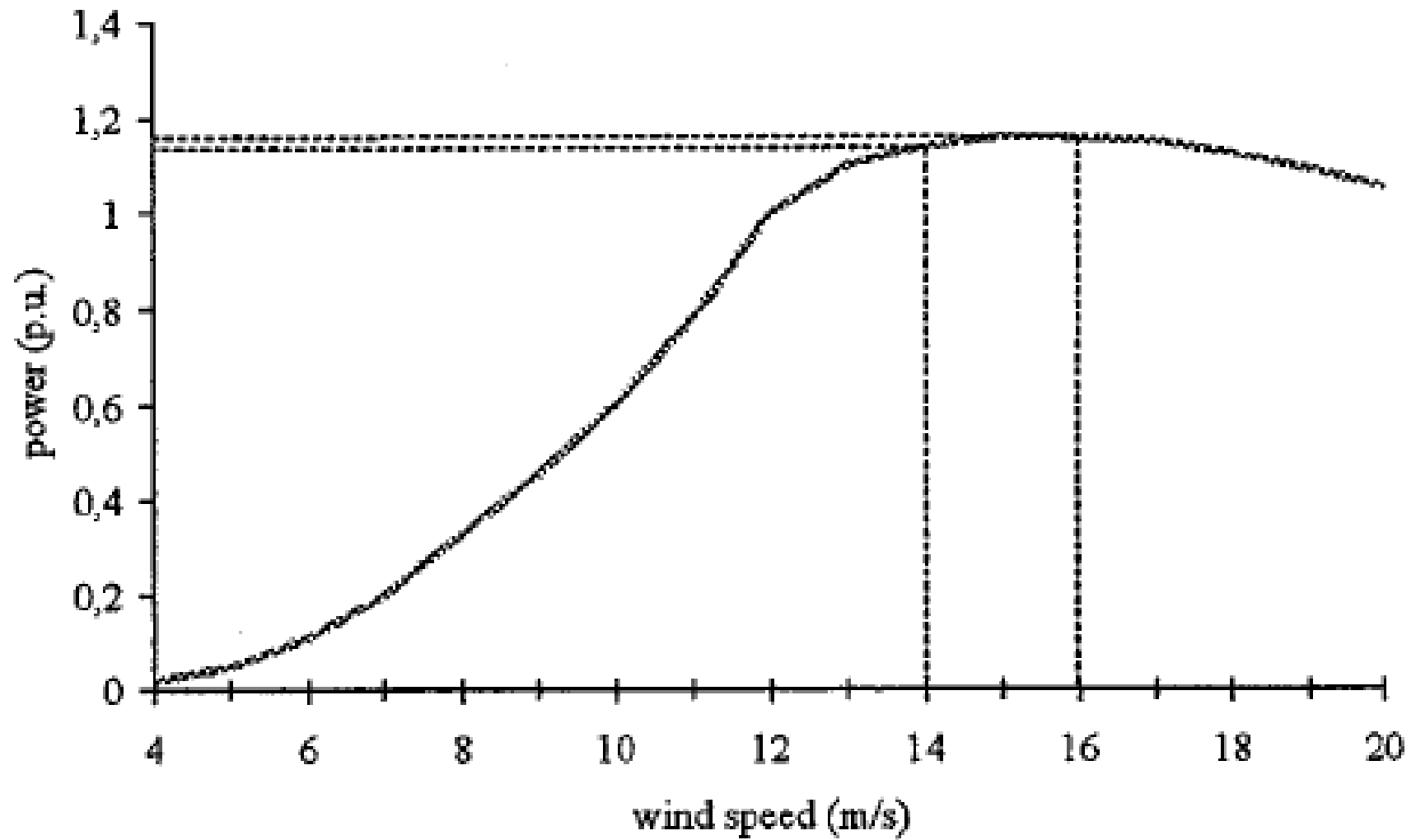


Fig. 3. Power as function of wind-speed from a stall-regulated wind turbine.

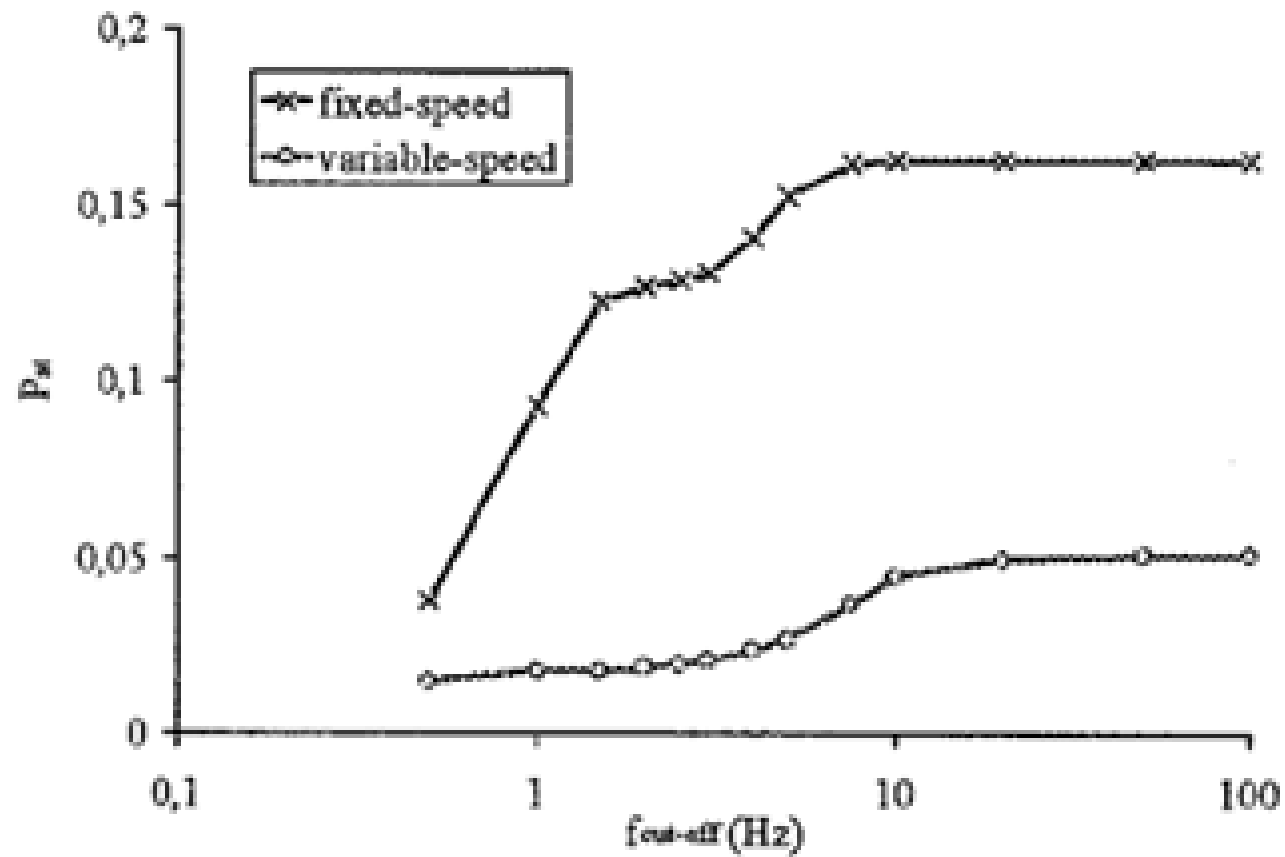


Fig. 5. Short-term flicker from a fixed-speed wind turbine and a variable-speed wind turbine calculated at different cut-off frequencies. The cut-off frequency has a logarithmic scale.

## NM 72C / 1500

Manufacturer: NEG Micon Deutschland GmbH  
 Rated power  $P_{nG}$ : 1,500 kW  
 Rotor diameter: 72.0 m

Power curve		
Extract from test report		
Risö-I-1710 (EN), 17 May 2001		
Guideline: IEC 61400-12 and MEASNET		
Test laboratory:		
Risö National Lab., Roskilde, DK		
v m/s	P kW	$C_p$ -
2.02	-4.00	-0.194
2.55	-4.50	-0.109
3.01	1.20	0.017
3.52	22.90	0.211
4.02	52.30	0.323
4.51	90.50	0.394
5.00	129.90	0.418
5.51	177.90	0.427
6.00	229.20	0.424
6.52	290.60	0.420
7.00	361.00	0.422
7.50	471.30	0.449
7.99	578.70	0.455
8.48	684.20	0.450
9.00	821.20	0.451
9.50	951.50	0.445
9.97	1,058.60	0.428
10.50	1,155.00	0.400
11.02	1,252.50	0.375
11.52	1,328.80	0.348
12.02	1,397.90	0.323
12.47	1,413.80	0.292
13.03	1,449.50	0.263
13.54	1,466.20	0.237
13.94	1,466.10	0.217
14.47	1,485.10	0.196
15.00	1,486.20	0.177
15.35	1,460.80	0.162
16.04	1,485.70	0.144

Sound power level					
Extract from test report: WICO 216SE701/02, 24 Jul 2002					
Guideline: FGW-standard					
Test laboratory: WIND-Consult GmbH					
Hub height: 64.0 m					
Power curve resp. test report No.:					
v at 10 m height, m/s	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
Sound power level, dB	99.6	100.8	102.1	103.7	104.2
Penalty for tonality, dB	0	0	1	0	0
Penalty for impulse, dB	0	0	0	0	0

Electrical characteristics										
Extract from test report: WT 2026/01, 19 Nov 2001										
Guideline:										
Test laboratory: WINDTEST Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH										
Nominal voltage $U_{nG}$ : 690 V										
Power										
Power peak	$P_{\text{momentary}}$	$P_{1-\text{min}}$	$P_{10-\text{min}}$	$P_{\text{power curve max}}$						
$P = P_{\text{max}}/P_{nG}$	1.41	1.14	1.04	0.99						
Power-										
factor $\lambda$ at	$0.25 P_{nG}$	$0.5 P_{nG}$	$0.75 P_{nG}$	$P_{nG}$	$P_{\text{max } 1-\text{min}}$					
	0.99	0.99	0.99	0.97	0.97					
Apparent power	$S_{nG}$ at $P_{nG}$		1,545 kVA							
Line current	$I_{nG}$ at $P_{nG}$		1,294 A							
Flicker										
$\Psi_k$	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°			
Flicker coefficient c	12	10	9	7	3	3	6			
Switching operations										
$\Psi_k$	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
$k_{\Psi}$	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8
$\Psi_k$	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°	
$k_{\Psi}$	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	
$k_{\text{imax}} = I_{\text{max}}/I_{nG}$	1.3									

## Flicker állandósult üzemben

A 99%-os valószínűségű flicker emisszió egyedülálló szélerőmű esetén:

$$P_{st} = P_{\ell t} = c(\psi_k, v) \frac{S_n}{S_k}.$$

Az egyenletben a rövididejű  $P_{st}$  és hosszúidejű (2 órára számított)  $P_{\ell t}$  flicker emissziót azonosnak lehet venni az állandósult üzem feltételezése miatt. A további jelölések:

$c(\psi_k, v)$  = a szélturbina flicker együtthatója egy adott hálózati impedancia fázisszögére ( $\psi_k$ ) és az éves átlagos szélesebességre (adott helyszínen a tengelymagasságban) értendő.  $c(\psi_k, v)$  értékeit a gyártók megadják a mérési eredményeik között ,

$S_n$  = a szélerőmű névleges látszólagos teljesítménye,

$S_k$  = a csatlakozási ponton mérhető rövidzárási látszólagos teljesítmény.

Szélerőmű-park esetén feltételezhetjük, hogy az egyes szélturbinák teljesítmény maximumai nincsenek korrelációban, és ekkor a szélerőmű-park flicker emissziója

$$P_{st} = P_{lt} = \frac{1}{S_k} \sqrt{\sum_{i=1}^N (c_i (\psi_k v) \cdot S_{ni})^2}.$$

# Kapcsolási tranziensek miatti flicker

- Indítások
- Átkapcsolások (pólusszám váltás)
- Leállítás

A flicker emisszió egyetlen szélturbina esetén:

$$P_{st} = 18 \cdot N_{10}^{0,31} k_f (\psi_k) \frac{S_n}{S_k}, \quad (2.5a)$$

$$P_{lt} = 8 \cdot N_{120}^{0,31} k_f (\psi_k) \frac{S_n}{S_k}, \quad (2.5b)$$

A szélturbinák indítása a feszültség hirtelen csökkenését okozhatja, amely néhány másodperc után áll helyre. Minden szélerőmű jellemezhető egy  $k_u(\Psi_k)$  feszültség változási tényezővel. A viszonylagos feszültségváltozás egyetlen szélerőmű kapcsolása következtében:

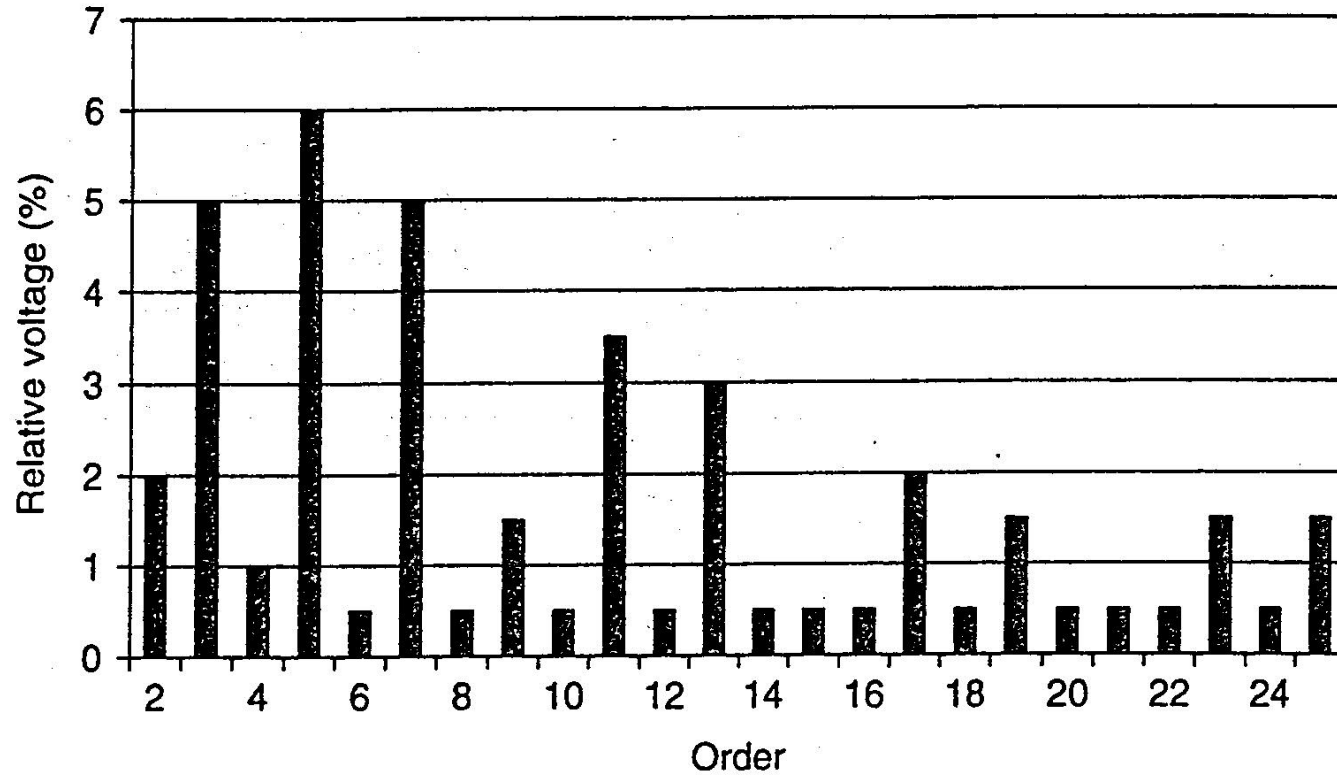
$$d = 100 k_u(\Psi_n) \frac{S_n}{S_k},$$

ahol

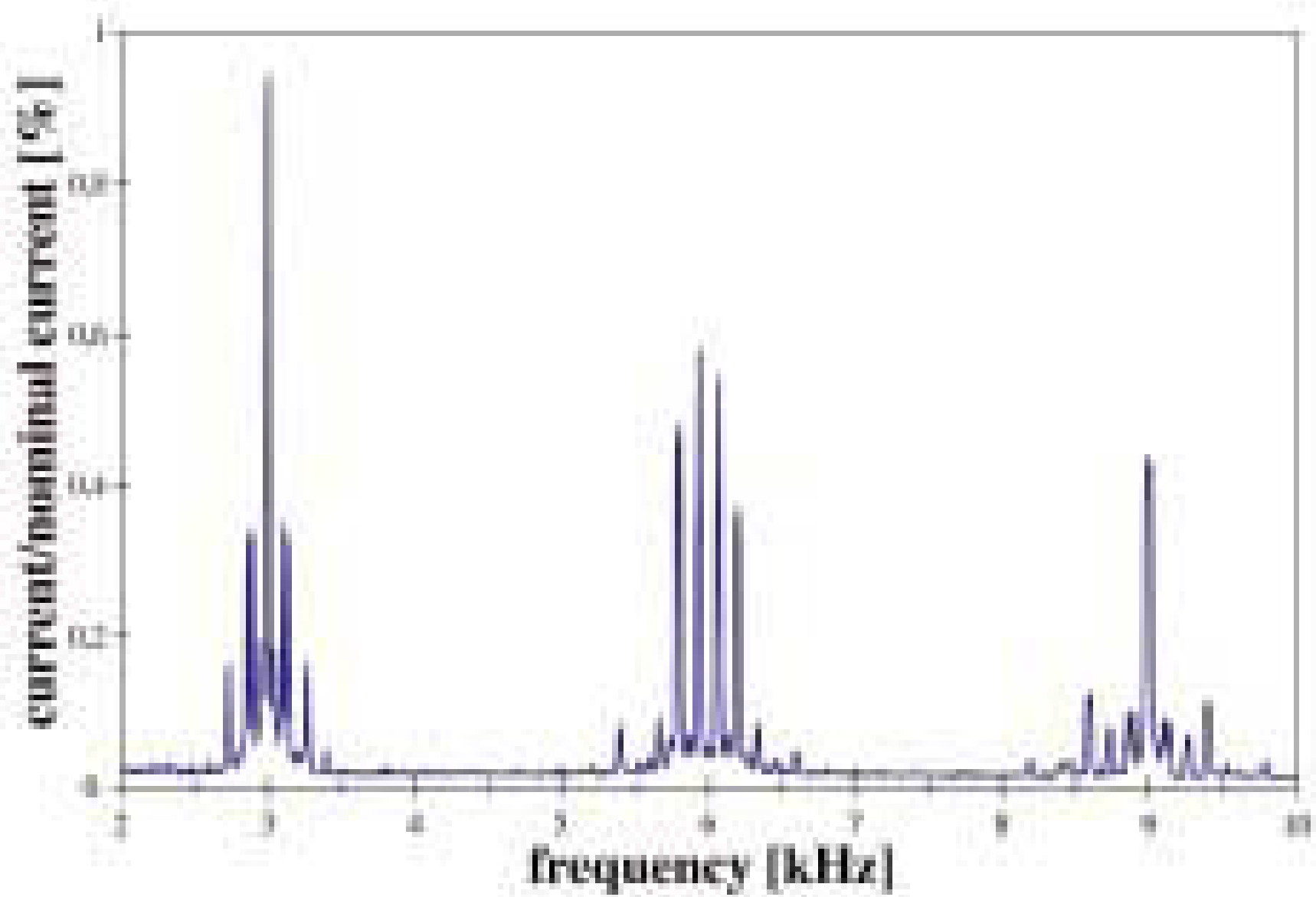
$d$ : a viszonylagos feszültségváltozás %-ban,

$k_u(\Psi_n)$ : a szélerőmű feszültségváltozási tényezője a csatlakozási ponton





$$\text{THD} = \left[ \sum_{h=2}^{40} (u_h)^2 \right]^{1/2} \leq 8\%.$$



# Üzemi szabályzat

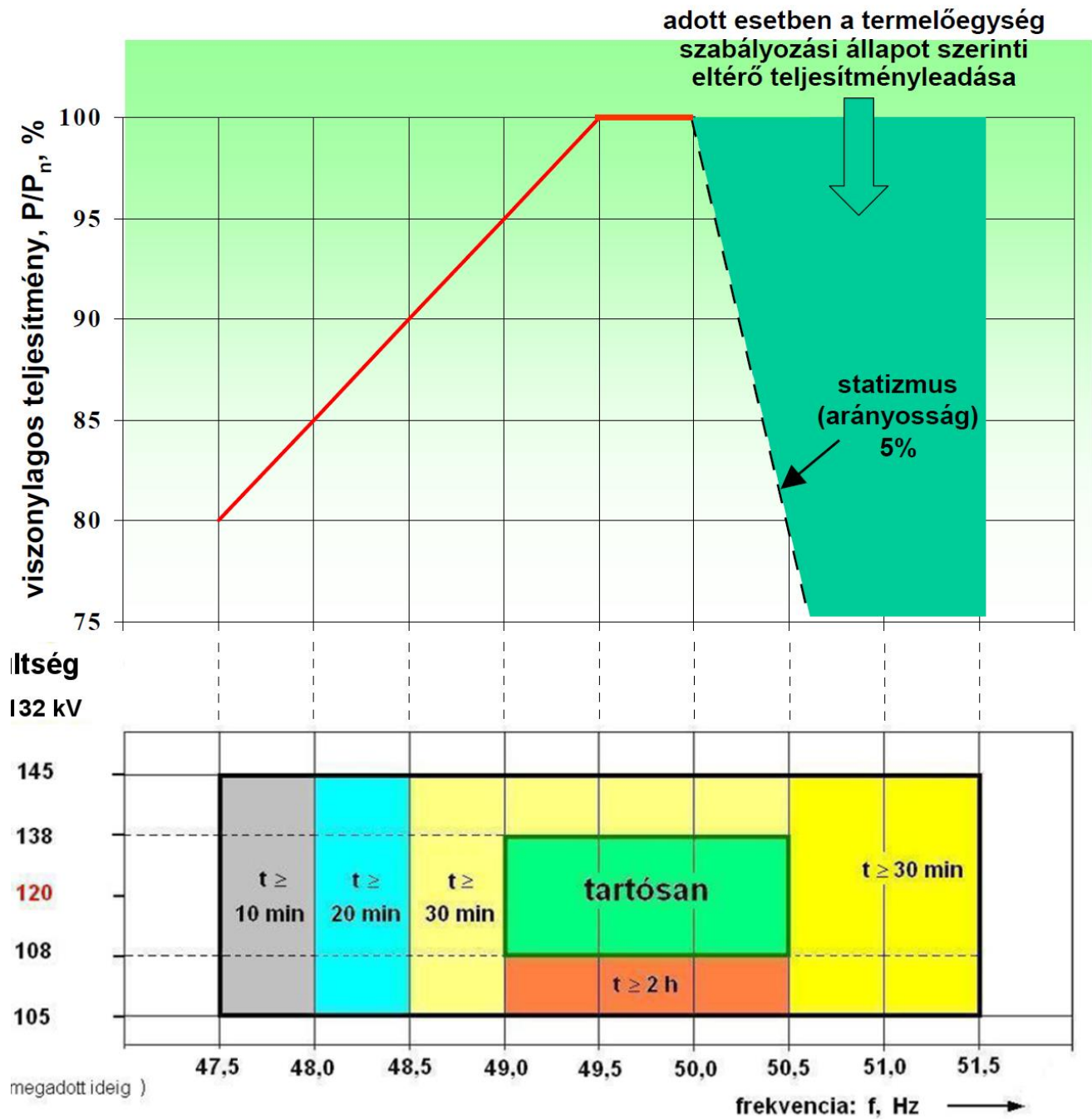
## IRÁNYELVEK

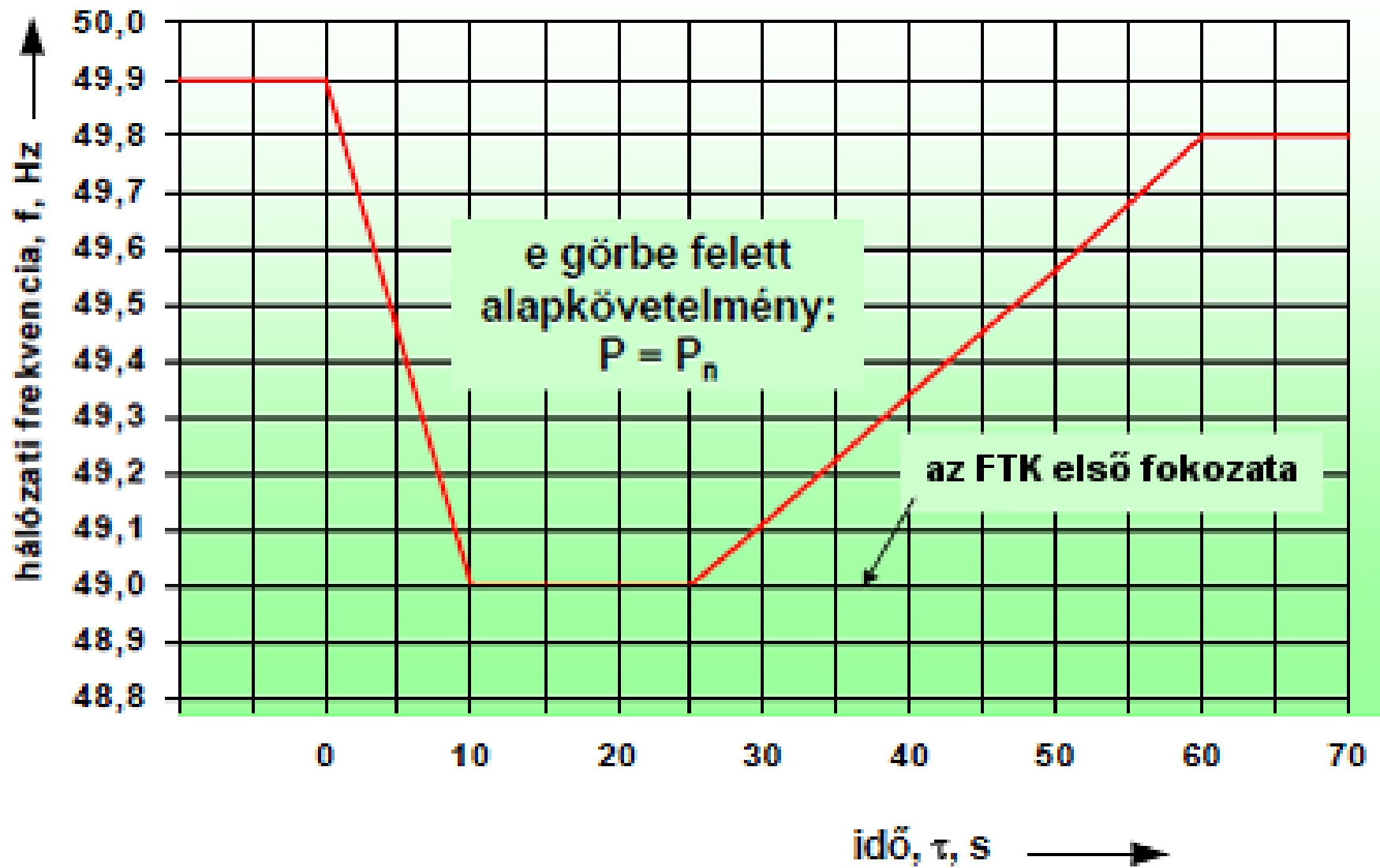
### IRÁNYELV 132 KV -OS VAGY NAGYOBB NÉVLEGES FESZÜLTSGŰ HÁLÓZATRA CSATLAKOZÓ ERŐMŰVEK LÉTESÍTÉSÉRE ÉS CSATLAKOZTATÁSÁRA

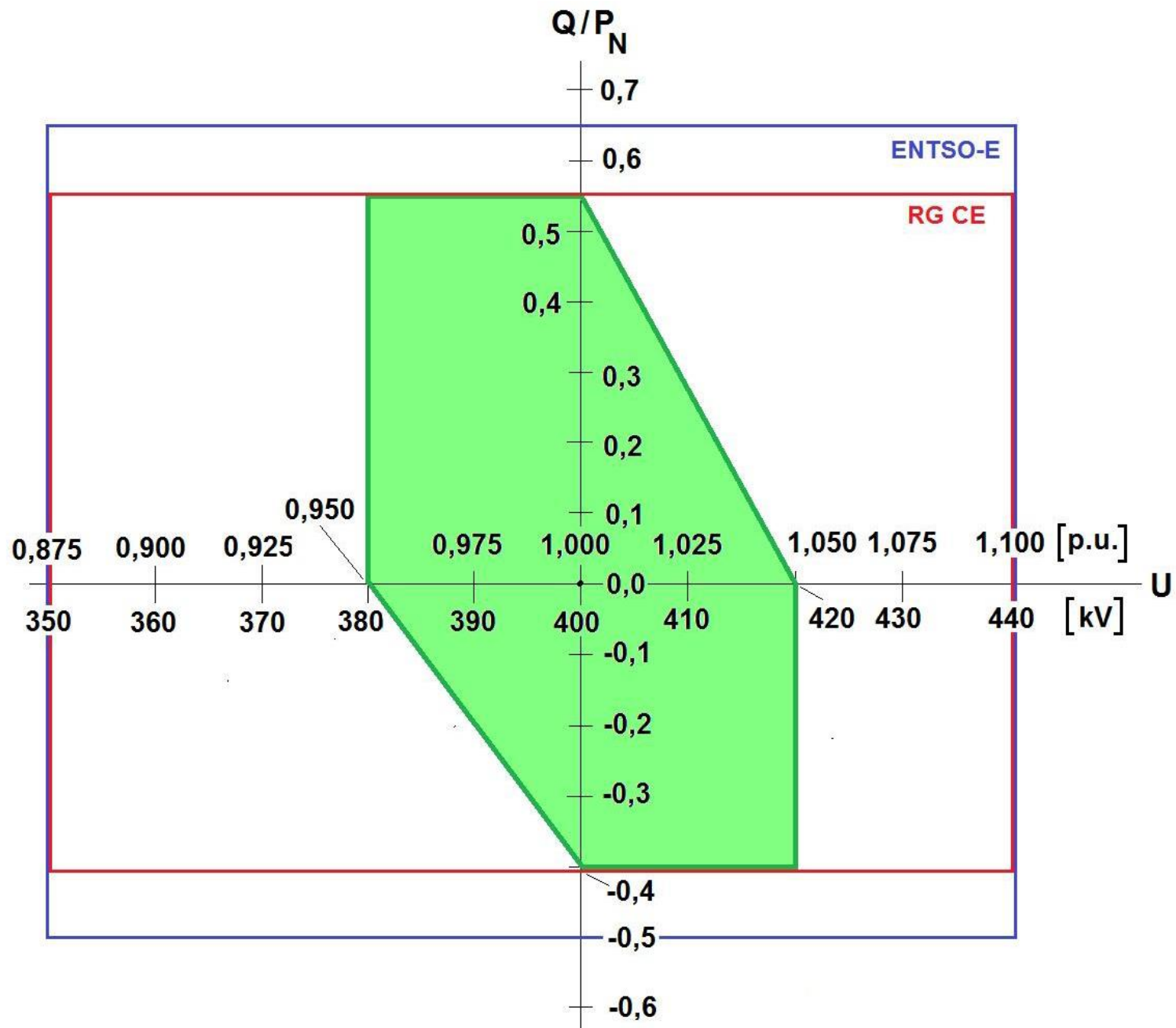
Minimális Műszaki Követelmények

2014. december 10.

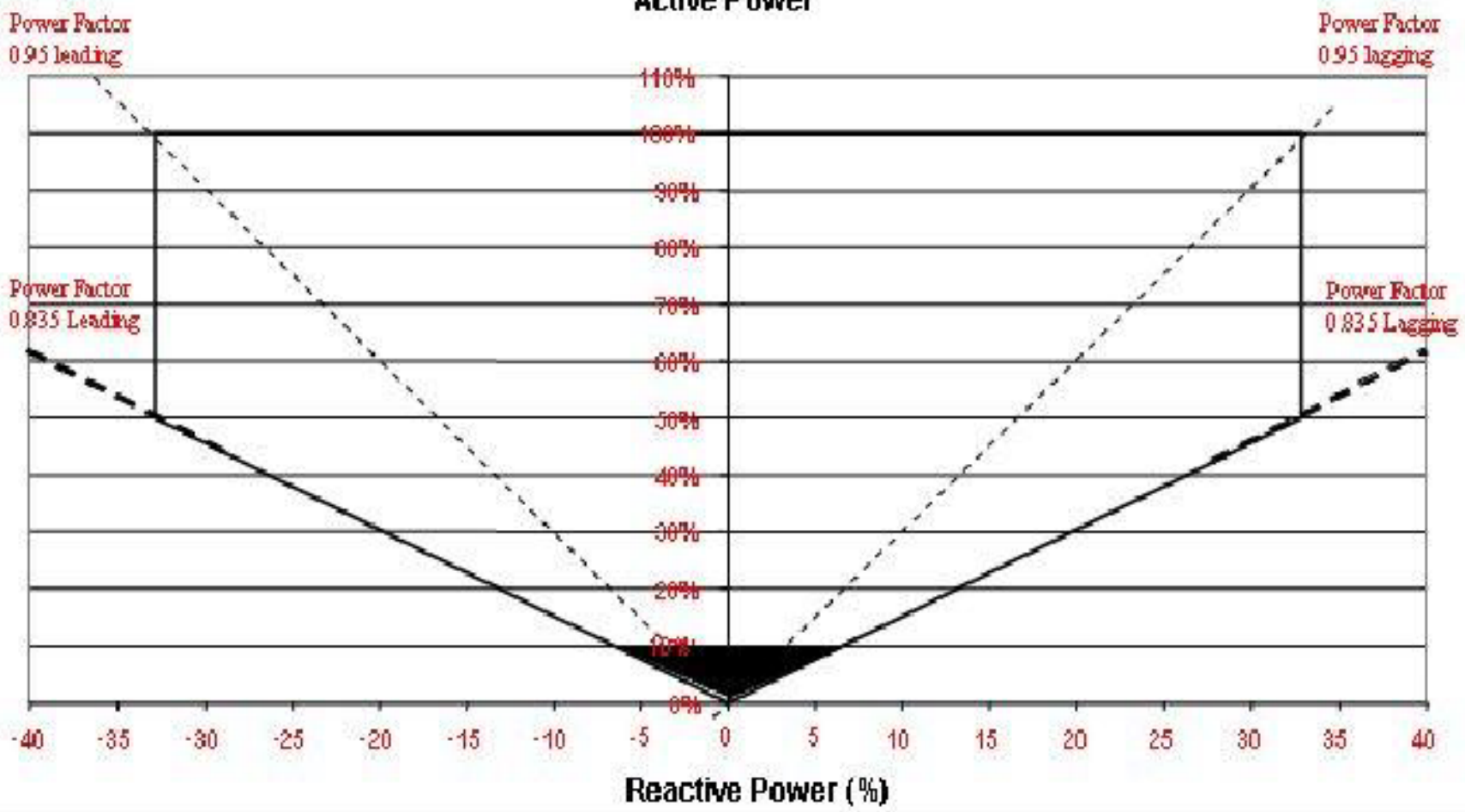
(a MEKH 3069/2014. sz. Határozatának 3. melléklete szerint)

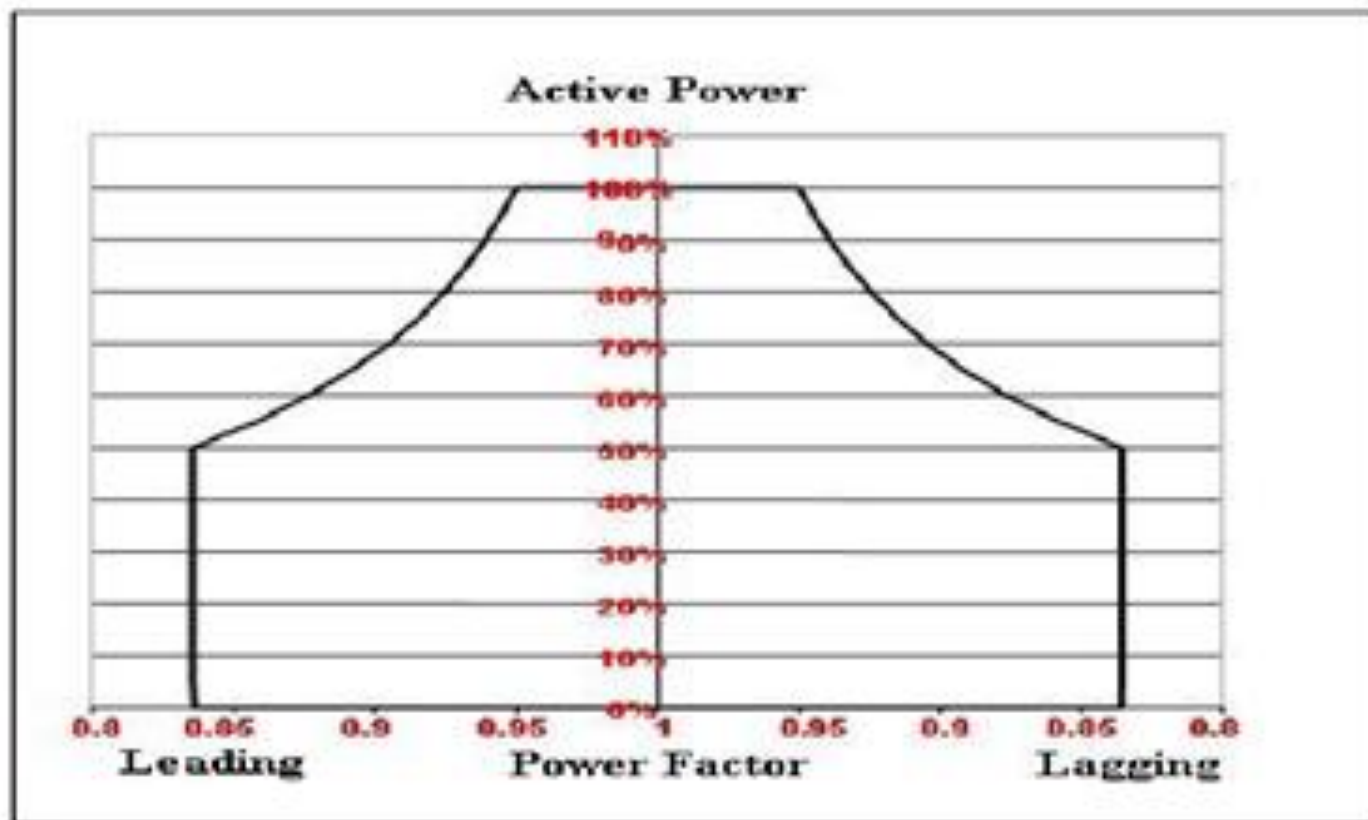




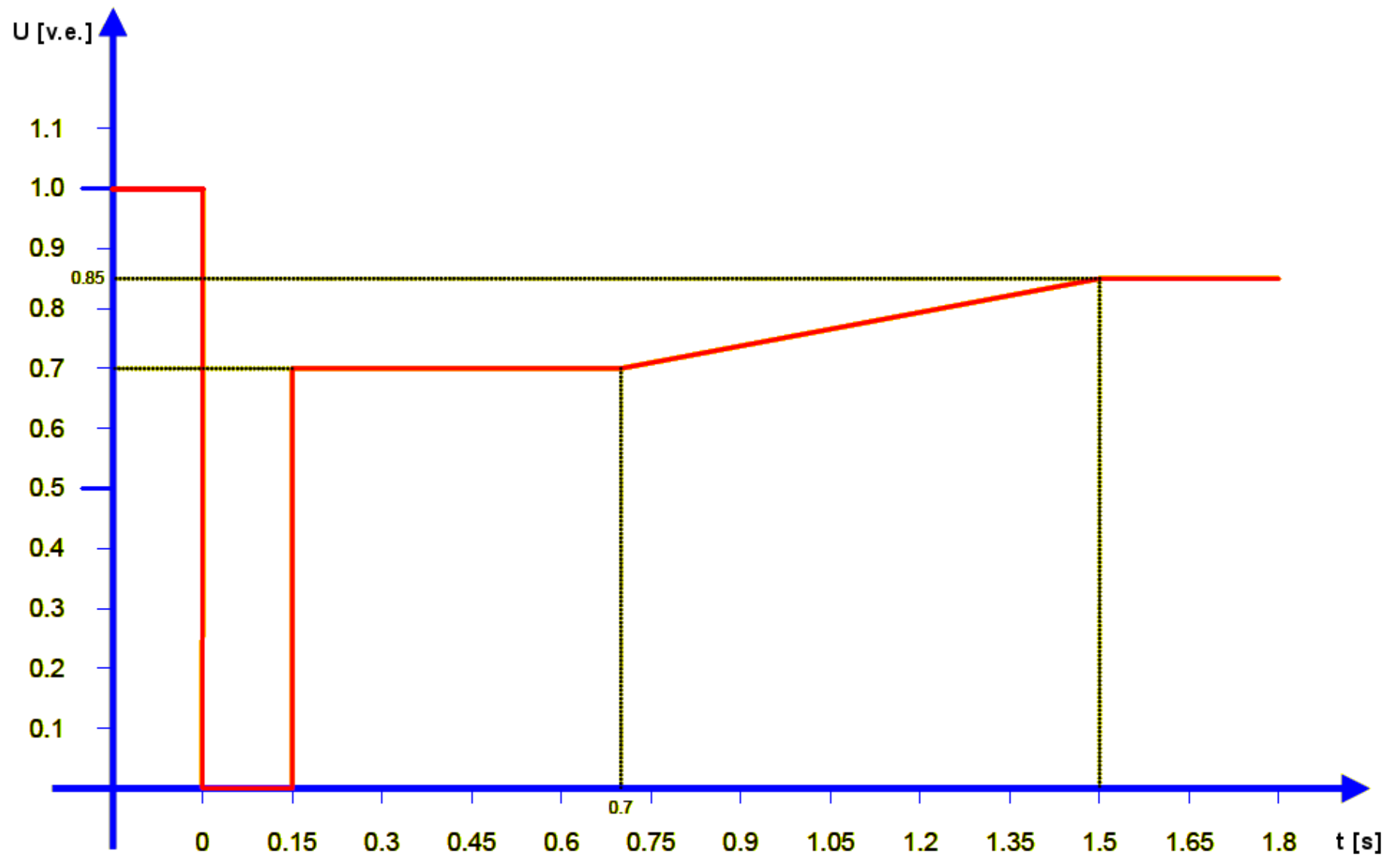


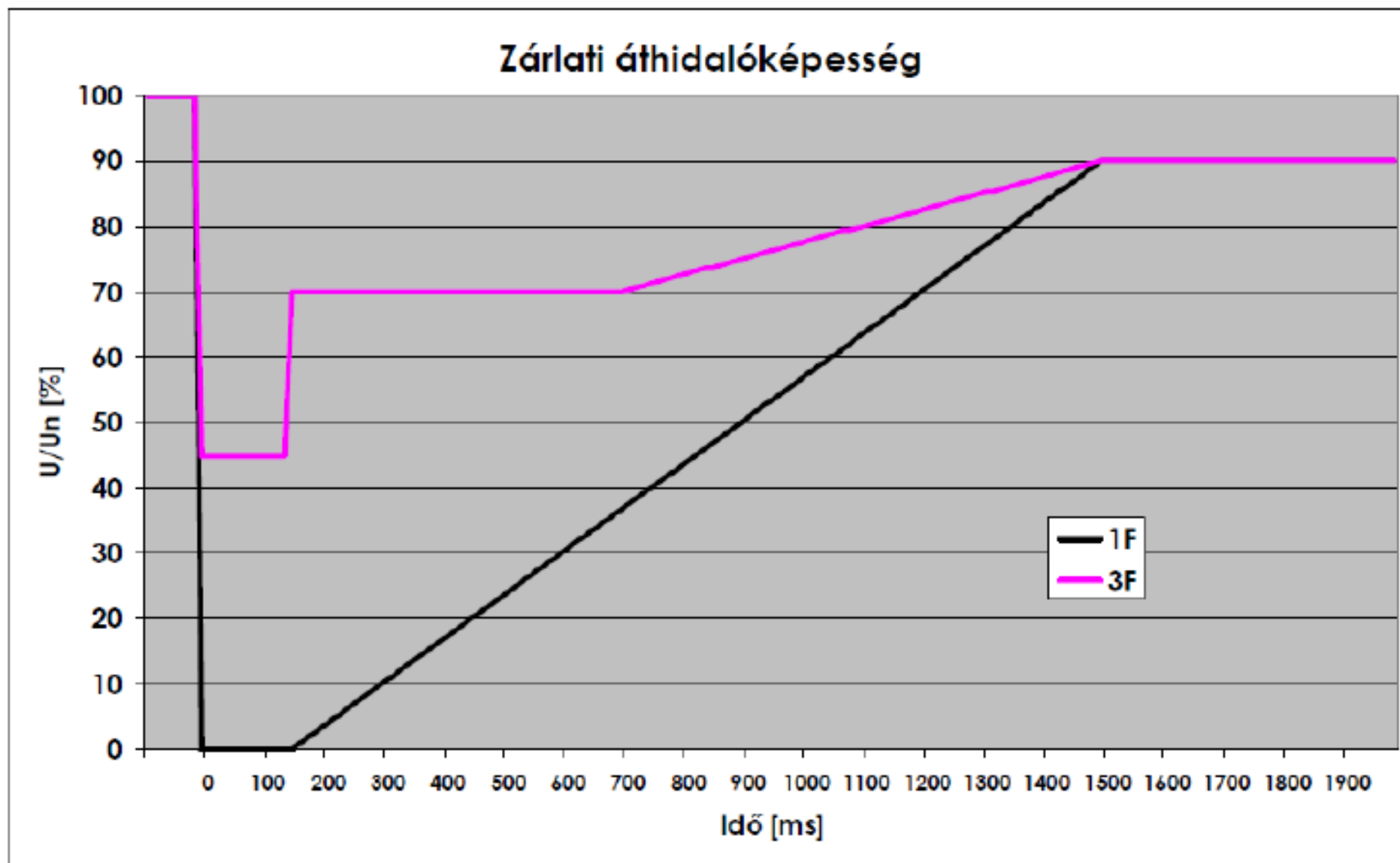
### Active Power



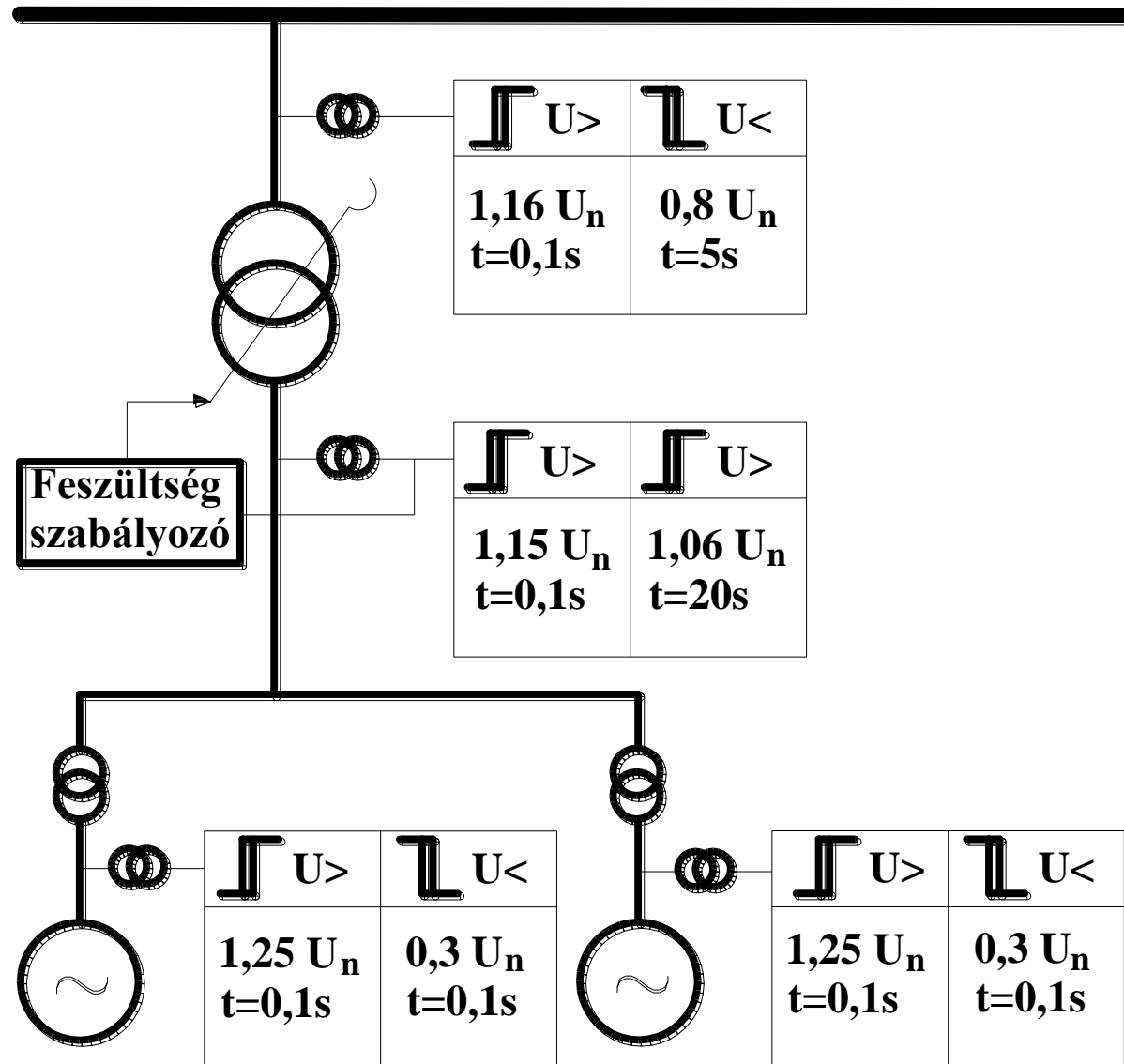








6.6. ábra Időjárásfüggő termelő egységek zárlati áthidalóképessége



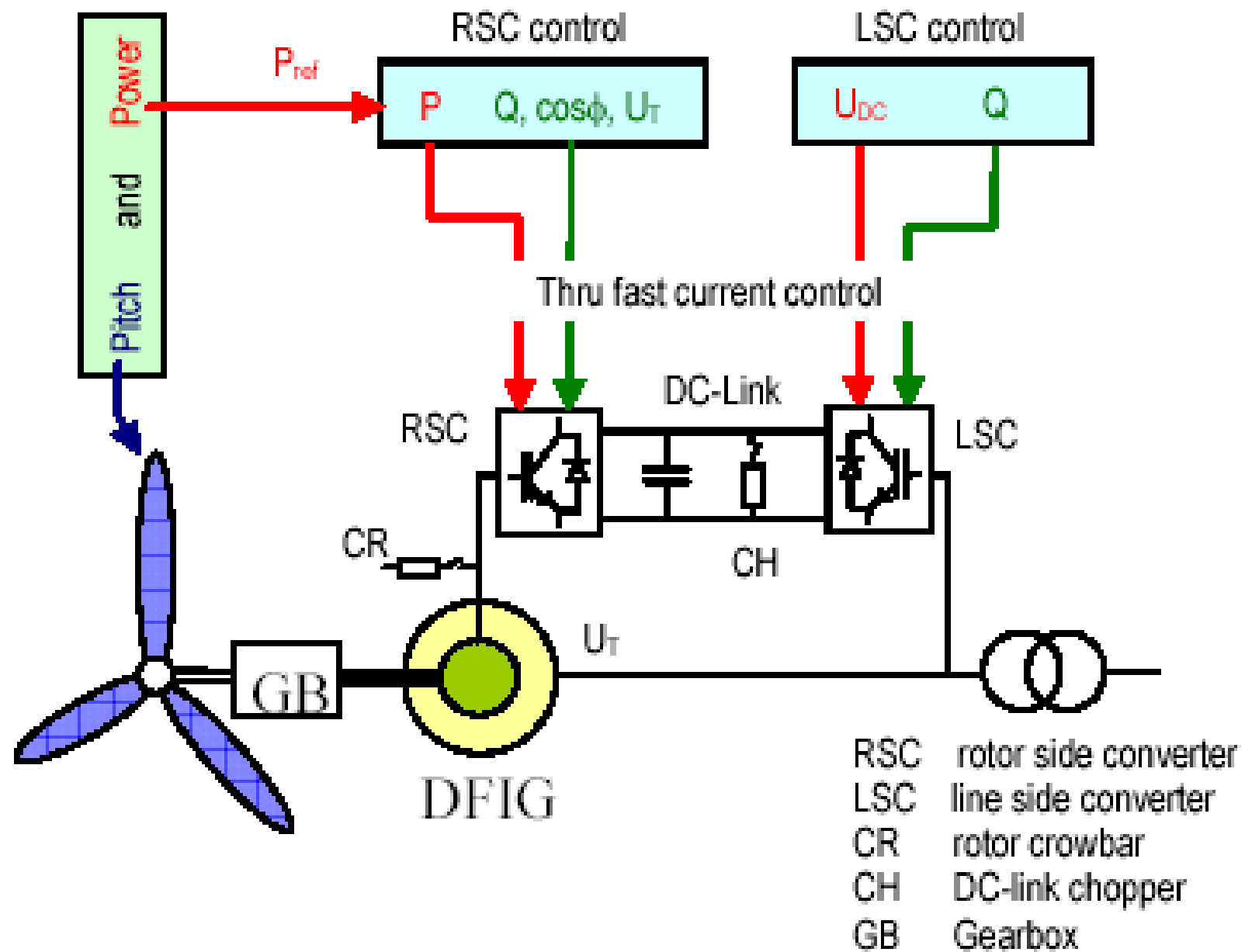


Fig. 3. Typical layout of a DFIG

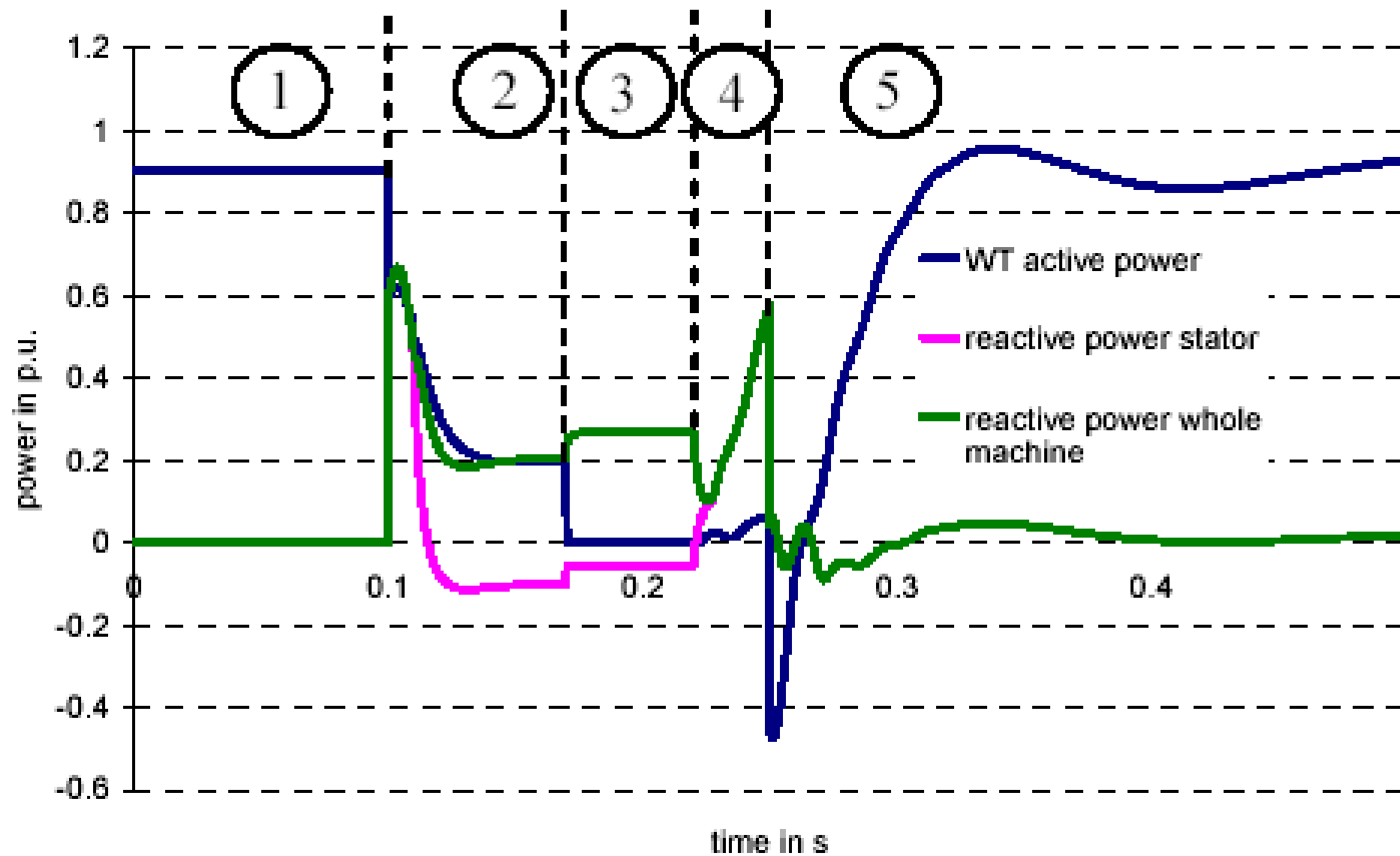


Fig. 9. DFIG response during fault ride-through

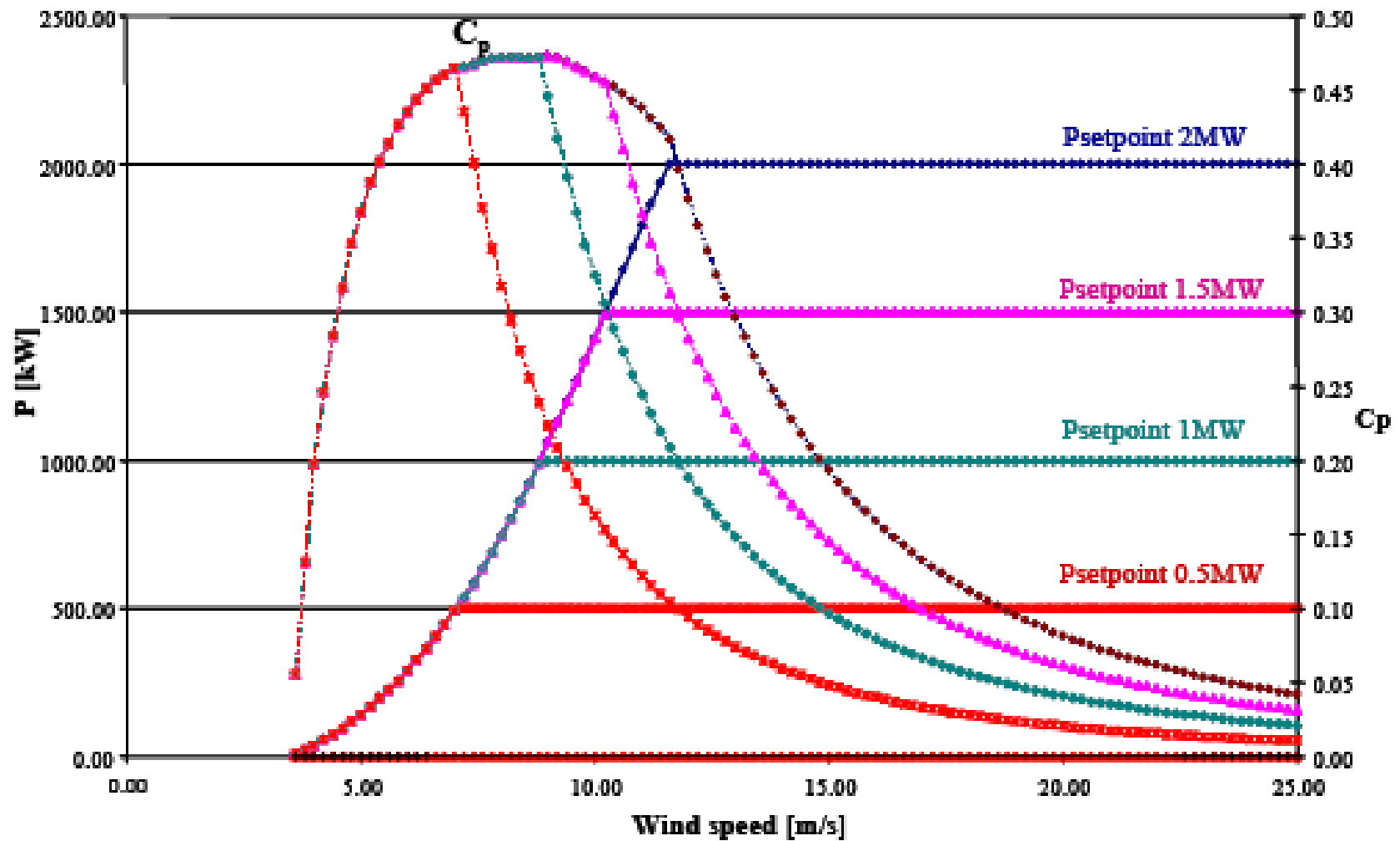
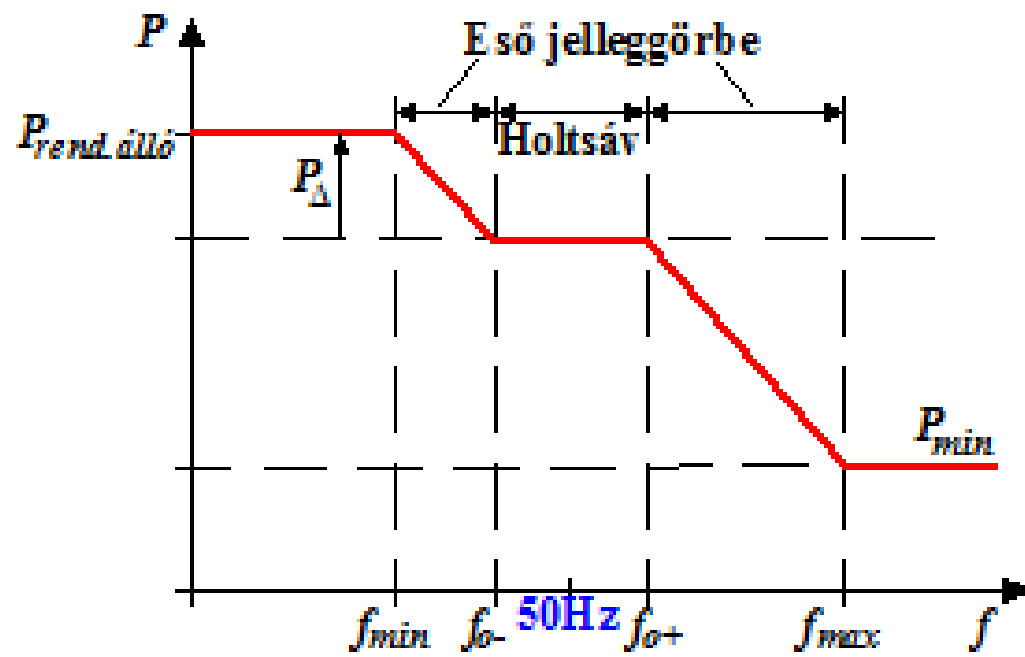
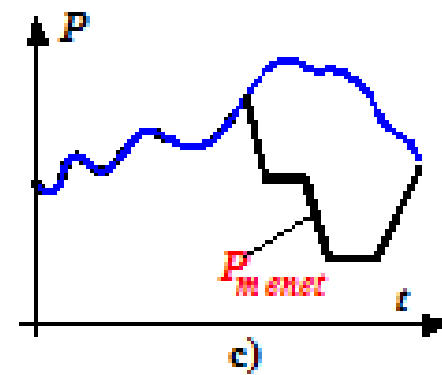
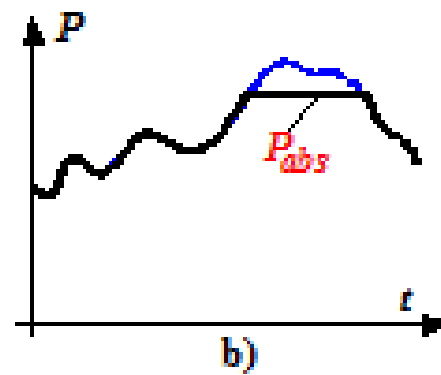
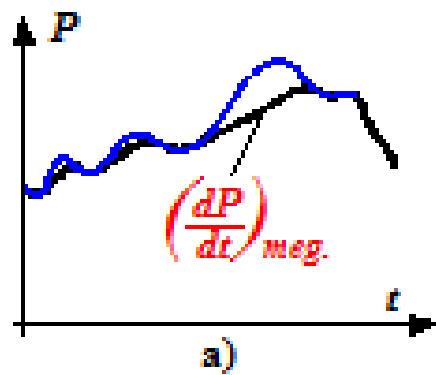


Figure 17: Power curves and  $C_p$  curves for different wind turbine power setpoints.



— A szélből kinyerhető teljesítmény  
— A ténylegesen kivett teljesítmény





## 3. rész

---

Vízerőművek turbinái és generátorai

# vízerőművekről

Osztályozási szempontok	Megnevezés	Megjegyzés
Energiagazdálkodás	Önálló (sziget) erőmű	
	Kooperációs Alaperőmű	
	Csúcserőmű	
Névteljes teljesítmény	Törpe erőmű	0-99kW
	Kis erőmű	100-999 kW
	Közepes erőmű	1-10 MW
	Nagy erőmű	>10MW
Energiaforrás	Folyóvíz	
	Természetes tározó	
	Szivattyús tározó	
Esés	Kis esésű	0-15m
	Közepes esésű	15-50m
	Nagy esésű	>50m
Vízgazdálkodás	Csak vill. energ. fejl.-t szolgál	
	Többféle hasznosítást szolgál	Öntözés, hajózás, vízellátás stb.
Gépészeti/villamos jellemzés	Turbinák	Propeller Kaplan Francis Pelton <b>Csőturbina</b>
		Generátorok
	Hajtás	Áttételes Közvetlen

3-1. táblázat  
Vízerőművek csoportosítása

2

A vízerőművek a globális villamos energia termelés kb. 20%-át adják. A vízerőművek csoportba sorolása sokféle szempont szerint történhet (lásd 3-1. táblázatot). A világ három legnagyobb vízerőműve (2010):

- Three Gorges (Kína): 32x780MW,
- Itaipu (Brazília-Paraguay): 20x720MW,
- Guri2 (Venezuela): 10x770MW.

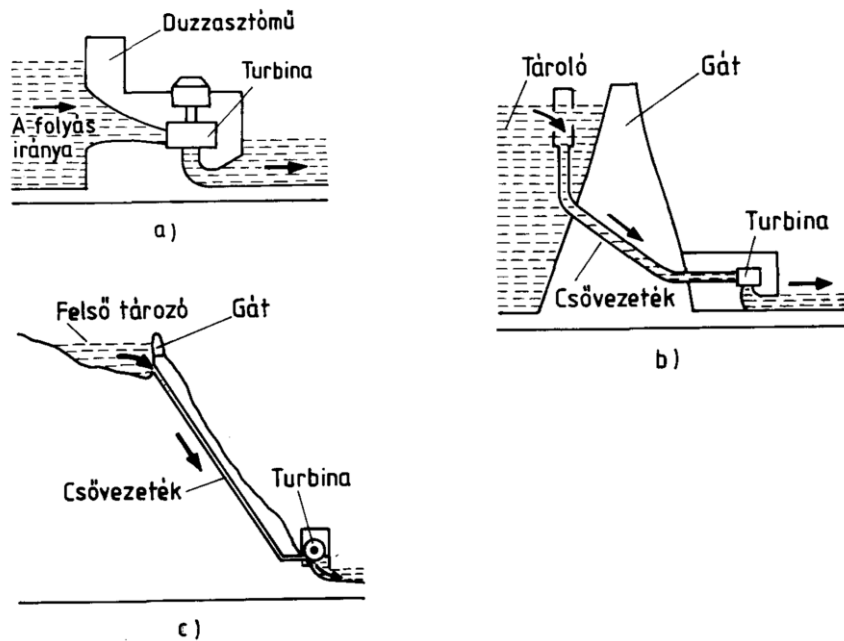
Európa legnagyobb vízerőműve:

- Vaskapu (Románia-Szerbia): 10x190MW.

A vízturbinák maximális hatásfoka:  $\eta_T=96,5\%$ .

A generátorok maximális hatásfoka:  $\eta_G=98,5\%$ .

### 3-1. ábra. A vízerőművek típusai az esésmagasság szerint.



3

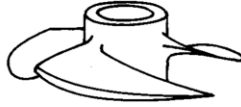
Az esésmagasság szerinti vízerőmű típusokat a 3-1. ábrán láthatjuk, ezek:

- kis esésű: átfolyó rendszerű, duzzasztóművel, Kaplan vagy propeller turbinával,
- közepes esésű: folyó vagy tó, tároló gáttal, Francis turbinával,
- nagy esésű: hegyen levő tározóval, Pelton turbinával,
- kis esés és kis vízhozam: átfolyó rendszerű, csőturbinával (ez a 3-5.ábrán látható).

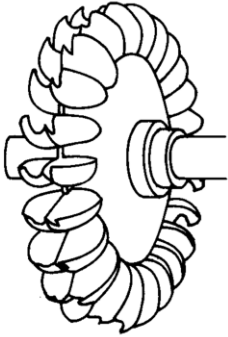
## 3-2. Turbina típusok



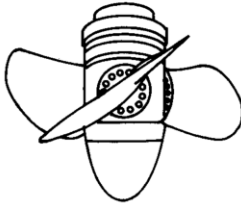
a)



b)



c)

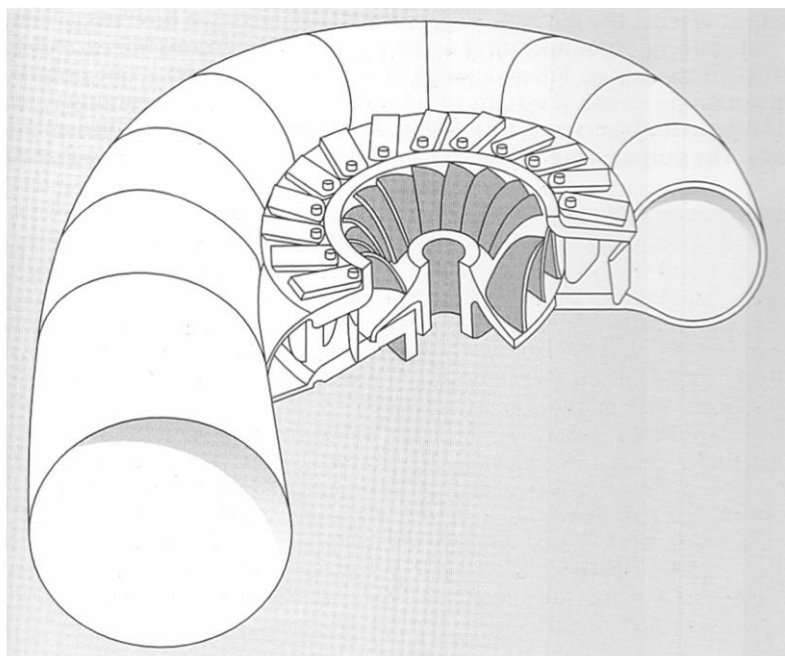


d)

3-2. ábra. A turbina járókerekének típusai.

a./ Francis,  
b./ propeller,  
c./ Pelton,  
d./ Kaplan.

3-3. ábra. A Francis turbina szerkezete.

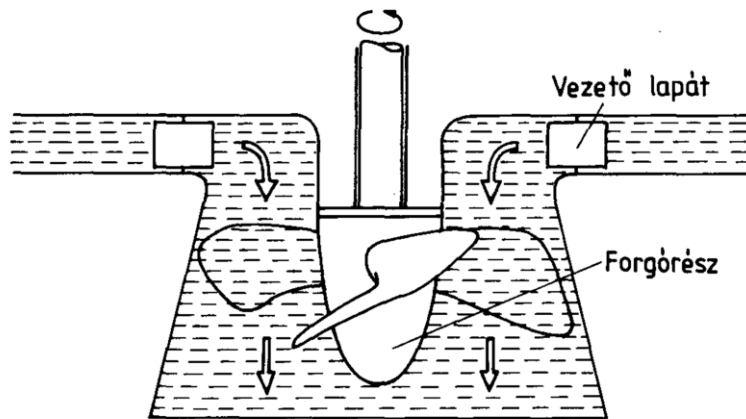


A 3-3. ábrán „kivágott” formában látható a Francis turbina szerkezete (kívülről befelé haladva):

- a csigaház (csökkenő keresztmetszetű),
- a vezető lapátok (forgó csapra szerelve a szabályozáshoz),
- a forgórész lapátok (fix helyzetűek).

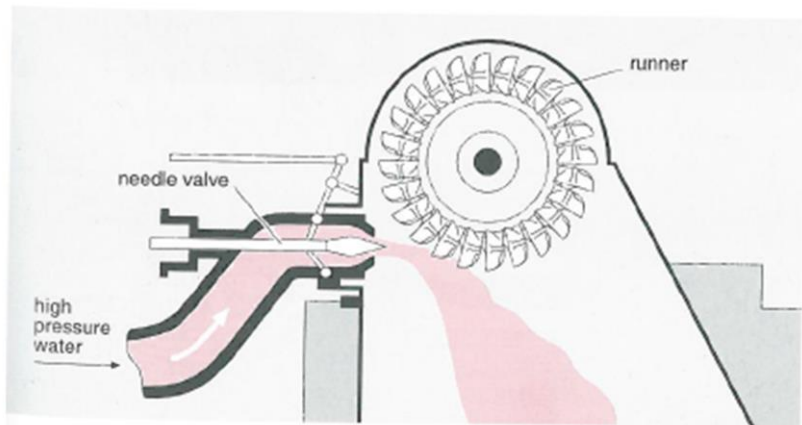
A vezetőlapátok elforgatásával állítható az áramlás mértéke, de ezzel változik a turbina hatásfoka is. Általában függőleges tengelyű. A lapátok eltérítik a vízszög útját (akció erő), a reakció erő forgásban tartja a turbina járókereket, ezért reakciós turbinának nevezik. A turbinán áthaladó víz nyomása jelentősen csökken az áthaladás során, ez fedezi az átadott energia jelentős részét.

3-4. ábra. Egy propeller turbina keresztmetszete.

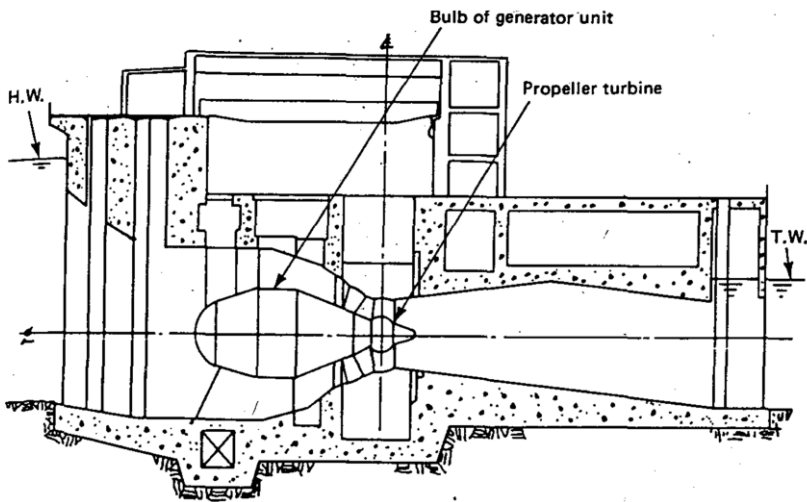


6

Ha nagy vízmennyiség kis esés magassággal áll rendelkezésre, akkor nagy keresztmetszetű axiális átömlésű (propeller vagy Kaplan) turbinát alkalmaznak. A vízszög megfelelő eltérítéséhez fokozatosan megcsavart, propellerhez hasonló lapátozás kell. A propeller turbina forgórésze fix lapátozású, így egyszerű és olcsó. A forgórész lapátok elforgatására szükség van a jó hatásfok érdekében, ha a teljesítményigény jelentősen változik (ez a Kaplan turbina). Ezek a turbinák is a „reakciós turbinák” csoportjába tartoznak. Döntő különbség a Francis turbinához képest, hogy ezeknél a lapát kerületi sebessége sokkal nagyobb a víz sebességénél (legalább kétszerese).



3-5. ábra. Egy körüláramoltatott generátorral készült csőturbinás erőmű keresztmetszete.



8

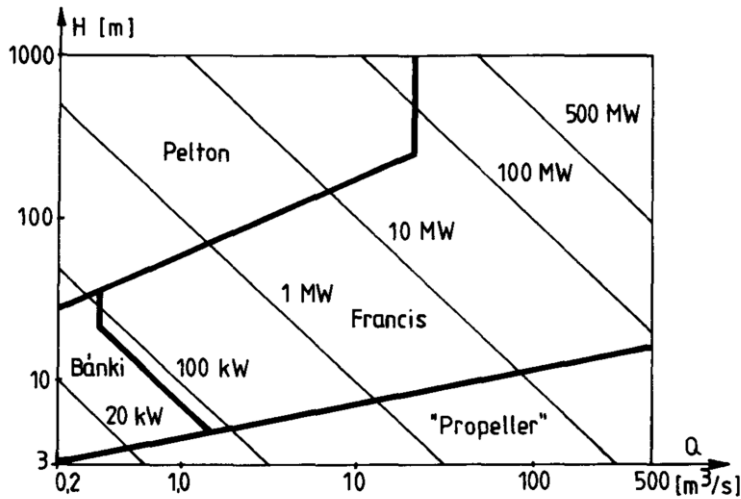
Kis esés magasság és kis vízmennyiség esetén a „csőturbinák” használhatók előnyösen. Az elnevezés gyűjtőnév, amely a következő közös tulajdonságokkal rendelkező turbinákat foglalja magába:

- a tengelyük vízszintes, vagy enyhén ferde,
- az állórész csigaház nélküli kb. vízszintes csatorna,
- az alkalmazott forgórész: propeller vagy Kaplan,
- az alkalmazott generátor különleges szerkezetű (pl. koszorú generátor).

A csőturbinák egyik konkrét típusa a „körüláramoltatott” generátorral kivitelezett megoldás, amelyknél egy torpedó alakú köpeny védi és szigeteli a generátort (lásd 3-5. ábrát). A Kiskörei Vízerőműben ezt a típust alkalmazzák. Az árapály erőművekben is ilyen típusú turbinákat használnak.



## teljesítmény, jellemző fordulatszám



9

3-6. ábra. A különböző típusú turbinák alkalmazási tartományai a H-Q síkon.

A vízerőműből kinyerhető teljesítmény [kW]-ban:

$$P_H = g \cdot \rho \cdot Q \cdot H \cdot \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{TR} \quad (3-1)$$

Itt:  $g$ : nehézségi gyorsulást [ $m/s^2$ ],

$\rho$ : a víz sűrűsége [ $kg/dm^3$ ],

$Q$ : térfogatáram [ $m^3/s$ ],

$\eta_T, \eta_G, \eta_{TR}$ : hatásfokok (turbina, generátor, transzformátor).

A turbinák névleges fordulatszámát a hidraulikus oldal határozza meg:

$$n_{Tn} = N_s \sqrt{\frac{H^{5/2}}{P_{Tn}}}, \quad (3-2)$$

itt  $n_{Tn}$  a turbina névleges fordulatszáma [ $1/min$ ]-ban,  $P_{Tn}$  [kW]-ban és  $H$  [m]-ben helyettesítendő.

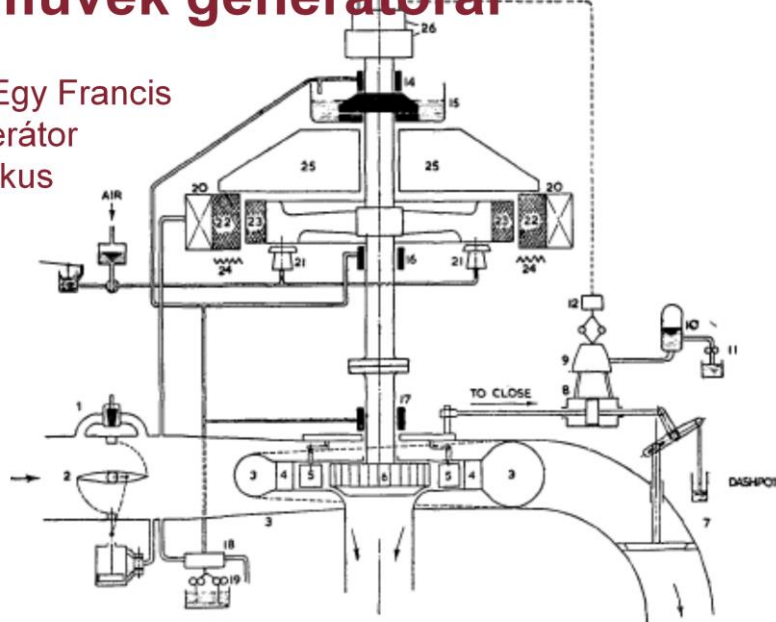
Az  $N_s$  „jellemző fordulatszám” gazdasági és konstrukciós optimumok alapján alakult ki és táblázatokból vehető ki (3-2. táblázat).

3-2. táblázat.

Turbina típus	Jellemző fordulatszám ( $N_s$ )
Francis	70-500
Propeller	600-900
Kaplan	350-1000
Pelton 1 sugárral	10-35
Pelton 2 sugárral	10-45

## 3-4. Nagyteljesítményű vízerőművek generátorai

3-7a. ábra. Egy Francis turbina-generátor rendszer tipikus felépítése.



10

A nagyteljesítményű vízerőművek generátorai: sokpólusú szinkron generátorok:  
 $6 \leq 2p \leq 100.$  (3-3)

A generátorok forgórésze kiálló pólusú és gyűrű alakú. A generátorok szinkron fordulatszámát a hálózati frekvencia és a pólusszám határozza meg:

$$n_{G1} = \frac{60f_H}{p} [1/\text{min}]. \quad (3-4)$$

Nagy teljesítményen áttételt nem szoktak alkalmazni, ezért

$$n_{G1} = n_{Tn}. \quad (3-5)$$

Mint mondtuk a fordulatszámot a hidraulikus oldal határozza meg, így a szükséges pólusszám:

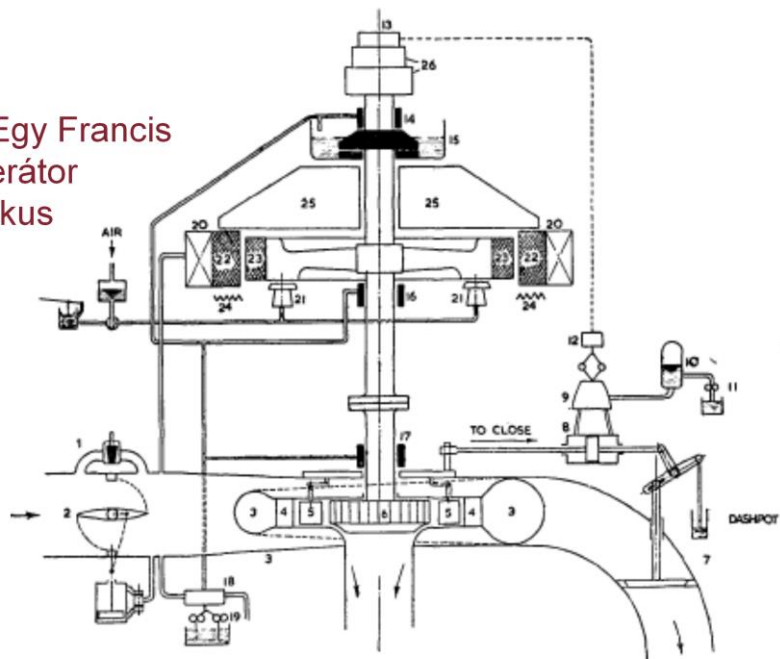
$$p = \frac{60f_H}{n_{Tn}}. \quad (3-6)$$

A (3-3) szerinti nagy pólusszám miatt  $n_{Tn}$  finoman „hangolható”, és így a 3-2 táblázat szerinti optimális  $N_s$  jellemző fordulatszámok kellő pontossággal beállíthatók. A nagyteljesítményű egységek általában függőleges tengelyelrendezéssel készülnek (3-7a. ábra).

Az elrendezés fő elemei felülről lefelé haladva a tengely mentén:

talpcsapágy, konzol, generátor, tengelykapcsoló, és a turbina forgórésze.

3-7a. ábra. Egy Francis turbina-generátor rendszer tipikus felépítése.

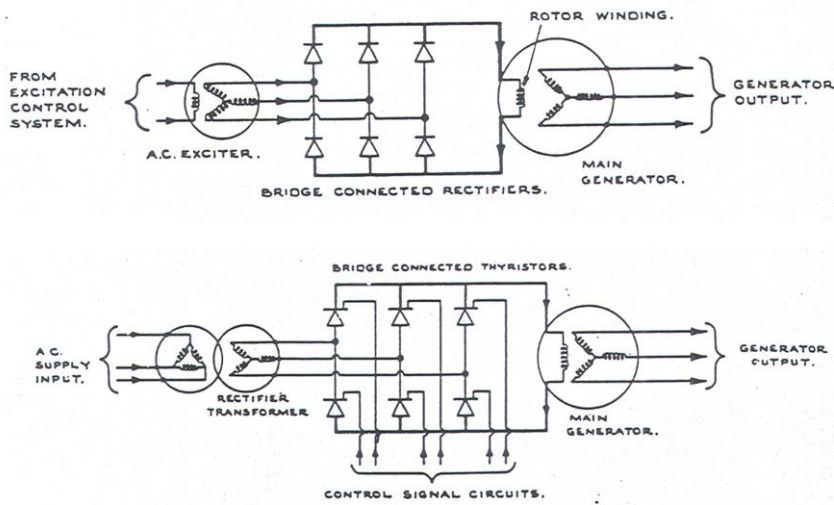


11

Néhány fontosabb elem megnevezése:

- 3: csigaház,
- 5: vezetőlapátok az állórészen,
- 6: a turbina forgórésze,
- 15: talpcsapágy,
- 14,16,17: (felső, középső, alsó) vezető csapágy,
- 22, 23: a generátor álló és forgórésze,
- 8,9,10,11,12,13: a vezetőlapátok szabályozásának részei,
- 25: tartó konzol,
- 18,19: olajozás,
- 26: gerjesztés.

3-7b. ábra. A kefenélküli gerjesztés két lehetséges megoldása.



12

A generátorok gerjesztésére a következők jellemzőek:

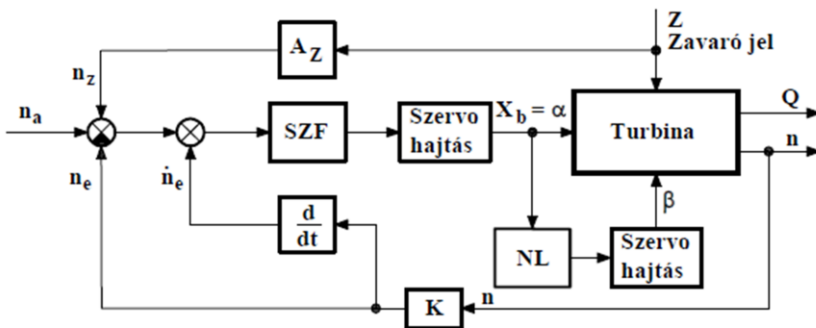
kefenélküli (lásd a 3-7b. ábrát),

maximális biztonságra méretezik (a költségek csak másodlagos szempontot jelentenek),

nagyteljesítményű ( $3\sim 5\% P_{Gn}$ ),

gyors működéshez forszírozás kell, mert a gerjesztőkori időállandó nagy ( $T_g \approx 5\sim 6s$ ).

## 3-5. Vízturbinák szabályozása



3-8. ábra. Egy szokásos turbina fordulatszám szabályozásának blokkvázlata.

13

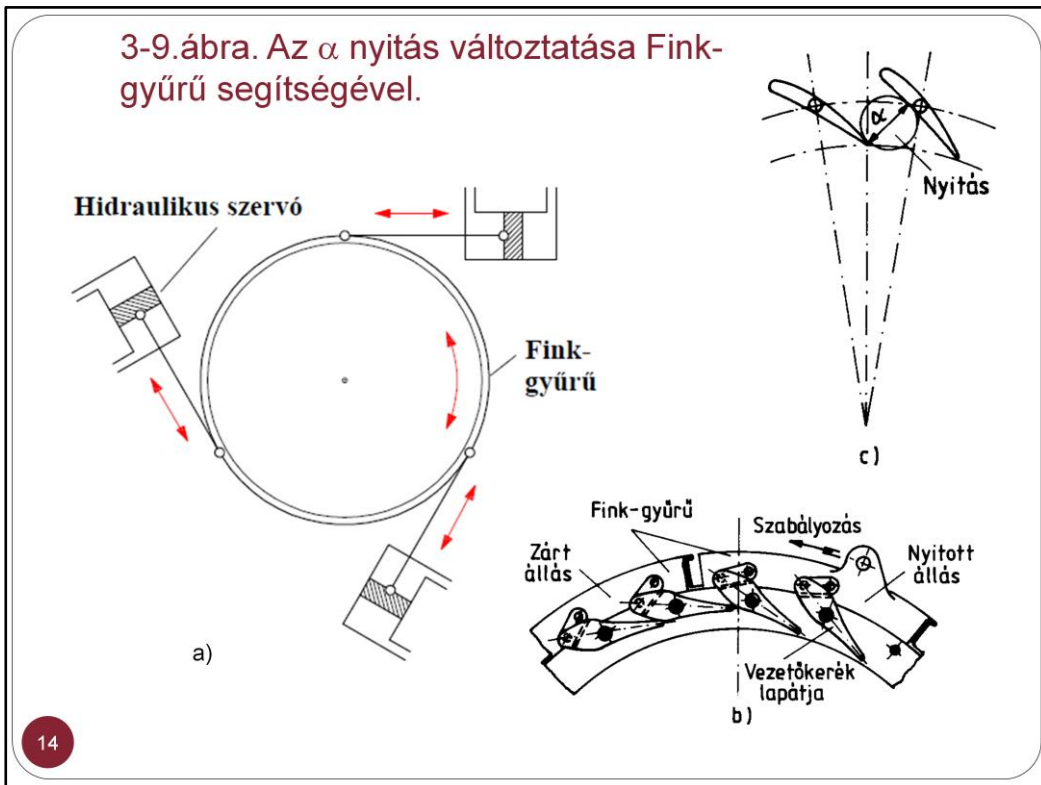
**Szigetüzemben:** a szabályozás célja a frekvencia pontos tartása a fordulatszám segítségével. Ekkor  $\Delta P$ ,  $\Delta H$ ,  $\Delta Q$  zavaró jelek.

**Hálózati üzemben:** a frekvenciát a teljes villamos rendszer határozza meg, a szabályozás elsődleges célja a terhelésben való részesedés meghatározása.

A szabályozás másodlagos célja: megvédeni a rendszert a károsodástól (megszaladás, ugrásszerű nyomásváltozás).

Hálózati üzemben a fordulatszám szabályozás a legfelső hurok, amely fölé teljesítmény szabályozó hurok, esetleg frekvencia szabályozó hurok van rendelve.

A sebesség szabályozás a turbinán áthaladó  $Q$  térfogatáram szabályozásán keresztül valósul meg, mivel (3-1) alapján ezzel szabályozni lehet a hálózatnak átadott  $P_H$  teljesítményt (lásd 3-8. ábrát).

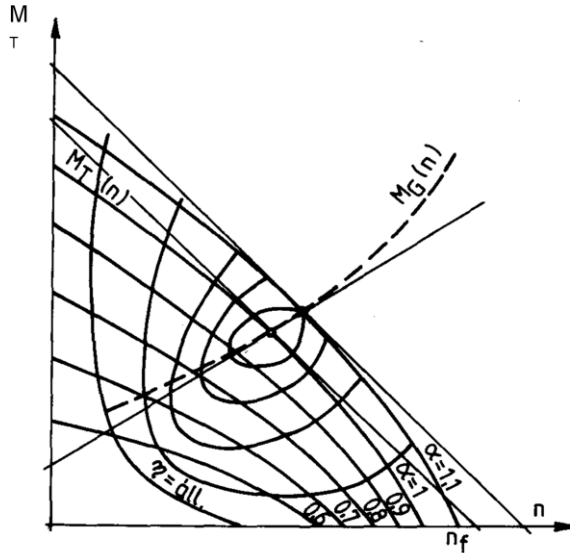


Francis turbina esetén  $Q$  az  $\alpha$  „nyitással” változtatható (lásd 3-9c. ábrát).

Kaplan turbinánál a járókerék lapátjainak  $\beta$  szögét is állítani kell a jó hatásfok elérése érdekében.  $\alpha$  és  $\beta$  összehangolása az NL nemlineáris függvénykapcsolat segítségével történik (lásd 3-8. ábrát).

A vízturbinák szabályozásához szükséges erő meglehetősen nagy. A vezetőlapátok helyzetét szabályozó Fink-gyűrű erőszükséglete elérheti a néhányszor  $10^4\text{N}$  nagyságrendet. Ilyen nagy erő kifejtés hidraulikus szervomotorral érhető el (lásd 3.9a. ábrát). A fordulatszám érzékelő és a szervomotor közé 2~3 fokozatú erősítést kell közbeiktatni.

3-10a. ábra. Egy Francis turbina  $M_T$ -n diagramjai különböző nagyságú nyitások ( $\alpha$ ) esetében, és a hatások szintgörbéi az  $M_T$ -n síkon.



15

A vízturbinák nyomaték-fordulatszám jelleggörbéi  $\alpha$ =állandó mellett eső jellegűek (3-10a. ábra), és a rendszer statikusan stabilis, ha frekvencia függő fogyasztók is vannak ( $M_G(n)$  emelkedő). A nemlineáris jelleggörbéket egy-egy munkapontban kis változásokra linearizáljuk, így a mozgásegyenlet (egy közös tengelyre redukálva):

$$J \frac{dw}{dt} = \Delta M_T - \Delta M_G = A_1 \Delta w - A_2 \Delta w + A_3 \Delta Q + A_4 \Delta H. \quad (3-7)$$

A megszaladási/megfutási fordulatszám ( $M_T=0$ -nál):

$$\text{Francis turbináknál:} \quad n_f \leq 2n_n, \quad (3-8a)$$

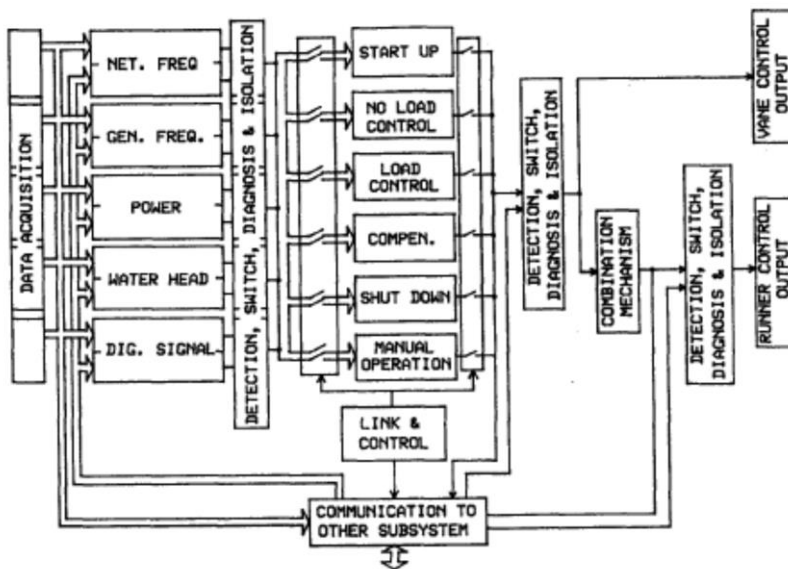
$$\text{Kaplan turbináknál:} \quad n_f = (2,5 \sim 3,5)n_n. \quad (3.8b)$$

A terhelés hirtelen elvesztése (pl. hálózat kimaradás) esetén a fellépő nagy fordulatszámokon (lásd (3-8b)-t) a centrifugális erők károsíthatják az erőmű forgó részeit (turbina, generátor). A szervohajtás lassú beavatkozása miatt nagy tehetetlenségi nyomatéokra van szükség a gyorsulás kellő korlátozásához. A forgórész tehetetlenségi nyomatékának döntő részét a generátor adja. A tehetetlenségi nyomaték megkívánt minimális értékét a következő összefüggés szerint számíthatjuk:

$$J_{\min} = cP_n \left( \frac{1000}{n_n} \right)^2. \quad (3-9)$$

Ha  $J_{\min}$ -ot [ $Ws^3$ ]-ben akarjuk megkapni, és  $P_n$ -et [kW]-ban,  $n_n$ -et [1/min]-ban helyettesítjük be, akkor a „c” konstans értéke 0,2~0,5 között változhat a turbina típusától függően. Megjegyeznénk, hogy egyes vízerőműveknél szükség esetére elkerülő (by-pass) utat biztosítanak a turbina mellett (lásd a 3-7a. ábra jobbalsó részét). Ez egyrészt csökkenti a turbina nyomatékát/teljesítményét és így a gyorsulását, másrészt megakadályozza az  $\alpha$  nyitás csökkentésével elérhető gyors elzárást, és nyomáshullám kialakulását a csővezetékben.

3-10b. ábra. Modern vízerőmű mikroproceszoros irányítása,



16

A mai modern vízerőművi turbina-generátor szabályozások mikroprocesszoros kivitelben készülnek, és alapvető követelmény, hogy a rendszer hibatűrő legyen. Ennek egyik lehetséges kivitele esetén pl. a fordulatszám szabályozás megduplázott hardverrel és szoftverrel készül, két lokális és egy multi-busszal. Mindkét rendszer a következő input/output interfészeket tartalmazza (3-10b. ábra).

*Bemenetek:*

- két frekvenciamérő csatorna ( $f_H$ ,  $f_G$ ),
- két adatgyűjtő A/D átalakító ( $P_G$ ,  $H$ ),
- hat digitális bemenet (indulás, leállítás, teljesítmény alapjel le/fel, generátor/konverter üzem, a megszakító állapota).

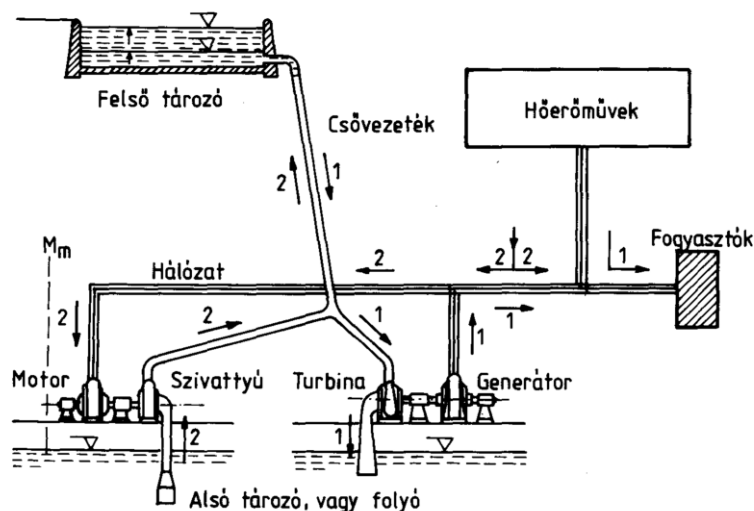
*Kimenetek:*

- két D/A átalakító ( $\alpha$ : nyitás,  $\beta$ : járókerék).

A szabályozó/vezérlő köröket szünetmentes áramforrás táplálja.



## 3-6. Szivattyús-tározós vízerőművek



3-11. ábra. A szivattyús tározó működési elve. (Az energia- és folyadékáramlás iránya a tározó leürítésekor („1”-es) és a tározó feltöltésekor („2”-es).

17

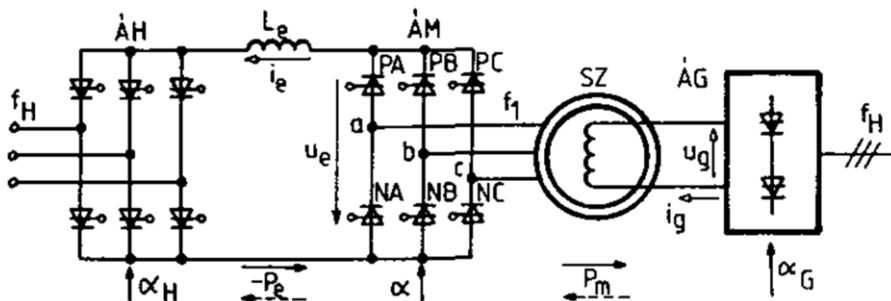
Nagy gazdasági érdek fűződik a villamos energiarendszer egyenletes terheléséhez, kihasználásához. Ez két úton érhető el.

- A fogyasztók le/fel kapcsolásával szabályozzuk azok eredő teljesítményfelvételét. Ekkor szükség van prioritás megállapítására is.
- A termelői oldalt szabályozzuk az egységek le- és felkapcsolásával, vagy azok folyamatos teljesítményszabályozásával. Az előbbit a gyakori újraindítás többlet igénybevételei és időigényessége, az utóbbit a részterhelésen jelentkező rossz hatások teszik előnytelen megoldássá.

A feladat energiátárolóval oldható meg, amelynek eddig legjobban bevált eszköze a szivattyús-tározós vízerőmű (lásd 3-11.ábrát).

Kis fogyasztású (völgy) időszakban energiátárolást valósítanak meg („2”-es irányok) azzal, hogy a vizet a felső tározóba szivattyúzzák fel. Nagy fogyasztású (csúcs) időszakban a felső tározóból leürítik a víz egy részét („1”-es irányok) és ezzel pótolják a fogyasztók többlet energia igényét, Alacsony vízhozam esetén kell alsó tározó is.

3-12. ábra. Áramirányítós szinkron motor elvi kapcsolási vázlata.



18

A 3-11. ábrán külön motor-szivattyú és turbina-generátor négygépes rendszert tétéleztünk fel (ilyenek voltak a korai megoldások). Elvileg a két gépcsoport összevonható egygé, hiszen a villamos gép működhet motorként és generátorként is, és hasonlóan a vízgép is működhet turbina és szivattyúként is.

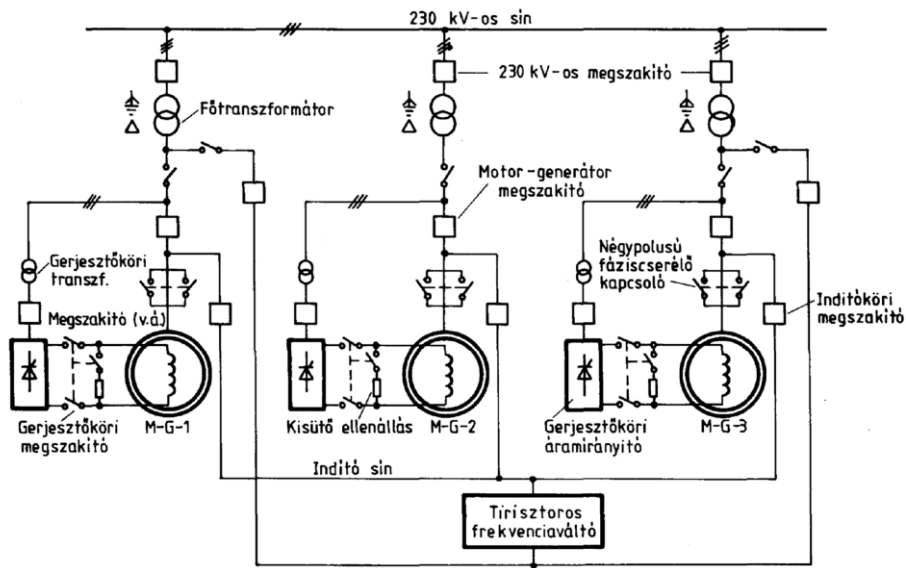
Kaplan turbina esetében a víz áramlási iránya megfordítható a lapátszög változtatásával forgásirányváltás nélkül is.

Francis és propeller turbinák esetében két ellentétes forgásirányra van szükség ahhoz (a legegyszerűbb esetben), hogy a víz kétirányú áramlását (tárolás/leürítés) biztosítsuk. Ez a háromfázisú villamosgépet tápláló fázisok cseréjével oldható meg. PI. turbina üzemből szivattyú üzembe való átmenetkor először le kell állni, majd újra meg kell indulni ellenkező irányban. Közismert, hogy a nagy szinkron motorok indítása problematikus, amelyre korábban több (nem túl előnyös) megoldást találtak ki. A mai korszerű megoldások egy része az indítás feladatára frekvenciaváltót alkalmaz (kétegéses rendszer az USA-ban), mégpedig:

- 100 MW felett kétoldalról táplált aszinkron motort (lásd 2-32. ábrát),
- 100 MW alatt áramirányítós szinkron motort (lásd 3-12. ábrát).

A modern megoldások másik része (elsősorban Európában) irányváltás nélküli háromgépes rendszert alkalmaz, pl. többfokozatú szivattyúval és Francis turbinával, valamint egy közös motor/generátorral.

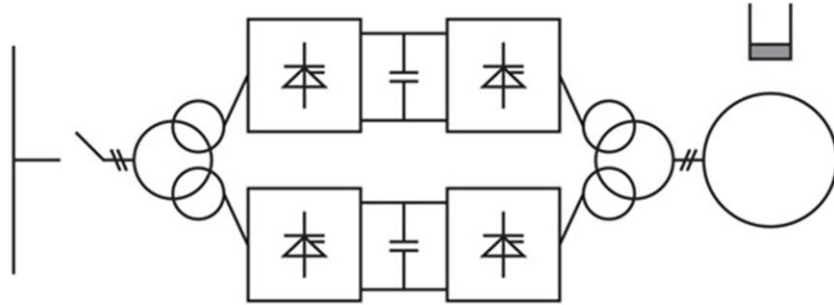
3-13. ábra. Szivattyús tározású vízerőmű egyvonalas kapcsolásának részlete. A szinkron motorok indítása egyenként történik a tirisztoros frekvenciaváltóról (ÁSZM kapcsolás).



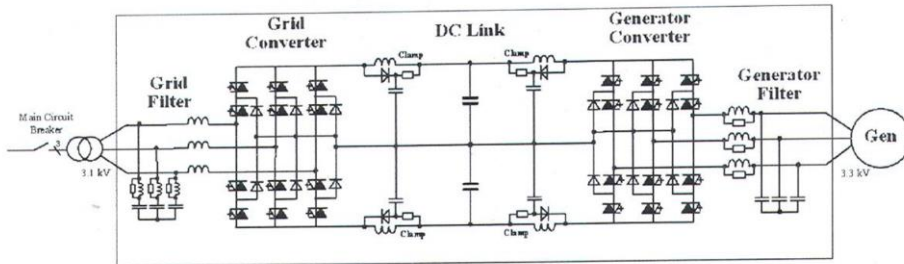
19

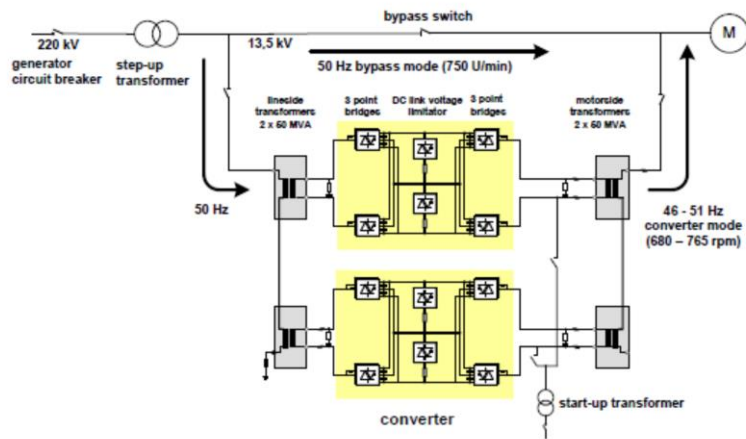
A 3-13. ábrán (egy Egyesült Államokbeli) szivattyús tározós vízerőmű egyvonalas kapcsolási vázlatát látható. Mindhárom szinkron motor egyenként indítható a „tirisztoros frekvenciaváltó” és az „indító sín” segítségével, majd szinkronozható a hálózathoz. A forgásirányváltást a „négypólusú fáziscserélővel” oldják meg. Ezen műveletek alatt a „motor-generátor megszakító” nyitva van.

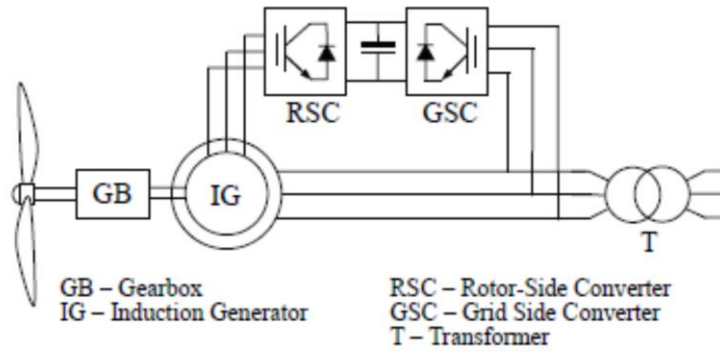
FIGURE 1 Fully Fed Single Line Diagram

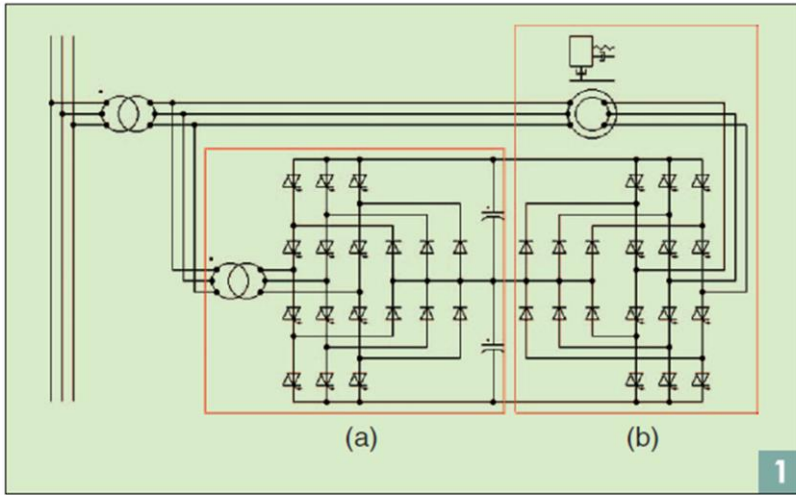


The above diagram shows the ideal arrangement for low output motor-generator units using a fully fed single line.









Three-level VSI slip energy recovery drive system: (a) transformer section and (b) machine section.



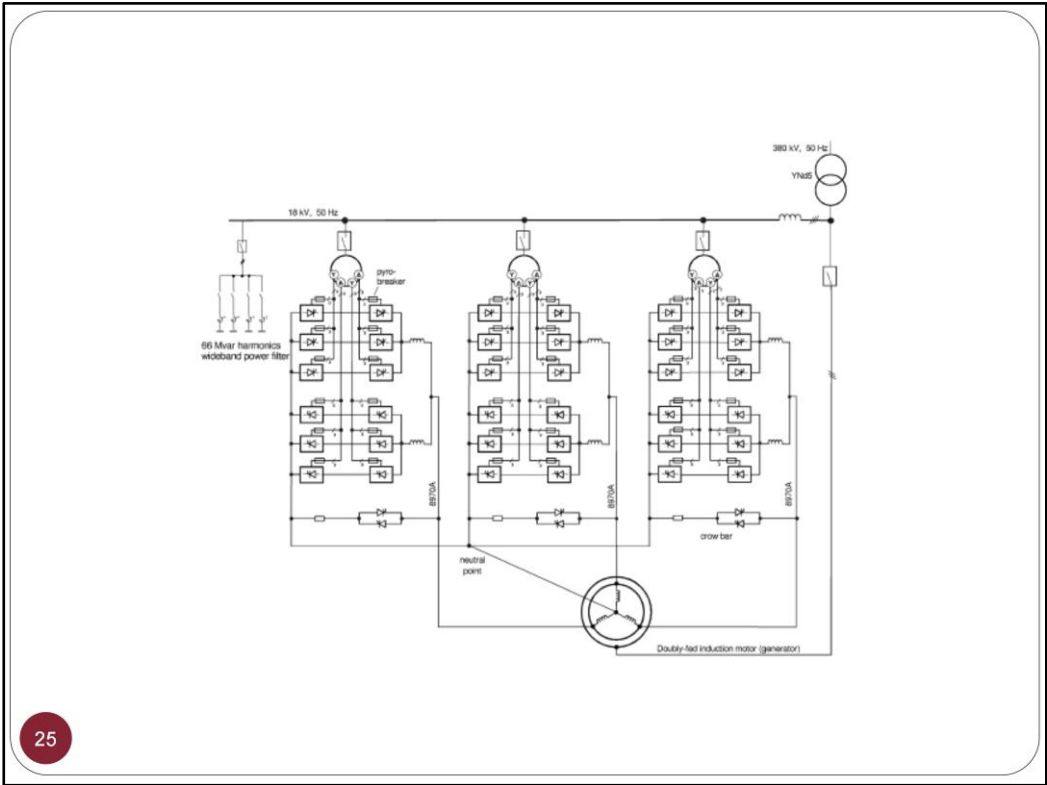
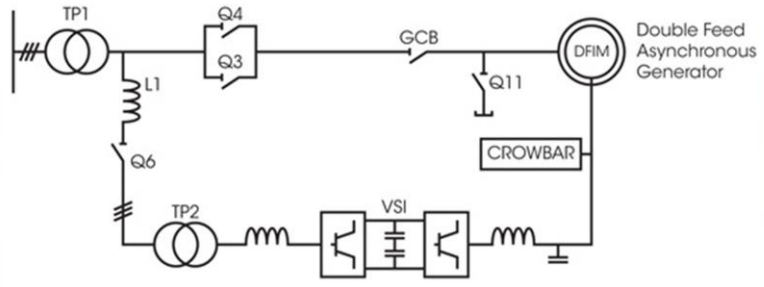
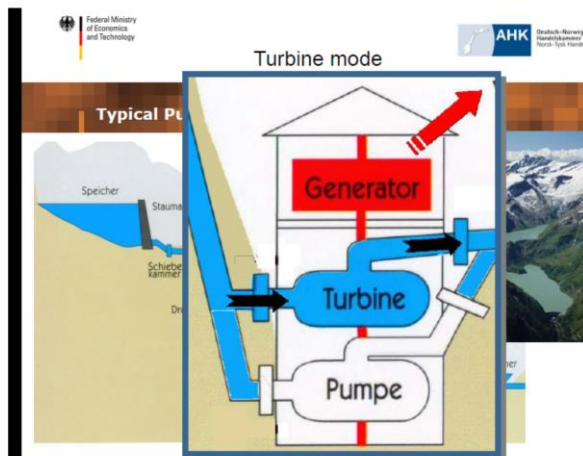
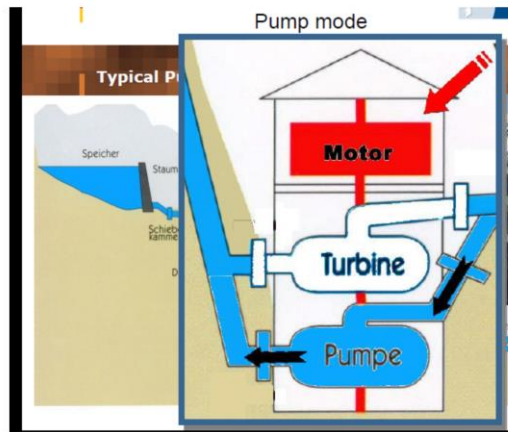


FIGURE 2 DFIM Fed Single Line Diagram



In contrast to Figure 1, Figure 2 shows the layout for replacing the synchronous motor-generator with a double fed induction machine (DFIM).





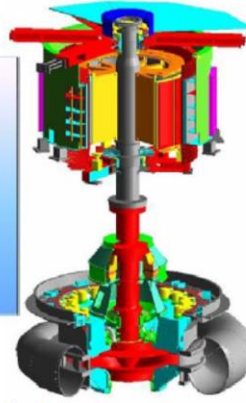
**More flexibility by using Variable Speed**

**Example Goldisthal, Germany**

- In operation since 2002
- 4x 265 MW Reversible Pump-Turbine units
- 2 units with variable speed supplied by AH
- Advantages
  - regulation of pump power
  - fast dynamic response times
  - higher efficiency for variable head

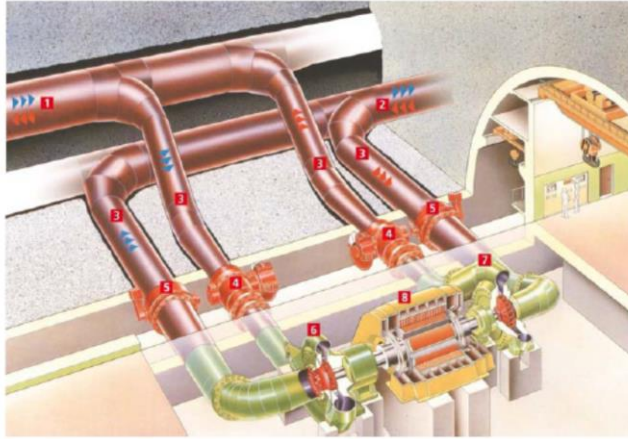


All Generators designed & supplied by Andritz Hydro

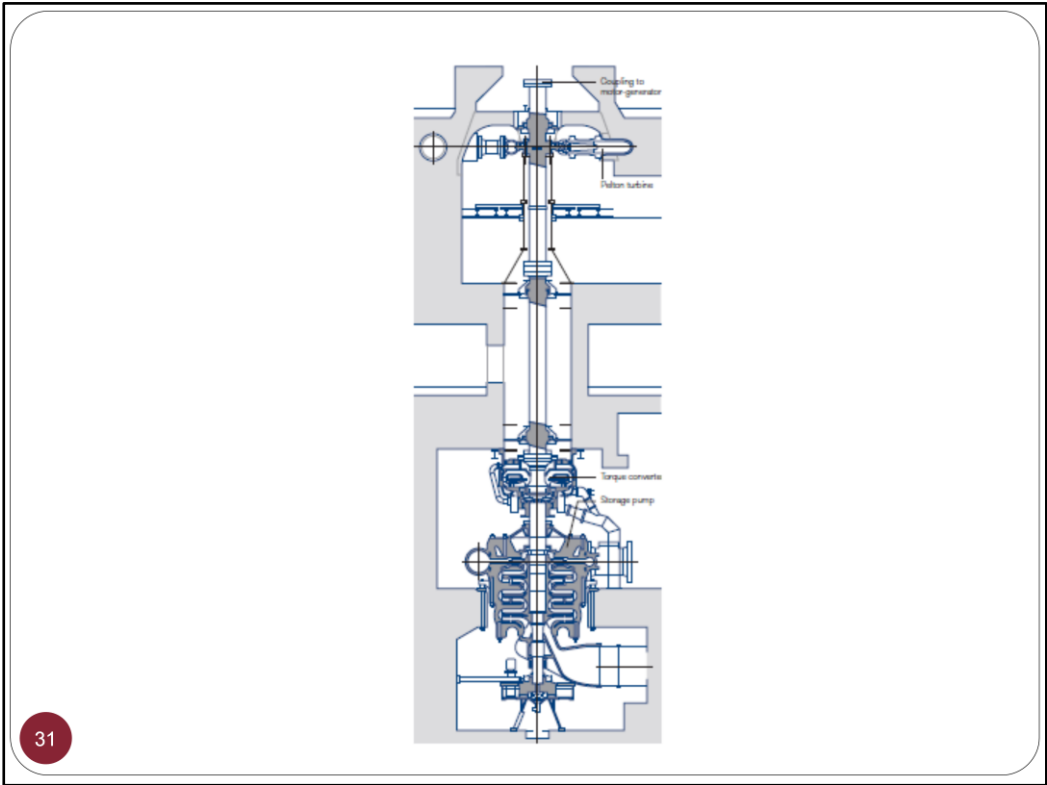


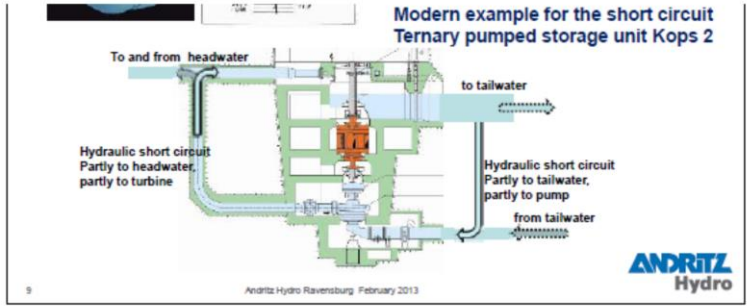
Pump-Turbine common design and supply by Andritz Hydro & Voith



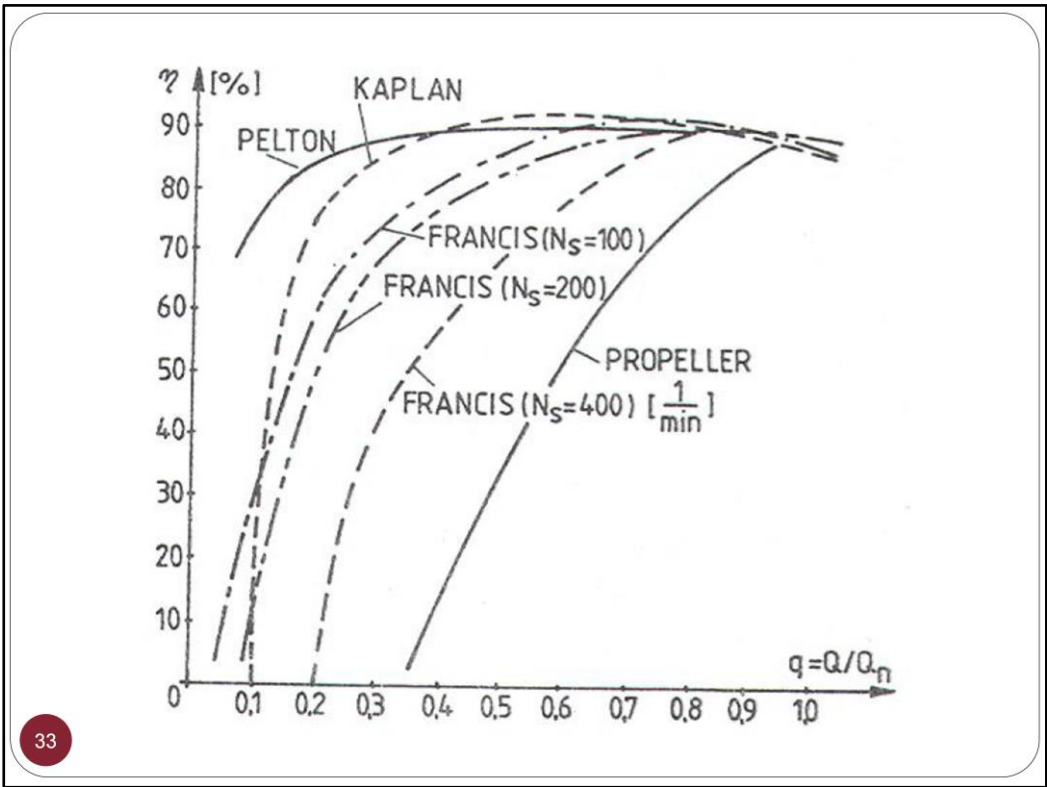


One 90 MW machine group comprising generator motor, Francis turbine and pump



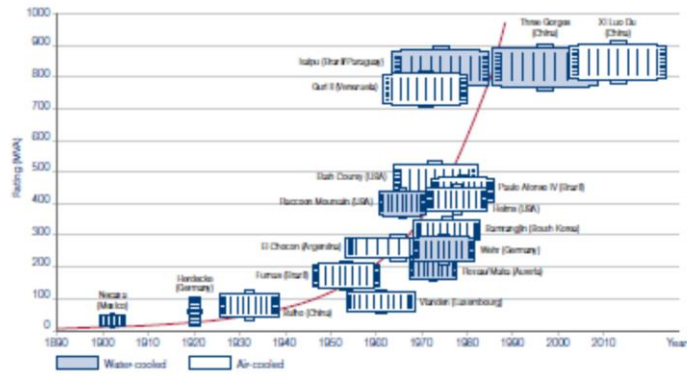






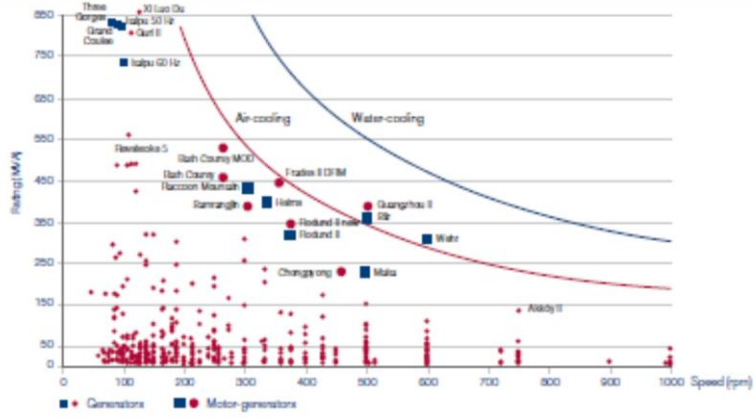
33

### History of generators and motor-generators



10

Generators and motor-generators

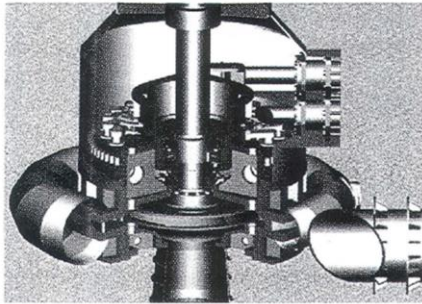


11

## 2. TÁBLÁZAT

### AZ ÜZEMELŐ FORDULATSZÁM-SZABÁLYOZOTT GENERÁTOROK

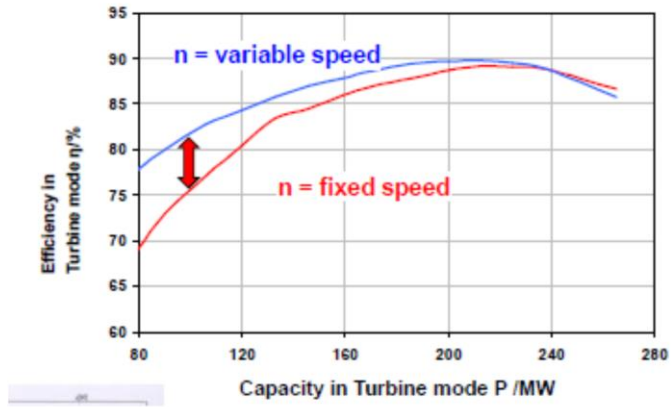
Erőmű	Generátor-motor		Üzembe helyezés
	Gépek száma	Egység (MVA)	
Yagisawa	1	85	1990
Takami	1	140	1993
Ohkawachi	2	395	1993–1995
Shiobara	1	360	1995
Okukiyotsu	1	345	1996
Okinawa Yanbaru	1	31,5	1999
Kyogoku	1	228	2006
Kazunogawa	2	475	2009
Omarugawa	1	370	2008
Goldistahl	2	350	2002–2003

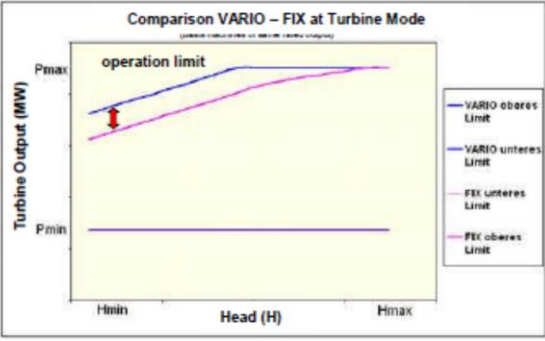


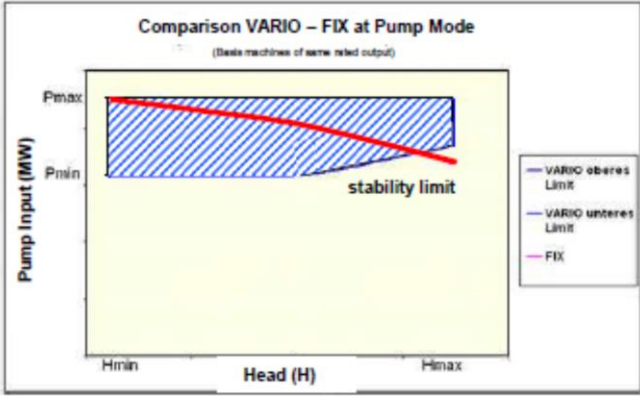
Turbinaesés (max)	728 m
(normál)	714 m
(min)	681 m
Szivattyúzás (max)	779 m
(min)	722 m
Turbinatelejesítmény	412 MW
Szivattyútelejesítmény	438 MW
Fordulatszám	500 1/mi

## 2. ÁBRA

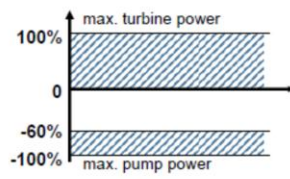
A JELENLEG ÜZEMELŐ LEGNAGYOBB ESÉSŰ, EGYFOKOZATÚ SZIVATTYÚ/TURBIN. SZERKEZETE (KAZUNOGAWA – JAPÁN)











By combining the four units nearly the whole operation range can be used as regulating power (except very small gaps)

Positive effects of variable speed pump turbines:

- Power control in pump mode
- Higher power control quality in turbine mode
- Higher efficiency at high head variations

- **Szolgáltatások, funkciók**

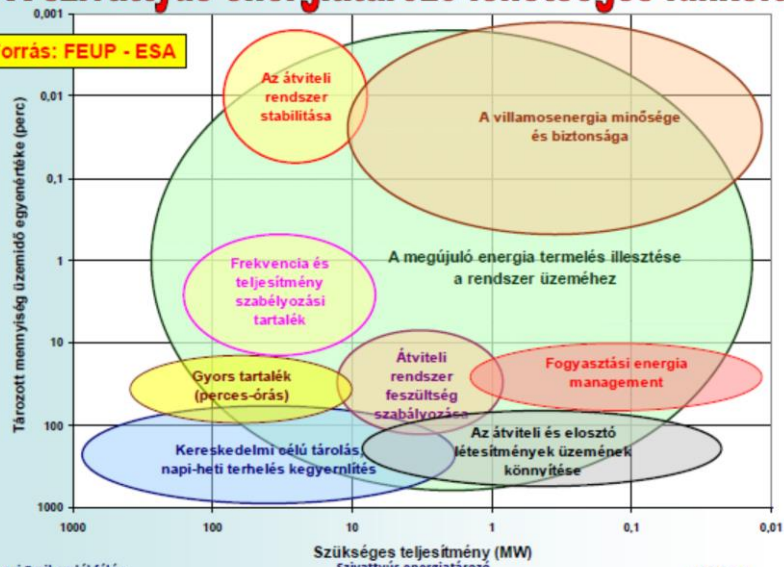
- 

- Kereskedelmi célú tárolás, napi-heti terhelés kiegyenlítés
- Menetrend kiegyenlítése, szekunder és perces tartalék
- Frekvencia és primer teljesítmény szabályozás
- Átviteli és elosztó hálózati létesítmények üzemének könnyítése, pl. black start
- Meddő teljesítmény termelése/nyelése, feszültség szabályozás
- Megújuló energiaforrások illesztése a rendszer üzeméhez
- Az átviteli rendszer stabilitásának növelése, PSS funkció
- Minőségi jellemzők javítása (flicker, letörés, áthidalás).



# A szivattyús energiatároló lehetséges funkciói

Forrás: FEUP - ESA

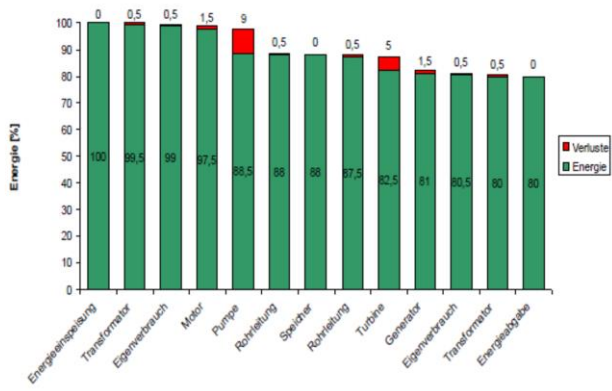


Mosonyi Emil emlékéül  
BME Energetikai Szakkollégium - 2009.09.10.

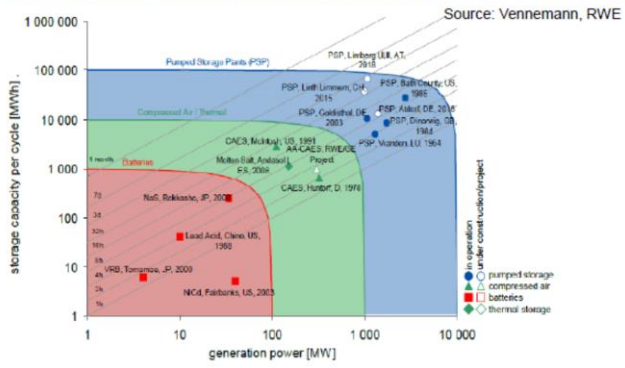
Szivattyús energiatároló  
Magyarországon

Oldal: 36

### Losses in a pump storage power plant



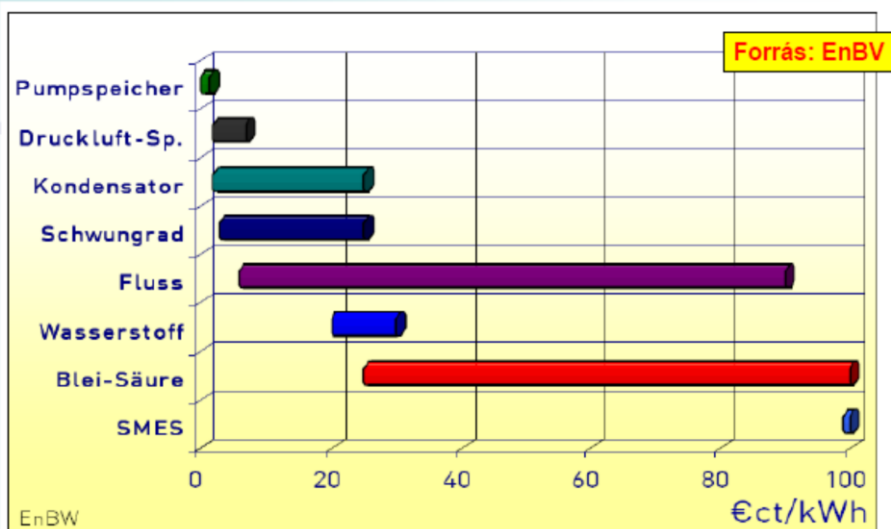
## Alternative storage technologies



Pump storage is the only available technology with large power and large capacity

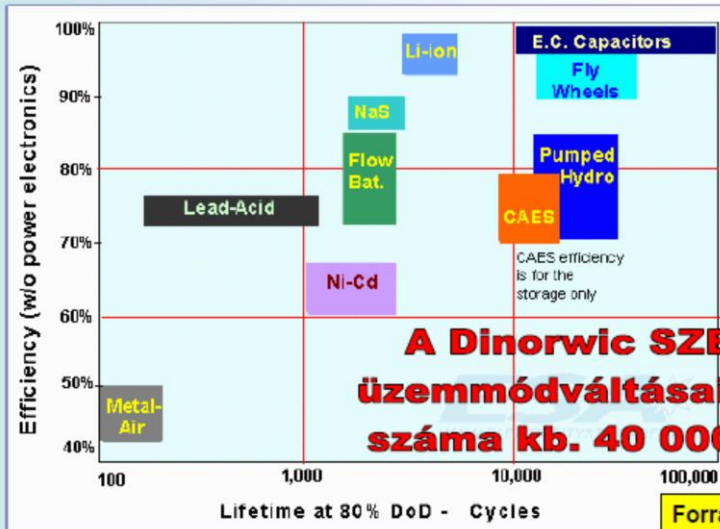


## A fajlagos költségek sorrendje az EnBV szerint





# Az élettartam és hatásfok tartomány



**A Dinorwic SZET  
üzem módváltásainak  
száma kb. 40 000/év**

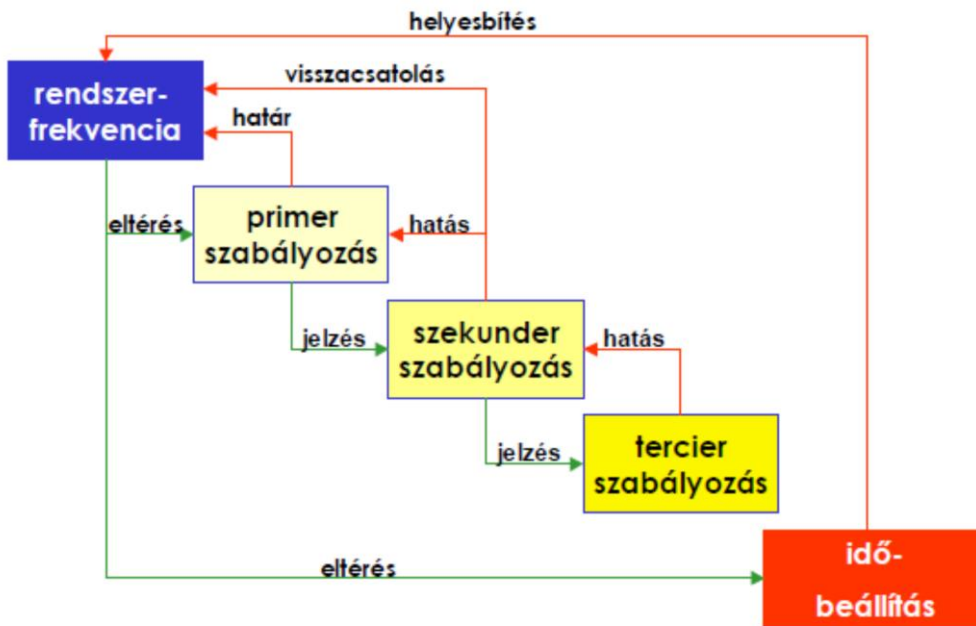
Forrás: ESA

Mosonyi Emil emlékéfény  
BME Energetikai Szakkollégium - 2009.09.10.

Szivattyús energiatároló  
Magyarországon

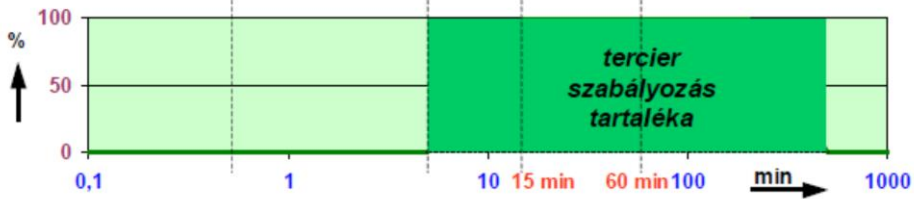
Oldal: 28

# Szinkronizáció-szabályozás



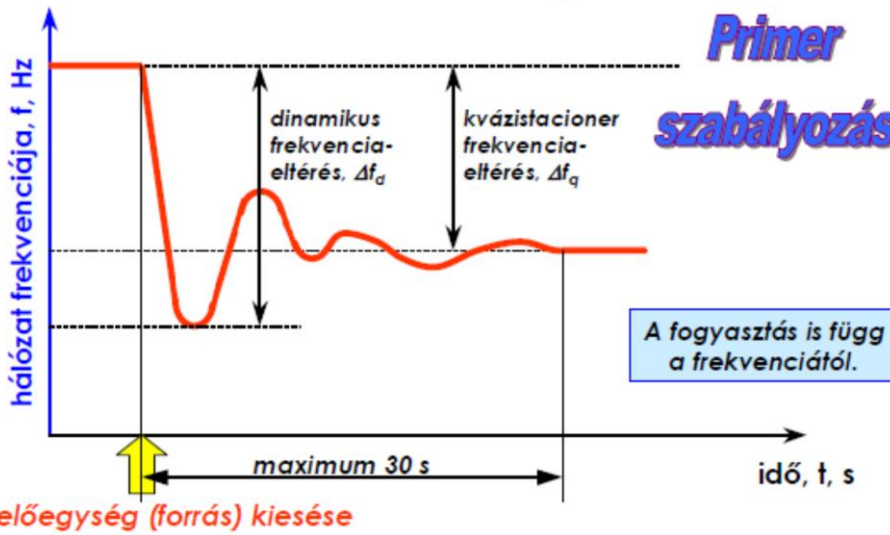


# Rendszerirányítási tartalékok



# Frekvenciaszabályozás

## Primer szabályozás



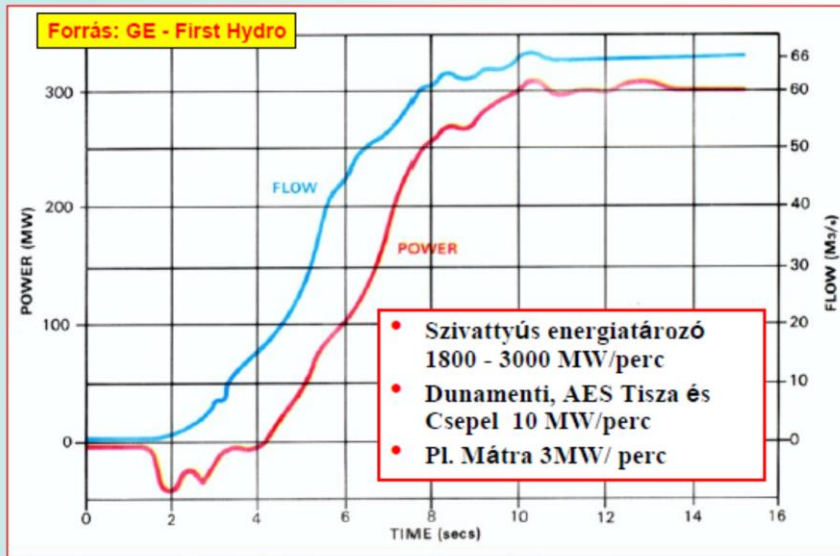
termelőegység (forrás) kiesése

**Primer szabályozással új egyensúly új frekvencián**

<b>Üzem mód/ forgásirány</b>	<b>Állórész lapát állása</b>	<b>Megszakít tó helyzete</b>	<b>Cső elzárás</b>	<b>Közeg amiben forog a forgórész</b>	<b>Meddő termelés / nyelés</b>
<b>Generátor/ turbina</b>	nyitott aktív	zárt	nyitott	víz	?
<b>üresjárás</b>	zárt	zárt	zárt	sűrített levegő	+/-Q
<b>áll</b>	zárt	nyitott	zárt	sűrített levegő	+/-Q
<b>üresjárás</b>	zárt	zárt	zárt	sűrített levegő	+/-Q
<b>Motor/ szivattyú</b>	nyitott aktív	zárt	nyitott	víz	?



## Szivattyús energiatároló üzemmód váltása



Mosonyi Emil emlékéfélv  
BME Energetikai Szakkollégium - 2009.09.10.

Szivattyús energiatároló  
Magyarországon

Oldal: 31

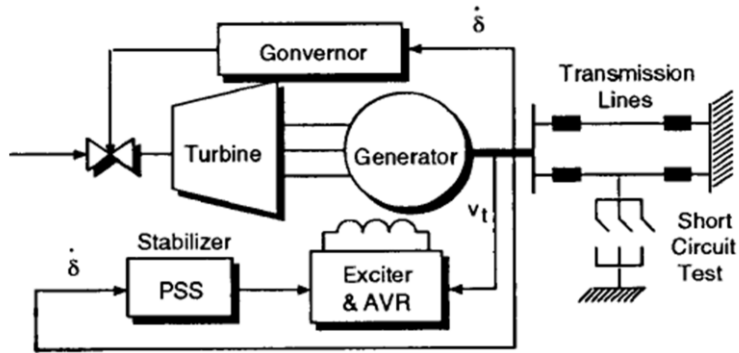
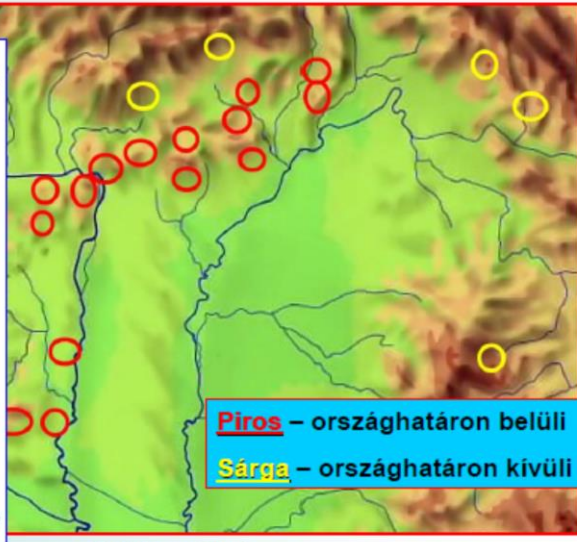
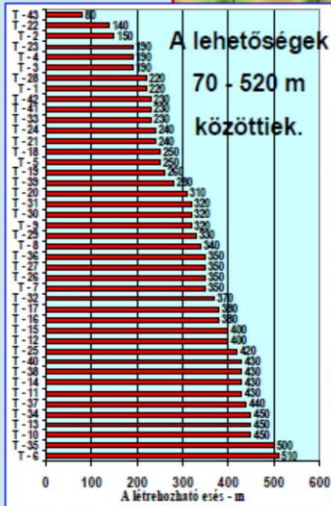


Figure 1: Power System Configuration



# A különböző vizsgálatokban szereplő helyszínek

## A belföldi helyek esése



**Piros** – országhatáron belüli

**Sárga** – országhatáron kívüli

Mosonyi Emil emlékéül  
BME Energetikai Szakkollégium - 2009.09.10.

Szivattyús energiatároló  
Magyarországon

Oldal: 54



## A hatóságok által kiemelt helyszínek összehasonlítása

			I. ütem	II. ütem
1	Dunakanyar	Keserős hegy (Prédikálószték)	600 MW	Bővíthető 1200 MW
2	Zemplén	Sima	600 MW	Bővíthető 1200 MW
3	Zemplén	Hideg völgy	600 MW	Bővíthető 1200 MW
4	Zemplén	Mád	600 MW	Bővíthető 1200 MW
5	Dunakanyar	Urak asztala - Visegrád	600 MW	Bővíthető 1200 MW
6	Dunakanyar	Urak asztala - Csódi hegy bánya	600 MW	Bővíthető 1200 MW
7	Dunakanyar	Kő hegy - Katalin völgy	600 MW	Bővíthető 1200 MW
8	Mátra	Visonta külfejtés - Vizes kesző völgy	600 MW	Bővíthető 1200 MW
9	Dunakanyar	Urak asztala - Dunabogdány	600 MW	Bővíthető 1200 MW
10	Dunakanyar	Naszály kőbánya - Duna	600 MW	Bővíthető 1200 MW
11	Dunakanyar	Kő hegy - Aranyos kúti völgy	600 MW	Nem bővíthető
12	Dunakanyar	Kő hegy - Verőce	600 MW	Nem bővíthető
13	Dunakanyar	Naszály nyugati bánya - Duna	600 MW	Nem bővíthető
14	Zemplén	Tokaj Nagy kopasz hegy	500 MW	Nem bővíthető
15	Mátra	Visonta külfejtés - Tekeres völgy	600 MW	Nem bővíthető
16	Mátra	Visonta külfejtés - Hosszú völgy	600 MW	Nem bővíthető
17	Sajó völgy	Sajóivánka - Bükk tető	600 MW	Nem bővíthető
18	Duna	Paks - Dunakömlőd	600 MW	Nem bővíthető

Mosonyi Emil emlékére  
BME Energetikai Szakkollégium - 2009.09.10.

Szivattyús energiatároló  
Magyarországon

Oldal: 55



## A részletesebben vizsgált helyszínek adottságai

			Esés	Terület	Felső tározó	Alsó tározó
1	Dunakanyar	Keserős hegy (Prédikálószék)	525 m	38 ha	Új létesítmény	Duna
2	Zemplén	Sima	382 m	85 ha	Új létesítmény	Új létesítmény
3	Zemplén	Hideg völgy	214 m	92 ha	Új létesítmény	Új létesítmény
4	Zemplén	Mád	250 m	108 ha	Új létesítmény	Új létesítmény
5	Dunakanyar	Urak asztala - Visegrád	482 m	46 ha	Rehabilitáció	Duna
6	Dunakanyar	Urak asztala - Csódi hegy	380 m	74 ha	Rehabilitáció	Rehabilitáció
7	Dunakanyar	Kő hegy- Aranyos kút völgy	127 m	169 ha	Új létesítmény	Új létesítmény
8	Dunakanyar	Kő hegy - Verőce	230 m	65 ha	Új létesítmény	Új létesítmény
9	Dunakanyar	Naszály bánya nyugat - Duna	362 m	47 ha	Rehabilitáció	Duna
10	Zemplén	Tokaj Nagy kopasz	385 m	129 ha	Új létesítmény	Új létesítmény
11	Dunakanyar	Kő hegy - Katalin völgy	167 m	138 ha	Új létesítmény	Új létesítmény
12	Mátra	Visonta - Vizes kesző völgy	340 m	109 ha	Új létesítmény	Rehabilitáció
13	Dunakanyar	Urak asztala – Dunabogdány	475 m	137 ha	Rehabilitáció	Új létesítmény
14	Mátra	Visonta - Tekeres völgy	334 m	115 ha	Új létesítmény	Rehabilitáció
15	Mátra	Visonta - Hosszú völgy	188 m	148 ha	Új létesítmény	Rehabilitáció
16	Sajó völgy	Sajóivánka - Bükk tető	250 m	172 ha	Új létesítmény	Új létesítmény
17	Dunakanyar	Naszály kőbánya - Duna	355 m	108 ha	Rehabilitáció	Duna
18	Duna	Paks - Dunakömlőd	79 m	590 ha	Új létesítmény	Új létesítmény

Mosonyi Emil emlékfélv  
BME Energetikai Szakkollégium - 2009.09.10.

Szivattyús energiatározó  
Magyarországon

Oldal: 56





## A részletesebben vizsgált helyszínek költségei

		Fajlagos költség 600 MW
1	Dunakanyar Kesperős hegy (Prédikálószték)	655 EUR/kW
2	Zemplén Sima	667 EUR/kW
3	Zemplén Hideg völgy	677 EUR/kW
4	Zemplén Mád	720 EUR/kW
5	Dunakanyar Urak asztala - Visegrád	749 EUR/kW
6	Dunakanyar Urak asztala - Csódi hegy	791 EUR/kW
7	Dunakanyar Kő hegy- Aranyos kút völgy	870 EUR/kW
8	Dunakanyar Kő hegy - Verőce	926 EUR/kW
9	Dunakanyar Naszály bánya nyugat - Duna	927 EUR/kW
10	Zemplén Tokaj Nagy kopasz	971 EUR/kW
11	Dunakanyar Kő hegy - Katalin völgy	990 EUR/kW
12	Mátra Visonta - Vizes kesző völgy	1 019 EUR/kW
13	Dunakanyar Urak asztala – Dunabogdány	1 055 EUR/kW
14	Mátra Visonta - Tekerés völgy	1 087 EUR/kW
15	Mátra Visonta - Hosszú völgy	1 100 EUR/kW
16	Sajó völgy Sajóivánka - Bükk tető	1 135 EUR/kW
17	Dunakanyar Naszály kőbánya - Duna	1 353 EUR/kW
18	Duna Paks - Dunakömlőd	1 489 EUR/kW

Mosonyi Emil emlékéül  
BME Energetikai Szakkollégium - 2009.09.10.

Szivattyús energiaterelő  
Magyarországon

Oldal: 58



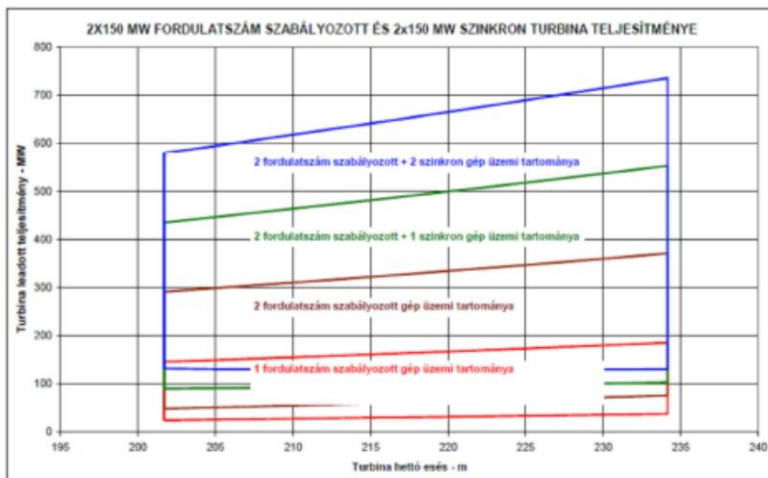
## SZIVATTYÚS ENERGIATÁROZÓ LÉTESÍTÉSE

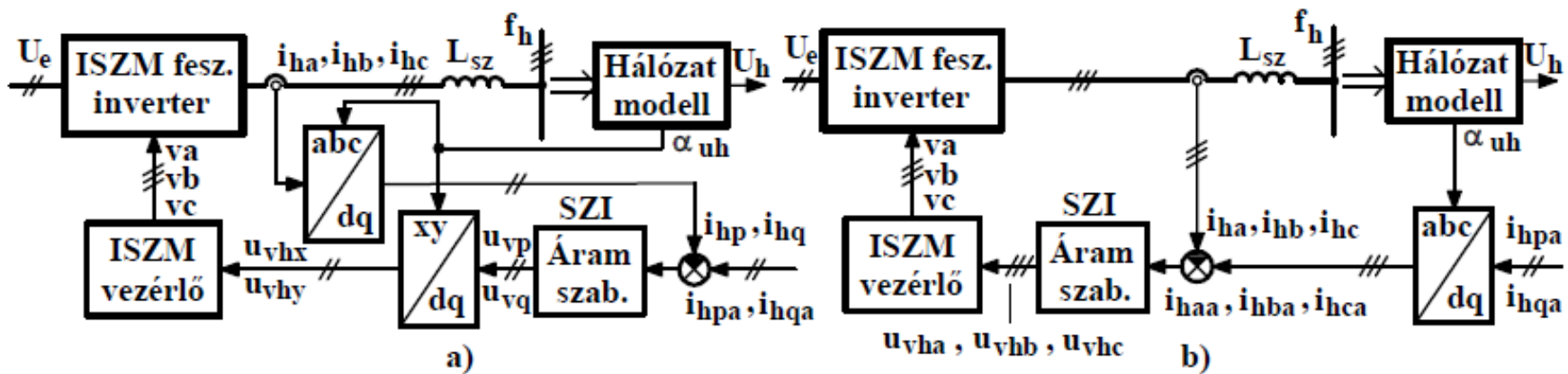
### A telephely kiválasztás szempontjai

- ▶ a **beruházási költség** minimuma
- ▶ az **energetikai hatékonyság** maximuma
- ▶ az igénybevett **terület nagyságának** minimuma
- ▶ az igénybevett **terület tulajdonosainak** minimuma
- ▶ az igénybevett terület legkisebb **védettsége**
- ▶ a **szeizmológiai biztonság** maximuma
- ▶ az új nyomvonalú **utak** hosszának minimuma
- ▶ a **villamos hálózattól** való távolság minimuma
- ▶ a **vízbeszerzés** biztonságának maximuma
- ▶ az **építési munkák** volumenének és időigényének minimuma
- ▶ a létesítmény **bővíthetőségének** biztosítása
- ▶ a **turistaforgalom** zavartalansága
- ▶ a térségben a **gazdasági fejlesztés** szükségessége
- ▶ a természeti **környezetre gyakorolt hatások** minimuma

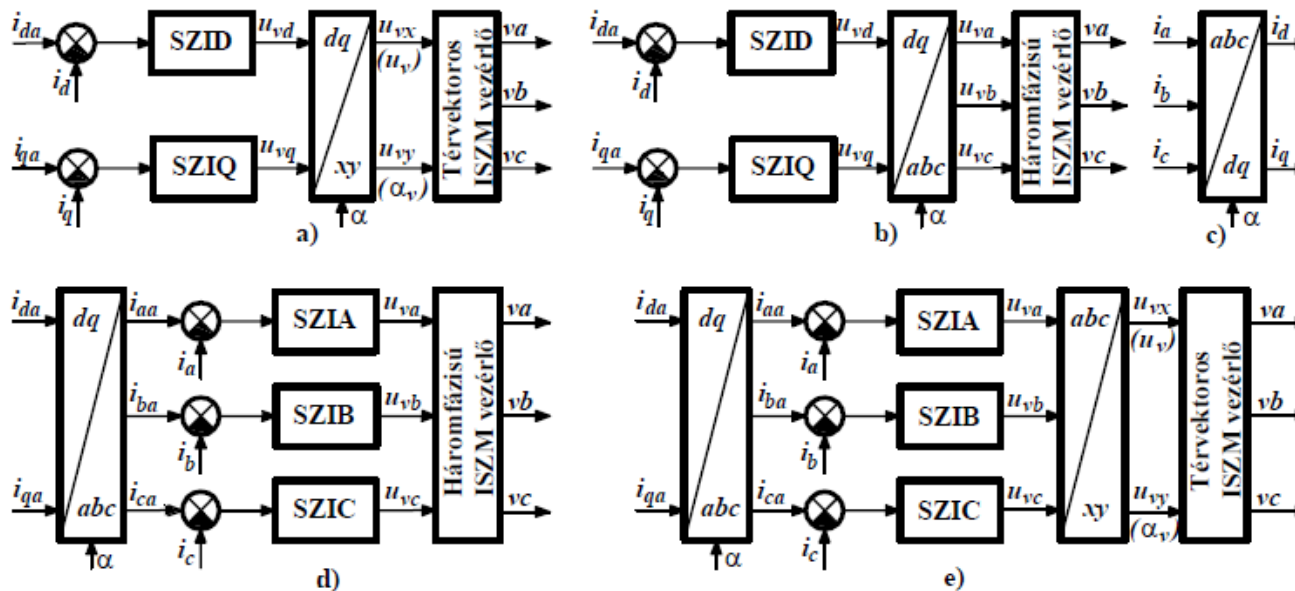
- A felső tározó üzemi térfogata 11,5 millió m<sup>3</sup>. Ez az első ütemben megvalósul.
- Az alsó tározó üzemi térfogata 11,5 millió m<sup>3</sup>. Ez az első ütemben megvalósul.
- A tározótavak kapacitása nagy biztonsággal elegendő 1200 MW beépíthető teljesítményhez, de első ütemben csak 600 MW-tal számoltunk.
- A tervezett gépnagyság 4x150 MW vagy 2x300 MW. A kisebb gépek szabályozási szempontból előnyösebbek, viszont drágábbak. A bővítéshez további gépek beépítése szükséges.
- A nyomóvezetékek felszíni acélcsövek, melyek átmérője 4x4400 mm vagy 2x5600 mm. A bővítéshez további nyomócsövek beépítése szükséges.
- A hálózati csatlakozás helye a Felsőzsolcai 400 kV-os állomás.

A fordulatszám szabályozott gépekkel biztosítható turbinaüzemi tartomány 150 MW teljesítményű blokkok esetén

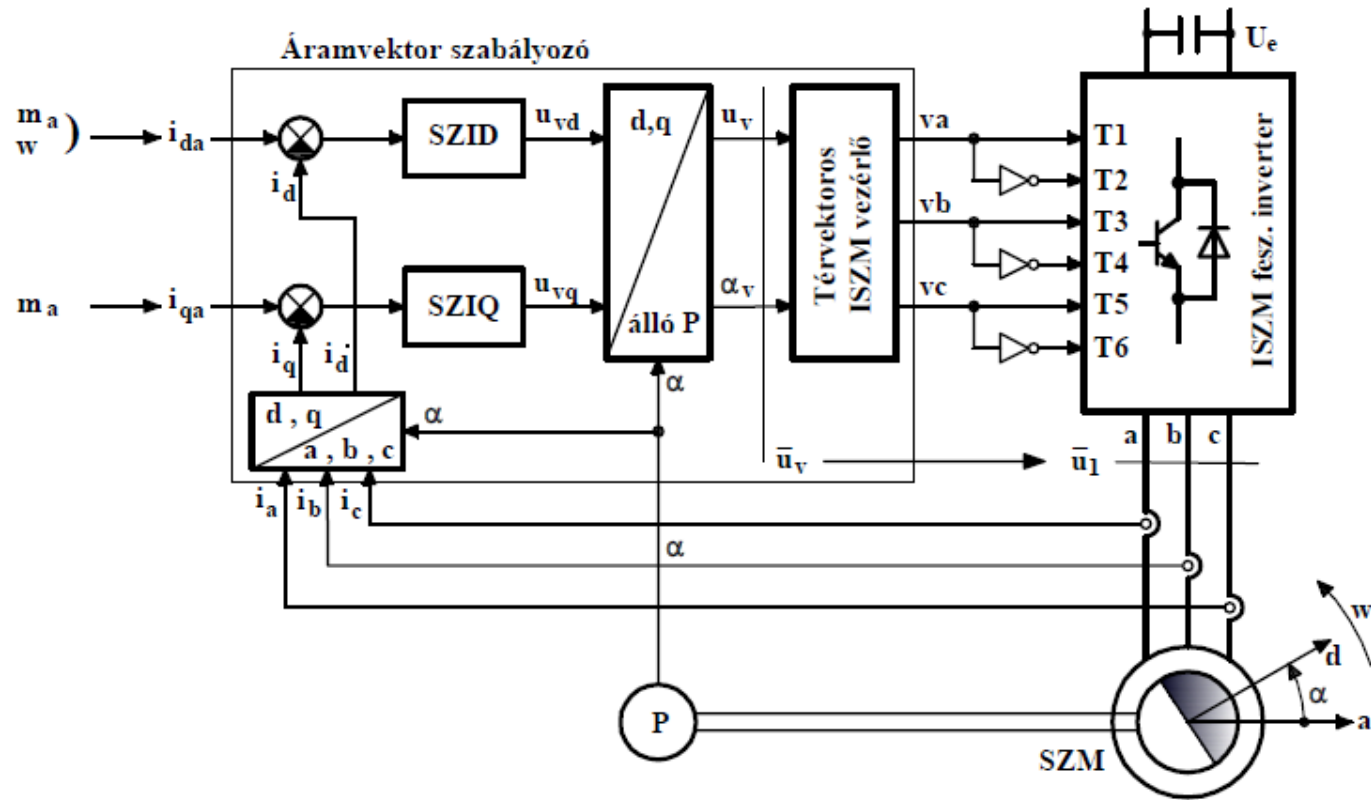




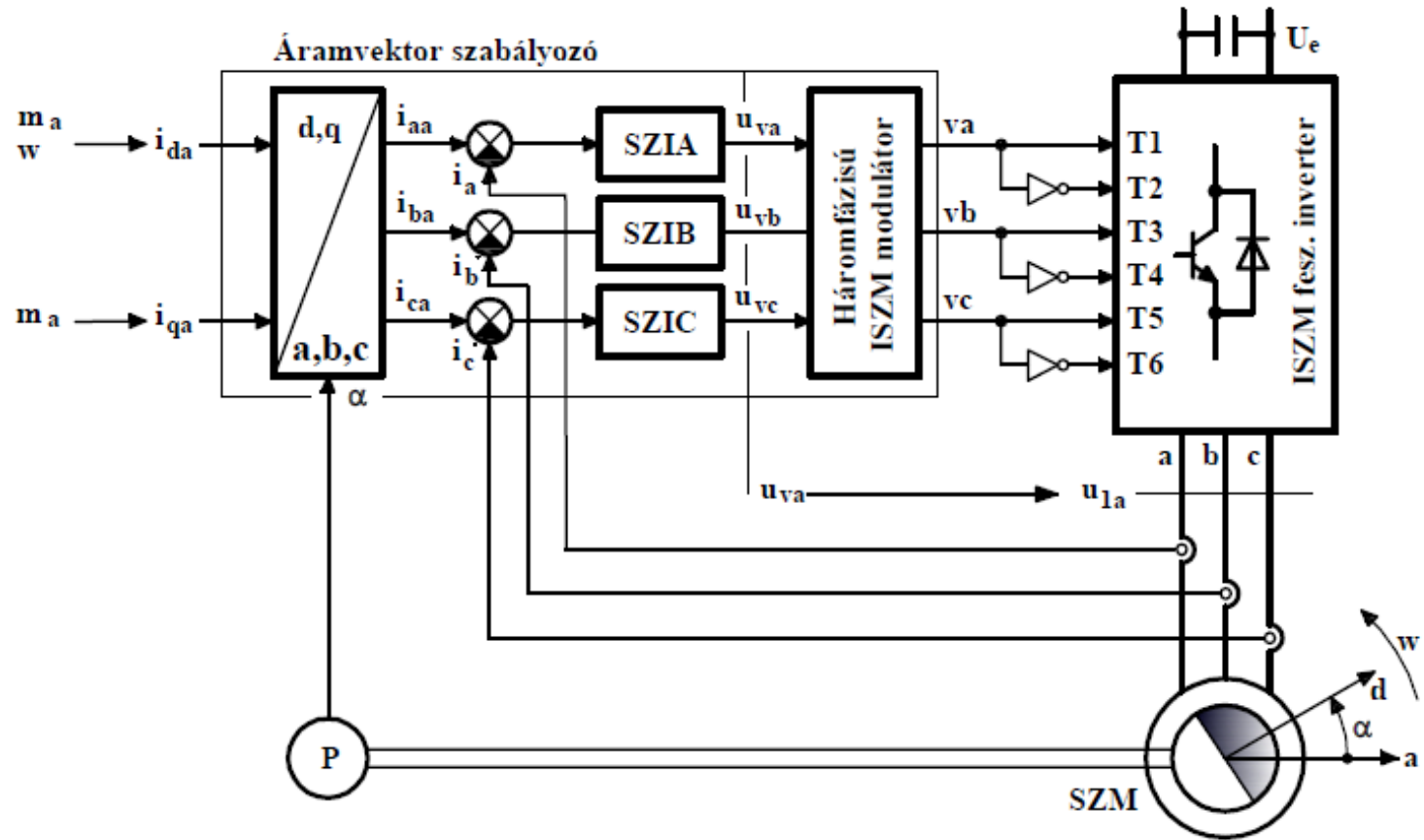
7.6. ábra: Áramvektor szabályozás egyvonalas blokkvázlata. a. Hálózati feszültségvektorral forgó kr.-ben Descartes koordinátákkal (a változat), b. Álló kr.-ben fázismennyiségekkel (e változat).



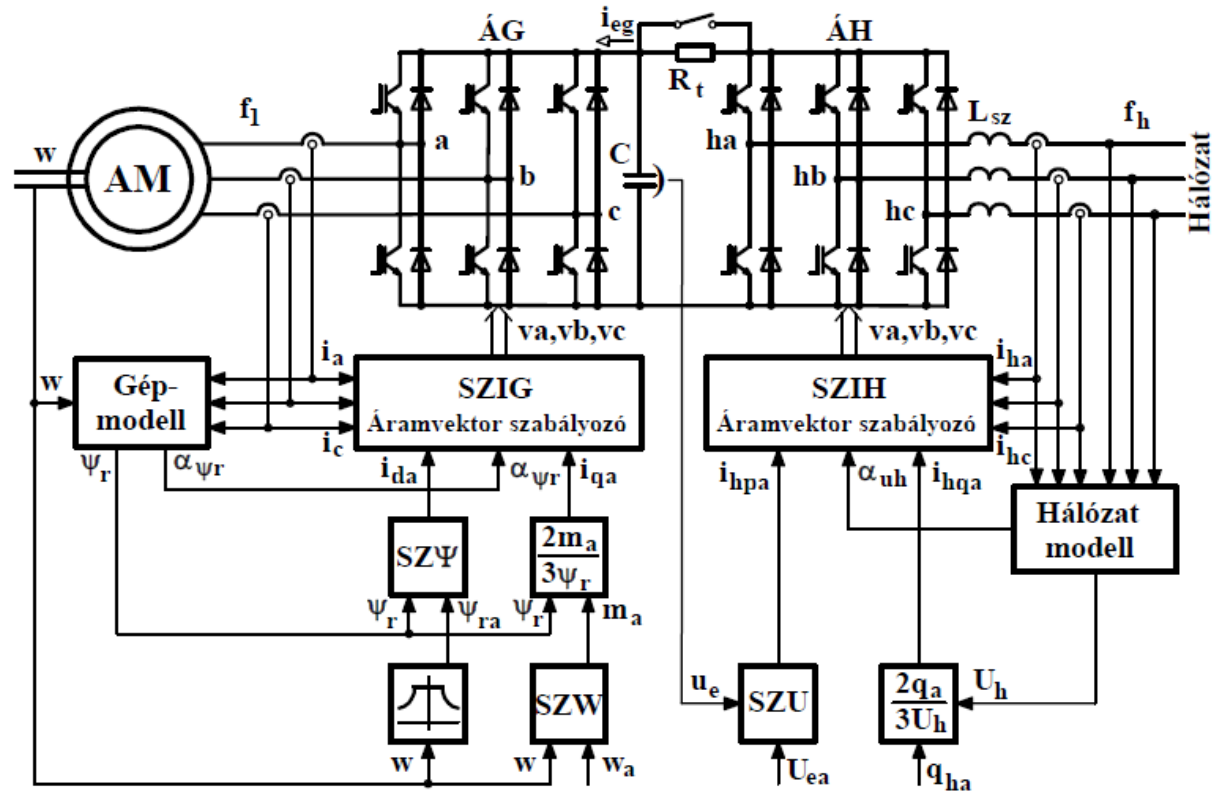
4.12. ábra: ISZM vezérlős áramvektor szabályozások blokkvázlatai. a,b,c. Szabályozók dq koordinátákban, d,e. Szabályozók abc koordinátákban.



4.13. ábra: Áramvektor szabályozás dq komponensekkel, térvektoros ISZM vezérlővel.

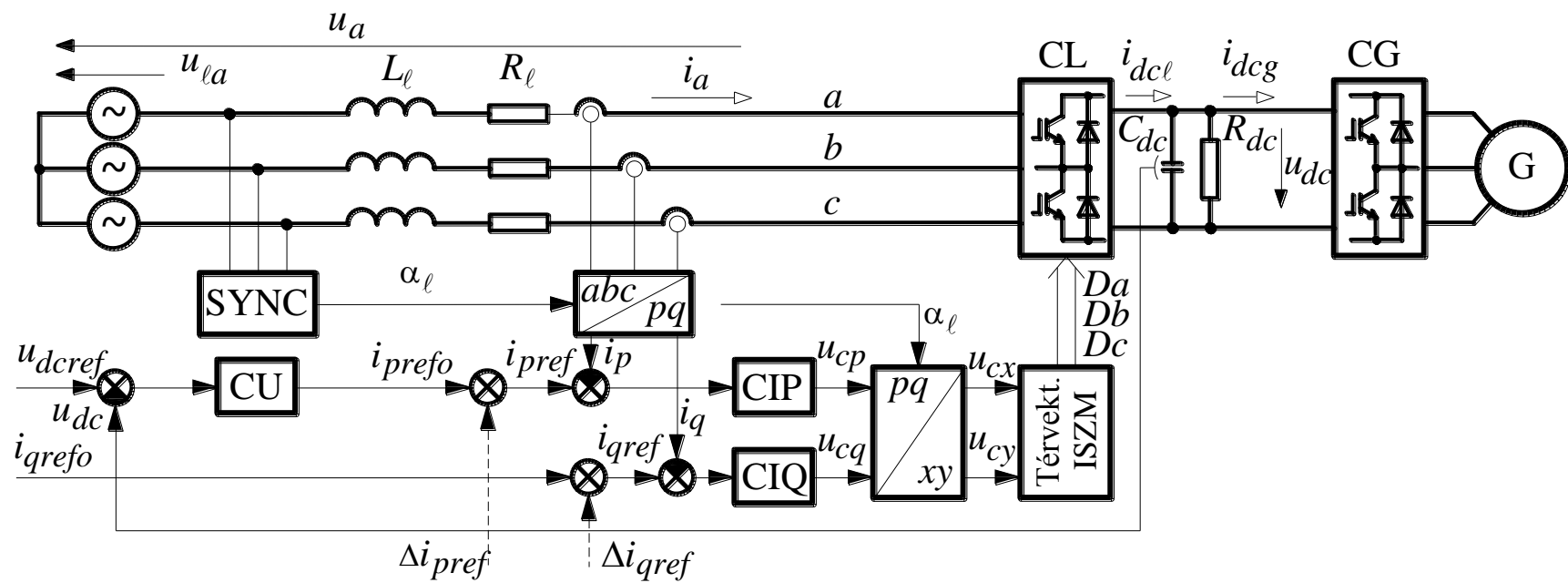


4.16. ábra: Áramvektor szabályozás abc fázismennyiségekkel, háromfázisú ISZM modulátorral.

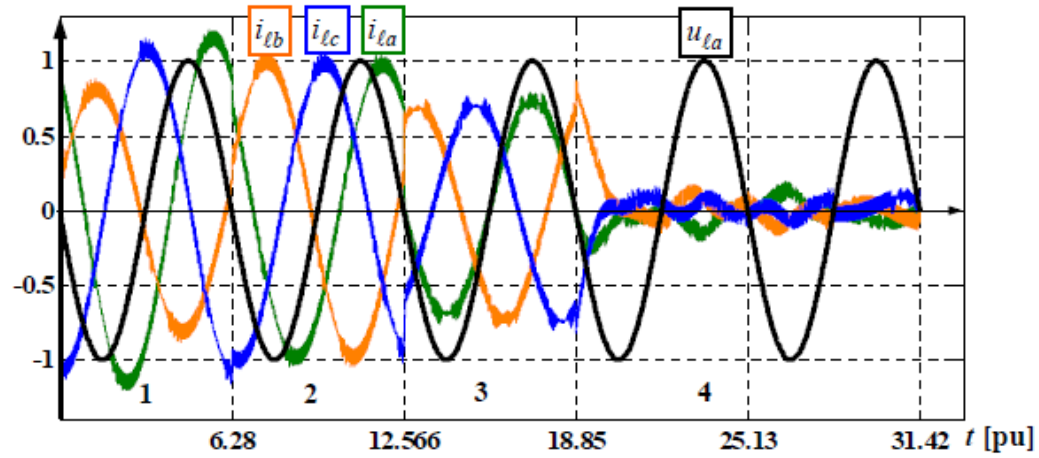


7.7. ábra: Korszerű feszültséginverteres kalickás aszinkron motoros hajtás.

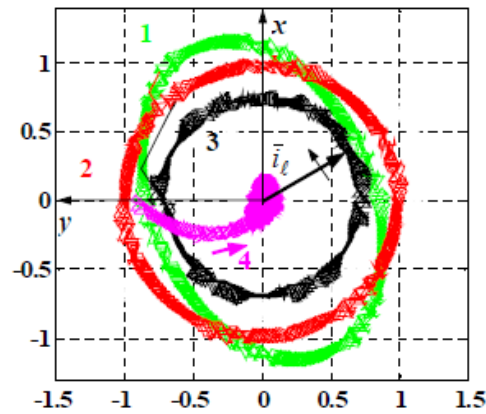




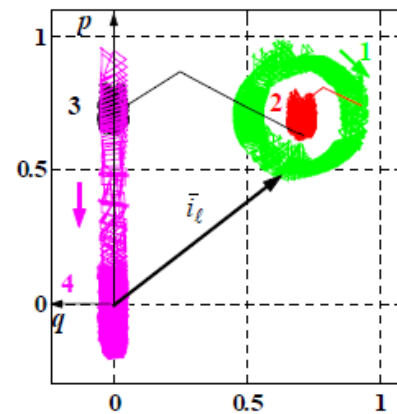
2.5.2. ábra. Áramvektor szabályozás forgó (p-q) koordináta rendszerben térvektoros ISZM-mel



a)



b)

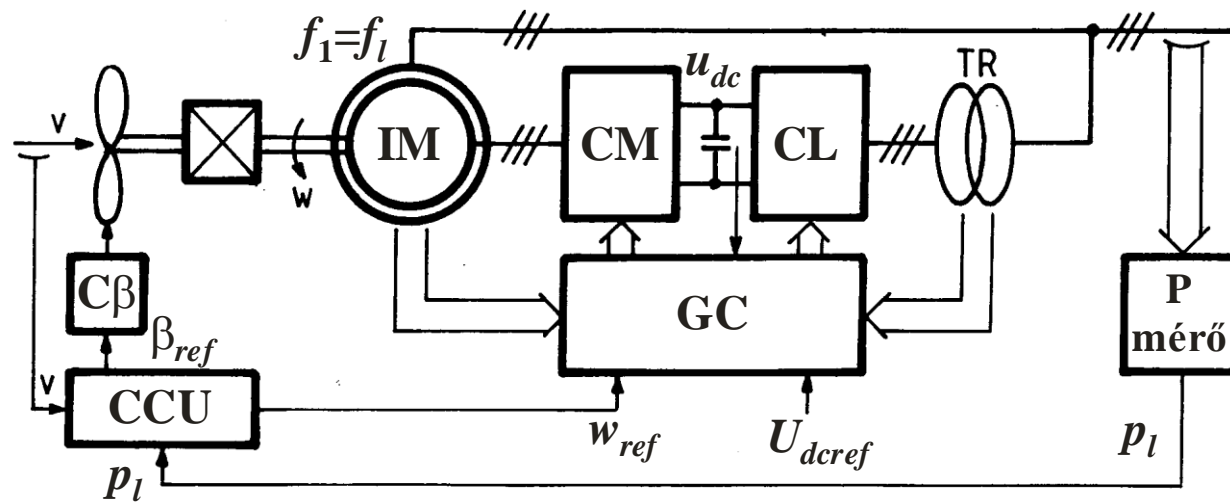


c)

12.13. ábra: Aszimmetria és meddő teljesítmény kompenzálása.

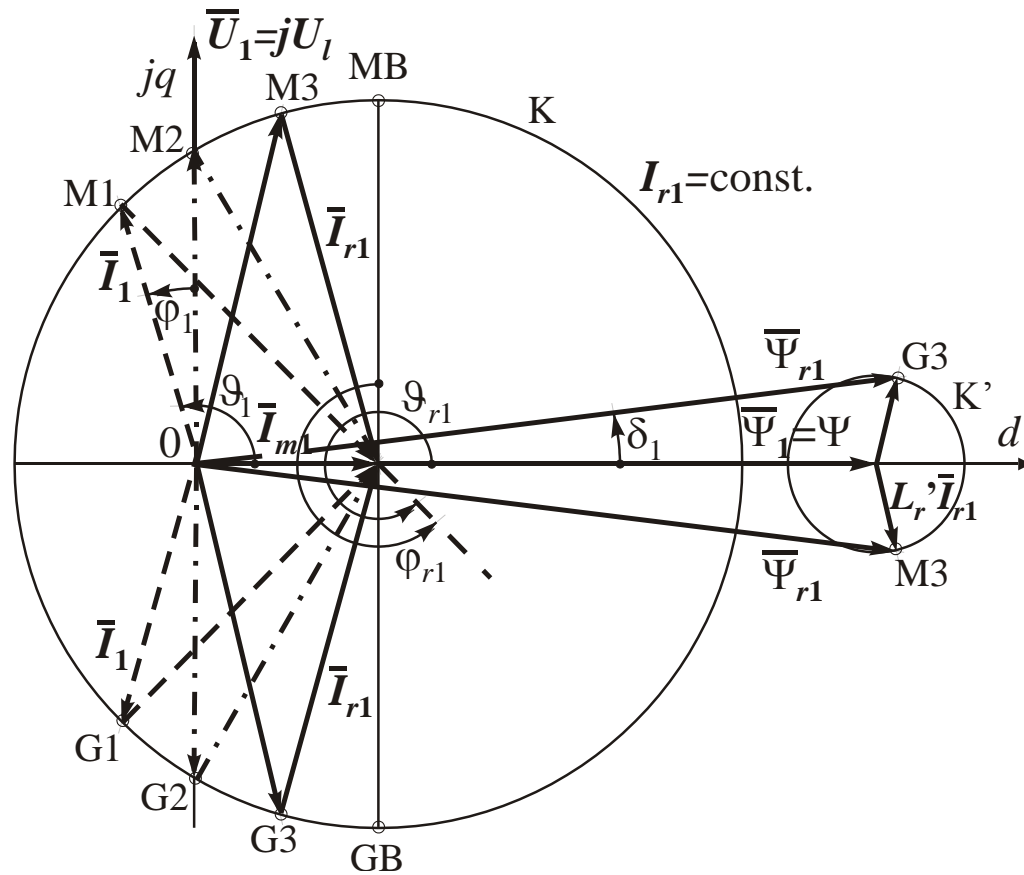
a. Hálózat fázisáramai és az **a** fázisfeszültsége.

b. Hálózati áramvektor x-y koordinátarendszerben. c. Hálózati áramvektor d-q koordinátarendszerben.

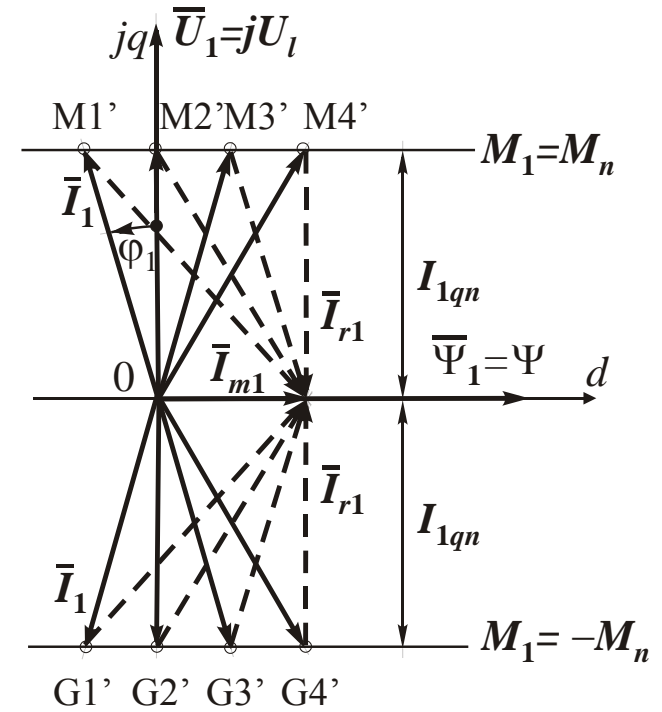


2.4.1. ábra. A kétoldalról táplált aszinkron szélgenerátor blokkvázlata.

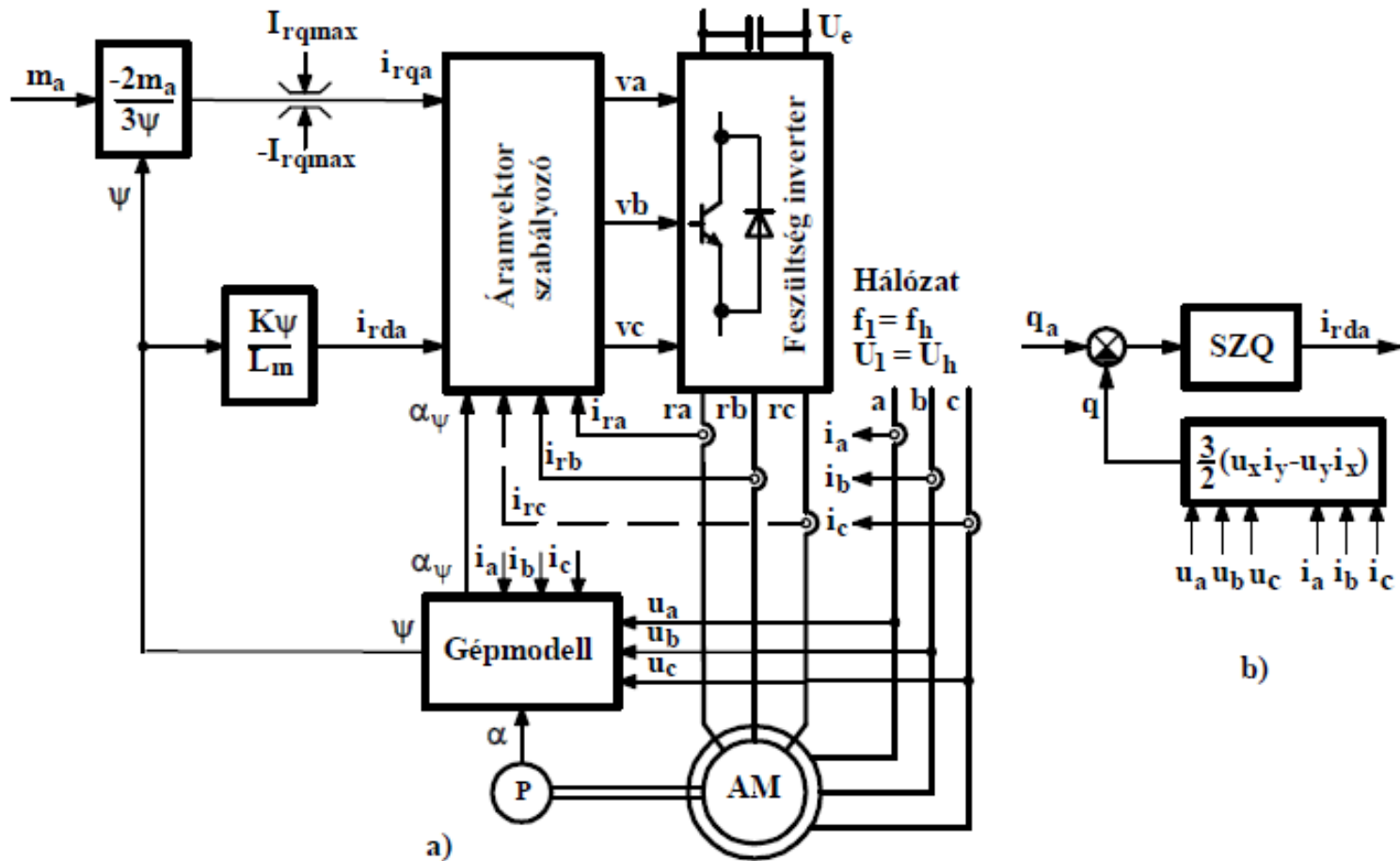




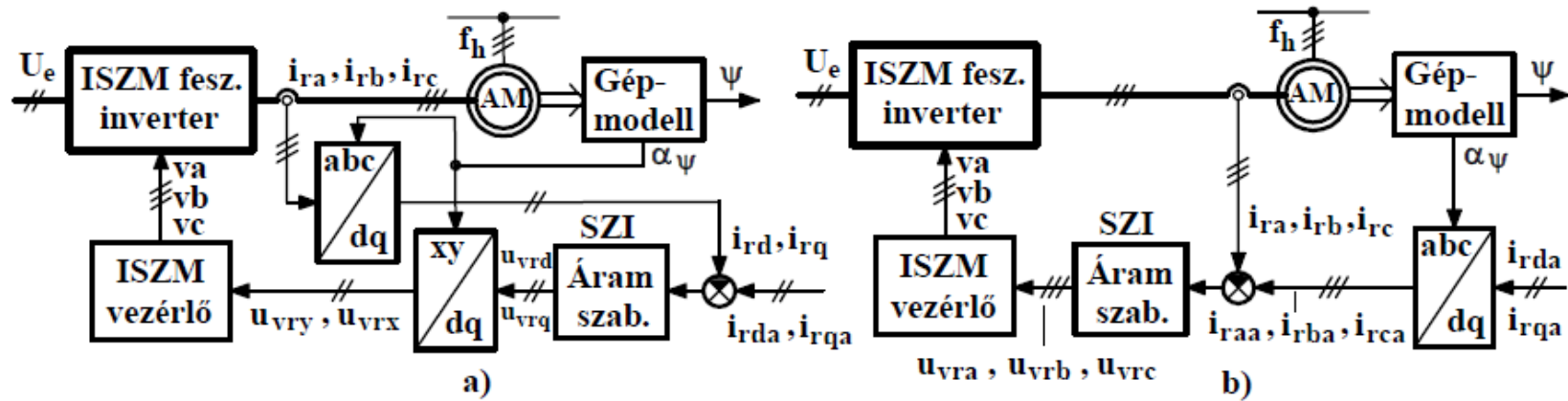
2.4.3. ábra. Az állórész alapharmonikus áramának és forgórész fluxusának pályája.



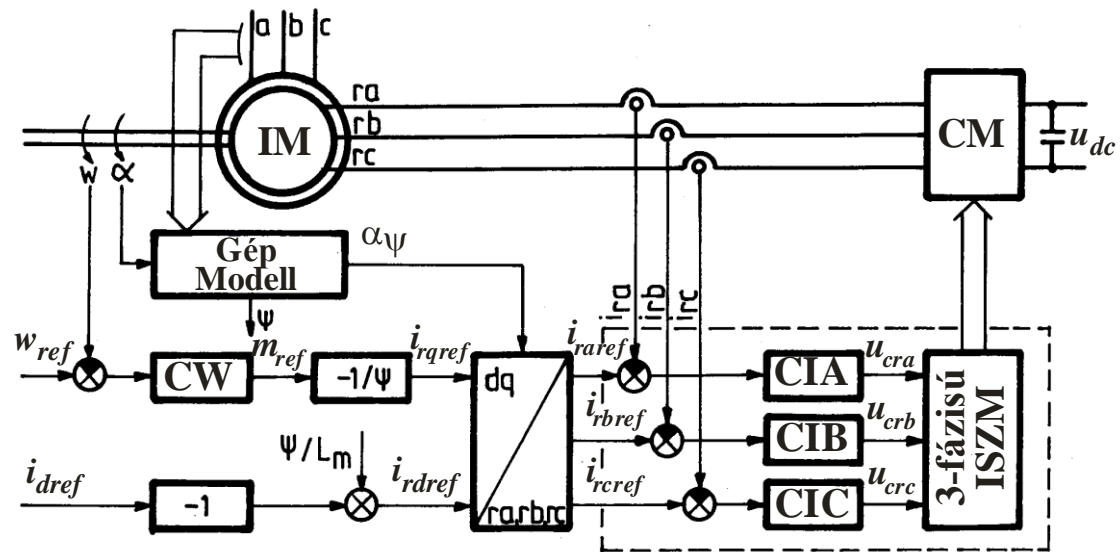
2.4.4. ábra. A névleges nyomaték kifejtése különböző optimalizált munkapontokban.



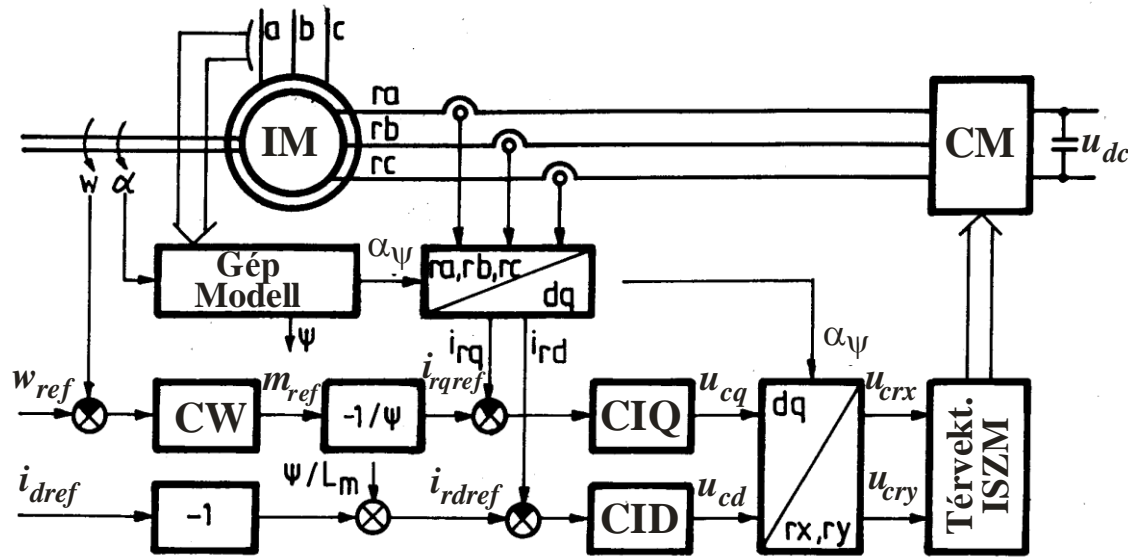
6.7. ábra: Mezőorientált nyomaték szabályozott hajtás.  
a.  $i_{rda}$  alapjelképzővel, b. SZQ meddő teljesítményszabályozóval.



6.9. ábra: Rotoráramvektor szabályozás egyvonalas blokkvázlata. a. Állórészmező kr.-ben Descartes koordinátákkal (a változat), b. Rotor kr.-ben fázismennyiségekkel (e változat).

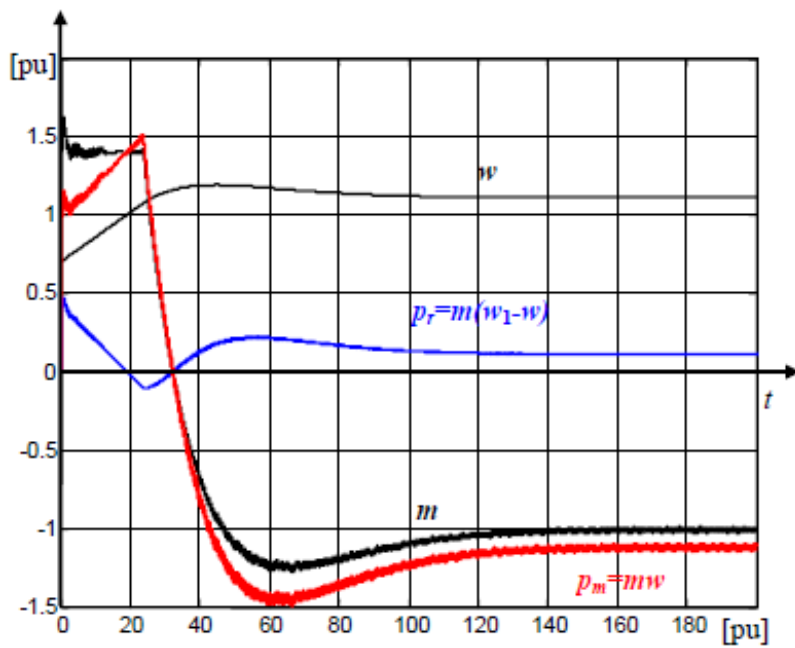


2.4.5. ábra. Mezőorientált áramvektor szabályozás fázisáramokkal.

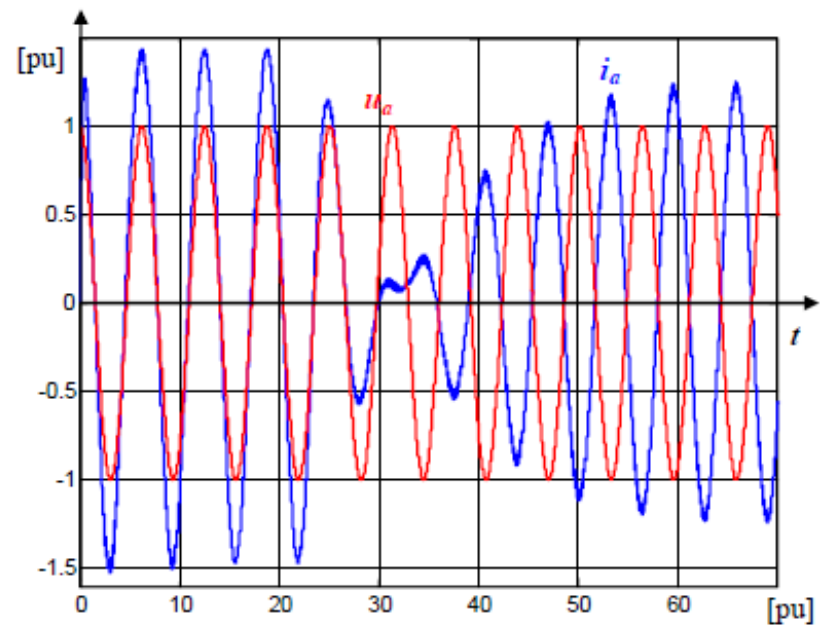


2.4.6. ábra. Mezőorientált szabályozás d-q rotor áram komponensekkel és térvektoros ISZM-mel.

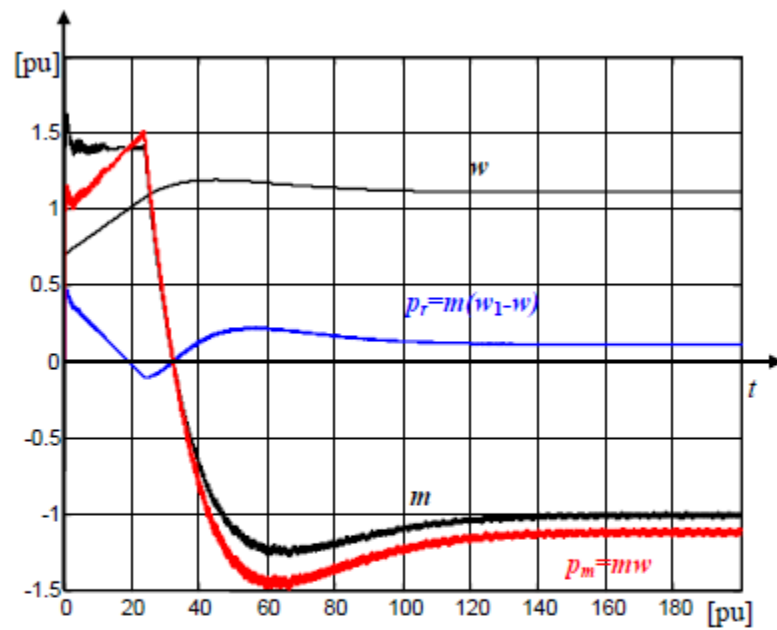




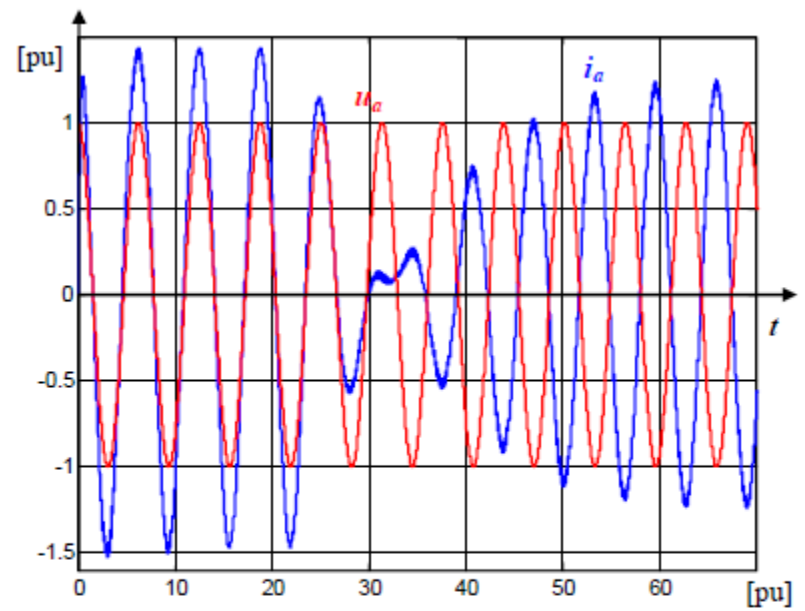
2.4.8. ábra. Nyomaték, szögsebesség, teljesítmények.



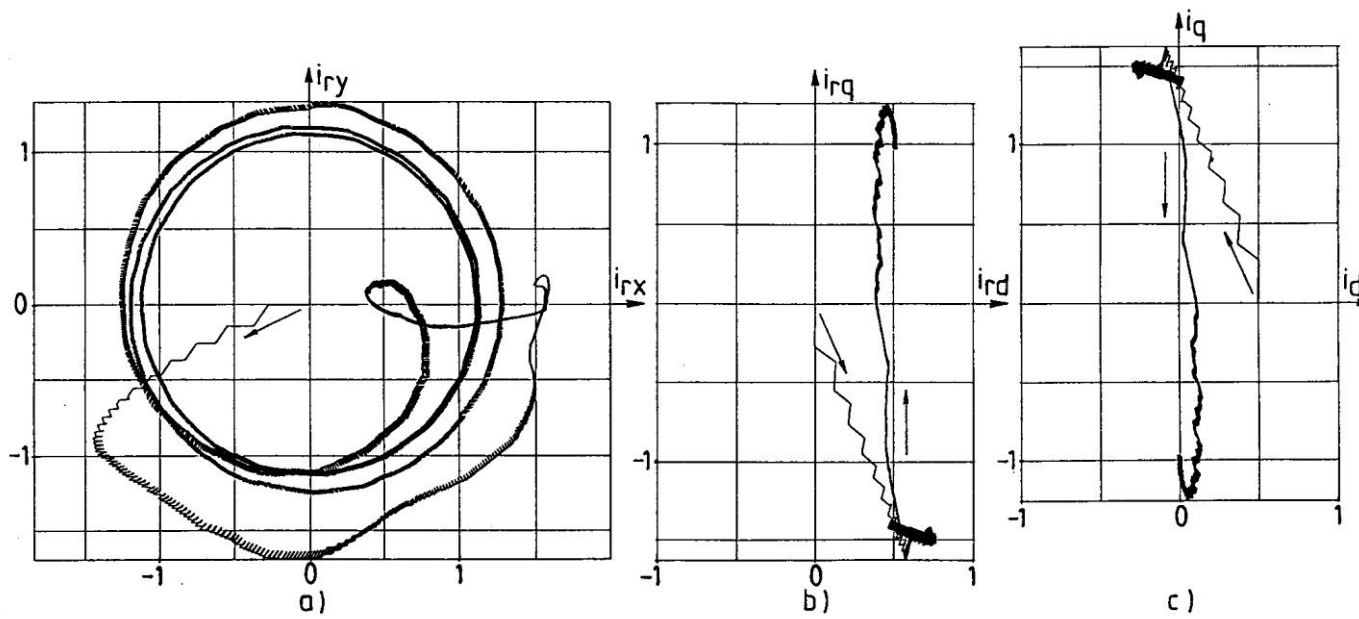
2.4.9. ábra. Az állórész fázisfeszültsége és árama.



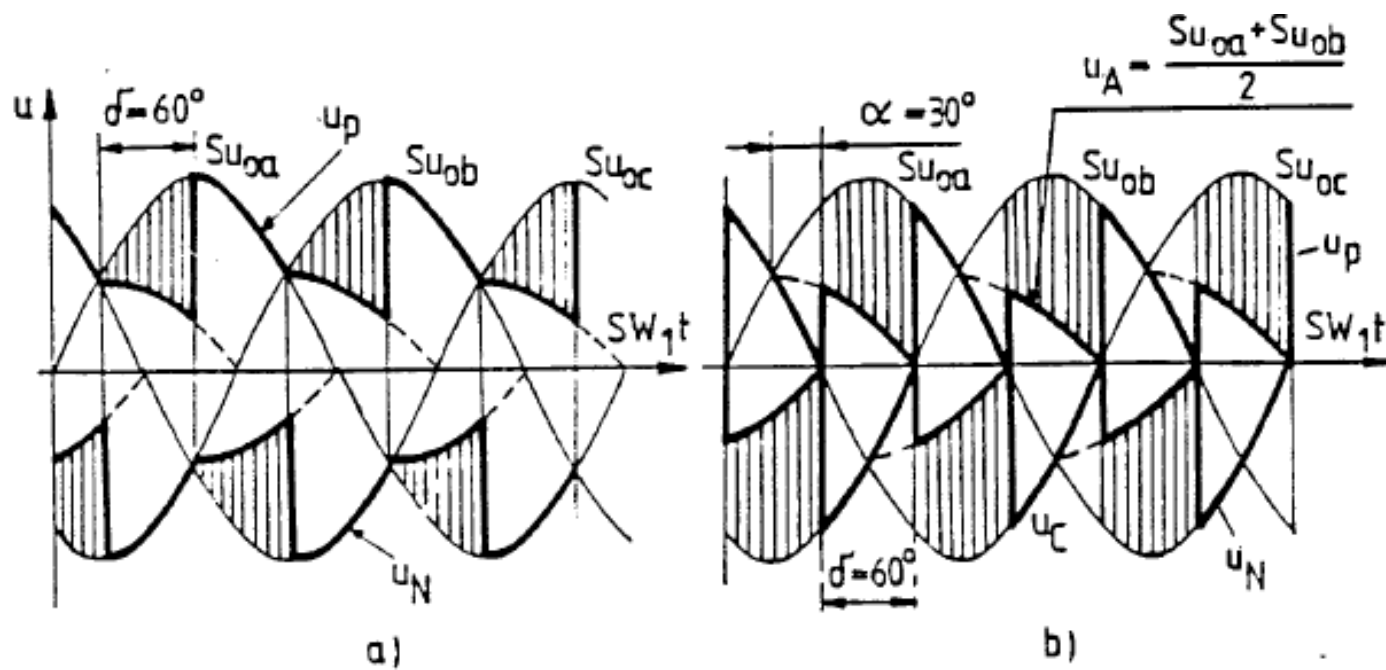
2.4.8. ábra. Nyomaték, szögsebesség, teljesítmények.



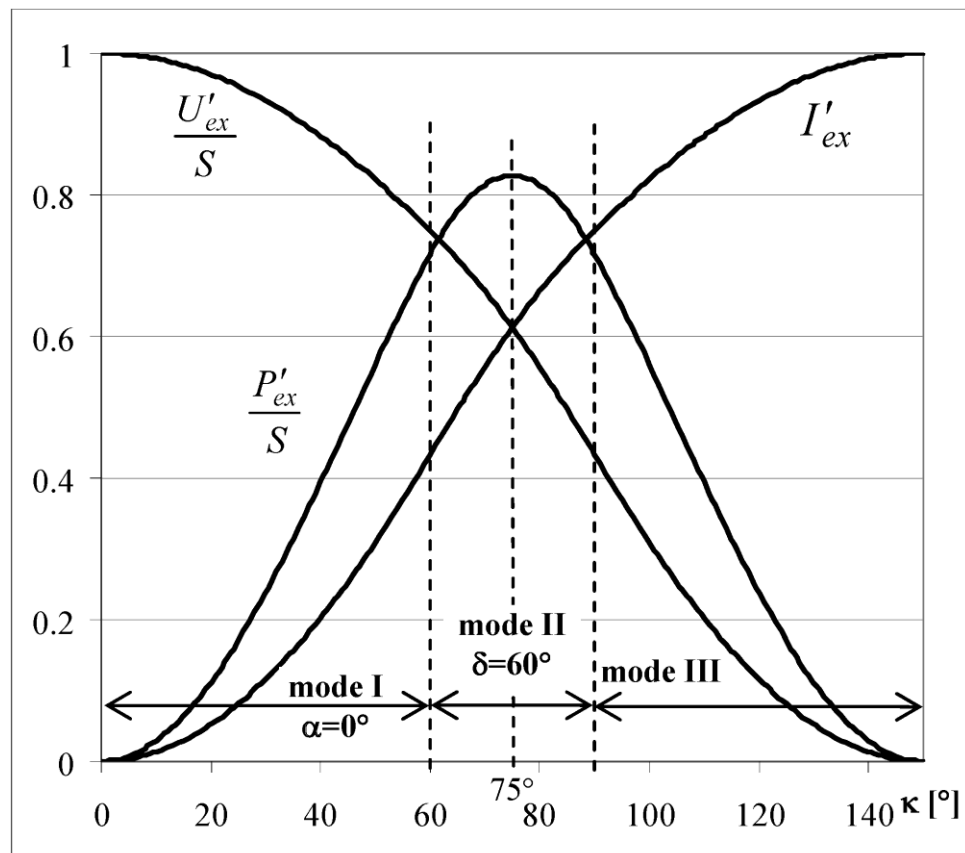
2.4.9. ábra. Az állórész fázisfeszültsége és árama.



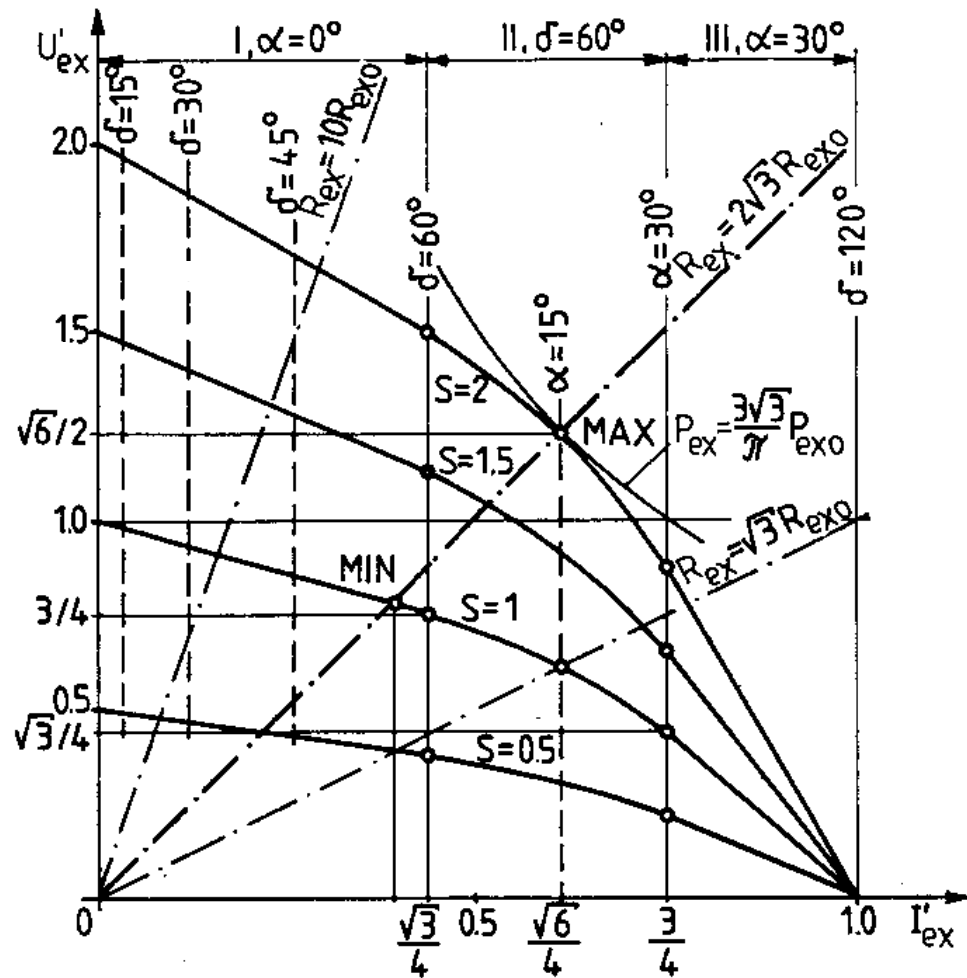
2.4.10. ábra. Forgórész (a,b) és állórész (c) áramvektorok.



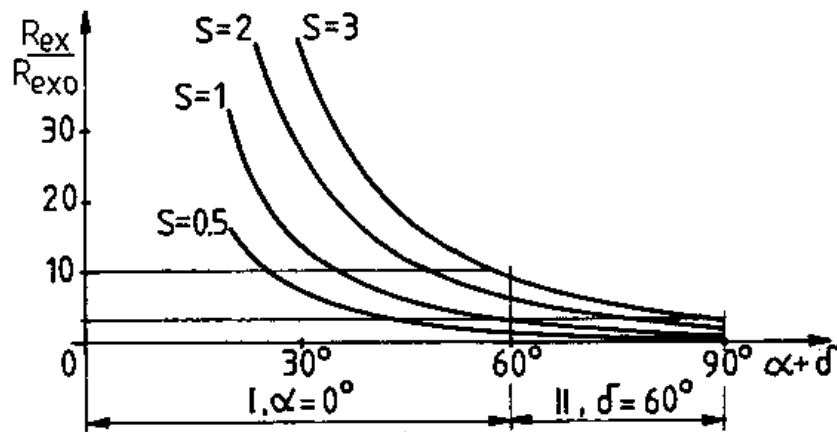
5.33. ábra Az egyenirányított csúszógyűrű feszültség  
 a)  $\delta = 60^\circ$ ;  $\alpha = 0^\circ$       b)  $\delta = 60^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$



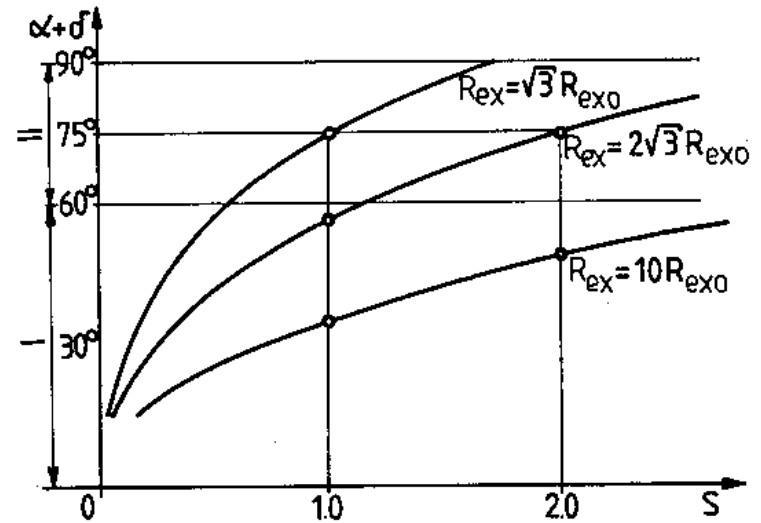
1.4.12. ábra. A normalizált gerjesztő-feszültség, a gerjesztő-áram és a gerjesztő-teljesítmény a  $\kappa$  **kialvási szög** függvényében.



1.4.13. ábra. A gerjesztő egyenáramú oldali külső jelleggörbéje.

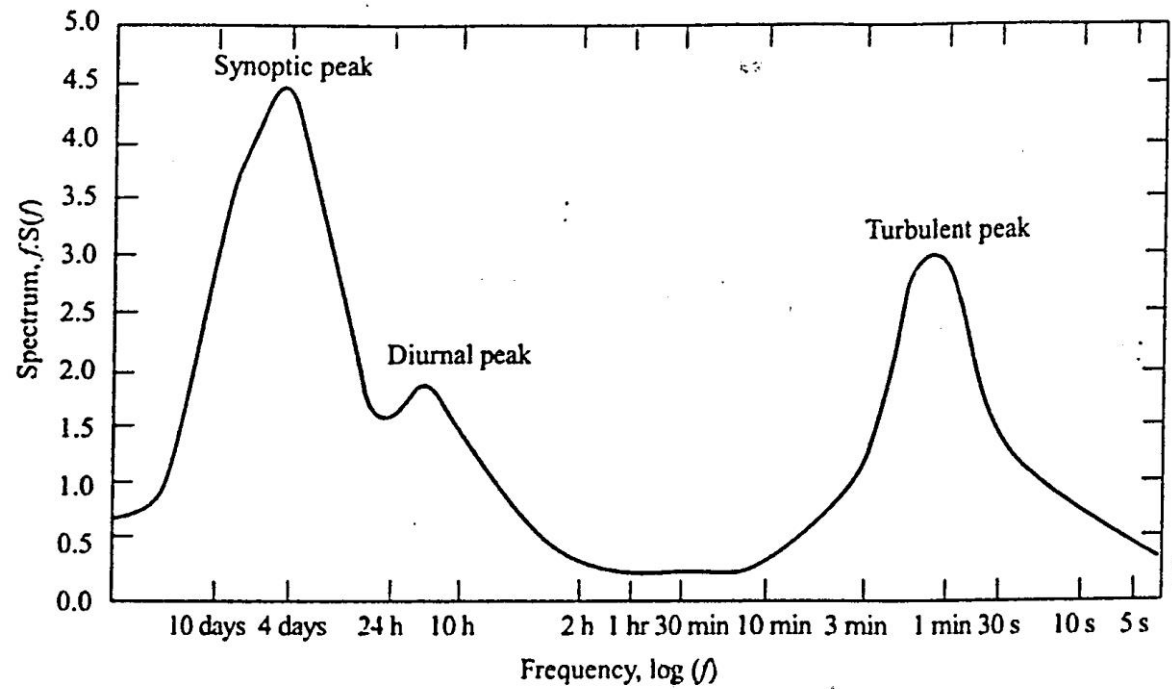


a) Gerjesztő-köri ellenállás a kialvási szög függvényében.



b) Kialvási szög a szlip függvényében.

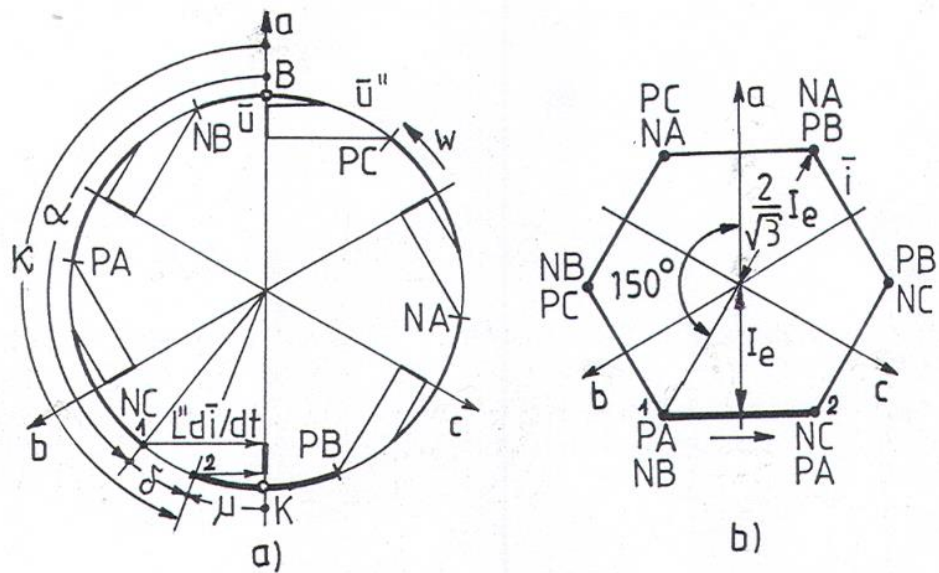
1.4.14. ábra. A gerjesztő-köri ellenállás, a kialvási szög és a szlip kapcsolata.



1.3. ábra. Szélspektrum Van der Hoven alapján.



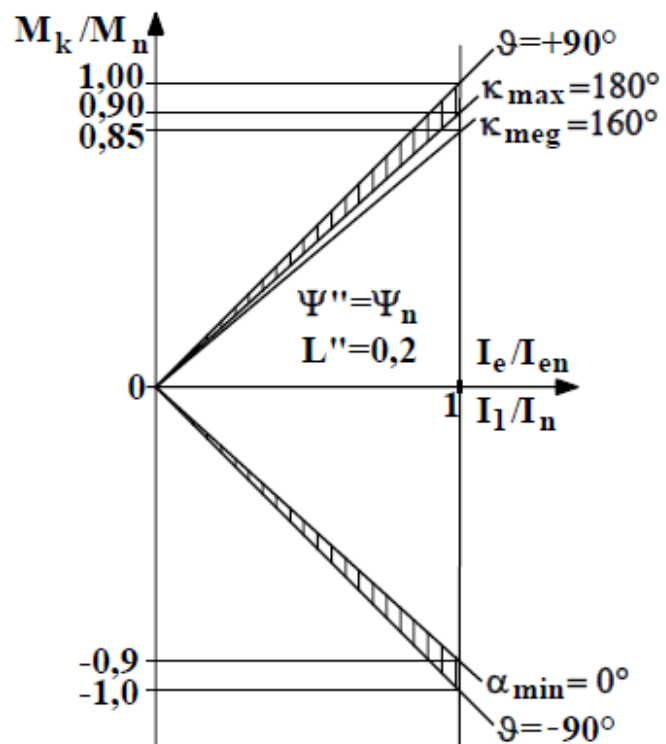




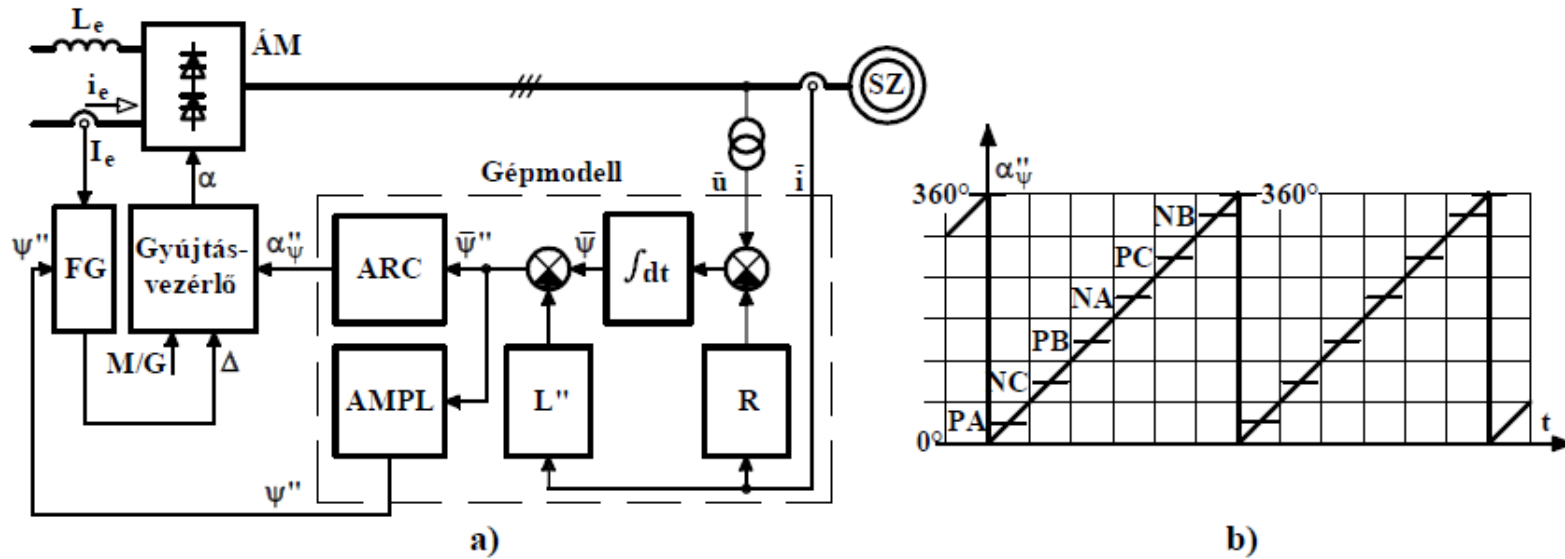
9.4. ábra: Vektorpályák  $i_e=I_e$  és  $R=0$  közelítéssel.

a. Feszültségvektorok,  $\alpha=140^\circ$ ,  $\delta=20^\circ$ ,  $\kappa=160^\circ$ ,  $\mu=20^\circ$ ,

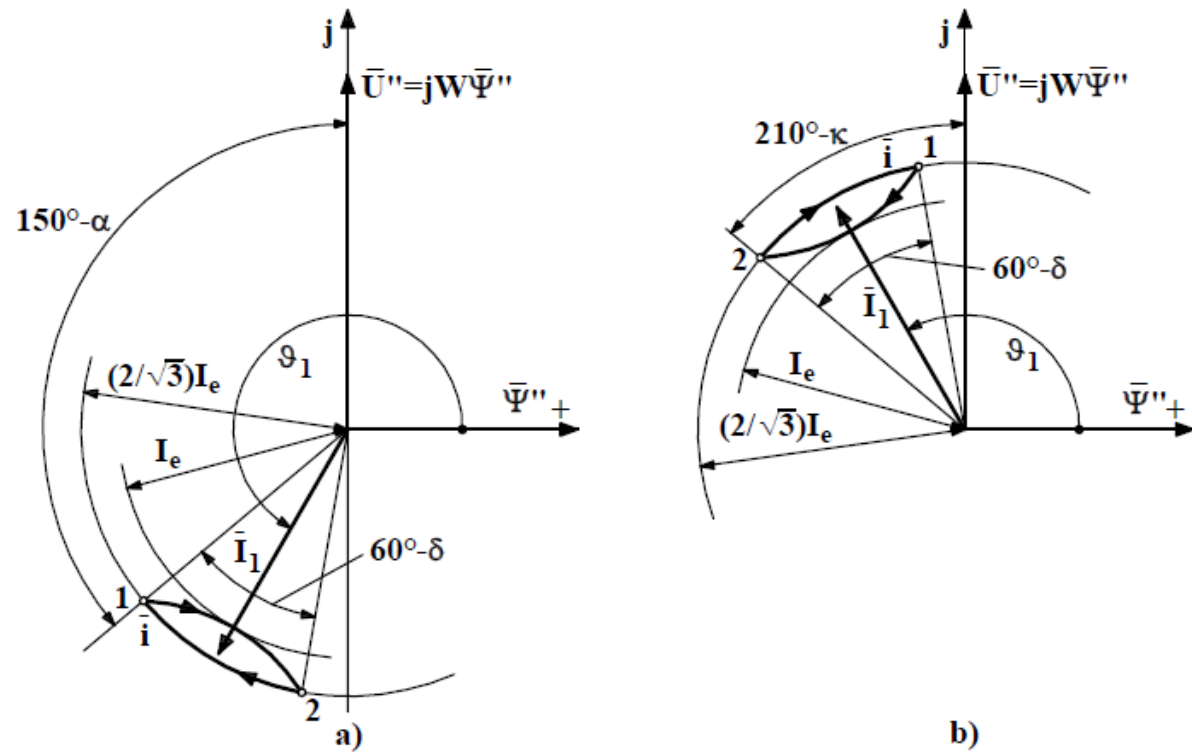
b. Áramvektor.



9.5. ábra:  
Nyomaték középérték az  
alapharmonikus áram függvényében.

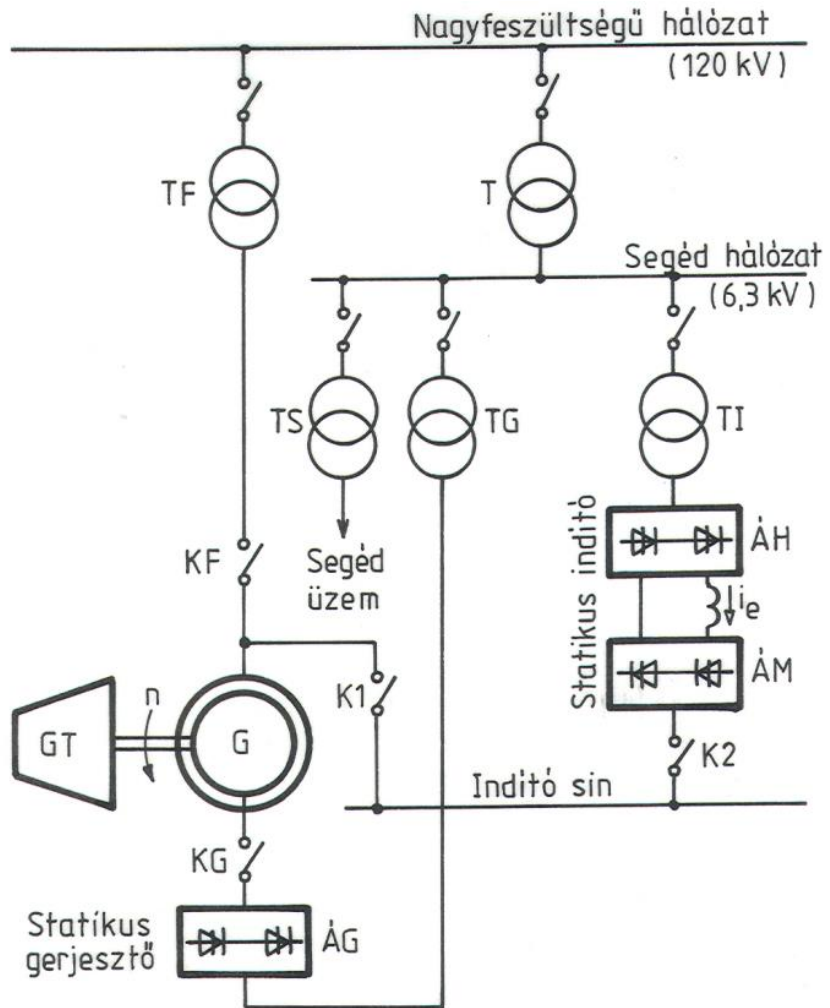


9.6. ábra: A  $\bar{\psi}''$  szubtransziens fluxusvektorról való gyűjtésvezérlés. a. Blokkvázlat, b. Gyűjtési szintek  $w > 0$ -ra.

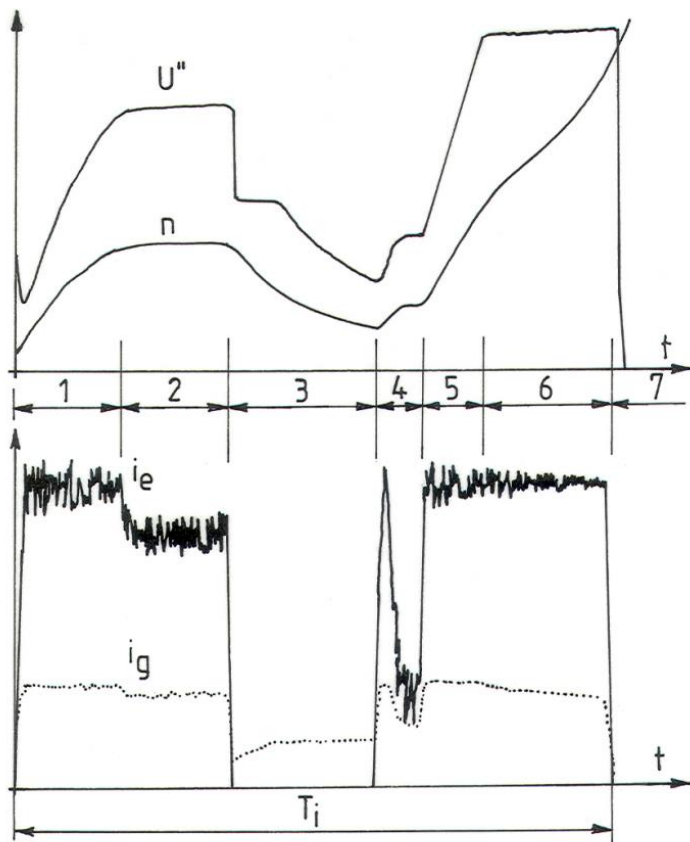


9.7. ábra: Gépi kommutációs áramvektor pályák  $w > 0$ -nál.

a. Generátoros/egyenirányító üzem:  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\delta = 20^\circ$ , b. Motoros/inverter üzem:  $\alpha = 140^\circ$ ,  $\delta = 20^\circ$ ,  $\kappa = 160^\circ$ .



12.14. ábra:  
 Áramirányítós szinkron motoros indító  
 gázturbinához.



12.15. ábra:  
 ÁSZM fő jellemzői az indítási folyamat  
 alatt.