

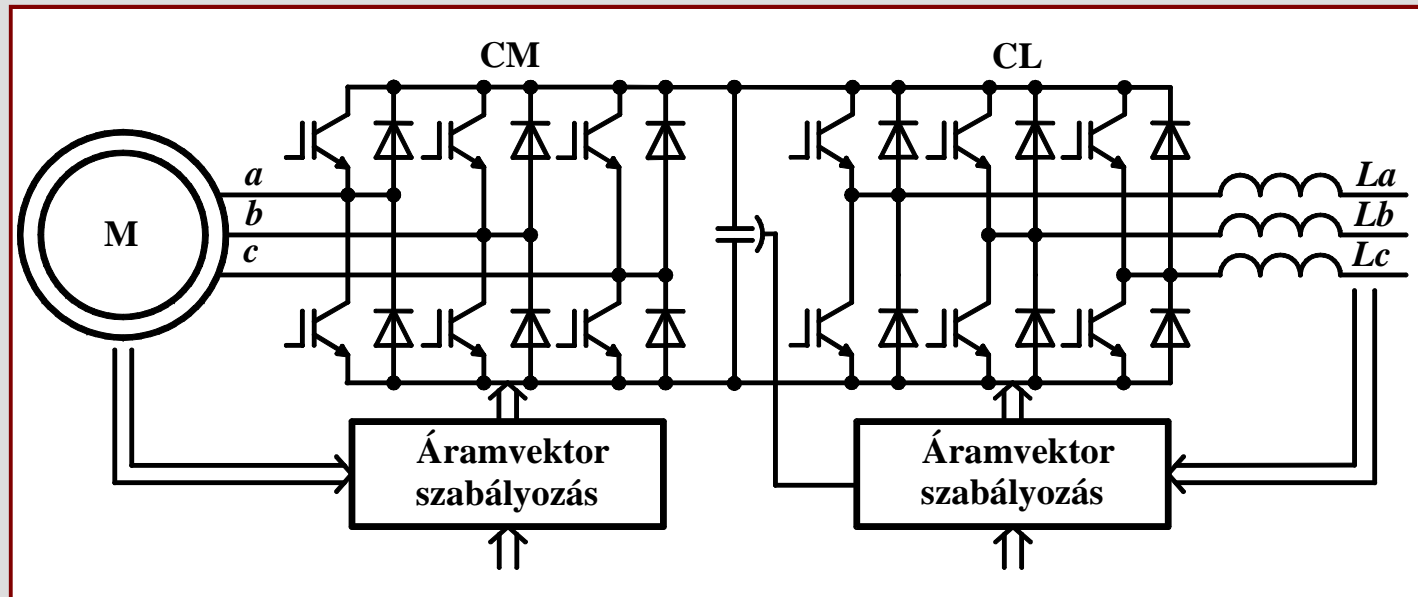
Dr. Veszprémi Károly
BME Villamos Energetika Tsz.
egyetemi tanár

**Váltakozóáramú átalakítók
(hajtások) közvetlen
(nyomaték) szabályozása**

A témakör helye:

A cím kissé általános, de konkretizálható:

- Váltakozóáramú átalakító: kétszintű feszültség inverter (frekvenciaváltó)

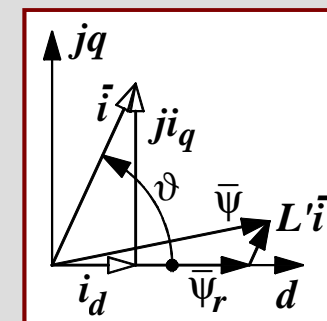
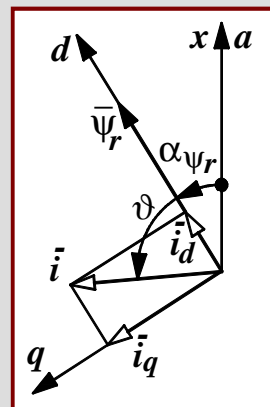
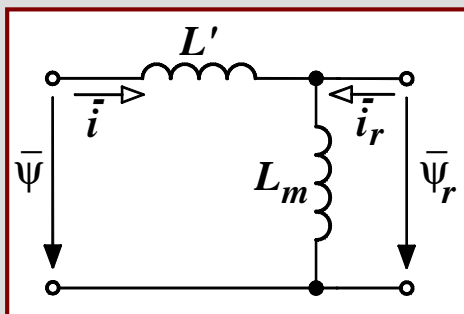


- Kalickás forgórészű aszinkron gép gépoldali áramirányítójának (CM) közvetlen nyomaték és fluxus szabályozásáról lesz szó **elsősorban**.
- Ha marad idő, **általánosítani és kiterjeszteni is lehet** az elvet (más gépek, más áramirányítók, más mennyiségek, más rendszerek).

Kiindulás:

Váltakozóáramú gépek **nyomaték-képzése:**

- **Fizikai kép:** mágneses térben árammal átjárt vezetőre ható erő arányos a mágneses tér nagyságával (fluxus: ψ) és a vezető áramával.
- **Mennyiségileg:** szinuszos térbeli indukció és gerjesztés eloszlás esetén arányos a vektoriális szorzatukkal $\bar{m} = C\bar{\psi} \times \bar{i}$
- **Jó dinamikájú nyomaték szabályozást** akkor kapunk, ha a fluxust nem, vagy a nyomatéktól függetlenül változtatjuk.
- Ebből jött a **mezőorientált szabályozás** ötlete: bontsuk fel az egyedül hozzáférhető és szabályozható állórész áramot fluxus irányú fluxus-képző (i_d) és rá merőleges irányú nyomaték-képző (i_q) áramkomponensre:



Problémák:

- **Bonyolult koordináta-transzformációkat** kell végrehajtani valós időben.
- Elő kell állítani a **rotorfluxus vektorát**.

Ezek ellenére úgy nézett ki sokáig, hogy a mezőorientált szabályozás (áramvektor szabályozás) szinte egyeduralkodó, szabványos megoldás lesz a jó dinamikájú hajtások területén.

De ekkor jött az újabb ötlet: **szabályozzuk a nyomatékot és fluxust közvetlenül, zárt áramszabályozási hurok nélkül**. Erre az ad lehetőséget, hogy:

- az állórész fluxus a motorra kényszerített feszültséggel (feszültség inverter) szabályozható:

$$\frac{d\bar{\Psi}}{dt} = \bar{u} - \bar{i}R \approx \bar{u}$$

- az áramvektor szabályozás pedig **visszavezethető fluxusvektor szabályozásra** (ld. előző ábra):

$$\bar{\Psi} = L' \bar{i} + \bar{\Psi}_r \quad \rightarrow \quad \bar{i} = \frac{\bar{\Psi} - \bar{\Psi}_r}{L'}$$

Átírva a nyomaték képletét:

$$\bar{m} = C\bar{\Psi} \times \bar{i} = C\bar{\Psi} \times \frac{\bar{\Psi} - \bar{\Psi}_r}{L'} \Rightarrow m = \frac{C\psi\psi_r \sin \delta}{L'}$$

A nyomaték **a fluxusokkal is kifejezhető, befolyásolható!**

δ a két fluxusvektor közti (kis) szög, $\sin \delta \approx \delta$:

$$m = \frac{C\psi\psi_r \sin \delta}{L'} \approx \frac{C\psi\psi_r \delta}{L'}$$

Állandósult állapotban, álló koordináta-rendszerben a $\bar{\Psi}_r$ forgórész fluxusvektor $w_{\psi r} \approx w_1$ alapharmonikus szögsebességgel **egyenletesen forog**.

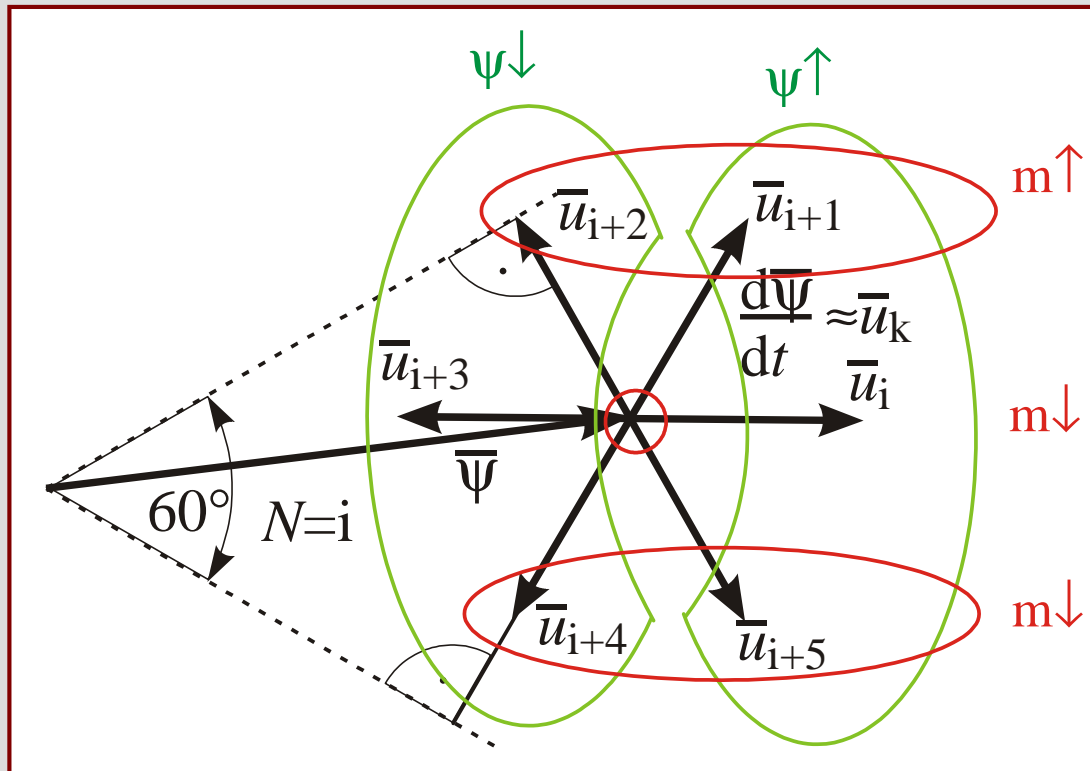
Az állórész fluxusvektor pedig **a kapcsolófeszültséggel befolyásolható** pályát ír le, ahogy láttuk már:

$$\frac{d\bar{\Psi}}{dt} = \bar{u} - \bar{i}R \approx \bar{u}$$

Szektorszámától függő általános szabályok is megállapíthatók a feszültségvektor kiválasztására:

Az $N=i$ -edik szektorban lévő fluxusvektor esetén, $w_{\psi r} > 0$ és $m > 0$ motoros üzemben geometriailag belátható, hogy mely feszültségvektorok jók az adott cél érdekében (i értéke 6-nál túlszordul):

ψ -t csökkenti: $\bar{u}_{i+3}, \bar{u}_{i+2}, \bar{u}_{i+4}$ ψ -t növeli: $\bar{u}_i, \bar{u}_{i+1}, \bar{u}_{i+5}$



m -t (δ -t) növeli:

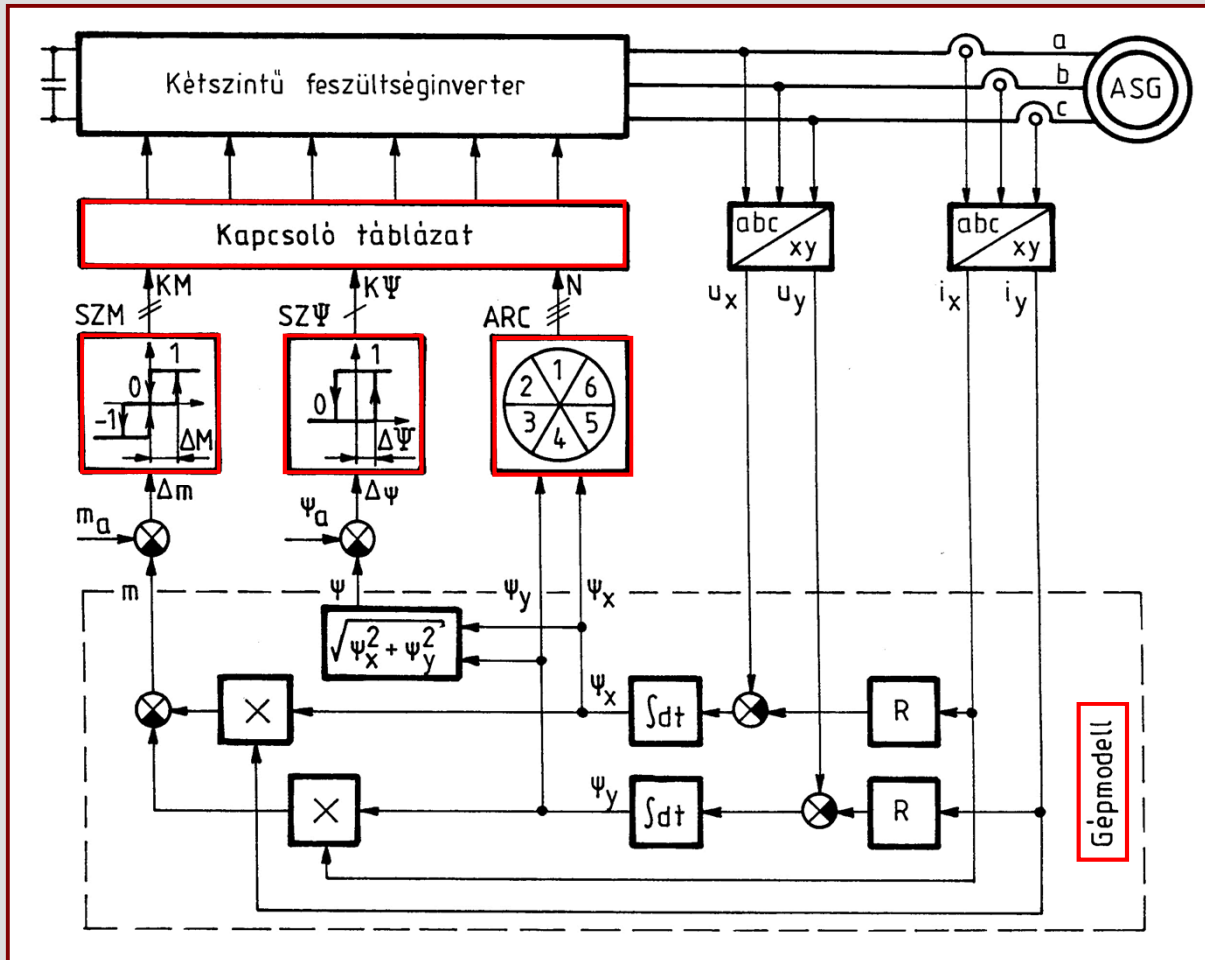
$\bar{u}_{i+1}, \bar{u}_{i+2}$

m -t (δ -t) csökkenti:

\bar{u}_7

$\bar{u}_{i+5}, \bar{u}_{i+4}$

A szabályozandó mennyiségeket **kétpont szabályozással** tarthatjuk az alapjel körüli ΔM ill. $\Delta \Psi$ szélességű sávban (alapjelek: m_a , ψ_a).
A szabályozás egy lehetséges blokkvázlata:



- **Gépmmodell:** a fluxus és nyomaték előállítására.
- **SZM, SZΨ:** hiszterézises komparátorok.
 - SZM háromszintű: $KM = -1, 0, 1$ (a kétféle forgásirány miatt, a finomabb beavatkozás végett)
 - SZΨ kétszintű: $K\Psi = 0, 1$
- **ARC:** a fluxusvektor szög-helyzetének meghatározása (N szektorszám)
- **Kapcsoló táblázat:** kiválasztja a Δm és $\Delta \psi$ hibajelek csökkentéséhez szükséges feszültségvektorokat az adott szektorban.

A fentebb megadott szabályokkal a Kapcsoló táblázat tartalma meghatározható:

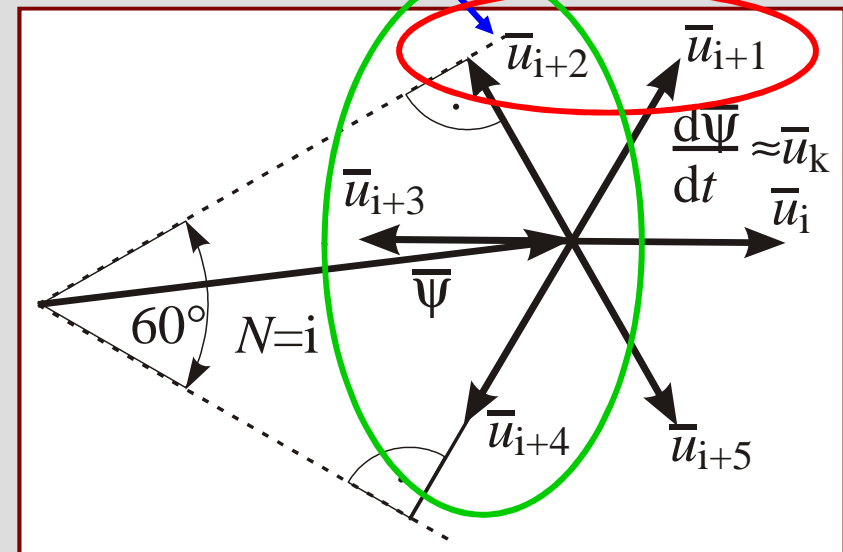
KΨ	KM	N					
		1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6	1
	0	7P	7N	7P	7N	7P	7N
	-1	6	1	2	3	4	5
0	1	3	4	5	6	1	2
	0	7N	7P	7N	7P	7N	7P
	-1	5	6	1	2	3	4

Pl. $N=i=6$, és ha a hibajelek a következők:

- $\Delta m = m_a - m > \Delta M \rightarrow KM=1$ (növelni kell a nyomatékot és δ -t)
- $\Delta \psi = \psi_a - \psi < -\Delta \Psi \rightarrow K\Psi=0$ (csökkenteni kell a fluxust)

Ilyen vektor az $i+2=6+2=8 \rightarrow 2$

- 7P és 7N a **kétféle nullavektor** (a pozitív ill. a negatív sínekre kapcsolva minden fázist)
- Azt kell választani, ami **kevesebb kapcsolást igényel** (a beazonosított 2. számú vektor után ez a 7P).



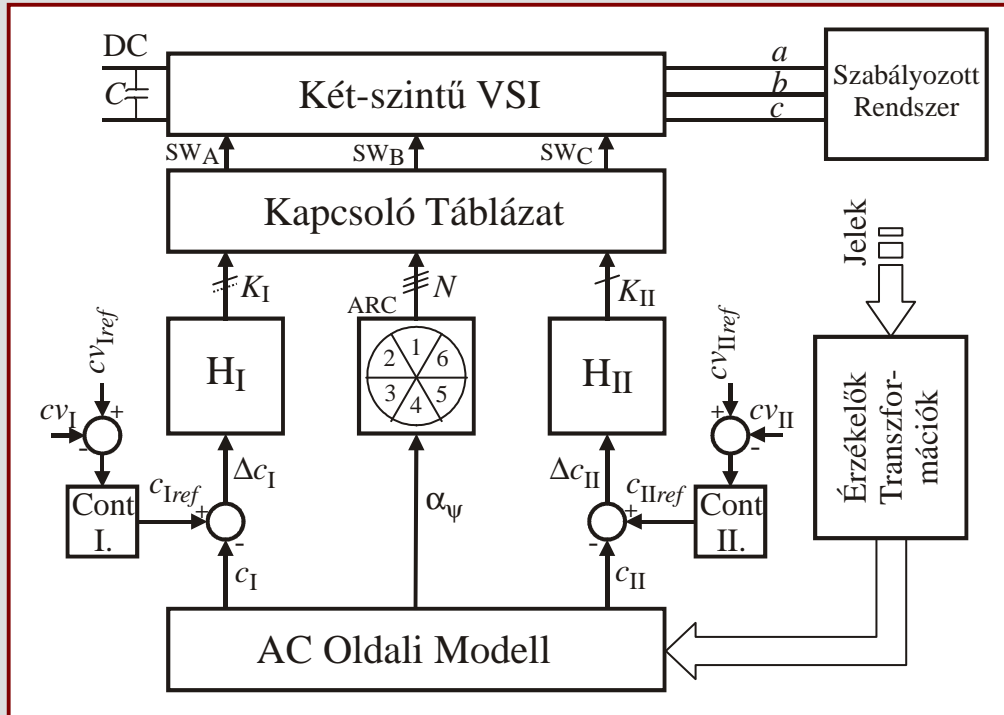
A szabályozás jellemzői:

- Mint minden kétpont szabályozás, **robosztus**. Az alapján avatkozik be, ahogy a rendszer viselkedik. 😊
- Csak a tolerancia sávok állíthatók. **Minimális értéküket a megengedhető kapcsolási frekvencia határozza meg.**
- A kapcsolási frekvencia **változó**. 😞
- A nyomaték gyorsan, **jó dinamikával szabályozható**. 😊
- Nem kell koordináta-transzformációkat végrehajtani. 😊
- Viszonylag **egyszerű** megvalósítás. 😊
- **A bemutatott gépmodellnek korlátai vannak**, elsősorban kis frekvencián problémás a nyílt hurkú integrálás. Ennek elkerülésére bonyolultabb gépmodell használandó. 😞
- Képes önmagában nyomatékszabályozottan üzemelni, nem kell fordulatszám érzékelés (**sensorless**). 😊
- Egy forgásirányú hajtásokban (pl. szélgenerátor) a Kapcsoló táblázat $K_M = -1$ -es sorait soha nem használjuk, ilyenkor az SZM hiszterézises nyomaték szabályozó is **kétállású**.
- Van olyan Kapcsoló táblázat, amely **nem használja a nullavektort**. Ebben az esetben a nyomaték gyorsabban változtatható, de megnő a kapcsolási frekvencia.

A közvetlen szabályozás általánosítása:

- **Egyéb gépek:** Mivel a váltakozóáramú gépekben a nyomatékképzés és a feszültség hatása a fluxusra nagyon hasonló, az aszinkronmotorokra kitalált szabályozási elv egyéb gépekre is használható:
 - Állandómágneses szinkrongép.
 - Kétoldalról táplált csúszógyűrűs aszinkrongép.
- **Egyéb mennyiségek:** Minden mennyiség, amely szoros kapcsolatban van a nyomatékkal, ugyanúgy szabályozható, mint a nyomaték. Ez lehet a gép hatásos teljesítménye. Hasonlóan, minden mennyiség, amely szoros kapcsolatban van a fluxussal, ugyanúgy szabályozható, mint a fluxus. Ez lehet a gép meddő teljesítménye.
- **Egyéb átalakítók:** Ha a hálózatoldali áramirányító is kétszintű feszültség inverter kapcsolású, akkor az is szabályozható hasonló elven. Ennek fizikai alapja az a hasonlóság, ahogy a váltakozóáramú hálózat modellezhető: egy indukált feszültséggel (fizikailag a távoli generátor indukált feszültsége), soros ellenállással és induktivitással. Bevezethető virtuális fluxus (a távoli generátoré). Így a hálózati áramirányító hatásos és meddő teljesítménye hasonlóan szabályozható, mint a nyomaték és a fluxus.

Általános blokkvázlat:



Még egy általánosítás:

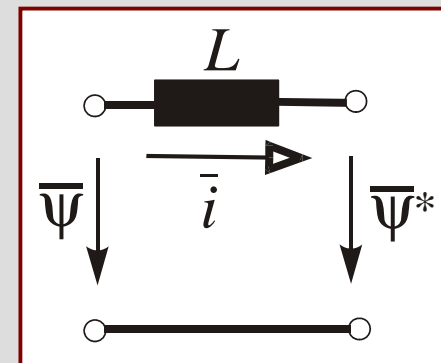
A közvetlen szabályozások alkalmazhatók mindenhol, ahol áramvektor szabályozásra van szükség, **mert ilyenkor az áram komponensei is indirekt módon szabályozhatók.**

c_I : nyomaték-szerű mennyiség.
A δ szöggel befolyásolható.

c_{II} : fluxus-szerű mennyiség.
A szabályozott fluxussal befolyásolható.

H_I lehet kétszintű, vagy háromszintű

Két fluxus értelmezhető:
 Ψ : amit szabályozunk.
 Ψ^* : ami kényszerítve van.



Vizsgáljunk meg egyet az általánosításból levezethető rendszerekből:

A hálózatoldali áramirányító közvetlen hatásos és meddő teljesítmény szabályozása

Általános	Telj. szab.	Jelentés
a, b, c x, y	La, Lb, Lc Lx, Ly	a hálózat (line) fázisai, (a továbbiakban L elhagyva) a hálózat „a” fázisához kötött koordinátarendszer
\bar{u} , $\bar{\psi}$	\bar{u}_L , $\bar{\psi}_L$	hálózati feszültség az inverter kapcsain (az inverter által kiadott feszültség) és a neki megfelelő virtuális fluxus
\bar{u}_i	\bar{u}_ℓ	a távoli generátor indukált feszültsége
α_ψ	α_{ψ_L}	$\bar{\psi}_L$ szöge Lx–Ly-ben, a továbbiakban α -val jelölve
$\bar{\psi}^*$, ω^*	$\bar{\psi}_\ell$, $\omega_{\psi_\ell} = \omega_\ell$	\bar{u}_ℓ -nek megfelelő virtuális fluxus , amit a hálózat állandó feszültsége kényszerít és az ő szögsebessége
R, L	R_ℓ , L_ℓ	a hálózat ellenállása és induktivitása
\bar{i}	$-\bar{i}_\ell$	hálózati áram
c_I , c_{II}	p_ℓ , q_ℓ	a hálózat hatásos és meddő teljesítménye
c_{VI} Cont.I	u_{dc} PI	a közbülső egyenáramú kör feszültsége zárt hurkú u_{dc} szabályozás
c_{VII} Cont.II	q_ℓ nyílt hurkú szab.	a hálózat meddő teljesítménye állandó meddő teljesítmény alapjel
K_I , K_{II}	KP, KQ	

Mennyiségi viszonyok, a teljesítmények szabályozásának összefüggései:

$$p_\ell = U_\ell i_{\ell p} = -U_\ell \frac{\Psi_L \sin \delta}{L_\ell} \approx -\frac{U_\ell \Psi_L \delta}{L_\ell}$$

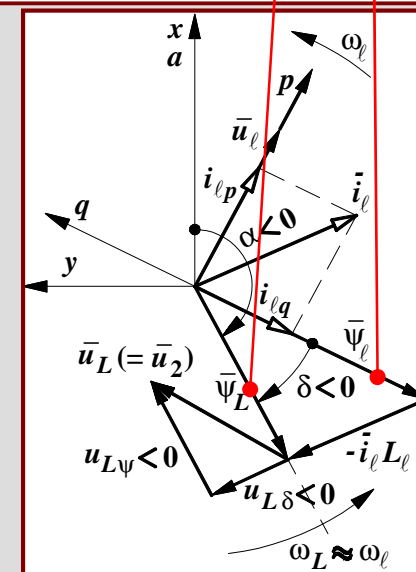
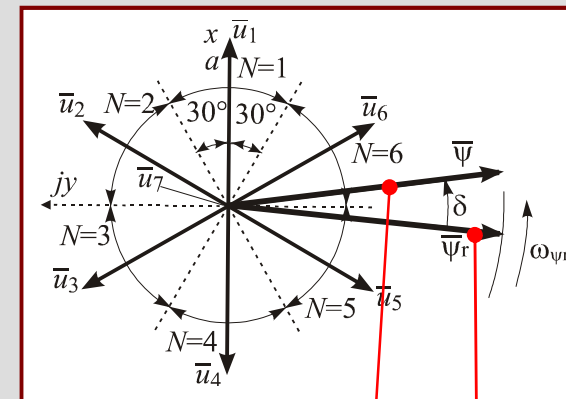
$$q_\ell = U_\ell i_{\ell q} = -U_\ell \frac{\Psi_\ell - \Psi_L \cos \delta}{L_\ell} \approx \frac{U_\ell}{L_\ell} (\Psi_L - \Psi_\ell)$$

- A p hatásos teljesítmény δ -val szabályozható.
- A q meddő teljesítmény Ψ_L -lel szabályozható.
- **Indirekt módon** ez a hálózati áram komponenseinek szabályozását is jelenti.
- A hatásos teljesítmény alapjelét a zárt hurkú **egyenfeszültség szabályozó** állítja. Ennek az alapfeladata az egyenfeszültség állandó értéken tartása. Ezért ez olyan hatásos teljesítmény alapjelet állít be, amely **teljesítmény egyensúlyt biztosít**, állandó értéken tartva a C_{dc} egyenköri kondenzátorban lévő energiát.
- A meddő teljesítmény alapjele **a megkívánt meddő viszonyok alapján** állítható be (akár kapacitív is lehet).
- **Hálózatbarát áramirányító**, szinuszos, nem meddő árammal.

A közvetlen szabályozás Kapcsoló táblázata:

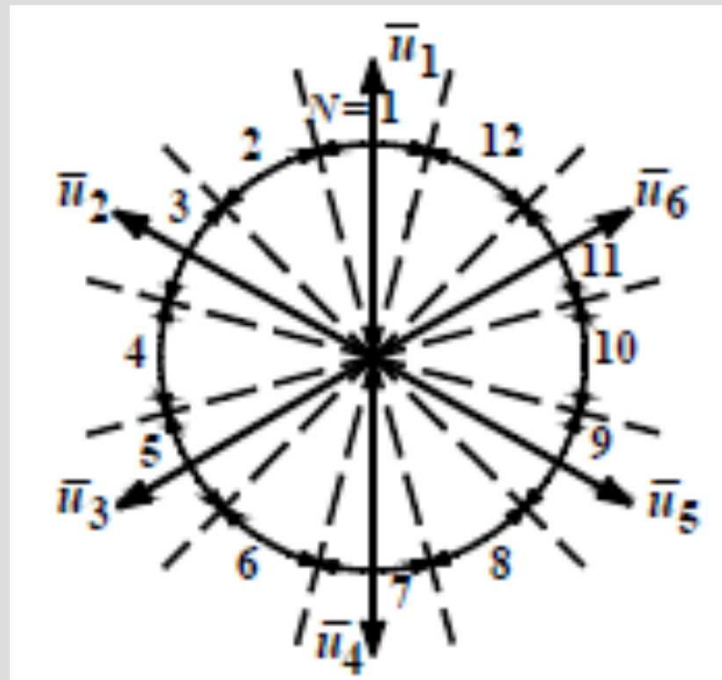
- Mindkét hiszterézises szabályozó **kétszintű**, a nyomaték-szerű mennyiségé (hatásos teljesítmény) is, mivel a forgásirány (ω_L) nem változik.
- Vegyük észre, hogy a választott pozitív irányokkal a **fluxusok egymáshoz képesti elhelyezkedése fordított**, az inverter feszültségvektorok δ -ra ellentétesen hatnak az eddig leírtakkal, más lesz a Kapcsoló táblázat (sorok felcserélve).
- A táblázatban a nulla vektort helyettesíthető hatékonyabb aktív vektorok is fel vannak tüntetve:

KQ	KP	N					
		1	2	3	4	5	6
1	0	2	3	4	5	6	1
	1	7P (6)	7N (1)	7P (2)	7N (3)	7P (4)	7N (5)
0	0	3	4	5	6	1	2
	1	7N (5)	7P (6)	7N (1)	7P (2)	7N (3)	7P (4)

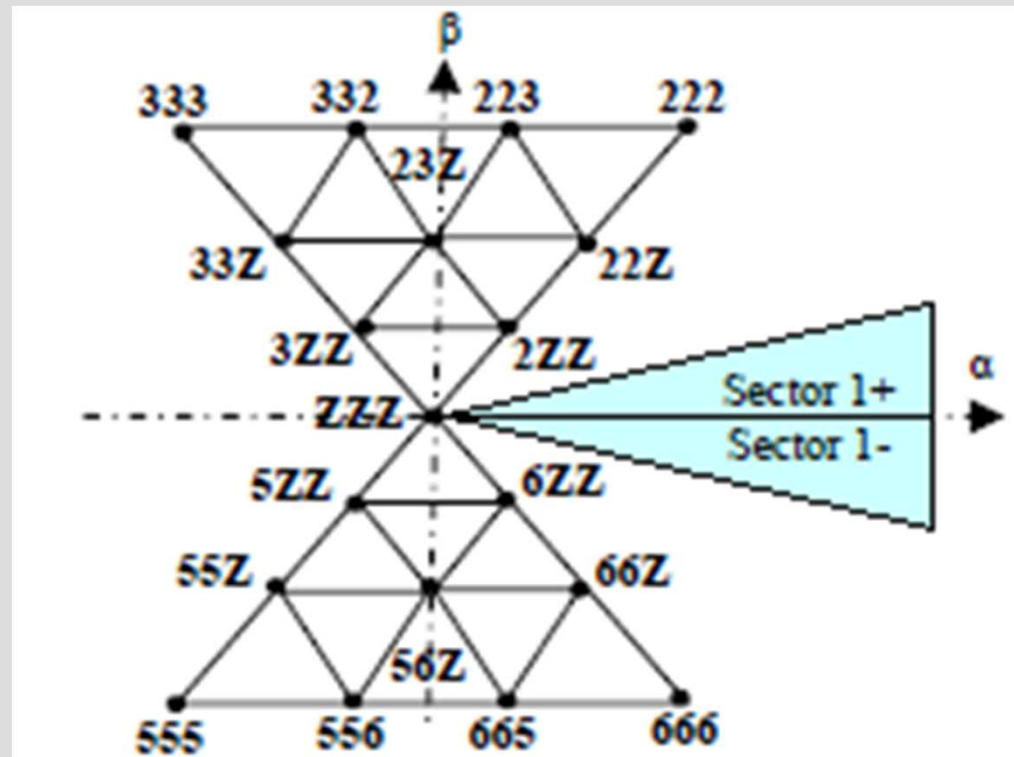


Továbbfejlesztések:

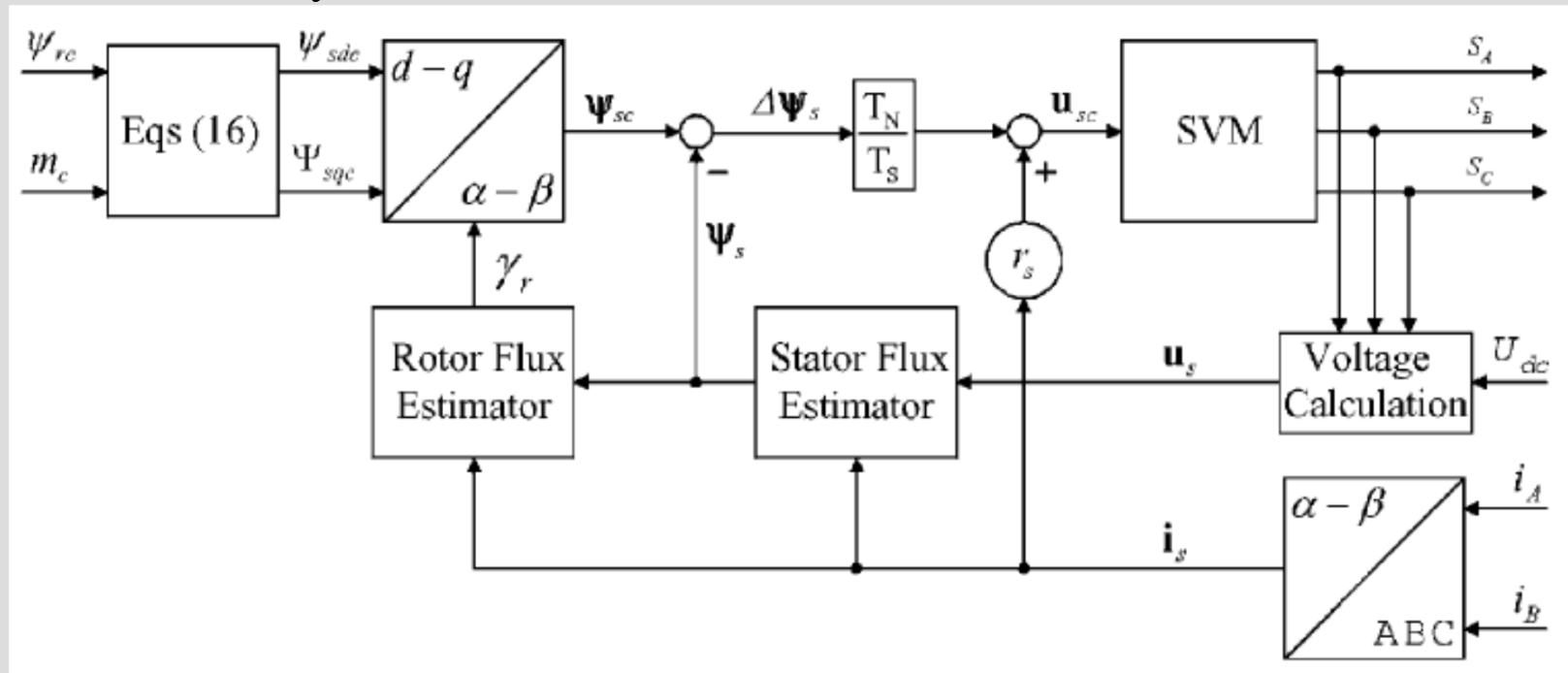
- A két legkritikusabb probléma (összefüggnek):
 - A nyomatéklüktetés nagysága.
 - A kapcsolási frekvencia változása.
- A nyomatéklüktetés csökkentésének lehetőségei:
 - A szektorok számának növelése (duplázása, 12 szektor)



- A nyomatéklüktetés csökkentésének lehetőségei (2):
 - ISZM modulátort használva több feszültség vektor szintetizálható és alkalmazható. Ezt diszkrét térvektoros modulációs DTC módszernek hívjuk (Discrete Space Vector Modulation DSVM-DTC)
 - A használt feszültség vektorok és a nekik megfelelő táblázatok a fordulatszám nagyságától függnek tartományonként (alacsony, közepes, magas).



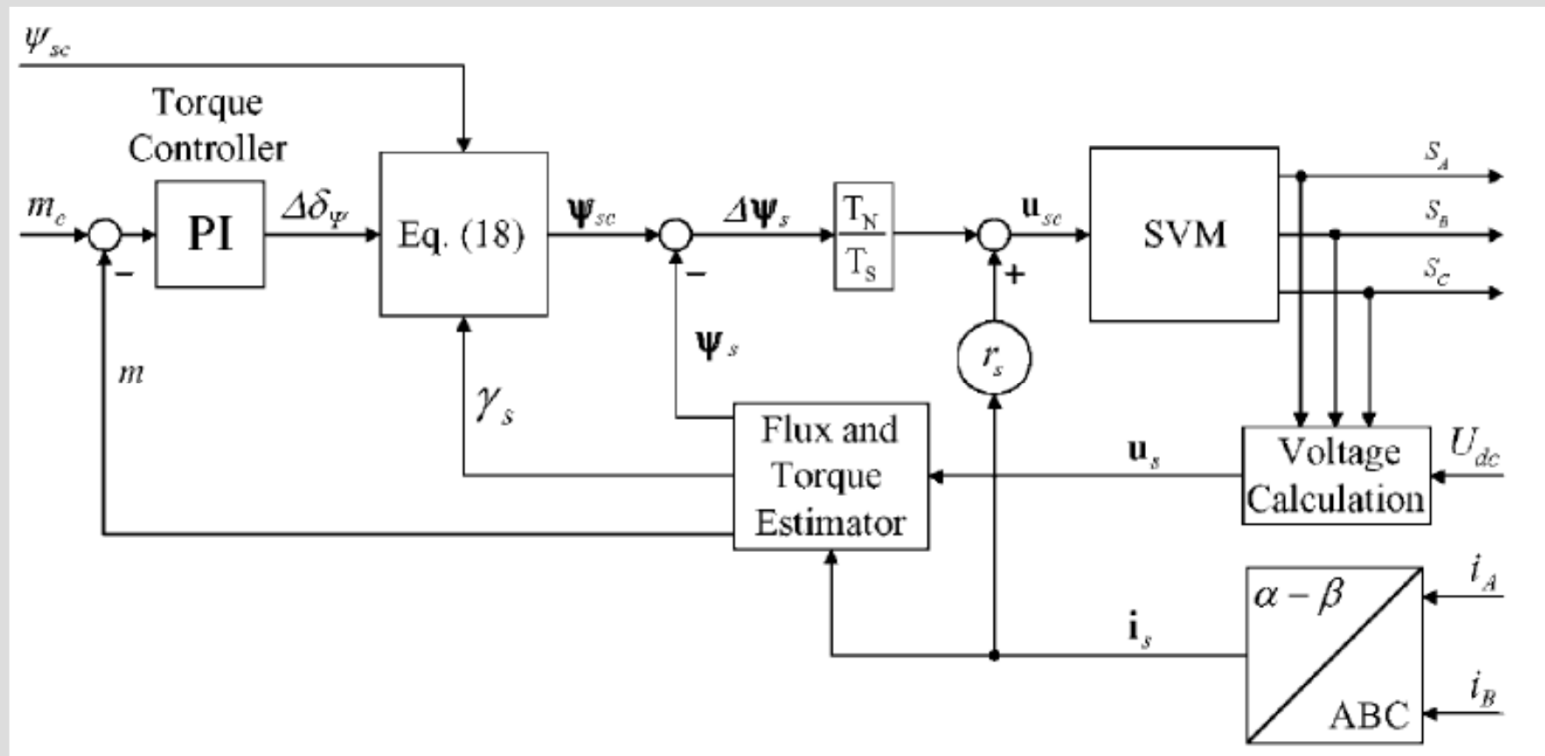
- Állandó kapcsolási frekvencia alkalmazása ISZM modulátor alkalmazásával (DTC-SVM)
 - Zárt hurkú fluxus szabályozás (ha a paraméterek nem helyesek, maradó nyomaték hiba):



$$\psi_{sdc} = \frac{l_s}{l_M} \left(1 + \sigma T_r \frac{d\psi_{rc}}{dt} \right) \quad (16a)$$

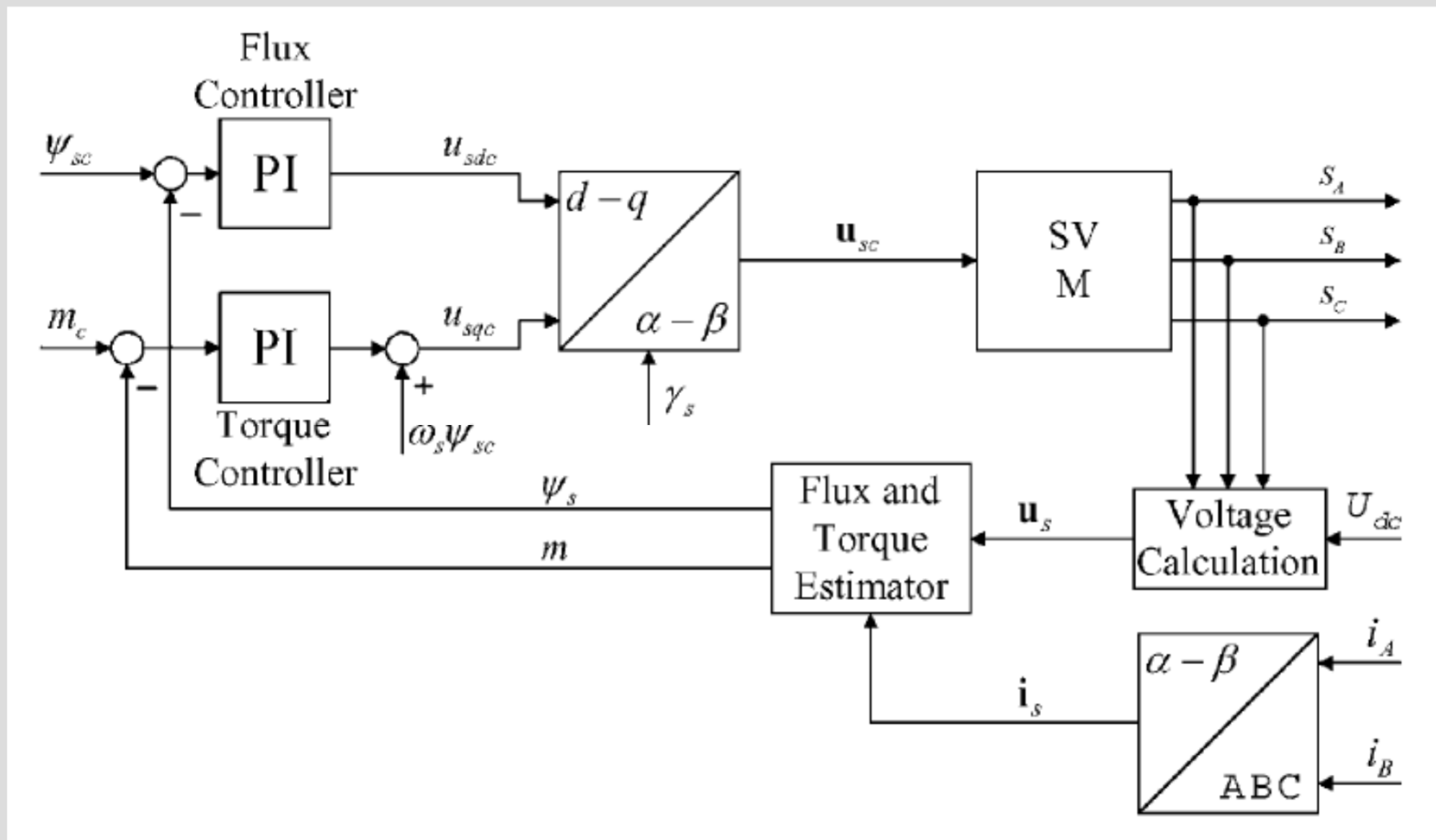
$$\psi_{sqc} = \frac{l_s}{l_M} \sigma l_s \frac{m_c}{\psi_{rc}} \quad (16b)$$

- Állandó kapcsolási frekvencia alkalmazása ISZM modulátor alkalmazásával (DTC-SVM) (2)
 - Zárt hurkú nyomaték szabályozás (ha a paraméterek nem helyesek, maradó fluxus hiba):



$$\psi_{sc} = \psi_{sc} e^{j(\gamma_s + \Delta\delta_\Psi)}. \quad (18)$$

- Állandó kapcsolási frekvencia alkalmazása ISZM modulátor alkalmazásával (DTC-SVM) (3)
 - Zárt hurkú nyomaték és fluxus szabályozás :



Köszönöm a figyelmet!