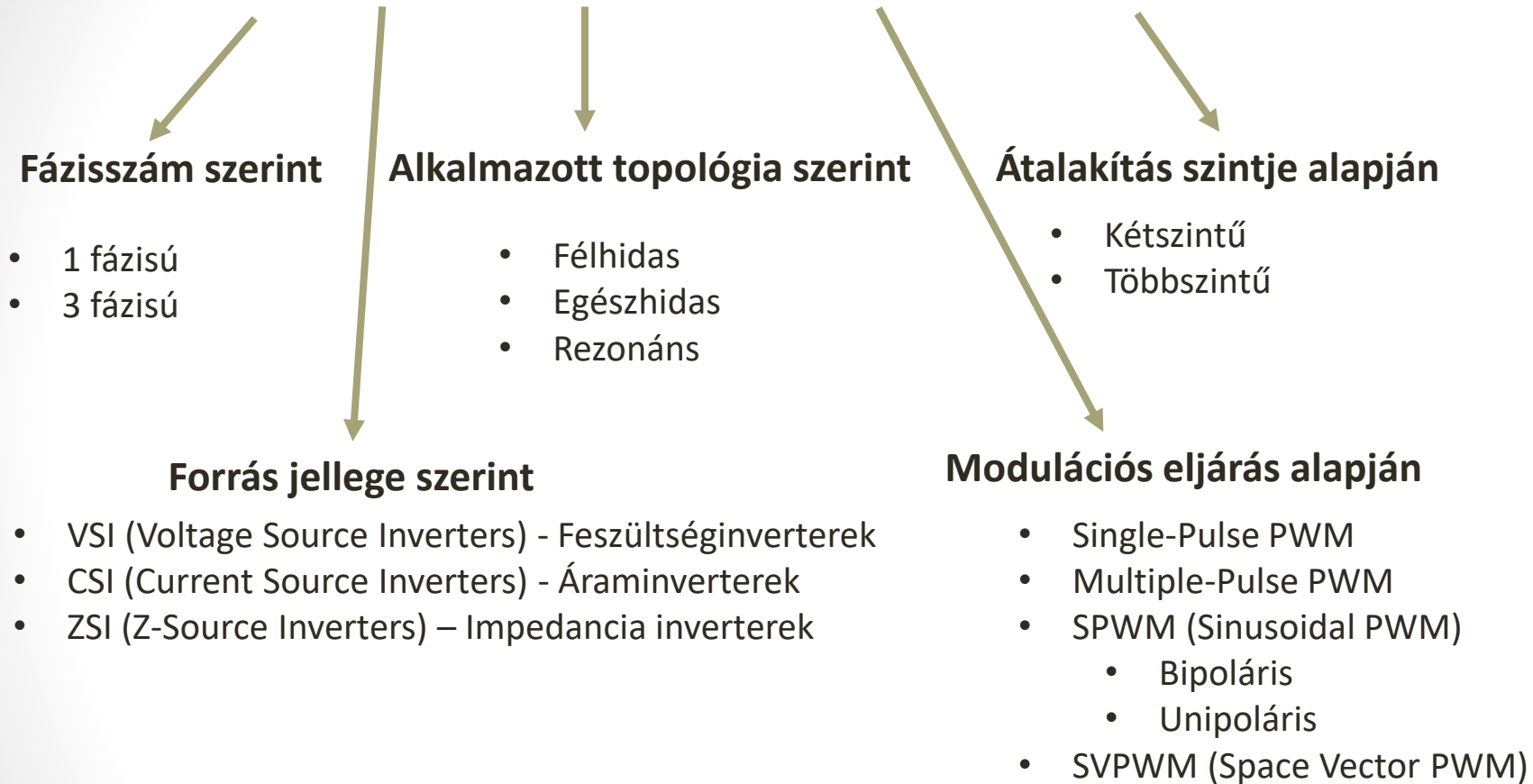


# Teljesítményelektronika

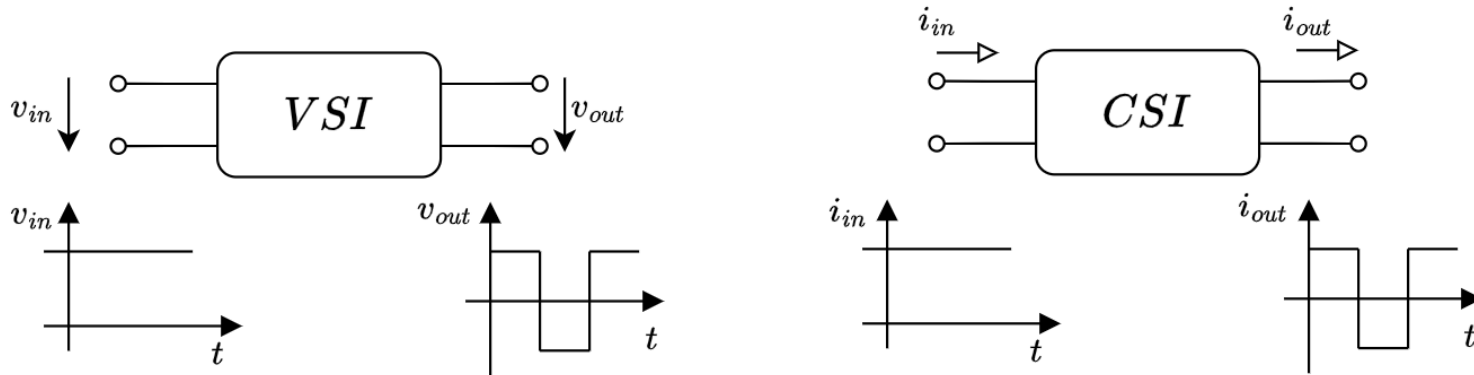
## DC/AC átalakítók (1f, 3f), AC/AC átalakítók



# Inverterek csoportosítása\*



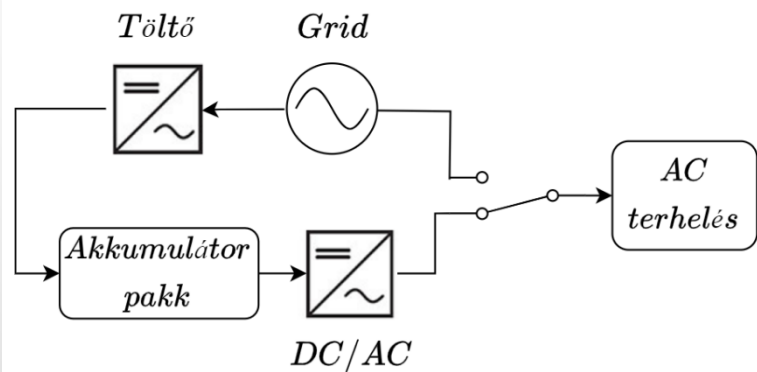
# Feszültség és áraminverterek (VSI, CSI)



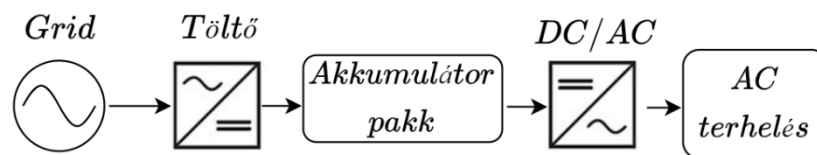
- A feszültség inverterek (VSI) a bemenetükön lévő –állandó (terhelőáram független, kis belső ellenállású)- egyenfeszültségből képeznek váltakozó feszültséget. A kimeneti áram jelalakja a terhelés jellegétől függ (rezisztív, induktív, kapacitív vagy ezek elegye)
- Az áram inverterek (CSI) a bemenetükön lévő –állandó (azaz olyan áramforrás, amelynek belső induktivitása olyan nagy, hogy a rajta áthaladó  $i$  áramot nem befolyásolhatja a rajta lévő  $u$  feszültség változása)- egyenáramból képeznek váltakozó váltakozó áramot. A kimeneti feszültség jelalakja a terhelés jellegétől függ (rezisztív, induktív, kapacitív vagy ezek elegye)

# Bevezetés

- A DC/AC átalakítók egyenmennyiséget (DC,  $U_1$ ) alakítanak át váltakozó mennyiséggé (AC,  $U_2$ ,  $f$ )
- A köznyelv az ilyen berendezéseket invertereknek hívja
- Egyfázisú kialakítás esetén kisebb teljesítményűek
- A vizsgált bloksémát szünetmentes tápegységnek nevezik (angolul Uninterrupted Power Supply, UPS), melyek a elvben hasonlatosak a háromfázisú villamos járműhajtások invertereihez
- Az UPS-ek két nagy csoportra oszthatók: (a.) készenléti, és (b.) online
- Készenléti esetben az akkumulátor és az inverter nem folytonos működésű (de töltődik), csakis a forrás megszűnése esetén lép működésbe. A forrás kimaradása esetén a kimenet némi késéssel reagál(hat)
- Folytonos esetben az akkumulátor és az inverter a hatáslánc része
- Egy speciális eset lehet, amikor a bemenet egy napelem cella (szolár)

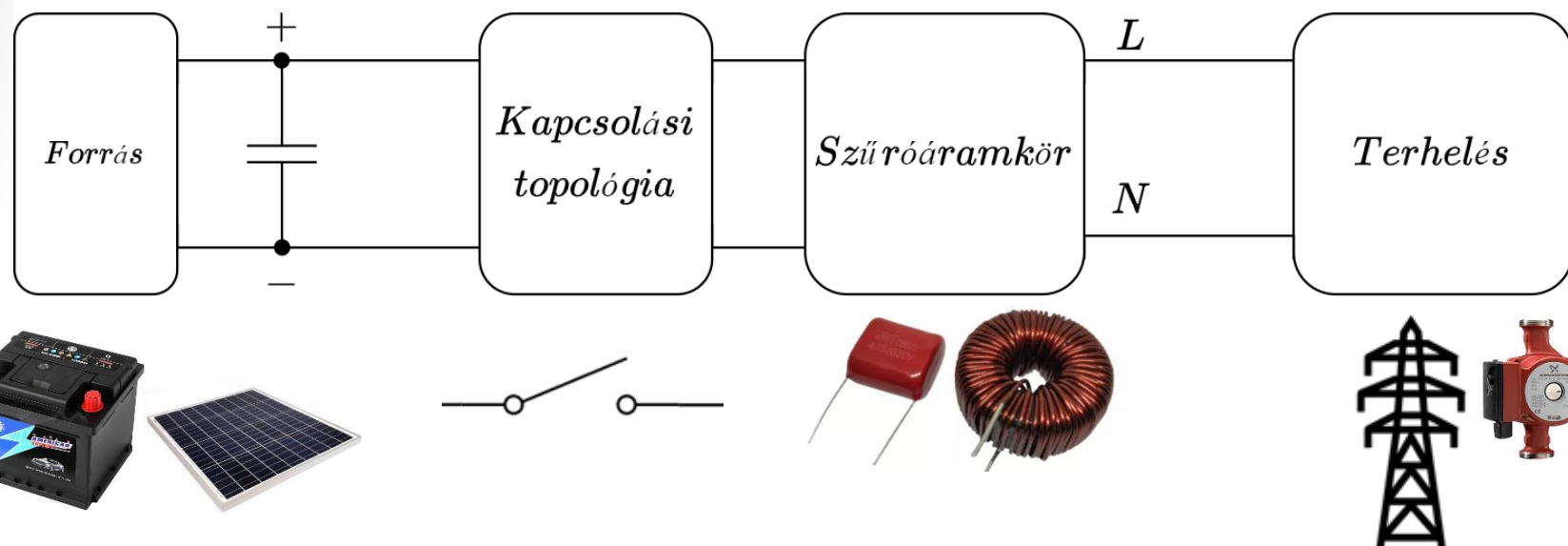


a.



b.

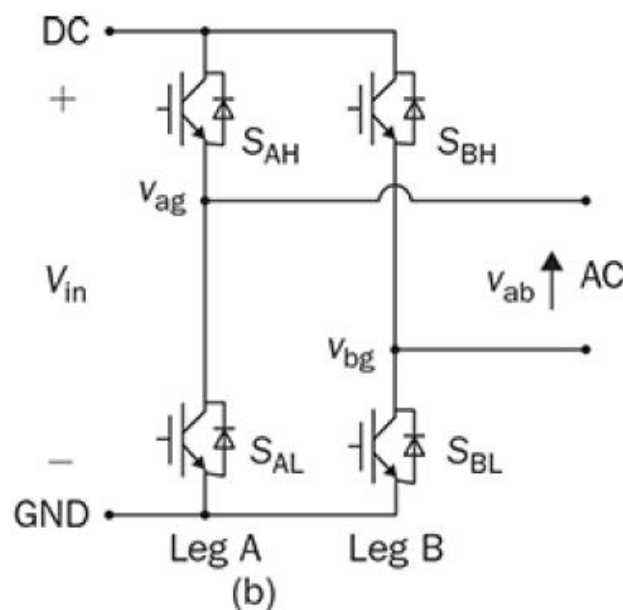
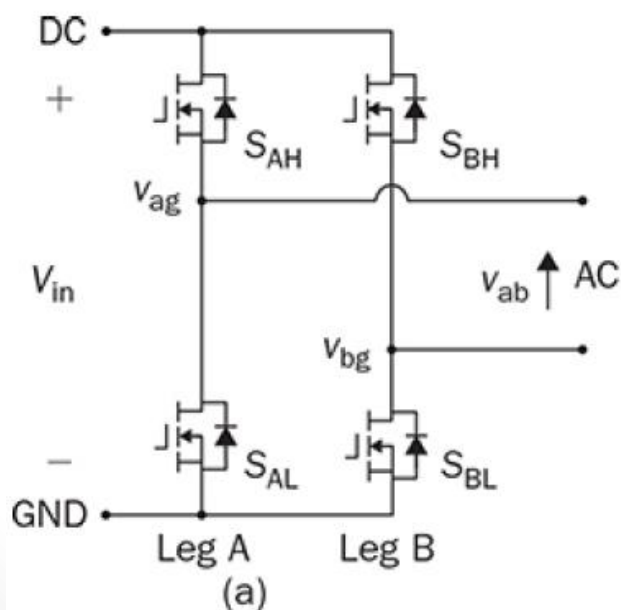
# Egyfázisú inverter blokkcséma



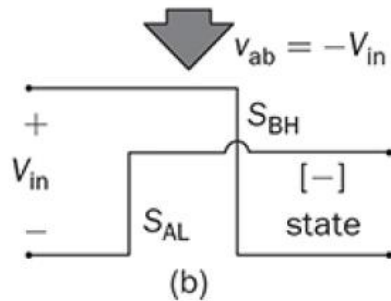
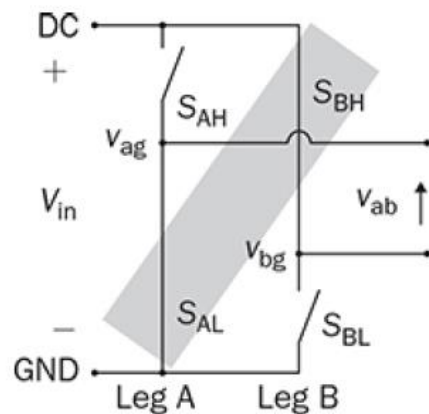
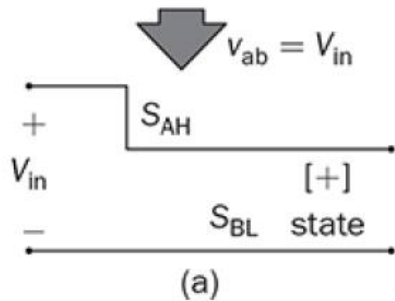
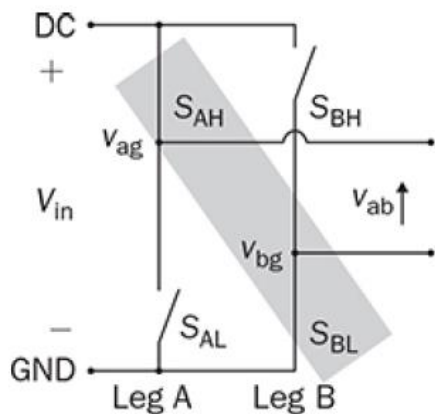
- Az inverterek forrása minden esetben valamilyen DC forrás, amely lehet akkumulátor, szolár (napelem) stb.
- Amennyiben a forrás nem stabil, szűrni szükséges ( $L$ ,  $C$  elemekkel)
- A kapcsolási topológia többféle lehet, ez végzi ténylegesen a DC/AC átalakítást
- A nagyfrekvenciás kapcsolás miatt a kimeneten szintén szűrőáramkört kell alkalmazni, főleg a nagyfrekvenciás felharmonikus összetevők kiszűrése miatt
- A terhelés lehet egy AC fogyasztó, vagy visszatáplálás a hálózatba (napelemes rendszer esetén)

# Egyfázisú inverter topológiák

- A leggyakoribb a négykapcsolós, két félhidat tartalmazó kialakítás, melyeket MOSFET-ek (a.), vagy IGBT-kkel építenek fel (b.) (mint az egészhidas DC/DC konverter esetén)
- A félvezetők kiválasztását a feladat határozza meg (milyen típus, teljesítmény stb.)
- A bemenet a DC és GND pontok között, míg a hídkimenet a  $V_{ag}$  és a  $V_{bg}$  kimenetek között definiált
- A korábbiaknak megfelelően az egy félhídban lévő félvezetők azonos időben nem vezethetnek
- Egyenáramú motorvezérlés esetén az említett topológiát H hídnak nevezik (az eltérés a vezérlés jellegében van)



# Vezérlési megoldások (Square Wave AC)



- A félvezetőket PWM alapú modulációval vezéreljük, melynek eredménye, hogy a kimenet vagy a „+” sínhez, vagy pedig a „-” sínhez kapcsolódik

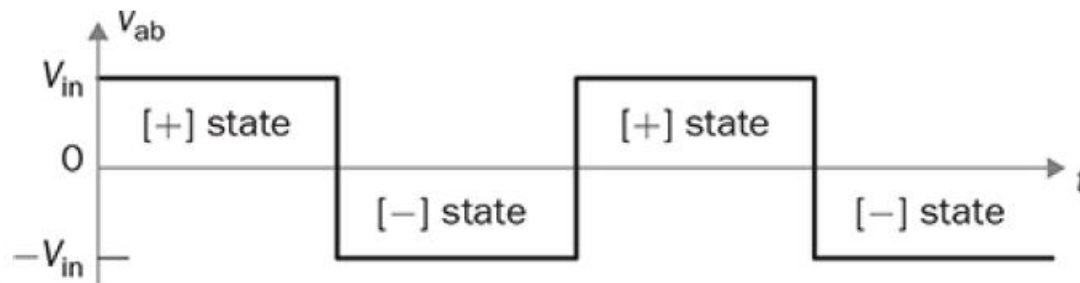
- A félvezetőket átlós módon kapcsoljuk (azonos hídágban tiltott az egyidejű bekapcsolás!)

- A pozitív ciklus esetén (a.) a kimeneti feszültség

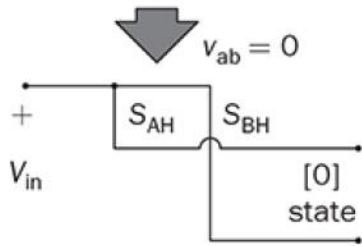
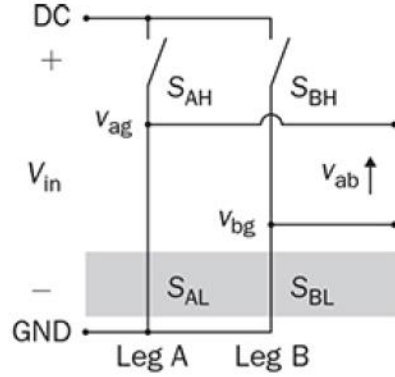
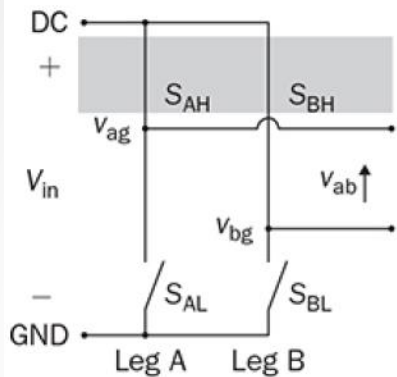
$$V_{ab} = V_{in} - 0 = V_{in}$$

- Negatív ciklus (b.) esetén a kimeneti feszültség pedig

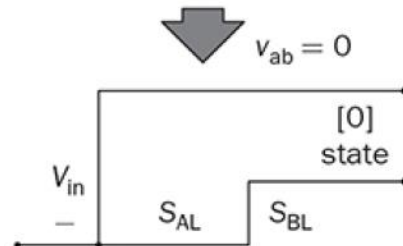
$$V_{ab} = 0 - V_{in} = -V_{in}$$



# Vezérlési megoldások (Chopperek – Szaggatók)

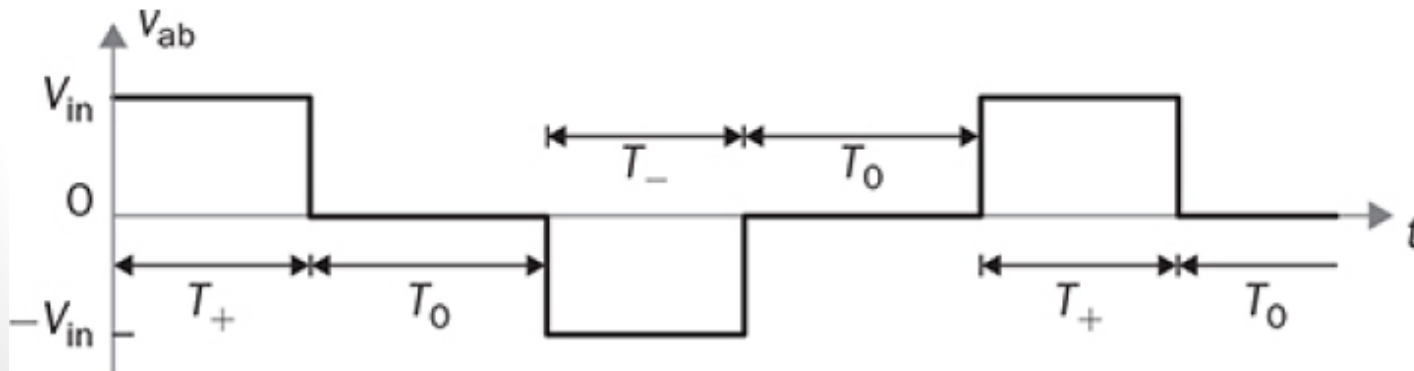


(a)



(b)

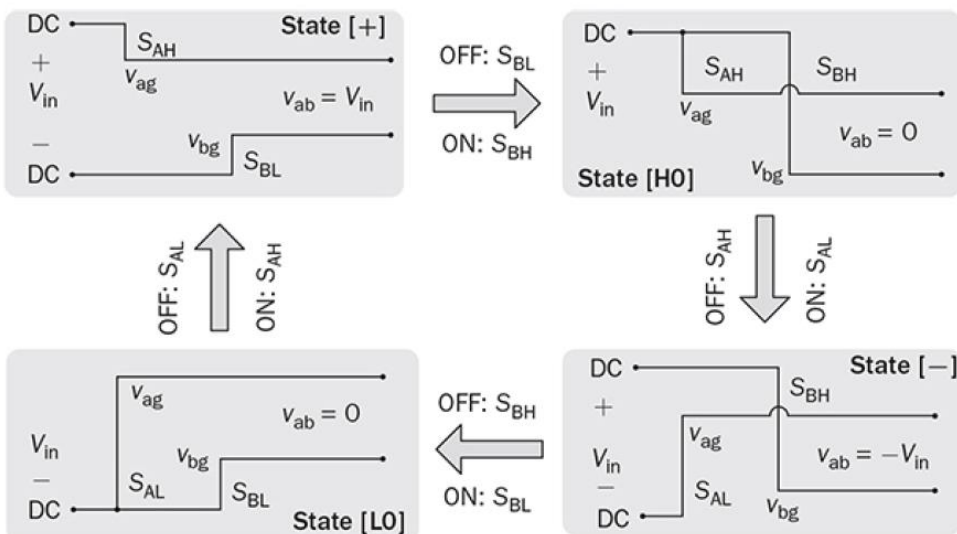
- A topológia ezen módszer esetén is azonos, a különbség a vezérlésben van: a felső ( $S_{AH}$ ,  $S_{BH}$ ) és az alsóoldali ( $S_{AL}$ ,  $S_{BL}$ ) azonos időben vezetnek
- Ezekben az esetekben a kimeneten ( $V_{ab}$ ) potenciálkülönbség nincs, így a kimeneti feszültség  $V_{ab} = V_{ag} - V_{bg} = 0$
- Jelen vezérlés az idődiagramon a  $T_0$  időpillanatokat állítja elő
- $V_{ab}$  RMS-értéke az állapotperiódusok ( $T_+$  és  $T_-$ ) beállításával szabályozhatóvá válik.



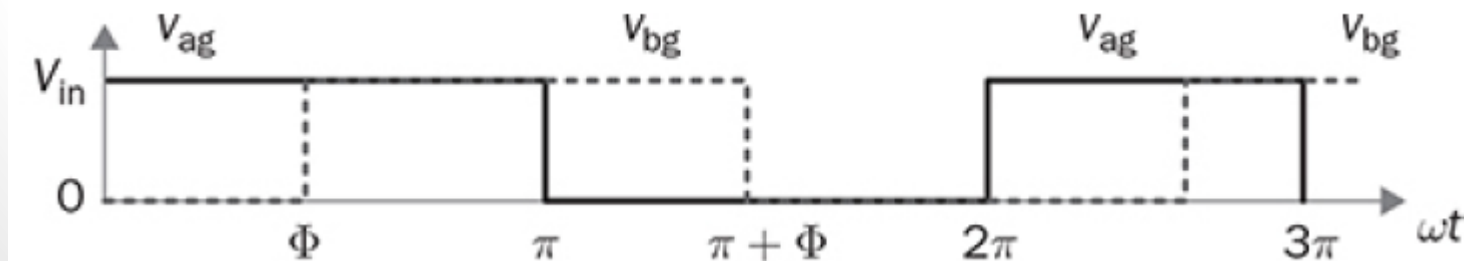
# Fázistolás és moduláció

## (Fáziseltolódásos négyszög hullám)

- Kombináljuk az előbbi két lehetőséget kombináljuk, azaz T+, T- és T0
- A félvezető kapcsolók a teljes periódus 50%-ban vezetnek, amely a kimeneten, amely  $V_{ag}$  és a  $V_{bg}$  négyszögjeles hullámformát eredményezi a kimeneten

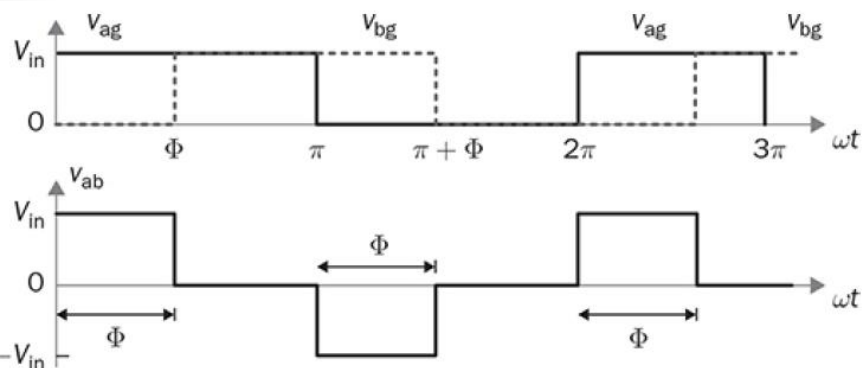


| Állapot                                | $S_{AH}$ | $S_{AL}$ | $S_{BH}$ | $S_{BL}$ |
|----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 1. (T+) (AH switched on)               | On       | Off      | Off      | On       |
| 2. (T <sub>0</sub> ) (BH switched on)  | On       | Off      | On       | Off      |
| 3. (T-) (AH switched off)              | Off      | On       | Off      | On       |
| 4. (T <sub>0</sub> ) (BH switched off) | Off      | On       | On       | Off      |



# folytatás...

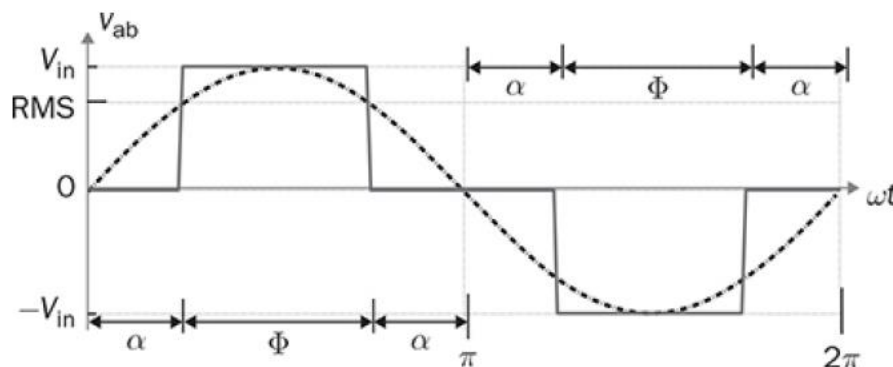
- Amennyiben a kimeneti feszültséget vizsgáljuk, az bal oldali ábra alsó jelalakját kapjuk, ahol  $\phi$  reprezentálja a fázistolás értékét
- A kimeneti jel RMS értékét a  $\phi$  szabályozza
- A kimeneti feszültség RMS értéke tehát:  $\text{RMS}(V_{ab}) = V_{in} \sqrt{\frac{\phi}{\pi}}$
- Amennyiben
  - $\phi=0$ , a kimeneti feszültség ( $V_{ab}$ ) értéke is zérus
  - $\phi=\pi$ , abban az esetben a legnagyobb konverziós arányt kapjuk
  - $\phi=\frac{\pi}{2}$ , a kimeneti feszültség ( $V_{ab}$ ) értéke  $V_{ab} = \frac{V_{in}}{\sqrt{2}}$



Ha  $\phi = \frac{\pi}{2}$ , a kapott jelalak szimmetrikus, továbbá  $\phi + 2\alpha = \pi$

A kimeneti feszültség „alfával” kifejezve:

$$\text{RMS}(V_{ab}) = V_{in} \sqrt{1 - \frac{2\alpha}{\pi}}$$



# Modulációs eljárások inverterek esetén

- A cél az, hogy az inverter magas minőségű (felharmonikus mentes, tiszta) szinuszos kimenettel rendelkezzen
- Ennek eléréséhez magas frekvenciás modulációt és aluláteresztő szűrést alkalmaznak

## SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation)

- A moduláció alapelve azonos a DC/DC átalakítók esetén bemutatott PWM modulációhoz, azaz szükség van egy alap (vivő) jelre és egy referencia jelre- amely ebben az esetben nem egy konstans érték, hanem szinuszos jellegű-

**Bipoláris SPWM**

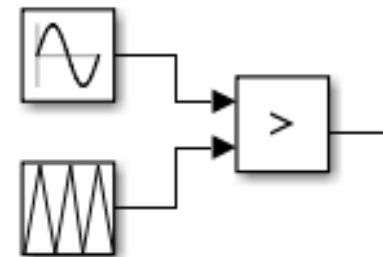
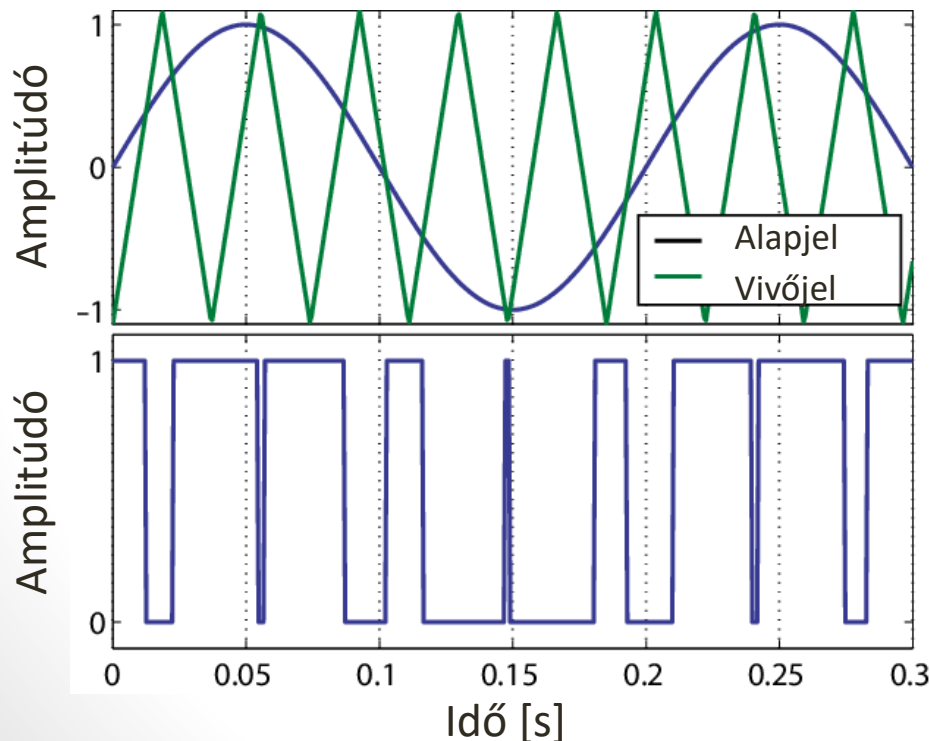
**Unipoláris SPWM**

## SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation)

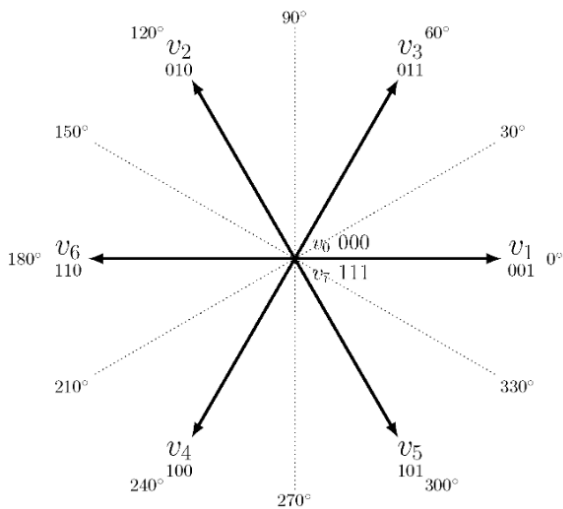
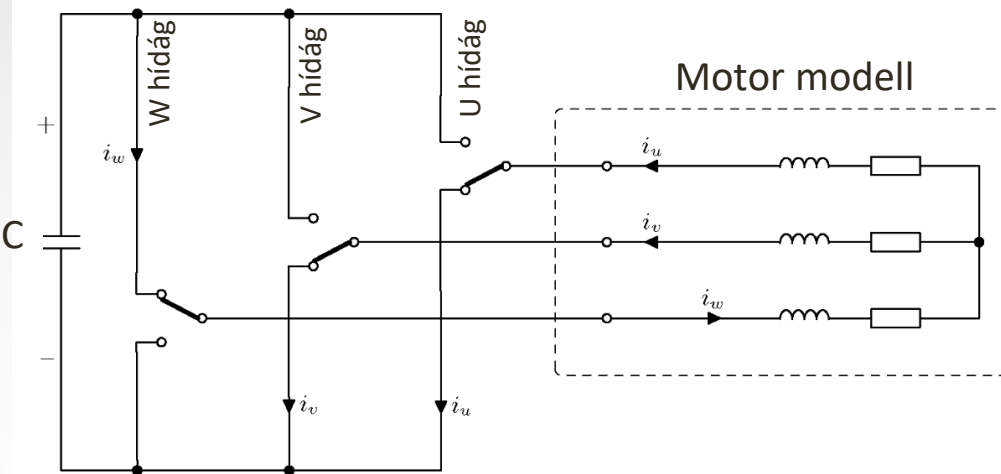
- Magyarul térvektor modulációnak is nevezik
- Általában többfázisú inverterek esetén alkalmazzák, előnyös tulajdonságai miatt (pl.: alacsony felharmonikus tartalom, jobb tápfeszültség kihasználás)
- Matematikailag bonyolultabb megvalósítás

# SPWM moduláció

- A két típus alapelve azonos, jelen előadás részletesen a bipoláris típust ismerteti
- Az alapjel bipoláris jellegű, azaz az időtengelyre szimmetrikus, jellemzően háromszög lefutású, szignifikánsan magasabb frekvenciájú, mint az alapjel
- Az alapjel az, amit a „kimeneten látni szeretnénk”, ez szinuszos időbeli lefutású
- Ezt a két jelet hasonlítjuk össze (komparáljuk), melynek eredménye egy változó szélességű négyszögjel: ez vezérli a kapcsolótranzisztorokat

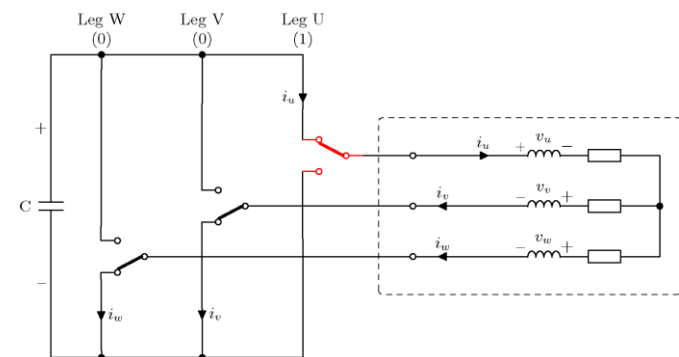


# SVPWM moduláció



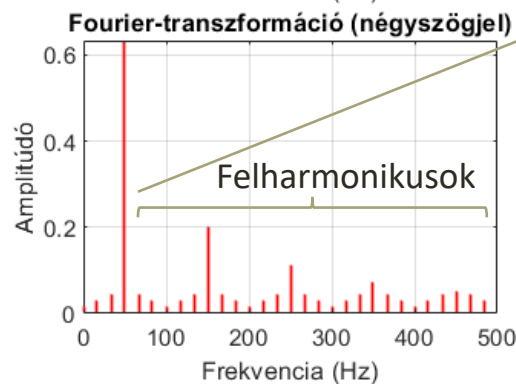
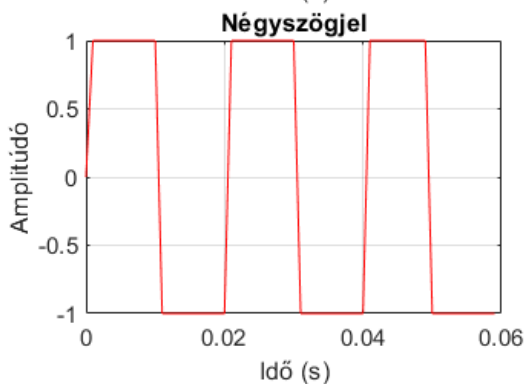
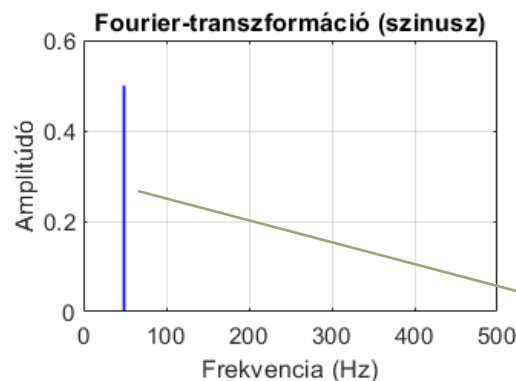
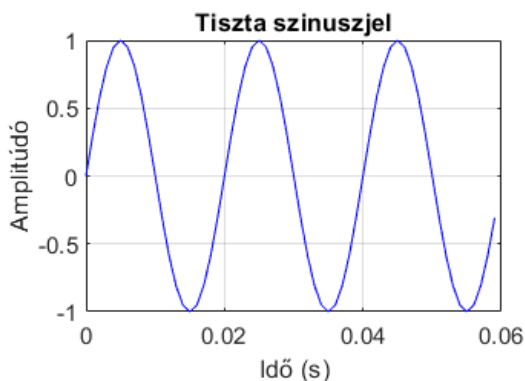
| Vektor  | U | V | W |
|---------|---|---|---|
| v0      | 0 | 0 | 0 |
| v1 (+U) | 0 | 0 | 1 |
| v2 (+V) | 0 | 1 | 0 |
| v3 (-W) | 0 | 1 | 1 |
| v4 (+W) | 1 | 0 | 0 |
| v5 (-V) | 1 | 0 | 1 |
| v6 (-U) | 1 | 1 | 0 |
| V7      | 1 | 1 | 1 |

- Az elv kétszintű inverter esetén kerül bemutatásra
- Bármelyik fázis esetén a motor (terhelés) fázistekercse a +/- tápfeszültséghez csatlakozhat, ezt reprezentálja a logikai 1 vagy 0
- Összesen  $2^3 = 8$  vektoros állapot állítható elő
- A vezérlő/szabályozó áramkör vektorokat állítja elő
- Példának vegyük a 011-es állapot



# Fourier-transzformáció

- Létezik egy eljárás, melynek segítségével a periodikus jelek időtartományból frekvenciatartományba alakíthatók át, azaz egy összetett periodikus függvény szinuszos és koszinuszos összetevőkre bontható
- A legnagyobb frekvenciájú összetevőt alapharmonikusnak, míg a rajta kívül egyéb frekvenciás összetevőket felharmonikusnak hívjuk
- A „tisztá” jelek egyetlen frekvenciás összetevőből állnak, míg az összetett periodikus jelek több frekvenciát is tartalmaznak (jellemzően kisebb amplitúdóval)



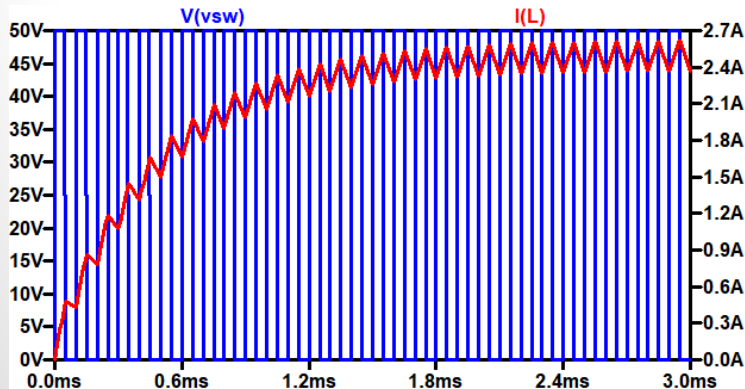
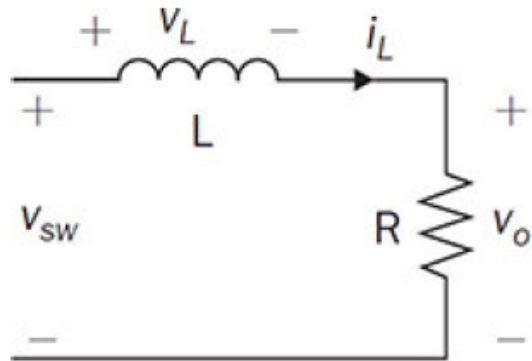
Alapharmonikus

Felharmonikusok

# Szűrőáramkörök –bevezetés-

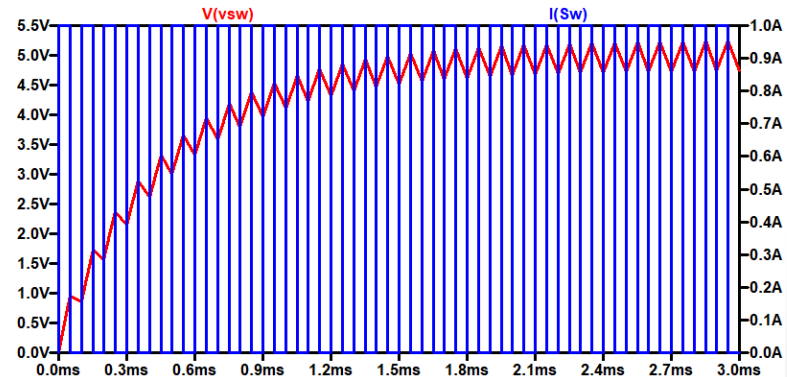
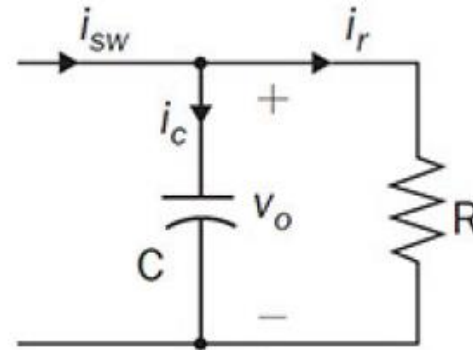
A különböző szűrőáramkörök reaktáns (L és C) elemek segítségével valósíthatók meg

Az induktivitás (mágneses) energiát tárol, egyenletes áram fenntartására alkalmas



$V_{sw}=50V$ ,  $R=10\Omega$ ,  $L=5m$ ,  $f=10kHz$

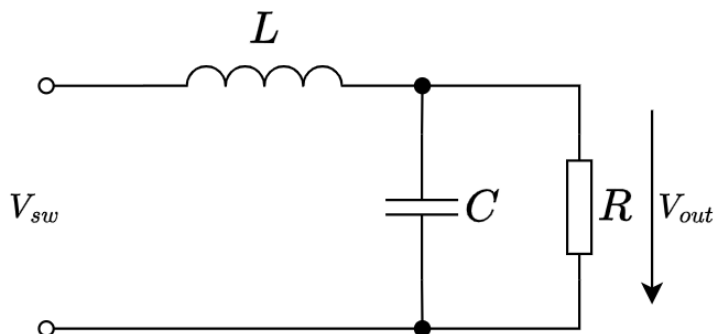
A kapacitás (elektromos) energiát tárol, egyenletes feszültség fenntartására alkalmas



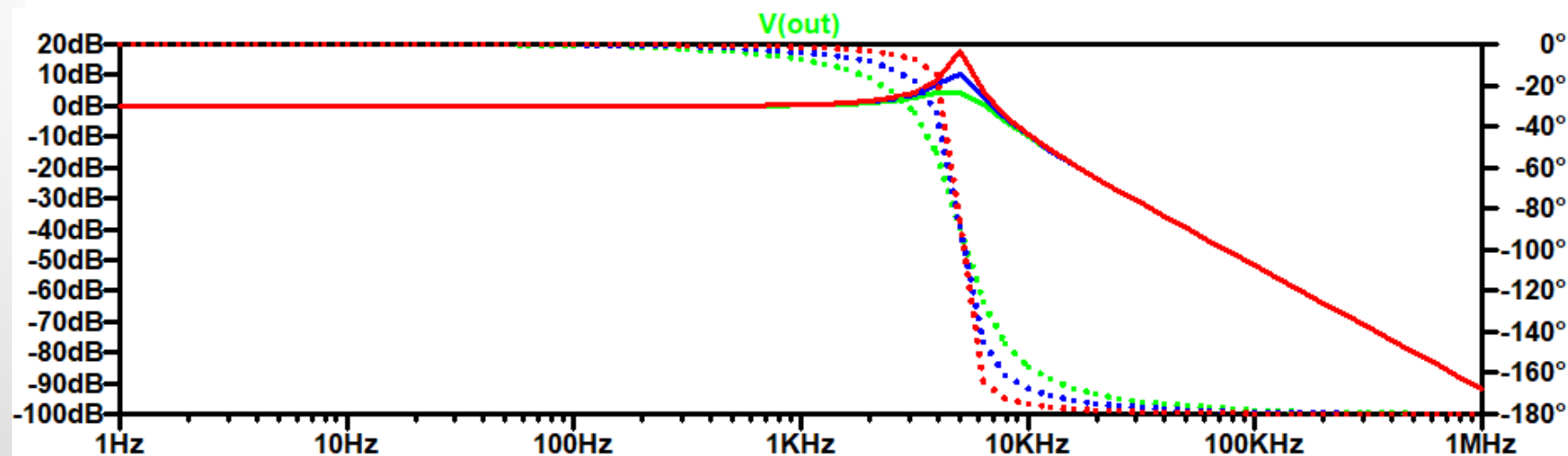
$I_{sw}=1A$ ,  $R=10\Omega$ ,  $C=50\mu F$ ,  $f=10kHz$

# LC szűrő (inverterek)

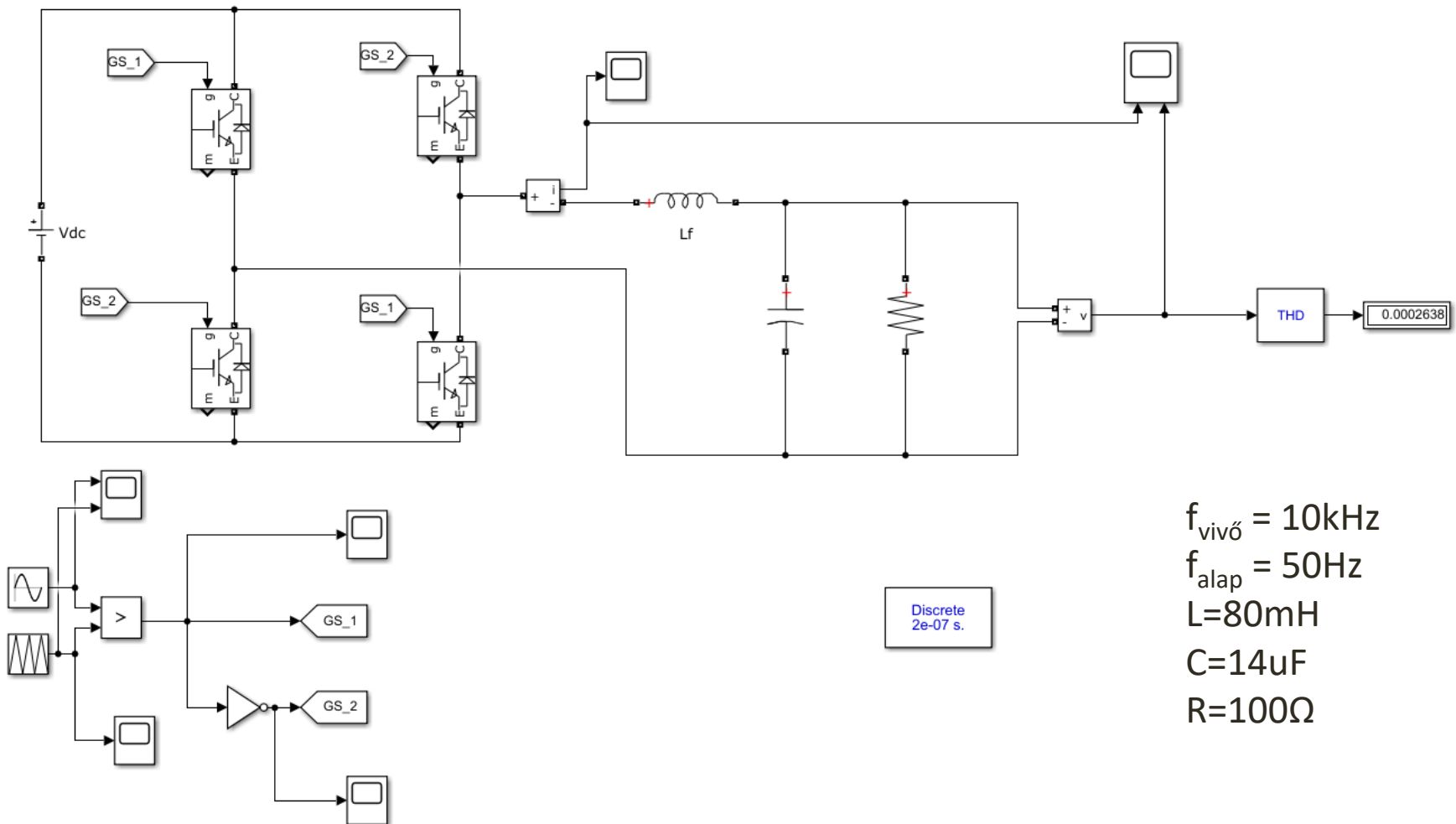
- Az LC áramkört széles körben használják aluláteresztő szűrésre a terhelésen megjelenő jó minőségű feszültség/áram elérése érdekében
- A cél az, hogy egy jól méretezett LC szűrő segítségével a kimenet felharmonikus tartalmát csökkentsük, minél inkább szinuszos legyen a kimenet (áram és/ vagy feszültség)



$L=100\mu\text{H}$ ,  $C=10\mu\text{F}$ ,  $R=5, 10, 25\Omega$



# SPWM szimulációs példa (Matlab/SIMULINK)



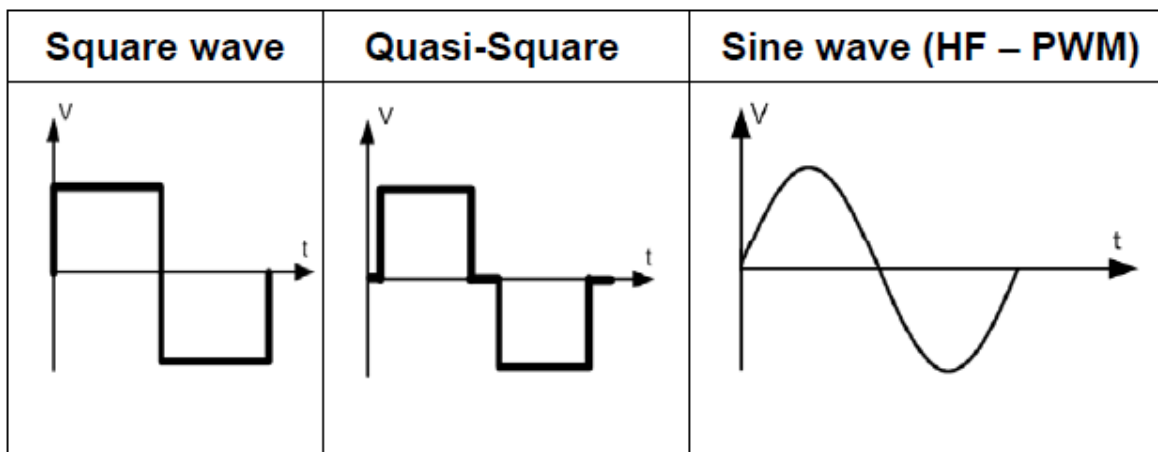
# Harmonikus torzítás (THD)

- A **harmonikus torzítás** (vagy más néven harmonikus torzítási tényező) olyan nemlineáris jelenség, amely során egy jelben megjelennek olyan frekvenciák, amelyek az eredeti jel alapfrekvenciájának egész számú többszörösei
- Ezeket a frekvenciákat "harmonikusoknak" nevezzük
- A harmonikus torzítás akkor lép fel, amikor egy rendszer nemlineárisan reagál a bemeneti jelre, így az eredeti jel mellett ezek a magasabb frekvenciájú komponensek is megjelennek.
- Értéke az alábbi összefüggéssel számítható:

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 \dots V_n^2}}{V_1},$$

ahol  $V_n$  az n-edik harmonikus feszültség effektív értéke,  $V_1$  pedig az alapkompone ns effektív értéke.

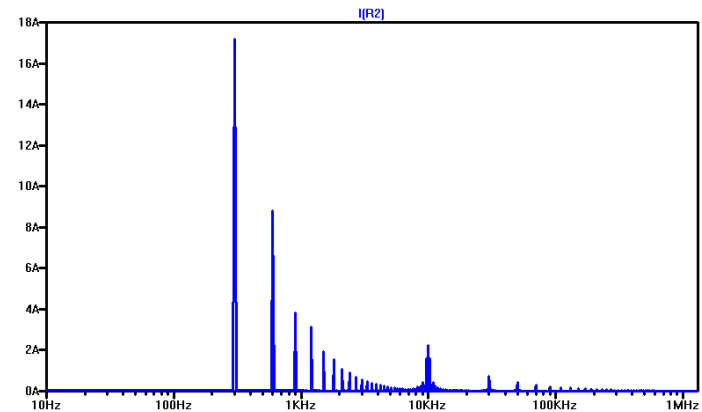
- Kávézsinuszos jel esetén a torzítás kb. 25-30%, négyszögjeles inverter esetén 40-50%, míg tisztán szinuszos inverter esetén néhány százalék



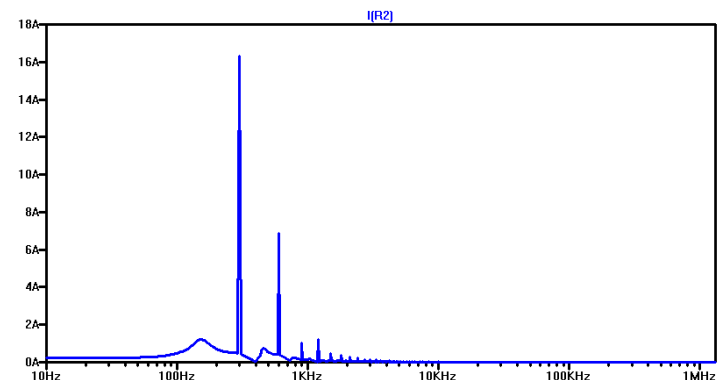
# Szűrés – torzítás csökkentése –példa-

- Mit tehetünk akkor, ha az áramkörünk kimeneti mennyisége (áram, feszültség) magas felharmonikus tartalommal rendelkezik?
- Különböző szűrőáramkörök (L, C, LC, LCL stb.) alkalmazásával a kimeneti felharmonikus tartalom csökkenthető.

L1 fojtó használata nélkül

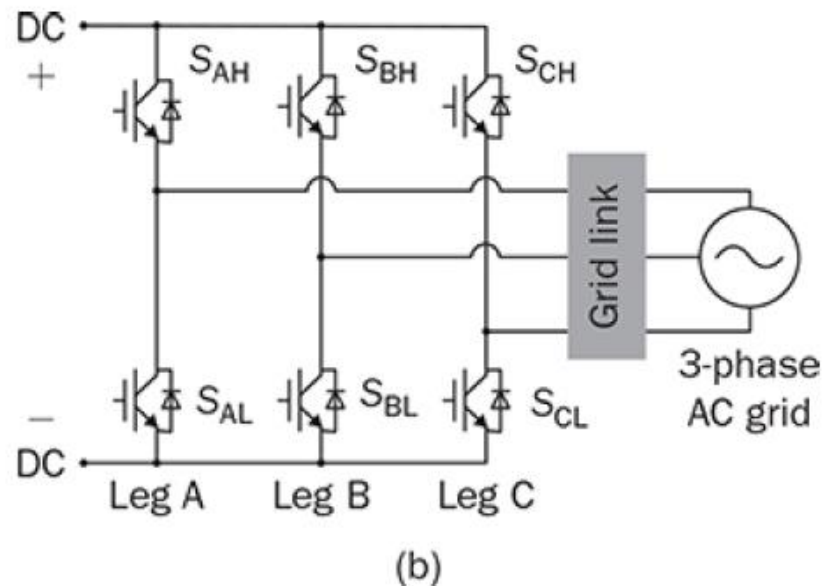
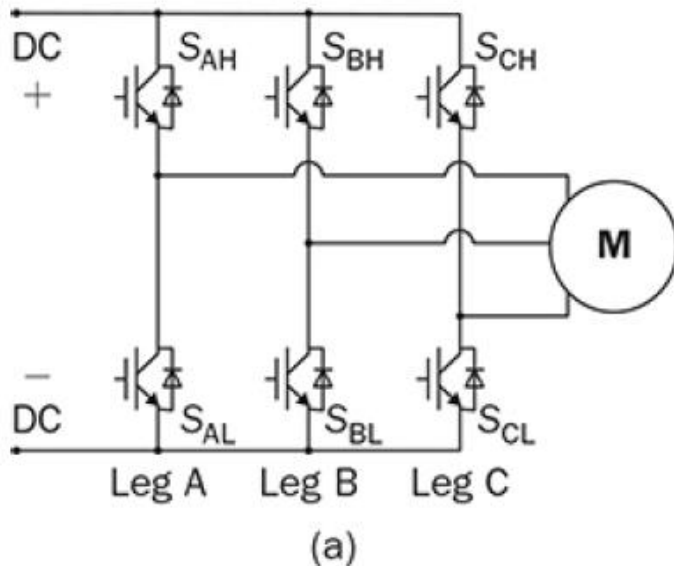


L1 fojtó használatával



# Többfázisú inverterek

- Villamos járműhajtás, automatizálás stb. esetén jellemzően háromfázisú rendszerek használatosak
- Teljesítményelektronikai szempontból ez azt jelenti hogy minden egyes fázistekercs egy félhídhoz kapcsolódik (kétszintű inverterek esetén)
- A félhídiban (pl.:  $S_{AH}$ , és  $S_{BH}$ ) a motor/fázistekercs vagy a pozitív tápsínhez, vagy a negatív tápsínhez csatlakozik
- Alapvetően két „típust” különböztetünk meg: a feszültség-inverter (VSI – Voltage Source Inverter) (a. ábra), ez jellemzően motorhajtások esetén alkalmazott, illetve áram-inverter (CSI – Current Source Inverter) (b. ábra), váltakozó áramú hálózatba történő áramtermeléshez használatos
- Előbbi esetén a bemeneti feszültséget, míg utóbbi esetén a bemeneti áramot kell állandó értéken tartani



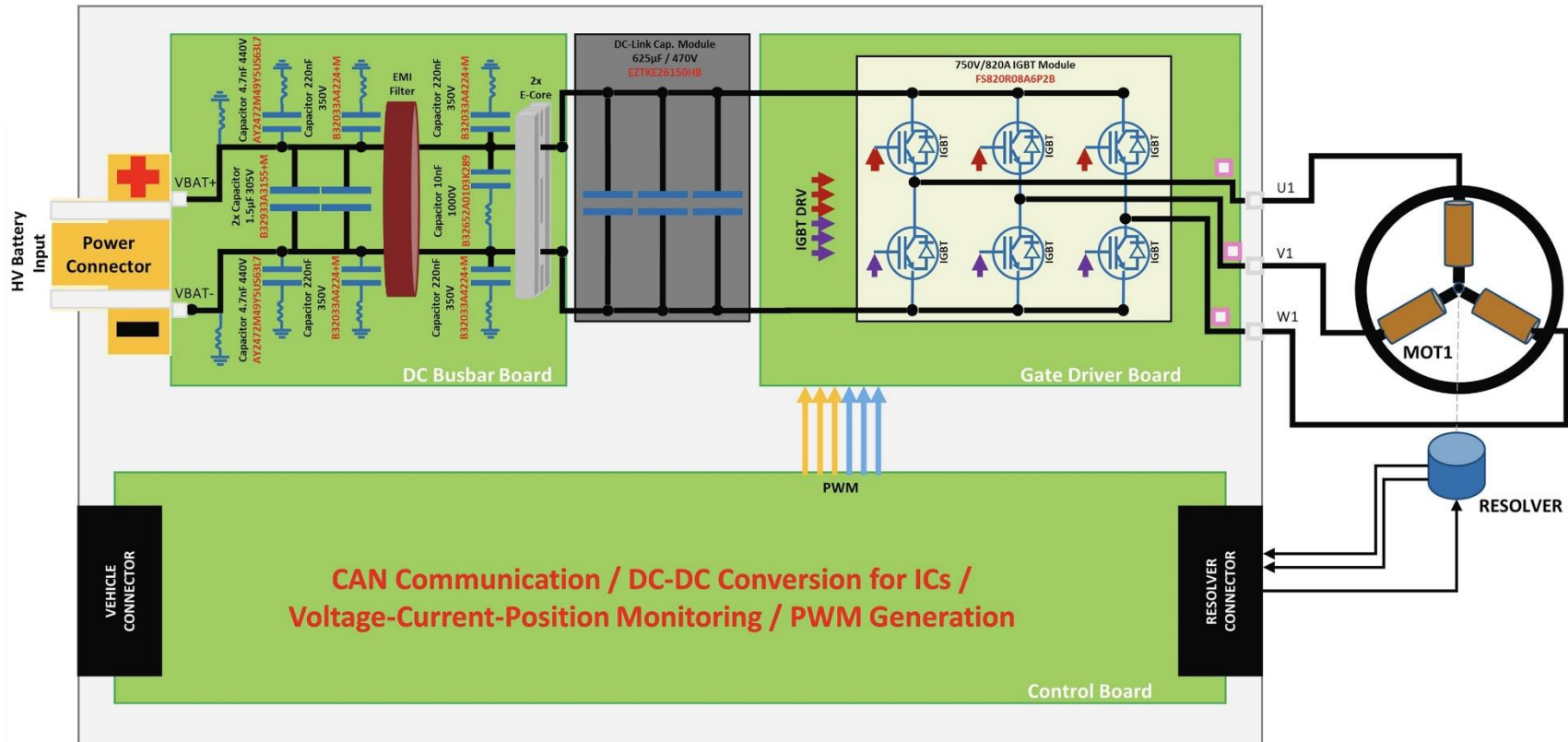
# Szemléltető példa (Audi e-tron inverter)

<https://www.audi-mediacycenter.com/en/videos/video/audi-e-tron-power-electronics-e-engine-animation-4845>

# Példa 2 –ID.3 blokkcsémák

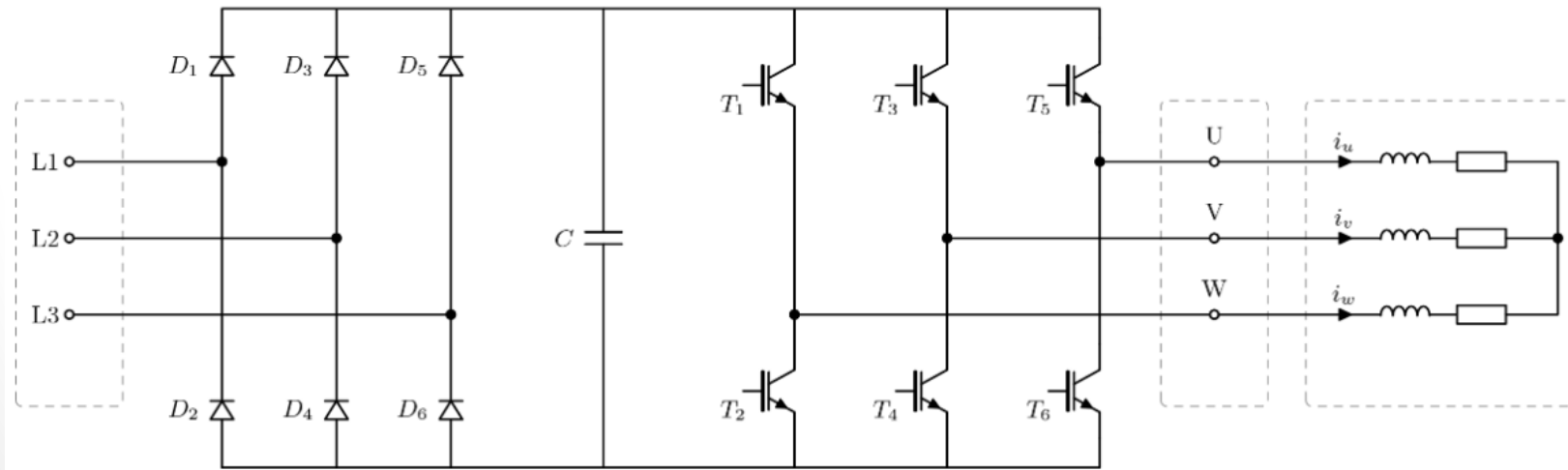
## Volkswagen ID.3 inverter block diagram

(Source: Automotive Teardown Track, Volkswagen ID.3 modules - System Plus Consulting, 2021)



# Frekvenciaváltók (AC/AC konverterek) - általános tulajdonságok-

- A fordulatszám szabályzás leghatékonyabb módja
- Ez a módszer a névleges fordulathoz kisebb és nagyobb fordulatot is lehetővé tesz, fokozatosan (a legkisebb veszteség mellett)
- Léteznek erre specializált integrált vezérlő áramkörök, melyek a szabályzó egységet is tartalmazzák
- Az energiaáramlás egyirányú



Háromfázisú  
hálózat

6 ütemű  
egyenirányító

Közbenső  
szűrés

Háromfázisú  
Inverter (U, V, W)

Motor  
csatlakozók

Motor  
modell