# Az inverteres villamos hajtások fejlődési irányai.

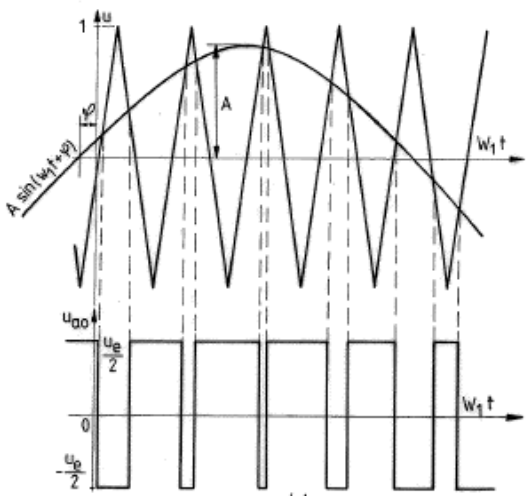
Dr. Halász Sándor, Dr. Stumpf Péter

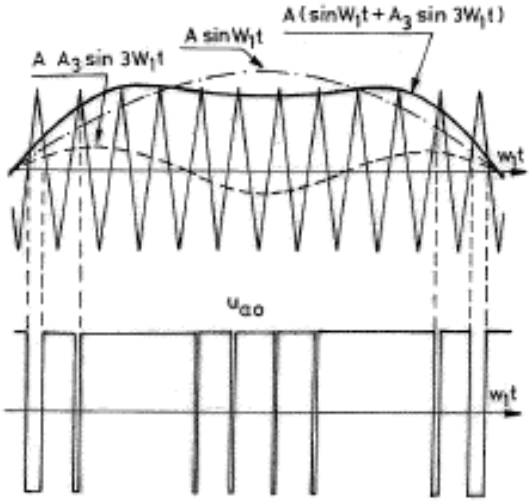
# Az ISZM inverteres hajtások és berendezések jelenlegi helyzete

1. Az aszinkron és szinkron gépes hajtások tipikus szabályozási módszere, amely gyakorlatilag kiszorította a régebbi szabályozási módszereket (kaszkádok, feszültség szabályozás, szellőzők és kompresszorok mechanikai módszereit stb.)
2. Az inverteres hajtások bevonultak a háztartásokba (mosógépek, jégszekrények stb.).
3. A villany motorral hajtott autók, ahol jelenleg több fajta motorral találkozunk (háromfázisú aszinkron és szinkron, permanens mágnesű szinkron motorok stb.)
4. A villamosok és trolibuszok tipikus hajtásává vált.
5. Hálózati tápegységek berendezései (a szél és a nap energiát átalakító erőművek, a nagy teljesítményű villamos energiát termelő erőművek, amikor az energiát a vízben lévő kábelekkel továbbítjuk stb. ).
6. Hálózati inverteres hajtások visszatáplálási lehetőséggel (szervóhajtások stb.).

# Háromfázisú ISZM alapjel függvényei (A=0.5)

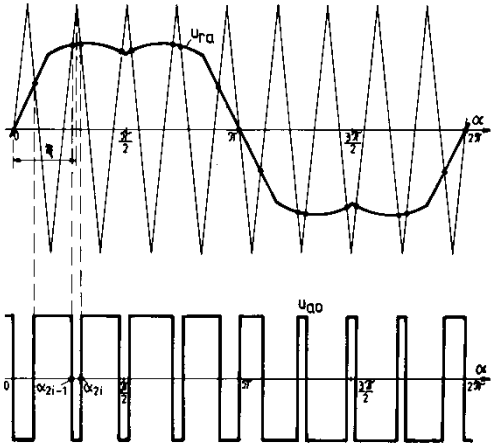
$A_{max} = 1$

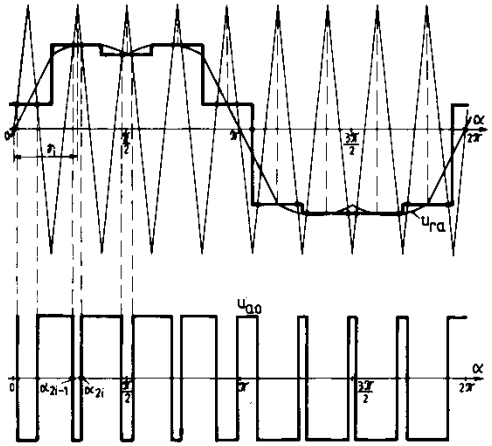



$A_{max} = 2/\sqrt{3}$

$A_{max} = 2/\sqrt{3}$

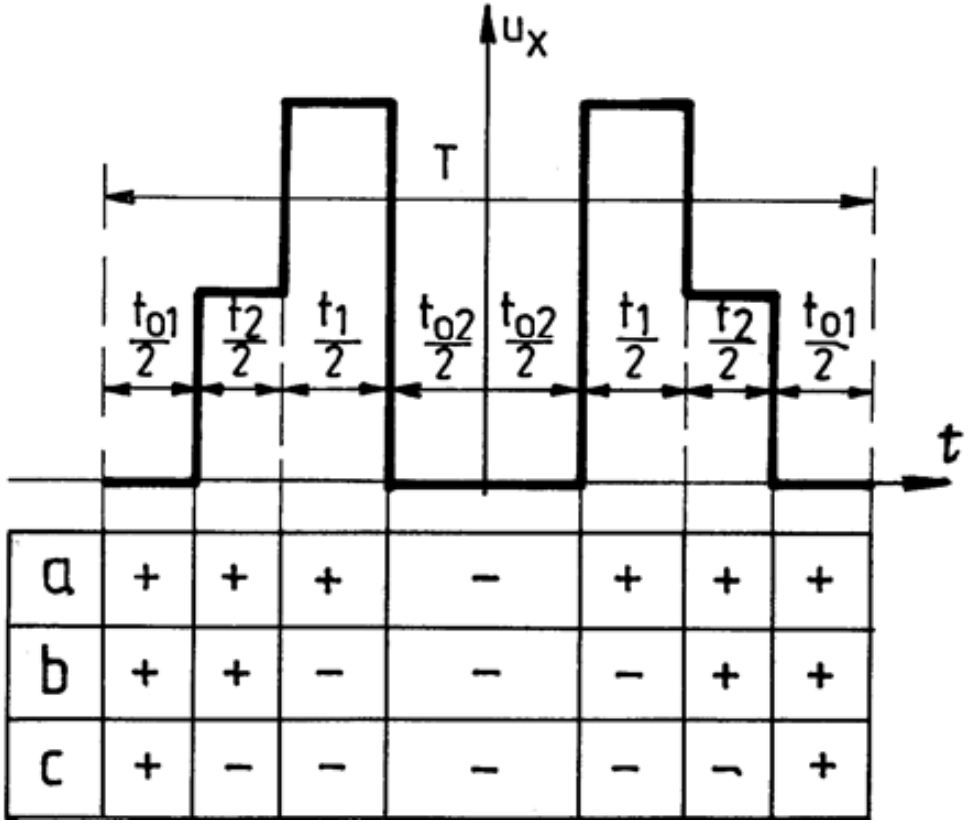



$A_{max} = 2/\sqrt{3}$

Gyakorlatilag csak a térvektoros módszer terjedt el

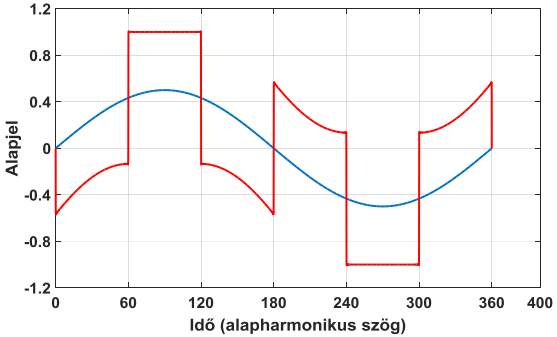
# A kapcsolások eloszlása egy *T* periódus alatt (a vivőfrekvencia egy periódusa alatt)



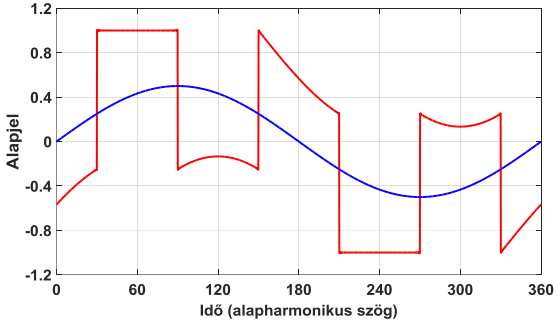

$$t_0 = t_{01} + t_{02}$$

**Az ISZM módszert ez az elosztás határozza meg**

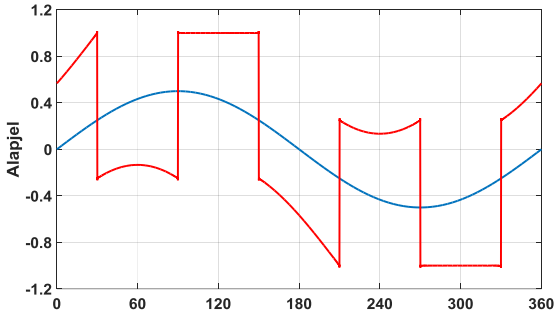
# Kétfázisú ISZM alapjel függvénye (A=0.5)



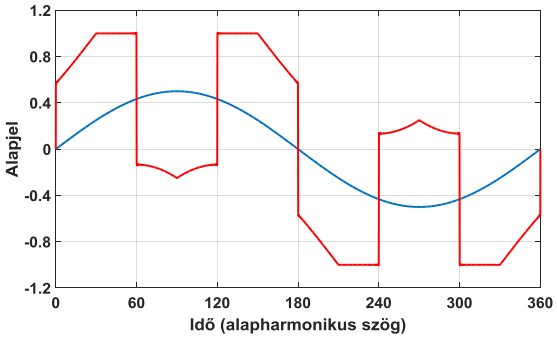

DPWM1



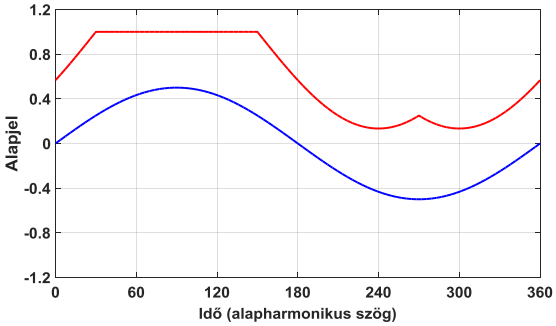

DPWM2a



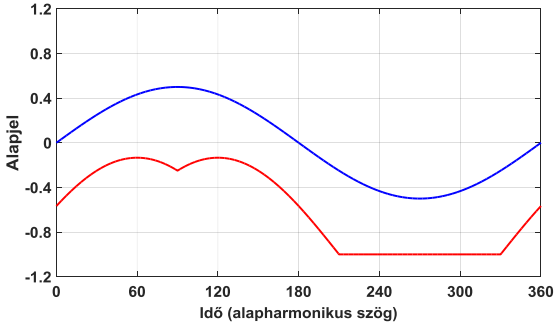

DPWM2b




DPWM3




DPWM4a




DPWM4b

Gyakorlatilag csak a DPWM1 módszer terjedt el

# ÁLTALÁNOSÍTOTT VESZTESÉGI TÉNYEZŐ

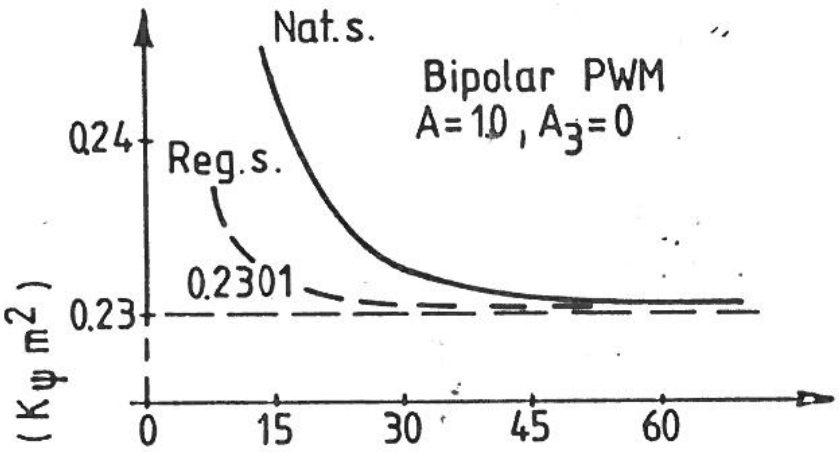
$$G_f = f_t^2 \Delta\Psi^2$$

$$\Delta\Psi^2 = \sum_{\nu > 1}^{\infty} \Psi_\nu^2 \qquad \Psi_\nu = U_\nu / \nu$$

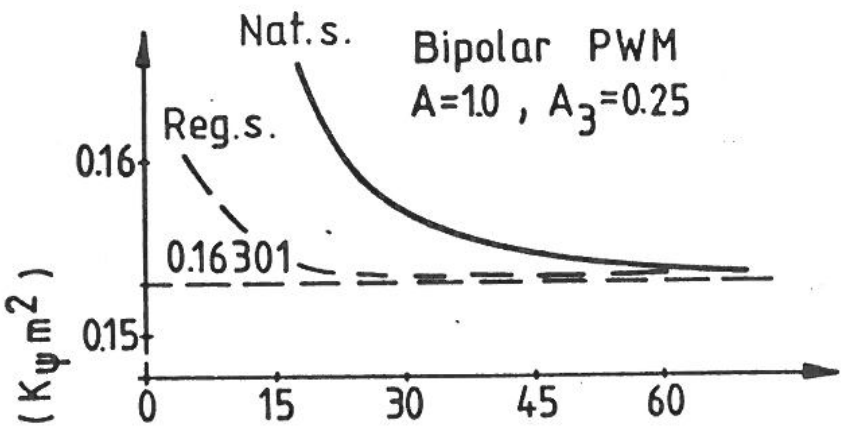
$$f_t = \frac{f_{tabs}}{f_{1névl}}$$

$$\Delta I^2 = \frac{G_f}{f_t^2 (L')^2}$$

# ÁLTALÁNOSÍTOTT VESZTESÉGI TÉNYEZŐ




*m*




*m*

$$\Delta I^2 = \frac{G_m}{m^2 (L')^2}$$

# ÁLTALÁNOSÍTOTT VESZTESÉGI TÉNYEZŐ

$$G_{sin} := \frac{\pi^4 A^2}{192} \cdot \left(1 - \frac{8 \cdot A}{\sqrt{3} \cdot \pi} + 0.75 A^2\right)$$

$$G_{terv} := \frac{\pi^4 A^2}{192} \cdot \left(1 - \frac{8 \cdot A}{\sqrt{3} \cdot \pi} + \frac{9}{8} \cdot A^2 - \frac{27 \cdot \sqrt{3} \cdot A^2}{32 \cdot \pi}\right)$$

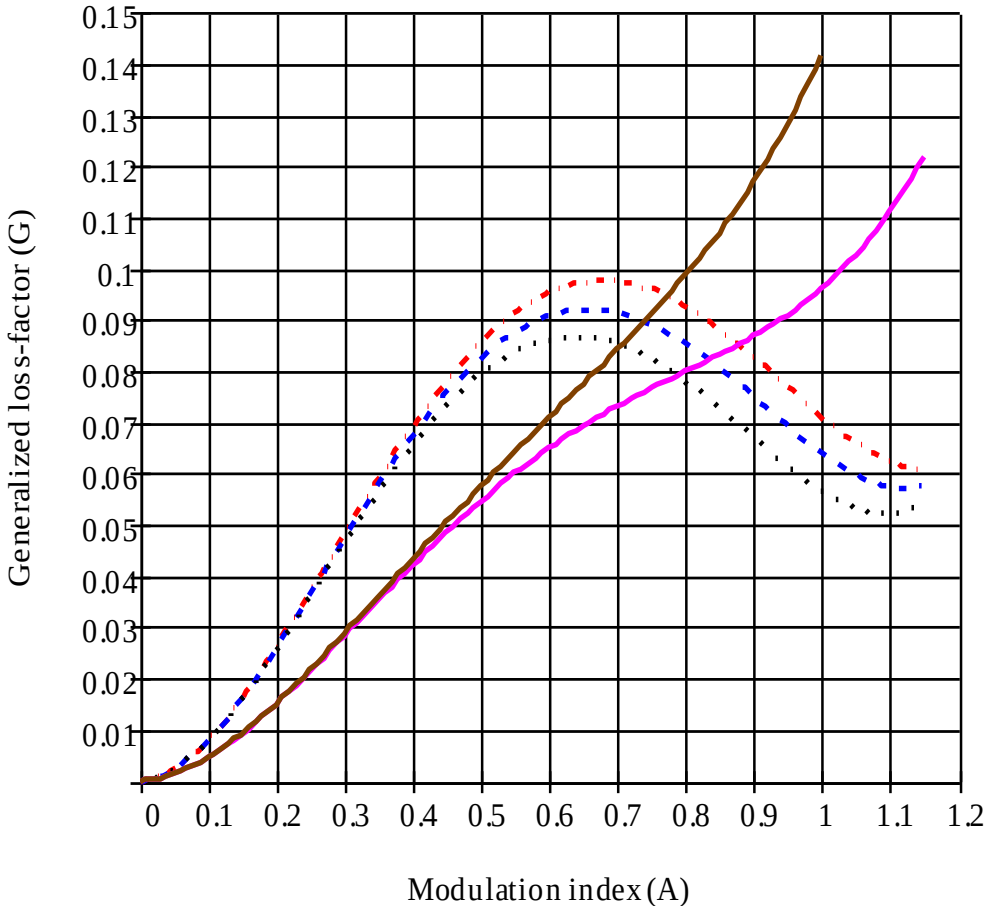
$$G_{3 \cdot har} := \frac{\pi^4 \cdot A^2}{192} \cdot \left[1 - \frac{8 \cdot A}{\sqrt{3} \cdot \pi} + 0.75 A^2 - 0.75 A_3 \cdot A^2 + 1.5 \left(A_3\right)^2 \cdot A^2\right]$$

# KÉTFÁZISÚ ISZM
# ÁLTALÁNOSÍTOTT VESZTESÉGI TÉNYEZŐ

| PWM technique | Generalized loss-factor $G_m = K_\psi m^2$ | $G_f = K_\psi f_c^2$ | Y |
|---|---|---|---|
| 60° cycle (shift 0°) $0 \le A \le \frac{2}{\sqrt{3}}$ | $\frac{\pi^2}{6} Y$ | $\frac{A^2\pi^4}{96} Y$ | $2 - \left(\frac{15}{2\pi} + \frac{4}{\sqrt{3}\pi}\right) A + \left(\frac{9}{8} + \frac{9}{32}\frac{\sqrt{3}}{\pi}\right) A^2$ |
| 60° cycle (shift ±30°) $0 \le A \le \frac{2}{\sqrt{3}}$ | $\frac{\pi^2}{6} Y$ | $\frac{A^2\pi^4}{96} Y$ | $2 - \frac{35\sqrt{3}}{6\pi} A + \left(\frac{9}{8} + \frac{27 \cdot \sqrt{3}}{64\pi}\right) A^2$ |
| 120° cycle $0 \le A \le \frac{2}{\sqrt{3}}$ | $\frac{\pi^2}{6} Y$ | $\frac{A^2\pi^4}{96} Y$ | $2 - \frac{35\sqrt{3}}{6\pi} A + \left(\frac{9}{8} + \frac{27 \cdot \sqrt{3}}{64\pi}\right) A^2$ |
| 60° cycle (30°-30°) $0 \le A \le \frac{2}{\sqrt{3}}$ | $\frac{\pi^2}{6} Y$ | $\frac{A^2\pi^4}{96} Y$ | $2 + \left(\frac{15}{2\pi} - \frac{31}{\sqrt{3}\pi}\right) A + \left(\frac{9}{8} + \frac{9}{16}\frac{\sqrt{3}}{\pi}\right) A^2$ |

$$G_t = G_f (f_t / f_c)^2 = G_f \, 4/9$$

# ÁLTALÁNOSÍTOTT VESZTESÉGI TÉNYEZŐ

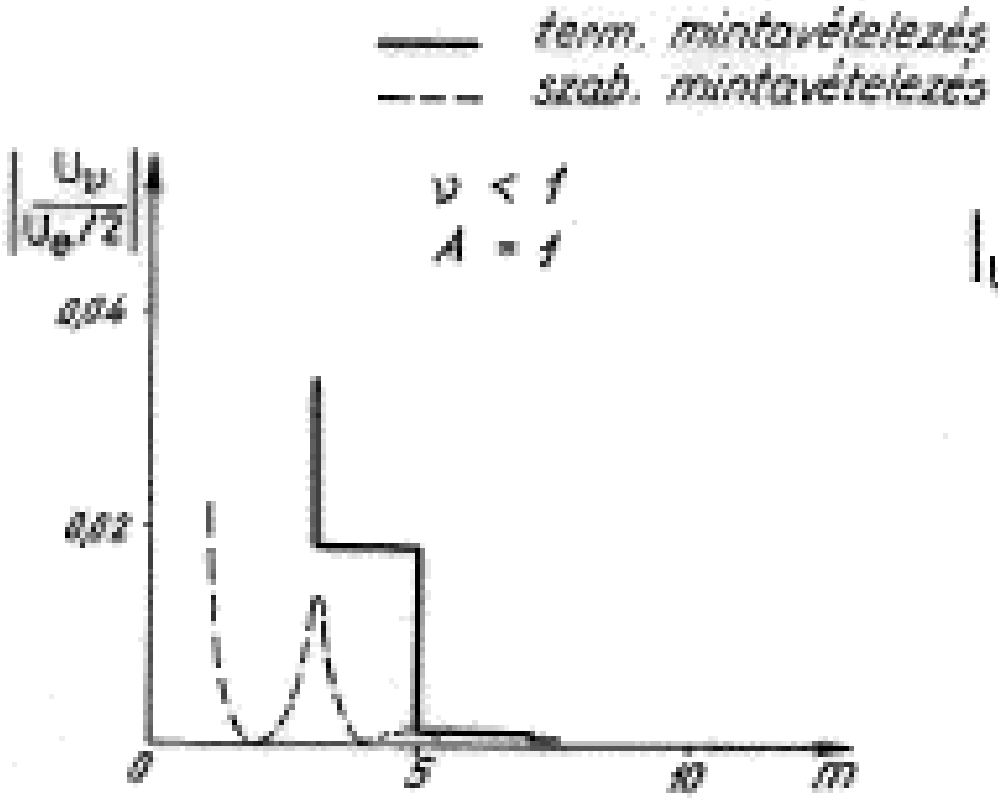


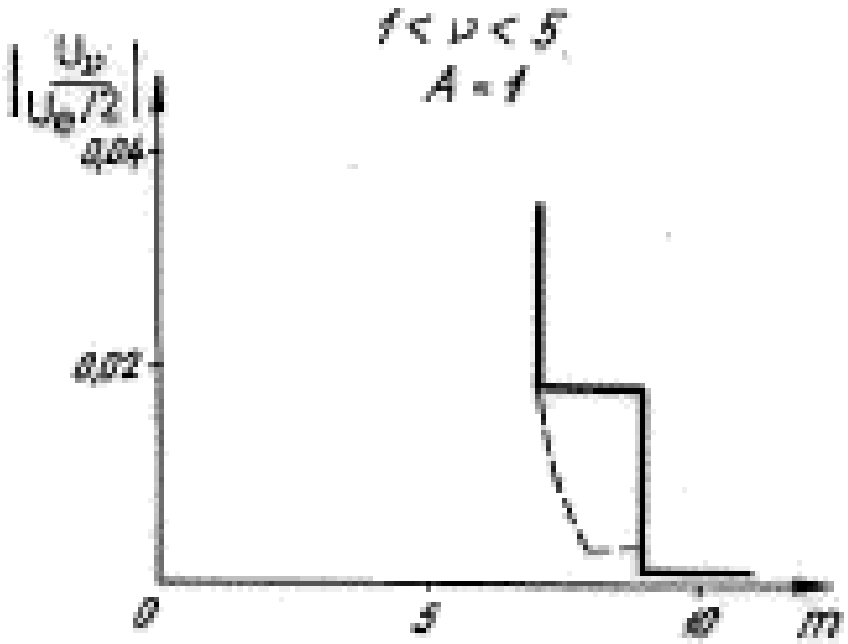

— • — 60°- 0°, — — 60°- 30° és 120°, ----- 30°

—— sin. ISZM —— térvektoros ISZM

# ALACSONY RENDSZÁMÚ HARMONIKUSOK

## Szinuuszos moduláció




**Szubharmonikusok** **Kis rendszámú harmonikusok**

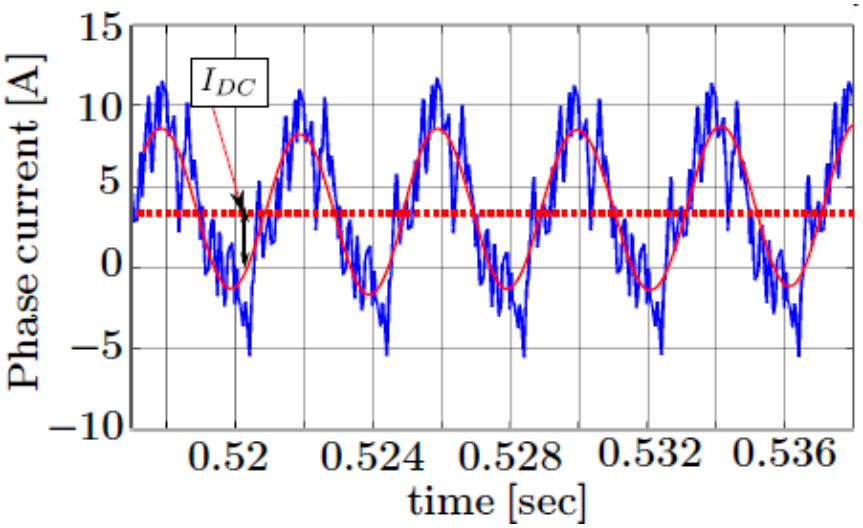
# NAGYFORDULATSZÁMÚ HAJTÁSOK

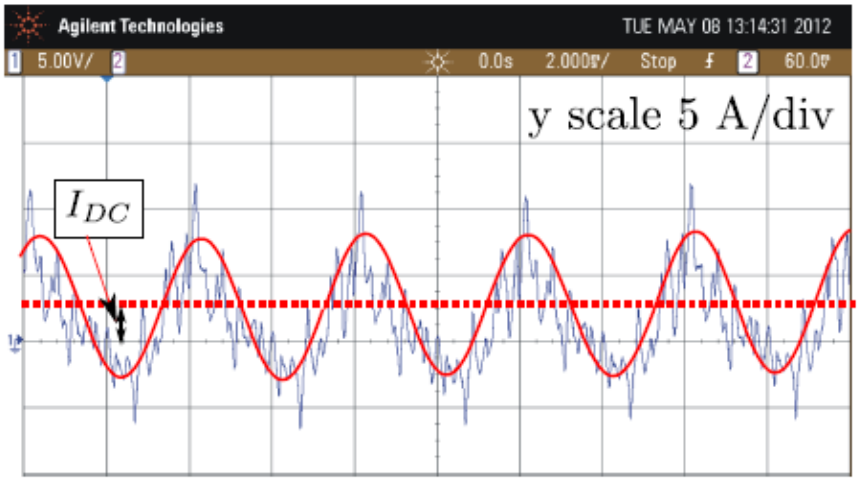
- Az elmúlt évtizedben a nagy fordulatszámú (akár 100 000 ford./perc) villamos motorok előtérbe kerültek
- nagy $f_1$ fundamentális frekvencia ($f_1$ akár 1-2 kHz)
- limitált vívőfrekvencia ($f_{car}$ < 16-20 kHz)
- alacsony frekvenciaarány $m_f = f_{car}/f_1$ (mf < 21)
- nagy harmonikus torzítás

Generátor: 90 000 ford./perc

# NAGYFORDULATSZÁMÚ HAJTÁSOK

- Javaslat szakirodalomban: $m_f$ egész (szinkron ISZM)
  - **egyenkomponens** léphet fel



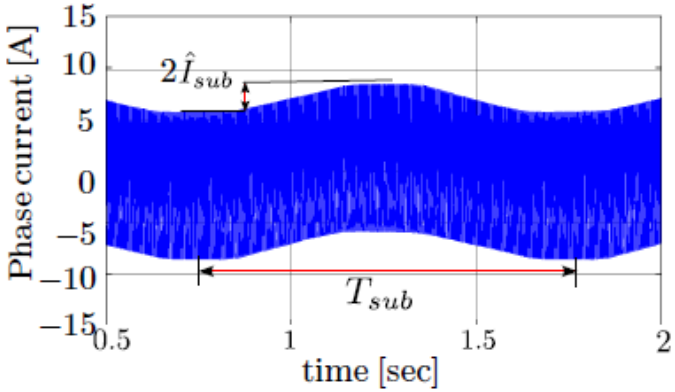



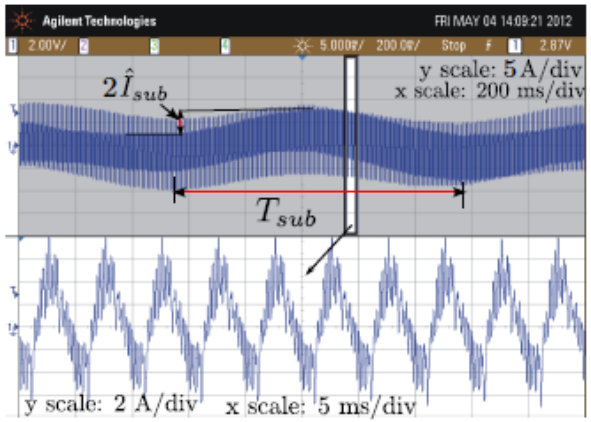

$f_1$=250 Hz, $m_f$=8, Térvektor moduláció

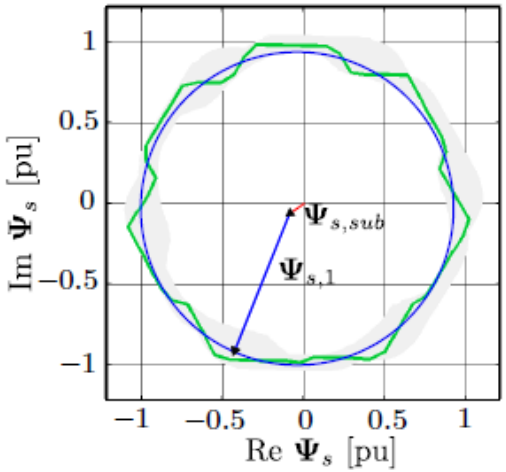
- Egyenkomponens értéke függ a mintavételezés módjától és $m_f$ értékétől

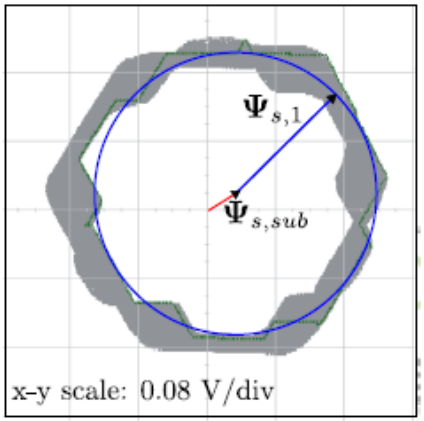
# NAGYFORDULATSZÁMÚ HAJTÁSOK

- Kereskedelemben kapható konverterek: $f_c$ diszkrét lépésekben változtatható ($m_f$ nem egész, aszinkron ISZM)
  - **szubharmonikus** komponens léphet fel




$f_1$=199,9 Hz, $m_f$=10,005, $f_{sub}$=1 Hz,Térvektor moduláció

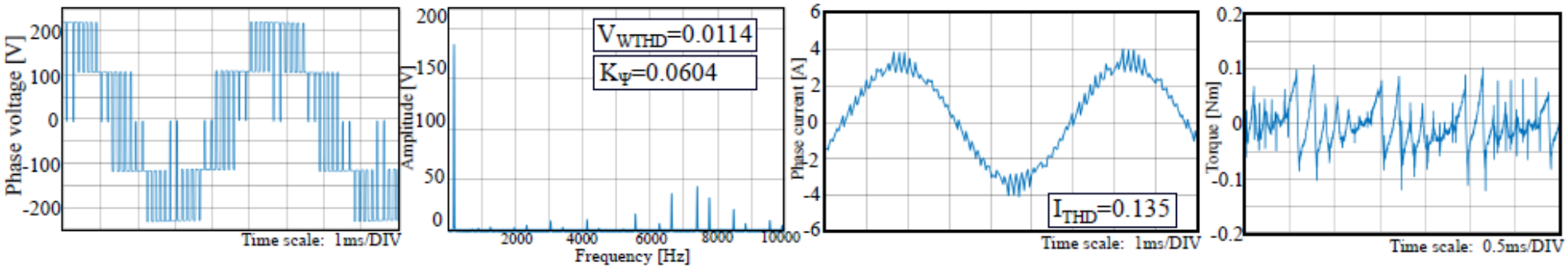
# NAGYFORDULATSZÁMÚ HAJTÁSOK

- Veszteség optimalizált ISZM technika
- Alacsony frekvenciaarányok esetén is alacsony veszteség
- Szinkron moduláció
- DSP-k, mikrovezérlők látványos fejlődése lehetővé teszi a könnyű implementálást
- Veszteségi tényező $$K'_{\Psi} = (L')^2 \sum_{\nu>1}^{\infty} I_{\nu}^2 = \Psi^2 - 1 = \sum_{\nu>1}^{\infty} \frac{U_{\nu}^2}{\nu}$$
- Célfüggvény $$F = \Psi^2 / \Psi_1^2 - 1 + \lambda(U_1^2 - V^2)$$

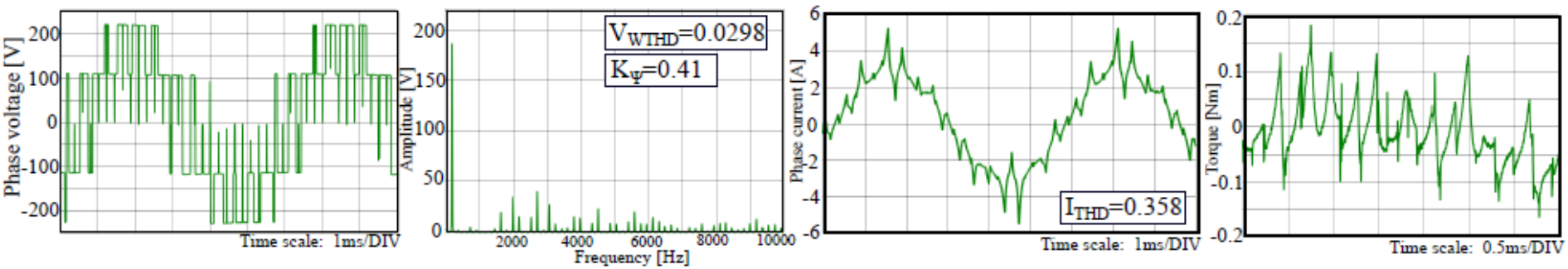
# NAGYFORDULATSZÁMÚ HAJTÁSOK

Frekvenciaarány: 13, $f_1$=180 Hz

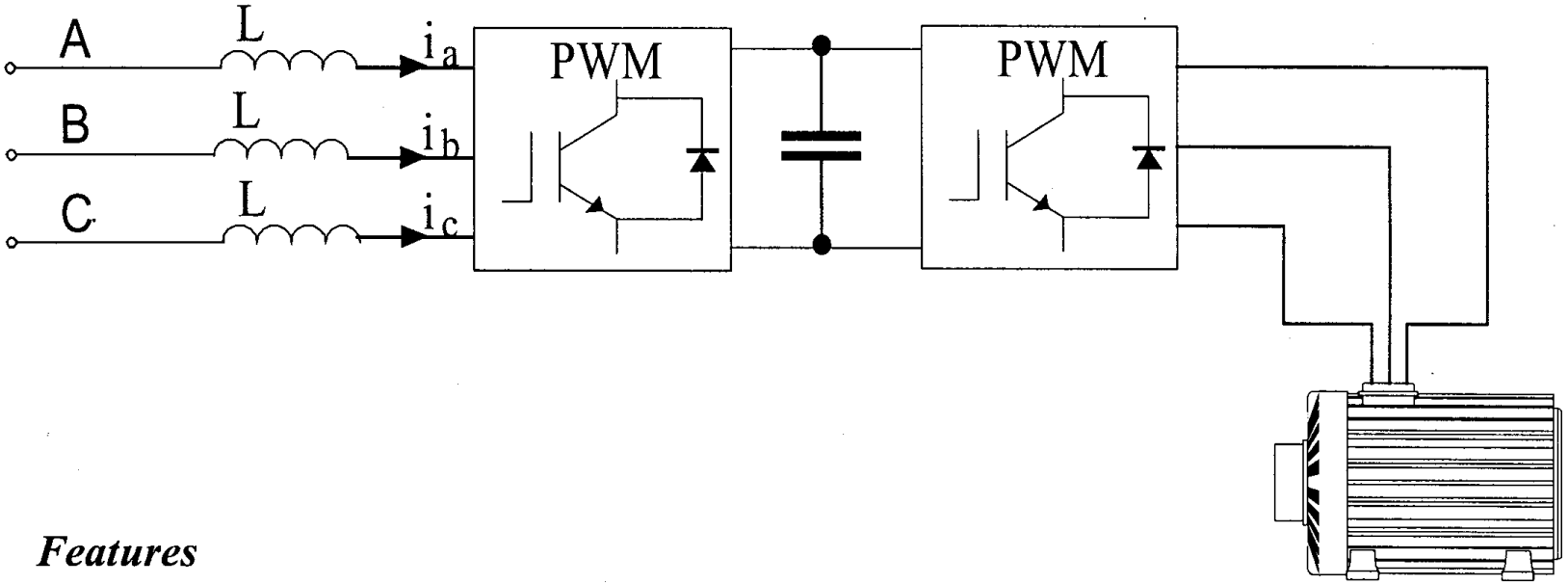
## Optimalizált ISZM




## Térvektor moduláció



# INVERTERES HAJTÁS HÁLÓZATI OLDALI INVERTERREL

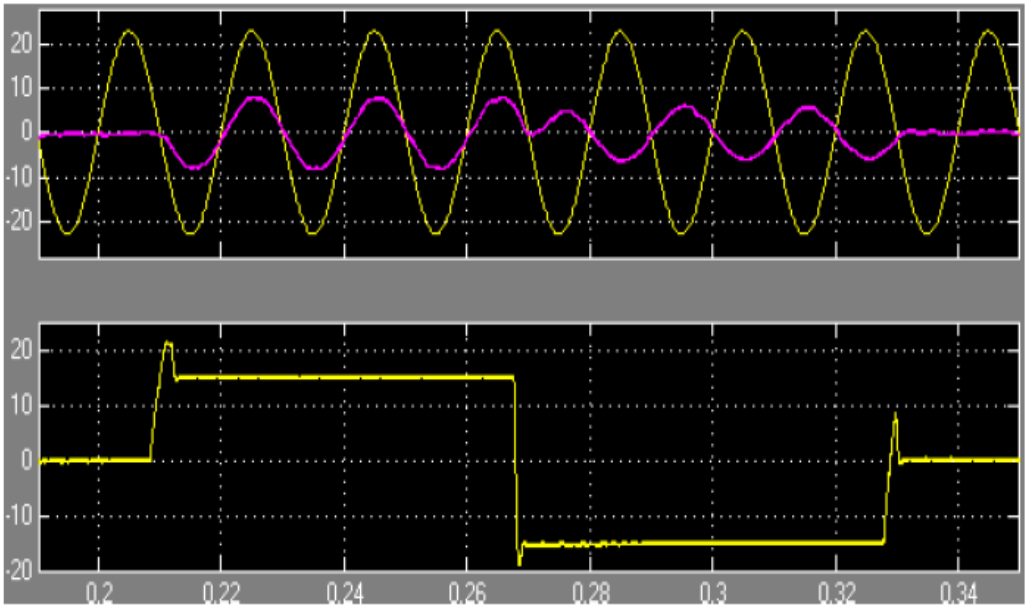



***Features***

- ***complete four-quadrant drive operation***
- ***motor can be operated at a higher speed without field weaking***
- ***the higher output voltage can use a motor with reducing the current for a given power, and hence cable requirements***
- ***AC/DC/AC converter can decrease theoretically by one-third common mode voltage***

# HÁLÓZATI ÁRAM ÉS FESZÜLTSÉG ÜZEMMÓD VÁLTÁSKOR

Szimuláció

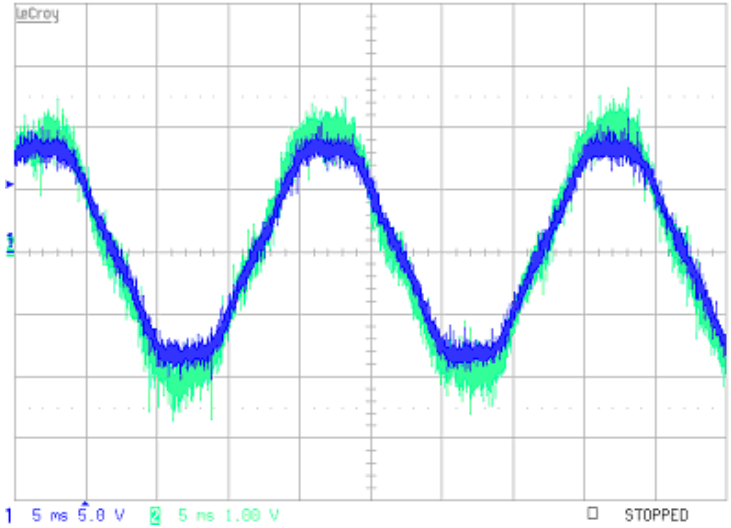



U(t)

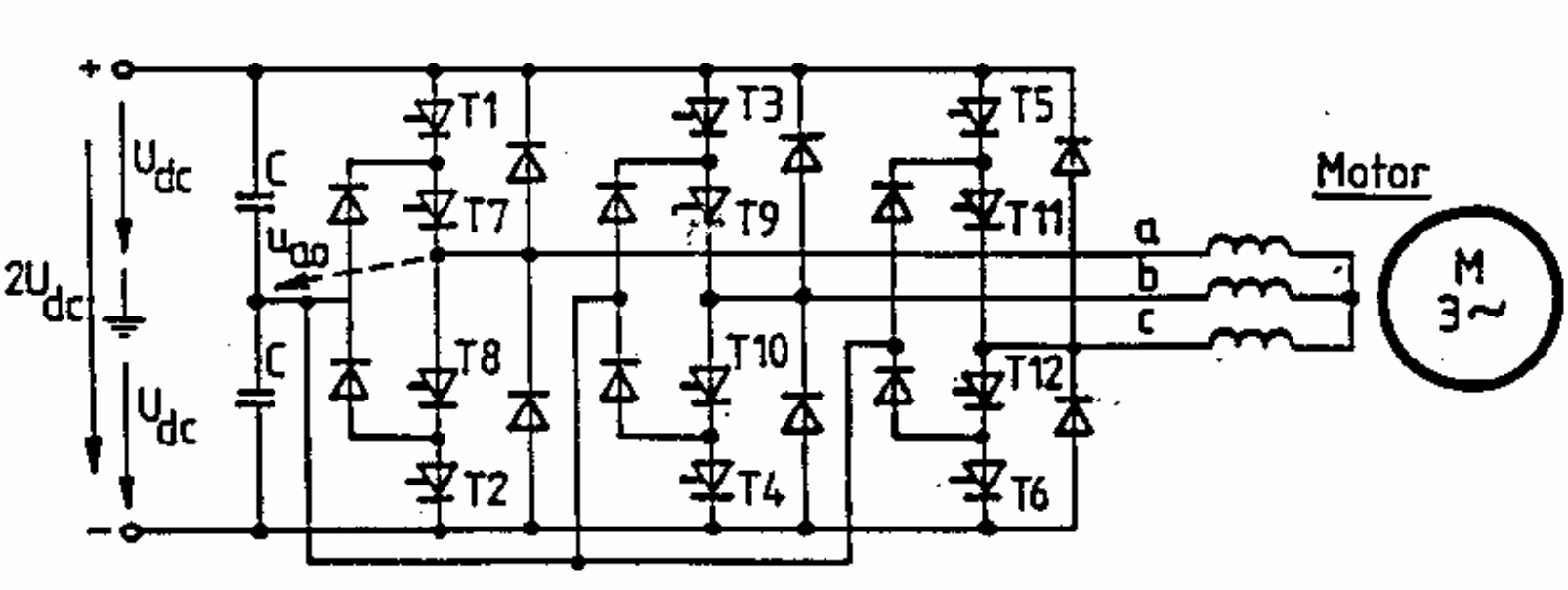
I(t)

M(t)

Mérés



# HÁROMSZINTŰ INVERTER

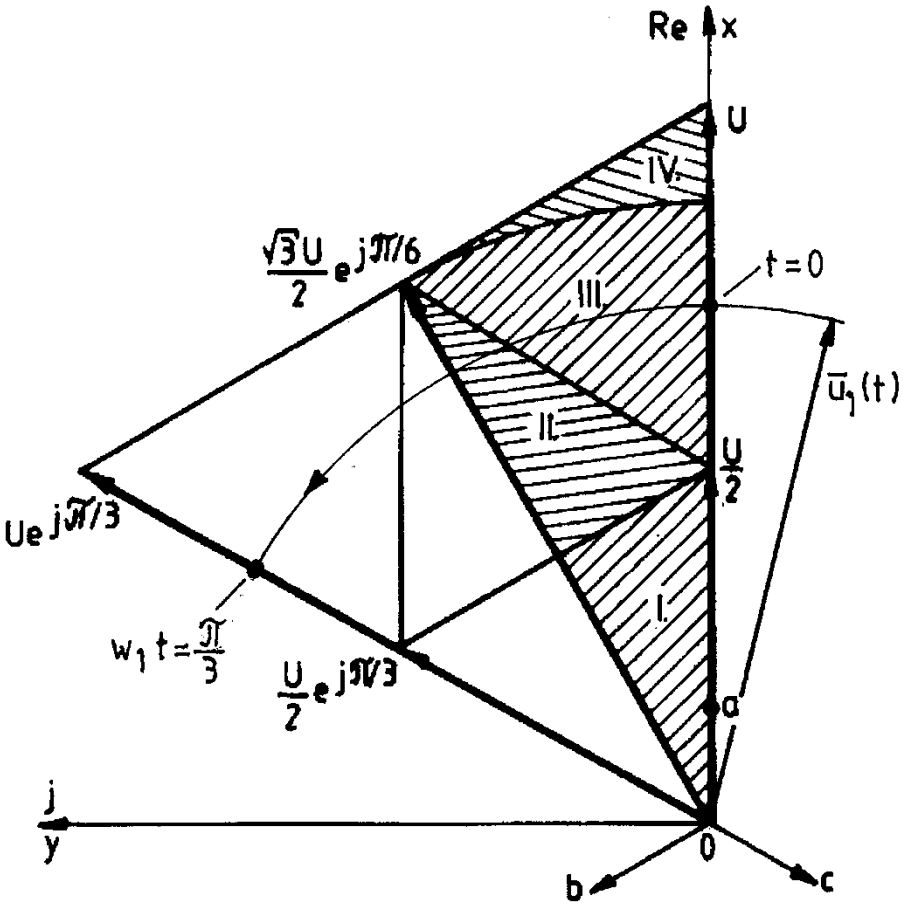



**Feszültségvektorok száma (kapcsolások) : $3^3$=27**

**Zérus feszültségű kapcsolások száma: 3**

**(+++, 000, ---)**

# HÁROMSZINTŰ INVERTER, FESZÜLTSÉG VEKTOROK




Nagy vektor: 6

Középső vektor: 6

Kis vektor: 12

<u>Zérus vektor: 3</u>

**<u>Összesen: 27</u>**

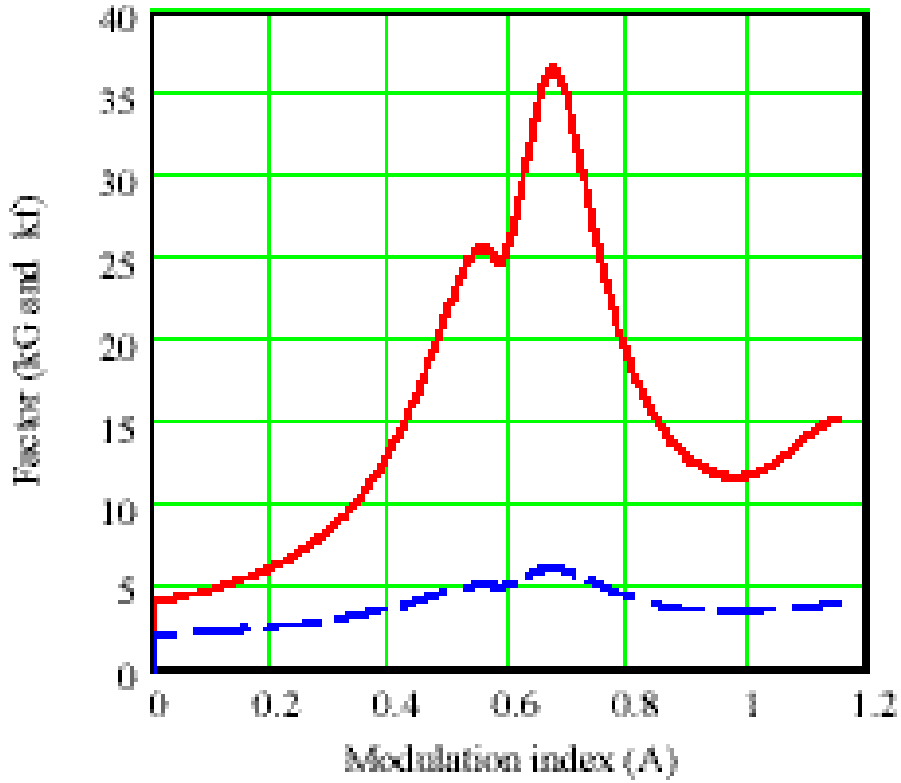
$$k_G = G_{2level} / G_{3level}$$

$$k_f = \sqrt{G_{2level} / G_{3level}}$$

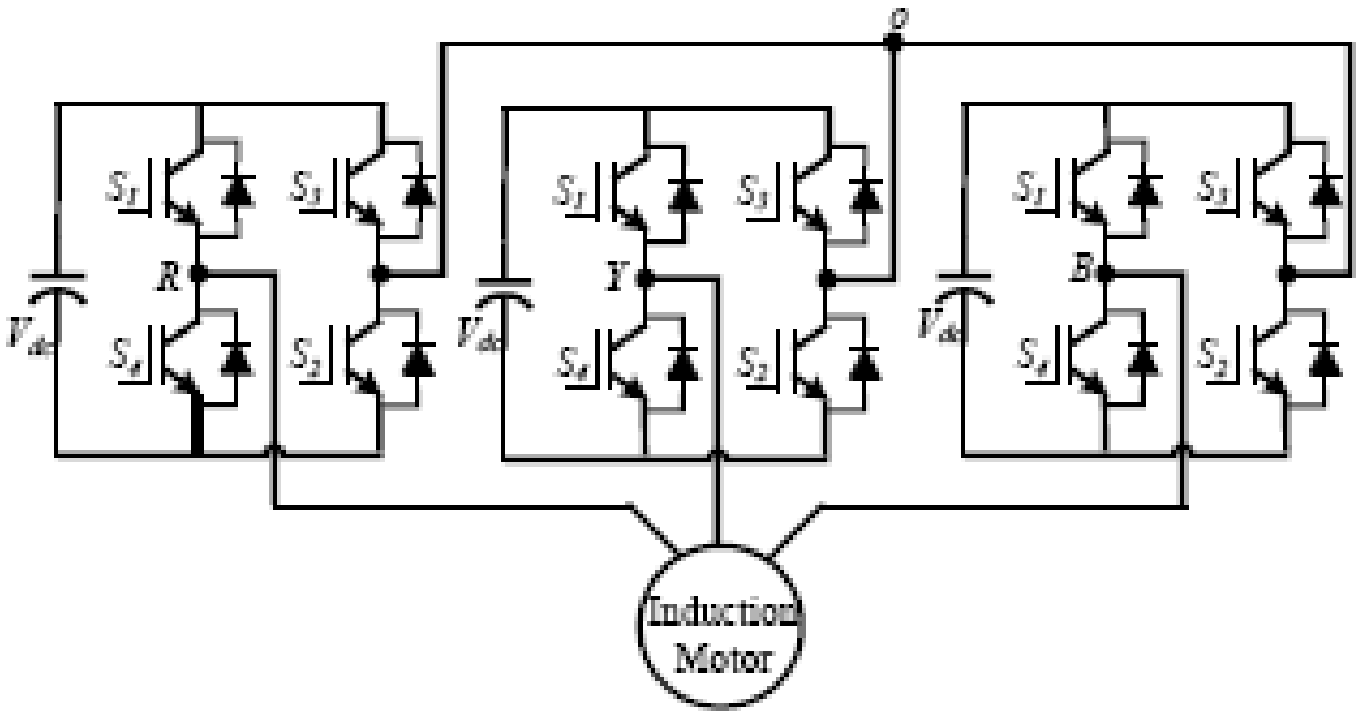
Two-phase PWM,

$k_G$,

$k_f$



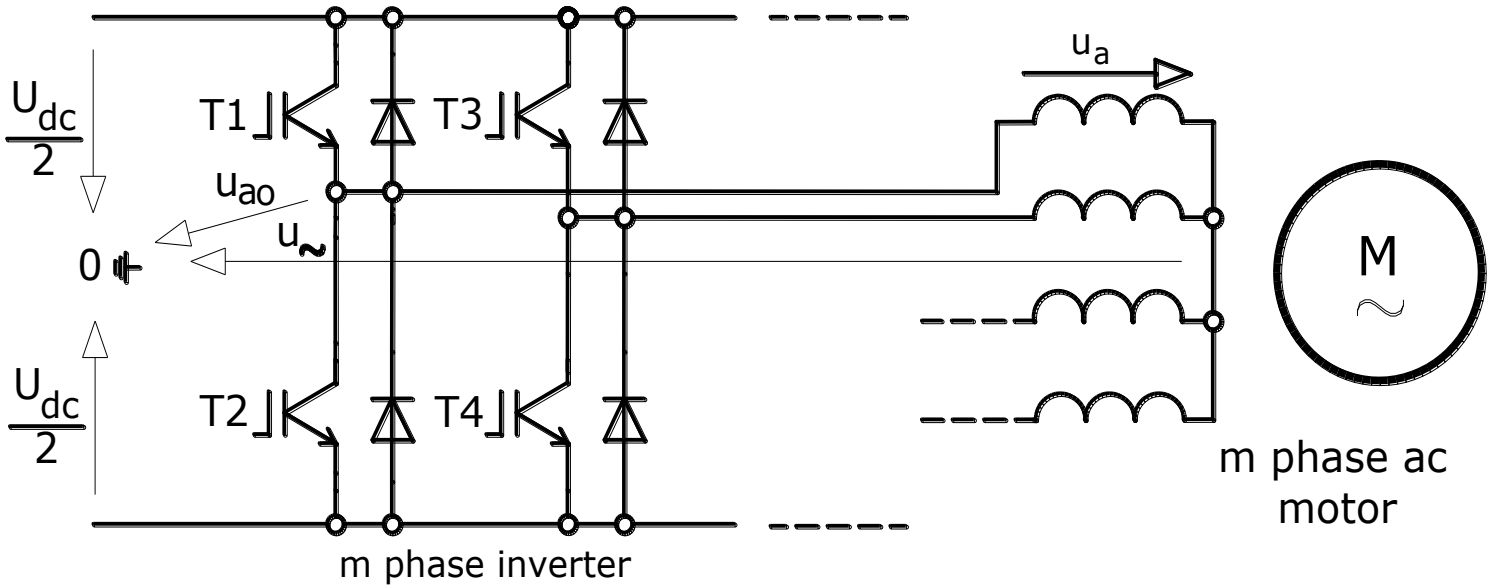
# HÁROMSZINTŰ H-HIDAS INVERTER



# Az ISZM inverteres hajtások és berendezések fejlesztési irányai

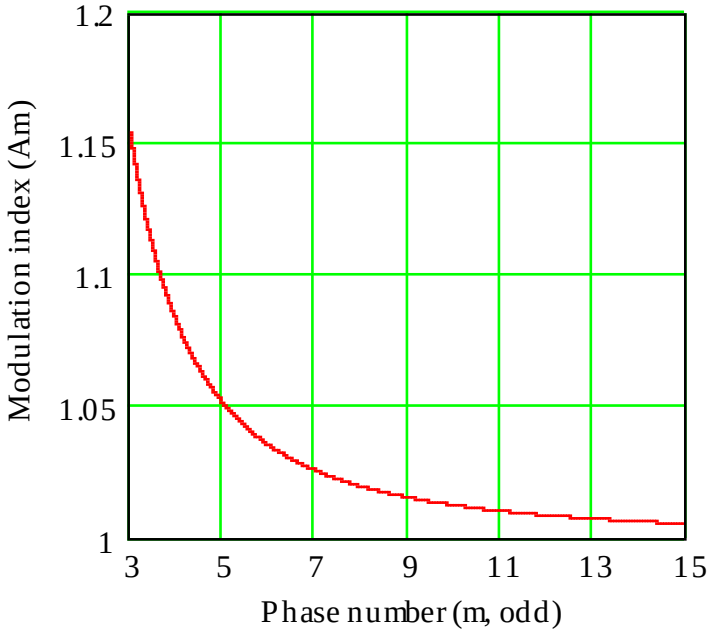
1. Az aszinkron és szinkron gépes hajtások tipikus szabályozási módszere, amely gyakorlatilag kiszorította a régebbi szabályozási módszereket (kaszkádok, feszültség szabályozás, szellőzők és kompresszorok mechanikai módszereit stb.)
2. Az inverteres hajtások bevonultak a háztartásokba (mosógépek, jégszekrények stb.).
3. A villany motorral hajtott autók, ahol jelenleg több fajta motorral találkozunk (háromfázisú aszinkron és szinkron, permanens mágnesű szinkron motorok stb.)
4. A villamosok és trolibuszok tipikus hajtásává vált.
5. Hálózati tápegységek berendezései (a szél és a nap energiát átalakító erőművek, a nagy teljesítményű villamos energiát termelő erőművek, amikor az energiát a vízben lévő kábelekkel továbbítjuk stb. ).
6. Hálózati inverteres hajtások visszatáplálási lehetőséggel (szervóhajtások stb.).

# ISZM módszerek sok fázisú rendszereknél



# ISZM módszerek sok fázisú rendszereknél

**Modulációs index:** $A=U_1/(U_{dc}/2)$

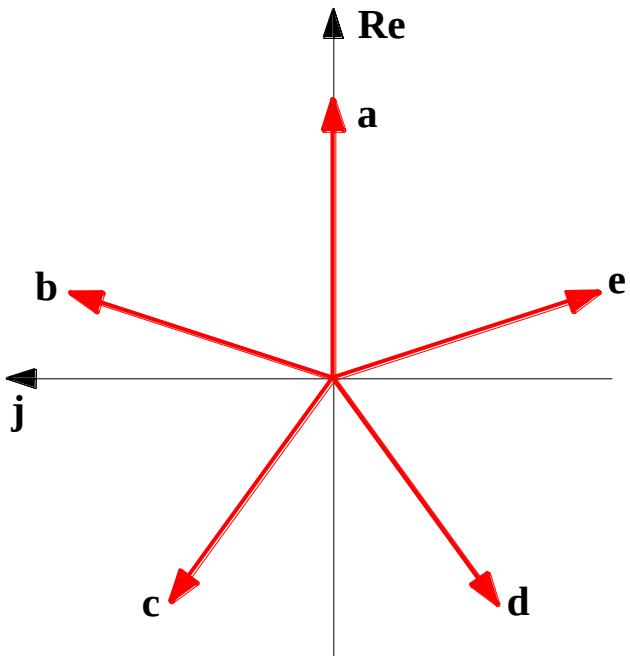


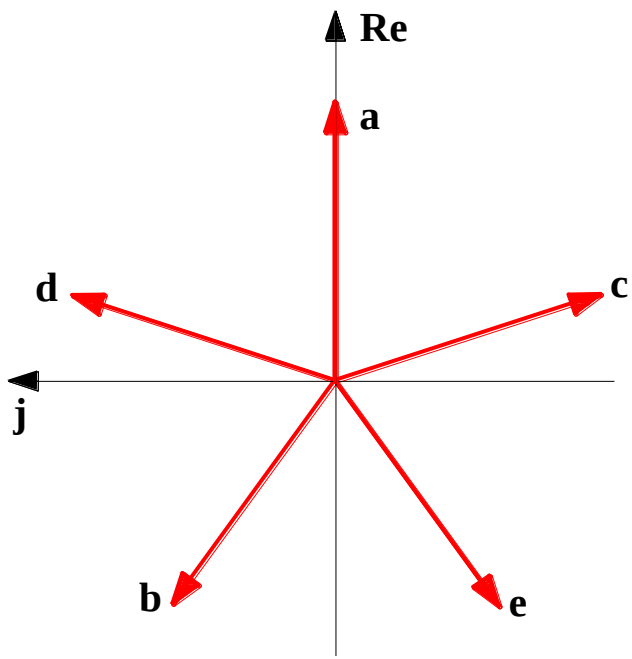

$$A_m=1/\cos(\pi/(2m))$$

$$\boldsymbol{m=7}:\ A_m=1.026$$

# ISZM módszer 5 fázisú rendszernél

$m=5$




$$v=kf_t/f_1 \pm k_1 m \pm 1$$

$$(2f_t/f_1 \pm 1,\ 4f_t/f_1 \pm 1,\ f_t/f_1 \pm 4 \ldots)$$

$$v=kf_t/f_1 \pm k_1 m \pm 2$$

$$(f_t/f_1 \pm 2,\ 3f_t/f_1 \pm 2,\ 2f_t/f_1 \pm 3 \ldots)$$

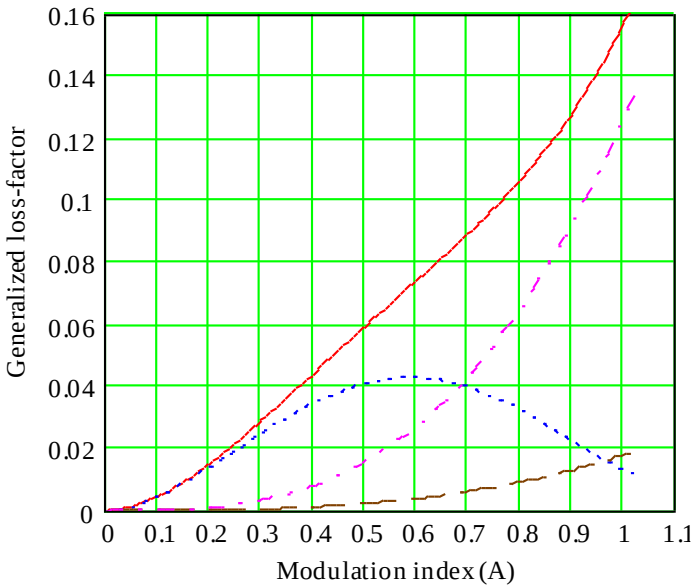
# ISZM módszer sok fázisú rendszernél

## Általanosított veszteségi tényező A=1,

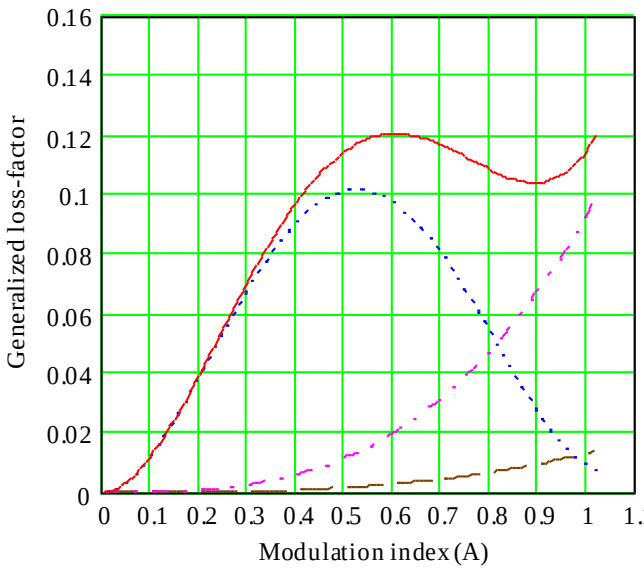
| Phase Number $m$ | Generalized loss-factor, $G_\ell$ | | |
|---|---|---|---|
| | Sinusoidal PWM | Space vector PWM | $m$ harmonic injection PWM |
| 3 | 0.1420 | 0.0962 | 0.0997 |
| 5 | 0.1552 | 0.1599 | 0.1581 |
| 7 | 0.1564 | 0.1577 | 0.1571 |
| 9 | 0.1566 | 0.1571 | 0.1569 |
| $\infty$ | 0.1568 | 0.1568 | 0.1568 |

# ISZM módszer sok fázisú rendszernél

## Általánosított veszteségi tényező komponensei




$b=A^2\pi/384$




**$m$=7, térvektoros**

$G=(2-2.88A+1.505A^2)b$

$G2=0.0705Ab$

$G3=0.5006Ab$

**$m$ =7, kétfázisú PWM**

$G=(8-14.78A+7.113A^2)b36/49$

$G2=0.0705Ab36/49$

$G3=0.5006Ab36/49$

# Sok fázisú rendszerek jellemzői

1. A háromnál nagyobb fázis számú motor üzembiztonsága – a háromfázisú motorhoz képest - jelentősen javul mivel a motornak lesz indító nyomatéka akkor is, ha az egyik fázis meghibásodik.
2. Motor felharmonikus veszteségei valamivel nagyobbak a három fázisú rendszerrel szemben. A rotorköri harmonikus veszteségei jelentősen kisebbek.
3. 2. A háromnál nagyobb fázis számnál a legkisebb harmonikus veszteségek a szinuszos ISZM módszerre adódnak.
4. 3. A háromnál nagyobb fázis számnál a motor forgórészének a harmonikus áramok miatti túlmelegedése jelentősen csökken, ami jelentősen csökkenti a motor tengelyének és csapágyainak túlmelegedését.

# Villamos személyautók adatai (december)

| Gyártó Típus | Motor teljesítm. kW/ ford/p | Max. nyoma-ték Nm | Motor fajta | Max. sebes-ség km/h | Akkum. energia kWh | Autó ható-távja km | Gyors. idő 0-100km sec | Ár $ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nissan LEAF | 110<br>160 | 320 | aszinkron | 150 | 40-50<br>64 | 241<br>362 | 8.5<br>6.5 | <30000<br>35000 |
| Tesla S | 225/5900<br>309/5300 | 440<br>600 | aszinkron | 190<br>210 | 60<br>85 | 370<br>480 | 6.2<br>4.4 | 60000<br>80000 |
| Kia, Soul EV | 81.4<br>96 | 285 | PM szinkron | 145 | 7<br>30 | 250 | 11.2<br>9.7 | 36000 |
| Tesla 3 Long | 192<br>201 | | PM szinkron | 200<br>220 | 350-500 | | 5.1-5.6 | 35000<br>55000 |
| BMWi3<br>BMWi3s | 106/4800<br>115/4800 | 249.5<br>270 | PM szinkron | 147<br>160 | 33.2 | 182 | 7<br>6.8 | 45000<br>48600 |
| Hyundal Kona EV | 150<br>242 | | | | 40<br>64 | 320<br>389 | | 39000 |
| Hyundal IONIQ | 88 | 295.6 | PM szinkron | 185 | 33.2 | 200<br>470 | 10.8 | 29500-<br>32500 |
| Reunault Zoe | 66<br>80 | 220 | Szinkron (tekercselt rotor) | 135 | 41<br>22 | 400<br>210 | 13.5 | 360002<br>6500 |
| Opel Ampera-E | 150 | 360 | PM szinkron (?) | 150 | 60 | 500 | 7.3 | 36000 |
| Ford Focus-e | 107 | 250 | PM szinkron | 135 | 33.5 | 185 | 9.9 | 29120 |
| VW e-Golf | 85 | 290 | Szinkron AC80 | 150 | 35.8 | 201 | 9.6 | 30500 |

Az Egyesült Államokban a személyautókból kb. 12 millió darabot adtak el 2017-ben, az eladott villamos autók száma nem haladja meg ennek az 1%-át. Európában az eladott személyautók száma kb. 18 millió, és a villamos autók aránya kb. 1.1%.

Európában 2017 első három negyedében 214653 villamos autót adtak el, ami 39%-os százalékos növekedést jelent az előző évhez képest. Érdekes, hogy legtöbbet, a viszonylag legolcsóbb kocsiból, Renault Zoe típusú autóból adták el, még pedig 23398 darabot, míg a következő számú, 14893 autó BMVi3 típusból kelt el, amely az egyik a legdrágább a fenti táblázatban (három negyed év alatt).

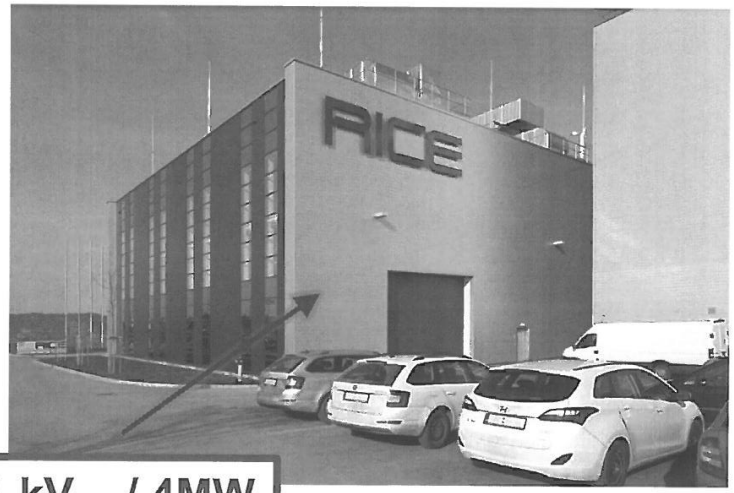
# Egy példa a jelenleg folyó fejlesztésről

Pilzen, Czech Republic

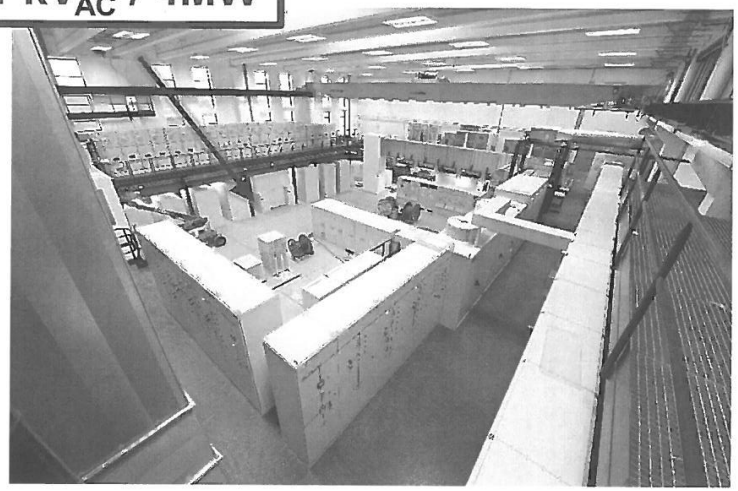
# RICE – unique research infrastructure

**World-unique research infrastructure:**

- Investment cost **over 25 mil. EUR** in last 5 years.
- A hall laboratory and testing room for medium-voltage power electronics and transportation systems for testing up to 31 $kV_{AC}$ / 4MW.
- **Opened on June 15, 2016**



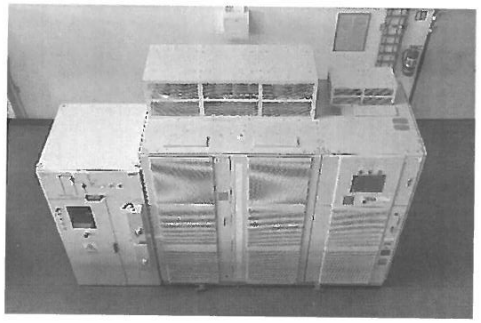

**Hall laboratory, 31 $kV_{AC}$ / 4MW**

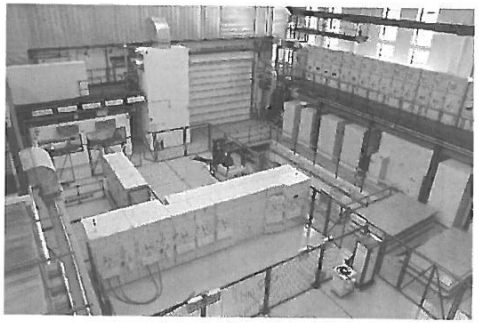


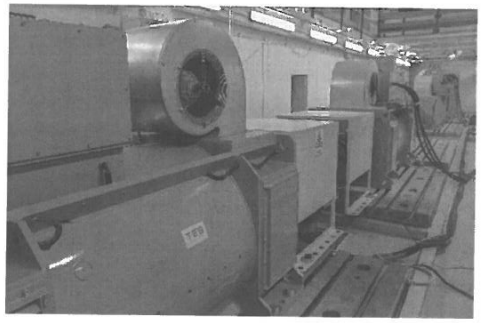
# Hall laboratory in deeper details

## Testing of transportation and MV power electronics systems

- Typical DUT power up to **4 MW**.
- Max. dissipated heat (power losses) of **500 kW**.
- Traction catenary:
  - AC **25 kV / 50 / 60 Hz** (max. 31.5 kV),
  - AC **15 kV / 16,7 Hz** (max. 19 kV),
  - DC **600 V, 750 V** with max. voltage up to 1 250 V,
  - DC **1.5 kV** and **3 kV** with max. voltage of 5.5 kV.
- 3-phase power supply systems:
  - Fixed voltage and frequency: 22 kV / 50 Hz, 10 kV / 50 Hz, 6 kV / 50 Hz, 3 kV / 50 Hz, 690 V / 50 Hz, 400 V / 50 Hz.
- Programmable power supplies:
  - AC 0 – 11.5 kV / 40 – 120 Hz, AC 0 – 690 V / 0 – 120 Hz.
  - DC 0 – 15 kV.
- 2 MV test beds, reconfigurable LV test area up to 4 test beds.
- MV and LV pits with loading motors (IM, PMSM).
- High-speed high-precision measurements (50 μs sampling rate).
- IR cameras with trigger event capability.
- Max crane load 12500 kg.





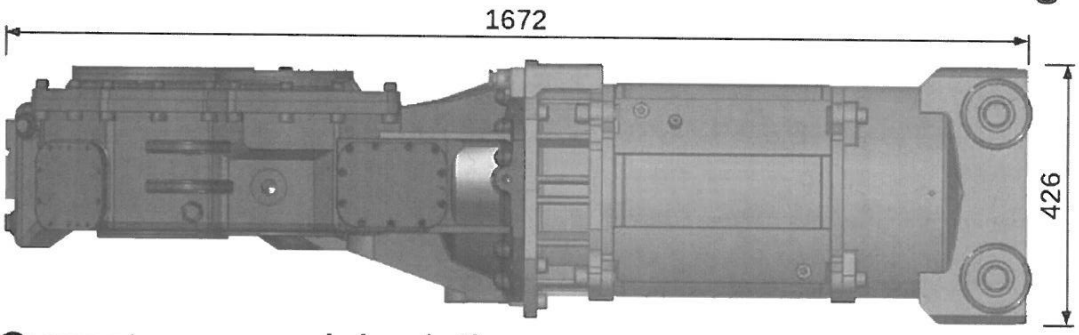


# New generation of compact traction drive unit

## Main advantages

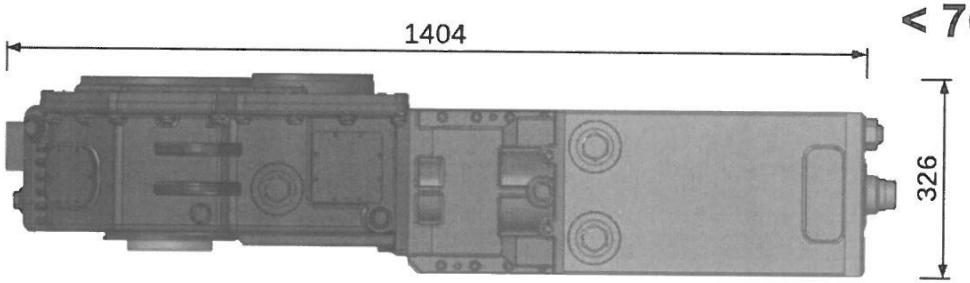
- compact drive unit embedded into a single housing – **high integration level**,
- simple and fast integration to vehicle,
- applicable for both wheel and wheelset/axle drive,
- **significantly reduced dimensions/volume and weight,**
- optimal heat transfer,
- minimised noise,
- mechanical brake as an option.

**~ 1000 kg**




Current commercial solution

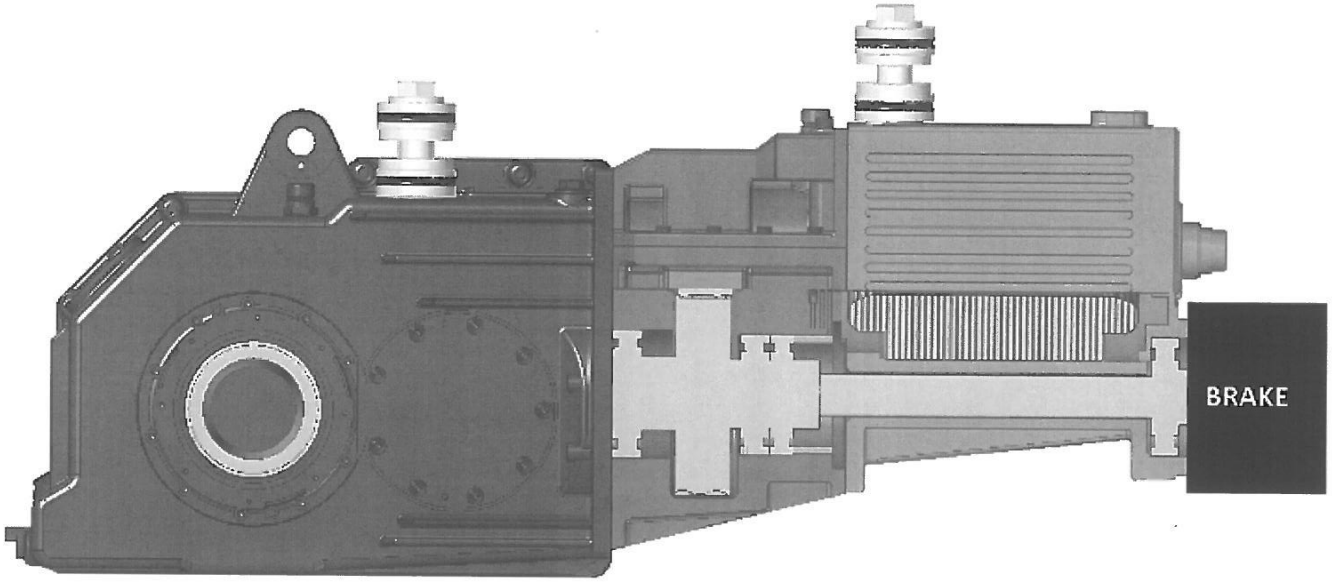
**< 700 kg**




Second generation prototype

# New generation of compact traction drive unit

## The drive unit design is protected by patent application – RICE + WIKOV




**High-speed PM motor with passive cooling:**

96.5% efficiency at rated point

Maximum power of 180 kW

Continuous power of 110 kW

**Multistage gearbox:**

Max. wheelset speed of 643 rpm

Nom. torque on the wheelset of 3854 Nm

Acceleration torque of 5625 Nm

Braking torque of 6660 Nm

- 17

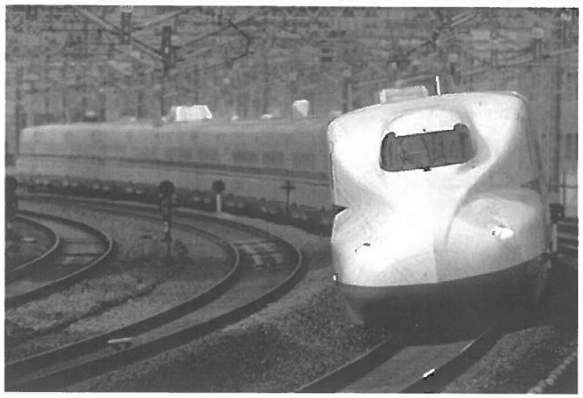

© UWB FEE RICE
MINISTRY OF EDUCATION YOUTH AND SPORTS
EUROPEAN UNION EUROPEAN REGIONAL DEVELOPMENT FUND INVESTING IN YOUR FUTURE
OP Research and Development for Innovation

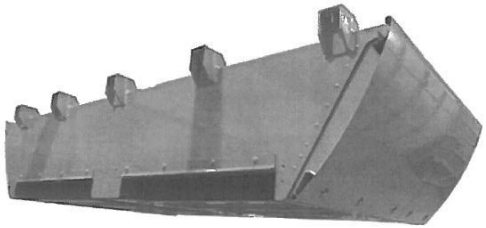
# All-SiC designs

## SiC MOSFETS 3.3kV/1500A in traction vehicles

## Mitsubishi Electric

- **Installs Railcar Traction System with All-SiC Power Modules or Shinkansen Bullet Trains for Central Japan Railway Company**

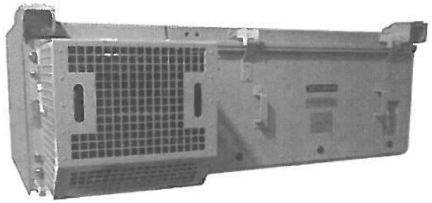




**Specifications of Main Circuit**

| | |
|---|---|
| Input voltage: | 2500V AC |
| Main circuit systém: | Large-capacity all-SiC power module<br>Three-level PWM inverter with regenerative brakes |
| Control system: | Four traction motors with 305kW, parallel control |
| Cooling system: | Self-cooling |

- **Supply Railcar Traction Inverter with All-SiC Power Module to Odakyu Electric Railway**



**Specifications of Main Circuit**

| | |
|---|---|
| Input voltage: | 1,500V DC |
| Main circuit system: | Two-level PWM inverter with regenerative brakes |
| Control system: | Four traction motors with 190kW, parallel control |
| Cooling system: | Self cooling |

# All-SiC designs

## SiC MOSFETs Mitsubishi Electric vs Cree vs ABB?

### Mitsubishi Electric

**SiC MOSFET**

| | |
|---|---|
| Drain – Source Voltage: | 3300V |
| Drain Current: | 400A |
| On – Resistance: | 6mΩ |
| Energy On: | 193mJ |
| Energy Off: | 58mJ |
| Package: | |

**Silicon Carbid**

**Ready to Run the Rails**

### Cree (Wolfspeed)

**SiC MOSFET 3.3kV**

| | |
|---|---|
| Drain – Source Voltage: | 3300V |
| Drain Current: | ??? |
| On – Resistance: | 5,7mΩ |
| Package: | XHP |

**SiC MOSFET 6,5kV**

| | |
|---|---|
| Drain – Source Voltage: | 6500V |
| Drain Current: | ??? |
| On – Resistance: | 100mΩ |
| Package: | XHP |

**SiC MOSFET 10kV**

| | |
|---|---|
| Drain – Source Voltage: | 10000V |
| Drain Current: | ??? |
| On – Resistance: | 100mΩ |
| Package: | XHV |

**XHV-6**

# All-SiC designs

## SiC MOSFETs Mitsubishi Electric vs Cree vs ABB?

## Mitsubishi Electric

**SiC MOSFET**

| | |
|---|---|
| Drain – Source Voltage: | 3300V |
| Drain Current: | 400A |
| On – Resistance: | 6mΩ |
| Energy On: | 193mJ |
| Energy Off: | 58mJ |
| Package: | |

**Silicon Carbid**
**Ready to Run the Rails**

## Cree (Wolfspeed)

**SiC MOSFET 3.3kV**

| | |
|---|---|
| Drain – Source Voltage: | 3300V |
| Drain Current: | ??? |
| On – Resistance: | 5,7mΩ |
| Package: | XHP |

**SiC MOSFET 6,5kV**

| | |
|---|---|
| Drain – Source Voltage: | 6500V |
| Drain Current: | ??? |
| On – Resistance: | 100mΩ |
| Package: | XHP |

**SiC MOSFET 10kV**

| | |
|---|---|
| Drain – Source Voltage: | 10000V |
| Drain Current: | ??? |
| On – Resistance: | 100mΩ |
| Package: | XHV |

**XHV-6**

# All-SiC designs

## SiC MOSFETs Mitsubishi Electric vs Cree vs ABB?

## Mitsubishi Electric

**SiC MOSFET**

| | |
|---|---|
| Drain – Source Voltage: | 3300V |
| Drain Current: | 400A |
| On – Resistance: | 6mΩ |
| Energy On: | 193mJ |
| Energy Off: | 58mJ |
| Package: | |

**Silicon Carbid**

**Ready to Run the Rails**

## Cree (Wolfspeed)

**SiC MOSFET 3.3kV**

| | |
|---|---|
| Drain – Source Voltage: | 3300V |
| Drain Current: | ??? |
| On – Resistance: | 5,7mΩ |
| Package: | XHP |

**SiC MOSFET 6,5kV**

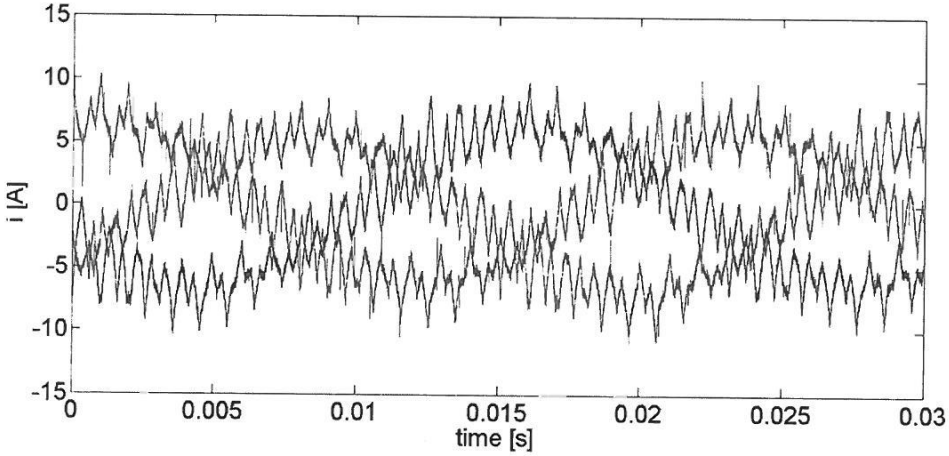
| | |
|---|---|
| Drain – Source Voltage: | 6500V |
| Drain Current: | ??? |
| On – Resistance: | 100mΩ |
| Package: | XHP |

**SiC MOSFET 10kV**

| | |
|---|---|
| Drain – Source Voltage: | 10000V |
| Drain Current: | ??? |
| On – Resistance: | 100mΩ |
| Package: | XHV |

**XHV-6**

# Interaction of a drive with its environment




## Noise of modern traction drives

- High content of harmonics in modern drives causes unwanted noise.
- Unsuitable environment for the driver and passengers.
- Harder and harder standards and customer requirements.

Köszönöm a figyelmet