



Villamos járműhajtások fejlődése

Budapest | 2021.09.23.

Történelem

Az első villanyautó

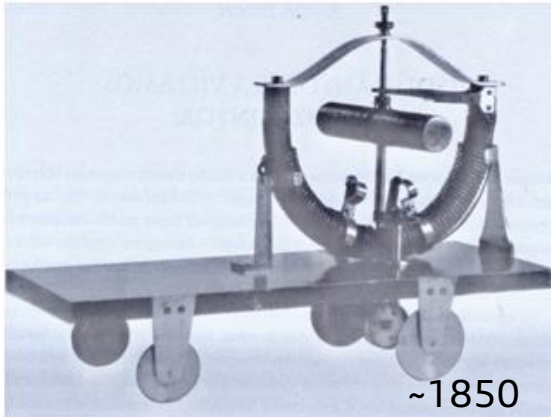


Jedlik Ányos

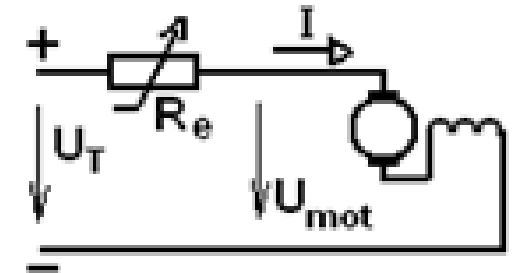
Először írta le az öngerjesztés jelenségét
Bevezette az elektrodinamika oktatását
Magyarországon



Először alkotott kommutátoros egyenáramú
motort a világon



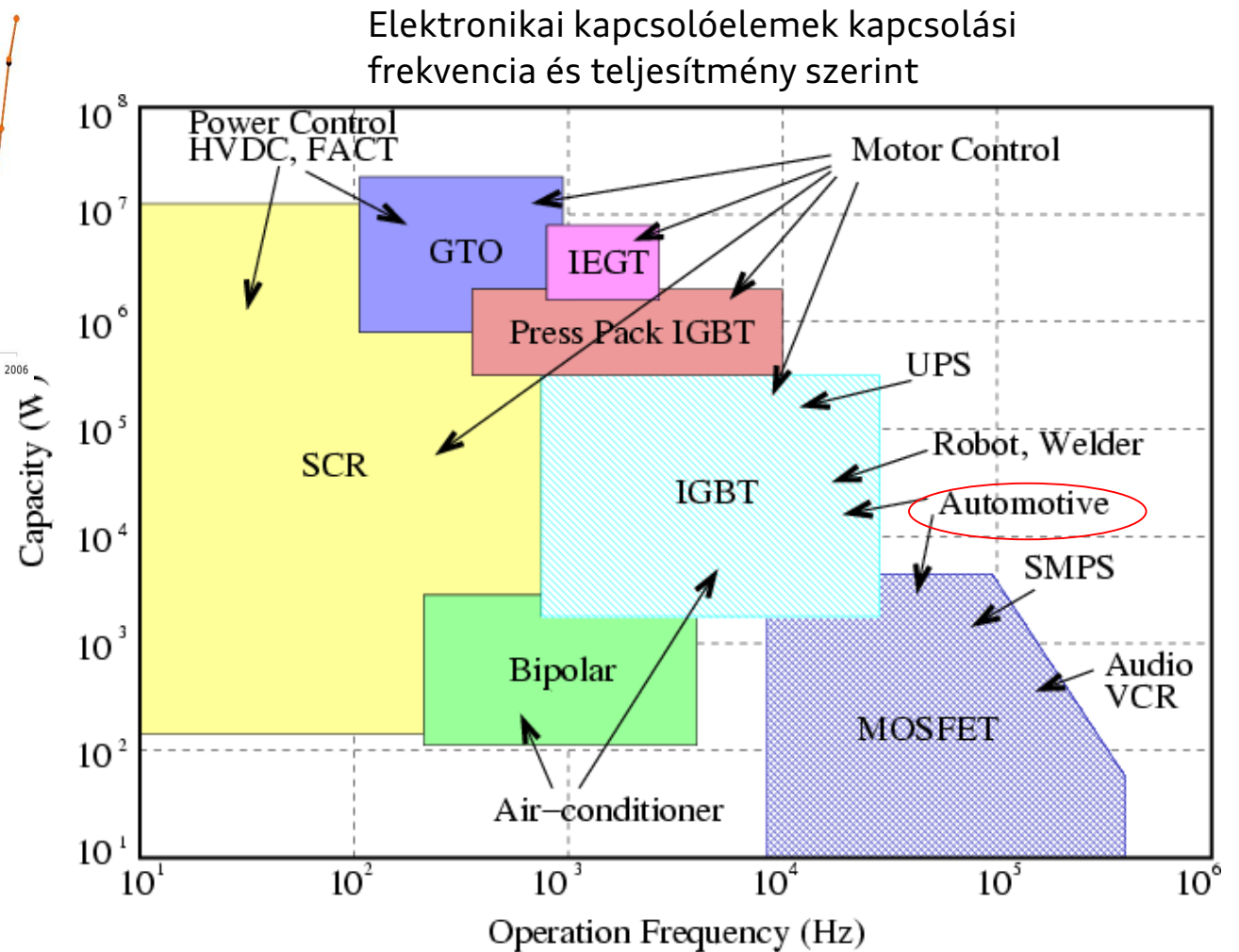
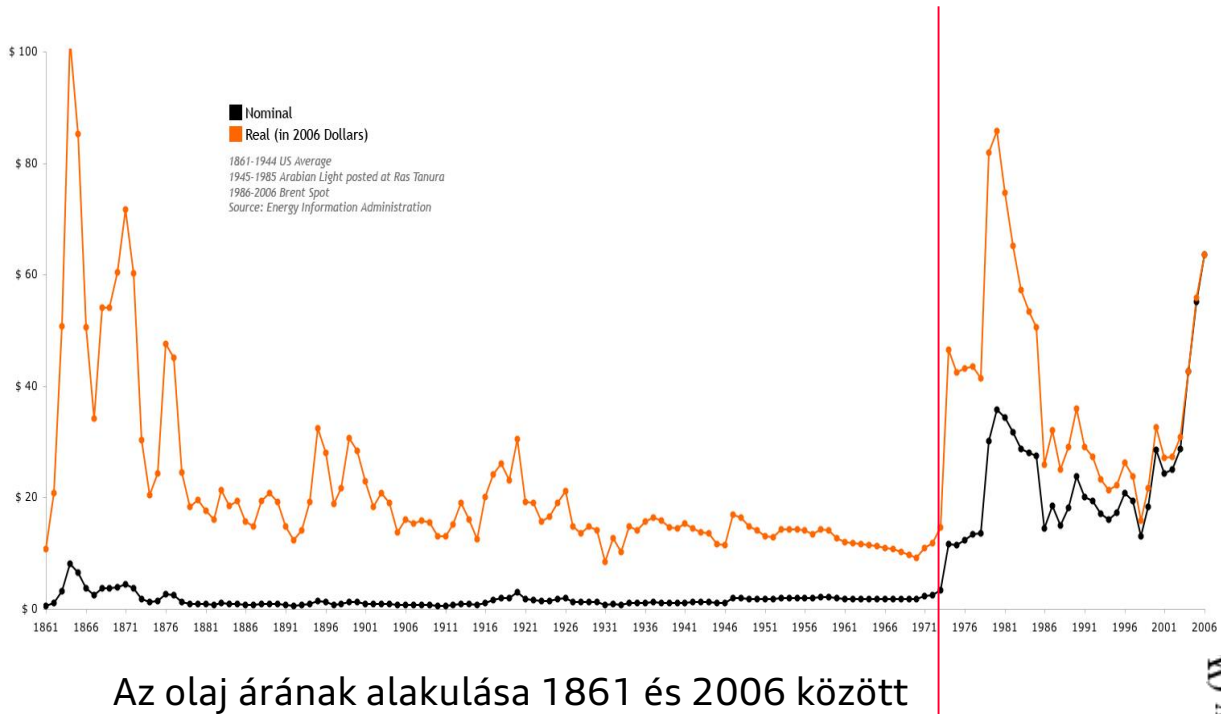
Az első villamos hajtású modellautó megépítője



A villanyautózás első hőskora



Az 1970-es évek

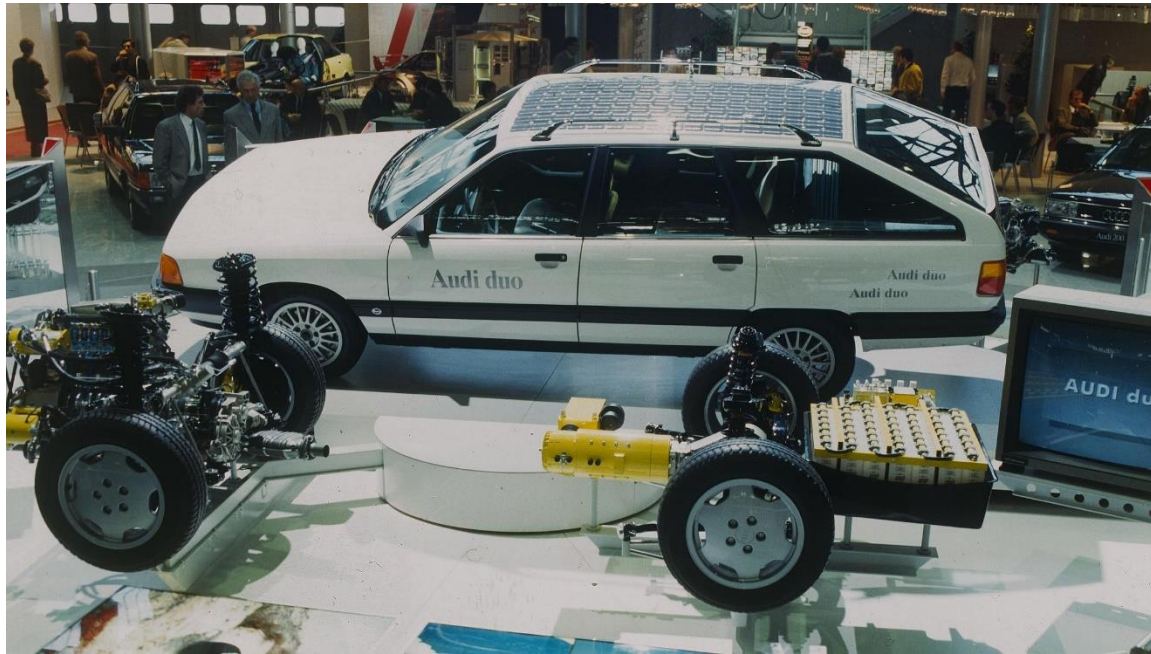


Az első modern, sorozatgyártott villanyautó

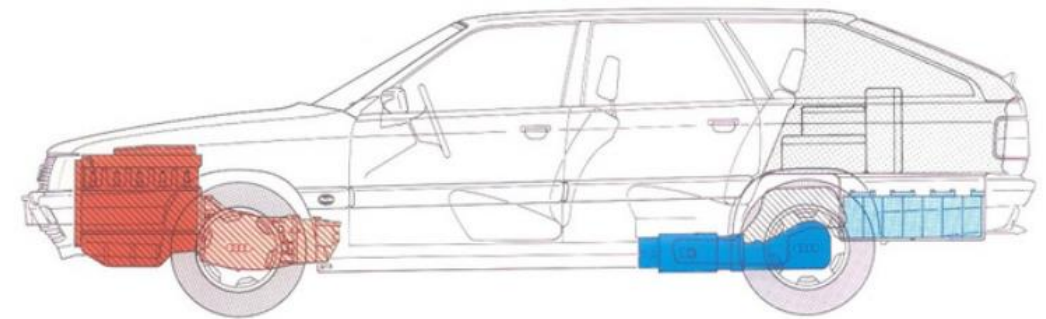


GM EV1

Az első modern hibridek - Audi Duo



Audi Hybridsystem duo

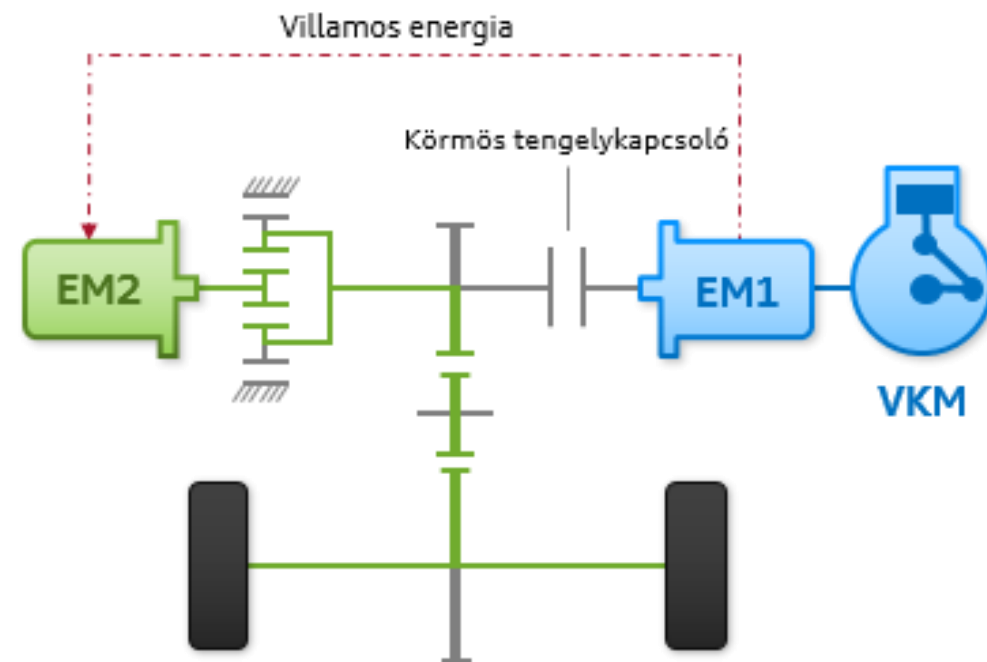
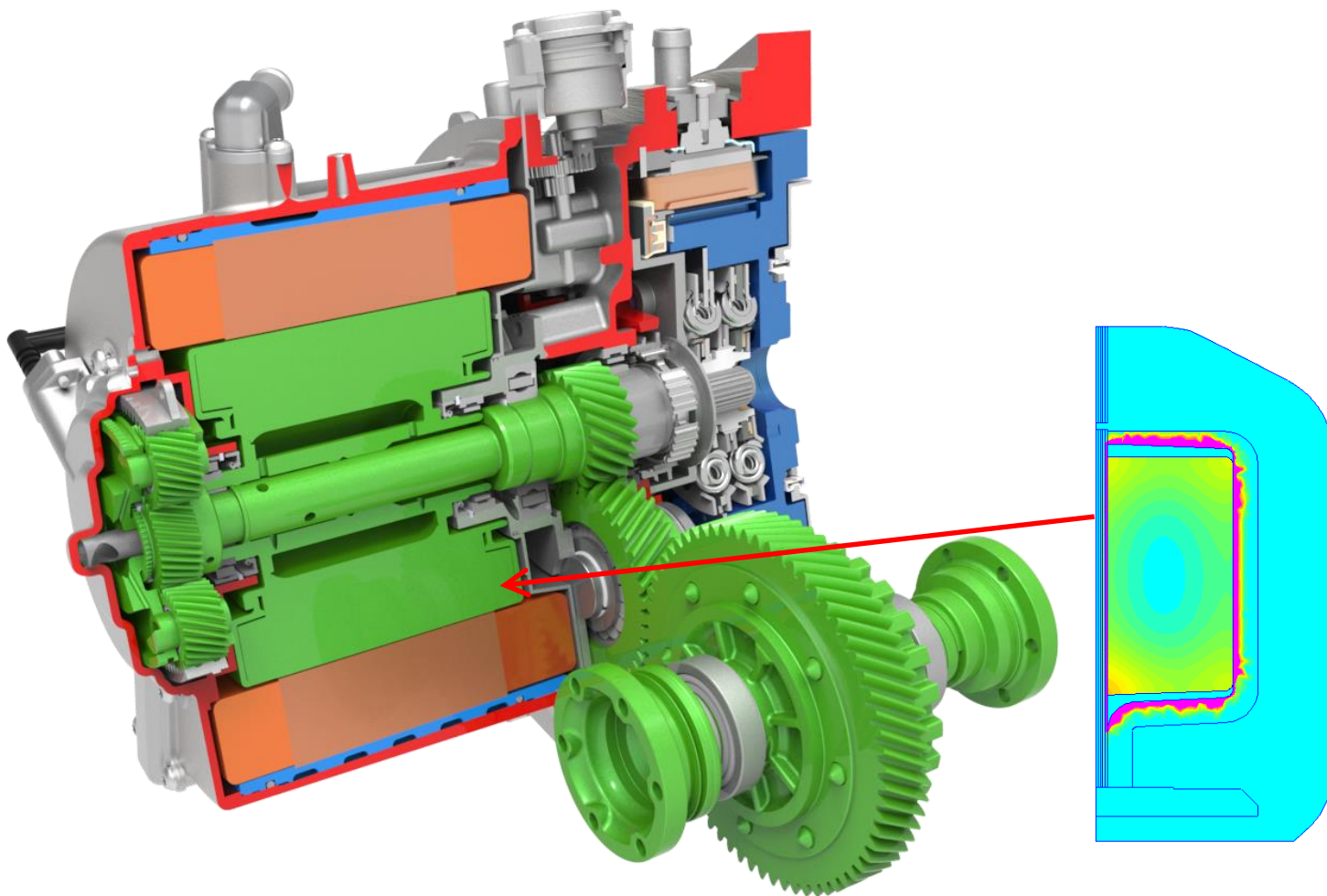


Verbrennungsmotor Frontantrieb

Elektromotor Elektroantrieb Batterie



Audi A1 e-tron hibrid hajtáslánc (2012)



Audi future lab: **mobility**



2004



Lotus Elise S Club Racer

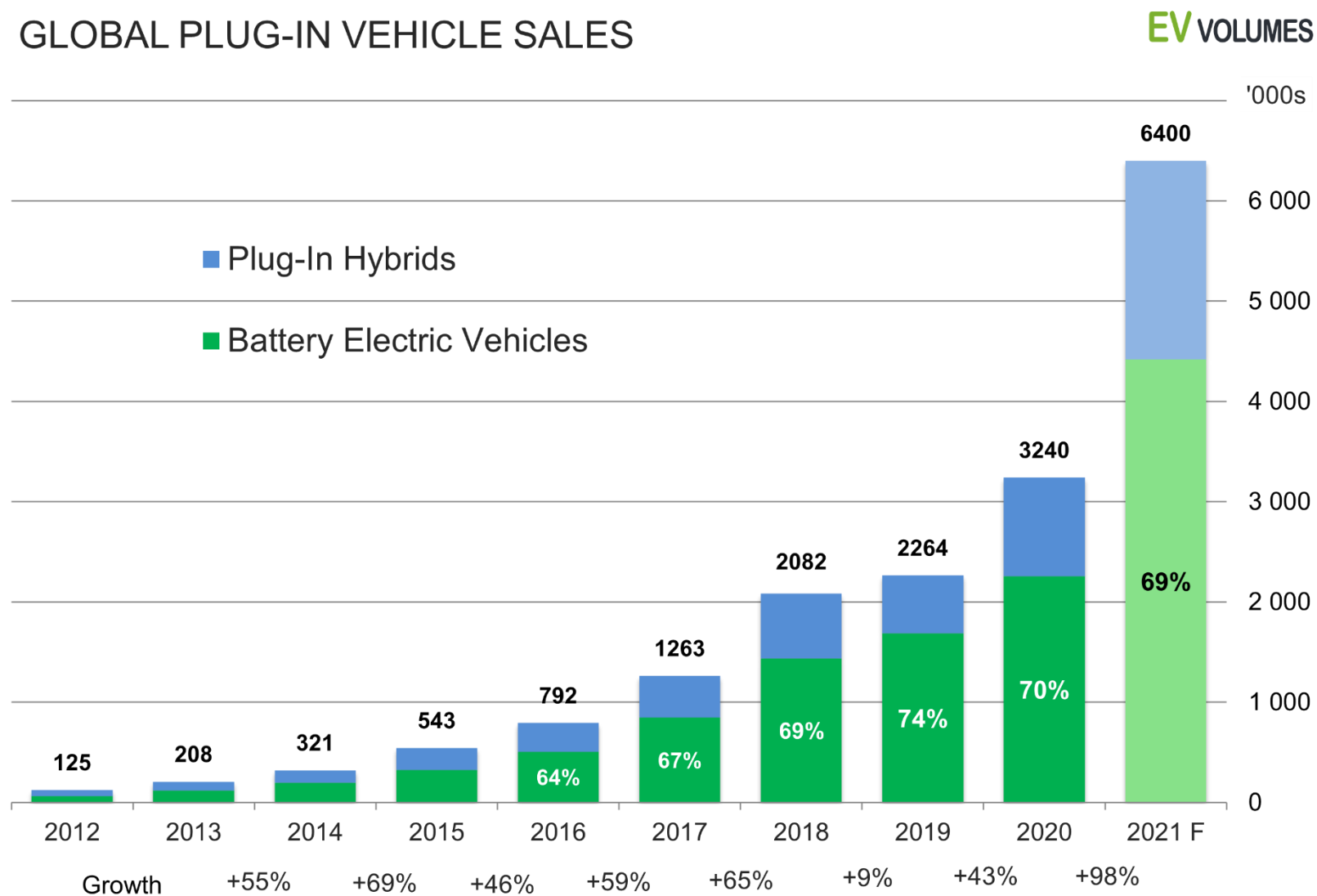
2008



Tesla Roadster Sport 2.5

Azóta...

GLOBAL PLUG-IN VEHICLE SALES



Fogyasztók ösztönzése:
Világszintű támogatások,
kedvezmények

Növekvő
környezettudatosság

Kevesebb kompromisszum

Relatív olcsóbb járművek

Gyártók ösztönzése:
Európai szén-dioxid kvóta

Olcsóbb alapanyagok

Konstrukció

Anyaghasználat, tekercselés, hűtés

Motorok

Motorfejlesztés: a körfűrésztől a turbógenerátorig



*Tesla Roadster
léghűtéses motor*

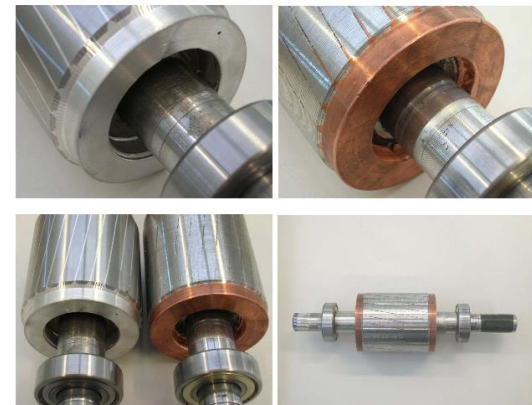


*Audi e-tron hosszú
motor állórésze*

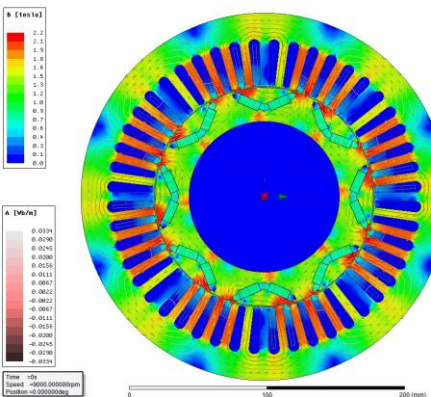


*TVV221 típusú generátor állórész
250MVA, Paksi Atomerőmű*

A járműhajtásban használt villamos motorok típusai



- › Indukciós – vagy aszinkron – gép
- › Réz- vagy alumínium kalicka a forgórészben.
- › Szabályozás szenzorai:
 $U_{DC}, I_{DC}, I_{3ph}, T, \omega_{rot}$
- › Beavatkozás: U_{3ph}



- › Állandó mágneses szinkrongép
- › Állandó mágnesek a gépbe építve.
- › Szabályozás szenzorai:
 $U_{DC}, I_{DC}, I_{3ph}, T, \omega_{rot}, \alpha_{rot}$
- › Beavatkozás: U_{3ph}



- › Külső gerjesztésű szinkrongép
- › Tekercselt fogak és csúszógyűrűs csatlakozás a forgórészen
- › Szabályozás szenzorai:
 $U_{DC}, I_{DC}, I_g, I_{3ph}, T, \omega_{rot}, \alpha_{rot}$
- › Beavatkozás: U_{3ph}, I_g

Anyaghasználat

Konstrukciós megoldások a veszteségek csökkentésére

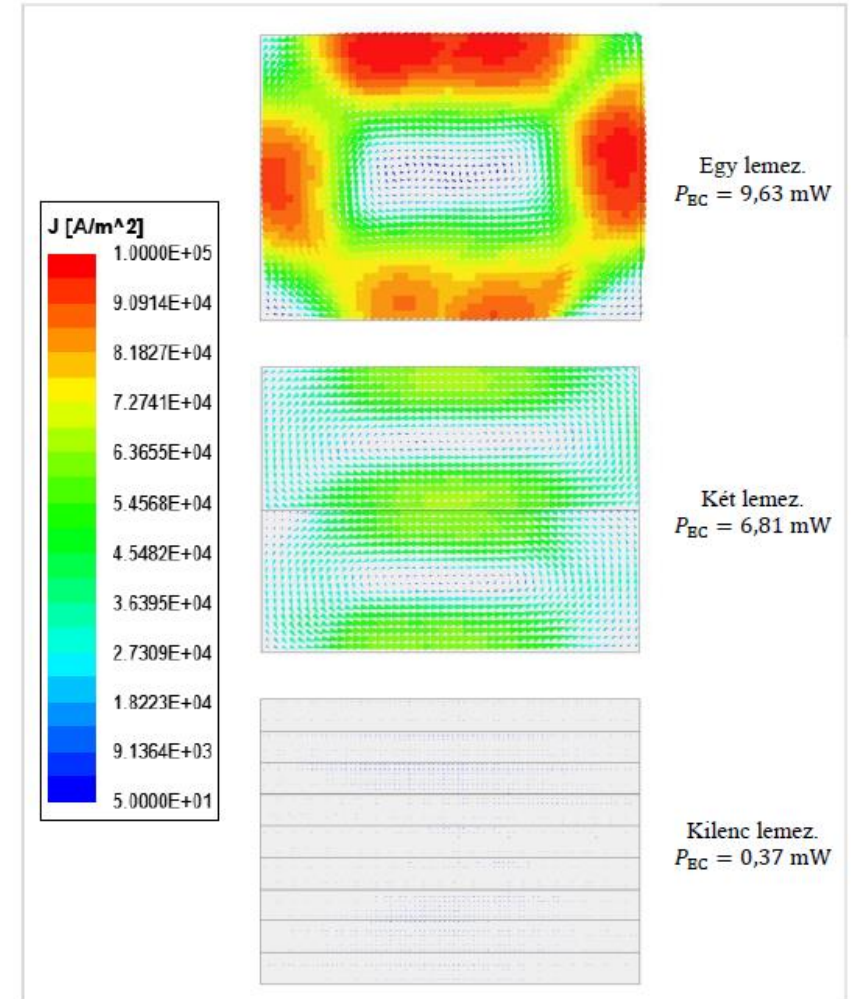
› Anyaghasználat:

- › Jó vezetőképességű tekercselés
- › Rossz villamos vezetőképességű mágneses anyagok
- › Jó relatív permeabilitású vastest
- › Magas telítési indukciójú vastest
- › SiC Mosfet félvezetők



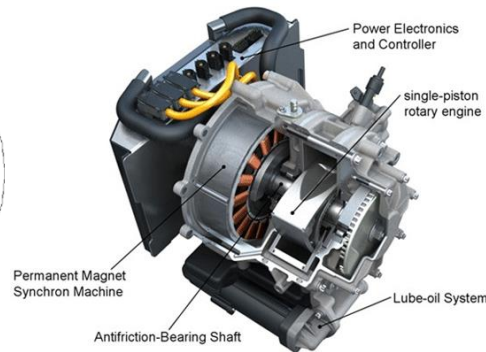
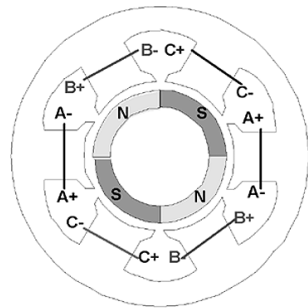
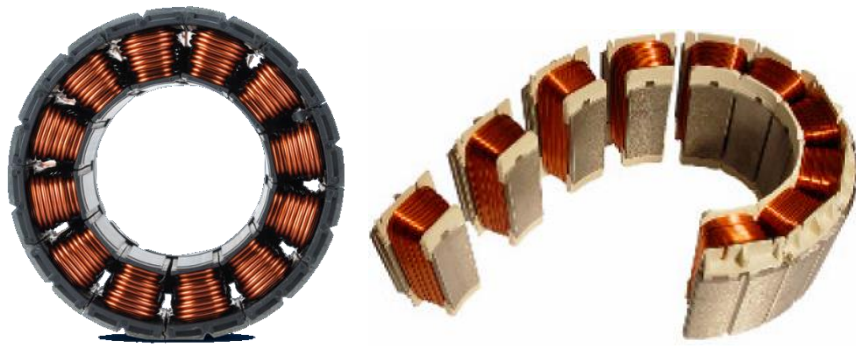
Konstrukciós megoldások a veszteségek csökkentésére

- › Vastest lemezelése, mágnesek szegmentálása
- › Az alkatrészek villamos ellenállását növeli



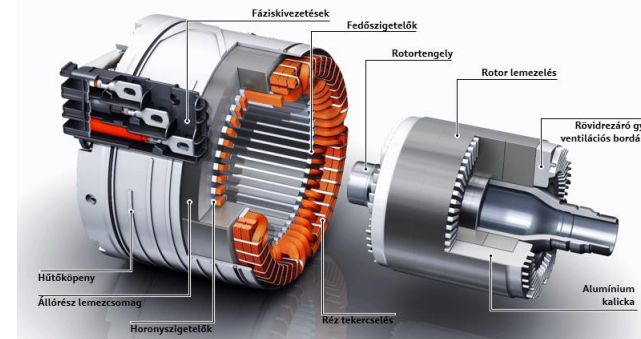
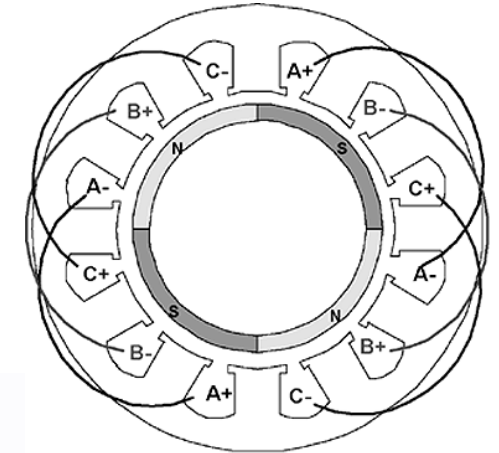
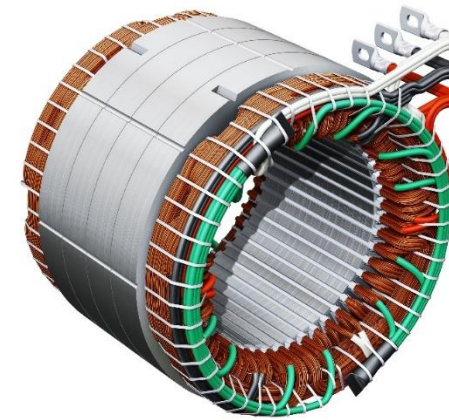
Tekercselés

Tekercselések fő típusai



Fogtekercselés (A1 e-tron hibrid, 2010)

Minden fog egyesével tekercselve, majd összeillesztve
Helytakarékos, nincs tekercsfej
Csak állandó mágneses szinkron géppel
Csak szinkron kapcsolásra (BLDC is ilyen)



Elosztott tekercselés (e-tron BEV, 2018)

A kész lemezttest tekercselve behúzással, varrással vagy hajtűtekercseléssel
A tekercsfej helyigényes és nem vesz részt a nyomatékképzésben
Bármilyen forgórésztípusra és kapcsolási módra alkalmas

Tekercselés kör vezetővel

> Horonykitöltés nő ↗

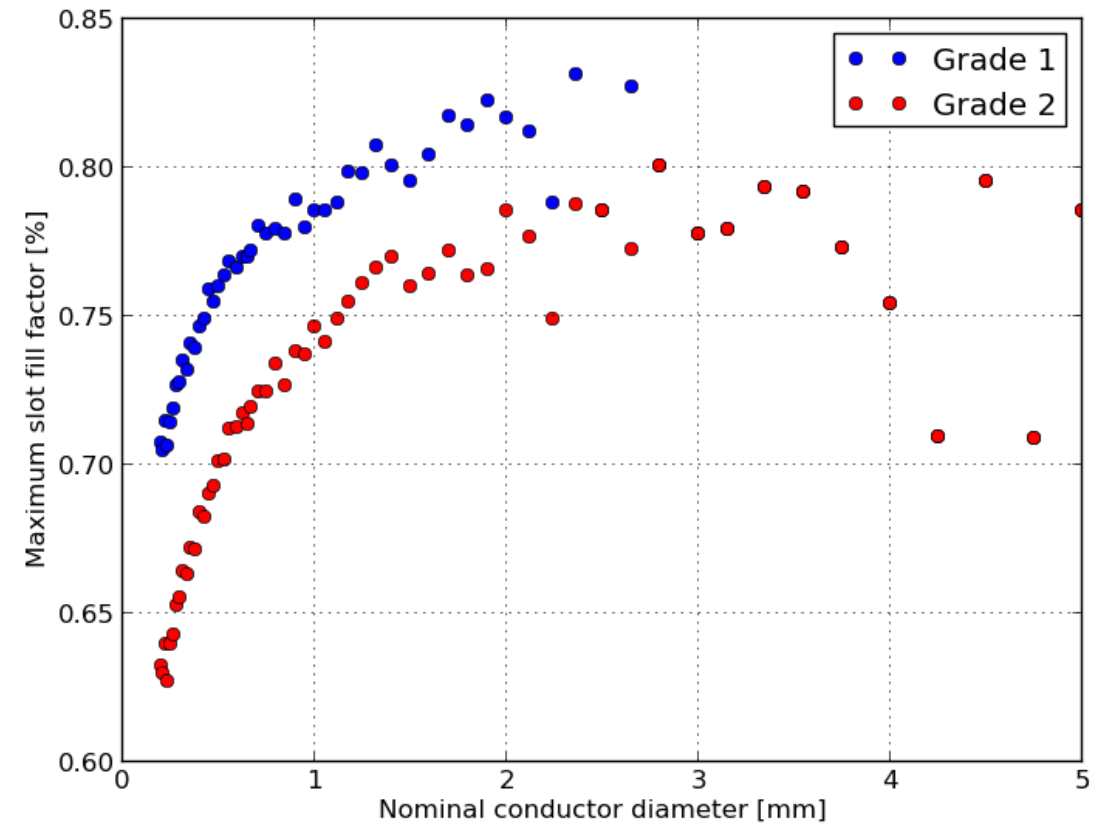
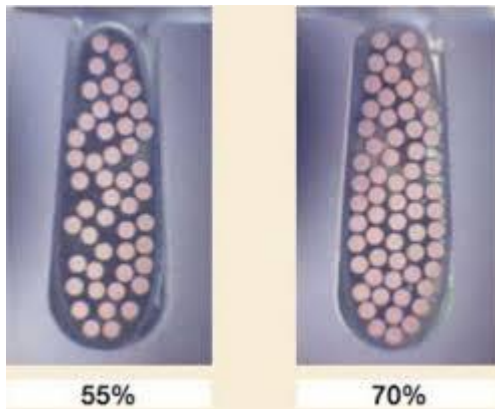


Fig. 2 Maximum slot fill factor as a function of insulation grading and nominal conductor diameter according to IEC 60317-0-1.

<https://www.emetor.com/glossary/slot-fill-factor/>

Tekercselés kör vezetővel



Tekercselés formavezetővel

➤ Horonykitöltés nő

	Conventional model		New-generation model
Appearances	Generation 6 Generation 8   Compared to Generation 6 Stator core diameter about 5% smaller		Generation 9  Compared to Generation 6 Stator core diameter about 10% smaller
	Cross-section of slot   Fill factor about 60% Fill factor about 72%		 Fill factor about 85%

Forrás: Mitsubishi ※Example of generator and motor-generator for the vehicle

Tekercselés kör vezetővel

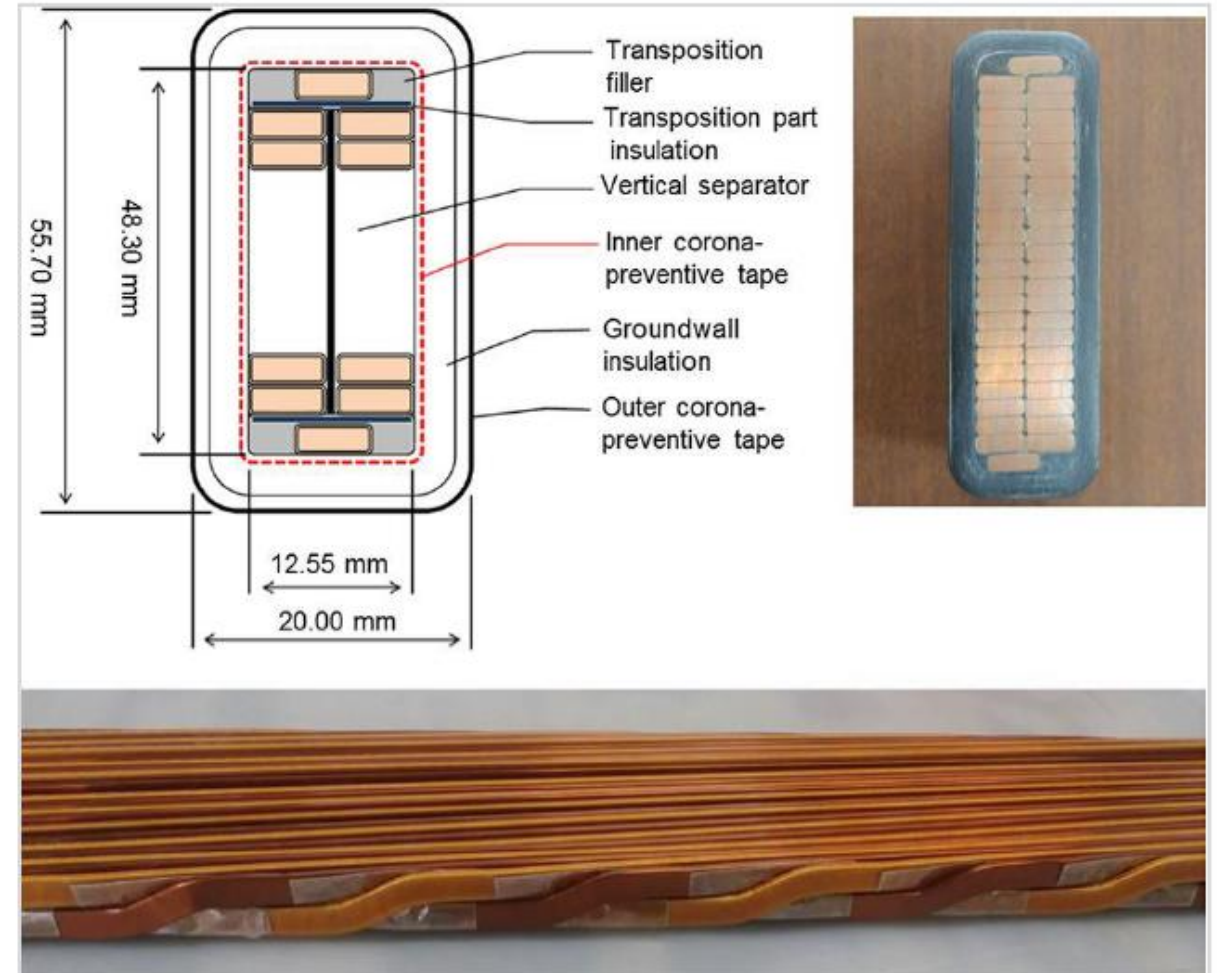
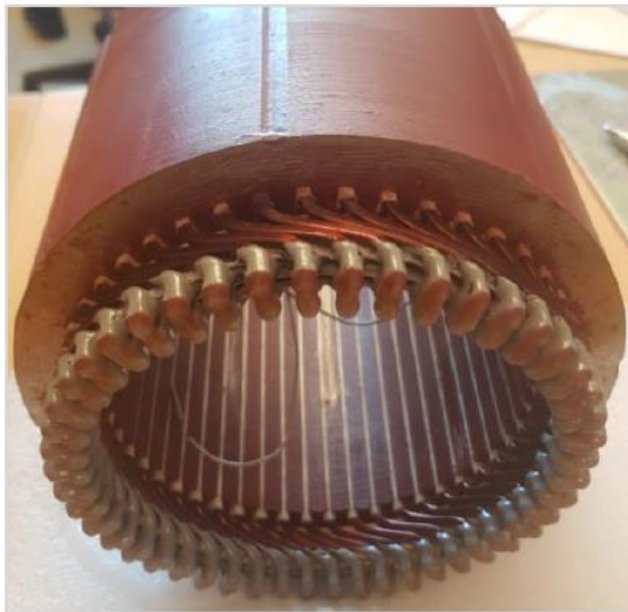
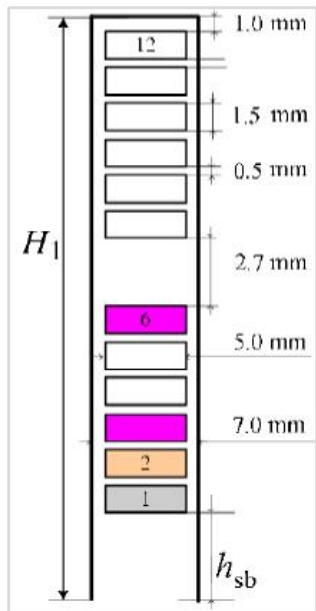
Tekercselés formavezetővel



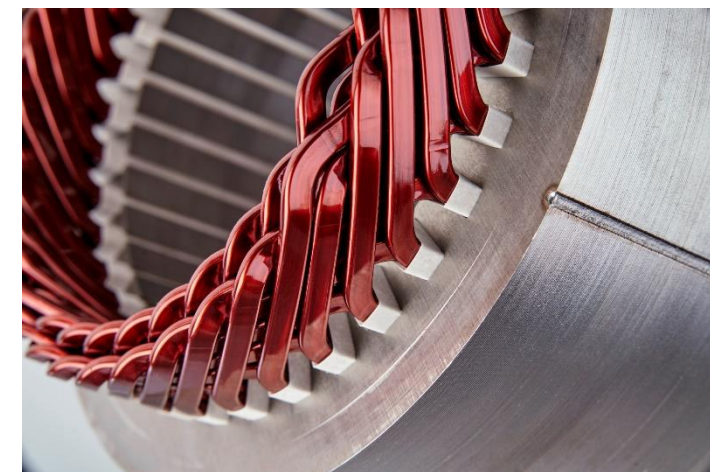
Konstrukciós megoldások a veszteségek csökkentésére

› Formatekerccselés + fonott tekercselés

- › Nagyfeszültségen régóta egyeduralkodó
- › Járműhajtásokban gyorsan terjed



Hairpin elosztott tekercselés



Tekercselés kör vezetővel



Tekercselés formavezetővel



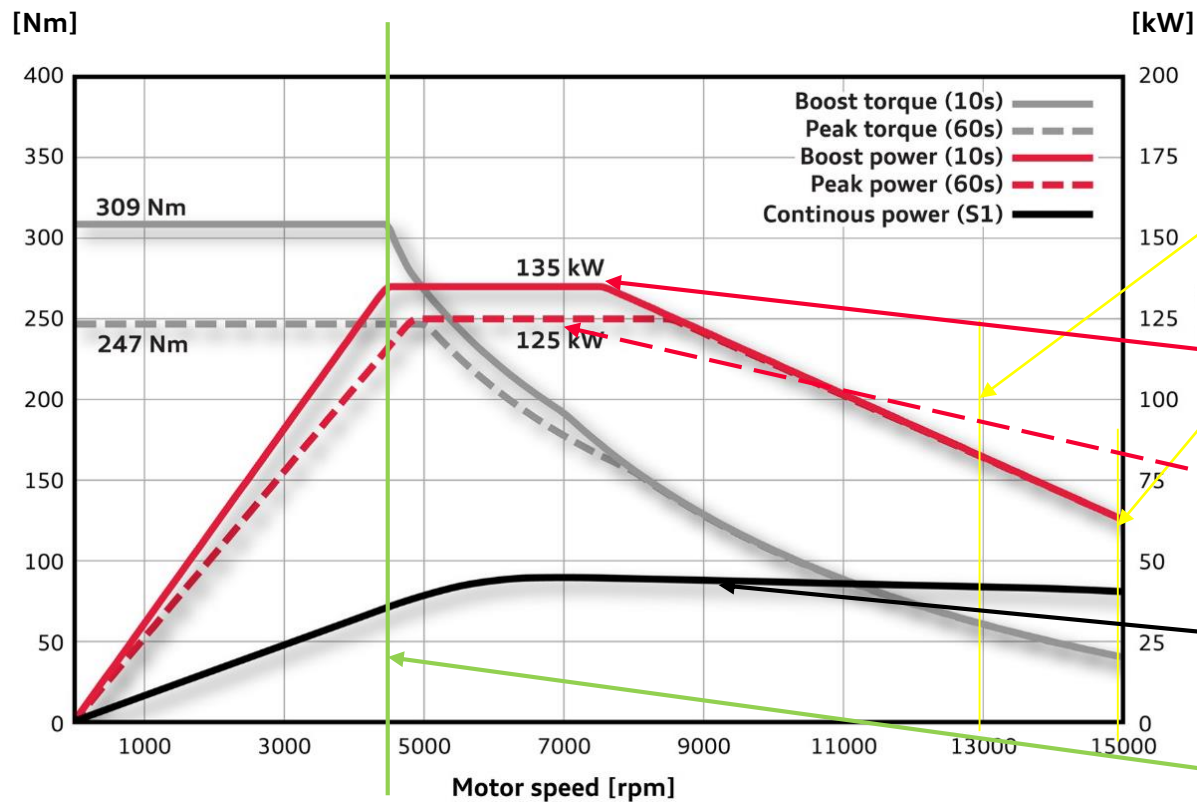
Hairpin tekercselés



Hűtés

A villamos gép (és teljesítményelektronika) üzemi határai, túlterhelés

APA250 hajtás teljesítmény és nyomaték jelleggörbe



Mechanikai alkatrészek élettartama miatti fordulatszám-korlát

Vezérlési stabilitás miatti fordulatszám-korlát

Teljesítményelektronika rövid idejű áramkorlátja

Teljesítményelektronika állandósult áramkorlátja

Motor melegedése miatti hosszútávú teljesítménykorlát

A mezőgyengítés határa: A DC-feszültségből adódik

rpm

Hz

A

°C

°C

V

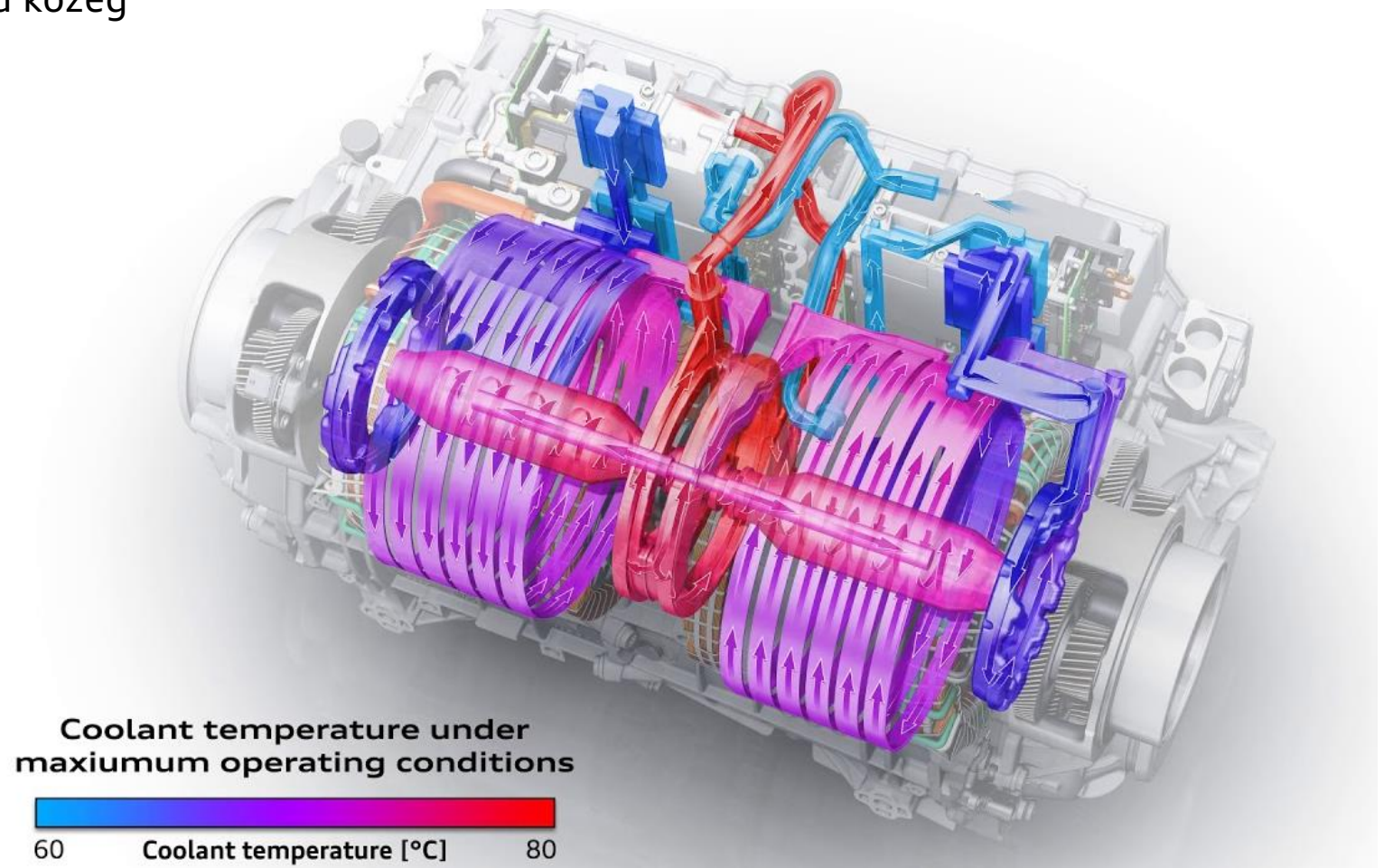
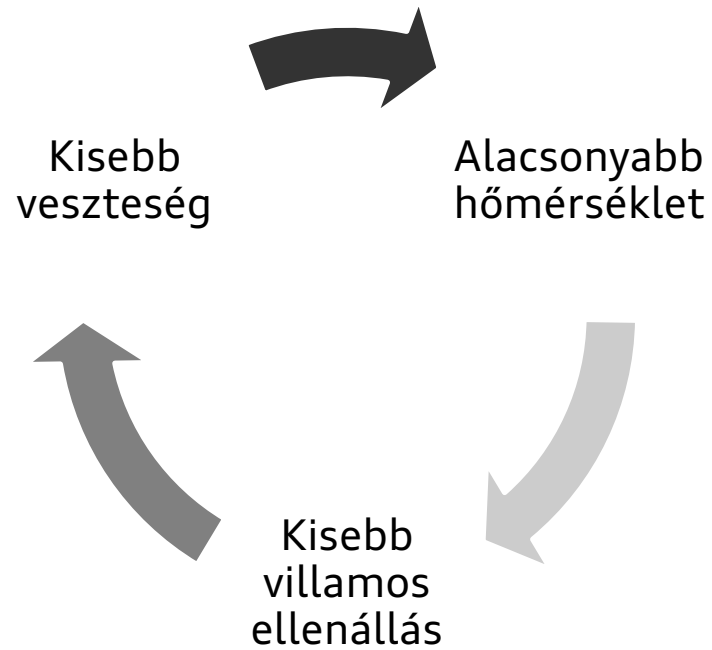
Boost teljesítmény

Boost nyomaték

135 kW **309 Nm**

Konstrukciós megoldások a veszteségek csökkentésére

- › Jobb hűtés
 - › Minél nagyobb hőelvonó képességű közeg
 - › Minél közelebb a hőforráshoz



Forgórész belső hűtése (víz-glikol) - Audi e-tron (2018)

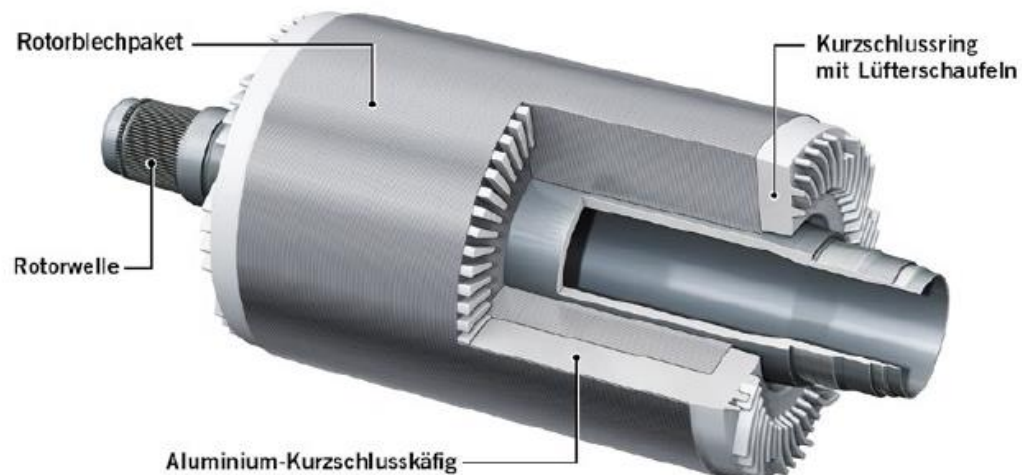
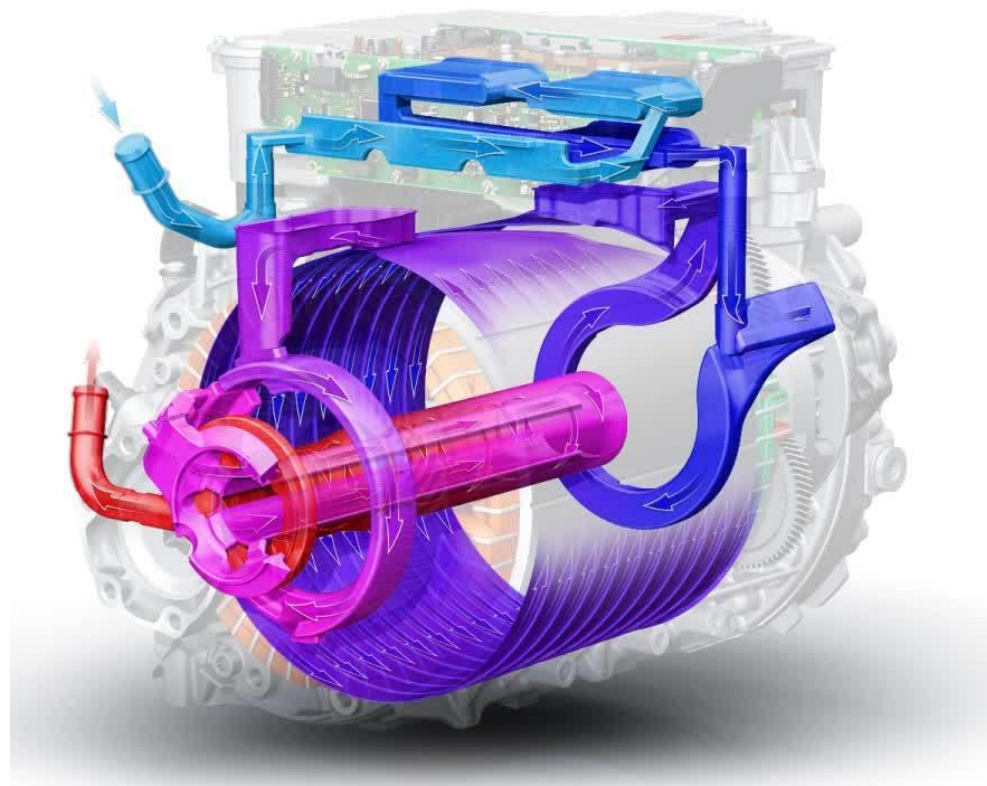


BILD 5 Aufbau des Rotors mit stanzpaketiertem Blechpaket, gegossenem Kurzschlusskäfig aus Aluminium und Lüfterschaufeln für optimale Entwärmung (© Audi)



Léghűtés

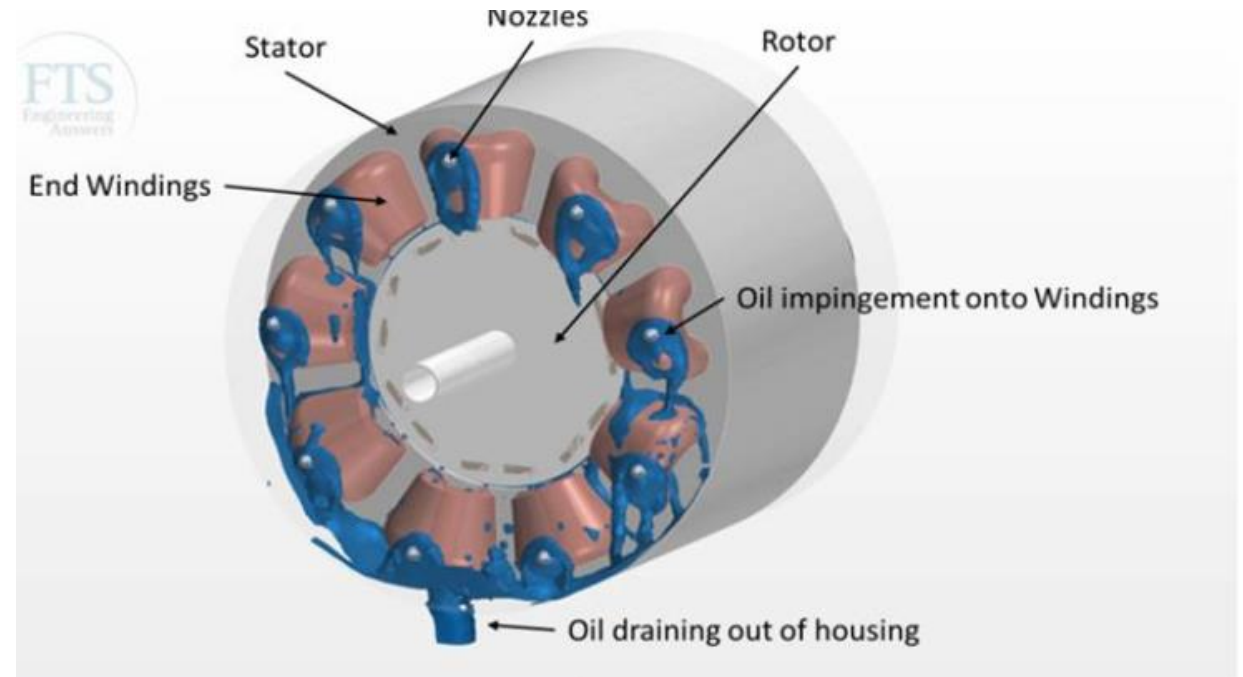
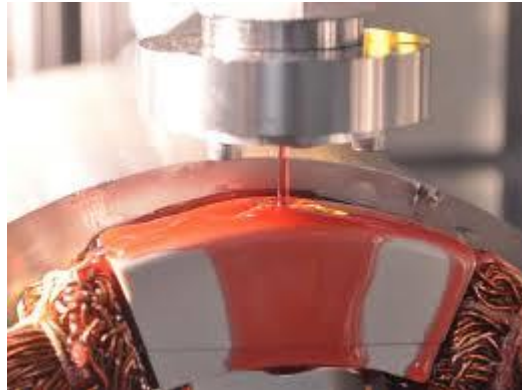
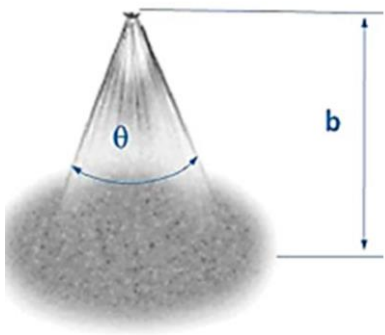


Víz-glikol hűtés



Szórt olaj hűtés

- Állórész tekercsfejek és/vagy forgórész hűtése szórt olajozással, olajpumpa segítségével
- (nozzle/ jet)



Légűtés



Víz-glikol hűtés

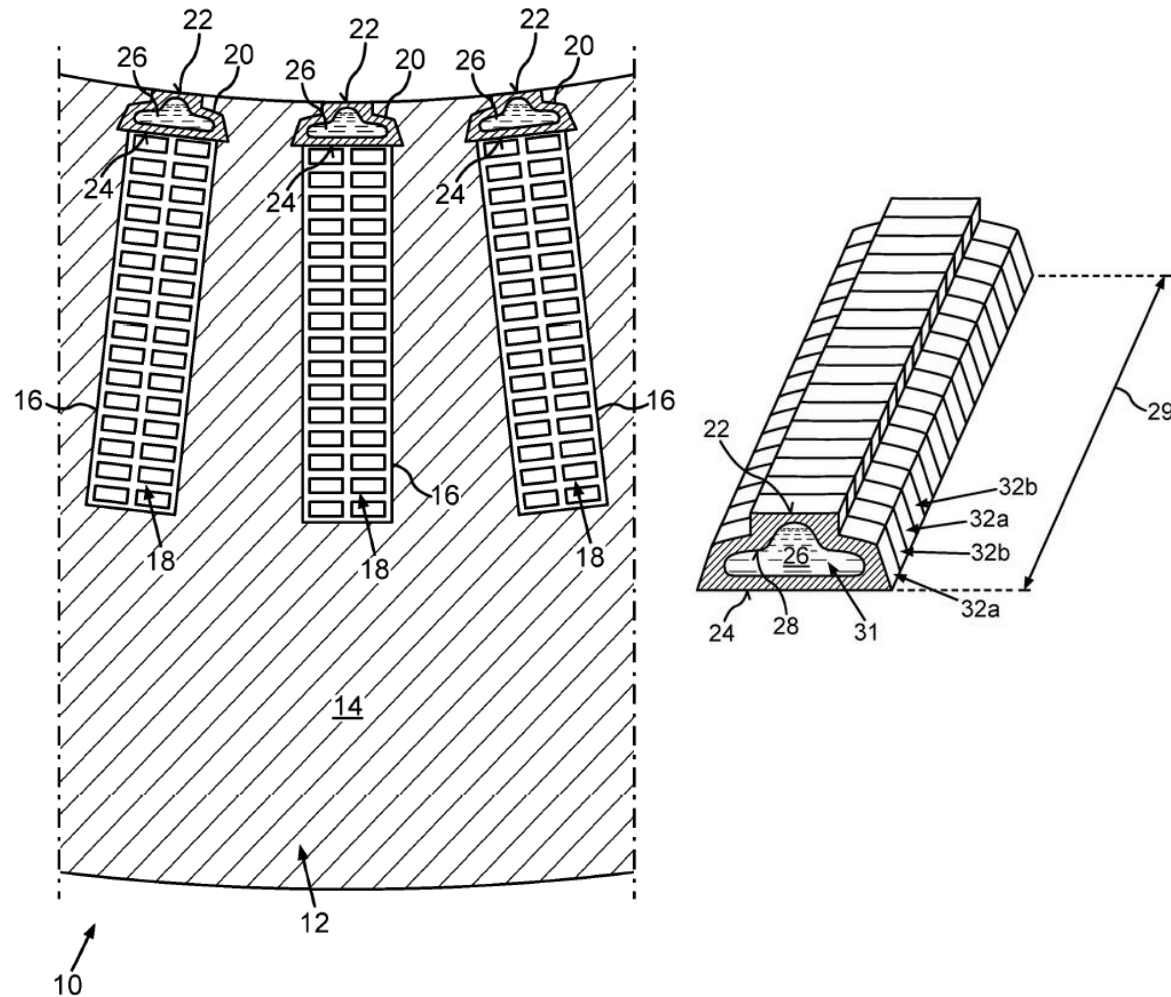


Szórt olajhűtés

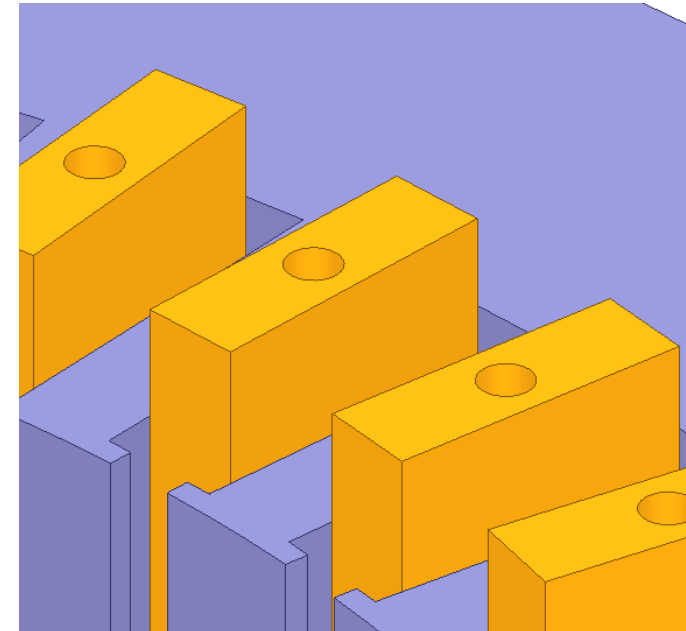


A hűtés helye / a veszteség helye

- Példa: Hűtött, 3D nyomtatott horonyzáró ék
- <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DDE102019214293A1>

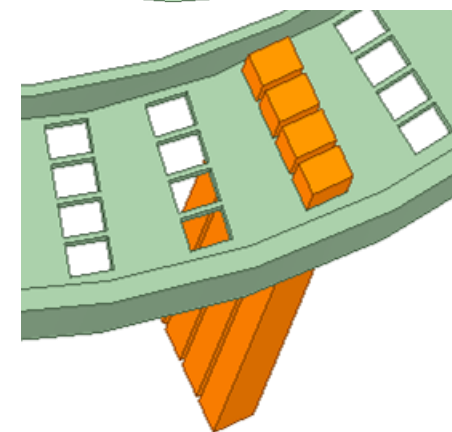
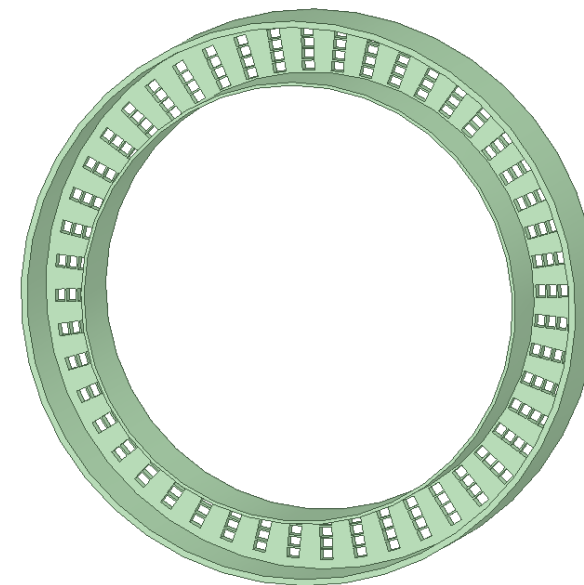
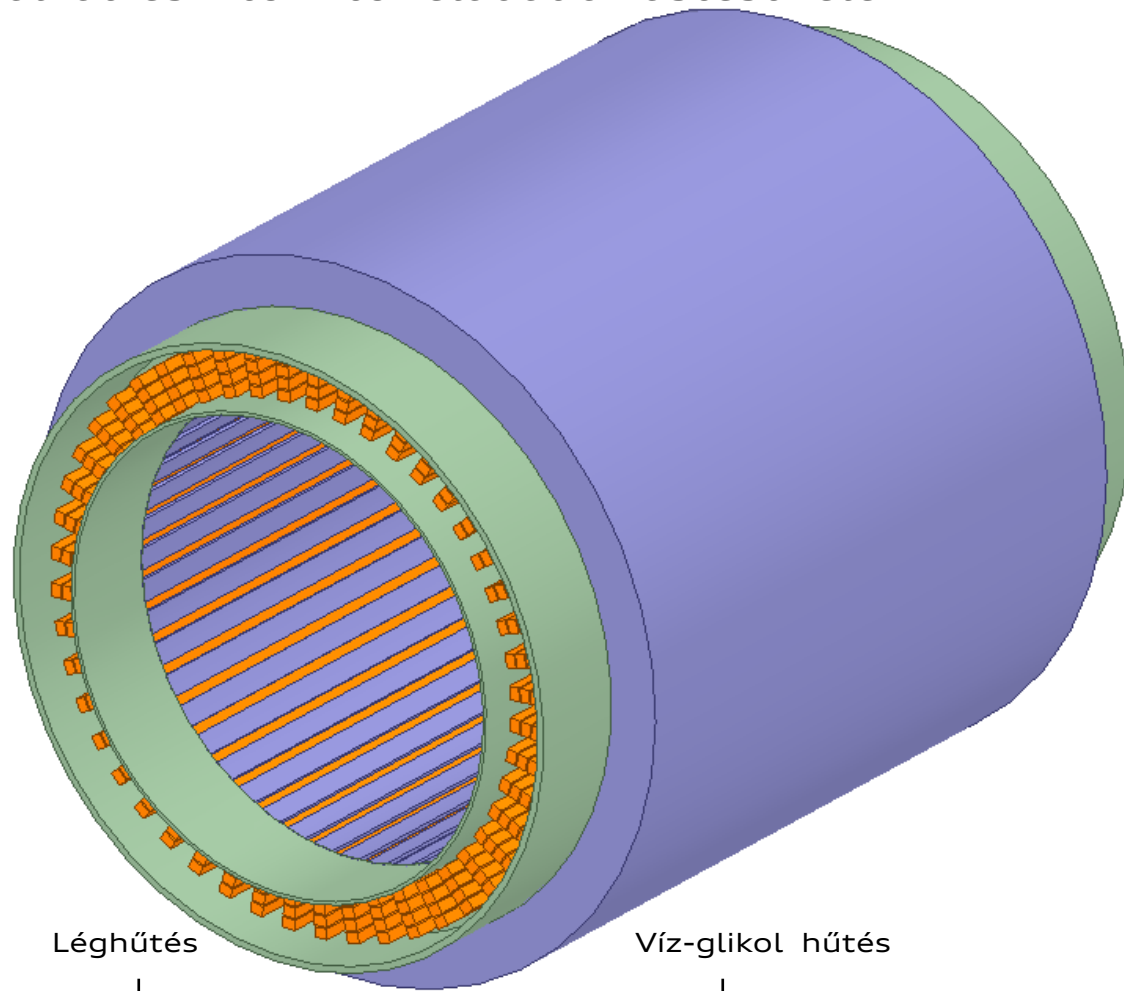


- Példa: Hűtőcsatornával ellátott vezető

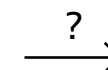


Bemerített olaj hűtés – csak tekercsfejek

- Zöld alkatrész: tömítő feladat a vastest felé



Szórt olajhűtés



Bemerített olaj hűtés?
Hőcsövek?

Légűtés

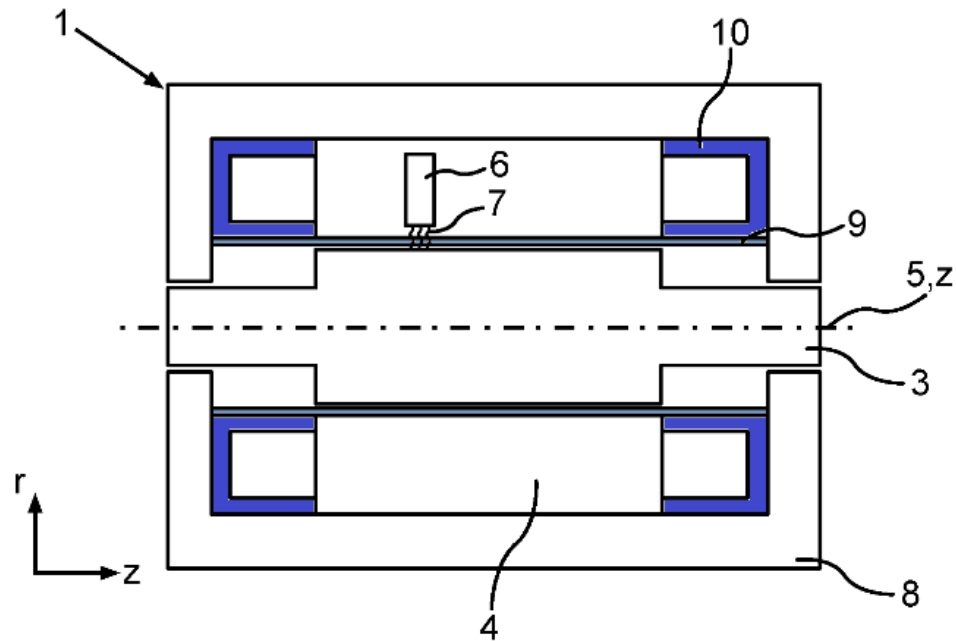
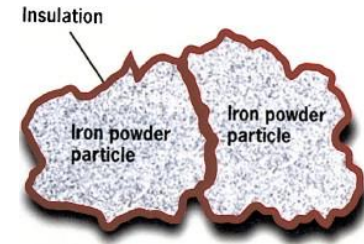
Víz-glikol hűtés



Bemerített olaj hűtés – egész állórész

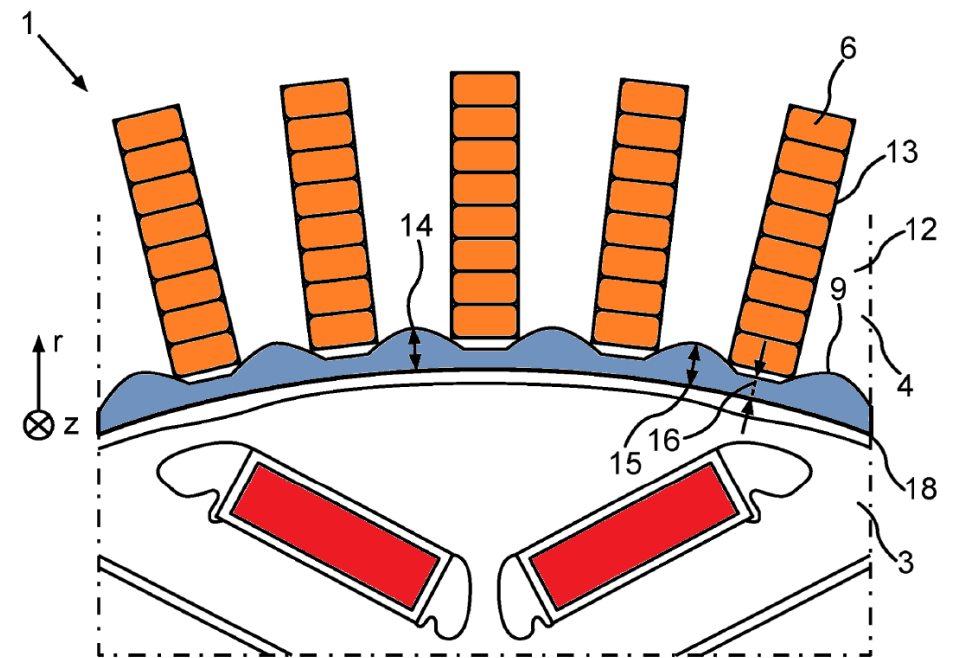
- Példa: SMC (soft magnetic composite) mágnesezhető anyagból készült állórész tömítő gyűrű (légrés felé tömít)

➤ <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DDDE102019210526B3>



Léghűtés

Víz-glükol hűtés



Szórt olajhűtés

?

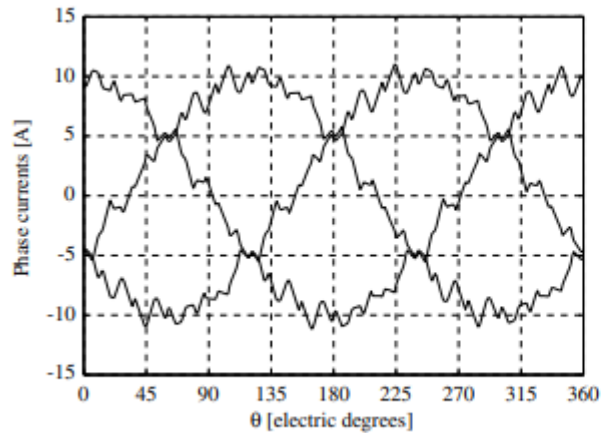
Bemerített olaj hűtés?
Hőcsövek?



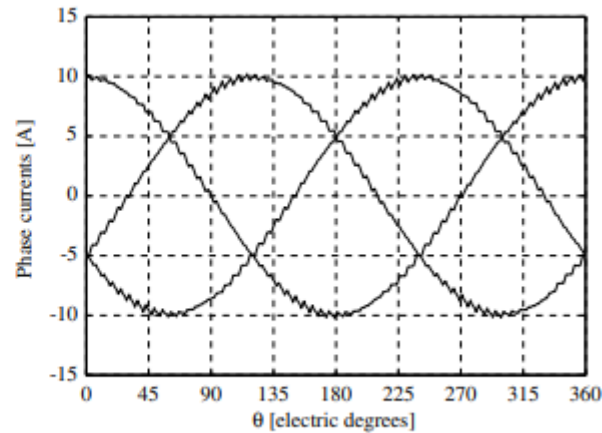
Szabályozástechnika

Frekvencia, áram, feszültség

Kapcsolási veszteségek csökkentése

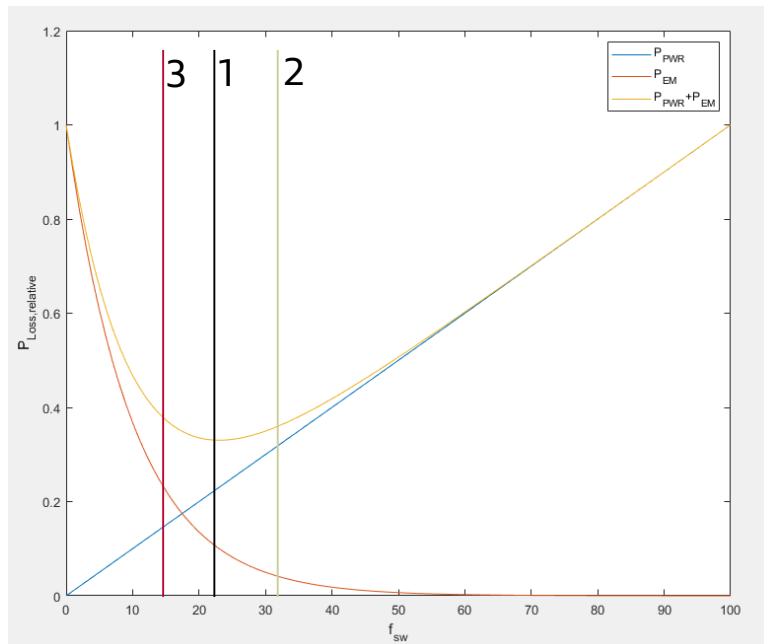


(a) 5 kHz



(b) 20 kHz

Villamos gép áramfelvétele 5 kHz-es kapcsolási frekvencia és 20 kHz-es kapcsolási frekvencia esetén



Kapcsolási veszteségek megoszlása a frekvencia [kHz] függvényében

Az áramhullámosság minden gép-akatrészben növeli a veszteségeket.

A frekvencia növelése csökkenti az áramhullámosságot, de növeli a kapcsolási veszteségeket a teljesítményelektronikában.

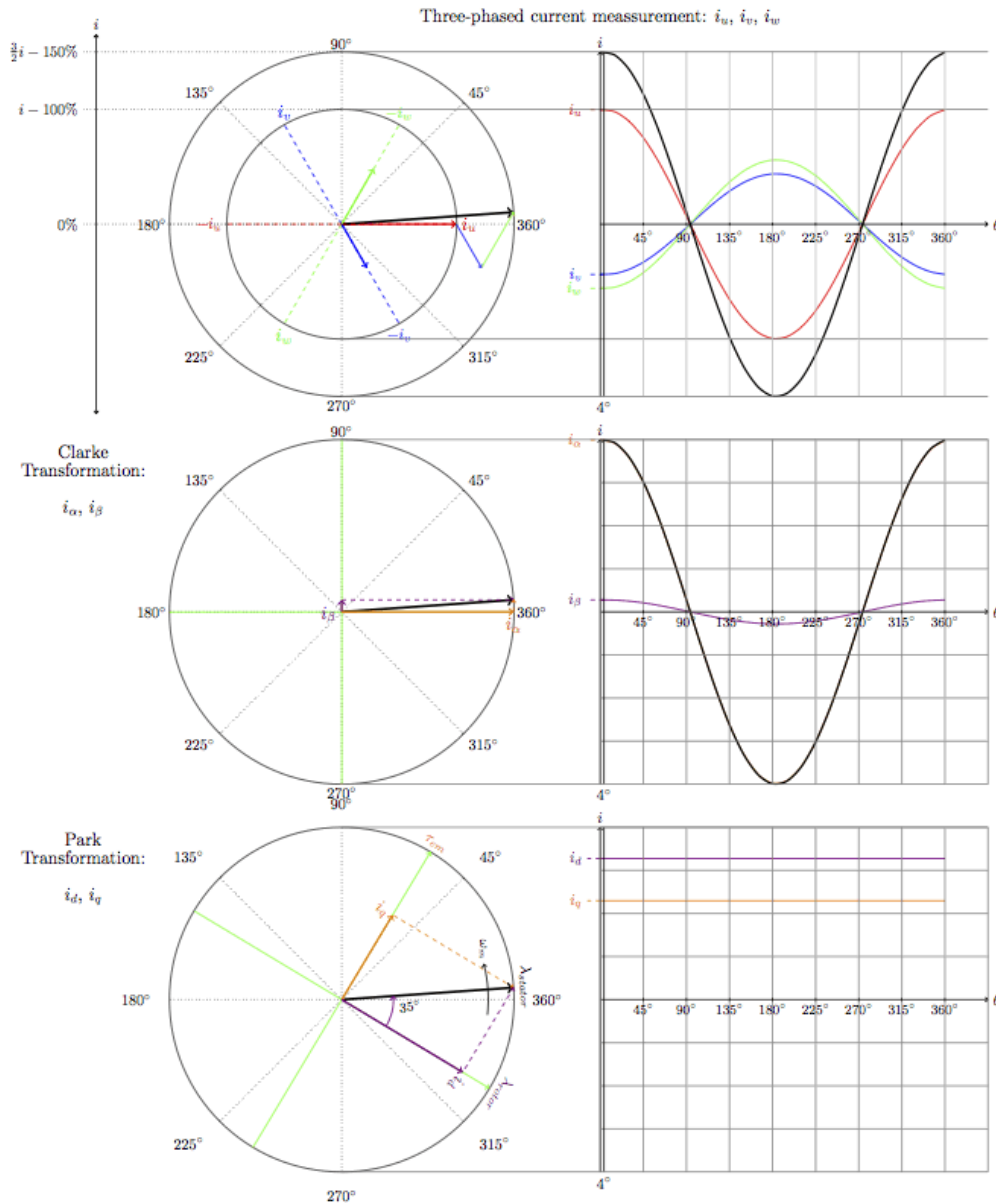


Minden munkapontban van egy optimális kapcsolási frekvencia, ahol az eredő veszteség minimális.

Változik a hőterhelés eloszlása is:

- 1: Veszteségi optimum, legjobb hatásfok
- 2: Nagyobb veszteség, de hidegebb a motor
- 3: Nagyobb veszteség, de hidegebb a teljesítményelektronika

A feszültséginverterrel táplált gép áramai



A három fázisáram nagysága az időben

-> ezt tudjuk mérni és szabályozni

Koordináta-transzformáció álló koordinátarendszerbe (Clark)

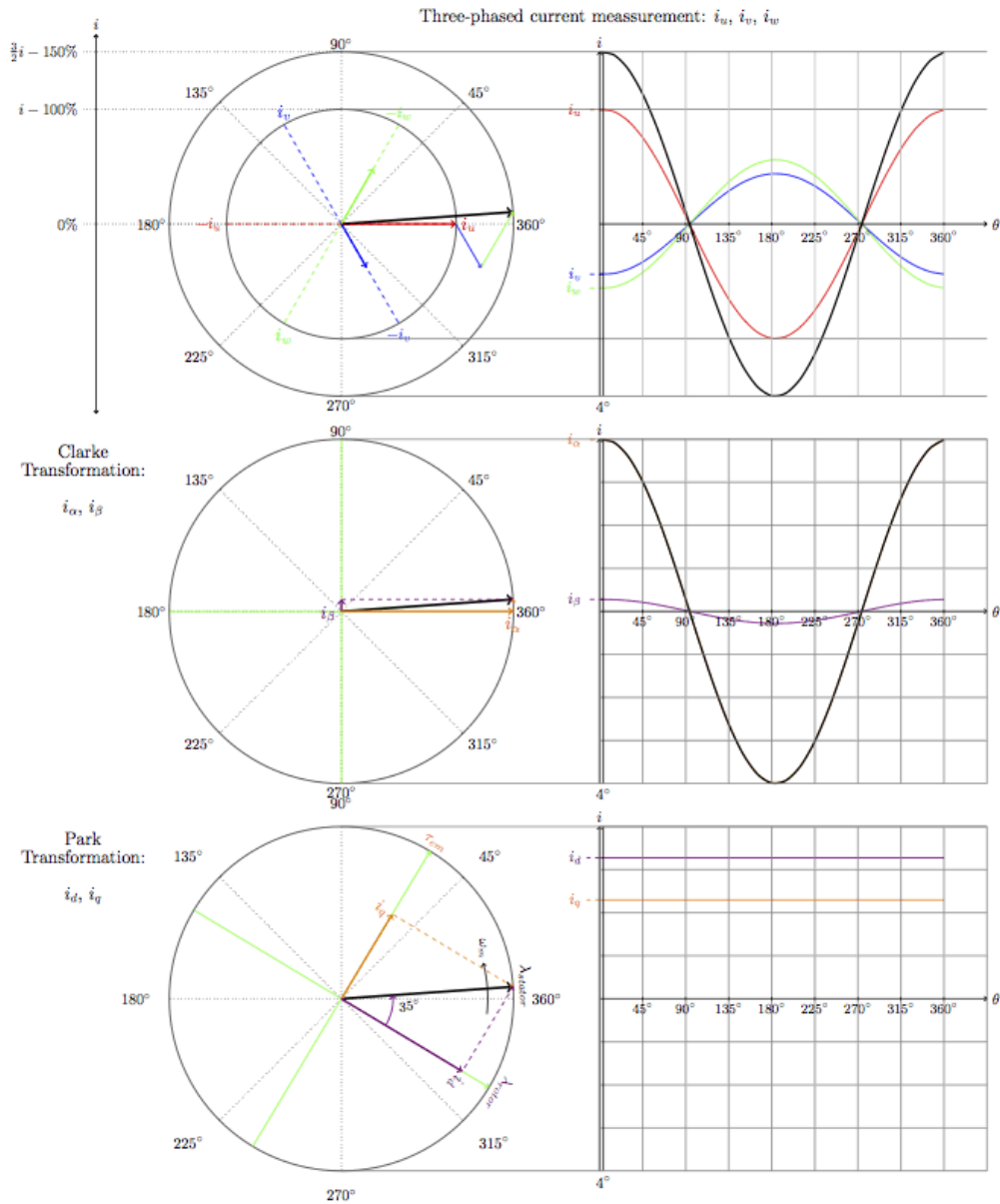
-> köztes állapot, két dimenzióban két független vektorral leírható

Koordináta-transzformáció forgó koordinátarendszerbe (Park)

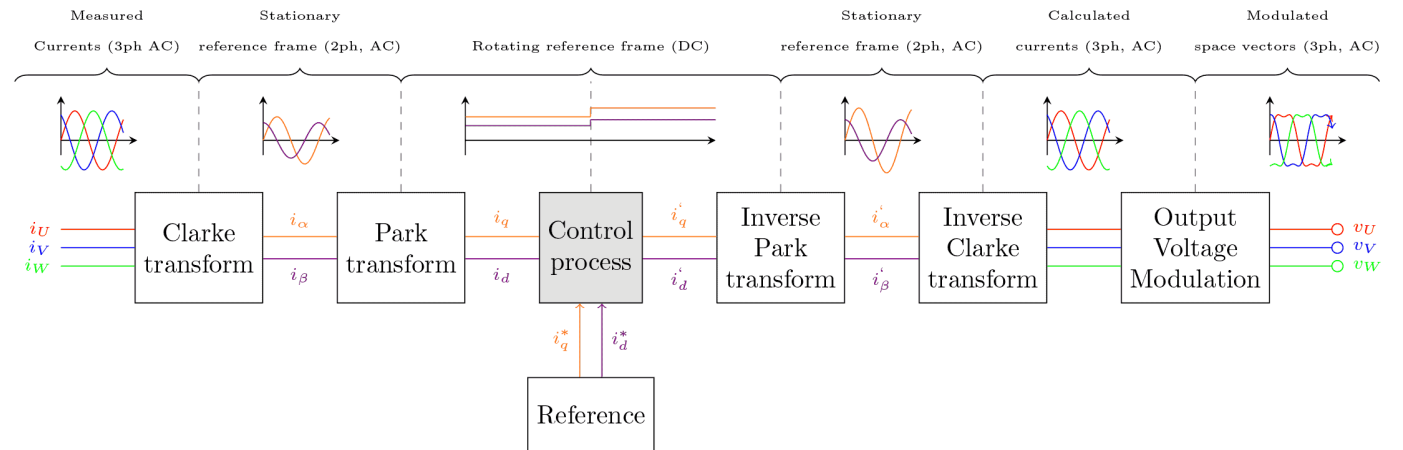
-> a koordinátarendszer együtt forog a rotor mágneses mezejével

-> így konstans alapjel adható

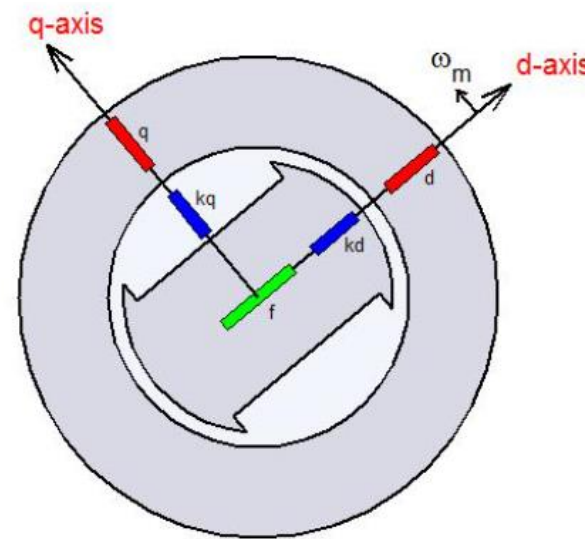
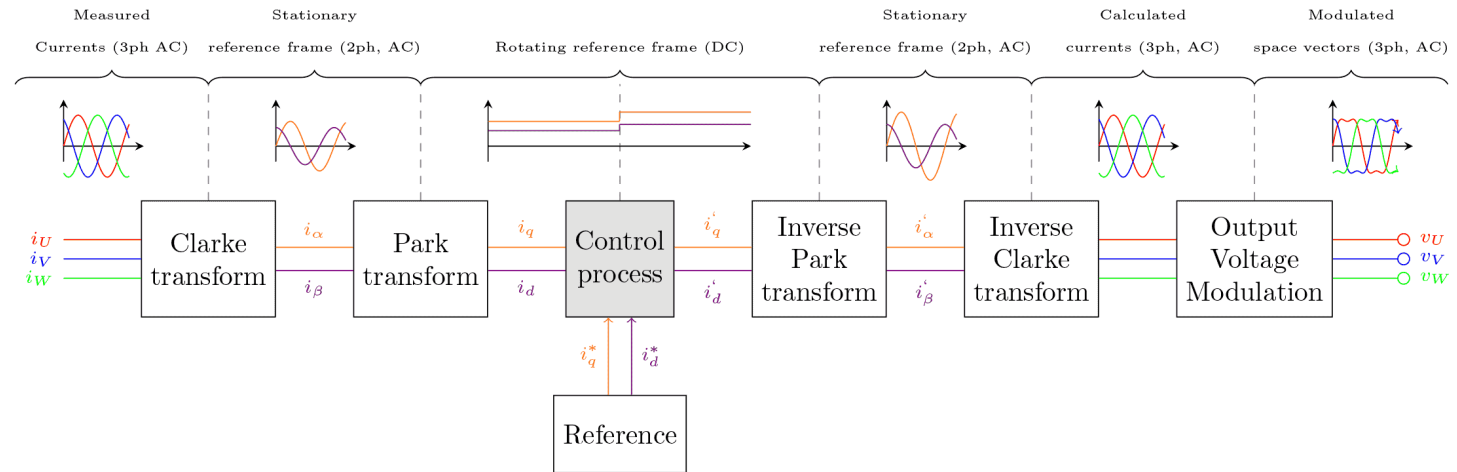
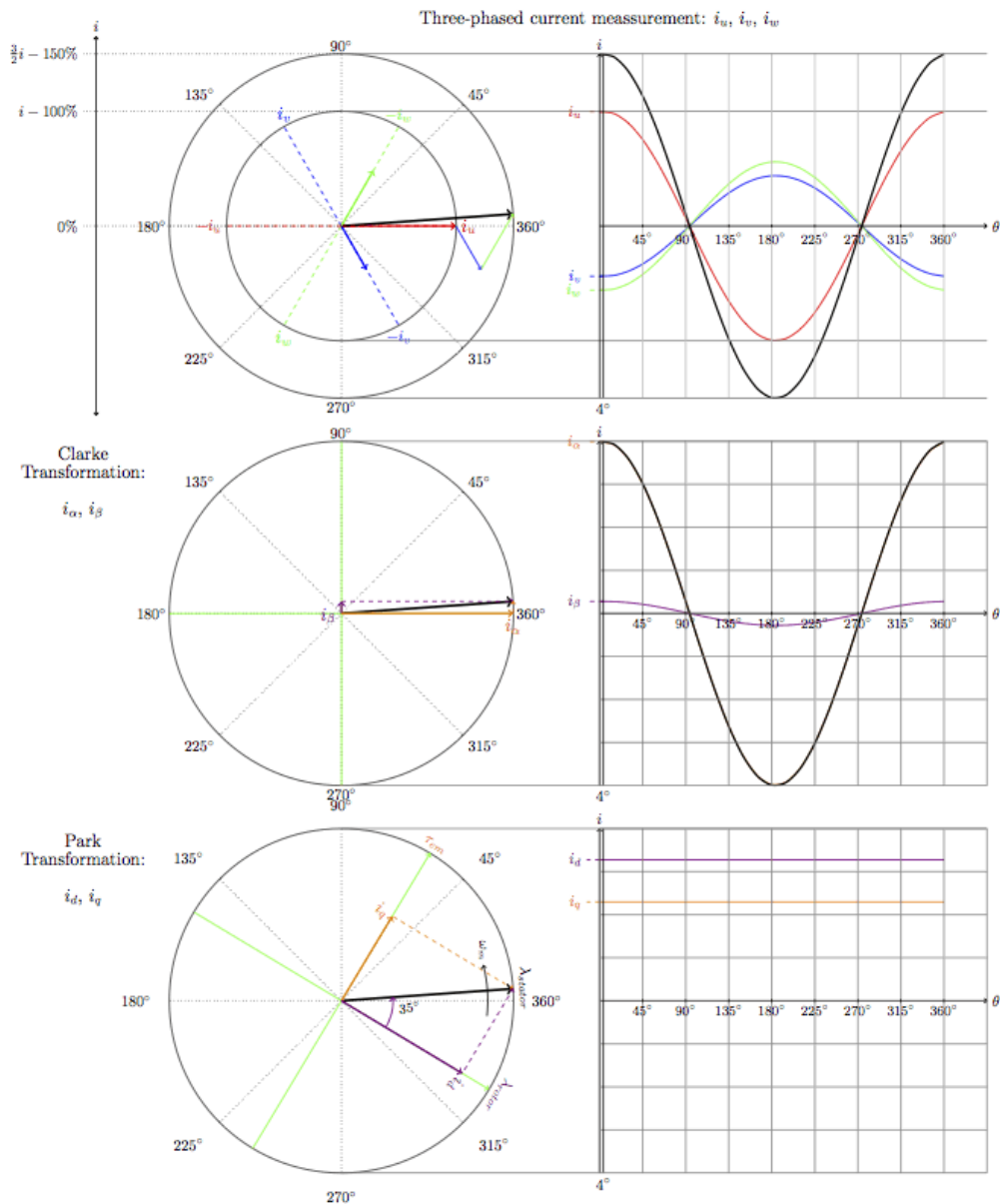
A feszültséginverterrel táplált gép áramai



Az áramszabályozáshoz szükséges koordináta-transzformációk:

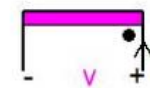


A feszültséginverterrel táplált gép áramai



armature
dampers
field

Synchronous machine windings

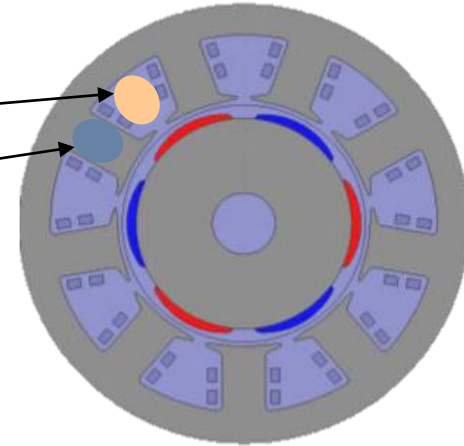


A háromfázisú áram két, forgó koordinátarendszerbeli áramkomponensre transzformálva

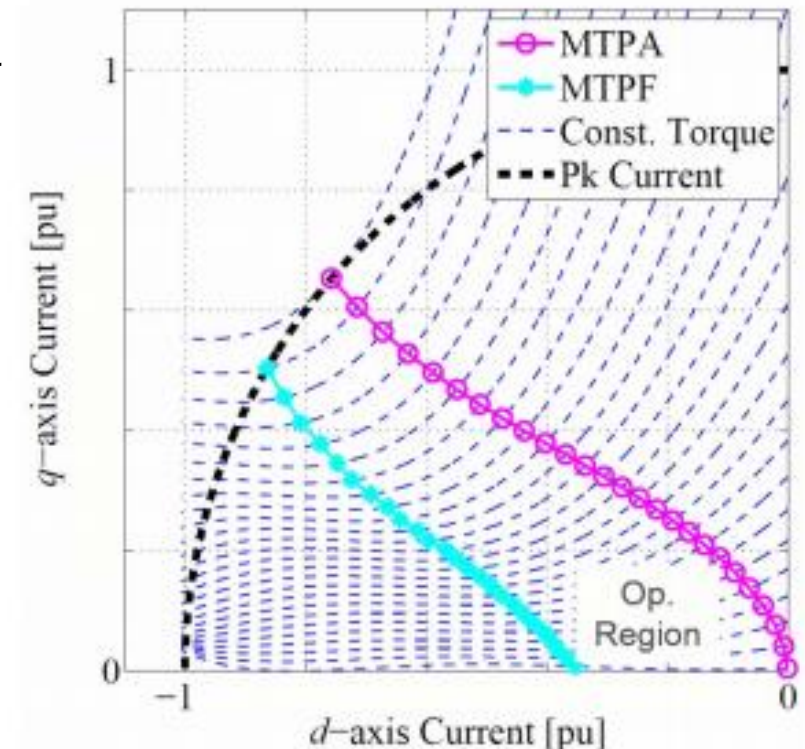
- i_d : mezőgyengítő komponens
- i_q : nyomatékképző komponens

MTPA, MTPF, MTPL – a hatásfok növelése az áramszabályozásban

- › A rézveszteség az átfolyó árammal arányos
- › A vasveszteség a mágneses indukcióval / fluxussal arányos



- › Adott fordulatszámon adott nyomatékot több i_q és i_d áramkomponenssel is ki lehet adni
 - › **MTPA – Maximal Torque per Ampere:** minimális rézveszteség
 - › A legkisebb áramhoz tartozó pont
 - › **MTPF – Maximal Torque per Flux:** minimális vasveszteség
 - › A legkisebb fluxushoz tartozó pont
 - › **MTPL – Maximal Torque per Loss**
 - › Valahol az MTPA és az MTPF között egy hatásfok-optimális pont
 - › Minden munkapontra meg kell találni

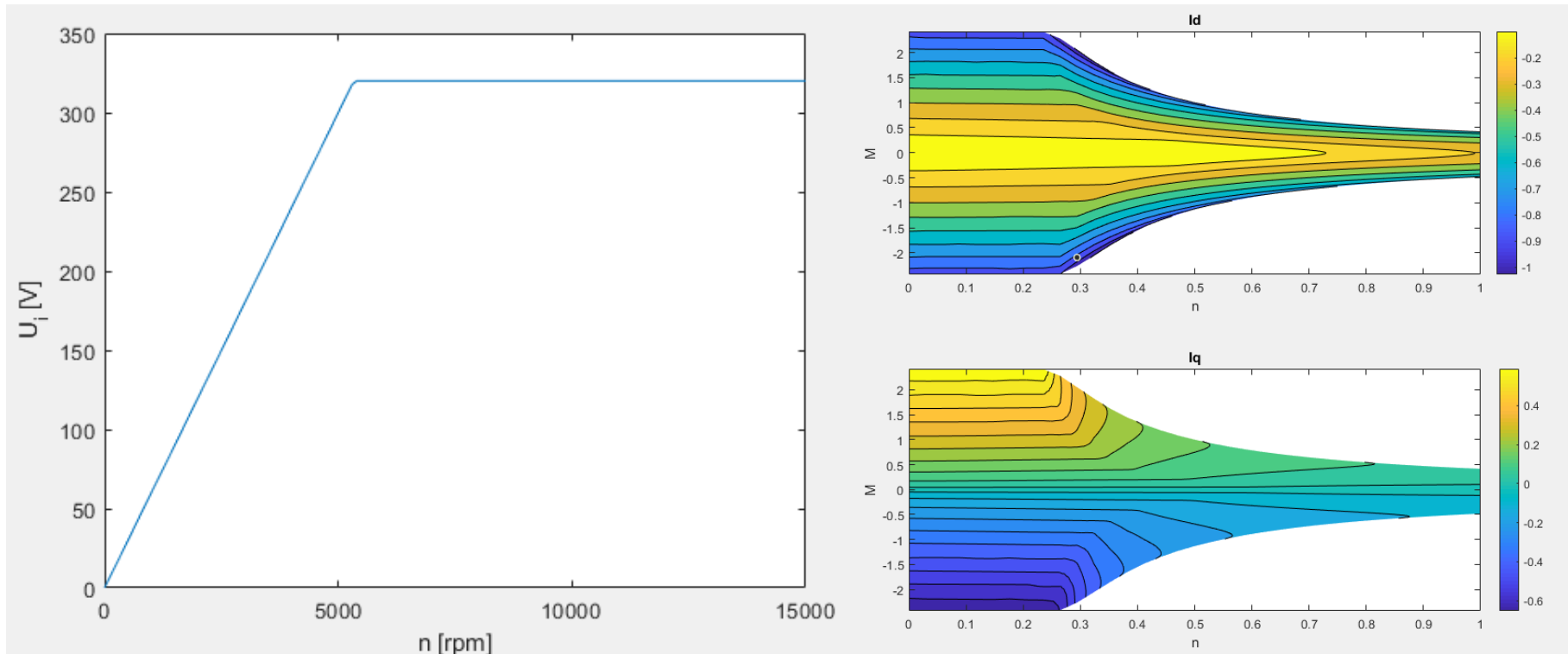


A mezőgyengítés tartománya

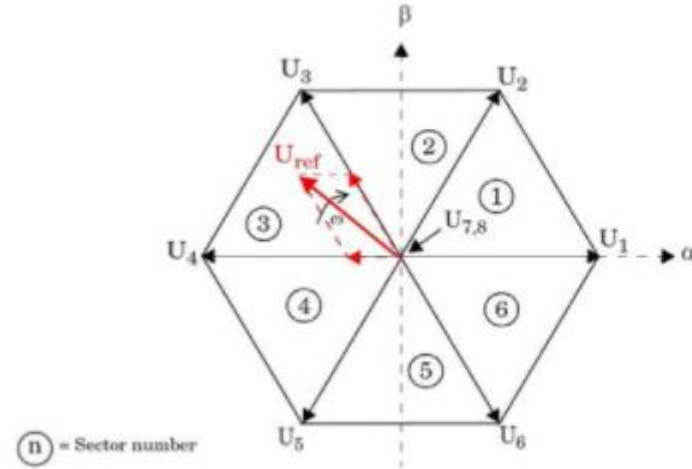
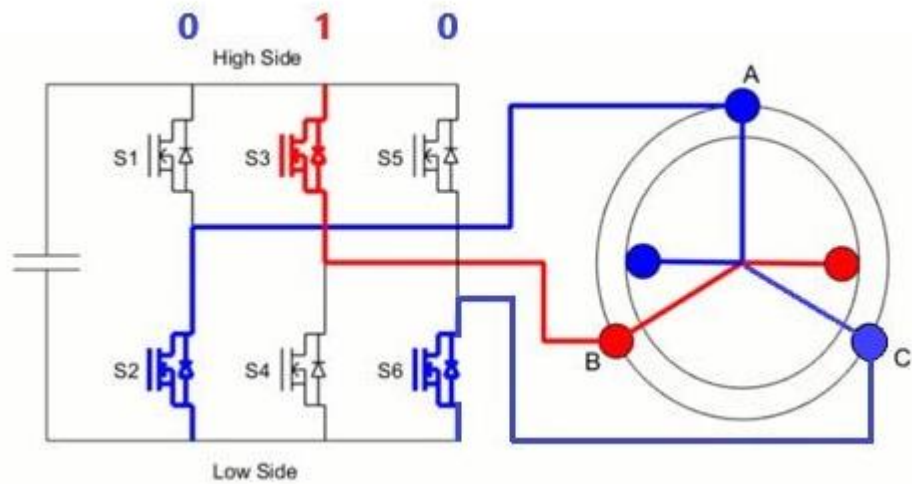
- Növekvő fordulatszámmal nő a gépben indukált feszültség

$$U_i \sim \omega \cdot \Psi_{mag}$$

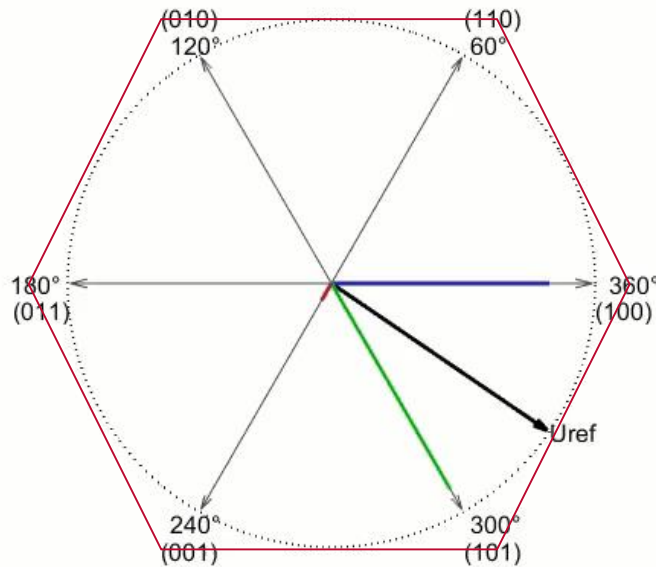
- Ha az indukált feszültség eléri az akkumulátor feszültségét, a fordulatszám nem tud tovább nőni
- Az id-áramot ekkor még 0 nyomaték esetén is növelni kell, ami csökkenti az indukált feszültséget – gyengíti a mágneses mezőt
- Minél hamarabb történik a mezőgyengítés, annál több energia „veszik el” a mezőgyengítő áramkomponensre



Feszültség-kivezérlés, moduláció



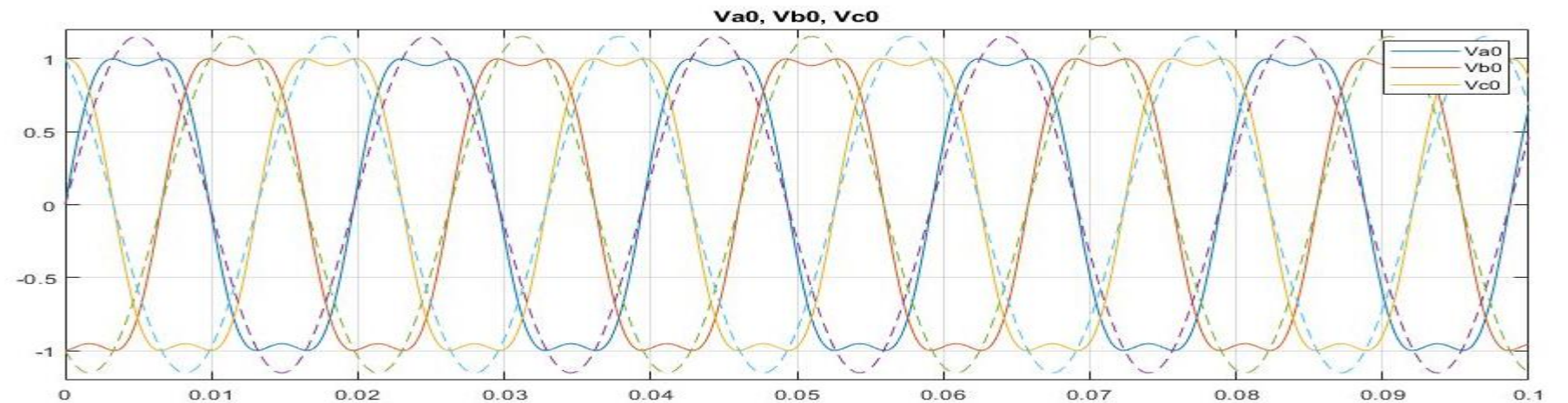
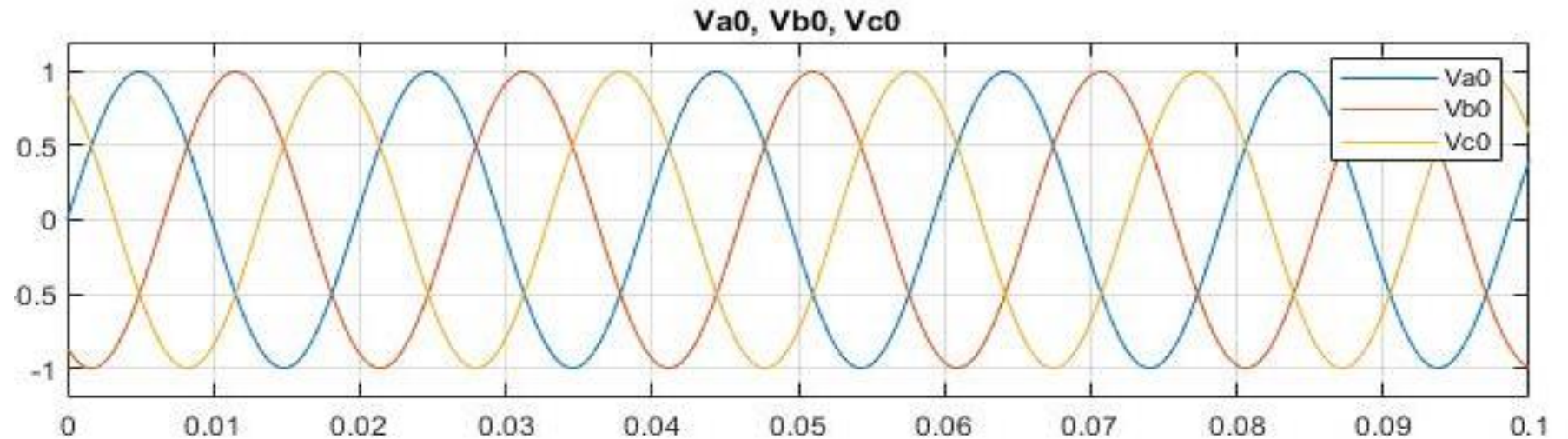
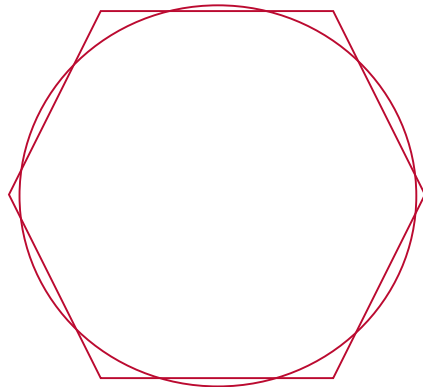
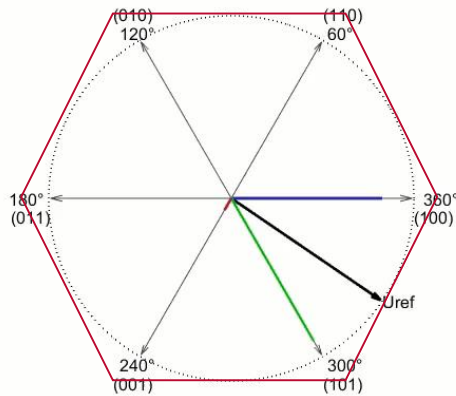
Space Vector	S1	S3	S5
U1	1	0	0
U2	1	1	0
U3	0	1	0
U4	0	1	1
U5	0	0	1
U6	1	0	1
U7	0	0	0
U8	1	1	1



Szabályosan csak a beírt körben mozoghat a feszültségvektor!
Innentől kezdve már kénytelenek vagyunk a mezőgyengítéshez nyúlni.

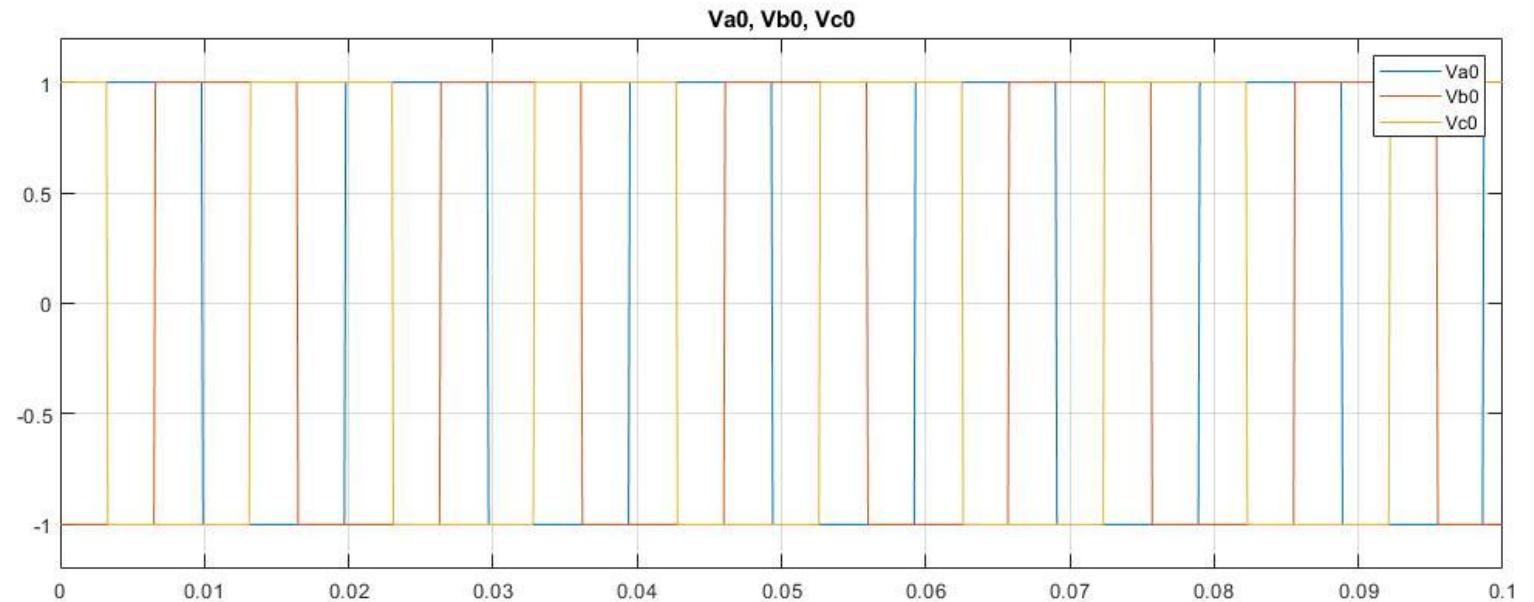
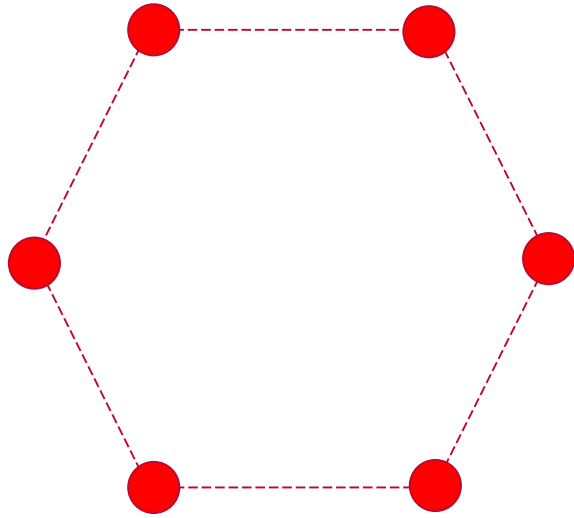
Vagy...

Túlmoduláció – A görbe ellapítása, Flat-Top



A piros kör az effektív érték – bizonyos pontokon kívül esik a hatszögön!

A túlmoduláció határa: a négyszögjel – szinkron kapcsolás, 6-Step



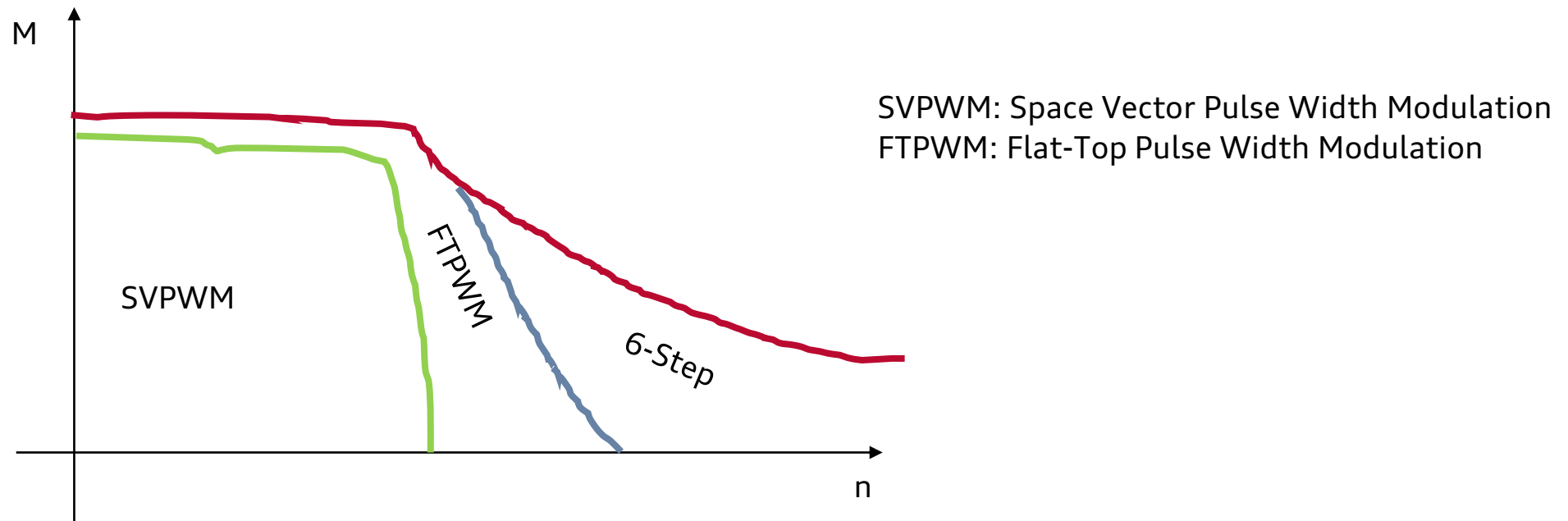
Nincs köztes kapcsolási állapot

Ez az elérhető legnagyobb moduláció

Nagy a felharmonikus-tartalma - > többletveszteségek

A feszültségvezérlési stratégia megválasztása

- › Szintén munkaponti optimalizációs feladat!



Visszatekintés, kulcsszavak

- Konstrukció:
 - Geometria
 - Anyaghasználat
 - Hűtés

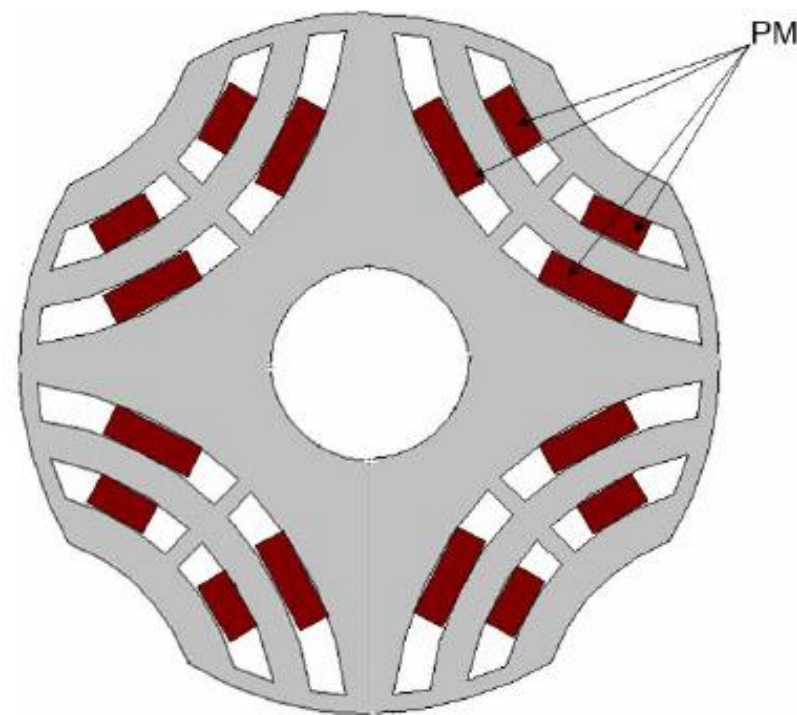
- Szabályozás
 - Kapcsolási frekvencia
 - Áramszabályozás – MTPL stratégia
 - Feszültségvezérlés – moduláció és túlmoduláció



Mit hoz a jövő? – szinkron reluktancia motor

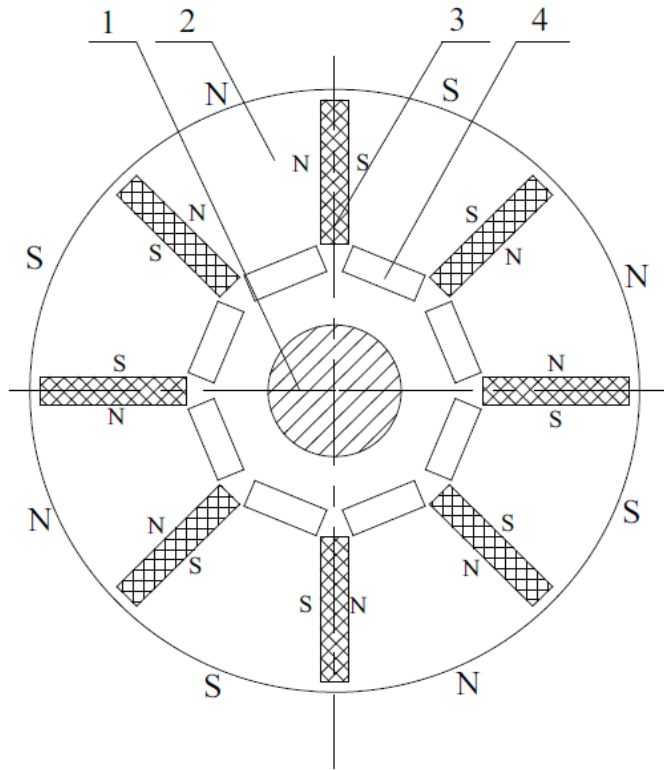


ABB, pumpahajtó motor



Kombinált: Reluktanciahatással erősített állandó mágneses rotor (ez már inkább a jelen)

Tangenciális mágneselrendezés



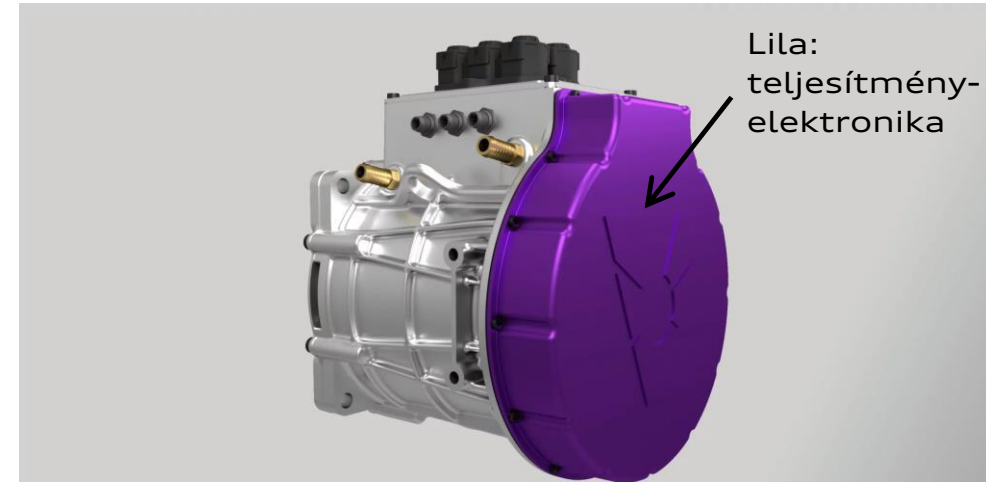
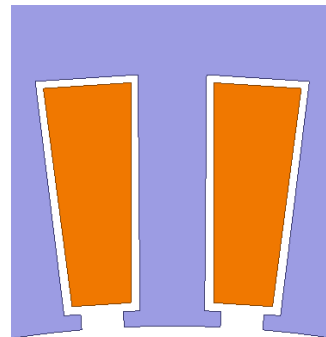
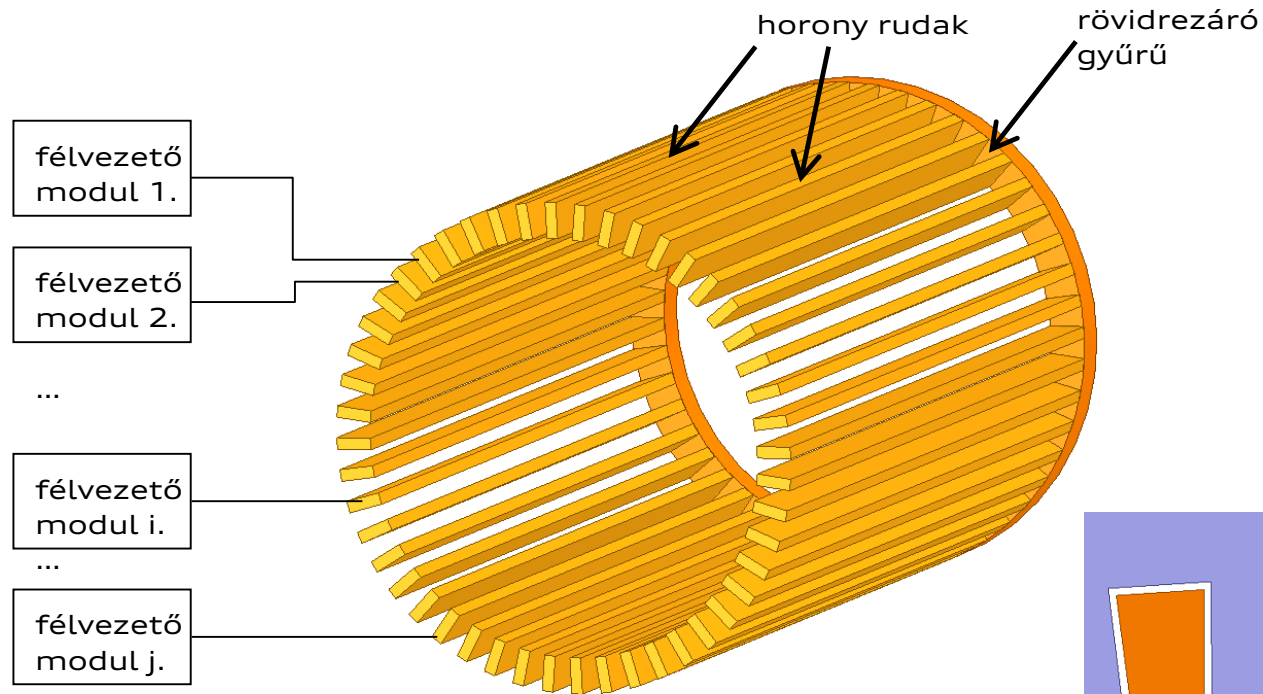
Nagy sebességű rotor



Akademischer Motorsportverein Zürich

Mit hoz a jövő? - Félketrec állórész tekercselés

- › Jelen technológia: pl. MOLABO / VOLABO (München) <https://molabo.eu/products/>
- › Technische Hochschule Nürnberg, Universität der Bundeswehr München, Dieter Gerling, G. Dajaku
- › Félketrec tekercselés (ISCAD - intelligent stator cage drive ;
- › iKSM - integrierte Käfig-Stator-Maschine)



Mit hoz a jövő? - Félketrec állórész tekercselés

- > Horonykitöltés nő ↗
- > Tekercsfej rövidül ↘
- > Menetszám ↘

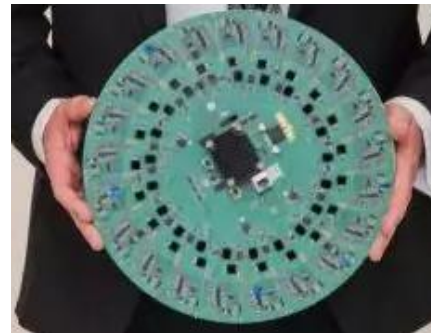


Fig. 1. Set-up of ISCAD: the aluminium bars inside the stator core are connected to a short circuit ring on the backside. A dedicated power electronics unit is connected to each aluminium bar.

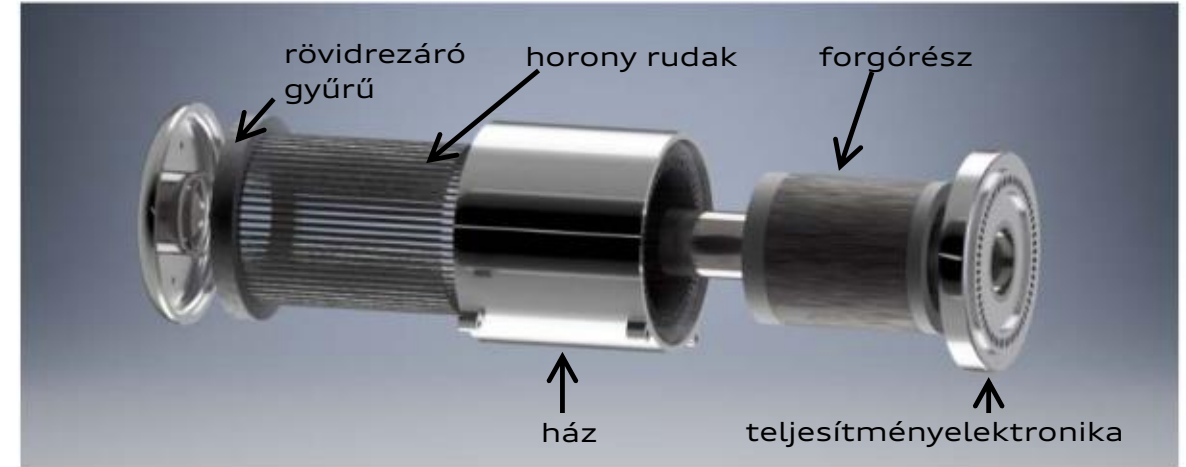
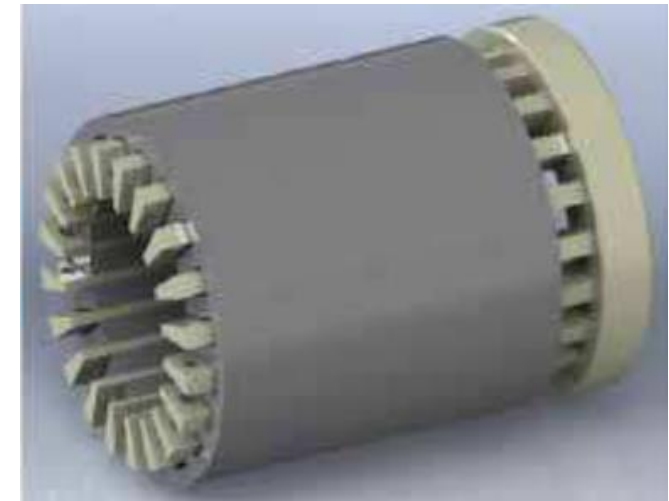
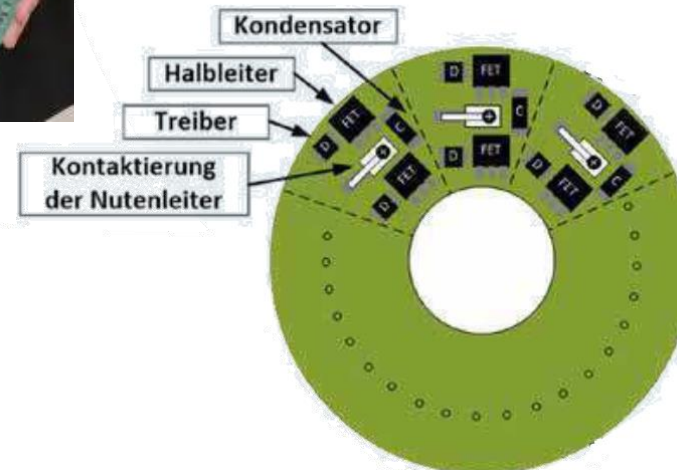


Fig. 1. Exploded view of a 60-phase ISCAD machine (from left: bearing shield, stator cage, stack of sheets with housing, rotor, bearing shield). The copper windings of conventional induction machines are replaced by aluminium bars with a short-circuit ring (stator cage).



**Köszönöm a
figyelmet**



Források

- › [Jedlik Ányos élete, fontosabb felfedezései és újításai \(e-villamos.hu\)](http://e-villamos.hu)
- › [History of the electric vehicle – Wikipedia](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_electric_vehicle)
- › [Villamos járművek](#) (Vincze Gyuláné, Balázs Gergely György)
- › [2.1.1 Evolution of Power Semiconductor Devices \(tuwien.ac.at\)](http://tuwien.ac.at)
- › P. Sergeant, H. Vansompel, L. Dupré and A. Van den Bossche, "Losses in VSI-PWM fed axial flux machines," *2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPE.2014.6910787.
- › [Vector control for dummies — Switchcraft](#)
- › B. Gallert, G. Choi, K. Lee, X. Jing and Y. Son, "Maximum efficiency control strategy of PM traction machine drives in GM hybrid and electric vehicles," 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2017, pp. 566-571, doi: 10.1109/ECCE.2017.8095833.
- › [Raumzeiger-Modulation - MATLAB & Simulink \(mathworks.com\)](https://www.mathworks.com)
- › Patrik Varecha, Pavol Makyš, Martin Sumega, Pavel Sovička, Power losses analysis in MOSFET 3-phase high current power inverter for automotive application area, *Transportation Research Procedia*, Volume 40, 2019,
- › Kuczmann et. al: Villamos gépek veszteségszámítása és mérése
- › [1973-as olajválság – Wikipédia \(wikipedia.org\)](https://en.wikipedia.org/wiki/1973_oil_crisis)
- › [EV-Volumes - The Electric Vehicle World Sales Database](#)
- › https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-basic-stator-winding-configurations-a-Distributed-with-SPP-1-b_fig16_3171949
- › <https://www.electric.amzracing.ch/>
- › <https://molabo.eu/products/>