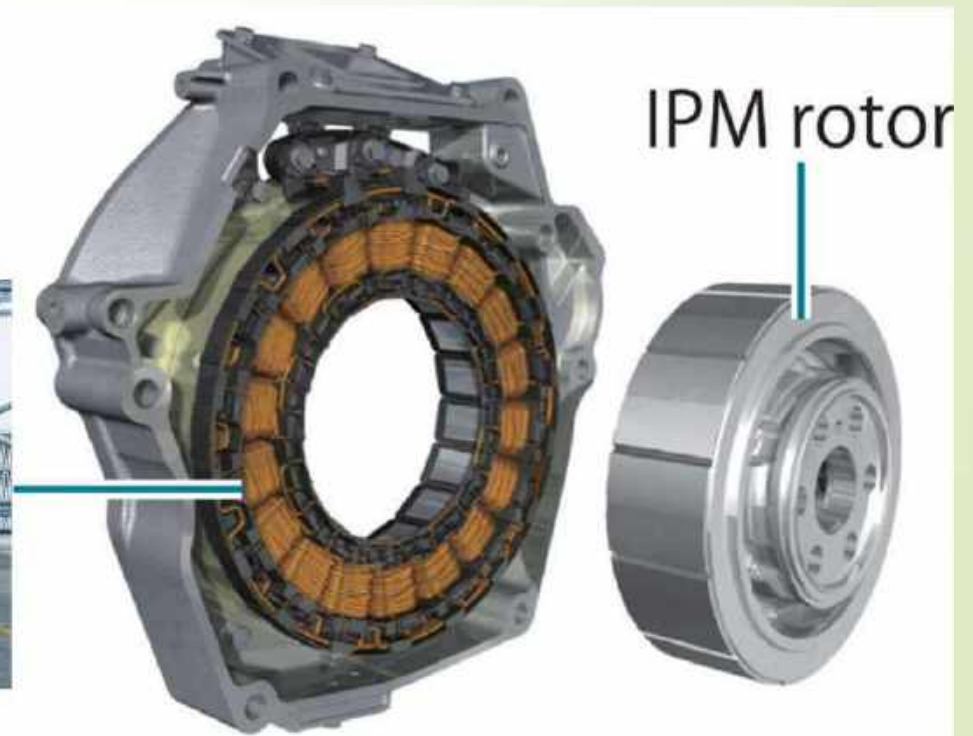


Rezultate ale unor cercetări recente din domeniul mașinilor electrice

Prof. Emerit dr. Ing. Aurelian Crăciunescu
Universitatea Politehnica din București
Facultatea de Inginerie Electrică



2018 ELECTRIC CAR
New EVs that are coming up



IPM rotor

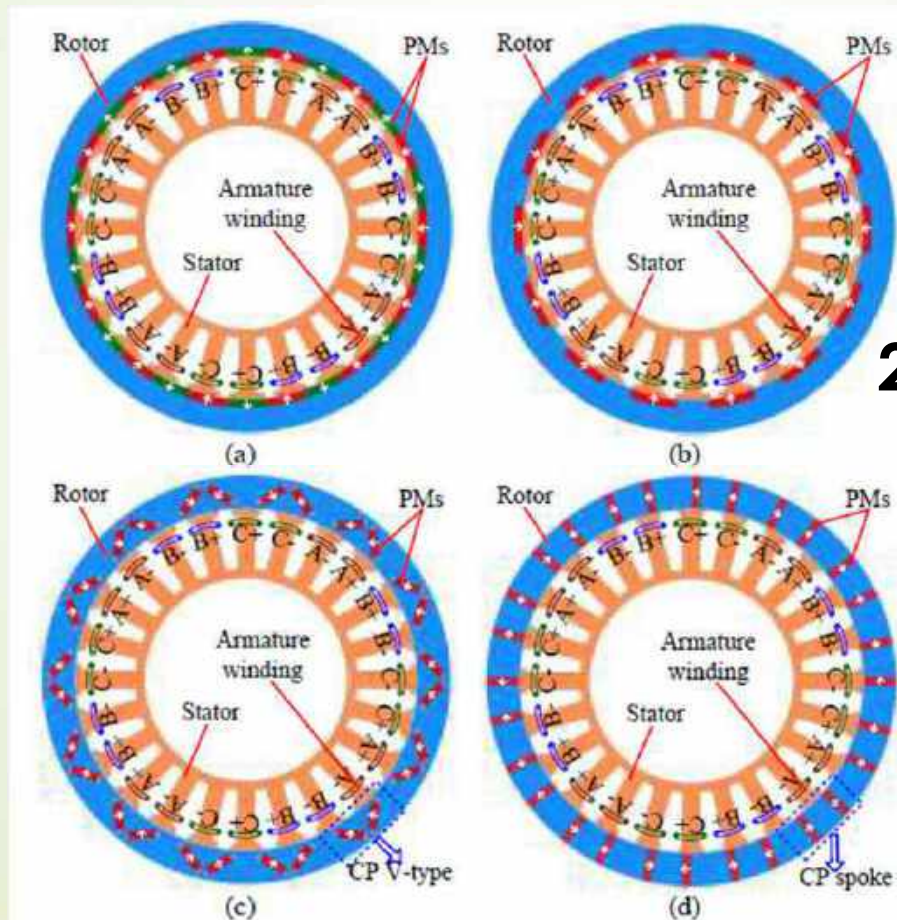
1

Cuprins

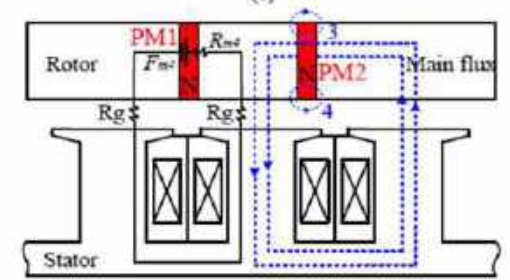
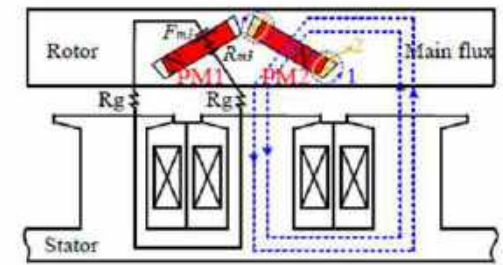
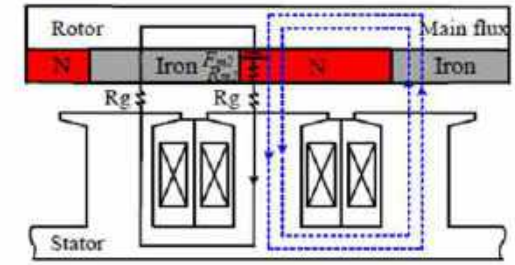
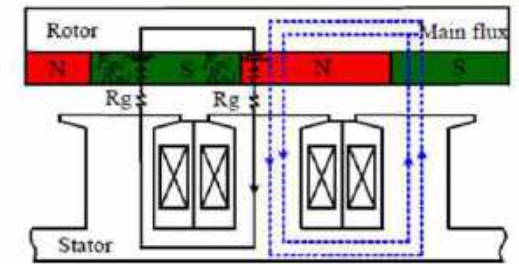
- ❑ Mașini electrice cu magneți permanenți
- ❑ Mașini electrice cu reluctanță
- ❑ Mașini electrice hibride
- ❑ Mașini electrice asincrone



Compararea mașinii cu MP plasați pe raze, consecvent, cu alte mașini cu MP plasați consecvent



24s/28r



Compararea mașinii cu MP plasați pe raze, consecvent, cu alte mașini cu MP dispuși consecvent [4]

Univ. de aeronautică și astronautică din Nanjung, China

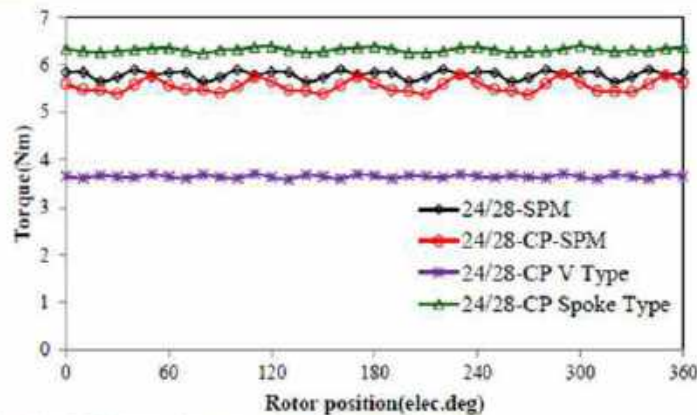


Fig. 11. Variation of torque with rotor position.

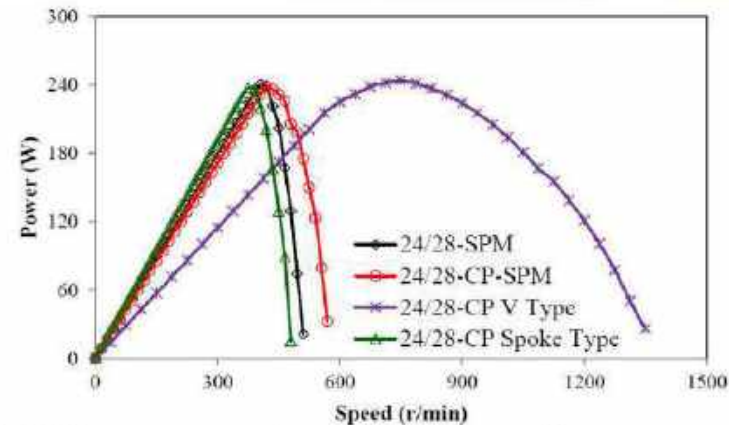


Fig. 15. Power versus operation speed of the four machines.

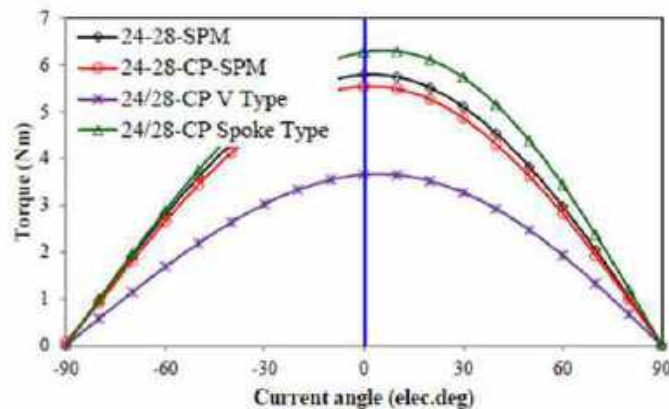


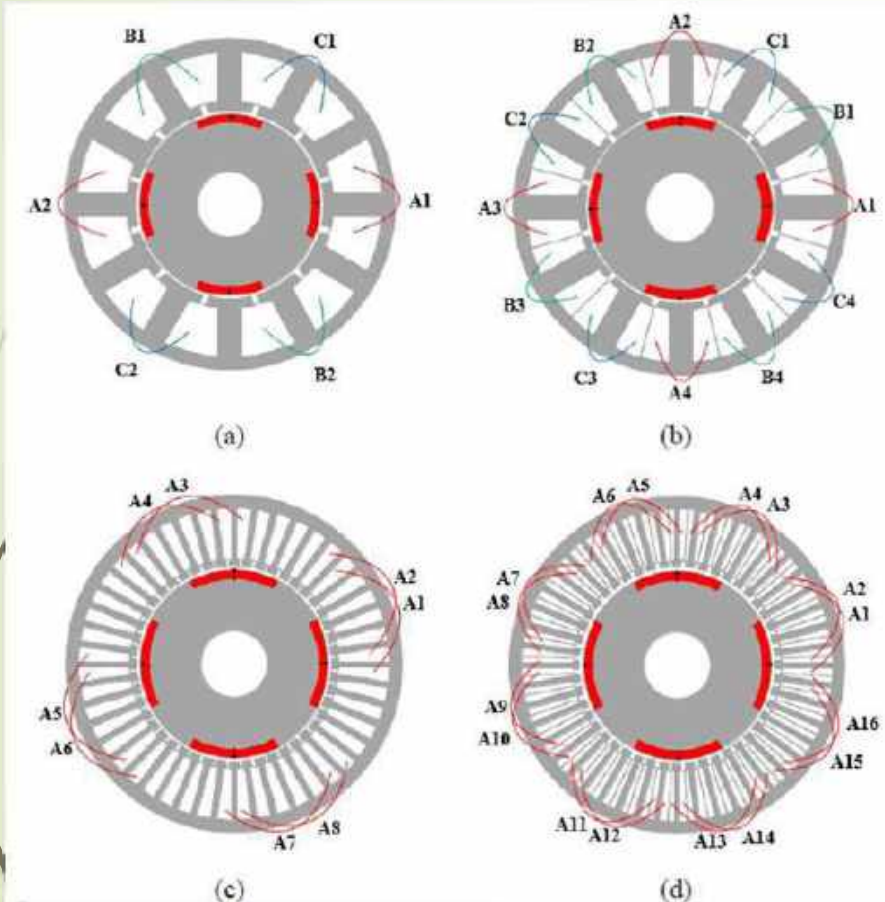
Fig. 12. Torque versus current angle of the four machines.

Avantaje față de mașina cu MP/S, disp. consecv., cu același volum de MP :

- Cuplul mediu mai mare cu 14%,
- Pulsatii de cuplu reduse cu 5,3%
- Fluxul de scăpări frontal, practic eliminat.
- Mașina cu CMP în V, are cea mai bună slăbire de câmp, dar are densitate de cuplu redusă și flux de scăpări frontal important.

Compararea motoarelor cu MP plasați pe suprafață, consecvenți, cu înfășurări concentrate sau distribuite [5]

Univ. din
Sheffield, UK



a/b: 12cr/8p, înf. concentrată / distribuită
c/d: 48cr/8p, înf. concentrată / distribuită

Concluzii:

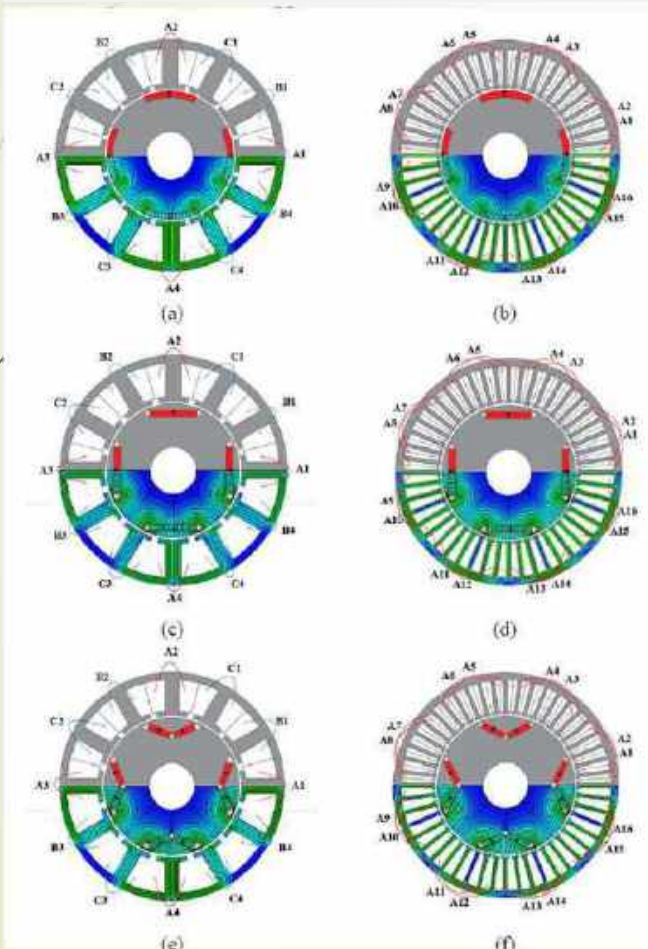
Motoarele cu înf. concentrată au o capacitate mai mare de slăbire a câmpului și, deci, de extindere a domeniului de viteze, cu putere constantă dar au un randament mai redus.

Avantajele structurii cu magneți consecvenți:

- O reducere de cca. 33% a volumului de MP, pt. aceleași performanțe, (MP virtual)

Motoare cu plasări diferite ale MP consecvenți și înfășurări concentrate sau distribuite [6]

Univ. din
Sheffield, UK

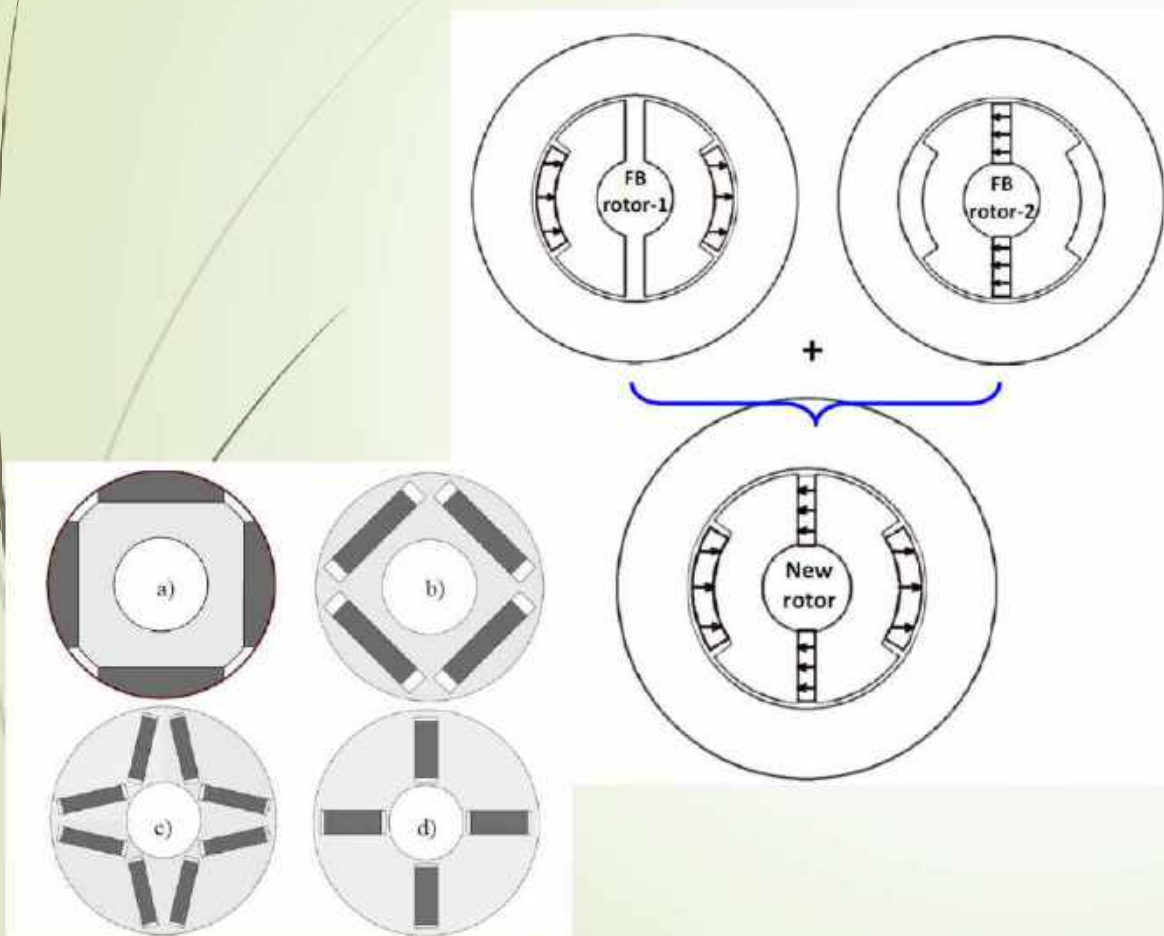


a/b: 12cr-8p/48cr-8p SPM, concentrată / distribuită
c/d: 12cr-8p/48cr-8p I-IPM, concentrată / distribuită
e/f: 12cr-8p/48cr-8p V-IPM

Concluzii:

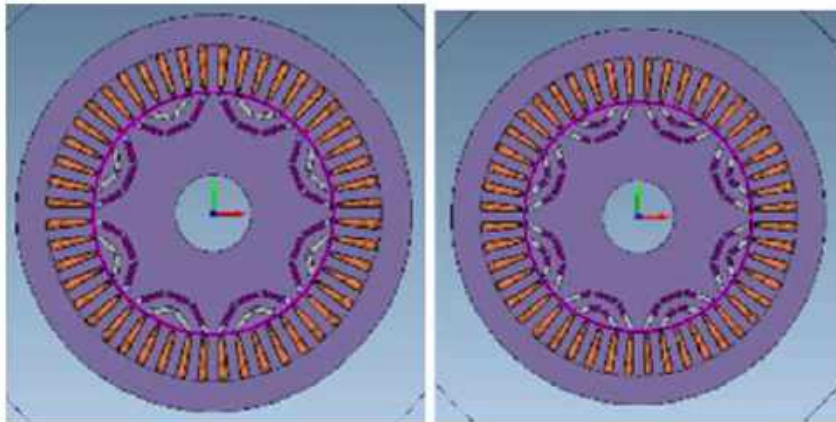
- La același vol. de MP, motoarele cu MPC-S au cuplu mai mare decât cele cu MPC-I
- La aceeași structură, motoarele cu MPC cu înfășurări distribuite au un cuplu mai mare
- Capacitatea de reducere a fluxului este mai mare la motoarele cu înfășurări concentrate, și MPC-I decât la MPC-S

Rotor cu MP, cu consum redus de material magnetic [15]



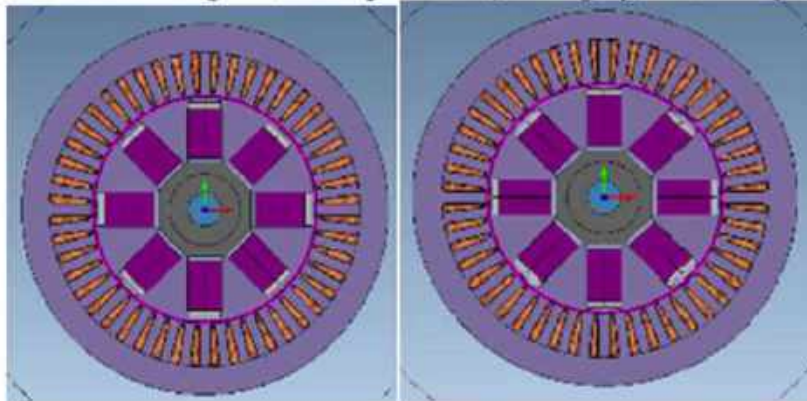
| | | BMW-i3 rotor | | New PM rotor | |
|----------------|--------|---|--------|--------------|-----|
| Pole pairs | [--] | 6 | | 6 | |
| Sator slots | [--] | 72 | | 72 | |
| Rotor poles | [--] | 12 | | 12 | |
| Sator diameter | [mm] | 242 | | 242 | |
| Rotor diameter | [mm] | 178,6 | | 178,6 | |
| Gap length | [mm] | 0,76 | | 0,8 | |
| Stack length | [mm] | 132,3 | | 132,3 | |
| Sator winding | | Single layer distributed winding with q=2 | | | |
| Magnet-1 | [mm] | 12-magnets | 25 *) | 4-magnets | 36 |
| | | | 5 *) | | 5 |
| Magnet-2 | [mm] | 12-magnets | 13 *) | 4-magnets | 24 |
| | | | 2,2 *) | | 5,4 |
| Magnet weight | [kg] | 1,9 | | 1,25 | |
| *) estimated | | | | | |

Motor cu amestec de MP plasați în interior [16]



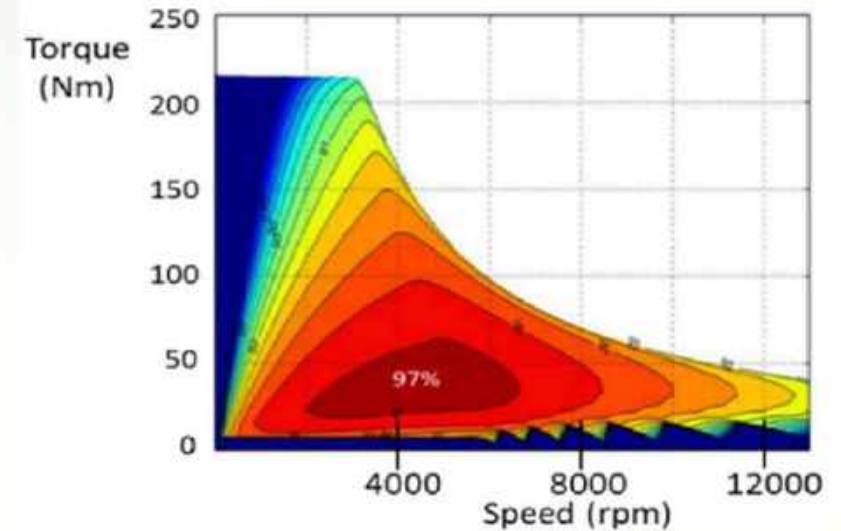
(a) Blended 2-V1 model (b) Blended 2-V2 model

Fig. 2: Blended magnets, V-shaped IPM (Nd in grey, ferrite in purple)



(a) Spoke, Nd shorter than ferrite (b) Spoke, ferrite and Nd equal length

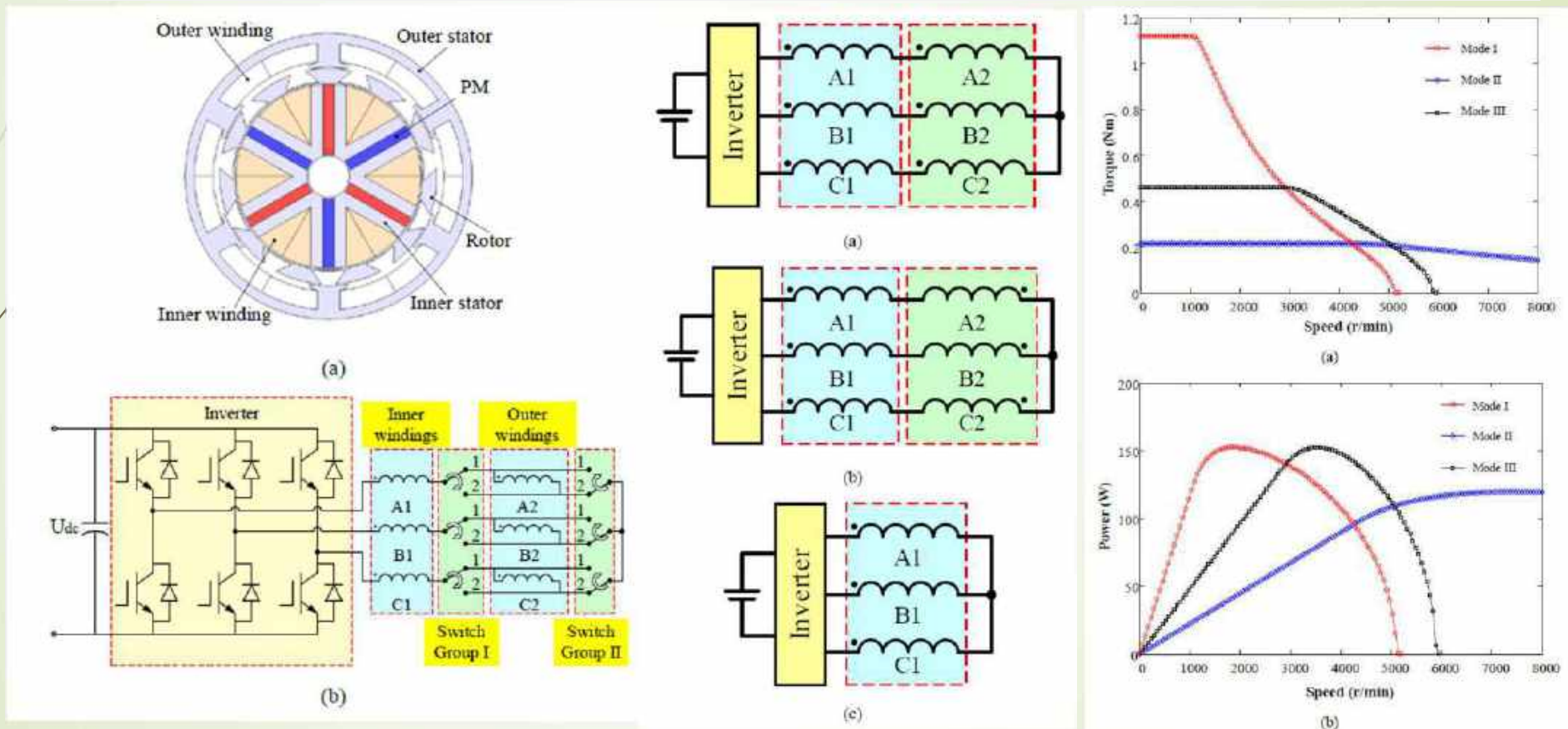
Fig. 3: Blended magnets, spoke IPM (Nd in grey, ferrite in purple)



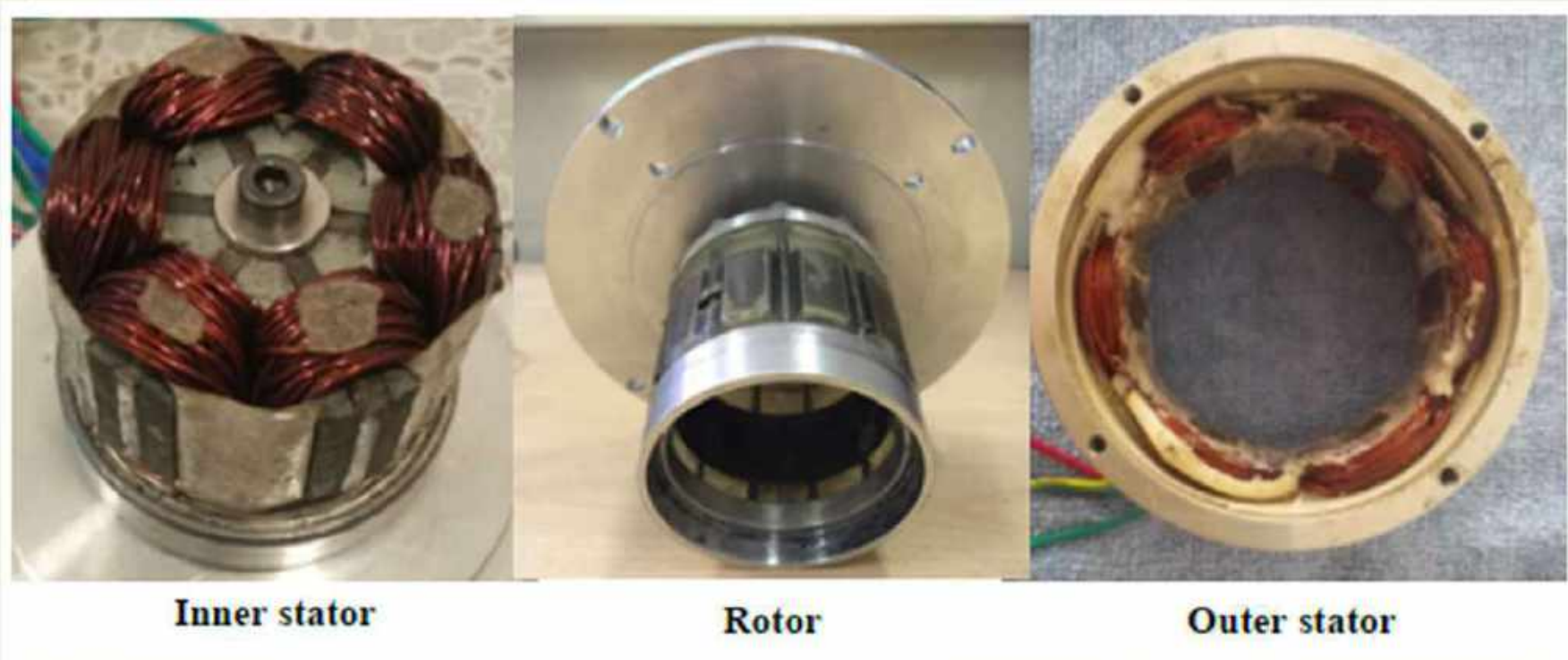
Referința - Toyota-Prius 2010

- Varianta cu plasarea pe raze a amestecului de magneți reduce cu 60% volumul MP pe bază de Nd, iar performanțele (cuplu, dimensiuni, demagnetizare) sunt aceleași.

Extinderea domeniului vitezei motoarelor sincrone cu MP și două statoare, prin comutarea în serie a înfășurărilor [3]



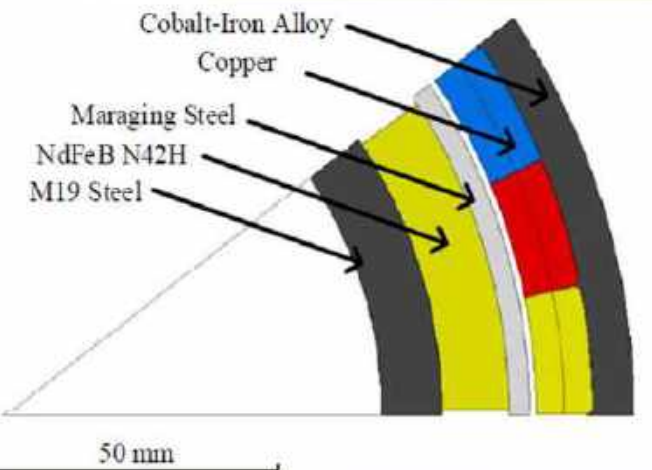
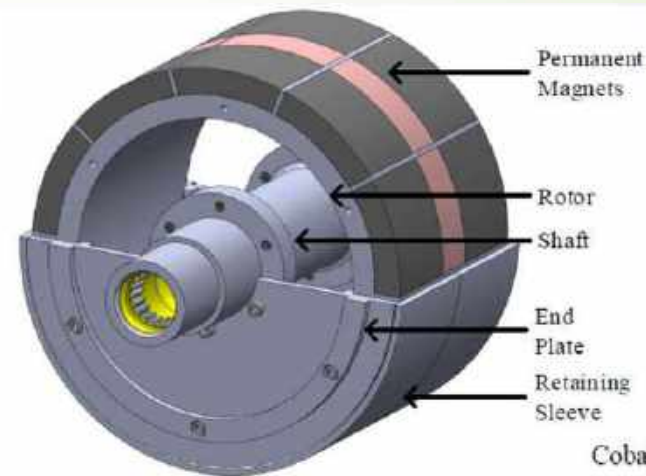
Motorul sincron cu MP și două statoare, cu comutarea în serie a înfășurărilor



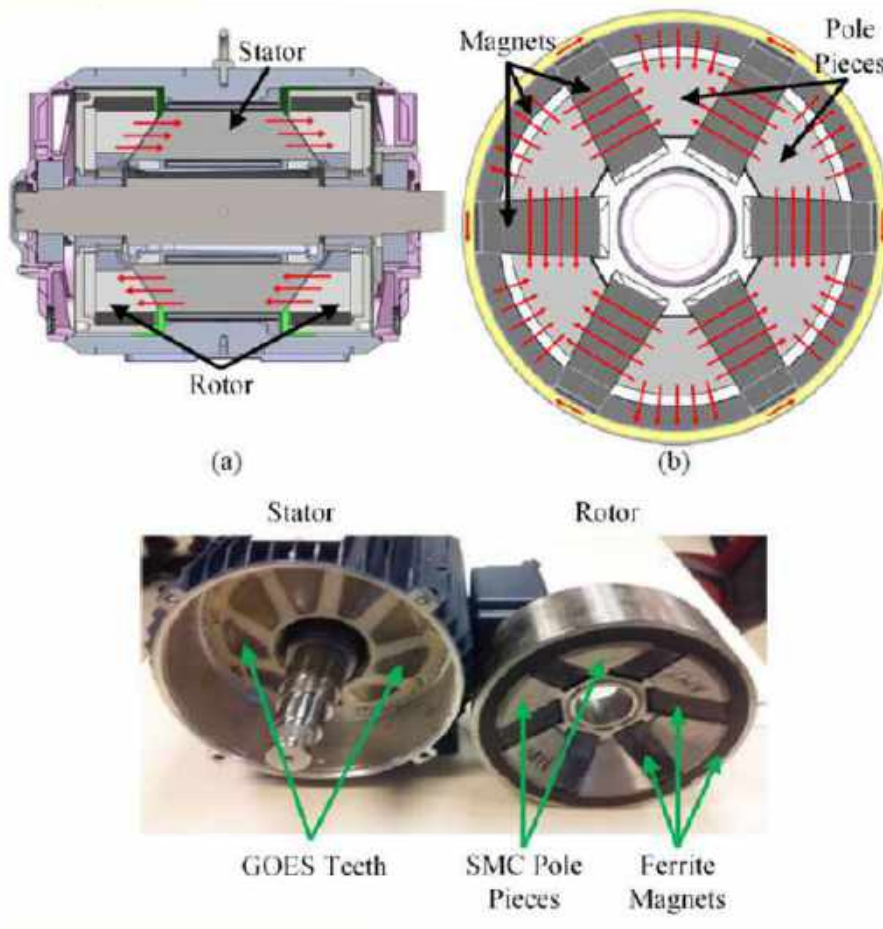
School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing, China

Motor sincron cu MP: 300 kW, 17.000 rpm, eficiență 99,2% și putere specifică 14,4 kW/kg [14]

- Mașinile comerciale, cu puteri de ordinul MW, au cca. 6,6 kW/kg (materiale active)
- Soluția realizată: stator fără creștături, rotor inelar cu MP pe suprafață, 10 poli, $M_n = 169 \text{ Nm}$.
- Destinație: viitorul avion hibrid turbo-electric
- Dimensiuni: $D_s = 230 \text{ mm}$, $L_s = 115 \text{ mm}$, $h\text{-MP} = 12,25 \text{ mm}$



Motor cu MP, cu rotor conic dual și circuit magnetic compozit [13]



Aplicații:

Acționarea turbo-compressoarelor (produc forțe axiale):

- Pentru 1,5 W, la 6000 rpm, $F = 145 \text{ N}$
- Pentru 350 kW, la 8000 rpm, $F = 3100 \text{ N}$

Motor sincron cu MP, cu două rotoare, pentru o motocicletă de curse [20]

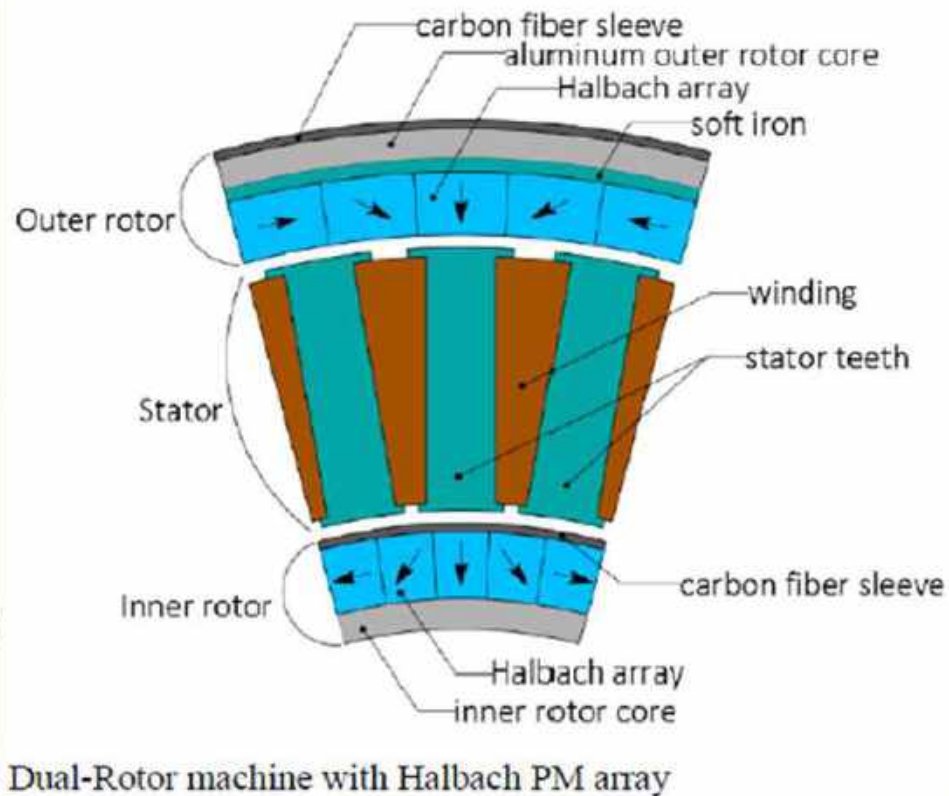


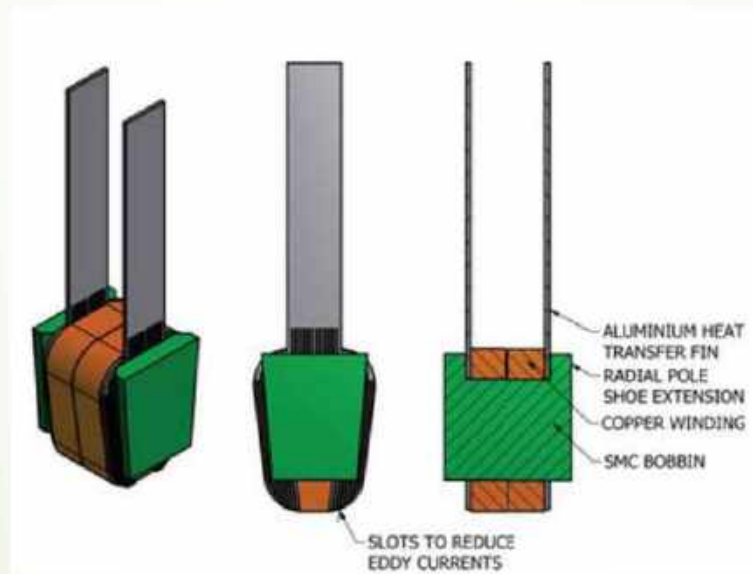
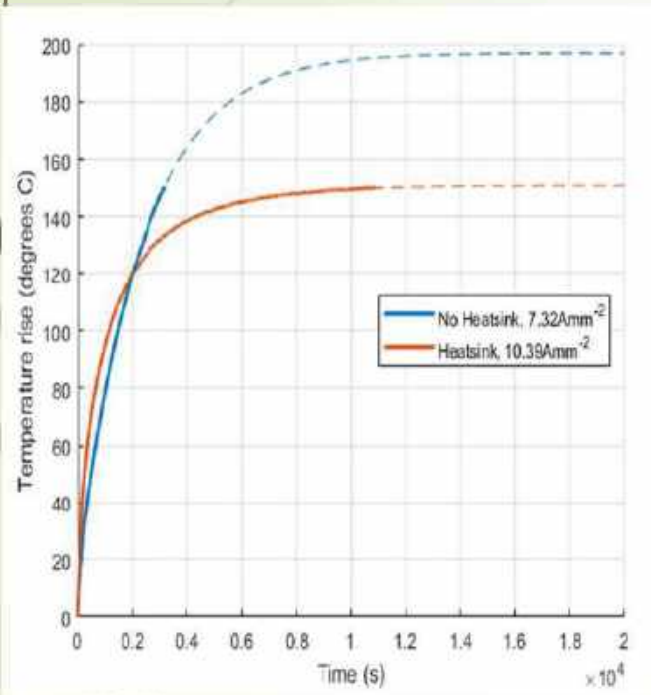
TABLE II. PARAMETERS OF OPTIMIZED MACHINE

| Parameter | Value |
|----------------------------------|-------|
| Phase Current, rms [A] | 450 |
| Phase Voltage, rms [V] | 295 |
| bEMF, rms [V] | 230 |
| Fundamental frequency [Hz] | 2100 |
| Reference speed [rpm] | 9000 |
| Reference torque [Nm] | 300 |
| Reference power [kW] | 283 |
| Number of pole pairs | 14 |
| Number of slots | 24 |
| Efficiency | 96.6% |
| Current density [A/mm^2] | 27 |
| Power density [kW/kg] | 18.6 |
| Total mass [kg] | 15.2 |
| Rotor inertia [$kg \cdot m^2$] | 0.067 |

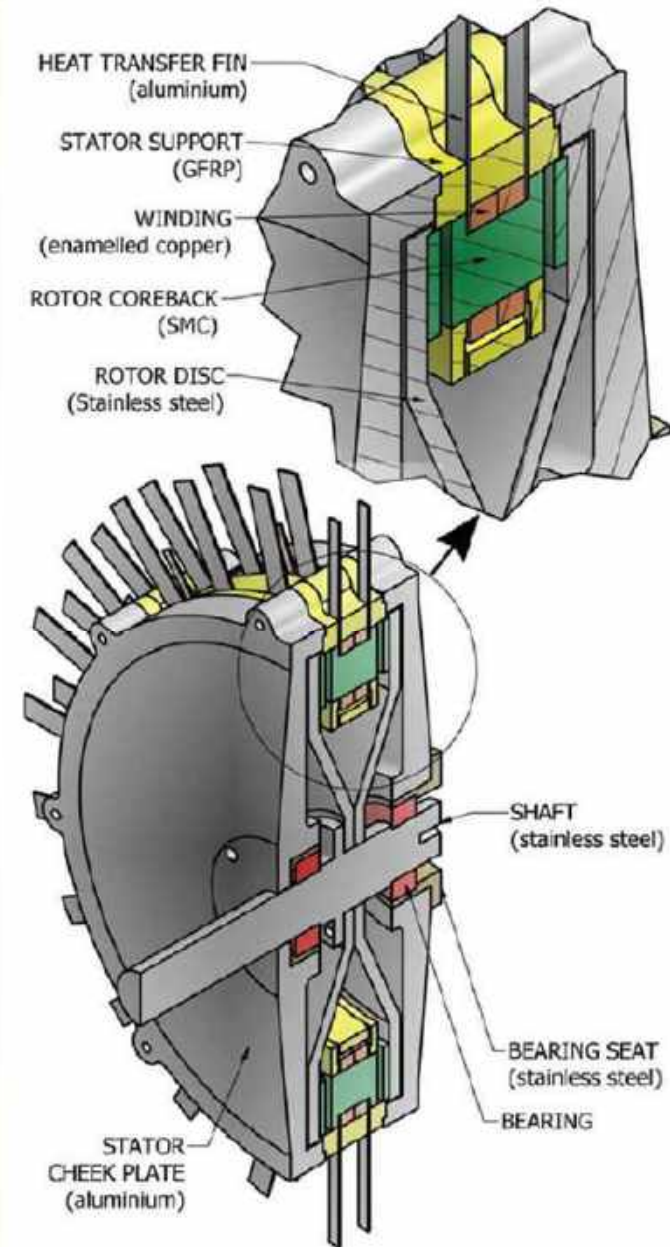
Univ. din Nottingham, UK

Motor YASA răcit cu aer, pentru vehicule cu roți motoare [21]

D = 380 mm; L = 125 mm; Mn = 70 Nm,
 n = 350 – 1400 rpm
 Yokeless and Segmented Armature (YASA)



Univ. din Nottingham, UK



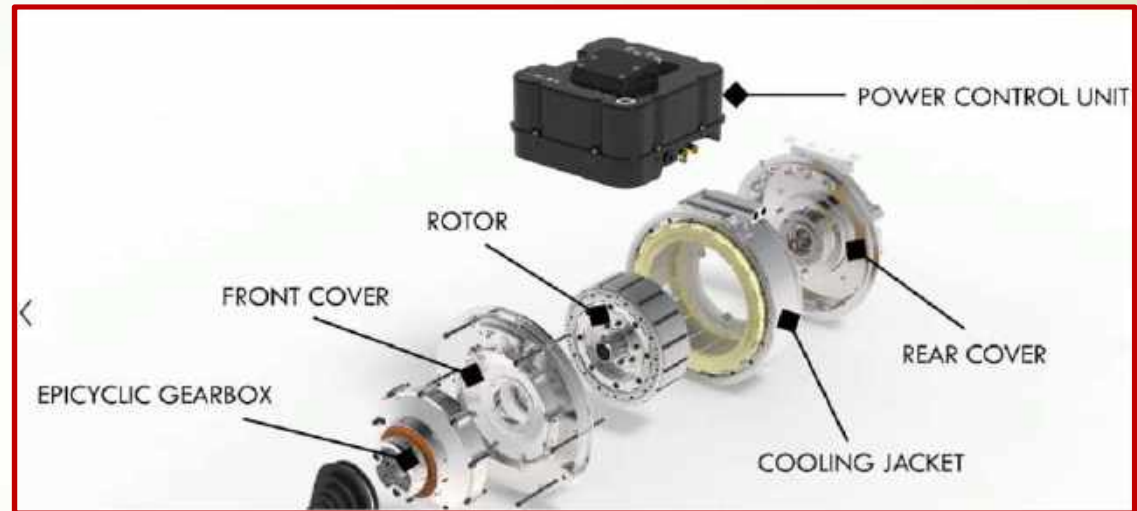
Motorul cu flux axial al firmei "Magnax"



- Densitatea puterii maxime: 15 kW/kg
- Densitatea puterii continue: 7,5 kW/kg
- Motorul BMW cu combustie internă pentru motocicletă are doar: 2,7 kW/kg

<https://newatlas.com/magnax-axial-flux-electric-motor/54821/>

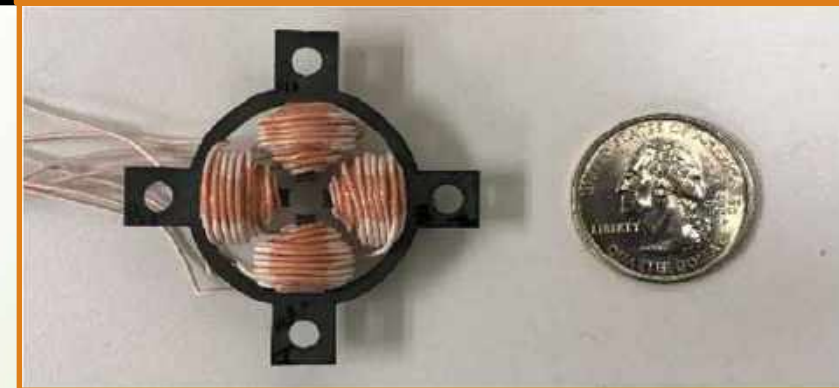
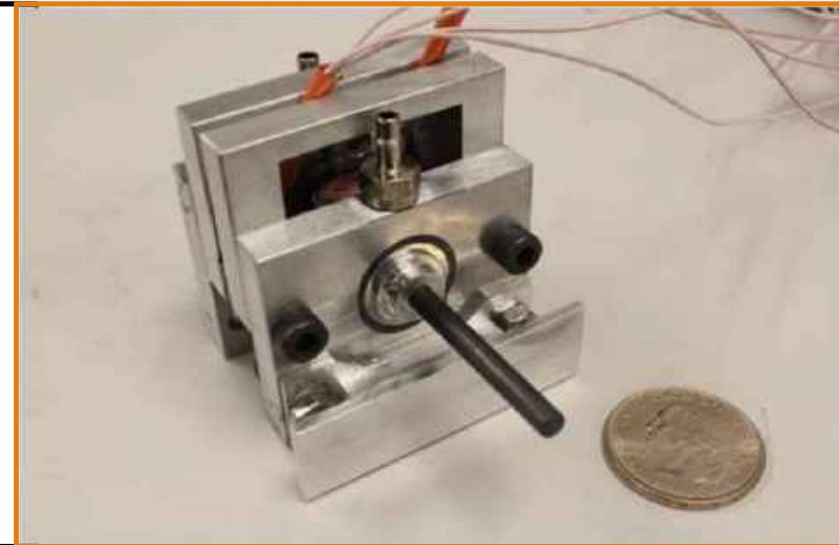
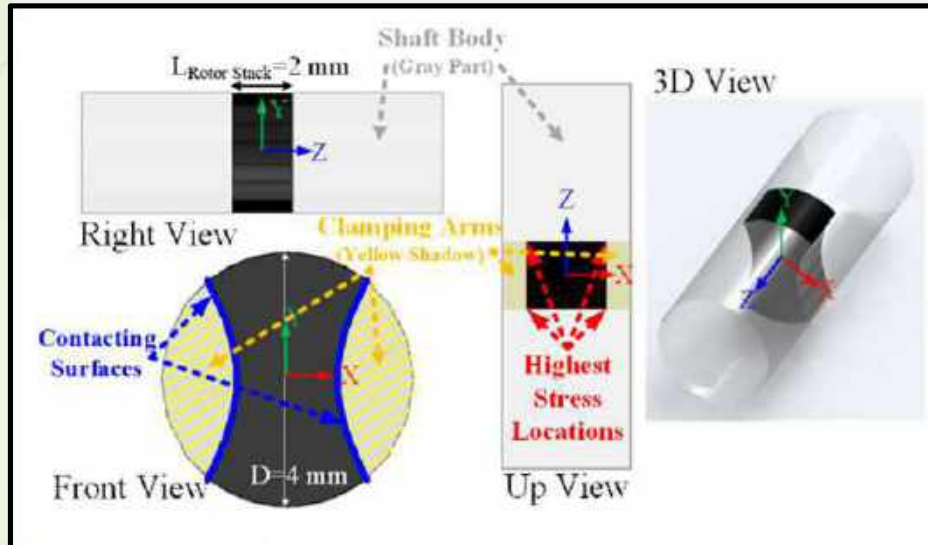
Motorul cu magneti răciți cu apă, plasați în spițe



- Comparație cu motorul cu flux radial, convențional:
- **50% volum, 80% masa, 75% material magnetic.**
- Comparație cu motorul Siemens pentru avionul electric:
- **9 kW/kg față de 5 kW/kg, mai ieftin și mai ușor de fabricat.**
- Destinație: automobil cu 4 roți motoare, cu autonomie extinsă - încărcarea bateriei cu o turbină cu gaz, cu turația de 120.000 rpm

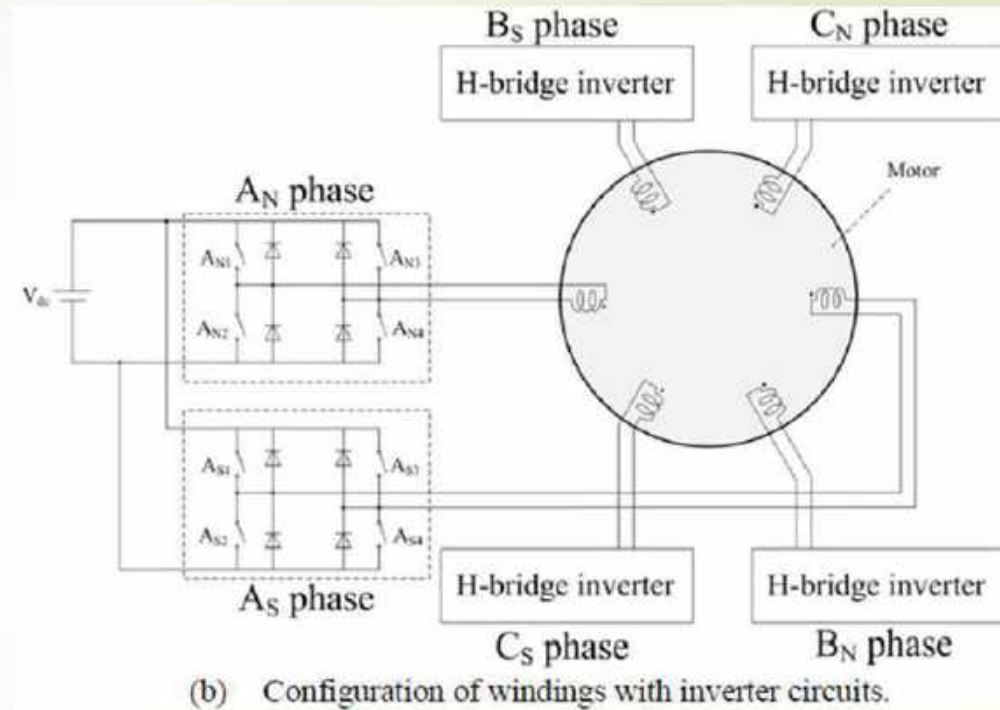
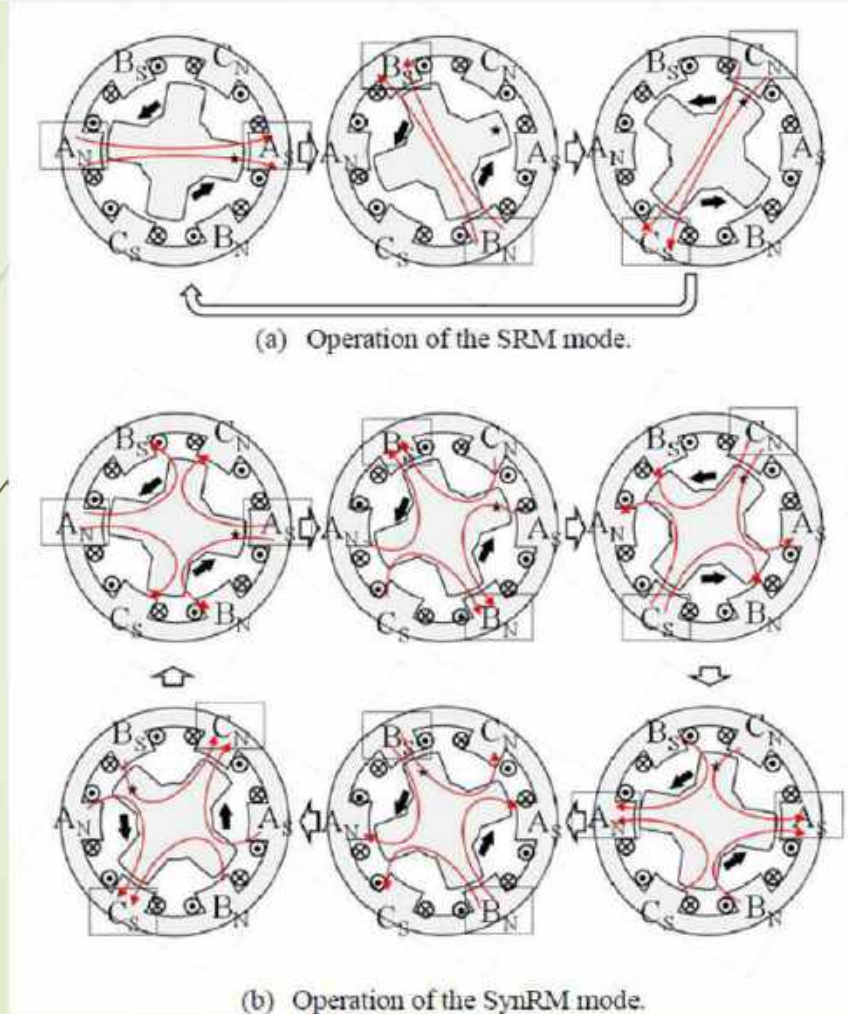
<https://newatlas.com/equipmake-electric-spoke-motor-interview/54694>

Motor cu reluctanță comutată, cu 1 milion rpm [1]



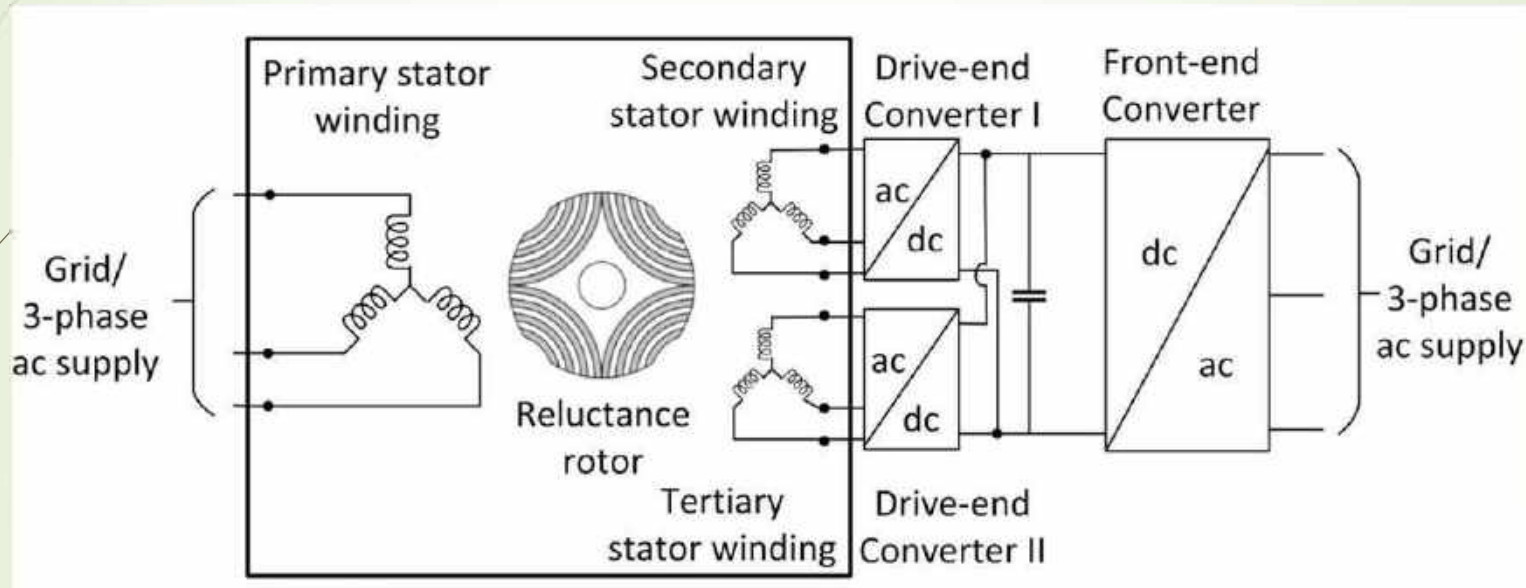
- Frecvența tensiunii de alimentare: 33,3 kHz,
- 50 tole/2mm = 0,04 mm
- Lagăre cu aer

Motor sincron cu reluctanță duală, adaptată [18]



- MS cu reluctanță comutată (SRM) – are densitate de cuplu mare, la nr mare de poli, dar pierderi mari - pentru turații mici
- MS reactiv – are pierderi mici dar densitate de cuplu redusă – pentru turații mari

Creșterea densității de cuplu la mașinile cu dublă alimentare, fără perii, cu modulator de câmp cu reluctanță, [10]



Mașinile cu dublă alimentare au puterea convertorului electronic de doar 25% - 30% din puterea mașinii.

Propunerea 4-2-8 poli statorici produce un cuplu mai mare cu 26% față de soluția de referință 4-2 poli statorici

Motor sincron cu reluctanță, de mare viteză, pentru vehicule electrice [7]

Univ. din Aquila,
Italia + Mircea
Popescu

TABLE I. TRACTION MOTORS FOR ELECTRIC VEHICLES

| Vehicle | Motor type | Rotor material | Max Speed [rpm] |
|----------------|--------------|----------------|-----------------|
| Audi e-tron | IPMSM | RE PM | ~10000 |
| BMW i3 | IPMSM | RE PM | 11400 |
| Chevrolet Bolt | IPMSM | RE PM | 8900 |
| Hyundai e-Kona | PMSM | RE PM | 11000 |
| Jaguar I-Pace | PM SynRel | Ferrite/RE PM | 13000 |
| Mercedes EQC | IPMSM | RE PM | ~10000 |
| Nissan Leaf | IPMSM | RE PM | 10500 |
| Renault Zoe | Synch. motor | Wounded Rotor | 11300 |
| Tesla S | IM | Cu cage | 16000 |

TABLE II. MOTOR REQUIREMENTS FOR THE TARGET APPLICATION

| | | |
|-----------------------|-------|-------|
| DC Voltage | V | 800 |
| Specific Peak Power | kW/kg | > 4.0 |
| Specific Peak Torque | Nm/kg | > 8.0 |
| Peak Power @5000rpm | kW | 200 |
| Peak Torque @5000rpm | Nm | 380 |
| Peak efficiency | % | > 95 |
| Maximum speed | rpm | 18000 |
| Power @ max speed | kW | 50 |
| Motor mass | kg | < 48 |
| Outer Stator diameter | mm | 230 |
| Stack length | mm | 200 |
| Air-gap length | mm | 0.7 |

- Nr optim de poli: între 4 și 8 (2 poli – raport d/q mare dar densitate de cuplu redusă)
- Coasta radială convențională scade capacitatea de extindere a domeniului de viteze

Motor sincron cu reluctanță, de mare viteză, pentru vehicule electrice [7]

TABLE IV. COMPARISON OF THE PROPOSED SOLUTIONS (6-POLES)

| Performance | | no radial ribs | radial ribs | optimized ribs |
|-------------------------------|-----|----------------|-------------|----------------|
| Peak torque | Nm | 430 | 358 | 384 |
| Peak power | kW | 287 | 230 | 250 |
| Peak efficiency | % | 97.6 | 96.9 | 97.1 |
| Power @ max speed (18000 rpm) | kW | 110 | 35 | 58.5 |
| Power factor @ 200kW | | 0.64 | 0.46 | 0.51 |
| Power factor @ max speed | | 0.61 | 0.41 | 0.46 |
| Max deformation @ air-gap | % | - | 6.6 | 7.4 |
| Max equivalent stress | MPa | - | 364 | 361 |



Fig. 10. SynRel motor with no radial ribs: flux density map at maximum speed [T].

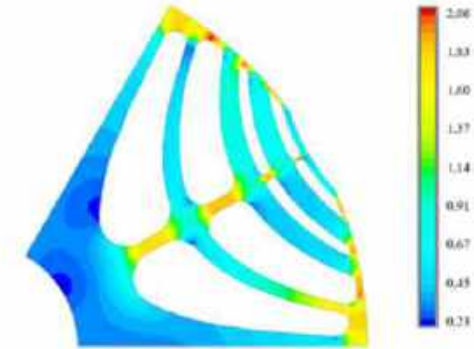


Fig. 11. SynRel motor with radial ribs: flux density map at maximum speed [T].

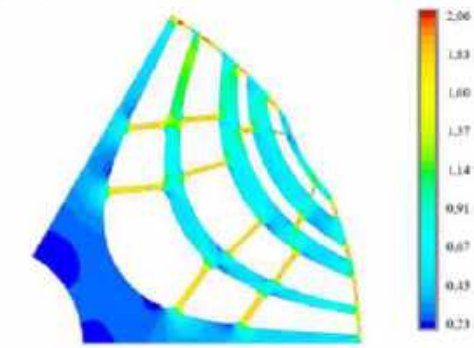
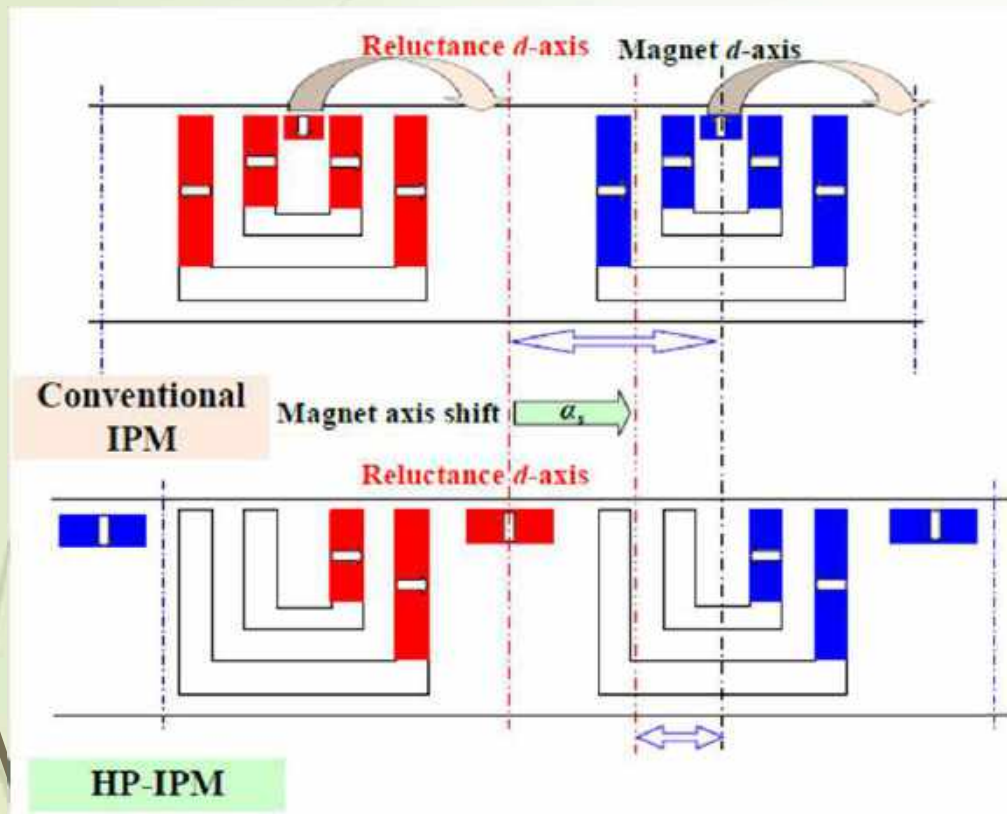
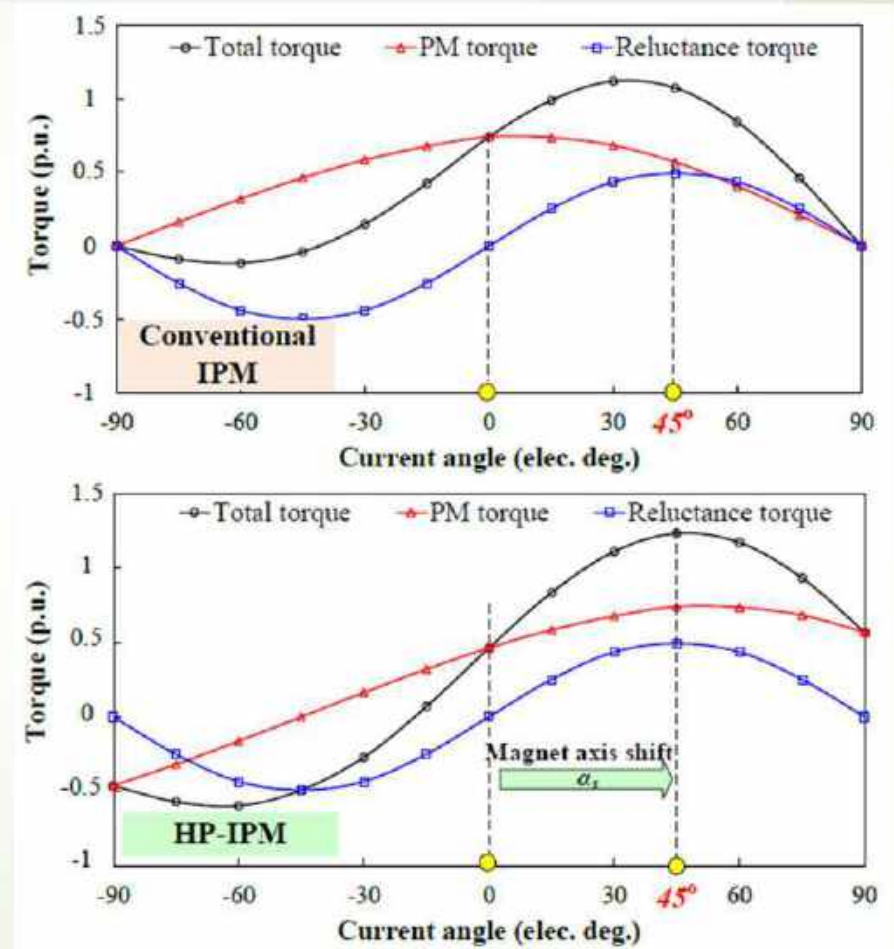


Fig. 12. SynRel motor with optimized ribs: flux density map at maximum speed [T].

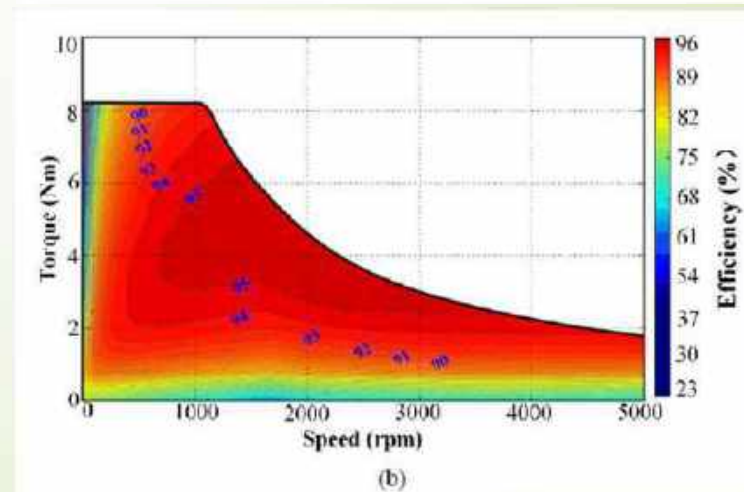
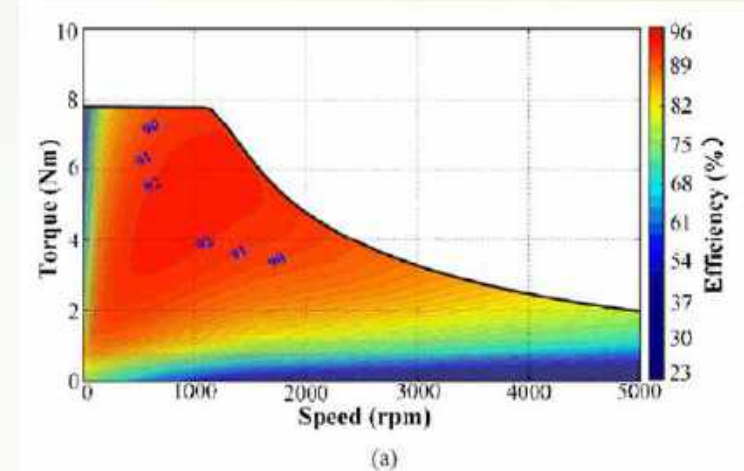
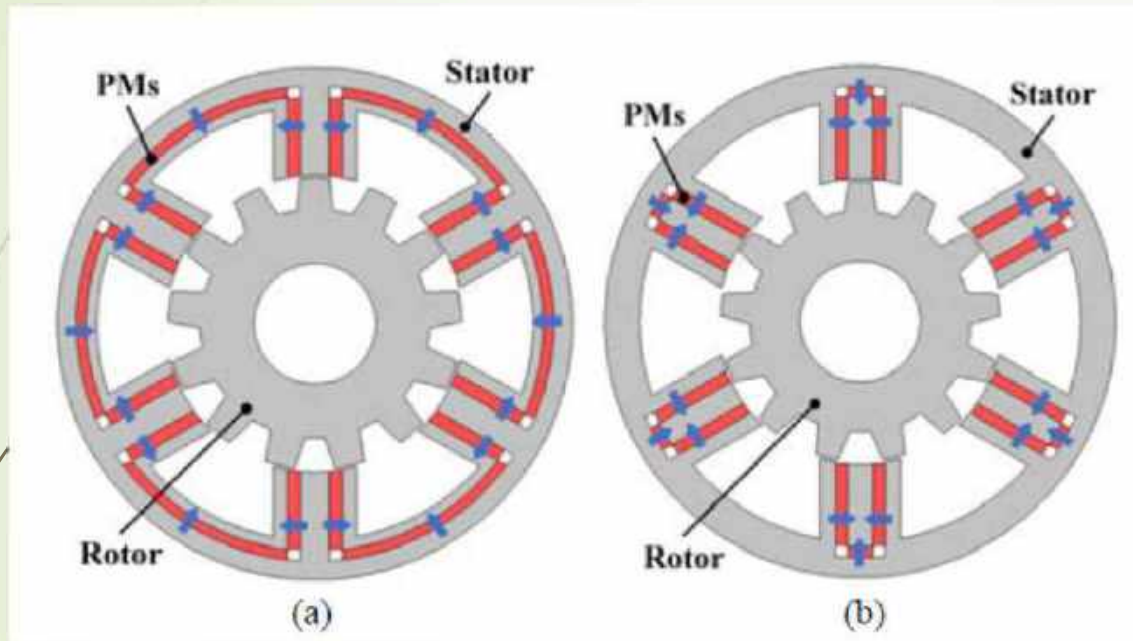
Un nou motor hibrid, cu MP interiori, cu efect de deplasare a axei magnetice [8]



Cuplul mediu mai mare cu 29% și pulsațiile de cuplu mai mici cu 41%



Topologii noi de motoare hibride, cu MP interiori, plasați pe raze și corzi [9]



Avantaje față de plasare în spițe convențională:

- Capacitate mare de diminuare de flux
- Densitate de cuplu mai mare cu cca. 57%
- Factor de putere sporit

Motor sincron cu dublă danturare, cu raportul poli statorici/poli rotorici 8/13, 500 rpm [19]

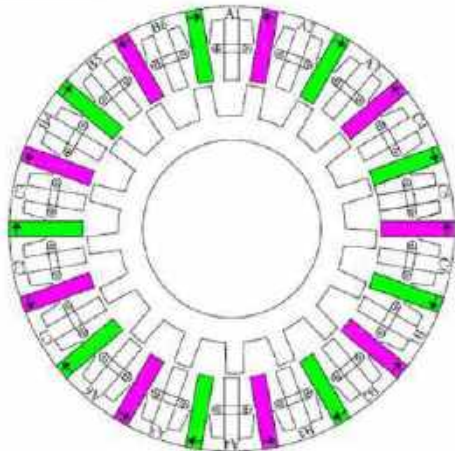


Fig. 1. Topology of 18/17-pole BFPM machine.

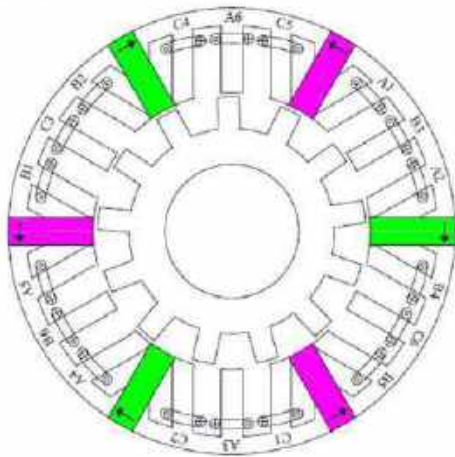
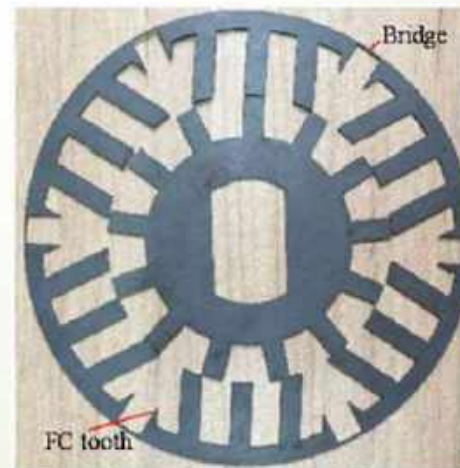


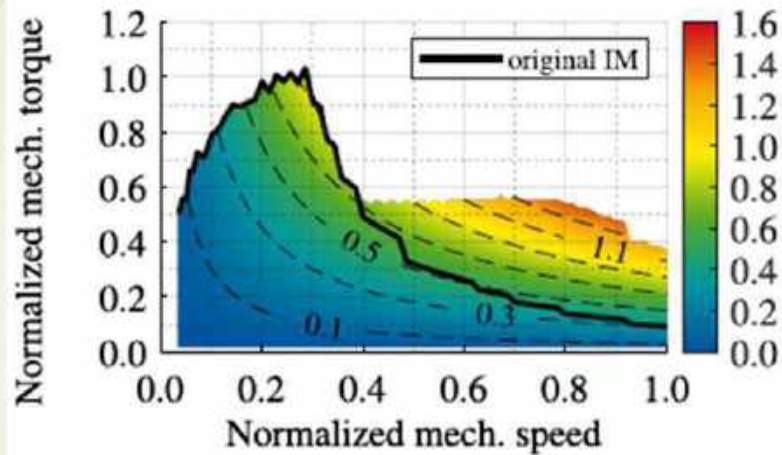
Fig. 2. Topology of 18/13-pole DSPM machine.

TABLE II MAIN ELECTROMAGNETIC TORQUE CHARACTERISTICS OF BFPM AND DSPM MACHINES.

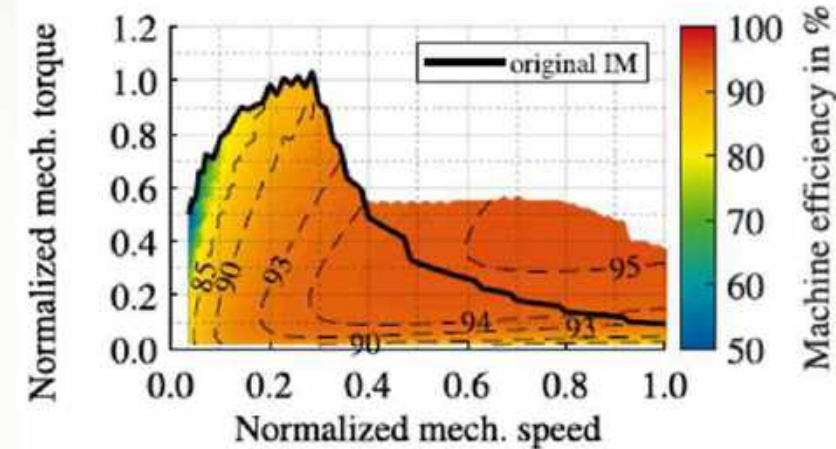
| Parameters | Value | |
|--|-------|-------|
| | BFPM | DSPM |
| Average torque (Nm) | 1.50 | 2.02 |
| Peak to peak torque ripple (Nm) | 0.008 | 0.031 |
| Torque ripple (%) | 0.53 | 1.53 |
| Torque density (kNm/m ³) | 3.8 | 5.1 |
| Torque / PM volume (kNm/m ³) | 28.9 | 57.6 |



Extinderea domeniului vitezei motoarelor asincrone de tracțiune prin comutarea serie-paralel a înfășurării statorice [2]

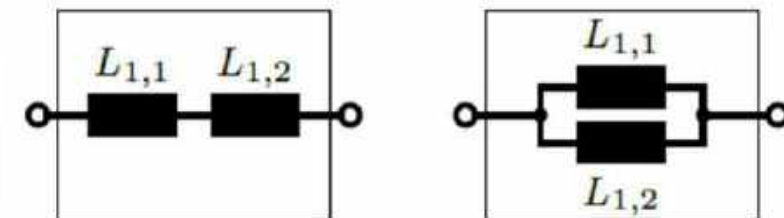


(a) Mechanical power

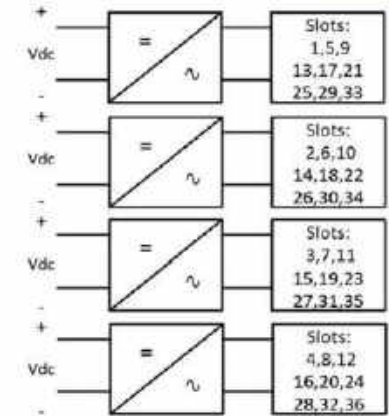
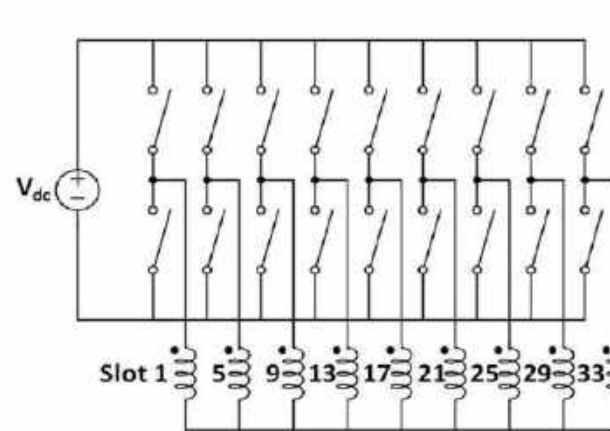
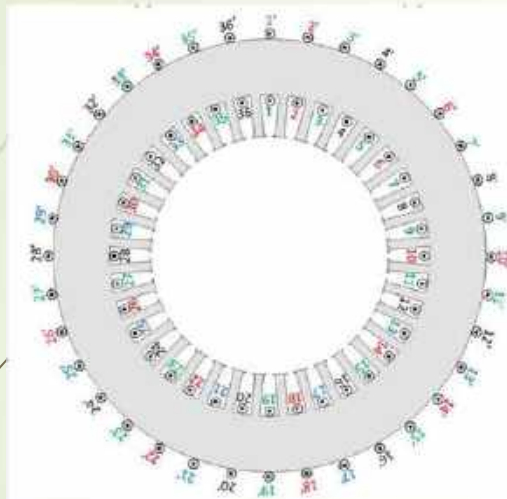


(c) Machine efficiency

- Comutarea serie – paralel a înfășurărilor statorice crește de până la 4 ori puterea la viteze mari; Conexiunea serie este benefică la viteze mici iar conexiunea paralel este benefică la viteze mari)
- Motorul studiat: maxim - 100 kW, max - 10.000 rpm, 400 Vcc (inverter)



Acționare cu motor asincron cu număr variabil de poli, pentru vehicule electrice [12]

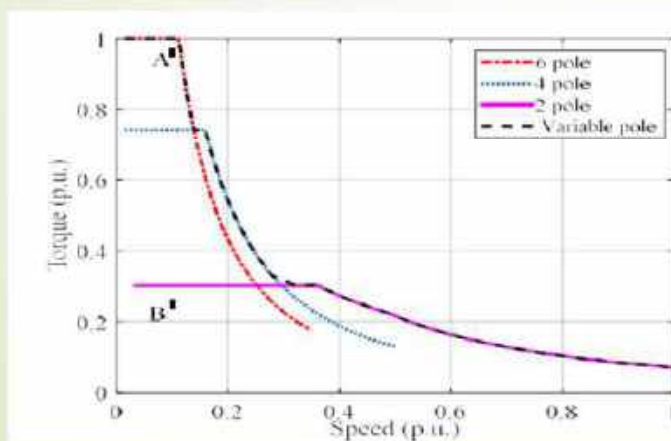


(a)

(b)

TABLE II. MACHINE PARAMETERS OF A TOROIDALLY WOUND 5 HP, 208 V, 7200 RPM INDUCTION MACHINE

| Parameters | Values |
|----------------------------------|--------|
| Total number of slots, Q_s | 36 |
| Airgap, g (mm) | 0.6 |
| Rotor external radius, r (mm) | 50 |
| Stack length, l (mm) | 71 |
| Number of turns-per-slot (N) | 46 |



Referințe bibliografice – IEMDC 2019

(Int. Electric Machines & Drives Conference, May 12-15, San Diego, CA, USA)

1. C. Gong, S. Li, T. Habetler, Practical Considerations in the Design and Manufacture of Ultra-High Speed Switched Reluctance Machines over 1 Million rpm.
2. D. Scharfenstein, R. W. De Donker, Extended Operating Range of Induction Machines using Switched Stator Winding.
3. S. Lyu, H. Yang, H. Lin, Y. Li, H. Zheng, Speed Range Extension of a Dual-Stator PM Machine using Winding Switching Strategy.
4. F. Li, K. Wang, H. Y. Sun, H. Zhang, L. Zhang, Quantitative Comparison between SPM Machine and Consequent Pole PM Machines with Different Topologies
5. R. Zhou, G. J. Li, Z. Q. Zhu, Y. X. Li, M. P. Foster, D. A. Stone, Comparative studies of fractional/integer-slot consequent pole permanent magnet machines.
6. R. Zhou, G. J. Li, Z. Q. Zhu, Y. X. Li, M. P. Foster, D. A. Stone, Investigation of Integer/fractional slot consequent pole PM machines with different rotor structure.
7. A. Credo, G. Fabri, M. Villani, M. Popescu, High speed synchronous reluctance motors for electric vehicles: a focus on rotor mechanical design.

Referințe bibliografice

8. H. Yang, W. Wang, H. Liu, Z. Q. Zhu, S. Lyu, S. Niu, A novel hybrid-pole interior PM machine with magnet-axis-shifting effect.
9. Y. Li, H. Yang, H. Liu, H. Zheng, Comparative study of advanced stator interior permanent magnet machines.
10. S. Agrawal, A. Banerjee, Torque-Density improvement in Brushless doubly-fed reluctance machines using additional stator winding.
11. Z. Zhang, A Brushless Doubly Fed Machine with Separated Field and Armature Windings in Dual Stators.
12. E. Libbos, B. Ku, S. Agrawal, S. Tungare, A. Banerjee, P. T. Krein, Variable-pole induction machine drive for electric vehicles
13. M. C. Gardner, Y. Zhang, D. Talebi, H. A. Toliyat, A. Crapo, P. Knauer, H. Wilis, Loss Breakdown of a dual conical rotor PM motor using grain oriented electrical steel and soft magnetic composite
14. L. Xu, H. Wang, H. Xiong, Z. Ke, J. Woo, J. Zhang, S. Dong, Design and experimental evaluation of a high specific power permanent magnet synchronous machine.

Referințe bibliografice

15. G. Dajaku, H. Zhou, X. Dajaku, D. Gerling, Novel rotor design with reduced rare-earth material for PM machines.
16. Q. Ma, A. El-Refaie, B. Lequesne, Low-cost interior PM machine with a blend of magnet types.
17. R. Cao, X. Zhang, X. Yuan, A new three-phase hybride excitation flux-switching motor for EV/HEV applications.
18. K. Kiyota, K. Ichiyanagi, K. Amei, T. Ohji, Principle of a novel dual-mode reluctance motor for EV applications
19. L. Wu, G. Ming, L. Zhang, Y. Fang, Comparative study between doubly salient PM machine with new stator/rotor-pole number combination and biased flux PM machine.
20. D. Golovanov, A. Galassini, L. Flanagan, D. Gerada, Z. Xu, C. Gerada, Dual-Rotor PM motor for electric superbike.
21. D. Winterborne, N. Stannard, L. Sjoeborg, G. Atkinson, An air-cooled YASA motor for in-weel electric vehicle applications

Vă mulțumesc pentru atenție !

