Trendi razvoja IPM motorjev v avtomobilski industriji s stališča količine trajnih magnetov

Andrija Jeknić, Alen Alić, Roman Manko, Urban Rupnik, Mario Vukotić, Selma Čorović, Damijan Miljavec

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: andrija.jeknic@fe.uni-lj.si

Development Trends of IPM Motors in the Automotive Industry from the Perspective of Permanent Magnet Quantity

Abstract. *This paper presents an overview of development trends of interior permanent magnet (IPM) motors in the automotive industry from the perspective of rotor design and the quantity of permanent magnets. The emphasis is on rotor geometry and different approaches to increasing the reluctance component of the torque, thereby reducing the magnet mass. Specific quantities are calculated and compared, namely specific torque and specific power per magnet mass, together with power density of the active volume, which serve as the key indicators of magnet utilization. Finally, the paper also addresses the current shift toward heavy rare-earth-free and magnet-free machines among European manufacturers.*

1 Uvod

Elektrifikacija avtomobilske industrije predstavlja enega ključnih stebrov prehoda v trajnostno mobilnost in zmanjševanja emisij toplogrednih plinov [1]. Med različnimi tipi električnih strojev so se sinhroni motorji z vgrajenimi trajnimi magneti (IPM – Interior Permanent Magnet) uveljavili kot primarna izbira za pogonske sklope sodobnih električnih (EV) in hibridnih vozil (HEV) [2]. Njihova izbira izhaja iz visoke gostote moči, visoke vrednosti izkoristka in širokega razpona obratovalnih hitrosti, kar omogoča kombinacija magnetnega in reluktančnega navora. Kljub izjemnim zmogljivostim pa množična proizvodnja IPM motorjev prinaša pomemben strateški in ekonomski izziv. Pri tem se misli na veliko odvisnost od trajnih magnetov na osnovi redkih zemelj, predvsem neodim-železo-bor (NdFeB) magnetov z dodatki težkih redkih zemelj, kot sta disprozij (Dy) in terbij (Tb), ki preprečujeta demagnetizacijo pri visokih temperaturah. Eksponentna rast trga električnih vozil je povzročila močno povečano povpraševanje po teh materialih, kar vodi v visoko cenovno nestabilnost in resna tveganja v dobavnih verigah zaradi geopolitične koncentracije naravnih virov. Samo pridobivanje in predelava redkih zemelj predstavljata precejšnjo ekološko obremenitev. Zaradi teh dejavnikov je zmanjšanje količine trajnih magnetov v rotorskih strukturah postalo ena izmed najpomembnejših raziskovalnih in razvojnih usmeritev v sodobni industriji e-mobilnosti. Trendi razvoja IPM motorjev se aktivno preusmerjajo v iskanje kompromisa med visoko zmogljivostjo stroja in smotrno rabo magnetnega materiala. Sodobni pristopi vključujejo napredno optimizacijo topologije rotorja, različne konfiguracije in postavitve magnetov (npr. V-postavitev, delta-postavitev ali večplastne in kombinirane konfiguracije) ter maksimizacijo deleža reluktančnega navora v skupnem navoru stroja [2]. Prav tako se intenzivno raziskujejo koncepti motorjev brez težkih redkih zemelj ter hibridni koncepti, ki deloma uporabljajo cenejše feritne magnete [3]. Ta članek obravnava in analizira sodobne trende razvoja IPM motorjev z vidika količine ter razporeditve trajnih magnetov znotraj rotorja skozi generacije v avtomobilski industriji.

2 Pregled razvoja izbranih motorjev

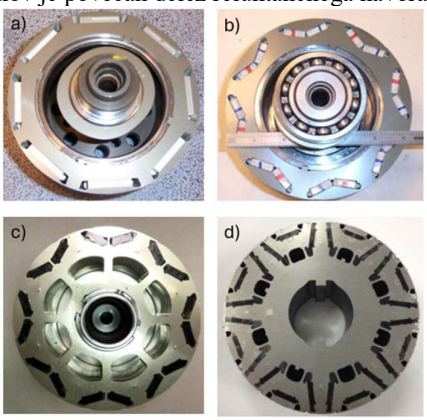
Za analizo trendov zmanjševanja količine trajnih magnetov (TM) v avtomobilski industriji je bil izveden pregled reprezentativnih pogonskih motorjev, ki so bili serijsko vgrajeni v hibridna (HEV) in popolnoma električna vozila (EV) v zadnjih dveh desetletjih. Izbrani modeli Toyota, Nissan, Chevrolet, BMW in Tesla, predstavljajo ključne tehnološke mejnike in odražajo evolucijo inženirskih pristopov pri optimizaciji prostornine ter mase magnetnega materiala [3]. Skupna značilnost, ki povezuje razvoj vseh motorjev izbranih električnih vozil je dvojna narava navora teh motorjev (enačba 1). Zato je v nadaljevanju njihov razvoj predstavljen prav skozi to perspektivo. Namreč, navor motorja s trajnimi magneti je vsota magnetnega in reluktančnega prispevka [2]:

$$M = \frac{3}{2} p[\psi_{TM}\, i_q + (L_d - L_q)\, i_d\, i_q] \qquad (1)$$

kjer je p število polovih parov, ψ_{TM} magnetni sklep, i_{d} in i_{q} komponenti toka ter L_{d} in L_{q} komponenti induktivnosti. Torej, iz enačbe 1 izhaja, da se lahko skupna vrednost navora ohrani na isti vrednosti s sorazmernim povečanjem reluktančnega navora in zmanjšanjem magnetnega navora, kar neposredno pomeni zmanjšanje mase magneta v stroju. Takšen pristop, iskanje kompromisa med visoko zmogljivostjo in čim manjšo količino trajnih magnetov je osnova za vse pristope, predstavljene v nadaljevanju. Prvotni način za zmanjšanje mase magnetov je bil prehod iz motorja s površinsko nameščenimi magneti na motor z vgrajenimi magneti znotraj rotorja. Primer motorja s površinskimi magneti z veliko količino magnetov najdemo v hibridnih pogonih Honda Accord in Honda Civic [3]. Z namestitvijo magnetov pod površino rotorja (t.j. IPM) se

med magneti ustvarijo bariere fluksa in s tem se poveča magnetna izraženost rotorja, kar vodi do povišanja reluktančne komponente navora. Naslednji korak k povečanju deleža reluktančnega navora je uporaba večslojnih barier fluksa in topologij, ki koncentrirajo magnetni pretok. Najpogosteje uporabljene topologije namestitve magnetov so: V-postavitev (Tesla Model Y, Toyota Prius), dvojna V-postavitev, ki je najbolj razširjena od leta 2021 (Volvo EX30, Nio ET5, BYD Seal) in delta-postavitev (Nissan Leaf, BYD Tang) [4].

Referenčni in v literaturi najpogosteje obravnavani primer v smislu razvoja generacij IPM motorjev je Toyota Prius. Preseki rotorjev štirih generacij Toyota Prius modelov so prikazani na sliki 1. Pri prvi generaciji (slika 1a) je magnet v obliki črke I. Za drugo generacijo (slika 1b) je značilen prehod na obliko magnetov IPM-V, ki omogoča več prostora za optimizacijo, predvsem s stališča kota magneta. Pri tretji generaciji (slika 1c) je obdržana oblika IPM-V s to razliko, da so magneti večji, v primerjavi s prejšnjo generacijo. Izvedena je tudi optimizacija oblike utora za magnet in so dodani »žepi«, ki preprečujejo mehanske obremenitve na magnet. Četrta generacija (slika 1d) odstopa od standardne oblike magnetov in temelji na uporabi delta oblike magnetov IPM-VI. Masa magnetov pri IPM-VI glede na prejšnjo generacijo je zmanjšana in s pomočjo optimizacijskih postopkov je povečan delež reluktančnega navora.



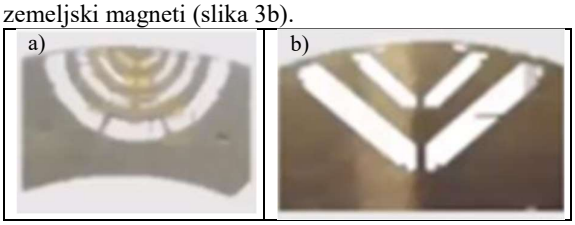
Slika 1: Presek rotorjev Toyota Prius modelov a) IPM-I 2002, b) IPM-V 2004, c) IPM-V 2010, d)IPM-VI 2014 [5]

Delta-postavitev magnetov je uporabljena tudi v Nissan Leaf modelu, ki velja za eno izmed najbolj prodajanih električnih vozil v Evropi. Preseka rotorja Nissanovih motorjev EM57 ter EM61 sta prikazana na sliki 2.



Slika 2: Nissan Leaf EM57 (levo), EM61 (desno)

Razvoj motorjev za Nissan Leaf je med obema generacijama prinesel tudi zmanjšanje mase magnetov za 10 %. Zanimiv model s stališča razvoja IPM motorjev je zagotovo Chevrolet. Preseka rotorjev Chevrolet Volt A in Chevrolet Volt B sta prikazana na sliki 3. Pri modelu Chevrolet Volt A, so v celoti uporabljeni cenejši feritni magneti (slika 3a), pri Chevrolet Volt B pa redko-zemeljski magneti (slika 3b).



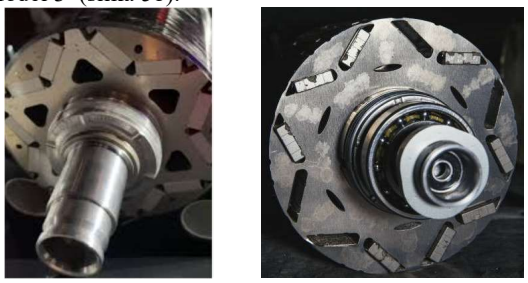
Slika 3: Rotorja: a) Chevrolet Volt A in b) Chevrolet Volt B

Še bolj specifičen primer razvoja generacij je BMW i3, ki ima med obravnavanimi modeli najbolj specifično geometrijo rotorja. Prvotna generacija BMW motorjev z oznako 225xe je vsebovala magnete v obliki črke V. Z nadaljnjim razvojem pa se je zgodil prehod na tip z dvojnimi plastmi magnetov, ki ga označujemo z IPM-II (slika 4). Pogosto ga imenujemo tudi Hybrid-IPM, kjer je reluktančna komponenta navora zelo blizu magnetni komponenti. Takšna zasnova je omogočila uporabo magnetov nižje kakovosti v tem modelu, ter pomembno prispevala k pocenitvi stroja.



Slika 4: a) Presek rotorja modela BMWi3, b) oblika magnetov enega pola, c) segmenti poševljenja [5]

Značilnost modela BMW i3 je tudi karakteristično poševljenje rotorskih segmentov, pri čemer je uporabljen linearen tip poševljenja s šestimi segmenti. Specifični primeri IPM motorjev s stališča IPM razvoja so tudi različne generacije Tesla modela vozila, ki vsebujejo veliko količino trajnih magnetov v rotorju, imajo pa specifično geometrijo s stališča oblike mehanskih mostičev [6]. Pri tem ločimo dve različici, in sicer geometrija brez rotorskih mostičev za motor Tesla S-Plaid (slika 5a) in geometrija z mostiči za motor Tesla Model 3 (slika 5b).



Slika 5: Rotorja Tesla modela a) S-Plaid [6], b) Model 3 [6]

Geometrija S-Plaid (Slika 5a) pomembno vpliva tako na magnetne kot mehanske lastnosti motorja. Mehanska stabilnost celotne geometrije je zagotovljena s prisotnostjo karbonskega zaščitnega plašča (angl. Sleeve). Posledica prisotnosti takšnega plašča je povečana efektivna širina zračne reže (ob enaki geometrijski zračni reži), saj je material obroča magnetno neprevoden in se magnetno obnaša kot zrak. Efektivna širina reže pri S-Plaid tako znaša 2 mm, kar je dvakrat več v primerjavi z Modelom 3. Kljub temu S-Plaid motor razvije višji navor v primerjavi z Modelom 3, saj se del magneta ne uporabi za nasičenje rotorskega mostiča. Pozitiven učinek S-Plaid geometrije je tudi zmanjšanje višjih harmonskih komponent, manjša strmina krivulje moči v odvisnosti od hitrosti v področju slabljenja polja, ter visoke vrtilne hitrosti zaradi karbonskega plašča z visoko natezno trdnostjo.

3 Specifične količine/kazalniki

Specifična moč p_{TM}, specifičen navor m_{TM} na maso trajnih magnetov ter specifična moč na volumen stroja p_{V} so pomembni kazalniki, ki opisujejo, kako učinkovito električni motor izkorišča vgrajene materiale redkih zemelj ter volumen za doseganje zahtevanih zmogljivosti [3]. Definirani so kot:

$$p_{TM} = \frac{P_{max}}{masa_{TM}} \tag{2}$$

$$m_{TM} = \frac{M_{max}}{masa_{TM}} \tag{3}$$

$$p_V = \frac{P_{max}}{V_m} = \frac{P_{max}}{r_z^2 \cdot \pi \cdot l_{Fe}} \tag{4}$$

kjer je M_{max} maksimalen navor motorja, P_{max} je maksimalna moč motorja, $masa_{TM}$ je masa vgrajenih trajnih magnetov v motorju, V_{m} aktivni volumen motorja, r_{z} zunanji polmer statorja in l_{Fe} dolžina motorja. Pri tem je pomembno poudariti, da kazalnik m_{TM} bolj nazorno pokaže učinkovitost rabe magnetov v stroju, saj je le-ta premo sorazmeren z magnetnim sklepom (enačba 1), kot kazalnik p_{TM}, na katerega vplivata tudi vrtilna hitrost in slabljenje polja. Treba je upoštevati tudi dejstvo, da oba kazalnika m_{TM} in p_{TM} popisujeta skupno maso trajnih magnetov, ne glede na vrsto magneta, saj je znotraj motorja lahko prisotna bodisi manjša količina bolj kvalitetnih magnetov, ki vsebujejo težke redkozemeljske elemente, ali pa večja količina manj kvalitetnih magnetov brez teh elementov. Osnovni podatki ter izračunane specifične količine p_{TM}, m_{TM} in p_{V} za obravnavane IPM motorje različnih električnih vozil so prikazani v Tabeli 1. Rezultati v tabeli kažejo na precejšnje razlike v inženirskih pristopih k optimizaciji IPM motorjev. Z vidika specifičnega navora na maso magnetov (m_{TM}), ki najbolje odraža dejansko učinkovitost rabe magnetnega materiala, presenetljivo izstopata najstarejši obravnavani model Toyota Prius 2004 in najzmogljivejša Tesla S-Plaid (Tabela 1). Z vidika kazalnikov p_{TM} in p_{V} pa izrazito izstopata IPM motorja v vozilu Tesla, kar potrjuje njuno izjemno kompaktnost in zanesljivost pri višjih vrtilnih hitrostih (Tabela 1). Industrijski razvojni premik k vse večji volumski gostoti moči je jasno viden tudi znotraj razvojne linije motorjev vozil Toyote Prius, kjer se je specifična moč na volumen (p_{V}) med letoma 2004 in 2018 povečala za več kot dvakrat (Tabela 1).

4 Novi trendi

Na sodobni razvoj električnih motorjev poleg njihovih zmogljivosti pomembno vplivata tudi razpoložljivost in ekonomski vidik uporabljenih materialov. V zadnjem času je vse več pozornosti namenjene dostopnosti in ceni elementov redkih zemelj, saj le-ti predstavljajo ključne surovine za izdelavo trajnih magnetov. Kitajska zavzema prevladujoč položaj v svetovni dobavni verigi redkozemeljskih elementov, saj je odgovorna za proizvodnjo več kot 90 % vseh magnetov NdFeB. Leta 2025 je Kitajska uvedla nadzor nad izvozom redkozemeljskih magnetov, kar je povzročilo upad izvoza ter občutno zvišanje cen teh magnetov na

Tabela 1: Osnovni podatki [3] - [6] in izračunane specifične količine obravnavanih IPM motorjev različnih EV in HEV

Model	r_z(mm)	l_{Fe} (mm)	$masa_{TM}$ (kg)	M_{max} (Nm)	P_{max} (kW)	m_{TM} (Nm/kg)	p_{TM} (kW/kg)	p_V (kW/dm³)
Toyota Prius 2004	134,5	84	1,23	400	50	324,7	40,58	10,47
Toyota Prius 2010	132	50,8	1,39	207	60	148,9	43,17	21,58
Toyota Prius 2018	107	60	0,66	163	53	247	80,3	24,56
Nissan Leaf EM61	99	151,16	1,9	280	80	147,4	42,11	17,17
Nissan Leaf EM57	99	141	1,8	254	80	141,1	44,44	18,43
Chevrolet Volt B	170	51,5	4,2	280	87	66,66	20,71	18,61
Chevrolet Volt A	170	31,5	0,9	118	48	131,11	53,33	16,78
BMW i3	121	132	2	250	125	125	62,5	20,59
Tesla Model 3	112,5	134	1,8	430	192	238,8	106,6	36,03
Tesla S-Plaid	112,5	134	1,8	530	266	294,4	147,7	49,9

evropskem trgu [7]. Prav ta nihanja v dobavni verigi so glavni razlog, da proizvajalci motorjev, zlasti v Evropi, še naprej iščejo rešitve, s katerimi bi postali neodvisni od trenutnih razmer na globalnem trgu. Omenjene rešitve se osredotočajo na razvoj novih materialov, ki izkazujejo manjše izgube pri višjih frekvencah. To je omogočilo, da je povečanje vrtilne hitrosti motorjev postalo eden izmed pomembnih sodobnih razvojnih trendov. Višje vrtilne hitrosti tako omogočajo zmanjšanje količine trajnih magnetov, saj je moč motorja zmnožek navora in vrtilne hitrosti. Slednje pomeni, da novi pogoni s hitrostmi do 20.000 vrt/min (Tesla Model Y in Polestar 2) dosežejo enako moč pri nižjem navoru v primerjavi s starejšimi pogoni z nižjimi hitrostmi [4]. Bolj smotrno rabo oziroma redukcijo količine trajnih magnetov v novejših električnih pogonih omogoča tudi napredek v tehnologiji izdelave trajnih magnetov. Redukcija količine težkih redkih zemelj se doseže z mejno difuzijo zrn Tb in Dy na površini magneta (angl. grain boundary diffusion) [8], pri čemer se zrna Tb in Dy nanašajo le na površino magneta. V nekaterih magnetih se delež neodima nadomešča s cenejšim cerijem in lantanom. Takšne magnete najdemo v motorjih Toyota iz leta 2018, kjer so količino neodimija zmanjšali za 50 % in popolnoma izločili Tb in Dy [9].

Pomembno je omeniti še povsem drugačno smer razvoja pogonskih električnih motorjev, ki temelji na tehnologiji brez uporabe trajnih magnetov. Gre za uporabo sinhronskih motorjev z navitim rotorjem, pri katerih vzbujalno magnetno polje ustvari tok rotorskega navitja. Prednost takšne zasnove, je nadzorovano vzbujanje, pri čemer je slabljenje polja možno enostavno doseči z nižanjem rotorskega toka. Takšen premik v razvoju je najbolj zastopan pri evropskih proizvajalcih. Predstavniki te zasnove v električnih avtomobilih so BMW eDrive, Renault Zoe in Nissan Leaf [4]. Druga možnost je uporaba asinhronega motorja s kratkostično kletko, ki ga lahko najdemo v sprednjem pogonu Tesle Model Y, v pogonih Audija e-tron in Mercedesa [4].

Na podlagi primerjave topologij motorjev v najbolj prodajanih električnih avtomobilih na trgu, od leta 2018 do 2023, lahko zaznamo trenutne trende in poskušamo napovedati nadaljnji razvoj električnih motorjev v avtomobilih. Sinhronski stroji s trajnimi magneti še vedno prevladujejo z 62 % deležem. Deleža zastopanosti asinhronskega in sinhronskega stroja z navitim rotorjem pa trenutno znašata po 19 % [4], pri čemer se njuna gostota moči v zadnjih letih vztrajno povečuje in hitro približuje motorjem s trajnimi magneti. Zaradi tega in zaradi nedostopnosti magnetnih materialov na trgu je pričakovati, da se bo ta trend nadaljeval in, da se bo njihov delež v prihodnjih letih še povečeval.

5 Zaključek

V članku je predstavljen pregled razvoja pogonskih motorjev, uporabljenih v električnih in hibridnih avtomobilih z vidika količine trajnih magnetov. Primerjavo med IPM motorji različnih proizvajalcev smo opravili na podlagi kazalnikov p_{TM}, m_{TM} in p_V. Ugotavljamo, da po specifični moči glede na maso (p_{TM}) in volumen (p_V) magnetov, dominirajo motorji v modelih Tesla, medtem ko najučinkovitejšo rabo trajnih magnetov izkazujeta motorja v pogonih vozil Prius 2004 in Tesla S-Plaid. Hitro naraščajoč industrijski trend prehoda k višji volumski gostoti moči najbolj nazorno izkazuje IPM motor v vozilih Prius, ki je kazalnik p_V med letoma 2004 in 2018 uspel povečati za več kot dvakrat. Rezultati kažejo, da so proizvajalci IPM motorjev skozi leta uporabljali različne rešitve za zmanjšanje vsebnosti trajnih magnetov, pri tem so uspeli hkrati znižati volumen motorja ter izboljšati njegove karakteristike. Omenjene rešitve temeljijo na povečanju reluktančne komponente navora, povečanju vrtilnih hitrosti motorjev in na uporabi inovativne tehnologije proizvodnje magnetov brez težkih redkozemeljskih elementov.

Zahvala

Raziskava je bila izvedena v okviru projektov ARIS P2-0258 in REMHub (101177493), Horizon Europe.

Literatura

[1] F. Un-Noor, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, M. N. Mollah, E. Hossain: A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development. Energies, vol. 10, art. 1217, 2017.

[2] R. Krishnan: Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. CRC Press, Boca Raton, 2010.

[3] M. Alani, Y. Oner, A. Tameemi: Electrical machines in automotive: evaluation of current technologies and future requirements. Electrical Engineering, vol. 105, str. 477–491, 2023.

[4] D. Drexler, A. Kampker, H. Born, M. Nankemann, S. Hartmann, T. Kulawik: Advances in electric motors: a review and benchmarking of product design and manufacturing technologies. Elektrotechnik und Informationstechnik, vol. 142, str. 312–345, 2025.

[5] T. Burress: Electrical performance, reliability analysis, and characterization. 2017 U.S. DOE Vehicle Technologies Office Annual Merit Review, Washington, DC, ZDA, 2017.

[6] J. Binder, M. Silvagni, S. Ferrari, B. Deusinger, A. Tonoli, G. Pellegrino: High-speed IPM motors with rotor sleeve: Structural design and performance evaluation. 2023 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Newcastle upon Tyne, United Kingdom, str. 1–6, 2023.

[7] International Energy Agency: With new export controls on critical minerals, supply concentration risks become reality. IEA, Pariz, 2025. https://www.iea.org/commentaries/with-new-export-controls-on-critical-minerals-supply-concentration-risks-become-reality

[8] Z. Liu, J. He, R. V. Ramanujan: Significant progress of grain boundary diffusion process for cost-effective rare earth permanent magnets: A review. Materials & Design, vol. 209, čl. 110004, 2021.

[9] Toyota Motor Corporation: Toyota develops new magnet for electric motors aiming to reduce use of critical rare-earth element by up to 50 %. Toyota Global Newsroom, 2018. Dostopno: https://global.toyota/en/newsroom/corporate/21139684.html