

Elektrické motory pre elektromobily

Electric motors for electric vehicles

Jaroslava Žilková, Ján Kaňuch

jaroslava.zilkova@tuke.sk, jan.kanuch@tuke.sk

Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, Slovenská Republika

Abstrakt — Tento príspevok podáva prehľad a charakteristiku elektrických motorov najčastejšie používaných v elektrických vozidlách (EV) a hybridných elektrických vozidlách (HEV). V článku je uvedená klasifikácia a krátke predstavenie EV a HEV, požiadavky kladené na elektrické motory pre elektrické vozidlá, ich charakteristiky, porovnania jednotlivých typov motorov a možnosti ďalšieho smerovania v použití elektrických motorov pre aplikáciu v elektromobiloch.

Kľúčové slová — elektrické motory, elektromobily, hybridné elektromobily.

Abstract — This paper gives an overview and characterization of electric motors most commonly used in electric vehicles (EVs) and hybrid electric vehicles (HEVs). The paper presents the classification and a brief introduction of EVs and HEVs, the requirements for electric motors, their characteristics, comparison of individual types of the motors and the possibility of further direction in the use of electric motors for application to electric vehicles.

Keywords — electric motors, electric vehicles, hybrid vehicles.

I. ÚVOD

Rozvoj automobilizmu priniesol so sebou ekologické zaťaženie životného prostredia. Emisie automobilov, ktoré majú nepriaznivý účinok na životné prostredie a človeka, sú sprievodné produkty bežnej prevádzky vozidiel. Vzhľadom na zhoršujúcu sa situáciu je nutné vytvárať podmienky pre korigovanie tohto vývoja a hľadať nástroje, ktorými by bolo možné dosiahnuť zníženie ekologickej záťaže životného prostredia.



Obr. 1. Zákaz jazdy pre časť dieselových áut v niektorých uliciach Hamburgu.

V súčasnosti, keď sa ďalší rozvoj krajín stále viac spája s opatreniami na ochranu životného prostredia obr.1, keď ceny palív neustále rastú a spotreba paliva je jedným z najdôležitejších parametrov automobilu, sa objavili viaceré alternatívne riešenia, z ktorých dominantné postavenie získal práve vývoj elektrických vozidiel (EV) s priamym a hybridným pohonom.

Elektrické vozidlá dnes vyvíjajú a vyrábajú všetci rozhodujúci výrobcovia automobilov. Širší pojem EV zahŕňa dnes celý rad vozidiel, ktoré môžeme rozdeliť na [6]:

- BEV (battery electric vehicles) – batériové elektromobily,
- FCEV (fuel cell electric vehicles) – elektromobily vybavené palivovými článkami,
- REEV (range extender electric vehicles) – batériové elektromobily s predĺženým dojazdom,
- HEV (hybrid electric vehicles) – hybridné elektromobily,
- PHEV (plug-in hybrid electric vehicles) – plug-in hybridné elektromobily.

Hybridné elektromobily pritom tvoria dôležitú skupinu automobilov pri prechode k využívaniu čisto elektrických vozidiel.

II. ELEKTROMOTORY PRE POHONY ELEKTRICKÝCH VOZIDIEL

Rýchly rozvoj elektromobilov je spojený s rastúcim záujmom o využitie elektrických pohonov v tejto oblasti. Náročné prevádzkové režimy a pracovné podmienky vozidiel vytvárajú špecifické požiadavky kladené na elektrické motory a pohonné systémy použité v hnacom systéme elektromobilov, čo nás núti považovať motory pre EV za osobitnú kategóriu elektrických motorov. Hlavné rozdiely medzi motormi pre EV a priemyselnými motormi sú uvedené v Tabuľke 1.

TABUĽKA I ROZDIELY V POŽIADAVKÁCH KLADENÝCH NA PRIEMYSELNÉ MOTORY A MOTORY ELEKTRICKÝCH VOZIDIEL

Parameter	Motory pre EV	Priemyselné motory
Teplota okolia [°C]	-40 až 140	20 až 40

Parameter	Motory pre EV	Priemyselné motory
Prevádzkové prostredie	Nepriaznivé vonkajšie prostredie	Vo vnútri budov
Teplota chladiacej kvapaliny [°C]	75 až 150	<40
Teplota vinutia [°C]	160 až 200	75 až 130
Rozsah otáčok [ot/min]	0 až 15000	<3000
Hladina hluku	Veľmi nízka	Nízka
Inštalčný priestor	Veľmi obmedzený	Voľný

Všeobecné požiadavky kladené na elektrické pohony pre EV sú prísnejšie než pre priemyselné aplikácie. K hlavným požiadavkám na pohony elektrických vozidiel patria požiadavky ako [6]:

- vysoký krútiaci moment a výkon,
- široký rozsah otáčok,
- vysoká účinnosť pri širokom rozsahu otáčok a momentu,
- veľký rozsah otáčok v oblasti konštantného výkonu,
- veľký krútiaci moment pri nízkych otáčkach, pri štarte a zdolávaní veľkých prevýšení,
- možnosť vysokého preťaženia pre predbiehania,
- potlačenie hlučnosti motora,
- rozumná cena.

Ako vyplýva z Tabuľky II, ktorá uvádza prehľad typov elektrických motorov použitých v jednotlivých elektrických vozidlách, najčastejšie používané motory pre pohon elektromobilov sú:

- jednosmerný motor,
- asynchrónny motor s kotvou nakrátko,
- synchrónny motor s permanentnými magnetmi.

A. Jedsomerný komutátorový motor (DC motor)

Je najstarším druhom elektrických motorov, ktoré boli v minulosti často používané hlavne pre ich jednoduché riadenie. Stator jednosmerného motora sa skladá z hlavných a pomocných pólov, pričom počet pólov nesúvisí s rýchlosťou motora ako je to u striedavých motorov. Podľa spôsobu pripojenia budiaceho vinutia rozdeľujeme jednosmerné motory na motory s cudzím buđením, sériové, derivačné a kompaundné.

V trakkii sa najviac využívajú sériové jednosmerné motory, ktoré majú zo všetkých typov jednosmerných motorov najväčší záberový moment. Tento typ jednosmerného motora má veľmi mäkkú momentovú charakteristiku, takže s rastúcou rýchlosťou moment rýchle klesá. Ďalším obmedzením sériového motora je skutočnosť, že sa nemôže rozbiehať bez zaťaženia, čo by viedlo k prudkému zvýšeniu rýchlosti a motor by sa mohol poškodiť. V prípade použitia motora v EV je táto vlastnosť výhodná.

Jednosmerný motor s cudzím buđením má veľmi dobré vlastnosti, je schopný plynulého prechodu z motorickej do generátorickej prevádzky, pričom oproti striedavým

motorom má pomerne jednoduchú reguláciu otáčok v širokom rozsahu. Výhodou použitia jednosmerných pohonov v EV je možnosť napájania motora jednosmerným napätím priamo z batérie bez použitia napäťového striedača, ako je to u striedavých motorov.

Derivačný jednosmerný motor má budiace vinutie pripojené paralelne k vinutiu kotvy. Tento motor má mäkkšiu momentovú charakteristiku ako cudzobudený motor, je pomerne jednoducho riaditeľný, ale v menšom rozsahu otáčok než cudzobudený motor.

Kompaundný jednosmerný motor má časť budiaceho vinutia zapojenú v sérii a časť vinutia paralelne s vinutím kotvy. Tieto motory majú jednoduchšie riadenie a priaznivejšie momentové charakteristiky než striedavé motory, sú však drahšie, pri rovnakej veľkosti majú nižší výkon a vyžadujú pravidelnú údržbu.

Nevýhodou jednosmerných motorov je, že kefky a komutátor sú náchylné na poruchy, maximálne otáčky sú obmedzené a účinnosť a hustota výkonu je menšia ako u striedavých motorov. Komutátor obmedzuje maximálne otáčky motora, vyžaduje pravidelnú údržbu a môže sa stať zdrojom poruchy motora z dôvodu opotrebovania.

Tieto skutočnosti a rozvoj polovodičovej techniky s vývojom frekvenčných meničov sú hlavné dôvody prečo sa od používania jednosmerných komutátorových motorov z veľkej časti upustilo.



Obr. 2. Warp 11 DC Motor [10]

B. Asynchrónny motor s kotvou nakrátko (AM motor)

Veľkou výhodou trojfázového asynchrónneho motora s kotvou nakrátko je jeho pomerne jednoduchá konštrukcia. K ďalším výhodám asynchrónneho motora patrí možnosť veľkého preťaženia, minimálna údržba a taktiež vysoká prevádzková spoľahlivosť. Oproti jednosmernému motoru je asynchrónny motor pri tom istom výkone menší a ľahší. Na Obr. 3 je uvedený asynchrónny motor, ktorý sa používa v elektromobiloch Tesla Model S.



Obr. 3. Asynchrónny motor pre elektromobil Tesla model S [11]

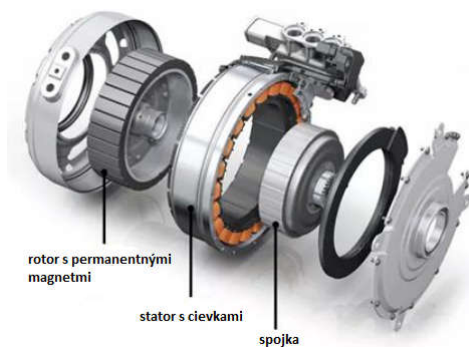
C. Synchrónny motor

Synchrónnym motorom najviac využívaným v EV je PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) synchrónny motor s permanentnými magnetmi. PMSM pre vytvorenie magnetického toku využíva permanentné magnety

TABULKA II PREHLAD JEDNOTLIVÝCH TYPOV ELEKTRICKÝCH MOTOROV V NIEKTORÝCH EV A HEV [7]

Typ motora	Modely EV a HEV
DC	Peugeot Partner, Peugeot 106, Honda EV Plus, Citroen Berlingo Electricque, Citroen Saxo, Subaru minivan 200, Chrysler TEVan, CityEl, Fiat Panda Elettra, Reva G-Wiz DC
AM	Audi e-tron, Tesla Model S, Tesla Model X, Ford Focus Electric, Fiat Doblo, Ford Transit Connect EV, Citroen C1 evie, Micro-Vet Fiat Panda, Micro-Vet Fiat 500, GM EV1, Ford Ranger EV, Ford Ecostar, BMW Mini E, Tesla Roadster,
PMSM	Tesla Model 3, Hyundai BlueOn, Nissan Leaf, Citroen C-Zero, Peugeot iOn, BYD F3M, BYD e6, Mitsubishi i-MiEV, Toyota Prius, Ford Fusion Hybrid, Toyota RAV4 EV, Nissan Altra, VW GOLF City Stromer
BLDC	Smart Fortwo ED, Honda Civic Hybrid

z moderných materiálov, neodoberá zo zdroja magnetizačný prúd, v rotore nevznikajú straty v budiacom vinutí a PMSM má v dôsledku toho vyššiu účinnosť a menšie rozmery než klasický AM. Najčastejšia konštrukcia PMSM motora má trojfázové statorové vinutie, ktoré sa nachádza v drážkach. Vo vnútri statora sa nachádza rotor s vloženými permanentnými magnetmi. Vytvorením dutín v rotore je možné znížiť hmotnosť motora. Materiály, z ktorých sa najčastejšie vyrábajú permanentné magnety sú zliatiny NdFeB (neodym-železo-bór) alebo SmCo (samarium-kobalt), ktorých magnetická indukčnosť je až trojnásobná v porovnaní s bežne používanými feritovými magnetmi. Vďaka tomu tieto motory nemajú veľké rozmery. Pracovná teplota magnetov môže dosiahnuť až 200°C, avšak dlhodobá prevádzka presahujúca teplotu 80°C znižuje ich životnosť. Na Obr. 4 je zobrazený PMSM v rozloženom stave.



Obr. 4. PMSM v rozloženom stave

Ako vyplýva z Tabuľky II, viacerí výrobcovia EV a HEV (Peugeot, Honda, Citroen, Subaru, Chrysler...) skoro až do roku 2000 používali prevažne jednosmerné motory. Po roku 2000 môžeme pozorovať odklon od používania jednosmerných motorov v EV a HEV, pričom v súčasnosti sa používajú hlavne dva typy motorov:

- asynchrónny motor s kotvou nakrátko (Tesla, Honda, Toyota, Saab, Ford, Fiat, Mini, Citroen, General Motors...),
- motor častejšie označovaný výrobcami EV (Hundai, Peugeot, Nissan...) ako PM motor alebo SM motor, často zahŕňa synchronný motor s permanentnými magnetmi (Obr. 4) a niekedy aj BLDC motor (Obr.5). Oba tieto motory využívajú permanentné magnety a konštrukčne sú veľmi podobné. Synchronný motor s permanentnými magnetmi je použitý aj v automobile Tesla Model 3.



Obr. 5. BLDC motor pre elektromobil [10]

D. Porovnanie striedavých pohonov pre využitie v elektrických vozidlách

U výkonných motorov s PM prevádzkovaných kratšiu dobu je výhodné ich použitie v prípadoch, kedy potrebujeme nízku hmotnosť, malé rozmery a čo najvyššiu účinnosť, ako je to v prípade elektrických vozidiel. PMSM sú efektívnejšie pri nízkych a stredne vysokých rýchlostiach, čo je vhodné pre menej výkonné modely EV ako je napr. Tesla Model 3.

AM musí mať chladený aj rotor, ale na druhej strane je možné ho viac preťažiť a znesie vyššie teploty. U PMSM je maximálna veľkosť magnetického poľa obmedzená permanentnými magnetmi, ale u AM môžeme zvýšením prúdu dosiahnuť silnejšie magnetické pole, teda aj vyšší krútiaci moment a vyššie zrýchlenie vozidla. Cenou za túto možnosť je však vyššia spotreba energie.

PMSM má výhodu vo väčšom krútiacom momente v porovnaní s rovnako veľkým AM, takže môže pracovať pri nižších otáčkach a preto aj s nižším prevodovým pomerom.

Preto v celkovom zhrnutí pre prácu v blízkosti svojho nominálneho výkonu môže byť PMSM spolu s prevodovkou menší, ľahší, lacnejší a účinnejší než riešenie s AM. Výhodou AM je možnosť vyššieho preťaženia, na ktoré sú konštruované motory EV, ale v praktickom využití to nespôsobuje veľký problém, nakoľko tieto preťaženia sú krátkodobé. Hlavnou nevýhodou PMSM okrem často uvádzaného problému dostupnosti a ceny vzácnych kovov, z ktorých sú vyrábané magnety je, že magnety sa pri prehriatí zničia.

III. ZÁVER

Dnešní výrobcovia elektromobilov používajú najmä tri typy motorov.

Staršie modely elektromobilov používali štandardné jednosmerné motory, ktoré sú relatívne jednoducho riaditeľné. Vzhľadom na ich relatívne nízku účinnosť a skutočnosť, že sú veľké, ťažké a vyžadujú si pravidelnú údržbu, štandardné jednosmerné motory nie sú pre moderné EV a HEV atraktívne. Preto ich ďalšie použitie je zamerané skôr ako domáce elektromotory, prípadne v lacných aplikáciách ako sú golfové vozíky a pod. Vďaka rozvoju

výkonovej elektroniky, ktorá umožnila presné riadenie striedavých pohonov, je použitie klasických trakčných motorov v dnešnej dobe prekonané.

V novších modeloch elektrických aj hybridných vozidiel sa používajú striedavé elektrické pohony, ktoré dnes pracujú s vysokými účinnosťami. Striedavé motory, ako asynchrónne motory s kotvou nakrátko alebo striedavé motory s rotorom s permanentnými magnetmi, poháňané elektronickými meničmi sú ľahšie, výkonnejšie a môžu sa používať aj ako generátory, ktoré vytvárajú energiu pri spomalení alebo brzdení. Pre aplikácie s nižším výkonom sa vo všeobecnosti používajú skôr motory s PM, ktoré sú o niečo efektívnejšie, zatiaľ čo vysokovýkonné vozidlá budú používať asynchrónne motory, ktoré sú schopné dosiahnuť väčšie akceleračné krútiace momenty. Pre použitie synchrónnych motorov s PM hovorí väčšia hustota výkonu vzhľadom k rozmerom motora. Tento trend sa však môže meniť vzhľadom k cenám kovov vzácných zemin potrebných pre výrobu PM a preto sa výrobcovia elektrických vozidiel môžu prikláňať k použitiu asynchrónnych motorov.

POĎAKOVANIE



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/ Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ. Tento článok bol vypracovaný v rámci projektu "Centrum excelentnosti integrovaného výskumu a využitia progresívnych materiálov a technológií v oblasti automobilovej elektroniky", ITMS 26220120055.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] Cheng, M., Sun, L., Buja, G., Song, L., „Advanced Electrical Machines and Machine-Based Systems for Electric and Hybrid Vehicles“, *Energies*, no. 8, pp. 9541-9564, 2015.
- [2] Satyendra Kumar, M., Revankar Shripad, T., „Development scheme and key technology of an electric vehicle: An overview“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 1266, 2017.
- [3] *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005.
- [4] Xue, X., Cheng, K., Cheung, N., „Selection of electric motor drives for electric vehicles“. *AUSTR U POWENG*, pp. 1-6, 2008.
- [5] Nanda, G., Kar, N.C.A., „Survey and Comparison of Characteristics of Motor Drives Used in Electric Vehicles“, *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, pp. 811-814, 2006.
- [6] Zhu, Z.Q., Howe, D., „Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles“, *Proceedings of IEEE*, vol. 9, no.4, April 2007.
- [7] Santiago, J., Bernhoff, H., Ekegard, B., et al., „Electrical Motor Drivelines in Commercial All-Electric Vehicles“, *A Review*, *IEEE*, vol. 61, no. 2, pp. 475-484, 2012.
- [8] West, J.G.W., „DC, Induction, Reluctance and PM Motors for Electric Vehicles“, *Power Engineering Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 77-88, 1994.
- [9] Volvo Cars to introduce 3-cylinder FWD PHEV in 2018, BEVs & 48V mild hybrid in 2019, Modular Electrification Platform. 2017, dostupné: www.volvo.html
- [10] Warp 11 DC Motor. 2017, dostupné: http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=8&products_id=84
- [11] Tesla Model S & Nissan LEAF = World's Best-Selling Electric Cars In 2016, Clean Technica. 2017
- [12] Brushless motors, nidec corporation, 2017, dostupné: <http://www.nidec.com/en-NA/technology/capability/brushless>
- [13] Tesla.Premium Electric Sedans and SUVs., 2017, dostupné: <https://www.tesla.com>
- [14] Nissan Partner With Green Charge Networks For Commercial Energy Storage. 2015, dostupné: <http://electriccarsreport.com/2015/06/nissan-partner-with-green-charge-networks-for-commercial-energy-storage/>

- [15] Audi reveal eROT energy harvesting 'regen' shock absorbers. Electric Vehicle News. 2016, dostupné: <http://www.electric-vehiclenews.com/2016/08/audi-reveal-erot-energy-harvesting.html>

J. Žilková (doc., Ing., PhD.) - ukončila inžinierske štúdium na Katedre Technickej kybernetiky FEI TU v Košiciach. Po ukončení štúdia pracovala ako výskumná pracovníčka v EVÚ Nová Dubnica det. prac. Košice a ZŤS VVÚ Košice. Od roku 2008, po habilitácii v odbore Silnoprúdová elektrotechnika, je docentkou na Katedre elektrotechniky a mechatroniky FEI TU v Košiciach. Oblasť jej výskumnej činnosti sú hlavne moderné metódy riadenia elektrických pohonov a aplikácie metód umelej inteligencie so zameraním na teóriu fuzzy množín a umelých neuronových sietí v riadení, modelovaní a pozorovaní veličín v el. pohonoch.

J. Kaňuch (doc., Ing., PhD.) - ukončil inžinierske štúdium v r. 1986 v odbore Silnoprúdová elektrotechnika na Katedre Elektrických pohonov FEI TU v Košiciach., so zameraním na elektrické stroje a prístroje. Od ukončenia štúdia pracuje na tejto katedre. V roku 2006 získal titul PhD. v odbore Silnoprúdová elektrotechnika a po habilitácii v roku 2018 je docentom (Katedra elektrotechniky a mechatroniky na FEI TU v Košiciach). Oblasť jeho profesijného záujmu sú hlavne Elektrické stroje a prístroje, Elektrické pohony, Automobilová elektrotechnika a mechatronika, EMC a Priemyselná elektronika.