

Ondřej Černý¹, Radovan Doleček², Jaroslav Novák³

Synchronní motory s permanentními magnety pro trakční pohony kolejových vozidel

Klíčová slova: *stejnoseměrný motor, asynchronní motor, synchronní motor s permanentními magnety (PMSM), permanentní magnet, trakční pohon, výzkum*

1 Úvod

Dominantní hnací jednotku v elektrických trakčních pohonech představovaly stejnosměrné motory ještě před 20 lety. S rozvojem techniky výkonových polovodičových měničů na bázi křemíkových součástek se v té době začaly uplatňovat v elektrické trakci první aplikace s konstrukčně jednoduššími a provozně spolehlivějšími asynchronními motory.

Velký obrat ve využití synchronních strojů malých a středních výkonů přinesla aplikace permanentních magnetů ze speciálních slitin s velkou magnetickou indukčností. Synchronní motory s těmito magnety (PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor) se již více než 10 let standardně využívají v servotechnice, robotice a automatizační technice v pohonech o výkonech od stovek W do desítek kW. V těchto oblastech nahrazují PMSM zejména stejnosměrné a krokové motory. Pro své příznivé vlastnosti se PMSM v posledních letech začaly využívat i v trakčních elektrických pohonech.

¹Ing. Ondřej ČERNÝ, Ph.D.; narozen 1980; Univerzita Pardubice, DFJP, obor Dopravní prostředky a infrastruktura, specializace elektrotechnika, se sídlem v Pardubicích; současné zaměření: Elektrické pohony, regulační technika, výkonová elektrotechnika; pracoviště: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, Studentská 95, 532 10 Pardubice, e-mail: ondrej.cerny@upce.cz

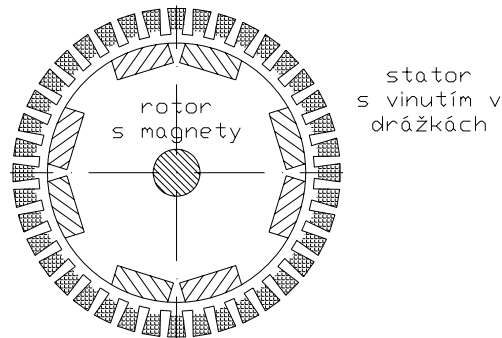
²Doc. Ing. Radovan DOLEČEK, Ph.D.; narozen 1971; Univerzita Pardubice, DFJP, obor Dopravní prostředky a infrastruktura, specializace elektrotechnika, se sídlem v Pardubicích; současné zaměření: EMC, výkonová elektronika, trakční systémy, elektrické pohony; pracoviště: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, Studentská 95, 532 10 Pardubice, e-mail: radovan.dolecek@upce.cz

³Doc. Ing. Jaroslav NOVÁK, CSc.; narozen 1966; Univerzita Pardubice, DFJP, obor Dopravní prostředky a infrastruktura, specializace elektrotechnika, se sídlem v Pardubicích; současné zaměření: Elektrické pohony, řídicí a regulační technika; pracoviště: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, Studentská 95, 532 10 Pardubice, e-mail: jaroslav.novak@upce.cz

2 PMSM pro trakci

Konstrukční řešení PMSM pro trakci lze rozdělit do dvou skupin:

- První klasickou koncepcí PMSM představuje stroj, který má satorové trojfázové vinutí uloženo v drážkách železného magnetického obvodu, podobně jako u asynchronního motoru. Uvnitř satoru je umístěn rotor, který nese permanentní magnety – obr. 1 – motor s vnitřním rotorem.



Obr. 1. Konstrukce PMSM s vnitřním rotorem

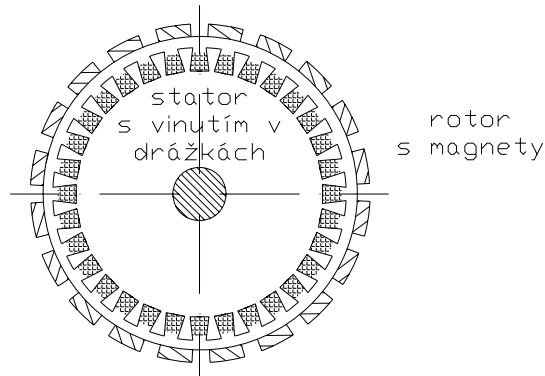
Rotor je často odlehčený dutinami, neboť magnetický tok se u těchto motorů uzavírá v povrchové vrstvě. Póly permanentních magnetů jsou tvořeny dílčími segmenty. Rozměry těchto segmentů jsou i u výkonných motorů omezeny na desetiny, maximálně jednotky cm – obr. 2.



Obr. 2. Segment permanentního magnetu NdFeB pro trakční PMSM

Magnety se na rotor upevňují lepením a zpevňují bandáží. Při napájení satorového vinutí z trojfázové soustavy napětí se ve satoru vytvoří točivé magnetické pole, jehož magnetické účinky jsou obdobné, jako účinky otáčejícího se magnetu. Rychlost otáčení točivého pole je dána frekvencí napájecího napětí satoru a konstrukcí stroje. Póly permanentních magnetů na rotoru jsou vázány silově na točivé magnetické pole satoru, rotor je tedy vlivem magnetických sil unášen a jeho rychlost je s rychlostí točivého pole totožná. Tato vlastnost je pro synchronní motor charakteristická. Z uvedených skutečností potom vyplývá, že rychlost otáčení rotoru synchronního motoru je možno řídit změnou frekvence napájecího napětí satoru. Trakční synchronní motory jsou proto vždy napájeny z výkonových polovodičových měničů napětí s říditelnou výstupní frekvencí.

- Druhou konstrukční variantou je řešení, kdy je trojfázový sator obepínán rotorem s permanentními magnety – obr. 3 – motor s vnějším rotorem.



Obr. 3. Konstrukce PMSM s vnějším rotorem

Tato konstrukce se využívá v aplikacích, kdy je motor integrován přímo do konstrukce kola. Stator je tedy v těchto případech spojen s osou kola, rotor, který jej obepíná, je součástí kola. Princip funkce, napájení a řízení motorů s vnějším rotorem jsou stejné jako u motorů s vnitřním rotorem.

2.1 **Permanentní magnety pro PMSM**

Permanentní magnety které představují klíčový element PMSM, jsou vyráběny ze speciálních slitin na bázi dvou skupin materiálů:

- Materiály na bázi prvků Neodym – Železo – Bór, např. $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$,
- nebo materiály na bázi prvků Samarium – Kobalt, např. Sm_1Co_5 nebo $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$.

Výhodou magnetů na bázi těchto materiálů je velká remanentní magnetická indukce – do 1 T u magnetů SmCo, do 1,25 T u magnetů NdFeB, remanentní magnetická indukce běžných permanentních magnetů na bázi feritu je přibližně 0,3 T. Kromě vyšší magnetické indukce mají magnety NdFeB, které se používají častěji, příznivější cenu, avšak, oproti magnetům SmCo, jsou méně odolné vůči korozi a tudíž mají menší životnost – udává se maximálně desítky let. Charakteristickou vlastností magnetů ze speciálních slitin je ztráta magnetických vlastností při zvýšené teplotě. Proto je maximální provozní teplota u magnetů SmCo přibližně 300 °C, u magnetů NdFeB přibližně 100°C.

U elektrických točivých strojů jsou obecně jejich objemy a hmotnosti dány velikostí dosažitelného točivého momentu. Pro dosažení únosných rozměrů a hmotnosti motoru se proto elektropohon koncipuje zpravidla pro vyšší otáčky a nižší točivý moment a potřebného snížení otáček a zvýšení točivého momentu se dosahuje použitím převodovky. Hlavními výhodami trakčních PMSM jsou jejich malé objemy a hmotnosti. Tohoto zmenšení rozměrů je dosaženo použitím permanentních magnetů s velkou remanentní magnetickou indukcí, neboť magnetické indukci je přímo úměrný dosažitelný točivý moment motoru. Trakční PMSM ze slitin SmCo nebo NdFeB je proto možno konstruovat jako pomaluběžné, s dostatečně velkou hodnotou točivého momentu při dostatečně malých rozměrech. Základním přínosem trakčních pohonů s PMSM je tudíž výrazné zmenšení objemu a hmotnosti motoru a možnost absence mechanické převodovky v přímém, bezpřevodkovém pohonu kol nebo náprav vozidla. Vlivem velké koncentrace výkonu v malém objemu motoru jsou u PMSM horší podmínky pro odvod ztrátového tepla. Proto se u trakčních PMSM větších výkonů používá zpravidla vodní chlazení.

3 Koncepce trakčních pohonů

V silničních a kolejových vozidlech se uplatňuje několik koncepcí bezpřevodkových trakčních pohonů se PMSM v rozsahu výkonů od řádově stovek W do stovek kW na jeden trakční motor. U silničních vozidel, počínaje elektrokoly, přes osobní automobily a autobusy s elektrickým nebo hybridním pohonem až po speciální stavení stroje, je efektivním řešením použití motorů s vnějším rotorem, které jsou integrovány přímo do kol. U kolejových vozidel není integrace motoru s vnějším rotorem do konstrukce kola příliš výhodná, neboť toto řešení navyšuje neodpružené hmoty a při jízdě vozidla dochází ke zvýšení mechanických rázů v trati a jejím okolí. U silničních vozidel jsou negativní vlivy neodpružených hmot eliminovány pneumatikami. U bezpřevodkových individuálních pohonů kol kolejových vozidel je proto z důvodu minimalizace neodpružených hmot výhodnější koncepce s PMSM s vnitřním rotorem a přenosem točivého momentu od motoru na kolo kloubovým spojením. Toto řešení je vhodné zejména pro plně nízkopodlažní tramvaje, neboť absence nápravy kol zvyšuje plochu nízké podlahy. U železničních vozidel s PMSM, kde jsou kola spojena nápravou, se používají trakční PMSM, u kterých motor pohání bezpřevodkově celou nápravu. Z důvodu minimalizace neodpružených hmot je však nutno opět řešit pružné spojení pro přenos točivého momentu, nejčastěji prostřednictvím pružné spojky s dutým hřídelem motoru, kterým prochází náprava.

Z realizovaných kolejových vozidel s trakčními PMSM je možno jmenovat například japonský příměstský vlak e-train s přímými pohony náprav s výkonem jednoho motoru 160 kW [1] - obr.4. - nebo tramvaj Citadis od firmy Alstom s výkonem jednoho motoru 100 kW – obr.5. Tato tramvaj umožňuje provoz na tramvajových i železničních tratích. Zajímavou aplikací trakčních PMSM jsou kolové pohony vozů metra od firmy Siemens pro francouzského zákazníka. Tyto vozy mají výkon jednoho motoru 65 kW a jezdí na pneumatikách – obr.6.



Obr. 4. Příměstský vlak e-train



Obr. 5. Tramvaj Citadis



Obr. 6. Vozy metra VAL 208

V současnosti jediným typem vozidla s trakčními PMSM, které bylo vyrobeno v České republice, je plně nízkopodlažní tramvaj 15T ForCity od firmy Škoda Transportation – obr.7.



Obr. 7. Tramvaj 15T For City s trakčními PMSM

Tramvaj je vybavena šestnácti trakčními PMSM 45 kW, které zajišťují individuální pohon všech šestnácti kol, která jsou umístěna ve čtyřech otočných podvozcích. Jsou použity motory s vnitřním rotorem, které jsou kloubově spojeny s koly. Tramvaj je určena pro Prahu a v současnosti je ve zkušebním provozu.

Kromě bezpřevodkových trakčních pohonů se v silničních i kolejových dopravních prostředcích můžeme setkat s aplikacemi PMSM, kde je náprava poháněna přes převodovku. Výhodou zde opět zůstávají malé rozměry a hmotnost motoru. Mezi nejzajímavější aplikace v této oblasti patří pohony pro nové francouzské vysokorychlostní vlaky AGV od firmy Alstom, kde jsou použity PMSM s výkonem 1 MW. V současnosti se jedná se o jedny z nejvýkonnějších PMSM, které jsou vyráběny.

Celkově lze výhody trakčních pohonů se PMSM shrnout do těchto bodů:

- výrazná úspora objemu a hmotnosti oproti pohonům s asynchronními a stejnosměrnými motory (až 3x)
- možnost konstrukce výkonných pomaluběžných motorů vhodných pro bezpřevodkové pohony
- velká momentová přetížitelnost (až 3x)

- vyšší účinnost oproti asynchronnímu motoru vlivem absence jouleových ztrát v rotoru (řádově až o jednotky %)
- nepřetržitá pohotovost motoru pro přechod do režimu elektrodynamické brzdy

V případě bezpřevodkových individuálních pohonů kol přistupují další výhody:

- efektivní řešení protiskluzové ochrany
- zvýšení účinnosti a ekologie vlivem absence převodovky
- řízené dělení tažné síly na jednotlivá kola
- řešení diferencíálu elektrickou cestou
- efektivní řešení pro plně nízkopodlažní vozidla

Vedle výhod trakčních PMSM však existují i určité nevýhody pohonů s těmito motory:

- složitější konstrukce a technologie výroby a oprav oproti pohonům s asynchronními motory
- v poruchových stavech mohou být narušeny magnetické vlastnosti permanentních magnetů
- stálá přítomnost magnetického toku permanentních magnetů způsobuje ztráty v železném magnetickém obvodu při jízdě výběhem, při poruchách v elektrické části, zejména při zkratech, pracuje motor jedoucího vozidla jako generátor do tohoto zkratu, což způsobuje proudové a momentové rázy – z tohoto důvodu je nutno řešit mechanickou nebo elektrickou odpojitelnost motoru

4 Výzkum trakčních pohonů s PMSM

Na Dopravní fakultu Jana Pernera (DFJP) Univerzity Pardubice byl v roce 2004 dlouhodobě zapůjčen speciální zkušební stav pro výzkum mechanických a elektrických vlastností trakčního bezpřevodkového individuálního pohonu kola kolejového vozidla – obr.8.



Obr. 8. Experimentální pracoviště s trakčním pohonem s PMSM na Univerzitě Pardubice

Stav je konstrukčně tvořen rámem, ve kterém je usazen trakční PMSM spojený pomocí homokinetického kloubu s tramvajovým kolem. Byla tak zvolena konstrukce s částečně odpruženým motorem pohánějícím kolo přes souběžný kuličkový kloub. Motor je uložen v silentblocích umožňujících jeho výkyv v horizontálním směru. Kolo je uloženo na kyvném rameni, které je přitlačováno pomocí pneumatického válce. Válcem lze vyvodit sílu na kolo v rozmezí 4 – 50 kN. Ta působí na druhé (spodní) protiběžné kolo, které reprezentuje kolejnici. Spodní kolo bylo v průběhu prací na DFJP mechanicky upraveno pro natáčení simulující průjezd obloukem. Spodní kolo je pomocí kardanového hřídele spojeno se zátěžným asynchronním motorem. Mezi zátěžný motor a protiběžné kolo je vložen snímač krouťícího momentu. Použitý trakční PMSM s vnitřním rotorem a vodním chlazením má jmenovitý výkon 58 kW při otáčkách 650 min^{-1} . Při těchto jmenovitých otáčkách je rychlost na obvodu tramvajového kola 85 km.h^{-1} . Jmenovitý točivý moment motoru je 852 N.m. Z obrázku 8 je velmi dobře patrná relace mezi objemy zatěžovacího asynchronního motoru a trakčního PMSM, přičemž oba stroje mají srovnatelné základní parametry (výkon, otáčky, točivý moment).

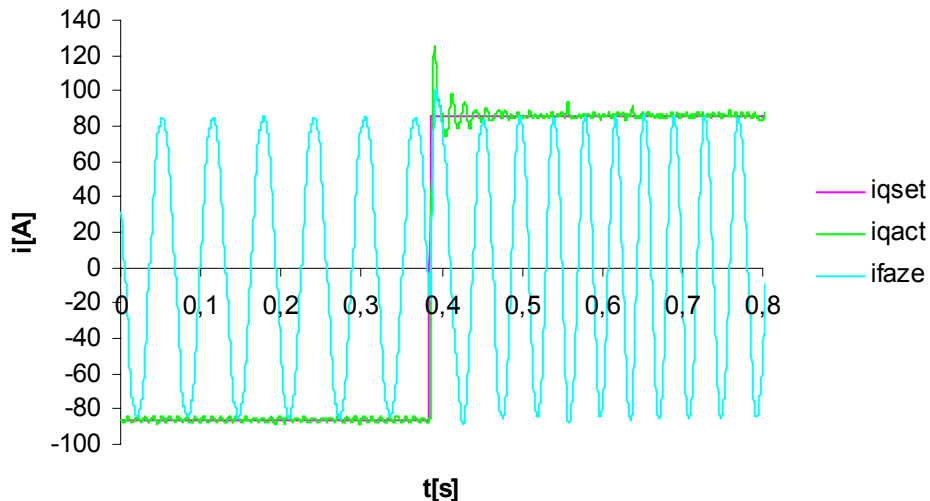
Z hlediska problematiky mechanické části jsou na tomto pracovišti řešeny úkoly vztahující se k vlastnostem styku kolo – kolejnice a adhezním vlastnostem.

V elektrické části je výzkum zaměřen především na problematiku elektronického napájení, mikroprocesorového řízení a regulace točivého momentu trakčního pohonu s PMSM [2-3], ale i problematiku EMC [4-5]. V rámci těchto aktivit byla na pracovišti realizována elektrická a řídicí část pro trakční i zatěžovací motor, která zahrnuje zejména výkonové elektronické měniče, potřebné spínací a jistící prvky, regulační obvody a senzory. Významnou částí v oblasti sensoriky je zejména realizovaný systém pro on-line vyhodnocování úhlového natočení rotoru trakčního motoru. Informace o této poloze udává vlastně informaci o orientaci magnetického pole permanentních magnetů rotoru v motoru. Tato informace je nezbytná pro správnou funkci regulační struktury točivého momentu trakčního motoru.

Řídicí algoritmy byly implementovány do řídicího systému, jehož centrálním členem je výkonný DSP (Digital Signal Processor). Úkolem řídicího systému je zejména sběr dat z pohonu prostřednictvím výstupních signálů senzorů (proudů, napětí, úhlového natočení rotoru, točivého momentu), výpočet regulační struktury, generování výstupních signálů pro řízení výkonových tranzistorů polovodičového měniče a provozní a vývojová diagnostika celého systému. Řídicí systém vykonává veškeré operace (tj. zejména sběr dat, výpočet regulační struktury a generování signálů pro řízení výkonových tranzistorů) s periodou 100 mikrosekund [6].

Řada výsledků výzkumů na tomto pracovišti, zejména z oblasti regulace, byla použita i při realizaci prvního vozidla s trakčními PMSM v ČR – tramvaje 15T For City.

Na obrázku 9 jsou pro ilustraci uvedeny časové průběhy některých veličin, které byly změřeny v rámci vyšetřování dynamických vlastností pohonu ve spojení s vyvinutou strukturou regulace [7].



Obr. 9. Příklad průběhů veličin změřených při ověřování dynamických vlastností trakčního pohonu s PMSM

Jedná se o průběhy naměřené při skokové změně žádané hodnoty velikosti proudu, které odpovídá velikost točivého momentu. Znázorněná skoková změna představuje skokový přechod z režimu brzda s nastaveným brzdícím momentem -50 % (tj. - 426 N.m) do režimu jízda s nastaveným hnacím momentem +50 % (tj. +426 N.m). Obvodová rychlost kola byla při tomto experimentu 17 km.h⁻¹. Na obrázku 9 představuje fialový průběh žádanou velikost proudu, zelený průběh skutečnou velikost této veličiny a světle modrý průběh okamžitou hodnotu proudu ve fázi motoru (± 61 A efektivních). Z obrázku je zřejmé, že k úplnému ustálení nové velikosti proudu, tj. i točivého momentu, dojde za několik desítek milisekund.

5 Závěr

Výzkum, který byl zahájen přibližně před pěti lety na DFJP, věnovaný trakčním pohonům s PMSM se jevil jako specifické řešení, určené v oboru kolejových vozidel pro úzkou skupinu aplikací, zejména pro pohony nízkopodlažních vozidel MHD. I když pohony s PMSM zřejmě nenahradí v trakci zcela pohony s asynchronními motory, ukazuje se, že se jejich aplikační oblast významně rozšířila i na výkonná železniční hnací vozidla. Příčinou je ve velké míře zdokonalování konstrukce motorů a pokles ceny permanentních magnetů ze speciálních slitin. Míru, s jakou trakční PMSM nahradí v kolejových vozidlech nyní dominující asynchronní motory, ukáže zřejmě budoucnost.

Literatura

- [1] M. OSAWA: "Toward creation of a railway car meeting the 21st-century requirements", JR East Technical Review Japan, no. 1, pp. 9-12. 2002.
- [2] DOLEČEK, R., NOVÁK J., ČERNÝ, O.: Traction Permanent Magnet Synchronous Motor Torque Control with Flux Weakening, Radioengineering, vol. 18, no. 4, 2009 ISSN 1210-2512
- [3] ŠIMÁNEK, J., NOVÁK, J., ČERNÝ, O., DOLEČEK, R.: FOC and flux weakening for traction drive with permanent magnet synchronous motor in IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 753 – 758, United Kingdom 2008.

- [4] NOVÁK, J., ŠIMÁNEK, J., ČERNÝ, O., DOLEČEK, R.: EMC of Frequency Controlled Electric Drives”, Radioengineering, pp. 101-106, vol. 17, no. 4, 2008, ISSN 1210-2512
- [5] DOLEČEK, R., ČERNÝ, O., NĚMEC, Z.: EMC of traction drive with permanent magnet synchronous motor, ICEAA 09-International conference on electromagnetics in advanced applications, Torino, Italy, pp. 339-342, ISBN 978-1-4244-3386-5
- [6] ŠIMÁNEK, J., DOLEČEK, R., ČERNÝ, O., SCHEJBAL, V.: Processor TI 2812 as Control Base of Permanent Magnet Synchronous Motor. In 19th International Conference „Radioelektronika 2009“, Bratislava, April 22-23, 2009, Slovak Republic, pp. 69 – 72, ISBN 978-1-4244-3536-4
- [7] DOLEČEK, R., ŠIMÁNEK, J., NOVÁK, J., ČERNÝ, O.: Dynamics of a Feedback Optimal Current Vector Flux Weakening Strategy for Traction PMSM, 8 th International ELECTROMOTION 2009 – EPE Chapter „Electric Drives, pp. OS7-5 (6), Lille, Francie, 2009, ISBN 978-2-915913-25-5

Pardubice, duben 2010

Lektoroval: Doc. Ing. Karel Hlava, CSc.

UP, DFJP