

Vyšetřování harmonických v trakci (1. část)

doc. Ing. Jaroslav Novák, CSc., doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D., Ing. Ondřej Černý, Ph.D.,
Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice
Ing. Jan Švanda, Škoda Electric, a. s.

Synchronní motory s permanentními magnety se staly díky malým rozměrům, malé hmotnosti, velké momentové přetížitelnosti a lepší účinnosti velmi atraktivní alternativou pohonné jednotky v elektrické trakci. V současnosti jsou používány běžně v silničních vozidlech, rychle se rozšiřuje jejich uplatnění u lehkých kolejových vozidel. Vzhledem ke zdokonalování konstrukce a technologie směřuje vývoj k uplatnění těchto motorů i u výkonných železničních vozidel. V této oblasti se ve zvětšené míře projevuje nutnost řešení rušivých vlivů a elektromagnetické kompatibility pohonu, a to vzhledem k velkým výkonům železničních vozidel a vzhledem k nezbytné slučitelnosti trakčních, zabezpečovacích a sdělovacích obvodů. Tento článek se věnuje některým vlastnostem trakčního pohonu se synchronním motorem s permanentními magnety, které se vztahují k harmonickému složení proudů v trakčním obvodu a které byly experimentálně vyšetřovány na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice ve spolupráci s firmou Škoda Electric, a. s.

1. Úvod

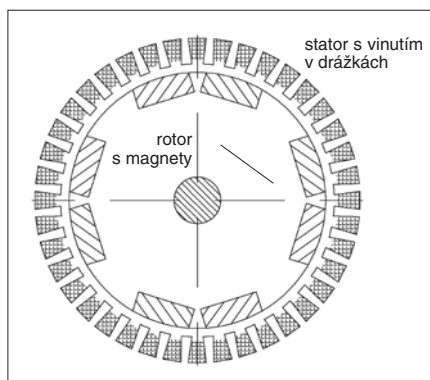
Aplikace permanentních magnetů ze speciálních slitin přinesla velký obrat ve využití synchronních strojů malých a středních výkonů. Konstrukční řešení synchronních motorů s permanentními magnety (PMSM – *Permanent Magnet Synchronous Motor*) pro trakci lze rozdělit do dvou skupin.

První koncepci PMSM představuje stroj – motor s vnitřním rotorem, který má statorové třífázové vinutí uloženo v drážkách železného magnetického obvodu a uvnitř statoru je umístěn rotor, na němž jsou nalepeny permanentní magnety (obr. 1). Póly permanentních magnetů jsou tvořeny dílčími segmenty. Rozměry těchto segmentů jsou i u výkonných motorů omezeny na desetiny, maximálně jednotky centimetrů (obr. 3). Rychlost otáčení rotoru synchronního motoru se řídí změnou frekvence napájecího napětí statoru. Trakční synchronní motory jsou proto vždy napájeny z výkonových polovodičových měničů napětí s říditelnou výstupní frekvencí.

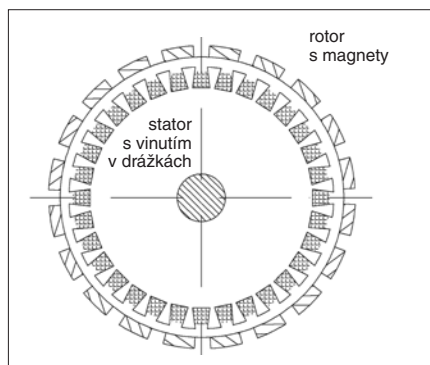
Druhou konstrukční variantou koncepce PMSM je motor s vnějším rotorem, u kterého rotor s permanentními magnety obepíná třífázový stator (obr. 2). Tato konstrukce se využívá v aplikacích, ve kterých je motor integrován přímo do konstrukce kola. Stator je spojen s osou kola, rotor je součástí kola. Principy napájení a řízení motorů s vnějším rotorem jsou stejné jako u motorů s vnitřním rotorem.

Hlavními výhodami trakčních PMSM jsou jejich malé objemy a hmotnosti – až třikrát menší ve srovnání s asynchronními a stejnosměrnými motory pro stejný výkon a otáčky. Tohoto zmenšení rozměrů je dosaženo použitím permanentních magnetů ze speciálních slitin NdFeB nebo SmCo s magnetickou indukcí přibližně 1 T. Trakční synchronní motory je proto možné konstruovat s dostatečně velkou hodnotou točivého momentu při dostatečně malých rozměrech. Přínosem trakč-

ních pohonů s PMSM je možnost absence mechanické převodovky v pohonu kol nebo náprav vozidla. Pomaluběžné trakční synchronní motory se konstruují jako mnohapólové až s padesáti póly.



Obr. 1. Synchronní motor s permanentními magnety s vnitřním rotorem

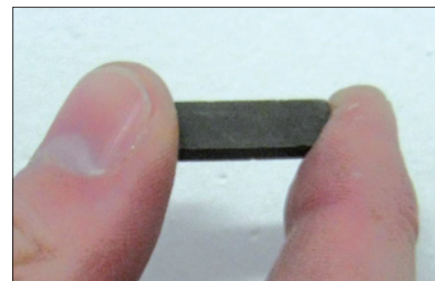


Obr. 2. Synchronní motor s permanentními magnety s vnějším rotorem

livem velké koncentrace výkonu v malém objemu motoru jsou u PMSM méně příznivé podmínky pro odvod ztrátového tepla. Proto se u trakčních PMSM větších výkonů používá zpravidla vodní chlazení.

U silničních a kolejových vozidel se uplatňuje několik koncepcí bezpřevodkových trakčních pohonů se synchronními motory s permanentními magnety v rozsahu výkonů od řádově stovek wattů do stovek kilowattů na jeden trakční motor. U silničních vozidel 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 výhodná, neboť toto řešení zvyšuje neodpružené hmoty a při jízdě vozidla dochází ke zvýšení mechanických rázů v trati a jejím okolí. 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 zvětšuje plochu nízké podlahy.

U železničních vozidel s PMSM, kde jsou kola spojena nápravou, se používají trakční PMSM, u kterých motor pohání celou nápravu. Z důvodu minimalizace neodpruže-



Obr. 3. Segment permanentního magnetu pro synchronní motor

ných hmot je nutné opět řešit pružné spojení pro přenos točivého momentu, nejčastěji prostřednictvím pružné spojky s dutou hřídelí motoru, kterou prochází náprava.

V oblasti silničních dopravních prostředků byl trakční PMSM využit např. ve voze Toyota Prius s hybridním pohonem nebo v autobusech a trolejbusích Neoplan.

Z realizovaných kolejových vozidel s trakčními PMSM je možné jmenovat např. japonský příměstský vlak e-train s přímými pohony náprav o výkonu jednoho motoru 160 kW nebo tramvaj Citadis od firmy Alstom s výkonem jednoho motoru 100 kW.

Zajímavou aplikací trakčních PMSM jsou kolové pohony vozů metra na pneumatikách od firmy Siemens s výkonem motoru 65 kW.

V oblasti vysokovýkonných pohonů byly trakční PMSM s výkonem 1 MW použity u vysokorychlostních francouzských vlaků AGV.

V současnosti jediným typem vozidla s trakčními PMSM, které bylo vyrobeno v České republice, je plně nízkopodlažní tramvaj 15 T ForCity od firmy Škoda Transportation (obr. 4). Tramvaj je vybavena šestnácti trakčními PMSM 45 kW. Jsou použity motory s vnitřním rotorem, které jsou kloubově spojeny s koly. Tramvaj je určena pro Prahu a v současnosti je ve zkušebním provozu.

Podrobnější informace o pohonech se synchronními motory s permanentními magnety jsou např. v [1], [2], [3].

2. Rušivé vlivy střídavých trakčních pohonů

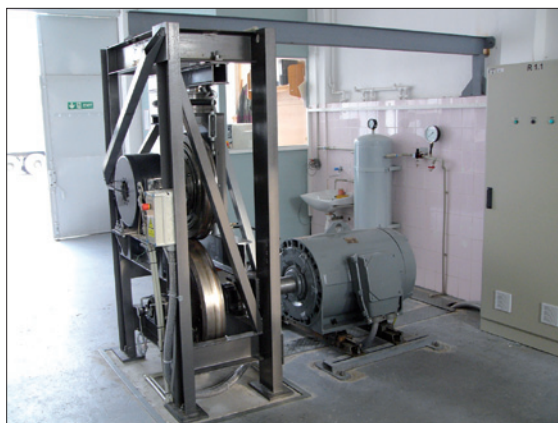
Rozvoj techniky výkonových polovodičových měničů přinesl v oblasti elektrických pohonů, včetně trakčních, zcela nové koncepce, umožňující využití zpětnovazebních regulačních struktur, které dávají pohonným systémům vyšší kvalitu po stránce trakční, dynamické i energetické. Naproti tomu se s nástupem výkonových polovodičových měničů otevřela problematika jejich vedlejších rušivých účinků, spojených s velkými strmými napětí a proudů výkonových polovodičových součástek, se kterými tyto měniče pracují. V trakční technice, zejména železniční, bylo nutné řešit odstranění rušivých účinků polovodičových měničů již u pohonů se stejnosměrnými motory v 80. letech 20. století. Výrazně větší pozornost vyžaduje tato problematika od 90. let 20. století v souvislosti s nástupem techniky trakčních pohonů s asynchronními motory.

Zvýšený důraz na řešení odstranění rušivých vlivů u trakčních pohonů s asynchronními motory je dán zejména těmito skutečnostmi:

- velké strmosti napětí (řádově 1 000 V/ μ s) a proudů (řádově 100 až 1 000 A/ μ s), se kterými pracují měniče pro napájení asynchronních motorů – trakční měniče pro asynchronní motory využívají nejčastěji rychlé vypínatelné tranzistory IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*);
- velké spínací frekvence širkové pulzní modulace (v trakčních pohonech 1 až 5 kHz);
- na rozdíl od stejnosměrných pohonů se v trakčních proudech pro střídavé pohony projevuje výrazně vliv okamžité hodnoty napájecí frekvence a jejích násobků v harmonickém složení proudů v trakčním obvodu;



Obr. 4. Tramvaj 15 T ForCity



Obr. 5. Zkušební stav s trakčním PMSM na Dopravní fakultě Jana Pernera

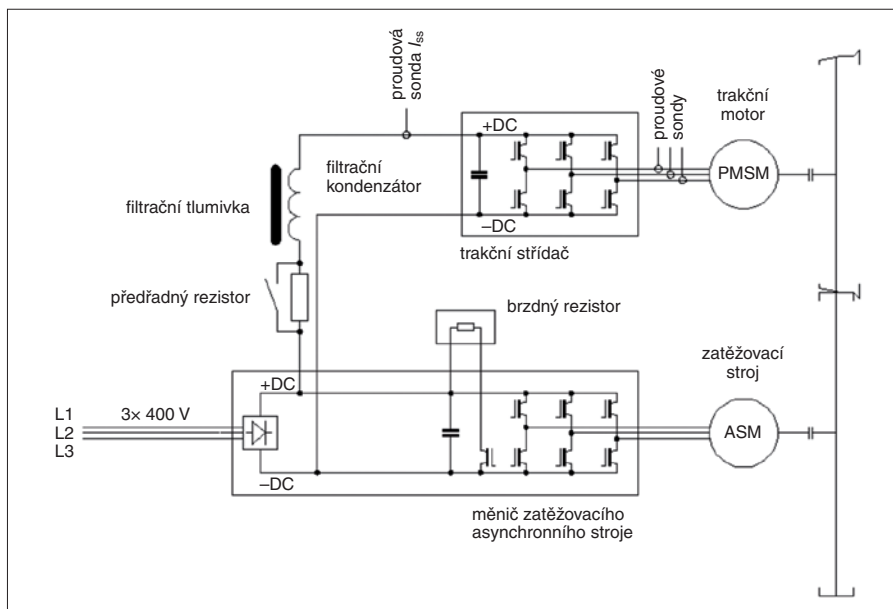
- náročné požadavky na dopravní systémy ze strany legislativy;
- požadavky na interoperabilitu železničních vozidel – provoz železničních vozidel sladěný s různými technickými podmínkami provozovatelů železničních sítí v různých zemích.

Velikost a druh rušivých účinků pohonu závisí na mnoha vlivech. Jde zejména o:

- celkovou koncepci trakčních obvodů vozidla,
- konstrukci výkonového měniče,
- instalaci elektrovýzbroje vozidla,
- parametry (R , L , C) trakčního obvodu,
- rozložení parametrů trakčního obvodu,
- spínací vlastnosti výkonových polovodičových součástek v měniči,
- frekvenci širkové pulzní modulace měniče,
- algoritmus širkové pulzní modulace měniče,
- velikosti ochranných (mrtvých) dob měniče,
- parametry a provedení vstupního filtru měniče,
- konstrukci motoru,
- okamžitou rychlost, režim a moment motoru.

Rušivé vlivy výkonových polovodičových měničů lze rozdělit na vysoko- a nízkofrekvenční.

Vysokofrekvenční rušení je vyzařováno v okolí výkonových obvodů, může pronikat do napájecí sítě a způsobovat rušení v blízkých signálových a řídicích obvodech. Ome-



Obr. 6. Elektrické zapojení výkonové části experimentálního pracoviště

- velký počet provozovaných výkonových zařízení, která pracují se širkové pulzní modulací;
- přítomnost mnoha citlivých zabezpečovacích a sdělovacích zařízení, která pracují v bezprostřední blízkosti trakčních zařízení;
- zvyšující se požadavky na bezpečnost a spolehlivost technických systémů;

zení vysokofrekvenčního rušení postihují příslušné normy jak z hlediska vlivů na napájecí síť, tak z hlediska rádiového rušení. Při konstrukci výkonových systémů je nutné dodržovat mnoho zásad pro omezení těchto rušivých vlivů.

Z hlediska bezpečnosti provozu železničních vozidel i z hlediska splnění legislativních požadavků je velmi kritickou oblastí nízkof-

frekvenční rušení, konkrétně součinnost výkonových trakčních obvodů a drážních zabezpečovacích zařízení. I v médiích byla tato problematika citována v souvislosti s uváděním vlaků Pendolino do provozu v České republice.

Aby nedocházelo k nežádoucímu ovlivňování drážního zabezpečovacího zařízení činností trakčních měničů na vozidlech, vyhodnocují se zejména harmonická spektra vstupních proudů hnacích vozidel. Při činnosti trakčních obvodů je nutné omezit ve vstupním proudu vozidla především harmonické složky s frekvencemi, se kterými pracuje drážní zabezpečovací technika. V podmínkách ČR jde o frekvence 50, 75 a 275 Hz.

Vyhodnocování harmonické skladby proudů v trakčním obvodu je velmi náročné. Na vymezených frekvencích stanovují normy mezní hodnoty velikostí harmonických složek i s ohledem na dobu působení. Mezní hodnoty velikostí harmonických složek na vstupu trakčního obvodu vozidla se pohybují v rozmezí desítek až stovek miliampérů. Tyto složky je nutné vyhodnocovat předepsanými postupy z proudů, jejichž základní harmonická – nultá v případě stejnosměrné trakce, první v případě střídavé trakce – se pohybuje v řádech stovek až tisíců ampérů. V případě, že spektra trakčních proudů nesplňují limity stanovené normami, je nutné činit zásahy v trakčním vozidle, a to jak na úrovni výkonového obvodu, tak na úrovni programového vybavení pro řízení výkonových měničů.

Tento článek je příspěvkem k řešení právě této problematiky nízkofrekvenčního rušení od trakčních pohonů.

3. Trakční pohon se synchronním motorem s permanentními magnety

Trakční pohony se synchronními motory s permanentními magnety se používají nejčastěji pro individuální pohony kol nebo náprav vozidla. Vzhledem k tomu, že regulační struktura momentu PMSM je orientována na okamžité úhlové natočení rotoru, musí být každý motor vybaven systémem vyhodnocování tohoto úhlu. Vzhledem k této skutečnosti nemůže být napájeno více PMSM společně z jednoho měniče, ale každý motor musí mít individuální střídač. Ve většině aplikací se používá třífázový můstkový střídač se šesti výkonovými spínacími prvky – nejčastěji IGBT – a šesti zpětnými diodami. Zapojení měniče je tedy shodné jako v případě pohonu s asynchronním motorem. U pohonů s PMSM je snaha volit co nejvyšší spínací frekvenci nejen z důvodu co nejvyššího promodulování výstupního napětí a proudu a co nejvyššího průběhu momentu, ale také proto, že vyšší harmonické složky proudu motoru způsobují ohřev permanentních magnetů vlivem ztrát vířivými proudy. Toto oteplení permanentních magnetů je nebezpečné, neboť magne-

The permanent magnet synchronous motors become the very attractive alternative of the drive unit at electric traction due to small sizes, small weight, high torque overload capacity and improved efficiency. Nowadays, these motors are usually used for road vehicles, and the application of these motors spreads very quickly at light rail vehicles. In consideration of improving of construction and technology, the development heads to use of these motors at high-power rail vehicles as well. In this area the necessity of the solution of interference effects and electromagnetic compatibility of drive becomes evident in increased ratio with respect to high power of rail vehicles and essential compatibility of traction, interlocking and communication circuits. The presented paper deals with certain characteristics of traction drive with permanent magnet synchronous motors. These characteristics are related to harmonic spectrum of currents in traction circuit and they were experimentally researched at Jan Perner Transport Faculty in University of Pardubice in cooperation with company Škoda Electric, a. s.

ty mohou při zvýšených teplotách (řádově stovky stupňů Celsia) ztrácet své magnetické vlastnosti.

Vstupní obvod střídače má vždy napěťový charakter a je tvořen článkem LC gama. Tento vstupní filtr může být i společný pro více střídačů. Vstupní filtr musí v co největší míře zabránit pronikání rušivých složek vstupního proudu pohonu do napájecího obvodu. Při nedostatečné eliminaci těchto složek může dojít k rušení činnosti drážního zabezpečovacího zařízení.

Kvalitativně je problematika rušivých vlivů trakčních pohonů s PMSM velmi podobná jako u pohonů s asynchronními motory – pohon s měničem se šifkově pulzní modulací. Odlišnosti pohonu s PMSM spočívají jednak v některých rozdílech v regulační struktuře a dále v odlišné konstrukci motoru – mnohápólový pomaluběžný stroj se zdrojem magnetického toku na rotoru.

Na Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě na Dopravní fakultě Univerzity Pardubice je již delší dobu řešena problematika trakčních pohonů s PMSM. Některé aktivity byly v posledním období věnovány právě vyšetřování specifik těchto pohonů z hlediska rušivých účinků v nízkofrekvenční oblasti. Několik výsledků těchto prací prezentují následující odstavce.

4. Experimentální pracoviště

Na Dopravní fakultu Jana Pernera 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. 5). Stav je konstrukčně tvořen rámem, ve kterém je usazen trakční PMSM spojený homokinetickým kloubem s tramvajovým kolem. Použitý tramvajový trakční PMSM s vnitřním motorem má tyto parametry:

- jmenovitý výkon 58 kW,
- jmenovitá otáčky 650 min^{-1} – odpovídá rychlosti na obvodu kola $85 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,
- jmenovitý moment $852 \text{ N} \cdot \text{m}$,
- jmenovitý proud 122 A,

- jmenovité napětí $3 \times 368 \text{ V}$,
- jmenovitá frekvence 238 Hz,
- počet pólů 22.

K pohonu byla na Dopravní fakultě Jana Pernera doplněna elektrická část a byl vyvinut systém regulace momentu založený na použití výkonného procesorového systému. Regulační struktura realizuje vektorovou regulaci momentu, včetně režimu odbuzování. Podrobnější informace k těmto pracím lze nalézt např. v [4], [5].

Elektrické schéma výkonové části experimentálního pohonu je na obr. 6. Zatěžovací asynchronní motor je napájen z průmyslového měniče frekvence s napěťovým stejnosměrným meziobvodem, který je napájen přes třífázový můstkový diodový usměrňovač. Z tohoto meziobvodu je zároveň přes filtrační tlumivku se železným jádrem napájen střídač trakčního PMSM. V sérii s tlumivkou je možné do napájecí části trakčního střídače zapojit předřadný rezistor 2Ω , který modeluje vliv odporu trakčního vedení. Popsaná konfigurace obvodu umožňuje rekuperaci energie při zkouškách a ze sítě je odebírána jen energie potřebná ke krytí ztrát soustrojí.

Parametry vstupního filtru LC jsou dány především indukčností filtrační tlumivky a kapacitou filtračního kondenzátoru v trakčním střídači. Základní kapacita filtru je $4,7 \text{ mF}$, při jedné sadě měření byla kapacita zvýšena na $6,9 \text{ mF}$. Při měřeních byly ověřovány vlastnosti s různými parametry vstupního filtru LC.

Při návrhu parametrů filtru LC je klíčová hodnota rezonanční frekvence dána vztahem:

$$f_{\text{rez}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Při zkouškách byly řazeny do filtru tlumivky se šitkovými hodnotami indukčnosti $L_1 = 3 \text{ mH}$, $L_2 = 1 \text{ mH}$ a $L_3 = 4 \text{ mH}$. Tomu odpovídají podle rovnice (1) teoretické hodnoty rezonančních frekvencí filtru $f_{\text{rez1}} = 42,4 \text{ Hz}$, $f_{\text{rez2}} = 73,4 \text{ Hz}$ a $f_{\text{rez3}} = 36,7 \text{ Hz}$. Při zvýšení kapacity na $6,9 \text{ mF}$ a indukčnosti na 4 mH je teoretická hodnota rezonanční frekvence $f_{\text{rez4}} = 30,3 \text{ Hz}$.

(dokončení příště)