

Nová výzbroj pro střídavou trakci

V květnu 2004 proběhly na ŽZO v Cerhenicích zkoušky modernizovaného elektrického vozu 560.007. Mezi hnacími vozidly Českých drah má nová elektrická výzbroj z technického hlediska hned dvě prvenství. Za prvé, měniče jsou realizovány na bázi moderních vypínatelných tyristorů IGCT, a za druhé, díky tzv. kompatibilním usměrňovačům vůz odebírá z trakčního systému 25 kV/50 Hz prakticky sinusový proud s účinníkem blízkým hodnotě 1.

Dosavadní vývoj

Elektrické jednotky řady 560 představovaly v době svého vzniku výrobek progresivních technických parametrů, a to jak v oblasti pojezdu, tak zejména v řešení elektrické výzbroje. Elektrické vozy SM 488.0 byly prvními hnacími vozidly tehdejších ČSD, u nichž pro řízení proudu trakčních motorů byly použity řízené tyristorové usměrňovače s plynulou regulací proudů. Rovněž poprvé byly použity standardní třífázové asynchronní motory pro pomocné pohony.

V 90. letech proběhla částečná modernizace soupravy 560.027/028, která se týkala jak trakčních usměrňovačů, tak i pomocných pohonů. Principiální zapojení trakčních usměrňovačů však zůstalo zachováno, a tím i úroveň kvality odebíraného trakčního proudu. Naproti tomu modernizace druhé soupravy, 560.007/008, šla podstatně dál - byla motivována získáním provozních zkušeností a ověření vlastností pohonu s kompatibilním usměrňovačem. Všeobecný popis modernizace byl publikován v ŽM 5/04 (str. 27 - 29); dnešní článek se zaměřuje na podrobnější zhodnocení jednak použitých výkonových prvků, jednak principu usměrňovače.

Trakční měniče s IGBT, GTO nebo... ?

Funkce polovodičových měničů pro trakční pohony je založena na činnosti plně řízených polovodičových spínačů, tj. takových spínačů, které lze řídicím impulsem kdykoli sepnout (pokud jsou splněny obvodové podmínky pro sepnutí) a rovněž kdykoli vypnout. Obecně známými a v posledním desetiletí běžně používanými spínači jsou IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, volným překladem: polem řízený bipolární tranzistor) a GTO (Gate Turn-Off, hradlem vypínatelný) tyristor.

Měniče na bázi IGBT zcela jasně dominují v lehké trakci, přesněji všude tam, kde provozní napětí měniče nepřekročí cca 1 250 V (jmenovité napětí trakční sítě 600 - 750 V ss). Všude tam lze totiž použít tranzistory s blokovacím napětím 1 700 V, které vynikají zejména dobrými dynamickými vlastnostmi a relativní nenáročností budících obvodů v hradle.

V poslední době světová výroba uvádějí na trh IGBT s hladinou blokovacího napětí 2,5, 3,3 a dokonce až 6,5 kV. V těchto hladinách se však již výrazně projevují nevýhody IGBT, vyplývající z jejich konstrukce. Všechny dnes vyráběné výkonové IGBT jsou složeny z mnoha paralelně

propojených čipů. Např. IGBT modul 3,3 kV, 1 200 A se skládá z 24 čipů s tranzistory, z 12 rychlých diod a 24 čipů s odpory. Spojení čipů je provedeno ultrazvukovým pájením pomocí 450 vodičů. Spolehlivost a životnost součástky závisí na rovnoměrnosti parametrů jednotlivých čipů, pozitivním a rovnoměrném teplotním koeficientu a kvalitě pájených spojů. Díky tomu jsou IGBT citlivé na nerovnoměrné cyklické zatěžování, které je v trakci běžné.

Trakční měniče pro pohony větších výkonů (a vyšších napětových hladin) jsou proto dosud většinou stavěny na bázi tyristorů, všeobecně známých GTO. Ty obecně zachovávají dobré vlastnosti „klasického“ tyristoru, jako je nízký úbytek napětí v propustném stavu, vysoká zkratová odolnost, vysoká životnost při cyklickém zatížení a vysoké dosažitelné blokovací napětí. Hlavní nevýhoda GTO tyristorů leží v procesu jejich vypínání. Ten je energeticky velmi náročný, a to hned na třech místech:

- ztráty při vypínání v součástce samotné,
- energie pro vypnutí, kterou musí dodat řídicí jednotka,
- ztráty v odlehčovacích obvodech (Turn-Off Snubber), což jsou obvody složené z kondenzátorů, odporů a diod, bez nichž spolehlivé vypnutí GTO není možné.

Může se stát, že spolehlivé vypnutí bude ohroženo lokálním přehřátím v důsledku nerovnoměrného procesu v ploše čipu (tzv. filamentace) nebo tzv. lavinovým průrazem v době dozívání vypínacího proudu. V obou případech dochází k destrukci součástky. Navenek (pro uživatele) je kromě toho měnič GTO spojen s poměrně masivními obvody v okolí vlastní součástky, přičemž délka vypínacího procesu a jeho energetická náročnost limitují spínací frekvenci měničů na prakticky použitelných 300 až 800 Hz.

... nebo IGCT?

Prvek IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) je v podstatě velmi „tvrdě komutovaný“ (tj. extrémně rychle vypínaný) GTO tyristor. Odlišná je podstata vypínacího procesu, jehož rychlost je pro uživatele jedním z nejpodstatnějších parametrů.

Součástka IGCT je složena ze dvou základních částí: - z tyristorové struktury GCT, která je umístěna v pastilkovém pouzdru obdobně jako součástka GTO,

Snímek: Ivo Valent



První vozidlo ČD s prvky IGCT - elektrický vůz 560.007 (při trakčních zkouškách na ŽZO dne 27. 4. 2004).

- z řídicího obvodu, k němuž je pastilka GCT připojena co nejtěsněji, tedy „integrována“ (odtud první slovo v názvu součástky). Je tomu tak proto, že pro řádnou funkci GCT musí být strmost nárůstu řídicího vypínacího proudu v hradle tyristoru extrémně vysoká, a proto parazitní indukčnost zdroje řídicích vypínacích impulzů včetně přivedů musí být snížena na proveditelné minimum. Během vypínání je celý anodový proud tyristoru prakticky skokově převeden do řídicí elektrody, tedy je „komutován řídicí elektrodou“, jak napovídá nezkrácený anglický název součástky.

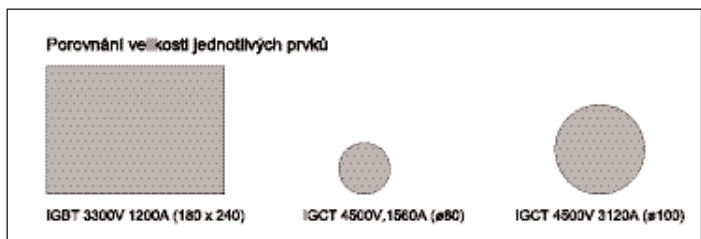
jsou významně sníženy vypínací ztráty a zkrácena vypínací doba. Pro praxi z toho plyne, že měnič může pracovat při vyšším kmitočtu (asi dvojnásobném vzhledem ke GTO srovnatelného typového napětí a proudu) a v konstrukci měniče nejsou zapotřebí odlehčovací sítě.

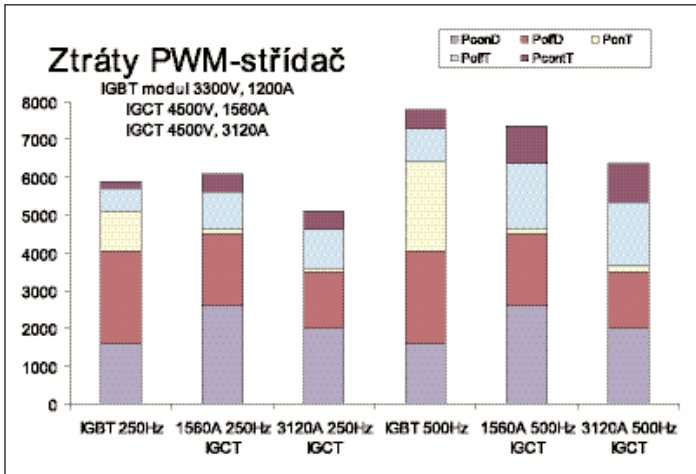
Porovnání ztrát k objemu a hmotnosti srovnatelného měniče je názorně vidět na připojeném grafu. Součástka IGCT v sobě slučuje hlavní výhody tyristoru



Takovým způsobem vypínání struktury GCT je vyloučena tzv. filamentace a problémy s ní spojené a není omezena strmost nárůstu blokovacího napětí (jako u GTO). Tím

(nízké ztráty propustným proudem, celkovou robustnost a spolehlivost) s výhodami IGBT (výhodný způsob vypínání bez odlehčovací sítě). IGCT byl vyvinut firmou ABB Semiconductors a mimo ní je v současné době vyrábí japonská firma Mitsubishi a česká společnost Polovodiče a. s.





Nejvhodnější použití pro běžné trakční napájecí systémy nacházejí tyristory napěťové třídy 45 (blokovací napětí 4,5 kV), které umožňují spolehlivou práci s provozním napětím stejnosměrné strany měniče do 2,8 kV. V případě trakčního systému 3 kV ss budou použita buď tříúrovňová schémata nebo skupinová zapojení měničů, přičemž maximální provozní napětí 2 x 2,8 kV zabezpečí dostatečnou bezpečnost při možných přepětech v síti.

Zpětné účinky hnacího vozidla na trakční síť

Všechna hnací vozidla pracující ve střídavé trakci jsou vybavena transformátorem, který snižuje vysoké napětí 25 kV ef. na hladinu použitelnou pro trakční motory, a dále usměrňovačem.

Pokud jsou použity tradiční stejnosměrné trakční motory, řízení výkonu se děje různými způsoby:

- řízením napětí motorů přepínáním odboček na sekundární straně transformátoru s diodovým usměrňovačem. Tento způsob je použit u lokomotivních řad 230, 240, 242;
- druhým způsobem je ovládání napětí bezkontaktně pomocí fázové řízení tyristorového usměrňovače při stálém převodu transformátoru. Tento typ pohonu byl poprvé u hnacích vozidel Č(S)D použit právě na voze řady 560 a dále na lokomotivách řad 210 a 263.
- Pro úplnost uvedme použití transformátoru se stálým převodem a diodovým usměrňovačem (lokomotivy řad 350, 363, 372 a jejich varianty). Tento způsob má opodstatnění zejména u dvousystémových vozi-



Kompatibilní usměrňovač vozů 560.007 a 008.

del, usměrněné napětí je přivedeno přímo k obvodům, které jinak obsluhují provoz na stejnosměrné trakci.

Ovšem vozidla, využívající uvedené způsoby řešení, odeberají při jízdě z trakční soustavy proud s velmi vysokým obsahem jalové a deformační složky. Takový proud snižuje efektivitu trakční energetiky a ve výsledku vede k vyšším nákladům na energii při provozu vozidla. Navíc dochází k výrazné deformaci trakčního napětí (viz ukázky jeho naměřeného průběhu na obrázcích vlevo dole). Popisovaný fakt vede železniční dopravce v řadě zemí k tomu, že u nově pořizovaných vozidel požadují takové konstrukce, které tyto nežádoucí zpětné účinky pohonu na síť omezují.

Kompatibilní usměrňovač

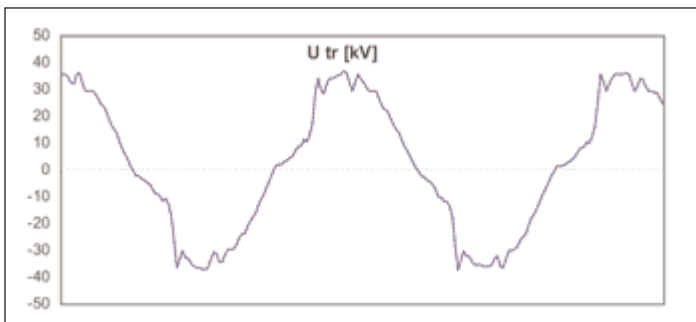
Název pro dále popisovaný typ usměrňovače dosud není v odborné terminologii ustálen; nejčastěji je nazýván pulsní, případně sinusový usměrňovač. Termín kompatibilní však nejlépe zdůrazňuje jeho nejdůležitější vlastnost, totiž vysokou kompatibilitu s napájecí soustavou.

Pohon s kompatibilním usměrňovačem je takový pohon, který odeberá ze střídavé napájecí soustavy proud s velmi vysokým obsahem základní harmonické složky (přibližně sinusový proud) při účinnosti blízké jedné. Nejvyšší hodnoty účinnosti jsou požadovány v oblasti vysokých výkonů, kde se dosahuje práce při hodnotách $\cos \varphi = 0,98$.

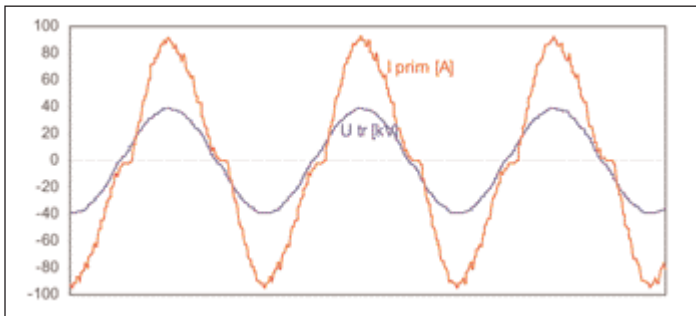
Těto vlastnosti lze dosáhnout různými způsoby zapojení usměrňovače (s plně řízenými spínacími prvky, např. vypínatelnými tyristory) a v každém případě sofistikovaným a vysoce citlivým řízením měniče. V případě výzbroje pro vůz řady 560 bylo použito zapojení tzv. čtyřkvadrantového měniče (viz schéma pro jednu motorovou skupinu vpravo dole).

Základním uzlem usměrňovače je jednofázový plně řízený můstek, složený ze čtyř IGCT tyristorů T1 až T4 a čtyř antiparalelních diod D1 až D4. V základním režimu (jízda) je usměrňovač napájen ze dvou sekundárních vinutí transformátoru T1 při sepnutém kontaktu jízdního přepojovače J1. Výstupní napětí usměrňovače na filtru C1 je 1 300 až 1 600 V. Toto napětí je prostřednictvím pulsního měniče motorů PMM snižováno na hodnotu 0 až 800 V podle požadovaného výkonu trakčního motoru. Pomocný obvod POP slouží jednak k bezkontaktnímu regulovanému nabíjení kondenzátoru C1 při zapnutí pohonu a též k připojení usměrňovače v režimu brzda, kdy je kontakt J rozpojený.

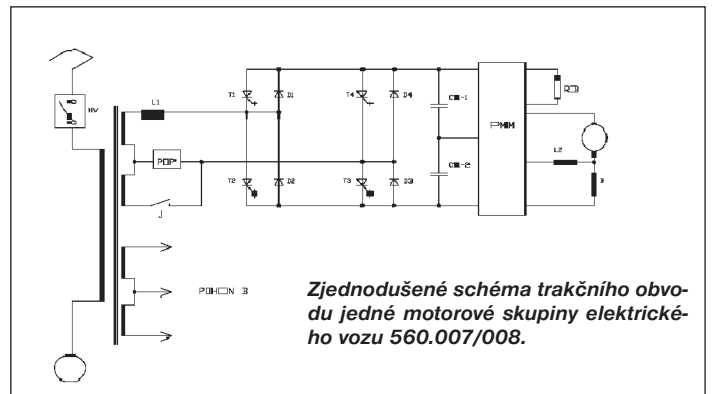
Tyristory pulsního usměrňovače jsou spínány se základní pulsní frekvencí 600 Hz, což při zvoleném způsobu řízení znamená, že frekvence pulsací proudu z transformátoru je 1 200 Hz. Velikost těchto pulsací je omezoována tlumivkou L1. Pro zlepšení kvality odebraného proudu (tj. co nejnižší úroveň pulsní složky) se využívá vzájemně synchronizace řízení



Napětí v troleji při průjezdu vlaku se dvěma stroji řady 240 v úseku trati Tisnov - Vlkov dne 8. 4. 2004.



Průběh napětí troleje a odebraného proudu při max. výkonu vozu 560.007. Záznam byl pořízen při zkušební jízdě v Brně-Horních Heršpicích dne 8. 4. 2004 vozem 560.007 při rychlosti cca 60 km/h, proudu trakčních motorů 1 000 A a výkonu 1 620 kW. Dosázeny byly následující parametry vstupního proudu: obsah základní harmonické 98,9 %, celkový efektivní účinník $\cos \varphi = 0,987$.



Zjednodušené schéma trakčního obvodu jedné motorové skupiny elektrického vozu 560.007/008.



Detail

nevhodné napětově proudové poměry: napětí na výstupu usměrňovače je podstatně vyšší, než jmenovité napětí motorů. Proto jak usměrňovače, tak zejména pulsní měniče motorů nemohou pracovat optimálně. Přesto bylo dosaženo kvalitních parametrů vstupního proudu; viz obr. na předchozí stránce.

Závěr

Koncepce elektrické výzbroje, použitá na modernizaci elektrických vozů 560.007/008, jejím srdcem je kompatibilní usměrňovač na bázi prvků IGBT, ukazuje směr dalšího vývoje techniky elektrické trakce. A pokud bude pulsní měnič a stejnosměrný motor zaměněn za napětový střídač napájející asynchronní trakční motor, půjde již v plné míře o techniku odpovídající trendům pro nová vozidla nadcházejícího období.

kteří mají zcela jiný účel. Ostatní hlavní části pohonu, transformátor, trakční motory, brzdový odpor a přepojovače byly zachovány původní, stejně jako většina ovládacích obvodů. Modernizovaný vůz je spřahovatelný v jedné soupravě s původním motorovým vozem. **Trakční charakteristika** v režimu „Jízda“ zůstala zachována, neboť je v podstatě dána

charakteristikou trakčních motorů. Naproti tomu režim elektrodyne-
mického brzdění získal díky použitému zapojení zcela nové možnosti - brzda pracuje plynule plným brzdícím momentem prakticky až do zastavení soupravy (asi 2 km/h), přičemž může pracovat i při staženém sběrači.

Zachování klíčových komponentů výzbroje - transformátorů a trakčních motorů - při změně koncepce usměrňovače, má za následek poměrně

měníčů obou motorových skupin na vozidle. Ty jsou řízeny tak, že se pulsní složky vzájemně kompenzují, proto jejich amplituda ve výsledném proudu je čtvrtinová vzhledem k případu, kdy by tato kompenzace nebyla použita.

Realizace modernizované výzbroje vozů 560.007/008

Modernizace výzbroje spočívala v náhradě původního trakčního usměr-

ňovače a tyristorového shuntování jednou skříní, v níž je integrován kompatibilní usměrňovač, pulsní měniče motorů včetně řízení odbuzování a pomocný obvod předbíjení. V souvislosti se změnou typu pohonu byla vyjmuta původní hlavní spřažená tlumivka, která omezovala zvlnění proudu motorů napájených z fázově řízených usměrňovačů, a byla nahrazena tlumivkami L1A a L1B (samostatně pro obě motorové skupiny),

Ing. Karel Kalčík
Polovodiče a. s.

Ing. Petr Laciga
Poll, s.r.o.

Neoznačené snímky:
Polovodiče a. s.

POLOVODIČE
skupina společností

Hledáte jednoduché a spolehlivé řešení?

Nabízíme široký výběr výkonových polovodičových součástek, chladičů a přelučňovačů pro nové konstrukce i jako náhradu za starší řešení.

Návrhy obvodů měničů a moderními součástkami, zaručujícími dlouhou životnost a vysokou provozní spolehlivost, jsou odrazem padesátileté tradice v oboru výkonové elektroniky.

Aplicace	Výkonové polovodičové jednotky
	Výkonové polovodičové měniče
Měniče pro trakční pohony	
Součástky	Diody
	Tyristory včetně IGBT, SITD a MGT
	Výkonové moduly
	Omezovače přepětí
	Solid state relé
	Chladiče a přelučňovače
Monokrystalický křemík	

<http://www.polovodice.cz>