

Stanislav Gregora, Jaroslav Novák

Modernizace trakčních pohonů vozidel elektrické trakce

Klíčová slova: *bezkomutátorové trakční motory, střídač, asynchronní motor, synchronní motor s permanentními magnety, vypínatelné polovodičové prvky, čtyřkvadrantový měnič, řídicí systém.*

V pohonu trakčních vozidel, kde se prakticky po jedno století používalo k trakčnímu pohonu komutátorových motorů pro jejich výhodnou trakční charakteristiku a vhodné regulační vlastnosti, dochází k inovačnímu procesu. Z historického hlediska vycházela volba trakčního motoru z požadovaných trakčních vlastností kladených na trakční motor. Byla to požadovaná momentová charakteristika vyplývající z požadavku využití konstantního výkonu

$$F = \frac{P \cdot 3,6}{v} = \frac{k}{v} \quad [\text{kN}; \text{kW}; \text{km/h}], \text{ kde tažná síla je odvislá od momentu}$$

$$F = k \cdot M \text{ a rychlost je funkcí otáček motoru } v = k \cdot n$$

Tento vztah pak vyjadřoval ideální požadavek z hlediska trakční charakteristiky vozidla, hyperbolickou závislost tažné síly na rychlosti. Dalším požadavkem na trakční pohon byly dynamické a regulační vlastnosti. Z tohoto pohledu měly požadované vlastnosti právě komutátorové motory, ať již v provedení jako stejnosměrný sériový motor napájený ze stejnosměrné sítě, nebo jednofázový sériový komutátorový motor napájený z jednofázové sítě se sníženým kmitočtem 16 2/3 Hz, a tím zaujaly dominantní postavení v trakčních pohonech. Volbou trakčního motoru pak byla ovlivněna i volba trakční soustavy. Společným znakem komutáto-

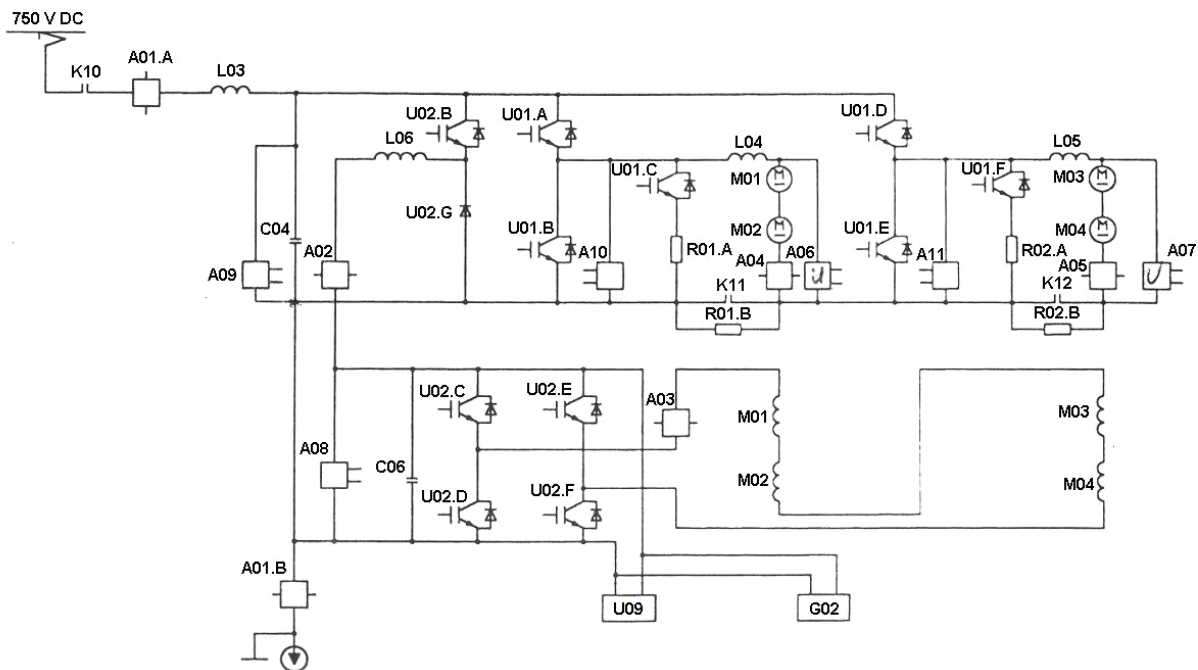
Ing. Stanislav Gregora, Ph.D., nar. 1942, v roce 1969 ukončil Vysokou školu dopravní v Žilině, obor elektrická trakce a energetika. Titul Ph.D. získal na Univerzitě Pardubice v r. 2002. V letech 1962 – 1969 pracoval jako servisní technik měření ČD, v letech 1970 – 1978 jako inženýr na úseku technického rozvoje, kde se zabýval zaváděním číslicově řízených strojů v Nové huti Ostrava – závod údržba. Od roku 1978 do roku 1995 působil jako učitel odborných předmětů na Vyšší odborné škole v Šumperku. Od roku 1995 pracuje na Univerzitě Pardubice, DFJP, KEEZ jako odborný asistent na katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě. Zde vyučuje odborné předměty elektrické pohony a elektrická trakce. Vedle této činnosti se věnoval konstrukci spalovacích motorů a jejich řízení. V současné době je jeho výzkumná činnost zaměřena na problematiku trakčního pohonu a testovacích dynamometrů pro silniční vozidla.

Doc. Ing. Jaroslav Novák, CSc., nar. roku 1966, v roce 1989 dokončil studium na ČVUT – FEL, obor silnoproudá elektrotechnika. Poté získal titul CSc. za práci, ve které se věnoval zpětnovazební regulaci střídavých strojů. V roce 2003 se habilitoval. V současnosti pracuje jako docent na ČVUT – FS. Současně částečně pracuje na Univerzitě Pardubice, DFJP, KEEZ v oblasti elektrických pohonů. Jeho odborná činnost se zaměřuje do oblasti automatické regulace elektrických pohonů, výkonové elektroniky a mikroprocesorového řízení v reálném čase.

rových motorů byl problematický rotační střídač – mechanický komutátor, který byl limitující konstrukční částí tohoto stroje z hlediska proudového zatížení. Negativními vlastnostmi těchto motorů pak byly vlastní komutační jevy, které se prakticky nepodařilo úspěšně zvládnout až do současné doby. Myšlenka použít pro pohon trakčních vozidel jednoduchý bezkomutátorový indukční motor byla již aktuální od jeho objevení slovanským badatelem N. Teslou (1896), žijícího tehdy v USA. Nelze zde zapomenout ani na českého technika Ing. Kolbena, který se zejména v českých zemích zasloužil o zavádění střídavých pohonů. Vlastní realizace tohoto pohonu byla ovšem vázána na tehdy dostupnou regulační techniku. Ve srovnání s komutátorovými motory je hlavní předností indukčního motoru jednoduchá konstrukce a menší geometrické rozměry, neboť komutátor zaujímá asi třetinu délky stroje, což je důležité z hlediska prostorového uložení trakčního motoru. Další jeho výhodou je pak momentová a proudová přetížitelnost a v neposlední řadě nižší výrobní cena a nenáročná údržba. Nevýhodou asynchronního motoru zůstávala nemožnost jednoduchým bezeztrátovým způsobem plynule řídit jeho otáčky. Tehdejší regulační prostředky prakticky do nedávné doby neumožňovaly dosáhnout u tohoto motoru srovnatelných regulačních vlastností s komutátorovými motory. I přes tyto problémy se již tehdy vyskytla alternativní řešení jeho použití. Nejstarší varianta řešení představovala použití třífázového motoru, kde jednofázová soustava se na lokomotivě štěpila na třífázovou soustavu, na kterou byly připojeny třífázové motory s kotvou kroužkovou (systém Kandó). Přes poměrně velkou složitost představoval tento systém dodnes aktuální myšlenku použití bezkomutátorových motorů. Druhou variantu pak představoval systém, který provozovaly italské dráhy až do r. 1976. Šlo o myšlenku přímého napájení z třífázové energetické sítě a pohon asynchronním třífázovým motorem. Všechna tato řešení nenašla širší uplatnění v pohonu trakčních vozidel, ať již z hlediska problémové regulace, nebo složitého napájecího systému.

Teprve rozvoj výkonové polovodičové techniky a mikroelektroniky umožnil zvládnout vyšší formy řízení a to z počátku u komutátorových motorů, kde nasazením spínacích prvků (tyristorů) byl u stejnosměrné trakce vyřešen doposud ztrátový, odporový způsob řízení, bezeztrátovou pulzní regulací. Tato bezkontaktní regulace vozidel ve srovnání s klasickou regulací představovala snížení spotřeby elektrické energie, kratší dobu trvání proudových špiček při spouštění a menší proudy při jízdě sníženou rychlostí, téměř neměřitelné zvlnění odběrových proudů a lepší adhezni využití plynulou regulací tažné síly.

Zvýšené požadavky z hlediska dynamiky řízení si vynutily i zde změny. Postupně se opustil doposud výhradně používaný sériový motor a na jeho místo nastupuje motor s cizím buzením. Důvodem byly jeho lepší dynamické vlastnosti uplatněné při zavádění automatického řízení a při řízení elektrodynamické brzdy (lok. ř. 163, 162, 363, 263). Modernizace stávajících vozidel s klasickou odporovou regulací, která se v současné době provádí, ponechává stejnosměrné motory, přičemž je modernizován regulační systém novou generací pulzních měničů v modulovém provedení, osazených novými vypínatelnými prvky (GTO, IGBT, IGCT), čímž se tyto měniče oproti tyristorovým se zhašecími obvody zjednodušily a rozměrově zmenšily. Příkladem modernizovaných vozidel s ponechanými komutátorovými motory je rekonstruované vozidlo metra, nebo střídavá pantografová jednotka ř. 560, kde bylo jako spínacích prvků použito tyristorů IGCT. Na obr. č. 1 je zobrazen příklad modernizace trakčního obvodu vozu Metra, kde byla nasazena pulzní regulace s novými spínacími prvky IGBT. Vozidlo je vybaveno jak odporovou brzdou, tak i rekuperací. Ponechané motory přešly na režim s cizím buzením.

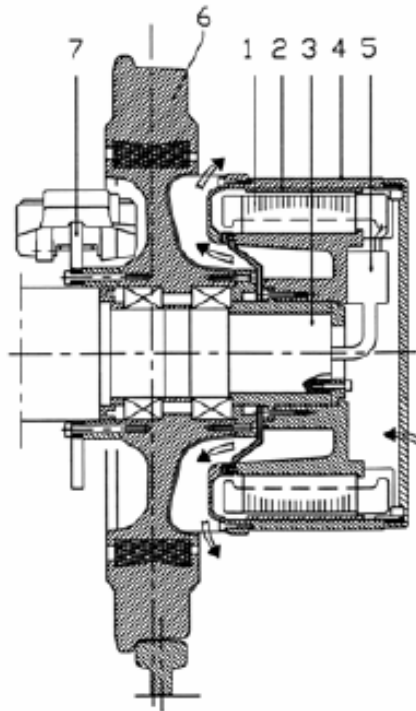


Obr. 1: Trakční obvod rekonstruovaného vozu Metra

S nástupem nových spínacích prvků (tyristory GTO, IGCT, spínací tranzistory IGBT) především do oblastí frekvenčně řízených střídačů, byly vytvořeny příznivé podmínky pro jejich široké aplikační využití především do oblasti řízení indukčních strojů. Z technického hlediska se vyřešil dlouhodobý problém již zmíněného mechanického komutátoru. Je zajímavé, že u všech pohonů s proměnlivou regulací otáček, zůstává komutace proudu limitujícím činitelem a to bez ohledu na druh proudu a druh motoru. Z tohoto pohledu je rozdíl mezi komutátorovým a bezkomutátorovým frekvenčně řízeným motorem v tom, zda komutace probíhá v mechanickém komutátoru nebo u indukčního motoru ve statickém měniči, kde dnes jsou tyto problémy spolehlivě zvládnuty. Během krátkého období vývoje frekvenčních měničů došlo k jejich pronikavému zjednodušení, které přineslo snížení energetických ztrát a minimalizaci jejich rozměrů, což má svůj význam zejména u malých trakčních vozidel jako jsou tramvaje, trolejbusy a motorové jednotky.

V poslední době se nabízí další varianta řešení trakčního pohonu bezkomutátorovým synchronním motorem s permanentními magnety. Nové technologie výroby permanentních magnetů ze zvláštních zemin, nejčastěji jsou to slinutiny, jako např. neodym – železo – bor nebo samarium – kobalt, kde se dosahuje vysoké hodnoty magnetického sycení (1 – 1,2 T), umožnily konstrukci těchto motorů. Synchronní motor s permanentními magnety má ve srovnání s asynchronním motorem další přednosti. Je to především vyšší kroutící moment vztahovaný na hmotnost stroje, menší moment setrvačnosti, menší oteplení, vyšší momentovou přetížitelnost a další jeho předností je, že může maximální moment vyvíjet v klidovém stavu, což je pro trakční pohon důležitá vlastnost. V současné době se již podařilo konstruktérům postavit tyto motory s výkonem až 180 kW. Konstrukce těchto motorů vzhledem k jeho trakčním vlastnostem, umožňuje i řešení bezpřevodového pohonu. Perspektivní užití těchto motorů přichází, vzhledem k realizovaným výkonům, zejména pro tak zvanou lehkou dopravní techniku, jako jsou elektromobily, elektroskútry, ale i lehká kolejová vozidla, kde se nabízí možnost přímého individuálního pohonu kol, a tím je umožněna stavba nízkopodlažního vozidla. Příklad takového řešení s individuálním bezpřevodovým přenosem kroutícího momentu na

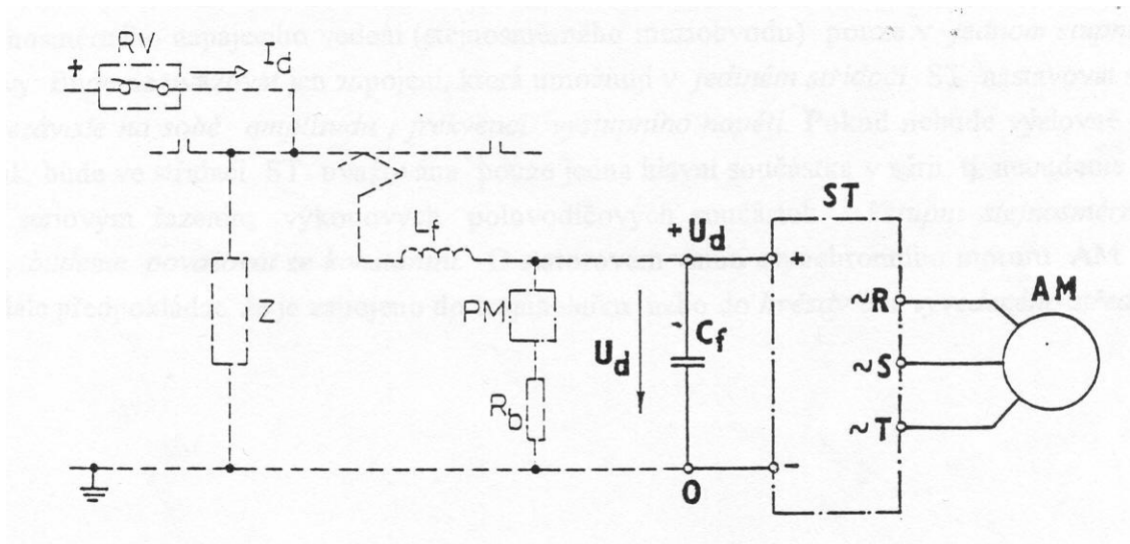
hnací kolo je na obr. č. 2. Pokud se týká řízení tohoto motoru, platí zde obdobné zásady řízení jako u asynchronních motorů.



Obr. 2: Řešení přímého individuálního převodu bezkomutátorovým motorem

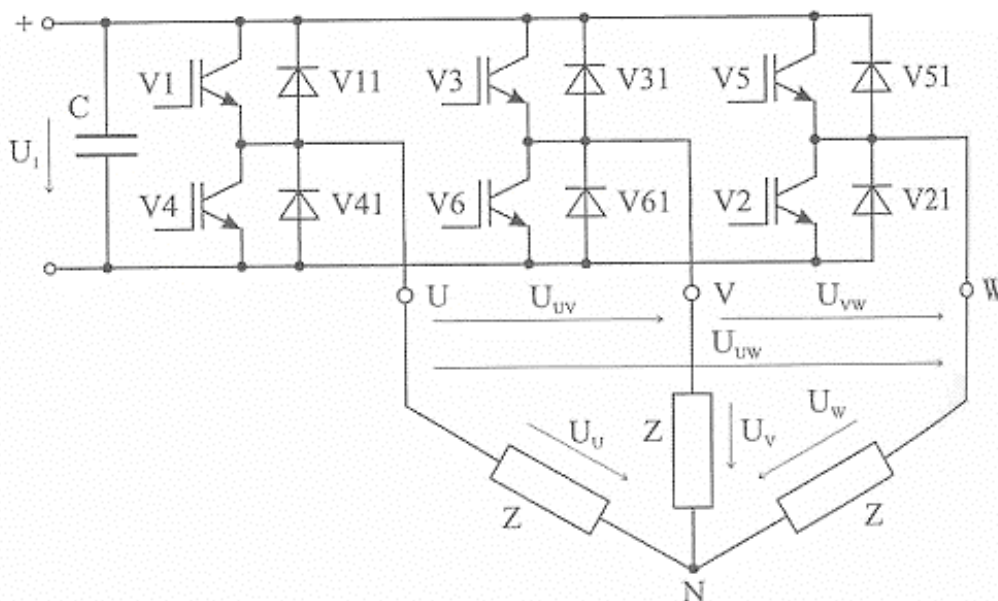
Současná koncepce uspořádání trakčního pohonu s asynchronním motorem respektive synchronním motorem s frekvenčním řízením vychází z varianty nepřímého měniče (řízeného střídače) napěťového typu (obr. č. 3).

Moderní trakční pohon s bezkomutátorovým motorem má v podstatě dvě části výkonovou a řídicí. Výkonovou část tvoří indukční asynchronní motor s kotvou nakrátko a frekvenční měnič, ve kterém dochází k vlastní přeměně energie s prakticky bezztrátovou přeměnou.



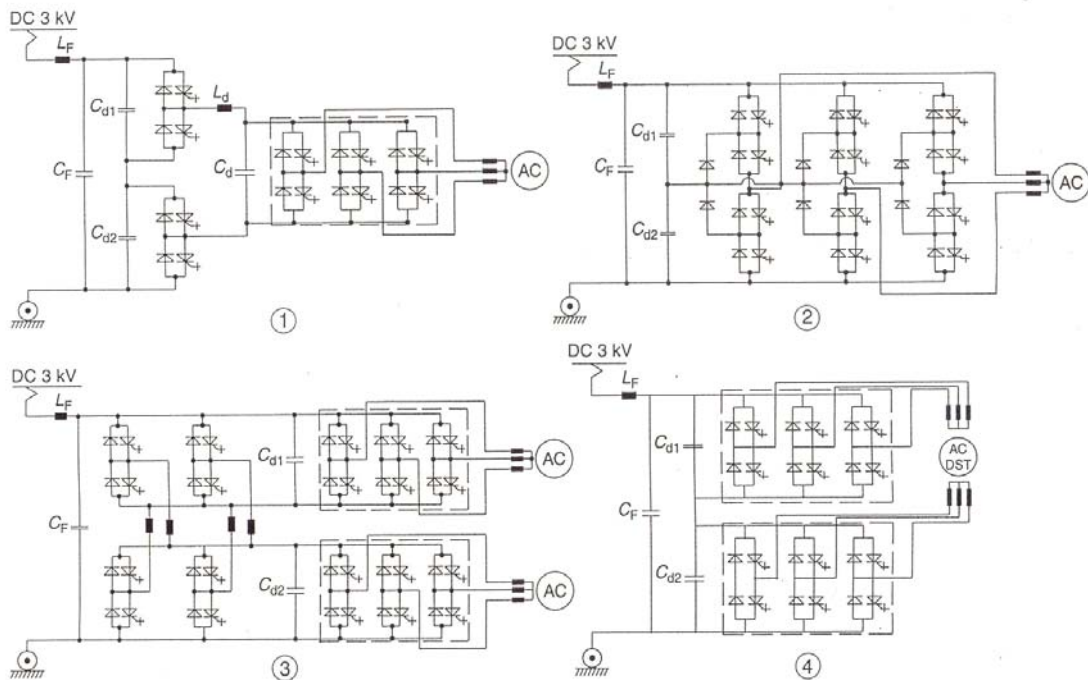
Obr. 3: Principiální uspořádání asynchronního pohonu s napěťovým měničem

Vlastní obvod tedy sestává ze stejnosměrného meziobvodu, který tvoří kondenzátor C_f . Napěťový meziobvod při napájení ze stejnosměrného vedení je napájen přes vstupní filtr buď přímo (při napájení 600, 750 V), nebo přes pulzní měnič regulující požadovanou hladinu napětí (u napájecího systému 3 kV). Paralelně ke stejnosměrnému obvodu je ještě připojen brzdový obvod, který tvoří pulzní měnič PM s brzdovým rezistorem R_b , který odebírá energii v případě generátorického chodu indukčního motoru, respektive tato energie může být rekuperací dodávána do trakčního vedení a spotřebována jiným trakčním vozidlem, což vyžaduje další úpravu obvodu. Vlastní střídač v základním provedení obr. č.4 sestává ze šesti vypínatelných prvků (GTO, IGBT, IGCT) a šesti antiparalelně připojených diod, přes které se uzavírá doznívající proud při přepínání spínacích prvků, nebo působí jako usměrňovače pro zpětný tok energie z motoru do meziobvodu.



Obr. 4: Základní zapojení frekvenčního měniče

Sekundárním problémem je pak řešení napájení stejnosměrného meziobvodu z hlediska napětového namáhání výkonových polovodičových prvků vzhledem k velikosti napěťové hladiny a s tím souvisejícího i zpětného vlivu na energetickou síť a na zabezpečovací traťové systémy. Na obr. č.5 jsou znázorněny varianty řešení používané při napájení ze sítě 3 kV DC. První variantou (obr. č. 5/1) je napájení pomocí kapacitního děliče a pulzních měničů, druhou variantu (obr. č.5/ 2) představuje tříhladinový střídač, třetí možnou variantou řešení představuje obr. č. 5/3, čtvrtou variantou je zdvojený měnič napájený z kapacitního děliče napájející motor se dvěma vinutími spojenými do hvězdy (varianta byla použita u motorové jednotky ČD 471).



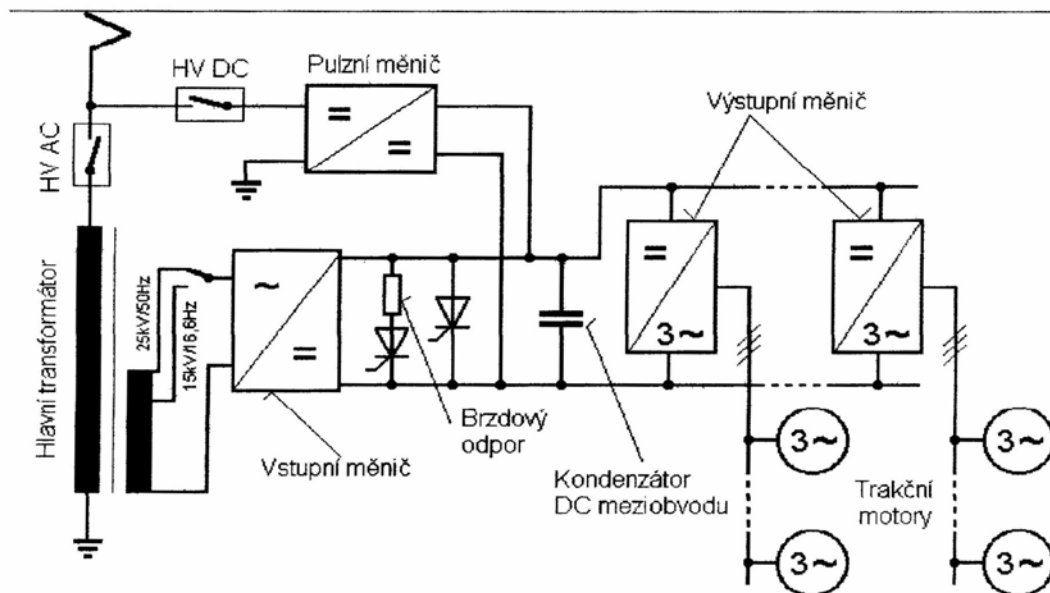
Obr. 5: Varianty řešení napájení meziobvodu z trakční sítě 3 kV

V případě napájení ze střídavé sítě (15 kV, 16 2/3 Hz resp. 25 kV, 50 Hz) je napájen stejnosměrný meziobvod z usměrňovače, který může plnit při rekuperačním brzdění i funkci střídače. Přejde-li indukční motor do generátorického režimu, je mu ze stejnosměrného meziobvodu přes spínací prvky výstupního měniče (střídače) dodáván jalový výkon a současně je přes antiparalelně připojené diody zpětně dodávána energie do stejnosměrného meziobvodu (paralelně řazené diody plní funkci usměrňovače). Rekuperovaná energie do meziobvodu je buď spotřebována na brzděném odporu obdobně jako u trakce stejnosměrné, respektive v druhém případě ji lze rekuperovat zpět do sítě. V tom případě ji musíme opět přeměnit přes vstupní střídač, což je v podstatě obráceně zapojený frekvenční měnič s určitým algoritmem řízení a PWM modulací. Takový měnič pak označujeme jako čtyřkvadrantový.

Na obr. č. 6 je uvedeno blokové zjednodušené schéma řešení trakčního obvodu více-systémového vozidla motorové jednotky ř. 680.

Při režimu jízda na stejnosměrném systému je napětí meziobvodu regulováno pulzním měničem, udržujícím žádané jeho napětí. Každá dvojice podvozků je pak napájena ze samostatných střídačů.

Při režimu na střídavém systému je meziobvod napájen ze vstupního měniče, který pracuje v režimu motorickém jako usměrňovač, v brzdném režimu pracuje jako střídač rekurující energii zpět do sítě.



Obr. 6: Zjednodušené schéma silového obvodu třísystemového vozidla ř. 680

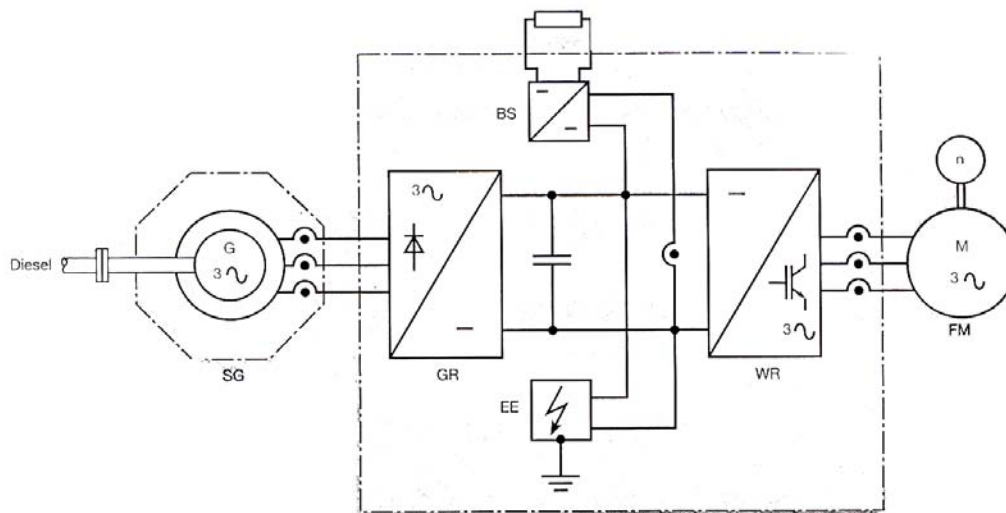
Druhou částí trakčního pohonu je řídicí část, která slouží k řízení energetické přeměny s cílem dosáhnout požadované trajektorie pohybu. Řídicí systém pracuje zpravidla s více zpětnými vazbami zajišťujícími regulaci dynamických veličin pohybu (tažná síla, rychlost), kdy je vyhodnocována regulační odchylka těchto veličin, zpracována v regulátoru a výstupní akční veličinou je generování signálů pro spínací prvky měniče nebo zadávání signálů pro další podřízené prvky. Pro dosažení řízení žádaného momentu motoru a jeho otáček je regulace prováděna mikroprocesorovým regulátorem, kde jsou dnes používány dvě metody řízení, jako je metoda vektorového řízení, kterou například upřednostňuje firma Siemens, nebo metoda přímého řízení momentu upřednostňovaná firmou ABB. Jde o složitější problematiku přesahující rámec tohoto článku. U dnešních měničů se změna frekvence a efektivní hodnoty výstupního napětí realizuje pulzně šířkovou modulací označovanou v odborné literatuře jako metoda PWM.

S nástupem nové generace pohonů s bezkomutátorovými motory je situace samozřejmě složitějším problémem. Frekvenční měnič napájející indukční motor představuje typický nelineární prvek a tedy i zdroj harmonických proudů, které se negativně budou projevat na chodu tohoto motoru (pulzační momenty, vyšší oteplení motoru, vyšší hlučnost). V druhém případě je zde nutno zkoumat zpětný vliv frekvenční regulace na napájecí síť. Cílem výrobců je z hlediska EMC dosáhnout „čistého vozidla“ s minimálními důsledky na vlastní trakční obvod, tak i na energetickou síť a v neposlední řadě i na zabezpečovací systémy, jejichž spolehlivost by mohla být ohrožena. Složitější situace je z hlediska EMC na střídavé napájecí síti, kde se používá čtyřkvadrantových měničů, jejichž meziobvod, jak již bylo uvedeno, je napájen z pulzního usměrňovače (obráceně zapojený střídač s PWM modulací), kde vhodným argumentem řízení lze minimalizovat nepříznivé účinky na napájecí síť. Zde je

možno zadat výstupní napětí pro stejnosměrný meziobvod a fázový posun vstupního proudu vůči vstupnímu napětí a tím máme možnost regulovat vstupní jalový výkon a lze dosáhnout sinusového proudu s minimálním obsahem harmonických. Zde je nutno vzít v úvahu, že technická opatření budou odlišná pro jednotlivé napájecí systémy a vozidla třetí generace budou konstruována spíše jako vícesystémová, pak bude nutné řešit potlačení negativních vlivů pro každý systém odděleně.

Nasazení frekvenčně řízených měničů do trakčních pohonů vozidel závislé trakce byla nastolena i myšlenka, nahradit i v přenosové soustavě motorové trakce doposud výhradně používaný stejnosměrný sériový motor konstrukčně jednoduchým asynchronním motorem.

Koncepčně je trakční obvod vozidla motorové trakce řešen tak, že je ponechán střídavý generátor SG, napájející přes řízený usměrňovač GR stejnosměrný meziobvod, který tvoří opět kondenzátor a spínaný brzdový odpor BS. Z meziobvodu je napájen řízený střídač WR, z něhož jsou napájeny třífázové asynchronní motory. Paralelně připojený pulzní měnič BS opět umožní odporové dynamické brzdění. Algoritmus řízení je obdobný jako u měničů pro závislou trakci. Blokové schéma řešení trakčního obvodu je na obr. č. 7.



Obr. 7: Blokové schéma elektrického přenosu výkonu s bezkomutátorovými motory

Koncepce moderních střídavých pohonů drážních vozidel v ČR

Koncepce trakčního pohonu lokomotivy 90E

První zkušenosti s trakčním pohonem drážního vozidla s asynchronními motory byly v České republice získány již v 80. letech 20. století u čtyřnápravové lokomotivy, která byla vyrobena ve firmě Škoda Plzeň s typovým označením 85E. Koncepce pohonu byla poplatná době vzniku tohoto vozidla, kdy nebyly dostupné vypínatelné polovodičové prvky pro dostatečné proudové a napěťové zatížení. Proto byly střídače osazeny klasickými tyristory a z důvodu maximálního zjednodušení vypínacích obvodů tyristorů byly střídače koncipovány s proudovým vstupním obvodem. Regulace pohonu byla realizována analogovým regulátorem

s relativně jednoduchou strukturou respektující napájení motoru ze střídače s proudovým vstupem. Tato koncepce pohonu však byla v současnosti opuštěna.

Prvním vozidlem s asynchronními trakčními motory vyrobeným v tuzemsku a nasazeným do provozu, jehož koncepce odpovídá současnému standardnímu řešení střídavého trakčního pohonu, které se používá v řadě modifikací, byla posunovací lokomotiva 90E vyrobená ve firmě Škoda Plzeň. Elektrickou výzbroj pro lokomotivu dodala rovněž Škoda Plzeň, programové vybavení pro regulaci momentu trakčních motorů a pro řízení trakčního střídače bylo vyvinuto na ČVUT v Praze, FEL. Lokomotiva byla ve čtyřech exemplářích nasazena do provozu v druhé polovině 90. let 20. století v severočeských povrchových dolech.

Lokomotiva 90E je čtyřnápravová, s individuálním pohonem dvojkolí. Ze stejnosměrné napájecí soustavy 3 kV je přivedeno napětí přes vstupní filtr na vstupní pulzní měnič. Pulzní měnič je čtyřfázový, sérioparalelní, je napájen z kapacitního děliče a je osazen GTO. Koncepce silového zapojení pulzního měniče je dána požadavkem co nejmenšího zvlnění vstupního a výstupního proudu a vzhledem k napěťové zatížitelnosti GTO, které byly dostupné v době vzniku lokomotivy, je zabezpečeno dělení vstupního napětí na jednotlivé GTO.

Vstupní pulzní měnič má tyto funkce:

- stabilizuje napětí pro napájení trakčního střídače, neboť napájecí trakční síť 3 kV ss je měkká a její napětí se může měnit v rozpětí 2000 V ÷ 3600 V
- snižuje napětí pro napájení trakčního střídače tak, aby nebylo překročeno přípustné napěťové namáhání použitých GTO střídače
- mění hodnotu napětí pro napájení trakčního střídače tak, že při malých rychlostech lokomotivy je toto napětí sníženo, neboť při těchto rychlostech je malá efektivní hodnota napájecího napětí trakčních motorů a při nižší hodnotě vstupního napětí střídače je malé výstupní napětí lépe promodulováno a dosáhne se příznivější skladby vyšších harmonických napětí pro motor

Kromě těchto funkcí musí zabezpečit regulátor pulzního měniče ještě tyto úlohy:

- udržení rovnoměrného rozložení proudů v jednotlivých fázích pulzního měniče
- udržení rovnoměrného rozložení napětí na vstupním kapacitním filtru
- úspěšný start pulzního měniče.

Na výstupu pulzního měniče je připojen filtrační kondenzátor, který tvoří napěťový meziobvod pro napájení střídače. Paralelně ke kondenzátoru je připojen brzdný odpor spínaný přes GTO. U lokomotivy se nepředpokládá rekuperační brzdění do napájecí sítě a tudíž veškerá energie generovaná při elektrickém brzdění je mařena v tomto odporu.

Napěťový meziobvod napájí střídač osazený GTO. Jmenovité vstupní napětí střídače je 2400V a toto napětí může kolísat v rozmezí 1600 V ÷ 2600 V. Střídač formuje výstupní napětí pomocí širkově pulzní modulace s maximální spínací frekvencí 300Hz.

Ze střídače jsou napájeny čtyři paralelně zapojené asynchronní trakční motory. V případě poruchy motoru může být lokomotiva provozována i s nižším počtem motorů připojených k výstupu střídače. Paralelní řazení motorů k výstupu střídače snižuje počet potřebných střídačů a snižuje objem, hmotnost a cenu výzbroje, avšak mohou se vyskytnout problémy spojené s nerovnoměrným dělením výkonu na jednotlivé paralelně pracující motory. Tato skutečnost je dána tím, že odpor rotoru trakčního motoru je velmi malý – řádově setiny ohmu – aby se minimalizovaly rotorové Jouleovy ztráty. To však vede k velké tvrdosti mechanické charakteristiky motoru. Při malé odchylce hodnoty rotorového odporu paralelně pracujících motorů, způsobené např. nestejným oteplením, může být potom nerovnoměrnost

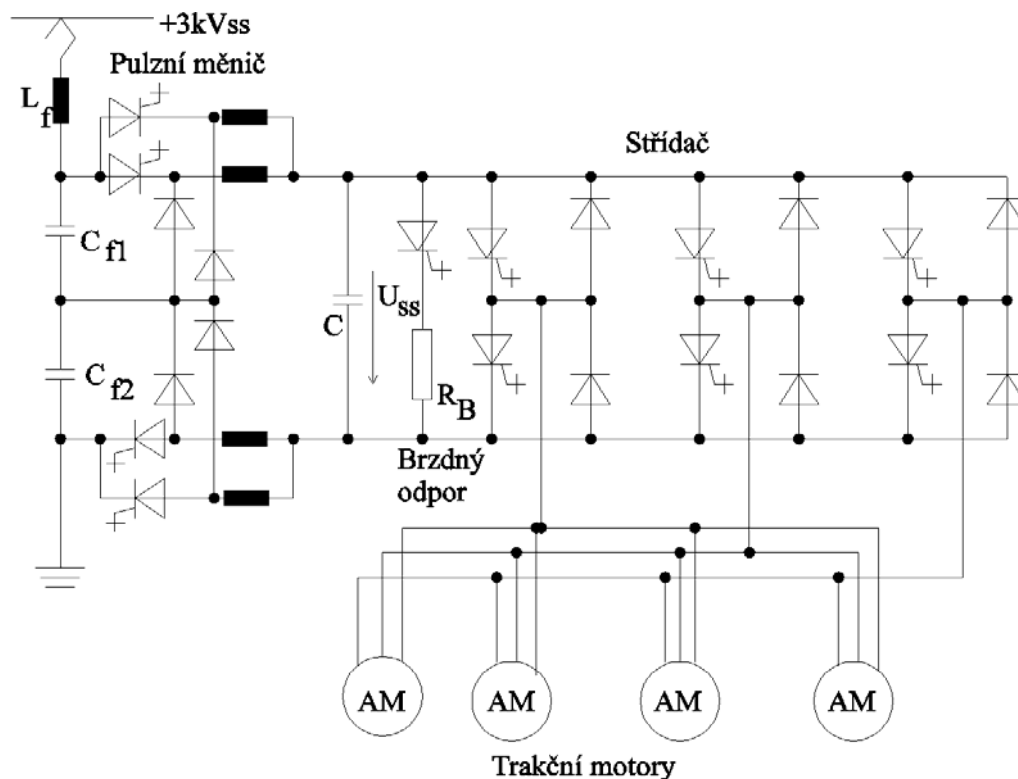
dělení výkonů velká. Další nevýhodou paralelního zapojení motorů k výstupu střídače je menší efektivita působení protiskluzové ochrany.

Jmenovité hodnoty použitého šestipólového trojfázového asynchronního motoru jsou:

Jmenovitý výkon	400 kW
Jmenovité napětí	1870 V
Jmenovitý proud	155 A
Jmenovité otáčky	1486 ot/min
Jmenovitá frekvence	75 Hz
Maximální frekvence	150 Hz
Chlazení	vzduchem, cizí

Točivý moment je z motoru přenášen ozubeným pastorkem nasazeným na jednostranně vyvedený kuželový konec hřídele.

Maximální frekvence napájecího napětí je dvojnásobkem frekvence jmenovité. Do jmenovitých otáček motor pracuje s konstantním magnetickým tokem a stálým maximálním momentem. Při otáčkách vyšších oproti jmenovitým pracuje motor se zeslabeným magnetickým tokem při konstantní efektivní hodnotě napájecího napětí se zmenšujícím se maximálním momentem a se stálým výkonem. Blokové schéma výkonové části popsaného pohonu je na obr. 6.



Obr. 8: Blokové schéma výkonové části pohonu lokomotivy 90E

Řídicí systém lokomotivy je tvořen osmi jednotkami, které byly vyvinuty a vyrobeny jako součást stavebnicového mikropočítačového systému PRIMIS ve firmě Škoda Plzeň. Tento systém je koncipován pro realizaci číslicových regulátorů pohonů. Jednotka je vybavena procesorem Intel 80C196KC. Jednotky řídicího systému lokomotivy pracují na společné sběrnici, výměna dat mezi procesory se uskutečňuje přes společně sdílené adresové prostory. Pro regulaci trakčního pohonu lokomotivy 90E slouží dvě z osmi procesorových karet: program jedné karty realizuje algoritmus šířkově pulzní modulace pro střídač, program druhé karty realizuje výpočet modelu trakčního motoru v reálném čase a algoritmus zpětnovazební regulace momentu trakčních motorů, tj. regulace tažné síly lokomotivy. Mezi těmito kartami se z jednotky regulátoru momentu do jednotky šířkově pulzního modulátoru uskutečňuje přenos požadované efektivní hodnoty první harmonické výstupního napětí střídače a frekvence tohoto napětí.

Koncepce trakčního pohonu elektrické jednotky řady 471

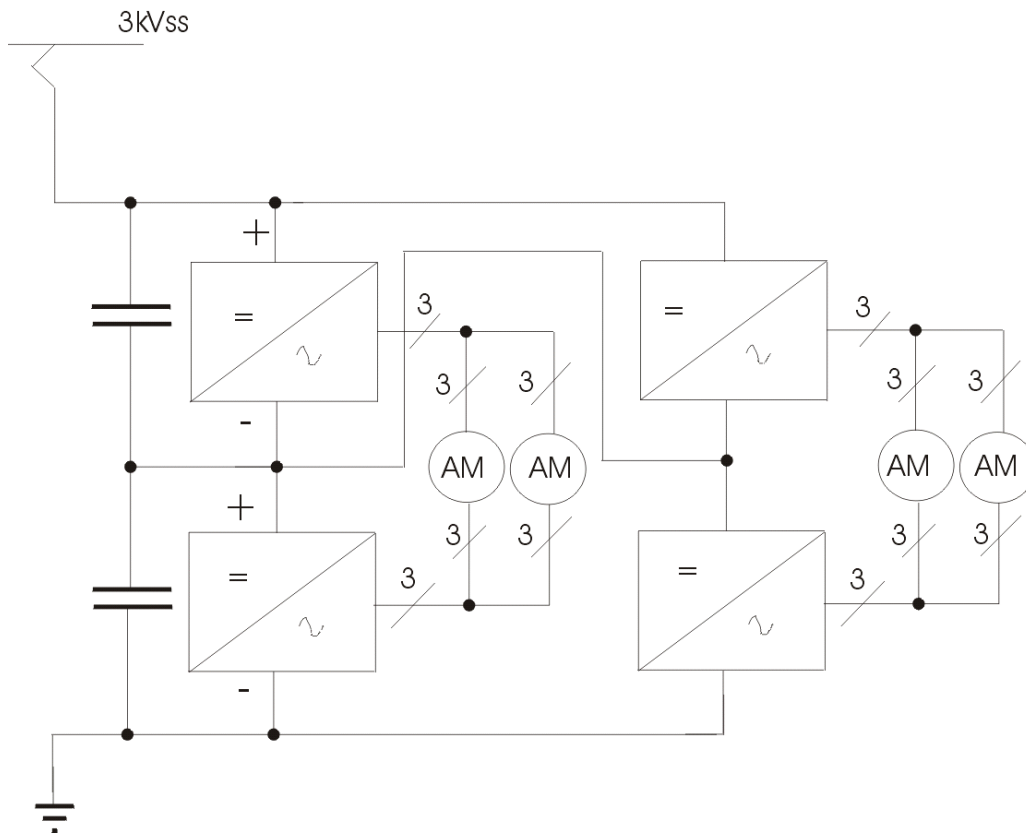
Elektrický motorový vlak řady 471 má tři vozy: hnací, vložený a řídicí. Hnací vůz má čtyři dvojkolí ve dvou podvozcích, každé dvojkolí je poháněno individuálně asynchronním trakčním motorem. Střídač je osazen prvky IGBT a jeho vstup je připojen přímo na trolejové napětí 3kV. Rozložení napájecího napětí na prvky IGBT tak, aby se nepřekročilo jejich maximální napěťové namáhání, je řešeno sériovým zapojením dvou střídačů. Z každého střídače je napájena dvojice paralelně zapojených speciálních trakčních motorů. Trakční motory mají speciální konstrukci, neboť mají dvojitě vinutí statoru. Každé vinutí je napájeno z jedné poloviny střídače. Hnací vůz jednotky je osazen dvěma střídači, každý střídač napájí trakční motory jednoho podvozku.

Použití prvků IGBT ve střídači umožnilo zvýšit spínací frekvenci šířkově pulzní modulace na 800 Hz. Mezní výkon jednoho střídače je 1800 kW.

Koncepce regulátoru trakčního pohonu vychází z řešení použitého na lokomotivě 90E. V hardwarové konfiguraci regulátoru pohonu byl nahrazen jeden procesor 80196 rychlým signálovým procesorem DSP a oproti lokomotivě 90E bylo změněno rozdělení výpočetních operací mezi oběma procesory pro řízení pohonu: rychlý DSP procesor provádí výpočet matematického modelu trakčního motoru v reálném čase pro získání hodnot zpětnovazebních veličin, procesor 80196 zabezpečuje výpočet algoritmu vektorové regulace momentů trakčních motorů a generování šířkově pulzní modulace pro řízení prvků ve střídači.

Nadřazené řízení vozidla a vlaku zabezpečuje řídicí systém, který dodala firma Uni-controls a.s. Jedná se o moderní distribuovaný systém založený na komunikaci po sběrnici CAN.

Elektrická výzbroj jednotky 471 je představuje moderní řešení střídavého trakčního pohonu a je pokračováním koncepce použité na lokomotivě 90E. Jednotka 471 je v současnosti jediným pravidelně nasazovaným vozidlem s asynchronními trakčními motory na Českých drahách.



Obr. 9: Blokové schéma trakčního pohonu hnacího vozu jednotky řady 471

Popsaná koncepce trakčního pohonu je v současnosti standardem a nelze zřejmě očekávat zásadní změny ani v budoucnu. I v případě použití synchronního motoru s permanentními magnety zůstává koncepce výkonové polovodičové výzbroje beze změny. Popsanou koncepcí lze charakterizovat těmito základními rysy:

- použití asynchronního motoru s kotvou nakrátko
- střídač s napěťovým vstupním obvodem
- střídač osazen vypínatelnými polovodičovými prvky
- výstupní napětí je formováno šířkově pulzní modulací
- mikroprocesorový regulátor nejčastěji s vektorovým řízením točivého momentu

I u renomovaných výrobců lze vysledovat tuto koncepci v různých obměnách. V závislosti na dané aplikaci se může lišit počet motorů napájených paralelně z jednoho střídače, z důvodu napěťového namáhání výkonových polovodičových prvků mohou být střídače řazeny do série či použit vícehladinový střídač, jak je uvedeno na obr. č.4. Značně rozdílnou podobu může mít vstupní měnič pro napájení napěťového vstupního obvodu pro střídač. Nejčastěji se používají různá zapojení pulzních měničů v případě stejnosměrné napájecí soustavy či kompatibilní usměrňovače v případě střídavé napájecí soustavy. Na rozdíl od lokomotivy 90E se v současnosti u trakčních pohonů přechází u střídačů od GTO k IGBT či k IGCT, využívají se vyšší spínací kmitočty u střídačů – do 3 kHz – a používají se výkonnější řídicí systémy založené na DSP, avšak celkovou filozofii pohonu tyto skutečnosti v podstatě neovlivňují.

Literatura:

- [1] Marian, P., Kazmierkowski, R., Krishnan, F., Blaabjerg: Control power electronics Academic press
- [2] Jiří Javůrek:Regulace moderních elektrických pohonů. Grada Publishing, a.s.,
Praha 2003
- [3] Firemní literatura

V Praze, březen 2004

Lektoroval: Ing. Jiří Doubrava
GŘ ČD O12