

Koncepce vozidel elektrické vozby

Počátky

Počátek elektrického provozu na železnici navázal na sklonku 19. století na tramvajové městské elektrické dráhy. Pro první pokusné elektrifikované železnice bylo použito stejnosměrné napětí, kolem 500 V, později kolem 1 000 V.

Snaha použít pro pohon vozidel jednoduché robustní asynchronní motory vedla na přelomu 19. a 20. století k elektrizaci železnic třífázovým systémem. Dvoustopé trakční vedení a v té době obtížně regulované asynchronní trakční motory byly slabinami, které vedly k opuštění tohoto stylu.

Další krok vedl k jednofázovým systémům. Střídavé napájecí napětí o velikosti 10 kV umožňovalo provádět elektrifikaci tratí lehčím trakčním vedením, zvyšovat vzdálenost napájecích stanic., snadnější transformaci napětí přímo na vozidle. Problémem zůstal trakční motor. Třífázový indukční motor vyžadoval rozměrné rotační měniče a jednofázový komutátorový motor byl provozně problematický z důvodů silného jiskření na komutátoru a tím k opalování lamel komutátoru a rychlé opotřebení uhlíkových kartáčů.

Proto byl kmitočet střídavého napájecího napětí snížen. V Evropě z obvyklých 50 Hz na jednu třetinu, tedy na 16 2/3 Hz. Celočíselný poměr (3) byl zvolen z důvodu realizace rotační konvertorů a to na bázi šestipólového synchronního motoru a dvoupólového alternátoru. Snížení kmitočtu vedlo ke zlepšení komutací trakčních motorů. Nižší kmitočet se též příznivě projevil ve snížení počtu napájecích stanic, neboť ty jsou díky poměrně malým úbytkům napětí schopny napájet poměrně dlouhé úseky.

Ve Francii se od roku 1920 prováděla elektrifikace stejnosměrným systémem o napětí 1 500 V a v Itálii od roku 1927 se zaváděl jednotně stejnosměrný systém 3 000 V. Samostatným rozvojem elektrizace tratí systémem 16 kV 50 Hz a použitím lokomotiv s rotačními měniči se vydalo Maďarsko.

Stejnossměrný systém 1 500 V se po svém zavedení ukázal jako velmi nákladný a výkonově omezený a proto jej Francie v padesátých letech minulého století doplnila jednofázovým systémem využívající průmyslový kmitočet 25 kV 50 Hz. Ten se stal v pořadí již čtvrtým z hromadně rozšířených systémů elektrizace železnic a v šedesátých letech jej převzaly nejen státy teprve v té době zahajující elektrizaci svých železnic, ale i některé státy již rozsáhle provozující systém 3 000 V.

Zavádění výkonové polovodičové techniky výrazně ovlivnil rozvoj a využívání elektrické vozby. Použití diodové usměrňovače pozitivně ovlivnila a v podstatě umožnila výrobu jednofázových lokomotiv využívající průmyslový kmitočet 50 Hz a stejnosměrné trakční motory. Zároveň však též polovodičové diody výrazně zjednodušily provedení a zohospodárnily provoz měnících napájecích stejnosměrných dráh.

Přechod od neřízených polovodičových usměrňovačů k řízeným, tedy v té době od diod k tyristorům, výrazně pomohl stejnosměrným lokomotivám, neboť technika pulsních měničů umožnila odstranit ztrátové řízení rozjezdu pomocí odporů a opotřebení podléhajících stykačů.

Výrazný pokrok ve vývoji výkonové i řídicí elektroniky vedl k odklonu od používání stejnosměrných i střídavých komutátorových trakčních motorů. Princip komutátoru jako mechanického střídače přímo v elektromotoru byl nahrazen polovodičovým statickým měničem, napájecím proměnným napětím a proměnnou frekvencí trakční motory. Těmi jsou zpravidla třífázové elektromotory:

- asynchronní s kotvou nakrátko;
- synchronní, například s rotorem buzeným permanentními magnety.

Důsledkem je možnost použití bezkomutátorových třífázových motorů, využívajících točivé magnetické pole, které v porovnání s komutátorovými trakčními motory mají:

- podstatně vyšší odolnosti vůči provozním vlivům (znečištění, rázy, přetížení),
- lepší regulační možnosti z důvodů použití polovodičové regulace s menšími ztrátami;
- vyšší výkonové parametry při menších rozměrech a hmotnost,
- podstatně jednodušší udržitelnost.

Tyto možnosti a vlastnosti způsobují, že střídavé třífázové trakční motory napájené z polovodičových měničů jsou nyní jednotně používány pro pohon elektromobilů, trolejbusů, tramvají a metra, dieselelektrických a elektrických lokomotiv, motorových vozů a jednotek.

Všechna vozidla elektrické trakce využívají velmi podobnou strukturu, sestávající z:

- vstupního obvodu:
 - sběrač a LC filtr u elektrických vozidel se stejnosměrným napájením z trakčního vedení (trolej nebo přívodní kolejnice);
 - sběrač, transformátor, čtyřkvadrantový měnič a LC filtr u elektrických vozidel se střídavým napájením z trakčního vedení (trolej);
 - alternátor s usměrňovačem u vozidel dieselelektrických;
- trakčního pohonu:
 - pulsní napěťový střídač s podpurným kondenzátorem stejnosměrného meziobvodu;
 - třífázové trakční motory;
 - pulsní spínač a brzdový odporník nebo brzdový kondenzátor (u vozidel, kde nelze veškerou brzdovou energii rekuperovat);
- pomocných pohonů:
 - primární měnič, zajišťující galvanické oddělení od napájecího systému (je-li potřebné);
 - sekundární měniče, zajišťující napájení jednotlivých pomocných elektromotorů proměnnou frekvencí respektive napájení stejnosměrné pomocné sítě a pomocné baterie;
 - třífázové pomocné motory.

Vozidla pro stejnosměrný napájecí systém

Vozidla se stupňovou odporovou regulací

Elektrické silové obvody hnacích vozidel na stejnosměrný napájecí systém se stupňovou odporovou regulací se skládá [Jansa, 1983]:

- trakčních motorů – většinou stejnosměrných sériových;
- snímacích přístrojů – sběrače, nápravové sběrače;
- spínacích přístrojů – hlavní vypínač, stykače, hlavní kontrolér, přepínače;
- regulačních přístrojů – spouštěcí odporníky, zeslabovací a brzdové odporníky, tlumivky;

- ochranných přístrojů – nadproudové, napěťové, diferenciální, skluzové;
- měřicí přístroje – napětí, proudy, rychlost spotřeby.

Obvody trakčního proudu hnacího vozidla se stupňovou odporovou regulací se skládají z částí:

- trolejové sběrače, odpojovače sběrače a uzemňovač, bleskojistka, které jsou umístěny na střeše vozidla;
- hlavní vypínač – hlavní spínací a ochranná prvek silových elektrických obvodů hnacího vozidla, je umístěný ve strojovně;
- silové ochrany trakčního obvodu – napěťová, proudová, rozdílová (diferenciální), skluzová;
- spouštěcí a brzdové odporníky – umístěné v blocích na střeše nebo v bočnicích skříně s důvodů chlazení;
- spínačů pro připojování spouštěcích a brzdových odporníků, spínačů pro změnu zapojení motorových skupin – hlavní kontrolér ve strojovně;
- přepínače směru otáčení trakčních motorů – mění směr toku proudu buzení nebo v kotvách trakčních motorů;
- spínače, odporníky a tlumivky zeslabování buzení trakčních motorů;
- trakční motory;
- bočníky měření trakčních proudů a spotřeby energie;
- nápravové sběrače.

Trakční motory jsou obvykle stejnosměrné sériové, napájení přímo z trakční soustavy. Z důvodů snížení jejich rozměrů (průměr komutátoru, izolace atd.) jsou tyto motory konstruovány na jmenovité napětí o velikosti poloviny hodnoty napětí napájení z trakčního vedení. Proto při regulaci skokovou změnou napětí (změnou jejich vzájemného zapojení) jsou vždy minimálně dva motory v sériovém zapojení. Pokud se oba motory otáčejí stejnou úhlovou rychlostí, jak napětí na komutátorech obou motorů má stejnou hodnotu. Tohoto jevu se využívají pro sledování prokluzu dvoukolí, které tyto motory pohánějí.

Pro regulaci (spouštění) se využívá tří základních principů:

skoková změna napětí na trakčním motoru – v případě sudého počtu motorů je možno pomocí stykačů měnit vzájemné zapojení motorů:

- u 4nápravových vozidel na sériové a sérioparalelní;
- u 6nápravových vozidel na sériové, sérioparalelní a paralelní zapojení motorových skupin.

předřadnými odporníky – která se označuje jako regulace ztrátová, neboť část energie se na těchto odpornících mění v teplo. Postupným snižováním hodnoty rezistence spouštěcího (rozjezdového)

Obr. 4.76

Schéma hlavních obvodů

1 - sběrač, 2 - odpojovače, 3 -
přepětový svodič, 4 - územnění,
5 - přepětová ochrana, 6 - hlavní
vypínač, 7 - přepínání zapojení,
8 - rozjezdové odpory, 9 - trakční
motory, 10 - měnič směru jízdy,
11 - šuntovací odpory, 12 - tlumiv-
ky, 13 - měřicí přístroje, 14 -
obvod dvojkolí

Obr. K.1: Zjednodušené principiální schéma obvodu trakčního proudu hnacího vozidla se stupňovou odporovou regulací. [Antonický, 1984]

Vozidla s plynulou (polovodičovou) regulací

Příchod polovodičové techniky v první fázi umožnil nahradit ztrátovou odporovou regulaci spouštění u stejnosměrných sériových (později i cize buzených) trakčních motorů. V druhé fázi pak byl proveden přechod na bezkomutátorové třífázové trakční motory s elektronickými střídači.

Soudobé polovodičové prvky a způsob jejich řízení již umožňují i u systému 3 kV stavbu vozidel se střídači přímo napájenými z trakčního vedení. Elektrická výzbroj trakčních vozidel systému 3 kV je proto relativně jednoduchá, lehká, prostorově nenáročná a tedy i levná. Vstupní obvod a stejnosměrný meziobvod u nich v podstatě splývají v jeden celek.[MAJ, 2005]

Svým výkonovým limitem tento systém vyhovuje pro konvenční evropské železnice (kategorie do 200 km/h).

Tyto koncepce řešení vozidel pro stejnosměrný napájecí systém umožňují realizovat elektrodynamickou rekuperační brzdu, Využití tohoto způsobu brzdění, a tím i možné další úspory energie, je daná možností jejího předání jiným vozidlům v napájeném úseku. U napájecího systému 3 kV je tento způsob úspěšný v husté příměstské dopravě, ale problematicky řešitelný v úsecích s řidší dopravou. Ve snaze zajistit dosažitelnost vhodného konzumenta energie i na větší vzdálenost, což je spojeno s překonáním poměrně velkých úbytků napětí v trakčním vedení, je při rekuperaci snaha napětí zvyšovat nad nejvyšší přípustné hodnoty, tedy nad 3 600 V. Podle EN 50 163 je hodnota 3 600 V možná trvale a po dobu 5 minut je přípustné i napětí 3 900 V (tedy 3 000 V + 30 %). Vzhledem k tomuto stavu musí být takováto vozidla vybavena záskokovým systémem brzdění do brzdového odporníku.

Vozidla se stejnosměrnými trakčními motory

U hnacích vozidel této koncepce v 1. generaci byl zaměněn odporový způsob spouštění stejnosměrných sériových motorů zdrojem plynule měnitelného napětí, který se nazývá pulsní měnič. Jeho účelem je snižování výstupního napětí, bezkontaktní spínání a minimalizace ztrát při regulaci trakčních motorů.

Největší přínos této regulace je u hnacích vozidel realizujících pomalé a často přerušované jízdy, jako je například posunovací služba. Při traťovém použití má tato koncepce rozhodující přínos na tratích s častým střídáním stoupání a spádu – možnost využití rekuperačního brzdění, např. v provozu MHD a u vedení vlaků v příměstské dopravě s častými rozjezdy a zastaveními.

Obvody trakčního proudu hnacího vozidla se stupňovou odporovou regulací se skládají z částí:

- trolejové sběrače, odpojovače sběrače a uzemňovač, bleskojistky, které jsou umístěny na střeše vozidla;
- hlavní vypínač – hlavní spínací a ochranná prvek silových elektrických obvodů hnacího vozidla, je umístěn ve strojovně;
- silové ochrany trakčního obvodu – napěťová, proudová, rozdílová (diferenciální), skluzová;

- kondenzátory a tlumivka vstupního filtru;
- pulzní měniče pro regulaci trakčních motorů, popř. jejich buzení
- přepínače směru otáčení trakčních motorů – mění směr toku proudu buzení nebo v kotvách trakčních motorů;
- spínače a odporníky odporové dynamické brzdy;
- trakční motory;
- bočníky měření trakčních proudů a spotřeby energie;
- nápravové sběrače.

Trakční motory jsou stejnosměrné sériové, trvale zapojené v sérii, napájené přímo z výstupů dvojice pulzních měničů, pracujících s fázovým posunem 180°. Vzájemné fázové posunutí měničů obou motorových skupin je pak 90° z důvodů minimalizace zvlnění napájecího napětí vlivem nerovnoměrného odběru.

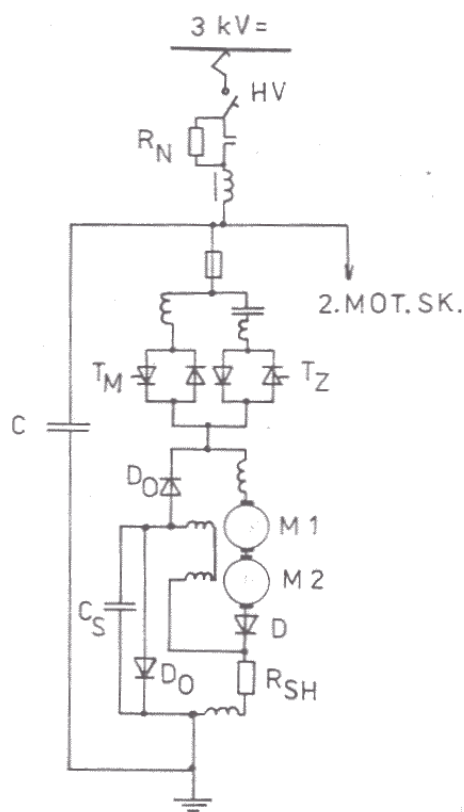
U vozidel druhé generace je pro pohon dvojkolí použit stejnosměrný cize buzený trakční motor o jmenovitém výkonu okolo 800 kW. Buzení těchto motorů, které je zapojeno u všech motorů do série, je regulováno samostatným měničem.

Pulzní měniče napájící sériové motory popř. kotvy cize buzených motorů jsou dimenzovány na cca 2,4 násobek jmenovitého výkonu napájených motorů. Vzhledem k těmto výkonům se výstupní frekvence nemůže měnit plynule. Některé hodnoty frekvencí nejsou z důvodů interference v elektrických obvodech, především zabezpečovacího zařízení, nepřipustné. Proto je výstupní frekvence pulzního napětí nastavena předem stanovené hodnoty 33 1/3 Hz, 100 Hz a 300 Hz. Současně je řízena i šířka výstupních impulzů. Kombinací těchto principů řízení je realizovaná plynulá změna střední hodnoty výstupního napětí těchto měničů.

U pulzních měničů pro menší výkony, např. pro buzení trakčních motorů, spouštění motorů pomocných zařízení, se používá pouze řízení frekvence při konstantní délce pulzu.

Zjednodušené principiální schéma obvodu trakčního proudu hnacího vozidla se sériovými motory je na obrázku Obr. K.2.

Zjednodušené principiální schéma obvodu trakčního proudu hnacího vozidla s cize buzenými motory je na obrázku Obr. K.3.



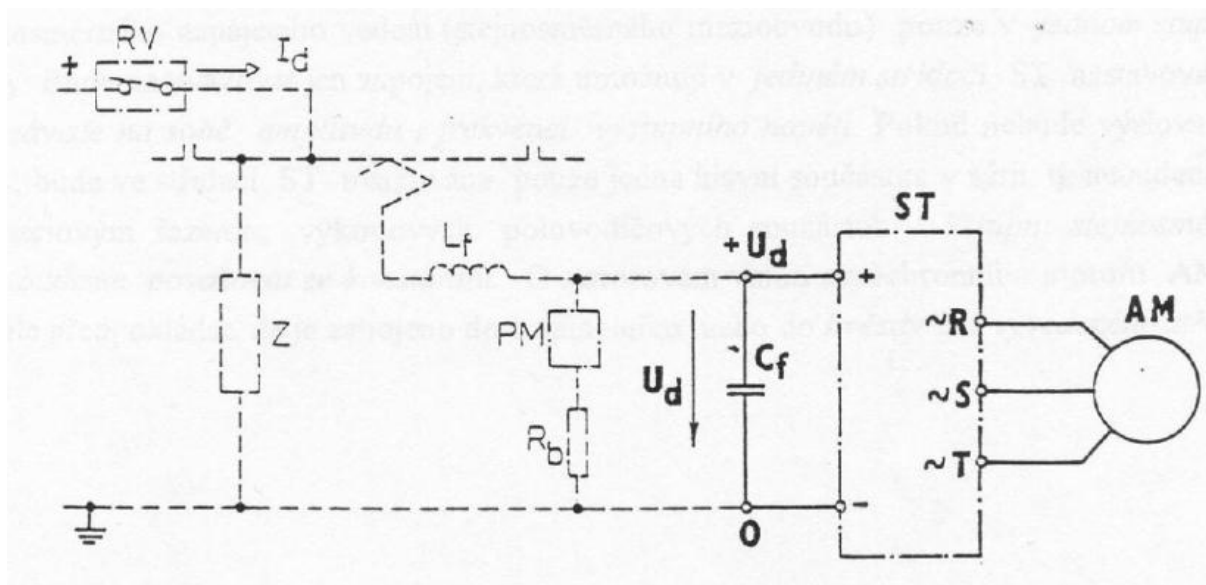
Obr. 4.77
Pulzní měnič pro posunovací lo-
komotivu na napětí 3 kV

Obr. K.2: Zjednodušené principiální schéma obvodu trakčního proudu hnacího vozidla se sériovými motory.

Obr. K.3: Zjednodušené principiální schéma obvodu trakčního proudu hnacího vozidla s cize buzenými motory.

Vozidla s asynchronními trakčními motory

Koncepce uspořádání trakčního pohonu s asynchronním motorem respektive synchronním motorem s frekvenčním řízením vychází z varianty nepřímého měniče (řízeného střídače) napět'ového typu (Obr. K.4) [MAJ, 2005].



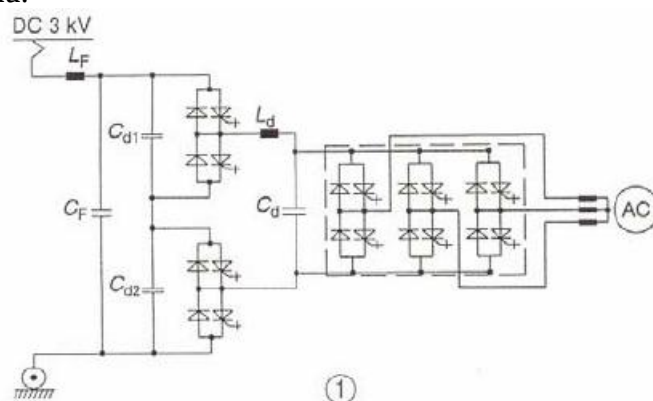
Obr. K4: Zjednodušené principiální schéma obvodu trakčního proudu hnacího vozidla s asynchronními trakčními motory.

Trakční obvod se 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).

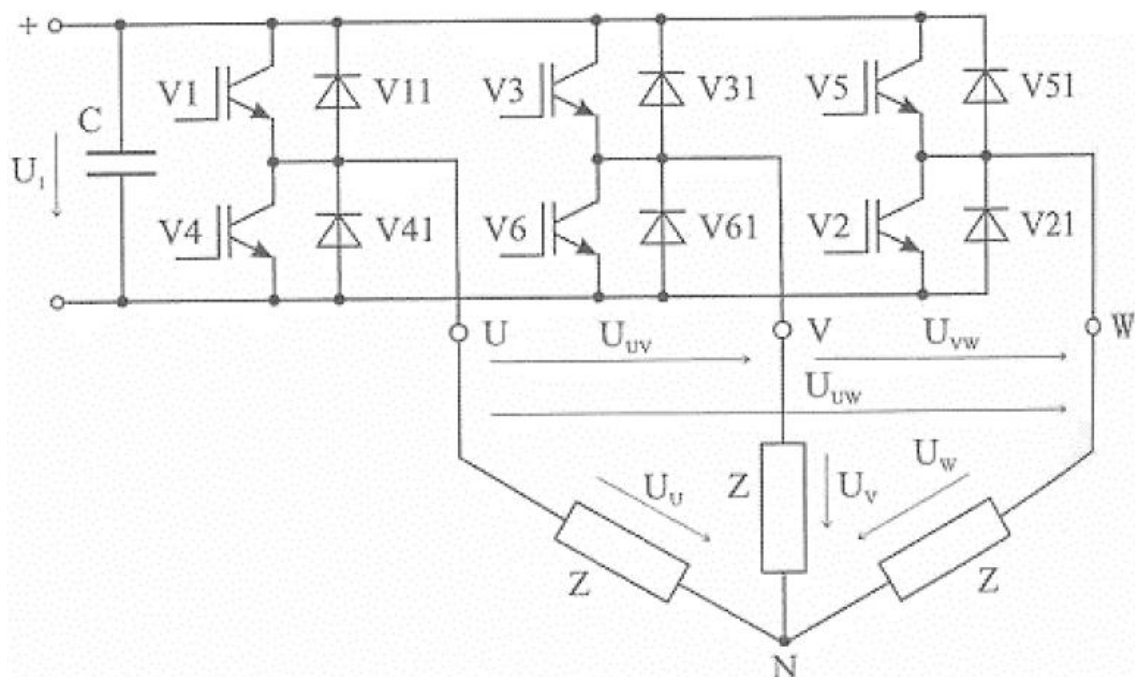
Napájení **stejnosměrného meziobvodu** při napájení ze sítě 3 kV DC pomocí kapacitního děliče a pulzních měničů stabilizujících napětí meziobvodu při změně napájecího napětí (2000 až 3600 V DC je znázorněno na Obr. K.5).

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. Při rekuperačním brzdění může být energie dodávána do trakčního vedení a spotřebována jiným trakčním vozidlem. To však vyžaduje další úpravu obvodu tohoto obvodu.

Střídač v základním provedení na obrázku Obr. K.6 se skládá 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.



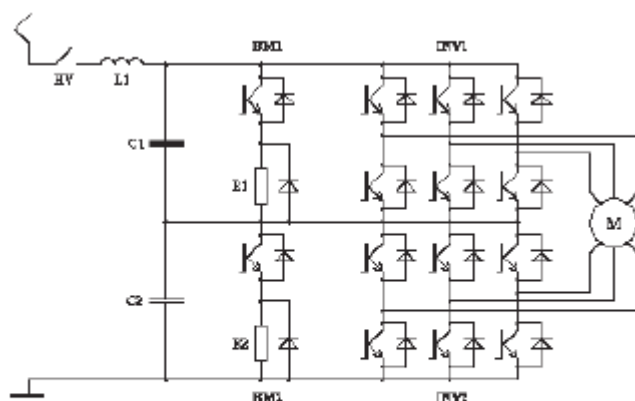
Obr. K.5: Napájení stejnosměrného meziobvodu.



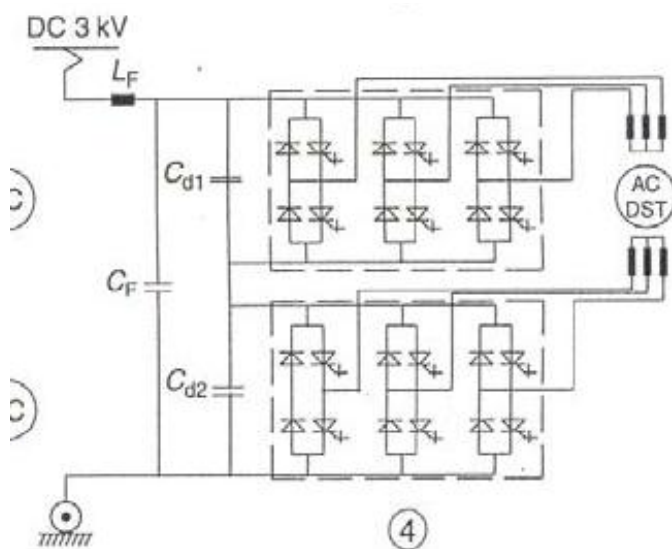
Obr. K.6: Napěťový střídač v základním provedení.

Další možností je pro pohon použít zdvojený měnič napájející **motory se dvěma vinutími spojenými do hvězdy**.

Trakční obvod je možno zjednodušeně popsat následovně. Proud z troleje se dostává přes sběrač, odrušovací filtry, hlavní vypínač do stejnosměrného meziobvodu, který je tvořen tlumivkou a kapacitním filtrem. Ten je dělen do dvou stejných částí s polovičním napětím troleje. Kapacitní filtr je součástí trakčního střídače, který napájí paralelní vinutí dvou trakčních motorů v podvozku. Vinutí těchto motorů se skládá ze dvou oddělených, na plné napětí izolovaných třífázových vinutí zapojených do hvězdy. Tato vinutí jsou plně symetrická a jsou napájena z IGBT střídačů zcela synchronně. Stejně symetricky jsou rozděleny měniče a odporů pro elektrodynamickou brzdou. Hlavní myšlenkou tohoto pohonu je použití speciálního asynchronního trakčního motoru s dvojitou hvězdou.



Obr.2 Trakční obvod s asynchronními motory s dvojitou hvězdou a IGBT tranzistory



Řešení trakčního pohonu s IGBT tranzistory má v porovnání s klasickým řešením GTO měničů pro systém 3 kV výhody [SOBOTKA, 2000]:

- Je možné vypustit komplikovaný stabilizační pulzní měnič.
- Dochází ke značné úspoře silových součástek (kondenzátory, tlumivky, polovodiče).
- Zařízení zabírá menší prostor a konstrukční je kompaktnější.
- Trakční pohon jako celek vykazuje menší ztráty při lepším tvaru proudu v asynchronních trakčních motorech.
- Při lepších parametrech pohonu je nižší cena elektrické výzbroje.

Pomocné pohony takto řešených hnacích vozidel jsou galvanicky odděleny pomocí transformátoru, který je napájen na primární straně z jednofázového střídače, pracujícího na frekvenci 400 Hz. Střídavý proud ze sekundárního vinutí je usměrněn a přiveden do stejnosměrného meziobvodu, kde

je stabilizované napětí 550 V. Z tohoto obvodu jsou napájeny střídače kompresoru, ventilátoru brzdového odporu a střídač pro napájení palubní sítě. Měníče pomocných pohonů včetně nabíječe jsou zkonstruovány z IGBT modulů a jsou řízeny mikroprocesorovými kartami vybavenými komunikačními moduly.

Vozidla pro střídavý napájecí systém

Vozidla pro napájecí systém 15 000 V 16,7 Hz

Důvodem použití střídavého napájecího systému se sníženou frekvencí na jednu třetinu bylo zlepšení komutace jednofázových komutátorových trakčních motorů v důsledku snížení velikosti transformačního napětí, indukovaného v komutující cívice rotorového vinutí změnou magnetického toku hlavních pólů.

Rozvoj polovodičové techniky umožnil změnit jmenovitou hodnotu kmitočtu z důvodu zamezení vzniku rezonančních jevů (zážnějů) v rozvodné síti. Poměr 1:3, tedy 16 2/3 Hz:50 Hz, realizovatelný při používání rotačních měničů při napájení systému, byl v období elektronických měničů změněn na nesoudělný poměr 16,7 Hz:50 Hz.

Nevýhodou systému 15 kV 16 2/3 Hz (16,7 Hz) je větší průřez železa trakčního transformátoru, potřebný k vytvoření příslušného magnetického toku.

Výhodně se jeví systém 15 kV 16,7 Hz z hlediska rekuperačního brzdění. To je umožněno obousměrnou průchodností trakční transformovny a zejména vlastní jednofázovou rozvodnou sítí, propojující jednotlivé trakční napájecí stanice. Tím je umožněno přenášet rekuperovanou energii rozvodnou sítí z úseku, kde nebyla spotřebována, do jiné napájecí stanice. Díky vlivem sníženého kmitočtu a tím i nízké induktivní reaktanci trakčního i rozvodného vedení je možno přenášet tuto energii i bez nutnosti příliš zvyšovat při brzdění trakční napětí.

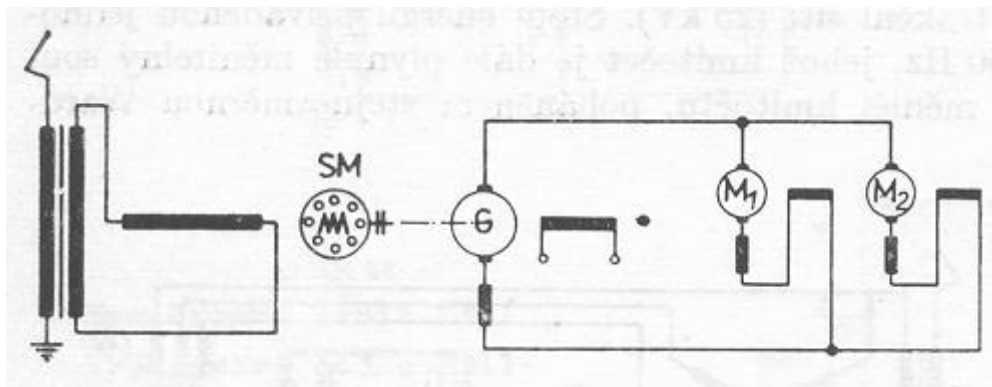
V důsledku toho vozidla tohoto napěťového systému vybavené elektrodynamickou brzdou pro dynamické brzdění elektromotory nepotřebují brzdové odporníky, skoro vždy se v rozvodné síti najde spotřeba. Ve většině případů brzdění tato vozidla rekuperují a jen ve výjimečných případech, když síť není schopna elektrickou energii odebrat, vstupuje v činnost mechanická brzda, která je provedena jako kotoučová a je náležitě výkonově a energeticky dimenzovaná.

Z důvodu optimalizace parametrů hnacích vozidel jsou hledána a ověřována i nová řešení:

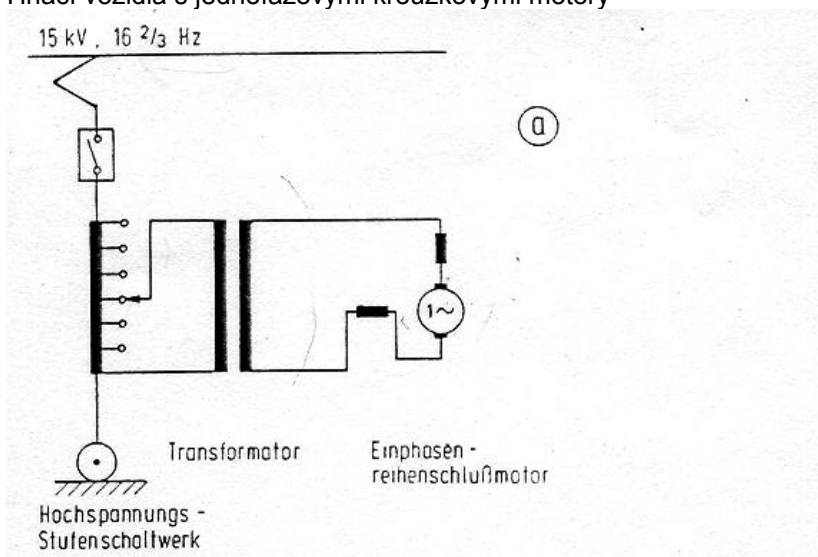
- vynechání trakčního transformátoru, tedy přímé napájení trakčního měniče a trakčních motorů napětím sítě;
- použití vstupního vysokonapěťového střídače a vysokofrekvenčního transformátoru s keramickým jádrem;
- použití kryogenního transformátoru se supravodivým vinutím;

Z technického hlediska jsou všechny tři varianty proveditelné.

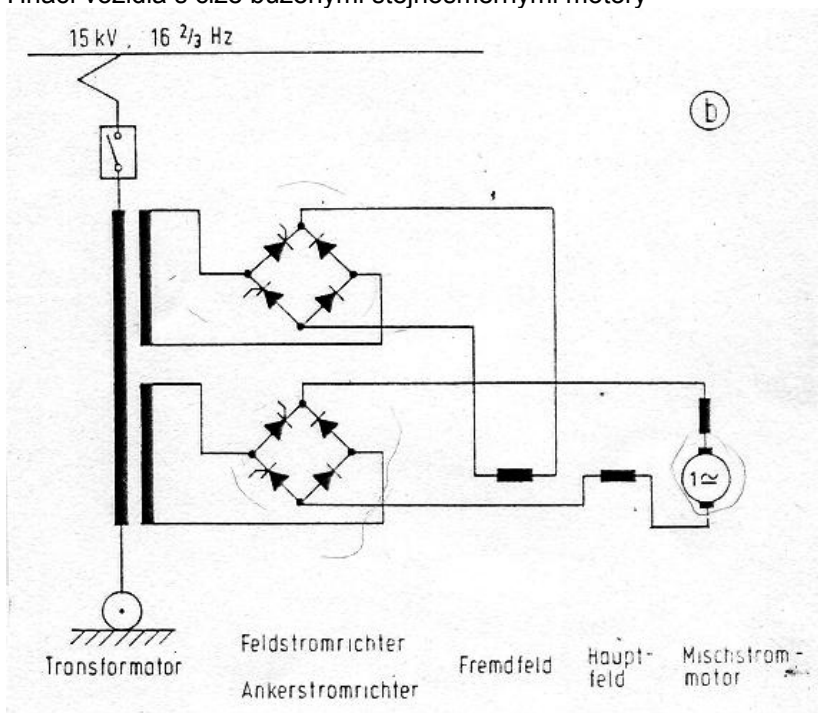
Hnací vozidla s rotačním měničem



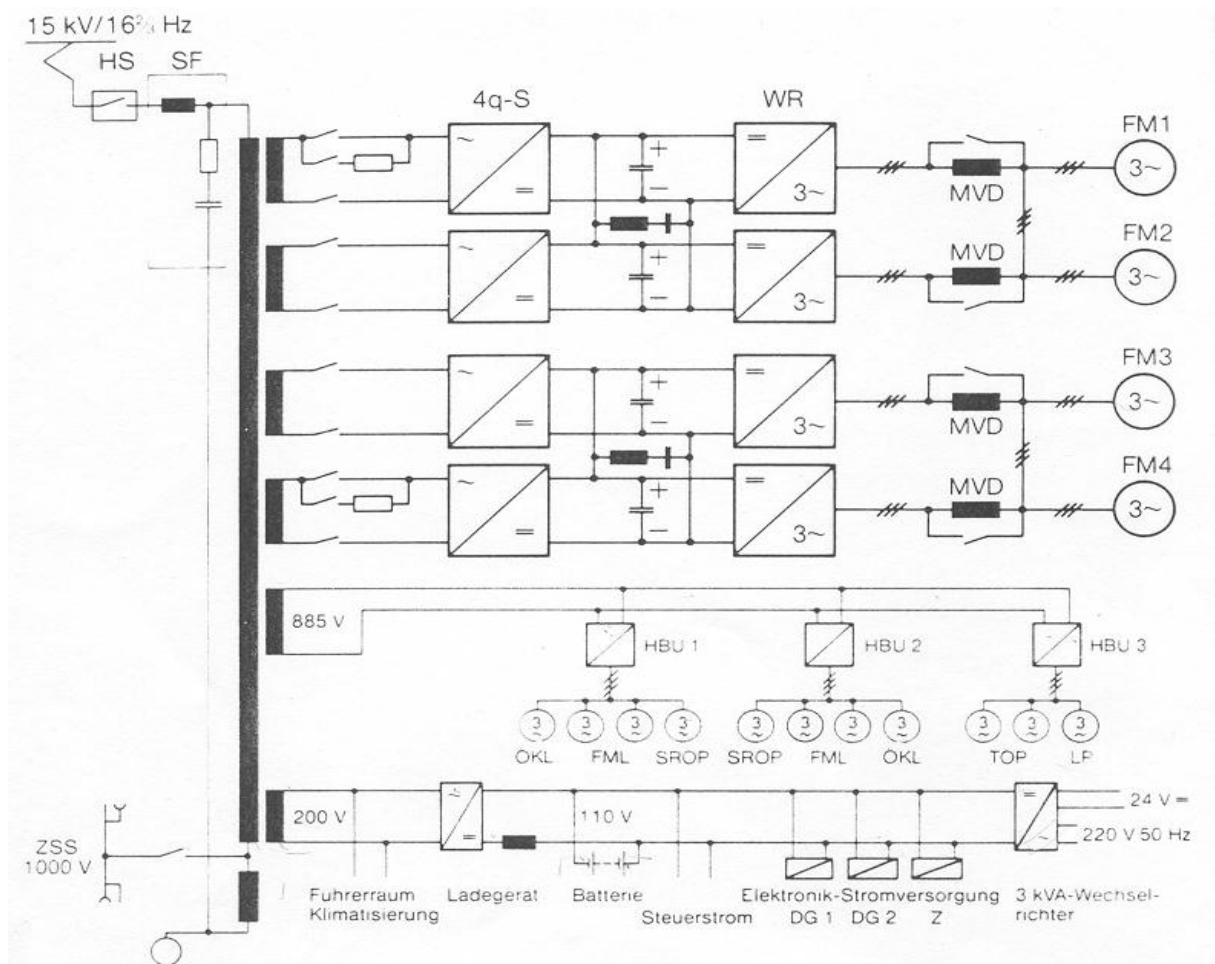
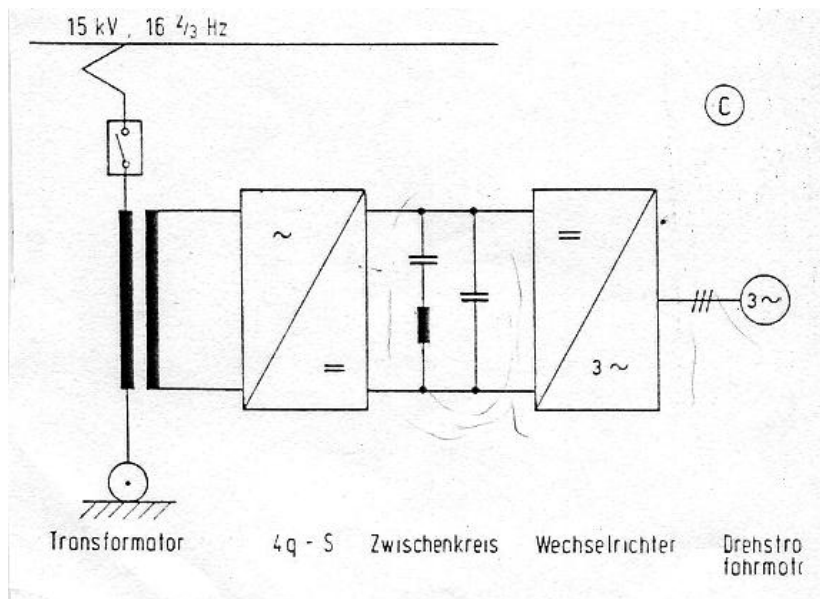
Hnací vozidla s jednofázovými kroužkovými motory



Hnací vozidla s cize buzenými stejnosměrnými motory



Hnací vozidla s asynchronními motory



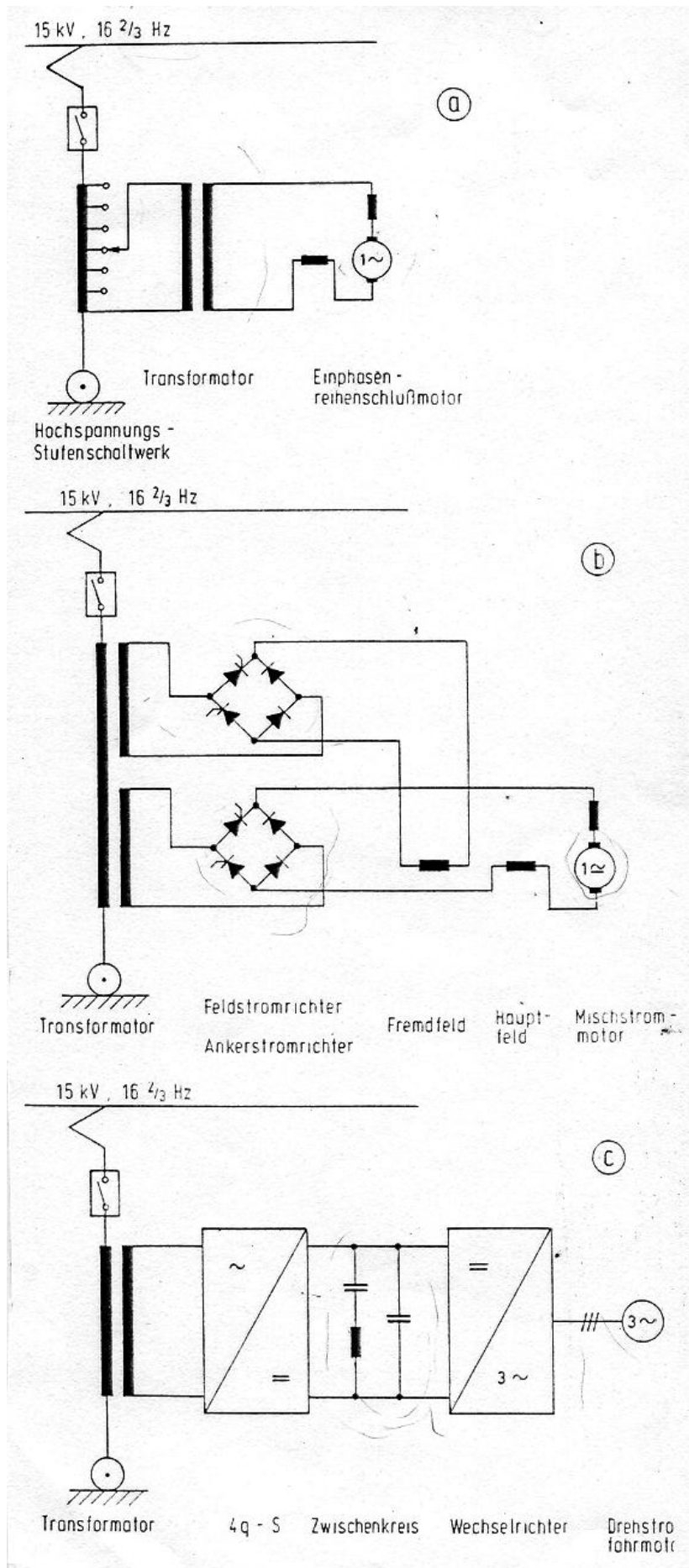
Obr: Ukázka schématu silových obvodů hnacího vozidla na napájecí systém 15 kV 16,7 Hz řady 120 BR.

Vozidla pro napájecí systém 25 000 V 50 Hz

Elektrizační systém 25 000 V 50 Hz má proti stejnosměrným systémům výhodu ve větší výkonové zatížitelnosti a ve větší vzdálenosti napájecích stanic. Díky možnosti odběru vysokého výkonu a lehčí konstrukci sběračů pro tento systém se dobře hodí i pro vysokorychlostní tratě.

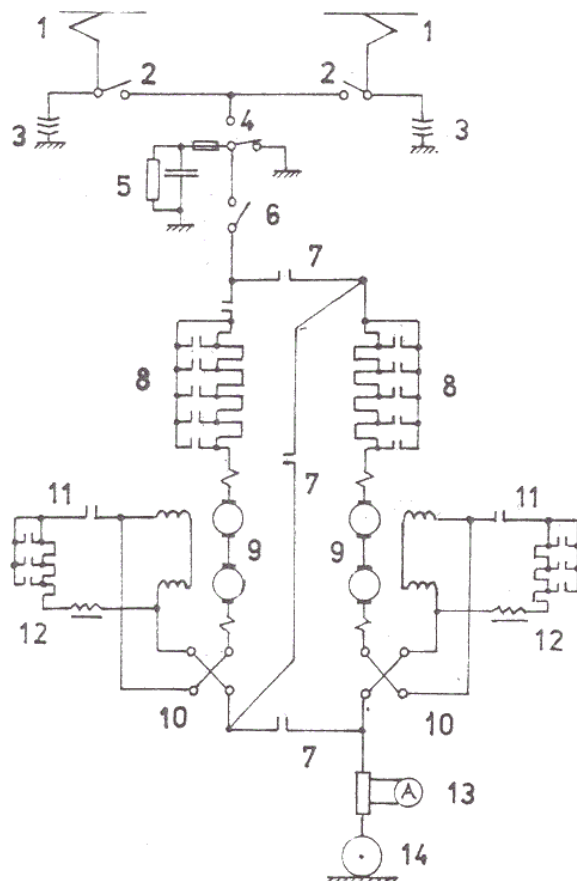
Nevýhody napájecího systému:

- napájení nevyužívá vlastní rozvodnou přenosovou (podobně jako je tomu u systému 15 kV 16,7 Hz) síť, ale všeobecnou (průmyslovou) distribuční síť, kterou transformovny ve všech třech fázích nezatěžují rovnoměrně a navíc ji zatěžuje časově proměnlivě: Toto se promítá do ceny dodávané elektrické energie ve formě různých tarifních přírůbků.
- nezájem distributora či dodavatele elektrické energie vykupovat od železnice zpět rekuperovanou elektrickou energii, zvláště když její velikost, okamžik zahájení dodávky a dobu trvání nedokáže železnice předem přesně a závazně stanovit.



Stejnoseměrný napájecí systém

Odporová regulace.



Obr. 4.76

Schéma hlavních obvodů

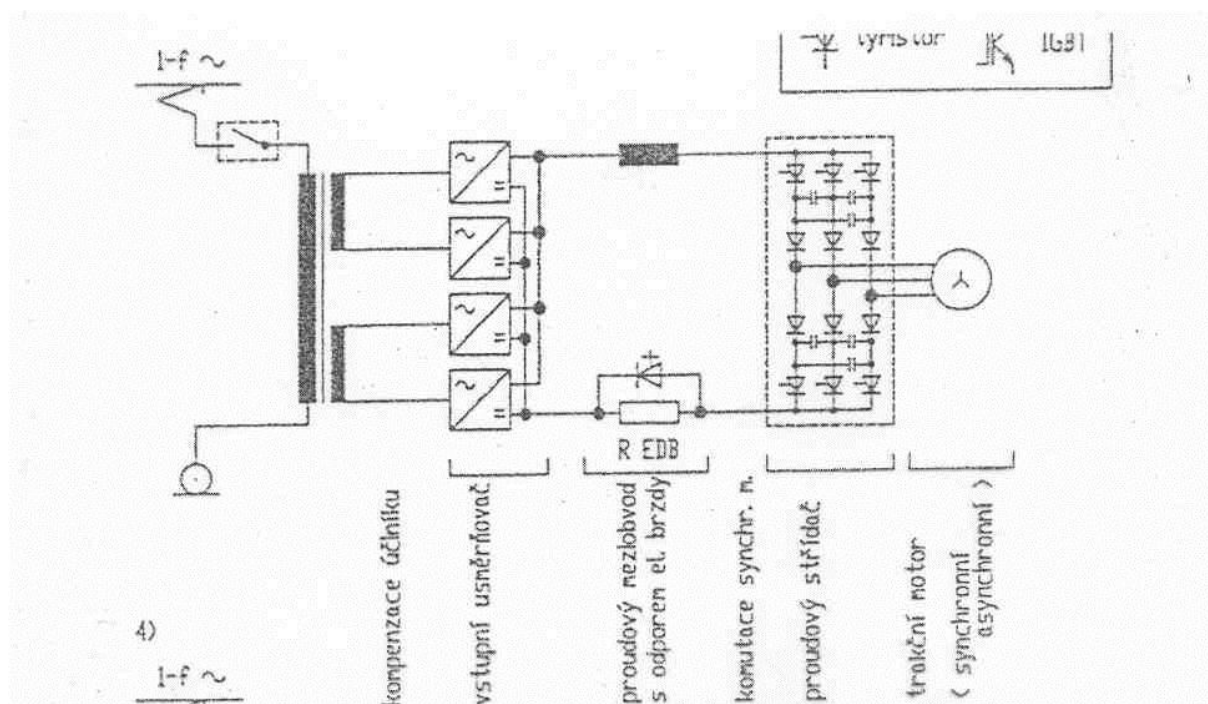
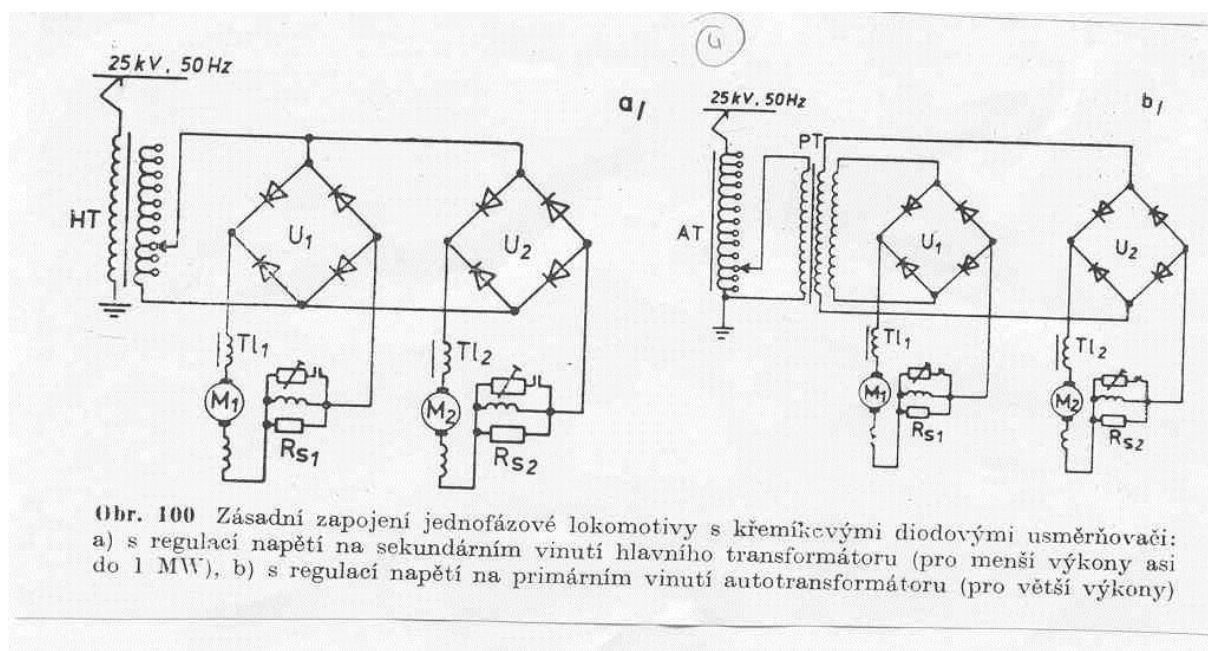
1 - sběrač, 2 - odpojovače, 3 -
přepětový svodič, 4 - územnění,
5 - přepětová ochrana, 6 - hlavní
vypínač, 7 - přepínání zapojení,
8 - rozjezdové odpory, 9 - trakční
motory, 10 - měnič směru jízdy,
11 - šuntovací odpory, 12 - tlumiv-
ky, 13 - měřicí přístroje, 14 -
obvod dvojkolí

Polovodičová regulace, seriový TM

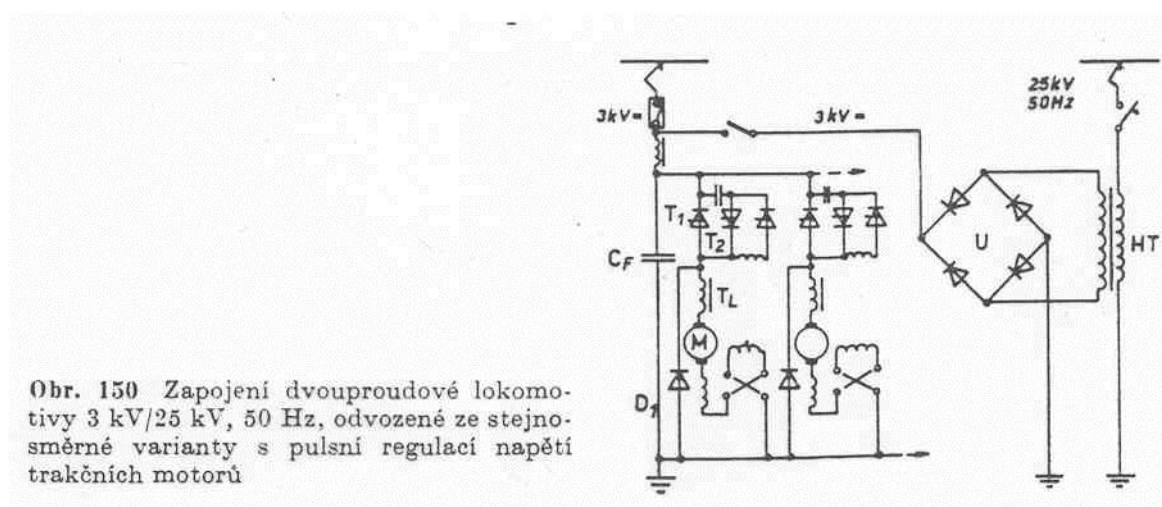
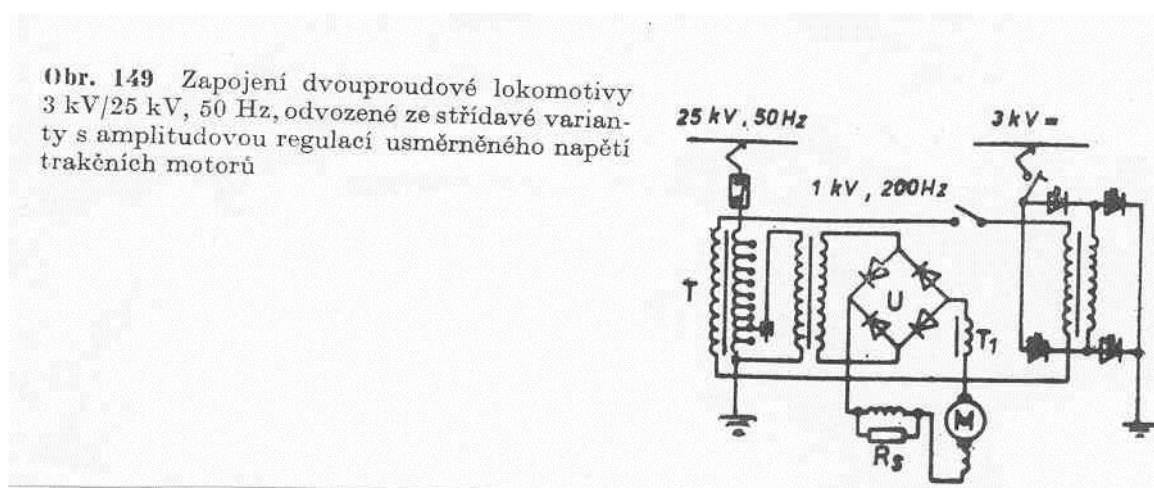
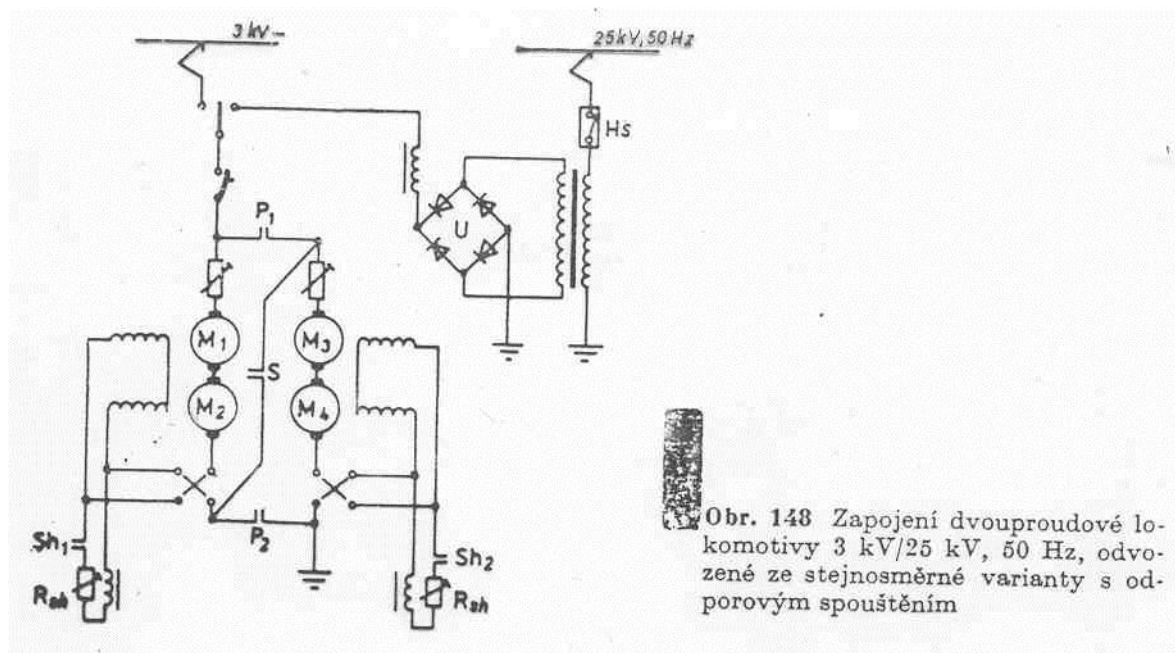
Polovodičová regulace, cize buzený TM:

Polovodičová regulace, asynchronní TM

Střídavý napájecí systém, 25 kV 50 Hz



Vícesystémová vozidla ektrické trakce



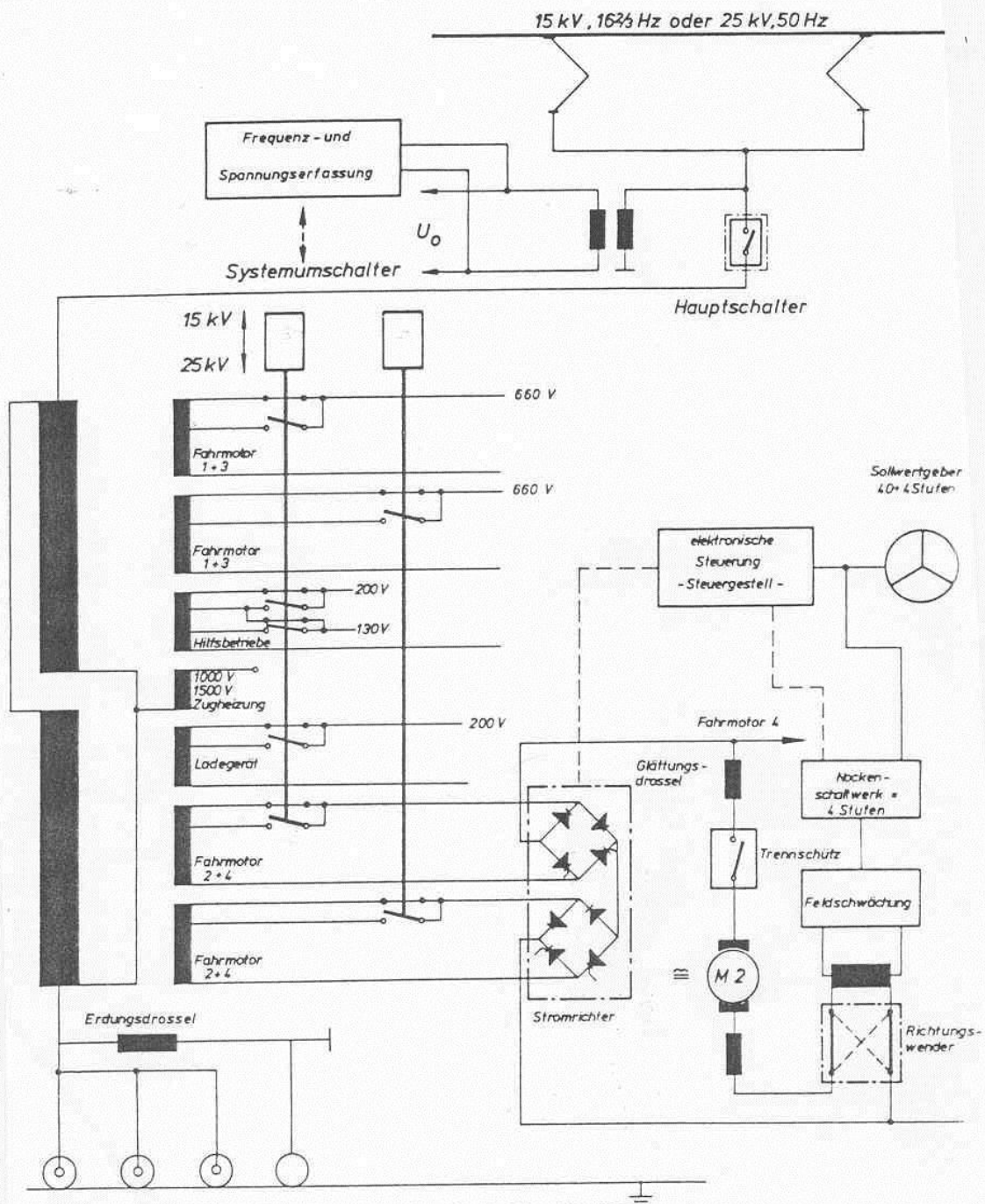


Abb. 216: Prinzipschaltplan der Lok 181.2 (Grafik: DB)

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

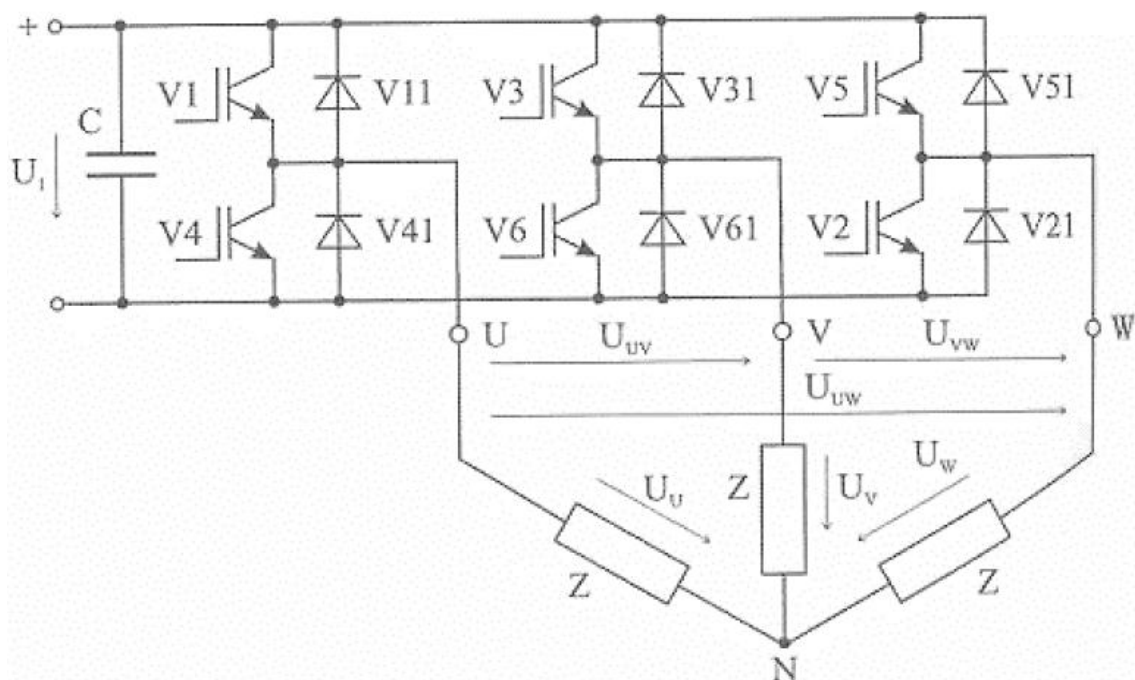
Moderní trakční pohon s bezkomutátorovým motorem má v podstatě dvě části výkonovou a řídicí. Výkonovou část tvoří indukční asynchronní motor s kotvou nakrátko a frekvenční měnič, ve kterém dochází k vlastní přeměně energie s prakticky bezztrátovou přeměnou.

Vlastní obvod tedy sestává ze stejnosměrného meziobvodu, který tvoří kondenzátor Cf. Napětový meziobvod při napájení ze stejnosměrného vedení je napájen přes vstupní filtr

bud' 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 brzdňý obvod, který tvoří pulzní měnič PM s brzdňým rezistorem R_b , který odebírá energii v případě generátorického chodu indukčňího motoru, respektive tato energie může být rekuperací

dodávána do trakčňího vedení a spotřebována jiným trakčňím vozidlem, což vyžaduje další úpravu obvodu. Vlastní střídač v základňím provedení obr. č.4 sestává ze šesti vypínatelných

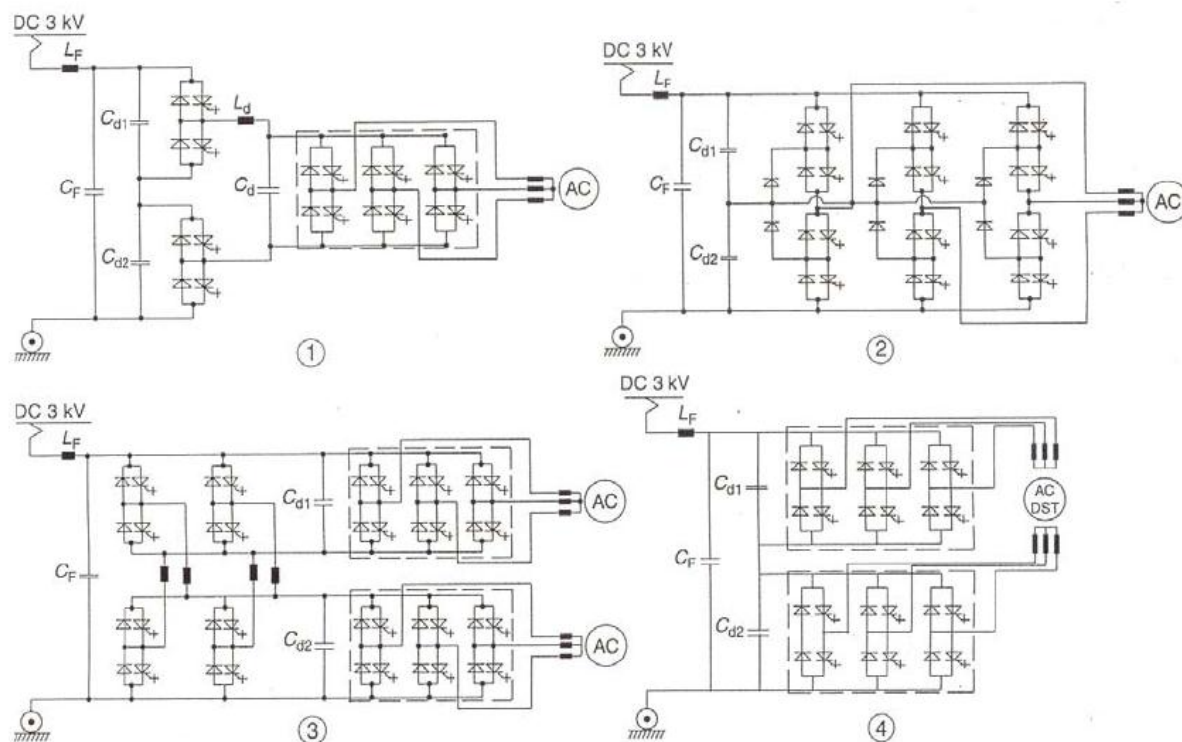
prvků (GTO, IGBT, IGCT) a šesti antiparalelně připojených diod, přes které se uzavírá doznívající proud při přepínání spínacích prvků, nebo působí jako usměrňovače pro zpětný tok energie z motoru do meziobvodu.



Obr. 4: Základňí zapojení frekvenčňího měňíče

Sekundárním problémem je pak řešení napájení stejnosměrného meziobvodu z hlediska napěťového 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 kapacitňího děliče a pulzních měňičů, druhou variantu (obr. č.5/ 2) představuje tříhladinový střídač, třetí možnou variantou řešení představuje obr. č. 5/3, čtvrtou variantou je zdvojený měňič napájený z kapacitňího 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

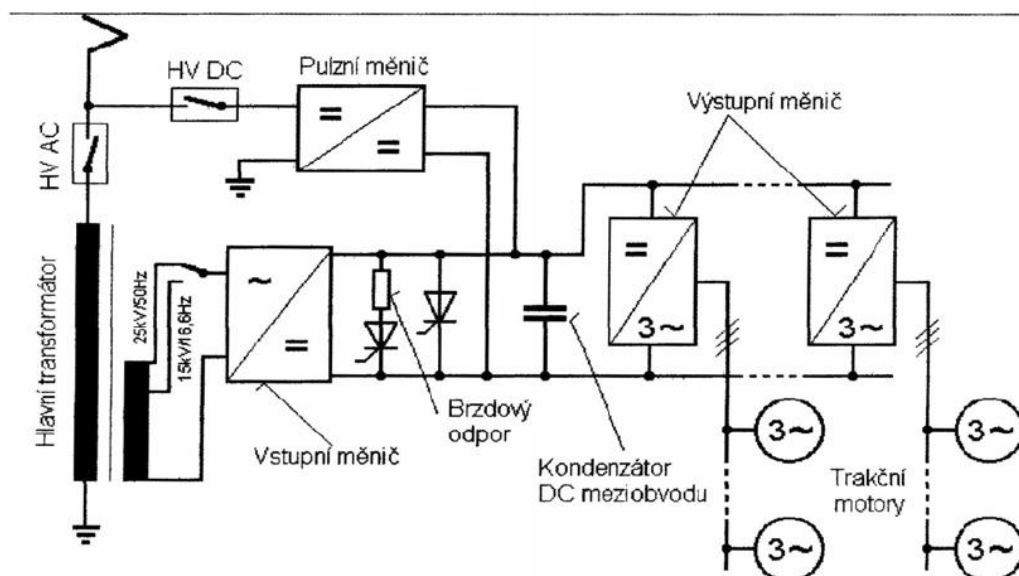
V případě napájení ze střídavé sítě (15 kV, 16 2/3 Hz resp. 25 kV, 50 Hz) je napájen stejnosměrný meziobvod z usměrňovače, který může plnit při rekuperačním brzdění i funkci střídače. Přejde-li indukční motor do generátorického režimu, je mu ze stejnosměrného meziobvodu

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 vícesystémového

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 brzděném režimu pracuje jako střídač rekuperující energii zpět do sítě.



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

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 napětové zatížitelnosti GTO, které byly dostupné

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 $2000 \text{ V} \div 3600 \text{ V}$

snižuje napětí pro napájení trakčního střídače tak, aby nebylo překročeno přípustné napětové 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 napětový 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

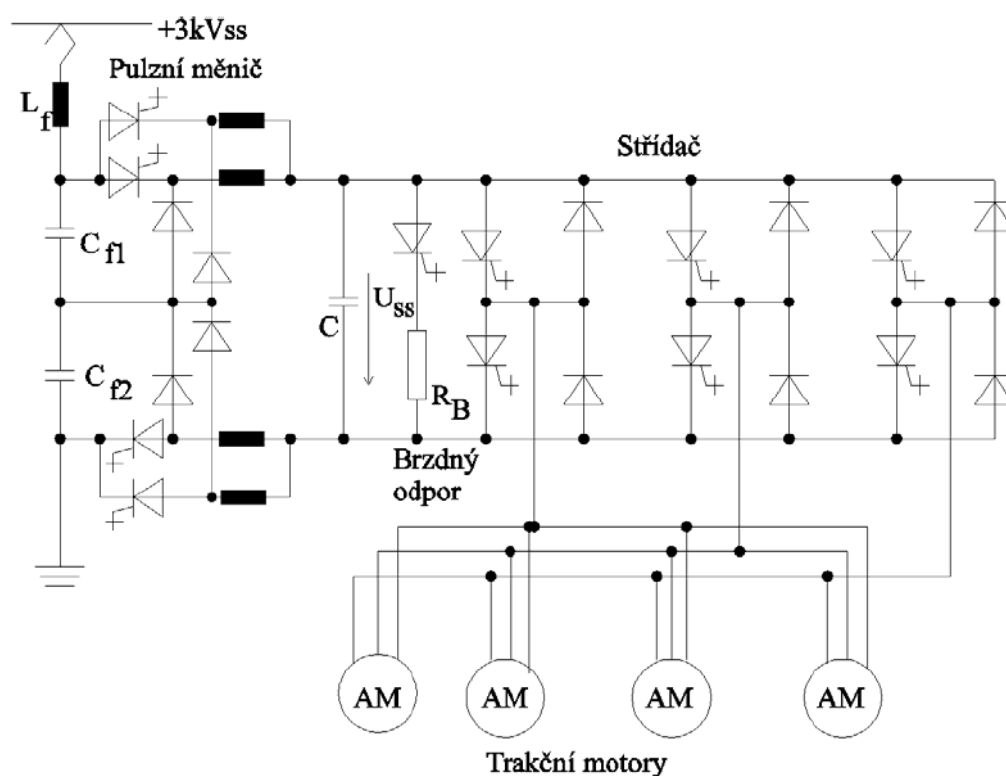
energie generovaná při elektrickém brzdění je mařena v tomto odporu.

Napětový meziobvod napájí střídač osazený GTO. Jmenovité vstupní napětí střídače je 2400V a toto napětí může kolísat v rozmezí $1600 \text{ V} \div 2600 \text{ V}$. Střídač formuje výstupní napětí pomocí širkově pulzní modulační 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



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

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

napětíové 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 dvojité 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 širkově 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 širkově pulzní modulace pro řízení prvků ve střídači.

Nadřazené řízení vozidla a vlaku zabezpečuje řídicí systém, který dodala firma Unicontrols 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.

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 napětíovým vstupním obvodem
- střídač osazen vypínatelnými polovodičovými prvky
- výstupní napětí je formováno širkově pulzní modulací
- mikroprocesorový regulátor nejčastěji s vektorovým řízením točivého momentu

I u renomovaných výrobců lze vysledovat tuto koncepci v různých obměnách.

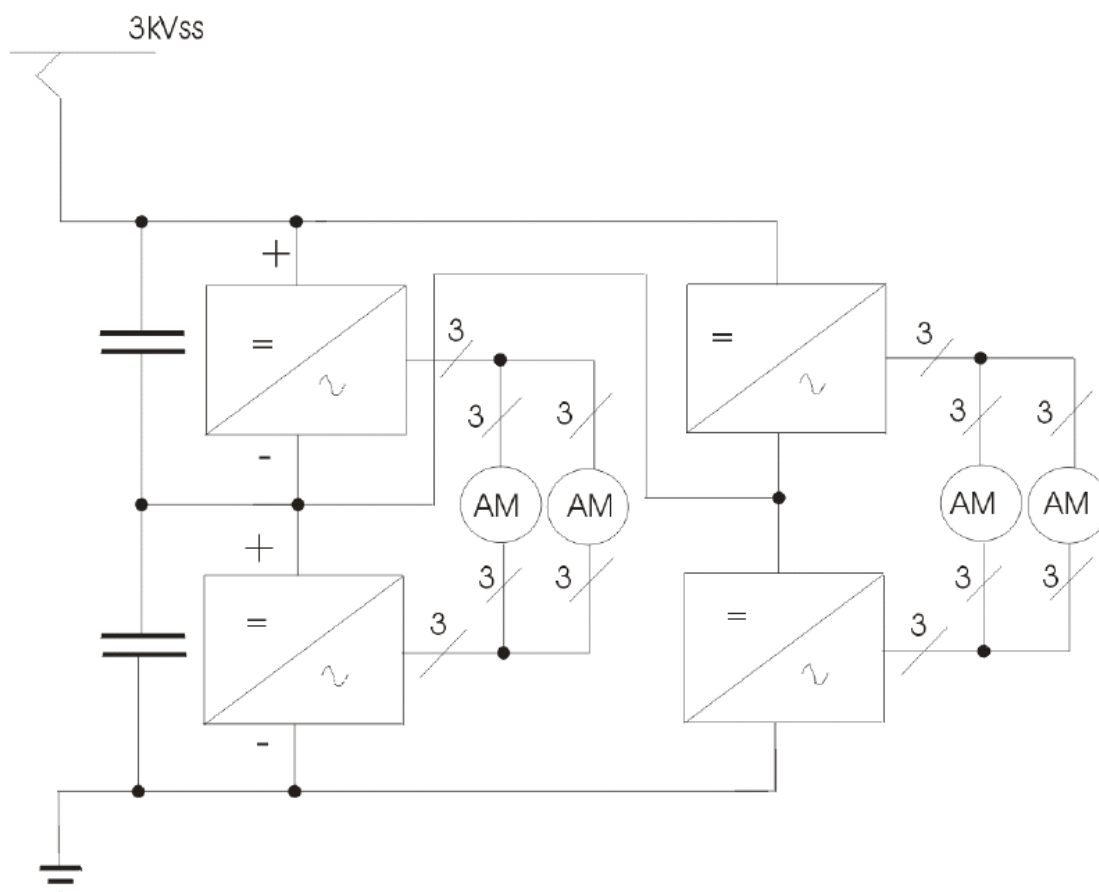
V závislosti na dané aplikaci se může lišit počet motorů napájených paralelně z jednoho střídače,

z důvodu napětíového 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 napětíového 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.



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

MAJ Jan, POHL Jiří: *Elektrické lokomotivy Siemens ES 64 U4*. Odborný seminář Czech Raildays 2005 - Aspekty vývoje železničních kolejových vozidel. [on line] Dostupnost: http://www.railvolution.net/czechraildays/craildays5/seminare/v_6.pdf. Cit: 20060210

JANSA, František. *Vozidla elektrické trakce*. Praha: NADAS. 1983. 372 s.

GREGORA Stanislav, NOVÁK Jaroslav. Modernizace trakčních pohonů vozidel elektrické trakce. In: *Vědeckotechnický sborník Českých drah*. Praha: České dráhy. On line. Dostupnost: <http://www.cdmail.cz/VTS/CLANKY/1704.pdf>. Cit: 20100310

SOBOTKA Ladislav: Trakční elektrická výzbroj EJ 741. In: *AT&P Journal* 9/2000. ISSN 1336-233X (on-line verzia). On line. Dostupnost: http://www.atpjournal.sk/pdf/2000_09_20-21.pdf