

Nové technologie trakčního napájení 25 kV/50 Hz (1. část)

Jaroslav Novák, Ladislav Mlynařík,
Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera,
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Článek prezentuje nové koncepty a nové technické prostředky pro napájení železničních tratí s trakční soustavou 25 kV/50 Hz. V článku je porovnán konvenční systém trakčního napájení v soustavě 25 kV/50 Hz s novými technologiemi založenými na využití výkonové elektroniky, je popsána konfigurace a možnosti napájecích stanic s výkonovými měniči a je představena koncepce připravovaná pro železniční síť v ČR.

1. Úvod

Rostoucí přetíženost silniční sítě, výrazné environmentální dopady silniční dopravy po stránce emisí, hluku a nároků na plochu,

její přínosy v elektrické trakci. Po ekonomické stránce lze tuto skutečnost dokreslit údajem z nákladní dopravy, kdy je v elektrické trakci realizováno v ČR přibližně 92 % přeprav, avšak náklady na provoz 8 % náklad-



Obr. 1. Drážní energetická infrastruktura – trakční vedení a napájecí stanice 3 kV DC

její neúměrná energetická náročnost, velká dopravní nehodovost a technologické limity tohoto segmentu dopravy vytvářejí potřebu hledání cest a prostředků, jak řešit dopravu osob i nákladu výrazně efektivněji, energeticky úsporněji a šetrněji vzhledem k životnímu prostředí. Zde má velký potenciál elektrifikovaná železnice, což je podpořeno i řadou koncepčních dokumentů EU a ČR v oblasti dopravy, energetiky a životního prostředí.

V důsledku modernizace železničních koridorů v ČR a dodávek nových nebo rekonstruovaných vozidel se rychle zvyšuje poptávka zejména po osobní železniční dopravě. Například mezi lety 2010 a 2019 vzrostl v ČR přepravní výkon osobní železniční dopravy z 6 591 mil. osobokilometrů na 11 069 mil. osobokilometrů (vnitrostátní přeprava), [7]. Podle stejného zdroje narostl ve stejném období přepravní výkon nákladní železniční dopravy z 13 770 mil. tkm na 16 070 tkm. V současnosti je však v ČR další nárůst objemů přeprav po železnici významně limitován kapacitou infrastruktury.

Po stránce energetické, environmentální i ekonomické má železniční doprava rozhod-

ných vlaků v dieselové trakci představují přibližně 30 % celkových nákladů.

Železnice je po technické stránce tvořena souborem čtyř subsystémů:

- vozidla,
- infrastruktura,
- zabezpečovací systémy,
- energetické napájení.

Nutnou podmínkou potřebného zvýšení kapacity železniční infrastruktury jsou opatření právě v oblasti energetické drážní infrastruktury (obr. 1). Do budoucna lze očekávat posilování trendů růstu požadavků na drážní napájecí systémy, a to zejména v souvislosti s následujícími skutečnostmi:

- Růst intenzity provozu.
- Růst instalovaných výkonů hnacích vozidel v osobní i nákladní dopravě, v současnosti je typickou hodnotou výkonu moderního elektrického hnacího vozidla 6 MW.
- Růst rychlostí vlaků – v současnosti jezdí na modernizovaných koridorových tratích dálkové vlaky rychlostí 140 až 160 km/h, aktuálně modernizované úseky tratí na IV. koridoru jsou připravovány na rychlost 200 km/h, přičemž výkon potřebný na pře-

konání odporu vzduchu roste s třetí mocninou rostoucí rychlosti.

- Zajištění dostatečné kvality napájení pro vozidla – spojitost napájení, minimalizace kolísání efektivní hodnoty trolejového napětí s vazbou na eliminaci výkonového omezení vozidel, zajištění podmínek pro neomezenou rekuperaci, minimalizace ztrát při přenosu energie do vozidla.
- Plnění požadavků kladených ze strany distributora elektrické energie – symetrie odběrů energie z distribuční sítě, co nejnížší poměr mezi maximální a střední hodnotou odebíraného výkonu, eliminace odběru jalového výkonu, eliminace harmonického zkreslení proudů odebíraných z distribuční sítě.

Elektrifikace hlavních tratí byla na území ČR zahájena v 50. letech 20. století stejnosměrnou napájecí soustavou 3 kV. Touto soustavou jsou v současnosti elektrifikovány tratě v severní části země, v podstatě jde o linii Chomutov – Ústí n. L. – Praha – Olomouc – Vsetín – celkem 1 818 km tratí. V jižní části území ČR je pro elektrifikaci tratí použita jednofázová soustava 25 kV/50 Hz. Celkem je v ČR touto soustavou elektrifikováno 1 381 km tratí.

Již v počátcích elektrifikace v 50. letech byl shledán jeden z významných nedostatků stejnosměrné soustavy 3 kV a to velká spotřeba mědi pro trakční a zesilovací vedení v důsledku průchodu velkých proudů zajišťujících dodávku potřebného výkonu pro hnací vozidla. Ztrátové výkony na trakční soustavě 3 kV stejnosměrných (ztráty v trakčním vedení při odběru, ztráty v trakčním vedení při rekuperaci a ztráty v brzdových odporových neuskutečněnou rekuperací) dosahují až 30 % výkonu odebraného pro pohon vozidel. Byly proto hledány jiné systémy pro trakční pohony hnacích vozidel, zajímavostí je, že nejen v oblasti elektrické trakce, ale například i pomocí turbínového pohonu lokomotiv s mechanickým přenosem výkonu. V době elektrifikace železničních tratí v ČR systémem 3 kV disponovaly elektrické lokomotivy výkonem 2 MW, v současnosti je však standardem 6 MW. Přitom ztráty v trakčním vedení rostou s druhou mocninou přenášeného výkonu.

Rozvojem výkonových polovodičů a dostupností výkonových diod s dostatečným napětovým a proudovým dimenzováním byly vytvořeny předpoklady pro efektivní realizaci lokomotiv pro napájecí jednofázovou soustavu

25 kV s průmyslovou frekvencí 50 Hz. Trakční řetězec těchto lokomotiv sestával z odbočkového transformátoru, diodového usměrňovače a stejnosměrných trakčních motorů. Řada lokomotiv této koncepce je stále v provozu.

Použití soustavy 25 kV/50 Hz umožnilo napájet vozidla menšími proudy s výrazně větší účinností přenosu (ztráty v trakčním vedení jen 2 až 4 %) a s menší spotřebou mědi na vedení, zároveň se snížila potřeba výstavby napájecích stanic (3 kV stejnosměrné – trakční měničky po přibližně 20 km, i méně, napájecí stanice 25 kV/50 Hz po 40 až 60 km). Díky vyššímu napětí a menším proudům vykazuje soustava 25 kV/50 Hz oproti stejnosměrné soustavě 3 kV vyšší přenosovou schopnost (rostoucí s druhou mocninou napětí) a vyšší tvrdost napětí trakční sítě. Kromě těchto zásadních přínosů se soustava 25 kV/50 Hz vyznačuje řadou dalších výhod jako je odbourání bludných zemních stejnosměrných proudů se všemi souvislostmi, snazší diagnostika vzdálených zkratů, potenciální zlepšení podmínek pro rekuperaci a možnost průběžného uzemňování kolejnic.

Uvedené přínosy napájecí soustavy 25 kV/50 Hz vůči stejnosměrné soustavě 3 kV vedly v roce 2016 k rozhodnutí Ministerstva dopravy ČR elektrifikovat do budoucna veškeré tratě v ČR pouze jednofázovou soustavou 25 kV/50 Hz a zároveň postupně rekonstruovat napájecí systém na stávajících tratích ze 3 kV stejnosměrných na 25 kV/50 Hz. Nejedná se o aktivity vzdálené budoucnosti, ale již v současnosti jsou rozpracovávány koncepce a etapy změny napájecího systému, některé investiční akce již směřují k realizaci.

Přechod na jednotnou drážní napájecí soustavu v ČR s sebou však přinese nejen opuštění systému 3 kV stejnosměrných, v širších souvislostech se ukazuje i nutnost nástupu nových technologií trakčního napájení 25 kV/50 Hz. Právě této problematice se věnuje předkládaný článek.

2. Technické řešení konvenční napájecí stanice 25 kV/50 Hz

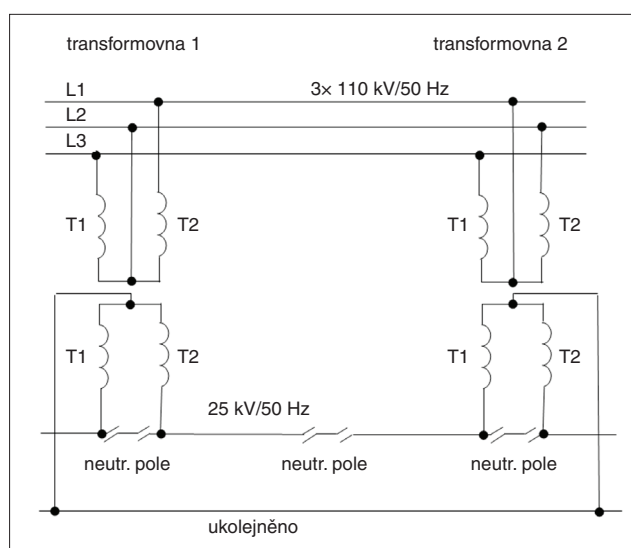
Napájení jednofázovou trakční soustavou 25 kV/50 Hz na části tratí v České republice je po technické stránce prakticky neměnné od jeho zavedení v 60. letech. Jedinou výraznější změnou bylo zkvalitnění odběru elektrické energie nasazením filtračně kompenzačních zařízení ke zvýšení účinnosti kompenzací jalového induktivního proudu a k potlačení lichých vyšších harmonických složek proudu, ovšem za cenu poměrně velkých trvalých ztrát.

Základem napájecí stanice 25 kV/50 Hz je jednofázový transformátor obvykle o výkonu 10 až 12,5 MVA. Transformátory jsou na primární straně vybaveny možností regulace napětí (2x 8 odboček) pro vyrovnání napětových výkyvů v síti 110 kV.

Z důvodu snahy o symetrizaci jednofázového odběru energie z veřejné třífázové distribuční sítě jsou obvykle v napájecí stanici

dva jednofázové transformátory, každý připojený na jiné sdružené napětí (zapojení do otevřeného trojúhelníka, neboli do V) a každý transformátor napájí jiný traťový úsek. Vzhledem k nerovnoměrnému trakčnímu odběru v jednotlivých traťových úsecích však dochází k symetrizaci pouze částečně.

Zároveň díky napájení jednotlivých úseků trakčního vedení přes jednofázové transformátory z různých fází třífázového distribučního systému dochází v sousedních traťových úsecích k fázovému posuvu napětí v trakčním vedení a není možné u trakční napájecí stanice sousední úseky propojit jízdou se zvednutým sběračem vozidla. Z těchto důvodů jsou sousední úseky trakčního vedení v místě střídání fází odděleny neutrálním polem, které nežádoucímu propojení úseků zabraňuje, avšak je možno jím projíždět pouze bez odběru prou-



Obr. 2. Princip napájení soustavy 25 kV/50 Hz s transformátory zapojenými do „V“

du. Díky existenci neutrálního pole není obvykle nutné při průjezdu na rozhraní napájených úseků stahovat sběrač. I přesto ale dochází při průjezdu k nežádoucímu přerušování napájení vozidla v oblasti neutrálního pole. Uvedená rozhraní jsou proto kryta návěstími „vypněte/zapněte proud“. Tato návěstí nařizují vypnutí veškerého odebíraného proudu včetně pomocných spotřeb a topení vlaku, aby nedošlo k propojení vzdušného dělení v neutrálním poli obloukem, což by vedlo k mezifázovému zkratu.

Z podobného důvodu, tj. nestejná sdružená napětí – fáze – sousedních napájecích stanic, se neutrální pole nachází vždy také přibližně v polovině úseku mezi napájecími stanicemi. Na rozdíl od stejnosměrného systému či jednofázového systému 15 kV/16,7 Hz, které využívají spojitě dvoustranné napájení, jde u systému 25 kV o jednostranné napájení, což je nevýhodné. Nevýhodou jsou vyšší úbytky napětí na trakčním vedení, vyšší ztráty při přenosu energie, omezené možnosti předávání rekuperované energie mezi vozidly, nespojitě působení tažné i brzdné síly elektrodynamické

brzdy, nespojitá činnost pomocných zařízení v trakčních vozidlech i ve vozech pro přepravu cestujících – vypínání klimatizace a technických zařízení stravovacích služeb.

Určitou možností omezení počtu v provozu nevhodných neutrálních polí je napájení tzv. do „T“, kdy je jeden traťový úsek zhruba v polovině napájen jedním sdruženým napětím. To však vede k větší nesymetrii odběru, neboť symetrizovat je možné pouze připojením sousedních napájecích stanic na rozdílná sdružená napětí.

Dosud nezmíněnou a důležitou funkcí neutrálních polí je i rozdělení traťových úseků v případě napájení ze stejného sdruženého napětí. I v tomto případě je úseky nutné rozdělit pro zabránění přetoků energie přes trakční napájecí soustavu místo přes veřejnou distribuční soustavu v případě rozdílných napětí téže fáze v distribuční síti v místech připojení trakčních napájecích stanic.

Řízené i neřízené usměrňovače starších typů hnacích vozidel se stejnosměrnými trakčními motory pro střídavou napájecí soustavu odebírají nesinusový, přibližně obdélníkový proud, který se vyznačuje přítomností složek s frekvencemi danými lichými násobky základní frekvence. Procentuální obsah těchto vyšších harmonických složek proudu s rostoucí frekvencí harmonických klesá. Avšak zejména 3. a 5. harmonická složka proudu jsou velmi výrazné a pro distribuční

sít škodlivé, proto jsou v trakčních napájecích stanicích filtrovány. Druhým nepříznivým vlivem neřízeného usměrňovače, navíc doplněného o induktivní zátěž tvořenou transformátory a trakčními motory, je fázový posuv proudu za napětím. Reálný účinník se v čase navíc mění v závislosti na zařazené odbočce primárního vinutí transformátoru vozidla, která koresponduje s požadovaným výkonem vozidla. Typické hodnoty účinníku starších vozidel se stejnosměrnými trakčními motory jsou 0,8 až 0,7, tedy pro distribuční síť neakceptovatelné, ke zlepšení účinníku jsou v trakčních napájecích stanicích statické kompenzátory.

Pro zlepšení kvality energie odebírané z distribuční energetické sítě byly proto všechny napájecí stanice pro trakční soustavu 25 kV/50 Hz v minulosti doplněny o filtračně kompenzační zařízení (FKZ). Jedná se zde o neřízené LC větve naladěné přibližně na frekvence 3. a 5. (výjimečně i 7.) harmonické složky proudu. Tyto větve zkratují složky proudu s dotyčnými frekvencemi a ve vstupním proudu napájecí stanice se tyto har-

monické složky prakticky neprojeví. Určitým nebezpečím je přetížení LC větví proudy, které na těchto frekvencích neprodukuje napájecí stanice, tedy vozidla, ale přicházejí ze strany distribuční sítě, nebo ovlivnění – utlumení signálu HDO. I proto musí být parametry FKZ navrhovány specificky pro konkrétní napájecí stanici.

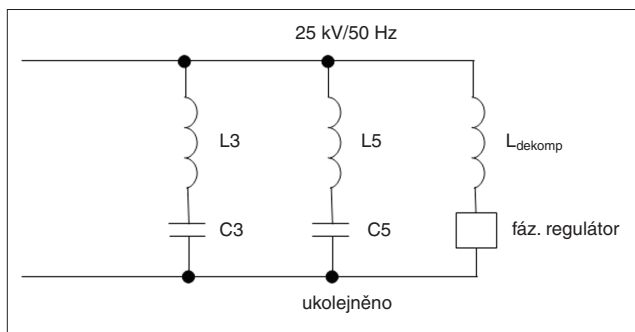
Kapacity filtračních větví slouží zároveň pro kompenzaci jalové složky proudu odebíraného trakční sítí. Aby v případě malého nebo nulového trakčního odběru nedocházelo k překompenzování do oblastí kapacitního účinníku, je potřeba tyto kompenzační kapacity naopak dekompenzovat k tomu určenou přidanou indukčností v sérii s fázovým regulátorem, tj. střídavým měničem napětí ve funkci měniče impedance, který řídí protékající dekompenzační proud. Právě dekompenzační větev spolu s větví pro filtraci 3. a 5. harmonické složky proudu odebírají činný výkon i při nulovém trakčním odběru a nezanedbatelným způsobem snižují jinak velmi dobrou účinnost napájecí stanice. Účinnost je jinak dána jen účinností jednofázového transformátoru a vlastní spotřebou napájecí stanice.

Soudobá vozidla s frekvenčně řízenými střídavými trakčními i pomocnými pohony se vstupními čtyřkvadrantovými měniči (pulzními usměrňovači) odebírají proud ve fázi s napětím a téměř sinusového tvaru, tedy FKZ nepotřebují. FKZ při jejich provozu způsobují zbytečné ztráty a v případě, že tato vozidla nejsou vybavena antirezonanční ochranou, dochází k rezonančním jevům, způsobujícím nepřijatelná přepětí, která vedou k poškození FKZ.

Jak již bylo uvedeno výše, současná napájecí soustava 25 kV/50 Hz je ve svém principu velice jednoduchá. Jediným složitým zařízením v napájecí stanici jsou FKZ, jejichž spotřeba nezanedbatelným způsobem snižuje účinnost napájecí stanice. Daní za jednoduchost je však nesymetrické zatížení veřejné distribuční sítě, nutnost rozdělit jednostranně napájené úseky s rozdílnými fázemi neutrálními poli a v neposlední řadě nutnost dimenzovat napájecí stanice na velké okamžité výkony, resp. vysoké poměry mezi maximálními a středními výkony, protože není možné rozdělit dodávaný výkon mezi sousední napájecí stanice.

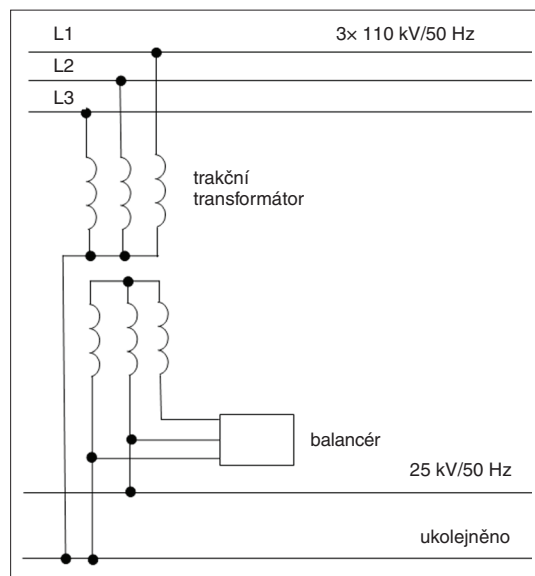
Spolu s růstem rychlosti jízdy vlaků, a tedy výkonů trakčních vozidel, roste i nesymetrie zatěžení třífázové distribuční sítě jednofázovou trakční napájecí stanicí. Nesymetrickým odběrem proudu vzniklé různé hodnoty úbytků napětí na vnitřních impedancích jednotlivých fází třífázové soustavy vedou k nesymetrii napětí v třífázových distribučních sítích. Vůči takto nekvalitním pa-

rametrům energie v distribuční síti protestují ostatní spotřebitelé, neboť i poměrně malá nesymetrie napětí výrazným způsobem zvyšuje ztráty asynchronních motorů. To zkracuje životnost jejich izolačního systému. Proto jsou moderní pohony vybaveny ochranami, které je automaticky odpojují při nedržení symetrie třífázového systému. Ve snaze spl-



Obr. 3. Principiální zapojení filtračně kompenzačního zařízení

nit kritéria kvality dodávek elektřiny nemohou distribuční společnosti tolerovat překračování dovolené nesymetrie odběru výkonu. Nesymetrický odběr nesmí překročit 0,7 % zkratového výkonu v místě k připojení k distribuční síti. Nesymetrie dodávané elektrické energie je též důvodem odmítavého přístupu distributorů k předávání přebytků rekuperované energie z trakčních napájecích stanic do distribuční sítě. Nežádoucí účinky zkraslení třífázového napětí nesymetrickým odběrem a nesymetrickou rekuperací se totiž sčítají.



Obr. 4. Připojení balancéru k napájecímu transformátoru

Výsledkem je, že tradiční trakční napájecí stanice s jednofázovými transformátory nespĺňují ani požadavky ze strany železnice (nezajišťují kvalitu napájení vlaků a spojitost odběru rekuperované energie podle technických podmínek pro interoperabilitu), ani požadavky ze strany energetiky (symetrie odebraného i navráceného výkonu). Proto je nelze používat pro nové instalace.

3. Symetrizace napájecí stanice pomocí balancérů

Současná jednofázová trakční síť 25 kV/50 Hz má několik zásadních nedostatků:

- Neodebírá sinusový proud, vozidla mají můstkový neřízený usměrňovač, jsou odebírány složky proudu s lichými násobky základní frekvence.
- Dochází k posunu proudu za napětím, což je dáno zátěží tvořenou neřízeným usměrňovačem a induktivní zátěží – stejnosměrnými motory se sériovým buzením.
- Nesymetricky je zatěžována trojfázová distribuční síť.
- Není možné traťové úseky napájet dvoustanně z důvodu možných přetoků energie i při případně stejné napájecí fázi sousedních úseků.
- V provozu dochází k pravidelnému střídání napájecích fází oddělených neutrálním polem s nutností přerušit odběr veškerého proudu. Tato nevýhoda nabývá na významu se zvyšujícími se rychlostmi a tím i v čase častějším přerušováním proudu pro vlak.

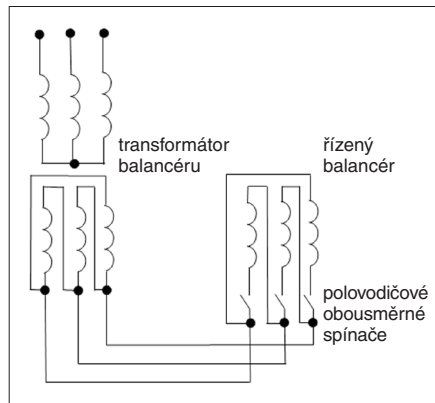
První dva z výše uvedených nedostatků jsou postupně řešeny dodávkou nově koncipovaných vozidel. Nová vozidla mají na vstupní straně řízený pulzní (čtyřkvadrantový) usměrňovač, který odebírá téměř sinusový proud, který je navíc ve fázi s napětím. Při převažujícím počtu těchto vozidel v provozu se tak stanou zbytečnými i nekomplikovanější zařízení střídavé napájecí soustavy – FKZ.

Další velkou nevýhodou střídavé soustavy 25 kV/50 Hz konvenční koncepce, tedy nesymetrii odběru energie, může odstranit nasazení řízených balancérů. Balancér umožní napájet trakční vedení jednotnou fází, odpadá tedy střídání fází. Avšak ani nasazení dále popsaných balancérů nevyřeší poslední dva problematické body, a to odstranění neutrálních polí na styku jednotlivých napájených úseků a s tím související nutnost pravidelně přerušovat odebíraný proud. Použití balancérů tedy neumožní zavedení dvoustanného napájení. Důvod proč nelze propojovat sousední napájecí stanice ani při systému jednotné fáze je v nestejných fázových úhlech stejných fází třífázové distribuční sítě v jejich různých bodech. Rozdíly fázového úhlu téhož napětí v různých bodech distribuční sítě činí až několik stupňů. Jsou způsobeny induktivními úbytky napětí na impedancích jednotlivých fází vedení či transformátorů v důsledku toku činného výkonu vedením.

I když by v případě aktivních balancérů bylo možné využít v celé trakční napájecí soustavě společnou fázi a symetrizaci odběru zajistit pomocí balancérů, nedokáže takové řešení zabránit přetokům netrakční energie trakční napájecí soustavou. V případě, že

nebude rozdělena neutrálními poli (v případě rozdílných úhlů napětí v distribuční síti v místě připojení jednotlivých napájecích stanic), přetoky by poté způsobovaly zbytečné zatížení trakční napájecí soustavy.

Aktivní (řízený) balancér zajišťuje symetrické zatížení třífázové distribuční sítě při napájení jednofázové trakční sítě. V místě



Obr. 5. Zjednodušení zapojení balancéru

připojení má potom napájecí stanice vlastnosti jako třífázový transformátor se symetrickou zátěží. Zatímco při konvenčním způsobu napájení je trakční proud odebírán pouze ze dvou fázových vodičů třífázové sítě, při využití aktivního balancéru je tentýž proud rozdělen mezi všechny fázové vodiče distribuční sítě.

Schéma zapojení aktivního balancéru je na obr. 4 a 5. Přes třífázový transformátor jsou připojeny do trojúhelníku zapojené tlumivky s polovodičovými spínacími prvky. Jejich řízením je možné dosáhnout kladného i záporného jalového výkonu umožňujícího kompenzaci účinnosti a symetrizaci fázových proudů, přičemž část zátěžného trakčního proudu je odebírána ze třetí fáze.

Princip činnosti aktivního balancéru je možné znázornit i na dále uvedeném fázovém diagramu, obr. 6. Na levé části obrázku jsou tři fázová napětí a fázové posunuté proudy I_{L1} a I_{L2} trakcí zatížených fází, fázový posun je dán přítomností vozidel s neřízenými usměrňovači. Aktivní balancér při správné činnosti posune fázové proudy rovnoběžně s příslušnými napětími a zároveň sníží proud trakcí zatížených fází zatížením i třetí fáze proudem I_{L3} . Fázorový diagram představující požadovaný stav je na pravé polovině obrázku.

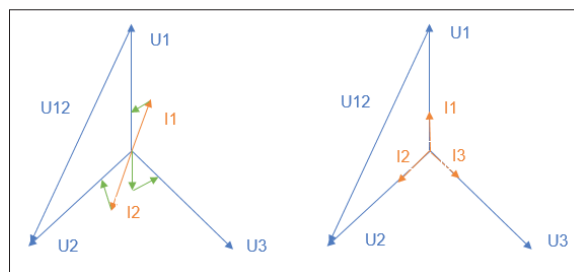
4. Technické řešení měničových napájecích stanic

Rozvoj vysokonapěťových výkonových polovodičových měničů pro energetické aplikace vytvořil předpoklady pro uplatnění těchto technologií i v drážních napájecích stanicích pro trakční soustavu 25 kV/50 Hz. Přínosy a možnosti měničových napájecích stanic jsou celkově shrnuty v dalším oddílu,

v tomto oddílu budou popsána vlastní technická řešení, zejména měničové části.

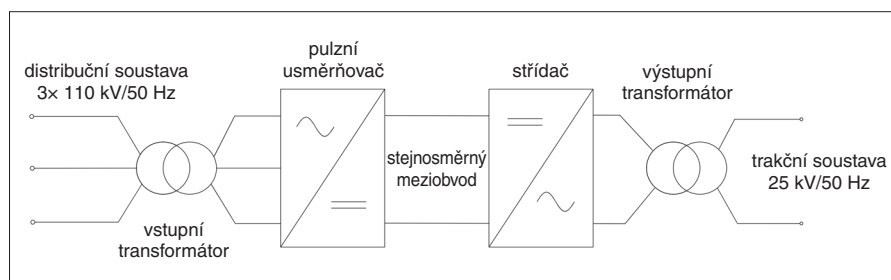
Bloková struktura měničové napájecí stanice 25 kV/50 Hz s kaskádou měničů 3 AC/DC a DC/1 AC je uvedena na obr. 7.

Zde je vhodné doplnit poznámku, která se vztahuje k terminologii v oblasti měničové techniky. Měniče, o kterých je zde pojednááno, jsou koncipovány jako jednofázová nebo třífázová tranzistorová můstková zapojení s jednou stranou střídavou a jednou stranou stejnosměrnou a s možností toku elektrického výkonu v obou směrech, tedy ze strany stejnosměrné do strany střídavé nebo naopak. Zejména v drážní oblasti, ať jde o aplikace stacionární nebo mobilní, jsou tyto typy měničových struktur označovány jako čtyřkvadrantové měniče nebo měniče 4Q. Kromě toho se v oboru výkonové elektroniky pro tato zapojení používají označení vycházející z převažujícího směru toku výkonu měničem v dané aplikaci. Převažuje-li tok výkonu



Obr. 6. Fázorový diagram znázorňující činnost balancéru

ze stejnosměrné strany do střídavé, je běžně měnič označován jako střídač. Převažuje-li v dané aplikaci směr toku výkonu ze střídavé strany do stejnosměrné, je měnič označován jako pulzní usměrňovač, usměrňovač se šířkově pulzní modulací, PWM usměrňovač,



Obr. 7. Blokovaná struktura měničové napájecí stanice

rekuperační usměrňovač, kompatibilní usměrňovač nebo též jako AFE jednotka. V měničových napájecích stanicích se uskutečňuje směr toku výkonu převážně ze strany energetické distribuční sítě do strany trakční sítě. Z důvodu přehlednosti a jednoznačného rozlišení měničů bude proto v tomto článku označován měnič na straně energetické sítě jako pulzní usměrňovač a měnič na straně trakční sítě jako střídač.

Z obr. 7 je zřejmé, že z distribuční energetické soustavy 110 kV je napájena primární strana vstupního oddělovacího snížovací-

ho třífázového transformátoru. Sekundární vinutí vstupního transformátoru napájí vstupní stranu třífázového pulzního usměrňovače. Jeho výstupní napětí vytváří stejnosměrný napěťový meziobvod, jehož napětí se zpravidla pohybuje v rozmezí 5 až 15 kV. Z tohoto meziobvodu je napájen výstupní jednofázový střídač, který pracuje s frekvencí 50 Hz. Zvýšení výstupního napětí střídače na hodnotu 25 kV (respektive 2×25 kV v případě aplikace systému s negativním napájecím vodičem) zajišťuje výstupní jednofázový transformátor, případně autotransformátor, jehož výstupním napětím se napájí trakční síť. Potřebných efektů měničové napájecí stanice, které budou popsány dále, se dosahuje prostřednictvím vhodného řízení měničových struktur.

Popsaná blokovaná struktura měničové napájecí stanice je standardní. Konkrétní provedení měničů se však v jednotlivých aplikacích odlišují. Technická řešení měničů vycházejí ze standardních aplikací pro energetiku a jedná se vždy o vícehladinová zapojení.

Měničové technologie pro trakční napájecí stanice nabízejí ve světovém měřítku tři výrobci – ABB, GE a SIEMENS. Nemusí jít vždy o technologie pro trakční soustavu 25 kV/50 Hz či 60 Hz, respektive 2×25 kV/50 Hz či 60 Hz. Řada měničových napájecích stanic byla realizována pro trakční soustavu 15 kV/16,7 Hz například v Německu a ve Švýcarsku, zde se však nevyužívá kaskáda měničů 3 AC/DC a DC/1 AC, ale jednostupňový přímý měnič 3 AC/1 AC bez stejnosměrného meziobvodu. Stavebnicová koncepce některých měničových struktur však umožňuje využívat stejné vý-

konové bloky pro měničové napájecí stanice s přímými měniči i s měniči se stejnosměrným meziobvodem.

V tomto článku budou popsány dvě používané koncepce měničové výzbroje pro trakční napájecí stanice.

5. Vícehladinové měniče s kapacitním děličem

První koncepce měničových výzbrojí pro napájecí stanice je založena na použití vícehladinových měničů s kapacitními děliči na

stejnosemné straně. Spínací prvky mohou být realizovány IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), bývají ale také realizovány IGCT (*Integrated Gate Controlled Thyristor*), [8]. V konkrétní měničové výzbroji je uvedené koncepte využito jak v případě vstupního třífázového pulzního usměrňovače, tak v případě jednofázového střídače. Problematika

nič – vstupní tlumivky vůči síti, se tedy blíží jedné. Činitel výkonu, který zahrnuje i vliv deformačního výkonu od vyšších harmonických složek, bude ale vlivem širšíkově pulzní modulace měniče vždy mírně nižší, než 1.

Použití vícehladinového zapojení měniče je ve značné míře motivováno rozložením napětového namáhání vysokonapětového měni-

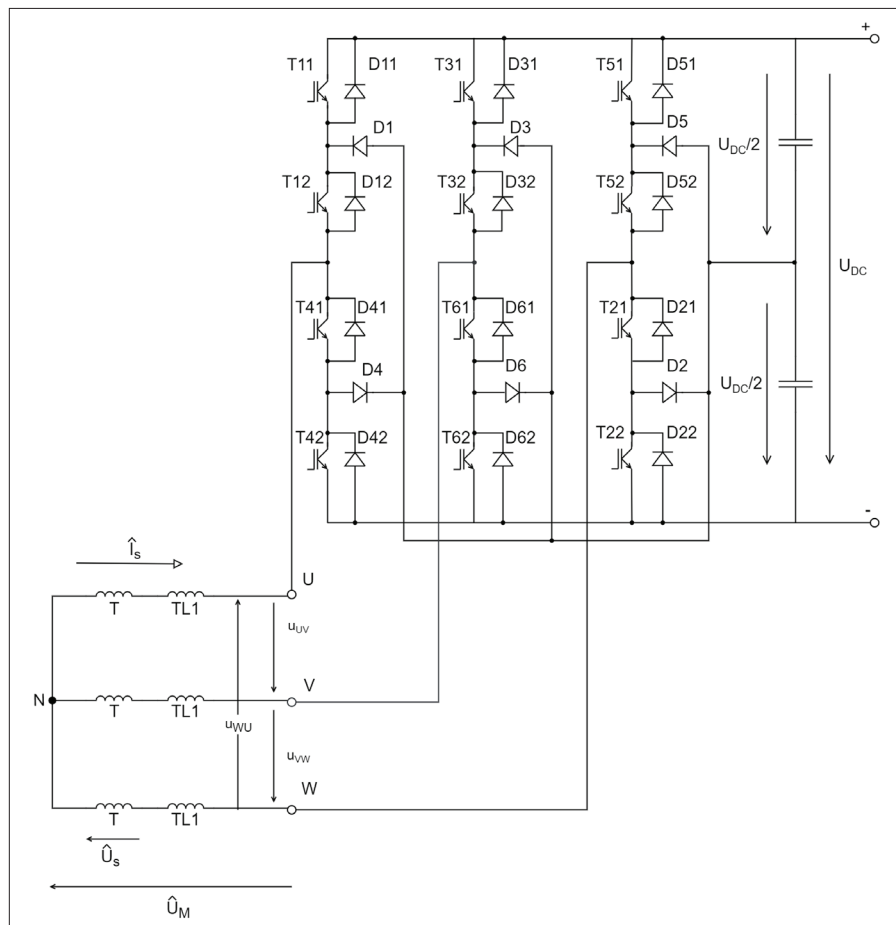
naší však vícehladinové zapojení měniče další efekty. Ty souvisejí zejména s možností formovat střídavé napětí širkově pulzní modulací ve větším počtu hladin, tedy s příznivějším harmonickým spektrem modulovaného napětí, oproti zapojení dvouhladinovému. Jednotlivé hladiny střídavého napětí jsou odvozeny z hodnoty napětí na stejnosměrné straně měniče. Pro plnou říditelnost měniče v případě jeho aplikace jako pulzního usměrňovače je nutné, aby napětí na stejnosměrné straně měniče bylo vyšší, než amplituda napětí střídavého napájecího zdroje.

Označíme-li podle obr. 8 celkové napětí na stejnosměrné straně měniče U_{DC} , mohou nabývat sdružená napětí na střídavé straně měniče okamžitých hodnot $-U_{DC}$, $-U_{DC}/2$, 0 , $+U_{DC}$, $+U_{DC}/2$, tedy pěti napětových hladin. Fázová napětí, vyznačená na obr. 8 jako napětí mezi fázemi měniče a středem napájecího zdroje, mohou nabývat hladin $\pm 2U_{DC}/3$, $\pm U_{DC}/2$, $\pm U_{DC}/3$, $\pm U_{DC}/6$ a 0 . Při formování širkově pulzní modulace na střídavé straně třífázového tříhladinového měniče může být nastaveno 27 kombinací sepnutí polovodičových prvků. Celkově lze na střídavé straně měniče vytvořit 19 napětových stavů. Je tedy zřejmé, že u některých napětových stavů existuje více možností jejich nastavení. Existuje-li pro nastavení požadovaného napětového stavu více kombinací sepnutí polovodičových prvků, je nutno použít konkrétní kombinaci s ohledem na udržování stálého potenciálu středu kapacitního děliče na stejnosměrné straně měniče a s ohledem na minimum přepínání polovodičových prvků při přechodu do nového napětového stavu.

V měničových trakčních napájecích stanicích je struktura výstupního tříhladinového střídače analogická k popsané struktuře pulzního usměrňovače, v případě střídače se však jedná o jednofázové zapojení, oproti schématu na obr. 8 má střídač jen dvě větve s polovodičovými spínači.

Reálné provedení měničové napájecí stanice využívající vícehladinových měničů s kapacitními děliči využívá vícevinutových transformátorů a skupinového řazení více vícehladinových měničů tvořících vstupní pulzní usměrňovač i výstupní střídač. Může jít např. o konfiguraci, kde má vstupní síťový transformátor několik sekundárních vinutí, která napájejí skupinu tříhladinových pulzních usměrňovačů, které napájejí paralelně stejnosměrný meziobvod. Analogickým způsobem je řešena i výstupní část, kde je skupina tříhladinových jednofázových střídačů paralelně napájena ze stejnosměrného meziobvodu a každý střídač napájí jedno primární vinutí jednofázového výstupního vícevinutového transformátoru. Konkrétní struktura měničové napájecí stanice závisí na požadovaném výkonovém dimenzování a na požadavcích na redundanci. V jedné napájecí stanici může být využito více paralelně pracujících jednotek podle obr. 7.

(pokračování)

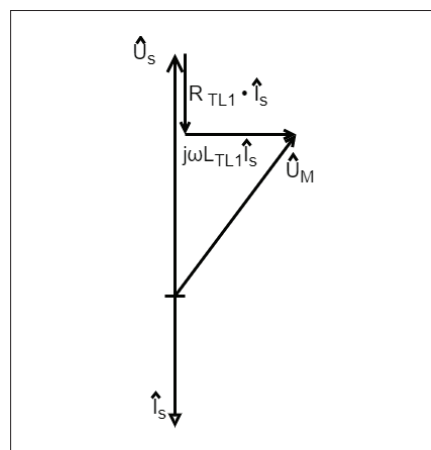


Obr. 8. Tříhladinový třífázový pulzní usměrňovač

vícehladinových měničů s kapacitními děliči na stejnosměrné straně byla již mnohokrát publikována, proto zde budou naznačeny stručně jen nejzákladnější skutečnosti na příkladu třífázového tříhladinového měniče, který je v měničových napájecích stanicích používán jako vstupní pulzní usměrňovač.

Základní schéma tříhladinového třífázového můstkového měniče ve funkci pulzního usměrňovače je uvedeno na obr. 8. Pulzní usměrňovač je napájen ze sekundárního vinutí třífázového transformátoru T a řídí pomocí širkově pulzní modulace úbytek napětí na vstupních tlumivkách TL1 jako rozdíl napětí mezi napájecí sítí u_s a svorkami usměrňovače u_M . Úbytek napětí na tlumivkách TL1 je dán úbytkem na jejich odporu R_{TL1} a indukčností L_{TL1} . Situace je pro první harmonické složky obvodových veličin znázorněna na fázorovém diagramu na obr. 9 pro případ, kdy je ze sítě odebírána první harmonická složka proudu i_s ve fázi s první harmonickou složkou napětí u_s . Účinnost, se kterým pracuje soustava mě-

če na více spínacích prvků v jedné větvi – fázi měniče. Oproti standardnímu třífázovému můstku se šesti tranzistory a šesti zpětnými diodami, což je zapojení dvouhladinové, při-



Obr. 9. Fázorový diagram poměrů na střídavé straně pulzního usměrňovače