

Nové technologie trakčního napájení 25 kV/50 Hz (2. část)

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

6. Modulární vícehladinové měniče

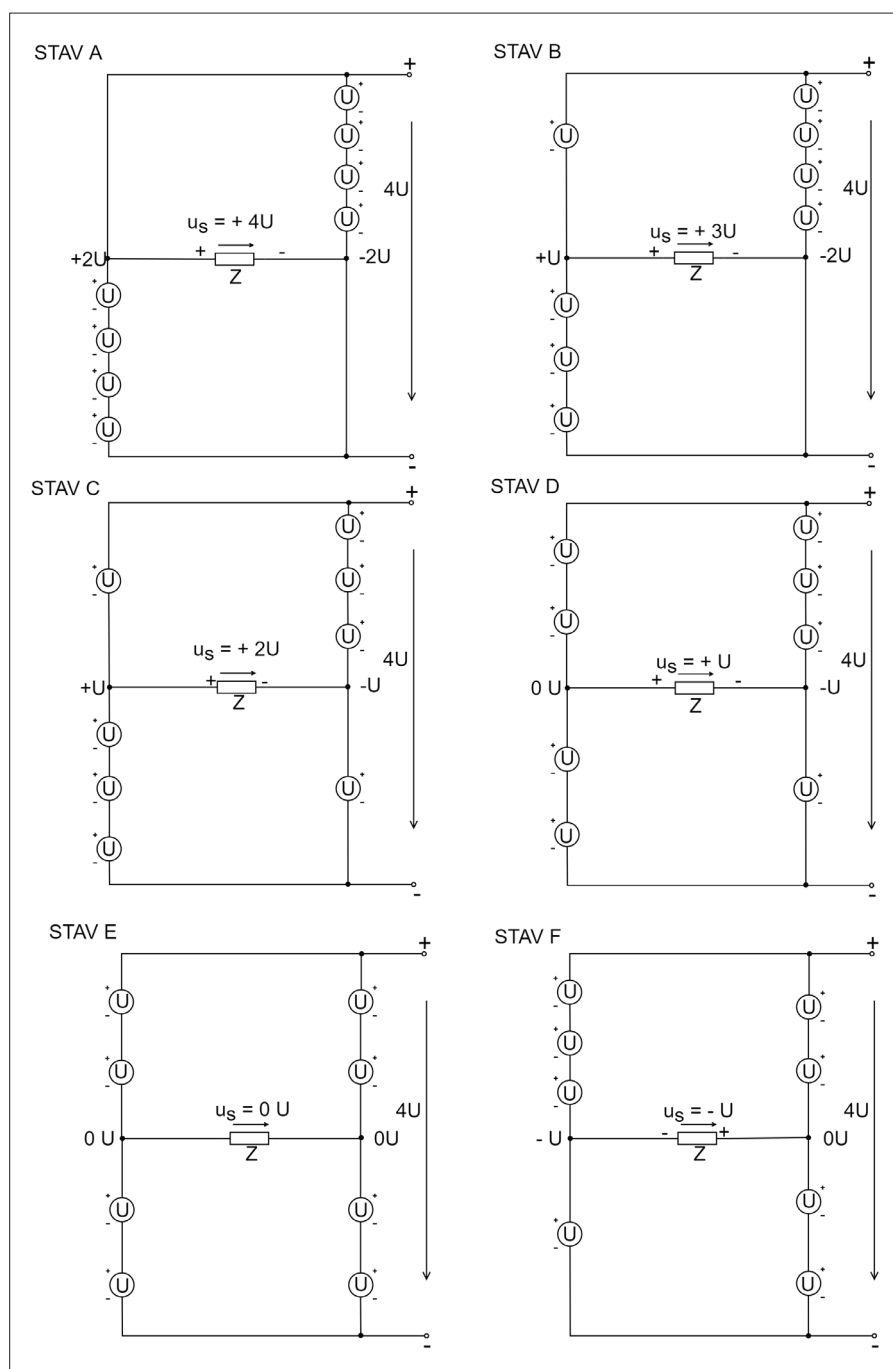
Druhou měničovou strukturou používanou v měničových napájecích stanicích je modulární vícehladinový měnič s balančními kondenzátory. I přes větší složitost s určitou vazbou i na cenu jde o velmi progresivní řešení. Výhody této struktury jsou zejména následující:

- Energie stejnosměrného meziobvodu je rozložena ve větším množství menších kondenzátorů.
- Modulární topologie umožňuje jemnější odstupňování napěťových hladin.
- Vlivem většího počtu napěťových hladin je příznivější harmonická skladba obvodových veličin, čímž se snižují požadavky na filtrační prvky a transformátory jsou méně zatěžovány ztrátovými výkony od vyšších harmonických složek proudu a napětí. To se příznivě projevuje i nižším akustickým výkonem generovaného hluku. To je důležité, neboť je třeba usilovat o to, aby hluk související s provozem měničových trakčních napájecích stanic nesnižoval jejich vysokou užžitnou hodnotu.
- Modulární koncepce dává předpoklady ke konstrukci měničů s dostatečnou redundancí a spolehlivostí.
- Použití jednoduchých standardních transformátorů.

Základní principy fungování modulárního vícehladinového měniče zde budou vysvětleny na příkladu jednofázového střídače, tedy výstupního měniče měničové napájecí stanice. Na obr. 10 je uvedeno šest schémat, která objasňují postup formování výstupního napětí jednofázového střídače na příkladu pětihladinového zapojení. Princip formování výstupního napětí je založen na definování potenciálu střídavé výstupní svorky (fáze) a tím i okamžité hodnoty výstupního napětí u_s na impedanci zátěže Z pomocí sérioparalelního řazení zdrojů napětí o hodnotě U . Potenciály výstupních svorek měniče jsou pro jednotlivé stavy vyznačeny v obr. 10. V případě pětihladinového zapojení podle obr. 10 je potenciál výstupní svorky definován kombinací řazení čtyř napěťových zdrojů, které určují potenciál výstupní střídavé svorky měniče v možných hladinách $+2U$, $+U$, 0 , $-U$, $-2U$. Uváží-li se v případě jednofázového střídače možnost nastavení uvedených potenciálů na obou výstupních střídavých svorkách a je-li výstupní napětí střídače u_s dáno rozdílem potenci-

álů těchto výstupních svorek, může okamžitá hodnota výstupního napětí u_s nabývat hodnot $+4U$, $+3U$, $+2U$, $+U$, 0 , $-U$, $-2U$, $-3U$, $-4U$. Zavede-li se vhodná sekvence nastavování jednotlivých napěťových stavů v obou vět-

vích střídače, dosáhne se při nejjednodušším způsobu řízení, při tzv. obdélníkovém řízení, průběhu okamžité hodnoty výstupního napětí u_s za jednu periodu podle obr. 11. Část sekvence nastavování napěťových stavů střídače



Obr. 10. K vysvětlení principu funkce vícehladinového modulárního měniče

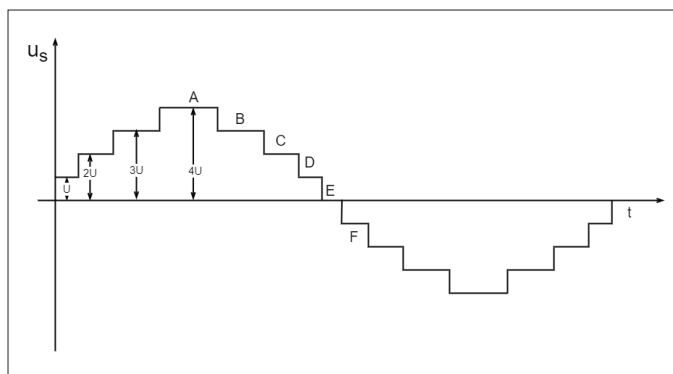
v části periody výstupního napětí je znázorněna v obr. 10, v obr. 11 jsou velkými písmeny označeny intervaly odpovídající napěťovým stavům v obr. 10. V jednotlivých větvích se mění počet napěťových zdrojů připojených ke kladnému a zápornému pólu stejnosměrné strany měniče. V daném příkladu pětihladinového měniče je zřejmé, že počet svisle sériově řazených napěťových zdrojů je v každé větvi konstantní, celkové napětí větve je stále rovno $4U$, toto je tedy zároveň stálá hodnota napětí na stejnosměrné straně měniče. Zároveň je zřejmé, že okamžitá hodnota napětí u_s na zátěži je dána součtem hodnot napětí napěťových zdrojů ve dvou smyčkách (horní a dolní) podle II. Kirchhoffova zákona.

Praktické realizaci měničové struktury, která zabezpečuje funkci měniče tak, jak bylo vysvětleno pomocí principiálního obr. 10, se věnují obr. 12 a obr. 13. V každé větvi měniče jsou sériově zapojeny dvě skupiny modulů M11 až M44 podle obr. 12, jedna skupina je zapojena ke kladnému pólu stejnosměrné strany měniče, druhá k pólu zápornému. Celkový počet modulů v jedné skupině, tedy polovina počtu modulů jedné větve měniče, je roven počtu hladin měniče – 1. V případě pětihladinového měniče tedy jde o čtyři moduly v jedné skupině a o osm modulů v jedné větvi (fázi). Na obr. 13 je znázorněno obvodové řešení jednoho modulu. Obvod na obr. 13 má vývody + a – paralelně k tranzistoru T2. Z hlediska těchto vývodů se modul může chovat jako zkrat s nulovým napětím nebo jako zdroj napětí U , což je napětí kondenzátoru C. Je evidentní, že kondenzátor C představuje praktickou realizaci zdroje napětí U z obr. 10. Jestliže je v modulu sepnut tranzistor T1, jde o stav, kdy je na vnějších vývodech modulu napětí U . To, zda se aktuálně proud uzavírá tranzistorem T1, nebo diodou D1, je dáno okamžitou polaritou proudu vnějších vývodů modulu. Je-li v modulu sepnut tranzistor T2, jsou vývody modulu zkratovány, o průchodu proudu T2 nebo D2 opět rozhoduje aktuální polarita proudu.

Má-li se tedy uvést do souvislosti obr. 10 s obr. 12 a obr. 13, jde např. při přechodu mezi stavy A a B na obr. 10 o proces, kdy se v dolní skupině modulů v levé větvi přepne jeden z modulů M41 až M44 do stavu „zkrat“ a v horní skupině této větve jeden z modulů M11 až M14 přejde ze stavu „zkrat“ do stavu, kdy je na vývody modulu připojen kondenzátor s napětím U .

Je zřejmé, že stejnosměrná strana měniče nedisponuje jedním velkým společným

kondenzátorem, ale kapacita stejnosměrné strany měniče je rozdělena do dílčích kondenzátorů v modulech. Tyto kondenzátory však nepředstavují ideální napěťové zdroje, ale při řízení měniče je nutné dbát nejen



Obr. 11. Výstupní napětí jednofázového pětihladinového modulárního střídače při obdélníkovém řízení

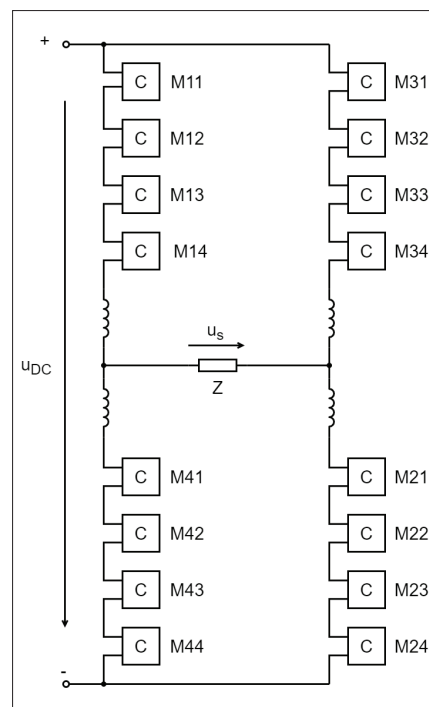
na správné formování střídavého napětí, ale i na udržování energie a tím i napětí U jednotlivých kondenzátorů. To se zajišťuje tak, že je-li v dané skupině modulů možnost výběru, u kterého modulu aktivovat připojení napětí kondenzátoru na vnější svorky (např. při přechodu ze stavu A do stavu B je možné vybrat k aktivaci v horní skupině levé větve jeden ze čtyř modulů), zohledňuje se okamžitá napětí kondenzátoru a požadavek na jeho trend – vybíjení nebo nabíjení. V případě, že má v modulu s připojeným kondenzátorem téci proud od vývodu + k vývodu –, volí se modul, u kterého je třeba napětí zvýšit, neboť kondenzátor se při dané polaritě proudu bude nabíjet, v případě opačné polaritě vnějšího proudu se aktivuje modul, jehož kondenzátor je třeba vybíjet, tedy u kterého je zapotřebí snížit napětí.

Vzhledem k tomu, že kondenzátory nejsou ideální zdroje napětí a v jednotlivých modulech nebudou nikdy okamžitá napětí kondenzátorů zcela totožná, je třeba zabránit špičkám vyrovnávacích proudů při přepínání mezi stavy. Tyto špičky vyrovnávacích proudů jsou omezovány tlumivkami ve větvích měniče, které jsou znázorněny na obr. 12.

Při řízení vícehladinových modulárních střídačů se využívá šířkově pulzní modulace. V tom případě je např. průběh střídavého napětí na obr. 11 pulzně modulován s cílem říditelnosti efektivní hodnoty střídavého napětí u_s a s cílem formovat výstupní napětí s co nejpříznivější harmonickou skladbou. U vícehladinových měničů existuje více metod generování šířkově pulzní modulace. Na obr. 14 je naznačen princip šířkově pulzní modulace, který vychází z analogie s elementární metodou šířkově pulzní modulace, jež je založena na určování okamžiků přepínání stavů v měničích z komparace referenčního průběhu u_{REF} , který představuje obraz idealizovaného střídavého napětí, s pilovitým signálem. V případě pětihladinového střídače je přepínání mezi pěti napěťovými stavy od $+2U$ do $-2U$ v jed-

né větvi (fázi) odvozeno od komparace referenčního sinusového průběhu napětí u_{REF} se čtyřmi pilovitými průběhy, kde každý pilovitý průběh určuje okamžiky přepínání mezi dvěma sousedními napěťovými stavy.

V případě třífázového modulárního vícehladinového měniče je zapojení na obr. 12 doplněno ještě o další větev – fázi s dílčími moduly. Potenciál této fáze se formuje zcela analogicky k provedenému výkladu u jednofázového měniče. V analogii s obr. 14 je v každé fázi třífázového měniče porovnávána sinusová referenční hodnota potenciálu se čtveřicí pilovitých signálů, přičemž referenční průběhy potenciálů v jednotlivých fázích mají vzájemný fázový posun 120° . Analogické je i fungování třífázového modulárního vícehladinového pulzního usměrňovače. V souladu s fázorovým diagramem na obr. 9 formuje pulzní usměrňovač taková střídavá napětí, aby rozdíl napětí mezi sítí a střídavými svorkami usměrňovače definoval požadovaný proud. Regulace proudu je zajištěna proudovými zpětnovazebními smyčkami, kde napětí formované na střídavé straně pulzního usměrňovače vystupuje jako akční veličina pro zpětnovazební smyčky.



Obr. 12. Praktická realizace pětihladinového jednofázového střídače

V měničových napájecích stanicích i v energetických aplikacích vícehladinových modulárních měničů se využívá zapojení s velkým počtem hladin, kde může být v jedné skupině zapojeno až kolem deseti modulů, tedy až dvacet modulů na jednu větev (fázi). Jde o značné navýšení složitosti měniče a jeho řízení, takoveto měniče však umožňují ve vysokonapěťových aplikacích formovat velmi kvalitní průběhy střídavých napětí s minimálním harmonickým zkrse-

ním a z toho vyplývající řadou pozitivních dopadů. Kromě toho umožňuje větší počet modulů využít spínací prvky IGBT s nižšími napětovými hladinami, které se vyznačují lepšími dynamickými vlastnostmi, kratšími spínacími časy, menšími spínacími ztrátami a z toho plynoucími frekvencemi širkové pulzní modulace v řádech kilohertzů.

Koncepce výrobců modulárních vícehladinových měničů je taková, že jednotlivé moduly jsou unifikované a velikost napětové hladiny, se kterou má měnič pracovat, je dána počtem použitých sériově řazených modulů. Dalším efektem modulární koncepce je to, že počet použitých modulů je zpravidla větší, než by odpovídalo nutným požadavkům napětového dimenzování, je tedy použita určitá napětová rezerva (vnitřní redundance). Ta je využita v případě, kdy nastane porucha některého z modulů. Tento modul je pak vodivě přemostěn a až do servisního zásahu může být měnič nouzově provozován, byť s řízením s menším počtem hladin napětí. Jde tedy o významný příspěvek k redundanci a spolehlivosti zařízení.

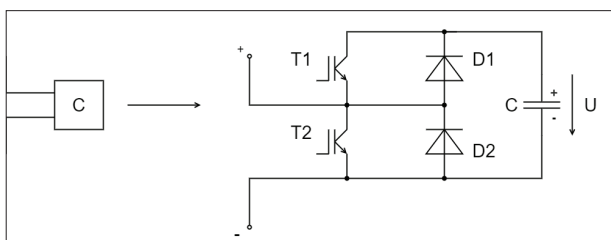
Měničové napájecí stanice a měničové bloky jsou koncipovány pro výkony desítek megavoltampérů, zpravidla 10 až 30 MV·A. V jedné měničové napájecí stanici lze řadit více struktur podle obr. 7 paralelně. Měničové struktury jsou vybaveny vodním chlazením. V případě měničových napájecích stanic s modulárními vícehladinovými měniči se řešení zjednodušuje tím, že se na výstupu používá jednofázový autotransformátor.

7. Přínosy měničových napájecích stanic

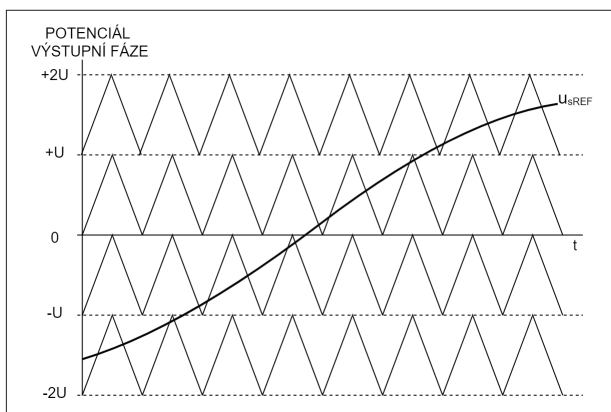
I přes větší složitost a cenu měničových napájecích stanic jsou jejich technické výhody oproti konvenčním transformátorovým napájecím stanicím výrazné, a to jak z pohledu součinnosti s energetickou sítí, tak i z hlediska vlastností a možností trakční napájecí soustavy 25 kV 50 Hz. Přínosy měničových napájecích stanic dále narůstají při jejich vzájemném propojeném řízení.

Měničové napájecí stanice v první řadě odstraňují výrazné nedostatky konvenčních transformátorových napájecích stanic. Na straně energetické sítě jde především o zajištění symetrického třífázového odběru energie z distribuční sítě i symetrické předávání přebytků z rekuperačního brzdění do distribuční sítě. Tato skutečnost neznamená jen

odstranění komplikací spojených s nesymetrickým odběrem energie, ale do budoucna v mnoha případech pravděpodobně půjde o jediné technické řešení, které splní požadavky distributora energie spojené s kvalitou odebrané energie, zvláště u nově budovaných napájecích stanic. Zde jde hlavně o nutnost splnění základní podmínky pro nesouměrnost odběru elektrické energie, při dvoufázovém odběru nesmí být u jednoho spotřebitele nesymetricky odebraný výkon vyšší než 0,7 % zkratového výkonu v místě připojení, a to v klouzavém časovém období 10 min. Nesouměrnost odběru energie



Obr. 13. Praktická realizace jednoho spínacího modulu modulárního vícehladinového měniče



Obr. 14. K vysvětlení principu širkové pulzní modulace u vícehladinového modulárního měniče

poškozuje ostatní odběratele energie tím, že pro tyto odběratele je nesymetrickým odběrem narušena symetrie sítě, zároveň nesymetrický odběr blokuje kapacity přenosové soustavy, neboť při nesouměrném zatížení fázových vodičů lze odebírat jen 58 % disponibilního výkonu. Požadavky na nesymetrické připojení se do budoucna nebudou zmírňovat, spíše naopak. To je dáno jednak velmi problematickou realizací nových vedení jako liniových staveb, jednak postupnou změnou struktury energetických zdrojů. Odstavováním uhelných elektráren jako velkých zdrojů a posilováním významu lokálních zdrojů a energetických úložišť bude pravděpodobně docházet k tomu, že se budou zkratové výkony v připojovacích bodech spíše snižovat. Z hlediska toku výkonu charakterizují měničovou trakční napájecí stanici tyto tři skutečnosti:

- Kladný či záporný činný výkon přechází z třífázové distribuční sítě do jednofázové trakční sítě a zpět.

- Trakční napájecí stanice poskytuje vozidlům potřebný jalový a deformací výkon (jestliže jej vyžadují – starší ano, nová ne) bez jeho pronikání na vstupní stranu.
- Nezávisle na činnosti výstupní strany lze ze vstupní strany dodávat do distribuční sítě kladný či záporný jalový výkon (podpůrná služba).

Všechny tyto aspekty jsou v posledních několika letech navíc doplněny požadavky na rekuperaci trakční energie zpět do veřejné distribuce. Konvenční trakční transformovny tak nepředstavují jen nesymetrický odběr, ale nově také nesymetrický dvoufázový zdroj energie.

Dalším významným přínosem měničových napájecích stanic z pohledu součinnosti s energetickou sítí je eliminace vyšších harmonických složek proudu na vstupu napájecí stanice a říditelnost účinnosti a jalového výkonu, s jakým pracuje napájecí stanice, díky použití vstupního pulzního usměrňovače. Tyto funkce zajišťuje pulzní usměrňovač v měničové napájecí stanici efektivněji než filtračně kompenzační zařízení v konvenčních napájecích stanicích.

Z hlediska trakční napájecí soustavy 25 kV 50 Hz poskytují měničové napájecí stanice vždy stabilizaci trolejového napětí v napájecím bodě, popř. i další efekty spojené s řízeným omezováním výkonu v situacích, kdy by hrozilo překročení přípustných maxim odebraného výkonu, která korespondují v první řadě s limity ve smluvních podmínkách s distributorem elektrické energie. Nejvýraznějších efektů měničových napájecích stanic lze ale dosáhnout při součinnosti více napájecích stanic v dané oblasti. Zde lze dosáhnout výrazných pozitivních efektů jak ve směru k distribuční energetické síti, tak ve směru k trakčnímu napájení. Jde zejména o tyto přínosy:

- Systém jednotné fáze – zrušení střídání fází v trakčním vedení, a tedy i neutrálních napájecích polí a provedení oboustranného napájení traťových úseků – odstraní se tím přerušování dodávek energie pro trakci i pro pomocná zařízení i odběru rekuperované energie pro jedoucí vlaky, sníží se ztráty výkonu i úbytky napětí v trakčním vedení.
- Snížení poměru mezi maximy odebraného výkonu a jeho střední hodnotou ze strany distribuční energetické sítě – tato skutečnost má významný přínos z hlediska zrovnomenění odběru z energetické sítě, po stránce ekonomické je zde přínos ve snížení hodnot požadovaného maximálního výkonu, který musí garantovat distributor – tento přínos bude nabývat na významu zejména v souvislosti s předpokládaným růstem poměru fixních plateb v ceně elektrické energie, kde tyto fixní platby s výškou rezervovaného výkonu vzrůstají. Tohoto pozitivního efektu je dosaženo cestou řízeného dělení výkonu mezi měničové napájecí stanice nezávisle na okamžitém roz-

ložení vlaků na trati. Aby nedocházelo ke kolísání efektivní hodnoty napětí trakční sítě vlivem řízeného dělení výkonů, předpokládá se, že při tomto řízení není akční veličinou efektivní hodnota trolejového napětí v místě připojení napájecí stanice, ale vzájemné fázové posunutí napětí sousedních napájecích stanic.

- Souvislé oboustranné napájení traťových úseků s koordinovaným řízením výkonů napájecích stanic umožňuje zabránit nežádoucím přetokům energie energetické sítě přes trakční vedení. Těmto přetokům by nebylo možné zabránit při využití konvenčních napájecích stanic bez vložených neutrálních polí, omezení přetoků energie přes trakční síť není řešitelné ani pomocí balancérů. Riziko nežádoucích přetoků energie je dáno skutečností, že v různých místech energetické sítě není vlivem indukčních úbytků napětí striktně garantován totožný fázový posun napětí, rozdíly fázového posunu napětí jsou tedy hlavní příčinou rizik spojených s těmito přetoky. S rozvojem lokálních energetických zdrojů a energetických úložišť lze očekávat prohlubování tohoto problému s fázovým posunem.
- Spojité oboustranné napájení traťových úseků měničovými napájecími stanicemi zásadně zlepšuje podmínky pro rekuperaci. To je spojeno s efekty řízeného dělení výkonů mezi jednotlivé napájecí stanice. Zatímco v případě konvenčních napájecích stanic s neutrálními poli jsou možnosti rekuperace mezi vozidly navzájem velmi omezené, zejména na jednokolejových tratích, a rekuperace do energetické sítě způsobuje mnoho problémů. Proto bývá rekuperace zakazována, což je provozně i energeticky nežádoucí. Rekuperace totiž v tomto případě zvyšuje nesymetrii připojení a nerovnoměrnost výkonu v místě připojení, v případě spojitěho napájení s měničovými napájecími stanicemi je velký potenciál pro rekuperaci energie v trakční síti – oblast spojitěho napájení je velká, i v případě rekuperace do energetické sítě přes měničovou napájecí stanici je velmi pravděpodobná nižší výkonová nerovnoměrnost a zejména by šlo o rekuperaci bez nesymetrií.
- Dvoustranné spojitě napájení traťových úseků z měničových napájecích stanic zabezpečuje zvýšení tvrdosti trakční sítě, nevznikají tak výrazné poklesy napětí jako v případě konvenčních napájecích stanic na koncích jednostranně napájených úseků. Zatímco v současnosti, při použití konvenčních napájecích stanic, jsou přípustné tolerance trolejového napětí od 17,5 do 27,5 kV, díky stabilizaci napětí měničovými napájecími stanicemi a vlivem spojitěho napájení by napětí v trolejové síti za běžných provozních podmínek nemělo klesat pod 22,5 kV, aby se předešlo automatickému snižování trakčního vý-

konu vozidel. Měničové napájecí stanice jsou napěťové zdroje s říditelnou tvrdostí, což v běžných situacích zabezpečuje stálost efektivní hodnoty napájecího napětí, přiřetížení sítě lze tvrdost trakční sítě a efektivní hodnotu napětí řízeně snižovat tak, aby nedocházelo k výkonovému přetížení. Ve spojení s moderními hnacími vozidly, která automaticky omezují svůj výkon v závislosti na aktuální hodnotě napětí v troleji, se takto vytváří systémem se samočinným řízením výkonového omezení, čímž se omezují výpadky napájení a zvyšuje jeho spolehlivost.

- Sledovaným parametrem napájecích stanic je jejich účinnost. Například u měničové napájecí stanice s vícehladinovými měniči s kapacitními děliči uvádí výrobce účinnost nad 97 % v oblasti výkonů vyšších než 25 % výkonu jmenovitého. Pokles účinnosti s klesajícím zatížením je zde dán především ztrátami naprázdno v transformátorech. Při použití modulárních vícehladinových měničů je sice struktura složena z více polovodičových součástek, to však neznamená pokles celkové účinnosti, neboť u těchto měničů lze používat součástky s nižšími hladinami napětí a lepšími parametry, zároveň jsou zde dány předpoklady pro velmi kvalitní promodulování napětí a proudů a tím omezení ztrát způsobených vyššími harmonickými složkami obvodových veličin v celém napájecím řetězci. I když by se mohlo zdát, že v případě měničových napájecích stanic jsou vždy horší podmínky pro dosažení dobré účinnosti vlivem větší složitosti oproti konvenčním napájecím stanicím, nemusí tomu tak být. U konvenčních napájecích stanic vykazuje nezanedbatelný ztrátový výkon filtračně kompenzační zařízení, a to zejména při nízkém zatížení trakční sítě. Měničové napájecí stanice vytvářejí předpoklady pro dosažení vyšší účinnosti i z hlediska širších souvislostí díky vytvoření velmi příznivých podmínek pro rekuperaci, obzvláště mezi vozidly. Dalším příspěvkem ke zvýšení účinnosti je stabilizace trolejového napětí měničovými napájecími stanicemi, a tudíž možnost dodávky výkonu pro hnací vozidla s vyšším napětím a menšími proudy s eliminací ztrát v trakčním vedení. Velmi podstatným energetickým přínosem měničových trakčních napájecích stanic je dvoustranné napájení, které významně snižuje ztráty v trakčním vedení.
- Spojité napájení s měničovými napájecími stanicemi dává velmi dobré předpoklady pro dosažení dostatečné redundance a spolehlivosti napájení. Redundance se zde projevuje v několika úrovních. V dané oblasti se jednak uplatňuje zásada N-1, tedy napájení musí být zabezpečeno i při výpadku jedné napájecí stanice v oblasti. Další redundance může být dosaženo instalací více měničových struktur paralelně v jedné napájecí stanici. V případě

vícehladinových modulárních měničů je redundance dosahována i řazením většího počtu modulů ve větvích měniče, než je nezbytné pro správnou funkci. Při poruše modulu je možné jej přemostit kontaktem a měnič může pracovat dále. Další stupeň redundance se zajišťuje možností kontaktního překlenutí celé měničové sestavy při poruše. V tomto případě není provoz napájecí stanice plnohodnotný, ale je umožněn alespoň nouzový provoz. Při spojitěm napájení traťových úseků je pro tyto případy potřebné vkládati vypínačů, umožňující nouzově oddělit napájené úseky. Při vypracovávání návrhu napájení je nutno otázku redundance řešit pro danou oblast komplexně se zohledněním specifických podmínek. V každém případě přináší široké možnosti redundance měničových napájecích stanic a spojitěho napájení ten efekt, že ve výsledku je v dané oblasti zapotřebí menší počet těchto napájecích stanic, než kdyby se využily konvenční napájecí stanice s jednostranným napájením traťových úseků s neutrálními poli, zároveň není při použití měničových napájecích stanic problematické zálohování napájení v případě výluk.

- Měničové napájecí stanice mají díky vstupním pulzním usměrňovačům říditelný účinník a jalový výkon na straně energetické sítě. To poskytuje provozovateli takovýchto napájecích stanic technické i obchodní příležitosti k provozování služeb spojených s kompenzací jalového výkonu v energetické síti. Vlivem síťového charakteru železnice tak může vzniknout síť zdrojů jalového výkonu pro kompenzaci.
- Spojité napájení traťových úseků měničovými napájecími stanicemi umožňuje při záměrně nastaveném rozdílu výstupních napětí sousedních napájecích stanic generovat říditelné vyrovnávací jalové proudy trakčním vedením s využitím jejich tepelných účinků při rozmrazování případné námrazy či ledovky na troleji.

8. Závěr

Vzhledem k nedostatečným parametrům trakčního napájení stejnosměrným napětím 3 kV, což je dáno skutečnostmi uvedenými v úvodu tohoto článku, je v ČR předpoklad postupné konverze tratí napájených stejnosměrnou soustavou na trakční soustavu 25 kV 50 Hz. Zároveň se předpokládá elektrifikace dosud neelektrifikovaných tratí i vysokorychlostních tratí jen soustavou 25 kV 50 Hz. Pro tyto rozsáhlé investiční akce jsou zpracovávány odpovídající koncepční dokumenty včetně časových harmonogramů, např. [1], [2]. Při zpracovávání koncepčních dokumentů byly uplatňovány simulační modely a energetické výpočty zahrnující predikce dopravních výkonů s ohledem na vývoj dopravy do roku 2050. Konverze napájecího systému je připravována po etapách s realizací do roku

The New Technologies of Traction Supply System 25 kV 50 Hz. The paper presents a new concepts and new technical means for 25 kV 50 Hz traction railway supplying system. The paper compares the traditional 25 kV 50 Hz traction power supply system with the new technologies based on the use of power electronics. The paper describes the configuration and possibilities of supply stations with power converters. The concept prepared for the railway network in the Czech Republic is presented.

2040. Jednotlivé etapy představují konverze napájecího systému na určených tratích nebo ve vymezených oblastech, např. Ostravsko, Olomoucko, oblast Ústí nad Labem, oblast Prahy atd. Přípravovaná konverze napájecího systému má jednoznačné dopady i na vozový park dopravců. Již několik let je nemyslitelné, aby si dopravci pořizovali nová vozidla jen pro stejnosměrnou soustavu 3 kV, nejčastěji se pořizují dvousystémová vozidla pro napájení 25 kV 50 Hz a 3 kV stejnosměrné. Pakliže jde o interoperabilní vozidla pro mezinárodní provoz, je již u dopravců standardem pořizování třísystémových vozidel pro soustavy 25 kV 50 Hz, 3 kV stejnosměrné a 15 kV 16,7 Hz. Přípravují se plány na odstavování starších vozidel pro napájecí soustavu 3 kV stejnosměrné, u novějších vozidel pro tuto napájecí soustavu jsou zvažovány rekonstrukce na vozidla dvousystémová. Nutné vysoké uplatnění dvousystémových i třísystémových vozidel je evidentní nejen z důvodu současné existence dvou drážních napájecích soustav na území ČR, ale i z důvodu postupu konverze napájecího systému na jednotlivých tratích. V určitých etapách konverze je nutné počítat s kombinací obou napájecích soustav tak, že mnoho vlakových spojů mine styk obou napájecích soustav během jedné jízdy i několikrát. Příprava a obměna vozového parku dopravců probíhají v současnosti nejen s ohledem na konverzi napájecího systému, ale jsou koordinovány i se zaváděním jednotného evropského vlakového zabezpečovače ETCS na hlavních tratích, neboť hnací vozidla budou muset být podle současných plánů povinně vybavena nákladnou vozovou částí nového vlakového zabezpečovače nejpozději od roku 2025.

V současnosti je v ČR již připravena první investiční akce zaměřená na konverzi napájecího systému. Pro tuto akci jsou už vysoutěženi klíčoví dodavatelé a je rozpracována projektová dokumentace. Jde o konverzi napájecího systému ze 3 kV stejnosměrných na 25 kV 50 Hz ve 44 km dlouhém úseku mezi stanicemi Nedakonice a Říkovice na II. železničním tranzitním koridoru Břeclav–Přerov. V rámci této investiční akce budou instalovány dvě měničové trakční napájecí stanice 25 kV 50 Hz. První nová napájecí stanice bude u železniční stanice Otrokovice a bude realizována přestavbou ze současné drážní měnirny 3 kV stejnosměrné. Druhá napájecí stanice bude realizována jako přístavba k současné drážní měnirně pro systém 3 kV stejnosměrných u stanice Říkovice v blízkosti nového styku obou trakčních soustav. Měnirna 3 kV stej-

nosměrné bude nadále zajišťovat napájení trati ve směru na Přerov.

Obě nové napájecí stanice 25 kV 50 Hz, vzdálené od sebe 20 km, jsou dimenzovány na výkon měničové části 30 MV·A. Toto dimenzování vychází z predikce budoucích dopravních výkonů na základě energetických simulačních výpočtů, dimenzování je počítáno i pro napájení odbočné tratě Otrokovice–Vízovice, která má být elektrifikována, počítá se s podporou napájení na dalších blízkých tratích připravovaných pro elektrifikaci (Kojetín–Hulín a Staré Město – Luhačovice/Bojkovice – Veselí nad Moravou). Dimenzování obou napájecích stanic počítá i s možností jejich vzájemného zálohování. V obou nových měničových napájecích stanicích budou instalovány vícehladinové měniče s kapacitními děliči na stejnosměrné straně osazené výkonovými spínacími součástkami IGCT.

Potenciál moderní železnice je v dopravním systému ČR obrovský a elektrická železnice je do budoucna jediným segmentem, který má předpoklady zajistit udržitelnou dopravu s dostatečnou kapacitou, rychlostí, bezpečností, energetickou hospodárností a šetrností k životnímu prostředí ve směrech nejsilnějších dopravních toků. Pro splnění této úlohy je nutné zajistit odpovídající technické prostředky v oblasti stavební infrastruktury, zabezpečovací techniky, vozidel i energetického napájení. Nástup nové generace technologií trakčního napájení, které byly přiblíženy v tomto článku, představuje v oblasti drážní energetiky bez nadsázky nejzásadnější technologický přelom od počátku elektrifikace hlavních tratí na území ČR v 50. letech 20. století.

Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory projektu TAČR č. TK02010009 Zvyšování efektivity železniční dopravy v rámci energetické optimalizace systému multimodální mobility.

Literatura:

- [1] *Koncepce přechodu na jednotnou napájecí soustavu ve vazbě na priority programového období 2014–2020 a naplnění.* Studie zpracovaná SUDOP Praha a. s. Praha, 2016.
- [2] *Změna trakční soustavy na AC 25 kV, 50 Hz v úseku Nedakonice–Říkovice.* Studie zpracovaná SUDOP Brno s. r. o. Brno, 2017.
- [3] HASAN, N. S., N. ROSMIN, D. OSMAN, A. A. H. MUSTA'AMAL. Reviews on multilevel converter and modulation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* Elsevier, 2017, **80**, 163–174. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117307955?via%3Dihub>



Prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc., ukončil studium na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze v oboru silnoproudá elektrotechnika v roce 1989. Roku 1992 ukončil studium ve vědecké výchově na Katedře elektrických pohonů a trakce téže fakulty. Od roku 1992 pracoval jako odborný asistent, od roku 2003 jako docent v Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze. V letech 1995 až 2001 spolupracoval s firmou Elektrosystém Praha, s. r. o., v oblasti vývoje a využití elektrických pohonů a řídicích systémů v průmyslových aplikacích. Od roku 2011 pracuje jako profesor na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice a nadále úzce spolupracuje s Fakultou strojní ČVUT v Praze. Svou odbornou činností zaměřuje zejména na oblast elektrických pohonů, výkonové elektroniky, elektrické trakce, mikroprocesorového řízení a elektromobility.



Ing. Ladislav Mlynařík, Ph.D., absolvoval studium na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice v oboru elektrotechnická zařízení v dopravě v roce 2008. Od roku 2009 pracoval jako asistent, od roku 2013 jako odborný asistent na Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice. V roce 2013 úspěšně ukončil doktorandské studium v oboru dopravní prostředky a infrastruktura. Odborné zaměření: trakční energetika, elektrická trakce, trakční mechanika, elektrické pohony.

- [4] MARTINEZ-RODRIGO, Fernando, SANTIAGO DE PABLO a L. Carlos HERRERO-DE LUCAS. Current control of a modular multilevel converter for HVDC applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* Elsevier, 2015, **83**, 318–331. Dostupné také z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0960148115003171?token=92BDD3D2F811F476CC28B64C119B024F36F6A81876227821D-D1BB2537B83112292B8C2BFB96E63597AFF2AF77C71CCCC>
- [5] Firemní materiály SIEMENS.
- [6] Firemní materiály ABB.
- [7] *Ročenky dopravy ČR.* Ministerstvo dopravy ČR.
- [8] NOVÁK, J. Moderní výkonové polovodičové prvky a jejich aplikační možnosti. *Elektro.* Praha, 2003, 2003(6), 6–12. ISSN 1210-0889.