

ŘÍZENÍ VÝKONU TRAKČNÍCH NAPÁJECÍCH STANIC 25 KV

POWER CONTROL OF TRACTION SUPPLY STATIONS 25 KV

Jaroslav Novák^{1*}, Ladislav Mlynařík²

Abstrakt *V první části článku jsou prezentovány hlavní vlastnosti a výhody trakčních napájecích stanic pro soustavu 25 kV 50 Hz s nepřímými polovodičovými měniči. V další části jsou uvedeny informace o perspektivní měničové struktuře pro tyto napájecí stanice. Hlavní část článku je věnována teoretické analýze metody pro synchronizované řízení výkonu napájecích stanic s polovodičovými měniči.*

Klíčová slova *trakční napájecí stanice, řízení výkonu, trakční napájecí soustava*

Summary *The main properties and advantages of traction supply stations for traction system 25 kV 50 Hz with indirect semiconductor converters are presented in the first part of the article. Information about perspective converter structure for traction supply stations is presented in the second part of article. The main part presents theoretical analyse of method for synchronised power control of traction supply stations with semiconductor converters.*

Keywords *traction supply station, power control, traction supply system*

1 ÚVOD

V rámci projektu Zvyšování efektivity železniční dopravy v rámci energetické optimalizace systému multimodální mobility, který je podporován agenturou TAČR, je na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice zaměřena pozornost na analýzu a využití nové generace technologií pro trakční napájení v drážní soustavě 25 kV 50 Hz, které jsou založeny na využití vysokonapětových měničových struktur, jejichž aplikace byly vyvinuty primárně pro energetické účely. Tyto nové technologie se v současnosti připravují pro první investiční akce v síti SŽ (dříve SŽDC) v rámci konverze trakční napájecí soustavy ze stejnosměrného napětí 3 kV na 25 kV 50 Hz. Výhody trakční napájecí soustavy 25 kV 50 Hz oproti soustavě stejnosměrné 3 kV byly na mnoha místech publikovány včetně relevantních koncepčních dokumentů (SUDOP 2016), (SUDOP 2017).

Soustava 25 kV 50 Hz byla budována od 60. let 20. století na tratích v jižní části ČR. Technologie napájecích stanic pro tuto soustavu se od doby svého vzniku prakticky nezměnila a představuje v podstatě transformátory doplněné později o filtračně kompenzační zařízení (FKZ) pro odstranění nejvýznamnějších negativních účinků drážní technologie na energetickou síť (eliminace odběru jalového výkonu a filtrace nejvýznamnějších vyšších harmonických složek proudu).

¹ Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, Studentská 95, 532 10, Pardubice, ČR

² Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, Studentská 95, 532 10, Pardubice, ČR

* korespondenční autor, tel.: +420 466 036 450, e-mail: Jaroslav.Novak@upce.cz

Uvedená konvenční koncepce trakčních napájecích stanic je v současnosti již nevyhovující jak z hlediska vlastností vůči energetické síti, tak vůči drážnímu provozu. Z hlediska energetické sítě je u konvenčního řešení trakčních napájecích stanic 25 kV 50 Hz největším problémem nesymetrický odběr výkonu s dopady na nestejněměrné úbytky napětí v jednotlivých fázích energetické sítě a blokování kapacity energetické sítě. Dalším problémem je vysoký poměr maximálního a středního odebraného výkonu z energetické sítě s dopady i na ekonomiku napájení, neboť je potřeba rezervovat vysoké příkony, které po většinu času nejsou využity. V případě budování nových napájecích stanic je použití konvenční koncepce prakticky nereálné, a to především z důvodu striktního požadavku na omezení nesymetrického odběru a navrácení výkonu z energetické distribuční sítě maximálně na hodnotu 0,7% zkratového výkonu v místě připojení v klouzavém časovém období 10 minut.

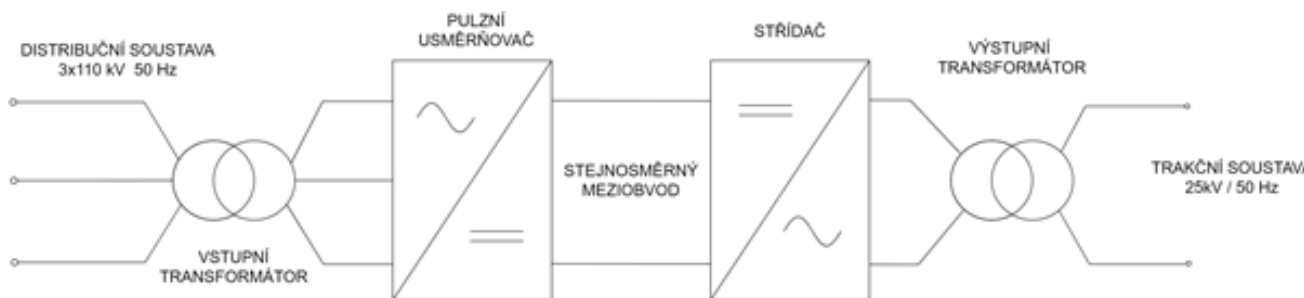
Z hlediska železničního provozu je problémem konvenční koncepce trakčního napájení 25 kV 50 Hz zejména jednostranné napájení tratových úseků s izolovanými neutrálními poli s dopady souvisejícími s poklesem napětí a disponibilního výkonu na koncích úseků a přerušování dodávky, respektive navrácení energie pro jedoucí vlaky při průjezdu neutrálními poli. Konvenční koncepce vytváří rovněž limitované možnosti pro rekuperaci energie hnacích vozidel. V úsecích, kde je rekuperace povolena, musí být shoda s distributorem elektrické energie na jejím zpětném odběru veřejnou energetickou sítí. Takováto rekuperace však dále navyšuje nesymetrii připojení na distribuční energetickou síť.

Další podrobnosti, které se týkají technického řešení a vlastností konvenční koncepce trakčních napájecích stanic 25 kV 50 Hz v ČR lze opět nalézt v (SUDOP 2016), (SUDOP 2017).

2 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ MĚNIČOVÝCH NAPÁJECÍCH STANIC 25 KV 50 HZ A JEJICH VLASTNOSTI

2.1 Struktura měničové napájecí stanice

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



Obr. 1 Blokovaná struktura měničové napájecí stanice

Zde je vhodné doplnit poznámku, která se vztahuje k terminologii v oblasti měničové techniky. Měniče, o kterých je zde pojednáváno, 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 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 pulsní usměrňovač, usměrňovač se šířkově pulsní modulací, PWM usměrňovač, 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 pulsní usměrňovač a měnič na straně trakční sítě jako střídač.

Z obr. 1 je zřejmé, že z distribuční energetické soustavy 110 kV je napájena primární strana vstupního oddělovacího snižovacího třífázového transformátoru. Sekundární vinutí vstupního transformátoru napájí vstupní stranu třífázového pulsního usměrňovače. Jeho výstupní napětí vytváří stejnosměrný napětíový 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 x 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, tj. na straně energetické sítě jde především o regulaci jalového výkonu, na straně trakční sítě jde o stabilizaci trolejového napětí a řízení výkonu napájecí stanice v součinnosti s dalšími napájecími stanicemi.

Popsaná bloková 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 se jednat vždy o technologie pro trakční soustavu 25 kV 50 Hz či 60 Hz, respektive 2 x 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 výkonové bloky pro měničové napájecí stanice s přímými měniči i s měniči se stejnosměrným meziobvodem.

2.2 Výhody měničových napájecích stanic 25 kV 50 Hz

Měničové napájecí stanice odstraňují výše uvedené nedostatky konvenční koncepce a poskytují další výhody. K hlavním skutečnostem, které charakterizují měničové napájecí stanice, patří tyto:

- Měničové napájecí stanice představují pro distribuční energetickou síť symetrickou zátěž.
- Měničové napájecí stanice odebírají díky vícehladinovému zapojení měničových struktur a díky šířkově pulsní modulaci ze sítě téměř sinusový proud.
- Měničové napájecí stanice mají říditelný účinník na straně sítě. To znamená nejen možnost odběru energie s účinníkem blízkým jedné, lze ale využít i obchodní příležitost dodávat kapacitní jalový výkon pro účely kompenzace v energetické síti.
- Zajištění podmínek pro rekuperaci symetrického výkonu do energetické sítě.
- Výše uvedené vlastnosti výrazně usnadňují povolení připojení měničových napájecích stanic k energetické distribuční síti oproti napájecím stanicím konvenční koncepce.
- Dobrá stabilizace napětí v trakční síti s pozitivními dopady na eliminaci stavů, kdy je nutno omezovat výkon hnacích vozidel (předpokládané kolísání napětí je v rozmezí 22,5 kV až 27,5 kV, v současnosti se připouští pokles napětí až na 17,5 kV).
- Při řízené součinnosti dvou a více měničových napájecích stanic je možné zrušení izolovaných neutrálních úseků mezi jednostranně napájenými sekcemi a vytvoření spojitého napájení s řadou pozitivních dopadů: odstraní se přerušování dodávky a odběru energie vlaků, při dvoustranném napájení traťových úseků se zmenší úbytky napětí na trakčním vedení a zvýší se přenosová schopnost, sníží se ztráty při přenosu a výrazně se zlepší podmínky pro rekuperaci energie mezi vozidly, mohou se zvýšit vzdálenosti mezi napájecími stanicemi a tím i klesne celkový počet potřebných napájecích stanic.

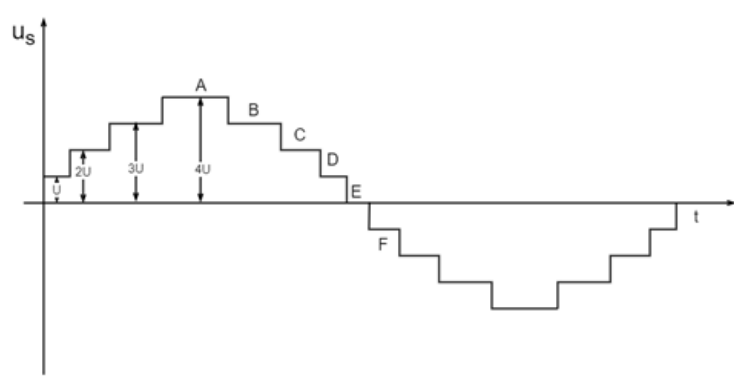
- Při součinnosti dvou a více stanic dochází ke zrovnoměrnění odběru z energetické sítě z důvodu propojeného vedení, lepších podmínek pro rekuperaci a řízeného dělení výkonů mezi napájecí stanice. To má příznivé ekonomické dopady prostřednictvím snížení poměru mezi hodnotou maximálního krátkodobého a středního výkonu v místě připojení k energetické síti. Lze očekávat posilování významu tohoto přínosu vlivem růstu fixních složek v ceně elektrické energie.
- Řízení výkonů napájecích stanic umožňuje zamezit nežádoucím přetokům elektrické energie energetické sítě přes trakční síť bez nutnosti zřizovat za tímto účelem neutrální pole.
- Měničové napájecí stanice představují řetězec s vyšší mírou ztrátového výkonu, v širších souvislostech však přispívají spíše k úsporám energie (lepší rekuperace, snížení ztrát vlivem malého obsahu vyšších harmonických složek napětí a proudu, dvoustranné napájení, lepší stabilizace napětí s nižšími proudy, v případě konvenční koncepce napájecích stanic bylo nezanedbatelným zdrojem ztrátové energie FKZ. Výrobci udávají účinnosti měničových napájecích stanic v okolí 97%.
- Zvýšení redundance a spolehlivosti napájení při paralelní spolupráci více napájecích stanic.
- Měničové napájecí stanice mohou generovat řízené vyrovnávací proudy pro odstraňování případné námrazy a ledovky na troleji.

3 ŘEŠENÍ MĚNIČOVÝCH STRUKTUR

V měničových napájecích stanicích se používají jak pro vstupní pulsní usměrňovač, tak pro výstupní střídač dvě koncepce vícehladinových měničů. První koncepcí je vícehladinový měnič s kapacitním děličem na stejnosměrné straně. Toto zapojení je dostatečně známé a bylo prezentováno v řadě publikací, například (Hasan 2017), proto zde nebude popisováno.

Druhou koncepcí je modulární vícehladinový měnič. Jedná se o perspektivní zapojení, jehož výhodami jsou zejména rozdělení napětí do velkého množství hladin s předpoklady pro velmi kvalitní promodulování napěťových průběhů, dobrá spolehlivost a redundance zapojení a možnost použití výkonových polovodičových součástek s nižšími napěťovými hladinami, které mají lepší dynamické a energetické vlastnosti.

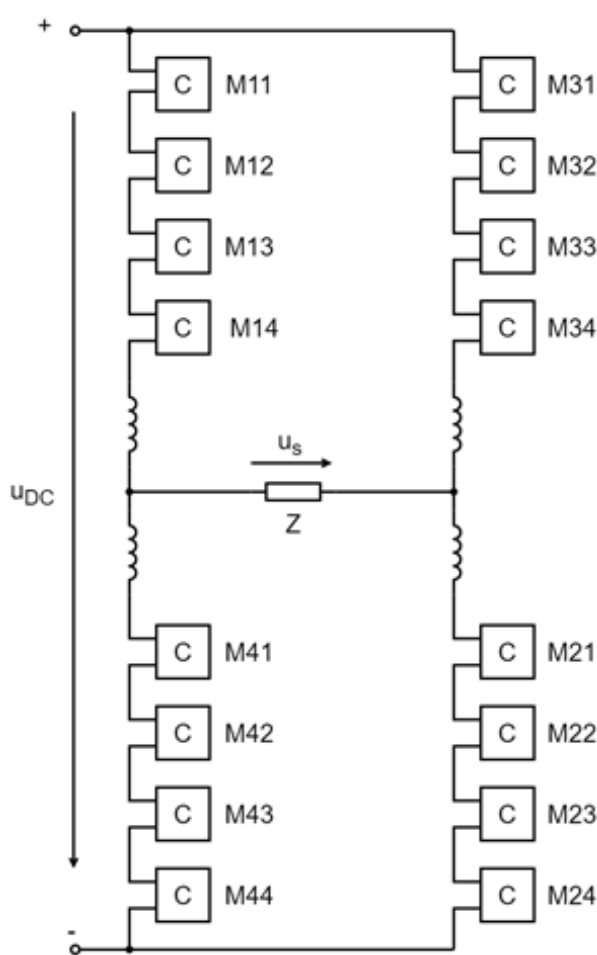
V měničových napájecích stanicích se modulární vícehladinové měniče používají jak ve funkci třífázových pulsních usměrňovačů, tak ve funkci jednofázových výstupních střídačů. Základní principy fungování modulárního vícehladinového měniče zde budou přiblíženy na příkladu pětihladinového jednofázového střídače (obr. 3).



Obr. 2 Výstupní napětí jednofázového pětihladinového modulárního střídače při obdélkovém řízení

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 - v obr. 3 jsou zdroje napětí U tvořeny moduly M11 až M44. V případě pětihladinového zapojení podle obr. 3 je potenciál výstupní svorky definován kombinací řazení čtyř napěťových zdrojů, které definují potenciál výstupní střídavé svorky měniče v možných hladinách $+2U$,

$+U, 0, -U, -2U$. Uvážíme-li v případě jednofázového střídače možnost nastavení uvedených potenciálů na obou výstupních střídavých svorkách a je-li výstupní napětí střídače u_s dáno rozdílem potenciálů těchto výstupních svorek, může okamžitá hodnota výstupního napětí u_s nabývat hodnot $+4U, +3U, +2U, +U, 0, -U, -2U, -3U, -4U$. Zavedeme-li vhodnou sekvenci nastavování jednotlivých napětíových stavů v obou větvích střídače, dosáhneme při nejjednodušším způsobu řízení, při tzv. obdélníkovém řízení, průběhu okamžité hodnoty výstupního napětí u_s za jednu periodu podle obr. 2.



Obr. 3 Principiální zapojení pětihladinového modulárního střídače

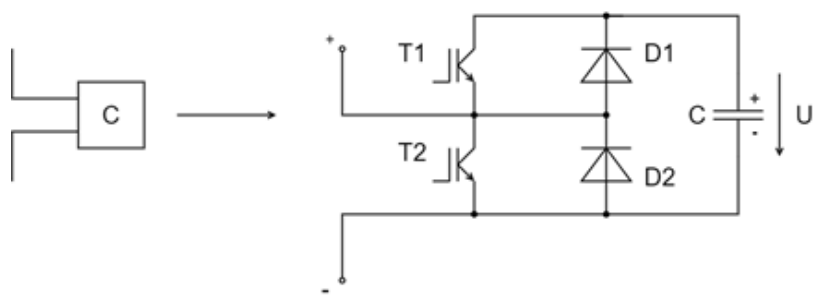
V jednotlivých větvích obvodu se mění počet napětíových zdrojů připojených ke kladnému a zápornému pólu stejnosměrné strany měniče. V daném příkladu pětihladinového měniče je zřejmé, že počet svisle sériově řazených napětíových zdrojů je v každé větvi konstantní, celkové napětí větve je stále rovno $4U$, 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 napětíových zdrojů ve dvou smyčkách (horní a dolní) podle II. Kirchhoffova zákona.

Na obr. 4 je znázorněno obvodové řešení jednoho modulu. Obvod na obr. 4 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. 3. Jestliže je v modulu sepnut tranzistor T1, jedná se 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 přes T2 nebo D2 opět rozhoduje aktuální polarita proudu.

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 napětíové zdroje, ale při řízení měniče je nutno nejen dbát na

správné formování střídavého napětí, ale i na udržování energie a tím i napětí U jednotlivých kondenzátorů.

Vzhledem k tomu, že kondenzátory nejsou ideálními zdroji 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. 3.



Obr. 4 Praktická realizace jednoho spínacího modulu modulárního vícehladinového měniče

Při řízení vícehladinových modulárních střídačů se využívá šířkově pulsní modulace. V tom případě je například průběh střídavého napětí na obr. 2 pulsně modulován s cílem říditelnosti efektivní hodnoty střídavého napětí u_s a s cílem formovat výstupní napětí s co nejpříznivější harmonickou skladbou.

V případě třífázového modulárního vícehladinového měniče je zapojení na obr. 3 doplněno ještě o další větve – fáze s dílčími moduly. Formování potenciálu této fáze se uskutečňuje zcela analogicky k provedenému výkladu u jednofázového měniče. Analogické je i fungování třífázového modulárního vícehladinového pulsního usměrňovače. Pulsní usměrňovač formuje 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 pulsního usměrňovače vystupuje jako akční veličina pro zpětnovazební smyčky.

V měničových napájecích stanicích i v energetických aplikacích vícehladinových modulárních měničů se využívá zapojení s vysokým počtem hladin, kde může být v jedné skupině zapojeno až kolem deseti modulů, tedy až dvacet modulů na jednu větev (fázi). Jedná se o značné navýšení složitosti měniče a jeho řízení, takovéto měniče však umožňují ve vysokonapěťových aplikacích formovat velmi kvalitní průběhy střídavých napětí s minimálním harmonickým zkreslením a z toho vyplývající řadou pozitivních dopadů. Kromě toho umožňuje vyšší počet modulů využití spínacích prvků IGBT s nižšími napěťovými hladinami, které se vyznačují lepšími dynamickými vlastnostmi, kratšími spínacími časy, menšími spínacími ztrátami a z toho plynoucími frekvencemi šířkově pulsní modulace k řádům kHz.

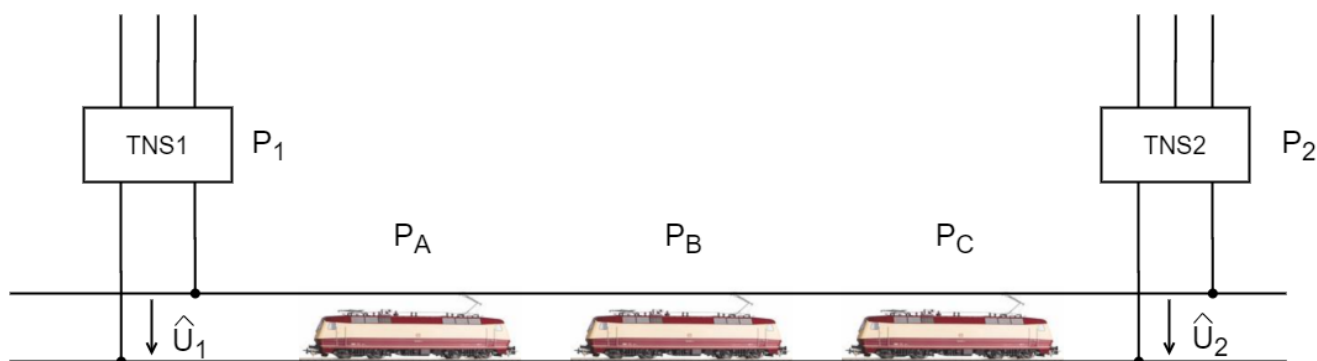
Filozofie výrobců modulárních vícehladinových měničů je taková, že jednotlivé moduly jsou unifikované a velikost napěťové hladiny, se kterou má měnič pracovat, je pak dána počtem použitých sériově řazených modulů. Dalším efektem modulární koncepce je to, že počet použitých modulů je zpravidla vyšší, než by odpovídalo nutným požadavkům napěťového dimenzování, je tedy použita určitá napěťová rezerva (vnitřní redundance). Ta je využita v případě, kdy dojde k poruše 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. Jedná se tedy o významný příspěvek k redundanci a spolehlivosti zařízení.

Měničové napájecí stanice a měničové bloky jsou koncipovány pro výkony desítek MVA, zpravidla 10 až 30 MVA. V jedné měničové napájecí stanici lze řadit více struktur podle obr. 1 paralelně. Měničové struktury jsou vybaveny vodním chlazením. V případě měničových napájecích stanic s modulárními vícehladinovými měniči se řešení zjednodušuje tím, že na výstupu se používá jednofázový autotransformátor.

Podrobnější informace o vícehladinových měničích lze nalézt v (Hasan 2017), (Fernando 2015).

4 ROZBOR SYNCHRONIZOVANÉHO ŘÍZENÍ VÝKONŮ NAPÁJECÍCH STANIC

Měničové trakční napájecí stanice 25 kV 50 Hz jsou v podmínkách ČR naprostou novinkou a připravují se první realizace. S tím souvisí i potřeba rozsáhlých analytických prací směřujících k ověření specifických vlastností těchto složitých technologií při jejich aplikaci v novém prostředí. Příspěvkem k těmto aktivitám jsou i práce, které probíhají v rámci projektu TAČR na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice. Na Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě byl zahájen vývoj SW simulačního modelu pro analýzu a optimalizaci součinnosti více měničových napájecích stanic při jejich synchronizovaném řízení s cílem řízeného dělení výkonů mezi jednotlivé napájecí stanice v nejrůznějších provozních situacích na trati (více vozidel s různými výkony v různých místech trati včetně vozidel rekuperujících) – obr. 5. V úvodu vývoje tohoto SW byly provedeny analytické práce pro ověření elementárních vlastností soustavy napájecí stanice – trakční napájecí soustava - vozidlo.



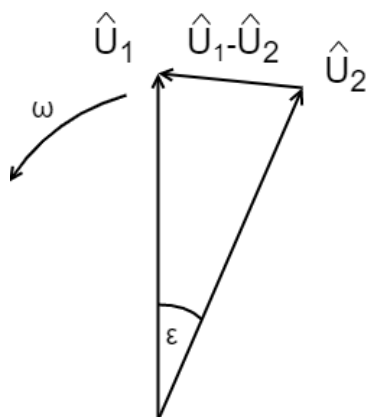
Obr. 5. Modelová situace při synchronizovaném provozu měničových napájecích stanic

Při požadavku na řízené dělení výkonů napájecích stanic je první myšlenkou zajistit dělení výkonů mezi jednotlivé napájecí stanice změnou napěťových spádů mezi jednotlivými napájecími stanicemi, což je možné díky říditelnosti efektivních hodnot výstupních napětí měničů. Tím je možno dosáhnout stavu, kdy je například významná část příkonu vozidla na trati pokryta dodávkou ze vzdálenější napájecí stanice z důvodu zvýšení rovnoměrnosti odběru výkonu jednotlivých napájecích stanic z energetické sítě. Jinou cestou ke zrovnoměrnění odběru výkonu napříč napájecími stanicemi je simulace impedančního změkčení jejich výstupu cestou řízení výstupního měniče. Oba popsané způsoby zrovnoměrnění odběru výkonu jsou založeny na řízení změn efektivních hodnot výstupních napětí napájecích stanic. Tento způsob synchronizace výkonů má však jeden zásadní nedostatek – řízení změnou velikosti efektivní hodnoty napětí zvyšuje kolísání efektivní hodnoty trolejového napětí, snižuje jeho stabilizaci a v případě jeho většího poklesu dochází k pokrytí potřebného výkonu vozidel vyšším proudem, a tudíž s celkově vyššími ztrátami při přenosu. Při výraznějším poklesu efektivní hodnoty napětí může dojít až k omezení výkonu vozidel, což je funkce, kterou mají moderní vozidla standardně implementovanou.

Z uvedených důvodů se tedy preferuje řízené dělení výkonů mezi napájecí stanice při konstantní efektivní hodnotě napětí, totožné na všech napájecích stanicích, avšak cestou měničem řízené změny vzájemného fázového posunutí fázorů výstupních napětí napájecích stanic – obr. 6. Na rozbor tohoto řízení jsou zaměřeny práce na Dopravní fakultě Jana Pernera.

V prvním kroku byly analyticky ověřeny nejjednodušší případy dělení výkonů mezi dvě napájecí stanice, nejprve bez trakčního odběru, jen s propojením stanic trolejovým vedením. Jsou řešeny pouze harmonické ustálené stavy, a proto byla pro řešení použita symbolicko – komplexní metoda. Pro přehlednost byly u vedení uvažovány jen podélné ohmické odpory a indukčnosti, byly zanedbány svodové odpory a parazitní kapacity vedení. Parazitní kapacity se uplatní především v přechodných jevech, které řešeny nejsou. Proudění parazitních kapacit a svodových odporů a související úbytky napětí na podélných impedancích jsou v harmonickém ustáleném stavu zanedbatelné v případě velkých proudů odebíraných hnacími vozidly.

Zanedbání příčných impedancí vedení potom umožňuje řešit úlohu v obvodu se soustředěnými parametry, tj. s podélnými parametry R a L .



Obr. 6 Nastavení fázového posunu mezi fázory napětí napájecích stanic

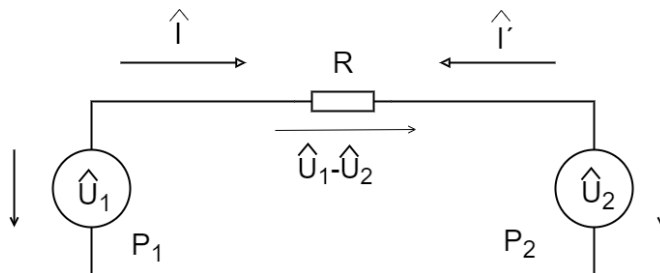
Pro získání základních představ o vlastnostech součinnosti řízení výkonů trakčních napájecích stanic prostřednictvím měničového řízení fázového posunu fázorů napájecích napětí byly analyticky postupně řešeny následující případy:

- Dvojice napájecích stanic spojená přes odpor vedení bez zátěže
- Dvojice napájecích stanic spojená přes indukčnost vedení bez zátěže
- Dvojice napájecích stanic spojená přes vedení s odporem a indukčností bez zátěže
- Dvojice napájecích stanic spojená přes odpor a indukčnost vedení se zatížením dvěma hnacími vozidly, každé vozidlo se nachází přímo u jedné napájecí stanice

První tři úlohy jsou řešeny v poměrných jednotkách pro získání obecných průběhů závislostí činných výkonů zdrojů na vzájemném fázovém posunu fázorů jejich napětí, čtvrtá úloha je již řešena pro reálnou situaci, s reálnými parametry vedení, reálným napětím a reálnými hodnotami výkonů odebíraných hnacími vozidly.

4.1 Dvojice napájecích stanic spojená přes odpor vedení bez zátěže

Situaci vystihuje obr. 7 – jedná se o obvod se dvěma zdroji harmonického napětí, které jsou spojeny přes odpor. Malý vliv vyšších harmonických složek napětí generovaných měničovou napájecí stanicí se zanedbává, situace je analyticky ve všech případech vyšetřována pouze pro 1. harmonickou složku napětí a proudu. Cílem je vyšetřit závislosti činného výkonu obou napájecích stanic – zdrojů napětí – na vzájemném fázovém posunu napětí obou zdrojů. Při výpočtech ve všech případech je uvažována zdrojová orientace výkonů, tedy kladný činný výkon daného zdroje značí, že zdroj tento výkon dodává do obvodu, záporný činný výkon značí, že zdroj tento výkon z obvodu odebírá.



Obr. 7 Obvod analyzovaný pro případ dvou zdrojů spojených přes odpor

Při výpočtech ve všech variantách je fázor napětí zdroje U_1 položen do reálné osy komplexní roviny, má tedy pouze reálnou složku. Fázor napětí zdroje U_2 je posunut o obecný úhel ϵ , přičemž kladná hodnota úhlu ϵ značí, že se okamžitá hodnota napětí prvního zdroje u_1 časově zpozdí uje za okamžitou hodnotou napětí

zdroje u_2 , záporná hodnota úhlu ε značí, že se o tento úhel časově zpožďuje průběh u_2 za průběhem u_1 , Efektivní hodnoty napětí obou zdrojů, tj. moduly obou vzájemně pootočených fázorů napětí jsou stejné – obr. 6:

$$\hat{U}_1 = |\hat{U}_1| = U_1 \quad \hat{U}_2 = |\hat{U}_2| \cdot e^{j\varepsilon} = U_2 \cdot e^{j\varepsilon} = U_1 \cdot e^{j\varepsilon} = U_1 \cdot (\cos \varepsilon + j \cdot \sin \varepsilon) \quad (1)$$

V souladu se značením v obr. 7 pro činný výkon zdroje P_1 bude platit:

$$P_1 = \operatorname{Re}[\hat{U}_1 \cdot \hat{I}^*] = \operatorname{Re}\left[\hat{U}_1 \cdot \left(\frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_2}{R}\right)^*\right] = \operatorname{Re}\left[\hat{U}_1 \cdot \left(\frac{U_1 - U_1 \cdot \cos \varepsilon + j \cdot \sin \varepsilon}{R}\right)\right] = \frac{U_1^2}{R} \cdot (1 - \cos \varepsilon) \quad (2)$$

Ve výše uvedeném vztahu (2) značí Re reálnou část komplexního čísla, j je imaginární jednotka a symbolem hvězdičky v horním indexu je označeno, že se jedná o číslo komplexně sdružené.

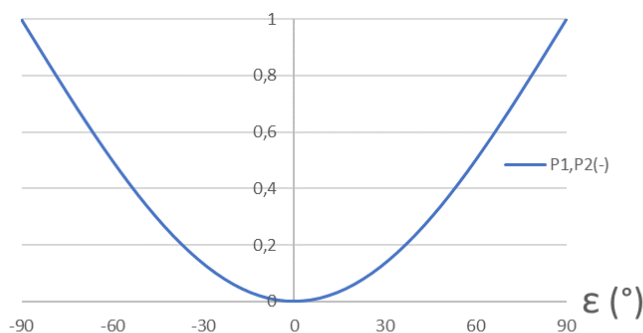
Obdobně lze odvodit vztah pro činný výkon P_2 :

$$P_2 = \operatorname{Re}[\hat{U}_2 \cdot \hat{I}^*] = \operatorname{Re}\left[\hat{U}_2 \cdot \left(\frac{\hat{U}_2 - \hat{U}_1}{R}\right)^*\right] = \frac{U_1^2}{R} \cdot (1 - \cos \varepsilon) \quad (3)$$

Jak je zřejmé z obr. 7, pro fázory proudů platí:

$$\hat{I} = -\hat{I}' \quad (4)$$

Ze vztahů (2) a (3) je zřejmé, že činné výkony P_1 a P_2 obou zdrojů dodávané do obvodu jsou totožné a jsou závislé na kosinu fázového posunu mezi oběma fázory napětí. Fyzikálně je situace taková, že činné výkony obou zdrojů dodávané do obvodu se mění na ztrátové teplo v odporu, přes který jsou spojeny, celkový tepelný výkon odporu je dán $P_1 + P_2$. Na obrázku 8 je graficky vyjádřena závislost podle ve vztahů (2) a (3) v intervalu úhlů -90° až $+90^\circ$, v grafu se závislosti činného výkonu pro oba zdroje překrývají.



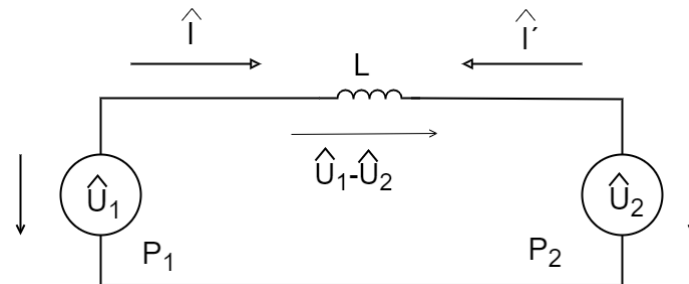
Obr. 8 Závislost výkonů dvou zdrojů napětí na fázovém posunu jejich napětí při spojení přes R (výkon v poměrných jednotkách)

4.2 Dvojice napájecích stanic spojená přes indukčnost vedení bez zátěže

Situaci pro výpočet dvou zdrojů spojených přes ideální cívku znázorňuje obr. 9. Výpočet bude proveden za analogických podmínek, jako v odstavci 4.1 a cílem je opět výpočet činných výkonů dvou zdrojů P_1 a P_2 v závislosti na fázovém posunu jejich fázorů napětí.

V souladu s předchozím značením a se značením na obr. 9 pro činný výkon prvního zdroje P_1 platí:

$$P_1 = \operatorname{Re}[\hat{U}_1 \cdot \hat{I}^*] = \operatorname{Re}\left[\hat{U}_1 \cdot \left(\frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_2}{j \cdot \omega \cdot L}\right)^*\right] = \operatorname{Re}\left[\hat{U}_1 \cdot \left(\frac{U_1 - U_1 \cdot \cos \varepsilon + j \cdot \sin \varepsilon}{j \cdot \omega \cdot L}\right)\right] = -\frac{U_1^2}{\omega \cdot L} \cdot \sin \varepsilon \quad (5)$$



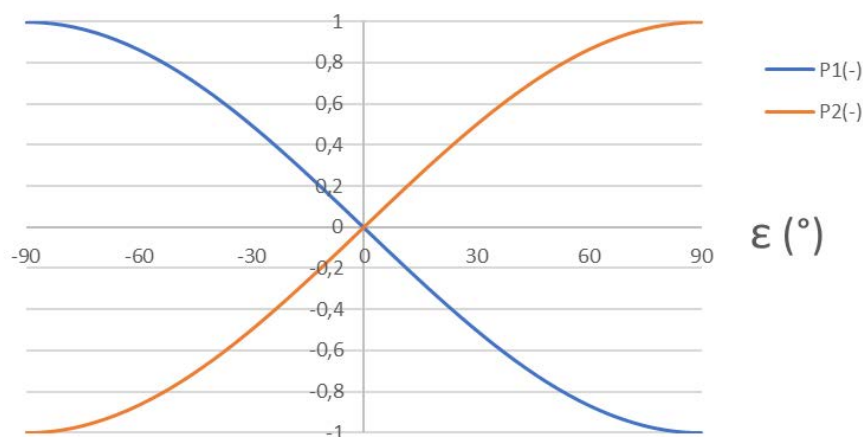
Obr. 9 Obvod analyzovaný pro případ dvou zdrojů spojených přes ideální cívku

Ve vztahu (5) značí ω úhlovou frekvenci napětí a proudu v obvodu.

Obdobně lze odvodit vztah pro činný výkon P_2 :

$$P_2 = \operatorname{Re}[\hat{U}_2 \cdot \hat{I}^*] = \operatorname{Re}\left[\hat{U}_2 \cdot \left(\frac{\hat{U}_2 - \hat{U}_1}{j \cdot \omega \cdot L}\right)^*\right] = \frac{U_1^2}{\omega \cdot L} \cdot \sin \varepsilon \quad (6)$$

Na obrázku 10 jsou graficky vyjádřeny závislosti podle ze vztahů (5) a (6) v intervalu úhlů -90° až $+90^\circ$.

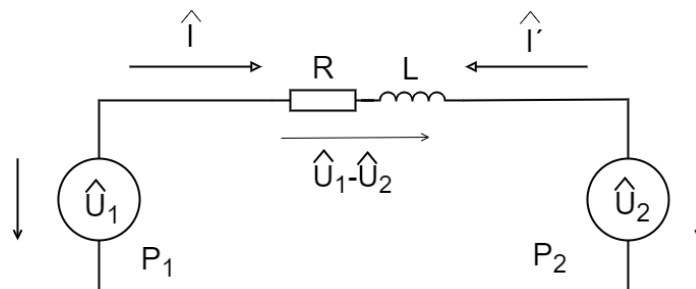


Obr. 10 Závislosti výkonů dvou zdrojů napětí na fázovém posunu jejich napětí při spojení přes L (výkon v poměrných jednotkách)

Z výše uvedeného je zřejmé, že jsou-li dva zdroje harmonického napětí se stejnou efektivní hodnotou spojeny přes ideální indukčnost, je závislost jejich činného výkonu na vzájemném fázovém posunu jejich průběhů sinusová se vzájemně opačným znaménkem. Vzhledem k tomu, že indukčnost má jen jalový výkon, činné výkony obou zdrojů se mohou vyměňovat jen mezi sebou navzájem, tedy činný výkon dodávaný jedním zdrojem je odebrán druhým zdrojem a celkový činný výkon obou zdrojů je nulový. Je zřejmé, že zdroj, jehož průběh napětí je zpožděn v čase, činný výkon odebrává, druhý ze zdrojů stejně velký činný výkon dodává. Řízením vzájemného fázového posunu napětí obou zdrojů lze tedy řídit velikost i směr činného výkonu, který si oba zdroje vyměňují.

4.3 Dvojice napájecích stanic spojená přes vedení s odporem a indukčností bez zátěže

Výpočty a závislosti z předchozích částí lze rozšířit pro případ, že jsou oba zdroje napětí spojeny přes sériovou kombinaci rezistoru a indukčnosti – obr. 11. Tento případ by odpovídal spojení dvou napájecích stanic vedením s induktivní a odporovou složkou. Výpočet bude proveden za analogických podmínek, jako v odstavci 4.1 a cílem je opět výpočet činných výkonů dvou zdrojů P_1 a P_2 v závislosti na fázovém posunu jejich fázorů napětí.



Obr. 11 Obvod analyzovaný pro případ dvou zdrojů spojených přes sériovou kombinaci RL

V souladu s předchozím značením a se značením na obr. 11 pro činný výkon prvního zdroje P_1 platí:

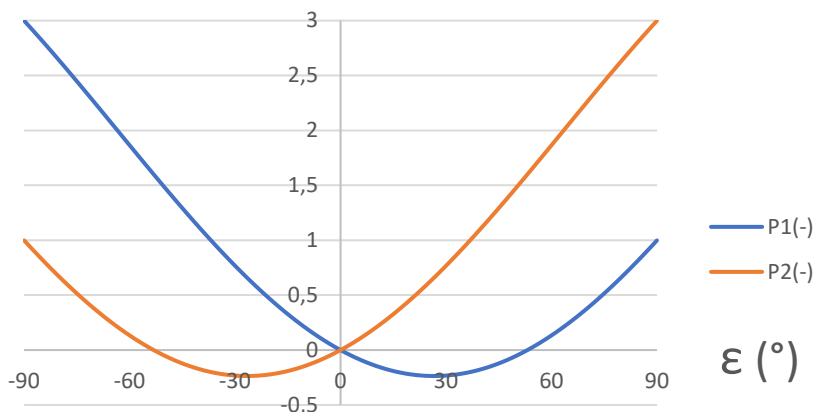
$$P_1 = \operatorname{Re}[\hat{U}_1 \cdot \hat{I}^*] = \operatorname{Re}\left[\hat{U}_1 \cdot \left(\frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_2}{R + j \cdot \omega \cdot L}\right)^*\right] = \operatorname{Re}\left[\hat{U}_1 \cdot \left(\frac{U_1 - U_1 \cdot \cos \varepsilon + j \cdot \sin \varepsilon}{R + j \cdot \omega \cdot L}\right)\right] = \quad (7)$$

$$= \frac{U_1^2}{R^2 + (\omega \cdot L)^2} (R \cdot (1 - \cos \varepsilon) - \omega \cdot L \cdot \sin \varepsilon)$$

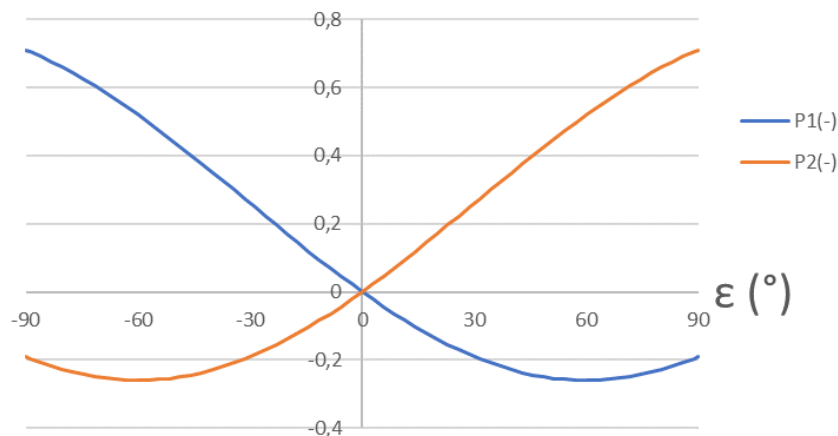
Obdobně lze odvodit vztah pro činný výkon P_2 :

$$P_2 = \operatorname{Re}[\hat{U}_2 \cdot \hat{I}^*] = \operatorname{Re}\left[\hat{U}_2 \cdot \left(\frac{\hat{U}_2 - \hat{U}_1}{R + j \cdot \omega \cdot L}\right)^*\right] = \frac{U_1^2}{R^2 + (\omega \cdot L)^2} \cdot (R \cdot (1 - \cos \varepsilon) + \omega \cdot L \cdot \sin \varepsilon) \quad (8)$$

Na obrázku 12 jsou graficky vyjádřeny závislosti podle ze vztahů (7) a (8) v intervalu úhlů -90° až $+90^\circ$ pro případ, kdy platí $R > \omega L$, na obrázku 13 jsou analogické závislosti pro případ, kdy $R < \omega L$.



Obr. 12 Závislosti výkonů dvou zdrojů napětí na fázovém posunu jejich napětí při spojení přes RL pro případ $R > \omega L$ (výkon v poměrných jednotkách)

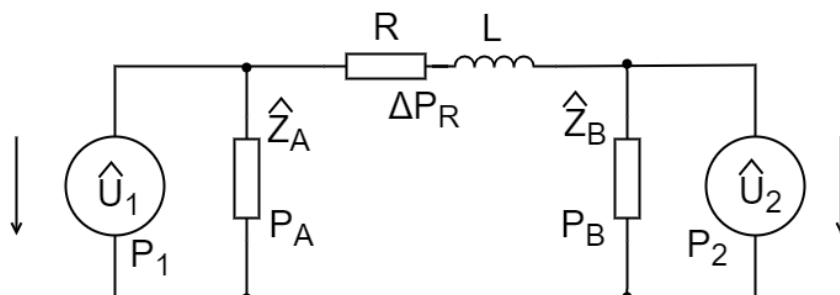


Obr. 13 Závislosti výkonů dvou zdrojů napětí na fázovém posunu jejich napětí při spojení přes RL pro případ $R < \omega L$ (výkon v poměrných jednotkách)

Ze vztahů (7) a (8) a z obr. 12 a 13 je zřejmé, že závislost činných výkonů obou zdrojů na vzájemném posunu jejich napětí při stejné efektivní hodnotě při jejich spojení přes RL je dána součtem závislosti odpovídající charakterem čistě odporovému propojení (složka závislá na $1 - \cos \epsilon$) a čistě induktivnímu propojení (složka závislá na $\sin \epsilon$). Složky činných výkonů obou zdrojů odpovídající odporovému propojení jsou totožné, oba zdroje se stejným dílem podílejí na pokrytí ztrátového výkonu odporu R. Složky činných výkonů zdrojů závislé na $\sin \epsilon$ opět odpovídají výměně výkonů mezi oběma zdroji. Ze vztahů (7) a (8) a z obr. 12 a 13 vyplývá, že pro případ $R > \omega L$ převáží velikost ztrátového výkonu v odporu R nad výkonem vyměňovaným vzájemně mezi oběma zdroji při úhlu $\epsilon < 90^\circ$ (průsečík závislosti s vodorovnou osou), pro případ $R < \omega L$ převáží velikost ztrátového výkonu v odporu R při úhlu $\epsilon > 90^\circ$.

4.4 Dvojice napájecích stanic spojená přes odpor a indukčnost vedení se zatížením dvěma hnacími vozidly, každé vozidlo se nachází přímo u jedné napájecí stanice

Předchozí případy závislostí činných výkonů dvou napěťových zdrojů na fázovém posunu ϵ mezi jejich fázory napětí byly řešeny bez zatížení zátěží odpovídající hnacím vozidlům na trati. Analyticky lze pro výše uvedená zjednodušení (zanedbání kapacity a svodového odporu vedení) velice dobře znázornit princip synchronizovaného řízení výkonů dvou měničových napájecích stanic s přítomností dvou hnacích vozidel. Řešenou situaci vystihuje obr. 14. Zde je vedení mezi napájecími stanicemi reprezentováno odporem a indukčností, přičemž hnací vozidla s činnými příkony P_A a P_B se obě nacházejí vždy u jedné napájecí stanice. Na obr. 14 jsou vozidla reprezentována impedancemi Z_A a Z_B . V případě moderních vozidel lze díky měničové výzbroji předpokládat jejich účinník velmi blízký jedné, obě impedance mají tedy prakticky činný charakter.



Obr. 14 Obvod reprezentující dvě měničové napájecí stanice, přičemž u každé napájecí stanice se právě nachází trakční vozidlo, vedení mezi stanicemi je reprezentováno článkem RL

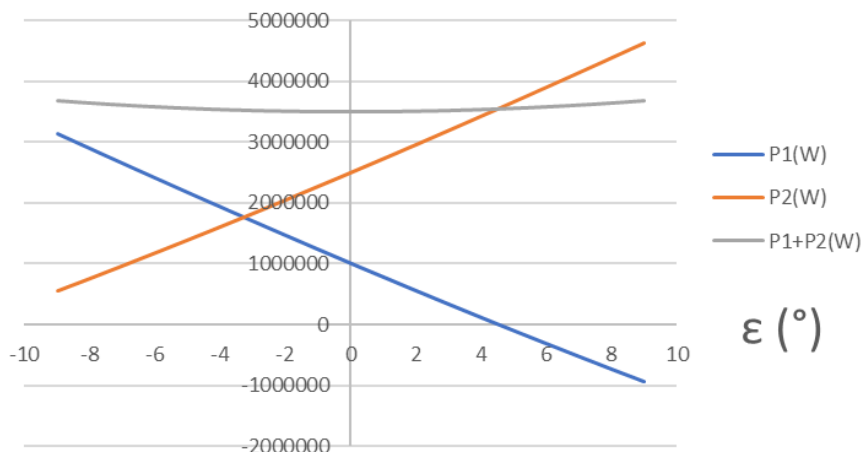
Pro analytické vyjádření činného výkonu P_1 první napájecí stanice lze psát vztah, který vychází ze vztahu (7) a k výrazu je přičten výkon P_A odpovídajícího trakčního vozidla:

$$P_1 = P_A + \frac{U_1^2}{R^2 + (\omega \cdot L)^2} (R \cdot (1 - \cos \varepsilon) - \omega \cdot L \cdot \sin \varepsilon) \quad (9)$$

Analogicky pro činný výkon P_2 druhé napájecí stanice platí:

$$P_2 = P_B + \frac{U_1^2}{R^2 + (\omega \cdot L)^2} \cdot (R \cdot (1 - \cos \varepsilon) + \omega \cdot L \cdot \sin \varepsilon) \quad (10)$$

Závislosti odpovídající vztahům (9) a (10) jsou na obr. 15 vyneseny pro detail reprezentovaný menším rozsahem úhlu ε . Výkony napájecích stanic P_1 a P_2 jsou zde udávány ve W. Zároveň jsou tyto závislosti parametrovány na reálné poměry na železniční trati, tj. $U_1 = 25$ kV. Hodnoty odporu a reaktance vedení odpovídají jednokolejné trati, součet impedance vedení a zpětné cesty je v tomto případě v interních drážních předpisech uvažován $0,26 + j0,45 \Omega/\text{km}$. Reálné vzdálenosti mezi měničovými napájecími stanicemi lze uvažovat v rozmezí 40 až 80 km, v modelovém výpočtu je uvažována vzdálenost mezi měničovými napájecími stanicemi 80 km. Činný výkon P_A hnacího vozidla nacházejícího se u první napájecí stanice je 1 MW, činný výkon P_B hnacího vozidla nacházejícího se u druhé napájecí stanice je 2,5 MW.

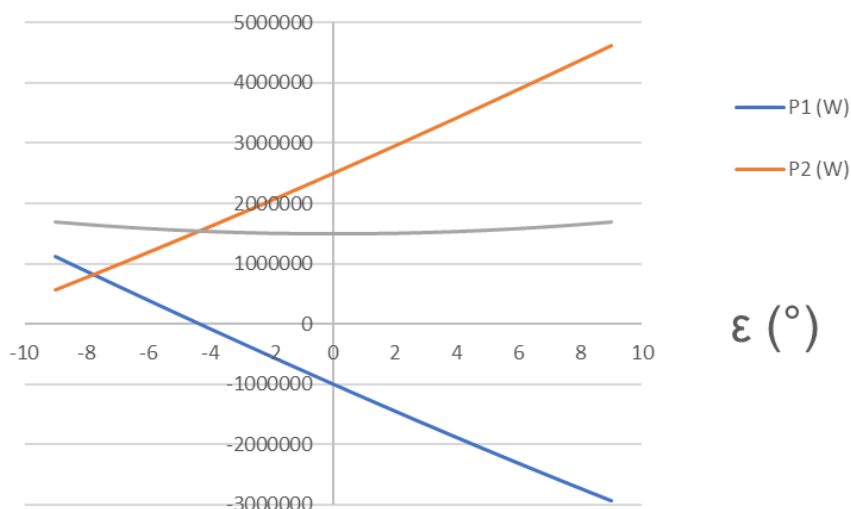


Obr. 15 Závislosti výkonů dvou napájecích stanic na fázovém posunu jejich napětí při spojení přes RL a při zatížení výkony hnacích vozidel P_A a P_B u napájecích stanic

Z obr. 15 je zřejmé, že při nulovém fázovém posunu napětí ε obou napájecích napětí dodává každá napájecí stanice činný výkon rovný výkonu vozidla, které se u napájecí stanice nachází. Existuje zde tedy nerovnoměrnost odběru energie dílčích napájecích stanic z energetické distribuční sítě. Zpozdí-li se při totožné efektivní hodnotě napětí obou napájecích stanic fázor napětí více zatížené stanice za fázorem méně zatížené napájecí stanice, začne vedením protékat vyrovnávací proud, který odlehčuje více zatíženou napájecí stanici, činný výkon této napájecí stanice klesá, činný výkon méně zatížené napájecí stanice roste. Z obr. 15 je zřejmé, že dodávky činného výkonu P_1 první napájecí stanice a P_2 druhé napájecí stanice se vyrovnají při zpoždění fázoru napětí druhé napájecí stanice U_2 za fázorem napětí první napájecí stanice U_1 přibližně o 3° . Při dalším zvyšování úhlového zpoždění U_2 za U_1 by již činný výkon P_1 převyšoval P_2 . Je tedy zřejmé, že řízením vzájemného fázového posunu fázorů napětí obou napájecích stanic lze při konstantní a totožné efektivní hodnotě jejich napětí měnit velikost dodávky jejich činných výkonů nezávisle na odběrech výkonů hnacích vozidel P_A a P_B a to i v případě, že se přímo u každé napájecí stanice nachází jedno vozidlo.

Šedá křivka v obr. 15 je součtový výkon obou napájecích stanic $P_1 + P_2$. Je zřejmé, že závislost tohoto celkového výkonu na úhlu ε vykazuje extrém - minimum - pro úhel $\varepsilon = 0^\circ$, na obě strany od této hodnoty celkový výkon mírně roste. Při úhlu $\varepsilon = 0^\circ$ je celkový činný výkon dán prostým součtem výkonů obou hnacích vozidel $P_A + P_B$, při rostoucí velikosti úhlu ε v obou polaritách se celkový výkon napájecích stanic $P_1 + P_2$ mírně zvyšuje, což je dáno růstem ztrát v odporu vedení a zpětné cesty při uzavírání vyrovnávacího proudu.

Při vyrovnání činných výkonů obou napájecích stanic, tedy při úhlu $\varepsilon = -3,3^\circ$, je součet činných výkonů obou napájecích stanic 3587 kW. Celkový činný příkon hnacích vozidel $P_A + P_B$ je 3500 kW. Ztráty na vedení a zpětné cestě vzniklé vlivem vyrovnávacího proudu jsou rovny 87 kW, což je 2,5 % z přenášeného výkonu. Tato hodnota je v relaci se ztrátami při přenosu v soustavě 25 kV 50 Hz, které se pohybují v hodnotách jednotek %.



Obr. 16 Závislosti výkonů dvou napájecích stanic na fázovém posunu jejich napětí při spojení přes RL a při zatížení výkony hnacích vozidel P_A a P_B u napájecích stanic, jedno z vozidel rekuperuje výkon 1000 kW

Na obr. 16 je případ analogický k případu na obr. 15, avšak s tím rozdílem, že vozidlo s výkonem P_A výkon 1000 kW rekuperuje. Řízením fázového posunu fázorů napětí lze opět řídit dílčí výkony napájecích stanic P_1 a P_2 . V případě podle obr. 16 však dojde k vyrovnání výkonů napájecích stanic až při úhlu ε v okolí -8° .

5 ZÁVĚR

Vzhledem k nedostatečným parametrům trakčního napájení stejnosměrným napětím 3 kV 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 tratí vysokorychlostních jen soustavou 25 kV 50 Hz. Pro tyto rozsáhlé investiční akce jsou zpracovávány odpovídající koncepční dokumenty včetně časových harmonogramů. V současnosti je v ČR již připravena první investiční akce zaměřená na konverzi napájecího systému. Pro tuto akci jsou již vysoutěženi klíčoví dodavatelé a je rozpracovávána projektová dokumentace. Jedná se 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 měničny 3 kV stejnosměrné. Druhá napájecí stanice bude realizována jako přístavba k současné drážní měničně pro systém 3 kV stejnosměrných u stanice Říkovice v blízkosti nového styku obou trakčních soustav.

Aktivita Dopravní fakulty Jana Pernera jsou příspěvkem k analýze a implementaci nových technologií drážního napájení 25 kV 50 Hz v podmínkách ČR. Předložený článek představuje teoretický, analyticky

snadno řešitelný, základ k principu funkce synchronizovaného řízení měničových napájecích stanic. Pro širší spektrum výpočtů zahrnujících nejrůznější provozní situace, je však nereálné uplatnit analytické řešení. Z toho důvodu je na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice vyvíjen simulační model, který bude provádět analýzu synchronizovaného napájení trakční sítě měničovými napájecími stanicemi, v závislosti na aktuální dopravní situaci na trati, a bude umožňovat i analýzu dynamiky zpětnovazebních akčních zásahů při synchronizovaném řízení výkonového zatížení jednotlivých napájecích stanic.

Poděkování

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

Literatura

Fernando Martinez-RodrigoSantiago de PabloL. Carlos Herrero-de Lucas. **2015**. Current control of a modular multilevel converter for HVDC applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 83, s. 318-331.

Firemní materiály SIEMENS

Hasan, N. S., Rosmin, N., Osman, D., Musta'amal, A., H. **2017**. Reviews on multilevel converter and modulation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, s. 163-175.

Koncepce přechodu na jednotnou napájecí soustavu ve vazbě na priority programového období 2014-2020 a naplnění. **2016**. Studie zpracovaná SUDOP Praha a.s.

Změna trakční soustavy na AC 25kV, 50Hz v úseku Nedakonice - Říkovice. **2016**. Studie zpracovaná SUDOP Brno s.r.o.