

ANALÝZA ŘÍZENÍ VÝKONŮ MĚNIČOVÝCH NAPÁJECÍCH STANIC V TRAKČNÍ SOUSTAVĚ 25 KV 50 HZ

POWER CONTROL ANALYSE OF CONVERTER SUPPLY STATIONS IN TRACTION SYSTEM 25KV 50 HZ

Jaroslav Novák, Dušan Čermák, Ladislav Mlynařík

prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc., Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika, jaroslav.novak@upce.cz

Ing. Dušan Čermák, Ph.D., Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika, dusan.cermak@upce.cz

Ing. Ladislav Mlynařík, Ph.D., Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika, ladislav.mlynarik@upce.cz

Abstrakt: V železničních trakčních systémech 25 kV 50 Hz se v ČR připravuje aplikace napájecích stanic s řízenými vysokonapětovými polovodičovými měniči. Významnými výhodami měničových napájecích stanic jsou možnost dvoustranného napájení trakčního vedení a řízené omezování výkonového zatížení napájecích stanic. V článku je prezentována simulační analýza trakčního dvoustranného napájení a hlavní vlastnosti systému při napájení vlakových souprav. Jsou analyzovány některé provozní situace z hlediska výkonového zatížení napájecích stanic a z hlediska ztrát při přenosu energie trakčním vedením.

Abstract: In railway traction systems 25 kV 50 Hz, applications of power supply stations with controlled high-voltage semiconductor converters are being prepared in the Czech Republic. Significant advantages of converter power supply stations are the possibility of double-side supply of traction line and controlled limitation of the power load of power supply stations. The article presents a simulation analysis of traction double-side power supply and the main properties of the system when trains are supplied. Some operating situations are analyzed in terms of power load of power stations and in terms of losses in power transmission in the traction line.

1. ÚVOD

S podporou projektu TAČR Zvyšování efektivity železniční dopravy v rámci energetické optimalizace systému multimodální mobility 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, a které 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, [1], [2], [3].

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).

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 často nereálné a to především z důvodu striktního požadavku na omezení nesymetrického odběru 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 traťových úseků s izolovanými neutrálními poli s dopady souvisejícími s poklesem napětí a disponibilního výkonu na koncích úseků a přerušování dodávky 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. Taková 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 [1], [2], [3].

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

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. Blokova 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 Blokova struktura měničové napájecí stanice

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, který pracuje se šířkově pulsní modulací. 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 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.

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

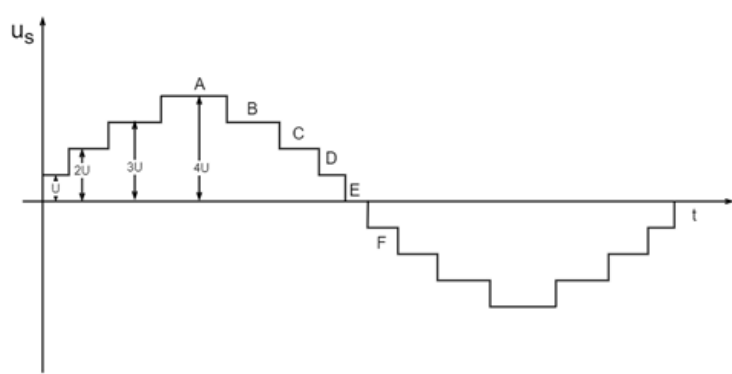
- Měničové napájecí stanice představují pro distribuční energetickou síť symetrickou zátěž.
- Měničové napájecí stanice odebírají ze sítě díky vícehladinovému zapojení měničových struktur a díky šířkově pulsní modulaci téměř sinusový proud.
- Měničové napájecí stanice mají říditelný účinník na straně 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 (předpokládáné 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 energie vlaků, při dvoustranném napájení trat'ových 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, 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 [1], [4], 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.

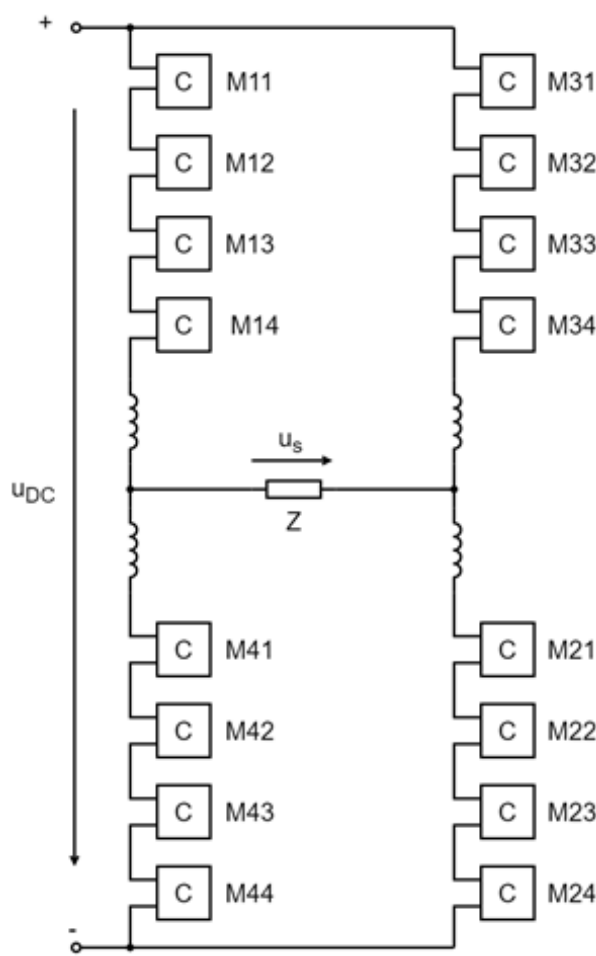
V měničových napájecích stanicích se modulární vícehladinové měniče používají jak ve funkci vstupních třífázových pulsních usměrňovačů, tak ve funkci jednofázových výstupních střídačů. Základní principy fungování modulárního vícehladinového měniče zde budou přiblíženy na příkladu pětihladinového jednofázového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



Obr. 2 Výstupní napětí jednofázového pětihladinového modulárního střídače při obdélníkovém 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 napěťových 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.

V jednotlivých větvích obvodu 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.



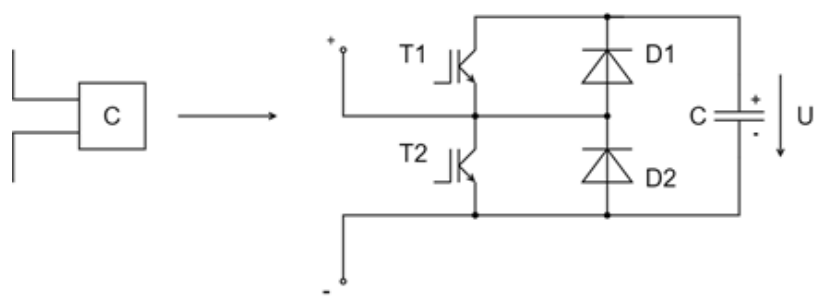
Obr. 3 Principiální zapojení pětihladinového modulárního střídače

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 napěťové 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.

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.



Obr. 4 Praktická realizace jednoho spínacího modulu modulárního vícehladinového měniče

V případě třífázového modulárního vícehladinového měniče je zapojení na obr. 3 doplněno ještě o další větev – fázi 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 řádech 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.

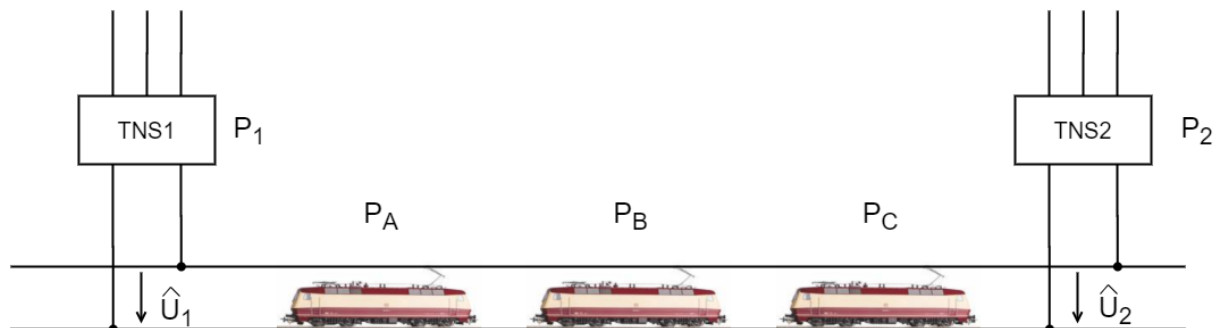
Měničové napájecí stanice a měničové bloky jsou koncipovány pro výkony desítek MVA, zpravidla 10 až 30 MVA. V jedné měničové napájecí stanici lze řídit více struktur podle obr. 1 paralelně. Měničové struktury jsou vybaveny vodním chlazením. V případě měničových napájecích stanic s modulárními vícehladinovými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

Podrobnější informace o vícehladinových měničích lze nalézt v [4], [5].

4. PŘÍKLAD ANALYTICKÉHO ŘEŠENÍ SYNCHRONIZOVANÉHO ŘÍZENÍ 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.

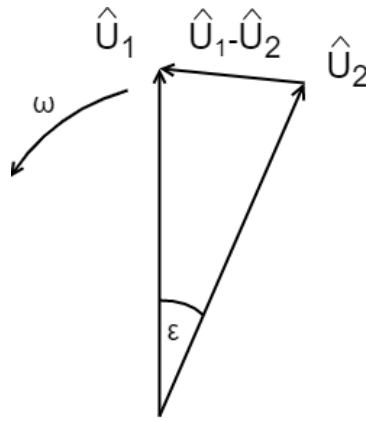


Obr. 5. Modelová situace při synchronizovaném provozu měničových napájecích stanic

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 zrovnomnění odběru výkonu napříč napájecími stanicemi je simulace impedančního změkčení jejich výstupu cestou řízení výstupního měniče. Oba popsané způsoby zrovnomnění 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 omezování 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.

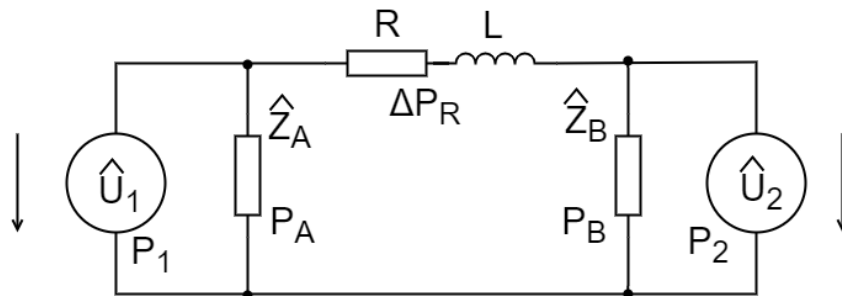
V prvním kroku byly analyticky ověřeny nejjednodušší případy dělení výkonů mezi dvě napájecí stanice. Analyticky lze přehledně řešit jen vybrané jednoduché provozní situace. Jsou řešeny pouze harmonické ustálené stavy, a proto byla pro řešení použita symbolicko – komplexní metoda. U soustavy 25 kV 50 Hz lze v určitém přípustném zjednodušení uvažovat 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. Proudů 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. jen s podélnými parametry vedení 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 je zde prezentováno analytické řešení speciálního případu - dvojice napájecích stanic spojená přes odpor a indukčnost vedení se zatížením dvěma hnacími vozidly, přičemž každé vozidlo se nachází přímo u jedné napájecí stanice. Úloha je řešena pro reálnou situaci, s reálnými parametry vedení, reálným napětím a reálnými hodnotami výkonů odebíraných hnacími vozidly.

Řešenou situaci vystihuje obr. 7. 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. 7 jsou vozidla reprezentována impedancemi Z_A a Z_B . V případě moderních vozidel lze díky měničové výzbroji předpokládat jejich účinnost velmi blízký jedné, obě impedance mají tedy v tomto případě prakticky činný charakter.



Obr. 7 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 součtu výkonu P_A odebíraným prvním vozidlem a výkonu, který je do tohoto bodu přenášen z druhé napájecí stanice přes vedení:

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

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

(1)

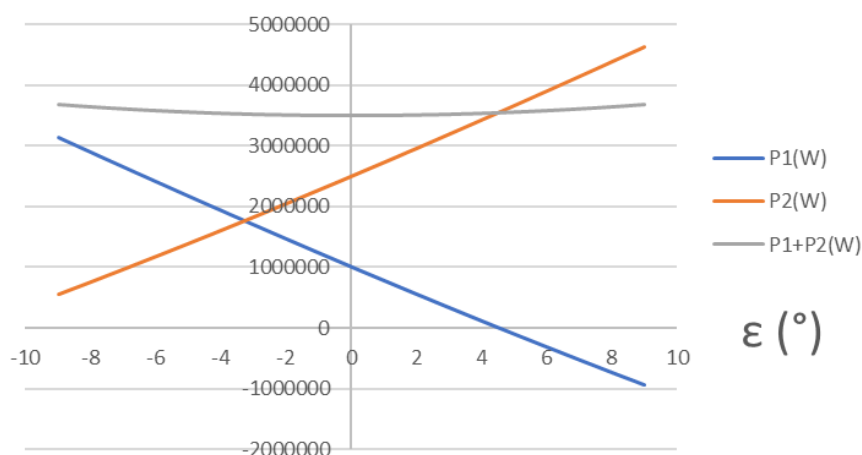
Ve vztahu (1) je U_1 efektivní hodnota napětí první napájecí stanice, U_2 je efektivní hodnota napětí druhé napájecí stanice, R a L jsou odpor a indukčnost vedení mezi napájecími stanicemi, ω je úhlová frekvence napětí a ε je vzájemný fázový posun fázorů napětí obou napájecích stanic. Pro tyto fázory napětí platí:

$$\hat{U}_1 = |\hat{U}_1| = U_1 \quad \hat{U}_2 = |\hat{U}_2| \cdot e^{j\varepsilon} = U_2 \cdot e^{j\varepsilon} = U_1 \cdot e^{j\varepsilon} = U_1 \cdot (\cos \varepsilon + j \cdot \sin \varepsilon) \quad (2)$$

Analogicky ke vztahu (1) pro činný výkon P_2 druhé napájecí stanice platí:

$$P_2 = P_B + \frac{U_1^2}{R^2 + (\omega \cdot L)^2} \cdot (R \cdot (1 - \cos \varepsilon) + \omega \cdot L \cdot \sin \varepsilon) \quad (3)$$

Závislosti odpovídající vztahům (1) a (3) jsou na obr. 8 vyneseny pro detail reprezentovaný vymezeným 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 dokumentech uvažován $0,26 + j0,55 \Omega/\text{km}$. 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.



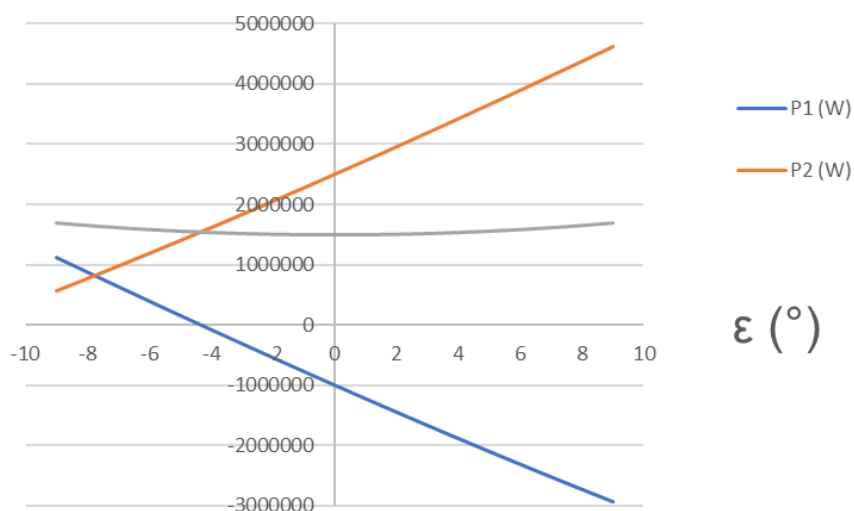
Obr. 8 Závislosti výkonů dvou napájecích stanic na fázovém posunu jejich napětí při spojení přes RL a při zatížení výkony hnacích vozidel P_A a P_B u napájecích stanic

Z obr. 9 je zřejmé, že při nulovém fázovém posunu 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 úhlově se při totožné efektivní hodnotě napětí obou napájecích stanic fázor napětí více zatížená stanice za fázorem méně zatížená napájecí stanice, začne vedením protékat vyrovnávací proud, který odlehčuje více zatíženou napájecí stanici, činný výkon této napájecí stanice klesá, činný výkon méně zatížená napájecí stanice roste. Z obr. 8 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. 8 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. 9 Závislosti výkonů dvou napájecích stanic na fázovém posunu jejich napětí při spojení přes RL a při zatížení výkonu hnacích vozidel P_A a P_B u napájecích stanic, jedno z vozidel rekuperuje výkon 1000 kW

Na obr. 9 je případ analogický k případu na obr. 8, avšak s tím rozdílem, že vozidlo s výkonem P_A výkon 1000 kW rekuperuje. Řízením fázového posunu fázorů napětí lze opět řídit dílčí výkon napájecích stanic P_1 a P_2 . V případě podle obr. 9 však dojde k vyrovnání výkonů napájecích stanic až při úhlu ε v okolí -8° .

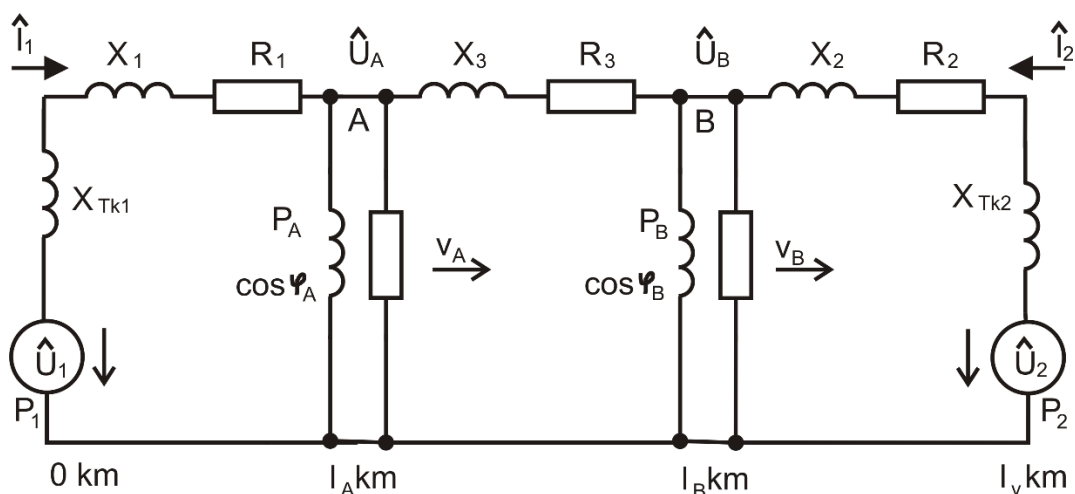
5. PŘÍKLAD STATICKÉHO SIMULAČNÍHO SYNCHRONIZOVANÉHO ŘÍZENÍ NAPÁJECÍCH STANIC

Počet a rozložení vozidel na trati může být velmi různorodé, navíc se při provozu vlaků mění jejich pozice na trati a s ní i velikosti impedancí vedení vůči napájecím stanicím i mezi jednotlivými vlaky navzájem. Při jízdě vlaku se mění odebíraný výkon v čase v závislosti na traťových poměrech, jízdních odporech a v závislosti na aktuálním jízdním režimu. U starších hnacích vozidel pro trakční soustavu 25 kV 50 Hz se v čase mění i účinník vozidla a harmonické spektrum odebíraného proudu. U novějších vozidel se vstupními pulsními usměrňovači je účinník řízen na téměř jednotkovou hodnotu a průběh proudu odebíraného z troleje je téměř sinusový, jen s malým harmonickým zkreslením způsobeným činností měničů se šířkově pulsní modulací na lokomotivě. Uvedené široké spektrum provozních

situaci není již snadno řešitelné analytickými metodami, proto je na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice vyvíjen výpočetní SW v prostředí Matlab, který provádí efektivně analýzu zadaných provozních situací. První skupina programově řešených úloh je zobecněním úlohy v oddílu 4 tohoto článku. Jedná se tedy o vyšetření zejména výkonových poměrů na traťovém úseku mezi dvěma měničovými napájecími stanicemi, úsek je tedy napájen dvoustanně. V současné fázi vývoje výpočetního SW je možno předemtný SW nástroj charakterizovat takto:

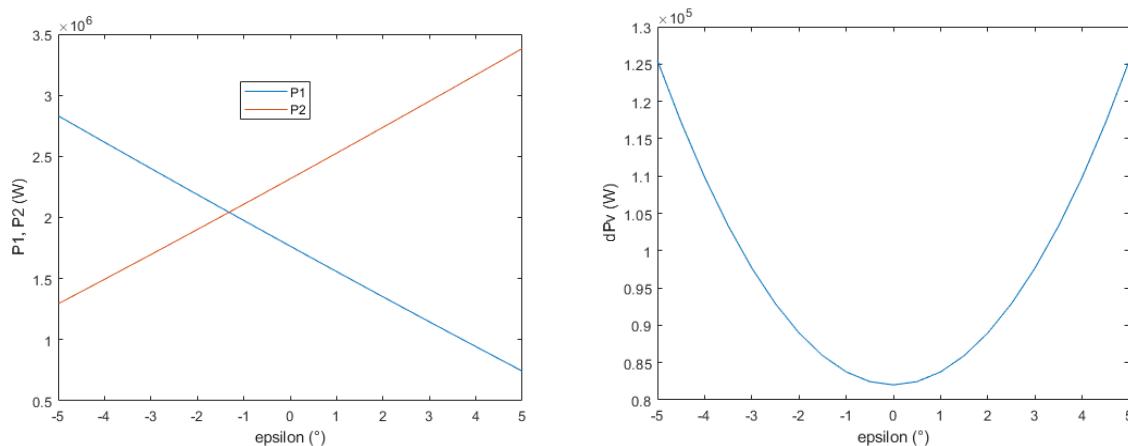
- Dvě měničové napájecí stanice s napětími U_1 a U_2 , napětí jsou popsána podle vztahu (2).
- Při výpočtech se uvažují pouze první harmonické složky napětí a proudů.
- Vedení je charakterizováno pouze sériovou kombinací odporu a indukčnosti, zanedbává se kapacita vedení a svod vedení, obvod je tedy možno řešit se soustředěnými parametry.
- Jsou uvažovány konstantní hodnoty odporů a indukčností, u vedení je uvažována měrná impedance $0,26 + j0,55 \Omega/\text{km}$, která odpovídá jednokolejné trati. Je tedy uvažován lineární obvod. Impedance zpětné cesty, tedy kolejnic, příp. země, se zanedbává.
- Obvod je řešen v harmonickém ustáleném stavu, neboť změna parametrů vedení před vlakem a za vlakem je při pohybu vlaku relativně pomalá. Jsou tedy splněny podmínky pro řešení úlohy symbolicko-komplexní metodou.
- Na traťovém úseku mezi napájecími stanicemi se nacházejí dvě vlakové soupravy, každá souprava je charakterizována okamžitým odebíraným činným příkonem a účínkem, po obvodové stránce je vlak simulován jako paralelní kombinace rezistoru a cívky. Vyčíslení aktuálních hodnot náhradního odporu a indukčnosti vlaku ze zadaných hodnot příkonu a účínku se uskutečňuje iteračně ve čtyřech krocích.
- Situace je řešena pro jeden časový bod charakterizovaný výkonem, účínkem a polohou soupravy na trati a z toho vyplývajících impedančních poměrů.

Prozatím rozpracovaná verze SW předpokládá dvě vlakové soupravy v traťovém úseku, úloha je tedy řešena pro dva uzly odpovídající umístění vlaků na trati. Je použita metoda uzlových napětí. Popsanou situaci znázorňuje na obvodové úrovni obr. 10.

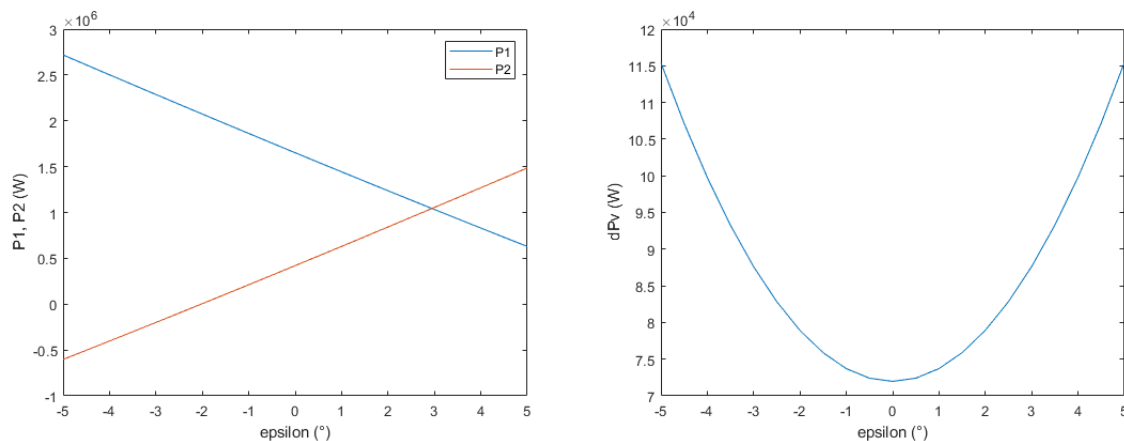


Obr. 10 Obvodový model situace se dvěma vlakovými soupravami mezi dvěma měničovými napájecími stanicemi při dvoustanném napájení traťového úseku

V obr. 10 značí U_1 první napájecí stanici, resp. její napětí, U_2 druhou napájecí stanici, resp. její napětí, X_{TK1} a X_{TK2} značí vnitřní reaktance napájecích stanic, X_1 , X_2 a X_3 jsou reaktance vedení u první, resp. druhé napájecí stanice resp. mezi dvěma vlakovými soupravami, R_1 , R_2 a R_3 jsou analogicky odpory jednotlivých úseků vedení, P_1 a P_2 jsou činné výkony dodávané jednotlivými napájecími stanicemi, I_1 a I_2 jsou proudy dodávané jednotlivými napájecími stanicemi, P_A a P_B jsou činné výkony odebírané jednotlivými vlakovými soupravami A a B, $\cos\varphi_A$ a $\cos\varphi_B$ jsou účinníky, při kterých jsou odebírány příkony vlakových souprav. U_A a U_B jsou napětí na sběrači vlakových souprav, tedy řešená uzlová napětí. Symboly v_A a v_B značí rychlosti vlakových souprav, pohyb vlakových souprav při řešení úlohy bude uvažován v následujícím oddíle 6 tohoto článku.



Obr. 11 Závislosti činných výkonů napájecích stanic a ztrátového výkonu na vedení na fázovém rozdílu napětí napájecích stanic – příkon vlaku A je 3MW, příkon vlaku B je 1MW (záporný úhel značí úhlové zpoždění napětí zdroje U_2 za U_1)



Obr. 12 Závislosti činných výkonů napájecích stanic a ztrátového výkonu na vedení na fázovém rozdílu napětí napájecích stanic – příkon vlaku A je 3MW, příkon vlaku B je -1MW, tedy rekuperace (záporný úhel značí úhlové zpoždění napětí zdroje U_2 za U_1)

Na obr. 11 a 12 jsou uvedeny příklady výsledků výpočtů programu. Na obr. 11 jsou uvedeny závislosti dodávaných výkonů jednotlivými napájecími stanicemi na vzájemném fázovém posunu ϵ napětí napájecích stanic, při úhlovém zpoždění napětí napájecí stanice klesá její výkon. Další graf znázorňuje závislost ztrátového výkonu vedení dP_v na fázovém posunu napětí napájecích stanic. Na obr. 11 jsou závislosti pro vzdálenost l_v mezi napájecími

stanicemi 90 km, pro vzdálenost vlaku A od první napájecí stanice 40 km a vzdálenost vlaku B od první napájecí stanice 85 km. Okamžitý příkon vlaku A je 3 MW, okamžitý příkon vlaku B je 1 MW. Na obr. 12 jsou znázorněny analogické závislosti, avšak pro případ, že vlak B rekuperuje elektrickou energii do vedení a jeho rekuperační výkon je 1 MW. V obou případech výpočtů jsou uvažována moderní hnací vozidla s účinnkem blízkým 1.

Na obr. 11 a 12 se potvrzuje skutečnost, že s rostoucím úhlovým zpožděním fázoru napětí napájecí stanice dochází k výkonovému odlehčování napájecí stanice a potřebný výkon je dodáván zbývajících napájecích stanic. Toto platí i pro případ rekuperačního brzdění vlakové soupravy a případnou rekuperaci energie z trakční sítě do sítě distribuční. Je zřejmé, že pro určitou hodnotu úhlu ε se dodávané činné výkony napájecích stanic vyrovnají. Velikost úhlu ε , pro který dojde k vyrovnání výkonů obou napájecích stanic, je závislá jak na velikosti příkonů vlakových souprav, tak na poloze vlaků na trati. Z průběhů ztrátových výkonů na vedení je zřejmé, že ztrátový výkon je minimální vždy pro případ, že fázory napětí obou napájecích stanic mají nulový vzájemný fázový posun nezávisle na situaci na trati. Z toho vyplývá, že z hlediska minimalizace ztrát na vedení je nejvýhodnější řídit fázory obou napájecích stanic s nulovým fázovým posunem a nastavovat nenulový fázový posun obou fázorů napětí pouze v případě, že by výkon napájecí stanice mohl překročit hodnotu smluvního maxima. Z výpočtů vyplývá, že ve sledovaném případě se účinnost přenosu výkonu pohybuje v rozmezí 0,969 až 0,980 pro případ kladných příkonů vlakových souprav a v rozmezí 0,962 až 0,976 pro případ, že jedna z vlakových souprav rekuperuje. Maximum hodnoty účinnosti přenosu se opět pohybuje v okolí nulového fázového posunu obou napájecích napětí nezávisle na situaci na trati. Jedná se o poměrně vysoké hodnoty účinnosti přenosu, a to zejména v relaci se situací na stejnosměrné napájecí soustavě 3 kV, kde mohou ztráty při přenosu dosahovat až 30% přenášeného výkonu.

6. SIMULAČNÍ ŘEŠENÍ DVOUSTRANNÉHO NAPÁJENÍ TRATOVÉHO ÚSEKU S POHYBEM VLAKOVÝCH SOUPRAV

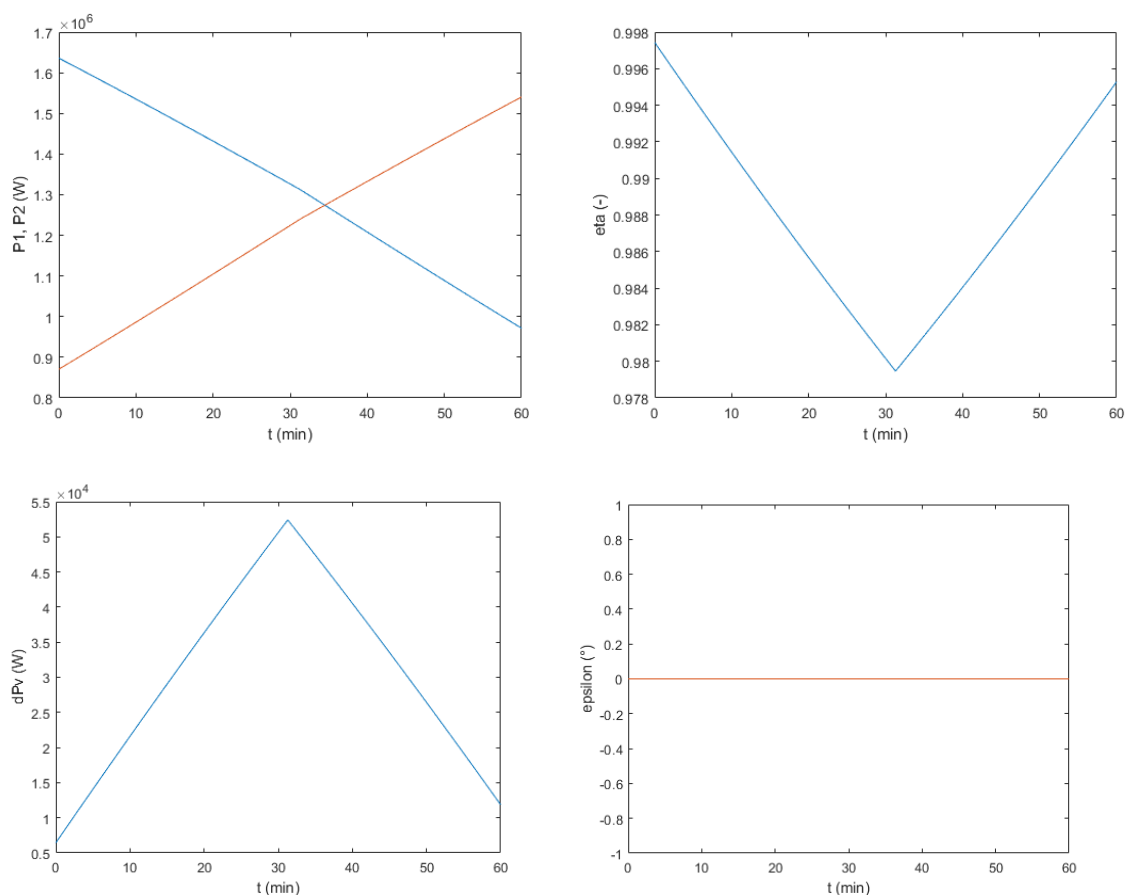
Další varianta vyvíjeného výpočetního SW umožňuje opět simulaci výkonových poměrů na traťovém úseku s oboustranným napájením mezi dvěma napájecími stanicemi, kde se nacházejí dvě vlakové soupravy. Obvodový model situace na trati opět odpovídá obr. 10, v této variantě je uvažován pohyb vlakových souprav buď ve stejném směru nebo v opačných směrech. Výstupem výpočtů jsou časové závislosti činných, případně jalových výkonů obou napájecích stanic, ztrátové výkony, účinnosti, napětí na sběračích hnacích vozidel, okamžitá poloha vlakových souprav na trati, impedance jednotlivých částí vedení a další veličiny, které se vyskytují v obvodu na obr. 10. Vstupy výpočtů jsou následující:

- Efektivní hodnota napětí U_1 první napájecí stanice.
- Efektivní hodnota napětí U_2 druhé napájecí stanice.
- Vnitřní impedance první napájecí stanice.
- Vnitřní impedance druhé napájecí stanice.
- Reálná složka poměrné impedance vedení (Ω/km).
- Imaginární složka poměrné impedance vedení (Ω/km).
- Celková vzdálenost traťového úseku (mezi napájecími stanicemi).
- Maximální činný výkon první napájecí stanice.
- Maximální činný výkon druhé napájecí stanice.
- Počáteční pozice prvního vlaku měřená od první napájecí stanice.

- Počáteční pozice druhého vlaku měřená od první napájecí stanice.
- Účinnost prvního vlaku.
- Účinnost druhého vlaku.
- Tabele uspořádané časové závislosti rychlostí obou vlaků.
- Tabele uspořádané časové závislosti příkonů obou vlaků.

Časová délka výpočtu je dána počtem časových vzorků vstupních dat – rychlostí a příkonů vozidel. Vstupní data výpočtů jsou zadávána ve formě formuláře v tabulce MS EXCEL. Tabele uspořádané časové závislosti rychlostí a příkonů vlakových souprav, jakožto jedny ze vstupních hodnot výpočtů, je možno zadávat ručně. Na našem pracovišti se však s výhodou využívá součinnosti s vyvinutým programem pro simulaci jízd drážních vozidel po reálných tratích v rámci železniční sítě ČR. Tento simulační program jízd generuje reálné vstupní hodnoty rychlostí a výkonů odpovídající reálným jízdním trajektoriím na konkrétních tratích pro výpočty výkonových poměrů napájení. Bližší informace o simulačních výpočtech jízd vozidel lze nalézt například v [6]. Výpočty jsou opět řešeny metodou uzlových napětí pomocí symbolicko-komplexní metody. Časové závislosti veličin jsou vyčíslovány po 1 s, tento krok je ale možné v programu měnit.

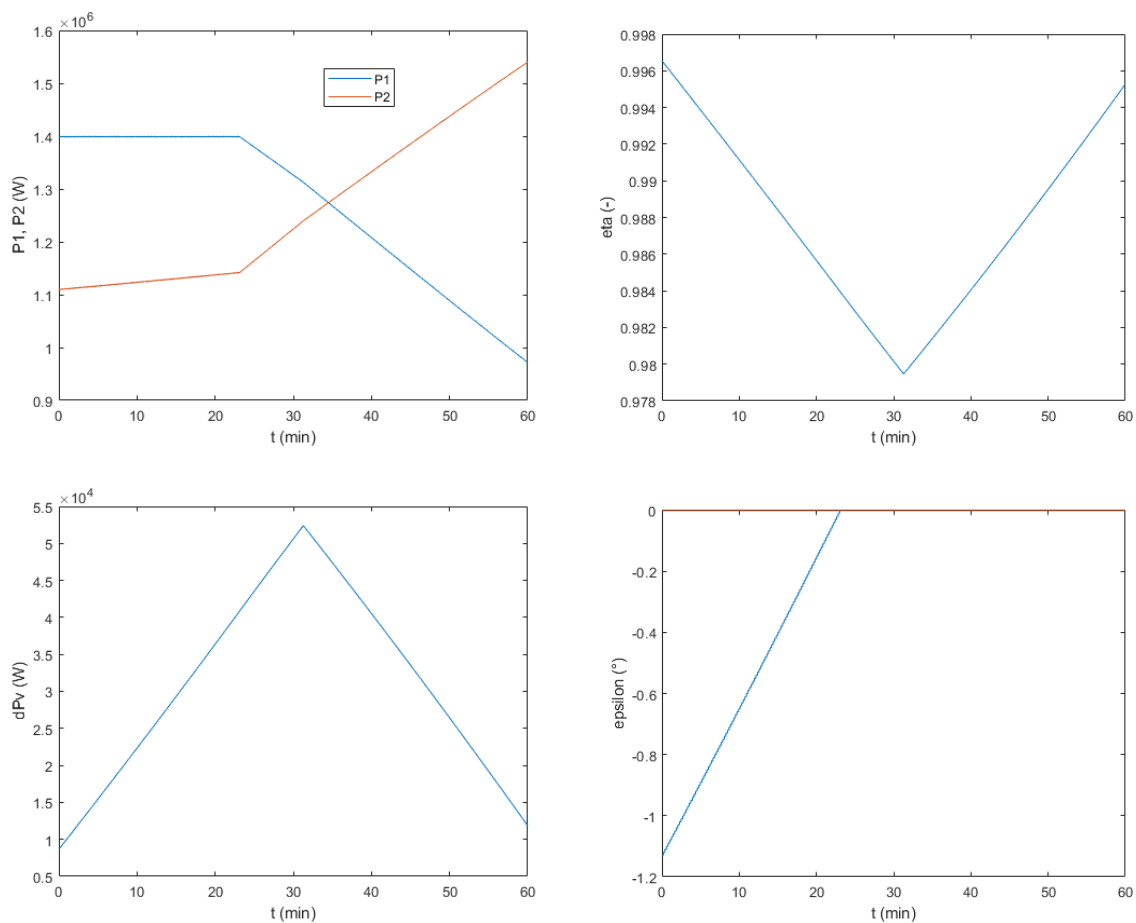
Následující výstupy výpočetního SW dokumentují energetické a výkonové vlastnosti traťového úseku s oboustranným napájením měničovými napájecími stanicemi, kde se vyskytují dvě jedoucí vlakové soupravy. Není-li uvedeno jinak, jsou uvažována moderní hnací vozidla s účinnkem blízkým 1.



Obr. 13 Časové závislosti veličin při jízdě dvou vlaků opačného směru bez omezení výkonu

První případ výpočtu s výsledky na obr. 13 předpokládá situaci, kdy vlak A v čase $t = 0$ jede konstantní rychlostí 80 km/h a při konstantním příkonu 1,5 MW z kilometru 2 od první napájecí stanice směrem k druhé napájecí stanici. Proti tomuto vlaku jeden vlak B v opačném směru konstantní rychlostí 60 km/h s konstantním příkonem 1 MW. V čase $t = 0$ se vlak B nachází v km 75 od první napájecí stanice. Výkon napájecích stanic není nijak omezován. Vnitřní impedance zdrojů nejsou uvažovány, měničové napájecí stanice s polovodičovou stabilizací napětí mají v pracovní oblasti vlastnosti ideálního zdroje napětí. Napětí napájecích stanic je 27 kV. Poměrná impedance vedení je ve všech uvažovaných případech dána hodnotou uvedenou v oddíle 4 tohoto článku. Na obr. 13 jsou uvedeny časové závislosti činných výkonů napájecích stanic P_1 a P_2 , okamžité výkonové účinnosti přenosu, časové závislosti ztrátového výkonu při přenosu dP_v a úhlu ϵ , tedy fázového posunu mezi fázory napětí napájecích stanic. Celkový vypočítávaný čas je 60 minut – na vodorovné ose grafů.

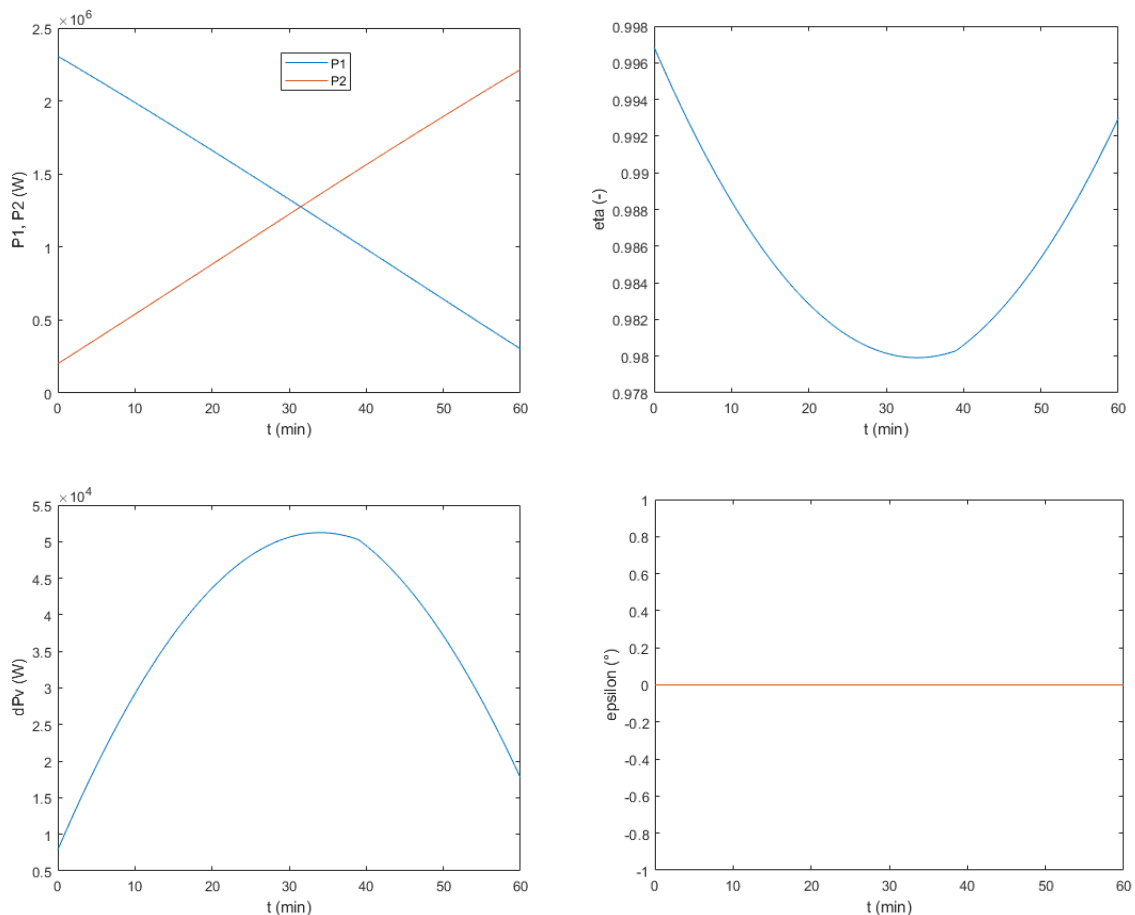
Z obr. 13 je zřejmé dělení výkonů mezi napájecí stanice a extrémy v průbězích účinnosti přenosu a ztrátového výkonu při přenosu. K extrémům těchto dvou funkcí dochází v okamžiku, kdy se obě vlakové soupravy míjejí, resp. křížují. Kromě grafických výstupů byly sledovány některé číselné výsledky výpočtů. Jedná se zejména o celkovou ztrátovou energii na vedení ve sledovaném časovém intervalu a celkovou energetickou účinnost jako podíl energie spotřebované hnacími vozidly a dodané napájecími stanicemi. Ve sledovaném případě činí ztrátová energie 31,07 kWh a energetická účinnost je 0,9877.



Obr. 14 Časové závislosti veličin při jízdě dvou vlaků opačného směru s omezením výkonu první napájecí stanice na hodnotu 1,4 MW

Následující výpočet byl proveden za stejných podmínek pouze s tím rozdílem, že výkon první napájecí stanice byl omezen na 1,4 MW. Jedná se o omezení na velmi nízkou hodnotu výkonu, toto omezení v praktických situacích nepřipadá v úvahu, výpočty zde prezentují princip metody. Odpovídající grafické výstupy výpočtů jsou na obr. 14. Z posledního grafu na obr. 14 je zřejmé nastavování nenulového fázového posunu mezi fázory napětí obou napájecích stanic, je zpožděn fázor napětí U_1 první napájecí stanice. Ve sledovaném případě činí ztrátová energie vedení ve sledovaném časovém intervalu 31,36 kWh a energetická účinnost je 0,9876. Opět se tedy ukazuje, že fázový posun napětí napájecích stanic sice může zrovnoměnit odběr činného výkonu napájecími stanicemi, avšak za cenu zvýšení ztrát ve vedení a snížení energetické účinnosti přenosu.

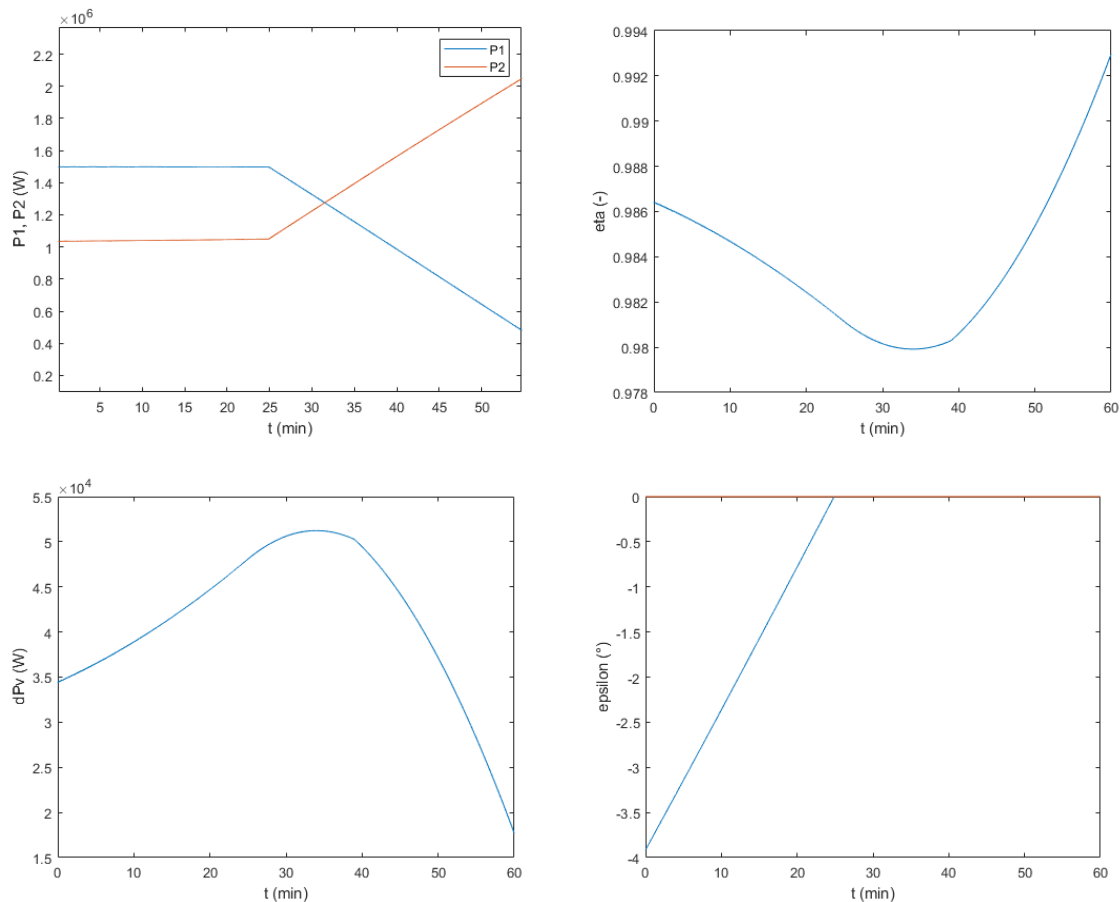
Další výpočet, jehož výsledky jsou na obr. 15, představuje případ, kdy vlaková souprava A jede v čase $t = 0$ z km 2 od první napájecí stanice rychlostí 80 km/h a vlaková souprava B z km 15 rychlostí 60 km/h v téže směru. V tomto případě není omežován výkon žádné z napájecích stanic.



Obr. 15 Časové závislosti veličin při jízdě dvou vlaků ve stejném směru bez omezení výkonu

Pro případ výpočtů, jejichž výsledky jsou na obr. 15, vychází hodnota ztrátové energie na vedení 37,77 kWh a energetická účinnost přenosu energie ve sledovaném časovém intervalu je 0,9851. Ztráty na vedení jsou vyšší a účinnost přenosu energie je nižší oproti případu opačného směru pohybu vlaků, neboť při totožném směru pohybu vlaků a jejich poměrně malé vzájemné vzdálenosti se uplatňuje horší dělení výkonů mezi napájecí stanice.

Na obr. 16 jsou výsledky analogických výpočtů s tím, že při totožném směru pohybu vlaků je omezen výkon první napájecí stanice na 1,5 MW.



Obr. 16 Časové závislosti veličin při jízdě dvou vlaků ve stejném směru s omezením výkonu první napájecí stanice na 1,5 MW

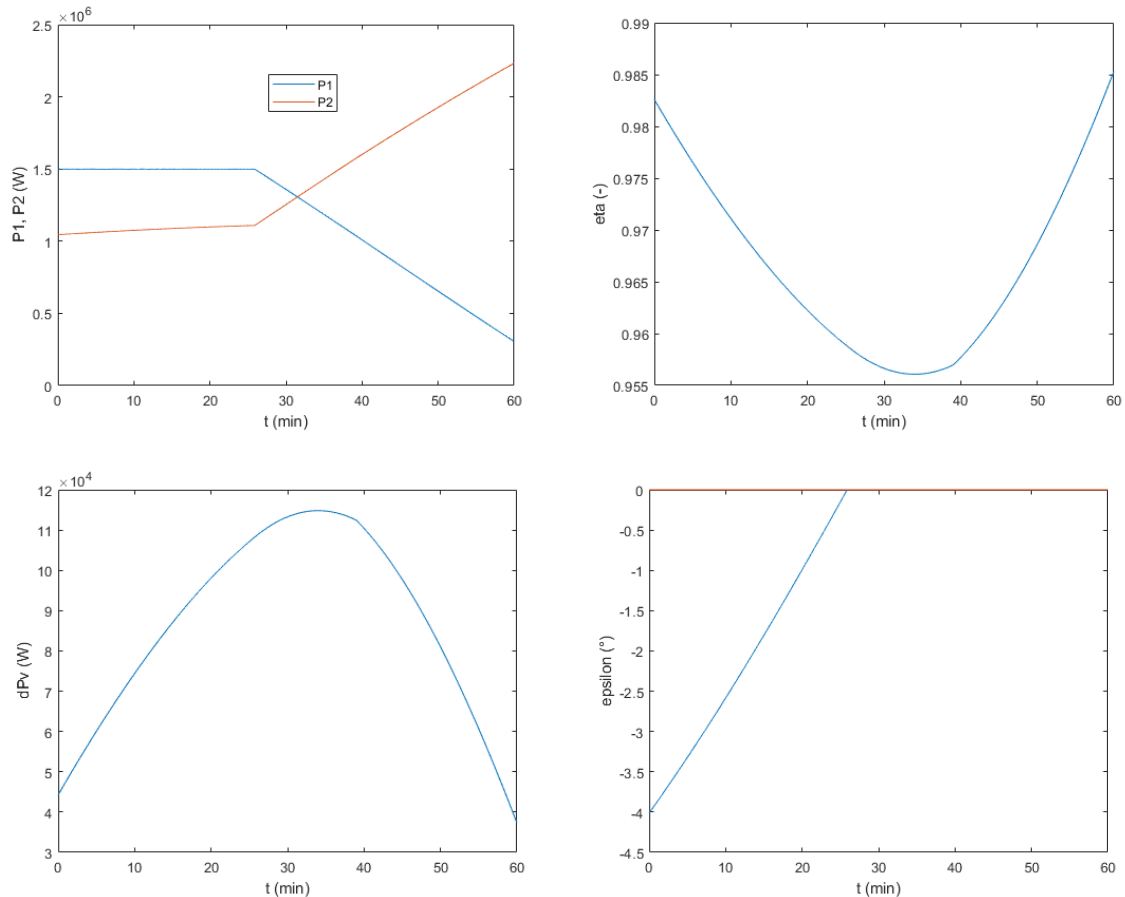
Z průběhů na obr. 16 je zřejmé omezení výkonu první napájecí stanice nastavením fázového posunu jejího napětí U_1 vůči napětí druhé napájecí stanice U_2 . Celková ztrátová energie ve vedení je ve sledovaném intervalu 41,49 kWh, energetická účinnost přenosu je 0,9837. Je tedy opět zřejmý nárůst ztrátového výkonu ve vedení při omezování výkonu napájecí stanice změnou fázového posunu jejího napětí.

V dalším kroku byly pro porovnání provedeny výpočty analogických závislostí s omezením výkonu první napájecí stanice, avšak s tím, že jsou uvažována starší vozidla s odbočkovými transformátory, diodovými usměrňovači a stejnosměrnými trakčními motory, u kterých je předpokládán účinník 0,7. Odpovídající grafické výsledky výpočtů jsou na obr. 17.

Z výsledků výpočtů vyplývá, že zhoršený účinník vozidla významně přispívá ke zvýšení ztrátové energie na vedení. Ztrátová energie na vedení se zvýšila při zhoršeném účinníku vozidel na 87,41 kWh, tedy oproti předchozímu případu více než na dvojnásobek. Energetická účinnost klesla na 0,9662.

Další série výpočtů zpracovává vstupní trajektorie vozidel (časové závislosti rychlosti a příkonu vozidla na sběrači) při reálném provozu, vstupní data byla získána simulačními výpočty jízd vozidel po trati s konkrétně zadanými parametry. Konkrétně se jedná o

dvouvozové elektrické jednotky pro regionální dopravu s kombinovaným napájením z troleje a z akumulátoru, u kterých může při jízdě na elektrifikovaném úseku docházet k nabíjení trakčního akumulátoru. Výpočty byly prováděny nejprve pro shodné směry pohybu vlakových souprav bez omezení výkonu napájecích stanic.

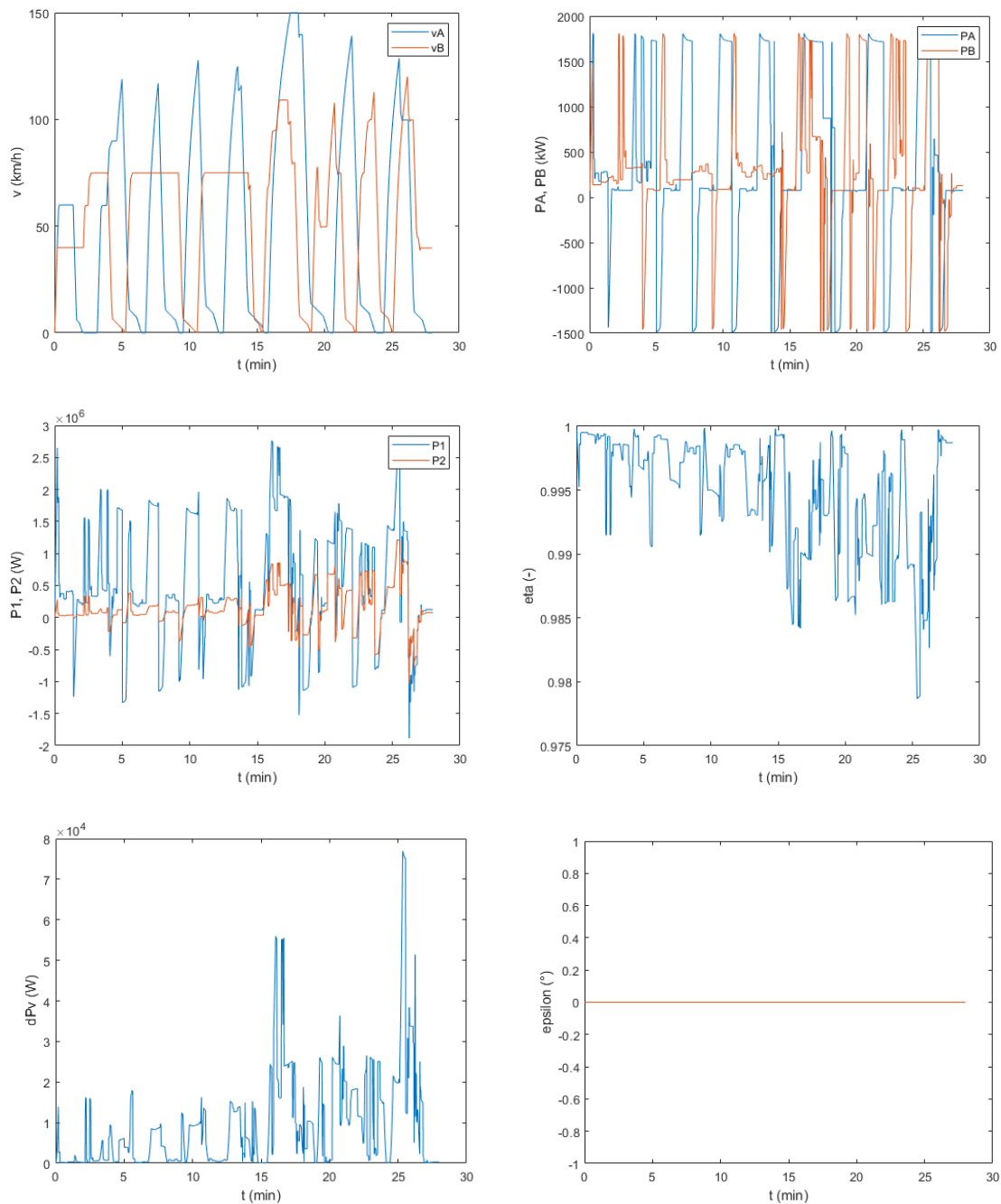


Obr. 17 Časové závislosti veličin při jízdě dvou vlaků ve stejném směru s omezením výkonu první napájecí stanice na 1,5 MW a při účinníku obou vlaků 0,7

Odpovídající výsledky výpočtů jsou na obr. 18. Na horních dvou grafech jsou znázorněny zadané časové závislosti rychlosti a příkonu vlakových souprav A a B. Na následujících grafech jsou opět průběhy výkonů napájecích stanic, průběh okamžité účinnosti přenosu výkonu, okamžitého ztrátového výkonu ve vedení a průběh fázového posunu mezi fázory napětí napájecích stanic, v případě, kdy výkon nejsou omežovány, je však tato hodnota nulová.

Z vypočtených průběhů je zřejmé, že v důsledku kolísání příkonů vlakových souprav kolísají i výkon napájecích stanic, ztrátový výkon vedení a okamžitá hodnota účinnosti přenosu. Intervaly záporných příkonů vlakových souprav a záporných výkonů napájecích stanic představují režimy rekuperačního brzdění vlakových souprav. V tomto případě dosahuje hodnota ztrátové energie na vedení ve sledovaném časovém intervalu 4,30 kWh a celková energetická účinnost dosahuje hodnoty 0,9866. Ve sledovaném případě jsou ztráty na vedení relativně malé vzhledem k reálným příkonům obou vlaků oproti modelovým případům předcházejícím, zároveň se jedná o lehké jednotky pro příměstskou dopravu.

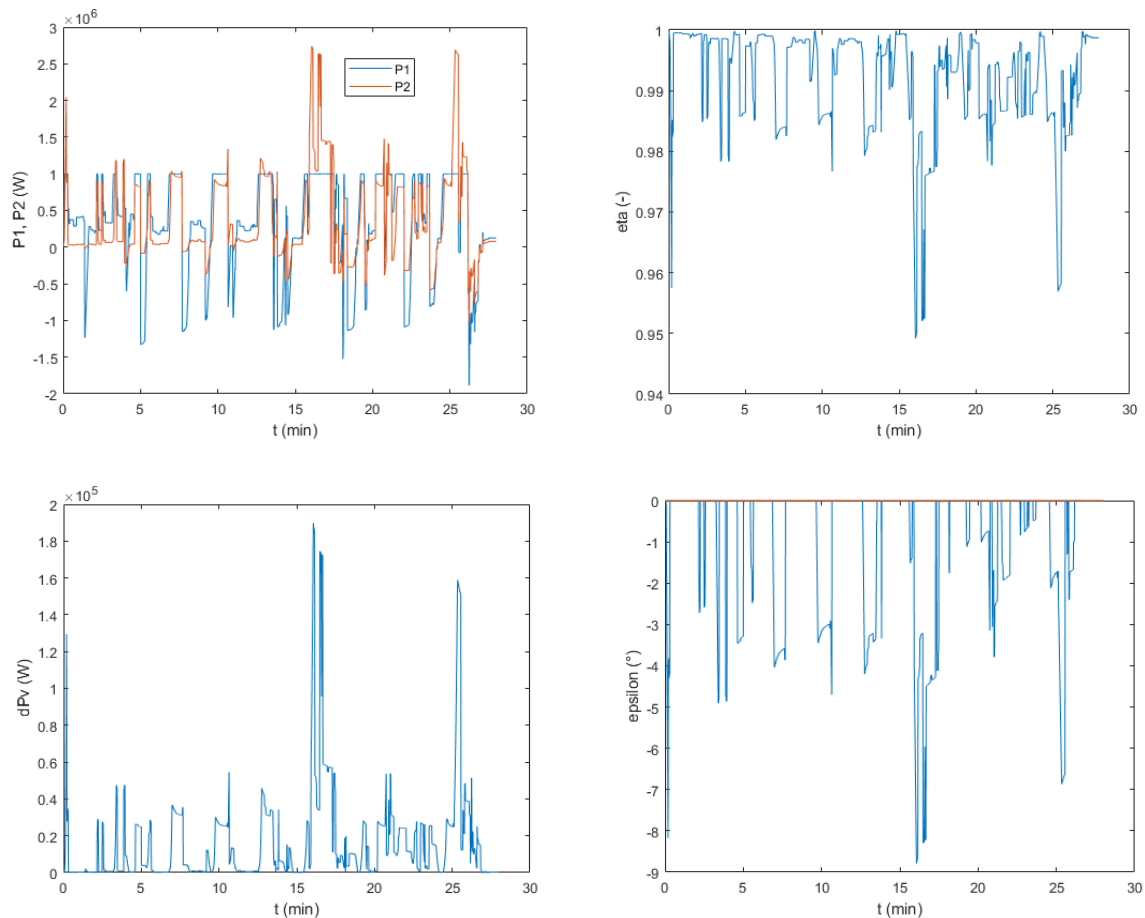
Další sledovaný případ je analogický k předchozímu, rozdíl je však v omezení maximálního výkonu první napájecí stanice na hodnotu 1 MW. Grafické výsledky těchto výpočtů jsou na obr. 19.



Obr. 18 Časové závislosti veličin při jízdě dvou vlaků ve stejném směru bez omezení výkonu – data vlaků jsou ze simulace jízdy

Z grafu časových závislostí výkonů napájecích stanic je zřejmé omezování výkonu první napájecí stanice na hodnotě 1 MW, to vychází z nastavování úhlového zpoždění fázoru napětí U_1 první napájecí stanice vůči fázoru napětí druhé napájecí stanice U_2 . Opět dochází ke zvýšení ztrátové energie na vedení při nastavování nenulového fázového posunu mezi napětími napájecích stanic, ve sledovaném případě je celková ztrátová energie v časovém

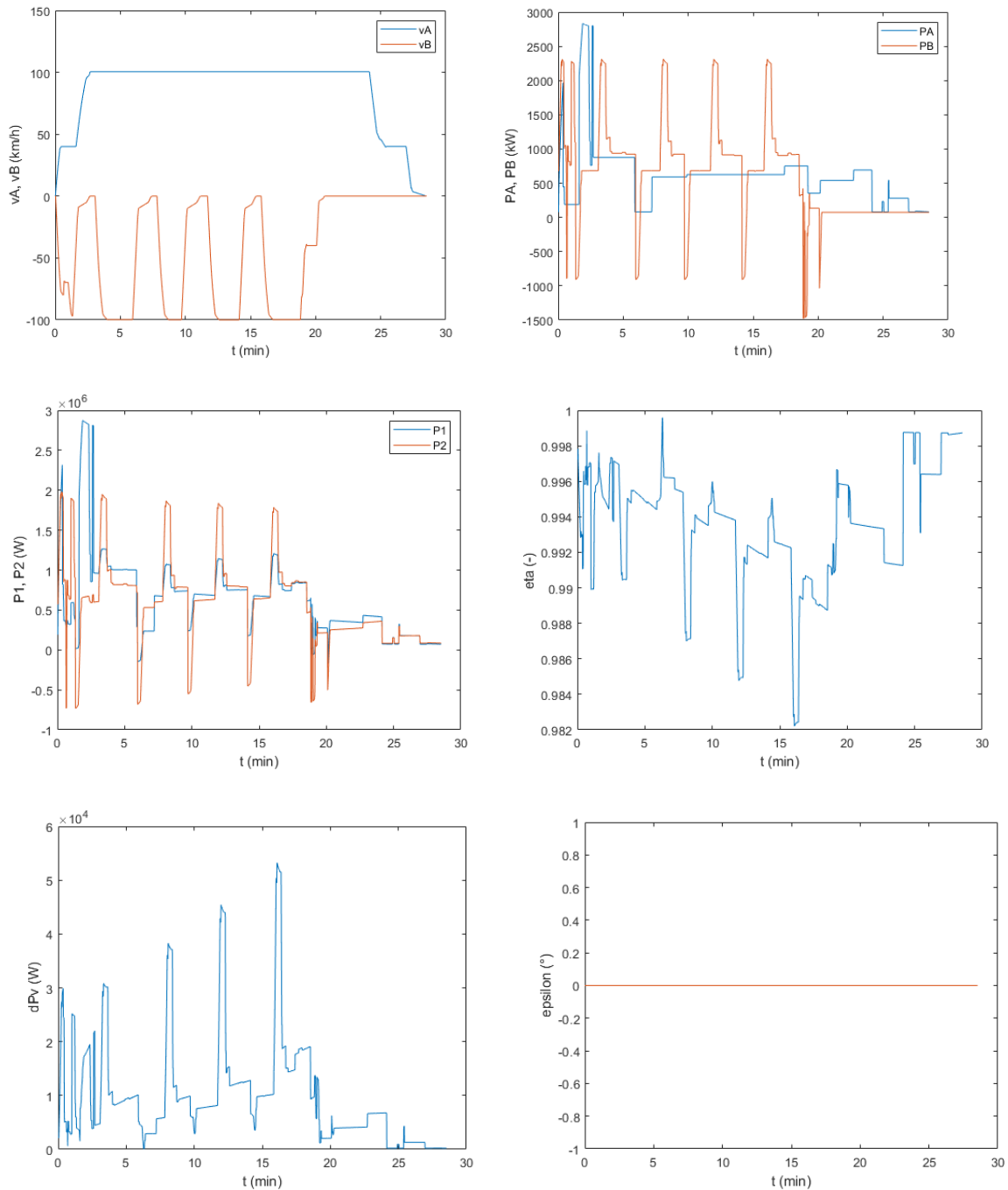
intervalu 7,57 kWh, jedná se o zvýšení ztrátové energie na téměř dvojnásobek. Energetická účinnost je při omezování výkonu první napájecí stanice snížena na 0,9766.



Obr. 19 Časové závislosti veličin při jízdě dvou vlaků ve stejném směru s omezením výkonu první napájecí stanice na 1MW – data vlaků jsou ze simulace jízdy

Další výpočet představuje situaci odpovídající jízdě dvou vlaků v opačném směru. Vlak A začíná jízdu na km 2 (2 km od první napájecí stanice) a směřuje ke druhé napájecí stanici. Jedná se o nákladní vlak. Vlak B zahajuje jízdu v km 75 (75 km od první napájecí stanice) a směřuje proti vlaku A, jede tedy směrem k první napájecí stanici. Jedná se o lehkou dvouvozovou jednotku pro regionální dopravu, s kombinovaným napájením z troleje a z akumulátoru, přičemž v části trasy je při jízdě akumulátor dobíjen výkonem 600 kW. V tomto případě nejsou omežovány výkony napájecích stanic. Výsledky odpovídajících výpočtů jsou na obr. 20, přičemž na horních grafech jsou opět zadané časové závislosti rychlostí a příkonů ve sledovaném časovém intervalu. Záporná rychlost značí pohyb vlaku od druhé napájecí stanice směrem k první. V případě nákladního vlaku se jedná o soupravu se starší lokomotivou s diodovým usměrňovačem a stejnosměrnými trakčními motory, která pracuje s účinností 0,8 a její technické řešení neumožňuje rekuperaci. V případě protijedoucího vlaku – jednotky pro regionální dopravu s kombinovaným napájením – se jedná o moderní vozidlo provozované s účinností blízkým 1, které může být provozováno s rekuperací.

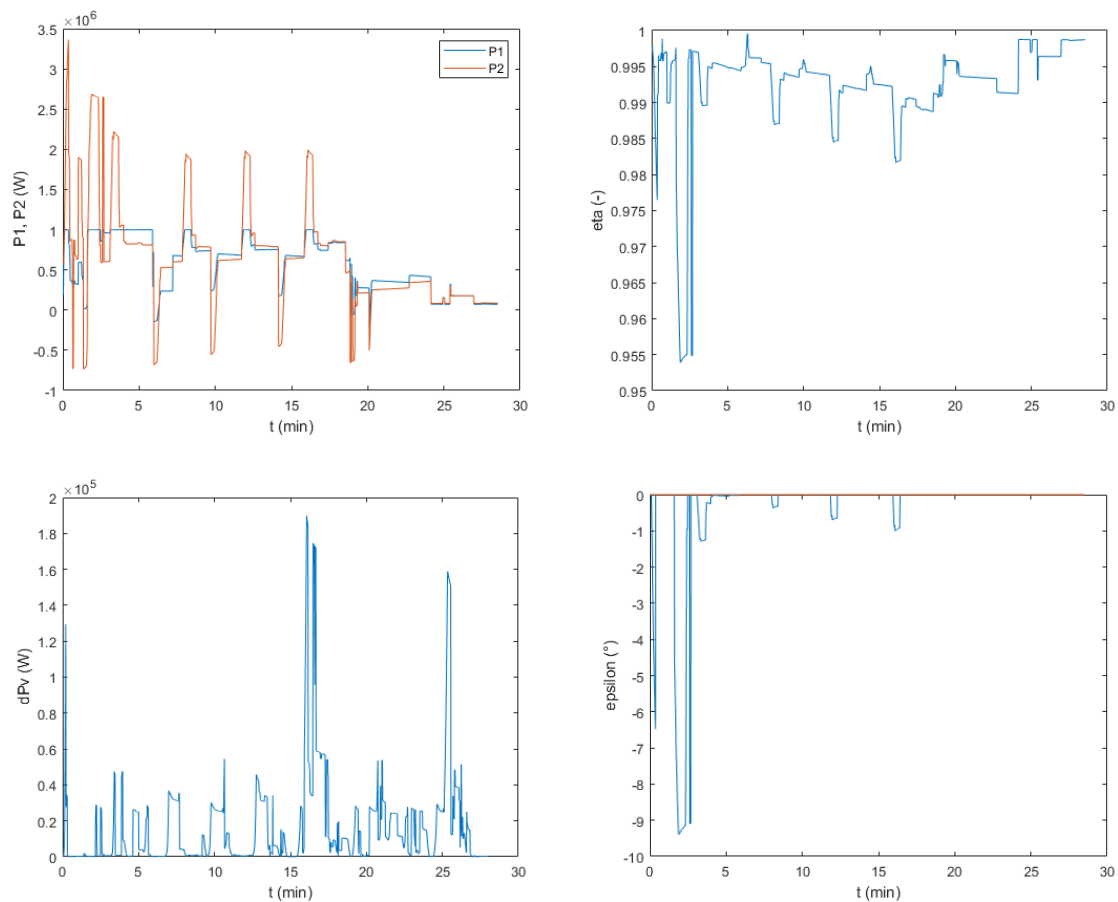
Výsledná ztrátová energie je ve sledovaném časovém intervalu 4,63 kWh, celková energetická účinnost přenosu po vedení je 0,9919.



Obr. 20 Časové závislosti veličin při jízdě dvou vlaků v opačném směru bez omezení výkonu – data vlaků jsou ze simulace jízdy

Na obr. 21 jsou výsledky výpočtů analogické k případu podle obr. 20, avšak s tím, že výkon první napájecí stanice je omezen na hodnotu 1 MW. V tomto případě jsou opět patrné zásahy omezení výkonu první napájecí stanice a v tomu odpovídajících časových intervalech nenulové hodnoty fázového posunu ϵ mezi fázory napětí U_1 a U_2 obou napájecích stanic. Celková ztrátová energie na vedení je v tomto případě 6,63 kWh, tedy přibližně o třetinu vyšší, než ve stejném případě, avšak bez omezování výkonu první napájecí stanice. Celková energetická účinnost se oproti případu bez omezování výkonu první napájecí stanice snížila na hodnotu 0,9885. Je tedy opět patrná skutečnost, že omezování výkonu napájecí stanice a

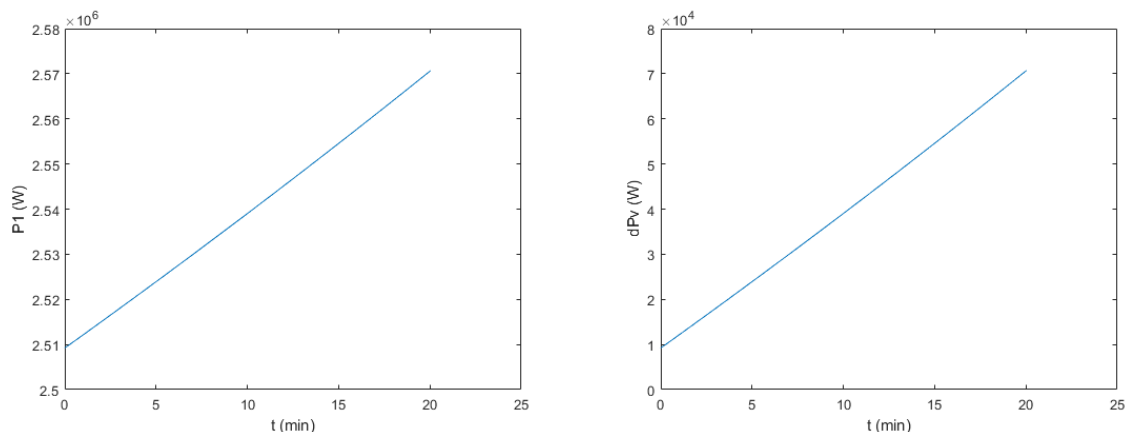
tím navýšení výkonu sousední napájecí stanice přináší zvýšení ztrátového výkonu na trakčním vedení.



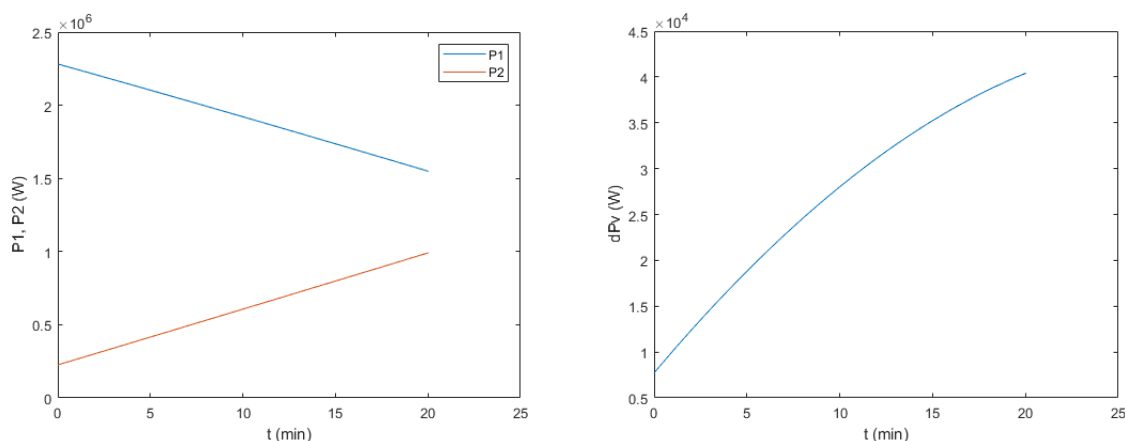
Obr. 21 Časové závislosti veličin při jízdě dvou vlaků v opačném směru s omezením výkonu první napájecí stanice na 1 MW – data vlaků jsou ze simulace jízdy

Poslední zde prezentované výpočty mají za cíl porovnat ztráty na vedení a účinnost přenosu energie přes vedení při dvoustranném napájení měničovými napájecími stanicemi a při jednostranném napájení z konvenční napájecí stanice s transformátorem. U transformátoru je uvažována vnitřní reaktance nakrátko, která je zadána $7,5 \Omega$, což při frekvenci 50 Hz odpovídá indukčnosti nakrátko $0,024 \text{ H}$ běžných transformátorů v napájecích stanicích 110 kV/25 kV se jmenovitým výkonem 10 MVA a napětím nakrátko v okolí 10%. Při výpočtu je uvažována délka jednostranně napájeného úseku 40 km, v případě dvoustranně napájeného úseku je uvažována vzdálenost mezi napájecími stanicemi 80 km. Při těchto porovnávacích výpočtech je uvažována dvojice vlaků jedoucích ve stejném směru konstantní rychlostí a s konstantním příkonem. Vlak A má rychlost 80 km/h, příkon 1,5 MW a v čase $t = 0$ má pozici na km 2 od napájecí stanice. Vlak B má rychlost 60 km/h a výkon 1 MW, v čase $t = 0$ má pozici v km 15 od napájecí stanice. Oba vlaky jsou uvažovány s účinníkem blízkým 1, výkon napájení není omezován.

Na obr. 22 jsou vypočtené časové závislosti výkonu napájecí stanice a okamžitého ztrátového výkonu na trakčním vedení pro případ jednostranného napájení s konvenční napájecí stanicí s transformátorem. Z výpočtu vychází pro případ jednostranného napájení ztrátová energie na trakčním vedení 13,16 kWh a energetická účinnost přenosu trakčním vedením 0,9845.



Obr. 22 Časová závislost výkonu napájecí stanice při jízdě dvou vlakových souprav stejným směrem při jednostranném napájení traťového úseku konvenční napájecí stanicí



Obr. 23 Časová závislost výkonů napájecích stanic při jízdě dvou vlakových souprav stejným směrem při oboustranném napájení traťového úseku měničovými napájecími stanicemi

Na obr. 23 jsou časové průběhy výkonů napájecích stanic při oboustranném napájení traťového úseku měničovými napájecími stanicemi při totožné dopravní situaci jako v předchozím případě, tj. dvojice vlakových souprav jedoucích stejným směrem s konstantní rychlostí a konstantním příkonem. Při oboustranném napájení se zvýšila energetická účinnost přenosu energie na 0,9894 a ztrátová energie ve vedení se snížila na 8,93 kWh, tedy zhruba o třetinu. Tento příklad tedy ukazuje nezanedbatelný energetický přínos dvoustranného napájení pomocí měničových napájecích stanic. Kromě snížení ztrát se při dvoustranném napájení snižují úbytky napětí na vedení. V uvedeném příkladu jsou na konci výpočtu efektivní hodnoty napětí trakčního vedení v místech vlakových souprav 26,50 kV, v případě jednostranného napájení je na konci výpočtu napětí trakčního vedení v místě vlakové soupravy A 26,15 kV, v místě vlakové soupravy B je napětí 26,09 kV. Ve sledovaném případě je trakční napájecí síť zatížena málo, v praktických případech většího zatížení by byl efekt dvoustranného napájení jak z hlediska snížení ztrát na vedení, tak z hlediska úbytků napětí ještě výraznější.

7. ZÁVĚR

Aplikace měničových napájecích stanic v trakční soustavě 25 kV 50 Hz jsou v současnosti v počátcích i v celosvětovém měřítku. Z toho důvodu je třeba připravit řadu prací pro

posouzení jejich přínosů v konkrétních podmínkách. Představené výpočetní práce prováděné na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice v této oblasti jsou příspěvkem k aplikacím měničových napájecích stanic 25 kV 50 Hz v podmínkách ČR. Jak bylo v tomto článku představeno, výpočetní model je v současnosti omezen na dvojici napájecích stanic a dvojici vlakových souprav. V současnosti se zahajují práce na rozšíření tohoto výpočetního programu tak, aby bylo možno postihnout rozsáhlejší strukturu napájecí sítě při větším počtu vlakových souprav, což vede k výraznému zvýšení počtu uzlů v obvodu a navýšení počtu rovnic, které daný obvod popisují.

Další připravované zdokonalení výpočetního SW je zaměřeno na optimalizaci podmínek rekuperace v soustavě napájené měničovými napájecími stanicemi. Z hlediska distribuční energetické sítě je v podstatě rekuperace nežádoucím jevem, a to i v případě, že se jedná o rekuperaci symetrickou v případě použití měničových napájecích stanic. Naopak je žádoucí, aby byla rekuperovaná energie spotřebována ostatními vozidly napájenými z trakční sítě. Proto se musí řízení měničových napájecích stanic zaměřit i na ošetření těchto stavů, tj. řízením vzájemného fázového posunu fázorů napětí měničových napájecích stanic minimalizovat rekuperaci do distribuční energetické sítě, a naopak maximalizovat spotřebu rekuperované energie v rámci sítě trakční. Vyvíjený výpočetní SW je proto připravován i na modelování těchto případů zpětnovazebního synchronizovaného řízení měničových napájecích stanic.

8. GRANTOVÁ PODPORA

Tento příspěvek vznikl s podporou projektu TAČR č. TK02010009 Zvyšování efektivity železniční dopravy v rámci energetické optimalizace systému multimodální mobility.

9. LITERATURA

- [1] Novák, J., Mlynařík, L.: Nové technologie trakčního napájení 25 kV 50 Hz 1. a 2. část, časopis ELEKTRO, 2020, roč. 30, č. 6 a 7, vydavatel FCC Public, Praha 2020, ISSN 1210-0889
- [2] Koncepce přechodu na jednotnou napájecí soustavu ve vazbě na priority programového období 2014-2020 a naplnění, studie zpracovaná SUDOP Praha a.s., Praha 2016
- [3] Změna trakční soustavy na AC 25kV, 50Hz v úseku Nedakonice - Říkovice, studie zpracovaná SUDOP Brno s.r.o., Brno 2017
- [4] Hasan, N. S., Rosmin, N., Osman, D., Musta'amal, A., H.: Reviews on multilevel converter and modulation techniques, časopis Renewable and Sustainable Energy Reviews, vydavatel Elsevier Ltd., ročník 2017, příspěvek 80, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117307955?via%3Dihub>
- [5] Fernando Martinez-Rodrigo Santiago de Pablo L. Carlos Herrero-de Lucas: Current control of a modular multilevel converter for HVDC applications, časopis Renewable and Sustainable Energy Reviews, vydavatel Elsevier Ltd., ročník 2015, příspěvek 83, <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0960148115003171?token=92BDD3D2F811F476C28B64C119B024F36F6A81876227821DD1BB2537B83112292B8C2BFB96E63597AFF2AF77C71CCCC>

[6] Novák, J., Mlynařík, L., Lelek, T.: Možnosti využití kolejových vozidel s kombinovaným napájením v regionální osobní dopravě, časopis ELEKTRO, č. 6/2015, roč. 25, vydavatelství FCC Public, ISSN 1210-0889

[7] Firemní materiály SIEMENS

[8] Firemní materiály ABB