

Ladislav Mlynařík¹, Jaroslav Novák²

Studie regionálního železničního provozu s akumulátorovým vozem a solárním napájením v podmínkách ČR

Klíčová slova: *sluneční energie, fotovoltaické panely, dobíjecí stanice, akumulátorové vozidlo, zásobník energie*

Úvod

Dopadající sluneční záření je potenciálně obrovským energetickým zdrojem a zdokonalující se technické systémy vytvářejí předpoklady pro využití alespoň malé části této energie. Je zřejmé, že nejefektivnější cestou pro využití fotovoltaické energie je krytí lokálních spotřeb, bez vlivu na energetickou síť. V našich zeměpisných šířkách, kde není intenzita slunečního svitu během roku extrémní, se až na některé specifické výjimky, jeví reálná pouze varianta s vyrovnávacími zásobníky elektrické energie. To sice zvyšuje nároky na pořízení a údržbu systému a snižuje jeho účinnost, je to však v podmínkách ČR jediná cesta k pokrytí výkyvů ve výrobě fotovoltaické energie i v její spotřebě.

Na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice se zabýváme studiem využitelnosti fotovoltaické energie pro pohon železničních vozidel. Železniční vozidla mají oproti vozidlům silničním řadu výhod pro využití uvažovaného energetického systému. Disponují větší hmotností a rozměry, ale zejména operují v definovaných trasách, kde lze velmi dobře predikovat energetické toky a úměrně tomu dimenzovat energetickou technologii. Vzhledem k tomu, že pro dálkovou a vysokokapacitní železniční dopravu se jeví jako nejvýhodnější závislá elektrická trakce, lze očekávat

¹ **Ing. Ladislav Mlynařík** absolvoval studium na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice v oboru Elektrotechnická zařízení v dopravě v roce 2008. Od roku 2009 pracuje jako asistent na Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice. Je studentem kombinované formy doktorandského studia v oboru Dopravní prostředky a infrastruktura. Odborné zaměření: trakční energetika, elektrická trakce, trakční mechanika, elektrické pohony.

² **Prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.** ukončil studium na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze v oboru silnoproudá elektrotechnika v roce 1989. V roce 1992 ukončil studium ve vědecké výchově na téže fakultě na Katedře elektrických pohonů a trakce. Od roku 1992 pracoval jako odborný asistent, od roku 2003 jako docent na Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze. V letech 1995 až 2001 úzce spolupracoval s firmou Elektrosystém Praha, s.r.o. v oblasti vývoje a využití elektrických pohonů a řídicích systémů v průmyslových aplikacích. Od roku 2011 pracuje jako profesor na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice. Svou odbornou činností zaměřuje zejména do oblastí elektrických pohonů, výkonové elektroniky, elektrické trakce a mikroprocesorového řízení.

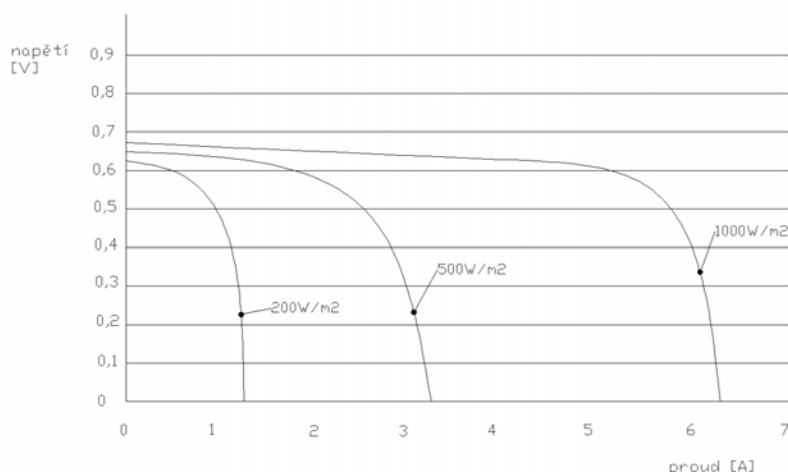
uplatnění alternativních energetických zdrojů, včetně fotovoltaických, v regionální železniční dopravě. Výchozí práce pro studium možných podob těchto systémů byly na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice provedeny v minulých letech ve spolupráci s firmou SIEMENS. V současnosti jsou na Univerzitě Pardubice vytvořeny dobré podmínky pro hlubší rozbor této problematiky díky projektu, který je podporován nadací Zelená energie ČEZ. Všechny níže uvedené obrázky jsou dílem autorů.

1. Sluneční záření a parametry fotovoltaických panelů

Množství využitelné dopadající energie slunečního záření závisí na zeměpisné poloze, denní době, meteorologických podmínkách, znečištění ovzduší a účinnosti fotovoltaických článků a souvisejících technických zařízení.

Celoroční průměr energie dopadajícího slunečního záření v ČR činí $2,88 \text{ kWh/m}^2/\text{den}$, přičemž od prosince do června kolísá tato hodnota v rozsahu od $0,52 \text{ kWh/m}^2/\text{den}$ do $5,62 \text{ kWh/m}^2/\text{den}$. Dopadající sluneční záření má dvě složky – záření přímé, které se uplatňuje jen při bezmračné obloze a mimo stín, a záření difuzní, které se uplatňuje i ve stínu. Energie difuzního záření je výrazně menší než energie přímého záření. V poledních hodinách je energie přímého záření více než desetinásobná oproti energii záření difuzního.

Množství sluneční energie, které dopadne za rok na 1 m^2 , není konstantní ani v rámci ČR. Nejvyšší jsou hodnoty roční energie slunečního záření na jižní Moravě a dosahují přibližně 1100 kWh/m^2 , směrem k severu a západu se hodnota roční energie slunečního záření snižuje a nejmenších hodnot, přibližně 950 kWh/m^2 , je dosahováno v severozápadních Čechách.



Obr. 1 - Voltampérové charakteristiky fotovoltaického článku

Přeměna světelné energie na elektrickou se uskutečňuje v polovodičových fotovoltaických článcích. Jeden fotovoltaický článek má zpravidla napětí v rozmezí 0,6 až 0,7 V a na obr. 1 jsou příklady voltampérových charakteristik pro různé hodnoty dopadajícího výkonu slunečního záření. V optimálním případě by měl článek pracovat s maximálním elektrickým výkonem pro daný dopadající výkon, pracovní bod by měl tedy optimálně ležet v oblasti zlomu voltampérové charakteristiky.

Klíčovým parametrem fotovoltaických článků je účinnost daná následujícím vztahem:

$$\eta = \frac{U_{mPP} \cdot I_{mPP}}{p \cdot S} \quad (1)$$

V tomto vztahu je U_{mPP} napětí článku, I_{mPP} proud článku, p je intenzita dopadajícího záření ve W/m^2 a S je plocha článku. U fotovoltaických článků se účinnost pohybuje v rozsahu 5 až 20%.

Účinnost článků je závislá na teplotě a s rostoucí teplotou klesá. Tento pokles je až 1%/10°C. Díky této vlastnosti zpravidla u nás nepracují solární zdroje s největšími výkony v červnu, jak by vyplývalo z maximální intenzity dopadajícího slunečního záření, ale v rozmezí duben – květen.

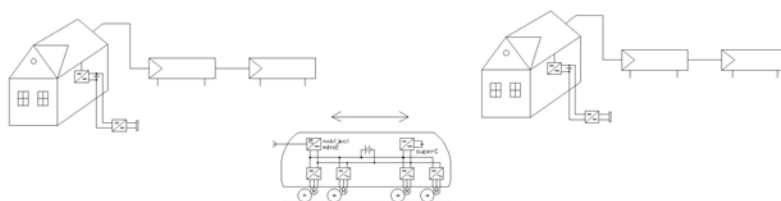
Fotovoltaické články se dodávají zapojené do panelu. Zapojení článků v panelu je sériové. K jednotlivým článkům jsou antiparalelně řazeny diody. Důvodem je ochrana článku před proudovým přetížením, ke kterému by mohlo dojít při zastínění článku. Zastíněný článek by pak fungoval jako spotřebič a byl by zatěžován proudem sousedních článků. V následujícím odstavci je uveden příklad parametrů sériově vyráběného fotovoltaického panelu:

Počet článků	96
Rozměry	1559 x 1046 mm
Jmenovité napětí	54,7 V
Jmenovitý proud	5,82 A
Napětí naprázdno	64,7 V
Zkratový proud	6,2 A
Maximální systémové napětí	600V
Účinnost	19,5%
Maximální výkon	318 W
Hmotnost	18,6 kg

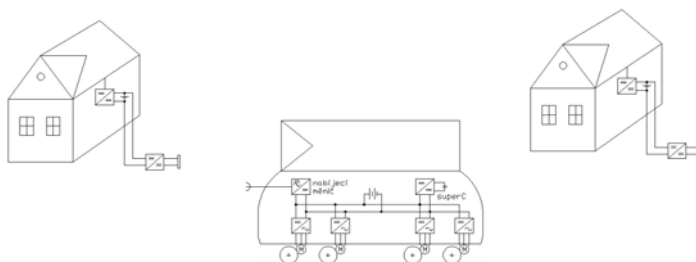
Systémové napětí článku je maximální napětí, se kterým může zařízení pracovat v případě sériového řazení fotovoltaických panelů.

2. Koncepce fotovoltaického napájení kolejového vozidla

Z hlediska uplatnění v ČR se v současnosti jeví jako nejreálnější koncepce provozu s nepřímým stacionárním napájením (obr. 2). V této koncepci se předpokládá statické umístění fotovoltaických panelů, přednostně v koncových stanicích dráhy. Energie z těchto panelů je uchovávána ve staničních akumulátorech a při pobytu vozidla ve stanici jsou akumulátory na vozidle dobíjeny ze staničních akumulátorů, případně v kombinaci s dobíjením ze sítě.



Obr. 2 - Pohon s nepřímým stacionárním napájením



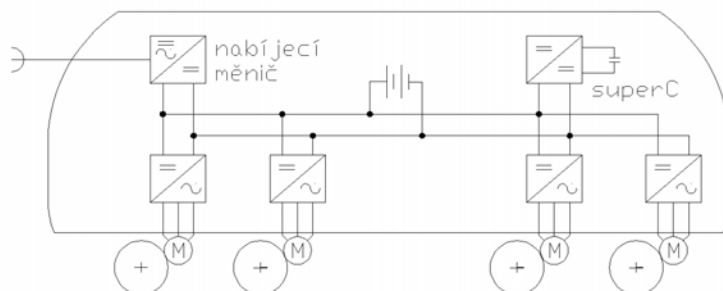
Obr. 3 - Pohon se smíšeným fotovoltaickým napájením

Určitou alternativou je pohon se smíšeným fotovoltaickým napájením (obr. 3). Předpokládá se dobíjení akumulátorů ve vozidle ve stanicích, vozidlo má však instalovány i fotovoltaické panely a jimi vyrobená energie je využívána trakčním pohonem s menšími ztrátami, neboť odpadá jeden stupeň akumulace. Tato koncepce by byla vhodná pro regionální osobní dopravu a v podmínkách ČR by zřejmě přinesla výraznější efekt v případě použití fotovoltaických panelů s vyšší účinností oproti současnému stavu.

3. Návrh vozidla

V rámci projektu je na Univerzitě Pardubice rozpracováván drážní systém s nepřímým stacionárním fotovoltaickým napájením. Je navrhován čtyřnápravový akumulátorový vůz pro regionální dopravu s obsaditelností 80 sedících cestujících. Uvažovaná hmotnost

vozu v provozu je 62 t. Je uvažována trakční charakteristika, kdy vůz vykazuje do rychlosti 22 km/h tažnou sílu 59,5 kN, při vyšší rychlosti (do 120 km/h) je charakteristika vymezena trakční hyperbolou, která odpovídá výkonu 350 kW.

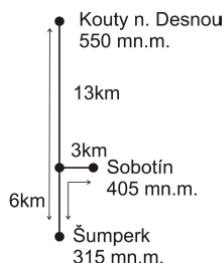


Obr. 4 - Koncepte elektrické výzbroje akumulátorového vozu

Na obr. 4 je návrh koncepce elektrické výzbroje akumulátorového vozu. Předpokládá se použití čtyř bezpřevodkových pohonů se synchronními motory s permanentními magnety s individuálním napájením ze čtyř střídačů. Střídače jsou napájené ze stejnosměrné sběrnice 750 V. Na tuto sběrnici je přímo připojen akumulátor a přes měnič superkondenzátor. Zároveň je na sběrnici připojen měnič pro nabíjení vozového akumulátoru z akumulátoru staničního nebo ze sítě.

4. Modelovaná trať

Problematika nepřímého fotovoltaického napájení je kvantitativně zpracovávána pro konkrétní železniční trať. Jedná se o trať Šumperk – Kouty nad Desnou s odbočkou Petrov nad Desnou – Sobotín. Jedná se o soukromou železnici provozovanou soukromým dopravcem, v současnosti standardními dvounápravovými motorovými vozy.



Obr. 5 - Schéma trati

Trat' se nachází v oblasti Jeseníků a má velký turistický potenciál. Schéma trati s uvedením kilometrických vzdáleností a nadmořských výšek je na obr. 5. Na trati jsou provozovány dvě vlakové linky – Šumperk – Kouty nad Desnou a Šumperk – Sobotín. Trakční a energetické výpočty byly prováděny pro obě linky.

5. Trakční a energetické výpočty

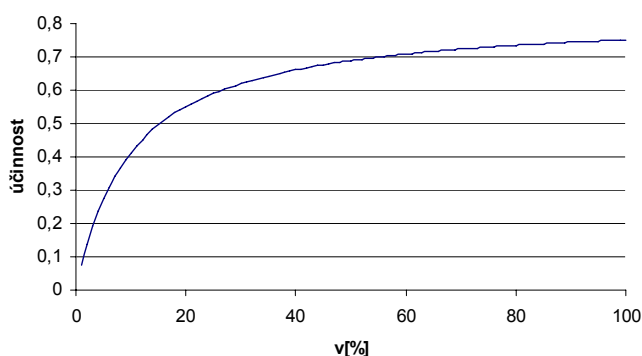
Pro modelové výpočty provozu na výše uvedené trati byl zvolen pohon s nepřímým stacionárním napájením (obr. 2). Základem pro dimenzování energetických komponent (zásobníků energie, fotovoltaických zdrojů) fotovoltaicky napájeného provozu je provedení trakčních a energetických výpočtů na základě parametrů vozidla, tratě a provozního režimu. Podkladem pro trakční výpočty byla detailní dokumentace trati, kterou Univerzita Pardubice poskytl vlastník trati. Pro trakční výpočty jsou v této dokumentaci klíčové údaje o sklonech, traťových rychlostech, poloměrech oblouků a jejich délkách a o rozmístění zastávek.

Na základě trakčních výpočtů byly provedeny po 1 m tratě výpočty energetické, určující spotřebovanou energii při jízdě v obou směrech. Z hodnoty zrychlení pro každý interval dráhy 1 m byla určena rychlost a čas průjezdu aktuálního intervalu 1 m. Z hodnot času, rychlosti, tažné síly a účinnosti byla vypočtena energie spotřebovaná při průjezdu aktuálního intervalu dráhy 1 m podle vztahu:

$$E = F_t \cdot v_m \cdot t \cdot \frac{1}{\eta} \quad (2)$$

V tomto vztahu je v_m rychlost, t je čas, E je spotřebovaná elektrická energie, F_t je tažná síla a η je účinnost elektrovýzbroje, jejíž velikost je uvažovaná v závislosti na rychlosti. Hodnota účinnosti ovlivňuje výrazně nejen velikost využitelné energie odebírané z akumulátoru, ale i velikost efektu předpokládaného rekuperačního brzdění. Při určování průběhu účinnosti je nutné zohlednit především účinnost trakčního motoru, trakčního střídače a akumulátoru.

Modelovaná závislost celkové účinnosti soustavy akumulátor – střídač - trakční motor na rychlosti vozidla má průběh podle obr. 6 s maximální hodnotou přibližně 0,75.

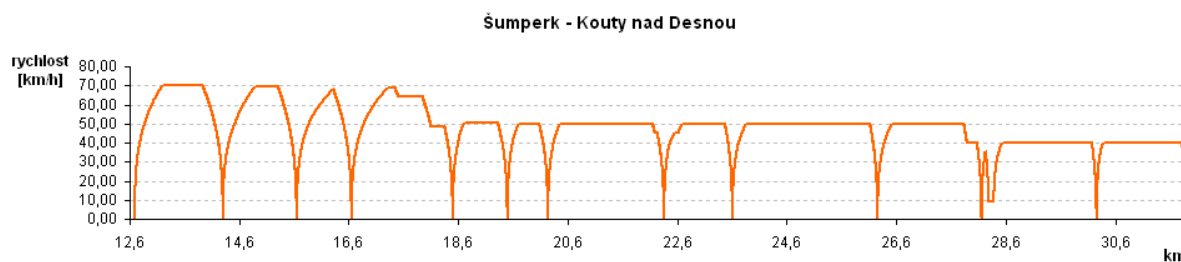


Obr. 6 - Závislost účinnosti trakčního pohonu na rychlosti

Výpočet trakční energie podle vztahu (2), zahrnující výše popisovanou závislost účinnosti na rychlosti, je platný pro jízdní režim. V brzděném režimu se uvažuje rekuperace, tj. navrácení energie do akumulátoru a případně do superkondenzátoru a energie se počítá dle vztahu:

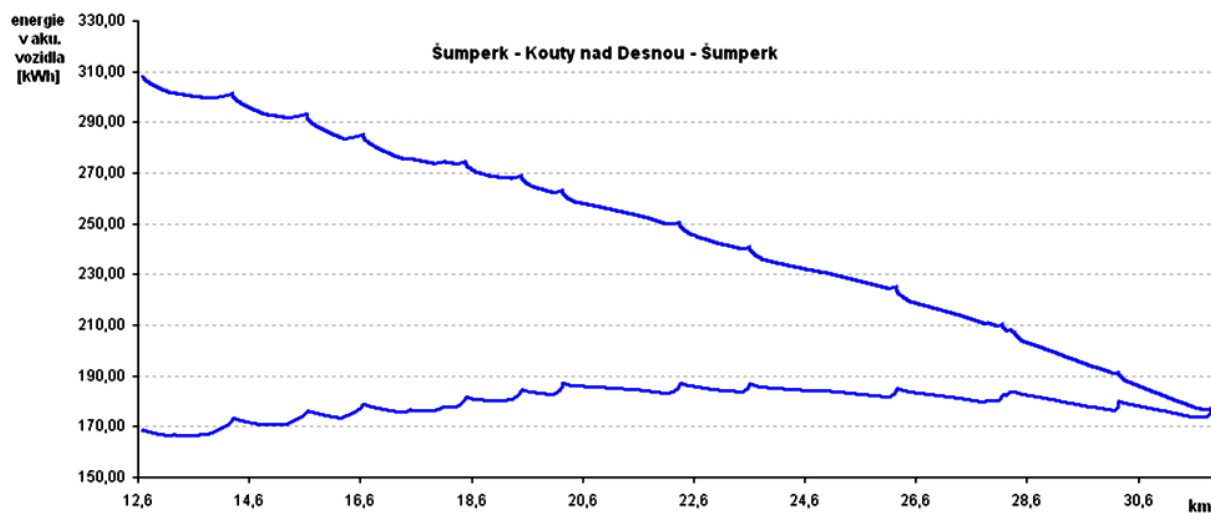
$$E = -F_t \cdot v_m \cdot t \cdot \eta \quad (3)$$

Na následujících obrázcích jsou uvedeny graficky vyjádřené příklady výsledků výpočtů. Na vodorovné ose jsou uvedeny traťové kilometry, průběhy jsou tedy vyneseny v závislosti na poloze vozu na trati. Vlastní spotřeba energie vozu (zahrnující například spotřebu pomocných pohonů, osvětlení, topení, klimatizace) byla uvažována 50 kW.

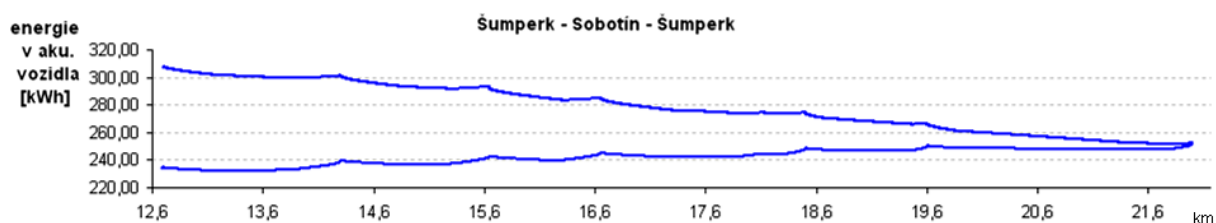


Obr. 7 - Rychlostní profil pro jízdu Šumperk – Kouty nad Desnou

Z energetických průběhů vyplývá, že v případě využití rekuperace je prakticky veškerá spotřeba dána energií potřebnou k jízdám vzhůru, tj. ve směru Kouty nad Desnou resp. Sobotín. Na průbězích jsou patrné intervaly rekuperace při brzdění do zastávek. Při výpočtech byl uvažován energeticky nejnepříznivější případ – zastavování ve všech zastávkách, přičemž v reálném provozu se v některých zastávkách zastavuje jen na znamení.



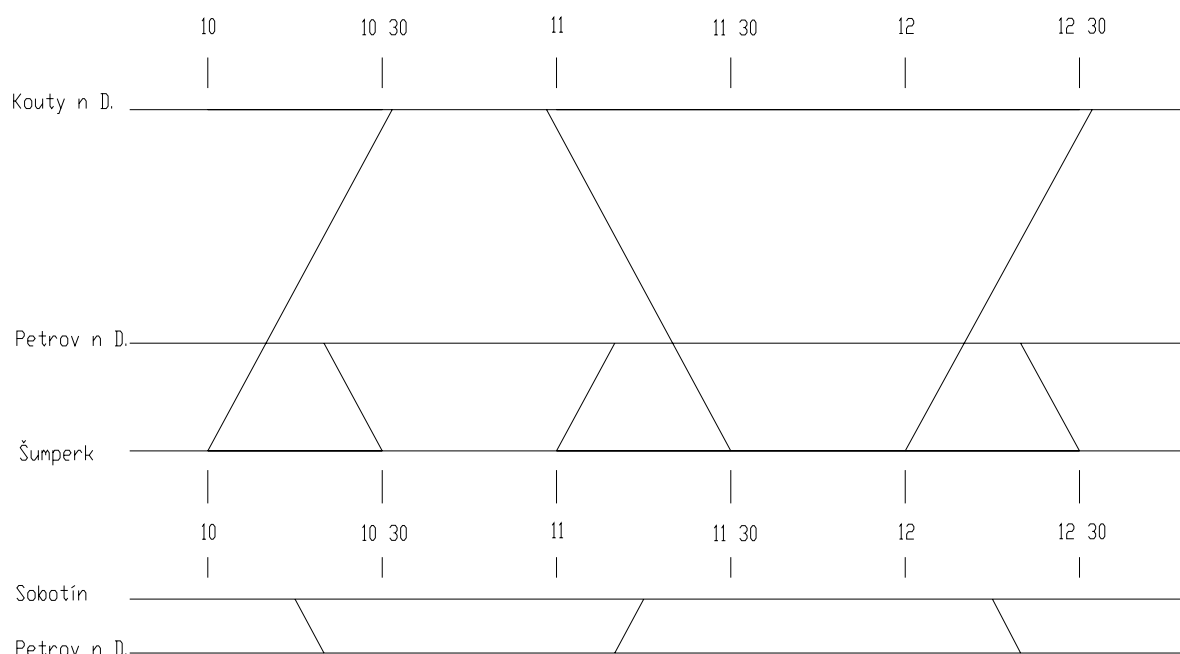
Obr. 8 - Průběh spotřebované energie při jízdě Šumperk – Kouty nad Desnou a zpět



Obr. 9 - Průběh spotřebované energie při jízdě Šumperk – Sobotín a zpět

6. Návrh klíčových komponent vozidla

Trakční výpočty a jejich výstupy, prezentované v grafické formě zejména v obr. 8 a 9, poskytly základní podklady pro dimenzování energetických a trakčních komponent. Veškerá energetická spotřeba byla ve výpočtech vztahena ke stejnosměrnému napěťovému meziobvodu vozidla podle obr. 4. Jedná se o obvod paralelně připojený ke svorkám trakční baterie se jmenovitým napětím 750 V. Při provozu na obou modelovaných železničních linkách byl při výpočtech předpokládán dvouhodinový takt – obr. 10. V tomto taktu byla vypočtena doba jízdy na lince Šumperk – Kouty nad Desnou 30 minut, předpokládá se, že ve dvouhodinovém taktu bude vozidlo vždy 30 minut na cestě a 30 minut bude dobíjen trakční akumulátor v koncové stanici ze staničního akumulátoru. Energetická spotřeba na jeden obrot byla vypočtena 150 kWh včetně zahrnutí účinností komponent trakčního pohonu, účinnosti nabíjení a vybíjení trakčního akumulátoru a vlastní pomocné spotřeby vozidla 50 kW. Na lince Šumperk – Sobotín byla určena spotřeba na jeden obrot 70 kWh. Strategie provozního nabíjení byla stanovena tak, že nabíjení vozu pro trať Šumperk – Sobotín, která je kratší a s menším stoupáním, se předpokládá jen ve stanici Sobotín. Tato koncepce potom umožňuje použití identických vozů pro obě tratě a použití identických dobíjecích technologií ve všech koncových stanicích.



Obr. 10 - Uvažovaný jízdní řád - výřez

Volba energetické kapacity trakční vozidlové baterie není dána jen energetickou spotřebou při provozu, ale zohledňuje i otázky provozních rezerv a životnosti, neboť čím jsou větší nabíjecí a vybíjecí proudy baterie vůči její kapacitě, tím je kratší její životnost. Nutnost provozní rezervy vychází z požadavku provozuschopnosti vozu při mimořádných provozních situacích (zpoždění atd.) a z požadavku krytí vlastních provozních spotřeb vozidla mimo dobu jízdy. Byla specifikována baterie Li-Ion s energetickou kapacitou 310 kWh s hmotností 3159 kg. Vzhledem k hmotnosti vozu je hmotnost baterie akceptovatelná, vyšší pořizovací náklady spojené s určitým předimenzováním baterie jsou eliminovány vyšší životností danou relativně menším výkonovým zatěžováním.

Při rozjezdech a zastavování vozidla je trakčním pohonem odebírána či vracena energie daná dynamickými složkami tažné síly. Jedná se o relativně vysoké energetické objemy v krátkých časech – patrné i z obr. 8 a 9. Zpracování této energie v trakční baterii by bylo vzhledem k limitované výkonové hustotě neefektivní, proto je doplněna sada superkondenzátorů, které jsou schopny tyto energetické objemy bez problémů zpracovávat. Energetické dimenzování kondenzátorů vychází z velikostí energií potřebných pro rozjezd a zastavení. Pomocí trakčních výpočtů byla určena průměrná energie pro jeden rozjezd 2 kWh. Z této hodnoty a určité rezervy vychází i navržené dimenzování superkondenzátoru - 3 kWh. Při určování kapacity superkondenzátoru je nutno zohlednit skutečnost, že za provozu je možno superkondenzátor vybíjet jen přibližně na polovinu maximálního napětí. Superkondenzátory jsou konstruovány na napětí řádově desítek až několika málo stovek V, proto se předpokládá připojení superkondenzátoru do stejnosměrného meziobvodu přes přizpůsobovací měnič.

Nabíjecí měnič vozidla je navržen jako třífázový tranzistorový můstek se zpětnými diodami. V případě dobíjení trakční baterie z baterie staniční pracuje tento obvod jako zvyšovací pulsní měnič, zároveň však tento měnič umožňuje nabíjení trakčního akumulátoru z běžné distribuční sítě 3 x 400 V ve funkci pulsního usměrňovače.

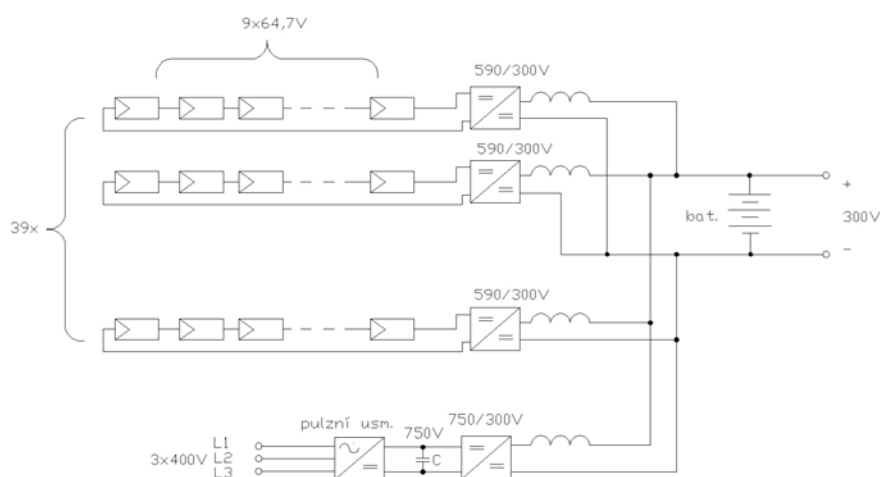
Navržený trakční pohon je tvořen čtveřicí synchronních motorů 87,5 kW v bezpřevodovkovém uspořádání, které jsou individuálně napájeny ze čtyř můstkových střídačů.

7. Návrh klíčových staničních komponent

Na obr. 11 je znázorněna bloková struktura staniční energetické technologie. Fotovoltaické panely jsou uspořádány sérioparalelně, každá sériová větev je připojena do obvodu staniční akumulátorové baterie přes snižovací pulsní měnič. Jmenovité napětí staniční baterie je stanoveno 300V, napětí sériové větve článků je 590 V. Staniční baterie je připojena k síti přes dvojici měničů s možností obousměrného toku energie. Při nedostatku fotovoltaické energie je staniční baterie dobíjena ze sítě, při přebytku fotovoltaické energie je umožněna její dodávka do sítě. Vstupní síťový měnič je řešen jako pulsní usměrňovač. Ten však pracuje s napětím vyšším na stejnosměrné straně. Vzhledem k relaci mezi napětím sítě (3 x 400 V) a napětím

staniční baterie (300V) je na stejnosměrné straně usměrňovače vřazen pulsní měnič pro přizpůsobení napěťových úrovní.

Energetická kapacita staniční baterie byla stanovena na 600 kWh, tedy přibližně dvojnásobek kapacity vozidlové trakční baterie. Rezerva kapacity zajistí delší životnost baterie, větší provozní rezervu energie a eliminaci výkyvů ve výrobě fotovoltaické energie. Z důvodu nižších pořizovacích nákladů je navržena olověná baterie s vyšší hmotností, vzhledem ke stacionární aplikaci není hodnota hmotnosti kritická.



Obr. 11 - Blokové schéma staniční energetické technologie

Zásadní etapou návrhu je specifikace fotovoltaického zdroje. Bylo vytipováno použití fotovoltaického panelu, jehož parametry jsou v odstavci 2. Pro linku Šumperk – Kouty nad Desnou byla vypočtena nutná energie na jeden obrát 150 kWh. O dodávku této energie se dělí obě koncové stanice. Vzhledem ke kapacitě vozidlové baterie 310 kWh, která je dimenzována i s ohledem na nutné rezervy, bylo rozhodnuto na pokrytí této kapacity v jednom provozním taktu přibližně dimenzovat i fotovoltaické zdroje v koncových stanicích, tj. jeden fotovoltaický zdroj je dimenzován na dobítí energie 150kWh každé dvě hodiny, což odpovídá navrženému dvouhodinovému provoznímu taktu. Energie 150 kWh je počítána na úrovni stejnosměrného napěťového meziobvodu vozidla, nezohledňuje tedy účinnosti nabíjecího měniče vozidla, nabíjení a vybíjení staniční baterie a měničů fotovoltaiky.

Pro pokrytí požadované energetické dodávky bude třeba 39 paralelních větví s devíti sériově řazenými panely. Celkový počet je potom 351 panelů s celkovou plochou 1589 m². Tato plocha je uvažována při průměrné energii dopadající za den na 1 m² v ČR 2,88 kWh/m²/den. Při této ploše fotovoltaických panelů v Šumperku a v Koutech nad Desnou by tedy s dostatečnými rezervami pokrývala v průměru fotovoltaická energie veškerou spotřebu vozů na trati v případě dvouhodinového taktu během dne.

Při výpočtech dimenzování fotovoltaického zdroje pro provoz na lince Šumperk – Sobotín při dvouhodinovém taktu a dobíjení pouze v Sobotíně bylo výpočetně ověřeno, že stejná plocha panelů by byla dostatečná i pro tuto trať.

Na základě požadované strategie dělení energie z jednotlivých energetických zdrojů by provozovatel z dostupné plochy panelů určil míru využití síťového dobíjení.

8. Relace mezi cenami energií za provoz

Hlavním cílem prováděných prací bylo získání základních technických parametrů dopravního systému využívajícího solární energii. Zpracování podrobné ekonomické analýzy zahrnující investiční i provozní část je mimo rámec technického návrhu. Pro získání alespoň dílčí orientační ekonomické představy bylo zpracováno porovnání nákladů na energii navrženého systému s náklady v případě použití stejného vozidla avšak s dielelektrickým přenosem výkonu. Pro jednoznačné porovnání byly náklady vztahovány k energii dodávané do stejnosměrného napěťového meziobvodu, tj. v případě akumulátorového vozu se jedná o obvod svorek trakční baterie, v případě dielelektrického vozu se jedná o výstup trakčního usměrňovače.

V případě krytí dodávky elektrické energie ze sítě je rovněž nutno počítat se staniční baterií vzhledem k předpokládané malé proudové zatížitelnosti síťové přípojky. Cena 1 kWh je kalkulována 2,3 Kč. K ceně energie je však nezbytné připočítat cenu za „uložení energie v bateriích“. Tuto položku je nezbytné kalkulovat z důvodu omezené životnosti zásobníků energie.

V případě, že je veškerá elektrická energie získávána dobíjením z energetické sítě, cena energie na jeden oběh vozu na lince Šumperk – Kouty nad Desnou se spotřebou 150 kWh činí 1464 Kč. V případě, že je veškerá energie získána z fotovoltaických zdrojů, je částka na projetí jednoho oběhu linky Šumperk – Kouty nad Desnou 942 Kč.

V případě vozidla s dielelektrickým pohonem je uvažována obvyklá poměrná spotřeba motorové nafty 0,2 kg/kWh. Zde se jedná o kWh na hřídeli spalovacího motoru. Při použití dielelektrického pohonu vozu není možno využívat efektu rekuperačního brzdění. Pro tento případ byly provedeny trakční výpočty a bylo zjištěno, že pro jeden oběh na lince Šumperk – Kouty nad Desnou se zvětší spotřeba energie ve stejnosměrném meziobvodu o 20 kWh, tedy na 170 kWh. Při uvažované ceně 32,5 Kč za 1 l motorové nafty bude cena za palivo pro jeden oběh této linky 1547 Kč.

Výše uvedené ekonomické úvahy jsou velmi zjednodušené. Všímají si pouze přímých nákladů na energii, případně její uskladnění v bateriích, nezahrnují však již například náklady na údržbu, řešeny rovněž nejsou počáteční investice. Přibližnost závěrů výpočtů je dána i obtížným postihnutím přesného počtu nabíjecích cyklů baterií a zejména nejistými relacemi v cenách energií.

9. Závěr

Práce mapuje současné možnosti využití akumulátorových kolejových vozidel pro regionální železniční dopravu s využitím fotovoltaických zdrojů. Výpočty byly provedeny pro jeden konkrétní dopravní systém. Obdobnou koncepci provozu by bylo možno provozovat i na dalších tratích podobného charakteru v České republice.

V případě nemožnosti dostatečného dimenzování fotovoltaických zdrojů je možnou alternativou síťové dobíjení ze sítě 3x400V nebo využití topné přípojky, tj. sítě 3 kV stejnosměrných.

Ze studie je zřejmé, že míra využití solární energie ve studovaném typu dopravního systému bude záviset na řadě faktorů, zejména na dopravní koncepci, rozvoji alternativních energetických technologií, investiční a energetické strategii provozovatele, parametrech tratě a klimatických podmínkách. Vzhledem k možnostem fotovoltaických technologií a klimatickým podmínkám v ČR je však zatím třeba vždy předpokládat existenci dalšího zdroje napájení, v podmínkách české železniční sítě přednostně síťové přípojky. Zcela optimální se však jeví začlenění energetické části studovaného dopravního systému do systému Smart Grids, kdy jsou vytvořeny předpoklady pro eliminaci výkyvů fotovoltaické energie a je k dispozici určitá část kapacity energetických zásobníků.

Ekonomické efekty řešení jsou vyčísleny jen částečně a orientačně. Je zřejmé, že při současných úrovních cen energií přináší akumulátorový provoz s nabíjením ze sítě poměrně malý efekt. Výroba energie ve fotovoltaických zdrojích by však přinesla efekt výraznější. Skutečný ekonomický efekt by v konkrétním případě závisel na zvolené strategii dělby energetických zdrojů a zejména na vývoji cen energií. Mimo veškerou pochybnost jsou však příznivé ekologické efekty akumulátorového provozu.

Poděkování

Výzkum je podporován projektem Zelená energie skupiny ČEZ - Studie využití solární energie pro regionální železniční tratě.



Literatura

- [1] BALSAR, J. - MRKVIČKA, J.: Trakční vozidla závislá I, 1. vydání, NADAS Praha 1982
- [2] LIBRA, M. - POULEK, V.: Fotovoltaická transformace energie. Časopis ELEKTRO 2010, roč. 20, č. 2. ISSN 1210-0889
- [3] MAŠEK, Z. - GREGORA, S. - MICHL, J. - DVOŘÁK, K.: Superkapacitory v dopravní technice. Vědeckotechnický sborník ČD [online]. Duben 2008, č. 25/2008. Dostupný z WWW: <http://www.cdmail.cz/VT/CLANKY/vts25/2511.pdf>
- [4] LIBRA, M. - POULEK, V.: Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. Praha: Ilsa, 2010. ISBN 978-80-904311-5-7.
- [5] MURTINGER, K. - BERANOVSKÝ, J.- TOMEŠ, M.: Fotovoltaika: elektřina ze slunce. Praha: EkoWATT, 2008. ISBN 978-80-7366-133-5.
- [6] POHL, J.: Využití solární energie pro pohon kolejových vozidel. 2010. Firemní prezentace Siemens.

Pardubice, listopad 2011

Lektoroval: Ing. Jiří Šimánek, Ph.D.
SŽDC, s.o.