

16.4.2012

## Oponentní posudek disertační práce

Ing. Miroslav Los:

### **Využití přímých měničů kmitočtu pro trakční pohony**

Západočeská univerzita

Fakulta elektrotechnická

Plzeň 2012

Disertační práce se zbývá analýzou činnosti vstupních měničů kmitočtu pro napájení trakčního středofrekvenčního transformátoru pro trakční vozidla střídavé trakce 25 kV, 50 Hz a/nebo 15 kV, 16,7 Hz s asynchronními trakčními motory. Proti dnes standardnímu provedení se síťovým jednofázovým trakčním transformátorem se očekávají významné úspory celkové hmotnosti soupravy vstupního měniče plus popřípadě vstupního filtru a středofrekvenčního transformátoru proti samotnému transformátoru na 50 Hz a zvláště pro 16,7 Hz.

Samotný transformátor se nezdá být zvláště problematický (pro napájení pomocných pohonů se používají na výkony řádově 200 kVA dnes běžně). Totéž do jisté míry platí i pro měniče na sekundární straně, jde o pulzní usměrňovače (PU - čtyřkvadrantní měniče), které vytvářejí napětí pro stejnosměrný meziobvod.

Jádro problému tkví především v provedení vstupního měniče, který je napájen z trolejového jednofázového systému napětím 15 kV nebo 25 kV a přenáší plný výkon trakčního vozidla (vč. přetížení, napájení pomocných pohonů a vlakového topení). Hlavním do značné míry i konstrukčním problémem je vyřešit takový střídač vzhledem omezenému prostoru ve vozidle a to závisí v rozhodující míře na zvoleném schématu zapojení. Vstupní obvody jsou ve všech případech tvořeny sériovým spojením dílčích měničů s ohledem na napěťové parametry polovodičových součástí.

Existuje řada možností, které jsou popsány v první části práce. Liší se v počtu polovodičových součástí, dalších komponent (např. kondenzátorů) a ovšem i možnostmi jejich řízení a jimi danými vlastnostmi celého zařízení.

Tato problematika se v současné době sleduje i v zahraničí a velké firmy, které se trakční problematikou zabývají, uveřejnily údaje o řadě (převážně zkušebních) zařízení, jak je ostatně zřejmé z uvedené literatury. Vzhledem k tradiční výrobě trakčních vozidel v ČR je zájem o tyto novinky přirozený a práce na analýze jednotlivých možných variant je i u nás aktuální. Proto byl na tyto problémy vypsán grant GAČR 102/09/1164, s jehož podporou také tato práce vznikla. Je tedy zřejmé, že téma disertační práce je aktuální a postihuje problémy, které mají význam pro další rozvíjení techniky ve zvoleném oboru.

Práce se v úvodu zabývá stručným přehledem možných řešení a jejich hlavními vlastnostmi a popisuje současný stav prací v tomto oboru. Podle zadání se věnuje především vstupním měničům na bázi maticových měničů (MM). Dále práce obsahuje kapitoly o řízení pulzního usměrňovače (PU) a jeho řízení v souvislosti s řízením MM a analýzu vstupního filtru MM.

Následující kapitoly se zabývají především modelováním činnosti na počítači i na fyzikálním modelu a jsou uvedeny poměrně rozsáhlé výsledky pro různé navrhované varianty řízení. Pozornost je věnována porovnání těchto variant s ohledem na vliv na napájecí síť (zvlnění vstupního proudu a jeho kmitočtovému spektru). Použitý postup je nepochybně správný a výsledky to potvrzují.

Postup je dobře dokumentován schémata, obrázky a grafy a komentáři autora. K jednotlivostem těchto etap jsou v dalším uvedeny některé poznámky resp. dotazy s cílem objasnit některé okolnosti a metody postupu.

K řízení fázového posunu na vstupu měniče se sledují dvě možnosti: vkládání nulových vektorů, kterému je věnována značná pozornost (kap. 4.5) a řízení fáze řízením pulzních usměrňovačů. Je ukázáno (a v dalších kapitolách ověřeno), že za jistých předpokladů mohou oba způsoby fungovat. Kterému dává autor přednost event. za jakých okolností?

K pulznímu usměrňovači: z řady důvodů bude pravděpodobně nutno na sekundární straně transformátoru použít několik paralelně zapojených PU. Běžně se napájejí ze samostatných vinutí a pro omezení vyšších harmonických v primárním proudu se používá přesazeného řízení. Bylo by možno i při dvouhodnotovém řízení využít tento postup? Svého času byl využit na rakouské lokomotivě, ovšem v poněkud jiných souvislostech. I z důvodů symetrie a dalších by bylo asi vhodné tak, jak je to u dnešních trakčních transformátorů běžné, každému primárnímu přidružit i odpovídající sekundární vinutí?

Významnou část tvoří analýza vstupního LC filtru, který je mimochodem nezbytnou (alespoň u tohoto typu vstupních měničů) a významnou součástí zapojení a ovšem i hmotnosti zařízení. Pro vyhodnocení optimálního řešení pro posouzení současného optima dvou parametrů by podle mého mínění bylo výhodnější použití např. znázornění pomocí „vrstevnic“ místo barevných odstínů. Sledovaný poměr zvlnění proudů bude zřejmě nutné udržet na velmi malé hodnotě s ohledem na rušení v akustickém pásmu.

Zajímavým způsobem je dosaženo významného snížení zvlnění prodlevami v řízení PU při změnách polarity. Byl tento způsob ve fyzikálním modelu použit a s jakým výsledkem?

K modelu pohonu kap. 8: v této a další kapitole je slabším místem transformátor. Měření jeho vlastností, rozmístění vinutí a vliv vzájemných vazeb vinutí je nejasný. Pro transformátor na 400 Hz by bylo asi vhodné použít standardní provedení vinutí (dvě vinutí na každém sloupcu) a pro stanovení jeho parametrů standardní metody, které vycházejí ze (správného) náhradního schématu na obr. 8.24, případně doplněné o zjištění možného vlivu kapacit, které se při použitých kmitočtech a strmých změnách proudu mohou uplatnit.

Ke kap. 8.5: není jasné, jak by bylo ve skutečnosti možno potlačit proud 2. harmonické „přidáním“ této složky do regulátoru. Proud 2. harmonické jsou stejného řádu jako proudy sekundární. Při běžném postupu, (který je rovněž citován), se proud v PU sice generuje, ale odvede se rezonančním filtrem. Byly podrobněji sledovány vlivy použitého postupu na ostatní vlastnosti zařízení?

Celá práce je zaměřena na problematiku měničů, ovšem v názvu práce je uvedeno „Využití...pro trakční pohony“ a jako cíl se považuje návrh řešení, které by mělo uspořit hmotnost vozidla náhradou stávajícího trakčního transformátoru soustrojím sestávajícím (ve sledované variantě) z vstupního filtru (na trolejové napětí)+kaskády maticových měničů (na trolejové napětí) + středofrekvenčního transformátoru. Tohoto problému se však práce prakticky nedotýká (stejně tak pro využití závažných otázek rozměrů, odolnosti proti jevům v napájecí síti atd.). To ovšem nemusí být považováno za zásadní nedostatek, jde o disertační práci a nikoliv projekt. Alespoň zmínku o tom, například v závěru, bych uvítal jako důkaz toho, že tyto autor si je

těchto problémů vědom. Budou muset být jistě v dalších etapách řešeny a není vyloučeno, že mohu ovlivnit volbu optimálního řešení pro skutečné zařízení.

Práce se přirozeně nevyhnula některým drobnějším nedostatkům, plynoucích zřejmě z časové tísně při zpracování dosti rozsáhlé práce (123 stran). Jedná se v některých případech o označení měřítka, os diagramů (především u oscilogramů, obr. 8.29 a další, obr. 9.31 a další), opakování některých pasáží v textu (str. 18), nesoulad v označení vinutí transformátoru (str. 76, obr. 8.4a), nejasné zapojení a rozložení vinutí transformátoru (obr. 8.4b) a některá další. Ty však neovlivňují celkovou vysokou úroveň práce především při modelování celkového zapojení obvodu a řízení obou měničů, které představují podstatnou část práce.

V závěru práce shrnuje autor přesvědčivý přehled vykonaných prací, tak jak byly dříve popsány. Připomen je také přehled prací, které autor považuje za vhodné pro pokračování v prachech na této problematice. V této souvislosti bych přivítal „osobnější“ posouzení autora, který si během prací na disertaci nepochyby vytvořil určitý širší pohled na danou problematiku, a na pozici zvolené varianty, jejím přednostem i omezením vzhledem k v úvodu jmenovaným jiným alternativám. To by bylo jistě přínosné pro zaměření dalších prací i při posouzení technických aplikací.

Publikace autora i použítá literatura jsou uvedeny a v práci řádně citovány. Jejich větší část prací autora je společným dílem i dalších pracovníků katedry, kteří se v rámci svých disertačních prací zabývali podobnými problémy. Není ovšem zcela zřejmé, jaký podíl v těchto zprávách představuje příspěvek autora této práce. To by bylo vhodné v závěru uvést zároveň s hodnocením vlastního přínosu autora ke sledované problematice obecně. Počet uvedených položek literatury považuji ze přiměřený.

Na základě prostudování předložené práce

**doporučuji disertační práci k obhajobě**

podle zákona č.111/1998 Sb. §47.

Plzeň 20. 4. 2012

Doc. Ing. Jirí Danzer CSc.



## Oponentní posudek disertační práce Ing. Miroslava Losa

### „Využití přímých měničů kmitočtu pro trakční pohony“

Předložená disertační práce Ing. Miroslava Losa je věnována aktuální problematice nasazení přímých měničů kmitočtu v pohonech vozidel střídavé trakce za účelem snižování hmotnosti trakční výzbroje. Výrazného snížení hmotnosti lze dosáhnout nasazením středofrekvenčního trakčního transformátoru namísto dosud používaných transformátorů pracujících s frekvencí 50 Hz příp. 16,7 Hz. Podmínkou pro nasazení středofrekvenčního transformátoru ve výzbroji vozidel napájených ze střídavých sítí 25 kV / 50 Hz či 15 kV / 16,7 Hz je zvýšení frekvence napětí na vstupu trakčního transformátoru pomocí vysokonapěťového měniče. Tento měnič je možné principiálně řešit jako nepřímý či přímý měnič kmitočtu.

Autor si v předkládané práci jako hlavní cíle klade navrzení a ověření vhodných metod regulace fázového posuvu proudu troleje vůči napětí a potlačení vyšších harmonických proudu troleje jednak řízením maticových měničů na primární straně středofrekvenčního transformátoru, jednak řízením pulzního usměrňovače na sekundární straně. Jako hlavní metody práce si autor zvolil simulaci obvodů a experimentální ověření na funkčním modelu pohonu trakčního vozidla s maticovými měniči, středofrekvenčním transformátorem a pulzním usměrňovačem.

Práce je rozdělena do deseti kapitol a příloh. Úvodní dvě kapitoly se věnují obecně problematice nasazení středofrekvenčních transformátorů do výzbroje vozidel střídavé trakce, popisu různých variant zapojení primárního měniče a shrnuje aktuální stav řešení tohoto problému.

Ve třetí kapitole si autor stanovuje hlavní cíle práce a dále vytyčuje dílčí podrobné úkoly, které mají vést ke splnění hlavních cílů.

Čtvrtá kapitola je věnována možnostem řízení maticového měniče, pátá kapitola možnostem řízení pulzního usměrňovače.

V šesté kapitole se autor podrobně zabývá důležitou částí primárního maticového měniče, a to problematikou vstupního filtru a jeho optimálním návrhem. Provádí zde obvodovou analýzu, rozděluje náhradní schéma na dílčí schémata, odvozuje vztahy pro určení hodnoty L a C tohoto filtru jak při obdélníkovém řízení maticových měničů, tak i při vkládání nulových vektorů. Dále se věnuje aspektům ovlivňujícím zvlnění vstupního proudu a řiditelnost měniče, kdy provádí návrh parametrů tohoto filtru na základě simulací.

Sedmá kapitola shrnuje výsledky experimentálního ověření činnosti maticového měniče.

Osmá kapitola je věnována simulacím při spolupráci maticových měničů na primární straně transformátoru a pulzního usměrňovače na straně sekundární. Je zde sledován vliv nesymetrie vinutí primárních cívek středofrekvenčního transformátoru na rozvážení primárních proudů a následně vyrovnání této nesymetrie pomocí kondenzátorů vstupního filtru, dále je ověřována metoda přednabíjení kondenzátoru sekundárního pulzního usměrňovače.

Devátá kapitola obsahuje výsledky experimentů prováděných na funkčním modelu pohonu trakčního vozidla s 2 maticovými měniči, středofrekvenčním transformátorem, pulzním usměrňovačem a trojfázovým napěťovým střídačem. Byl ověřován provoz funkčního modelu na programovatelném

střídavém zdroji i na jednofázové síti 230V / 50 Hz, přičemž bylo sledováno vyhlazení trolejového proudu pomocí vkládání nulových vektorů do obdélníkového řízení maticového měniče. Dále byla ověřována regulace fázového posunu trolejového proudu pomocí sekundárního pulzního usměrňovače.

Na závěr byla provedena harmonická analýza vstupního proudu odebíraného funkčním modelem a zkoumán vliv vkládání nulových vektorů na potlačení vyšších harmonických.

Desátá kapitola je kapitola závěrečná, představuje shrnutí výsledků a plnění stanovených cílů předkládané práce. Dále zde autor uvádí hlavní přínosy práce a perspektivní směry dalšího zkoumání.

Zpracovávaná problematika nasazení sériově zapojených maticových měničů na primární straně středofrekvenčního transformátoru a pulzního usměrňovače na sekundární straně je velmi aktuální, protože umožňuje jednak výrazné snížení hmotnosti trakční výzbroje, jednak řízením minimalizovat negativní účinky střídavého pohonu na napájecí síť.

Předložená práce plně splnila stanovené cíle, disertant metodicky správně postupoval při řešení problému, přičemž použil v dostatečném rozsahu vhodné metody – teoretický rozbor, simulace a experimenty.

Je třeba zvláště ocenit, že pro splnění cílů v experimentální části práce musel disertant postavit, oživit funkční modely maticového měniče, napět'ového pulzního usměrňovače a trojfázového napět'ového střídače včetně jejich řízení.

Jako původní přínos disertanta k problematice navržené koncepce střídavého pohonu a zejména s ohledem na jeho praktickou aplikaci považují rozbor vstupního filtru maticového měniče a návrh metody pro optimální volbu jeho prvků.

Jako celek je předložená práce vyvážená, a to jak v části teoretické, simulační i experimentální. Jednotlivé části práce jsou dostatečně propracované do hloubky i rozsahu. Po stránce formální úpravy, grafického zpracování i jazykové úrovně je práce na dobré úrovni s minimem drobných chyb, které ale nijak nesnižují celkově velmi pozitivní dojem z celé práce.

Publikační činnost disertanta je dostatečně bohatá jak na národní, tak i mezinárodní úrovni.

K předložené práci mám následující formální připomínky:

1. V práci se vyskytují některé stylisticky méně vhodné formulace:

- str. 11 Kap. 1 *Zvýšením frekvence napětí na prim. straně transformátoru můžeme dosáhnout možnosti použití středofrekvenčního transformátoru.*
- str. 17 *... autory topologie SPARC ...*
- str. 30 *... zapínány měkkou komutací a vypínány tvrdou komutací ...*

2. Dále se v práci vyskytují zjednodušené formulace jako např. :

- str. 13 *Dva antisériové IGBT moduly. Zapojení jsou identická, jediný rozdíl je v zapojení driveru.*
- str. 29 *... napětí na sepnutém prvku a náboj PN přechodu ...*
- str. 52 *... dvojnásobkům spínací frekvence MM ...*
- str. 75 *... tyto tranzistory jsou však poměrně drahé a navíc pomalejší (spínací frekvence kolem 500 Hz) ...*

### Náměty a otázky do diskuse:

1. Vysvětlíte, proč je metoda řízení fázového posuvu trolejového proudu a napětí pomocí vkládání nulových vektorů v řízení primárního maticového měniče méně vhodná než obdobná metoda řízení pomocí nulových vektorů u sekundárního napěťového pulzního usměrňovače.
2. Diskutujte vliv sériového zapojení více maticových měničů ( $> 10$ ) s 6.5 kV IGBT v reálné aplikaci 25 kV / 50 Hz na zjištění a závěry plynoucí z modelu se 2 sériově zapojenými maticovými měniči.
3. Proved'te srovnání v práci navrženého pohonu s jedním středofrekvenčním transformátorem a trakčním pohonem s maticovými měniči se separátními transformátory od firmy ABB (viz str. 24).  
Porovnejte: - počet vn výkonových prvků  
- realizovatelnost vstupního filtru pro maticové měniče  
- rozměry / váha a realizovatelnost středofrekvenčních transformátorů  
- způsob řízení maticových měničů a pulzního usměrňovače

Předložená disertační práce splňuje požadavky plynoucí z §47 Zákona č. 11 / 1998 Sb. o vysokých školách pro udělení doktorského titulu. Proto doporučuji práci k obhajobě.

V Plzni dne 25. června 2012



Ing. Miroslav Hruška, Ph.D.  
ŠKODA ELECTRIC a.s.  
Tylova 1 / 57  
301 28 Plzeň

## **Oponentní posudek disertační práce „Využití přímých měničů kmitočtu pro trakční pohony“**

Posudek podává: Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

### **1) Význam disertační práce pro obor**

Předložená disertační práce řeší velmi aktuální problematiku. Velká hmotnost klasického trakčního transformátoru je konstrukčním problémem při stavbě hnacích kolejových vozidel (pro střídavou trakci) s velkým výkonem a vysokou konstrukční rychlostí (expresní vozidla). Zejména pro napájecí síť s kmitočtem 16,7Hz vychází transformátor objemný a těžký. Komplikací je rovněž požadavek univerzality tj. možnosti používání obou napájecích sítí 15kV/16,7Hz i 25kV/50Hz.

Práce se podrobně zabývá konkrétní vybranou topologií s primárním maticovým měničem umožňujícím provoz trakčního transformátoru na vyšším kmitočtu (400Hz). Díky tomu jsou jeho rozměry a hmotnost podstatně redukovány. Provedené teoretické analýzy, výpočty, simulace, popsané strategie řízení, návrhy regulačních struktur a konečně i výsledky praktických měření poskytují cenné a přínosné informace o výhodách i slabinách analyzované topologie. Praktické testy byly bohužel prováděny jen na malovýkonovém funkčním vzorku. To je však zcela pochopitelné vzhledem k náročnosti konstrukce a ceně skutečného trakčního pohonu v řádu jednotek MW.

### **2) Způsob řešení, splnění cílů práce**

V úvodu práce podává autor dobrý přehled možných topologických uspořádání umožňujících nasazení trakčního transformátoru pracujícího na vyšší frekvenci. Pro vlastní zkoumání byla vybrána varianta s primárním maticovým měničem s předřazeným LC filtrem (nikoliv pouze indukčností), středofrekvenčním transformátorem 400Hz a s následným sekundárním aktivním usměrňovačem.

V práci byly dobře vysvětleny specifické vlastnosti tohoto uspořádání a byly nastíněny souvislosti řízení maticového měniče v součinnosti s řízením výstupního aktivního usměrňovače (s ohledem přiblížení se harmonickému průběhu vstupního proudu odebíraného z troleje a s ohledem na říditelnost fázového posuvu tohoto proudu vůči napětí).

Klíčové problémy jsou řešeny v kap. 6. Název kapitoly „Vstupní filtr maticového měniče“ navozuje dojem jednoduchého podružného problému, ve skutečnosti však kapitola odhaluje složité souvislosti funkce celého systému a pro práci je opravdu klíčová. Oceňuji postup prezentovaný autorem v této kapitole. Na rozdíl od mnoha „povrchních“ prací obsahujících pouze množství simulací bez originální složitější nosné myšlenky, zde je patrný konstruktivní přístup k problému doprovázený také nezbytným analytickým matematickým postupem. Uvedené rozbory také objektivně odhalují slabiny celé koncepce. Podle mého názoru je koncepce s primárními nepřímými měniči s DC meziobvodem mnohem robustnější (spolehlivější) a lépe říditelná. Je to vidět již z principiálního problému – v maticovém měniči s předřazeným LC filtrem nesmí dojít ke zkratu vstupu nebo k rozpojení výstupu (v obou případech hrozí destrukce silového obvodu). Vše je v „rukou“ řídicích obvodů, což v podmínkách silného rušení není dobrá situace. Rovněž vlastní kmity LC filtru a další složité souvislosti, které se jej týkají, vytváří určitá omezení v říditelnosti (dosažení harmonického vstupního proudu). Jak bylo vysvětleno v práci, problematika je složitá a optimální parametry filtru závisí na zátěži, situaci komplikuje i proměnlivá vlastní indukčnost trolejového vedení (v závislosti na poloze vozidla vzhledem k napájecímu uzlu). Je mi však jasné, že na klasické koncepci

nelze disertační práci postavit a že v univerzitním výzkumu je třeba ověřovat i netradiční topologie.

### **3) Výsledky práce a původní přínos**

Z podrobných výsledků prezentovaných v kapitole 7 a 9 je patrné, že cíle práce byly splněny a že problematiku se podařilo zvládnout jednak simulačně (strategicky) a jednak i prakticky při realizaci malovýkonového funkčního vzorku. Je vidět, že na pracovišti autora je problematice maticových měničů systematicky věnována pozornost. Myšlenkové postupy a dosažené výsledky, které autor v práci předvádí, svědčí o jeho odborných kvalitách a o tvůrčích schopnostech. Použitá topologie primárních obvodů se sice na první pohled podobá vývojové koncepci ABB uvedené na Obr. 2.8., ovšem pouze „opticky“. Použitím LC filtru na primární straně v autorově topologii místo pouhé indukčnosti z Obr. 2.8. se chování obvodu a přístup k jeho řešení zcela mění. Publikované výsledky mají tedy zcela originální přínos.

### **4) Formální zpracování**

Práce je po jazykové stránce na velmi vysoké úrovni. Místy jsou popisovány složité souvislosti, autor přitom postupuje metodicky, myšlenky mají promyšlený sled a jeho výklad působí srozumitelně. Text je podepřen kvalitními obrázky.

Snad trochu nekonceptně působí podle mého názoru umístění zajímavých kapitol 8.3 a 8.4 s podrobnou analýzou nesymetrie rozptylu konkrétního transformátoru s pouze dvěma primárními vinutími, který byl použit při realizaci malovýkonového funkčního vzorku. Automatické vyrovnání nesymetrie popsané v kap. 8.4 po připojení kapacit je zřejmě důležitá systémová okolnost, která mohla být uvedena na jiném místě v souvislosti se skutečným schématem zapojení měniče.

### **5) Publikační činnost autora**

Ze seznamů publikací uvedených na konci práce je patrné, že disertant je autorem nebo spoluautorem celé řady publikací v českém i anglickém jazyce, což dokazuje jeho schopnost informovat odbornou veřejnost o své výzkumné činnosti. Podle zákonných pravidel musí být jádro disertační práce na patřičné úrovni publikováno. Tuto podmínku autor splňuje hned v několika publikacích.

Pozn.: Podle mého názoru je posuzování vlastních odborných schopností disertantů podle počtu a typu jejich publikací nemožné. Vygenerování publikace se „závažným impact faktorem“ je v praxi často spíše uměním organizačním či dokonce politickým a nevypovídá téměř nic o skutečné odborné úrovni autora.

### **6) Závěrečné vyjádření**

Na základě všech uvedených skutečností hodnotím práci kladně, jednoznačně ji doporučuji k obhajobě. Doporučuji, aby autorovi byl po úspěšné obhajobě udělen titul „doktor“ (Ph.D.).

### **Otázky k obhajobě:**

- 1) Mohl byste podrobněji popsat vzájemné výhody a nevýhody Vašeho zapojení a zapojení na Obr. 2.8.? V textu se zmiňujete jen o nevýhodách řešení z Obr. 2.8. Myslím si ale, že díky neexistenci kondenzátoru na primární straně je toto zapojení možná v určitých směrech bezpečnější.
- 2) Jaký je Váš názor na spolehlivost realizace Vašeho systému na plné výkonové hladině v řádu jednotek MW a s vysokým vstupním napětím? Kde vidíte hlavní úskalí?



Hodláte na pracovišti takový úkol řešit? Bude součástí nějakého experimentálního vozidla (Škoda, atd.)? Na otázku odpovězte, pokud to není obchodním tajemstvím:-)

V Brně, dne 3.5. 2012.

Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

