

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrických pohonů a trakce

Ing. Petr Vrána

**Sofistikované metody řízení měničů pro trakci s ohledem na
minimalizaci konduktivních proudů**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Teze disertace k získání akademického titulu „doktor“ ve zkratce „Ph.D.“

Praha, únor 2012

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na katedře elektrických pohonů a trakce Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Petr Vrána
Katedra elektrických pohonů a trakce
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školitel: Ing. Jiří Zděnek, CSc.
Katedra elektrických pohonů a trakce
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školitel-specialista: Doc. Ing. Jiří Javůrek, CSc.
ŠKODA ELECTRIC a.s.
Pekařská 10, 155 00 Praha 5

Oponenti:

.....
.....
.....

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Elektrické stroje, přístroje a pohony v zasedací místnosti č Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

Prof. Ing. Jiří Pavelka, DrSc.
předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru
Elektrické stroje, přístroje a pohony
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6



1. Úvod	1
2. Přehled o současném stavu problematiky	1
3. Cíle práce	2
4. Metody zpracování	3
5. Výsledky	6
6. Závěr	22
Použité odkazy v disertační práci	25
Publikační činnost	28
Summary	29

1. Úvod

Nové trendy v oboru výkonové elektroniky a regulace pohonů jsou aplikovány v různých odvětví průmyslu. Výjimečnost pohonů trakčních vozidel je v tom, že jsou pro jejich realizaci zpravidla použity ty nejnovější poznatky a technologie z oblasti elektrických pohonů výkonu jednotek MW. Ty pak slouží jako vzor pro realizaci pohonů jiných průmyslových zařízení podobných výkonů a jsou měřítkem technických možností, kterých lze momentálně dostupnou technologií dosáhnout.

Vývoj v oblasti trakčních pohonů se snaží o splnění požadavků, které lze shrnout zhruba do tří bodů.

- Snaha o stále vyšší výkon hnacích vozidel při zachování maximálních zatížení náprav a stávajících rozměrů. Tento požadavek je dán jak stále zvyšujícími se rychlostmi vozidel, tak i reliéfem nově budovaných konvenčních kolejových tratí. Ty se z důvodu nákladů na stavební práce nestaví jako dříve s ohledem na co nejmenší traťová převýšení. To má za následek, že nové tratě, na kterých budou trakční vozidla provozována, mají běžně převýšení 10-ky ‰ (vysokorychlostní trať pro TGV do 35‰), se kterými si musí hnací vozidlo poradit.
- Snaha o co nejmenší náročnost a kvalifikaci potřebnou pro údržbářské práce a s tím související spolehlivost a životnost pohonu. V dnešní době jsou na našich tratích provozovány lokomotivy, kde nejstarší s odporovou regulací jezdí 60 let (řada 140), lokomotivy s diodovým usměrňovačem 45 let (řada 230) a s tyristorovým měničem 40 let (řada 560). Pohon trakčních vozidel je tedy zařízení u něhož životnost menší než 20 let nepřipadá v úvahu. Přes veškeré nevýhody pohonů starých lokomotiv jim nemůže upřít vysokou životnost, která je daná jejich jednoduchostí a robustností. Naplnit očekávání podobné životnosti u zařízeních nesrovnatelně schopnějších, ale zároveň složitějších, je nesnadné.
- Snaha o co „nejčistější“ odběr trakčního proudu a obecně o co nejlepší EMC trakčního vozidla. A právě tento požadavek je těžko splnitelný vzhledem k splnění předchozích dvou bodů. Protože jak stále větší výkony trakčních vozidel, tak i snaha o vyšší životnost měničů částečně realizovanou snížením spínací frekvence výkonových prvků, vede ke zvýšení amplitud vyšších harmonických odebíraného proudu měničem.

Moderní trakční pohon skládající se ze statických měničů elektrické energie a bezkomutátorových točivých strojů se vzhledem k napájecí síti chová jako zdroj vyšších harmonických proudů. Harmonické proudy, které jsou součástí celkového trakčního proudu, se uzavírají v elektrickém obvodu napájecí stanice – trolejové vedení – trakční vozidlo – koleje – napájecí stanice. Naneštěstí část tohoto elektrického obvodu je sdílena s jiným elektrickým systémem zajišťujícím detekci polohy vlaku a opakování návěstí. Na základě zjištěné polohy vlaku pak zabezpečovací systém kolejových vozidel ovládá nastavení dopravní cesty, návěstí a závor. Asi není třeba zvláště zdůrazňovat, že správná funkce zabezpečovacího systému je klíčová pro bezpečný provoz na tratích a vše je tomuto požadavku podřízeno. Náplní této práce je zkoumání vzniku vyšších harmonických proudů trakčních vozidel, které by mohly ohrozit správnou funkci kolejových obvodů. Následně navrhnout řešení potlačení rušivých proudů v podobě zásahů do SW pohonu.

2. Přehled o současném stavu problematiky

V roce 2005 bylo zahájeno řešení dvouletého vývojového projektu FI-IM 2/071 vypsánoho Ministerstvem průmyslu a obchodu s názvem Konduktivní proudy v asynchronním trakčním



pohonu a jejich vliv na bezpečnost kolejových obvodů. Účastníky projektu byly firmy ŠKODA ELECTRIC a.s., AŽD Praha s.r.o. a Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vzniklé výzkumné zprávy se opíraly především o dlouholetý výzkum Doc. Ing. Jiřího Danzera. Ten se však ve svých zprávách zabýval především ovlivněním konduktivních proudů pomocí zapojení vstupních obvodů a trakčního transformátoru vozidla [22], [23], [28], [29], [34]. Více mne zajímaly zprávy týkající se ovlivnění konduktivních proudů pomocí modulací a řízení pohonu. Kompilací výzkumných zpráv [24], [31], [36], [37] vznikla disertační práce pana Ing. Jandy Ph.D., takže se dá říci, že dosavadní stav zkoumané problematiky je uveden v této disertační práci [1] publikované v roce 2007. Proto jí bude věnována celá jedna kapitola. Všechny výzkumné práce stojí na simulacích vybraných jevů, mezi kterými je největší důležitost přiřknuta vlivu mrtvých časů spínacích prvků měniče [24], [26], [30], [31], [35], [36]. Několik záznamů změřených průběhů na reálném čtyřkilowattovém pohonu je obsaženo v jedné z posledních zpráv [37]. Vzhledem ke specifickým vlastnostem kolejových obvodů používaných Českými a Slovenskými drahami, není v zahraničí výzkum vzniku nízkofrekvenčních harmonických v trakčních pohonech tak atraktivním tématem, jako je tomu u nás. Podobný výzkum jistě proběhl například i ve firmě Siemens, která se dlouhodobě snaží proniknout na „české koleje“ svojí lokomotivou Siemens Taurus ES64U4-C. Po několika letech řešení problému právě s vysokými hodnotami rušivých proudů dosáhly 29.11.2007 povolení zkušebního provozu. Snažení bylo korunováno 16.1.2008 typovým schválením českým Drážním úřadem, které platí pro tratě Brno - Břeclav a České Budějovice - Horní Dvořiště. Završení schvalovacího procesu bylo dosaženo schválením typu i polského „Husara“ lokomotivy ES64U4-D dne 21.6.2010. Z pochopitelných důvodů však nelze od fy. Siemens získat žádné informace ohledně zkoumané problematiky. Atraktivitu této problematice přinesly především problémy, které se vyskytly s uváděním do provozu jednotek 680 „Pendolino“ na území České republiky. Zde byl problém vyřešen aplikací aktivního filtru, který však neřeší příčiny rušení, ale pouze potlačuje jeho následky.

Bohužel až v průběhu roku 2010 se mi povedlo nalézt velice zajímavou disertační práci Dipl. Ing. Würflingera Ph.D. [40], která se mimo jiné zabývá aktivním potlačením nízkofrekvenčních rušivých proudů pomocí modifikace řízení výkonového měniče s přímým řízením momentu. Přímé řízení momentu jsem na základě vlastního výzkumu vyloučil jako nevhodné vzhledem k rušivým proudům již počátkem roku 2008, avšak k výsledkům Würflingerovi práce se budu vracet v průběhu jednotlivých kapitol. Würflingerův seznam použité literatury potvrdil mé přesvědčení o nezajímavosti této problematiky v zahraničí. Z více než stovky uvedených titulů bylo pouze šestnáct mladších deseti let a z nich se tématu rušení trakčních vozidel věnovaly pouze čtyři [41], [42], [43], [44].

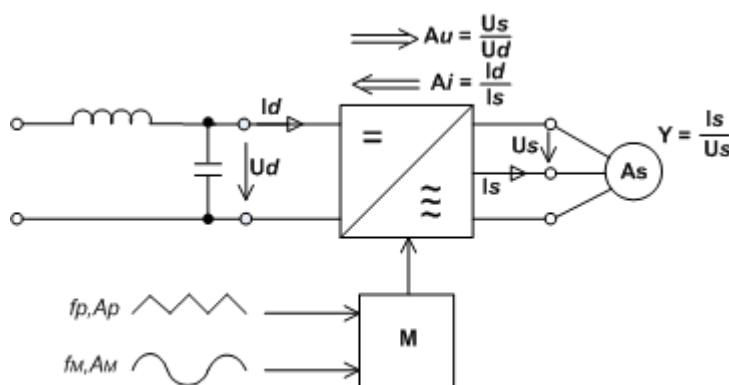
3. Cíle práce

- Objasnit vznik vyšších harmonických proudů odebíraného napěťovým střídačem trakčního pohonu, které mohou rušit železniční zabezpečovací zařízení.
- Na základě znalostí o vzniku vyšších harmonických v nízkofrekvenční oblasti navrhnout metody jejich odstranění, nebo jejich „vytlačení“ do jiné frekvenční oblasti tak, aby trakční vozidlo vyhovělo z hlediska limitů rušivých proudů daných normou.
- Prakticky realizovat a odzkoušet navržené metody. Měřením na pohonu trakčního vozidla, či v laboratoři dokázat jejich účinnost.

4. Metody zpracování

Výzkum harmonických ideální ho napět'ového střídače

Pro co nejdokonalejší popis harmonických proudů v meziobvodu střídače a následné hledání možností jejich korekce je užitečné si harmonické rozdělit podle způsobu jejich vzniku. První takto vzniklou skupinou jsou harmonické vznikající během funkce ideálního střídače. Dá se předpokládat, že minimálně tyto harmonické budou obsaženy při provozu všech reálných střídačů. Přičtením dalších harmonických vzniklých v důsledku odchylek vlastností reálného střídače od ideálního se pak získá skutečná skladba harmonických. Experimentálně pomocí simulací střídače realizovaného programy v LabVIEW a analytickými výpočty jsem určil všechny harmonické proudy meziobvodu pro případ ideálního střídače, konstantního napětí meziobvodu a proudových sinusových zdrojů na straně zátěže. Tento výzkum se rozpadl do tří částí. Výzkum přenosu jednotlivých harmonických napětí meziobvodu na satorová napětí stroje $A_{U_s/U_d} = U_{S/Harm} / U_{d/Harm}$ (simulace), přenos jednotlivých harmonických satorového napětí stroje na satorový proud stroje $Y_{I_s/U_s} = I_{S/Harm} / U_{S/Harm}$ (analytický výpočet, zobrazení MuPAD) a konečně přenos harmonických satorového proudů stroje na proud meziobvodu střídače $A_{I_d/I_s} = I_{d/Harm} / I_{S/Harm}$ (simulace a analytický výpočet v MuPAD). Modulací střídače byla suboscilační PWM spočívající v koincidenci pily modulátoru se zadanou sinusovkou. Nejprve bylo potřeba u jednotlivých přenosů určit harmonickou skladbu, abych mohl následně jednotlivým harmonickým přiřadit jejich přenosy amplitud. Klíčové bylo určení přesnosti simulace, tedy zvolení vhodného počtu diskretních kroků výpočtu, kterým je přesnost určena.



4.1: Ideální střídač se zátěží

Admitance reálného asynchronního stroje $Y_{I_s/U_s} = I_s/U_s$

Výpočet admitance stroje vychází ze základních rovnic popisujících asynchronní stroj k vztahné soustavě \underline{k} [4.1]. Pro vyjádření vztahu mezi U , I a n je zapotřebí z rovnic odstranit toky, čímž vzniknou rovnice U - n modelu asynchronního stroje. Při volbě vztahného systému svázaného s tokem, vzniknou rovnice [4.2]. Pro následné zjednodušení rovnic budu uvažovat konstantní rotorový tok. Stejně zjednodušení jsem použil i ve své diplomové práci, kde je odvozeno, že je-li konstantní rotorový tok, musí být zároveň konstantní a satorový tok. To samé platí pro rotorové a satorové proudy. Tím vznikne soustava dvou rovnic [4.3], ze kterých lze již vyjádřit rovnici [4.4], tedy funkci prostorových vektorů $\mathbf{U}_1 = f(I_1, n)$. My však hledáme funkci modulů prostorových vektorů satorového napětí a proudu, pro jejíž získání je nutné rozepsat rovnici [4.4] do složek x , y . Při vyjádření hledané funkce $|\mathbf{U}_1| = f(|I_1|, n)$ jsem si pomohl umístěním prostorového vektoru satorového napětí do osy x , z čehož plyne, že U_{1x}



= $|\mathbf{U}_1|$ a $U_{1y} = 0$. Po několika matematických operacích vznikl výsledný vztah [4.5]. Pro grafické zobrazení různých závislostí jsem použil program MuPAD. Všechny níže uvedené průběhy byly vygenerovány v souboru Admittance ASM.mn, který je opět na doprovodném DVD. Po přenesení rovnic do MuPAD jsem si zkontroloval jejich věrohodnost vykreslením závislosti statorového proudu na rotorovém kmitočtu při konstantním napětí a otáčkách viz. obrázek 4.2.

$$\begin{aligned}\vec{U}_1^k &= R_1 \vec{I}_1^k + \frac{d\vec{\Psi}_1^k}{dt} + j\omega_k \vec{\Psi}_1^k \\ 0 &= R_2 \vec{I}_2^k + \frac{d\vec{\Psi}_2^k}{dt} + j(\omega_k - \omega) \vec{\Psi}_2^k\end{aligned}\quad [4.1]$$

$$\begin{aligned}\vec{\Psi}_1 &= \vec{\Psi}_{1\sigma} + \vec{\Psi}_m = \vec{I}_1 L_{12} + L_m (\vec{I}_1 + \vec{I}_2) = \vec{I}_1 L_1 + \vec{I}_2 L_m \\ \vec{\Psi}_2 &= \vec{\Psi}_{2\sigma} + \vec{\Psi}_m = \vec{I}_2 L_{22} + L_m (\vec{I}_2 + \vec{I}_1) = \vec{I}_1 L_m + \vec{I}_2 L_2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{U}_1 &= R_1 \vec{I}_1 + L_1 \frac{d\vec{I}_1}{dt} + L_m \frac{d\vec{I}_2}{dt} + j\omega_1 (\vec{I}_1 L_1 + \vec{I}_2 L_m) \\ 0 &= R_2 \vec{I}_2 + L_m \frac{d\vec{I}_1}{dt} + L_2 \frac{d\vec{I}_2}{dt} + j\omega_2 (\vec{I}_1 L_m + \vec{I}_2 L_2)\end{aligned}\quad [4.2]$$

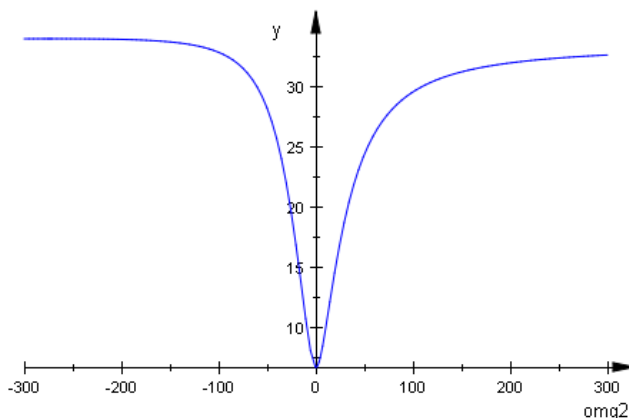
$$\begin{aligned}\vec{U}_1 &= R_1 \vec{I}_1 + j\omega_1 (\vec{I}_1 L_1 + \vec{I}_2 L_m) \\ 0 &= R_2 \vec{I}_2 + j\omega_2 (\vec{I}_1 L_m + \vec{I}_2 L_2)\end{aligned}\quad [4.3]$$

$$\vec{U}_1 = \vec{I}_1 \left[R_1 + j\omega_1 L_1 + \frac{R_2 \omega_1 \omega_2 L_m^2 - j\omega_1 \omega_2^2 L_m^2 L_2}{R_2^2 + \omega_2^2 L_2^2} \right]\quad [4.4]$$

$$|I_1| = |U_1| \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2}}{\left[R_1 - \omega_1 L_1 \frac{C_1}{C_2} + \frac{\omega_1 \omega_2^2 L_m^2 L_2}{R_2^2 + \omega_2^2 L_2^2} \frac{C_1}{C_2} + \frac{R_2 \omega_1 \omega_2 L_m^2}{R_2^2 + \omega_2^2 L_2^2} \right]}\quad [4.5]$$

$$C_1 = \frac{\omega_1 \omega_2^2 L_m^2 L_2}{R_2^2 + \omega_2^2 L_2^2} - \omega_1 L_1 \quad C_2 = R_1 \frac{R_2 \omega_1 \omega_2 L_m^2}{R_2^2 + \omega_2^2 L_2^2}$$

Známý průběh proudu a skutečnost, že při jmenovitém skluzu bylo dosaženo jmenovitého statorového proudu byly postačujícím důkazem správnosti odvození.



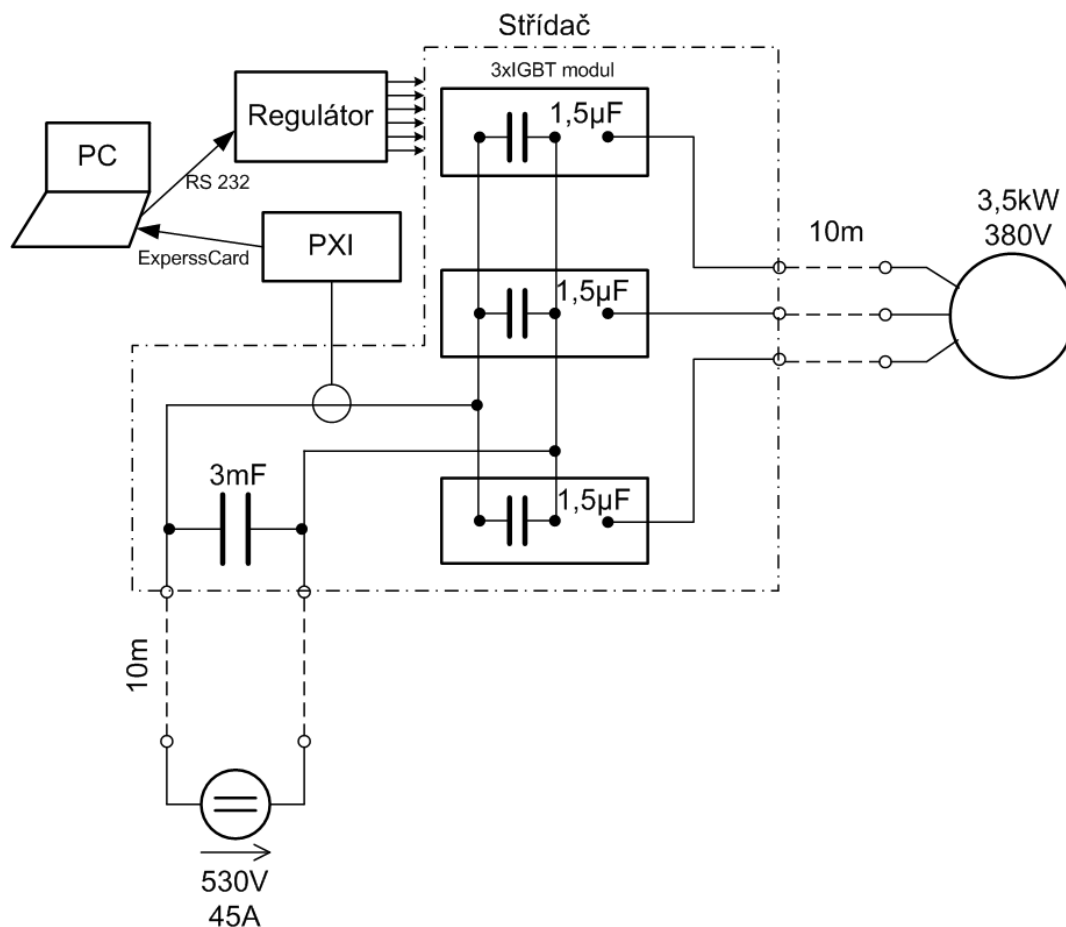
4.2: Závislost modulu statorového proudu na rotorové frekvenci

Výzkum vlastností reálného střídače

Po popisu harmonických v proudu meziobvodu ideálního střídače, tedy těch, které se vyskytují v meziobvodu vždy již z principu funkce střídače, jsem se soustředil na popis jevů způsobujících generování nových dodatečných harmonických. V prvním kroku jsem se snažil popsat příčiny výskytu první harmonické fázového proudu v proudu meziobvodu střídače. Tato harmonická vyvolávala největší obavy především v počátcích výzkumu. Zvláštní kapitolou je též výskyt šesté harmonické statorového proudu v meziobvodu střídače. Dále jsem se ještě jednou zaměřil na skutečný vliv mrtvých dob střídače a jejich kompenzace, které pan Janda považoval ve své práci za zásadní. Ve frekvenčním spektru změřeného proudu meziobvodu pan Janda narazil na výraznou čáru odpovídající polovině frekvence první harmonické statorového proudu. V závěru kapitoly uvádí, že si výskyt této subharmonické nedovede vysvětlit, což bylo pro mne podnětem pro další výzkum. Většina následujících změřených spekter proudu meziobvodu byla sejmuta na laboratorním střídači zapojeném podle schématu na obrázku 4.3. Rogowského sondu měřící proud meziobvodu jsem se snažil umístit tak, aby měřený proud obsahoval co nejvíce harmonických. Dá se očekávat, že snubberové kondenzátory $1,5\mu\text{F}$ budou mít pro harmonické řádu stovek Hz dost velikou impedanci, aby příliš neovlivnily přesnost měření. Ostatní publikovaná spektra byla sejmuta již na různých vozidlech, jejichž typ záměrně neuvedu. U takovýchto průběhů uvedu pouze data určující pracovní bod pohonu, přičemž regulační SW je totožný se SW použitým v laboratoři.

Volba regulace a modulací z hlediska ohrožujících konduktivních proudů

V době vývoje pohonu lokomotivy 109E byla eliminace rušivých trakčních proudů jedním z nejdůležitějších faktorů pro volbu vhodného typu regulace. Ze známých typů regulací se do užšího výběru dostalo přímé řízení momentu a vektorové regulace, a to především proto, že bylo s nimi nejvíce zkušeností a osvědčily se již v minulosti. Pokusná měření rušivých proudů nakonec rozhodla, která regulace bude použita. Co se týče modulací, celý svůj výzkum jsem se věnoval pouze asynchronní modulaci, která je realizována koincidencí zadávacích sinusovek a pily modulátoru. V kapitole 7.3 se pokusím vysvětlit tento svůj skoro až diskriminační přístup vůči modulacím synchronním. Veškerou teorii týkající se volby a přechodů mezi modulacemi jsem si přivezl ze studijního pobytu na Ruhr-Universität Bochum. Nejzajímavější, co se týče harmonických proudů různých synchronních modulací, byla cvičení a přednášky Prof. Steimela v předmětu Leistungselektronik 2.



4.3: Schéma pokusného pracoviště

5. Výsledky

Výzkum ideálního střídače

Jandova práce nabídla postup analytického výpočtu harmonických ideálního střídače, avšak zveřejňuje minimum použitelných výsledků. Těmi jsou výpisy vyskytujících se harmonických v proudu meziobvodu střídače, $(1, 3, 5, 7\dots)f_{P\pm}$ ($3, 9, 15, 21\dots$) f_S , $(0, 2, 4,\dots)f_{P\pm}$ ($0, 6, 12, 18\dots$) f_S . To je však nedostatečné hlavně z důvodu nemožnosti odhadu velikosti jednotlivých harmonických u pohonů různých výkonů a pracovních stavů, což je pro splnění limitů OKP klíčové. Proto jsem se pokusil mimo hlavní experimentální část výzkumu spočívající v on-line měřeních konduktivních proudů i o podrobnější popis ideálního střídače.

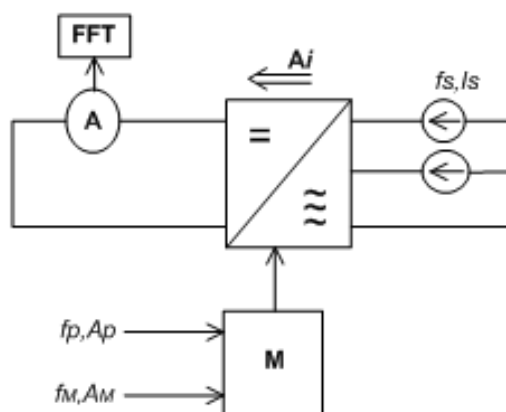
Proudový přenos střídače $H_{Id/I_s} = I_d/I_s$

5.1: Simulace proudového přenosu střídače

Schéma obvodu, který byl realizován programem (SimulaceMenice_prenosProudu.vi) je na obrázku 5.1. Při jednotkovém harmonickém proudu zátěže jsem odečítal velikosti amplitud harmonických obsažených v proudu meziobvodu. Nejprve jsem zkoumal nejjednodušší případ, kdy frekvence proudových zdrojů je totožná se zadávací frekvencí modulátoru. Snažil jsem se nalézt co nejvíce závislostí velikosti frekvence a amplitud harmonických proudů meziobvodu. Výsledky simulací potvrdily, že velikost ani frekvence harmonických proudů meziobvodu vůbec nezávisí na fázi pily modulátoru vůči zadávacímu sinusovému průběhu, či sinusovým proudům meziobvodu. Jediný fázový posuv ovlivňující velikost, nikoliv však frekvenci harmonických, je mezi sinusovým proudem zátěže a sinusovým zadáním modulátoru. Dalším ne samozřejmým zjištěním je, že amplitudy harmonických proudů meziobvodu nejsou nikterak závislé na velikosti frekvence pily modulátoru, tedy spínací frekvenci střídače. Pouze dojde podle velikosti spínací frekvence k posunu celého spektra, ale velikost jednotlivých harmonických zůstává stejná.

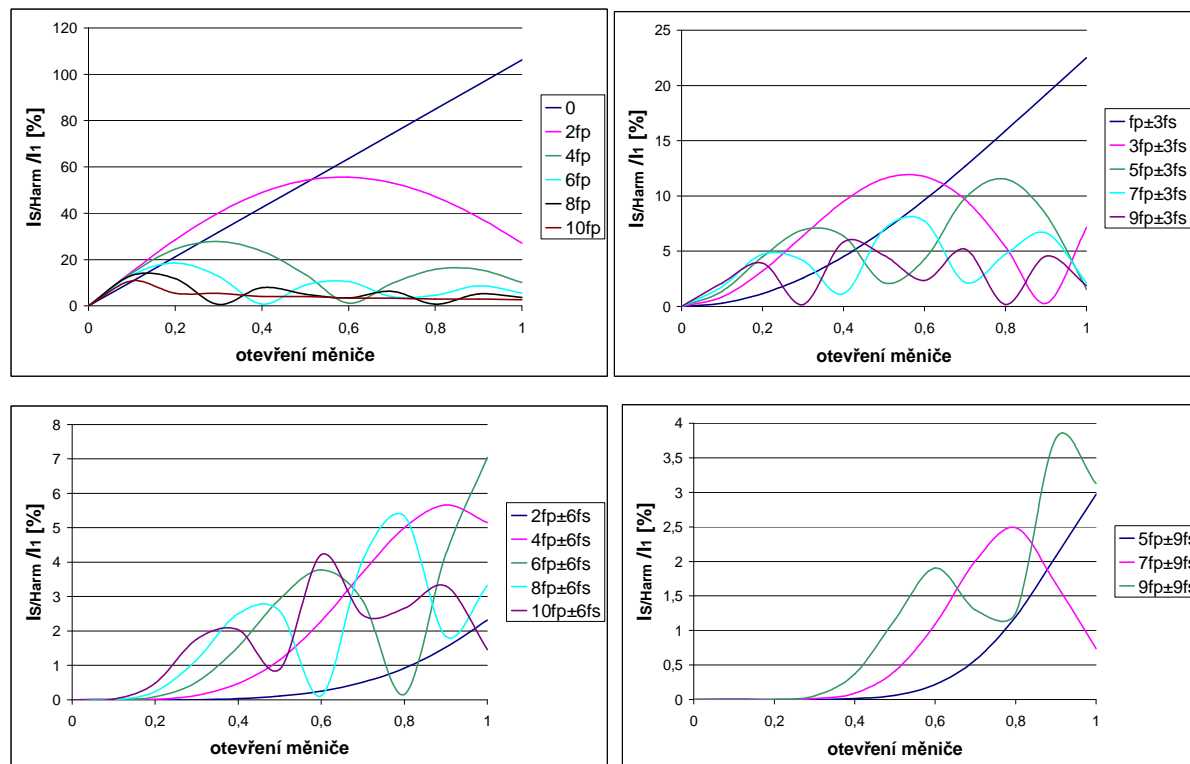
Po vyjasnění si závislostí frekvence harmonických proudů meziobvodu směřovaly pokusy k získání zobecňujících vzorců popisujících frekvence harmonických v proudu meziobvodu, které by zahrnovaly i případy, kdy frekvence sinusových proudových zdrojů zátěže jsou H násobkem frekvence zadávající sinusovky modulátoru. To odpovídá situaci, kdy strojem napájeným střídačem teče z jakéhokoliv příčiny harmonický proud, jehož frekvence je násobkem frekvence zadávající sinusovky modulátoru. Díky principu superpozice je potom možné poskládat výsledné spektrum proudu meziobvodu z harmonických vzniklých od první harmonické statorového proudu stroje a od vyšších harmonických proudů stroje. Tyto zobecněné vztahy jsou od lichých násobků spínací frekvence [5.1], od sudých [5.2].

$$f = |v_u f_p \pm |H - 6k + 2| f_M| \quad \text{kde } v_u = 1,3,5,\dots \quad k = 0,1,2,3,\dots \quad [5.1]$$

$$f = |v_g f_p \pm |H - 6k + 5| f_M| \quad \text{kde } v_g = 2,4,6,\dots \quad k = 0,1,2,3,\dots \quad [5.2]$$

Následující výzkum se týkal určení závislostí amplitud harmonických proudů meziobvodu. Ze simulací vyplynulo, že velikosti amplitud harmonických jsou ovlivněny pouze fázovým

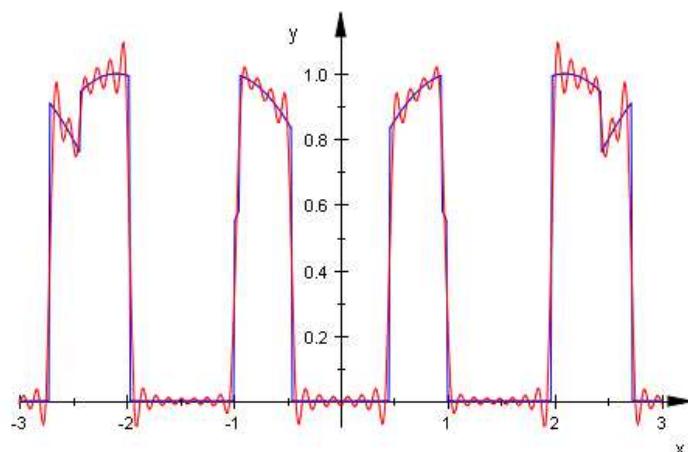
posuvem zadávací sinusovky modulátoru, harmonickým proudem zátěže a otevření měniče. Otevření měniče je definováno jako poměr amplitud pily a zadávací sinusovky modulátoru. Pro různá otevření modulátoru jsem s krokem 0,1 odečítal amplitudu harmonických proudů do frekvencí odpovídající desetinásobku spínací frekvence. Délka generovaného průběhu proudu meziobvodu vstupujícího do FFT je dána zvolenou velikostí okna FFT a vzorkovací frekvencí. Práce probíhala tak, že po provedení všech nastavení jsem zpustil výpočet, jehož výsledkem byla harmonická analýza zobrazená v 2D grafu, ze kterého se postupným odčítáním určily frekvence a amplitudy všech harmonických. Výsledky pro případ, kdy se frekvence harmonických proudů zátěže rovná frekvenci zadávací sinusovky modulátoru jsou na obrázku 5.2.



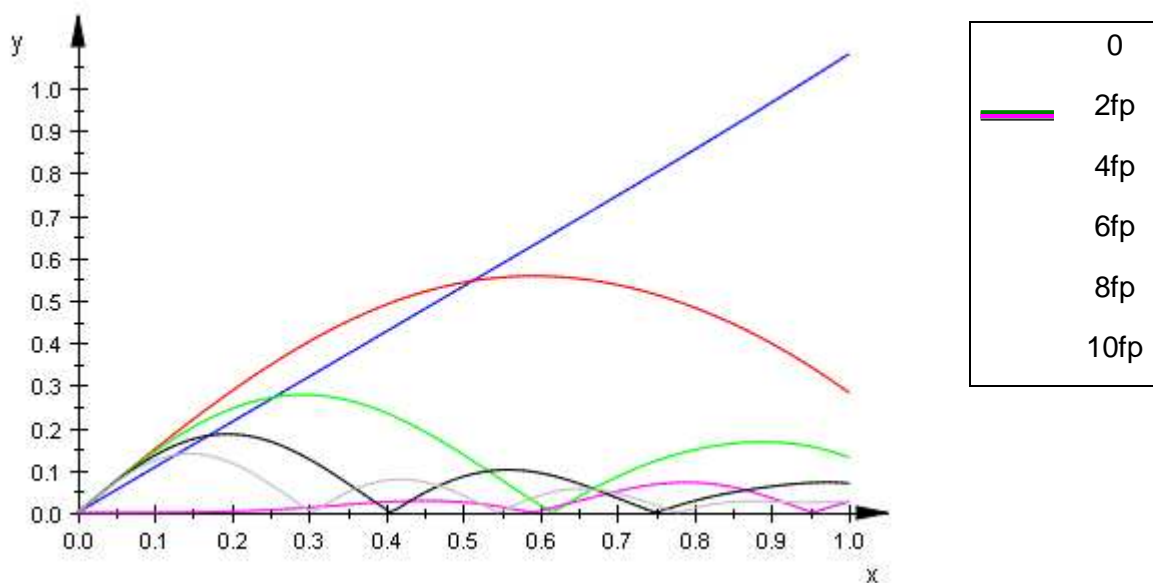
5.2: Závislost přenosu H_{Id/I_s} na otevření měniče

Ve snaze ověřit si správnost dosažených výsledků jsem se snažil nalézt podobné průběhy v odborné literatuře, což se mi však nepovedlo. Zároveň jsem nebyl spokojen s krokem otevření střídače $\Delta a = 0,1$, se kterým jsem z časových důvodů odečty prováděl. Rozhodl jsem se proto potvrdit platnost dosažených výsledků analytickým výpočtem, jehož výsledkem by byly spojité funkce popisující $A_m(k) = f(a, k)$, kde k je řád harmonické, a je otevření střídače. Výpočty jsou provedeny v programu Matlab 7.11.0 obsahujícího Toolbox MuPAD verze 5.5.0.

Celý postup odvození a výsledky výpočtů jsou k dispozici na přiloženém DVD v souboru Fourier.mn. Po otevření souboru lze příkazem Evaluate to End, který se nachází pod položkou Notebook v roletovém menu, spustit celý výpočet. Výsledné analytické vztahy se mi bohužel nepovedlo v programu MuPAD upravit tak, aby se daly rozumným způsobem prezentovat v tomto textu. Kvůli jejich rozlehlosti jsou proto k dispozici pouze v souboru Fourier.mn. Celý analytický výpočet byl proveden pro konkrétní poměr velikosti frekvence pily a zadávací sinusovky a zároveň konkrétní fázový posun mezi nimi. To však nijak nesnižuje výsledky výpočtu, protože již víme, že tyto dva parametry nemají na velikost harmonických vliv.



5.3: Rekonstrukce jedné periody proudu meziobvodu pomocí 50-ti členů Fourierovy řady

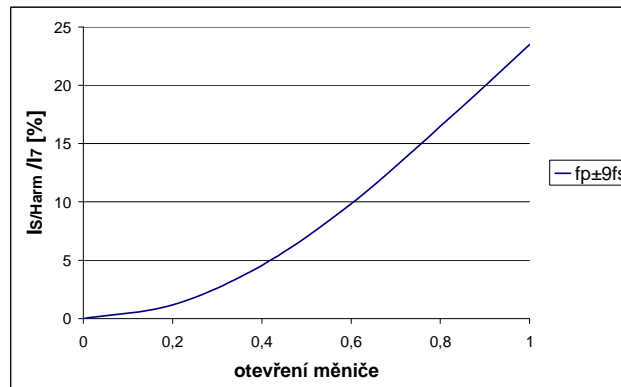


5.4: Příklad výsledků analytického výpočtu závislosti přenosu H_{Id/I_s} na otevření měniče

Závěr výzkumu přenosu H_{Id/I_s} ideálního střídače je takový, že výčet frekvenčních čar obsažených v napájecím proudu střídače je $0f$, $|f_p \pm 3f_s|$, $2f_p$, $|2f_p \pm f_s|$, $|2f_p \pm 6f_s|$, $|3f_p \pm 3f_s|$, $4f_p$, $|4f_p \pm f_s|$, $|4f_p \pm 6f_s|$, $|5f_p \pm 3f_s|$, $|5f_p \pm 9f_s|$, atd. Velikost těchto harmonických je přímo úměrná velikosti fázového proudu f_s a závisí na otevření měniče podle průběhů na obrázcích 5.2 a 5.4. Ostatní harmonické vycházející z obecných vzorců [5.1] a [5.2] pro případ $H = 1$ mají zanedbatelnou velikost, pod rozlišovací schopnost simulace. Vše platí za předpokladu, že výstupem ideálního střídače jsou fázové proudy neobsahující žádnou jinou harmonickou než $f_s = f_M$.

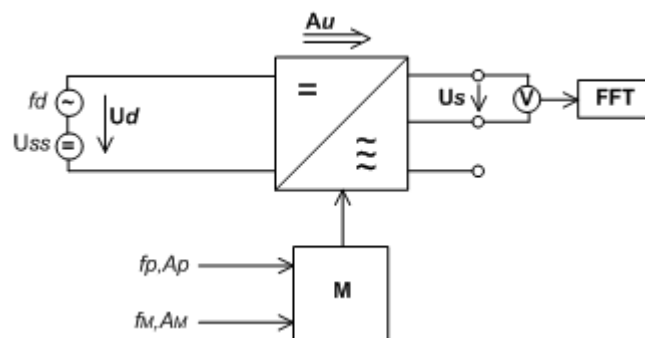
Ve fázovém proudu reálného střídače se však mimo f_s vyskytují výrazné harmonické $5f_s$, $7f_s$, které se v proudu meziobvodu projevují čarami na frekvencích $6f_s$, $|f_p \pm 5f_s|$, $|f_p \pm 9f_s|$, $|f_p \pm 11f_s|$, $|f_p \pm 15f_s|$, $|f_p \pm 17f_s|$, $|f_p \pm 21f_s|$, $|f_p \pm 23f_s|$, $|f_p \pm 21f_s|$, $|f_p \pm 21f_s|$, ... $|2f_p \pm 36f_s|$, jak opět vyplývá ze vzorců [5.1] a [5.2] při $H = 5$ a $H = 7$. Výsledky přenosu H_{Id/I_s} uvedených harmonických na otevření střídače jsou uvedeny na obrázku 5.5. Skoro všechny harmonické měly v simulaci zanedbatelnou velikost až na $|f_p \pm 9f_s|$. Velikost těchto harmonických obsažených v proudu

meziobvodu střídače je přímo úměrná velikosti harmonických $5f_s$, $7f_s$ obsažených ve fázových proudech. Lze tedy tvrdit, že velikost harmonických $|f_p \pm 9f_s|$, $|f_p \pm 15f_s|$, $|f_p \pm 21f_s|$ je svázána s velikostí harmonické $6f_s$, což je důležitý závěr použitý v následujících kapitolách.



5.5 Závislost přenosu H_{I_d/I_s} na otevření měniče u harmonické fázového proudu $7f_s$

Napět'ový přenos střídače $H_{U_s/U_d} = U_s/U_d$



5.6 Simulace napět'ového přenosu střídače

Schéma obvodu, který byl realizován programem (SimulaceMenice_prenosNapeti.vi) je na obrázku 5.6. Napětí meziobvodu bylo tvořeno ideálním zdrojem stejnosměrného napětí se zdrojem napětí vyšších harmonických, jejichž frekvence byla volitelným násobkem frekvence zadávací sinusovky modulátoru. Výstupní sdružené napětí střídače bylo podrobeno frekvenční analýze. Výsledkem jsou opět zobecňující vzorce pro výpočet frekvencí všech vyskytujících se harmonických [5.3], [5.4] a průběhy jejich amplitud v závislosti na otevření střídače 5.7.

$$f = |v_u f_p \pm 2f_M \pm Hf_M|$$

$$f = |v_u f_p \pm 4f_M \pm Hf_M|$$

$$\text{kde } v_u = 1, 3, 5, \dots \quad [5.3]$$

$$f = |v_u f_p \pm 8f_M \pm Hf_M|$$

$$f = |v_u f_p \pm 10f_M \pm Hf_M|$$

$$f = |v_u f_p \pm 14f_M \pm Hf_M|$$

$$f = |v_g f_p \pm f_M \pm Hf_M|$$

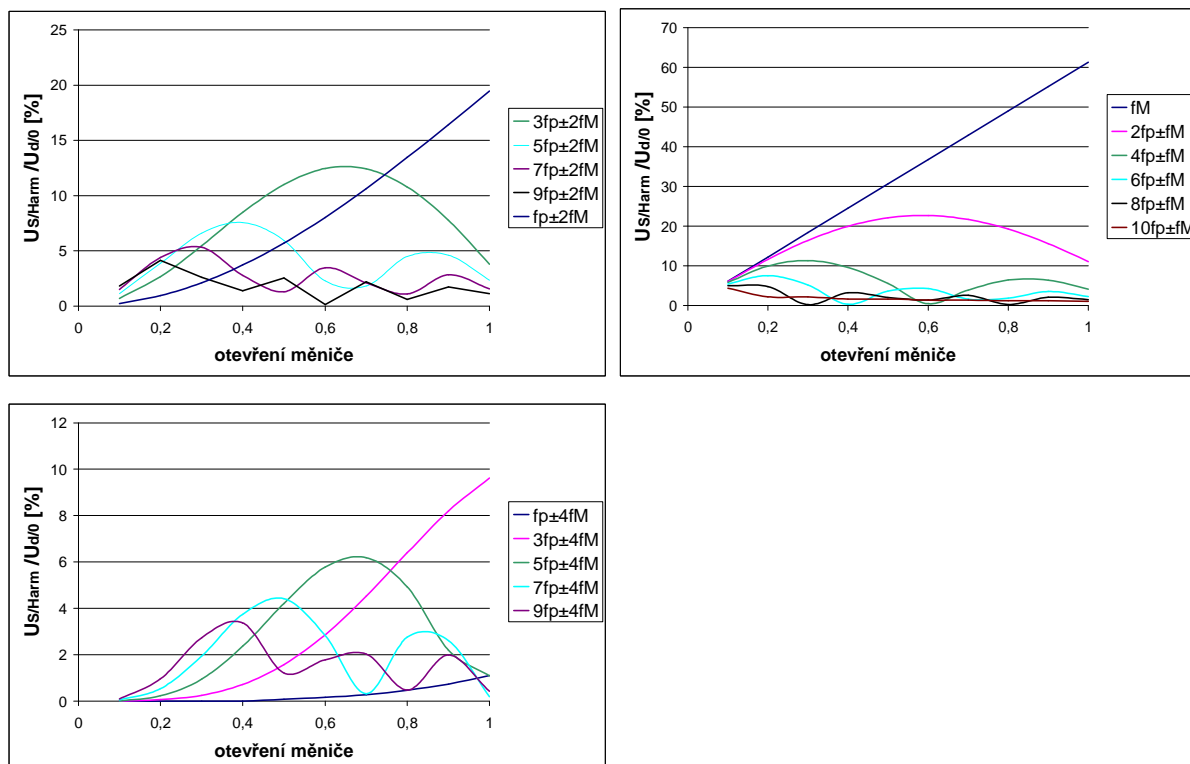
$$f = |v_g f_p \pm 5f_M \pm Hf_M|$$

$$f = |v_g f_p \pm 7f_M \pm Hf_M|$$

$$\text{kde } v_u = 2, 4, 6, \dots \quad [5.4]$$

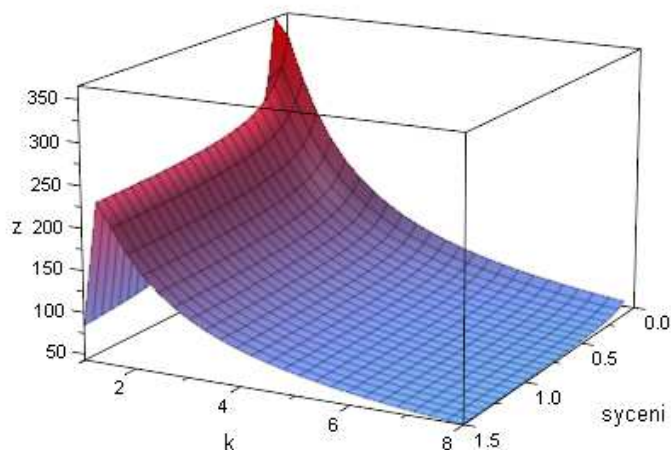
$$f = |v_g f_p \pm 11f_M \pm Hf_M|$$

$$f = |v_g f_p \pm 13f_M \pm Hf_M|$$

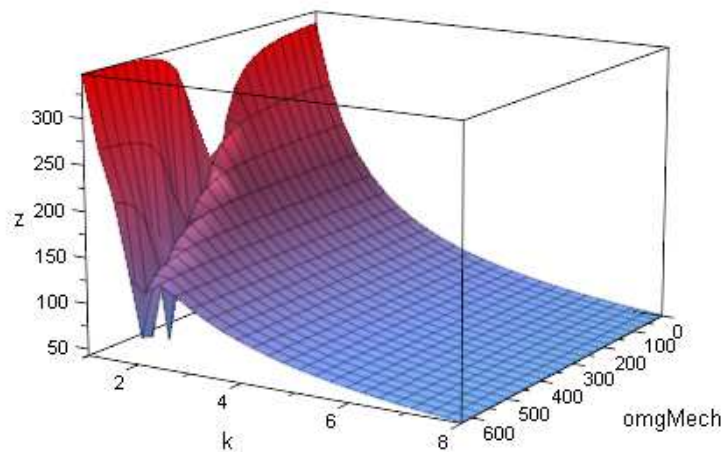


5.7: Závislost přenosu H_{U_s/U_d} na otevření měniče

Cílem výpočtů bylo získat u konkrétního stroje závislosti modulů statorového proudu jednotlivých harmonických v závislosti na sycení, či rychlosti otáčení stroje. Výpočet je parametrizovatelný, takže případný zájemce si může zvolit stroj podle svého přání a po spuštění výpočtu čekat na výsledky. Prezentované průběhy popisují chování stroje používaného v laboratoři ŠKODA ELECTRIC a.s.



5.8 Modul harmonické proudu (% I_N) v závislosti na sycení a řádu harmonické



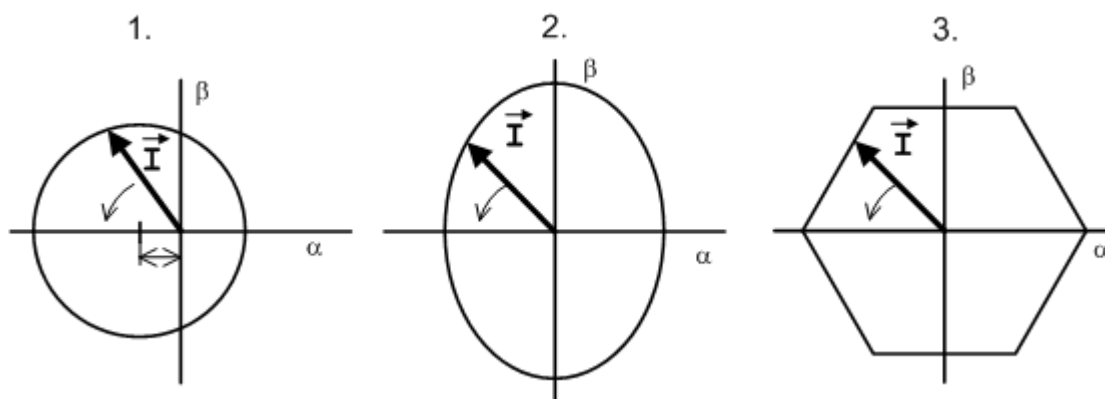
5.9: Modul harmonické proudu (% I_N) v závislosti na otáčkách a řádu harmonické

Na obrázku 5.8 je příklad závislosti modulu statorového proudu v % ke jmenovité hodnotě fázového proudu stroje při jmenovitém napětí, skluzu a otáčkách na sycení stroje a řádu harmonické k . Lze z něj vysledovat, že chování stroje ve vztahu k vyšším harmonickým není nikterak ovlivněno nabuzením stroje. Na obrázku 5.9 je příklad závislosti modulu statorového proudu v % ke jmenovité hodnotě fázového proudu stroje při jmenovitém napětí, skluzu a sycení na mechanických otáčkách a řádu harmonické. Z těchto a i dalších závislostí plyne, že nemá smysl z důvodu potlačení vyšších harmonických fázového proudu udržovat stroj v nějakém speciálním pracovním stavu. Překvapilo mne, že stroj tlumí až harmonické řádu vyššího než 5. Harmonické 2,3,4 naopak zesiluje. Zvolený stroj je trochu atypický. Za povšimnutí stojí, že jeho proud naprázdno je 60% I_N .

Výzkum reálného střídače

Vznik první harmonické v meziobvodu střídače a její kompenzace

Během každého měření spekter proudů pomocí Rogowského sond je potřeba brát v potaz elektromagnetické pozadí. V případě výzkumu výskytu první harmonické fázového proudu v proudu meziobvodu je analýza spektra elektromagnetického pozadí nezbytností. První harmonická v meziobvodu střídače podle všeho nevzniká z principu funkce střídače, protože není ve spektru proudu meziobvodu ideálního střídače, ale vzniká v důsledku nesymetrií střídače. Ať už je příčinou nesymetrie cokoliv, má za následek „vyosení“ obrazce, který opisuje koncový bod prostorového vektoru výstupního proudu střídače, viz. průběh 1. na obrázku 5.10. Toto vyosení však není důsledkem ničeho jiného než přítomnosti stejnosměrné složky ve fázových proudech střídače.



5.10: Prostorový vektor výstupního proudu střídače

Stejnosemnná složka ve fázových proudech střídače může vzniknout z různých důvodů. Pomineme-li chyby v modulátoru střídače, může být příčinou nevhodná konstrukce střídače, jejímž důsledkem jsou nestejně odpory přívodů od kladných a záporných svorek jednotlivých fází. Nestejně odpory přívodů mohou nastat i v důsledku povolení šroubových spojů. Další příčinou mohou být nestejně zapínací a vypínací doby výkonových prvků v jednotlivých fázích střídače. U moderních měničů využívajících IGBT tranzistory, či IGCT tyristory, jejichž spínací časy se pohybují v jednotkách μs , není s rozdílnými dobami v řádu stovek nanosekund problém. Hůře jsou na tom měniče postavené na GTO tyristorech, jejichž spínací doby dosahují sta mikrosekund s chybou jednotek mikrosekund. Strmosti proudu především při vypínání GTO tyristorů jsou značně ovlivněny parametry snubberového obvodu, které se mohou s časem měnit, především stárnutím kondenzátorů snubberu. Nestejně spínací doby výkonových prvků mohou být zapříčiněny samozřejmě i poruchou driverů.

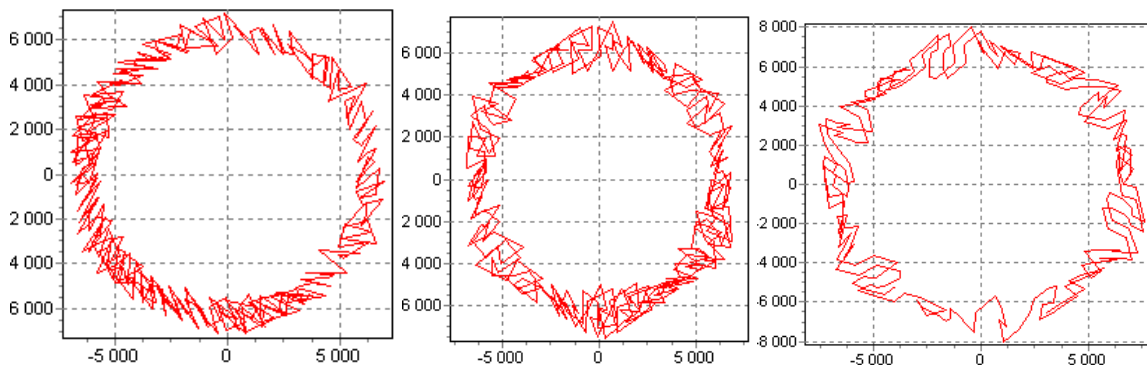
Kompenzace první harmonické fázového proudu v meziobvodu střídače

Jestliže je teorie o příčině vzniku první harmonické v proudu meziobvodu střídače správná, musí jít první harmonická odstranit pomocí kompenzace stejnosměrné složky fázových proudů. Nejprve je tedy nutné určit velikost stejnosměrné složky ve fázových proudech střídače a kompenzovat je úpravou zadání modulátoru. V laboratorních podmínkách se mi podařilo tuto kompenzaci provést. Vhodným zadáním modulátoru se mi povedlo snížit velikost první harmonické prakticky na úroveň po opravě poškozeného driveru IGBT. K získání velikosti stejnosměrné složky lze použít integrace změřených fázových proudů po dobu jedné periody. Výsledek integrace vstupuje do běžného regulačního schématu, které vygeneruje korigovanou zadání pro modulátor. K realizaci takovéto sofistikovanější struktury jsem však nepřistoupil. Především jsem nevěřil v praktické využití této kompenzace v provozu. Všechny myslitelné příčiny nesymetrií způsobující první harmonickou se vyskytují v poruchových stavech měniče. Ty se detekují jinými způsoby a vedou k okamžitému

odstavení měniče. Realizace by asi také narazila na omezenou přesnost měření fázových proudů a vytížení procesoru.

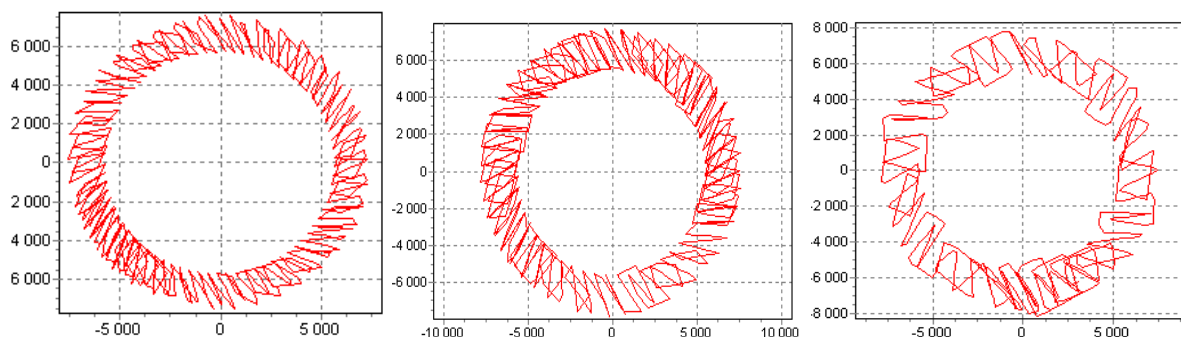
Vznik šesté harmonické v meziobvodu střídače, vliv mrtvých dob

Simulace ideálního střídače neukázaly vznik šesté harmonické v proudu meziobvodu. Zdá se tedy, že šestá harmonická nevzniká v důsledku vlastností ideálního střídače generujícího harmonický proud, jak by se dalo soudit z disertace pana Würflingera. V této kapitole se na základě laboratorních měření pokusím dokázat, že složka $6f_s$ je způsobena prací střídače, který se pomocí omezeného počtu šesti vektorů napětí snaží ve stroji vytvořit rotující magnetické pole. Zároveň ukáží skutečný vliv mrtvých dob.



5.11: Vektor výstupního proudu střídače pohonu 3,5kW při $f_s = 20, 30, 40$ Hz spínací frekvenci 768Hz a jmenovitém momentu

Na obrázcích 5.11 jsou zobrazeny průběhy koncového bodu prostorového vektoru statorového proudu stroje při asynchronní modulaci a výstupních frekvencích 20, 30, 40Hz. I zběžný pohled odhalí stále výraznější šestiúhelník v těchto průbězích. Tomu odpovídá velikost šesté harmonické ve spektru proudu meziobvodu střídače. Šestiúhelníkové nádech dostávají v okamžicích, kdy začíná znatelně klesat počet sepnutí na jednu periodu první harmonické výstupního proudu střídače. Začíná se projevovat omezený počet šesti vektorů napětí, v jejichž směru se koncový bod vektoru \vec{I}_s (jemu odpovídající $\vec{\Psi}_s$) pohybuje. Nachází-li se koncový bod vektoru v některé z částí kružnice, kde má tečna kružnice shodný směr s některým z vektorů napětí, je požadovaná rychlost a směr pohybu vektoru docílena spínáním těchto vhodných vektorů napětí, čímž je dosaženo malého rozkmitu modulu \vec{I}_s .



5.12: Vektor výstupního proudu střídače pohonu 350kW při $f_s = 20, 30, 40$ Hz spínací frekvenci 768Hz a jmenovitém momentu

Takto optimalizované řízení pohybu \vec{I}_s však není možné v částech kružnice, kde ani jeden ze šesti vektorů napětí neodpovídá směru tečny kružnice a tudíž je trajektorie \vec{I}_s realizována kombinací několika vektorů napětí. Tím se však opakovaně šestkrát za periodu změni velikost rozkmitu modulu \vec{I}_s , čímž vzniká z kruhového šestiúhelníkový průběh.

Z toho vyplývá, že šestá harmonická bude tím větší, čím bude menší časová $\tau = L / R$ konstanta stroje a čím větší je napájecí napětí stroje. Velikost τ je u asynchronního stroje dána odpory vinutí, rozptylovými reaktancemi a velikostí skluzu. Velikost šesté harmonické se dá tedy redukovat zvýšením spínací frekvence, změnou konstrukce stroje nebo použitím střídače disponujícím větším počtem vektorů napětí (víceúrovňové střídače). Z hlediska řízení či modulace lze šestou harmonickou potlačit přechodem do synchronních modulací při nižší výstupní frekvenci. Z výsledků prací univerzity v Bochum [45] však přechod do synchronních modulací při poměru výstupní a spínací frekvence střídače nižším než 0,1 z hlediska obsahu harmonických v proudu meziobvodu nedoporučují. A nakonec i pokusy na lokomotivě uvedené v následující kapitole ukázaly, že méně synchronních modulací znamená více ve snaze potlačit OKP.

Průběhy z obrázků 5.12 jsou z měření v laboratoři. Otázkou bylo, jak se projeví $6f_s$ ve spektru proudu meziobvodu lokomotivy. Protože střídač pokusného pracoviště byl řízen regulátorem z lokomotivy, musí velikost I_{6fs} na lokomotivě odpovídat průběhu z laboratoře v poměru parametrů strojů. Při použití stejných modulací a spínací frekvence střídače z výše uvedeného vyplývá, že poměr velikostí I_{6fs} změřených v laboratoři a na lokomotivě je dána vztahem [5.5]. Bez uvažování útlumu filtru meziobvodu lokomotivy by měla být velikost I_{6fs} řádově stejná jako při měřeních v laboratoři. Především však není velikost I_{6fs} úměrná velikosti I_s , jako je tomu u harmonických z obrázku 5.2 V reálu však bude I_{6fs} v trakčním proudu díky značnému útlumu filtru meziobvodu lokomotivy mnohem menší. To samé platí i pro velikost harmonických, které kvůli harmonické $6f_s$ v proudu meziobvodu vznikají. Jak bylo vysvětleno v kapitole popisující ideální střídač jedná se mimo jiné o V-křivky $|2f_p \pm 38f_s|$, $|f_p \pm 9f_s|$, $|f_p \pm 15f_s|$, $|f_p \pm 21f_s|$. Relativní pokles poměru I_{6fs} / I_{1fs} u pohonu lokomotivy ilustrují průběhy na obrázku 5.12.

$$\frac{U_{1Loko} \cdot \tau_{Lab}}{U_{1Lab} \cdot \tau_{Loko}} = \frac{1130 \cdot 0,663 \cdot 10^{-3}}{380 \cdot 0,47 \cdot 10^{-3}} \cong 4 \quad [5.5]$$

$$\tau_{Lab} = \frac{L_{1\sigma} + L_{2\sigma'}}{R_1 + \frac{R_2'}{f_{2n}}} = \frac{(8,4 + 12,3)10^{-3}}{1,2 + \frac{0,9}{1,5} 50} = 0,663 \cdot 10^{-3} s \quad [5.6]$$
$$\tau_{Loko} = \frac{(117 + 125)10^{-6}}{(3,85 + \frac{3,6}{0,657} 92) \cdot 10^{-3}} = 0,47 \cdot 10^{-3} s$$

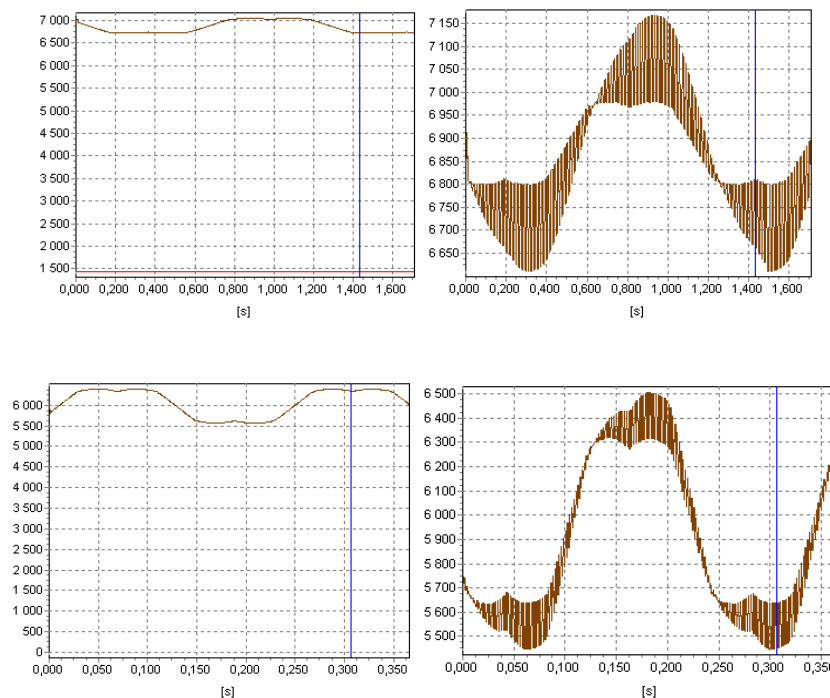
Pan Janda ve své práci přičítá zásadní vliv na velikost šesté harmonické a potažmo všech V-křivek mrtvým dobám střídače. Měření, která jsem v laboratoři provedl tento závěr Jandovy práce potvrzují jen částečně. Změřené průběhy ilustrují závislost velikosti šesté harmonické na poměru f_s/f_p při zanedbatelně velkých mrtvých dobách střídače. Dokazují tvrzení, že velikost šesté harmonické a všech V-křivek, které díky její přítomnosti vznikají, je při vyšších f_s dána nedostačenou velikostí spínací frekvence a nikoliv velikostí mrtvých dob. Mrtvé doby způsobují nesymetrii napětí opakující se šestkrát za periodu první harmonické fázového proudu. Velikost této nesymetrie bude tím větší, čím větší je délka mrtvých dob, napětí meziobvodu, ale též počet sepnutí, tedy i vložených mrtvých dob za periodu. Sloučíme-li vliv

nedostatečné spínací frekvence s vlivem mrtvých dob na velikost šesté harmonické proudu, dostaneme rovnici [5.7]. První člen reprezentuje vliv mrtvých dob, druhý člen vliv omezeného počtu šesti vektorů napětí použitých pro vytvoření kruhového magnetického toku ve stroji.

$$I_{6f_s} = k_1 \cdot U_d \cdot Y_{I_s/U_s} \cdot t_{DB} \cdot \frac{f_p}{k_2 + f_s} + k_3 \cdot \frac{U_1}{\tau} \cdot \frac{f_s}{f_p} \quad [5.7]$$

Z rovnice vyplývá, že mrtvé doby budou mít zásadní vliv na velikost šesté harmonické a V-křivky s ní svázané v okolí nulových otáček stroje. Zároveň jejich vliv bude mnohem větší u velkých strojů vyznačujících se nízkou vstupní impedancí. S rostoucí frekvencí první harmonické vliv mrtvých dob klesá a čím dál více se začne projevovat vliv šesti vektorů napětí. Kompenzace mrtvých dob má tedy význam pouze při nižších f_s , mrtvé doby způsobí v okolí nulových otáček šestou harmonickou nejen v proudu meziobvodu, což není z pohledu OKP problém, tak i v momentu stroje. Především u velkých motorů tím vzniká nepříjemné cukání při rozjezdu pohonu. Kompenzace mrtvých dob, ale i úbytků na polovodičových prvcích a dalších napěťových nesymetrií má svůj význam tedy především kvůli vyhlazení momentu v okolí nulových otáček. Kompenzace mrtvých dob, jako i dalších napěťových nesymetrií střídače, je komplikovaná. To co nedokáže odstranit kompenzace, do frekvence $f_s = 6\text{Hz}$ dokáže „dotáhnout“ regulace složek napětí. Vyhlazení momentu, které u velkých pohonů regulace složek napětí způsobuje, je však zásadní. Z pohledu OKP je důležitější velikost šesté harmonické při frekvencích $f_s = 45\text{Hz} \div 95\text{Hz}$. V tomto intervalu statorové frekvence při $f_p = 768\text{Hz}$ začnou do pásma pracovních frekvencí KO 75Hz vnikat V-křivky $|f_p \pm 9f_s|$, $|f_p \pm 15f_s|$. Jejich velikost je úměrná velikosti I_{6s} na jejíž velikost však mají mrtvé doby již malý vliv. Platí-li alespoň tendenčně rovnice [5.7], lze velikost šesté harmonické a tedy i V-křivek při vyšších statorových frekvencích u pohonu lokomotivy odvodit z velikosti šesté harmonické laboratorního pohonu podle vztahu [5.5].

Kompenzace mrtvých dob střídače



5.13: Průběhy zadávacích napětí modulátoru pohonu 350 kW při $f_s = 1\text{Hz}$ (horní dvojice), $f_s = 5\text{Hz}$ (dolní dvojice), bez kompenzace (vlevo) a s kompenzací mrtvých dob

Na obrázku 5.13 jsou průběhy zadávacích napětí modulátoru pro dvě výstupní frekvence první harmonické fázového proudu střídače s „velikým“ motorem. Ilustrují vliv kompenzace mrtvých dob na napětí a tedy i proud střídače. Při $f_S = 1\text{Hz}$ je deformace zadávacích napětí vzhledem k amplitudě napětí značná. Zatímco při $f_S = 5\text{Hz}$ je znatelně nižší a se vzrůstající výstupní frekvencí a tedy i otevřením měniče nadále prudce klesá. Z těchto důvodů je kompenzace v praxi prováděna pouze do $f_S = 30\text{Hz}$ s jejím pozvolným zánikem. To však platí u pohonu s prvky 6kV, které vyžadují nastavení mrtvých dob nad $10\mu\text{s}$. Mrtvé doby u měničů s 3kV IGBT jsou přibližně $3\mu\text{s}$, což hranici ukončení kompenzace mrtvých dob posune na $f_S = 10\text{Hz}$.

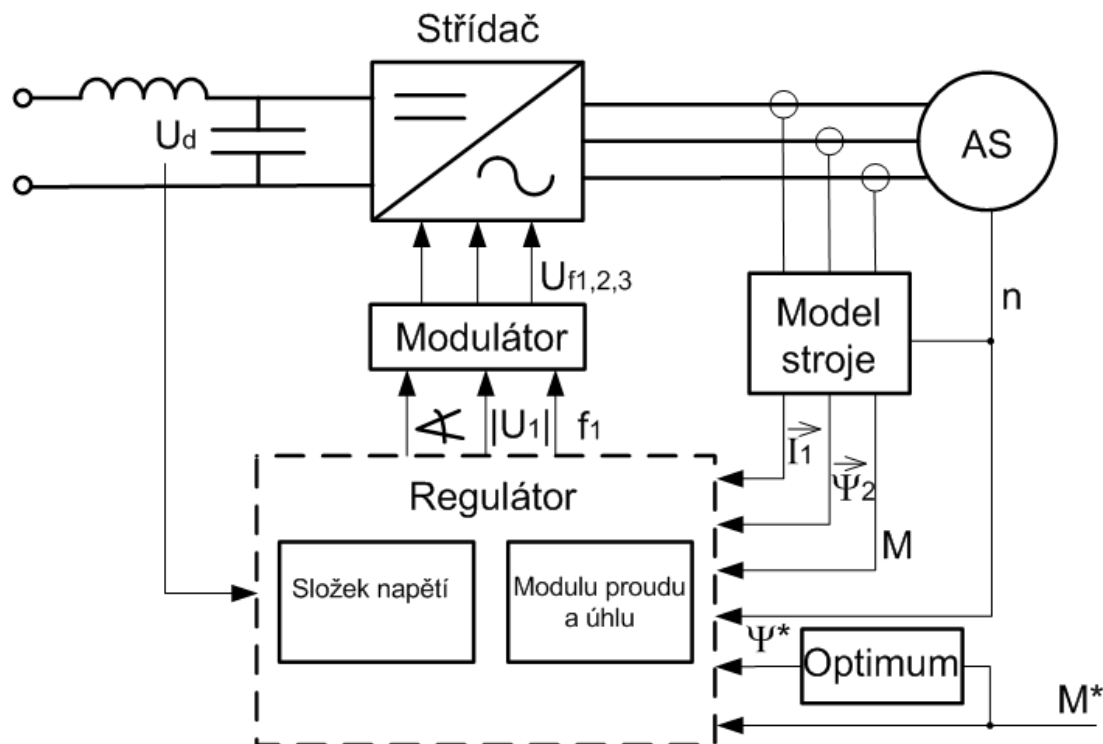
Výzkum subharmonických v proudu meziobvodu

Pan Janda ve své disertační práci narazil na výraznou, jím nevysvětlenou frekvenční složku, projevující se v měřeném spektru čarou na kmitočtu $0,5 f_S$. Jedním z mých vytyčených cílů bylo objasnění této záhadné frekvenční složky. První pokusná měření se stroji s různým počtem pólů potvrdila podezření, že frekvence této subharmonické je dána vztahem f_S / pp . V dalším kroku výzkumu šlo o popsání závislostí určujících velikost této subharmonické. Přistoupil jsem k sérii systematických úprav zvoleného čtyřpólového stroje, na kterém jsem opět provedl pokusná měření. První úpravou bylo izolování obou ložisek v čele stroje, aby se tím znemožnil případný vznik ložiskových proudů. Ty by podle jedné z domněnek mohli indukovat napětí, jež by bylo zdrojem subharmonických v proudu meziobvodu. Dalším pokusem bylo vyosení rotoru stroje o $15\mu\text{m}$, přičemž vzduchová mezera stroje byla před jeho úpravou $40\mu\text{m}$. Vyosení bylo docíleno vložením excentrických vložek do čel stroje, ve kterých byla usazena ložisek s menším vnějším průměrem, než měla původní ložiska. Tak vznikly tři série měření, kde v každé se mimo harmonické analýzy proudu meziobvodu střídače provedla i harmonická analýza napětí skluzové cívky připevněné na ložiskovém štítu stroje. V rámci příprav stroje jsem odměřil indukčnost na svorkách dvou fází v závislosti na natočení rotoru stroje. A právě závislost indukčnosti stroje na natočení rotoru po jeho vyosení o $15\mu\text{m}$ dávala naději na zajímavé výsledky. Bohužel očekávání vložená do časově i finančně náročných úprav stroje se nenaplnila. Pouze odbuzováním stroje se podařilo sledovanou subharmonickou snížit. Přibližně rok po ukončení výše popsaných pokusů se v rámci spolupráce s Dopravní fakultou Jana Pernera Univerzity Pardubice provedla měření na pohonu 58kW čtyřiceti pólovém synchronním stroji. Podle očekávání obsahovalo spektrum napájecího proudu střídače celou škálu subharmonických. Rozsáhlá výzkumná zpráva [10], která se změřenými výsledky zabývá, těž nepřinesla do tohoto problému větší světlo. Vše co o velikosti subharmonických doposavad víme je, že závisí na nabuzení stroje, u každého stroje se liší, nezávisí na vyosení rotoru či izolaci ložisek. Subharmonické se neobjevují ve spektrech elektromagnetického pozadí. Lze tedy alespoň konstatovat, že se nepotvrdily obavy ze vzniku subharmonických vlivem mechanického opotřebení ložisek motorů, či jiných mechanismů způsobujících postupný vznik elektromagnetické nesymetrie stroje.

Zvolená vektorová regulace

Na základě pokusů s DSR a zkušeností pana Javůrka s vektorovou regulací, kterou v té době již s úspěchem použil na metrech pro města Kyjev, Kazaň a příměstských jednotkách 471, se rozhodlo o použití stejné regulace i pro pohon lokomotivy 109E. Panem Javůrkem používaná vektorová regulace je postavena na proudově – otáčkovém modelu asynchronního stroje, bloku optimum, regulátoru modulu statorového proudu a úhlu, modulátoru se vstupy \underline{a} , f_1 . Tato regulační struktura s úspěchem fungovala na pohonech s výkonem do 0,5MW. Pan Bednář však při vývoji pohonu s jmenovitým výkonem 1,6MW narazil na problémy zmíněné regulace v oblasti nulových otáček. Proto se rozhodl doplnit regulátor modulu a úhlu statorového proudu o regulátor složek statorového napětí. Schéma takto vzniklé regulační struktury je na obrázku 5.14. Jaký vliv má tato regulace na rušivé

proudy bylo popsáno v kapitole o vzniku šesté harmonické proudu meziobvodu střídače. Detailnější informace k regulaci nelze publikovat, protože se jedná o know-how firmy ŠKODA ELECTRIC a.s.



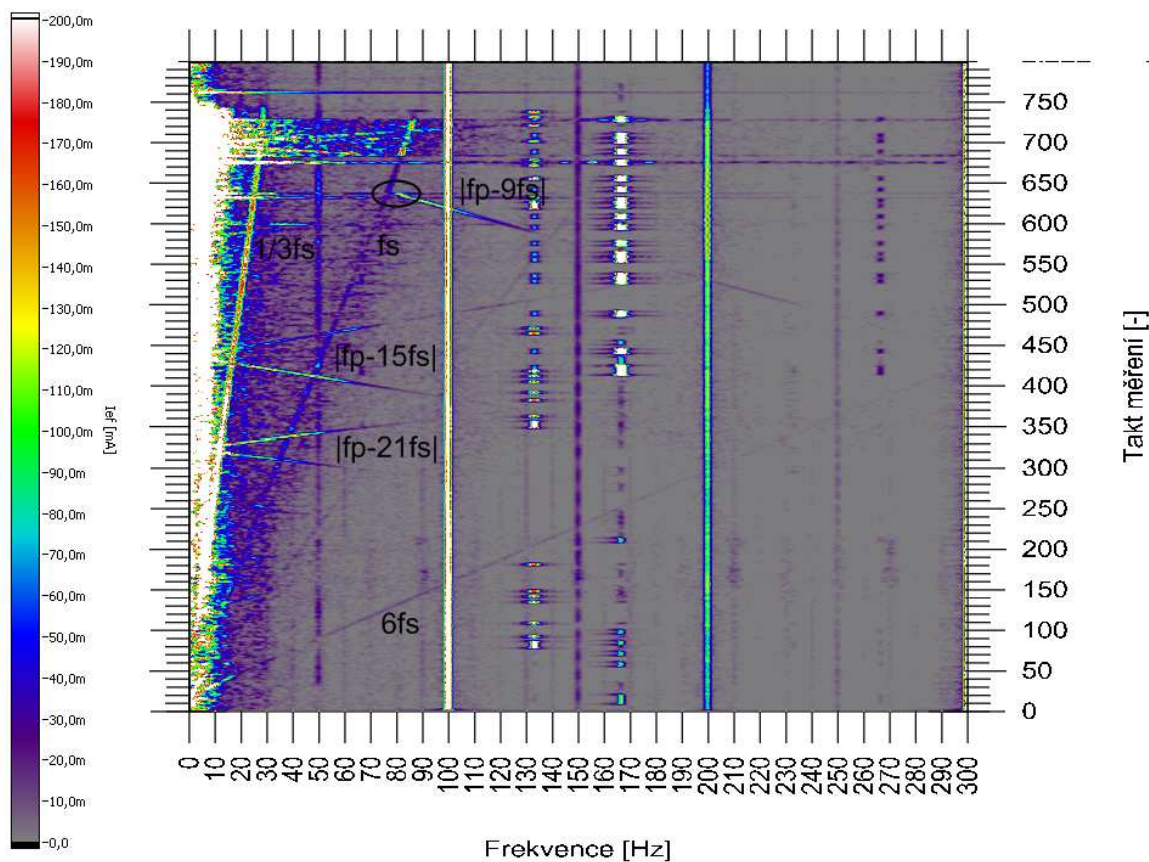
5.14: Schéma zvolené vektorové regulace

Kompensace V-křivek

Výzkum ideálního střídače odhalil frekvence a amplitudy harmonických, které se objeví v proudu meziobvodu vždy, již z principu. Při rozjezdu vozidla, tedy při pozvolném zvyšování frekvence první harmonické fázového proudu stroje f_s tyto harmonické vytvářejí takzvané V-křivky, což již konstatoval pan Janda. Nové je však zjištění, že velikost těchto V-křivek je přímo úměrná velikosti první harmonické proudu a závisí pouze na poměrném otevření měniče podle křivek na obrázku 5.2. Přidají-li se k tomu zjištění o chování reálného střídače lze vytipovat nejpravděpodobnější příčiny případných problémů při schvalování vozidla podle normy ČSN 34 2613 ed.2. Problémy se nedají čekat s první harmonickou, která jakožto důsledek nesymetrií konstrukčního rázu by neměla vzniknout. Vznikne-li, mělo by se její odstranění řešit odstraněním nesymetrií, jejichž příklad byl uveden. Až jako krajní řešení lze použít kompenzaci popsanou v kapitole 0. Ani šestá harmonická by podle předpokladů neměla činit potíže, protože její velikost předvídatelná podle vztahu [5.5] by měla odpovídat měření v laboratoři. K tomu se musí připočíst útlum filtru meziobvodu vozidla s řezovou frekvencí okolo 8Hz a strmostí 20dB na dekádu. Ani prvotní strach z mrtvých dob není oprávněný, jejich kompenzace do 15Hz statorové frekvence je při použití IGBT 3kV dostačující. Obavy vzbuzuje subharmonická o frekvenci f_s/pp , jejíž vznik se mi nepovedlo objasnit a u kolejových obvodů 25Hz a 50Hz by mohla způsobit těžko řešitelné potíže. Takže nakonec nejvíce problémů u pohonu s vektorovou regulací a vyjádřeným modulátorem s pevnou spínací frekvencí lze očekávat od vzniknuvších V-křivek. Tato kapitola je věnována odstranění nepříznivého vlivu V-křivek na spektrum proudu meziobvodu střídače.

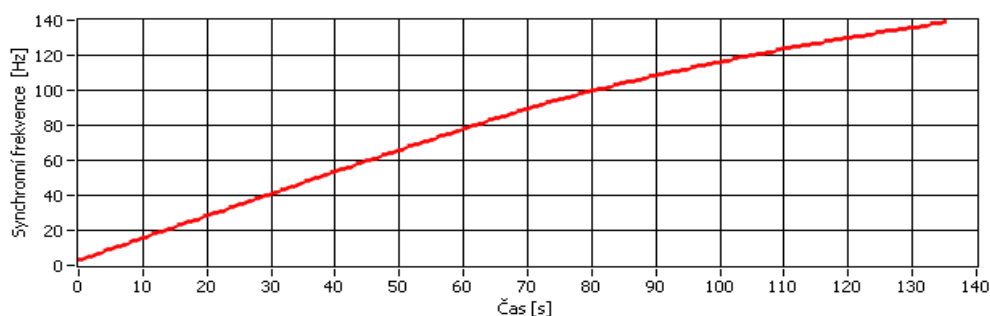
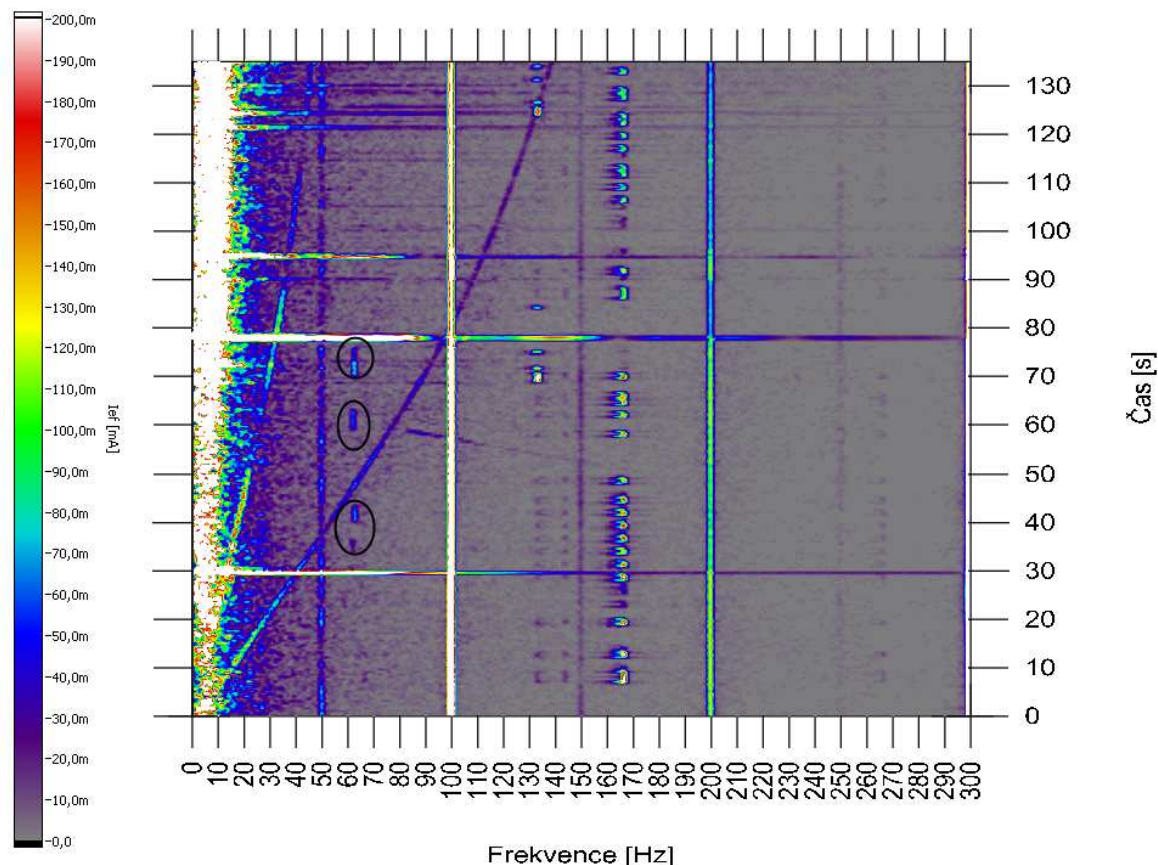
Kompensace V-křivek na vozidle

Na obrázku 5.15 je změřené spektrum trakčního proudu lokomotivy při rozjezdu na zkušební okruhu na DC systému.



5.15: Spektrum bez kompenzace, 100% tahu, jeden podvozek, průběh f_s

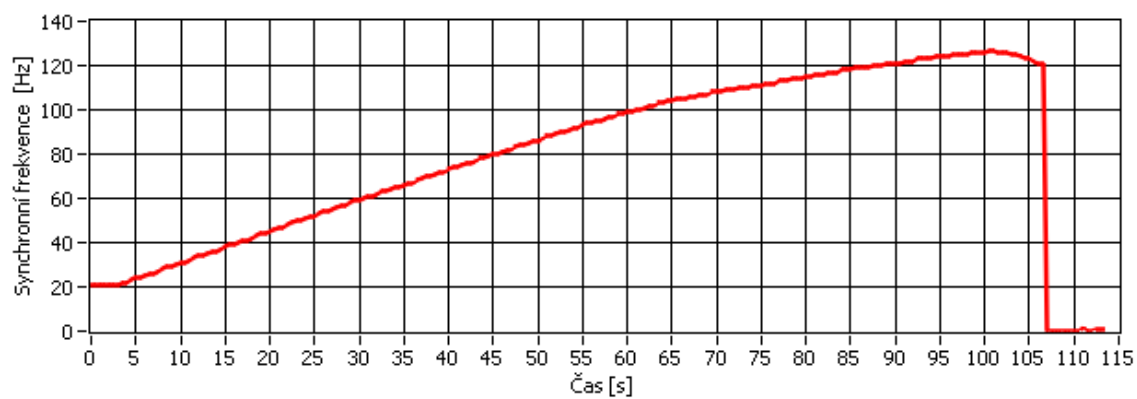
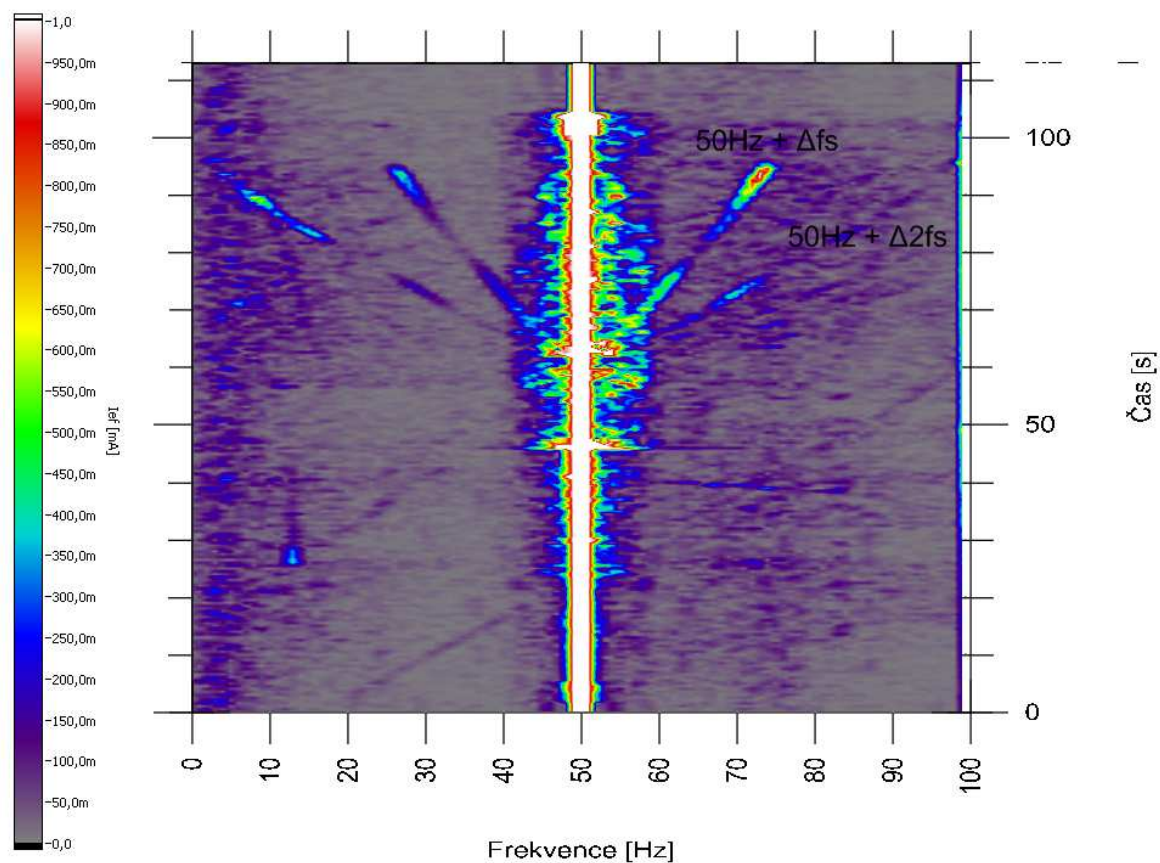
Na obrázku jsou popsány jednotlivé nekompenzované V-křivky. Zakroužkovaná oblast ukazuje nástup V-křivky $|f_p - 9f_s|$ do pásma 68–80Hz, která způsobovala překročení limitu OKP. V-křivka běžně pokračuje dál a projde až k 0Hz. Zde však díky prokluzu nápravy došlo k rychlému snížení trakčního výkonu a zdánlivému odstranění inkriminované V-křivky. Přechodný děj prokluzu se ve spektru projeví čarami napříč všemi frekvencemi. Na obrázku 5.16 je spektrum trakčního proudu lokomotivy s kompenzací V-křivek. Bohužel záznamy nebyly pořízeny ve stejném pracovním režimu lokomotivy. Zatímco spektrum na obrázku 5.15 bylo pořízeno při připojené zátěži a mohlo se tedy jet se 100% tahem a přiměřeným zrychlením, spektrum na obrázku 5.16 bylo pořízeno bez připojené zátěže, rozjezdu do zabrzděné lokomotivy vzduchem a ač s třetinovým tahem, tak s větším zrychlením a většími prokluzy, které způsobují přechodné děje. Tlak na co nejrychlejší schválení vozidel a obsazenost zkušební okruhu nám nedovolily pořídit více vypovídajících sad průběhů. Průběhy spekter, které lépe postihují vliv kompenzace V-křivek obsahují měřicí protokoly VUŽ. Nejsm však oprávněn je použít.



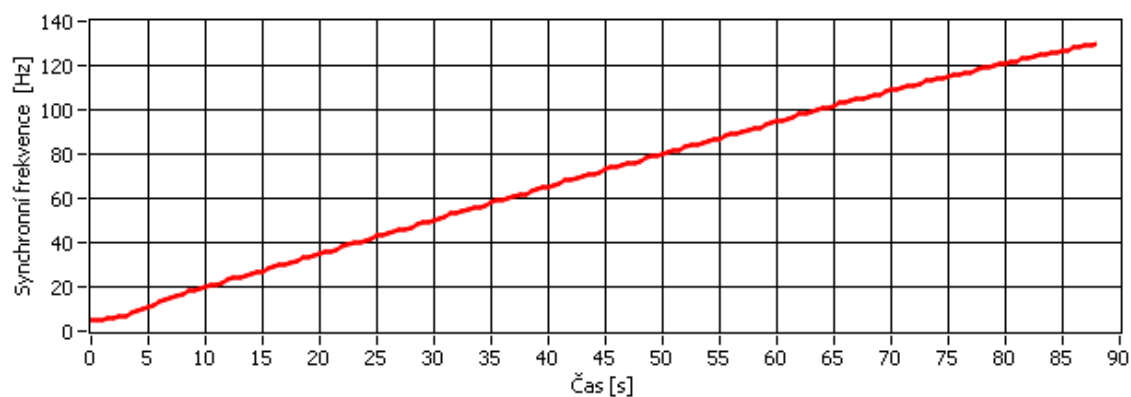
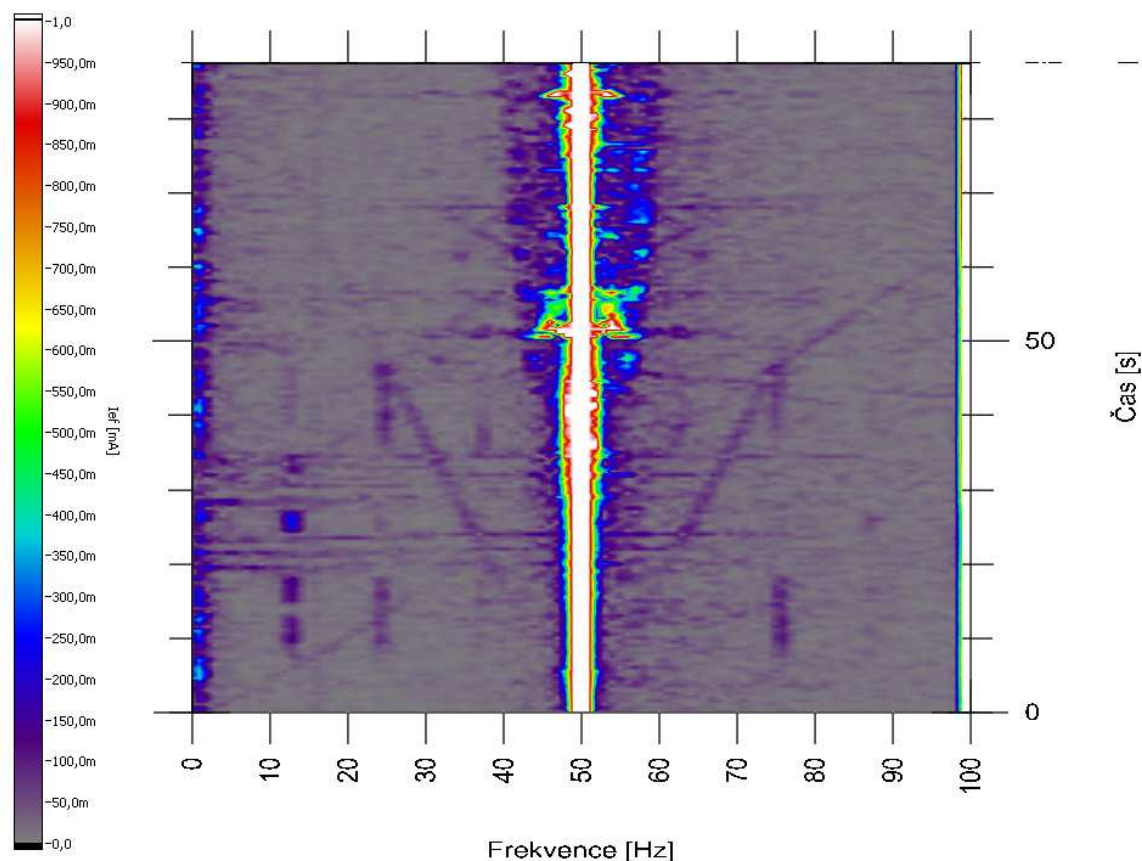
5.16: Spektrum s kompenzací, 30% tahu, jeden podvozek, průběh f_s

Skutečná volba modulací na základě změřeného spekter trakčního proudu

V případě provozu lokomotivy na DC trakčním systému neměla volba synchronních modulací vliv na spektrum trakčního proudu, protože vzniknuvší harmonické mající frekvence stovek Hz plně potlačil filtr meziobvodu. Problémy vznikly na střídavém trakčním systému 50Hz. Přeskočíme-li ladění samotného usměrňovače, vliv střídače na trakční proud ukazuje spektrum na obrázku 5.17. Při přechodu do 5FM následované 3F se ve spektru objevily výrazné čáry, které lze popsat $50\text{Hz} \pm \Delta f_s$ a $50\text{Hz} \pm \Delta 2f_s$. Znak delta vyjadřuje diferenci mezi frekvencí aktuální a frekvencí v okamžiku přechodu do synchronních modulací. Po této špatné zkušenosti se synchronními modulacemi se přistoupilo k řešení, kdy se využije do co nejvyšší rychlosti modulace asynchronní a pro přechod do obdélníku se použije synchronní modulace 3M, ve které se pohon zdrží jen nejkratší možnou dobu. Výsledek takovéto strategie ilustruje spektrum na obrázku 5.18.



5.17: Spektrum trakčního proudu na systému 25kV,50Hz s modulacemi pohonu SMS,5FM,3F,GFT a časový průběh synchronní frekvence



5.18: Spektrum trakčního proudu na systému 25kV,50Hz s modulacemi pohonu SMS,3M,GFT a časový průběh synchronní frekvence

6. Závěr

Prvním dílčím výsledkem práce je volba metodiky měření konduktivních proudů a její realizace na produktech firmy NI. Představená metodika je vhodná pro výzkum harmonických a ladění pohonu, avšak selektivní vykreslení jednotlivých harmonických je samo o sobě neužitečné v případě, chceme-li se dostat k hodnotám, na jejichž základě pověřená právnická osoba vozidlo schvaluje. Schvalovateli totiž nejde primárně o mechanismy vzniku harmonických, ale o co nejdokonalejší napodobení vlastností kolejového obvodu a to především použitím totožné frekvenční charakteristiky filtru. Schvalovatel nechá



projít naměřená data digitálním filtrem s frekvenční charakteristikou kolejového obvodu a tím určí velikost energie schopné kolejový obvod vybudit. Vyskytuje-li se ve sledovaném frekvenčním pásmu jen jedna harmonická, mají obě metody shodný výsledek. Naopak například v přechodných dějích, které se ve spektru vyznačují čarami přes všechny frekvence, metodika o velikosti ohrožujícího proudu nevypovídá nic. K tomu však nebyla určena.

Výsledky výzkumu ideálního střídače prostřednictvím výpočtů a simulací jsou shrnuty v rovnicích a obrázcích. Pro harmonické, jejichž velikost je odvozena od první harmonické fázového proudu a otevření střídače, se mi podařilo dospět ke shodným výsledkům jak pomocí simulací, tak i analytického výpočtu. Následná konfrontace s naměřenými daty na laboratorním střídači dopadla nad očekávání dobře. Špatně dopadlo porovnání výsledků simulací s naměřenou realitou u harmonických, jejichž původ vysvětluji od přítomnosti šesté harmonické v proudu meziobvodu. Naměřené průběhy spektra proudu meziobvodu lokomotivního střídače mi však daly zapravdu, že jak šestá harmonická, tak V-křivky $|f_p \pm 9f_s|$, $|f_p \pm 15f_s|$, $|f_p \pm 21f_s|$, $|2f_p \pm 36f_s|$ s ní spjaté jsou řádově stejně velké, jako ve spektru laboratorního pohonu.

Výzkum asynchronního stroje spočívající ve výpočtu jeho admitance v závislosti na otáčkách a zatížení stroje ukázal, že z pohledu rušivých proudů není potřeba udržovat stroj v nějakém speciálním pracovním bodě.

V rámci popisu spektra meziobvodu reálného střídače jsem oddémonizoval výskyt první harmonické fázového proudu v meziobvodu a poukázal na její přítomnost v elektromagnetickém pozadí, což způsobuje výskyt první harmonické v každém naměřeném průběhu. Pro případ nutnosti jsem navrhl metodiku kompenzace první harmonické, která se mi však zdá být v běžném provozu zbytečnou. Výsledky výzkumu vlivu mrtvých dob střídače na obsah a velikost harmonických ve spektru proudu meziobvodu částečně potvrdily zjištění pana Jandy. Ten přičítal mrtvým dobám jak nárůst šumu spektra a $6f_s$, tak i zvýšení velikosti V-křivek $|f_p \pm 9f_s|$, $|f_p \pm 15f_s|$, $|f_p \pm 21f_s|$. Podle mých zjištění mrtvé doby zásadně ovlivňují velikost šesté harmonické pouze v počátku rozjezdu pohonu a postupně jejich vliv na velikost šesté harmonické klesá. Způsobují tak při rozjezdu především problémy s průběhem momentu pohonu, pro jehož vyhlazení je kompenzace mrtvých dob přínosná. Na vyhlazení momentu v intervalu $f_s = 0\text{Hz} \div 6\text{Hz}$ má v případě uvedené vektorové regulace zásadní vliv regulace složek napětí. Při dalším zrychlování během $f_s = 6\text{Hz} \div 40\text{Hz}$ je dominantní ve snižování velikosti šesté harmonické a V-křivek $|f_p \pm 21f_s|$, $|2f_p \pm 36f_s|$ kompenzace mrtvých dob střídače. Tyto V-křivky však nejsou díky svému vysokému řádu a tedy malé amplitudě nebezpečné i v případě nekompensování mrtvých dob. Ve vyšších rychlostech $f_s = 40\text{Hz} \div 100\text{Hz}$, kde je stále použita asynchronní modulace, je kompenzace mrtvých dob ve snaze snížení velikosti V-křivek $|f_p \pm 9f_s|$, $|f_p \pm 15f_s|$ neúčinná. Podle vzorce [5.7] by se musela výrazně zvýšit spínací frekvence, což není možné. Nebezpečí z hlediska OKP představuje především V-křivka $|f_p \pm 9f_s|$, která zasahuje do frekvenčního pásma kolejových obvodů 75Hz při $f_s = 76\text{Hz} \div 94\text{Hz}$. Zabránění jejího vniku do frekvenčního pásma KO 75Hz bylo dosaženo kompenzací V-křivek.

Veliké zklamání přinesl výzkum vzniku subharmonických v proudu meziobvodu laboratorního střídače, který napájel čtyřpólový asynchronní stroj. Časově náročné pokusy na několikrát upravovaném stroji přinesly slabé výsledky popisující vlivy na velikost subharmonické frekvence f_s/pp . Experimenty ukázaly, že velikost subharmonické neovlivnila ani izolace ložisek, ani vyosení rotoru stroje. Sledoval jsem pouze nejasný vliv odbuzení stroje, kdy snížení toku stroje vedlo k mírnému zmenšení subharmonické. Měření však nebyla natolik průkazná, abych z nich mohl vyvozovat podrobné závěry. Z porovnání změřených hodnot na všech čtyřech motorech vyskytujících se v laboratoři vyplynulo, že u každého stroje je velikost subharmonické jiná, ale řádově se shodují. Větší rozptyl velikostí subharmonických jsem vysledoval u velkých motorů, kde však výzkum nebyl z důvodu omezeného počtu měření systematický.



Volba vhodné regulace z pohledu rušivých proudů spočívá především ve schopnosti regulovat moment s co nejmenším zvlněním při dané spínací frekvenci. Zároveň je výhodnější mít pevnou spínací frekvenci, která v kombinaci s hladkým momentem zaručí spojité spektrum proudu meziobvodu s relativně malým počtem harmonických. Při použití jakéhokoliv řízení s proměnou spínací frekvencí riskujeme v ochranných frekvenčních pásmech výskyt jen těžko odstranitelných harmonických nebo šumu. Zároveň se vzdáváme možnosti řízenou změnou spínací frekvence ovlivnit průběh vyjádřených harmonických, jak je nakonec použito u všech nových vozidel plzeňské Škodovky počínaje lokomotivou 109E. Z toho důvodu se zavrhl přímé řízení momentu, ačkoliv pan Würflinger ve své práci dokázal za použití aktivní filtrace harmonického momentu do vteřiny eliminovat harmonické ve zvoleném frekvenčním pásmu. Bez praktické realizace této metody lze jen těžko posoudit její možnosti, v každém případě je to zajímavé řešení. Nakonec pan Bednář použil pro lokomotivu 109E vektorovou regulaci, kde pro oblast vyšších otáček převzal regulaci z jednotky 471, kterou v oblasti nízkých otáček doplnil regulací složek statorového napětí.

Kapitola věnována modulacím je typickým příkladem ladění pohonu v praxi. Na základě dostupných teorií se zvolí strategie modulátoru, ale až s lokomotivou na zkušebním okruhu se zjistí její nevhodnost. V tom okamžiku se již většinou metodou pokus-omyl zkouší různé varianty, dokud se nedostaví úspěch. Bez podpůrných prostředků online měření je to však nemožné. Tento způsob vývoje je naprosto legitimní a zdaleka není cizí ani například našim kolegům v německy mluvících zemích.

Závěry pro další rozvoj vědy

Nedostatek své práce vidím především v nedokonalém popisu vztahu velikosti šesté harmonické a velikostí V-křivek $|fp \pm 9fs|$, $|fp \pm 15fs|$, $|fp \pm 21fs|$, $|2fp \pm 36fs|$. Fakt, že jsem schopen tyto V-křivky vykompenzovat bez ohledu na jejich velikost, mi umožnil věnovat drahocenný čas na výzkum praktičtějších věcí. Zůstává zde tedy prostor pro další výzkum.

Otevřeným tématem je stále výskyt subharmonických ve spektru proudu meziobvodu. Mé jediné průkazné zjištění, že frekvence těchto subharmonických je určena statorovou frekvencí a počtem pólpárů, je vzhledem k vynaloženému úsilí velice skromné. Po neúspěšných pokusech s mechanickými úpravami stroje, či jeho provozování v různých pracovních režimech, padá stín podezření na technologii výroby stroje. Pokusy získat nějaké podnětné nápady či návrhy dalšího výzkumu od technologů z ŠKODA ELECTRIC a.s. divize Trakční motory či ČKD Nové Energo nedopadly úspěšně.

Veliký potenciál vidím v technické realizaci a ověření skutečných možností přímého řízení momentu s filtrací zvolených harmonických, jak ji ve své práci popsal pan Würflinger. V souvislosti s tím je velice zajímavým tématem výskyt mechanických rezonancí stroje, které značně ovlivní průběh regulovaného momentu, zdá se však bez vlivu na obsah vyšších harmonických v proudu meziobvodu.

Do plánu vývojových úkolů ŠKODA ELECTRIC a.s. se oddělení SW2 pokusí prosadit detailní výzkum synchronních modulací a jejich vlivu mimo jiné na spektrum napájecího proudu střídače. Jak jsem poodhalil v poslední kapitole práce, jejich vlastnosti nemáme přesně popsané.

Novým trendem, který neminul ani firmu ŠKODA ELECTRIC a.s., je bezsenzorová regulace pohonu s asynchronním strojem. V laboratorních podmínkách ji úspěšně zrealizovali pánové Bednář, Javůrek a v nejbližší době se uvažuje o jejím nasazení do zkušebního provozu na pomocných pohonech. V případě nasazení této regulace na hlavních pohonech vozidla bude výzkum vlivu této regulace na obsah vyšších harmonických v meziobvodu střídače nutností.

Použité odkazy v disertační práci

- [1] JANDA, M.: Harmonické v meziobvodu trakčního pohonu s asynchronním motorem, Západočeská univerzita v Plzni – Fakulta elektrotechnická, Disertační práce, 2007, 60s.
- [2] BELLADA, L.: Waveletová transformace, ZČU Plzeň, Semestrální práce, 2005, 15 s., <http://www.fs.vsb.cz/akce/2000/asr2000/Sbornik/papers/bilovsky.pdf>
- [3] BENEŠ, K.; CHUDÁČEK V.; KONEČNÝ I.; PEŠKA K. : Problémy kompatibility kolejových obvodů u ČD, VÚŽ Praha, 24 s., http://www.fel.zcu.cz/Data/documents/sem_de_2005/chudacek-kompatibilita-ko.pdf
- [4] CHUDÁČEK, J., KONEČNÝ, I., STOLL, K.: Ohrožující vlivy na kolejové obvody, VÚŽ Praha, březen 2005, 25 s
- [5] CHUDÁČEK, J. a kol.: Zabezpečovací technika, VÚŽ Praha, listopad 2005, 145 s.
- [6] CHUDÁČEK, J. a kol.: Detekce kolejových vozidel, VÚŽ Praha, prosinec 2005, 110 s., <http://vyuka.fel.zcu.cz/kae/+ztd2/Skripta/Detekce%20kolejovych%20vozidel.pdf>
- [7] FARAN A.; SRB S.; DOBIÁŠ R.: Možnosti řešení eliminace ohrožujících konduktivních proudů v kolejových obvodech, AŽD Praha, 7 s.
- [8] FARAN, A. a kol. z AŽD Praha, s.r.o.: Železniční zabezpečovací zařízení-Kolejové obvody vnější podmínky pro jejich činnost ČSN 34 2613 ed.2, Český normalizační institut, 2007
- [9] MATOUCH, Z.; PRINC, J.: Trakční energetika, NADAS, Praha, 1974, 627 s.
- [10] NOVÁK J.; ČERNÝ O.; DOLEČEK R.; ŠIMÁNEK J.: Vyšetřování rušivých vlivů a dalších specifických vlastností trakčního pohonu se synchronním motorem s permanentními magnety, Univerzita Pardubice, Výzkumná zpráva k řešení programového projektu č. FT-TA5/084 za rok 2010, 73 s.
- [11]* MARUSIČOVÁ, D.: Zásady revize ČSN 34 2613 Ed.2, Prezentace na semináři ACRI, Praha, 7.12.2011, 9 s.
- [12]* BENEŠ, K.: Vývoj v technických specifikacích pro interoperabilitu subsystému řízení a zabezpečení (TSI CCS), Prezentace na semináři ACRI, Praha, 7.12.2011, 8 s.
- [13]* KARBAN, M.: Postup výměn nevyhovujících KO, Prezentace na semináři ACRI, Praha, 7.12.2011, 14 s.
- [14]* KONEČNÝ, J.; LESO, M.: Limity odolnosti starých a perspektivních KO vůči ohrožujícímu proudu, Prezentace na semináři ACRI, Praha, 7.12.2011, 23 s.
- [15] VRÁNA, P.: Rušivé proudy trakčních vozidel, 30. Celostátní konference o elektrických pohonech, Plzeň, červen 2007, 10s.
- [16] VRÁNA, P.: Vektorové řízení s U_{1-n} modelem, Diplomová práce, ČVUT FEL, Praha, 2005, 63 s.
- [17] KONEČNÝ, I.; HLOUŠEK, P.: Vybrané problémy EMC hnacích vozidel a kolejových obvodů, VÚŽ, Plzeň, 2004. 18 s., <http://www.cd rail.cz/vts/CLANKY/1705.pdf>



-
- [18] AŽD PRAHA s.r.o.: Způsob fázově citlivého vyhodnocení konduktivního proudu kolejevého obvodu, Praha, 2006, Patent 297 442
- [19] HRDINA, L.: A Comparison of Characteristics of Less Common Methods of Direct Torque Control with the Classic Takahashi Method, WOFEX , 2007, 6 s.
- [20] HRDINA, L.: Metody přímého řízení momentu asynchronních motorů, Vysoká škola báňská – Technická univerzita – Fakulta elektrotechniky a informatiky, Disertační práce, 2008, 104 s.
- [21] JAVŮREK, J.: Regulace moderních elektrických pohonů, GRADA, Praha, 2003, 264 s.
- [22]** DANZER, J : Zapojení vstupních obvodů lokomotivy, možnosti a vlastnosti, Výzkumná zpráva č. 22160-5-05, 2006, 49 s.
- [23]** DANZER, J : Harmonické v pulzním usměrňovači a možnosti jejich omezení, Výzkumná zpráva č. 22160-3-05, 2006, 30 s.
- [24]** JANDA, M.: Harmonická analýza proudu ve stejnosměrném meziobvodu střídače asynchronního pohonu při konstantním napětí na kondenzátoru – Simulace reálné modulace, Výzkumná zpráva č. 22160-19-05, 2005, 10 s.
- [25]** ZEMAN, K.; PEROUTKA, Z.: Konduktivní proudy v asynchronním trakčním pohonu – vliv nenulového součtu fázových proudů střídače, Výzkumná zpráva č. 22160-15-05, 2005, 23 s.
- [26]** ZEMAN, K.; PEROUTKA, Z.: Konduktivní proudy v asynchronním trakčním pohonu – simulace vybraných stavů a jevů, Výzkumná zpráva č. 22160-14-05, 2005, 49 s.
- [27]** ZEMAN, K.: Rezonanční filtr pro vyhodnocení konduktivních proudů trakčního pohonu, Výzkumná zpráva č. 22160-13-05, 2005, 19 s.
- [28]** DANZER, J : Trakční transformátory a pulzní usměrňovače, Výzkumná zpráva č. 22160-1-05, 2006, 50 s.
- [29]** DANZER, J : Výpočet vlastností transformátoru s pulzními usměrňovači, Výzkumná zpráva č. 22160-7-06, 2006, 12 s.
- [30]** ZEMAN, K.; PEROUTKA, Z.: Konduktivní proudy v asynchronním trakčním pohonu – návrh logiky pro zmenšení vlivu mrtvých časů I, Výzkumná zpráva č. 22160-15-06, 2006, 27 s.
- [31]** JANDA, M.; ZEMAN, K.; PEROUTKA, Z.: Konduktivní proudy v asynchronním trakčním pohonu – návrh logiky pro zmenšení vlivu mrtvých časů II, Výzkumná zpráva č. 22160-27-06, 2006, 9 s.
- [32]** GLASBERGER, T.; PEROUTKA, Z.: Konduktivní proudy v asynchronním trakčním pohonu – Vektorová PWM: Algoritmy plynulého přechodu do obdélníkového řízení, Výzkumná zpráva č. 22160-26-06, 2006, 16 s.
- [33]** ŠKUBAL, J.: Měření konduktivních proudů soupravy metra Kazaň s asynchronním pohonem, Výzkumná zpráva č. 22160-24-06, 2006, 22 s.
- [34]** DANZER, J. : Vyšší harmonické lokomotivy 109E na střídavých systémech, Výzkumná zpráva č. 22160-16-06, 2006, 44 s.
- [35]** ZEMAN, K.; PEROUTKA, Z.: Konduktivní proudy v asynchronním trakčním pohonu – výpočet složky proudu o kmitočtu 75 Hz při plynulém rozjezdu, Výzkumná zpráva č. 22160-14-06, 2006, 38 s.
-



- [36]** JANDA, M.; ZEMAN, K.; BARTOŠ, V.: Rezonanční stav trakčního pohonu, Výzkumná zpráva č. 22160-8-07, 2007, 52 s.
- [37]** JANDA, M.; PEROUTKA, Z.: Konduktivní proudy v asynchronním trakčním pohonu – měření na laboratorním modelu trakčního pohonu, Výzkumná zpráva č. 22160-20-07, 2007, 12 s.
- [38] ARRILLAGA, J.; WATSON, N.: Power system harmonics, ISBN 0-470-85129-5, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2003, 391 s.
- [39] GARDWELL, B.J.; CRAWSHAW, G.: The Adoption of New Concepts in AC Traction Interference Kontrol, ISBN: 0-85296-703-9, 1998. International Conference on (Conf. Publ. No. 453), 1998, 8 s.
- [40] WÜRFLINGER, K.: Aktive Bedämpfung von niederfrequenten Störströmen in Bahnstromnetzen mittels der Umrichterregelung, Ruhr-Universität Bochum, Disertační práce, 2007, 120 s., <http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/netahtml/HSS/Diss/WuerflingerKlaus/diss.pdf>
- [41] MANGOLD, ChR.; TRIFFTELER, ChR.: Störstromüberwachung und □chulz der Hochspannungskreise auf Triebfahrzeuge. Teil 1: Plattformentwicklung, El.Ba. 100, 2002, H. 11, S.411ff
- [42] WÜRGLER, D.; GÜLKER, J.: Störstromüberwachung und □chulz der Hochspannungskreise auf Triebfahrzeuge. Teil 2: Sicherheitsnachweis, El.Ba. 100, 2002, H. 11, S.419ff
- [43] MEYER, M.: Netzstabilität bei Wechselstrombahnen – Systemkompatibilität auf dem Weg nach dem Europa, ETG-Kongress, Dresden, 2002
- [44] MÜLLER, R.: Anforderungen an Mehrsystemlokomotiven in Europa – Die BR 189 der Deutschen Bahnen AG, ETR 51, 2002, H.7/8, S.439ff
- [45] STEIMEL, A.: Leistungselektronik II, Ruhr-Universität Bochum, http://www.ei.rub.de/media/ei/lehmaterialien/steimel_leistungselektronik-ii/UE_901-911.pdf

* Präsentation přednesené na semináři ACRI 7.12.2011
<http://www.acri.cz/cz/prihlasen/pro-cleny/acri-prezentace>

** Výzkumné zprávy zpracované s podporou grantu MPO ČR FI – IM2/071
<http://www.isvav.cz/projectDetail.do?rowId=FI-IM2%2F071>

Publikační činnost

Publikace vztahující se k tématu disertační práce

- Publikace v impaktovaných časopisech
--
- Publikace v recenzovaných časopisech
--
- Patenty
--
- Publikace excerpované WOS
--
- Ostatní

2007

- [1] Vrána, P.: Rušivé proudy trakčních vozidel. In *30. Celostátní konference o elektrických pohonech* [CD-ROM]. Praha: Český svaz vědeckotechnických společností, 2007, ISBN 978-80-02-01921-3. 100%

2008

- [2] Vrána, P.: Disturbance Currents of Inverters in Traction. In *Poster 2008* [CD-ROM]. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, 2008 100%
- [3] Javůrek, J. - Vrána, P.: Disturbance Currents of Inverters. In *Proceedings of the 13th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2008*. Poznaň: PTETiS, 2008, p. 1488-1491. ISBN 978-1-4244-1741-4. 50%

2009

- [4] Vrána, P., Švanda, J., Kopecký, M.: Metodika vyhodnocení rušivých proudů pro účely ladění pononu lokomotivy. In *31. Celostátní konference o elektrických pohonech* [CD-ROM]. Praha: Český svaz vědeckotechnických společností, 2009, ISBN: 978-80-02-02151- 3. 33%
- [5] Vrána, P., Švanda, J., Bednář, M.: HW a SW prostředky pro on-line vyhodnocení rušivých proudů. In *31. Celostátní konference o elektrických pohonech* [CD-ROM]. Praha: Český svaz vědeckotechnických společností, 2009, ISBN: 978-80-02-02151- 3. 33%

2010

- [6] Vrána, P., Švanda, J.: Experimentální vyhodnocování rušivých vlivů v trakčních měničích Používané pro ladění pohonů. In *Seminář Rušivé vlivy elektrických trakčních zařízení, jejich eliminace a elektromagnetická kompatibilita* [CD-ROM] Pardubice: Universita Pardubice, ISBN 978-80-7395-255-6 50%

Ohlasy

2007

- [1] Janda, M.: Harmonické v meziobvodu trakčního pohonu s asynchronním motorem. Plzeň: *Disertační práce*, ZČU v Plzni

Publikace ostatní

- Publikace v impaktovaných časopisech
--
- Publikace v recenzovaných časopisech
--
- Patenty
--
- Publikace excerptované WOS
--
- Ostatní
--

Summary

New trends in the electric drives are implemented into many branches of industries, in railway area as well. Drive of a modern locomotive consists of a brushless machine supplied by an inverter. Such an engine behaves as a current harmonic source. The current harmonics are switched in the same way as supply current, it means substation, trolley wire, locomotive, rails and a substation again. Unfortunately a part of this circuit is shared with another system which performs detection of train's position, semaphore settings, automatic control of crossing-gates, switch blocking etc. The function of this railway safety appliance system may not be affected by any other equipment.

In this work, the author wants to discuss the shown theme and bring solution for trouble free running of a locomotive with modern drives on the tracks of the Czech Railways. In Chapter 2 is a common description of function of the track circuit with putting accent on mechanism of disturbance currents caused by locomotive. There are introduced methods that can be used for suppressing the influence of locomotive on track circuit. Chapter 3 describes research and enclosures of another dissertation written by Ing. Martin Janda Ph.D. Information of chapters 2 and 3 are not so commonly known but were written without the author's own contribution. Chapters 4,5,6,7 deal with author's own work and research.

First, there is a description of methods and developed tools for measuring and interpreting the disturbance currents. Next, an ideal converter by the help of simulations and an analytical calculation is described in Chapter 5. Chapter 6 bears explanation to several phenomena which answer for harmonics in DC link current of converter. Chapter 7 deals with regulations with emphasis on the disturbance current.

Results of work are used to drive locomotives ŠKODA.